

 ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ	ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ <hr/> Σχεδίαση και Επεξεργασία Συστημάτων (Systems Engineering) & Εφαρμοσμένη Επιχειρησιακή Έρευνα και Ανάλυση (ΠΔ 96 & ΠΔ 97/2015/ΦΕΚ 163Α'/20.08.2014)	 ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
--	---	---

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ
ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ ΚΑΙ
ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΓΡΑΦΩΝ»

ΥΠΟ ΤΟΥ:

ΜΙΚΡΟΥΛΑΚΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

A.M: 2015018030

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος της «Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων» και του τμήματος «Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης» του Πολυτεχνείου Κρήτης. Με την ολοκλήρωση των σπουδών μου νιώθω ότι το μεγαλύτερο κέρδος που αποκόμισα, είναι ο διαφορετικός τρόπος σκέψης. Καθόλη την διάρκεια αυτής της εκπαιδευτικής πορείας απέκτησα πολύτιμες γνώσεις και ήρθα σε επαφή με άκρως ενδιαφέροντα αντικείμενα. Αλλά το βασικότερο είναι ότι με έκανε να αλλάξω τρόπο θεώρησης των προβλημάτων, να σκέφτομαι ορθά και να κάνω τεκμηριωμένες επιλογές. Στην διαδρομή αυτή δεν ήμουν μόνος. Είχα οδηγούς τους καθηγητές μου, που με άριστο επαγγελματισμό και κατανόηση μου έδειξαν τον δρόμο. Θα ήθελα να τους ευχαριστήσω όλους και καθένα ξεχωριστά για το έργο που επιτελούν στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν.

Ειδικότερα όσον αφορά στην συγκεκριμένη εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα από όλους θερμά και από τα βάθη της καρδιάς μου τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δεσσαλέρμο Σπυρίδων, ο οποίος με μύησε στον υπέροχο κόσμο της υποβρύχιας ακουστικής, μου πρόσφερε τις γνώσεις του χωρίς να φείδεται κόπου και χρόνου, με καθοδήγησε και μου συμπαραστάθηκε καθόλη την διάρκεια της συγγραφής. Μεγάλο μέρος της εργασίας στηρίζεται στην διδασκαλία του και στις προσωπικές του σημειώσεις, ενώ χωρίς την βοήθεια του θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της. Εξίσου θα ήθελα θερμά να ευχαριστήσω τον κ. Δάρα Νικόλαο. Από την στιγμή της εισαγωγής μου στο πρόγραμμα μέχρι και την ολοκλήρωση των σπουδών μου, το όραμα και το πάθος του αποτέλεσαν διαρκή παρακίνηση, στήριγμα και φάρο για την ολοκλήρωση αυτής της όμορφης αλλά δύσκολης διαδρομής. Θέρμες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω και στον κ. Ματσατσίνη Νικόλαο. Η διδασκαλία του και τα μαθήματα του, που αποτέλεσαν κυριο κορμό των μεταπτυχιακών μου σπουδών, με έκαναν να αντιμετωπίζω τα προβλήματα με άλλη οπτική γωνιά και με πιο δομημένο τρόπο σκέψης. Τέλος θα ήθελα και οφείλω να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου ανθρώπους για την αμέριστη και ειλικρινή στήριξη που μου παρείχαν στην επίτευξη του στόχου μου.

Στην μνήμη του πατέρα μου

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του κ. Μικρουλάκη Γεωργίου εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Πλωτάρχης Δεσσαλέρμος Σπυρίδων



Καθηγητής Δάρας Νικόλαος



Καθηγητής Ματσατσίνης Νικόλαος

Nikolaos
Matsatsi
nis

Digitally signed
by Nikolaos
Matsatsinis
Date:
2020.11.27
08:49:00 +02'00'

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1^ο: Θεωρία Ακουστικής

1.	Σύντομη Ιστορική Αναδρομή.....	14
2.	Ήχος.	16
2.1	Διάδοση Ήχου στο Νερό.	20
2.2	Ανάκλαση – Διέλευση – Διάθλαση.....	21
2.3	Νόμος του «SNELL».	22
2.4	Απώλειες Διάδοσης.	24
2.5	Θεωρία Ακτίνων.	27
3.	Θόρυβος.	28
3.1	Περιβαντολογικός Θόρυβος.	29
3.2	Αυτοθόρυβος.	29
3.2.1	Κατηγορίες Αυτοθορύβου.	31
4.	Συντελεστής SNR.	33
5.	Σύνοψη Κεφαλαίου.	33

Κεφάλαιο 2^ο : Επεξεργασία Ψηφιακού Σήματος

1.	Δειγματοληψία.....	35
1.2	Θεώρημα «NYQUIST» και «ALIASING».....	35
2.	Μετασχηματισμός «FOURIER».....	36
3.	Προσδιορισμός DOA.....	40
4.	Συστοιχίες Υδροφώνων.....	40
5.	Beam Forming.....	41
5.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο.	43
6.	Αλγόριθμος MUSIC.	48
6.1	Μαθηματικό Μοντέλο MUSIC.	49
7.	Σύνοψη Κεφαλαίου.	54

Κεφάλαιο 3: Ανθυποβρυχιακός Πόλεμος – Ηχοεντοπιστικά Συστήματα

1.	Εισαγωγή.	55
2.	Αρχές της Ανθυποβρυχιακής Δράσης.....	56
2.1	Ενεργητική και Παθητική Ανθυποβρυχιακή Δράση.....	57
3.	Ηχοεντοπιστικά Συστήματα.	58
4.	Παθητικά SONAR.	60
4.1.	Εξίσωση Παθητικού SONAR.	60
4.2	Τύποι Παθητικών SONAR.	61
5.	Σύνοψη Κεφαλαίου.	65

Κεφάλαιο 4^ο: Επιχειρησιακή Ανάλυση Αιγαίου

1.	Περιγραφή Αιγαίου Πελάγους–Γεωπολιτική Σημασία.....	67
2.	Επιχειρησιακή Ανάλυση.	69
2.1	Γεωγραφικά Στοιχεία - Βαθυθερμογραφικές Συνθήκες.....	70
2.1.1	Περιγραφή Λογισμικού «BELLHOP».....	74
2.2	Περιοχή 1 – Βόρειο Αιγαίο.	76
2.2.1	Γεωγραφικά Στοιχεία.....	76

2.2.2	Βαθυθερμογραφικές Συνθήκες.....	85
2.3	Περιοχή 2 – Νοτιοδυτικό Αιγαίο.....	92
2.3.1	Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά.....	92
2.3.2	Βαθυθερμογραφικές Συνθήκες.....	94
2.4	Περιοχή 3 – Κυκλαδες.....	101
2.4.1	Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά.....	101
2.4.2	Βαθυθερμογραφικές Συνθήκες.....	111
2.5	Περιοχή 4 – Νοτιοανατολικό Αιγαίο.....	118
2.5.1	Γεωγραφικά Στοιχεία.....	118
2.5.2	Βαθυθερμογραφικές Συνθήκες.....	131
3.	Σύνοψη Κεφαλαίου.....	137

Κεφάλαιο 5^ο: Προσομοίωση

1.	Ανάλυση Προσομοίωσης.....	139
2.	Α΄ Μέρος Προσομοίωσης: Απόσταση - Αριθμός Υδροφώνων.....	141
2.1	Προσομοίωση με Συστοιχία 8 Υδροφώνων.....	142
2.2	Προσομοίωση με Συστοιχία 16 Υδροφώνων.....	151
2.3	Συμπεράσματα.....	160
3.	Β΄ Μέρος Προσομοίωσης: Απόδοση σε Περιβάλλον Θορύβου.....	161
3.1	Προσομοίωση για SNR= -12dB.....	161
3.2	Προσομοίωση για SNR= -13dB.....	168
3.3	Συμπεράσματα.....	180
4.	Σύνοψη Κεφαλαίου.....	181

Κεφάλαιο 6^ο: Τοποθέτηση Συστοιχιών Υδροφώνων Στο Αιγαίο

1.	Εισαγωγή.....	183
2.	Δυνατότητα Επιτήρησης Αιγαίου με Συστοιχίες Υδροφώνων.....	184
3.	Τοποθέτηση Υδροφώνων.....	188
3.1	Προτεραιότητα Επιτήρησης.....	190
3.2	Δυνατότητα Επιτήρησης.....	192
3.3	Πολυκριτήριος Πίνακας.....	193
4.	Σύνοψη Κεφαλαίου.....	195

Κεφάλαιο 7^ο : Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία

1.	Συμπεράσματα.....	197
2.	Μελλοντική Εργασία.....	197

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1.1: Λίμνη Γένοβας - Πείραμα Μέτρησης Ταχύτητας Ήχου.....	15
Εικόνα 1.1.2: Υδρόφωνο.....	16
Εικόνα 1.2.1: Κατηγορίες Μηχανικών Κυμάτων.....	17
Εικόνα 1.2.2: Επίπεδο Κύμα.....	17
Εικόνα 1.2.3: Σφαιρικό Κύμα.....	17
Εικόνα 1.2.2.1:Καθετή Πρόσπτωση Ακουστικού Κύματος.....	21
Εικόνα 1.2.3.1:Προσπτωση Ακουστικού Κύματος υπό Γωνία.....	22
Εικόνα 1.2.3.2:Διάδοση Ακτίνων σε Μέσα με Διαφορετική Πυκνότητα.....	22
Εικόνα 1.2.3.3:Σκιερές Ζώνες.....	23
Εικόνα 1.2.3.4:Κρίσιμη Γωνία Πρόσπτωσης.....	23
Εικόνα 1.2.4.1:Σφαιρική Διάδοση.....	24
Εικόνα 1.2.4.2:Ημισφαιρική Διάδοση.....	25
Εικόνα 1.2.4.3:Κυλινδρική Διάδοση.....	25
Εικόνα 1.2.4.4:Μικτή Διάδοση.....	26
Εικόνα 1.2.5.1:Θεωρία «Ακτίνων».....	27
Εικόνα 1.3.2.1:Πηγες Αυτοθορύβου Υποβρυχίου.....	30
Εικόνα 2.1.2.1: Δειγματοληψία και Φαινόμενο «ALIASING».....	36
Εικόνα 2.2.1: Μετασχηματισμός «FOURIER».....	36
Εικόνα 2.3.1: Σχηματική Απεικόνιση Εύρεσης «DOA».....	40
Εικόνα 2.5.1.1: Σχηματική Απεικόνιση Συστοιχίας M – υδροφώνων.....	43
Εικόνα 2.6.1.1: Σχηματική Απεικόνιση Συστοιχίας M – υδροφώνων.....	50
Εικόνα 2.6.1.2: Σχηματικό διάγραμμα «MUSIC».....	53
Εικόνα 3.1.1: Βελτίωση Επιπέδου Θορύβου Υ/B ανά Δεκαετία.....	56
Εικόνα 3.3.1: Αρχή Λειτουργίας Ενεργητικού SONAR.....	59
Εικόνα 3.3.2: Αρχή λειτουργίας Παθητικού SONAR.....	59
Εικόνα 3.4.1.1:Σχηματικό Διάγραμμα Εξίσωσης Παθητικού SONAR.....	60
Εικόνα 3.4.2.1:Towed Array SONAR.....	61
Εικόνα 3.4.2.2:Flank Array SONAR.....	62
Εικόνα 3.4.2.3:ΡΙψη Ηχοσημαντήρων από ΑΦΝΕ.....	63
Εικόνα 3.4.2.4:Σύστημα Ανάλυσης Δεδομένων από Η/Σ.....	63
Εικόνα 3.4.2.5:Στατικό Σύστημα Επιτήρησης.....	64
Εικόνα 4.1.1: Ονομασία Πελάγων Ελλάδας.....	67
Εικόνα 4.1.2: Η Ελλάδα, χερσαίο και θαλάσσιο σταυροδρόμι.....	68
Εικόνα 4.2.1.1:Παραδειγμα Βαθυθερμογραφικής Παρατήρησης.....	71
Εικόνα 4.2.1.1.1: Παράδειγμα λογισμικού «BELLHOP».....	75
Εικόνα 4.2.1.1.2: Πεδία Εισαγωγής στο Λογισμικό «BELLHOP».....	75
Εικόνα 4.2.2.1: Ναυτιλιακή Κίνηση στο Βόρειο Αιγαίο (Π-1).....	76
Εικόνα 4.2.3.1: Ναυτιλιακή Κίνηση στο Νοτιοδυτικό Αιγαίο (Π-2).....	92
Εικόνα 4.2.4.1: Ναυτιλιακή Κίνηση στις Κυκλάδες (Π-3).....	101
Εικόνα 4.2.5.1: Ναυτιλιακή Κίνηση στο Νοτιοανατολικό Αιγαίο (Π-4).....	118
Εικόνα 6.2.1: Διάταξη Συστοιχιών σε Στενό.....	185
Εικόνα 6.3.1: Δράση – Άξονες Προτίμησης – Διαστάσεις – Κριτήρια.....	189

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.2.1.1:Επιδραση Θερμοκρασίας – Βάθους – Αλατότητας στην Ταχύτητα του Ήχου.....	20
Διάγραμμα 1.2.1.2:Επιδραση Θερμοκρασίας – Αλατότητας στην Ταχύτητα του Ήχου.....	20
Διάγραμμα 1.2.4.1: Συντελεστής Απορρόφησης.....	26
Διάγραμμα 1.2.5.1: Παράδειγμα Διάδοσης Ακτίνων Ήχου.....	28
Διάγραμμα 1.3.1.1: Θόρυβος Περιβάλλοντος.....	29
Διάγραμμα 1.3.2.1.1: Ακουστική Πίεση Ξυριστικής Μηχανής (0 – 7KHz).....	31
Διάγραμμα 1.3.2.1.2: Ακουστική Πίεση Ξυριστικής Μηχανής (0 – 800Hz).....	32
Διάγραμμα 1.3.2.1.3:Παραδειγμα Ακουστικής Πίεσης Αυτοθορύβου.....	33
Διάγραμμα 2.2.1:Ακουστικό σήμα διακριτού χρόνου ($T=1\text{sec}$).....	38
Διάγραμμα 2.2.2:Ακουστικό σήμα διακριτού χρόνου ($T=0,5\text{sec}$).....	38
Διάγραμμα 2.2.3: Ημιτονοειδές σήμα $S(t)$ με θόρυβο.....	39
Διάγραμμα 2.2.4: Ημιτονοειδές σήμα $S(f)$ με θόρυβο.....	39
Διάγραμμα 2.5.1: Κύριος λοβός συστοιχίας 8 υδροφώνων.....	41
Διάγραμμα 2.5.2: Κύριος λοβός συστοιχίας 16 υδροφώνων.....	42
Διάγραμμα 2.5.3: Κύριος λοβός συστοιχίας 32 υδροφώνων.....	42
Διάγραμμα 2.5.1.1:Περιστροφή κύριου λοβού (45°).....	45
Διάγραμμα 2.5.5: Δευτερεύοντες λοβοί.....	45
Διάγραμμα 2.5.6: Κύριος λοβός συστοιχίας για $d \leq \lambda/2$	46
Διάγραμμα 2.5.7: Περιστροφή κύριου λοβού συστοιχίας (45°) για $d \leq \lambda/2$	47
Διάγραμμα 2.5.8: Κύριος λοβός συστοιχίας για $d \geq \lambda/2$	47
Διάγραμμα 2.5.9: Περιστροφή κύριου λοβού συστοιχίας (45°) για $d \geq \lambda/2$	48
Διάγραμμα 4.2.1.1:SSP.....	72
Διάγραμμα 4.2.1.2:Παραδειγμα υπολογισμού διάδοσης ακτίνων.....	72
Διάγραμμα 4.2.1.3:Παραδειγμα υπολογισμού απωλειών.....	73
Διάγραμμα 4.2.2.2.1: SSP το Φθινόπωρο σε Π-1.....	85
Διάγραμμα 4.2.2.2.2: Διάδοση ακτίνων το Φθινόπωρο σε Π-1.....	85
Διάγραμμα 4.2.2.2.3 Απώλειες διάδοσης το Φθινόπωρο σε Π-1.....	86
Διάγραμμα 4.2.2.2.4: SSP το Χειμώνα σε Π-1.....	86
Διάγραμμα 4.2.2.2.5: Διάδοση ακτίνων το Χειμώνα σε Π-1.....	87
Διάγραμμα 4.2.2.2.6: Απώλειες διάδοσης το Χειμώνα σε Π-1.....	87
Διάγραμμα 4.2.2.2.7: SSP την Άνοιξη σε Π-1.....	88
Διάγραμμα 4.2.2.2.8:Διάδοση ακτίνων την Άνοιξη σε Π-1.....	88
Διάγραμμα 4.2.2.2.9:Απώλειες Διάδοσης Άνοιξη σε Π-1.....	89
Διάγραμμα 4.2.2.2.10:SSP το Καλοκαίρι σε Π-1.....	89
Διάγραμμα 4.2.2.2.11:Διάδοση ακτίνων το Καλοκαίρι σε Π-1.....	90
Διάγραμμα 4.2.2.2.12:Απώλειες διάδοσης το Καλοκαίρι σε Π-1.....	90
Διάγραμμα 4.2.3.2.1: SSP το Φθινόπωρο σε Π-2.....	94
Διάγραμμα 4.2.3.2.2: Διάδοση ακτίνων το Φθινόπωρο σε Π-2.....	95
Διάγραμμα 4.2.3.2.3: Απώλειες διάδοσης το Φθινόπωρο σε Π-2.....	95
Διάγραμμα 4.2.3.2.4: SSP το Χειμώνα σε Π-2.....	96
Διάγραμμα 4.2.3.2.5: Διάδοση ακτίνων το Χειμώνα σε Π-2.....	96
Διάγραμμα 4.2.3.2.6: Απώλειες διάδοσης το Χειμώνα σε Π-2.....	97
Διάγραμμα 4.2.3.2.7: SSP την Άνοιξη σε Π-2.....	97
Διάγραμμα 4.2.3.2.8: Διάδοση ακτίνων την Άνοιξη σε Π-2.....	98

Διάγραμμα 4.2.3.2.9: Απώλειες Διάδοσης Άνοιξη σε Π-2.....	98
Διάγραμμα 4.2.3.2.10: SSP το Καλοκαίρι σε Π-2.....	99
Διάγραμμα 4.2.3.2.11: Διάδοση ακτίνων το Καλοκαίρι σε Π-2.....	99
Διάγραμμα 4.2.3.2.12: Απώλειες διάδοσης το Καλοκαίρι σε Π-2.....	100
Διάγραμμα 4.2.4.2.1: SSP το Φθινόπωρο σε Π-3.....	111
Διάγραμμα 4.2.4.2.2: Διάδοση ακτίνων το Φθινόπωρο σε Π-3.....	111
Διάγραμμα 4.2.4.2.3: Απώλειες διάδοσης το Φθινόπωρο σε Π-3.....	112
Διάγραμμα 4.2.4.2.4: SSP το Χειμώνα σε Π-3.....	112
Διάγραμμα 4.2.4.2.5: Διάδοση ακτίνων το Χειμώνα σε Π-3.....	113
Διάγραμμα 4.2.4.2.6: Απώλειες διάδοσης το Χειμώνα σε Π-3.....	113
Διάγραμμα 4.2.4.2.7: SSP την Άνοιξη σε Π-3.....	114
Διάγραμμα 4.2.4.2.8: Διάδοση ακτίνων την Άνοιξη σε Π-3.....	114
Διάγραμμα 4.2.4.2.9: Απώλειες Διάδοσης Άνοιξη σε Π-3.....	115
Διάγραμμα 4.2.4.2.10: SSP το Καλοκαίρι σε Π-3.....	115
Διάγραμμα 4.2.4.2.11: Διάδοση ακτίνων το Καλοκαίρι σε Π-3.....	116
Διάγραμμα 4.2.4.2.12: Απώλειες διάδοσης το Καλοκαίρι σε Π-3.....	116
Διάγραμμα 4.2.5.2.1: SSP το Φθινόπωρο σε Π-4.....	131
Διάγραμμα 4.2.5.2.2: Διάδοση ακτίνων το Φθινόπωρο σε Π-4.....	131
Διάγραμμα 4.2.5.2.3: Απώλειες διάδοσης το Φθινόπωρο σε Π-4.....	132
Διάγραμμα 4.2.5.2.4: SSP το Χειμώνα σε Π-4.....	132
Διάγραμμα 4.2.5.2.5: Διάδοση ακτίνων το Χειμώνα σε Π-4.....	133
Διάγραμμα 4.2.5.2.6: Απώλειες διάδοσης το Χειμώνα σε Π-4.....	133
Διάγραμμα 4.2.5.2.7: SSP την Άνοιξη σε Π-4.....	134
Διάγραμμα 4.2.5.2.8: Διάδοση ακτίνων την Άνοιξη σε Π-4.....	134
Διάγραμμα 4.2.5.2.9: Απώλειες Διάδοσης Άνοιξη σε Π-4.....	135
Διάγραμμα 4.2.5.2.10: SSP το Καλοκαίρι σε Π-4.....	135
Διάγραμμα 4.2.5.2.11: Διάδοση ακτίνων το Καλοκαίρι σε Π-4.....	136
Διάγραμμα 4.2.5.2.12: Απώλειες διάδοσης το Καλοκαίρι σε Π-4.....	136
Διάγραμμα 5.2.1.1: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:8,d=0.25-1.....	142
Διάγραμμα 5.2.1.2: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:8,d=0.25-1.....	142
Διάγραμμα 5.2.1.3: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:8,d=0.25-2.....	143
Διάγραμμα 5.2.1.4: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:8,d=0.25-2.....	143
Διάγραμμα 5.2.1.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	144
Διάγραμμα 5.2.1.6: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:8-d=0.5-1.....	145
Διάγραμμα 5.2.1.7: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:8,d=0.5-2.....	145
Διάγραμμα 5.2.1.8: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:8,d=0.5-2.....	146
Διάγραμμα 5.2.1.9: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:8,d=0.5-2.....	146
Διάγραμμα 5.2.1.10: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	147
Διάγραμμα 5.2.1.11: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:8,d=0.75-1.....	148
Διάγραμμα 5.2.1.12: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:8,d=0.75-1.....	148
Διάγραμμα 5.2.1.13: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:8,d=0.75-2.....	149
Διάγραμμα 5.2.1.14: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:8,d=0.75-2.....	149
Διάγραμμα 5.2.1.15: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	150
Διάγραμμα 5.2.2.1: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.25-1.....	151
Διάγραμμα 5.2.2.2: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.25-1.....	151
Διάγραμμα 5.2.2.3: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.25-2.....	152
Διάγραμμα 5.2.2.4: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.25-2.....	152
Διάγραμμα 5.2.2.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	153
Διάγραμμα 5.2.2.6: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16-d=0.5-1.....	154
Διάγραμμα 5.2.2.7: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.5-2.....	154

Διάγραμμα 5.2.2.8: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.5-2.....	155
Διάγραμμα 5.2.2.9: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.5-2.....	155
Διάγραμμα 5.2.2.10: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	156
Διάγραμμα 5.2.2.11: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-1.....	157
Διάγραμμα 5.2.2.12: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-1.....	157
Διάγραμμα 5.2.2.13: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-2.....	158
Διάγραμμα 5.2.2.14: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-2.....	158
Διάγραμμα 5.2.2.15: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	159
Διάγραμμα 5.3.1.1: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.5-1.....	161
Διάγραμμα 5.3.1.2: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.5-1.....	161
Διάγραμμα 5.3.1.3: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.5-2.....	162
Διάγραμμα 5.3.1.4: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.5-2.....	162
Διάγραμμα 5.3.1.5: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	163
Διάγραμμα 5.3.1.6: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-1.....	164
Διάγραμμα 5.3.1.7: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-1.....	164
Διάγραμμα 5.3.1.8: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-2.....	165
Διάγραμμα 5.3.1.9: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-2.....	165
Διάγραμμα 5.3.1.10: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-3.....	166
Διάγραμμα 5.3.1.11: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-3.....	166
Διάγραμμα 5.3.1.12: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	167
Διάγραμμα 5.3.2.1: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.5-1.....	168
Διάγραμμα 5.3.2.2: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.5-1.....	168
Διάγραμμα 5.3.2.3: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.5-2.....	169
Διάγραμμα 5.3.2.4: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.5-2.....	169
Διάγραμμα 5.3.2.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	170
Διάγραμμα 5.3.2.6: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-1.....	171
Διάγραμμα 5.3.2.7: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-1.....	171
Διάγραμμα 5.3.2.8: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-2.....	172
Διάγραμμα 5.3.2.9: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:16,d=0.75-2.....	172
Διάγραμμα 5.3.2.10: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	173
Διάγραμμα 5.3.2.11: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:32,d=0.5-1.....	174
Διάγραμμα 5.3.2.12: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:32,d=0.5-1.....	174
Διάγραμμα 5.3.2.13: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:32,d=0.5-2.....	175
Διάγραμμα 5.3.2.14: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:32,d=0.5-2.....	175
Διάγραμμα 5.3.2.15: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	176
Διάγραμμα 5.3.2.16: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:32,d=0.75-1.....	177
Διάγραμμα 5.3.2.17: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:32,d=0.75-2.....	177
Διάγραμμα 5.3.2.18: Προσομοίωση (B), Αρ.Υδροφ:32,d=0.75-2.....	178
Διάγραμμα 5.3.2.19: Προσομοίωση (M), Αρ.Υδροφ:32,d=0.75-2.....	178
Διάγραμμα 5.3.2.20: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Συμπεράσματα.....	179

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 4.2.1: Χάρτης Αιγαίου Πελάγους.....	69
Χάρτης 4.2.2.1.1:Στενό Σαμοθρακής-Αλεξανδρουπόλης.....	76
Χάρτης 4.2.2.1.2:Περιοχή Σκύρου – Ψαρών.....	77
Χάρτης 4.2.2.1.3:Στενό Αλόνησου-1.....	77
Χάρτης 4.2.2.1.4:Στενό Αλόνησου – 2.....	78
Χάρτης 4.2.2.1.5:Στενό Βόλου – Εύβοιας.....	78
Χάρτης 4.2.2.1.6:Στενό Λήμνου.....	79
Χάρτης 4.2.2.1.7:Στενό Σαμοθράκης.....	79
Χάρτης 4.2.2.1.8: Στενό Ψαρών – Αντίψαρων.....	80
Χάρτης 4.2.2.1.9: Στενό Ψαρών – Χίου.....	80
Χάρτης 4.2.2.1.10:Περιοχή Σκύρου – Εύβοιας.....	81
Χάρτης 4.2.2.1.11: Στενό Σκυρού – Σποραδών.....	81
Χάρτης 4.2.2.1.12: Στενό Λέσβου - 1.....	82
Χάρτης 4.2.2.1.13: Στενά Λέσβου - 2.....	82
Χάρτης 4.2.2.1.14: Θερμαϊκός Κόλπος.....	83
Χάρτης 4.2.2.1.15:Σκιάθου – Αλοννήσου.....	83
Χάρτης 4.2.3.1.1:Στενό Αντικυθήρων.....	92
Χάρτης 4.2.3.1.2:Στενό Κυθήρων.....	93
Χάρτης 4.2.3.1.3:Στενό Κυθήρων – Ελαφώνησος.....	93
Χάρτης 4.2.4.1.1:Στενό Νάξου – Μυκόνου.....	101
Χάρτης 4.2.4.1.2 Στενό Κυθνου.....	102
Χάρτης 4.2.4.1.3:Στενό Κιμώλου.....	102
Χάρτης 4.2.4.1.4:Στενό Κουφονησια – Ναξος.....	103
Χάρτης 4.2.4.1.5:Στενό Κέρου – Κουφονήσια.....	103
Χάρτης 4.2.4.1.6:Στενό Κερου – Αντικερου.....	104
Χάρτης 4.2.4.1.7:Στενό Αντικερου – Αμοργού.....	104
Χάρτης 4.2.4.1.8:Στενό Σερίφου.....	105
Χάρτης 4.2.4.1.9: Στενό Μακρονήσου – Κεας.....	105
Χάρτης 4.2.4.1.10:Στενό Πολυαίγου – Φολεγάνδρου.....	106
Χάρτης 4.2.4.1.11: Στενό Σίφνου.....	106
Χάρτης 4.2.4.1.12:Στενό Σίκινου – Ίου.....	107
Χάρτης 4.2.4.1.13: Στενό Σαντορίνης – Ανάφης.....	107
Χάρτης 4.2.4.1.14:Στενό Μυκόνου – Τήνου.....	108
Χάρτης 4.2.4.1.16:Στενό Καφηρέα.....	108
Χάρτης 4.2.4.1.17:Στενό Γυάρου – Τήνου.....	109
Χάρτης 4.2.4.1.18:Στενό Γυάρου – Κέας.....	109
Χάρτης 4.2.5.1.1:Στενό Αγαθονησίου – Τουρκίας.....	118
Χάρτης 4.2.5.1.2:Στενό Αμοργού – Κίναρου.....	119
Χάρτης 4.2.5.1.3:Στενό Ανάφης – Αστυπάλαιας.....	119
Χάρτης 4.2.5.1.4:Στενό Αρκών – Αγαθονησίου.....	120
Χάρτης 4.2.5.1.5:Στενό Ικαρίας – Σάμου.....	120
Χάρτης 4.2.5.1.6:Στενό Ικαρίας – Θυμαίνας.....	121
Χάρτης 4.2.5.1.7:Στενό Καρπάθου.....	121
Χάρτης 4.2.5.1.8:Στενό Κάσου – Καρπάθου.....	122
Χάρτης 4.2.5.1.9:Στενό Κρήτης – Κάσου.....	122
Χάρτης 4.2.5.1.10:Στενό Κω – Τουρκίας.....	123
Χάρτης 4.2.5.1.11:Στενό Λέρου – Καλύμνου.....	123
Χάρτης 4.2.5.1.12:Στενό Λέρου – Λειψών.....	124

Χάρτης 4.2.5.1.13 Στενό Νισύρου – Κω.....	124
Χάρτης 4.2.5.1.14:Στενό Νισύρου – Τήλου.....	125
Χάρτης 4.2.5.1.15:Στενό Ρόδου – Τουρκίας.....	125
Χάρτης 4.2.5.1.16:Στενό Σάμου – Αγαθονησίου.....	126
Χάρτης 4.2.5.1.17:Στενό Σύμης – Τουρκίας.....	126
Χάρτης 4.2.5.1.18:Στενό Τήλου – Χάλκης.....	127
Χάρτης 4.2.5.1.19:Στενό Φαρμακονησίου – Τουρκίας.....	127
Χάρτης 4.2.5.1.20:Στενό Φούρνων – Σάμου.....	128
Χάρτης 4.2.5.1.21:Στενό Ψέριμου – Καλύμνου.....	128
Χάρτης 4.2.5.1.22:Στενό Ψέριμου – Κω.....	129
Χάρτης 6.3.1.1: Χωρικά Ύδατα Ελλάδας.....	190
Χάρτης 6.3.3.1:Διάταξη Υδροφώνων στο Αιγαίο.....	194

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.2.2.1.1: Συγκεντρωτικά Γεωγραφικά Στοιχεία Π-1.....	84
Πίνακας 4.2.2.2.2: Μέγιστες - Μ.Ο Απωλειών Διάδοσης Π-1.....	91
Πίνακας 4.2.3.1.1: Συγκεντρωτικά Γεωγραφικά Στοιχεία Π-2.....	94
Πίνακας 4.2.3.2.2: Μέγιστες - Μ.Ο Απωλειών Διάδοσης Π-2.....	100
Πίνακας 4.2.4.1.1:Συγκεντρωτικά Γεωγραφικά Στοιχεία Π-3.....	110
Πίνακας 4.2.4.2.1:Μέγιστες - Μ.Ο Απωλειών Διάδοσης Π-3.....	117
Πίνακας 4.2.5.1.1:Συγκεντρωτικά Γεωγραφικά Στοιχεία Π-4.....	130
Πίνακας 4.2.5.2.1:Μέγιστες- Μ.Ο Απωλειών Διάδοσης Π-4.....	137
Πίνακας 5.2.3.1:Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Α'Μέρους Προσομοίωσης.....	160
Πίνακας 5.3.3.1:Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Β'Μέρους Προσομοίωσης.....	180
Πίνακας 6.1.1:Επίπεδο Θορύβου Υ/Β ΗΠΑ – Ρωσίας.....	184
Πίνακας 6.1.2: Επίπεδο Θορύβου Υποβρυχίου.....	185
Πίνακας 6.1.3:Ποσοστα Κάλυψης Στενών.....	187
Πίνακας 6.2.1.1:Επιχειρησιακή Χρησιμότητα - Κλίμακα Μέτρησης.....	192
Πίνακας 6.2.2.1:Μορφολογία Βυθού - Κλίμακα Μέτρησης.....	192
Πίνακας 6.2.2.2:Ικανοποιητική Κάλυψη – Κλίμακα Μέτρησης.....	192
Πίνακας 6.2.3.1: Πολυκριτήριος Πίνακας Κατάταξης Στενών.....	193

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

AΦΝΕ:	Αεροσκάφη Ναυτικών Επιχειρήσεων
ΠΕΠ:	Παράνομα Εισερχόμενα Πρόσωπα
ΣΔΝ:	Στενά Διεθνούς Ναυσιπλοΐας
ASW:	Anti-Submarine Warfare
ASuW:	Anti-Surface Warfare
ASDIC:	Anti-Submarine Detection Investigation Committee
ATP:	Allied Tactical Publications
DOA:	Direction Of Arrival
DCL:	Detect, Classify, Localize
DFT:	Discrete Fourier Transform
FFT:	Fast Fourier Transform
FOM:	Figure Of Merit
ISR:	Identification Surveillance Reconnaissance
MUSIC:	MUltiple Signal Classification
PL:	Propagation Loss
PSR:	Predicted Sonar Range
RMP:	Real Maritime Picture
SONAR:	SOund NAvigation and Ranging
SOF:	Special Operations Forces
STW:	Strike Warfare
UWB:	Under Water Battlespace
TL:	Transmition Loss

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Διατριβή έχει ως θέμα την εφαρμογή των σύγχρονων μεθόδων στατιστικής επεξεργασίας ακουστικών σημάτων που λαμβάνονται από μια παθητική συστοιχία υδροφώνων στη θάλασσα με σκοπό τον εντοπισμό ακουστικών υπογραφών και την διερεύνηση της δυνατότητας ανάπτυξης ενός αξιόπιστου συστήματος υποθαλάσσιας επιτήρησης στην περιοχή του Αιγαίου.

Στο Κεφάλαιο 1^ο αναλύονται οι βασικές αρχές διάδοσης ακουστικών κυμάτων στη θάλασσα και των φαινομένων που την επηρεάζουν. Ο ήχος αποτελεί το μοναδικό μέσο για την έρευνα στόχων κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας οπότε η γνώση του αποτελεί την βάση για την κατανόηση των θεμάτων που πραγματεύεται η παρούσα διατριβή.

Στο Κεφάλαιο 2^ο αναπτύσσονται οι βασικότερες θεωρίες και τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων. Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζεται ο αλγόριθμος υψηλής ανάλυσης «MUSIC» που θα εφαρμοστεί για τον παθητικό εντοπισμό ακουστικών «υπογραφών» στο υποθαλάσσιο πεδίο.

Στο Κεφάλαιο 3^ο γίνεται μια εισαγωγή στον Ανθυποβρυχιακό Πόλεμο ώστε να γίνει κατανοητή η αναγκαιότητα κυριαρχίας στο υποθαλάσσιο πεδίο επιχειρήσεων και η συμβολή των ηχοεντοπιστικών συστημάτων σε αυτό τον σκοπό. Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας τους, με έμφαση στα παθητικά συστήματα, καθώς και οι κύριες κατηγορίες αυτών.

Στο Κεφάλαιο 4^ο γίνεται επιχειρησιακή ανάλυση της γεωγραφικών και των βαθυθερμογραφικών συνθήκων του Αιγαίου Πελάγους ώστε να προσδιοριστεί κατά ποσό επηρεάζει η μορφολογία του βυθού την διάδοση των ακουστικών σημάτων και να υπολογιστούν οι απώλειες της ακουστικής έντασης συναρτήσει της απόστασης.

Στο Κεφάλαιο 5^ο εφαρμόζεται ο αλγόριθμος «MUSIC» σε περιβάλλον προσομοίωσης, παρατίθενται τα ευρήματα, τεκμηριώνονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

Στο Κεφάλαιο 6^ο αξιοποιούνται τα αποτελέσματα της επιχειρησιακής ανάλυσης του Αιγαίου και της εφαρμογής του αλγόριθμου «MUSIC» προκειμένου να διαπιστωθεί η δυνατότητα και τα οφέλη ανάπτυξης ενός υποθαλάσσιου συστήματος επιτήρησης στο Αιγαίο από παθητικές συστοιχίες υδροφώνων.

Κεφάλαιο 1^ο : Θεωρία Ακουστικής

§ 1. Σύντομη Ιστορική Αναδρομή

Ο ήχος διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην ανθρώπινη ύπαρξη από την αρχή της δημιουργίας της, είτε ως μέσο επικοινωνίας είτε με την μορφή της μουσικής. Ωστόσο σαν φυσικό φαινόμενο απασχόλησε τον ανθρώπινο νου αρκετά αργότερα. Ο πρώτος που ασχολήθηκε με την μελέτη της ακουστικής ήταν ο Πυθαγόρας¹, ο οποίος συσχέτισε τον ήχο που παράγει μια τεντωμένη χορδή με το μήκος της. Στην συνέχεια ο Αριστοτέλης² το 350 π.Χ εκτέλεσε μελέτες που σχετίζονταν με τον ήχο και την διάδοση του, τις οποίες αποτύπωσε στις «Πραγματείες περί Φυσικής»³.

Ωστόσο σοβαρή ενασχόληση με την ακουστική δεν παρατηρείται έως την εποχή της Αναγέννησης. Τον 15^ο αιώνα ο Leonardo da Vinci⁴ γράφει:

«Αν σταματήσεις το πλοίο σου και βάλεις την άκρη μιας σωλήνας μέσα στο νερό και την άλλη της άκρη στο αυτί σου, τότε θα ακούσεις πλοία από πολύ μακριά»

Αυτή η φράση αποτελεί την πρώτη δήλωση περί παθητικού εντοπισμού στην θάλασσα. Τον 16^ο αιώνα ο Mersenne⁵ έγραψε το «*Traiti d' Harmonie Universelle*» και ήταν ο πρώτος που μέτρησε την ταχύτητα του ήχου στον αέρα. Τον 17^ο αιώνα η θεωρία του «*Huygens–Fresnel*»⁶ περί διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εφαρμόστηκε και στον ήχο. Το 1827 ο Chladni⁷ προσδιόρισε την ταχύτητα του ήχου αξιοποιώντας τις δονήσεις από μεταλλικές ράβδους, ενώ τον ίδιο χρόνο ένας Ελβετός φυσικός ο Daniel Colladon⁸ και ο Γάλλος μαθηματικός Charles Francois Sturm⁹

¹ Πυθαγόρας ο Σάμιος (580-496 π.Χ.): Σημαντικός Έλληνας φιλόσοφος, μαθηματικός, γεωμέτρης και θεωρητικός της μουσικής.

² Αριστοτέλης (384 π.Χ. - 322 π.Χ.): Αρχαίος Έλληνας φιλόσοφος και επιστήμονας. Η σκέψη και οι διδασκαλίες του, που συνοπτικά περιγράφονται με τον όρο Αριστοτελισμός, επηρέασαν για αιώνες τη φιλοσοφική, θεολογική και επιστημονική σκέψη έως και τον ύστερο Μεσαίωνα.

³ Τα «Φυσικά» ή «Φυσικής Ακροάσεως» είναι η πραγματεία του Αριστοτέλη, ένα από τα θεμελιώδη έργα της Δυτικής επιστήμης και φιλοσοφίας.[2]

⁴ Leonardo da Vinci (1452 - 1519): Ιταλός πολυμαθής της Αναγέννησης. Ασχολήθηκε με τις εφευρέσεις, τη ζωγραφική, τη γλυπτική, την αρχιτεκτονική, την επιστήμη, τη μουσική, τα μαθηματικά, την εφαρμοσμένη μηχανική, τη λογοτεχνία, την ανατομία, τη γεωλογία, την αστρονομία, τη βοτανική, τη συγγραφή, την ιστορία καθώς και τη χαρτογραφία.

⁵ Marin Mersenne (1588-1648), Γάλλος φιλόσοφος, θεολόγος και μαθηματικός, που θεωρείται «πατέρας της ακουστικής».

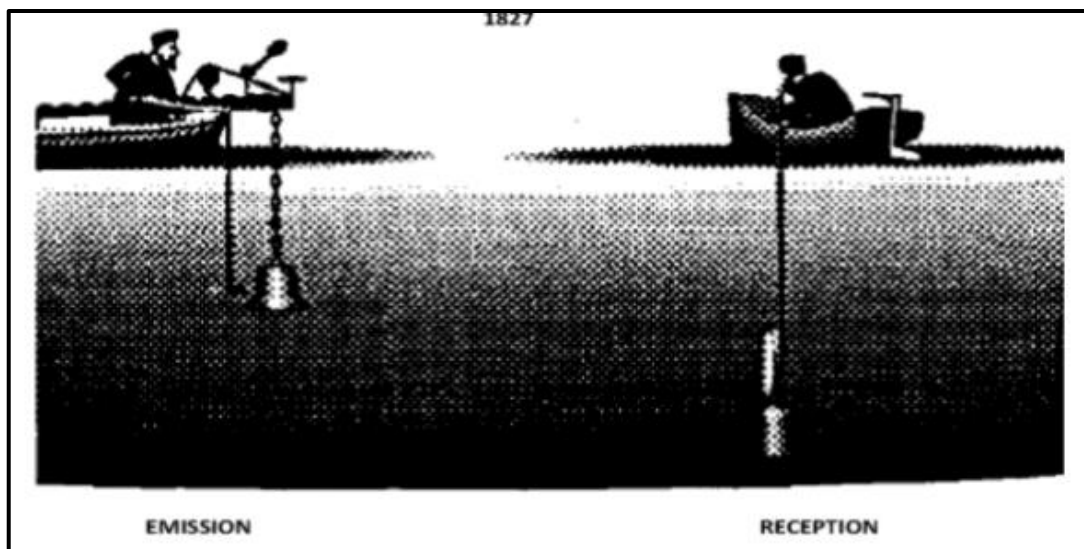
⁶ Μέθοδος ανάλυσης που εφαρμόζεται σε προβλήματα διάδοσης κυμάτων. Υποστηρίζει ότι κάθε σημείο σε ένα κύμα αποτελεί πηγή σφαιρικών κυμάτων και τα δευτερεύοντα αυτά κύματα που προέρχονται από διαφορετικά σημεία αλληλοεπηρεάζονται. Το άθροισμα αυτών των σφαιρικών κυμάτων σχηματίζει το τελικό κύμα.

⁷ Ernst Florens Friedrich Chladni (1756 – 1827): Γερμανός φυσικός και μουσικός. Το πιο σημαντικό του έργο αφορά στην έρευνα για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ήχου μέσω διαφορών αερίων.

⁸ Jean-Daniel Colladon (1802-1893): Ελβετός Φυσικός. Σπούδασε νομικά αλλά στη συνέχεια εργάστηκε στα εργαστήρια του Ampere και του Fourier.

⁹ Charles Francois Sturm (1803 – 1855): Γάλλος μαθηματικός βραβευμένος με το μετάλλιο «Copley» που απονέμεται από την «Royal Society» της Αγγλίας για εξαιρετικά επιτεύγματα στην έρευνα σε οποιοδήποτε τομέα των επιστημών.

εκτέλεσαν στην λίμνη της Γένοβας τις πρώτες μετρήσεις της ταχύτητας του ήχου στο νερό (εικόνα 1.1.1), με το αποτέλεσμα να είναι 1435m/sec. Το 1887 εκδόθηκε το «*Theory of Sound*» του Lord Rayleigh¹⁰ το οποίο αποτελεί, μέχρι και σήμερα, την βάση της επιστήμης της ακουστικής.



Εικόνα 1.1.1

Μετα από πολλούς αιώνες αργής προόδου, αυτό που έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη της ακουστικής ήταν ένα δυστύχημα. Την νύχτα της 14^{ης} προς 15^{ης} Απριλίου 1912, το καμάρι της τότε ναυπηγικής, ο «αβύθιστος Τιτανικός» χάθηκε στα νερά του Ατλαντικού αφού συγκρούστηκε με ένα σχεδόν βυθισμένο παγόβουνο, παίρνοντας στον υγρό τάφο του εκατοντάδες ανθρώπους. Το συμβάν αυτό αποτέλεσε την αφετηρία για επισταμένες μελέτες και έρευνες προκειμένου να κατασκευαστεί ένα σύστημα εγκαίρου εντοπισμού τους. Η πρώτη επιτυχία σημειώθηκε το 1914 στην Αμερική από τον Fessenden¹¹, ο οποίος εντόπισε παγόβουνο με την χρήση ενός μεγαφώνου σε απόσταση περί των 2 ναυτικών μιλίων. Δεν χρειάστηκε πολύς καιρός, ιδίως εκείνη την εποχή του Α' Παγκοσμίου Πολέμου, ώστε να γίνει αντιληπτό ότι με τον ίδιο τρόπο θα μπορούσαν να εντοπιστούν και υποβρύχια.

Για πολλές δεκαετίες πρωτεύων στόχος των ερευνητών στο υποθαλάσσιο πεδίο αποτέλεσε η ανάπτυξη αποτελεσματικών εντοπιστικών συσκευών αξιοποιώντας τον «πιεζοηλεκτρισμό», δηλαδή την μετατροπή του ακουστικού σήματος σε ηλεκτρικό. Ο Paul Langevin¹² ήταν ο πρώτος που επισήμανε την σημασία αυτού του φαινομένου για την υποβρύχια ακουστική το 1917. Η συσκευή με την οποία μετατρέπεται η ακουστική ενέργεια σε ηλεκτρική ονομάστηκε «υδρόφωνο» (εικόνα 1.1.2) και μέσω αυτής τα

¹⁰ John William Strutt Rayleigh (1842 – 1919): Άγγλος φυσικός, ο οποίος μαζί με τον Ουίλιαμ Ράμσεϊ ανακάλυψαν το χημικό στοιχείο «Αργό (Ar)», ανακάλυψη για την οποία τιμήθηκε με το Βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1904.

¹¹ Reginald Aubrey Fessenden (1866 – 1932): Καναδός εφευρέτης με εκατοντάδες πατέντες που αφορούσαν στην διάδοση ραδιοκυμάτων και στο SONAR.

¹² Paul Langevin (1872 – 1946): Σημαντικός Γάλλος φυσικός ο οποίος κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο εργάστηκε στη αξιοποίηση των υπερήχων για την ανίχνευση υποβρυχίων.

ακουστικά κύματα μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία στην συνέχεια υπόκεινται σε κατάλληλη ψηφιακή επεξεργασία με σκοπό την αποκάλυψη στόχων ενδιαφέροντος.



Εικόνα 1.1.2

Τα δυο πρώτα ενεργητικά συστήματα που αναπτύχθηκαν το 1918, από Άγγλους και Αμερικάνους, μπορούσαν να εντοπίσουν υποβρύχιο περί τα 1500μ. Το βρετανικό ονομάστηκε ASDIC (Anti-Submarine Detection Investigation Committee) και το αντίστοιχο αμερικανικό SONAR (SOUND Navigation and Ranging), όρος που έχει επικρατήσει έως σήμερα.

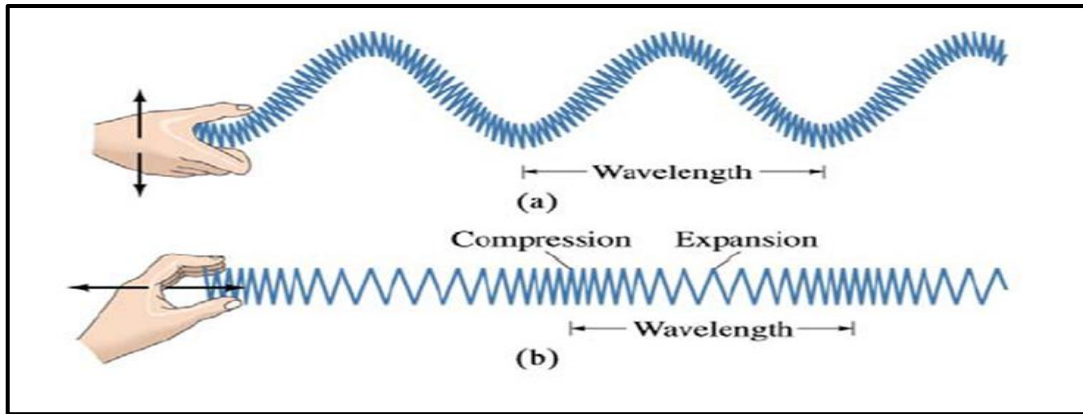
Στην σύγχρονη εποχή η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος έχει στρέψει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στην ανάπτυξη αλγορίθμων για την καλύτερη ψηφιακή επεξεργασία των σημάτων, προκειμένου να κατασκευαστούν αποτελεσματικότερες ηχοεντοπιστικές συσκευές.

§ 2. Ήχος

Από φυσικής άποψης ο ήχος σε ένα ρευστό είναι μια διαταραχή της πίεσης και της πυκνότητας του μέσου από την κατάσταση της ισορροπίας, η οποία διαδίδεται ως ένα μηχανικό κύμα. Οι διαταραχές της πίεσης συνοδεύονται από κίνηση των μορίων του ρευστού από την θέση ισορροπίας κατά μήκος της διάδοσης του κύματος.

Τα μηχανικά κύματα διακρίνονται σε δυο κατηγορίες (εικόνα 1.2.1):

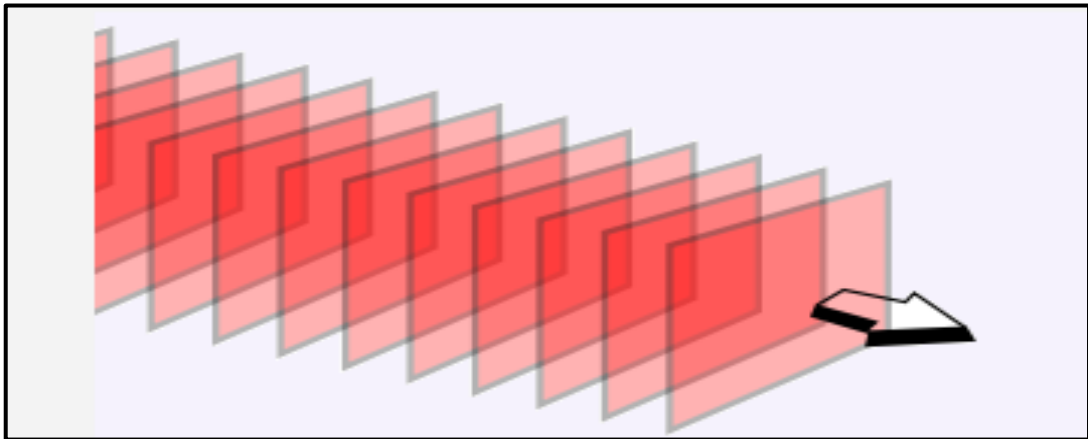
- α. Τα εγκάρσια (κύματα ταλάντωσης).
- β. Τα διαμήκη (κύματα πίεσης).



Εικόνα 1.2.1

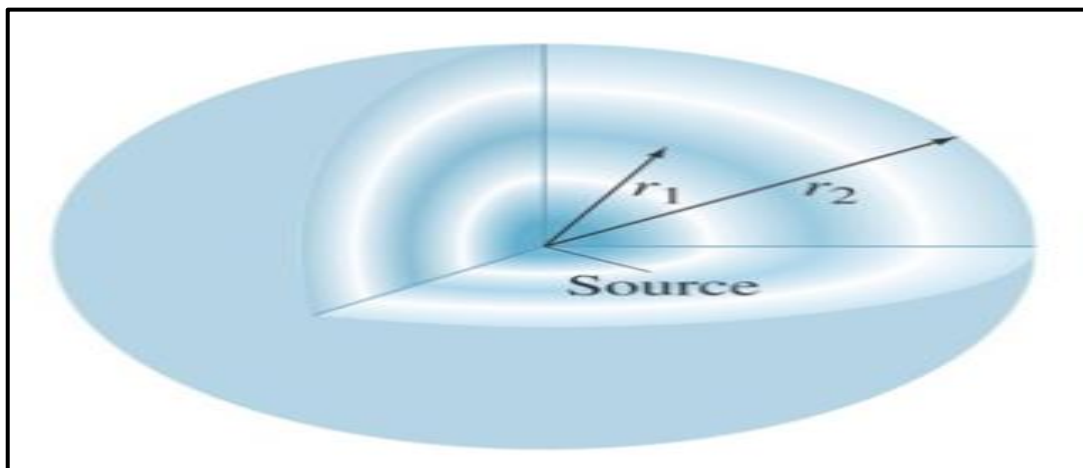
Ο ήχος ανήκει στην δεύτερη κατηγορία. Είναι ένα διάμηκες μηχανικό κύμα. Η διάδοση του στο μέσο γίνεται με δυο τρόπους (εικόνα 1.2.2):

α. Ως επίπεδο κύμα.



Εικόνα 1.2.2

β. Ως σφαιρικό κύμα.



Εικόνα 1.2.3

Σε περίπτωση μεγάλων αποστάσεων η διάδοση ενός κύματος που διαδίδεται σφαιρικά μπορεί να μελετηθεί ως επίπεδο κύμα.

Το σημαντικότερα μεγέθη στην ακουστική είναι:

α. Η «ακουστική πίεση P », η οποία ορίζεται ως ακολούθως:

(1) Για τα επίπεδα κύματα:

$$\delta p(x, t) = \delta p_0 \cos(\omega t - kx) \text{ ή } \delta p(x, t) = \delta p_0 e^{j(\omega t - kx)} \quad (1.2.1)$$

(2) Για τα σφαιρικά κύματα:

$$\delta p(r, t) = \frac{\delta p_0}{r} \cos(\omega t - kr) \text{ ή } \delta p(r, t) = \frac{\delta p_0}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1.2.2)$$

όπου δp_0 το μέτρο της πίεσης σε απόσταση: $r = 1m$.

β. Η «ακουστική ένταση I » που ορίζεται ως η ποσότητα της ακουστικής ενέργειας που διέρχεται από την μοναδιαία επιφάνεια στην μονάδα του χρόνου καθώς το ακουστικό κύμα διαδίδεται στο ρευστό και ισχύει:

(1) Για τα επίπεδα κύματα:

$$I = \frac{(\delta p_0)^2}{2\rho_0 c} \quad (1.2.3)$$

(2) Για τα σφαιρικά κύματα:

$$I = \frac{(\delta p_0)^2}{2r^2 \rho_0 c} \quad (1.2.4)$$

γ. Η «ακουστική ισχύς Π » που ορίζεται ως:

$$\Pi = I * A \quad (1.2.5)$$

όπου A η εγκάρσια επιφάνεια από την οποία διαδίδεται το ακουστικό κύμα, επί παραδείγματι για σφαιρικά κύματα: $A = 4\pi r^2$.

δ. Η «ακουστική εμπέδηση Z_α », που ορίζεται ως:

$$Z_\alpha = p/V \quad (1.2.6)$$

όπου p η ακουστική πίεση και V η σωματιδιακή ταχύτητα όγκου των μορίων του μέσου.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη για τα ακουστικά κύματα είναι:

α. λ : Το μήκος κυματος, σε m .

β. ω : Η γωνιακή ταχύτητα, σε rad/sec .

γ. f : H συχνότητα, σε Hz .

δ. T : H περίοδος, σε sec .

ε. k : O κυματαριθμός, σε rad/m .

Για τα ανωτέρω χαρακτηριστικά μεγέθη ισχύουν και οι ακόλουθες σχέσεις:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.2.7)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (1.2.8)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.2.9)$$

Μια σύντομη σύγκριση των ακουστικών κυμάτων με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αναδεικνύει τις ιδιαιτερότητες που καλείται να αντιμετωπίσει η έρευνα στόχων στο υποθαλάσσιο πεδίο. Ο ήχος είναι ένα μηχανικό κύμα και ως τέτοιο απαιτεί την ύπαρξη κάποιου μέσου για να διαδοθεί. Αντίθετα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να διαδοθούν και στο κενό. Οπότε το μέσο παίζει κρίσιμο ρόλο στην διάδοση του ήχου. Ο ήχος στο νερό διαδίδεται με ταχύτητα περί των 1500m/sec. Αντίστοιχα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο κενό διαδίδονται με ταχύτητα 300.000.000m/sec (ταχύτητα φωτός). Αυτή η αναλογία $\approx 2 \cdot 10^5$ έχει τρεις σημαντικές επιπτώσεις:

α. Επεξεργασία σήματος: Στα SONAR διατίθεται περισσότερος χρόνος για επεξεργασία των πληροφοριών που λαμβάνουν από ότι στα RADAR. Επι παραδείγματι για απόσταση 30km, ένα SONAR έχει στην διάθεση του 40sec, ενώ ένα RADAR 0,0002sec.

β. Έρευνα περιοχής: Η μικρή ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων απαιτεί μεγάλο χρόνο αναμονής σε κάθε διόπτευση. Επι παραδείγματι αν θέλουμε να ερευνήσουμε μια περιοχή ακτίνας 12km για ύπαρξη στόχου με ένα ενεργητικό SONAR, με έλεγχο ανά 10° , θα χρειαζόταν περί τα 10min για μια μόνο πλήρη σάρωση. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη μεθόδων ηλεκτρονικής περιστροφής της δέσμης, που μπορεί ταυτόχρονα να επεξεργάζεται πληροφορίες από περισσότερες των μια διοπτεύσεων, αυξάνοντας όμως σημαντικά την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων επεξεργασίας και την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται. Ωστόσο στην σύγχρονη εποχή η πρόοδος της τεχνολογίας παρέχει πλέον την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ με ολοένα μικρότερη κατανάλωση ισχύος.

γ. Doppler Effect (για ενεργητικά συστήματα): Λόγω της διαφοράς των ταχυτήτων διάδοσης το φαινόμενο Doppler στα ακουστικά κύματα, που εκμεταλλεύονται τα ενεργητικά συστήματα εντοπισμού για εξαγωγή κινηματικών στοιχείων των στόχων, είναι 4000 φορές μεγαλύτερο από ότι στα ηλεκτρομαγνητικά. Λόγω αυτού έχει επικρατήσει και το λογοπαίγνιο ότι «τα πλοία πάνε ταχύτερα από τα αεροπλάνα».

§ 2.1 Διάδοση Ήχου στο Νερό

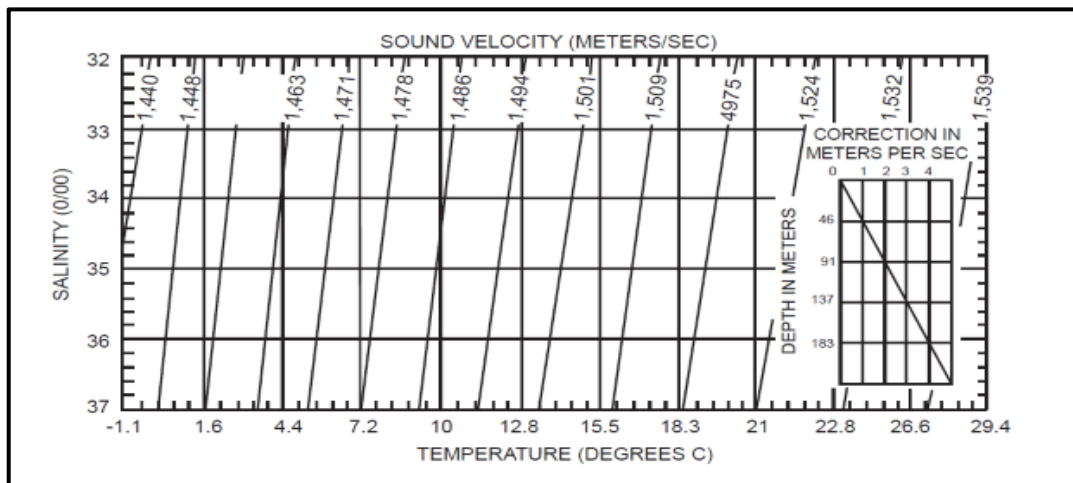
Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό κυμαίνεται από 1.432m/s έως 1.554m/s και επηρεάζεται από τρεις παράγοντες:

α. Την θερμοκρασία (T): Η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ($T \uparrow \Rightarrow c \uparrow$) και συγκεκριμένα αύξηση 1°C έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του ήχου κατά 3m/s.

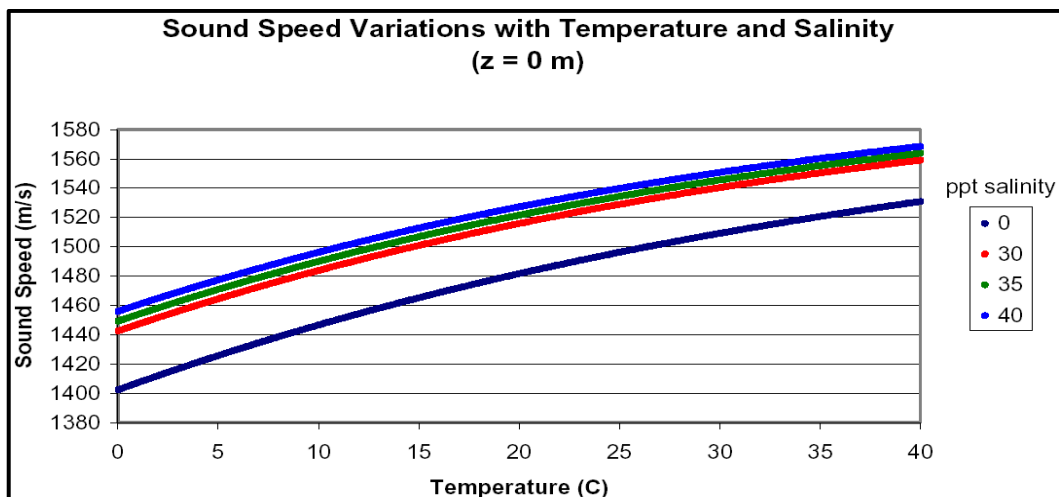
β. Την αλατότητα (S): Η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται όταν αυξάνεται η αλατότητα ($S \uparrow \Rightarrow c \uparrow$) και συγκεκριμένα αύξηση 1‰ έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του ήχου κατά 1,2 m/s.

γ. Το βάθος (z): Η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται όταν αυξάνεται το βάθος ($z \uparrow \Rightarrow c \uparrow$) και συγκεκριμένα κατά 0,017m/sec για κάθε μέτρο, για σταθερή θερμοκρασία και αλατότητα.

Στις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις (διαγράμματα 1.2.1.1, 1.2.1.2) φαίνεται η μεταβολή της ταχύτητας του ήχου σε σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας, της αλατότητας και του βάθους.



Διάγραμμα 1.2.1.1



Διάγραμμα 1.2.1.2

Μια από τις σχέσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στην θάλασσα είναι η εξίσωση «MACKENZIE». Χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου τα τρία κρίσιμα μεγέθη που αναφέρθηκαν ανωτέρω για να υπολογίσει την ταχύτητα του ήχου σε συγκεκριμένο βάθος.

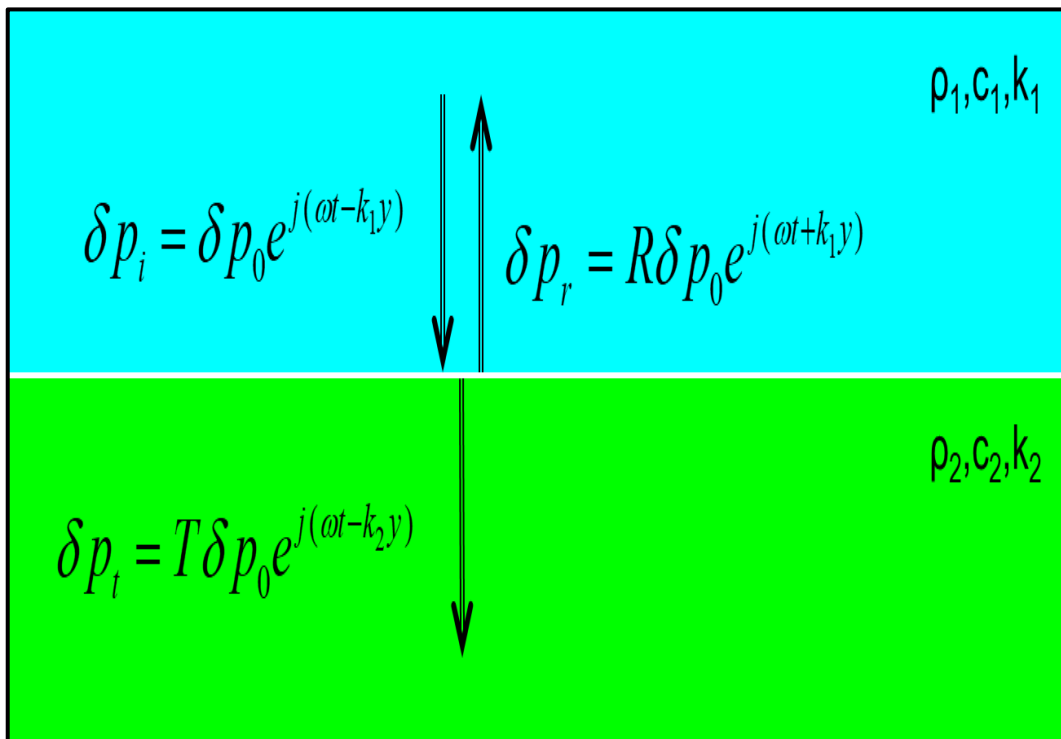
$$c = 1448,96 + 4,591 * T - 5,304 * 10^2 * T^2 + 2,374 * 10^{-4} * T^3 + 1,34(S - 35) + 1,6310^{-2} * z + 1,675 * 10^{-7} * z^2 - 1,025 * 10^{-2} * T(S - 35) - 7,139 * 10^{-13} * T * z^3 \quad (1.2.1.1)$$

όπου T σε βαθμούς $^{\circ}\text{C}$, z σε μέτρα m , S σε ppt¹³ και c σε m/sec

§2.2 Ανάκλαση - Διέλευση - Διάθλαση

Όταν ένα κύμα προσπίπτει σε ένα άλλο μέσο διαφορετικής πυκνότητας τότε μέρος αυτού ανακλάται και μέρος αυτού διαπερνά στο διάδοχο μέσο.

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η περίπτωση της κάθετης πρόσπτωσης ενός ηχητικού κύματος από ένα μέσο πυκνότητας ρ_1 σε ένα μέσο πυκνότητας ρ_2 (εικόνα 1.2.2.1).



Εικόνα 1.2.2.1

Η σχέση μεταξύ συντελεστή ανάκλασης R και συντελεστή διέλευσης T είναι:

$$1 + R = T \quad (1.2.3.1)$$

¹³ ppt: Parts Per Thousand, μονάδα μέτρησης αλατότητας.

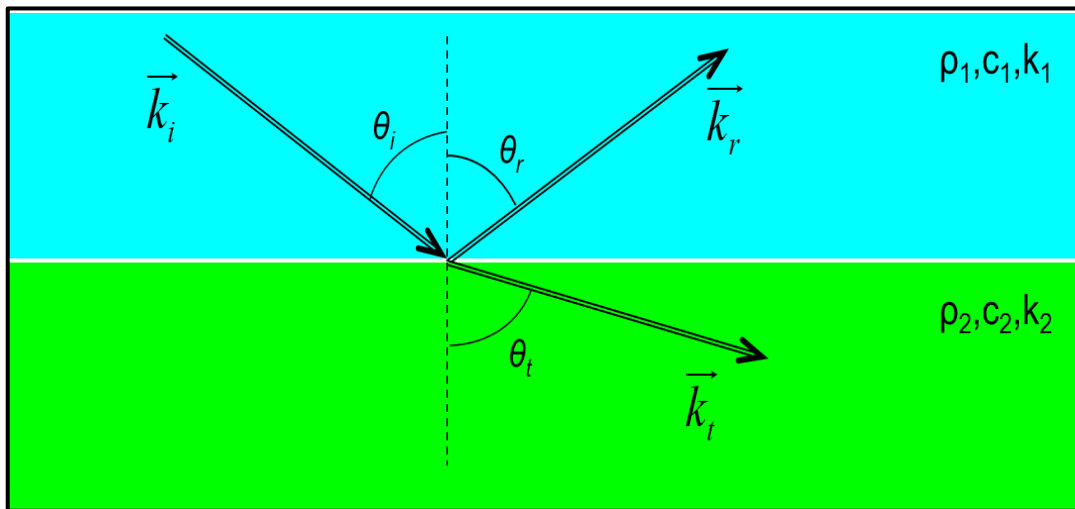
§ 2.3 Νόμος του «SNELL»

Το ακουστικό κύμα όταν προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια υπό γωνία θ_i , ανακλάται με γωνία θ_r και διαθλάται υπό γωνία θ_t . Όσον αφορά στην ανάκλαση του ακουστικού κύματος ισχύει η σχέση για τις γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης:

$$\theta_i = \theta_r \quad (1.2.4.1)$$

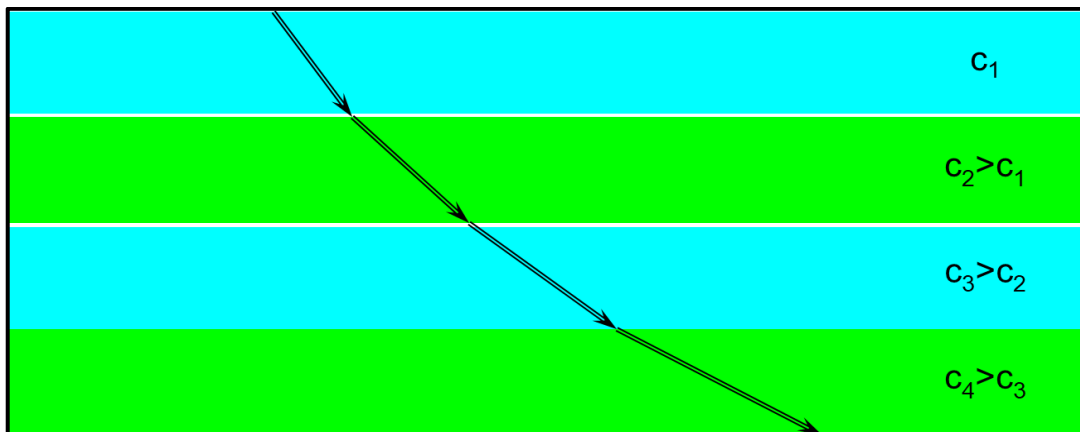
Στην διάθλαση ισχύει ο νόμος του «**SNELL**» σύμφωνα με τον οποίο ο λόγος των ταχυτήτων διάδοσης σε κάθε μέσο είναι ανάλογος του λογιού των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης θ_r και διάθλασης θ_t (εικόνα 1.2.3.1).

$$\frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_t}{c_2} \quad (1.2.4.2)$$



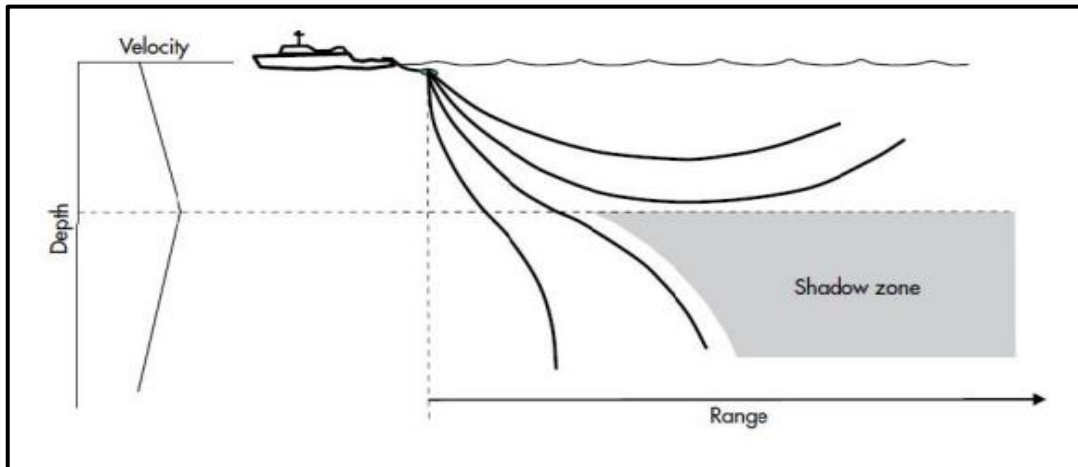
Εικόνα 1.2.3.1

Παράδειγμα διάδοσης ακτίνων από μέσα με διαφορετική πυκνότητα, άρα και ταχύτητα διάδοσης, φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (εικόνα 1.2.3.2). Οι ηχητικές ακτίδες στρέφουν προς τα στρώματα όπου ο ήχος έχει χαμηλότερη ταχύτητα.



Εικόνα 1.2.3.2

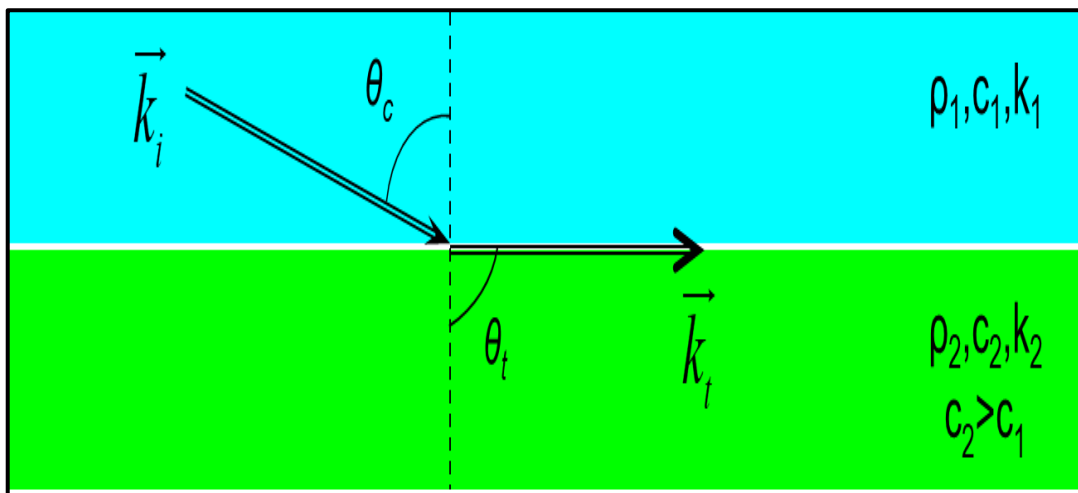
Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην θάλασσα για συγκεκριμένες συνθήκες βάθους, θερμοκρασίας και αλατότητας, να δημιουργούνται «σκιαρές ζώνες» (εικόνα 1.2.3.3). Λόγω διάθλασης, τα ηχητικά κύματα εκτρέπονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην εισέρχονται ποτέ σε αυτές τις περιοχές, κάνοντας αδύνατον τον εντοπισμό ενός στόχου που βρίσκεται μέσα σε αυτές, ακόμα και σε πολύ κοντινές αποστάσεις.



Εικόνα 1.2.3.3

Για την περίπτωση που $c_2 > c_1$ υπάρχει μια γωνία πρόσπτωσης για την οποία δεν υπάρχει διάθλαση ακουστικού κύματος στο δεύτερο μέσο (εικόνα 1.2.3.4). Η γωνία πρόσπτωσης θ_c στην οποία εμφανίζεται το φαινόμενο ονομάζεται κρίσιμη γωνία και δίδεται από την σχέση:

$$\sin \theta_c = \frac{c_1}{c_2} \Rightarrow \theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{c_1}{c_2} \right) \quad (1.2.4.4)$$



Εικόνα 1.2.3.4

Στη γενική περίπτωση όπου η γωνία πρόσπτωσης είναι θ_i :

- α. Όταν $\theta_i > \theta_c$, το ακουστικό κύμα δεν διαθλάται στο δεύτερο μέσο.
- β. Όταν $\theta_i < \theta_c$, το ακουστικό κύμα διαθλάται στο δεύτερο μέσο.

§ 2.4 Απώλειες Διάδοσης

Απώλειες διάδοσης είναι η σταδιακή εξασθένηση του ηχητικού κύματος καθώς διαδίδεται. Ο ακριβής υπολογισμός των απωλειών της ακουστικής ενέργειας στην θάλασσα είναι εξαιρετικά δύσκολος λόγω των πολλών παραγόντων που επιδρούν ταυτόχρονα. Επιπλέον ο υπολογισμός μπορεί να αφορά μόνο σε συγκεκριμένο χώρο και χρόνο λόγω της δυναμικής αλλαγής του περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό οι απώλειες υπολογίζονται προσεγγιστικά από μαθηματικά μοντέλα. Η συνολική τιμή των απωλειών (TL), σε κλίμακα Decibel, δίδεται από την σχέση:

$$TL = TL_g + TL_{abs} + TL_S + TL_L \quad (1.2.4.1)$$

Τα βασικότερα είδη απωλειών διάδοσης είναι τα ακόλουθα:

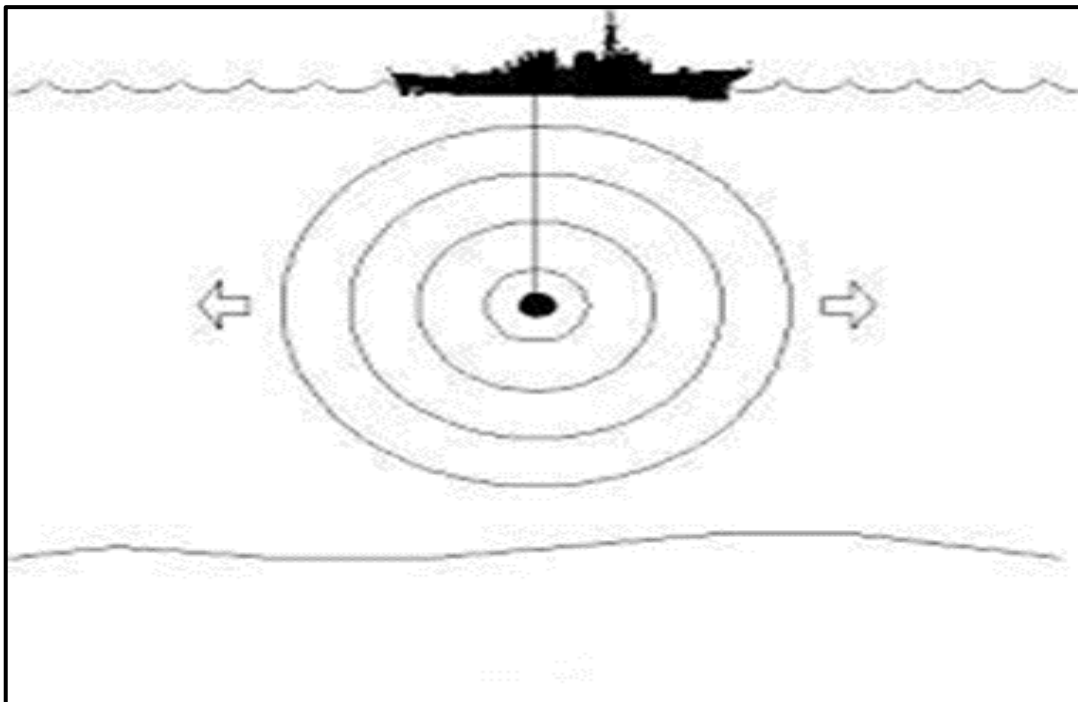
α. Γεωμετρικές απώλειες (Geometrical Losses): Αφορούν στην εξασθένηση της ακουστικής έντασης η οποία οφείλεται αποκλειστικά στη γεωμετρική διάδοση του ακουστικού κύματος και ορίζονται ως εξής:

$$TL_g(r) = 10 \log \frac{I(1m)}{I(r)} [dB] \quad (1.2.4.2)$$

Οι κατηγορίες διάδοσης στην θάλασσα είναι οι ακόλουθες :

(1) Σφαιρική διάδοση: Τα εκπεμπόμενα ακουστικά κύματα έχουν σφαιρικά μέτωπα (εικόνα 1.2.4.1). Σε αυτή την περίπτωση οι απώλειες υπολογίζονται ως εξής:

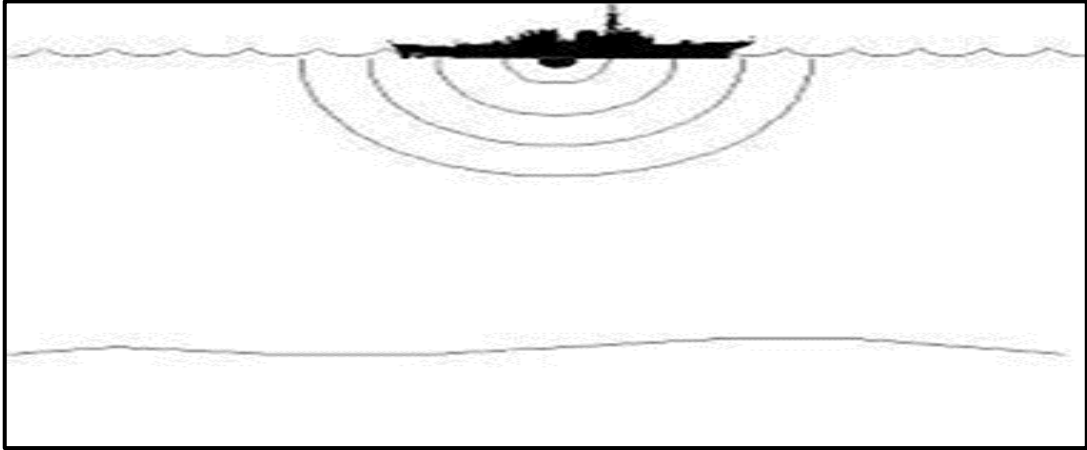
$$TL_g(r) = 20 \log(r) \quad (1.2.4.3)$$



Εικόνα 1.2.4.1

(2) Ημισφαιρική διάδοση: Τα εκπεμπόμενα ακουστικά κύματα έχουν ημισφαιρικά μέτωπα (εικόνα 1.2.4.2). Σε αυτή την περίπτωση οι απώλειες υπολογίζονται ως εξής:

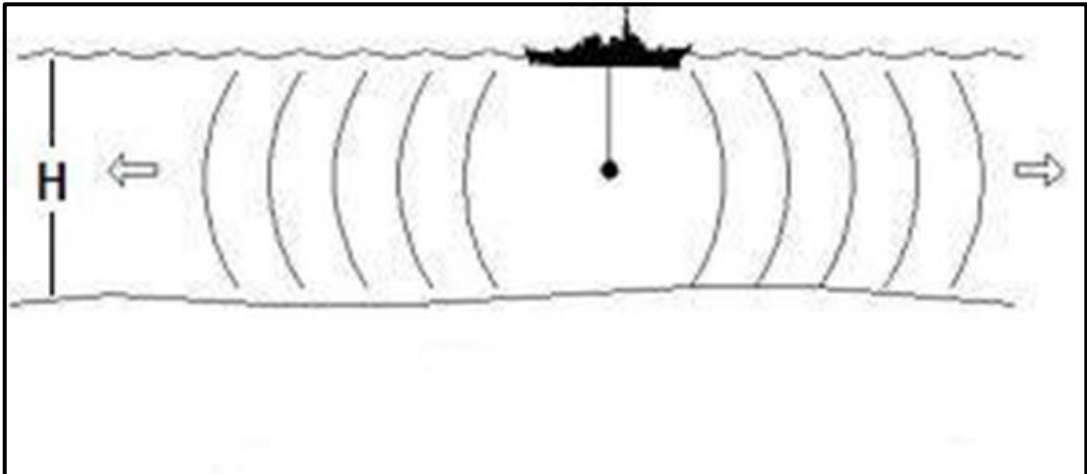
$$TL_g(r) = 20 \log(r) - 3 \quad (1.2.4.4)$$



Εικόνα 1.2.4.2

(3) Κυλινδρική διάδοση: Τα εκπεμπόμενα ακουστικά κύματα έχουν κυλινδρικά μέτωπα (εικόνα 1.2.4.3). Σε αυτή την περίπτωση οι απώλειες υπολογίζονται ως εξής:

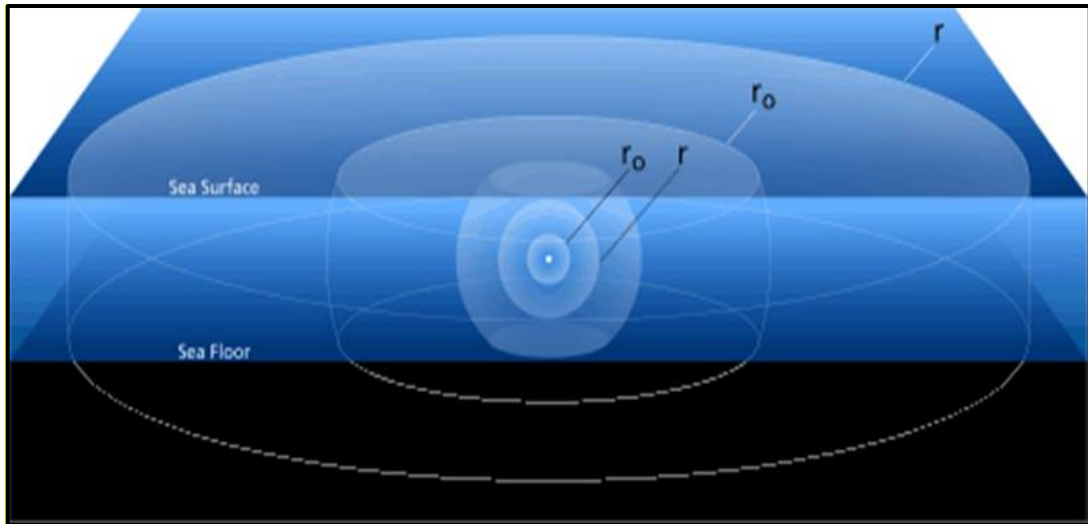
$$TL_g(r) = 10 \log(r) \quad (1.2.4.5)$$



Εικόνα 1.2.4.3

(4) Μικτή διάδοση: Συνδυασμός σφαιρικής και κυλινδρικής διάδοσης. Έστω ότι η ακουστική πηγή βρίσκεται στο μέσο βάθος του ακουστικού διαύλου (εικόνα 1.2.4.4). Αρχικά η διάδοση είναι σφαιρική και μετά την ανάκλαση, στο βυθό και στην επιφάνεια, γίνεται κυλινδρική. Η απόσταση r_0 , στην οποία αλλάζει ο τρόπος διάδοσης, λέγεται απόσταση μετάβασης. Σε αυτή την ειδική περίπτωση οι απώλειες υπολογίζονται ως εξής:

$$TL_g(r) = 10 \log(r_0) + 10 \log(r) \quad (1.2.4.6)$$

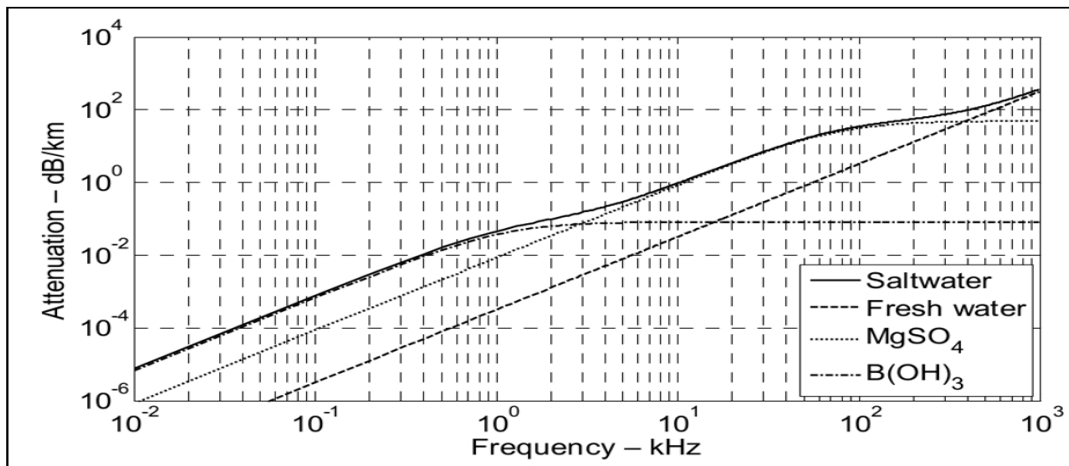


Εικόνα 1.2.4.4

β. Απώλειες Απορρόφησης (Absorption Losses): Αφορούν στην εξασθένηση της ακουστικής έντασης λόγω μετατροπής της ακουστικής ενέργειας σε θερμική ή χημική ενέργεια. Οι απώλειες TL_{abs} της απορρόφησης ορίζονται ως εξής:

$$TL_{abs} = ar \quad (1.2.4.7)$$

οπού a ο συντελεστής απορρόφησης (absorption coefficient) με μονάδες [dB/m] και εξαρτάται από το μέσο διάδοσης (διάγραμμα 1.2.4.1). Η τιμή του αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας, με αποτέλεσμα οι χαμηλότερες συχνότητες να εμφανίζουν μικρότερες απώλειες συναρτήσει της απόστασης που συνεπάγεται μεγαλύτερες αποστάσεις εντοπισμού.



Διάγραμμα 1.2.4.1

γ. Απώλειες Σκέδασης (Scattering Losses): Οι απώλειες σκέδασης (TL_s) αφορούν στην εξασθένηση της ακουστικής έντασης λόγω σκέδασης ή διάχυσης των ακουστικών κυμάτων κατά την πρόσπτωση στην επιφάνεια της θάλασσας, στο βυθό, την διέλευση μέσα από φυσαλίδες, μικροοργανισμούς, αγέλες ψαριών ή μικροσωματίδια αιωρούμενα στη θάλασσα.

Εν γενεί αφορούν στον διασκορπισμό της ακουστικής ενέργειας κατά την διάδοση της σε κατευθύνσεις διαφορετικές από την εμπρόσθια διεύθυνση διάδοσης ή την κατοπτρικά ανακλώμενη (στην περίπτωση ανάκλασης στην επιφάνεια). Οι απώλειες σκέδασης αυξάνονται:

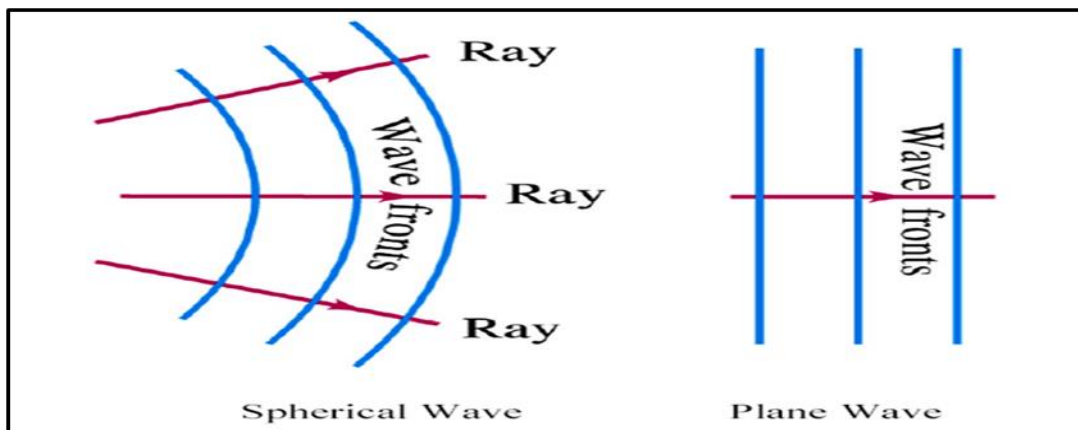
- (1) Με την αύξηση της συχνότητας του ακουστικού κύματος.
- (2) Με την αύξηση της κατάστασης θαλάσσης.
- (3) Όσο μειώνεται το βάθος του ακουστικού διαύλου.

δ. Απώλειες Διαφυγής (Leakage Losses): Οι απώλειες διαφυγής (**TLL**) αφορούν την εξασθένηση της ακουστικής έντασης από τις διαρροές των ακουστικών κυμάτων λόγω διάθλασης στο βυθό της θάλασσας. Ο λασπώδης βυθός έχει τις μεγαλύτερες απώλειες λόγω διαφυγής. Ο αμμώδης βυθός έχει μέσες απώλειες διαφυγής, ενώ ο βραχώδης έχει χαμηλές. Οι απώλειες διαφυγής αυξάνονται επίσης με την:

- (1) Αύξηση της συχνότητας του ακουστικού κύματος
- (2) Μείωση της γωνίας πρόσπτωσης.
- (3) Μείωση του βάθους του ακουστικού διαύλου.

§ 2.5 Θεωρία Ακτίνων (RAY THEORY)

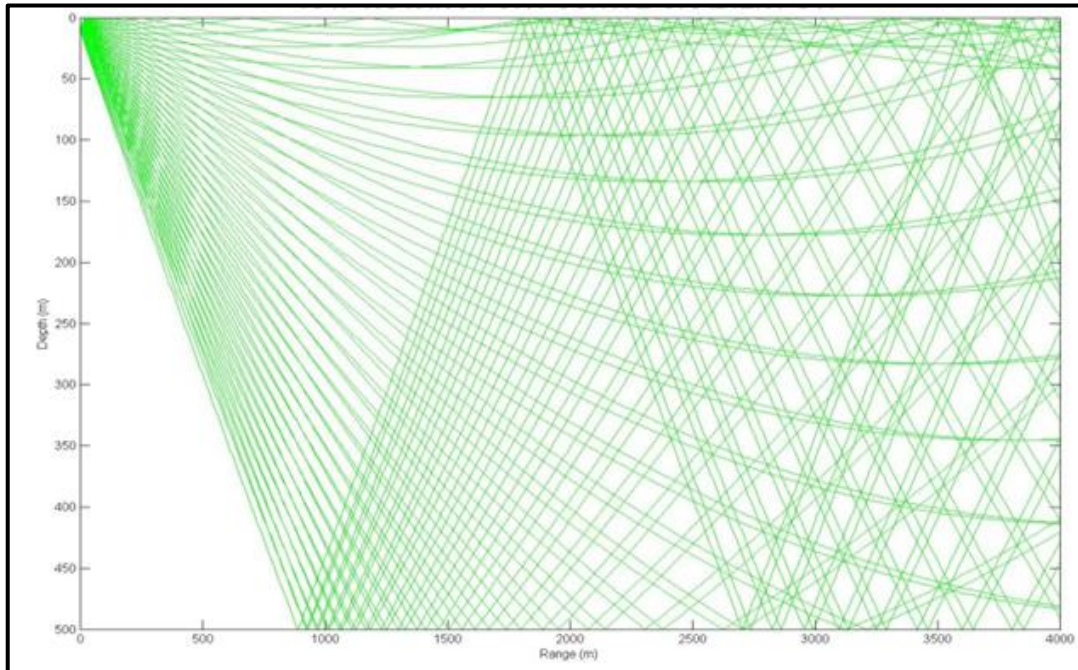
Για την αξιοποιήσιμη πρόβλεψη της διάδοσης του ήχου και τον υπολογισμό διάφορων χρήσιμων μεγεθών, όπως των απωλειών που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 2.4, έχουν διατυπωθεί πολλές θεωρίες με τα αντίστοιχα μοντέλα. Μια από αυτές είναι η θεωρία «Ακτίνων» που αντιμετωπίζει την διάδοση των ακουστικών κυμάτων στη θάλασσα ως διάδοση ακτίνων. Οι ηχητικές ακτίνες είναι γραμμές κάθετες στα μέτωπα του κύματος (εικόνα 1.2.5.1). Η διάδοση των ακτίνων γίνεται σύμφωνα με το νόμο του «**SNELL**»¹⁴.



Εικόνα 1.2.5.1

¹⁴ Βλέπε παράγραφο 1.2.3.

Η θεωρία ακτίδων αποτελεί μια ιδιαίτερως χρήσιμη προσέγγιση λόγω των άμεσων εμποπτικών αποτελεσμάτων που παράγει. Γενικά από ένα διάγραμμα διάδοσης των ηχητικών ακτίδων μπορούμε άμεσα και οπτικά να συμπεράνουμε το επίπεδο της ακουστικής έντασης σε κάθε περιοχή που εξετάζουμε, επι παραδείγματι όταν οι ακτίνες είναι πυκνές συνεπάγεται ότι έχω υψηλή ακουστική ένταση και το αντίθετο όταν είναι αραιές (διάγραμμα 1.2.5.1)



Διάγραμμα 1.2.5.1

Στο ανωτέρω διάγραμμα παρατηρούμε ότι κοντά στην πηγή του ήχου, για βάθη έως 100m, και εγγύς στην επιφάνεια, για αποστάσεις μεγαλύτερες των 2000m, έχουμε υψηλότερη ακουστική ένταση.

§ 3. Υποθαλάσσιος Θόρυβος

Με τον όρο «υποθαλάσσιος θόρυβος» ορίζεται η ανεπιθύμητη ακουστική ένταση μέσα στην οποία βρίσκεται το ακουστικό σήμα ενδιαφέροντος. Έχει ιδιαίτερη σημασία καθόσον καθορίζει το ελάχιστο επίπεδο της ακουστικής έντασης των υποθαλάσσιων σημάτων που μπορούν να εντοπιστούν.

Ο συνολικός υποθαλάσσιος θόρυβος διακρίνεται σε δυο κατηγορίες:

- α. Στον θόρυβο περιβάλλοντος (ambient noise)
- β. Στον αυτοθόρυβο (self-noise).

Η συνολική τιμή του υποθαλάσσιου θορύβου προκύπτει από την άθροιση των ακουστικών πιέσεων των ως άνω επιμέρους υποθαλάσσιων θορύβων.

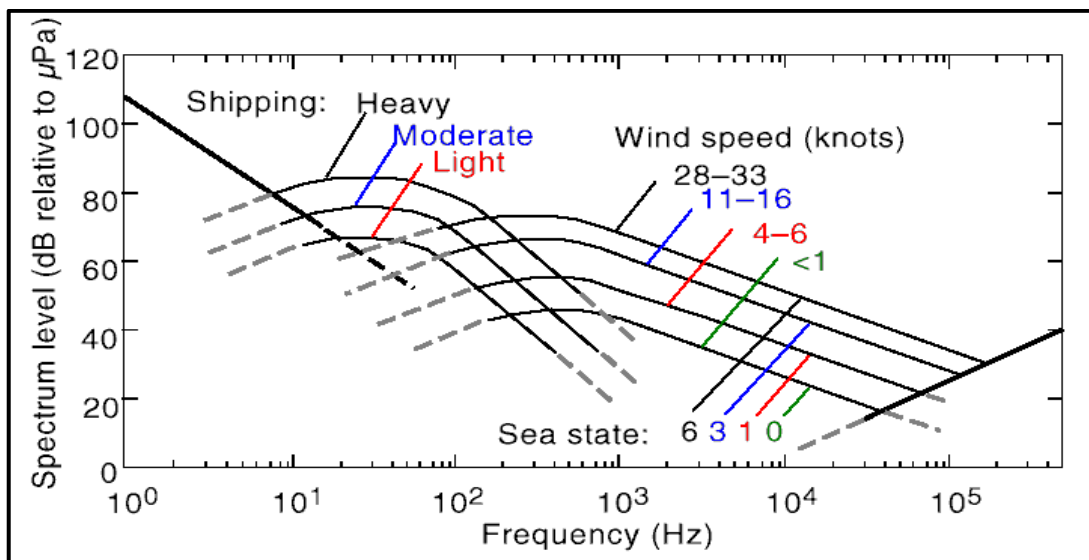
§ 3.1 Θόρυβος Περιβάλλοντος

Περιλαμβάνει όλες τις ανεπιθύμητες ακουστικές διαταραχές από το περιβάλλον πλην αυτών που προέρχονται από την πλατφόρμα που εκτελεί την Α/Υ δράση. Οι κύριες συνιστώσες του θορύβου αυτού στην περιοχή συχνοτήτων ενδιαφέροντος είναι οι ακόλουθες:

α. Θόρυβος προερχόμενος από φυσικές πηγές: Αφορά στον θόρυβο που προκαλείται από τον κυματισμό, την πρόσπτωση των κυμάτων στις ακτές, την βροχή και την θαλάσσια ζωή. Καλύπτει μια μεγάλη περιοχή συχνοτήτων (100Hz έως 50KHz) ενώ στην περιοχή ενδιαφέροντος Α/Υ είναι κυρίαρχος από 500Hz έως 10KHz.

β. Θόρυβος προερχόμενος από τεχνητές πηγές: Αφορά στον θόρυβο που προκαλείται κυρίως από τη ναυτιλιακή κίνηση. Είναι ισχυρά εξαρτώμενος από την γεωγραφική περιοχή και ιδιαίτερα αυξημένος σε λιμάνια και στενά με μεγάλη κίνηση. Καλύπτει σχετικά μικρή περιοχή χαμηλών συχνοτήτων (10Hz έως 500Hz), ενώ στην περιοχή ενδιαφέροντος Α/Υ είναι κυρίαρχος από 1Hz έως 200Hz.

Στην κατωτέρω γραφική παράσταση (διάγραμμα 1.3.1.1) παρουσιάζεται η φασματική πυκνότητα της ακουστικής πίεσης για την περιοχή συχνοτήτων από 1Hz έως 20KHz.



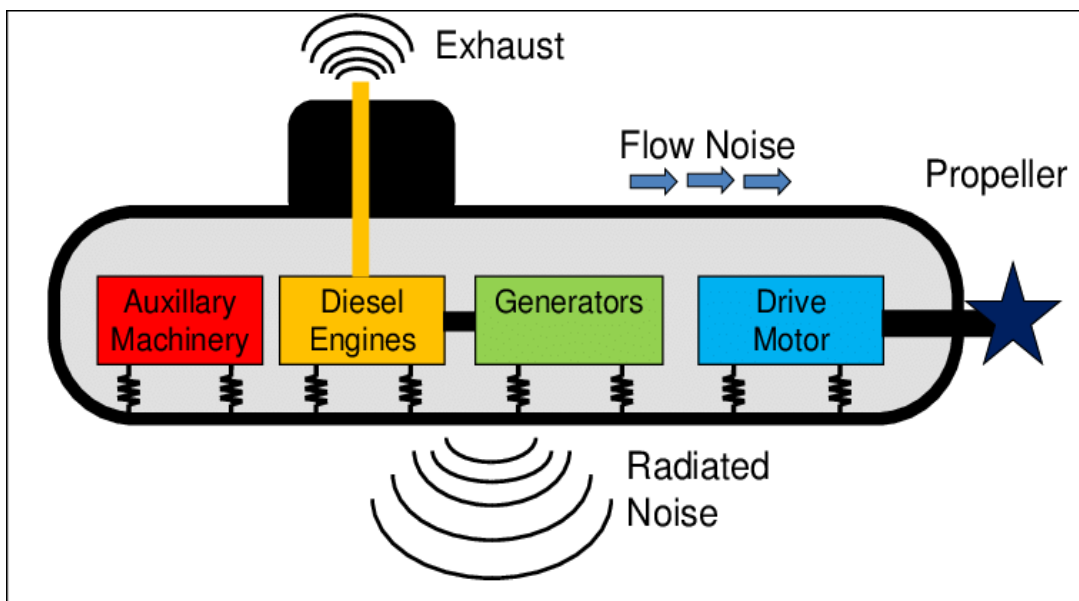
Διάγραμμα 1.3.1.1

§ 3.2 Αυτοθόρυβος

Τα πλοία επιφανείας και τα υποβρύχια εκπέμπουν ακουστική ενέργεια στη θάλασσα ως επι το πλείστον από τα μηχανήματα και τις συσκευές που λειτουργούν σε αυτά (εικόνα 1.3.2.1). Τόσο τα διαφορετικά μηχανήματα που βρίσκονται σε κάθε σκάφος αλλά και οι διαφορετικές παράμετροι λειτουργίας των ίδιων μηχανήματων έχει ως αποτέλεσμα να εκπέμπουν ακουστικά κύματα πίεσεως με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά

διαφοροποιούνται όσον αφορά στην κατανομή της πυκνότητας ακουστικής πίεσεως στις ακουστικές συχνότητες.

Ο συνδυασμός των πολλών διαφορετικών συσκευών και μηχανημάτων που λειτουργούν σε κάθε σκάφος, παράλληλα με την ηχητική ιδιαιτερότητα του καθενός μηχανήματος / συσκευής, δημιουργούν ένα μοναδικό συνολικό φάσμα ακουστικής ισχύος για κάθε σκάφος, ακόμα και μεταξύ ιδίων τύπου πλοίων. Αυτή η μοναδικότητα του φάσματος κάθε σκάφους μπορεί να παρομοιαστεί με την μοναδικότητα της υπογραφής του κάθε ανθρώπου και για αυτό τον λόγο αυτό το ακουστικό φάσμα του σκάφους αναφέρεται ως «ακουστική υπογραφή». Ως εκ τούτου η γνώση του είναι πολύτιμη και ευαίσθητη πληροφορία. Συγκεκριμένα, εφόσον υπάρχει μια ενημερωμένη «βιβλιοθήκη» ακουστικών υπογραφών, η χρήση των σύγχρονων παθητικών συστημάτων SONAR επιτρέπει, πέραν του εντοπισμού ενός σκάφους από μεγάλες αποστάσεις, την αναγνώριση της ταυτότητας του.



Εικόνα 1.3.2.1

α. Θόρυβος Προπελών (Propeller Noise): Ο θόρυβος των προπελών κυριαρχεί στις πολύ χαμηλές συχνότητες (1Hz έως 50Hz). Σε μεγαλύτερες ταχύτητες εμφανίζεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης (cavitation) οπότε και εμφανίζεται υψηλός θόρυβος επεκτεινόμενος και σε υψηλότερες συχνότητες (άνω των 1000 Hz). Η σπηλαίωση είναι εντονότερη σε μικρά βάθη και πιο συνήθης σε πλοία επιφανείας.

β. Θόρυβος Μηχανημάτων (Machinery Noise): Προκαλείται από στροβίλους, κύριες μηχανές, ηλεκτρομηχανές, γεννήτριες, μειωτήρες, υδραυλικά συστήματα κτλ. εκπέμπεται στη θάλασσα μέσω της γάστρας του πλοίου.

γ. Υδροδυναμικός Θόρυβος (Flow Noise): Προκαλείται από την ροή του νερού γύρω από την πλατφόρμα. Αυξάνεται με ταχύτητα της πλατφόρμας και την ύπαρξη στρειδώνας.

δ. Μεταβατικά Σήματα Θορύβου (Transient Noise): Ο αυτοθόρυβος μιας πλατφόρμας (ιδιαιτέρως ενός Υ/Β) μπορεί να επιβαρυνθεί από συγκεκριμένους σύντομους θορύβους όπως χειρισμός πηδαλίων, άνοιγμα πωμάτων τορπιλοσωλήνων, εκκίνηση μηχανήματος, κίνηση πτερυγίων κτλ.

ε. Θόρυβος από δραστηριότητες του πληρώματος.

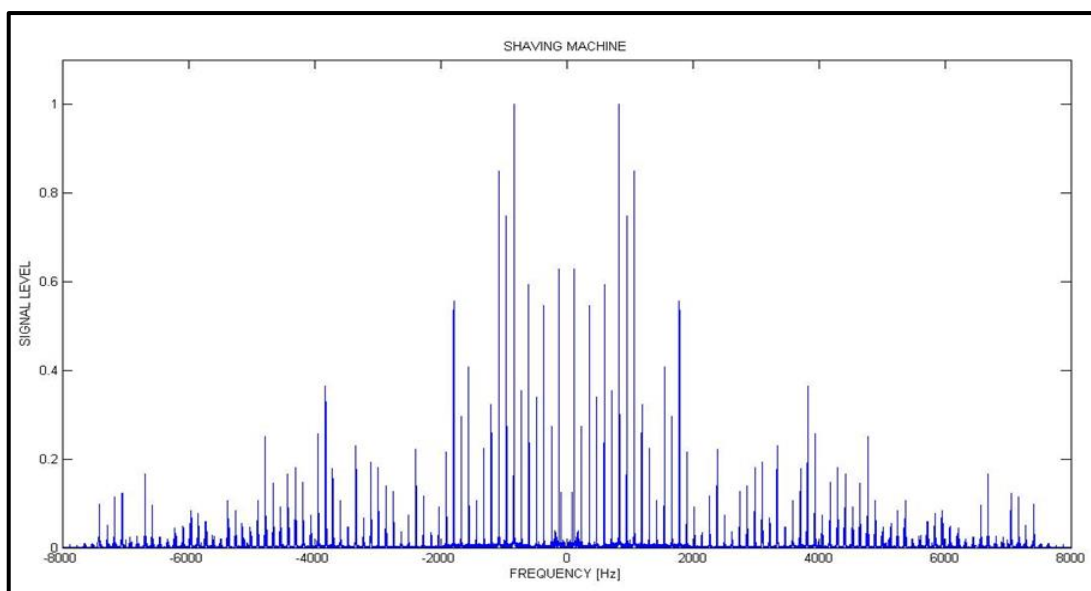
§3.2.1 Κατηγορίες Αυτοθορύβου

Από μαθηματικής πλευράς ο αυτοθόρυβος του πλοίου είναι συνδυασμός του θορύβου ευρέως φάσματος (Broadband) και του τονικού θορύβου (Narrowband). Οπότε έχουμε δυο είδη θορύβου:

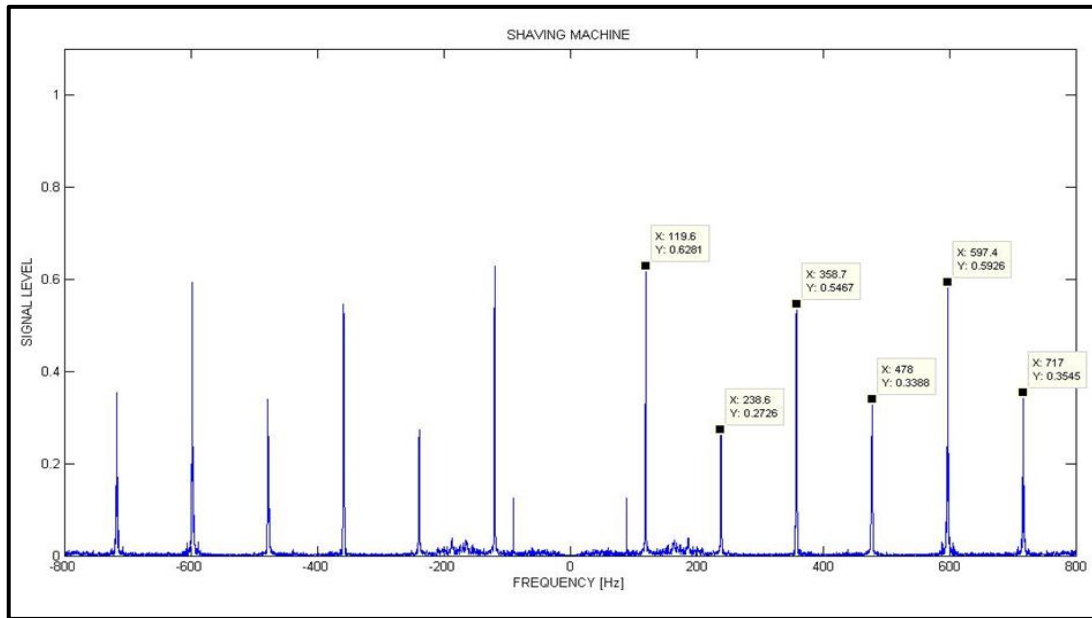
α. Broadband Noise: Ο θόρυβος του οποίου το επίπεδο φασματικής πυκνότητας πίεσεως είναι μια συνεχόμενη συνάρτηση μέσα σε μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων.

β. Narrowband Noise: Είναι θόρυβοι οι οποίοι αποτελούνται από διακριτά σήματα σε συγκεκριμένες συχνότητες με μικρό εύρος συχνοτήτων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα από την καθημερινότητα είναι ο ήχος που παράγει μια οικιακή ξυριστική μηχανή. Καταγράφοντας τον εκπεμπόμενο ήχο από μια ξυριστική μηχανή διαπιστώνεται ότι το φάσμα της πυκνότητας της ακουστικής πίεσεως ως προς την συχνότητα (διάγραμμα 1.3.2.1.1) περιέχεται στις συχνότητες: 0 – 7KHz. Εστιάζοντας στις συχνότητες: 0 – 800Hz (διάγραμμα 1.3.2.1.2) παρατηρείται ότι η ακουστική ισχύς της μηχανής περιέχεται σχεδόν όλη σε συγκεκριμένες διακριτές συχνότητες οι οποίες μάλιστα είναι ακέραια πολλαπλάσια αυτής με την μικρότερη τιμή (119,5 Hz). Η συχνότητα αυτή στην ακουστική θεωρία ονομάζεται θεμελιώδης ή βασική, ενώ τα ακέραια πολλαπλάσια της αρμονικές.

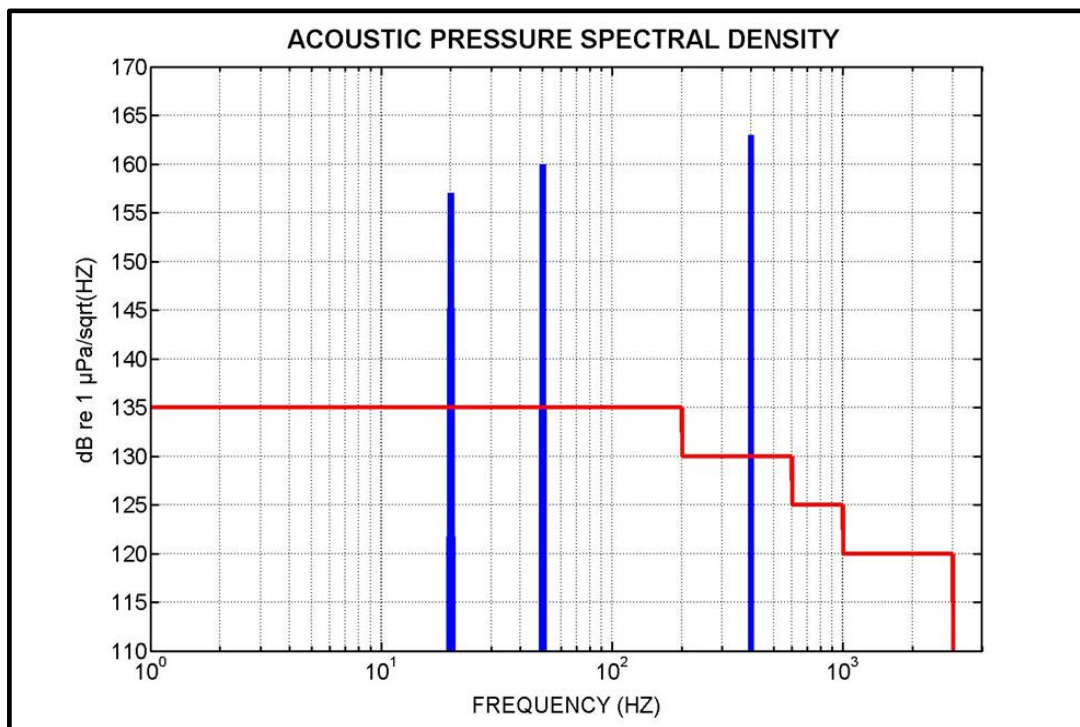


Διάγραμμα 1.3.2.1.1



Διάγραμμα 1.3.2.1.2

Η συνολική τιμή του αυτοθορύβου δίδεται από την άθροιση της ακουστικής πίεσης που προέρχεται από τον broadband και το narrowband θόρυβο. Στην γράφημα που ακολουθεί (διάγραμμα 1.3.2.1.3) παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο παράδειγμα φασματικής πυκνότητας ακουστικής πίεσεως αυτοθορύβου. Με την κόκκινη γραμμή απεικονίζεται η ακουστική πίεση από τον ευρύ φάσματος θόρυβο ενώ με την μπλε γραμμή του τονικού θορύβου. Παρατηρούμε ότι ο τονικός θόρυβος είναι πολύ μεγαλύτερης ισχύος, αρά και πιο ευκολά ανιχνεύσιμος, γεγονός που αντισταθμίζεται από το πολύ μικρό εύρος συχνοτήτων που εμφανίζεται.



Διάγραμμα 1.3.2.1.3

§ 4. Συντελεστής SNR

Ως συντελεστής SNR ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου και μετριέται σε Decibel. Ουσιαστικά είναι ένα μέτρο σύγκρισης του επιπέδου του επιθυμητού σήματος ως προς το επίπεδο του υφιστάμενου θορύβου.

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} \quad (1.4.1)$$

Όπου:

P_s : Ισχύς του σήματος.

P_n : Ισχύς του θορύβου.

Στην κλίμακα Decibel εκφράζεται ως:

$$SNR_{dB} = 10\log_{10}(SNR) \quad \text{ή} \quad SNR_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{P_s}{P_n}\right) \quad (1.4.2)$$

Επι παραδείγματι για $SNR = 10$, εφαρμόζοντας τον τύπο έχουμε:

$$10 = 10\log_{10}\left(\frac{P_s}{P_n}\right) \leftrightarrow 1 = \log_{10}\left(\frac{P_s}{P_n}\right) \leftrightarrow 10 = \frac{P_s}{P_n} \leftrightarrow P_s = 10 P_n \quad (1.4.3)$$

Δηλαδή το σήμα είναι δέκα φορές ισχυρότερο από τον θόρυβο.

Ο λόγος αυτός έχει ιδιαίτερη βαρύτητα στην υποβρύχια ακουστική καθώς καθορίζει αν ένα σήμα μπορεί να ξεχωρίσει από τον θόρυβο. Προκειμένου να γίνει με ακρίβεια η καταγραφή της ακουστικής υπογραφής ενός πλοίου ή υποβρυχίου, απαραίτητη προϋπόθεση είναι το επίπεδο της ακουστικής ισχύος από το επιθυμητό σήμα να είναι αρκετά μεγαλύτερο από το περιβαλλοντικό θόρυβο, που λαμβάνεται από τα υδρόφωνα.

§ 5. Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια σύντομη αναδρομή στην ιστορία της ακουστικής. Εν συνέχεια παρουσιάστηκε ο ήχος ως φυσικό φαινόμενο με τα βασικά μεγέθη που τον χαρακτηρίζουν. Τα ακουστικά κύματα συγκρίθηκαν με τα ηλεκτρομαγνητικά ώστε να γίνουν αντιληπτές οι ιδιαιτερότητες που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι εντοπιστικές συσκευές στο υποθαλάσσιο πεδίο. Αναφέρθηκαν οι παράμετροι και τα φυσικά φαινόμενα που επηρεάζουν την διάδοση του ήχου στην θάλασσα. Αναλυθήκαν οι απώλειες των ακουστικών σημάτων και ο θόρυβος, παράγοντες που επηρεάζουν την τελική ακουστική πίεση που καταλήγει στον δεκτή από την ηχητική πηγή. Παρουσιάστηκε μια από τις βασικές θεωρίες, με το αντίστοιχο μοντέλο της, που λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, παράγει αξιοποιήσιμα ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα σχετικά με την διάδοση του ήχου. Τέλος προσδιορίστηκε ο συντελεστής που καθορίζει αν ένα ακουστικό σήμα είναι ανιχνεύσιμο ή όχι από έναν αισθητήρα.

Κεφάλαιο 2^ο: Επεξεργασία Ψηφιακού Σήματος

Τα αναλογικά σήματα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες, προκειμένου να είναι εφικτή η εκμετάλλευσή τους, μετατρέπονται σε ψηφιακά. Η ψηφιακή επεξεργασία ασχολείται με την ψηφιακή αναπαράσταση των σημάτων, την ανάλυση και την κατάλληλη τροποποίηση τους. Σκοπός είναι η άντληση πληροφοριών και στην συγκεκριμένη περίπτωση στοχεύει στον εντοπισμό αυτών που προέρχονται από στόχους ενδιαφέροντος, εξαλείφοντας το θόρυβο και τις παρεμβολές, εξάγοντας στοιχεία για τον προσδιορισμό της θέσης, της κίνησης και της ταυτότητας των στόχων.

§ 1. Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία είναι το πρώτο βήμα στην ψηφιοποίηση ενός αναλογικού σήματος. Είναι η διαδικασία καταγραφής δειγμάτων από ένα σήμα συνεχούς χρόνου $s_{ct}(t)$, όπως είναι ο ήχος, ώστε να μετατραπεί σε διακριτό $s(n)$ και να δύναται να επεξεργαστεί ψηφιακά.

Στην δειγματοληψία το θεμελιώδες ερώτημα είναι κάθε πότε θα πρέπει να λαμβάνεται δείγμα από το συνεχές σήμα έτσι ώστε να μην αλλοιωθεί, δηλαδή όλες οι πληροφορίες που περιέχει να περάσουν στο ψηφιακό.

Έστω ένα σήμα συνεχούς χρόνου s_{ct} , ο αριθμός των δειγμάτων είναι N και ο χρόνος μεταξύ λήψης δυο διαδοχικών δειγμάτων είναι T_s . Τότε η συχνότητα δειγματοληψίας f_s ορίζεται ως εξής:

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad (2.1.1)$$

και το σήμα διακριτού χρόνου θα έχει την μορφή:

$$s(n) = s_{ct}(n * T_s), \quad n \in \{1, \dots, N\} \quad (2.1.2)$$

§1.2 Θεώρημα «NYQUIST» και φαινόμενο «ALIASING»

Σύμφωνα με το θεώρημα «NYQUIST» για να μην παραμορφωθεί ένα αναλογικό σήμα κατά την μετατροπή του σε ψηφιακό, θα πρέπει η συχνότητα δειγματοληψίας f_s να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την μέγιστη συχνότητα f_{max} που περιέχεται στο φάσμα του σήματος. Δηλαδή:

$$f_s \geq 2 * f_{max} \quad (2.2.1)$$

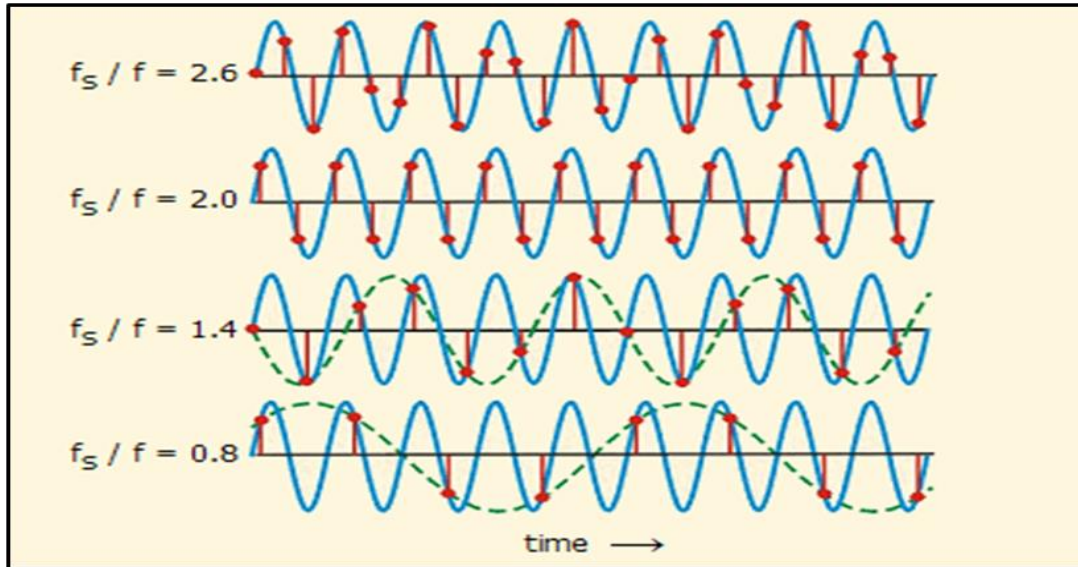
Επι παραδείγματι στην περίπτωση που καταγράφεται ένας απλός ημιτονοειδής ήχος, συχνότητας $f = 1000\text{Hz}$, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί συχνότητα δειγματοληψίας:

$$f_s \geq 2 * f_{max} = 2 * 1000 = 2000 \text{ samples/sec} \quad (2.2.2)$$

Το φαινόμενο της παραμόρφωσης ενός σήματος λόγω χαμηλού ρυθμού δειγματοληψίας ονομάζεται «Aliasing».

Στο ακόλουθο παράδειγμα (εικόνα 2.1.2.1) φαίνεται η δειγματοληψία ενός σήματος συχνότητας f για διαφορετικές συχνότητες δειγματοληψίας f_s . Με την πράσινη γραμμή απεικονίζεται το παραμορφωμένο σήμα όταν ισχύει:

$$\frac{f_s}{f} < 2 \quad (2.2.3)$$

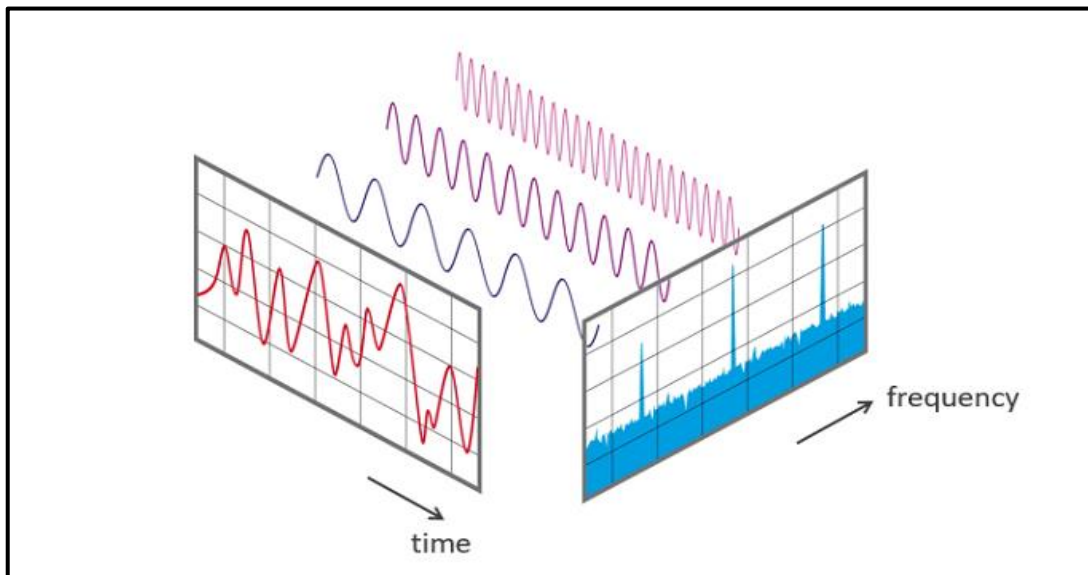


Εικόνα 2.1.2.1

§ 2. Μετασχηματισμός «FOURIER»

Ο μετασχηματισμός «FOURIER» (εικόνα 2.2.1) είναι η σχέση που απεικονίζει ένα αναλογικό σήμα $s(t)$ στο πεδίο της συχνότητας $S(f)$. Περιγράφεται από την σχέση:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) * e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.2.1)$$



Εικόνα 2.2.1

Ειδικότερα στην επεξεργασία σημάτων διακριτού χρόνου εφαρμόζεται ο αλγόριθμος «DISCRETE FOURIER TRANSFORM (DFT)» ή ο «FAST FOURIER TRANSFORM (FFT)» προκειμένου να υπολογιστεί το $S(f)$ ενός σήματος. Ο «DFT» είναι ένας από τους σημαντικότερους αλγόριθμους στον τομέα της επεξεργασίας ψηφιακού σήματος, που επιτρέπει την ανάλυση, την επεξεργασία και την σύνθεση σημάτων.

Ο «DFT» είναι μια μαθηματική διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των συχνοτήτων που αποτελούν ένα διακριτό σήμα. Το διακριτό αυτό σήμα προκύπτει μετά από την διαδικασία δειγματοληψίας που περιγράψαμε στην παράγραφο §1. Σε αντιστοιχία με τον μετασχηματισμό «FOURIER» περιγράφεται από την σχέση:

$$S(f) = \int_{n=0}^{N-1} s(n) * e^{-j2\pi nm/N} \quad (2.2.2)$$

Οι δυο βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού είναι:

α. Η συχνότητα δειγματοληψίας f_s .

β. Η διακριτή διάρκεια του σήματος T .

Η συχνότητα δειγματοληψίας προσδιορίζει το εύρος των συχνοτήτων του διακριτού σήματος. Από το θεώρημα «NYQUIST», εξετάζοντας ως προς f (εξίσωση 2.2.1) έχουμε:

$$f \leq \frac{f_s}{2} \quad (2.2.3)$$

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι αν κατά την καταγραφή ενός ακουστικού σήματος συνεχούς χρόνου, χρησιμοποιήσω συχνότητα δειγματοληψίας f_s , το αποτέλεσμα που θα λαβω θα είναι ένα σήμα διακριτού χρόνου του οποίου το εύρος συχνοτήτων θα είναι από 0Hz έως $f_s/2$ Hz. Άρα η συχνότητα δειγματοληψίας καθορίζει τα όρια του Χ-άξονα στην απεικόνιση (του μέτρου) της $S(f)$ τα οποία θα είναι από:

$$-f_s/2 \text{ έως } f_s/2 \text{ Hz} \quad (2.2.4)$$

Η επίδραση της διάρκειας T του σήματος που χρησιμοποιείται στον «DFT» αφορά στο εύρος συχνοτήτων μεταξύ δυο διαδοχικών τιμών της συνάρτησης που θα προκύψει από τον αλγόριθμο. Δηλαδή για το $S(f)$ ισχύει ότι:

$$S(f), f \in \{-f_s/2, -\frac{f_s}{2} + \Delta f, \dots, f(n), f(n) + \Delta f, \dots, \frac{f_s}{2} - \Delta f, f_s/2\} \quad (2.2.5)$$

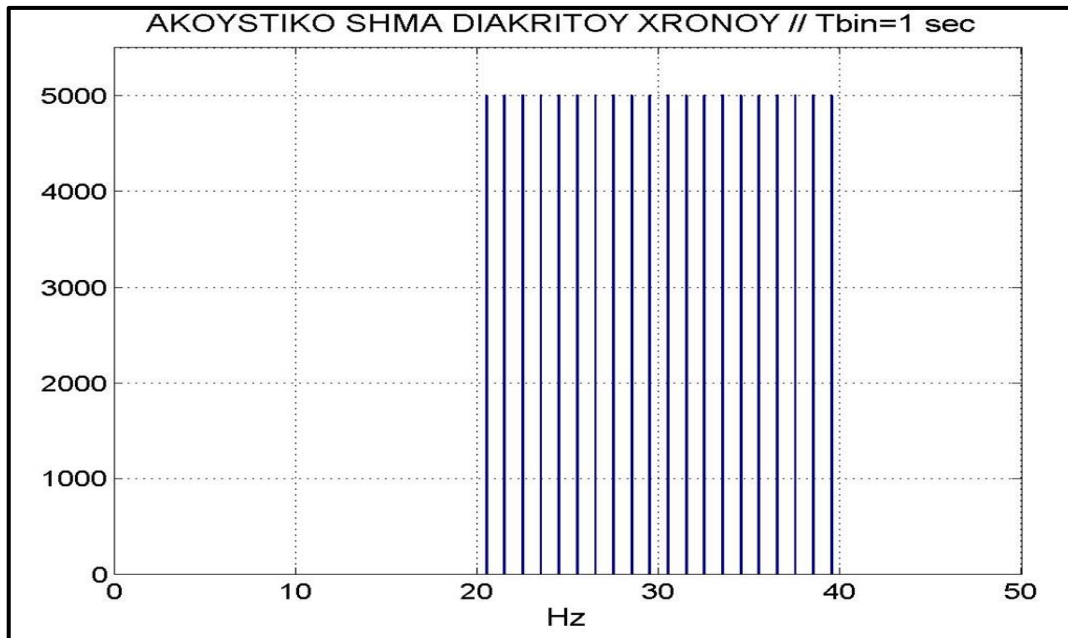
όπου $\Delta f = \frac{1}{T}$.

Ειδικότερα για ακουστικά σήματα, η τιμή της συνάρτησης $S(f_0)$ είναι ανάλογη την τετραγωνικής ρίζας της ακουστικής ισχύος που περιλαμβάνεται

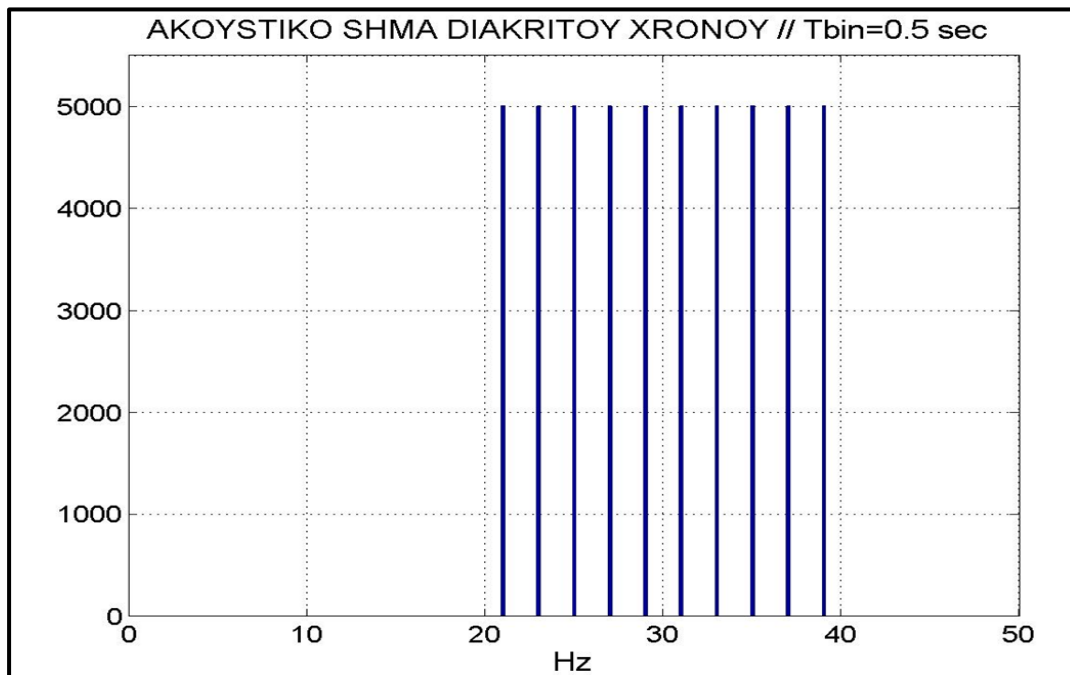
στο εύρος συχνοτήτων από $f_0 - \frac{df}{2}$ έως $f_0 + \frac{df}{2}$. Επιπρόσθετα ο DFT που προκύπτει, λαμβανομένου υπόψη ότι αφορά σε πραγματικά ακουστικά σήματα, είναι μια συνάρτηση συμμετρική ως προς την συχνότητα $f = 0$, δηλαδή ισχύει ότι:

$$S(f) = -S(f) \quad (2.2.6)$$

Στα ακόλουθα παραδείγματα παρουσιάζεται ένα ημιτονοειδές σήμα, το θετικό του μέρος λόγω συμμετρίας, για $T = 1 \text{ sec}$ (διάγραμμα 2.2.1) και για $T = 0,5 \text{ sec}$ (διάγραμμα 2.2.2):

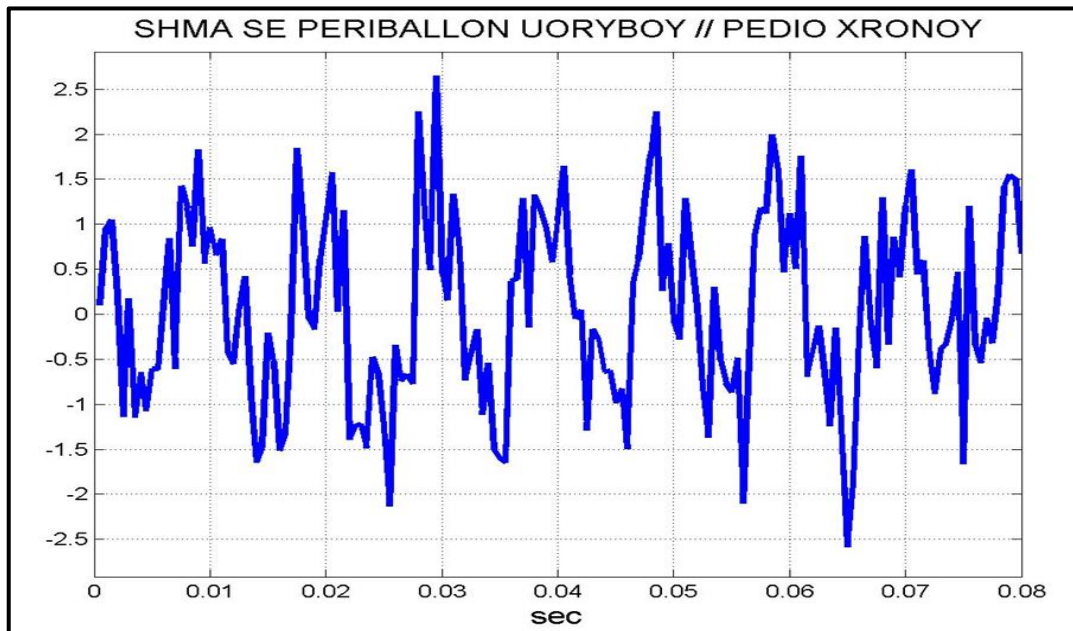


Διάγραμμα 2.2.1

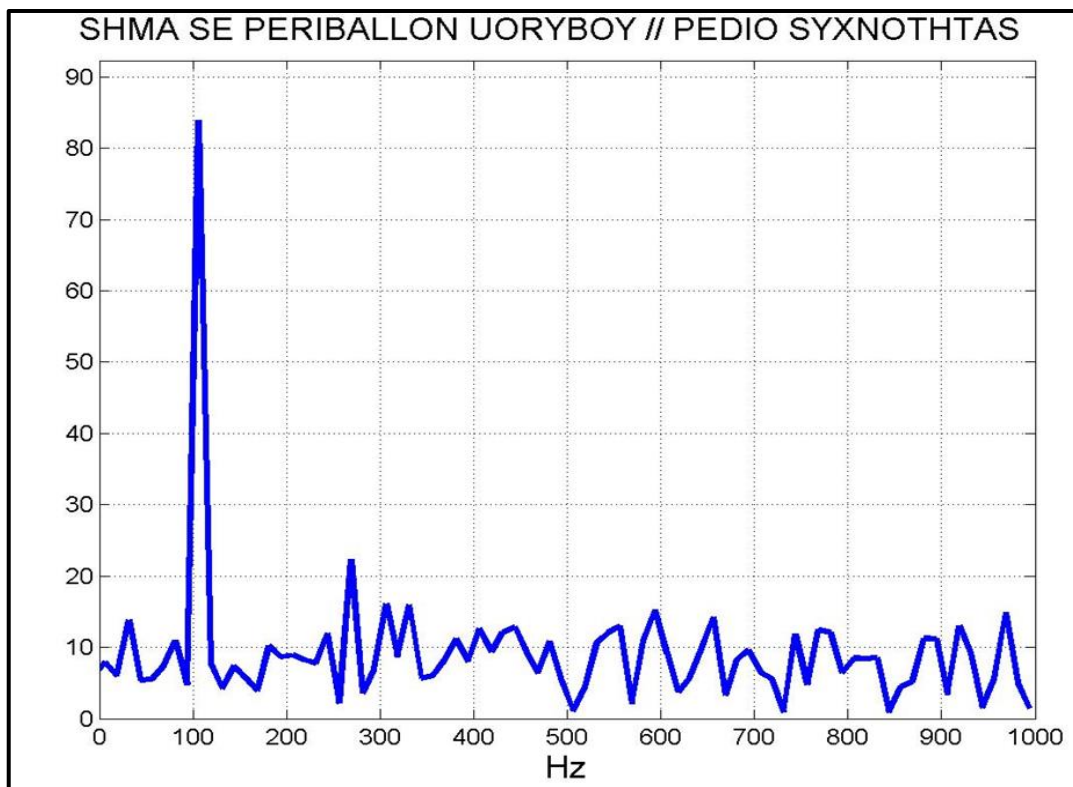


Διάγραμμα 2.2.2

Στο ακόλουθο παράδειγμα απεικονίζεται ένα ημιτονοειδές σήμα $f = 100\text{Hz}$, σε περιβάλλον θορύβου με $SNR = 0$, πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου (διάγραμμα 2.2.3) και μετά την εφαρμογή του για $f_s = 2000\text{ Hz}$ και $T = 80$ (διάγραμμα 2.2.4).



Διάγραμμα 2.2.3

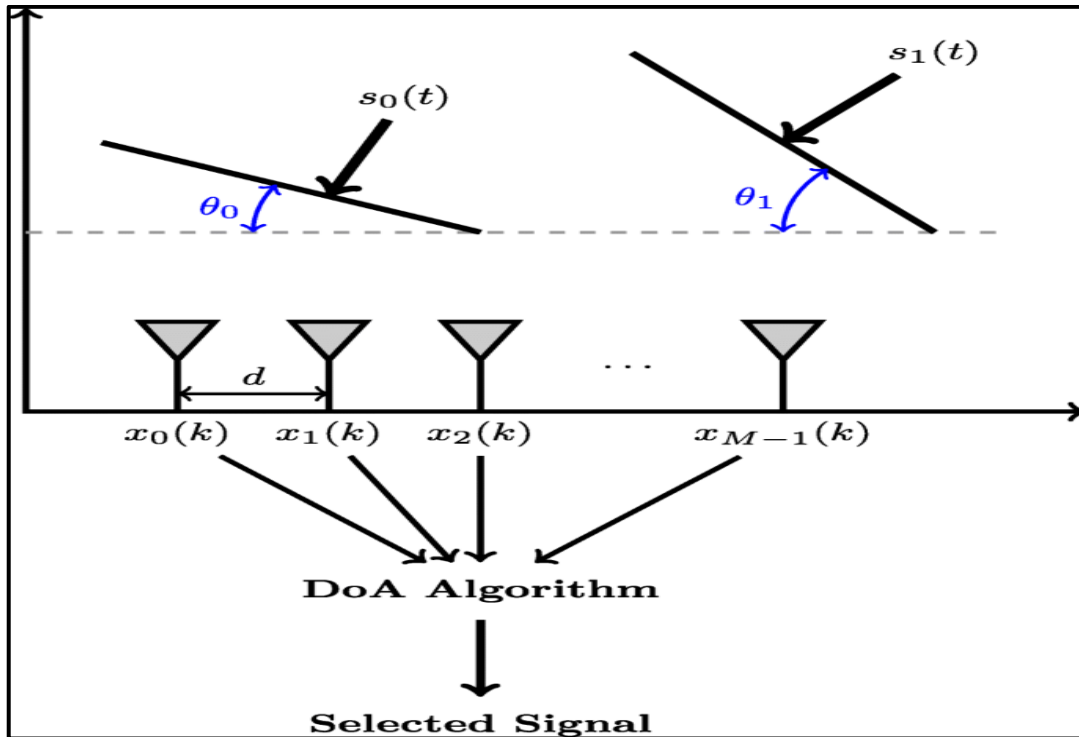


Διάγραμμα 2.2.4

Παρατηρείται ότι το σήμα στο πρώτο διάγραμμα δεν διακρίνεται από τον θόρυβο, ενώ στο δεύτερο διάγραμμα ξεχωρίζει αισθητά πάνω από το θόρυβο.

§3. Προσδιορισμός DOA

Μετα την μετατροπή του ακουστικού σήματος σε ηλεκτρικό και εν συνεχεία σε ψηφιακό, το επόμενο βήμα είναι η εξαγωγή στοιχείων σχετικά με την ύπαρξη και την θέση του στόχου ή των στόχων. Η εύρεση της κατεύθυνσης του επιθυμητού σήματος (DOA) ως προς την ηχοεντοπιστική συσκευή, αποτελεί μια από τις κρίσιμες παραμέτρους εντοπισμού ενός στόχου. Η μεγάλη διακριβωτική ικανότητα είναι απαραίτητη όταν αφορά σε εφαρμογές ηλεκτρονικής παρατήρησης / παρακολούθησης όπως RADAR και SONAR.



Εικόνα 2.3.1

Για τον προσδιορισμό της DOA χρησιμοποιείται αριθμός υδροφώνων σε κατάλληλη διάταξη. Επειδή, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, η μηχανική περιστροφή της διάταξης μέσα στο νερό είναι πρακτικά αδύνατη, στα σήματα που λαμβάνονται από τα υδρόφωνα εφαρμόζονται διάφοροι μέθοδοι προσδιορισμού της DOA μέσω αλγορίθμων. Αυτοί μπορεί να είναι είτε συμβατικής μορφής, ηλεκτρονικής περιστροφής της δέσμης, είτε αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν πρωτότυπες προσεγγίσεις, όπως ο «MUSIC» που θα αναλυθεί στην συνέχεια, είτε συνδυασμός αυτών (εικόνα 2.3.1).

§ 4. Συστοιχίες Υδροφώνων

Για την επίτευξη κατευθυντικότητας στα ηχοεντοπιστικά συστήματα δεν χρησιμοποιείται τότε μόνο ένα υδρόφωνο αλλά συστοιχίες αυτών. Ο λόγος έγκειται στο ότι αν υφίσταται μόνο ένα υδρόφωνο, αυτό θα λαμβάνει ήχους από όλες τις κατευθύνσεις χωρίς να είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η κατεύθυνση του επιθυμητού ήχου. Επιπλέον η χρήση περισσότερων από ένα

υδροφώνων επιτρέπει την πρόσθεση των ληφθέντων ακουστικών σημάτων ώστε να αυξηθεί η αναλογία του σήματος προς θόρυβο. Στα σύγχρονα συστήματα χρησιμοποιούνται τρία ή και τέσσερα υδρόφωνα, σε διάταξη τριγώνου ή τετράγωνου, αντί για ένα υδρόφωνο σε κάθε θέση της συστοιχίας, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο το SNR και την ακρίβεια της διόπτουσας.¹⁵

Στα σήματα που λαμβάνονται από τις συστοιχίες υδροφώνων δίνεται η δυνατότητα εφαρμογής τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας ώστε να επιτυγχάνεται:

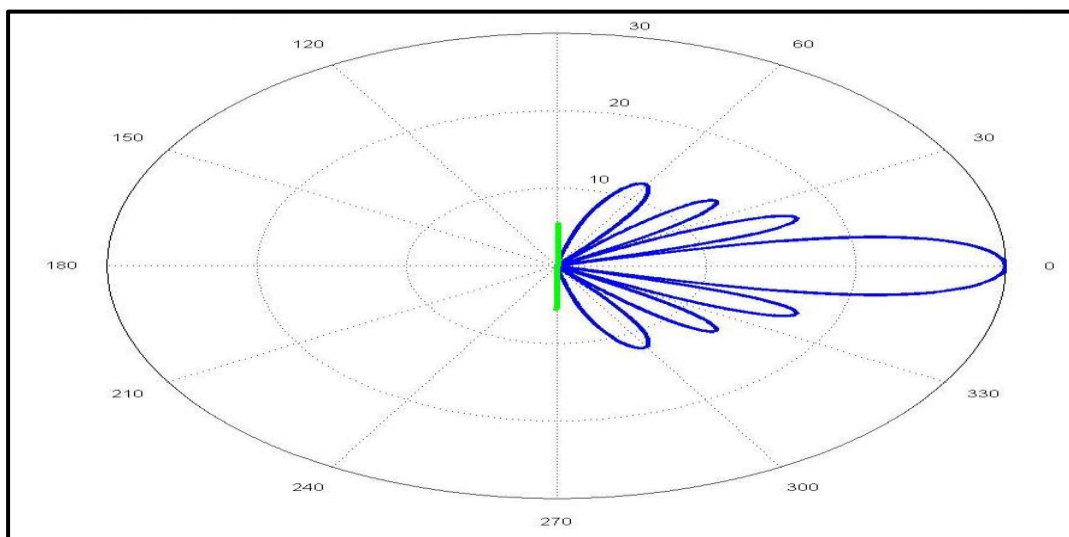
α. Η λήψη ηχητικών σημάτων από μόνο μια διεύθυνση κάθε στιγμή βελτιώνοντας την διακριβωτική ικανότητα.

β. Η ενίσχυση του SNR στην επιθυμητή διεύθυνση βελτιώνοντας την ικανότητα αποκάλυψης στόχων.

§ 5. *Beamforming*

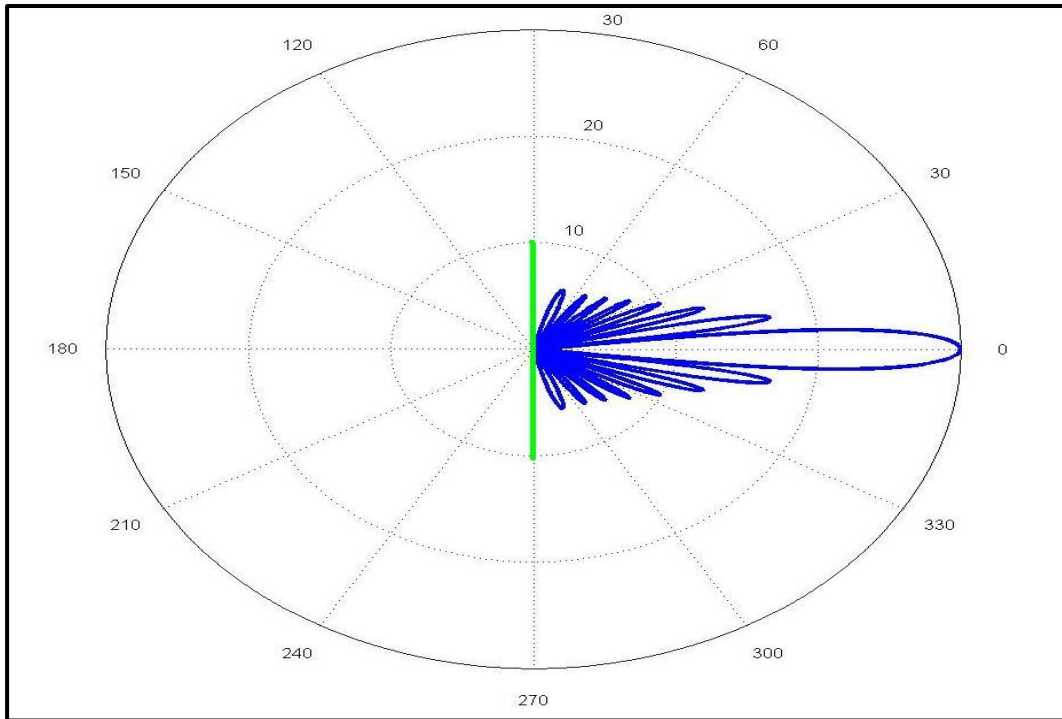
Με τον όρο «*Beamforming*» ή αλλιώς «*spatial filtering*» περιγράφεται η τεχνική ψηφιακής επεξεργασίας του σήματος που εφαρμόζεται σε συστοιχίες αισθητήρων, στην συγκεκριμένη περίπτωση υδροφώνων, ώστε να διαμορφωθεί κατάλληλα τόσο το εύρος του κύριου λοβού όσο και η γωνία του ως προς το εγκάρσιο της συστοιχίας, δηλαδή να επιτευχθεί η ηλεκτρονική του στρέψη. Η επεξεργασία αυτή εφαρμόζεται σε όλα τα συστήματα που στοχεύουν στον εντοπισμό του ευρυζωνικού θορύβου που εκπέμπει ένας στόχος.

Στα πολικά διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται η διαφορά στο εύρος του κύριου λοβού με την εφαρμογή της εν λόγω επεξεργασίας για συστοιχίες των 8 (διάγραμμα 2.5.1), 16 (διάγραμμα 2.5.2) και 32 υδροφώνων (διάγραμμα 2.5.3):

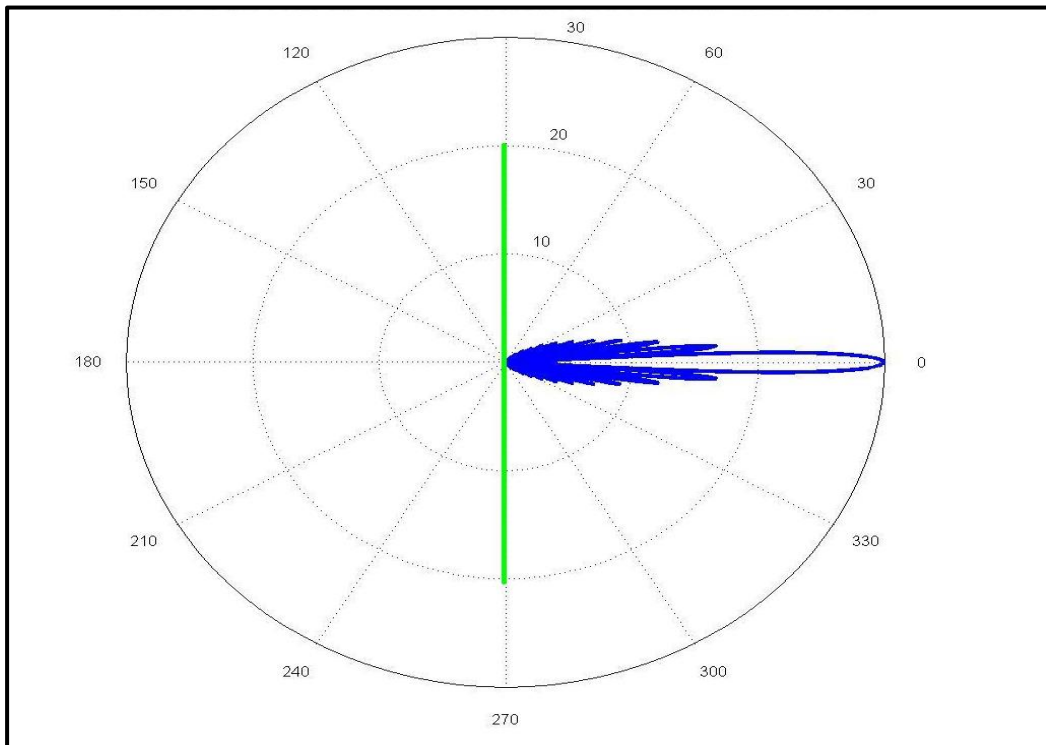


Διάγραμμα 2.5.1

¹⁵ ATP 28.



Διάγραμμα 2.5.2

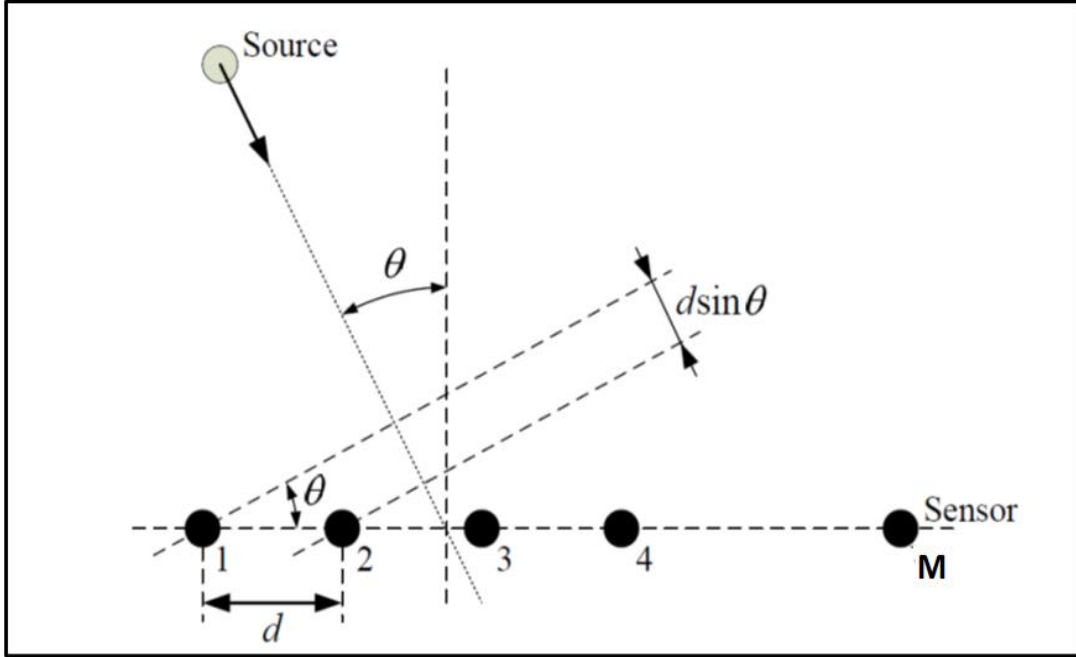


Διάγραμμα 2.5.3

Το εύρος του κυρίου λοβού στα ανωτέρω διαγράμματα είναι 13° , 6.5° και 3° αντίστοιχα. Η αύξηση του αριθμού των υδροφώνων μειώνει τόσο το εύρος του κύριου λοβού αλλά ταυτόχρονα συμπιέζει και τους πλευρικούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτευση και επιπλέον αύξηση του SNR, καθόσον επισέρχεται λιγότερος θόρυβος από την διεύθυνση λήψης του ηχητικού σήματος.

§ 5.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Έστω ένα ακουστικό κύμα που προσπίπτει υπό γωνία θ σε μια γραμμική και ομοιόμορφη συστοιχία M υδρόφωνων που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d (εικόνα 2.5.1.1):



Εικόνα 2.5.1.1

Το μήκος της συστοιχίας θα είναι:

$$L = (M - 1) * d \quad (2.5.1)$$

Έστω ότι $f_m(t)$, όπου $m=0,1,2, \dots, M-1$, είναι η ακουστική πίεση στο m υδρόφωνο. Το ακουστικό κύμα θα φτάνει διαδοχικά στα υδρόφωνα με καθυστέρηση ίση με τον χρόνο που χρειάζεται ο ήχος να διανύσει την απόσταση:

$$d * \sin(\theta) = \Delta r \quad (2.5.2)$$

Η απόσταση του m υδρόφωνου από την ακουστική πηγή θα ισούται με:

$$r_m = r - \frac{(M-1)*d}{2} \sin(\theta) + m * d \sin(\theta) \quad (2.5.3)$$

Επίσης το m υδρόφωνο θα λαμβάνει σήμα το οποίο δίδεται από την σχέση:

$$f_m(t, r_m, \theta) = \frac{F_0}{r} e^{j(\omega t - k r_m)} \quad (2.5.4)$$

Από τις εξισώσεις 2.5.3 και 2.5.4 προκύπτει ότι:

$$f_m(t, r, \theta) = \frac{F_0}{r} e^{j(\omega t - kr)} \underbrace{e^{j \frac{(M-1) * k * d \sin(\theta)}{2}} \sum_{m=0}^{M-1} e^{-j * m * k * d * \sin(\theta)}}_{H(\theta)} \quad (2.5.5)$$

Από την ανωτέρω σχέση, ο παράγοντας που διαφοροποιείται για διαφορετική γωνία θ είναι ο $H(\theta)$, που στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως «*Steering Vector*».

Ο παράγοντας $H(\theta)$ σε κανονικοποιημένη μορφή δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$H(\theta) = \frac{\sin \left(\left(\frac{M}{2} \right) * k * d * \sin(\theta) \right)}{M \sin \left(\left(\frac{1}{2} \right) * k * d * \sin(\theta) \right)} \quad (2.5.6)$$

Ο παράγοντας $H(\theta)^2$ ονομάζεται συνάρτηση κατευθυντικότητας και συμβολίζεται ως $b(\theta)$. Συνήθως εκφράζεται σε κλίμακα Decibel και χρησιμοποιείται για την δημιουργία των γραφικών παραστάσεων που απεικονίζουν τα διαγράμματα ακτινοβολίας¹⁶ των συστοιχιών.

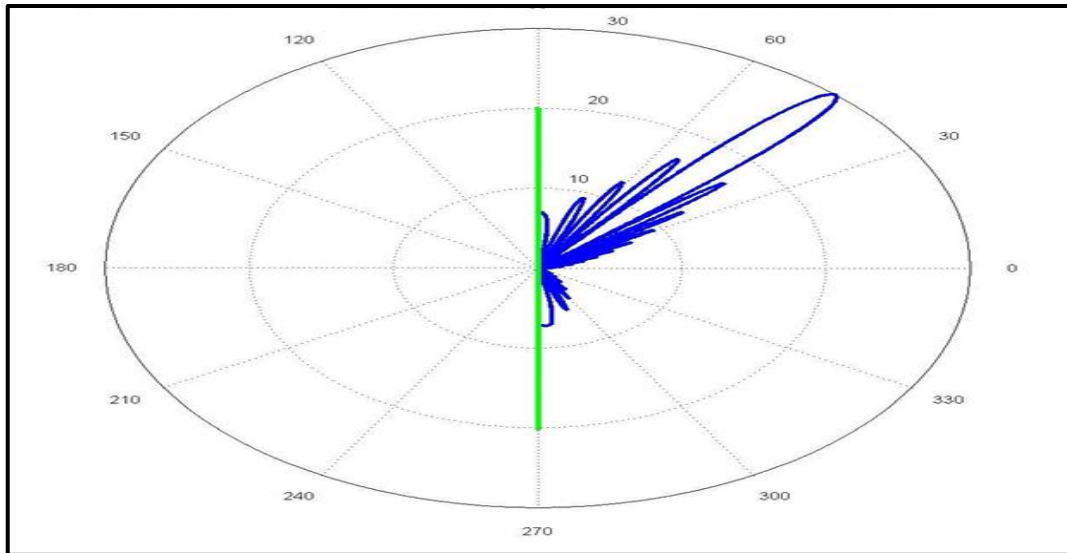
$$b_{dB}(\theta) = 10 \log \left(\frac{\sin \left(\left(\frac{M}{2} \right) * k * d * \sin(\theta) \right)}{M * \sin \left(\left(\frac{1}{2} \right) * k * d * \sin(\theta) \right)} \right)^2 \quad (2.5.7)$$

Οι προηγούμενες σχέσεις περιγράφουν τον κυριο λοβό μιας συστοιχίας ως προς το εγκάρσιο. Σχεδόν σε όλες όμως τις περιπτώσεις η συστοιχία απαιτείται να καλύπτει ένα εύρος τομέα. Επειδή η περιστροφή ολόκληρης της συστοιχίας μηχανικά είναι τεχνικά αδύνατη, αυτό επιτυγχάνεται με την ηλεκτρονική περιστροφή του λοβού, εισάγοντας μια κατάλληλη χρονικά καθυστέρηση τ , ανάλογη της επιθυμητής γωνίας έρευνας.

Για περιστροφή του λοβού κατά γωνία θ_0 που αντιστοιχεί σε χρονική καθυστέρηση τ ισχύει:

$$\sin(\theta_0) = \frac{c * \tau}{d} \quad (2.5.8)$$

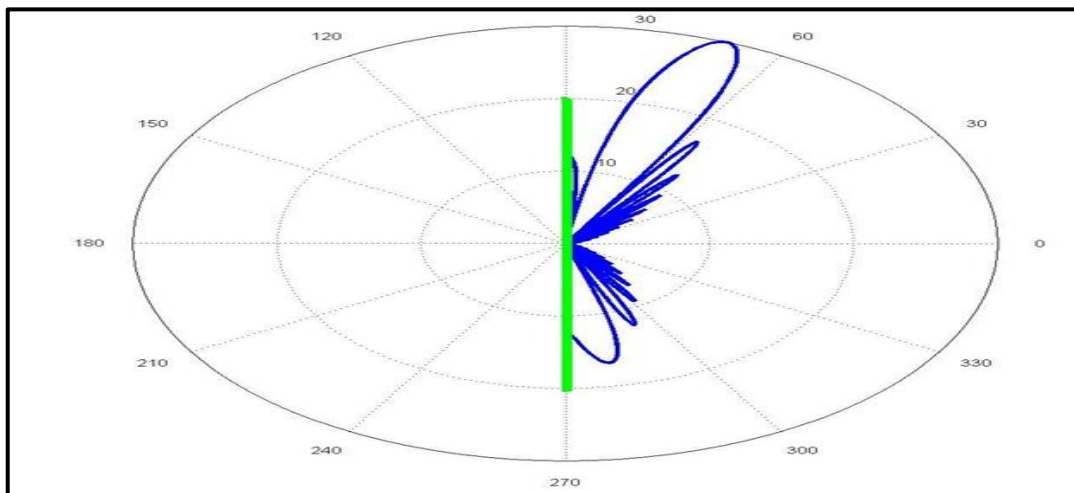
¹⁶ Το διάγραμμα ακτινοβολίας (radiation pattern) είναι ένα γράφημα του πώς ακτινοβολεί μια συγκεκριμένη κεραία ως συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων.



Διάγραμμα 2.5.1.1

Στο ανωτέρω διάγραμμα (διάγραμμα 2.5.4) ο κύριος λοβός έχει περιστρέφει κατά γωνία $\theta = 45^\circ$ που αντιστοιχεί σε χρονική καθυστέρηση $\tau = 90 \text{ msec}$.

Κατά την ηλεκτρονική περιστροφή του λοβού, ιδίως σε μεγάλες γωνίες ως προς το εγκάρσιο, παρατηρείται το φαινόμενο της δημιουργίας δευτερευόντων λοβών μεγάλου εύρους, που επηρεάζουν την διακριβωτική ικανότητα της συστοιχίας. Στο ακόλουθο διάγραμμα (διάγραμμα 2.5.5) σε μια συστοιχία 32 υδροφώνων παρατηρείται η δημιουργία ενός μεγάλου εύρους δευτερεύοντος λοβού, κατά την στροφή του άξονα του κύριου λοβού κατά γωνία $\theta = 70^\circ$ ως προς το εγκάρσιο.



Διάγραμμα 2.5.5

Στην συνάρτηση κατευθυντικότητας $b_{dB}(\theta)$ περιλαμβάνεται ο όρος $k * d$, όπου k είναι ο κυματάρθμος και ισούται¹⁷ με:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.5.9)$$

¹⁷ Παράγραφος 1.2, εξίσωση (1.2.7).

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει το γινόμενο $k * d$ για να μην δημιουργούνται δευτερεύοντες κύριοι λοβοί είναι:

$$k * d \leq 2 * \pi * \left(\frac{M-1}{M}\right) \quad (2.5.10)$$

Από την εξίσωση (2.5.9) και την (2.5.10) συνεπάγεται ότι η απόσταση μεταξύ των υδροφώνων πρέπει να είναι:

$$d \leq \lambda * \left(\frac{M-1}{M}\right) \quad (2.5.11)$$

Ωστόσο για να αποφευχθεί η δημιουργία δευτερευόντων κύριων λοβών έχει διαπιστωθεί πρακτικά ότι για το γινόμενο $k * d$ θα πρέπει να ισχύει:

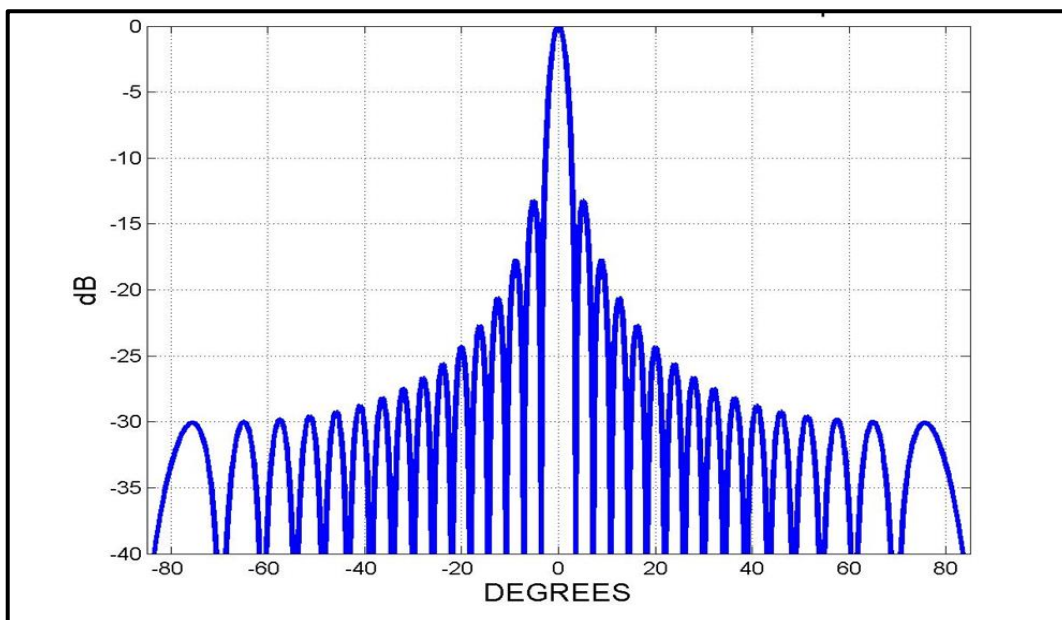
$$k * d \leq \pi \quad (2.5.12)$$

δηλαδή η απόσταση μεταξύ των υδροφώνων να είναι:

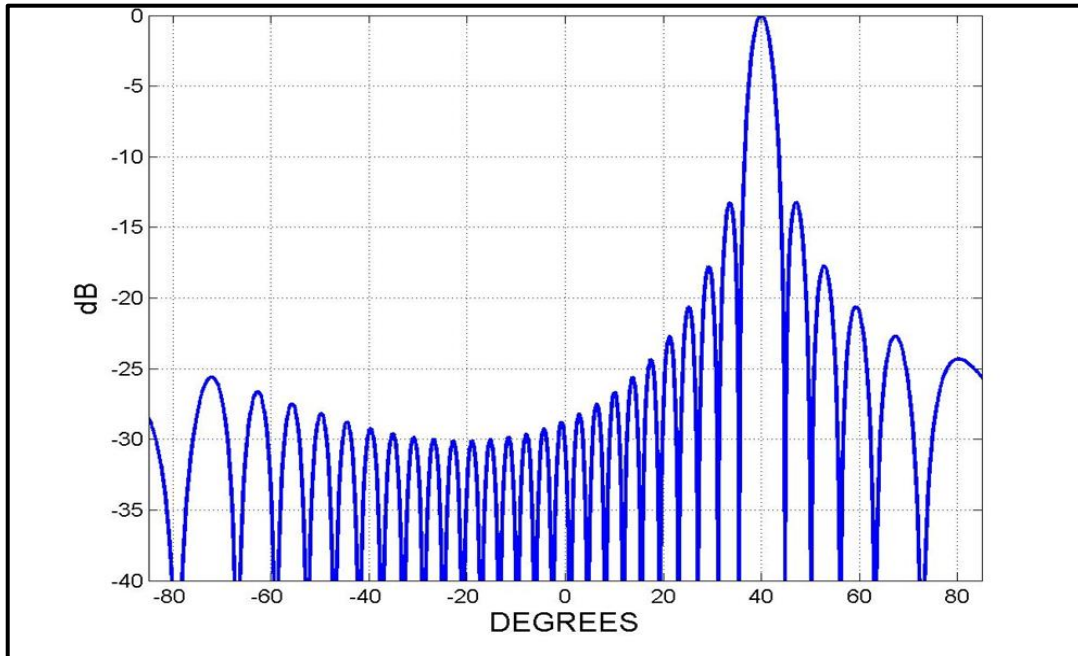
$$d \leq \frac{\lambda}{2} \quad (2.5.13)$$

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι οι συστοιχίες είναι αποτελεσματικότερες όταν τα υδρόφωνα είναι τοποθετημένα σε απόσταση ίση με το μισό μήκος κύματος της συχνότητας για την οποία έχουν σχεδιαστεί. Για τον λόγο αυτό η έρευνα σε χαμηλές συχνότητες απαιτεί συστοιχίες μεγαλύτερου μήκους.

Στα ακόλουθα δυο πρώτα διαγράμματα (διάγραμμα 2.5.6, 2.5.7) απεικονίζεται ο λοβός μιας συστοιχίας 32 υδροφώνων στην περίπτωση που ικανοποιείται η ανωτέρω συνθήκη (2.5.13), χωρίς περιστροφή και με περιστροφή του κύριου λοβού για γωνία $\theta = 40^\circ$ αντίστοιχα.



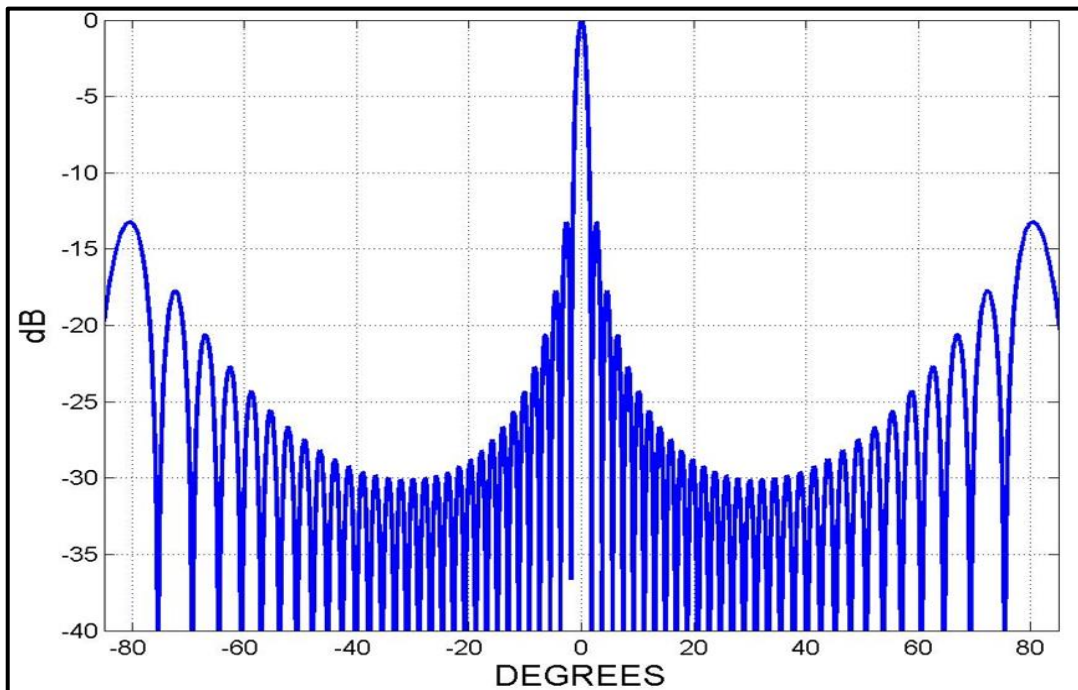
Διάγραμμα 2.5.6



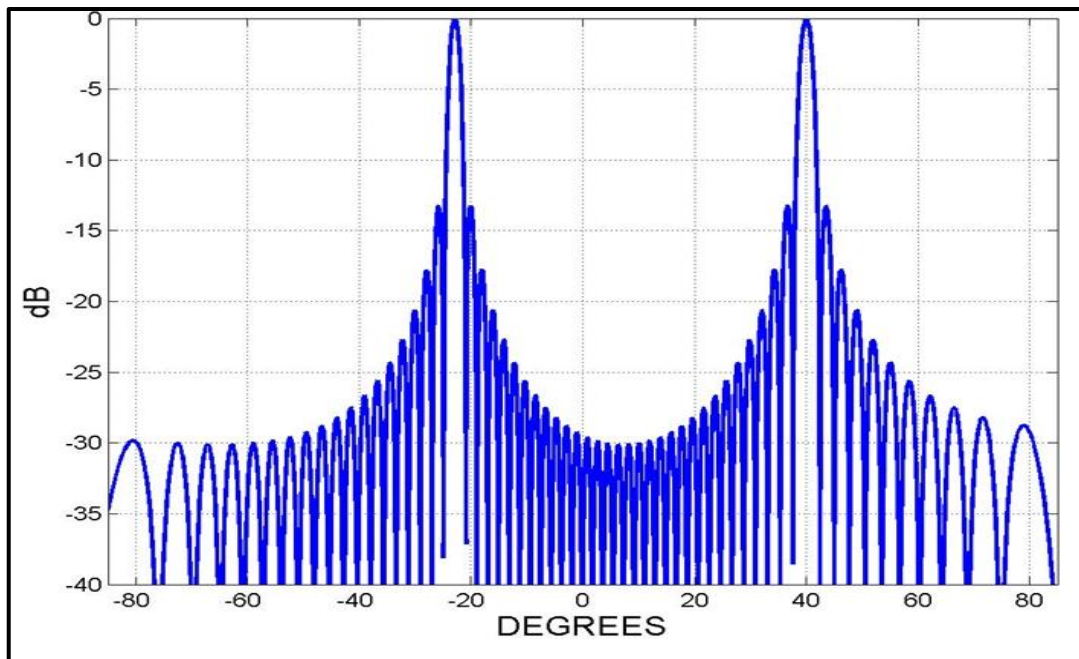
Διάγραμμα 2.5.7

Παρατηρείται ότι υφίσταται ένας κύριος λοβός ενώ οι δευτερεύοντες είναι αρκετά συμπιεσμένοι σε σχέση με αυτόν.

Στα δυο επόμενα διαγράμματα (διάγραμμα 2.5.8, 2.5.9) απεικονίζεται ο λοβός της ίδιας συστοιχίας στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται η ανωτέρω συνθήκη (2.5.13), χωρίς περιστροφή και με περιστροφή του κύριου λοβού στην ίδια γωνία αντίστοιχα.



Διάγραμμα 2.5.8



Διάγραμμα 2.5.9

Στα διαγράμματα 2.5.8 και 2.5.9 που η απόσταση των υδροφώνων είναι μεγαλύτερη από το μισό του μήκους κύματος ($d \geq \lambda/2$) παρατηρείται η εμφάνιση δευτερευόντων λοβών μεγάλου εύρους με ή χωρίς περιστροφή του κυρίου λοβού. Ιδίως στην περίπτωση της περιστροφής του δημιουργείται παρόμοιος κύριος λοβός σε μη επιθυμητή διόπτευση.

§6. Αλγόριθμος MUSIC

Ανάμεσα στις μεθόδους που έχουν προταθεί για επίλυση / βελτιστοποίηση του προβλήματος της εύρεσης της DOA είναι η χρήση αλγορίθμων που ανήκουν στην κατηγορία «Signal Subspace». Οι αλγόριθμοι αυτοί προσπαθούν να ξεχωρίσουν το σήμα από τον θόρυβο εκμεταλλευόμενοι τις ιδιότητες των πινάκων και των ιδιοτιμών τους. Στην κατηγορία αυτή ο πιο γνωστός αλγόριθμος είναι ο «MUltiple Signal Classification (MUSIC)».

Ο «MUSIC» είναι από τους πιο μελετημένους αλγορίθμους στην εύρεση της DOA. Η αρχική (κανονική) του μορφή αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως «Spectral MUSIC», ωστόσο κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί πολλές παραλλαγές, όπως «Root-MUSIC», «Constrained MUSIC», «Beamspace MUSIC», ενώ επίσης έχουν προταθεί διάφορες πιθανές βελτιώσεις τόσο του βασικού αλγορίθμου όσο και των παραλλαγών του.

Ο V.F Pisarenko, το 1973, θεωρείται ότι είναι ο πρώτος που ανακάλυψε την αρχική μορφή του αλγορίθμου, προσπαθώντας να εκτιμήσει τις συχνότητες σύνθετων ημιτονοειδών σημάτων με «λευκό»¹⁸ θόρυβο χρησιμοποιώντας μια μέθοδο συνδιακύμανσης¹⁹. Ο R. Schmidt, το 1977,

¹⁸ Λευκός θόρυβος: Τυχαίο σήμα που έχει ίση ένταση σε διαφορετικές συχνότητες, δίνοντάς του μια σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος.

¹⁹ Pisarenko harmonic decomposition (PHD).

εργαζόμενος αρχικά στην «Northrop Grumman» και στην συνέχεια ανεξάρτητα, το 1979, κατάφερε εφαρμόζοντας μια μορφή του αλγορίθμου να εξάγει αξιόπιστα αποτελέσματα από δεδομένα συστοιχιών αισθητήρων. Ο αλγόριθμος που προέκυψε τελικά ονομάστηκε «MUSIC».

Μια συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των αλγορίθμων υψηλής ανάλυσης (Superresolution Algorithms) που εκτελέστηκε από το εργαστήριο «LINCOLN» του «MIT» το 1984, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο «MUSIC» ήταν ο πιο αποτελεσματικός, με δυνατότητες πρακτικής εφαρμογής και υλοποίησης σε ένα σύστημα.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του αλγορίθμου στην εύρεση της DOA είναι τα ακόλουθα:

- α. Δυνατότητα ταυτοχρόνου εντοπισμού πολλαπλών στόχων.
- β. Μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις.
- γ. Υψηλή διακριβωτική ικανότητα.
- δ. Μπορεί να εφαρμοστεί σε σχετικά μικρό όγκο δεδομένων - αισθητήρων.
- ε. Πραγματικού χρόνου (real-time) επεξεργασία δεδομένων.

Τα μειονεκτήματα του είναι:

- α. Πολύ ευαίσθητος στην θέση των αισθητήρων.
- β. Απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύ.
- γ. Αισθητά μειωμένη απόδοση σε συμφασικά (coherent) σήματα.
- δ. Μειωμένη απόδοση σε μικρό SNR.
- ε. Απαιτείται οι αισθητήρες να είναι περισσότεροι από τους στόχους.

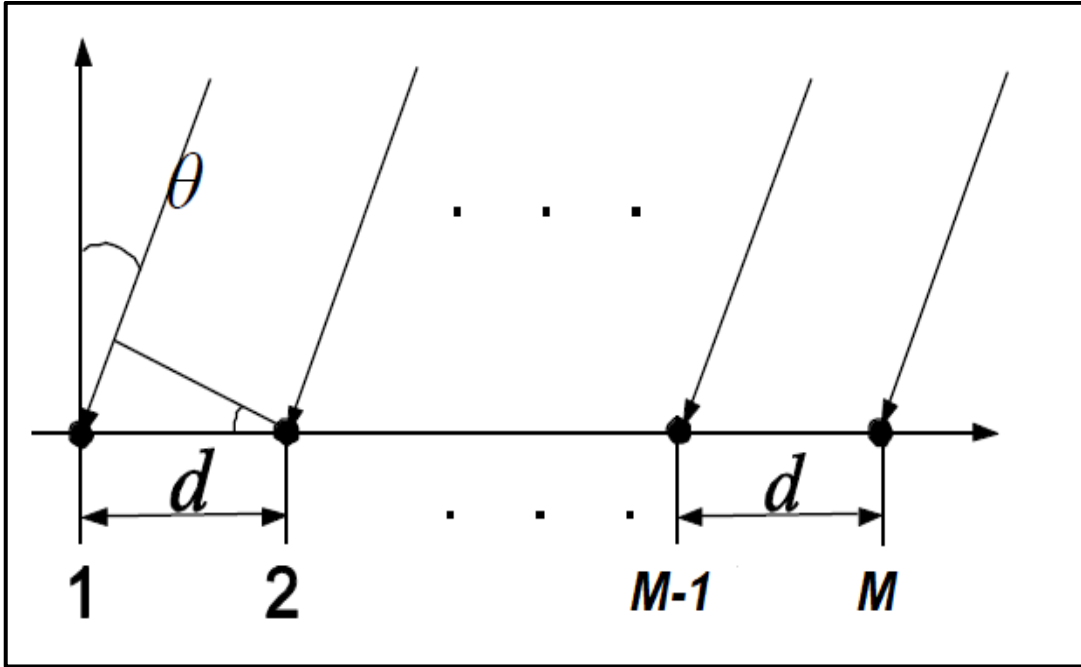
§6.1 Μαθηματικό Μοντέλο MUSIC

Έστω ότι έχουμε ένα σύνθετο ημιτονοειδές (πραγματικό) σήμα:

$$s(t) = \rho e^{j\omega t} \quad (2.6.1.1)$$

το οποίο προσπίπτει σε μια συστοιχία M υδροφώνων (εικόνα 2.6.1.1). Στο κάθε υδρόφωνο το σήμα θα φτάνει με μια χρονική καθυστέρηση λόγω της διαφοράς της απόστασης των υδροφώνων. Αυτή η χρονική καθυστέρηση μοντελοποιείται ως μια διαφορά φάσης:

$$s(t - t_0) = e^{-j\omega t_0} \rho e^{j\omega t} = e^{-j\omega t_0} s(t) \quad (2.6.1.2)$$



Εικόνα 2.6.1.1

Υποθέτουμε ότι σήμα προσπίπτει σε κάθε υδρόφωνο της συστοιχίας με μια γωνιά θ . Αν στο πρώτο υδρόφωνο το σήμα είναι:

$$\chi_1(t) = s(t) \quad (2.6.1.3)$$

τότε στο i υδρόφωνο το σήμα θα φτάνει με μια χρονική καθυστέρηση:

$$\Delta_i = \frac{(i-1)dsin\theta}{c} \quad (2.6.1.4)$$

και θα ισούται με:

$$\chi_i(t) = e^{-j\omega\Delta_i}s(t) = e^{-j\omega\frac{(i-1)dsin\theta}{c}}s(t) \quad (2.6.1.5)$$

Τότε το σήμα που λαμβάνει η συστοιχία από τους M αισθητήρες από την συγκεκριμένη πηγή θα είναι:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\omega\frac{dsin\theta}{c}} \\ e^{-j\omega\frac{2dsin\theta}{c}} \\ \vdots \\ e^{-j\omega\frac{(M-1)dsin\theta}{c}} \end{bmatrix} s(t) = a(\theta)s(t) \quad (2.6.1.6)$$

όπου $a(\theta)$ ονομάζεται «steering vector».

Αν έχουμε I narrowband πηγές σήματος και θόρυβο περιβάλλοντος N :

$$s_1(t) = \rho_1 e^{j\omega_1 t}, s_2(t) = \rho_2 e^{j\omega_2 t}, s_3(t) = \rho_3 e^{j\omega_3 t}, \dots, s_I(t) = \rho_I e^{j\omega_I t} \quad (2.6.1.7)$$

τότε το σήμα που λαμβάνεται από την συστοιχία μπορεί να αποδοθεί με την μορφή πινάκων:

$$X = AS + N \quad (2.6.1.8)$$

Όπου:

$$X = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T \quad (2.6.1.9)$$

$$A = [\alpha(\theta_1), \alpha(\theta_2) \dots \alpha(\theta_I)] \quad (2.6.1.10)$$

$$S = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_I(t)]^T \quad (2.6.1.11)$$

$$N = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T \quad (2.6.1.12)$$

Βάσει του αλγορίθμου, τα σήματα που λαμβάνονται από τα υδρόφωνα θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές, για τις οποίες υπολογίζεται ο πίνακας «συνδιακύμανσης» (covariance matrix) R_x . Επειδή όμως αυτό δεν γίνεται να γίνει υπολογιστικά, ο πίνακας προκύπτει από δειγματοληψία των σημάτων σε διακριτές χρονικές στιγμές (snapshots). Ο πίνακας R_x είναι στην συγκεκριμένη περίπτωση διαστάσεων: $M \times M$. Θεωρητικά δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_x = E\{XX^H\} \quad (2.6.1.13)$$

Αντικαθιστώντας το X με την εξίσωση (2.6.1.8) έχουμε:

$$R_x = E\{XX^H\} = E\{(AS + N)(AS + N)^H\} = AE\{SS^H\}A^H + E\{NN^H\} \quad (2.6.1.14)$$

Όμως:

$$E\{SS^H\} = R_s = \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_I^2\} \quad (2.6.1.15)$$

$$E\{NN^H\} = R_N = \sigma_0^2 I, \sigma_0: \text{ενταση θορυβου} \quad (2.6.1.16)$$

Από τις εξισώσεις (2.6.1.14), (2.6.1.15) και (2.6.1.16) προκύπτει ότι:

$$R_x = AR_s A^H + \sigma_0^2 I \quad (2.6.1.17)$$

Για $M > I$, ο πίνακας $AR_s A^H$ είναι εξ' ορισμού «singular», οπότε:

$$\det[AR_s A^H] = \det[R_x - \sigma_0^2 I] = 0 \quad (2.6.1.18)$$

που συνεπάγεται ότι σ_0^2 είναι ιδιοτιμή του πίνακα R_x . Επιπλέον για τον πίνακα R_x θα υπάρχουν και I ιδιοτιμές, σ_i^2 , για τις οποίες θα ισχύει:

$$\sigma_i^2 > \sigma_0^2 > 0 \quad (2.6.1.19)$$

Αν ορίσουμε ως u_i το i ιδιοδιάνυσμα του πίνακα R_x που αντιστοιχεί στην σ_i^2 ιδιοτιμή τότε:

$$R_x u_i = [AR_s A^H + \sigma_0^2 I] u_i = \sigma_i^2 u_i, \text{ για } i = 1, 2, \dots, M \quad (2.6.1.20)$$

για το οποίο ισχύει:

$$\sigma_i^2 > \sigma_0^2 > 0, \text{ για } i = 1, \dots, I \quad (2.6.1.21)$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_0^2, \text{ για } i = I + 1, \dots, M \quad (2.6.1.22)$$

Από τις εξισώσεις (2.6.1.20), (2.6.1.21) και (2.6.1.22) συνεπάγεται:

$$AR_s A^H u_i = \begin{cases} (\sigma_i^2 - \sigma_0^2) u_i, \text{ για } i = 1, \dots, I & (1) \\ 0, \text{ για } i = I + 1, \dots, M & (2) \end{cases} \quad (2.6.1.23)$$

Με αυτόν τον τρόπο διαχωρίζεται ο M -διανυσματικός χώρος του σήματος που λαμβάνει η συστοιχία σε δυο κάθετους διανυσματικούς υποχώρους, τον U_s που αντιστοιχεί στο σήμα και τον U_n που αντιστοιχεί στον θόρυβο.

$$[U_s \ U_n] = [u_1 \dots u_I \ u_{I+1} \dots u_M] \begin{cases} u_s: (\sigma_i^2 - \sigma_0^2) > 0 \text{ για } i = 1, \dots, I \\ u_n = 0 \text{ για } i = I + 1, \dots, M \end{cases} \quad (2.6.1.24)$$

Τα διανύσματα «steering vector $a(\theta_i)$ » ανήκουν στον υποχώρο των σημάτων, άρα είναι κάθετα στον υποχώρο του θορύβου, οπότε το εσωτερικό τους γινόμενο με οποιοδήποτε διάνυσμα του U_n θα ισούται με μηδέν:

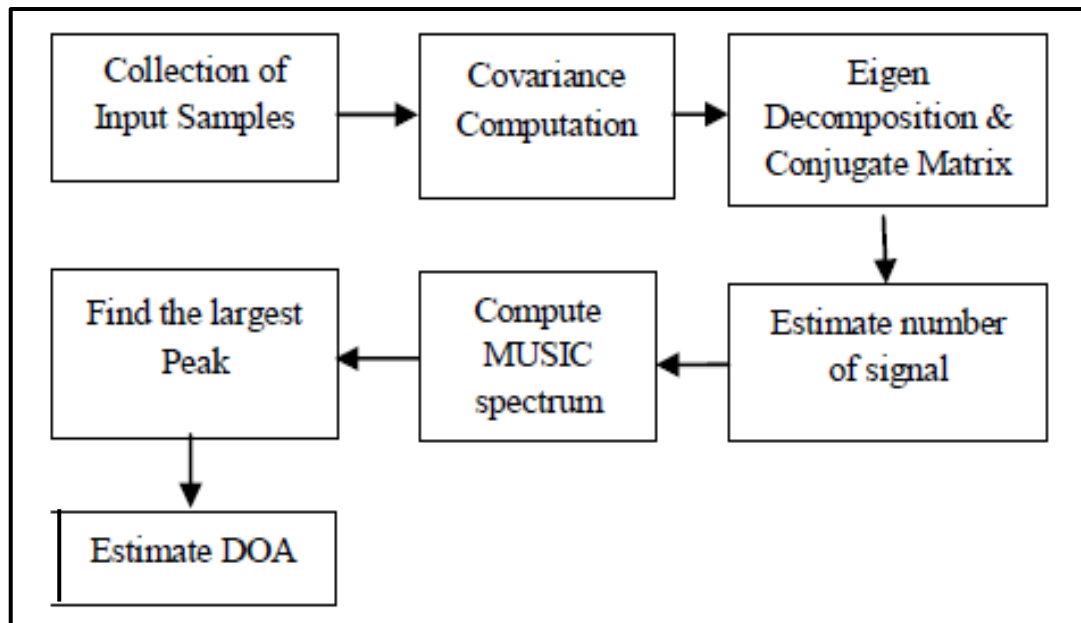
$$[a^H(\theta) U_n] = 0 \quad (2.6.1.25)$$

Ο αλγόριθμος ερευνά όλες τις γωνίες θ και υποτυπώνει το λεγόμενο ψευδοφάσμα του «MUSIC»:

$$P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) U_n} \quad (2.6.1.26)$$

Όποτε η γωνία $\theta = \theta_i$ τότε το $P(\theta)$ τείνει στο άπειρο και παρουσιάζει μια «κορυφή». Η υποτύπωση όλων αυτών των κορυφών αντιστοιχεί στις διοπτεύσεις των στόχων.

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικονα 2.6.1.2) φαίνονται σχηματικά τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος:



Εικόνα 2.6.1.2

§ 7. Σύνοψη Κεφαλαίου

Το ηχητικό σήμα κατά την διαδρομή του από τον στόχο μέχρι την ηχοεντοπιστική συσκευή υπόκειται σε απώλειες. Το σήμα που τελικά καταλήγει στην συσκευή, είναι ένα αναλογικό σήμα με θόρυβο το οποίο μέσω των υδροφώνων μετατρέπεται σε ηλεκτρικό. Για να ενισχυθεί η πιθανότητα εντοπισμού του επιθυμητού σήματος μέσα από τον θόρυβο και να αντληθούν πληροφορίες από αυτό σχετικά με την πηγή - στόχο, έχουν αναπτυχθεί διάφορες ψηφιακές τεχνικές επεξεργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι βασικές μέθοδοι ψηφιοποίησης ενός αναλογικού σήματος, η κύρια τεχνική επεξεργασίας που εφαρμόζεται στα συστήματα ευρυζωνικού εντοπισμού, οι βασικές μέθοδοι ψηφιοποίησης ενός αναλογικού σήματος και στο τέλος ένας πρωτότυπος αλγόριθμος οποίος στοχεύει στον εντοπισμό των τονικών θορύβων που παράγονται από τους στόχους.

Κεφάλαιο 3ο: Ανθυποβρυχιακός Πόλεμος – Ηχοεντοπιστικά Συστήματα

§ 1. Εισαγωγή.

Η κυριαρχία στον ανθυποβρυχιακό πόλεμο αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για τη διεξαγωγή επιχειρήσεων στη θάλασσα. Τον 21^ο αιώνα τα υποβρύχια, που ενισχύονται όλο και περισσότερο από αυτόνομα και τηλεκατευθυνόμενα μη επανδρωμένα οχήματα, παραμένουν η αιχμή του δόρατος στο υποθαλάσσιο πεδίο.

Τα υποβρύχια αποτελούν πολλαπλασιαστής ισχύος στο ναυτικό μιας χώρας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν συγκεκαλυμένα για τον θαλάσσιο έλεγχο σε όλες τις φάσεις των επιχειρήσεων. Έχουν τις δυνατότητες για ανάληψη ενός ευρύτατου φάσματος αποστολών όπως συλλογή πληροφοριών (INTEL), επιτήρηση και αναγνώριση (ISR), επιχειρήσεις κατά μονάδων επιφανείας (ASuW), επιχειρήσεις κατά Υ/Β (ASW), επιχειρήσεις κρούσης (STW) και επιχειρήσεις ειδικών δυνάμεων (SOF).

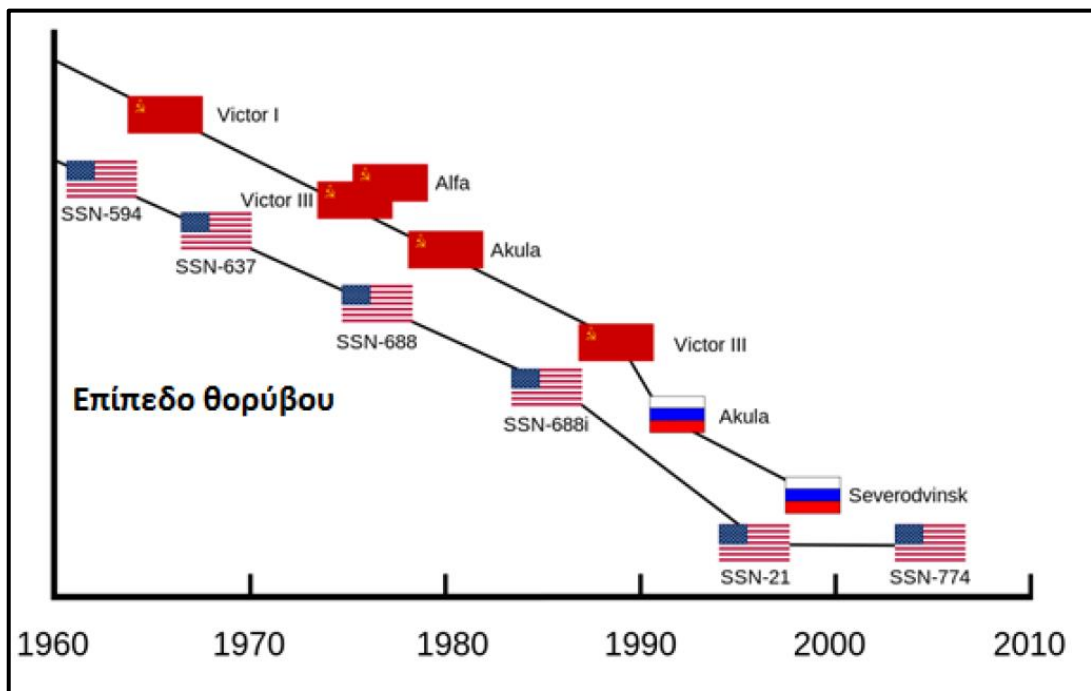
Το κυριο πλεονέκτημα τους είναι ότι μπορούν να αναπτυχθούν και να περιπολούν αφανώς, ανεξάρτητα και με υψηλό βαθμό αυτονομίας, σε περιοχές και υπό καταστάσεις που θα ήταν αδύνατο να χρησιμοποιηθούν άλλα μέσα χωρίς να εντοπιστούν ή να προκαλέσουν κλιμάκωση. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα, ιδίως στα αρχικά στάδια των επιχειρήσεων, καθόσον ένα υποβρύχιο μπορεί να εισχωρήσει στην περιοχή ενδιαφέροντος, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες προς τα κέντρα διοίκησης και λήψης αποφάσεων, παραμένοντας ανεντόπιστο από τις αντίπαλες δυνάμεις. Κατά την εξέλιξη των επιχειρήσεων και αναλόγως της επιχειρησιακής κατάστασης μπορεί είτε να εξασφαλίσει την αναγκαία κάλυψη για την άφιξη των δυνάμεων επιφανείας είτε, σε περίπτωση αποκλιμάκωσης, να συνεχίσει να παρέχει πληροφορίες για τις κινήσεις των αντίπαλων.

Η πιθανότητα και μόνο ύπαρξης υποβρυχίου μπορεί να επηρεάσει ολόκληρο των σχεδιασμό των επιχειρήσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η δράση των Υ/Β στον πόλεμο των Φώκλαντ²⁰. Η ύπαρξη δυο Υ/Β της Αργεντινής, του «SANTA FE» και του «SAN LUIS» καθυστέρησε την ανάπτυξη της βρετανικής ναυτικής δύναμης αρκετές μερες, η οποία αναγκάστηκε να αναλώσει σημαντικούς πόρους, μονάδες και ανθυποβρυχιακά όπλα, στην εξακρίβωση κάθε πιθανής επαφής, όπου πλείστον των περιπτώσεων αποδεικνύονταν ψευδοεπαφές. Από την αντίπαλη πλευρά, η ανακοίνωση εγκατάστασης ζώνης αποκλεισμού πέριξ των νήσων από τους Βρετανούς, η οποία θα φυλασσόταν από τα πυρηνικά τους Υ/Β, πριν ακόμα αυτά φτάσουν στην περιοχή, ανάγκασε τους Αργεντινούς να διακόψουν τις θαλάσσιες μεταφορές στρατευμάτων και οπλών στα Φώκλαντ, συνεχίζοντας την εφοδιαστική αλυσίδα με αερομεταφορές. Συνέπεια αυτού ήταν ορισμένα από τα βαρέα όπλα να μην

²⁰ Πόλεμος των Φώκλαντ (2 Απριλίου - 14 Ιουνίου 1982): Πόλεμος μεταξύ της Αργεντινής και του Ηνωμένου Βασιλείου με αντικείμενο δύο Βρετανικά υπερπόντια εδάφη στον Νότιο Ατλαντικό: τα Νησιά Φώκλαντ και τις Νήσοι Νότια Γεωργία και Νότιες Σάντουιτς.

φτάσουν ποτέ στις νήσους, δίνοντας το πλεονέκτημα αργότερα στους Βρετανούς κατά τον χερσαίο αγώνα.

Λόγω της αξίας αυτής του υποβρυχίου, στο χώρο του υποθαλάσσιου πολέμου συνυπάρχουν δυο αντιμαχόμενες τάσεις. Η πρώτη συνίσταται στην προσπάθεια κατασκευής ολοένα και πιο αθόρυβων υποβρυχίων που θα παραμένουν ανεντόπιστα από τα ηχοεντοπιστικά συστήματα του αντίπαλου και η δεύτερη συνίσταται στην προσπάθεια κατασκευής αποτελεσματικότερων ηχοεντοπιστικών συστημάτων που θα αποκαλύπτουν τα ολοένα και πιο αθόρυβα υποβρύχια του αντίπαλου. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η σχετική μείωση του παραγόμενου θορύβου, στα Υ/Β της Αμερικής και της Ρωσίας, από το 1960 έως το 2010. Επειδή το επίπεδο θορύβου ενός Υ/Β είναι άκρως απόρρητη πληροφορία, δεν υφίστανται ακριβή στοιχεία σε ανοιχτές πηγές. Ωστόσο από την εικόνα (εικόνα 3.1.1) γίνεται αντιληπτή η σημαντική μείωση του αυτοθορύβου τους, που καθιστά ολοένα και δυσκολότερο τον εντοπισμό τους.



Εικόνα 3.1.1

§ 2. Αρχές της ASW.

Επιτυχία στις ανθυποβρυχιακές επιχειρήσεις δεν πρέπει να θεωρείται αποκλειστικά η καταστροφή των εχθρικών υποβρυχίων, αλλά περισσότερο η στέρηση της δυνατότητας στον εχθρό να κάνει αποτελεσματική χρήση αυτών μέσω της αποτροπής, του εξαναγκασμού, του περιορισμού και εν τέλει της καταστροφής. Υπό το πρίσμα αυτό, η προστασία μιας ναυτικής δύναμης, των θαλάσσιων γραμμών μεταφορών και των θαλάσσιων συνόρων ενάντια στην υποβρύχια απειλή, εξαρτάται από παράγοντες όπως:

α. Το πόσο αθόρυβες είναι οι ναυτικές μονάδες ώστε να αναγκάσουν το υποβρύχιο να επιχειρήσει κοντά στην επιφάνεια. Όταν ένα υποβρύχιο δεν μπορεί να αναγνωρίσει στόχους αποκλειστικά μέσω των

ακουστικών αισθητήρων του, αναγκάζεται να προσεγγίσει και να χρησιμοποιήσει ετέρους αισθητήρες, όπως RADAR, ESM, περισκόπιο. Το γεγονός αυτό το αναγκάζει να επιχειρεί σε περισκοπικό βάθος (PD), ώστε να μπορεί να αναδύει τους ιστούς που φέρουν τις μη ακουστικές εντοπιστικές συσκευές. Στο βάθος αυτό, που κυμαίνεται περί τα 14m, το Υ/Β είναι ευάλωτο στον εντοπισμό από μέσα όπως RADAR, κάμερες, ΑΦΝΕ.

β. Την ικανότητα των ακουστικών αισθητήρων να εντοπίζουν, να ταξινομούν και να παρακολουθούν (DCL) ένα υποβρύχιο.

γ. Την ικανότητα των μη ακουστικών αισθητήρων να εντοπίζουν μικρού μεγέθους ίχνη, όπως είναι οι ιστοί, όταν το υποβρύχιο βρίσκεται πλησίον του PD.

δ. Την δυνατότητα αποτελεσματικού συντονισμού και ανάπτυξης όλων των μέσων που είναι ικανά για ASW. Η ανθυποβρυχιακή δράση δεν εκτελείται ποτέ από μεμονωμένη μονάδα αλλά από ένα σύνολο μέσων όπως μονάδες επιφανείας, ελικόπτερα, ΑΦΝΕ καθώς επίσης και πληροφορίες από δορυφόρους, στατικά συστήματα κ.α.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι το κυνήγι υποβρυχίων είναι μια χρονοβόρα και συχνά ατελέσφορη διαδικασία. Στην πράξη τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν χρησιμοποιούνται τακτικές οι οποίες αποτρέπουν τα Υ/Β από την επίτευξη της αποστολής τους. Συναφώς πρωτεύων στόχος του ASW είναι η αποτροπή των αντίπαλων υποβρυχίων από τη εκπλήρωση των αποστολών τους και ταυτόχρονα ο περιορισμός της αρνητικής επίδρασης που επιβάλλουν στις αποστολές που ανατίθενται στις φίλιες δυνάμεις.

Λόγω των ανωτέρω κεντρικός πυλώνας του ανθυποβρυχιακού πολέμου είναι η αρχή της «άρνησης» (Denial). Άρνηση πρόσβασης στο θέατρο επιχειρήσεων των αντίπαλων υποβρυχίων και παράλληλα την άρνηση οποιασδήποτε ευκαιρίας να επηρεάσουν δυσμενώς τις ημέτερες αποστολές.

§2.1 Ενεργητική και Παθητική Ανθυποβρυχιακή Δράση.

Η δράση στον ανθυποβρυχιακό πόλεμο χωρίζεται σε δυο κυρίες κατηγορίες: την ενεργητική και την παθητική. Σε περιπτώσεις που η επιχειρησιακή κατάσταση το επιβάλλει μπορεί να γίνει συνδυασμός των δυο δράσεων ταυτόχρονα ή με χρονικό - χωρικό διαχωρισμό. Κάθε δράση έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία τις καθιστούν κατάλληλες για συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Βασικό μειονέκτημα της ενεργητικής έρευνας είναι ότι μπορεί να γίνει αντιληπτή από τα Υ/Β σε αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες από ότι τα ενεργητικά συστήματα μπορούν να τα εντοπίσουν. Για παράδειγμα, τα ενεργά SONAR μεσαίων συχνοτήτων μπορεί να εντοπιστούν σε αποστάσεις από 15% έως 30% μακρύτερα από το θόρυβο που προκαλεί μια μικρή ναυτική δύναμη που πλέει με ταχύτητα 18kts. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα στα Υ/Β για έγκαιρη ανάληψη μέτρων αποφυγής του εντοπισμού, που συνήθως είναι η

απομάκρυνση από την δύναμη που διεξάγει την Α/Υ δράση και εκμετάλλευση των βαθυθερμογραφικών συνθήκων.

Σε αντίθεση τα παθητικά μέσα δεν προσφέρουν καμία ένδειξη στον αντίπαλο. Ωστόσο εξαρτώνται αποκλειστικά από το αν αντίπαλος παράγει ανιχνεύσιμη ακουστική ενέργεια. Όπως όμως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τα υποβρύχια έχουν σχεδιαστεί να ελαχιστοποιούν το επίπεδο θορύβου τους, δεδομένου ότι η επιτυχία τους εξαρτάται από την ικανότητά τους να παραμένουν ανεντόπιστα. Επομένως τα σύγχρονα υποβρύχια είναι δυσκολότερο να ανιχνευθούν με παθητικά μέσα.

Το μειονέκτημα αυτό της παθητικής ερευνάς μπορεί να αντιμετωπιστεί εν μέρει με την βελτίωση του SNR. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τους κάτωθι τρόπους:

α. Μειώνοντας τον αυτό-θόρυβο των μονάδων ή συστημάτων που εκτελούν την παθητική έρευνά.

β. Μειώνοντας τον θόρυβο από την ροή, όταν πρόκειται για μονάδες επιφανείας ή Υ/Β. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι απαιτείται τα πλοία που εκτελούν επιχειρήσεις παθητικής έρευνας να χρησιμοποιούν μικρές έως πολύ μικρές ταχύτητες. Ως εκ τούτου, οι παθητικές έρευνες περιοχής από μονάδες επιφανείας είναι χρονοβόρες.

γ. Βελτιώνοντας την επεξεργασία του σήματος.

Αντίστοιχα τα Υ/Β για να αποφύγουν τον παθητικό εντοπισμό, εφόσον υποπτεύονται ή έχουν πληροφορίες ότι μπορεί να συμβαίνει, μπορούν να εκτελέσουν τα ακόλουθα:

α. Να καταδυθούν βαθύτερα ή και να μειώσουν σημαντικά την ταχύτητα τους, δηλαδή ουσιαστικά να μειώσουν τον θόρυβο που παράγουν.

β. Να χρησιμοποιήσουν ψευδοστόχους για παραπλάνηση.

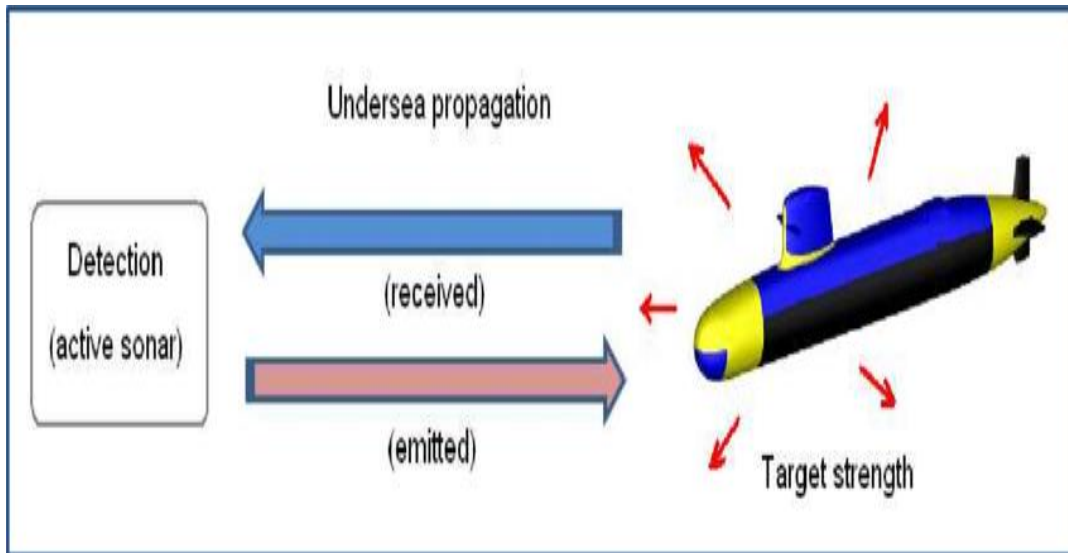
γ. Να εκμεταλλευτούν τον θόρυβο περιβάλλοντος για κάλυψη όπως επι παραδείγματι να προσεγγίσουν εμπορικούς στόχους, ο θόρυβος των οποίων υπερκαλύπτει τον δικό τους.

§ 3. Ηχοεντοπιστικά Συστήματα

Η πρωταρχική χρήση εφαρμογών ήχου στις ναυτικές επιχειρήσεις αφορά στον ηχητικό εντοπισμό στόχων στο θαλάσσιο περιβάλλον και κυρίως στο υποθαλάσσιο. Τα ηχοεντοπιστικά συστήματα χωρίζονται ανάλογα με την λειτουργία τους, σε αντιστοιχία με την δράση όπως είδαμε στο προηγούμενη παράγραφο, σε δυο βασικές κατηγορίες, τα ενεργητικά και τα παθητικά.

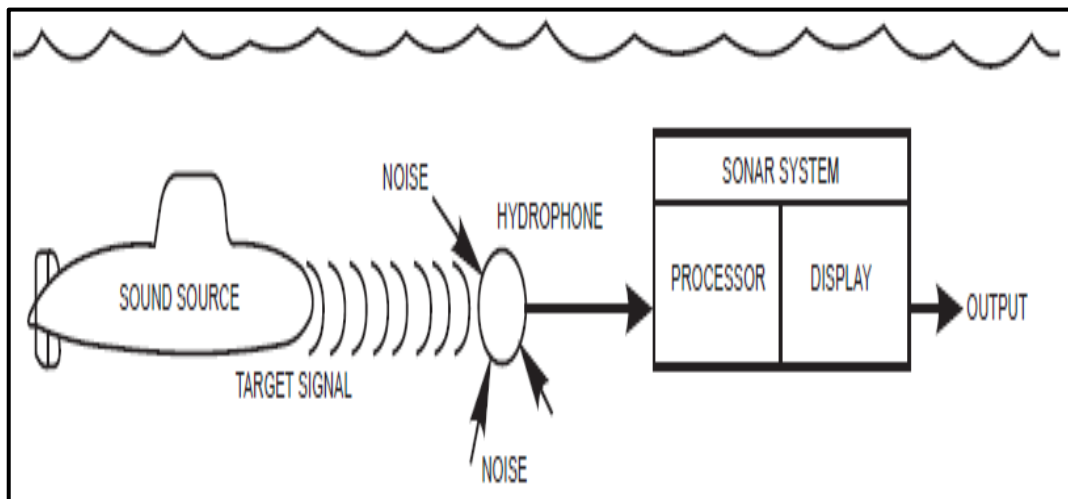
Τα ενεργητικά βασίζουν την λειτουργία τους στη εκπομπή ακουστικών κυμάτων και στη λήψη του ανακλώμενου από τον στόχο ακουστικού κύματος

(εικόνα 3.1.1). Η αρχή λειτουργίας τους είναι παρόμοια με τα RADAR με την διαφορά ότι δεν χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνητικά κύματα αλλά ακουστικά.



Εικόνα 3.3.1

Τα παθητικά συστήματα παρακολουθούν τον ήχο στο νερό για να προσδιορίσουν την παρουσία ενός στόχου (εικόνα 3.1.2). Αυτό σημαίνει ότι η επιτυχία εντοπισμού εξαρτάται από τον εκπεμπόμενο ήχο του στόχου σε σχέση με τον θόρυβο του περιβάλλοντος. Από την άλλη τους δίνει το πλεονέκτημα ότι η χρήση τους δεν είναι ανιχνεύσιμη από τις αντίπαλες δυνάμεις. Δεδομένου ότι η εξασθένιση του ήχου αυξάνεται εκθετικά όσο αυξάνεται η συχνότητα, τα παθητικά συστήματα εστιάζουν σε ζώνες χαμηλής συχνότητας.



Εικόνα 3.3.2

Τα σύγχρονα ενεργητικά συστήματα SONAR έχουν δυνατότητες παθητικής ερευνάς. Ωστόσο, πολλά από τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν σε μεσαίες έως υψηλές συχνότητες. Σε αυτές τις συχνότητες ο εντοπισμός είναι εφικτός μόνο για πολύ θορυβώδεις στόχους ή για φορείς με πολύ χαμηλό επίπεδο αυτοθορύβου. Αυτό τα καθιστά ακατάλληλα για λειτουργίες παθητικής έρευνας από μονάδες επιφάνειας

εναντίον υποβρυχίων και χρήση τους περιορίζεται κυρίως στην αυτοπροστασία δηλαδή στην ανίχνευση торπιλών. Ομοίως η χρήση τους από Υ/Β είναι πολύ περιορισμένη γιατί προδίδει την θέση τους.

§4. Παθητικά SONAR

Λόγω του ανεντόπιστου από τις αντίπαλες δυνάμεις τα παθητικά συστήματα έχουν ευρεία χρήση στον ανθυποβρυχιακό πόλεμο. Εφόσον στηρίζονται αποκλειστικά στον ήχο που παράγει η πηγή για τον εντοπισμό της, οι κυρίες προσπάθειες βελτίωσης της απόδοσης τους εστιάζονται στην ψηφιακή επεξεργασία του λαμβανομένου σήματος. Στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζεται η βασική αρχή λειτουργίας τους και οι κύριοι τύποι που χρησιμοποιούνται επι του παρόντος.

§4.1. Εξίσωση Παθητικού SONAR

Η αρχή λειτουργίας των παθητικών συστημάτων βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$SL - TL \geq NL - DI + DT \quad (3.4.1)$$

Όπου:

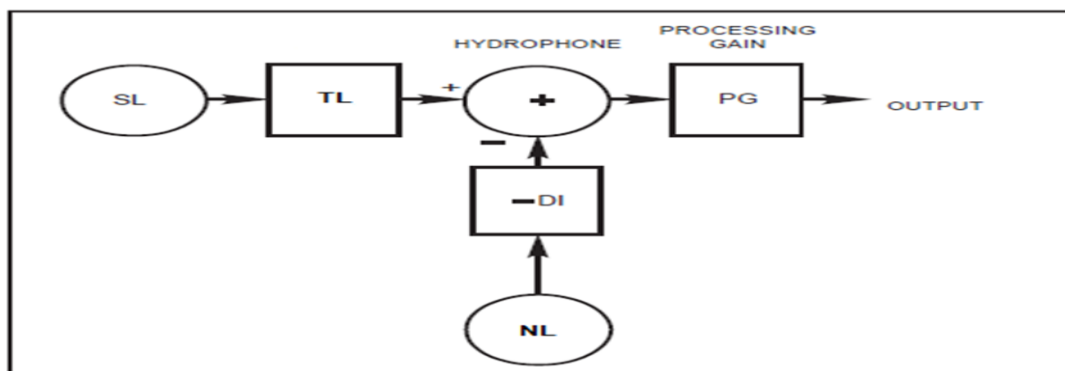
α. SL (Sound Level): Το εκπεμπόμενο επίπεδο ακουστικής πίεσης του στόχου, δηλαδή αυτοθόρυβος του στόχου, προς την κατεύθυνση του παθητικού SONAR σε κάποιο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.

β. TL (Transmission Loss): Απώλειες διάδοσης.

γ. NL (Noise Level): Επίπεδο θορύβου, αυτοθορύβου και περιβάλλοντος, στην περιοχή του δέκτη.

δ. DI (Directivity Index): Δείκτης κατευθυντικότητας της συστοιχίας λήψης.

ε. DT (Detection Threshold): Απαιτούμενη τιμή του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) στον δέκτη για την επίτευξη συγκεκριμένης πιθανότητας εντοπισμού.



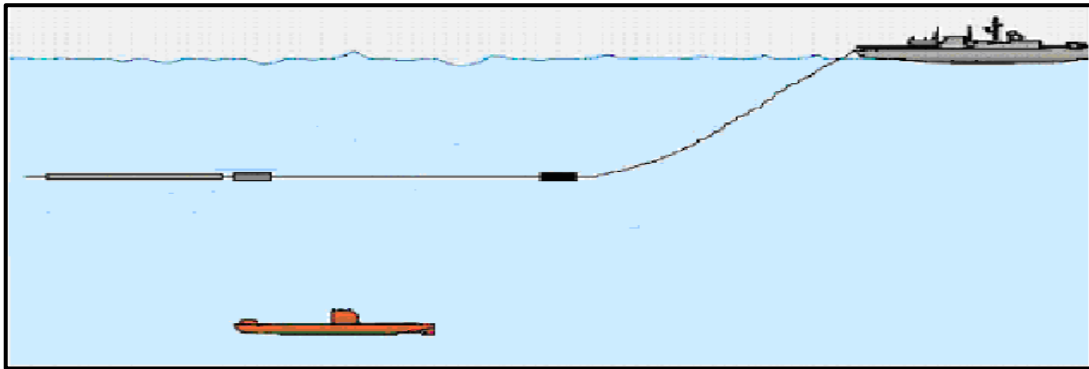
Εικόνα 3.4.1.1

Οι ανωτέρω παράμετροι εκφράζονται σε Decibel οπότε αποτελούν απλά αλγεβρικά αθροίσματα. Για την επίτευξη εντοπισμού θα πρέπει το αριστερό μέρος της εξίσωσης να είναι μεγαλύτερο από το δεξιό. Η πιθανότητα εντοπισμού εκφράζεται από τον δείκτη FOM (Passive Figure of Merit) και είναι μέγιστη απώλεια (TL) κατά την οποία το σύστημα μπορεί να εντοπίζει το στόχο τουλάχιστον κατά 50% του χρόνου που είναι παρόν. Εκφράζεται σε dB και ο υπολογισμός του γίνεται από πίνακες που εξαρτώνται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά της πηγής, του δέκτη και ενός μέσου εκπαιδευμένου χειριστή.

§ 4.2 Τύποι Παθητικών SONAR.

α. Towed Array Sonar (TAS):

Είναι μια γραμμική συστοιχία υδροφώνων η οποία ρυμουλκείται από πλοία επιφανείας ή Υ/Β. Είναι SONAR χαμηλών συχνοτήτων με δυνατότητα εξαιρετικά αξιόπιστων εντοπισμών αθόρυβων Υ/Β, χωρίς ψευδοστόχους και σε μεγάλες αποστάσεις.



Εικόνα 3.4.2.1

Τα κυριότερα πλεονεκτήματά τους είναι:

(1) Το μεταβλητό βάθος: Μπορούμε να μεταβάλουμε το βάθος ανάλογα με το μήκος του καλωδίου ρυμούλκησης και την ταχύτητα της πλατφόρμας. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να υπερκεράσουμε τα επιφανειακά στρωματά.

(2) Ικανοποιητική ακρίβεια διόπτευσης, η οποία εξαρτάται από τις διαστάσεις της συστοιχίας ($<1,5^\circ$).

(3) Δυνατότητα λήψης και ανάλυσης εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία καθόσον:

α/ Οι πολύ χαμηλές συχνότητες διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις λόγω των χαμηλών απωλειών διάδοσης.

β/ Οι πολύ χαμηλές συχνότητες καταπιέζονται δύσκολα ακόμα και από τις πιο σύγχρονες μονάδες (πλοία, Υ/Β).

γ/ Στις χαμηλές συχνότητες, κυρίως $< 500\text{Hz}$, υπάρχουν οι χαρακτηριστικές συχνότητες των μονάδων (μηχανές, αξονικά, προπέλες κ.α) από τις οποίες μπορεί να γίνει ταυτοποίηση του στόχου.

(4) Μειωμένη επίδραση αυτοθορύβου λόγω της απόστασης από την πλατφόρμα παράσης.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα τους είναι:

(1) Δεν παρέχουν απόσταση στόχου.

(2) Η επιβολή περιορισμών στους χειρισμούς / ταχύτητα της πλατφόρμας κατά την διάρκεια που είναι αναπτυγμένο.

(3) Μειωμένη απόδοση, ιδίως σε μεγάλου μήκους ΤΑΣ, λόγω της τεχνικής αδυναμίας να διατηρηθεί συνέχεια η γραμμική διάταξη της συστοιχίας ενώ είναι αναπτυγμένη στην θάλασσα.

β. Flank Array Sonar (FAS):

Αποτελούνται από πλευρικές γραμμικές συστοιχίες υδροφώνων εγκατεστημένες κατά μήκος των πλευρών των Υ/Β (εικόνα 3.4.2.2). Τα συστήματα FAS μοιάζουν στην λειτουργία με τα ΤΑΣ, πλην όμως έχουν πλεονέκτημα ως προς την μεγαλύτερη ευελιξία χειρισμών.

Στα εν λόγω συστήματα δεν υπεισέρχεται αμφιβολία διοπτεύσεως καθόσον έχουν διαφορετική συστοιχία λήψης για κάθε πλευρά, ωστόσο επηρεάζονται εντονότερα από τον αυτοθόρυβο του φορέα-Υ/Β και επίσης υπάρχει μικρότερη κάλυψη του ακουστικού φάσματος λόγω του μικρότερου μήκους συστοιχιών, οι οποίες περιορίζονται από το μήκος του Υ/Β.



Εικόνα 3.4.2.2²¹

²¹ http://www.thales7seas.com/html_2014/products/509/thales_Planar_Flank_AS.pdf, όπως ανακτήθηκε την 06/07/2020.

γ. Ηχοσημαντήρες:

Οι παθητικοί ηχοσημαντήρες αποτελούν χαμηλού κόστους μικρογραφίες παθητικών συστημάτων SONAR, οι οποίοι συνήθως ρίπτονται από αεροσκάφη ναυτικών επιχειρήσεων (ΑΦΝΕ) ή ελικόπτερα (εικόνα 3.4.2.3).



Εικόνα 3.4.2.3

Παρέχουν στοιχεία για έρευνά, εντοπισμό, αναγνώριση, παρακολούθηση και επίθεση εναντίον Υ/Β, συνήθως για καταστάσεις θαλάσσης έως 5.

Τα στοιχεία που συλλέγονται από τους Η/Σ μεταδίδονται μέσω ραδιοζεύξης στο ιπτάμενο μέσο ή σε έτερη κατάλληλη πλατφόρμα για ανάλυση (εικόνα 3.4.2.4). Τα περισσότερα μοντέλα Η/Σ είναι αναλώσιμα με τυπική περίοδο λειτουργίας περί τους 8 ώρες ενώ τα πιο σύγχρονα διαθέτουν και GPS για την μετάδοση τους ακριβούς θέσης τους.

Οι Η/Σ έχουν μικρή κατευθυντικότητα λόγω μεγέθους τους. Ωστόσο εξαιτίας του πολύ χαμηλού αυτοθορύβου που παρουσιάζουν, η απόδοση τους είναι υψηλή.



Εικόνα 3.4.2.4²²

²² <https://gdmissionsystems.ca/products/underwater-warfare/sonobuoy-processing/sonobuoy-processor>, όπως ανακτήθηκε την 06/07/20.

δ. Στατικά Συστήματα Επιτήρησης:

Χρησιμοποιούνται για παθητικό (κυρίως) εντοπισμό Υ/Β και τοποθετούνται σε επιλεγμένα σημεία του βυθού της θαλάσσιας περιοχής που θέλουμε να επιτηρηθεί. Ήδη από τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο οι βρετανοί είχαν τοποθετήσει στις εισόδους ναυστάθμων και λιμένων συστοιχίες υδροφώνων ελεγχόμενων από σταθμούς ξηράς για τον εντοπισμό υποβρύχιας απειλής.

Η σύγχρονη αντίληψη όσον αφορά στον Α/Υ πόλεμο και όχι μόνο έχει προσδώσει στα συστήματα αυτά πρωτεύοντα ρολό λόγω της μεταφοράς της περιοχής δράσης από τους ανοικτούς ωκεανούς στα παράκτια ύδατα.

Τα παράκτια ύδατα χαρακτηρίζονται από υψηλή ναυτιλιακή κίνηση, περιορισμό της διάδοσης του ήχου σε μεγάλες αποστάσεις και ισχυρές αντηχήσεις. Ταυτόχρονα η σύγχρονη Α/Υ απειλή συνίσταται σε συμβατικά Υ/Β χαρακτηριζόμενα από μικρό μέγεθος, χαμηλή ακουστική υπογραφή, και αυξημένη διάρκεια παραμονής σε βάθος.

Για την κάλυψη των συγχρόνων απαιτήσεων έχουν σχεδιασθεί και αναπτυχθεί στατικά δίκτυα ακουστικών δεκτών, τα οποία μπορούν ευκολά να αναπτυχθούν σε συγκεκριμένες περιοχές (πχ. στενά) και να παραμείνουν σε λειτουργία για διάστημα αρκετών μηνών χωρίς την απαίτηση αλλαγής μπαταριών τροφοδοσίας.

Οι ακουστικοί δέκτες βρίσκονται ποντισμένοι στο βυθό και έχουν δυνατότητα ενσύρματης ή ασύρματης ανταλλαγής πληροφοριών, με βασικό πλεονέκτημα την απουσία αυτοθορύβου.



Εικόνα 3.4.2.5²³

²³ <https://dsit.co.il/sonar/anti-submarine-warfare-asw-systems/seashield-static-sonar-sas/>

Τα ακουστικά δεδομένα συλλέγονται και αποστέλλονται σε κατάλληλο σταθμό ξηράς όπου γίνεται επεξεργασία και αξιολόγηση των πληροφοριών που προκύπτουν. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν στοιχεία για την θέση, πορεία, ταχύτητα, βάθος καθώς και εκτίμηση του τύπου του στόχου.

§ 5. Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε αρχικά μια εισαγωγή στον ανθυποβρυχιακό πόλεμο και στις βασικές αρχές που τον διέπουν. Ο κύριος στόχος είναι η «άρνηση» της δράσης των αντίπαλων υποβρυχίων, δηλαδή ο περιορισμός και η αποτροπή τους πάρα η καταστροφή τους, έννοια που είναι συνήθως συνυφασμένη με αυτή του πολέμου. Εν συνέχεια αναλυθήκαν οι κύριες δράσεις του Α/Υ πολέμου, η ενεργητική και η παθητική, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Για τον εντοπισμό στόχων τα κυρία μέσα που χρησιμοποιούνται είναι οι ηχοεντοπιστικές συσκευές, ενεργητικές και παθητικές σε αντιστοιχία με τις μορφές δράσης. Στο τέλος έγινε ιδιαίτερη αναφορά στα παθητικά συστήματα, στην αρχή λειτουργίας τους και στις κυρίες κατηγορίες τους, καθώς και παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα και θα αποτελέσουν πεδίο εφαρμογής του αλγόριθμου «MUSIC», που πραγματεύεται η παρούσα εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Επιχειρησιακή Ανάλυση Αιγαίου

§1. Περιγραφή Αιγαίου Πελάγους – Γεωπολιτική Σημασία

Αιγαίο πέλαγος ονομάζεται η θαλασσιά περιοχή της λεκάνης της Μεσογείου μεταξύ της ανατολικής ακτογραμμής του ηπειρωτικού κορμού της Ελλάδος και της Μ. Ασίας, που αποκαλείται ενίοτε και Αρχιπέλαγος. Σύμφωνα με την μυθολογία το όνομα προέρχεται από τον Αιγαία²⁴, βασιλιά της Αθήνας και πατέρα του Θησέα, ο οποίος έπεσε και πνίγηκε στα νερά του Πελάγους από το ναό του Ποσειδώνα στο Σούνιο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ήδη από την αρχαιότητα εντοπίζεται επιμερισμός του Αιγαίου σε τμήματα με πιο γνωστά:

- α. Το Μυρτώο Πέλαγος, μεταξύ Σουνίου και Κυθήρων.
- β. Το Θρακικό Πέλαγος, μεταξύ Θάσου, Σαμοθράκης και Θρακικών ακτών.
- γ. Το Ικάριο Πέλαγος, μεταξύ Χίου και Κω.
- δ. Κρητικό πέλαγος, βόρεια της Κρήτης.
- ε. Καρπάθιο πέλαγος, μεταξύ Καρπάθου και Μικρασιατικών ακτών.
- στ. Ευβοϊκή θάλασσα, που περιβρέχει την νήσο Εύβοια.
- ζ. Δωδεκανησιακή θάλασσα, που περιβάλλει τα Δωδεκάνησα.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα του Αιγαίου είναι ότι αποτελείται από πολλά νησιωτικά συμπλέγματα, με κυριότερα τις Κυκλάδες, τα Δωδεκάνησα και τις Σποράδες.



Εικόνα 4.1.1

²⁴ Ο ένατος στη σειρά μυθικός βασιλιάς της αρχαίας Αθήνας τον 13ο αιώνα.

Καταλαμβάνει μια έκταση της τάξεως των 240.000χλμ και το μέγιστο βάθος εντοπίζεται μεταξύ Κρήτης και Κυκλάδων (2.249μ). Περιέχει πολυάριθμα νησιά και βραχονησίδες, πάνω 2500. Η Ελλάδα είναι η δεύτερη χώρα στην Ευρώπη, μετά την Νορβηγία, με το μεγαλύτερο μήκος ακτών ενώ κατέχει την πρώτη θέση στην Ε.Ε, με μήκος 13.676χλμ (τα χερσαία σύνορα είναι περίπου 1.228χλμ). Στον χάρτη που ακολουθεί (εικόνα 4.1.2) μπορούμε ευκολά να διαπιστώσουμε ότι ο γεωγραφικός χώρος που καταλαμβάνει η Ελλάδα και κατ' επέκταση το Αιγαίο αποτελεί ένα σημαντικό κόμβο θαλάσσιων οδών, μεταξύ της Ευρώπης και της Ασίας.

Από το Αιγαίο διέρχονται δύο κύριοι άξονες, εκείνος που συνδέει την Κεντρική Ευρώπη με τη Μεσόγειο και την Αφρική ή τη Μέση Ανατολή, διερχόμενος δια των Βαλκανίων και του λιμένα της Θεσσαλονίκης και εκείνος που συνδέει τον Εύξεινο Πόντο με την ίδια περιοχή, διερχόμενος διά των Στενών Βοσπόρου - Δαρδανελίων.



Εικόνα 4.1.2.²⁵

Από τα ανωτέρω γίνεται αντιληπτό ότι το Αιγαίο είναι μια ζωτικών συμφερόντων περιοχή, η επιτήρηση της οποίας εμπίπτει στις αρμοδιότητες της Ελλάδας. Οι δυσκολίες που παρουσιάζει το έργο αυτό είναι ποικίλες κυρίως λόγω της μεγάλης ναυτιλιακής κίνησης και της μορφολογίας. Επιπρόσθετα τα τελευταία χρόνια έχει προκύψει ένα νέο ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα, αυτό της παράνομης μετανάστευσης λόγω του ότι το Αιγαίο αποτελεί εύκολη πρόσβαση από την Ασία προς την Ευρώπη.

Από στρατιωτικής άποψης αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι ναυτικές μονάδες των χωρών που εδρεύουν στην Μαύρη Θάλασσα, ιδιαιτέρως της Τουρκίας και της Ρωσίας, για να αναπτυχθούν στην Μεσόγειο θα πρέπει να διέλθουν από το Αιγαίο.

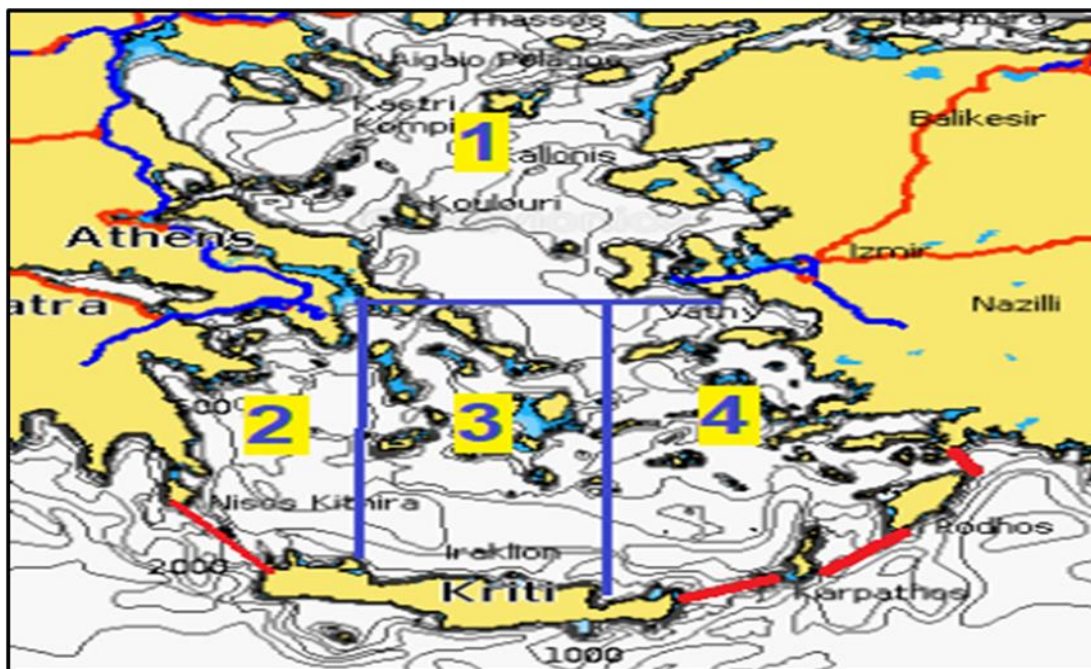
²⁵ Γεωπολιτική της Ελλάδας, Γ. Πρεβελάκης, Libro, Αθήνα 1998.

§2. Επιχειρησιακή Ανάλυση

Σκοπός της ανάλυσης είναι να προσδιοριστούν οι παράγοντες εκείνοι που επηρεάζουν την διάδοση των ηχητικών κυμάτων στην θάλασσα του Αιγαίου, να υπολογιστούν οι απώλειες συναρτήσει της απόστασης ώστε στην συνέχεια να διερευνηθούν τα οφέλη από την τοποθέτηση παθητικών συστοιχιών υδροφώνων. Για τον λόγο αυτό το Αιγαίο Πέλαγος χωρίστηκε σε τέσσερις (4) γεωγραφικές περιοχές όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (χάρτης 4.2.1) με βάση:

α. Των ιδιαίτερων γεωγραφικών και βαθυθερμογραφικών χαρακτηριστικών τους.

β. Την επιχειρησιακή τους αξία.



Χάρτης 4.2.1

Αναλυτικά οι περιοχές αυτές είναι:

α. Περιοχή 1: Περιλαμβάνει το βόρειο Αιγαίο και ορίζεται από τον 38ο παράλληλο και βόρεια. Περιέχει στενά υψηλού επιχειρησιακού ενδιαφέροντος όπως τις προσβάσεις των στενών του Ελλησπόντου και της ναυτικής βάσης της Σμύρνης. Κυριο χαρακτηριστικό της είναι ότι σε αυτή καταλήγει η θάλασσα του Μαρμαρά που αποτελεί ουσιαστικά τον δίαυλο μέσω του οποίου μεταφέρεται η υπερπλήρωση των υδάτων της Μαύρης Θάλασσας, τα οποία συγκεντρώνονται από διάφορους «ψυχρούς» ποταμούς με κυρίαρχο τον Δούναβη, στο Αιγαίο. Κατά τόπους υφίσταται υψηλή ναυτιλιακή κίνηση καθώς περιέχει διεθνείς οδούς ναυσιπλοΐας (Ελλησπόντος – Καφηρέας) και κεντρικούς λιμένες (Θεσσαλονίκη, Βόλος, Σμύρνη, Καβάλα). Επιπλέον η θάλασσα του Μαρμαρά έχει ξεχωριστή σημασία για την διεθνή ναυσιπλοΐα καθώς ενώνει την Μαύρη θάλασσα με το Αιγαίο και κατ' επέκταση με την Μεσόγειο.

β. Περιοχή 2: Ορίζεται από τον 24° μεσημβρινό και δυτικά ως τα όρια του Αιγαίου Πελάγους. Αποτελεί την πύλη εισόδου στο Αιγαίο από δυσμάς και την φυσική συνέχεια της οδού διεθνούς ναυσιπλοΐας που συνδέει την Μαύρη Θάλασσα, μέσω της θάλασσας του Μαρμαρά με την δυτική Μεσόγειο. Επηρεάζεται από τα ρεύματα της Αδριατικής και της δυτικής Μεσογείου.

γ. Περιοχή 3: Είναι η περιοχή που περικλείεται από τον 24ο έως τον 26ο μεσημβρινό και από τον 38ο παράλληλο έως την Κρήτη. Περιλαμβάνει το σύμπλεγμα των Κυκλάδων και αποτελεί ένα μικρό αρχιπέλαγος μέσα στο Αιγαίο. Περιέχει πληθώρα νήσων και μικρονήσων σε κοντινές αποστάσεις καθώς και το στενό του Καφηρέα, από τα σημαντικότερα στενά διεθνούς ναυσιπλοΐας (ΣΝΔ). Αυτό δημιουργεί ένα ιδιαίτερο περιβάλλον το οποίο δέχεται επιρροές, λόγω της γειτνίασης του, από τις συνορεύουσες περιοχές.

δ. Περιοχή 4: Στα βόρεια ορίζεται από τον 38ο παράλληλο, στα δυτικά από τον 26ο μεσημβρινό και ανατολικά επεκτείνεται ως τα όρια του Αιγαίου Πελάγους και των Τουρκικών θαλάσσιων συνόρων. Επηρεάζεται από τα ρεύματα της Ανατολικής Μεσογείου και περιέχει την φυσική συνέχεια της διεθνούς οδού ναυσιπλοΐας που συνδέει την θάλασσα του Μαρμαρά με την Ανατολική Μεσόγειο και την Διώρυγα του Σουέζ. Εκτός αυτού, ιδιαίτερη επιχειρησιακή αξία της προσδίδει η γειτνίαση με τα τουρκικά θαλάσσια σύνορα και η ύπαρξη σε αυτήν ενός μεγάλου μέρους των αμφισβητούμενων διαχρονικά περιοχών από την πλευρά της Τουρκίας.

§2.1 Γεωγραφικοί Παράγοντες - Βαθυθερμογραφικές Συνθήκες.

Για την ανάλυση των γεωγραφικών στοιχείων χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή «NAVIONICS»²⁶, της οποίας η δωρεάν έκδοση προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια για τον σκοπό της παρούσας εργασίας. Τα γεωγραφικά στοιχεία που επηρεάζουν την διάδοση του ήχου και εξετάζονται στην συνέχεια για κάθε στενό είναι:

α. Η απόσταση, που σχετίζεται με τις απώλειες διάδοσης του ακουστικού σήματος.

β. Το βάθος, το οποίο επηρεάζει το SSP.

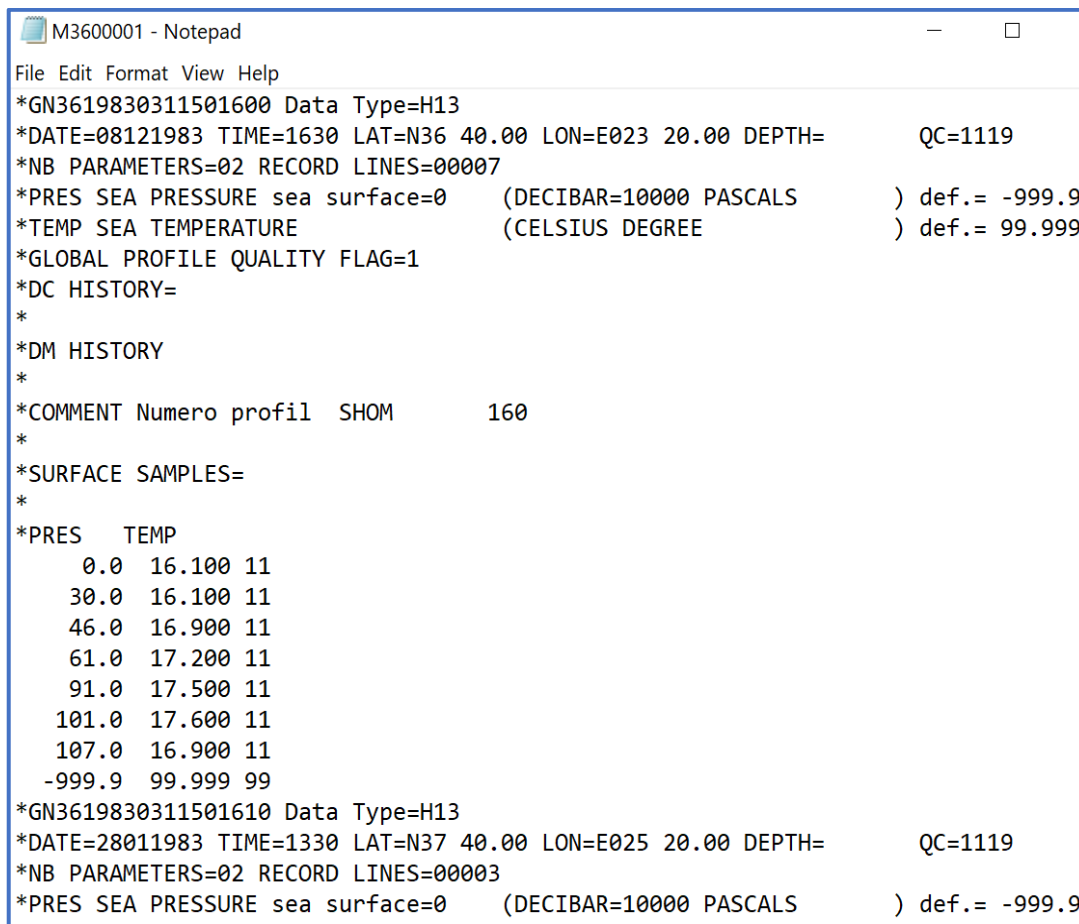
γ. Η μορφολογία του πυθμένα, η οποία δύναται να επηρεάσει την ομαλή διάδοση των ακουστικών κυμάτων. Η ύπαρξη εξάρσεων ή απότομων βυθίσεων θα μπορούσε να εκτρέψει τα ακουστικά κύματα και να αποτρέψει τον εντοπισμό ενός υποβρύχιου στόχου.

Για την μελέτη των βαθυθερμογραφικών συνθήκων και της διάδοσης του ήχου χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές βαθυθερμογραφικές

²⁶ <https://www.navionics.com/fin/>: Εφαρμογή για ηλεκτρονική πλοήγηση στην θάλασσα, που αναπτύσσεται από την εταιρεία GARMIN.

παρατηρήσεις της Υ.Υ Ναυτικού από το 1980 έως το 1995 (real historical data) στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Οι βαθυθερμογραφικές παρατηρήσεις από την Υ.Υ ήταν σε μορφή notepad (εικόνα 4.2.1.1).



```
File Edit Format View Help
*GN3619830311501600 Data Type=H13
*DATE=08121983 TIME=1630 LAT=N36 40.00 LON=E023 20.00 DEPTH= QC=1119
*NB PARAMETERS=02 RECORD LINES=00007
*PRES SEA PRESSURE sea surface=0 (DECIBAR=10000 PASCALS ) def.= -999.9
*TEMP SEA TEMPERATURE (CELSIUS DEGREE ) def.= 99.999
*GLOBAL PROFILE QUALITY FLAG=1
*DC HISTORY=
*
*DM HISTORY
*
*COMMENT Numero profil SHOM 160
*
*SURFACE SAMPLES=
*
*PRES TEMP
  0.0 16.100 11
 30.0 16.100 11
 46.0 16.900 11
 61.0 17.200 11
 91.0 17.500 11
101.0 17.600 11
107.0 16.900 11
-999.9 99.999 99
*GN3619830311501610 Data Type=H13
*DATE=28011983 TIME=1330 LAT=N37 40.00 LON=E025 20.00 DEPTH= QC=1119
*NB PARAMETERS=02 RECORD LINES=00003
*PRES SEA PRESSURE sea surface=0 (DECIBAR=10000 PASCALS ) def.= -999.9
*TEMP SEA TEMPERATURE (CELSIUS DEGREE ) def.= 99.999
```

Εικόνα 4.2.1.1

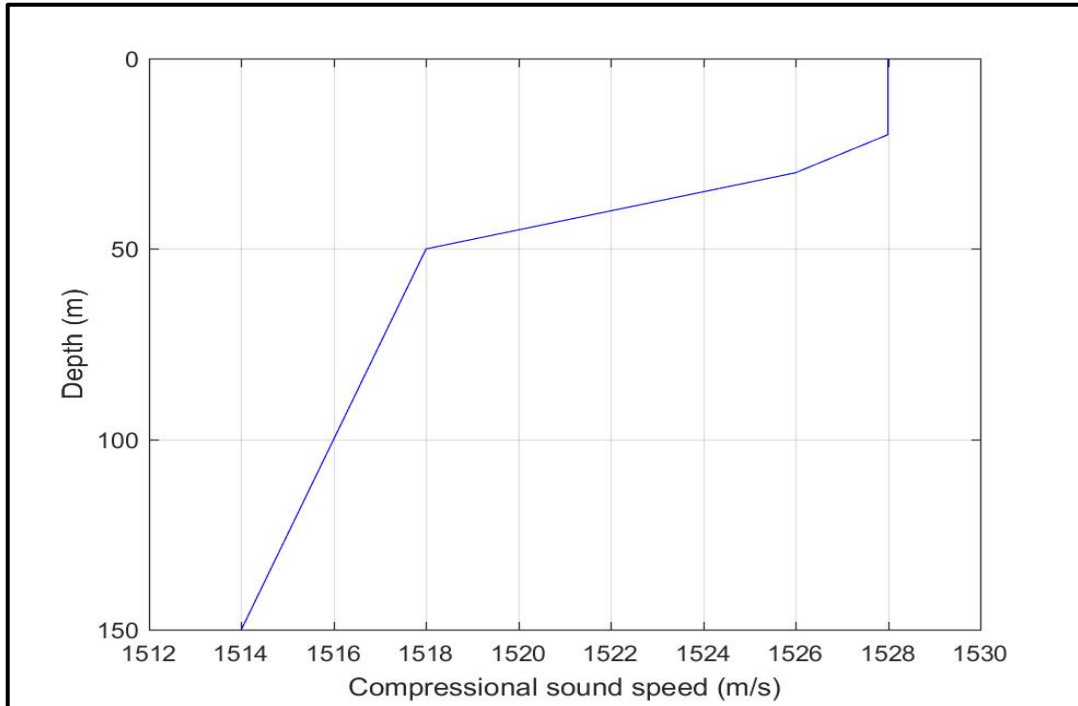
Στα δεδομένα έγινε καθαρισμός, αφαιρέθηκαν τα αρχεία που περιείχαν μικρό αριθμό μετρήσεων ή ελλιπή στοιχεία και ομαδοποιήθηκαν με βάση την περιοχή και την εποχή. Στην συνέχεια μετασχηματίστηκαν κατάλληλα ώστε να μπορέσουν να εισαχθούν στο πρόγραμμα υπολογισμού του SSP.

Με την χρήση λογισμικού «MATLAB» δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα υπολογισμού του SSP βασισμένο στην εξίσωση «MACKENZIE» και προσδιορίστηκε το SSP για κάθε παρατήρηση (διάγραμμα 4.2.1.2). Εν συνεχεία τα στοιχεία που προέκυψαν από το SSP (βάθος - ταχύτητα ήχου) αποτέλεσαν δεδομένα εισόδου για το λογισμικό BELLHOP²⁷ με το οποίο προσδιορίστηκε ο τρόπος διάδοσης των ακτίνων του ήχου και οι απώλειες συναρτήσει της απόστασης. Ειδικότερα:

α. Για το χαρακτηριστικό SSP (διάγραμμα 4.2.1.2) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό «MATLAB». Ως μέγιστο βάθος τέθηκαν τα

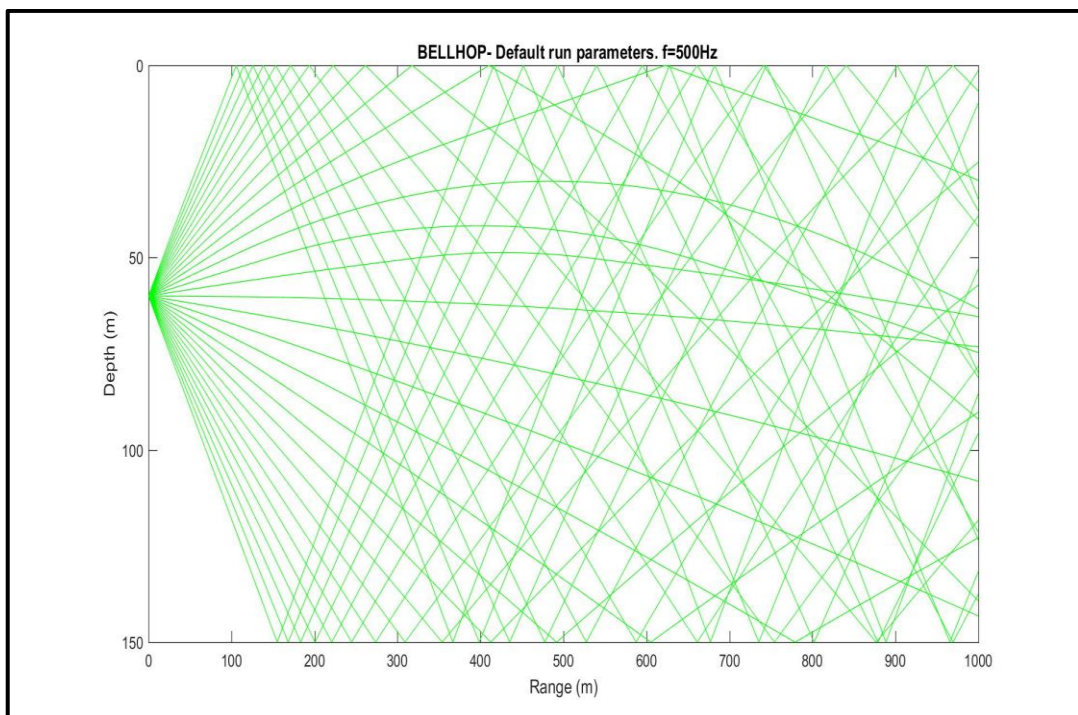
²⁷ Βλέπε παράγραφο 4.2.1.1

150m. Το βάθος αυτό είναι το εκτιμώμενο μέγιστο βάθος δράσης των Υ/Β και επίσης είναι εκτιμώμενο μέγιστο βάθος τοποθέτησης των συστοιχιών, ούτως ώστε να είναι πλησίον των ακτών και να μην υφίστανται νεκροί τομείς πρύμα αυτών.



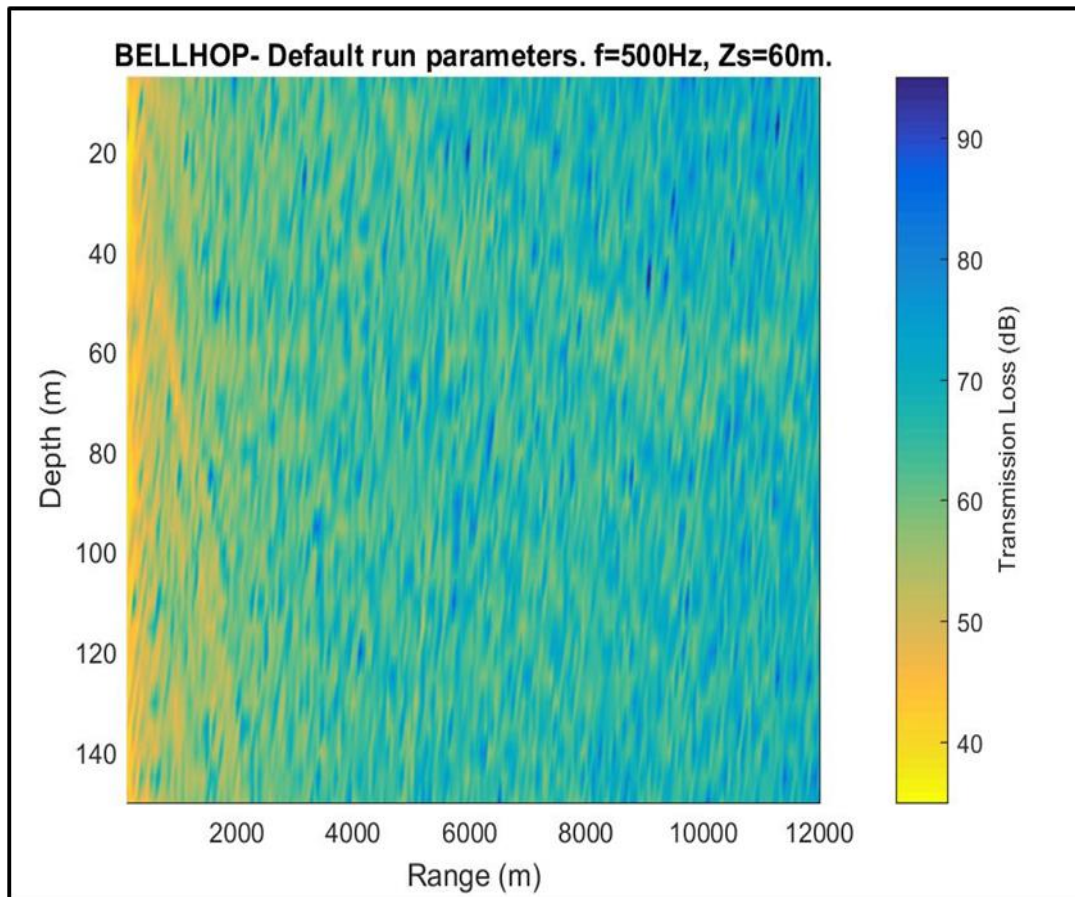
Διάγραμμα 4.2.1.1

β. Για το γράφημα απεικόνισης της διάδοσης των ακτίνων ήχου (διάγραμμα 4.2.1.2) τέθηκε ομοίως ως μέγιστο βάθος τα 150m και απόσταση 1000m για λόγους ευκρίνειας της εικόνας.



Διάγραμμα 4.2.1.2

γ. Για τις απώλειες διάδοσης του ήχου επιλέχθηκε ομοίως ως μέγιστο βάθος τα 150m και μέγιστη απόσταση διερεύνησης το ήμισυ του M.O των αποστάσεων των στενών της κάθε περιοχής (διάγραμμα 4.2.1.3). Με τον τρόπο αυτό θα διαπιστωθεί ποια στενά μπορούν να επιτηρηθούν αποτελεσματικά με δυο συστοιχίες τοποθετημένες σε κάθε ακτή²⁸. Ως βάθος πηγής θορύβου επιλέχθηκαν τα 60m. Το βάθος αυτό αποτελεί ένα σύνηθες βάθος επιχειρησιακής δράσης Υ/Β²⁹.



Διάγραμμα 4.2.1.3

Για κάθε περιοχή παρουσιάζονται ανά εποχή διαγράμματα που αφορούν στο SSP, στον τρόπο διάδοσης των ακτίνων και στις απώλειες διάδοσης του ήχου. Οι εποχές επηρεάζουν το SSP μέσω της διαφοράς θερμοκρασίας. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας στο περιβάλλον, που είναι αισθητές ανά εποχή, επηρεάζουν την θερμοκρασία της θάλασσας, ιδίως των επιφανειακών στρωμάτων, που κατ' επέκταση επηρεάζει το προφίλ της ταχύτητας του ήχου. Τα διαγράμματα διάδοσης ακτίνων είναι χαρακτηριστικό της περιοχής, και αφορούν σε πηγή θορύβου $f = 500Hz$ και $z = 60m$. Τα διαγράμματα SSP και των απωλειών, που ομοίως αφορά σε πηγή θορύβου $f = 500Hz$ και $z = 60m$, είναι ενδεικτικά και έχουν υπολογιστεί για κάθε παρατήρηση ξεχωριστά. Στο τέλος των παραγράφων για κάθε περιοχή

²⁸ Εικόνα 6.1.1.

²⁹ Το βάθος δράσης ενός Υ/Β αποτελεί ευαίσθητη πληροφορία και ποικίλει ανάλογα με την επιχειρησιακή κατάσταση. Ωστόσο, αν δεν επιβάλουν αλλιώς οι συνθήκες, τα 60m είναι ένα σύνηθες βάθος δράσης/περιτολίας σύμφωνα με ειδικούς στον Α/Υ πόλεμο.

παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα στις επιλεγμένες συχνότητες συναρτήσει της απόστασης ανεξάρτητα της εποχής, λόγω του ότι η εγκατάσταση ενός ηχοεντοπιστικού συστήματος θα είναι μόνιμη και όχι εποχιακή.

Θα πρέπει τέλος να σημειωθεί, όσον αφορά στις βαθυθερμογραφικές συνθήκες, ότι στο Αιγαίο δεν έχουμε σημαντικές διαφοροποιήσεις της αλατότητας τόσο ως προς τις περιοχές όσο και ως προς το βάθος. Χαρακτηριστικά έχουν παρατηρηθεί οι ακόλουθες μέγιστες μεταβολές στην ταχύτητα του ήχου:

- α. Εως 22 m/sec, λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.
- β. Εως 1 m/sec, λόγω διαφοράς αλατότητας.
- γ. Εως 1,7 m/sec λόγω διαφοράς πίεσεως.

Γίνεται συνεπώς σαφές ότι η επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών, που ονομάζονται «θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις», στην ταχύτητα διάδοσης και στην διάθλαση του ήχου είναι πολύ σπουδαιότερες από αυτές που προκαλούν η μεταβολή της αλατότητας και της πίεσης, στα βάθη έως 150m που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή.

§2.1.1 Περιγραφή Λογισμικού «BELLHOP».

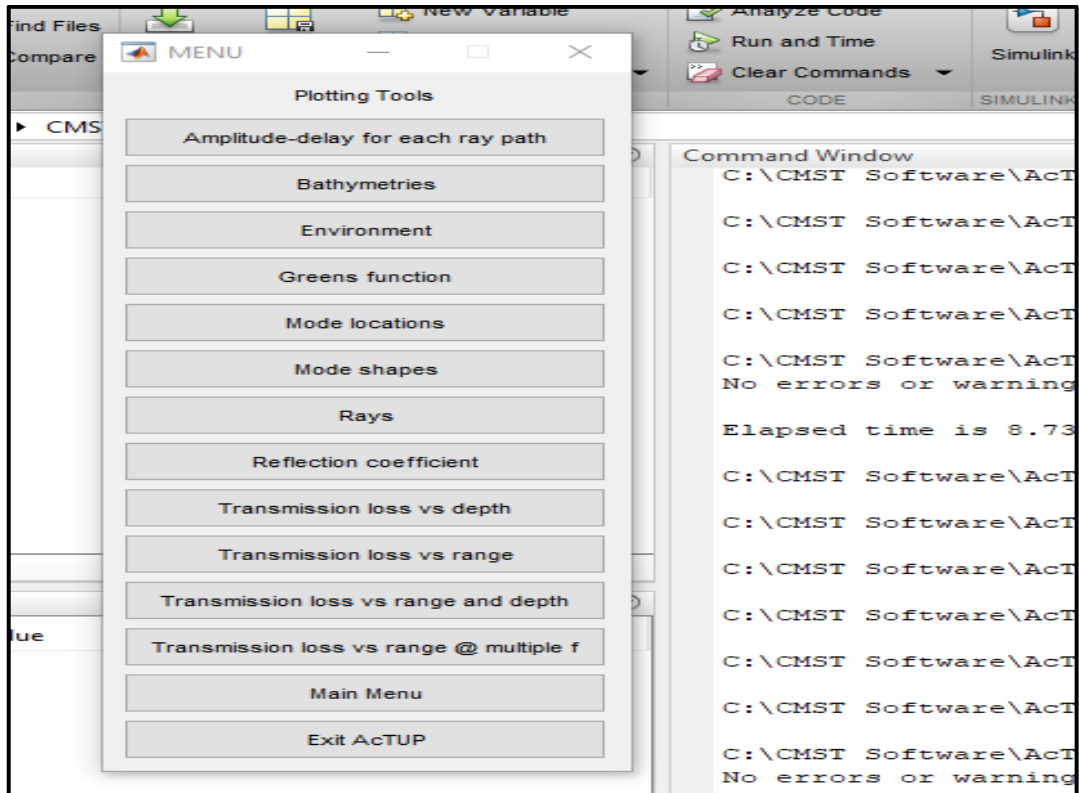
Για την περιγραφή της διάδοσης του ήχου έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς διαφορά μαθηματικά μοντέλα, τα οποία εκμεταλλεύονται αντίστοιχα λογισμικά, προκειμένου να προβλέψουν την διάδοση του ήχου σε συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (γεωγραφία / είδος βυθού, καιρικές συνθήκες, κατάσταση θαλάσσης, χαρακτηριστικά νερού κ.α). Για την ανάλυση και για την προσομοίωση μας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό «BELLHOP».

Το λογισμικό «BELLHOP» είναι ένα υψηλής αποτελεσματικότητας πρόγραμμα κατασκευής / απεικόνισης ακτίδων, το οποίο μπορεί να βρεθεί στην ιστοσελίδα «Ocean Acoustics Library³⁰», που υποστηρίζεται από το τμήμα ερευνάς του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ³¹. Το μοντέλο, βασισμένο στην θεωρία ακτίνων, υπολογίζει προσεγγιστικά την διάδοση των ακουστικών κυμάτων που εκπέμπονται από μια δεδομένη πηγή σε ένα δεδομένο μέσο. Στη συνέχεια, τα προϊόντα ενδιαφέροντος, π.χ. ακουστική πίεση, υπολογίζονται για συγκεκριμένο σημείο και χρόνο, αθροίζοντας τη συνεισφορά κάθε μιας από τις μεμονωμένες ακτίδες.

Μπορεί να παράγει ένα πλήθος χρήσιμων προϊόντων όπως την διαδρομή διάδοσης των ακουστικών κυμάτων, τις απώλειες διάδοσης κ.α (εικόνα 4.2.1.1.1).

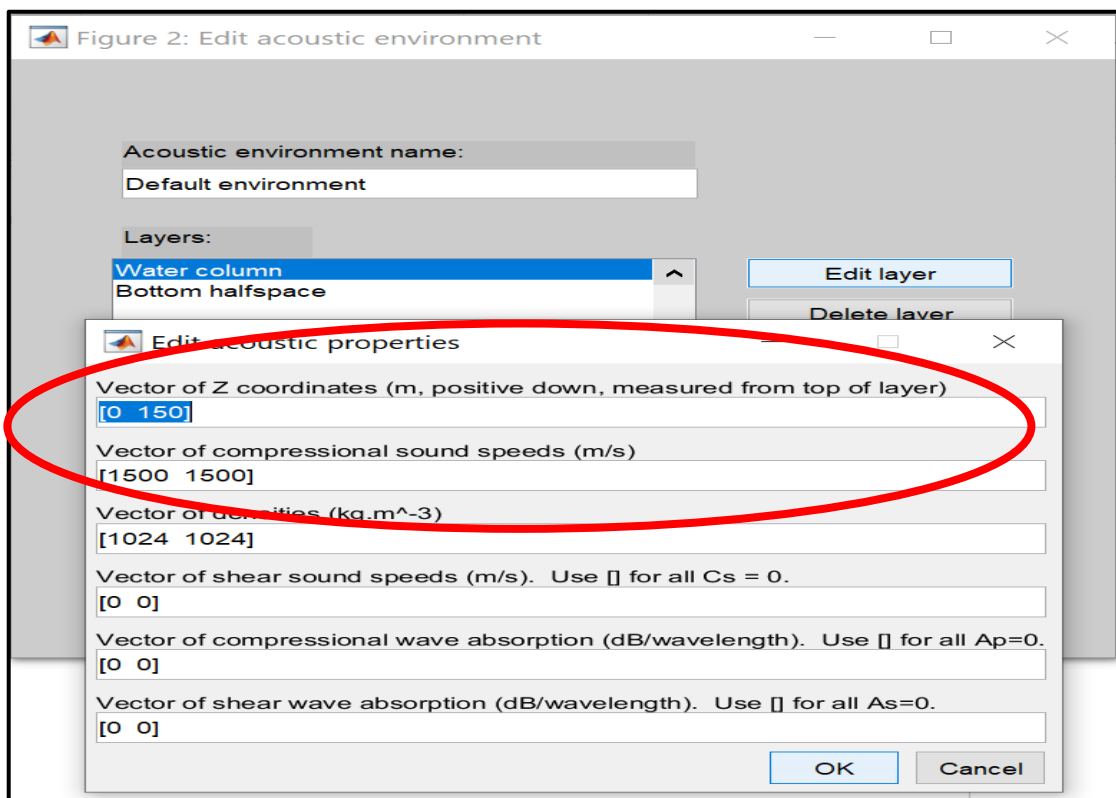
³⁰ <https://oalib-acoustics.org/>

³¹ U.S. Office of Naval Research



Εικόνα 4.2.1.1.1

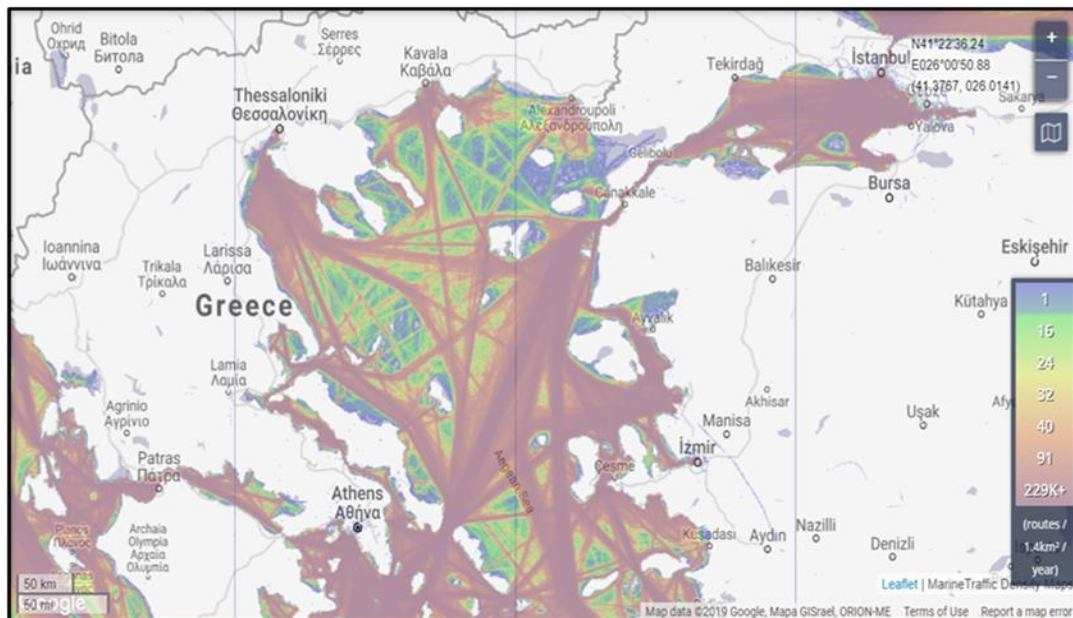
Στην ακόλουθη εικόνα (εικόνα 4.2.1.1.2) φαίνονται τα πεδία εισαγωγής ταχύτητας – βάθους που προέκυψαν από τα διαγράμματα SSP.



Εικόνα 4.2.1.1.2

§2.2 Περιοχή 1 – Βόρειο Αιγαίο.

Στην περιοχή αυτή υφίστανται 15 στενά από τα οποία θα μπορούσε να διέλθει ασφαλώς ένα Υ/Β. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η μεγάλη πυκνότητα της ναυτιλιακής κίνησης γεγονός που επιβαρύνει με επιπλέον θόρυβο το θαλάσσιο περιβάλλον και δυσχεραίνει των εντοπισμό στόχων (εικόνα 4.2.2.1).



Εικόνα 4.2.2.1³²

§2.2.1 Γεωγραφικά Στοιχεία.

α. Στενό Σαμοθρακης-Αλεξανδρουπολης:

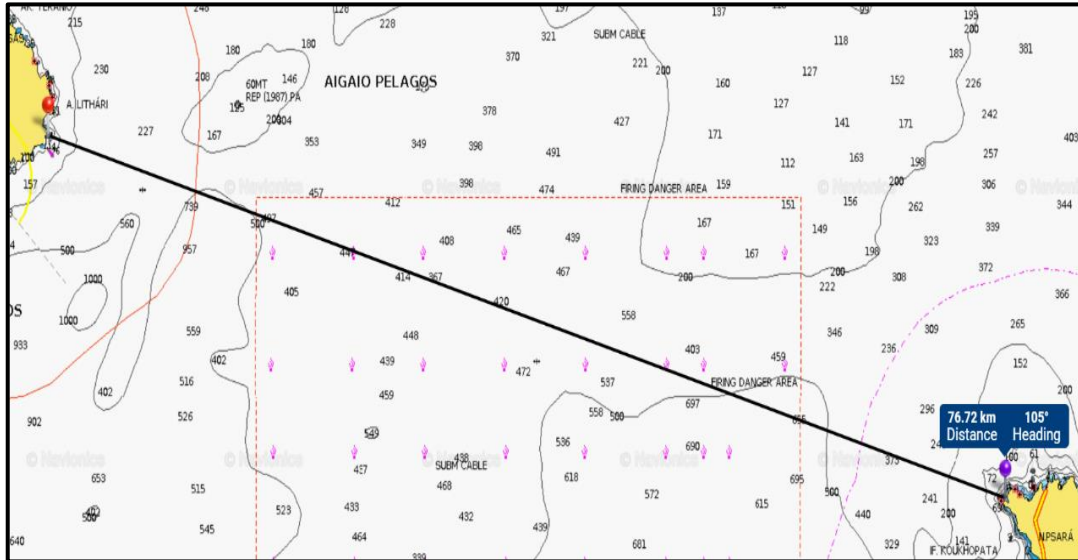


Χάρτης 4.2.2.1.1

³² marinetraffic.com/Density-Maps-on-the-Live-Map.

- (1) Απόσταση: 39.220m
- (2) Μέγιστο βάθος: 77m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

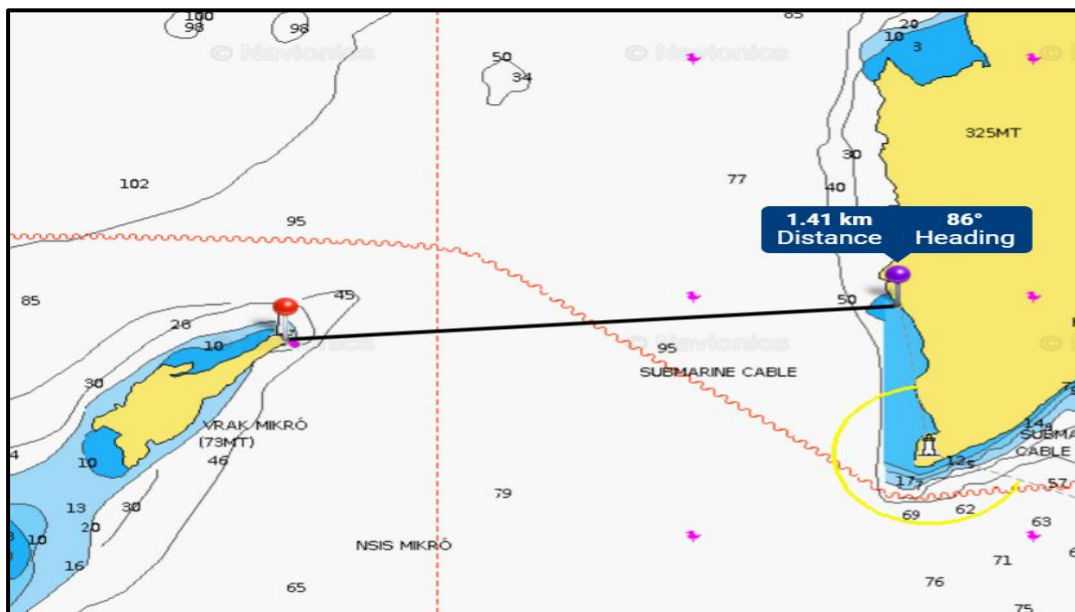
β. Περιοχή Σκύρου – Ψαρών:



Χάρτης 4.2.2.1.2

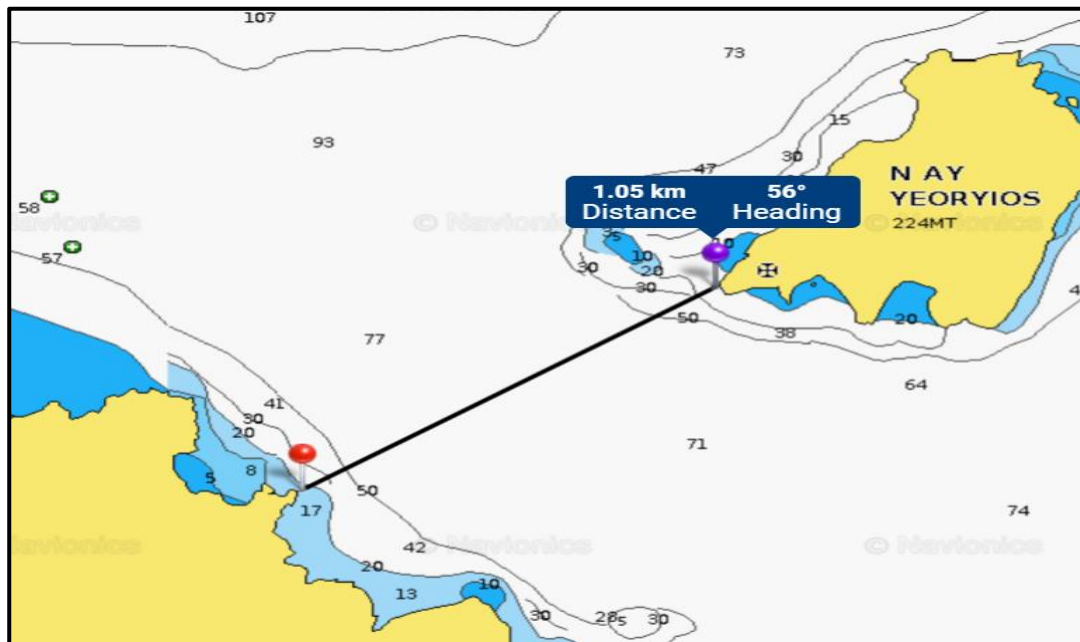
- (1) Απόσταση: 76.720m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 697m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

γ. Στενά Αλόνητσου:



Χάρτης 4.2.2.1.3

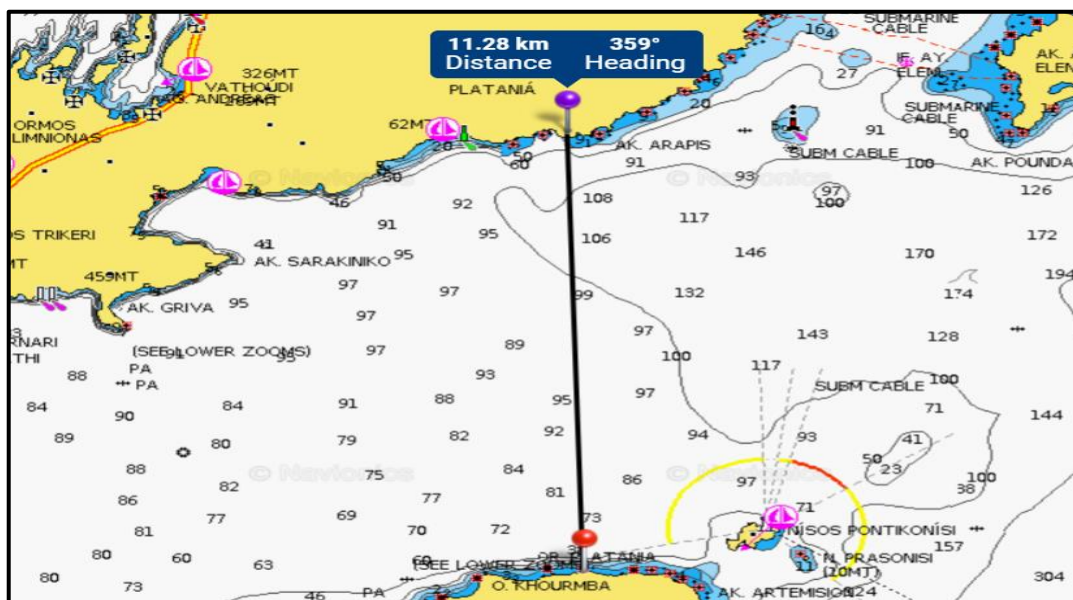
- (1) Απόσταση: 1.410m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 95m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή



Χάρτης 4.2.2.1.4

- (1) Απόσταση: 1.050m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 77m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

δ. Περιοχή Βόλου – Εύβοιας:



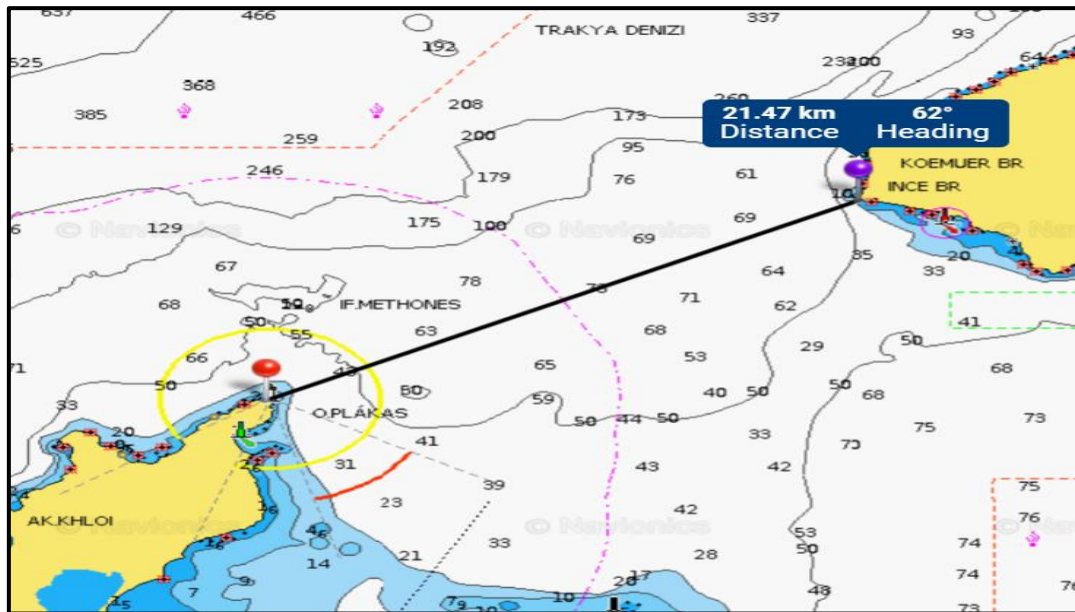
Χάρτης 4.2.2.1.5

(1) Απόσταση: 11.280m

(2) Μέγιστο Βάθος: 108m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

ε. Στενό Λήμνου:



Χάρτης 4.2.2.1.6

(1) Απόσταση: 21.470m

(2) Μέγιστο Βάθος: 78m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

στ. Στενό Σαμοθράκης:



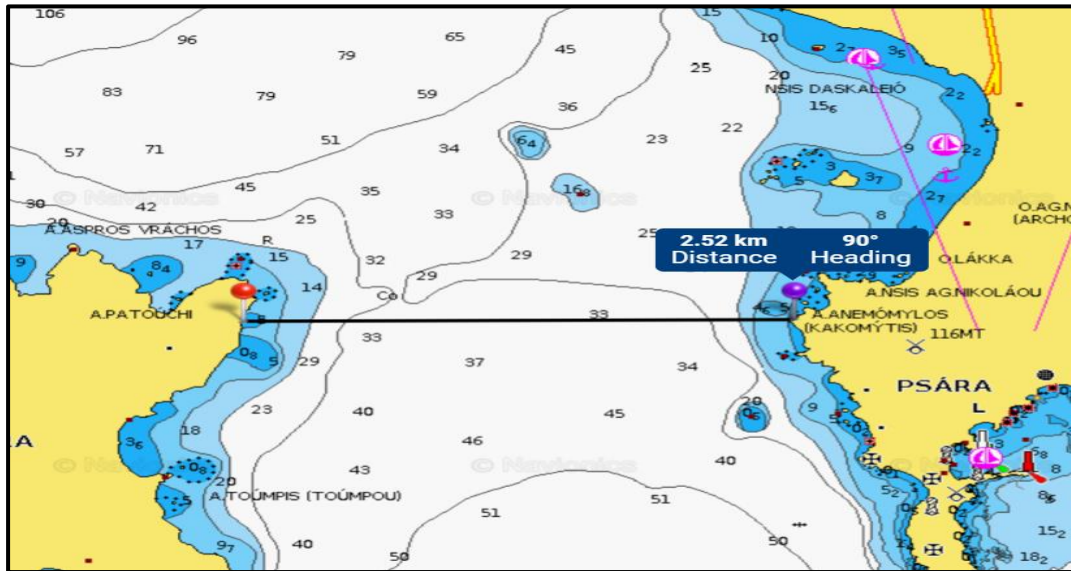
Χάρτης 4.2.2.1.7

(1) Απόσταση: 24.630m

(2) Μέγιστο Βάθος: 895m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

ζ. Στενό Ψαρών – Αντίψαρων:



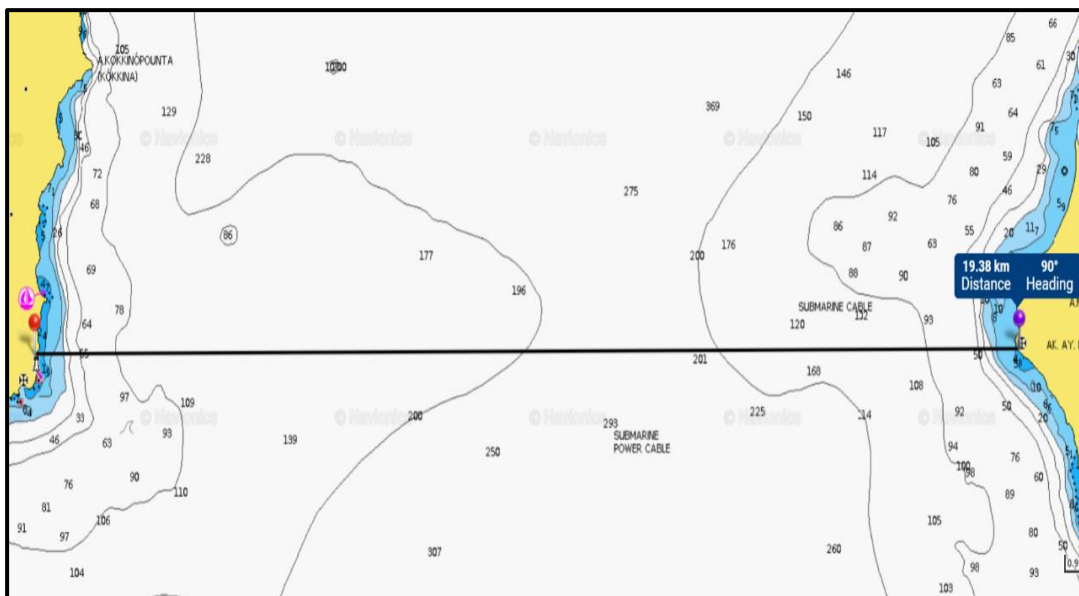
Χάρτης 4.2.2.1.8

(1) Απόσταση: 2.520m

(2) Μέγιστο Βάθος: 50m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

η. Περιοχή Ψαρών – Χίου:



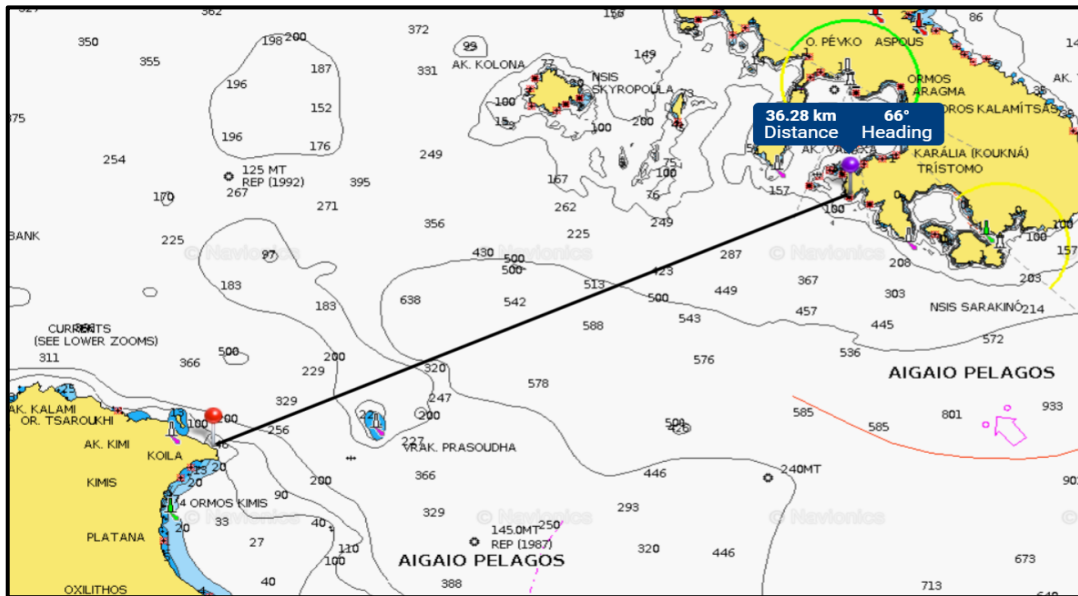
Χάρτης 4.2.2.1.9

(1) Απόσταση: 2.520m

(2) Μέγιστο Βάθος: 293m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

θ. Περιοχή Σκύρου – Εύβοιας



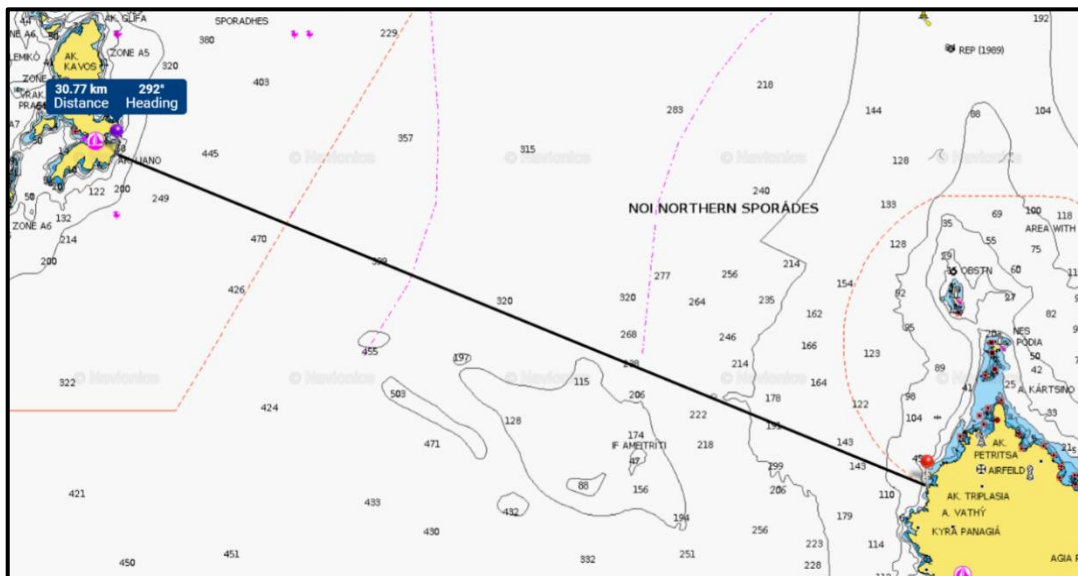
Χάρτης 4.2.2.1.10

(1) Απόσταση: 36.280m

(2) Μέγιστο Βάθος: 588m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή – Με μια έξαρση.

ι. Περιοχή Σκύρου – Σποράδων:



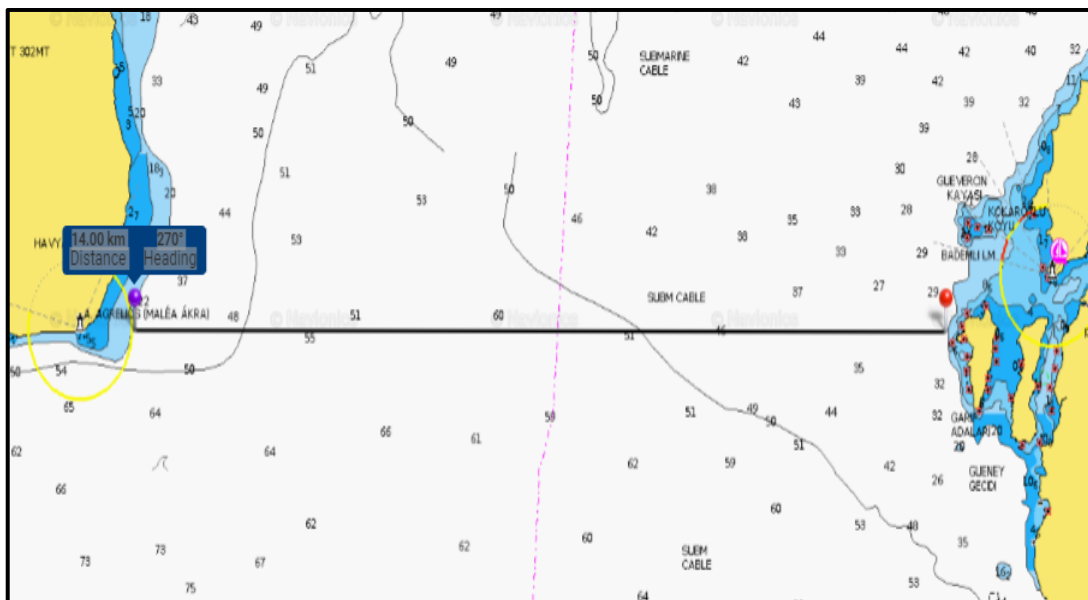
Χάρτης 4.2.2.1.11

- (1) Απόσταση: 30.770m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 470m
- (3) Κλίση Βυθού: Ανώμαλος

ια. Στενά Λέσβου:



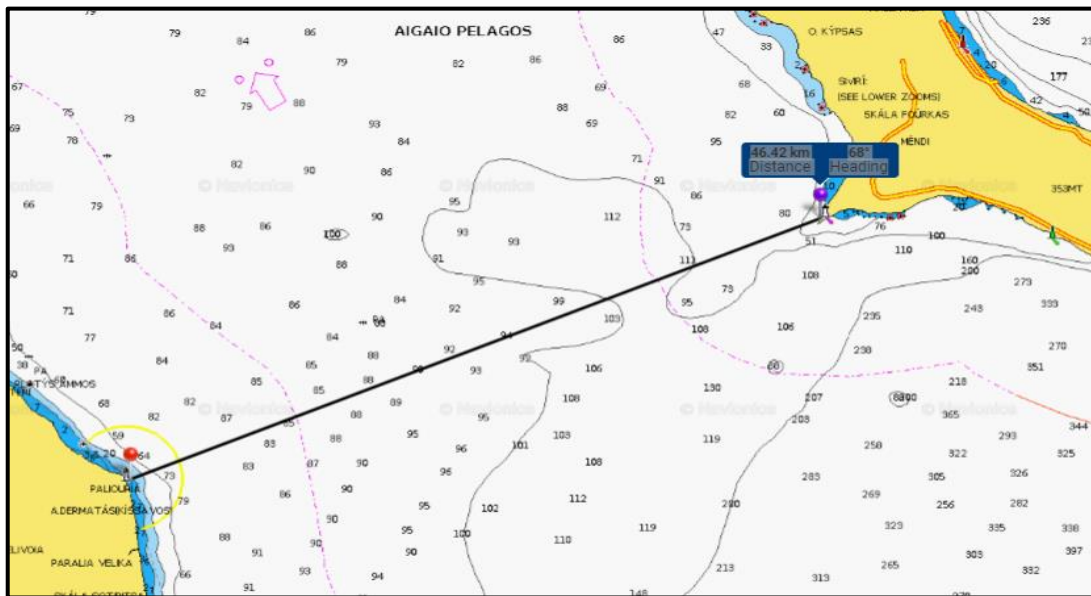
Χάρτης 4.2.2.1.12



Χάρτης 4.2.2.1.13

- (1) Απόσταση: 8.810m / 14.000μ
- (2) Μέγιστο Βάθος: 275m / 60m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

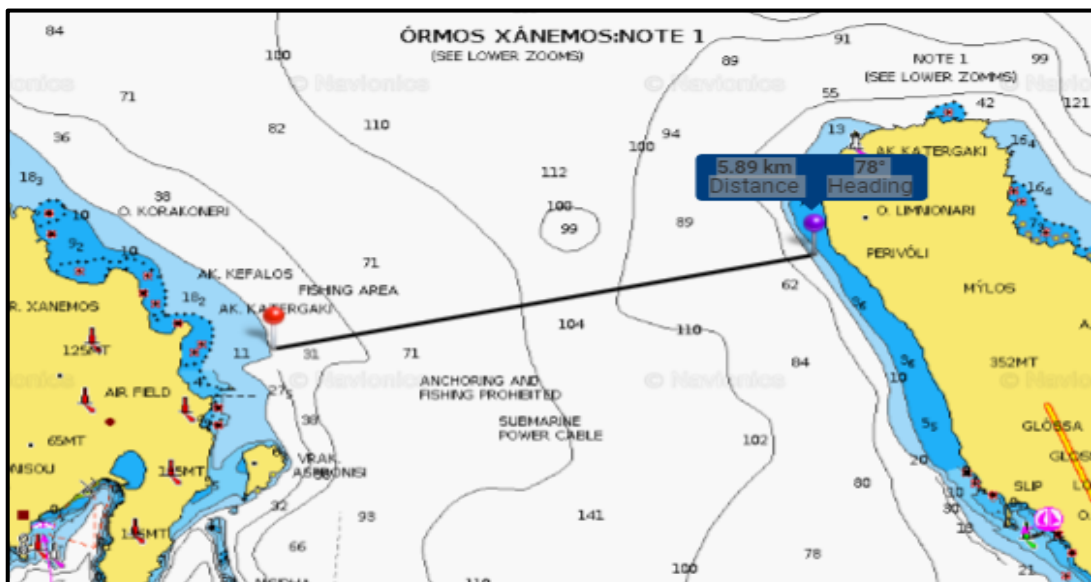
ιβ. Θερμαϊκός Κόλπος:



Χάρτης 4.2.2.1.14

- (1) Απόσταση: 46.420m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 100m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

ιγ. Σκιάθου – Αλοννήσου:



Χάρτης 4.2.2.1.15

- (1) Απόσταση: 5.890m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 100m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

Συγκεντρωτικά τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά των στενών παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 4.2.2.1.1):

A/A	ΣΤΕΝΟ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΒΑΘΟΣ (m)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ (m)	ΚΛΙΣΗ ΒΥΘΟΥ
1.	ΣΑΜΟΘΡΑΚΗΣ - ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	77	39220	ΟΜΑΛΗ
2.	ΣΚΥΡΟΥ - ΨΑΡΩΝ	1000	76720	ΟΜΑΛΗ
3.	ΑΛΟΝΝΗΣΟΥ-1	95	1410	ΟΜΑΛΗ
4.	ΑΛΟΝΝΗΣΟΥ-2	77	1050	ΟΜΑΛΗ
5.	ΒΟΛΟΣ - ΕΥΒΟΙΑ	108	11280	ΟΜΑΛΗ
6.	ΛΗΜΝΟΥ	78	21470	ΟΜΑΛΗ
7.	ΣΑΜΟΘΡΑΚΗΣ	895	24630	ΟΜΑΛΗ
8.	ΨΑΡΑ - ΑΝΤΙΨΑΡΑ	50	2520	ΟΜΑΛΗ
9.	ΨΑΡΩΝ - ΧΙΟΥ	293	19380	ΟΜΑΛΗ
10.	ΣΚΥΡΟΥ - ΕΥΒΟΙΑΣ	588	36280	ΟΜΑΛΗ
11.	ΣΚΥΡΟΥ - ΣΠΟΡΑΔΩΝ	470	30770	ΑΝΩΜΑΛΗ
12.	ΛΕΣΒΟΥ-1	275	8810	ΟΜΑΛΗ
13.	ΛΕΣΒΟΥ-2	60	14000	ΟΜΑΛΗ
14.	ΘΕΡΜΑΙΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ	100	46420	ΟΜΑΛΗ
15.	ΣΚΙΑΘΟΥ-ΑΛΟΝΗΣΟΥ	100	5890	ΟΜΑΛΗ
	Μ.Ο	284	22657	

Πίνακας 4.2.2.1.1

Προκύπτει ότι:

α. Τα μέγιστα βάθη κυμαίνονται από 50m έως 1000m, με Μ.Ο τα 284m, που προσεγγίζει το μέγιστο επιχειρησιακό βάθος των σύγχρονων συμβατικών Υ/Β.

β. Διάμεσος των βαθών: 100m

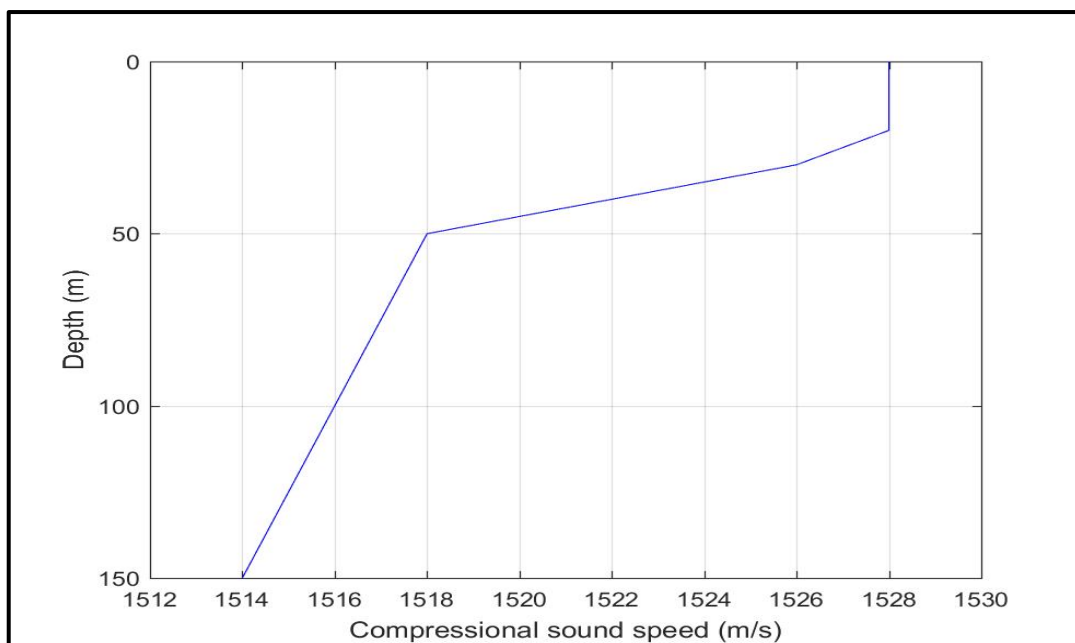
γ. Ο Μ.Ο των αποστάσεων είναι: 22.657m.

δ. Η μορφολογία του βυθού δεν επηρεάζει την διάδοση των ακουστικών κυμάτων εκτός από μια έξαρση στο στενό Σκύρου – Σποράδων.

§2.2.2 Βαθυθερμογραφικές Συνθήκες.

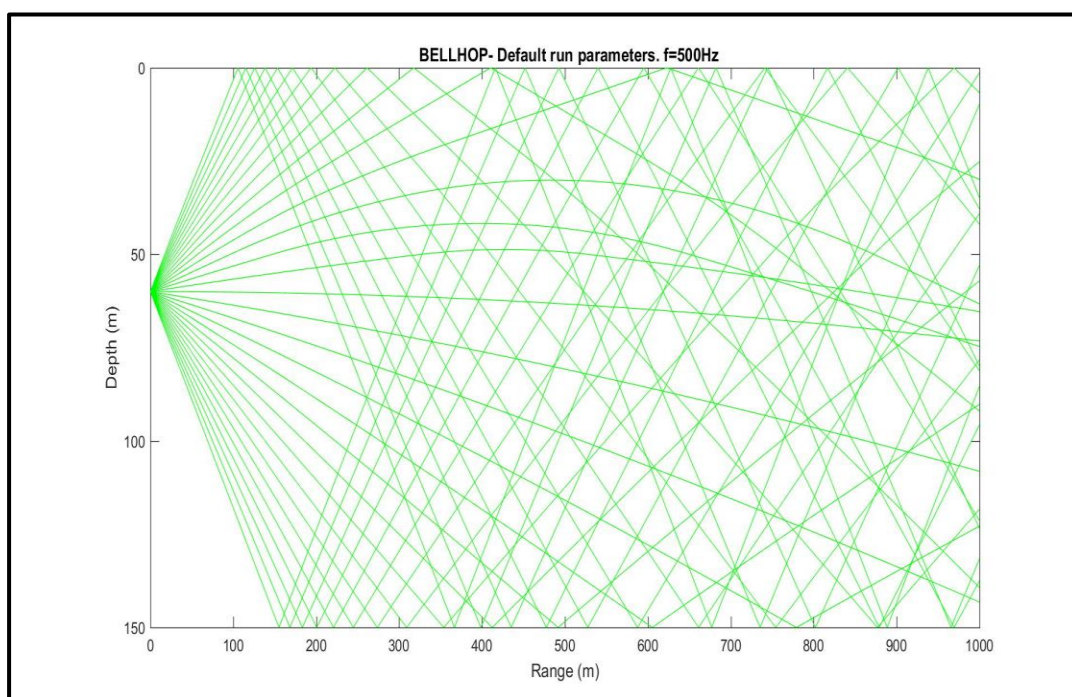
α. Φθινόπωρο.

(1) SSP: Σταθερό μέχρι το βάθος των 20m ενώ μετα παρουσιάζει έντονη αρνητική διαβάθμιση έως τα 50m.



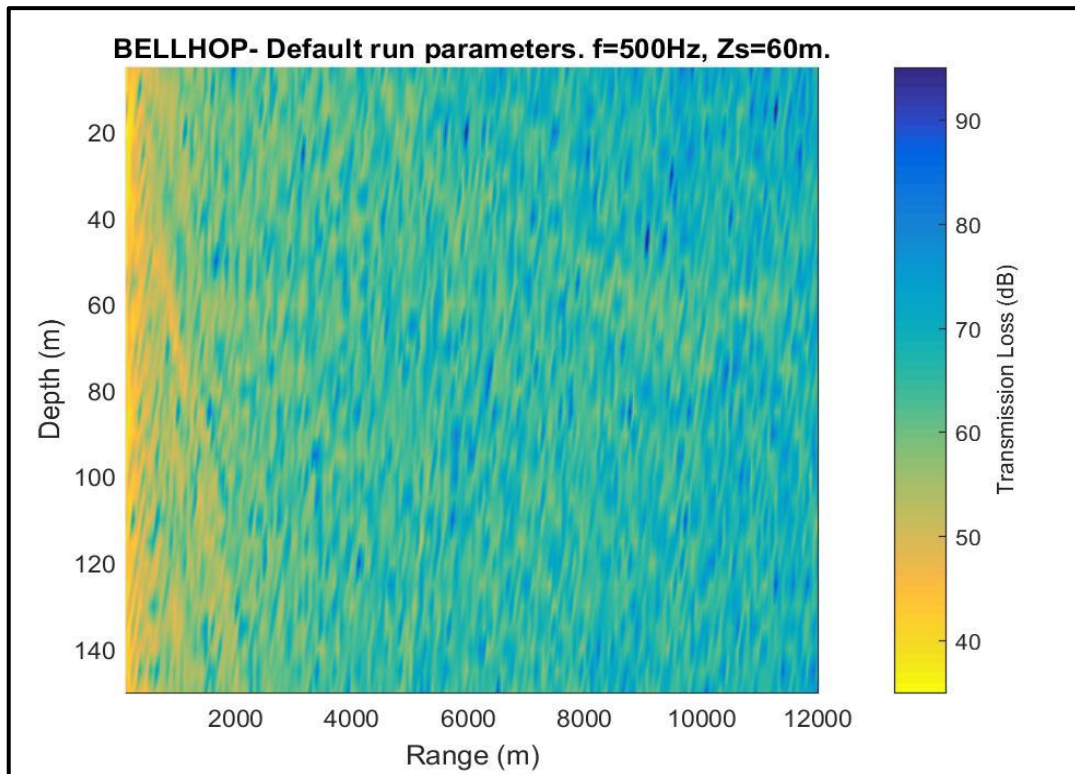
Διάγραμμα 4.2.2.2.1

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται έντονη καμπύλωση των ακτίνων προς τον πυθμένα λόγω της απότομης αρνητικής διαβάθμισης του SSP από τα 30m έως τα 50m.



Διάγραμμα 4.2.2.2.2

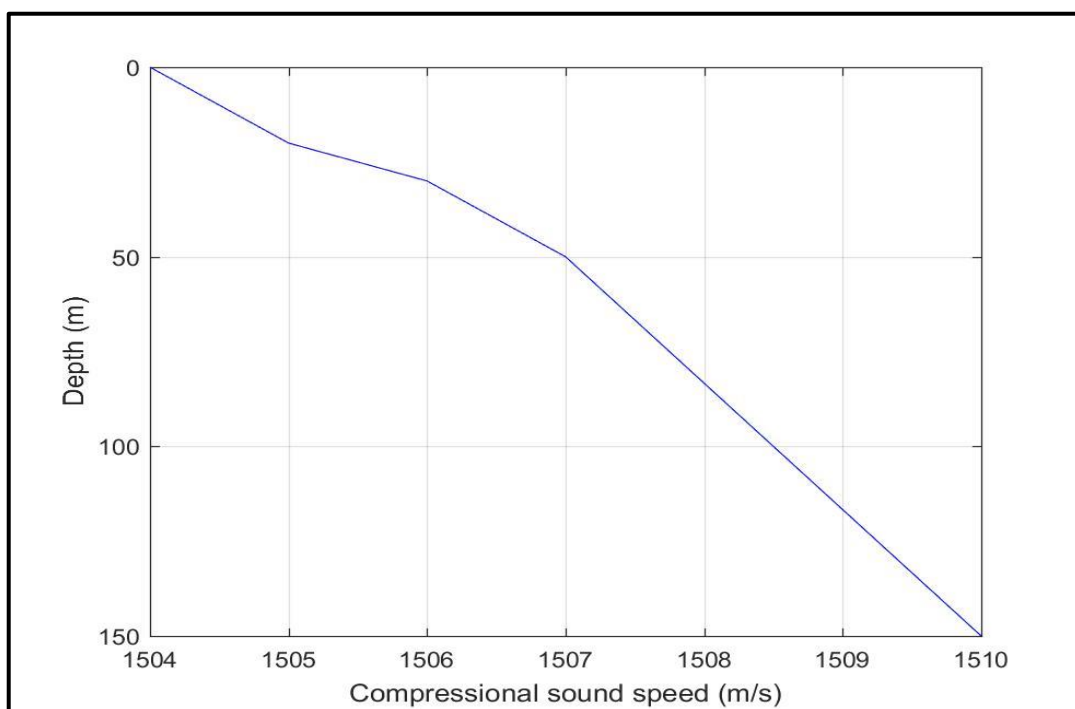
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 4000m και κοντά στην επιφάνεια.



Διάγραμμα 4.2.2.2.3

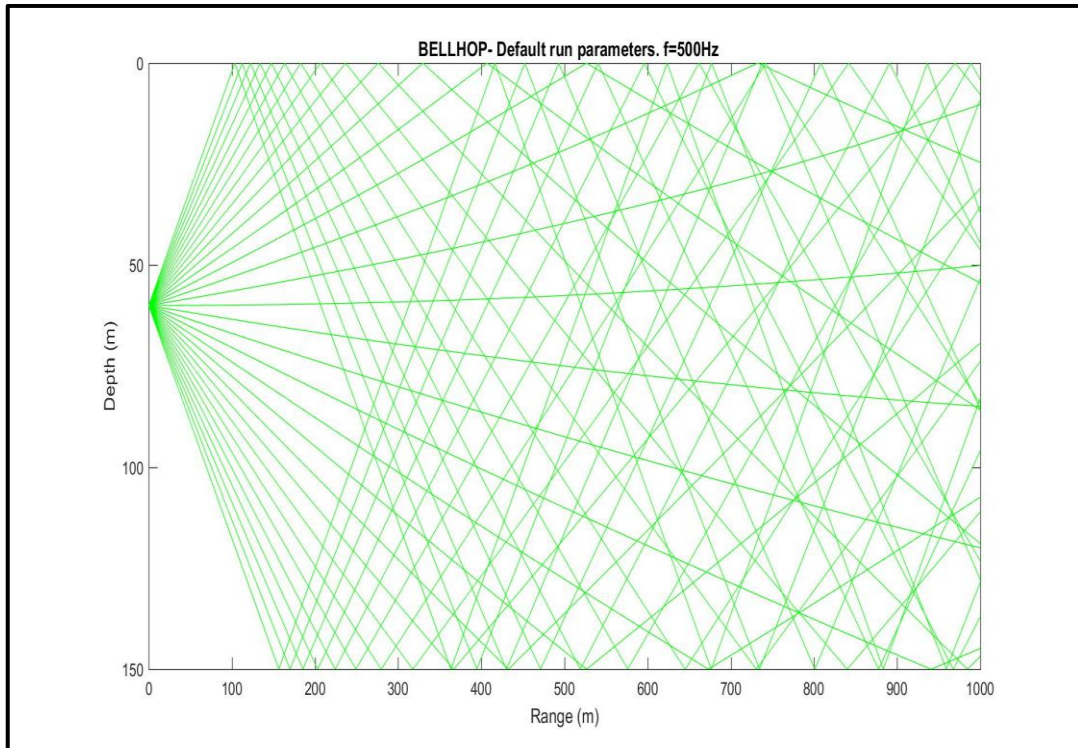
β. Χειμώνας.

(1) SSP: Παρατηρείται ομαλή θετική διαβάθμιση.



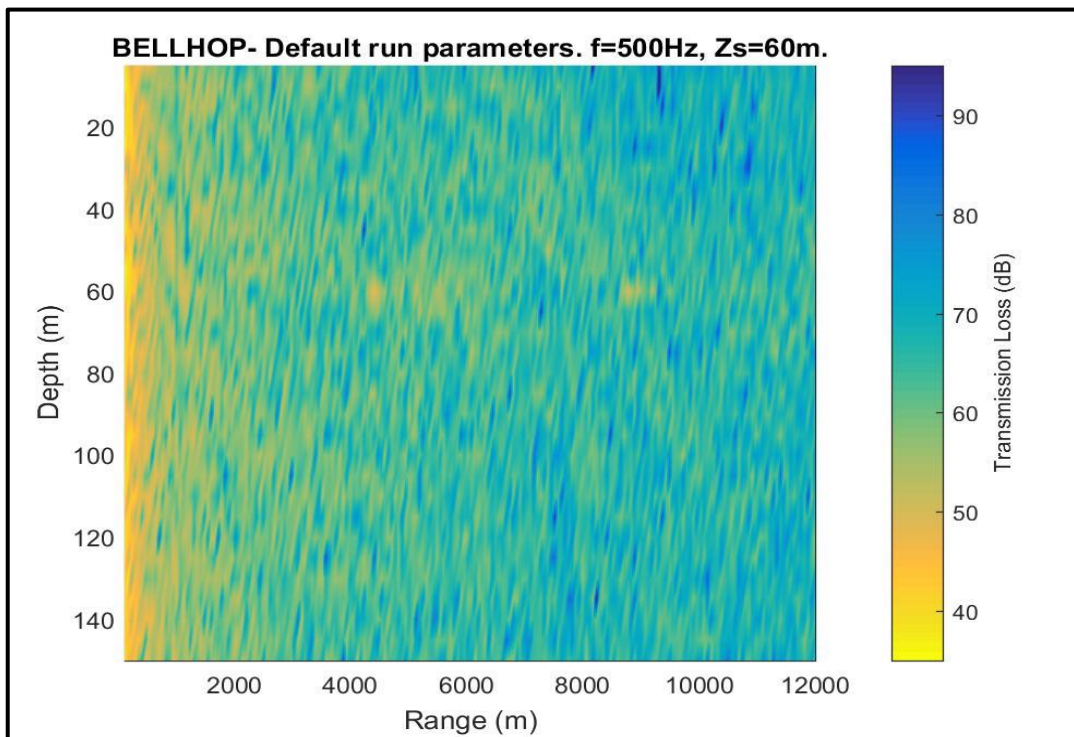
Διάγραμμα 4.2.2.2.4

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται μικρή καμπύλωση των ακτίνων προς την επιφάνεια λόγω θετικής διαβάθμισης του SSP για βάθη μεγαλύτερα των 60m.



Διάγραμμα 4.2.2.2.5

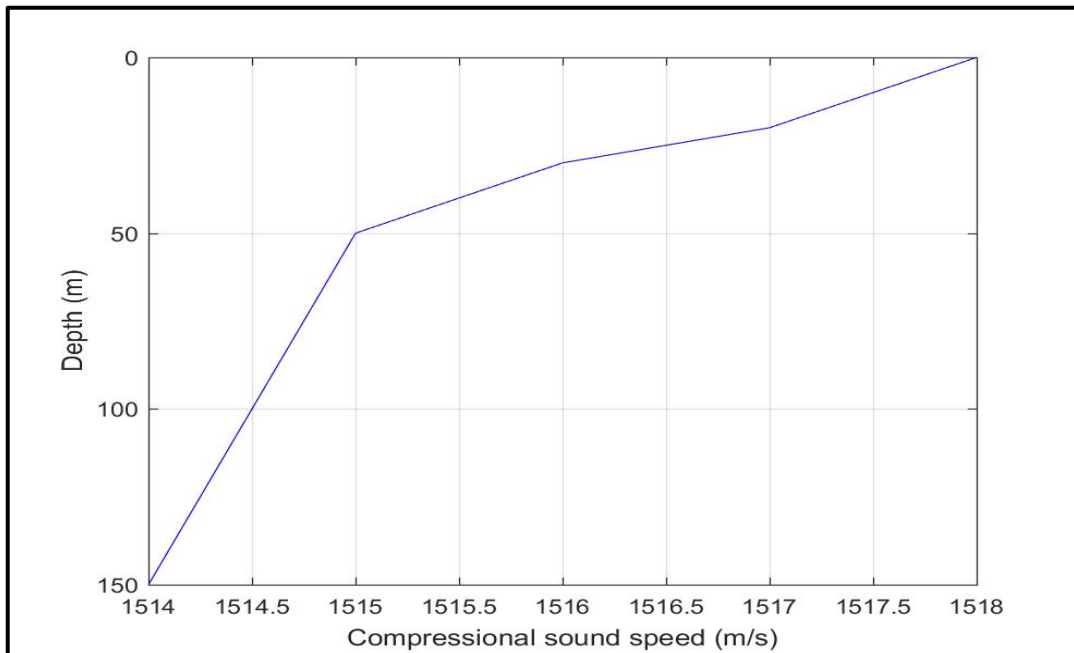
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 6000m.



Διάγραμμα 4.2.2.2.6

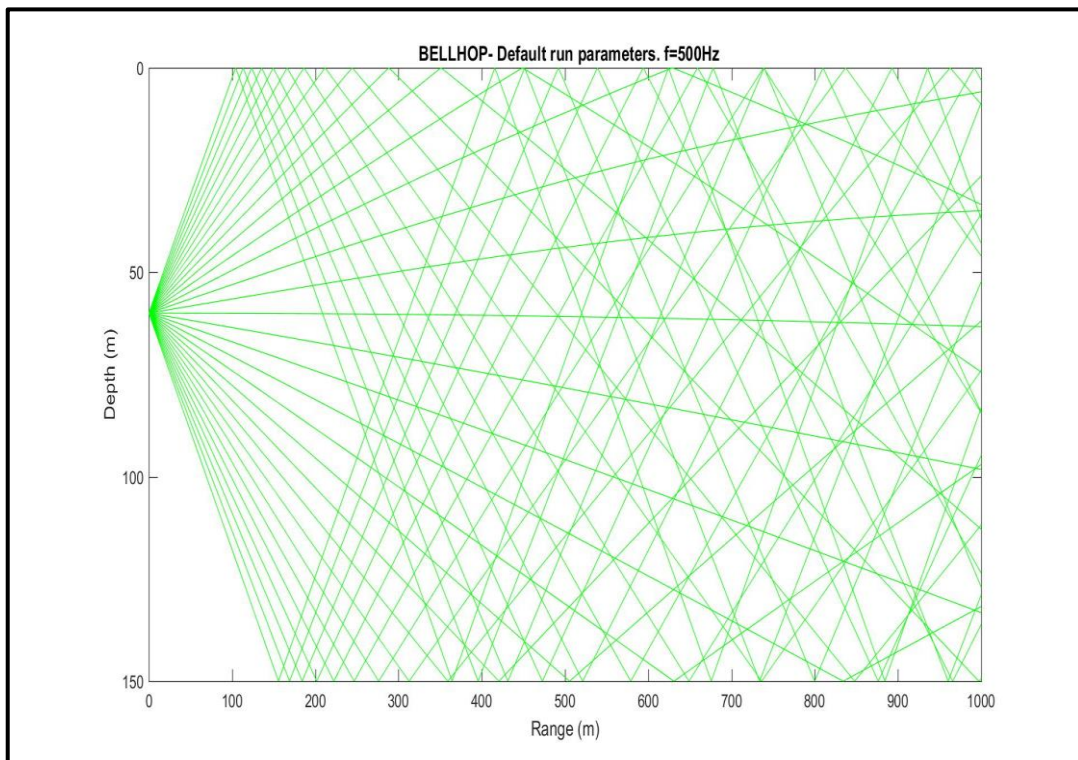
γ. Άνοιξη.

(1) SSP: Απότομη αρνητική διαβάθμιση, ιδίως μέχρι το βάθος των 50m.



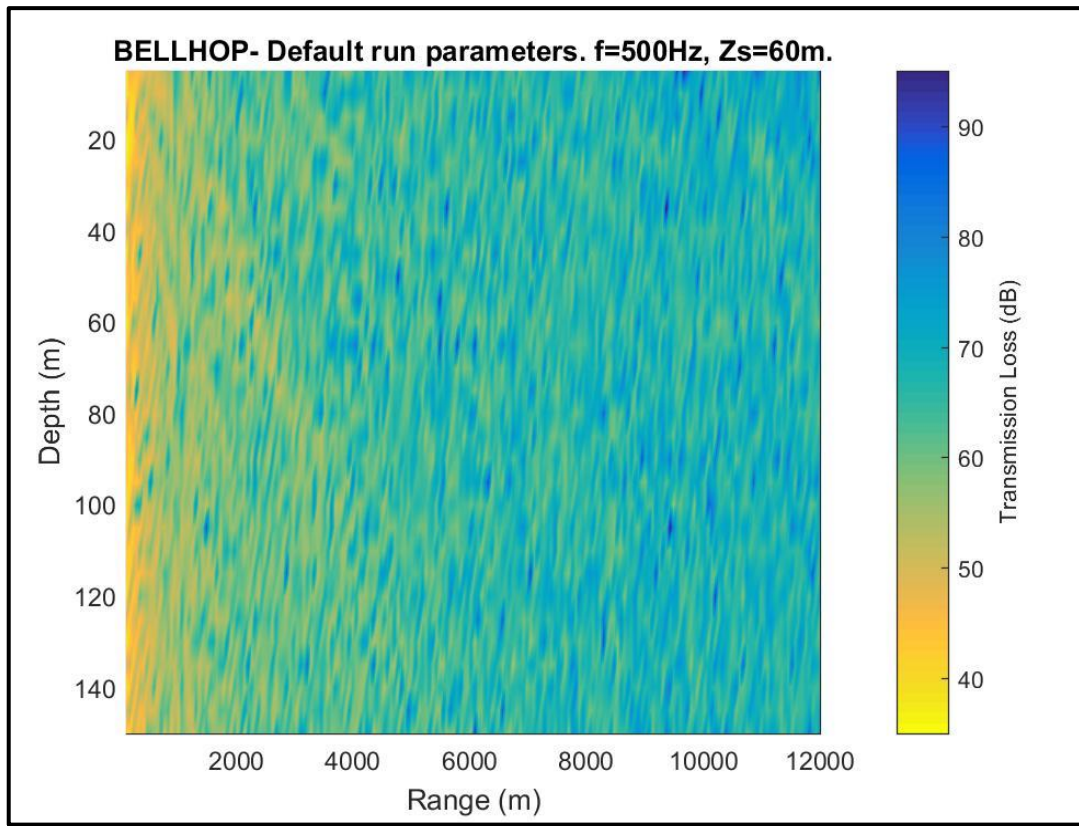
Διάγραμμα 4.2.2.2.7

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται πολύ μικρή καμπύλωση των ακτίνων προς τον πυθμένα σε βάθη μεγαλύτερα των 60m.



Διάγραμμα 4.2.2.2.8

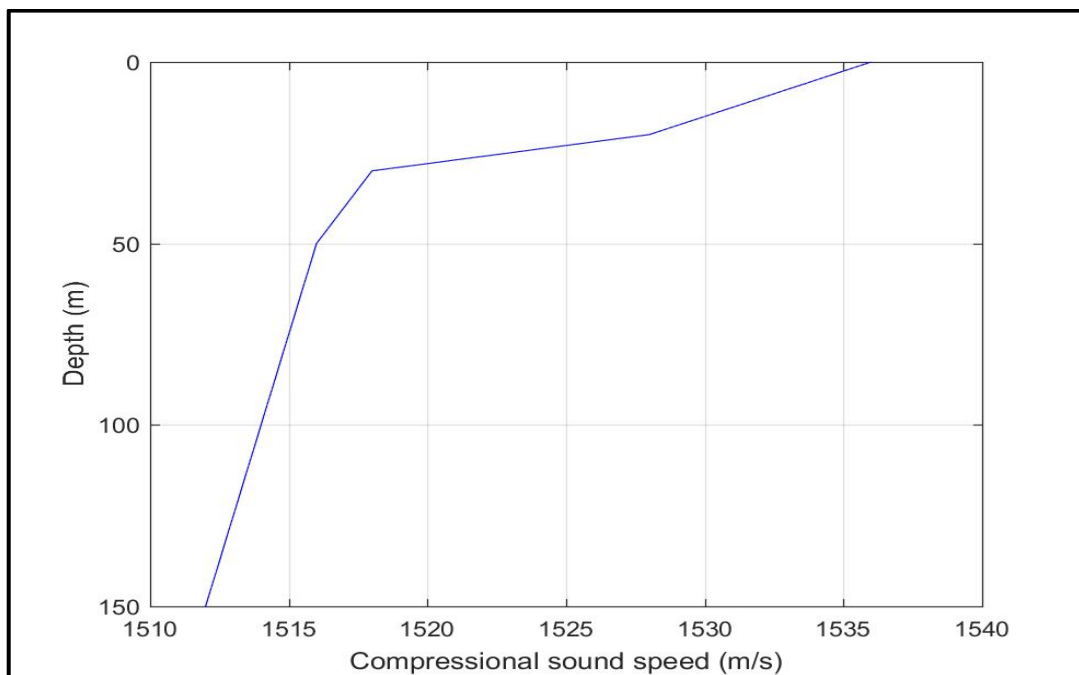
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 4000m.



Διάγραμμα 4.2.2.2.9

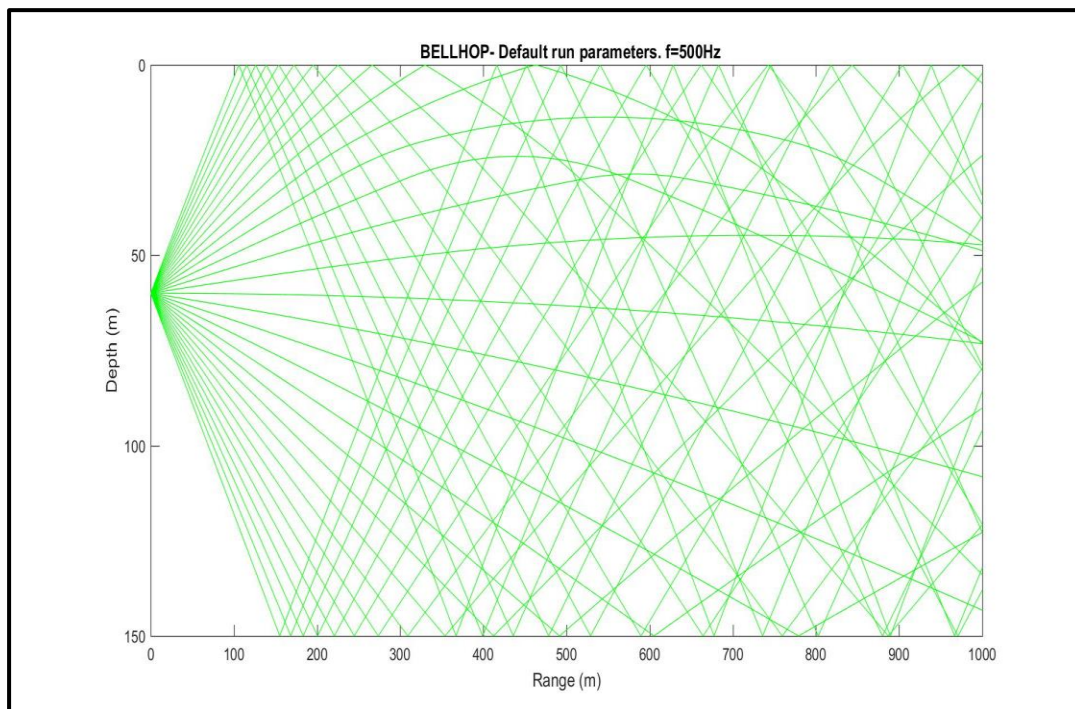
δ. Καλοκαίρι.

(1) SSP: Απότομη αρνητική διαβάθμιση ως το βάθος των 30m.



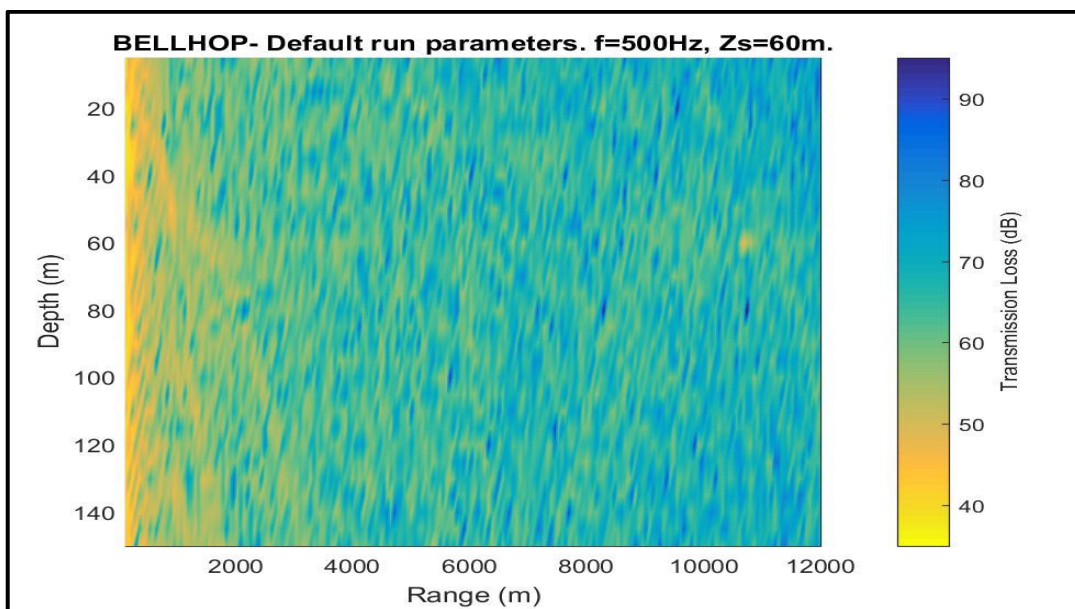
Διάγραμμα 4.2.2.2.10

(2) Διάδοση Ακτίνων: Έντονη καμπύλωση προς τον πυθμένα στο για βάθη έως 30m.



Διάγραμμα 4.2.2.2.11

(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 4000m.



Διάγραμμα 4.2.2.2.12

Στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 4.2.2.2.2) συνοψίζονται οι μέγιστες και ο Μ.Ο των απωλειών (σε dB), ανά 2000m για απόσταση έως 12000m, των επιλεγμένων χαρακτηριστικών συχνοτήτων (20Hz, 100Hz, 500Hz, 1000Hz) όπως προέκυψαν από την ανάλυση των βαθυθερμογραφικών δεδομένων:

MAX-AVERAGE ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ						
Fq(Hz)/ ΑΠΟΣΤΑΣΗ(m)	2000	4000	6000	8000	10000	12000
MAX 20	55	60	65	70	75	75
AVERAGE 20	47	53	58	62	65	65
MAX 100	55	65	65	70	70	75
AVERAGE 100	49	55	59	62	65	66
MAX 500	65	70	75	75	75	80
AVERAGE 500	52	58	61	64	66	67
MAX 1000	55	65	65	70	70	70
AVERAGE 1000	52	58	60	64	66	68

Πίνακας 4.2.2.2.2

Από τον ανωτέρω πίνακα προκύπτει ότι, συναρτήσει της απόστασης, οι μέγιστες απώλειες αναμένεται να κυμανθούν από 55dB έως 80dB, ενώ οι μέσες αναμενόμενες απώλειες θα κυμανθούν από 47dB έως 68dB.

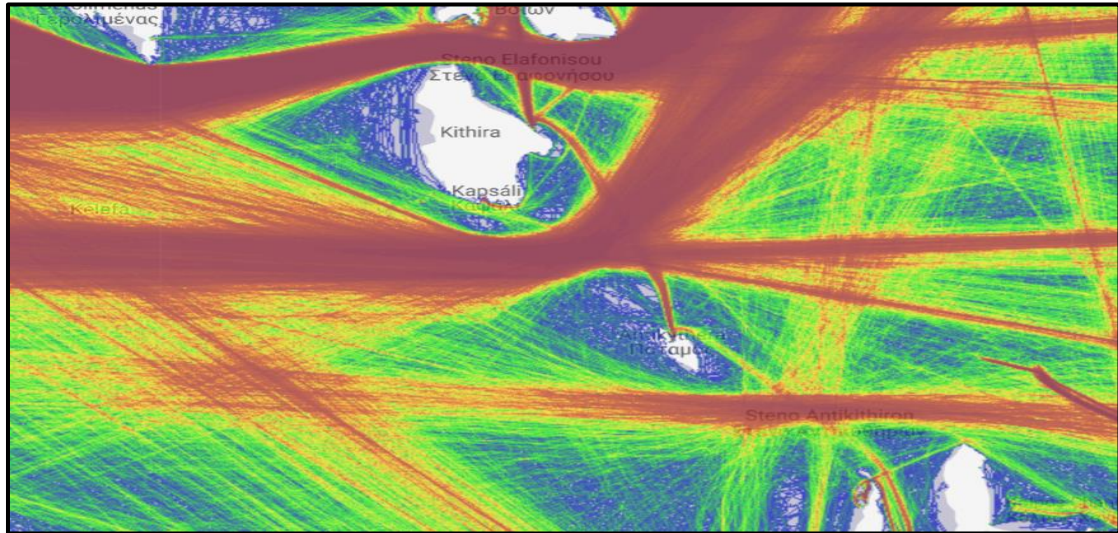
Επιπρόσθετα από τα διαγράμματα διάδοσης των ακτίδων του ήχου προκύπτει ότι το φθινόπωρο και το καλοκαίρι δημιουργούνται σκιερές ζώνες κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας ενώ τις υπόλοιπες εποχές η διάδοση είναι ομαλή. Από το γεγονός αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι ένα παθητικό σύστημα εντοπισμού θα έχει καλύτερη απόδοση εάν τοποθετηθεί στο μέγιστο δυνατό βάθος.

§2.3 Περιοχή 2 – Νοτιοδυτικό Αιγαίο.

Περιέχει τρία στενά μεταξύ Κρήτης και Πελοποννήσου, τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς:

α. Αποτελούν πύλη εισόδου – εξόδου από την Μεσόγειο στο Αιγαίο και κατ' επέκταση στην Μαύρη Θάλασσα.

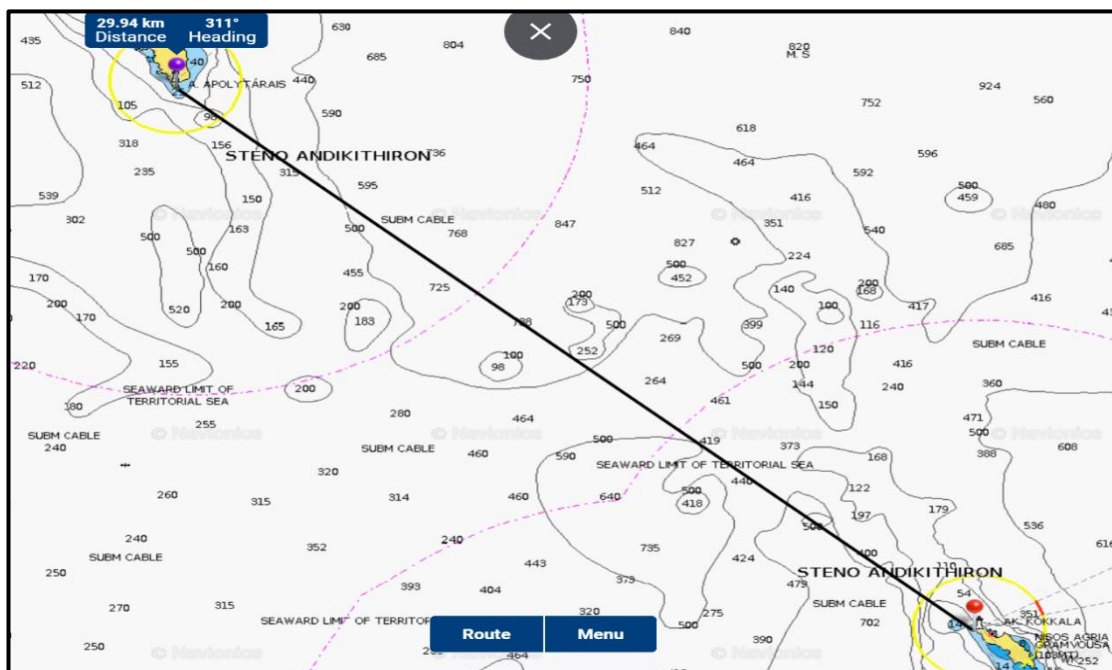
β. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη ναυτιλιακή κίνηση (εικόνα 4.2.3.1).



Εικόνα 4.2.3.1³³

§2.3.1 Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά.

α. Στενό Αντικυθήρων:

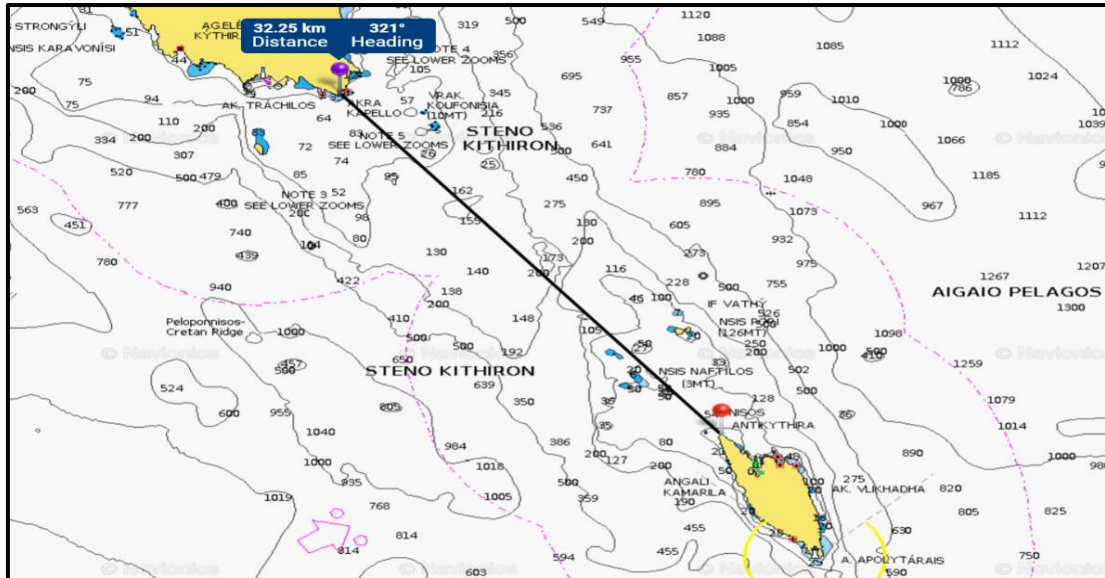


Χάρτης 4.2.3.1.1

³³ marinetraffic.com/Density-Maps-on-the-Live-Map.

- (1) Απόσταση: 29.940m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 725m
- (3) Κλίση Βυθού: Ανώμαλη

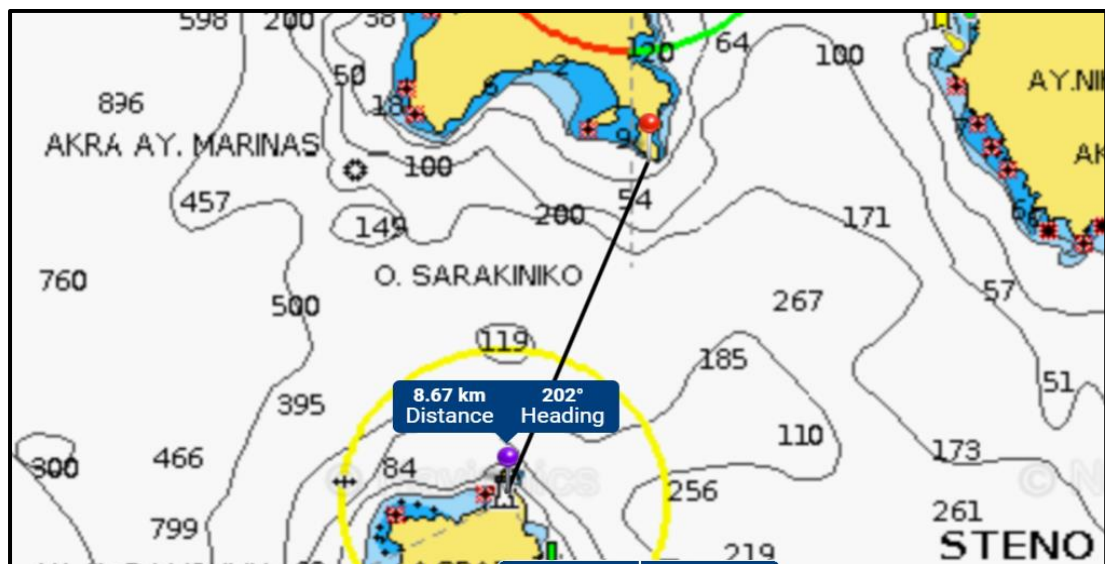
β. Στενό Κυθήρων:



Χάρτης 4.2.3.1.2

- (1) Απόσταση: 32.250m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 200m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή – Με μικρά εμπόδια

γ. Στενό Κυθήρων - Ελαφόνησου:



Χάρτης 4.2.3.1.3

- (1) Απόσταση: 8.670m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 200m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

Συγκεντρωτικά τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά των στενών της «Περιοχής 2» παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 4.2.3.1.1):

A/A	ΠΕΡΙΟΧΗ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΒΑΘΟΣ (m)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ (m)	ΚΛΙΣΗ ΒΥΘΟΥ
1.	ΣΤΕΝΟ ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΩΝ	725	29940	ΑΝΩΜΑΛΗ
2.	ΣΤΕΝΟ ΚΥΘΗΡΩΝ	200	32250	ΟΜΑΛΗ
3.	ΣΤΕΝΟ ΚΥΘΗΡΩΝ - ΕΛΑΦΟΝΗΣΟΣ	200	8670	ΟΜΑΛΗ
	Μ.Ο	375	23620	

Πίνακας 4.2.3.1.1

Παρατηρούμε ότι³⁴:

α. Τα μέγιστα βάθη κυμαίνονται από 200m έως 725m, με Μ.Ο τα 375m και διάμεσο: 200m.

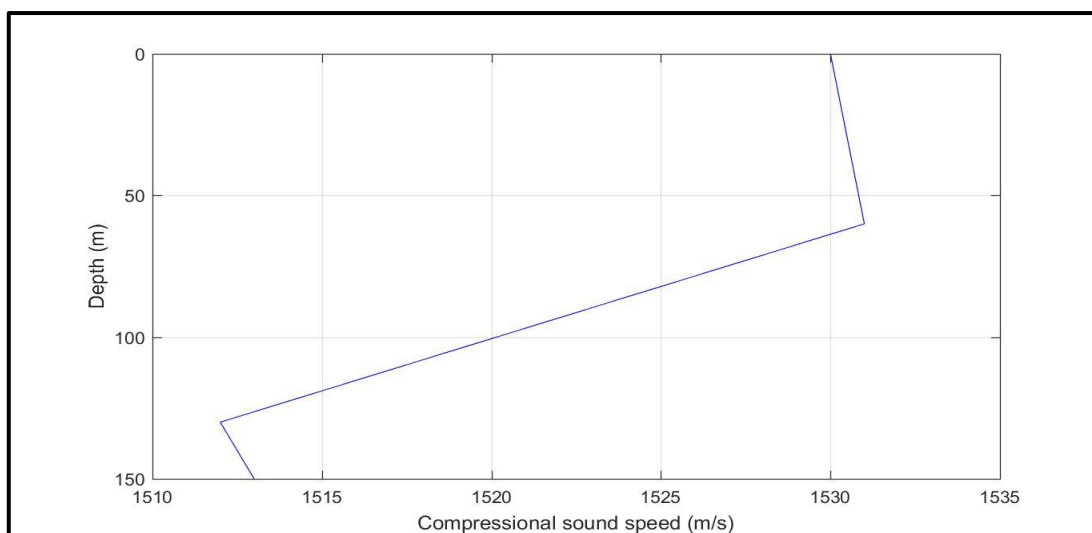
β. Ο Μ.Ο των αποστάσεων είναι: 23620m.

γ. Η μορφολογία του βυθού δύναται να επηρεάσει την διάδοση των ακουστικών κυμάτων στο στενό Αντικυθήρων.

§2.3.2 Βαθυθερμογραφικές Συνθήκες.

α. Φθινόπωρο.

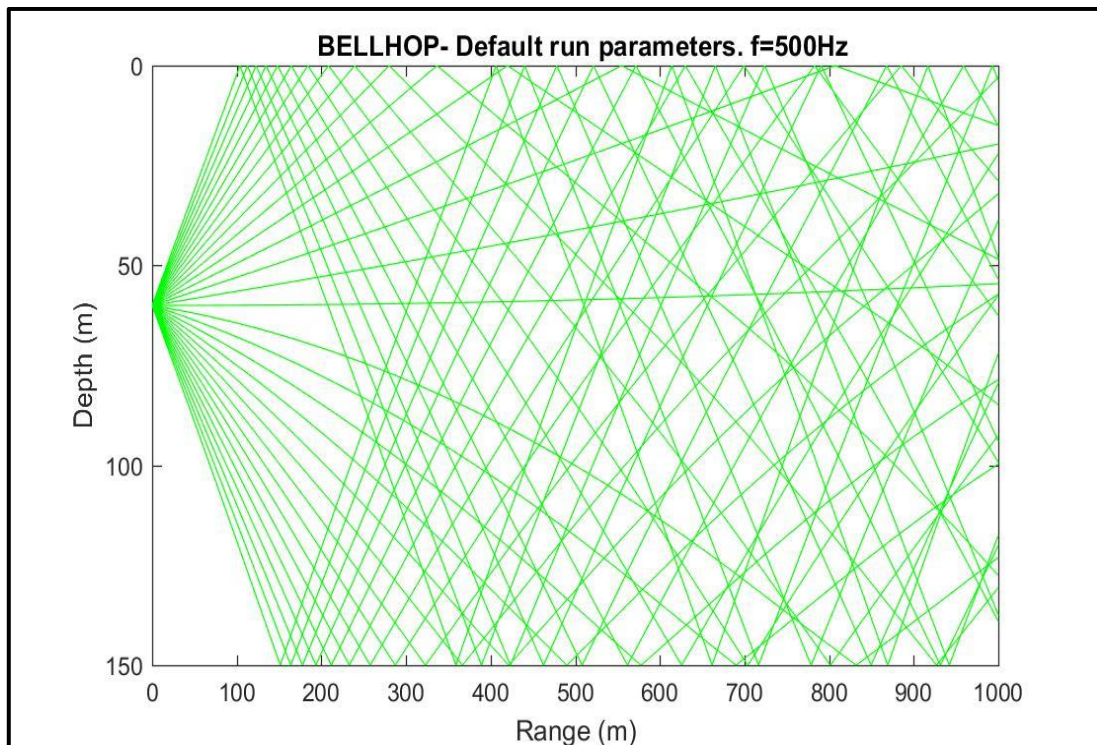
(1) SSP: Παρατηρείται απότομη αρνητική διαβάθμιση από τα 60m έως τα 130m.



Διάγραμμα 4.2.3.2.1

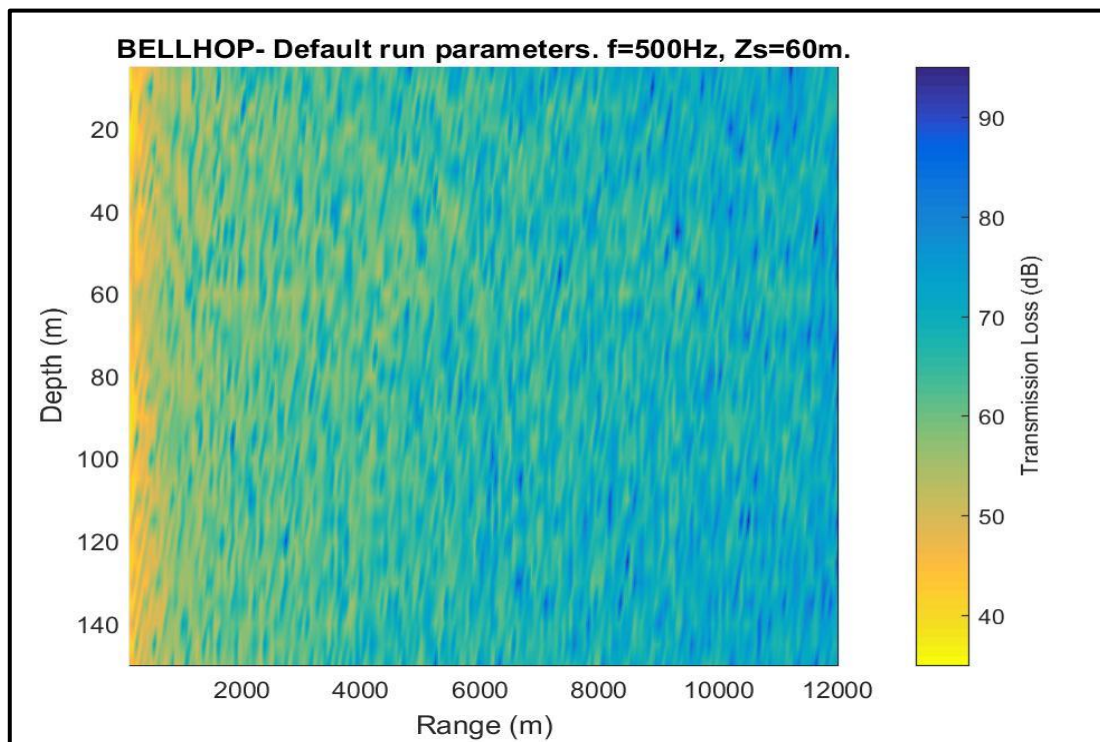
³⁴ Λόγω του μικρού αριθμού στενών ο Μ.Ο στην συγκεκριμένη περίπτωση αναφέρεται για τυπικούς λόγους.

(2) Διάδοση Ακτίνων: Στρέψη των ακτίνων προς τον πυθμένα για βάθη μεγαλύτερα των $60m$ και δημιουργία σκιερής ζώνης σε μεσαία και μεγάλα βάθη.



Διάγραμμα 4.2.3.2.2

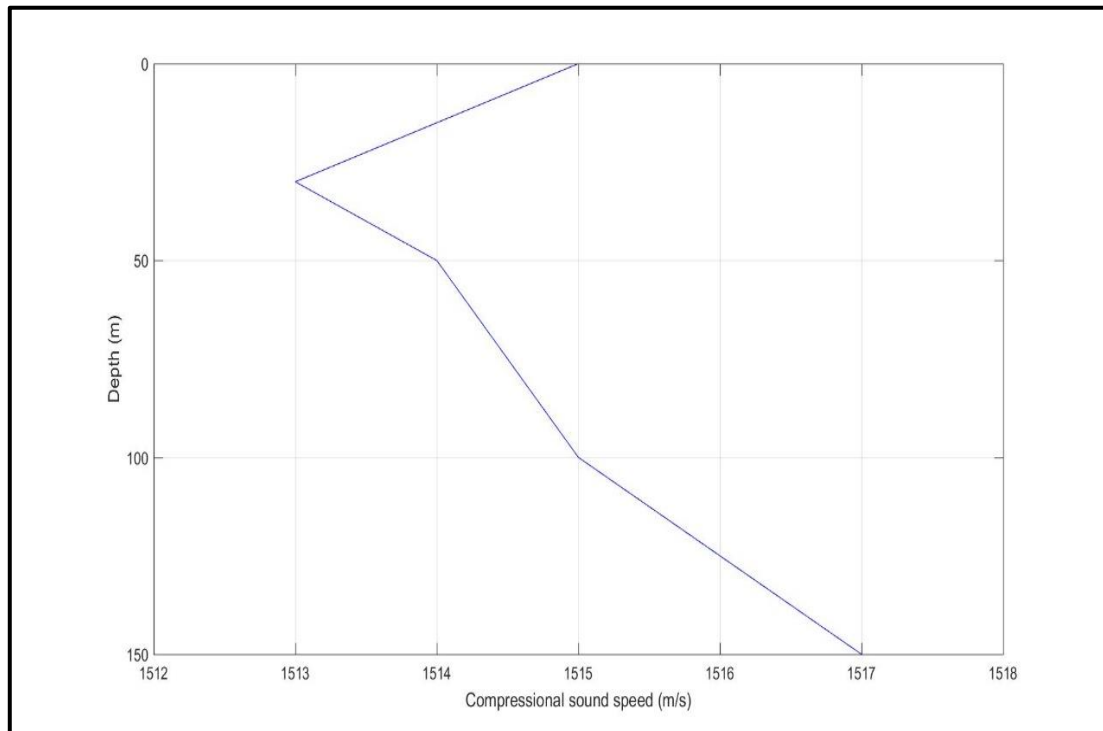
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των $6000m$.



Διάγραμμα 4.2.3.2.3

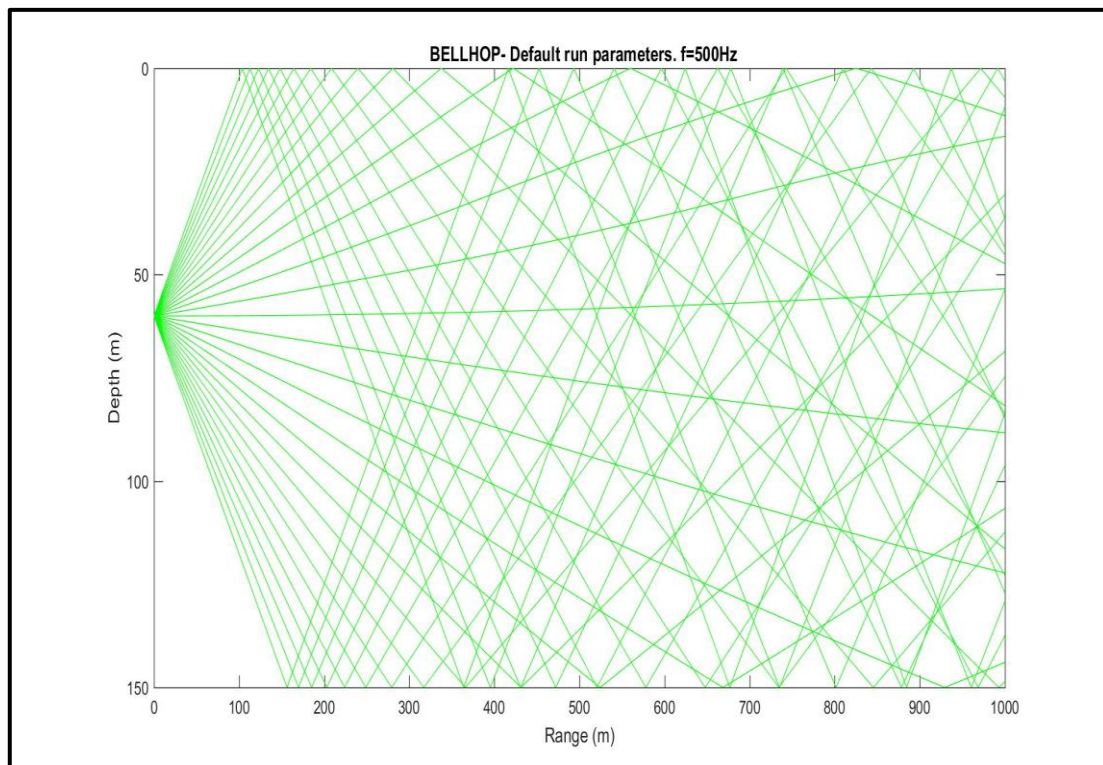
β. Χειμώνας.

(1) SSP: Αλλαγή διαβάθμισης στα 30m, με μικρή μεταβολή στην ταχύτητα.



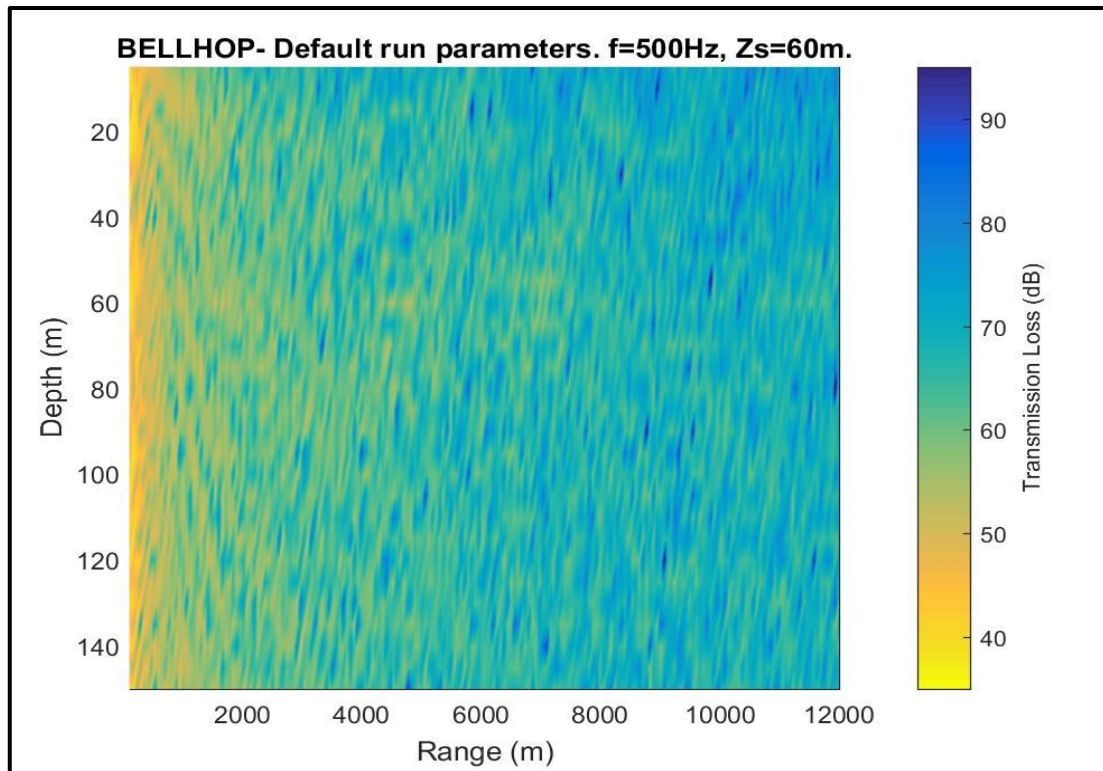
Διάγραμμα 4.2.3.2.4

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται ομαλή διάδοση.



Διάγραμμα 4.2.3.2.5

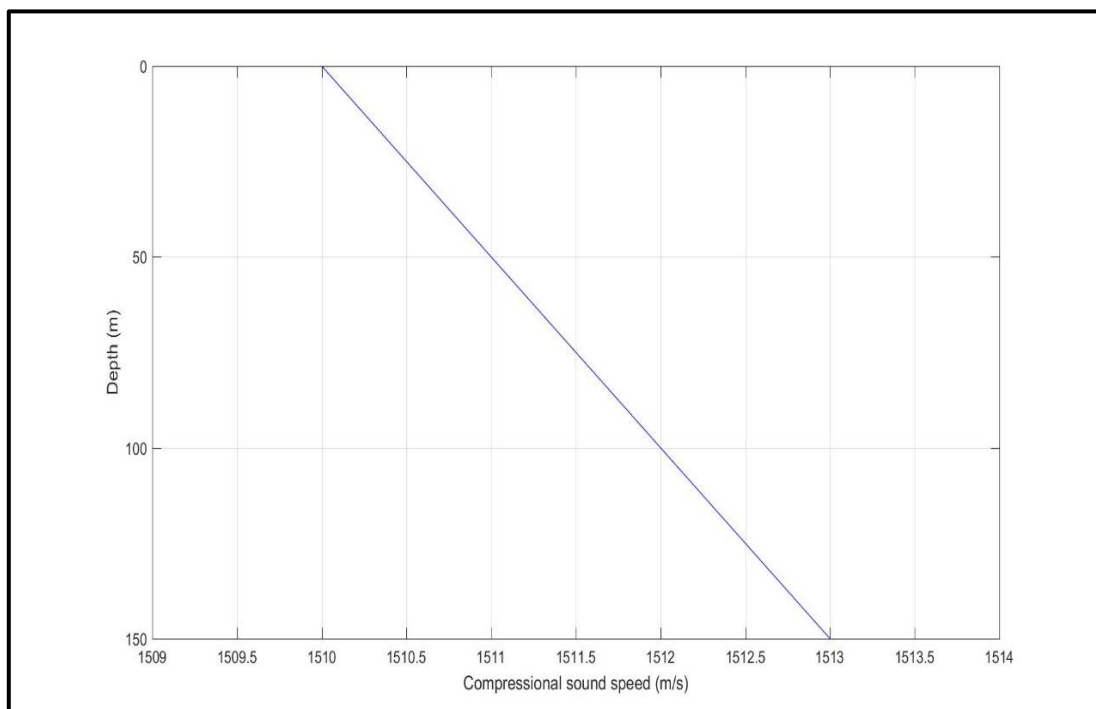
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 6000m.



Διάγραμμα 4.2.3.2.6

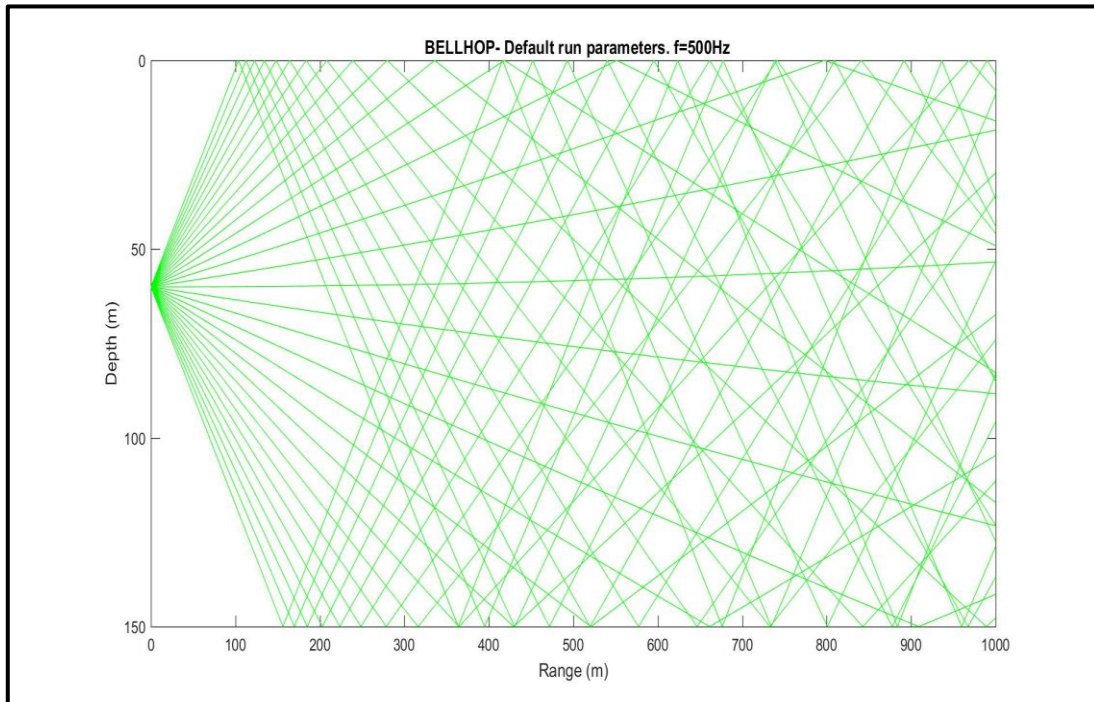
γ. Ανοιξη.

(1) SSP: Παρατηρείται θετική διαβάθμιση με μικρή μεταβολή στην ταχύτητα.



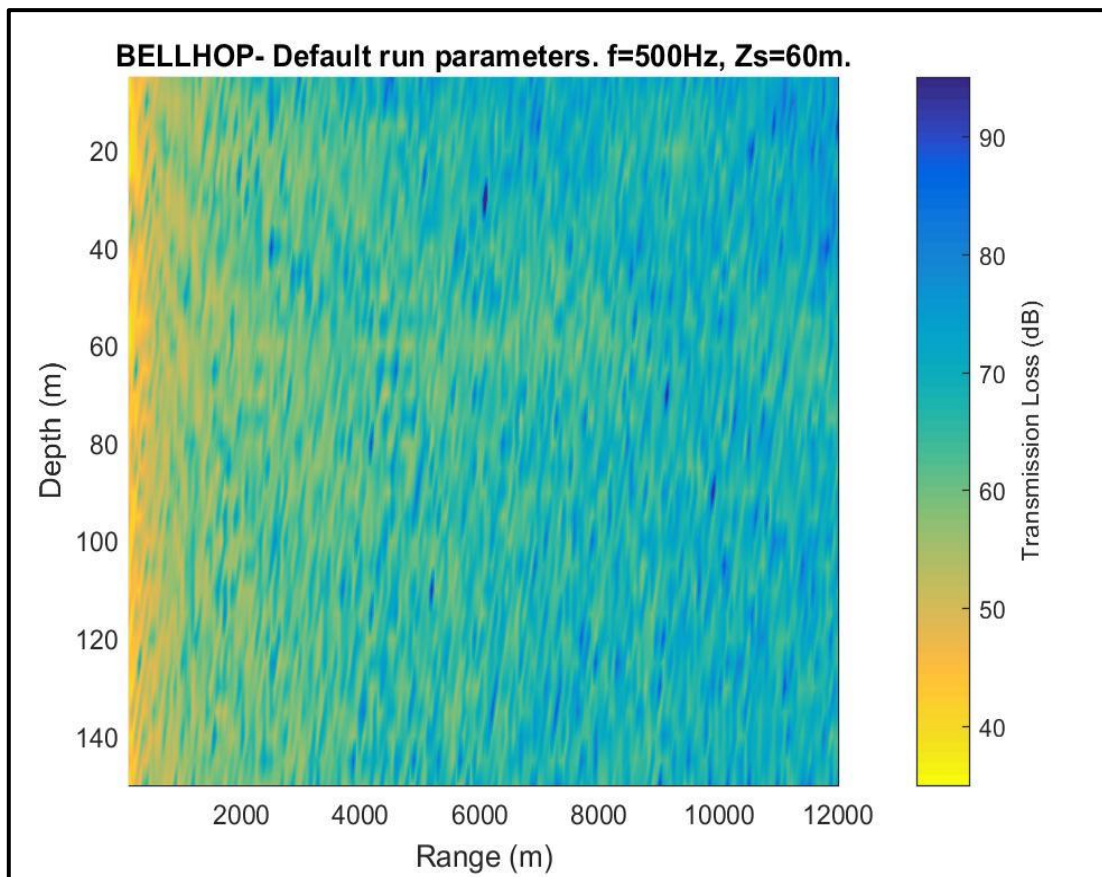
Διάγραμμα 4.2.3.2.7

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται ομαλή διάδοση.



Διάγραμμα 4.2.3.2.8

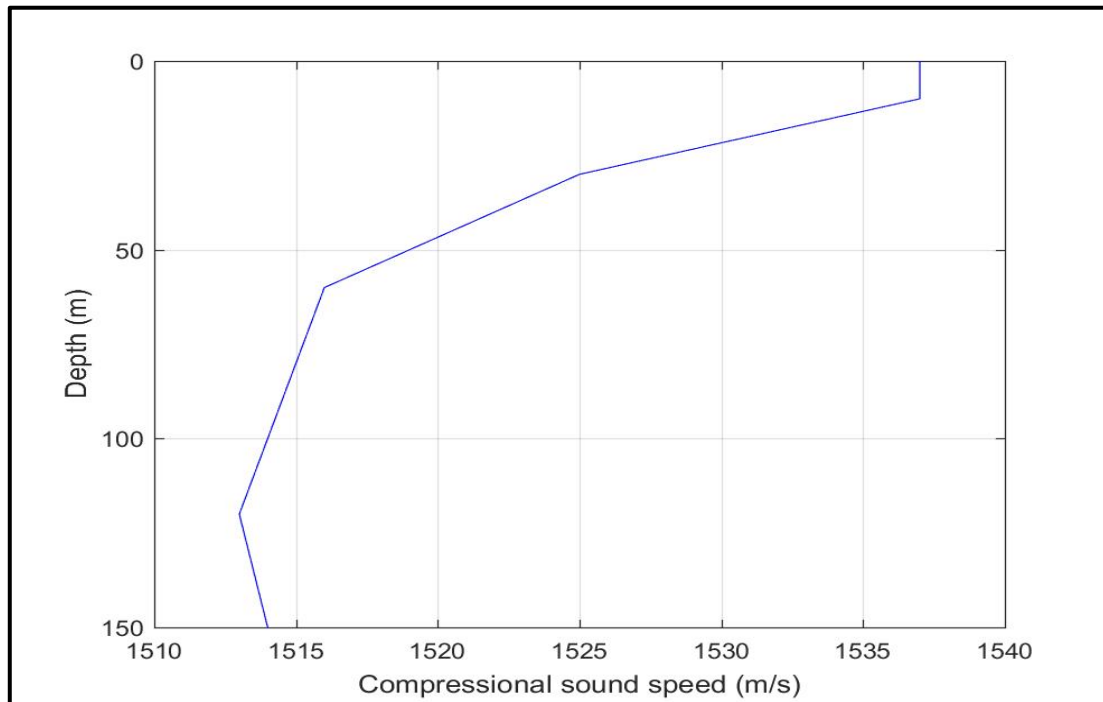
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 6000m.



Διάγραμμα 4.2.3.2.9

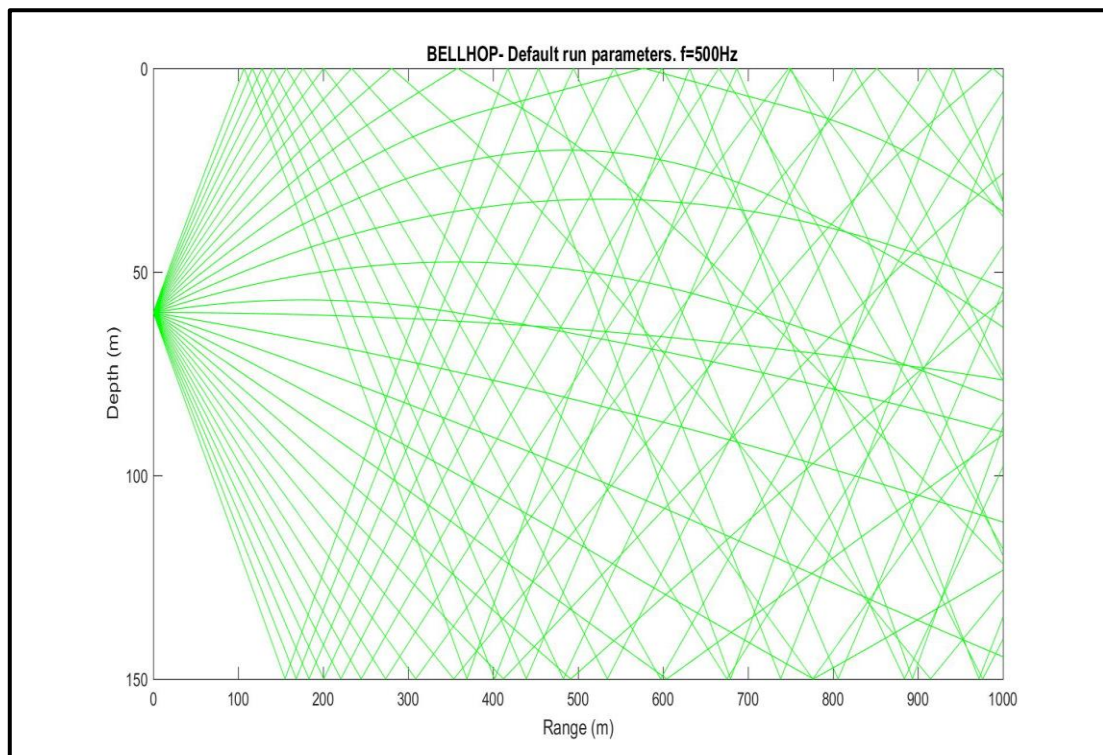
δ. Καλοκαίρι.

(1) SSP: Παρατηρείται απότομη αρνητική διαβάθμιση από τα 20m έως τα 60m.



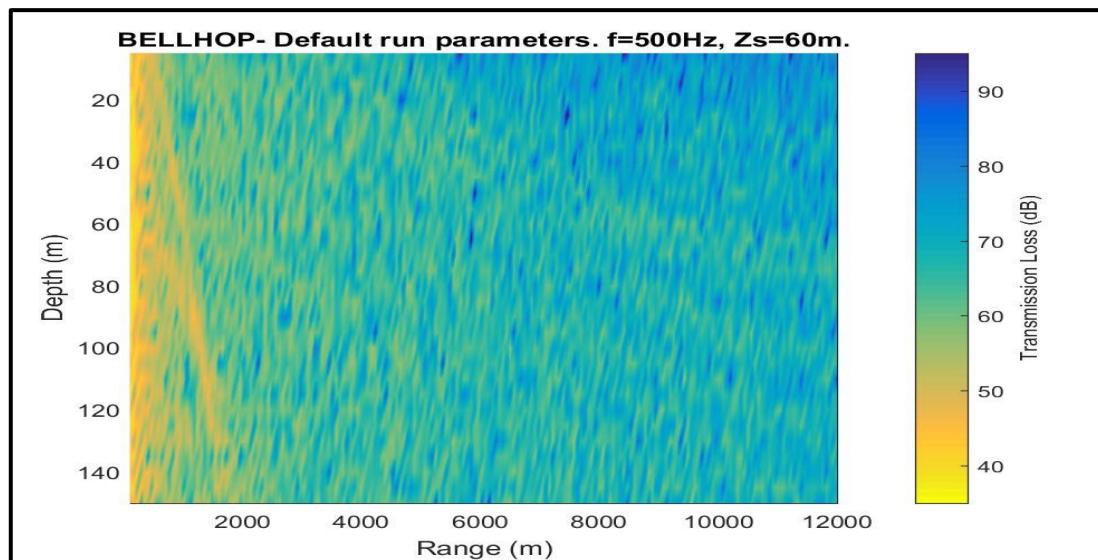
Διάγραμμα 4.2.3.2.10

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται έντονη στρέψη των ακτίνων προς τον πυθμένα στα βαθύ έως 60m.



Διάγραμμα 4.2.3.2.11

(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 6000m και κοντά στην επιφάνεια.



Διάγραμμα 4.2.3.2.12

Στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 4.2.3.2.2) συνοψίζονται οι μέγιστες και ο M.O των απωλειών (σε dB), ανά 2000m, για απόσταση έως 12000m των επιλεγμένων χαρακτηριστικών συχνοτήτων (20Hz, 100Hz, 500Hz, 1000Hz), όπως προέκυψαν από την ανάλυση των βαθυθερμογραφικών δεδομένων:

MAX/AVERAGE Απωλειών Διάδοσης Ηχητικού Σήματος						
Fq(Hz)/ ΑΠΟΣΤΑΣΗ(m)	2000	4000	6000	8000	10000	12000
MAX 20	50	55	60	65	70	75
AVERAGE 20	47	49	54	59	66	66
MAX 100	50	60	65	65	70	70
AVERAGE 100	50	57	62	63	67	67
MAX 500	55	60	65	65	70	75
AVERAGE 500	53	59	62	65	68	69
MAX 1000	55	60	65	70	75	75
AVERAGE 1000	53	58	63	67	70	71

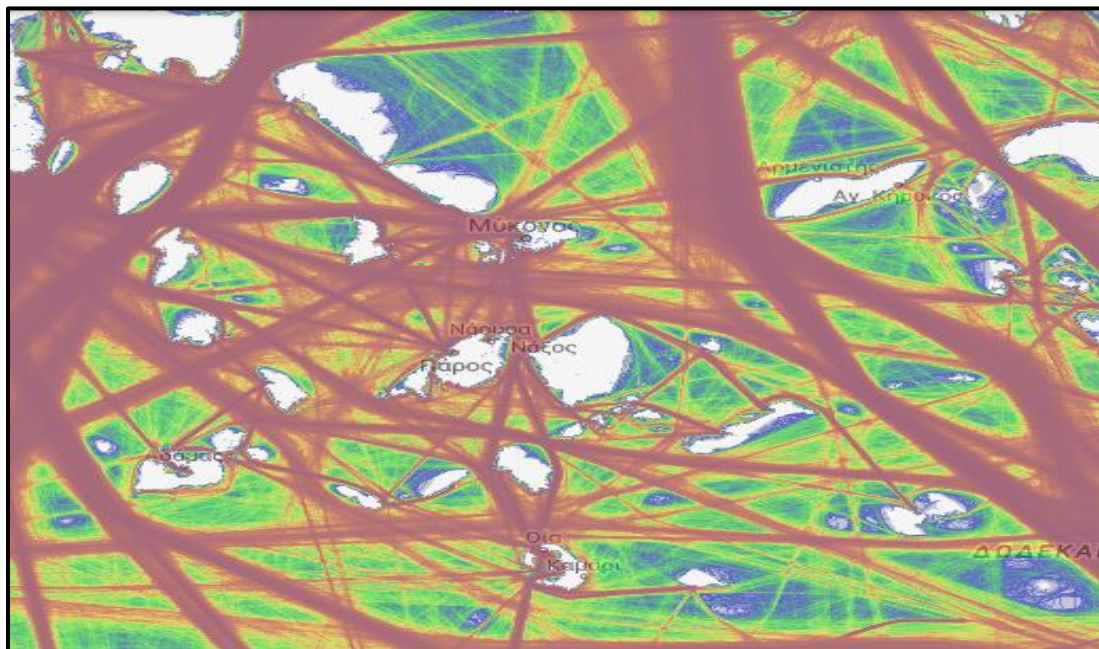
Πίνακας 4.2.3.2.2

Από τον ανωτέρω πίνακα προκύπτει ότι, συναρτήσει της απόστασης, οι μέγιστες απώλειες αναμένεται να κυμανθούν από 50dB έως 75dB ενώ οι μέσες αναμενόμενες απώλειες θα κυμανθούν από 47dB έως 71dB.

Επιπρόσθετα από τα διαγράμματα διάδοσης των ακτίδων του ήχου προκύπτει ότι το καλοκαίρι δημιουργούνται σκιερές ζώνες κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, ενώ το φθινόπωρο από μεσαία βάθη και κάτω. Τις υπόλοιπες εποχές η διάδοση είναι ομαλή. Από το γεγονός αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι το παθητικό σύστημα εντοπισμού θα έχει καλύτερη απόδοση καθόλη την διάρκεια του χρόνου εάν τοποθετηθεί στο μέγιστο δυνατό βάθος, καθώς θα αποφεύγεται το δυνατόν ο θόρυβος της επιφάνειας, ωστόσο θα έχει μειωμένη απόδοση τους φθινοπωρινούς μήνες.

§2.4 Περιοχή 3 – Κυκλάδες.

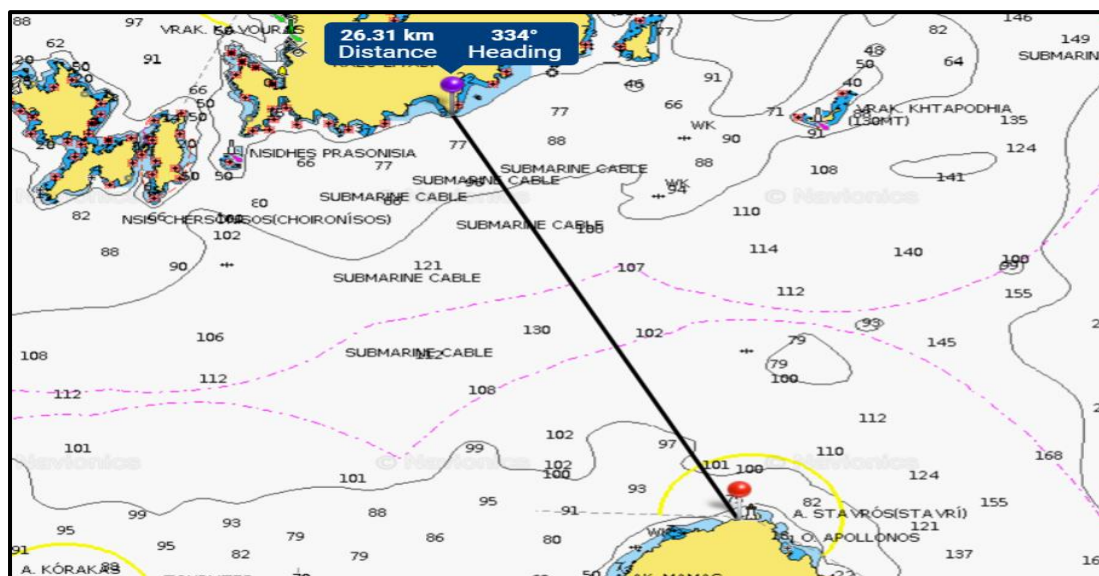
Αποτελείται από 17 στενά που επιτρέπουν την διέλευση Υ/Β επιφανειας. Το συμπλεγμα νησιών και βραχονησίδων δημιουργεί ένα δύσκολο επιχειρησιακό περιβάλλον που ευνοεί την αποκρυψη και διαφυγη Υ/Β. Επιπλέον χαρακτηρίζεται από έντονη ναυτιλιακή κίνηση, ιδίως τους θερινούς μήνες λόγω των σκαφών αναψυχής (εικόνα 4.2.4.1).



Εικόνα 4.2.4.1³⁵

§2.4.1 Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά

α. Στενό Νάξου – Μυκόνου:

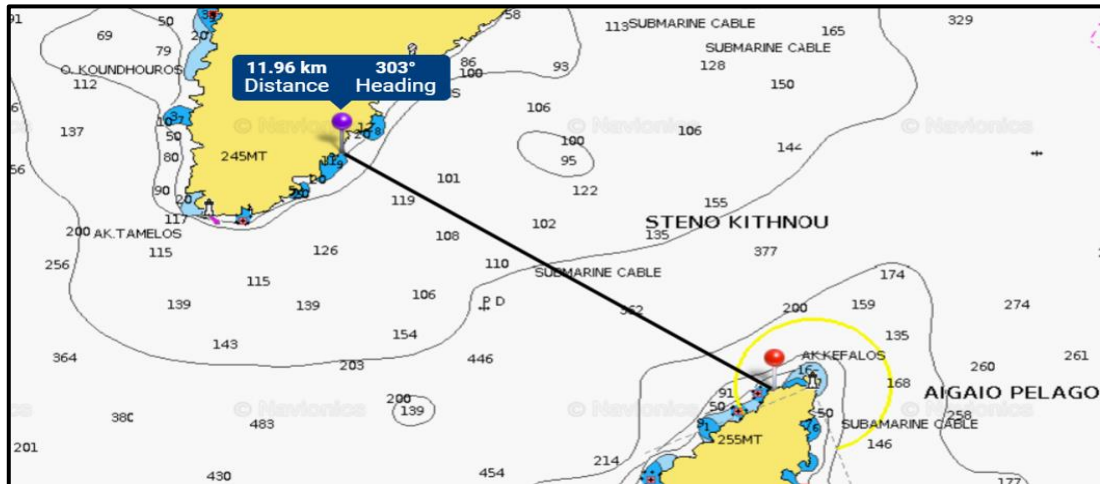


Χάρτης 4.2.4.1.1

³⁵ marinetraffic.com/Density-Maps-on-the-Live-Map.

- (1) Απόσταση: 26.310m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 130m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

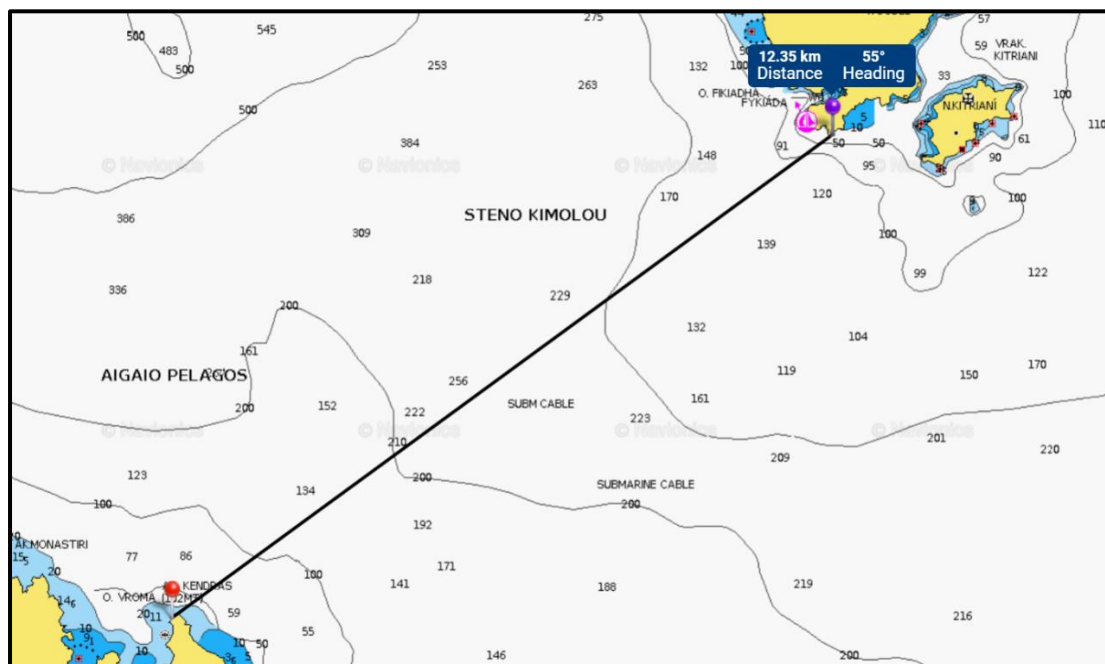
β. Στενό Κυθνου:



Χάρτης 4.2.4.1.2

- (1) Απόσταση: 11.960m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 362m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

γ. Στενό Κιμώλου:



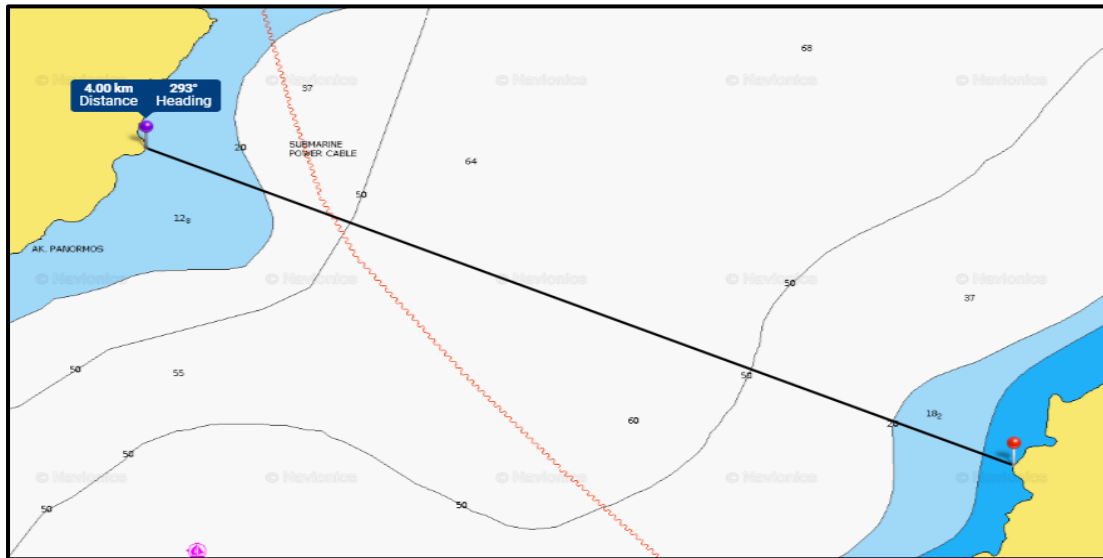
Χάρτης 4.2.4.1.3

(1) Απόσταση: 12.350m

(2) Μέγιστο Βάθος: 256m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

δ. Στενό Κουφονησια – Ναξος:



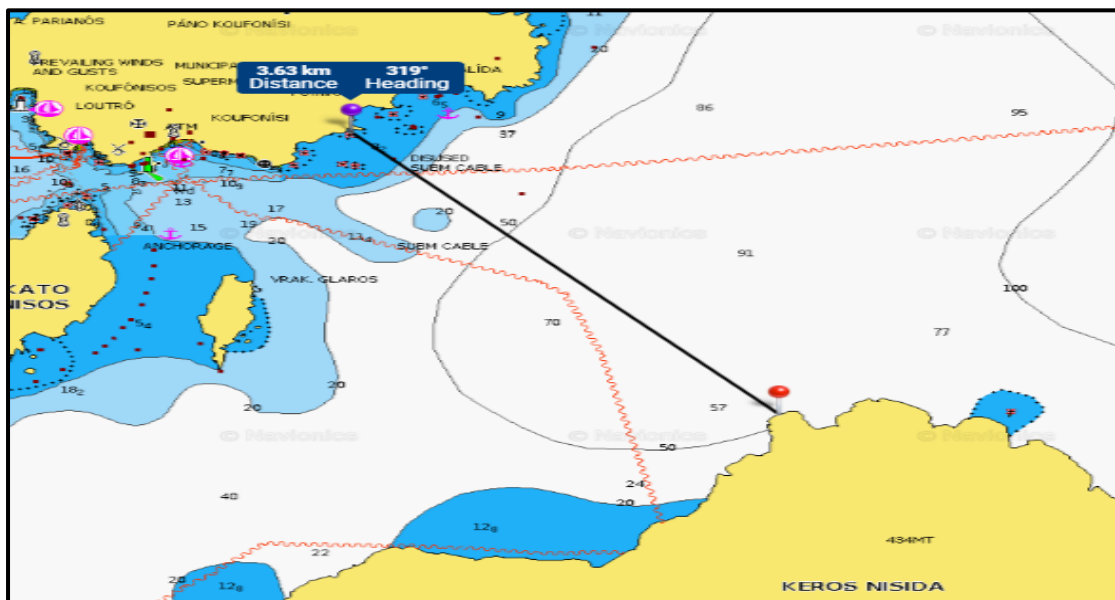
Χάρτης 4.2.4.1.4

(1) Απόσταση: 4000m

(2) Μέγιστο Βάθος: 60m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

ε. Στενό Κέρου – Κουφονήσια:



Χάρτης 4.2.4.1.5

- (1) Απόσταση: 3.630m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 70m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

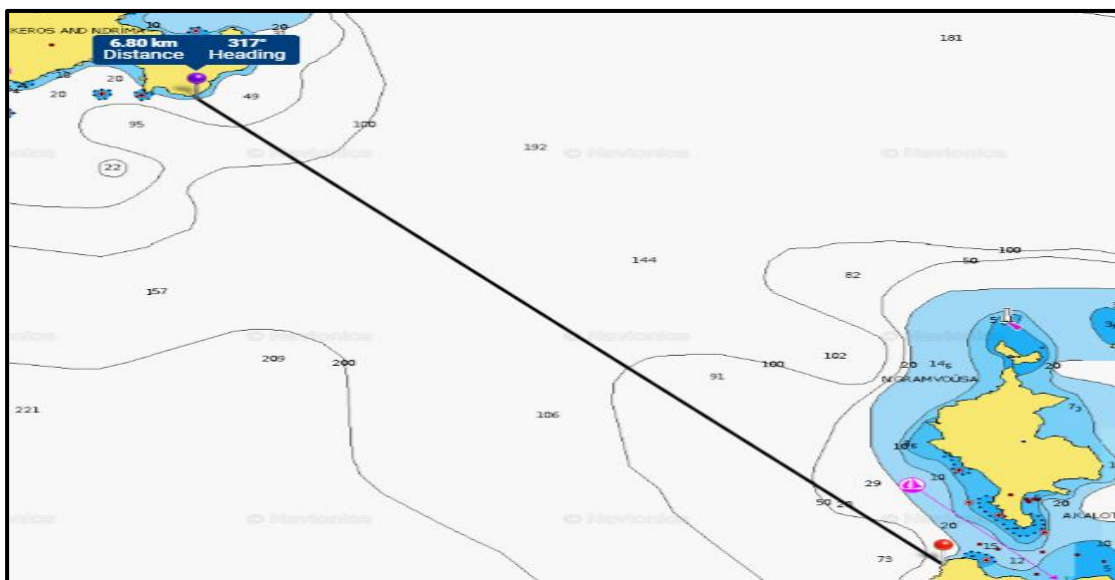
στ. Στενό Κερου – Αντικερου:



Χάρτης 4.2.4.1.6

- (1) Απόσταση: 2.730m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 112m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

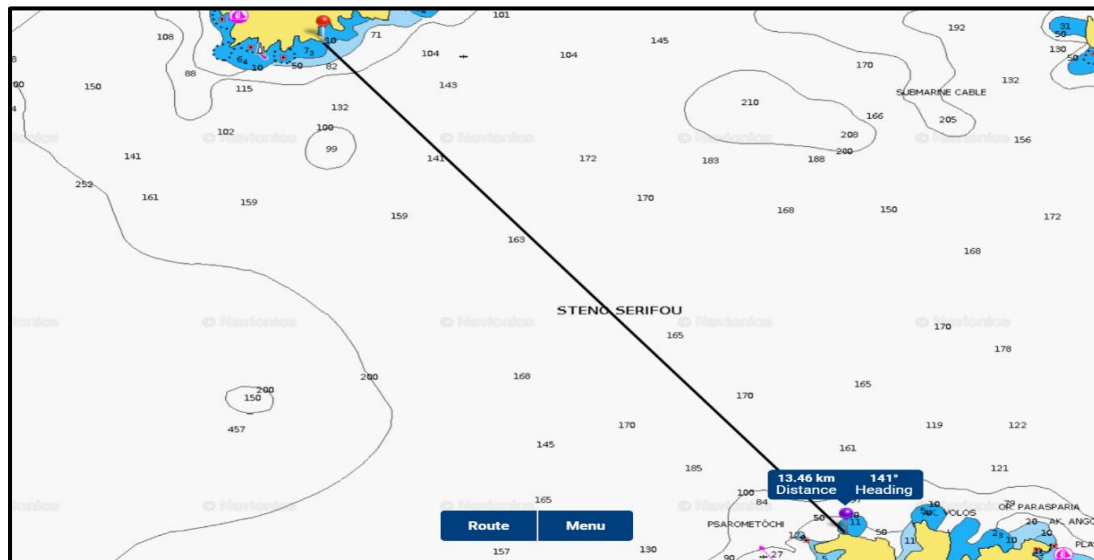
ζ. Στενό Αντικερου – Αμοργου:



Χάρτης 4.2.4.1.7

- (1) Απόσταση: 6.800 m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 150m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

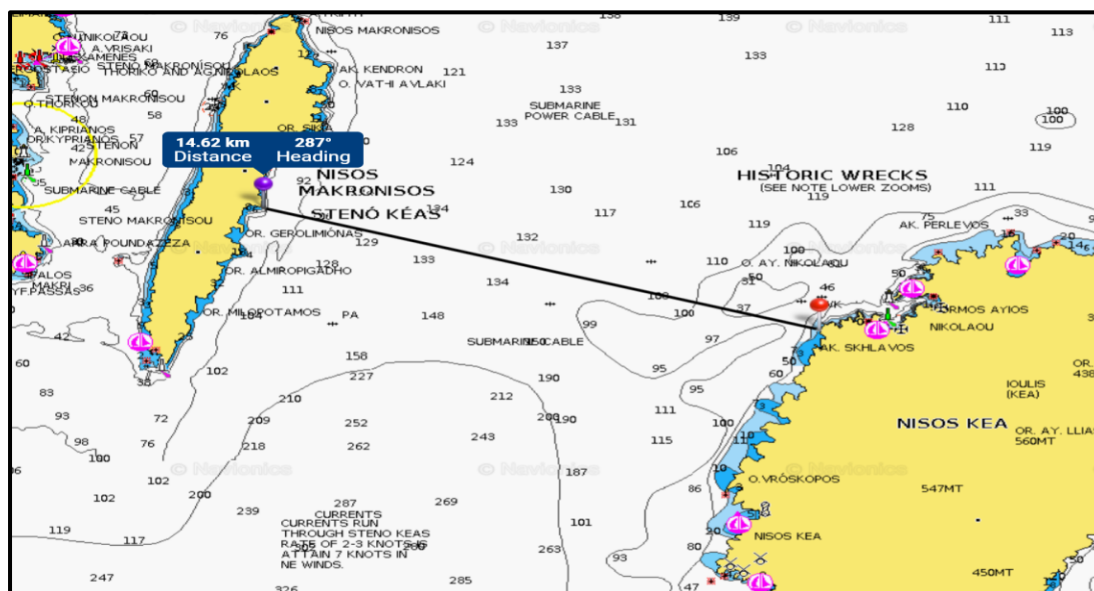
η. Στενό Σερίφου:



Χάρτης 4.2.4.1.8

- (1) Απόσταση: 13.460m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 170m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

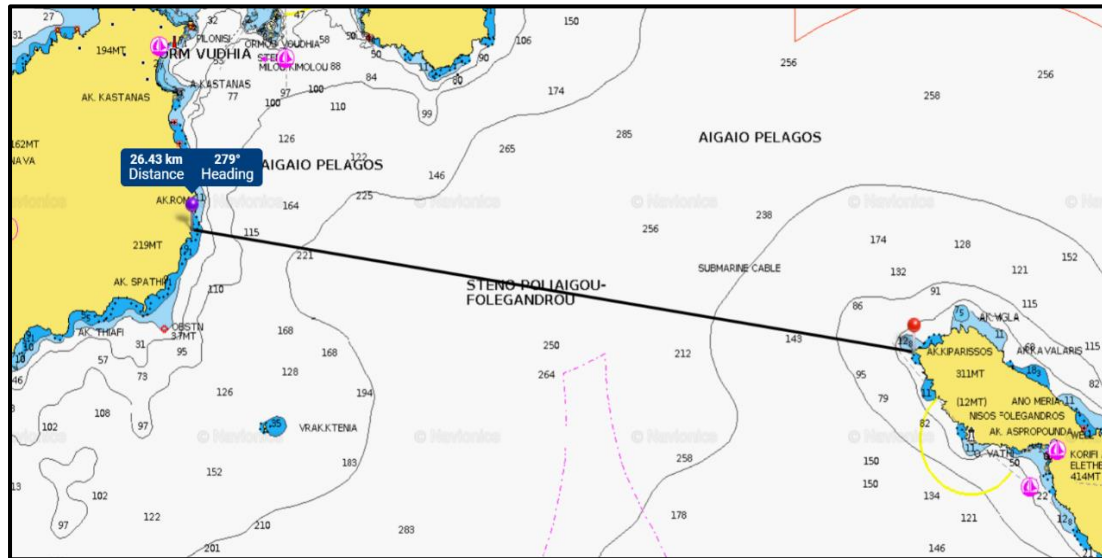
θ. Στενό Μακρόνησος – Κέας:



Χάρτης 4.2.4.1.9

- (1) Απόσταση: 14.620m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 134m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

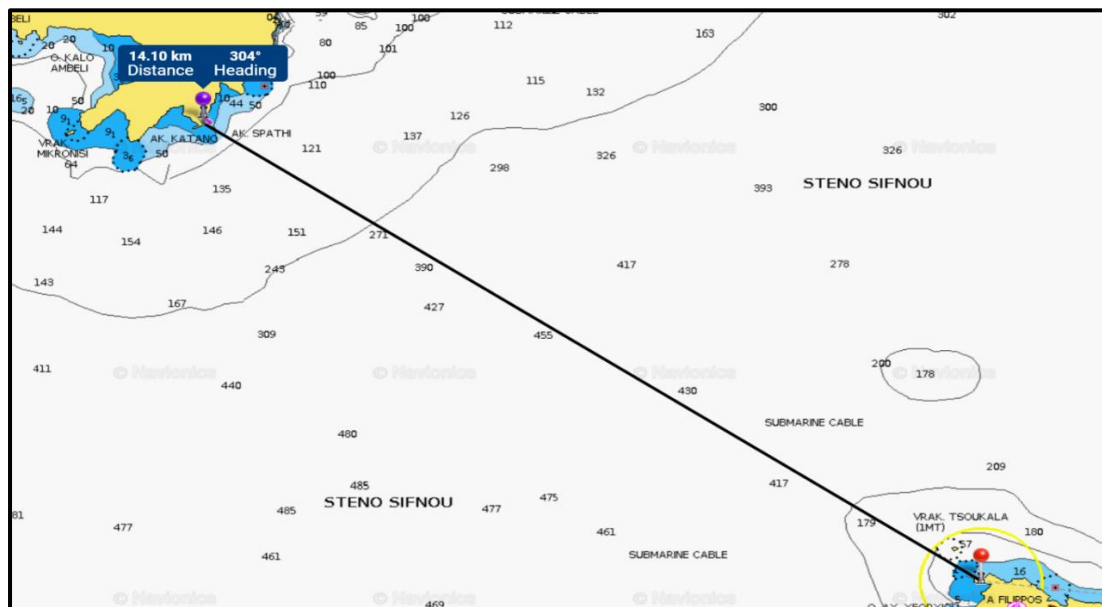
Ι. Στενό Πολυαίγου – Φολεγάνδρου:



Χάρτης 4.2.4.1.10

- (1) Απόσταση: 26.430m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 250m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

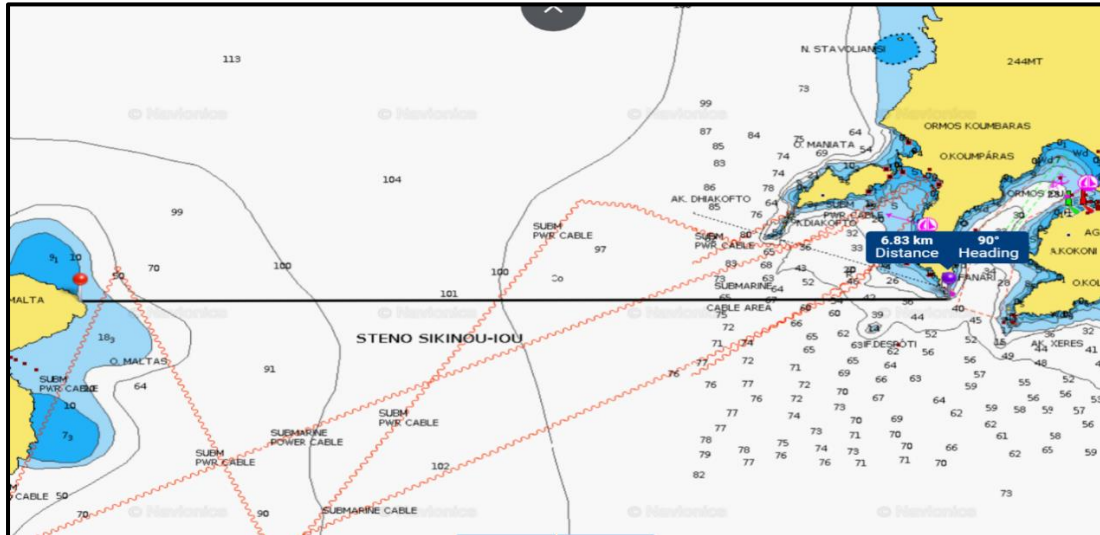
Ια. ΣΤΕΝΟΪ ΣΙΨΝΟΥ:



Χάρτης 4.2.4.1.11

- (1) Απόσταση: 14.100m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 455m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

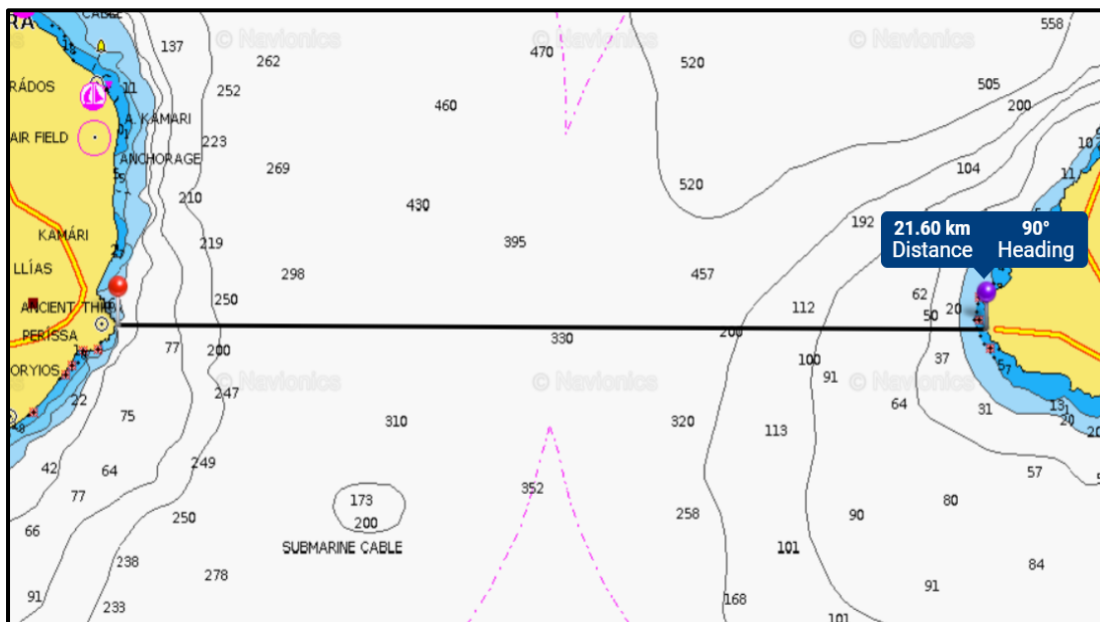
ιβ. Στενό Σίκινου – Ίου:



Χάρτης 4.2.4.1.12

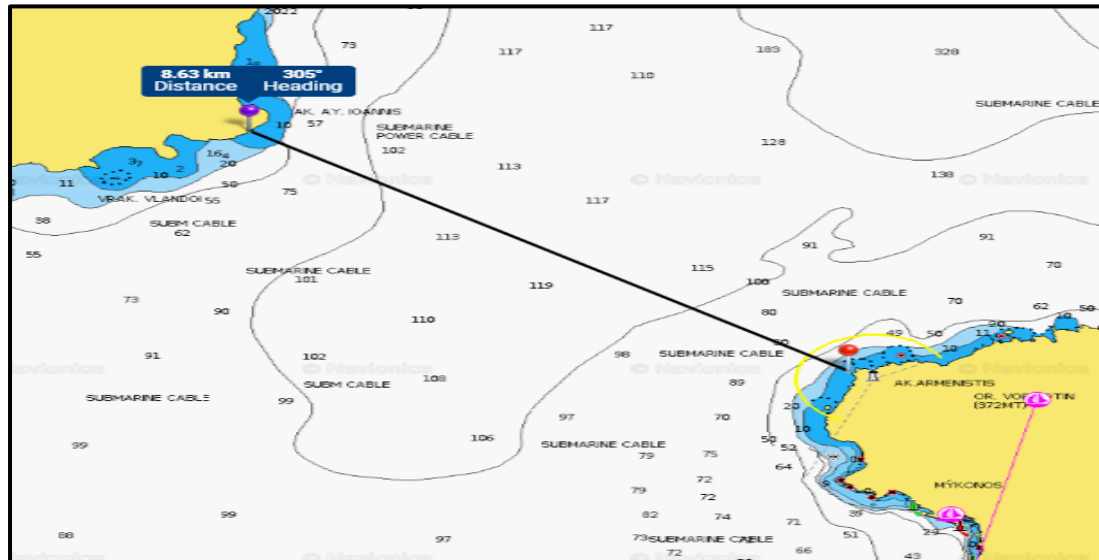
- (1) Απόσταση: 6.830m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 101m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

ιγ. Στενό Σαντορίνης – Ανάφης:

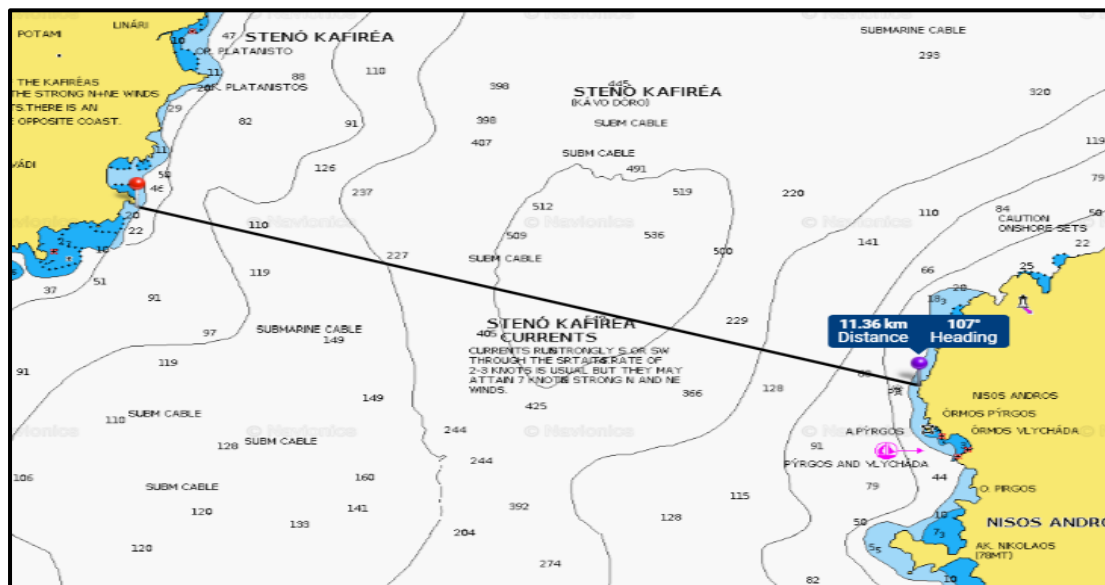


Χάρτης 4.2.4.1.13

- (1) Απόσταση: 21.600m
 - (2) Μέγιστο Βάθος: 330m
 - (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή
- ιδ. Στενό Μυκόνου – Τήνου:

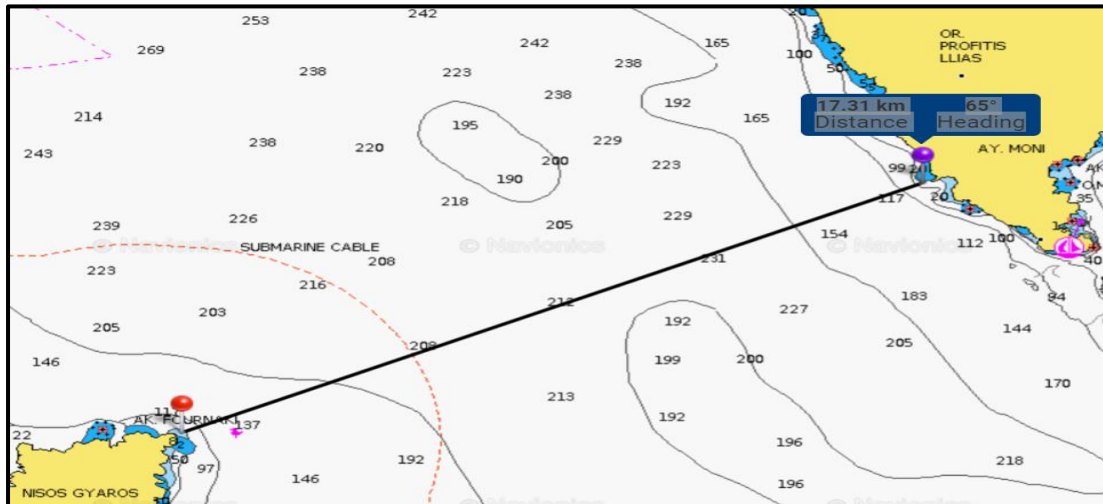


- (1) Απόσταση: 8.630m
 - (2) Μέγιστο Βάθος: 119m
 - (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή
- ΙΕ. Στενό Καφηρέα:



- (1) Απόσταση: 11.360m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 536m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

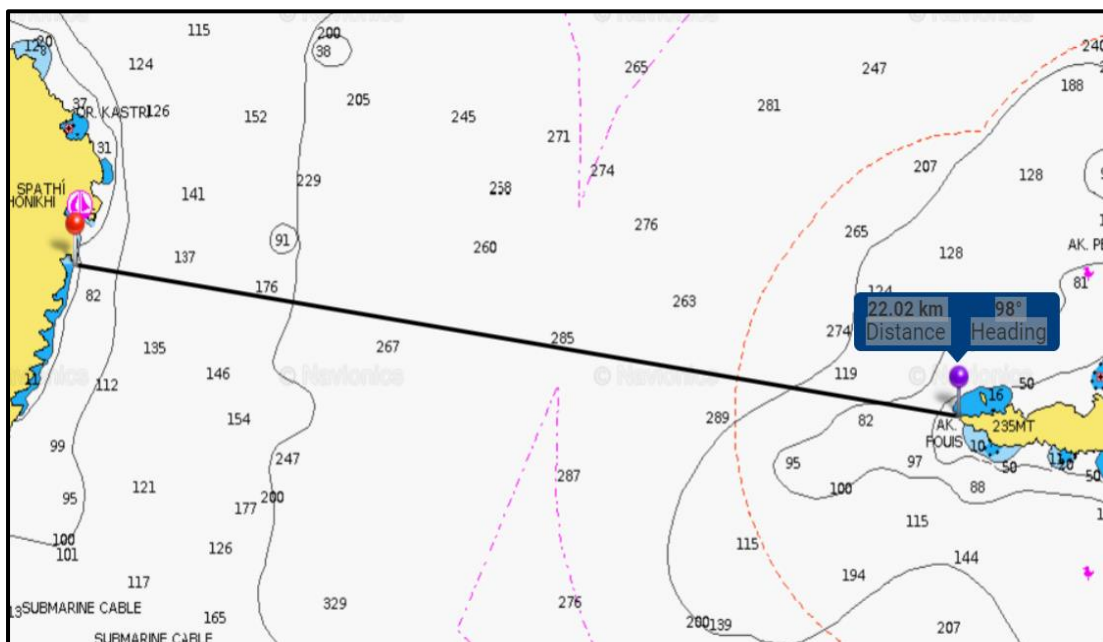
ιζ. Στενό Γυάρου – Τήνου:



Χάρτης 4.2.4.1.16

- (1) Απόσταση: 17.310m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 231m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

ιθ. Στενό Γυάρου - Κέας:



Χάρτης 4.2.4.1.17

(1) Απόσταση: 22.020m

(2) Μέγιστο Βάθος: 289m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

Συγκεντρωτικά τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά των στενών της «Περιοχής 3» παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 4.2.4.1.1):

Α/Α	ΣΤΕΝΟ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΒΑΘΟΣ (m)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ (m)	ΚΛΙΣΗ ΒΥΘΟΥ
1.	ΝΑΞΟΣ - ΜΥΚΟΝΟΣ	130	26310	ΟΜΑΛΗ
2.	ΚΥΘΝΟΥ	362	11960	ΟΜΑΛΗ
3.	ΚΙΜΩΛΟΥ	256	12350	ΟΜΑΛΗ
4.	ΚΟΥΦΟΝΗΣΙΑ ΝΑΞΟΣ	60	4000	ΟΜΑΛΗ
5.	ΚΕΡΟΣ - ΚΟΥΦΟΝΗΣΙΑ	70	3630	ΟΜΑΛΗ
6.	ΚΕΡΟΣ - ΑΝΤΙΚΕΡΟΣ	112	2730	ΟΜΑΛΗ
7.	ΑΝΤΙΚΕΡΟΣ - ΑΜΟΡΓΟΣ	150	6800	ΟΜΑΛΗ
8.	ΣΕΡΙΦΟΥ	170	13460	ΟΜΑΛΗ
9.	ΜΑΚΡΟΝΗΣΟΣ - ΚΕΑΣ	134	14620	ΟΜΑΛΗ
10.	ΠΟΛΥΑΙΓΟΥ - ΦΟΛΕΓΑΝΔΡΟΥ	250	26430	ΟΜΑΛΗ
11.	ΣΙΦΝΟΥ	455	14100	ΟΜΑΛΗ
12.	ΣΙΚΙΝΟΥ - ΙΟΥ	101	6830	ΟΜΑΛΗ
13.	ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ - ΑΝΑΦΗ	330	21600	ΟΜΑΛΗ
14.	ΜΥΚΟΝΟΣ - ΤΗΝΟΣ	119	8630	ΟΜΑΛΗ
15.	ΚΑΦΗΡΕΑ	536	11360	ΟΜΑΛΗ
16.	ΓΥΑΡΟΥ – ΤΗΝΟΥ	231	17310	ΟΜΑΛΗ
17.	ΓΥΑΡΟΥ - ΚΕΑΣ	289	22020	ΟΜΑΛΗ
	Μ.Ο	201	12991	

Πίνακας 4.2.4.1.1

Παρατηρούμε ότι:

α. Τα μέγιστα βάθη κυμαίνονται από 60m έως 536m, με Μ.Ο τα 201m και διάμεσο: 160m.

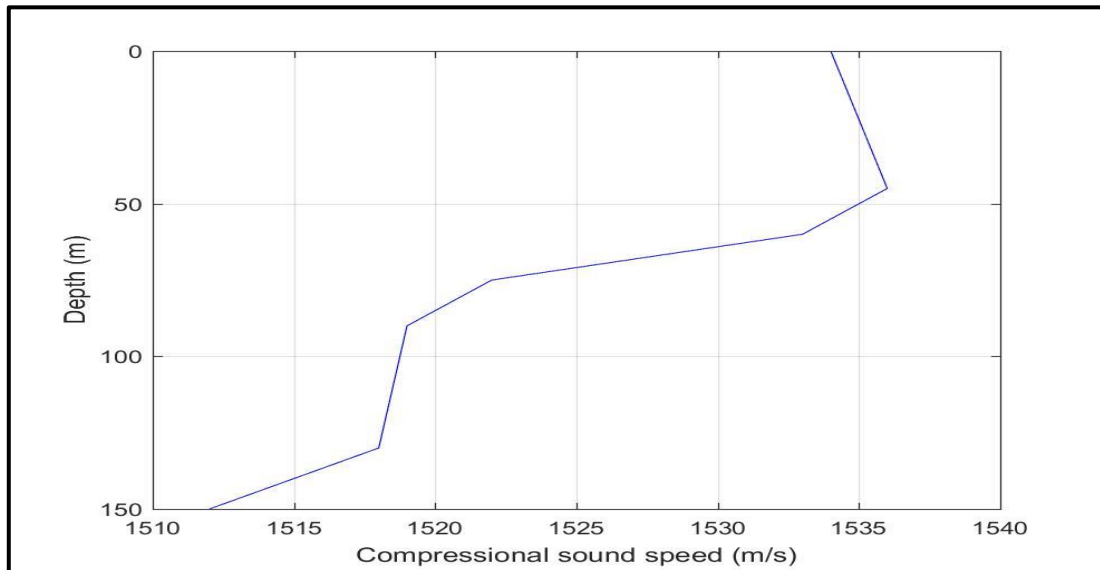
β. Ο Μ.Ο των αποστάσεων είναι: 12.991m.

γ. Η μορφολογία του βυθού δεν επηρεάζει την διάδοση των ακουστικών κυμάτων.

§2.4.2 Βαθυθερμογραφικές Συνθήκες

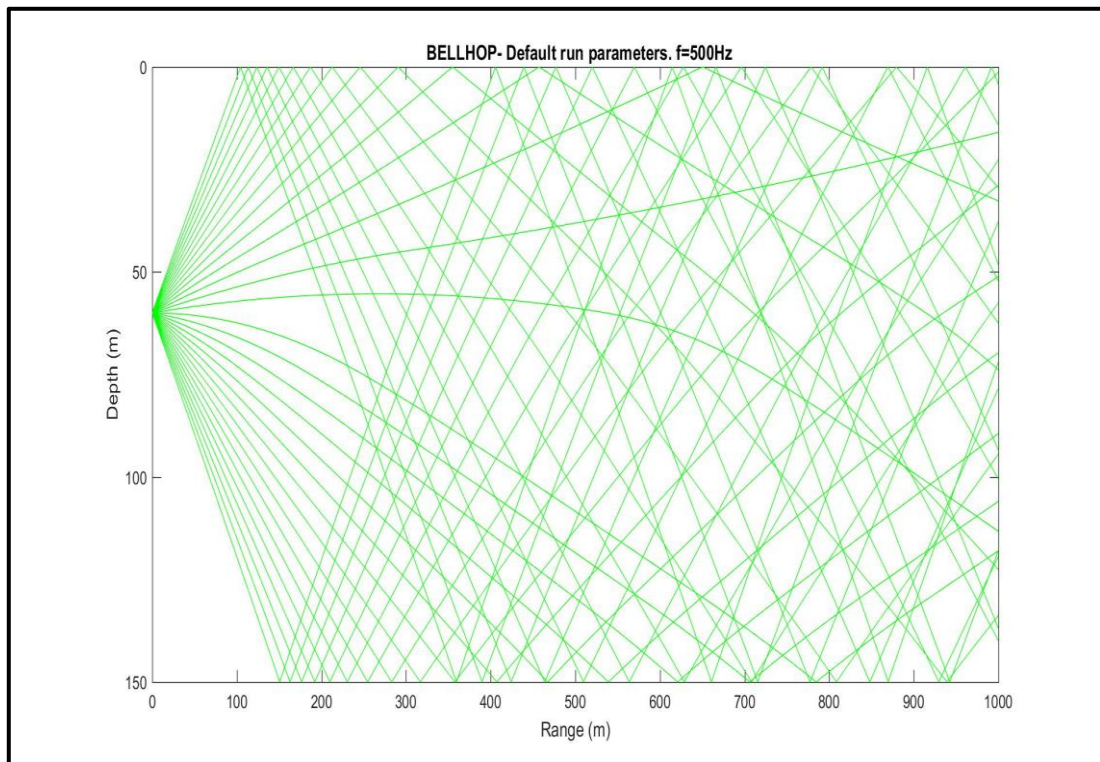
α. Φθινόπωρο.

(1) SSP: Παρατηρείται απότομη αρνητική διαβάθμιση από τα 40m έως τα 150m.



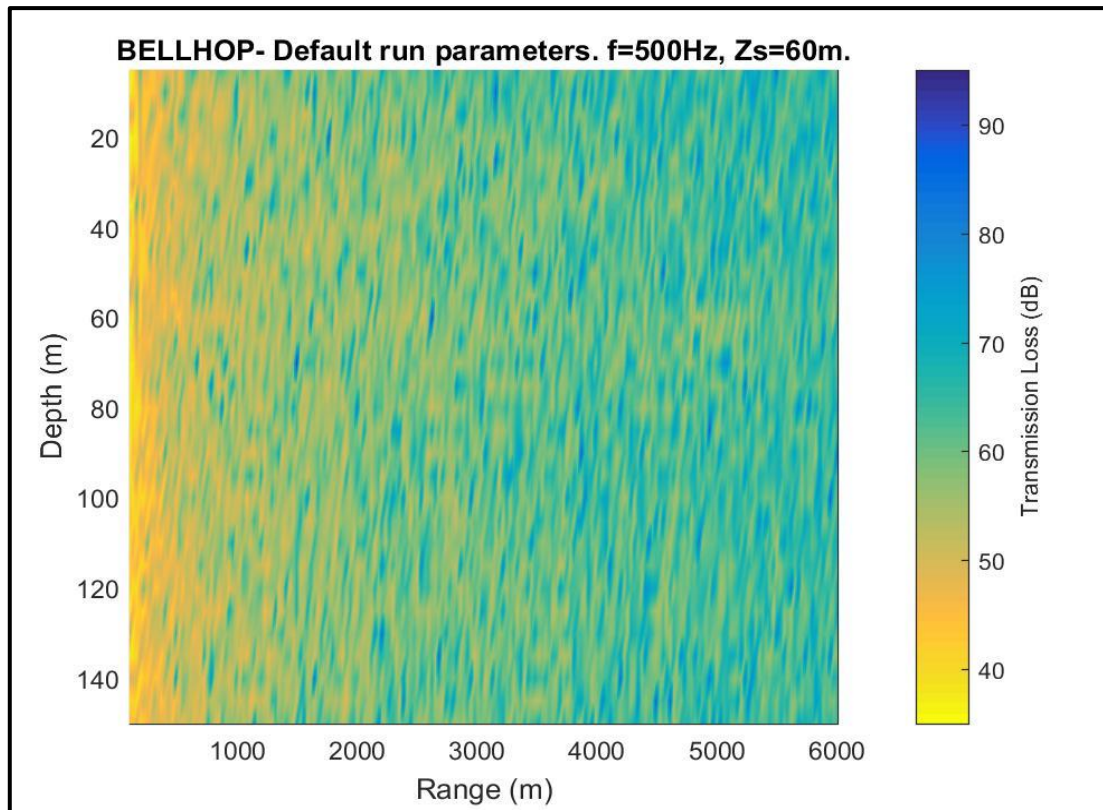
Διάγραμμα 4.2.4.2.1

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται έντονη καμπύλωση των ακτίνων για βάθη μεγαλύτερα των 60m, με αποτέλεσμα την δημιουργία σκιερής ζώνης στα μεσαία βάθη.



Διάγραμμα 4.2.4.2.2

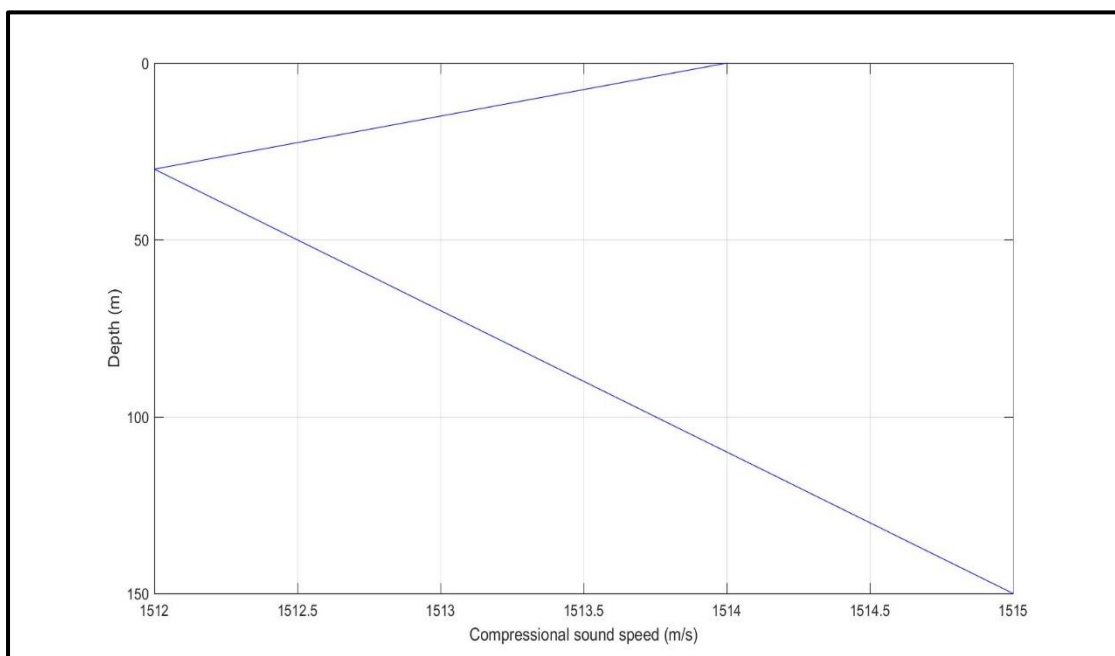
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 5000m.



Διάγραμμα 4.2.4.2.3

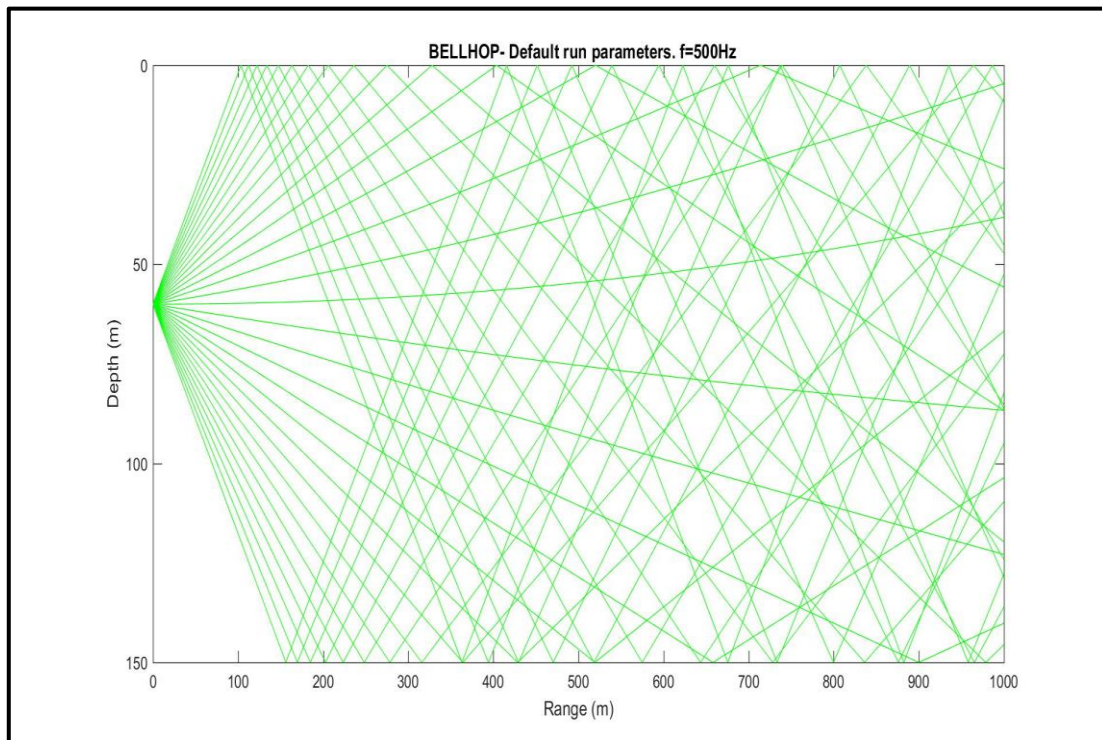
β. Χειμώνας.

(1) SSP: Παρατηρείται αλλαγή διαβάθμισης στα 30m αλλά με μικρή μεταβολή της ταχύτητας.



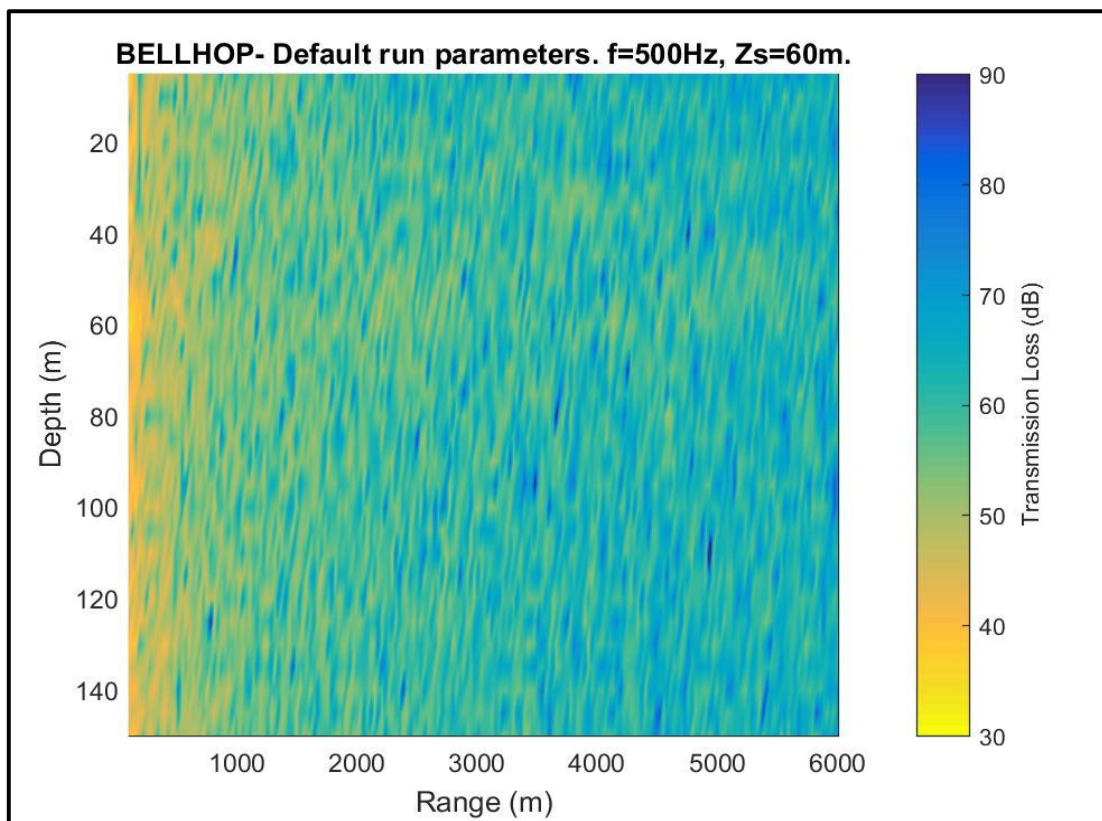
Διάγραμμα 4.2.4.2.4

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται ομαλή διάδοση.



Διάγραμμα 4.2.4.2.5

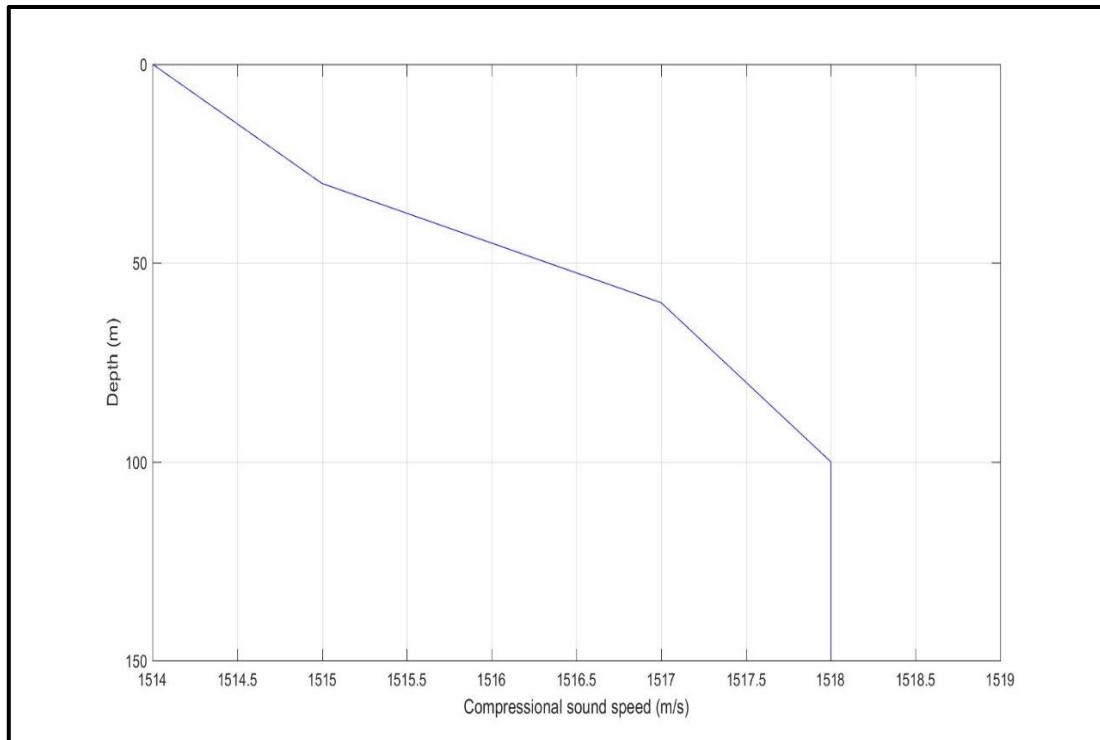
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 3000m.



Διάγραμμα 4.2.4.2.6

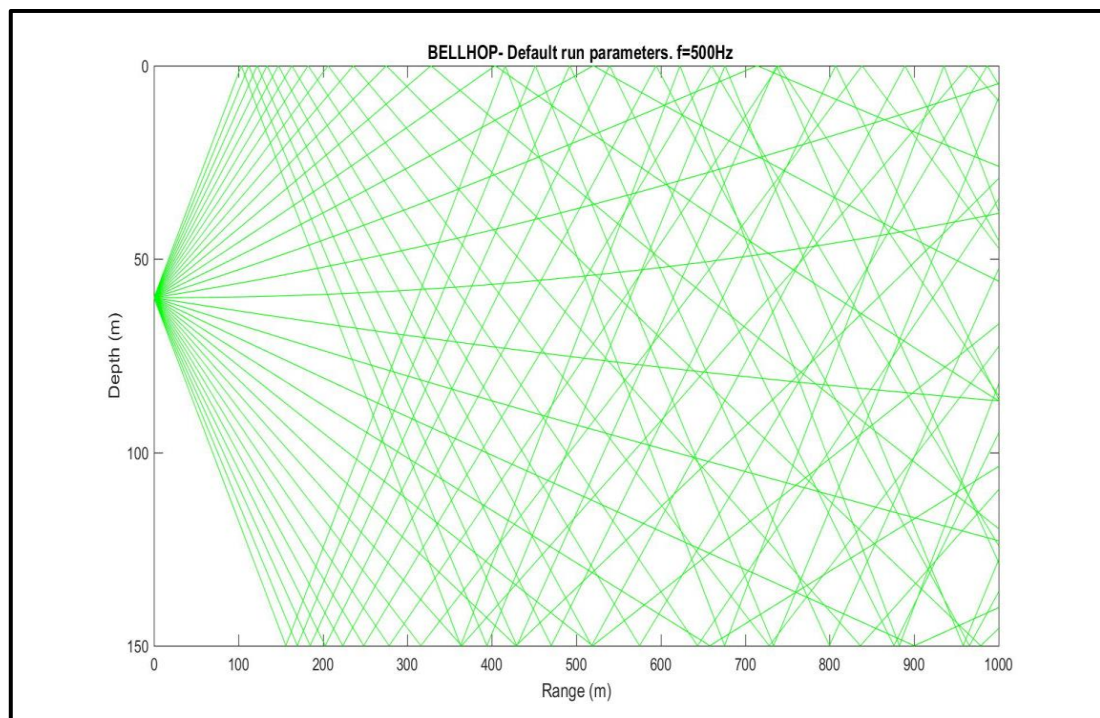
γ. Ανοιξη.

(1) SSP: Παρατηρείται θετική διαβάθμιση με μικρή μεταβολή στην ταχύτητα του ήχου.



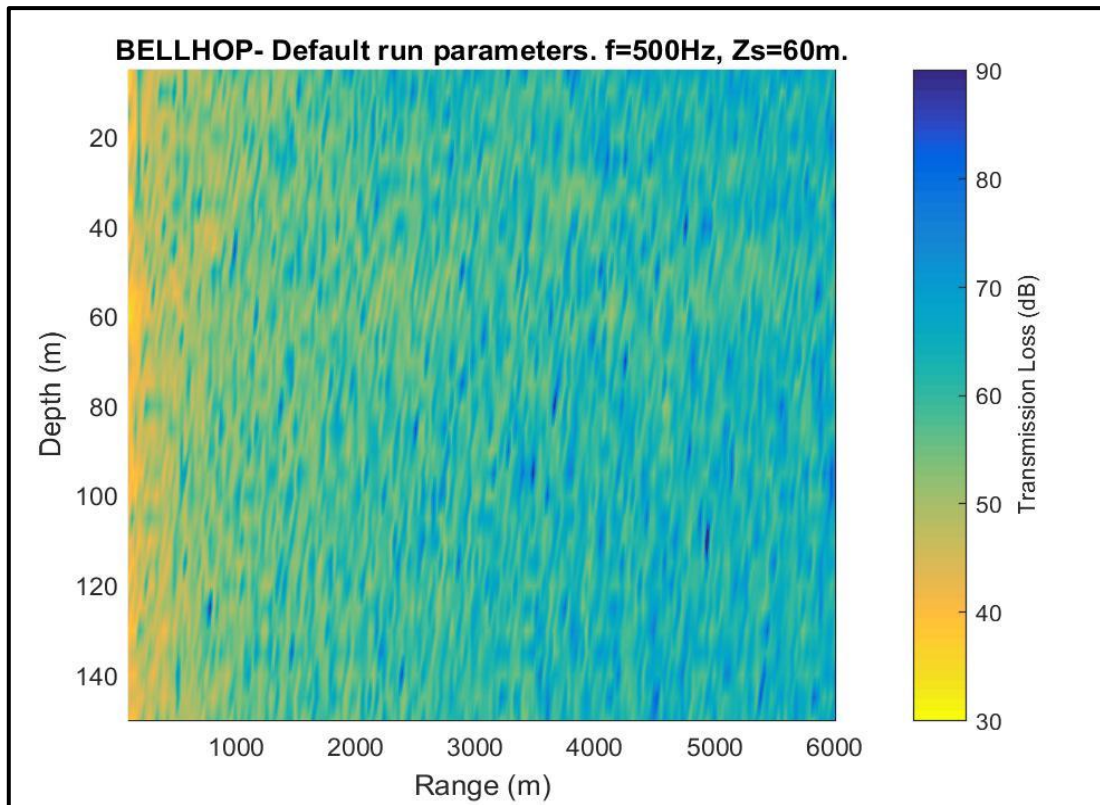
Διάγραμμα 4.2.4.2.7

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται ομαλή διάδοση ακτίνων, με μικρή στρέψη προς την επιφάνεια.



Διάγραμμα 4.2.4.2.8

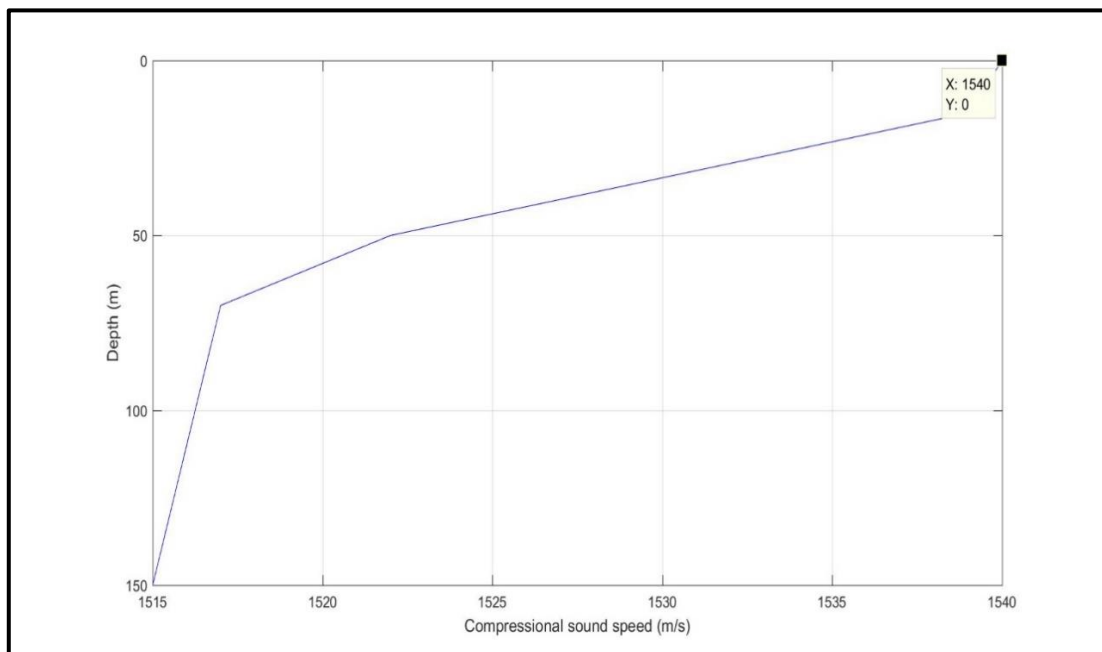
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 4000m.



Διάγραμμα 4.2.4.2.9

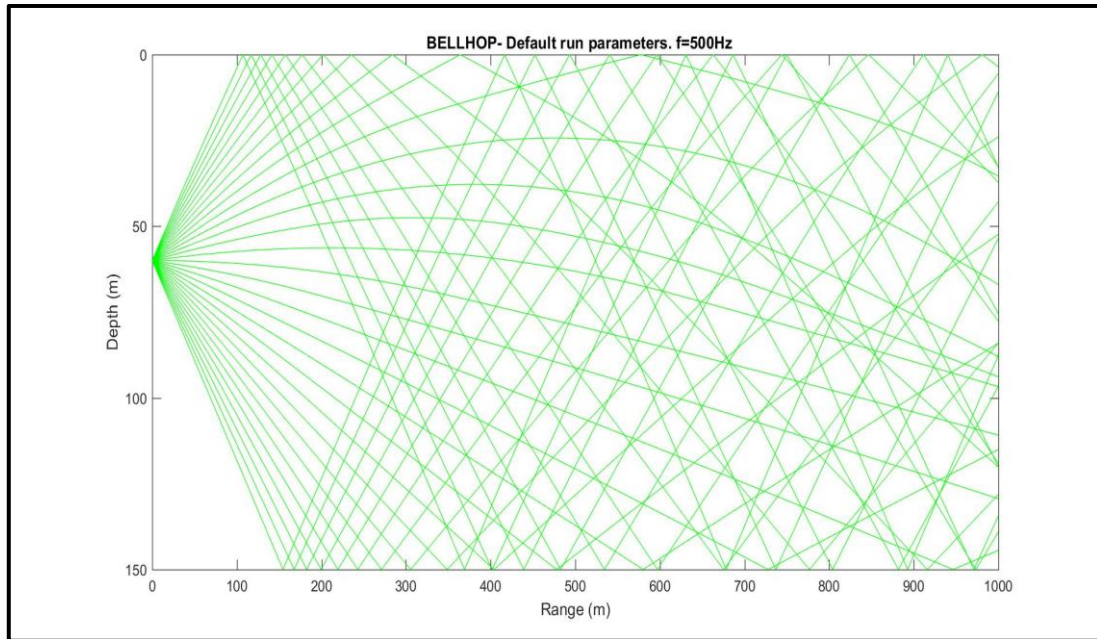
δ. Καλοκαιρι.

(1) SSP: Παρατηρείται απότομη αρνητική διαβάθμιση με σημαντική μεταβολή στην ταχύτητα του ήχου έως τα 70m.



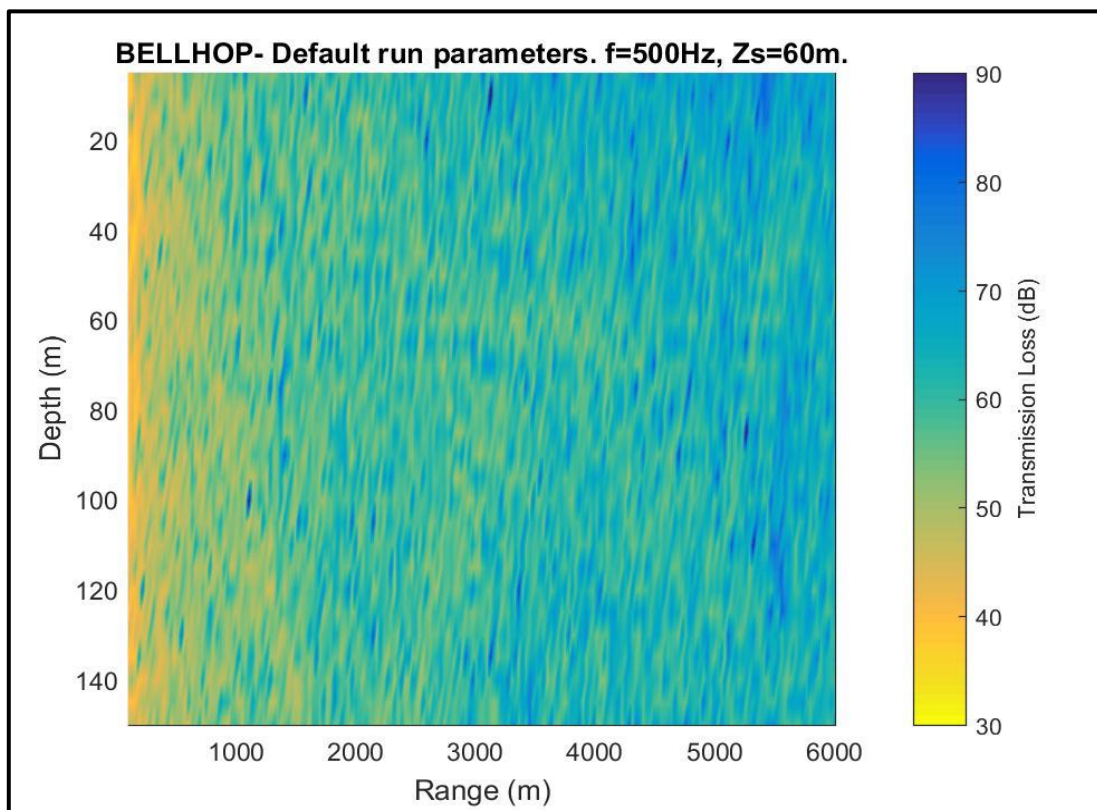
Διάγραμμα 4.2.4.2.10

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται έντονη καμπυλότητα των ακτίνων μέχρι τα βάθη των $70m$, με αποτέλεσμα την δημιουργία σκιερής ζώνης στην κοντά στην επιφάνεια.



Διάγραμμα 4.2.4.2.11

(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των $4000m$ και κοντά στην επιφάνεια.



Διάγραμμα 4.2.4.2.12

Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4.2.4.2.1) συνοψίζονται οι μέγιστες και ο Μ.Ο των απωλειών (σε dB), ανά 2000m, για απόσταση έως 6000m των επιλεγμένων χαρακτηριστικών συχνοτήτων (20Hz, 100Hz, 500Hz, 1000Hz), όπως προέκυψαν από την ανάλυση των βαθυθερμογραφικών δεδομένων:

MAX/AVERAGE Απωλειών Διάδοσης Ηχητικού Σήματος			
Fq(Hz)/ ΑΠΟΣΤΑΣΗ(m)	2000	4000	6000
MAX 20	45	55	60
AVERAGE 20	35	41	46
MAX 100	50	55	60
AVERAGE 100	45	52	57
MAX 500	50	55	65
AVERAGE 500	48	53	59
MAX 1000	55	60	65
AVERAGE 1000	50	55	62

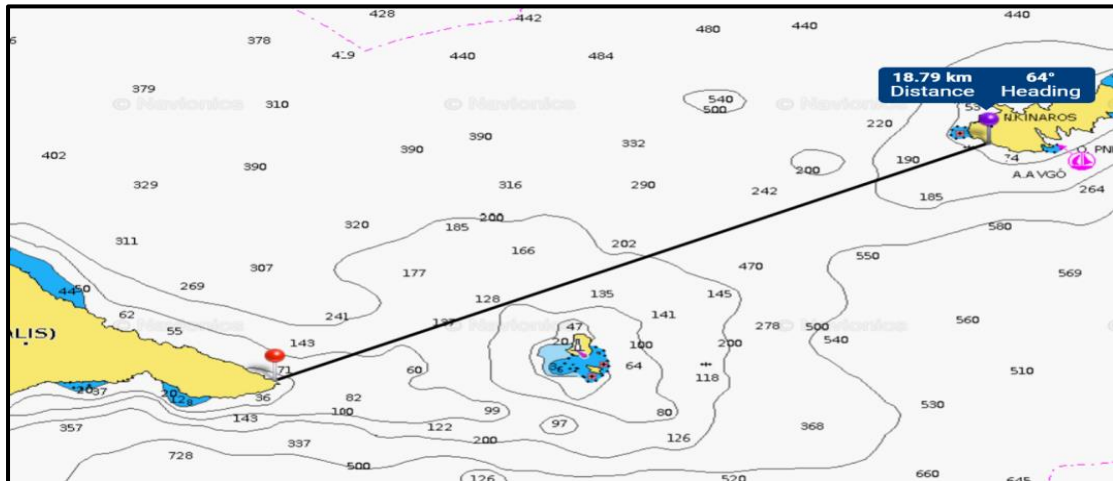
Πίνακας 4.2.4.2.1

Από τον ανωτέρω πίνακα προκύπτει ότι, συναρτήσει της απόστασης, οι μέγιστες απώλειες αναμένεται να κυμανθούν από 45dB έως 65dB, ενώ οι μέσες αναμενόμενες απώλειες θα κυμανθούν από 35dB έως και 62dB.

Επιπρόσθετα από τα διαγράμματα διάδοσης των ακτίδων του ήχου προκύπτει ότι το καλοκαίρι δημιουργούνται σκιερές ζώνες κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας ενώ τις υπόλοιπες εποχές δημιουργούνται σκιερές ζώνες σε μεσαία βάθη. Από το γεγονός αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι ένα παθητικό σύστημα εντοπισμού θα έχει καλύτερη απόδοση καθόλη την διάρκεια του χρόνου εάν τοποθετηθεί στο μέγιστο δυνατό βάθος.

- (1) Απόσταση: 14.660m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 69m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή - Πλατό

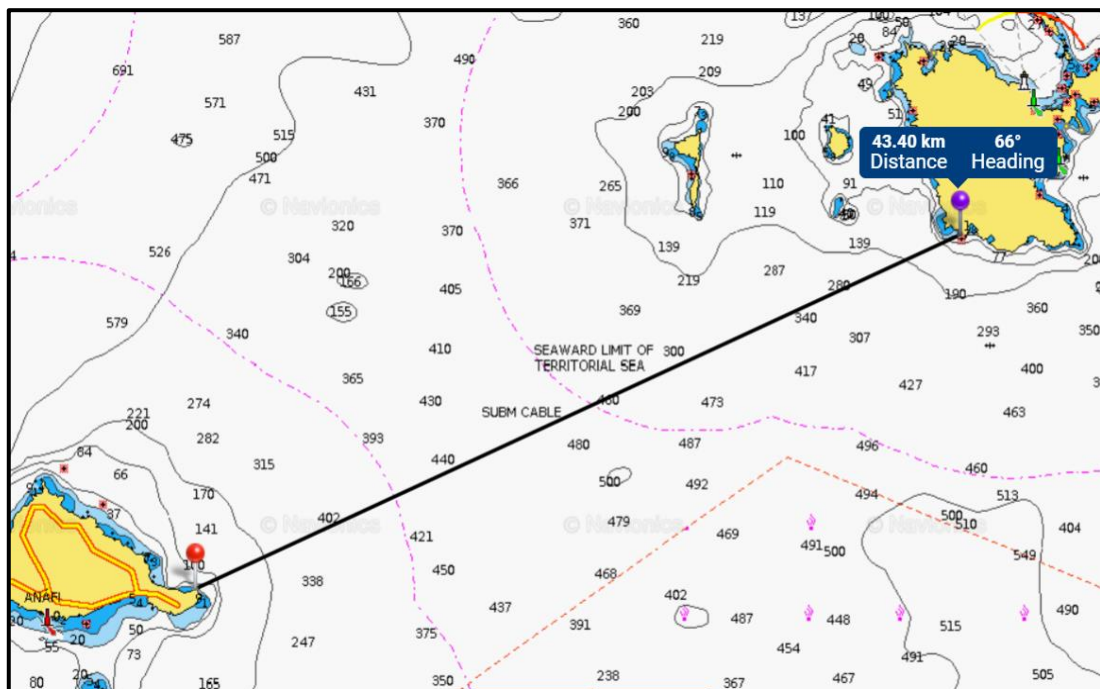
β. Στενό Αμοργού – Κίναρου:



Χάρτης 4.2.5.1.2

- (1) Απόσταση: 18.790m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 242m
- (3) Κλίση Βυθού: Ανώμαλη

γ. Στενό Ανάφης – Αστυπάλαιας:



Χάρτης 4.2.5.1.3

(1) Απόσταση: 43.400m

(2) Μέγιστο Βάθος: 480m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

δ. Στενό Αρκών – Αγαθονησίου:



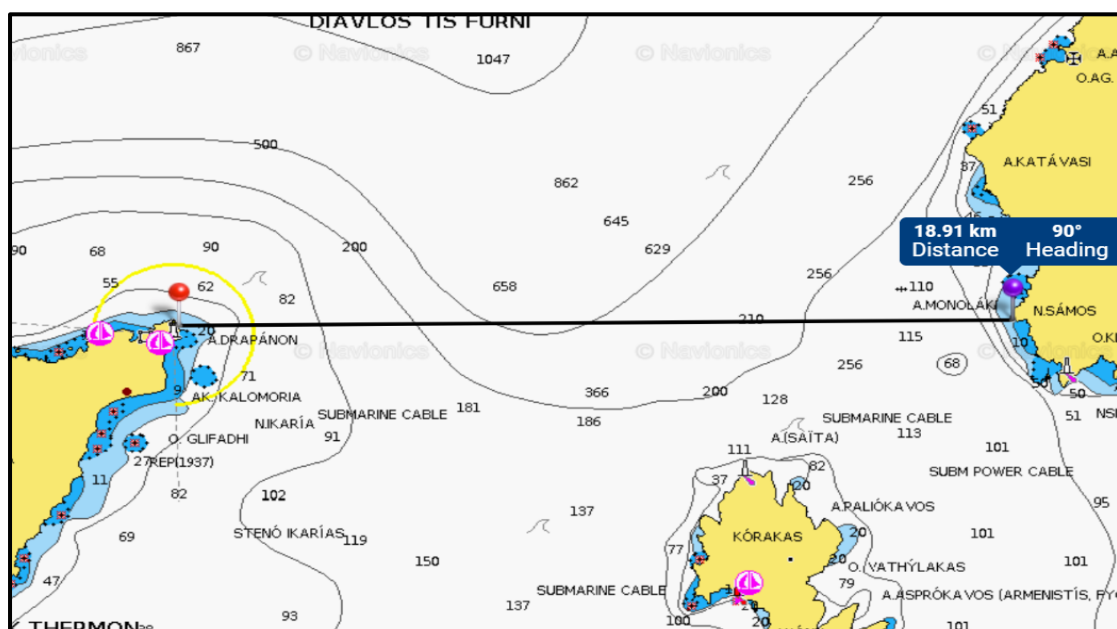
Χάρτης 4.2.5.1.4

(1) Απόσταση: 18.740m

(2) Μέγιστο Βάθος: 82m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή – Πλατό.

ε. Στενό Ικαρίας – Σάμου:



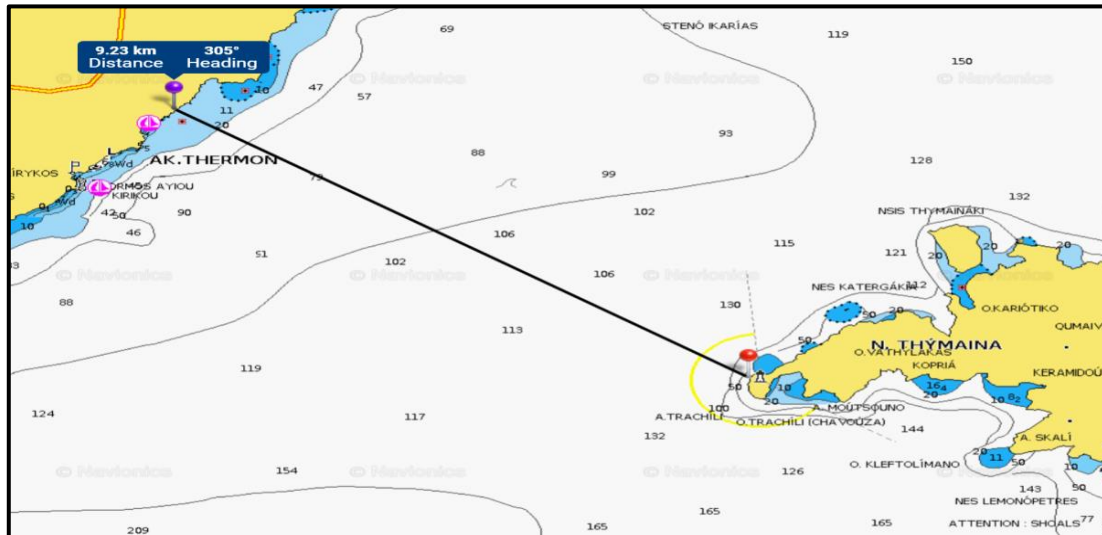
Χάρτης 4.2.5.1.5

(1) Απόσταση: 18.910m

(2) Μέγιστο Βάθος: 658m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

στ. Στενό Ικαρίας – Θύμαινας:



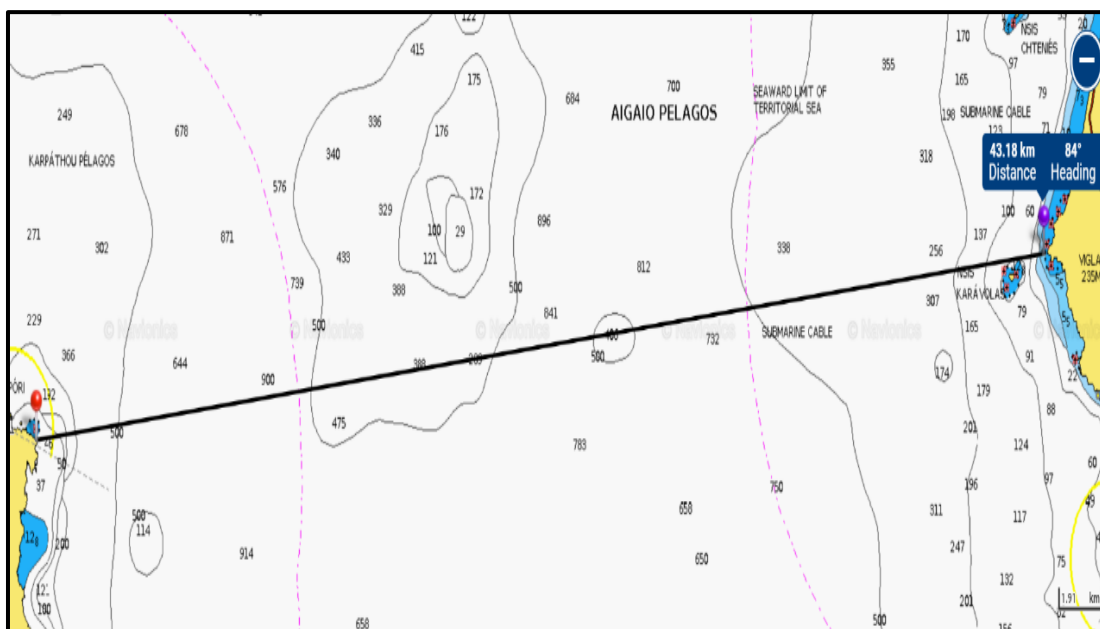
Χάρτης 4.2.5.1.6

(1) Απόσταση: 9.230m

(2) Μέγιστο Βάθος: 130m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

ζ. Στενό Καρπάθου:



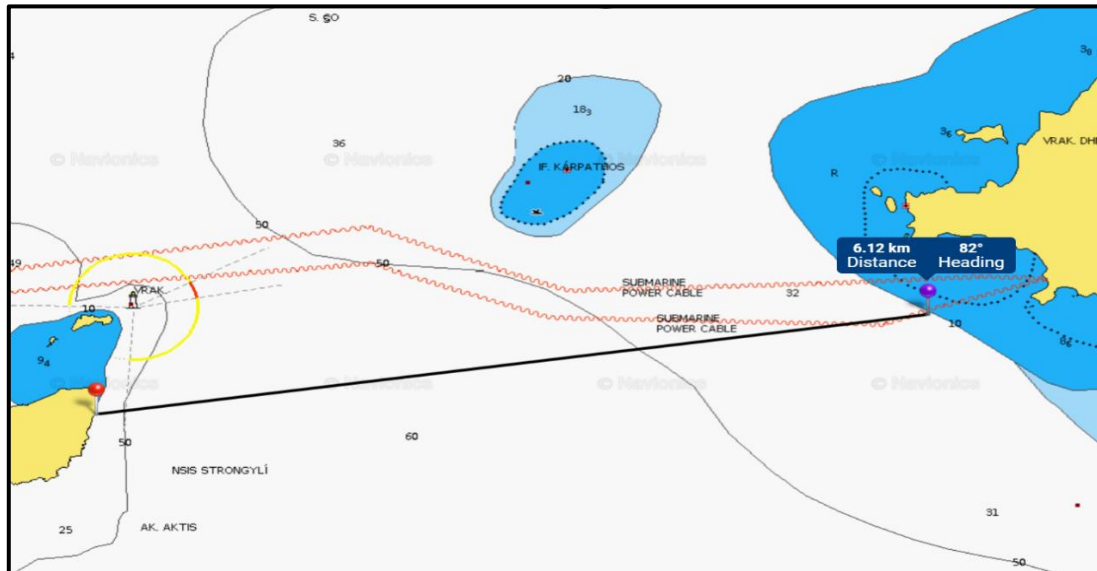
Χάρτης 4.2.5.1.7

(1) Απόσταση: 43.180m

(2) Μέγιστο Βάθος: 900m

(3) Κλίση Βυθού: Ανώμαλη

η. Στενό Κάσου – Καρπάθου:



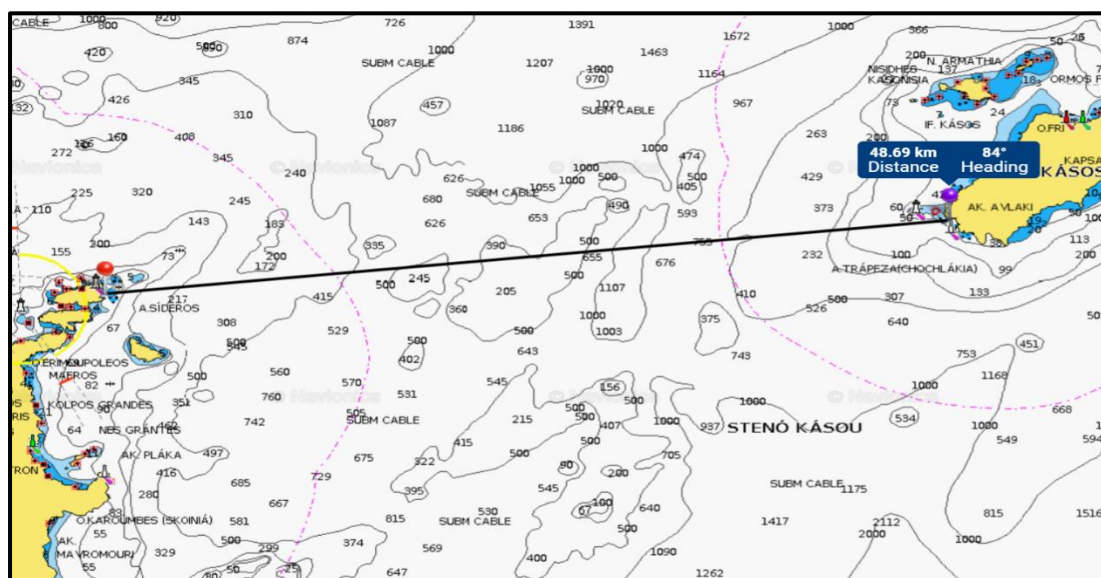
Χάρτης 4.2.5.1.8

(1) Απόσταση: 6.120m

(2) Μέγιστο Βάθος: 60m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

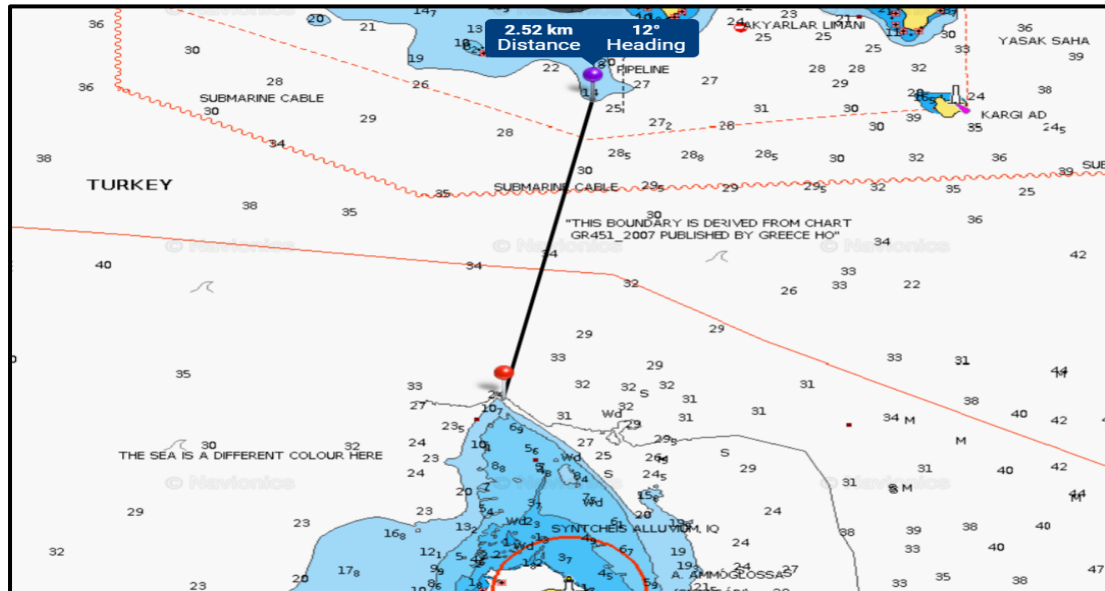
θ. Στενό Κρήτης – Κάσου:



Χάρτης 4.2.5.1.9

- (1) Απόσταση: 48.690m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 1107m
- (3) Κλίση Βυθού: Ανώμαλη

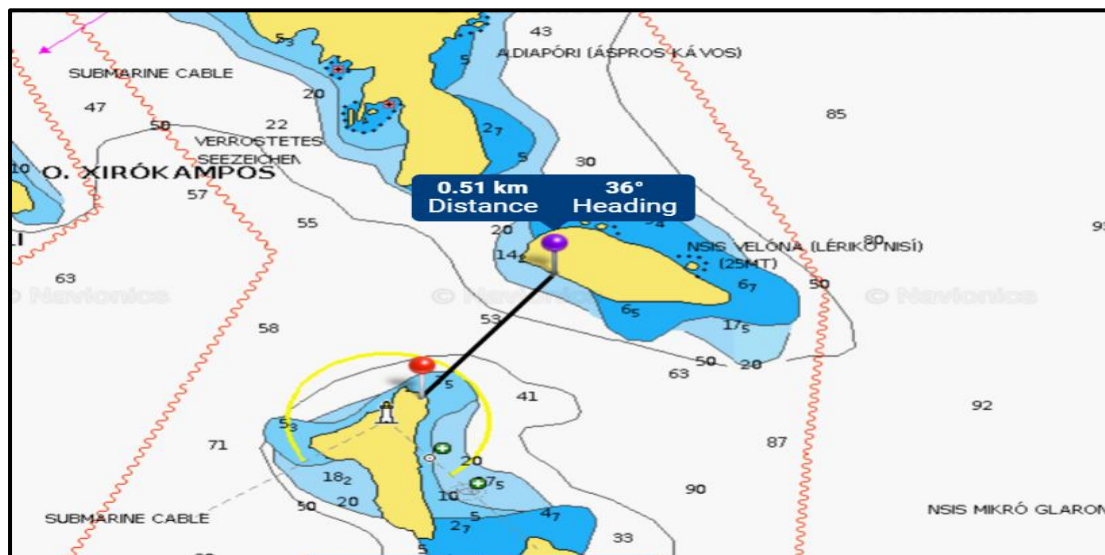
Ι. Στενό Κω – Τουρκίας:



Χάρτης 4.2.5.1.10

- (1) Απόσταση: 2.520m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 34m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

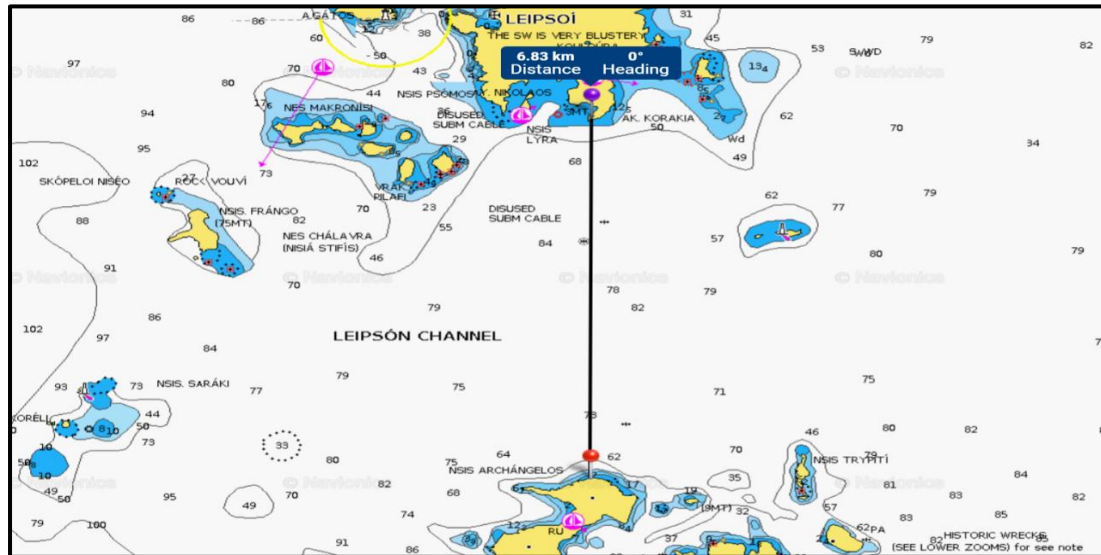
ια. Στενό Λέρου – Καλύμνου:



Χάρτης 4.2.5.1.11

- (1) Απόσταση: 510m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 53m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

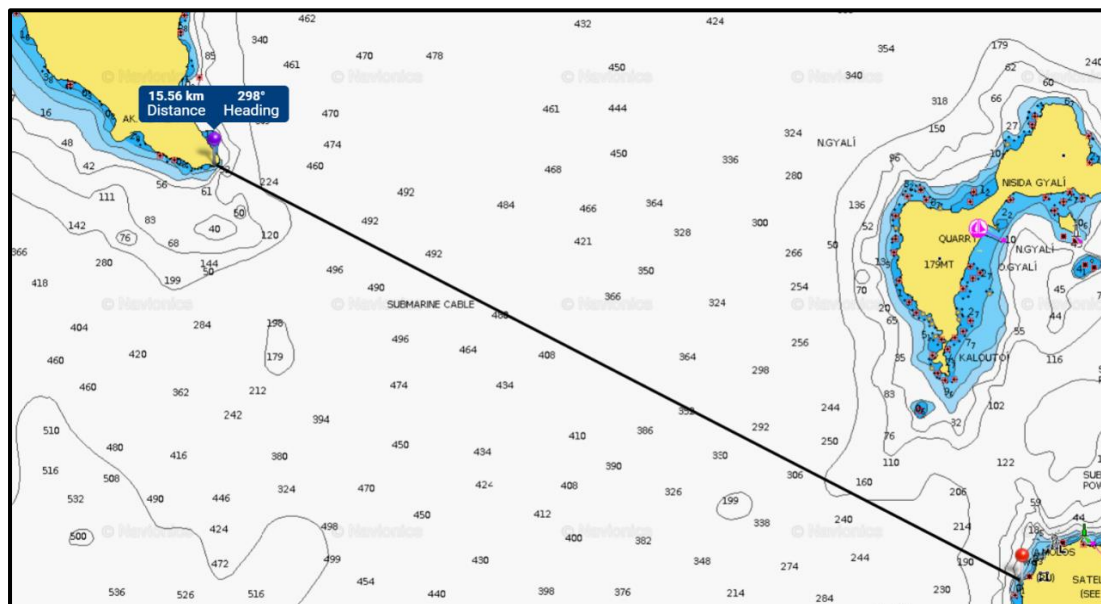
ιβ. Στενό Λέρου – Λειψών:



Χάρτης 4.2.5.1.12

- (1) Απόσταση: 6.830m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 84m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

ιγ. Στενό Νισύρου – Κω:



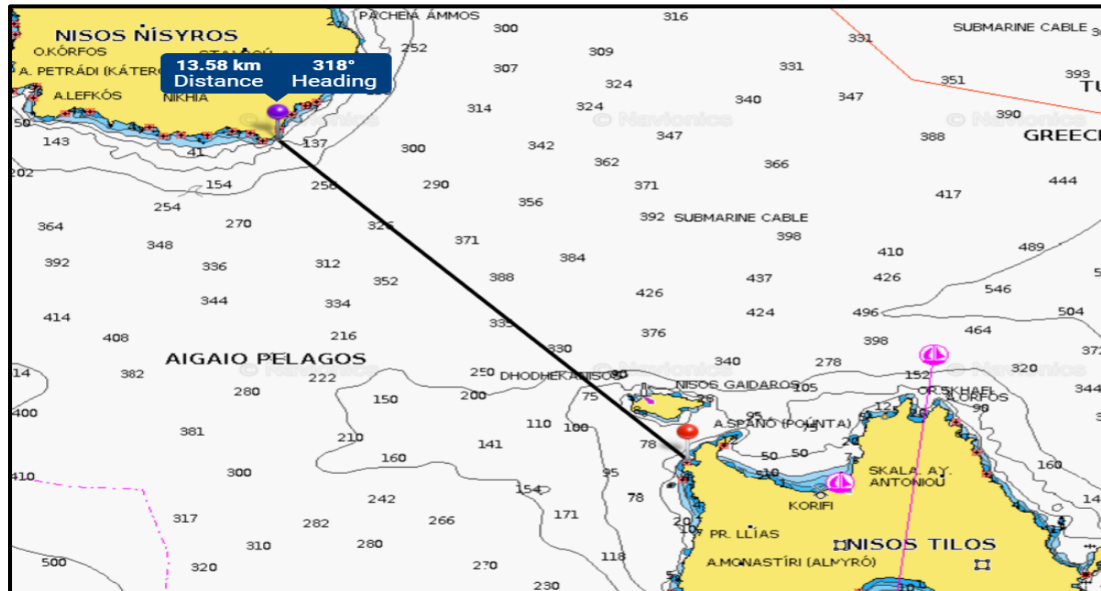
Χάρτης 4.2.5.1.13

(1) Απόσταση: 15.560m

(2) Μέγιστο Βάθος: 496m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

ιδ. Στενό Νισύρου – Τήλου:



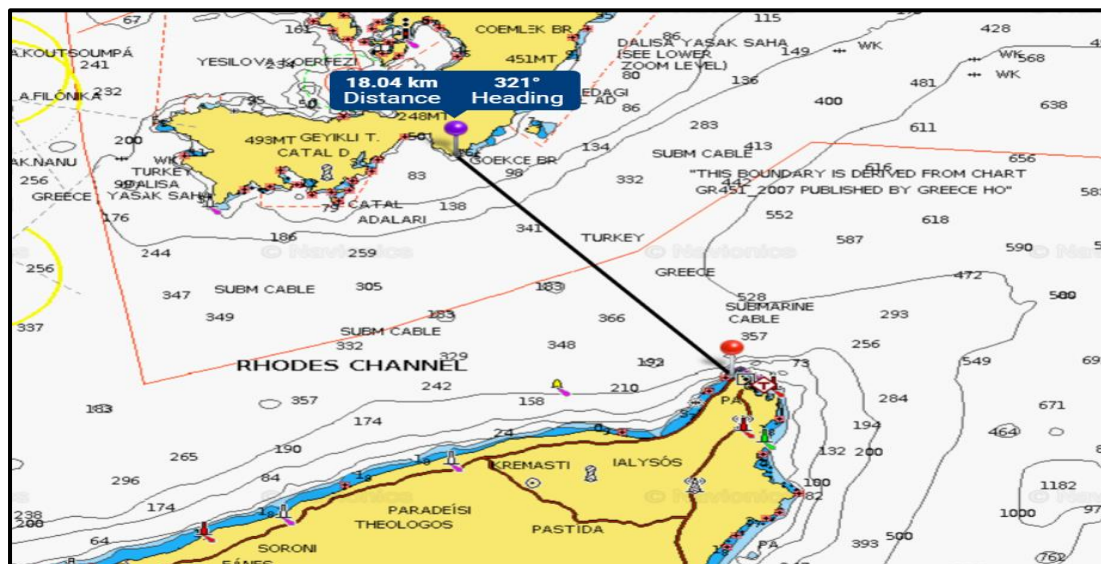
Χάρτης 4.2.5.1.14

(1) Απόσταση: 13.580m

(2) Μέγιστο Βάθος: 352m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

ιε. Στενό Ρόδου – Τουρκίας:



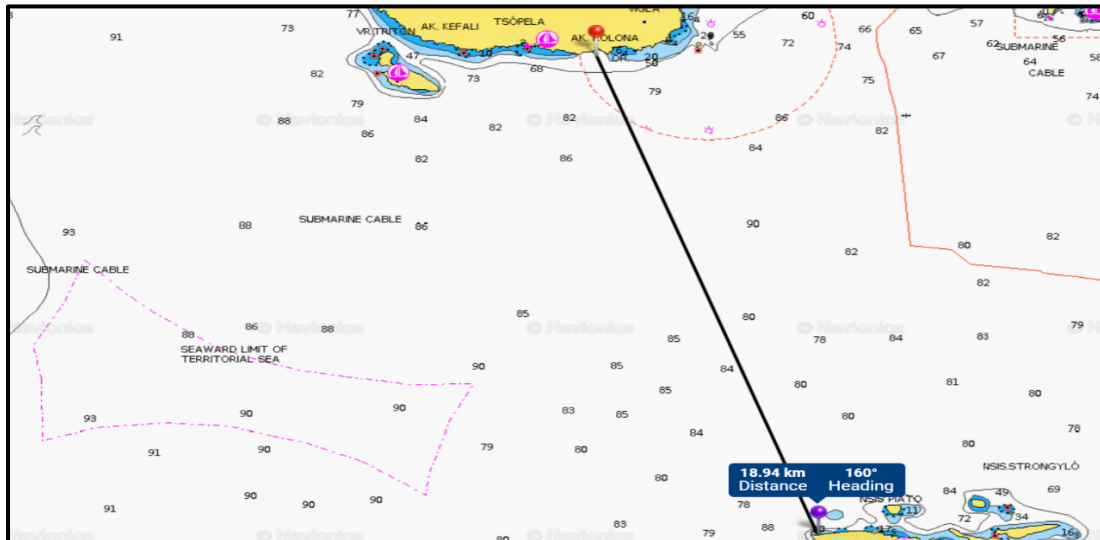
Χάρτης 4.2.5.1.15

(1) Απόσταση: 18.040m

(2) Μέγιστο Βάθος: 366m

(3) Κλίση Βυθού: Ανώμαλη.

ιστ. Στενό Σάμου – Αγαθονησίου:



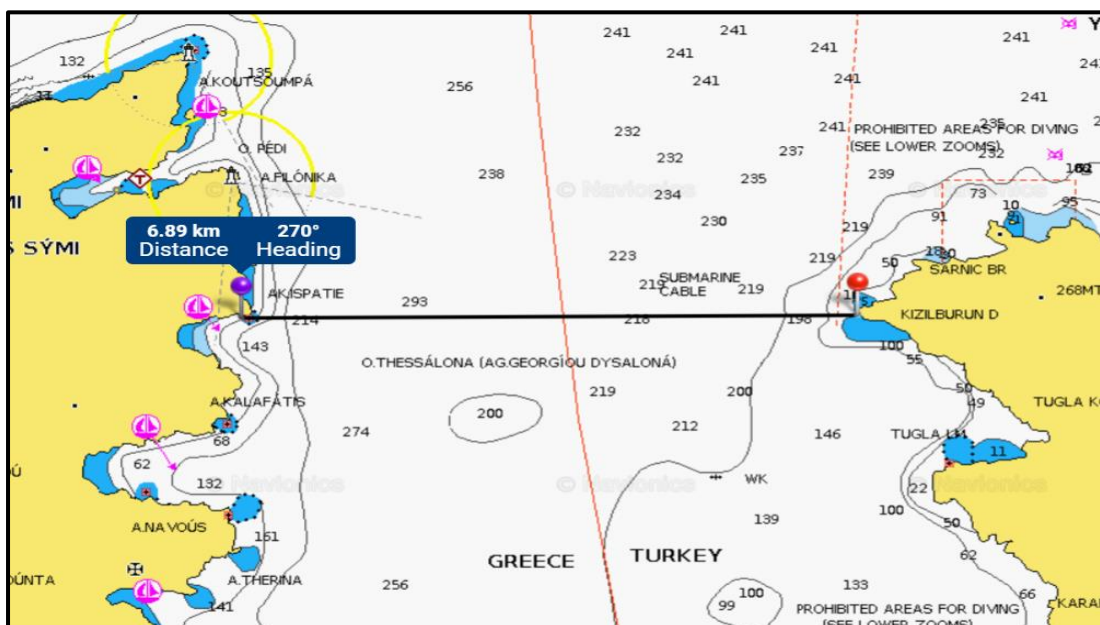
Χάρτης 4.2.5.1.16

(1) Απόσταση: 18.940m

(2) Μέγιστο Βάθος: 86m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

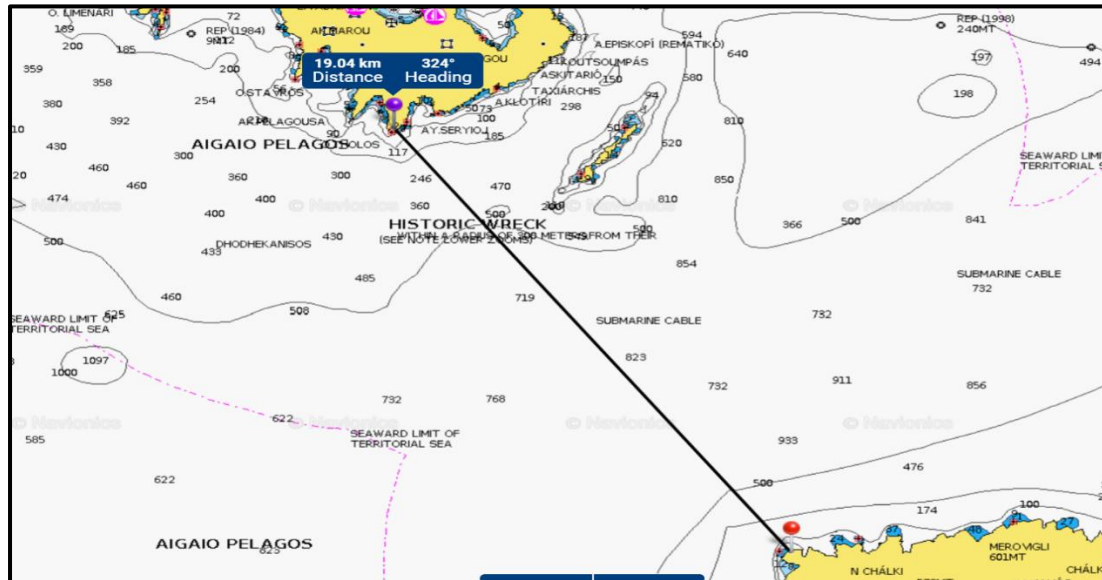
ιζ. Στενό Σύμης – Τουρκίας:



Χάρτης 4.2.5.1.17

- (1) Απόσταση: 6.890m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 293m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

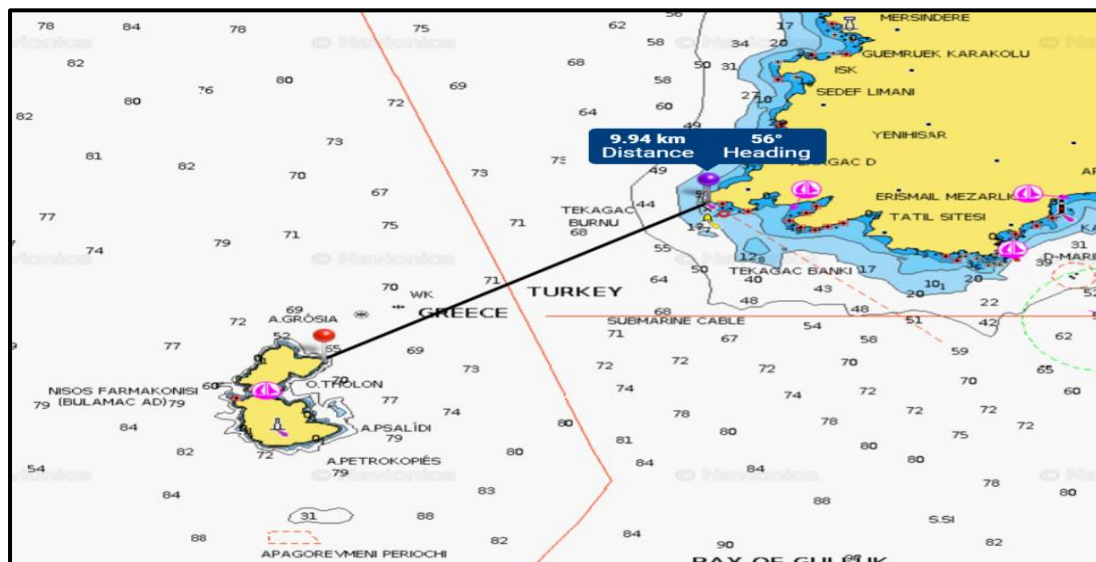
ιη. Στενό Τήλου – Χάλκης:



Χάρτης 4.2.5.1.18

- (1) Απόσταση: 19.040m
- (2) Μέγιστο Βάθος: 823m
- (3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

ιθ. Στενό Φαρμακονησίου – Τουρκίας:



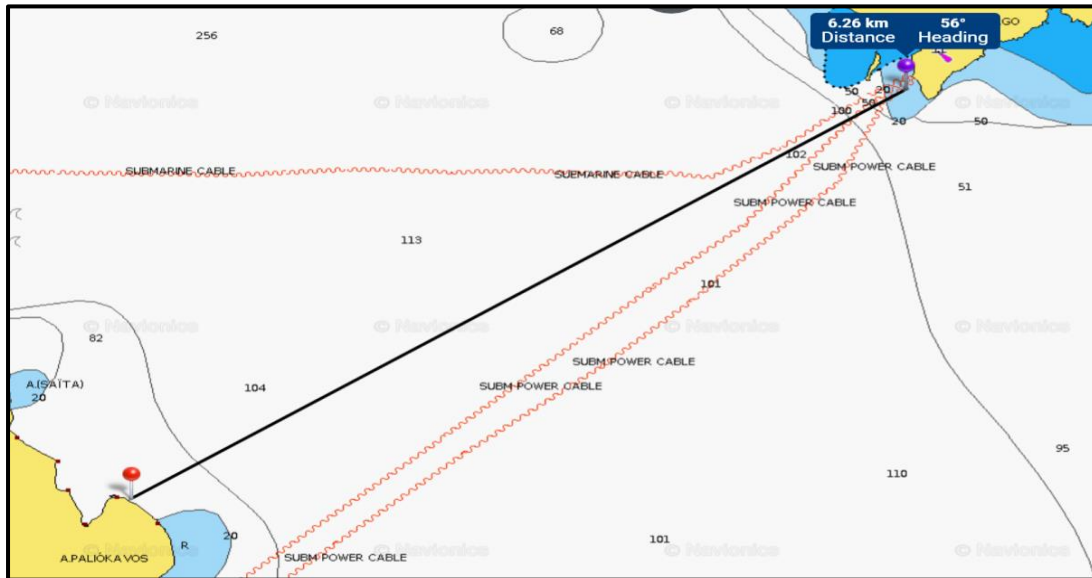
Χάρτης 4.2.5.1.19

(1) Απόσταση: 9.940m

(2) Μέγιστο Βάθος: 71m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

κα. Στενό Φούρνων – Σάμου:



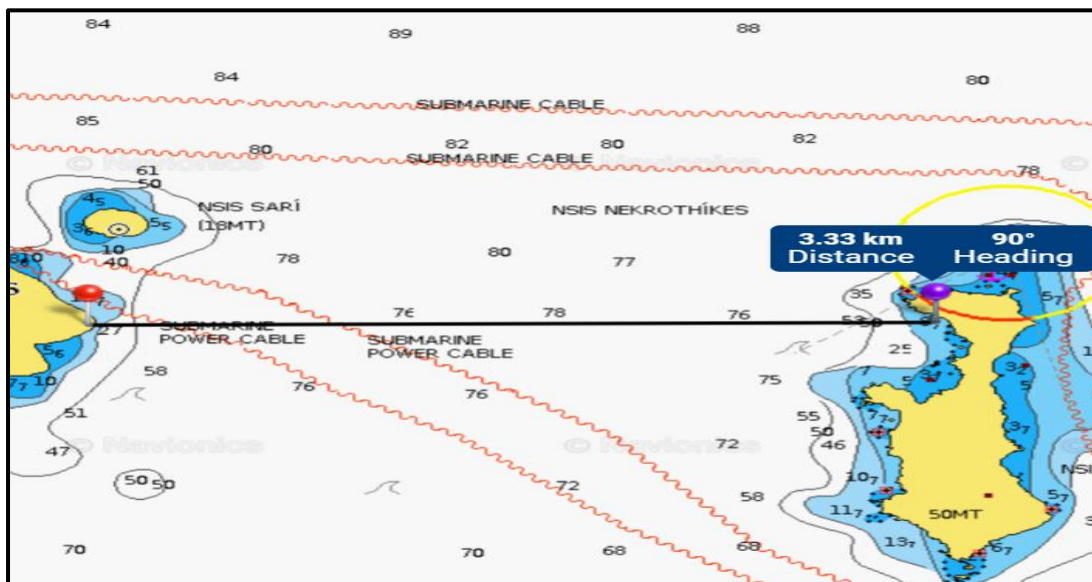
Χάρτης 4.2.5.1.20

(1) Απόσταση: 6.260m

(2) Μέγιστο Βάθος: 104m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή - Πλατό

κβ. Στενό Ψέριμου – Καλύμνου:



Χάρτης 4.2.5.1.21

(1) Απόσταση: 3.330m

(2) Μέγιστο Βάθος: 78m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή

κγ. Στενό Ψέριμου – Κω:



Χάρτης 4.2.5.1.22

(1) Απόσταση: 1.820m

(2) Μέγιστο Βάθος: 36m

(3) Κλίση Βυθού: Ομαλή – Πλατό

Συγκεντρωτικά τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά των στενών της «Περιοχής 4» παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 4.2.5.1.1):

A/A	ΠΕΡΙΟΧΗ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΒΑΘΟΣ (m)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ (m)	ΚΛΙΣΗ ΒΥΘΟΥ
1.	ΑΓΑΘΟΝΗΣΙ- ΤΟΥΡΚΙΑ	69	14660	ΟΜΑΛΗ
2.	ΑΜΟΡΓΟΣ - ΚΙΝΑΡΟΣ	242	18790	ΑΝΩΜΑΛΗ
3.	ΑΝΑΦΗ - ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ	480	43400	ΟΜΑΛΗ
4.	ΑΡΚΟΙ ΑΓΑΘΟΝΗΣΙ	82	18740	ΟΜΑΛΗ
5.	ΙΚΑΡΙΑ - ΣΑΜΟΣ	658	18910	ΟΜΑΛΗ
6.	ΙΚΑΡΙΑ -ΘΥΜΑΙΝΑ	130	9230	ΟΜΑΛΗ
7.	ΣΤΕΝΟ ΚΑΡΠΑΘΟΥ	900	43180	ΑΝΩΜΑΛΗ
8.	ΣΤΕΝΟ ΚΑΣΟΥ - ΚΑΡΠΑΘΟΥ	60	6120	ΟΜΑΛΗ
9.	ΣΤΕΝΟ ΚΡΗΤΗΣ ΚΑΣΟΥ	1107	48690	ΑΝΩΜΑΛΗ
10.	ΚΩ -ΤΟΥΡΚΙΑ	34	2520	ΟΜΑΛΗ
11.	ΛΕΡΟΣ - ΚΑΛΥΜΝΟΣ	53	510	ΟΜΑΛΗ

12.	ΛΕΡΟΥ - ΛΕΙΨΩΝ	84	6830	ΟΜΑΛΗ
13.	ΝΙΣΥΡΟΥ - ΚΩ	496	15560	ΟΜΑΛΗ
14.	ΝΙΣΥΡΟΣ - ΤΗΛΟΣ	352	13580	ΟΜΑΛΗ
15.	ΡΟΔΟΥ - ΤΟΥΡΚΙΑΣ	366	18040	ΟΜΑΛΗ
16.	ΣΑΜΟΥ - ΑΓΑΘΟΝΗΣΙ	86	18940	ΟΜΑΛΗ
17.	ΣΥΜΗ - ΤΟΥΡΚΙΑ	293	6890	ΟΜΑΛΗ
18.	ΤΗΛΟΥ - ΧΑΛΚΗΣ	823	19040	ΟΜΑΛΗ
19.	ΦΑΡΜΑΚΟΝΗΣΙ - ΤΟΥΡΚΙΑ	71	9940	ΟΜΑΛΗ
20.	ΦΟΥΡΜΟΙ ΣΑΜΟΣ	104	6260	ΟΜΑΛΗ
21.	ΨΕΡΙΜΟΣ - ΚΑΛΥΜΝΟΣ	78	3330	ΟΜΑΛΗ
22.	ΨΕΡΙΜΟΥ - ΚΩ	36	1820	ΟΜΑΛΗ
	Μ.Ο	300	15681	

Πίνακας 4.2.5.1.1

Παρατηρούμε ότι:

α. Τα μέγιστα βάθη κυμαίνονται από 34m έως 1.107m, με Μ.Ο τα 300m, που προσεγγίζει το μέγιστο επιχειρησιακό βάθος των σύγχρονων Υ/Β.

β. Διάμεσος των βαθών: 117m

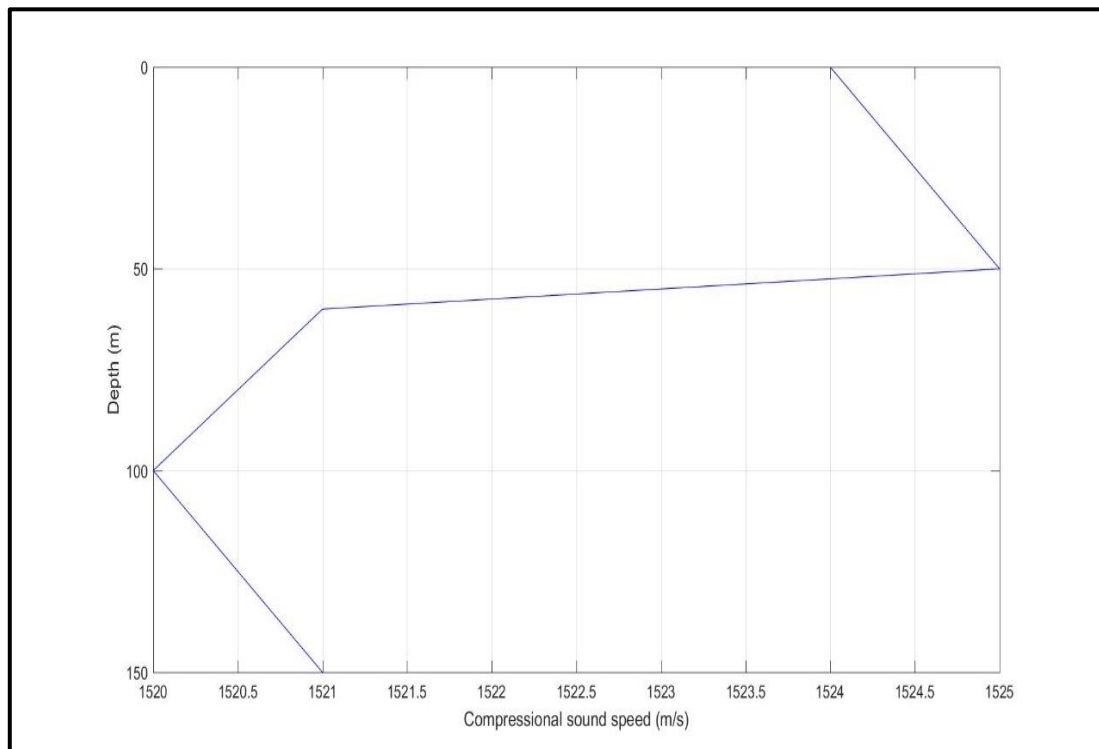
γ. Ο Μ.Ο των αποστάσεων είναι: 15.681m.

δ. Η μορφολογία του βυθού δύναται να επηρεάσει την διάδοση των ακουστικών κυμάτων σε τρία στενά, εκ των οποίων τα δυο αποτελούν πύλες εισόδου στο Αιγαίο (Κρήτη – Κάσος, Κάσος – Κάρπαθος).

§2.5.2 Βαθυθερμογραφικές Συνθήκες

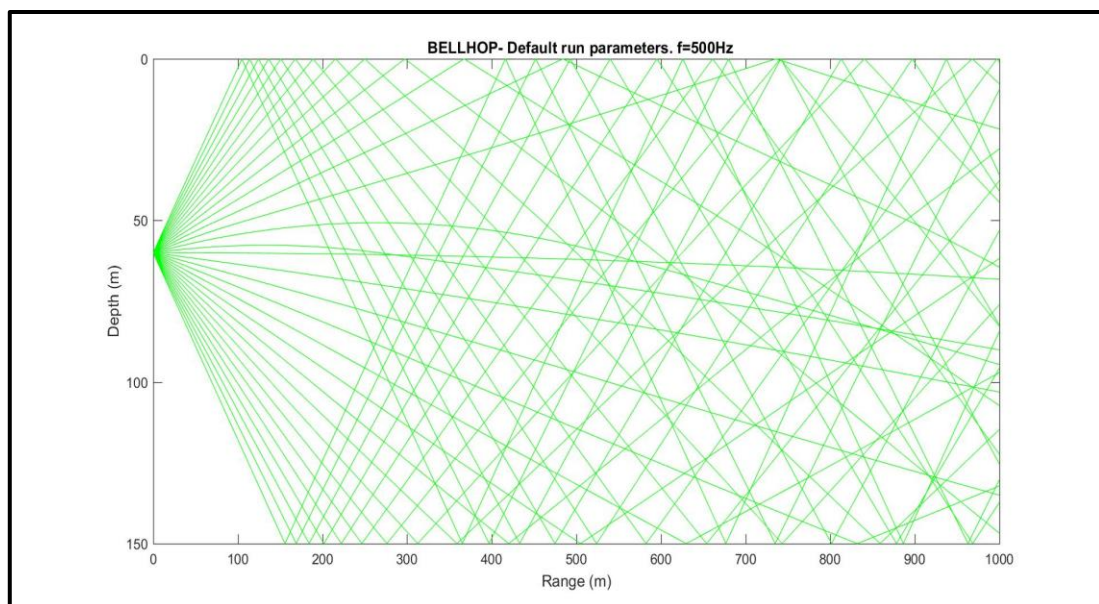
α. Φθινόπωρο.

(1) SSP: Παρατηρούνται απότομη αλλαγή διαβάθμισης στα $50m$ και αλλαγή στα $100m$ με μικρή μεταβολή της ταχύτητας του ήχου.



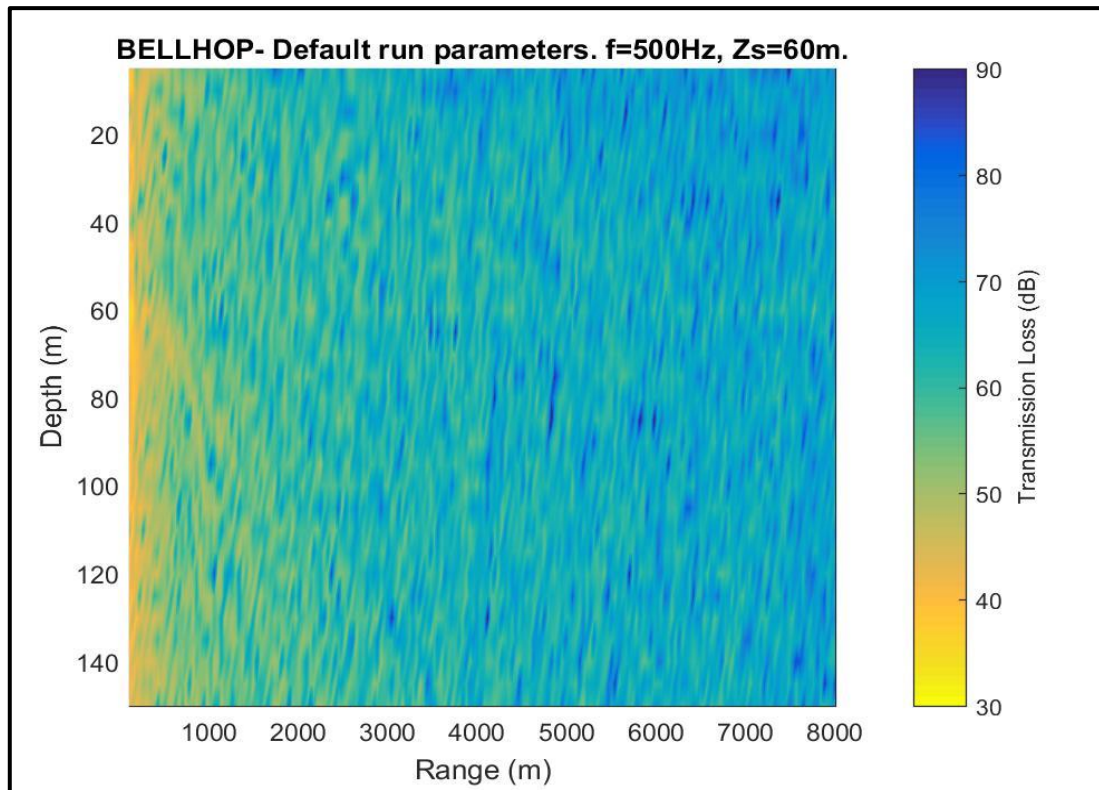
Διάγραμμα 4.2.5.2.1

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται στρέψη των ακτίνων του ήχου στα $50m$, δημιουργώντας σκιερή ζώνη κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας.



Διάγραμμα 4.2.5.2.2

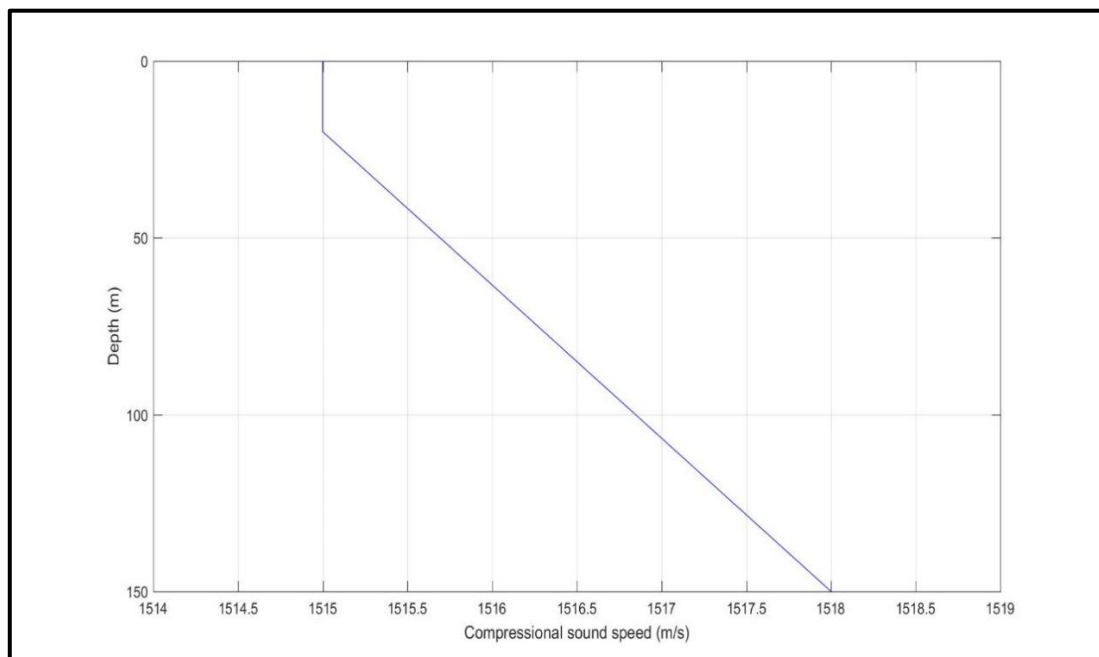
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 3000m.



Διάγραμμα 4.2.5.2.3

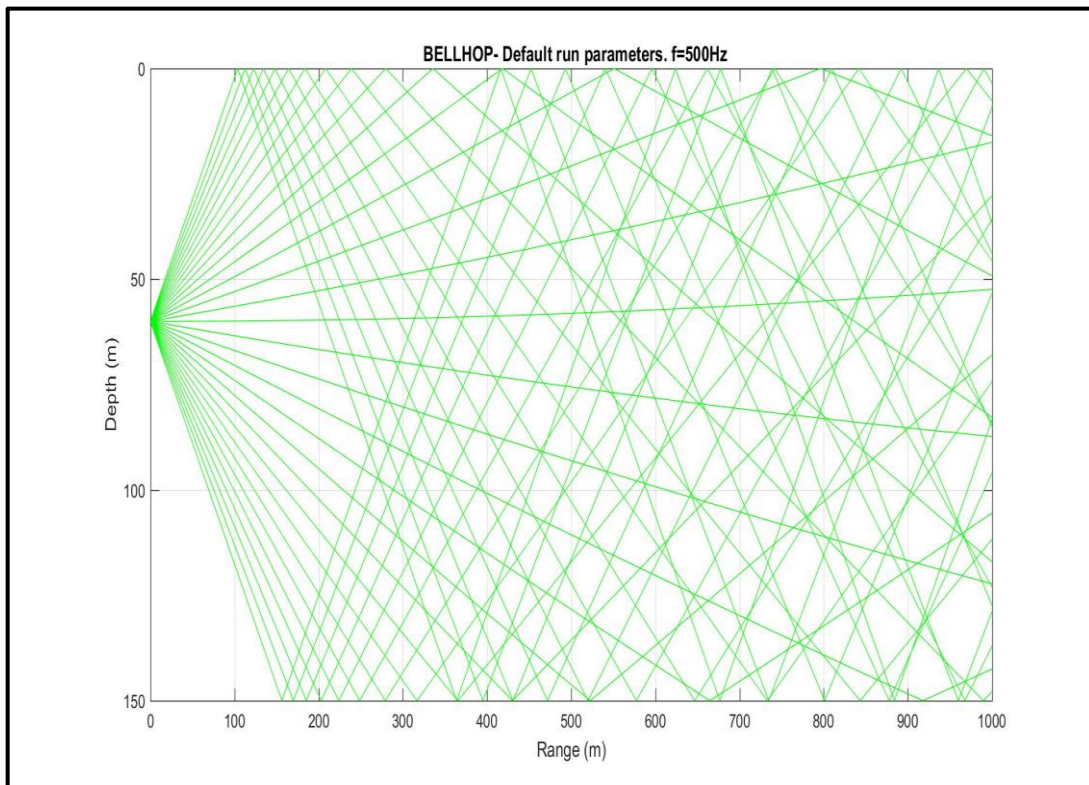
β. Χειμώνας.

(1) SSP: Παρατηρείται θετική διαβάθμιση με μικρή μεταβολή στην ταχύτητα του ήχου.



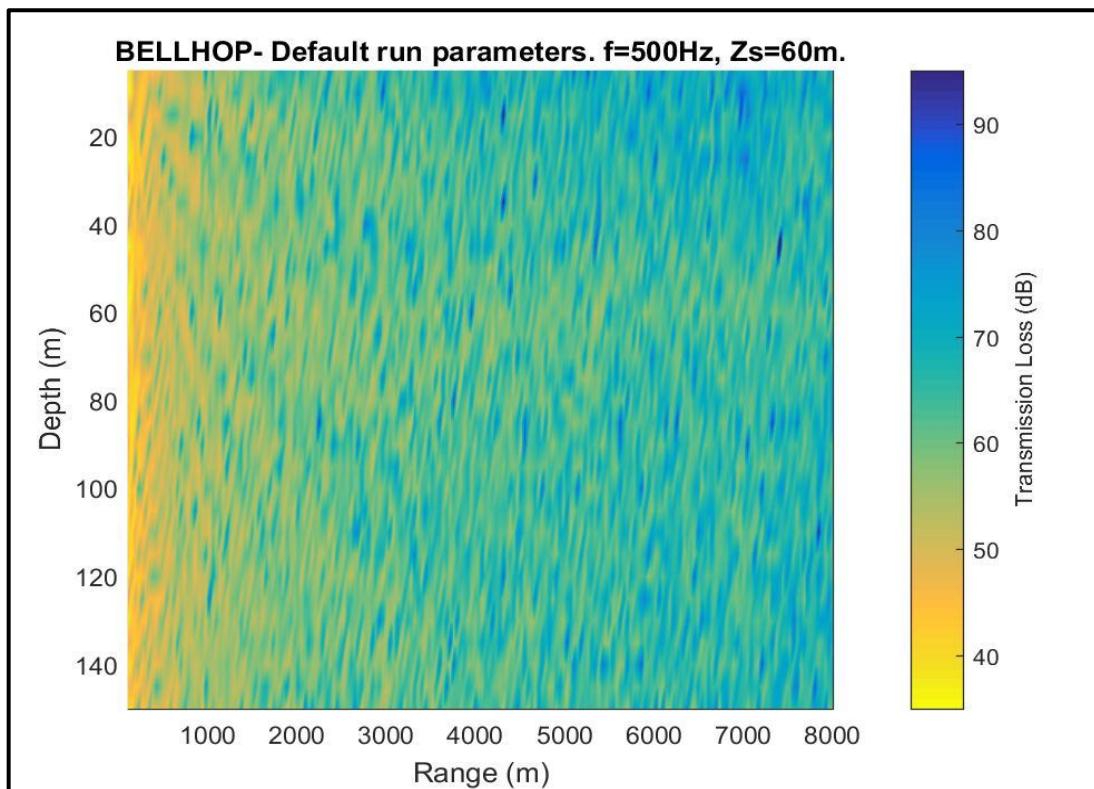
Διάγραμμα 4.2.5.2.4

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται ομαλή διάδοση.



Διάγραμμα 4.2.5.2.5

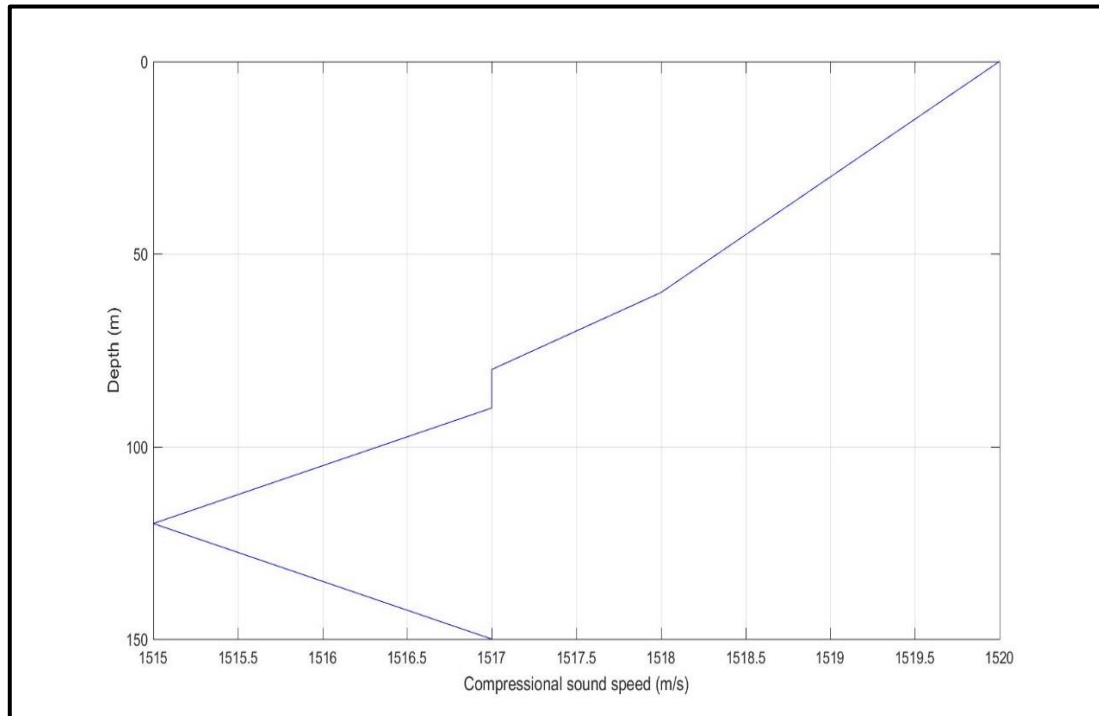
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 5000m.



Διάγραμμα 4.2.5.2.6

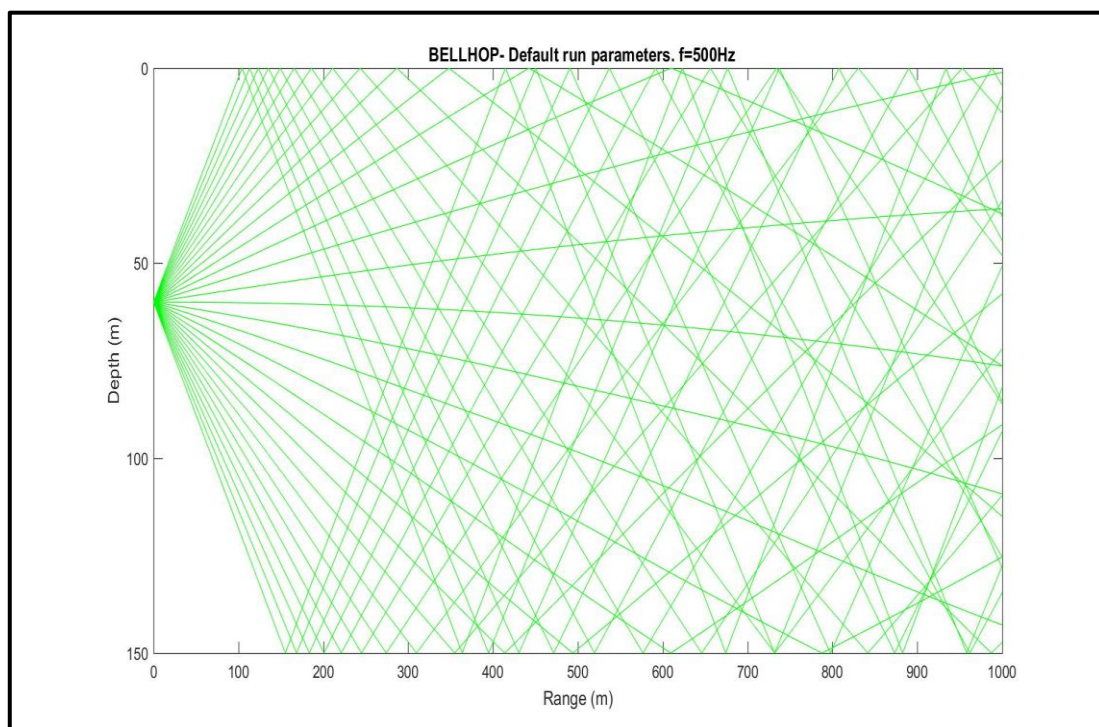
γ. Άνοιξη.

(1) SSP: Παρατηρείται σταδιακή αρνητική διαβάθμιση έως τα $120m$ και αλλαγή διαβάθμισης έως τα $150m$, με μικρή μεταβολή της ταχύτητας του ήχου.



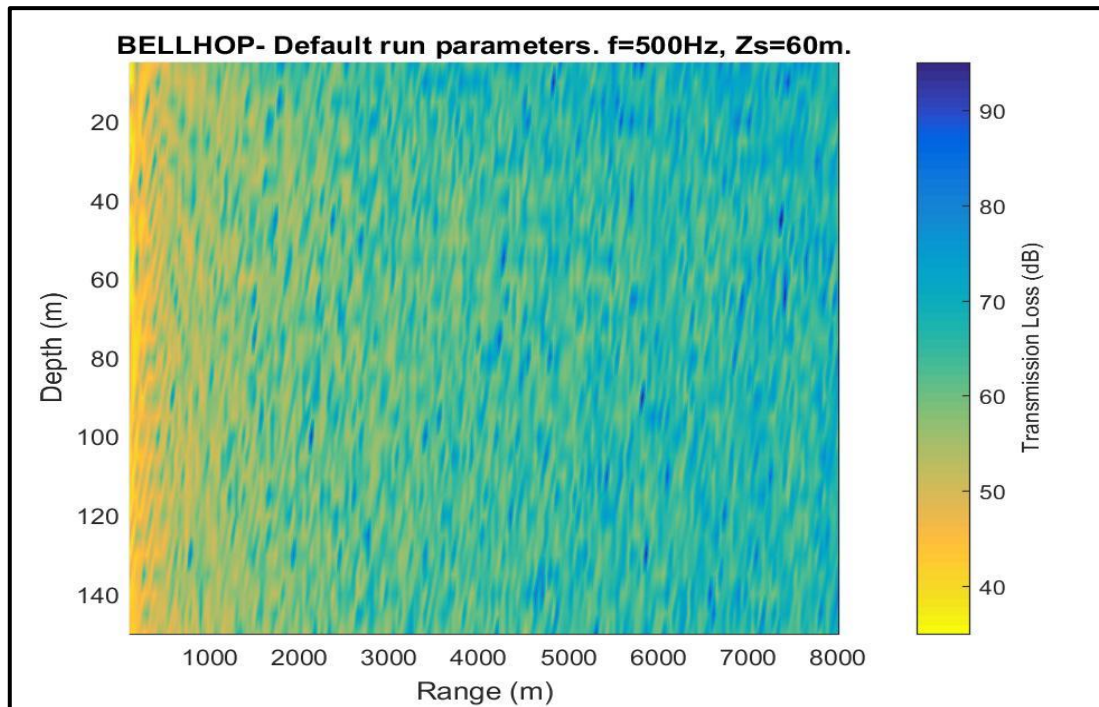
Διάγραμμα 4.2.5.2.7

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται ομαλή διάδοση.



Διάγραμμα 4.2.5.2.8

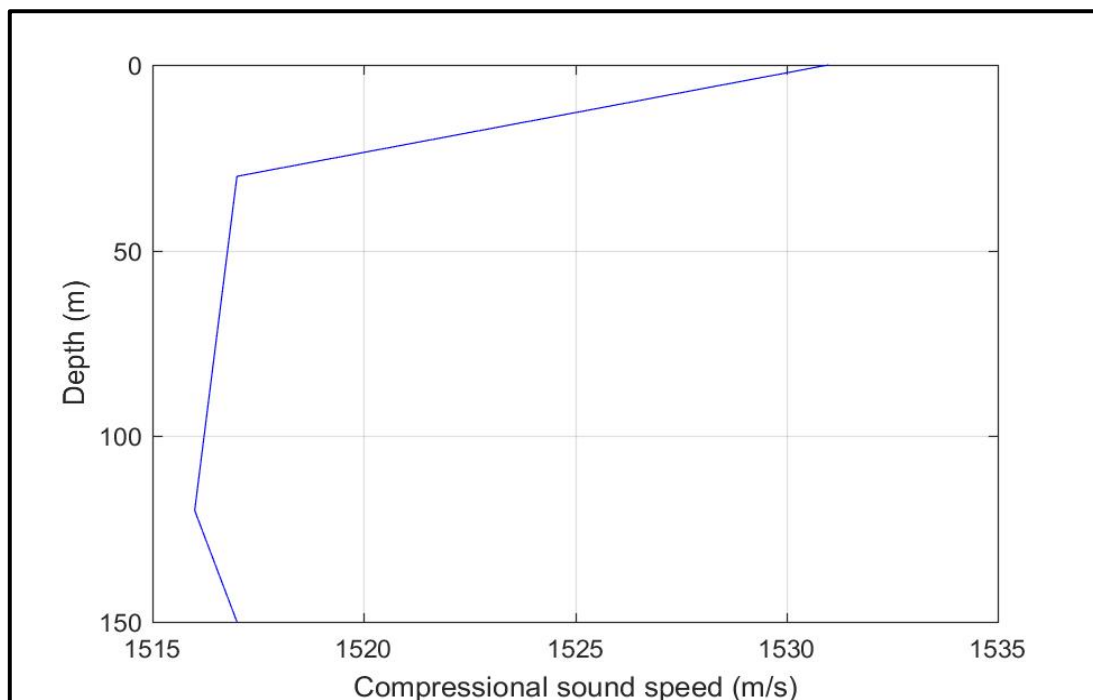
(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 4000m.



Διάγραμμα 4.2.5.2.9

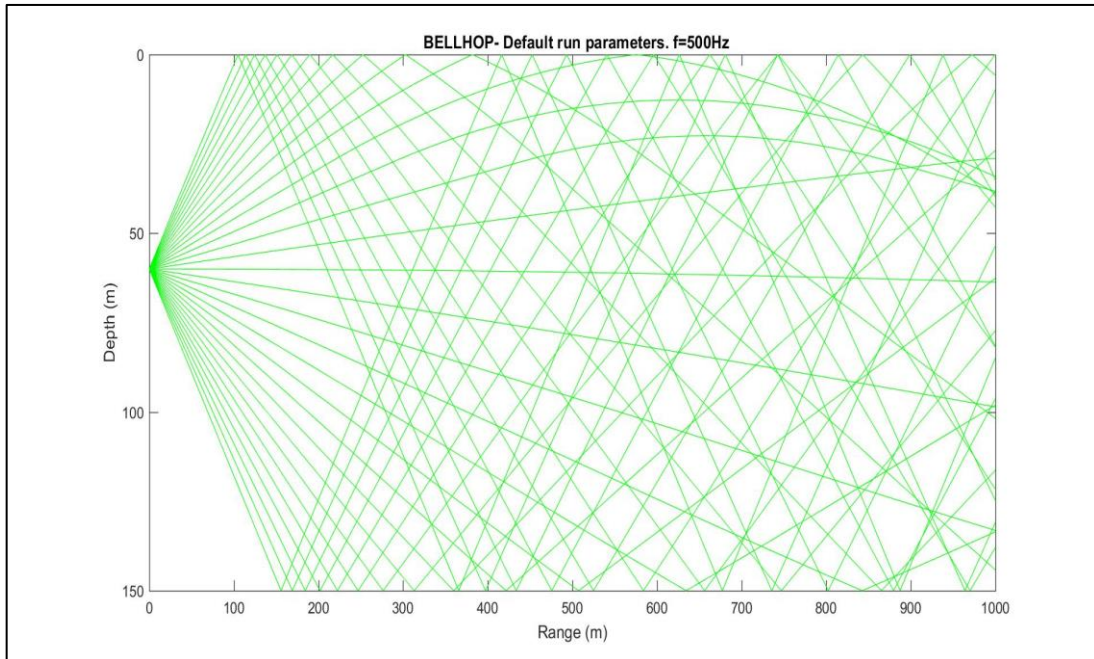
δ. Καλοκαίρι.

(1) SSP: Παρατηρείται απότομη αρνητική διαβάθμιση έως τα 30m με σημαντική μεταβολή στην ταχύτητα του ήχου.



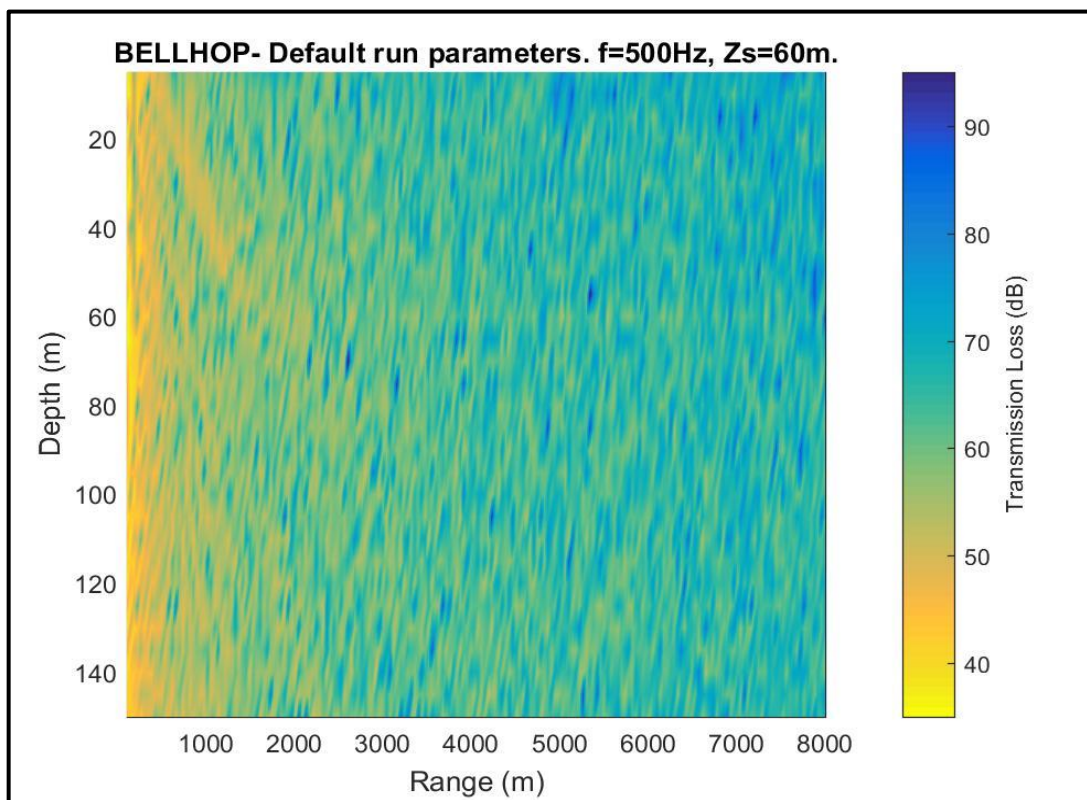
Διάγραμμα 4.2.5.2.10

(2) Διάδοση Ακτίνων: Παρατηρείται έντονη καμπύλωση των ακτίνων προς τον πυθμένα έως τα 30m, που δημιουργεί σκιερή ζώνη κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας.



Διάγραμμα 4.2.5.2.11

(3) Απώλειες Διάδοσης: Παρατηρούνται σημαντικές απώλειες για αποστάσεις μεγαλύτερες των 5000m.



Διάγραμμα 4.2.5.2.12

Στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 4.2.5.2.1) συνοψίζονται οι μέγιστες και ο Μ.Ο απωλειών (σε dB), ανά 2000m για απόσταση έως 8000m των επιλεγμένων χαρακτηριστικών συχνοτήτων (20Hz, 100Hz, 500Hz, 1000Hz), όπως προέκυψαν από την ανάλυση των βαθυθερμογραφικών δεδομένων:

MAX/AVERAGE Απωλειών Διάδοσης Ηχητικού Σήματος				
Fq(Hz)/ ΑΠΟΣΤΑΣΗ(m)	2000	4000	6000	8000
MAX 20	50	55	60	60
AVERAGE 20	47	52	56	58
MAX 100	50	55	60	65
AVERAGE 100	47	53	57	62
MAX 500	50	60	65	70
AVERAGE 500	49	55	60	65
MAX 1000	50	55	60	70
AVERAGE 1000	50	55	60	66

Πίνακας 4.2.5.2.1

Από τον ανωτέρω πίνακα προκύπτει ότι, συναρτήσει της απόστασης, οι μέγιστες απώλειες αναμένεται να κυμανθούν από 50dB έως 70dB, ενώ οι μέσες αναμενόμενες απώλειες θα κυμανθούν από 47dB έως 66dB.

Επιπρόσθετα από τα διαγράμματα διάδοσης των ακτίδων του ήχου προκύπτει ότι το φθινόπωρο και το καλοκαίρι δημιουργούνται σκιερές ζώνες κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας ενώ τις υπόλοιπες εποχές η διάδοση είναι ομαλή. Από το γεγονός αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι ένα παθητικό σύστημα εντοπισμού θα έχει καλύτερη απόδοση εάν τοποθετηθεί στο μέγιστο δυνατό βάθος.

§3. Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια διεξοδική ανάλυση των παραμέτρων της μορφολογίας των στενών του Αιγαίου Πελάγους και των βαθυθερμογραφικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτό ανά περιοχή και ανά εποχή. Χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές βαθυθερμογραφικές παρατηρήσεις, από την ανάλυση των οποίων προκύψαν συμπεράσματα σχετικά με το προφίλ ταχύτητας του ήχου, τον τρόπο διάδοσης των ακτίνων, την βέλτιστη τοποθέτηση των συστοιχιών ως προς το βάθος και τέλος υπολογίστηκαν οι απώλειες διάδοσης του ήχου συναρτήσει της απόστασης, για κάθε περιοχή.

Κεφάλαιο 5^ο: Προσομοίωση

Στο κεφάλαιο αυτό προσομοιώνεται η εφαρμογή και αξιολογείται η απόδοση του αλγόριθμου «MUSIC», σε παθητικές συστοιχίες υδροφώνων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται, τροποποιημένο καταλληλά το μοντέλο που ανέπτυξε ο κ. Παράσχος Δημήτριος³⁷, του οποίου η παρούσα προσομοίωση αποτελεί συνέχεια. Τα δυο μοντέλα τρέχουν παράλληλα και τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους.

§ 1. Ανάλυση Προσομοίωσης.

Η προσομοίωση αποτελείται από δυο μέρη:

α. Στο πρώτο μέρος, σε συστοιχίες των 8 και 16 υδροφώνων, εξετάζεται η σχέση της απόστασης μεταξύ των υδροφώνων της συστοιχίας με τον αριθμό αυτών, τηρώντας σταθερό SNR, αντίστοιχα. Στόχος είναι να μελετηθεί η επίδραση αυτών των δυο μεγεθών στην απόδοση του αλγορίθμου και να προσδιοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός των δυο παραμέτρων. Στο κεφάλαιο 2^ο αναλύθηκε η επίδραση της αύξησης του αριθμού των υδροφώνων και της μεταξύ τους απόστασης στην απόδοση μιας συστοιχίας, που λειτουργεί με την συμβατική τεχνική επεξεργασίας «Beamforming».

β. Στο δεύτερο μέρος εξετάζεται η απόδοση του αλγορίθμου για διάφορες τιμές του SNR. Δοκιμάζεται διαδοχικά σε ολοένα και μεγαλύτερο περιβάλλον θορύβου ώστε να προσδιοριστεί το ελάχιστο SNR στο οποίο μπορεί αξιόπιστα να εντοπίσει τους στόχους.

Οι τροποποιήσεις του αρχικού μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

α. Προστέθηκε ο αλγόριθμος «MUSIC», παράλληλα αλλά ανεξάρτητα από την επεξεργασία «Beamforming».

β. Περιορίστηκε το εύρος ερευνάς από $\pm 60^\circ$ σε $\pm 30^\circ$ εκατέρωθεν του εγκάρσιου της συστοιχίας. Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2^ο, προϋπόθεση λειτουργίας του αλγορίθμου είναι ο αριθμός των στόχων να είναι μικρότερος του αριθμού των αισθητήρων. Στην πράξη, ένας τομέας ερευνάς μεγάλου εύρους αυξάνει την πιθανότητα ύπαρξης περισσότερων στόχων. Επιπλέον αυξάνεται σημαντικά η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται, λόγω των πολυάριθμων υπολογισμών που εκτελεί ο αλγόριθμος σε κάθε διεύθυνση

γ. Περιορίστηκαν οι εκπεμπόμενες συχνότητες από τους στόχους σε 2 τονικές από 12.

Συναφώς οι παράμετροι που καθορίζονται εκ των προτερων σε κάθε προσομοίωση είναι:

α. Ο αριθμός των στόχων: 3.

³⁷ «Σύγχρονες Μέθοδοι Επεξεργασίας Ακουστικών Σημάτων στη Θάλασσα από Συστοιχίες Υδροφώνων», Παράσχος Δημήτριος, 2017.

β. Το εύρος έρευνας: $\pm 30^\circ$ εκατέρωθεν της συστοιχίας.

γ. Ο αριθμός των εκπεμπόμενων συχνοτήτων από τους στόχους. Συγκεκριμένα θα εκπέμπονται από κάθε στόχο δυο τονικές (narrowband) συχνότητες.

δ. Ο σηματοθορυβικός λόγος SNR: Ο λόγος αυτός θα μειώνεται σταδιακά ώστε να διαπιστωθεί το κατώτερο όριο στο οποίο ο αλγόριθμος μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά.

Οι μεταβλητές που καθορίζονται τυχαία είναι:

α. Οι θέσεις των στόχων.

β. Η κατανομή της φασματικής πυκνότητας της ακουστικής ισχύος.

Ως μεταβλητές που θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν είναι:

α. Ο αριθμός των υδροφώνων της συστοιχίας.

β. Η απόσταση μεταξύ των υδροφώνων της συστοιχίας

Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο³⁸ η απόσταση μεταξύ των υδροφώνων μιας συστοιχίας θα πρέπει να είναι:

$$d \leq \frac{\lambda}{2} \quad (5.1.1)$$

ώστε να μην δημιουργούνται δευτερεύοντες κύριοι λοβοί και δημιουργείται αμφιβολία ως προς την διόπτρευση του στόχου. Στην περιοχή ενδιαφέροντος που εξετάζουμε, $f = 0 - 1000\text{Hz}$, το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη συχνότητα είναι $\lambda = 1,5\text{m}$. Οπότε η μέγιστη απόσταση των υδροφώνων στην συστοιχία δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα $d \leq 0,75\text{m}$. Οπότε η υπό εξέταση αποστάσεις μεταξύ των υδροφώνων επιλέχθηκαν να είναι $d = 0,25\text{m}, 0,5\text{m}$ και $0,75\text{m}$.

Ως κριτήρια της απόδοσης του αλγορίθμου «MUSIC» καθορίζονται τα ακόλουθα:

α. Ο εντοπισμός συνόλου των στόχων: Θα πρέπει να επιτευχθεί εντοπισμός και των τριών των στόχων ώστε το σύστημα να θεωρηθεί αξιόπιστο.

β. Η ύπαρξη ψευδοστόχων: Η ύπαρξη ψευδοστόχων μπορεί να αποπροσανατολίσει τους χειριστές και με αυτόν τον τρόπο να αποτρέψει τον εντοπισμό των πραγματικών. Στις προσομοιώσεις ως ψευδοστόχος θα

³⁸ Κεφάλαιο 2.

θεωρείται εκείνος του οποίου η ένταση εντοπισμού του ξεπερνάει αυτή των πραγματικών.

γ. Η διακριβωτική ικανότητα: Η διακριβωτική ικανότητα κατά διόπτευση είναι καθοριστική όσον αφορά τον εντοπισμό ενός στόχου, ιδίως στις παθητικές συστοιχίες που παρέχουν αποκλειστικά στοιχεία διόπτευσης. Ένας στόχος που κινείται πλησίον ενός άλλου, επι παραδείγματι ενός Υ/Β που άνωθεν του κινείται ένας στόχος επιφανείας σε παρόμοια διόπτευση, μπορεί να περάσει ανεντόπιστος.

δ. Η σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου που εφαρμόζει την μέθοδο «Beamforming».

§ 2 Α' Μέρος Προσομοίωσης: Απόσταση - Αριθμός Υδροφώνων.

Στο πρώτο μέρος εκτελείται μια σειρά προσομοιώσεων για κάθε συνδυασμό των συστοιχιών των 8 και 16 υδροφώνων με τις αποστάσεις $D = 0.25m, 0.5m$ και $0.75m$. Ο σηματοθορυβικός λόγος διατηρείται σταθερός και ίσος με $SNR = 10$, ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Στην συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά χαρακτηριστικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για κάθε ανωτέρω συνδυασμό με την εφαρμογή του αλγορίθμου «MUSIC» και συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου «Beamforming».

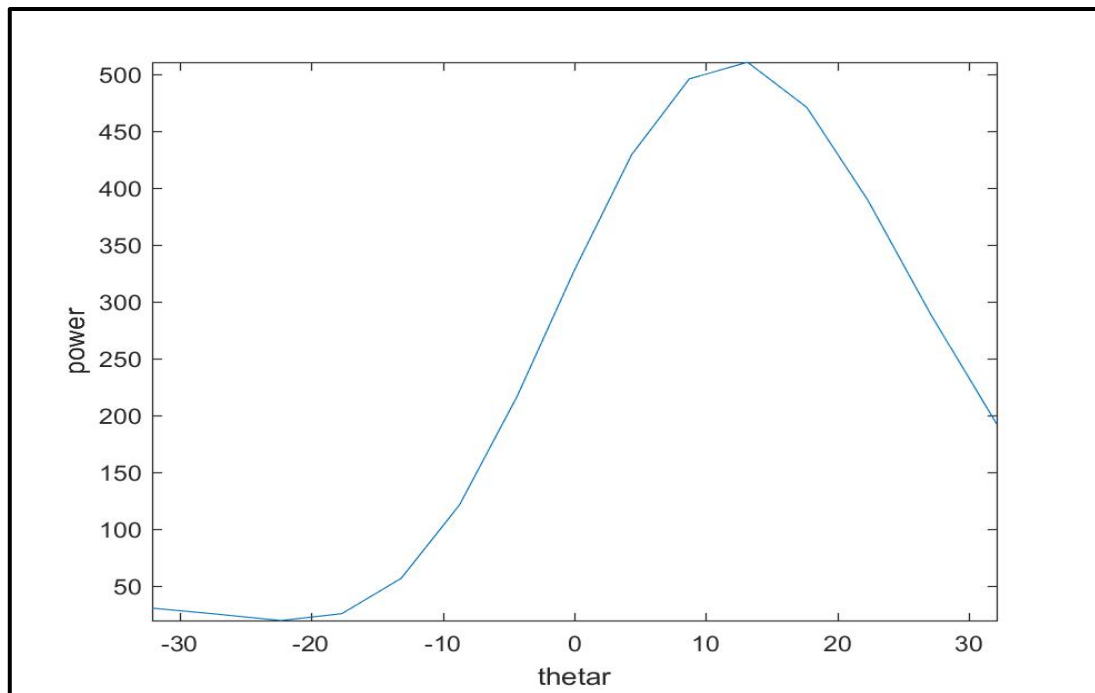
Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων οι «πραγματικές διοπτεύσεις» στόχων αναφέρονται στους στόχους που παράγονται τυχαία από το μοντέλο. Η ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση αναφέρεται στην μικρότερη διαφορά διοπτεύσεων μεταξύ των τριών στόχων και χρησιμοποιείται για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την διακριβωτική ικανότητα του αλγορίθμου. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι διοπτεύσεις των ακουστικών σημάτων που εντοπίζουν τα υδρόφωνα (άξονας X) και η ένταση τους (άξονας Y).

Στο τέλος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων υπό μορφή πίνακα. Στον πίνακα η κόκκινη γραμμή απεικονίζει την ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση των πραγματικών στόχων, η πράσινη και η κίτρινη το μέγιστο σφάλμα κατά διόπτευση από τους εντοπισθέντες στόχους, μεταξύ της πραγματικής τους θέσης και αυτής που υποδεικνύει η συστοιχία, με την μέθοδο «Beamforming (B)» και «MUSIC (M)» αντίστοιχα. Οι ακραίες τιμές $Y = 22, 20, 18$ υποδηλώνουν τον μη εντοπισμό στόχων, τον εντοπισμό ενός εκ των τριών στόχων και τον εντοπισμό δυο εκ των τριών στόχων αντίστοιχα.

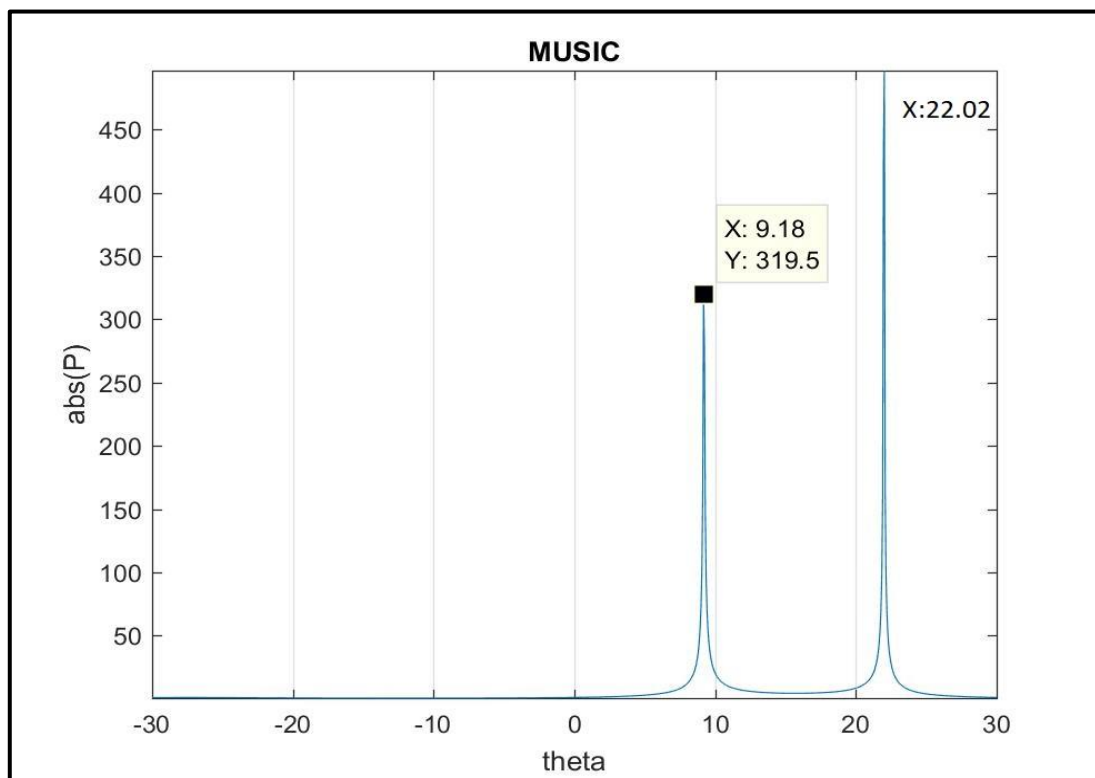
§ 2.1 Συστοιχία 8 Υδροφώνων.

α. $D=0,25m$.

(1) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $9,22^\circ / 21,55^\circ / 22,43^\circ$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $0,88^\circ$.

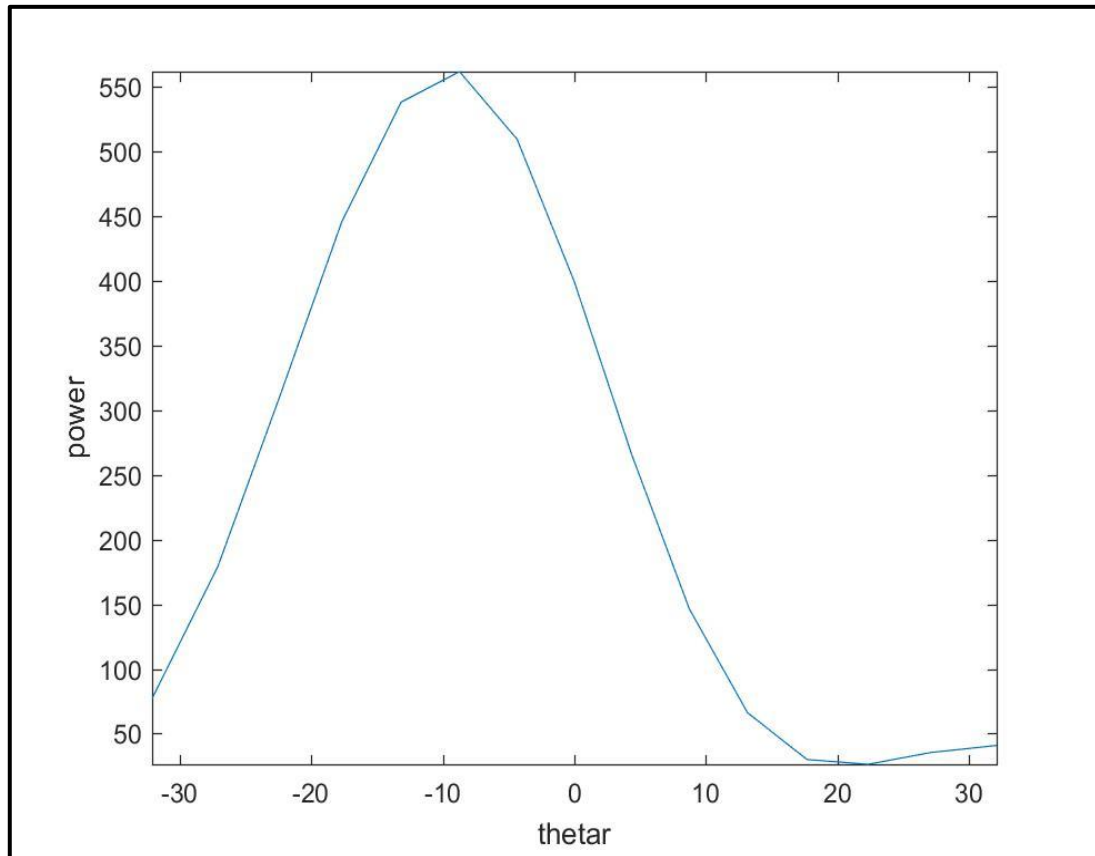


Διάγραμμα 5.2.1.1

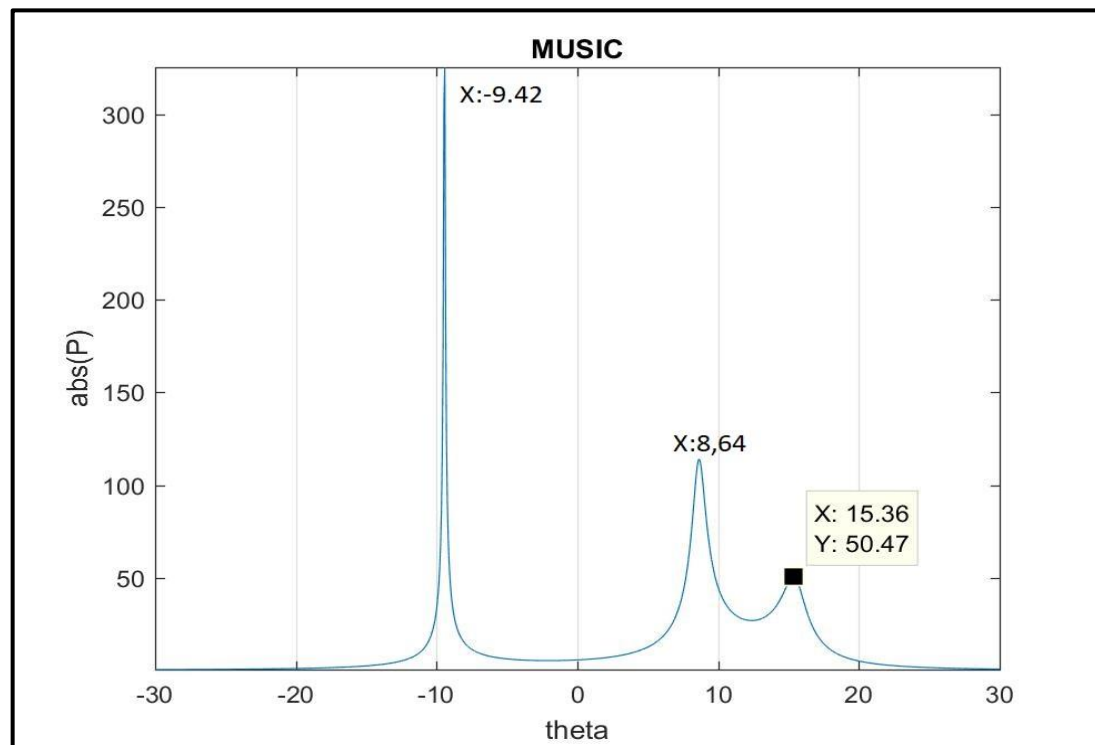


Διάγραμμα 5.2.1.2

(2) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-9,47^\circ / 7,92^\circ / 14,59^\circ$.
Ελάχιστη διαφορά κατά δίοπτρευση: $6,67^\circ$.

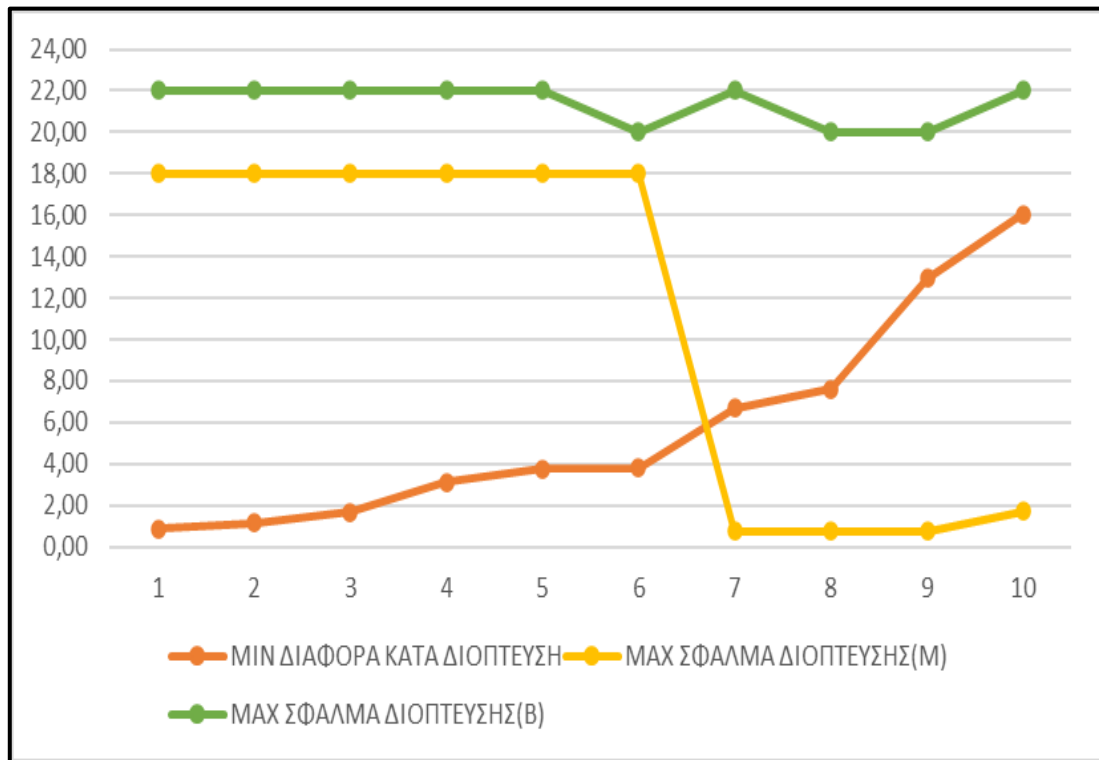


Διάγραμμα 5.2.1.3



Διάγραμμα 5.2.1.4

(3) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.2.1.5

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming» δεν επετεύχθη ο εντοπισμός του συνόλου των στόχων.

Με την μέθοδο «MUSIC»:

α/ Σε όλες τις προσομοιώσεις εντοπίστηκαν τουλάχιστον δυο από τους τρεις στόχους, χωρίς ύπαρξη ψευδοστόχων.

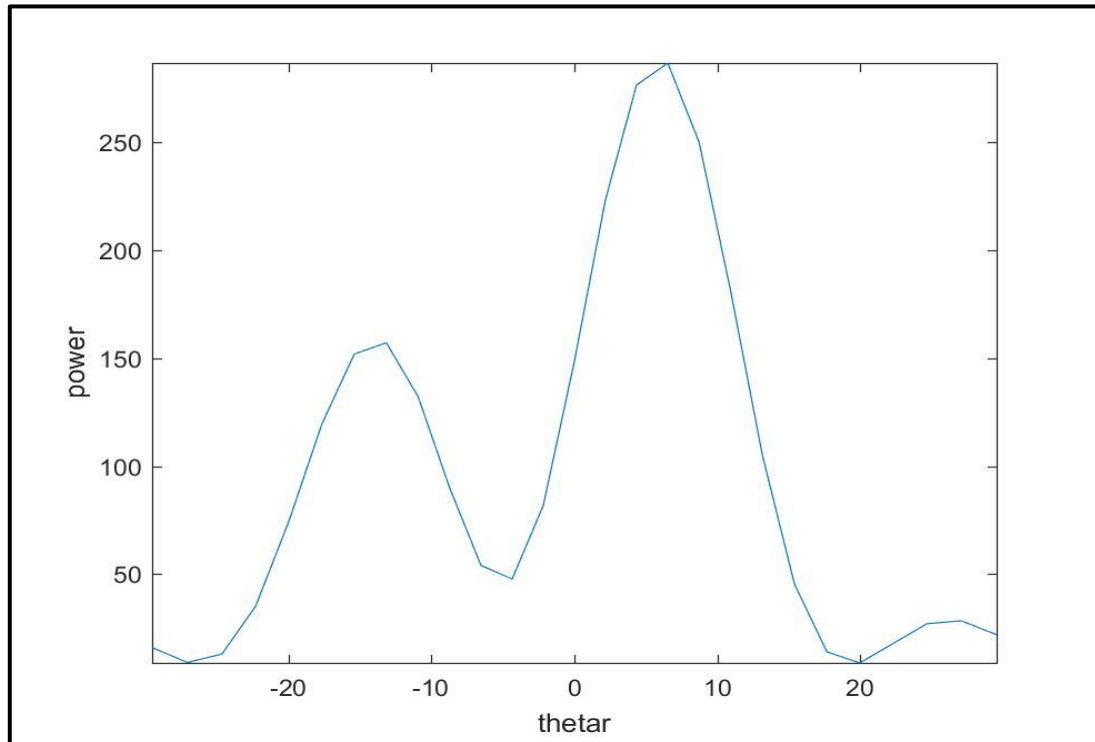
β/ Κατά 60% δεν επετεύχθη ο εντοπισμός του 3^{ου} στόχου.

γ/ Δεν επετεύχθη διαχωρισμός των στόχων για διαφορά δίοπτεισης: $< 6^\circ$

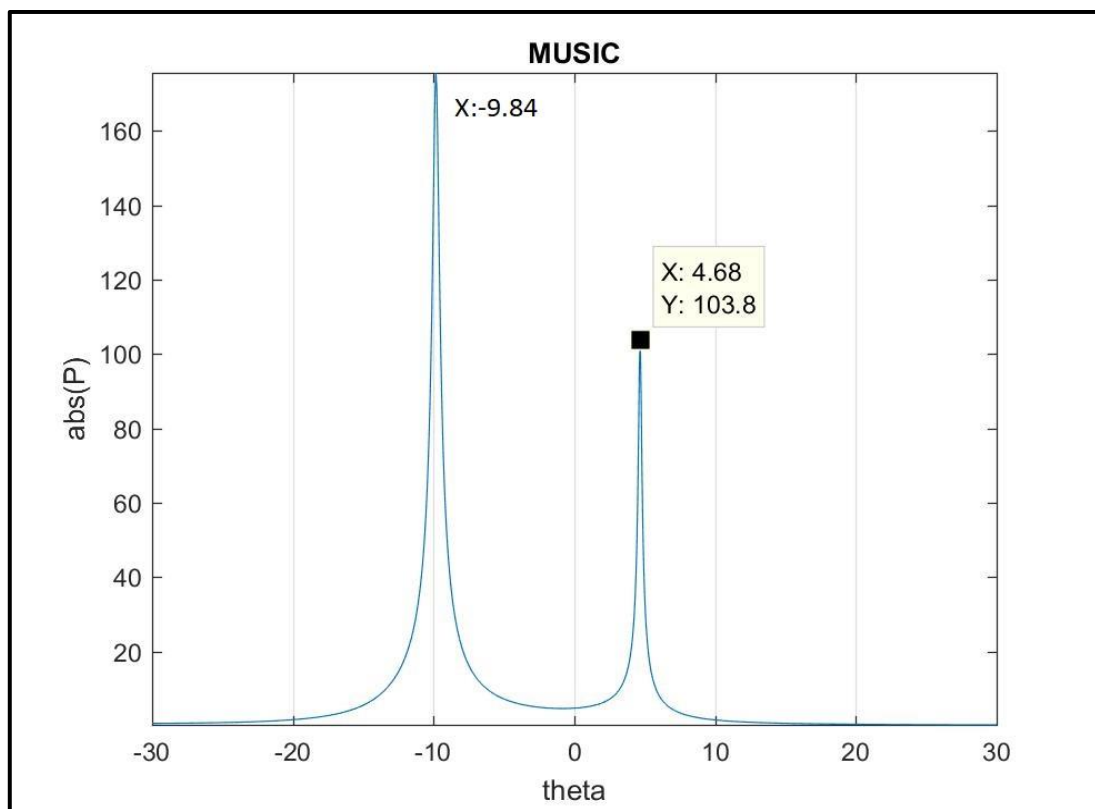
δ/ Μέγιστο σφάλμα κατά δίοπτειση: $< 2^\circ$.

β. $D=0,5m$.

(1) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-12,18^\circ / -9,72^\circ / 5,11^\circ$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $2,46^\circ$.

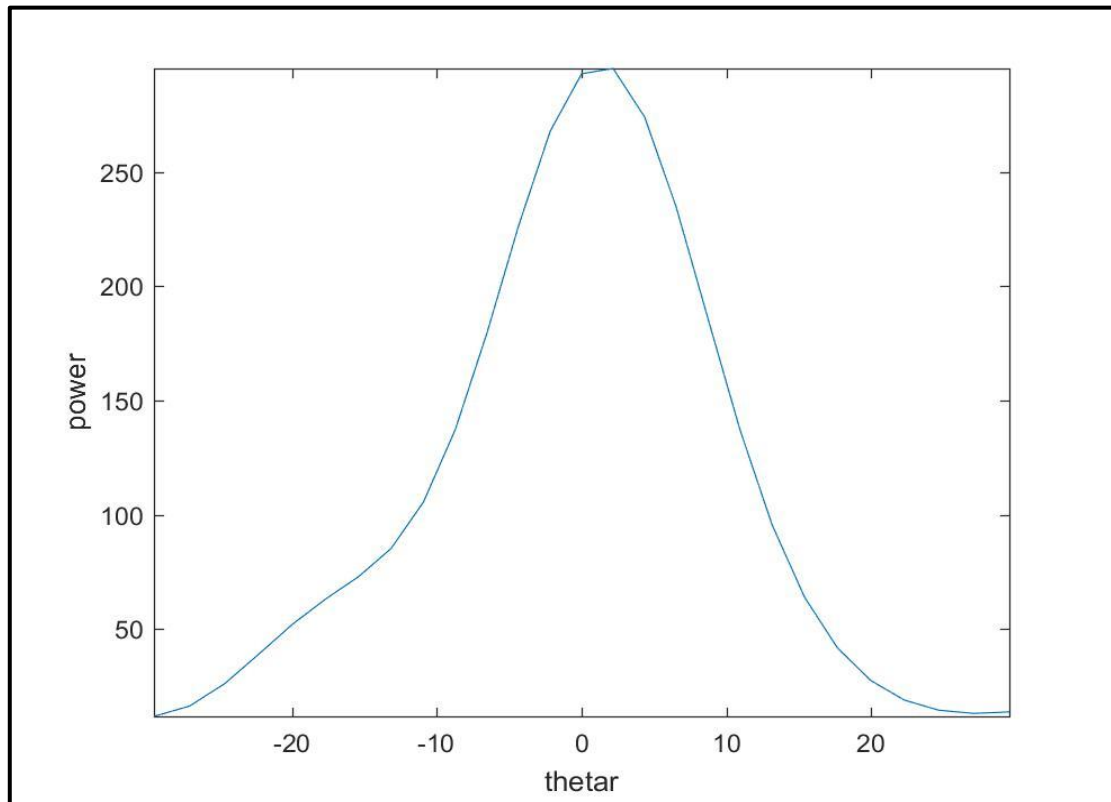


Διάγραμμα 5.2.1.6

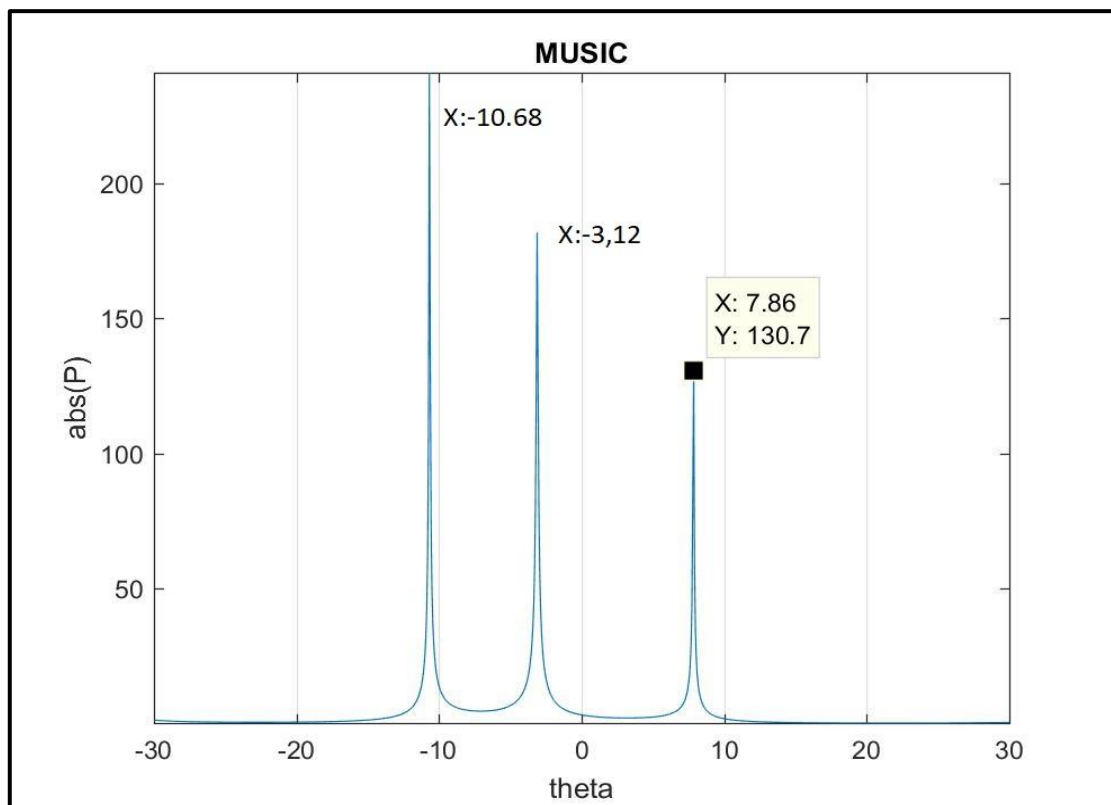


Διάγραμμα 5.2.1.7

(2) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-10,67^{\circ} / -3,07^{\circ} / 7,81^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $7,6^{\circ}$.

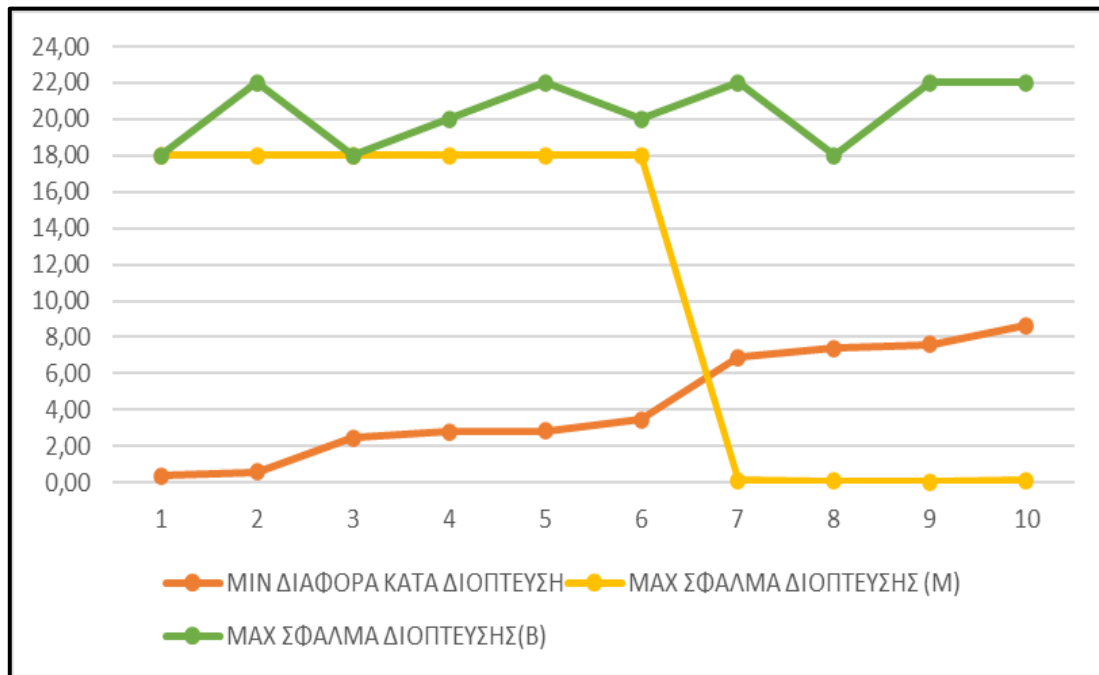


Διάγραμμα 5.2.1.8



Διάγραμμα 5.2.1.9

(3) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.2.1.10

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming» δεν επετεύχθη ο εντοπισμός του συνόλου των στόχων.

Με την μέθοδο «MUSIC»:

α/ Σε όλες τις προσομοιώσεις εντοπίστηκαν τουλάχιστον δυο από τους τρεις στόχους, χωρίς ύπαρξη ψευδοστόχων.

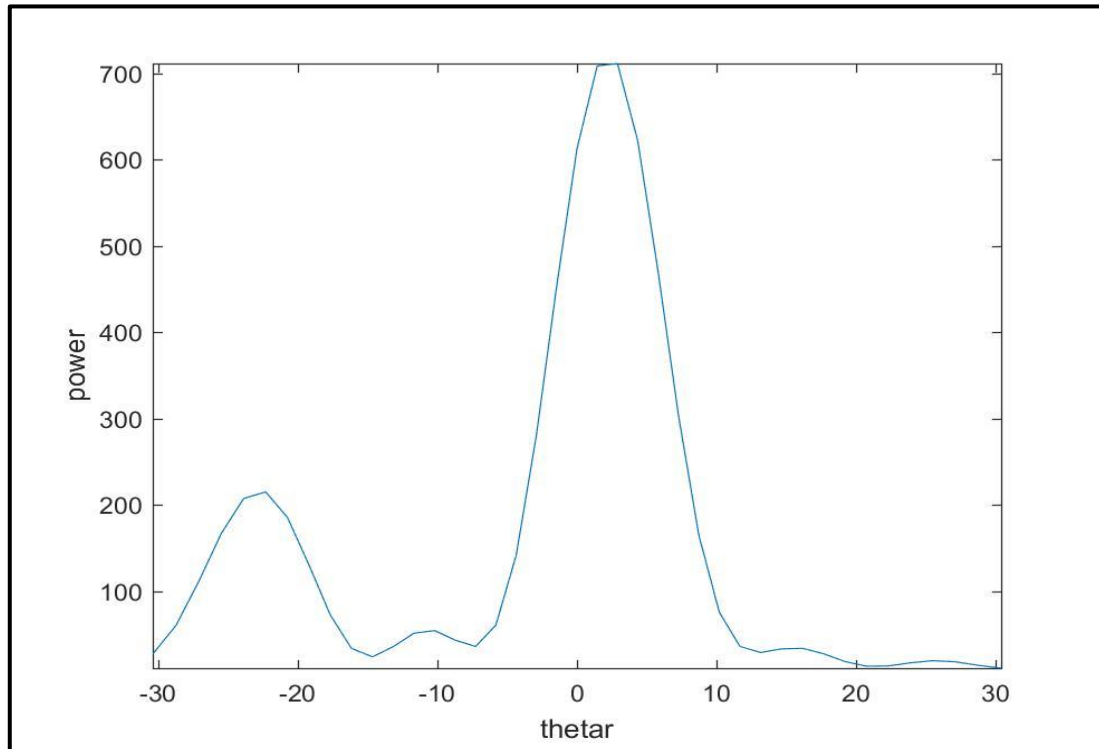
β/ Κατά 60% δεν επετεύχθη ο εντοπισμός του 3^{ου} στόχου.

γ/ Δεν επετεύχθη διαχωρισμός των στόχων για διαφορά δίοπτρευσης: $< 4^\circ$.

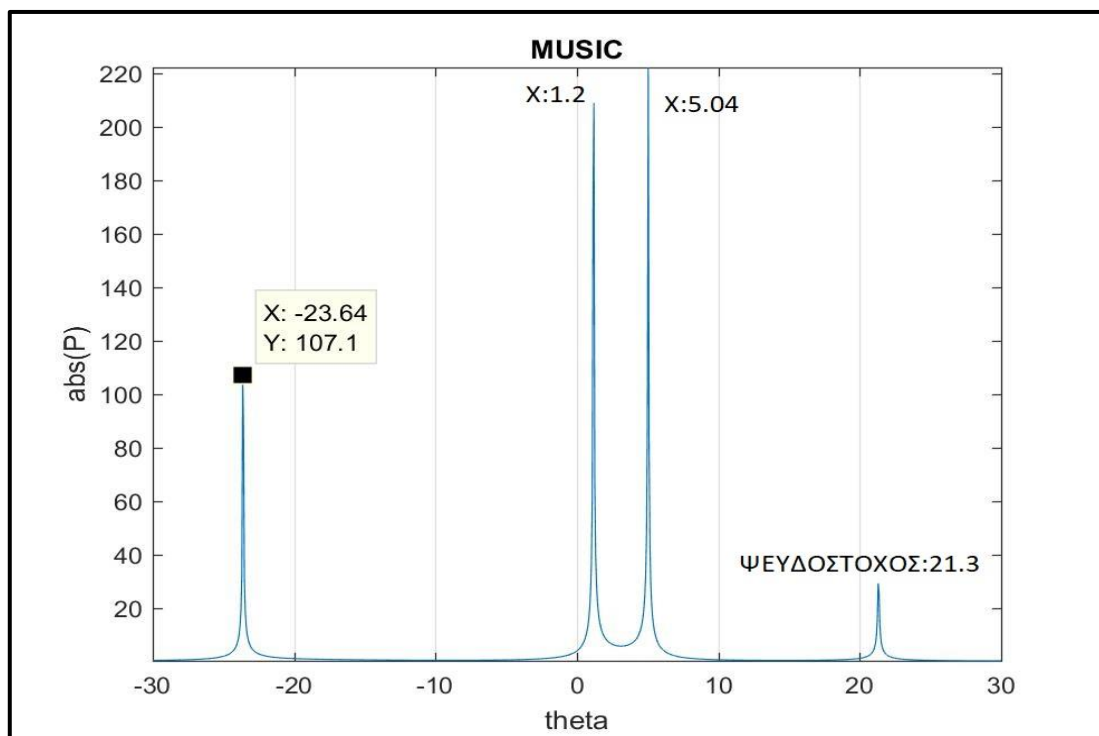
δ/ Μέγιστο σφάλμα κατά δίοπτρευση: $< 1^\circ$.

γ. D=0,75m.

(1) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-23,64^{\circ} / -1,2^{\circ} / 5,04^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $3,82^{\circ}$.

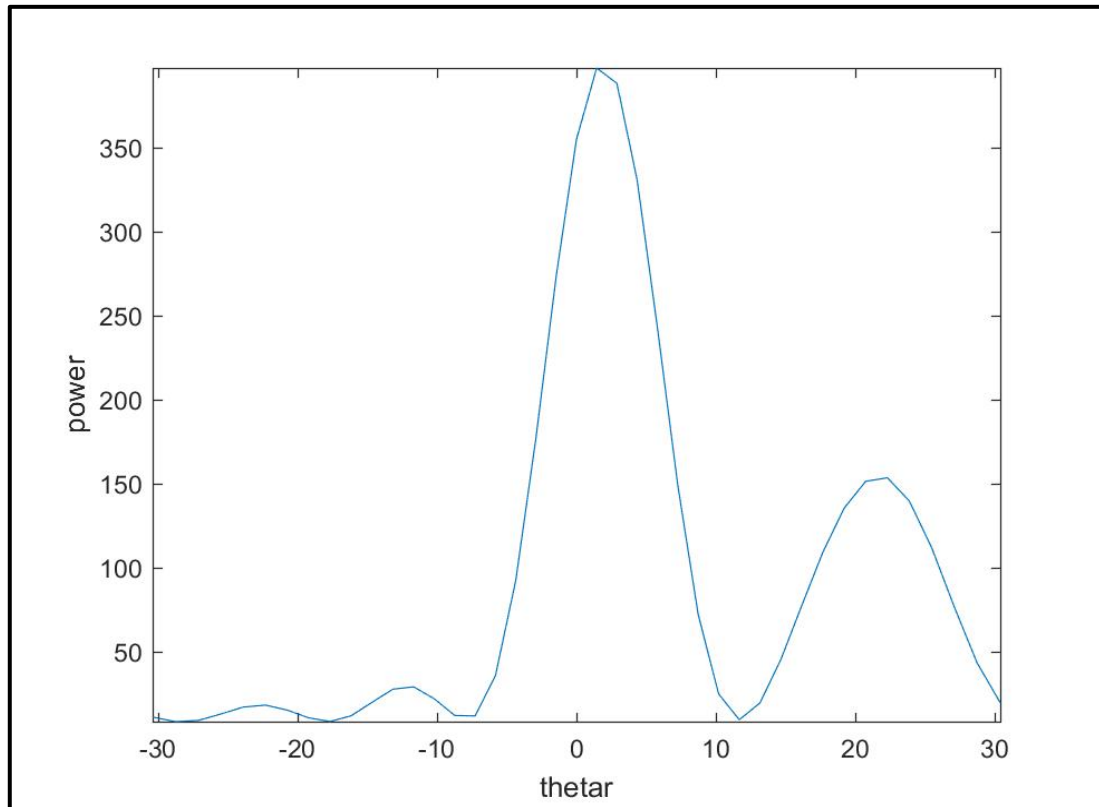


Διάγραμμα 5.2.1.11

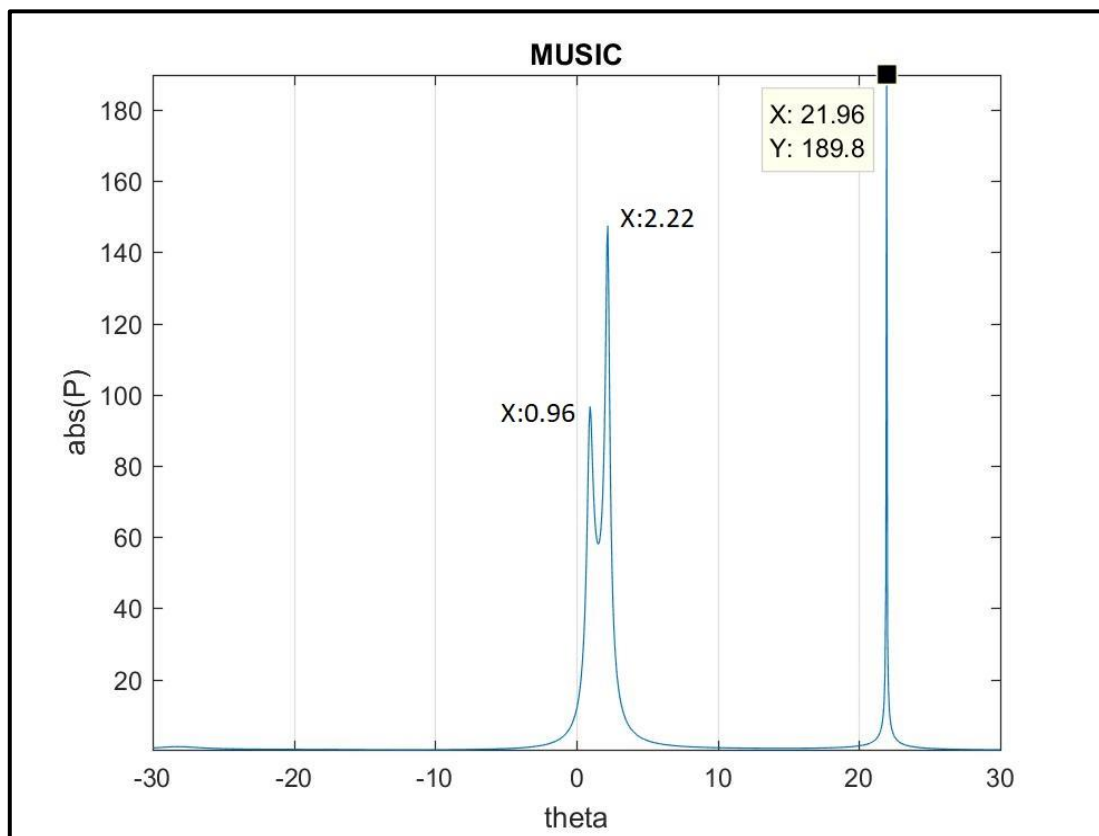


Διάγραμμα 5.2.1.12

(2) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $0.96^\circ / 2.22^\circ / 21.96^\circ$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διοπτρευση: 1.16° .

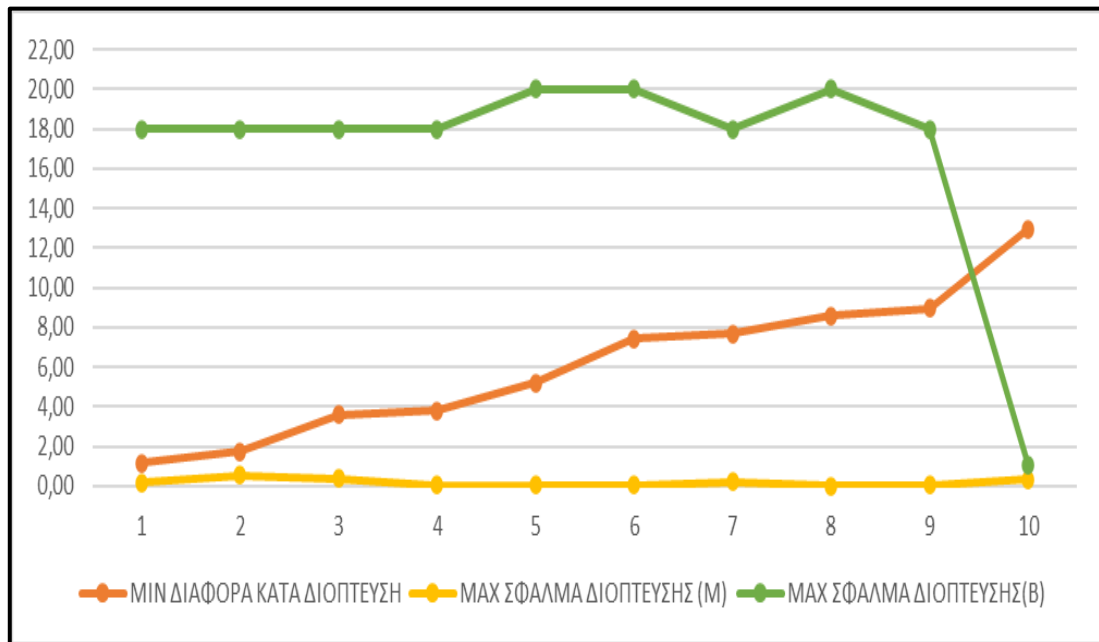


Διάγραμμα 5.2.1.13



Διάγραμμα 5.2.1.14

(3) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.2.1.15

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming», επετεύχθη για ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση: $\geq 12^\circ$, ο εντοπισμός του συνόλου των στόχων.

Με την μέθοδο «MUSIC»:

α/ Επετεύχθη εντοπισμός συνόλου στόχων.

β/ Ελάχιστη διαφορά διόπτευσης μεταξύ στόχων: $1,16^\circ$.

γ/ Μέγιστο σφάλμα κατά διόπτευση: $< 0,5^\circ$.

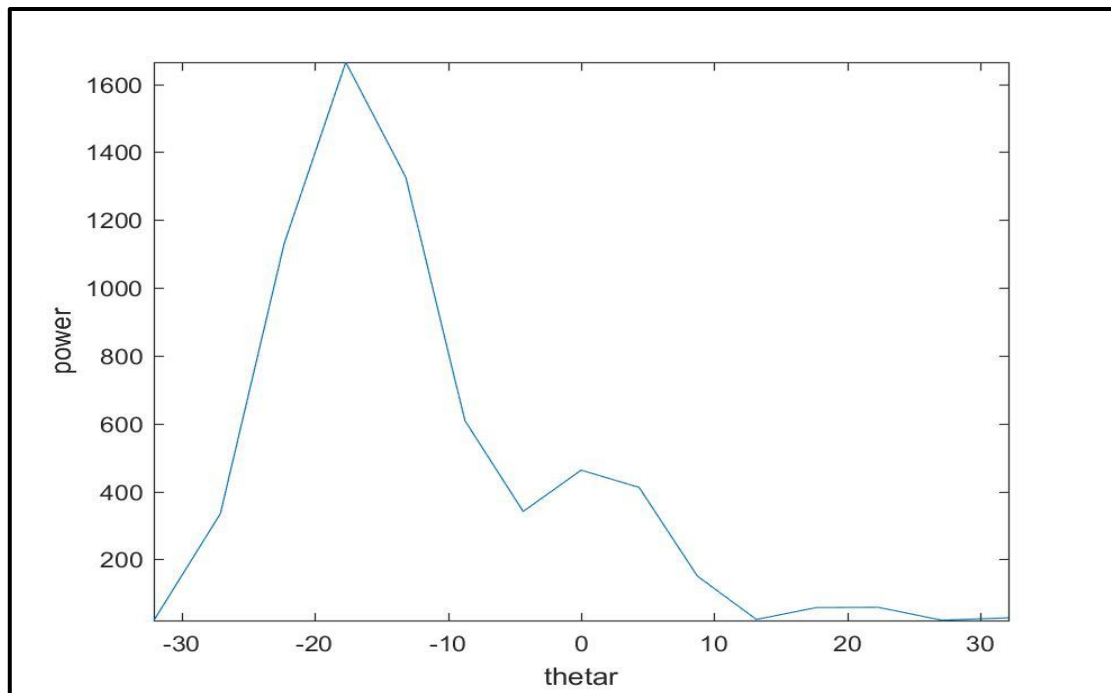
δ/ Παρουσιάστηκαν ψευδοστόχοι, χαμηλότερης όμως εντάσεως από τους πραγματικούς.

Στην περίπτωση που εντοπίστηκε το σύνολο των στόχων, η ακρίβεια κατά διόπτευση της μεθόδου «Beamforming» και «MUSIC» είναι παρόμοια.

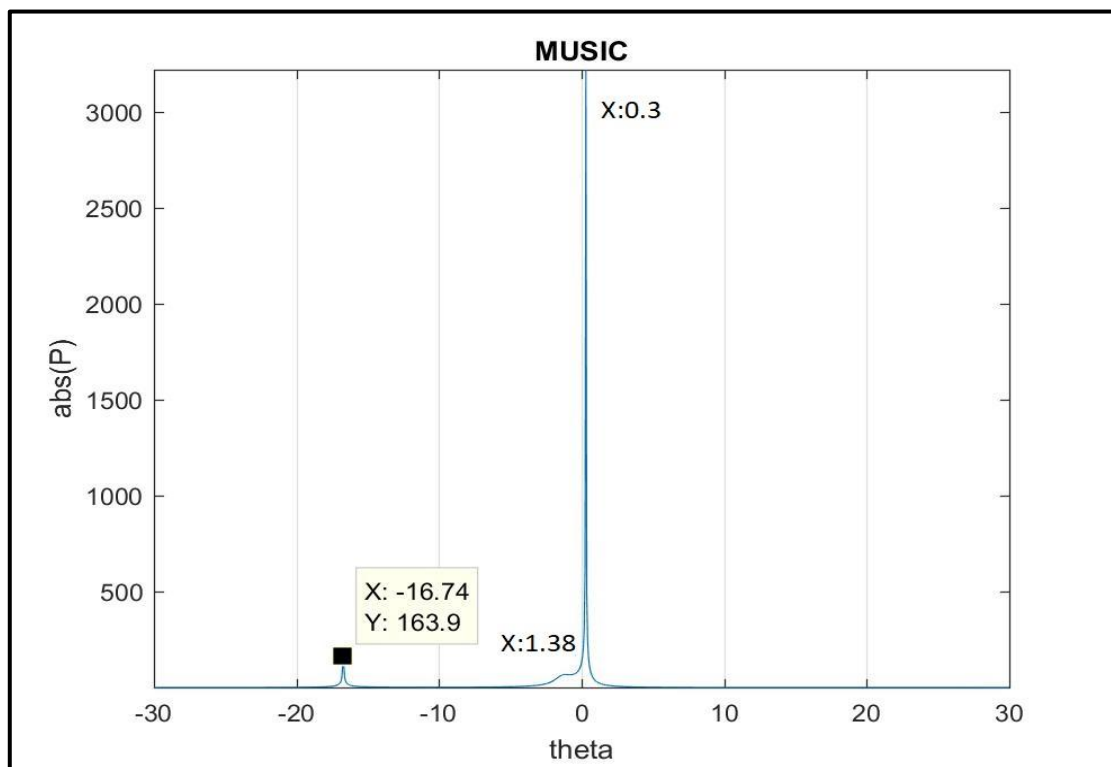
§ 2.2 Συστοιχία 16 Υδροφώνων.

α. $D=0,25m$.

(1) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-16,72^\circ / -1,6^\circ / 0,42^\circ$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $2,03^\circ$.

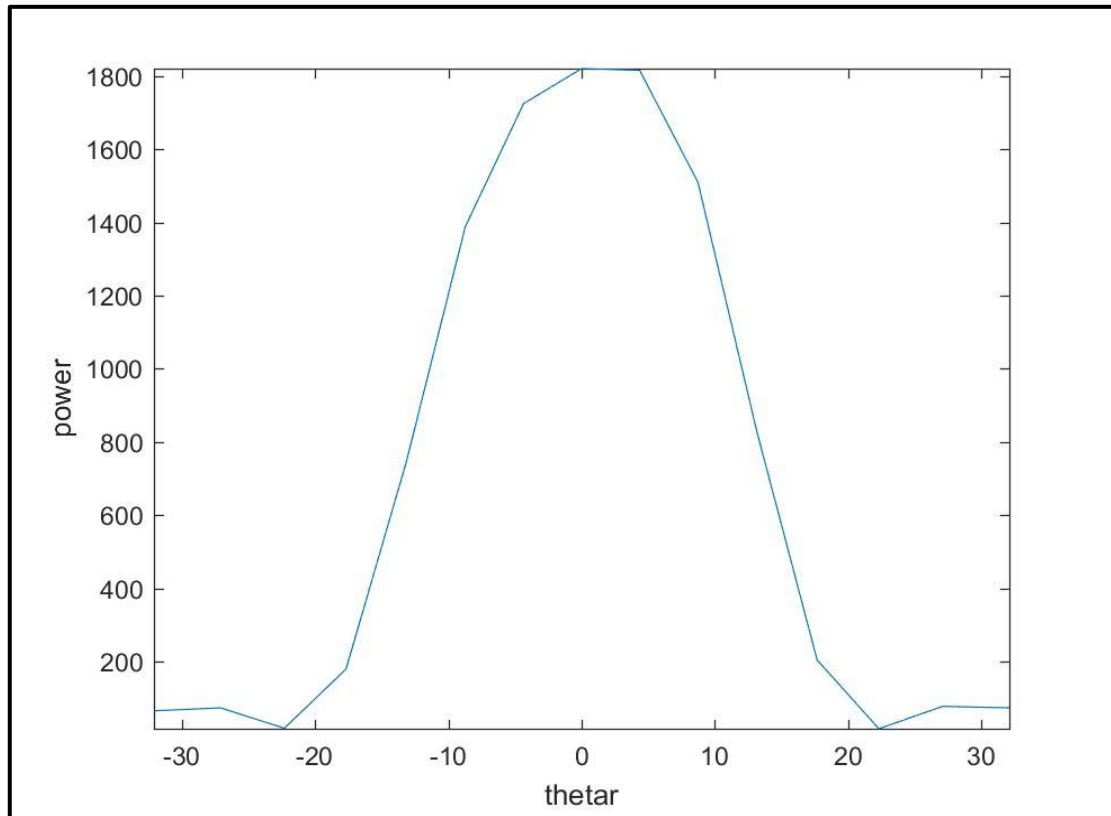


Διάγραμμα 5.2.2.1

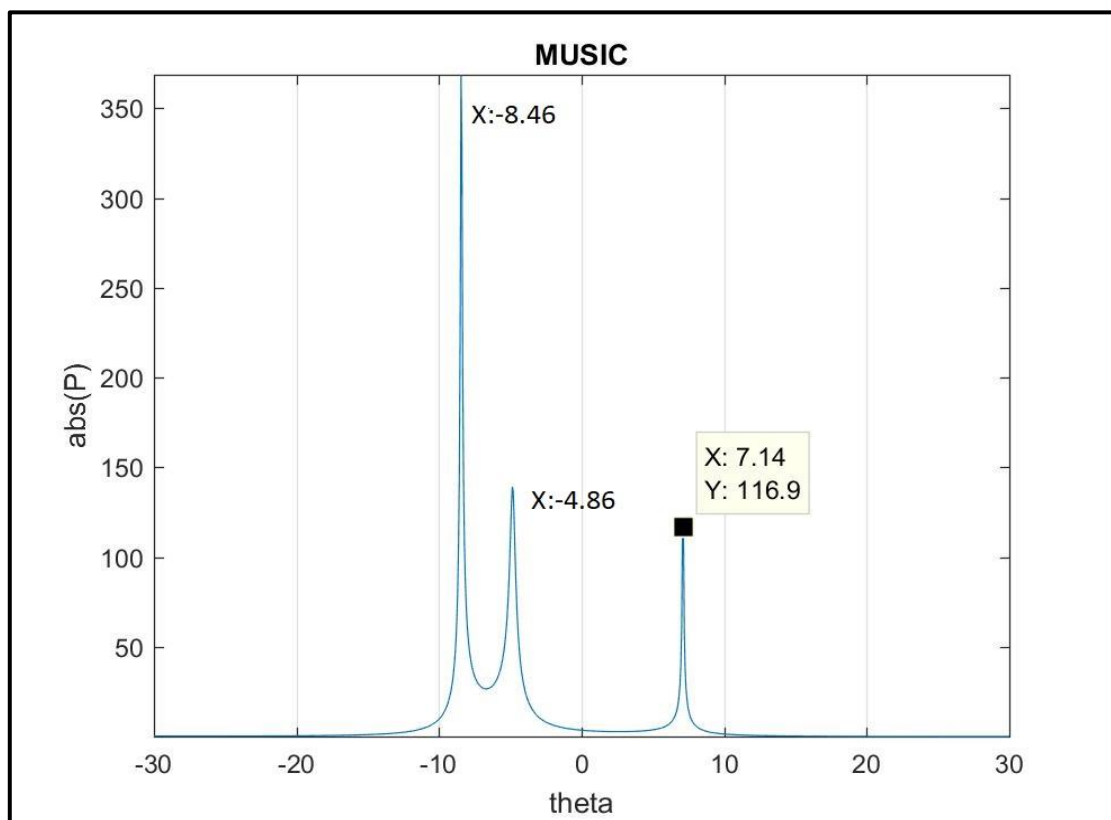


Διάγραμμα 5.2.2.2

(2) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-8,46^{\circ} / -4,86^{\circ} / 7,10^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $3,66^{\circ}$.

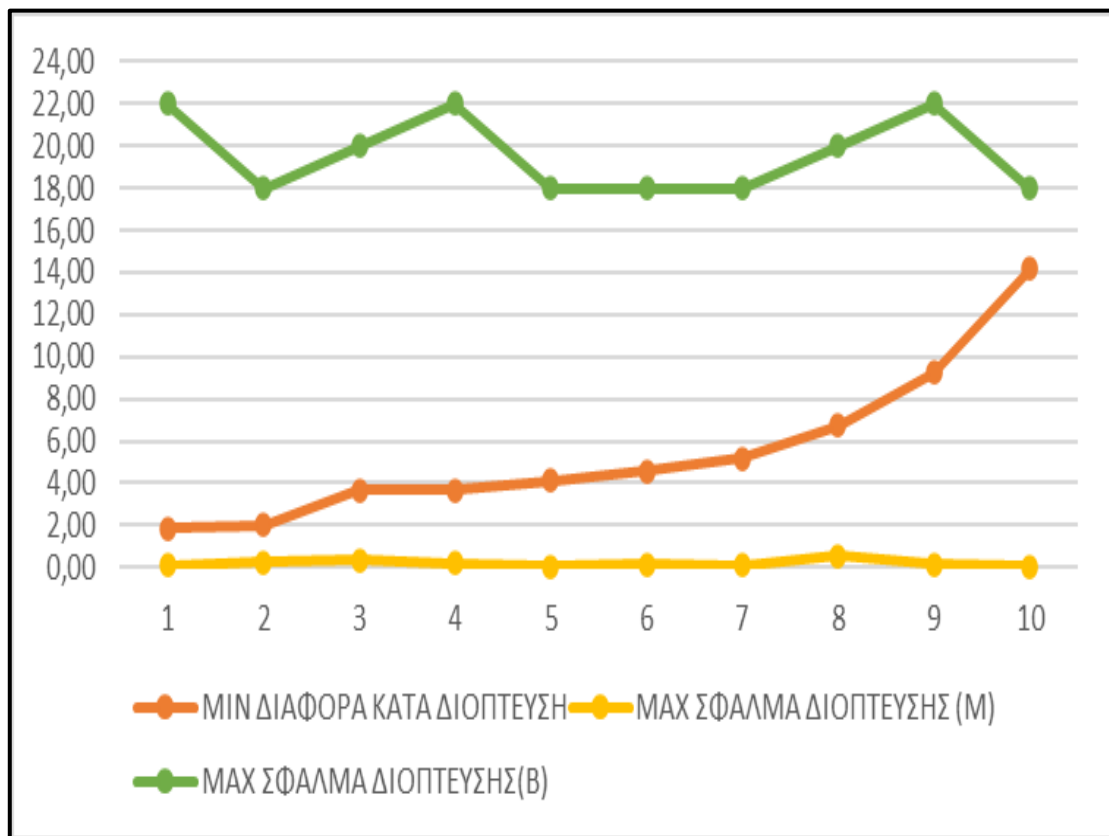


Διάγραμμα 5.2.2.3



Διάγραμμα 5.2.2.4

(3) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.2.2.5

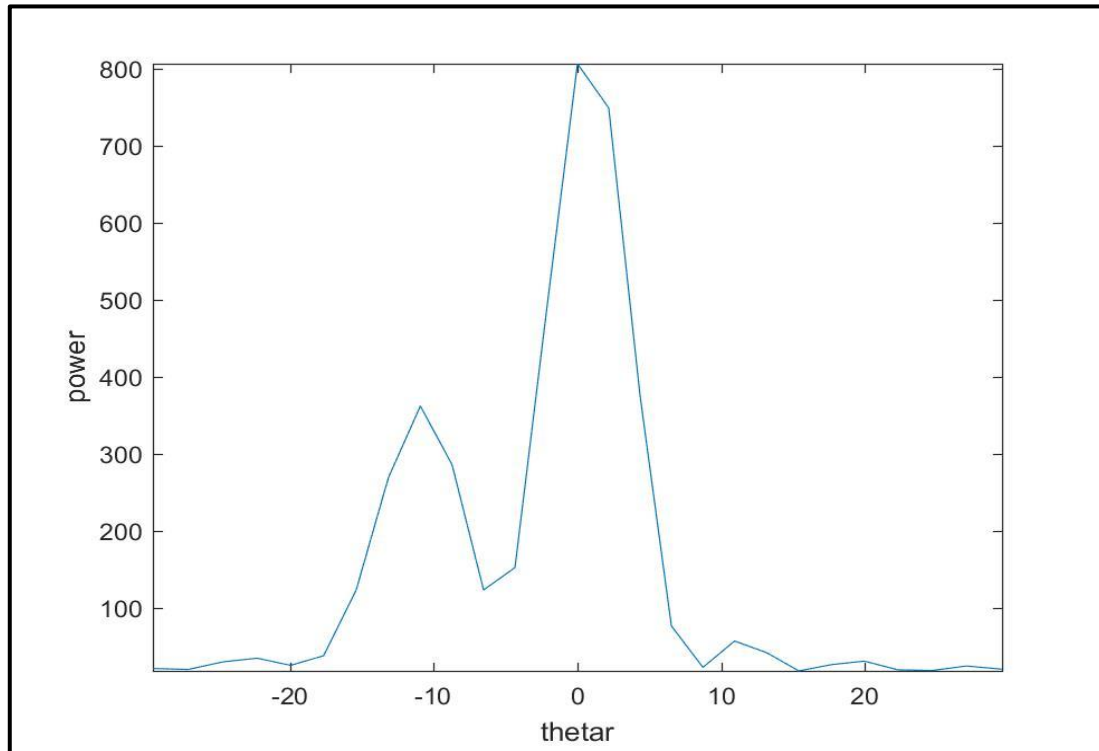
Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming» δεν επετεύχθη ο εντοπισμός του συνόλου των στόχων.

Με την μέθοδο «MUSIC»:

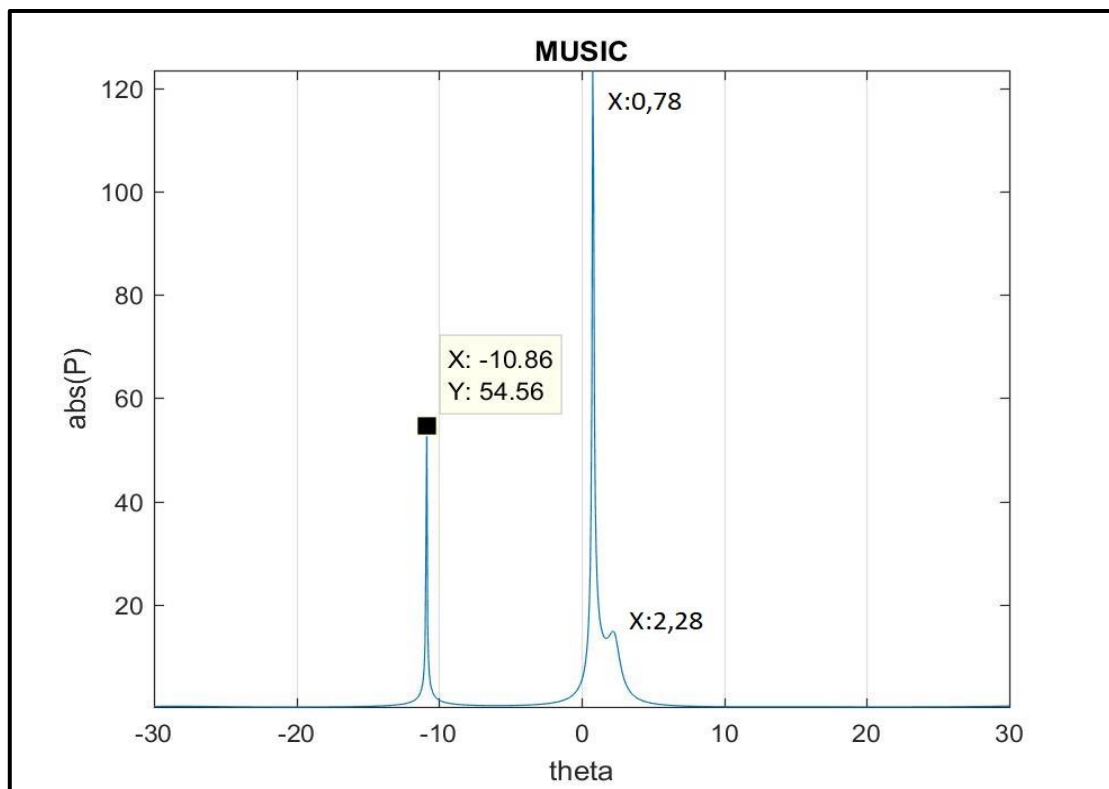
- α/ Επετεύχθη οριακά εντοπισμός συνόλου στόχων.
- β/ Ελάχιστη διαφορά διόπτευσης μεταξύ στόχων: $1,84^{\circ}$.
- γ/ Μέγιστο σφάλμα κατά διόπτευση: $< 0,5^{\circ}$.

β. D=0,5m.

(1) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-10,87^{\circ}/0,76^{\circ}/1,15^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $0,38^{\circ}$.

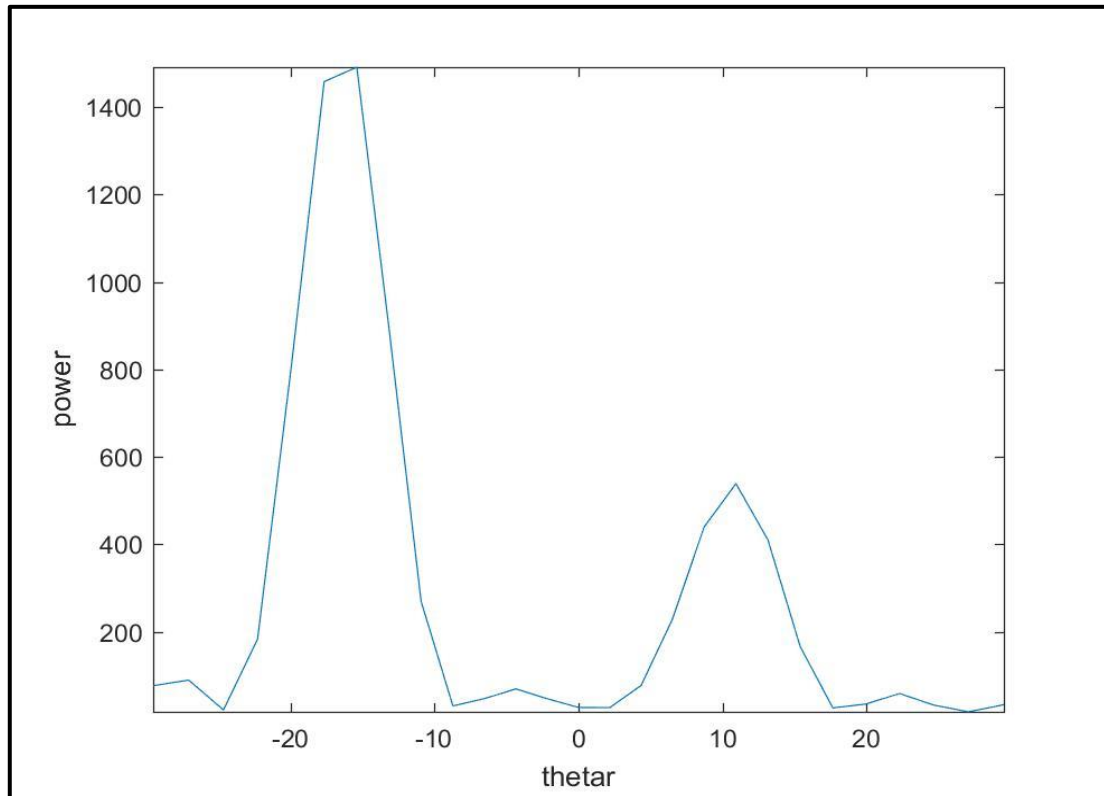


Διάγραμμα 5.2.2.6

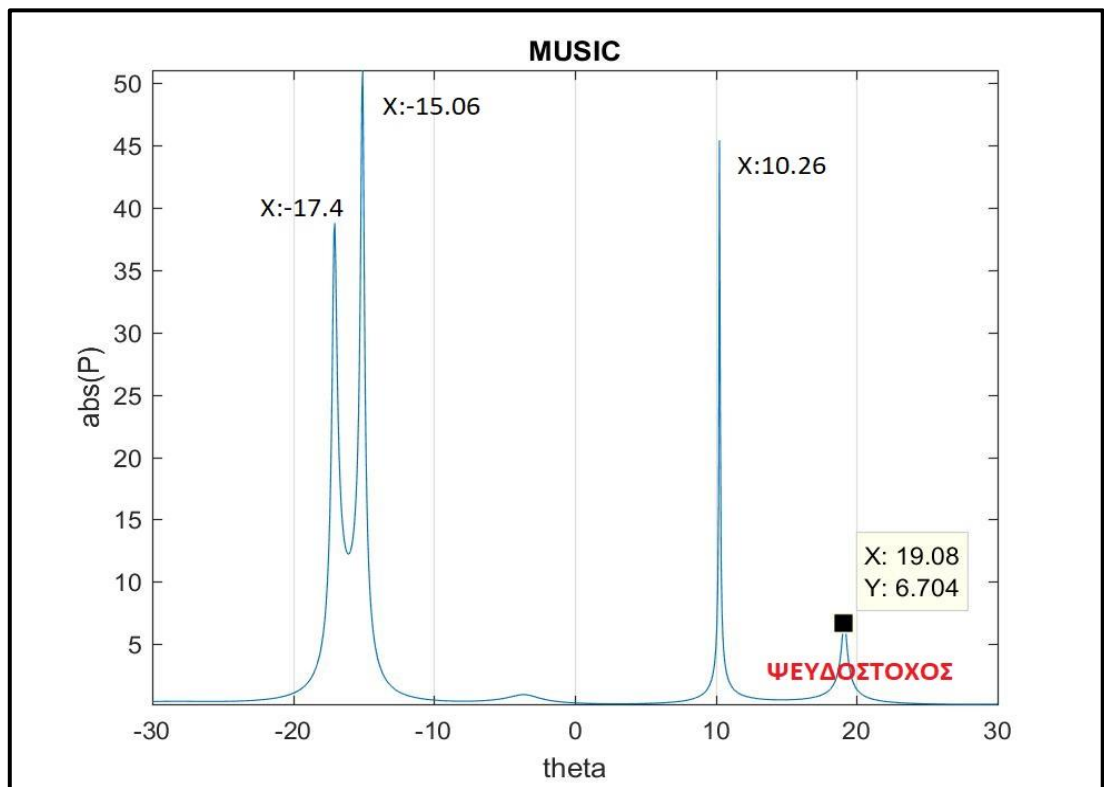


Διάγραμμα 5.2.2.7

(2) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-16,96^{\circ} / -15,09^{\circ} / 10,3^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $1,87^{\circ}$.

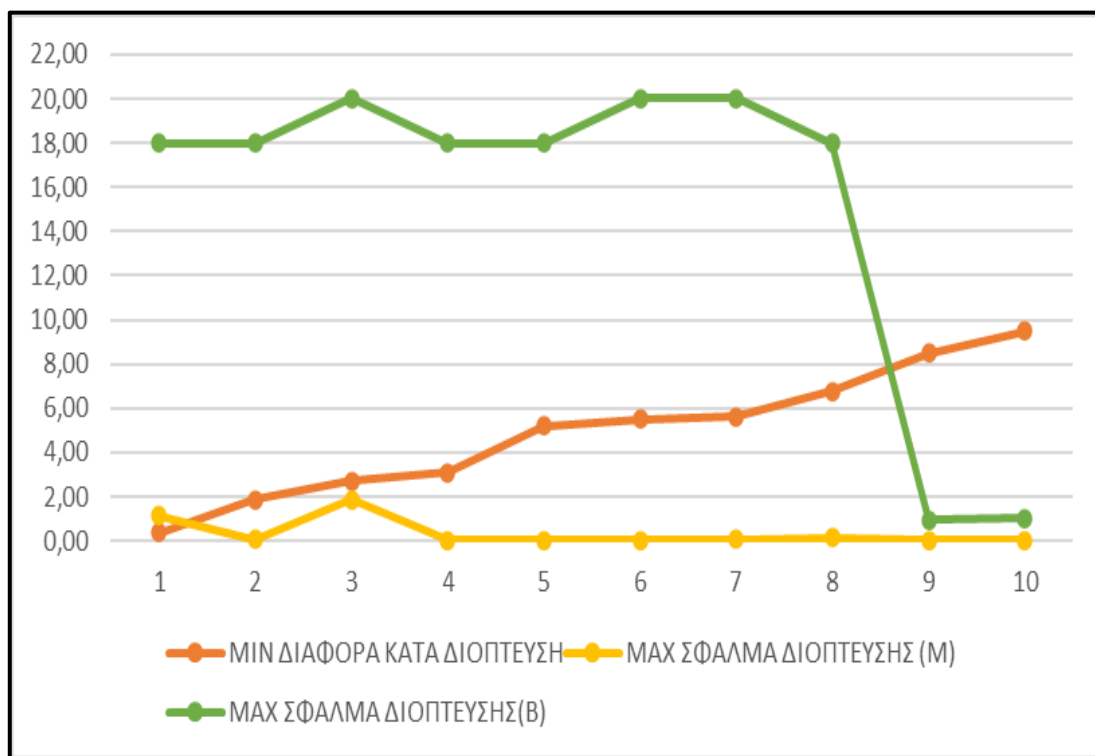


Διάγραμμα 5.2.2.8



Διάγραμμα 5.2.2.9

(3) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.2.2.10

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming» επετεύχθη, για ελάχιστη διαφορά διόπτεισης: $\geq 8^\circ$, ο εντοπισμός συνόλου των στόχων.

Με την μέθοδο «MUSIC»:

α/ Επετεύχθη οριακά εντοπισμός συνόλου στόχων.

β/ Ελάχιστη διαφορά διόπτεισης μεταξύ στόχων: $1,16^\circ$.

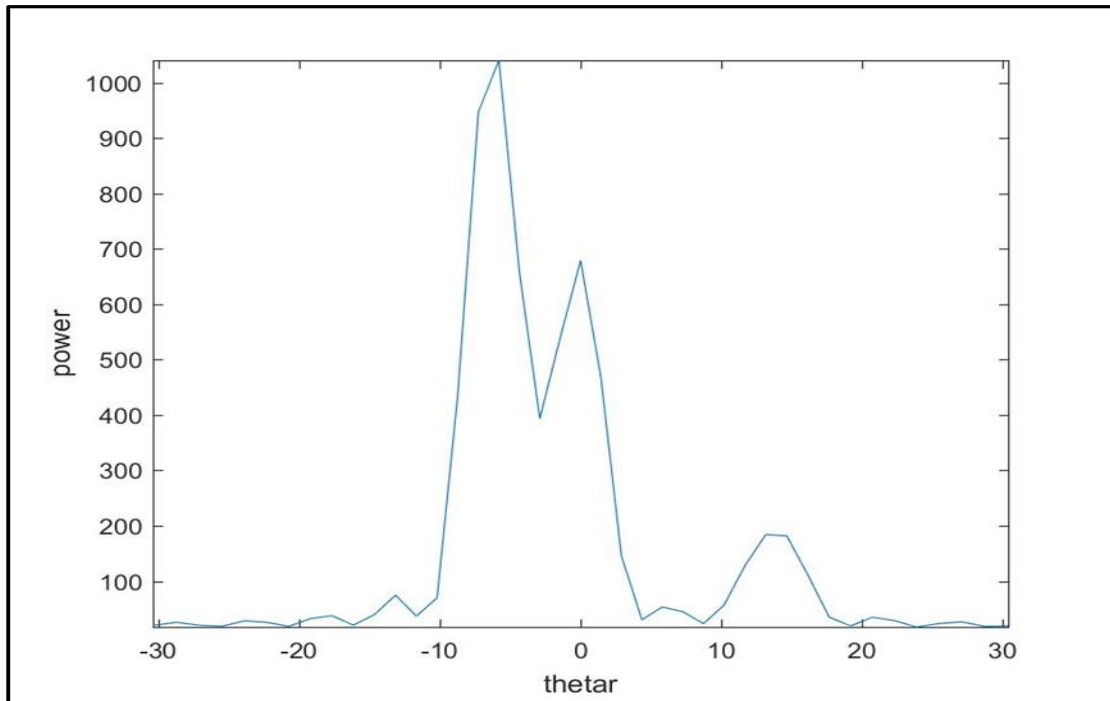
γ/ Μέγιστο σφάλμα κατά διόπτειση: $< 0,5^\circ$.

δ/ Παρουσιάστηκαν ψευδοστόχοι, χαμηλότερης όμως εντάσεως από τους πραγματικούς.

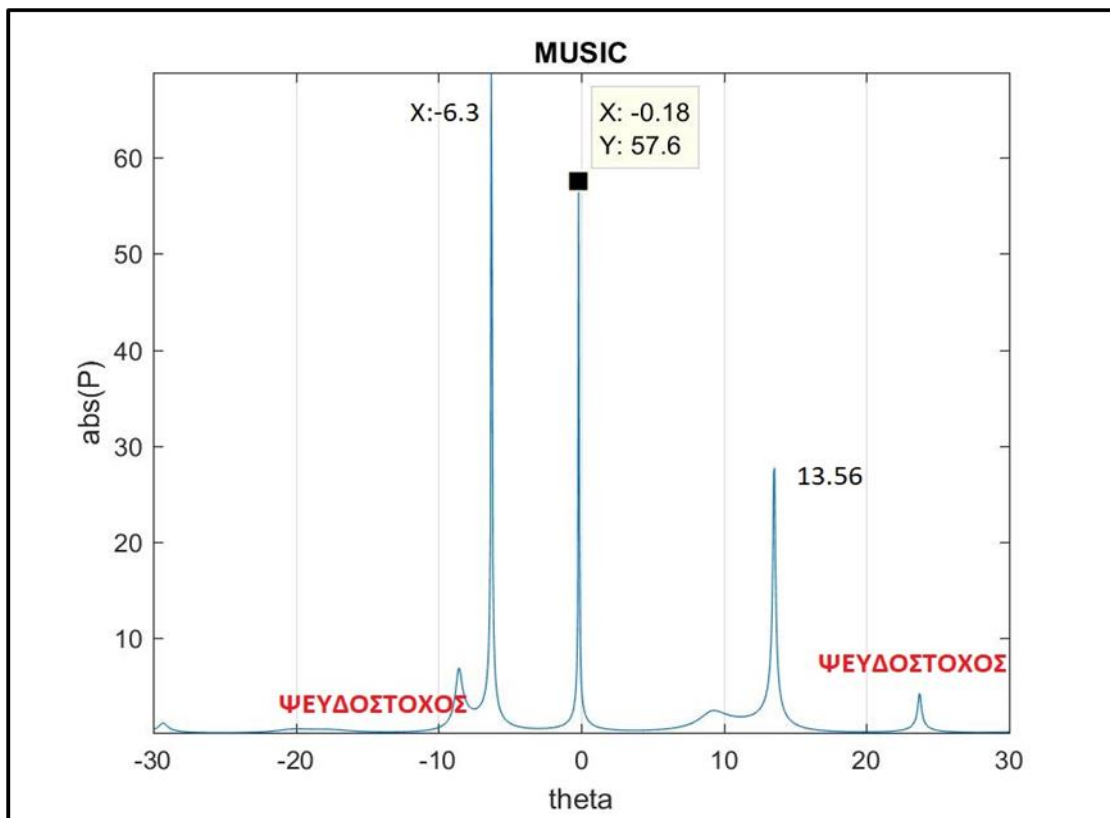
Στις περιπτώσεις που είχαμε εντοπισμό όλων των στόχων, η ακρίβεια κατά διόπτειση με την μέθοδο «Beamforming» και «MUSIC» είναι παρόμοια.

γ. $D=0,75m$.

(1) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-6,27^\circ / -0,16^\circ / 13,52^\circ$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $6,11^\circ$.

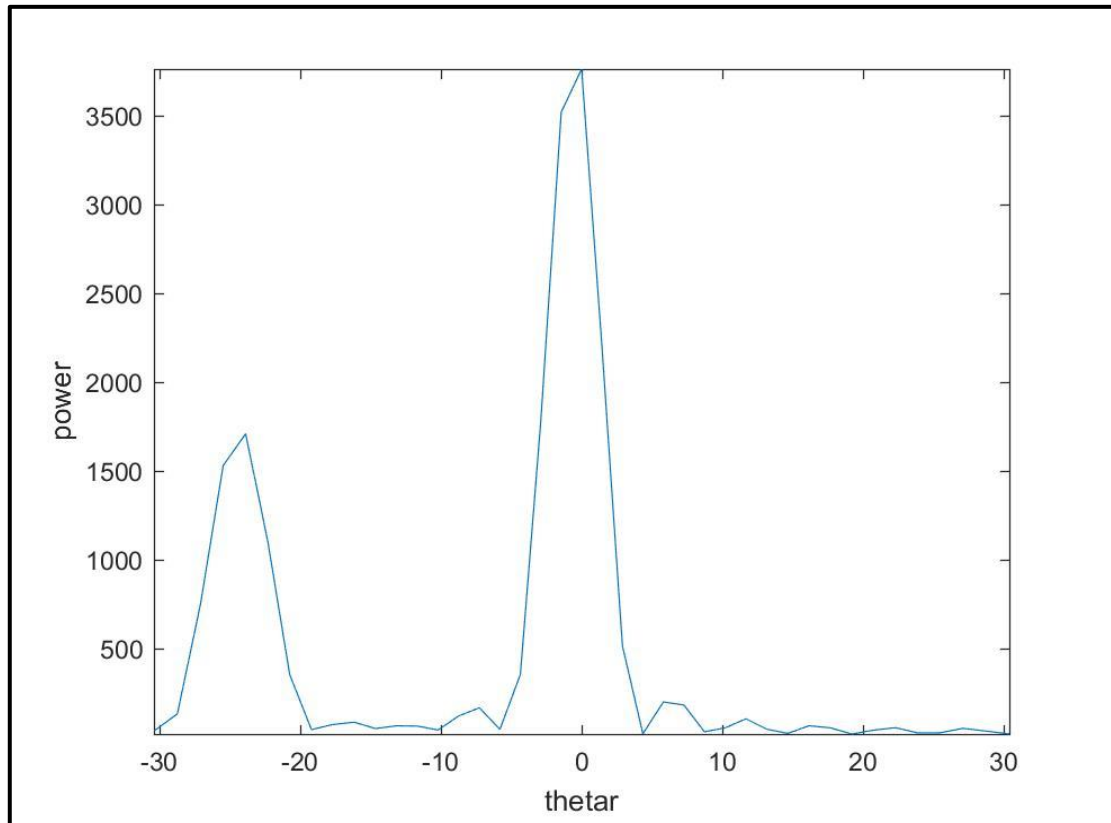


Διάγραμμα 5.2.2.11

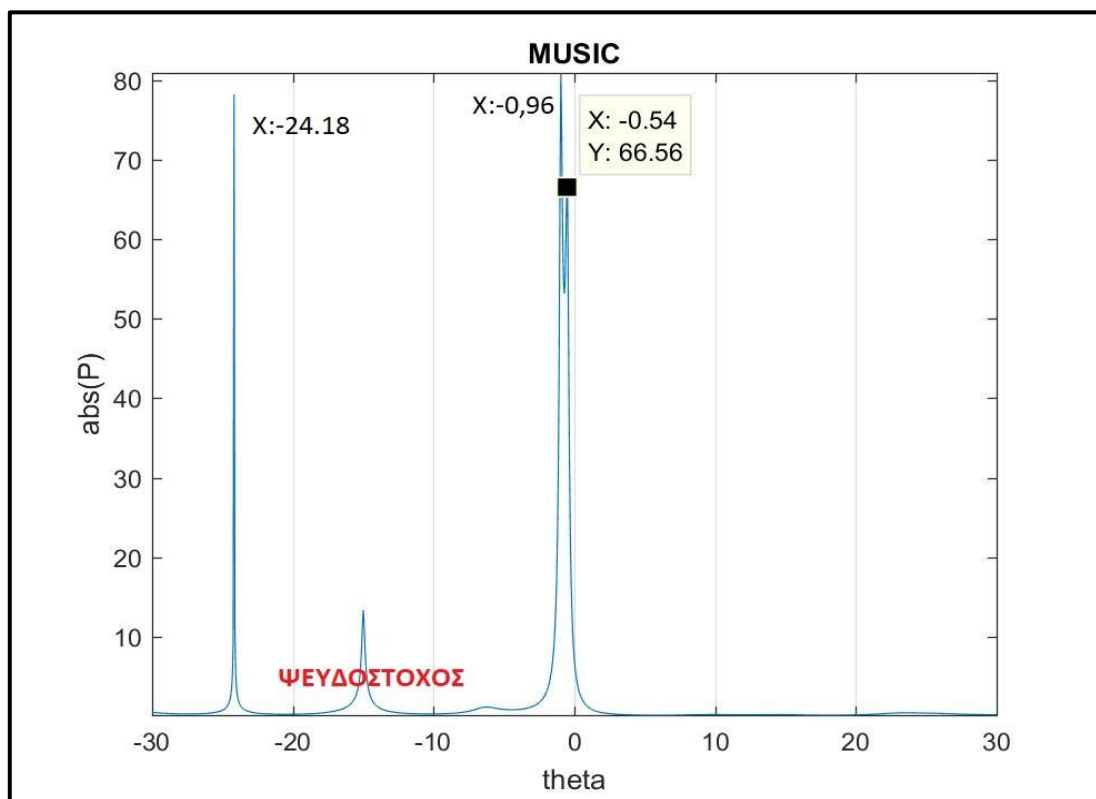


Διάγραμμα 5.2.2.12

(2) Πραγματικές διοπτεύσεις στόχων: $-24,17^\circ / -1,03^\circ / -0,52^\circ$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διοπτεύση: $0,52^\circ$.

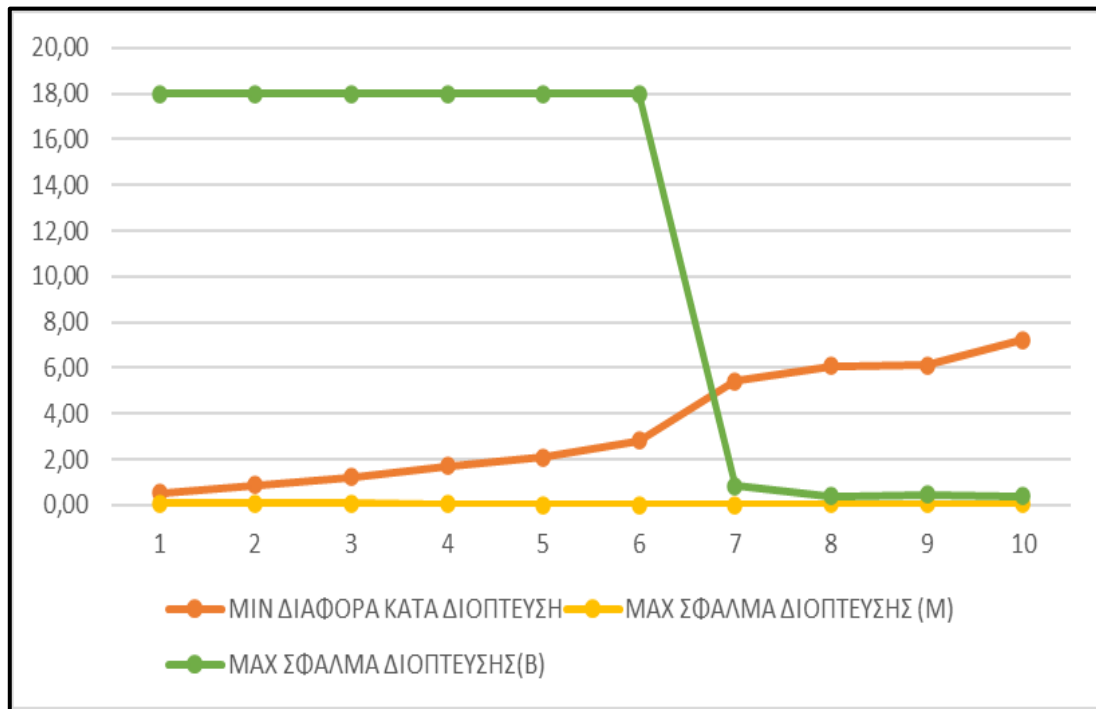


Διάγραμμα 5.2.2.13



Διάγραμμα 5.2.2.14

(3) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.2.2.15

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming», για ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση: $\geq 5^\circ$, επετεύχθη εντοπισμός συνόλου των στόχων.

Με την μέθοδο «MUSIC»:

α/ Επετεύχθη εντοπισμός συνόλου στόχων.

β/ Ελάχιστη διαφορά διόπτευσης μεταξύ στόχων: $0,52^\circ$.

γ/ Μέγιστο σφάλμα κατά διόπτευση: $< 0,07^\circ$.

δ/ Παρουσιάστηκαν ψευδοστόχοι, χαμηλότερης όμως εντάσεως από τους πραγματικούς.

Στις περιπτώσεις που είχαμε εντοπισμό όλων των στόχων, η ακρίβεια κατά διόπτευση με την μέθοδο «Beamforming» και «MUSIC» είναι παρόμοια.

§ 2.3 Συμπεράσματα

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της μεθόδου MUSIC παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 5.2.3.1):

ΑΡΙΘ. ΥΔΡΟΦΩΝΩΝ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΥΔΡΟΦΩΝΩΝ	ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΟΥ ΣΤΟΧΩΝ	ΥΠΑΡΞΗ ΨΕΥΔΟΣΤΟΧΩΝ	ΔΙΑΚΡΙΒΩΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ	ΣΦΑΛΜΑ ΔΙΟΠΤΕΥΣΗΣ
8	0.25	ΌΧΙ	ΌΧΙ	$> 6^\circ$	$< 2^\circ$
	0.5	ΌΧΙ	ΌΧΙ	$> 4^\circ$	$< 1^\circ$
	0.75	ΝΑΙ	ΝΑΙ	$> 1,16^\circ$	$< 0,5^\circ$
16	0.25	ΝΑΙ	ΌΧΙ	$> 1,84^\circ$	$< 0,5^\circ$
	0.5	ΝΑΙ	ΝΑΙ	$> 1,16^\circ$	$< 0,5^\circ$
	0.75	ΝΑΙ	ΝΑΙ	$> 0,52^\circ$	$< 0,07^\circ$

Πίνακας 5.2.3.1

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται ότι:

α. Η μέθοδος «MUSIC» λειτουργεί αποδίδοντας μεγάλης ακρίβειας αποτελέσματα, ακόμα και σε συστοιχίες με μικρό αριθμό υδροφώνων.

β. Η μέθοδος «Beamforming» δεν αποδίδει ικανοποιητικά παρουσιάζοντας «φτωχή» διακριβωτική ικανότητα. Ωστόσο για στόχους των οποίων η διαφορά στην διόπτευση τους είναι: $\geq 12^\circ$ και $\geq 5^\circ$, για τις συστοιχίες των 8 και 16 υδροφώνων αντίστοιχα, καθώς και για αποστάσεις μεταξύ υδροφώνων: $\geq 0,5m$, επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια εντοπισμού, παρόμοια με αυτή της μεθόδου «MUSIC».

γ. Η αύξηση του αριθμού των υδροφώνων της συστοιχίας βελτιώνει την ικανότητα εντοπισμού στόχων.

δ. Η αύξηση της απόστασης μεταξύ των υδροφώνων της συστοιχίας επηρεάζει θετικά τόσο την διακριβωτική ικανότητα όσο και την ακρίβεια της DOA (μείωση σφάλματος διοπτύσεως).

ε. Η αύξηση της απόστασης μεταξύ των υδροφώνων της συστοιχίας έχει ως αποτέλεσμα την παρουσίαση ψευδοστόχων, που ωστόσο είναι μικρότερης έντασης από τους πραγματικούς.

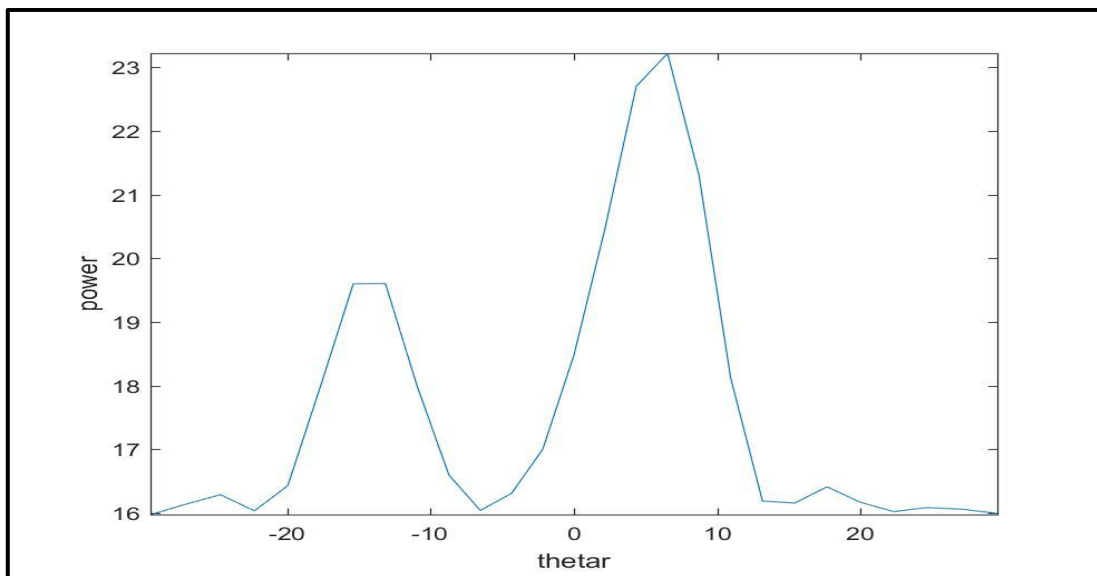
§ 3 Β' Μέρος: Προσομοίωση σε Αυξημένο Περιβάλλον Θορύβου.

Στο δεύτερο μέρος εκτελούνται προσομοιώσεις με σταδιακή μείωση του SNR. Στην συστοιχία των 8 υδροφώνων παρατηρείται μειωμένη απόδοση όταν $\text{SNR} \cong 0$. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η συστοιχία των 16 υδροφώνων, των οποίων τα οριακά αποτελέσματα παρουσιάζονται ακολούθως. Εν συνέχεια εκτελούνται προσομοιώσεις με συστοιχίες των 32 υδροφώνων και ελέγχεται η πιθανή βελτίωση της απόδοσης συγκρίνοντας τα αποτελέσματα.

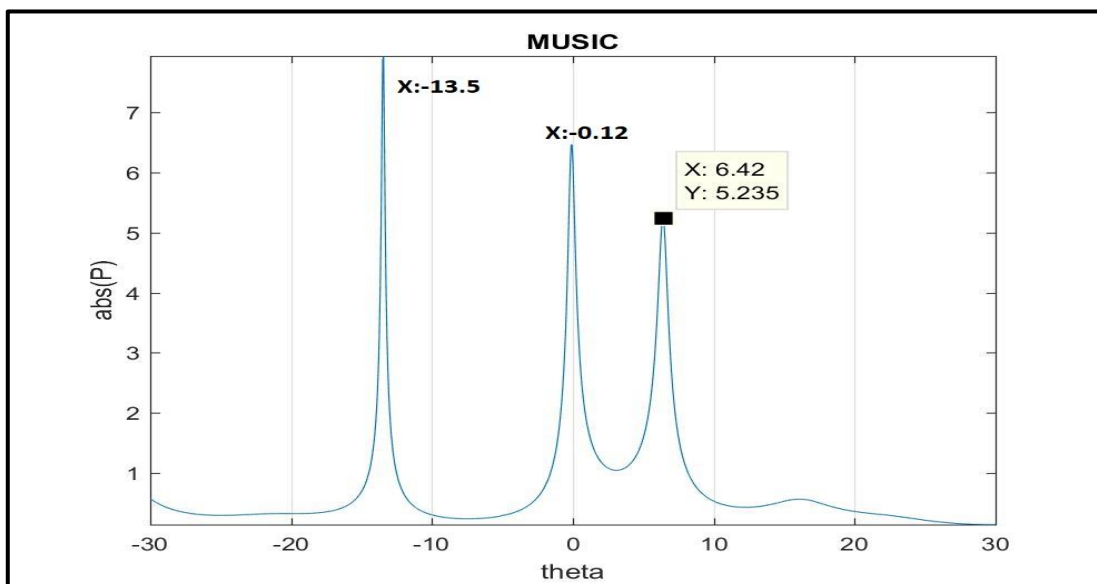
§ 3.1 Προσομοίωση για $\text{SNR} = -12$.

α. Αρ. Υδροφώνων: 16 - $D=0,5\text{m}$.

(1) Πραγματικές διόπτευσεις στόχων: $-13,64^\circ / 0,69^\circ / 6,52^\circ$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση: $5,83^\circ$.

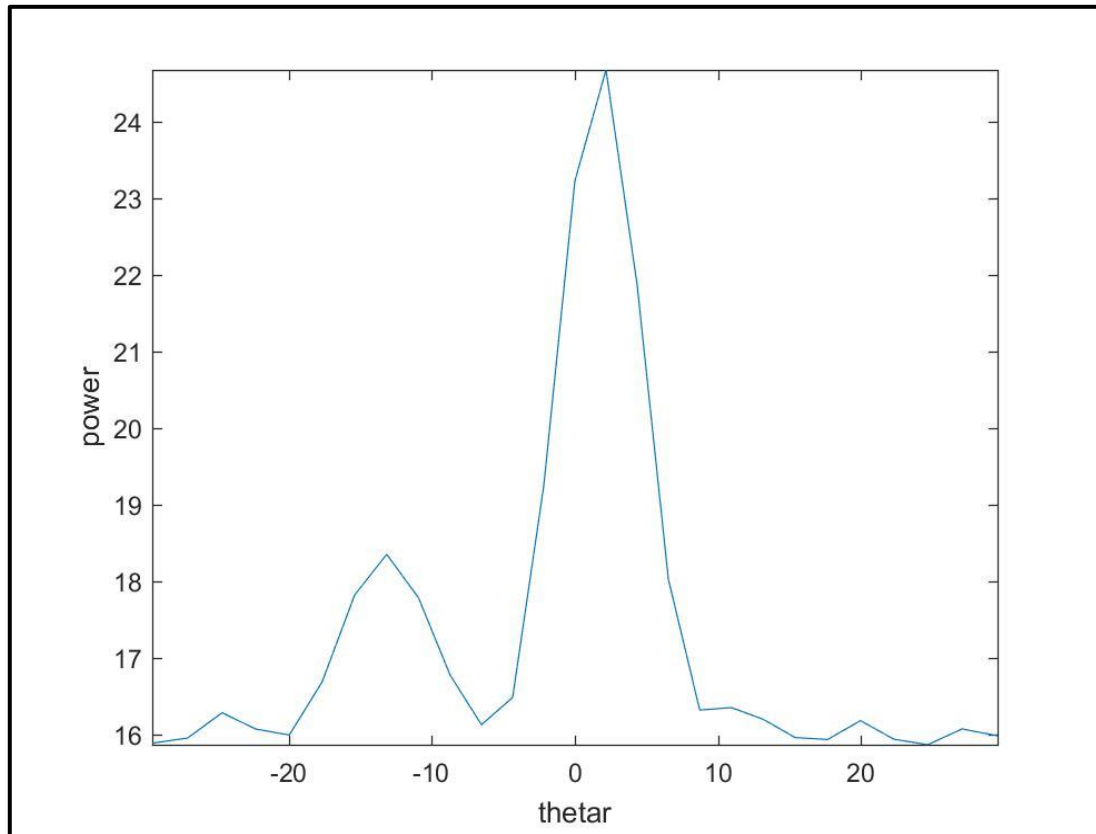


Διάγραμμα 5.3.1.1

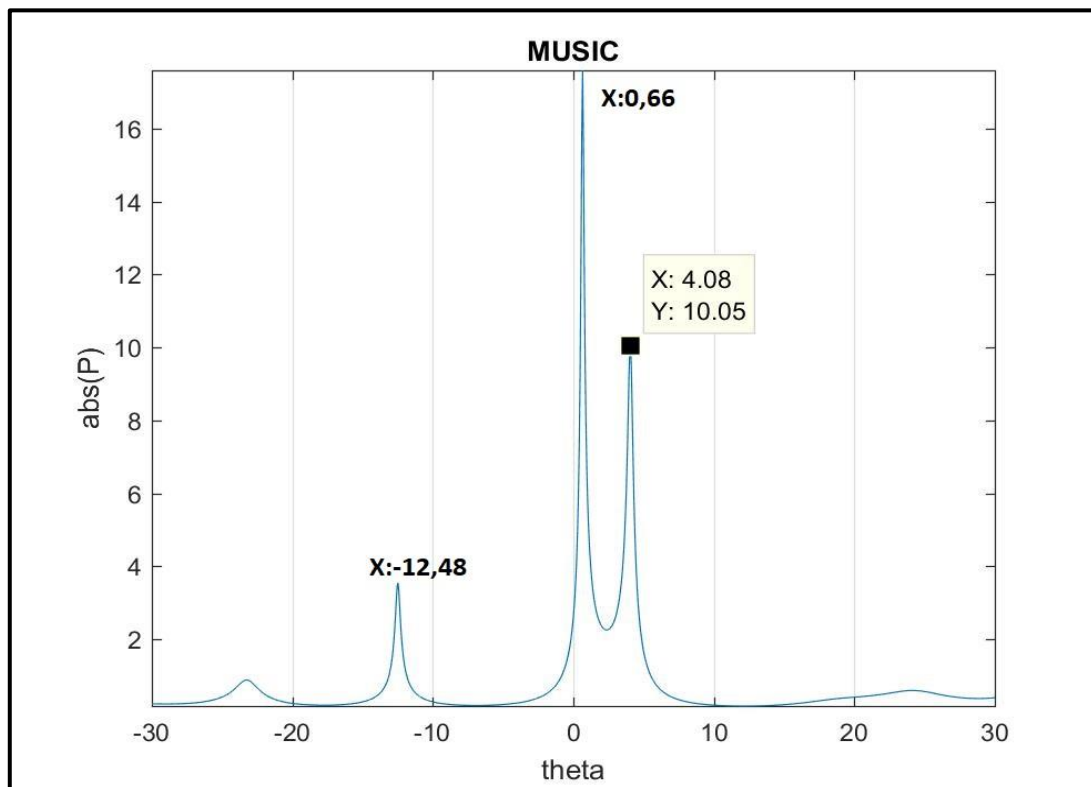


Διάγραμμα 5.3.1.2

(2) Πραγματικές διοπτεύσεις στόχων: $-12,52^{\circ} / 1,23^{\circ} / 4,2^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $2,97^{\circ}$.

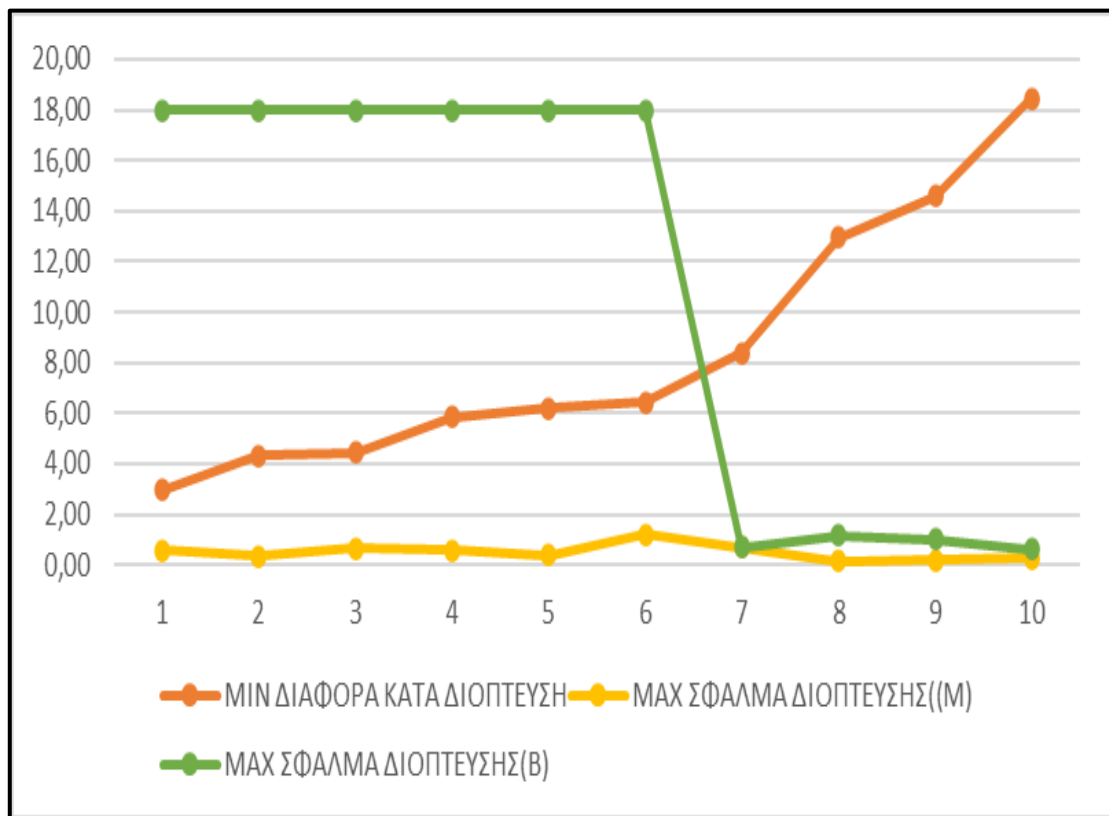


Διάγραμμα 5.3.1.3



Διάγραμμα 5.3.1.4

(3) Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.3.1.5

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming», για ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση: $\geq 8^\circ$, επετεύχθη εντοπισμός συνόλου των στόχων.

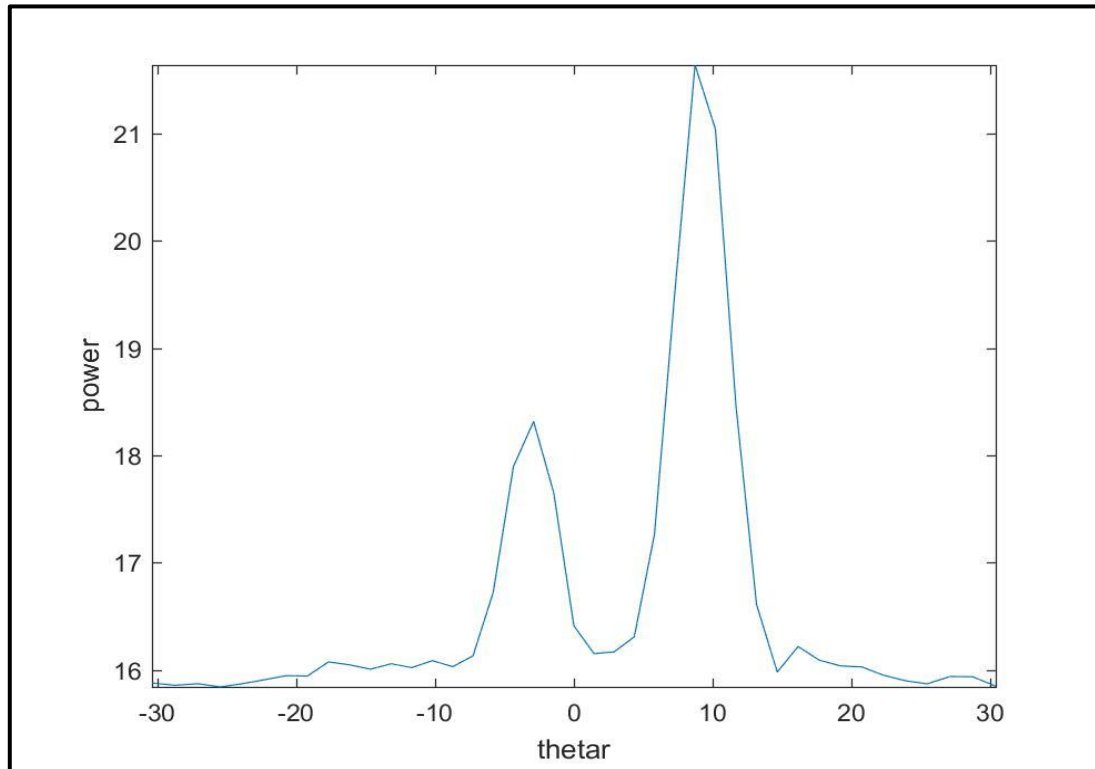
Με την μέθοδο «MUSIC»:

- α/ Επετεύχθη εντοπισμός συνόλου στόχων.
- β/ Ελάχιστη διαφορά διόπτευσης μεταξύ στόχων: $2,97^\circ$.
- γ/ Μέγιστο σφάλμα κατά διόπτευση: $< 1,5^\circ$ ($1,21^\circ$).
- δ/ Δεν παρουσιάστηκαν ψευδοστόχοι.

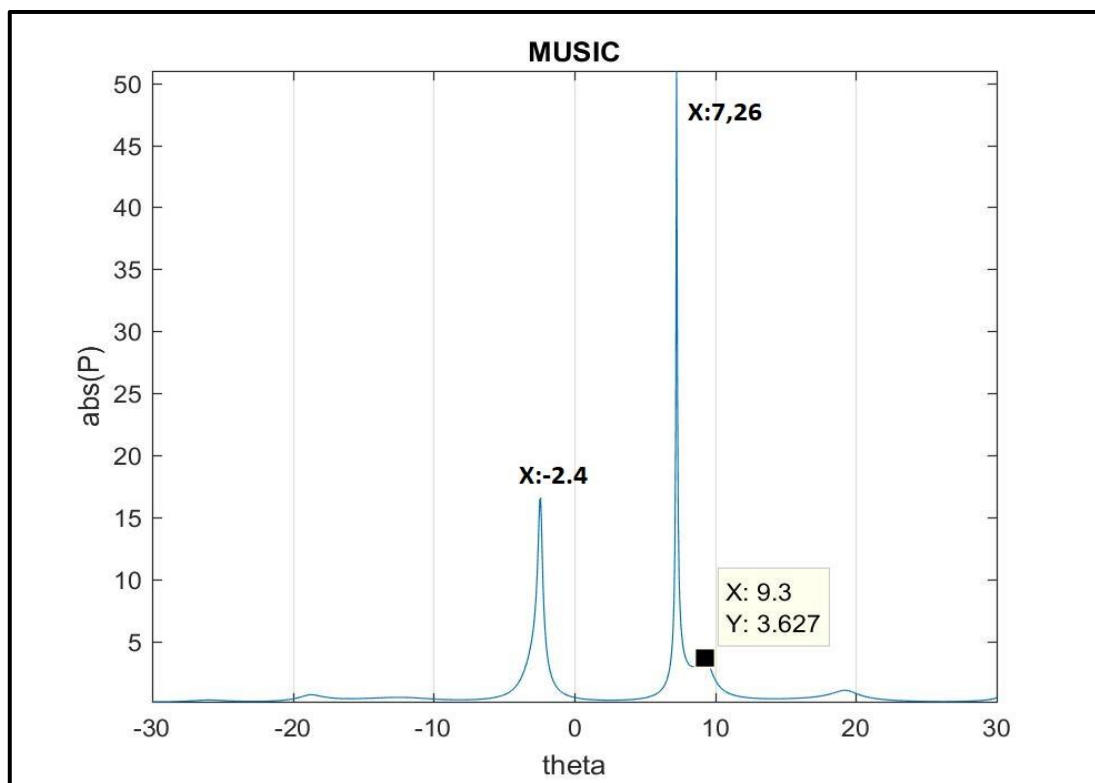
Στις περιπτώσεις που είχαμε εντοπισμό όλων των στόχων, η ακρίβεια κατά διόπτευση με την μέθοδο «Beamforming» και «MUSIC» είναι παρόμοια.

β. Αρ. Υδροφώνων:16 - D=0,75m.

(1) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-3,29^{\circ} / 8,41^{\circ} / 9,55^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $1,15^{\circ}$.

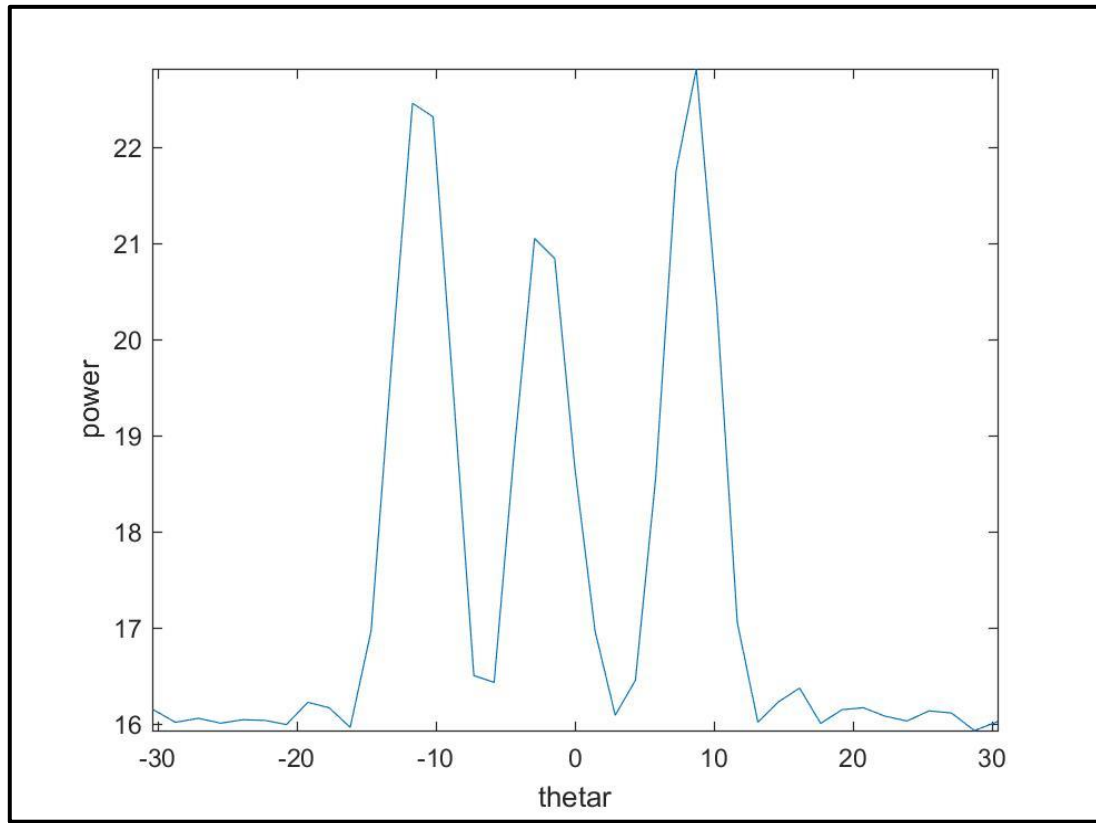


Διάγραμμα 5.3.1.6

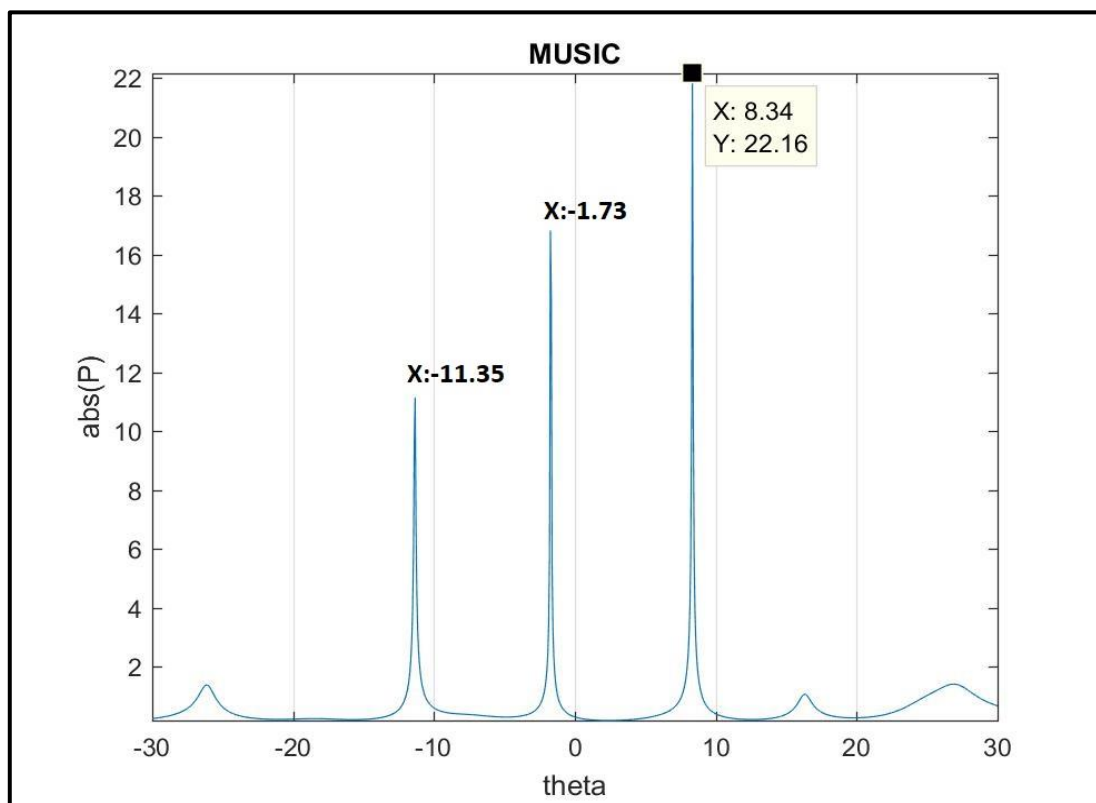


Διάγραμμα 5.3.1.7

(2) Πραγματικές διοπτεύσεις στόχων: $-11,35^{\circ} / -1,73^{\circ} / 8,31^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: 9.62° .

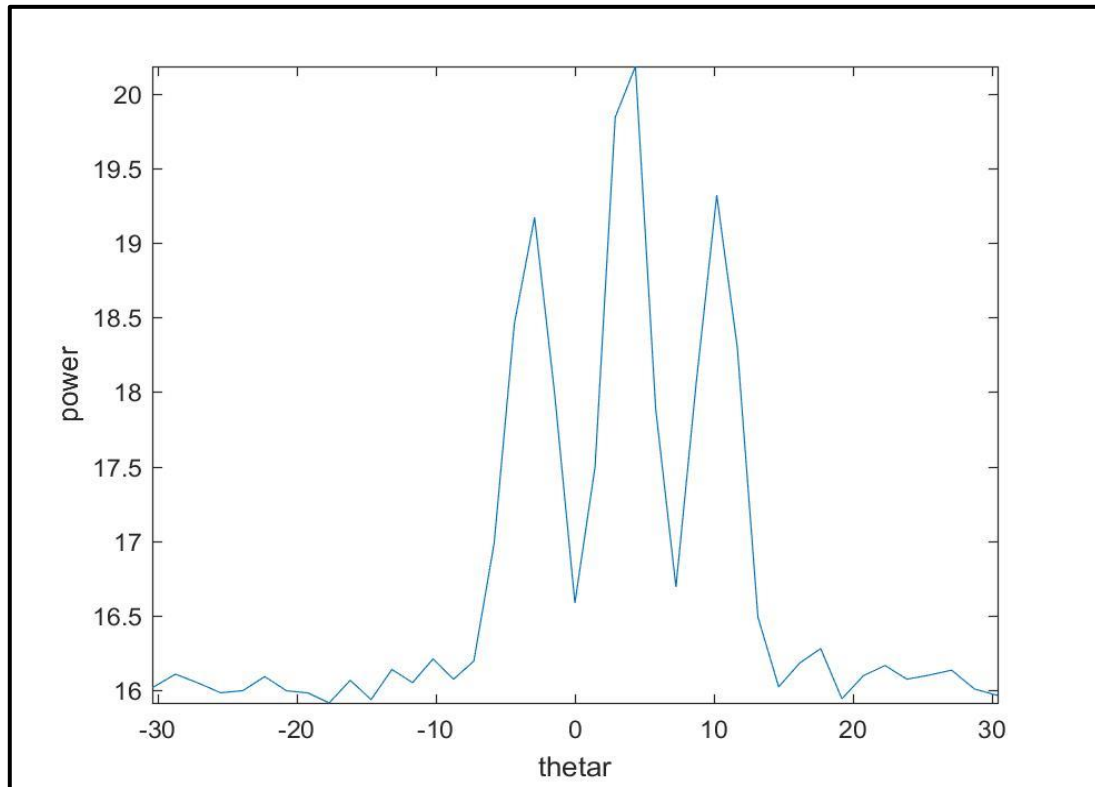


Διάγραμμα 5.3.1.8

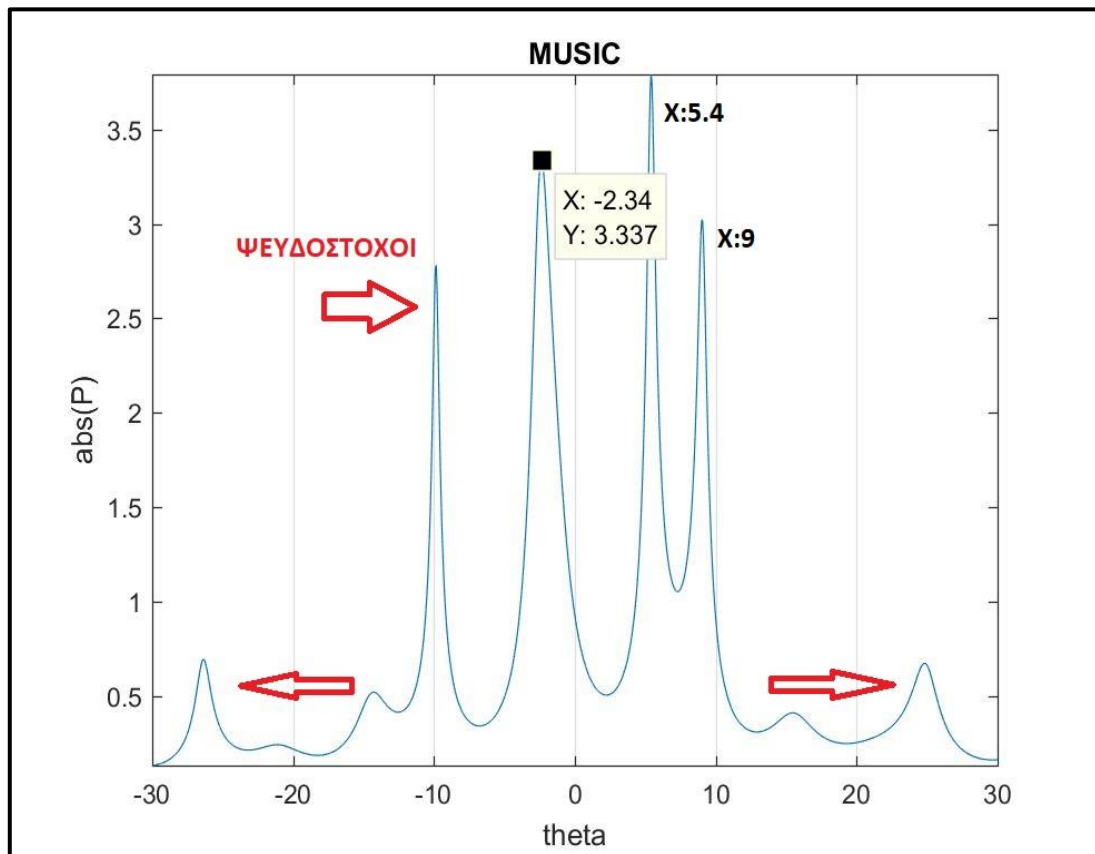


Διάγραμμα 5.3.1.9

(3) Πραγματικές διόπτευσες στόχων: $-3,16^0 / 4,18^0 / 9,8^0$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση: $5,61^0$.

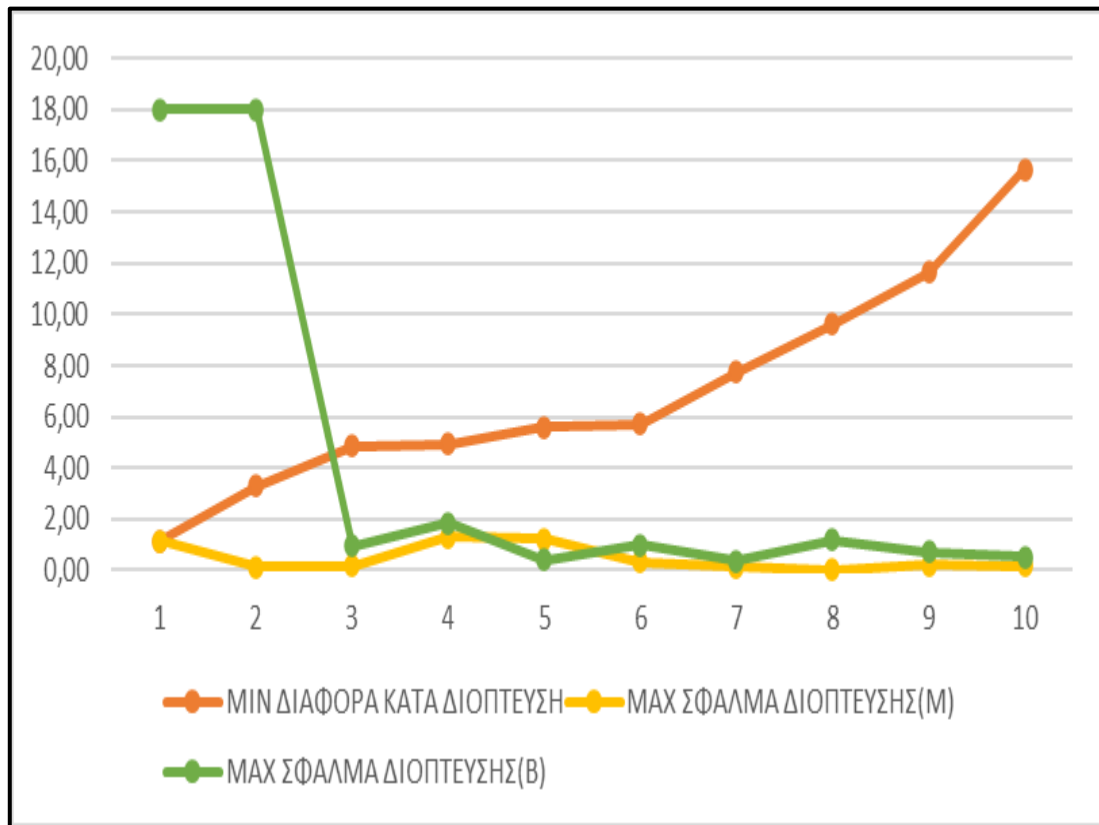


Διάγραμμα 5.3.1.10



Διάγραμμα 5.3.1.11

(4) Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.3.1.12

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming», για ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση: $\geq 4^\circ$, επετευχθεί εντοπισμός συνόλου των στόχων με μεγάλη ακρίβεια.

Με την μέθοδο «MUSIC»:

α/ Επετεύχθη εντοπισμός συνόλου στόχων.

β/ Ελάχιστη διαφορά διόπτευσης μεταξύ στόχων: $1,15^\circ$.

γ/ Το μέγιστο σφάλμα κατά διόπτευση είναι: $< 1,5^\circ (1,3^\circ)$.

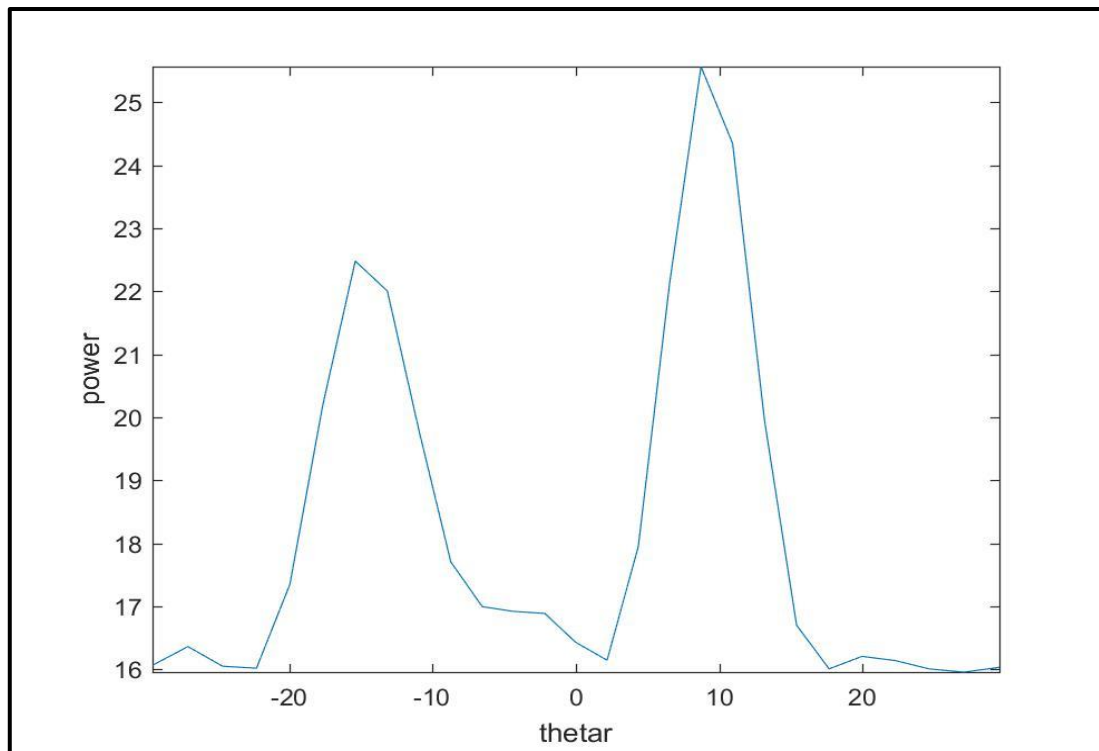
δ/ Παρουσιάζονται ψευδοστόχοι κατά περίπτωση οι οποίοι όμως είναι μικρότερης ισχύος από τους πραγματικούς.

Στις περιπτώσεις που είχαμε εντοπισμό όλων των στόχων, η ακρίβεια κατά διόπτευση με την μέθοδο «Beamforming» και «MUSIC» είναι παρόμοια.

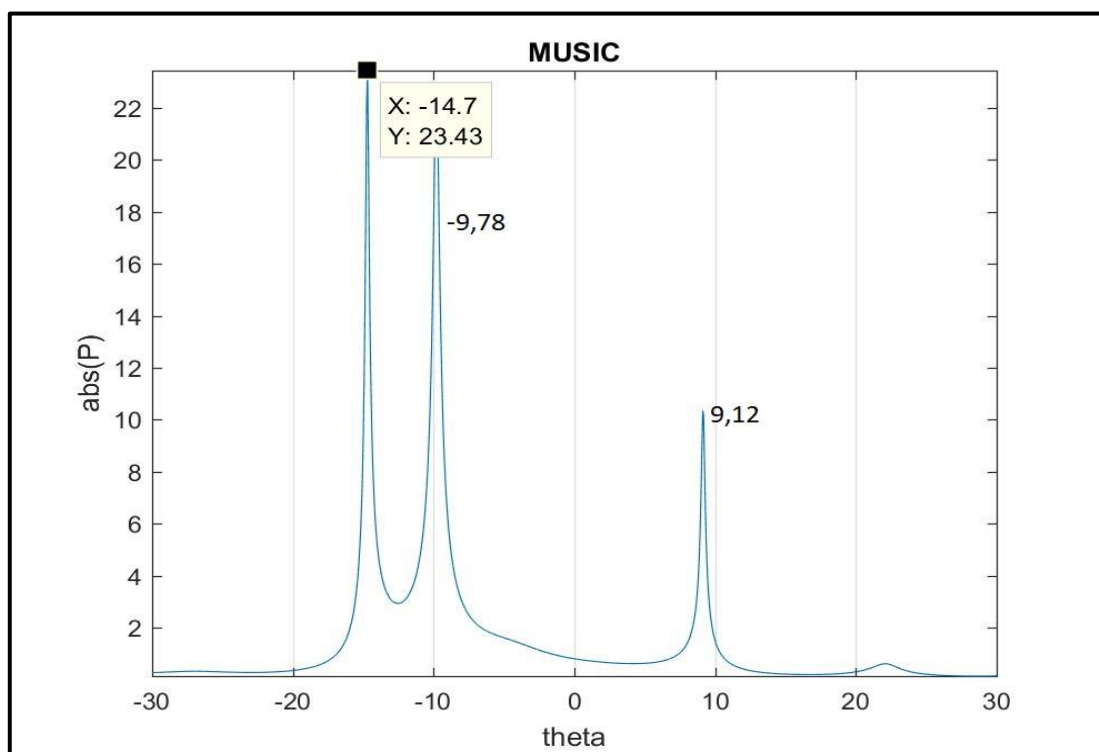
§ 3.2 Προσομοίωση για $SNR = -13$

α. Αρ. Υδροφώνων: 16 - $D=0,5m$.

(1) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-14,83^\circ / -9,04^\circ / 9,49^\circ$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $5,79^\circ$.

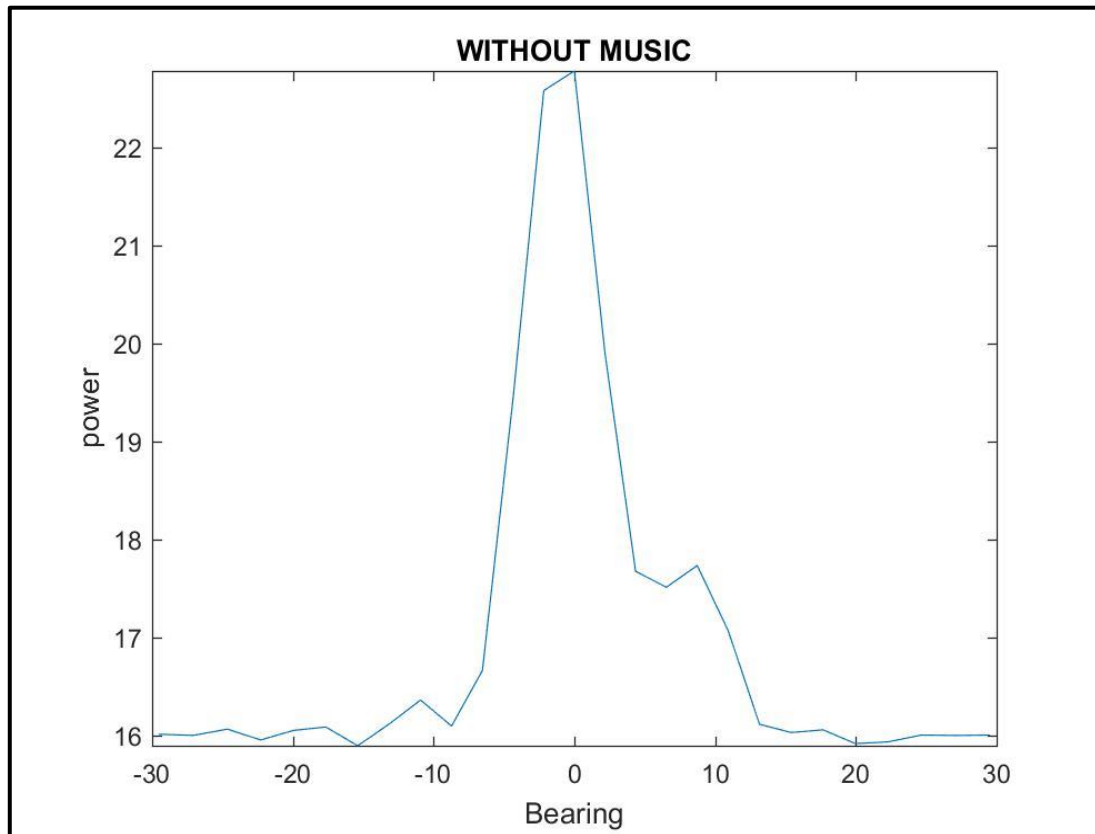


Διάγραμμα 5.3.2.1

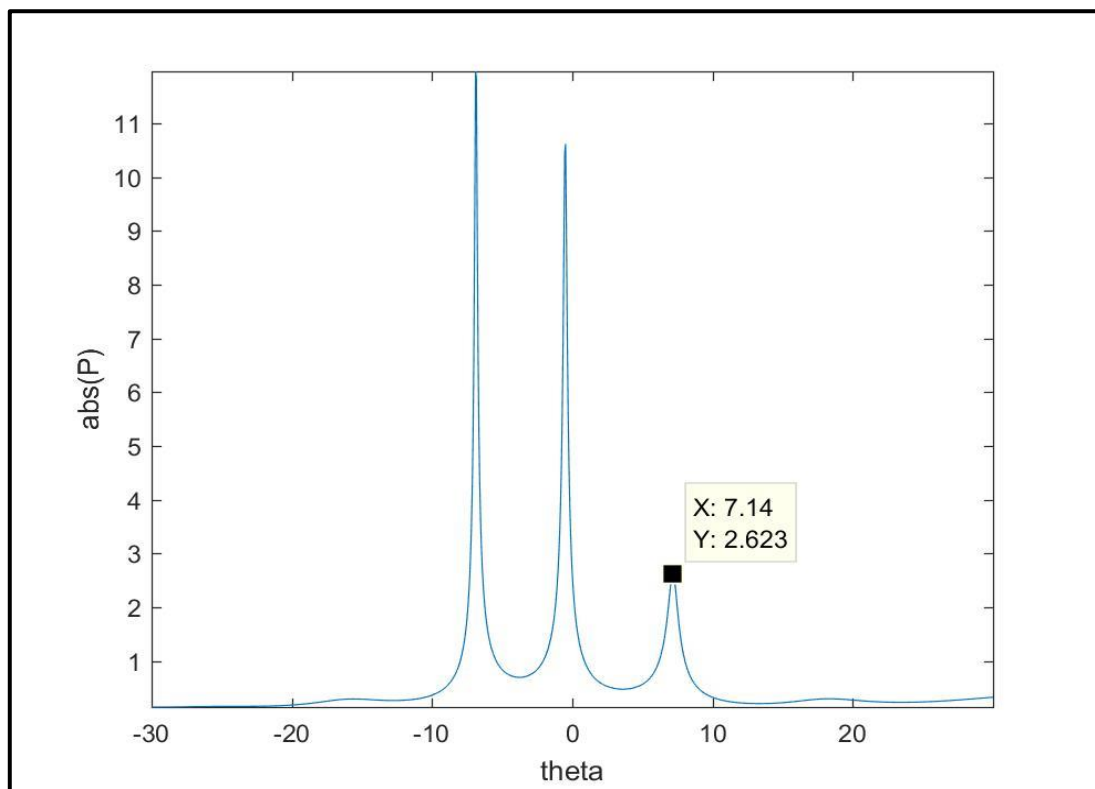


Διάγραμμα 5.3.2.2

(2) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-2,09^{\circ} / -0,41^{\circ} / 7,72^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διοπτρέυση: $1,67^{\circ}$.

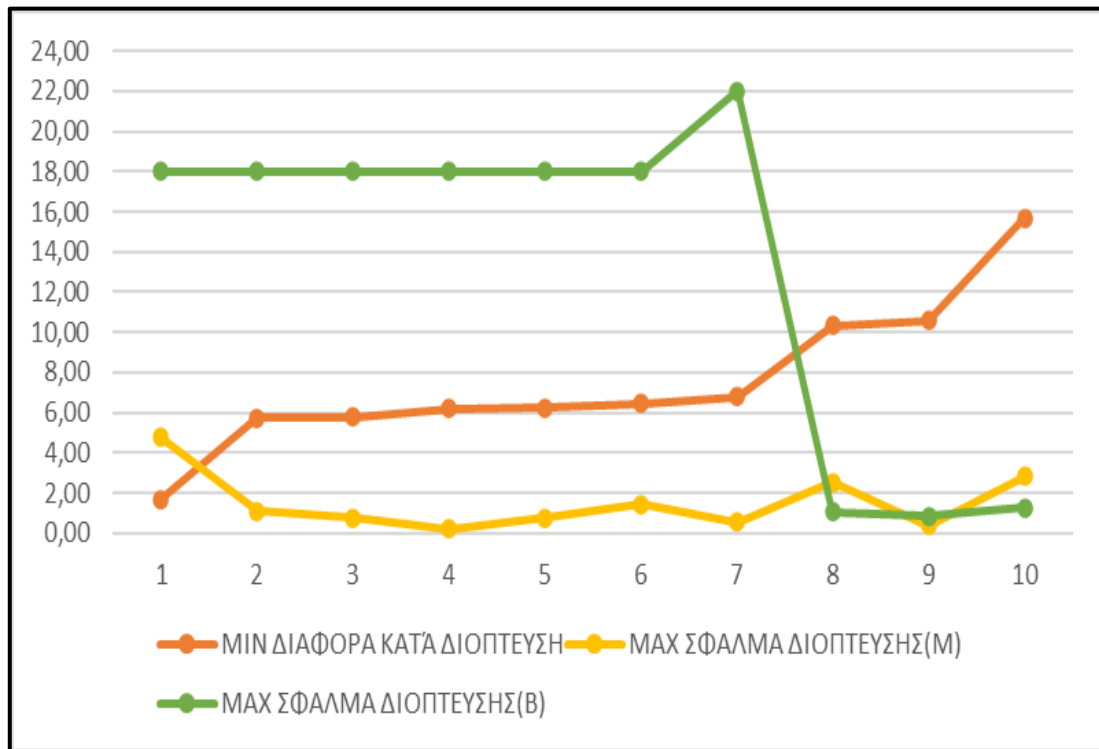


Διάγραμμα 5.3.2.3



Διάγραμμα 5.3.2.4

(3) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.3.2.5

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming», για ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση: $\geq 10^\circ$, επετευχθη εντοπισμός συνόλου των στόχων με μεγάλη ακρίβεια.

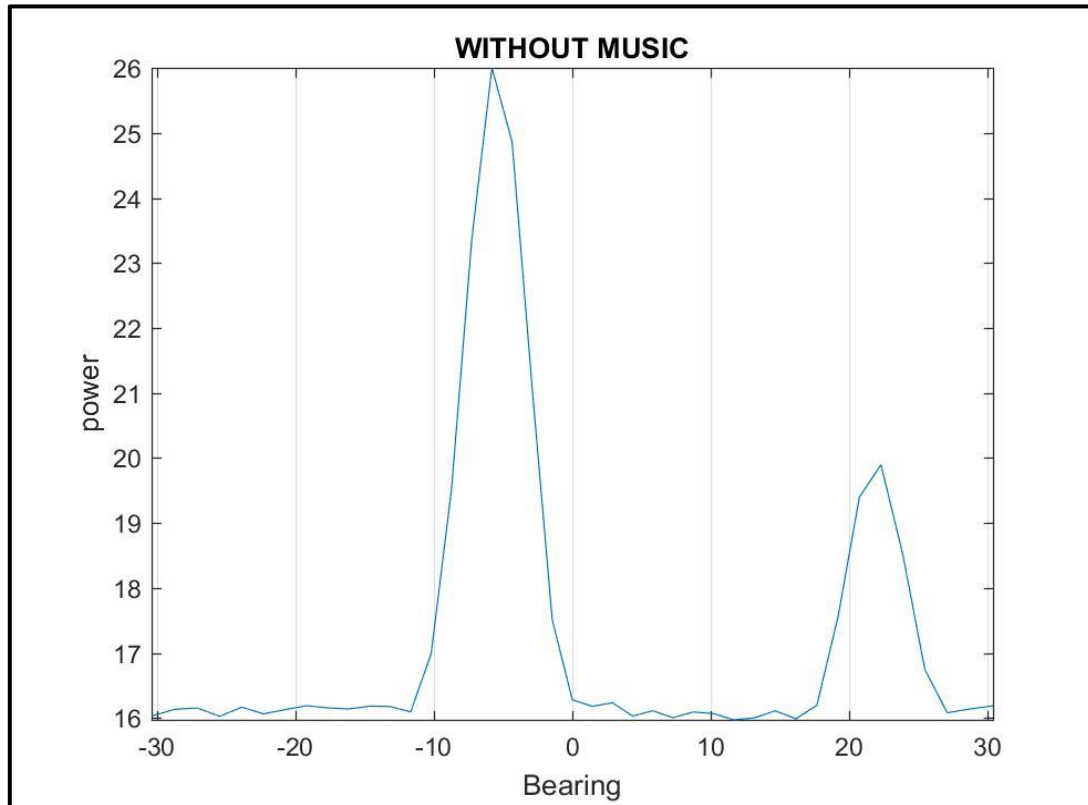
Με την μέθοδο «MUSIC»:

- α/ Επετεύχθη εντοπισμός συνόλου στόχων.
- β/ Ελάχιστη διαφορά διόπτευσης μεταξύ στόχων: $1,67^\circ$.
- γ/ Μέγιστο σφάλμα κατά διόπτευση: $4,75^\circ$ / *Μ.Ο*: $1,53^\circ$
- δ/ Δεν παρουσιάζονται ψευδοστόχοι.

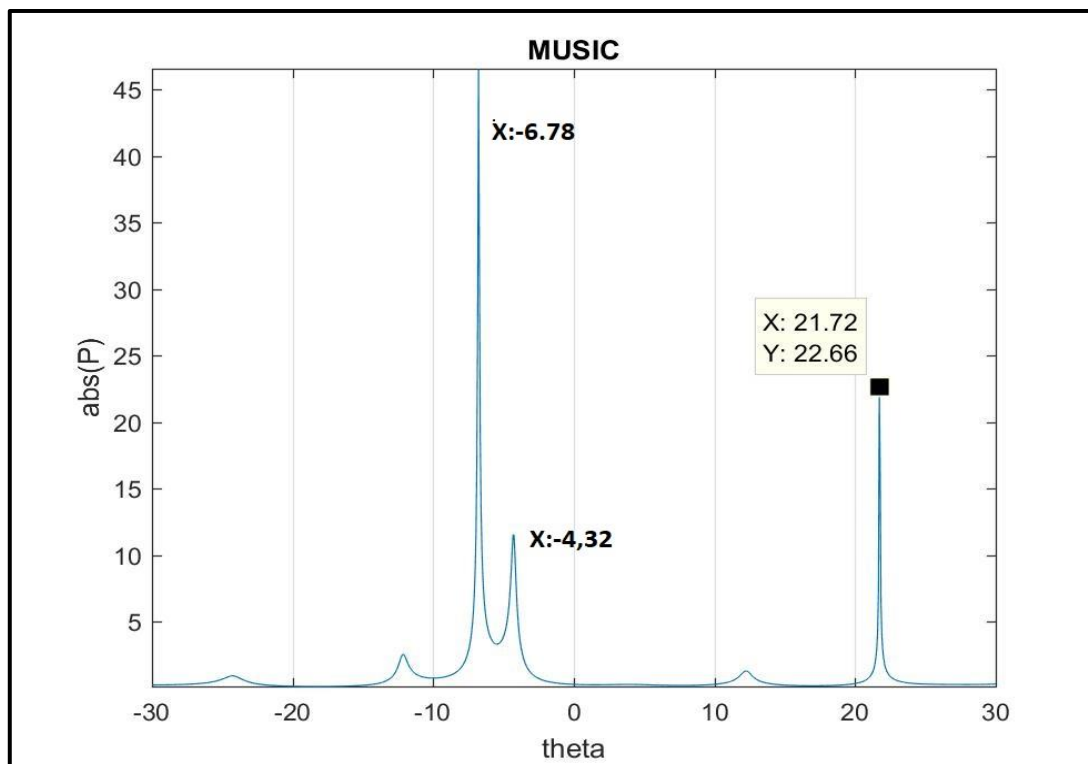
Στις περιπτώσεις που επιτυγχάνεται εντοπισμός όλων των στόχων, η ακρίβεια κατά διόπτευση με την μέθοδο «Beamforming» και «MUSIC» είναι παρόμοια.

β. Αρ. Υδρόφωνων:16 - D=0,75m.

(1) Πραγματικές διοπτεύσεις στόχων: $-7,11^{\circ} / -4,19^{\circ} / 21,75^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διοπτεύση: $2,92^{\circ}$.

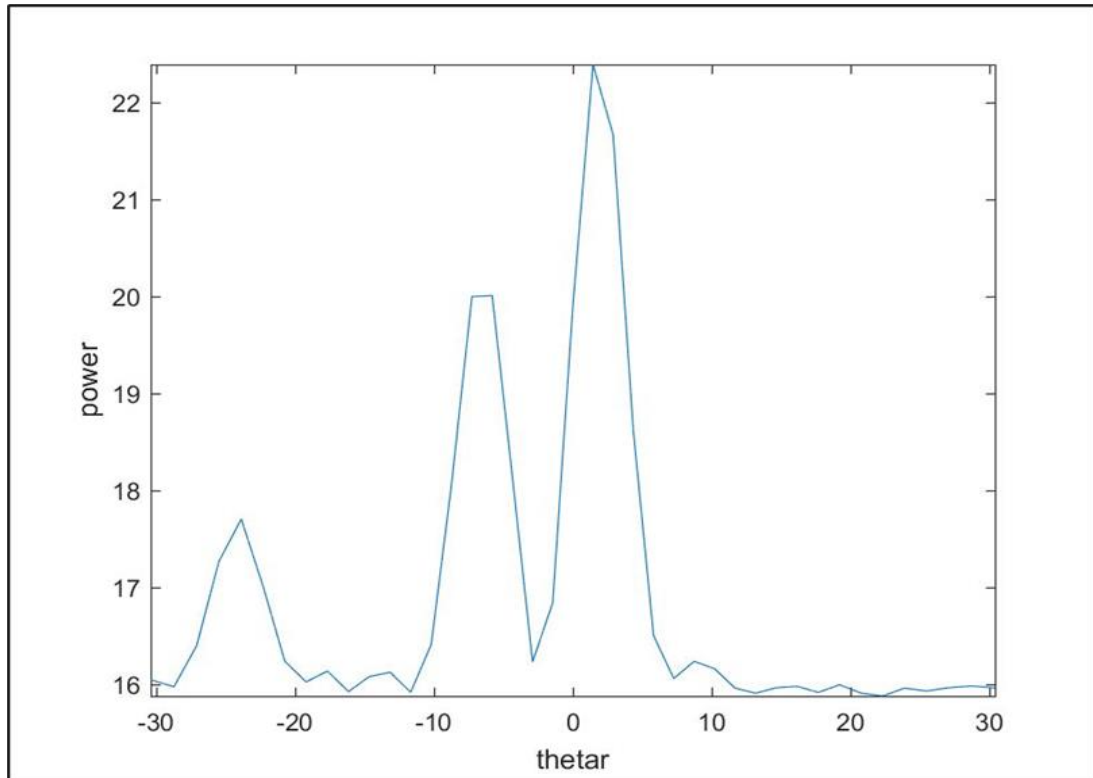


Διάγραμμα 5.3.2.6

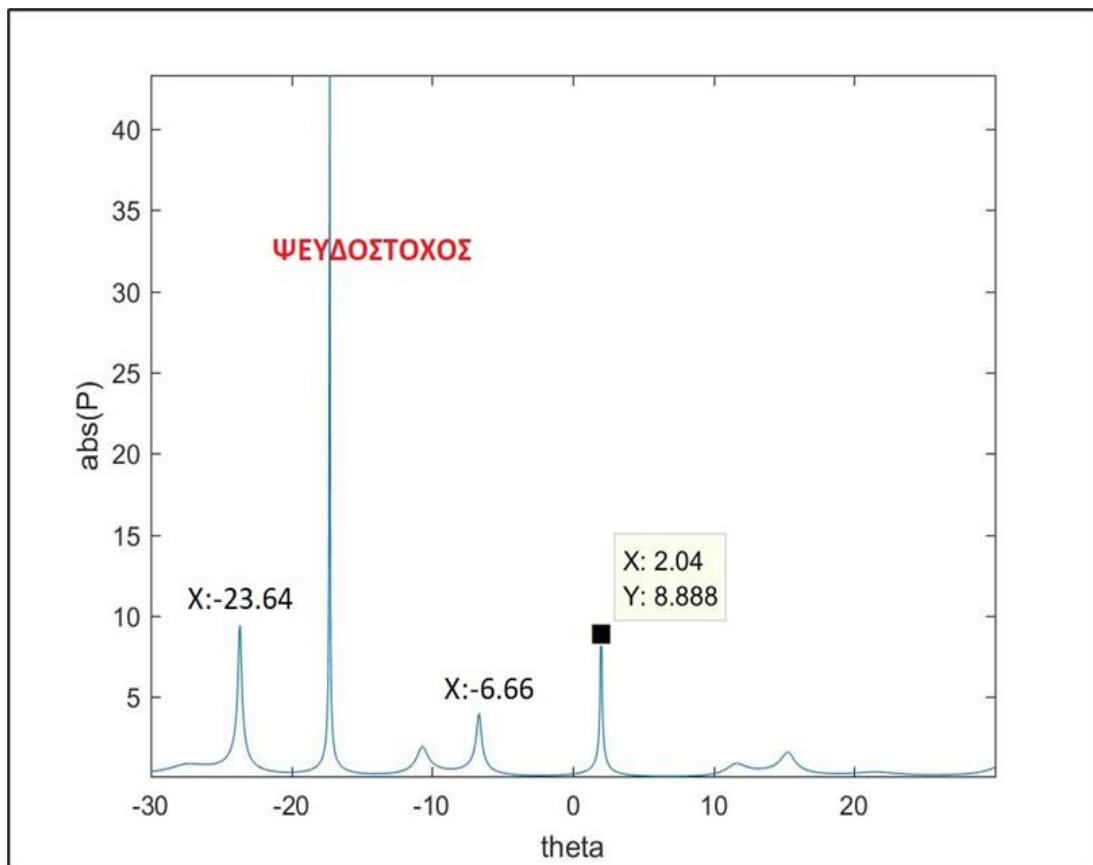


Διάγραμμα 5.3.2.7

(2) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-23,94^{\circ} / -6,66^{\circ} / 1,98^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $8,64^{\circ}$.

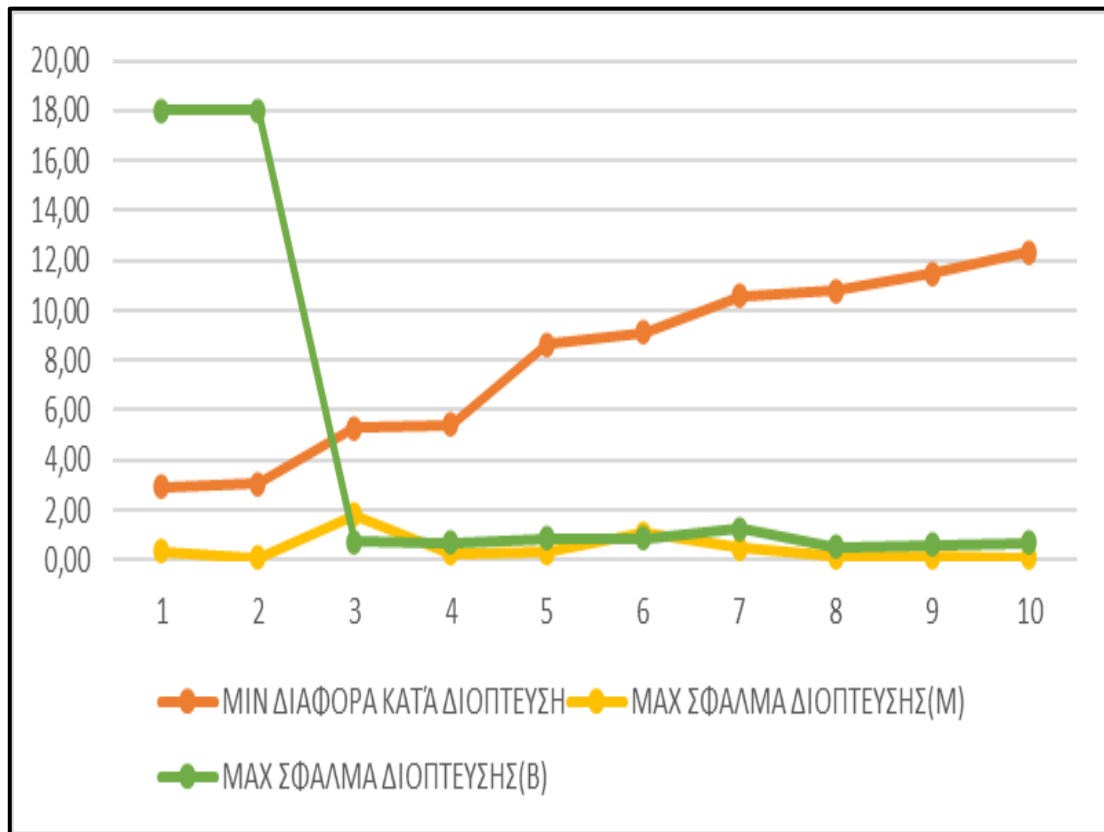


Διάγραμμα 5.3.2.8



Διάγραμμα 5.3.2.9

(3) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.3.2.10

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming», για ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση: $\geq 5^\circ$, επετεύχθη εντοπισμός συνόλου των στόχων με μεγάλη ακρίβεια.

Με την μέθοδο «MUSIC»:

α/ Επετεύχθη εντοπισμός συνόλου στόχων.

β/ Ελάχιστη διαφορά διόπτευσης μεταξύ στόχων: 2.92° .

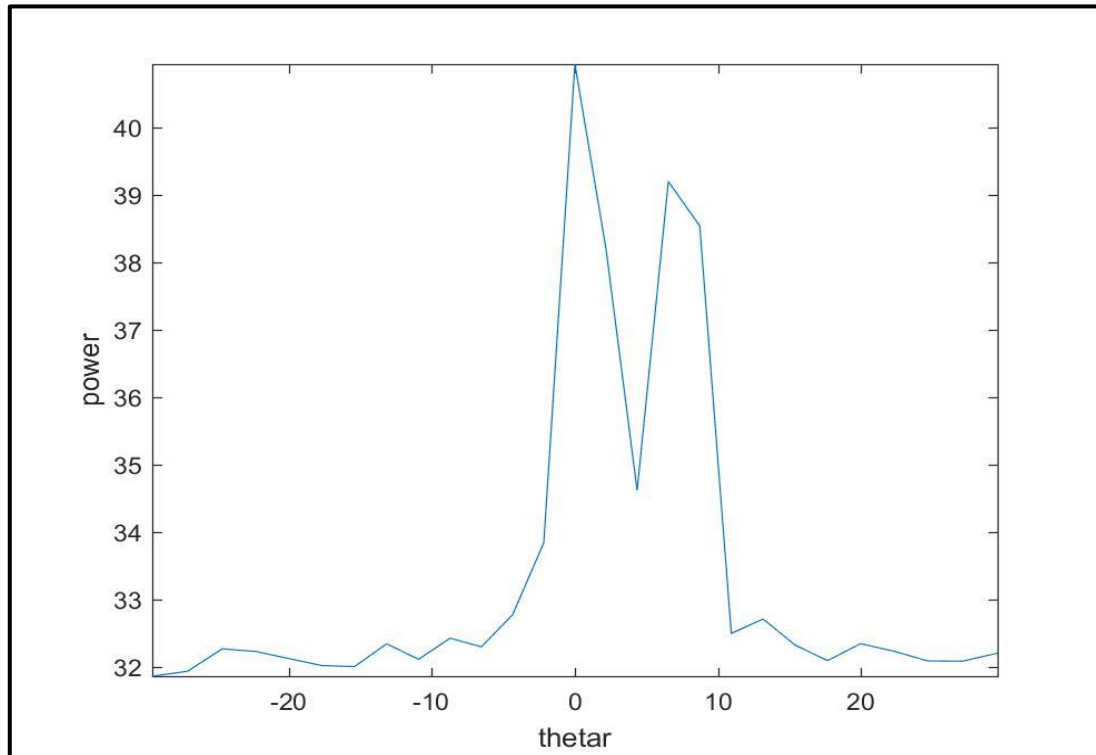
γ/ Το μέγιστο σφάλμα κατά διόπτευση: $< 2^\circ$ (1.83°).

δ/ Παρουσιάζονται ψευδοστόχοι κατά περίπτωση οι οποίοι είναι μεγαλύτερης ισχύος από τους πραγματικούς.

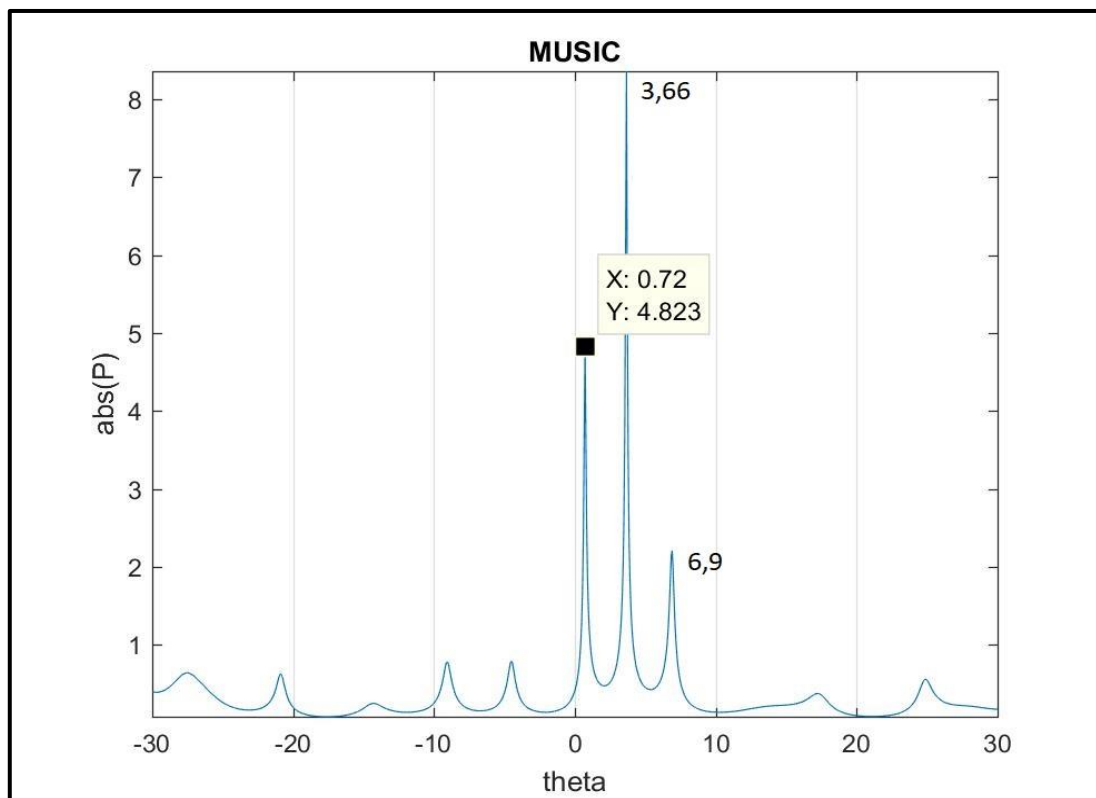
Στις περιπτώσεις που επιτυγχάνεται εντοπισμός όλων των στόχων, η ακρίβεια κατά διόπτευση με την μέθοδο «Beamforming» και «MUSIC» είναι παρόμοια.

γ. Αρ. Υδροφώνων:32 - D=0,5m.

(1) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $0,69^\circ$ / $3,8^\circ$ / $6,82^\circ$. Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $3,01^\circ$.

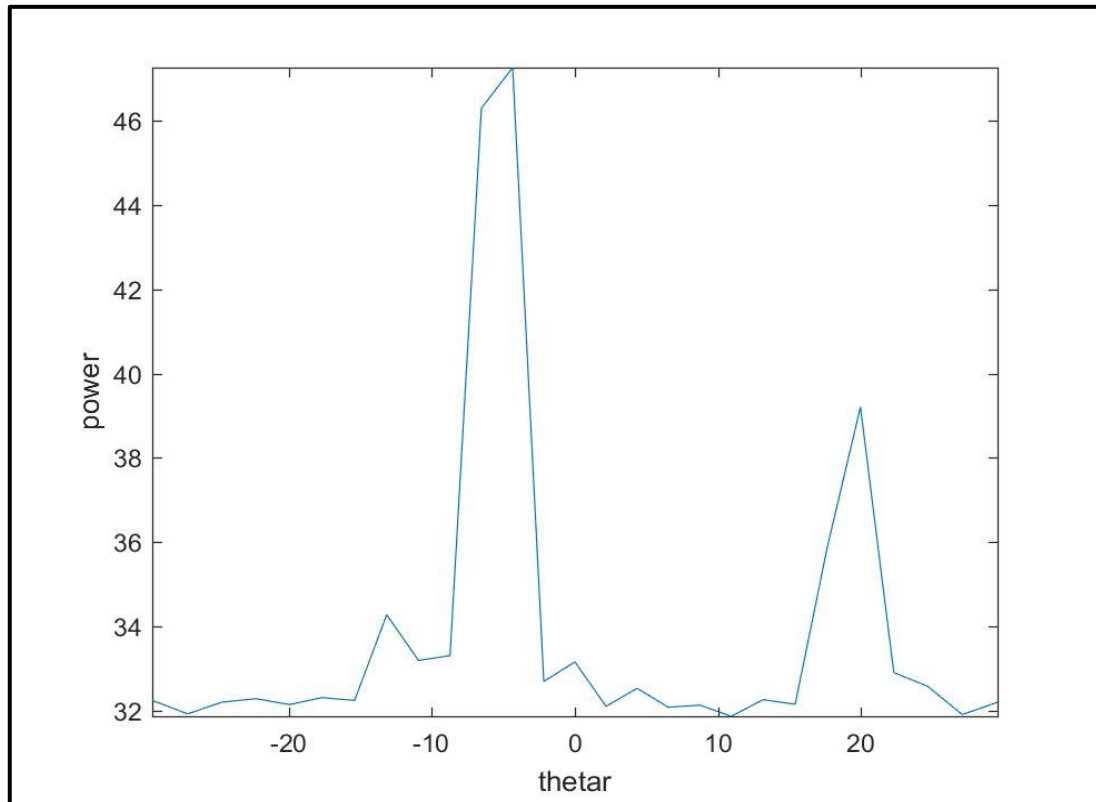


Διάγραμμα 5.3.2.11

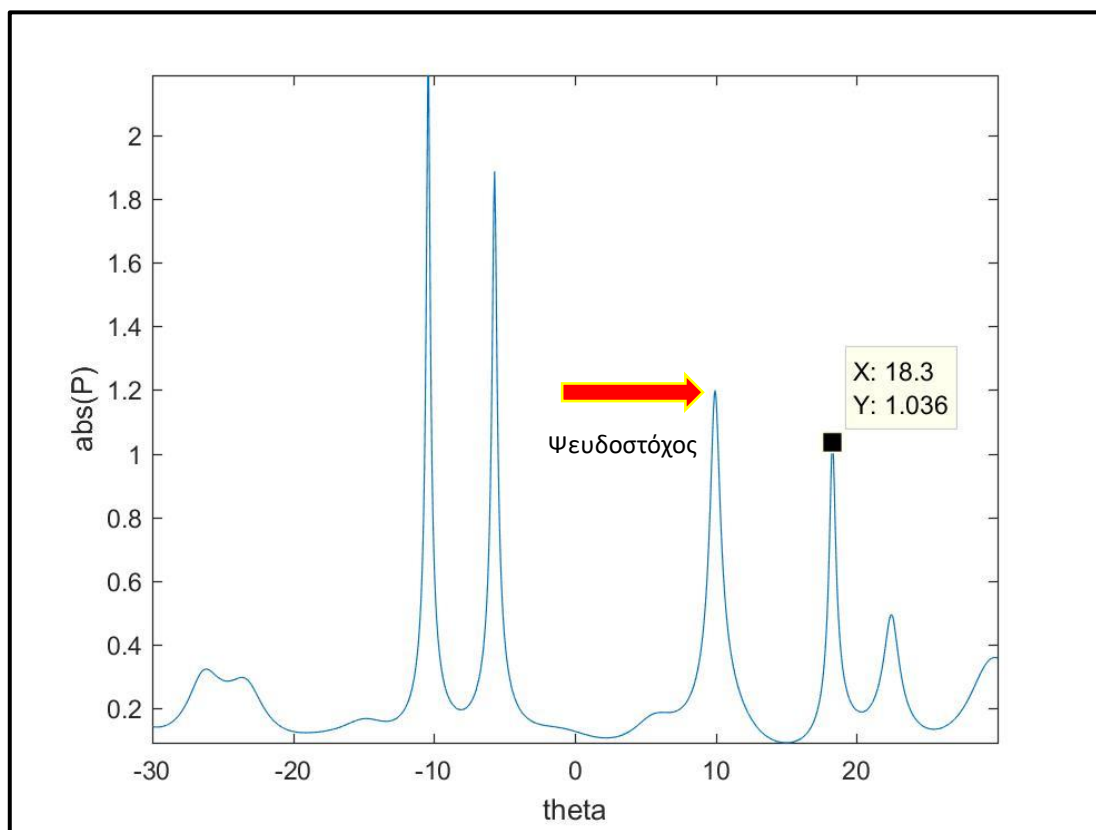


Διάγραμμα 5.3.2.12

(2) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-11,52^\circ / -5,45^\circ / 19,26^\circ$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $6,06^\circ$.

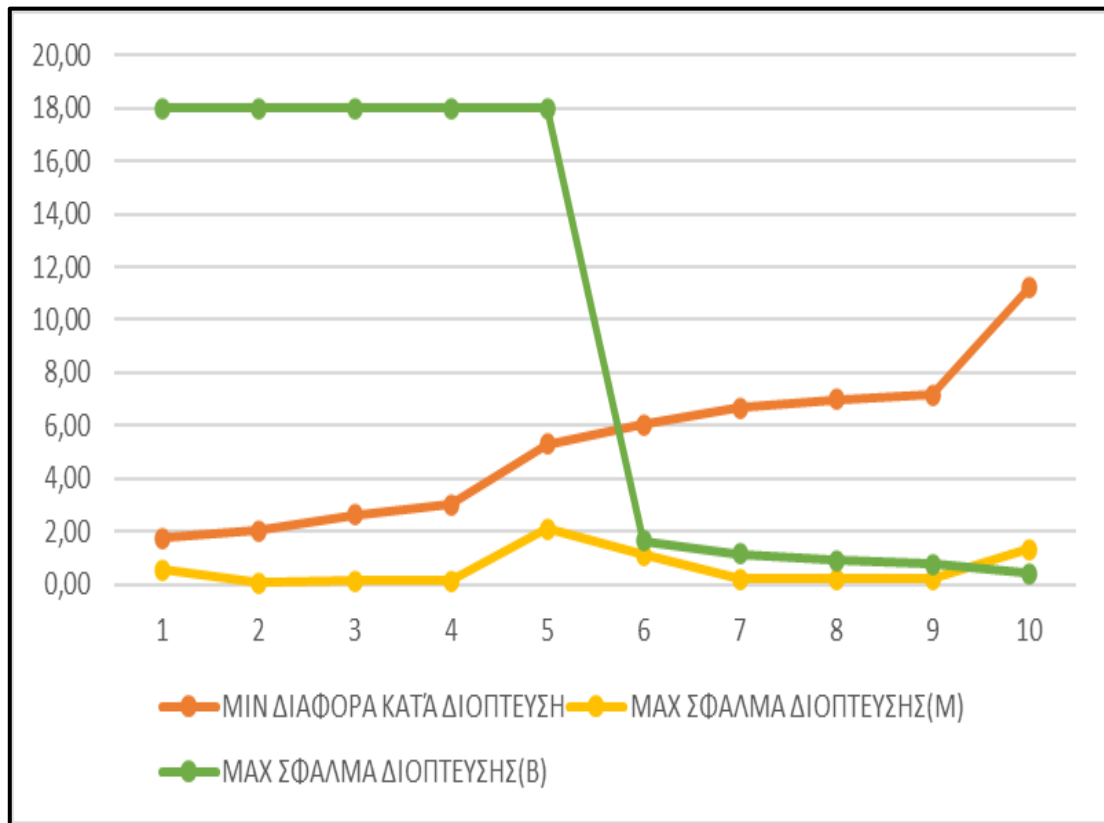


Διάγραμμα 5.3.2.13



Διάγραμμα 5.3.2.14

(3) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.3.2.15

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming», για ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση: $\geq 6^\circ$, επετεύχθη εντοπισμός συνόλου των στόχων με μεγάλη ακρίβεια.

Με την μέθοδο «MUSIC»:

α/ Επετεύχθη εντοπισμός συνόλου στόχων.

β/ Ελάχιστη διαφορά διόπτευσης μεταξύ στόχων: $1,74^\circ$.

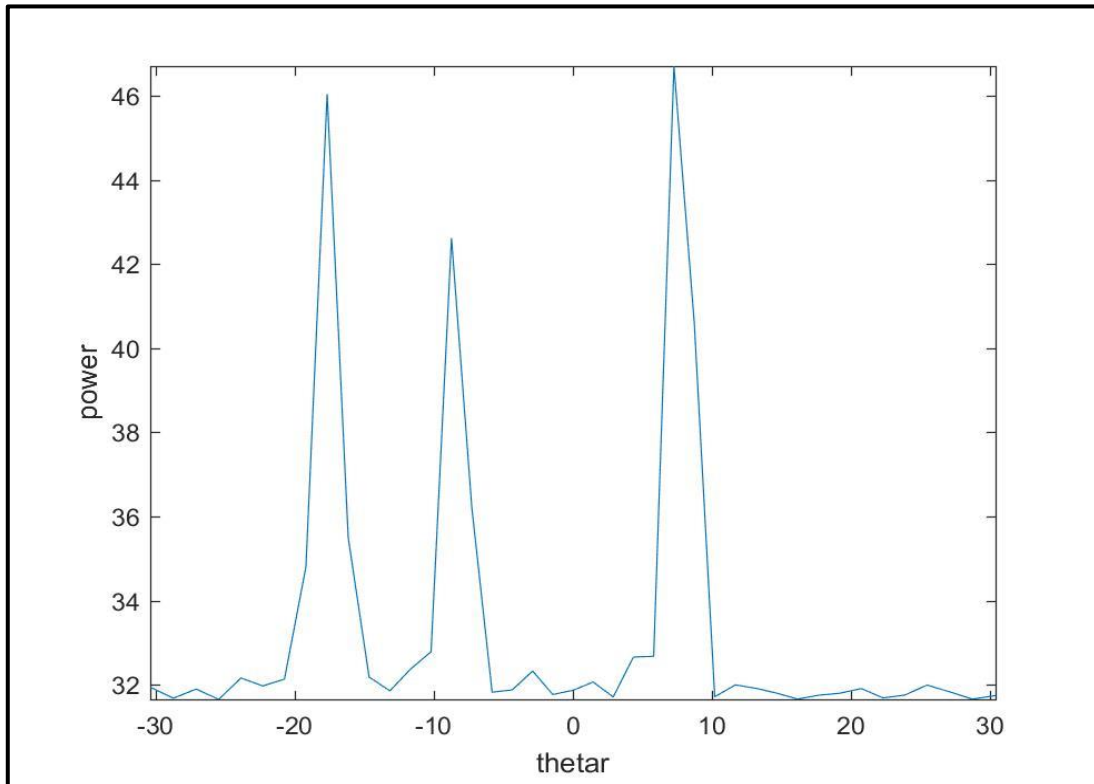
γ/ Μέγιστο σφάλμα κατά διόπτευση: $2,11^\circ$ / $M.O: 0,61^\circ$

δ/ Παρουσιάζονται ψευδοστόχοι οι οποίοι είναι μεγαλύτερης ισχύος από τους πραγματικούς.

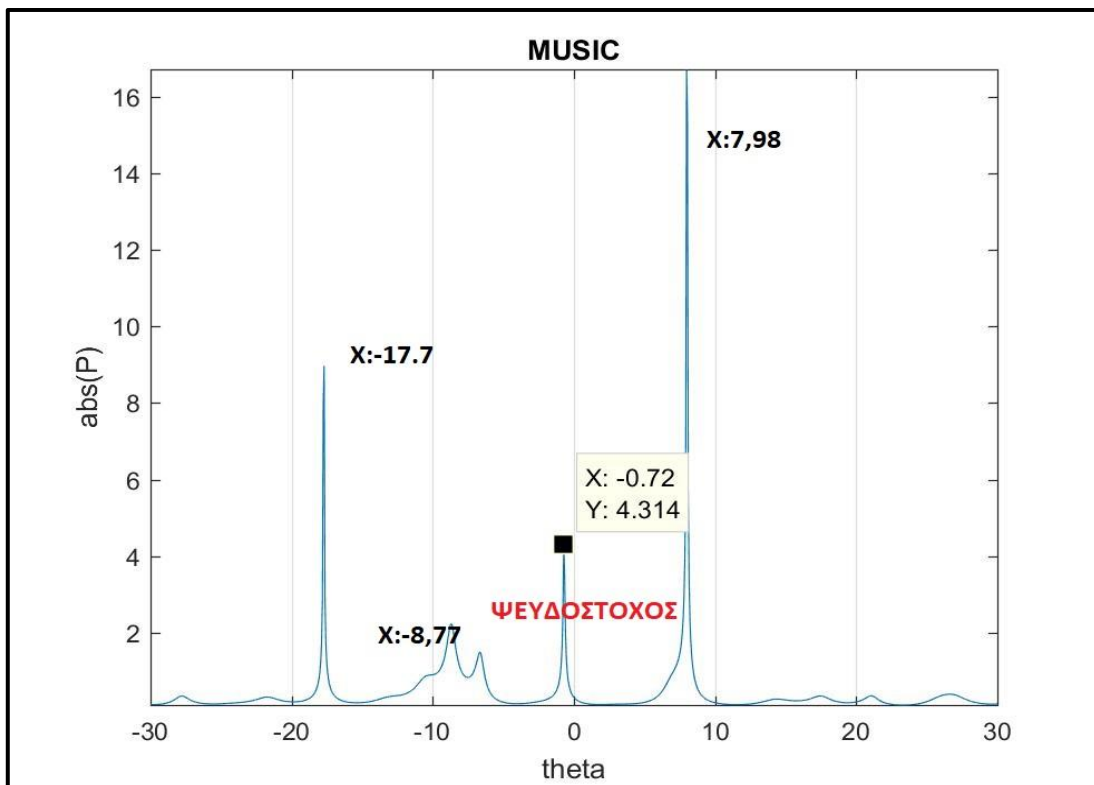
Στις περιπτώσεις που επιτυγχάνεται εντοπισμός όλων των στόχων, η ακρίβεια κατά διόπτευση με την μέθοδο «Beamforming» και «MUSIC» είναι παρόμοια.

δ. Αρ. Υδροφώνων:32 - D=0,75m.

(1) Πραγματικές διοπτρεύσεις στόχων: $-17,64^{\circ} / -8,5^{\circ} / 7,76^{\circ}$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διόπτρευση: $9,14^{\circ}$.

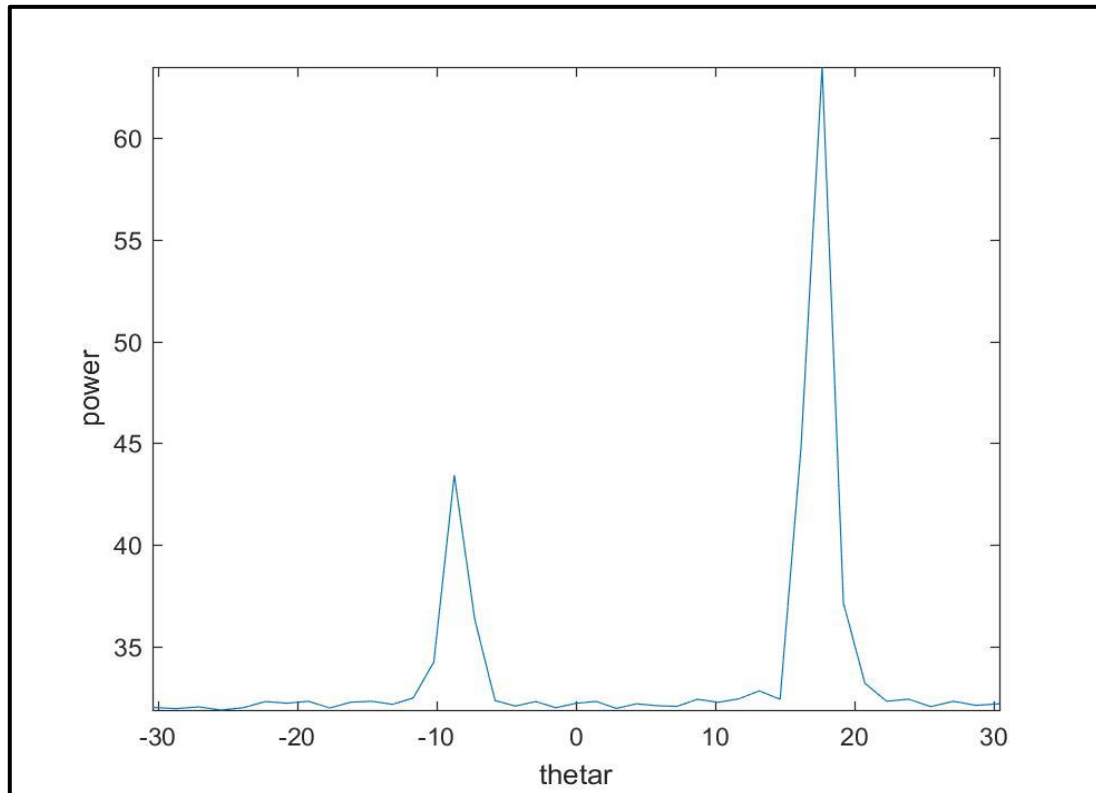


Διάγραμμα 5.3.2.16

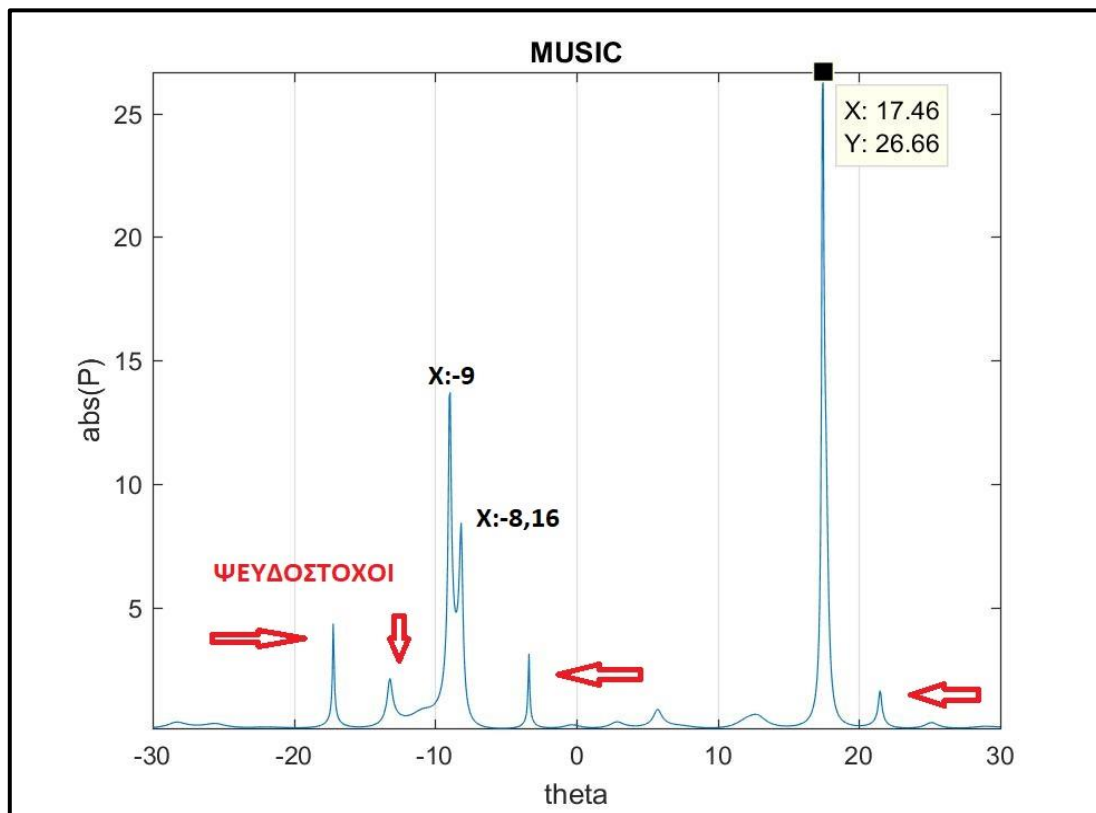


Διάγραμμα 5.3.2.17

(2) Πραγματικές διοπτεύσεις στόχων: $-8,65^\circ / -7,97^\circ / 17,45^\circ$.
Ελάχιστη διαφορά κατά διοπτευση: $0,68^\circ$.

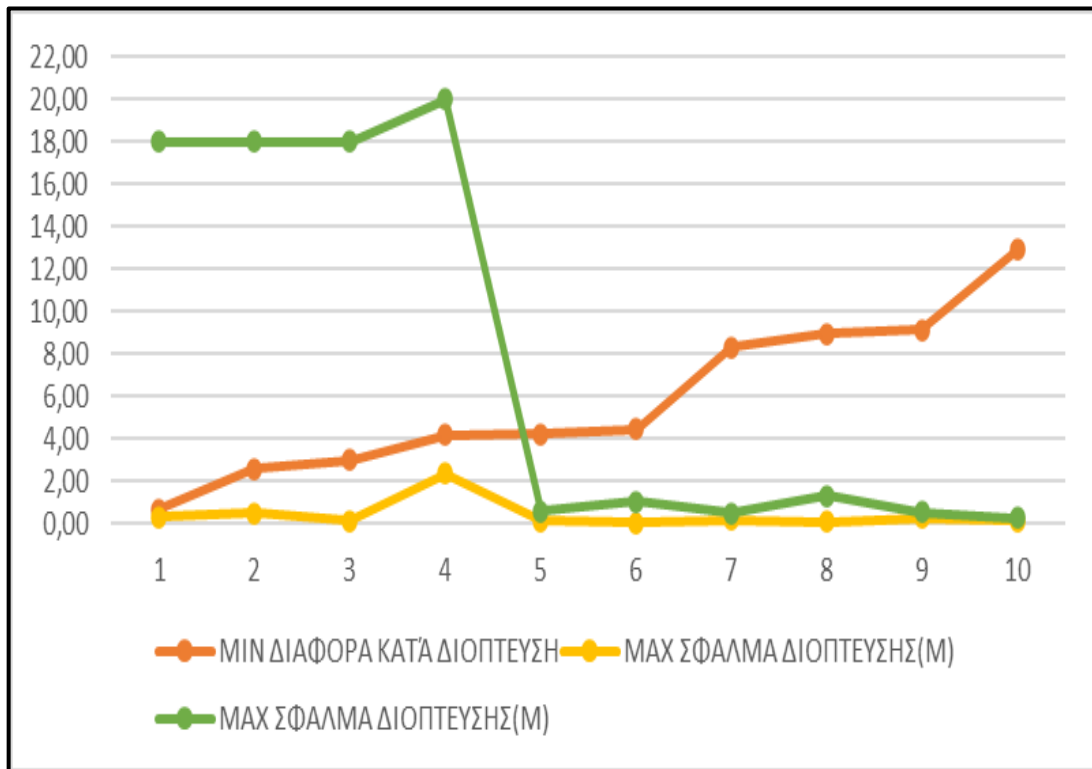


Διάγραμμα 5.3.2.18



Διάγραμμα 5.3.2.19

(3) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Συμπεράσματα:



Διάγραμμα 5.3.2.20

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει ότι με την μέθοδο «Beamforming», για ελάχιστη διαφορά κατά διόπτευση: $\geq 4^\circ$, επετεύχθη εντοπισμός συνόλου των στόχων με μεγάλη ακρίβεια.

Με την μέθοδο «MUSIC»:

α/ Επετεύχθη εντοπισμός συνόλου στόχων.

β/ Ελάχιστη διαφορά διόπτευσης στόχων: $0,68^\circ$.

γ/ Μέγιστο σφάλμα κατά διόπτευση: $2,38^\circ$ / $M.O$: $0,5^\circ$.

δ/ Παρουσιάζονται ψευδοστόχοι οι οποίοι είναι μεγαλύτερης ισχύος από τους πραγματικούς.

Στις περιπτώσεις που επιτυγχάνεται εντοπισμός όλων των στόχων, η ακρίβεια κατά διόπτευση με την μέθοδο «Beamforming» και «MUSIC» είναι παρόμοια.

§ 3.3 Συμπεράσματα

Η αξιολόγηση της απόδοσης του αλγορίθμου φαίνεται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 5.3.3.1):

SNR	ΑΡΙΘ. ΥΔΡΟΦΩΝΩΝ	d	ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΟΥ ΣΤΟΧΩΝ	ΥΠΑΡΞΗ ΨΕΥΔΟ/ΧΩΝ	ΔΙΑΚΡΙΒΩΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ	ΣΦΑΛΜΑ ΔΙΟΠΤΕΥΣΗΣ
-12	16	0.5	ΝΑΙ	ΟΧΙ	> 2,97	<1,21
-12	16	0.75	ΝΑΙ	ΝΑΙ*	>1,15	<1,3
-13	16	0,5	ΝΑΙ	ΌΧΙ	>1,67	<4,74 (Μ.Ο:1,53)
-13	16	0,75	ΝΑΙ	ΝΑΙ	>2,92	<1,83
-13	32	0,5	ΝΑΙ	ΝΑΙ	>1,74	<2,11
-13	32	0,75	ΝΑΙ	ΝΑΙ	>0,68	<2,38

Πίνακας 5.3.3.1

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι:

α. Η καλύτερη απόδοση της συστοιχίας επιτυγχάνεται για απόσταση μεταξύ υδροφώνων: $d = 0,5m$. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα στην συστοιχία των 16 υδροφώνων για $SNR: -13dB$.

β. Η αύξηση του αριθμού των υδροφώνων έχει ως αποτέλεσμα μικρή βελτίωση στο σφάλμα διόπτευσης ωστόσο παρουσιάζει ψευδοστόχους.

γ. Παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στον εντοπισμό στόχων, όταν αυξήθηκε ο αριθμός των υδροφώνων με την μέθοδο «Beamforming», όπως και αναμενόταν. Συναφώς θα μπορούσε σε μια συστοιχία με υψηλό αριθμό υδροφώνων, αφού γίνει ο αρχικός εντοπισμός, ένας παράλληλος αλγόριθμος «MUSIC» να προσφέρει σε δεύτερο χρόνο την υψηλή ακρίβεια διοπτεύσεως (fine estimate).

§ 4. Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος «MUSIC» σε περιβάλλον προσομοίωσης. Ως βάση χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο παθητικής συστοιχίας υδροφώνων που λειτουργεί με την μέθοδο «Beamforming». Το μοντέλο αυτό τροποποιήθηκε καταλλήλα ώστε ο εντοπισμός των στόχων να εκτελείται ανεξάρτητα και με τις δυο μεθόδους, την Beamforming και την «MUSIC». Με τον τρόπο αυτό επετεύχθη η δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων. Τα αποτελέσματα ήταν άκρως ενθαρρυντικά. Ο αλγόριθμος «MUSIC» απέδωσε λίαν ικανοποιητικά. Δοκιμάστηκε σε συστοιχίες με μικρό αριθμό υδροφώνων και σε περιβάλλον υψηλού θορύβου εντοπίζοντας τονικές ακουστικές υπογραφές με μεγάλη ακρίβεια.

Κεφάλαιο 6° : Ανάπτυξη Συστοιχιών Υδροφώνων στο Αιγαίο

§1. Εισαγωγή

Η τοποθέτηση υδροφώνων σε κομβικές περιοχές του Αιγαίου Πελάγους στο πλαίσιο ανάπτυξης ενός υποθαλάσσιου συστήματος επιτήρησης θα συνέβαλε στα ακόλουθα:

α. Στον εντοπισμό στόχων ενδιαφέροντος (μονάδες επιφανείας, Υ/Β, USV, USuV).

β. Στην καταγραφή ακουστικών υπογράφων στόχων ενδιαφέροντος και τον εμπλουτισμό / επικαιροποίηση των υφιστάμενων βιβλιοθηκών.

γ. Στην λήψη απόφασης για την βέλτιστη ανάπτυξη των ημέτερων μονάδων κατά την διεξαγωγή των επιχειρήσεων. Η γνώση για την ύπαρξη ή μη αντίπαλων δυνάμεων σε συγκεκριμένες περιοχές αποτελεί κρίσιμη πληροφορία για την απόφαση του τρόπου ανάπτυξης των ημέτερων μέσων.

δ. Στην αντιμετώπιση των προσφυγικών ροών με τον έγκαιρο εντοπισμό μικρών σκαφών, ιδίως των ελαστικών λέμβων που είναι δύσκολο να εντοπιστούν από τα RADAR επιτήρησης. Τα τελευταία χρόνια οι ελαστικοί λέμβοι με εξωλέμβιες μηχανές αποτελούν το κυριο μέσο μεταφοράς παράνομων εισερχόμενων προσώπων (ΠΕΠ) στην ελληνική επικράτεια από τα τουρκικά παράλια. Επίσης αποτελούν κυριο μέσο μεταφοράς ομάδων ειδικών επιχειρήσεων που θα μπορούσαν να συνιστούν ασύμμετρη απειλή.

Στο κεφάλαιο αυτό θα διερευνηθούν τα πιθανά οφέλη από την τοποθέτηση παθητικών συστοιχιών υδροφώνων στο Αιγαίο, η οποία θα βασίζεται:

α. Στα ευρήματα που προέκυψαν από την ανάλυση της μορφολογίας του βυθού και των βαθυθερμογραφικών συνθήκων.

β. Τις αποστάσεις εντοπισμού που μπορούν να επιτευχθούν από παθητικές συστοιχίες υδροφώνων, με την εφαρμογή του αλγορίθμου MUSIC.

Επιπλέον των ανωτέρω η επιλογή τοποθέτησης παθητικών ηχοεντοπιστικών συστημάτων έχει τα κάτωθι πλεονεκτήματα:

α. Τα παθητικά μέσα μπορούν να εκτελούν τα έργα που αναφέρθηκαν από τον καιρό της ειρήνης καθόσον δεν συνεγείρουν τον αντίπαλο ώστε να προκαλέσουν την αντίδραση του σε πολιτικό - διπλωματικό επίπεδο.

β. Περιορίζει τις κινήσεις του αντίπαλου, από τον καιρό της ειρήνης, αποτρέποντας την διέλευση μονάδων του από στενά του Αιγαίου, προκειμένου να αποφύγει την υποκλοπή των ακουστικών τους υπογράφων.

γ. Τα παθητικά συστήματα λόγω απουσίας εκπομπών δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον και δεν δύναται να παραβιάσουν τους νομούς που αφορούν στην προστασία της θαλάσσιας ζωής.

Τέλος η σύγχρονη τάση, όπως φαίνεται από διαφορά έργα, όπως το MAR.I.S.A³⁹ που χρηματοδοτούνται από την ΕΕ μέσω προγραμμάτων όπως το HORIZON 2020⁴⁰, είναι η ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων σύντηξης δεδομένων από ετερογενείς πηγές, όπως RADAR, θερμικές κάμερες, μέσα κοινωνικής δικτύωσης, δορυφόρους, προκειμένου να επιτευχθεί η δημιουργία αναγνωρισμένης εικόνας περιοχής σε πραγματικό χρόνο, με έμφαση στο θαλάσσιο πεδίο (RMP). Σε ένα τέτοιο σύστημα η συμβολή ηχοεντοπιστικών συσκευών θα μπορούσε να είναι κρίσιμη καθώς η ακουστική υπογραφή ενός πλοίου ή υποβρυχίου είναι μοναδική και καθορίζει με βεβαιότητα την ταυτότητα του.

§2. Δυνατότητα Επιτήρησης Αιγαίου με Συστοιχίες Υδροφώνων.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι με την εφαρμογή του αλγορίθμου MUSIC στην επεξεργασία του ακουστικού σήματος που λαμβάνει μια συστοιχία 16 ή 32 υδροφώνων μπορούμε με ακρίβεια να εντοπίσουμε στόχους σε περιβάλλον θορύβου με σηματοθορυβικό λόγο έως: $SNR = -13\text{dB}$.

Για μια μέση κατάσταση θαλάσσης «4» ο θόρυβος στην περιοχή συχνοτήτων ενδιαφέροντος κυμαίνεται στα: $NL_{amb} = 70\text{dB}$ ⁴¹.

Το πόσο θορυβώδης είναι ένα Υ/Β είναι μια άκρως διαβαθμισμένη πληροφορία που δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί μέσω ανοιχτών πηγών στο διαδίκτυο. Ωστόσο μια προσέγγιση μπορεί να γίνει από αναλύσεις, όπως η ακόλουθη του Κινεζικού Ναυτικού και αφορά σε ρωσικά και αμερικανικά Υ/Β (πίνακας 6.2.1), από εκτιμήσεις, όπως αυτή του κάτωθι πίνακα (πίνακα 6.2.2) και από πληροφορίες ειδικών στον ASW. Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα αυτά, για έναν τονικό (narrowband) θόρυβο μια μέση τιμή: $SL = 120\text{ dB}$, αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση.

SSN-21 Seawolf class SSN	95 decibels
Virginia class SSN	95 decibels
Russian Improved 636 Kilo class SSK	105 decibels
Akula class SSN	110 decibels
Improved Los Angeles SSN	105 - 110 decibels

Πίνακας 6.2.1⁴²

³⁹ Maritime Integrated Surveillance Awareness project: Έργο χρηματοδοτούμενο από την ΕΕ με σκοπό την ανάπτυξη συστήματος σύνθεσης αναγνωρισμένης εικόνας επιφάνειας στην θάλασσα, αξιοποιώντας δεδομένα από ετερογενείς πηγές όπως RADAR, δορυφορικές εικόνες, μέσα κοινωνικής δικτύωσης κ.α.

⁴⁰ Πρόγραμμα χρηματοδότησης της ΕΕ για έργα ερευνάς και καινοτομίας.

⁴¹ Γράφημα 1.3.1.1

⁴² <http://gentleseas.blogspot.com/2016/10/submarine-noise.html>, Chinese Evaluations of the U.S. Navy Submarine Force.

Table A1. A model of a SL spectrum of submarines		
	SL component of the spectrum [relative to 1 Pa at 1 m]	Spectral strength of SL in a frequency band (1Hz) [relative to 1 Pa at 1m]
	5-200 Hz	1kHz
"Noisy" Submarine	140	120
"Quiet" Submarine	120	100
"Very quiet" Submarine	100	80

Πίνακας 6.2.2⁴³

Συναφώς των ανωτέρω προκύπτει η κάτωθι συνθήκη (εξίσωση 6.2.1) σύμφωνα με την οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι ένα υποβρύχιο εκπέμπει αυτοθόρυβο ίσο με $N_s = 63dB$, ο οποίος κατά την διάδοση του υφίσταται μόνο τις απώλειες διάδοσης που έχουν υπολογιστεί για κάθε περιοχή του Αιγαίου. Συνεπώς ο ήχος από το υποβρύχιο εκπέμπεται στην θάλασσα και μπορεί να εντοπιστεί από την παθητική συστοιχία έως την απόσταση που εξασθενεί πλήρως, δηλαδή έως την απόσταση που οι απώλειες είναι: $TL \leq 63dB$.

Θόρυβος Στόχου - Θόρυβος Περιβάλλοντος - $SNR=120-70+13=63dB$ (6.2.1)

Η τοποθέτηση των συστοιχιών θεωρείται ότι θα γίνει κατά το δυνατόν πλησίον και κατά μήκος των ακτών (εικόνα 6.2.1). Αυτή η παραδοχή βασίζεται τόσο σε επιχειρησιακούς και όσο και τεχνικούς λόγους. Οι επιχειρησιακοί λόγοι είναι ότι με αυτόν τον τρόπο δεν θα υφίστανται περιοχές στα μετόπισθεν της συστοιχίας από τους οποίες θα μπορούσε να διέλθει ένα υποβρύχιο ή μια μονάδα επιφάνειας. Οι τεχνικοί λόγοι είναι ότι η εγγύτητα με την ακτή διευκολύνει την παροχή τροφοδοσίας και την μεταφορά δεδομένων από την συστοιχία στους σταθμούς ξηράς. Συνεπώς σε κάθε στενό μπορεί να τοποθετηθούν έως δυο συστοιχίες, μια σε κάθε ακτή που ορίζει το στενό, εκτός από την περίπτωση που η μια ακτή του στενού είναι τουρκική.



Εικόνα 6.2.1

⁴³ <https://fas.org/spp/eprint/snf03221.htm> , όπως ανακτήθηκε 05/06/20.

Από τους πίνακες 4.2.2.2.2, 4.2.3.2.2, 4.2.4.2.2 και 4.2.5.2.2 του Κεφαλαίου 4, οι οποίοι υπολογίζουν τις απώλειες διάδοσης συναρτήσει της απόστασης, προκύπτουν οι κάτωθι μέγιστες αποστάσεις εντοπισμού (PSR) με την χρήση δυο συστοιχιών υδροφώνων:

α. Περιοχή 1: 16000m (2 * 8000m).

β. Περιοχή 2: 12000m (2 * 6000m).

γ. Περιοχή 3: 12000m (2 * 6000m).

δ. Περιοχή 4: 12000m (2 * 6000m).

Με βάση τα ανωτέρω, ο αριθμός των στενών που καλύπτονται πλήρως, σε ποσοστό: $\geq 90\%$ ⁴⁴, είναι 24 (πίνακας 6.1.3), δηλαδή επιτυγχάνεται κάλυψη των στενών του Αιγαίου σε ποσοστό: 42%.

Α/Α	ΠΕΡΙΟΧΗ	ΣΤΕΝΟ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΛΥΨΗΣ
1.	1	ΣΑΜΟΘΡΑΚΗΣ - ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	41%
2.	1	ΣΚΥΡΟΥ – ΨΑΡΩΝ	21%
3.	1	ΑΛΟΝΗΣΟΥ_1	100%
4.	1	ΑΛΟΝΗΣΟΥ_2	100%
5.	1	ΒΟΛΟΥ - ΕΥΒΟΙΑΣ	100%
6.	1	ΛΗΜΝΟΥ	37%
7.	1	ΣΑΜΟΘΡΑΚΗΣ	32%
8.	1	ΨΑΡΩΝ – ΑΝΤΙΨΑΡΩΝ	100%
9.	1	ΨΑΡΩΝ - ΧΙΟΥ	83%
10.	1	ΣΚΥΡΟΥ – ΕΥΒΟΙΑΣ	44%
11.	1	ΣΚΥΡΟΥ - ΣΠΟΡΑΔΩΝ	52%
12.	1	ΛΕΣΒΟΥ-1	91%
13.	1	ΛΕΣΒΟΥ-2	57%
14.	1	ΣΚΙΑΘΟΥ - ΑΛΛΟΝΗΣΟΥ	100%
15.	1	ΘΕΡΜΑΙΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ	34%
16.	2	ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΩΝ	40%
17.	2	ΚΥΘΗΡΩΝ	37%
18.	2	ΚΥΘΗΡΩΝ – ΕΛΑΦΟΝΗΣΟΥ	100%
19.	3	ΝΑΞΟΥ – ΜΥΚΟΝΟΥ	46%
20.	3	ΚΥΘΝΟΥ	100%
21.	3	ΚΙΜΩΛΟΥ	97%
22.	3	ΚΟΥΦΟΝΗΣΙΑ – ΝΑΞΟΥ	100%
23.	3	ΚΕΡΟΥ - ΚΟΥΦΟΝΗΣΙΩΝ	100%

⁴⁴ Στην θάλασσα η τήρηση επακριβώς και πάντα ενός δρομολογίου, στην συγκεκριμένη περίπτωση στο μέσο ενός στενού, για λογούς που σχετίζονται με τον καιρό και την ναυτιλιακή κίνηση είναι πρακτικά αδύνατη, οπότε η κάλυψη 90% παραπέμπει σε πλήρη κάλυψη.

24.	3	ΚΕΡΟΥ - ΑΝΤΙΚΕΡΟΥ	100%
25.	3	ΑΝΤΙΚΕΡΟΥ - ΑΜΟΡΓΟΥ	100%
26.	3	ΣΕΡΙΦΟΥ	89%
27.	3	ΜΑΚΡΟΝΗΣΟΥ - ΚΕΑΣ	82%
28.	3	ΠΟΛΥΑΙΓΟΥ - ΦΟΛΕΓΑΝΔΡΟΥ	45%
29.	3	ΣΙΦΝΟΥ	85%
30.	3	ΣΙΚΙΝΟΥ - ΙΟΥ	100%
31.	3	ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ - ΑΝΑΦΗΣ	56%
32.	3	ΜΥΚΟΝΟΥ - ΤΗΝΟΥ	100%
33.	3	ΚΑΦΗΡΕΑ	100%
34.	3	ΓΥΑΡΟΥ - ΤΗΝΟΥ	69%
35.	3	ΓΥΑΡΟΥ - ΚΕΑΣ	54%
36.	4	ΑΓΑΘΟΝΗΣΙΟΥ- ΤΟΥΡΚΙΑΣ	41%
37.	4	ΑΜΟΡΓΟΥ - ΚΙΝΑΡΟΥ	64%
38.	4	ΑΝΑΦΗΣ - ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑΣ	28%
39.	4	ΑΡΚΟΙ - ΑΓΑΘΟΝΗΣΙ	64%
40.	4	ΙΚΑΡΙΑΣ – ΣΑΜΟΥ	63%
41.	4	ΙΚΑΡΙΑΣ -ΘΥΜΑΙΝΑΣ	100%
42.	4	ΚΑΡΠΑΘΟΥ	28%
43.	4	ΚΑΣΟΥ – ΚΑΡΠΑΘΟΥ	100%
44.	4	ΚΡΗΤΗΣ – ΚΑΣΟΥ	25%
45.	4	ΚΩ -ΤΟΥΡΚΙΑΣ	100%
46.	4	ΛΕΡΟΥ – ΚΑΛΥΜΝΟΥ	100%
47.	4	ΛΕΡΟΥ – ΛΕΙΨΩΝ	100%
48.	4	ΝΙΣΥΡΟΥ - ΚΩ	77%
49.	4	ΝΙΣΥΡΟΥ – ΤΗΛΟΥ	88%
50.	4	ΡΟΔΟΥ - ΤΟΥΡΚΙΑΣ	33%
51.	4	ΣΑΜΟΥ – ΑΓΑΘΟΝΗΣΙΟΥ	63%
52.	4	ΣΥΜΗΣ – ΤΟΥΡΚΙΑΣ	87%
53.	4	ΤΗΛΟΥ – ΧΑΛΚΗΣ	63%
54.	4	ΦΑΡΜΑΚΟΝΗΣΙΟΥ – ΤΟΥΡΚΙΑΣ	60%
55.	4	ΦΟΥΡΝΩΝ - ΣΑΜΟΥ	100%
56.	4	ΨΕΡΙΜΟΥ - ΚΑΛΥΜΝΟΥ	100%
57.	4	ΨΕΡΙΜΟΥ - ΚΩ	100%

Πίνακας 6.2.3

§3. Μοντέλο Επιλογής Τοποθέτησης Υδροφώνων.

Για την βέλτιστη επιχειρησιακή τοποθέτηση των συστοιχιών χρησιμοποιήθηκε η προβληματική τύπου «γ»⁴⁵. Η συγκεκριμένη προβληματική επιλέχθηκε ώστε να παρουσιασθεί στους αποφασίζοντες, επι παραδείγματι την Διοίκηση του ΠΝ, μια κατάταξη των στενών για την τοποθέτηση παθητικών συστοιχιών υδροφώνων βάση συγκεκριμένων κριτηρίων⁴⁶.

Στην κατασκευή του μοντέλου, το σύνολο των εναλλακτικών ενεργειών αποτελούν τα στενά του Αιγαίου. Τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες τους αναλυθήκαν στο Κεφάλαιο 4^ο. Σε αυτές θα πρέπει να συμπεριληφθεί και το ποσοστό κάλυψης από τις παθητικές συστοιχίες υδροφώνων, που έχει άμεση σχέση με τα χαρακτηριστικά τους (μορφολογία βυθού, εύρος).

Εν συνέχεια καθορίζονται οι άξονες προτίμησης, οι διαστάσεις προτίμησης και τα κριτήρια απόφασης, τα οποία ταυτίζονται με τις διαστάσεις, ως ακολούθως (εικόνα 6.3.1):

α. Άξονες Προτίμησης:

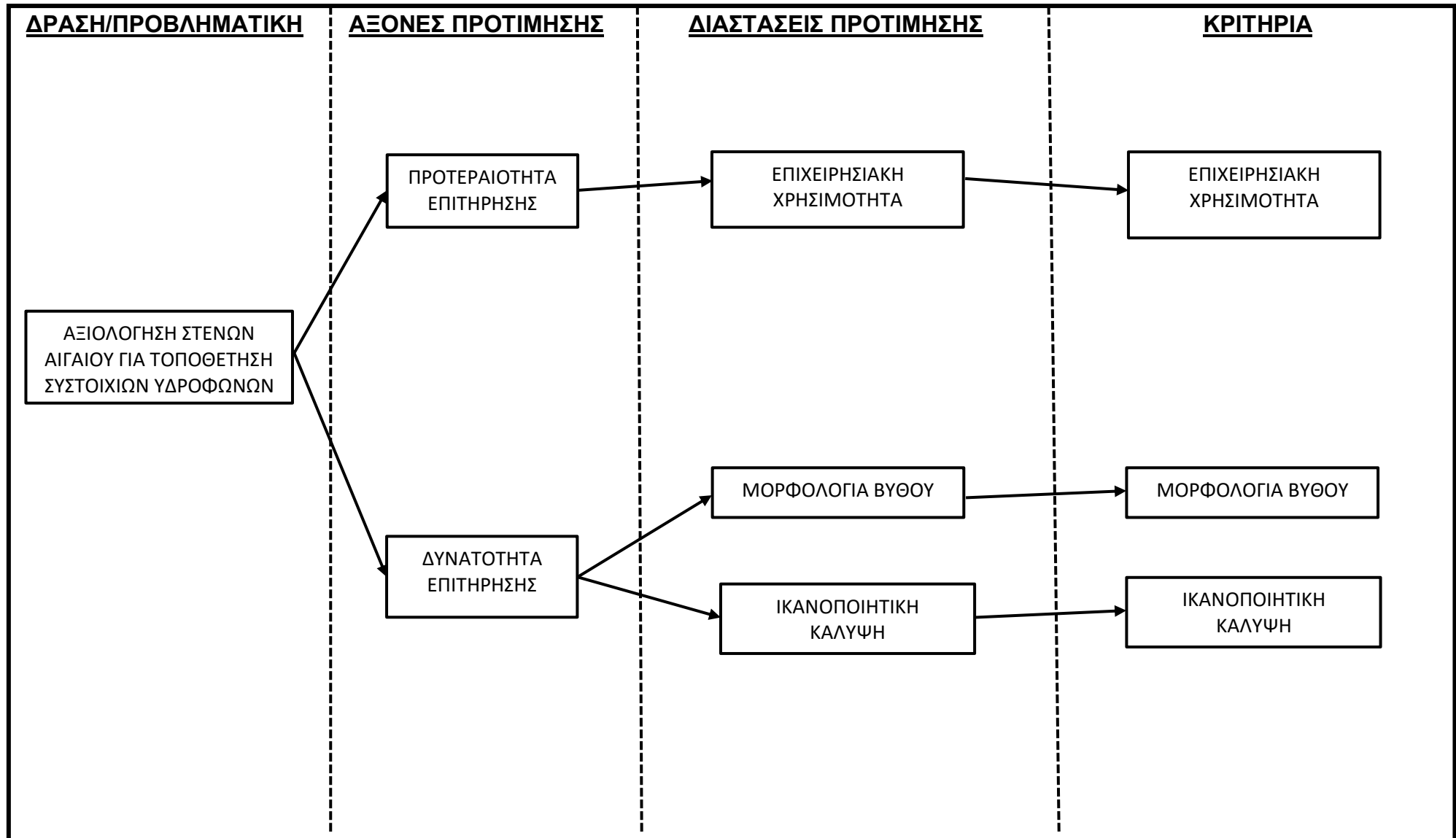
- (1) Προτεραιότητα Επιτήρησης.
- (2) Δυνατότητα Επιτήρησης.

β. Διαστάσεις Προτίμησης - Κριτήρια:

- (1) Επιχειρησιακή Χρησιμότητα.
- (2) Μορφολογία Βυθού.
- (3) Ικανοποιητική Κάλυψη.

⁴⁵ Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, Νικόλαος Ματσατσίνης, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών 2010.

⁴⁶ Συνεπής οικογένεια κριτηρίων, Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων, Διαλέξεις Νικόλαου Ματσατσίνη.



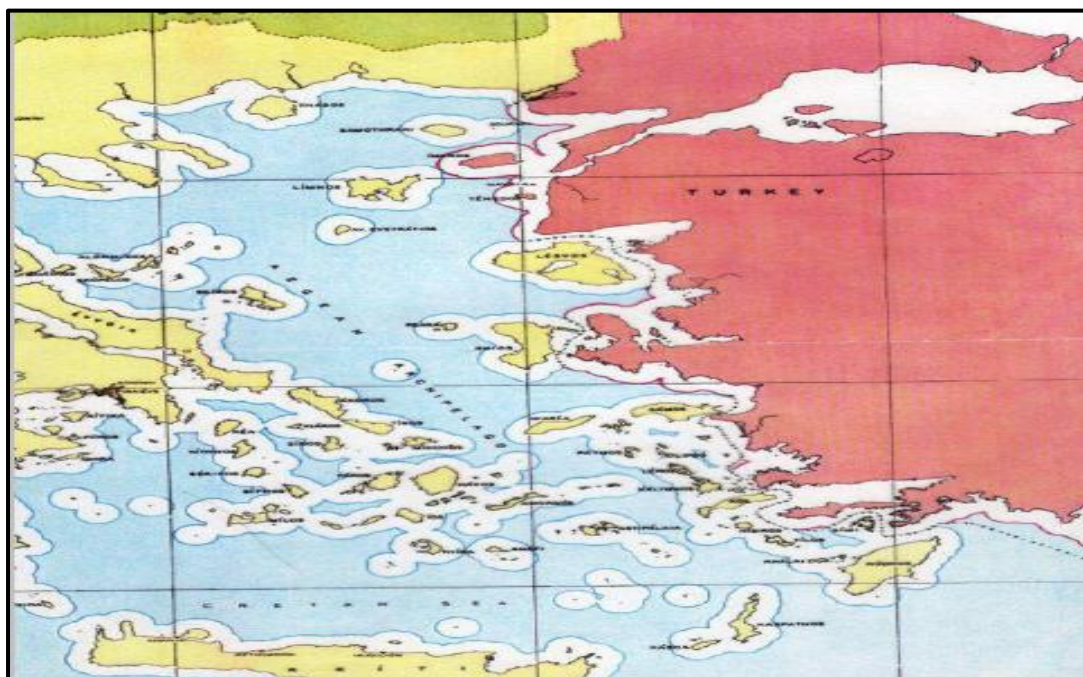
Εικόνα 6.3.1

§3.1. Προτεραιότητα Επιτήρησης.

Ο θαλάσσιος χώρος του Αιγαίου αποτελείται από τα χωρικά ύδατα της Ελλάδας, της Τουρκίας και από διεθνή ύδατα (γράφημα 6.3.1.1). Τα χωρικά ύδατα της Ελλάδας εκτείνονται στα 6ν.μ. από τη φυσική ακτογραμμή (χάρτης 6.3.1.1), σύμφωνα με δύο νομοθετήματα για την αιγιαλίτιδα ζώνη της Ελλάδας. Πρόκειται για το άρθρο του Α.Ν. 230/1936 «Περί Καθορισμού Αιγιαλίτιδος Ζώνης της Ελλάδας» (ΦΕΚ Α' 450) και το άρθρο 139 του ΚΔΝΔ (Ν.Δ. 187/1973, ΦΕΚ Α' 261).



Γράφημα 6.3.1.1



Χάρτης 6.3.1.1

Σε πολλές περιπτώσεις στο Αιγαίο, το εύρος μεταξύ δυο νησιών μπορεί να είναι μικρότερο από 6ν.μ, με αποτέλεσμα η θάλασσα μεταξύ τους να αποτελεί εξ' ολοκλήρου χωρική θάλασσα, όπως για παράδειγμα στο στενό του Καφηρέα. Σε αυτές τις περιπτώσεις και ειδικά όταν αφορά στενά χαρακτηρισμένα ως «στενά διεθνούς ναυσιπλοΐας (ΣΔΝ)» ισχύει το καθεστώς της «αβλαβής διέλευσης»⁴⁷. Η αβλαβής διέλευση είναι ένας κανόνας του Δικαίου της Θάλασσας, ο οποίος επιτρέπει σε ένα σκάφος να διέλθει από τα χωρικά ύδατα ενός ξένου κράτους υπό ορισμένους περιορισμούς. Η Σύμβαση του ΟΗΕ για το Δίκαιο της Θάλασσας, ορίζει την αβλαβή διέλευση ως εξής: «Η διέλευση είναι αβλαβής, εφόσον δεν παραβιάζει την ειρήνη, την ομαλή λειτουργία ή την ασφάλεια του παράκτιου κράτους. Η διέλευση θα πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τη Σύμβαση αυτή και τους λοιπούς κανόνες του Διεθνούς Δικαίου.»

Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η διέλευση θα πρέπει να είναι συνεχής και ταχεία, από το συντομότερο δρόμο. Ιδιαίτερα όσον αφορά στα πολεμικά πλοία, θα πρέπει επιπλέον να έχουν υψωμένη την σημαία του παράκτιου κράτους, να μην εκτελούν γυμνάσια (π.χ. στρέψη πυροβόλων) και εν γένει να μην προβαίνουν σε οποιαδήποτε ενέργειες εις βάρος της κυριαρχίας του παράκτιου κράτους.

Η Τουρκία εκμεταλλεύεται τόσο τα διεθνή ύδατα όσο και το δικαίωμα της αβλαβούς διέλευσης ούτως ώστε:

α. Να δεσμεύει περιοχές εντός του ελληνικού FIR προκειμένου να εκτελεί αεροναυτικές ασκήσεις.

β. Μονάδες της να διέρχονται από τα στενά του Αιγαίου προφασιζόμενες «αβλαβή διέλευση», κάνοντας κατάχρηση του δικαιώματος αυτού.

Η τουρκική δραστηριότητα δημιουργεί αυξημένες ανάγκες επιτήρησης για συλλογή και καταγραφή στοιχείων ώστε να υφίσταται η δυνατότητα ανάδειξης της τουρκικής παραβατικής συμπεριφοράς και έγκαιρης αντίδρασης σε ενέργειες που υπονομεύουν την εθνική κυριαρχία της Ελλάδας

Η μορφολογία του Αιγαίου, με το πλήθος των νησιών, μικρονήσων και βραχονησίδων, καθιστά αναγκαία μια προτεραιοποίηση στην επιτήρηση. Αυτή μπορεί να προκύψει από παράγοντες όπως:

α. Περιοχές επιχειρησιακού ενδιαφέροντος, όπως προσβάσεις σε λιμένες, στρατιωτικές εγκαταστάσεις κ.α.

β. Στενά διεθνούς ναυσιπλοΐας, που χρησιμοποιούνται τόσο από το Τουρκικό Ναυτικό όσο και από άλλες εκτός NATO χώρες.

γ. Στενά που παρουσιάζουν συχνή διέλευση, όπως καταγράφεται από τις αρμόδιες υπηρεσίες του ΠΝ. Επι παραδείγματι το δρομολόγιο από την

⁴⁷ Σύμβαση Διεθνούς Δικαίου, άρθρο 19, παράγραφος 1.

ναυτική βάση της Σμύρνης προς την ναυτική βάση λόγω συχνών μετακινήσεων τουρκικών μονάδων.

δ. Συνήθης περιοχές που δεσμεύονται για εκτέλεση ασκήσεων, λόγω της μετακίνησης στόχων ενδιαφέροντος από / προς αυτές.

Τα ανωτέρω μπορούν να συντεθούν στην διάσταση προτίμησης-κριτήριο: επιχειρησιακή χρησιμότητα. Ως κριτήριο είναι ποιοτικό και η κλίμακα μέτρησης καθορίζεται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 6.3.1.1):

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ	ΚΛΙΜΑΚΑ
ΥΨΗΛΗ	3
ΜΕΤΡΙΑ	2
ΧΑΜΗΛΗ	1

Πίνακας 6.3.1.1

§3.2 Δυνατότητα Επιτήρησης.

Η δυνατότητα επιτήρησης ενός στενού προσδιορίζεται από δυο διαστάσεις προτίμησης – κριτήρια:

α. Μορφολογία Βυθού: Η ανώμαλη μορφολογία του βυθού, όπως έχει ήδη αναλυθεί, δύναται να επηρεάσει την απόδοση της συστοιχίας. Θα προσεγγιστεί ως ποιοτικό κριτήριο και η κλίμακα μέτρησης καθορίζεται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 6.3.1.1):

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ	ΚΛΙΜΑΚΑ
ΥΨΗΛΗ	1
ΜΕΤΡΙΑ	2
ΧΑΜΗΛΗ	3

Πίνακας 6.3.2.1

β. Ικανοποιητική Κάλυψη: Η ικανοποιητική κάλυψη είναι ποσοτικό κριτήριο και εξαρτάται από την απόσταση εντοπισμού που μπορεί να επιτύχει η συστοιχία σε σχέση με το εύρος του στενού. Ως κατώφλι ικανοποίησης τίθεται εμπειρικά το ποσοστό: 70%⁴⁸. Με βάση αυτό, τα ποσοστά κάλυψης των στενών μετασχηματίζονται στην ακόλουθη κλίμακα μέτρησης (πίνακας 6.3.2.1):

ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΑΛΥΨΗΣ	ΚΛΙΜΑΚΑ
71% - 80%	1
81%- 90%	2
91%-100%	3

Πίνακας 6.3.2.2

⁴⁸ Για την θάλασσα και λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως ακρίβεια ναυτιλίας, καιρικές συνθήκες και ναυτιλιακή κίνηση είναι ένα ικανοποιητικό ποσοστό.

§3.3 Πολυκριτήριο Πίνακας

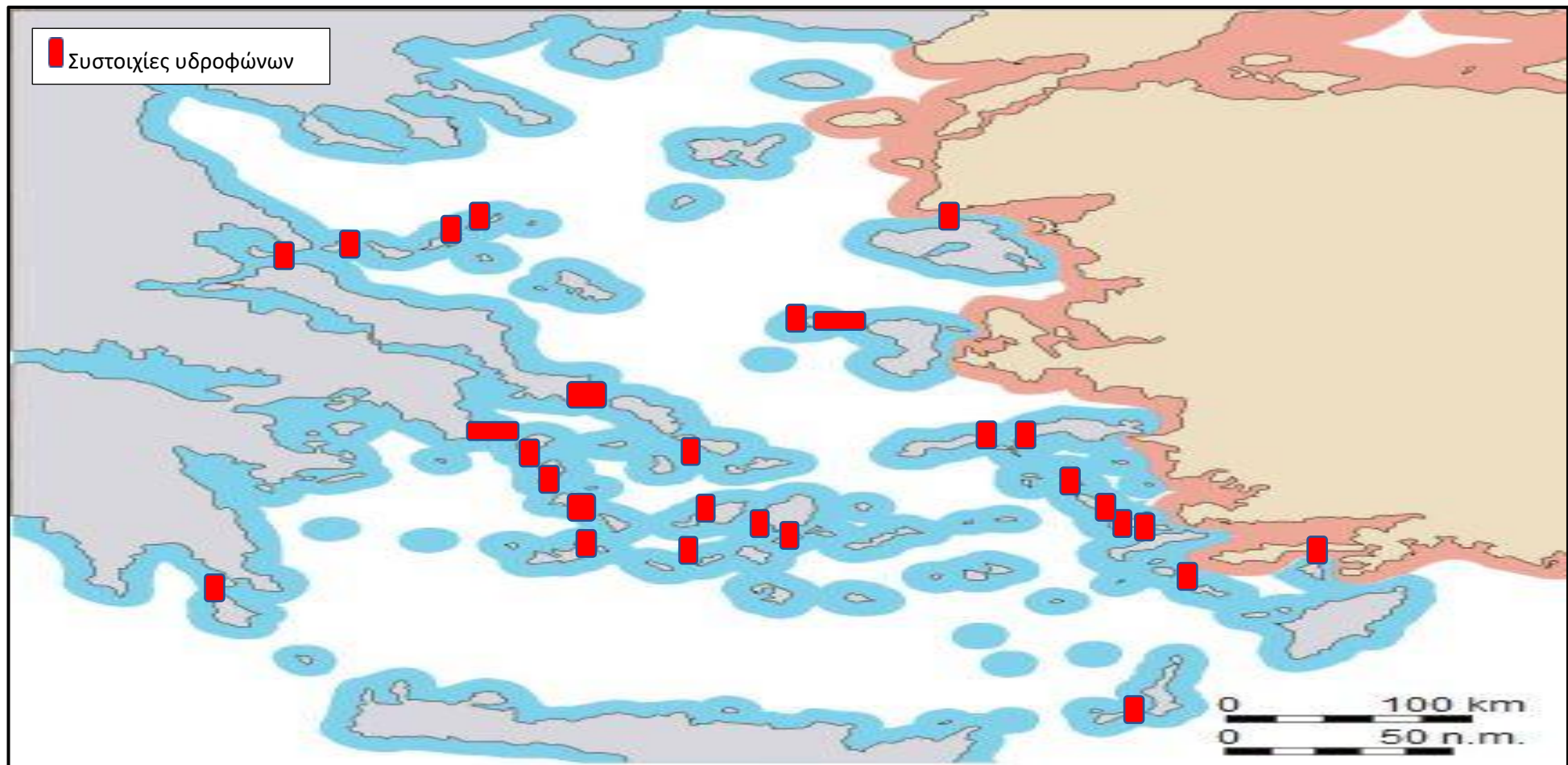
Λαμβάνοντας υπόψη τα αναφερόμενα στις ανωτέρω παραγράφους, τα στενά που πληρούν την προϋπόθεση κάλυψης κατά 70% περιορίζονται στα 29. Στον ακόλουθο πολυκριτήριο πίνακα (πίνακας 6.3.3.1) παρουσιάζονται τα στενά σε προτεραιοποιημένα σύμφωνα με την βαθμολογία τους στα κριτήρια⁴⁹ αξιολόγησης, ενώ στο χάρτη 6.3.3.1 απεικονίζεται η διάταξη τους στο Αιγαίο.

α/α	Π ⁵⁰	ΣΤΕΝΟ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ	ΚΑΛΥΨΗ	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΒΥΘΟΥ	ΣΥΝΟΛΟ
1.	1	ΒΟΛΟΣ - ΕΥΒΟΙΑ	3	3	3	9
2.	1	ΛΕΣΒΟΥ-1	3	3	3	9
3.	1	ΣΚΙΑΘΟΥ - ΑΛΛΟΝΗΣΟΥ	3	3	3	9
4.	3	ΜΥΚΟΝΟΣ - ΤΗΝΟΣ	3	3	3	9
5.	3	ΣΤΕΝΟ ΚΑΦΗΡΕΑ	3	3	3	9
6.	4	ΙΚΑΡΙΑ -ΘΥΜΑΙΝΑ	3	3	3	9
7.	4	ΣΤΕΝΟ ΚΑΣΟΥ - ΚΑΡΠΑΘΟΥ	3	3	3	9
8.	4	ΚΩ -ΤΟΥΡΚΙΑ	3	3	3	9
9.	4	ΛΕΡΟΥ - ΛΕΙΨΩΝ	3	3	3	9
10.	4	ΦΟΥΡΝΩΝ- ΣΑΜΟΥ	3	3	3	9
11.	4	ΨΕΡΙΜΟΣ - ΚΑΛΥΜΝΟΣ	3	3	3	9
12.	4	ΨΕΡΙΜΟΥ - ΚΩ	3	3	3	9
13.	1	ΣΤΕΝΟ ΑΛΟΝΗΣΟΥ_1	2	3	3	8
14.	1	ΣΤΕΝΟ ΑΛΟΝΗΣΟΥ_2	2	3	3	8
15.	2	ΚΥΘΗΡΩΝ - ΕΛΑΦΟΝΗΣΟΣ	2	3	3	8
16.	3	ΣΤΕΝΟ ΚΥΘΝΟΥ	2	3	3	8
17.	3	ΑΝΤΙΚΕΡΟΣ - ΑΜΟΡΓΟΣ	2	3	3	8
18.	3	ΜΑΚΡΟΝΗΣΟΣ - ΚΕΑΣ	3	2	3	8
19.	4	ΛΕΡΟΣ - ΚΑΛΥΜΝΟΣ	2	3	3	8
20.	4	ΝΙΣΥΡΟΣ - ΤΗΛΟΣ	3	2	3	8
21.	4	ΣΥΜΗ - ΤΟΥΡΚΙΑ	3	2	3	8
22.	3	ΣΤΕΝΟ ΚΙΜΩΛΟΥ	1	3	3	7
23.	3	ΚΟΥΦΟΝΗΣΙΑ ΝΑΞΟΣ	1	3	3	7
24.	3	ΚΕΡΟΣ - ΚΟΥΦΟΝΗΣΙΑ	1	3	3	7
25.	3	ΚΕΡΟΣ - ΑΝΤΙΚΕΡΟΣ	1	3	3	7
26.	3	ΣΕΡΙΦΟΥ	2	2	3	7
27.	3	ΣΤΕΝΟ ΣΙΦΝΟΥ	2	2	3	7
28.	3	ΣΙΚΙΝΟΥ - ΙΟΥ	1	3	3	7
29.	4	ΝΙΣΥΡΟΥ - ΚΩ	3	1	3	7

Πίνακας 6.3.3.1

⁴⁹ Τα κριτήρια είναι ισοβαρή.

⁵⁰ Περιοχή.



Χάρτης 6.3.3.1

§ 4. Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτυχθήκαν τα πλεονεκτήματα και τα οφέλη από την τοποθέτηση συστοιχιών παθητικών υδροφώνων σε στενά του Αιγαίου στο πλαίσιο ενός υποθαλάσσιου συστήματος επιτήρησης. Τα συμπεράσματα και τα ευρήματα που προέκυψαν από την επιχειρησιακή ανάλυση του Αιγαίου και των προσομοιώσεων αξιοποιήθηκαν για να προσδιοριστούν οι μέγιστες αποστάσεις εντοπισμού στόχων ανά περιοχή. Με βάση το δεδομένο αυτό τα στενά που καλύπτονται, σε όλο το εύρος τους, ανέρχονται στο ποσοστό του 42%. Στο τέλος του κεφαλαίου έγινε μια προσέγγιση για την βέλτιστη επιχειρησιακά χωρική τοποθέτηση των συστοιχιών λαμβάνοντας υπόψη επιχειρησιακά και περιβαντολογικά κριτήρια.

Κεφάλαιο 7° : Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία

§1. Συμπεράσματα

Το Αιγαίο Πέλαγος αποτελεί γεωπολιτικά μια ζωτικής σημασίας περιοχή. Αυτό καθιστά επιτακτική την ανάγκη για διαρκή επιτήρηση, αναγνώριση και υποτύπωση όλων των στόχων που κινούνται σε αυτό. Οι συστοιχίες υδροφώνων είτε μεμονωμένα είτε ως ένα σύστημα υποθαλάσσιας επιτήρησης ενταγμένο στο πλαίσιο ενός ενιαίου εθνικού συστήματος επιτήρησης, θα μπορούσαν να συμβάλουν καθοριστικά στην επίτευξη αυτού του σκοπού.

Ο αλγόριθμος «MUSIC», σε επίπεδο προσομοίωσης, αποδείχτηκε ότι μπορεί να λειτουργήσει σε μια συστοιχία παθητικών υδροφώνων, προσδίδοντας το συγκριτικό πλεονέκτημα της ταυτοποίησης των στόχων. Από την επιχειρησιακή ανάλυση του Αιγαίου δυο συστοιχίες, με μικρό αριθμό υδροφώνων, που μεταφράζεται σε χαμηλό κόστος και δύσκολο εντοπισμό, αρκούν για να καλύψουν σε πλήρη εύρος το 42% των στενών. Αν ληφθεί υπόψη ότι:

α. Οι καιρικές συνθήκες και η ναυτιλιακή κίνηση δεν επιτρέπουν πάντα την πλοήγηση ακριβώς στο μέσο της απόστασης ενός στενού.

β. Η κάλυψη σε ποσοστό 50%, ή και λιγότερο, του εύρους ενός στενού μπορεί να συμβάλει στην οικονομία δυνάμεων. Επι παραδείγματι θα απαιτείται μια μονάδα επιφάνειας σε συνδυασμό με την συστοιχία για την επιτήρηση του ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα χρειαζόταν η δέσμευση παραπάνω μέσων.

γ. Με κατάλληλους χειρισμούς μπορεί μια αντίπαλη μονάδα να εξαναγκαστεί να διέλθει εντός της εμβέλειας των συστοιχιών προκειμένου να υποκλαπεί η ακουστική υπογραφή της.

δ. Η γνώση της ύπαρξης των συστοιχιών από τον αντίπαλο δεν πρέπει να θεωρείται δεδομένη.

τότε το επιχειρησιακό όφελος που προκύπτει από τις συστοιχίες υδροφώνων πολλαπλασιάζεται.

§2. Μελλοντική Εργασία

Ως μελλοντική εργασία προτείνονται τα ακόλουθα:

α. Εκτέλεση προσομοιώσεων με τροποποιημένες εκδόσεις του αλγορίθμου «MUSIC» και σύγκριση αποτελεσμάτων.

β. Εκτέλεση προσομοιώσεων με συνδυασμό μεθόδων εύρεσης DOA ώστε να γίνει εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων εκάστης. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5°, θα μπορούσε μια παθητική συστοιχία με την μέθοδο «Beamforming» να αποκαλύψει την ύπαρξη στόχου προς μια κατεύθυνση και σε δεύτερο χρόνο με την μέθοδο «MUSIC» να προσδιοριστούν:

(1) Αν πρόκειται για έναν ή περισσότερους στόχους.

(2) Με ακρίβεια οι διοπτεύσεις του/των στόχου/ων.

(3) Οι ταυτότητες του/των στόχου/ων.

γ. Επικαιροποίηση των βαθυθερμογραφικών μετρήσεων σε περιοχές ενδιαφέροντος.

δ. Εκτέλεση πειραμάτων με πραγματική συστοιχία σε περιοχές ενδιαφέροντος, με διάθεση μέσων.

ε. Περαιτέρω διερεύνηση και τεκμηρίωση του επιχειρησιακού οφέλους από την τοποθέτηση συστοιχιών παθητικών υδροφώνων.

Βιβλιογραφία

1. «Σύγχρονες Μέθοδοι Επεξεργασίας Ακουστικών Σημάτων στη Θάλασσα από Συστοιχίες Υδροφώνων», Παράσχος Δημήτριος, 2017.
2. «Undersea Acoustic Propagation Channel Estimation», Dessalermos Spyridon, Naval Postgraduate School Monterey, California, 2005.
3. «Adaptive Reception for Underwater Communications», Dessalermos, Spyridon Naval Postgraduate School Monterey, California, 2011.
4. «Sonar and Underwater Acoustics», Jean-Paul Marage - Yvon Mori, John Wiley & Sons 2010.
5. «DOA Estimation Based on MUSIC Algorithm», Honghao Tang Thesis, Linnaeus University Sweden, 4/6/2014.
6. «A High DOA Technique for Acoustic Target Detection Underwater Using MUSIC Algorithm», Prashil M. Junghare¹, Cyril Prasanna Raj P.², T. Srinivas³, International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS) Volume VII, Issue IV, April 2018 | ISSN 2278-2540.
7. «Modified Root-Music Algorithm and its Application to Real Data, Passive Bearing Estimation of Shallow Water Acoustic Targets», R&D Marine Technology Centre, Sławomir Henclik, Poland 2001.
8. «Performance Comparison of Superresolution Array Processing Algorithms», Lincoln Laboratory MIT, 1998.
9. «Hydroacoustics Waves' Direct-Of-Arrival Estimation Using Music Algorithm – Simulations Results», Andrzej Żak, Polish Naval Academy.
10. «Iterative root-MUSIC algorithm for DOA estimation», Mahdi Shaghaghi and Sergiy A. Vorobyov, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Alberta Canada, 2013.
11. «Multiple Signal Classification for Determining Direction of Arrival of Frequency Hopping Spread Spectrum Signals», Fawwaz Alsubaie, Air Force Institute of Technology USA, Μάρτιος 2014.
12. «The Linear Sampling Method and the MUSIC Algorithm», Department of Electrosience - Electromagnetic Theory, Lund Institute of Technology, Sweden 2001.
13. «Direction of Arrival Estimation using a Root-MUSIC Algorithm», H.K. Hwang, Zekeriya Aliyazicioglu, Marshall Grice, Anatoly Yakovlev, Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists 2008 Vol II IMECS 2008, Hong Kong.

14. «A Novel High Resolution DOA Estimation Design Algorithm of Close Sources Signal for Underwater Conditions», Prashil M Junghare, Shoaib Wajid, Cyril Prasanna Raj P., Richard Lincoln Paulraj, International Journal of Research in Engineering and Technology, eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308.

15. ATP-01, Volume I, Edition (G), Version (1), «Allied Maritime Tactical Instructions and Procedures», NATO, October 2015.

16. ATP-18 Edition (I) Version (2), Allied Manual of Submarine Operations, NATO, April 2018.

17. ATP-28 Edition (D) Version (1), Allied Antisubmarine Warfare Manual, NATO, October 2017.

18. «Understanding Digital Signal Processing», Third Edition, Richard G. Lyons, 2011.

19. Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Ακουστικής Ι, ΤΕΙ Κρήτης – Παράρτημα Ρεθύμνου, Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Μηνάς Κ. Σηφάκης - Χρήστος Κουτσοδημάκης, Ρέθυμνο, Μάρτιος 2012.

20. «Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων και Σημάτων», Α. Σκορδάς, Β. Αναστασόπουλος, ΕΑΠ, 2003.

21. «Fundamentals Of Acoustics», Professor Colin H Hansen, Department of Mechanical Engineering, University of Adelaide, South Australia.

22. «Ο Πόλεμος των Φώκλαντ», Σχολή Πολέμου Ναυτικού, 2010.

23. «Πλαίσιο Διαχείρισης Ναυτιλιακής Κίνησης στο Αιγαίο Πέλαγος, υπό το Πρίσμα Ενεργειακών και Γεωπολιτικών Εξελίξεων», Δ. Δαλακλής, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 2013.

24. «Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων», Νικόλαος Ματσατσίνης, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών 2010.

Ιστοτόποι

1. www.girdsystems.com/ An introduction to MUSIC and ESPRIT.
2. <https://www.marinetraffic.com/>
3. <https://www.navionics.com/fin/>
4. <https://oalib-acoustics.org/>
5. <https://www.wikipedia.org/>