

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ



**Επιπτώσεις περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων της
υδάτινης στήλης στις βενθικές κοινότητες**

Διδακτορική Διατριβή

Εμμανουήλ Μωραΐτης

2019

UNIVERSITY OF CRETE

BIOLOGY DEPARTMENT



**Effects of water column environmental gradients
on the benthic communities**

Doctoral dissertation

Emmanouil Moraitis

2019

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Ιωάννης Καρακάσης (Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Κρήτης)

ΜΕΛΗ ΤΡΙΜΕΛΟΥΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Χρίστος Αρβανιτίδης (Ερευνητής, Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών)

Μαριάννα Γιαννουλάκη (Ερευνήτρια, Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών)

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Κωσταντία Λύκα (Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Πανεπιστήμιο Κρήτης)

Γεώργιος Κουμουνδούρος (Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Κρήτης)

Εμμανουήλ Λαδουκάκης (Επίκουρος Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Κρήτης)

Νικόλαος Λαμπαδαρίου (Ερευνητής, Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών)

Ευχαριστίες

Η παρούσα μελέτη συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (Γ.Γ.Ε.Τ) μέσω των ερευνητικών προγραμμάτων «HYPOXIA» (Αρ. 5381) και «ECODISK» (Αρ. 4794). Ευχαριστώ θερμά το ιδιωτικό ίδρυμα Α.Γ Λεβέντη για την χορήγηση ετήσιων υποτροφιών για τα ακαδημαϊκά έτη 2016-2017 και 2017-2018.

Ευχαριστώ θερμά την Μαριάννα Γιαννουλάκη, Χρίστο Αρβανιτίδη και Βασίλη Βαλαβάνη για την επιστημονική υποστήριξη και καθοδήγηση όλα αυτά τα χρόνια. Επίσης ευχαριστώ την εξεταστική επιτροπή για τις πολύτιμες διορθώσεις και τα εποικοδομητικά σχόλια σχετικά με το κείμενο της διατριβής. Ευχαριστώ τα μέλη του εργαστηρίου «Θαλάσσιας Οικολογίας» του τμήματος Βιολογίας του Πανεπιστημίου Κρήτης: Παναγιώτη Δημητρίου, Ειρήνη Τσικοπούλου, Ναυσικά Παπαγεωργίου και Αντώνη Γερόπουλο για τις στιγμές που περάσαμε στο εργαστήριο στα ταξίδια και στις δειγματοληψίες και τη συμπαράσταση όλα αυτά τα χρόνια. Ευχαριστώ τον Παναγιώτη Καλατζή για την φίλια του και τις σκέψεις που μοιραστήκαμε.

Ευχαριστώ τον επιστημονικό μου υπεύθυνο, Ιωάννη Καρακάση για τις ευκαιρίες που μου έδωσε από πολύ νωρίς και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τους γονείς μου Λεωνίδα και Λίζα και τον αδερφό μου Γιάννη για την αμέριστη αγάπη και υποστήριξη που μου παρείχαν. Δεν θα έφτανα σε αυτό το σημείο χωρίς αυτούς. Ευχαριστώ και τους άλλους μου γονείς Θανάση και Σοφία γιατί συμπαραστάθηκαν πλάι μου όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ πηγαίνει στην οικογένεια μου, Άννη και Ελίσα καθώς όλα έγιναν γι' αυτούς. Πάντα γι' αυτούς.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Γενική Εισαγωγή.....	2
Κεφάλαιο 2. Μελέτη απόκρισης μακροπανιδικών βενθικών κοινοτήτων στις κυριότερες περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις του Αιγαίου πελάγους.....	14
2.1 Εισαγωγή.....	14
2.2 Υλικά και Μέθοδοι.....	19
2.2.1 Περιοχή μελέτης.....	19
2.2.2 Βιολογικά δεδομένα.....	20
2.2.3 Κλιματικά δεδομένα.....	21
2.2.4 Μελέτη βενθικών κοινοτήτων.....	24
2.3 Αποτελέσματα.....	26
2.4 Συζήτηση.....	33
2.5 Συμπεράσματα.....	38
Κεφάλαιο 3. Χρήση βενθικών ειδών-δεικτών για αξιολόγηση οικολογικής κατάστασης μέσω μοντέλων κατανομής.....	40
3.1 Εισαγωγή.....	40
3.2 Υλικά και Μέθοδοι.....	44
3.2.1 Περιοχή μελέτης.....	44
3.2.2 Βιολογικά δεδομένα.....	46
3.2.3 Περιβαλλοντικά δεδομένα.....	48
3.2.4 Modelling.....	52
3.3 Αποτελέσματα.....	54
3.3.1 Ανάλυση ειδών-δεικτών.....	54
3.3.2 Modelling.....	59
3.4 Συζήτηση.....	62
3.5 Συμπεράσματα.....	68
Κεφάλαιο 4. Αξιολόγηση πιθανών επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής στην κατανομή θαλάσσιων βενθικών ειδών στην Ανατολική Μεσόγειο.....	70

4.1 Εισαγωγή.....	70
4.2 Υλικά και Μέθοδοι.....	73
4.2.1 Σχεδιασμός δειγματοληψίας.....	73
4.2.2 Κλιματικά δεδομένα.....	76
4.2.3 Ανάλυση οικολογικού θώκου.....	79
4.2.4 Modelling.....	80
4.3 Αποτελέσματα.....	82
4.3.1 Οικολογικός θώκος.....	82
4.3.2 Modelling.....	84
4.4 Συζήτηση.....	88
4.5 Συμπεράσματα.....	95
Κεφάλαιο 5. Γενική Συζήτηση.....	97
Βιβλιογραφία.....	110
Περίληψη.....	132
Abstract.....	135
Παράρτημα.....	137

Κεφάλαιο 1. Γενική Εισαγωγή

Η επιστημονική κοινότητα και ιδιαίτερα οι επιστήμες περιβάλλοντος καλούνται να βρουν διαχειριστικές λύσεις σε παγκόσμια οικολογικά ζητήματα όπως η κλιματική αλλαγή, η οργανική ρύπανση, η εξάπλωση ξενικών ειδών κ.α. Οι πιο αποτελεσματικές στρατηγικές υιοθετούν τεχνικές περιβαλλοντικής παρακολούθησης που ανιχνεύουν οικολογικές αλλαγές σε αρχικό στάδιο και αφήνουν επαρκή χρόνο αντίδρασης. Η παρακολούθηση των βιοτικών στοιχείων ενός οικοσυστήματος επιτρέπει μια αξιόπιστη και σχετικά λιγότερο δαπανηρή προσέγγιση στην αξιολόγηση της οικοσυστημικής λειτουργίας (Gogina and Zettler, 2010).

Η αξιολόγηση της οικοσυστημική λειτουργίας γίνεται συχνά με «είδη-δείκτες». Ο όρος «είδη-δείκτες» (indicator species), χρησιμοποιείται τακτικά σε μελέτες οικολογικής κατάστασης υδάτινων οικοσυστημάτων και αναφέρεται σε παρατηρήσεις της πληθυσμιακής κατανομής ενός είδους που συσχετίζεται άμεσα με μία ή περισσότερες περιβαλλοντικές μεταβλητές που χαρακτηρίζουν ένα ενδιαίτημα (Siddig et al., 2016). Ο προσδιορισμός του οικολογικού θώκου ή οικοθέσης (niche) ενός είδους-δείκτη και των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών που τον καθορίζουν χρησιμοποιείται για χρονικές ή χωρικές συγκρίσεις, για ανίχνευση περιβαλλοντικών αλλαγών και για αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης ενός ενδιαιτήματος. Η δυνατότητα χρήσης ενός είδους στην ανίχνευση φυσικών και ανθρωπογενών μεταβολών στο υδάτινο περιβάλλον το καθιστά «δείκτη» ενός συγκεκριμένου ενδιαιτήματος ή της κατάστασής του. Η συζήτηση για τα είδη-δείκτες αναζωπυρώθηκε εντός της επιστημονικής κοινότητας τα τελευταία 15 χρόνια με την υιοθέτηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση πολιτικών για το θαλάσσιο περιβάλλον των χωρών-

μελών και την θέσπιση οδηγιών για αξιολόγηση της κατάστασης των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Ενδεικτικά παραδείγματα αποτελούν οι οδηγίες «Water Framework Directive» (EU, 2000) και «Marine Strategy Water Framework Directive» (EU, 2008), που υποχρεώνουν το κάθε μέλος στην αξιολόγηση όλων των παράκτιων και μεταβατικών οικοσυστημάτων και στην επίτευξη «καλής» οικολογικής κατάστασης έως το έτος 2020.

Η οικολογική κατάσταση των υδάτινων ενδιαιτημάτων συχνά αξιολογείται μέσω της μελέτης του βενθικού περιβάλλοντος και των βενθικών κοινοτήτων που το χαρακτηρίζουν. Ορισμένα βενθικά είδη, εξαιτίας του στενού οικολογικού θώκου που καταλαμβάνουν, αποτελούν καλούς «δείκτες» συγκεκριμένων βενθικών ενδιαιτημάτων (Reiss et al., 2015). Ωστόσο, η έννοια του «είδους-δείκτη» είναι διαφορετική από το βαθμό «ευαισθησίας» ενός βενθικού είδους. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται η παρουσία ενός είδους ως ένδειξη συγκεκριμένων περιβαλλοντικών συνθηκών στις οποίες το είδος δείχνει προτίμηση η ανεκτικότητα. Ο αριθμός της συγκεκριμένης κατηγορίας ειδών είναι σημαντικά μικρότερος από την επόμενη κατηγορία. Ο δεύτερος όρος προκύπτει από την προσέγγιση στο επίπεδο της κοινότητας όπου όλα τα είδη που την απαρτίζουν συμμετέχουν στην αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης. Τα είδη βαθμονομούνται με ένα αριθμό (στις περισσότερες περιπτώσεις αναφερόμαστε μόνο στην οργανική ρύπανση ως παράγοντα διατάραξης) και στη συνέχεια ενσωματώνονται σε υπολογισμούς από θεσπισμένους βιοτικούς δείκτες (Dauvin and Ruellet, 2007). Ο βαθμός ευαισθησίας του είδους προκύπτει από το ποσοστό του στη συνολική αφθονία της κοινότητας. Βασική διαφορά των δύο κατηγοριών είναι πως τα είδη-δείκτες μπορούν να ενσωματωθούν σε μελέτες για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων πάσης φύσεως διατάραξης πέρα από τον οργανικό εμπλουτισμό για τον οποίο και έχει θεσπιστεί η πλειονότητα των βενθικών βιοτικών δεικτών. Παραδείγματα τέτοιων πηγών διατάραξης είναι η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, και

η μεταβολή των διαβαθμίσεων αλατότητας, δύο σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν τα γεωγραφικά όρια των θαλάσσιων ειδών. Το κυριότερο μειονέκτημα της χρήσης των βιοτικών δεικτών που χρησιμοποιούνται παραδοσιακά στην αξιολόγηση των βενθικών ενδιαιτημάτων έναντι των ειδών-δεικτών είναι η μεροληψία των αποτελεσμάτων τους όταν εφαρμόζονται σε μεγάλη χωρική κλίμακα. Για παράδειγμα, υφάλμυρα ενδιαιτήματα ή θαλάσσιες περιοχές με χαμηλή αλατότητα όπως η Βαλτική Θάλασσα, συχνά χαρακτηρίζονται ως «κακής» οικολογικής κατάστασης από τους βιοτικούς δείκτες που κάνουν χρήση των βενθικών κοινοτήτων εξαιτίας της απουσίας των ευαίσθητων ειδών. Στην πραγματικότητα όμως, σε φυσικά διαταραγμένα ενδιαιτήματα όπως η Βαλτική Θάλασσα που χαρακτηρίζονται από έντονη μεταβλητότητα και περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις, υπάρχει δυσκολία στον διαχωρισμό φυσικής και ανθρωπογενούς καταπόνησης (Zettler et al., 2007). Αντίστοιχα, οι Μεσογειακές λίμνες αποτελούν ένα ακόμη παράδειγμα μεροληπτικής κατάταξης από τους σημερινούς βιοτικούς βενθικούς δείκτες, που σχετίζεται με τον μειωμένο αριθμό ειδών που ευδοκίμει σε τόσο ευτροφικά ενδιαιτήματα (Barbone et al., 2012).

Η σημαντικότητα των παραγόντων που διαμορφώνουν τις κατανομές των θαλάσσιων βενθικών ειδών βρίσκεται σε άμεση σχέση με την χωρική κλίμακα (Zettler et al., 2013). Η συνεισφορά των βιοτικών αλληλεπιδράσεων αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη δομή των βενθικών κοινοτήτων σε σχετικά περιορισμένη (τοπική) χωρική κλίμακα. Αντίστοιχα, σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα οι αβιοτικές συνθήκες διαδραματίζουν μεγαλύτερο ρόλο στην κατανομή των ειδών. Η διαχείριση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων συχνά πάσχει από έλλειψη περιβαλλοντικών δεδομένων σε εκτεταμένη χωρική κλίμακα (Rodil et al., 2014, Saure et al., 2014). Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της δυσκολίας στην συλλογή τέτοιου είδους πληροφορίας στο θαλάσσιο περιβάλλον σε σχέση με το χερσαίο. Σύγχρονες προσεγγίσεις στη χαρτογράφηση των θαλάσσιων ενδιαιτημάτων κάνουν χρήση δορυφορικών δεδομένων

τηλεπισκόπησης και αυξάνουν τη διαθεσιμότητα των περιβαλλοντικών δεδομένων σε μεγάλη χωρική κλίμακα. Παρατηρήσεις προερχόμενες από δορυφόρους και μοντέλα παρέχουν ακριβείς παρατηρήσεις σχετικά με την επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας την αλατότητα και την πρωτογενή παραγωγή σε παγκόσμια κλίμακα ανάμεσα σε πολλές άλλες περιβαλλοντικές μεταβλητές. Η βελτίωση της ικανότητας απεικόνισης του θαλάσσιου πυθμένα και της υπερκείμενης στήλης νερού έχει αυξήσει το ενδιαφέρον για τη χρήση της χαρτογράφησης των ενδιαιτημάτων για σκοπούς περιβαλλοντικής διαχείρισης, οικονομικού οφέλους και ανάπτυξης.

Η συστηματική παρακολούθηση των βιοτικών χαρακτηριστικών του θαλάσσιου πυθμένα αποτελεί μια διαδικασία που απαιτεί αρκετό κόστος και κόπο κατά το στάδιο της συλλογής δειγμάτων. Τα προβλήματα που προκύπτουν εντείνονται όταν πρέπει να λάβει χώρα καταγραφή των βιοτικών χαρακτηριστικών σε μεγάλη χωρική κλίμακα όπως επιβάλλει το τρέχον νομοθετικό πλαίσιο Marine Strategy Framework Directive – Descriptor 6 (EU, 2008). Επομένως, μέθοδοι που προβλέπουν την κατανομή ειδών σε μεγάλη χωρική κλίμακα βασιζόμενες σε σημειακές μετρήσεις απέκτησαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια (Gama et al., 2016). Τα μοντέλα κατανομής ειδών (Species Distribution Modelling) αναφέρονται στους μαθηματικούς αλγόριθμους που χρησιμοποιούν σημειακές καταγραφές ειδών σε συνδυασμό με την χωρική κάλυψη των περιβαλλοντικών δεδομένων (προερχόμενη κυρίως από δορυφόρους), για την ερμηνεία και πρόβλεψη της κατανομής των ειδών (Elith and Leathwick, 2009). Η χρήση των μοντέλων κατανομής ειδών στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι σε πρώιμα στάδια σε σχέση με τα χερσαία οικοσυστήματα. Ως επί το πλείστον οι μελέτες που κάνουν χρήση των μοντέλων αυτών αφορούν στην πρόβλεψη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην κατανομή των οργανισμών, στην αξιολόγηση των βιολογικών εισβολών, στην μελέτη της κατανομής θαλάσσιων εμπορικών ειδών ή στην διαχείριση

θαλάσσιων ενδιαιτημάτων. Τα μοντέλα κατανομής ειδών έχουν μεγαλύτερη εφαρμογή όταν ενσωματώνονται σε μελέτες που αφορούν σχετικά εδραίους οργανισμούς ή οργανισμούς με περιορισμένη δυνατότητα μετακίνησης όπως ασπόνδυλα, φύκη, φανερόγαμα, κνιδόζωα και σπόγγους. Τα βενθικά ασπόνδυλα αποτελούν ιδανικό βιοτικό υλικό για μοντέλα κατανομής ειδών εξαιτίας της περιορισμένης μετακίνησής τους και της ικανότητας να αντικατοπτρίζουν τις περιβαλλοντικές αλλαγές μέσω των συναθροίσεων τους (Sarà et al., 2018). Οι εφαρμογές των μοντέλων κατανομής ειδών στο βένθος έχουν ιδιαίτερη σημασία καθώς αυτό αποτελεί τμήμα του θαλάσσιου περιβάλλοντος που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη δυσκολία στην δειγματοληψία και ανάλυση δεδομένων. Η απόδοση των μοντέλων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η μέθοδος που χρησιμοποιείται, ο οικολογικός θώκος του είδους, η διασπορά και η ικανότητα μετακίνησης του.

Τα χωρικά μοντέλα κατανομής ειδών βασίζονται σε δύο πηγές πληροφορίας: 1) τα βιοτικά δεδομένα και 2) τα περιβαλλοντικά (αβιοτικά κυρίως) δεδομένα. Όσον αφορά στα βιοτικά δεδομένα, οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται σε ένα είδος ή σε ένα λειτουργικό χαρακτηριστικό (π.χ. ιζηματοφαγία). Λιγότερο συχνές είναι οι μελέτες που κάνουν χρήση δεικτών ποικιλότητας και βιομάζας. Η χρήση μοντέλων κατανομής ανά είδος αποτελεί την πιο συχνή επιλογή και χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε διαχειριστικές πρακτικές που προβλέπουν την κατανομή ενός είδους οικολογικής ή οικονομικής σημασίας. Οι κυριότεροι περιορισμοί στην ποιότητα και στη συλλογή των βιοτικών δεδομένων αποτελούν: η ανεπάρκεια καταγραφών, η χωρική ή χρονική μεροληψία στη δειγματοληπτική προσπάθεια και η χωρική και χρονική κλίμακα της μελέτης. Η αξιόπιστη χωρική πρόβλεψη της κατανομής ενός είδους απαιτεί επαρκή και ισοκατανεμημένη δειγματοληπτική προσπάθεια. Σε βενθικές μελέτες τα κυριότερα προβλήματα προκύπτουν κατά τον σχεδιασμό της δειγματοληψίας καθώς για πρακτικούς λόγους (κόστους και προσπάθειας) οι

σταθμοί τείνουν να είναι συγκεντρωμένοι σε αβαθείς περιοχές ή σε περιοχές με ιδιαίτερο οικολογικό ή οικονομικό ενδιαφέρον (περιοχές αλιείας, προστατευόμενες περιοχές ή ευαίσθητα ενδιαιτήματα) με αποτέλεσμα να παρατηρείται σχετική μεροληψία στη συλλογή των βιοτικών δεδομένων (Aiello-Lammens et al., 2015; Rodil et al., 2014).

Η ποιότητα των περιβαλλοντικών δεδομένων αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την απόδοση και εγκυρότητα των μοντέλων κατανομής ειδών (Tyberghein et al., 2012). Η διαθεσιμότητα μεγάλης κλίμακας περιβαλλοντικών δεδομένων για το θαλάσσιο περιβάλλον έχει βελτιωθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία. Ο ολοένα αυξανόμενος αριθμός των παγκόσμιων βάσεων δεδομένων βοήθησε σημαντικά στην αύξηση των μελετών που αφορούν τη χαρτογράφηση ενδιαιτημάτων και στην πρόβλεψη των κατανομών ειδών. Οι περιβαλλοντικές παράμετροι που επιλέγονται για να χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα κατανομής ειδών θα πρέπει ιδανικά να έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: να αποτελούν για το υπό μελέτη είδος περιοριστικό παράγοντα ή πόρο ή περιβαλλοντική διατάραξη (φυσική ή ανθρωπογενή) (Reiss et al., 2015). Οι πιο συνηθισμένες περιβαλλοντικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται σε βενθικές μελέτες είναι η θερμοκρασία, η αλατότητα και η πρωτογενής παραγωγικότητα. Το βάθος και ο τύπος του υποστρώματος αν και σημαντικοί παράγοντες για την κατανομή των βενθικών ειδών, πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή σε μελέτες μεγάλης χωρικής κλίμακας καθώς για το πρώτο υπάρχει κίνδυνος συσχέτισης με άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία και το δεύτερο χαρακτηρίζεται από μεγάλη μεταβλητότητα και έλλειψη δεδομένων. Οι περισσότερες μελέτες βενθικών ειδών επικεντρώνονται στη χρήση της θερμοκρασίας (βένθους ή στήλης) και της αλατότητας καθώς οι δύο αυτές μεταβλητές καθορίζουν τα γεωγραφικά όρια των βενθικών ειδών στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ο τρίτος, πιο σημαντικός παράγοντας για μοντέλα κατανομής βενθικών ειδών είναι η

πρωτογενής παραγωγή (ή η συγκέντρωση χλωροφύλλης) ως έμμεσο μέτρο διαθεσιμότητας τροφής.

Σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης της ποιότητας των παράκτιων θαλάσσιων οικοσυστημάτων αποτελεί η δομή των βενθικών κοινοτήτων και η αφθονία των βενθικών μακροασπόνδυλων ειδών (EU, 2008). Συγκεκριμένα, η απόκριση των μακροπανιδικών ειδών μαλακού υποστρώματος σε ανθρωπογενείς πιέσεις οργανικού εμπλουτισμού βασίστηκε αρχικά στην εργασία των Pearson and Rosenberg (1978) και έκτοτε χρησιμοποιείται κατά κόρον ως βιοτικό εργαλείο για την παρακολούθηση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Για τον σκοπό αυτό, οι μακροβενθικοί οργανισμοί χρησιμοποιούνται για τη θέσπιση μιας σειράς βενθικών δεικτών για την αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης θαλάσσιων περιοχών χάρη στα εξής χαρακτηριστικά τους: Διαθέτουν περιορισμένη δυνατότητα μετακίνησης επομένως αδυνατούν να αποφύγουν δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες ιζήματος και υδάτινης στήλης, ο σχετικά μεγάλος χρόνος ζωής των μακροπανιδικών ειδών καθιστά τους οργανισμούς αυτούς ικανούς να αντικατοπτρίζουν τις περιβαλλοντικές αλλαγές σε μεγάλο χρονικό διάστημα, οι βενθικές κοινότητες απαρτίζονται από είδη με διαφορετική ανεκτικότητα στην περιβαλλοντική διατάραξη και τέλος διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ανταλλαγή θρεπτικών συστατικών μεταξύ στήλης και υποστρώματος (de-la-Ossa-Carretero et al., 2012; Rosenberg et al., 2004).

Πολυάριθμες είναι μελέτες των μακροβενθικών ασπόνδυλων ειδών στις Ευρωπαϊκές θάλασσες. Οι Régès and Picard (1964) έθεσαν τις βάσεις για τη μελέτη των βενθικών κοινοτήτων με την πρώτη περιγραφή των κύριων ενδιαιτημάτων τους όσον αφορά τη σύσταση του υποστρώματος (άμμος, ιλύς, άργιλος κλπ) και τις συνθήκες της στήλης του νερού (π.χ. διαβαθμίσεις αλατότητας σε μεταβατικά ενδιαιτήματα). Καταλυτικό ρόλο στη

θέσπιση βενθικών βιοτικών δεικτών επιτέλεσε η μελέτη του Gray (1979), όπου περιγράφει τις κατηγορίες απόκρισης των βενθικών ειδών στην οργανική διατάραξη σε τρεις ομάδες. Διαφορετικοί συγγραφείς κάνουν λόγο για 4 ή 5 κατηγορίες βενθικών οργανισμών όσον αφορά την απόκριση τους στην περιβαλλοντική διατάραξη (Borja et al., 2000). Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούν το γενικό πρότυπο διαδοχής των βενθικών οργανισμών στον οργανικό εμπλουτισμό που προτάθηκε από τους Pearson and Rosenberg (1978). Κατά το πρότυπο αυτό, η διαδοχή κατά μήκος μιας διαβάθμισης οργανικού εμπλουτισμού, βασίζεται στο ποσοστό «ευκαιριακών» ή αντίθετα, «ευαίσθητων» στην περιβαλλοντική διατάραξη ειδών που συγκροτούν μια βιοκοινότητα. Κατά τα αρχικά στάδια και κάτω από μικρής έντασης καταπόνηση, τα άτομα αποκρίνονται με προσαρμογή της φυσιολογίας τους εντός των ορίων του εύρους ανοχής τους. Έπειτα, καθώς η καταπόνηση εντείνεται ή/και διαρκεί περισσότερο, τα αρχικά άτομα και είδη αντικαθίστανται από άλλα (διαφορετικού είδους, γένους ή ανώτερης ταξινομικής ομάδας) δηλαδή τα διαδέχονται άτομα που χαρακτηρίζονται από διαφορετικά φυσιολογικά όρια και οικολογική στρατηγική. Κατά τους (Rosenberg et al., 2004), η ταξινομική βαθμίδα του είδους πρέπει να χρησιμοποιείται σε μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθώς τα είδη που εμπερικλείονται στο επίπεδο του γένους είναι δυνατόν να παρουσιάζουν διαφορετική απόκριση στην περιβαλλοντική διατάραξη. Επομένως, η πανιδική σύνθεση κατά μήκος μιας διαβάθμισης καταπόνησης αποτελείται από διαφορετικά στάδια διαδοχής ειδών στα όρια της προσαρμοστικότητας του εκάστοτε είδους.

Ο επικρατέστερος δείκτης σήμερα στο χώρο της ανατολικής Μεσογείου είναι ο δείκτης BENTIX (Simboura and Zenetos, 2002) (Πίνακας 1).

Κατάσταση Ρύπανσης	Bentix	Bentix-λασπόδες υπόστρωμα	Οικολογική Κατάσταση
Φυσιολογική	$4,5 \leq \text{Bentix} < 6$	$4 \leq \text{Bentix} < 6$	Υψηλή
Ελαφρά ρυπασμένη/μεταβατική	$3,5 \leq \text{Bentix} < 4,5$	$3 \leq \text{Bentix} < 4$	Καλή
Ενδιάμεσα ρυπασμένη	$2,5 \leq \text{Bentix} < 3,5$	$2,5 \leq \text{Bentix} < 3$	Ενδιάμεση
Έντονα ρυπασμένη	$2 \leq \text{Bentix} < 2,5$	$2 \leq \text{Bentix} < 2,5$	Φτωχή
Αξωική	0	0	Κακή

Πίνακας 1: Οικολογικές κατηγορίες του δείκτη BENTIX για τις βενθικές κοινότητες μαλακού υποστρώματος (από Simboura and Zenetos, 2002).

Ο συγκεκριμένος δείκτης θεσπίστηκε αποκλειστικά για τον ελληνικό θαλάσσιο χώρο με ευρεία όμως εφαρμογή και στην υπόλοιπη μεσογειακή λεκάνη. Κατά τον δείκτη αυτό οι βενθικοί μακροπανδικοί οργανισμοί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

Ομάδα 1: Τα είδη που ανήκουν στη κατηγορία αυτή αναφέρονται γενικά σαν **ευαίσθητα** στην περιβαλλοντική διατάραξη. Χαρακτηρίζονται από K οικολογική στρατηγική που περιγράφει είδη με σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, αργή ανάπτυξη και υψηλή βιομάζα. Είδη που ανήκουν στην τάξη αυτή παίρνουν την τιμή 1.

Ομάδα 2: Στη δεύτερη κατηγορία του δείκτη BENTIX ανήκουν είδη ανθεκτικά στην περιβαλλοντική διατάραξη ή καταπόνηση που αποκρίνονται στον οργανικό εμπλουτισμό ή σε άλλες μορφές ρύπανσης με αύξηση των πληθυσμών τους. Επίσης, σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται τα **ευκαιριακά είδη δευτέρας τάξης** που χαρακτηρίζονται από r οικολογική στρατηγική, δηλαδή είδη με σχετικά μικρό χρόνο ζωής, γρήγορη ανάπτυξη και αναπαραγωγική ωρίμανση. Είδη που ανήκουν στην τάξη αυτή παίρνουν την τιμή 2.

Ομάδα 3: Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα ευκαιριακά είδη πρώτης τάξης που χαρακτηρίζονται ως είδη με μεγάλη ανεκτικότητα σε υποξικές συνθήκες. Τα είδη αυτά

παρουσιάζουν έντονη r στρατηγική και αποτελούν τους πρώτους αποικιστές μιας περιοχής που έχει υποστεί έντονη περιβαλλοντική διατάραξη.

Στόχοι μελέτης

Τα μακροβενθικά ασπόνδυλα είδη αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι στα προγράμματα παρακολούθησης (monitoring) της περιβαλλοντικής κατάστασης των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Εν τούτοις, η κύρια χρήση τους περιορίζεται στην ενσωμάτωση των αφθονιών τους σε βενθικούς δείκτες που εξετάζουν τις επιπτώσεις ανθρωπογενών διαταραχών σε επίπεδο βιοκοινότητας. Η προσέγγιση αυτή χαρακτηρίζεται από τρία κύρια μειονεκτήματα που η παρούσα μελέτη καλείται να απαντήσει:

1. Τα μακροβενθικά ασπόνδυλα είδη αναμένεται να εναλλάσσουν τα πρότυπα απόκρισης τους ανάλογα με τη θέση τους σε μια περιβαλλοντική διαβάθμιση (Zettler et al., 2007).

Σε μεγάλη χωρική κλίμακα όπου η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από έντονες ή/και ταυτόχρονες (περισσότερες από μία) περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις, η απόκριση των μακροβενθικών ειδών στην περιβαλλοντική διατάραξη αναμένεται να είναι διαφορετική με αποτέλεσμα η γενική κατάταξη σε οικολογικές κατηγορίες από τους θεσπισμένους βιοτικούς δείκτες να μην συμπεριλαμβάνει την προαναφερθείσα οικολογική απόκριση των ειδών. Σε αυτή την περίπτωση η βενθο-πελαγική διασύνδεση (benthic-pelagic coupling) που αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των βιοτικών δεικτών δεν επιτυγχάνεται.

2. Η εφαρμογή των σημερινών βενθικών δεικτών απαιτεί επαρκή γνώση ταξινομικής κατάταξης σε επίπεδο είδους όλων των κύριων μακροβενθικών ομάδων (δακτυλιοσκώληκες, εχινόδερμα, μαλάκια, καρκινοειδή, σωληνοειδή κλπ). Η διαδικασία της διαλογής των ατόμων και της αναγνώρισής τους στην ταξινομική βαθμίδα του είδους αποτελεί μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία έως την εξαγωγή ακόμη και των αρχικών αποτελεσμάτων.
3. Η κατάταξη των βενθικών ειδών σε ευαίσθητα και ανθεκτικά γίνεται με βάση την απόκριση τους στον οργανικό εμπλουτισμό. Η χρησιμότητα των μακροβενθικών ειδών στον εντοπισμό των επιπτώσεων της οργανικής ρύπανσης έχει μελετηθεί εκτεταμένα στην Ανατολική Μεσόγειο (Dimitriou et al., 2015; Moraitis et al., 2013; Tsikoroulou et al., 2018). Ωστόσο, μέχρι σήμερα οι προαναφερθείσες οικολογικές κατηγορίες, χρησιμοποιούνται σε αξιολόγηση πάσης φύσεως περιβαλλοντικών διαταράξεων. Όμως, δεν έχει μελετηθεί αν, και σε ποιο βαθμό, οι κατηγορίες αυτές (που έχουν συγκροτηθεί για μια συγκεκριμένη πηγή διατάραξης) είναι αξιόπιστες, χρήσιμες ή έστω σχετικές για την ανίχνευση της απόκριση των βενθικών κοινοτήτων σε μια άλλου τύπου διατάραξη ή ακόμη περισσότερο σε περισσότερες από μία.

Για την απάντηση των πιο πάνω ερωτημάτων σχεδιάστηκαν οι αντίστοιχες προσεγγίσεις:

1. Συλλογή δειγμάτων μακροπανίδας κατά μήκος της παράκτιας ζώνης του Αιγαίου πελάγους, μιας περιοχής που χαρακτηρίζεται από έντονες περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις. Σκοπός της μελέτης αυτής (Κεφάλαιο 1) είναι η μελέτη της επιρροής των διαβαθμίσεων θερμοκρασίας, αλατότητας και πρωτογενούς παραγωγικότητας στην αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης με βάση τις συναθροίσεις των

μακροβενθικών ασπόνδυλων ειδών. Συγκεκριμένα, συλλέξαμε δείγματα μακροπανίδας από δύο ομάδες σταθμών με διαφορετικά επίπεδα ευτροφισμού και διερευνήθηκε κατά πόσον η συμμεταβολή των περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων επηρέαζε την βενθο-πελαγική διασύνδεση. Στο τμήμα αυτό της μελέτης ελέγξαμε την υπόθεση ότι οι βενθικές κοινότητες κάθε σταθμού αποτελούνται από ευαίσθητα και ανθεκτικά είδη και πως μόνο τα είδη που χαρακτηρίζουν κάθε ομάδα (είδη-δείκτες) έχουν συγκλίνουσα απόκριση.

2. Με βάση τα αποτελέσματα του πρώτου ερωτήματος, χρησιμοποιήθηκαν τα είδη-δείκτες ως μια εναλλακτική λύση στην αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης έναντι των θεσπισμένων βενθικών δεικτών (Κεφάλαιο 2). Στις περιπτώσεις που οι συνθήκες της υδάτινης στήλης δεν αντικατοπτρίζονται στο επίπεδο των βενθικών κοινοτήτων η προσέγγιση αυτή είναι αναγκαία για την αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης μιας θαλάσσιας περιοχής. Προτείνουμε μια μεθοδολογία που περιλαμβάνει την ενσωμάτωση βενθικών ειδών-δεικτών σε μοντέλα πρόβλεψης κατανομής για την αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης θαλάσσιων περιοχών σε εκτεταμένη χωρική κλίμακα. Για το σκοπό αυτό συμπεριλάβαμε σταθμούς από το Ιόνιο πέλαγος σε συνδυασμό με τους σταθμούς του Αιγαίου που χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο ερώτημα. Το πιο πάνω βήμα έλαβε χώρα για να ενισχύσει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων εξετάζοντας την συμπεριφορά των ειδών σε υδρογραφικά σταθερότερες περιοχές που χαρακτηρίζουν το Ιόνιο πέλαγος πέρα από τις έντονες περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις του Αιγαίου. Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει σκοπό να εξοικονομήσει κόπο, χρόνο και κόστος στην αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης θαλάσσιων ενδιαιτημάτων με την ανάδειξη ειδών με εύκολη ταξινομική

αναγνώριση και την ενσωμάτωση τους σε αναπαραγωγικά μοντέλα με σκοπό την αναγωγή αποτελεσμάτων σε ευρεία χωρική κλίμακα.

3. Στα πλαίσια του τρίτου ερωτήματος, διερευνήθηκε η απόκριση των ειδών-δεικτών που προέκυψαν από το δεύτερο ερώτημα σε ένα σενάριο κλιματικής αλλαγής (Κεφάλαιο 3). Συγκεκριμένα, μέσω χρήσης μοντέλων κατανομής ειδών, διερευνήσαμε αν οι υπάρχουσες οικολογικές κατηγορίες οργανισμών (ευαίσθητα – ανθεκτικά) ανταποκρίνονται στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας κατά τον ίδιο τρόπο με αυτόν που αποκρίνονται στον οργανικό εμπλουτισμό. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε προβολή της σημερινής κατανομής των ειδών στο χειρότερο μελλοντικό σενάριο κλιματικής αλλαγής RCP85 για το έτος 2100 με βάση το οποίο αναμένεται αύξηση ~ 3 °C της θαλάσσιας θερμοκρασίας (van Vuuren et al., 2011).

Κεφάλαιο 2. Μελέτη απόκρισης μακροπανιδικών βενθικών κοινοτήτων στις κυριότερες περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις του Αιγαίου πελάγους

2.1 Εισαγωγή

Η αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης των παράκτιων οικοσυστημάτων και η επίτευξη της «καλής» οικολογικής κατάστασης επιβάλλεται από το τρέχον ευρωπαϊκό πλαίσιο της Θαλάσσιας Στρατηγικής (Marine Strategy Framework Directive) (EU, 2008). Η κατανόηση της σχέσης μεταξύ βιοτικών και αβιοτικών συστατικών των θαλάσσιων και μεταβατικών ενδιαιτημάτων και των πιέσεων που συμβάλλουν στη διατάραξη της σχέσης αυτής αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι για την υλοποίηση της Οδηγίας. Ταυτόχρονα, για να επιτευχθεί αποτελεσματική διαχείριση των ενδιαιτημάτων αυτών, απαιτείται η χρήση οικολογικών δεικτών (βιοτικών και αβιοτικών) σε κατάλληλη χωρική κλίμακα. Οι αντίστοιχες δυσκολίες στη δειγματοληπτική προσπάθεια για κάλυψη της ετερογένειας του φυσικού περιβάλλοντος από την εισαγωγή του μέτρου αυτού είναι εμφανείς. Μια σύγχρονη προσέγγιση αποτελεί η χρήση χωρικών μοντέλων ως εργαλεία πρόβλεψης των κατανομών των ειδών μέσω της απόκρισής τους σε περιβαλλοντικές μεταβολές (Reiss et al., 2015). Η χωρική παρακολούθηση του βενθικού οικοσυστήματος γίνεται για διάφορους λόγους όπως για την μελέτη των προτύπων κατανομής ειδών, την παρακολούθηση πληθυσμιακών διακυμάνσεων, την αξιολόγηση των επιπτώσεων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων κ.α. Τα τελευταία χρόνια τα προγράμματα παρακολούθησης ενσωματώνουν ολοένα και περισσότερες χωρικές ή χρονικές προσεγγίσεις στη μελέτη του θαλάσσιου πυθμένα (Gama et al., 2016). Οι βενθικές κοινότητες αποτελούν ένα ιδανικό εργαλείο για ενσωμάτωση σε

μελέτες αξιολόγησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος σε εκτεταμένη χωρική κλίμακα μια προσέγγιση που επιβάλλεται από τη τρέχουσα νομοθεσία περί παρακολούθησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος (EU, 2008). Συγκεκριμένα, η χωρική προσέγγιση της επίτευξης «καλής οικολογικής κατάστασης» στα παράκτια οικοσυστήματα αναφέρεται στο κεφάλαιο 6 (περί ακεραιότητας του θαλάσσιου πυθμένα) και κριτήριο 6.2 (περί χωρικής κατάστασης βενθικών κοινοτήτων). Κατά την οδηγία αυτή αναγνωρίζονται τρεις προσεγγίσεις για την μελέτη των βενθικών κοινοτήτων μαλακού υποστρώματος: (α) προσδιορισμός των ενδιαιτημάτων, (β) ορισμός σημείων αναφοράς για το κάθε ενδιαίτημα και (γ) επιλογή των κατάλληλων βιοτικών και αβιοτικών δεικτών για αξιολόγηση. Παρά το γεγονός ότι υπάρχει ανάγκη για ενσωμάτωση χωρικών μοντέλων στη μελέτη των βενθικών οικοσυστημάτων, οι μελέτες στην ανατολική Μεσόγειο που χρησιμοποιούν μοντέλα κατανομής για την αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης είναι περιορισμένες (Galanidi et al., 2016; Moraitis et al., 2018).

Για την επίλυση του πρώτου και βασικού βήματος για την εφαρμογή της τρέχουσας οδηγίας η πιο σύγχρονη λύση είναι η πρόβλεψη της δομής και της κατανομής των βιοκοινοτήτων για τον προσδιορισμό των βενθικών ενδιαιτημάτων. Η προσέγγιση της πρόβλεψης της δομής των βενθικών κοινοτήτων βασίζεται σε δύο υποθέσεις: 1) διαφορετικά είδη μπορούν να συνυπάρξουν σε κάθε τοποθεσία και 2) είδη με παρόμοιες περιβαλλοντικές προτιμήσεις αναμένεται να απαντώνται στην ίδια τοποθεσία. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, ομάδες ειδών συχνά αποκρίνονται με παρόμοιο τρόπο (Dunstan et al., 2011; Onaskainen et al., 2016). Οι προαναφερθείσες ομάδες ονομάζονται *αρχέτυποι* καθώς αποτελούν αντιπροσωπευτικό δείγμα του κάθε ενδιαιτηματος. Η πρόβλεψη της κατανομής των ομάδων αυτών σε περιοχές με περιορισμένη δειγματοληπτική κάλυψη προσδίδει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την επιρροή των σημαντικότερων περιβαλλοντικών

μεταβλητών στην κατανομή των θαλάσσιων ειδών και αποτελεί εφελτήριο για ολοκληρωμένη οικοσυστημική διαχείριση (Piroddi et al., 2015; Tedesco et al., 2016). Από τις πιο σύγχρονες μεθοδολογίες για ανάλυση των χωρικών συναθροίσεων των ειδών μέσω πρόβλεψης της δομής των βιοκοινοτήτων αποτελούν τα Μοντέλα Αρχέτυπων Ειδών (Species Archetype Modelling) (Dunstan et al., 2011). Η πιο πάνω μεθοδολογία βασίζεται στην αρχή της παλινδρόμησης και αποσκοπεί στην κατασκευή ομάδων ειδών που έχουν κοινή απόκριση στις περιβαλλοντικές μεταβλητές. Το κοινό χαρακτηριστικό των ειδών κάθε ομάδας (αρχέτυπος) είναι η όμοια απόκριση τους και οι κοινές περιβαλλοντικές τους προτιμήσεις. Η χρησιμότητα της μεθόδου αυτής είναι εμφανής στις πρακτικές που απαιτούνται για τη διαχείριση των ενδιαιτημάτων αυτών όπου και αναμένεται να είναι κοινές για τα είδη της κάθε ομάδας.

Τα μη-τυχαία πρότυπα συμπαρουσίας (co-occurrence) των ειδών αποτελούν τη βάση για τη συγκρότηση των βιοκοινοτήτων (Griffith et al., 2016). Η συμπαρουσία των ειδών σε ένα ενδιαίτημα είναι το αποτέλεσμα τόσο της επικάλυψης του θώκου τους, όσο και βιοτικών αλληλεπιδράσεων όπως ο ανταγωνισμός για πόρους και χώρο. Στα θαλάσσια οικοσυστήματα, οι δια-ειδικές σχέσεις αποτελούν αποτέλεσμα των περιβαλλοντικών αλλαγών στη στήλη και στο ίζημα. Κατά ένα βασικό επίπεδο, δύο είδη μπορούν να σχετίζονται θετικά, αρνητικά ή τυχαία (Veech, 2013). Πρόσφατες μελέτες έχουν συμβάλει καταρχήν στην αποσαφήνιση των σχέσεων μεταξύ των βενθικών ειδών μέσω της συμπαρουσίας τους στη βιοκοινότητα (Bateman and Bishop, 2017; Bouma et al., 2009). Οι μελέτες των βιοτικών αλληλοεπιδράσεων στο βενθικό οικοσύστημα του Αιγαίου πελάγους είναι περιορισμένες (Tsikoroulou et al. 2018) και όχι υπό το πρίσμα των περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων.

Η ετερογένεια του περιβάλλοντος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα που διαμορφώνει τη δομή των βιοκοινοτήτων και την συμπαρουσία ειδών (Heino, 2013). Διαφορετικά είδη αναμένεται να χαρακτηρίζονται από διαφορετικούς οικολογικούς θώκους, και συνεπώς, να καταλαμβάνουν διαφορετικές θέσεις κατά μήκος μιας περιβαλλοντικής διαβάθμισης. Κατά μήκος των περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων και βαίνοντας προς ακραίες τιμές, η μείωση της ποικιλότητας συνοδεύεται από επικράτηση συγκεκριμένων ειδών (Carbonell et al., 2017). Η επικρατούσα θεωρία για την απόκριση των βενθικών κοινοτήτων μαλακού υποστρώματος αναφέρεται στον οργανικό εμπλουτισμό ως πηγή περιβαλλοντικής διατάραξης. Κατά το πρότυπο αυτό, τα βενθικά μακροασπόνδυλα είδη αποκρίνονται στη συγκεκριμένη περιβαλλοντική διατάραξη με εναλλαγή ειδών που χαρακτηρίζονται με διαφορετική προσαρμοστικότητα στην οργανική ρύπανση. Συγκεκριμένα, κατά τον Gray (1979) τα βενθικά είδη μαλακού υποστρώματος χαρακτηρίζονται από δύο οικολογικές στρατηγικές: r – στρατηγική η οποία χαρακτηρίζει είδη με σχετικά μικρό χρόνο ζωής, γρήγορη ανάπτυξη και γρήγορη αναπαραγωγική ωριμότητα, χαρακτηριστικά που τα κατατάσσουν ως «ανθεκτικά» στην οργανική ρύπανση. Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται σε είδη τα οποία χαρακτηρίζονται από K – στρατηγική. Τα άτομα αυτής της ομάδας χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, αργούς ρυθμούς ανάπτυξης και υψηλή βιομάζα. Η συγκεκριμένη ομάδα χαρακτηρίζεται από άτομα «ευαίσθητα» στην οργανική ρύπανση. Έκτοτε η κατηγοριοποίηση των ειδών σε αυτές τις δύο κατηγορίες οδήγησε σε μια πληθώρα βενθικών δεικτών αξιολόγησης της οικολογικής κατάστασης (Borja et al., 2000; Dauvin and Ruellet, 2007; Simboura and Zenetos, 2002) που χρησιμοποιούνται ευρέως στην παρακολούθηση της οικολογικής κατάστασης των μεσογειακών θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Οι περισσότεροι βιοτικοί δείκτες βασίζονται στο πρότυπο διαδοχής των ειδών σε μια διαβάθμιση οργανικού εμπλουτισμού (Pearson and Rosenberg, 1978). Κατά το

πρότυπο αυτό, οι βενθικές κοινότητες αποκρίνονται στη βελτίωση των συνθηκών οργανικής ρύπανσης με αύξηση βιομάζας, ποικιλότητας και με επικράτηση των ευαίσθητων ειδών έναντι των ανθεκτικών. Παρά το γεγονός ότι η απόκριση των βενθικών κοινοτήτων σε μια διαβάθμιση οργανικής ρύπανσης έχει μελετηθεί εκτενώς (de-la-Ossa-Carretero et al., 2012), οι επιπτώσεις των κυριότερων περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων (πρωτογενούς παραγωγικότητας, θερμοκρασίας και αλατότητας) στην κατανομή των βενθικών ειδών παραμένουν άγνωστες.

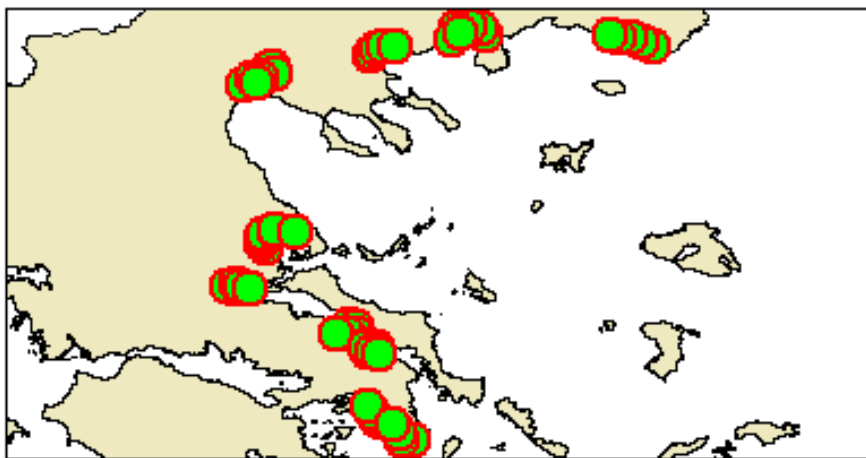
Στόχοι αυτού του τμήματος της διατριβής ήταν: 1) η μελέτη της απόκρισης των βενθικών κοινοτήτων σε μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από έντονες περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις πρωτογενούς παραγωγικότητας, θερμοκρασίας και αλατότητας, 2) η αξιολόγηση της βενθο-πελαγικής σύνδεσης των παράκτιων οικοσυστημάτων και 3) η επανεξέταση των κυριότερων θεωριών για τα πρότυπα διαδοχής των βενθικών ειδών κατά μήκος μιας περιβαλλοντικής διατάραξης. Για την απάντηση των πιο πάνω ερωτημάτων επιλέχθηκε η παράκτια ζώνη του Αιγαίου πελάγους με σκοπό την ευρεία κάλυψη των περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων Υποθέτουμε ότι το υπάρχον πρότυπο δομής των βενθικών κοινοτήτων σε περιβαλλοντικά διαταραγμένα ενδιαιτήματα δεν αναμένεται να παρατηρηθεί όταν υπάρχει συμμεταβολή πολλαπλών περιβαλλοντικών παραμέτρων πέρα από τον οργανικό εμπλουτισμό. Αναμένουμε την παρουσία πολλαπλών βενθικών κοινοτήτων με ανάμεικτα ευαίσθητα και ανθεκτικά στη περιβαλλοντική διατάραξη είδη που έχουν όμως κοινή απόκριση σε έναν από τους κύριους περιβαλλοντικούς παράγοντες που εξετάστηκαν.

2.2 Υλικά και Μέθοδοι

2.2.1 Περιοχή μελέτης

Ο σκοπός του σχεδιασμού της παρούσας μελέτης ήταν να συμπεριλάβει τις κύριες περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις του Αιγαίου πελάγους (θερμοκρασία, αλατότητα και συγκέντρωση χλωροφύλλης – a) με σκοπό να συμπεριληφθεί όλο το γεωγραφικό εύρος των βενθικών ειδών που χαρακτηρίζουν την περιοχή. (Εικόνα 2.1). Αρχικά, οι σταθμοί δειγματοληψίας χωρίστηκαν σε δύο ομάδες με βάση την οικολογική τους κατάσταση, σύμφωνα με τα τροφικά επίπεδα της στήλης του νερού. Ο σκοπός του πιο πάνω διαχωρισμού ήταν να μελετηθεί κατά πόσο μπορεί να επιτευχθεί βενθο-πελαγική διασύνδεση ως προς την οικολογική ποιότητα με ταυτόχρονη συμμεταβολή διαφορετικών περιβαλλοντικών μεταβλητών όπως η θερμοκρασία και η αλατότητα. Η άμεση απόκριση της υδάτινης στήλης στον εμπλουτισμό με θρεπτικά, είναι η αύξηση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, μια σχέση που ορίζει το φαινόμενο του ευτροφισμού. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η συγκέντρωση της χλωροφύλλης a ($chl - a$) ως δείκτης ευτροφισμού (ή τροφικής κατάστασης). Η οικολογική κατάσταση κάθε δειγματοληπτικού σταθμού προσδιορίστηκε με βάση τα επίπεδα της συγκέντρωσης χλωροφύλλης – a με βάση σύμφωνα με την κλίμακα που θεσπίστηκε από τους Karydis (1999) και Pagou et al.(2002) όπως τροποποιήθηκε από τους Simboura et al.(2005) για τον Ελλαδικό χώρο. Χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων «Bio-Oracle, a global environmental dataset designed for marine species distribution modelling» (<http://www.bio-oracle.org/>) (Tyberghein et al., 2012) για εξαγωγή χωρικών δεδομένων της συγκέντρωσης χλωροφύλλης – a για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια, οι σταθμοί δειγματοληψίας χωρίστηκαν σε δύο ομάδες οικολογικής κατάστασης (αποδεκτή, $Chl a < 0.4 \mu g/l$ – «μη αποδεκτή», $Chl a > 0.4 \mu g/l$) ανάλογα με τα

επίπεδα της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης χλωροφύλλης με βάση την κλίμακα της οδηγίας WFD όπως προσδιορίστηκε από τους Simboura et al. (2005). Ο όρος «αποδεκτή» οικολογική κατάσταση ανταποκρίνεται στις τάξεις εντός των αποδεκτών ορίων τιμών συγκεντρώσεως χλωροφύλλης για την οδηγία WFD (που αντιστοιχεί στην κατάσταση «High» και «Good») ενώ αντίστοιχα, ο όρος «μη αποδεκτή» χρησιμοποιείται για τα επίπεδα οικολογικής κατάστασης «Bad», «Poor» και «Moderate».



Εικόνα 2.1: Σταθμοί δειγματοληψίας στο Αιγαίο πέλαγος.

2.2.2 Βιολογικά δεδομένα

Συνολικά, 60 σταθμοί επιλέχθηκαν για συλλογή δειγμάτων μακροπανίδας μαλακού υποστρώματος από το Αιγαίο πέλαγος (Εικόνα 2.1). Η δειγματοληψία έλαβε χώρα κατά την περίοδο Απριλίου – Ιουλίου 2014 μέσω δειγματολήπτη τύπου αρπάγης (Smith-McIntyre grab) με επιφάνεια 0.1m^2 . Μετά το πέρας της συλλογής, τα μακροπανιδικά δείγματα κοσκινίστηκαν αρχικά με κόσκινο διαμέτρου 1mm και στη συνέχεια με κόσκινο διαμέτρου 0.5mm και συντηρήθηκαν σε διάλυμα φορμόλης 10% σε θαλασσινό νερό. Πριν τη μεταφορά τους στο εργαστήριο για περαιτέρω ανάλυση έγινε χρώση με χρωστική Rose Bengal για να

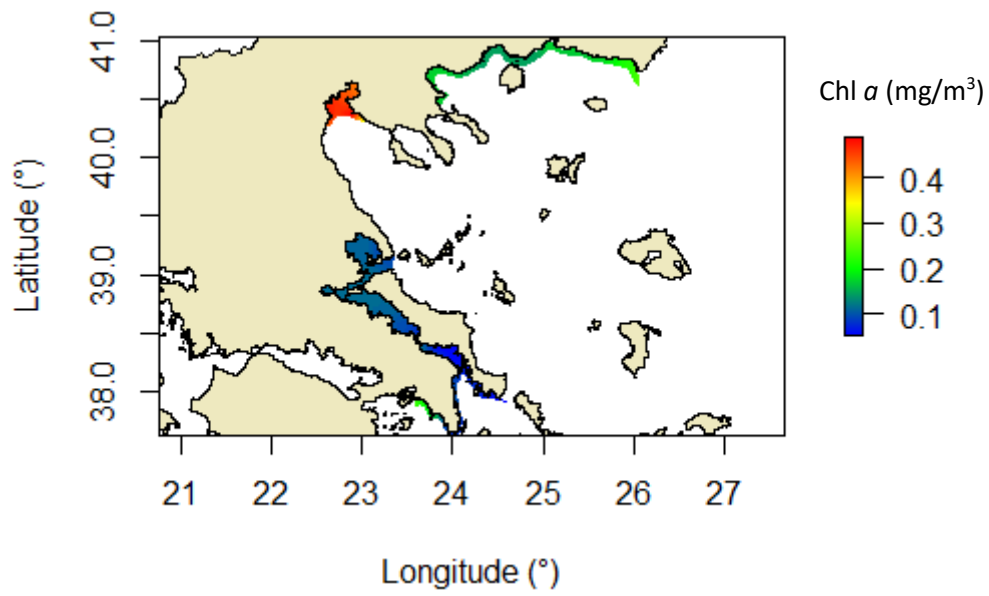
διευκολυνθεί η διαδικασία της διαλογής. Στο εργαστήριο, έλαβε χώρα η διαλογή των δειγμάτων και η αναγνώριση των μακροβενθικών οργανισμών όλων των ομάδων (Δακτυλιοσκόληκες, Μαλάκια, Καρκινοειδή, Εχινόδερμα, Σωληνοειδή κλπ) στο επίπεδο του είδους. Η εγκυρότητα της ονοματολογίας των ειδών ελέγχθηκε μέσω της ιστοσελίδας «World Register of Marine Species» (WoRMS Editorial Board, 2018). Επιπλέον, η οικολογική κατάταξη (ευαίσθητα ή ανθεκτικά) όλων των ειδών προσδιορίστηκε μέσω του βιοτικού δείκτη BENTIX (Simboura and Zenetos, 2002). Ο δείκτης BENTIX θεσπίστηκε συγκεκριμένα για τον ελληνικό χώρο επομένως επιλέχθηκε για αυτή τη μελέτη έναντι άλλων μεσογειακών δεικτών.

2.2.3 Κλιματικά δεδομένα

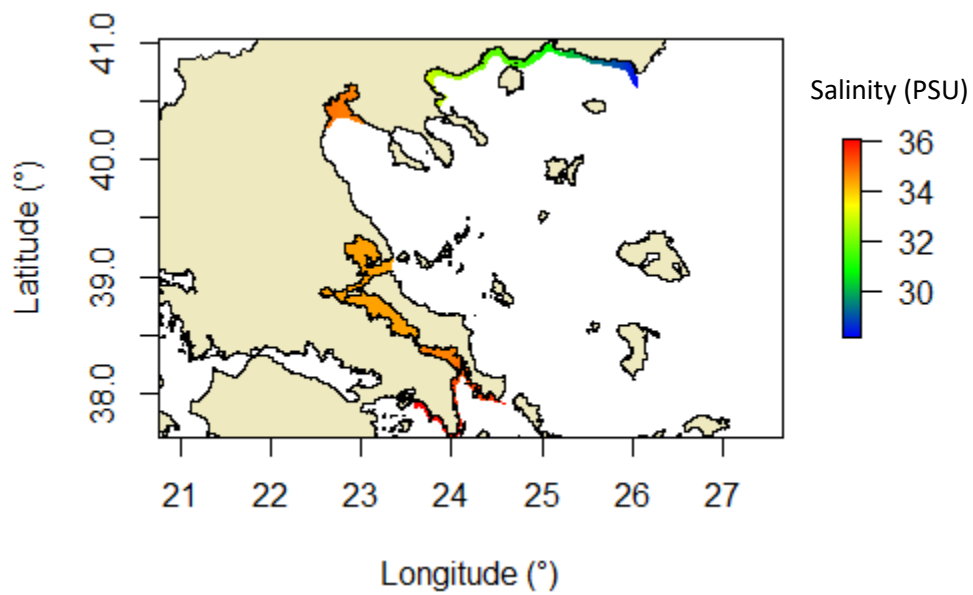
Η θερμοκρασία η αλατότητα και η πρωτογενής παραγωγή επιλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη μελέτη καθώς οι συγκεκριμένες μεταβλητές διαμορφώνουν και τις κυριότερες περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις στο Αιγαίο πέλαγος. Αρχικά, επιφανειακά και υποεπιφανειακά δεδομένα της στήλης ελέγχθηκαν για συγγραμμικότητα μέσω του δείκτη VIF (Variance Inflation Factor, cut-off threshold=5), σε μια σταδιακή διαδικασία ελέγχου και αποκλεισμού συγγραμμικών περιβαλλοντικών παραμέτρων σε συνδυασμό με το test συσχέτισης Pearson (threshold >0.5). Τα περιβαλλοντικά δεδομένα συλλέχθηκαν από την παγκόσμια βάση Bio-Oracle, (<http://www.bio-oracle.org/>) (Tyberghein et al., 2012) και αποτελούνται από δορυφορικά και *in situ* δεδομένα. Όλα τα περιβαλλοντικά στρώματα (raster layers) υπέστησαν επαναδειγματοληψία (resampling) μέσω αμφιγραμμικής παρεμβολής (bilinear interpolation) στην ανάλυση 1 km² και η επιφάνεια τους περικόπηκε με τη χρήση ενός πολυγώνου στην έκταση του δειγματοληπτικού εύρους (μέχρι 40m βάθος) ακολουθώντας τη μεθοδολογία που προτάθηκε από προηγούμενες μελέτες στη Μεσογειακή λεκάνη (Galanidi et al., 2016; Moraitis et al., 2018; Sarà et al., 2018). Το στατιστικό πακέτο

spThin (Aiello-Lammens et al., 2015) μέσω της γλώσσας προγραμματισμού R χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο των καταγραφών ώστε να απέχουν τουλάχιστον 1 km απόσταση μεταξύ τους με σκοπό την αποφυγή συσσωμάτωσης (clustering) σε συγκεκριμένες γεωγραφικές θέσεις. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιείται ως μέσο αντιμετώπισης της δειγματοληπτικής μεροληψίας και χωρικής αυτοσυσχέτισης (Kramer-Schadt et al., 2013). Όλες οι χωρικές και στατιστικές αναλύσεις έγιναν στο περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού R 3.4.3 (R Development Core Team, 2019) μέσω των πακέτων raster, rasterVis, usdm, maptools, maps και prettymapr και του προγράμματος ArcGIS 10.2.

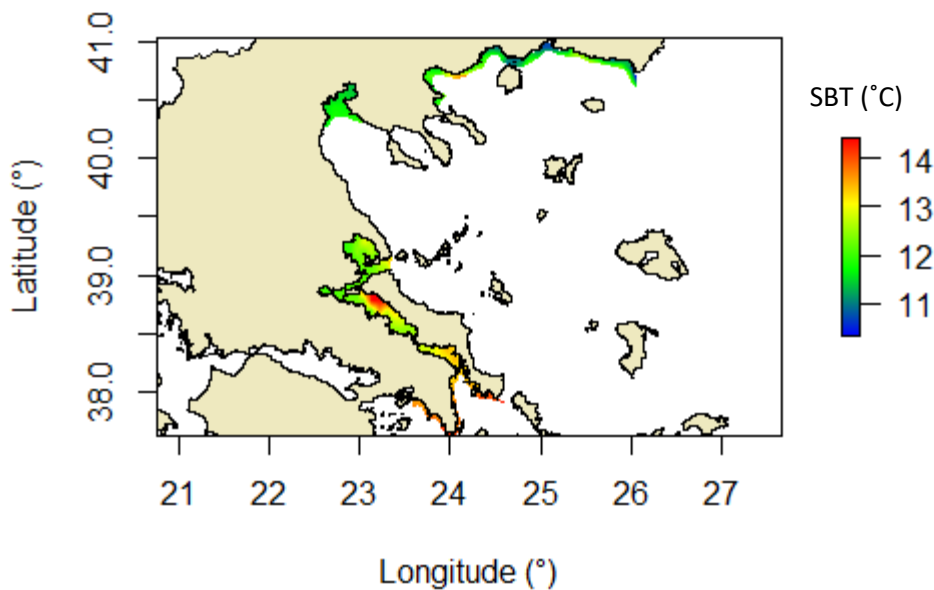
Οι περιβαλλοντικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις ήταν η θερμοκρασία βυθού (ελάχιστη), η επιφανειακή αλατότητα (μέση) και η συγκέντρωση χλωροφύλλης – α ως μέσο μέτρησης της πρωτογενούς παραγωγής (Εικόνες 2.2, 2.3 & 2.4). Οι επιλεγμένες περιβαλλοντικές μεταβλητές αποτελούν ιδανικούς δείκτες (descriptors) που περιγράφουν την περιβαλλοντική μεταβλητότητα της περιοχής μελέτης που έχουν χρησιμοποιηθεί σε μελέτη με χρήση μοντέλων κατανομής βενθικών ειδών (Moraitis et al., 2019, 2018).



Εικόνα 2.2: Κατανομή της συγκέντρωσης χλωροφύλλης –α στο Αιγαίο πέλαγος.



Εικόνα 2.3: Κατανομή της αλατότητας στο Αιγαίο πέλαγος.



Εικόνα 2.4: Κατανομή της θερμοκρασίας πυθμένα στο Αιγαίο πέλαγος.

2.2.4 Μελέτη βενθικών κοινοτήτων

Για τη μελέτη των βενθικών κοινοτήτων χρησιμοποιήθηκαν δύο προσεγγίσεις: Τα **Μοντέλα Αρχέτυπων Ειδών (Species Archetype Modelling)** και η ανάλυση **ειδών-δεικτών (Indicator species analysis)**.

Η πρώτη ανάλυση επιτρέπει τον προσδιορισμό των βενθικών ομάδων (αρχέτυπων) που αποτελούνται από είδη με κοινή απόκριση στις περιβαλλοντικές μεταβλητές που εξετάζονται και θεσπίστηκε αποκλειστικά για τη μελέτη των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων στην κατανομή των βενθικών ειδών. Η πιο πάνω ανάλυση λαμβάνει χώρα με τη χρήση πολλαπλών Γενικευμένων Γραμμικών Μοντέλων (Generalized Linear Models) σε επίπεδο βιοκοινότητας κατά την μέθοδο που προτάθηκε από τους Dunstan et al. (2011) και εφαρμόζεται μέσω του πακέτου SpeciesMix στη γλώσσα προγραμματισμού R. Τα μοντέλα αυτά έχουν την ικανότητα να αναγνωρίζουν είδη που χαρακτηρίζονται από

στατιστικά όμοιες αποκρίσεις στις περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις και στη συνέχεια να ενσωματώνουν τα είδη αυτά σε ένα ή περισσότερα GLMs χωρίς καμία επίβλεψη/επέμβαση του χρήστη στην επιλογή ειδών. Το τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι η πιθανότητα να ανήκει ένα είδος σε συγκεκριμένο αρχέτυπο, χωρίς όμως να αποκλείεται να συμπεριλαμβάνεται σε περισσότερα από ένα αρχέτυπα. Σε αυτή την περίπτωση η πιθανότητα εμφάνισης του είδους σε κάθε αρχέτυπο αποτελεί ένδειξη της συμφωνίας μεταξύ της απόκρισης του είδους και της απόκρισης του εκάστοτε αρχέτυπου. Για τον προσδιορισμό των αρχέτυπων χρησιμοποιήθηκαν είδη με παρουσία σε περισσότερους από επτά σταθμούς. Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν είδη με πιθανότητα παρουσίας σε ένα από τους πιθανούς αρχέτυπους μεγαλύτερη από 0.5.

Η ανάλυση προσδιορισμού ειδών-δεικτών (Indicator Species Analysis) (De Cáceres and Legendre, 2009) έλαβε χώρα για να προσδιοριστούν τα είδη δείκτες των δύο ομάδων σταθμών στη συγκεκριμένη μελέτη. Τα είδη-δείκτες προκύπτουν από μια ανάλυση σχέσης ανάμεσα στις αφθονίες των ειδών σε κάθε δείγμα και στην κατάταξη του κάθε δείγματος στις δύο ομάδες σταθμών που αναφέρθηκαν. Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που πρότειναν οι Dufrene & Legendre (1997), κατά την οποία αποκλείονται οι τυχαίοι συνδυασμοί των σταθμών με σκοπό την συσχέτιση των ειδών με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Στα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται δύο δείκτες: Ο δείκτης «ειδικότητας» (specificity) και ο δείκτης «ευαισθησίας» (sensitivity). Ο δείκτης «ειδικότητας» είναι η πιθανότητα ο σταθμός να ανήκει σε μια από τις δύο ομάδες εφόσον το είδος έχει βρεθεί. Ο δείκτης «ευαισθησίας» είναι η πιθανότητα εύρεσης του είδους σε όλους τους σταθμούς της συγκεκριμένης ομάδας. Τέλος, ο αλγόριθμος παρουσιάζει ένα δείκτη ποσοτικοποίησης της ικανότητας ενός είδους να δρα ως «δείκτης» (Indicator Value) με τιμές να κυμαίνονται από 0 (μη κατάλληλος δείκτης) μέχρι 1 (κατάλληλος δείκτης).

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα “indicspecies” μέσω της γλώσσας προγραμματισμού R 3.3.2 (R Development Core Team).

2.3 Αποτελέσματα

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, η ομάδα με «αποδεκτή» οικολογική κατάσταση όσον αφορά τα επίπεδα ευτροφισμού στη στήλη αντιπροσωπεύεται από είδη με ανάμεικτα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, τα είδη που χαρακτηρίζουν τους σταθμούς της ομάδας ως επί το πλείστον είναι είδη που θεωρούνται κατά τον δείκτη BENTIX ευαίσθητα στην περιβαλλοντική διατάραξη (*Echinocyamus pussilus*, *Moerella donacina*, *Cypridina mediterranea*, *Glycera celtica*, *Jasmineira caudata* και *Glycera lapidum*). Παράλληλα, στους σταθμούς της ομάδας αυτής καταγράφηκαν και είδη ανθεκτικά στην περιβαλλοντική διατάραξη όπως τα: *Notomastus profundus*, *Chondrocellia savignyi* και *Protodorvillea kefersteini*. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για την ομάδα σταθμών με «μη αποδεκτή» οικολογική κατάσταση όσον αφορά τα επίπεδα ευτροφισμού ήταν πιο σαφή. Συγκεκριμένα, όλα τα είδη που χαρακτηρίζουν την ομάδα κατατάσσονται ως ανθεκτικά στην περιβαλλοντική διατάραξη. Τα είδη που αντιπροσωπεύουν τους σταθμούς αυτούς είναι τα: *Nephtys incisa*, *Corbula gibba*, *Kurtiella bidentata* και *Sternaspis scutata*. Οι δείκτες ειδικότητας και ευαισθησίας παρέχουν επιπλέον πληροφορίες σχετικά με την ικανότητα των ειδών αυτών να χαρακτηρίζουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες των δύο ενδιαιτημάτων. Συγκεκριμένα όλες σχεδόν οι καταγραφές των ειδών που χαρακτηρίζουν τις δυο ομάδες κατέγραψαν υψηλά ποσοστά ειδικότητας (~1) (specificity) αναδεικνύοντας την σημαντική ταύτιση με τους σταθμούς της κάθε ομάδας. Ιδιαίτερα υψηλός επίσης ήταν ο δείκτης Indicator Value (~1) για όλα τα είδη, ένα εύρημα που δείχνει την ικανότητα το κάθε είδος να αποκρίνεται ως «δείκτης» για το ενδιαίτημα που χαρακτηρίζει. Ο δείκτης ευαισθησίας

(sensitivity) κατέγραψε υψηλότερες τιμές για τα είδη της ομάδας με αποδεκτή οικολογική κατάσταση και χαρακτηρίζει τα είδη της ομάδας με ένα βαθμό προβλεψιμότητας ως προς την εύρεσή τους σε όλους τους σταθμούς με χαμηλά επίπεδα ευτροφισμού. Τα είδη της ομάδας με ψηλά επίπεδα ευτροφισμού (μη-αποδεκτή οικολογική κατάσταση στη στήλη) δεν κατέγραψαν υψηλές τιμές του δείκτη ευαισθησίας επομένως ο βαθμός εύρεσής τους σε μη ευτροφικά ενδιαιτήματα είναι σχετικά χαμηλός.

Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα Indicator Species Analysis. Οικολογική κατάταξη κατά τον δείκτη BENTIX.

Group: **UNACCEPTABLE**

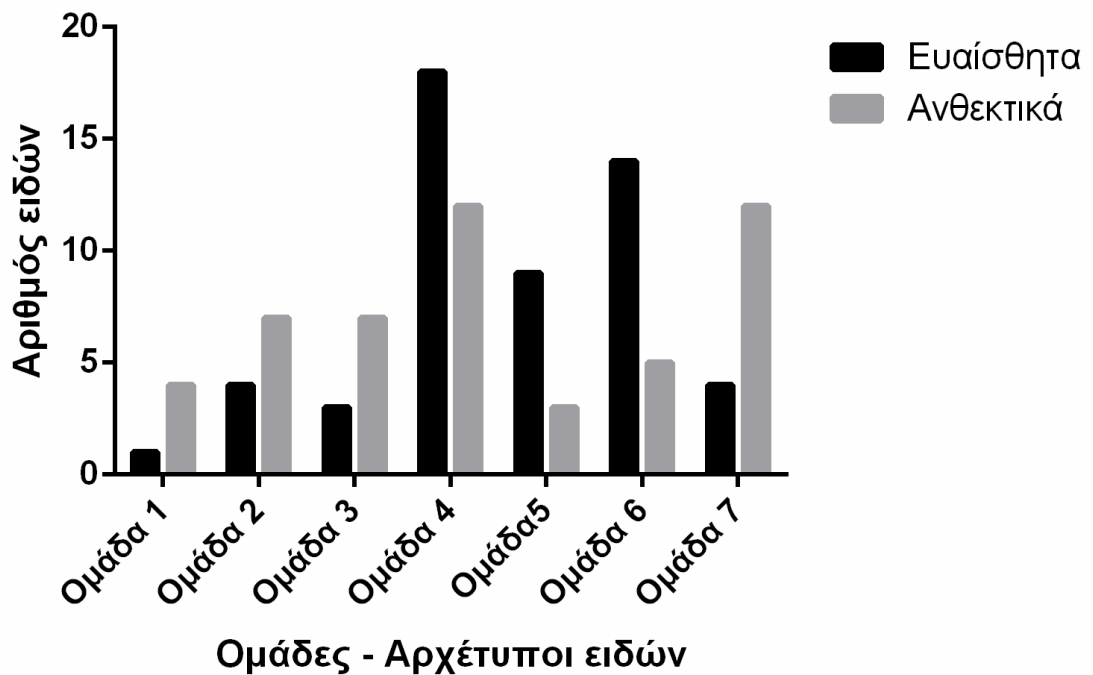
Species	Bentix	Specificity	Sensitivity	Indicator Value	p. value
<i>Nephtys incisa</i>	Tolerant	0.9	0.6	0.8	0.012
<i>Corbula gibba</i>	Tolerant	1	0.6	0.74	0.024
<i>Kurtiella bidentata</i>	Tolerant	0.9	0.52	0.7	0.047
<i>Sternaspis scutata</i>	Tolerant	1	0.5	0.7	0.036

Group:

ACCEPTABLE

Species	Bentix	Specificity	Sensitivity	Indicator Value	p. value
<i>Echinocyamus pusillus</i>	Sensitive	0.9	0.66	0.77	0.001
<i>Moerella donacina</i>	Sensitive	0.66	0.88	0.77	0.002
<i>Notomastus profundus</i>	Tolerant	0.64	0.88	0.76	0.03
<i>Chondrochelia savignyi</i>	Tolerant	0.81	0.67	0.74	0.006
<i>Cypridina mediterranea</i>	Sensitive	0.96	0.6	0.74	0.001
<i>Glycera celtica</i>	Sensitive	0.90	0.6	0.7	0.002
<i>Jasmineira caudata</i>	Sensitive	0.83	0.6	0.68	0.005
<i>Glycera lapidum</i>	Sensitive	0.92	0.44	0.64	0.004
<i>Protodorvillea kefersteini</i>	Tolerant	0.66	0.56	0.6	0.044

Συνολικά, 7 ομάδες (αρχέτυποι) ειδών καταγράφηκαν στην παρούσα μελέτη. Όσον αφορά τη δομή των βιοκοινοτήτων, όλες οι ομάδες αποτελούνταν από είδη ευαίσθητα και ανθεκτικά στην περιβαλλοντική διατάραξη (Εικόνα 2.5).



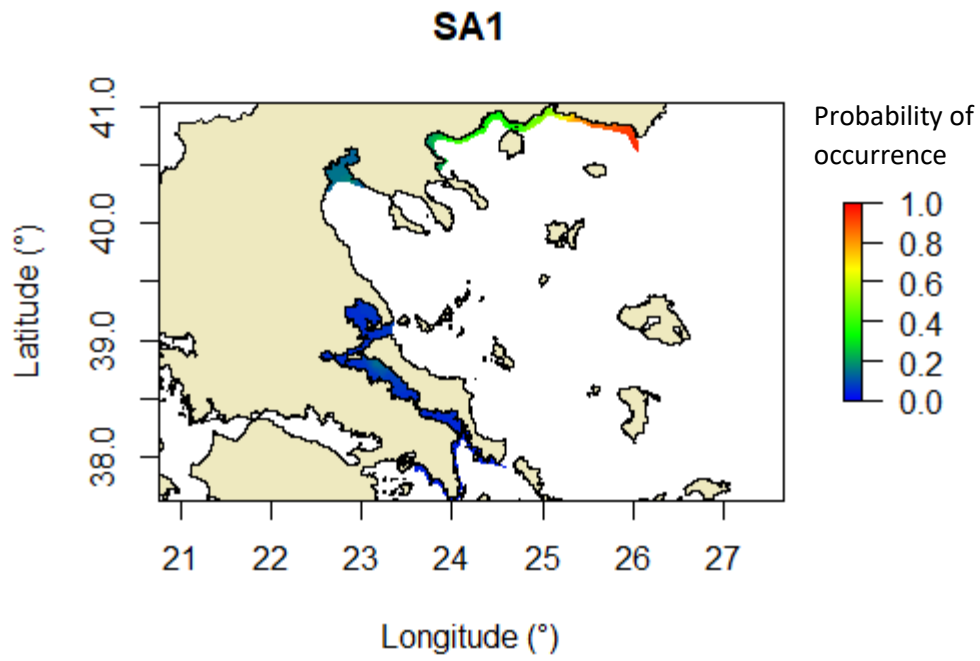
Εικόνα 2.5. Ομάδες-αρχέτυποι και λειτουργική σύσταση των βενθικών κοινοτήτων στο Αιγαίο πέλαγος.

Τα ανθεκτικά είδη υπερίσχυσαν στις ομάδες 1,2,3 και 7 και τα ευαίσθητα στις ομάδες 4, 5 και 6. Η προβλεπόμενη χωρική κατανομή της κάθε ομάδας και οι κυριότερες περιβαλλοντικές μεταβλητές που την διαμορφώνουν παρουσιάζονται στις Εικόνες 2.6-2.12 και στον Πίνακα 2.2 αντίστοιχα. Η συνεισφορά των περιβαλλοντικών παραμέτρων προσδιορίστηκε με τη χρήση του στατιστικού Relative Standard Error – RSE, όπου χαμηλές τιμές υποδηλώνουν σημαντική συνεισφορά της αντίστοιχης περιβαλλοντικής μεταβλητής (Galanidi et al., 2016). Η ομάδα 1 παρουσίασε αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης στα ενδιαίτηματα του βορειο-ανατολικού Αιγαίου καθώς ο κύριος παράγοντας που καθορίζει εκεί την κατανομή των ειδών είναι η χαμηλή αλατότητα. Η ομάδα 2, κατέγραψε μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης στο κεντρικό και βόρειο-ανατολικό Αιγαίο με τη χαμηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης να διαμορφώνει την κατανομή των ειδών. Η αυξημένη αλατότητα καθιστά τα ενδιαίτηματα του κεντρικού και νότιου Αιγαίου ιδανικά για εποίκηση

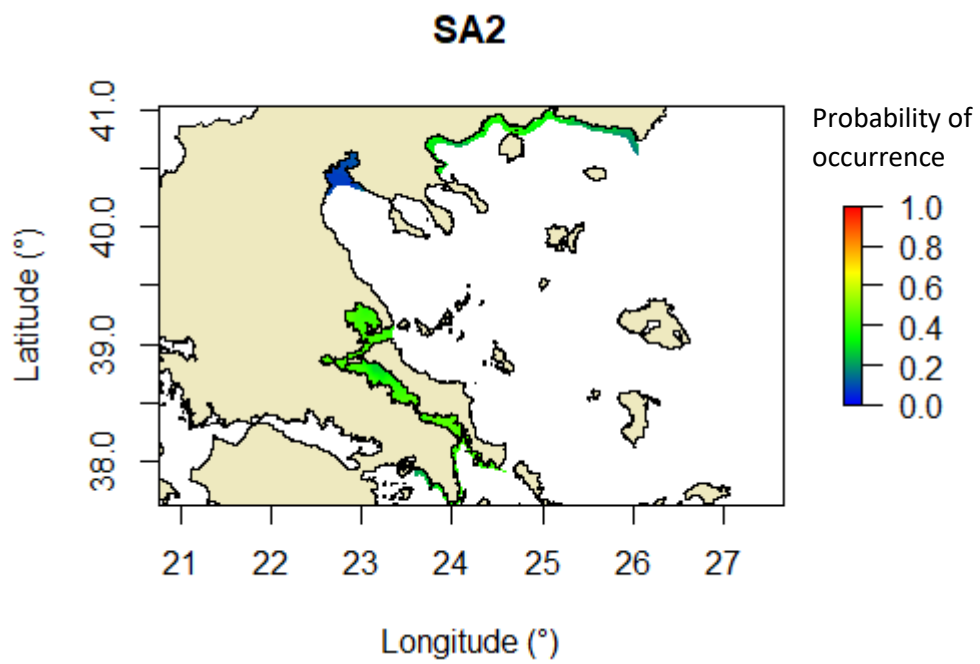
από τα είδη της ομάδας 3. Αντιθέτως, η κατανομή των ειδών της ομάδας 4 καθορίζεται κυρίως από τη χαμηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης και τη αυξημένη αλατότητα στο νότιο Αιγαίο πέλαγος. Παρόμοια κατανομή με την ομάδα 4 παρουσίασε και η ομάδα 5 με την αυξημένη θερμοκρασία στο νότιο Αιγαίο πέλαγος να αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την παρουσία των ειδών στην περιοχή. Οι ομάδες 6 και 7 παρουσίασαν παρόμοιο πρότυπο κατανομής με μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης στο βόρειο Αιγαίο με τη χαμηλή θερμοκρασία στην περιοχή να αποτελεί την κύρια περιβαλλοντική παράμετρο για την ομάδα 6 και την υψηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης για την ομάδα 7. Η μεγαλύτερη απόκλιση στη λειτουργική ποικιλότητα (ευαίσθητα – ανθεκτικά είδη) παρατηρήθηκε στις ομάδες 5, 6 και 7. Επίσης οι ομάδες περιγράφουν καλύτερα τις περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις του Αιγαίου πελάγους με τη μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης.

Πίνακας 2.2: Συμβολή των περιβαλλοντικών παραμέτρων στην κατανομή των ομάδων – αρχέτυπων. Οι σημαντικότερες μεταβλητές που καθορίζουν την κατανομή κάθε ομάδας απεικονίζονται με έντονο μαύρο χρώμα.

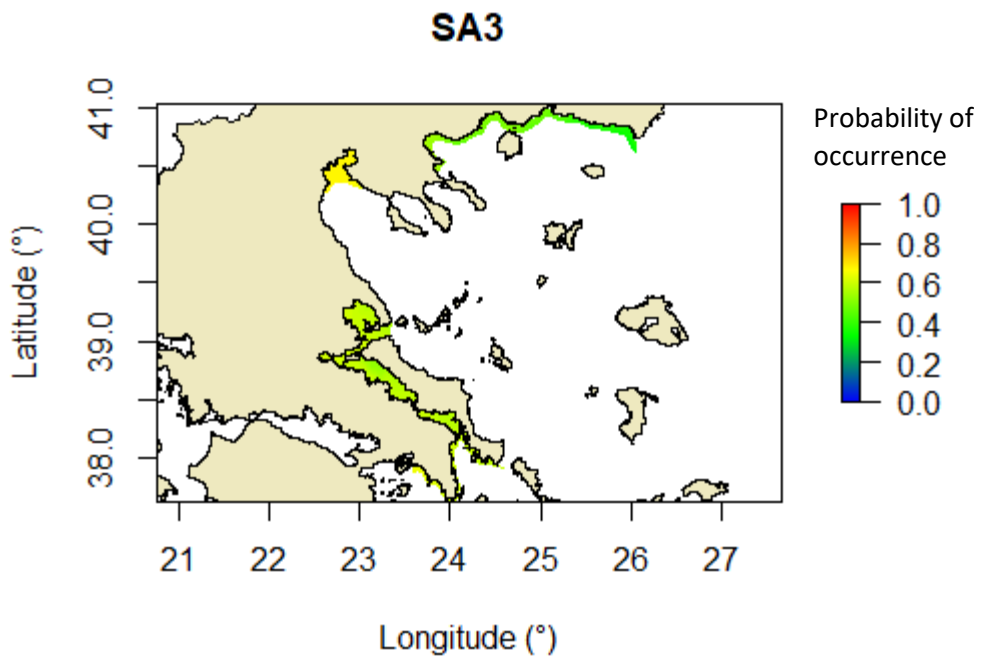
Groups	Coefficients				RSE		
	(Intercept)	chlomean	salinity	sbtmin	chlomean	salinity	sbtmin
SA1	21,49	4,51	-0,86	0,39	66,5	-27,5	200,0
SA2	0,54	-6,45	0,09	-0,28	-24,2	74,4	-66,1
SA3	-4,77	0,48	0,19	-0,13	204,2	34,0	-147,7
SA4	-5,26	-2,64	0,09	0,06	-42,4	55,6	283,3
SA5	-21,98	4,15	-0,07	1,79	31,2	-114,3	14,0
SA6	10,84	0,70	-0,04	-0,91	132,9	-175,0	-31,9
SA7	9,3	2,41	-0,15	-0,39	33,8	-50,0	-52,3



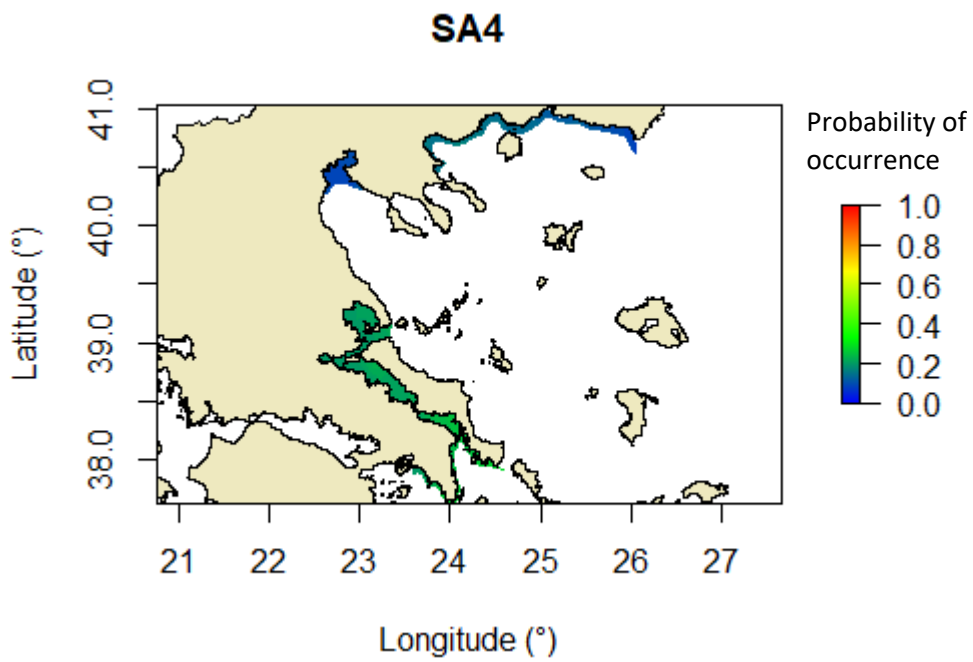
Εικόνα 2.6: Πιθανότητα εμφάνισης της κοινότητας SA1.



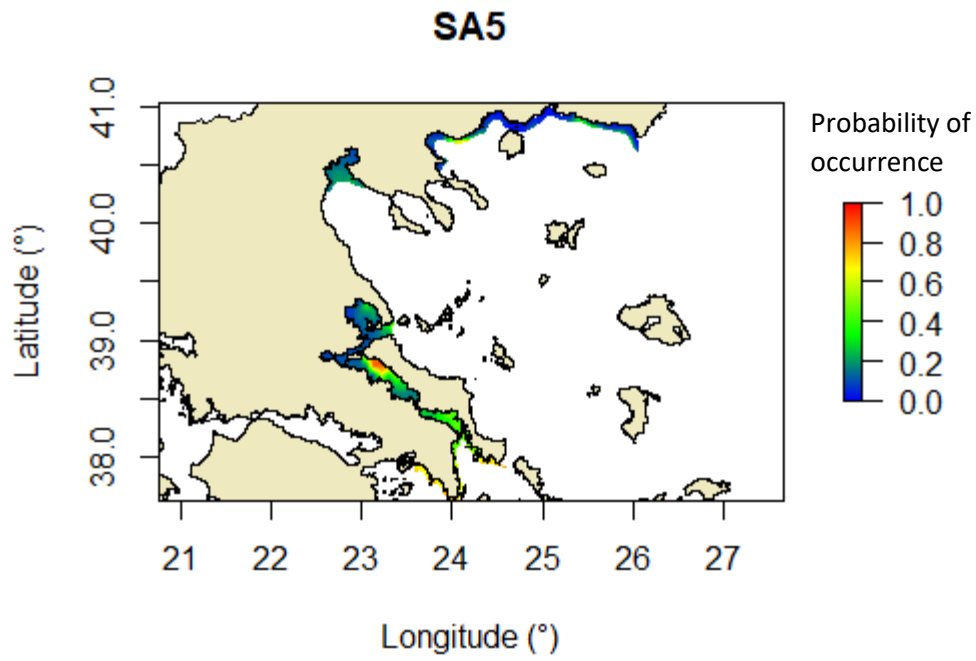
Εικόνα 2.7: Πιθανότητα εμφάνισης της κοινότητας SA2.



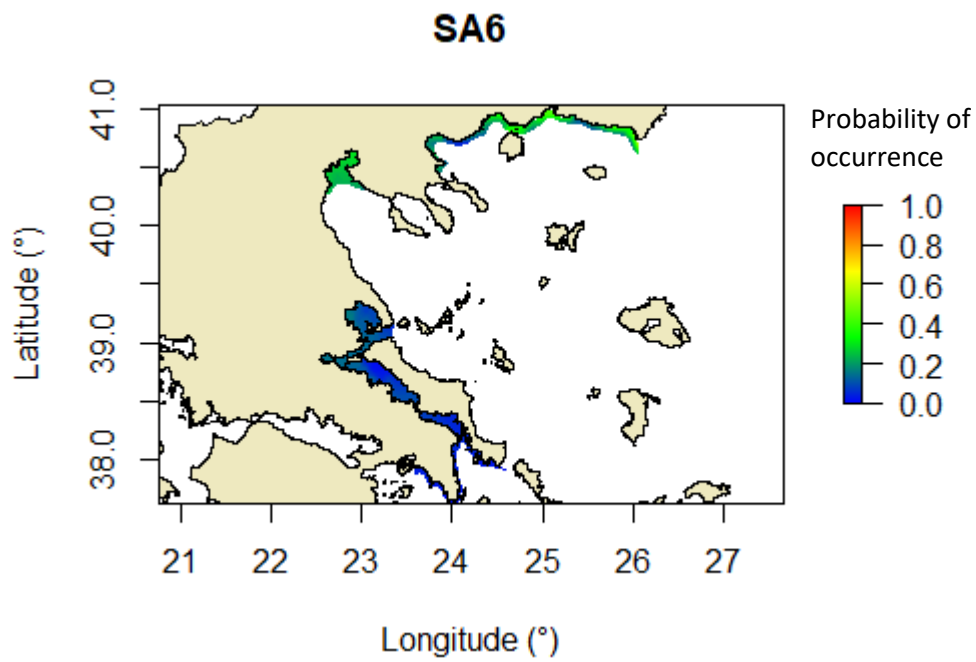
Εικόνα 2.8: Πιθανότητα εμφάνισης της κοινότητας SA3.



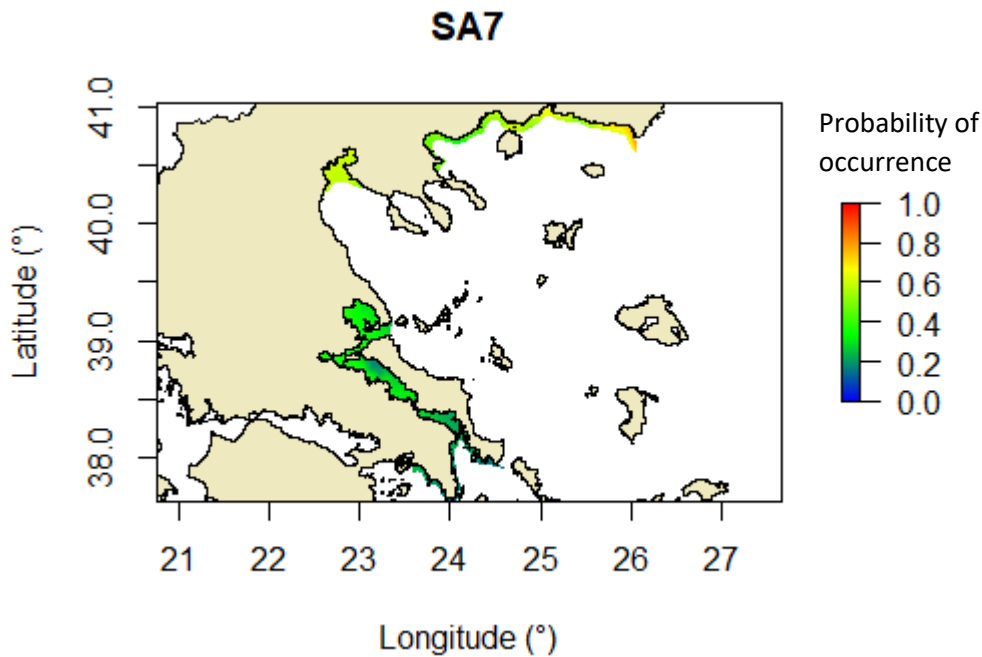
Εικόνα 2.9: Πιθανότητα εμφάνισης της κοινότητας SA4.



Εικόνα 2.10: Πιθανότητα εμφάνισης της κοινότητας SA5.



Εικόνα 2.11: Πιθανότητα εμφάνισης της κοινότητας SA6.



Εικόνα 2.12: Πιθανότητα εμφάνισης της κοινότητας SA7.

2.5 Συζήτηση

Στην παρούσα μελέτη οι περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις του Αιγαίου πελάγους παρουσίασαν 7 πρότυπα απόκρισης των βενθικών κοινοτήτων. Όλες οι ομάδες αποτελούνταν από ανθεκτικά και ευαίσθητα (κατά BENTIX) είδη και δεν παρατηρήθηκε το ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο διαδοχής βενθικών ειδών σε οργανικό εμπλουτισμό.

Αρχικά, μελετήθηκε η διασύνδεση βένθους και υδάτινης στήλης με την απόκριση των βενθικών κοινοτήτων στον οργανικό εμπλουτισμό με τη μορφή ευτροφισμού. Τα είδη-δείκτες που χαρακτηρίζουν τους σταθμούς με «μη-αποδεκτή» οικολογική κατάσταση κατατάσσονται ως ανθεκτικά στην οργανική ρύπανση. Ωστόσο, στην περιγραφή των αρχέτυπων των βενθικών κοινοτήτων όπου η συγκέντρωση χλωροφύλλης αποτελεί

καθοριστικό παράγοντα που διαμορφώνει την κατανομή τους, η οικολογική κατάσταση της βενθικής κοινότητας δεν φάνηκε να αντικατοπτρίζει την κατάσταση στην υδάτινη στήλη καθώς παρατηρήθηκε παρουσία τόσο ευαίσθητων όσο και ανθεκτικών ειδών. Οι βενθικές κοινότητες των σταθμών με αυξημένο ποσοστό οργανικού υλικού δεν παρουσίασαν το γενικό πρότυπο διαδοχής που προτάθηκε αρχικά από τους Pearson and Rosenberg (1978) και τροποποιήθηκε στη συνέχεια από σύγχρονες μελέτες στη Μεσογειακή λεκάνη (Borja et al., 2000; Simboura and Zenetos, 2002). Η θεωρία αυτή έχει επαληθευθεί στο παρελθόν στην ανατολική Μεσόγειο σε μελέτες που αφορούσαν τη σύγκριση οργανικά ρυπασμένων και αδιατάρακτων περιοχών (Dimitriou et al., 2015; Moraitis et al., 2013). Το συγκεκριμένο πρότυπο διαδοχής δεν παρατηρήθηκε στην παρούσα μελέτη πιθανά διότι η κατανομή των βενθικών κοινοτήτων επηρεαζόταν από ταυτόχρονη συμμεταβολή διαφορετικών φυσικοχημικών παραμέτρων πέραν του οργανικού εμπλουτισμού και τα είδη αποκρίθηκαν ανάλογα με τη θέση τους κατά μήκος των παρατηρούμενων περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων. Τα πιο πάνω ευρήματα είναι εμφανή στην απόκριση των ομάδων 1,2 και 3 όπου καταγράφηκε επικράτηση των ανθεκτικών ειδών σε περιοχές με ελάχιστο οργανικό εμπλουτισμό. Προηγούμενες μελέτες συνιστούν προσοχή στη χρήση των θεσπισμένων βιοτικών δεικτών για αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης σε ένα ενδιαίτημα καθώς ένα βενθικό είδος, δύναται να παρουσιάσει διαφορετικό πρότυπο κατανομής ανάλογα με τη θέση του στις περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις (Siddig et al., 2016; Zettler et al., 2013), δηλαδή όταν συμμεταβάλλονται πολλοί παράγοντες ταυτόχρονα. Η γενική κατηγοριοποίηση των βενθικών οργανισμών σε ευαίσθητα και ανθεκτικά λαμβάνει χώρα με βάση την απόκριση των ειδών σε ανθρωπογενούς προελεύσεως περιβαλλοντικές πιέσεις και αναφέρεται στην οργανική ρύπανση. Κατά τον δείκτη BENTIX (Simboura and Zenetos, 2002), που έχει προταθεί αποκλειστικά για την ανατολική Μεσόγειο και κυρίως για τα ελληνικά ύδατα, τα ανθεκτικά

είδη αναμένεται να επικρατούν (ανάλογα με την πίεση από οργανικό υλικό) σε διαταραγμένες περιοχές ενώ αντίστοιχα, τα ευαίσθητα είδη αναμένεται να είναι επικρατέστερα σε αδιατάρακτες. Οι βενθικές κοινότητες στην παρούσα μελέτη δεν αποκρίθηκαν κατά αυτό τον τρόπο. Αντίθετα, καταγράφηκαν πολυάριθμες αποκρίσεις (7 ομάδες βιοκοινοτήτων), όλες με ανάμεικτα είδη όσον αφορά την οικολογική τους κατάσταση (Ευαίσθητα – Ανθεκτικά) σε όλους τους σταθμούς, οργανικά διαταραγμένους και αδιατάρακτους. Η βενθοπελαγική διασύνδεση επιτεύχθηκε μόνο με τη μελέτη των ειδών-δεικτών σε κάθε ομάδα σταθμών. Τα ευρήματα αυτά συμφωνούν με προηγούμενες μελέτες που τονίζουν τη χρήση των ειδών-δεικτών για αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης σε μεγάλη χωρική κλίμακα έναντι των θεσπισμένων βιοτικών δεικτών (Moraitis et al., 2018; Zettler et al., 2013). Τα είδη-δείκτες που χαρακτηρίζουν τους σταθμούς με «μη-αποδεκτή» οικολογική κατάσταση αντιπροσώπευαν τις ευτροφικές συνθήκες στη στήλη του νερού και ήταν όλα «ανθεκτικά» με βάση τον δείκτη BENTIX. Αντιθέτως, τα αποτελέσματα της ανάλυσης για την ομάδα με «αποδεκτή» οικολογική κατάσταση κατέγραψαν ευαίσθητα και ανθεκτικά είδη να χαρακτηρίζουν τους σταθμούς της ομάδας. Η αυξημένη λειτουργική ποικιλότητα όσον αφορά τις οικολογικές ομάδες (ευαίσθητα – ανθεκτικά είδη) στους σταθμούς με χαμηλά επίπεδα ευτροφισμού ερμηνεύεται με την Υπόθεση Διαβαθμισμένης Διατάραξης (Stress Gradient Hypothesis) (Bertness and Callaway, 1994). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη θεωρία, η απόκριση των ειδών κατά μήκος μιας περιβαλλοντικής διατάραξης είναι ανάλογη με τα χαρακτηριστικά ζωής (life history traits) τους και τον τύπο/φύση της διατάραξης. Στην παρούσα μελέτη τα ανθεκτικά και ευαίσθητα στην περιβαλλοντική διατάραξη είδη χαρακτηρίζονται από διαφορετικές οικολογικές στρατηγικές. Τα ανθεκτικά είδη έχουν σύντομο προσδόκιμο ζωής, γρήγορη ανάπτυξη και αναπαραγωγική ωρίμανση και χαμηλή βιομάζα (r-στρατηγική). Τα είδη που κατατάσσονται ως «ευαίσθητα» στην

περιβαλλοντική διατάραξη έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, αργούς ρυθμούς ανάπτυξης και αυξημένη βιομάζα (Κ-στρατηγική). Σε ενδιαιτήματα που χαρακτηρίζονται από μειωμένη περιβαλλοντική διατάραξη παρατηρείται συμπαρουσία ειδών με μερική ή καθόλου επικάλυψη οικολογικού θώκου. Ο μηχανισμός αυτός ενισχύει τις οικολογικές διαφορές ανάμεσα στα είδη όσον αφορά την εκμετάλλευση πόρων ή οικοθέσης με αποτέλεσμα να συνυπάρχουν είδη με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά (Carbonell et al., 2017). Η δράση του μηχανισμού αυτού είναι εμφανής στους σταθμούς της παρούσας μελέτης που χαρακτηρίζονται από μειωμένα επίπεδα ευτροφισμού όπου συνυπάρχουν είδη με διαφορετικές οικολογικές προσαρμογές.

Η θαλάσσια περιοχή του Αιγαίου πελάγους χαρακτηρίζεται από άλλες έντονες περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις, πέρα της πρωτογενούς παραγωγικότητας με εμφανείς επιπτώσεις στην κατανομή των βενθικών ειδών. Συγκεκριμένα, το νότιο-κεντρικό Αιγαίο πέλαγος επηρεάζεται από το επιφανειακό υδάτινο μέτωπο της Λεβαντίνης (Levantine surface water), το οποίο είναι αποτέλεσμα έντονης εξάτμισης στην περιοχή της Λεβαντίνης (Ciarra, 2014) και προμηθεύει συνεχώς το Αιγαίο πέλαγος με θερμά και υψηλής αλατότητας ρεύματα κατά τρόπο που οι υδρογραφικές συνθήκες της περιοχής να διατηρούνται σχετικά σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ταυτόχρονα, η εισροή υδάτων από τα Δαρδανέλια και από το έντονο υδρογραφικό δίκτυο συμβάλουν στην πτώση της αλατότητας και της θερμοκρασίας στο βόρειο τμήμα του Αιγαίου πελάγους. Συνεπώς, οι υδρογραφικές συνθήκες του Αιγαίου πελάγους δημιουργούν έντονες περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις και συνθήκες καταπόνησης για ορισμένες μακροβενθικές ομάδες ειδών. Στην παρούσα μελέτη παρατηρείται ότι οι ομάδες ειδών 5,6,7 όπου κατέγραψαν την μεγαλύτερη μείωση λειτουργικής ποικιλότητας με την επικράτηση μιας εκ των δύο οικολογικών ομάδων (ευαίσθητα – ανθεκτικά) χαρακτηρίζονται από είδη που αποκρίνονται με τη μεγάλη

πιθανότητα εμφάνισης στα ελάχιστα και στα μέγιστα όρια των περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων. Συγκεκριμένα η ομάδα 5 αποτελείται από θερμόφιλα είδη που αποκρίνονται με μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης στα ενδιαιτήματα του Νότιου Αιγαίου που χαρακτηρίζονται από αυξημένη θερμοκρασία. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες το κεντρικό και νότιο Αιγαίο αποτελεί σημείο εισροής θερμού υδάτινου στρώματος με προέλευση από την Λεβαντίνη (Lykousis et al., 2002) και χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη σύσταση βενθικών ειδών (Galanidi et al., 2016). Αντίθετα, οι ομάδες 6 και 7 αποκρίνονται με μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης στους πιο ψυχρούς και πιο ευτροφικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης στο βόρειο Αιγαίο συμφωνώντας με προηγούμενες μελέτες που τονίζουν την ιδιαίτερη πανιδική σύσταση της περιοχής εξαιτίας του υδρογραφικού της χαρακτήρα (Sayin et al., 2011; Velaoras and Lascaratos, 2010). Οι μεταβολές στη σύσταση των βενθικών κοινοτήτων κατά μήκος μιας περιβαλλοντικής διατάραξης είναι εμφανείς με την επικράτηση ειδών που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένα λειτουργικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά ως αποτέλεσμα της διαδικασίας προσαρμογής σε βάθος χρόνου. Οι ακραίες τιμές ενός περιβαλλοντικού παράγοντα οδηγούν στον διαχωρισμό και στην επιλογή των ειδών στα αντίστοιχα ενδιαιτήματα μέσω ενός συνδυασμού οικολογικών χαρακτηριστικών που καθιστούν τα είδη ικανά να επιβιώσουν στις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης συμφωνούν με προηγούμενες μελέτες που τονίζουν τη σημασία των φυσικών περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων στην κατανομή των βενθικών οργανισμών ως μέσο επιλογής ειδών ικανών για επιβίωση στις εκάστοτε συνθήκες (Carbonell et al., 2017; Maestre et al., 2009).

2.6 Συμπεράσματα

Το Αιγαίο πέλαγος αποτελεί ιδανική περιοχή μελέτης των επιπτώσεων των κυριότερων περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων στη κατανομή των θαλάσσιων ειδών. Στην παρούσα μελέτη, αναγνωρίστηκαν 7 ομάδες βενθικών κοινοτήτων με βάση την απόκριση τους στις περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις θερμοκρασίας, αλατότητας και πρωτογενούς παραγωγής. Το πρότυπο διαδοχής βενθικών ειδών κατά μήκος μιας περιβαλλοντικής διατάραξης οργανικού εμπλουτισμού δεν φάνηκε να καθορίζει συνολικά την σύσταση των βενθικών κοινοτήτων στη συγκεκριμένη μελέτη. Όλες οι κοινότητες συμπεριλαμβανομένων και εκείνων σε σταθμούς με έντονη διατάραξη από καθίζηση οργανικής ύλης λόγω ευτροφισμού χαρακτηρίζονταν και από ευαίσθητα και από ανθεκτικά στην περιβαλλοντική διατάραξη είδη. Το πιο πάνω πρότυπο παρατηρήθηκε εξαιτίας της συμμεταβολής διαφορετικής φύσεως περιβαλλοντικών μεταβλητών από τους βόρειους προς τους νότιους σταθμούς της περιοχής μελέτης. Στους σταθμούς που χαρακτηρίζονταν από ακραίες τιμές των περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων παρατηρήθηκε μείωση της λειτουργικής ποικιλότητας με την επικράτηση ειδών με συγκεκριμένες οικολογικές προτιμήσεις ανεξάρτητα από την ταξινόμηση τους ως ευαίσθητα ή ανθεκτικά. Η διασύνδεση πελαγικού και βενθικού τμήματος επιτεύχθηκε μέσω της μελέτης βενθικών ειδών-δεικτών που χαρακτήριζαν κάθε ενδιαίτημα π.χ οργανικά εμπλουτισμένο. Τα ευρήματα της μελέτης αυτής αναδεικνύουν τη χρησιμότητα των ειδών δεικτών ως μέσο αξιολόγησης της οικολογικής κατάστασης και τη σημασία των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων στην κατανομή των θαλάσσιων βενθικών ειδών. Παράλληλα, συνιστούν προσοχή στη χρήση των υπάρχουσών οικολογικών κατηγοριών (ευαίσθητα – ανθεκτικά είδη) για την περιγραφή των βενθικών κοινοτήτων σε περιοχές με έντονο υδροδυναμικό χαρακτήρα. Προτείνουμε τρεις

προσεγγίσεις: 1) Περιορισμό της χρήσης των οικολογικών κατηγοριών σε συνθήκες οργανικής διατάραξης και χωρίς την συμμεταβολή άλλων περιβαλλοντικών παραμέτρων. 2) Εναλλακτικά, στην επανεξέταση των ορισμών αυτών υπό το πρίσμα του οικολογικού θώκου του κάθε είδους και 3) Την προσαρμογή των τιμών ανεκτικότητας και ευαισθησίας για κάθε είδος ανάλογα με τα υδρογραφικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής ώστε να μετριαστεί η επιρροή διαφορετικών περιβαλλοντικών παραμέτρων πέραν του οργανικού εμπλουτισμού (Fleischer and Zettler, 2009).

Κεφάλαιο 3. Χρήση βενθικών ειδών-δεικτών για αξιολόγηση οικολογικής κατάστασης μέσω μοντέλων κατανομής¹

3.1 Εισαγωγή

Η διαχείριση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων μέσω βιώσιμων δράσεων είναι υποχρεωτική και επιβάλλεται κυρίως μέσα από μια σειρά ευρωπαϊκών οδηγιών όπως η European Water Framework Directive – WFD (EU, 2000) και η Marine Strategy Framework Directive – MSFD (EU, 2008). Οι προαναφερθείσες οδηγίες στοχεύουν στην επίτευξη της «καλής» οικολογικής κατάστασης παράκτιων και μεταβατικών υδάτινων οικοσυστημάτων χρησιμοποιώντας για την αξιολόγηση και την παρακολούθηση μια σειρά από βιοτικούς δείκτες (Borja et al., 2000; Dauvin and Ruellet, 2007; Rosenberg et al., 2004; Simboura and Zenetos, 2002) που διαπιστώνουν την οικολογική κατάσταση της κάθε περιοχής ανάλογα με την πανιδική σύσταση των βιοκοινοτήτων της. Ειδικότερα, εξάγεται η τιμή ενός δείκτη που υπολογίζεται με βάση την παρουσία ειδών που ανήκουν σε ένα κατάλογο ειδών τα οποία έχουν χαρακτηριστεί ως προς την ευαισθησία ή ανθεκτικότητά τους στην περιβαλλοντική διατάραξη. Η μελέτη του βενθικού οικοσυστήματος και των βιοκοινοτήτων που σχετίζονται με αυτό αποτελεί κοινή προσέγγιση στην αξιολόγηση των επιπτώσεων φυσικών και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο θαλάσσιο περιβάλλον (Zettler et al., 2013). Οι

¹ Δεδομένα από την ενότητα αυτή έχουν χρησιμοποιηθεί στην εργασία:

Moraitis ML, Tsikoroulou I, Geropoulos A, Dimitriou PD, Papageorgiou N, Giannoulaki M, Valavanis VD, Karakassis I (2018) Molluscan indicator species and their potential use in ecological status assessment using species distribution modeling. *Marine Environmental Research* **140**: 10-17. doi: 10.1016/j.marenvres.2018.05.020

μακροβενθικοί ασπόνδυλοι οργανισμοί θεωρούνται σημαντικοί βιοτικοί δείκτες και η απόκρισή τους σε ποικιλία τύπων περιβαλλοντικής διατάραξης είναι δεδομένη (de-la-Ossa-Carretero et al., 2012; Dimitriou et al., 2015; Moraitis et al., 2013). Ωστόσο, για να είναι δυνατή η χρήση όλων των κύριων μακροβενθικών ομάδων (δακτυλιοσκόληκες, μαλάκια, αρθρόποδα και εχινόδερμα) από τους προαναφερθέντες βενθικούς βιοτικούς δείκτες απαιτείται επαρκής γνώση ταξινομικής. Επιπλέον, πολλές από τις προαναφερθείσες ομάδες όπως τα αρθρόποδα και τα εχινόδερμα απουσιάζουν από περιοχές με έντονη περιβαλλοντική διατάραξη σε αντίθεση με τα μαλάκια που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο εύρος ανοχής (Nerlonić et al., 2011; Pearson and Rosenberg, 1978) και συνεπώς απαντώνται σε περιβάλλοντα με πολλές διαφορετικές (και διαφορετικής έντασης) περιβαλλοντικές διαταράξεις. Αυτή η ιδιότητα καθιστά τα μαλάκια ιδανικούς δείκτες για αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

Η οικολογική κατάσταση στα υδάτινα οικοσυστήματα πολλές φορές καθορίζεται από την παρουσία (ή απουσία) ενός είδους (Zettler et al., 2013). Σε αυτές τις περιπτώσεις, το είδος έχει σημαντική συσχέτιση με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και χαρακτηρίζεται ως «δείκτης» (indicator species) των ενδιαιτημάτων που φέρουν τις συνθήκες αυτές. Η μελέτη της κατανομής και των χωρικών προτύπων των ειδών-δεικτών μπορεί να δώσει πληροφορίες για μια επερχόμενη οικολογική ή περιβαλλοντική αλλαγή, λόγω των συγκεκριμένων περιβαλλοντικών απαιτήσεων που περιγράφουν τον οικολογικό τους θώκο (López-Baucells et al., 2017). Η συσχέτιση των ειδών-δεικτών με μια πληθώρα θαλάσσιων ενδιαιτημάτων, καθιστά την παρακολούθηση των πληθυσμών τους μια αξιόπιστη μέθοδο για την απόκτηση πληροφορίας απαραίτητης για την περιβαλλοντική διαχείριση των αντίστοιχων οικοσυστημάτων (McGeoch and Chown, 1998). Στα πλεονεκτήματα της χρήσης ειδών-δεικτών σε πρακτικές περιβαλλοντικής διαχείρισης

συγκαταλέγεται το γεγονός ότι α) συνήθως αποτελούνται από είδη που η παρουσία τους ταυτίζεται με συγκεκριμένους τύπους ενδιαιτημάτων και β) η χωρική κατανομή τους αντικατοπτρίζει τις περιβαλλοντικές μεταβολές που έλαβαν χώρα σε σχετικά μεγάλο βάθος χρόνου (Siddig et al., 2016). Η ικανότητα ταύτισης ενός είδους με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές μεταβλητές προκύπτει από ανάλυση της παρουσίας του είδους σε συγκεκριμένου τύπου ενδιαιτήματα και το ποσοστό κάλυψης όλων των σταθμών που εμπίπτουν σε αυτόν τον τύπο (De Cáceres et al., 2010). Ένα είδος που απαντάται αποκλειστικά σε συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες αποτελεί ένα ιδανικό «δείκτη» που σχετίζεται με τις συνθήκες αυτές σε σχέση με ένα είδος που χαρακτηρίζεται από πολύ ευρύ οικολογικό θώκο (De Cáceres and Legendre, 2009).

Τα μαλάκια χρησιμοποιούνται ως δείκτες αξιολόγησης της οικολογικής κατάστασης μιας θαλάσσιας περιοχής στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης Water Framework Directive (Leshno et al., 2015; Nerloni et al., 2011), ως οικολογικοί δείκτες (La Valle et al., 2011) και ως βιοδείκτες περιβαλλοντικής ρύπανσης. Ο οικολογικός ρόλος της μαλακοπανίδας στην ανατολική Μεσόγειο έχει καταδειχθεί από διάφορες μελέτες (Arvanitidis et al., 2005; Dimitriadis and Koutsoubas, 2008; Koutsoubas et al., 2000; Zenetos, 1996) που ανέδειξαν τη συμβολή τους στην οικοσυστημική δομή και λειτουργία, στη διατήρηση της βιοποικιλότητας και που τόνισαν την ικανότητα τους να αντανakλούν τα μακροπανιδικά πρότυπα όσον αφορά την οικολογική κατάσταση μιας θαλάσσιας περιοχής. Μελέτες που περιλαμβάνουν είδη μαλακίων σε χωρικά μοντέλα πρόβλεψης κατανομής περιορίζονται κατά κύριο λόγο στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Saure et al., 2014), την εκτίμηση της βιοποικιλότητας (Darr et al., 2014), αφορούν είδη οικονομικού ή κοινωνικού ενδιαφέροντος (Appelqvist et al., 2015; Russell et al., 2012; Vázquez-Luis et al., 2014) και τις επιπτώσεις βιολογικών εισβολών (Jones et al., 2013; Raybaud et al., 2014) και λιγότερο σε μελέτες που

αφορούν είδη υψηλής οικολογικής σημασίας (Gormley et al., 2013). Στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου δεν υπάρχουν, από όσο γνωρίζουμε, δημοσιευμένες μελέτες που να ενσωματώνουν μαλάκια σε χωρικά μοντέλα πρόβλεψης κατανομής με σκοπό την αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης μιας περιοχής.

Στόχοι της συγκεκριμένης μελέτης είναι: 1) Να διερευνηθεί η πιθανότητα χρήσης μακροπανιδικών ειδών από την ομάδα των μαλακίων ως πιθανών «δεικτών» ενδιαιτημάτων με διαφορετικά επίπεδα ευτροφισμού με βάση τα όρια που έχουν προταθεί για τις ελληνικές θάλασσες, 2) να γίνει χρήση χωρικών μοντέλων για τη μελέτη της κατανομής των ειδών «δεικτών» ως μέσο αξιολόγησης της οικολογικής κατάστασης και 3) να γίνει αξιολόγηση της σημασίας των ειδών αυτών ως βιολογικών εργαλείων σε μελέτες περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Τα μακροβενθικά μαλάκια αποτελούν ιδανικούς δείκτες για τους συγκεκριμένους στόχους αυτής της μελέτης λόγω της ιδιότητας τους να αντανακλούν οι χωρικές συναθροίσεις τους τις μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές αλλαγές στη στήλη του νερού λόγω της περιορισμένης δυνατότητας μετακίνησης τους (Moraitis et al., 2013). Η αρχική υπόθεση είναι πως οι χάρτες καταλληλότητας του ενδιαιτηματος των ειδών-δεικτών που θα παραχθούν μέσω χωρικών μοντέλων θα αντιπροσωπεύουν την ευρύτερη οικολογική κατάσταση της περιοχής. Αναμένεται, πως η κατανομή των ειδών που σχετίζονται με περιβαλλοντικά διαταραγμένες περιοχές θα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα επίπεδα χλωροφύλλης - *a* και ενδεχομένως να είναι δυνατή η χρήση τους ως δεικτών των επιπέδων ευτροφισμού. Αντίστοιχα, είδη που χαρακτηρίζουν περιβαλλοντικά αδιατάρακτες θαλάσσιες περιοχές αναμένεται να επηρεάζονται από μια πληθώρα περιβαλλοντικών παραμέτρων.

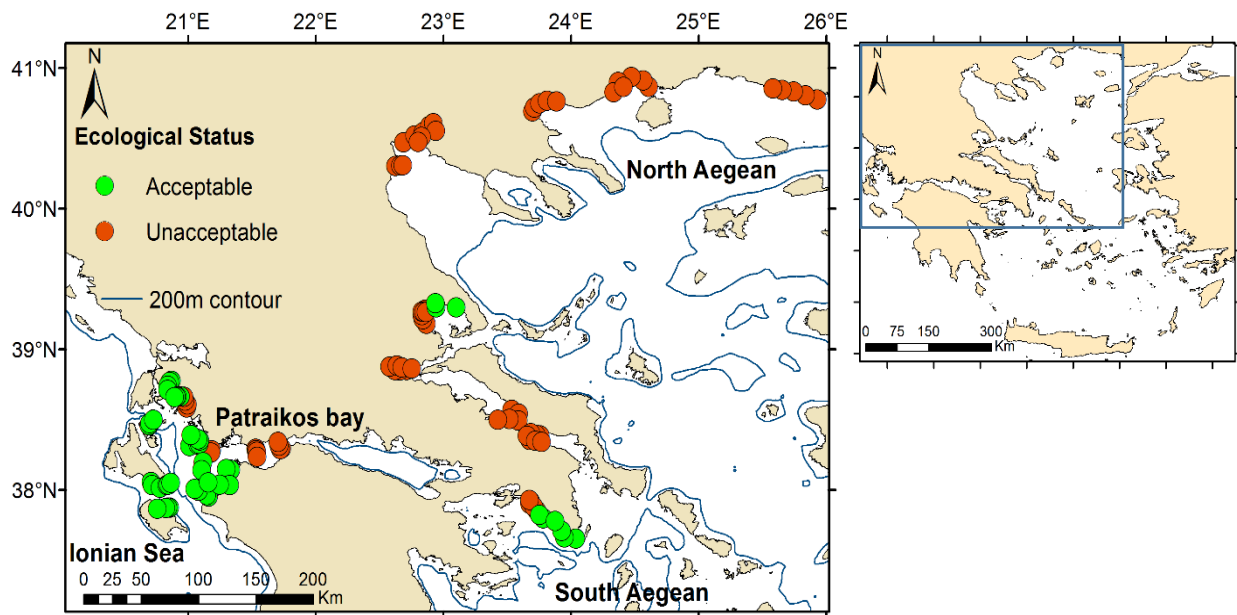
Στοιχείο πρωτοτυπίας της ενότητας αυτής αποτελεί η χρήση των ειδών δεικτών για χαρακτηρισμό ενδιαιτημάτων που είναι σπάνια (Zettler et al., 2013) ενώ παράλληλα δεν έχει

παρατηρηθεί καμία μελέτη που να ενσωματώνει τα είδη αυτά σε χωρικά μοντέλα για τον σκοπό αυτό.

3.2 Υλικά και Μέθοδοι

3.2.1 Περιοχή μελέτης

Οι περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις (environmental gradients) τείνουν να επηρεάζουν την απόκριση ενός οργανισμού σε μια περιβαλλοντική διατάραξη (π.χ. ευτροφισμός) και η απόκριση αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την χωρική θέση του είδους κατά μήκος των διαβαθμίσεων (Zettler et al., 2013). Εξαιτίας των έντονα διαμορφωμένων περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων στο Αιγαίο πέλαγος, συμπεριλήφθηκαν και σταθμοί από το Ιόνιο πέλαγος (Εικόνα 3.1) με απώτερο στόχο την ολοκληρωμένη προσέγγιση στην κάλυψη του οικολογικού θώκου των ειδών και κατ' επέκταση στην ενίσχυση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3.1: Σταθμοί δειγματοληψίας με την αντίστοιχη οικολογική κατάσταση των επιπέδων ευτροφισμού με βάση τα όρια που θεσπίστηκαν για τον ελληνικό χώρο (Simboura et al., 2005).

Αρχικά, οι σταθμοί δειγματοληψίας χωρίστηκαν σε δύο ομάδες ανάλογα με την οικολογική τους κατάσταση σύμφωνα με τα τροφικά επίπεδα της στήλης του νερού. Η άμεση απόκρισή της υδάτινης στήλης στον εμπλουτισμό με θρεπτικά, είναι η αύξηση της φυτοπλαγκτονικής βιομάζας, μια σχέση που ορίζει το φαινόμενο του ευτροφισμού. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η συγκέντρωση της χλωροφύλλης a ($chl - a$) ως δείκτης ευτροφισμού. Η οικολογική κατάσταση κάθε δειγματοληπτικού σταθμού προσδιορίστηκε με βάση τα επίπεδα της συγκέντρωσης χλωροφύλλης - a σύμφωνα με την κλίμακα που έχει προταθεί στο παρελθόν (Karydis, 1999; Ραγου et al., 2002) όπως τροποποιήθηκε από τους Simboura et al. (2005) για τον ελληνικό χώρο. Στην προαναφερθείσα κλίμακα, η συγκέντρωση της χλωροφύλλης αντιπροσωπεύει ένα τμήμα της αφθονίας του φυτοπλαγκτού που αποτελεί μια από τις τρεις βιολογικές ομάδες (μαζί με τα μακροφύκη και το βένθος) που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης των

παράκτιων υδάτων σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία για τα νερά ή WFD (Simboura et al., 2016). Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης αποτελεί έναν απλό και ολοκληρωμένο τρόπο αξιολόγησης της απόκρισης του φυτοπλαγκτού στον εμπλουτισμό με θρεπτικά (Spatharis and Tsirtsis, 2010). Χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων «Bio-Oracle, a global environmental dataset designed for marine species distribution modelling» (<http://www.bio-oracle.org/>) (Tyberghein et al., 2012) για εξαγωγή χωρικών δεδομένων της συγκέντρωσης χλωροφύλλης – α για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια, οι σταθμοί χωρίστηκαν σε δύο ομάδες οικολογικής κατάστασης (αποδεκτή, Chl $a < 0.4$ $\mu\text{g/l}$ – μη αποδεκτή, Chl $a > 0.4$ $\mu\text{g/l}$) ανάλογα με τα επίπεδα της ετήσιας μέσης τιμής της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης με βάση την κλίμακα της οδηγίας WFD όπως προσδιορίστηκε από τους Simboura et al. (2005). Ο όρος «αποδεκτή» οικολογική κατάσταση ανταποκρίνεται στις τάξεις εντός των αποδεκτών ορίων τιμών συγκεντρώσεως χλωροφύλλης υπό την οδηγία WFD και αντίστοιχα, ο όρος «μη αποδεκτή» οικολογική κατάσταση ανταποκρίνεται στις τάξεις εκτός των αποδεκτών ορίων για τις τιμές της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης a κατά την ίδια οδηγία.

3.2.2 Βιολογικά δεδομένα

Συλλέχθηκαν μακροπανιδικά δείγματα μαλακού υποστρώματος από 123 σταθμούς δειγματοληψίας στο Αιγαίο και Ιόνιο πέλαγος κατά την περίοδο Απριλίου – Ιουλίου 2014. Η συλλογή έλαβε χώρα με την χρήση βενθικού δειγματολήπτη-αρπάγη (grab) τύπου Smith-McIntyre με επιφάνεια συλλογής 0.1m^2 . Στη συνέχεια, κάθε δείγμα κοσκινίστηκε αρχικά με κόσκινο διαμέτρου 1 mm και έπειτα με κόσκινο 0.5mm. Το ίζημα που συγκρατήθηκε μεταφέρθηκε στο εργαστήριο αφού συντηρήθηκε σε διάλυμα φορμόλης 10% μέχρι την επεξεργασία του. Χρησιμοποιήθηκε χρώση με την οργανική χρωστική Rose Bengal για την διευκόλυνση της διαλογής που πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια μεγεθυντικού φακού.

Τέλος, έλαβε χώρα η αναγνώριση και ο προσδιορισμός των ατόμων σε επίπεδο είδους. Συνολικά, αναγνωρίστηκαν 122 είδη θαλάσσιων μαλακίων (3015) άτομα. Επιπλέον, μελετήθηκαν τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά κάθε είδους (τρόπος τροφοληψίας, θέση στο ίζημα, και οικολογική κατάταξη σύμφωνα με τον δείκτη BENTIX (Simboura and Zenetos, 2002)).

Η ανάλυση προσδιορισμού ειδών-δεικτών (Indicator Species Analysis) (De Cáceres and Legendre, 2009) έλαβε χώρα για να προσδιοριστούν τα είδη-δείκτες των δύο ομάδων σταθμών στη συγκεκριμένη μελέτη. Τα είδη-δείκτες προκύπτουν από μια ανάλυση της σχέσης ανάμεσα στις αφθονίες των ειδών σε κάθε δείγμα και στην κατάταξη του κάθε δείγματος στις δύο ομάδες σταθμών που αναφέρθηκαν. Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που πρότειναν οι Dufrêne and Legendre (1997), κατά την οποία αποκλείονται οι τυχαίοι συνδυασμοί των σταθμών με σκοπό την συσχέτιση των ειδών με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Στα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται δύο στατιστικοί δείκτες: Ο δείκτης «ειδικότητας» (specificity) και ο δείκτης «ευαισθησίας» (sensitivity). Ο δείκτης «ειδικότητας» είναι η πιθανότητα ο σταθμός να ανήκει σε μια από τις δύο ομάδες με δεδομένο ότι το είδος έχει βρεθεί. Ο δείκτης «ευαισθησίας» είναι η πιθανότητα εύρεσης του είδους σε όλους τους σταθμούς της συγκεκριμένης ομάδας. Τέλος, ο αλγόριθμος παρουσιάζει ένα δείκτη ποσοτικοποίησης της ικανότητας ενός είδους να δρα ως «δείκτης» (Indicator Value) με τιμές να κυμαίνονται από 0 (μη κατάλληλος δείκτης) μέχρι 1 (κατάλληλος δείκτης). Το πρόγραμμα “indicspecies” μέσω της γλώσσας προγραμματισμού R 3.3.2 (R Development Core Team).

3.2.3 Περιβαλλοντικά δεδομένα

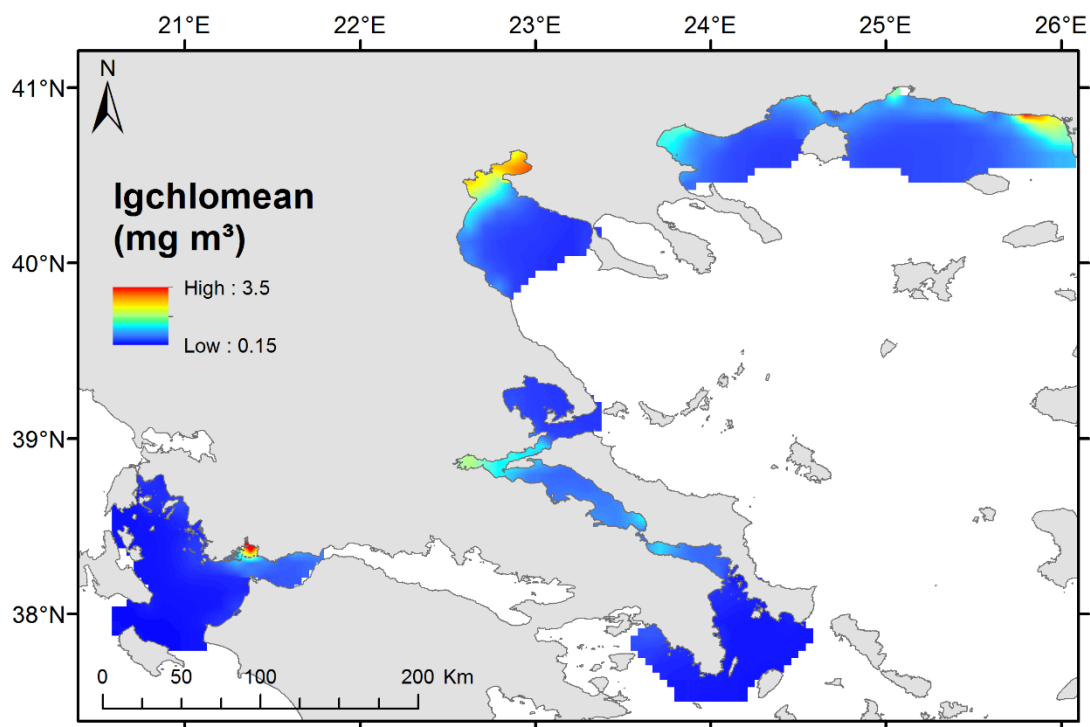
Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκαν οι καταλληλότερες περιβαλλοντικές παράμετροι για χρήση σε χωρικά μοντέλα πρόβλεψης κατανομής ειδών. Το βάθος και ο τύπος του υποστρώματος δεν ενδείκνυται να χρησιμοποιούνται σε μελέτες που χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλη χωρική κλίμακα· το πρώτο εξαιτίας της στατιστικά σημαντικής συσχέτισης που παρουσιάζει με τις περισσότερες περιβαλλοντικές μεταβλητές (Reiss et al., 2015) και το δεύτερο εξαιτίας της μεγάλης ετερογένειας και της έλλειψης δεδομένων ικανοποιητικής χωρικής ακρίβειας (Saure et al., 2014; Townhill et al., 2017). Σύμφωνα με τους (Reiss et al., 2015), οι πιο χρήσιμες περιβαλλοντικές παράμετροι για χωρικά μοντέλα πρόβλεψης κατανομής βενθικών ειδών είναι η αλατότητα η θερμοκρασία και η πρωτογενής παραγωγή επομένως, οι προαναφερθείσες παράμετροι επιλέχθηκαν για την παρούσα μελέτη. Η ενσωμάτωση περιβαλλοντικών παραμέτρων με βιολογικό υπόβαθρο συμβάλλει σημαντικά στην απόδοση των μοντέλων εφόσον ερμηνεύουν σε μεγάλο βαθμό την κατανομή του υπό μελέτη είδους. Αρχικά, στην παρούσα μελέτη ελέγχθηκαν για συσχέτιση οι εξής παράμετροι: η μέση επιφανειακή θερμοκρασία (sea surface temperature), η μέση θερμοκρασία πυθμένα (sea bottom temperature - sbt) η μέση επιφανειακή αλατότητα (salinity), η μέση αλατότητα πυθμένα (bottom salinity) και η μέση επιφανειακή συγκέντρωση χλωροφύλλης – α (chlomean) ως μέσο μέτρηση της πρωτογενούς παραγωγής. Μετά το πέρας του ελέγχου, η μέση επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας και η αλατότητα πυθμένα κρίθηκαν ακατάλληλες (λόγω συγγραμμικότητας με άλλες μεταβλητές) και δεν συμπεριλήφθηκαν στις αναλύσεις. Όλα τα περιβαλλοντικά δεδομένα συλλέχθηκαν από την βάση δεδομένων «Bio-Oracle, a global environmental dataset designed for marine species distribution modelling» (<http://www.bio-oracle.org/>) (Tyberghein et al., 2012) εκτός από τη μέση θερμοκρασία

βένθους για την οποία χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων «Aquamaps» (<http://www.aquamaps.org/>) (Kaschner et al., 2016). Η πολυσυσχετικότητα και over-fitting ελέγχθηκαν με τη χρήση του στατιστικού VIF (Variance Inflation Factor) και όριο αποκλεισμού (cut-off threshold) = 5 μέσω μιας σταδιακής διαδικασίας ανίχνευσης και αποκλεισμού συγγραμμικών παραμέτρων με βάση τον δείκτη συσχέτισης Pearson (όριο > 0.5). Ο μετασχηματισμός των συνεχών (continuous) περιβαλλοντικών δεδομένων πριν τις αναλύσεις αποτελεί μια λύση στο πρόβλημα της συγγραμμικότητας (Vázquez-Luis et al., 2014). Για τον λόγο αυτό, η συγκέντρωση της χλωροφύλλης – α μετασχηματίστηκε με βάση το λογάριθμο $\log(x+1)$ πριν από την ανάλυση του μοντέλου ακολουθώντας το παράδειγμα προηγούμενης μελέτης που κάνει χρήση βενθικών χωρικών μοντέλων στην ίδια περιοχή (Galanidi et al., 2016). Όλα τα περιβαλλοντικά στρώματα (raster layers) υπέστησαν επαναληπτική δειγματοληψία μέσω αμφιγραμμικής παρεμβολής (bilinear interpolation) στην ανάλυση 1 km² και η επιφάνεια τους περικόπηκε με τη χρήση ενός πολύγону στην έκταση του δειγματοληπτικού εύρους (μέχρι 200μ βάθος). Η επιφάνεια δράσης του μοντέλου βασίστηκε στην επιφάνεια των περιβαλλοντικών στρωμάτων που επιλέχθηκε για την κάλυψη όλων των σταθμών κατά μήκος της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας. Κατά αυτό τον τρόπο, το εύρος των τιμών που χρησιμοποιούνται κατά το στάδιο training του μοντέλου καλύπτει το τελικό εύρος των τιμών κατά το στάδιο testing συμβάλλοντας σημαντικά στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Όλες οι αναλύσεις έλαβαν χώρα στο περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού R 3.3.2 program language (R Development Core Team, 2017) μέσω των πακέτων “raster”, “maptools” and “usdm” και μέσω του προγράμματος ArcGIS (Version 10.2). Ο τελικός κατάλογος με τις περιβαλλοντικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα της παρούσας μελέτης και τη βιολογική τους σημασία για

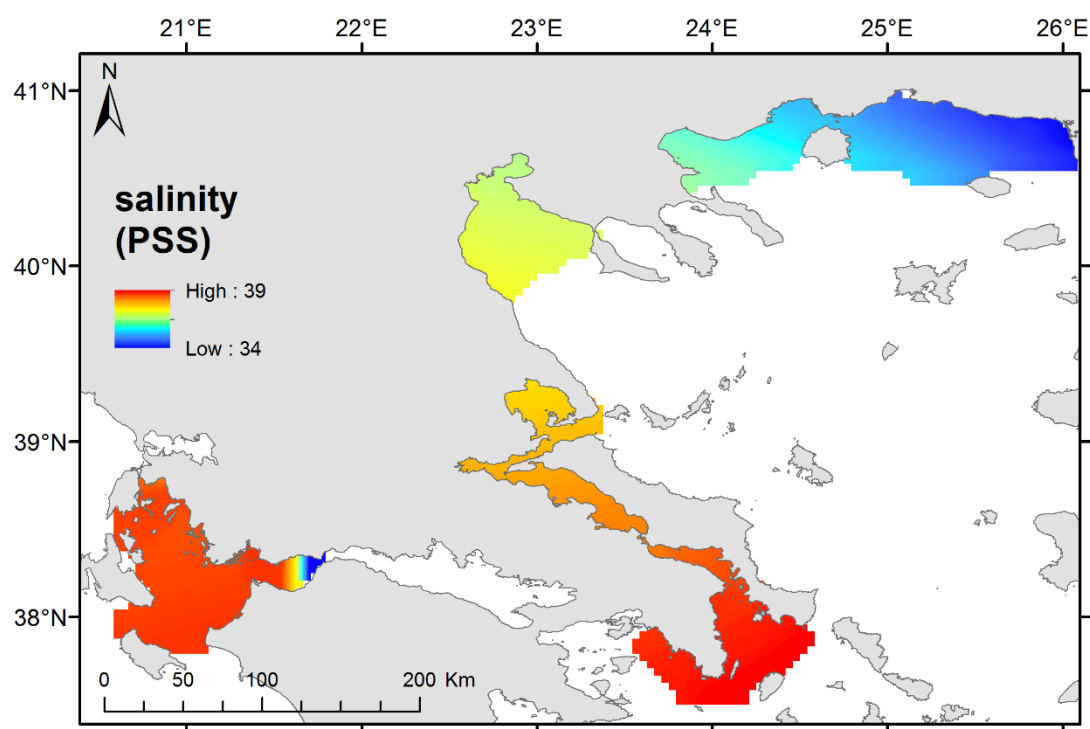
τα βενθικά μαλάκια παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1. Η χωρική επισκόπηση των περιβαλλοντικών δεδομένων απεικονίζεται στις Εικόνες 3.2-3.4.

Πίνακας 3.1: Βιολογική σημασία των περιβαλλοντικών παραμέτρων κατάλληλων για μοντέλα κατανομής βενθικών ειδών.

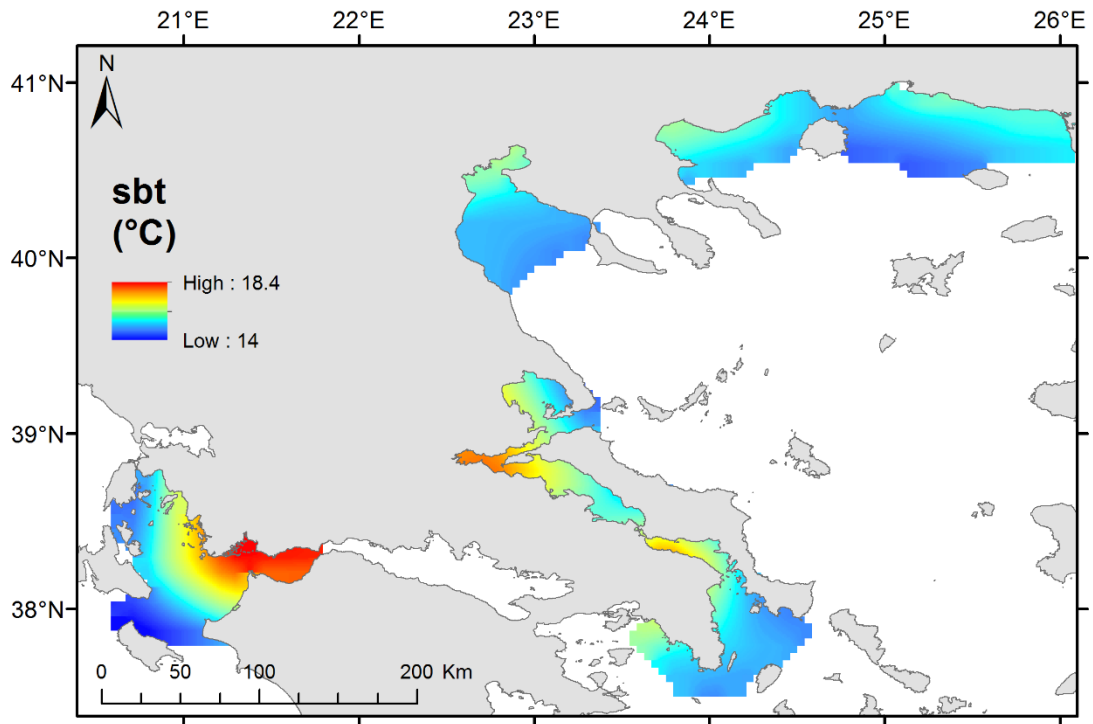
Predictor	Unit	Abbreviation	Biological Importance
Mean surface salinity	PSS	salinity	Η αλατότητα καθορίζει τις γεωγραφικές ζώνες στα θαλάσσια οικοσυστήματα και καθορίζει την κατανομή των βενθικών ειδών (Reiss et al., 2015).
Log (x+1) mean chl <i>a</i> concentration	mg / m ³	lgchlomean	Πρωτογενής παραγωγικότητα αποτελεί ένδειξη των διαθέσιμων πόρων για τα διηθηματοφάγα μαλάκια (Rodil et al., 2014).
Mean sea bottom temperature	°C	sbt	Η θερμοκρασία αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα του μεταβολισμού και της γενικότερης φυσιολογίας των θαλάσσιων ειδών (Valentine and Jablonski, 2015).



Εικόνα 3.2: Συγκέντρωση χλωροφύλλης – α στον ελληνικό χώρο.



Εικόνα 3.3: Συγκέντρωση επιφανειακής αλατότητας στον ελληνικό χώρο.



Εικόνα 3.4: Θερμοκρασία πυθμένα σε Αιγαίο και Ιόνιο πέλαγος.

3.2.4 Modelling

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν *in situ* δεδομένα παρουσίας-απουσίας των ειδών σε συνδυασμό με τις σχετικές περιβαλλοντικές μεταβλητές. Περιορισμούς που αφορούν μοντέλα κατανομής ειδών αποτελούν η ασυνέχεια των δεδομένων (raucity of the data), η χωρική μεροληψία κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας και η έλλειψη έγκυρων δεδομένων απουσίας (Guisan et al., 2006; Reiss et al., 2015) που επηρεάζουν κατά κύριο λόγο τα μοντέλα παρουσίας ειδών (Veloz, 2009). Για να αποφευχθούν τα προαναφερθέντα προβλήματα στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα παρουσίας και πραγματικής απουσίας που συλλέχθηκαν *in situ* και αποκλείστηκαν περιοχές που δεν είχαν επαρκή δειγματοληπτική κάλυψη. Η χρήση υψηλής ποιότητας βιολογικών δεδομένων σε χωρικά μοντέλα πρόβλεψης κατανομής συμβάλλει σημαντικά στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων (Singer et al., 2016).

Είδη που παρατηρήθηκαν σε λιγότερους από 5 σταθμούς αφαιρέθηκαν από την ανάλυση όπως προτείνουν προηγούμενες μελέτες μοντέλων κατανομής ειδών (Galanidi et al., 2016; van Proosdij et al., 2016). Υπάρχει μια πληθώρα μεθόδων για χωρικά μοντέλα πρόβλεψης κατανομής με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα να χαρακτηρίζουν τη κάθε μια (Robinson et al., 2011). Η δημιουργία ενός συμπλέγματος (ensemble) από διαφορετικές μεθόδους μοντελοποίησης είναι μια σύγχρονη προσέγγιση που παρακάμπτει τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου και ενισχύει τα πλεονεκτήματα (Araújo and New, 2007; Gama et al., 2016; Riul et al., 2013). Με τη συγχώνευση διαφορετικών αλγόριθμων αυτή η προσέγγιση συμπεριλαμβάνει την μεταβλητότητα ανάμεσα στους διαφορετικούς αλγόριθμους και μειώνει τυχόν αβεβαιότητες που δυνητικά θα προέκυπταν από την επιλογή ενός μόνο αλγόριθμου (Araújo and New, 2007; Singer et al., 2016; Thuiller et al., 2009). Στην παρούσα μελέτη, δυο μέθοδοι παλινδρόμησης: Γενικευμένα Γραμμικά Μοντέλα (Generalized Linear Models - GLM), Γενικευμένα Αθροιστικά Μοντέλα (Generalized Additive Models - GAM) και δύο μέθοδοι μηχανικής μάθησης (machine-learning): Boosted Regression Tree analysis (BRT) και Random Forest (RF) έλαβαν χώρα με τη μέθοδο υποδειγματοληψίας (subsampling) καταλήγοντας, για κάθε αλγόριθμο, το 70% των δεδομένων να χρησιμοποιείται κατά το training στάδιο και το 30% κατά το στάδιο testing. Η μέθοδος υποδειγματοληψίας επιλέχθηκε για να αποφευχθεί η επιλογή των ίδιων καταγραφών στα δυο στάδια μοντελοποίησης. Η απόδοση των μοντέλων αξιολογήθηκε με τη χρήση του στατιστικού ROC (Receiver-Operating Characteristic) AUC (Fielding and Bell, 1997) και του στατιστικού (TSS) (True Skill Statistic) (Allouche et al., 2006). Και οι δύο δείκτες υπολογίζονται από το ποσοστό της «ευαισθησίας» του μοντέλου (η ικανότητα να προβλέπει ορθά τις παρουσίες) και της «ειδίκευσης» (η ικανότητα να προβλέπει ορθά τις απουσίες). Το στατιστικό AUC είναι ακατάλληλο για χρήση σε περιοχές με περιορισμένη δειγματοληπτική

κάλυψη και με απουσία πραγματικών απουσιών ενώ ταυτόχρονα έχει επικριθεί για ανισορροπία ανάμεσα σε απουσίες και ψευδο-απουσίες σε μελέτες που χρησιμοποιούν αποκλειστικά δεδομένα παρουσίας (Pearson et al., 2007; van Proosdij et al., 2016). Η δειγματοληπτική προσπάθεια στην παρούσα μελέτη καλύπτει τον οικολογικό θώκο τόσο των σπάνιων όσο και των κοινών ειδών με δεδομένα παρουσιών και πραγματικών απουσιών καθιστώντας κατ' αυτό τον τρόπο τον δείκτη AUC ιδανικό για αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων. Ο δείκτης TSS αξιολογεί την απόδοση των μοντέλων με τιμές >0.4 να υποδεικνύουν αξιοπιστία των μοντέλων (Allouche et al., 2006). Η συνεισφορά των περιβαλλοντικών παραμέτρων στη διαδικασία μοντελοποίησης αξιολογήθηκε μέσω της μεθοδολογίας των Thuiller et al. (2009) κατά την οποία λαμβάνει χώρα συσχέτιση ανάμεσα στις τιμές του μοντέλου και τις εκάστοτε περιβαλλοντικές μεταβλητές μέσω μιας τυχαίας διαδικασίας. Το τελικό σύμπλεγμα μοντέλων βασίζεται στην ενσωμάτωση των πιο αξιόπιστων μοντέλων για τους δείκτες AUC και TSS ($TSS > 0.65$, $AUC > 0.8$) κατά το μέσο όρο (weighted averaging). Με αυτό τον τρόπο μόνο μοντέλα υψηλής ποιότητας συμπεριλαμβάνονται στην τελική απεικόνιση. Όλες οι αναλύσεις έγιναν στο περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού R (R Development Core Team, 2019) με τη χρήση του πακέτου sdm (Naimi and Araújo, 2016).

3.3 Αποτελέσματα

3.3.1 Ανάλυση ειδών-δεικτών (indicator species analysis)

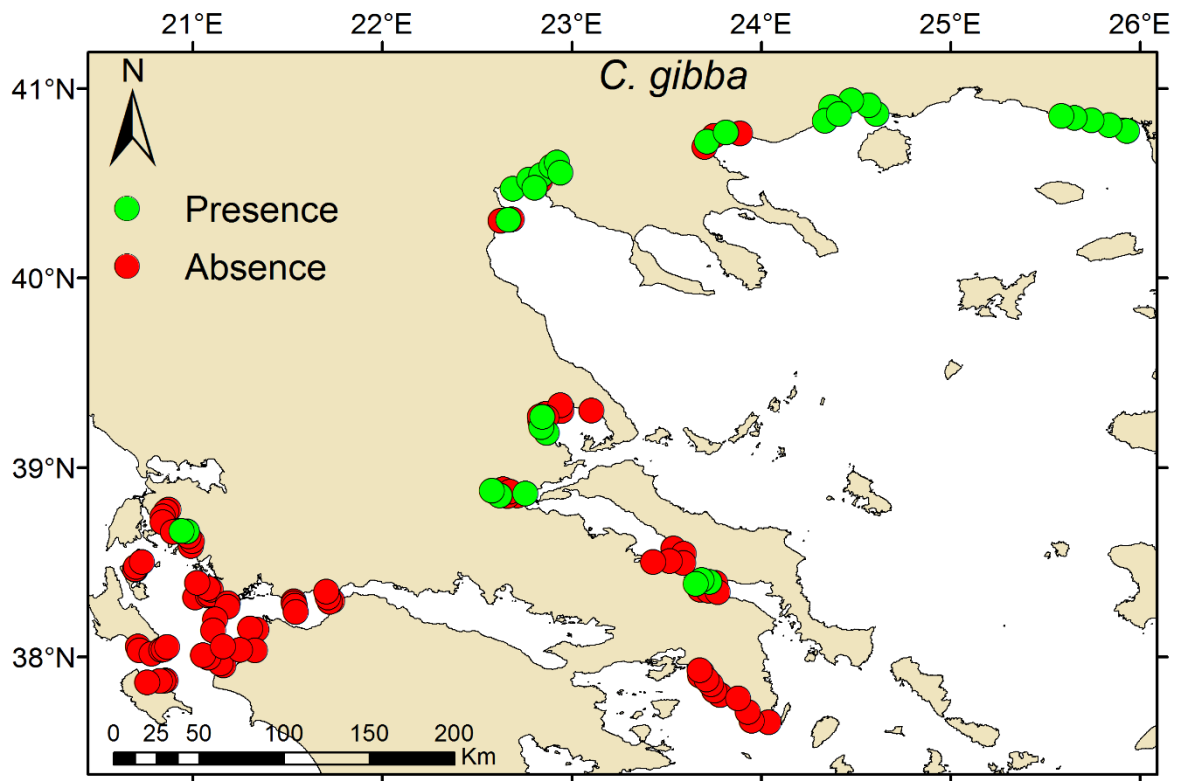
Συνολικά, 73 από τους 123 σταθμούς αξιολογήθηκαν με «μη αποδεκτή» (unacceptable) οικολογική κατάσταση με βάση τα επίπεδα ευτροφισμού στη στήλη. Οι

υπόλοιποι 50 σταθμοί αξιολογήθηκαν με «αποδεκτή» (acceptable) οικολογική κατάσταση (Εικόνα 3.1). Η ανάλυση ειδών-δεικτών σε αυτές τις δύο ομάδες σταθμών κατέγραψε ένα κατάλογο ειδών που χαρακτηρίζουν αυτά τα ενδιαίτηματα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2, τα αντιπροσωπευτικά είδη από την ομάδα με «αποδεκτή» κατάσταση χαρακτηρίζονται από κοινά λειτουργικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, όλα τα είδη είναι επιπανιδικοί διηθηματοφάγοι οργανισμοί που είναι ευαίσθητοι στην περιβαλλοντική διατάραξη. Το βενθικό δίθυρο *Flexorpecten hyalinus* (Poli, 1795) (Indicator value=0.36) υπερίσχυσε στην ανάλυση ως είδος που χαρακτηρίζει τους σταθμούς της ομάδας με «αποδεκτή» οικολογική κατάσταση (Εικόνα 3.5). Τα είδη που αντιπροσωπεύουν τους σταθμούς με «μη αποδεκτή» οικολογική κατάσταση χαρακτηρίζονται ως ευκαιριακά ή ανθεκτικά στην περιβαλλοντική διατάραξη όπου αναμένεται να έχουν μια επιτυχημένη προσαρμογή σε επιβαρυμένα ενδιαίτηματα. Το είδος *Corbula gibba* (Olivi, 1792) είναι ένα ευκαιριακό είδος που απαντάται συχνά σε επιβαρυμένα με οργανικούς ρύπους ενδιαίτηματα και στη συγκεκριμένη μελέτη είναι αντιπροσωπευτικό της ομάδας με «μη αποδεκτή» οικολογική κατάσταση που αποτελείται από ευτροφικούς σταθμούς (Εικόνα 3.5).

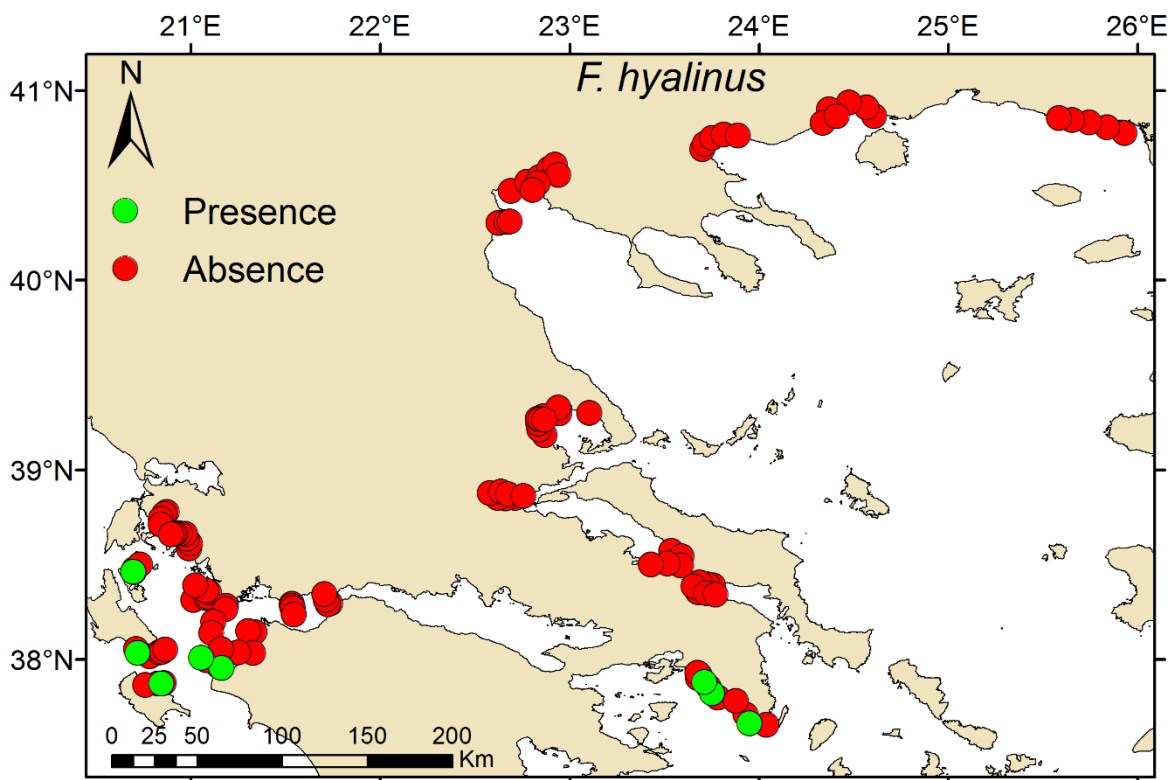


Εικόνα 3.5: Αριστερά – *Flexopecten hyalinus*, δεξιά – *Corbula gibba*. (Πηγή: World Register of Marine Species)

Οι δείκτες ειδικότητας και ευαισθησίας παρουσιάζουν επιπλέον πληροφορίες σχετικά με την ικανότητα των ειδών αυτών να χαρακτηρίζουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες των δύο ενδιαιτημάτων. Συγκεκριμένα, σχεδόν όλες οι καταγραφές του είδους *F. hyalinus* ανήκουν σε σταθμούς με «αποδεκτή» οικολογική κατάσταση (specificity=0.9), όμως το είδος δεν παρουσιάζεται σε όλους τους σταθμούς που ανήκουν στην ομάδα αυτή (sensitivity=0.14). Το είδος *C. gibba* εμφανίζεται σχεδόν σε όλους τους σταθμούς που χαρακτηρίζονται από περιβαλλοντική διατάραξη (specificity=0.9) ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει μεγαλύτερη ταύτιση με τη συγκεκριμένη ομάδα σταθμών σε σχέση με το *F. hyalinus* με καταγραφές σχεδόν στους μισούς σταθμούς που χαρακτηρίστηκαν με «μη αποδεκτή» οικολογική κατάσταση ευτροφισμού (sensitivity=0.42) (Εικόνες 3.6-3.7). Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, τα βενθικά είδη *C. gibba* και *F. hyalinus* αποτελούν είδη υψηλής οικολογικής σημασίας και επιλέχθηκαν για ενσωμάτωση σε μοντέλα πρόβλεψης κατανομής ειδών.



Εικόνα 3.6: Κατανομή του είδους *Corbula gibba*.



Εικόνα 3.7: Κατανομή του είδους *Flexopecten hyalinus*.

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα Indicator Species Analysis για τις δύο ομάδες σταθμών με βάση τη συγκέντρωση χλωροφύλλης – α. Ορισμός SF: Suspension Feeder.

	Diet	Behavior	Bentix	Specificity	Sensitivity	Indicator Value	p.value
Group: ACCEPTABLE							
<i>Flexopecten hyalinus</i>	SF	Epifauna	Sensitive	0.90	0.14	0.36	0.007
<i>Limatula subauriculata</i>	SF	Epifauna	Sensitive	1.00	0.08	0.28	0.003
Group: UNACCEPTABLE							
<i>Corbula gibba</i>	SF	Burrower	Opportunistic	0.94	0.42	0.63	0.001
<i>Kurtiella bidentata</i>	SF	Epifauna	Tolerant	0.91	0.43	0.63	0.001
<i>Abra prismatica</i>	DF	Burrower	Tolerant	0.91	0.35	0.57	0.002

3.3.2. Modelling

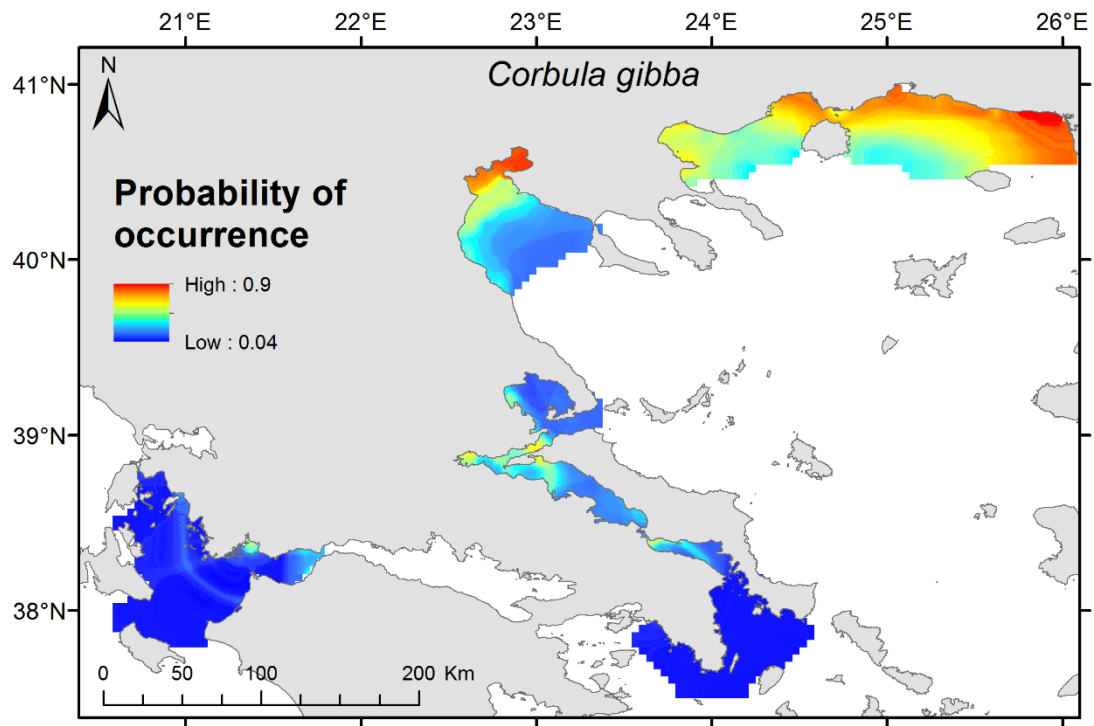
Τα επιμέρους μοντέλα για κάθε είδος κτίστηκαν με 100% επιτυχία. Οι δείκτες που περιγράφουν την απόδοση των μοντέλων κατέγραψαν τιμές εντός των αποδεκτών ορίων που περιγράφονται στα Υλικά και Μέθοδοι ($AUC \geq 0.8$, $TSS \geq 0.65$) (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.3: Συνεισφορά των περιβαλλοντικών μεταβλητών στην κατανομή των ειδών και αξιολόγηση των μοντέλων κατανομής με βάση τους δείκτες AUC και TSS.

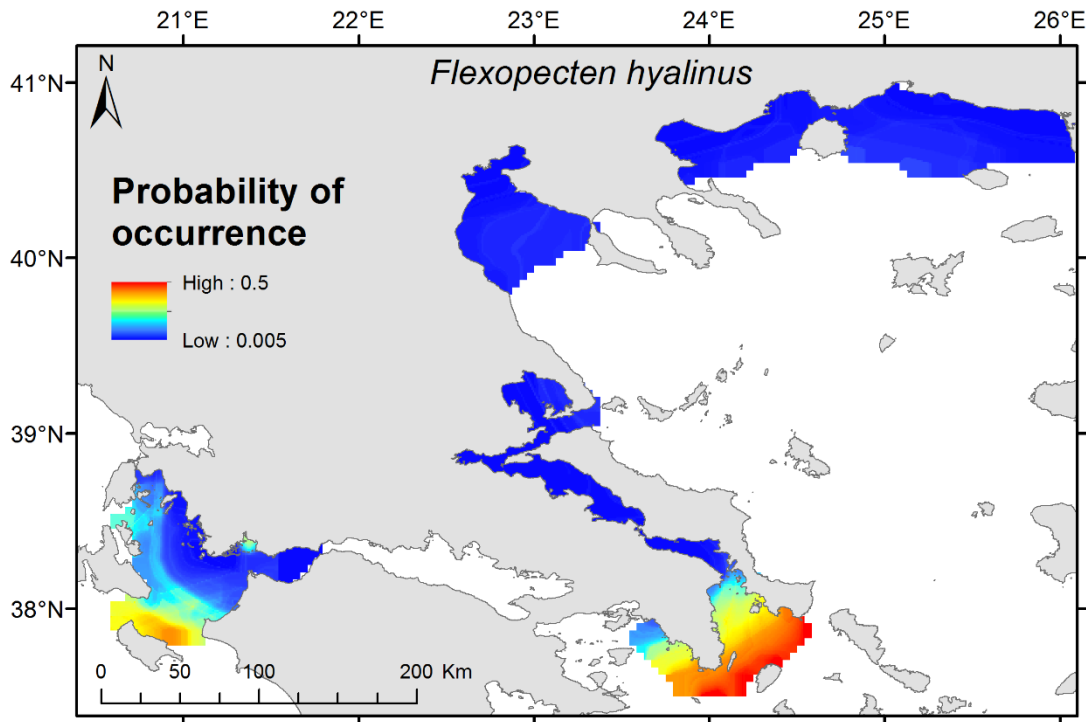
Model	Species	Predictor importance			Evaluation measures	
		lgchlomean	sbt	salinity	AUC	TSS
GLM	<i>G. gibba</i>	0.622	0.029	0.228	0.87	0.70
	<i>F. hyalinus</i>	0.392	0.295	0.744	0.89	0.81
GAM	<i>C. gibba</i>	0.472	0.344	0.509	0.9	0.73
	<i>F. hyalinus</i>	0.437	0.478	0.646	0.88	0.81
BRT	<i>C. gibba</i>	0.322	0.000	0.412	0.87	0.67
	<i>F. hyalinus</i>	0.113	0.168	0.458	0.89	0.79
RF	<i>C. gibba</i>	0.343	0.088	0.317	0.87	0.68
	<i>F. hyalinus</i>	0.223	0.178	0.319	0.81	0.72

Γενικά, η αλατότητα και η συγκέντρωση χλωροφύλλης – a αποτέλεσαν τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή των δύο ειδών σε Ιόνιο και Αιγαίο πέλαγος. Η συγκέντρωση χλωροφύλλης - a ήταν ο πιο σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την κατανομή του είδους *C. gibba* ακολουθούμενος από την αλατότητα και τη θερμοκρασία. Η κατανομή του *F. hyalinus* καθορίζεται κυρίως από την αλατότητα. Οι χάρτες κατανομής των δύο ειδών όπως προκύπτουν από τα μοντέλα παρουσίασαν αντίθετα πρότυπα. Το μοντέλο για το είδος *C. gibba* επιτυχώς προβλέπει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης του είδους σε σχετικά ευτροφικές περιοχές επιβεβαιώνοντας την συμπεριφορά του είδους ως δείκτη περιβαλλοντικά διαταραγμένων περιοχών. Από τα αποτελέσματα της Εικόνας 3.8 το μοντέλο προβλέπει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης του είδους στο Βόρειο Αιγαίο και σταδιακή

μείωση της πιθανότητας αυτής από Βορά προς Νότο. Στις νότιες περιοχές της μελέτης το είδος περιορίζεται σε κλειστούς κόλπους που καταγράφουν παράλληλα υψηλά ποσοστά συγκέντρωσης χλωροφύλλης – α. Στο Ιόνιο πέλαγος το είδος αναμένεται να έχει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης κυρίως στον Πατραϊκό κόλπο. Τα αποτελέσματα του μοντέλου για το είδος *F. hyalinus* δείχνουν ότι η αναμενόμενη κατανομή του είδους είναι διάσπαρτη στο νότιο τμήμα του Αιγαίου και στο νησιωτικό σύμπλεγμα του Ιονίου πελάγους δείχνοντας κατ' αυτό τον τρόπο την προτίμηση του είδους σε περιοχές με χαμηλή πρωτογενή παραγωγικότητα (Εικόνα 3.9). Ο χάρτης καταλληλότητας ενδιαιτήματος για το είδος *C. gibba* όπως προέκυψε από το μοντέλο ταυτίζεται χωρικά με τη «μη αποδεκτή» οικολογική κατάσταση των περιοχών αυτών όσον αφορά τη κατάσταση του ευτροφισμού φανερώνοντας την άμεση σχέση του είδους με τη συγκέντρωση χλωροφύλλης – α. Ο χάρτης καταλληλότητας ενδιαιτήματος για το *F. hyalinus* δείχνει τη μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης του είδους σε περιβαλλοντικά αδιατάρακτες περιοχές (όσον αφορά τα επίπεδα ευτροφισμού) που χαρακτηρίζονται από υψηλή αλατότητα.



Εικόνα 3.8: Χάρτης πιθανών ενδιαιτημάτων για το είδος *Corbula gibba*.



Εικόνα 3.9: Χάρτης πιθανών ενδιαιτημάτων για το είδος *Flexopecten hyalinus*.

3.4 Συζήτηση

Η αρχική υπόθεση ότι η κατανομή των ειδών που σχετίζονται με περιβαλλοντικά διαταραγμένες περιοχές όσον αφορά τα επίπεδα ευτροφισμού καθορίζεται άμεσα από τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης – α επιβεβαιώθηκε. Στην παρούσα μελέτη, η παρουσία του μακροπανιδικού είδους *C. gibba* είχε άμεση σχέση με τα περιοχές που αξιολογήθηκαν με μέτρια, κακή ή φτωχή οικολογική κατάσταση όσον αφορά τα επίπεδα της συγκέντρωσης χλωροφύλλης – α όπου και ήταν ο καθοριστικότερος παράγοντας που επηρεάζει την κατανομή του είδους με βάση τα μοντέλα πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με την μελέτη των Rodil et al. (2014) όπου τονίζουν τη σημαντική συμβολή της συγκέντρωσης χλωροφύλλης – α ως του κυριότερου παράγοντα που καθορίζει τη κατανομή των διηθηματοφάγων βενθικών μαλακίων. Αυξημένη συγκέντρωση

χλωροφύλλης – α μεταφράζεται σε αφθονία πόρων για πρωτογενείς καταναλωτές όπως τα μαλάκια όπου και αποκρίνονται με αύξηση αφθονίας, βιομάζας και ικανότητας αφομοίωσης. Ωστόσο, οι επιπτώσεις από τον εμπλουτισμό με θρεπτικά σε μια περιοχή είναι αποτέλεσμα των θετικών και των αρνητικών επιπτώσεων στο οικοσύστημα και στα είδη που το απαρτίζουν (Carmichael et al., 2012). Συγκεκριμένα, τα διηθηματοφάγα είδη όπως το *C. gibba* και *F. hyalinus* όπου διηθούν φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν, φύκη και οργανικά σωματίδια αναμένεται να επηρεαστούν περισσότερο από άλλα είδη. Στην παρούσα μελέτη το *C. gibba* βρέθηκε να αποκρίνεται στον οργανικό εμπλουτισμό και στα υψηλά επίπεδα φυτοπλαγκτού με αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης του σε περιοχές με υψηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης α συμφωνώντας με τον Jensen, (1990).

Το είδος *C. gibba* θεωρείται είδος υψηλής οικολογικής σημασίας εξαιτίας της ευκαιριακής φύσης του και της ικανότητάς του να ευδοκίμει σε υδάτινα ενδιαιτήματα που χαρακτηρίζονται από έντονη περιβαλλοντική διατάραξη (Hrs-Brenko, 2006). Στην παρούσα μελέτη, η καταλληλότητα ενδιαιτήματος για το είδος, ήταν μεγάλη σε περιοχές με σχετικά αυξημένα - για τα δεδομένα του ελληνικού χώρου - επίπεδα ευτροφισμού (Εικόνα 3.8). Υδρογραφικές συνθήκες που χαρακτηρίζονται από περιορισμένους πόρους και θερμοκρασίες ≤ 12 °C, επηρεάζουν άμεσα τη φυσιολογία του είδους μέσω εκτεταμένης περιόδου ανάπτυξης που οδηγεί σε χαμηλή στρατολόγηση, λόγω θήρευσης κατά το στάδιο της προνύμφης καθώς επίσης και τερματισμό της ανάπτυξης στα ενήλικα άτομα (Hrs-Brenko, 2006). Η υψηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης α στις βόρειες περιοχές της μελέτης σε συνδυασμό με την ιδανική θερμοκρασία που προκαλεί ανάπτυξη του οστράκου και των ατόμων που βρίσκονται στο στάδιο της προνύμφης, δημιουργεί το ιδανικό ενδιαιτήμα για το είδος *C. gibba*. Η μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης του είδους στο βόρειο Αιγαίο πέλαγος ερμηνεύεται από τις υδρογραφικές συνθήκες που χαρακτηρίζουν την περιοχή αυτή. Η

αυξημένη πρωτογενής παραγωγή στο βόρειο Αιγαίο όπου και καταγράφηκε η μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης του είδους είναι – πέραν της ανθρωπογενούς προελεύσεως - και φυσικό αποτέλεσμα λόγω των εκβολικών εισροών από ένα έντονο δίκτυο ποταμών σε συνδυασμό με τις εισροές από τη Μαύρη θάλασσα μέσω των στενών των Δαρδανελίων όπου και χαρακτηρίζονται από πλούσια σε θρεπτικά υδάτινα μέτωπα (Giannakourou et al., 2014; Ignatiades, 2005; Primpas and Karydis, 2011). Όπως αρχικά αναμενόταν, λόγω του γεγονότος ότι το *C. gibba* αποτέλεσε είδος-δείκτη ευτροφικών περιοχών, στη συγκεκριμένη μελέτη, ο χάρτης καταλληλότητας ενδιαιτήματος όπως προέκυψε από τα μοντέλα για το είδος αντιπροσωπεύει το γεωγραφικό εύρος των σταθμών που χαρακτηρίστηκαν με υποβαθμισμένη οικολογική κατάσταση. Η επικράτηση του *C. gibba* έναντι άλλων μακροπανιδικών ειδών σε περιοχές με έντονο οργανικό εμπλουτισμό υποστηρίζεται από μια σειρά μελετών (Cavallini et al., 2005; Crema et al., 1991; Leshno et al., 2015; N'Siala et al., 2008; Solis-Weiss et al., 2004). Σε αυτό το πλαίσιο, συμπεραίνεται πως η απόκριση του είδους στον εμπλουτισμό με θρεπτικά και στη αυξημένη πρωτογενή παραγωγικότητα είναι προβλέψιμη, ένα χαρακτηριστικό το οποίο είναι απαραίτητο για ένα είδος-δείκτη. Επιπλέον, η κατανομή του είδους που εκτείνεται σχεδόν σε όλες τις κύριες θαλάσσιες περιοχές της Βόρειας Ευρώπης το καθιστούν κατάλληλο οικολογικό δείκτη ανεξάρτητο της παρούσας χωρικής κλίμακας. Αξίζει να σημειωθεί ότι το χαρακτηριστικό ασύμμετρο κέλυφός του το καθιστά ένα εύκολο προς αναγνώριση είδος. Η ταξινόμηση των μαλακίων αποτελεί μια πιο εύκολη διαδικασία σε σχέση με τις υπόλοιπες μακροπανιδικές ομάδες (Nerloni et al., 2011; Zenetos, 1996). Με βάση τα προαναφερθέντα, συμπεραίνεται πως η ενσωμάτωση αυτού του είδους ως δείκτη ευτροφισμού σε μοντέλα κατανομής ειδών είναι μια ακριβής και μειωμένης απαίτησης σε χρόνο προσέγγιση στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών αλλαγών θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

Η οικολογική σημασία του χτενιού *F. hyalinus* αναδεικνύεται μέσω αυτής της μελέτης. Σε αντίθεση με το *C. gibba* το οποίο χαρακτηρίζεται από μια ευρεία κατανομή στη μεσογειακή λεκάνη και σε όλα τα κύρια θαλάσσια τμήματα της Ευρώπης, η κατανομή του *F. hyalinus* περιορίζεται αποκλειστικά στη Μεσόγειο Θάλασσα. Τα σπάνια είδη που παρουσιάζουν περιορισμένη γεωγραφική κατανομή, αποτελούν ιδανικό υλικό για ενσωμάτωση σε μοντέλα κατανομής ειδών για τον λόγο ότι ενισχύεται σημαντικά η απόδοση των μοντέλων με την πλήρη κάλυψη του οικολογικού θώκου (Hernandez et al., 2006; van Proosdij et al., 2016). Επιπλέον, στις περιπτώσεις των σπάνιων ειδών, τα αποτελέσματα των μοντέλων είναι πιο πληροφοριακά καθώς παρουσιάζουν, με λεπτομερή ανάλυση στο χώρο, τις οικολογικές προτιμήσεις του εκάστοτε είδους. Η πιθανότητα εμφάνισης του είδους *F. hyalinus* ήταν αυξημένη στο νότιο Αιγαίο πέλαγος και στο νησιωτικό τμήμα του Ιονίου πελάγους (Εικόνα 3.9) ένα πρότυπο αντίθετο με αυτό που παρουσιάζει το είδος *C. gibba*. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα καθώς το *F. hyalinus* αποτελεί είδος-δείκτη της «αποδεκτής» οικολογικής κατάστασης όσον αφορά τη συγκέντρωση χλωροφύλλης – α, επομένως η προβλεπόμενη κατανομή συμβαδίζει με το χωρικό πρότυπο αυτών των περιοχών. Στην περίπτωση του είδους *F. hyalinus* η αλατότητα είχε τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην απόδοση των μοντέλων και κατ' επέκταση στην κατανομή του είδους συμφωνώντας με προηγούμενες μελέτες ενσωμάτωσης βενθικών ειδών σε μοντέλα κατανομής (Darr et al., 2014; Gogina and Zettler, 2010b). Οι επιπτώσεις της αλατότητας στις βενθικές συναθροίσεις σχολιάστηκαν από προηγούμενες μελέτες όπου και αναδείχθηκε το γεγονός ότι η ποικιλότητα ειδών και η αφθονία των ατόμων επηρεάζονται άμεσα από αυτό τον παράγοντα (Lucena-Moya et al., 2009; Sangiorgio et al., 2014; Whitfield et al., 2012). Τα είδη του γένους *Flexorecten* συγκεκριμένα, επηρεάζονται από υποοσμωτική καταπόνηση καθώς οι συνθήκες χαμηλής αλατότητας επηρεάζουν την σύνθεση των βραγχίων και του

μανδύα (Telahigue et al., 2010). Στη συγκεκριμένη μελέτη η κατανομή του *F. hyalinus* επηρεάζεται από τη χωρική μεταβλητότητα της αλατότητας εξαιτίας των έντονα διαμορφωμένων περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων στο Αιγαίο πέλαγος (από Βορά προς Νότο) ως αποτέλεσμα της εισροής υδάτων από τη Μαύρη Θάλασσα μέσω των στενών των Δαρδανελίων. Σε θαλάσσιες περιοχές με ελάχιστες μεταβολές στην αλατότητα οι βενθικές κοινότητες απαρτίζονται κατά κύριο λόγο από είδη που κατατάσσονται ως «ευαίσθητα» στην περιβαλλοντική διατάραξη. Στις περιοχές του Ιονίου και του κεντρικού-νότιου Αιγαίου, τα ποσοστά αλατότητας παραμένουν σχετικά σταθερά σε σχέση με το βόρειο Αιγαίο εξαιτίας των υδάτινων μετώπων που διαμορφώνουν τις υδρογραφικές συνθήκες στις περιοχές αυτές. Η περιοχή του νότιου-κεντρικού Αιγαίου επηρεάζεται από το υδάτινο επιφανειακό μέτωπο Λεβαντίνης (Levantine surface water mass) που είναι αποτέλεσμα της έντονης εξάτμισης στην περιοχή της Λεβαντίνης και χαρακτηρίζεται από υψηλή αλατότητα έως και 39.20 psu (Velaoras et al., 2013). Επιπλέον, το υδάτινο μέτωπο του Ατλαντικού ωκεανού (Atlantic water mass) που εισέρχεται στη λεκάνη της Μεσογείου από τα στενά του Γιβραλτάρ, εμπλουτίζει κατά την επιστροφή του, το Ιόνιο πέλαγος και το νότιο Αιγαίο πέλαγος με υψηλά ποσοστά αλατότητας (Ciappa, 2014). Τέλος, το ενδιάμεσο υδάτινο στρώμα με προέλευση από τη Λεβαντίνη (Levantine intermediate water mass) το οποίο αποτελεί το τελικό προϊόν από τις αλληλεπιδράσεις αέρα-θάλασσας σε όλη την λεκάνη της Μεσογείου κατά τους χειμερινούς μήνες, είναι η τελική υδάτινη μάζα που συμβάλει στη διατήρηση των υψηλών ποσοστών αλατότητας σε αυτές τις περιοχές σε βάθος έως και 500 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας (Menna and Roulain, 2009). Επομένως, οι περιοχές αυτές ευνοούν την αποίκηση από το είδος *F. hyalinus* εξαιτίας των σταθερών ποσοστών αλατότητας που διατηρούνται σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Το είδος *F. hyalinus* ευδοκιμεί σε ενδιαιτήματα που χαρακτηρίζονται από σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες συμφωνώντας με προηγούμενη μελέτη με τους Çinar et al. (2015) που χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο είδος ως ευαίσθητο στις περιβαλλοντικές αλλαγές. Παρά το γεγονός ότι το *F. hyalinus* αποτελεί είδος-δείκτη θαλάσσιων περιοχών με χαμηλά επίπεδα ευτροφισμού, η χαμηλή του συσχέτιση με αυτού του τύπου ενδιαιτήματα σε σύγκριση με το *C. gibba* επιβεβαιώνει το συμπέρασμα ότι η πανιδική σύσταση περιβαλλοντικά αδιατάρακτων περιοχών είναι σύνθετη και καθορίζεται από μια πληθώρα περιβαλλοντικών παραμέτρων όπως αναλύθηκε εκτεταμένα στο κεφάλαιο 2. Στη συγκεκριμένη μελέτη δεν αναμενόταν η συγκέντρωση της χλωροφύλλης – *a* να αποτελεί τον κύριο παράγοντα που καθορίζει τη σύσταση των βενθικών κοινοτήτων στις περιβαλλοντικά αδιατάρακτες περιοχές κάτι που επιβεβαιώνεται από την απόκριση του *F. hyalinus* στην αύξηση της συγκέντρωσης χλωροφύλλης – *a* η οποία δεν ήταν τόσο έντονη όσο του *C. gibba* με βάση τα μοντέλα που εκτιμήθηκαν. Τα είδη-δείκτες που χαρακτηρίζουν περιβαλλοντικά αδιατάρακτες περιοχές αναμένεται να διαφέρουν για κάθε θαλάσσια περιοχή επομένως συνιστάται ο προσδιορισμός των ειδών δεικτών ανά περιοχή μελέτης. Στην παρούσα μελέτη, το ενδιαιτήμα του *F. hyalinus* όπως αυτό προκύπτει από τα μοντέλα πρόβλεψης κατανομής συμβαδίζει χωρικά με τις περιοχές που χαρακτηρίζονται με «αποδεκτή» οικολογική κατάσταση όσον αφορά τα επίπεδα ευτροφισμού. Μέσω αυτής της μελέτης προτείνουμε την ενσωμάτωση του είδους σε μοντέλα κατανομής ειδών ως δείκτη περιβαλλοντικής σταθερότητας για την περιοχή της Μεσογείου. Επίσης, λόγω της υψηλής συσχέτισης με την αλατότητα υποθέτουμε ότι η χρήση του είδους ως δείκτη παρακολούθησης μεταβολών της αλατότητας σε μια περιοχή, είναι επίσης αποδεκτή.

3.5 Συμπεράσματα

Οι χάρτες κατανομής των δυο ειδών όπως προκύπτουν από τα μοντέλα συμβαδίζουν με τη οικολογική κατάσταση των θαλάσσιων περιοχών όσον αφορά τα επίπεδα ευτροφισμού. Προτείνουμε τη χρήση του δίθυρου *C. gibba* ως δείκτη ευτροφισμού και σαν βιοτικό εργαλείο παρακολούθησης της οικολογικής κατάστασης εξαιτίας της προβλεψιμότητας της απόκρισης του είδους σε αυτό τον παράγοντα καταπόνησης και της εύκολης αναγνώρισης του. Η μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης του είδους *C. gibba* σε περιβαλλοντικά διαταραγμένες περιοχές όσον αφορά τα επίπεδα ευτροφισμού οφείλεται στη μεγάλη συγκέντρωση χλωροφύλλης – *a*. Αντιθέτως, σε περιβαλλοντικά αδιατάραχτες περιοχές οι βενθικές κοινότητες απαρτίζονται από σύνθετη λειτουργική και βιολογική ποικιλότητα. Στην παρούσα μελέτη το *F. hyalinus* αποτέλεσε το είδος-δείκτη αυτών των ενδιαιτημάτων λόγω των σταθερών επιπέδων αλατότητας.

Η παρακολούθηση της οικολογικής κατάσταση των βενθικών ενδιαιτημάτων μέσω των κατανομών των μακροβενθικών ασπόνδυλων ως βιοτικά εργαλεία αποτελεί μια χρονοβόρα και με μεγάλο κόστος διαδικασία που απαιτεί επαρκή γνώση ταξινομικής. Η μεθοδολογία που προτείνεται στη συγκεκριμένη μελέτη στοχεύει να λύσει τα προαναφερθέντα εμπόδια μέσω τριών σταδίων: 1) Τη χρήση δεδομένων παρουσίας/απουσίας ειδών έναντι δεδομένων αφθονίας. Αυτό το στάδιο έχει ως στόχο να μειώσει το χρόνο διαλογής των ειδών. 2) Τη μελέτη συγκεκριμένων ειδών έναντι της μελέτης ολόκληρης της κοινότητας. Το στάδιο αυτό έχει σαν στόχο την ενσωμάτωση ειδών που δεν απαιτούν εξεζητημένη γνώση ταξινομικής σε μελέτες αξιολόγησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Και 3) τη χρήση περιβαλλοντικών δεδομένων που είναι άμεσα διαθέσιμα από

παγκόσμιες διαδικτυακές βάσεις. Αυτό το στάδιο αποτελεί τη λύση με το λιγότερο κόστος όσον αφορά τη συλλογή των περιβαλλοντικών δεδομένων.

Πιστεύουμε ότι η χρήση βενθικών ειδών-δεικτών και περιβαλλοντικών δεδομένων από παγκόσμιες βάσεις στη χρήση μοντέλων πρόβλεψης κατανομής ειδών αποτελεί μια καινοτόμο και αποτελεσματική προσέγγιση στην αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης θαλάσσιων ενδιαιτημάτων.

Κεφάλαιο 4. Αξιολόγηση πιθανών επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής στην κατανομή θαλάσσιων βενθικών ειδών στην Ανατολική Μεσόγειο²

4.1 Εισαγωγή

Η Μεσόγειος Θάλασσα χαρακτηρίζεται ως «θερμό σημείο» (hot spot) όσον αφορά τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Giorgi, 2006) και αναμένεται να αποκριθεί πιο γρήγορα στην περιβαλλοντική πίεση σε σχέση με την ανοικτή θάλασσα εξαιτίας των υδρογραφικών της χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα, η γεωγραφική θέση της Μεσογείου ανάμεσα σε δύο διαφορετικές κλιματικά περιοχές (το ξηρό κλίμα της βόρειας Αφρικής και το εύκρατο κλίμα της κεντρικής Ευρώπης) σε συνδυασμό με την περιορισμένη ανταλλαγή υδάτων με τον Ατλαντικό ωκεανό καθιστούν την περιοχή πιο ευάλωτη σε κλιματικές αλλαγές (Marbà et al., 2015). Πρόσφατες μελέτες συμπεραίνουν ότι η Μεσόγειος Θάλασσα θα μετατραπεί σε πιο θερμή και υψηλότερης αλατότητας θαλάσσια λεκάνη με άγνωστες επιπτώσεις στην πρωτογενή παραγωγικότητα (Macias et al., 2015; Piroddi et al., 2017). Ωστόσο, εξαιτίας της γεωγραφικής θέσης, του πολύπλοκου ανάγλυφου και της ημίκλειστης φύσης, η Μεσόγειος Θάλασσα χαρακτηρίζεται από διαφορετικές φυσικοχημικές διαδικασίες και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αναμένεται να διαφέρουν κατά μήκος της λεκάνης. Οι περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις από ανατολικά προς δυτικά και από βορρά προς νότο εξαιτίας των εισροών ποταμών εντείνουν την πολυπλοκότητα των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών

² Δεδομένα από την ενότητα αυτή έχουν χρησιμοποιηθεί στην εργασία:

Moraitis ML, Valavanis VD, Karakassis I (2019) Assessing the effects of climate change on the distribution of benthic indicator species in the Eastern Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment* **667**:16-24. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.338

της Μεσογείου (Basterretxea et al., 2018). Η κύρια πρόκληση στην αξιολόγηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής είναι το γεγονός ότι οι επιπτώσεις αναμένεται να διαφέρουν ανά κύρια περιοχή (Lejeusne et al., 2010). Κατά τους Spalding et al. (2007) η Μεσόγειος Θάλασσα διαχωρίζεται σε περαιτέρω υπο-περιοχές δύο εκ των οποίων είναι το Αιγαίο και το Ιόνιο πέλαγος. Το Αιγαίο πέλαγος χαρακτηρίζεται από περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις θερμοκρασίας, αλατότητας και πρωτογενούς παραγωγικότητας εξαιτίας της γεωγραφικής θέσης ανάμεσα στη Μαύρη Θάλασσα και στη θάλασσα της Λεβαντίνης (Giannakourou et al., 2014). Το Ιόνιο πέλαγος εξαιτίας των υδάτινων μετώπων που το χαρακτηρίζουν παρουσιάζει ένα διαφορετικό υδρογραφικό πρότυπο σε σχέση με το Αιγαίο πέλαγος (Menna and Roulain, 2009). Παρά το γεγονός ότι οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους θαλάσσιους οργανισμούς της Μεσογείου έχουν παρατηρηθεί (Lejeusne et al., 2010), εντούτοις, υπάρχει κενό γνώσης όσον αφορά την πρόβλεψη των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην κατανομή των θαλάσσιων ειδών σε τόσο δυναμικές περιοχές.

Τα μακροπανιδικά ασπόνδυλα είδη του μαλακού υποστρώματος χρησιμοποιούνται εκτεταμένα ως βιοτικά εργαλεία για αξιολόγηση της κατάστασης των Μεσογειακών βενθικών ενδιαιτημάτων υπό διάφορες περιβαλλοντικές πιέσεις. (Dauvin et al., 2017; de-la-Ossa-Carretero et al., 2012; Moraitis et al., 2013). Η σχετικά περιορισμένη δυνατότητα μετακίνησης τους είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά που καθιστά τα μακροπανιδικά είδη ιδανικούς δείκτες για παρακολούθηση περιβαλλοντικών υποβαθμισμένων ενδιαιτημάτων (Sánchez-Moyano et al., 2017). Το φύλο των Μαλακίων (Phylum: Mollusca) συγκεκριμένα, αποτελεί την ομάδα ειδών με τον μεγαλύτερο περιορισμό στην μετακίνηση καθώς επίσης και με το μεγαλύτερο εύρος ανοχής σε σχέση με τις υπόλοιπες μακροπανιδικές ομάδες (Nerlović et al., 2011; Pearson and Rosenberg, 1978) επομένως αποτελούν ιδανικό βιοτικό υλικό για αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης θαλάσσιων περιοχών (Moraitis et

al., 2018). Οι πιο σχετικοί βενθικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται στην μελέτη της οικοσυστημικής κατάστασης σε ένα θαλάσσιο ενδιαίτημα κατατάσσουν τα μακροβενθικά είδη σε ομάδες ανάλογα με την ευαισθησία ή την ανοχή τους σε ένα συγκεκριμένο περιβαλλοντικό παράγοντα κυρίως οργανικό εμπλουτισμό και κατ' επέκταση χαμηλό οξειδοαναγωγικό δυναμικό και υποξία (Borja et al., 2000; Dauvin and Ruellet, 2007; Rosenberg et al., 2004; Simboura and Zenetos, 2002). Επομένως, αναμένεται ότι τα είδη που ανήκουν στην ίδια οικολογική ομάδα θα αποκρίνονται κατά τον ίδιο τρόπο σε περιβαλλοντικά διαταραγμένα ενδιαίτηματα. Αυτή η υπόθεση έχει αποδειχθεί σε περιπτώσεις οργανικής ρύπανσης (Dauvin and Ruellet, 2007). Ωστόσο, είναι ασαφές πως τα είδη αυτά αποκρίνονται σε διαφορετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Τα μοντέλα κατανομής ειδών αποτελούν ιδανικά εργαλεία πρόβλεψης των επιπτώσεων των διάφορων σεναρίων κλιματικής αλλαγής στη κατανομή των ειδών. Η ενσωμάτωση των βενθικών ειδών σε μοντέλα πρόβλεψης κατανομής για αξιολόγηση των επιπτώσεων διαφορετικών σεναρίων κλιματικής αλλαγής επικεντρώνεται στη μελέτη βιολογικών εισβολών (Jones et al., 2013; Raybaud et al., 2014; Sarà et al., 2018), είδη κοινωνικο-οικονομικού ενδιαφέροντος (Appelqvist et al., 2015; Russell et al., 2012), υψηλής οικολογικής σημασίας (σημαντικός ρόλος στην οικοσυστημική λειτουργία) (Gormley et al., 2013) ή ένα συνδυασμό των προαναφερθεισών κατηγοριών (Saeedi et al., 2016; Saure et al., 2014). Μέχρι σήμερα, οι μελέτες που αφορούν την κατανομή των βενθικών ειδών υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής είναι σπάνιες (Sarà et al., 2018) και όχι υπό την σκοπιά της επανεξέτασης των βασικών αρχών της βενθικής οικολογίας που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα για εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την οικολογική κατάσταση των θαλάσσιων ενδιαιτημάτων.

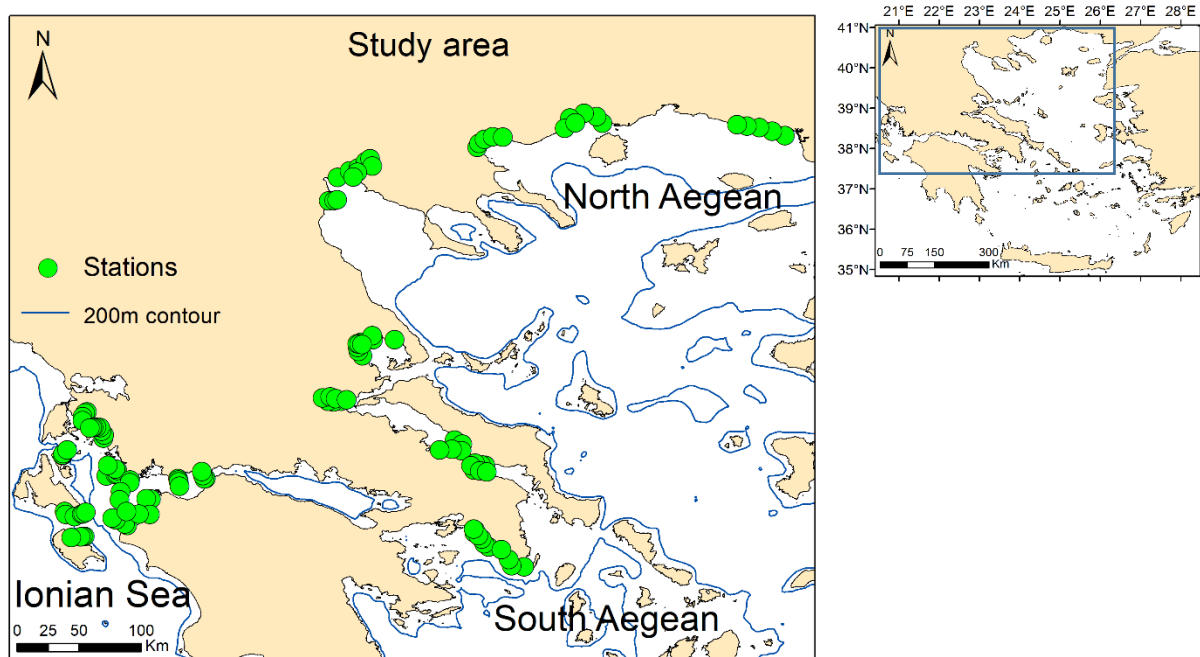
Οι στόχοι της συγκεκριμένης μελέτης ήταν: i) πρόβλεψη των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής του σεναρίου RCP8.5 (δυσμενέστερο σενάριο που προβλέπει συνεχόμενη αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου) στη κατανομή των βενθικών μαλακίων που χρησιμοποιούνται για μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων για το έτος 2100, ii) αξιολόγηση της σχετικότητας της παρούσας οικολογικής κατάταξής τους με βάση τις αρχές της βενθικής οικολογίας όσον αφορά την απόκριση τους στην κλιματική αλλαγή και iii) μελέτη των χαρακτηριστικών που καθορίζουν την ανθεκτικότητα ή ευαισθησία των βενθικών ειδών στην κλιματική αλλαγή. Υποθέτουμε ότι τα είδη που χαρακτηρίζουν συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες θα αποκρίνονται στην κλιματική αλλαγή ανάλογα με τις οικολογικές τους προτιμήσεις ασχέτως με την παρούσα οικολογική τους ομάδα (ευαίσθητα ή ανθεκτικά). Μέχρι σήμερα, καμία μελέτη δεν ανέδειξε τις πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη κατανομή των βενθικών ειδών που χρησιμοποιούνται για εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την οικολογική κατάσταση των θαλάσσιων ενδιαιτημάτων με τη χρήση μοντέλων κατανομής ειδών.

4.2 Υλικά και Μέθοδοι

4.2.1 Σχεδιασμός δειγματοληψίας

Ο σκοπός του σχεδιασμού της παρούσας μελέτης ήταν να συμπεριλάβει τις κύριες περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις του Αιγαίου πελάγους (θερμοκρασία, αλατότητα και συγκέντρωση χλωροφύλλης – α) με σκοπό να ενσωματωθεί όλο το οικολογικό εύρος των βενθικών ειδών που χαρακτηρίζουν την περιοχή. Επίσης στη μελέτη συμπεριλήφθηκαν και σταθμοί από το Ιόνιο πέλαγος (Εικόνα 4.1), μια θαλάσσια περιοχή που χαρακτηρίζεται από

σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ο σχεδιασμός βασίζεται στη μελέτη των Moraitis et al. (2018) και επιτρέπει την ολοκληρωμένη μελέτη των βενθικών ειδών που υπόκεινται σε ένα συγκεκριμένο παράγοντα καταπόνησης, στη συγκεκριμένη περίπτωση την κλιματική αλλαγή.

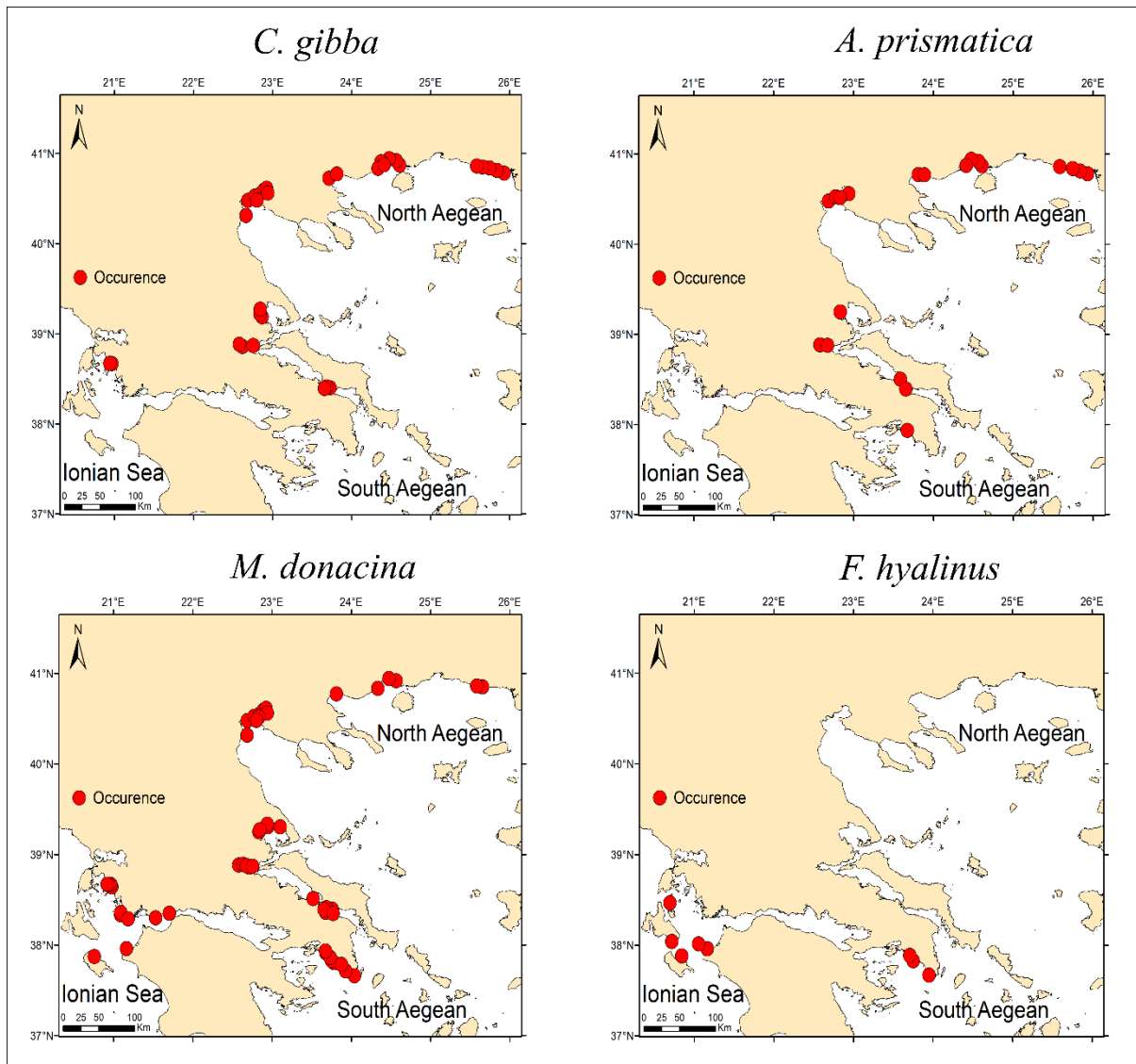


Εικόνα 4.1: Σταθμοί δειγματοληψίας σε Αιγαίο και Ιόνιο πέλαγος.

Συνολικά, 123 σταθμοί επιλέχθηκαν για συλλογή δειγμάτων μακροπανίδας μαλακού υποστρώματος από το Αιγαίο και το Ιόνιο πέλαγος (Εικόνα 4.1). Λεπτομέρειες για τον τρόπο δειγματοληψίας, συντήρησης και ανάλυσης των δειγμάτων παρατίθενται στην Ενότητα 3.2.2. Η εγκυρότητα της ονοματολογίας των ειδών ελέγχθηκε μέσω της ιστοσελίδας World Register of Marine Species (WoRMS Editorial Board, 2018). Επιπλέον, η οικολογική κατάσταση

(ευαίσθητα ή ανθεκτικά) όλων των ειδών προσδιορίστηκε μέσω του βιοτικού δείκτη BENTIX (Simboura and Zenetos, 2002).

Στη συγκεκριμένη μελέτη οι πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην κατανομή των βενθικών οργανισμών αξιολογήθηκαν με την χρήση βενθικών μαλακίων. Ο σκοπός ήταν να συμπεριληφθούν είδη ευαίσθητα και ανθεκτικά στην περιβαλλοντική διατάραξη που αντιπροσωπεύουν διαταραγμένα και αδιατάρακτα ενδιαιτήματα αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τα είδη: *Corbula gibba* (Olivi, 1792) και *Abra prismatica* (Montagu, 1808) ως αντιπρόσωποι των ανθεκτικών ειδών και τα είδη: *Moerella donacina* (Linnaeus, 1758) και *Flexopecten hyalinus* (Poli, 1795) ως αντιπρόσωποι των ευαίσθητων ειδών (Εικόνα 4.2). Τα είδη αυτά χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στην αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο θαλάσσιο περιβάλλον του ελληνικού χώρου.



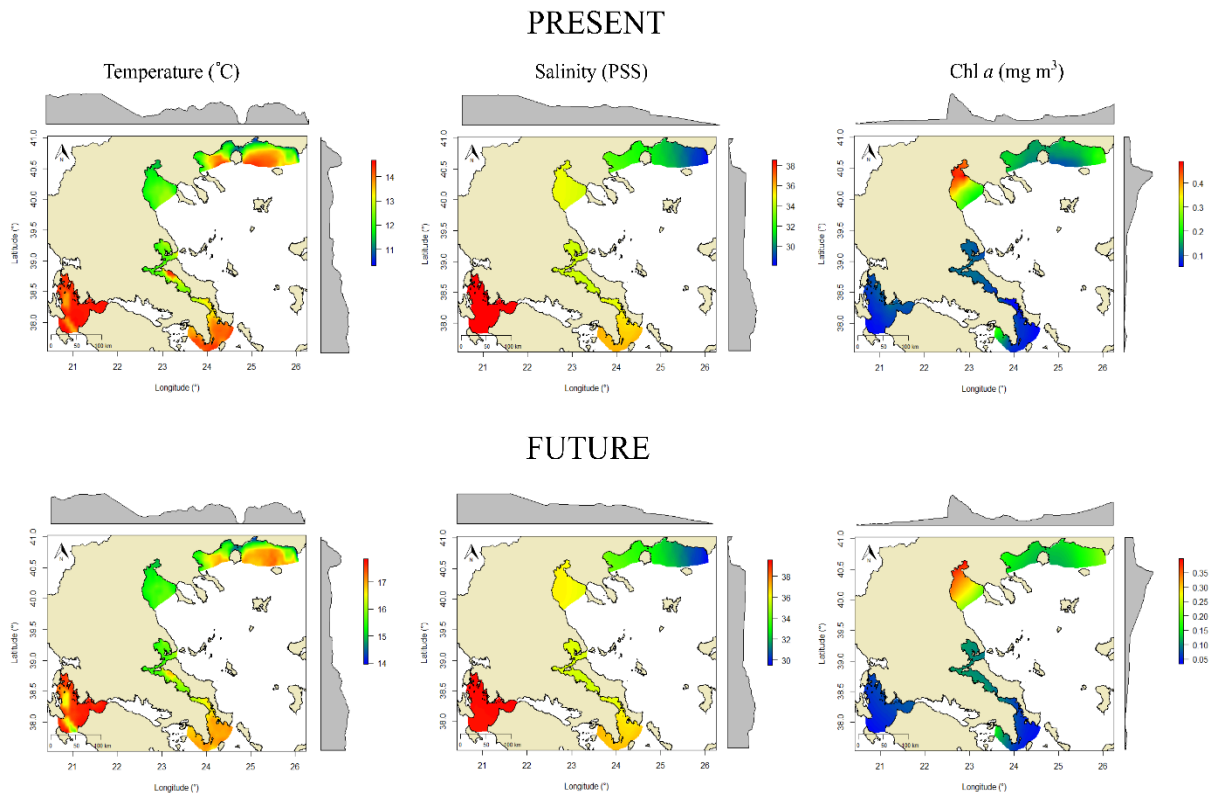
Εικόνα 4.2: Καταγραφές των ειδών *Corbula gibba*, *Abra prismatica*, *Moerella donacina*, *Flexopecten hyalinus* στον θαλάσσιο ελληνικό χώρο.

4.2.2 Κλιματικά δεδομένα

Κλιματικά δεδομένα εκτεταμένης χωρικής κλίμακας επιλέχθηκαν για ενσωμάτωση σε μοντέλα πρόβλεψης κατανομής ειδών για πρόβλεψη της παρούσας και της μελλοντικής κατανομής με βάση το σενάριο RCP 8.5 στο Αιγαίο και Ιόνιο πέλαγος. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία η αλατότητα και η πρωτογενής παραγωγικότητα αποτελούν τις πιο χρήσιμες περιβαλλοντικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται σε μοντέλα πρόβλεψης κατανομής

(Reiss et al., 2015) επομένως επιλέχθηκαν και για τη συγκεκριμένη μελέτη. Η ενσωμάτωση βιολογικά σημαντικών περιβαλλοντικών παραμέτρων συμβάλει ουσιαστικά στην απόδοση και στην αξιοπιστία των μοντέλων (Kotta et al., 2014). Παρά το γεγονός ότι το βάθος και το υπόστρωμα θεωρούνται σημαντικά συστατικά του βενθικού οικοσυστήματος, εντούτοις πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή σε μοντέλα πρόβλεψης κατανομής: το πρώτο εξαιτίας της συγγραμικότητας με άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες (Reiss et al., 2015) και το δεύτερο εξαιτίας της περιορισμένης διαθεσιμότητας δεδομένων σε εκτεταμένη χωρική κλίμακα (Goldsmit et al., 2018; Saupe et al., 2014; Townhill et al., 2017). Αρχικά, επιφανειακά και βενθικά δεδομένα ελέγχθηκαν για συγγραμικότητα μέσω του δείκτη VIF (Variance Inflation Factor, cut-off threshold=5), μέσω μιας σταδιακής διαδικασίας ελέγχου και αποκλεισμού συγγραμικών περιβαλλοντικών παραμέτρων. Ο έλεγχος συσχέτισης Pearson (threshold>0.5) επίσης χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη. Τα περιβαλλοντικά δεδομένα για τις σημερινές και τις μελλοντικές περιβαλλοντικές συνθήκες συλλέχθηκαν από την παγκόσμια βάση «Bio-Oracle», (<http://www.bio-oracle.org/>) (Tyberghein et al., 2012) και αποτελούνται από δορυφορικά και *in situ* δεδομένα. Οι κλιματολογικές συνθήκες για το έτος 2100 βασίζονται στο σενάριο επόμενης γενιάς RCP 8.5 (Representative Concentration Pathways - RCP). Κατ' αυτό το σενάριο προβλέπεται συνεχόμενη αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (8.5 W/m^2 , $\sim 1370 \text{ ppm CO}_2$) έως και το τέλος του αιώνα (van Vuuren et al., 2011). Όλα τα περιβαλλοντικά στρώματα (raster layers) υπέστησαν επαναληπτική δειγματοληψία μέσω αμφιγραμμικής παρεμβολής (bilinear interpolation) στην ανάλυση 1 km^2 και η επιφάνεια τους περικόπηκε με τη χρήση ενός πολύγωνου στην έκταση του δειγματοληπτικού εύρους (μέχρι 200μ βάθος) ακολουθώντας τη μεθοδολογία που προτάθηκε από προηγούμενες μελέτες στη Μεσογειακή λεκάνη (Galanidi et al., 2016; Moraitis et al., 2018; Sarà et al., 2018). Το στατιστικό πακέτο spThin (Aiello-Lammens et al.,

2015) μέσω της γλώσσας προγραμματισμού R χρησιμοποιήθηκε για έλεγχο των καταγραφών ώστε να απέχουν τουλάχιστον 1 km απόσταση μεταξύ τους με σκοπό την αποφυγή συσσωμάτωσης (clustering) σε συγκεκριμένες γεωγραφικές θέσεις. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιείται ως μέσω αντιμετώπισης της δειγματοληπτικής μεροληψίας λόγω χωρικής αυτοσυσχέτισης (Kramer-Schadt et al., 2013). Όλες οι χωρικές και στατιστικές αναλύσεις έγιναν στο περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού R 3.4.3 (R Development Core Team, 2019) μέσω των πακέτων raster, rasterVis, usdm, maptools, maps και prettymapr και του προγράμματος ArcGIS 10.2. Οι περιβαλλοντικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα κατανομής ειδών είναι η θερμοκρασία βένθους (ελάχιστη), η επιφανειακή αλατότητα (μέση) και η συγκέντρωση χλωροφύλλης – α ως μέσο μέτρησης της πρωτογενούς παραγωγικότητας (Εικόνα 4.3). Οι επιλεγμένες περιβαλλοντικές παράμετροι αποτελούν ιδανικούς δείκτες (descriptors) που περιγράφουν την περιβαλλοντική μεταβλητότητα της περιοχής μελέτης που έχουν χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενη μελέτη που κάνει χρήση μοντέλων κατανομής βενθικών ειδών (Moraitis et al., 2018).



Εικόνα 4.3: Σημερινή και μελλοντική χωρική πρόγνωση για τις εξής περιβαλλοντικές μεταβλητές (από αριστερά προς δεξιά): Θερμοκρασία πυθμένα (ελάχιστη), επιφανειακή αλατότητα (μέση) και συγκέντρωση επιφανειακής χλωροφύλλης – *a* (μέση).

4.2.3 Ανάλυση οικολογικού θώκου

Η ανάλυση του οικολογικού θώκου έλαβε χώρα με σκοπό να εξεταστούν οι οικολογικές παράμετροι που καθορίζουν τα γεωγραφικά όρια των βενθικών ειδών. Ο προσδιορισμός του οικολογικού θώκου έλαβε χώρα ακολουθώντας τη μεθοδολογία που πρότειναν οι Broennimann et al., (2012). Κατά την προαναφερθείσα μεθοδολογία ο οικολογικός θώκος προσδιορίζεται μέσω της ποσοτικοποίησης του περιβαλλοντικού χώρου που αποικίζεται από κάθε είδος με τη χρήση Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (PCA). Επιπλέον, η συνάρτηση kernel (kernel density function) εφαρμόστηκε με σκοπό τη εξομάλυνση της πυκνότητας των καταγραφών του κάθε είδους στα αντίστοιχα περιβαλλοντικά πλέγματα (girds). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία περιορίζει την επιρροή της δειγματοληπτικής

μεροληψίας εξαιτίας της εξάρτησης των καταγραφών από την χωρική ανάλυση των περιβαλλοντικών δεδομένων και μετριάζει την έντονη περιβαλλοντική μεταβλητότητα (Warren et al., 2008). Οι πιο πάνω χειρισμοί είναι απαραίτητοι για την έγκυρη εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις κλιματικές συνθήκες που πλαισιώνουν κάθε είδος (Gama et al., 2017). Η χρήση πραγματικών δεδομένων παρουσίας-απουσίας των ειδών συμβάλλει σημαντικά στη αποφυγή της υπερεκτίμησης των παραμέτρων που καθορίζουν τον οικολογικό θώκο έναντι της εναλλακτικής προσέγγισης με τη τυχαία δημιουργία ψευδοαπουσιών στον χώρο. Το τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης αποτελείται από την απεικόνιση των καταγραφών του κάθε είδους στο 100% και 50% του διαθέσιμου περιβαλλοντικού χώρου κατά μήκος των δυο αξόνων της ανάλυσης. Ο προσδιορισμός του οικολογικού θώκου έλαβε χώρα με τη χρήση του στατιστικού πακέτου “ecospat” μέσω της γλώσσας προγραμματισμού R (Di Cola et al., 2017).

4.2.4 Modelling

Η καταλληλότητα ενδιαιτήματος προσδιορίστηκε μέσω του αλγόριθμου μηχανιστικής μάθησης (machine-learning) μέγιστης εντροπίας (maximum entropy – MaxEnt 3.4.1) (Phillips et al., 2006). Η ανάλυση μέγιστης εντροπίας αποτελεί την ιδανική προσέγγιση για προβολή της πρόβλεψης του ενδιαιτήματος ενός είδους σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες (στη δική μας περίπτωση για το έτος 2100 όπως χαρακτηρίζονται από το σενάριο κλιματικής αλλαγής RCP 8.5) και έχει χρησιμοποιηθεί από προηγούμενες μελέτες βενθικών ειδών για αυτό το σκοπό (Saeedi et al., 2017; Sarà et al., 2018). Τα μοντέλα κατασκευάστηκαν μέσω της μεθόδου επαναληπτικής δειγματοληψίας (bootstrapping) σε δέκα επαναληπτικές προσπάθειες (runs) όπου για κάθε προσπάθεια το 70% των τυχαίων καταγραφών

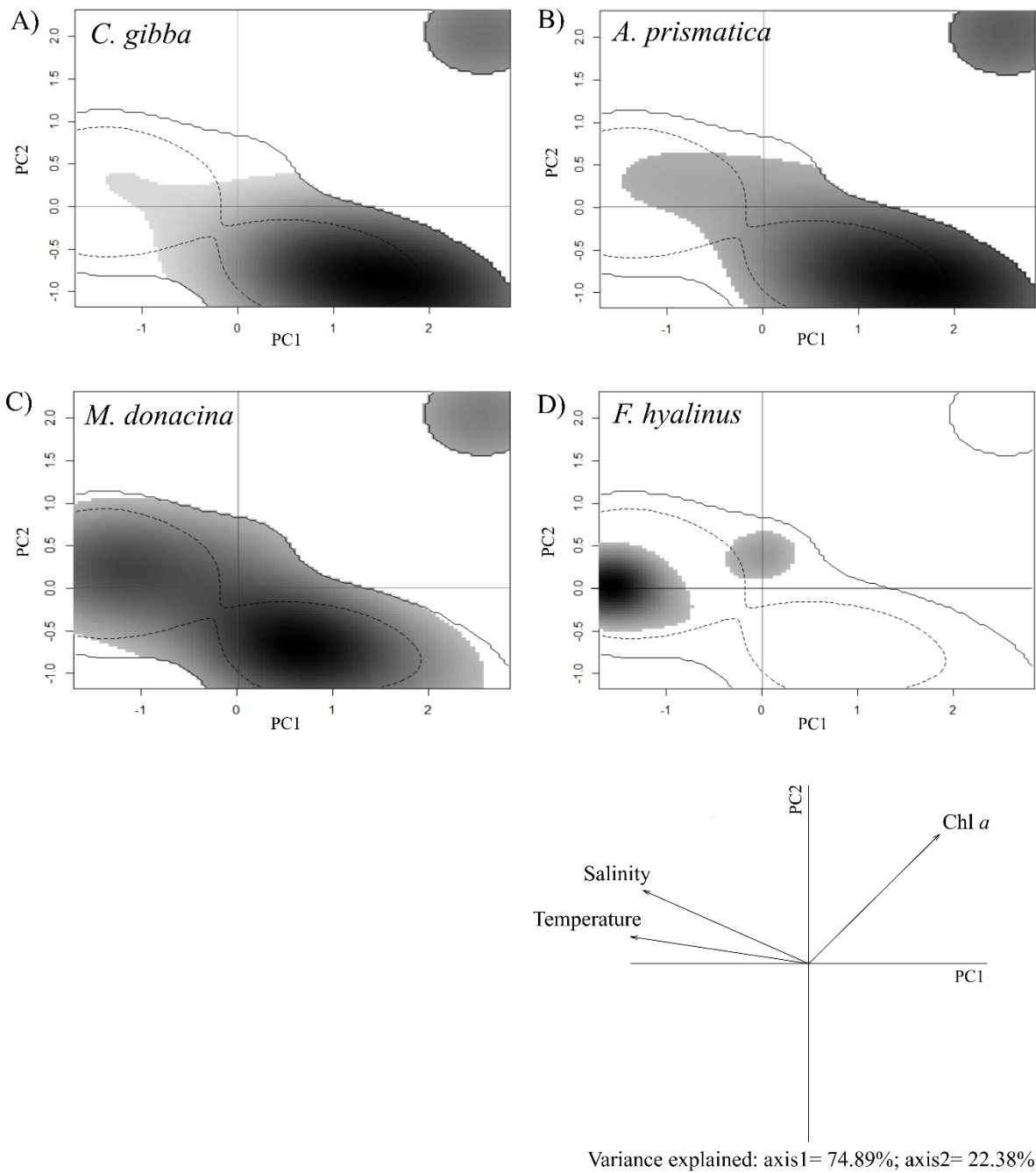
συγκρατήθηκε με σκοπό τη κατασκευή/εκπαίδευση του μοντέλου (training) και το 30% για επαλήθευση/έλεγχο (testing). Επιπλέον, τα σημεία αναφοράς (background points) περιορίστηκαν στα 1000 με σκοπό την αποφυγή overfitting και ο συντελεστής regularization multiplier ήταν στο 1. Η απόδοση του μοντέλου αξιολογήθηκε με βάση τον δείκτη receiver-operating characteristic (ROC) curve (AUC) (Fielding and Bell, 1997), κατά τον οποίο τιμές ίσες με 0.5 υποδεικνύουν μια τυχαία απόδοση του μοντέλου και τιμές ίσες ή μεγαλύτερες από 0.7 υποδεικνύουν καλή απόδοση του μοντέλου. Η σημαντικότητα της κάθε περιβαλλοντικής μεταβλητής προσδιορίστηκε μέσω της συνεισφοράς της στην αλλαγή του AUC κατά το στάδιο training του μοντέλου όταν αυτή αφαιρείται. Η προβολή της χωρικής κατανομής του είδους στις κλιματολογικές συνθήκες για το έτος 2100 έγινε με τη μέθοδο clamping κατά την οποία γίνεται μια χωρική απεικόνισή των περιοχών όπου οι τιμές του μελλοντικού σεναρίου δεν έχουν συμπεριληφθεί στο στάδιο training (Elith et al., 2011).

Τα αποτελέσματα των μοντέλων ανάμεσα στις δυο χρονικές περιόδους (παρόν – μέλλον) συσχετίστηκαν με σκοπό την αξιολόγηση της ευαισθησίας του κάθε είδους στην κλιματική αλλαγή. Για τον πιο πάνω στόχο εξετάστηκε η επικάλυψη οικολογικού θώκου (niche overlap) ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο χρονικών περιόδων μέσω του δείκτη Schoener's D ENMTools package (Warren et al., 2010). Ο δείκτης D είναι ιδανικός για σύγκριση οικολογικών θώκων που προκύπτουν από μοντέλα κατανομής ειδών (Rödder and Engler, 2011). Κατά τον δείκτη Schoener's D γίνεται ποσοτικοποίηση των ομοιοτήτων ανάμεσα στους δύο θώκους με εύρος τιμών 0 (μη επικάλυψη) έως 1 (πλήρης επικάλυψη) (Warren et al., 2008). Η ανάλυση του θώκου γίνεται μέσω σύγκρισης των διαφορών ανάμεσα στις τιμές καταλληλότητας ενδιαιτήματος (suitability scores) για κάθε εικονοκύτταρο (pixel).

4.3 Αποτελέσματα

4.3.1 Οικολογικός θώκος

Η ανάλυση οικολογικού θώκου των ειδών *C. gibba* και *A. prismatica* παρουσίασε κοινό πρότυπο όπου τα είδη καταλαμβάνουν τις ίδιες διακριτές περιοχές στους δυο κύριους κλιματικούς άξονες (Εικόνα 4.4). Η ανάλυση παρουσίασε διαφορές στον οικολογικό θώκο των ειδών *M. donacina* και *F. hyalinus* με το πρώτο να καταλαμβάνει σχεδόν όλο τον διαθέσιμο περιβαλλοντικό χώρο και το δεύτερο να παρουσιάζει συγκεκριμένες περιβαλλοντικές προτιμήσεις. Η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών ερμηνεύει το 97.27% της διακύμανσης. Η θερμοκρασία κατάγραψε τη μεγαλύτερη συνεισφορά (-0.96) ακολουθούμενη από την αλατότητα (-0.89) και τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης - α (0.71) όπου συνολικά αποτελούν το 74.89% των περιβαλλοντικών συνθηκών της περιοχής μελέτης. Αντίστοιχα, ο δεύτερος άξονας ερμηνεύει το 22.38% της μεταβλητότητας με κύρια συνεισφορά από την συγκέντρωση της χλωροφύλλης - α (0.7) και της αλατότητας (0.39). Τα είδη *C. gibba* και *A. prismatica* καταλαμβάνουν περιοχές που χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμοκρασία και αλατότητα και υψηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης - α . Το είδος *F. hyalinus* παρουσιάζει προτίμηση σε περιοχές με υψηλή αλατότητα και θερμοκρασία και χαμηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης - α . Αντίθετα με τα υπόλοιπα είδη της μελέτης, ο οικολογικός θώκος του *M. donacina* δεν είναι τόσο περιορισμένος υποδηλώνοντας ότι το είδος αυτό έχει μεγάλο εύρος ανοχής στους κυριότερους περιβαλλοντικούς παράγοντες.



Εικόνα 4.4: Αποτελέσματα ανάλυσης οικολογικού θώκου για τα είδη *C. gibba*, *A. prismatica*, *M. donacina* και *F. hyalinus* όπως προέκυψαν από την ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA) βαθμονομημένη στο κλιματικό χώρο του κάθε είδους. Η γκρί-μαύρη διαβάθμιση παρουσιάζει την πυκνότητα των καταγραφών του κάθε είδους.

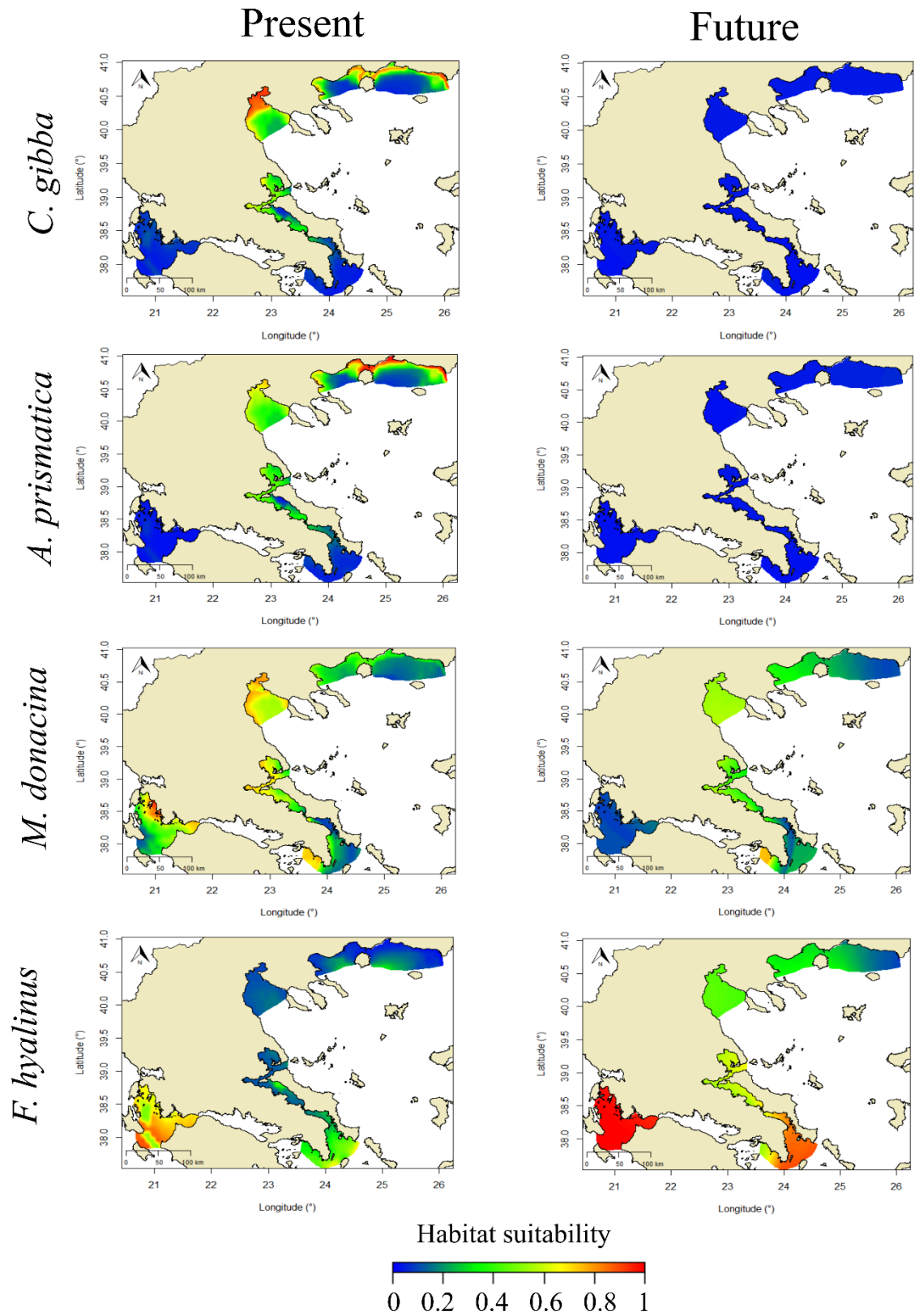
4.3.2 Modelling

Όλα τα μοντέλα κατανομής ειδών είχαν καλή απόδοση για τις δυο χρονικές περιόδους (παρόν – μέλλον) με τον δείκτη AUC εντός των ορίων που υποδηλώνουν αξιόπιστη απεικόνιση των μοντέλων (AUC>0.7) (Πίνακας 4.1). Το ενδιαίτημα για τα είδη *C. gibba*, *A. prismatica* και *M. donacina* αναμένεται να μειωθεί κατά το σενάριο κλιματικής αλλαγής RCP 8.5 για το έτος 2100 (Εικόνα 4.5). Η θερμοκρασία και η αλατότητα αποτελούν τις πιο σημαντικές περιβαλλοντικές μεταβλητές που καθορίζουν την κατανομή των ειδών στη συγκεκριμένη μελέτη (Πίνακας 4.1). Τα είδη *C. gibba* και *A. prismatica* είναι πιο ευάλωτα στην αναμενόμενη αύξηση της θερμοκρασίας σε σχέση με το *M. donacina* για το οποίο αυτή η παράμετρος είχε λιγότερη επιρροή σε σχέση με την αλατότητα και τη συγκέντρωση χλωροφύλλης – α. (Εικόνα 4.1). Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα είδη της μελέτης, το μοντέλο κατανομής για το είδος *F. hyalinus* κατέγραψε αύξηση της κατανομής του είδους υπό το εξεταζόμενο σενάριο κλιματικής αλλαγής λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της αλατότητας.

Πίνακας 4.1: Συνεισφορά των περιβαλλοντικών παραμέτρων και αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων κατανομής.

Species	Temperature		Salinity		Chl <i>a</i>		Model Evaluation
	Contr. (%)	Perm.	Contr. (%)	Perm.	Contr. (%)	Perm.	AUC
<i>Corbula gibba</i>	82.2	80	2.7	8	15.1	12	0.87
<i>Abra prismatica</i>	91.8	86.4	8	12.9	0.2	0.8	0.86
<i>Moerella donacina</i>	10.9	24.1	44.3	41.1	44.8	34.8	0.8
<i>Flexopecten hyalinus</i>	52.1	50.2	41	38.6	6.8	11.2	0.88

Οι χωρικές προβλέψεις για τα είδη *C. gibba* και *A. prismatica* ήταν παρόμοιες παρουσιάζοντας μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης των ειδών στο βόρειο τμήμα του Αιγαίου πελάγους με σταδιακή μείωση της καταλληλότητας ενδιαιτήματος από το Βόρειο προς το Νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης όπου και περιορίζεται στους κύριους κλειστούς κόλπους. Το είδος *M. donacina* παρουσίασε μεγαλύτερο γεωγραφικό εύρος κατανομής σε σχέση με τα άλλα είδη με κατάλληλα ενδιαιτήματα να καταγράφονται και στις δύο θαλάσσιες περιοχές (Ιόνιο – Αιγαίο). Η προβλεπόμενη κατανομή του είδους *F. hyalinus* περιορίζεται στο νότιο τμήμα του Αιγαίου πελάγους και στο νησιωτικό τμήμα της θαλάσσιας περιοχής του Ιονίου. Η προβολή των κατανομών των ειδών *C. gibba* και *A. prismatica* στις μελλοντικές κλιματολογικές συνθήκες του έτους 2100 κατά το σενάριο RCP 8.5 κατέγραψε παρόμοια αποτελέσματα. Τα μοντέλα κατανομής για αυτά τα είδη αναμένουν σημαντική μείωση των περιοχών που είναι κατάλληλες για εποίκηση από τα είδη αυτά. Μείωση της γεωγραφικής κατανομής παρατηρήθηκε επίσης για το είδος *M. donacina*, ωστόσο οι επιπτώσεις για το είδος αυτό δεν είναι τόσο έντονες όσο οι αναμενόμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής για τα είδη *G. gibba* και *M. donacina*. Για όλα τα είδη παρατηρήθηκε μείωση της πιθανότητας εμφάνισης εκτός από το είδος *F. hyalinus* όπου αναμένεται να επεκταθεί σε μέχρι πρότινος περιβαλλοντικά ακατάλληλες περιοχές όπως το Βόρειο Αιγαίο.



Εικόνα 4.5: Σημερινή και μελλοντική πρόγνωση της κατανομής των ειδών *C. gibba*, *A. prismatica*, *M. donacina* και *F. hyalinus* όπως προκύπτουν από τα μοντέλα κατανομής.

Η επικάλυψη του οικολογικού θώκου ανάμεσα στους χάρτες κατανομής των δυο χρονικών περιόδων ήταν διαφορετική για τα είδη της συγκεκριμένης μελέτης. Τα είδη *C. gibba* και *A. prismatica* παρουσίασαν τη μικρότερη επικάλυψη κατά τον δείκτη ομοιότητας που χρησιμοποιήθηκε καταγράφοντας έντονες διαφορές στην κατανομή των ειδών (Πίνακας 4.2). Η επικάλυψη για το είδος *F. hyalinus* ήταν επίσης περιορισμένη σε σχέση με το *M. donacina* το οποίο κατέγραψε τη μεγαλύτερη επικάλυψη κατανομής μεταξύ παρόντος και μέλλοντος παρουσιάζοντας κατ' αυτό τον τρόπο μια ικανότητα διατήρησης του θώκου κατά το εξεταζόμενο σενάριο κλιματικής αλλαγής. Γενικά, τα είδη *C. gibba*, *A. prismatica* και *F. hyalinus* είναι πιο επιρρεπή στις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής καθώς αυτά τα είδη φαίνεται ότι δεν θα κατορθώσουν να διατηρήσουν τον αρχικό τους θώκο.

Πίνακας 4.2: Αλληλοεπικάλυψη θώκου ανάμεσα σε σημερινή και μελλοντική προβλεπόμενη κατανομή (2100) με τη χρήση του στατιστικού Schoener's *D* metric.

Species	Niche overlap
<i>Corbula gibba</i>	0.63
<i>Abra prismatica</i>	0.64
<i>Moerella donacina</i>	0.8
<i>Flexopecten hyalinus</i>	0.75

4.4 Συζήτηση

Η αρχική υπόθεση ότι η απόκριση των μακροβενθικών μαλακίων στο εξεταζόμενο σενάριο κλιματικής αλλαγής εξαρτάται από το εύρος του οικολογικού τους θώκου επιβεβαιώθηκε. Η οικολογική κατάταξη του κάθε είδους όσον αφορά την απόκρισή του στην περιβαλλοντική διατάραξη από οργανικό υλικό δεν ανταποκρινόταν στην απόκριση του είδους στην κλιματική αλλαγή. Αντίθετα, το ποσοστό ευαισθησίας του κάθε είδους στις πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, είναι σε άμεση εξάρτηση με τις περιβαλλοντικές του προτιμήσεις και όχι με την οικολογική ταξινόμηση του είδους που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα. Τα χωρικά μοντέλα πρόβλεψης κατανομής στην παρούσα μελέτη που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής για το έτος 2100, έδειξαν ότι η καταλληλότητα του ενδιαιτήματος για τα είδη *C. gibba*, *A. prismatica* και *M. donacina* αναμένεται να μειωθεί ενώ το είδος *F. hyalinus* αναμένεται να επεκτείνει τα γεωγραφικά του όρια.

Η αποσαφήνιση των παλαιογεωγραφικών κατανομών των ειδών συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση των πιθανών επιπτώσεων μελλοντικών κλιματολογικών αλλαγών. Καθώς η πανίδα της Μεσόγειου αποκτούσε τη σημερινή μορφή της, σημαντικό γεγονός αποτέλεσε η μετανάστευση ψυχρόφιλων ειδών από τον Ατλαντικό ωκεανό (Pégès, 1967). Τα κατάλοιπα από αυτή την μετανάστευση είναι εμφανή και στη σύγχρονη εποχή με την παρουσία ψυχρόφιλων ειδών στις κύριες θαλάσσιες περιοχές της Μεσογείου. Στην παρούσα μελέτη, η πρώτη ομάδα ειδών που χαρακτηρίστηκαν ευάλωτα στην κλιματική αλλαγή και κατ' επέκταση στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας αποτελούνται από εκπροσώπους του Ατλαντικού ωκεανό που καταγράφουν μεγάλες αφθονίες στις θάλασσες της βόρειας Ευρώπης και η παρουσία τους στη Μεσόγειο Θάλασσα είναι αποτέλεσμα παλαιοκλιματικών

γεγονότων. Η σύγχρονη Μεσογειακή θαλάσσια πανίδα έχει άμεση σχέση με την πανίδα του βόρειου-ανατολικού ωκεανού καθώς τα είδη *C. gibba*, *A. prismatica* και *M. donacina* έχουν όλα προέλευση από τον Ατλαντικό ωκεανό και μετανάστευσαν στη Μεσόγειο μετά την κρίση αλατότητας του Μεσσηνίου όταν καταγράφηκε το πρώτο κύμα μετανάστευσης ειδών. Τα είδη αυτά αποτελούν τα μόνα είδη στην παρούσα μελέτη που έχουν καταγραφεί και στη Μεσόγειο και στη Βόρεια Θάλασσα κατά την περίοδο του Νεογενούς όπου διαμορφώθηκε ο κύριος όγκος της μεσογειακής πανίδας (Raffi et al., 1985). Παρά το γεγονός ότι τα είδη αυτά επέζησαν από τις κλιματολογικές αλλαγές του παρελθόντος ήταν πάντοτε άρρηκτα συνδεδεμένα με ενδιαιτήματα που χαρακτηρίζονταν από χαμηλές θερμοκρασίες. Κατά την περίοδο του Νεογενούς, οι υδρογραφικές συνθήκες της Βορείου Θάλασσας χαρακτηρίζονταν από ήπιους καλοκαιρινούς μήνες και ψυχρούς χειμώνες (Raffi et al., 1985). Παρόμοιες υδρογραφικές συνθήκες επικρατούσαν στη μεσογειακή λεκάνη κατά τη διάρκεια του Πλειστοκαίνου που σε συνδυασμό με έντονες παγετώδεις περιόδους εξάλειψαν τα θερμόφιλα είδη. Στη σύγχρονη εποχή, τα προαναφερθέντα είδη είναι πιο άφθονα στη Βόρεια Θάλασσα, μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από χαμηλή θερμοκρασία και αλατότητα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, εξαιτίας της επιρροή του ρεύματος του Κόλπου. Η αφθονία των ειδών αυτών στη Μεσόγειο περιορίζεται στα βόρεια τμήματα της λεκάνης. Στην παρούσα περιοχή μελέτης, η πανίδα του βόρειου Αιγαίου χαρακτηρίζεται από ψυχρόφιλα είδη που συγκροτούν όμοιες βενθικές κοινότητες με το βόρειο-δυτικό τμήμα της Μεσογείου (Bianchi, 2007; Pérès, 1967). Τα είδη *C. gibba* και *A. prismatica* κατέγραψαν μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης στο βόρειο Αιγαίο, μια θαλάσσια περιοχή που χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και αλατότητα, ενώ ταυτόχρονα καταγράφονται υψηλά ποσοστά πρωτογενούς παραγωγικότητας. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής αυτής προκύπτουν από την εισροή υδάτων από τη Μαύρη Θάλασσα μέσω των Δαρδανελίων

στενών και από το πυκνό παράκτιο υδρογραφικό δίκτυο που εκβάλλει σε αυτή την περιοχή (Giannakourou et al., 2014; Ignatiades, 2005; Primpas and Karydis, 2011). Σύμφωνα με τα ευρήματα της μελέτης, η αύξηση >3 βαθμών της ελάχιστης θερμοκρασίας πυθμένα σύμφωνα με το σενάριο RCP 8.5 οδηγεί σε μείωση των κατάλληλων ενδιαιτημάτων των ψυχρόφιλων ειδών. Επιπλέον, η αύξηση ~2 βαθμών της αλατότητας δεν ευνοεί τη κατανομή των ειδών αυτών καθώς είναι ανθεκτικά στα υφάλμυρα νερά, όχι όμως και στα υπέραλα. Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης συμφωνούν με τους Weinert et al., (2016), που επίσης κατέγραψαν μείωση της κατανομής του είδους *C. gibba* και για κάποια είδη από τα γένη *Abra* και *Moerella* υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής, τονίζοντας παράλληλα τη σημαντικότητα της αύξησης της θερμοκρασίας και της αλατότητας στην κατανομή των βενθικών οργανισμών. Εξαιτίας της σημαντικής συσχέτισης με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, τα είδη αυτά παρουσίασαν ελάχιστη αλληλεπικάλυψη θώκου ανάμεσα στη σημερινή και την πιθανή μελλοντική κατανομή τους, παρουσιάζοντας ευαισθησία στο εξεταζόμενο σενάριο κλιματικής αλλαγής και μικρή δυνατότητα διατήρησης του οικολογικού θώκου. Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης επιβεβαιώνουν τη σημαντική σχέση των ειδών *C. gibba* και *A. prismatica* με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (indicative power) που περιεγράφηκαν αρχικά από τους Moraitis et al. (2018). Αντίθετα με τα είδη *C. gibba* και *A. prismatica*, το είδος *M. donacina* δεν παρουσίασε ισχυρή συσχέτιση με κάποιο συγκεκριμένο ενδιαίτημα ή υδρογραφικό πρότυπο (δεν ήταν είδος-δείκτης), επειδή η κατανομή του είδους ήταν πολύ μεγαλύτερη. Εξαιτίας του ευρέως οικολογικού θώκου, το είδος αυτό ήταν ικανό να διατηρήσει σε μεγάλο βαθμό τα γεωγραφικά του όρια κατά την προβολή της σημερινής κατανομής του στο μελλοντικό σενάριο κλιματικής αλλαγής. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής ήταν λιγότερο εμφανείς στην κατανομή του *M. donacina* σε σχέση με τα άλλα είδη, ωστόσο, ως ψυχρόφιλο είδος επίσης παρατηρήθηκε μείωση των

ενδαιτημάτων του. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στην επιρροή της αλατότητας και της συγκέντρωσης $chl\ a$ όπου για το είδος *M. donacina* είχαν μεγαλύτερη επιρροή από τη θερμοκρασία. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη μελέτη η διακύμανση ανάμεσα στη σημερινή και στη μελλοντική συγκέντρωση της χλωροφύλλης ήταν περιορισμένη, επομένως αποδόθηκε αυτόματα περισσότερη βαρύτητα από τα μοντέλα στις δύο πρώτες περιβαλλοντικές μεταβλητές. Το *M. donacina* κατατάσσεται ως «ευαίσθητο» στην περιβαλλοντική διατάραξη σύμφωνα με τους προτεινόμενους και χρησιμοποιούμενους βιοτικούς δείκτες. Ωστόσο, η απόκριση του στην κλιματική αλλαγή ήταν παρόμοια με την πρώτη ομάδα ειδών που κατατάσσονται ως «ανθεκτικά» στην περιβαλλοντική διατάραξη. Το πιο πάνω αποτέλεσμα αποδίδεται στις αρνητικές επιπτώσεις της αύξησης της θερμοκρασίας στη κατανομή του είδους, κάτι το οποίο παρατηρείται και στις περιπτώσεις των *C. gibba* και *A. prismatica* (Εικόνα 4.5).

Το κτένι, *F. hyalinus* κατέγραψε μια σημαντικά διαφορετική απόκριση στην κλιματική αλλαγή σε σχέση με το άλλο ευαίσθητο είδος *M. donacina* επομένως εξασφάλισε μια κατηγορία από μόνο του στη συγκεκριμένη μελέτη. Ο κλιματικός χώρος του είδους είναι πολύ συγκεκριμένος και χαρακτηρίζεται κυρίως από σχετικά υψηλή θερμοκρασία και αλατότητα. Η καταλληλότητα του είδους *F. hyalinus* ως είδους-δείκτη ενδαιτημάτων που χαρακτηρίζονται από σταθερά υψηλή θερμοκρασία και αλατότητα παρατηρήθηκε επίσης από τους Moraitis et al., (2018) οι οποίοι χαρακτήρισαν το είδος αυτό ως δείκτη στα ενδαιτήματα που καταγράφηκε όσον αφορά τα επίπεδα αλατότητας και θερμοκρασίας. Το *F. hyalinus* παρουσίασε πολύ λίγη αλληλεπικάλυψη θώκου ανάμεσα στη σημερινή και στη μελλοντική κατανομή του, ένα πρότυπο που παρατηρήθηκε επίσης και στα υπόλοιπα είδη-δείκτες της παρούσας μελέτης *C. gibba* και *A. prismatica*. Εξαιτίας των ιδιαίτερων περιβαλλοντικών προτιμήσεων του είδους που διαμορφώνονται από πολύ συγκεκριμένο

εύρος θερμοκρασίας και αλατότητας η κατανομή του *F. hyalinus* αναμένεται να επηρεαστεί πολύ από τις κλιματικές μεταβολές που εξετάστηκαν. Η διαφορά της απόκρισης του *F. hyalinus* σε σχέση με τα άλλα είδη, είναι ότι παρατηρείται επέκταση της κατανομής του με την προβλεπόμενη αύξηση θερμοκρασία και αλατότητας και όχι μείωση. Η πρόβλεψη των κατανομών των βενθικών μαλακίων σε μελλοντικά κλιματολογικά σενάρια είναι δυνατή εξαιτίας της καταγεγραμμένης παλαιογεωγραφίας τους μέσω απολιθωμένων μορφών που εμπερικλείουν κλιματολογικά γεγονότα του παρελθόντος (Fortunato, 2016). Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα είδη της μελέτης, το *F. hyalinus* δεν ανήκε στην αρχική πανίδα που εποίκισε τη μεσογειακή λεκάνη με προέλευση από τον Ατλαντικό ωκεανό (Raffi et al., 1985). Το είδος *F. hyalinus* χαρακτηρίζεται ως «στενόθερμο» είδος και ανήκει στην κατηγορία των θερμών-εύκρατων ή ημι-τροπικών δίθυρων που μετανάστευσαν στη Μεσόγειο Θάλασσα κατά τη διάρκεια του Πλειόκαινου. (Raffi et al., 1985). Τα προαναφερθέντα θερμόφιλα είδη αναπαράγονται κατά τους θερινούς μήνες επομένως ήταν άμεσα συνδεδεμένα με θερμοκρασία που έφτανε τους 25 °C κατά την περίοδο αυτή (Monegatti and Raffi, 2001; Raffi, 1986). Η αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης του είδους στο νότιο Αιγαίο και στο νησιωτικό τμήμα του Ιονίου πελάγους στην παρούσα μελέτη, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις υδρογραφικές συνθήκες των περιοχών που καταγράφηκε το είδος. Συγκεκριμένα, το νότιο-κεντρικό Αιγαίο πέλαγος επηρεάζεται από το επιφανειακό υδάτινο μέτωπο Λεβαντίνης (Levantine surface water), το οποίο είναι αποτέλεσμα έντονης εξάτμισης στην περιοχή της Λεβαντίνης (Ciappa, 2014), ενώ ταυτόχρονα το Ιόνιο πέλαγος επηρεάζεται από το ενδιάμεσο υδάτινο μέτωπο Λεβαντίνης (Levantine Intermediate Water), το οποίο είναι αποτέλεσμα ανταλλαγών αέρα-θάλασσας κατά μήκος της μεσογειακής λεκάνης (Menna and Roulain, 2009). Οι προαναφερθείσες υδάτινες μάζες προμηθεύουν συνεχώς το Ιόνιο και το Αιγαίο πέλαγος με θερμά και με υψηλή αλατότητα ρεύματα κατά τρόπο που οι υδρογραφικές

συνθήκες των περιοχών αυτών διατηρούνται σχετικά σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου ευνοώντας την παρουσία του *F. hyalinus* (Moraitis et al., 2018). Αποδίδουμε τα αποτελέσματα των μοντέλων που προβλέπουν επέκταση του είδους μέχρι το έτος 2100 στην αναμενόμενη αύξηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας που αναμένεται να δημιουργήσουν καινούργιους θώκους σε μέχρι πρότινος ακατάλληλες για εποίκηση περιοχές κυρίως στο βόρειο Αιγαίο πέλαγος. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης συμφωνούν με άλλες μελέτες που τονίζουν το γεγονός ότι παρατηρείται σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας στη Μεσόγειο Θάλασσα (Borghini et al., 2014; Potter and Lozier, 2004). Η σημερινή μέση επιφανειακή θερμοκρασία στο βόρειο Αιγαίο είναι ~14°C (Bianchi, 2007; Moraitis et al., 2018) και τα ευρήματα της παρούσας μελέτης καταγράφουν την μέση ελάχιστη θερμοκρασία πυθμένα <12°C, συνθήκες οι οποίες δεν ευνοούν την παρουσία του είδους *F. hyalinus*. Επιπλέον, τα επίπεδα αλατότητας σε αυτή την περιοχή είναι απαγορευτικά για τα είδη του γένους *Flexorecten*, καθώς τα βράγχια και ο μανδύας υποκύπτουν στη καταπόνηση λόγω υποσμωτικών συνθηκών σε συνθήκες χαμηλής αλατότητας (Telahigue et al., 2010).

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήσαμε μακροπανιδικά είδη για να αξιολογήσουμε τις πιθανές επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στην κατανομή τους και εξετάσαμε τη σχετικότητα της σημερινής οικολογικής κατάταξης τους ως προς το μελλοντικό κλιματολογικό σενάριο που ενσωματώσαμε. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αναμένεται να είναι πιο εμφανείς σε είδη που χαρακτηρίζουν ενδιαιτήματα με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (είδη-δείκτες). Επίσης, παρατηρήθηκε πως είδη που κατατάσσονταν στην ίδια οικολογική βαθμίδα ευαισθησίας στην περιβαλλοντική διατάραξη αποκρίθηκαν διαφορετικά στο σενάριο RCP 8.5. Τα ευρήματα της μελέτης συμφωνούν με τους Zettler et al. (2013) που τονίζουν ότι τέτοιου είδους γενικευμένη

κατάταξη είναι μεροληπτική όταν εφαρμοστεί σε μελέτες περιβαλλοντικής διατάραξης μεγάλης χωρικής κλίμακας και πως τα είδη-δείκτες αποτελούν καλύτερη επιλογή για αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε αυτές τις περιπτώσεις. Τα σημερινά θεσπισμένα όρια ανεκτικότητας των βενθικών ειδών προκύπτουν από τους βενθικούς βιοτικούς δείκτες που χρησιμοποιούνται για αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Ωστόσο, οι βιοτικοί δείκτες αναπτύχθηκαν για την εξέταση των επιπτώσεων του οργανικού εμπλουτισμού στο βενθικό οικοσύστημα και συμπεριλαμβάνουν τα ποσοστά των ειδών στις βενθικές κοινότητες ως απόκριση στη οργανική ρύπανση (Dauvin and Ruelllet, 2007). Στην παρούσα μελέτη συμπεριλάβαμε τη συγκέντρωση χλωροφύλλης – α ως δείκτη του οργανικού υλικού υπό μορφή ευτροφισμού όπως προτείνει προηγούμενη μελέτη του συγγραφέα στην ίδια περιοχή (Moraitis et al., 2018). Παρά το γεγονός ότι η συγκέντρωση χλωροφύλλης – α είχε σημαντική συνεισφορά στην απόδοση των μοντέλων, δεν αποτελούσε τον κύριο παράγοντα που καθορίζει την κατανομή των βενθικών ειδών υπό το σενάριο κλιματικής αλλαγής που εξετάστηκε. Τα αποτελέσματα της μελέτης αποδίδονται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία και η αλατότητα αναμένεται να έχουν μεγαλύτερη διακύμανση κατά το δυσμενέστερο σενάριο RCP 8.5 μέχρι το τέλος του αιώνα σε σχέση με την πρωτογενή παραγωγικότητα. Η πρόβλεψη των μεταβολών της συγκέντρωσης της πρωτογενούς παραγωγικότητας στη λεκάνη της Μεσογείου αποτελεί δύσκολο εγχείρημα καθώς τοπικές διαφορές στα σημαντικότερα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά λόγω γεωμορφολογίας και υδάτινων εισροών αναμένεται να επηρεάζουν την πρωτογενή παραγωγικότητα ανάμεσα στις κύριες θαλάσσιες περιοχές (Basterretxea et al., 2018). Τα αποτελέσματα της μελέτης συμφωνούν με τους Reiss et al., (2015) στο γεγονός ότι πρωτογενής παραγωγικότητα αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό παράγοντα που πρέπει να ενσωματώνεται σε χωρικά μοντέλα κατανομής ειδών, ωστόσο, τα γεωγραφικά όρια των

θαλάσσιων οργανισμών διαμορφώνονται από τη θερμοκρασία και την αλατότητα. Τα πιο πάνω ευρήματα έχουν άμεση εφαρμογή όταν γίνεται αξιολόγηση των επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής και παγκόσμιας θέρμανσης στα θαλάσσια οικοσυστήματα. Προηγούμενες μελέτες που κάνουν χρήση βενθικών ειδών σε χωρικά μοντέλα κατανομής επίσης τονίζουν τη καίρια συμβολή της θερμοκρασίας και αλατότητας στη κατανομή των ειδών υπό διαφορετικά σενάρια κλιματικής (Weinert et al., 2016) (Jones et al., 2013; Raybaud et al., 2014; Russell et al., 2012; Sarà et al., 2018; Saupé et al., 2014). Οι βενθικοί βιοτικοί δείκτες αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για αξιολόγηση των επιπτώσεων ανθρωπογενούς οργανικής ρύπανσης στα θαλάσσια ενδιαίτηματα, ωστόσο, διέπονται από συγκεκριμένους περιορισμούς που αξίζει να αναφερθούν. Η ύπαρξη περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων θερμοκρασίας και αλατότητας αναμένεται να επηρεάσει τις βενθικές συναθροίσεις με αποτέλεσμα να αλλοιωθεί η ποιότητα των αποτελεσμάτων των βενθικών δεικτών (Rakocinski et al., 1997; Zettler et al., 2013). Ένας ακόμα περιορισμός των βενθικών δεικτών είναι η υπόθεση ότι όλα τα άτομα του είδους παρουσιάζουν τα ίδια λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως η στρατηγική τροφοληψίας ανεξάρτητα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, κάτι που σύμφωνα με τους Maurer et al., (1999), δεν συμβαίνει πάντα. Στην παρούσα μελέτη, η ενσωμάτωση ειδών-δεικτών που αντικατοπτρίζουν πλήρως την περιβαλλοντική μεταβλητότητα της περιοχής παρουσίασε αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά τις πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην κατανομή των θαλάσσιων βενθικών ειδών.

4.5 Συμπεράσματα

Τα ευρήματα της συγκεκριμένης μελέτης οδηγούν στο συμπέρασμα ότι όσο περιορισμένος είναι ο οικολογικός θώκος ενός είδους, τόσο πιο επιρρεπές είναι αυτό στην

κλιματική αλλαγή. Το σημερινό σύστημα οικολογικής κατάταξης των οργανισμών δεν συμβαδίζει με την απόκριση τους όσον αφορά το μελλοντικό κλιματολογικό σενάριο που εξετάστηκε. Τα ευρήματα αυτά ερμηνεύονται από το γεγονός ότι η διαδικασία κατάταξης των οργανισμών σε οικολογικές ομάδες με βάση την ευαισθησία τους στη διατάραξη δεν εμπερικλείει την πιθανή απόκριση των οργανισμών σε αλλαγές της θερμοκρασίας και της αλατότητας και περιορίζεται κυρίως, αν όχι αποκλειστικά, στην απόκριση των ειδών στον οργανικό εμπλουτισμό. Η ενσωμάτωση των ειδών-δεικτών σε μοντέλα πρόβλεψης κατανομής είναι μια χρήσιμη προσέγγιση για αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής σε μεγάλη χωρική κλίμακα. Στην παρούσα μελέτη τα μακροπανιδικά μαλάκια *C. gibba*, *A. prismatica* και *F. hyalinus* αποτέλεσαν δείκτες των υδρογραφικών συνθηκών που χαρακτηρίζουν το Αιγαίο και το Ιόνιο πέλαγος και αποκρίθηκαν έντονα στο εξεταζόμενο σενάριο. Το δίθυρο *M. donacina* το οποίο δεν συσχετίζεται με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες ήταν λιγότερο επιρρεπές στην αύξηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας. Τα μαλάκια αποτελούν ιδανικό βιολογικό υλικό για πρόβλεψη των επιπτώσεων διαφόρων κλιματολογικών αλλαγών εξαιτίας της καταγεγραμμένης παλαιογεωγραφίας τους.

Η παρούσα μελέτη βασίζεται σε μια νέα αντίληψη για τη χρήση των βενθικών οργανισμών ως βιοτικά μέσα για την εξέταση των επιπτώσεων διαφόρων τύπων περιβαλλοντικών διαταραχών με κύρια αρχή την κατανόηση του οικολογικού θώκου του κάθε είδους. Πιστεύουμε ότι το υπάρχον πρότυπο κατάταξης των μακροβενθικών ειδών δεν είναι συναφές με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο βενθικό οικοσύστημα. Προτείνουμε τη χρήση ειδών που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες ως μέσα παρακολούθησης εν εξελίξει περιβαλλοντικών διαταραχών όπως η κλιματική αλλαγή.

Κεφάλαιο 5. Γενική συζήτηση

Η αρχική υπόθεση ότι οι περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις επηρεάζουν την απόκριση των βενθικών ειδών στην περιβαλλοντική διατάραξη επιβεβαιώθηκε. Στη συγκεκριμένη μελέτη, οι διαβαθμίσεις θερμοκρασίας, αλατότητας και πρωτογενούς παραγωγικότητας επηρεάζουν την δομή των βενθικών κοινοτήτων. Σε αντίθεση με την κατάταξη του βενθικού δείκτη BENTIX όπου κατατάσσει τα μακροβενθικά είδη σε τρεις κατηγορίες, οι αναλύσεις μας παρουσίασαν 6 τύπους βενθικών κοινοτήτων, που η κάθε μια αποκρίνεται με διαφορετικό τρόπο στις περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις. Συγκεκριμένα, οι χαμηλές τιμές αλατότητας στο Βόρειο Αιγαίο ήταν το κύριο παράγοντα που επηρεάζει τη δομή της πρώτης ομάδας, ενώ αντίστοιχα οι υψηλές τιμές του ίδιου παράγοντα στο Νότιο Αιγαίο διαμόρφωσαν τον αρχέτυπο της ομάδας 3. Η ομάδα 4 και 2 παρουσίασαν μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης σε όλες τις περιοχές της μελέτης που χαρακτηρίζονται από χαμηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης αντίθετα από την ομάδα 7 όπου αντιπροσωπεύει περιοχές με υψηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης και χαμηλή αλατότητα και θερμοκρασία. Η έντονη χωρική διαβάθμιση θερμοκρασίας αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα που διαμόρφωσε τις βενθικές κοινότητες των ομάδων 5 και 6 που χαρακτηρίζουν τα θερμά και τα ψυχρά ενδιαίτηματα του βόρειου και νότιου Αιγαίου αντίστοιχα.

Σημαντικό εύρημα αποτελεί το γεγονός ότι σε όλους τους αρχέτυπους των βενθικών κοινοτήτων καταγράφηκαν ευαίσθητα και ανθεκτικά στην περιβαλλοντική διατάραξη είδη. Τα ευρήματα της συγκεκριμένης μελέτης δείχνουν ότι δεν επαρκεί για όλες τις περιπτώσεις το ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο διαδοχής των ειδών στην περιβαλλοντική διατάραξη (Pearson and Rosenberg, 1978). Τα αποτελέσματα αυτά ερμηνεύονται από το γεγονός ότι το υπάρχον πρότυπο λαμβάνει υπόψη την απόκριση των βενθικών ειδών στον οργανικό

εμπλουτισμό ως μόνη πηγή διατάραξης και την κατάταξη των ειδών σε οικολογικές κατηγορίες (ευαίσθητα ή ανθεκτικά) ανάλογα με το ποσοστό παρουσίας τους σε οργανικά διαταραγμένα ή αδιατάρακτα ενδιαιτήματα. Τα αποτελέσματά μας συμφωνούν με προηγούμενες μελέτες που αναφέρουν ότι η απόκριση ενός είδους είναι αποτέλεσμα της θέσης του στις περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις (Siddig et al., 2016; Zettler et al., 2007). Σε περιοχές όπου συμμεταβάλλονται διαφορετικές περιβαλλοντικές παράμετροι, οι βενθικές κοινότητες διαμορφώνονται σύμφωνα με τα φυσιολογικά όρια ανοχής των ειδών που τις απαρτίζουν για τους εκάστοτε παράγοντες. Αναμένουμε ότι το υπάρχον πρότυπο διαδοχής των ειδών ισχύει σε περιοχές όπου οργανικός εμπλουτισμός αποτελεί τη μοναδική πηγή περιβαλλοντικής διατάραξης.

Η παρουσία έντονων περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων θερμοκρασίας, αλατότητας και πρωτογενούς παραγωγικότητας οδηγεί στη μείωση των οικολογικών ομάδων των βενθικών κοινοτήτων που διαμορφώνονται στα ενδιαιτήματα που χαρακτηρίζονται από ακραίες περιβαλλοντικές τιμές. Συγκεκριμένα στις ομάδες 5,6 και 7 παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη μείωση της λειτουργικής ποικιλότητας με την επικράτηση μιας εκ των δύο οικολογικών ομάδων (ευαίσθητα – ανθεκτικά είδη). Η ομάδα 5 χαρακτηρίζεται από έντονη παρουσία θερμόφιλων ειδών που παρουσιάζουν μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης στα παράκτια ενδιαιτήματα του νότιου Αιγαίου και αντίστοιχα η ομάδα 6 από ψυχρόφιλα είδη που παρουσιάζουν μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης στα ενδιαιτήματα του βόρειου Αιγαίου. Η ομάδα 7 ευνοείται από την υψηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης σε κλειστούς κόλπους στο βόρειο και κεντρικό Αιγαίο. Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης συμφωνούν με προηγούμενες μελέτες που τονίζουν τη σημασία των φυσικών περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων στην κατανομή των βενθικών οργανισμών ως μέσο επιλογής ειδών ικανών για επιβίωση στις εκάστοτε συνθήκες (Carbonell et al., 2017; Maestre et al., 2009).

Ένας άλλος στόχος της συγκεκριμένης μελέτης ήταν η εξέταση της απόκρισης των βενθικών ειδών στην οικολογική κατάσταση της υδάτινης στήλης. Για το σκοπό αυτό, οι σταθμοί μελέτης χωρίστηκαν σε δύο ομάδες ανάλογα με τα επίπεδα ευτροφισμού σύμφωνα με τα προταθέντα όρια του ελληνικού θαλάσσιου χώρου (Simboura et al., 2005). Σε επίπεδο κοινότητας δεν αντικατοπτρίζεται η υποβαθμισμένη οικολογική κατάσταση της υδάτινης στήλης στο βενθικό οικοσύστημα των ευτροφικών σταθμών της περιοχής μελέτης. Αντιθέτως, σε επίπεδο είδους, η διασύνδεση στήλης – βένθους επιτεύχθηκε με τη μελέτη των ειδών-δεικτών που χαρακτηρίζουν κάθε ομάδα σταθμών. Παρά το γεγονός ότι στους σταθμούς με υψηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης («μη αποδεκτή» οικολογική κατάσταση) καταγράφηκαν ευαίσθητα και ανθεκτικά είδη εξαιτίας της παρουσίας επιπλέον περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων όπως έχει ήδη αναλυθεί, τα είδη που αντιπροσωπεύουν τους ευτροφικούς σταθμούς (δεικτες) ανήκουν όλα στην κατηγορία ειδών που περιγράφονται ως ανθεκτικά. Αντιθέτως, τα είδη-δείκτες που χαρακτηρίζουν τους σταθμούς που ανήκουν στην ομάδα με «αποδεκτή» οικολογική κατάσταση καταγράφηκε ότι ανήκουν και στις δύο οικολογικές κατηγορίες (ευαίσθητα – ανθεκτικά). Η αυξημένη λειτουργική ποικιλότητα στους σταθμούς αυτούς ερμηνεύεται από το γεγονός ότι σε ενδιαιτήματα που χαρακτηρίζονται από μειωμένη περιβαλλοντική διατάραξη παρατηρείται συμπαρουσία ειδών με μερική ή καθόλου επικάλυψη του οικολογικού θώκου. Η απόκριση των ειδών κατά μήκος μιας περιβαλλοντικής διατάραξης είναι ανάλογη με τα χαρακτηριστικά ζωής (life history traits) και τον τύπο/φύση της διατάραξης (Bertness and Callaway, 1994). Στην παρούσα μελέτη τα ανθεκτικά και ευαίσθητα στην περιβαλλοντική διατάραξη είδη χαρακτηρίζονται από διαφορετικές οικολογικές στρατηγικές. Τα ανθεκτικά είδη έχουν σύντομο κύκλο ζωής, γρήγορη ανάπτυξη και αναπαραγωγική ωρίμανση και χαμηλή βιομάζα (r-στρατηγική). Τα είδη που κατατάσσονται ως «ευαίσθητα» στην περιβαλλοντική διατάραξη

έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, αργούς ρυθμούς ανάπτυξης και αυξημένη βιομάζα (Κ-στρατηγική). Η συμπαρουσία ειδών με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά ενισχύει τις οικολογικές διαφορές ανάμεσα στα είδη όσον αφορά την εκμετάλλευση πόρων ή οικοθέσης (Carbonell et al., 2017). Η δράση του μηχανισμού αυτού είναι εμφανής στους σταθμούς της παρούσας μελέτης που χαρακτηρίζονται από μειωμένα επίπεδα ευτροφισμού όπου συνυπάρχουν είδη με διαφορετικές οικολογικές προσαρμογές.

Τα ευρήματα του κεφαλαίου αυτού αναδεικνύουν την χρησιμότητα των ειδών-δεικτών ως μέσο αξιολόγησης της οικολογικής κατάστασης και τη σημασία των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων στην κατανομή των θαλάσσιων βενθικών ειδών. Παράλληλα, συνιστούν προσοχή στη χρήση των υπαρχουσών οικολογικών κατηγοριών (ευαίσθητα – ανθεκτικά) για περιγραφή των βενθικών κοινοτήτων σε περιοχές με δυναμικό υδροδυναμικό χαρακτήρα. Συγκεκριμένα προτείνονται τρεις προσεγγίσεις για ορθή χρήση των βενθικών βιοτικών δεικτών 1) Περιορισμό των οικολογικών κατηγοριών σε συνθήκες οργανικής διατάραξης και χωρίς τη συμμεταβολή άλλων περιβαλλοντικών παραμέτρων. 2) Εναλλακτικά, στην επανεξέταση των ορισμών αυτών υπό το πρίσμα του οικολογικού θώκου του κάθε είδους και 3) Την προσαρμογή των τιμών ανθεκτικότητας και ευαισθησίας για κάθε είδος ανάλογα με τα υδρογραφικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής ώστε να μετριαστεί η επιρροή διαφορετικών περιβαλλοντικών παραμέτρων πέραν του οργανικού εμπλουτισμού. (Fleischer and Zettler, 2009).

Τα αποτελέσματα του δευτέρου κεφαλαίου της παρούσας μελέτης οδήγησε στη χρήση των ειδών-δεικτών *C. gibba* και *F. hyalinus* σε μοντέλα πρόβλεψης κατανομής με σκοπό την αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης μιας ευρύτερης θαλάσσιας περιοχής. Προτείνουμε τη χρήση του δίθυρου *C. gibba* ως δείκτη ευτροφισμού και ως βιοτικό εργαλείο

παρακολούθησης της οικολογικής κατάστασης εξαιτίας της προβλεψιμότητας όσον αφορά την απόκριση του είδους σε συνθήκες οργανικού εμπλουτισμού και της εύκολης αναγνώρισής του. Η μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης του είδους *C. gibba* σε περιβαλλοντικά διαταραγμένες περιοχές όσον αφορά τα επίπεδα ευτροφισμού οφείλεται στη μεγάλη συγκέντρωση χλωροφύλλης – *α*. Αντιθέτως, σε περιβαλλοντικά αδιατάρακτες περιοχές οι βενθικές κοινότητες χαρακτηρίζονται από αυξημένη πολυπλοκότητα και βιολογική ποικιλότητα. Στην παρούσα μελέτη το *F. hyalinus* αποτέλεσε το είδος-δείκτη περιβαλλοντικά αδιατάρακτων ενδιαιτημάτων λόγω των σταθερών επιπέδων αλατότητας.

Τα είδη που εξετάζονται στο κεφάλαιο αυτό πληρούν τις προϋποθέσεις για ενσωμάτωσή τους σε χωρικά μοντέλα κατανομής. Το γεγονός ότι η απόκριση των ειδών αυτών στον εμπλουτισμό με θρεπτικά και στην αυξημένη πρωτογενή παραγωγικότητα είναι προβλέψιμη, αποτελεί απαραίτητο χαρακτηριστικό για ένα είδος-δείκτη. Στην παρούσα μελέτη, η παρουσία του μακροπανιδικού είδους *C. gibba* είχε άμεση σχέση με περιοχές που αξιολογήθηκαν με μέτρια, κακή ή φτωχή οικολογική κατάσταση όσον αφορά τα επίπεδα της συγκέντρωσης χλωροφύλλης – *α* η οποία και αποτελούσε τον καθοριστικότερο παράγοντα που επηρεάζει την κατανομή του είδους με βάση τα χωρικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν. Η επικράτηση του είδους *C. gibba* έναντι άλλων μακροπανιδικών ειδών σε περιοχές με έντονο οργανικό εμπλουτισμό υποστηρίζεται από μια σειρά μελετών (Cavallini et al., 2005; Crema et al., 1991; Leshno et al., 2015; N'Siala et al., 2008; Solis-Weiss et al., 2004). Η υψηλή συγκέντρωση χλωροφύλλης *α* στις βόρειες περιοχές της μελέτης σε συνδυασμό με την ιδανική θερμοκρασία που προκαλεί ανάπτυξη του οστράκου και των ατόμων που βρίσκονται στο στάδιο της προνύμφης, δημιουργεί το ιδανικό ενδιαίτημα για το είδος *C. gibba*. Η υψηλή πιθανότητα εμφάνισης του είδους στο Βόρειο Αιγαίο πέλαγος ερμηνεύεται από τις υδρογραφικές συνθήκες που χαρακτηρίζουν την περιοχή αυτή. Η αυξημένη πρωτογενής

παραγωγή στο βόρειο Αιγαίο όπου και καταγράφηκε η μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης του είδους είναι – πέραν της ανθρωπογενούς - και φυσικής προελεύσεως λόγω των εκβολικών εισροών από ένα έντονο δίκτυο ποταμών σε συνδυασμό με τις εισροές με προέλευση από τη Μαύρη Θάλασσα μέσω των στενών των Δαρδανελίων με νερά πλούσια σε θρεπτικά (Giannakourou et al., 2014; Ignatiades, 2005; Primpas and Karydis, 2011).

Αντίστοιχα, το βενθικό είδος *F. hyalinus* ευδοκμεί σε ενδιαιτήματα που χαρακτηρίζονται από σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες συμφωνώντας με προηγούμενη μελέτη από τους Çinar et al. (2015) που χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο είδος ως ευαίσθητο στις περιβαλλοντικές αλλαγές όσον αφορά τα επίπεδα αλατότητας και θερμοκρασίας. Τα είδη-δείκτες που χαρακτηρίζουν περιβαλλοντικά αδιατάρακτες περιοχές αναμένεται να διαφέρουν για κάθε θαλάσσια περιοχή επομένως συνιστάται ο προσδιορισμός των κατάλληλων ειδών-δεικτών ανά περιοχή μελέτης. Στην παρούσα μελέτη, το ενδιαίτημα του *F. hyalinus* όπως αυτό προκύπτει από τα μοντέλα πρόβλεψης κατανομής συμβαδίζει χωρικά με τις περιοχές που χαρακτηρίζονται με «αποδεκτή» οικολογική κατάσταση όσον αφορά τα επίπεδα ευτροφισμού. Οι επιπτώσεις της αλατότητας στις βενθικές συναθροίσεις και συγκεκριμένα για τα είδη του γένους *Flexorecten* σχολιάστηκαν στην Ενότητα 3.4. Στη συγκεκριμένη μελέτη η κατανομή του *F. hyalinus* επηρεάζεται από τη χωρική μεταβλητότητα της αλατότητας εξαιτίας των έντονα διαμορφωμένων διαβαθμίσεων στο Αιγαίο πέλαγος (από Βορρά προς Νότο) ως αποτέλεσμα της εισροής υδάτων από τη Μαύρη Θάλασσα μέσω των στενών των Δαρδανελίων.

Η προβλεψιμότητα στα ενδιαιτήματα που ευδοκμούν τα είδη αυτά είναι βασικό χαρακτηριστικό για τη χρήση τους ως είδη-δείκτες. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι τα χαρακτηριστικά όστρακα τους τα καθιστούν εύκολα προς αναγνώριση είδη. Η ταξινόμηση

των δίθυρων χαρακτηρίζεται ως πιο εύκολη διαδικασία σε σχέση με τις υπόλοιπες μακροπανιδικές ομάδες (Nerlonić et al., 2011; Zenetos, 1996).

Η παρακολούθηση της οικολογικής κατάστασης ενός βενθικού οικοσυστήματος μέσω των κατανομών των μακροβενθικών ασπόνδυλων ως βιοτικά εργαλεία αποτελεί μια χρονοβόρα και με μεγάλο κόστος διαδικασία που απαιτεί επαρκή γνώση ταξινομικής. Η μεθοδολογία που προτείνεται στη συγκεκριμένη μελέτη στοχεύει να λύσει τα προαναφερθέντα εμπόδια μέσω τριών σταδίων: 1) Τη χρήση δεδομένων παρουσίας/απουσίας ειδών έναντι δεδομένων αφθονίας. Αυτό το στάδιο έχει ως στόχο να διευκολύνει τη διαδικασία της δειγματοληψίας. 2) μελέτη συγκεκριμένων ειδών έναντι της μελέτης κοινότητας. Το στάδιο αυτό έχει ως στόχο την ενσωμάτωση ειδών που δεν απαιτούν εκτεταμένη γνώση ταξινομικής σε μελέτες αξιολόγησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Και 3) τη χρήση περιβαλλοντικών δεδομένων που είναι άμεσα διαθέσιμα από παγκόσμιες διαδικτυακές βάσεις. Αυτό το στάδιο αποτελεί την λύση με το μικρότερο κόστος όσον αφορά τη συλλογή των περιβαλλοντικών δεδομένων.

Υποστηρίζουμε πως η χρήση βενθικών ειδών-δεικτών και περιβαλλοντικών δεδομένων από παγκόσμιες βάσεις σε μοντέλα κατανομής ειδών αποτελεί μια καινοτόμο και αποτελεσματική προσέγγιση στην αξιολόγηση της οικολογικής κατάστασης θαλάσσιων ενδιαιτημάτων.

Στα πλαίσια του τρίτου ερωτήματος της παρούσας μελέτης, έγινε διερεύνηση της σχετικότητας των οικολογικών κατηγοριών των βενθικών ειδών στην αξιολόγηση διαφορετικών περιβαλλοντικών διαταραχών πέραν του οργανικού εμπλουτισμού. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η απόκριση των βενθικών οργανισμών στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας. Με βάση τη μεθοδολογία που προτάθηκε στο τρίτο κεφάλαιο,

αξιολογήθηκαν οι πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην κατανομή αντιπροσωπευτικών βενθικών ειδών-δεικτών και η σχετικότητα των σημερινών οικολογικών κατηγοριών τους. Η αρχική υπόθεση ότι η απόκριση των βενθικών ειδών στο εξεταζόμενο σενάριο κλιματικής αλλαγής εξαρτάται από το εύρος του οικολογικού του θώκου επιβεβαιώθηκε. Η οικολογική κατάταξη του κάθε είδους όσον αφορά την απόκρισή του στην περιβαλλοντική διατάραξη λόγω οργανικού εμπλουτισμού δεν συνέπιπτε με την απόκριση του είδους στην κλιματική αλλαγή. Αντίθετα, το ποσοστό ευαισθησίας του κάθε είδους στις πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, είναι σε άμεση εξάρτηση με τις περιβαλλοντικές του προτιμήσεις και όχι με την παρούσα οικολογική του ταξινόμηση που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα. Τα αποτελέσματα της μελέτης δικαιολογούνται από το γεγονός ότι η κατάταξη των βενθικών ειδών σε οικολογικές κατηγορίες γίνεται με βάση την απόκριση τους στον οργανικό εμπλουτισμό ως μοναδική πηγή διατάραξης. Τα ευρήματά μας παρουσιάζουν τις πιθανές επιπτώσεις στην κατανομή χαρακτηριστικών βενθικών ειδών του ελληνικού χώρου εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας και της αλατότητας.

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αναμένεται να είναι πιο εμφανείς σε είδη που χαρακτηρίζουν ενδιαιτήματα με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (είδη-δείκτες). Επίσης, παρατηρήθηκε πως είδη που κατατάσσονταν στην ίδια οικολογική βαθμίδα ευαισθησίας στην περιβαλλοντική διατάραξη αποκρίθηκαν διαφορετικά στο σενάριο RCP 8.5. Τα χωρικά μοντέλα πρόβλεψης κατανομής στην παρούσα μελέτη που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής για το έτος 2100 αλλαγής έδειξαν ότι η καταλληλότητα του ενδιαιτήματος για τα είδη *Corbula gibba*, *Abra prismatica* και *Moerella donacina* αναμένεται να μειωθεί ενώ το είδος *Flexorecten hyalinus* αναμένεται να επεκτείνει τα γεωγραφικά του όρια. Τα αποτελέσματα της μελέτης ερμηνεύονται από το γεγονός ότι οι βενθικές κοινότητες της ανατολικής Μεσογείου

αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από μεταναστευτικά ψυχρόφιλα είδη του Ατλαντικού ωκεανού (Pérès, 1967). Η σύγχρονη Μεσογειακή θαλάσσια πανίδα έχει άμεση σχέση με την πανίδα του βόρειου-ανατολικού Ατλαντικού ωκεανού καθώς τα είδη *C. gibba*, *A. prismatica* και *M. donacina* έχουν όλα προέλευση από τον Ατλαντικό ωκεανό και μετανάστευσαν στη Μεσόγειο μετά το πέρας της κρίσης αλατότητας του Μεσσηνίου όπου και καταγράφηκε το πρώτο κύμα μετανάστευσης ειδών. Στην σύγχρονη εποχή, τα προαναφερθέντα είδη είναι πιο άφθονα στη Βόρεια Θάλασσα, μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από χαμηλή θερμοκρασία και αλατότητα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, υδρογραφικές συνθήκες που οφείλονται στην επιρροή του ρεύματος του Κόλπου. Η κατανομή των ειδών αυτών στην Μεσόγειο περιορίζεται στα ψυχρότερα βόρεια τμήματα της λεκάνης. Στην παρούσα περιοχή μελέτης, η πανίδα του βόρειου Αιγαίου χαρακτηρίζεται από ψυχρόφιλα είδη που συγκροτούν όμοιες βενθικές κοινότητες με το βόρειο-δυτικό τμήμα της Μεσογείου (Bianchi, 2007; Pérès, 1967). Τα είδη *C. gibba* και *A. prismatica* κατέγραψαν μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης στο βόρειο Αιγαίο, μια θαλάσσια περιοχή που χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και αλατότητα ενώ ταυτόχρονα καταγράφονται υψηλά ποσοστά πρωτογενούς παραγωγικότητας. Σύμφωνα με τα ευρήματα της μελέτης, η αύξηση >3 βαθμών της ελάχιστης θερμοκρασίας πυθμένα σύμφωνα με το σενάριο RCP 8.5 οδηγεί σε μείωση των κατάλληλων ενδιαιτημάτων των ψυχρόφιλων ειδών. Επιπλέον, η αύξηση ~2 βαθμών της αλατότητας δεν ευνοεί τη κατανομή των ειδών αυτών καθώς είναι ανθεκτικά σε υφάλμυρα νερά όμως όχι σε υπέραλα συμφωνώντας με την μελέτη των Weinert et al., (2016), όπου επίσης παρατηρήθηκε μείωση της κατανομής του είδους *C. gibba* καθώς επίσης και για κάποια είδη από τα γένη *Abra* και *Moerella* υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής τονίζοντας παράλληλα τη σημαντικότητα της αύξησης της θερμοκρασίας και της αλατότητας στη κατανομή των βενθικών οργανισμών. Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης επιβεβαιώνουν

την σημαντική σχέση των ειδών *C. gibba* και *A. prismatica* αυτών με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (indicative power) που περιεγράφηκαν αρχικά από τους Moraitis et al., (2018). Αντίθετα με τα είδη *C. gibba* και *A. prismatica*, το είδος *M. donacina* δεν παρουσίασε ισχυρή συσχέτιση με κάποιο συγκεκριμένο ενδιαίτημα ή υδρογραφικό προφίλ (δεν ήταν είδος-δείκτης), επομένως η κατανομή του είδους ήταν πολύ ευρύτερη. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής ήταν λιγότερο εμφανείς στην κατανομή του *M. donacina* σε σχέση με τα άλλα είδη, ωστόσο, καθώς πρόκειται για ψυχρόφιλο είδος, παρατηρήθηκε μείωση των ενδιαιτημάτων του. Το *M. donacina* κατατάσσεται ως «ευαίσθητο» στην περιβαλλοντική διατάραξη σύμφωνα με τους θεσπισμένους βιοτικούς δείκτες ωστόσο, η απόκρισή του στην κλιματική αλλαγή ήταν παρόμοια με την πρώτη ομάδα ειδών που κατατάσσονται ως «ανθεκτικά» στην περιβαλλοντική διατάραξη. Το πιο πάνω αποτέλεσμα αποδίδεται στις αρνητικές επιπτώσεις της αύξησης της θερμοκρασίας στη κατανομή του είδους, κάτι το οποίο παρατηρείται και στις περιπτώσεις των *C. gibba* και *A. prismatica*.

Το κτένι, *F. hyalinus* κατέγραψε μια σημαντικά διαφορετική απόκριση στην κλιματική αλλαγή σε σχέση με το επίσης ευαίσθητο είδος *M. donacina*. Ο κλιματικός χώρος του είδους είναι πολύ συγκεκριμένος και χαρακτηρίζεται κυρίως από υψηλή θερμοκρασία και αλατότητα. Η ικανότητα του είδους *F. hyalinus* να αποτελεί είδος-δείκτη ενδιαιτημάτων που διακατέχονται από σταθερά αυξημένη θερμοκρασία και αλατότητα παρατηρήθηκε επίσης από τους Moraitis et al., (2018) οι οποίοι χαρακτήρισαν το είδος αυτό ως δείκτη στα ενδιαιτήματα που καταγράφηκε όσον αφορά τα επίπεδα αλατότητας και θερμοκρασίας. Εξαιτίας των ιδιαίτερων περιβαλλοντικών προτιμήσεων του είδους που διαμορφώνονται από συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας και αλατότητας η κατανομή του *F. hyalinus* αναμένεται να επηρεαστεί άμεσα από τις κλιματολογικές μεταβολές που εξετάστηκαν. Η διαφορά της απόκρισης του *F. hyalinus* σε σχέση με τα άλλα είδη, είναι ότι παρατηρείται

επέκταση της κατανομής του με το προβλεπόμενο σενάριο αύξησης θερμοκρασία και αλατότητας και όχι μείωση. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα είδη της μελέτης, το *F. hyalinus* δεν ανήκει στη αρχική πανίδα που εποίκισε τη μεσογειακή λεκάνη με προέλευση από τον Ατλαντικό ωκεανό (Raffi et al., 1985). Το είδος *F. hyalinus* χαρακτηρίζεται ως «στενόθερμο» είδος και ανήκει στην κατηγορία των θερμών-εύκρατων ή ημι-τροπικών δίθυρων που μετανάστευσαν στη Μεσόγειο Θάλασσα κατά τη διάρκεια του Πλειόκαινου. (Raffi et al., 1985). Η αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης του είδους στο νότιο Αιγαίο και στο νησιωτικό τμήμα του Ιονίου πελάγους στην παρούσα μελέτη, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις υδρογραφικές συνθήκες των περιοχών που καταγράφηκε το είδος. Συγκεκριμένα, το νότιο-κεντρικό Αιγαίο πέλαγος επηρεάζεται από το επιφανειακό υδάτινο μέτωπο Λεβαντίνης (Levantine surface water), το οποίο είναι αποτέλεσμα έντονης εξάτμισης στην περιοχή της Λεβαντίνης (Ciappa, 2014), ενώ ταυτόχρονα το Ιόνιο πέλαγος επηρεάζεται από το ενδιάμεσο υδάτινο μέτωπο Λεβαντίνης (Levantine Intermediate Water), το οποίο είναι αποτέλεσμα ανταλλαγών αέρα-θάλασσας κατά μήκος της μεσογειακής λεκάνης (Menna and Roulain, 2009). Οι προαναφερθείσες υδάτινες μάζες προμηθεύουν συνεχώς το Ιόνιο και το Αιγαίο πέλαγος με θερμά και με αυξημένης αλατότητας ρεύματα κατά τρόπο που οι υδρογραφικές συνθήκες των περιοχών αυτών διατηρούνται σχετικά σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου ευνοώντας την παρουσία του *F. hyalinus* (Moraitis et al., 2018). Αποδίδουμε τα αποτελέσματα των μοντέλων που προβλέπουν επέκταση του είδους μέχρι το έτος 2100 στην αναμενόμενη αύξηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας που αναμένεται να δημιουργήσουν καινούργιους θώκους σε μέχρι πρότινος ακατάλληλες για εποίκηση περιοχές κυρίως στο βόρειο Αιγαίο πέλαγος. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης συμφωνούν με άλλες μελέτες που τονίζουν το γεγονός ότι παρατηρείται σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας στη Μεσόγειο Θάλασσα (Borghini et al., 2014; Potter

and Lozier, 2004). Η σημερινή επιφανειακή θερμοκρασία στο βόρειο Αιγαίο είναι ~14°C (Bianchi, 2007; Moraitis et al., 2018) και τα ευρήματα της παρούσας μελέτης καταγράφουν την ελάχιστη θερμοκρασία πυθμένα <12°C, συνθήκες οι οποίες δεν ευνοούν την παρουσία του είδους *F. hyalinus*. Επιπλέον, τα επίπεδα αλατότητας σε αυτή την περιοχή είναι απαγορευτικά για τα είδη το γένους *Flexorecten* όπως αναφέρεται και στην Ενότητα 3.4.

Οι οικολογικές κατηγορίες ευαισθησίας στις οποίες κατατάσσονται σήμερα οι βενθικοί οργανισμοί δεν χαρακτηρίζουν μια πιθανή απόκριση τους σε κάποιο παράγοντα διατάραξης πέρα από τη οργανική ρύπανση. Τα ευρήματα της μελέτης συμφωνούν με τους Zettler et al., (2013) που τονίζουν ότι τέτοιου είδους γενικευμένη κατάταξη είναι μεροληπτική όταν εφαρμοστεί σε μελέτες περιβαλλοντικής διατάραξης μεγάλης χωρικής κλίμακας και πως τα είδη-δείκτες αποτελούν καλύτερη επιλογή για αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε αυτές τις περιπτώσεις. Η ενσωμάτωση των ειδών-δεικτών σε μοντέλα πρόβλεψης κατανομής είναι μια χρήσιμη προσέγγιση για αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής σε μεγάλη χωρική κλίμακα. Στην παρούσα μελέτη τα μακροπανιδικά μαλάκια *C. gibba*, *A. prismatica* και *F. hyalinus* αποτέλεσαν δείκτες των υδρογραφικών συνθηκών που χαρακτηρίζουν το Αιγαίο και το Ιόνιο πέλαγος και αποκρίθηκαν έντονα στο εξεταζόμενο σενάριο. Το δίθυρο *M. donacina* το οποίο δεν συσχετίζεται με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες ήταν λιγότερο επιρρεπές στην αύξηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας.

Σήμερα οι επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων δεν περιορίζονται σε τοπικό επίπεδο αλλά ανάγονται σε μεγαλύτερη χωρική και χρονική κλίμακα με τη δημιουργία περιβαλλοντικών ζητημάτων όπως η κλιματική αλλαγή. Η χρήση των παραδοσιακών βιολογικών εργαλείων και μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνταν στη θαλάσσια οικολογία

μέχρι σήμερα πιθανόν να μην επαρκεί για την παρακολούθηση της οικολογικής κατάστασης σε τέτοιο επίπεδο. Η ανάγκη για θέσπιση καινοτόμων μεθοδολογιών που ενσωματώνουν περιβαλλοντικά δεδομένα εκτεταμένης χωρικής κλίμακας και βιοτικά συστατικά των οικοσυστημάτων για αξιολόγηση αλλά και πρόβλεψη της κατάστασης των ενδιαιτημάτων αποτελεί ένα βήμα προς αυτή την κατεύθυνσή. Επίσης, τα ευρήματα της συγκεκριμένης μελέτης τονίζουν τη σημασία της κατανόησης των επιπτώσεων των υδρογραφικών συνθηκών που χαρακτηρίζουν τη κάθε περιοχή στην κατανομή των ειδών. Στην μελέτη μας, η παρουσία των περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων αποτέλεσε αναπόσπαστο κομμάτι στον σχεδιασμό και στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Η παρούσα διδακτορική διατριβή στηρίζεται σε μια καινούργια προσέγγιση στην παρακολούθηση των παράκτιων θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

Βιβλιογραφία

- Aiello-Lammens, M.E., Boria, R.A., Radosavljevic, A., Vilela, B., Anderson, R.P., 2015. spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography (Cop.)*. 38, 541–545. <https://doi.org/10.1111/ecog.01132>
- Allouche, O., Tsoar, A., Kadmon, R., 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *J. Appl. Ecol.* 43, 1223–1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Appelqvist, C., Al-Hamdani, Z.K., Jonsson, P.R., Havenhand, J.N., 2015. Climate envelope modeling and dispersal simulations show little risk of range extension of the shipworm, *Teredo navalis* (L.), in the Baltic Sea. *PLoS One* 10, 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119217>
- Araújo, M.B., New, M., 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends Ecol. Evol.* 22, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.09.010>
- Arvanitidis, C., Atzigeorgiou, G., Koutsoubas, D., Dounas, C., Eleftheriou, A., Koulouri, P., 2005. Mediterranean lagoons revisited: Weakness and efficiency of the rapid biodiversity assessment techniques in a severely fluctuating environment. *Biodivers. Conserv.* 14, 2347–2359. <https://doi.org/10.1007/s10531-004-1668-x>
- Barbone, E., Rosati, I., Reizopoulou, S., Basset, A., 2012. Linking classification boundaries to sources of natural variability in transitional waters: A case study of benthic macroinvertebrates. *Ecol. Indic.* 12, 105–122. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.014>
- Basterretxea, G., Font-Muñoz, J.S., Salgado-Hernanz, P.M., Arrieta, J., Hernández-Carrasco,

- I., 2018. Patterns of chlorophyll interannual variability in Mediterranean biogeographical regions. *Remote Sens. Environ.* 215, 7–17.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.027>
- Bateman, D.C., Bishop, M.J., 2017. The environmental context and traits of habitat-forming bivalves influence the magnitude of their ecosystem engineering. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 563, 95–110. <https://doi.org/10.3354/meps11959>
- Bertness, M.D., Callaway, R., 1994. Positive interactions in communities. *Trends Ecol. Evol.* 9, 191–193. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(94\)90088-4](https://doi.org/10.1016/0169-5347(94)90088-4)
- Bianchi, C.N., 2007. Biodiversity issues for the forthcoming tropical Mediterranean Sea. *Hydrobiologia* 580, 7–21. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0469-5>
- Borghini, M., Bryden, H., Schroeder, K., Sparnocchia, S., Vetrano, A., 2014. The Mediterranean is becoming saltier. *Ocean Sci.* 10, 693–700.
<https://doi.org/10.5194/os-10-693-2014>
- Borja, A., Franco, J., Pérez, V., 2000. A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos Within European Estuarine and Coastal Environments. *Mar. Pollut. Bull.* 40, 1100–1114. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00061-8)
- Bouma, T.J., Olenin, S., Reise, K., Ysebaert, T., 2009. Ecosystem engineering and biodiversity in coastal sediments: Posing hypotheses. *Helgol. Mar. Res.* 63, 95–106.
<https://doi.org/10.1007/s10152-009-0146-y>
- Broennimann, O., Fitzpatrick, M.C., Pearman, P.B., Petitpierre, B., Pellissier, L., Yoccoz, N.G., Thuiller, W., Fortin, M.J., Randin, C., Zimmermann, N.E., Graham, C.H., Guisan, A., 2012. Measuring ecological niche overlap from occurrence and spatial environmental data.

- Glob. Ecol. Biogeogr. 21, 481–497. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00698.x>
- Carbonell, J.A., Velasco, J., Millán, A., Green, A.J., Coccia, C., Guareschi, S., Gutiérrez-Cánovas, C., 2017. Biological invasion modifies the co-occurrence patterns of insects along a stress gradient. *Funct. Ecol.* 31, 1957–1968. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12884>
- Carmichael, R.H., Shriver, A.C., Valiela, I., 2012. Bivalve Response to Estuarine Eutrophication: The Balance between Enhanced Food Supply and Habitat Alterations. *J. Shellfish Res.* 31, 1–11. <https://doi.org/10.2983/035.031.0101>
- Cavallini, F., Iotti, M., Simonini, R., 2005. Evoluzione dei popolamenti macrozoobentonici dell'Adriatico Settentrionale. 1. Analisi dei dati storici di Aristocle Vatova (1934-1936). *Atti della Soc. dei Nat. e Mat. di Modena* 2005) 135, 145–154.
- Ciappa, A.C., 2014. The controversial path of Atlantic Water in the Eastern Mediterranean. *Prog. Oceanogr.* 123, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.02.001>
- Çinar, M.E., Bakır, K., Öztürk, B., Katağan, T., Dağlı, E., Açıık, Ş., Doğan, A., Bakır, B.B., 2015. TUBI (Turkish Benthic Index): A new biotic index for assessing impacts of organic pollution on benthic communities. *J. Black Sea / Mediterr. Environ.* 21, 135–168.
- Crema, R., Castelli, A., Prevedelli, D., 1991. Long term eutrophication effects on macrofaunal communities in northern Adriatic Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 22, 503–508. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(91\)90405-H](https://doi.org/10.1016/0025-326X(91)90405-H)
- Darr, A., Gogina, M., Zettler, M.L., 2014. Detecting hot-spots of bivalve biomass in the south-western Baltic Sea. *J. Mar. Syst.* 134, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.03.003>

- Dauvin, J.C., Bakalem, A., Baffreau, A., Delecrin, C., Bellan, G., Lardicci, C., Balestri, E., Sardá, R., Grimes, S., 2017. The well sorted fine sand community from the western Mediterranean Sea: A resistant and resilient marine habitat under diverse human pressures. *Environ. Pollut.* 224, 336–351. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.013>
- Dauvin, J.C., Ruellet, T., 2007. Polychaete/amphipod ratio revisited. *Mar. Pollut. Bull.* 55, 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.08.045>
- de-la-Ossa-Carretero, J.A., Simboura, N., Del-Pilar-Ruso, Y., Pancucci-Papadopoulou, M.A., Giménez-Casalduero, F., Sánchez-Lizaso, J.L., 2012. A methodology for applying Taxonomic Sufficiency and benthic biotic indices in two Mediterranean areas. *Ecol. Indic.* 23, 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.03.029>
- De Cáceres, M., Legendre, P., 2009. Associations between species and groups of sites: Indices and statistical inference. *Ecology* 90, 3566–3574. <https://doi.org/10.1890/08-1823.1>
- De Cáceres, M., Legendre, P., Moretti, M., 2010. Improving indicator species analysis by combining groups of sites. *Oikos* 119, 1674–1684. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18334.x>
- Di Cola, V., Broennimann, O., Petitpierre, B., Breiner, F.T., D’Amen, M., Randin, C., Engler, R., Pottier, J., Pio, D., Dubuis, A., Pellissier, L., Mateo, R.G., Hordijk, W., Salamin, N., Guisan, A., 2017. ecospat: an R package to support spatial analyses and modeling of species niches and distributions. *Ecography (Cop.)*. 40, 774–787. <https://doi.org/10.1111/ecog.02671>
- Dimitriadis, C., Koutsoubas, D., 2008. Community properties of benthic molluscs as

indicators of environmental stress induced by organic enrichment. *J. Nat. Hist.* 42, 559–574. <https://doi.org/10.1080/00222930701835530>

Dimitriou, P.D., Karakassis, I., Pitta, P., Tsagaraki, T.M., Apostolaki, E.T., Magiopoulos, I., Nikolioudakis, N., Diliberto, S., Theodorou, J.A., Tzovenis, I., Kagalou, I., Beza, P., Tsapakis, M., 2015. Mussel farming in Maliakos Gulf and quality indicators of the marine environment: Good benthic below poor pelagic ecological status. *Mar. Pollut. Bull.* 101, 784–793. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.035>

Dimitriou, P.D., Karakassis, I., Pitta, P., Tsagaraki, T.M., Apostolaki, E.T., Magiopoulos, I., Nikolioudakis, N., Diliberto, S., Theodorou, J.A., Tzovenis, I., Kagalou, I., Beza, P., Tsapakis, M., 2015. Mussel farming in Maliakos Gulf and quality indicators of the marine environment: Good benthic below poor pelagic ecological status. *Mar. Pollut. Bull.* 101, 784–793. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.035>

Dufrêne, M., Legendre, P., 1997. Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecol. Monogr.* 67, 345–366. <https://doi.org/10.2307/2963459>

Dunstan, P.K., Foster, S.D., Darnell, R., 2011. Model based grouping of species across environmental gradients. *Ecol. Modell.* 222, 955–963. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.11.030>

Elith, J., Leathwick, J.R., 2009. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 40, 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>

Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C.J., 2011. A statistical

explanation of MaxEnt for ecologists. *Divers. Distrib.* 17, 43–57.

<https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>

EU, 2008. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008, establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). *Official Journal of the European Union* 2008, pp. 19–40.

EU, 2000. Directive of the European parliament and of the Council 2000/60/EC establishing a framework for community action in the field of Water Policy.

Fielding, A.H., Bell, J.F., 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environ. Conserv.* 24, 38–49.

<https://doi.org/10.1017/S0376892997000088>

Fleischer, D., Zettler, M.L., 2009. An adjustment of benthic ecological quality assessment to effects of salinity. *Mar. Pollut. Bull.* 58, 351–357.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.10.016>

Fortunato, H., 2016. Mollusks: Tools in Environmental and Climate Research *. *Am. Malacol. Bull.* 33, 310–324. <https://doi.org/10.4003/006.033.0208>

Galanidi, M., Kaboglu, G., Bizsel, K.C., 2016. Predicting the Composition of Polychaete Assemblages in the Aegean Coast of Turkey. *Front. Mar. Sci.* 3, 1–14.

<https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00154>

Gama, M., Crespo, D., Dolbeth, M., Anastácio, P., 2016. Predicting global habitat suitability for *Corbicula fluminea* using species distribution models: The importance of different environmental datasets. *Ecol. Modell.* 319, 163–169.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.001>

Gama, R., Aguirre-Gutiérrez, J., Stech, M., 2017. Ecological niche comparison and molecular phylogeny segregate the invasive moss species *Campylopus introflexus* (Leucobryaceae, Bryophyta) from its closest relatives. *Ecol. Evol.* 7, 8017–8031.
<https://doi.org/10.1002/ece3.3301>

Giannakourou, A., Tsiola, A., Kanellopoulou, M., Magiopoulos, I., Siokou, I., Pitta, P., 2014. Temporal variability of the microbial food web (viruses to ciliates) under the influence of the Black Sea Water inflow (N. Aegean, E. Mediterranean). *Mediterr. Mar. Sci.* 15, 769–780. <https://doi.org/10.12681/mms.1041>

Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.* 33, 1–4.
<https://doi.org/10.1029/2006GL025734>

Gogina, M., Zettler, M.L., 2010a. Diversity and distribution of benthic macrofauna in the Baltic Sea: Data inventory and its use for species distribution modelling and prediction. *J. Sea Res.* 64, 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2010.04.005>

Gogina, M., Zettler, M.L., 2010b. Diversity and distribution of benthic macrofauna in the Baltic Sea. *J. Sea Res.* 64, 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2010.04.005>

Goldsmith, J., Archambault, P., Chust, G., Villarino, E., Liu, G., Lukovich, J. V., Barber, D.G., Howland, K.L., 2018. Projecting present and future habitat suitability of ship-mediated aquatic invasive species in the Canadian Arctic. *Biol. Invasions* 20, 501–517.
<https://doi.org/10.1007/s10530-017-1553-7>

Gormley, K.S.G., Porter, J.S., Bell, M.C., Hull, A.D., Sanderson, W.G., 2013. Predictive Habitat Modelling as a Tool to Assess the Change in Distribution and Extent of an OSPAR

Priority Habitat under an Increased Ocean Temperature Scenario: Consequences for Marine Protected Area Networks and Management. *PLoS One* 8, 1–16.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068263>

Gray, J.S., 1979. Pollution-induced changes in populations. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. B* 286, 545–561.

Griffith, D.M., Veech, J.A., Marsh, C.J., 2016. **cooccur** : Probabilistic Species Co-Occurrence Analysis in R. *J. Stat. Softw.* 69, 1–17. <https://doi.org/10.18637/jss.v069.c02>

Guisan, A., Broennimann, O., Engler, R., Vust, M., Yoccoz, N.G., Lehmann, A., Zimmermann, N.E., 2006. Using niche-based models to improve the sampling of rare species. *Conserv. Biol.* 20, 501–511. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00354.x>

Heino, J., 2013. Environmental heterogeneity, dispersal mode, and co-occurrence in stream macroinvertebrates. *Ecol. Evol.* 3, 344–355. <https://doi.org/10.1002/ece3.470>

Hernandez, P.A., Graham, C., Master, L.L., Albert, D.L., 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography (Cop.)*. 29, 773–785. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2006.04700.x>

Hrs-Brenko, M., 2006. The basket shell, *Corbula gibba* Olivi, 1792 (Bivalve Mollusks) as a species resistant to environmental disturbances: A review. *Acta Adriat.* 47, 49–64.

Ignatiades, L., 2005. Scaling the trophic status of the Aegean Sea, eastern Mediterranean. *J. Sea Res.* 54, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2005.02.010>

Jensen, J.N., 1990. Increased abundance and growth of the suspension-feeding bivalve *corbula gibba* in a shallow part of the eutrophic Limfjord, Denmark. *Netherlands J. Sea*

Res. 27, 101–108. [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(90\)90038-I](https://doi.org/10.1016/0077-7579(90)90038-I)

Jones, M.C., Dye, S.R., Pinnegar, J.K., Warren, R., Cheung, W.W.L., 2013. Applying distribution model projections for an uncertain future: the case of the Pacific oyster in UK waters. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 23, 710–722.
<https://doi.org/10.1002/aqc.2364>

Karydis, M., 1999. Evaluation report on the eutrophication level in coastal greek areas. University Of Aegean. Mytilini, February 1999 (In Greek).

Kaschner, K., Kesner-Reyes, K., Garilao, C., Rius-Barile, J., Rees, T., Froese, R., 2016. AquaMaps: Predicted range maps for aquatic species. World wide web electronic publication, www.aquamaps.org, Version 08/2016.

Kotta, J., Möller, T., Orav-Kotta, H., Pärnoja, M., 2014. Realized niche width of a brackish water submerged aquatic vegetation under current environmental conditions and projected influences of climate change. *Mar. Environ. Res.* 102, 88–101.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.05.002>

Koutsoubas, D., Tselepides, A., Eleftheriou, A., 2000. Deep sea molluscan fauna of the Cretan Sea (Eastern Mediterranean): Faunal, ecological and zoogeographical remarks. *Senckenbergiana maritima* 30, 85–98. <https://doi.org/10.1007/BF03042958>

Kramer-Schadt, S., Niedballa, J., Pilgrim, J.D., Schröder, B., Lindenborn, J., Reinfelder, V., Stillfried, M., Heckmann, I., Scharf, A.K., Augeri, D.M., Cheyne, S.M., Hearn, A.J., Ross, J., Macdonald, D.W., Mathai, J., Eaton, J., Marshall, A.J., Semiadi, G., Rustam, R., Bernard, H., Alfred, R., Samejima, H., Duckworth, J.W., Breitenmoser-Wuersten, C., Belant, J.L., Hofer, H., Wilting, A., 2013. The importance of correcting for sampling bias

in MaxEnt species distribution models. *Divers. Distrib.* 19, 1366–1379.

<https://doi.org/10.1111/ddi.12096>

La Valle, P., Nicoletti, L., Finoia, M.G., Ardizzone, G.D., 2011. *Donax trunculus* (Bivalvia: Donacidae) as a potential biological indicator of grain-size variations in beach sediment. *Ecol. Indic.* 11, 1426–1436. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.005>

Lejeusne, C., Chevaldonné, P., Pergent-Martini, C., Boudouresque, C.F., Pérez, T., 2010. Climate change effects on a miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea. *Trends Ecol. Evol.* 25, 250–260.

<https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.10.009>

Leshno, Y., Benjamini, C., Edelman-Furstenberg, Y., 2015. Ecological quality assessment in the Eastern Mediterranean combining live and dead molluscan assemblages. *Mar. Pollut. Bull.* <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.014>

López-Baucells, A., Casanova, L., Puig-Montserrat, X., Espinal, A., Páramo, F., Flaquer, C., 2017. Evaluating the use of *Myotis daubentonii* as an ecological indicator in Mediterranean riparian habitats. *Ecol. Indic.* 74.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.012>

Lucena-Moya, P., Pardo, I., Álvarez, M., 2009. Development of a typology for transitional waters in the Mediterranean ecoregion: The case of the islands. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 82, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.12.011>

Lykousis, V., Chronis, G., Tselepides, A., Price, N.B., Theocharis, A., Siokou-Frangou, I., Van Wambeke, F., Danovaro, R., Stavrakakis, S., Duineveld, G., Georgopoulos, D., Ignatiades, L., Souvermezoglou, A., Voutsinou-Taliadouri, F., 2002. Major outputs of the

- recent multidisciplinary biogeochemical researches undertaken in the Aegean Sea. *J. Mar. Syst.* 33–34, 313–334. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00064-7)
- Macias, D.M., Garcia-Gorriz, E., Stips, A., 2015. Productivity changes in the Mediterranean Sea for the twenty-first century in response to changes in the regional atmospheric forcing. *Front. Mar. Sci.* 2, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00079>
- Maestre, F.T., Callaway, R.M., Valladares, F., Lortie, C.J., 2009. Refining the stress-gradient hypothesis for competition and facilitation in plant communities. *J. Ecol.* 97, 199–205. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01476.x>
- Marbà, N., Jordà, G., Agustí, S., Girard, C., Duarte, C.M., 2015. Footprints of climate change on Mediterranean Sea biota. *Front. Mar. Sci.* 2, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00056>
- Maurer, D., Nguyen, H., Robertson, G., Gerlinger, T., 1999. The Infaunal Trophic Index (ITI): Its suitability for marine environmental monitoring. *Ecol. Appl.* 9, 699–713. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1999\)009\[0699:TITIII\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1999)009[0699:TITIII]2.0.CO;2)
- McGeoch, M.A., Chown, S.L., 1998. Scaling up the value of bioindicators. *Trends Ecol. Evol.* 13, 46–47. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(97\)01279-2](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(97)01279-2)
- Menna, M., Poulain, P.M., 2009. Mediterranean subsurface circulation estimated from Argo data in 2003–2009. *Ocean Sci. Discuss.* 6, 2717–2753. <https://doi.org/10.5194/osd-6-2717-2009>
- Monegatti, P., Raffi, S., 2001. Taxonomic diversity and stratigraphic distribution of Mediterranean Pliocene bivalves. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 165, 171–193. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00159-0](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00159-0)

- Moraitis, M., Papageorgiou, N., Dimitriou, P.D., Petrou, A., Karakassis, I., 2013. Effects of offshore tuna farming on benthic assemblages in the eastern mediterranean. *Aquac. Environ. Interact.* 4, 41–51.
- Moraitis, M.L., Tsikopoulou, I., Geropoulos, A., Dimitriou, P.D., Papageorgiou, N., Giannoulaki, M., Valavanis, V.D., Karakassis, I., 2018. Molluscan indicator species and their potential use in ecological status assessment using species distribution modeling. *Mar. Environ. Res.* 140, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.05.020>
- Moraitis, M.L., Valavanis, V.D., Karakassis, I., 2019. Modelling the effects of climate change on the distribution of benthic indicator species in the Eastern Mediterranean Sea. *Sci. Total Environ.* 667, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.338>
- N'Siala, G.M., Grandi, V., Iotti, M., Montanari, G., Prevedelli, D., Simonini, R., 2008. Responses of a Northern Adriatic *Ampelisca*-*Corbula* community to seasonality and short-term hydrological changes in the Po river. *Mar. Environ. Res.* 66, 466–476. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2008.08.002>
- Naimi, B., Araújo, M.B., 2016. Sdm: A reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography (Cop.)*. 39, 368–375. <https://doi.org/10.1111/ecog.01881>
- Nerlović, V., Doğan, A., Hrs-Brenko, M., 2011. Response to oxygen deficiency (depletion): Bivalve assemblages as an indicator of ecosystem instability in the northern Adriatic Sea. *Biologia (Bratisl)*. 66, 1114–1126. <https://doi.org/10.2478/s11756-011-0121-3>
- Ovaskainen, O., Roy, D.B., Fox, R., Anderson, B.J., 2016. Uncovering hidden spatial structure in species communities with spatially explicit joint species distribution models.

Methods Ecol. Evol. 7, 428–436. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12502>

Pagou, K., Siokou-Frangou, I., Papathanassiou, E., 2002. Nutrients and their ratios in relation to eutrophication and HAB occurrence . The case of Eastern Mediterranean coastal waters., in: In: Second Workshop on “Thesholds of Environmental Sustainability: The Case of Nutrients.” 18 -19 June, Brussels, Belgium.

Pearson, R.G., Raxworthy, C.J., Nakamura, M., Townsend Peterson, A., 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: A test case using cryptic geckos in Madagascar. *J. Biogeogr.* 34, 102–117.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>

Pearson, T., Rosenberg, R., 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. An Annu. Rev.* 16, 229–311.

Pérès, J., Picard, J., 1964. Nouveau manuel de bionomie benthique de la Mer Méditerranéete. *Rec. Trav. Stn. mar. Endoume* 31, 137.

Pérès, J.M., 1967. The Mediterranean benthos. *Oceanogr. Mar. Biol. An Annu. Rev.* 5, 449–533.

Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Modell.* 190, 231–259.

<https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2005.03.026>

Piroddi, C., Coll, M., Liqueste, C., Macias, D., Greer, K., Buszowski, J., Steenbeek, J., Danovaro, R., Christensen, V., 2017. Historical changes of the Mediterranean Sea ecosystem: Modelling the role and impact of primary productivity and fisheries changes over time.

Sci. Rep. 7, 1–18. <https://doi.org/10.1038/srep44491>

Piroddi, C., Teixeira, H., Lynam, C.P., Smith, C., Alvarez, M.C., Mazik, K., Andonegi, E., Churilova, T., Tedesco, L., Chifflet, M., Chust, G., Galparsoro, I., Garcia, A.C., Kämäri, M., Kryvenko, O., Lassalle, G., Neville, S., Niquil, N., Papadopoulou, N., Rossberg, A.G., Suslin, V., Uyarra, M.C., 2015. Using ecological models to assess ecosystem status in support of the European Marine Strategy Framework Directive. *Ecol. Indic.* 58, 175–191. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2015.05.037>

Potter, R.A., Lozier, M.S., 2004. On the warming and salinification of the Mediterranean outflow waters in the North Atlantic. *Geophys. Res. Lett.* 31, 1–4. <https://doi.org/10.1029/2003GL018161>

Primpas, I., Karydis, M., 2011. Scaling the trophic index (TRIX) in oligotrophic marine environments. *Environ. Monit. Assess.* 178. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1687-x>

R Development Core Team, 2019. R: A language and environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.r-project.org/>. Version: 3.4.3.

Raffi, S., 1986. The significance of marine boreal molluscs in the Early Pleistocene faunas of the Mediterranean area. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 52, 267–289. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(86\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0031-0182(86)90051-9)

Raffi, S., Stanley, S.M., Marasti, R., 1985. Biogeographic patterns and Plio-Pleistocene extinction of *Bivalvia* in the Mediterranean and southern North Sea. *Paleobiology* 11, 368–388. <https://doi.org/10.1017/S0094837300011684>

Rakocinski, C.F., Brown, S.S., Gaston, G.R., Heard, R.W., Walker, W., Summers, J.K., 1997.

Macrobenthic Responses to Natural and Contaminant-Related Gradients in Northern

Gulf of Mexico Estuaries Published by : Ecological Society of America Stable URL :

<http://www.jstor.org/stable/2641214>. Ecol. Appl. 7, 1278–1298.

[https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[1278:MRTNAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[1278:MRTNAC]2.0.CO;2)

Raybaud, V., Beaugrand, G., Dewarumez, J.M., Luczak, C., 2014. Climate-induced range shifts

of the American jackknife clam *Ensis directus* in Europe. Biol. Invasions 17, 725–741.

<https://doi.org/10.1007/s10530-014-0764-4>

Reiss, H., Birchenough, S., Borja, A., Buhl-mortensen, L., Craeymeersch, J., Dannheim, J.,

Darr, A., Galparsoro, I., Gogina, M., Neumann, H., Populus, J., Rengstorf, A.M., Valle,

M., Hoey, G. Van, Zettler, M.L., Degraer, S., 2015. Benthos distribution modelling and

its relevance for marine ecosystem management. ICES J. Mar. Sci. 72, 297–315.

Riul, P., Targino, C.H., Júnior, L.A.C., Creed, J.C., Horta, P.A., Costa, G.C., 2013. Invasive

potential of the coral *Tubastraea coccinea* in the southwest Atlantic. Mar. Ecol. Prog.

Ser. 480, 73–81. <https://doi.org/10.3354/meps10200>

Robinson, L.M., Elith, J., Hobday, A.J., Pearson, R.G., Kendall, B.E., Possingham, H.P.,

Richardson, A.J., 2011. Pushing the limits in marine species distribution modelling:

Lessons from the land present challenges and opportunities. Glob. Ecol. Biogeogr. 20,

789–802. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00636.x>

Rödder, D., Engler, J.O., 2011. Quantitative metrics of overlaps in Grinnellian niches:

Advances and possible drawbacks. Glob. Ecol. Biogeogr. 20, 915–927.

<https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00659.x>

- Rodil, I.F., Compton, T.J., Lastra, M., 2014. Geographic variation in sandy beach macrofauna community and functional traits. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 150, 102–110.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.06.019>
- Rosenberg, R., Blomqvist, M., Nilsson, H., Cederwall, H., Dimming, A., 2004. Marine quality assessment by use of benthic species-abundance distributions: a proposed new protocol within the European Union Water Framework Directive. *Mar. Pollut. Bull.* 49, 728–739. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.05.013>
- Russell, B.D., Connell, S.D., Mellin, C., Brook, B.W., Burnell, O.W., Fordham, D.A., 2012. Predicting the Distribution of Commercially Important Invertebrate Stocks under Future Climate. *PLoS One* 7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046554>
- Saeedi, H., Basher, Z., Costello, M.J., 2017. Modelling present and future global distributions of razor clams (*Bivalvia: Solenidae*). *Helgol. Mar. Res.* 70.
<https://doi.org/10.1186/s10152-016-0477-4>
- Saeedi, H., Dennis, T.E., Costello, M.J., 2016. Bimodal latitudinal species richness and high endemism of razor clams (*Mollusca*). *J. Biogeogr.* 1–13.
<https://doi.org/10.1111/jbi.12903>
- Sánchez-Moyano, J.E., García-Asencio, I., Donázar-Aramendía, I., Miró, J.M., Megina, C., García-Gómez, J.C., 2017. BENFES, a new biotic index for assessing ecological status of soft-bottom communities. Towards a lower taxonomic complexity, greater reliability and less effort. *Mar. Environ. Res.* 132, 41–50.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.10.014>
- Sangiorgio, F., Quintino, V., Rosati, I., Rodrigues, A.M., Pinna, M., Basset, A., 2014.

- Macrofauna in Mediterranean and Black Sea transitional aquatic ecosystems: A comparative study of the benthic populations sampled by box corer and leaf bags. *Ecol. Indic.* 38, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.10.009>
- Sarà, G., Porporato, E.M.D., Mangano, M.C., Mieszkowska, N., 2018. Multiple stressors facilitate the spread of a non-indigenous bivalve in the Mediterranean Sea. *J. Biogeogr.* 45, 1090–1103. <https://doi.org/10.1111/jbi.13184>
- Saupe, E.E., Hendricks, J.R., Townsend Peterson, A., Lieberman, B.S., 2014. Climate change and marine molluscs of the western North Atlantic: Future prospects and perils. *J. Biogeogr.* 41, 1352–1366. <https://doi.org/10.1111/jbi.12289>
- Sayın, E., Eronat, C., Uçkaç, Ş., Beşiktepe, Ş.T., 2011. Hydrography of the eastern part of the Aegean Sea during the Eastern Mediterranean Transient (EMT). *J. Mar. Syst.* 88, 502–515. <https://doi.org/10.1016/J.JMARSYS.2011.06.005>
- Siddig, A.A.H., Ellison, A.M., Ochs, A., Villar-Leeman, C., Lau, M.K., 2016. How do ecologists select and use indicator species to monitor ecological change? Insights from 14 years of publication in *Ecological Indicators*. *Ecol. Indic.* 60, 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.036>
- Simboura, N., Panayotidis, P., Papathanassiou, E., 2005. A synthesis of the biological quality elements for the implementation of the European Water Framework Directive in the Mediterranean ecoregion: The case of Saronikos Gulf. *Ecol. Indic.* 5, 253–266. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.006>
- Simboura, N., Pavlidou, A., Bald, J., Tzapakis, M., Pagou, K., Zeri, C., Androni, A., Panayotidis, P., 2016. Response of ecological indices to nutrient and chemical contaminant stress

factors in Eastern Mediterranean coastal waters. *Ecol. Indic.* 70, 89–105.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.018>

Simboura, N., Zenetos, A., 2002. Benthic indicators to use in ecological quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystems, including a new Biotic Index.

Mediterr. Mar. Sci. 3, 77–111. <https://doi.org/10.12681/mms.249>

Singer, A., Schückel, U., Beck, M., Bleich, O., Brumsack, H.J., Freund, H., Geimecke, C.,

Lettmann, K.A., Millat, G., Staneva, J., Vanselow, A., Westphal, H., Wolff, J.O., Wurpts,

A., Kröncke, I., 2016. Small-scale benthos distribution modelling in a North Sea tidal

basin in response to climatic and environmental changes (1970s-2009). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 551, 13–30. <https://doi.org/10.3354/meps11756>

Solis-Weiss, V., Aleffi, F., Bettoso, N., Rossin, P., Orel, G., Fonda-Umani, S., 2004. Effects of industrial and urban pollution on the benthic macrofauna in the Bay of Muggia

(industrial port of Trieste, Italy). *Sci. Total Environ.* 328, 247–263.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.01.027>

Spalding, M.D., Fox, H.E., Allen, G.R., Davidson, Nick Ferdaña, Z.A., Finlayson, M., Halpern,

B.S., Jorge, M.A., Lombana, A., Lourie, S.A., Martin, K.D., Mcmanus, E., Molnar, J.,

Recchia, C.A., Robertson, J., 2007. Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization

of Coastal and Shelf Areas. *Bioscience* 57, 573. <https://doi.org/10.1641/B570707>

Spatharis, S., Tsirtsis, G., 2010. Ecological quality scales based on phytoplankton for the

implementation of Water Framework Directive in the Eastern Mediterranean. *Ecol.*

Indic. 10, 840–847. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.01.005>

Tedesco, L., Piroddi, C., Kämäri, M., Lynam, C., 2016. Capabilities of Baltic Sea models to

assess environmental status for marine biodiversity. *Mar. Policy* 70, 1–12.

<https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2016.04.021>

Telahigue, K., Rabeh, I., Chetoui, I., Romdhane, M.S., EL Cafsi, M., 2010. Effects of decreasing salinity on total lipids and fatty acids of mantle and gills in the bivalve *Flexopecten glaber* (Linnaeus, 1758) under starvation. *Cah. Biol. Mar.* 51, 301–309.

Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R., Araújo, M.B., 2009. BIOMOD - A platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography (Cop.)*. 32, 369–373.

<https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x>

Townhill, B., Pinnegar, J., Tinker, J., Jones, M., Simpson, S., Stebbing, P., Dye, S., 2017. Non-native marine species in north-west Europe: Developing an approach to assess future spread using regional downscaled climate projections. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* <https://doi.org/10.1002/aqc.2764>

Tsikopoulou, I., Moraitis, M.L., Tsapakis, M., Karakassis, I., 2018. Can intensive fish farming for 20 years induce changes in benthic ecosystems on a scale of waterbody? An assessment from Cephalonia bay (Ionian Sea). *Environ. Monit. Assess.* 190.

<https://doi.org/10.1007/s10661-018-6846-5>

Tyberghein, L., Verbruggen, H., Pauly, K., Troupin, C., Mineur, F., De Clerck, O., 2012. Bio-ORACLE: A global environmental dataset for marine species distribution modelling.

Glob. Ecol. Biogeogr. 21, 272–281. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00656.x>

Valentine, J.W., Jablonski, D., 2015. A twofold role for global energy gradients in marine biodiversity trends. *J. Biogeogr.* 42, 997–1005. <https://doi.org/10.1111/jbi.12515>

van Proosdij, A.S.J., Sosef, M.S.M., Wieringa, J.J., Raes, N., 2016. Minimum required number

- of specimen records to develop accurate species distribution models. *Ecography (Cop.)*. 39, 542–552. <https://doi.org/10.1111/ecog.01509>
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: An overview. *Clim. Change* 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vázquez-Luis, M., March, D., Alvarez, E., Alvarez-Berastegui, D., Deudero, S., 2014. Spatial distribution modelling of the endangered bivalve *Pinna nobilis* in a Marine Protected Area. *Mediterr. Mar. Sci.* 15. <https://doi.org/10.12681/mms.796>
- Veech, J.A., 2013. A probabilistic model for analysing species co-occurrence. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 22, 252–260. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2012.00789.x>
- Velaoras, D., Kassis, D., Perivoliotis, L., Pagonis, P., Hondronasios, A., Nittis, K., 2013. Temperature and salinity variability in the greek seas based on POSEIDON stations time series: Preliminary results. *Mediterr. Mar. Sci.* 14, 5–18. <https://doi.org/10.12681/mms.446>
- Velaoras, D., Lascaratos, A., 2010. North–Central Aegean Sea surface and intermediate water masses and their role in triggering the Eastern Mediterranean Transient. *J. Mar. Syst.* 83, 58–66. <https://doi.org/10.1016/J.JMARSYS.2010.07.001>
- Veloz, S.D., 2009. Spatially autocorrelated sampling falsely inflates measures of accuracy for presence-only niche models. *J. Biogeogr.* 36, 2290–2299. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2009.02174.x>
- Warren, D.L., Glor, R.E., Turelli, M., 2010. ENMTools: A toolbox for comparative studies of

environmental niche models. *Ecography (Cop.)*. 33, 607–611.

<https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.06142.x>

Warren, D.L., Glor, R.E., Turelli, M., 2008. Environmental niche equivalency versus conservatism: Quantitative approaches to niche evolution. *Evolution (N. Y.)*. 62, 2868–2883. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2008.00482.x>

Weinert, M., Mathis, M., Kröncke, I., Neumann, H., Pohlmann, T., Reiss, H., 2016. Modelling climate change effects on benthos: Distributional shifts in the North Sea from 2001 to 2099. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 175, 157–168.

<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.03.024>

Whitfield, A.K., Elliott, M., Basset, A., Blaber, S.J.M., West, R.J., 2012. Paradigms in estuarine ecology – A review of the Remane diagram with a suggested revised model for estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 97, 78–90.

<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.11.026>

WoRMS Editorial Board, 2018. World Register of Marine Species.

<https://doi.org/10.14284/170>

Zenetos, A., 1996. Classification and Interpretation of the Established Mediterranean Biocoenoses Based Solely on Bivalve Molluscs. *J. Mar. Biol. Assoc. United Kingdom* 76, 403–416. <https://doi.org/10.1017/S0025315400030630>

Zettler, M.L., Proffitt, C.E., Darr, A., Degraer, S., Devriese, L., Greathead, C., Kotta, J., Magni, P., Martin, G., Reiss, H., Speybroeck, J., Tagliapietra, D., Van Hoey, G., Ysebaert, T., 2013. On the Myths of Indicator Species: Issues and Further Consideration in the Use of Static Concepts for Ecological Applications. *PLoS One* 8.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078219>

Zettler, M.L., Schiedek, D., Bobertz, B., 2007. Benthic biodiversity indices versus salinity gradient in the southern Baltic Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 55, 258–270.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.08.024>

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη έχει σαν απώτερο στόχο την αξιολόγηση των επιπτώσεων των κύριων περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων στην κατανομή των βενθικών κοινοτήτων του ελληνικού χώρου. Παράλληλα επανεξετάζει τις βάσεις και τις αρχές της βενθικής οικολογίας που αφορούν την δομή των βενθικών κοινοτήτων ως απόκριση στην περιβαλλοντική διατάραξη.

Μέσα από τα αποτελέσματα της μελέτης αναδεικνύεται η σημασία της χωρικής θέσης των βενθικών ειδών κατά μήκος των περιβαλλοντικών διαβαθμίσεων η οποία και καθορίζει άμεσα την απόκριση του είδους. Σε επίπεδο κοινότητας, οι αποκρίσεις ήταν μεγαλύτερες σε αριθμό από ότι θα αναμενόταν με βάση τους σχετικούς βιοτικούς δείκτες. Οι περιβαλλοντικές διαβαθμίσεις θερμοκρασίας, αλατότητας και πρωτογενούς παραγωγικότητας στον χώρο του Αιγαίου πελάγους συνέβαλαν σημαντικά στη συγκρότηση των βενθικών κοινοτήτων καθώς σε περιοχές που παρατηρήθηκαν ακραίες τιμές καταγράφηκαν είδη ανθεκτικά στις συνθήκες καταπόνησης για τον εκάστοτε παράγοντα. Σε περιοχές με ήπια καταπόνηση παρατηρήθηκε αυξημένη λειτουργική ποικιλότητα στις βενθικές κοινότητες εξαιτίας των αντίθετων οικολογικών στρατηγικών που χαρακτηρίζουν τους οργανισμούς που οδηγεί σε διαφορετική εκμετάλλευση πόρων και θέσης στο ίζημα.

Οι παράκτιες βενθικές κοινότητες του Αιγαίου πελάγους δεν αντιπροσώπευαν την οικολογική κατάσταση όσον αφορά τα επίπεδα ευτροφισμού της υδάτινης στήλης με βάση την υπάρχουσα προσέγγιση στην αξιολόγηση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Αντιθέτως, η ταξινομική βαθμίδα του είδους ήταν ικανή να προσδώσει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την περιβαλλοντική κατάσταση της υδάτινης στήλης. Συγκεκριμένα, μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην παρούσα μελέτη, η κατανομή των βενθικών δίθυρων

αποκρινόταν αντίστοιχα στην διαβάθμιση της πρωτογενούς παραγωγικότητας μέσω της συγκέντρωσης χλωροφύλλης – α. Η κύρια προσέγγιση της εργασίας αποτελείται από την χρήση βενθικών ειδών που αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και ενδιαιτήματα (είδη – δείκτες) σε συνδυασμό με μοντέλα κατανομής για πρόβλεψη της κατανομής των ειδών στον χώρο. Το ανθεκτικό είδος *Corbula gibba* (Olivi, 1792) στην παρούσα μελέτη ήταν αντιπροσωπευτικό είδος των σταθμών με αυξημένα ποσοστά ευτροφισμού και ο χάρτης κατανομής του χαρακτήριζε τις θαλάσσιες περιοχές με περιβαλλοντική διατάραξη ως προς αυτή την περιβαλλοντική πίεση. Αντίστοιχα το ευαίσθητο είδος *Flexopecten hyalinus* (Poli, 1795) ήταν αντιπροσωπευτικό των σταθμών με μειωμένα επίπεδα ευτροφισμού και ο χάρτης κατανομής του χαρακτήριζε τις περιοχές με μειωμένη περιβαλλοντική διατάραξη όσον αφορά τα επίπεδα χλωροφύλλης. Με βάση την προηγούμενη μεθοδολογία, αξιολογήθηκε η σχετικότητα της οικολογικής κατάταξης των προαναφερθέντων ειδών όσον αφορά την ανοχή τους στην περιβαλλοντική διατάραξη υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Για το συγκεκριμένο στόχο χρησιμοποιήθηκαν επίσης τα είδη *Moerella donacina* (Linnaeus, 1758) και *Abra prismatica* (Montagu, 1808) που χαρακτηρίζονται ως «ευαίσθητο» και «ανθεκτικό» αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν μια σημαντική πιθανή μείωση των ενδιαιτημάτων των ανθεκτικών ειδών κατά την προβολή του σεναρίου RCP85 για το έτος 2100. Το είδος *Moerella donacina* αναμένεται να διατηρήσει ένα σημαντικό κομμάτι του ενδιαιτηματος του με αύξηση ~ 3 °C ενώ αναμένεται επέκταση των γεωγραφικών ορίων για το ευαίσθητο είδος *Flexopecten hyalinus*. Με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης η απόκριση του κάθε θαλάσσιου είδους στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας δεν σχετίζεται με την υπάρχουσα οικολογική του κατάταξη (ευαίσθητο – ανθεκτικό). Το εύρος ανοχής του σε κάθε παράγοντα καταπόνησης

(σε αυτή την περίπτωση, αύξηση θερμοκρασίας) είναι ανάλογο με τους κλιματικούς παράγοντες που διαμορφώνουν τον οικολογικό του θώκο.

Η συσχέτιση της πρόγνωσης των κατάλληλων ενδιαιτημάτων των ειδών-δεικτών με την οικολογική κατάσταση της υδάτινης στήλης που αποτελούσε και το βασικό πυλώνα της μελέτης επιβεβαιώθηκε. Μέσα από την παρούσα μελέτη αναδεικνύεται η σημασία της χρήσης των ειδών-δεικτών ως βιοτικά εργαλεία για τη μελέτη των θαλάσσιων ενδιαιτημάτων όσον αφορά περιβαλλοντικές διαταραχές όπως ο ευτροφισμός και η κλιματική αλλαγή. Επίσης, τονίζεται η σημασία των κυριότερων κλιματικών παραμέτρων που πλαισιώνουν τον οικολογικό θώκο του είδους ως ιδανικό μέσο για βαθμονόμηση της ευαισθησίας ή ανθεκτικότητας ενός είδους. Τα μοντέλα κατανομής που προβλέπουν την καταλληλότητα των ενδιαιτημάτων των ειδών-δεικτών αποτελούν μια εναλλακτική προσέγγιση στην περιβαλλοντική παρακολούθηση που προσδίδει έγκυρα αποτελέσματα και σε σημαντικά λιγότερο χρόνο σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους βενθικής οικολογίας.

Abstract

The scope of this study was to evaluate the impact of the main environmental gradients on the distribution of benthic species of the Greek waters. In addition, we re-examine the baselines of benthic ecology regarding the community structure and species succession along an environmental stressor.

Through our work we highlight the importance of the species geographic positions along the main environmental gradients which shape the species responses. The benthic communities of this study presented various responses unlike the traditional approach which is based on the use of relevant benthic indices. The benthic communities of the Aegean Sea were defined by the environmental gradients of salinity, temperature and primary productivity found in these marine region. Diversity was significantly lower in areas that are characterised by upper and lower extremes of the environmental values. Consequently, increased diversity was documented in areas characterised by mild environmental disturbance. This is attributed to the fact that marine areas with reduced environmental stress, functionally different species co-occur due to their ecological differences which allow the use of different sources and sediment position.

Based on traditional approaches, the coastal benthic communities of the Aegean Sea did not reflect the water column ecological status in terms of eutrophication. However, a species-level approach rendered valuable insights regarding the environmental status of the water column. More specifically, through this work's proposed methodology, the bivalve distribution responded accordingly to the water column chlorophyll – *a* concentration. The main approach in this work was consisted by two steps: The first step was to identify the indicator species of a specific habitat and the second step was to incorporate them in relevant

Species Distribution Modelling Methods in order to identify their habitat suitability. The tolerant species *Corbula gibba* (Olivi, 1792) was the indicator species of the eutrophic areas of this study and the habitat suitability derived from the modelling process reflected the overall eutrophication status. Accordingly, the sensitive species *Flexopecten hyalinus* (Poli, 1795) was the indicator species of pristine areas with minimum environmental disturbance in terms of chlorophyll concentration. Based on the mentioned methodology, the relevance of the present ecological classes of the benthic species was evaluated under the scope of climate change. For this aim we also used the sensitive species *Moerella donacina* (Linnaeus, 1758) and the tolerant species *Abra prismatica* (Montagu, 1808). Based on the findings of this study, an overall reduction of the distribution was observed for the tolerant species when projected under the RCP8.5 for the year 2100. The species *Moerella donacina* is expected to retain the main part of its habitats under the increase of ~ 3 °C while an overall geographic expansion is expected for the sensitive species *Flexopecten hyalinus*. According to our findings, the species responses to climate change (or any other environmental stressor) depends on their climatic suite that shapes their niche regardless of their present disturbance classification (sensitive or tolerant).

Our initial hypothesis regarding the use of indicator species as proxies of environmental disturbance is met. Through our work, we highlight the use of benthic indicator species as biotic tools for assessing the effects of various stressors such as eutrophication and climate change on marine ecosystems. Additionally, we suggest the use of ecological niche as a suitable metric to assess the tolerance of a species to an environmental stressor. The habitat suitability models represent an important alternative in marine health assessment rendering accurate results much faster than the traditional methods used in benthic ecology.

Παράρτημα

Species Archetypes

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
<i>Abra.prismatica</i>	0,0012	0	0	0	0	0,0024	0,9965
<i>Abra.sp</i>	0	0,0002	0	0,3775	0	0,6223	0
<i>Ampelisca.jaffaensis</i>	0	0,0146	0	0,5831	0,4024	0	0
<i>Ampelisca.pseudosarsi</i>	0	0,0054	0,0002	0,0003	0	0,0008	0,9932
<i>Ampelisca.typica</i>	0,0018	0	0	0,0002	0	0,9979	0,0001
<i>Ampharete.finmarchica</i>	0	0	0	0,2336	0,0001	0,7662	0
<i>Amphiura.chiajei</i>	0	0,0032	0,9757	0	0	0	0,0211
<i>Anapagurus.laervis</i>	0	0,1432	0,0006	0,6472	0,199	0,0001	0,01
<i>Aonides.oxycephala</i>	0	0,435	0	0,4475	0	0,1136	0,0039
<i>Aphelochaeta.marioni</i>	0,9991	0	0	0	0	0,0009	0
<i>Aponuphis.bilineata</i>	0	0,0002	0	0,9718	0,0259	0,0021	0
<i>Aponuphis.bremonti</i>	0	0,127	0	0,8692	0,0027	0,0006	0,0005
<i>Apseudopsis.latreillii</i>	0	0,6918	0,2206	0,0001	0	0	0,0875
<i>Aricidea.catherinae</i>	0	0	0	0,0001	0,9991	0	0,0008
<i>Aricidea.mediterranea</i>	0	0,0014	0,0021	0	0	0	0,9965
<i>Aspidosiphon.muelleri.muelleri</i>	0,0002	0,0007	0	0,0117	0	0,9872	0,0002
<i>Athanas.nitescens</i>	0	0,0046	0	0,9757	0,0022	0,0176	0
<i>Chaetozone.setosa</i>	0	0,8735	0	0,0271	0	0,0678	0,0316
<i>Chondrochelia.savignyi</i>	0	0	0	0,001	0,9989	0	0
<i>Corbula.gibba</i>	0	0	0	0	0	0	1
<i>Cossura.soyeri</i>	0,8411	0,0009	0	0,0009	0	0,0362	0,121
<i>Cylichna.cylindracea</i>	0	0	0	0,0162	0	0,9838	0
<i>Cypridina.mediterranea</i>	0	0	0	0,0055	0,9945	0	0
<i>Deflexilodes.gibbosus</i>	0,7462	0	0	0,0083	0	0,2455	0
<i>Dialychone.acustica</i>	0,0002	0	0	0,3658	0,0234	0,6105	0
<i>Diastylis.rugosa</i>	0	0,0007	0	0,8312	0,0001	0,168	0
<i>Echinocyamus.pusillus</i>	0	0	0	0,0003	0,9997	0	0
<i>Eualus.cranchii</i>	0	0,0004	0	0,9665	0,005	0,0281	0
<i>Euclymene.oerstedii</i>	0	0,9957	0,0001	0,0041	0,0001	0	0
<i>Eunice.pennata</i>	0	0,0024	0	0,7066	0,0001	0,2908	0,0001
<i>Eunice.vittata</i>	0	0,9919	0,0076	0,0003	0	0	0,0002
<i>Fauveliopsis.sp</i>	0	0,9352	0	0,0133	0	0,0001	0,0514
<i>Galathea.squamifera</i>	0	0,007	0	0,9909	0,002	0,0001	0
<i>Glycera.capitata</i>	0	0,0015	0,2339	0	0	0	0,7646
<i>Glycera.celtica</i>	0	0	0	0,0022	0,9978	0	0
<i>Glycera.lapidum</i>	0	0	0	0,0042	0,9958	0	0
<i>Glycera.tridactyla</i>	0	0,0059	0	0,9855	0,0021	0,0064	0
<i>Goniada.norvegica</i>	0	0,0007	0	0,9749	0,0002	0,0242	0

<i>Gouldia.minima</i>	0	0,993	0,0001	0,0069	0	0	0
<i>Harmothoe.reticulata</i>	0	0	0	0,0036	0	0,9963	0,0001
<i>Heteranomia.squamula</i>	0,0005	0	0	0,0656	0	0,9338	0
<i>Hiatella.arctica</i>	0,0013	0	0	0,0105	0	0,9882	0
<i>Hilbigneris.gracilis</i>	0	0	1	0	0	0	0
<i>Hydrobia.acuta</i>	0	0,0094	0	0,5933	0	0,3972	0,0001
<i>Iphinoe.trispinosa</i>	0	0,0002	0,0762	0	0	0	0,9235
<i>Jasmineira.caudata</i>	0	0,0002	0	0,0744	0,9254	0	0
<i>Kirkegaardia.dorsobranchialis</i>	0	0	0,9998	0	0	0	0,0001
<i>Kurtiella.bidentata</i>	0	0	0,0004	0	0	0	0,9996
<i>Leptocheirus.bispinosus</i>	0	0,1161	0,0002	0,8024	0,0263	0,0023	0,0527
<i>Leucothoe.spinicarpa</i>	0,0003	0,003	0	0,7147	0,0002	0,2816	0,0001
<i>Levinsenia.gracilis</i>	0	0	0,0016	0	0	0	0,9984
<i>Loripinus.fragilis</i>	0	0,0004	0,9996	0	0	0	0
<i>Lucinella.divaricata</i>	0	0,0013	0	0,3013	0,6975	0	0
<i>Lysianassa.costae</i>	0	0,0001	0	0,2638	0,736	0	0
<i>Lysidice.unicornis</i>	0	0,6545	0	0,3453	0,0002	0	0
<i>Magelona.minuta</i>	0	0	0,9292	0	0	0	0,0708
<i>Magelona.sp</i>	0,0003	0	0	0,0041	0	0,9955	0,0002
<i>Maldane.sarsi</i>	0	0,0077	0	0,9876	0	0,0046	0
<i>Marphysa.bellii</i>	0	0,8922	0	0,1077	0	0,0001	0
<i>Mediomastus.capensis</i>	0,9974	0	0	0	0	0,0026	0
<i>Melinna.palmata</i>	0	0	0,9999	0	0	0	0,0001
<i>Micronephthys.stammeri</i>	0	0,0094	0,0001	0,0322	0,9583	0	0
<i>Moerella.donacina</i>	0	0	1	0	0	0	0
<i>Musculus.subpictus</i>	0	0,0002	0	0,8746	0,0015	0,1237	0
<i>Myrtea.spinifera</i>	0,0311	0,0001	0	0,0115	0	0,9572	0
<i>Mysidae</i>	0	0,0004	0	0,0211	0,9786	0	0
<i>Mysta.picta</i>	0	0,0032	0	0,9836	0,0128	0,0003	0
<i>Nephtys.hystricis</i>	0	0,0261	0	0,848	0	0,1259	0
<i>Nephtys.incisa</i>	0	0	0,2991	0	0	0	0,7009
<i>Nereis.rava</i>	0	0,1103	0	0,8872	0,0025	0	0
<i>Notocochlis.dillwynii</i>	0	0,0016	0	0,9494	0,0011	0,0478	0
<i>Notomastus.profundus</i>	0	0,0001	0,9999	0	0	0	0
<i>Nucula.nucleus</i>	0,0001	0,0001	0	0	0	0,0021	0,9978
<i>Odostomia.sp</i>	0,0155	0	0	0,0046	0	0,9799	0
<i>Paradoneis.harpagonea</i>	0	0,0167	0	0,9781	0,0001	0,0051	0
<i>Paradoneis.lyra</i>	0	0,985	0,0104	0,0003	0	0	0,0043
<i>Paralacydonia.paradoxa</i>	0	0,379	0	0,6159	0	0,004	0,0011
<i>Parvicardium.pinnulatum</i>	0	0,0202	0	0,971	0,0047	0,0039	0,0002
<i>Petaloproctus.terricola</i>	0	0,0021	0	0,3576	0	0,6398	0,0004
<i>Phaxas.adriaticus</i>	0	0	0	0,0124	0	0,9875	0
<i>Phtisica.marina</i>	0	0,7041	0	0,2945	0,0012	0	0,0001
<i>Phyllodoce.sp</i>	0	0,0139	0	0,9614	0,0008	0,0237	0,0002
<i>Pilargis.verrucosa</i>	0,0029	0,0008	0	0,0222	0	0,887	0,0871
<i>Pista.cristata</i>	0	0,0002	0	0,8617	0,1376	0,0005	0

<i>Poecilochaetus.serpens</i>	0	0,0005	0,0001	0,0022	0	0,1027	0,8945
<i>Prionospio.cirrifera</i>	0	0	0,0001	0	0	0,0002	0,9997
<i>Prionospio.ehlersi</i>	0	0,0008	0,0002	0,0459	0,0029	0,0433	0,9069
<i>Prionospio.malmgreni</i>	0,9994	0	0	0	0	0,0006	0
<i>Protodorvillea.kefersteini</i>	0	0,0001	0	0,0049	0,9951	0	0
<i>Schistomeringos.rudolphii</i>	0	0,0022	0	0,9966	0,0003	0,0009	0
<i>Scoletoma.impatiens</i>	0,083	0	0	0,0046	0	0,9124	0
<i>Scoloplos.armiger</i>	0	0,0002	0	0,9597	0,0054	0,0346	0
<i>Sigambra.parva</i>	0	0,0001	0,9999	0	0	0	0
<i>Spio.filicornis</i>	0	0,0021	0	0,99	0,0078	0,0001	0
<i>Spiophanes.kroyeri</i>	0	0	0	0	0	0,0001	0,9999
<i>Sternaspis.scutata</i>	0	0	0	0	0	0	1
<i>Syllis.garciai</i>	0	0,0102	0	0,9455	0,0443	0	0
<i>Syllis.parapari</i>	0	0,0012	0	0,997	0,0009	0,0009	0
<i>Tellimya.ferruginosa</i>	0,0408	0	0	0,0013	0	0,9501	0,0078
<i>Thracia.convexa</i>	0	0	0	0,0432	0	0,9567	0
<i>Thyasira.flexuosa</i>	0	0,0073	0,0001	0	0	0,0002	0,9924
<i>Timoclea.ovata</i>	0	0,0005	0	0,1004	0	0,899	0
<i>Upogebia.pusilla</i>	0	0,844	0	0,1547	0	0,001	0,0003

Probability of Occurrence (>0.8)

G1
Aphelochaeta.marioni 0.9991
Cossura.soyeri 0.8411
Deflexilodes.gibbosus 0.7462
Mediomastus.capensis 0.9974
Prionospio.malmgreni 0.9994

G2
Apseudopsis.latreillii 0.6918
Chaetozone.setosa 0.8735
Euclymene.oerstedii 0.9957
Eunice.vittata 0.9919

Fauveliopsis.sp	0.9352
Gouldia.minima	0.9930
Lysidice.unicornis	0.6545
Marphysa.bellii	0.8922
Paradoneis.lyra	0.9850
Phtisica.marina	0.7041
Upogebia.pusilla	0.8440

G3	
Amphiura.chiajei	0.9757
Hilbigneris.gracilis	1.0000
Kirkegaardia.dorsobranchialis	0.9998
Loripinus.fragilis	0.9996
Magelona.minuta	0.9292
Melinna.palmata	0.9999
Moerella.donacina	1.0000
Notomastus.profundus	0.9999
Sigambra.parva	0.9999

G4	
Ampelisca.jaffaensis	0.5831
Anapagurus.laevis	0.6472
Aponuphis.bilineata	0.9718
Aponuphis.brementi	0.8692
Athanas.nitescens	0.9757
Diastylis.rugosa	0.8312
Eualus.cranchii	0.9665

Eunice.pennata	0.7066
Galathea.squamifera	0.9909
Glycera.tridactyla	0.9855
Goniada.norvegica	0.9749
Hydrobia.acuta	0.5933
Leptocheirus.bispinosus	0.8024
Leucothoe.spinicarpa	0.7147
Maldane.sarsi	0.9876
Musculus.subpictus	0.8746
Mysta.picta	0.9836
Nephtys.hystricis	0.8480
Nereis.rava	0.8872
Notocochlis.dillwynii	0.9494
Paradoneis.harpagonea	0.9781
Paralacydonia.paradoxa	0.6159
Parvicardium.pinnulatum	0.9710
Phyllodoce.sp	0.9614
Pista.cristata	0.8617
Schistomeringos.rudolphii	0.9966
Scoloplos.armiger	0.9597
Spio.filicornis	0.9900
Syllis.garciai	0.9455
Syllis.parapari	0.9970

G5	
Aricidea.catherinae	0.9991
Chondrochelia.savignyi	0.9989
Cypridina.mediterranea	0.9945
Echinocyamus.pusillus	0.9997

Glycera.celtica	0.9978
Glycera.lapidum	0.9958
Jasmineira.caudata	0.9254
Lucinella.divaricata	0.6975
Lysianassa.costae	0.7360
Micronephthys.stammeri	0.9583
Mysidae	0.9786
Protodorvillea.kefersteini	0.9951

G6	
Abra.sp	0.6223
Ampelisca.typica	0.9979
Ampharete.finmarchica	0.7662
Aspidosiphon.muelleri.muelleri	0.9872
Cylichna.cylindracea	0.9838
Dialychone.acustica	0.6105
Harmothoe.reticulata	0.9963
Heteranomiasquamula	0.9338
Hiatella.arctica	0.9882
Magelona.sp	0.9955
Myrtea.spinifera	0.9572
Odostomia.sp	0.9799
Petaloproctus.terricola	0.6398
Phaxas.adriaticus	0.9875
Pilargis.verrucosa	0.8870
Scoletoma.impatiens	0.9124
Tellimya.ferruginosa	0.9501
Thracia.convexa	0.9567
Timoclea.ovata	0.8990

G7	
Abra.prismatica	0.9965
Ampelisca.pseudosarsi	0.9932
Aricidea.mediterranea	0.9965
Corbula.gibba	1.0000
Glycera.capitata	0.7646
Iphinoe.trispinosa	0.9235
Kurtiella.bidentata	0.9996
Levinsenia.gracilis	0.9984
Nephtys.incisa	0.7009
Nucula.nucleus	0.9978
Poecilochaetus.serpens	0.8945
Prionospio.cirrifera	0.9997
Prionospio.ehlersi	0.9069
Spiophanes.kroyeri	0.9999
Sternaspis.scutata	1.0000
Thyasira.flexuosa	0.9924