



Πανεπιστήμιο Κρήτης
Σχολή Θετικών και Τεχνολογικών Επιστημών
Τμήμα Βιολογίας
Π.Μ.Σ. Περιβαλλοντική Βιολογία

Τίτλος

**«Η επίδραση των Αερολυμάτων στο πλαγκτονικό,
μικροβιακό τροφικό πλέγμα της Ανατολικής
Μεσογείου.»**

Όνοματεπώνυμο: Χαντζάρας Χρήστος

A.M.: 1066

Ηράκλειο Κρήτης 2023

Εξεταστική Επιτροπή

Παρασκευή Πήττα: Διευθύντρια Ερευνών, Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας
ΕΛΚΕΘΕ

Ιωάννης Καρακάσης: Καθηγητής, Τμήμα Βιολογίας, Παν. Κρήτης

Ναυσικά Παπαγεωργίου: Επικ. Καθηγήτρια, Τμήμα Αγροτικής
Ανάπτυξης, Αγροδιατροφής και Διαχείρισης Φυσικών Πόρων, ΕΚΠΑ

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract	4
1 Εισαγωγή	5
1.1 Μεσόγειος Θάλασσα	5
1.2 Τροφικά Πλέγματα	6
1.3 Αερολύματα.....	6
1.4 Βιοαερολύματα	7
1.5 Ο ρόλος των αερολυμάτων στην Α. Μεσόγειο.....	8
1.6 Στόχος της εργασίας	8
2 Υλικά και μέθοδοι	9
2.1 Προετοιμασία του πειράματος.....	9
2.2 Σχεδιασμός του πειράματος.....	10
2.2 Πικοπλαγκτόν.....	11
2.3 Νανοπλαγκτόν	11
2.4 Μικροπλαγκτόν	12
2.5 Στατιστική ανάλυση.....	12
3 Αποτελέσματα	13
3.1 Ανόργανα Θρεπτικά.....	13
3.2 Χλωροφύλλη	15
3.3 Πικοπλαγκτόν.....	16
3.4 Νανοπλαγκτόν	16
3.5 Μικροπλαγκτόν	18
3.6 Ζωοπλαγκτόν	20
3.7 Rank Abundance	21
3.8 Πολυμεταβλητή ανάλυση	24
4. Συζήτηση.....	25
5. Βιβλιογραφία	29

Περίληψη

Μια από τις κύριες πηγές θρεπτικών για την Α. Μεσόγειο είναι τα αερολύματα και οι υποκατηγορίες αυτών, τα οποία είναι πλούσια σε οργανικές και ανόργανες ενώσεις. Οι χημικές ενώσεις που συναντώνται στα αερολύματα μπορεί να διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή, σε διαφορετικά υψόμετρα καθώς και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Αυτό συμβαίνει διότι η σύστασή τους μπορεί να μεταβάλλεται σύμφωνα με τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες και την πηγή προέλευσης. Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης των αερολυμάτων διαφορετικής προέλευσης στο πλαγκτονικό, μικροβιακό τροφικό πλέγμα. Για τον στόχο αυτό, ένα πείραμα μεσοκόσμων έλαβε χώρα στις εγκαταστάσεις CretaCosmos του ΕΛΚΕΘΕ τον Μάιο-Ιούνιο 2022. Διήρκησε 11 ημέρες και είχε 3 πειραματικές συνθήκες: Control, Rural και Urban. Στο Control δεν έγινε κανένας χειρισμός. Στις συνθήκες Rural και Urban, έγιναν τρεις προσθήκες αερολυμάτων αγροτικής και αστικής περιοχής, αντιστοίχως, τις ημέρες D0, D2 και D4. Επίσης, στο Rural και στο Urban, τις ημέρες D3 και D5 έγιναν άλλες δύο προσθήκες, σκόνης Αφρικανικής προέλευσης που είχε συλλεχθεί στη διάρκεια αμέσως προηγούμενου συμβάντος εναπόθεσης σκόνης στην περιοχή του Ηρακλείου. Η συχνότητα και η ποσότητα των αερολυμάτων και της σκόνης που προστέθηκαν είχε ως στόχο να προσομοιάσει, κατά τις πρώτες πειραματικές ημέρες, αρχικά, ήπια συμβάντα ατμοσφαιρικής εναπόθεσης που παρατηρούνται στην Α. Μεσόγειο και στη συνέχεια (ημέρα D5), έντονα φαινόμενα μεταφοράς Αφρικανικής σκόνης. Τα αποτελέσματα του πειράματος δείχνουν διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων φωσφορικών ιόντων, διοξειδίου του πυριτίου και διαλελυμένου ανόργανου αζώτου στις συνθήκες Rural και Urban. Αυτή η μεταβολή μπορεί να εξηγήσει τις αυξήσεις που απαντώνται στα αυτότροφα μαστιγωτά και διάτομα που εκμεταλλεύτηκαν τα διαθέσιμα θρεπτικά. Τα δινομαστιγωτά και το ζωοπλαγκτόν ευνοήθηκαν έμμεσα από τις προσθήκες καθώς αποτέλεσαν τους κύριους θηρευτές για τις υπόλοιπες ομάδες που εκμεταλλεύτηκαν τα διαθέσιμα θρεπτικά.

Λέξεις κλειδιά

Πλαγκτόν, Aerosol, Sahara Dust, Μεσόκοσμος, Μικροβιακή οικολογία

Abstract

One of the main sources of nutrients for the east Mediterranean is aerosols and their subcategories, which have a high concentration of organic and inorganic compounds. The chemical compounds found in aerosols can vary from one region to another, between different altitudes, as well as between different time periods. As a result of its nature, the composition of the aerosols changes according to the environmental conditions and the source of origin. The aim of this work was to study the effects of aerosols of different origins on the planktonic, microbial food web. For this purpose, a mesocosm experiment was organized at the CretaCosmos facilities of H.C.M.R. in May-June 2022. The experiment lasted 11 days and had 3 experimental conditions: Control, Rural, and Urban. No manipulation was conducted in the control. In the Rural and Urban conditions, three additions were performed, in days D0, D2, and D4, of rural and urban aerosols respectively. Moreover, in Rural and Urban, on days D3 and D5, dust of African origin that was collected during a previous dust deposition event in the Heraklion region was added. The amount of aerosols and dust added and the frequency of the addition events aimed to simulate mild atmospheric deposition events observed in the E. Mediterranean for the first experimental days, followed by intense African dust deposition events from D5. The results of the experiment showed a difference in the concentrations of phosphate ions, silicon dioxide, and dissolved inorganic nitrogen in both Rural and Urban conditions. This change may explain the increases found in autotrophic flagellates and diatoms that exploited the above available nutrients. Dinoflagellates and zooplankton were indirectly favored by the additions as they were the main predators for the other groups that exploited the available nutrients.

Key words

Plankton, Aerosol, Sahara dust, Mesocosm, Microbial ecology

1 Εισαγωγή

1.1 Μεσόγειος Θάλασσα

Η Θάλασσα της Ανατολικής Μεσογείου αποτελεί ένα περιβάλλον με χαμηλή συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων και χλωροφύλλης (LNLC) (Krom et al., 1991), καθιστώντας τη έτσι ένα από τα πιο ολιγοτροφικά θαλάσσια περιβάλλοντα παγκοσμίως (Azon et al., 1991). Η κύρια αιτία που συμβάλλει στα ολιγοτροφικά αυτά χαρακτηριστικά της Ανατολικής Μεσογείου είναι η ανταλλαγή υδάτινων μαζών μεταξύ της Δυτικής Μεσόγειου και του Ατλαντικού Ωκεανού. Είναι γνωστό ότι στα μεγαλύτερα βάθη έχουμε μεγαλύτερη συγκέντρωση θρεπτικών. Στα στενά του Γιβραλτάρ όπου η Μεσόγειος και ο Ατλαντικός συναντώνται, οι πιο πυκνές υδάτινες μάζες της Μεσογείου από μεγαλύτερα βάθη (και άρα με μεγαλύτερη συγκέντρωση θρεπτικών), εξέρχονται προς τον Ατλαντικό ενώ αντίθετα, επιφανειακές υδάτινες μάζες, φτωχές σε θρεπτικά, εισέρχονται στη Μεσόγειο, λειτουργώντας έτσι ως μια «αντλία» απομάκρυνσης θρεπτικών από τη Μεσόγειο. Επιπλέον, ο ολιγοτροφικός χαρακτήρας της Α. Μεσογείου ενισχύεται από την απουσία εκβολών μεγάλων ποταμών σε σχέση με τη Δ. Μεσόγειο, με αποτέλεσμα τη μειωμένη εισαγωγή φερτών υλικών, που αποτελούν μια πηγή πλούσια τόσο σε οργανικές όσο και ανόργανες χημικές ενώσεις. Οι παραπάνω λόγοι συμβάλλουν καθοριστικά στη δημιουργία μίας διαβάθμισης τόσο πρωτογενούς παραγωγής, από τη Δυτική ($120\text{--}131 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) προς την Ανατολική Μεσόγειο ($56\text{--}76 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$), όσο και συγκέντρωσης θρεπτικών και χλωροφύλλης (Lazzari et al., 2012). Επιπλέον, κατά τους θερινούς μήνες παρατηρείται εξάντληση των ήδη περιορισμένων διαθέσιμων ανόργανων θρεπτικών στα ανώτερα στρώματα της εύφωτης ζώνης λόγω της στρωμάτωσης της υδάτινης στήλης αλλά και της κατανάλωσης αυτών από τους πλαγκτονικούς οργανισμούς που αφθονούν κατά τους αμέσως προηγούμενους μήνες (άνοιξη).

Κύριο περιοριστικό θρεπτικό για την ανάπτυξη των πλαγκτονικών οργανισμών στη Μεσόγειο θεωρείται ο φώσφορος, με την αναλογία αζώτου:φωσφόρου να φτάνει έως και 28:1 στα βαθιά ύδατα της Ανατολικής λεκάνης (Krom et al., 1991).

1.2 Τροφικά Πλέγματα

Η μεταφορά ενέργειας σε ένα οικοσύστημα, από το χαμηλότερο επίπεδο της πρωτογενούς παραγωγής μέχρι και τους ανώτερους καταναλωτές, γίνεται μέσω πολύπλοκων τροφικών σχέσεων. Μια απλοποιημένη μορφή αποτύπωσης αυτών των σχέσεων είναι οι τροφικές αλυσίδες. Οι τροφικές αλυσίδες όμως αντιπροσωπεύουν καλύτερα τις «μονόδρομες γραμμικές» σχέσεις που απαντώνται περισσότερο στα χερσαία οικοσυστήματα αλλά απέχουν σημαντικά από το να περιγράψουν τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα και την ποικιλία των σχέσεων που δημιουργούνται ανάμεσα στις διάφορες ταξινομικές ομάδες των θαλάσσιων οργανισμών, καθώς και τις διαφοροποιήσεις που μπορούν να προκύψουν σε αυτές τις σχέσεις σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και πιέσεις (θερμοκρασία, αλατότητα, διαθέσιμα θρεπτικά, κτλ). Για την καλύτερη απεικόνιση των τροφικών σχέσεων των θαλάσσιων οικοσυστημάτων χρησιμοποιούνται τα τροφικά πλέγματα. Ένα τροφικό πλέγμα μπορεί να περιλαμβάνει όλα τα δομικά στοιχεία του οικοσυστήματος, τόσο τα βιοτικά (π.χ. βακτήρια, πρωτόζωα, φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν, ιχθύες) όσο και τα αβιοτικά μέρη του αλλά και τις διεργασίες που μπορεί να επιδρούν σε αυτά (π.χ. ανοργανοποίηση) καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ όλων αυτών. Ο συνδυασμός όλων αυτών των σχέσεων δημιουργεί μια εικόνα πιο κοντά στην πραγματικότητα που επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της δομής και λειτουργίας μιας κοινότητας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τροφικού πλέγματος είναι αυτό που παρουσιάστηκε από τους Azam et al. (1983), στο οποίο εκτός από τις πελαγικές τροφικές αλυσίδες (θρεπτικά → φυτοπλαγκτόν → ζωοπλαγκτόν → ιχθύες) προστέθηκε και ο μικροβιακός βρόχος.

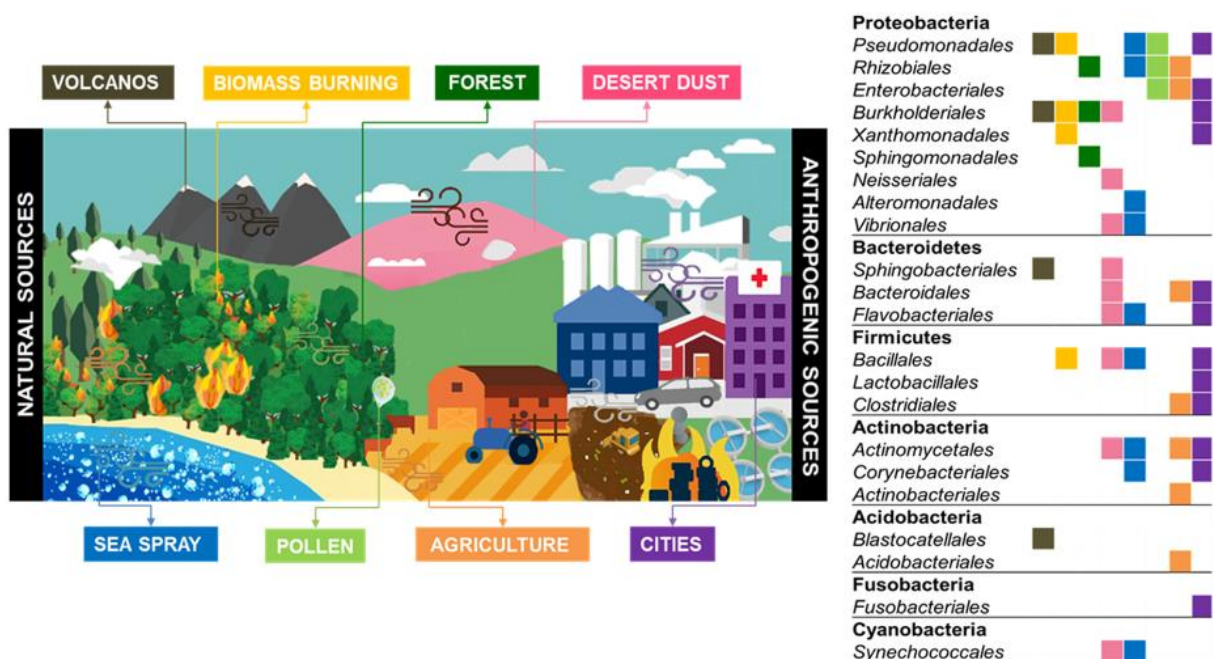
1.3 Αερολύματα

Με τον όρο αερολύματα αναφερόμαστε σε εναιωρήματα στερεών και υγρών σωματιδίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται από 10^{-4} μm έως και 10 μm . Η σύσταση των αερολυμάτων διαφέρει σημαντικά μεταξύ περιοχών, υψομέτρου και χρονικών περιόδων και καθορίζεται από την εκάστοτε προέλευση (πχ ωκεάνια ή χερσαία), τις περιβαλλοντικές συνθήκες στην ατμόσφαιρα (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία) αλλά και από τις περιοχές διέλευσής τους στο χρονικό διάστημα που αιωρούνται («Pöschl et al., 2005» ; «Q Fu, RADIATION TRANSFER

IN THE ATMOSPHERE, 2015»; «Stockdalea et al., 2016».. Ανάλογα με τη σύστασή τους, είναι πλούσια σε φώσφορο, μέταλλα, οξείδια του αζώτου και θείου, αμμωνία, οργανικές ενώσεις καθώς και άλλες ουσίες.

1.4 Βιοαερολύματα

Μια υποκατηγορία των αερολυμάτων είναι τα βιο-αερολύματα. Ως βιο-αερολύματα (bioaerosols), ορίζονται τα σωματίδια τα οποία απελευθερώνονται από τη βιόσφαιρα και μπορούν να είναι σε ζωντανή ή νεκρή κατάσταση. Τα βιοαερολύματα αποτελούνται από ολόκληρους, μονοκύτταρους κατά βάση, οργανισμούς (π.χ., βακτήρια, φύκη ή ιούς), μηχανισμούς διασποράς (π.χ. σπόρια μυκήτων και γύρη φυτών) καθώς και θραύσματα φυτών (Fröhlich-Nowoisky et al., 2016). Τα βιοαερολύματα, εμφανίζουν πολύ διαφορετική μικροβιακή σύσταση ανάλογα με την πηγή προέλευσης. Παραδείγματος χάριν, σύμφωνα με τους T. Ruiz-Gil et al. (2020), διαφορετικές ομάδες βακτηρίων που απαντώνται στην ατμόσφαιρα προέρχονται από διαφορετικές πηγές (Εικόνα 1). Σε γενικές γραμμές, είναι διακριτή η διαφοροποίηση των αερολυμάτων που προέρχονται από φυσικές πηγές (π.χ. sea spray ή από δάση) και από ανθρωπογενή δραστηριότητα (π.χ. αστικά αερολύματα ή αγροτική παραγωγή)



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση των αερομεταφερόμενων βακτηριακών ομάδων που σχετίζονται με διαφορετικές αστικές και αγροτικές πηγές (Ruiz-Gil et al., 2020).

1.5 Ο ρόλος των αερολυμάτων στην Α. Μεσόγειο

Η εναπόθεση αφρικανικής σκόνης, πλούσια τόσο σε φώσφορο όσο και σε άζωτο, έδειξε σημαντικές αποκρίσεις στο μικροβιακό πλέγμα («Pitta et al., 2017 »; «Tsagaraki et al., 2017»). Συνδυάζοντας τα παραπάνω ευρήματα από πειράματα μεσοκόσμων με την πρόσφατη εργασία των Violaki et al. (2021) που έδειξε ότι η κύρια πηγή οργανικού φωσφόρου στην Ανατολική Μεσόγειο είναι τα αερολύματα (και ειδικά αυτά με αφρικανική προέλευση) γίνεται αντιληπτό ότι η εναπόθεση θρεπτικών (τόσο οργανικών όσο και ανόργανων) από την ατμόσφαιρα στα επιφανειακά νερά της Ανατολικής Μεσογείου, φαίνεται να έχει πολύ μεγάλη σημασία για τη δομή και λειτουργία του μικροβιακού τροφικού πλέγματος της περιοχής που χαρακτηρίζεται από χαμηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών και περιορισμό από τον φώσφορο.

1.6 Στόχος της εργασίας

Η εναπόθεση θρεπτικών από τα aerosols επηρεάζει σημαντικά το θαλάσσιο οικοσύστημα της Ανατολικής Μεσογείου. Όμως, τόσο η χημική όσο και η βιολογική σύσταση των aerosols μεταβάλλεται ανάλογα με την προέλευσή τους. Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια να απαντηθούν τα ακόλουθα ερωτήματα:

- Το μικροβιακό τροφικό πλέγμα αποκρίνεται διαφορετικά σε aerosols διαφορετικής σύστασης/προέλευσης, όπως π.χ. σε aerosols προερχόμενα από περιοχές με έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα σε αντίθεση με aerosols πιο «φυσικής» προέλευσης;
- Η απόκριση του μικροβιακού πλέγματος στην εναπόθεση σκόνης αφρικανικής προελεύσεως διαφέρει από την απόκριση στην προσθήκη αερολυμάτων αστικής και/ή αγροτικής προέλευσης;

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών τύπων αερολυμάτων στο πλαγκτονικό, μικροβιακό τροφικό πλέγμα στο ολιγοτροφικό οικοσύστημα της Ανατολικής Μεσογείου.

2 Υλικά και μέθοδοι

2.1 Προετοιμασία του πειράματος

Το πείραμα μεσοκόσμων διεξήχθη τον Μάιο - Ιούνιο του 2022 στις εγκαταστάσεις του ΕΛΚΕΘΕ CretaCosmos στο πλαίσιο του προγράμματος H2020 RI AQUACOSM-plus.

Οι μεσόκοσμοι κατασκευάστηκαν από φίλμ πολυαιθυλενίου, πάχους 200 μm και υψηλής οπτικής διαπερατότητας ενώ οι σωλήνες συλλογής δειγμάτων και αερισμού ήταν κατασκευασμένοι από σιλίκονη και PVC, αντίστοιχα. Πριν την έναρξη του πειράματος όλα τα υλικά που έρχονται σε επαφή με το νερό, πλύθηκαν με 5% HCl για την αποφυγή βιολογικής ή χημικής επιμόλυνσης και στη συνέχεια ξεπλύθηκαν με μεγάλη ποσότητα απιονισμένου νερού.

Το νερό για το πείραμα μεσοκόσμων συλλέχθηκε έξω από τις εγκαταστάσεις του ΕΛΚΕΘΕ, σε απόσταση περίπου 100 m από την ακτή και από βάθος 2 m. Για την άντληση του νερού έγινε χρήση ειδικής αντλίας χαμηλής πίεσης, για την αποφυγή καταστροφής των ευαίσθητων πλαγκτονικών μικροοργανισμών. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια βαρελιών πολυαιθυλενίου 1 m^3 το νερό μεταφέρθηκε στις εγκαταστάσεις του ΕΛΚΕΘΕ. Το νερό κάθε βαρελιού ισομοιράστηκε σε όλους τους μεσοκόσμους έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ομοιογένεια των αρχικών συνθηκών του πειράματος. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 9 μεσόκοσμοι των 3,2 m^3 και η διαδικασία του γεμίσματος διήρκεσε δύο ημέρες. Οι μεσόκοσμοι βρίσκονταν βυθισμένοι σε μια τσιμεντένια δεξαμενή όγκου 150 m^3 , με συνεχή παροχή νερού προκειμένου να διατηρεί σταθερή η θερμοκρασία των μεσοκόσμων στη διάρκεια του πειράματος. Σε κάθε μεσόκοσμο τοποθετήθηκε καπάκι κατασκευασμένο από plexiglass που επέτρεπε τη διέλευση του φωτός, αλλά προστάτευε από εναποθέσεις σωματιδιακού υλικού. Σε κάθε μεσόκοσμο είχε επίσης προστεθεί σωληνάκι παροχής αέρα το οποίο δημιουργούσε φυσαλίδες αέρα από κάτω προς τα πάνω έτσι ώστε να υπάρχει μια ελαφριά ανάδευση μέσα στον μεσόκοσμο, η οποία όμως δεν θα προκαλούσε την καταστροφή των ευαίσθητων πλαγκτονικών οργανισμών.

2.2 Σχεδιασμός του πειράματος

Το πείραμα αποτελείται από 3 πειραματικές συνθήκες (Control, Rural και Urban). Το πείραμα είχε διάρκεια 11 ημερών μετά την ολοκλήρωση του γεμίσματος των μεσοκόσμων. Για την συλλογή των αερολυμάτων επιλέχθηκαν δυο τοποθεσίες με διαφορετικά χαρακτηριστικά, μια με έντονη ανθρωπογενή δραστηριότητα (αστική, Urban) και μια χωρίς (αγροτική, Rural). Ο αστικός σταθμός (Urban, UA) συλλογής αερολυμάτων βρισκόταν στο κέντρο της πόλης του Ηρακλείου Κρήτης καθώς και στις εγκαταστάσεις του Τμήματος Χημείας του Πανεπιστημίου Κρήτης, ενώ ο αγροτικός (Rural, RA) στο χωριό Ορεινό, του Δήμου Ιεράπετρας, στα ανατολικά της Κρήτης (35° 4'35.81"B, 25°54'42.54"A), το οποίο περιβάλλεται τόσο από αγροτικές όσο και δασικές περιοχές και απέχει αρκετά χιλιόμετρα από κάποιο μεγάλο αστικό κέντρο. Για τη συλλογή των αερολυμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικού τύπου δειγματολήπτες, ένας δειγματολήπτης High-Volume που επέτρεπε τη συλλογή μεγάλων ποσοτήτων aerosol, και ένας τύπου Coriolis, ο οποίος στόχευε περισσότερο στη συλλογή των bioaerosol. Συμπληρωματικά, χρησιμοποιήθηκε σκόνη που είχε συλλεχθεί στη διάρκεια επεισοδίου εναπόθεσης αφρικανικής σκόνης, που έλαβε χώρα 2 εβδομάδες πριν το πείραμα, στην περιοχή του Ηρακλείου. Η σκόνη είχε τοποθετηθεί σε αποστειρωμένα σωληνάρια φυγοκέντρισης (falcon tubes) των 50mL και είχε αποθηκευτεί στους 4°C μέχρι την χρήση της. Το Control (C) ήταν η πειραματική συνθήκη στην οποία δεν έγινε κανένας χειρισμός. Στις συνθήκες Rural (RA) και Urban (UA), έγιναν τρεις προσθήκες aerosol προερχόμενα από αγροτική και αστική περιοχή, αντιστοίχως, τις ημέρες D0 (UA= 521 m³ και RA= 225 m³ αεροζόλ σε κάθε μεσόκοσμο), D2 (UA= 492 m³ και RA= 249 m³ αεροζόλ σε κάθε μεσόκοσμο) και D4 (UA= 510 m³ και RA= 341 m³ αεροζόλ σε κάθε μεσόκοσμο). Επίσης, έγιναν άλλες δύο προσθήκες με σκόνη αφρικανικής προέλευσης τις ημέρες D3 (0,46 ± 0,01 g σε κάθε μεσόκοσμο) και D5 (4,44 ± 0,01 g σε κάθε μεσόκοσμο), στο Rural και στο Urban,. Η συχνότητα και η ποσότητα προσθήκης aerosol και σκόνης είχαν ως στόχο να προσομοιάσουν αρχικά, ήπια συμβάντα ατμοσφαιρικής εναπόθεσης που παρατηρούνται στην Α. Μεσόγειο καθημερινά και στη συνέχεια (ημέρα T5), έντονα φαινόμενα μεταφοράς αφρικανικής σκόνης που συμβαίνουν

κυρίως την άνοιξη. Καθημερινά συλλέγονταν δείγματα για διάφορες χημικές και βιολογικές μεταβλητές.

2.2 Πικοπλαγκτόν

Για τον υπολογισμό της αφθονίας των ετερότροφων και αυτότροφων βακτηρίων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της κυτταρομετρίας ροής (flow cytometry) με χρήση του BD FACSCalibur (Becton Dickinson). Ο κυτταρομετρητής διαθέτει ένα laser το οποίο λειτουργεί στα 488 nm καθώς και μια σειρά διάφορων αισθητήρων. Η προετοιμασία των δειγμάτων έγινε σύμφωνα με τους Brussaard et al. (2004) και Marie et al. (1999). Η μονιμοποίηση των δειγμάτων έγινε με την προσθήκη γλουταραλδεύδης 25% σε τελική συγκέντρωση 0,5% ανά δείγμα. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν στο ψυγείο για 20 λεπτά στους 4°C και μετρήθηκαν μετά από επώαση στους 4°C. Όλα τα δείγματα αποθηκεύτηκαν στους -80°C μετά από flash freezing σε υγρό άζωτο. Για την καταμέτρηση των αυτότροφων βακτηρίων δεν απαιτήθηκε επιπλέον χρώση λόγω της ύπαρξης των φωτοσυνθετικών χρωστικών. Τα αυτότροφα βακτήρια χωρίστηκαν σε δύο ομάδες (*Synechococcus* spp. και *Prochlorococcus* spp.) με βάση τα σήματα φθορισμού και σκεδασμού που παράγονται λόγω της χλωροφύλλης και της φυκοερυθρίνης. Για τη μελέτη των ετερότροφων βακτηρίων έγινε χρώση με SYBR™ Green I Nucleic Acid Gel Stain (Thermo Fisher), αραιωμένη κατά 4×10^{-4} της αρχικής της συγκέντρωσης, και ακολούθως επώαση για 10 λεπτά σε σκοτεινές συνθήκες. Τα ετερότροφα βακτήρια χωρίστηκαν σε δύο ομάδες (High και Low nucleic acid content bacteria) με βάση την ένταση φθορισμού του SYBR GREEN I (Marie et al., 1999). Η συλλογή των δεδομένων από τον κυτταρομετρητή έγινε με το πρόγραμμα CellQuest.

2.3 Νανοπλαγκτόν

Οι ομάδες νανοπλαγκτού των οποίων οι αφθονίες αναλύθηκαν ήταν αυτές των αυτότροφων και ετερότροφων μαστιγωτών. Για κάθε δείγμα χρησιμοποιήθηκαν 50 mL νερού και έγινε μονιμοποίηση με γλουταραλδεύδη (σε τελική συγκέντρωση 1%). Στη συνέχεια, τα δείγματα διηθήθηκαν σε φίλτρα (μαύρα polycarbonate φίλτρα με πόρους 0,6 μm και διάμετρο 25 mm) μέσω ειδικής συσκευής. Για τη χρώση των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε 4' 6- diamidino-2-phenylindole (DAPI), που προστέθηκε για 10 λεπτά στα φίλτρα (Porter and Feig, 1980). Μετά τη χρώση, τα φίλτρα τοποθετήθηκαν σε αντικειμενοφόρους πλάκες με προσθήκη κεδρελαίου. Μέχρι την

παρατήρησή τους τα δείγματα παρέμειναν αποθηκευμένα στους -20°C . Για την παρατήρηση χρησιμοποιήθηκε μικροσκόπιο φθορισμού (Olympus BX60) με τελική μεγέθυνση 1000x και μπλε φωτός. Η αναγνώριση των οργανισμών έγινε με βάση την παρουσία/απουσία φθορισμού σε αυτότροφα και ετερότροφα, και με βάση το μέγεθός τους σε τρία μεγέθη (0-3 μm , 3-5 μm , > 5 μm) για τις δύο ομάδες.

2.4 Μικροπλαγκτόν

Για τον προσδιορισμό της αφθονίας του μικροπλαγκτού έγινε αναγνώριση σε επίπεδο γένους για τις ταξινομικές ομάδες των δινομαστιγιωτών, βλεφαριδωτών και διατόμων. Τα δείγματα μονιμοποιήθηκαν με Acid Iodine Lugol's solution (σε συγκέντρωση 2%) και συντηρήθηκαν στους 4°C μέχρι την ανάλυσή τους. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν 100 mL δείγματος τα οποία τοποθετήθηκαν σε ειδικούς κυλίνδρους καθίζησης όπου και παρέμειναν για 24 ώρες (Utermöhl, 1958) ώστε μέσω της βαρύτητας οι οργανισμοί να καθιζάνουν στην ειδική βάση (η οποία στην συνέχεια λειτουργεί ως αντικειμενοφόρος). Η ανάλυση των δειγμάτων έγινε με χρήση ανάστροφου μικροσκοπίου (Olympus IX70), σε τελική μεγέθυνση 150X.

2.5 Στατιστική ανάλυση

Για την εύρεση των στατιστικά σημαντικών διαφορών για όλες τις μεταβλητές έγινε repeated measures ANOVA (RM-ANOVA), η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση των τιμών των μεταβλητών μεταξύ των τριών πειραματικών συνθηκών (C, RA, UA). Ο grouping factor ήταν οι τρεις πειραματικές συνθήκες, ενώ η πειραματική ημέρα (T0 έως T10) ήταν το repeated measure. Η πειραματική συνθήκη θεωρήθηκε ο between-subjects factor και η πειραματική ημέρα ο within-subjects factor. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε το post-hoc Tukey test για τη σύγκριση κάθε μεταβλητής μεταξύ των διαφορετικών πειραματικών συνθηκών. Η στατιστική ανάλυση έγινε με την χρήση στατιστικών πακέτων της R και του Excel.

Η ανάλυση Rank abundance ή Whittaker plot είναι ένας τρόπος απεικόνισης διαφόρων οικολογικών όρων, όπως του species evenness, relative abundance και του species richness. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, στον y άξονα απεικονίζεται η αφθονία των γενών τα οποία που βρέθηκαν σε κάθε δείγμα ενώ στον x άξονα απεικονίζεται το Rank (Θέση κατάταξης) κάθε οργανισμού, όπου το 1 αντιστοιχεί

στο γένος με την μεγαλύτερη αφθονία.

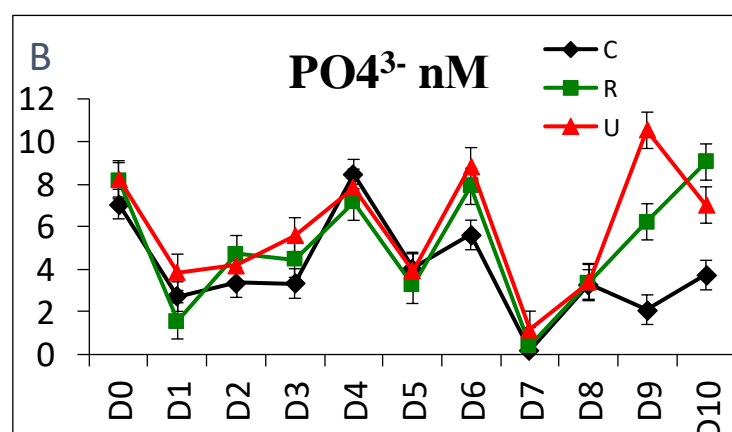
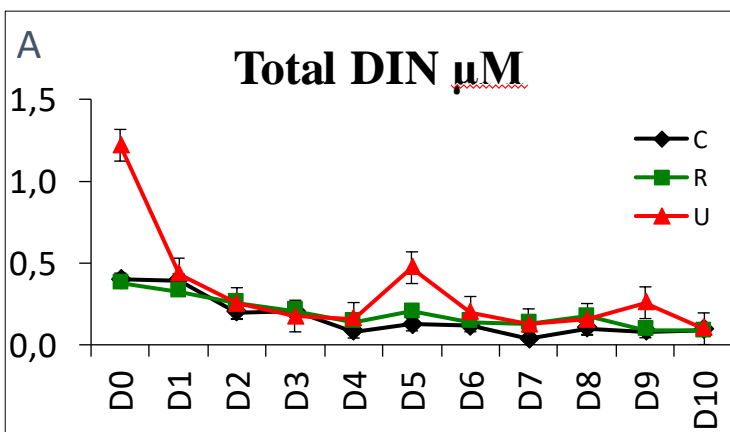
Με την χρήση των δεδομένων αφθονίας του μικροπλαγκτού και δημιουργήθηκαν οι μήτρες ομοιότητας με την χρήση της απόστασης Bray-Curtis. Για την μύτρα που δημιουργήθηκε εφαρμόστηκε δευτέρου επιπέδου απεικόνιση με πολυμεταβλητές διαγραμματικές μεθόδους (MDS second stage -Multidimensional scaling). Για τους παράγοντες Day και Treatment πραγματοποιήθηκε και η ανάλυση ομοιότητας ANOSIM (Analysis of similarity).

3 Αποτελέσματα

3.1 Ανόργανα Θρεπτικά

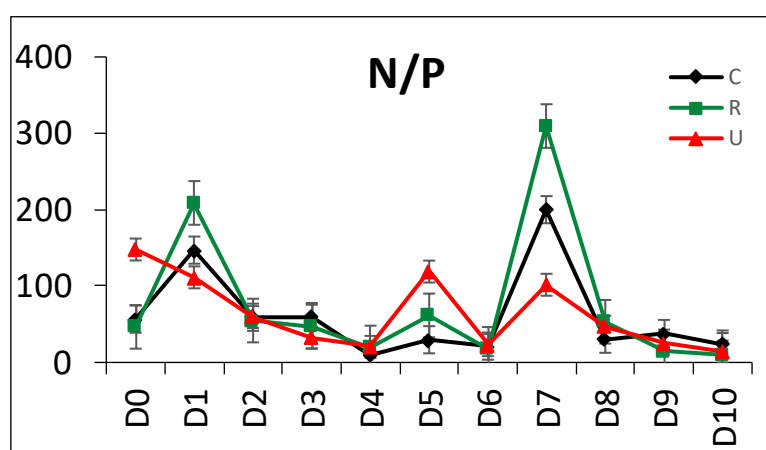
Τα διαλελυμένα νιτρικά ιόντα (DIN) (Διάγραμμα 1α) παρουσίασαν απόκλιση μεταξύ του Urban και των άλλων δυο πειραματικών συνθηκών την πρώτη ημέρα του πειράματος (D1). Την D1 παρατήθηκε πτώση στις τιμές του Urban σε παρόμοια επίπεδα με το Control και το Rural. Μέχρι την D4, οι τρεις πειραματικές συνθήκες παρουσίασαν την ίδια τάση μείωσης. Την D5 παρατηρήθηκε αύξηση στην συγκέντρωση των DIN στο Urban καθώς επίσης και στατιστικά σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P < 0.05$) ανάμεσα στο Control και στο Urban. Από την ημέρα D5 και μέχρι το τέλος του πειράματος, υπήρξαν μικρές διαφοροποιήσεις στις συγκεντρώσεις.

Η συγκέντρωση των φωσφορικών ιόντων (Διάγραμμα 1β) παρουσίασε μια αρχική μείωση μέχρι την D1. Από την D1 μέχρι την D7, καταγράφηκαν αυξομειώσεις και στις τρεις πειραματικές συνθήκες, ενώ από την D7, παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση στις συγκεντρώσεις των φωσφορικών ιόντων στις τρεις πειραματικές συνθήκες ενώ υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P < 0.05$).



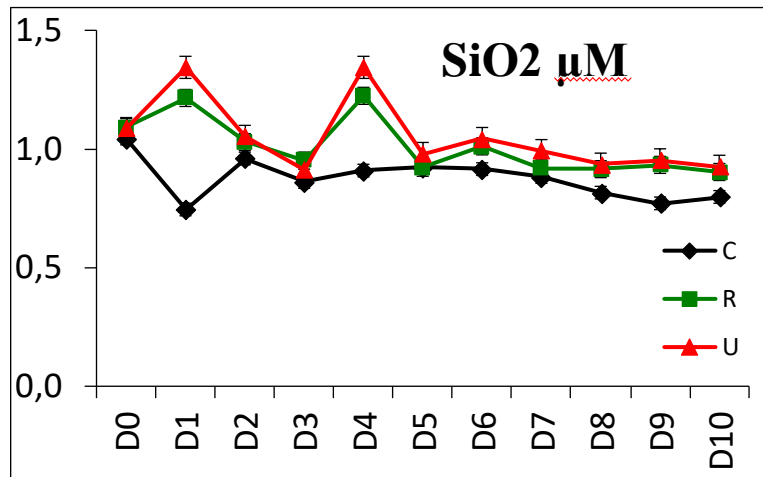
Διάγραμμα 1. (α) Ολική συγκέντρωση Νιτρικών και (β) Συγκέντρωση Φωσφορικών ιόντων στη διάρκεια του πειράματος (D0, D1, ..., D10: πειραματικές ημέρες 1-10). C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης. Κάθε σημείο στις καμπύλες αντιστοιχεί στη μέση τιμή±τυπική απόκλιση 3 μεσοκόσμων-αντιγράφων για κάθε πειραματική συνθήκη.

Η αναλογία αζώτου/φωσφόρου (Διάγραμμα 2) αυξήθηκε από την ημέρα D0 στην D1 στο Rural και Control. Από την D1 μέχρι και την D6 υπήρχε μία σταθερή μείωση με εξαίρεση την ημέρα D5. Την πειραματική ημέρα D7 παρατηρήθηκε αύξηση στην αναλογία η οποία ήταν πιο έντονη στο Rural και το Control ενώ στο Urban η αναλογία έφτασε σε παρόμοια επίπεδα με αυτά του Urban την ημέρα D5.



Διάγραμμα 2. Αναλογία συνολικής συγκέντρωσης Νιτρικών προς την συγκέντρωση φωσφορικών (D0, D1, ..., D10: πειραματικές ημέρες 1-10). C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης. Κάθε σημείο στις καμπύλες αντιστοιχεί στη μέση τιμή±τυπική απόκλιση 3 μεσοκόσμων-αντιγράφων για κάθε πειραματική συνθήκη.

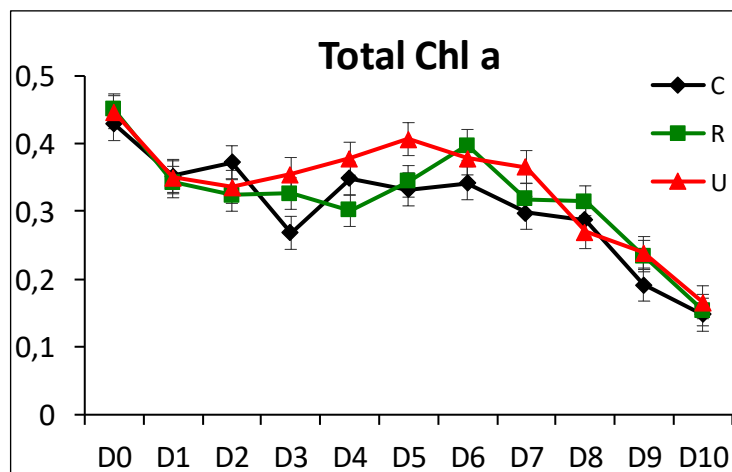
Η συγκέντρωση του διοξειδίου του πυριτίου (Διάγραμμα 3) αυξήθηκε την ημέρα D1 στο Rural και το Urban ενώ στο control μειώθηκε. Τις ημέρες D2 και D3 στις τρεις πειραματικές συνθήκες οι τιμές βρίσκονταν στα ίδια επίπεδα. Την ημέρα D4 υπήρξε αύξηση στη συγκέντρωση του πυριτίου και πάλι στο Rural και Urban ενώ στο Control παρέμεινε σταθερή. Από την ημέρα D5 και μέχρι το τέλος του πειράματος υπήρχαν μικρές μεταβολές στη συγκέντρωση του πυριτίου. Βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P < 0.05$) την ημέρα D4 ανάμεσα στο Control και τις άλλες δύο πειραματικές συνθήκες, αλλά και την ημέρα D9 ανάμεσα στο Urban και το Control .



Διάγραμμα 3. Συγκέντρωση του διοξειδίου του πυριτίου στη διάρκεια του πειράματος (D0, D1, ..., D10: πειραματικές ημέρες 1-10). C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης. Κάθε σημείο στις καμπύλες αντιστοιχεί στη μέση τιμή±τυπική απόκλιση 3 μεσοκόσμων-αντιγράφων για κάθε πειραματική συνθήκη.

3.2 Χλωροφύλλη

Οι τιμές της χλωροφύλλης (Διάγραμμα 4) παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά και στις τρεις πειραματικές συνθήκες καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Αρχικά, υπήρξε μείωση από την D0 μέχρι και την D1. Παρέμειναν σε σταθερό επίπεδο με μικρές αυξομειώσεις μέχρι την D6 και ακολούθησε πτωτική τάση μέχρι την ολοκλήρωση του πειράματος. Δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές για τη χλωροφύλλη μεταξύ των πειραματικών συνθηκών (RM-ANOVA, $P > 0.05$).

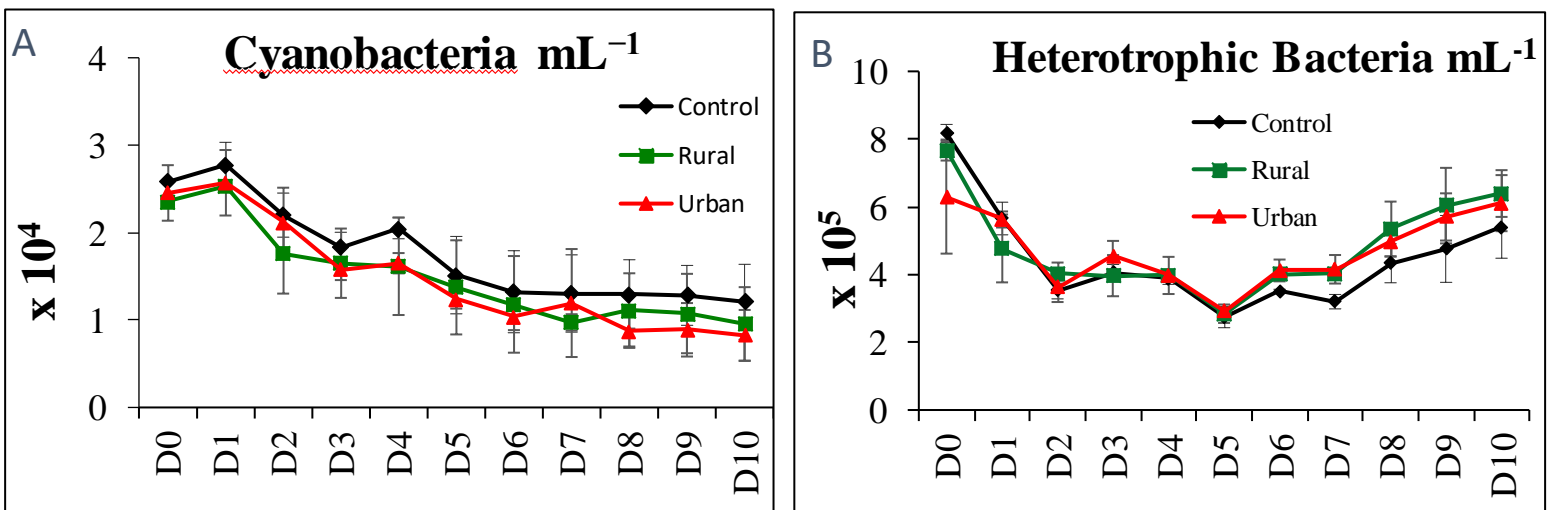


Διάγραμμα 4: Συγκέντρωση ολικής χλωροφύλλης στη διάρκεια του πειράματος (D0, D1, ..., D10: πειραματικές ημέρες 1-10). C= μεσόκοσμος χωρίς την προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμος με την προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμος με την προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης. Κάθε σημείο στις καμπύλες αντιστοιχεί στη μέση τιμή±τυπική απόκλιση 3 μεσοκόσμων-αντιγράφων για κάθε πειραματική συνθήκη.

3.3 Πικοπλαγκτόν

Η αφθονία των Κυανοβακτηρίων (διάγραμμα 5α) παρουσίασε την ίδια τάση και στις τρεις πειραματικές συνθήκες. Από την D0 έως την D1, σημειώθηκε μια μικρή αύξηση αλλά εν συνεχεία και μέχρι την τελευταία ημέρα του πειράματος υπήρξε μια σταθερή μείωση με μικρές εξαιρέσεις (π.χ. Control D4, Urban D7), χωρίς να υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των πειραματικών συνθηκών (RM-ANOVA, $P > 0.05$).

Παρόμοια εικόνα παρουσίασε και στις τρεις πειραματικές συνθήκες η αφθονία των Ετερότροφων Βακτηρίων (Διάγραμμα 5β). Έντονη μείωση της αφθονίας στην αρχή του πειράματος (μέχρι την D2), με τις χαμηλότερες τιμές κατά την D5. Μετά την D5, παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση μέχρι το τέλος του πειράματος. Να σημειωθεί ότι κατά τις τελευταίες πειραματικές ημέρες η αφθονία του control ήταν πιο χαμηλή σε σχέση με το Rural και το Urban χωρίς όμως να υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P > 0.05$) μεταξύ των πειραματικών συνθηκών.

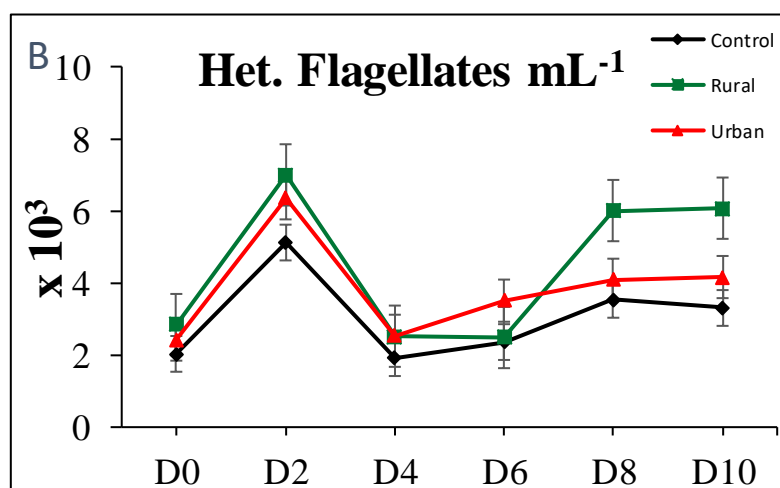
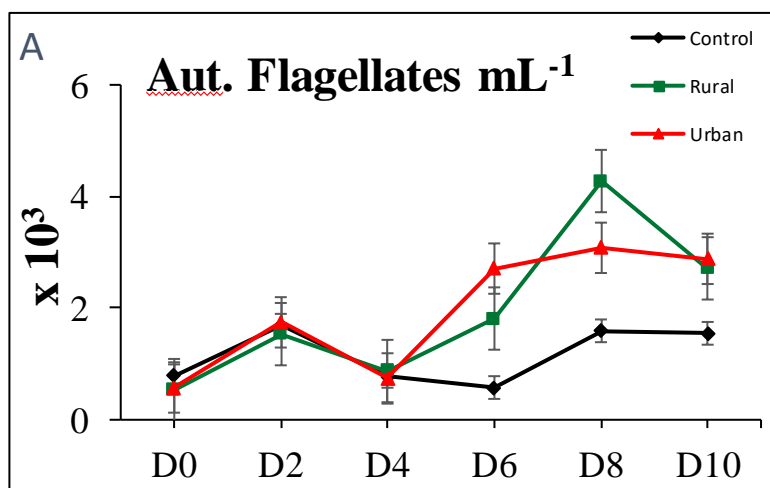


Διάγραμμα 5. Αφθονία (α) κυανοβακτηρίων και (β) ετερότροφων βακτηρίων στη διάρκεια του πειράματος. (D0, D1, ..., D10: πειραματικές ημέρες 1-10) C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης. Κάθε σημείο στις καμπύλες αντιστοιχεί στη μέση τιμή±τυπική απόκλιση 3 μεσοκόσμων-αντιγράφων για κάθε πειραματική συνθήκη.

3.4 Νανοπλαγκτόν

Η αφθονία των Αυτότροφων Μαστιγωτών, και στις τρεις πειραματικές συνθήκες, εμφάνισε αρχικά αύξηση από την D0 μέχρι την D2, ενώ στη συνέχεια μειώθηκε μέχρι την D4 (Διάγραμμα 6α) μετά την οποία σημειώθηκε αύξηση στο Rural και στο Urban σε αντίθεση με το Control στο οποίο η αφθονία μειώθηκε. Την ημέρα D8, καταγράφηκε αύξηση στα Urban και Control, στα οποία η αφθονία έφτασε σε πλατό μέχρι την ημέρα D10. Ως προς το Rural, την D8, παρατηρήθηκε αύξηση της αφθονίας μεγαλύτερη σε σχέση με των άλλων δύο πειραματικών συνθηκών ενώ, την ημέρα 10, παρατηρήθηκε μείωση φτάνοντας πλέον στα ίδια επίπεδα με του Urban. Υπήρξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P < 0.05$) κατά την D6 ανάμεσα στα Rural – Control και Urban - Control αλλά και κατά την D8 ανάμεσα στο Rural – Control.

Η αφθονία στα Ετερότροφα Μαστιγωτά (Διάγραμμα 6β) παρουσίασε αρχικά αύξηση από την D0 μέχρι την D2 και στην συνέχεια μείωση μέχρι την D4 και στις τρεις πειραματικές συνθήκες. Από την ημέρα D4 και μέχρι το τέλος του πειράματος, και στις τρεις πειραματικές συνθήκες σημειώθηκε σταδιακή αύξηση, μεγαλύτερη στο Rural σε σχέση με τις άλλες δύο πειραματικές συνθήκες χωρίς να υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P > 0.05$)

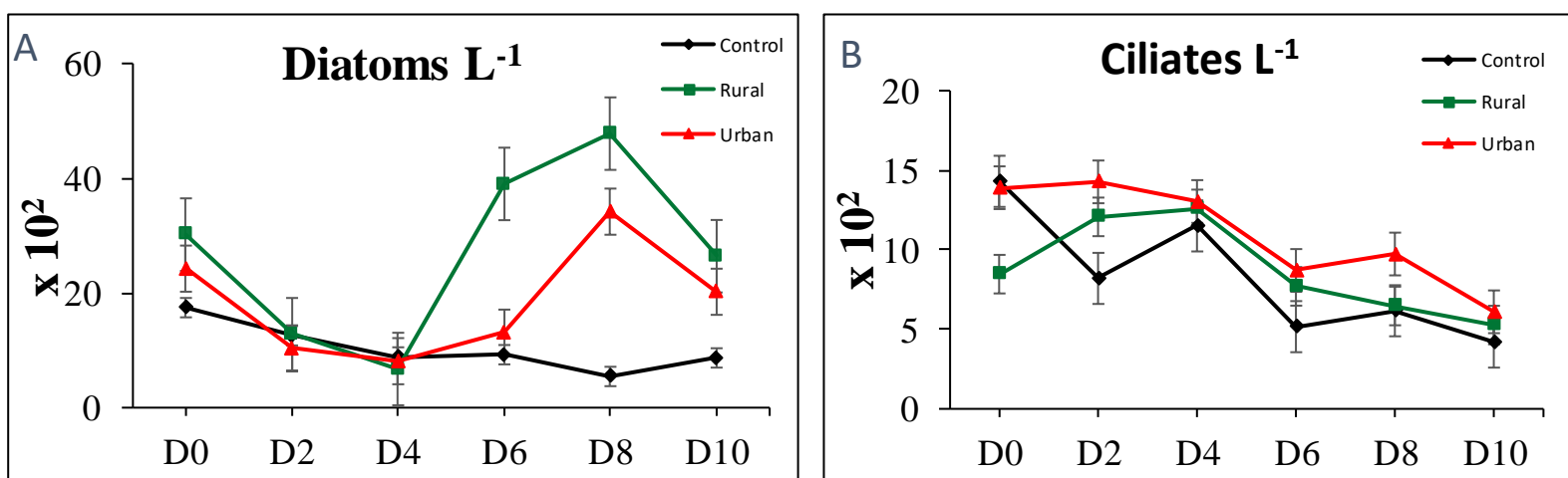


Διάγραμμα 6. Αφθονία (α) Αυτότροφων και (β) Ετερότροφων Μαστιγωτών στη διάρκεια του πειράματος (D0, D1, ..., D10: πειραματικές ημέρες 1-10). C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης. Κάθε σημείο στις καμπύλες αντιστοιχεί στη μέση τιμή±τυπική απόκλιση 3 μεσοκόσμων-αντιγράφων για κάθε πειραματική συνθήκη.

3.5 Μικροπλαγκτόν

Η αφθονία στα Διάτομα (Διάγραμμα 7α) από την ημέρα D0 μέχρι και την D4 είχε μια σταθερή μείωση σε όλες τις πειραματικές συνθήκες. Έπειτα από την ημέρα D4, στο Rural παρουσιάστηκε αύξηση σε σχέση με τις άλλες δυο πειραματικές συνθήκες μέχρι την ημέρα D8, μετά την οποία μειώθηκε. Στο Urban παρατηρήθηκε το ίδιο πρότυπο με μικρότερη ένταση. Υπήρξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P < 0.05$) την D6 ανάμεσα στο Rural και τις άλλες δύο πειραματικές συνθήκες αλλά και την D8 στο Urban και στο Rural σε σχέση με το Control.

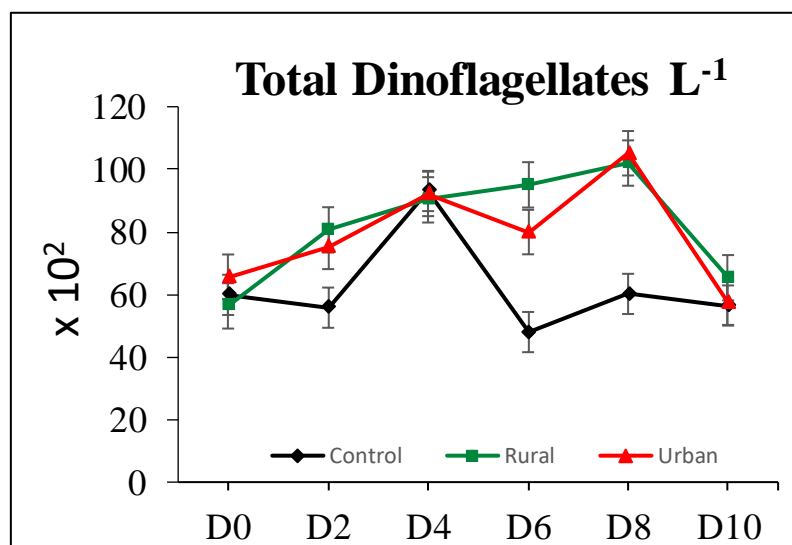
Η αφθονία των βλεφαριδωτών (Διάγραμμα 7β) παρουσίασε την ίδια τάση μείωσης σε όλη τη διάρκεια του πειράματος (με κάποιες εξαιρέσεις) και στις τρεις πειραματικές συνθήκες χωρίς να υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P > 0.05$)



Διάγραμμα 7. Αφθονία (α) Διατόμων και (β) Βλεφαριδωτών στη διάρκεια του πειράματος (D0, D1, ..., D10: πειραματικές ημέρες 1-10). C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης. Κάθε σημείο στις καμπύλες αντιστοιχεί στη μέση τιμή±τυπική απόκλιση 3 μεσοκόσμων-αντιγράφων για κάθε πειραματική συνθήκη.

Η συνολική αφθονία των Δινομαστιγωτών (Διάγραμμα 8) από την αρχή του πειράματος και μέχρι την D4 αυξήθηκε σε όλες τις πειραματικές συνθήκες. Από την D4 στην ημέρα D6, η αφθονία στο Control μειώνεται, ενώ, κατά την D8, φτάνει σε ένα πλατό μέχρι το τέλος του πειράματος. Η αφθονία στο Rural και στο Urban, από την D4 μέχρι και την D8, αυξάνεται και στην συνέχεια μειώνεται και στις δύο

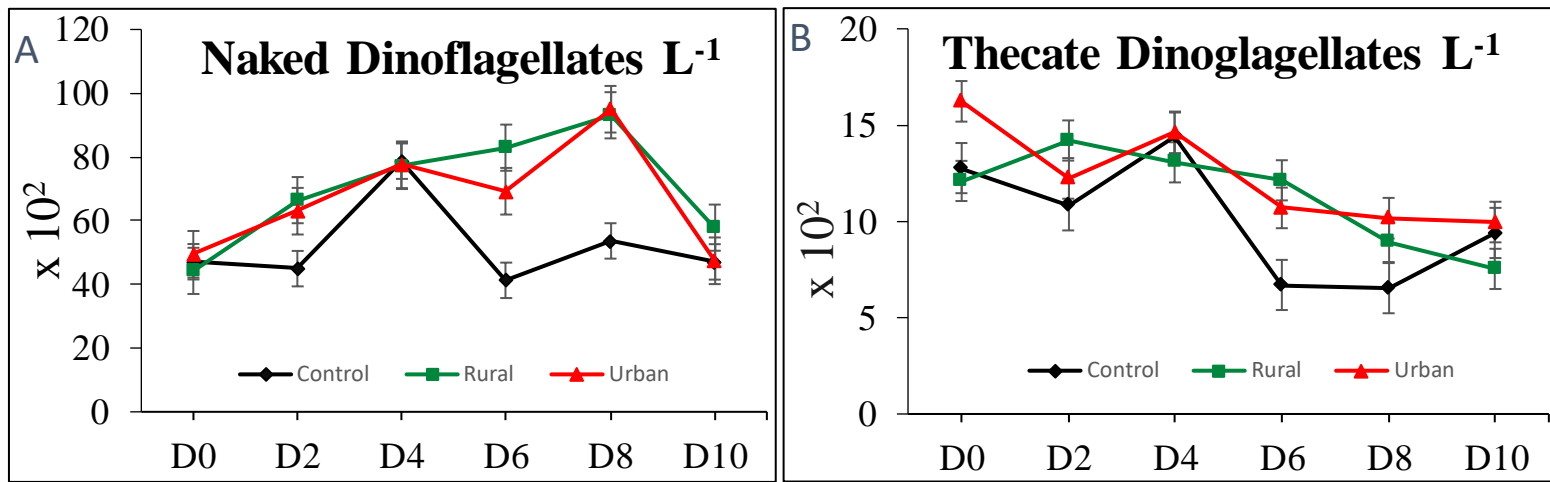
συνθήκες μέχρι το τέλος του πειράματος (D10) όπου φτάνει στα ίδια επίπεδα με του Control. Η στατιστική ανάλυση εδώ έδειξε σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P < 0.05$) την D6 ανάμεσα στο Rural - Control καθώς και την D8 στο Rural - Control και στο Urban - Control αντίστοιχα.



Διάγραμμα 8. Ολική Αφθονία Δινομαστιγωτών στη διάρκεια του πειράματος (D0, D1, ..., D10: πειραματικές ημέρες 1-10). C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης. Κάθε σημείο στις καμπύλες αντιστοιχεί στη μέση τιμή±τυπική απόκλιση 3 μεσοκόσμων-αντιγράφων για κάθε πειραματική συνθήκη.

Στο Διάγραμμα 9α, όπου αποτυπώνεται η αφθονία μόνο των γυμνών Δινομαστιγωτών, παρατηρούμε μια πολύ παρόμοια εικόνα με αυτή της συνολικής αφθονίας. Αρχικά και μέχρι την D4, υπάρχει αύξηση στις τρεις πειραματικές συνθήκες. Η στατιστική ανάλυση έδειξε σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P < 0.05$) την D6 ανάμεσα στο Rural και το Control καθώς και την D8 στο Rural- Control Urban - Control αντίστοιχα.

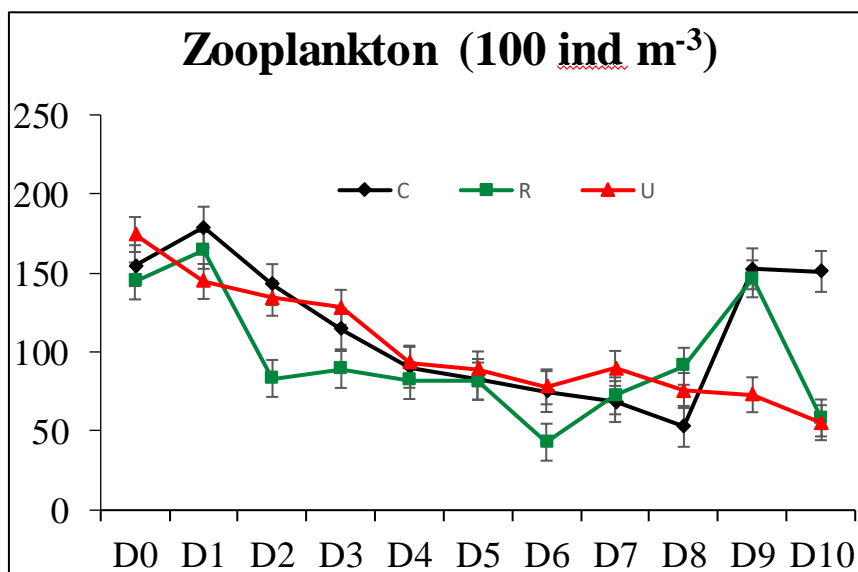
Η αφθονία των Δινομαστιγωτών με θήκη (Διάγραμμα 9β) στις τρεις πειραματικές συνθήκες τις πρώτες ημέρες του πειράματος παρουσίασαν αυξομειώσεις μέχρι και την D4, μετά την οποία, υπήρξε μείωση σε όλες τις συνθήκες - με αυτή του Control (D4 - D6) να είναι περισσότερο έντονη. Στο τέλος του πειράματος οι αφθονίες και στις τρεις πειραματικές συνθήκες βρίσκονταν στα ίδια επίπεδα ενώ δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P > 0.05$).



Διάγραμμα 9. Αφθονία (α) γυμνών Δινομαστιγωτών, (β) Δινομαστιγωτών με θήκη στη διάρκεια του πειράματος (D0, D1, ..., D10: πειραματικές ημέρες 1-10). C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης. Κάθε σημείο στις καμπύλες αντιστοιχεί στη μέση τιμή±τυπική απόκλιση 3 μεσοκόσμων-αντιγράφων για κάθε πειραματική συνθήκη.

3.6 Ζωοπλαγκτόν

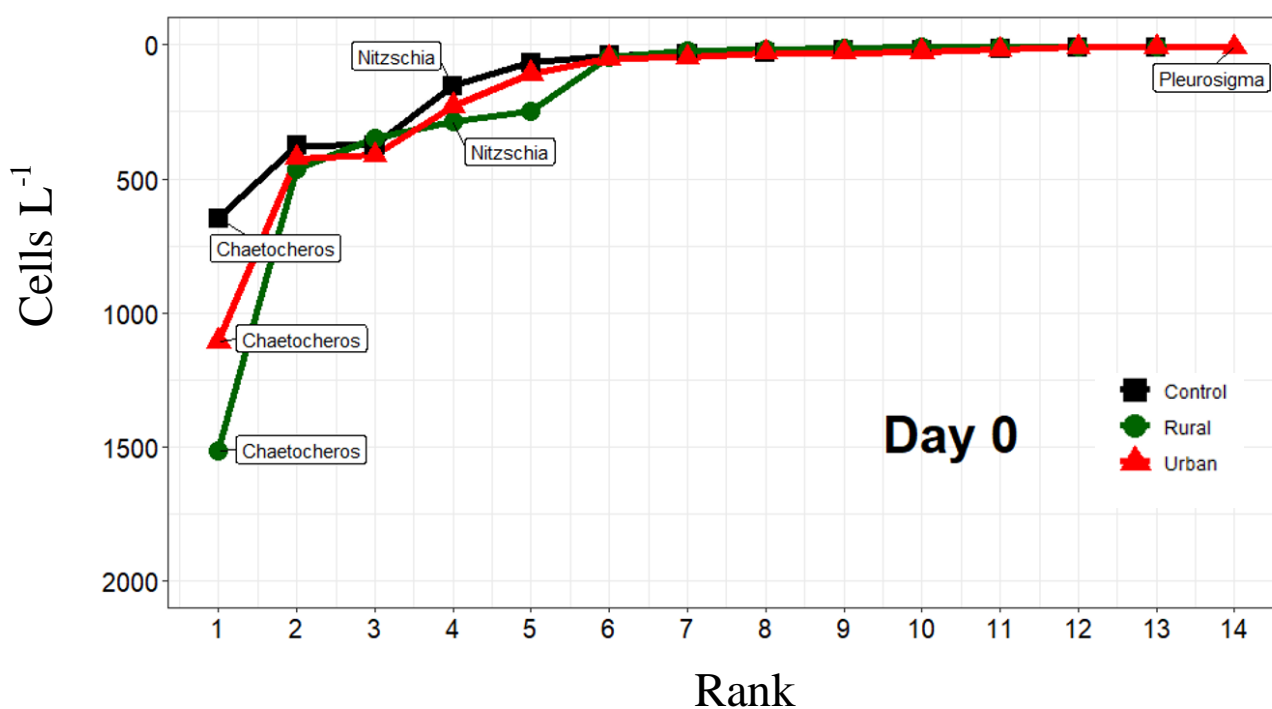
Η αφθονία του ζωοπλαγκτού (Διάγραμμα 10) παρουσίασε και στις τρεις πειραματικές συνθήκες μια πτωτική τάση κατά τις πρώτες ημέρες του πειράματος. Μάλιστα, στο Urban η τάση αυτή συνεχίστηκε έως και την τελευταία ημέρα (D10), ενώ τα Rural και Control παρουσίασαν στην συνέχεια ετεροχρονισμένα αύξηση στην αφθονία τους, μετά την D6 στο Rural και μετά τη D8 στο Control. Μετά τη D9, η αφθονία έμεινε σταθερή στο Control ενώ μειώθηκε σημαντικά στο Rural. Δε βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές (RM-ANOVA, $P > 0.05$).



Διάγραμμα 10. Αφθονία Ζωοπλαγκτού στη διάρκεια του πειράματος (D0, D1, ..., D10: πειραματικές ημέρες 1-10). C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης. Κάθε σημείο στις καμπύλες αντιστοιχεί στη μέση τιμή±τυπική απόκλιση 3 μεσοκόσμων-αντιγράφων για κάθε πειραματική συνθήκη.

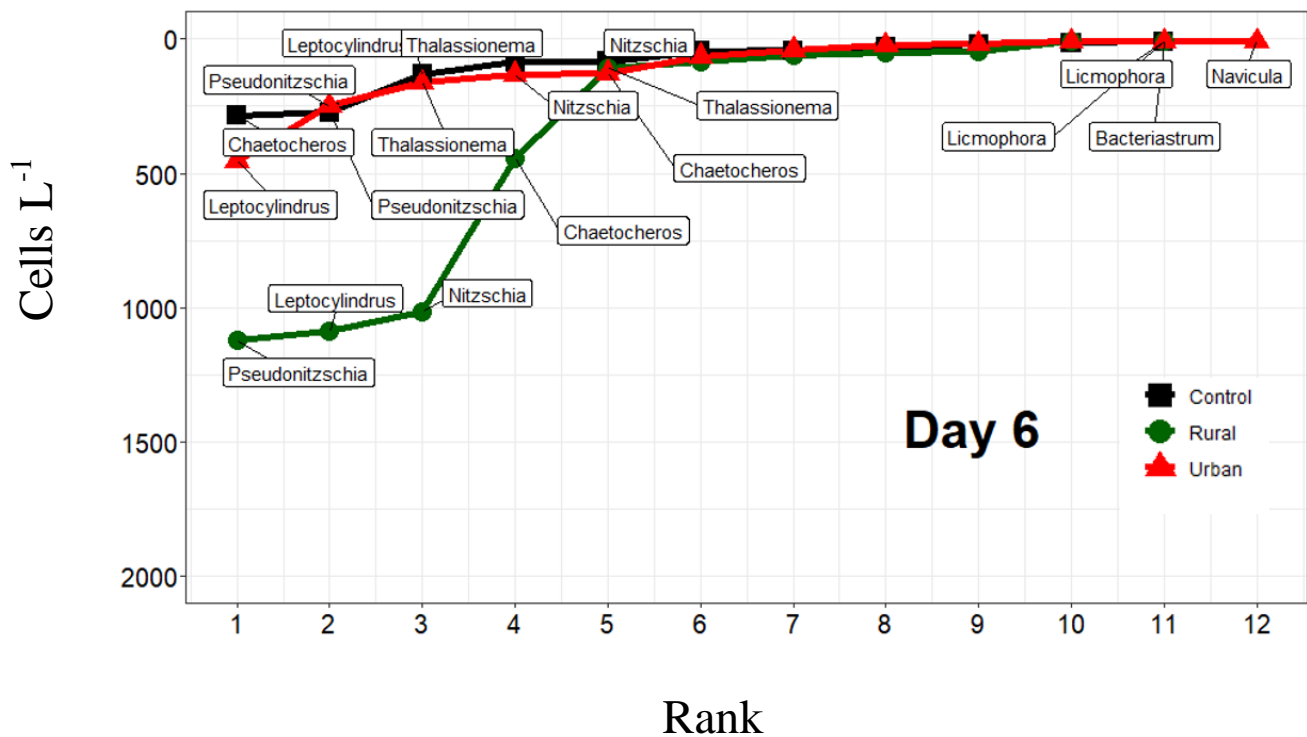
3.7 Rank Abundance

Στα Διαγράμματα 11, 12, 13 & 14 απεικονίζεται το Rank Abundance για τα Διάτομα σε τέσσερις διαφορετικές ημέρες της πειραματικής διαδικασίας, D0, D6, D8 και D10. Την D0 (Διάγραμμα 11), το πιο κυρίαρχο γένος βάσει της αφθονίας ήταν το *Chaetocheros* (Ehrenberg, 1844) και στις τρεις πειραματικές συνθήκες, στις οποίες μάλιστα παρουσιάστηκε παρόμοια τάση στις καμπύλες αλλά και παρόμοια κατάταξη για τα ίδια γένη. Υπήρχε δηλαδή ομοιογένεια όσο αφορά στο ποια γένη κυριαρχούσαν αλλά και πόσο έντονα και στις τρεις πειραματικές συνθήκες.



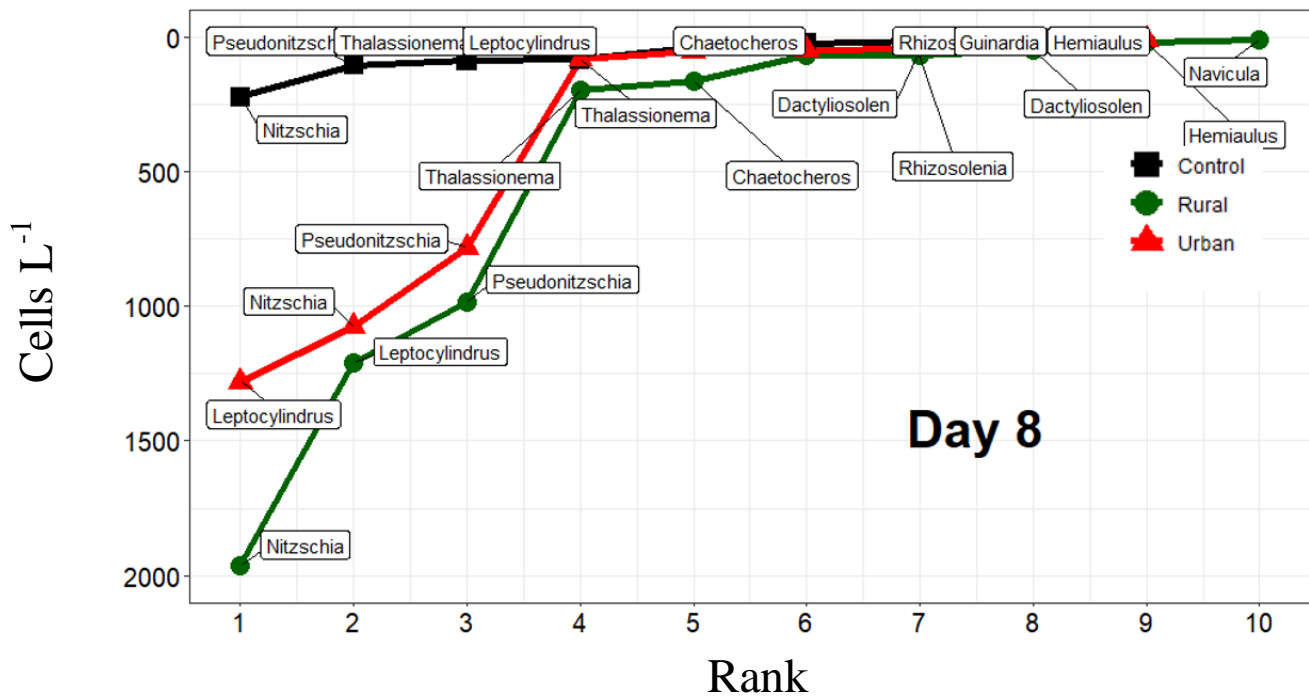
Διάγραμμα 11. Διαγράμματα Rank Abundance για τα Διάτομα την ημέρα Day 6 όπου στον y άξονα απεικονίζεται η αφθονία των Γενών που βρέθηκαν σε κάθε δείγμα και στον x άξονα απεικονίζεται το Rank κάθε οργανισμού όπου το 1 αντιστοιχεί στο γένος με τη μεγαλύτερη αφθονία. C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης.

Την D6 (Διάγραμμα 12) υπήρξε διαφοροποίηση του Rural από τις άλλες δύο πειραματικές συνθήκες ως προς την τάση της καμπύλης, με τα πιο άφθονα γένη να είναι τα *Pseudo-nitzschia* (H. Peragallo & M. Peragallo, 1900), *Leptocylindrus* (Petersen, 1889) και *Nitzschia* (Baer, 1826), τα οποία παρουσίασαν παρόμοια αφθονία. Παράλληλα, σε ό,τι αφορά την κατάταξη υπήρξε διαφοροποίηση μεταξύ των Urban και Control. Συγκεκριμένα, το γένος *Chaetocheros* έλαβε την κατάταξη 5 (Urban) και την κατάταξη 1 (Control)



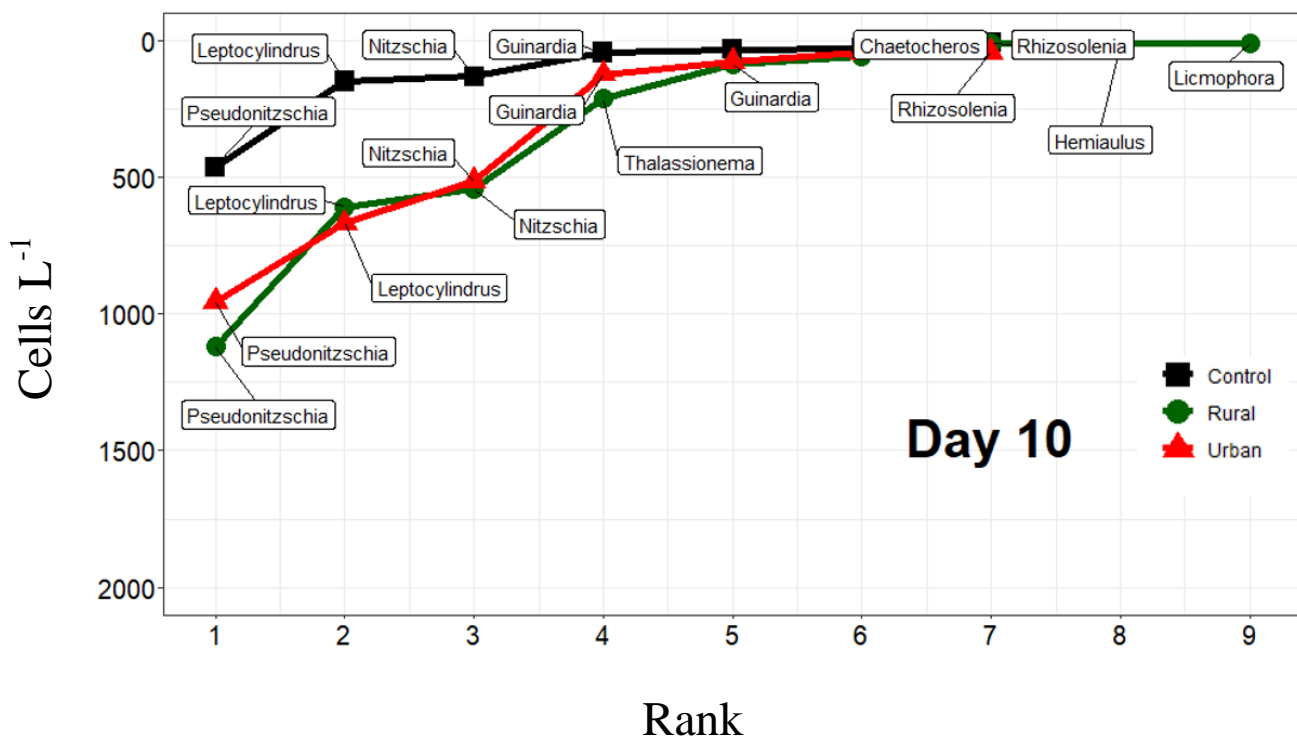
Διάγραμμα 12. Διαγράμματα Rank Abundance για τα Διάτομα την ημέρα Day 6 όπου στον y άξονα απεικονίζεται η αφθονία των γενών ανά λίτρο που βρέθηκαν σε κάθε δείγμα και στον x άξονα απεικονίζεται το Rank κάθε οργανισμού όπου το 1 αντιστοιχεί στο γένος με τη μεγαλύτερη αφθονία. C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης.

Την ημέρα D8 (Διάγραμμα 13), το Urban παρουσίασαν παρόμοια τάση με το Rural, τόσο στο σχήμα της καμπύλης όσο και στα είδη που κυριαρχούν [*Pseudonitzschia* (H. Peragallo & M. Peragallo, 1900), *Leptocylindrus* (Petersen, 1889) και *Nitzschia* (Baer, 1826)], έχοντας όμως διαφορετικό Rank. Το Control δεν παρουσίασαν κάποια αλλαγή ως προς την καμπύλη αλλά υπήρχαν αλλαγές στα Ranks.



Διάγραμμα 13. Διαγράμματα Rank Abundance για τα Διότομα την ημέρα Day 8 όπου στον y άξονα απεικονίζεται η αφθονία των γενών ανά λίτρο που βρέθηκαν σε κάθε δείγμα και στον x άξονα απεικονίζεται το Rank κάθε οργανισμού όπου το 1 αντιστοιχεί στο γένος με τη μεγαλύτερη αφθονία. C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης.

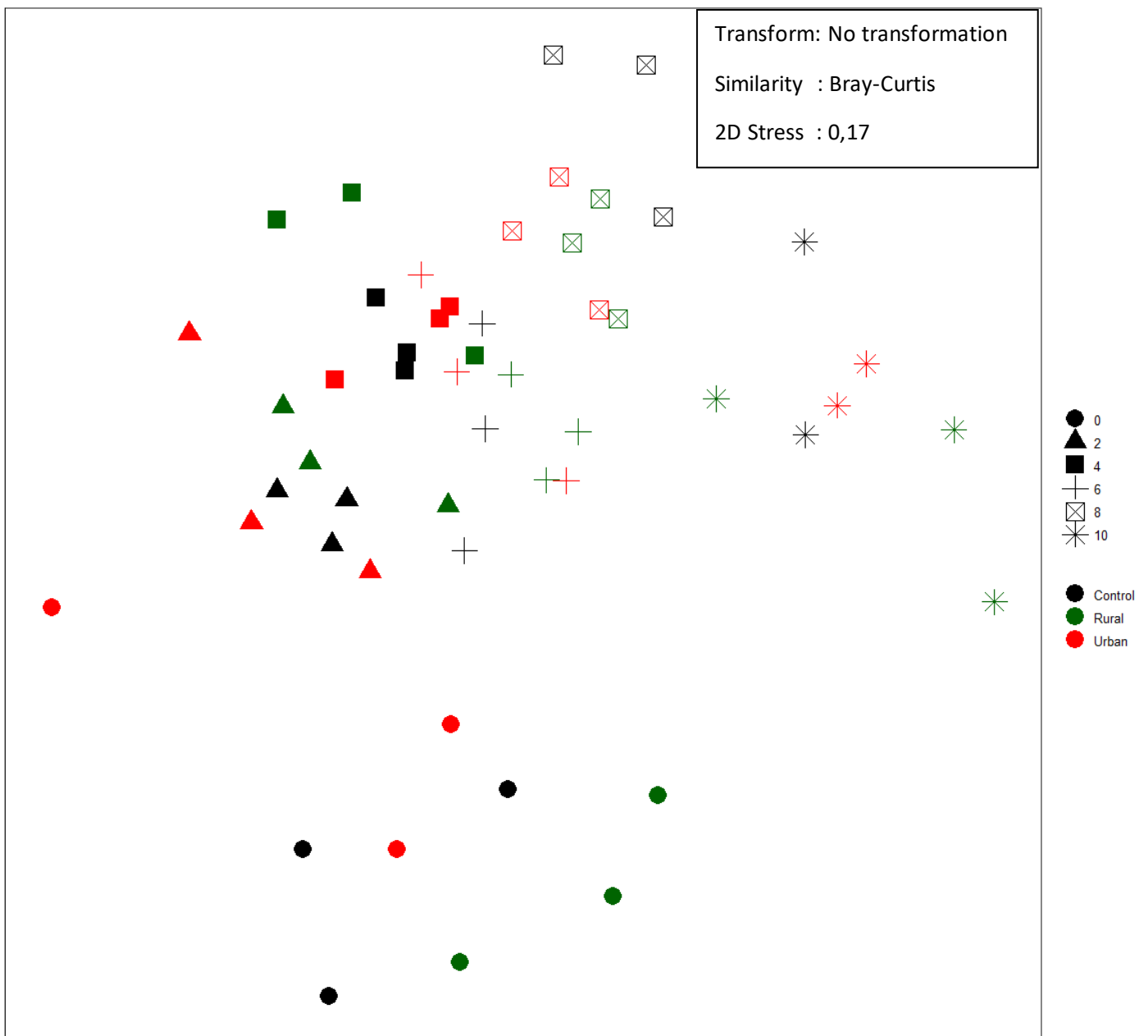
Την ημέρα 10, οι τρεις πειραματικές συνθήκες παρουσίασαν παρόμοια τάση τόσο στα Ranks, στα οποία στις τρεις πρώτες θέσεις ήταν τα *Leptocylindrus* (Petersen, 1889) *Pseudo-nitzschia* (H. Peragallo & M. Peragallo, 1900), και *Nitzschia* (Baer, 1826) με την ίδια σειρά, όσο και στις καμπύλες.



Διάγραμμα 14. Διαγράμματα Rank Abundance για τα Διάτομα την ημέρα Day 10 όπου στον y άξονα απεικονίζεται η αφθονία των γενών ανά λίτρο που βρέθηκαν σε κάθε δείγμα και στον x άξονα απεικονίζεται το Rank κάθε οργανισμού όπου το 1 αντιστοιχεί στο γένος με τη μεγαλύτερη αφθονία. C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης.

3.8 Πολυμεταβλητή ανάλυση

Το διάγραμμα nMDS (Διάγραμμα 20) απεικονίζει τις ομοιότητες μεταξύ των ομάδων του Μικροπλαγκτού. Το stress πήρε την τιμή (0.17), η οποία είναι σχετικά χαμηλή, οπότε συμπεραίνουμε ότι η απεικόνιση του διαγράμματος είναι καλή. Για τους παράγοντες Day και Treatment πραγματοποιήθηκε και η ανάλυση ομοιότητας ANOSIM (Analysis of similarity) η οποία έδειξε ότι οι διαφορές μεταξύ της αφθονίας ως προς τους παράγοντες ήταν στατιστικά σημαντικές ($p < 0.05$). (Treatment: $R = 0.126$, $P = 5e-04$) (Day: $R = 0.342$, $P = 1e-04$).



Διάγραμμα 20: Αποτελέσματα του nMDS για την ομαδοποίηση των Μεσοκόσμων από δεδομένα αφθονίας των γενών με βάση την πειραματική ημέρα και την πειραματική συνθήκη. C= μεσόκοσμοι χωρίς προσθήκη Aerosol (Control), R= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αγροτικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης, U= μεσόκοσμοι με προσθήκη aerosol αστικής περιοχής και αφρικανικής σκόνης.

4. Συζήτηση

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε η επίδραση των αερολυμάτων στο πλαγκτονικό μικροβιακό πλέγμα της Ανατολικής Μεσογείου. Διεξήχθη ένα πείραμα μεσοκόσμων για τις ανάγκες του οποίου συλλέχθηκαν αερολύματα από δυο διαφορετικές περιοχές, μια αγροτική (Rural) που χαρακτηρίζεται από δασικές και αγροτικές εκτάσεις και μια αστική (Urban) που χαρακτηρίζεται από έντονη ανθρωπογενή δραστηριότητα και προστέθηκαν στους αντίστοιχους μεσοκόσμους (Rural treatment και Urban treatment), σε 3 χρονικές στιγμές. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του πειράματος, στους μεσοκόσμους Urban και Rural προστέθηκε δύο φορές σκόνη Αφρικανικής προέλευσης, με διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα αερολύματα, που είχε συλλεχθεί στη διάρκεια επεισοδίου ατμοσφαιρικής εναπόθεσης που προηγήθηκε του πειράματος. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκε μια αναπαράσταση κλιμακωτής αύξησης της εναπόθεσης, δηλαδή στην αρχή του πειράματος οι εναποθέσεις ήταν ήπιες ενώ στη συνέχεια ήταν περισσότερο έντονες, με τις ποσότητες που προστέθηκαν να είναι αντίστοιχες με αυτές που απαντώνται την άνοιξη, εποχή του έτους κατά την οποία παρατηρείται η πλειονότητα των επεισοδίων ατμοσφαιρικής εναπόθεσης στη Μεσόγειο (Kalivitis et al. 2007).

Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών παρουσίασαν μικρές μεταβολές μεταξύ των πειραματικών συνθηκών τις περισσότερες πειραματικές ημέρες. Η αύξηση της συγκέντρωσης του πυριτίου τις ημέρες D1 και D4 συνέπεσε με την προσθήκη αερολυμάτων και σκόνης τις ημέρες αυτές, και πιθανόν οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητα των αερολυμάτων/σκόνης σε πυρίτιο. Κατά τις πρώτες ημέρες του πειράματος, παρατηρήθηκε έντονη κατανάλωση των φωσφορικών ιόντων και η συγκέντρωσή τους δεν εμφάνισε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών πειραματικών συνθηκών. Τα παραπάνω αποτελούν ένδειξη της έλλειψης των φωσφορικών που είναι γνωστή για την Α. Μεσόγειο (Krom et al., 1991), γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την αναλογία αζώτου/φωσφόρου που παρουσίασε πολύ υψηλές τιμές παρά τη μείωση των νιτρικών καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής έδειξαν ότι από την προσθήκη αεροζόλ και Αφρικανικής σκόνης δεν ευνοήθηκαν όλες οι ομάδες αυτότροφων οργανισμών αλλά μόνο τα αυτότροφα μαστιγωτά και τα διάτομα. Επίσης, φαίνεται ότι η προσθήκη σκόνης (και λιγότερο η προσθήκη αεροζόλ) ήταν εκείνη που επηρέασε περισσότερο τους αυτότροφους οργανισμούς και ειδικότερα η προσθήκη σκόνης την ημέρα D5, η οποία ήταν 5 φορές μεγαλύτερη από την προσθήκη σκόνης της ημέρας D3. Συγκεκριμένα, μετά την προσθήκη σκόνης η αύξηση της αφθονίας των διατόμων ήταν μεγαλύτερη και πιο απότομη στο Rural σε σχέση με το Urban, αλλά και στις δύο αυτές πειραματικές συνθήκες, η αφθονία των διατόμων ήταν πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με τους μεσοκόσμους-μάρτυρες. Αντίθετα, τα αυτότροφα μαστιγωτά εμφάνισαν αρχικά παρόμοιες αφθονίες στα Control, Rural και Urban, αλλά μετά την προσθήκη σκόνης την D5, καταγράφηκαν μεγαλύτερες αφθονίες στα Rural και Urban σε σχέση με τους μάρτυρες, αλλά και διαφορές ανάμεσα στα Rural και Urban, όμως ήταν μικρότερες σχετικά με των διατόμων. Αυτές οι διαφοροποιήσεις που υπήρξαν ανάμεσα στις πειραματικές συνθήκες μετά την ημέρα D5 σε Rural και Urban στα αυτότροφα μαστιγωτά και τα διάτομα, είναι πιθανόν να οφείλονται στις προσθήκες των αερολυμάτων από τις προηγούμενες ημέρες, δεδομένου ότι και στις δύο συνθήκες έγινε προσθήκη ίδιας ποσότητας σκόνης που προήλθε από την ίδια πηγή. Συνεπώς, η διαφορετική σύσταση των δύο αερολυμάτων προκάλεσε τις διαφοροποιήσεις που περιγράφηκαν. Τα αποτελέσματα για το νανο- και μικροφυτοπλαγκτόν (μετά την προσθήκη της σκόνης της Σαχάρας) ήταν παρόμοια με εκείνα προηγούμενων πειραμάτων στα οποία καταγράφηκε άμεση απόκριση αυτών των ομάδων φυτοπλαγκτού στην προσθήκη σκόνης της Σαχάρας (Pitta et al., 2017; Tsagaraki et al., 2017).

Σε σχέση με τα διάτομα, η αλλαγή αφθονίας στη διάρκεια του πειράματος και στις διάφορες πειραματικές συνθήκες, αποτυπώθηκε επίσης στη σύνθεση των πληθυσμών τους, όπως φάνηκε από την ανάλυση Rank Abundance. Συγκεκριμένα, την D6 άλλαξε η κυριαρχία των γενών των διατόμων στο Rural και το Urban ακολούθησε με τον ίδιο τρόπο την D8.

Η ολική συγκέντρωση χλωροφύλλης δεν επηρεάστηκε από τις προσθήκες που έγιναν κατά τη διάρκεια του παρόντος πειράματος, γεγονός που διαφέρει κατά πολύ από τα αποτελέσματα των δύο προηγούμενων πειραμάτων (2012 και 2014) που έγιναν στην ίδια περιοχή και κατά τα οποία προστέθηκαν σκόνη της Σαχάρας και σκόνη από αστικές περιοχές. Στα πειράματα εκείνα εμφανίστηκε έντονη αύξηση της

συγκέντρωσης χλωροφύλλης μετά την προσθήκη της σκόνης (Pitta et al., 2017; Tsagaraki et al., 2017) γεγονός που πιθανόν υποδηλώνει ότι η σκόνη/αεροζόλ του παρόντος πειράματος δεν ήταν επαρκής (δηλ δεν περιείχε ποσότητες θρεπτικών, επαρκείς να προκαλέσουν αύξηση όλων των ομάδων του φυτοπλαγκτού, αλλά μόνο κάποιων ομάδων όπως προαναφέρθηκε). Στο παρόν πείραμα, φαίνεται ότι η φυτοπλαγκτονική βιομάζα κυριαρχήθηκε από τα κυανοβακτήρια, καθώς οι καμπύλες της χλωροφύλλης και της αφθονίας κυανοβακτηρίων παρουσίασαν παρόμοιο πρότυπο μεταβολής στη διάρκεια του πειράματος. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγήσει την απουσία επίδρασης των προσθηκών αεροζόλ/σκόνης στην ολική χλωροφύλλη.

Ανάλογη απόκριση του φυτοπλαγκτού σε προσθήκη σκόνης έχει παρατηρηθεί στο παρελθόν σε πολλά ακόμα πειράματα, τόσο με μικροκόσμους (Romero et al., 2011) όσο και σε μεσοκόσμους (Pulido-Villena et al., 2014).

Εκτός από τη χλωροφύλλη, ούτε τα ετερότροφα βακτήρια παρουσίασαν απόκριση στις προσθήκες αεροζόλ/σκόνης που έγιναν μέχρι την πειραματική ημέρα D4 του πειράματος, γεγονός που επίσης διαφέρει από όσα παρατηρήθηκαν στα προηγούμενα πειράματα των 2012 και 2014 («Pitta et al., 2017»; «Tsagaraki et al., 2017»). Στη συνέχεια, η καμπύλη είχε παρόμοια τάση με τα προηγούμενα πειράματα όπου έγινε προσθήκη Αφρικανικής σκόνης στα οποία παρατηρήθηκαν οι χαμηλότερες τιμές αφθονίας στην μέση του πειράματος και στην συνέχεια αυξήθηκαν («Pitta et al., 2017»; «Tsagaraki et al., 2017»).

Στην αρχή του πειράματος, παρατηρήθηκε μείωση της αφθονίας των ετερότροφων βακτηρίων, πιθανότατα λόγω θήρευσής τους από τα ετερότροφα μαστιγωτά, γεγονός που αποτυπώνεται στην αύξηση των τελευταίων μετά από την D4. Σε αντίθεση με το προηγούμενο, μετά την D6, τα ετερότροφα μαστιγωτά αυξήθηκαν ταυτόχρονα με τα βακτήρια, ενώ αντίθετα μειώθηκε η αφθονία των κυανοβακτηρίων. Είναι επομένως πιθανόν τα μαστιγωτά να στράφηκαν στα κυανοβακτήρια (Rodríguez-Martínez et al., 2022), γεγονός που προκάλεσε άρση της θηρευτικής πίεσης πάνω στα ετερότροφα βακτήρια με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της αφθονίας τους.

Φαίνεται ότι στην αρχή του πειράματος τα βλεφαριδωτά θήρυσαν κατά κύριο λόγο τα ετερότροφα και αυτότροφα μαστιγωτά στα Rural και Urban, γεγονός που εξηγεί την πτώση των μαστιγωτών μετά την D2. Στη συνέχεια όμως, και μετά την D4, τα βλεφαριδωτά φαίνεται ότι αποτέλεσαν τα ίδια λεία για τα δινομαστιγωτά ή/και το

ζωοπλαγκτόν, γεγονός που αποτυπώθηκε στη μείωση της αφθονίας τους. Αυτό οδήγησε στην άρση της θηρευτικής πίεσης επί των μαστιγωτών (κυρίως των ετερότροφων) και στην εκ νέου αύξηση της αφθονίας των μαστιγωτών τις τελευταίες μέρες του πειράματος.

Σε αυτό το πείραμα, τα δινομαστιγωτά κυριαρχήθηκαν από την ομάδα των γυμνών δινομαστιγωτών καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η μειωμένη αφθονία δινομαστιγωτών που μετρήθηκε στα Control πιθανόν να σχετίζεται με την αυξημένη αφθονία των κυανοβακτηρίων τα οποία υπέστησαν λιγότερη θήρευση στο Control από ό,τι στις άλλες δύο πειραματικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, φαίνεται ότι τα δινομαστιγωτά συνετέλεσαν τόσο στον έλεγχο της αφθονίας των μαστιγωτών τις ημέρες D4 & D6 καθώς δεν επέτρεψαν την αύξηση των πληθυσμών τους, όσο και στη σταδιακή μείωση της αφθονίας των βλεφαριδωτών. Από την ημέρα D8 και μετά, υπήρξε έντονη μείωση των δινομαστιγωτών, το οποίο πιθανόν σχετίζεται με την αύξηση του ζωοπλαγκτού, καθώς αυτό μπορεί να καταναλώνει τα δινομαστιγωτά ή να τα ανταγωνίζεται για την ίδια τροφή (π.χ. βλεφαριδωτά). Λόγω του μεγαλύτερου κύκλου ζωής του (σε σχέση με τα βακτήρια, το φυτοπλαγκτόν και τα πρωτόζωα), το ζωοπλαγκτόν δεν εμφάνισε αύξηση τις πρώτες πειραματικές ημέρες, αλλά αντίθετα παρουσίασε μικρή και σταδιακή μείωση της αφθονίας του. Φαίνεται ότι υπήρξε καθυστερημένη έναρξη της θήρευσης επί των δινομαστιγωτών, γεγονός που εξηγεί την αύξηση των δινομαστιγωτών στην αρχή του πειράματος και την πτώση της αφθονίας τους στην πορεία. Είναι πιθανόν ότι το ζωοπλαγκτόν είχε μεγαλύτερο ρόλο στο τέλος του πειράματος, πιθανότητα που ενισχύεται από μία μικρή αύξηση της παραγωγής των αυγών που παρατηρήθηκε τις τελευταίες πειραματικές ημέρες.

Συνοψίζοντας, τα ετερότροφα βακτήρια, τα αυτότροφα μαστιγωτά και τα διάτομα ευνοήθηκαν από την έντονη προσθήκη σκόνης (D5) και παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά με παλαιότερα πειράματα που αφορούσαν την επίδραση της προσθήκης σκόνης της Σαχάρας στη δομή και λειτουργία των μικροβιακών ομάδων της περιοχής αυτής. Τα δινομαστιγωτά και το ζωοπλαγκτόν φαίνεται ότι ευνοήθηκαν έμμεσα από τις προσθήκες καθώς αύξησαν τους πληθυσμούς τους θηρεύοντας τις ομάδες που επωφελήθηκαν από τις προσθήκες αεροζόλ/σκόνης, δηλ. από τα διαθέσιμα θρεπτικά. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η προσθήκη των αερολυμάτων είχε περισσότερο χαρακτήρα συντήρησης του τροφικού πλέγματος και δεν οδήγησε σε άλλες διαφοροποιήσεις. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι τα αερολύματα περιείχαν μικρές ποσότητες θρεπτικών οπότε δεν επέφεραν άμεση

απόκριση των μικροβιακών πληθυσμών. Επιπλέον πρέπει να ληφθούν υπόψη οι καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν τις ημέρες πλήρωσης των μεσοκόσμων με νερό από τη θάλασσα. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερα τη δεύτερη ημέρα υπήρξε επεισόδιο ατμοσφαιρικής εναπόθεσης με αποτέλεσμα την προσθήκη σκόνης στο θαλάσσιο οικοσύστημα λόγω των ισχυρών νότιων ανέμων. Η αυξημένη συγκέντρωση των θρεπτικών στο ξεκίνημα του πειράματος αποτυπώνεται και από τη μείωση μετά την D0 των φωσφορικών, της χλωροφύλλης αλλά και των κυανοβακτηρίων. Ενδεχομένως, οι προσθήκες των αεροζόλ (χαμηλή συγκέντρωση θρεπτικών) να μην ήταν ικανές να τροφοδοτήσουν το σύστημα αρκετά ώστε να προκληθούν σημαντικές μεταβολές. Αντίθετα, μετά την D5, η προσθήκη μεγάλης ποσότητας σκόνης προκάλεσε τη διαφοροποίηση των ομάδων του μικροπλαγκτού.

5. Βιβλιογραφία

1. Krom, M. D., N. Kress, S. Brenner, and L. I. Gordon. 'Phosphorus Limitation of Primary Productivity in the Eastern Mediterranean Sea'. *Limnology and Oceanography* 36, no. 3 (1 May 1991): 424–32. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.3.0424>.
2. Lazzari, P., C. Solidoro, V. Ibello, S. Salon, A. Teruzzi, K. Béranger, S. Colella, and A. Crise. 'Seasonal and Inter-Annual Variability of Plankton Chlorophyll and Primary Production in the Mediterranean Sea: A Modelling Approach'. *Biogeosciences* 9, no. 1 (11 January 2012): 217–33. <https://doi.org/10.5194/bg-9-217-2012>.
3. Pitta, Paraskevi, Maria Kanakidou, Nikolaos Mihalopoulos, Sylvia Christodoulaki, Panagiotis D. Dimitriou, Constantin Frangoulis, Antonia Giannakourou, et al. 'Saharan Dust Deposition Effects on the Microbial Food Web in the Eastern

- Mediterranean: A Study Based on a Mesocosm Experiment'. *Frontiers in Marine Science* 4 (2 May 2017): 117. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00117>.
4. Azam, F, T Fenchel, Jg Field, Js Gray, La Meyer-Reil, and F Thingstad. 'The Ecological Role of Water-Column Microbes in the Sea'. *Marine Ecology Progress Series* 10 (1983): 257–63. <https://doi.org/10.3354/meps010257>.
 5. Fu, Q. 'Radiation Transfer in the Atmosphere: Radiation, Solar'. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Second Edition*, 1–4, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00334-0>.
 6. Pöschl, Ulrich. 'Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects'. *Angewandte Chemie International Edition* 44, no. 46 (25 November 2005): 7520–40. <https://doi.org/10.1002/anie.200501122>.
 7. Stockdale, Anthony, Michael D. Krom, Robert J. G. Mortimer, Liane G. Benning, Kenneth S. Carslaw, Ross J. Herbert, Zongbo Shi, Stelios Myriokefalitakis, Maria Kanakidou, and Athanasios Nenes. 'Understanding the Nature of Atmospheric Acid Processing of Mineral Dusts in Supplying Bioavailable Phosphorus to the Oceans'. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, no. 51 (20 December 2016): 14639–44. <https://doi.org/10.1073/pnas.1608136113>.
 8. Fröhlich-Nowoisky, Janine, Christopher J. Kampf, Bettina Weber, J. Alex Huffman, Christopher Pöhlker, Meinrat O. Andreae, Naama Lang-Yona, et al. 'Bioaerosols in the Earth System: Climate, Health, and Ecosystem Interactions'. *Atmospheric Research* 182 (December 2016): 346–76. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.018>.
 9. Ruiz-Gil, Tay, Jacqueline J. Acuña, So Fujiyoshi, Daisuke Tanaka, Jun Noda, Fumito Maruyama, and Milko A. Jorquera. 'Airborne Bacterial Communities of Outdoor Environments and Their Associated Influencing Factors'. *Environment International* 145 (December 2020): 106156. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106156>.

10. Violaki, Kalliopi, Athanasios Nenes, Maria Tsagkaraki, Marco Paglione, Stéphanie Jacquet, Richard Sempéré, and Christos Panagiotopoulos. 'Bioaerosols and Dust Are the Dominant Sources of Organic P in Atmospheric Particles'. *Npj Climate and Atmospheric Science* 4, no. 1 (December 2021): 63. <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00215-5>.
11. Tsagaraki, Tatiana M., Barak Herut, Eyal Rahav, Ilana R. Berman Frank, Anastasia Tsiola, Manolis Tsapakis, Antonia Giannakourou, et al. 'Atmospheric Deposition Effects on Plankton Communities in the Eastern Mediterranean: A Mesocosm Experimental Approach'. *Frontiers in Marine Science* 4 (4 July 2017): 210. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00210>.
12. Brussaard, Corina P. D. 'Optimization of Procedures for Counting Viruses by Flow Cytometry'. *Applied and Environmental Microbiology* 70, no. 3 (March 2004): 1506–13. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.3.1506-1513.2004>.
13. Marie, Dominique, Corina P. D. Brussaard, Runar Thyrhaug, Gunnar Bratbak, and Daniel Vaultot. 'Enumeration of Marine Viruses in Culture and Natural Samples by Flow Cytometry'. *Applied and Environmental Microbiology* 65, no. 1 (January 1999): 45–52. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.1.45-52.1999>.
14. Porter, Karen G., and Yvette S. Feig. 'The Use of DAPI for Identifying and Counting Aquatic Microflora¹'. *Limnology and Oceanography* 25, no. 5 (September 1980): 943–48. <https://doi.org/10.4319/lo.1980.25.5.0943>.
15. Utermöhl, Hans. 'Methods of Collecting Plankton for Various Purposes Are Discussed.' *SIL Communications, 1953-1996* 9, no. 1 (1 January 1958): 1–38. <https://doi.org/10.1080/05384680.1958.11904091>.
16. Kalivitis, N., E. Gerasopoulos, M. Vrekoussis, G. Kouvarakis, N. Kubilay, N. Hatzianastassiou, I. Vardavas, and N. Mihalopoulos. 'Dust Transport over the Eastern Mediterranean Derived from Total Ozone Mapping Spectrometer, Aerosol Robotic Network, and Surface Measurements'. *Journal of Geophysical Research* 112, no. D3 (7 February 2007): D03202. <https://doi.org/10.1029/2006JD007510>.

17. Pulido-Villena, E., Baudoux, A.-C., Obernosterer, I., Landa, M., Caparros, J., Catala, P., et al. (2014). Microbial food web dynamics in response to a Saharan dust event: results from a mesocosm study in the oligotrophic Mediterranean Sea. *Biogeosciences* 11, 5607–5619. [doi: 10.5194/bg-11-5607-2014](https://doi.org/10.5194/bg-11-5607-2014)

18. Romero, Estela, Francesc Peters, Cèlia Marrasé, Òscar Guadayol, Josep M. Gasol, and Markus G. Weinbauer. ‘Coastal Mediterranean Plankton Stimulation Dynamics through a Dust Storm Event: An Experimental Simulation’. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 93, no. 1 (May 2011): 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.03.019>.

19. Rodríguez-Martínez, R., Vaqué, D., Forn, I. and Massana, R. (2022), Dominant marine heterotrophic flagellates are adapted to natural planktonic bacterial abundances. *Environ Microbiol*, 24: 2421-2434. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15911>