



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ  
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

# Εντοπισμός Μαγνητικού Αντικειμένου Μέσω Μαγνητόμετρου Πύλης Ροής Και Ορθογωνοποιημένων Συναρτήσεων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
του Ελευθερίου Μπακόγλου

Επιβλέπων : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Αθήνα, Μάρτιος, 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ. «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ»

# Εντοπισμός Μαγνητικού Αντικειμένου Μέσω Μαγνητόμετρου Πύλης Ροής Και Ορθογωνοποιημένων Συναρτήσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΜΠΑΚΟΓΛΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3<sup>η</sup> Μαρτίου 2023.

.....  
Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Αφροδίτη Κτενά  
Καθηγήτρια Ε.Κ.Π.Α.

.....  
Σπύρος Αγγελόπουλος  
Βαθμίδα ΔΕΠ



.....  
Ελευθέριος Ν. Μπακόγλου

Επιστήμων των Υλικών

Copyright © Ελευθέριος Μπακόγλου, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο εντοπισμός μαγνητικού αντικειμένου μέσω μαγνητόμετρου πύλης ροής και ορθογωνοποιημένων συναρτήσεων. Η προσπάθεια ανίχνευσης υλικού μέσω της διαφοροποίησης του τοπικού μαγνητικού πεδίου ονομάζεται μέθοδος Ανίχνευσης Μαγνητικής Ανωμαλίας (Magnetic Anomaly Detection, MAD). Η MAD χρησιμοποιείται ευρέως για την ανίχνευση πλοίων, την παρακολούθηση της πορείας υποβρυχίων στόχων και στόχων ξηράς, την αναγνώριση σεισμικής δραστηριότητας με στόχο την εξόρυξη μετάλλων κλπ. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί ένα μαγνητόμετρο υψηλής ευαισθησίας ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση, και έναν αλγόριθμο επεξεργασίας των δεδομένων για τον υπολογισμό της θέσης, της ταχύτητας και άλλων παραμέτρων του στόχου με σκοπό τον εντοπισμό και την αναγνώριση του. Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία επιτυγχάνεται ανίχνευση σιδηρομαγνητικού δοκιμίου σε εργαστηριακό περιβάλλον μέσω μαγνητόμετρου πύλης ροής (fluxgate) και αλγορίθμου αποσύνθεσης μέσω ορθογώνιων συναρτήσεων βάσης OBF σε γλώσσα προγραμματισμού Python.

**Λέξεις κλειδιά:** εντοπισμός μαγνητικού στόχου, ανίχνευση μαγνητικής ανωμαλίας, μαγνητικοί αισθητήρες, αισθητήρας πύλης ροής, ορθογωνοποιημένες συναρτήσεις βάσης

## Abstract

The purpose of this study is to locate a magnetic object using a fluxgate magnetometer and orthogonalized functions. The effort to detect material through the differentiation of the local magnetic field is called Magnetic Anomaly Detection (MAD) method. MAD is widely used for the detection of ships, tracking the course of underwater and land targets, recognizing seismic activity with the aim of mining metals, etc. This specific method requires a high-sensitivity magnetometer to enable detection, and a data processing algorithm to calculate the position, speed, and other parameters of the target for the purpose of locating and recognizing it. Specifically, in this study, the detection of a ferromagnetic sample in a laboratory environment is achieved using a fluxgate magnetometer and a decomposition algorithm based on orthogonal basis functions (OBF) in the Python programming language.

**Keywords:** magnetic target detection, magnetic anomaly detection (MAD), magnetic sensors, fluxgate magnetometer, orthogonal basis function (OBF)

## Ευχαριστίες

Στον Κ. Χριστοφόρου για την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον πρόβλημα.

Στην κ. Κτενά, για την ευγενή και συνεχή καθοδήγηση κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Στην κ. Τζαννέτου, υποψήφιας διδάκτορα του Εθνικού & Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, για την παραχώρηση του αρχικού κώδικα.

Στην κ. Alexandra Elbakyan, ιδρύτρια του Sci-hub, χωρίς τον συγκεκριμένο ιστότοπο θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της ακόλουθης διπλωματικής.





## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	iv
Abstract .....	v
Ευχαριστίες .....	vi
Πίνακας περιεχομένων .....	viii
Πρόλογος.....	xi
1 Θεωρητική Εισαγωγή.....	1
1.1 Ιστορική πορεία του ηλεκτρομαγνητισμού .....	1
1.2 Οι θαυμαστές εξισώσεις του Maxwell .....	3
1.2.1 Ο νόμος του Gauss .....	3
1.2.2 Ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό.....	3
1.2.3 Ο νόμος του Faraday .....	4
1.2.4 Ο νόμος των Ampere - Maxwell.....	4
1.2.5 Η δύναμη Lorentz.....	4
1.3 Νόμος Biot – Savart .....	5
1.3.1 Μαγνητικό πεδίο σημειακού δίπολου .....	6
1.4 Γεωμαγνητικό πεδίο .....	7
1.4.1 Εσωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο .....	7
1.4.2 Εξωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο.....	9
2 Αισθητήρες.....	10
2.1 Ορισμός και ταξινόμηση .....	10
2.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων .....	11
2.3 Έξυπνοι Αισθητήρες .....	13
2.4 Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου .....	13
2.4.1 Αισθητήρες SQUID .....	17
2.4.2 Αισθητήρες Fluxgate .....	18
2.4.3 Αισθητήρες MDL .....	20
2.4.4 Αισθητήρες AMR και GMR.....	22
2.4.5 Αισθητήρες GMI.....	23
2.4.6 Αισθητήρες Hall.....	24

3	Ανίχνευσης Μαγνητικής Ανωμαλίας (MAD).....	28
3.1	Εισαγωγή στη μέθοδο MAD .....	28
3.2	Ανίχνευση βάση στόχων.....	30
3.2.1	Μοντέλο σήματος μαγνητικού στόχου.....	31
3.2.2	Ορθογώνιες συνάρτησεις βάσης (OBF) .....	33
3.3	Ανίχνευση Βάση Θορύβου .....	41
4	Πειραματικές Μετρήσεις και Αποτελέσματα.....	44
4.1	Πειραματική διάταξη και αλγόριθμος ανίχνευσης.....	44
4.1.1	Πρόγραμμα και δυνατότητες.....	48
4.2	Πειραματικές Μετρήσεις και Αποτελέσματα .....	50
4.2.1	Μεταβλητή Απόσταση .....	51
4.2.2	Αλγόριθμος και αριθμός δειγματοληψίας ανά παράθυρο μετρήσεων. ....	61
4.2.3	Μεταβλητή κατεύθυνση αισθητήρα .....	73
4.2.4	Μεταβλητή κατεύθυνσή του αντικειμένου .....	79
4.2.5	Αντίθετη κατεύθυνση αντικειμένου. ....	86
	Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία .....	90
	Βιβλιογραφία .....	92
	Ευρετήριο Πινάκων .....	96
	Ευρετήριο Σχημάτων.....	97



# Πρόλογος

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται οι απαραίτητοι ορισμοί και το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που είναι απαραίτητο για την κατανόηση της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των μαγνητικών αισθητήρων. Αρχικά δίνεται ο ορισμός των αισθητήρων και η κατηγοριοποίηση τους ανάλογα με τον τύπο του ερεθίσματος, καταγράφονται τα κύρια χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα και δίνεται επιγραμματικά πληροφορίες για τον αποκαλούμενο 'έξυπνο' αισθητήρα. Τέλος, γίνεται μια εισαγωγή στις αρχές λειτουργίας για κάθε ένα από τους αισθητήρες που κυριαρχούν στην τεχνολογία αυτή την στιγμή.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος ανίχνευσης μαγνητικής ανωμαλίας, καταγράφεται η ιστορική της πορεία και γίνεται η περιγραφή των απαραίτητων μερών. Ακολούθως, έχουμε κατηγοριοποίηση των διάφορων διαδικασιών που απαρτίζουν την MAD, ανάλογα με την στόχευση του αλγορίθμου (ανίχνευση βάση στόχου - βάση θορύβου) και περιγράφεται κάθε μια από τις μεθόδους.

Περνώντας στο πειραματικό μέρος, στο τέταρτο κεφάλαιο αρχικά καταγράφονται οι βελτιώσεις του αλγόριθμου και η αυτοματοποίηση της διαδικασίας εξαγωγής αποτελεσμάτων. Εν συνεχεία, δίνονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, ανά κατηγορία ανάλογα με την σχετική κατεύθυνση και θέση του συστήματος αισθητήρα-δοκιμίου, και ο απαραίτητος σχολιασμός.

Τέλος, καταγράφονται τα συμπεράσματα του πειράματος, σχολιάζονται οι αδυναμίες της μεθόδου, ενώ γίνονται προτάσεις για την βελτίωση της και ιδέες για μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο ζήτημα.

# 1 Θεωρητική Εισαγωγή

Η παρακάτω εργασία πραγματεύεται ανίχνευση μαγνητικής ανωμαλίας. Έτσι, κρίνεται απαραίτητη η εισαγωγή στις αρχές που διέπουν τον μαγνητισμό. Ο μαγνητισμός αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι μιας εκ των τεσσάρων δυνάμεων που συναντάμε στην φύση, της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης που παρουσιάζει μοναδικές ιδιότητες ανάμεσα στις υπόλοιπες. Πρώτον, είναι η μόνη που καθορίζει τη δομή της ύλης από την κλίμακα του ατόμου ( $10^{-10} \text{ cm}$ ) έως αυτήν ενός αστεροειδούς ( $10^5 \text{ cm}$ ), δηλαδή είναι αυτή που κυριαρχεί για 15 τάξεις μεγέθους. Δεύτερον, το στοιχειώδες σωματίδιο της συγκεκριμένης δύναμης, το φωτόνιο, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους φορείς αλληλεπίδρασης, μπορεί να ταξιδεύει ελεύθερο μεταφέροντας σε τεράστιες αποστάσεις ενέργεια και πληροφορία.

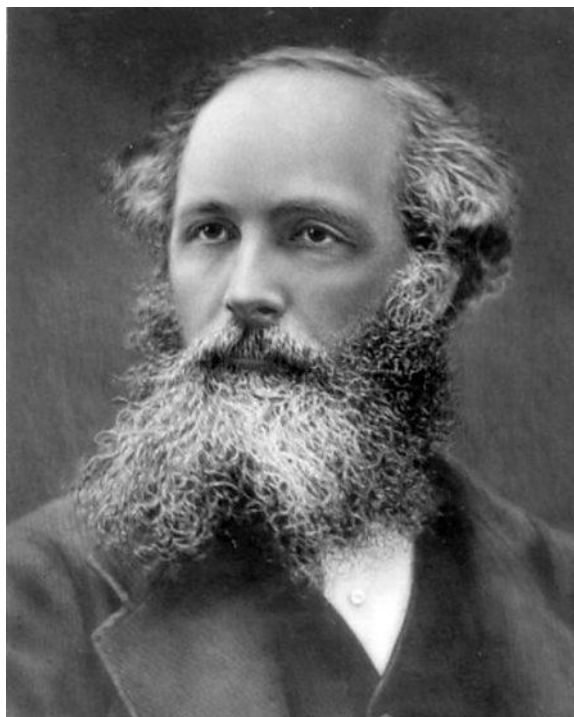
## 1.1 Ιστορική πορεία του ηλεκτρομαγνητισμού

Ιστορικές καταγραφές συνδεόμενες με τα φαινόμενα του ηλεκτρομαγνητισμού βρίσκουμε σε διάφορες χρονικές περιόδους και πολιτισμούς. Πρώτος καταγεγραμμένος φυσικός φιλόσοφος που ασχολείται με τα φαινόμενα αυτά είναι ο Θαλής ο Μιλήσιος ο οποίος περί το 600 Π.Κ.Ε. ότι η τριβή συγκεκριμένων υλικών έχει ως αποτέλεσμα αυτό να έλκει ελαφρά αντικείμενα. Η ίδια η λέξη ηλεκτρισμός προέρχεται από ένα υλικό με την συγκεκριμένη ιδιότητα, το ήλεκτρο (σημερινή λέξη κεχριμπάρι). Ανάλογα, ο όρος μαγνητισμός έλκει την καταγωγή του από το ορυκτό οξείδιο του σιδήρου  $Fe_3O_4$  το οποίο εξόρυσσαν στην Μαγνησία και ονόμασαν μαγνητίτη. Το συγκεκριμένο ορυκτό είχε την ιδιότητα να έλκει μικρά κομμάτι σιδήρου. Ειδική μνεία πρέπει να γίνει στη εφεύρεση της μαγνητικής πυξίδας από τους κινέζους (περί των 11<sup>ο</sup> αιώνα Μ.Κ.Ε.) με αποτελέσματα της βελτίωση της ναυσιπλοΐας.



*Σχήμα 1-1 Μοντέλο μαγνητικής πυξίδας από μαγνητίτη της περιόδου της δυναστείας Χαν.*

Περί το 1600 ο Gilbert με μια σειρά προσεκτικά ηλεκτρικών πειραμάτων ανακαλύπτει πολλές από τις εκφάνσεις φαινομένων που συνδέονται με τον ηλεκτρομαγνητισμό, με τον Gilbert να είναι ο πρώτος που εισαγάγει το δίπολο αγωγός-μονωτής. Το 1785 ο Coulomb αποδεικνύει ότι ο νόμος της ηλεκτρικής δύναμης είναι νόμος αντίστροφου τετραγώνου όπως αυτό της βαρύτητας του Newton. Στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα, με την παρατήρηση του Oersted ότι η μαγνητική πυξίδα εκτρέπεται από την θέση ισορροπίας της όταν βρίσκεται κοντά σε σύρματα που διαρρέονται από ρεύμα, αρχίζει και γίνεται αντιληπτό ότι ηλεκτρισμός και μαγνητισμός είναι όψεις του ίδιου νομίσματος. Αυτό πιστοποιήθηκε από την ανεξάρτητη έρευνα των Faraday και Henry, η οποία κατέγραψε πως όταν σύρμα κινείται κοντά σε μαγνήτη (ή αντίστοιχα μαγνήτης κινείται κοντά σε σύρμα) τότε στο σύρμα παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.



*Σχήμα 1-2 James Clerk Maxwell*

Έτσι, φτάνουμε στο 1873, όταν ο Maxwell μετά από συγκέντρωση και διόρθωση των μέχρι τότε πειραματικών δεδομένων προτείνει 12 νόμους για την εξήγηση των φαινομένων του ηλεκτρομαγνητισμού. Αργότερα ο Heaviside μειώνει τον αριθμό των απαραίτητων νόμων στις τέσσερις με την αποκαλούμενες εξισώσεις του Maxwell να παίρνουν την τελική τους μορφή. Είναι αδιανόητο πως η απίστευτη ποικιλία και πολυπλοκότητα της σημερινής τεχνολογίας πηγάζει από αυτές τις τέσσερις εξισώσεις.

## 1.2 Οι θαυμαστές εξισώσεις του Maxwell

Θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις του Maxwell, απουσία μαγνητικών ή διηλεκτρικών υλικών δηλαδή όπως ισχύουν στο κενό, με μια μικρής έκτασης επεξήγηση.

### 1.2.1 Ο νόμος του Gauss

$$\oint E \cdot dA = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (1.1)$$

Ο νόμος του Gauss ορίζει ότι η ολική ροή ηλεκτρικού πεδίου  $E$  που διαπερνά μια κλειστή επιφάνεια  $A$  ισούται με το πηλίκο του φορτίου  $Q$  που εμπεριέχεται στο χώρο που περικλείει η επιφάνεια δια την διαπερατότητα του κενού  $\epsilon_0$ . Δηλαδή, ο πρώτος νόμος συνδέει το ηλεκτρικό πεδίο με το ηλεκτρικό φορτίο που το δημιουργεί.

### 1.2.2 Ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό

$$\oint B \cdot dA = 0 \quad (1.2)$$

Ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό ορίζει πως η ολική μαγνητική ροή  $B$  που διέρχεται από μια κλειστή (γκαουσιανή) επιφάνεια  $A$  είναι ίση με το μηδέν. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των γραμμών μαγνητικού πεδίου που εισέρχονται σε μια κλειστή επιφάνεια ισούται με αυτόν που εξέρχονται.

### 1.2.3 Ο νόμος του Faraday

$$\oint E \cdot ds = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1.3)$$

Ο νόμος της επαγωγής του faraday ορίζει ότι το κλειστό επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  (δηλαδή η ηλεκτρεγερτική δύναμη) ισούται με το ρυθμό μεταβολής της ροής  $\Phi_m$  του μαγνητικού πεδίου που διαπερνά την επιφάνεια η οποία περικλείεται από την καμπύλη πάνω στην οποία υπολογίστηκε το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα. Με άλλα λόγια, ο συγκεκριμένος νόμος συνδέει ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο με το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο αυτό επάγει.

### 1.2.4 Ο νόμος των Ampère - Maxwell

$$\oint B \cdot ds = \mu_0 I + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_e}{dt} \quad (1.4)$$

Ορίζει ότι το κλειστό επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του μαγνητικού πεδίου  $B$ , υπολογιζόμενο σε μια οποιαδήποτε κλειστή διαδρομή, εξαρτάται από το άθροισμα του ολικού ηλεκτρικού ρεύματος  $I$  το οποίο διέρχεται μέσα από την επιφάνεια που περικλείεται από την καμπύλη επί της οποίας υπολογίζεται το ολοκλήρωμα συν το ρεύμα μετατόπισης, δηλαδή τον ρυθμό μεταβολής της ροής του ηλεκτρικού πεδίου  $\Phi_e$  το οποίο διαπερνά την επιφάνεια αυτή. Ουσιαστικά, ο γενικευμένος νόμος του Ampère περιγράφει την σχέση ανάμεσα σε ηλεκτρικό ρεύμα και μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο.

### 1.2.5 Η δύναμη Lorentz

$$F = qE + qu \times B \quad (1.5)$$

Με τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων,  $E$  και  $B$ , σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου μέσω των εξισώσεων Maxwell είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τη δύναμη  $F$  που ασκείται σε φορτίο  $q$  βρισκόμενο στο σημείο και κινούμενο με ταχύτητα  $u$ . Το συγκεκριμένο άθροισμα των ηλεκτρικών και μαγνητικών δυνάμεων ονομάζεται δύναμη Lorentz. Να τονιστεί πως όλα τα κλασικά

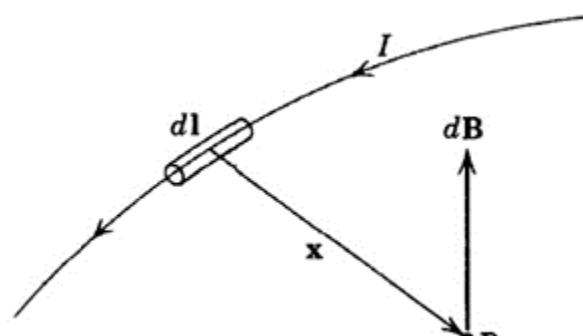


ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα περιγράφονται πλήρως από τις παραπάνω πέντε εξισώσεις.

### 1.3 Νόμος Biot – Savart

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-3 ,αν  $d\vec{l}$  είναι το στοιχειώδες μήκος (δείχνει στη κατεύθυνση της ροής του ρεύματος) ενός αγωγού που φέρει ρεύμα  $I$  και  $\vec{x}$  η απόσταση του στοιχειώδους μήκους από έναν παρατηρητή στο σημείο P, τότε η στοιχειώδης πυκνότητα μαγνητικής ροής  $d\vec{B}$  στο σημείο P δίνεται από τη σχέση:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{(d\vec{l} \times \vec{x})}{|\vec{x}|^3} \quad (1.6)$$



Σχήμα 1-3 Αναπαράσταση της στοιχειώδους μαγνητικής επαγωγής  $dB$

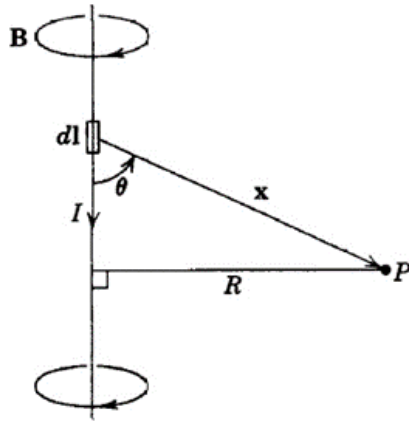
Το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής  $\vec{B}$ , ενός ευθύγραμμου σύρματος που φέρει ρεύμα  $I$ , όπως αυτό στην σχήμα 1-4, δίνεται από τη σχέση:

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi} IR \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dl}{(R^2 + l^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (1.7)$$

Όπου  $R$  η απόσταση από το σημείο παρατήρησης ως το σύρμα.

Η μαγνητική επαγωγή στη θέση  $\vec{x}$ , για μια κατανομή ρεύματος  $\vec{J}$  δίνεται από την γενική μορφή του Biot-Savart:

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{J}(\vec{x}') \times \frac{(\vec{x} - \vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|^3} d^3x' \quad (1.8)$$



Σχήμα 1-4 Μαγνητική επαγωγή  $B$  για ευθύ, μακρύ σύρμα που διαρρέεται από ρεύμα  $I$

### 1.3.1 Μαγνητικό πεδίο σημειακού δίπολου

Ο στροβιλισμός του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού ( $\vec{A}$ ) δίνει τη μαγνητική επαγωγή,  $\nabla \times \vec{A} = \vec{B}$ . Το διανυσματικό δυναμικό επιλέγεται έτσι ώστε να ικανοποιεί την εξίσωση

$\nabla \cdot \vec{A} = 0$  με κάθε συντεταγμένη του διανυσματικού δυναμικού να ικανοποιεί την εξίσωση Poisson:  $\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{J}$ .

Το διανυσματικό δυναμικό για εντοπισμένη κατανομή ρεύματος δίνεται από τη σχέση

$$\vec{A}(\vec{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J}(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} d^3x' \quad (1.4)$$

Ακολούθως, το διανυσματικό δυναμικό του σημειακού μαγνητικού δίπολου είναι:

$$\vec{A}(\vec{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{m} \times \vec{x}}{|\vec{x}|^3} \quad (1.5)$$

$$\text{με } \vec{m} = \frac{1}{2} \int \vec{x} \times \vec{J} d^3x$$

Τελικά, μετά από σειρά πράξεων καταλήγουμε ότι η μαγνητική επαγωγή σημειακού μαγνητικού δίπολου δίνεται από την:

$$\vec{B}(\vec{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3\hat{n}(\vec{m} \cdot \hat{n}) - \vec{m}}{|\vec{x}|^3} \quad (1.5)$$

με  $\hat{n}$  το μοναδιαίο διάνυσμα.

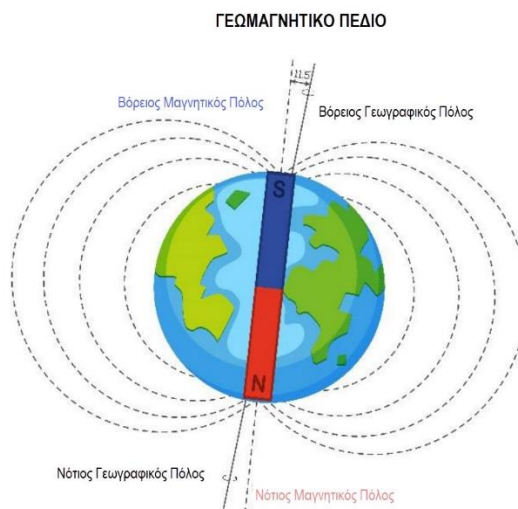
## 1.4 Γεωμαγνητικό πεδίο

Μαγνητικό πεδίο ονομάζεται ο χώρος όπου μαγνητικές δυνάμεις ασκούνται σε κινούμενα ηλεκτρικά φορτία ή ορισμένα υλικά. Μπορεί να εντοπιστεί εύκολα με τη χρήση πυξίδας ή μαγνητικής βελόνας, η οποία προσανατολίζεται προς τον βόρειο πόλο του πεδίου.

Η Γη λειτουργεί σαν ένας τεράστιος φυσικός μαγνήτης, με χαρακτηριστικά το Βόρειο και Νότιο μαγνητικό Πόλο, καθώς και τον μαγνητικό ισημερινό. Οι μαγνητικοί πόλοι της Γης είναι εκείνα τα σημεία με τη μεγαλύτερη μαγνητική ένταση και βρίσκονται κοντά στα αντίστοιχα γεωγραφικά σημεία.

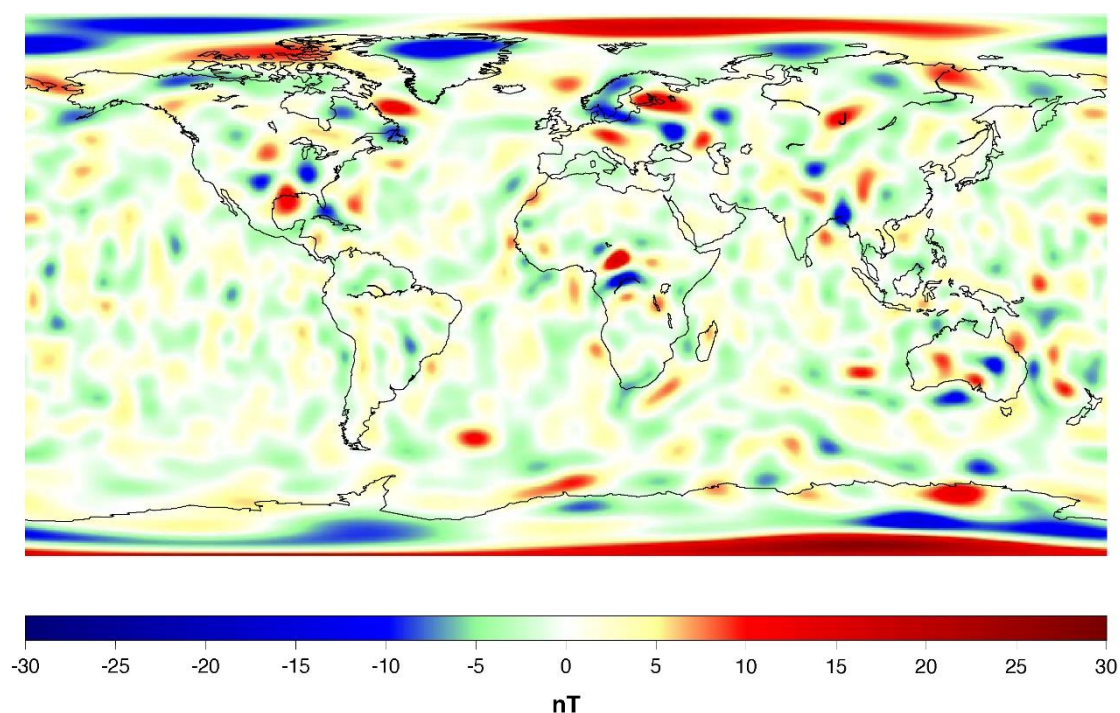
Το μαγνητικό πεδίο που παράγει η γη καλείται γεωμαγνητικό πεδίο. Η λειτουργία της μαγνητικής πυξίδας μας δίνει μια αντίληψη της ύπαρξης του γεωμαγνητικού πεδίου. Σε οποιοδήποτε σημείο της Γης τοποθετήσουμε μια ελεύθερα περιστρεφόμενη μαγνητική βελόνα, θα πάρει πάντα μια συγκεκριμένη κατεύθυνση από νότο προς βορρά.

### 1.4.1 Εσωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο



Σχήμα 1-5 Μοντέλο μαγνήτη για το μαγνητικό πεδίο της γης

Το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα της Γης, που αποτελείται κυρίως από σίδηρο, παρουσιάζει χωρικές και χρονικές διαφοροποιήσεις και αντιπροσωπεύει το 90% του συνολικού γεωμαγνητικού πεδίου που μετράμε στην επιφάνεια της Γης. Το λιθοσφαιρικό μαγνητικό πεδίο (περίπου 400 φορές μικρότερο από το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα της γης) παράγεται στο ανώτατο στρώμα του μανδύα και του φλοιού της Γης (από 10 έως 70 χιλιόμετρα) και, ως εκ τούτου, διαφέρει ανάλογα με τη θέση που πραγματοποιείται η μέτρηση. Συνολικά, το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου της Γης στην επιφάνειά της κυμαίνεται από 25 έως 65  $\mu\text{T}$  (0,25 έως 0,65 G). Κατά προσέγγιση, αντιπροσωπεύεται από ένα πεδίο ενός μαγνητικού δίπολου που βρίσκεται σε γωνία περίπου  $11^\circ$  ως προς τον άξονα περιστροφής της Γης. Ο βόρειος γεωμαγνητικός πόλος αντιπροσωπεύει στην πραγματικότητα τον νότιο πόλο του μαγνητικού πεδίου της Γης και αντιστρόφως ο νότιος γεωμαγνητικός πόλος αντιστοιχεί στον βόρειο πόλο του μαγνητικού πεδίου της Γης. Από το 2015, ο Βόρειος γεωμαγνητικός πόλος βρίσκεται στο νησί Ellesmere, Nunavut, στον Καναδά.



Σχήμα 1-6 Μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της γης στην επιφάνειας της (NASA)

#### 1.4.2 Εξωτερικό γεωμαγνητικό πεδίο

Σε απόσταση 10-20 φορές της ακτίνας της Γης, βρίσκεται η μαγνητόσφαιρα, μια περιοχή αδιαπέραστη από τα σωματίδια του ηλιακού ανέμου. Εντός αυτής της περιοχής, υπάρχει ένα ηλεκτρικό ρεύμα, το δακτύλιο ρεύματος, που περιστρέφεται κατά μήκος του ισημερινού και συμβάλλει στο γεωμαγνητικό πεδίο που μετράται στην επιφάνεια της Γης. Επιπλέον, σε υψόμετρο 50-60 χιλιόμετρα, βρίσκεται η ιονόσφαιρα, όπου η υπεριώδης ακτινοβολία του ήλιου ιονίζει τα άτομα των ανώτερων ατμοσφαιρικών στρωμάτων, δημιουργώντας επιπρόσθετα κυκλικά ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία επηρεάζουν και αυτά το γεωμαγνητικό πεδίο της γης.

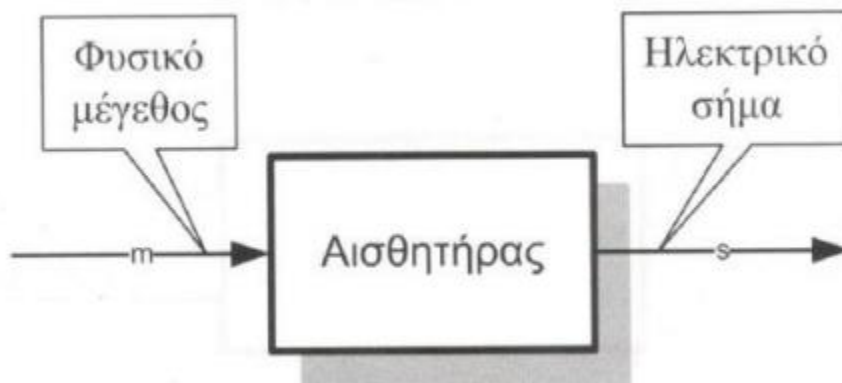
Ο ήλιος είναι επίσης υπεύθυνος για τις καθημερινές αλλαγές του μαγνητικού πεδίου της Γης, με μεγαλύτερη επίδραση στον ισημερινό και μειωμένη σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Παρατηρείται επίσης εποχική διακύμανση, με την ημερήσια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου να είναι μεγαλύτερη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες σε σύγκριση με τους χειμερινούς. Αυτό συμβαίνει λόγω των διαφορών στην ακτινοβολία, δηλαδή στην ενέργεια που λαμβάνουμε από τον ήλιο κατά τη διάρκεια των διαφορετικών εποχών.

## 2 Αισθητήρες

### 2.1 Ορισμός και ταξινόμηση

Η σημασία των αισθητήρων για τον άνθρωπο είναι συνυφασμένη με την ύπαρξη του. Οι πρώτοι αισθητήρες εμφανίζονται ως όργανα εμβρύων όντων. Το μάτι και το αυτί είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα αισθητήριων οργάνων : το πρώτο ανιχνεύει τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, φως, και το δεύτερο κύματα πίεσης, δηλαδή ήχο. Και τα δύο μετατρέπουν το ερέθισμα σε ηλεκτρικό σήμα που μεταφέρεται στον εγκέφαλο σαν πληροφορία.

Στην τεχνολογία, ως αισθητήρας ορίζεται μια συσκευή ή υποσύστημα που ανιχνεύει τις μεταβολές ενός φυσικού μεγέθους και το μετατρέπει σε κατάλληλη μορφή, παράγοντας μια μετρήσιμη έξοδο.



Σχήμα 2-1 Διάγραμμα λειτουργίας αισθητήρα

Οι αισθητήρες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση διάφορα κριτήρια. Κύρια ταξινόμηση αυτή που διαχωρίζει τους σένσορες ανάλογα με τον τύπο του ερεθίσματος(Πίνακας 2.1).Ακόμη μπορούν να χωριστούν σε ενεργούς

και παθητικούς αισθητήρες ανάλογα με την ανάγκη τους ή όχι για εξωτερική τροφοδοσία. Τέλος μπορούν να διαχωριστούν σε απόλυτους και σχετικούς, με τον απόλυτο να χαρακτηρίζει τον αισθητήρα του οποίου το σήμα αναφέρεται σε μια απόλυτη(ακριβή) φυσική κλίμακα που είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες μέτρησης. Αντιθέτως, σχετικός αισθητήρας καλείται αυτός του οποίου το παραγόμενο σήμα αναφέρεται σε ειδική (σχετική) κλίμακα.

*Πίνακας 2.1 Κατηγορίες Αισθητήρων με Βάση τον τύπο του ερεθίσματος*

<b>Ερέθισμα</b>	<b>Παράδειγμα</b>
Μηχανικό	Μάζα, Πυκνότητα Θέση, Ταχύτητα, Επιτάχυνση, Δύναμη, Πίεση, Τάση, Καταπόνηση, Ροπή
Ηλεκτρικό	Φορτίο, Ένταση, Τάση, Αγωγιμότητα, Αντίσταση, Χωρητικότητα
Θερμικό	Θερμοκρασία, Θερμότητα, Ροή Θερμότητας, θερμική αγωγιμότητα
Ακτινοβολία	Ένταση, Μήκος κύματος ,Τύπος (πχ ακτίνες γ, ακτίνες Χ, Ορατό φως)
Μαγνητικό	Μαγνητικό Πεδίο, Ροή, Αγωγιμότητα, Διαπερατότητα
Χημικό	Ταυτότητα συστατικών στοιχείων, Συγκέντρωση, pH, Ρύποι

## 2.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Ακολουθούν τα κυριότερα χαρακτηριστικά που αφορούν τους αισθητήρες, τα οποία γενικά βοηθούν στην αξιολόγηση της ποιότητας ενός αισθητήρα και ειδικότερα σε επιλογή κατάλληλου αισθητήρα για συγκεκριμένη εφαρμογή μέτρησης.

**Εύρος λειτουργίας (operating range):** αναφέρεται στην ελάχιστη και την μέγιστη τιμή του φυσικού μεγέθους που μπορεί να μετρήσει (αξιόπιστα) ο αισθητήρας

**Σφάλμα (error):** η διαφορά ανάμεσα στην πραγματική τιμή και στην έξοδο του αισθητήρα. Βασικές κατηγορίες σφαλμάτων: τα τυχαία ή στατιστικά σφάλματα και τα συστηματικά σφάλματα.

- Τυχαία σφάλματα επηρεάζουν όλες τις μετρήσεις αλλά με τυχαίο τρόπο και επομένως δεν μπορούν να αφαιρεθούν κατά την επεξεργασία τους.

- Συστημικά σφάλματα, είναι τα σφάλματα τα οποία επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο όλες τις μετρήσεις, ώστε συνήθως να μπορούν να αναγνωρισθούν και να αφαιρεθούν κατά την επεξεργασία τους.

**Διακριτική ικανότητα (resolution):** η μικρότερη αλλαγή εισόδου που μπορεί να ανιχνεύσει (μετρήσει) ένας αισθητήρας. Όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα, τόσο μικρότερο είναι το βήμα που μπορεί να μετρηθεί.

**Γραμμικότητα (linearity):** Ο βαθμός στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο ενός αισθητήρα προσεγγίζει μία ευθεία γραμμή. Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός σε μία περιοχή τιμών εισόδου και η γραμμικότητα να δίνεται ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας του.

**Ακρίβεια (accuracy) :** η διαφορά που παρουσιάζει το σήμα εξόδου του σε σχέση με την πραγματική του τιμή και εκφράζεται ως ποσοστό του εύρους μέτρησης.

**Απόκριση (response):** ο χρόνος που απαιτείται για να λάβει η έξοδος ενός αισθητήρα την τελική της τιμή, για μία δεδομένη είσοδο.

**Χρόνος λειτουργίας (operating life):** : Ο εκτιμώμενος χρόνος λειτουργίας στα πλαίσια των προδιαγραφών του. (σε μονάδες χρόνου ή κύκλων λειτουργίας).

**Ολίσθηση (drift):** Φυσική τάση ενός αισθητήρα να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του με τον χρόνο λόγω γήρανσης υλικών και λόγω περιβαλλοντικών μεταβολών

**Αξιοπιστία (reliability):** ικανότητα της συσκευής να λειτουργήσει στα πλαίσια των προδιαγραφών της, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και για μία δεδομένη περίοδο ή αριθμό κύκλων λειτουργίας.



## 2.3 Έξυπνοι Αισθητήρες

Έξυπνος αισθητήρας (smart sensor) ονομάζεται μια διάταξη που περιλαμβάνει εκτός του αισθητήρα και μονάδες επεξεργασίας για διαφορετικές διεργασίες όπως φιλτράρισμα, ενίσχυση σήματος, αυτοέλεγχο και αυτόματη βαθμονόμηση, μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό κα.



Σχήμα 2-2 Διάγραμμα λειτουργίας έξυπνου αισθητήρα

Βασικά πλεονεκτήματα ενός έξυπνου αισθητήρα είναι η αυτόνομη και προγραμματιζόμενη λειτουργία, η δυνατότητα επικοινωνίας με άλλα δίκτυα (ενσύρματα και ασύρματα), η χαμηλή κατανάλωση, το μικρό μέγεθος, ώστε γενικά να παρουσιάζει μικρό κόστος κατασκευής και λειτουργίας.

## 2.4 Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου

Οι περισσότεροι μαγνητικοί αισθητήρες είναι στην πραγματικότητα αισθητήρες της πυκνότητας ροής του μαγνητικού πεδίου—υπάρχουν μερικοί αισθητήρες που μετρούν άλλες τιμές σχετικές με τον μαγνητισμό, όπως για παράδειγμα, αισθητήρες πίεσης βασιζομένων στη τεχνική των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης. Το σχήμα 2.3 παρουσιάζει τα εύρη ευαισθησίας των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων αισθητήρων μαγνητικού πεδίου (Magnetic Field Sensor, MFS). Για να δοθεί μια ιδέα του εύρους των απαιτούμενων μετρήσεων, στον Πίνακα 2.2 δίνονται παραδείγματα μαγνητικών πεδίων με τις μέσες τιμές τους.

Οι βασικότερες τεχνολογίες αισθητήρων μαγνητικού πεδίου είναι: συσκευές υπεραγωγικής κβαντικής παρεμβολής [SQUID], συντονισμού, πύλης ροής , μαγνητοαντίστασης , Hall, επαγωγής.

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές τιμές μαγνητικών πεδίων

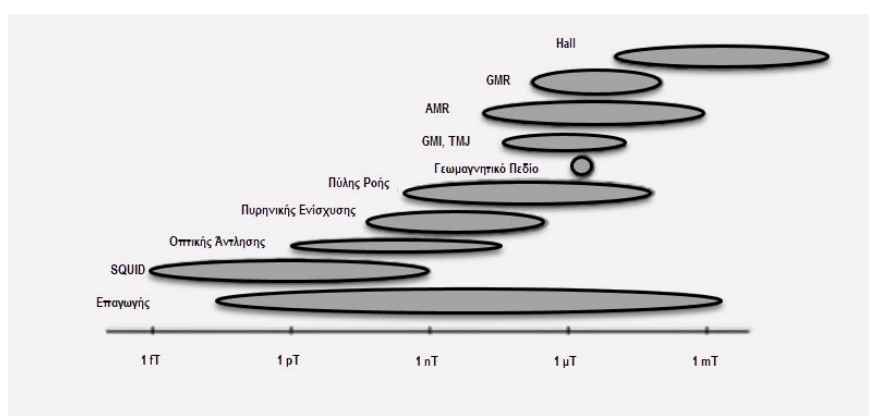
Φαινόμενο	Μαγνητικό Πεδίο ( $B$ )
Βιομαγνητικό πεδίο	10 fT
Μέσο γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο	0.25 nT
Μέση τιμή γεωμαγνητικού πεδίου	50 $\mu$ T
Οικιακή συσκευή σε λειτουργία (σε απόσταση 1 μέτρου)	60 $\mu$ T
Ηλεκτροκινητήρας (σε απόσταση 10 μέτρων)	0.1 – 10 mT
Μόνιμοι μαγνήτες (στην επιφάνεια)	100mT – 1T
Τομογραφία μαγνητικού πυρηνικού συντονισμού	4T
Πειράματα πυρηνικής σύντηξης	10 – 20T
Λευκοί Νάνοι (άστρα με πυκνότητα 1000kg/cm <sup>3</sup> )	1 kT

Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει τα τυπικά μεγέθη εφαρμογής των πιο δημοφιλών αισθητήρων. Πολύ μικρά μαγνητικά πεδία, συνήθως βιομαγνητικά πεδία, μετρούνται χρησιμοποιώντας αισθητήρες SQUID. Για πεδία πάνω από 0.1nT, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο κατηγορίες αισθητήρων, συντονισμού και πύλης ροής (fluxgate). Οι τεχνολογίες συντονισμού είναι τα μαγνητόμετρα οπτικής άντλησης (optically pumped magnetometers) και πυρηνικού συντονισμού (nuclear magnetic

resonance – NMR). Οι αντίστοιχοι αισθητήρες παρουσιάζουν πολύ καλή ανάλυση, αλλά είναι μεγάλοι σε μέγεθος και ανιχνεύουν μόνο τη βαθμωτή τιμή του μαγνητικού πεδίου. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται συνήθως στη γεωφυσική και για έρευνες στο διάστημα.

Πιο ευέλικτος σε παρόμοιο εύρος μετρήσεων είναι ο αισθητήρας fluxgate. Είναι πολύ μικρότερος και ανιχνεύει τη διανυσματική τιμή (τιμή και κατεύθυνση) με τους συγκεκριμένους αισθητήρες να αποτελούν κατασκευαστική πρόκληση για τους επιστήμονες.

Στην περιοχή γύρω από το μαγνητικό της Γης πεδίο, πολύ φθηνότεροι είναι οι αισθητήρες ανιστροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR) και γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR). Τα μεγάλα μαγνητικά πεδία μετρούνται σχεδόν αποκλειστικά από αισθητήρες φαινομένου Hall. Ειδικά χαρακτηριστικά παρουσιάζουν επαγωγικοί αισθητήρες (με πηνίο αναζήτησης (search coil)). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα πολύ μεγάλο εύρος τιμών — από πολύ μικρό εύρος pT έως πολύ μεγάλα μαγνητικά πεδία, από συνεχή DC ρεύματα (όταν μετακινείται ο αισθητήρας) έως εναλλασσόμενα εύρους ζώνης που φτάνουν τα GHz.



Σχήμα 2-3 Εύρος ευαισθησίας των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων αισθητήρων μαγνητικού πεδίου [43]

Να σημειωθεί πως όταν ένας αισθητήρας μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου στον αέρα, δεν έχει σημασία αν μετρά την πυκνότητα ροής  $B$  ή την ένταση μαγνητικού πεδίου  $H$ , επειδή και οι δύο τιμές

συνδέονται με γραμμική σχέση  $B = \mu_0 H$ . Ως εκ τούτου, τα όργανα μέτρησης συνήθως μετρούν σε μονάδες πυκνότητας ροής (Tesla), αλλά είναι δυνατό να συναντηθούν όργανα σε μονάδες έντασης μαγνητικού πεδίου (A/m).

Όταν ανακοινώνεται μια νέα αρχή αισθητήρα, είναι συνήθως μακρύς ο δρόμος μέχρι τις πρακτικές εφαρμογές. Δεν αρκεί απλώς να βρεθεί η σχέση  $H \rightarrow X$  ( $H$ =φαινόμενο,  $X$ = σήμα εξόδου αισθητήρα). Είναι πιο σημαντικό να προσδιορίσουμε και να διασφαλίσουμε τις κατάλληλες παραμέτρους μέτρησης, ως εξής:

- Επίπεδο θορύβου και ανάλυση (Noise level and resolution)
- Μετατόπιση και μακροχρόνια σταθερότητα (Offset and long-term stability)
- Ευαισθησία, μη γραμμικότητα και εύρος μετρούμενων τιμών (Sensitivity, nonlinearity, and range of measured values)
- Εύρος ζώνης συχνότητας (Frequency bandwidth)
- Σταθερότητα σε αυξομειώσεις της θερμοκρασίας (Temperature stability)
- Ανοσία στην ορθογώνια διέγερση (Immunity to orthogonal excitation)
- Υστέρηση (Hysteresis)
- Και, φυσικά, κόστος υλικού και κατασκευής ( cost of material and fabrication)

Ακολουθεί μια παρουσίαση των κυριότερων μαγνητικών αισθητήρων.

### 2.4.1 Αισθητήρες SQUID

Βασίζουν την λειτουργία τους στα υπεραγώγιμα υλικά, τα οποία όταν βρεθούν σε θερμοκρασία χαμηλότερη κάποιας κρίσιμης τιμής (συγκεκριμένης για κάθε υλικό) η ηλεκτρική τους αντίσταση μηδενίζεται. Ανάλογα με την θερμοκρασία λειτουργίας κατηγοριοποιούνται σε δύο κατηγορίες [1],[2]:

- Αισθητήρες Χαμηλής Θερμοκρασίας (Low Temperature Sensors – LTS). Κατασκευάζονται από κράματα μόλυβδου ή νιόβιο και λειτουργούν σε θερμοκρασία  $-270^{\circ}\text{C}$ . Η συγκεκριμένη θερμοκρασία κάνει απαραίτητη την χρήση υγρού ηλίου για την ψύξη με αποτέλεσμα τέτοια συστήματα να είναι κοστοβόρα και δύσχρηστα.
- Αισθητήρες Υψηλής Θερμοκρασίας (High Temperature Sensors – HTS). Κατασκευάζονται από YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) και λειτουργούν σε θερμοκρασία κοντά στους  $-130^{\circ}\text{C}$ . Αντίθετα με την προηγούμενη κατηγορία, οι συγκεκριμένοι αισθητήρες ψύχονται μέσω υγρού αζώτου, ώστε να είναι περισσότερο εύχρηστοι και οικονομικότεροι.



Σχήμα 2-4 Εμπορικός αισθητήρας SQUID

Οι αισθητήρες SQUID βασίζουν την λειτουργία τους στο κβαντικό φαινόμενο σήραγγας Josephson (Josephson effect), σύμφωνα με το οποίο ένα ρεύμα μπορεί να διαπεράσει ένα υπέρλεπτο, μη υπεραγώγιμο στρώμα εάν αυτό βρίσκεται μεταξύ ενός ζεύγους υπεραγώγιμων υλικών. Όταν αισθητήρας SQUID (σε σχήμα κλειστού δακτυλίου) ψυχθεί σε κατάλληλη θερμοκρασία, δημιουργείται μια σταθερή μαγνητική ροή. Εάν εφαρμόσουμε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο με μαγνητική ροή  $\Phi_{ex}$ ,

η εσωτερική ροή  $\Phi_{in}$  αλλάζει στιγμιαία, με τα παραπάνω να περιγράφονται από την σχέση:

$$\Phi_{in} = \Phi_{ex} - LI_c \sin \frac{2\pi\Phi_{in}}{\Phi_0} \quad (2.1)$$

Με

- $L$ : η αυτεπαγωγή του δακτυλίου
- $I_c$ : μια κρίσιμη τιμή έντασης ρεύματος
- $\Phi_0 = 2.068 \times 10^{-15} \text{ Wb}$

Έτσι, μέσω της μέτρησης της μεταβολής της μαγνητικής ροής, γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Ένας τυπικός εμπορικός αισθητήρας SQUID παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 . Η μεγάλη ευαισθησίας των SQUID, αλλά και οι ειδικές εργαστηριακές συνθήκες που απαιτεί η λειτουργία τους, επιβάλλουν την χρήση τους ως ερευνητικό εξοπλισμό (μικροσκόπιο SQUID) και στην Βιοϊατρική (MRI) [3].

#### 2.4.2 Αισθητήρες Fluxgate

Τα μαγνητόμετρα πύλης-ροής ή Fluxgate αποτελούν μια κύρια κλάση μαγνητικών αισθητήρων, παρέχοντας ευκολία στην χρήση, χωρίς ωστόσο την ανάγκη για περιοριστικές συνθήκες λειτουργίας, όπως είναι απαραίτητο για τους SQUID αισθητήρες. Κύρια εφαρμογή τους ως αισθητήρες είναι στον προσδιορισμό θέσης και ταχύτητας, ενώ απαντώνται επίσης σε συσκευές πλοήγησης ή όργανα για την ανίχνευση και μέτρηση του μαγνητικού πεδίου. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για μετρήσεις μαγνητικών πεδίων από  $10^{-10}$  έως  $10^{-4}$  T με την ακρίβεια τους να κυμαίνεται από 0.1 έως 10 nT [4].

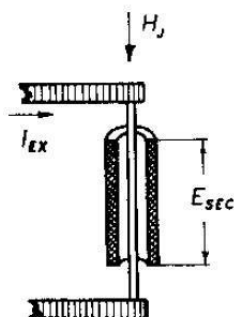
Ένας τυπικός αισθητήρας Fluxgate αποτελείται από δύο πηνία, το ένα αποτελεί το πηνίο διέγερσης και το άλλο το πηνίο λήψης, στο εσωτερικό των οποίων υπάρχει ένας φερρομαγνητικός πυρήνας. Το πηνίο διέγερσης τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργώντας μαγνητική ροή που διαδίδεται μέσω του μαγνητικού πυρήνα. Εάν το μαγνητικό πεδίο διέγερσης είναι αρκετά ισχυρό, ώστε να

οδηγεί τον πυρήνα στον περιοδικό κορεσμό του, τότε μέσω του πηνίου λήψης λαμβάνεται ένα σήμα που είναι ανάλογο της πρώτης παραγώγου της μαγνητικής επαγωγής ως προς τον χρόνο. Αναλύοντας το παραλαμβανόμενο σήμα σε σχέση με διαφορετικές μεταβλητές παραμέτρους (όπως το πλάτος, τις χρονικές διακυμάνσεις των κορυφών κ.ά.), μπορεί να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με την ένταση και την προσανατολισμό του εντοπιζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Ένας σημαντικός παράγοντας για την λειτουργία των αισθητήρων Fluxgate είναι η επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί ως μαγνητικός πυρήνας. Το επιλεγμένο υλικό θα πρέπει να έχει χαμηλή υστέρηση και υψηλή ευαισθησία. Συνήθη πρακτική η χρησιμοποίηση άμορφων μαγνητικών υλικών, όπως τα FeSiB, CoSiB και CoFeSiB σε μορφή σύρματος ή λωρίδων, τα οποία παρουσιάζουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως [5].

Η ασυμμετρία της κατασκευής και η επίδραση του σήματος διέγερσης στο πηνίο λήψης αποτελούν δύο παραμέτρους που μπορούν να παρεμποδίσουν την ακρίβεια των μετρήσεων. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, η επιλογή κατάλληλης τοπολογίας πηνίων αποτελεί ζωτικής σημασίας παράγοντα. Η χρήση μαγνητικού πυρήνα σχήματος δακτυλίου μπορεί να ξεπεράσει την πρόκληση της ασυμμετρίας, ενώ η εφαρμογή δύο παράλληλων πηνίων διέγερσης (τοπολογία racetrack) μπορεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της επίδρασης του σήματος διέγερσης στο σήμα λήψης.

Μια εναλλακτική λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος είναι να αποφευχθεί η χρήση πηνίου διέγερσης, επιβάλλοντας το σήμα να διέρχεται απευθείας μέσα από τον μαγνητικό πυρήνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5. Αυτή η τοπολογία, που αποκαλείται Orthogonal Fluxgate, επιτρέπει τη μείωση του συνολικού μεγέθους του αισθητήρα, αλλά παρουσιάζει το μειονέκτημα της παραγωγής ενός ασθενέστερου μαγνητικού πεδίου διέγερσης, καθώς αυτό προκύπτει από τον ίδιο τον πυρήνα και όχι από ένα πηνίο [6].



Σχήμα 2-5 Τυπική τοπολογία αισθητήρα *Orthogonal Fluxgate*, στην οποία το ρεύμα διέρχεται από τον μαγνητικό πυρήνα [3]

Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία λεπτών υμενίων (*thin film*), είναι εφικτή η "εκτύπωση" ενός αισθητήρα με την κατάλληλη τοπολογία [7]. Με αυτόν τον τρόπο, η ενσωμάτωση του αισθητήρα σε μια ολοκληρωμένη διάταξη, η οποία θα περιλαμβάνει επίσης τα ηλεκτρονικά συστήματα λήψης και επεξεργασίας του σήματος, γίνεται πιο εύκολη. Στο πλαίσιο αυτό, είναι δυνατή η κατασκευή μιας διάταξης που θα περιλαμβάνει πολλούς αισθητήρες *Fluxgate*, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ταυτόχρονες μετρήσεις σε πολλές διαστάσεις. Ένας απλός τρόπος υλοποίησης μιας τέτοιας διάταξης περιλαμβάνει την τοποθέτηση τριών κάθετων αισθητήρων, ο καθένας εκ των οποίων θα μετρά μία από τις τρεις διευθύνσεις του μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των αισθητήρων, καθώς το σήμα του ενός επηρεάζει τα σήματα των γειτονικών του.

#### 2.4.3 Αισθητήρες MDL

Μαγνητοσυστολή καλείται η μεταβολή του μεγέθους ενός μαγνητικού υλικού (διαστολή ή συστολή) όταν εφαρμόζεται ένα μαγνητικό πεδίο. Αυτή η μεταβολή μπορεί να περιγραφεί με τον παρακάτω λόγο:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.2)$$

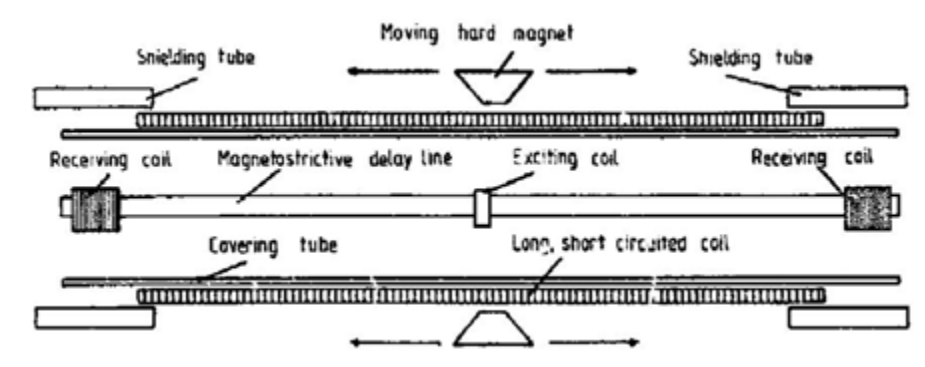
όπου,



- Δl: η μεταβολή του μεγέθους του υλικού κατά την επιβολή του πεδίου
- l: το αρχικό του μέγεθος

Οι αισθητήρες MDL βασίζουν την λειτουργία τους σε αυτό το φαινόμενο με τις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (Magnetostrictive Delay Lines – MDL). Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής προκύπτει από τη μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων όταν εφαρμόζεται ένα μαγνητικό πεδίο σε φερρομαγνητικά υλικά. Η μελέτη της μαγνητοσυστολής μπορεί να γίνει μέσω της χρήσης άμορφων μαγνητικών υλικών που λειτουργούν ως κυματοδηγοί, διαρρεόμενα από παλμικό ρεύμα.

Μια κλασική διάταξη MDL αποτελείται από ένα πηνίο διέγερσης και ένα πηνίο λήψης, μεταξύ των οποίων βρίσκεται ένας κυματοδηγός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6. Μέσω του πηνίου διέγερσης, παράγεται ένα παλμικό μαγνητικό πεδίο που οδηγείται μέσω του άμορφου μαγνητικού σύρματος ή ταινίας που εκτελεί τη λειτουργία του κυματοδηγού. Εξαιτίας του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, το υλικό παραμορφώνεται τοπικά, προκαλώντας τη δημιουργία ενός ελαστικού παλμού που διαδίδεται κατά μήκος του κυματοδηγού. Τελικά, το σήμα εντοπίζεται από το πηνίο λήψης που τοποθετείται στο άλλο άκρο.



Σχήμα 2-6 Αισθητήρας θέσης βασισμένος στη διάταξη MDL [3]

Το μήκος του κυματοδηγού μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο, παρέχοντας την ικανότητα να εντοπίζει τη σχετική θέση μαγνητικών αντικειμένων με τη συσκευή. Υπολογίζοντας τις διαφορές στον χρόνο ή τις αλλαγές στο πλάτος των σημάτων που

λαμβάνονται, μπορούμε να καθορίσουμε ποικίλα μεγέθη, όπως η θέση, η απόσταση και η εφαρμοσμένη δύναμη. Ως εκ τούτου, τέτοιοι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία και στην δικτύωση "έξυπνων" πόλεων [8].

#### 2.4.4 Αισθητήρες AMR και GMR

Οι αισθητήρες ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR) και γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR) είναι δύο τύποι αισθητήρων που λειτουργούν βασισμένοι στην αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης υλικών όταν σε αυτά εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο. Αυτό το φαινόμενο συνήθως παρατηρείται σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά σε κάποιες κατηγορίες υλικών όπως τα φερρομαγνητικά υλικά και σε θερμοκρασίες δωματίου. Για τους αισθητήρες AMR, η αντίσταση του υλικού αλλάζει διαφορετικά ανάλογα με το αν το ρεύμα διαδίδεται κατά μήκος ή κατά πλάτος του υλικού.

Στους αισθητήρες GMR, έχουμε δομές από λεπτά φερρομαγνητικά υμένα που χωρίζονται από ένα πολύ λεπτό, αγωγίμο, μη μαγνητικό στρώμα, συνήθως από χαλκό. Η αντίσταση του χαλκού αυξάνεται παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, επιτρέποντας την ανίχνευση του πεδίου. Σε αυτή την περίπτωση, ο χαλκός, παρόλο που είναι ένας αγωγίμο υλικό, εμφανίζει αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση λόγω του μικροσκοπικού πάχους του, το οποίο προκαλεί αυξημένη σκέδαση των φορέων φορτίου εντός της δομής του. Ανάμεσα στα φερρομαγνητικά στρώματα λαμβάνει χώρα αντιφερρομαγνητική σύζευξη, που σημαίνει ότι τα μαγνητικά δίπολα τους έχουν αντίθετους προσανατολισμούς. Ωστόσο, όταν εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο με κατάλληλη κατεύθυνση, η αντιφερρομαγνητική σύζευξη διακόπτεται, και τα μαγνητικά δίπολα ευθυγραμμίζονται με το εξωτερικό πεδίο, καθιστώντας δυνατή την ανίχνευση του πεδίου αυτού.

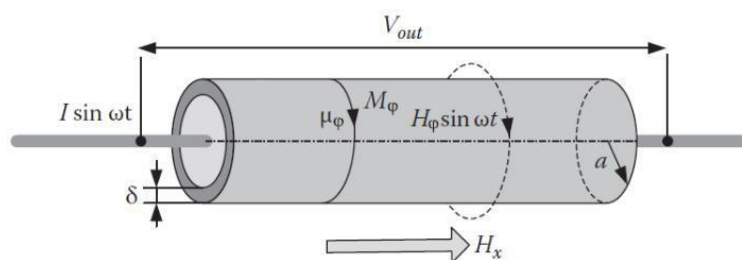
Αυτοί οι ανιχνευτές εφαρμόζονται σε συστήματα που διαβάζουν πληροφορίες από μαγνητικά μέσα αποθήκευσης, σε μνήμες τυχαίας προσπέλασης (RAM) και βιολογικούς αισθητήρες. Για την ανακάλυψη των ανιχνευτών GMR οι Albert Fert και Peter Grünberg έλαβαν το έτος 2007 το βραβείο Νόμπελ Φυσικής.

Οι αισθητήρες GMR συνήθως εντάσσονται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα μέσω της διάταξης της γέφυρας Wheatstone. Εφαρμόζονται σε ρομποτικά συστήματα και μέσα

μεταφοράς (κυρίως ως αισθητήρες προσανατολισμού). Έχουν γίνει προσπάθειες για την ενσωμάτωσή τους σε ολοκληρωμένα κυκλώματα που ανιχνεύουν βιομόρια, με σκοπό να αντικαταστήσουν τις τεχνικές φθορισμού σε διαγνωστικές εργασίες. Αντί για φθορίζουσες ουσίες, έχει δοκιμαστεί η χρήση κατάλληλων μαγνητικών νανοσωματιδίων που μπορούν να ανιχνευθούν από τους αισθητήρες μαγνητικοαντίστασης [3] .

#### 2.4.5 Αισθητήρες GMI

Οι αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (Giant Magnetoeimpedance - GMI) παρουσιάζουν εξαιρετικές αποδόσεις, αν και δεν έχουν ακόμη κυκλοφορήσει ευρέως σε εμπορικές εφαρμογές. Βασισμένοι στο ομώνυμο φαινόμενο, η διέλευση εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας μέσω ενός φερρομαγνητικού σύρματος προκαλεί την εμφάνιση κυκλικής ανισοτροπίας, η οποία επηρεάζεται από τα σταθερά ή χαμηλής συχνότητας μαγνητικά πεδία που δρουν στο υλικό. Σε αυτή την περίπτωση, λόγω του επιφανειακού φαινομένου, δημιουργείται ένα εξωτερικό στρώμα πάχους  $\delta$ , που αντιστοιχεί στο βάθος διείσδυσης. Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης απεικονίζεται στο σχήμα 2-7.



Σχήμα 2-7 Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (GMI) σε έναν αγωγό που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα [3]

Βασιζόμενοι στην αντίστροφη σχέση μεταξύ βάθους διείσδυσης και συχνότητας, παρατηρούμε ότι σε χαμηλές συχνότητες οι αλλαγές στην αντίσταση είναι πιο δύσκολα αντιληπτές. Ωστόσο, σε υψηλές συχνότητες, η επίδραση του επιφανειακού φαινομένου γίνεται πιο έντονη, καθιστώντας τις αλλαγές στην αντίσταση πιο εμφανείς. Για να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα, χρειάζονται υλικά με υψηλή

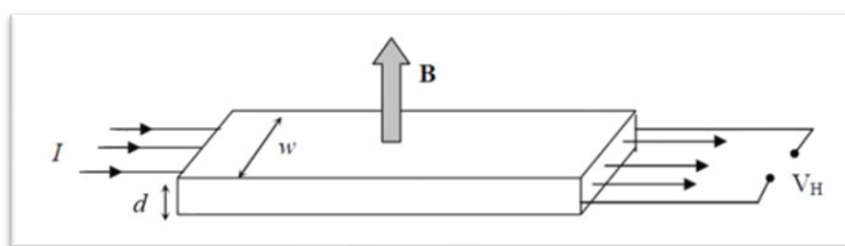
μαγνητική διαπερατότητα και χαμηλή ειδική αντίσταση, συνήθως άμορφα κράματα που περιέχουν κοβάλτιο (CoSiB, CoFeSiB).

Οι αισθητήρες GMI χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ρεύματος, γωνιακής ταχύτητας και δύναμης, με ευαισθησία που μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 0.3nT. Επιπλέον, μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασία δωματίου και να καταναλώνουν χαμηλή ενέργεια [8].

#### 2.4.6 Αισθητήρες Hall

Οι αισθητήρες Hall αποτελούν μια δημοφιλή κατηγορία μαγνητικών αισθητήρων, που οφείλεται κυρίως στην απλότητά τους, το μικρό τους μέγεθος και το χαμηλό κόστος τους. Έχουν ευρεία χρήση σε διάφορες εφαρμογές και μπορούν να εντοπιστούν, για παράδειγμα, σε οχήματα και κινητά τηλέφωνα [10].

Η λειτουργία του μαγνητικού αισθητήρα Hall εδράζεται στο φαινόμενο Hall, το οποίο ανακαλύφθηκε το 1879 από τον Edwin Hall. Σύμφωνα με αυτό, όταν ένα ρεύμα  $I$  εισέρχεται σε μια πλάκα ενώ ταυτόχρονα εφαρμόζεται ένα κάθετο μαγνητικό πεδίο  $B$  στην κατεύθυνση του ρεύματος, παρατηρείται μια τάση που είναι κάθετη τόσο στο ρεύμα όσο και στο μαγνητικό πεδίο, λόγω της δύναμης Lorentz  $F_L$  που επηρεάζει τα κινούμενα φορτία (Σχήμα 2-8). Αυτή η τάση ονομάζεται τάση Hall,  $V_H$ .



Σχήμα 2-8 Αρχή λειτουργίας αισθητήρα Hall [3]

Όταν η δύναμη Lorentz  $F_L$  επιδρά σε ένα σωματίδιο με φορτίο  $q$  που κινείται με ταχύτητα  $v$ , υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου  $E$  και μαγνητικού πεδίου  $B$ , τότε ισχύει η σχέση:

$$F_L = q(E + v \times B) \quad (2.3)$$

Απουσία μαγνητικού πεδίου, η ταχύτητα  $v_p$  και η πυκνότητα ρεύματος  $J$  των σωματιδίων δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$v_p = m_p E \quad (2.4)$$

$$J = q m_p D_p E \quad (2.5)$$

όπου  $m_p$ : η κινητικότητα των σωματιδίων,  $D_p$ : η πυκνότητα τους

Κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου, τα σωματίδια σκεδάζονται κάθετα ως προς αυτό, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο  $E_H$  που επιδρά σε αυτά είναι:

$$E_H = -(v \times B) = -m_p (E \times B) \quad (2.6)$$

Η γωνία σκέδασης  $\tan\theta_H$  δίνεται από τον τύπο:

$$\tan\theta_H = \frac{|E_H|}{|E|} \quad (2.7)$$

Επομένως, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι το ηλεκτρικό πεδίο Hall  $E_H$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E_H = -\frac{1}{qD_p} (J \times B) = -R_H (J \times B) \quad (2.8)$$

όπου,  $R_H$ : είναι ο συντελεστής Hall

Τελικά, η τάση Hall  $V_H$  σε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλάτους  $w$ , δίνεται από τον τύπο:

$$V_H = m_p w E_x E_y = R_H W J B \quad (2.9)$$

Έστω ότι το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο έχει πάχος  $d$ . Τότε, η πυκνότητα ρεύματος  $J$  θα είναι ίση με:

$$J = \frac{I}{wd} \quad (2.10)$$

Οπότε, αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση, προκύπτει:

$$V_H = \frac{R_H I B}{d} \quad (2.11)$$

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα Hall συνδέεται στενά με την επιλογή υλικών που έχουν υψηλή κινητικότητα φορτίων. Λαμβάνοντας υπόψη και τις ισχύος απώλειες  $P_R$

που οφείλονται στην αντίσταση του υλικού, η τελική τάση εξόδου ενός αισθητήρα Hall  $V_H$  καθορίζεται από την εξής εξίσωση:

$$V_H = \sqrt{\left(\frac{m_p P_R}{D_p d}\right) B} \quad (2.12)$$

Στους αισθητήρες Hall, κοινά χρησιμοποιούμενα υλικά περιλαμβάνουν το Si, GaAs, InAs και InSb. Κάθε υλικό παρουσιάζει διαφορετικά προτερήματα και μειονεκτήματα που συνδέονται κυρίως με την ευαισθησία, τη γραμμικότητα των μετρήσεων, τα σφάλματα λόγω θερμοκρασιακών αλλαγών και την επίπεδα θορύβου. Λόγω της εκτεταμένης χρήσης του πυριτίου στην παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, το πυρίτιο είναι το πιο συνηθισμένο υλικό που χρησιμοποιείται στους αισθητήρες Hall. Ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής του αισθητήρα, είναι δυνατόν να μετρηθούν περισσότερες από μία διαστάσεις.

Ωστόσο, οποιαδήποτε ασυμμετρία στη διάταξη ή ακριβής τοποθέτηση των ηλεκτροδίων εισόδου και εξόδου οδηγεί σε αποκλίσεις στις παρατηρούμενες μετρήσεις. Για την αποφυγή αυτής της απόκλισης, επιλέγεται είτε η κατασκευή των αισθητήρων με χρήση λέιζερ, είτε η επαναφορά της με χρήση αντιστάσεων. Παρομοίως, για την αντιμετώπιση σφαλμάτων που σχετίζονται με τη θερμοκρασία, συχνά χρησιμοποιούνται αισθητήρες θερμοκρασίας που ενσωματώνονται στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα με τον αισθητήρα Hall, με σκοπό να αντισταθμίζουν τις αποκλίσεις που προκαλούνται.

Οι αισθητήρες Hall είναι διαθέσιμοι στην αγορά σε μεγάλο αριθμό και με χαμηλό κόστος, καθώς παράγονται μαζικά και έχουν ευρεία χρήση σε διάφορες εφαρμογές. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο των μετρήσεων που είναι ικανοί να πραγματοποιήσουν.

Η πρώτη κατηγορία αισθητήρων Hall περιλαμβάνει τους λεγόμενους Latch Hall αισθητήρες, οι οποίοι παράγουν ένα σήμα εξόδου μόνο εάν το μαγνητικό πεδίο που δέχονται υπερβαίνει μια προκαθορισμένη τιμή. Αυτοί οι αισθητήρες δεν είναι κατάλληλοι για τη μέτρηση της ακριβούς τιμής του μαγνητικού πεδίου, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της παρουσίας ή απουσίας ενός μαγνητικού πεδίου. Τέτοιοι αισθητήρες είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όπου

απαιτείται μόνο η ανίχνευση της περιστροφής ενός αντικειμένου, όπως για παράδειγμα σε μηχανικές εφαρμογές που αφορούν στην περιστροφή ενός άξονα

Οι αισθητήρες Hall που ανήκουν στη δεύτερη και τρίτη κατηγορία είναι ικανοί να παράγουν μία τάση εξόδου που σχετίζεται γραμμικά με το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτοί οι γραμμικοί αισθητήρες Hall χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: τους μονοπολικούς (linear unipolar) και τους διπολικούς (linear bipolar). Οι μονοπολικοί αισθητήρες Hall χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται μόνο η μέτρηση της απόλυτης τιμής του μαγνητικού πεδίου. Αντίθετα, όταν απαιτείται η γνώση της κατεύθυνσης επιβολής του μαγνητικού πεδίου ως προς τον αισθητήρα, χρησιμοποιούνται οι διπολικοί αισθητήρες Hall [8].

## 3 Ανίχνευσης Μαγνητικής Ανωμαλίας (MAD)

### 3.1 Εισαγωγή στη μέθοδο MAD

Τα φερρομαγνητικά μαγνητικά υλικά δημιουργούν (λόγω εγγενούς ασθενούς μαγνήτισης) ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο. Όταν τοποθετηθούν σε ένα μαγνητικό πεδίο (εν προκειμένω το γεωμαγνητικό), μαγνητίζονται και δημιουργούν ένα επαγόμενο μαγνητικό πεδίο. Ο συνδυασμός τους θα διαταράξει το μέτρο του τοπικού μαγνητικού πεδίου. Αυτή η τοπική μαγνητική ανωμαλία μπορεί να μετρηθεί με μαγνητόμετρο [10] και η μέτρηση αυτή είναι η απαραίτητη διεργασία της τεχνολογίας που σχετίζεται με την ανίχνευση φερρομαγνητικών υλικών. Η μέθοδος ανίχνευσης μαγνητικής ανωμαλίας (MAD) αναφέρεται συνήθως στην ανίχνευση εξ αποστάσεων ακίνητου ή κινούμενου στόχου μέσω μέτρησης του τοπικού μαγνητικού πεδίου με τη διαδικασία να ακολουθεί συγκεκριμένα βήματα επεξεργασίας και ανάλυσης του σήματος [11],[12]. Έτσι, η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση, εντοπισμό, προσδιορισμό και παρακολούθηση της πορείας μαγνητικών στόχων(όπως οχήματα [13], εκρηκτικά [14], νάρκες[15], υποβρύχια [16], κλπ.).

Η τεχνολογία MAD εφαρμόστηκε πρώτη φορά στον ανθυποβρυχιακό πόλεμο κατά την διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, όπου πλοία και αεροσκάφη εξοπλισμένα με μαγνητόμετρα, μετρούσαν μαγνητικές ανωμαλίες με σκοπό την ανίχνευση υποβρύχιων [17]. Συγκεκριμένα, το 1944, συμμαχικό αεροσκάφος εξοπλισμένο με σύστημα MAD, χρησιμοποιώντας ένα μαγνητόμετρο πύλης ροής, εντόπισε επιτυχώς για πρώτη φορά ένα γερμανικό υποβρύχιο με αποτέλεσμα την βύθιση του. Μετά τον πόλεμο βρήκε εφαρμογές σε γεωλογικές έρευνες [18], στρατιωτικούς σκοπούς [19], βιομηχανικές δοκιμές [20], προβλέψεις σεισμών [21].

Τις τελευταίες δεκαετίες, με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας επεξεργασίας και κατασκευής υλικών κατάλληλων για μαγνητικούς αισθητήρες, έχει προταθεί πληθώρα μαγνητόμετρων με υψηλή ευαισθησία και ακρίβεια μετρήσεων με αποτελέσματα η δυνατότητα ανίχνευσης να βελτιώνεται συνεχώς [22]-[25]. Συγχρόνως, η βελτίωση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και ακολούθως των



μικροελεγκτών-μικροεπεξεργαστών έχει θετικό αντίκτυπο τόσο στο λογισμικό όσο και στον εξοπλισμό.

Η τεχνολογία MAD συνήθως αποτελείται από ένα σύστημα μέτρησης μαγνητικού πεδίου, το μαγνητόμετρο, το οποίο μετρά το μαγνητικό πεδίο της γης ανιχνεύοντας τις εκάστοτε μαγνητικές ανωμαλίες και έναν αλγόριθμο επεξεργασίας του σήματος [26]. Ωστόσο, λόγω της επίδρασης του περιβάλλοντος ανίχνευσης το σήμα συχνά επηρεάζεται από θόρυβο με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης του συστήματος ανίχνευσης. Στην πραγματικότητα, επειδή η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου δεν είναι σε θέση να αποφύγει άλλα μαγνητικά πεδία σε ένα ανοιχτό φυσικό περιβάλλον το σήμα μαγνητικής ανωμαλίας είναι συνήθως 'θαμμένο' βαθιά στον μαγνητικό θόρυβο και εύκολα μπορεί να αγνοηθεί. Επομένως, απαιτείται αποτελεσματικός αλγόριθμος ανίχνευσης για την μεγιστοποίηση της πιθανότητας επιτυχούς ανίχνευσης [27].

Ακολουθεί μια επισκόπηση των μεθόδων MAD που έχουν προταθεί από ερευνητές τα τελευταία χρόνια, οι οποίες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον αν οι αλγόριθμοι της μεθόδου επικεντρώνεται στην εξεύρεση του στόχου ή στην στατιστική ανάλυση του θορύβου [28].

Στην πρώτη κατηγορία (target based), περιλαμβάνονται συστήματα μαγνητικής αναζήτησης, που βασίζονται στην υπόθεση ότι υπάρχει σχετική κίνηση ανάμεσα σε μαγνητόμετρο και στόχο. Στην συγκεκριμένη κατηγορία οι αλγόριθμοι επικεντρώνονται στην μαθηματική ανάδειξη της μαγνητικής ανωμαλίας, δηλαδή στοχεύουν στο να μεγιστοποιήσουν την απόκριση του μαγνητόμετρου στο φαινόμενο αγνοώντας στατικό πεδίο και θόρυβο.

Αντίθετα, στη δεύτερη κατηγορία (noise based), έχουμε μεθόδους που βασίζονται σε στατιστικές αναλύσεις του σήματος του μαγνητόμετρου και χρησιμοποιούνται όταν δεν είναι γνωστές εξ αρχής οι σχετικές κινήσεις μαγνητόμετρου και στόχου. Αυτές επικεντρώνονται στο να αφαιρέσουν υπόβαθρο και θόρυβο από το σήμα με σκοπό να απογυμνώσουν την απόκριση της ανωμαλίας.

### 3.2 Ανίχνευση βάση στόχων

Η ανίχνευση με βάση των στόχο βασίζεται στην ανάλυση των μοτίβων του σήματος, με τον στόχο να αποκαλύπτεται από τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου πεδίου.

Για την παρακάτω θα γίνουν τρεις υποθέσεις:

A) Όταν η απόσταση αισθητήρα-στόχου είναι πολύ μεγαλύτερη από το μέγεθος του στόχου, ο στόχος μπορεί να αναπαρασταθεί με το μοντέλο μαγνητικού δίπολου [29].

B) Ο στόχος κινείται ευθύγραμμα με το μέγεθος και τη κατεύθυνση της μαγνητικής ροπής να παραμένουν σταθερά.

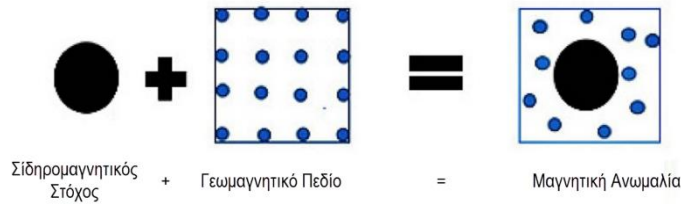
Γ) Ο χαρακτηριστικός χρόνος  $\tau$  είναι γνωστός εξαρχής.

Θα περιγραφεί η κυριότερη από τις μεθόδους ανίχνευσης στόχου, η μέθοδος αποσύνθεσης μέσω ορθογώνιων συναρτήσεων βάσης OBF που προτάθηκε από τον Ginzburg, η οποία ακολουθήθηκε και στην πειραματική διαδικασία.

Ωστόσο, ο αλγόριθμος OBF απαιτεί ο θόρυβος (υπόβαθρου) να ικανοποιεί την υπόθεση του γκαουσιανού (λευκού) θορύβου. Επομένως, η πραγματική εφαρμογή απαιτεί την διόρθωση των (περιβαλλοντικών) δεδομένων για να επιτευχθεί καλύτερο αποτέλεσμα ανίχνευσης.

### 3.2.1 Μοντέλο σήματος μαγνητικού στόχου

Το 1982, ο Yoshii Tanekage κατέθεσε ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για ανίχνευση υποβρυχίων [30]. Υπέθεσε πως ο υποβρύχιος στόχος δρα ως μαγνητικό δίπολο και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τη κλίση του μαγνητικού πεδίου (μετρώντας το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή πτήσης) μπόρεσε να εξαγάγει έναν αναλυτικό τύπο για τη θέση του στόχου(μαγνητική ανωμαλία).



*Σχήμα 3-1: Σχηματική αναπαράσταση της μαγνητικής ανωμαλίας γύρω από το σιδηρομαγνητικό υλικό*

Το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνητικού δίπολου σε οποιαδήποτε θέση στον χώρο μπορεί να εκφραστεί ως

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{r^5} - \frac{\mathbf{M}}{r^3} \right] \quad (3.1)$$

όπου  $\mathbf{M}$  είναι η μαγνητική ροπή του στόχου,  $\mathbf{r}$  είναι το διάνυσμα από το στόχο στο σημείο μέτρησης (μαγνητικός αισθητήρας) και  $\mu_0$  είναι η διαπερατότητα του κενού.

Λόγω της παρουσίας του μαγνητικού πεδίου της γης, η φερρομαγνητική μαγνητική ουσία μαγνητίζεται για να δημιουργήσει ένα επαγόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο διαταράσσει την κατανομή του μαγνητικού πεδίου της γης γύρω από το φερρομαγνητικό αντικείμενο, παράγοντας ένα σήμα μαγνητικής ανωμαλίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 .

Το πραγματικό συνολικό μαγνητικό πεδίο που μετράται από το μαγνητόμετρο  $\mathbf{B}_s$  είναι το διανυσματικό άθροισμα του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{B}$  που δημιουργείται από τον σιδηρομαγνητικό στόχο και το γεωμαγνητικό πεδίο  $\mathbf{T}$  :

$$\mathbf{B}_s = \mathbf{B} + \mathbf{T} \quad (3.2)$$

Όταν λαμβάνεται υπόψη η συνολική ένταση του μαγνητικού πεδίου, το γεωμαγνητικό πεδίο είναι γενικά πολύ μεγαλύτερο από το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από σιδηρομαγνητικά αντικείμενα. Επομένως, μπορούμε να υποθέσουμε ότι  $T \gg B$ , και βάσει αυτής της συνθήκης, μπορεί να ληφθεί η ακόλουθη προσέγγιση:

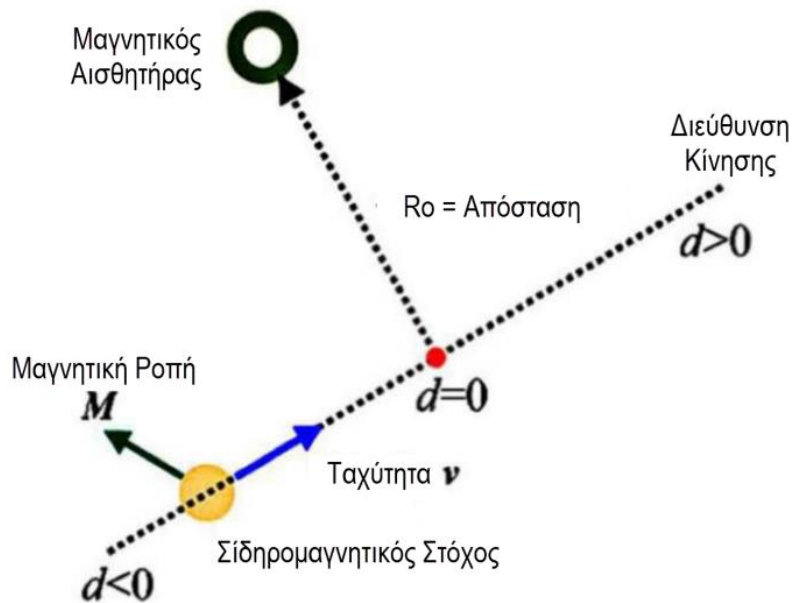
$$|\mathbf{B}_s|^2 = (\mathbf{B} + \mathbf{T}) \cdot (\mathbf{B} + \mathbf{T}) \cong |\mathbf{T}|^2 + 2\mathbf{B}\mathbf{T} \quad (3.3)$$

Επειδή ισχύει  $\sqrt{1+2x} \cong 1+x$ , η βαθμωτή εξίσωση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να ληφθεί από την παρακάτω εξίσωση

$$B_s = T \left( 1 + \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{T}}{|\mathbf{T}|^2} \right) = T + \mathbf{B} \cdot \frac{\mathbf{T}}{T} \quad (3.4)$$

Επειδή το γεωμαγνητικό πεδίο είναι γενικά πολύ μεγαλύτερο από το μαγνητικό πεδίο του σιδηρομαγνητικού στόχου, το σήμα του μαγνητόμετρου θεωρείται ότι είναι η προβολή του μαγνητικού πεδίου της Γης:

$$S = \mathbf{B} \cdot \frac{\mathbf{T}}{T} \quad (3.5)$$

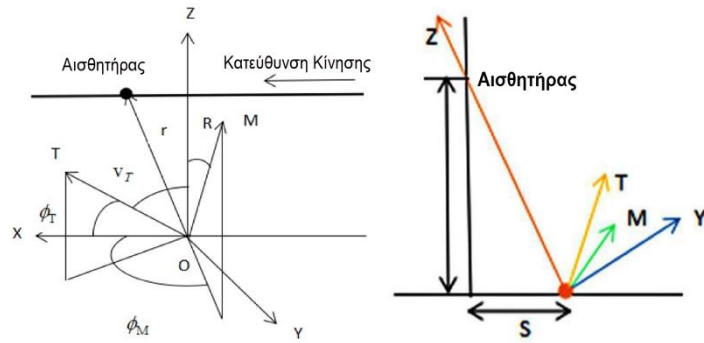


Σχήμα 3-2: Πειραματική διάταξη

Το στατικό μαγνητόμετρο φαίνεται στο σχήμα 3.2 , όπου το  $R_0$  αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ του μαγνητικού οργάνου και του στόχου, το  $M$  είναι η μαγνητική ροπή του στόχου και το  $v$  είναι η ταχύτητα του. Από την εξίσωση (3.1) φαίνεται ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης. Όσο πιο μακριά είναι ο στόχος ανίχνευσης από το μαγνητόμετρο, τόσο μικρότερο το μαγνητικό πεδίο που ανιχνεύεται [32]. Η προσέγγιση ελάχιστης απόστασης (closest proximity approach CPA) ορίζει πως το σήμα είναι δυνατότερο στο σημείο όπου είναι εγγύτερα στο αισθητήρα. Επομένως, στο σημείο όπου το σύστημα MAD ανιχνεύει το μέγιστο σήμα ο στόχος βρίσκεται στο CPA (Σχήμα 3.2). Όταν οι διαστάσεις του αισθητήρα είναι μικρές σε σύγκριση με την απόσταση CPA, τότε η απόκριση του αισθητήρα στη χρονική περίοδο ακριβώς πριν και μετά το CPA του στόχου θα ακολουθήσει το πραγματικό ανώμαλο σήμα και θα εξασφαλίσει αποτελεσματική στόχευση.

### 3.2.2 Ορθογώνιες συνάρτησεις βάσης (OBF)

Ο Άντερσον ήταν ο εμπνευστής των OBF στα τέλη της δεκαετίας του 1940. Μετά από αυτό, το 1990, ο Mori [33] περιέγραψε τη χρήση προσαρμοσμένων συναρτήσεων για τη βελτίωση της ανίχνευσης μαγνητικών ανωμαλιών όταν ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio, SNR) είναι μικρός. Με βάση αυτό, το 2002, η ερευνητική ομάδα του Frumkis πρότεινε μια μέθοδο για την αποτελεσματική βελτίωση του SNR των σημάτων μαγνητικής ανωμαλίας - τον τυπικό αλγόριθμο αποσύνθεσης OBF [34]. Αυτός ο αλγόριθμος βελτιώνει το SNR λύνοντας την ενεργειακή συνάρτηση στο χώρο ορθογώνιων συναρτήσεων βάσης. Στη συνέχεια, το 2004, η ίδια ερευνητική ομάδα παρουσίασε τη χρησιμοποίηση πέντε OBF για την επεξεργασία σημάτων μαγνητικής ανωμαλίας από μαγνητόμετρα κλίσης [35].



Σχήμα 3-3 (α) Πειραματική διάταξη. (β) Το μοντέλο ανίχνευσης σήματος μαγνητικής ανωμαλίας ενός μόνο μαγνητόμετρου..

Στη συνέχεια πρότειναν τη μείωση των πέντε OBF σε τέσσερις, κάτι που όχι μόνο απλοποιεί τον υπολογισμό αλλά ενισχύει επίσης τη σταθερότητα του αλγορίθμου [36]. Τα τελευταία χρόνια, πολλοί ερευνητές έχουν βελτιώσει τη μέθοδο OBF με βάση άλλες διαδικασίες [37]- [39].

### 3.2.2.1. Τρεις συναρτήσεις ορθογωνίας βάσης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3-2, εάν ο αισθητήρας κινείται κατά μήκος μιας ευθείας τροχιάς παράλληλη προς τον άξονα  $x$ , τότε το δίπολο βρίσκεται στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων.

Αντικαθιστώντας την (3.1) στην (3.2) λαμβάνεται το σήμα μαγνητικής ανωμαλίας:

$$S = \frac{\mu_0 M}{4\pi R_0^3} \sum_{n=1}^4 b_n \varphi_n(w) \quad (3.6)$$

$$w = \frac{vt}{R} = \frac{t}{\tau_0} \quad (3.7)$$

όπου  $w$  είναι η αδιάστατη συντεταγμένη κατά μήκος της τροχιάς του στόχου, και  $\tau_0 = R_0/v$  είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος, με την τριάδα της ορθογωνιοποιημένης συνάρτησης που λαμβάνεται μετά τη διαδικασία ορθογωνιοποίησης Schmidt να είναι η ακόλουθη:

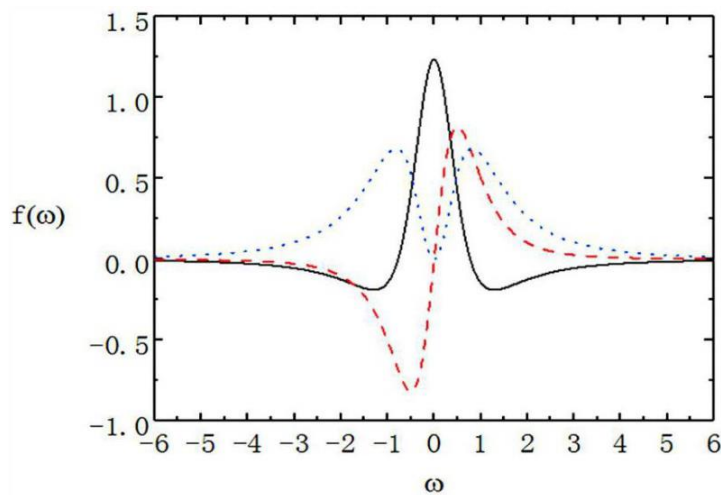
$$f_1(w) = \sqrt{\frac{128}{3\pi}} \frac{w^2}{(1+w^2)^{5/2}} \quad (3.8\alpha)$$

$$f_2(w) = \sqrt{\frac{128}{5\pi}} \frac{w}{(1+w^2)^{5/2}} \quad (3.8\beta)$$

$$f_3(w) = \sqrt{\frac{24}{5\pi}} \frac{1-\frac{5}{3}w^2}{(1+w^2)^{5/2}} \quad (3.8\gamma)$$

Το σήμα μαγνητικής ανωμαλίας μπορεί περαιτέρω να γραφτεί ως

$$S = \frac{\mu_0 M}{4\pi R_0^3} \sum_{n=1}^3 a_n f_n(w) \quad (3.9)$$



Σχήμα 3-4 Το διάγραμμα των ορθογωνίων συναρτήσεων βάσης, στο οποίο η μαύρη συμπαγής γραμμή αντιπροσωπεύει την  $f_1(w)$ , η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει την  $f_2(w)$  και η μπλε διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει την  $f_3(w)$ .

Οι ορθογωνιοποιημένες συναρτήσεις βάσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4.

Αυτές οι εξισώσεις πληρούν τις γενικές προϋποθέσεις:

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} f_i(w) f_j(w) dw = 0, i \neq j \\ \int_{-\infty}^{\infty} f_i^2(w) dw = 1, i, j = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (3.10)$$

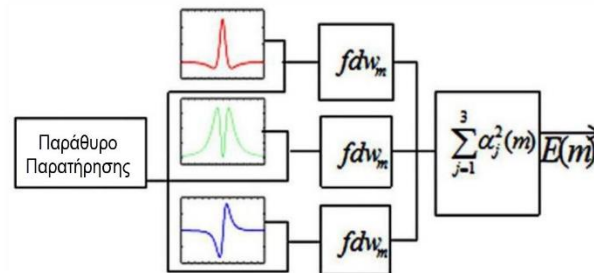
Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των OBF, οι συντελεστές  $a_j$  υπολογίζονται ως εξής:

$$a_j = \left( \frac{\mu_0 M}{4\pi R_0^3} \right)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} f_i(w) S dw \quad (3.11)$$

Έτσι, ορίζεται η συνάρτηση ενέργειας του σήματος μαγνητικής ανωμαλίας μέσω των συναρτήσεων βάσης:

$$E = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 \quad (3.12)$$

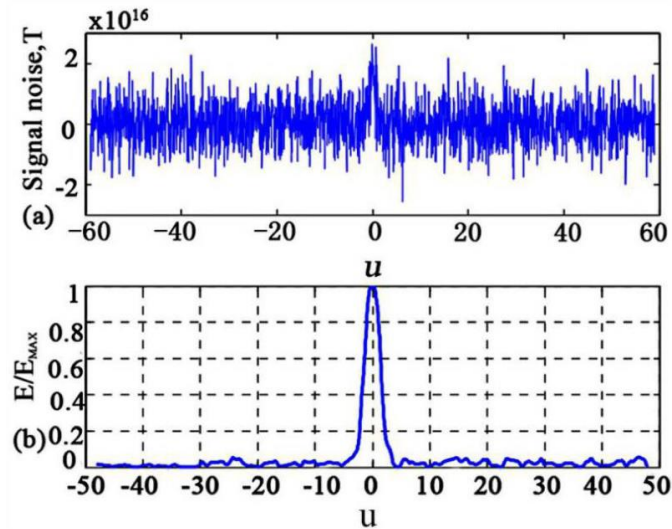
Το διάγραμμα ροής ολόκληρης της διαδικασίας του αλγορίθμου OBF φαίνεται στο σχήμα 2.5 .



Σχήμα 3-5 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου αποσύνθεσης OBF

Το 2002, ο Boris Ginzburg υιοθέτησε τον αλγόριθμο αποσύνθεσης OBF για την επεξεργασία μαγνητικών ανώμαλων σημάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-6. Το Σχήμα 3.6(α) δείχνει τα αρχικά δεδομένα MAD, στα οποία το σήμα στόχος είναι σχεδόν πλήρως βυθισμένο στον θόρυβο και είναι δύσκολο να διακριθεί οπτικά. Το σχήμα 2.6(β) είναι η κανονικοποιημένη συνάρτηση ενέργειας που λαμβάνεται (υπό την προϋπόθεση  $-6 \leq w \leq 6$ ) μέσω του αλγορίθμου αποσύνθεσης OBF. Μπορεί να φανεί από το σχήμα ότι ακόμα και αν το σήμα μαγνητικής ανωμαλίας εμπεριέχει λευκό θόρυβο, η ενεργειακή συνάρτηση MAD που λαμβάνεται από τον αλγόριθμο αποσύνθεσης OBF όχι μόνο επιδεικνύει σημαντική βελτίωση στο SNR αλλά μπορεί επίσης να εξαγάγει αποτελεσματικά μαγνητικές ανωμαλίες από σήμα με ισχυρό περιβαλλοντικό θόρυβο. Η τιμή κορυφής της συνάρτησης ενέργειας αντιστοιχεί στη θέση στόχου.

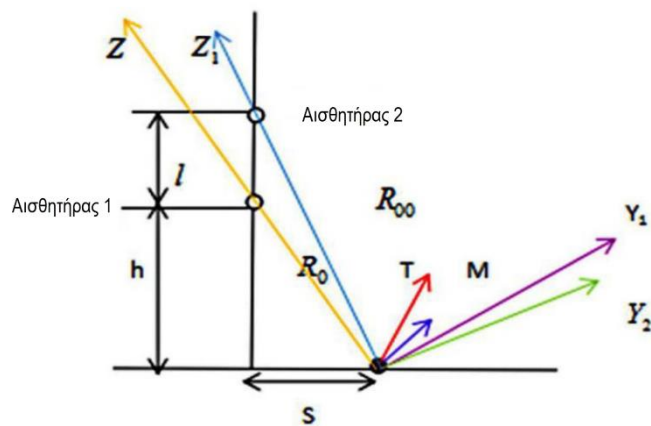




Σχήμα 3-6 Οι συγκρίσεις πριν και μετά τον αλγόριθμο αποσύνθεσης, όπου (α) είναι το αρχικό σήμα μαγνητικής ανωμαλίας και (β) είναι η κανονικοποιημένη ενεργειακή συνάρτηση των ορθογώνιων συναρτήσεων βάσης

### 3.2.2.2 Πεντε ορθογώνιες συναρτήσεις βάσης

Τα δύο μαγνητόμετρα μετρούν το μαγνητικό πεδίο και η κλίση του μαγνητικού πεδίου λαμβάνεται μέσω της διαφοράς, η οποία στη ουσία είναι η γεωμαγνητική κλίση μεταξύ των δύο θέσεων, η οποία έχει σχεδόν σταθερή τιμή. Το σχήμα 3.7 παρουσιάζει το μοντέλο ανίχνευσης σήματος μαγνητικής ανωμαλίας του αποκαλούμενου μαγνητομέτρου κλίσης. Το μαγνητόμετρο 1 λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως στην προηγούμενη ενότητα,



Σχήμα 3-7 Το μοντέλο ανίχνευσης σήματος μαγνητικής ανωμαλίας μέσω μαγνητόμετρου κλίσης.

επομένως το σήμα που παράγεται όταν κινείται προς την κατεύθυνση  $X$  είναι το ίδιο όπως στην εξίσωση (3.11). Το μαγνητόμετρο 2 βρίσκεται σε απόσταση από το μαγνητόμετρο 1 και το σήμα του μπορεί να εκφραστεί με τρόπο παρόμοιο με αυτό του μαγνητόμετρου 1. Δεδομένου ότι η απόσταση  $R_{00}$  και η γωνία μεταξύ του δίπολου και της τροχιάς είναι διαφορετικές, το σήμα του μαγνητόμετρου 2 εκφράζεται ως

$$S_2 = \frac{\mu_0 M}{4\pi R_{00}^3} \sum_{n=1}^3 a_{Vn} f_{Vn}(w) \quad (3.13)$$

με  $R_{00}$  να αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ του μαγνητόμετρου 2 και του σημείου του στόχου.

Μετά την ορθογωνιοποίηση Schmidt, λαμβάνονται έξι OBF. Αφού πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί, αποδεικνύεται ότι μια από τις OBF μπορεί να αγνοηθεί, επομένως ο αριθμός των βασικών συναρτήσεων μπορεί να μειωθεί σε πέντε:

$$S = \frac{\mu_0 M}{4\pi R_0^3} \sum_{n=1}^5 A_n u_n(w) \quad (3.14)$$

Εδώ το σήμα  $S$  είναι η διαφορά μεταξύ των  $S_1, S_2$ .

Επιλέγεται η παρακάτω πεντάδα εξισώσεων ορθογώνιων βάσεων.

$$u_1(w) = f_1(w) \quad (3.15\alpha)$$

$$u_2(w) = (f_1(w) - f_1(w)F_1)F_2 \quad (3.15\beta)$$

$$u_3(w) = f_2(w) \quad (3.15\gamma)$$

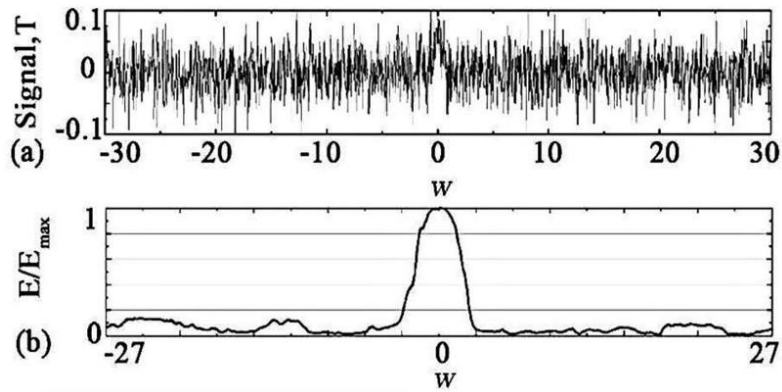
$$u_4(w) = (f_3(w) + f_1(w)F_1(F_2)^2F_3 - f_1(w)(F_2)^2F_3)F_4 \quad (3.15\delta)$$

$$u_5(w) = (f_{V2}(w) - f_2(w)F_5)F_6 \quad (3.15\epsilon)$$

Τότε το σήμα του μαγνητόμετρου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$S = \frac{\mu_0 M}{4\pi R_0^3} \sum_{n=1}^5 \alpha_n f_n(w) \quad (3.16)$$

Οι συντελεστές μπορούν να υπολογιστούν επίσης από την (3.11).

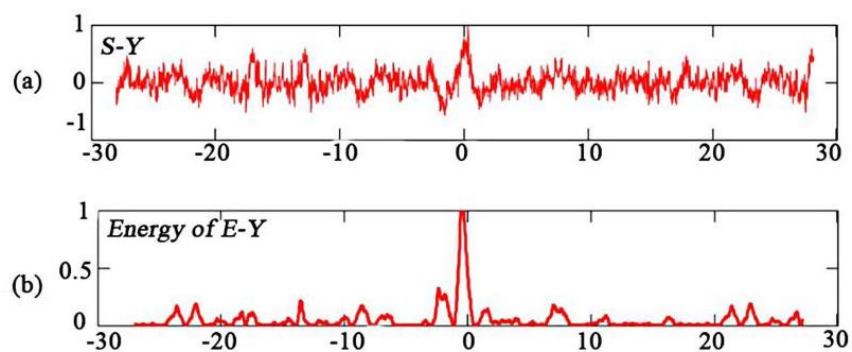


Σχήμα 3-8 Η σύγκριση πριν και μετά του αλγόριθμου αποσύνθεσης, όπου (α) είναι το αρχικό σήμα μαγνητικής ανωμαλίας, και (β) είναι η κανονικοποιημένη συνάρτηση ενέργειας μέσω ορθογώνιων συναρτήσεων βάσης.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της επεξεργασίας του σήματος μαγνητικής ανωμαλίας ενός μεμονωμένου μαγνητόμετρο μπορούν να εξαχθούν μόνο με τρεις OBF ενώ αυτά του μαγνητόμετρο κλίσης με πέντε OBF. Το 2002, ο Ginzburg υιοθέτησε αυτή τη μέθοδο για να επεξεργαστεί τα σήματα μαγνητικής ανωμαλίας που λαμβάνονται από μαγνητόμετρο βαθμίδας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 3.8. Το σχήμα 3.8(α) δείχνει τα αρχικά δεδομένα MAD, όπου το σήμα του στόχου δεν διακρίνεται μέσα στον θόρυβο. Το σχήμα 3.8(β) δείχνει τη συνάρτηση της ενέργειας με τη μέγιστη παρατηρούμενη τιμή. Από το συγκεκριμένο σχήμα γίνεται εύκολα αντιληπτό πως η κανονικοποιημένη συνάρτηση ενέργειας μπορεί να τονίσει σημαντικά το σήμα του στόχου, έτσι ώστε η εικόνα να έχει καλύτερη ευκρίνεια και το φαινόμενο να είναι εμφανές.

### 3.2.2.3 Τέσσερις ορθογώνιες συναρτήσεις βάσης

Πέντε τυπικές ορθογώνιες συναρτήσεις μπορούν να ικανοποιήσουν τις διάφορες διαδικασίες επεξεργασίας σήματος που απαιτούνται για την ανίχνευση, αλλά τέτοιες διαδικασίες απαιτούν σχετικά μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Το 1992, ο Yarotsky πρότεινε ότι όταν η απόσταση μεταξύ του εξεταζόμενου σιδηρομαγνητικού αντικειμένου και του μαγνητόμετρου είναι σχετικά μικρή, τέσσερις ορθογώνιες συναρτήσεις βάσης επαρκούν για την ανίχνευση [40]. Θέτοντας ως δεδομένο ότι οι αποστάσεις μεταξύ των μαγνητόμετρων ικανοποιούν την παραπάνω συνθήκη, το 2002, ο Ginzburg χρησιμοποίησε τέσσερις OBF για να ανιχνεύσει ανωμαλίες σε μαγνητικά σήματα, με την συγκεκριμένη εφαρμογή να μειώνει την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ για την διεκπεραίωση των υπολογισμών ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε ρεαλιστικές συνθήκες.



Σχήμα 3-9 Αλγόριθμοι αποσύνθεσης OBF, πριν και μετά (α) είναι το αρχικό σήμα μαγνητικής ανωμαλίας. (β) είναι η ενεργειακή συνάρτηση μετά τη κανονικοποίηση.

Η εφαρμογή της ορθογωνικότητας Schmidt δίνει τέσσερα τυπικά OBF:

$$v_1(w) = \sqrt{\frac{1024}{7\pi}} \frac{w^2}{(1+w^2)^{7/2}} \quad (3.17\alpha)$$

$$v_2(w) = \sqrt{\frac{1024}{21\pi}} \frac{w}{(1+w^2)^{7/2}} \quad (3.17\beta)$$

$$v_3(w) = \sqrt{\frac{128}{21\pi}} \frac{w^2-3}{(1+w^2)^{7/2}} \quad (3.17\gamma)$$

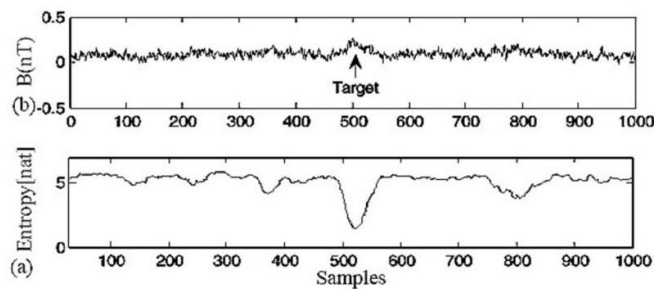
$$v_4(w) = \sqrt{\frac{384}{\pi}} \frac{w^2}{(1+w^2)^{5/2}} - \frac{4}{3} \frac{w}{(1+w^2)^{7/2}} \quad (3.17\delta)$$

Ακολούθως, το σήμα μπορεί να εκφραστεί ως :

$$G(w) = \frac{\mu_0 M \delta}{4\pi R_0^3} \sum_{n=1}^4 C_n v_n(w) \quad (3.18)$$

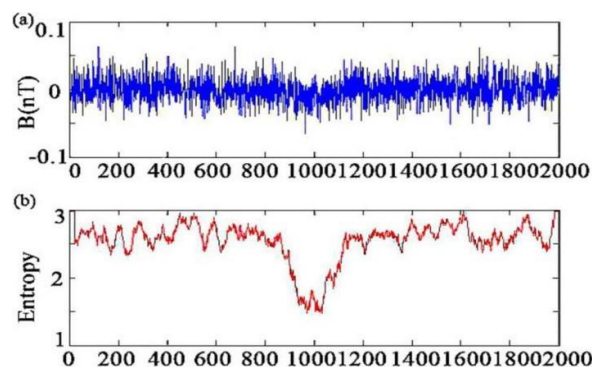
Το 2003, ο Boris Ginzburg επεξεργάστηκε το σήμα μαγνητικής ανωμαλίας με τέσσερις ορθογώνιες βάσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9. Το σχήμα 3.9 (α) δείχνει τα αρχικά δεδομένα του αισθητήρα, στα οποία το σήμα του στόχος είναι 'θαμμένο' μέσα στο θόρυβο και δεν μπορεί να διακριθεί άμεσα από το υπόβαθρο. Το σχήμα 3.9 (β) είναι η γραφική παράσταση της συνάρτησης ενέργειας και δείχνει ότι η ενεργειακή συνάρτηση αναδεικνύει την παρουσία του στόχου. Σε σύγκριση με τους πέντε τυπικούς αλγόριθμους OBF, οι τέσσερις εξισώσεις OBF όχι μόνο μειώνουν την απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ, αλλά ενισχύουν σημαντικά το SNR και βελτιώνουν επίσης το ποσοστό επιτυχία του αλγορίθμου ανίχνευσης.

### 3.3 Ανίχνευση Βάση Θορύβου

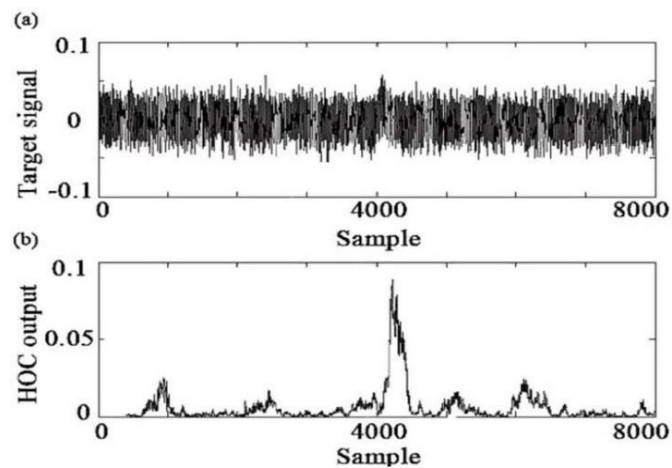


Σχήμα 3-10 (α) Το μαγνητικό σήμα και (β) το σήμα μετά το φιλτράρισμα εντροπίας.

Για την ανίχνευση με βάση το θόρυβο, θεωρείται ότι οι αυξομειώσεις προκαλούνται από την παρουσία σιδηρομαγνητικών στόχων και δεν απαιτείται προηγούμενη υπόθεση σχετικά με την κίνηση του στόχου, καθιστώντας την υλοποίηση απλούστερη και μειώνοντας τον όγκο των απαραίτητων υπολογισμών.

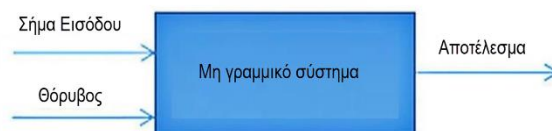


Σχήμα 3-11 (α) Το σήμα μαγνητικής ανωμαλίας και (β) το σήμα μετά το φιλτράρισμα εντροπίας

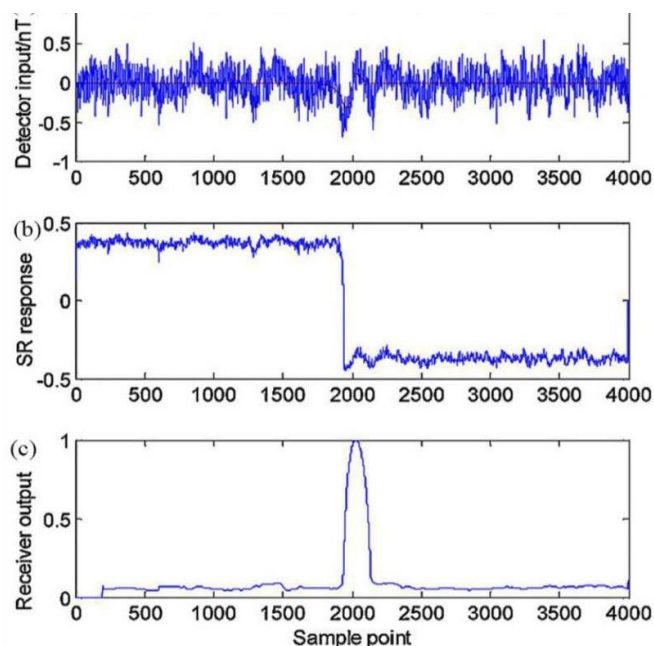


Σχήμα 3-12 (α) Ο θόρυβος του σήματος, και (β) το σήμα εξόδου μετά τον αλγόριθμο HOC.

Οι συγκεκριμένες μέθοδοι ανίχνευσης που βασίζονται στον θόρυβο περιλαμβάνουν κυρίως τη μέθοδο φιλτραρίσματος ελάχιστης εντροπίας (minimum entropy filtering method), τη μέθοδο διασταύρωσης υψηλής τάξης (Higher order crossings (HOC)), τη μέθοδο στοχαστικού συντονισμού (Stochastic resonance) και τη μέθοδο μετασχηματισμού κυματιδίων (wavelet transformation), με καθεμία από αυτές τις μεθόδους να έχει τα δικά της χαρακτηριστικά.



Σχήμα 3-13 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος στοχαστικού συντονισμού



Σχήμα 3-14 Το σήμα εισόδου του ανιχνευτή, (β) την απόκριση του συστήματος SR σε σήματα ανωμαλιών, και (γ) το σήμα εξόδου του ανιχνευτή SR

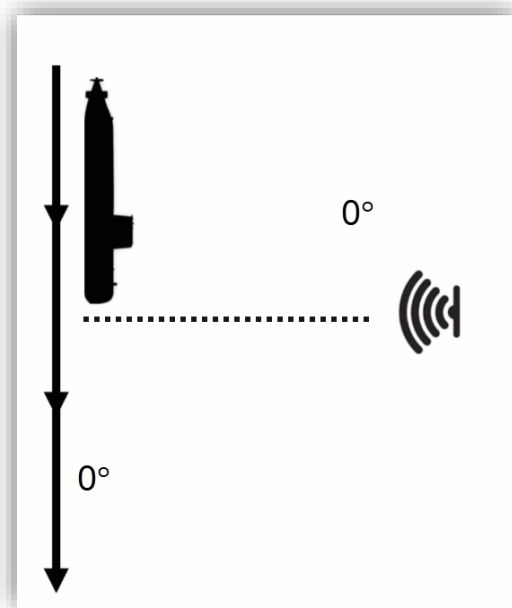
Η μέθοδος φιλτραρίσματος ελάχιστης εντροπίας και η μέθοδος μαγνητικής ανωμαλίας μέσω διασταύρωσης υψηλής τάξης εμφανίζουν χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Η μέθοδος στοχαστικού συντονισμού μπορεί να βελτιώσει το SNR της εξόδου χρησιμοποιώντας ενίσχυση του σήματος με θόρυβο. Η μέθοδος μετασχηματισμού wavelet μπορεί να προσεγγίσει τον λευκό θόρυβο και να διατηρήσει όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον στόχο.

## 4 Πειραματικές Μετρήσεις και Αποτελέσματα

### 4.1 Πειραματική διάταξη και αλγόριθμος ανίχνευσης

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ηλεκτρονικών αισθητήρων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το μαγνητόμετρο είναι κατασκευής του εργαστηρίου και ο αρχικός κώδικας αποτελεί ευγενή παραχώρηση της κ. Τζαννέτου Λήδας.

Η διάταξη αποτελούνταν από ένα δοκίμιο σιδηρομαγνήτη πάνω σε ράγα κινούμενη από σερβοκινητήρα ελεγχόμενο από μικρό ελεγκτή ο οποίος συνδέεται με υπολογιστή δίνοντας στον χρήστη πλήρη έλεγχο της λειτουργίας. Το δοκίμιο χάλυβα κινείται σε ευθύγραμμη κίνηση με σταθερή ταχύτητα. Το μαγνητόμετρο τοποθετείται στον κύριο άξονα που συμπίπτει με την καθετή στο μέσο της απόστασης που διανύει το δοκίμιο μας.



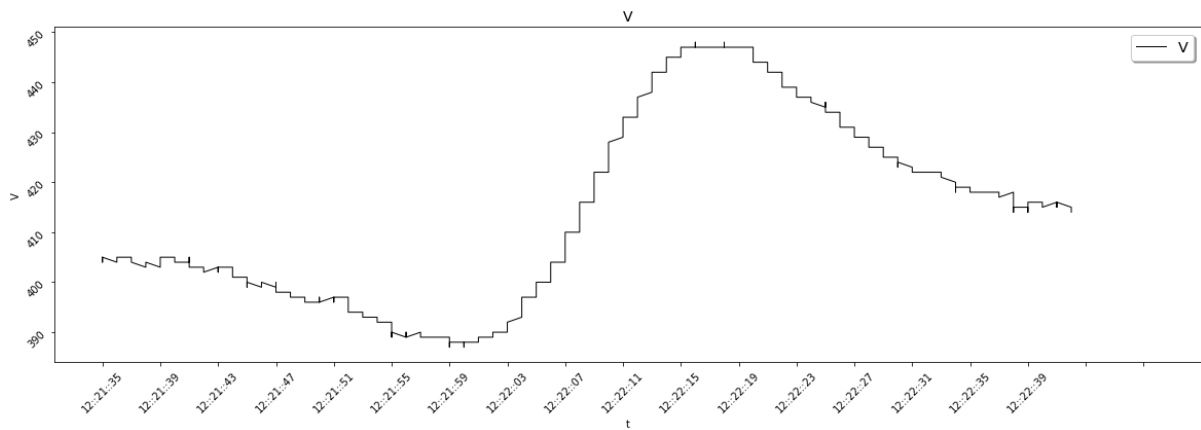
Σχήμα 4-1 Πρότυπη διάταξη πειράματος

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι αισθητήρας πύλης ροής τοπολογίας racetrack, δηλαδή αποτελείται από δύο παράλληλα πηνία, με στόχο να περιοριστεί η επίδραση του σήματος διέγερσης στο σήμα λήψης (Κεφ. 2.4.2) με την έξοδο του να είναι η τάση του πηνίου λήψης. Επειδή ο αισθητήρας μας είναι διανυσματικός, εκτός



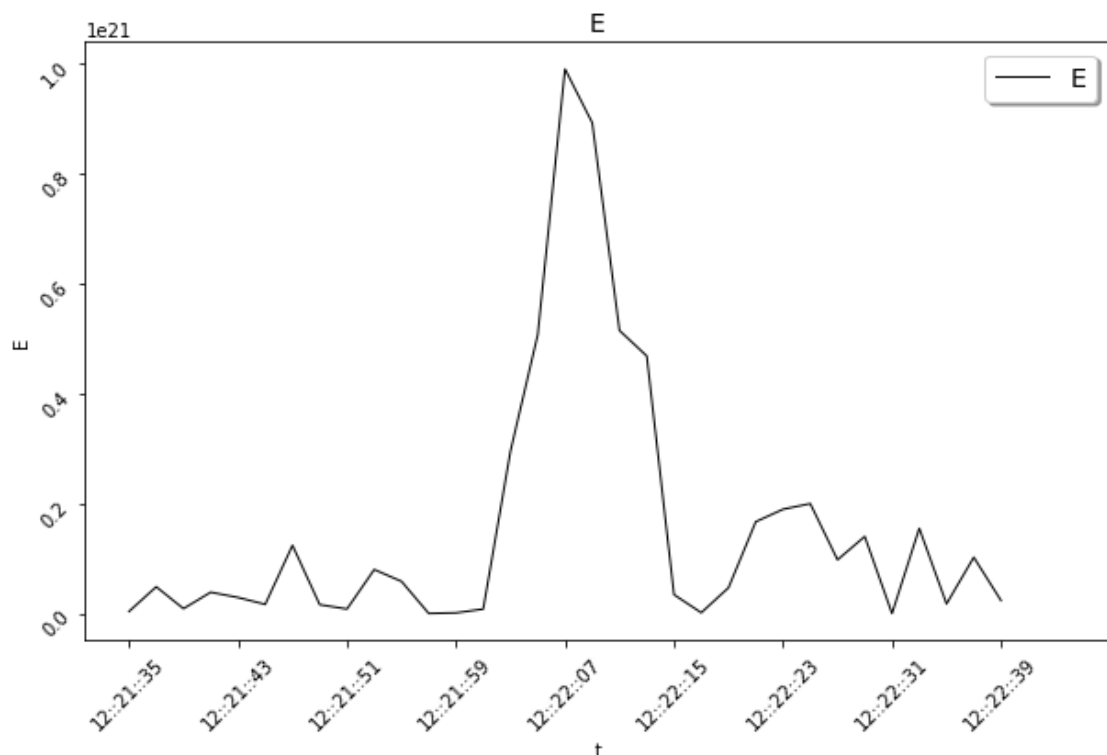
από την απόσταση πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η κατεύθυνσή του. Στην πρότυπη κατεύθυνση το δοκίμιο βρίσκεται  $90^\circ$  από το μαγνητόμετρο. Η πρότυπη κατεύθυνση του αισθητήρα συμπίπτει με τον κύριο άξονα έτσι ώστε η πρότυπη κατεύθυνση του δοκιμίου να είναι κάθετη στον κύριο άξονα.

Πρότυπη κίνηση = το αντικείμενο κατευθύνεται από δεξιά προς τα αριστερά με σταθερή ταχύτητα με τον αισθητήρα να βρίσκεται στην κάθετο από το κέντρο της απόστασης που διανύει το αντικείμενο. Πρότυπη σταθερή ταχύτητα  $v = 0.017m/s$



Σχήμα 4-2 Τυπική μορφή μέτρησης,  $V(t)$

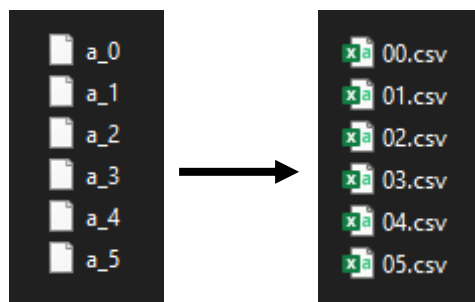
Με την συγκεκριμένη διάταξη η τυπική μορφή του σήματος  $V(t)$  που λαμβάνεται αποτυπώνεται στην γραφική παράσταση του σχήματος 4.2 με τα αποτελέσματα του αρχικού κώδικα MAD OBF για την ενέργεια  $E(t)$  να δίνονται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4-3 Τυπική μορφή αποτελέσματος,  $E(t)$

Πραγματοποιήθηκαν πληθώρα μετρήσεων ανά κατεύθυνση και απόσταση με αποτέλεσμα κάθε σετ μετρήσεων να αποτελείται από εκατοντάδες μετρήσεις. Έτσι, κρίθηκε σκόπιμο να γραφεί κώδικας με σκοπό την αυτοματοποίηση της διαδικασίας εξαγωγής αποτελεσμάτων.

Αρχικά ήταν απαραίτητη η διαμόρφωση των αρχείων σε μορφή κατάλληλη για εισαγωγή στο κυρίως πρόγραμμα. Έτσι κατασκευάστηκε πρόγραμμα το οποίο διαβάζει τα αρχεία φακέλου που επιδεικνύει ο χρήστης, τα ελέγχει και τα τροποποιεί κατάλληλα αν χρειαστεί, και τέλος τα αποθηκεύει με αύξοντα αριθμό σε τύπο αρχείου csv.



Σχήμα 4-4 Διαμόρφωση αρχείων σε μορφή κατάλληλη για περαιτέρω επεξεργασία

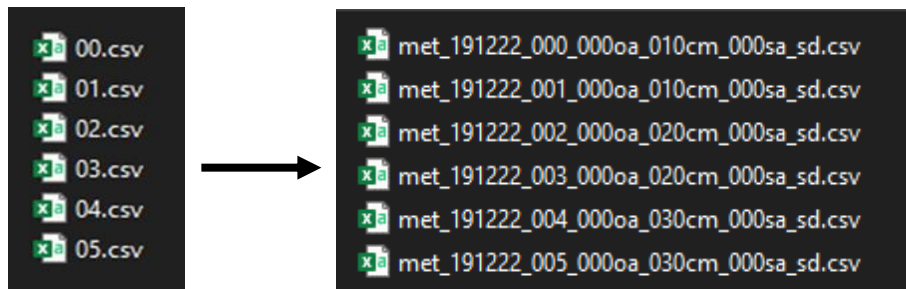
Για την πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας, δηλαδή για να μη χρειάζεται ο χρήστης να εισάγει δεδομένα για κάθε μια μέτρηση, κρίθηκε απαραίτητο τα αρχεία να ονομαστούν σε μορφή που εμπεριέχει όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται το πρόγραμμα αλλά και ο χρήστης να γνωρίζει.

Πίνακας 4.1 Πρότυπη μορφή ονόματος αρχείου

Πρότυπη μορφή ονόματος αρχείου:

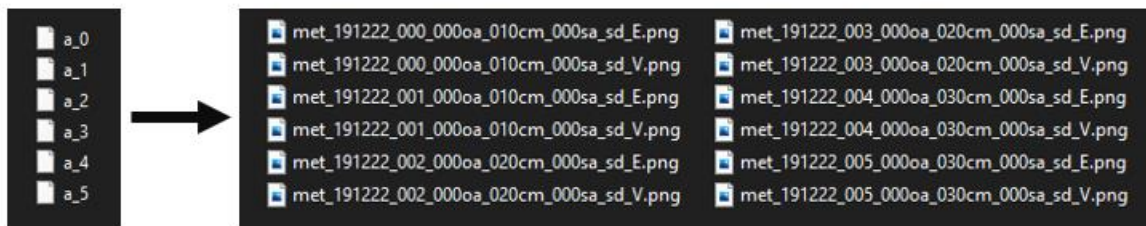
**met\_191222\_000\_000oa\_010cm\_000sa\_sd.csv**

- 191222 ημερομηνία διεξαγωγής πειράματος
- 000 αύξων αριθμός μετρήσεων συγκεκριμένης ημέρας
- 000oa γωνία που σχηματίζει το αντικείμενο με τον οριζόντιο άξονα
- 010cm απόσταση αντικειμένου-αισθητήρα<sup>46</sup>
- 000sa γωνία που σχηματίζει ο αισθητήρας με τη κάθετη του οριζόντιου άξονα



Σχήμα 4-5 Ονοματοδοσία αρχείων

Έτσι επιλέχτηκε το συγκεκριμένο πρότυπο ονοματοδοσίας (Πίνακας 4.1), με το πρόγραμμα να δέχεται σύνολο μετρήσεων με το χρήστη να εισάγει τα απαραίτητα στοιχεία των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου υποπρογράμματος αποτυπώνονται στο σχήμα 4.5 .

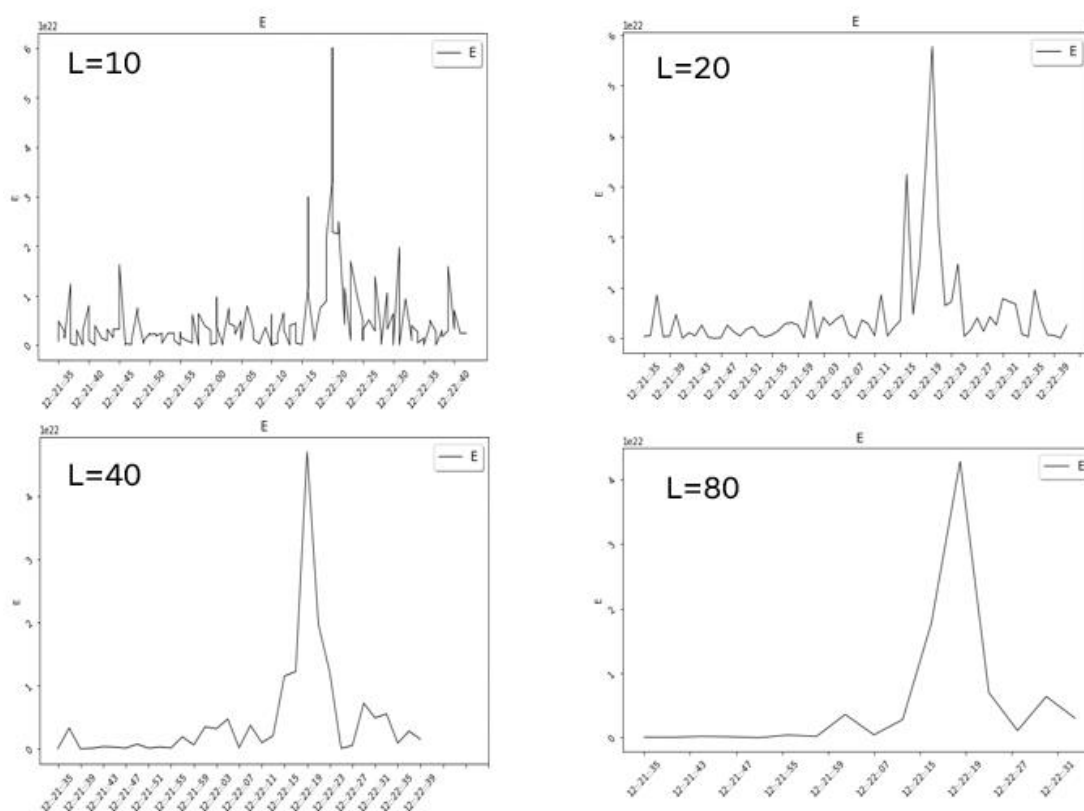


Σχήμα 4-6 Αποτέλεσμα τελικού προγράμματος.

Ακολούθως, το πρόγραμμα πια έχει την δυνατότητα διαβάζονται το όνομα του αρχείου να είναι σε θέση να συσχετίσει πληροφορίες που βρίσκονται σε αυτό με τις παραμέτρους του προγράμματος. Επομένως, μπορεί αυτόματα να τρέξει τον αλγόριθμο και να αποθηκεύσει τα αποτελέσματα σε τύπο αρχείου png (Σχήμα 4.6). Με αυτό τον τρόπο δεν εξοικονομείται μόνο χρόνος αλλά δίνεται δυνατότητα για περαιτέρω επεξεργασία δεδομένων και αποτελεσμάτων.

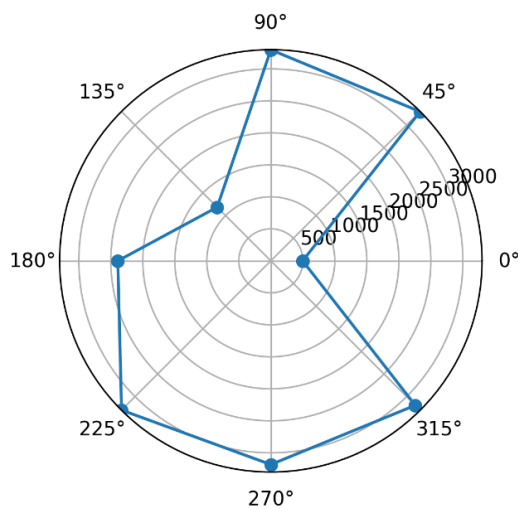
#### 4.1.1 Πρόγραμμα και δυνατότητες

Αυτός ο τρόπος, αρχικά δίνει την δυνατότητα εκτέλεσης του αλγόριθμου για συγκεκριμένη μέτρηση αλλάζοντας κάθε φορά την τιμή μιας παραμέτρου. Στα παράδειγμα του σχήματος 4.7 Βλέπουμε την γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων για διαφορετικές τιμές αριθμού μετρήσεων ανά παράθυρο υπολογισμού που εκτελούνται πράξεις



Σχήμα 4-7 Αποτέλεσμα για αριθμό μετρήσεων ανά παράθυρο  $L=10,20,40,80$ .

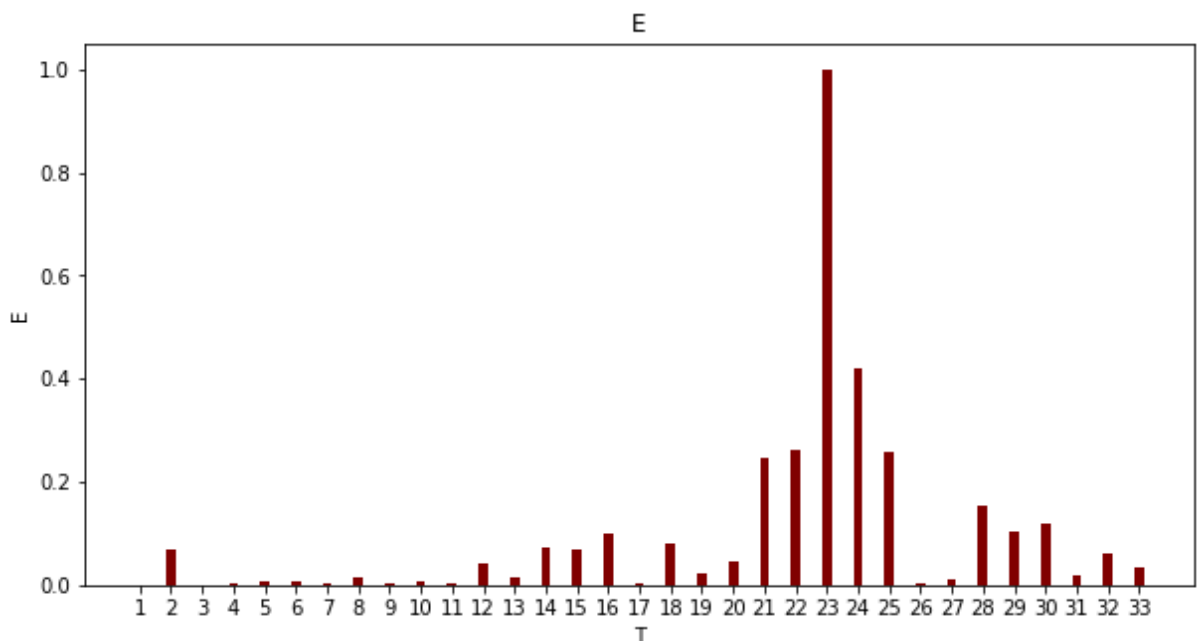
Ακόμη υπάρχει δυνατότητα αναζήτησης, σύγκρισης και συσχέτισης μετρήσεων, παραδείγματος χάριν στο Σχήμα 4.8 συνεχείς μετρήσεις ανά 45 μοίρες ομαδοποιούνται και προβάλλονται σε κοινό πολικό διάγραμμα.



Σχήμα 4-8 Πολικό διάγραμμα μετρήσεων για γωνίες 0-360.

Τέλος, παρέχει δυνατότητα για εύκολη διόρθωση και προσθήκες.

Για παράδειγμα, κρίθηκε σκόπιμο να γίνεται προβολή του αποτελέσματος με τον συγκεκριμένο τύπο γραφικής παράστασης, με την κάθε μπάρα να εκφράζει την κανονικοποιημένη ενέργεια για το κάθε παράθυρο μετρήσεων (σχήμα 4.?) και όχι συνεχή συνάρτηση ως προς τον χρόνο (σχήμα 4.9).



Σχήμα 4-9 Τελική μορφή γραφικής παράστασης αποτελεσμάτων.

## 4.2 Πειραματικές Μετρήσεις και Αποτελέσματα

Οι μετρήσεις χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με την σχετική κίνηση των δύο μερών, δηλαδή του μαγνητόμετρου και του δοκιμίου. Να σημειωθεί ότι κάθε τεστ επαναλήφθηκε με μεταβλητή την απόσταση ώστε να ληφθούν όσο περισσότερες πληροφορίες ήταν δυνατό.

Α. Η πρώτη κατηγορία εμπεριέχει μετρήσεις για σταθερή κατεύθυνση αντικείμενου και αισθητήρα. Αυτή είναι η πιο απλή από τις μετρήσεις, με τα δυο μέρη να παραμένουν σε πρότυπη κατεύθυνση και μεταβλητή την μεταξύ τους απόσταση. Από το σετ μετρήσεων αυτό περιμένουμε αρχικά να επιβεβαιωθεί ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί, και εν συνεχεία να προσδιοριστούν τα όρια της ανίχνευσης. Ακολουθούν δύο σετ μετρήσεων της συγκεκριμένης κατηγορίας, αντιπροσωπευτικά των μετρήσεων που λήφθηκαν στο εργαστήριο.

Β. Στην δεύτερη κατηγορία έχουμε μεταβλητή την κατεύθυνση του αισθητήρα για πρότυπη κατεύθυνση δοκιμίου. Με αυτό το σετ αναμένεται να αποδειχθεί κατά πόσο η κατεύθυνσή του αισθητήρα, δηλαδή η σχετική του γωνία με το πεδίο της γης επηρεάζει τις μετρήσεις.

Γ. Στην τρίτη κατηγορία έχουμε μεταβλητή την κατεύθυνση του αντικειμένου. Σε αυτό το σετ έγινε προσπάθεια να δειχθεί κατά πόσο η κατεύθυνση του αντικείμενου με σταθερή την κίνηση επηρεάζει το σήμα και το αποτέλεσμα. (αναμένεται να μην επηρεάζει γιατί ακολουθήθηκε μοντέλο μαγνητικού δίπολου)

Δ. Στην τελευταία κατηγορία έγιναν μετρήσεις για τις πρότυπες κατευθύνσεις και την αντίστροφη κίνηση από την πρότυπη, με τριπλάσια ταχύτητα από την αρχική. Με το τελευταίο σετ πιστοποιείται ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί σωστά και με διαφορετική ταχύτητα και διαπιστώνεται αν η σχετική κατεύθυνση της κίνησης αποτυπώνεται στο διάγραμμα του σήματος του μαγνητομέτρου.

### 4.2.1 Μεταβλητή Απόσταση

Καταγράφονται δυο σετ μετρήσεων αντιπροσωπευτικά των μετρήσεων και αποτελεσμάτων του συστήματος. Σημειώνεται ότι επειδή ο αριθμός δειγματοληψιών ανά μέτρηση δεν είναι σταθερός, και ο αλγόριθμος δέχεται ως δεδομένο τον αριθμό δειγματοληψίας ανά παράθυρο υπολογισμού  $R$ , ο αριθμός παραθύρων υπολογισμού  $T$  ποικίλει. Με αριθμό δειγματοληψιών ανά παράθυρο  $R = 59$  και κριτήριο ανίχνευσης  $E \geq 0.8$ ,

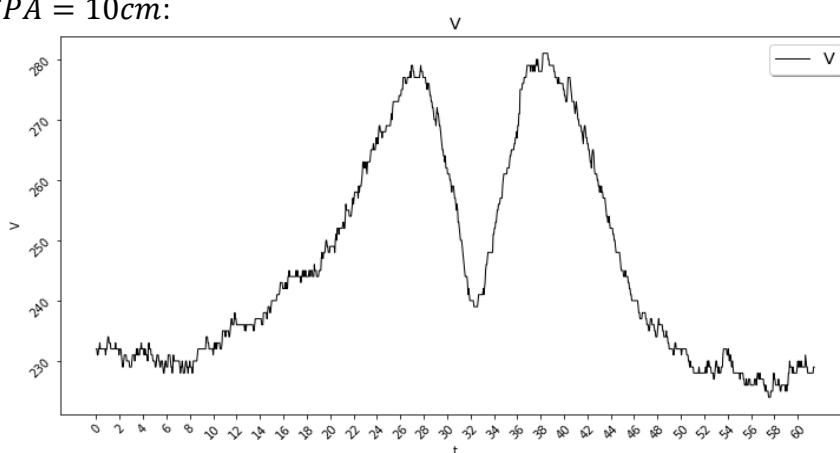
Για κάθε μια μέτρηση δίνεται

A) η γραφική παράσταση του σήματος εξόδου του μαγνητόμετρου  $V$  (σε millivolt) προς τον χρόνο (sec)

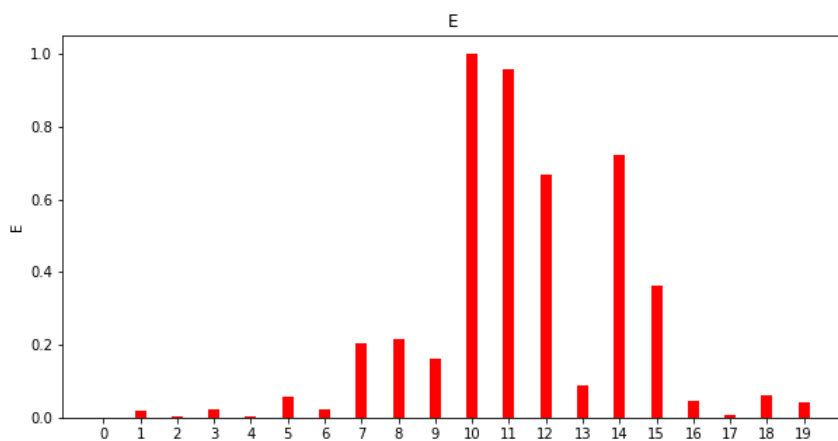
B) η γραφική παράσταση της υπολογιζόμενης ενέργειας  $E$ , κανονικοποιημένης ως προς την μέγιστη τιμή, ανά παράθυρο υπολογισμού

1<sup>ο</sup> Σετ Μετρήσεων

Για  $CPA = 10cm$ :

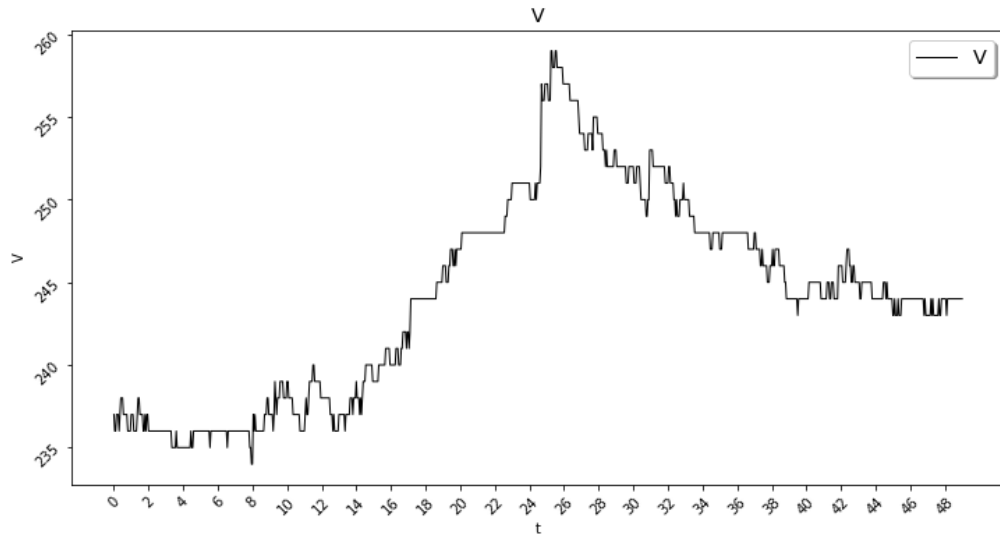


Σχήμα 4-10  $V(t)$ ,  $CPA=10cm$

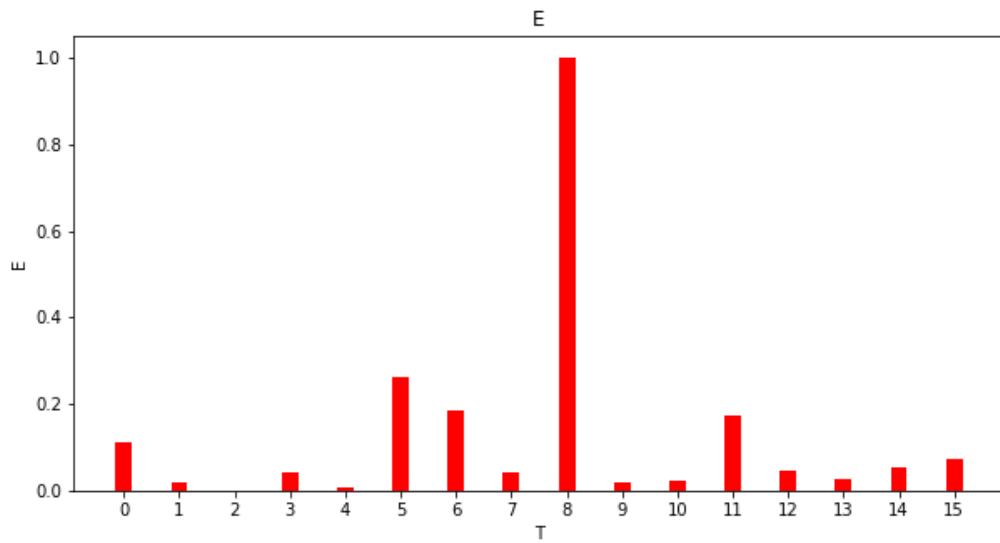


Σχήμα 4-11  $E(T)$ ,  $CPA=10cm$

Για  $CPA = 20cm$ :



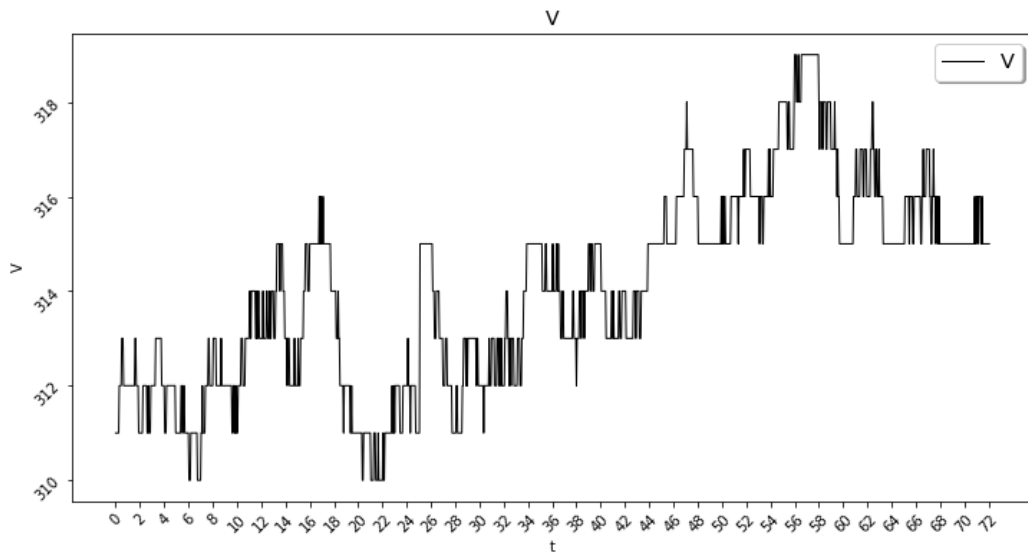
Σχήμα 4-12  $V(t)$ ,  $CPA=20cm$



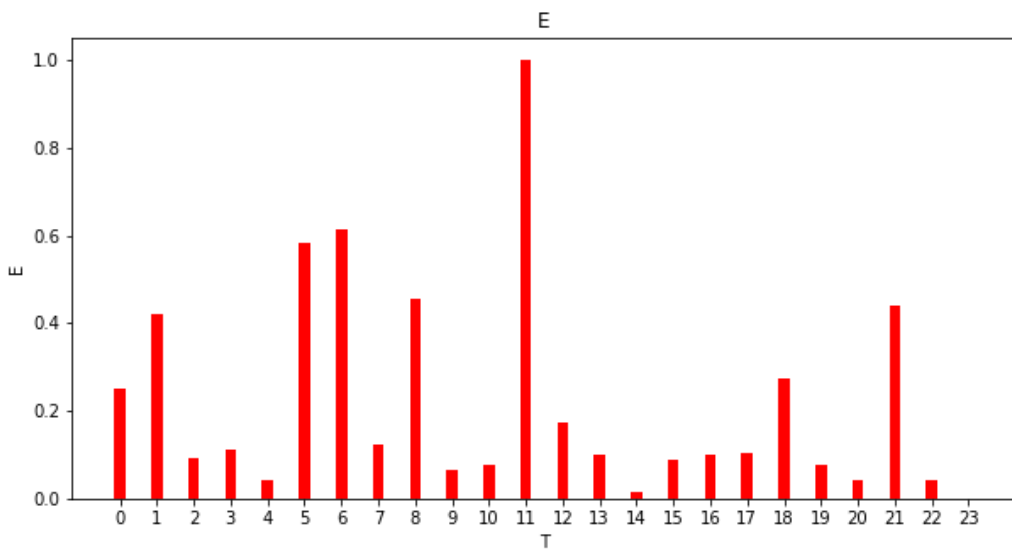
Σχήμα 4-13  $E(T)$ ,  $CPA=20cm$



Για  $CPA = 30cm$ :

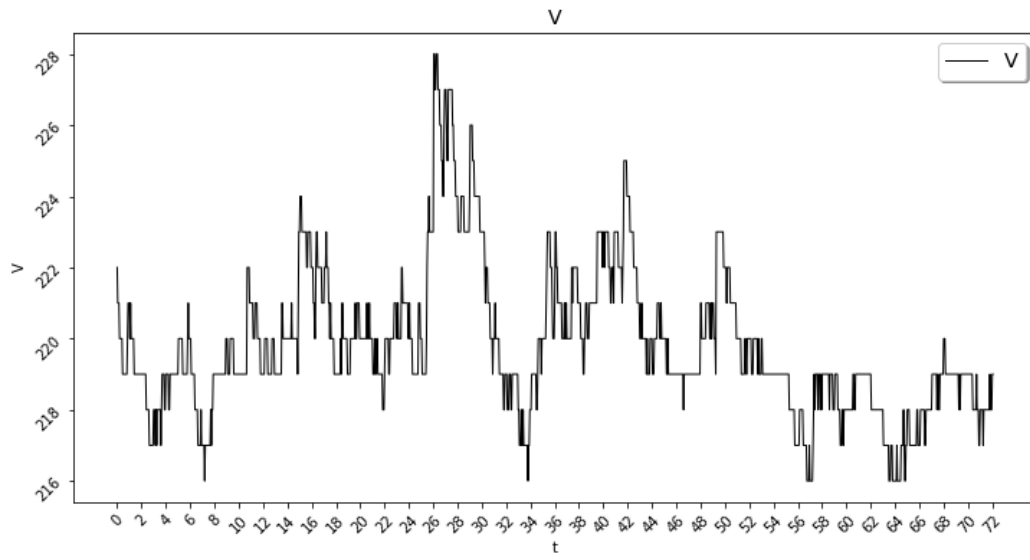


Σχήμα 4-14  $V(t)$ ,  $CPA=30cm$

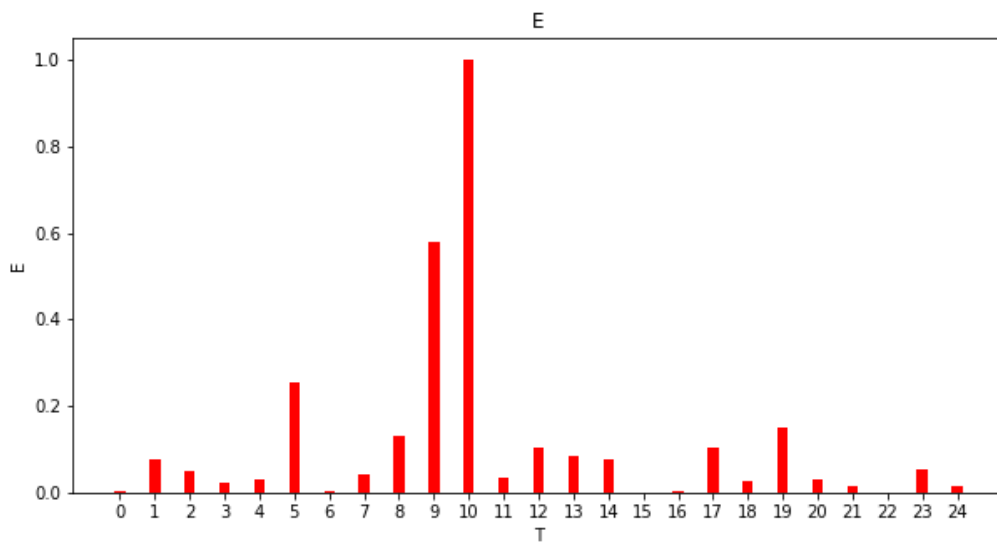


Σχήμα 4-15  $E(T)$ ,  $CPA=30cm$

Για  $CPA = 40cm$ :

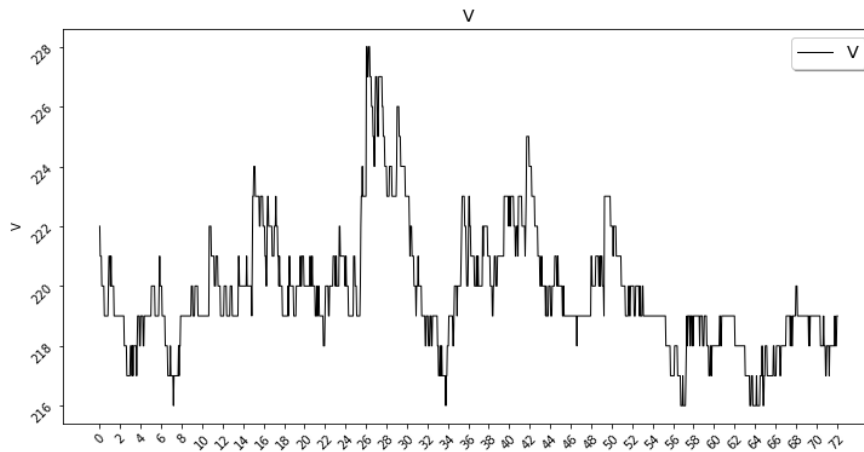


Σχήμα 4-16  $V(t)$ ,  $CPA=40cm$

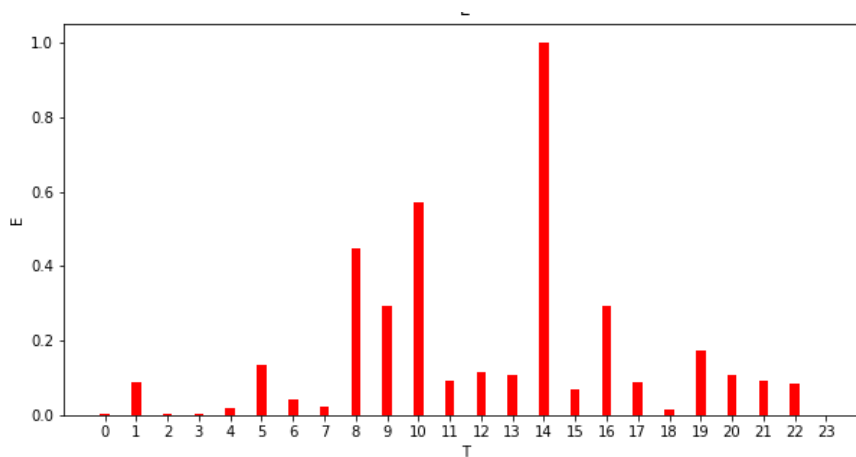


Σχήμα 4-17  $E(T)$ ,  $CPA=40cm$

Για  $CPA = 50cm$ :



Σχήμα 4-18  $V(t)$ ,  $CPA=50cm$

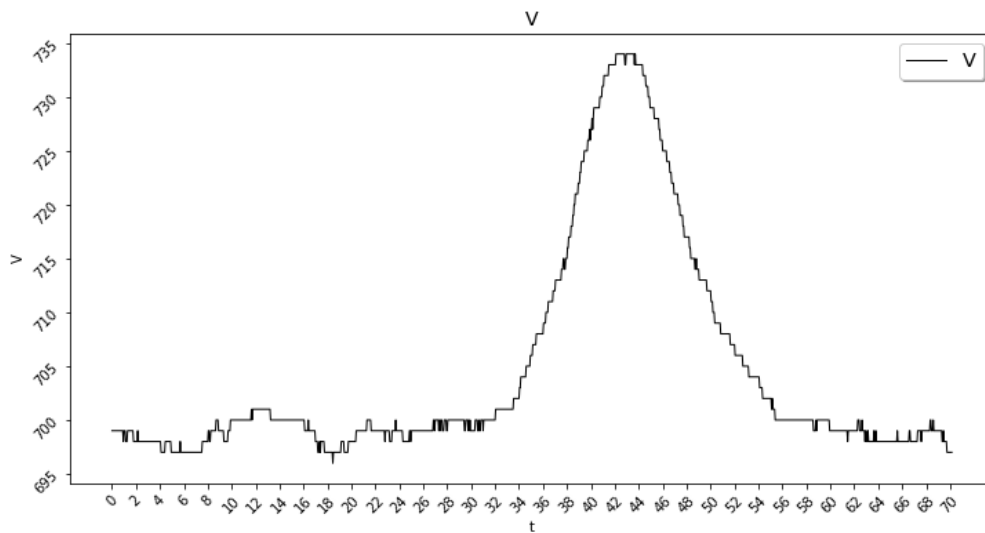


Σχήμα 4-19  $E(t)$ ,  $CPA=50cm$

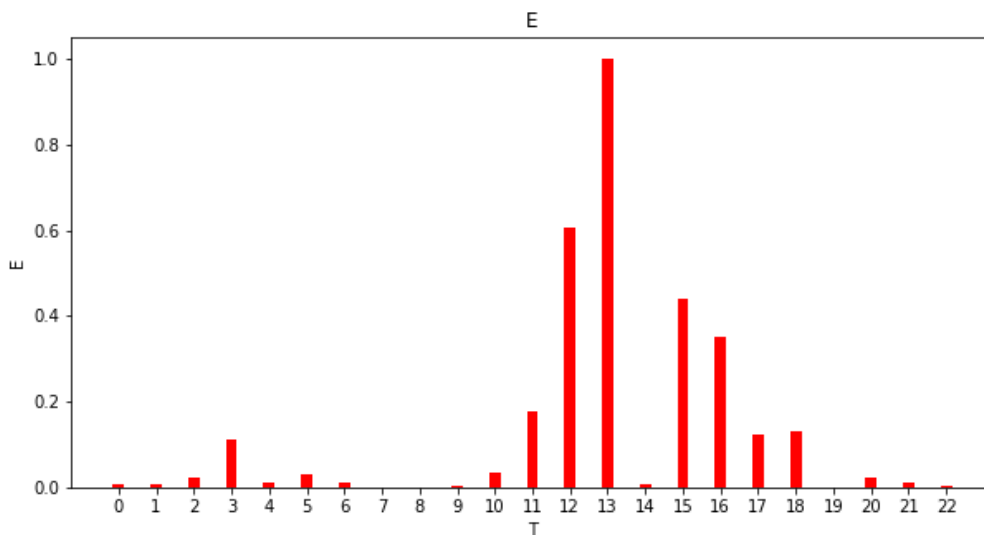
Κύρια παρατήρηση είναι ότι ο αλγόριθμός μας λειτουργεί, με το σημείο ανίχνευσης να βρίσκεται περίπου στο μέση των μετρήσεων. Αυτό είναι αποτέλεσμα του ανθρωπίνου παράγοντα, τα συστήματα καταγραφής μαγνητικού πεδίου και κίνησης του δοκιμίου ξεκινούν από τον χρήστη και όχι αυτοματοποιημένα, ώστε να μην είναι δυνατό το μέσο των μετρήσεων να συμπίπτει πάντα με το σημείο CPA του δοκιμίου. Αυτό είναι σύνηθες φαινόμενο στις μετρήσεις μας. Παρατηρείται ακόμα ότι έχουμε ανίχνευση και για τις πέντε διαφορετικές αποστάσεις, με τα όρια ανίχνευσης του συστήματος να είναι περίπου τα 50cm! Γνωρίζοντας ότι για αυξημένη απόσταση η απόκριση του μαγνητομέτρου μειώνεται, πιστοποιείται ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί αξιόπιστα με την κατάλληλη απόκριση για διαφορετικές αποστάσεις.

## 2ο Σετ Μετρήσεων

Για  $CPA = 10cm$  και σταθερή κατεύθυνση αισθητήρα-στόχου

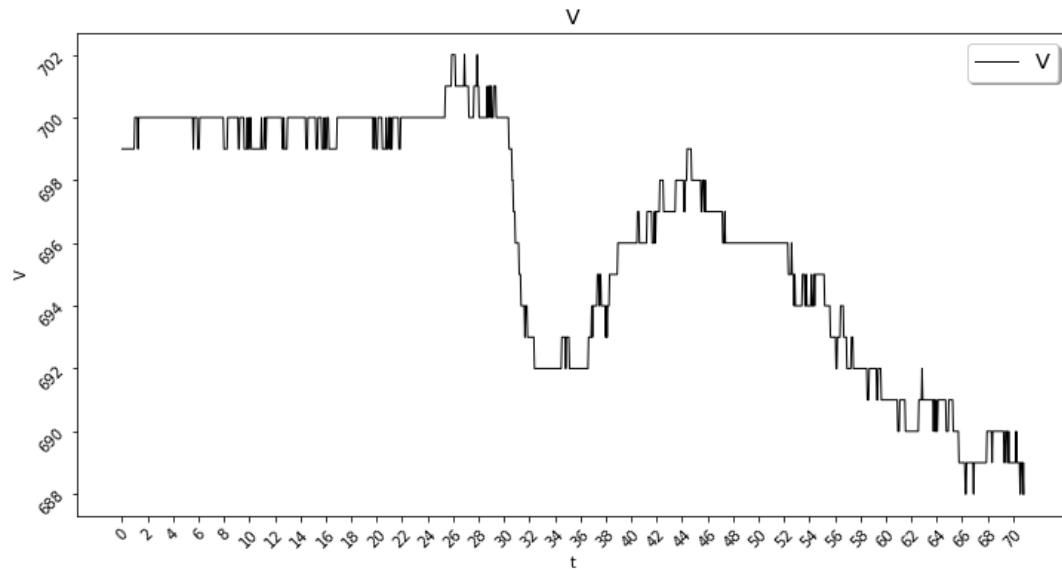


Σχήμα 4-20  $V(t)$ ,  $CPA=10cm$

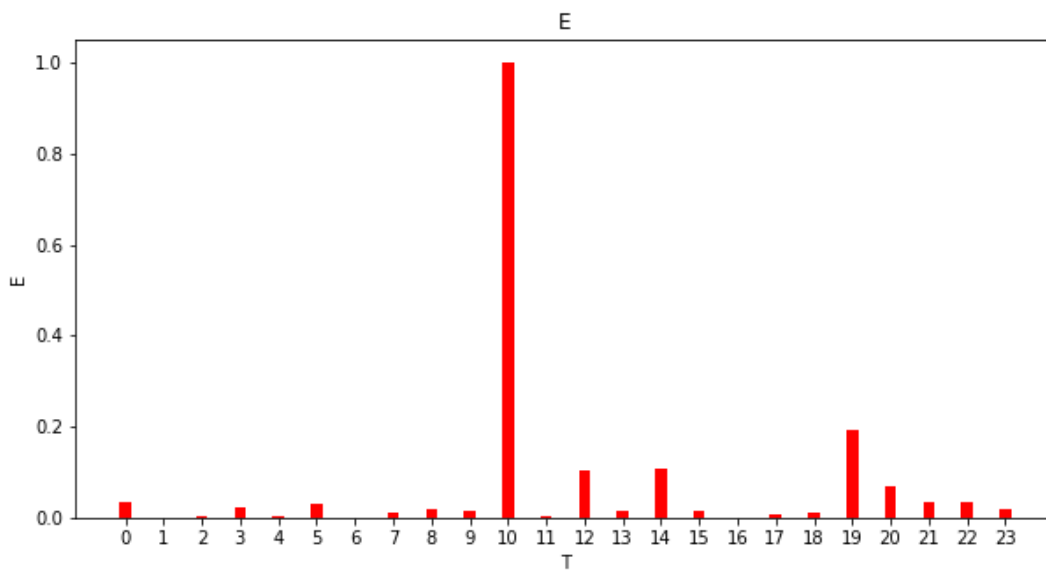


Σχήμα 4-21  $E(T)$ ,  $CPA=10cm$

Για  $CPA = 20cm$



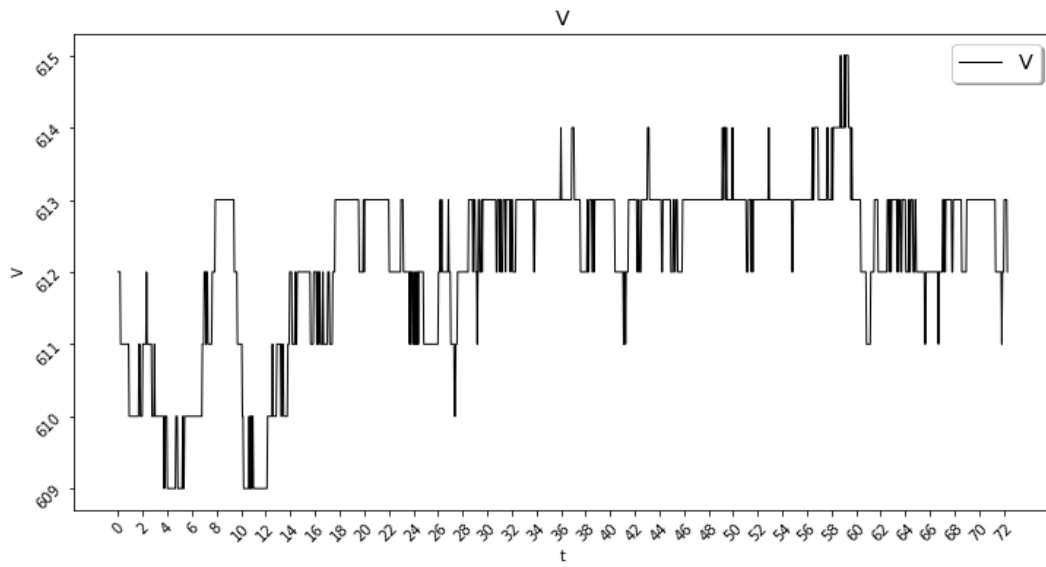
Σχήμα 4-22  $V(t)$  ,  $CPA=20cm$



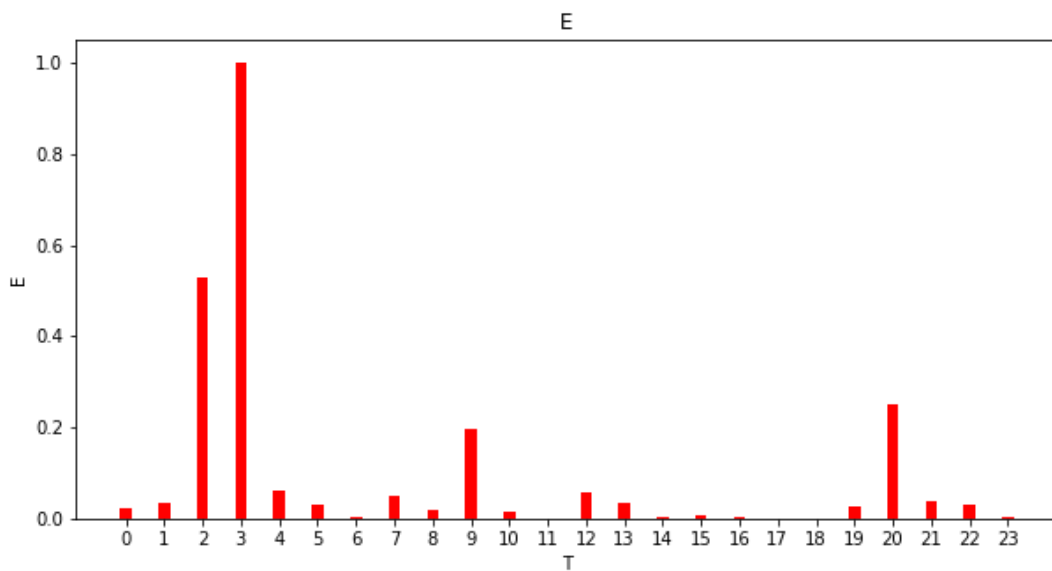
Σχήμα 4-23  $E(T)$  ,  $CPA=20cm$



Για  $CPA = 40cm$

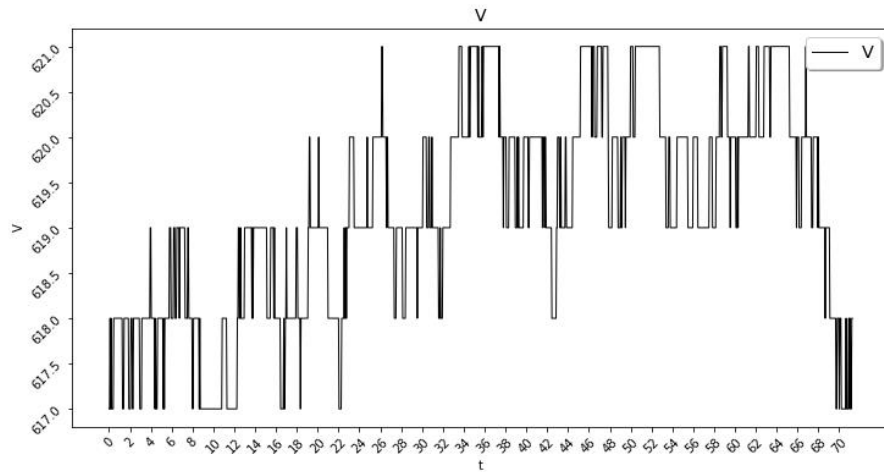


Σχήμα 4-26  $V(t)$ ,  $CPA=40cm$

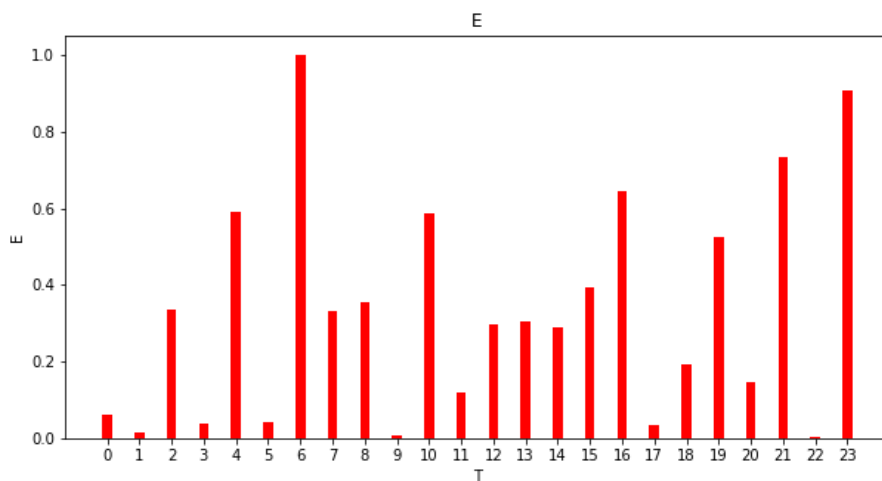


Σχήμα 4-27  $E(T)$ ,  $CPA=40cm$

Για  $CPA = 50cm$



Σχήμα 4-28  $V(t)$  ,  $CPA=50cm$



Σχήμα 4-29  $E(T)$  ,  $CPA=50cm$

### Παρατηρήσεις

Παρατηρείται ότι για τις πρώτες δύο μετρήσεις, για αποστάσεις 10cm και 20cm, έχουμε καθαρή ανίχνευση. Σε αντίθεση όμως με το 1<sup>ο</sup> σετ, από τα 30cm και μετά τα πράγματα περιπλέκονται. Για  $CPA=30-40$  εμφανίζεται ψευδή ανίχνευση σε πρώιμη χρονική στιγμή, για  $CPA=50$  τρία σημεία ψευδούς ανίχνευσης, με τον θόρυβο να είναι εμφανής.

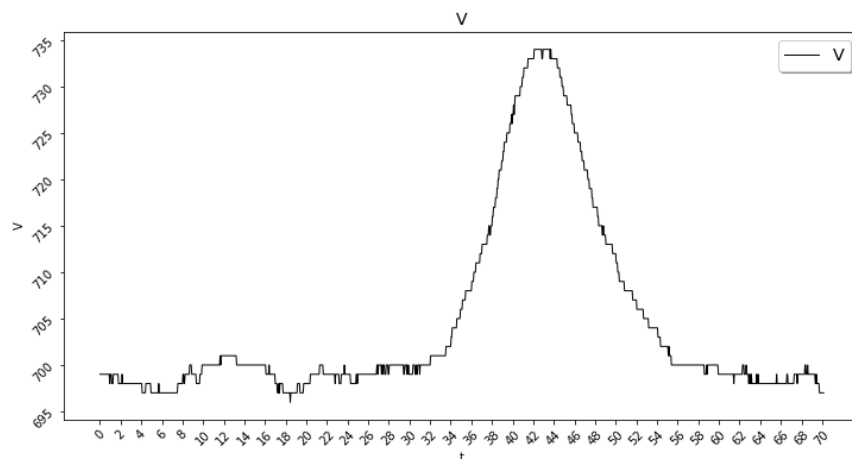


#### 4.2.2 Αλγόριθμος και αριθμός δειγματοληψίας ανά παράθυρο μετρήσεων.

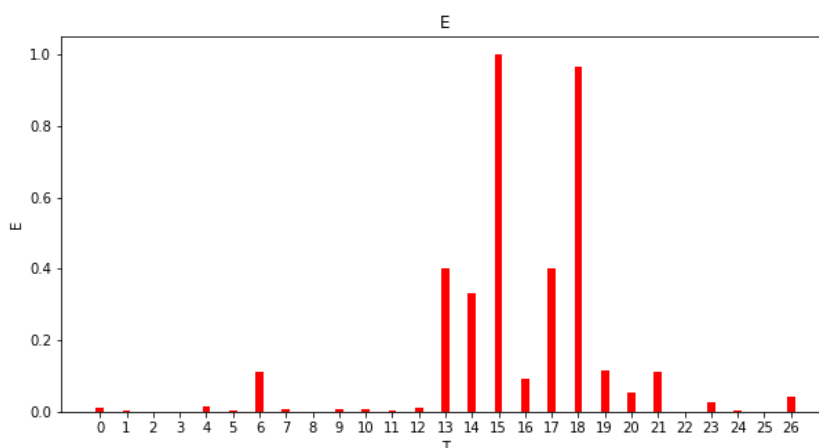
Στο προηγούμενο σετ μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι για μετρήσεις μεγαλύτερες των 30cm, ο αλγόριθμος μας δεν είναι αποτελεσματικός. Θα αποδειχθεί ότι ο αριθμός μετρήσεων ανά παράθυρο μετρήσεων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην επιτυχία της ανίχνευσης και στον προσδιορισμό ψευδούς ανίχνευσης.

##### 4.2.2.1 CPA=10

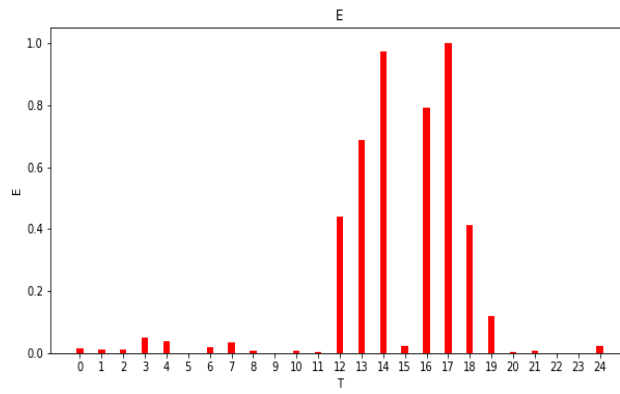
Ακολουθούν οι γραφικές του σήματος και τα αποτελέσματα για CPA=10 και αριθμό δειγματοληψιών ανά παράθυρο R=51,55,59,63,67



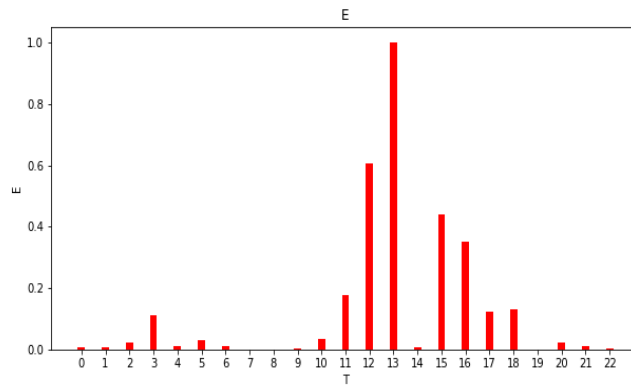
Σχήμα 4-30  $V(Tt)$ , CPA=10cm



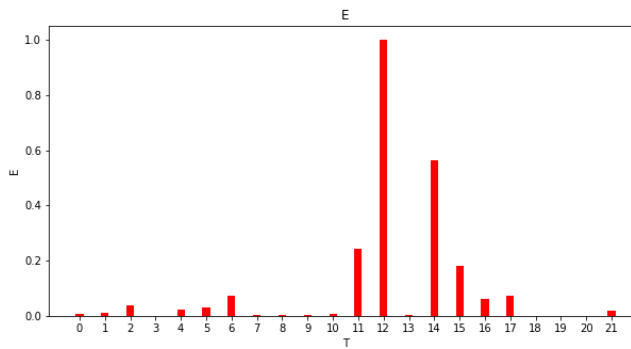
Σχήμα 4-31  $E(T)$ , CPA=10cm, R=51



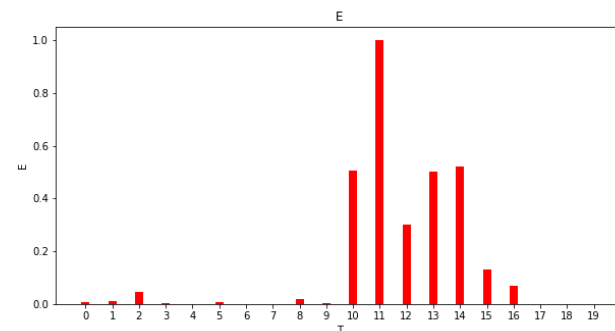
Σχήμα 4-32 E(T) ,CPA=10cm ,R=55



Σχήμα 4-33 E(T) ,CPA=10cm ,R=59



Σχήμα 4-34 E(T) ,CPA=10cm ,R=63

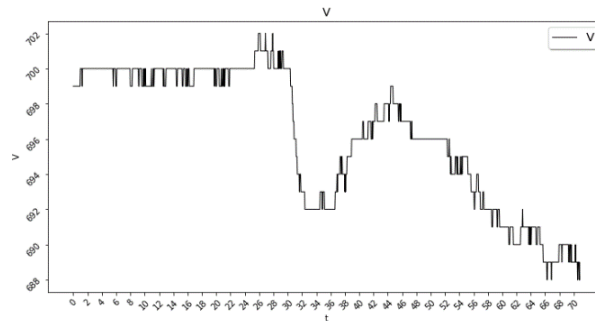


Σχήμα 4-35 E(T) ,CPA=10cm ,R=67

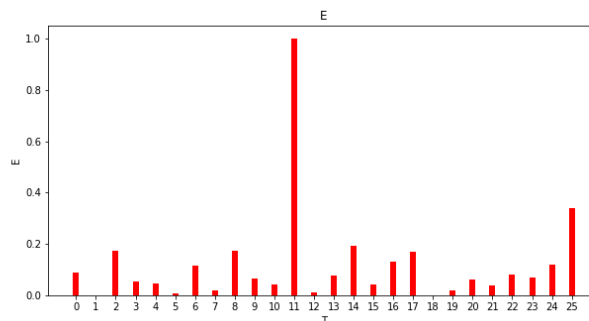
Παρατηρείται ότι ανεξαρτήτως αριθμού παραθύρων έχουμε επιτυχή ανίχνευση στο ίδιο σημείο. Στην συγκεκριμένη μέτρηση λόγω εγγύτητας, το φαινόμενο είναι τόσο ισχυρό που ώστε ο αριθμός μετρήσεων ανά παράθυρο να μην επηρεάζει το αποτέλεσμα.

#### 4.2.2.2 CPA=20

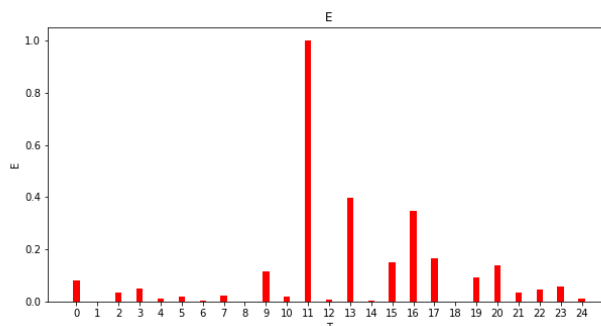
Ακολουθούν οι γραφική του σήματος και τα αποτελέσματα για CPA=20 και αριθμό δειγματοληψιών ανά παράθυρο R=51,55,59,63,67



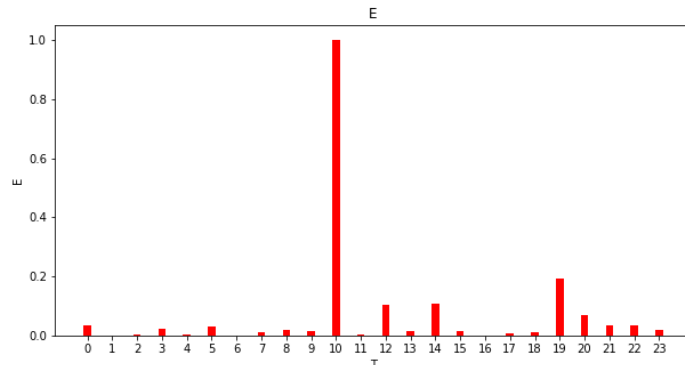
Σχήμα 4-36  $V(t)$ , CPA=20cm



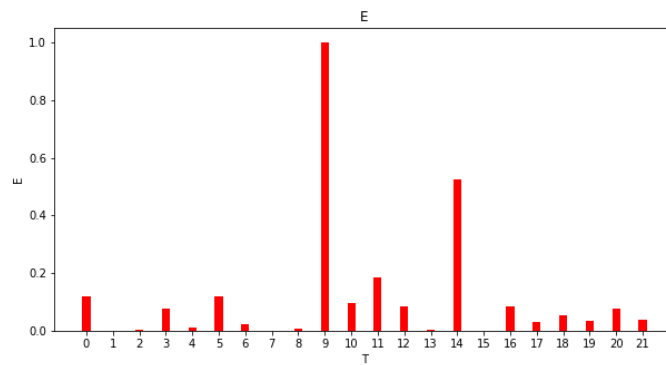
Σχήμα 4-37  $E(T)$ , CPA=20cm, R=51



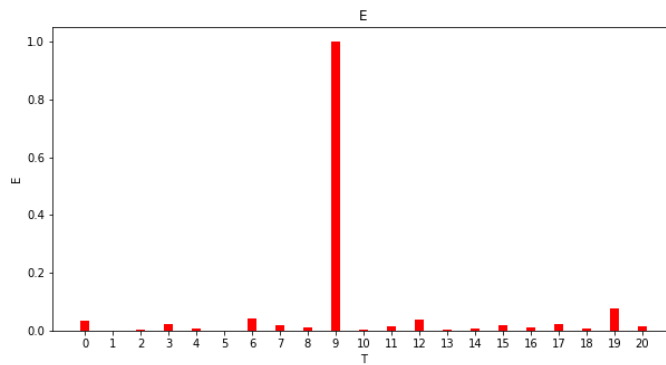
Σχήμα 4-38  $E(T)$ , CPA=20cm, R=55



Σχήμα 4-39 E(T) , CPA=20cm , R=59



Σχήμα 4-40 E(T) , CPA=20cm , R=63

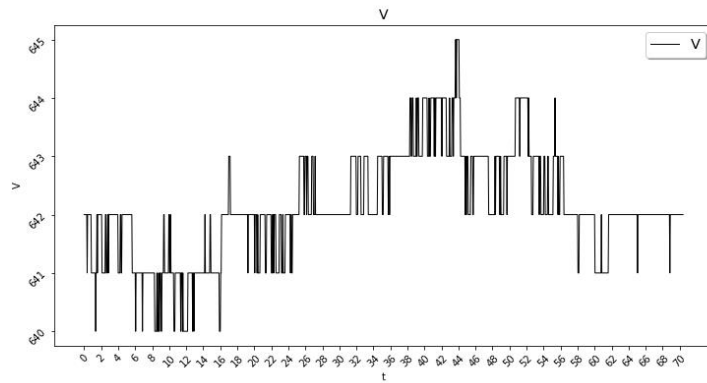


Σχήμα 4-41 E(T) , CPA=20cm , R=67

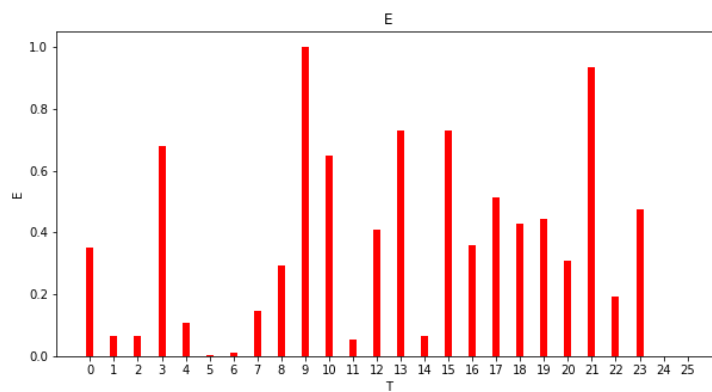
Όπως και στην πρώτη περίπτωση έχουμε επιτυχή ανίχνευση ανεξαρτήτως του  $R$ .

#### 4.2.2.3 CPA=30

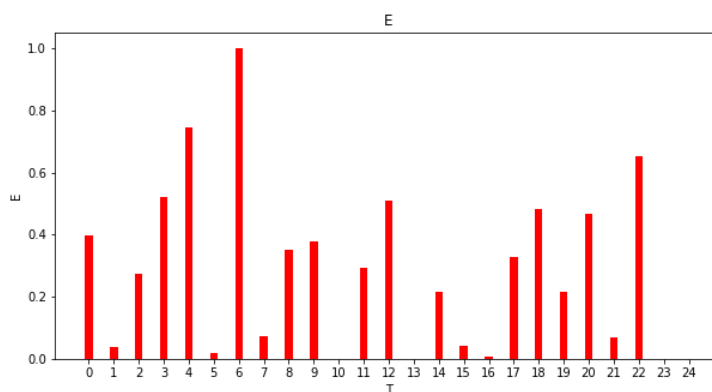
Η γραφική του σήματος και τα αποτελέσματα για CPA=30 και αριθμό δειγματοληψιών ανά παράθυρο R=51,55,59,63,67.



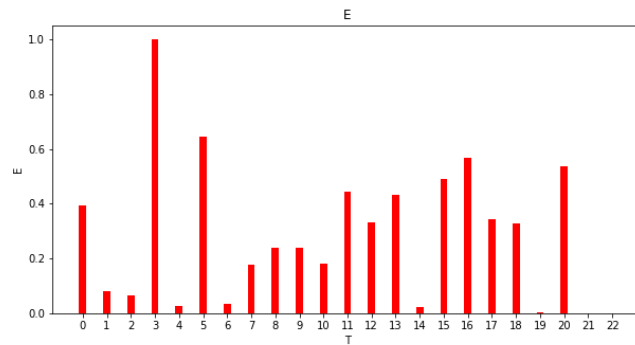
Σχήμα 4-42 V(t) ,CPA=30cm



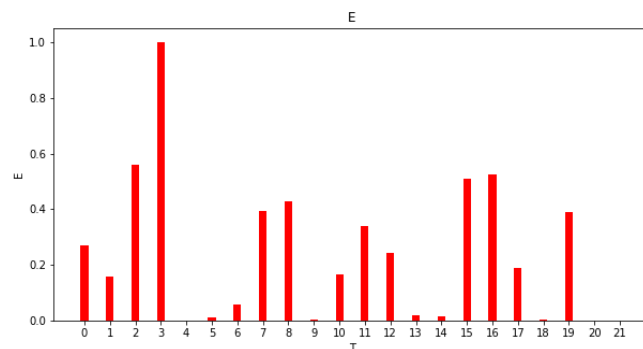
Σχήμα 4-43 E(T) ,CPA=30cm ,R=51



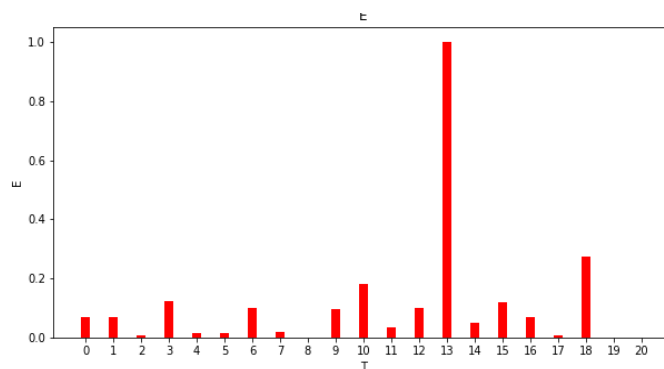
Σχήμα 4-44 E(T) ,CPA=30cm ,R=55



Σχήμα 4-45 E(T) ,CPA=30cm ,R=59



Σχήμα 4-46 E(T) ,CPA=30cm ,R=63

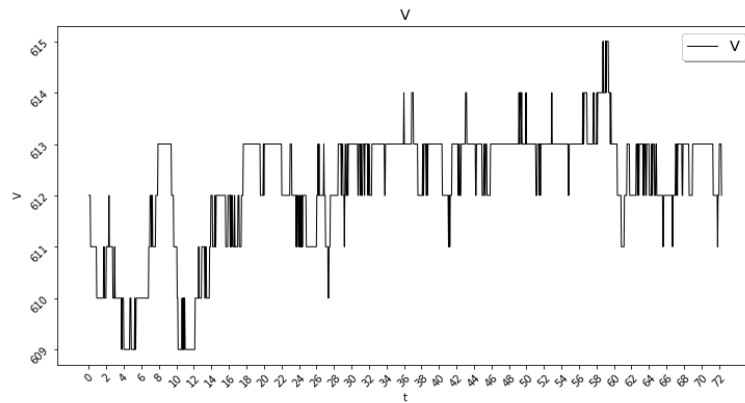


Σχήμα 4-47 E(T) ,CPA=30cm ,R=67

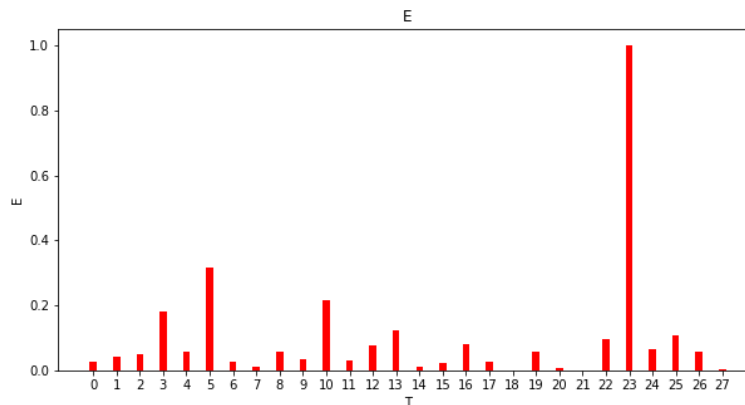
Στο συγκεκριμένο σετ παρατηρούμε ότι ο αριθμός R επηρεάζει πολύ το αποτέλεσμα των μετρήσεων. Μπορεί για R=67 να έχουμε ανίχνευση αλλά αυτό αποτελεί εξαίρεση στο κανόνα. Στα επόμενα θα παρουσιαστεί ένα τρόπος ώστε να μπορεί να αποδειχθεί αν μια ανίχνευση είναι ψευδής ή όχι.

#### 4.2.2.4 CPA=40

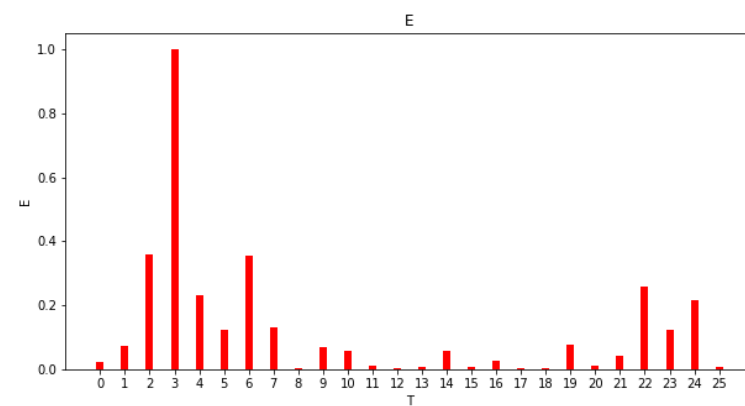
Η γραφική του σήματος και τα αποτελέσματα για CPA=40 και αριθμό δειγματοληψιών ανά παράθυρο  $R=51,55,59,63,67$ .



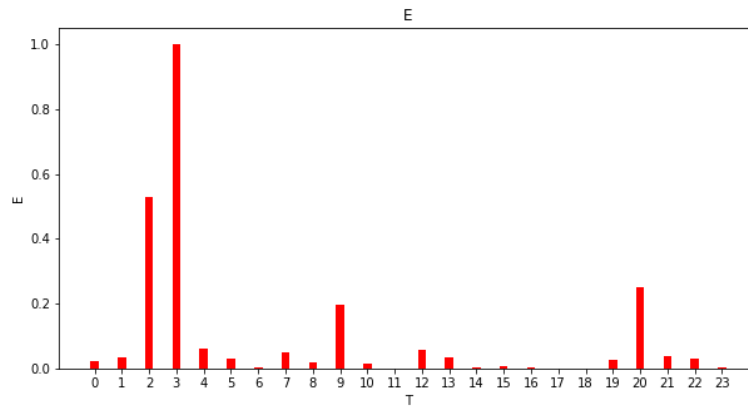
Σχήμα 4-48  $V(t)$ , CPA=40cm



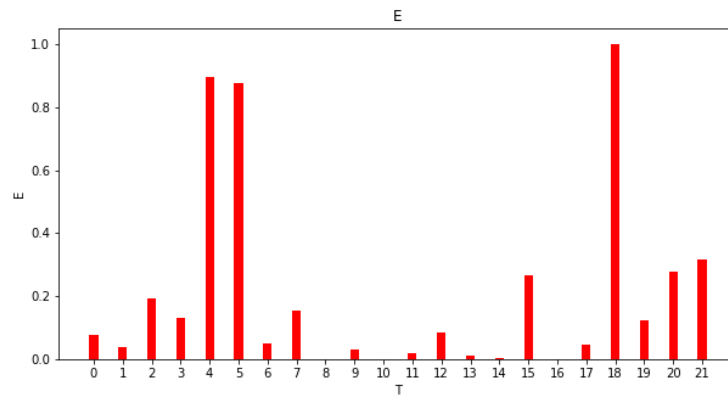
Σχήμα 4-49  $E(T)$ , CPA=40cm, R=51



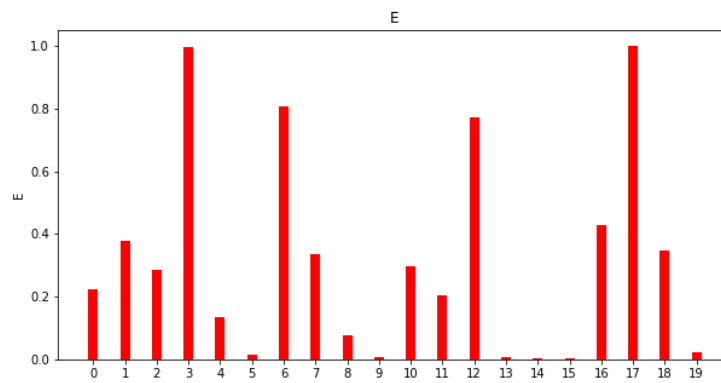
Σχήμα 4-50  $E(T)$ , CPA=40cm, R=55



Σχήμα 4-51 E(T) ,CPA=40cm ,R=59



Σχήμα 4-52 E(T) ,CPA=40cm ,R=63



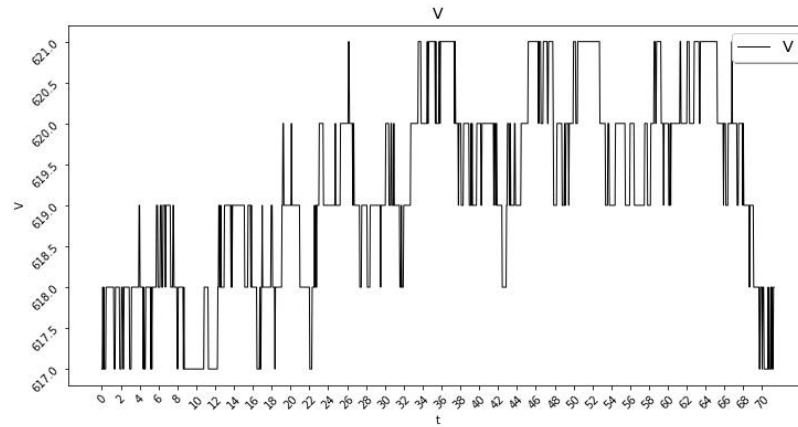
Σχήμα 4-53 E(T) ,CPA=40cm ,R=67

Παρατηρούμε τα ίδια αποτελέσματα με την προηγούμενη μέτρηση, το σύνολο των μετρήσεων χαρακτηρίζεται από ψευδείς ανιχνεύσεις και θόρυβο.

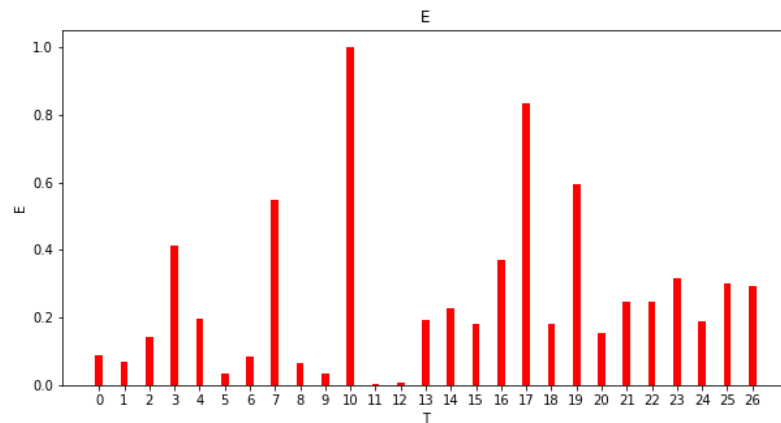


#### 4.2.2.5 CPA=50

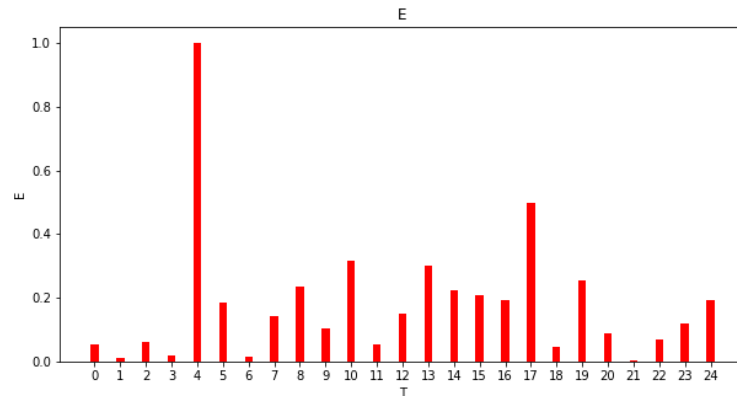
Η γραφική του σήματος και τα αποτελέσματα για CPA=50 και αριθμό δειγματοληψιών ανά παράθυρο R=51,55,59,63,67.



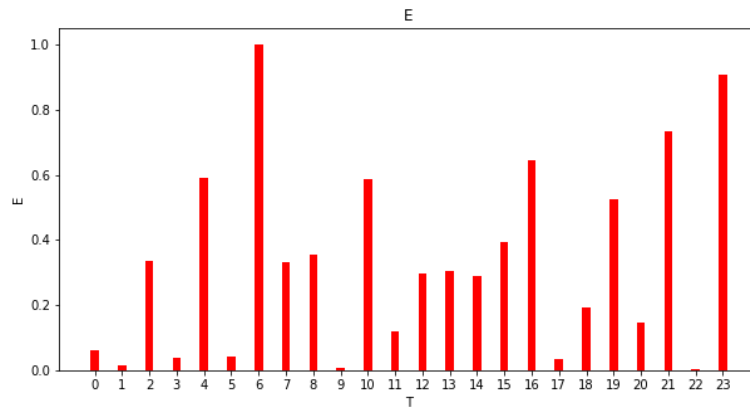
Σχήμα 4-54  $V(Tt)$ , CPA=50cm



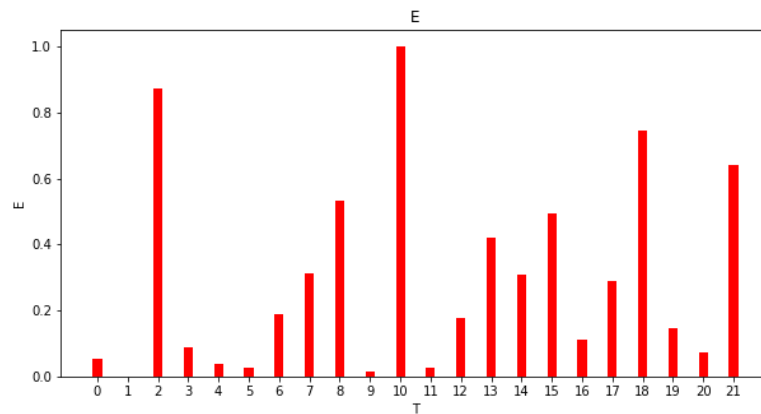
Σχήμα 4-55  $E(T)$ , CPA=50cm, R=51



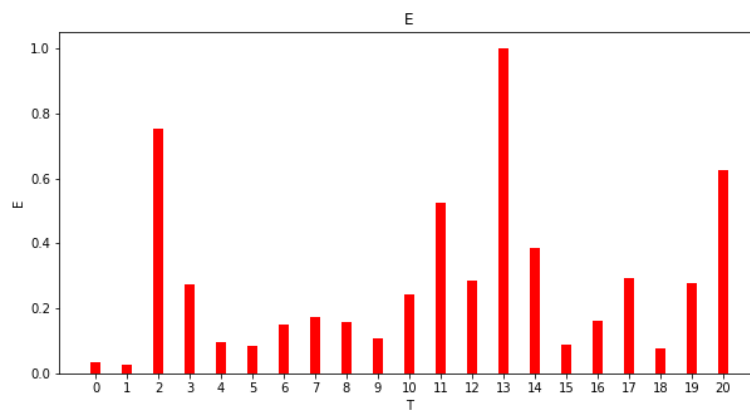
Σχήμα 4-56  $E(T)$ , CPA=50cm, R=55



Σχήμα 4-57 E(T) ,CPA=50cm ,R=59



Σχήμα 4-58 E(T) ,CPA=50cm ,R=63

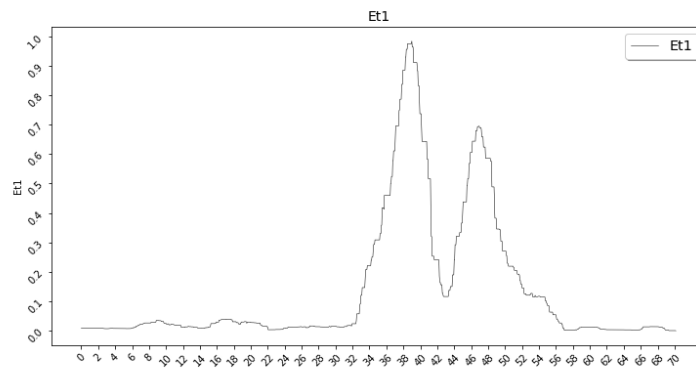


Σχήμα 4-59 E(T) ,CPA=50cm ,R=67

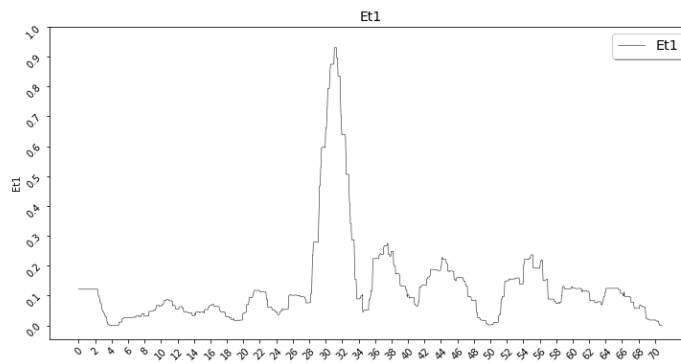
Παρατηρείται ότι όπως και στην με την προηγούμενη μέτρηση το αποτέλεσμα χαρακτηρίζεται από ψευδείς ανιχνεύσεις και θόρυβο.

#### 4.2.2.6 Πιστοποίηση ψευδούς ανίχνευσης

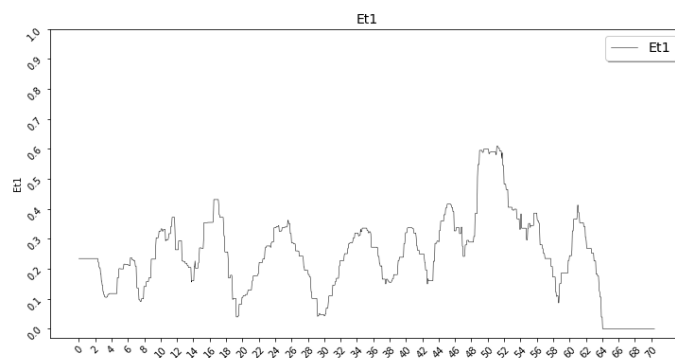
Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι για σχετικά μεγάλες αποστάσεις, δηλαδή για ασθενή σήματα ή χαμηλό SNR, ο αλγόριθμος επηρεάζεται πολύ από τον αριθμό μετρήσεων ανά παράθυρο με αποτέλεσμα την τυχαία εμφάνιση σημείων ψευδούς ανίχνευσης. Έτσι, έπρεπε να βρεθεί τρόπος ώστε να αρθεί η τυχειότητα αυτή. Ακολουθούν γραφικές παραστάσεις, αποτέλεσμα αλγορίθμου ο οποίος υπολογίζει την συνάρτηση ενέργεια για διαφορετικό αριθμό δειγματοληψίας, αθροίζει το αποτέλεσμα και προβάλλει τον μέσο όρο του για το κάθε σημείο μέτρησης.



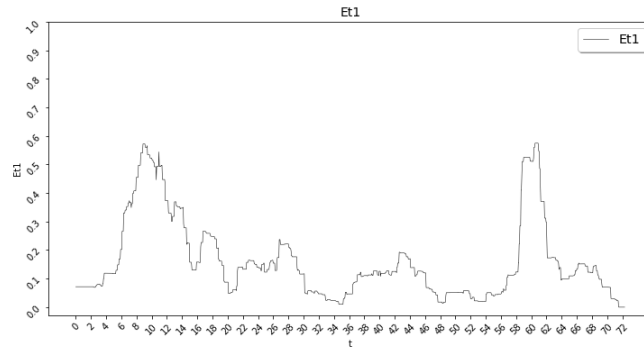
Σχήμα 4-60  $Et1(t)$ , CPA=10cm



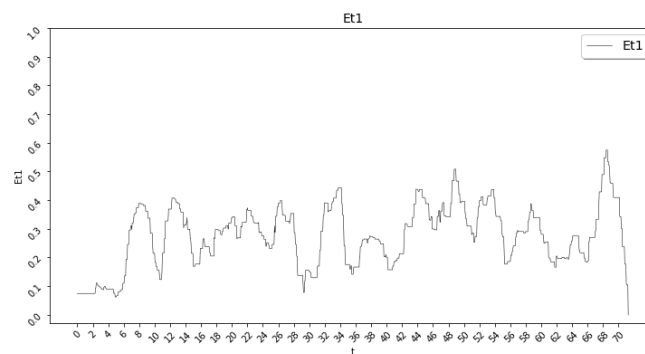
Σχήμα 4-61  $Et1(t)$ , CPA=20cm



Σχήμα 4-62  $Et1(t)$ , CPA=30cm



Σχήμα 4-63  $Et1(t)$  , CPA=40cm



Σχήμα 4-64  $Et1(t)$  , CPA=50cm

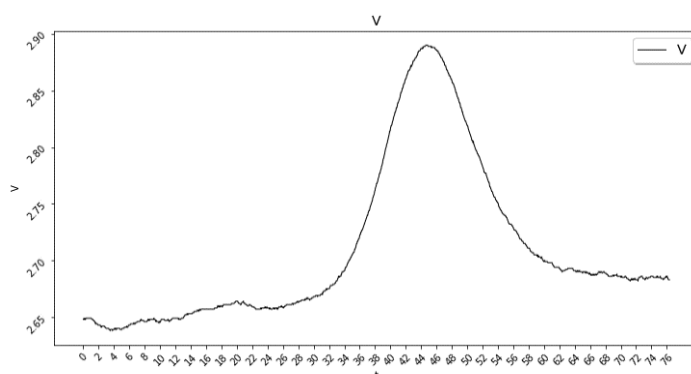
Στα σχήματα 4.60-64 αποτυπώνεται αυτό που είχε γίνει αντιληπτό από τα προηγούμενα. Για τις πρώτες δυο περιπτώσεις έχουμε ξεκάθαρη ανίχνευση σε σημείο κοντά στο ενδεδειγμένο CPA. Για τις υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις παρατηρείται ότι με την μέθοδο μας αίρετε η τυχαιότητα και οι μέσες τιμές των ενεργειών δεν ξεπερνούν ποτέ το  $E = 0.5$  , πόσο μάλλον να ξεπεράσουν το κριτήριο ανίχνευσης το οποίο έχει οριστεί στο  $E_m = 0.8$ . Έτσι πιστοποιείται ότι για τις αποστάσεις 10cm και 20cm έχουμε επιτυχή ανίχνευση ενώ στις υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις όχι.

### 4.2.3 Μεταβλητή κατεύθυνση αισθητήρα

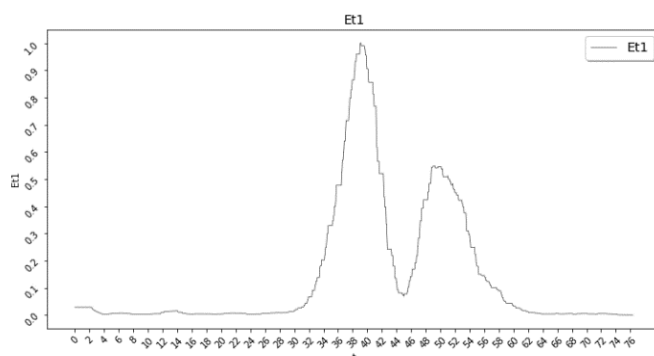
Στην δεύτερη κατηγορία έχουμε μεταβλητή την κατεύθυνση του αισθητήρα για πρότυπη κατεύθυνση δοκιμίου. Με αυτό το σεντ αναμένεται να αποδειχθεί κατά ποσό η κατεύθυνση του αισθητήρα, δηλαδή η σχετική του γωνία με το πεδίο της γης επηρεάζει τις μετρήσεις. Ακολουθούν σεντ μετρήσεων για απόσταση 10-20cm για γωνία αισθητήρα (= sensor angle)  $sa=-90^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ . Να σημειωθεί ότι για την αποτύπωση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του κεφαλαίου 4.2.2.6.

#### 4.2.3.1 CPA = 10cm

-  $sa = -90^\circ$

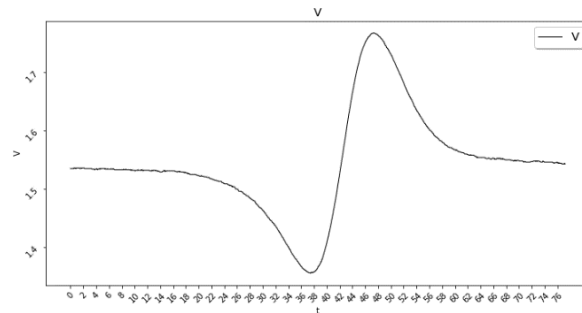


Σχήμα 4-65  $V(t)$ , CPA=10cm,  $sa=-90^\circ$

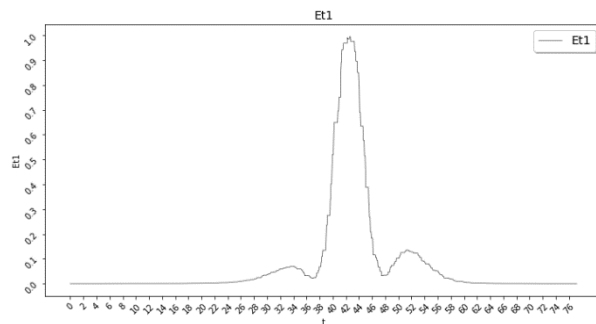


Σχήμα 4-66  $E(t)$ , CPA=10cm,  $a=-90^\circ$

-  $sa = -45^\circ$

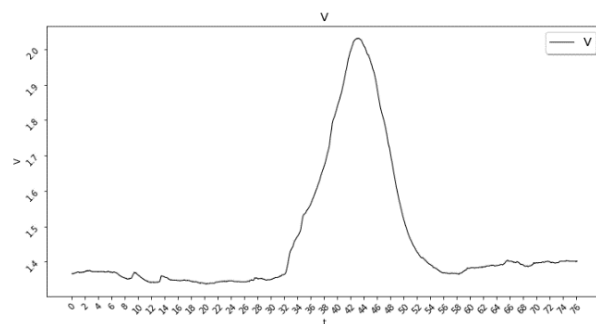


Σχήμα 4-67  $V(t)$ ,  $CPA=10cm$ ,  $sa=-45^\circ$

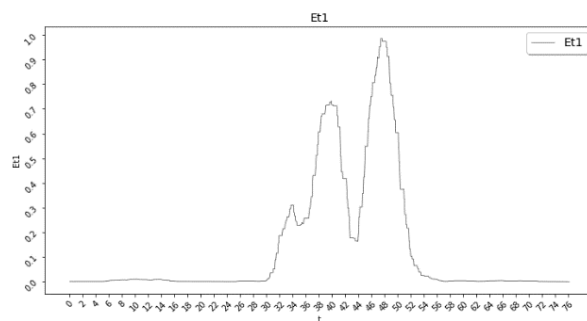


Σχήμα 4-68  $E(t)$ ,  $CPA=10cm$ ,  $a=-45^\circ$

-  $sa = 0^\circ$

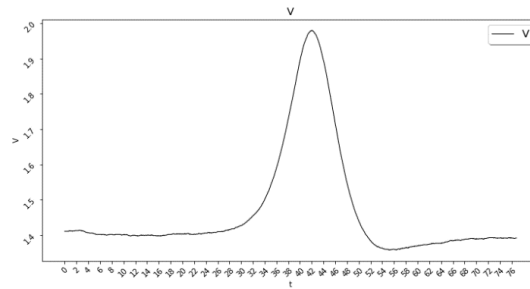


Σχήμα 4-69  $V(t)$ ,  $CPA=10cm$ ,  $sa=0^\circ$

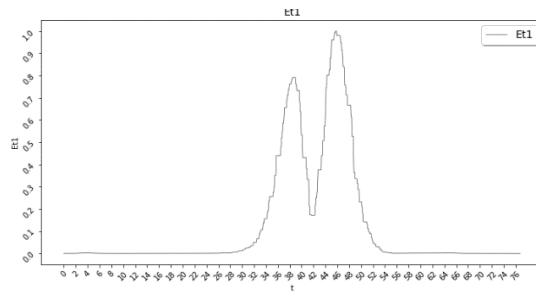


Σχήμα 4-70  $E(t)$ ,  $CPA=10cm$ ,  $sa=0^\circ$

-  $sa = 45^\circ$

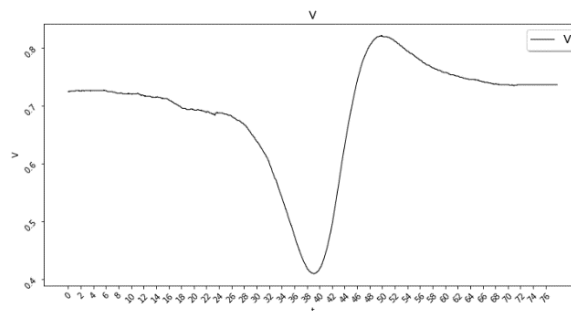


Σχήμα 4-71  $V(t)$  , CPA=10cm , sa=45°

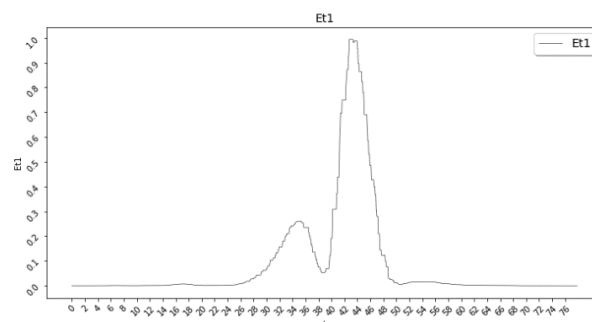


Σχήμα 4-72  $E(t)$  , CPA=10cm , sa=45°

-  $sa = 90^\circ$



Σχήμα 4-73  $V(t)$  , CPA=10cm , sa=90°

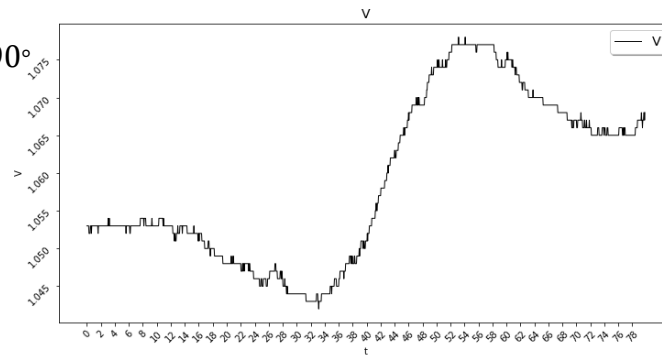


Σχήμα 4-74  $E(t)$  , CPA=10cm , a=90°

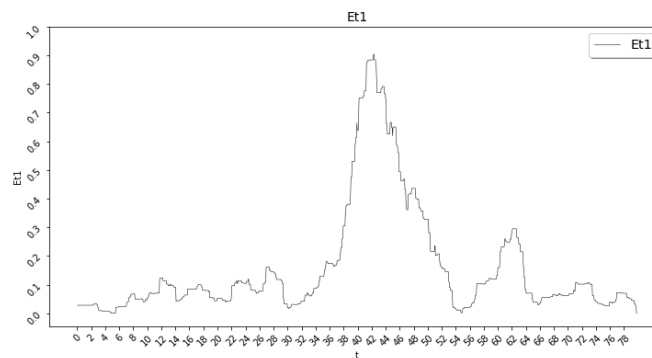
Παρατηρείται ανίχνευση για κάθε μια από τις παραπάνω γωνίες. Αυτό είναι λογικό λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ αισθητήρα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το σήμα αυτό καθαυτό γιατί παρουσιάζει διαφορετική κυματομορφή. Υπάρχει πιθανότητα η πληροφορία της κατεύθυνσης να βρίσκεται το σήμα. Το θέμα χρήζει διερεύνησης και είναι ενδιαφέρον ζήτημα για περαιτέρω έρευνα.

#### 4.2.3.2 CPA = 20cm

-  $sa = -90^\circ$

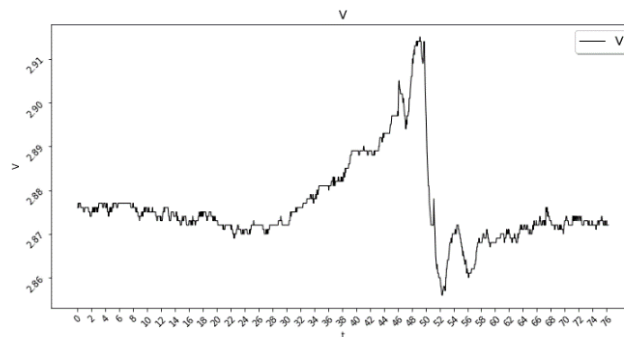


Σχήμα 4-75 V(t) , CPA=20cm , sa=-90°

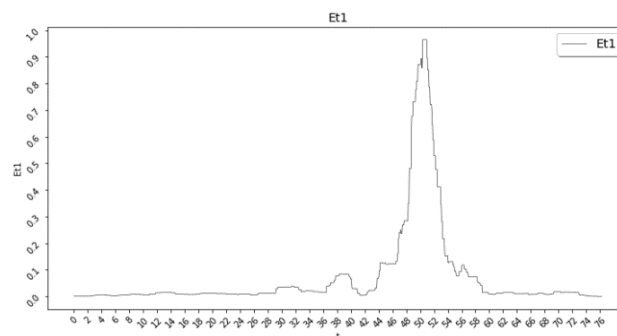


Σχήμα 4-76 E(t) , CPA=20cm , sa=-90°

-  $sa = -45^\circ$



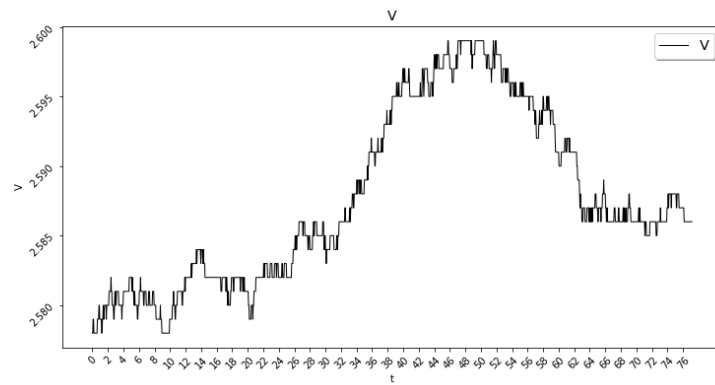
Σχήμα 4-77 V(t) , CPA=20cm , sa=-45°



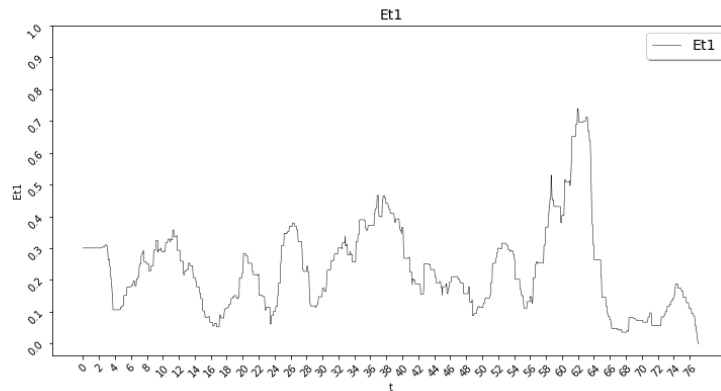
Σχήμα 4-78 E(t) , CPA=20cm , sa=-45°



-  $sa = 0^\circ$

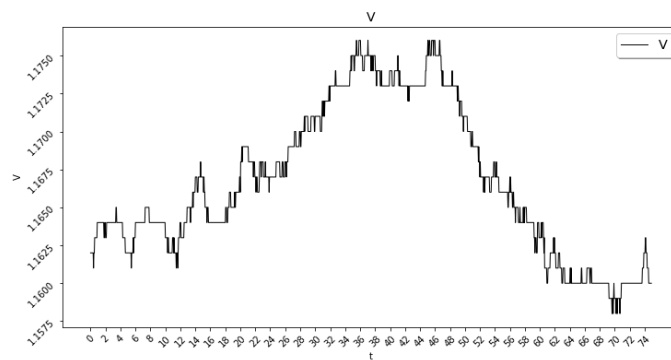


Σχήμα 4-79  $V(t)$ ,  $CPA=20cm$ ,  $sa=0^\circ$

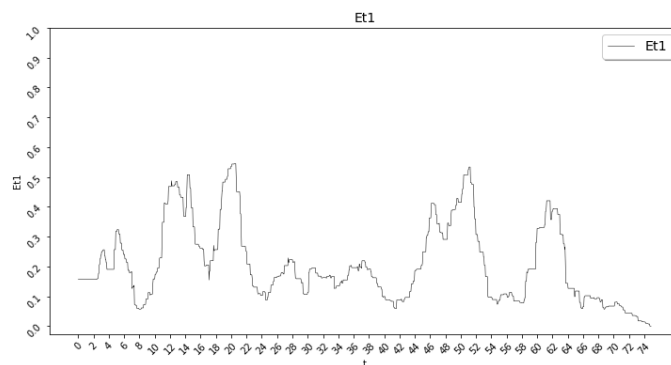


Σχήμα 4-80  $E(t)$ ,  $CPA=20cm$ ,  $sa=0^\circ$

-  $sa = 45^\circ$

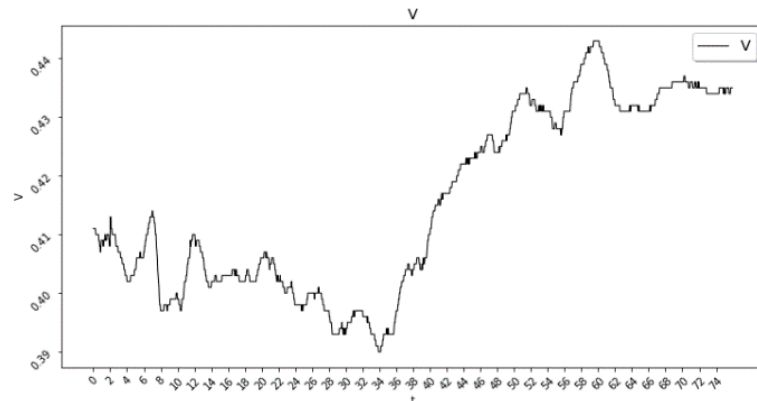


Σχήμα 4-81  $V(t)$ ,  $CPA=20cm$ ,  $sa=45^\circ$

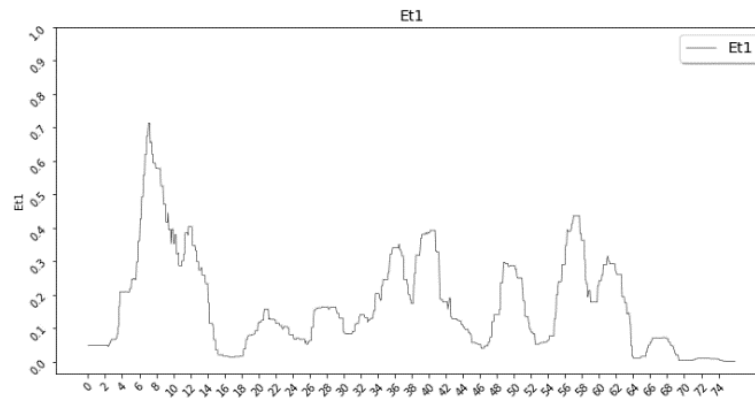


Σχήμα 4-82  $E(t)$ ,  $CPA=20cm$ ,  $sa=45^\circ$

-  $sa = 90^\circ$



Σχήμα 4-83  $V(t)$ ,  $CPA=20cm$ ,  $sa=90^\circ$



Σχήμα 4-84  $E(t)$ ,  $CPA=20cm$ ,  $sa=90^\circ$

Στα παραπάνω αποτυπώνεται ξεκάθαρα η επιτυχής ανίχνευση του στόχου για γωνίες  $sa = -90, -45$ . Αυτό δεν αποτελεί τυχαίο γεγονός. Ο προσανατολισμός του αισθητήρα στις συγκεκριμένες γωνίες είναι μακριά από την κύρια συνιστώσα του γεωμαγνητικού πεδίου με αποτέλεσμα αυτό να βοηθάει στις μετρήσεις. Για τις υπόλοιπες γωνίες βλέπουμε ότι η παρουσία του μαγνητικού πεδίου της γης επηρεάζει τόσο την ευαισθησία του αισθητήρα ώστε να είναι αδύνατη η ανίχνευση του στόχου. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε μεγαλύτερες αποστάσεις χωρίς αυτές να αποδίδουν νέα πληροφορία.

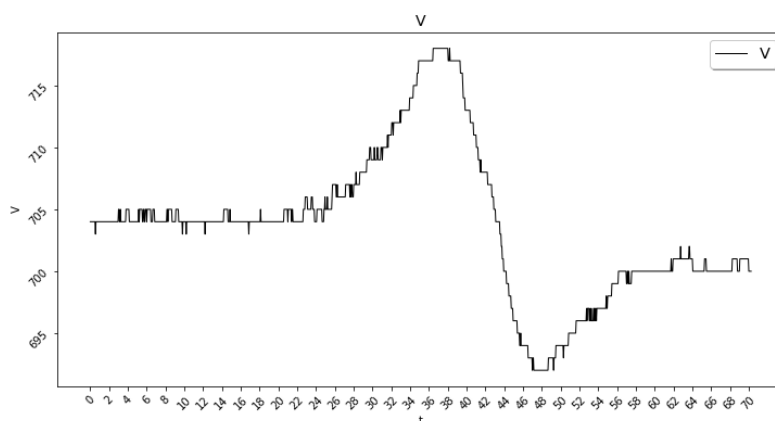
#### 4.2.4 Μεταβλητή κατεύθυνσή του αντικειμένου

Στην τρίτη κατηγορία έχουμε μεταβλητή την κατεύθυνση του αντικειμένου. Σε αυτό το σετ μετρήσεων έγινε προσπάθεια να δειχθεί κατά πόσο η κατεύθυνση του αντικειμένου με σταθερή την κίνηση επηρεάζει το σήμα και το αποτέλεσμα. Σημειώνουμε ότι αναμένεται να μην επηρεάζει γιατί ακολουθήθηκε μοντέλο μαγνητικού δίπολου.

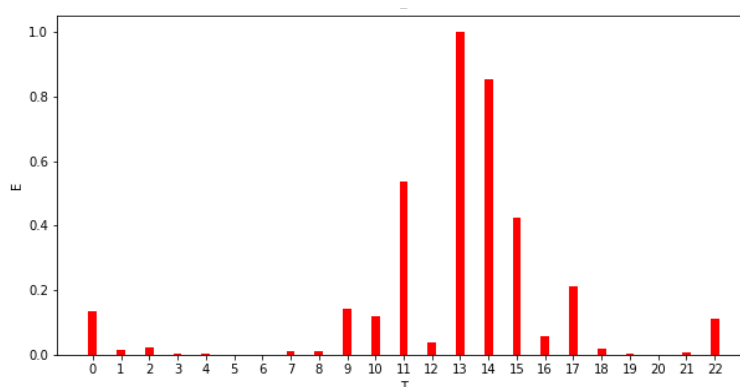
Ακολουθούν μετρήσεις για αποστάσεις 10cm και 30cm για γωνίες αντικειμένου (object angle,  $\theta_a$ )  $\theta_a = -90^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ .

##### 4.2.4.1 CPA = 10cm

-  $\theta_a = 90^\circ$

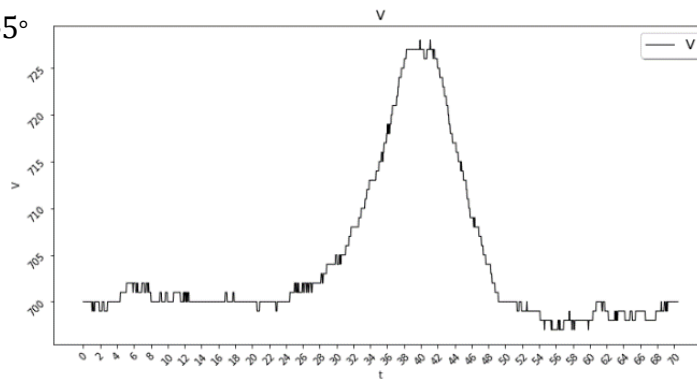


Σχήμα 4-85  $V(t)$ , CPA=10cm,  $\theta_a=90^\circ$

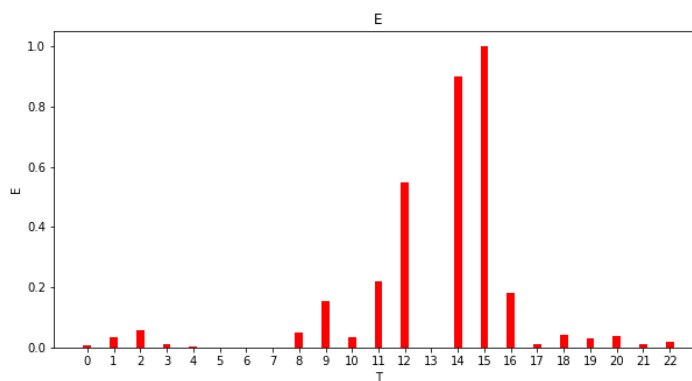


Σχήμα 4-86  $E(t)$ , CPA=10cm,  $\theta_a=90^\circ$

-  $oa = 45^\circ$

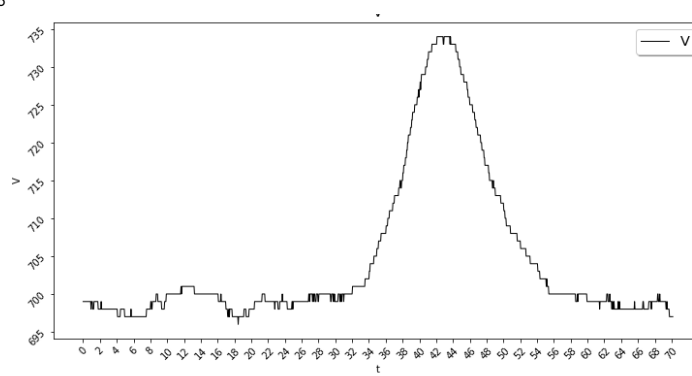


Σχήμα 4-87  $V(t)$ , CPA=10cm,  $oa=45^\circ$

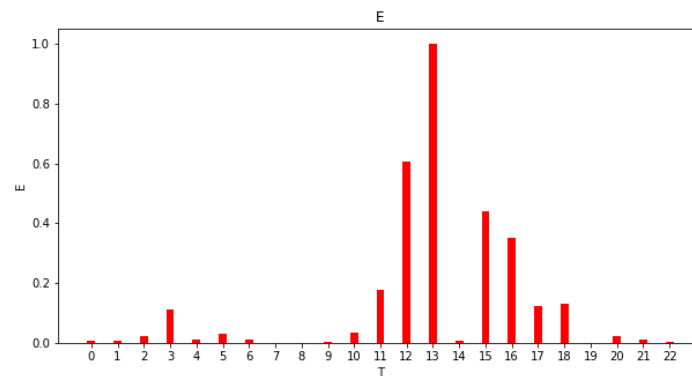


Σχήμα 4-88  $E(t)$ , CPA=10cm,  $oa=45^\circ$

-  $oa = 0^\circ$

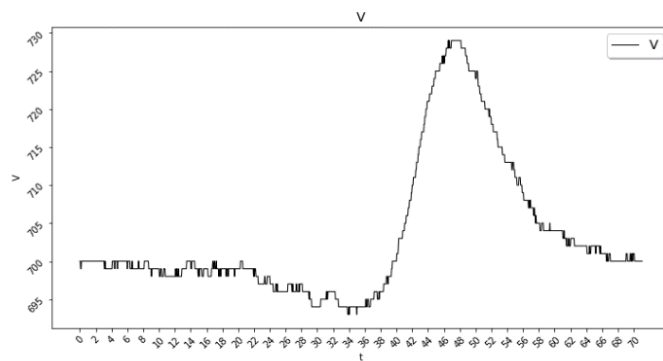


Σχήμα 4-89  $V(t)$ , CPA=10cm,  $oa=0^\circ$

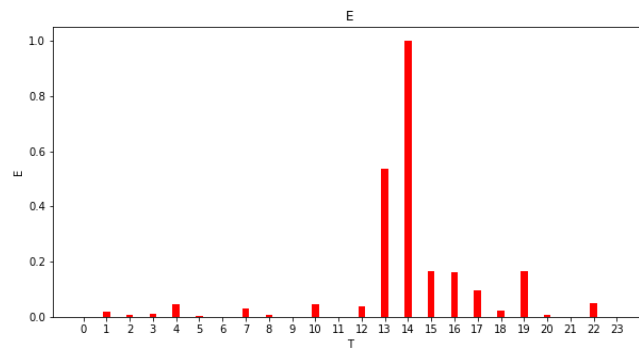


Σχήμα 4-90  $E(t)$ , CPA=10cm,  $oa=0^\circ$

-  $\sigma_a = -45^\circ$

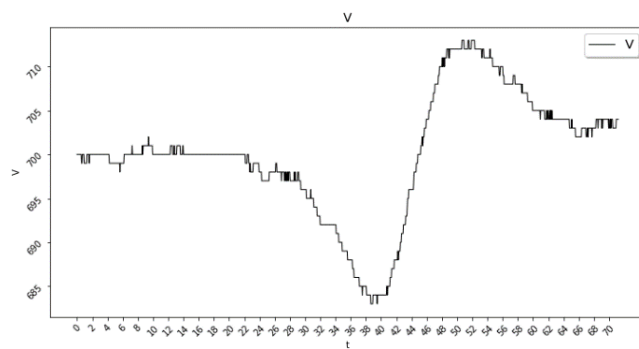


Σχήμα 4-91  $V(t)$ , CPA=10cm,  $\sigma_a = -45^\circ$

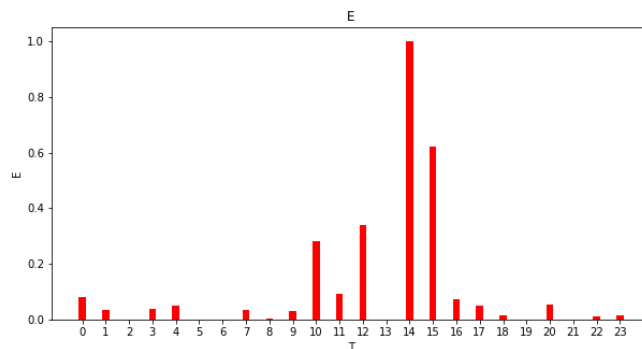


Σχήμα 4-92  $E(t)$ , CPA=10cm,  $\sigma_a = -45^\circ$

-  $\sigma_a = -90^\circ$



Σχήμα 4-93  $V(t)$ , CPA=10cm,  $\sigma_a = -90^\circ$

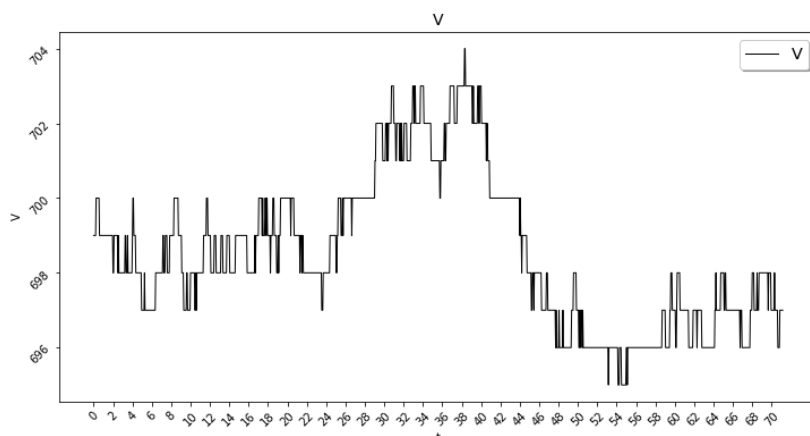


Σχήμα 4-94  $E(t)$ , CPA=10cm,  $\sigma_a = -90^\circ$

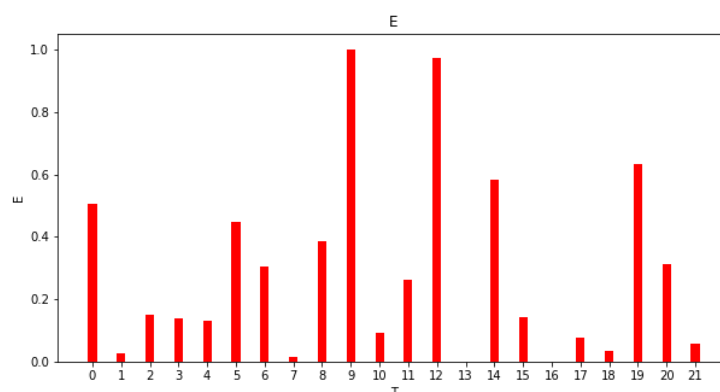
Παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται ανίχνευση και για τις πέντε γωνίες μετρήσεων. Άξιο σχολιασμού είναι το γεγονός ότι για διαφορετικές γωνίες έχουμε διαφορετική μορφή για την γραφική παράσταση του σήματος του μαγνητόμετρου. Η απόσταση είναι τόσο μικρή ώστε να μην ισχύει η υπόθεση του ιδανικού δίπολου με αποτέλεσμα η διαφορετική διεύθυνση του αντικειμένου, ανεξαρτήτως κατεύθυνσης κίνησης, να επηρεάζει την μέτρηση μας.

#### 4.2.4.2 CPA = 30cm ,R=63

-  $\sigma\alpha = 90^\circ$

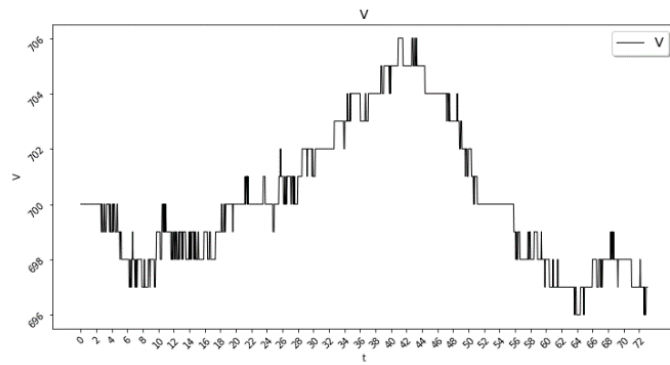


Σχήμα 4-95 V(t) ,CPA=30cm , $\sigma\alpha=90^\circ$

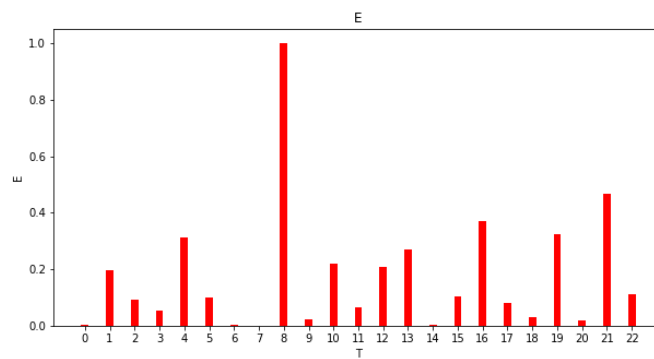


Σχήμα 4-96 E(T) ,CPA=30cm , $\sigma\alpha=90^\circ$

-  $oa = 45^\circ$

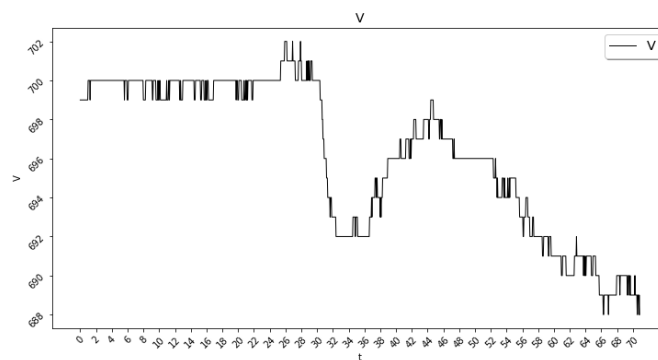


Σχήμα 4-97  $V(t)$  , CPA=30cm ,  $oa=45^\circ$

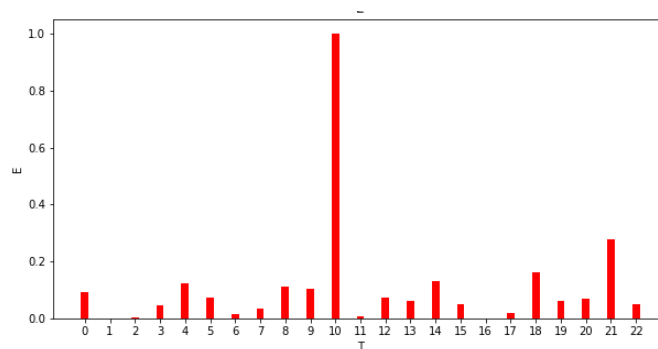


Σχήμα 4-98  $E(T)$  , CPA=30cm ,  $oa=45^\circ$

-  $oa = 0^\circ$

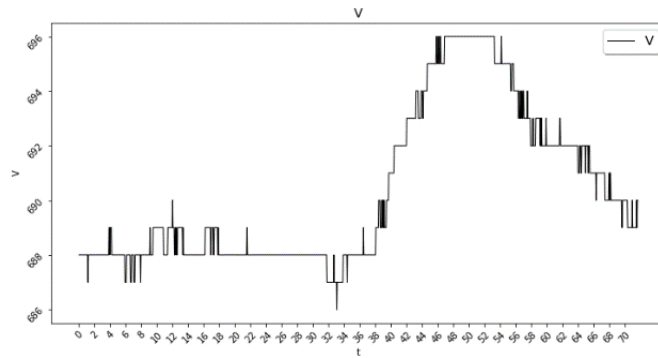


Σχήμα 4-99  $V(t)$  , CPA=30cm ,  $oa=0^\circ$

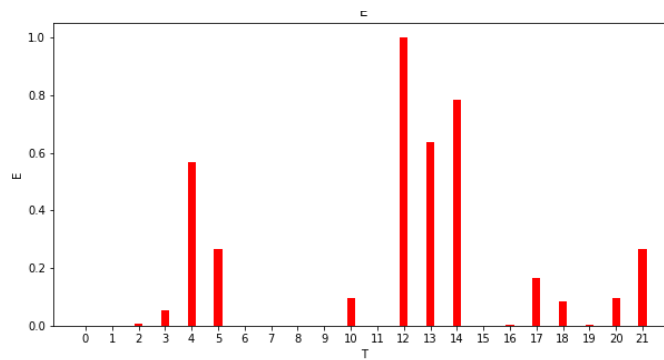


Σχήμα 4-100  $E(T)$  , CPA=30cm ,  $oa=0^\circ$

-  $\alpha = -45^\circ$

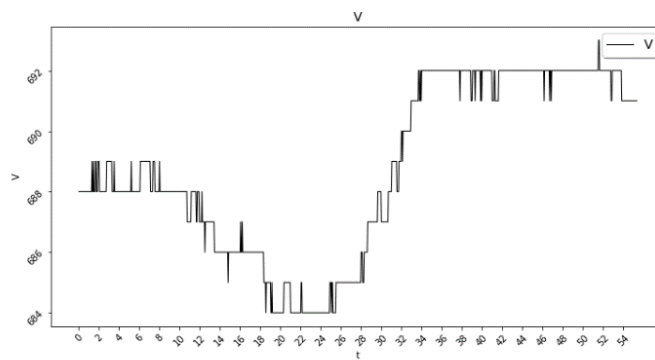


Σχήμα 4-101  $V(t)$ ,  $CPA=30cm$ ,  $\alpha=-45^\circ$

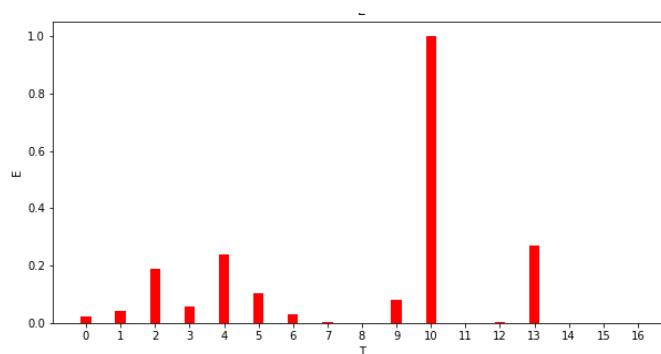


Σχήμα 4-102  $E(T)$ ,  $CPA=30cm$ ,  $\alpha=-45^\circ$

-  $\alpha = -90^\circ$



Σχήμα 4-103  $V(t)$ ,  $CPA=30cm$ ,  $\alpha=-90^\circ$



Σχήμα 4-104  $E(T)$ ,  $CPA=30cm$ ,  $\alpha=-90^\circ$



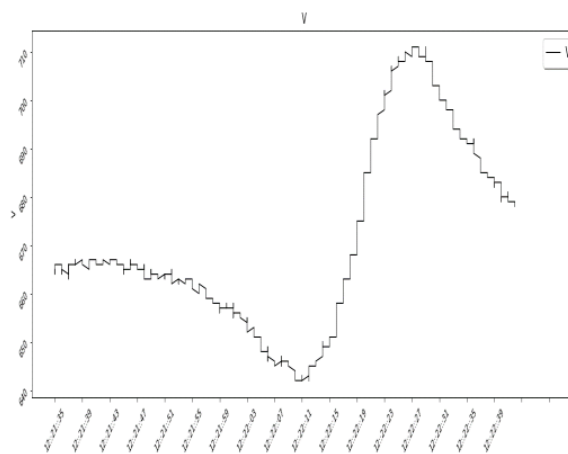
Παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται και πάλι ανίχνευση και για τις πέντε γωνίες μετρήσεων. Στο συγκεκριμένο σετ θα περίμενε κάποιος την μορφή του σήματος να παραμένει ίδια γιατί η απόστασή είναι τέτοια ώστε να αναμένεται να ισχύει η υπόθεση του ιδανικού δίπολου. Η ποιότητα των μετρήσεων είναι τέτοια ώστε δεν κατέστη εφικτό να αποδειχτεί αυτό και χρήζει διερεύνησης.

#### 4.2.5 Αντίθετη κατεύθυνση αντικειμένου.

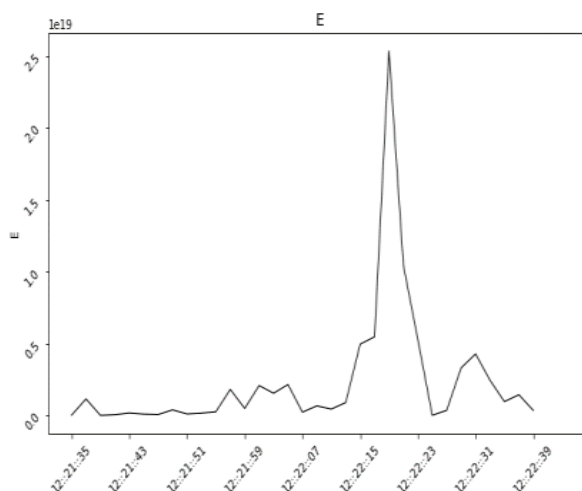
Στο συγκεκριμένο σετ έγιναν μετρήσεις για αντίθεση κατεύθυνση κίνησης αντικειμένου με την ταχύτητα αυτή την φορά να είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την πρότυπη, δηλαδή  $v = 0.051m/s$ . Σκοπός του συγκεκριμένου σετ μετρήσεων να εξακριβωθεί αν ο αλγόριθμος διαθέτει την κατάλληλη προσαρμοστικότητα ως προς την αλλαγή ταχύτητας αλλά και να προσδιοριστεί αν ισχύει το γεγονός ότι στην κυματομορφή της γραφικής του πεδίου εμπεριέχεται η πληροφορία της κατεύθυνσης κίνησης του στόχου.

(sd=standard direction, od =opposite direction)

$$CPA = 10cm, sd$$

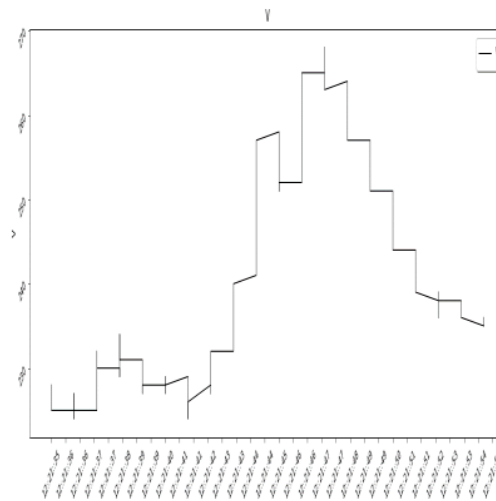


Σχήμα 4-105  $V(t)$ ,  $CPA=30cm, sd$

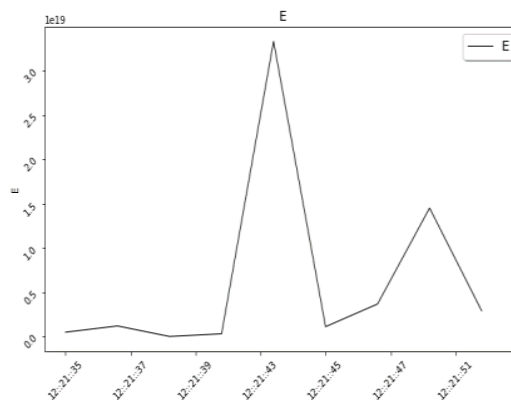


Σχήμα 4-106  $E(t)$ ,  $CPA=10cm, sd$

$CPA = 10cm, od$

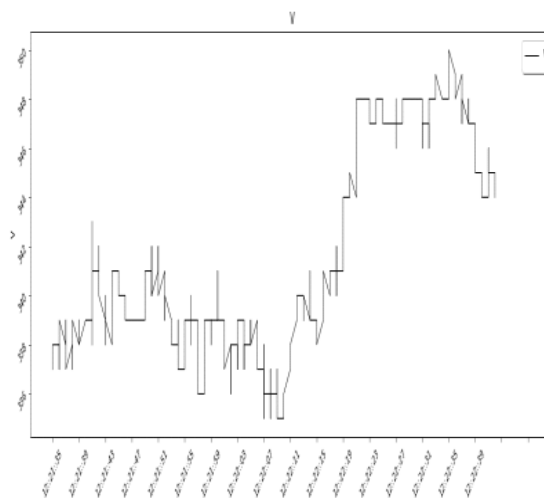


Σχήμα 4-107  $V(t)$ ,  $CPA=10cm, od$

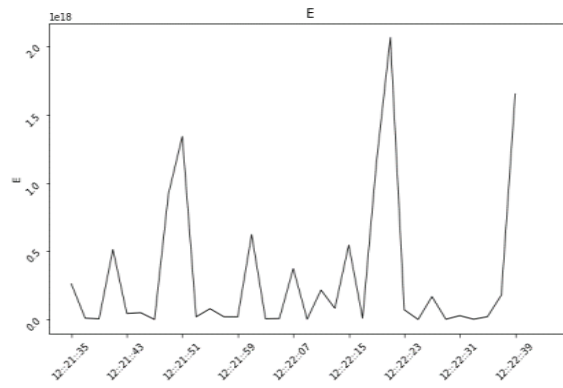


Σχήμα 4-108  $E(t)$ ,  $CPA=10cm, od$

$CPA = 20cm, sd$

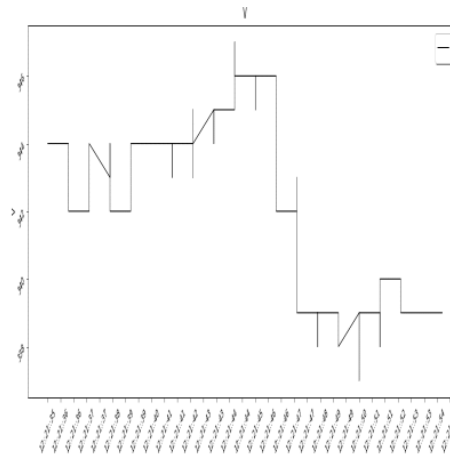


Σχήμα 4-109  $V(t)$ ,  $CPA=20cm, sd$

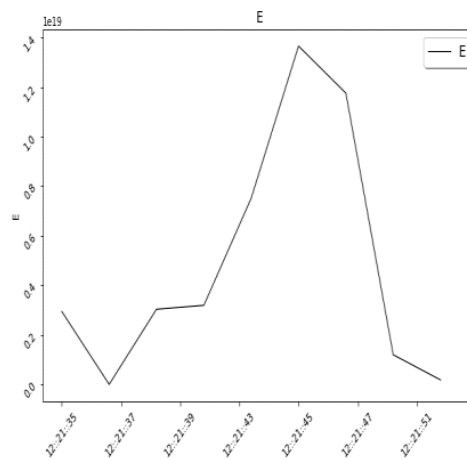


Σχήμα 4-110 E(t), CPA=10cm, sd

CPA = 20cm, od



Σχήμα 4-111 V(t), CPA=30cm, od



Σχήμα 4-112 E(t), CPA=10cm, od

Ενώ για το δεύτερο ζεύγος παρατηρείται η αναμενόμενη διαφορά στην γραφική του μετρούμενου πεδίου, για το ζεύγος μετρήσεων απόστασης 10cm κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό. Αυτό θέτει σε αμφιβολία την παραπάνω πρόβλεψη, με αποτέλεσμα να χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για το συγκεκριμένο ζήτημα.

## Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία

Στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ανίχνευση εξ αποστάσεων μαγνητικού στόχου. Αυτό έγινε εφικτό μέσω μετρήσεων με fluxgate αισθητήρα και αλγόριθμου OBF. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε μπορεί να χαρακτηριστεί επιτυχής, με πολλά περιθώρια βελτίωσης όμως. Όπως γίνεται κατανοητό από τα συμπεράσματα των αποτελεσμάτων, ο αλγόριθμος μας ανιχνεύει με ασφάλεια σε απόσταση τουλάχιστον 50cm ανεξαρτήτως σχετικής κατεύθυνσης αισθητήρα-στόχου. Τις μετρήσεις επηρεάζει ισχυρά η σχετική κατεύθυνση του μαγνητόμετρου ως προς το γεωμαγνητικό πεδίο, με τα αποτελέσματα να συνηγορούν ότι ιδεατά το μαγνητόμετρο πρέπει να είναι προσανατολισμένο κάθετα στο πεδίο, με σκοπό να επηρεάζεται όσο λιγότερο.

Προβλήματα που ανέκυψαν είχαν ως κύριο αποτέλεσμα μικρό και αφορούν την επαναληψιμότητα των μετρήσεων του αισθητήρα. Ο αισθητήρας ανά διαστήματα παρουσίασε σφάλμα τόσο στην διακριτική ικανότητα όσο και σε γραμμικότητα λειτουργίας. Φαίνεται πως μετρήσεις σε υψηλά πεδία έχουν ως αποτέλεσμα την παρωδική απώλεια ευαισθησίας του αισθητήρα με αποτέλεσμα την μείωση της πιθανότητας ανίχνευσης.

Εν κατακλείδι, η προσπάθεια ανίχνευση μαγνητικής ανωμαλίας μέσω μαγνητόμετρου fluxgate και ορθογωνοποιημένων συναρτήσεων στέφθηκε με επιτυχία, με το σύστημα να επιδέχεται μεγάλα περιθώρια βελτίωσης

## Μελλοντική εργασία

Προτάσεις ως προς την συνέχεια της εργασίας και την βελτίωση της μεθόδου μπορούν να γίνουν τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού. Για τον αλγόριθμο ο συνδυασμός με φίλτρα είναι λογικό βήμα ώστε τυχαίες αυξομειώσεις του σήματος να μην επηρεάζουν την λειτουργικότητα του συστήματος ανίχνευσης.

Ο αλγόριθμος OBF που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να λειτουργήσει παράλληλα με έναν Noise Based αλγόριθμο για την πιστοποίηση του αποτελέσματος. Αυτό θα έδινε μεγαλύτερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα αφού δυο ανεξάρτητοι αλγόριθμοι θα επιχειρούσαν την ανίχνευση.

Όπως αποτυπώθηκε και στο κεφάλαιο 3, είναι κοινή πρακτική η χρησιμοποίηση συστήματος δυο αισθητήρων, με τον ένα να λειτουργεί ως αισθητήρας αναφοράς, δηλαδή να μετρά το υπόβαθρο το οποίο θα αφαιρείται από το σήμα του αισθητήρα μέτρησης. Απαραίτητη προϋπόθεση ο αισθητήρας αναφοράς να βρίσκεται σε απόσταση που δεν επηρεάζεται από το διερχόμενο στόχο. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε μπορεί με κάποιες τροποποιήσεις να δεχτεί δεδομένα από δυο αισθητήρες με σκοπό το καλύτερο ποσοστό ανίχνευσης.

Το παραπάνω παράδειγμα φέρνει στη επιφάνεια άλλο ένα πρόβλημα που έγινε αντιληπτό κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Ο αισθητήρας παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία ως προς τις αλλαγές κατεύθυνσης, μικρές γωνιακές διαφοροποιήσεις επιφέρουν μεγάλη αλλαγές στις έξοδο του αισθητήρα. Εμφανίζεται έτσι (επιτακτική στην περίπτωση συστήματος δύο αισθητήρων) η ανάγκη αυτοματοποίησης της διαδικασίας διεξαγωγής μετρήσεων στο εργαστήριο με την κατεύθυνση του αισθητήρα να ελέγχεται από κινητήρα συνδεδεμένο με υπολογιστή με σκοπό την όσο μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων.

## Βιβλιογραφία

- [1] Weinstock, 'SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications', NATO Science Series E: (NSSE, volume 329), 2012.
- [2] Clarke, Braginski, 'The SQUID Handbook: Applications of SQUIDs and SQUID Systems', Wiley, 2006.
- [3] Αγγελόπουλος, 'Σχεδίαση και ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων και διατάξεων χαρακτηρισμού των, με χρήση μαγνητικών φαινομένων', Διδακτορική Διατριβή, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, 2019.
- [4] Ripka 'New directions in fluxgate sensors', J. Magn. Magn. Mate, 2000.
- [5] Benyosef, Stael, Bochner 'Optimization of the magnetic properties of materials for fluxgate sensors', Mat. Res. 11 (2), 2008.
- [6] Sasada, Harada 'Fundamental Mode Orthogonal Fluxgate Gradiometer', IEEE Transactions on Magnetics, 2014.
- [7] Ripka, Kubik, Duffy, Hurley, O'Reilly 'Current sensor in PCB technology', IEEE Sensors Journal 5(3):433 – 438, 2002.
- [8] Brockelsby 'Ultrasonic Delay Lines', Iliffe Books, 1963.
- [9] Hristoforou 'Magnetostrictive delay lines and their applications', Sensors and Actuators A: Physical Volume 59, 1997.
- [10] Meijer, 'Smart Sensor Systems', Wiley, 2008
- [11] Kim, Kim, Choi, Park 'Improvement of the signal to noise ratio of the magnetic detection system using the geological magnetic filter' IEEE ICECS'99 1 237–40, 1999
- [12] Wiegert 'Magnetic anomaly guidance system for mine countermeasures using autonomous underwater vehicles', Oceans Celebrating the Past, Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No. 03CH37492) (IEEE) 4, 2002
- [13] Marshall 'Vehicle detection using a magnetic field sensor' IEEE Trans. Veh. Technol. 27 65–8, 1978



[14] Zalevsky, Bregman, Salomonski, Zafirir 'Resolution enhanced magnetic sensing system for wide coverage real time UXO detection' J. Appl. Geophys., 2012

[15] Bello 'Literature review on landmines and detection methods' Front. Sci. 3 27–42, 2013

[16] Nazlibilek, Ege, Kalender 'A multi-sensor network for direction finding of moving ferromagnetic objects inside water by magnetic anomaly', Measurement 42 1402–16, 2009

[17] Watermann 'Magnetic detection techniques in antisubmarine warfare' Spec. Issue 18 88–9, 1997

[18] Zhang, Guan, Wang, Shi 'Detect adjacent well by analyzing geomagnetic anomalies research', J. Appl. Sci. Eng. Technol. 7 2353–61, 2014

[19] Wiegert, Price, Hyder 'Magnetic anomaly sensing system for mine counter measures using high mobility autonomous sensing platforms' OCEANS'02MTS/IEEE 2 937–44, 2002

[20] Kosmas, Hristoforou 'The effect of magnetic anomaly detection technique in eddy current nondestructive testing', Int. J. Appl. Electromagn. Mech. 25 319–24, 2007

[21] Zhang, Gao, Zeng, Li, Guan, He, Wang and Lu 'Relationship between characteristics of gravity and magnetic anomalies and the earthquakes in the Longmenshan range and adjacent areas' Tectonophysics 491 218–29, 2010

[22] Taue, Sugihara, Kobayashi, Ishikawa 'Magnetic field mapping and biaxial vector operation for biomagnetic applications using high-sensitivity optically pumped atomic magnetometers' Jpn. J. Appl. Phy. 50 6604, 2011

[23] Lee, Shim, Moon, Kim 'Flat-response spin-exchange relaxation free atomic magnetometer under negative feedback' Opt. Express 22 19887–94, 2014

[24] Savukov, Karaulanov, Boshier 'Ultra-sensitive high-density Rb-87 radio-frequency magnetometer' Appl. Phys. Lett. 104 023504, 2014

[25] Zhang, Huang, Xu, Hu, Lin 'Multi-channel spin exchange relaxation free magnetometer towards two-dimensional vector magnetencephalography' Opt. Express 27 597–607, 2019

[26] Huang, Hao 'Method of separating dipole magnetic anomaly from geomagnetic field and application in underwater vehicle localization' The 2010 IEEE Int. Conference on Information and Automation pp 1357–62, 2010

[27] Zhang, Wang, Ge, Cheng, Cheng 'Automatic search algorithms for near-field ferromagnetic targets based on magnetic anomaly detection' Math. Probl. Eng., 2018

[28] Ginzburg, Sheinker, Salomonski, Kaplan, Frumkis 'Application of target-based and noise-based methods in magnetic anomaly detection systems' Int. Marine Electromagnetics Conf. (MARELEC) ,2009

[29] Balaji, Nelson 'Parameter estimation and tracking of a magnetic dipole Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition' XXIII (International Society for Optics and Photonics) 9091 90910A, 2014

[30] Yoshii 'Method for detecting a magnetic source by measuring the magnetic field thereabout', US 06/083,641, 1982

[31] Loane 'Speed and depth effects in magnetic anomaly detection', Olney, MD: EPL Technical Report Analysis, 1976

[32] Watermann, Lam 'Distributions of magnetic field variations, differences and residuals', Saclant Undersea Research Centre La Spezia, 1999

[33] Mori 'Detection of magnetic anomaly signal by applying adjustable weight functions', IEEE Trans. Magn. 26 1083–7, 1990

[34] Ginzburg, Frumkis and Kaplan 'Processing of magnetic scalar magnetometer signals using orthonormal function', Sens. Actuators A 102 67–75, 2002

[35] Ginzburg, Frumkis and Kaplan 'An efficient method for processing scalar magnetic gradiometer signals', Sens. Actuators A 114 73–9, 2004

[36] Frumkis, Ginzburg, Salomonski, Kaplan 'Optimization of scalar magnetic gradiometer signal processing', Sens. Actuators A 121 88–94, 2005

[37] Guo et al, 'Field experimental study on magnetic dipole anomaly signal detection Cross-Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology', Conf. (CSQRWC) pp 12–15, 2015

[38] Jian, Chunsheng, Peng, Zhenyu 'Detection of magnetic anomaly signal based on OBF decomposition in wavelet domain', *J. Projectiles Rockets Missiles Guid.* 31 187–9, 2011

[39] Inaba, Shima, Konishi, Yanagisawa, Araki 'Magnetic dipole signal detection and localization using subspace method', *Electron. Commun. Japan* 85 23–34, 2010

[40] Yarotsky 'Optimalnoe obnaruzhenie magnitnogo dipolya', *Izmeritel'naya Tekhnika*, 10 43–5, 1992

[41] Wan, Pan, Zhang, Chen, Pang, Zhu 'Performance improvement of magnetic anomaly detector using Karhunen–Loeve expansion', *IET Sci. Meas. Technol.* 2017

[42] Zhao, Han, Tong, Guo 'Adaptive filtering method for magnetic anomaly detection' *J. Appl. Remote Sens.* 12 025003, 2018

[43] Tumanski 'Handbook of Magnetic Measurements', CRC Press, 2019

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1 Κατηγορίες Αισθητήρων με Βάση τον τύπο του Ερεθίσματος

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές τιμές μαγνητικών πεδίων

Πίνακας 4.1 Πρότυπη μορφή ονόματος αρχείου

## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1 Μοντέλο μαγνητικής πυξίδας από μαγνητίτη .....	2
Σχήμα 1-2 James Clerk Maxwell .....	2
Σχήμα 1-3 Αναπαράσταση της στοιχειώδους μαγνητικής επαγωγής dB .....	5
Σχήμα 1-4 Μαγνητική επαγωγή B για ευθύ, μακρύ σύρμα που διαρρέεται από ρεύμα I .....	6
Σχήμα 1-5 Μοντελο μαγνητη για το μαγνητικού πεδίου της γης .....	7
Σχήμα 1-6 Μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της γης στην επιφάνειας .....	8
Σχήμα 2-1 Διάγραμμα λειτουργίας αισθητήρα .....	10
Σχήμα 2-2 Διάγραμμα λειτουργίας έξυπνου αισθητήρα .....	13
Σχήμα 2-3 Εύρος ευαισθησίας των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων αισθητήρων μαγνητικού πεδίου .....	15
Σχήμα 2-4 Εμπορικός αισθητήρας SQUID .....	17
Σχήμα 2-5 Τυπική τοπολογία αισθητήρα Orthogonal Fluxgate, στην οποία το ρεύμα διέρχεται από τον μαγνητικό πυρήνα.....	20
Σχήμα 2-6 Αισθητήρας θέσης βασισμένος στη διάταξη MDL.....	21
Σχήμα 2-7 Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (GMI) σε έναν αγωγό που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα .....	23
Σχήμα 2-8 Αρχή λειτουργίας αισθητήρα Hall .....	24
Σχήμα 3-1: Σχηματική αναπαράσταση της μαγνητικής ανωμαλίας γύρω από το σιδηρομαγνητικο υλικό .....	31
Σχήμα 3-2: Πειραματική διάταξη .....	32
Σχήμα 3-3 (α) Πειραματική διάταξη. (β) Το μοντέλο ανίχνευσης σήματος μαγνητικής ανωμαλίας ενός μόνο μαγνητόμετρου.....	34
Σχήμα 3-4 Το διάγραμμα των ορθογωνίων συναρτήσεων βάσης.....	35
Σχήμα 3-5 Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου αποσύνθεσης OBF.....	36
Σχήμα 3-6 Οι συγκρίσεις πριν και μετά τον αλγόριθμο αποσύνθεσης, όπου (α) είναι το αρχικό σήμα μαγνητικής ανωμαλίας και (β) είναι η κανονικοποιημένη ενεργειακή συνάρτηση των ορθογώνιων συναρτήσεων βάσης.....	37
Σχήμα 3-7 Το μοντέλο ανίχνευσης σήματος μαγνητικής ανωμαλίας μέσω μαγνητόμετρου κλίσης. ....	37

Σχήμα 3-8 Η σύγκριση πριν και μετά του αλγόριθμου αποσύνθεσης, όπου (α) είναι το αρχικό σήμα μαγνητικής ανωμαλίας. και (β) είναι η κανονικοποιημένη συνάρτηση ενέργειας μέσω ορθογώνιων συναρτήσεων βάσης. ....	39
Σχήμα 3-9 Αλγόριθμοι αποσύνθεσης OBF, πριν και μετά (α) είναι το αρχικό σήμα μαγνητικής ανωμαλίας. (β) είναι η ενεργειακή συνάρτηση μετά τη κανονικοποίηση. ....	40
Σχήμα 3-10 (α) Το μαγνητικό σήμα και (β) το σήμα μετά το φιλτράρισμα εντροπίας. ....	41
Σχήμα 3-11 (α) Το σήμα μαγνητικής ανωμαλίας. και (β) το σήμα μετά το φιλτράρισμα εντροπίας. ....	41
Σχήμα 3-12 (α) Ο θόρυβος του σήματος. και (β) το σήμα εξόδου μετά τον αλγόριθμο HOC. ....	42
Σχήμα 3-13 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος στοχαστικού συντονισμού	42
Σχήμα 3-14 Το σήμα εισόδου του ανιχνευτή. (β) την απόκριση του συστήματος SR σε σήματα ανωμαλιών. και (γ) το σήμα εξόδου του ανιχνευτή SR .....	42
Σχήμα 4-1 Πρότυπη διάταξη πειράματος. ....	44
Σχήμα 4-2 Τυπική μορφή μέτρησης, $V(t)$ .....	45
Σχήμα 4-3 Τυπική μορφή αποτελέσματος, $E(t)$ .....	45
Σχήμα 4-4 Διαμόρφωση αρχείων σε μορφή κατάλληλη για περαιτέρω επεξεργασία. ....	46
Σχήμα 4-5 Ονοματοδοσία αρχείων .....	47
Σχήμα 4-6 Αποτέλεσμα τελικού προγράμματος. ....	47
Σχήμα 4-7 Αποτέλεσμα για αριθμό μετρήσεων ανά παράθυρο $L=10,20,40,80$ . ..	48
Σχήμα 4-8 Πολικό διάγραμμα μετρήσεων για γωνίες 0-360. ....	49
Σχήμα 4-9 Τελική μορφή γραφικής παράστασης αποτελεσμάτων. ....	49
Σχήμα 4-10 $V(t)$ ,CPA=10cm .....	51
Σχήμα 4-11 $E(T)$ ,CPA=10cm .....	51
Σχήμα 4-12 $V(t)$ ,CPA=20cm .....	52
Σχήμα 4-13 $E(T)$ ,CPA=20cm .....	52
Σχήμα 4-14 $V(t)$ ,CPA=30cm .....	53
Σχήμα 4-15 $E(T)$ ,CPA=30cm .....	53
Σχήμα 4-16 $V(t)$ ,CPA=40cm .....	54

Σχήμα 4-17 E(T) ,CPA=40cm.....	54
Σχήμα 4-18 V(t) ,CPA=50cm.....	55
Σχήμα 4-19 E(T) ,CPA=50cm.....	55
Σχήμα 4-20 V(t) ,CPA=10cm.....	56
Σχήμα 4-21 E(T) ,CPA=10cm.....	56
Σχήμα 4-22 V(t) ,CPA=20cm.....	57
Σχήμα 4-23 E(T) ,CPA=20cm.....	57
Σχήμα 4-24 V(t) ,CPA=30cm.....	58
Σχήμα 4-25 E(T) ,CPA=30cm.....	58
Σχήμα 4-26 V(t) ,CPA=40cm.....	59
Σχήμα 4-27 E(T) ,CPA=40cm.....	59
Σχήμα 4-28 V(t) ,CPA=50cm.....	60
Σχήμα 4-29 E(T) ,CPA=50cm.....	60
Σχήμα 4-30 V(Tt) ,CPA=10cm.....	61
Σχήμα 4-31 E(T) ,CPA=10cm ,R=51.....	61
Σχήμα 4-32 E(T) ,CPA=10cm ,R=55.....	62
Σχήμα 4-33 E(T) ,CPA=10cm ,R=59.....	62
Σχήμα 4-34 E(T) ,CPA=10cm ,R=63.....	62
Σχήμα 4-35 E(T) ,CPA=10cm ,R=67.....	62
Σχήμα 4-36 V(t) ,CPA=20cm.....	63
Σχήμα 4-37 E(T) ,CPA=20cm ,R=51.....	63
Σχήμα 4-38 E(T) ,CPA=20cm ,R=55.....	63
Σχήμα 4-39 E(T) ,CPA=20cm ,R=59.....	64
Σχήμα 4-40 E(T) ,CPA=20cm ,R=63.....	64
Σχήμα 4-41 E(T) ,CPA=20cm ,R=67.....	64
Σχήμα 4-42 V(t) ,CPA=30cm.....	65
Σχήμα 4-43 E(T) ,CPA=30cm ,R=51.....	65
Σχήμα 4-44 E(T) ,CPA=30cm ,R=55.....	65
Σχήμα 4-45 E(T) ,CPA=30cm ,R=59.....	66
Σχήμα 4-46 E(T) ,CPA=30cm ,R=63.....	66
Σχήμα 4-47 E(T) ,CPA=30cm ,R=67.....	66
Σχήμα 4-48 V(t) ,CPA=40cm.....	67

Σχήμα 4-49 E(T) ,CPA=40cm ,R=51 .....	67
Σχήμα 4-50 E(T) ,CPA=40cm ,R=55 .....	67
Σχήμα 4-51 E(T) ,CPA=40cm ,R=59 .....	68
Σχήμα 4-52 E(T) ,CPA=40cm ,R=63 .....	68
Σχήμα 4-53 E(T) ,CPA=40cm ,R=67 .....	68
Σχήμα 4-54 V(Tt) ,CPA=50cm .....	69
Σχήμα 4-55 E(T) ,CPA=50cm ,R=51 .....	69
Σχήμα 4-56 E(T) ,CPA=50cm ,R=55 .....	69
Σχήμα 4-57 E(T) ,CPA=50cm ,R=59 .....	70
Σχήμα 4-58 E(T) ,CPA=50cm ,R=63 .....	70
Σχήμα 4-59 E(T) ,CPA=50cm ,R=67 .....	70
Σχήμα 4-60 Et1(t) ,CPA=10cm .....	71
Σχήμα 4-61 Et1(t) ,CPA=20cm .....	71
Σχήμα 4-62 Et1(t) ,CPA=30cm .....	71
Σχήμα 4-63 Et1(t) ,CPA=40cm .....	72
Σχήμα 4-64 Et1(t) ,CPA=50cm .....	72
Σχήμα 4-65 V(t) ,CPA=10cm ,sa=-90° .....	73
Σχήμα 4-66 E(t) ,CPA=10cm ,a=-90° .....	73
Σχήμα 4-67 V(t) ,CPA=10cm ,sa=-45° .....	74
Σχήμα 4-68 E(t) ,CPA=10cm ,a=-45° .....	74
Σχήμα 4-69 V(t) ,CPA=10cm ,sa=0° .....	74
Σχήμα 4-70 E(t) ,CPA=10cm ,sa=0° .....	74
Σχήμα 4-71 V(t) ,CPA=10cm ,sa=45° .....	75
Σχήμα 4-72 E(t) ,CPA=10cm ,sa=45° .....	75
Σχήμα 4-73 V(t) ,CPA=10cm ,sa=90° .....	75
Σχήμα 4-74 E(t) ,CPA=10cm ,a=90° .....	75
Σχήμα 4-75 V(t) ,CPA=20cm ,sa=-90° .....	76
Σχήμα 4-76 E(t) ,CPA=20cm ,sa=-90° .....	76
Σχήμα 4-77 V(t) ,CPA=20cm ,sa=-45° .....	76
Σχήμα 4-78 E(t) ,CPA=20cm ,sa=-45° .....	76
Σχήμα 4-79 V(t) ,CPA=20cm ,sa=0° .....	77
Σχήμα 4-80 E(t) ,CPA=20cm ,sa=0° .....	77



Σχήμα 4-81 V(t) ,CPA=20cm ,sa=45° .....	77
Σχήμα 4-82 E(t) ,CPA=20cm ,sa=45° .....	77
Σχήμα 4-83 V(t) ,CPA=20cm ,sa=90° .....	78
Σχήμα 4-84 E(t) ,CPA=20cm ,sa=90° .....	78
Σχήμα 4-85 V(t) ,CPA=10cm ,oa=90° .....	79
Σχήμα 4-86 E(t) ,CPA=10cm ,oa=90° .....	79
Σχήμα 4-87 V(t) ,CPA=10cm ,oa=45° .....	80
Σχήμα 4-88 E(t) ,CPA=10cm ,oa=45 .....	80
Σχήμα 4-89 V(t) ,CPA=10cm ,oa=0° .....	80
Σχήμα 4-90 E(t) ,CPA=10cm ,oa=0° .....	80
Σχήμα 4-91 V(t) ,CPA=10cm ,oa=-45° .....	81
Σχήμα 4-92 E(t) ,CPA=10cm ,oa=-45° .....	81
Σχήμα 4-93 V(t) ,CPA=10cm ,oa=-90° .....	81
Σχήμα 4-94 E(t) ,CPA=10cm ,oa=-90° .....	81
Σχήμα 4-95 V(t) ,CPA=30cm ,oa=90° .....	82
Σχήμα 4-96 E(T) ,CPA=30cm ,oa=90° .....	82
Σχήμα 4-97 V(t) ,CPA=30cm ,oa=45° .....	83
Σχήμα 4-98 E(T) ,CPA=30cm ,oa=45° .....	83
Σχήμα 4-99 V(t) ,CPA=30cm ,oa=0° .....	83
Σχήμα 4-100 E(T) ,CPA=30cm ,oa=0° .....	83
Σχήμα 4-101 V(t) ,CPA=30cm ,oa=-45° .....	84
Σχήμα 4-102 E(T) ,CPA=30cm ,oa=-45° .....	84
Σχήμα 4-103 V(t) ,CPA=30cm ,oa=-90° .....	84
Σχήμα 4-104 E(T) ,CPA=30cm ,oa=-90° .....	84
Σχήμα 4-105 V(t), CPA=30cm,sd .....	86
Σχήμα 4-106 E(t), CPA=10cm, sd.....	86
Σχήμα 4-107 V(t), CPA=10cm, od.....	87
Σχήμα 4-108 E(t), CPA=10cm, od .....	87
Σχήμα 4-109 V(t), CPA=20cm, sd .....	87
Σχήμα 4-110 E(t), CPA=10cm, sd.....	88
Σχήμα 4-111 V(t), CPA=30cm, od.....	88
Σχήμα 4-112 E(t), CPA=10cm, od .....	88

