



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Τμήμα Ωκεανογραφίας και Θαλασσίων Βιοεπιστημών

**Κοινωνικά Δίκτυα αφθονίας στο θαλάσσιο
περιβάλλον: Εφαρμογή σε κοινότητες φυτοπλαγκτού
στον Κόλπο Καλλονής Λέσβου**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Απόστολος Κωνσταντάρας ΑΜ 1932019005

Επιβλέπων: Τσιρτσής Γεώργιος

Καθηγητής

Ιούνιος 2021

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Γεώργιο Τσιρτσή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και την τριμελή επιτροπή αξιολόγησης. Επίσης, ευχαριστώ θερμά την κυρία Ανδρονίκη Ταμβάκη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
1 Κοινωνικά Δίκτυα	6
1.1 Εισαγωγή.....	6
1.2 Κοινωνική Δικτύωση	6
1.3 Είδη Κοινωνικών Δικτύων	8
1.4 Είδη συνδέσεων κόμβων	9
1.5 Βασικά μέτρα κόμβων.....	9
1.6 Ρόλοι κλειδιά κόμβων μέσα στο δίκτυο.....	12
1.7 Βασικά μέτρα δικτύου.....	12
2 Κοινωνικά Δίκτυα με εφαρμογές στο φυτοπλαγκτόν	14
2.1 Φυτοπλαγκτόν και ευτροφισμός	14
2.2 Εφαρμογές κοινωνικών δικτύων στο φυτοπλαγκτόν	15
3 Στόχος και Σχεδιασμός.....	16
4 Μέθοδοι.....	18
4.1 Περιοχή Μελέτης.....	18
4.2 Δειγματοληψία.....	19
4.3 Δεδομένα περιβαλλοντικών και φυσικοχημικών παραμέτρων	21
4.4 Δεδομένα για τα γένη φυτοπλαγκτού	23
4.5 Υλοποίηση δικτύων ανά μήνα	24
4.6 Ανίχνευση της παρουσίας υποομάδων (clusters) στα δίκτυα.	26
5 Αποτελέσματα	27
5.1.1 Δίκτυα γενών ανά μήνα με βάση τις συν-παρουσίες	27
5.1.2 Δίκτυα γενών ανά μήνα με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών	33
6 Συμπεράσματα	39
6.1 Δίκτυα γενών ανά μήνα με βάση τις συν-παρουσίες	39
6.2 Δίκτυα γενών ανά μήνα με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών	39
7 Παράρτημα (Κώδικας σε R)	41
8 Βιβλιογραφία	45

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία περιβαλλοντικών παραμέτρων ανά μήνα (μέση τιμή, τυπική απόκλιση σε παρένθεση και ελάχιστη-μέγιστη τιμή).....	21
Πίνακας 2: Αριθμός δειγμάτων και πλήθος γενών φυτοπλαγκτού ανά σταθμό δειγματοληψίας	23
Πίνακας 3: Γένη και αριθμοί ειδών φυτοπλαγκτού στον κόλπο Καλλονής.	23
Πίνακας 4: Αριθμός δειγμάτων και πλήθος γενών ανά μήνα δειγματοληψίας.....	24
Πίνακας 5: Βασικά μέτρα δικτύων μηνών με βάση τις συν-παρουσίες γενών	28
Πίνακας 6: Τα τρία σημαντικότερα γένη των δικτύων μηνών με βάση τις συν-παρουσίες τους ως προς τα βασικότερα μέτρα	29
Πίνακας 7: Μέτρα ανά συστάδα μηνιαίων δικτύων σταθμών με βάση τις συν-παρουσίες γενών.....	31
Πίνακας 8: Αντιπροσωπευτικά δίκτυα μηνών με βάση τις συν-παρουσίες γενών ανά συστάδα ομαδοποίησης.....	32
Πίνακας 9: Βασικά μέτρα δικτύων μηνών με βάση τις συσχετίσεις αφθονίας γενών	34
Πίνακας 10: Τα τρία σημαντικότερα γένη των δικτύων μηνών με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών τους ως προς τα βασικότερα μέτρα	35
Πίνακας 11: Μέτρα ανά συστάδα μηνιαίων δικτύων σταθμών με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών των γενών.....	37
Πίνακας 12: Αντιπροσωπευτικά δίκτυα μηνών με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών ανά συστάδα ομαδοποίησης.....	38

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Αναπαράσταση κόμβων που συνδέονται μεταξύ τους και δημιουργούν ένα ενιαίο κοινωνικό δίκτυο (https://www.annalindhfoundation.org)	7
Εικόνα 2: Τα έξι είδη κοινωνικών δικτύων, σύμφωνα με τον τρόπο σύνδεσης των κόμβων (πηγή:ComputerHope.com).	8
Εικόνα 3: Τα έξι είδη κοινωνικών δικτύων, σύμφωνα με τον τρόπο σύνδεσης των κόμβων (πηγή:ComputerHope.com).	9
Εικόνα 4: Κοινωνικό δίκτυο που δείχνει τους κόμβους που έχουν τις μεγαλύτερες τιμές των βασικών μέτρων κόμβων	11
Εικόνα 5: Νεκρές πίνες στις ακτές του Κόλπου Καλλονής (πηγή: Lesvosnews.gr) ..	18
Εικόνα 6: Ο κόλπος Καλλονής και οι παράκτιοι οικισμοί της Σκάλας Καλλόνης, Αχλαδεράς και Παρακοίλων (GoogleMaps).....	19
Εικόνα 7: Ο Κόλπος Καλλονής και οι σταθμοί δειγματοληψίας K1-K8 (Spatharis et. al. 2007)	20
Εικόνα 8: Μεταβολή της θερμοκρασίας (πρωτεύων άξονας) και αλατότητας (δευτερεύων άξονας) ανά μήνα δειγματοληψίας.....	22
Εικόνα 9: Μέση μηνιαία μεταβολή των θρεπτικών (DIN και SiO ₂ σε πρωτεύων άξονα, PO ₄ σε δευτερεύων άξονα) στα δείγματα νερού.....	22
Εικόνα 10: Δενδρόγραμμα της ιεραρχικής ανάλυσης κατά συστάδες των δικτύων συν-παρουσιών των μηνών.....	30
Εικόνα 11: Δενδρόγραμμα της ιεραρχικής ανάλυσης κατά συστάδες των δικτύων με βάση την συσχέτιση των αφθονιών των γενών ανά μήνα.....	36

Περίληψη

Ο ευτροφισμός είναι ένα φαινόμενο που επηρεάζει οικονομικά και περιβαλλοντικά την παράκτια ζώνη. Η δυναμική και οι σχέσεις μεταξύ των ειδών του φυτοπλαγκτού μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην μελέτη του φαινομένου αυτού. Τα κοινωνικά δίκτυα είναι μια σχετικά καινούρια αναπαράσταση που μπορεί να αναδείξει σχέσεις μεταξύ οντοτήτων και έχει χρησιμοποιηθεί σε πρόσφατες εφαρμογές για να μελετήσει τις σχέσεις μεταξύ οργανισμών. Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν δίκτυα ανά μήνα με βάση τις συν-παρουσίες και τις συσχετίσεις αφθονιών γενών φυτοπλαγκτού. Από τα δίκτυα αυτά καθορίστηκαν τα σημαντικότερα είδη με βάση τον βαθμό, την εγγύτητα και την διαμεσολαβικότητα. Τα μηνιαία δίκτυα που ομοιάζουν ως τα μέτρα και τη δομή των δικτύων ομαδοποιήθηκαν προκειμένου να βρεθούν οι μήνες με παρόμοια δίκτυα. Τα δίκτυα με βάση τις συν-παρουσίες ομαδοποιήθηκαν σε τρεις ομάδες: μια ομάδα (τέλος καλοκαιριού-αρχές φθινοπώρου) παρουσιάζει μικρό αριθμό συν-παρουσιών, στη δεύτερη (χειμώνας-αρχή άνοιξης) τα δίκτυα είναι πλούσια σε είδη και πυκνά σε συνδέσεις και στην τρίτη τα δίκτυα εμφανίζουν ενδιάμεσα χαρακτηριστικά. Τα δίκτυα που δημιουργήθηκαν με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών ανήκουν επίσης σε τρεις διακριτές συστάδες. Στην πρώτη τα δίκτυα αποτελούνται από πολλές μικρές ομάδες γενών, στη δεύτερη οι ομάδες είναι λιγότερες και με περισσότερα είδη ενώ στην τελευταία έχουμε συνήθως δύο βασικές ομάδες με πολλά είδη που συσχετίζονται ισχυρά. Τα γένη που αναδείχθηκαν σημαντικά ως προς τις συν-παρουσίες ήταν τα *Chaetoceros* και *Ceratoneis* ενώ ως προς τις συσχετίσεις των ειδών τα *Pseudo-nitzschia* και *Leptocylindrus*.

Λέξεις Κλειδιά: Κοινωνικά δίκτυα, Ευτροφισμός, Ανάλυση κατά συστάδες

1 Κοινωνικά Δίκτυα

1.1 Εισαγωγή

Τα κοινωνικά δίκτυα είναι μια τεχνική ανάλυσης που αναπτύχθηκε στις κοινωνικές επιστήμες, αποτελώντας μία πολύ ελπιδοφόρα τεχνική για την εξερεύνηση των αλληλεπιδράσεων και των κοινωνικών σχέσεων μεταξύ οντοτήτων. Πρόκειται στην ουσία για μια κοινωνική δομή που αποτελείται από ένα σύνολο οντοτήτων, οι οποίες μπορεί να είναι άτομα ή οργανισμοί. Ένα Κοινωνικό Δίκτυο, είναι μια κοινωνική αναπαράσταση η οποία αποτελείται από οργανισμούς (ή είδη ατόμων), οι οποίοι ονομάζονται κόμβοι. Ο τρόπος με τον οποίο είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους οι κόμβοι, έχει να κάνει με τον τρόπο αλληλεξάρτησης δηλαδή συγγένεια, φιλία, κοινά ενδιαφέροντα ή κοινή συμπεριφορά (Τσίμπου 2013). Αυτό που καθιστά τα Κοινωνικά Δίκτυα πρωτοποριακά είναι η ευκολία στην δημιουργία τους λόγω της δομής τους, ο επεξηγηματικός τρόπος αναπαράστασης και η άμεση έκφραση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κόμβων που τα αποτελούν (Τσίμπου 2013).

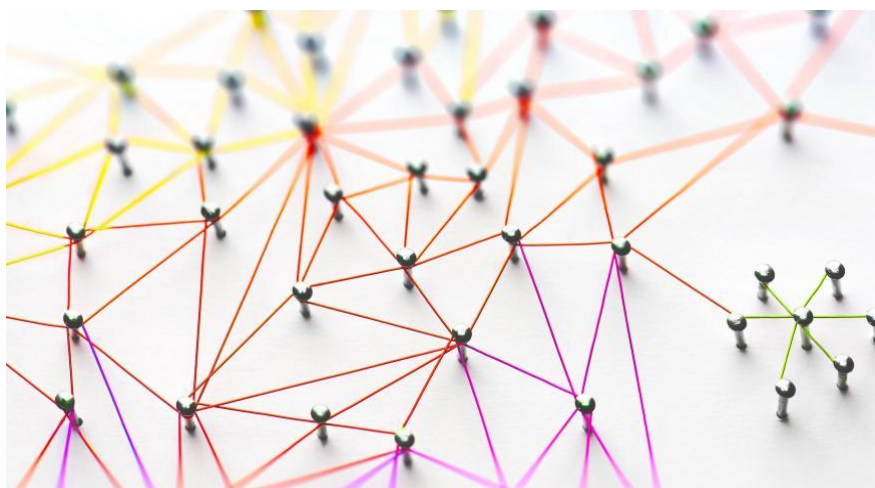
Βασικό προτέρημά τους είναι η ευκολία χρήσης τους από διάφορες επιστήμες ώστε να εκφράσουν σχέσεις και ροές μεταξύ των δικών τους οντοτήτων. Αυτές οι οντότητες, στον τομέα της κοινωνιολογίας για παράδειγμα, μπορούν να είναι λέξεις σε μία γλώσσα, σχέσεις μαθητών σε ένα σχολείο, σχέσεις εργαζομένων σε μία υπηρεσία, αλλά και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενός συνόλου ατόμων σε μία σελίδα κοινωνικής δικτύωσης. Στον τομέα της θαλάσσιας οικολογίας, οι οντότητες θα μπορούσαν να είναι βακτήρια ή είδη μικροοργανισμών (όπως γένη φυτοπλαγκτού στην παρούσα εργασία), που η θεωρία των κοινωνικών δικτύων θα μπορούσε να ερμηνεύσει σχέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους.

1.2 Κοινωνική Δικτύωση

Οι οργανισμοί (φυτικοί και ζωικοί) ζουν και αλληλεπιδρούν, σχηματίζοντας πολύπλοκες σχέσεις οδηγώντας στη δημιουργία μιας κοινωνικής δομής. Μια προσέγγιση που μελετά τις σχέσεις των κοινωνικών δομών ενισχύει την κατανόησή τους σε σχέση με την κοινωνική πολυπλοκότητα και τις αλληλεπιδράσεις (άμεσες και έμμεσες) των οργανισμών που την αποτελούν. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο δημιουργήθηκαν τα κοινωνικά δίκτυα ως δίκτυα κόμβων και αναπτύχθηκε η ανάλυση των κοινωνικών δικτύων ως μελέτη της δομής τους. Αυτή η προσέγγιση εξετάζει κόμβους και ομάδες κόμβων ως προς τις μεταξύ τους σχέσεις και συμπεριφορές, υπερβαίνοντας την προηγούμενη κλασσική προσέγγιση που ήθελε να μελετώνται οι κοινωνικές δομές κυρίως ως προς το μέγεθός τους.

Ως κοινωνική δικτύωση, ορίζεται η τάση των διάφορων οντοτήτων στον κόσμο να δημιουργούν ομάδες μέσα στις οποίες ζουν, επικοινωνούν και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτές οι οντότητες μπορούν να είναι είτε ανθρώπινα όντα, είτε ζώα του ίδιου ή

διαφόρων ειδών, ιοί και βακτήρια, αλλά και όπως στην περίπτωση αυτή της εργασίας γένη φυτοπλαγκτού. Σε κάθε περίπτωση, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κόμβων ορίζονται ως συνδέσεις με τις οποίες κάθε άτομο/οντότητα συνδέεται άμεσα ή έμμεσα με άλλους δημιουργώντας ομάδες οι οποίες μπορεί να συνδέονται με άλλες ομάδες κόμβων. Μία απεικόνιση ενός τέτοιου σύνθετου δικτύου ανθρώπινων σχέσεων, έχει συνήθως μια δαιδαλώδη μορφή δενδρογράμματος (Εικόνα 1), με πολλές και δυσδιάκριτες διακλαδώσεις που εκτείνονται ανάμεσα στους κόμβους και ρυθμίζουν την ροή του δικτύου που μπορεί να σχετίζεται με μια πληροφορία ή έναν ιό που διαδίδεται από κόμβο σε κόμβο. Πάνω σε αυτό το πρότυπο των ανθρώπινων κοινωνικών σχέσεων, σχεδιαστήκαν και τα αντίστοιχα δίκτυα αλληλεπίδρασης μεταξύ διάφορων άλλων οργανισμών, καθώς των δικτύων γενών φυτοπλαγκτού όπως στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 1: Αναπαράσταση κόμβων που συνδέονται μεταξύ τους και δημιουργούν ένα ενιαίο κοινωνικό δίκτυο (<https://www.annalindhfoundation.org>)

Έτσι, ως Κοινωνικό Δίκτυο, ορίζεται μια κοινωνική δομή η οποία μπορεί να αποτελείται από οργανισμούς, υπηρεσίες ή αντικείμενα τα οποία ονομάζονται κόμβοι. Οι κόμβοι, μπορούν να είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με ένα ή περισσότερους τρόπους αλληλεξάρτησης που εκφράζουν συγγένεια, φιλία, κοινά ενδιαφέροντα ή κοινή συμπεριφορά (Τσίμπου 2013, αναφέρεται στο Κωνσταντάρας 2019). Πολλά μικρά δίκτυα είναι δυνατόν να συνενωθούν σε ένα σύνολο, σχηματίζοντας ένα ενιαίο κοινωνικό δίκτυο (πχ. αλληλεπιδράσεις σε μια κοινωνία ανθρώπων).

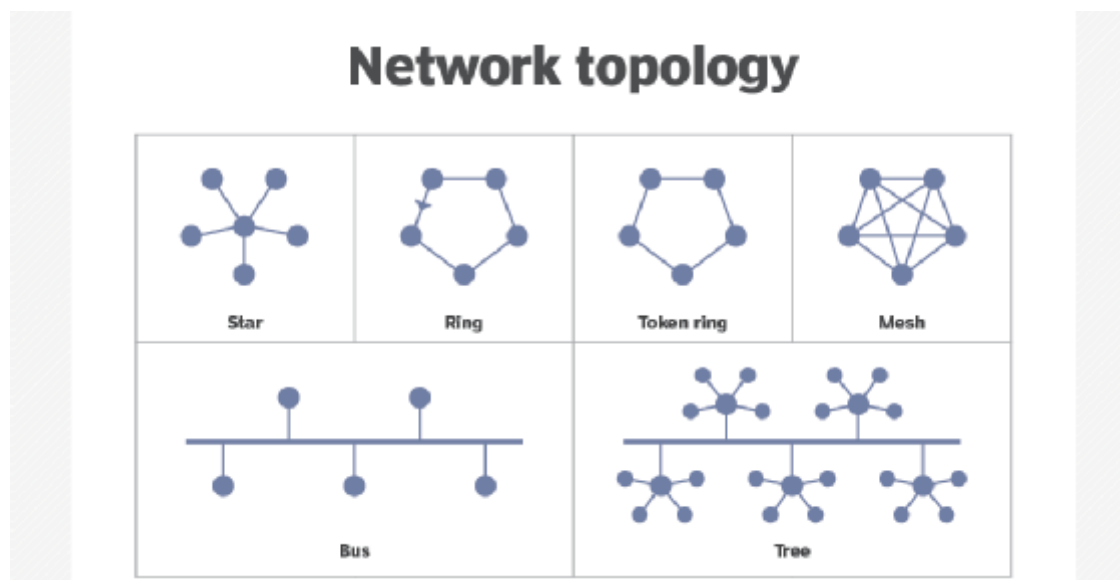
Τα κοινωνικά δίκτυα αποτελούνται από κόμβους και συνδέσεις που μαζί δημιουργούν ένα γράφημα. Πιο συγκεκριμένα:

- **Κόμβος (Node):** Μέσα σε ένα κοινωνικό δίκτυο, ο κόμβος μπορεί να είναι ένα άτομο ή ζώο ή μια οντότητα. Ο κόμβος είναι ένα στοιχείο ενός δικτύου με γνωστές σχέσεις με άλλους στο μοντέλο του γραφήματος του κοινωνικού δικτύου.

- **Σύνδεση (Edge):** Εκφράζει μια σχέση μεταξύ δύο κόμβων στο γράφημα. Σε ένα κοινωνικό δίκτυο οι συνδέσεις μπορούν να εκφράζουν οποιοδήποτε είδος κοινωνικής σχέσης, όπως μία αλληλεπίδραση μεταξύ ατόμων ή μία σχέση μεταξύ ατόμων με σκοπό την ανταλλαγή πληροφοριών. Στην περίπτωση, που υπάρχει κατεύθυνση, τότε το δίκτυο θεωρείται «κατευθυνόμενο». Η σύνδεση μεταξύ των κόμβων καλείται επίσης δεσμός (tie) ή σύνδεσμος (link).
- **Γράφημα (Graph):** Είναι ένα σύνολο κόμβων και ένα σύνολο συνδέσεων μεταξύ τους που εκφράζονται με την βοήθεια ενός πίνακα. Ο πίνακας έχει τόσες στήλες και γραμμές όσες το πλήθος των κόμβων και για στοιχεία περιέχει δυαδικά ψηφία (0 ή 1) αν οι συνδέσεις έχουν όλες το ίδιο βάρος ή διάφορους αριθμούς που εκφράζουν το βάρος της κάθε σύνδεσης. Ο πίνακας είναι συμμετρικός για μη κατευθυνόμενο δίκτυο. Με την βοήθεια του πίνακα απεικονίζονται οι κόμβοι σαν κύκλοι και οι συνδέσεις με γραμμές που ενώνουν τους κόμβους.

1.3 Είδη Κοινωνικών Δικτύων

Τα κοινωνικά δίκτυα τα οποία περιέχουν κόμβους και συνδέσεις, χωρίζονται σε 7 διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με την διάρθρωσή τους και τον τρόπο σύνδεσης των κόμβων μεταξύ τους (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Τα έξι είδη κοινωνικών δικτύων, σύμφωνα με τον τρόπο σύνδεσης των κόμβων (πηγή:ComputerHope.com).

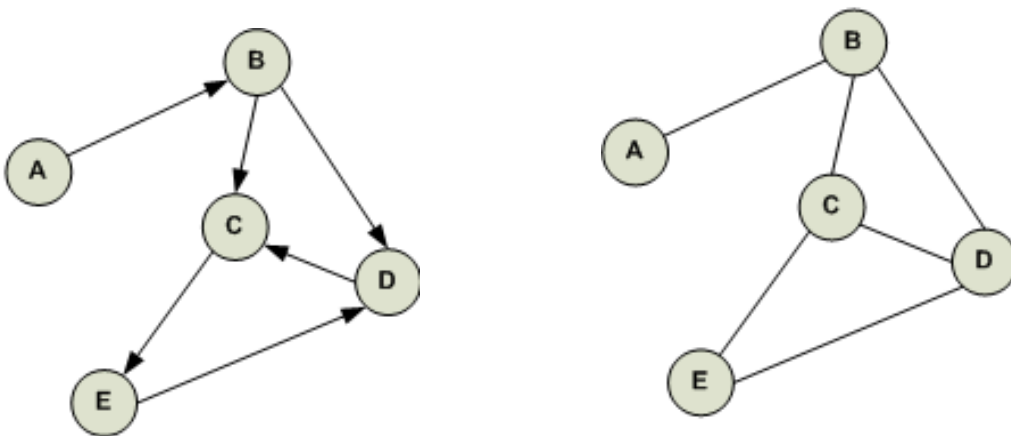
Αυτές οι 6 κατηγορίες κοινωνικών δικτύων είναι οι ακόλουθες:

- **Αστέρας (Star):** Όλα τα σημεία (κόμβοι), συνδέονται με έναν κεντρικό κόμβο.

- **Δακτύλιος/Δακτυλίδι (Ring):** Κυκλική σύνδεση των κόμβων.
- **Πλήρης Σύνδεση (Mesh):** Όλοι οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα πολύπλοκο σύστημα αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους.
- **Λεωφορείο (Bus):** Όλοι οι κόμβοι, συνδέονται με μία κεντρική γραμμή και έτσι επικοινωνούν μεταξύ τους.
- **Δένδρο (Tree):** Πολλά διαφορετικά δίκτυα συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας γραμμής, που λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με την περίπτωση «Λεωφορείο».
- **Πλέγμα:** Τρόπος σύνδεσης των κόμβων, παρόμοιος με αυτόν του δακτυλίου, αλλά μία γραμμή από κόμβους, διέρχεται από το εσωτερικό του δακτυλίου, σχηματίζοντας πολλές φορές ένα σχήμα χαρταετού.

1.4 Είδη συνδέσεων κόμβων

Οι σχέσεις που μπορεί να αναπτυχθούν ανάμεσα σε δύο κόμβους μπορεί να είναι μονόδρομες (μονομερείς) ή αμφίδρομες. Στις μεν μονόδρομες σχέσεις, ένας κόμβος A μπορεί να συνδέεται με έναν άλλο B, χωρίς αυτός να συνδέεται με τον A. Στις δε αμφίδρομες σχέσεις, οι συνδέσεις ανάμεσα στους κόμβους είναι διπλής κατεύθυνσης, δηλαδή αν ο A συνδέεται με τον B, τότε συμβαίνει και το ανάποδο (Τσίμπου 2013), έτσι μία μονόδρομη σχέση, ονομάζεται κατευθυνόμενη, ενώ μια αμφίδρομη ονομάζεται και μη κατευθυνόμενη (Τσίμπου 2013).



Εικόνα 3: Τα έξι είδη κοινωνικών δικτύων, σύμφωνα με τον τρόπο σύνδεσης των κόμβων (πηγή:ComputerHope.com).

1.5 Βασικά μέτρα κόμβων

Σε κάθε κόμβο ενός κοινωνικού δικτύου αντιστοιχούν συνδέσεις που εκφράζουν τις σχέσεις, τις συσχετίσεις ή τις επιδράσεις που υπάρχουν με τους άλλους κόμβους του

δικτύου. Έτσι για κάθε κόμβο μπορούν να μετρηθούν κάποια μέτρα που εκφράζουν το μέγεθος και το ύψος αυτών των σχέσεων. Τα βασικότερα μέτρα είναι τα εξής:

- **Βαθμός Κεντρικότητας (Degree Centrality):** Το πλήθος των απευθείας συνδέσεων ενός κόμβου i με τους άλλους κόμβους στο δίκτυο, ονομάζεται βαθμός κεντρικότητας του κόμβου και συμβολίζεται ως $d(i)$. Έτσι, ο κόμβος με τις περισσότερες διασυνδέσεις είναι ο πιο κεντρικός (εμφανίζει την μεγαλύτερη κεντρικότητα).

$$C_d(i) = d(i)$$

Στην περίπτωση που οι συνδέσεις έχουν προτυποποιηθεί φέροντας κάποιο βάρος (δεν έχει δηλαδή κάθε σύνδεση την ίδια σημαντικότητα με τις άλλες) τότε ως βαθμός κεντρικότητας ορίζεται το άθροισμα των βαρών των συνδέσεων που ξεκινούν από τον κόμβο (σε κατευθυνόμενο δίκτυο) ή συνδέουν (μη κατευθυνόμενο δίκτυο) τον κόμβο με τους υπόλοιπους του δικτύου.

- **Εγγύτητα (Closeness Centrality):** Το πλήθος των συνδέσεων που χρειαζόμαστε για να πάμε από έναν κόμβο i σε έναν κόμβο j , ονομάζουμε απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων και συμβολίζεται $d(i,j)$. Η εγγύτητα του κόμβου i ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C_c(i) = \frac{1}{\sum_{i \neq j} d(i,j)}$$

για κάθε κόμβο j που ανήκει στο δίκτυο. Η εγγύτητα είναι δηλαδή το αντίστροφο της συνολικής απόστασης του κόμβου από όλους του υπόλοιπους. Έτσι αν ένας κόμβος απέχει μεγάλη απόσταση από τους υπόλοιπους κόμβους ή εγγύτητα του κόμβου είναι μικρή, ενώ αν ο κόμβος βρίσκεται σε μικρή απόσταση από τους υπόλοιπους κόμβους η εγγύτητα προσέγγισής του είναι μεγάλη.

- **Διαμεσολαβικότητα/ενδιαμεσότητα (Betweenness Centrality):** Αν συμβολίσουμε $g_{j,k}$ τον αριθμό των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων j και k και με $g_{j,k}(i)$ τον αριθμό των συνδέσεων μεταξύ j και k , που περνούν ενδιάμεσα από τον κόμβο i , τότε ορίζουμε ως διαμεσολαβικότητα (betweenness centrality) του κόμβου i , τον παρακάτω τύπο:

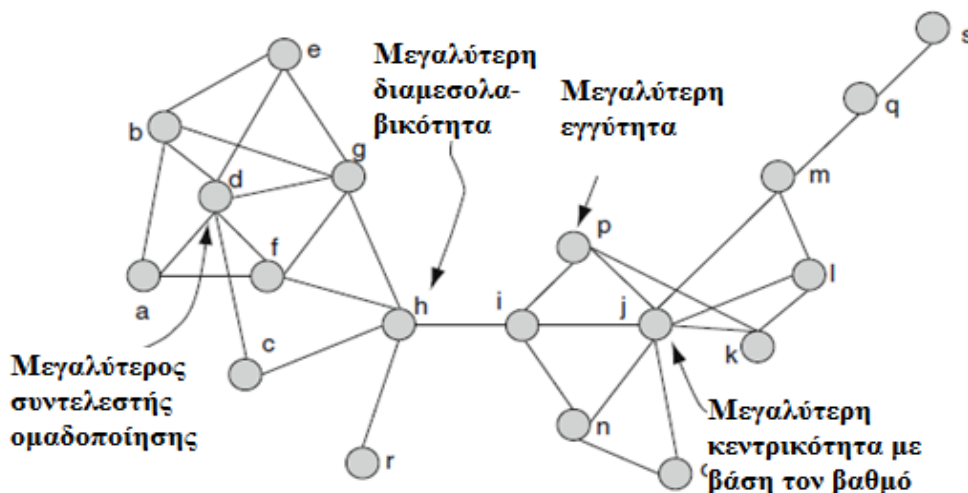
$$C_B(i) = \sum_{j < k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}$$

για όλους τους κόμβους $j, k \neq i$

Η διαμεσολαβικότητα εξετάζει εάν ένας κόμβος εξαρτάται από άλλους ενδιάμεσους κόμβους στην προσπάθειά του να προσεγγίσει έναν άλλο κόμβο. Καθένας από τους ενδιάμεσους κόμβους μπορεί να καθυστερήσει ή και να αποτρέψει εντελώς την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Επομένως όσο λιγότεροι ενδιάμεσοι στην προσέγγιση ενός κόμβου με τους υπόλοιπους, τόσο πιο κεντρική θέση κατέχει με βάση την διαμεσολαβικότητα.

- **Συντελεστής Ομαδοποίησης (Eigenvector centrality):** είναι το μέτρο επίδρασης ενός κόμβου σε ένα δίκτυο. Η λειτουργία του είναι να καταγράφει το βαθμό στον οποίο ένας κόμβος είναι σημαντικός σε ένα δίκτυο με βάση το πόσο σημαντικό είναι οι κόμβοι που συνδέεται μέσα στο δίκτυο αυτό. Ουσιαστικά μετράει τη σημασία (την επιρροή δηλαδή) κάθε κόμβου με βάση τις συνδέσεις του μέσα στο δίκτυο. Ο αλγόριθμος υπολογίζει πως η σύνδεση με άλλους σημαντικούς κόμβους αυξάνει αντίστοιχα την επιρροή του (Πέτλη 2016).

Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται ένα δίκτυο με τους κόμβους που εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές των μέτρων που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Ο κόμβος j εμφανίζει την υψηλότερη κεντρικότητα αφού είναι συνδεδεμένος με τον μεγαλύτερο αριθμό κόμβων. Ο κόμβος p είναι ο κόμβος με την υψηλότερη εγγύτητα αφού βρίσκεται συνολικά κοντύτερα από το σύνολο των υπόλοιπων κόμβων του δικτύου. Την μεγαλύτερη διαμεσολαβικότητα εμφανίζει ο κόμβος h αφού είναι ενδιάμεσος δύο διαφορετικών ομάδων κόμβων καθώς και του κόμβου r που συνδέεται μόνο μαζί του. Τέλος ο κόμβος d είναι ο κόμβος με την μεγαλύτερη επίδραση στους γύρω κόμβους του οπότε και εμφανίζει τον μεγαλύτερο συντελεστή ομαδοποίησης.



Εικόνα 4: Κοινωνικό δίκτυο που δείχνει τους κόμβους που έχουν τις μεγαλύτερες τιμές των βασικών μέτρων κόμβων

1.6 Ρόλοι κλειδιά κόμβων μέσα στο δίκτυο

Ανάλογα με την θέση τους μέσα στο δίκτυο, αλλά και τη λειτουργία τους και το σκοπό που εξυπηρετούν, οι κόμβοι, λαμβάνουν τις εξής ονομασίες:

Ο Υπερβολικά Κεντρικός Ρόλος, τον οποίο παίζουν οι κόμβοι οι οποίοι διαθέτουν μεγάλο αριθμό συνδέσεων ή αλλιώς μεγάλο βαθμό κεντρικότητας (Τσίμπου 2013, αναφέρεται στο Κωνσταντάρας, 2019).

Ο Ρόλος του Αφανή Ήρωα, ο οποίος χαρακτηρίζει άτομα που τείνουν να παίζουν πολύ κεντρικότερο ρόλο από τις προβλέψεις (Τσίμπου 2013, αναφέρεται στο Κωνσταντάρας, 2019).

Ο Ρόλος του Μεσάζοντα, όπου οι σύνδεσμοι, δεν συνδέουν άμεσα κάποια άτομα μεταξύ τους (Τσίμπου 2013, αναφέρεται στο Κωνσταντάρας, 2019), αλλά ωστόσο λειτουργούν ως ενδιάμεσοι κόμβοι για τους υπόλοιπους κόμβους. Ουσιαστικά επιτελούν σημαντικό έργο, γιατί είναι εκείνα τα άτομα που κρατάνε την ομάδα ενωμένη. Επίσης παρατηρείται ότι παρουσιάζουν μεγάλη τιμή στο μέτρο της διαμεσολαβικότητας.

Ο Ρόλος γεφύρωσης απομακρυσμένων ομάδων, δηλαδή όταν ένα συγκεκριμένος κόμβος λειτουργεί σαν δεσμός ανάμεσα σε δυο υπό-ομάδες που ορίζονται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως ο λειτουργικός σχεδιασμός, φυσική τοποθεσία, επίπεδο στην ιεραρχία, τότε παίζει το ρόλο του γεφυρωτή των απομακρυσμένων ομάδων (Τσίμπου 2013, αναφέρεται στο Κωνσταντάρας, 2019).

Υπερβολικά περιφερειακός ρόλος, τον οποίο παίζουν κόμβοι που είναι χαλαρά συνδεδεμένοι με τους υπόλοιπους κόμβους. Επίσης, έντονο περιφερειακό ρόλο μπορεί να έχουν και απομονωμένοι κόμβοι. Ακόμη, δύο σημαντικά ζητήματα είναι η διαπίστωση ότι ένας κόμβος είναι όντως απομονωμένος αλλά και αν έχει υπερβολικά σημαντικό ρόλο σε μια συγκεκριμένη ομάδα κόμβων (περιφέρεια) καθώς επίσης και ο τρόπος με τον οποίο ο κόμβος αυτός επηρεάζει το συνολικό δίκτυο (Τσίμπου 2013, αναφέρεται στο Κωνσταντάρας, 2019).

1.7 Βασικά μέτρα δικτύου

Για ένα κοινωνικό δίκτυο κατευθυνόμενο ή μη είναι δυνατό να υπολογιστούν διάφορα μέτρα που αφορούν στην δομή του. Τα πιο γνωστά μέτρα στην ανάλυση των κοινωνικών δικτύων είναι τα εξής:

- **Μέσος Βαθμός Δικτύου (Average Degree):** Βασικό μέτρο κάθε δικτύου, που δείχνει τον μέσο βαθμό του συνόλου των κόμβων που αποτελούν το δίκτυο. Είναι δηλαδή ο μέσος αριθμός συνδέσεων όλων των κόμβων του δικτύου.

- **Μέσος Σταθμισμένος Βαθμός (Average Weighted Degree):** Είναι ειδική περίπτωση του μέσου βαθμού όταν οι συνδέσεις του δικτύου εμπεριέχουν βάρος (Πέτλη 2016, αναφέρεται στο Κωνσταντάρας 2019). Μέσος σταθμισμένος βαθμός είναι δηλαδή ο μέσος των σταθμισμένων βαθμών όλων των κόμβων του δικτύου
- **Μέση Εγγύτητα (Average Closeness Centrality):** Είναι ο μέσος όρος του μέσου βαθμού εγγύτητας όλων των κόμβων του δικτύου.
- **Μέση Διαμεσολαβικότητα/Μέση Ενδιαμεσότητα (Average Betweenness Centrality):** Είναι ο μέσος όρος του βαθμού διαμεσολαβικότητας όλων των κόμβων του δικτύου.
- **Πυκνότητα (Density):** Χρησιμοποιείται περισσότερο στην θεωρία των γραφημάτων και περιγράφει το γενικό επίπεδο της σύνδεσης ανάμεσα στα σημεία ενός γραφήματος. Η πυκνότητα του δικτύου είναι ο λόγος του πλήθους των συνδέσεων που περιέχει το δίκτυο προς τον αριθμό όλων των δυνατών συνδέσεων που μπορούν να υπάρξουν μεταξύ των κόμβων.
- **Συνοχή (Consistency):** Η συνοχή προκύπτει από τον τρόπο με τον οποίο οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους. Αν ένα μέλος μιας ομάδας συνδέεται κατευθείαν με τα υπόλοιπα μέλη της, τότε η ομάδα, είναι μια «κλίκα», διαφορετικά ονομάζεται κοινωνικός κύκλος (Τσίμπου 2013, αναφέρεται στο Κωνσταντάρας 2019).
- **Δομική συνοχή (Structural Consistency):** Η δομική συνοχή εκτιμάται από τον ελάχιστο αριθμό των μελών που εάν αφαιρεθούν από το δίκτυο θα διακόψουν τη εννιαία σύνδεση του δικτύου (Τσίμπου 2013, αναφέρεται στο Κωνσταντάρας 2019).
- **Μήκος μονοπατιού (Length):** Είναι ο μικρότερος αριθμός συνδέσεων που περιλαμβάνονται μεταξύ δύο κόμβων ή το μικρότερο συνολικό βάρος των συνδέσεων που περιλαμβάνονται μεταξύ δύο κόμβων.
- **Διάμετρος Δικτύου (Network Diameter):** Υπολογίζει την απόσταση μεταξύ όλων των ζευγών κόμβων που περιλαμβάνονται σε ένα δίκτυο (Πέτλη 2016, αναφέρεται στο Κωνσταντάρας 2019).

2 Κοινωνικά Δίκτυα με εφαρμογές στο φυτοπλαγκτόν

2.1 Φυτοπλαγκτόν και ευτροφισμός

Το φυτοπλαγκτόν αποτελείται από ένα σύνολο πλαγκτονικών οργανισμών (κυρίως φυτικών), οι οποίοι έχουν δυνατότητα φωτοσύνθεσης (Κουτσούμπας 2003, αναφέρεται στο Αθανασάκη και Κοκκόνης 2005). Οι πλαγκτονικοί οργανισμοί πλέουν ελεύθερα στη θάλασσα και μετακινούνται παρασυρόμενοι από τις διάφορες μορφές κίνησης του νερού (όπως ρεύματα). Λόγω της ιδιότητάς τους να φωτοσυνθέτουν, αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα της δημιουργίας και της σημερινής μορφής της ατμόσφαιρας της Γης. Υπήρξαν οι πρώτοι παραγωγοί οξυγόνου και είναι ο κύριος πάροχος σε οξυγόνο του πλανήτη, ξεπερνώντας και τις πιο γνωστές πηγές οξυγόνου, τα δέντρα και τα χερσαία φυτά. Φυτοπλαγκτονικοί οργανισμοί, είναι τα κυανοβακτήρια, τα μικροφύκη, καθώς και τα πράσινα χλωροφύκη (Levinton, 1995, αναφέρεται στο Αθανασάκη και Κοκκόνης 2005). Τα είδη του φυτοπλαγκτού παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία και διαφορετικούς μηχανισμούς αναπαραγωγής. Ωστόσο, οι βιοχημικοί μηχανισμοί είναι οι ίδιοι σε όλους τους οργανισμούς φυτοπλαγκτού, όπως το γεγονός ότι χρησιμοποιούν χλωροφύλλη-α κατά τη φωτοσύνθεση και τα τελικά προϊόντα φωτοσύνθεσης είναι τα ίδια (Αθανασάκη και Κοκκόνης 2005).

Το φυτοπλαγκτόν υπήρξε η πρώτη μορφή φυτικής ζωής επάνω στο πλανήτη και ο κύριος διαμορφωτής του ατμοσφαιρικού αέρα, μέσω του οξυγόνου που παράγει. Το φυτοπλαγκτόν αποτελεί βασική τροφή για το ζωοπλαγκτόν και αυτό με τη σειρά του, τροφή για ένα μεγάλο εύρος θαλάσσιων ειδών όπως όστρακα, προνύμφες ψαριών και ενήλικα ψάρια, μαλάκια και είδη κνιδόζωων, όπως μέδουσες (Μαρίνου 2017). Επομένως, μια έλλειψη σε φυτοπλαγκτόν, θα σήμαινε αυτόματα και μείωση στην αφθονία των ειδών ζωοπλαγκτού και κατ' επέκταση στα είδη που εξαρτώνται τροφικά από αυτό. Τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από την υπέρμετρη ανάπτυξη φυτοπλαγκτού σχετίζονται με την υψηλή βιομάζα που παράγεται σε παράκτιες κυρίως περιοχές, φαινόμενο γνωστό ως ευτροφισμός. Ενίοτε κάποια είδη φυτοπλαγκτού απελευθερώνουν τοξικές ουσίες που προκαλούν επιπτώσεις στους πληθυσμούς ψαριών και οστράκων, αλλά και έμμεσα στον άνθρωπο αν καταναλώσει επιβαρυμένα ψάρια ή όστρακα. Ένα παράδειγμα περιοχής με σχετικά προβλήματα είναι του κόλπου της Καβάλας. Το πρόβλημα στην περιοχή προκύπτει από την υπερβολική ανάπτυξη φυτικών οργανισμών (φυτοπλαγκτού), ιδιαίτερα στις λιμνοθάλασσες Ερατεινό, Βάσσοβα, Αγιάσμα, στις περιοχές Χαϊδευτό Ν. Καρβάλη, αλλά και στις ακτές της Ραψάνης και της Καλαμίτσας (Σακκά 2005). Η αύξηση της βιομάζας φυτοπλαγκτού, οφείλεται στην αύξηση παροχής θρεπτικών, από τα οποία εξαρτάται η ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού. Στην περίπτωση των λιμνοθαλασσών, των ακτών της Καβάλας και της ευρύτερης περιοχής, αιτία είναι η τοπική βιομηχανία παραγωγής φωσφορικών λιπασμάτων, η ελλιπής λειτουργία των μονάδων επεξεργασίας αστικών λυμάτων, καθώς επίσης και η στρωμάτωση του κόλπου. Επίσης, μεγάλη συμβολή σε αυτό το φαινόμενο έχουν η γεωργική δραστηριότητα

στον κάμπο της Χρυσούπολης, τα αστικά και βιομηχανικά απόβλητα (αστική απορροή) και η ιχθυοκαλλιέργεια στα νερά αυτών των περιοχών. Τέλος, η ηλιοφάνεια και συγκεκριμένα η άφθονη ηλιακή ενέργεια και η θερμότητα ευνοεί το συγκεκριμένο φαινόμενο ευτροφισμού (Σακκά 2005). Ο ευτροφισμός, στις περιοχές όπου λαμβάνει χώρα, έχει συνήθως αρνητικό αντίκτυπο στα τοπικά εισοδήματα, από αλιεία, γεωργία και υδατοκαλλιέργειες, καθώς και από τον τουρισμό. Η αυξημένη βιομάζα φυτοπλαγκτού οδηγεί σε αύξηση της βιομάζας ζωοπλαγκτού, το οποίο τρέφεται από αυτό. Μετά το θάνατο των πλαγκτονικών οργανισμών, οργανική ύλη συσσωρεύεται στη στήλη του νερού και στον πυθμένα. Για την αποδόμηση του οργανικού αυτού υλικού απαιτείται οξυγόνο και σε ακραίες περιπτώσεις ευτροφισμού μπορεί να υπάρξει έλλειψη οξυγόνου και ως αποτέλεσμα θάνατοι μεγαλύτερων οργανισμών, όπως ψαριών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα απώλεια εισοδήματος για τους αλιείς, αλλά και γενικότερα στην ποιότητα του οικοσυστήματος της περιοχής, που γίνεται λιγότερο ελκυστική για τουρισμό και αναψυχή.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για εκτίμηση της βιομάζας φυτοπλαγκτού σε μία θαλάσσια περιοχή, όπως *insitu* δειγματοληψίες και εργαστηριακές αναλύσεις και μέτρηση της χλωροφύλλης (χρωστική που χρησιμοποιείται στη φωτοσύνθεση). Επιπλέον είναι δυνατόν να ανιχνεύσουν οι επιστήμονες την ύπαρξη και τη δραστηριότητα του φυτοπλαγκτού, μέσω δορυφορικών εικόνων και αναλύσεων της σχετικής πληροφορίας. Μέσω της σχετικά νέας αυτής τεχνολογίας, οι επιστήμονες είναι σε θέση να έχουν ανά πάσα στιγμή εικόνες από συγκεκριμένους δορυφόρους, όπως οι Sentinel 1, 2 και 3 και σχετικών υπηρεσιών στο διαδίκτυο, όπως το πρόγραμμα Copernicus ESA, το οποίο είναι μια υπηρεσία που μεταξύ άλλων αναλύει την συγκέντρωση της χλωροφύλλης σε μία περιοχή και στη συνέχεια παρέχει ψηφιακά δεδομένα για τη βιομάζα φυτοπλαγκτού. Στη συνέχεια, τα ψηφιακά δεδομένα αναλύονται από προγράμματα όπως το SNAP ESA.

2.2 Εφαρμογές κοινωνικών δικτύων στο φυτοπλαγκτόν

Η ανάλυση των κοινωνικών δικτύων είναι μια σχετικά σύγχρονη μέθοδος, ενώ η εφαρμογή της σε δεδομένα φυτοπλαγκτού έχει αναπτυχθεί κατά τα τελευταία χρόνια. Η χρήση μεθόδων κοινωνικών δικτύων στο φυτοπλαγκτόν απαιτεί την αναγνώριση σε επίπεδο γένους ή είδους. Παλαιότερα η αναγνώριση αυτή γινόταν αποκλειστικά στο μικροσκόπιο από έμπειρους ερευνητές. Επειδή η διαδικασία της αναγνώρισης εμπειρείχε υποκειμενικότητα, η αναγνώριση σε επίπεδο είδους συχνά είχε διαφορές από παρατηρητή σε παρατηρητή. Σήμερα με τη χρήση νέων τεχνολογιών μοριακής ανάλυσης, ταυτοποιήθηκαν νέα είδη και γενικά τα αποτελέσματα θεωρούνται πλέον αξιόπιστα (Marcellin-Gros et al. 2020). Επιπλέον οι μοριακές αναλύσεις έχουν υποστηρίξει βελτιώσεις και στην παλαιότερη μέθοδο αναγνώρισης μέσω μικροσκοπίου.

Η ανάλυση κοινωνικών δικτύων χρησιμοποιήθηκε για να συγκριθούν χαρακτηριστικά δικτύων συν-εμφάνισης τάξεων φυτοπλαγκτού σε περιβάλλοντα χωρίς επικράτηση σε σχέση με αντίστοιχα περιβάλλοντα που εμφανίζουν ισχυρή επικράτηση χλωροφύτων (*Chlorophyta*) και κυανοβακτηρίων (*Cyanobacteria*) σε υδροταμιευτήρες της περιοχής του Παρισιού (Escalasetal. 2019). Κοινωνικά δίκτυα μεταξύ διάφορων ομάδων πελαγικών και βενθικών οργανισμών εφαρμόστηκαν προκειμένου να μελετηθεί η ροή του άνθρακα στον κόλπο του Chesapeake στην Αμερική (Johnsonetal. 2009). Ευρεία εφαρμογή ανάλυσης κοινωνικών δικτύων υπάρχει στην μελέτη τροφικών δικτύων (foodwebs) σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε αυτά τα δίκτυα ενσωματώνονται οι βιομάζες και οι τροφικές ανταλλαγές μεταξύ ομάδων ειδών και μελετάται το μέγεθος του συστήματος προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την εξέλιξη τους με βάση τον χρόνο, τις περιβαλλοντικές συνθήκες ή τις ανθρωπογενείς επιδράσεις (Schuckeletal. 2015; D’Alelioetal. 2016).

Στον ελληνικό χώρο κοινωνικά δίκτυα ειδών φυτοπλαγκτού, έχουν χρησιμοποιηθεί σε έρευνες για τον εντοπισμό των αιτιών εμφάνισης του φαινομένου του ευτροφισμού σε θαλάσσιες περιοχές. Μία τέτοια περίπτωση ήταν αυτή του Θερμαϊκού κόλπου. Όπως αναφέρουν οι Genitsarisetal. (2019) πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες στην παράκτια περιοχή της Θεσσαλονίκης και ιδιαίτερα σε περιοχές κατά μήκος του λιμένα της Θεσσαλονίκης, για να ερευνηθούν τα είδη του φυτοπλαγκτού στο νερό του λιμένα και της προκυμαίας της πόλης. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν τα κοινωνικά δίκτυα συμπαρουσίας των ειδών φυτοπλαγκτόν, προκειμένου να διερευνηθούν οι αλληλεπιδράσεις τους και ο ρόλος τους στην εμφάνιση του φαινομένου του ευτροφισμού (Genitsarisetal. 2019).

3 Στόχος και Σχεδιασμός

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η ανάλυση της δομής των κοινωνικών δικτύων που σχηματίζουν οι βιολογικές κοινότητες φυτοπλαγκτού σε επίπεδο γένους κατά τη διάρκεια ενός ετήσιου κύκλου σε κλειστό κόλπο και συγκεκριμένα στον Κόλπο Καλλονής Λέσβου. Η ανάλυση βασίστηκε τόσο σε δεδομένα συν-παρουσίας, όσο και σε δεδομένα συσχετίσεων αφθονίας

Τα επιμέρους ερωτήματα που τέθηκαν είναι

- Μεταβάλλεται η δομή των δικτύων με το χρόνο; Τυχόν μεταβολές ομοιάζουν όταν λαμβάνεται υπόψιν η συν-παρουσία των γενών έναντι της συσχέτισης αφθονίας τους;
- Υπάρχει τάση εποχικότητας με ομοιότητες μεταξύ των δικτύων σε κάθε περίπτωση, συν-παρουσίας γενών συσχέτισης αφθονίας;

Για να απαντηθούν τα παραπάνω έγιναν τα παρακάτω βήματα:

- Δημιουργία δικτύων με βάση τις συν-παρουσίες των γενών

Τα 188 δείγματα νερού από 8 διαφορετικούς σταθμούς του Κόλπου Καλλονής χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργηθούν 12 μηνιαία δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά έχουν κόμβους τα 54 διαφορετικά γένη φυτοπλαγκτού και συνδέσεις τις συν-παρουσίες των γενών ανά μήνα. Επιπλέον η κάθε σύνδεση έχει σαν βαρύτητα τον λόγο των συν-παρουσιών προς το σύνολο των δειγμάτων νερού ανά μήνα. Τα δίκτυα δημιουργήθηκαν στο λογισμικό R με την βοήθεια των βιβλιοθηκών `igraph` και `assortnet`.

- Δημιουργία δικτύων με βάση τις συσχετίσεις αφθονίας μεταξύ γενών

Με την βοήθεια των αφθονιών των γενών ανά μήνα υπολογίστηκαν 12 πίνακες (54x54 γένη) συσχετίσεων των αφθονιών. Με βάση την τιμή του συντελεστή συσχέτισης του Spearman ανά δύο γένη δημιουργήθηκαν 12 μηνιαία δίκτυα με κόμβους τα γένη και συνδέσεις την στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις. Επιπλέον η κάθε σύνδεση έχει βαρύτητα που ισούται με τον συντελεστή συσχέτισης. Τα δίκτυα δημιουργήθηκαν στο λογισμικό R με την βοήθεια των βιβλιοθηκών `igraph` και `assortnet`.

- Υπολογισμός των μέτρων κόμβων και δικτύων

Τα βασικά μέτρα της ανάλυσης κοινωνικών δικτύων υπολογίστηκαν ανά κόμβο και στη συνέχεια ανά δίκτυο του κάθε μήνα. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με την χρήση κατάλληλων συναρτήσεων στο λογισμικό R. Οι βασικότερες από αυτές τις συναρτήσεις ήταν: `degree`, `strength`, `closeness`, `betweenness`, `eccentricity`, `hub_score` και `eigen_centrality`. Με την βοήθεια των μέτρων αυτών είναι δυνατή η δομική σύγκριση των δικτύων.

- Καθορισμός σημαντικότερων γενών των δικτύων

Οι τιμές των βασικών μέτρων των κόμβων χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να επιλεγούν τα γένη με τον μεγαλύτερο βαθμό, την εγγύτητα και τη διαμεσολαβικότητα ανά μήνα. Τα γένη αυτά κατέχουν σημαντική θέση στα μηνιαία δίκτυα. Σχολιάστηκε επίσης και το γεγονός γένη να εμφανίζουν σημαντική θέση μέσα στα δίκτυα περισσότερων μηνών.

- Ομαδοποίηση δικτύων συν-παρουσιών που ομοιάζουν ως προς την δομή

Τα βασικά μέτρα των 12 μηνιαίων δικτύων με βάση τις συν-παρουσίες αναλύθηκαν κατά συστάδες προκειμένου να ομαδοποιηθούν ως προς την δομή τους. Η ανάλυση έγινε στο λογισμικό R (βασική συνάρτηση `cluster_louvain`) και σκοπό είχε να βρεθούν οι μήνες που οι συν-παρουσίες των γενών εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά. Επίσης μελετήθηκε η ομαδοποίηση των μηνών.

- Ομαδοποίηση δικτύων συσχετίσεων που ομοιάζουν ως προς την δομή

Τα βασικά μέτρα των 12 μηνιαίων δικτύων με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών τους αναλύθηκαν κατά συστάδες προκειμένου να ομαδοποιηθούν ως προς την δομή τους. Η ανάλυση έγινε στο λογισμικό R (βασική συνάρτηση `cluster_louvain`)

και σκοπό είχε να βρεθούν οι μήνες που οι αφθονίες των γενών εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά. Τέλος μελετήθηκε η ομαδοποίηση των μηνών συσχετίσεων.

4 Μέθοδοι

4.1 Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή που επιλέχθηκε για να γίνει η έρευνα, βρίσκεται στο Αιγαίο πέλαγος και συγκεκριμένα είναι ο κόλπος Καλλονής στη νήσο Λέσβο. Ο κόλπος Καλλονής, είναι ένας σχετικά επιβαρυσμένος οικότοπος, λόγω της έντονης δραστηριότητας των γεωργικών καλλιεργειών στη λεκάνη απορροής και των οστρακοαλιευτικών δραστηριοτήτων, καθώς και της ρίψης αποβλήτων από την κωμόπολη της Καλλονής (δεύτερη σε πληθυσμό στο νησί) και της Σκάλας Καλλονής, αλλά και των άλλων οικισμών που βρίσκονται περιμετρικά του κόλπου (Ζέλιου και Ντούρμα 2015). Το κυριότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει είναι η εισροή θρεπτικών στοιχείων από τη χέρσο κυρίως στο βόρειο τμήμα, που στη συνέχεια διαχέονται σε όλο τον κόλπο. Η Καλλονή δεν διαθέτει δομή επεξεργασίας υγρών αποβλήτων σε πλήρη λειτουργία και τα λύματα που παράγονται από τον μόνιμο πληθυσμό, αλλά και από τους τουρίστες που διαμένουν κατά διαστήματα εκεί, καταλήγουν στον κόλπο ανεπεξέργαστα (Ζέλιου και Ντούρμα 2015). Άλλο ένα μεγάλο πρόβλημα για το οικοσύστημα, είναι η μη ελεγχόμενη αλιεία οστράκων και ψαριών από τον κόλπο με αποτέλεσμα να διαταράσσεται η ισορροπία των σχετικών πληθυσμών. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι ένα μεγάλο πρόβλημα για όλη την περιοχή, είναι τα νερά από ρέματα που ρέουν από τα κοντινά βουνά και μεταφέρουν φυτοφάρμακα, λιπάσματα και λύματα από ζώα που εκτρέφονται στην περιοχή. Αυτοί οι λόγοι οδηγούν πολλές φορές στην εμφάνιση του φαινομένου του ευτροφισμού, λόγω της υπέρμετρης αύξησης της βιομάζας ειδών φυτοπλαγκτού, μεταξύ των οποίων μπορεί να περιλαμβάνονται και τοξικά είδη.



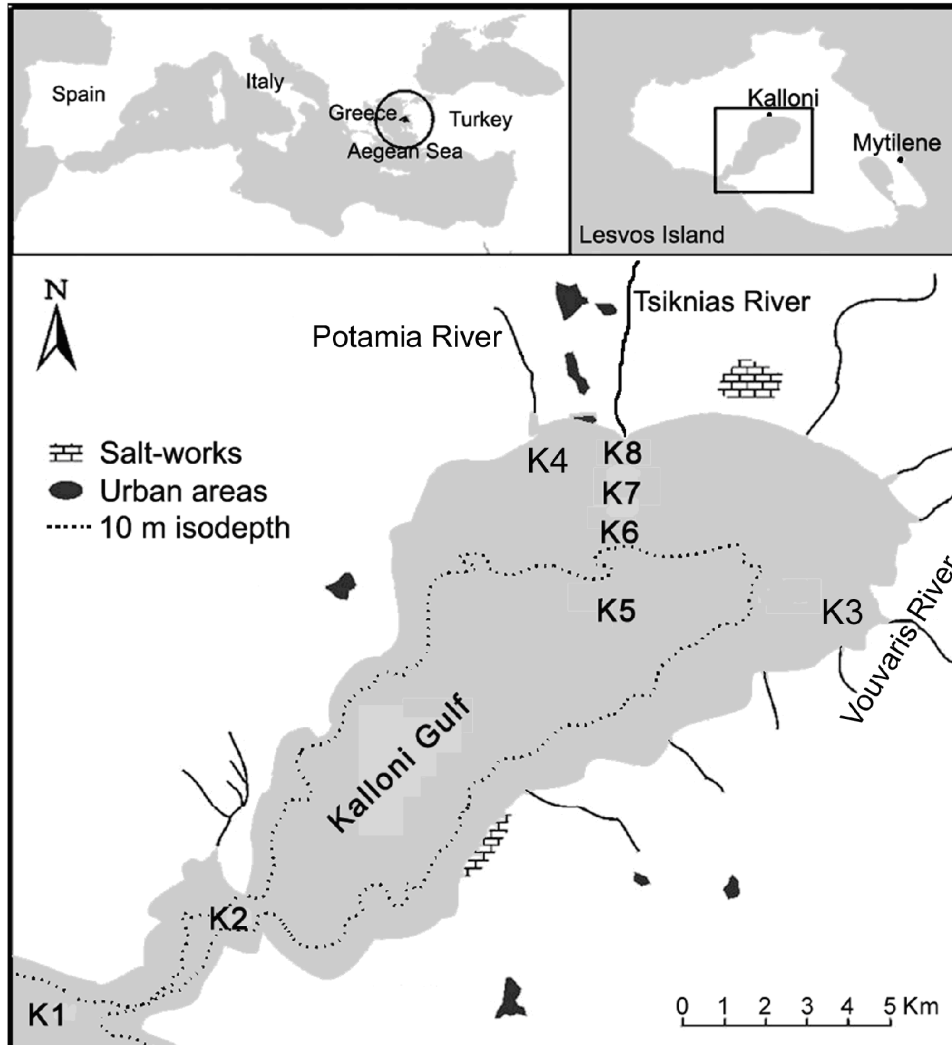
Εικόνα 5: Νεκρές πίνες στις ακτές του Κόλπου Καλλονής (πηγή: Lesvosnews.gr)



Εικόνα 6: Ο κόλπος Καλλονής και οι παράκτιοι οικισμοί της Σκάλας Καλλονής, Αχλαδεράς και Παρακοιλίων (GoogleMaps)

4.2 Δειγματοληψία

Για να διερευνηθεί η κατάσταση στον κόλπο της Καλλονής με χρήση ανάλυσης κοινωνικών δικτύων χρησιμοποιήθηκε υπάρχουσα βάση δεδομένων από δειγματοληψίες ενός πλήρους έτους (Αύγουστος 2004-Ιούλιος 2005). Η λήψη δειγμάτων νερού πραγματοποιήθηκε σε 8 σταθμούς δειγματοληψίας (Εικόνα 9) τουλάχιστον μια φορά κάθε μήνα σε βάθος 1 και 5 μέτρων καλύπτοντας όλη την επιφάνεια του κόλπου. Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών έγινε φασματοσκοπικά ενώ οι φυσικές παράμετροι μετρήθηκαν στο πεδίο. Η αναγνώριση φυτοπλαγκτού έγινε σε επίπεδο είδους. Τα δίκτυα συν-παρουσίας και συσχέτισης αφθονίας που μελετήθηκαν στην παρούσα βασίστηκαν στα παραπάνω δεδομένα σε επίπεδο γένους.



Εικόνα 7: Ο Κόλπος Καλλονής και οι σταθμοί δειγματοληψίας K1-K8 (Spatharis et. al. 2007)

Όπως φαίνεται και στο χάρτη, οι περιοχές όπου υπάρχουν σταθμοί δειγματοληψίας βρίσκονται σε όλο το πλάτος του κόλπου. Ο σταθμός K1, βρίσκεται στα νοτιοδυτικά και έξω από το στόμιο του κόλπου Καλλονής δίνοντας πληροφορίες για την ανοιχτή θάλασσα, ενώ ο σταθμός K2 βρίσκεται στο εσωτερικό του στομίου, στο κανάλι που ενώνει τον κόλπο με την θάλασσα του Αιγαίου. Στο εσωτερικό του κόλπου, μπροστά στην εκβολή του ποταμού Τσικνιά κοντά στη Σκάλα Καλλονής βρίσκονται οι σταθμοί K5-K8 σε ευθεία γραμμή απομακρυνόμενοι από την εκβολή. Από αυτούς τους σταθμούς οι K6, K7, K8, βρίσκονται σε περιοχή με βάθος μικρότερο των 10 μέτρων και ελέγχουν τις εισροές των υδάτων πλούσιων σε θρεπτικά από τον χείμαρρο Τσικνιά, ενώ ο σταθμός K5 βρίσκεται στο κέντρο του κόλπου σε βαθύτερα νερά. Τέλος οι σταθμοί K1 και K3 βρίσκονται στις εκβολές των ποταμών Βούβαρη και Ποταμιάς, αντίστοιχα, που εκπλένουν το δυτικό και ανατολικό αντίστοιχα τμήμα της λεκάνης απορροής.

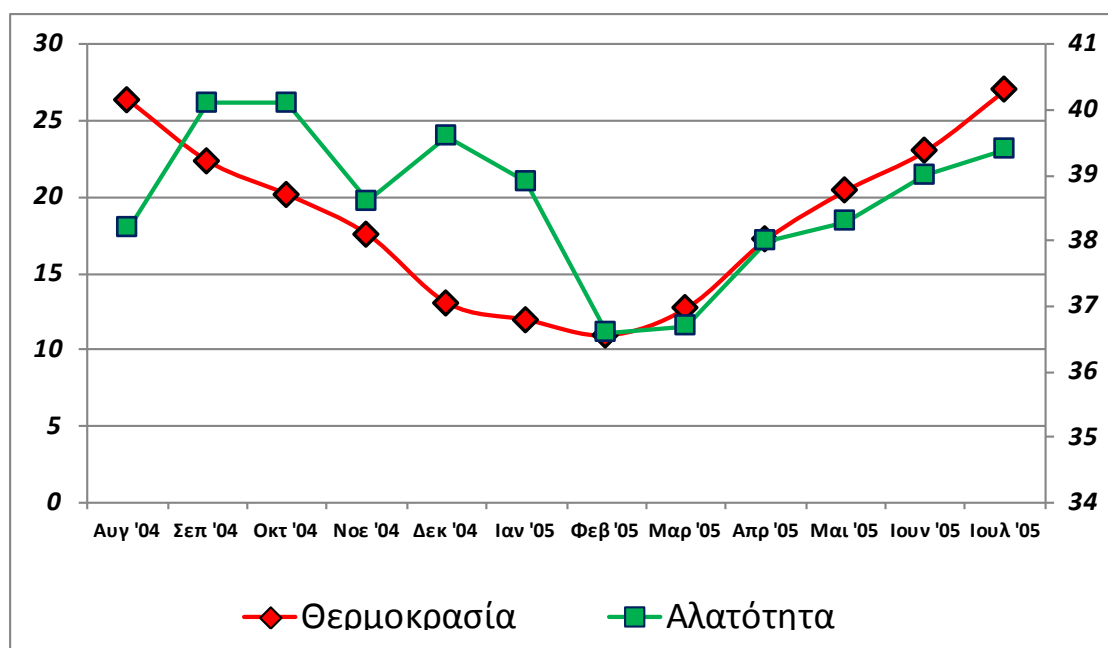
4.3 Δεδομένα περιβαλλοντικών και φυσικοχημικών παραμέτρων

Η βάση δεδομένων της δειγματοληψίας περιλαμβάνει δεδομένα από περιβαλλοντικές και φυσικοχημικές παραμέτρους που μετρήθηκαν στο πεδίο. Τα βασικά περιγραφικά στατιστικά μέτρα ανά μήνα δειγματοληψίας περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία περιβαλλοντικών παραμέτρων ανά μήνα (μέση τιμή, τυπική απόκλιση σε παρένθεση και ελάχιστη-μέγιστη τιμή).

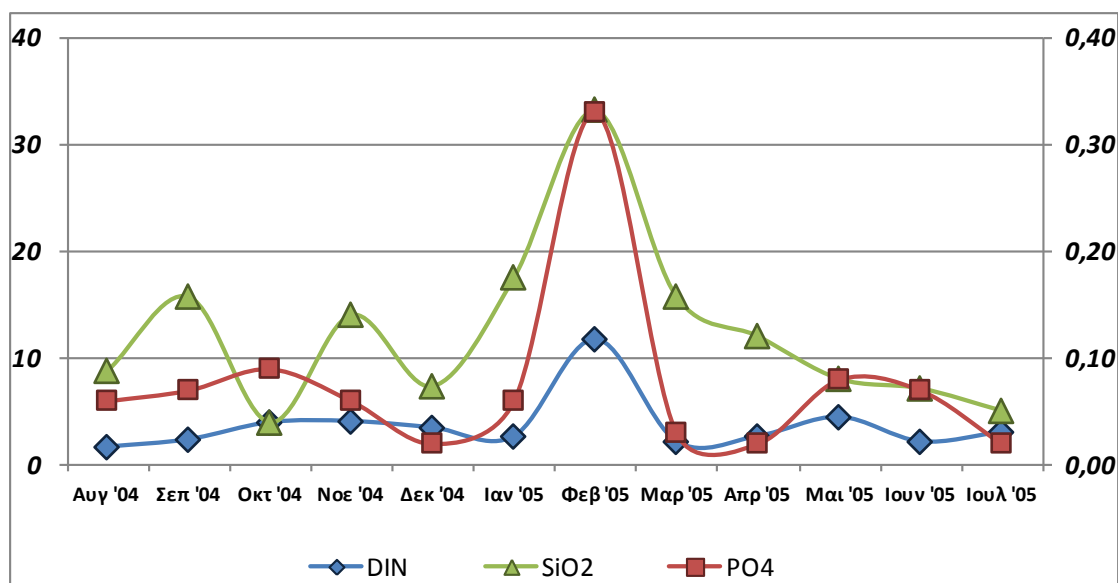
Μήνας	Θερμοκρασία	Αλατότητα	DIN	PO4	SiO2
Αυγ '04	26.3 (1.4)	38.2 (0.4)	1.6 (0.7)	0.06 (0.02)	8.75 (3.7)
	24.0-28.2	37.5-38.7	1.0-4.0	0.03-0.08	0.9-13.3
Σεπ '04	22.3 (0.9)	40.1 (0.5)	2.3 (2.0)	0.07 (0.02)	15.7 (9.2)
	20.8-23.3	39.3-40.7	1.0-8.0	0.03-0.09	7.7-41.8
Οκτ '04	20.1 (0.2)	40.1 (0.8)	1.1 (0.4)	0.08 (0.01)	3.9 (0.9)
	20.0-20.4	38.8-41.1	0.5-2.2	0.07-0.08	1.7-4.8
Νοε '04	17.5 (2.4)	39.8 (0.4)	4.0 (4.1)	0.06 (0.02)	16.4 (8.7)
	11.0-17.4	38.9-40.3	1.3-21.0	0.03-0.08	7.0-34.5
Δεκ '04	13.0 (2.4)	39.6 (0.4)	3.4 (2.1)	0.02 (0.02)	7.3 (2.4)
	11.0-17.4	39.0-40.2	1.2-9.0	0.00-0.05	5.1-12.2
Ιαν '05	11.9 (2.0)	38.9 (0.1)	2.6 (1.3)	0.06 (0.07)	17.5 (5.9)
	10.3-16.4	38.7-39.2	1.5-7.5	0.01-0.33	6.5-28.6
Φεβ '05	10.9 (1.6)	36.6 (1.4)	11.7 (13.1)	0.33 (0.55)	33.2 (29.5)
	9.4-15.0	34.0-39.0	1.6-45.2	0.01-1.58	5.7-94.0
Μαρ '05	12.7 (0.8)	36.7 (0.9)	2.1 (0.7)	0.03 (0.02)	15.7 (6.9)
	11.7-14.7	35.5-38.9	1.2-3.2	0.01-0.06	7.0-27.4
Απρ '05	17.2 (0.7)	38.0 (0.4)	2.6 (1.5)	0.02 (0.01)	12.0 (9.0)
	16.8-18.11	37.5-38.9	1.4-6.2	0.00-0.05	4.1-26.5
Μαϊ '05	20.4 (1.4)	38.3 (0.5)	4.4 (5.5)	0.08 (0.04)	8.0 (3.1)
	19.0-22.5	36.8-39.1	2.1-28.0	0.00-0.15	3.8-18.0
Ιουν '05	23.0 (1.1)	39.0 (0.4)	2.1 (0.6)	0.07 (0.05)	7.1 (2.9)
	20.7-24.1	38.7-40.3	1.4-4.0	0.00-0.20	2.4-14.0
Ιουλ '05	27.0 (1.3)	39.4 (0.4)	3.0 (1.5)	0.02 (0.01)	5.0 (1.3)
	24.4-28.0	38.8-40.0	1.5-6.15	0.00-0.04	3.1-6.8
Total	17.7 (5.5)	38.6 (1.4)	3.9 (6.1)	0.09 (0.22)	14.0 (14.5)
	9.4-28.2	34.0-41.1	0.5-45.2	0.00-1.58	0.9-94.0

Η μέση μηνιαία μεταβολή της θερμοκρασίας (πρωτεύων άξονας) και της αλατότητας (δευτερεύων άξονας) παρουσιάζεται στην εικόνα 8. Η θερμοκρασία της θάλασσας μειώνεται σταδιακά από 26.3 °C τον Αύγουστο του 2004 μέχρι 10.9 °C τον Φεβρουάριο του 2005 και σταδιακά ανεβαίνει μέχρι να φτάσει σχεδόν στα ίδια επίπεδα 27.0 °C τον Ιούλιο του 2005. Η αλατότητα από την άλλη που σχετίζεται άμεσα με την βροχόπτωση παρουσιάζει αυξομειώσεις το φθινόπωρο του 2004, με την ελάχιστη μέση μηνιαία τιμή 36.6 psu να καταγράφεται τον Φεβρουάριο 2005.



Εικόνα 8: Μεταβολή της θερμοκρασίας (πρωτεύων άξονας) και αλατότητας (δευτερεύων άξονας) ανά μήνα δειγματοληψίας.

Τα διαλυμένα θρεπτικά παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές ανά μήνα. Ο λόγος N/P για τους περισσότερους μήνες υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή του 16, που σημαίνει ότι το οικοσύστημα βρίσκεται σε έλλειψη φωσφόρου. Τα θρεπτικά καταγράφονται σε υψηλές τιμές τον Φεβρουάριο (μέγιστο και για τα τρία θρεπτικά) που οι απορροές είναι αυξημένες. Μεγαλύτερες αυξομειώσεις παρουσιάζονται στον διαλυμένο ανόργανο άζωτο DIN και στα φωσφορικά PO₄ ενώ στα πυριτικά άλατα οι μεταβολές είναι ηπιότερες.



Εικόνα 9: Μέση μηνιαία μεταβολή των θρεπτικών (DIN και SiO₂ σε πρωτεύων άξονα, PO₄ σε δευτερεύων άξονα) στα δείγματα νερού.

4.4 Δεδομένα για τα γένη φυτοπλαγκτού

Στον πίνακα 2, παρουσιάζονται αριθμητικά στοιχεία για τον αριθμό των δειγμάτων και το πλήθος των γενών σε κάθε σταθμό δειγματοληψίας K1-K8.

Πίνακας 2: Αριθμός δειγμάτων και πλήθος γενών φυτοπλαγκτού ανά σταθμό δειγματοληψίας

Σταθμός Δειγματοληψίας	Αριθμός Δειγμάτων	Πλήθος Γενών
K1	24	35
K2	24	41
K3	24	47
K4	24	43
K5	32	47
K6	14	39
K7	32	51
K8	14	38
Σύνολο	188	54

Στην περιοχή του κόλπου Καλλονής, στο σύνολο των 8 σταθμών δειγματοληψίας βρέθηκαν 134 διαφορετικά γένη φυτοπλαγκτού σε ένα σύνολο 188 δειγμάτων μετά από ανάλυση των δειγμάτων ακολουθώντας το πρωτόκολλο της μεθόδου Utermöhl (1958) με τη βοήθεια μικροσκοπίου,. Τα γένη που βρέθηκαν στα δείγματα, ανήκουν στις τάξεις *Bacillariophyceae*, *Dinophyceae*, *Coscinodiscophyceae*, *Fragilariophyceae* και *Dictyochophyceae*. Αναλυτικότερα ο αριθμός ατόμων κάθε γένους στα δείγματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3: Γένη και αριθμοί ειδών φυτοπλαγκτού στον κόλπο Καλλονής.

Genus	N# of Species	Genus	N# of Species	Genus	N# of Species
Chaetoceros	13	Oxytoxum	2	Gymnodinium	1
Protoperidinium	13	Proboscia	2	Gyrodinium	1
Peridinium	12	Pseudo-nitzschia	2	Karlodinium	1
Ceratium	8	Thalassionema	2	Lingulodinium	1
Coscinodiscus	7	Amphidinium	1	Lithodesmium	1
Cyclotella	6	Archaeperidinium	1	Melosira	1
Rhizosolenia	5	Arcocellulus	1	Neocalyptrella	1
Entomoneis	4	Asterionella	1	Octactis	1
Prorocentrum	4	Asterionellopsis	1	Orthoseira	1
Alexandrium	3	Asteromphalus	1	Ostreopsis	1
Dictyocha	3	Bacteriastrium	1	Paralia	1
Leptocylindrus	3	Cerataulina	1	Planktoniella	1

Thalassiosira	3	Cerataulus	1	Podolampas	1
Dactyliosolen	2	Ceratoneis	1	Polykrikos	1
Dinophysis	2	Cryptomonas	1	Pyrophacus	1
Gonyaulax	2	Cyclostephanos	1	Scrippsiella	1
Guinardia	2	Ditylum	1	Skeletonema	1
Hemiaulus	2	Eucampia	1	Thalassiothrix	1

4.5 Υλοποίηση δικτύων ανά μήνα

Για κάθε μήνα ομαδοποιήθηκαν τα δείγματα νερού από όλους τους σταθμούς δειγματοληψίας και τα χαρακτηριστικά τους ως προς τον αριθμό δειγμάτων και το πλήθος των γενών εμφανίζονται στον πίνακα 4.

Πίνακας4: Αριθμός δειγμάτων και πλήθος γενών ανά μήνα δειγματοληψίας

Μήνας Δειγματοληψίας	Αριθμός Δειγμάτων	Πλήθος Γενών
Ιανουάριος	20	40
Φεβρουάριος	24	44
Μάρτιος	16	33
Απρίλιος	12	30
Μάιος	20	38
Ιούνιος	16	35
Ιούλιος	12	33
Αύγουστος	12	25
Σεπτέμβριος	12	27
Οκτώβριος	12	26
Νοέμβριος	20	45
Δεκέμβριος	12	33
Σύνολο	188	54

Τα δείγματα νερού χωρίστηκαν ανά μήνα και τροφοδοτήθηκαν στο λογισμικό R προκειμένου να δημιουργηθούν τα δίκτυα, να υπολογιστούν τα διάφορα μέτρα που αφορούν τους κόμβους και το δίκτυο συνολικά και τέλος να παρασταθούν γραφικά. Δύο τύποι δικτύων δημιουργήθηκαν: (α) δίκτυα συν-παρουσιών γενών και (β) δίκτυα συσχέτισης αφθονίας γενών.

(α) δίκτυα συν-παρουσιών γενών ανά μήνα

Τα δίκτυα συν-παρουσιών γενών έχουν για κόμβους τα γένη φυτοπλαγκτού που βρέθηκαν σε όλες τις δειγματοληψίες του κάθε μήνα. Οι συνδέσεις μεταξύ των

κόμβων έχουν βάρος που ισούται με το λόγο των συν-παρουσιών των δύο γενών προς το πλήθος των δειγματοληψιών του κάθε μήνα. Έτσι για παράδειγμα, αν στον μήνα Ιανουάριο για τον οποίο έχουμε 20 δείγματα νερού από όλους τους σταθμούς βρέθηκαν να συν-παρουσιάζονται τα γένη *Chaetoceros* και *Thalassiosira* σε 8 δείγματα τότε η σύνδεση μεταξύ των κόμβων των δύο αυτών γενών θα έχει βάρος ίσο με $8/20=0.4$ για τον συγκεκριμένο μήνα. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε το δίκτυο των γενών που συν-παρουσιάζονται κάθε μήνα το οποίο είναι μη κατευθυνόμενο (συμμετρικό) και περιέχει βάρη στις συνδέσεις. Στη συνέχεια προς απλοποίηση των δικτύων απαλειφθήκαν τα γένη που δεν ήταν παρόντα τουλάχιστον στις μισές δειγματοληψίες κάθε μήνα (θεωρήθηκαν ως σπάνια είδη).

(β) δίκτυα συσχετίσεων γενών ανά μήνα

Τα δίκτυα συσχετίσεων ανά μήνα έχουν για κόμβους τα γένη φυτοπλαγκτού που βρέθηκαν στις δειγματοληψίες του κάθε μήνα. Οι συνδέσεις αυτών των δικτύων δημιουργούνται μεταξύ δύο γενών όταν οι αφθονίες τους εμφανίζουν στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ τους σύμφωνα με τον συντελεστή συσχέτισης του Spearman. Επιπλέον το βάρος κάθε σύνδεσης ισούται με την τιμή του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των δύο γενών που συνενώνονται.

Ο συντελεστής συσχέτισης Spearman είναι ένα μη-παραμετρικό μέτρο που αξιολογεί το πόσο καλά συσχετίζονται δύο μεταβλητές. Ο τύπος με βάση τον οποίο υπολογίζεται είναι ο εξής:

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

Το πρόσημο της συσχέτισης Spearman δείχνει την κατεύθυνση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών και είναι θετικός όταν η αύξηση της μιας μεταβλητής οδηγεί στην αύξηση και της δεύτερης μεταβλητής, ενώ είναι αρνητικός αν η αύξηση της μίας οδηγεί στην μείωση της άλλης μεταβλητής. Ο συντελεστής συσχέτισης Spearman παίρνει τιμές μεταξύ -1 και 1, ενώ οι τιμές που βρίσκονται κοντά στα άκρα δείχνουν ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

Στα δίκτυα που δημιουργήθηκαν με βάση την συσχέτιση αφθονίας μεταξύ των γενών περιλαμβάνονται τα γένη που παρουσιάζονται τουλάχιστον στα μισά δείγματα κάθε μηνός.

4.6 Ανίχνευση της παρουσίας υποομάδων (clusters) στα δίκτυα.

Για την ανίχνευση της παρουσίας υποομάδων (clusters) εντός κάθε δικτύου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Louvain η οποία είναι μια μέθοδος εξαγωγής κοινοτήτων από μεγάλα δίκτυα που δημιουργήθηκε στο Πανεπιστήμιο του Louvain (από όπου έλαβε όνομά της). Η επιλογή αυτής της μεθόδου κοινοτικής ανίχνευσης έγινε λόγω της ιδιότητας που διαθέτει για βελτιστοποίηση της αρθρωτότητας καθώς εξελίσσεται ο αλγόριθμος. Η αρθρωτότητα είναι μια τιμή κλίμακας μεταξύ $-0,5$ (μη αρθρωτή ομαδοποίηση) και 1 (πλήρως αρθρωτή ομαδοποίηση) που μετρά τη σχετική πυκνότητα των άκρων εντός των κοινοτήτων σε σχέση με τις άκρες εκτός των κοινοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη μέθοδο ανίχνευσης κοινότητας Louvain, οι πρώτες μικρές κοινότητες εντοπίζονται με βάση την βελτιστοποίηση της αρθρωτότητας τοπικά σε όλους τους κόμβους και στη συνέχεια κάθε μικρή κοινότητα ομαδοποιείται σε έναν κόμβο.

5 Αποτελέσματα

5.1.1 Δίκτυα γενών ανά μήνα με βάση τις συν-παρουσίες

Η εφαρμογή της ανάλυσης δικτύων ανά μήνα οδήγησε στην δημιουργία 12 διαφορετικών δικτύων με κόμβους τα γένη που παρατηρήθηκαν σε κάθε μήνα και συνδέσεις ανάλογες του αριθμού των συν-παρουσιών των γενών στα δείγματα του μήνα. Τα μέτρα των 12 δικτύων των μηνών περιλαμβάνονται στον πίνακα 4.

Τα δίκτυα των μηνών Αυγούστου, Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου φαίνεται ότι περιέχουν τα λιγότερα καταγεγραμμένα γένη (20, 24 και 23, αντίστοιχα), ενώ τα περισσότερα γένη βρίσκονται στα δίκτυα του Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Νοεμβρίου αντίστοιχα (31, 31 και 32 αντίστοιχα). Επιπλέον τα δίκτυα των μηνών Αυγούστου, Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου είναι το ίδιο πυκνά με κάλυψη γύρω στο 85% ενώ τα δίκτυα των υπόλοιπων μηνών είναι ακόμα πιο πυκνά με κάλυψη που ξεπερνάει το 90%

Πίνακας 5: Βασικά μέτρα δικτύων μηνών με βάση τις συν-παρουσίες γενών

Μήνας	Κόμβοι	Συνδέσεις	Βαθμός	Σταθμ. Βαθμός	Διάμετρος	Εγγύτητα	Διαμεσολαβικότητα	Εκκεντρότητα	Πυκνότητα
Ιαν	31	423	27.29	9.20	0.20	0.13	13.14	1.68	0.91
Φεβ	31	446	28.77	9.67	0.17	0.13	12.87	1.39	0.96
Μαρ	29	384	26.48	9.42	0.25	0.13	12.64	1.48	0.95
Απρ	27	318	23.56	8.89	0.25	0.14	10.30	1.52	0.91
Μαι	29	395	27.24	11.61	0.40	0.11	11.76	1.41	0.97
Ιουν	29	385	26.55	10.58	0.25	0.13	11.74	1.48	0.95
Ιουλ	27	336	24.89	13.30	0.33	0.09	10.61	1.48	0.96
Αυγ	20	161	16.10	3.87	0.25	0.24	6.78	1.75	0.85
Σεπ	24	238	19.83	6.75	0.25	0.16	8.24	1.71	0.86
Οκτ	23	210	18.26	5.75	0.25	0.18	8.13	1.70	0.83
Νοε	32	463	28.94	10.75	0.25	0.11	18.80	1.50	0.93
Δεκ	27	330	24.44	10.30	0.33	0.11	10.43	1.56	0.94

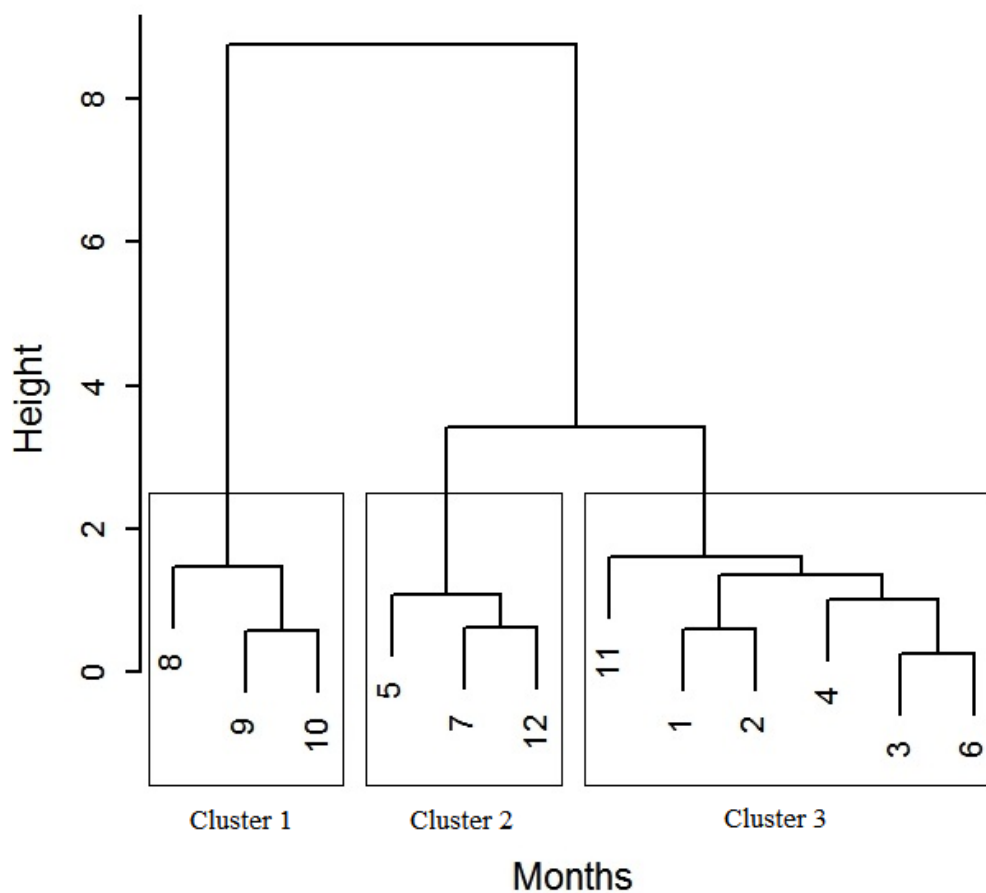
Πίνακας 6: Τα τρία σημαντικότερα γένη των δικτύων μηνών με βάση τις συν-παρουσίες τους ως προς τα βασικότερα μέτρα

Μήνας	Βαθμός	Εγγύτητα	Διαμεσολαβικότητα
1	Ceratoneis	Lithodesmium	Entomoneis
	Cryptomonas	Dactyliosolen	Scrippsella
	Cyclotella	Scrippsella	Dactyliosolen
2	Amphidinium	Lithodesmium	Octactis
	Asterionellopsis	Octactis	Lithodesmium
	Ceratium	Archaeperidinium	Archaeperidinium
3	Asterionellopsis	Scrippsella	Proboscia
	Ceratium	Archaeperidinium	Scrippsella
	Chaetoceros	Octactis	Gyrodinium
4	Ceratoneis	Dictyocha	Dinophysis
	Chaetoceros	Dinophysis	Gymnodinium
	Cryptomonas	Gymnodinium	Dictyocha
5	Asterionellopsis	Lithodesmium	Archaeperidinium
	Ceratoneis	Archaeperidinium	Lithodesmium
	Chaetoceros	Gyrodinium	Gyrodinium
6	Ceratoneis	Dictyocha	Dictyocha
	Chaetoceros	Coscinodiscus	Coscinodiscus
	Cryptomonas	Asterionellopsis	Scrippsella
7	Ceratium	Entomoneis	Entomoneis
	Ceratoneis	Archaeperidinium	Archaeperidinium
	Chaetoceros	Thalassiothrix	Dactyliosolen
8	Ceratium	Rhizosolenia	Proboscia
	Cyclotella	Hemiaulus	Hemiaulus
	Dictyocha	Proboscia	Rhizosolenia
9	Ceratium	Paralia	Guinardia
	Chaetoceros	Entomoneis	Leptocylindrus
	Cyclotella	Guinardia	Rhizosolenia
10	Ceratoneis	Dinophysis	Entomoneis
	Chaetoceros	Paralia	Ceratium
	Cryptomonas	Prorocentrum	Paralia
11	Ceratium	Dactyliosolen	Scrippsella
	Ceratoneis	Entomoneis	Archaeperidinium
	Chaetoceros	Archaeperidinium	Guinardia
12	Ceratoneis	Hemiaulus	Guinardia
	Chaetoceros	Thalassiothrix	Hemiaulus
	Cryptomonas	Scrippsella	Scrippsella

Τα σημαντικότερα γένη για κάθε δίκτυο μηνών με βάση τον βαθμό (degree), την εγγύτητα (closenesscentrality) και τη διαμεσολαβικότητα (betweennesscentrality) παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Τα γένη που είναι σημαντικότερα με βάση την

εγγύτητα και τη διαμεσολαβικότητα ομοιάζουν αρκετά καθώς σε κάθε μήνα ένα έως και τρία είδη (σημειώνονται με γκρίζο χρώμα στον πίνακα) είναι ίδια. Άρα τα γένη με ρόλο διαμεσολαβητή είναι και γένη που βρίσκονται κοντύτερα (εγγύτερα) σε όλα τα άλλα γένη του δικτύου. Τα γένη που εμφανίζουν την μεγαλύτερη εγγύτητα από όλα τα γένη είναι το *Archaeoperidinium* που εμφανίζεται με υψηλή εγγύτητα σε 5 δίκτυα μηνών και ακολούθως τα *Entomoneis* και *Scrippsiela* σε 3 δίκτυα. Τα γένη με την μεγαλύτερη διαμεσολαβικότητα είναι τα *Scrippsiela* και *Archaeoperidinium* που εμφανίζουν υψηλή τιμή του δείκτη σε 5 και 4 δίκτυα μηνών, αντίστοιχα. Αντίθετα τα σημαντικά γένη με βάση τον βαθμό είναι διαφορετικά σε σχέση με αυτά με βάση τα δύο άλλα μέτρα και μας δείχνουν ποια γένη έχουν τις περισσότερες και δυνατότερες συνδέσεις. Τα γένη που είναι πιο κοινωνικά είναι τα *Chaetoceros* και *Ceratoneis* με εμφάνιση υψηλών βαθμών στους 9 και 8 μήνες αντίστοιχα σε σύνολο 12 μηνών.

Η ιεραρχική ανάλυση κατά συστάδες χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να ομαδοποιηθούν τα δίκτυα των μηνών ως προς τα χαρακτηριστικά τους (Εικόνα 10). Τα μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση κατά συστάδες ήταν: (α) ο σταθμισμένος βαθμός, (β) η εγγύτητα, (γ) η διαμεσολαβικότητα, (δ) η πυκνότητα, (ε) η διάμετρος και (στ) ο αριθμός των κόμβων (γενών).



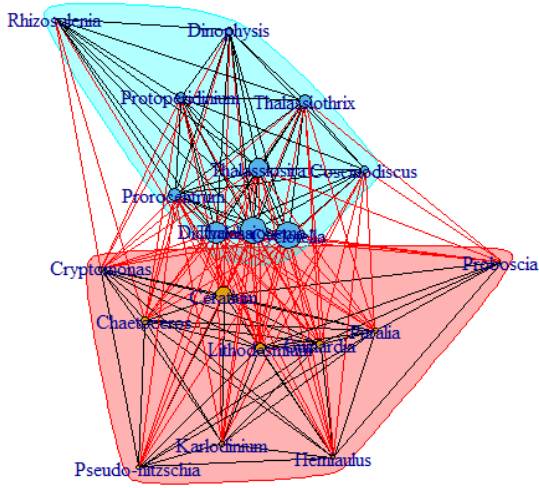
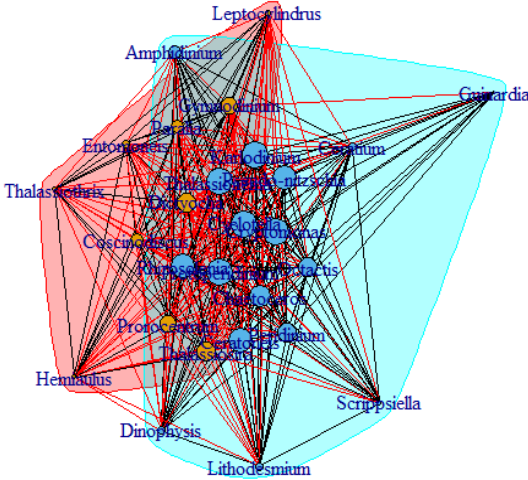
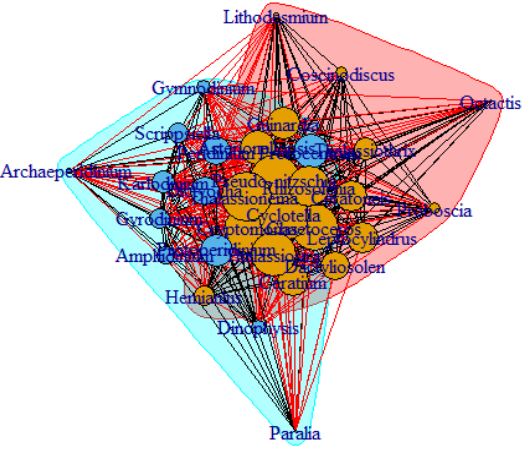
Εικόνα 10: Δενδρόγραμμα της ιεραρχικής ανάλυσης κατά συστάδες των δικτύων συν-παρουσιών των μηνών.

Πίνακας 7: Μέτρα ανά συστάδα μηνιαίων δικτύων σταθμών με βάση τις συν-παρουσίες γενών

Cluster	Στ. βαθμός	Εγγύτητα	Διαμεσολαβικότητα	Πυκνότητα	Διάμετρος	Κόμβοι
1	5.46	0.19	7.72	0.85	0.19	22
2	11.74	0.10	10.94	0.96	0.36	28
3	9.75	0.13	13.25	0.93	0.23	30

Οι συστάδες που δημιουργήθηκαν είναι 3, ενώ οι μέσες τιμές των παραμέτρων της ανάλυσης περιλαμβάνονται στον πίνακα 6. Η πρώτη συστάδα περιέχει τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο και περιλαμβάνει το τελευταίο μέρος του καλοκαιριού και την αρχή του φθινοπώρου. Στη διάρκεια αυτής της περιόδου τα δίκτυα: (α) περιλαμβάνουν λιγότερα παρατηρούμενα γένη (λιγότεροι κόμβοι) (β) έχουν πιο αδύναμες συνδέσεις (μικρός βαθμός) και (γ) είναι πιο αραιά (μικρότερη πυκνότητα και διαμεσολαβικότητα). Η δεύτερη συστάδα αποτελείται από τα δίκτυα των μηνών Απριλίου, Ιουλίου και Δεκεμβρίου. Οι μήνες αυτοί εκφράζουν περιόδους που έπονται από περιόδους εξάρσεων. Τα δίκτυα αυτά: (α) είναι πιο πυκνά, (β) έχουν περισσότερα καταγεγραμμένα γένη (μεγάλος αριθμός κόμβων) (γ) περιλαμβάνουν γένη με ισχυρές συν-παρουσίες (μεγάλος στ. βαθμός). Η τρίτη συστάδα γενών περιλαμβάνει τα δίκτυα των μηνών Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου, Μαρτίου, Απριλίου, Ιουνίου και Νοεμβρίου, τους μήνες δηλαδή εμφανίσεων των εξάρσεων του φυτοπλαγκτού. Εδώ τα δίκτυα (α) περιλαμβάνουν τα περισσότερα γένη (μεγαλύτερος βαθμός), (β) είναι αρκετά πυκνά, (γ) τα γένη έχουν λιγότερες σχετικά συν-παρουσίες σε σχέση με τα δίκτυα της δεύτερης συστάδας και γι αυτό (δ) η διαμεσολαβικότητα των ειδών είναι ισχυρή. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι υπάρχουν αρκετές συν-παρουσίες γενών, αλλά αυτές δεν είναι τόσο συγκεκριμένες (όχι ίδιες σε κάθε δείγμα νερού του μήνα) γεγονός που ευνοεί την υψηλή διαμεσολαβικότητα.

Πίνακας 8: Αντιπροσωπευτικά δίκτυα μηνών με βάση τις συν-παρα presences γενών ανά συστάδα ομαδοποίησης.

Μήνες 8-9-10	Μήνες 5-7-12	Μήνες 1-2-3-4-6-11
<p style="text-align: center;">Month 8 presences</p> 	<p style="text-align: center;">Month 12 presences</p> 	<p style="text-align: center;">Month 2 presences</p> 
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Λίγοι κόμβοι ✓ Ασθενείς συνδέσεις ✓ Μικρός βαθμός ✓ Μικρότερη πυκνότητα 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Μέσο πλήθος κόμβων ✓ Μεγάλος βαθμός ✓ Μεγάλη πυκνότητα 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Μεγάλο πλήθος κόμβων ✓ Πολλή μεγάλη πυκνότητα ✓ Μεγάλη διαμεσολαβικότητα

5.1.2 Δίκτυα γενών ανά μήνα με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών

Η εφαρμογή της ανάλυσης δικτύων ανά μήνα οδήγησε στην δημιουργία 12 διαφορετικών δικτύων με κόμβους τα γένη τα οποία εμφάνισαν στατιστικά σημαντική συσχέτιση των μηνιαίων αφθονιών τους και συνδέσεις ανάλογες του βαθμού της συσχέτισης αυτής. Η συσχέτιση μεταξύ των αφθονιών των γενών μετρήθηκε με βάση τον συντελεστή συσχέτισης του Spearman. Τα μέτρα των 12 δικτύων των μηνών με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.

Τα δίκτυα των μηνών με βάση την συσχέτιση της αφθονίας των γενών εμφανίζουν χαμηλή πυκνότητα και επομένως είναι δίκτυα αραιά. Αυτό φαίνεται και από τον μικρό σχετικά αριθμό συνδέσεων και από τις τιμές του βαθμού και του σταθμισμένου βαθμού. Η διάμετρος των δικτύων καθώς και η εκκεντρότητα είναι αρκετά αυξημένες γεγονός που δείχνει την ύπαρξη γενών με υψηλή διαμεσολαβικότητα και άρα γένη με αφθονίες που δεν συσχετίζονται με τις αφθονίες άλλων γενών.

Πίνακας 9: Βασικά μέτρα δικτύων μηνών με βάση τις συσχετίσεις αφθονίας γενών

Μήνας	Κόμβοι	Συνδέσεις	Βαθμός	Σταθμ. Βαθμός	Διάμετρος	Εγγύτητα	Διαμεσολαβικότητα	Εκκεντρότητα	Πυκνότητα
1	29	59	4.07	2.33	4.12	0.02	36.52	6.48	0.15
2	28	94	6.71	4.05	1.91	0.01	8.71	3.04	0.25
3	28	103	7.36	4.77	2.68	0.03	14.50	3.68	0.27
4	21	58	5.52	3.92	3.91	0.04	11.67	4.19	0.28
5	27	99	7.33	4.85	2.89	0.00	8.93	3.70	0.28
6	24	64	5.33	3.37	3.43	0.01	11.83	3.96	0.23
7	22	56	5.09	3.62	2.75	0.01	6.14	2.82	0.24
8	18	18	2.00	1.44	4.90	0.00	4.11	3.72	0.12
9	19	17	1.79	1.30	2.69	0.00	1.74	2.16	0.10
10	17	37	4.35	3.13	2.72	0.01	2.65	2.47	0.27
11	32	106	6.63	3.86	3.88	0.02	26.56	5.47	0.21
12	22	37	3.36	2.35	3.89	0.01	9.73	3.86	0.16

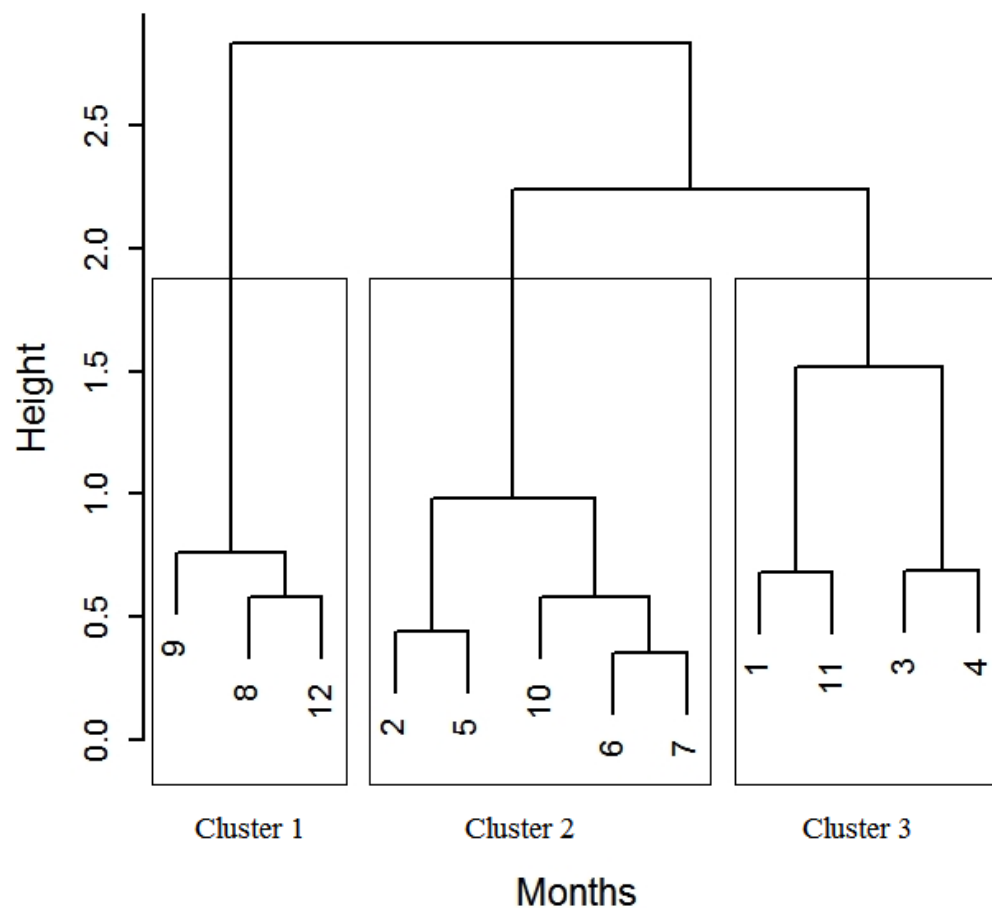
Πίνακας 10: Τα τρία σημαντικότερα γένη των δικτύων μηνών με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών τους ως προς τα βασικότερα μέτρα

Μήνας	Βαθμός	Εγγύτητα	Διαμεσολαβικότητα
Ιαν	Protoperidinium	Octactis	Octactis
	Leptocylindrus	Lithodesmium	Prorocentrum
	Cryptomonas	Leptocylindrus	Lithodesmium
Φεβ	Peridinium	Rhizosolenia	Cyclotella
	Pseudo-nitzschia	Pseudo-nitzschia	Rhizosolenia
	Amphidinium	Peridinium	Peridinium
Μαρ	Cyclotella	Thalassiothrix	Pseudo-nitzschia
	Chaetoceros	Cyclotella	Thalassiothrix
	Thalassiothrix	Asterionellopsis	Guinardia
Απρ	Dactyliosolen	Dactyliosolen	Dactyliosolen
	Karlodinium	Leptocylindrus	Prorocentrum
	Leptocylindrus	Proboscia	Cryptomonas
Μάι	Chaetoceros	Thalassiosira	Thalassiosira
	Cryptomonas	Thalassiothrix	Dinophysis
	Cyclotella	Pseudo-nitzschia	Ceratium
Ιούν	Leptocylindrus	Leptocylindrus	Thalassionema
	Pseudo-nitzschia	Hemiaulus	Hemiaulus
	Thalassionema	Thalassionema	Proboscia
Ιούλ	Hemiaulus	Hemiaulus	Archaeoperidinium
	Pseudo-nitzschia	Prorocentrum	Hemiaulus
	Thalassiosira	Archaeoperidinium	Peridinium
Αύγ	Thalassionema	Karlodinium	Karlodinium
	Chaetoceros	Cryptomonas	Chaetoceros
	Cryptomonas	Pseudo-nitzschia	Cryptomonas
Σεπτ	Dictyocha	Dictyocha	Dictyocha
	Chaetoceros	Chaetoceros	Chaetoceros
	Hemiaulus	Octactis	Entomoneis
Οκτ	Cyclotella	Dictyocha	Dictyocha
	Thalassionema	Cyclotella	Coscinodiscus
	Cryptomonas	Cryptomonas	Thalassiosira
Νοέ	Ceratoneis	Ceratoneis	Ceratoneis
	Leptocylindrus	Coscinodiscus	Coscinodiscus
	Pseudo-nitzschia	Hemiaulus	Lithodesmium
Δεκ	Thalassiosira	Thalassiosira	Ceratoneis
	Cyclotella	Ceratoneis	Thalassiosira
	Ceratoneis	Cyclotella	Entomoneis

Τα τρία πιο σημαντικά είδη ως προς βασικά μέτρα των δικτύων που δημιουργήθηκαν με βάση τη συσχέτιση των αφθονιών των γενών παρουσιάζονται στον πίνακα 8. Τα σημαντικά γένη με βάση τα μέτρα των δικτύων ομοιάζουν σημαντικά μεταξύ τους

μέσα σε κάθε μήνα. Δηλαδή, τα σημαντικά γένη ως προς τον βαθμό είναι και σημαντικά ως προς την εγγύτητα και την διαμεσολαβικότητα (παρουσιάζονται με γκρι χρώμα στον πίνακα). Τα πιο σημαντικά γένη ως προς το βαθμό για όλους του μήνες είναι τα *Chaetoceros*, *Cryptomonas*, *Cyclotella*, *Leptocylindrus* και *Pseudonitzschia* που εμφανίζονται σημαντικά σε δίκτυα 4 μηνών. Με βάση την εγγύτητα σημαντικά γένη βρέθηκαν τα *Cyclotella*, *Hemiaulus*, *Leptocylindrus* και *Pseudonitzschia* (σημαντικά σε 3 μήνες) ενώ με βάση την διαμεσολαβικότητα το σημαντικότερο γένος ήταν το *Thalassiosira* που εμφανίστηκε ως βασικό είδος στα δίκτυα 3 μηνών.

Η ιεραρχική ανάλυση κατά συστάδες χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να ομαδοποιηθούν τα δίκτυα των μηνών με βάση τη συσχέτιση των αφθονιών των γενών ως προς τα χαρακτηριστικά τους (Εικόνα 11). Τα μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση κατά συστάδες ήταν: (α) ο σταθμισμένος βαθμός, (β) η εγγύτητα, (γ) η διαμεσολαβικότητα, (δ) η πυκνότητα, (ε) η διάμετρος και (στ) ο αριθμός των κόμβων (γενών).



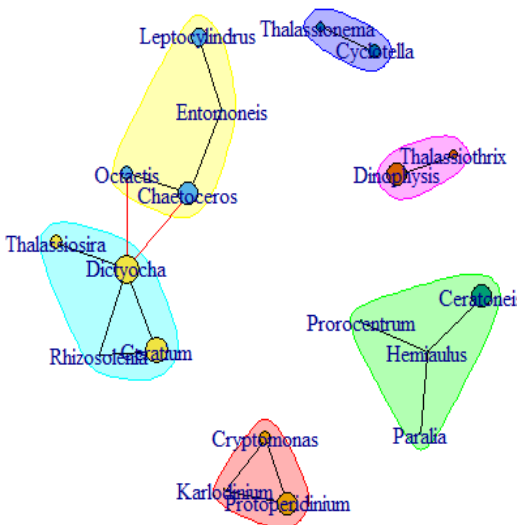
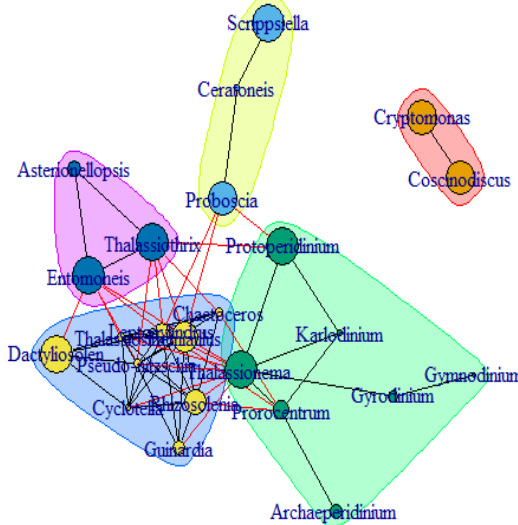
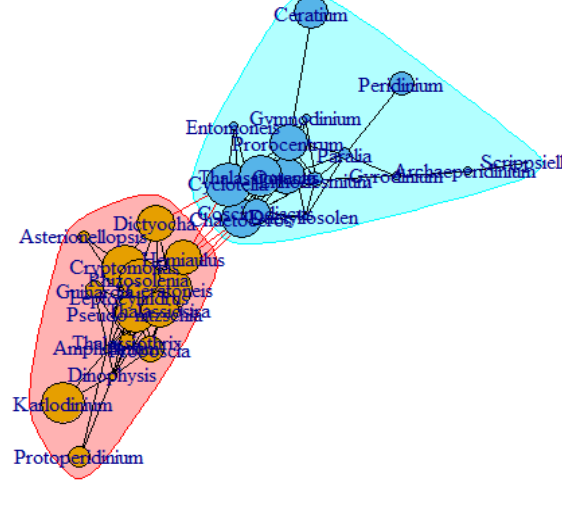
Εικόνα 11: Δενδρόγραμμα της ιεραρχικής ανάλυσης κατά συστάδες των δικτύων με βάση την συσχέτιση των αφθονιών των γενών ανά μήνα.

Πίνακας 11: Μέτρα ανά συστάδα μηνιαίων δικτύων σταθμών με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών των γενών.

Cluster	Στ. βαθμός	Εγγύτητα	Διαμεσολαβικότητα	Πυκνότητα	Διάμετρος	Κόμβοι
1	1.70	0.01	5.19	0.13	3.83	20
2	3.80	0.01	7.65	0.26	2.74	24
3	3.72	0.03	22.31	0.23	3.65	28

Τα μηνιαία δίκτυα με βάση την συσχέτιση των αφθονιών των γενών διαχωρίστηκαν σε τρεις ομάδες με βάση τη στατιστική ανάλυση κατά συστάδες. Η πρώτη συστάδα περιέχει τους μήνες Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο στα δίκτυα των οποίων καταγράφονται τα λιγότερα σχετικά γένη (20 σε πλήθος). Οι συνδέσεις εμφανίζουν μικρή βαρύτητα (μικρός βαθμός) και είναι αρκετά αραιές (μικρή πυκνότητα) ενώ τα γένη έχουν μικρή εγγύτητα και διαμεσολαβικότητα. Η δεύτερη συστάδα περιέχει του μήνες Φεβρουάριο, Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Οκτώβριο. Τα γένη με υψηλή συσχέτιση είναι περισσότερα από αυτά της προηγούμενης συστάδας, είναι πυκνότερα και εμφανίζουν σημαντικά βαρύτερες συνδέσεις (μεγάλος βαθμός). Η διαμεσολαβικότητα είναι μέτρια που σημαίνει ότι λίγα είδη έχουν το ρόλο του διαμεσολαβητή. Η τρίτη συστάδα των μηνών Ιανουαρίου, Μαρτίου, Απριλίου και Νοεμβρίου περιέχει τα στατιστικά τα περισσότερα είδη (28 σε πλήθος) τα οποία είναι συνδεδεμένα με ισχυρές συνδέσεις αλλά η πυκνότητα τους είναι πιο μικρή σε σχέση με αυτή της δεύτερης συστάδας. Εδώ έχουμε δίκτυα που γένη που έχουν ισχυρό ρόλο διαμεσολαβητή (μεγάλη διαμεσολαβικότητα) και που κρατάνε ενιαίο το δίκτυο.

Πίνακας 12: Αντιπροσωπευτικά δίκτυα μηνών με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών ανά συστάδα ομαδοποίησης.

Μήνες 8-9-12	Μήνες 2-5-6-7-10	Μήνες 1-3-4-11
<p style="text-align: center;">Month 9 abundances</p> 	<p style="text-align: center;">Month 6 abundances</p> 	<p style="text-align: center;">Month 11 abundances</p> 
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Πολλές μικρές ομάδες ✓ Λίγοι κόμβοι σε κάθε ομάδα ✓ Ασθενείς συνδέσεις ✓ Μικρός βαθμός ✓ Μικρότερη πυκνότητα ✓ Ξεκάθαρες σχέσεις 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Αρκετές ομάδες κόμβων ✓ Αρκετοί κόμβοι σε κάθε ομάδα ✓ Έντονες συσχετίσεις ✓ Ύπαρξη συσχετίσεων και μεταξύ κόμβων που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες ✓ Μεγάλη πυκνότητα 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Μεγάλο πλήθος κόμβων ανά ομάδα ✓ Ομάδες κόμβων που συσχετίζονται μεταξύ τους ✓ Πολλή μεγάλη πυκνότητα μέσα στις ομάδες ✓ Μεγάλη διαμεσολαβικότητα κάποιων κόμβων που συνδέουν τις ομάδες

6 Συμπεράσματα

6.1 Δίκτυα γενών ανά μήνα με βάση τις συν-παρουσίες

Οι συν-παρουσίες των γενών με βάση τις μηνιαίες δειγματοληψίες χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να κατασκευαστούν κοινωνικά δίκτυα. Οι συνδέσεις των δικτύων αυτών έχουν βάρος ανάλογο με τον αριθμό των συν-παρουσιών στα δείγματα των νερών που συλλέχθηκαν ανά μήνα. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την στατιστική μέθοδο της ανάλυσης κατά συστάδες ομαδοποιήθηκαν τα δίκτυα των μηνών σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους.

Τα δίκτυα των μηνών ομαδοποιήθηκαν σε τρεις συστάδες με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ένα αντιπροσωπευτικό δίκτυο από κάθε συστάδα σε συνδυασμό με τα βασικά χαρακτηριστικά της συστάδας αυτής, παρουσιάζεται στον πίνακα 11. Το δίκτυο της πρώτης συστάδας περιέχει τα λιγότερα γένη με τις πιο χαλαρές συνδέσεις. Άρα στο τέλος του καλοκαιριού με αρχή φθινοπώρου οι συν-παρουσίες των γενών είναι λίγες. Αντίθετα στο τέλος του χειμώνα και στην αρχή της άνοιξης που οι βροχοπτώσεις είναι περισσότερες και εμφανίζεται το φαινόμενο του ευτροφισμού τα δίκτυα είναι πυκνά και με πολλά είδη. Οι συν-παρουσίες των γενών είναι έντονες και επαναλαμβανόμενες στα δείγματα των νερών της περιόδου αυτής. Ενδιάμεσα στις δύο συστάδες των μηνών (τέλος χειμώνα-άνοιξη και τέλος καλοκαιριού-φθινόπωρο) υπάρχει ένα ενδιάμεσο στάδιο που περιλαμβάνει τους μήνες που έπονται των εξάρσεων φυτοπλαγκτού και περιέχουν λιγότερα γένη που συνδέονται με μετρίου βάρους συνδέσεις.

Τα γένη με τις περισσότερες συν-παρουσίες με άλλα γένη στην περίοδο των εξάρσεων (συστάδα 2 και 3) είναι τα *Chaetoceros* και *Ceratoneis*, ενώ την περίοδο που το φαινόμενο του ευτροφισμού υποχωρεί (συστάδα 1) στα γένη με τις περισσότερες συν-παρουσίες προστίθεται και το γένος *Cyclotella*. Επιπλέον σημαντικό γένος που φαίνεται να συνδέει συν-παρουσίες (ρόλος διαμεσολαβητή) την περίοδο των εξάρσεων παίζει το γένος *Scrippsiella*. Τέλος το γένος *Archaeperidinium* εμφανίστηκε να έχει κεντρικό ρόλο στα δίκτυα εμφανίζοντας μεγάλη εγγύτητα.

6.2 Δίκτυα γενών ανά μήνα με βάση τις συσχετίσεις των αφθονιών

Οι αφθονίες των γενών στα δείγματα των νερών ομαδοποιήθηκαν ανά μήνα και με τα δεδομένα αυτά υπολογίστηκαν οι συσχετίσεις των αφθονιών μεταξύ κάθε ζεύγους γενών. Οι στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις των αφθονιών χρησιμοποιήθηκαν για να παραχθούν μηνιαία δίκτυα που έχουν σαν κόμβους τα γένη τα οποία συνδέονται με συνδέσεις που έχουν σαν βάρος την τιμή του συντελεστή συσχέτισης. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα βασικά μέτρα των δικτύων σύμφωνα με τα οποία εφαρμόστηκε ανάλυση κατά συστάδες για να τοποθετηθούν τα δίκτυα σε συστάδες. Αντιπροσωπευτικά δίκτυα ανά συστάδα παρουσιάζονται στον Πίνακα 12.

Η πρώτη συστάδα των μηνών Αυγούστου, Σεπτεμβρίου και Δεκεμβρίου περιέχει λίγους κόμβους που βρίσκονται τοποθετημένοι σε πολλές μικρές ομάδες των 2-5 γενών. Οι σχέσεις μεταξύ των γενών που τις αποτελούν είναι ασθενείς και λίγες συνδέσεις υπάρχουν μεταξύ των ομάδων (χαμηλή διαμεσολαβικότητα). Στη δεύτερη συστάδα υπάρχουν δίκτυα που περιέχουν αρκετές διακριτές ομάδες με περισσότερους κόμβους που συνδέονται με αρκετά ισχυρές συσχετίσεις. Οι συνδέσεις μεταξύ ομάδων είναι περισσότερες και για αυτό η τιμή της διαμεσολαβικότητας είναι αυξημένη. Τέλος τα δίκτυα της τρίτης συστάδας αποτελούνται από τους μήνες που εμφανίζονται υψηλές αφθονίες γενών. Τα δίκτυα αυτά έχουν λίγες ομάδες στις οποίες περιλαμβάνεται μεγάλος αριθμός γενών. Οι κόμβοι έχουν μεγάλους βαθμούς εξαιτίας των υψηλών συσχετίσεων και η διαμεσολαβικότητα είναι πολύ μεγάλη εξαιτίας των σχέσεων μεταξύ των κόμβων των ομάδων.

Το γένος *Pseudo-nitzschia* εμφανίζει υψηλή συσχέτιση της αφθονίας του με άλλα γένη ειδικά στα δίκτυα του τέλους άνοιξης με καλοκαίρι (συστάδα 2). Αντίθετα το γένος *Leptocylindrus* εμφανίζει υψηλή συσχέτιση με άλλα γένη στην αρχή της άνοιξης. Άλλα γένη με υψηλές συσχετίσεις αφθονιών είναι τα *Chaetoceros*, *Cryptomonas*, και *Cyclotella*. Με βάση την διαμεσολαβικότητα το σημαντικότερο γένος ήταν το *Thalassiosira* που εμφανίστηκε ως βασικό είδος στα δίκτυα 3 μηνών.

7 Παράρτημα (Κώδικας σε R)

```
nets=function() {
# Sources
# http://www.shizukalab.com/toolkits/sna/
# http://kateto.net/networks-r-igraph
# http://pablobarbera.com/big-data-upf/html/02a-networks-intro-
visualization.html
# https://dshizuka.github.io/networkanalysis/05_community.html

# Libraries
library(igraph)
library(assortnet)

# Input file with genus abundances (species by sites matrix) in-
cluding Class, Phylum, Genus
dat=read.csv(file="input.csv",sep="," ,dec=".",header=F)
species=nrow(dat)-1
samples=ncol(dat)-3

presences=vector(length=species) # vector to store number of
presences for each species
specimp=vector(length=species) # species importance based on
presence in a number of stations

stations=as.matrix(dat[1,]) # extract station codes for each
sample
stations=stations[1,-c(1:3)]
statnames=unique(stations) # extract unique station names

datvalues=dat[-1,-c(1:3)] # extract abundance data species by
sample
datvalues=matrix(unlist(datvalues), ncol = species, byrow = TRUE)
datvalues=t(datvalues)
datvalues=mapapply(datvalues, FUN=as.numeric)
datvalues=matrix(data=datvalues, ncol=samples, nrow=species)

datnames=as.matrix(dat[-1,1:3]) # extract species descrip-
tive data (Class, Phylum, Genus)
names(datnames)=c("Class","Phylum","Genus")

cluster=1 # if cluster=1 select most important players (appearing
in more than half sampling stations)
if(cluster==1) {
  for(j in 1:species) {
    for(i in 1:length(statnames)) {
      statindex=which(stations==statnames[i])
      if(sum(datvalues[j,statindex])>0) specimp[j]=specimp[j]+1
    }
  }

  # impspecies=which(specimp>length(statnames)/2)
  impspecies=which(specimp>(length(statnames)*0.5))
  datvalues=datvalues[impspecies,]
  datnames=datnames[impspecies,]
  species=length(impspecies)
}
```

```

# Selection of method
method=c("presences", "abundances")
outfile="output_indices.csv"
outfile1="output_nodes.csv"
outfile2="output_random.csv"

cat(file=outfile1, "Method", "Station", "Degree", "Strength", "Closeness", "Betweenness", "Eccentricity", "Hub", "Eigenvector", append=F, sep=", ")
cat(file=outfile1, append=T, "\n")

cat(file=outfile2, "Method", "Station", "Shapiro", "p-value", append=F, sep=", ")
cat(file=outfile2, append=T, "\n")

cat(file=outfile, "Method", "Station", "Nodes", "Edges", "Degree", "Weighted_degree", "Diameter", "Closeness", "Betweenness", "Eccentricity", "Density", "Hub", "Eigenvector", "Transitivity", "Assortativity", "Modularity", "GOF", append=F, sep=", ")
cat(file=outfile, append=T, "\n")
cat("Method", "Station", "Nodes", "Edges", "Degree", "Weighted_degree", "Diameter", "Closeness", "Betweenness", "Eccentricity", "Density", "Hub", "Eigenvector", "Transitivity", "Assortativity", "Modularity", "GOF", "\n")

for(m in 1:2) { # method m=1:presences or m=2:abundances

# if(m==1) {
#   outfile="output_pres.csv"
# } else if(m==2) {
#   outfile="output_abund.csv"
# }

# Data processing for each station (extract columns of abundances for each station)
for(i in 1:length(statnames)) {
# for(i in 1:1) {
  statindex=which(stations==statnames[i])
  ab=datvalues[,statindex] # abundance data for each station

  for(j in 1:species) { # calculate presences of each species in a row
    presences[j]=length(which(ab[j,]>0))
  }

# Select most important players (per station)
# -----
flag=1 # flag=1 all species found in a station, flag=2 only species >=median of presences
if(flag==1) {
  subpresences=presences[presences>0]
  subpresindex=which(presences>0) # rows with presences>0
  subpresences=presences[subpresindex]
} else if(flag==2) {
  subpresences=presences[presences>0]
  limit=quantile(subpresences, 0.5)
}
}

```

```

        subpresindex=which(presences>=limit) # rows with presences >=
median
        subpresences=presences[subpresindex]
    }

    aball=cbind(datnames[subpresindex,],ab[subpresindex,]) # bind
descriptive and quantitative information

    # Create colors for nodes based on phylum
    bacc=aball[which(aball[,2]=="Ochrophyta"),3]
    dino=aball[which(aball[,2]=="Dinophyta"),3]
    other=aball[which(aball[,2]!="Dinophyta" & ab-
all[,2]!="Ochrophyta"),3]

    ab=aball[,-c(1:3)] # keep only quantitative information to
build the adjacency matrix
    rows=nrow(ab)
    cols=ncol(ab)
    ab=apply(ab, FUN=as.numeric)
    ab=matrix(data=ab, ncol=cols, nrow=rows)
    rownames(ab)=aball[,3]

    x=matrix(nrow=rows,ncol=rows) # adjacency matrix
    colnames(x)=rownames(ab)
    rownames(x)=rownames(ab)
    x[,]=0

    if(m==1) {
        for(ii in 1:(rows-1)) { # build the adjacency matrix with
presences
            for(jj in (ii+1):rows) {
                for(kk in 1:cols) {
                    if(ab[ii,kk]>0 & ab[jj,kk]>0) x[ii,jj]=x[ii,jj]+1
                }
                x[jj,ii]=x[ii,jj]
            }
        }

        x=x/length(statindex) # Standardize the number of samples
per station

    } else if(m==2) {
        for(ii in 1:(rows-1)) { # build the adjacency matrix with
abundance correlations
            for(jj in (ii+1):rows) {

if(cor.test(ab[ii,],ab[jj,],method="spearman")$p.value<0.05 &
cor.test(ab[ii,],ab[jj,],method="spearman")$estimate>0) {

x[ii,jj]=cor.test(ab[ii,],ab[jj,],method="spearman")$estimate
} else {
    x[ii,jj]=0
}

        # x[ii,jj]=cor(ab[ii,],ab[jj,],method="spearman")
        # if(x[ii,jj]<0) x[ii,jj]=0

    }
}

```

```

        x[jj,ii]=x[ii,jj]
    }
}

# x
# colnames(x)
# rownames(x)

x=as.matrix(x) # coerces the data set as a matrix
g=graph.adjacency(x,mode="undirected",weighted=T) # this will
create an 'igraph object'
# if(m==1) g=delete.edges(g, which(E(g)$weight <=.3)) # here's
my condition
g=delete.vertices(g,which(degree(g)<1))
# summary(g)
# clustering=cluster_louvain(g)

# set the node colors
V(g)$color = NA
V(g)$color[V(g)$name %in% bacc] = "red"
V(g)$color[V(g)$name %in% dino] = "blue"
V(g)$color[V(g)$name %in% other] = "yellow"

# V(g)$label=ifelse(strength(g)>2, V(g)$name, NA ) # label only
important players

# V(g)$size=degree(g)
V(g)$size=subpresences

l=layout_with_fr          # select layout for graph
# l=layout_in_circle
# l=layout_as_tree
# l=layout_as_star
# l=layout_on_grid

```

8 Βιβλιογραφία

Ξένη Βιβλιογραφία

- D' Alelio D., Libralato S., Wyatt T., Ribera d' Alcala M. (2016). Ecological-network models link diversity, structure and function in the plankton food-web. *Scientific Reports* 6 (Article number: 21806)
- Escalas, A., Catherine, A., et al, (2019), Drivers and ecological consequences of dominance in periurban phytoplankton communities using network approaches, HAL
- Ferrari A. 2011. Some steps forward in semi-quantitative networks modelling. *Network Biology*, 1(1):72-78
- Gavriil A.M., Angelidis, M.O., 2005, *Metal and organic carbon distribution in water column of a shallow enclosed Bay at the Aegean Sea Archipelago: Kalloni Bay, island of Lesbos, Greece*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64 (2005), 200-210, διαθέσιμο στο www.sciencedirect.com
- Genitsaris, S., Stefanidou, N., et al, (2019) Phytoplankton Blooms, Red Tides and Mucilaginous Aggregates in the Urban Thessaloniki Bay, Eastern Mediterranean, MDPI
- Johnson J.C, Luczkovich J.J., Borgatti S.P. (2009). Using social network analysis tools in ecology: Markov process transition models applied to the seasonal trophic network dynamics of the Chesapeake Bay. *Ecological Modelling* 220(22): 3133-3140.
- Levinton J. ,1995, "Marine Biology", Oxford University Press, New York
- Marcellin-Gros, R., Pigeneau, G., Stien, D., (2020), *Metabolomic Insights into Marine Phytoplankton Diversity*, Sorbonne Université, CNRS
- Mariani, M. A., Padedda, B. M., Kaštovský, J., et. al., (2015), *Effects of trophic status on microcystin production and the dominance of cyanobacteria in the phytoplankton assemblage of Mediterranean reservoirs*, *Scientific Reports*
- Mischaud, E., (2007) *Twitter: Expressions of the whole self. An investigation into user appropriation of a web-based communications platform*, London MSc
- Schückel U., Kröncke I., Baird D. (2015). Linking long-term changes in trophic structure and function of an intertidal macrobenthic system to eutrophication and climate change using ecological network analysis. *Marine Ecology Progress Series* 538: 25-38.
- Spatharis, S., Danielidis, D.B., Tsirtsis, G., (2007), *Recurrent Pseudo-nitzschia calliantha (Bacillariophyceae) and Alexandrium insuetum (Dinophyceae) winter blooms induced by agricultural runoff*, ELSEVIER
- Utermöhl, H., 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik. *Mitt. Internationale Vereinigung für Theoretische Angewandte Limnologie: Mitteilungen* 9, 1-38.
- Zhang, W., (2011), *Constructing ecological interaction networks by correlation analysis: hints from community sampling*, School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou, China

- Zhang WJ. 2011 Network Biology: an exciting frontier science. *Network Biology*, 1(1):79-80
- Zhang WJ. 2012. *Computational Ecology: Graphs, Networks and Agent-based Modeling*. World Scientific, Singapore
- Zohary, T., (2004), Changes to the phytoplankton assemblage of Lake Kinneret after decades of a predictable, repetitive pattern, *Freshwater Biology*

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αθανασάκη, Κ., Κοκκόνης, Ε., Εκτίμηση της συνδυασμένης επίδρασης Cu και συνθετικών οργανικών ενώσεων σε φυτοπλαγκτόν, Πανεπιστήμιο Αιγαίου Τμήμα Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη, Ελλάδα
- Ασλανίδου, Μ., Βαλσαμίδης, Α.Μ., Κουκουρουβλή, Ν., Λαγού, Μ., Ντούτζος-Μούρτζος, Δ., (2015), ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Παράκτιας Ζώνης Κόλπου Καλλονής, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σχολή Περιβάλλοντος, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, ΠΜΣ Ολοκληρωμένη Διαχείριση Παράκτιων Περιοχών
- Ζέλιου, Β., Ντούρμα, Ε., (2014), Ολοκληρωμένη προσέγγιση στην Διαχείριση παράκτιων περιοχών με την χρήση της Πολυκριτηριακής ανάλυσης και της Μεθοδολογίας Ισοζυγίου LOICZ: Η περίπτωση του Κόλπου Καλλονής, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σχολή Περιβάλλοντος, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Μυτιλήνη, Ελλάδα
- Κουτσούμπας, Δ., 2003, Σημειώσεις «Οικολογία παράκτιων υδατικών οικοσυστημάτων», Μυτιλήνη.
- Μαρίνου, Μ., (2017), Χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης στην ανάδειξη των παραγόντων που διαμορφώνουν την κατανομή κλάσεων φυτοπλαγκτού σε παράκτιες περιοχές του Αιγαίου, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ, ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
- Πέτλη, Π., (2016), Χρήση δικτύων στην μελέτη της οικολογίας ιχθυοκοινοτήτων στις Κυκλάδες
- Σακκά, Ε., (2005), Φυτοπλαγκτόν και Ρύπανση της θάλασσας, ΤΕΙ Καβάλας, Σχολή Τεχνικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Καβάλα, Ελλάδα
- Τσίμπου, Μ., (2013), Μελέτη της δομής, των υπηρεσιών και των τεχνολογιών υποστήριξης των κοινωνικών δικτύων και ανάλυση εργαλείων ποσοτικής και ποιοτικής ανάπτυξης