



**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΤΗΣ ΤΗΣ *Pinna nobilis* ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ NATURA
GR1220002 & GR1270010 ΤΟΥ ΘΕΡΜΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ**

Αλέξανδρος Τσατίρης

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων Καθηγητής: Στυλιανός Κατσανεβάκης

Μυτιλήνη, Μάρτιος 2022

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αποφοίτου του Τμήματος Επιστημών της Θάλασσας

Αλέξανδρου, Τσατίρη

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΤΗΣ ΤΗΣ *Pinna nobilis* ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ NATURA
GR1220002 & GR1270010 ΤΟΥ ΘΕΡΜΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ

Τριμελής Επιτροπή Επίβλεψης και Κρίσης της Εργασίας

Υπογραφές

Στυλιανός Κατσανεβάκης

Δρόσος Κουτσούμπας

Θωμάς Χασιώτης

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία υποστηρίχθηκε από το πρόγραμμα «Παρατηρητήριο Παρακτίου Περιβάλλοντος και Διαχείριση Κρίσεων σε Νησιωτικές Περιοχές (AEGIS+)» (ΟΠΣ 5047038) στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» (ΕΣΠΑ 2014-2020), με συγχρηματοδότηση από την Ελληνική Κυβέρνηση (Υπουργείο Ανάπτυξης και Επενδύσεων) και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης, Ταμείο Συνοχής).

Πρόσθετα θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους: κ.Κατσανεβάκη Στυλιανό που συντέλεσε στο να είναι εφικτή η συμμετοχή μου στο πρόγραμμα από το οποίο προέκυψαν οι δειγματοληψίες και τα δεδομένα για την παρούσα εργασία, στον Όλυμπο και στον Βαγγέλη για την καλή συνεργασία τους στο πεδίο, στις ομάδες του κ.Χασιώτη και του κ.Τοπουζέλη για την δημιουργία χαρτών χωρικής πληροφορίας και στην αδερφή μου Πηγή που με βοήθησε στην αναζήτηση προσβάσεων από την ακτή στην Χαλκιδική, καθώς και την σύντροφό μου που με στήριξε πλήρως κατά την διεκπεραίωση της εργασίας μου.

Περίληψη

Για να γίνει αξιολόγηση της κατάστασης της *Pinna nobilis* στον Θερμαϊκό Κόλπο επιλέχθηκαν 15 σταθμοί δειγματοληψίας εντός της καθεμίας εκ των δύο περιοχών NATURA 2000 (GR1220002 - Δέλτα & GR1270010 – Χαλκιδική) όπου έγινε δειγματοληψία αποστάσεων. Βασικός σκοπός ήταν η ανίχνευση ζωντανών ατόμων πίννας και στην περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, δευτερογενής στόχος ήταν η καταγραφή των όσων νεκρών ατόμων υπάρχουν. Δεν εντοπίστηκαν ζωντανά άτομα, ενώ από την καταγραφή νεκρών ατόμων έγινε στατιστική ανάλυση και ανάλυση με χωρικά μοντέλα για την εκτίμηση της κατανομής του είδους πριν το συμβάν μαζικής νέκρωσης. Η εκτίμηση αυτή αποτελεί μεγάλη υποεκτίμηση της πραγματικής κατανομής του είδους καθώς τα νεκρά άτομα που βρέθηκαν ήταν σε κατάσταση υψηλής διάβρωσης, ενώ εντοπίστηκαν μόνο σε περιοχές με μικρή έως καθόλου κλίση βυθού, ελάχιστη επιρροή από κυματικές συνθήκες και ρεύματα και σε απομακρυσμένη θέση από την ακτή. Φαίνεται να υπήρχε μεγάλος πληθυσμός *Pinna nobilis* και στις δύο περιοχές NATURA καθώς οι πληθυσμοί νεκρών ατόμων είχαν πολύ μεγάλη συγκέντρωση όπου εντοπίστηκαν, ο οποίος όμως θανατώθηκε ολοκληρωτικά πιθανότατα από τις αρχές του φαινομένου μαζικής θανάτωσης κρίνοντας από την έντονη επιπανίδα των κελυφών και την ευθραυστότητα τους. Συγκεκριμένα εντοπίστηκαν 21 νεκρά άτομα πίννας στην περιοχή των Δέλτα και 19 νεκρά άτομα στην Χαλκιδική. Η στατιστική μέθοδος έδωσε μέση εκτίμηση 125300 άτομα στα Δέλτα και 19.400 άτομα στην Χαλκιδική, ενώ η χωρική μέθοδος με μοντέλα έδωσε μέση εκτίμηση 35.735 νεκρά άτομα πίννας στα Δέλτα και 5.411 νεκρά άτομα στην περιοχή της Χαλκιδικής.

Abstract

In order to evaluate the condition of *Pinna nobilis* in Thermaikos Gulf, 15 sampling stations were selected inside each of the two NATURA 2000 areas (GR1220002 - Delta & GR1270010 – Xalkidiki), where distance sampling was implemented. The main goal of the survey was the detection of live specimens of *Pinna nobilis*, with the secondary goal of recording any dead specimens found. No live specimens were detected, while the dead specimens records were analysed both statistically and with the use of spatial models in order to estimate the distribution of the species before the Mass Mortality Event. This estimation however constitutes but an underestimation of the true distribution of the former living population since all dead specimens were highly brittle, while at the same time they were detected only in environments with little to no gradient, minimal influence from wave energy and currents and a good distance from the coastline. It is safe to say that there used to be a dense population of *Pinna nobilis* in both NATURA 2000 areas, since the dead specimens were densely distributed in the areas they were detected. However the brittleness of the shells combined with the intense epibionts on them are strong signs that the population collapsed at the start of the Mass Mortality Event. 21 dead *P.nobilis* specimens were located in Xalkidiki and 19 in the Delta. The statistical method estimated an average abundance of 125300 individuals in the Delta and 19.400 in Xalkidiki, while the model based method estimated an average of 35.735 individuals in the Delta and 5.411 individuals in Xalkidiki.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	6
Abstract	6
Εισαγωγή	9
Υλικά και Μέθοδοι	10
Πρωτόκολλο παρακολούθησης.....	10
Περιοχές Μελέτης	17
Εργασίες πεδίου	18
Στατιστική ανάλυση.....	19
Χωρική ανάλυση με Μοντέλα	20
Σημασία του βάθους και του τύπου βυθού στην κατανομή της <i>P.nobilis</i>	21
Αποτελέσματα	22
Στατιστική ανάλυση.....	25
Γραφήματα Ανιχνευσιμότητας	27
Χωρική Ανάλυση με Μοντέλα	28
Χάρτες Βαθυμετρίας και χωρικής κατανομής ενδιαιτημάτων.....	28
GAMS	30
Χάρτες Πληθυσμιακής Πυκνότητας.....	31
Ανιχνευσιμότητα	32
Συζήτηση.....	33
Βιβλιογραφία.....	36
Λοιπό φωτογραφικό υλικό από τις εργασίες πεδίου	40

Εισαγωγή

Η πίννα, *Pinna nobilis* Linnaeus, 1758 είναι ένα θαλάσσιο δίθυρο μαλάκιο της οικογένειας των Pinnidae. Είναι ενδημικό στην Μεσόγειο Θάλασσα και είναι το μεγαλύτερο δίθυρο σε αυτήν, καθώς και ένα απ' τα μεγαλύτερα στον κόσμο. Το μέσο μήκος ενός ενήλικου ατόμου είναι από 30 έως 50 εκατοστά αλλά φτάνει και τα 120 εκατοστά (Zavodnik et al. 1991). Υπό φυσιολογικές συνθήκες τα άτομα επιβιώνουν πάνω από 20 χρόνια, αλλά μπορεί να ξεπεράσουν και τα 45 (Rouanet et al. 2015). Βρίσκονται σε βάθη από 0,5 έως και 60 μέτρα. Συνήθως προτιμούν λιβάδια θαλάσσιων αγγειόσπερμων όπως *Posidonia oceanica*, *Zostera marina*, *Z. noltii* και *Cymodocea nodosa* (Zavodnik et al. 1991), αλλά βρίσκονται σε αφθονία τόσο σε βυθούς με λιβάδια μακροφυκών, όπως *Caulerpa prolifera* και *C. cylindracea* (Katsanevakis and Thessalou-Legaki 2009), όσο και σε μαλακό υπόστρωμα χωρίς βλάστηση (Katsanevakis 2006, Addis et al. 2009). Το μεγάλο μέγεθός τους προσφέρει σκληρό υπόστρωμα σε πολλούς επιβιοτικούς οργανισμούς σε περιβάλλοντα μαλακού υποστρώματος (Giacobbe, 2002; Addis et al., 2009; Rabaoui et al., 2009).

Η πίννα (*Pinna nobilis*) είναι ένα από τα απειλούμενα ενδημικά είδη της Μεσογείου και τελεί υπό καθεστώς αυστηρής προστασίας σύμφωνα με την Οδηγία για τους Οικοτόπους (92/43/EEC, Annex IV), το Πρωτόκολλο για τις Προστατευόμενες Περιοχές και τη Βιολογική Ποικιλότητα στη Μεσόγειο της Σύμβασης της Βαρκελώνης (Annex II), καθώς και την Εθνική Νομοθεσία των περισσότερων Μεσογειακών χωρών. Παρά την προστασία, οι πληθυσμοί της πίννας έχουν μειωθεί σημαντικά κατά τις τελευταίες δεκαετίες ως αποτέλεσμα της απώλειας σημαντικών ενδιαιτημάτων της, της παράνομης αλιείας και διακίνησής της, ως παρεμπόδιον είδος της Επαγγελματικής Αλιείας, αλλά και από την αγκυροβόληση των Σκαφών (π.χ. Katsanevakis 2007b, Katsanevakis et al. 2011, Basso et al. 2015).

Την τελευταία πενταετία οι πληθυσμοί της πίννας στη Μεσόγειο έχουν αποδεκατιστεί λόγω ενός διαρκούς επεισοδίου μαζικής θανάτωσης που ξεκίνησε το φθινόπωρο του 2016 με ποσοστά θνησιμότητας που αγγίζουν το 100% στις προσβεβλημένες περιοχές (π.χ. Deudero et al. 2015, Vázquez-Luis et al. 2017, Catanese et al. 2018). Η μαζική θανάτωση παρατηρήθηκε αρχικά στις Νοτιοανατολικές ακτές της Ιβηρικής Χερσονήσου. Εν συνεχεία μεταφέρθηκε βορειότερα προς τις Βαlearίδες Νήσους τον Ιούνιο του 2017 (Vázquez-Luis et al. 2017). Η εξάπλωση των μαζικών θανάτων συνεχίστηκε προς Δυσμάς, πρώτα σε ακτές της Γαλλίας και της Ιταλίας, ενώ άμεσα άρχισαν να γίνονται αναφορές σε ακτές της Ελλάδας, της Κύπρου, της Τυνησίας, της Αλγερίας, της Κροατίας, του Μαρόκου κ.λ.π. (Catanese et al. 2018; Carella et al. 2019, Panarese et al. 2019, Katsanevakis et al. 2019, Kersting et al. 2019, IUCN 2019, Čížmek et al. 2020)

Λόγω της μαζικής θνησιμότητας του είδους, μετά από έκτακτη αξιολόγηση του καθεστώτος προστασίας του από την IUCN, κρίθηκε Κρισίμως Κινδυνεύον (CR) το 2019. Υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι η μαζική θνησιμότητα οφείλεται σε ένα παράσιτο (*Harposporidium pinnae*) το οποίο ενεργοποιεί μια φλεγμονώδη αντίδραση στις πίννες που οδηγεί τελικά στη θανάτωσή τους. Το παράσιτο έχει ήδη καταγραφεί και στις Ελληνικές Θάλασσες

προκαλώντας τη θνησιμότητα πολλών πληθυσμών πίννας στο Αιγαίο (π.χ. Katsanevakis et al. 2019, Zotou et al., 2020). Είναι επιτακτική η ανάγκη για την παρακολούθηση του είδους, καταρχάς, στις Προστατευόμενες Περιοχές του Δικτύου Natura 2000, αλλά και σε όλη την επικράτεια προκειμένου να διαπιστωθεί η κατάσταση των πληθυσμών και να προταθούν διαχειριστικά μέτρα για την προστασία του είδους. Η προσβολή των ελληνικών πληθυσμών από το *Harposporidium pinnae* έχει οδηγήσει στην τοπική εξαφάνιση του είδους στις περισσότερες θαλάσσιες περιοχές και τη θανάτωση >95% των υπάρχοντων πληθυσμών (Zotou et al. 2020, Katsanevakis et al. 2021).

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση της αφθονίας και της μέσης πληθυσμιακής πυκνότητας της πίννας στην Περιοχή Μελέτης, εντός των ΕΖΔ GR1220002“ΔΕΛΤΑ ΑΞΙΟΥ-ΛΟΥΔΙΑ-ΑΛΙΑΚΜΟΝΑ-ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ-ΑΞΙΟΥΠΟΛΗ” & GR1270010“ΑΚΡΩΤΗΡΙΟ ΠΥΡΓΟΣ-ΟΡΜΟΣ ΚΥΨΑΣ-ΜΑΛΑΜΟ”», στο πλαίσιο υλοποίησης του Προγράμματος: «Διαχειριστικές δράσεις για την προστασία και διατήρηση της βιοποικιλότητας στις προστατευόμενες περιοχές του Θερμαϊκού Κόλπου», της Πράξης «ΕΠΙΧΟΡΗΓΗΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΘΕΡΜΑΪΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ ΓΙΑ ΔΡΑΣΕΙΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ, ΕΙΔΩΝ ΚΑΙ ΟΙΚΟΤΟΠΩΝ» (κωδ. ΟΠΣ 5033615), η οποία έχει ενταχθεί στο ΕΠ ΥΜΕΠΕΡΑΑ με την απόφαση ένταξης με αρ. πρωτ. οικ. ΕΥΔ/ΕΠ ΥΜΕΠΕΡΑΑ 11972/30-12-2019 (ΑΔΑ: 68ΣΕ46ΜΤΛΡ-Β9Ζ) της Ειδικής Υπηρεσίας Διαχείρισης Επιχειρησιακού Προγράμματος «Υποδομές Μεταφορών, Περιβάλλον, και Αειφόρος Ανάπτυξη», του Υπουργείου Ανάπτυξης και Επενδύσεων/Ειδική Γραμματεία Διαχείρισης Προγραμμάτων Ευρωπαϊκού Ταμείου Περιφερειακής Ανάπτυξης, Ταμείου Συνοχής και Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου» κωδικός ΠΔΕ 2020ΣΕ27510002».

Υλικά και Μέθοδοι

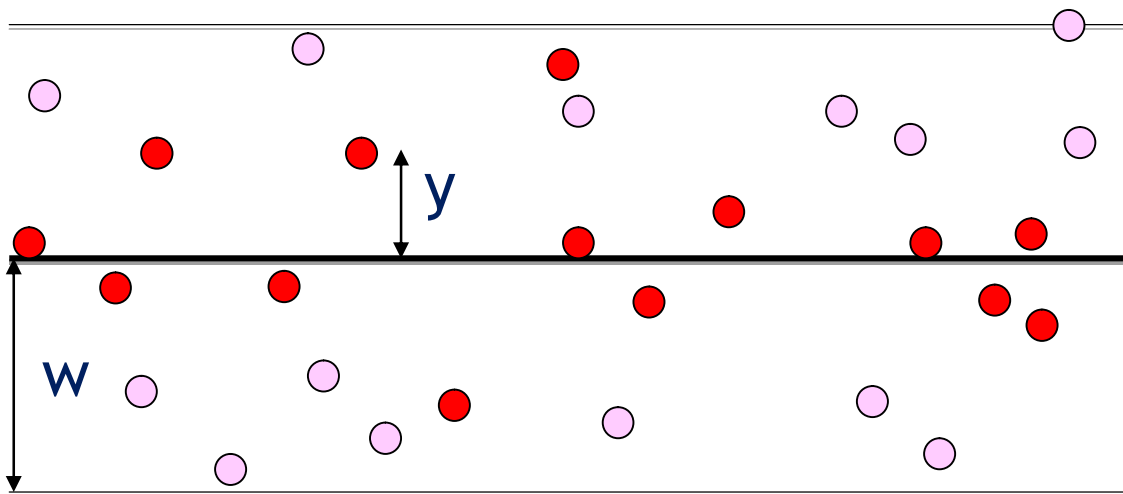
Πρωτόκολλο παρακολούθησης

Η αποτύπωση της χωρικής κατανομής της πίννας *Pinna nobilis* στην Περιοχή Μελέτης – ώστε να εκτιμηθεί το μέγεθος του πληθυσμού του είδους πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή της Μεθόδου Δειγματοληψίας Αποστάσεων σε γραμμικές διατομές (Distance Sampling in Line Transects), που έχει καθιερωθεί ως μια αξιόπιστη και αμερόληπτη μέθοδος για την πληθυσμιακή μελέτη της πίννας από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες περιοχές της Μεσογείου συμπεριλαμβανομένων των Ελληνικών Θαλασσών. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής και η ανάπτυξη των σχετικών Πρωτοκόλλων πεδίου ειδικά για την πίννα έχει γίνει και εφαρμοσθεί σε διάφορες περιοχές των Ελληνικών Θαλασσών και της Μεσογείου (π.χ. Katsanevakis 2006, 2007a;b Katsanevakis and Thessalou-Legaki 2009; Rabaoui et al. 2010; Tsaতিরis et al. 2018).

Η ατελής ανιχνευσιμότητα κατά την καταγραφή ενός πληθυσμού με αυτόνομη κατάδυση, αν αγνοηθεί, οδηγεί σε υποεκτίμηση των μεταβλητών κατάστασης του πληθυσμού (αφθονία, πληθυσμιακή πυκνότητα, πιθανότητα παρουσίας). Σε αυτές τις περιπτώσεις προκειμένου να γίνει αμερόληπτη εκτίμηση της μεταβλητής κατάστασης θα

πρέπει να αναπτυχθούν κατάλληλες μέθοδοι συνεκτίμησης της ανιχνευσιμότητας. Η Δειγματοληψία Αποστάσεων είναι ένα σύνολο στατιστικών μεθόδων εκτίμησης αφθονίας ή/και πληθυσμιακής πυκνότητας που συνεκτιμούν την πιθανότητα ανίχνευσης των ατόμων του πληθυσμού ενδιαφέροντος στο δείγμα. Πρόκειται ουσιαστικά για μια επέκταση της μεθόδου πλήρους καταγραφής σε δειγματοληπτικές επιφάνειες που αμβλύνει τη βασική της παραδοχή (πλήρους ανιχνευσιμότητας), επιτρέποντας την εφαρμογή της μεθόδου σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατό να εξασφαλιστούν συνθήκες τέλει ανίχνευσης (Buckland et al. 2001; Thomas et al. 2002).

Κάθε επιφάνεια δειγματοληψίας ορίζεται από μια γραμμική διατομή μήκους l_i κι ένα εύρος καταγραφής (πλάτος) w εκατέρωθεν αυτής. Το εμβαδό των δειγματοληπτικών επιφανειών που προβλέπονται από τη Δειγματοληψία Αποστάσεων δεν είναι κατ' ανάγκη προκαθορισμένο κατά το σχεδιασμό της δειγματοληψίας και μπορεί να προκύψει μετά από την ολοκλήρωσή της. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως δεν τίθεται αναγκαστικά συγκεκριμένο όριο εύρους διερεύνησης όπως στη δειγματοληψία πλήρους καταγραφής σε δειγματοληπτικές επιφάνειες, αλλά ο παρατηρητής μπορεί να καταγράψει όσα άτομα του πληθυσμού μπορεί να εντοπίσει εκατέρωθεν της γραμμικής διατομής. Ωστόσο, για κάθε άτομο που εντοπίζει, ο παρατηρητής οφείλει επιπλέον να καταγράψει την κάθετη του απόσταση y_i από την εκάστοτε γραμμική διατομή ή το σημείο δειγματοληψίας (Εικόνα 1). Το εμβαδό της δειγματοληπτικής επιφάνειας στην οποία θα αναφέρονται τελικά οι καταγραφές ($2wl_i$) σχετίζεται με την μέγιστη απόσταση όλων των ανιχνεύσεων στο σύνολο του δείγματος ($w = y_{\max}$).

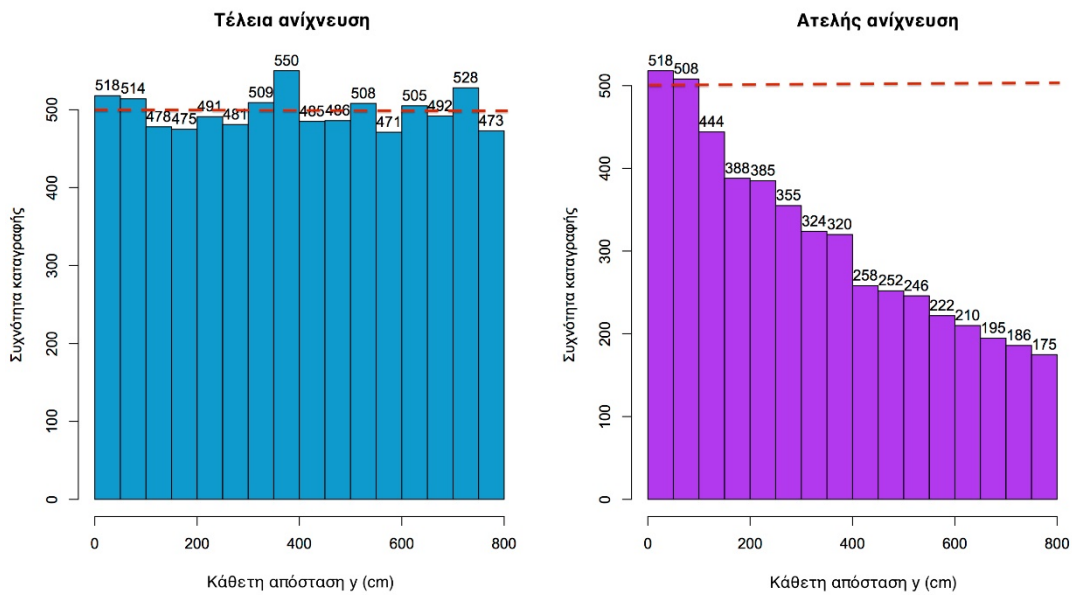


Εικόνα 1: Σχηματική παράσταση της Δειγματοληψίας Αποστάσεων. Ο ερευνητής κινείται κατά μήκος μιας γραμμής και καταγράφει τις αποστάσεις y_i του κάθε ατόμου του είδους-στόχου που εντοπίζει. Κάποια άτομα εντοπίζονται (σκούρο κόκκινο) και κάποια άλλα όχι (ανοιχτό μοβ).

Στην περίπτωση λοιπόν που η ανίχνευση του είδους στις δειγματοληπτικές επιφάνειες δεν είναι πλήρης, η σχέση εκτίμησης της αφθονίας μπορεί να γραφτεί ως $\hat{N} = nA/(A_c P_c) = n/(P_c \hat{P}_a)$, όπου n είναι το πλήθος των ατόμων που καταγράφηκαν στις δειγματοληπτικές επιφάνειες, A_c είναι η συνολική επιφάνεια δειγματοληψίας, $p_c = A_c/A$ είναι το ποσοστό κάλυψης της περιοχής δειγματοληψίας (ή πιθανότητα κάλυψης – coverage probability) και P_c είναι η πιθανότητα ανίχνευσης των ατόμων του πληθυσμού στις δειγματοληπτικές επιφάνειες, ενώ η σχέση της πληθυσμιακής πυκνότητας μπορεί να γραφτεί ως $\hat{D} = n/2wL\hat{P}_a = n/(A_c \hat{P}_a)$, όπου L είναι το συνολικό μήκος όλων των γραμμικών διατομών.

Ως πιθανότητα ανίχνευσης P_c μπορεί να θεωρηθεί το κλάσμα του πλήθους των ατόμων του πληθυσμού που εντοπίστηκαν στις δειγματοληπτικές επιφάνειες προς το πλήθος του συνόλου των ατόμων του πληθυσμού που βρίσκονταν εντός των ορίων τους. Δεδομένου πως οι υπόλοιπες παράμετροι των παραπάνω σχέσεων εκτίμησης πληθυσμιακής πυκνότητας και αφθονίας προκύπτουν από τη εκπόνηση και την εκτέλεση του σχεδίου της δειγματοληψίας, ο ουσιαστικός στόχος της Δειγματοληψίας Αποστάσεων είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας ανίχνευσης (ή ανιχνευσιμότητας) P_c του είδους ενδιαφέροντος στις εκάστοτε συνθήκες διερεύνησης.

Σε αντίθεση με την πλήρη καταγραφή σε δειγματοληπτικές επιφάνειες, κατά την εφαρμογή της Δειγματοληψίας Αποστάσεων δεν απαιτείται η ανίχνευση όλων των ατόμων του πληθυσμού στις δειγματοληπτικές επιφάνειες. Η βασική παραδοχή της Δειγματοληψίας Αποστάσεων ως προς την ανιχνευσιμότητα προβλέπει πλήρη ανίχνευση μόνο ακριβώς επάνω και πολύ κοντά στην κάθε γραμμική διατομή. Στην περίπτωση μιας οπτικής έρευνας κατά την οποία αφενός η τοποθέτηση των γραμμικών διατομών έχει γίνει με τυχαίο (ή συστηματικά τυχαίο) τρόπο και αφετέρου έχει εξασφαλιστεί πλήρης ανίχνευση, το ιστόγραμμα συχνοτήτων των αποστάσεων των ατόμων του πληθυσμού που εντοπίζονται αναμένεται να είναι ομοιόμορφο (Εικόνα 2). Ωστόσο, με την αύξηση της απόστασης από τη γραμμική διατομή, είναι λογικό να αυξάνεται και η δυσκολία ανίχνευσης των ατόμων του πληθυσμού ενδιαφέροντος (π.χ. λόγω περιορισμένης ορατότητας). Πρακτικά, εάν δεν μπορεί να εξασφαλιστεί η πλήρης ανίχνευση του είδους ενδιαφέροντος κατά την έρευνα πεδίου, αναμένεται να υπάρχει μείωση του πλήθους των ατόμων που ανιχνεύονται σε ολόένα και μεγαλύτερες αποστάσεις και κατά συνέπεια μείωση της πιθανότητας ανίχνευσής τους με την απόσταση από τη γραμμή (Εικόνα 2). Μέσα από τη συλλογή και την ανάλυση των αποστάσεων των καταγραφών των ατόμων του πληθυσμού που εντοπίστηκαν στις δειγματοληπτικές επιφάνειες, η μέθοδος της Δειγματοληψίας Αποστάσεων στοχεύει στην μοντελοποίηση της συνάρτησης ανιχνευσιμότητας που προσδιορίζει τη σχέση της πιθανότητας ανίχνευσης των ατόμων του πληθυσμού ενδιαφέροντος με την απόσταση τους από τη γραμμική διατομή.



Εικόνα 2. Προσομοίωση ιδανικού (τέλεια ανίχνευση – αριστερά) και ρεαλιστικού (ατελής ανίχνευση – δεξιά) ιστογράμματος συχνοτήτων των κάθετων αποστάσεων του συνόλου των καταγραφών μιας υποβρύχιας οπτικής έρευνας γραμμικών διατομών.

Η συνολική πιθανότητα ανίχνευσης μπορεί να εκτιμηθεί από το λόγο του εμβαδού του ιστογράμματος συχνοτήτων των αποστάσεων των καταγραφών στην Εικόνα 2 (ανάλογο του πλήθους των ατόμων που εντοπίστηκαν στις δειγματοληπτικές επιφάνειες) προς το λόγο του εμβαδού της ορθογώνιας επιφάνειας που σχηματίζεται κάτω από τις κόκκινες διακεκομμένες γραμμές (ανάλογο του πλήθους των ατόμων που πραγματικά ήταν παρόντα στις δειγματοληπτικές επιφάνειες). Εάν προσαρμόσουμε μια καμπύλη στο παραπάνω ιστόγραμμα συχνοτήτων (π.χ. με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων) και την κανονικοποιήσουμε διαιρώντας την με τον εαυτό της στην απόσταση $y = 0$, τότε θα έχουμε εκτιμήσει τη συνάρτηση ανιχνευσιμότητας $g(y)$ που περιγράφει την πιθανότητα ανίχνευσης των ατόμων του πληθυσμού σε κάθετη απόσταση y από την κάθε γραμμική διατομή. Σύμφωνα και με τα παραπάνω, το ολοκλήρωμα της συνάρτησης ανιχνευσιμότητας αντιστοιχεί στο πλήθος των ατόμων που εντοπίστηκαν στις δειγματοληπτικές επιφάνειες, οπότε η ζητούμενη πιθανότητα ανίχνευσης P_a δίνεται από τη σχέση $\hat{P}_a = \frac{\int_0^w \hat{g}(y) dy}{w}$, όπου w είναι το ημίσιο πλάτος των γραμμικών διατομών, δηλαδή το μέγιστο πλάτος των διατομών, που καθορίζεται από τη μέγιστη κάθετη απόσταση στην οποία καταγράφηκε κάποιο άτομο του πληθυσμού κατά την οπτική διερεύνηση των δειγματοληπτικών επιφανειών (Buckland et al. 2001). Το ολοκλήρωμα $\mu = \int_0^w g(y) dy$ ονομάζεται ενεργό ημίσιο πλάτος λωρίδας (effective strip half-width) και αναφέρεται στο ημίσιο πλάτος λωρίδας εντός του οποίου το πλήθος των ατόμων του είδους ενδιαφέροντος που εντοπίζεται είναι ίσο με το πλήθος των ατόμων που δεν εντοπίζεται.

Όπως περιγράφηκε και παραπάνω, η συνάρτηση ανιχνευσιμότητας $g(y)$ έχει προκύψει ουσιαστικά από την κανονικοποίηση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των δεδομένων της απόστασης $f(y)$, ώστε το ολοκλήρωμά της να είναι ίσο με τη μονάδα. Έτσι, μπορούμε να θεωρήσουμε πως $f(y) = g(y)/\mu$ και συνεπώς

$f(0) = 1/\mu$, αφού $g(0) = 1$ ως προϋπόθεση εφαρμογής της Δειγματοληψίας Αποστάσεων. Τελικά, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί ως $\hat{D} = n\hat{f}(0)/2L$.

Ο συγκεκριμένος τρόπος έκφρασης της εκτιμήτριας της πληθυσμιακής πυκνότητας (και κατ' επέκταση και της εκτιμήτριας της αφθονίας) είναι ιδιαίτερα βολικός, λόγω της ύπαρξης πλούσιας βιβλιογραφίας που ασχολείται με την προσαρμογή συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας. Η μέθοδος μοντελοποίησης που ακολουθείται είναι *μη παραμετρική* και συνήθως βασίζεται στην επιλογή μιας κατάλληλης κύριας συνάρτησης που λαμβάνει υπόψη το πιθανό σχήμα της καμπύλης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των δεδομένων απόστασης (είτε από τη θεωρία, είτε από προηγούμενη εμπειρία), στην οποία προστίθενται όροι κατάλληλων σειρών επέκτασης (πολυωνυμική ή Fourier) για την επίτευξη της βέλτιστης προσαρμογής στα δεδομένα (Buckland et al. 2001).

Η σημαντικότερη ιδιότητα που οφείλει να έχει ένα μοντέλο συνάρτησης ανιχνευσιμότητας είναι η *ευρωστία* (model robustness). Για να είναι το μοντέλο εύρωστο, θα πρέπει να έχει μια αρκετά γενική μορφή ώστε η καμπύλη του να μπορεί να προσαρμοστεί σε μια μεγάλη ποικιλία σχημάτων (δηλαδή ιστογραμμάτων συχνοτήτων απόστασης). Ο συγκεκριμένος περιορισμός πρακτικά αποκλείει μονοπαραμετρικά μοντέλα, ενώ αντίθετα στη θέση τους προκρίνονται και προτιμώνται τα *ημιπαραμετρικά*: εκείνα που έχουν τη δυνατότητα να περιλαμβάνουν ένα μεταβλητό πλήθος παραμέτρων, ανάλογα με όσες χρειάζονται για να προσαρμοστούν στα εκάστοτε δεδομένα. Επιπλέον, το κατάλληλο μοντέλο για τη $g(y)$ οφείλει να χαρακτηρίζεται και από την ιδιότητα της *συγκεντρωτικής ευρωστίας* (pooling robustness). Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στις εκτιμήσεις που προκύπτουν ακόμη και μέσα από την ανάλυση συγκεντρωτικών δεδομένων –τα οποία μπορεί να αφορούν επιμέρους παραμέτρους που επηρεάζουν την πιθανότητα ανίχνευσης– να παραμένουν αξιόπιστες. Μια ακόμη σημαντική ιδιότητα που πρέπει να διαθέτει το μοντέλο της συνάρτησης ανιχνευσιμότητας σχετίζεται με το σχήμα της καμπύλης της (*κριτήριο σχήματος*). Η καμπύλη του μοντέλου κοντά στην απόσταση $y = 0$ πρέπει να είναι σχετικά οριζόντια (δηλαδή η παράγωγος $g'(0)$ θα πρέπει να είναι ίση με μηδέν). Το εν λόγω κριτήριο του σχήματος ουσιαστικά αποκλείει συναρτήσεις που εμφανίζουν απότομες κορυφές κοντά στη μηδενική απόσταση. Τέλος, εφόσον πληρούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις, το μοντέλο θα πρέπει επίσης να είναι *αποτελεσματικό* και να δίνει εκτιμήσεις με μεγάλη πιστότητα, δηλαδή εκτιμήσεις με μικρή διασπορά. Προφανώς οι εκτιμήσεις με μεγάλη πιστότητα είναι ωφέλιμες μόνο στην περίπτωση μοντέλων που είναι εύρωστα και πληρούν το παραπάνω κριτήριο σχήματος – σε αντίθετη περίπτωση, οι εκτιμήσεις μπορεί να έχουν μεν μεγάλη πιστότητα αλλά δε θα είναι αμερόληπτες.

Η γενική μορφή του μοντέλου της συνάρτησης ανιχνευσιμότητας που χρησιμοποιείται συνήθως είναι $g(y) = \frac{key(y)[1+series(y)]}{key(0)[1+series(0)]}$, όπου $key(y)$ είναι μια κατάλληλη κύρια συνάρτηση και $series(y)$ είναι μια κατάλληλη σειρά επέκτασης. Η μορφή αυτή, σε συνδυασμό με τις κύριες συναρτήσεις και τις σειρές επέκτασης που προτείνονται από τους Buckland et al. (2001) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, πληροί όλες τις προαναφερθείσες προδιαγραφές της ευστάθειας, του κριτηρίου σχήματος και της αποτελεσματικότητας.

Πίνακας 1. Προτεινόμενες κύριες συναρτήσεις και σειρές επέκτασης για τη μοντελοποίηση της συνάρτησης ανιχνευσιμότητας, σύμφωνα με τους Buckland et al. (2001).

Κύριες συναρτήσεις		Σειρές επέκτασης	
key(y)		series(y)	
Half-normal	$\exp(-y^2/2\sigma^2)$	Simple polynomial	$\sum_j^m a_j (y/w)^{2j}$
Hazard-rate	$1 - \exp(-(y/\sigma)^{-b})$	Hermite polynomial	$\sum_j^m a_j H_{2j}(y/\sigma)$

Οι παράμετροι του μοντέλου που ικανοποιούν τη βέλτιστη προσαρμογή της συνάρτησης ανιχνευσιμότητας στα δεδομένα της απόστασης που έχουν συλλεχθεί κατά τη δειγματοληψία εκτιμώνται με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood estimation). Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών αυτών υπάρχει το εξειδικευμένο και δωρεάν διαθέσιμο λογισμικό DISTANCE 7.3 (Thomas et al. 2010), που περιλαμβάνει τις σχετικές ρουτίνες μεγιστοποίησης και είναι σε θέση να παράγουν αναλυτικά αποτελέσματα. Κατά την ανάλυση των δεδομένων συνίσταται να γίνεται δοκιμή προσαρμογής περισσότερων της μιας μορφής πιθανών μοντέλων που προκύπτουν από τους συνδυασμούς των κύριων συναρτήσεων και των σειρών επέκτασης του Πίνακα 1. Η επιλογή του βέλτιστου μοντέλου και ο υπολογισμός μέσω σταθμισμένων εκτιμήσεων μπορεί γίνει χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που βασίζεται στο Κριτήριο Πληροφορίας του Akaike (AIC) (Akaike 1973; Burnham & Anderson 2002). Μια εκτιμώμενη συνάρτηση ανιχνευσιμότητας αφορά το συγκεκριμένο είδος-στόχο, τους συγκεκριμένους παρατηρητές και τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Οι συναρτήσεις ανιχνευσιμότητας διαφορετικών ειδών ή του ίδιου είδους σε διαφορετικές συνθήκες μπορεί να διαφοροποιούνται δραματικά.

Η διασπορά της εκτίμησης της πληθυσμιακής πυκνότητας μπορεί να προσεγγιστεί σε πολύ καλό βαθμό χρησιμοποιώντας τη μέθοδο δέλτα (Seber 1982), σύμφωνα με την εξίσωση

$$\widehat{Var}(\widehat{D}) \cong \widehat{D}^2 \left[\frac{\widehat{var}(n)}{n^2} + \frac{\widehat{var}[\widehat{f}(0)]}{[\widehat{f}(0)]^2} \right].$$

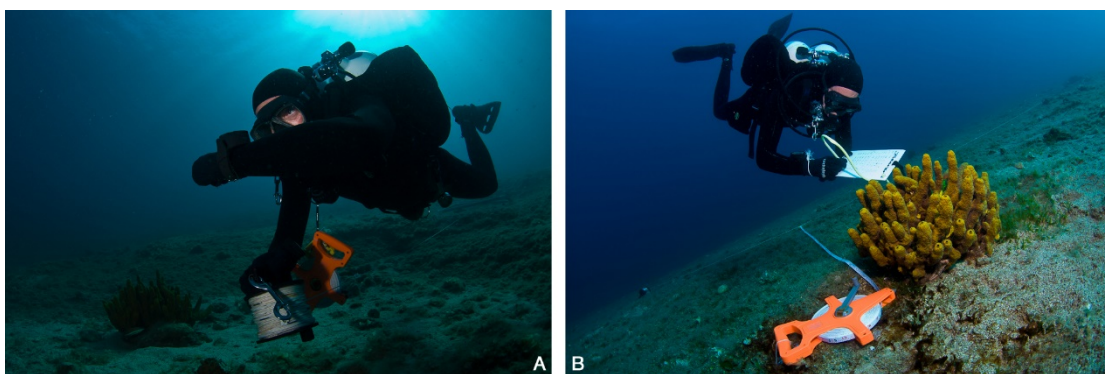
Αντίστοιχα μπορεί να προσεγγιστεί και η διασπορά της εκτίμησης της αφθονίας. Στην περίπτωση αυτή, η διασπορά $\widehat{var}(n)$ εκτιμάται από τη διασπορά του δείγματος των ρυθμών καταγραφής (encounter rates) n_i/l_i , ενώ η διασπορά $\widehat{var}[\widehat{f}(0)]$ προκύπτει από τον πίνακα πληροφορίας του Fisher, εφόσον η πιθανότητα ανίχνευσης έχει εκτιμηθεί με χρήση της μεθόδου μέγιστης πιθανοφάνειας (Buckland et al. 2001). Εναλλακτικά, ο υπολογισμός

της διασποράς της εκτίμησης της αφθονίας και της πληθυσμιακής πυκνότητας μπορεί να γίνει απευθείας, αξιοποιώντας μια μέθοδο επαναδειγματοληψίας όπως η μη παραμετρική bootstrap (Efron & Tibshirani 1993).

Η παραπάνω προσέγγιση αφορά στη μοντελοποίηση της σχέσης της ανιχνευσιμότητας με την απόσταση από τη γραμμική διατομή. Εξαιτίας της ιδιότητας της συγκεντρωτικής ευρωστίας που χαρακτηρίζει τα μοντέλα που επιλέγονται για την ανιχνευσιμότητα, οι εκτιμήσεις που προκύπτουν είναι αξιόπιστες, ακόμη και στην περίπτωση που η πιθανότητα ανίχνευσης των ατόμων του πληθυσμού εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους πλέον της απόστασης (Buckland et al. 2001). Τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι το μέγεθος των ατόμων, η πολυπλοκότητα του βιοτόπου στον οποίο απαντούν, αλλά και παράμετροι που σχετίζονται με τις ίδιες τις συνθήκες της δειγματοληπτικής προσπάθειας, όπως η ορατότητα, η εμπειρία του παρατηρητή, κ.λπ. Ωστόσο, εάν κάποιες από τις εν λόγω παραμέτρους κριθεί πως συμβάλλουν σημαντικά στη διαμόρφωση της ανιχνευσιμότητας, ο συνυπολογισμός τους κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης της ανιχνευσιμότητας μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια των εκτιμήσεων.

Με αυτό το σκεπτικό, οι Marques & Buckland (2003, 2004) και Buckland et al. (2004) πρότειναν την ένταξη των παραμέτρων αυτών ως συμμεταβλητές (συμβολιζόμενες με το διάνυσμα z) στο μοντέλο της συνάρτησης ανιχνευσιμότητας $g(y,z)$ μέσω του όρου κλίμακας σ (scale term) που εμφανίζεται στις κύριες συναρτήσεις half-normal και hazard-rate (βλ. Πίνακα 1): $\sigma = \exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^r \beta_i z_i)$. Οι εν λόγω παράμετροι αποκτούν με αυτό τον τρόπο ενεργό συμμετοχή στη διαμόρφωση του ρυθμού μεταβολής της πιθανότητας ανίχνευσης συναρτήσει της απόστασης. Ο υπολογισμός των σημειακών εκτιμήσεων των παραμέτρων ενδιαφέροντος, της διασποράς τους και των διαστημάτων εμπιστοσύνης τους μπορεί να γίνει με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο για την απλή περίπτωση της Δειγματοληψίας Αποστάσεων χωρίς συμμεταβλητές.

Οι υλικοτεχνικές απαιτήσεις για την άμεση εφαρμογή της μεθόδου από δύτες-ερευνητές είναι μικρές και δεν διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες της πλήρους καταγραφής σε λουρίδες. Έτσι, για τον ορισμό της θέσης της κάθε γραμμικής διατομής στο χώρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα βαθμονομημένο ως προς το μήκος του λεπτό σκοινί από νάilon (καταδυτικός μίτος) που αναπτύσσεται ή/και στερεώνεται κατάλληλα στο βυθό, καθώς και μια υποβρύχια πυξίδα για την εξασφάλιση της ευθείας ανάπτυξης του μίτου (βλ. Εικόνα 3Α). Η μέτρηση της απόστασης των ατόμων του πληθυσμού ενδιαφέροντος από την εκάστοτε γραμμική διατομή μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μια μετροταινία ή κατάλληλα βαθμονομημένη ράβδο (βλ. Εικόνα 3Β).

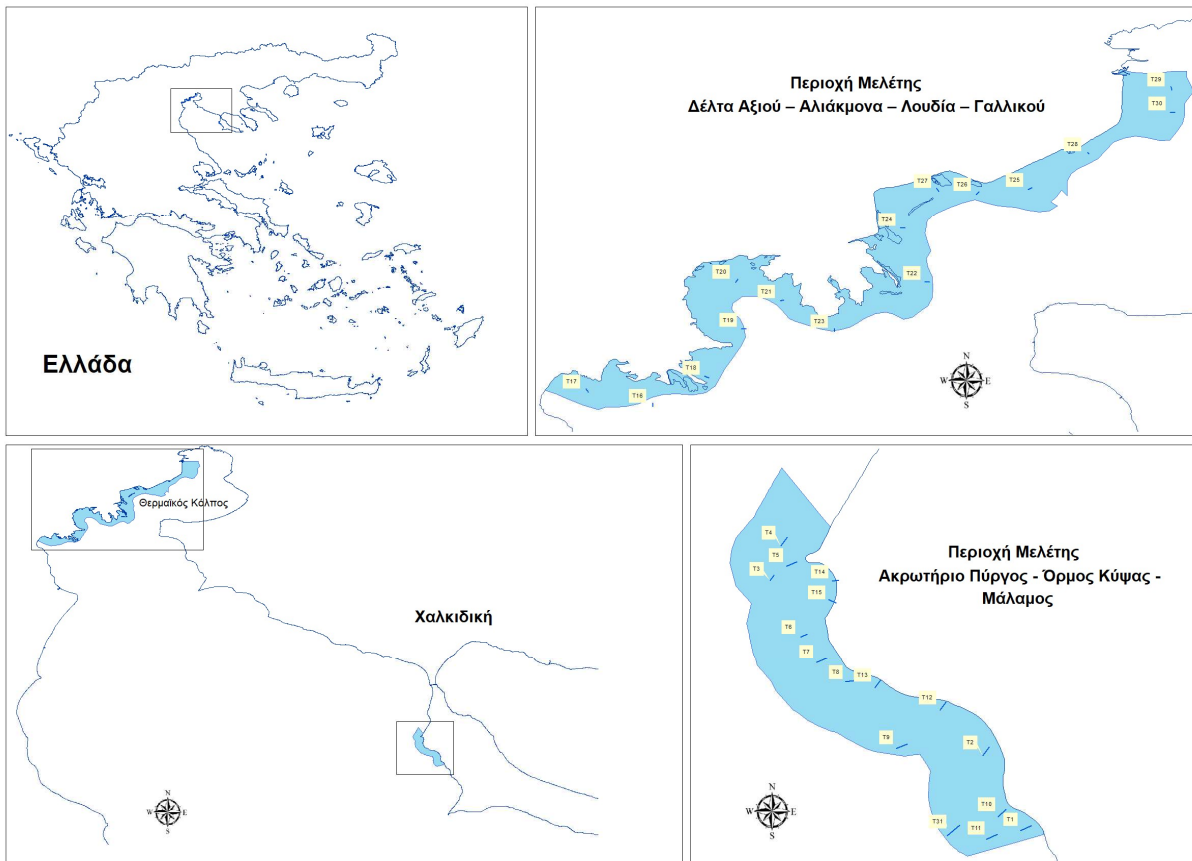


Εικόνα 3: Ανάπτυξη καταδυτικού μίτου σε ευθεία για τον καθορισμό της γραμμικής διατομής με τη χρήση πυξίδας (Α) και μέτρηση κάθετης απόστασης μιας αποικίας σπόγγου *Aplysina aerorhoba* από τη γραμμική διατομή χρησιμοποιώντας μετροταινία (Β).

Περιοχές Μελέτης

Η πρώτη περιοχή μελέτης αφορά την περιοχή Natura 2000 που περιέχει το Ακρωτήριο Πύργος τον Όρμο Κύψας και την Μάλαμο (Εικόνα 4). Βρίσκεται στα βόρειο-δυτικά του πρώτου ποδιού της Χαλκιδικής, δίπλα σε κατοικημένη και μη δασική περιοχή που επίσης αποτελεί μέρος του δικτύου Natura 2000. Έχει έκταση 11,38 τετραγωνικά χιλιόμετρα, έχει ποικιλία ενδιαιτημάτων και σε σημεία ξεπερνάει τα 40 μέτρα βάθος.

Η δεύτερη περιοχή μελέτης αφορά την περιοχή Natura 2000 που περιλαμβάνει το Δέλτα Αξιού – Αλιάκμονα – Λουδία – Γαλλικού στην ευρύτερη περιοχή Αξιούπολης (Εικόνα 4). Βρίσκεται στα δυτικά του Θερμαϊκού Κόλπου και δέχεται μεγάλες ποσότητες γλυκού νερού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Έχει έκταση 62,38 τετραγωνικά χιλιόμετρα, χαρακτηρίζεται κυρίως από θολά νερά με μεγάλη παραγωγικότητα, μαλακό υπόστρωμα και μικρά βάθη, ενώ υπάρχει έντονη παρουσία μυδοκαλλιεργειών.



Εικόνα 4: Οι περιοχές μελέτης και η θέση τους, καθώς και οι 31 τομές δειγματοληψίας. Οι χάρτες παρήχθησαν με ArcGIS v10.2.2

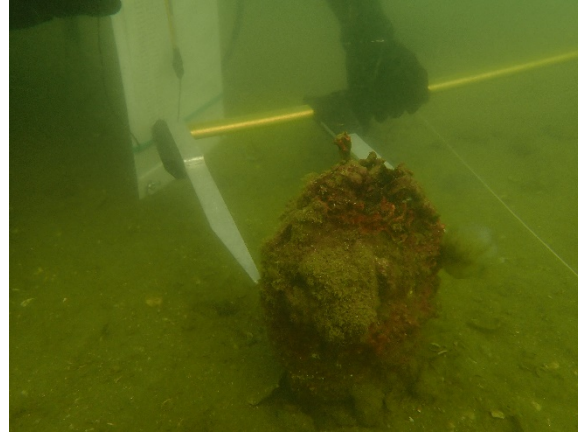
Εργασίες πεδίου

Πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία αποστάσεων σε ευθείες τομές, με έναν παρατηρητή και με αυτόνομη κατάδυση (SCUBA). Σε κάθε περιοχή μελέτης επιλέχθηκαν 15 σημεία με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτονται τα περισσότερα ενδιαίτηματα και βάθη των περιοχών με βάση τους πρώιμους χάρτες βαθυμετρίας και ενδιαιτημάτων, αλλά και να είναι το δυνατό απλωμένα καθ' όλη την έκταση της κάθε περιοχής. Το μήκος των τομών ήταν 200 μέτρα, παρόλα αυτά σε κάποιες περιπτώσεις οι τομές έγιναν μικρότερες, άλλοτε λόγω πολύ μεγάλων βαθών (Χαλκιδική), άλλοτε λόγω εμποδίων, όπως η επικίνδυνη χρήση τουριστικών θαλάσσιων σκαφών στην επιφάνεια (Χαλκιδική) και η παρουσία σχοινιών, κλωβών, δικτύων και άλλων εμποδίων στον βυθό με περιορισμένη ορατότητα < 0,5m (εσωτερικός Θερμαϊκός Κόλπος).

Η κάθε τομή (transect) γινόταν με την χρήση μίτου, ο οποίος ήταν σημαδεμένος ανά πέντε μέτρα. Η μέτρηση βάθους γινόταν στην μέση του κάθε πεντάμετρου τμήματος (segment) με καταδυτικό υπολογιστή. Ο τύπος βυθού κατηγοριοποιήθηκε σε σκληρό υπόστρωμα (συνεχόμενος βράχος, κροκάλες, κατρακύλια, ύφαλοι), σε μαλακό υπόστρωμα (λάσπη, άμμος, βιογενής άμμος, αραιά λιβάδια θαλάσσιων αγγειόσπερμων όπως *Cymodocea nodosa* σε άμμο) και σε πυκνά λιβάδια θαλάσσιων αγγειόσπερμων, όπως *Posidonia oceanica*, *Zostera marina*, *Z. noltii*, όπου και καταγράφηκε ο κυρίαρχος τύπος σε κάθε τμήμα.

Για κάθε παρατήρηση νεκρής ή ζωντανής πίννας καταγράφηκαν τα εξής δεδομένα: Η κατά μήκος απόσταση από την αρχή της τομής (I_x), η κάθετη απόσταση από την τομή (I_y) και το μέγεθος του ατόμου (S_i) ως το μέγιστο πλάτος του άνω τμήματος του οστράκου και η κατάσταση του ατόμου, δηλαδή αν ήταν ζωντανό ή νεκρό (να σημειωθεί ωστόσο ότι δε βρέθηκε κανένα ζωντανό άτομο). Η κάθετη απόσταση μετρήθηκε με μεζούρα (0,5 εκατοστά ακρίβεια) και το μέγεθος με παχύμετρα (ακρίβειας 0,5 εκατοστών για άτομα >15 εκατοστά πλάτος και ακρίβειας 0,05 εκατοστών για άτομα <15 εκατοστά πλάτος) (Εικόνα 5). Επιπρόσθετα εκτιμήθηκε η ορατότητα για κάθε τομή με την κοινή μέθοδο κατά την οποία ο ένας δύτης κάθετα ακίνητος κρατώντας έναν λευκό πίνακα στην αρχή μιας μεζούρας, ενώ ο άλλος, απομακρυνόμενος, σταματάει όταν ο πίνακας γίνεται μετά βίας ορατός και καταγράφει την απόσταση (Εικόνα 6). Για τα πολύ βαθιά νερά (>30 μέτρων βάθους) στην Χαλκιδική πραγματοποιήθηκε μία επιπλέον τομή μήκους 305 μέτρων με συρόμενη κάμερα βυθού από το σκάφος.

Η ανάλυση με δειγματοληψίες αποστάσεων έχει στόχο να εκτιμήσει την ανιχνευσιμότητα των ατόμων ως μία συνάρτηση της απόστασης από την τομή. Η ανιχνευσιμότητα μπορεί να εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τον παρατηρητή, ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε ατόμου, περιβαλλοντικές συνθήκες (ορατότητα, τύπος βυθού) κ.α. Η ανιχνευσιμότητα ποσοτικοποιήθηκε μέσω της συνάρτησης $g(y)$, η οποία δίνει την πιθανότητα να ανιχνευτεί ένα άτομο σε μία κάθετη απόσταση y από την τομή, χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις του Πίνακα 1.



Εικόνα 5: Μέτρηση μέγιστου πλάτους οστράκου πίννας εντός λιβαδιού ποσειδωνίας (αριστερά) και σε περιοχή μαλακού γυμνού υποστρώματος (δεξιά)



Εικόνα 6: Μέτρηση ορατότητας με τη μέθοδο του λευκού πίνακα

Στατιστική ανάλυση

Επιλέχθηκαν 3 συμμεταβλητές για την συνάρτηση ανιχνευσιμότητας: το μέγεθος των ατόμων, η ορατότητα και το ενδιαίτημα (τύπος οικοτόπου). Στο λογισμικό Distance, χρησιμοποιήθηκε η μηχανή Multiple Covariates Distance Sampling (MCDS). Οι κύριες συναρτήσεις hazard-rate και half-normal χρησιμοποιήθηκαν χωρίς συμμεταβλητές, με την κάθε συμμεταβλητή ξεχωριστά, καθώς και με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Για τα μοντέλα m1 και m2 η παράμετρος σ ήταν σταθερή, για τα μοντέλα m3 και m4 η σ συμπεριέλαβε το μέγεθος των ατόμων ως συμμεταβλητή, για τα μοντέλα m5 και m6 η σ συμπεριέλαβε την ορατότητα ως συμμεταβλητή, για τα μοντέλα m7 και m8 η σ συμπεριέλαβε το ενδιαίτημα ως συμμεταβλητή, για τα μοντέλα m9 και m10 η σ προέκυψε από το συνδυασμό του μεγέθους με την ορατότητα, για τα μοντέλα m11 και m12 η σ προέκυψε από το συνδυασμό του μεγέθους με το ενδιαίτημα, για τα μοντέλα m13 και m14 η σ προέκυψε από το συνδυασμό του ενδιαιτήματος με την ορατότητα και για τα μοντέλα m5 και m16 η σ προέκυψε από το συνδυασμό και των τριών. Το καλύτερο μοντέλο επιλέχθηκε με βάση το κριτήριο του Akaike.

Χωρική ανάλυση με Μοντέλα

Στην ανάλυση με μοντέλα χρησιμοποιήθηκε η μηχανή Density Surface Modelling (DSM) στο πρόγραμμα DISTANCE αλλά και στην R. Τα χωρικά δεδομένα της περιοχής μελέτης ήταν σε μορφή GIS shapefiles. Για την εκτίμηση της πληθυσμιακής πυκνότητας της *P. nobilis*, στην ανάλυση DSM, χρησιμοποιήθηκαν οι χωρικές μεταβλητές: ενδιαίτημα ως κατηγορική μεταβλητή και βάθος ως συνεχής μεταβλητή. Και οι δύο αυτές μεταβλητές θεωρούνται υψηλής σημασίας για την εκτίμηση του είδους *P. nobilis* (Katsanevakis 2005b,2007a). Για να γίνει χρήση τους στο Distance οι περιοχές μελέτης χωρίστηκαν σε pixel μεγέθους 17x17m. Σε καθένα από αυτά καταγράφηκε η τιμή βάθους του κέντρου του pixel και ο κυρίαρχος τύπος ενδιαιτήματος της περιοχής επικάλυψης του pixel, όπως αυτές προέκυψαν από τους χάρτες βαθυμετρίας και τύπου ενδιαιτήματος που δημιουργήθηκαν για αυτή τη μελέτη. Η συνάρτηση ανιχνευσιμότητας υπολογίστηκε με την μηχανή Mark Recapture Distance Sampling (MRDS) του DISTANCE ανεξάρτητα από τις χωρικές μεταβλητές (σ). Χρησιμοποιώντας την συνάρτηση ανιχνευσιμότητας υπολογίστηκε η αφθονία και η πληθυσμιακή πυκνότητα των νεκρών ατόμων *P. nobilis* για κάθε segment. Έπειτα η αφθονία συσχετίστηκε με τις χωρικές συμμεταβλητές χρησιμοποιώντας GAMs (Hasties&Tibshirani 1990).

$$\text{Ο τύπος των GAM είναι: } f(E[n_i]/2W_t l) = c + \sum_m s_m(z_{mi}) + \sum_r F_{ri}$$

όπου f είναι συνάρτηση σύνδεσης, c είναι η τομή, $s_m(\cdot)$ είναι η μονοδιάστατη λεία συνάρτηση για την μεταβλητή πρόβλεψης m , z_{mi} είναι η τιμή της μεταβλητής πρόβλεψης m για το segment i , F_r είναι οι κατηγορικοί όροι πρόβλεψης και το $a = 2W_t l$ είναι η επιφάνεια του segment. Σε αυτήν την μελέτη χρησιμοποιήθηκε μία quasi-roison κατανομή με λογαριθμική σύνδεση (link). Αυτή σιγουρεύει πως θα υπάρχουν θετικές τιμές στην μέση απόκριση και μετατρέπει τον τύπο του GAM στο: $\ln(E[n_i]) = c + \sum_m s_m(z_{mi}) + \ln(a)$. Η ομαλή συνάρτηση $s_m(\cdot)$ αντιπροσωπεύεται ως κυβική παλινδρομική συνάρτηση spline, υπολογισμένη με ανάλυση παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων με ποινή. (Wood 2006). Για να τρέξει το μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν τα πακέτα mgcd, DSM και mrds (Wood 2000,2006) στο πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης R v.4.1.0. (R Development Core Team 2006).

Σημασία του βάθους και του τύπου βυθού στην κατανομή της *P.nobilis*.

Όταν μελετάει κανείς οργανισμούς που ζουν στην επιφάνεια του βυθού, το βάθος είναι η κύρια βαθμίδα πάνω στην οποία παρατηρούνται αλλαγές (e.g. Bianchi, 1992; Demestre et al., 2000; Katsanevakis et al., 2009). Αυτό αφορά λιγότερο την άμεση επίδραση του βάθους (στη μορφή διαφοράς πιέσεων), αλλά περισσότερο τις αλλαγές που προκύπτουν στις περιβαλλοντικές συνθήκες με το βάθος, όπως ο τύπος βυθού, οι υδροδυναμικές συνθήκες, η ένταση του ηλιακού φωτός, η θερμοκρασία, η πρωτογενής και η δευτερογενής παραγωγή.

Το μοτίβο βαθυμετρικής εξάπλωσης των νεκρών ατόμων πίννας σε αυτή τη μελέτη ήταν μεταξύ 5m και 6m βάθος σε μαλακό υπόστρωμα και 9-11m βάθος σε λιβάδια θαλάσσιων αγγειόσπερμων με καθόλου καταγραφές σε

ρηχότερα ή βαθύτερα νερά. Παρόλο που συνήθως τα ζωντανά άτομα πίννας θα βρισκόντουσαν σε μεγαλύτερο εύρος βαθών, ο περιορισμός εξηγείται καθώς σε αυτά τα βάθη και για τα αντίστοιχα ενδιαιτήματα οι υδροδυναμικές συνθήκες σε συνδυασμό με την μικρή κλίση του βυθού τείνουν να γίνονται εντονότερες τόσο κοντύτερα προς στην ακτογραμμή και σε μικρότερα βάθη, όπως και μακρύτερα και σε μεγαλύτερα βάθη. Προστατεύονται με αυτόν τον τρόπο σε μεγάλο βαθμό τα εύθραυστα και διαβρωμένα κελύφη των νεκρών ατόμων από την διάβρωση και καταστροφή.

Αποτελέσματα

Πίνακας 2: Τα βασικά χαρακτηριστικά των σταθμών δειγματοληψίας που διερευνήθηκαν.

Σταθμός	Περιοχή	Ευρύτερη Περιοχή	Συντεταγμένες (σε Decimal Degrees)		Ημερομηνία	Βάθος	
			Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος		Ελάχιστο (m)	Μέγιστο (m)
T1	Παραλία Ελάνη	Χαλκιδική	40.049994°	23.346405°	1/7/2021	3.3	7
T2	Παραλία Χελώνα	Χαλκιδική	40.064658°	23.338478°	1/7/2021	4	7.2
T3	Ακρωτήριο Πύργος	Χαλκιδική	40.096939°	23.298258°	2/7/2021	22.2	30.1
T4	Παραλία Σταυρονικήτα	Χαλκιδική	40.102399°	23.299533°	2/7/2021	8.4	11.8
T5	Ακρωτήριο Πύργος	Χαλκιδική	40.098561°	23.300495°	2/7/2021	3.5	10
T6	Δασική Παραλία Σάνη	Χαλκιδική	40.085301°	23.303168°	3/7/2021	15.1	23.9
T7	Sunset Panorama	Χαλκιδική	40.081355°	23.308171°	3/7/2021	5.9	24.3
T8	Παραλία Κουτσουπιά	Χαλκιδική	40.077187°	23.313870°	3/7/2021	5.1	17.9
T9	Παραλία Κύνα	Χαλκιδική	40.065228°	23.323150°	4/7/2021	14.9	22
T10	Παραλία Ελάνη	Χαλκιδική	40.053035°	23.341679°	4/7/2021	2.9	7.8
T11	Παραλία Ελάνη	Χαλκιδική	40.048375°	23.340031°	4/7/2021	8.7	11.6
T12	Παραλία Σημάνδρου	Χαλκιδική	40.073036°	23.330428°	5/7/2021	2.6	6.6
T13	Παραλία Κουτσουπιά	Χαλκιδική	40.077252°	23.318282°	5/7/2021	0.5	5.3
T14	Παραλία του Sanni Resort	Χαλκιδική	40.095969°	23.310307°	6/7/2021	0.5	3.9
T15	Παραλία του Sanni Resort	Χαλκιδική	40.091745°	23.309824°	6/7/2021	0.7	4.2
T16	Δέλτα Αλιάκμονα Νότια	Δέλτα	40.460726°	22.638130°	7/7/2021	9.8	11.6
T17	Δέλτα Αλιάκμονα Δυτικά	Δέλτα	40.465638°	22.607877°	7/7/2021	0.1	1
T18	Δέλτα Αλιάκμονα Νότια	Δέλτα	40.472379°	22.664271°	7/7/2021	0.4	1.8
T19	Δέλτα Αλιάκμονα Ανατολικά	Δέλτα	40.495143°	22.679264°	8/7/2021	4.2	10.8
T20	Κόλπος Δέλτα Αλιάκμονα-Αξιού	Δέλτα	40.516793°	22.676546°	8/7/2021	4	5.3
T21	Δέλτα Αξιού Δυτικά	Δέλτα	40.508245°	22.697483°	8/7/2021	0.6	2.2
T22	Δέλτα Αξιού Ανατολικά	Δέλτα	40.517041°	22.767501°	9/7/2021	8.8	13.4
T23	Δέλτα Αξιού Νότια	Δέλτα	40.494029°	22.723108°	9/7/2021	4.9	6.4
T24	Δέλτα Αξιού Ανατολικά	Δέλτα	40.542223°	22.756024°	9/7/2021	1.6	3.5
T25	Ανάχωμα Νότια της Σίνδου	Δέλτα	40.561402°	22.815417°	10/7/2021	1.8	3.2
T26	Ανάχωμα Νότια της Σίνδου	Δέλτα	40.558190°	22.789205°	10/7/2021	2.6	3.9
T27	Ανάχωμα Νότια της Σίνδου	Δέλτα	40.559682°	22.771882°	10/7/2021	0.1	1.1
T28	Δέλτα Γαλλικού Νότια	Δέλτα	40.577277°	22.842027°	10/7/2021	1.1	2.9
T29	Δέλτα Γαλλικού Βόρεια	Δέλτα	40.607065°	22.880715°	11/7/2021	5.4	13.1
T30	Δέλτα Γαλλικού	Δέλτα	40.596593°	22.879842°	11/7/2021	4.9	6.1
T31	Παραλία Ελάνη	Χαλκιδική	40.048106°	23.330598°	4/7/2021	34.3	45.6

Πίνακας 3: Ο αριθμός ατόμων που καταγράφηκαν σε κάθε σταθμό δειγματοληψίας και το αντίστοιχο ποσοστό θνησιμότητας. Επιπλέον ενδεικτικός χαρακτηρισμός του ενδιαιτήματος κάθε

Σταθμός	Αριθμός Ατόμων <i>Pinna nobilis</i> που καταγράφηκαν			Ποσοστό θνησιμότητας	Ενδιαιτήμα
	Ζωντανά άτομα	Νεκρά άτομα	Νεαρά άτομα		
T1	0	0	0	-	Κυρίως μαλακό υπόστρωμα με αραιά λιβάδια αγγειόσπερμων
T2	0	0	0	-	Κυρίως πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων με μαλακό υπόστρωμα
T3	0	0	0	-	Κυρίως πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων με μαλακό υπόστρωμα
T4	0	6	0	100%	Κυρίως πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων με μαλακό υπόστρωμα
T5	0	0	0	-	Κυρίως πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων με μαλακό υπόστρωμα
T6	0	0	0	-	Πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων
T7	0	0	0	-	Πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων
T8	0	0	0	-	Πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων
T9	0	0	0	-	Πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων
T10	0	1	0	100%	Κυρίως πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων με μαλακό υπόστρωμα
T11	0	12	0	100%	Πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων
T12	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T13	0	0	0	-	Κυρίως μαλακό υπόστρωμα με αραιά λιβάδια αγγειόσπερμων
T14	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T15	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T16	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T17	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T18	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T19	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T20	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T21	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T22	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T23	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T24	0	0	0	-	Κυρίως πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων με μαλακό υπόστρωμα
T25	0	0	0	-	Πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων με μαλακό υπόστρωμα
T26	0	0	0	-	Κυρίως πυκνά λιβάδια αγγειόσπερμων με μαλακό υπόστρωμα
T27	0	0	0	-	Κυρίως αραιά λιβάδια αγγειόσπερμων με μαλακό υπόστρωμα
T28	0	0	0	-	Κυρίως αραιά λιβάδια αγγειόσπερμων με σκληρό υπόστρωμα
T29	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα
T30	0	21	0	100%	Μαλακό υπόστρωμα
T31	0	0	0	-	Μαλακό υπόστρωμα

σταθμού (λεπτομερέστερη περιγραφή παρέχεται στο αρχείο excel των πρωτογενών δεδομένων).

Πίνακας 4: Παράθεση των 16 υποψηφίων μοντέλων m_i της στατιστικής ανάλυσης για την συνάρτηση ανιχνευσιμότητας, και το ενεργό μέσο πλάτος λωρίδας (μ , $mean \pm SE$), η μέση πιθανότητα ανίχνευσης (P_a , $\pm SE$), το σκορ του κριτηρίου του Akaike (AIC_c) και η διαφορά του κριτηρίου Akaike (Δ_i), όπως προέκυψαν από το DISTANCE v7.3.

Μοντέλο	Βασική Συνάρτηση	Συντελεστές Συνδιακύμανσης	Αριθμός Παραμέτρων	μ (cm)	P_a	AIC_c	Δ_i	Πυκνότητα (<i>P.nobilis</i> /Km ²)
m_1	Half-normal	-	1	224±26	0,54±0,06	469,57	11,75	1623,6
m_2	Hazard-rate	-	2	220±42	0,53±0,095	470,09	12,27	1655,9
m_3	Half-normal	Μέγεθος	2	217±25	0,52±0,06	469,78	11,96	1672,2
m_4	Hazard-rate	Μέγεθος	3	235±26	0,56±0,055	473,23	15,4	1549,9
m_5	Half-normal	Ορατότητα	2	190±26	0,46±0,065	460,66	2,84	1910,1
m_6	Hazard-rate	Ορατότητα	3	235±26	0,56±0,055	473,23	15,4	1549,8
m_7	Half-normal	Ενδιαίτημα	2	185±26	0,44±0,07	457,82	0	1962,3
m_8	Hazard-rate	Ενδιαίτημα	3	219±28	0,52±0,065	459,81	1,99	1664,4
m_9	Half-normal	Μέγεθος & Ορατότητα	2	220±42	0,53±0,095	470,09	12,27	1655,9
m_{10}	Hazard-rate	Μέγεθος & Ορατότητα	4	235±26	0,56±0,055	475,7	17,88	1549,9
m_{11}	Half-normal	Μέγεθος & Ενδιαίτημα	3	181±26	0,43±0,075	458,79	0,97	2005,4
m_{12}	Hazard-rate	Μέγεθος & Ενδιαίτημα	4	198±26	0,47±0,065	462,74	4,92	1833,4
m_{13}	Half-normal	Ορατότητα & Ενδιαίτημα	3	183±31	0,44±0,085	459,62	1,8	1987,8
m_{14}	Hazard-rate	Ορατότητα & Ενδιαίτημα	4	208±27	0,5±0,065	466,26	8,44	1750,7
m_{15}	Half-normal	Μέγεθος & Ορατότητα & Ενδιαίτημα	4	178±31	0,43±0,085	460,56	2,74	2040
m_{16}	Hazard-rate	Μέγεθος & Ορατότητα & Ενδιαίτημα	5	209±27	0,5±0,065	468,66	10,84	1736,2

Στατιστική ανάλυση

Κατά τις εργασίες πεδίου πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες σε 31 σταθμούς δειγματοληψίας (Πίνακας 2) σε όλα τα παρατηρούμενα ενδιαίτηματα της πίννας. Τα βάθη που διερευνήθηκαν ήταν από επιφάνεια μέχρι τα 30.1 m με αυτόνομη κατάδυση, ενώ έγινε και διερεύνηση με κάμερα σε μεγαλύτερα βάθη (σταθμός T31) έως 45.6 m (Πίνακας 2). Δεν βρέθηκε κανένα ζωντανό άτομο πίννας στις περιοχές μελέτης (Πίνακας 2), οπότε όλα τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν τα νεκρά άτομα και αποτελούν μέτρο της παρελθούσας πληθυσμιακής πυκνότητας της πίννας πριν ο πληθυσμός του Θερμαϊκού καταρρεύσει. Συνολικά βρέθηκαν 40 νεκρά άτομα, εκ των οποίων τα 19 στην Χαλκιδική και τα 21 στον εσωτερικό Θερμαϊκό (Δέλτα).

Με βάση το κριτήριο του Akaike το μοντέλο m7 με την half-normal και το ενδιαίτημα ως συμμεταβλητή ήταν το καλύτερο ανάμεσα σε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς (Πίνακας 4). Η εκτιμώμενη αφθονία των νεκρών ατόμων πίννας στην περιοχή της Χαλκιδικής είναι 19400 άτομα με 95% διάστημα εμπιστοσύνης [5100, 73300] άτομα. Αντίστοιχα στην περιοχή των Δέλτα η εκτιμώμενη αφθονία των νεκρών ατόμων πίννας είναι 125300 άτομα με 95% διάστημα εμπιστοσύνης [21300, 736900] άτομα. Τέλος η ολική αφθονία και στις δύο περιοχές εκτιμάται στα 144700 άτομα με 95% διάστημα εμπιστοσύνης [29300, 715300] άτομα.

Η εκτιμώμενη πληθυσμιακή πυκνότητα των νεκρών ατόμων πίννας στην περιοχή της Χαλκιδικής είναι 1706 άτομα/km² με 95% διάστημα εμπιστοσύνης [452, 6439] άτομα/km². Αντίστοιχα στην περιοχή των Δέλτα η εκτιμώμενη πληθυσμιακή πυκνότητα των νεκρών ατόμων πίννας είναι 2009 άτομα/km² με διάστημα εμπιστοσύνης [3429, 11813] άτομα/km². Τέλος η μέση πληθυσμιακή πυκνότητα και των δύο περιοχών εκτιμάται στα 1962 άτομα/km² με διάστημα εμπιστοσύνης [397, 9698] άτομα/km².

Ο τύπος της συνάρτησης ανιχνευσιμότητας για το μοντέλο m7 έχει ως εξής:

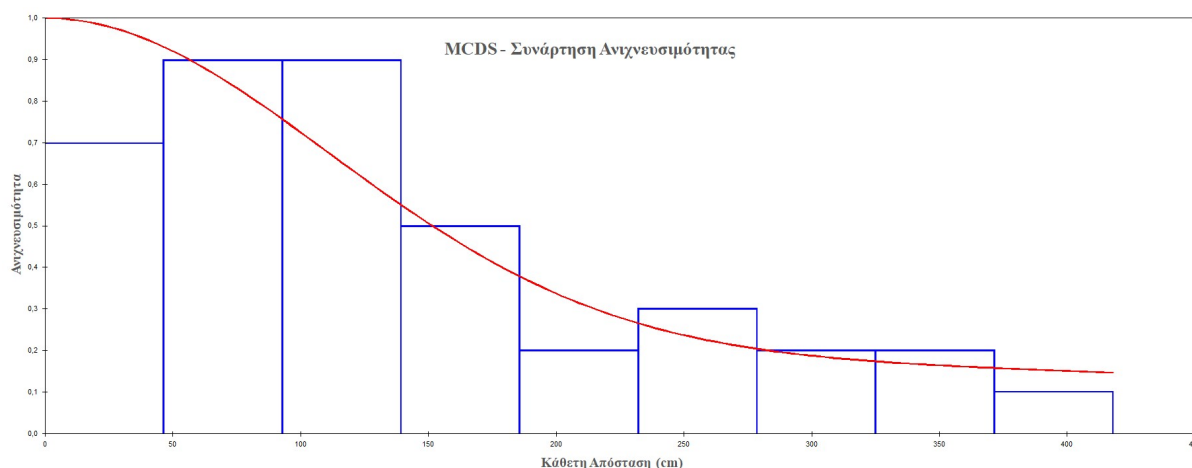
$$f(Di) = \exp\left(-\frac{Di^2}{2 \times (549,2 \times \exp(-1,606 \times Habitat))^2}\right)$$

όπου για σκληρό υπόστρωμα και για πυκνά λιβάδια θαλάσσιων αγγειόσπερμων Habitat = 0, ενώ για το μαλακό υπόστρωμα και για αραιά λιβάδια θαλάσσιων αγγειόσπερμων Habitat = 1 και το D_i δίνεται σε cm.

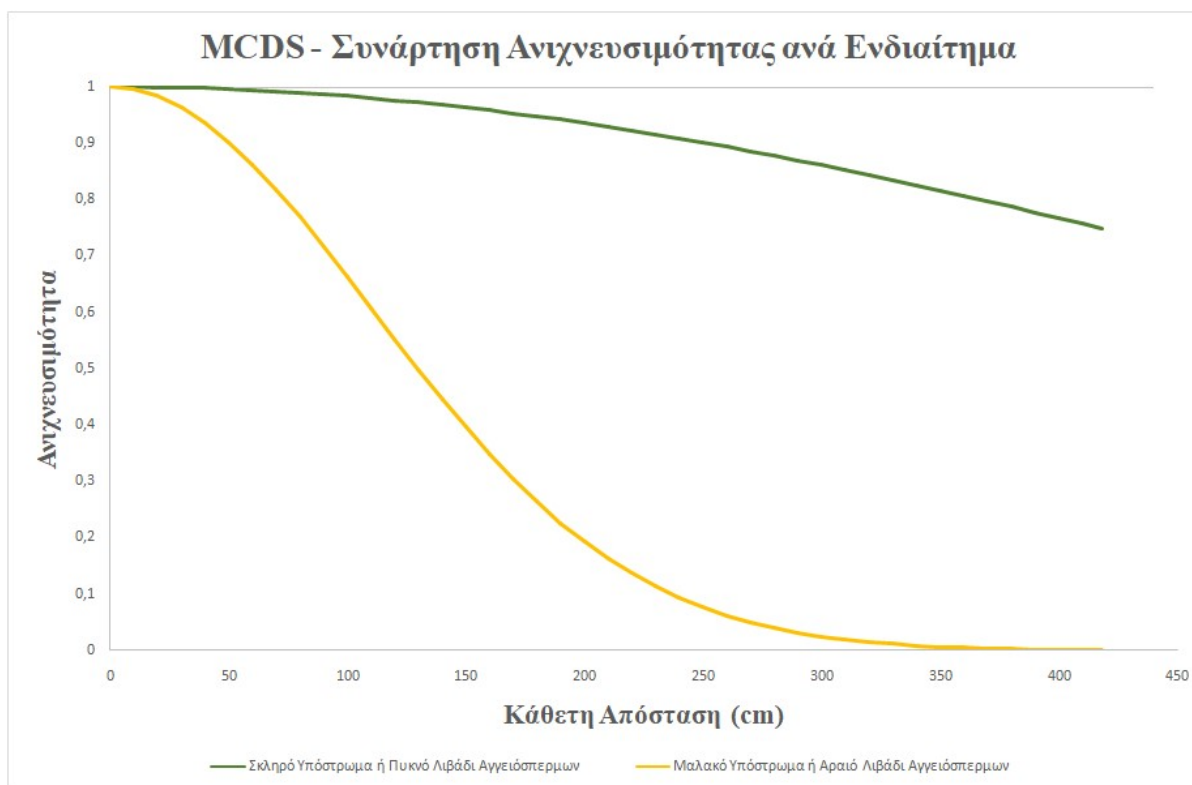
Το μέσο ποσοστό ανίχνευσης είναι p_{global} = 0,4433, ενώ σε σκληρό υπόστρωμα και σε πυκνά λιβάδια θαλάσσιων αγγειόσπερμων είναι p_{h,sg} = 0,9358 και σε μαλακό υπόστρωμα είναι p_{so} = 0,3424 (Εικόνες 7, 8). Τα αποτελέσματα αυτά εξηγούνται από το γεγονός πως στην Χαλκιδική τα νερά είναι

διαυγή και η ορατότητα ξεπερνά κατά πολύ το μέγιστο πλάτος των τομών (418 εκατοστά), όπου το κύριο ενδιαίτημα ήταν τα πυκνά λιβάδια θαλάσσιων αγγειόσπερμων (Εικόνα 11), ενώ οι παρατηρήσεις ήταν ομοιόμορφες στο πλάτος των τομών. Αντίθετα στον εσωτερικό Θερμαϊκό Κόλπο, όπου τα νερά είναι από αρκετά έως πολύ θολά, η μέση ορατότητα (1,5 μέτρο) είναι σχεδόν το ένα τρίτο του μέγιστου πλάτους των τομών, ενώ το κύριο ενδιαίτημα ήταν το μαλακό υπόστρωμα (Εικόνα 12) και τα αραιά λιβάδια θαλάσσιων αγγειόσπερμων, με αποτέλεσμα οι παρατηρήσεις να συγκεντρώνονται κοντά στον μίτο. Επομένως οι πολύ χαμηλές τιμές ορατότητας στο κυρίαρχο τμήμα των ενδιαιτημάτων με μαλακό υπόστρωμα (εσωτερικός Θερμαϊκός) και οι πολύ υψηλές τιμές σε περιοχές όπου υπάρχει ποσειδωνία (Χαλκιδική) εξηγούν την πολύ μικρή και μεγάλη ανιχνευσιμότητα αντίστοιχα και την επιλογή του μοντέλου m7 ως καλύτερο.

Γραφήματα Ανιχνευσιμότητας



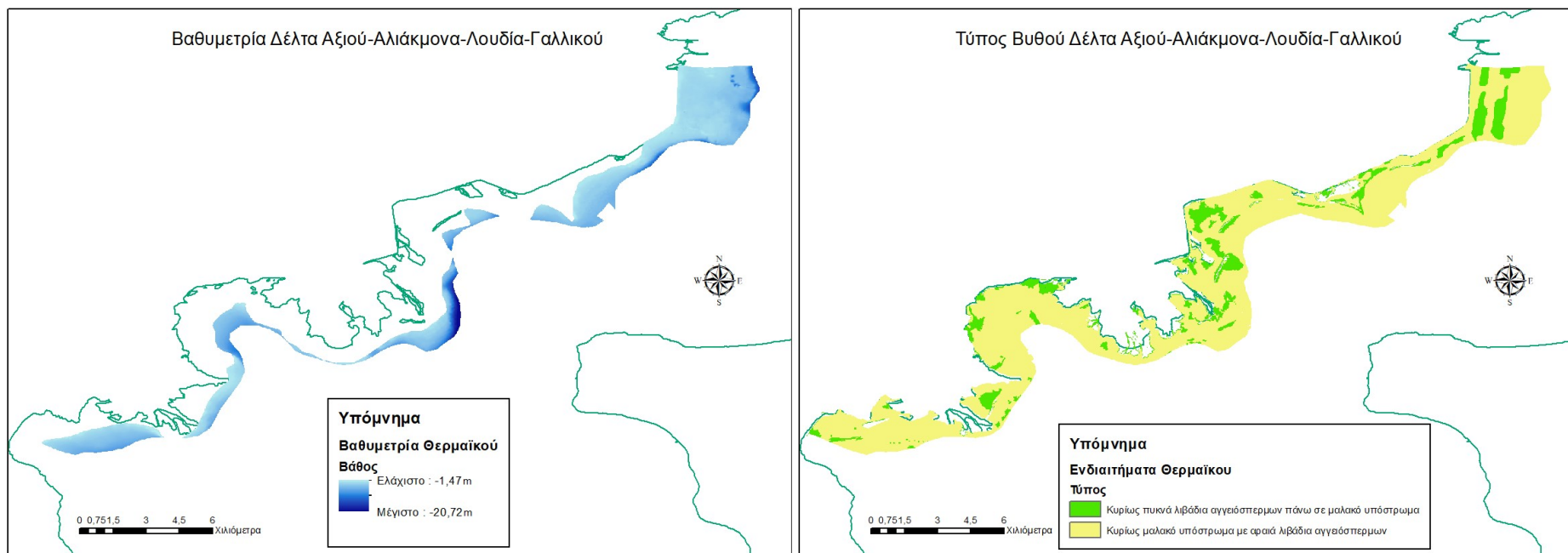
Εικόνα 7: Η μέση ανιχνευσιμότητα της *P. nobilis* στο σύνολο των περιοχών μελέτης μέχρι το μέγιστο πλάτος παρατηρήσεων, όπως προέκυψε από την μηχανή MCDS του DISTANCE v7.3.



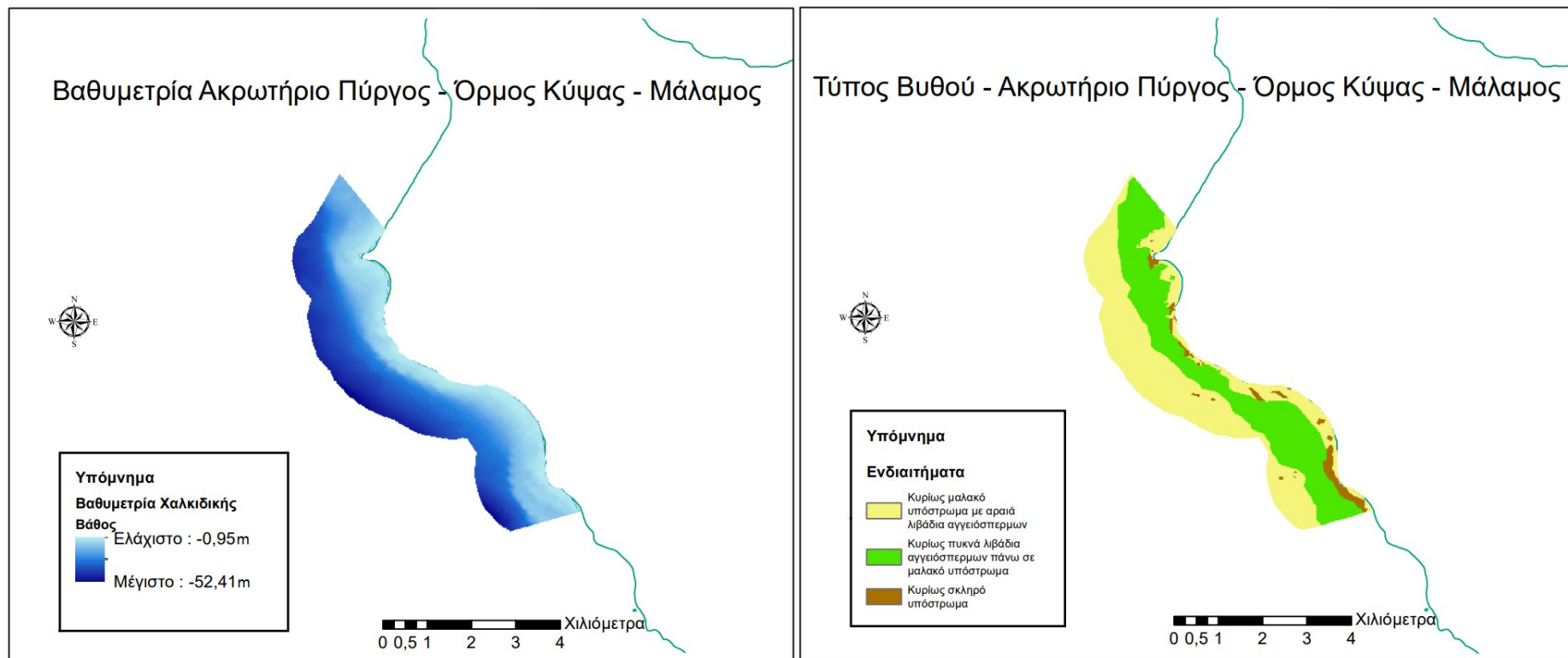
Εικόνα 8: Η μέση ανιχνευσιμότητα της *P. nobilis* στο σύνολο των περιοχών μελέτης μέχρι το μέγιστο πλάτος παρατηρήσεων, όπως προέκυψε από την μηχανή MCDS του DISTANCE v7.3.

Χωρική Ανάλυση με Μοντέλα

Χάρτες Βαθυμετρίας και χωρικής κατανομής ενδιαιτημάτων

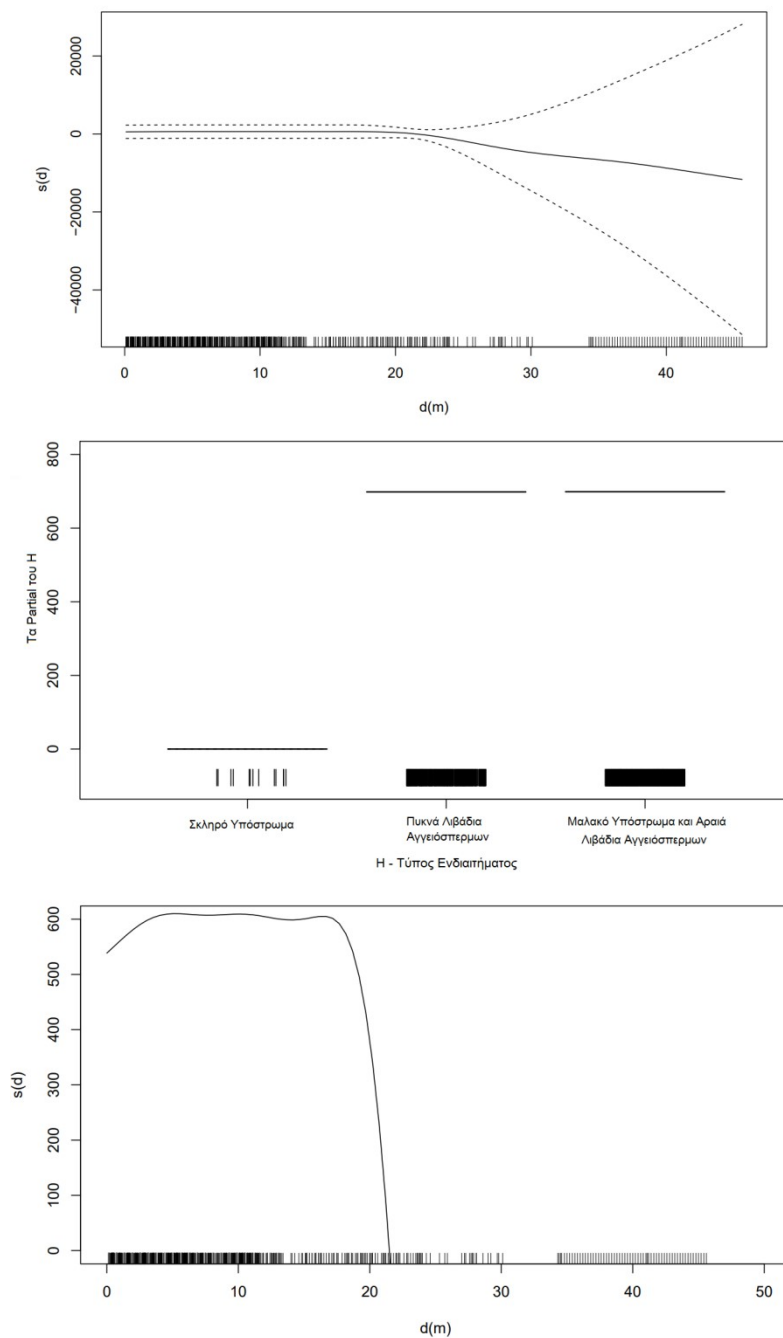


Χάρτες 1 & 2: Αριστερά ο χάρτης βαθυμετρίας και Δεξιά ο χάρτης τύπου βυθού της περιοχής NATURA 2000 στον Θερμαϊκό Κόλπο.



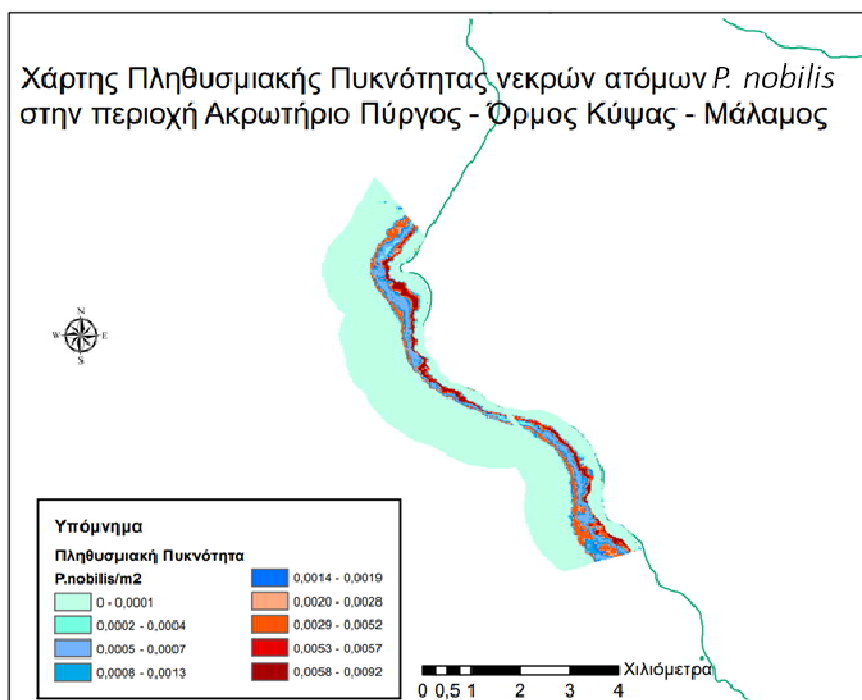
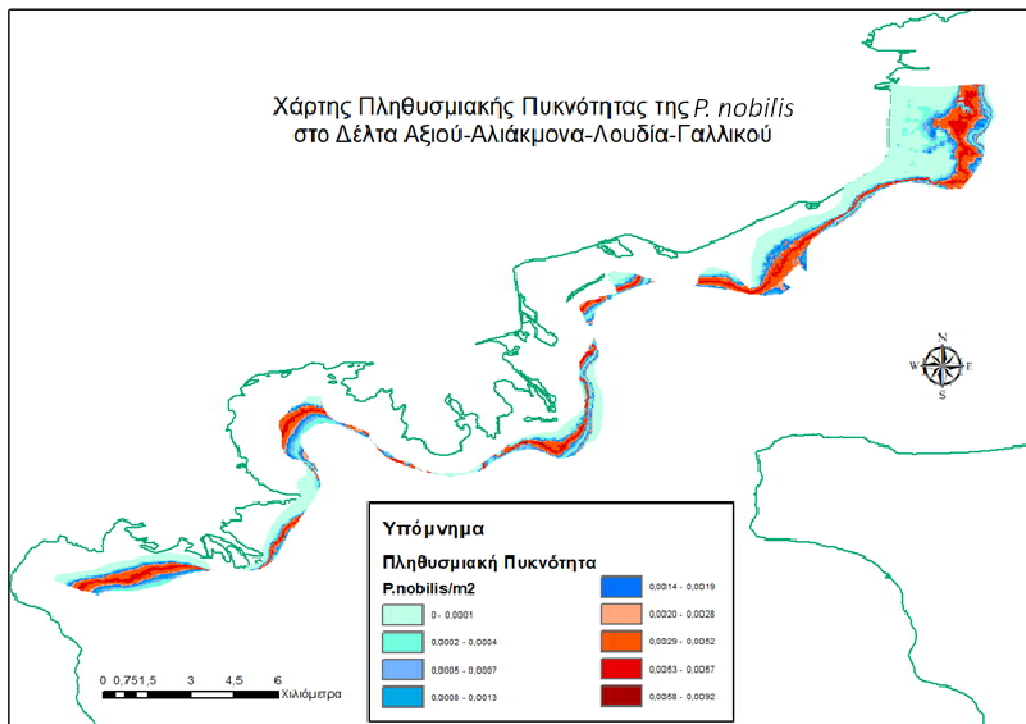
Χάρτες 3 & 4: Αριστερά ο χάρτης βαθυμετρίας και Δεξιά ο χάρτης τύπου βυθού της περιοχής NATURA 2000 στην Χαλκιδική.

GAMS



Εικόνα 9: Ο ομαλός όρος $s(d)$ (d το βάθος) και ο κατηγορικός όρος H (Ενδιαίτημα) για το μοντέλο εκτίμησης πληθυσμιακής πυκνότητας και αφθονίας των νεκρών ατόμων *P. nobilis* σε ρίχελ μεγέθους 17x17m. Στα δύο επάνω γραφήματα οι όροι δίνονται σε γραμμική κλίμακα. Στο κατώτερο γράφημα δίνονται σε response κλίμακα. Στο κάτω μέρος όλων των γραφημάτων βρίσκεται ένα μονοδιάστατο scatterplot που δείχνει την κατανομή της διαθέσιμης πληροφορίας.

Χάρτες Πληθυσμιακής Πυκνότητας

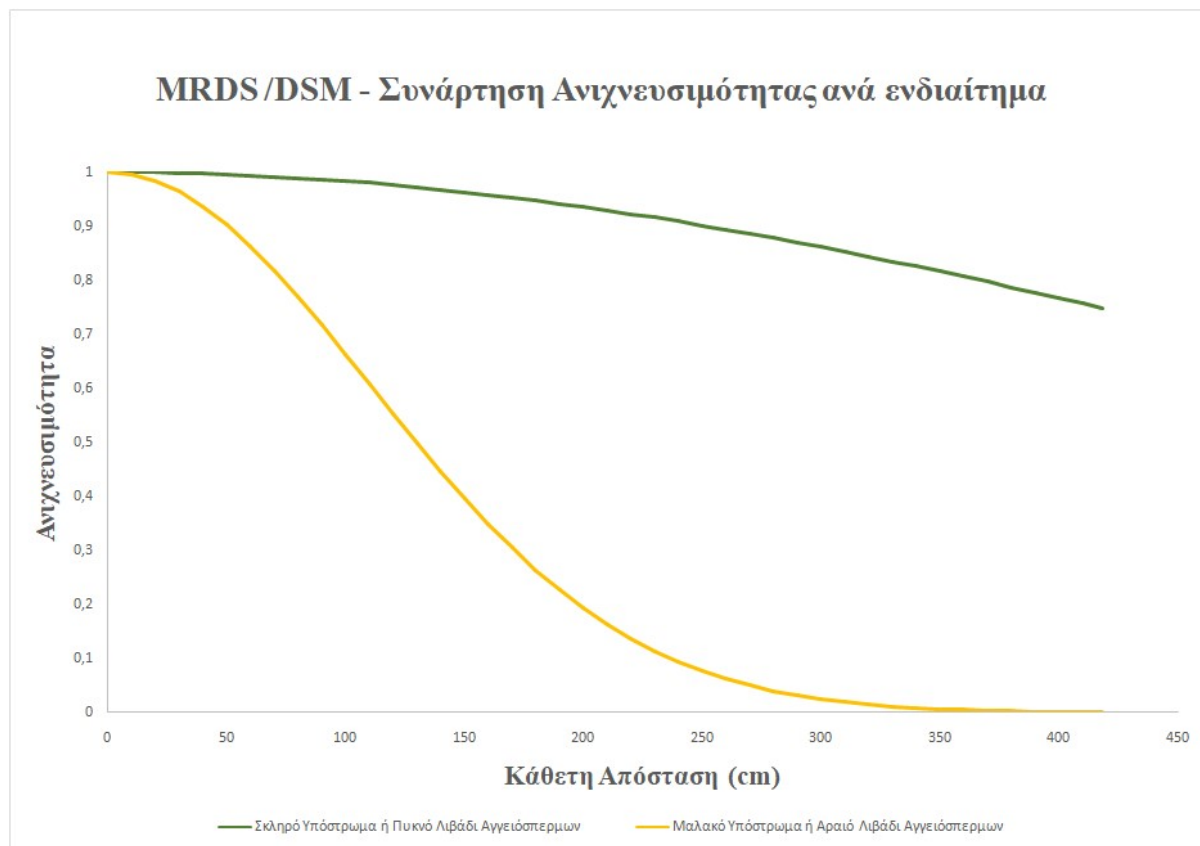


Χάρτες 5 & 6: Επάνω ο Χάρτης πληθυσμιακής πυκνότητας στην περιοχή μελέτης του Θερμαϊκού Κόλπου σε νεκρά άτομα/ανά εικοστοστοιχείο έκτασης 17x17m . Κάτω ο Χάρτης πληθυσμιακής πυκνότητας στην περιοχή μελέτης της Χαλκιδικής. Όπως προέκυψαν από το μοντέλο h4.

Πίνακας 5: Αξιολόγηση των τεσσάρων υποψήφιων GAMs για την πληθυσμιακή πυκνότητα της *P. nobilis* στις δύο περιοχές μελέτης, βασισμένη στον γενικευμένο διασταυρωμένο έλεγχο εγκυρότητας (GCV) σκορ. Δίνεται το εξηγούμενο ποσοστό απόκλισης του κάθε μοντέλου, καθώς και η εκτίμηση αφθονίας για το επιλεγμένο μοντέλο.

Μοντέλο	Χωρική Μεταβλητή	GCV σκορ	Ποσοστό δικαιολογημένης απόκλισης	Εκτίμηση Αφθονίας (αριθμός νεκρών ατόμων)
h1	-	0,01147	0,01%	44067
h2	Τύπος Ενδιαιτήματος	0,01120	2,75%	29348
h3	Βάθος	0,00817	29,40%	49571
h4	Τύπος Ενδιαιτήματος & Βάθος	0,00811	30,20%	35735

Ανιχνευσιμότητα



Εικόνα 10: Η μέση ανιχνευσιμότητα της *P. nobilis* στο σύνολο των περιοχών μελέτης μέχρι το μέγιστο πλάτος παρατηρήσεων, όπως προέκυψε από την μηχανή MCDS του DISTANCE v7.3.

Από το μοντέλο h_4 προέκυψε πληθυσμιακή αφθονία νεκρών ατόμων $N_1= 30323$ στην περιοχή του Θερμαϊκού και $N_2= 5411$ στην περιοχή της Χαλκιδικής. Συνολικά η αφθονία νεκρών ατόμων και στις δύο περιοχές υπολογίζεται σε $\tilde{N}=35735$. Το ποσοστό εξηγούμενο απόκλισης για το μοντέλο h_4 είναι 30,2% και το GCV σκορ του μοντέλου ήταν 0.00811.

Συζήτηση

Και στις δύο περιοχές μελέτης βρέθηκαν μόνο νεκρά άτομα *P.nobilis* τα περισσότερα απ' τα οποία στην Χαλκιδική ήταν ξεριζωμένα και βρίσκονταν ξαπλωμένα στον βυθό, ενώ στον εσωτερικό Θερμαϊκό κόλπο ήταν κατά κύριο λόγο όρθια. Και στις δύο περιπτώσεις τα νεκρά άτομα βρέθηκαν σε περιοχές με σχετικά μικρό βάθος, μικρή έως καθόλου κλίση και μεγάλη απόσταση από την ακτή (>500 μέτρων). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί καθώς η χαμηλή κλίση αφ' ενός δυσκολεύει την μετακίνηση ενός νεκρού ξεριζωμένου ατόμου από ρεύματα και κυματικό καθεστώς, αφ' ετέρου είναι ένδειξη μειωμένης έντασης ρευμάτων. Αντίστοιχα η μεγάλη απόσταση από την ακτή βοηθάει στην προστασία των ζωντανών και νεκρών ατόμων από την συγκομιδή από τον άνθρωπο. Με βάση το πάχος και την ποικιλότητα των οργανισμών οι οποίοι ζούσαν επάνω και μέσα στα κελύφη των νεκρών ατόμων, καθώς και την αυξημένη ευαισθησία σε φθορά των κελυφών, εκτιμάται πως τα άτομα ήταν νεκρά για μεγάλο χρονικό διάστημα (Εικόνα 13).

Δυστυχώς η πλήρης απουσία ζωντανών ατόμων πίννας και στις δύο περιοχές μελέτης είναι ένδειξη ολοκληρωτικής θνησιμότητας του ντόπιου πληθυσμού της *Pinna nobilis*.

Παρόλο που δε βρέθηκαν ζωντανά άτομα *P.nobilis* έγινε εκτίμηση της αφθονίας και της πληθυσμιακής πυκνότητας με βάση τα νεκρά άτομα που εντοπίστηκαν. Αυτό έχει σκοπό να μας δώσει μια εικόνα της κατάστασης πριν την καταστροφή του ντόπιου πληθυσμού από το παράσιτο που οδηγεί το είδος στην εξαφάνιση. Οι εκτιμήσεις αυτές θα πρέπει να θεωρηθούν ως υποεκτιμήσεις της παρελθούσας κατάστασης, καθώς πολλά νεκρά άτομα έχουν θαφτεί, μετακινηθεί από τα ρεύματα ή και έχουν καταστραφεί εντελώς.

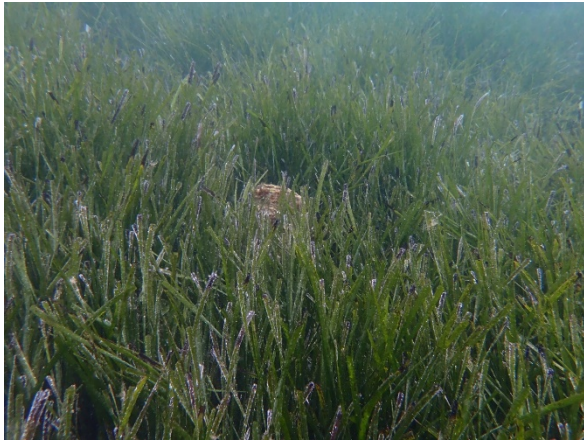
Αξίζει να σημειωθεί πως στην περιοχή μελέτης στον Θερμαϊκό κόλπο τα νεκρά άτομα βρέθηκαν στην βορειότερη περιοχή όπου η κοκκομετρία του μαλακού υποστρώματος ήταν πολύ μεγαλύτερου μεγέθους από τις νοτιότερες περιοχές και αποτελούνταν από βιογενή άμμο, σε αντίθεση με την λασπώδη φύση του βυθού νοτιότερα. Πιστεύεται πως αυτό έπαιξε εξίσου σημαντικό ρόλο στην διατήρηση των νεκρών ατόμων πίννας, σε συνδυασμό με την πολύ χαμηλή κλίση της περιοχής. Παρόλα αυτά, η έντονη θολερότητα της στήλης του νερού, σε συνδυασμό με την περιορισμένη

πληροφορία όσων αφορά την κοκκομετρία του ιζήματος, απέτρεψε την δημιουργία χαρτών ενδιαιτήματος που να διαχωρίζει το μαλακό υπόστρωμα σε υποκατηγορίες που αφορούν την κοκκομετρία. Όμως κρίνεται πως η κοκκομετρία όπως και η κλίση του βυθού αποτελούν παράγοντες μετακίνησης, καταστροφής και κάλυψης των νεκρών ατόμων και όχι απαραίτητα παράγοντες που επηρέαζαν την κατανομή του είδους εν ζωή. Επομένως δεν λήφθηκαν υπόψη κατά τις αναλύσεις καθώς ο σκοπός τους ήταν η εκτίμηση της κατανομής του είδους πριν το συμβάν μαζικής θανάτωσης.

Η εκτιμώμενη αφθονία νεκρών ατόμων *P.nobilis* είναι αρκετά μικρότερη από αυτή της στατιστικής μεθόδου που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο βήμα, κάτι το οποίο εξηγείται από το γεγονός πως για την περιοχή μελέτης των Δέλτα, η πληροφορία της βαθυμετρίας περιοριζόταν στο βαθύτερο τμήμα της περιοχής Natura σε έκταση μόλις 19,16 km² σε αντίθεση με την συνολική έκταση της περιοχής που είναι 62,38 km². Εφόσον τα μοντέλα που συμπεριλαμβάνουνε την βαθυμετρία αποδείχτηκαν πολύ καλύτερα, εκτιμήθηκε η αφθονία μόνο σε αυτό το κομμάτι της περιοχής NATURA όπου υπήρχε η απαιτούμενη χωρική πληροφορία βάθους.

Πάντως άσχετα με την διαφορά στην έκταση της περιοχής των Δέλτα, όπως φαίνεται και στην περιοχή της Χαλκιδικής, η μέθοδος με χωρικά μοντέλα δίνει μικρότερες εκτιμήσεις αφθονίας, καθώς όπως αποδείχτηκε και με την επιλογή του καλύτερο μοντέλου το οποίο περιείχε το βάθος και τον τύπο βυθού, αυτά έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο πρακτικά δίνοντας μεγαλύτερες πυκνότητες του είδους σε βάθη μεταξύ 4-8 μέτρων με μαλακό υπόστρωμα από αυτές τις στατιστικής μεθόδου και πολύ μικρότερες πυκνότητες σε άλλα βάθη και τύπους βυθού.

Η κατηγορία αποτελεί μικρό υποσύνολο της συνολικής έκταση των περιοχών μελέτης και επομένως είναι αναμενόμενο η χωρική μέθοδος να δίνει μικρότερη εκτίμηση αφθονίας συγκριτικά με την απλή στατιστική μέθοδο που κάνει απλή αναγωγή μιας μέσης πυκνότητας στην συνολική έκταση των περιοχών.



Εικόνα 11: Δειγματοληψίες στη Χαλκιδική (GR1270010) όπου υπάρχουν εκτεταμένα λιβάδια ποσειδωνίας και διαυγή νερά.



Εικόνα 12: Δειγματοληψίες στον εσωτερικό Θερμαϊκό (GR1220002) όπου κυριαρχεί το μαλακό υπόστρωμα χωρίς βλάστηση και η ορατότητα είναι περιορισμένη.



Εικόνα 13: Νεκρό άτομο πίννας κοντά στο δέλτα του Γαλλικού ποταμού, με σημαντική επιπανίδα

Βιβλιογραφία

Addis, P., Secci, M., Brundu, G., Manunza, A., Corrias, S.etal., 2009. Density, sizestructure, shellorientation andepibionticcolonization of the fanmussel*Pinnanobilis* L.1758 (Mollusca: Bivalvia) in threecontrastinghabitats inanestuarinearea of Sardinia (W Mediterranean). *ScientiaMarina*, 73 (1), 143-152.

Akaike, H., 1973. Information theoryasanextension of the maximumlikelihoodprinciple. p. 267–281. In: Pro 2nd International Symposium on Information Theory, Tsahkadsor, Armenia, USSR, 2-8 September 1971. AkademiaiKiado, Budapest.

Basso, L., Vázquez-Luis, M., García-March, J., Deudero, S.,Alvarez, E. etal., 2015. The penshell, *Pinnanobilis*: A reviewof population status and recommended research prioritiesin the Mediterranean Sea. *Advances in MarineBiology*,71, 109-160.

Buckland, S.T., Anderson, D.R., Burnham, K.P., Laake, J.L., Borchers, D.L. etal., 2001. Introductiontodistancesampling: estimatingabundance of biologicalpopulations. OxfordUniversityPress, NewYork, 448 pp.

Buckland, S.T., Anderson, D.R., Burnham, K.P., Laake, J.L., Borchers, D.L., Thomas, L., 2004. Advanceddistancesampling: estimatingabundance of biologicalpopulations. OxfordUniversityPress, NewYork, 434 pp.

Burnham KP, Anderson D (2002) Modelselection and multi-modelinference. Berlin: Springer.

Catanese, G., Grau, A., Valencia, J.M., García-March, J.M., Álvarez,E. etal., 2018. *Haplosporidiumpinnaesp.* nov., ahaplosporidanparasiteassociatedwithmassivemortalitiesof the fanmussel, *Pinnanobilis*, in the Western MediterraneanSea. *Journal of InvertebratePathology*, 157, 9-24.

Carella, F., Aceto, S., Pollaro, F., Miccio, A., Iaria, C. et al., 2019. A mycobacterial disease is associated with the silent mass mortality of the pen shell *Pinna nobilis* along the Tyrrhenian coastline of Italy. *Scientific Reports*, 9, 2725.

Čižmek, H., Čolić, B., Gračan, R., Grau, A., Catanese, G., 2020. An emergency situation for pen shells in the Mediterranean: the Adriatic Sea, one of the last *Pinna nobilis* shelters, is now affected by a mass mortality event. *Journal of Invertebrate Pathology*, 173, 107388

Deudero, S., Vázquez-Luis, M., Alvarez, E., 2015. Human Stressors Are Driving Coastal Benthic Long-Lived Sessile Fan Mussel *Pinnanobilis* Population Structure More than Environmental Stressors. PLoS ONE, 10 (7), e0134530.

Efron B, Tibshirani RJ (1993) An introduction to the bootstrap (Monographs on statistics and applied probability). New York: Chapman & Hall/CRC.

Giacobbe, S., 2002. Epibiontic mollusc communities on *Pinna nobilis* L. (Bivalvia, Mollusca). Journal of Natural History, 36 (12), 1385-1396

Hastie, T.J., Tibshirani, R.J., 1990. Generalized additive models (monographs on statistics and applied probability). Chapman & Hall, London, 352pp.

IUCN, 2019. Mediterranean Noble Pen Shell Crisis (*Pinna nobilis*) - January 2020 Update. <https://www.iucn.org/news/mediterranean/202001/mediterranean-noble-pen-shell-crisis-pinna-nobilis-january-2020-update> (Assessed 15 January 2020).

Katsanevakis S, 2006. Population ecology of the endangered fan mussel *Pinnanobilis* in a marine lake. Endangered Species Research 1: 51–59

Katsanevakis S, 2007a. Density surface modelling with line transect sampling as a tool for abundance estimation of marine benthic species: the *Pinnanobilis* example in a marine lake. Marine Biology 152: 77–85.

Katsanevakis, S., 2007b. Growth and mortality rates of the fan mussel *Pinnanobilis* in Lake Vouliagmeni (Korinthiakos Gulf, Greece): a generalized additive modelling approach. Marine Biology, 152 (6): 1319-1331.

Katsanevakis S, Thessalou-Legaki M, 2009. Spatial distribution and abundance of the endangered fan mussel *Pinnanobilis* in Souda Bay (Crete Island, Greece). Aquatic Biology 8: 45–54.

Katsanevakis, S., Poursanidis, D., Issaris, Y., Panou, A., Petza, D. et al., 2011. "Protected" marine shelled molluscs: thriving in Greek seafood restaurants. Mediterranean Marine Science, 11(2), 429-438.

Katsanevakis, S., Tsirintanis, K., Tsaparis, D., Doukas, D., Sini, M. et al., 2019. The cryptogenic parasite *Haplosporidium pinnae* invades the Aegean Sea and causes the collapse of *Pinnanobilis* populations. Aquatic Invasions, 14 (2), 150-164.

Katsanevakis S, Carella F, Çinar ME, Čížmek H, Jimenez C, Kersting DK, Moreno D, Rabaoui L, Vicente N, 2021. The fan mussel *Pinnanobilis* in the brink of extinction in the Mediterranean. Imperiled: The Encyclopedia of Conservation, 9p, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821139-7.00070-2>

Katsares V, Tsiora A, Galinou-Mitsoudi S, Imsiridou A, 2008. Genetic structure of the endangered species *Pinnanobilis* (Mollusca: Bivalvia) inferred from mtDNA sequences. *Biologia* 63(3): 412-417

Kersting, D., Benabdi, M., Čížmek, H., Grau, A., Jimenez, C. et al., 2019. *Pinna nobilis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019, e.T160075998A160081499, 24 pp

Marques FFC, Buckland ST (2003) Incorporating covariates into standard line transect analyses. *Biometrics* 59: 924–935.

Marques FFC, Buckland ST (2004) Covariate models for the detection function. In: Buckland ST, Anderson DR, Burnham KP, Laake JL, Borchers DL, Thomas L (eds) *Advanced distance sampling: estimating abundance of biological populations*. New York, Oxford University Press, pp. 31-47.

Panarese, R., Tedesco, P., Chimienti, G., Latrofa, M.S., Quaglio, F. et al., 2019. Haplosporidium pinnae associated with mass mortality in endangered *Pinna nobilis* (Linnaeus 1758) fan mussels. *Journal of Invertebrate Pathology*, 164, 32-37.

R Core Team, 2015. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Available at <https://www.R-project.org/>.

Rabaoui, L., Tlig-Zouari, S., Cosentino, A., Ben Hassine, O.K., 2009. Associated fauna of the fan shell *Pinna nobilis* (Mollusca: Bivalvia) in the northern and eastern Tunisian coasts. *Scientia Marina*, 73, 129-141.

Rabaoui L., Tlig-Zouari S., Katsanevakis S. & OK Ben Hassine, 2010. Modelling population density of *Pinnanobilis* (Mollusca: Bivalvia) in the eastern and south-eastern Tunisian coasts. *Journal of Molluscan Studies* 76: 340-347.

Rouanet, E., Trigos, S., Vicente, N., 2015. From youth to death of old age: the 50-year story of a *Pinnanobilis* fan mussel population at Port - Cros Island (Port - Cros National Park, Provence, Mediterranean Sea). *Scientific Reports of Port -Cros National Park*, 29, 209-222.

Seber GAF (1982) *The estimation of animal abundance and related parameters*. New York, Macmillan.

Thomas L, Buckland ST, Rexstad EA, Laake JL, Strindberg S, et al., 2010. Distancesoftware: design and analysis of distancesamplingsurveys for estimatingpopulationsize. *Journal of AppliedEcology* 47: 5-14.

Tsatiris A., Papadopoulos V., Makri D., Topouzelis K., Manoutsoglou E., Hasiotis T. & S. Katsanevakis, 2018. Spatialdistribution, abundance and habitatus of the endemicMediterraneanfanmussel*Pinnanobilis* in the GeraGulf, Lesvos (Greece): comparison of design-based and model-basedapproaches. *MediterraneanMarineScience* 19: 642–655.

Vázquez-Luis, M., Alvarez, E., Barrajon, A., García-March,J.R., Grau, A. et al., 2017. S.O.S. *Pinnanobilis*: a massmortalityevent in westernMediterranean Sea. *Frontiers inMarineScience*, 4, 109.

Wood, S.N., 2000. Modelling and smoothing parameter estimation with multiple quadratic penalties. *Journal of the Royal Statistical Society - Series B Statistical Methodology*, 62, 413-428.

Wood, S.N., 2006. Generalized additive models: an introduction with R (texts in statistical science). Chapman & Hall/ CRC, Boca Raton, FL.

Zavodnik, D., Hrs-Brenko, M., Legac, M., 1991. Synopsis onthe fanshell*Pinnanobilis* L. In the easternAdriatic Sea. p.169-178. In : *LesEspècesMarines à protégerenMéditerranée*.Boudouresque, C.F., Avon, M., Gravez, V. (Eds). *GisposidonieParcscientifiqueettechnologique de Luminy*,Marseille.

Zotou M., Gkrantounis P., Karadimou E., Tsirintanis k., Sini M., Poursanidis D., Azzolin M. et al. 2020. *Pinnanobilis* in the Greek seas (NE Mediterranean): on the brink of extinction? *MediterraneanMarineScience*, 21(3): 575-591.

Λοιπό φωτογραφικό υλικό από τις εργασίες πεδίου



Εικόνα 14: Προετοιμασία του εξοπλισμού για επιβίβαση στο σκάφος.



Εικόνα 15: Αμέσως πριν την κατάδυση.



Εικόνα 16: Το απαραίτητο διάλειμμα για αποβολή αζώτου και ενυδάτωση μεταξύ διαδοχικών καταδύσεων.



Εικόνα 17: Ο μίτος των διακοσίων μέτρων και η σήμανση των 5 μέτρων όπως φαίνεται στο βάθος.



Εικόνα 18: Ξεριζωμένο άτομο *P. nobilis*.



Εικόνα 19: Μυδοκαλλιέργειες ανάμεσα στο δέλτα Αξιού και Αλιάκμονα.