



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΓΕΙΑ**

**2021-2022**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΙΤΛΟΣ**

**«ΚΥΑΝΟΤΟΞΙΝΕΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ  
ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»**

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ: ΜΠΑΧΤΗ ΚΑΛΛΙΟΠΗ**

**A.M.: 21047**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Ι. ΔΑΜΙΚΟΥΚΑ**

Αθήνα, Νοέμβριος 2023



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ**

**POSTGRADUATE PROGRAM (MSc)**

**OCCUPATIONAL AND ENVIRONMENTAL HEALTH**

**2021-2022**

**DIPLOMA THESIS**

**TITLE**

**«CYANOTOXINS AND WATER RESOURCES. EFFECTS ON HUMAN  
HEALTH AND THE ENVIRONMENT»**

**STUDENT NAME & SURNAME: BACHTI KALLIOPI**

**Registration Number: 21047**

**SUPERVISOR NAME & SURNAME: I. DAMIKOUKA**

Athens, November 2023



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΓΕΙΑ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ  
«ΚΥΑΝΟΤΟΞΙΝΕΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ  
ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>Α/α</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	Δαμικούκα Ιωάννα	Επίκουρη Καθηγήτρια	
2	Εβρένογλου Λευκοθέα	Αναπληρώτρια Καθηγήτρια	
3	Κάβουρα Όλγα	Επίκουρη Καθηγήτρια	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μπαχτή Καλλιόπη του Χαράλαμπου, με αριθμό μητρώου 21047, φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Επαγγελματική και Περιβαλλοντική Υγεία του Τμήματος Πολιτικών Δημόσιας Υγείας της Σχολής Δημόσιας Υγείας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότiκάθε βοήθεια η οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

ΚΑΛΛΙΟΠΗ ΜΠΑΧΤΗ



**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ**

**Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

**Εισαγωγή:** Τα κυανοβακτήρια προσαρμόζονται εύκολα τόσο σε γλυκά όσο και σε αλμυρά υδάτινα περιβάλλοντα, σε παράκτιες περιοχές, σε καλλιέργειες, ακόμη και σε ξηρό έδαφος. Η αυξημένη ανάπτυξή τους στα υδάτινα οικοσυστήματα μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχές αφενός στο περιβάλλον και αφετέρου στην ανθρώπινη υγεία. Οι κυανοτοξίνες που εκκρίνουν τα κυανοβακτήρια είναι πολλές φορές επιβλαβείς και απειλητικές για τη δημόσια υγεία.

**Σκοπός:** Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην ανάδειξη της σπουδαιότητας της πρόληψης και διαχείρισης της ανάπτυξης των κυανοβακτηρίων, προκειμένου να περιοριστούν οι επιβλαβείς επιπτώσεις της ανθρώπινης έκθεσης σε υψηλά επίπεδα κυανοτοξινών. Σημαντική είναι η διερεύνηση του ζητήματος ως ένα πρόβλημα της δημόσιας υγείας αλλά και της περιβαλλοντικής συνείδησης.

**Μεθοδολογία:** Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση, με αναζήτηση πρόσφατων και παλαιότερων δημοσιεύσεων που έχουν διερευνήσει το εν λόγω ζήτημα. Η ανασκόπηση στηρίχθηκε σε άρθρα δημοσιευμένα στην ελληνική και αγγλική γλώσσα από αναζήτηση σε βάσεις δεδομένων, όπως Pubmed και Google Scholar.

**Αποτελέσματα:** Έχουν εντοπιστεί ορισμένα είδη κυανοβακτηρίων και κυανοτοξινών σε υδάτινα περιβάλλοντα τόσο θαλάσσιου όσο και γλυκού ύδατος, που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές ή και απειλητικές για την ανθρώπινη ζωή επιπτώσεις. Υπάρχουν επίσης κατευθυντήριες οδηγίες και κανονισμοί για τα συχνότερο εμφανιζόμενα κυανοβακτήρια, που οριοθετούν τις επιτρεπόμενες τιμές συγκέντρωσης των κυανοτοξινών στο πόσιμο νερό ή σε ύδατα αναψυχής.

**Συμπεράσματα:** Η παρουσία και άνθιση των κυανοβακτηρίων στο υδάτινο περιβάλλον μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Απαιτούνται συνεχείς μελέτες για την εκτίμηση του επιπέδου συγκέντρωσης των κυανοτοξινών στα διάφορα υδάτινα περιβάλλοντα και η τήρηση των μέτρων πρόληψης και διαχείρισης του ρυθμού ανάπτυξης των κυανοβακτηρίων στα υδάτινα οικοσυστήματα τόσο στην Ελλάδα όσο και σε άλλες χώρες παγκοσμίως.

**Λέξεις-κλειδιά:** κυανοτοξίνες, κυανοβακτήρια, ανθρώπινη υγεία, ρύπανση υδάτων, ευτροφισμός

## ABSTRACT

**Introduction:** Cyanobacteria are easily adapted to both fresh and salt water environments, coastal areas, crops and even dry soil. Their increased development in aquatic ecosystems can lead to disturbances on the one hand in the environment and on the other hand in human health. The cyanotoxins secreted by cyanobacteria are often harmful and a threat to public health.

**Purpose:** This study aims to highlight the importance of preventing and managing the growth of cyanobacteria in order to limit the harmful effects of human exposure to high levels of cyanotoxins. It is important to investigate the issue as a problem of public health and environmental awareness.

**Methodology:** A literature review was conducted, searching for recent and past publications that have investigated the issue in question. The review was based on articles published in Greek and English by searching databases such as Pubmed and Google Scholar.

**Results:** Certain species of cyanobacteria and cyanotoxins have been identified in both marine and freshwater aquatic environments, which can cause negative or even life-threatening effects on humans. There are also guidelines and regulations for the most frequently occurring cyanobacteria, which delimit the permissible concentration values of cyanotoxins in drinking or recreational waters.

**Conclusions:** The presence and bloom of cyanobacteria in the aquatic environment can pose a risk to public health and the environment. Continuous studies are needed to assess the level of concentration of cyanotoxins in the various aquatic environments and the observance of measures to prevent and manage the growth rate of cyanobacteria in aquatic ecosystems both in Greece and in other countries worldwide.

**Keywords:** cyanotoxins, cyanobacteria, human health, water pollution, environmental health

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Ακολουθεί λίστα με τις εικόνες που εμφανίζονται στην παρούσα εργασία.

Τίτλος εικόνας	Σελίδα
Εικόνα 1. Παράγοντες ρύπανσης των υπόγειων υδάτων	σελ.16
Εικόνα 2. Η είσοδος των κυανοτοξινών στην τροφική αλυσίδα	σελ.36
Εικόνα 3. Ενώσεις συνηθέστερων κυανοτοξινών	σελ.38
Εικόνα 4. Συνηθισμένη απεικόνιση των ενώσεων των μικροκυστινών	σελ.39
Εικόνα 5. Χημική δομή της μικροκυστίνης LR	σελ.40
Εικόνα 6. Χημική δομή της μικροκυστίνης RR	σελ.40
Εικόνα 7. Χημική δομή Νοντουλαρίνης	σελ.41
Εικόνα 8. Η τοξική επίδραση των κυανοτοξινών στον άνθρωπο και τα κατοικίδια	σελ.44
Εικόνα 9. Γεωγραφική κατανομή κυανοτοξινών σε διεθνές επίπεδο	σελ.46

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Ακολουθεί λίστα με συντομογραφίες (συντομεύσεις, μονάδες μέτρησης και σύμβολα) που χρησιμοποιούνται στην εργασία.

Συντομογραφίες	Σημασία –αναλυτική ονομασία
ATX	ανατοξίνη
CYN	κυλινδροσπαρμοψίνη
E.E.	Ευρωπαϊκή Ένωση
g/L	γραμμάριο ανά λίτρο
HPLC	<i>High-performance liquid chromatography</i> – υγροχρωματογραφία
ICBN	<i>International Code of Botanical Nomenclature</i> –Διεθνής Κώδικας Βοτανικής Ονοματολογίας
κ.ά. /κ.λπ.	και άλλα /και λοιπά
MCYST-LR	μικροκυστίνη
mg	<i>milligram</i> (μονάδα μέτρησης μάζας)
mm	<i>millimetre</i> (μονάδα μέτρησης μήκους)
μg	<i>microgram</i> ή μικρογραμμάρια
μm	μικρόμετρο
pH	<i>potential of hydrogen</i> –ενεργόζυττητα
PFAS	<i>Per- andpolyfluoroalkylsubstances</i> –υπερφθοριωμένες αλκυλιωμένες ουσίες
π.χ.	παραδείγματος χάριν
σελ.	σελίδα
STX	σαξιτοξίνη



TDI	Tolerable Daily Intake –ημερήσια πρόσληψη
WHO –ΠΟΥ	<i>World Health Organization</i> –Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
°C	βαθμοί Κελσίου

## Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	5
ABSTRACT .....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	7
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ .....	8
ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ .....	15
1.1 Το εδαφικό νερό .....	15
1.2 Η ποιότητα των υπόγειων υδάτων .....	15
1.3 Επιφανειακά ύδατα .....	17
1.4 Τοξικές ουσίες -ρύποι των υδάτων .....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΚΥΑΝΟΒΑΚΤΗΡΙΑ .....	22
2.1 Ορισμός .....	22
2.2 Είδη κυανοβακτηρίων .....	23
2.3 Μορφολογία .....	24
2.4 Χρωστικές ουσίες κυανοβακτηρίων .....	29
2.5 Κυανοβακτήρια και ευτροφισμός .....	30
2.6 Μεταβολισμός και αύξηση των κυανοβακτηρίων .....	31
2.7 Συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξη κυανοβακτηρίων .....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΚΥΑΝΟΤΟΞΙΝΕΣ .....	35
3.1 Εισαγωγή .....	35
3.2 Οι κυανοτοξίνες .....	38
3.3 Ο ρόλος των κυανοτοξινών .....	45
3.4. Οδοί και τρόποι έκθεσης σε κυανοτοξίνες .....	46
3.5 Η τοξική επίδραση των κυανοτοξινών στον άνθρωπο και στο περιβάλλον .....	47
3.5.1 Κυανοτοξίνες σε γεωργικές καλλιέργειες .....	52
3.5.2 Κυανοτοξίνες στο έδαφος και τα φυτά .....	53
3.6 Παρουσία κυανοβακτηρίων και κυανοτοξινών στην Ελλάδα .....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	58
4.1 Πολιτικές προστασίας για τη δημόσια υγεία, κατευθυντήριες οδηγίες και σχετικές νομοθεσίες .....	58
4.2 Στρατηγικές διαχείρισης και περιορισμού των κυανοβακτηρίων και των κυανοτοξινών .....	62
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	65
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	67

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο μέρος για την ολοκλήρωση του Π.Μ.Σ. του Τμήματος Πολιτικών Δημόσιας Υγείας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής με τίτλο Επαγγελματική και Περιβαλλοντική Υγεία. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια Ιωάννα Δαμικούκα για την πολύτιμη βοήθειά της και την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής δεδομένου ότι αυτή εκπονήθηκε εν μέσω νέων και απαιτητικών επαγγελματικών υποχρεώσεων. Τέλος, ευχαριστώ τα άτομα που με δική τους προτροπή έκανα αίτηση σε αυτό το Π.Μ.Σ.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση των κυανοτοξινών που προέρχονται από τα κυανοβακτήρια. Παράλληλα, έχει ως στόχο να αναδείξει τους παράγοντες που ευνοούν την ανάπτυξη τους σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις τους στους υδατικούς πόρους και ευρύτερα στην υγεία του ανθρώπου και των οικοσυστημάτων. Λόγω της τοξικότητας των τοξινών η μελέτη σε βάθος των ιδιοτήτων τους, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη μείωση των επιπτώσεων στη δημόσια υγεία και για τον εντοπισμό μεθόδων εξυγίανσης των υδάτων που επηρεάζονται από την ανάπτυξή τους.

Τα κυανοβακτήρια χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης καθώς έχουν τη δυνατότητα να αναπτυχθούν σε πολλούς τύπους περιβάλλοντος. Παρουσιάζουν εύκολη προσαρμοστικότητα και έτσι μπορούν να εντοπιστούν σε γλυκά νερά, αλμυρά νερά (ωκεανούς), παράκτιες περιοχές αλλά και σπήλαια, ξηρά εδάφη αλλά και καλλιέργειες όπως οι ορυζώνες. Ακόμα, λειτουργούν και σαν συμβιωτικοί οργανισμοί με άλλους οργανισμούς που μάλιστα χαρακτηρίζονται και από τους αρχαιότερους οργανισμούς με αυτή την ικανότητα (Karusta&Stanczyk, 2011). Η υπέρμετρη άνθιση των κυανοβακτηρίων αποτελεί και το μείζον πρόβλημα καθώς ο μεγάλος αριθμός τους στην επιφάνεια των υδάτων μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υγείας και γενικότερα αποτελεί ισχυρό παράγοντα μόλυνσης και υδάτινης επιβάρυνσης.

Οι κυανοτοξίνες που παράγονται από τα κυανοβακτήρια δύναται να προκαλέσουν νευροτοξικές αλλά και ηπατοτοξικές διαταραχές. Οι παραπάνω είναι πολύ πιθανό να ανιχνευθούν στα ύδατα και στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης. Αρκετά περιστατικά δηλητηριάσεων έχουν αναφερθεί στην Κίνα, την Αυστραλία αλλά και τη Σκωτία. Μελέτες αναφέρουν πως η συνεχή έκθεση σε κάποια είδη κυανοτοξινών προωθούν την ανάπτυξη όγκων και καρκινογένεσης (Sahoo & Seckbach, 2015).

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (Π.Ο.Υ.) έχει θέσει επιτρεπόμενα όρια για πολλά από τα είδη των κυανοτοξινών στο πόσιμο νερό, τα ύδατα ψυχαγωγίας αλλά και τα νερά κολύμβησης. Επιπροσθέτως, περιοχές όπως το Ohio, η Γαλλία, η Σιγκαπούρη κ.α. έχουν θέσει ακόμα αυστηρότερα όρια σε σχέση με αυτά του Π.Ο.Υ. και σε αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα εύρος τιμών στα επιτρεπόμενα όρια μεταξύ 1μg/L έως 1.5μg/L (WHO, 2008).

Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, το παγκόσμιο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, που αναφέρεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, σε εκτεταμένες περιόδους ξηρασίας και σε αύξηση των θρεπτικών συστατικών, έχει αυξήσει σημαντικά την ανάπτυξη κυανοβακτηριακών ομάδων, που συγκεντρώνονται μαζικά σε υδάτινους χώρους της παγκόσμιας κλίμακας (WHO, 2008).

Στόχος λοιπόν της παρούσας μελέτης είναι να αναδείξει τη σπουδαιότητα της πρόληψης και της σωστής διαχείρισης του πληθυσμού των κυανοβακτηρίων και να αναδειχθούν και διάφοροι τρόποι αξιοποίησης τους καθώς νέες μελέτες δείχνουν πως υπάρχει θετική προοπτική στη χρήση τους για την παραγωγή τροφίμων αλλά και τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε χημική. Λαμβάνοντας υπόψη την περαιτέρω κλιματική κρίση που θα υπάρξει στο μέλλον, η ανάγκη ελέγχου της κυανοβακτηριακής άνθισης αλλά και ενδεχόμενοι τρόποι αξιοποίησης των ιδιοτήτων των κυανοβακτηρίων πρέπει να απασχολήσουν τους αρμόδιους φορείς. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έχει στόχο την ανάδειξη του θέματος από την οπτική της προστασίας της δημόσιας υγείας και της ευρύτερης περιβαλλοντικής υγιεινής.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας θα παρουσιαστούν τα βασικότερα στοιχεία των υδατικών πόρων, τα εδαφικά, επιφανειακά και υπόγεια νερά, καθώς και ορισμένες ουσίες που ρυπαίνουν τα ύδατα. Στο δεύτερο κεφάλαιο θα μελετηθούν οι ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά και τα είδη των κυανοβακτηρίων. Είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στο περιβάλλον ανάπτυξής τους, στις ιδιότητες που παρουσιάζει κάθε είδος αλλά και στον κύκλο ζωής και ανάπτυξης. Ακόμα, σημαντική είναι η αναφορά και στη λεγόμενη κυανοβακτηριακή άνθιση (*bloom*) η οποία είναι ο κύριος παράγοντας δημιουργίας και ανάπτυξης κυανοτοξινών. Στο τρίτο κεφάλαιο θα αναπτυχθούν οι συνηθέστερες κυανοτοξίνες και η επίδραση αυτών στον άνθρωπο και στο περιβάλλον.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα ελληνικά δεδομένα σχετικά με την παρουσία των κυανοτοξινών και των κυανοβακτηρίων. Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας θα παρουσιαστούν οι κυριότερες κατευθυντήριες οδηγίες από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο γύρω από τις κυανοτοξίνες και τα κυανοβακτήρια παγκοσμίως αλλά και στην Ελλάδα, καθώς και οι σπουδαιότερες στρατηγικές διαχείρισης και απομάκρυνσης ή περιορισμού των κυανοβακτηρίων.

Θα ακολουθήσει το κεφάλαιο των συμπερασμάτων που συνοψίζει τα παραπάνω δεδομένα και η λίστα με τις βιβλιογραφικές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή της ανασκόπησης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

## 1.1 Το εδαφικό νερό

Το εδαφικό νερό εμφανίζεται στο εσωτερικό τμήμα της γης και συγκεκριμένα μέσα σε ιζηματογενή στρώματα. Ο γεωλογικός αυτός σχεδιασμός των υπόγειων υδάτων, που αναφέρεται συχνά και υδροφορέας γιατί φέρει το υδάτινο περιεχόμενο, είναι μια μεγάλη δεξαμενή όπου συγκεντρώνεται και αποθηκεύεται το νερό. Το εδαφικό ύδωρ βρίσκεται σε συνεχή επικοινωνία και αλληλεπίδραση με το ύδωρ της επιφάνειας και αναπληρώνεται μέσω αυτού. Μπορεί επίσης να μετακινηθεί προς πηγές και να οδηγήσει με αυτόν τον τρόπο στην ανάπτυξη υγρότοπων (Karusta & Stanczyk, 2011).

## 1.2 Η ποιότητα των υπόγειων υδάτων

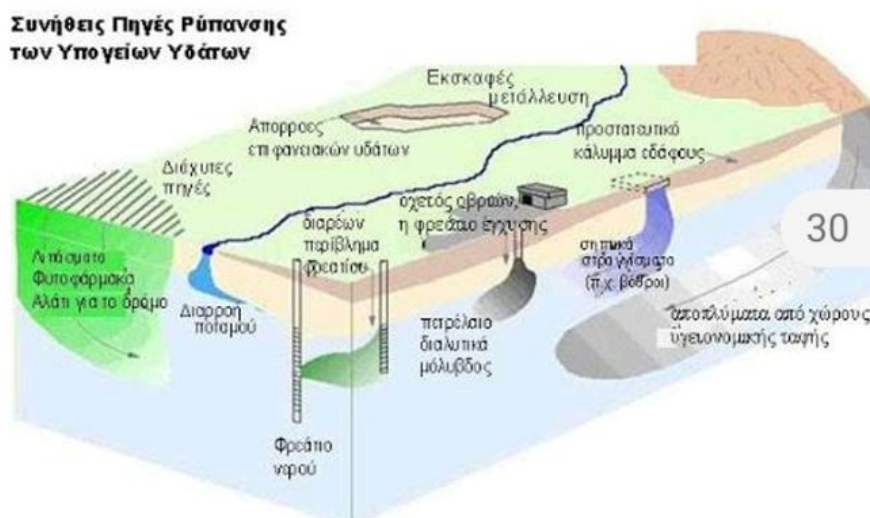
Σημαντικό είναι να αναφερθούμε στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων, που επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες παράμετροι που θεωρούνται βασικές για τον καθορισμό της ποιότητας του υπόγειου νερού, που είναι οι εξής (Μπουρτσαλάς και συν., 2011):

- 1) Η εναπόθεση των ορυκτών
- 2) Η αποσάθρωση, η αποσύνδεση και αποσύνθεση των πετρωμάτων
- 3) Στοιχεία της οργανικής ύλης, που αφορούν σε έκλυση του διοξειδίου του άνθρακα, στην αναγωγή των οξειδίων σιδήρου, νιτρικού ιόντος, θεικού ιόντος κ.λπ.
- 4) Η ύπαρξη βλάστησης, που αναφέρεται στην πρόσληψη φωσφόρου, καλίου και λοιπών αερίων συστατικών που βρίσκονται στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον
- 5) Παράγοντες που σχετίζονται με τον υδρολογικό κύκλο, όπως η αυξημένη εξάτμιση σε υδροφόρες εκτάσεις χωρίς βάθος που μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή συσσώρευση των αλάτων
- 6) Διάφορες ενέργειες και δραστηριότητες του ανθρώπινου γένους, οι οποίες περιλαμβάνουν τη χρήση φυτοφαρμάκων, λιπασμάτων και λοιπών σκευασμάτων για εφαρμογές στον τομέα της γεωργίας, αυξημένη παραγωγή αστικών λυμάτων και

αποβλήτων από βιομηχανικούς χώρους, τη διαφυγή ρύπων και απορριμμάτων από τις χωματερές κ.λπ.

Η ρύπανση που παρουσιάζουν τα υπόγεια νερά οφείλεται σε ρύπους, διάφορες ουσίες και στοιχεία του υπερκείμενου εδάφους που κατακάθονται ή που αποσυντίθενται και συσσωρεύονται στην περιοχή του πυθμένα. Οι ουσίες αυτές καλούνται ρύποι και αποτελούν είτε διαλυτές ή υδρόφιλες ουσίες, όπως για παράδειγμα τα ανόργανα άλατα, είτε αδιάλυτες ή αλλιώς υδρόφοβες ουσίες, που περιλαμβάνουν συνήθως τους υδρογονάνθρακες και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια, που εντοπίζονται εντός του υδάτινου περιβάλλοντος (Νταράκας, 2011).

Τα βιομηχανικά απόβλητα και τα αστικά λύματα συνδέονται σε ένα μεγάλο βαθμό με ανάπτυξη και μόλυνση από ποικίλα μικρόβια, όπως είναι η εμφάνιση της χολέρας, της δυσεντερίας ή των περιστατικών τυφοειδούς πυρετού. Από την άλλη μεριά, τα απόβλητα που εμφανίζονται από γεωργικές δραστηριότητες μπορούν να οδηγήσουν σε ευτροφισμό των υδάτων και να καταλήξουν σε ρύπανση του νερού, λόγω των ρυπαντών που εμπεριέχονται σε λιπάσματα, εντομοκτόνα και φυτοφάρμακα (European Environmental Agency, 2000). Στην Εικόνα 1 που ακολουθεί εμφανίζεται η απεικόνιση της ρύπανσης των υπόγειων νερών.



Εικόνα 1. Παράγοντες ρύπανσης των υπόγειων υδάτων

Πηγή: Kapusta & Stanczyk, 2011



### 1.3 Επιφανειακά ύδατα

Τα επιφανειακά νερά παρουσιάζονται κυρίως με τις ακόλουθες μορφές (Karusta & Stanczyk, 2011):

- Ωκεανός
- Θάλασσα ή πέλαγος
- Λίμνη
- Λιμνοθάλασσα
- Ποταμός
- Έλος
- Χείμαρρος

Ο ωκεανός αποτελεί τη συσσώρευση αλμυρών υδάτων και είναι το σύνολο των υδάτινων συγκεντρώσεων που καλύπτουν τις λεκάνες που σχηματίζονται ανάμεσα στις ηπείρους. Οι θάλασσες είναι πιο μικρές εκτάσεις από τους ωκεανούς και μπορούν να θεωρηθούν πιο περιορισμένες εκτάσεις αλμυρών υδάτων. Τα πελάγη αποτελούν επιμέρους τμήματα των θαλασσών. Οι λίμνες αποτελούν εκτάσεις υδάτινου περιβάλλοντος, με συγκέντρωση γλυκού νερού κατά κύριο λόγο, που δεν έρχονται σε άμεση αλληλεπίδραση με τη θάλασσα και καλύπτουν ουσιαστικά τις λεκάνες που εμφανίζονται στη στεριά. Η λιμνοθάλασσα αποτελεί μια εντελώς κλειστή ή σχετικά περιορισμένη υδάτινη έκταση που εντοπίζεται σε παραθαλάσσια περιοχή και περιλαμβάνει τη συγκέντρωση αλμυρών ή υφάλμυρων υδάτων. Έχει μικρότερο βάθος από τη λίμνη και έρχεται σε άμεση αλληλεπίδραση με τη θάλασσα. Ο ποταμός διακρίνεται από μεγάλες συγκεντρώσεις γλυκών υδάτων που βρίσκονται σε συνεχή ροή. Τα έλη αποτελούν μικρές συγκεντρώσεις γλυκού συνήθως ύδατος, με μικρό βάθος κατά κύριο λόγο. Οι χείμαρροι χαρακτηρίζονται ως υδάτινα ρεύματα που σχηματίζονται από συγκέντρωση γλυκών υδάτων με προσωρινή /παροδική ροή, που παρουσιάζει συνήθως μικρό μήκος και μεγάλη κλίση (Karusta & Stanczyk, 2011).

Οι επιφανειακοί υδατικοί πόροι περιλαμβάνουν επομένως τα υδατικά ρεύματα, τις λίμνες που μπορεί να είναι φυσικές ή και τεχνητές αλλά και τους διάφορους υγροτοπικούς πόρους. Οι υδατικοί πόροι τροφοδοτούνται κατά κανόνα από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Το ύψος και η κατανομή αυτών σε χώρο και χρόνο εμφανίζουν υψηλή διακύμανση στον ελλαδικό χώρο. Παρατηρείται πως στα δυτικά διαμερίσματα της Ελλάδας το ύψος της βροχής είναι σχεδόν στο διπλάσιο σε σχέση με τα ανατολικά γεωγραφικά διαμερίσματα, με εκτιμήσεις που αναφέρουν 600 με 800 mm έναντι 370 με 420 mm αντιστοίχως (Μπουρτσάλας και συν., 2011).

#### **1.4 Τοξικές ουσίες -ρύποι των υδάτων**

Υπάρχουν αρκετές τοξικές ουσίες που έχουν αναγνωριστεί ως ρύποι των υδάτων. Σύμφωνα με τους καταλόγους επιτήρησης της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.), οι οποίοι αναδεικνύουν ορισμένες ουσίες που αποτελούν σοβαρούς κινδύνους για την περιβαλλοντική αλλά και την ανθρώπινη υγεία, αναφέρονται ως βασικοί ρύποι ορισμένες υπερφθοροαλκυλιωμένες και πολυφθοριωμένες αλκυλιωμένες ουσίες ή αλλιώς PFAS. Υπάρχουν επίσης και άλλες ουσίες, που συμπεριλαμβάνουν εκτός των άλλων τα μικροπλαστικά και τα ανθεκτικά σε αντιμικροβιακά μικροοργανισμών, που θα έπρεπε να ενσωματωθούν στους καταλόγους, εφόσον βρεθούν οι κατάλληλοι τρόποι διαχείρισης και παρακολούθησης αυτών. Με βάση τους ενημερωμένους καταλόγους της ΕΕ, οι κυριότεροι ρύποι των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων είναι (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2023):

1. Οργανοαλογονούχες ενώσεις και ουσίες που μπορεί να σχηματίζουν τέτοιες ενώσεις στο υδάτινο περιβάλλον
2. Οργανοφωσφορικές ενώσεις
3. Οργανοκασσιτερικές ενώσεις
4. Ουσίες ή προϊόντα αποικοδόμησής τους, που αποδεδειγμένα έχουν καρκινογόνες ιδιότητες ή ιδιότητες που ενδέχεται να επιδράσουν στη στερεοειδογόνο λειτουργία του θυρεοειδούς, την αναπαραγωγή ή άλλες διαδικασίες που συνδέονται με το ενδοκρινικό σύστημα εντός του υδάτινου περιβάλλοντος ή διαμέσου του ίδιου

5. Υδρογονάνθρακες και βιοσωρεύσιμες οργανικές τοξικές ουσίες
6. Κυανιούχες ενώσεις
7. Μέταλλα και ενώσεις αυτών
8. Αρσενικό και ενώσεις του ίδιου
9. Βιοκτόνα και φυτοπροστατευτικά παρασκευάσματα
10. Υλικά σε αιώρημα
11. Ουσίες που συμβάλλουν στον ευτροφισμό (κυρίως νιτρικές ή φωσφορικές ενώσεις)
12. Ουσίες που επηρεάζουν δυσμενώς το ισοζύγιο οξυγόνου

Έχουν μάλιστα εντοπιστεί πολλές φορές συσσωρευμένες ομάδες νιτρικών αλάτων στα υπόγεια ύδατα, που ευθύνονται κατά κύριο λόγο στις δραστηριότητες του κλάδου της γεωργίας και σε λύματα από ενέργειες των βιομηχανικών χώρων, που ρυπαίνουν το έδαφος και κατ' επέκταση τα εδαφικά ύδατα. Ο γεωλογικός σχηματισμός, η αξιοποίηση καλλιεργητικών τεχνικών στο έδαφος και οι διάφορες καιρικές συνθήκες (ιδιαίτερα τα μηχανικά καιρικά φαινόμενα) ενδέχεται να προκαλέσουν ορισμένες μετατροπές στη σύσταση και τα επιμέρους χαρακτηριστικά των υπόγειων υδάτων (European Environmental Agency, 2000).

Τα βασικά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά που διακρίνουν τους ρύπους είναι τα ακόλουθα (Νταράκας, 2011):

- a) Ικανότητα διάλυσης
- b) Αυξημένα επίπεδα αποσύνθεσης
- c) Πτητικότητα
- d) Τοξικότητα
- e) Ικανότητα προσρόφησης
- f) Συντελεστής κατανομής
- g) Δείκτης βιοσυγκέντρωσης

#### h) Πίεση των ατμών

Η ρύπανση του εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε ήπιες ή και πιο ισχυρές –εμφανείς επιδράσεις στα διάφορα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υπόγειων υδάτων και να μεταβάλει σταδιακά τη σύσταση του υδάτινου περιβάλλοντος. Η ανθρώπινη δραστηριότητα προκαλεί επίσης συνεχείς μετατροπές και επιδράσεις στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του εδάφους, με αποτέλεσμα να επιδρά σημαντικά στη σύσταση και την ποιότητα των υπόγειων υδάτων (Karusta & Stanczyk, 2011).

Επιπλέον, η μικροβιολογία του ύδατος ασχολείται με τη μελέτη των μικροοργανισμών οι οποίοι διαβιούν στα φυσικά ύδατα, λίμνες, ποτάμια, δέλτα ποταμών, ωκεανούς. Τα αστικά και τα βιομηχανικά λύματα αποβάλλονται σε λίμνες και θάλασσες και συνεπώς η διάσπασή τους και οι επιδράσεις τους στη ζωή των μικροοργανισμών έχει σημασία στη μικροβιολογία ύδατος. Τα μικρόβια, ιδιαίτερα όσα ανήκουν στις επικράτειες βακτήρια, αποικίζουν πολύ διαφορετικές περιοχές της γης. Ανευρίσκονται σε ποικίλα περιβάλλοντα, όπως σε θερμές πηγές, σε μικροσκοπικές σχισμές βράχων, στις κορυφές των άλπεων, στα βάθη των ωκεανών, στα καθαρά ρυάκια, στην θάλασσα. Η ποικιλομορφία των μικροβιακών πληθυσμών υποδεικνύει τη δυνατότητα εκμετάλλευσης οποιοδήποτε οικολογικού ενδιαυτήματος στο περιβάλλον τους (Μπουρτσάλας και συν., 2011).

Επομένως, η διασφάλιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων συσχετίζεται σε ένα μεγάλο βαθμό με την εξασφάλιση της ποιότητας του εδάφους, που διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην ευρύτερη διατήρηση της ομαλής και φυσιολογικής λειτουργίας και ανάπτυξης των οικοσυστημάτων (Μπουρτσάλας και συν., 2011). Η διατήρηση και προφύλαξη του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα η προστασία των υδάτινων χώρων έχει λάβει τη μέγιστη προσοχή της Ευρωπαϊκής Ένωσης τα τελευταία χρόνια, εφόσον η προστασία του φυσικού περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της οικονομίας και της κοινωνικής συσπείρωσης και συνεκτικότητας αποτελούν τους κύριους άξονες για τη σύσταση και διατήρηση της Ευρωπαϊκής πολιτικής.

Μάλιστα, οι σύγχρονες αντιλήψεις και πεποιθήσεις για ζητήματα της διαχείρισης και του ελέγχου των αποβλήτων –λυμάτων καθορίζονται από ποικίλες απόψεις, συμπεριφορές,

δράσεις και πρακτικές όλων των αρμόδιων φορέων για τη διατήρηση και προστασία του περιβάλλοντος. Οι ενέργειες αυτές αποσκοπούν στον περιορισμό της παραγωγής λυμάτων και αποβλήτων αλλά και στην ενίσχυση της ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, μειώνοντας τις συσσωρεύσεις των ρυπαντών, που έχουν αποδειχθεί απειλητικοί για την υγεία και ευημερία των ανθρώπων αλλά και του ευρύτερου οικοσυστήματος. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζονται καινοτόμα τεχνολογικά μέσα και υιοθετούνται σύγχρονες στάσεις και συμπεριφορές υπέρ του περιβάλλοντος αλλά και της δημόσιας υγείας (Καραγιαννίδης & Μουσιόπουλος, 2002). Τα τελευταία χρόνια βέβαια, οι έρευνες εστιάζουν στη μελέτη της επίδρασης των κυανοτοξινών στη δημόσια υγεία αλλά και την περιβαλλοντική επιβάρυνση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΚΥΑΝΟΒΑΚΤΗΡΙΑ

### 2.1 Ορισμός

Τα κυανοβακτήρια ή αλλιώς κυανοφύκη, ή κυανοπράσινα φύκη ή κυανόφυτα) μαζί με τα προχλωροφύκη (Lee & Eggleston, 1989) είναι οι μοναδικοί προκαρυωτικοί οργανισμοί που επιτελούν φωτοσύνθεση. Συνιστούν τους πιο αρχέγονους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς που συναντώνται στη γη. Συγκεκριμένα, τα κυανοβακτήρια αποτελούν μία υψηλή συγκέντρωση *gram* αρνητικών προκαρυωτικών οργανισμών, μια ποικιλόμορφη ομάδα βακτηρίων που περιλαμβάνει μονοκύτταρα κυανοβακτήρια (φυτοπλαγκτόν), αποικιακές και νηματοειδείς μορφές.

Τα κυανοβακτήρια (οξυγονοπαράγωγα φωτοσυνθετικά βακτήρια) ονομάστηκαν έτσι εξαιτίας του χαρακτηριστικού κυανού χρώματος που έχουν. Παλαιότερα αποκαλούνταν κυανοφύκη. Είναι εμφανές πως παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τα ευκαρυωτικά φύκη, όπως επίσης παρατηρείται συχνά ότι καταλαμβάνουν τα ίδια ενδιαιτήματα, ωστόσο ο συγκεκριμένος χαρακτηρισμός δεν μπορεί να θεωρηθεί σωστός, καθότι αποτελούν βακτήρια και είναι σαφές πως τα φύκη δεν ανήκουν στην ίδια κατηγορία (Whitton, 2012). Ανήκουν στο Βασίλειο των ευβακτηρίων ή μονήρων, στην ίδια οικογένεια που εντάσσονται και τα χλαμυδοβακτήρια, τα πράσινα βακτήρια αλλά και τα ανοξυγενή φωτο-αυτοτροφικά ερυθρά. Αποτελούν μονοκύτταρους ή πολυκύτταρους οργανισμούς, που ανευρίσκονται σε γλυκά, αλμυρά, υφαλμυρά ύδατα. Συνήθως δημιουργούν αποικίες, με αθροίσεις κυττάρων, η νήματα κυτταρικά, και σπανιότερα απαντούν ως μονοκύτταρα και αυτόνομα κύτταρα.

Τα κυανοβακτήρια παράγουν οξυγόνο κατά την φωτοσύνθεση, όπως τα ευκαρυωτικά φυτά και τα φύκη. Παράλληλα, φαίνεται πως πολλά κυανοβακτήρια είναι σε θέση να δεσμεύουν ατμοσφαιρικό άζωτο, συνήθως μέσα σε ειδικά κύτταρα, τις ετεροκύστες. Οι ετεροκύστες περιέχουν ένζυμα που δεσμεύουν το ατμοσφαιρικό άζωτο και το μετατρέπουν σε ιόν αμμωνίου μια μορφή χρήσιμη για το αναπτυσσόμενο κύτταρο. Επιπρόσθετα, ορισμένα κυανοβακτήρια διαθέτουν την ικανότητα του ετεροτροφισμού (Gkelis & Panou, 2016). Περίπου 50 είδη νηματοειδών κυανοβακτηρίων διαθέτουν ειδικά κύτταρα στο τρίχωμά τους, που ονομάζονται ετερόκυτα-ετεροκύστες (*heterocytes*), που δεσμεύουν το ατμοσφαιρικό άζωτο. Τα ετερόκυτα δεν επιτελούν φωτοσύνθεση, δεν παράγουν οξυγόνο, και προμηθεύονται

θρεπτικές ουσίες από τα γειτονικά φωτοσυνθετικά κύτταρα. Στο εσωτερικό των ετεροκυστών επικρατούν αναερόβιες συνθήκες. Τα υδρόβια είδη διαθέτουν κενοτόπια που τους παρέχουν άνοση, ώστε να επιπλέουν σε ευνοϊκότερο περιβάλλον. Τα κυανοβακτήρια κινούνται πάνω σε στερεές επιφάνειες με ολίσθηση. (Komarek, 2016).

Τα κυανοβακτήρια ήταν ανάμεσα στους πρώτους οργανισμούς πάνω στη γη και κυριαρχούσαν στο Προκάμβιο περίπου 3.500.000.000 χρόνια πριν (Castenholz, 1992). Με τη φωτοσύνθεσή τους συνέβαλαν στην αλλαγή των αναγωγικών συνθηκών που επικρατούσαν στην ατμόσφαιρα της γης σε οξυγονικές κι έτσι έπαιξαν έναν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του πλανήτη. Με τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης κατέστησαν δυνατή την αερόβια αναπνοή. Η εξελικτική πορεία των κυανοβακτηρίων έχει απαρχή 3,5 10<sup>9</sup> έτη πριν και από τότε επικράτησαν στην περίοδο του προκάμβριου με την παραγωγή οργανικής ύλης και οξυγόνου. Η αύξηση του πληθυσμού των κυανοβακτηρίων, των πρώτων φωτοσυνθετικών οργανισμών, συντέλεσε στην αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου της ατμόσφαιρας και στην απορρόφηση μεγάλης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα, γεγονός που επηρέασε τις κλιματικές συνθήκες στον πλανήτη (Komarek, 2016).

## 2.2 Είδη κυανοβακτηρίων

Όπως αναφέρεται στο Διεθνή Κώδικα Βοτανικής Ονοματολογίας ή αλλιώς ICBN, η κλάση των Κυανοφυκών εμπεριέχει περισσότερα από 150 γένη και περίπου δύο χιλιάδες είδη (Mur et al., 1999). Επειδή, όμως, πολλά κυανοβακτήρια υπολείπονται σε ευκρινή μορφολογικά στοιχεία, η συστηματική κατηγοριοποίησή τους είναι μια απαιτητική και περίπλοκη διαδικασία, που συνεχώς αναδιατάσσεται (Komarek, 2016).

Σύμφωνα με τις οδηγίες του *Bergey's Manual of systematic Bacteriology*, η κατηγοριοποίηση των κυανοβακτηρίων διακρινόταν σε πέντε ενότητες, που κάθε μία αντιστοιχούσε στην ανάλογη ομάδα ή τάξη /κατηγορία από τις ακόλουθες: κατηγορία *Chroococcales*, που περιλαμβάνει τα μονοκύτταρα κυανοβακτήρια που δημιουργούνται μέσω της απλής διχοτόμησης, κατηγορία *Pleurocapsales*, που αναφέρεται στα μονοκύτταρα κυανοβακτήρια που αναπτύσσονται μέσω της πολλαπλής διχοτόμησης, κατηγορία *Oscillatoriales*, κατηγορία *Nostocales* και κατηγορία *Stigonematales*. Μάλιστα, οι τρεις τελευταίες

κατηγορίες συμπεριλαμβάνουν εκτός των άλλων τα νηματοειδή κυανοβακτήρια (Whitton, 2012).

Σήμερα, ωστόσο, η ταξινόμηση των κυανοβακτηρίων πραγματοποιείται με βάση βιοχημικά και μορφολογικά ευρήματα σε 8 κατηγορίες, που είναι οι εξής (Whitton, 2012):

1. *Gloeobacterales*: Αποτελείται από ένα γένος (*gloeobacter*) που δεν έχει θυλακοειδή. Η φωτοσύνθεση επιτελείται στα φυκοβιλισώματα.
2. *Synechococcales*: Αποτελείται από νηματοειδείς αποικίες και από αυτόνομα κύτταρα.
3. *Oscillatoriales*: Περιέχει νηματοειδή κυανοβακτήρια, που αναπαράγονται με διχοτόμηση.
4. *Chroococcales*: Περιλαμβάνει κοκκώδη κυανοβακτήρια, που αναπαράγονται με διχοτόμηση.
5. *Pleurocapsales*: Τα είδη των κυανοβακτηρίων αναπαράγονται με διχοτόμηση του κυττάρου.
6. *Spirulinales*: Περιλαμβάνουν νηματοειδή τριχώματα.
7. *Chroococciopsidales*: Περιέχει λίγα γένη που αναπαράγονται με διχοτόμηση του κυττάρου.
8. *Nostocales*: Περιλαμβάνει νηματοειδή κυανοβακτήρια που σχηματίζουν ετερόκυτα.

## 2.3 Μορφολογία

Η μορφολογία των κυανοβακτηρίων ποικίλλει. Παρατηρούνται μονοκύτταρες μορφές που πολλαπλασιάζονται με διχοτόμηση, αλλά και νηματοειδείς μορφές που αναπαράγονται με κατακερματισμό των νηματίων. Στις νηματοειδείς μορφές τα κύτταρα συνήθως εμφανίζουν κάποιο βαθμό διαφοροποίησης και συχνά συγκρατούνται μαζί, μέσα σε έλυτρο ή σε θήκη (Whitton, 2012). Το κυτταρόπλασμα (πρωτόπλασμα) των κυανοβακτηρίων περιλαμβάνει το εξωτερικό-περιφερειακό χρωμόπλασμα και το εσωτερικό άχρωμο κεντρόπλασμα ή πυρηνόπλασμα. Το χρωμόπλασμα έχει ζελατινώδη-κολλώδη υφή με διάφορα αποθηκευτικά



σωμάτια. Σε αντίθεση με τα ευκαρυωτικά μικροφύκη δεν διαθέτουν πυρήνα και μεμβρανικά υποκυτταρικά οργανίδια (Gkelis et al., 2016).

Το περιφερειακό πρωτόπλασμα αποτελείται από θυλακοειδή με επιφανειακές δομές φυκοβιλισωμάτων και κοκκία γλυκογόνου. Περιέχει ριβοσώματα 70Sδιάχυτα σε όλο το πρωτόπλασμα, και σε μεγαλύτερη συγκέντρωση κοντά στο πυρηνόπλασμα, όπου πραγματοποιείται η πρωτεϊνοσύνθεση. Επίσης περιέχονται κοκκία κυανοφυκίνης. Δεν υπάρχουν ενδοπλασματικό δίκτυο, οργανίδιο golgi, μιτοχόνδρια και χλωροπλάστες. Υπάρχει μεγάλος αριθμός κυτταρικών εγκλείστων, που μπορεί να συμπεριλαμβάνει κοκκία γλυκογόνου, κοκκία πολύ-β-υδροξυβουτυρικού οξέος και λιποσφαιρίδια. Στο χρωμόπλασμα διατάσσονται τα θυλακοειδή σε ομόκεντρες στιβάδες, μέχρι το όριο του κεντροπλάσματος (Whitton, 2012).

Τα κυανοβακτήρια έχουν πολυεδρικά σωματίδια, τα καρβοξυσώματα, όπου δεσμεύεται ο άνθρακας και χρησιμοποιείται στον κύκλο κάλβιν της φωτοσυνθετικής διεργασίας. Στα καρβοξυσώματα περιέχεται το ένζυμο rubisco, και το ένζυμο καρβονική ανυδράση που μετασχηματίζει τα διττανθρακικά ιόντα σε διοξείδιο του άνθρακα. Τα ετερόκυτα των αζωτοδεσμευτικών βακτηρίων δεν δεσμεύουν διοξείδιο του άνθρακα γιατί δεν περιέχουν ένζυμο rubisco και καρβοξυσώματα (Whitton, 2012).

Στα γηρασμένα κυανοβακτήρια ανευρίσκονται στο κυτταρόπλασμα πολυφωσφορικά σωματίδια ή κοκκία βολουτίνης, που έχουν σφαιρικό σχήμα και αποθηκεύουν φώσφορο. Τα κοκκία πολυγλυκάνης βρίσκονται στις θυλακοειδείς μεμβράνες και περιέχουν σάκχαρα παρόμοια με την αμυλοπηκτίνη.

Το κυτταρόπλασμα περιβάλλεται από το κυτταρικό τοίχωμα, που συνίσταται από τρεις στιβάδες (Komarek, 2005):

- Την εσωτερική, που αποτελείται από πεπτιδογλυκάνες (πολυμερές σακχάρων, N-ακέτυλογλυκοζαμίνης, N-ακέτυλομουραμικού οξέος) και αμινοξέα
- Την εξωτερική, που δημιουργεί τον περιπλασμικό χώρο και περιέχει ινίδια πεπτιδογλυκάνης σε δικτυακό σχηματισμό

- Την εξώτατη, που συνιστά μια τυπική φωσφολιπιδική μεμβράνη. Σε μερικά είδη κυανοβακτηρίων περιέχει λιποπολυσακχαρίτες και πρωτεϊνικά ινίδια, που σχετίζονται με την ολισθητική κίνηση των κυττάρων (*gliding*)

Η στιβάδα πεπτιδογλυκάνης είναι παχύτερη στα κυανοβακτήρια, συγκριτικά με τα gram αρνητικά βακτήρια. Μερικά νηματοειδή κυανοβακτήρια περιέχουν βλαστικά κύτταρα, ετεροκύστες, ακινέτες. Οι ετεροκύστες έχουν παχύ κυτταρικό τοίχωμα, και παράγονται σε συνθήκες όπου το άζωτο συνιστά περιοριστικό παράγοντα αύξησης. Οι ακινέτες έχουν παχύ κυτταρικό τοίχωμα, αποθηκευτικούς χώρους αζώτου, και δημιουργούνται σε συνθήκες περιορισμού της ανάπτυξής τους (ένδεια θρεπτικών ουσιών). Οι ακινέτες επιβιώνουν μετά τον θάνατο του κυανοβακτηριακού νηματίου και μπορούν να δραστηριοποιηθούν και να βλαστήσουν όταν οι συνθήκες γίνουν ευνοϊκές (Whitton, 2012).

Στα υδρόβια κυανοβακτήρια ανευρίσκονται δομές-έγκλειστα που αποκαλούνται αεροτόπια, που περιέχουν αέρα και λειτουργούν ως πλωτήρες. Τα αεροτόπια αποτελούνται από αθροίσεις κοίλων σωλήνων-κυστιδίων αέρα που περιβάλλονται από στιβαρή μεμβράνη, διαπερατή στα αέρια. Η μεμβράνη εξισορροπεί τις πιέσεις εντός του κυστιδίου με τις πιέσεις των διαλυμένων αερίων στο περιβάλλον. Εξωτερικά είναι υδρόφιλη και εσωτερικά υδρόφοβη (Gkelis et al., 2016).

Τα αεροτόπια προσδίδουν πλευστότητα στα κύτταρα και παρεμποδίζουν την εισροή ύδατος και κυτταρικών στοιχείων. Με την επίτευξη της πλευστότητας τα κύτταρα προσλαμβάνουν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία, εντείνεται η φωτοσυνθετική διεργασία, παράγονται μεγαλύτερες ποσότητες υδατανθράκων (Whitton, 2012).

Απόρροια της πλευστότητας είναι η συσσώρευση μεγάλων μαζών κυανοβακτηρίων στην υδατική επιφάνεια με τη μορφή του φυτοπλαγκτού. Η μεγάλη κυανοβακτηριακή μάζα συχνά παγιδεύεται στην επιφάνεια του νερού. Η έκθεση στο ηλιακό φως για αυξημένη χρονική διάρκεια ωθεί στην εξάντληση των θρεπτικών υλικών και η νέκρωση των βακτηρίων απελευθερώνει τοξίνες στο υδάτινο περιβάλλον καθιστώντας το ακατάλληλο για τα υδρόβια όντα και επικίνδυνο για την ανθρώπινη ευημερία (Whitton, 2012).

Τα κυανοβακτήρια με αεροτόπια φαίνεται πως διακρίνονται σε δυο κατηγορίες (Komarek, 2005):

- Στα είδη που έχουν αεροτόπια μόνο σε ορισμένα στάδια του βιολογικού κύκλου (*tolypothrix, calothrix*)
- Στα πλαγκτονικά κυανοβακτήρια (*anabaena, phormidium, microcystis*)

Η πλευστότητα των κυανοβακτηρίων μπορεί να μειωθεί εξαιτίας καταστροφής των αεροτοπίων. Επιπλέον, η πλευστότητά τους μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η συγκέντρωση των πολυφωσφορικών κοκκίων, του γλυκογόνου. Τα κυανοβακτήρια δεν διαθέτουν μαστίγια και επομένως είναι ακίνητα. Ορισμένα είδη εμφανίζουν μια αργή, ολισθητική κίνηση. Κινητική ικανότητα διαθέτουν μερικά νηματοειδή βακτήρια (γένη *arthrospira, Oscillatoria*). Η κίνηση αφορά σε κίνηση του τριχώματος εμπρός-πίσω, εξαιτίας εκκρίσεων ή ρυθμικά επαναλαμβανόμενων διαστολών-συστολών των κυττάρων. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η ολίσθηση των κυανοβακτηρίων συνιστά αργή κίνηση και μάλιστα σε κατεύθυνση παράλληλη στον άξονα του νηματίου, το οποίο συχνά αναστρέφεται. Συχνά συνδέεται με έκκριση βλέννας (Whitton, 2012).

Υπάρχουν στοιχεία ότι τα αερόβια κυανοβακτήρια έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ζωής πάνω στη γη, στα αρχικά στάδια όταν το ελάχιστο ελεύθερο οξυγόνο που ήταν διαθέσιμο δεν επαρκούσε να υποστηρίξει τη ζωή όπως την γνωρίζουμε σήμερα. Απολιθώματα αποδεικνύουν ότι την εποχή που πρωτοεμφανίστηκαν τα κυανοβακτήρια η ατμόσφαιρα περιείχε μόνο 0,1% ελεύθερο οξυγόνο. Όταν, εκατομμύρια χρόνια μετέπειτα εμφανίστηκαν στη Γη τα οξυγονοπαραγωγά ευκαρυωτικά φυτά, η συγκέντρωση οξυγόνου ήταν πάνω από 10%. Συνεπώς, η αύξηση αυτή προέκυψε ως αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των κυανοβακτηρίων. Συγκεκριμένα, η ατμόσφαιρα με την οποία έρχεται ο άνθρωπος σε επαφή και την οποία αναπνέει στη σημερινή εποχή εμπεριέχει οξυγόνο σε ένα ποσοστό σχεδόν 20% (Whitton, 2012).

Τα κυανοβακτήρια και ιδίως οι αζωτοδεσμευτικές μορφές αυτών είναι σπουδαία στοιχεία για το περιβάλλον. Πιο αναλυτικά, καταλαμβάνουν ενδιαιτήματα που θυμίζουν /μοιάζουν με αυτά των ευκαρυωτικών αλγών. Η αζωτοδεσμευτική ικανότητα πολλών κυανοβακτηρίων τα

καθιστά καλύτερα προσαρμοσμένα σε περιβάλλοντα φτωχά σε θρεπτικά συστατικά. Τα κυανοβακτήρια διαθέτουν ευρεία οικολογική προσαρμογή που είναι η φυσική συνέπεια της εξέλιξής τους (Fay, 1983). Εμφανίζονται κατά κύριο λόγο σε υδάτινα οικοσυστήματα, όπως είναι για παράδειγμα οι λίμνες, οι θάλασσες ή οι λιμνοθάλασσες, ενώ σημαντικό είναι να αναφερθεί πως πολλά είδη παρουσιάζονται σε χερσαίο περιβάλλον.

Τα κυανοβακτήρια ανευρίσκονται στο έδαφος και στην θάλασσα, ιδιαίτερα σε χώρους με φωτισμό. Μπορούν να επιζούν σε ακραία περιβάλλοντα, όπως σε θερμές πηγές όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος ξεπερνά τους 85 °C. Πιο αναλυτικά, τα κυανοβακτήρια αναπτύσσονται συχνά σε περιοχές όπου υπάρχει γλυκό νερό, όπως επίσης και σε υπεράλυρα ύδατα ή σε θάλασσες, ωκεανούς, ακόμη και σε ιζήματα που μπορεί να δημιουργηθούν σε παράκτια σημεία. Επιπροσθέτως, μπορεί να παρουσιαστούν σε ξηρά εδάφη ή σε σπήλαια. Συγκεκριμένα, τα κυανοβακτήρια παρουσιάζονται συχνά ως οργανισμοί που συμβιώνουν με άλλους ζώντες οργανισμούς, όπως είναι για παράδειγμα η περίπτωση του *Rhizosolenia*, η συμβίωση στις ρίζες του *Cycas*, καθώς και στα φύλλα του *Azolla*. Τα κυανοβακτήρια, μάλιστα, μπορεί να συμβιώνουν με φυτικούς οργανισμούς, όπως είναι οι λειχήνες, τα βρυόφυτα και το αγγειόσπερμα, με μύκητες και με σπόγγους ή άλλα ασπόνδυλα είδη (Komarek, 2005).

Θεωρείται ότι οι ευκαρυωτικοί οργανισμοί αποτέλεσαν απόρροια της ενδοσυμβίωσης κυανοβακτηρίων σε αρχέγονα πρώιστα και τα εγκλεισμένα κυανοβακτήρια εξελίχθηκαν σε κυτταρικά οργανίδια. Με τη βοήθεια των μεθόδων του ριβοσωμικού RNA αυξάνονται οι γνώσεις σχετικά με τα μικρόβια που διαβιούν στους ωκεανούς. Το 1/3 των ζωντανών οργανισμών του πλανήτη αποτελούν μικρόβια που ζουν στο βυθό των ωκεανών. Τα μικρόβια αυτά παράγουν μεγάλες ποσότητες μεθανίου. Στα ανώτερα ηλιόλουστα στρώματα νερού του ωκεανού, μεγάλο μέρος του πληθυσμού αποτελείται από κυανοβακτήρια ειδικά το μονοκύτταρο γένος *Synechococcus* και το πρόσφατα αναγνωρισμένο γένος *Prochlorococcus* (Whitton, 2012).

Το τελευταίο αυτό βακτήριο είναι μικροσκοπικό με διάμετρο 0,7 μm. Μια σταγόνα θαλάσσιου ύδατος μπορεί να περιέχει έως 20.000 τέτοια βακτήρια. Ένας πληθυσμός τέτοιων βακτηρίων γεμίζει τα ανώτερα 200 μέτρα των θαλασσών και έχει τεράστια επίδραση στη ζωή στην γη. Η επιβίωση της ωκεάνιας ζωής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις μικροσκοπικές φωτοσυνθετικές μορφές ζωής, το θαλάσσιο φυτοπλαγκτόν (Whitton, 2012).

Τα κυανοβακτήρια ή αλλιώς τα φωτοσυνθετικά βακτήρια αποτελούν τη βάση της τροφικής αλυσίδας της θάλασσας. Δεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα και συνθέτουν οργανικές ενώσεις που απελευθερώνονται ως διαλυτή οργανική ύλη, και χρησιμοποιούνται από τα ετερότροφα βακτήρια του ωκεανού. Τεράστιοι πληθυσμοί του βακτηρίου *Pelagibacterubique* μεταβολίζουν τα απόβλητα των φωτοσυνθετικών πληθυσμών. Πολλά βακτηριακά είδη χρησιμεύουν ως τροφή για μια σειρά καταναλωτών αυξανόμενου μεγέθους. Μεγάλο μέρος του διοξειδίου του άνθρακα και των ανόργανων αλάτων που απελευθερώνονται από τη μεταβολική δραστηριότητα των βακτηρίων ανακυκλώνεται από το φωτοσυνθετικό φυτοπλαγκτόν. Τα κυανοβακτήρια δεσμεύουν άζωτο και διοξείδιο του άνθρακα στις σκοτεινές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης. (Pappas et al., 2020).

Οι φωτεινές αντιδράσεις της φωτοσυνθετικής διεργασίας πραγματοποιούνται εντός του συστήματος της θυλακοειδούς μεμβράνης που διακρίνει ένα κύτταρο. Διαθέτουν επίσης στο φωτοσυνθετικό τους σχεδιασμό τα φωτοσυστήματα 1 και 2, όπως τα φύκη και τους φυτικούς οργανισμούς. Επιπλέον, στα κυανοβακτήρια ανευρίσκονται πολυφωσφορικά σωμάτια με μεγάλη συσσώρευση φωσφορικών αλάτων, όπως και κενοτόπια που βοηθούν στην πλευστότητα (Gkelis et al., 2016).

Τα βασικά στοιχεία της φωτοσυνθετικής διαδικασίας των κυανοβακτηρίων περιλαμβάνουν τη χλωροφύλλη-α και τις φυκοβιλίνες (υδατοδιαλυτές χρωμοπρωτεΐνες) που σχηματίζουν τα φυκοβιλιώματα τα οποία συνδέονται με τις εξωτερικές μεμβράνες των θυλακοειδών. Σε μερικά κυανοβακτήρια υπάρχει επιπρόσθετα χλωροφύλλη β (*prochloron, prochlorococcus*) (Pappas et al., 2020). Οι φυκοβιλιπρωτεΐνες διατάσσονται με μορφή «βεντάλιας» στην επιφάνεια της θυλακοειδούς μεμβράνης. Η «βεντάλια» αποτελείται από 5 βραχίονες (μόρια φυκοκυανίνης και φυκοερυθρίνης) και στη βάση μόρια αλλοφυκοκυανίνης. Η διάταξη αυτή διευκολύνει τη μεταβίβαση της ηλιακής ενέργειας στην χλωροφύλλη-α, κύριο στοιχείο του φωτοσυστήματος 1 (Pappas et al., 2020).

## 2.4 Χρωστικές ουσίες κυανοβακτηρίων

Επιπρόσθετα, τα κυανοβακτήρια περιέχουν καρωτινοειδή σε μεγαλύτερη συγκέντρωση από τα ευκαρυωτικά φύκη, γεγονός που τους προσδίδει ανθεκτικότητα στην μεγάλη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα καρωτινοειδή των κυανοβακτηρίων περιέχουν τις χρωστικές

εχινέονη και μυξοξανθοφύλλη. Οι χρωστικές αυτές απορροφούν το κυανοπράσινο, το πράσινο, το κίτρινο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεταφέροντας την ενέργεια στην χλωροφύλλη-α.

Τα κυανοβακτήρια διαθέτουν τη δεξιότητα της αυτορύθμισης κατά την έκκριση των χρωστικών αυτών ουσιών, μια ικανότητα που επηρεάζεται συνήθως από την ένταση της ακτινοβολίας (χρωματική προσαρμογή). Η κυανοφυκίνη αποθηκεύεται στα κυανοβακτήρια, μέσα σε διάσπαρτα στο κυτταρόπλασμα κοκκία ποικίλων μορφών και σχημάτων (*granules*). Επίσης, η κυανοφυκίνη συνιστά αποθηκευτική μορφή αζώτου στα αζωτοδεσμευτικά βακτήρια (Gkelis et al., 2016).

## 2.5 Κυανοβακτήρια και ευτροφισμός

Έχει αποδειχθεί πως τα κυανοβακτήρια προμηθεύονται την ενέργειά τους από το φως του ήλιου και προσλαμβάνουν τον άνθρακα από το διοξείδιο του άνθρακα που βρίσκεται διαλυμένο στο ύδωρ. Αυτό υποδηλώνει πως στα περισσότερα υδάτινα περιβάλλοντα ο φωσφόρος και το άζωτο που θα μπορούσαν να διατεθούν και να προσφερθούν για τη δημιουργία και ανάπτυξη των φυκών είναι ελλιπή ή και ανεπαρκή. Και τα δυο θρεπτικά συστατικά φθάνουν στο νερό από οικιακά, αγροτικά και εργοστασιακά λύματα, όταν η επεξεργασία των τελευταίων είναι ανεπαρκής ή τελείως ανύπαρκτη. Τα επιπρόσθετα θρεπτικά στοιχεία προκαλούν υπερανάπτυξη φυκών (*algalblooms*). Δεδομένου ότι πολλά κυανοβακτήρια δεσμεύουν το οξυγόνο της ατμόσφαιρας αυτοί οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί απαιτούν ίχνη μόνο φωσφόρου, για την υπερανάπτυξη των αλγών (Gkelis et al., 2016).

Όταν ο ευτροφισμός καταλήξει σε υπερανάπτυξη φυκών ή κυανοβακτηρίων, η κατάληξη θα είναι η ίδια, όπως με την προσθήκη βιοαποικοδομήσιμης οργανικής ύλης στο νερό. Βραχυπρόθεσμα τα κυανοβακτήρια παράγουν οξυγόνο. Τελικά όμως πεθαίνουν και αποικοδομούνται. Κατά τη διάρκεια της αποικοδόμησής τους καταναλώνεται το οξυγόνο του νερού με αποτέλεσμα το θάνατο των ψαριών από ασφυξία. Αυτό το είδος υπερανάπτυξης προκαλεί ευτροφισμό και ενέχει κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία. Ο ευτροφισμός αποτελεί απόρροια της προσθήκης φυσικών θρεπτικών στοιχείων ή της μόλυνσης του νερού (Gkelis et al., 2016).

## 2.6 Μεταβολισμός και αύξηση των κυανοβακτηρίων

Με βάση τις μεταβολικές τους λειτουργίες, τα κυανοβακτήρια διακρίνονται σε:

- Υποχρεωτικά φωτοαυτότροφα

Πραγματοποιούν φωτοσύνθεση και αναπτύσσονται μόνο με την ύπαρξη φωτός προσλαμβάνοντας ανόργανο άνθρακα από το διοξείδιο του άνθρακα.

- Προαιρετικά χημειοετερότροφα

Επιτελούν φωτοσύνθεση με την χρήση διοξειδίου του άνθρακα και φωτός. Μπορούν να αναπτύσσονται και στο σκοτάδι με την χρήση οργανικής πηγής άνθρακα (γλυκόζη, φρουκτόζη). Χρησιμοποιούν την οδό των φωσφορικών πεντοζών για την παραγωγή ενέργειας. Αντίθετα ο κύκλος του *krebs* είναι ατελής εξαιτίας της έλλειψης ενζύμων. Η οδός των φωσφορικών πεντοζών δεν λειτουργεί σε φωτεινό περιβάλλον.

- Φωτοετερότροφα

Επιτελούν φωτοσύνθεση και χρησιμοποιούν οργανικές πηγές άνθρακα. Στο σκοτάδι είναι αδύνατη η πρόσληψη άνθρακα. Η ανάπτυξη των κυανοβακτηρίων σε σκοτεινό περιβάλλον είναι βραδεία εξαιτίας της μικρής παροχής ενέργειας από την οδό των φωσφορικών πεντοζών (Gkelis et al., 2016).

## 2.7 Συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξη κυανοβακτηρίων

Τα κυανοβακτήρια διαβιώνουν σε υδάτινα και σε χερσαία περιβάλλοντα. Περισσότερο άφθονα απαντούν σε υδάτινο περιβάλλον και επιτελούν φωτοσύνθεση. Ανευρίσκονται σε λίμνες, ποτάμια, σε παράκτιες και ωκεάνιες περιοχές, σε θερμοπηγές. Συνιστούν κύριο στοιχείο του φυτοπλαγκτόν των θαλασσών και των λιμνών. Ανευρίσκονται σε υπεραλμυρές λίμνες, στην Αρκτική και στην Ανταρκτική, σε παγετώνες, σε σπήλαια. Στις ψυχρές θάλασσες κυριαρχούν τα ψυχότροφα κυανοβακτήρια, που είναι ανθεκτικά και αναπτύσσονται στον κρύο χειμώνα (Amos & Qiang, 2013).

Στο περιβάλλον των λιμνών απαντούν τα είδη *microcystis*, *lyngbya*, *Oscillatoria*, *anabaena*, *aphanizomenon* τα οποία αναπτύσσονται έντονα στο τέλος του καλοκαιριού και το φθινόπωρο, καθώς ευνοούνται από παράγοντες όπως (Amos & Qiang, 2013):

- Η υψηλή θερμοκρασία που ευνοεί το μεταβολισμό τους
- Η αποδοτικότερη φωτοσυνθετική λειτουργία
- Η ικανότητα δέσμευσης των θρεπτικών ουσιών
- Η ικανότητα αυτορύθμισης της πλευστότητας

Στο φυτοπλαγκτόν των λιμνών απαντούν συνήθως μονοκύτταρα κυανοβακτήρια (π.χ. *synechococcus*). Στις παραλίες τα κυανοβακτήρια δημιουργούν μια μεμβράνη (γλίτσα) στην επιφάνεια των βράχων και η θέση τους προσδιορίζεται από υφαλοστρακόδερμα και από θαλάσσιους λειχήνες. Στο παράκτιο περιβάλλον κυανοβακτήρια απαντούν στην επιφάνεια των βράχων. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη παρατηρείται σε ασβεστολιθικούς συνήθως βράχους. Η πλειοψηφία των βακτηρίων της παράκτιας ζώνης αποτελεί τα αζωτοδεσμευτικά (Amos & Qiang, 2013).

Στις τροπικές θάλασσες αναπτύσσονται αποικίες του κυανοβακτηρίου *Hyella*spp. Μερικά είδη διαβιώνουν σε χερσαία περιβάλλοντα (αμμώδεις εκτάσεις, άγονα εδάφη, βράχια) και συμβάλλουν στην ανακύκλωση των θρεπτικών ουσιών. Τα κυανοβακτήρια ανευρίσκονται στους ωκεανούς, και ευθύνονται για την ωκεάνια φωτοσυνθετική δραστηριότητα. Τα ωκεάνια κυανοβακτήρια συνήθως ανήκουν στο πικοφυτοπλαγκτόν και αποτελούνται από κοκκώδη κύτταρα του γένους *Prochlorococcus*. Επίσης στο ωκεάνιο οικοσύστημα ανευρίσκεται το κυανοβακτήριο *trichodesmium* (Amos & Qiang, 2013).

Έχει διαπιστωθεί η παρουσία τουλάχιστο 100.000 κυττάρων *Prochlorococcus/ml* ωκεάνιου ύδατος σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές στην περίοδο των ανθίσεων. Το 5% της φωτοσυνθετικής παραγωγής διεθνώς αποδίδεται στο κυανοβακτήριο των ωκεανών *Prochlorococcus* (Amos & Qiang, 2013). Έχει παρατηρηθεί αυξημένη συγκέντρωση του πικοφυτοπλαγκτόν στην ευφωτική ζώνη ιδιαίτερα στις κατώτερες στιβάδες της, καθώς εκεί ανευρίσκονται περισσότερα θρεπτικά στοιχεία. Η φωτοχρωστική φυκοερυθρίνη μπορεί να απορροφήσει το μπλε-πράσινο μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εισέρχεται σε μεγάλο βάθος στον ωκεανό (Amos & Qiang, 2013).

Το κυανοβακτήριο *trichodesmium* αποτελεί νηματοειδές, αζωτοδεσμευτικό κυανοβακτήριο, βασικό συστατικό του ωκεάνιου φυτοπλαγκτού. Απαντά κυρίως σε τροπικές θάλασσες



δημιουργώντας χρωματισμό στην επιφάνεια των υδάτων. Επιπλέον εξαιτίας των αεροτοπίων που διαθέτει. Η αναλογία αεροτοπίων-κυτταρικής μάζας καθορίζει τη δυνατότητα πλεύσης των κυανοβακτηρίων στα θαλάσσια οικοσυστήματα (Amos & Qiang, 2013). Μορφολογικά διακρίνεται μάζα νηματίων από όπου παράγεται και εκκρίνεται βλέννα. Ως αζωτοδεσμευτικό βακτήριο δεσμεύει 1,3 mg αέριο άζωτο/το τετραγωνικό μέτρο/ημέρα.

Στην θάλασσα της Καραϊβικής το κυανοβακτήριο *trichodesmium* ευθύνεται για το 20% των φωτοσυνθετικής παραγωγής. Στην Αυστραλία και στην Ερυθρά Θάλασσα (*Redsea*) παρατηρούνται ανθίσεις του *trichodesmium* (Amos & Qiang, 2013). Επίσης, κυανοβακτήρια ανευρίσκονται σε θερμές πηγές (θερμοκρασίες 70-73 °C) με αλκαλικό pH. Τα θερμοφιλα κυανοβακτήρια (*Synechococcuslividus*) έχουν βέλτιστη θερμοκρασία 60 °C και μέγιστη 73 °C. Τα κυανοβακτήρια αναπτύσσονται στις θερμές πηγές με τη μορφή στρώσεων. Σε όξινες πηγές δεν παρατηρούνται κυανοβακτήρια. Η ανάπτυξη των θερμοφίλων κυανοβακτηρίων αναστέλλεται σε θερμοκρασίες μικρότερες από 54 °C (Amos & Qiang, 2013).

Στο εδαφικό περιβάλλον αναπτύσσονται επίσης κυανοβακτήρια, ως συστατικό της χλωρίδας του χώματος. Στο έδαφος παίζουν σημαντικό ρόλο στην ύγρανση, στη λίπανση με άζωτο, στην παροχή αυξητικών ουσιών στα φυτά, στην παρεμπόδιση της διάβρωσης (Amos & Qiang, 2013). Αξιοσημείωτη είναι η δυνατότητα διατήρησης ή επιβίωσης των κυανοβακτηρίων σε συνθήκες αντίξοες με τη μορφή της λαθροβίωσης (ανυδροβίωσης και κρυπτοβίωσης).

Στην ανυδροβίωση το κυανοβακτήριο επιβιώνει παρά την παρατεταμένη αφυδάτωσή του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το βακτήριο *Nostoc* που επιβιώνει μακροχρόνια στον ξηρό αέρα. Στην κρυπτοβίωση αναφερόμαστε στα μικροσκοπικά κυανοβακτήρια που φωτοσυνθέτουν και δεσμεύουν αέριο άζωτο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι κρυπτοβιωτικοί επίπαγοι σε έρημες εκτάσεις με ελάχιστη υγρασία. Στην περίπτωση αυτή τα κυανοβακτήρια παράγουν μια προστατευτική ουσία απέναντι στην υπεριώδη ακτινοβολία, τη σκυτονεμίνη (Amos & Qiang, 2013).

Η υψηλή θερμοκρασία, η αφθονία θρεπτικών ουσιών, οι αναγωγικές συνθήκες του εδάφους, συμβάλλουν στην ανάπτυξη των κυανοβακτηρίων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως τα κυανοβακτήρια είναι ανθεκτικά σε μεταβολές της αλατότητας του περιβάλλοντος και αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ικανότητας της σύνθεσης ενδοκυττάρων ωσμωλυτών (τρεχαλόζη,

γλυκοσιλγλυκερόλη) που βοηθούν στην αντιστάθμιση της οσμωτικής πίεσης (Amos & Qiang, 2013).

Η άνθιση των κυανοβακτηρίων επιτυγχάνεται με ευκολία στις αποθήκες ύδατος που διαθέτουν επαρκείς συσσωρεύσεις ανόργανων θρεπτικών στοιχείων, όπως είναι για παράδειγμα το άζωτο και ο φωσφόρος. Παράλληλα, παρατηρείται πως η θερμοκρασία του ύδατος κυμαίνεται κατά κανόνα από 15 έως 30°C και το *pH* βρίσκεται συνήθως μεταξύ του 6 και 9. Οι κυανοβακτηριακές ανθίσεις ή αλλιώς τα λεγόμενα *blooms* αναπτύσσονται κατά κύριο λόγο κατά τα τέλη του θέρους ή στις αρχές του φθινοπώρου και εμφανίζονται συχνότερα σε ευτροφικά ή υπερευτροφικά περιβάλλοντα με υδάτινη συγκέντρωση (Amos & Qiang, 2013).

Επιπλέον, οι διαταραγμένες και αυξημένες ροές δε φαίνεται να ευνοούν τη δημιουργία των κυανοβακτηρίων, εφόσον επιδρούν αρνητικά στην ικανότητα του οργανισμού να παραμείνει σταθερά σε ένα συγκεκριμένο βάθος. Από την άλλη μεριά, οι έντονες βροχοπτώσεις και οι συχνές καταιγίδες μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλότερα επίπεδα των θρεπτικών στοιχείων του ύδατος, με συνέπεια να αναπτύσσεται πιο εύκολα η άνθιση των κυανοβακτηρίων (Amos & Qiang, 2013).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΚΥΑΝΟΤΟΞΙΝΕΣ

### 3.1 Εισαγωγή

Μερικές φορές παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση κυανοβακτηρίων σε επιφάνειες λιμνών και θαλασσών με τη μορφή πράσινων κόκκων, που παράγουν και εκλύουν τοξίνες, αποκαλούμενες κυανοτοξίνες. Οι μεγάλες συγκεντρώσεις των κυανοβακτηρίων αναφέρονται συχνά ως ανθίσεις ύδατος ή αλλιώς *waterblooms* και διακρίνονται από πολλαπλό αριθμό κυττάρων που είναι διάσπαρτα στο υδάτινο περιβάλλον, καθώς και από τη δημιουργία στρωμάτων που αποτελούνται από απόβλητες και ακάθαρτες ουσίες στην επιφάνεια του υδάτινου περιβάλλοντος (Abed et al., 2011).

Πιο αναλυτικά, παρατηρούνται μερικά είδη κυανοβακτηρίων που εκκρίνουν συγκεκριμένες οσμές κατά την ομαλή εξελικτικής τους πορεία. Οι οσμές αυτές δε συσχετίζονται πάντοτε με την τοξική ιδιότητα των κυανοβακτηρίων, όμως μπορεί να υποδηλώσουν την παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων των κυανοβακτηρίων αυτών. Επιπλέον, οι μαζικές συγκεντρώσεις των κυανοβακτηρίων ευθύνονται κατά κύριο λόγο από πλαγκτικές μορφές και εντοπίζονται συνήθως σε ευτροφικά ύδατα, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις βενθικών στρωμάτων σε λιγότερο τροφικά ύδατα που συνδέονται με εμπόδια και διαταραχές του ευρύτερου οικοσυστήματος (Abed et al., 2011).

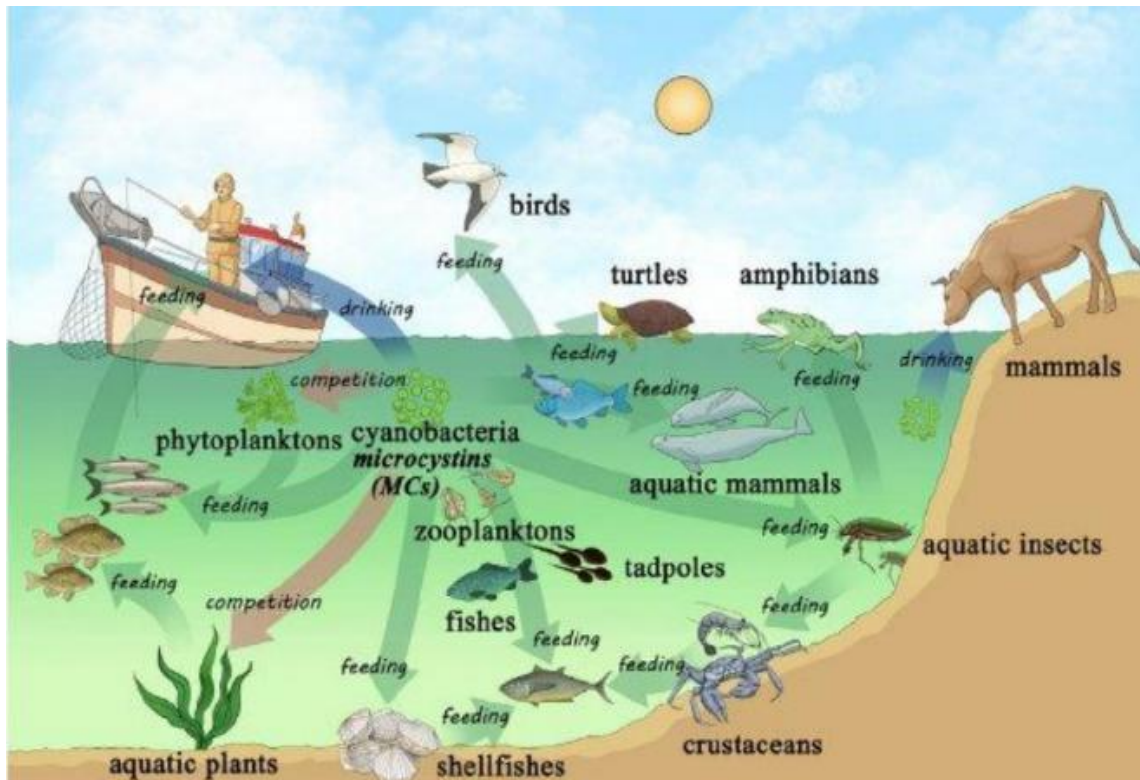
Έχουν αναγνωριστεί απειλητικές για την προστασία και διατήρηση του φυσικού –υδάτινου περιβάλλοντος κυανοβακτηριακές ανθίσεις, οι οποίες καλούνται *CyanoHABs* και είναι συχνά υπεύθυνες για τη μειωμένη ποιότητα των υδάτινων οικοσυστημάτων σε γλυκά ή αλμυρά ύδατα. Οι συγκεντρώσεις των επιβλαβών αυτών κυανοβακτηριακών ανθίσεων μπορούν να μολύνουν το πόσιμο νερό, ενώ συχνά επιδρούν αρνητικά στη διαδικασία της άρδευσης ή της αλιείας και γενικότερα επηρεάζουν και απειλούν την ευημερία ή την αναψυχή των ανθρώπων. Η επικινδυνότητα αυτή στηρίζεται στην έκκριση των βλαβερών μεταβολιτών που καλούνται κυανοτοξίνες και που συμπεριλαμβάνουν εκτός των άλλων τις μικροκυστίνες, τις σαξιτοξίνες και άλλες νευροτοξίνες (Gkelis et al., 2016).

Τα κυανοβακτήρια, που παράγουν κυανοτοξίνες, πολλαπλασιάζονται και μεταφέρονται στα θαλάσσια οικοσυστήματα και στο πόσιμο νερό (Abed et al., 2011). Βασικός παράγοντας επιπολασμού των κυανοβακτηρίων είναι ο ευτροφισμός των επιφανειακών υδάτων (Paerl & Millie, 1996). Η μελέτη του επιπολασμού των κυανοβακτηρίων έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς αρκετά είδη παράγουν και εκκρίνουν στο περιβάλλον τοξίνες (κυανοτοξίνες) (Carmichael, 1994).

Ορισμένα μάλιστα είδη από τα γένη των *Oscillatoria*, *microcystis* και *anabaena* αναπτύσσονται ραγδαία σε εύτροφα ύδατα και σχηματίζουν τις ανθίσεις του φυτοπλαγκτού. Οι ανθίσεις αυτές καταναλώνουν το οξυγόνο που έχει διαλυθεί εντός του υδάτινου περιεχομένου και επιφέρουν ασφυξία ή θάνατο στα ψάρια. Ορισμένα είδη κυανοβακτηρίων παράγουν τοξίνες που καθιστούν ακατάλληλο το νερό για βιολογική χρήση (Amos & Qiang, 2013).

Τα κυριότερα είδη τοξικών κυανοβακτηρίων συμπεριλαμβάνουν τα εξής:

- *Cylindrospermopsis*
- *Anabaena*
- *Lyngbya*
- *Oscillatoria*
- *Aphanizomenon*
- *Planktothrix*
- *Nostoc*
- *Microcystis*



Εικόνα 2. Η είσοδος των κυανοτοξινών στην τροφική αλυσίδα

Πηγή: Amos&Qiang, 2013

Τα κυανοβακτήρια εκκρίνουν ένα γενικευμένο φάσμα τοξικών ενώσεων, που αποτελούν δευτερογενείς μεταβολίτες. Παρατηρείται μάλιστα πως δεν αξιοποιούνται από τον οργανισμό κατά την πρωτογενή διαδικασία του μεταβολισμού, ενώ συνήθως αναπτύσσονται για δευτερεύον ή βοηθητικό λόγο. Επιπλέον, φαίνεται πως οι τοξίνες που περιέχουν τα κυανοβακτήρια εμφανίζονται άλλοτε συνδεδεμένες με την μεμβράνη του κυττάρου και άλλοτε σε ελεύθερη διάχυση εντός του κυττάρου. Η πλειονότητα των τοξινών που παράγονται παρατηρείται σε ελεύθερη φάση παρά σε προσκόλληση στη μεμβράνη των κυττάρων, που καθώς αναπτύσσονται και περνούν στην περίοδο γήρανσης, καταστρέφονται και ελευθερώνουν το κυτταρικό περιεχόμενο που εμπεριέχει τις τοξίνες. Βέβαια, αυτό δε σημαίνει πως δεν παρουσιάζονται συγκεντρώσεις τοξινών σε νεαρά κύτταρα (Amos & Qiang, 2013).

Τα κυανοβακτήρια ανταγωνίζονται τα υπόλοιπα είδη οργανισμών του φυτοπλαγκτόν και ορισμένα από αυτά μπορούν να παράγουν και να εκκρίνουν μικροκυστίνες, που είναι επιβλαβείς για τους υδρόβιους οργανισμούς (οστρακοειδή, καρκινοειδή, ψάρια). Οι

μικροκυστίνες εισέρχονται τόσο στην τροφική αλυσίδα (βλ. Εικόνα 2) όσο και στο πόσιμο ύδωρ και ενδέχεται να επιφέρουν απειλητικές επιπτώσεις για την υγεία και ευημερία του ανθρώπου (Amos & Qiang, 2013).

### 3.2 Οι κυανοτοξίνες

Τα κυανοβακτήρια αποτελούν προκαρυωτικές μορφές που μπορούν να εντοπιστούν σε διάφορες περιοχές παγκοσμίως. Είναι οργανισμοί που έχουν την ικανότητα να ευδοκιμούν και να αναπτύσσονται σε διαφορετικούς περιβάλλοντες χώρους, όπως για παράδειγμα σε παράκτιες περιοχές στην Ανταρκτική, σε πηγές αυξημένης θερμοκρασίας, σε σπήλαια, ηφαίστεια και διάφορα άλλα περιβάλλοντα όπου δεν είναι εύκολο να επιβιώσουν άλλοι οργανισμοί. Επομένως, το ζήτημα της άνθισης των κυανοβακτηρίων δε θεωρείται πρόβλημα σε τοπικό αλλά σε παγκόσμιο επίπεδο. Μάλιστα, το πιο συχνά εμφανιζόμενο γένος κυανοβακτηρίων αποτελεί το *Microcystis*, ενώ γενικότερα οι μικροκυστίνες αποτελούν τις πιο συνηθισμένες μορφές κυανοτοξινών που εμφανίζονται σε υδάτινα περιβάλλοντα, από όπου συλλέγεται το πόσιμο νερό (Amos & Qiang, 2013). Η ύπαρξη και η συνεχής συσσώρευση των μικροκυστινών στο υδάτινο περιβάλλον ενδέχεται να επιφέρει ισχυρές βλάβες και προβλήματα στην υγεία και ευημερία των ανθρώπων, ενώ μπορεί να οδηγήσει μέχρι και στο θάνατο (Berg et al., 2002).

Οι κυανοτοξίνες αποτελούν ένα είδος βιοτοξινών. Πρόκειται για μορφές που αναπτύσσονται μέσω των κυανοβακτηρίων και εμφανίζουν τοξικές ιδιότητες (Amos & Qiang, 2013). Οι κυανοτοξίνες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τα συμπτώματα που προκαλούν στους ανθρώπους και τα σπονδυλωτά που προσβάλλουν. Μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες κυανοτοξίνες (βλ. Πίνακα 1), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3 που ακολουθεί:

- Ηπατοτοξίνες (προσβάλλουν το ήπαρ)
- Κυτοτοξίνες (προκαλούν καταστροφή των κυττάρων)
- Νευροτοξίνες (προκαλούν βλάβη ή καταστροφή των νευρικών ιστών)
- Δερματοτοξίνες (προκαλούν κόπωση, ατονία, θαμπό δέρμα κ.ά.)

**Πίνακας 1.** Είδη κυανοτοξινών και οι συνηθέστερες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

<b>Είδη κυανοτοξινών</b>	<b>Παραδείγματα</b>	<b>Επιπτώσεις</b>
ηπατοτοξίνες	μικροκυστίνη, νοντουλαρίνη, κυλινδροσπερμοψίνη	βλάπτουν το συκώτι
κυτοτοξίνες	κυτοτοξίνη-K	προκαλούν βλάβες στις κυτταρικές μεμβράνες, καταστρέφουν τα κύτταρα, προκαλούν διάρροια, εμέτους, αφυδάτωση και πυρετό
νευροτοξίνες	σαξιτοξίνη,  ανατοξίνη-α, ανατοξίνη-α (S)	προκαλεί παραλυτική δηλητηρίαση από οστρακοειδή, προκαλούν τροφική δηλητηρίαση και θάνατο,  καταστρέφουν το νευρικό ιστό, προκαλώντας νευροτοξικότητα
δερματοτοξίνες ή δερμοτοξίνες	τοξίνη T2, κανθαριδίνη, στεριγματοκυστίνη κ.ά.	προκαλούν βλάβες στο δέρμα και τους βλεννογόνους, οδηγώντας σταδιακά σε νέκρωση των ιστών



Εικόνα 3. Ενώσεις συνηθέστερων κυανοτοξινών

Πηγή: Amos & Qiang, 2013

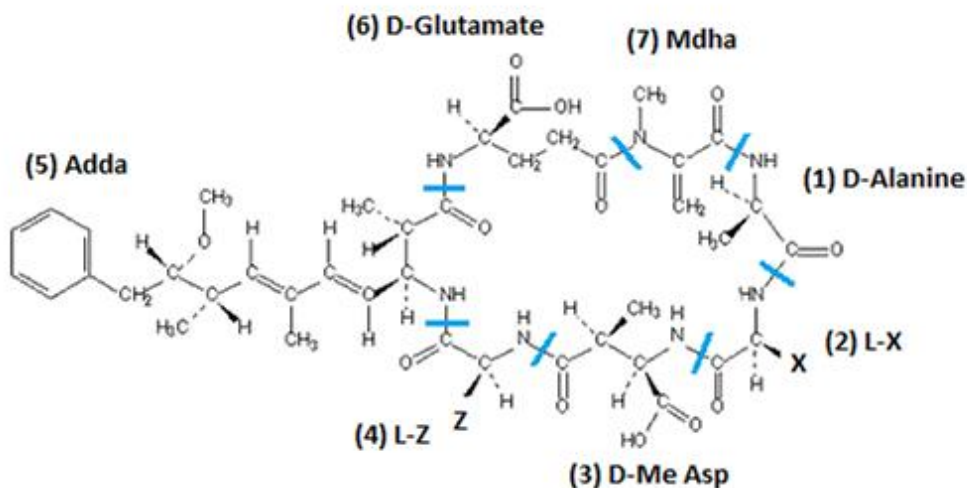
Αφενός οι ηπατοτοξίνες και αφετέρου οι νευροτοξίνες έχει παρατηρηθεί πως εκκρίνονται από βακτήρια, τα οποία εντοπίζονται κατά κύριο λόγο σε επιφανειακά υδάτινα περιβάλλοντα και επομένως αποτελούν σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση και την ποιότητα του υδάτινου χώρου και κατ' επέκταση του πόσιμου νερού που θα καταλήξει στην ανθρώπινη κατανάλωση ή την ενυδάτωση άλλων ζώντων οργανισμών (Amos & Qiang, 2013). Επιπρόσθετα, οι κυανοτοξίνες μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη χημική τους σύσταση σε τρεις ομάδες, τους λιποπολυσακχαρίτες, τα κυκλικά πεπτίδια ή τα αλκαλοειδή (Berg et al., 2002).



- **Μικροκυστίνες και νοντουλαρίνες**

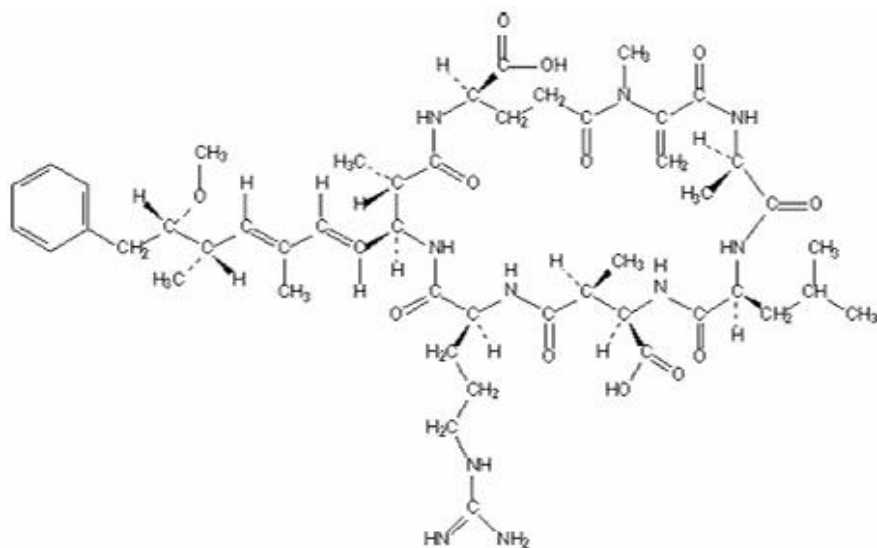
Κρίνεται σημαντικό να γίνει λόγος για τις μικροκυστίνες και τις νοντουλαρίνες, που εμφανίζονται με τη μεγαλύτερη συχνότητα σε παγκόσμιο επίπεδο στο σύνολο των τοξινών που παράγουν τα κυανοβακτήρια σε φάσεις άνθισης τόσο στα γλυκά όσο και στα υφάλμυρα υδάτινα οικοσυστήματα (Paradimitriou et al., 2010). Πρόκειται για κυκλικά πεπτίδια που διαθέτουν ηπατοτοξικές ιδιότητες. Πιο αναλυτικά, οι μικροκυστίνες εκκρίνονται συνήθως από τις πλαγκτονικές μορφές μεταξύ των γενών *Nostoc*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Microcystis*, *Anabaenopsis* και *Planktothrix*, ενώ μπορεί να παράγονται και από το γένος *Harpalosiphon* που ανιχνεύεται κυρίως στο ξηρό έδαφος.

Από την άλλη μεριά, οι νοντουλαρίνες εκκρίνονται κατά κανόνα από το είδος *Nodulariaspumigena* ή από το θαλάσσιο σπόγγο *Theonellaswinhoei* (Berg et al., 2002). Πιο αναλυτικά, οι μικροκυστίνες αποτελούν μονοκυκλικές ηπατοτοξικές ενώσεις που σχηματίζονται από επτά πεπτίδια, τα οποία συνάπτουν σχέσεις με αμινοξέα. Για πρώτη φορά το 1959, λήφθηκε δείγμα τους από το γένος *Microcystis Aeruginosa* με ενέργειες και προσπάθειες των Bishop και Anet & Gorham (Berg et al., 2002). Η συνηθέστερη εμφάνιση των μικροκυστινών απεικονίζεται στην Εικόνα 4 που ακολουθεί, ενώ σημαντικές είναι και οι δομές της μικροκυστίνης LR και RR που παρουσιάζονται αντίστοιχα στις Εικόνες 5 και 6.



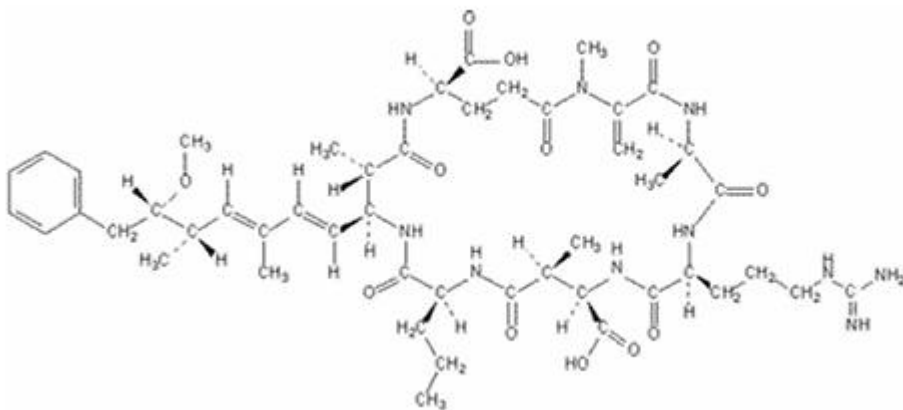
Εικόνα 4. Συνηθισμένη απεικόνιση των ενώσεων των μικροκυστινών

Πηγή: Berg et al., 2002



Εικόνα 5. Χημική δομή της μικροκυστίνης LR

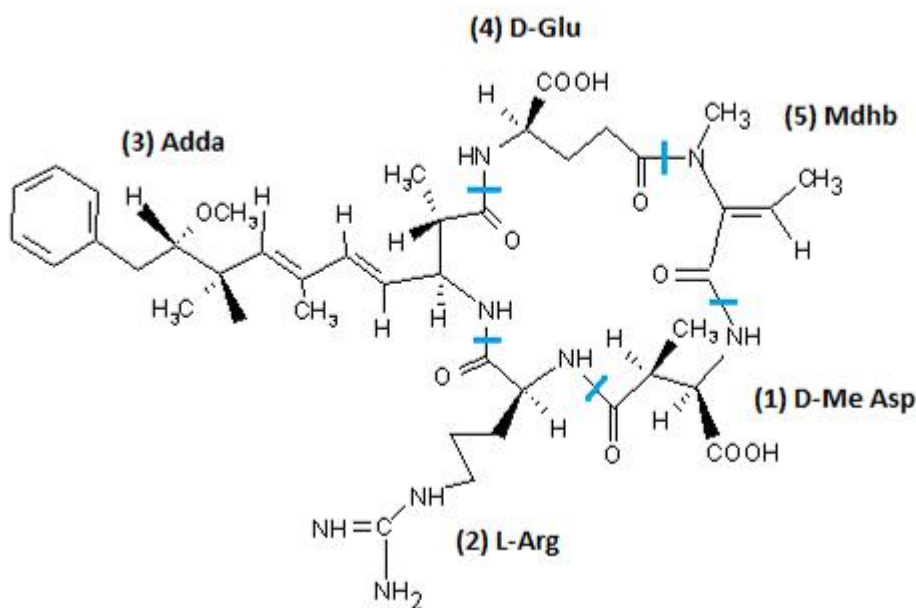
Πηγή: Berget al., 2002



Εικόνα 6. Χημική δομή της μικροκυστίνης RR

Πηγή: Bergetal., 2002

Από την άλλη πλευρά, οι νοντουλαρίνες αποτελούν κυκλικά πολυπεπίδια, τα οποία σχηματίζονται συγκεκριμένα από πέντε πεπίδια και η συνηθέστερη χημική δομή τους είναι η *cyclo (DMeAsp1Z2Adda3Dglutamate4Mdhb5* όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7 (Berg et al., 2002).



Εικόνα 7. Χημική δομή Νοντουλαρίνης

Πηγή: Berg et al., 2002

Πιο αναλυτικά, οι μικροκυστίνες αποδομούνται και διαλύονται στους υδάτινους χώρους, αλλά ενδέχεται να εμφανίσουν μια περίοδο αναβολής ή καθυστέρησης προτού πραγματοποιηθεί η βασική διαδικασία της αποικοδόμησής τους. Από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί με παρατήρηση και παρακολούθηση της δράσης της μικροκυστίνης LR έχει βρεθεί πως ο χρόνος της ζωής της κατά μέσο όρο στο υδάτινο περιβάλλον δεν ξεπερνάει την εβδομάδα (Berg et al., 2002). Μάλιστα, οι μικροκυστίνες παρουσιάζουν σταθερή δομή και σύσταση σε αυξημένες θερμοκρασίες και δεν είναι εύκολο να εμφανίσουν το φαινόμενο της μετουσίωσης κατά το βρασμό τους. Όταν οι τοξίνες αυτές απομακρύνονται από το υδάτινο περιβάλλον, εκτελείται μια διαδικασία που πραγματοποιείται μέσω της βιοαποικοδόμησης αλλά και της φωτόλυσης (Amos & Qiang, 2013).

Η διαρκής έκθεση στις μικροκυστίνες, κυρίως λόγω της πρόσληψής τους από τον οργανισμό μέσω της κατανάλωσης του πόσιμου ύδατος, μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή και μη αναστρέψιμη ηπατική βλάβη. Επιπλέον, εμφανίζονται ενδείξεις και υποθέσεις που ενισχύουν τη δημιουργία όγκων και μορφών καρκίνου. Αντιθέτως, υπάρχουν και άλλες μελέτες σε παγκόσμιο επίπεδο που έχουν πραγματοποιηθεί σε πληθυσμούς ποντικών και δεν έχουν καταλήξει στα αντίστοιχα αποτελέσματα. Δεν έχουν αποδείξει ουσιαστικά πως η συνεχής έκθεση στις μικροκυστίνες μπορεί να επιφέρει την ανάπτυξη καρκίνων, τερατογένεσης, απώλειας της ζωής των εμβρύων ή καθυστερημένη ανάπτυξη των εμβρύων, όπως επίσης και χαμηλά επίπεδα γονιμότητας (Paradimitriou et al., 2010).

Παράλληλα, η τοξικότητα που εκδηλώνουν οι μικροκυστίνες και οι νοντουλαρίνες στους ζώντες οργανισμούς που έχουν μελετηθεί έως σήμερα φαίνεται πως ευθύνεται στην ικανότητα που οι ίδιες διαθέτουν να δημιουργούν ισχυρές συνάψεις με ορισμένα ένζυμα του κυττάρου, που καλούνται πρωτεϊνικές φωσφατάσες. Επίσης, οι μικροκυστίνες παρουσιάζουν κυρίως ηπατοτοξική δράση. Μπορεί να οδηγήσουν σε διάσπαση /διάλυση του σχηματισμού των ηπατικών κυττάρων, σε υπερδιόγκωση ή υπερβολική αύξηση στο βάρος του ήπατος εξαιτίας της αιμορραγίας που προκαλούν, ενώ σταδιακά καταλήγουν σε καρδιακή ανεπάρκεια ή και θάνατο. Συχνά επηρεάζουν και τους νεφρούς ή το αναπνευστικό σύστημα και ιδίως τους πνεύμονες (Berg et al., 2002).

Οι νοντουλαρίνες, από την άλλη μεριά, μπορεί να επιφέρουν πιο ήπιες περιπτώσεις δηλητηρίασης σε ανθρώπους και άλλους ζώντες οργανισμούς. Η ευρύτερη δράση των νοντουλαρίνων θυμίζει εκείνη των μικροκυστινών και μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή των ηπατικών κυττάρων, νέκρωση και εσωτερική αιμορραγία. Η νοντουλαρίνη αναστέλλει τη λειτουργία των πρωτεϊνικών φωσφατασών (Berg et al., 2002).

Σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί πως η απώλεια της ζωής που μπορεί να προκληθεί από την παρουσία των ηπατοτοξινών επέρχεται συνήθως έπειτα από μερικές ημέρες, ενώ υπάρχουν και αναφορές για «ξαφνικό θάνατο». Το διάστημα που θα χρειαστεί να περάσει για να επέλθει ο θάνατος εξαρτάται συνήθως από την έκταση του οργανισμού, τη μορφή και τη δόση της τοξίνης (Moore et al., 2011).

Σύμφωνα με τον Π.Ο.Υ. και έπειτα από συγκρίσεις των ευρημάτων διαφόρων ερευνών που έχουν διεξαχθεί για τα οφέλη και τους κινδύνους των κυανοτοξινών, έχει δηλώσει πως το επιτρεπόμενο όριο για τη μικροκυστίνη LR είναι 1 µg/L στη σύσταση του πόσιμου νερού. Η οδηγία αυτή έχει υιοθετηθεί από πολλά κράτη παγκοσμίως, που περιλαμβάνουν εκτός των άλλων την Νορβηγία, τη Γαλλία, την Ισπανία, την Πολωνία, την Ιαπωνία και την Τσεχία (WHO, 2004). Και η Ελλάδα έχει υιοθετήσει το όριο του Π.Ο.Υ. για το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης. Στον Καναδά βέβαια, το 1999 είχε οριστεί ως ανώτερο επιτρεπτό επίπεδο η συσσώρευση της μικροκυστίνης LR στα 1,5 µg/L στο πόσιμο νερό.

- **Νευροτοξίνες**

Οι νευροτοξίνες αποτελούν τοξίνες που μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα επιβλαβείς ή καταστροφικές για την υγεία των ανθρώπων και άλλων ζώων. Οι τοξίνες αυτές ευθύνονται για καταστροφές στο νευρικό ιστό και με αυτό τον τρόπο προκαλούν νευροτοξικότητα στους πάσχοντες οργανισμούς. Συγκεκριμένα, είναι μια ξεχωριστή και εκτεταμένη ομάδα εξωγενών παραγόντων που μπορούν να προσβάλουν το νευρολογικό σύστημα του ανθρώπου ή άλλων ζώντων οργανισμών και να επιδράσουν αρνητικά στη λειτουργικότητα του ώριμου ή του αναπτυσσόμενου νευρικού ιστού (Isbister & Kiernan, 2005).

Οι τοξίνες αυτές παρεμποδίζουν τον έλεγχο των νευρώνων σε συγκεντρώσεις των ιόντων στην κυτταρική μεμβράνη ή δυσχεραίνουν την επικοινωνία μεταξύ δύο νευρώνων μέσω της σύναψής τους. Η συνηθισμένη εικόνα από την έκθεση σε νευροτοξίνη περιλαμβάνει την τοξικότητα λόγω διέγερσης ή την απόπτωση των νευρώνων, όμως ενδέχεται να εμφανίσει και βλάβες στα νευρογλοιακά κύτταρα (Arnon et al., 2001). Σταδιακά και μακροπρόθεσμα η έκθεση στις νευροτοξίνες μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένη βλάβη του κεντρικού νευρικού συστήματος, με εκδηλώσεις διανοητικών ελλειμμάτων, απώλεια μνήμης, άνοια και επιληπτικές κρίσεις (Jevtonic-Todorovic et al., 2003).

### **3.3 Ο ρόλος των κυανοτοξινών**

Οι κυανοτοξίνες συνιστούν υψηλό ποσοστό της βιομάζας των κυανοβακτηρίων. Επιτελούν ορισμένες βιολογικές λειτουργίες όπως:

- Άμυνα-αναχαίτιση θήρευσης
- Συμβιωτικές σχέσεις
- Αλληλοπαθητική δράση (πρόκειται για τη σύνθεση κυανοτοξινών από τα κυανοβακτήρια που επηρεάζουν δυσμενώς την ανάπτυξη άλλων ειδών) (Amos & Qiang, 2013).

### 3.4. Οδοί και τρόποι έκθεσης σε κυανοτοξίνες

Οι κυριότερες μορφές ή οδοί έκθεσης του ανθρώπινου γένους στις κυανοτοξίνες περιλαμβάνουν την κατανάλωση μολυσμένου με κυανοτοξίνες ύδατος, την κατανάλωση βρώσιμων φυτών ή επιμέρους τμημάτων αυτών ή άλλων υδρόβιων οργανισμών, όπως είναι για παράδειγμα τα ψάρια, τα οποία έχουν προηγουμένως εκτεθεί και μολυνθεί με κυανοτοξίνες. Επιπρόσθετα, η άμεση δερματική επαφή με τις τοξίνες εν μέσω ψυχαγωγικών δραστηριοτήτων, μπορούν να αποτελέσουν οδούς –τρόπους έκθεσης στις κυανοτοξίνες (Drobac et al., 2013; Svirčev et al., 2017). Η έκθεση του ανθρώπου στις κυανοτοξίνες ενδέχεται να καταλήξει σε ισχυρές διαταραχές της υγείας και ευημερίας του ίδιου (Kubickovaetal., 2019; Burattietal., 2017).

Οι συνηθέστεροι οδοί και τρόποι με τους οποίους εκτίθεται κανείς στις κυανοτοξίνες είναι οι εξής (Amos & Qiang, 2013):

- Στοματική κοιλότητα (πόσιμο νερό, τροφές, συμπληρώματα διατροφής)
- Δέρμα
- Διαδικασία εισπνοής (σκόνη, αερολύματα)
- Παρεντερική οδός
- Ύδατα ψυχαγωγίας
- Ψάρια, στρείδια και θαλασσινά
- Φυτά
- Έδαφος

### 3.5 Η τοξική επίδραση των κυανοτοξινών στον άνθρωπο και στο περιβάλλον

Η επίδραση των κυανοτοξινών έχει μελετηθεί και έχει παρατηρηθεί εκδήλωση επεισοδίων τοξίνωσης και νέκρωσης σε διάφορα θηλαστικά, πτηνά και φυτά (βλ. Εικόνα 8). Στον άνθρωπο επίσης έχουν παρατηρηθεί εκδηλώσεις τοξίνωσης μετά από πόση-χρήση νερού, καθώς και θανατηφόρα συμβάντα (Falconer, 1999). Σημαντικό είναι να αναφερθεί η περίπτωση του *Caruaru* στην Βραζιλία, που οδήγησε σε θανάτους (Chorus et al., 2000). Υπάρχουν επίσης ενδείξεις ότι ορισμένες κυανοτοξίνες δρουν ως καρκινογόνα (Falconer & Humpage, 1996). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8 ακολούθως, οι κυανοτοξίνες που προσλαμβάνονται μέσω του μολυσμένου πόσιμου νερού ή μέσω της θρέψης με μολυσμένα θαλασσινά ή άλλα τρόφιμα, μπορεί να προκαλέσουν βλάβες στον εγκέφαλο, όπως για παράδειγμα πονοκεφάλους, υπνηλία και ασυντόνιστες κινήσεις, καθώς και στο πεπτικό σύστημα του ανθρώπου, με εκδήλωση κοιλιακού άλγους, ναυτίας ή εμέτου και διάρροιας ή κοιλιακής κράμπας. Η έκθεση στις κυανοτοξίνες μέσω των τροφών μπορεί επίσης να οδηγήσει σε νεφρική δυσλειτουργία ή σε φλεγμονή του ήπατος. Το νευρικό σύστημα είναι ιδιαίτερα ευάλωτο έπειτα από την έκθεση σε κυανοτοξίνες, με εμφάνιση μουδιάσματος ή καψίματος.

Επιπλέον, η έκθεση στις κυανοτοξίνες με εισπνοή ή επαφή, π.χ. μέσω της κολύμβησης, μπορεί να επιφέρει αναπνευστικές διαταραχές, με εκδήλωση συμπτωμάτων όπως βήχας, δύσπνοια, ξηρολαιμία, καθώς και άλλες δυσλειτουργίες ή επιπτώσεις στο σώμα, όπως για παράδειγμα ερεθισμό στα μάτια ή το λαιμό, εμφάνιση εξανθημάτων, πυρετού, ατονίας και άλγους στο σύστημα των μυών. Στα κατοικίδια οι επιπτώσεις από την έκθεση στις κυανοτοξίνες περιλαμβάνουν συνήθως τους εμέτους, την κόπωση, τη δύσπνοια, το βήχα, τους σπασμούς και την αναπνευστική παράλυση που μπορεί να οδηγήσει το ζώο στο θάνατο. Ωστόσο, κάθε είδος κυανοτοξίνης επιδρά διαφορετικά στον άνθρωπο και τα ζώα, ενώ στις νευροτοξίνες είναι σημαντική και η δόση της ουσίας.



Εικόνα 8. Η τοξική επίδραση των κυανοτοξινών στον άνθρωπο και τα κατοικίδια

Πηγή: Hotos, 2018

Επιπρόσθετα έχει διαπιστωθεί η μεταφορά των κυανοτοξινών στην τροφική αλυσίδα, όπως διαπιστώνεται από τη συσσώρευση κυανοβακτηριακών τοξινών σε μύδια (Yokoyama & Park, 2003), στρείδια (Ghadouani et al., 2003), αστακούς (Saker et al., 2003) και ψάρια (Magalhães et al., 2003). Ο μαζικός πολλαπλασιασμός των τοξικών κυανοβακτηρίων σχετίζεται με σημαντικό οικονομικό κόστος σε παγκόσμια κλίμακα εξαιτίας της αναγκαιότητας για την απομάκρυνση των κυανοβακτηρίων, αλλά και με αρνητικές συνέπειες στη γεωργία και την αναψυχή (Berg et al., 2002).

Μελέτη που διεξήχθη στην πόλη *Haimen* και στην επαρχιακή πόλη *Fusui* στην Κίνα, όπως επίσης και σε περιοχές της κεντρικής Σερβίας, αναδείχθηκε η παρουσία ισχυρής σχέσης μεταξύ των υψηλών συγκεντρώσεων των μικροκυστινών στο πόσιμο νερό και της ανάπτυξης πρωτογενούς καρκίνου στο ήπαρ (Amos & Qiang, 2013). Σε αντίστοιχη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Αυστραλία φάνηκε πως επηρεάστηκε η ευρύτερη λειτουργία του



ήπατος και εντοπίστηκαν χρόνιες βλάβες στο ήπαρ εξαιτίας της αυξημένης συγκέντρωσης των τοξινών που παράγουν τα κυανοβακτήρια που εντοπίστηκαν εντός του πόσιμου ύδατος (Svrcek & Smith, 2004).

Είναι λοιπόν εμφανές πως οι ανθίσεις των κυανοβακτηρίων μπορούν να αναπτύσσονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις, μαζικά και σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο, δημιουργώντας ορισμένους προβληματισμούς και ανησυχίες για τη διασφάλιση της ποιότητας των υδάτινων χώρων και για την προστασία της ανθρώπινης υγείας ή της δημόσιας υγείας. Σημαντική κρίνεται η παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των κυανοβακτηρίων στο πόσιμο νερό και γενικότερα στους ταμειυτήρες ύδατος διεθνώς (Lafarga et al., 2019).

Εξαιτίας των βλαπτικών επιδράσεων στην ανθρώπινη υγεία, η μελέτη της ύπαρξης κυανοβακτηρίων και κυανοτοξινών στα υδατικά οικοσυστήματα που σχετίζονται με την ύδρευση και την αναψυχή, έχει ιδιαίτερη αξία για την προστασία της δημόσιας υγείας και για τη διαφύλαξη του περιβάλλοντος, της πανίδας, των φυτών, των ζώων της κτηνοτροφίας. Ο Π.Ο.Υ. εστιάζει στην ανεύρεση κυανοβακτηρίων και τοξινών στα υδάτινα συστήματα, μελετώντας τη γεωγραφική κατανομή των κυανοτοξινών σε παγκόσμιο επίπεδο (βλ. Εικόνα 9), στον σχεδιασμό και στην εφαρμογή προληπτικής στρατηγικής, με σκοπό τη μεταβολή των συγκεντρώσεών τους στα οικοσυστήματα και την παρεμπόδιση εισόδου τους στην τροφική αλυσίδα (Amos & Qiang, 2013).



Εικόνα 9. Γεωγραφική κατανομή κυανοτοξινών σε διεθνές επίπεδο

Πηγή: Svrcek & Smith, 2004

Οι κίνδυνοι που απειλούν την ανθρώπινη υγεία και ευημερία και συνδέονται ή προκύπτουν από την ανάπτυξη των κυανοβακτηρίων ταξινομούνται σε υψηλή βαθμίδα ανάμεσα στα διάφορα ζητήματα που μπορεί να εμφανιστούν κατά την παροχή και διαχείριση του πόσιμου ύδατος. Το πρόβλημα αυτό προκύπτει συνήθως εξαιτίας της ευρείας έκκρισης των τοξινών των κυανοβακτηρίων. Επιπλέον, οι οδοί που είναι πιο συνηθισμένο ή εύκολο να επιτρέψουν την έκθεση στις κυανοτοξίνες περιλαμβάνουν τη στοματική κοιλότητα, το δέρμα, τη διαδικασία της εισπνοής και την παρεντερική οδό, ενώ οι τρόποι έκθεσης αναφέρονται κατά κύριο λόγο στο πόσιμο ύδωρ, σε διάφορα τρόφιμα ή συμπληρώματα διατροφής που καταναλώνονται, στη σκόνη ή σε αερολύματα, και φαίνεται πως ελέγχονται τακτικά τα τελευταία έτη. Οι τρόποι δράσης και οι τοξικότητες της κυανοτοξίνης συζητούνται για

μικροκυστίνες, οζουλαρίνες, κυλινδροσπερμοψίνη, ανατοξίνη-α και ομοανατοξίνη-α, ανατοξίνη-α(S), σαξιτοξίνες, λιποπολυσακχαρίτες και τη β-N-μεθυλαμινο-L-αλανίνη, μια τοξίνη που έχει συσχετιστεί με την εμφάνιση του Alzheimer. Πρόσφατες μελέτες έχουν αναφερθεί στην τοξίνη αυτή, καταλήγοντας σε ευρήματα που σχετίζονται με εκφυλισμό των νευρώνων και σχηματισμό β-αμυλοειδών πλακών, που ταιριάζουν με τις εκδηλώσεις της νόσου Alzheimer (Cox et al., 2016).

Παράλληλα, ο υπολογισμός /το συνάθροισμα των κατευθυντήριων επιπέδων που αναφέρονται στην ασφάλεια και προφύλαξη της υγείας των ανθρώπων έναντι των κυανοτοξινών εκτιμάται συνεχώς, με έναν ευρύτερο και διαρκή διάλογο αλλά και εκτενή έλεγχο για τις ενδεχόμενες ελλείψεις ή απώλειες γνώσεων, καθώς και για τις απαιτήσεις και ανάγκες που εντοπίζονται σε ερευνητικό επίπεδο, με σκοπό την ανάπτυξη και ενδυνάμωση των υφιστάμενων πολιτικών προστασίας (Codd et al., 2020).

Οι ανασφάλειες του κοινού αναφορικά με την έκκριση των κυανοτοξινών στο ύδωρ αλλά και σχετικά με τους διάφορους κινδύνους που μπορεί να επιφέρουν οι ίδιες στην ανθρώπινη υγεία αυξάνονται, ιδιαίτερα εξαιτίας του υψηλού ευτροφισμού που παρουσιάζεται στα υδάτινα περιβάλλοντα και στα αντίστοιχα οικοσυστήματα. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που σχετίζεται με το εν λόγω ζήτημα εστιάζει συχνά στη διερεύνηση του επιπέδου συγκέντρωσης των κυανοτοξινών στο νερό και στην εκτίμηση των επικίνδυνων συνεπειών της εκτεταμένης παρουσίας -ανάπτυξης των κυανοτοξινών στα υδάτινα οικοσυστήματα (Muluyeetal., 2023). Έχουν μάλιστα διεξαχθεί πολλαπλές σχετικές μελέτες, οι οποίες μεταξύ των ετών 1990 και 2022 έχουν καταλήξει σε ορισμένα συμπεράσματα. Έχουν εντοπιστεί 64 έρευνες που δημοσιεύθηκαν εκείνη την περίοδο (1990-2022) και έχουν ταξινομηθεί τα επί μέρους ευρήματα που υπολογίζουν τη συλλογή –συσώρευση των κυανοτοξινών σε αφρικανικά υδάτινα περιβάλλοντα.

Πιο αναλυτικά, αναφέρονται συγκεντρώσεις κυανοτοξινών σε 95 οικοσυστήματα ύδατος, εκ των οποίων τα 42 αφορούν σε ταμιευτήρες, τα 39 σε λίμνες, τα 9 σε ποτάμια, τα 5 σε παράκτιες υδάτινες περιοχές και ένα μονάχα σε κανάλι άρδευσης, που έχουν εντοπιστεί σε αφρικανικά κράτη. Παράλληλα, έχουν εμφανιστεί μικροκυστίνες στα περισσότερα υδάτινα οικοσυστήματα, σε ένα ποσοστό που ξεπερνάει το 98%. Αντίθετα, σε πολύ μικρότερο επίπεδο μεταξύ των υδάτινων συστημάτων παρουσιάζονται ανατοξίνη-α (σχεδόν 5,3%), οζουλαρίνες

(περίπου 2,1%), κυλινδροσπερμοψίνη (σχεδόν 2,1%) και β-N- μεθυλαμινο –L-αλανίνη (σε ποσοστό σχεδόν 1,1%). Επίσης, ομοανατοξίνη-α και β- N -μεθυλαμινο- L -αλανίνη παρουσιάστηκαν σε ένα μονάχα οικοσύστημα αντιστοίχως. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μικροκυστινών και οζουλαρινών αναφέρθηκαν στις λίμνες Nhlanguanzwani της Νότιας Αφρικής ( $49.410 \mu\text{gL}^{-1}$ ) και Zeekoewlei ( $347.000 \mu\text{gL}^{-1}$ ).

Οι συσσωρεύσεις μικροκυστίνης που ξεπερνούν την κατευθυντήρια γραμμή που ορίζει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας για το πόσιμο ύδωρ εφόρου ζωής ( $1 \mu\text{gL}^{-1}$ ) εκτιμήθηκαν στο 63% περίπου των υδάτινων περιοχών -συστημάτων που συμμετείχαν στη μελέτη. Το συχνότερο γένος των κυανοβακτηρίων που αναφέρεται στην έρευνα και εκκρίνει τοξίνες αποτελεί το *Microcystis* spp. (αναφέρεται σε ποσοστό περίπου 73,7%), ενώ ακολουθεί το γένος *Oscillatoria* spp. (σε ποσοστό περίπου 35,8%) και το γένος *Dolichospermum* spp. (σε ποσοστό σχεδόν 33,7%). Στην Αφρικανική Ήπειρο αναφέρθηκαν θνησιμότητα ζώων και ανθρώπινες ασθένειες που σχετίζονται με τις κυανοτοξίνες. Επομένως, είναι σημαντικό και αναγκαίο να παρακολουθείται συστηματικά και να υπολογίζεται τακτικά το ποσοστό των θρεπτικών ουσιών, των κυανοβακτηρίων αλλά και των κυανοτοξινών που εκκρίνονται και συσσωρεύονται στα αφρικανικά υδάτινα οικοσυστήματα, με ασφαλή μέθοδο για να υπάρχει σωστή ενημέρωση, πληροφόρηση, ευαισθητοποίηση και διαχείριση –έλεγχος των υδάτινων οικοσυστημάτων (Muluye et al., 2023).

### 3.5.1 Κυανοτοξίνες σε γεωργικές καλλιέργειες

Πρόσφατες μελέτες για τις κυανοτοξίνες έχουν υπογραμμίσει τη σημασία της κατανόησης της παρουσίας τους σε γεωργικές εκτάσεις, καθώς ένα σημαντικό μέρος του παγκόσμιου γλυκού νερού είναι δυνητικά μολυσμένο και χρησιμοποιείται για γεωργικές πρακτικές (Lee et al., 2021). Οι κυανοτοξίνες απελευθερώνονται στο έδαφος κυρίως με τη χρήση ή κατάποση ύδατος που έχει μολυνθεί από κυανοτοξίνες ή κυανοβακτήρια που εκκρίνουν τις τοξίνες αυτές, που συχνά χρησιμοποιούνται ως λίπασμα ή άλλους σκοπούς και ανάγκες της γεωργίας (Bouaïcha & Corbel, 2016; Corbel et al., 2022).

Η παρατεταμένη ανάπτυξη και παρουσία των κυανοτοξινών σε γεωργικές περιοχές ενδέχεται να επιφέρει σοβαρούς κινδύνους, εξαιτίας της επιμονής των τοξικών ουσιών (Corbel et al., 2014). Η κατάσταση αυτή μπορεί να καταλήξει σε αρνητικές και επικίνδυνες επιπτώσεις τόσο

στην αποδοτικότητα και παραγωγικότητα των γεωργικών εκτάσεων ή των καλλιεργειών όσο και στην ποιότητα των αγαθών που καλλιεργούνται –παράγονται και στη συγκέντρωση των κυανοτοξινών στη διαδοχική σειρά της αντίστοιχης τροφικής αλυσίδας. Επιπλέον, όταν το πότισμα στις καλλιέργειες αφορά σε μολυσμένο ύδωρ, είναι πολύ πιθανό να αναπτυχθούν και να αυξηθούν οι κυανοτοξίνες στους φυτικούς οργανισμούς, οδηγώντας σταδιακά σε επικίνδυνες συγκεντρώσεις τόσο για το περιβάλλον όσο και για τον άνθρωπο (Lee et al., 2021).

Σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί πως η άμεση εφαρμογή οργανικών λιπασμάτων που περιέχουν κυανοβακτηριακή βιομάζα (Driscoll & Cao et al., 2018) μπορεί να οδηγήσει σε μόλυνση του εδάφους από κυανοτοξίνες. Οι αγροτικές περιοχές κάνουν πιο εύκολη την αποίκιση και ανάπτυξη των κυανοβακτηρίων. Μερικοί ενδεχόμενοι παραγωγοί κυανοτοξινών μπορεί να ευδοκιμήσουν σε τέτοια εδάφη και να εκκρίνουν επιβλαβείς για τα ζώα και τον άνθρωπο κυανοτοξίνες. Μάλιστα, οι καλλιέργειες που υπάρχουν και αναπτύσσονται σε τέτοια εδάφη είναι πολύ πιθανό να προσλάβουν τις κυανοτοξίνες που παράγονται, με συνέπεια να προκαλέσουν σταδιακά ορισμένες επιβλαβείς επιπτώσεις στην ποιότητα των καλλιεργειών αλλά και στην ευρύτερη υγεία των ζωικών οργανισμών που σιτίζονται από αυτές (Lee et al., 2021).

### **3.5.2 Κυανοτοξίνες στο έδαφος και τα φυτά**

Έχουν διακριθεί δύο παράγοντες που ενδυναμώνουν περισσότερο τη βιοδιαθεσιμότητα και την ευτροφία των κυανοτοξινών στο έδαφος, που αναφέρονται στην παρουσία κυανοτοξινών σε γεωργικές περιοχές εξαιτίας του μολυσμένου ύδατος κατά την άρδευση (Cao et al., 2018) και στην απορρόφηση των κυανοτοξινών από το έδαφος. Υπάρχουν αρκετές δημοσιευμένες μελέτες που έχουν επικεντρωθεί στην πρόσληψη κυανοτοξινών διαμέσου της ρίζας των φυτών και στην παρουσία των τοξινών σε φύλλα ή και βλαστούς των φυτών αυτών (Campos et al., 2021; Levizou et al., 2020; Nowruzzi et al., 2021).

Η συγκέντρωση των κυανοτοξινών στους φυτικούς οργανισμούς ενδέχεται να επιφέρει υψηλή φυτοτοξικότητα εξαιτίας ειδικών σχετικών μηχανισμών. Οι μηχανισμοί αυτοί εμπεριέχουν αυξημένο οξειδωτικό στρες, προσωρινή διακοπή της βλάστησης των σπόρων αλλά και της δημιουργίας και ανάπτυξης των δενδρυλλίων, παροδική παύση της δραστηριότητας και

λειτουργίας των ρυθμιστικών ενζύμων των φυτών, με αποτέλεσμα να καταστραφούν οι ιστοί των φυτών και μακροπρόθεσμα να καταστραφούν ολόκληρα τα φυτά (Machado et al., 2017; Purkayastha et al., 2010).

Οι περισσότερες καταγραφές που υπήρχαν από προηγούμενα χρόνια αναφορικά με τη φυτοτοξική επίπτωση των κυανοτοξινών στους φυτικούς οργανισμούς έχουν αναφερθεί για πρώτη φορά σε φωτοαυτοτροφικούς οργανισμούς ευδοκιμούν και αναπτύσσονται σε υδρόβιο περιβάλλον και αναφέρονται εκτός των άλλων σε φύκια και μακρόφυτα (Ikawa et al., 2001; Mitrović et al., 2006). Τα τελευταία χρόνια, μάλιστα, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις συνέπειες των κυανοτοξινών στα χερσαία φυτά. Η συγκέντρωση των κυανοτοξινών σε βρώσιμα φυτά μπορεί να αναπτύξει έναν έμμεσο τρόπο με τον οποίο θα εισέρχονται οι τοξίνες αυτές στον ανθρώπινο οργανισμό, επιφέροντας σταδιακά ολοένα και περισσότερες απειλητικές για τη ζωή του και την υγεία του επιπτώσεις (Saqrane & Oudra, 2009). Υπάρχουν ενδείξεις πως οι κυανοτοξίνες συμπεριλαμβάνονται στις κυριότερες παραμέτρους που απειλούν τον άνθρωπο για εμφάνιση χρόνιας νεφρικής νόσου από άγνωστα αίτια, μια παθολογική κατάσταση που έχει μη αναστρέψιμη πορεία και έχει καταγραφεί πολλές φορές σε κράτη που δραστηριοποιούνται στη γεωργία (Manage, 2019).

### **3.6 Παρουσία κυανοβακτηρίων και κυανοτοξινών στην Ελλάδα**

Όσον αφορά τον ελλαδικό χώρο, φαίνεται πως υπάρχει εξίσου μεγάλη ανάγκη για παρακολούθηση και διαχείριση του ζητήματος της ανάπτυξης των κυανοβακτηρίων στο υδάτινο περιβάλλον και ιδίως στο πόσιμο νερό. Στις χώρες μάλιστα της Μεσογείου σημειώνονται περισσότερες πιθανότητες να αναπτυχθούν ανθίσεις κυανοβακτηρίων, που ευθύνονται συνήθως στην αυξημένη συγκέντρωση του είδους *Microcystis* spp και εμφανίζουν υψηλά επίπεδα ανάπτυξης μικροκυστινών (Amos & Qiang, 2013). Βέβαια, μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980 δεν είχαν ακόμη αναφερθεί σοβαρά περιστατικά τοξικότητας από κυανοβακτήρια στην Ελλάδα, ενώ δεν υπήρχαν καταγραφές δηλητηριάσεων από τοξίνες των κυανοβακτηρίων, παρά το γεγονός ότι παρουσιάζονταν ανά διαστήματα αυξημένα επίπεδα ανθίσεων του είδους *Microcystis Aeruginosa*, ιδίως στα επφανειακά ύδατα του ελλαδικού χώρου (Papadopoulou & Mourkidou, 2002).

Συγκεκριμένα, η διερεύνηση που σχετίζεται με τα κυανοβακτήρια στον ελλαδικό χώρο ξεκίνησε κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα με τις έρευνες των φυκών που αναπτύσσονται σε γλυκά ύδατα και πραγματοποιήθηκε από τους Stanković (1931) και Skuja (1937). Στις δύο επόμενες δεκαετίες, καμία δημοσιευμένη μελέτη σχετικά με τη μικροχλωρίδα δεν μπορεί να ανιχνευθεί μέχρι την έρευνα του Ανανιάδη (1956) για τα ύδατα των λιμνών. Κατά τη δεκαετία του 1960, ο Κωνσταντίνος Αναγνωστίδης διεξήγαγε δύο εκτενείς έρευνες, με αντικείμενο μελέτης τα κυανοβακτήρια που αναπτύσσονται σε ιαματικές πηγές και θειούχες συγκεντρώσεις (*Sulphuretum*) σε θαλάσσια ή γλυκού νερού υδάτινα οικοσυστήματα σε περιοχές της Ελλάδας (Αναγνωστίδης 1968).

Αργότερα, μεταξύ των ετών 1987 και 2000, πραγματοποιήθηκε μια μεγάλη μελέτη σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Η μελέτη αυτή κατέληξε στο συμπέρασμα πως υπήρχαν αρκετές ηπατοτοξικές ανθίσεις κυανοβακτηρίων και συγκεκριμένα εντοπίστηκαν στις εννέα από τις 33 περιοχές με ποτάμια ή λίμνες που επιλέχθηκαν για τη διεξαγωγή της έρευνας. Οι λίμνες μάλιστα εμφάνισαν υψηλότερες συγκεντρώσεις κυανοβακτηριακών ανθίσεων σε σχέση με τα ποτάμια και ιδιαίτερα η λίμνη των Ιωαννίνων και η λίμνη της Καστοριάς (Papadopoulou & Mourkidou, 2002).

Άλλες λίμνες που εμφάνισαν επίσης υψηλές συγκεντρώσεις κυανοβακτηρίων ήταν οι λίμνες Κερκίνη, Βιστωνίδα, Ζάζαρη, Αμβρακία, Κορώνεια, Βόλβη και η Μικρή Πρέσπα. Η ευρύτερη συσσώρευση των μικροκυστινών στις περιοχές αυτές, στη βιομάζα, παρουσίασε μια διακύμανση της τάξεως του 50,3 μέχρι και 1.091 ng/L, σύμφωνα με τις δηλώσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO, 2004). Παρόμοια μελέτη που διεξήχθη με μελέτη και παρακολούθηση 45 δειγμάτων από πόσιμο νερό στην Αθήνα, με τη συμμετοχή και βοήθεια του δικτύου της ΕΥΔΑΠ, καθώς και σε είκοσι δείγματα από επιφανειακά ύδατα των λιμνών Μόρνου και Υλίκης, δε βρέθηκαν τα ίδια αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, δεν εντοπίστηκαν οι μικροκυστίνες και η νοντουλαρίνη, οι οποίες ελέγχθηκαν στα δείγματα αυτά που μελετήθηκαν (Svrcek & Smith, 2004).

Παρόλο που έχουν πραγματοποιηθεί πολλές προσπάθειες σε ερευνητικό επίπεδο, η γνώση και πληροφόρηση για την ποικιλότητα και την ταξινόμηση των κυανοβακτηρίων στον ελλαδικό χώρο συνεχίζει ακόμη και σήμερα να αποτελεί μια αμφίβολη και δυσκατανόητη κατάσταση, εφόσον δεν έχει καταχωρηθεί και παρουσιαστεί ακόμη ένας συγκεντρωτικός –ενιαίος και

συνεχής κατάλογος για την τοπική χλωρίδα που αναφέρεται στην παρουσία και κατανομή των κυανοβακτηρίων. Η καινοτόμα διερεύνηση που αφορά στη βιοποικιλότητα φαίνεται πως αντιμετωπίζει έναν ολοένα αυξανόμενο ρυθμό παραγωγής πληροφοριών, ενώ παρατηρείται σήμερα πως καταβάλλονται συνεχείς και σπουδαίες προσπάθειες για τη μελέτη της δομής, της συγκέντρωσης, της σύνδεσης αλλά και της επεξεργασίας των πληροφοριών αυτών, με έναν πιο ουσιαστικό τρόπο (Koureas et al., 2016).

Μια ενδελεχής ανασκόπηση του Gkelis (2016) αποκάλυψε ότι μέχρι σήμερα έχουν αναφερθεί 543 είδη κυανοβακτηρίων στην Ελλάδα. Τα είδη που συγκεντρώθηκαν και ταξινομήθηκαν από τον ελλαδικό χώρο έχουν παρουσιαστεί σε κατηγορίες 130 γενών και 41 οικογενειών, με αντιπροσωπευτικές και τις οκτώ τάξεις του *Cyanophyceae* (Komárek et al., 2014). Ορισμένα είδη που αναφέρθηκαν στην Ελλάδα βρέθηκε ότι δεν ήταν έγκυρα ή αλλιώς αναφέρθηκαν ως αβέβαιης ταξινόμησης: Το είδος *Pleurocapsa crepidinum* είναι πιθανώς είδος *Chroococcidiopsis* και χρειάζεται αναθεώρηση (Komárek & Anagnostidis 2005). Το είδος *Hydrocoleus homoeotrichus sensu* που καταγράφηκε από τους Anagnostidis et al. (1983), πιθανολογείται πως ανήκει στα *Oscillatoriaceae* και στο γένος *Blennothrix* (Komárek & Anagnostidis, 2005) όπως φαίνεται από τη μελέτη της δομής του τριχώματος. Ωστόσο, το *nidulans* που εντοπίστηκε στη λίμνη Βόλβη (Hindak & Moustaka, 1988) δεν συμπεριλαμβάνεται ούτε στον τόμο *Chroococcales* του *Süßwasserflora von Mitteleuropa* (Komárek & Anagnostidis, 1999) ούτε στο *AlgaeBase* (Guiry & Guiry, 2016).

Στη συνέχεια, το *AlgaeBase* συμπεριλαμβάνει μονάχα δύο ποικιλίες *nidulans* var. *longissima* Nash και var. *thermalis* Hansgirg. Το *Gloeocapsa polydermatica* που εντοπίστηκε στις ιαματικές πηγές της Νιγρίτας (Αναγνωστίδης 1961) εντάσσεται στην ίδια ταξινόμηση με το χλωρόφυτο *Sporotetras polydermatica* (Kostikov & Lukesován, 2000). Το είδος *Scolecia filosa* που εντοπίστηκε σε μια υποβρύχια θαλάσσια περιοχή στην Πελοπόννησο (Färber et al., 2015) φαίνεται πως ανήκει σε μια κατηγορία που αναπτύσσεται από άγνωστους ετερότροφους οργανισμούς (Heindel et al. 2009) και δεν αφορά σε κυανοβακτήρια. Τα άλλα δεκαεπτά είδη που εντοπίστηκαν ανήκουν στην οικογένεια *Pelonemataceae*, που συμπεριλαμβάνει τα τέσσερα γένη *Achroonema*, *Pelonema*, *Peloploca* και *Desmanthos*, και έχει αναπτυχθεί με σκοπό να φιλοξενήσει ορισμένα άχρωμα βακτήρια που διαθέτουν πολυκύτταρα νημάτια (τριχώματα), που έχουν εντοπιστεί και καταγραφεί σε λίμνες και σε θειούχες πηγές (Hirsch, 1981).



Είναι επίσης ιδιαίτερα ενδιαφέρον το γεγονός ότι τα περισσότερα από αυτά τα είδη εντοπίστηκαν σε σπάνια δείγματα, όπως για παράδειγμα από λήψεις -συλλογές σε σπήλαια [π.χ. *Toxopsis calypsus* , *Ifinoe spelaea* (Lamprinou et al., 2011), θαλάσσιους παράκτιους βράχους [π.χ. επιλιθικούς *Cyanosarcina thalassia* ( Anagnostidis and 199oliyanthicus ) *aegaeus* and *Cyanosaccus atticus* ( Αναγνωστίδης και Πανταζίδου 1985 , Αναγνωστίδης και Πανταζίδου 1988 )], αρχαιολογικοί χώροι [π.χ. οβία ( *Anagnostidis and Roussomoustakaki* 1991)], και καταρράκτες [ *Phormidium edessae* ( Skuja 1937 )], υπογραμμίζοντας την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα για την αποκάλυψη της άγνωστης ποικιλομορφίας σε αυτά τα περιβάλλοντα. Μια πρόσφατη έρευνα που διεξήχθη από τους Bravakos et al. (2016) σε στελέχη κυανοβακτηρίων που συλλέχθηκαν από ψάθες σε περιοχές της Ελλάδας με ιαματικές πηγές έχει αναδείξει περισσότερα από έξι νέα είδη. Αργότερα την ίδια χρονιά, οι Κωνσταντίνου και συνεργάτες (2016) δήλωσαν ορισμένα ενδεχόμενα νέα είδη σε στελέχη κυανοβακτηρίων που μελετήθηκαν από σπόγγους της θάλασσας που συλλέχθηκαν από διάφορα μέρη του Αιγαίου Πελάγους, που ενίσχυσαν τον ισχυρισμό τους για την πλούσια ποικιλομορφία των ελάχιστα γνωστών συστημάτων και περιβαλλόντων. Ο κατάλογος των κυανοβακτηρίων που αναφέρθηκε από τη μελέτη του Gkelis (2016) φαίνεται πως ήταν ο πρώτος στην Ελλάδα και είναι πολύ πιθανό τα σημερινά δεδομένα να έχουν αλλάξει λόγω των σύγχρονων περιβαλλοντικών συνθηκών και λοιπών παραγόντων. Σημαντικά είναι επίσης τα στοιχεία που προκύπτουν από μελέτες των συμπεριφορών και μεταλλάξεων ή μετακινήσεων των ομάδων κυανοβακτηρίων αλλά και της διάθεσης ή των επιπτώσεων των κυανοτοξινών σε αυξημένες συσσωρεύσεις τους στα ελληνικά υδάτινα περιβάλλοντα (Amos & Qiang, 2013).

Κυανοβακτήρια και κυανοτοξίνες έχουν ανιχνευθεί σε λίμνες και ταμιευτήρες στην Ελλάδα (Gkelis et al., 2014), όπως στη λίμνη Κάρλα (Papadimitriou et al., 2018). Στην λίμνη της Καστοριάς βρέθηκαν τα είδη *Microcystis aeruginosa*, *Cylindrospermopsis raciboeskii* και *Aphanizomenon gracile* ως κυρίαρχα για την περίοδο που μελετήθηκε η λίμνη (Moustaka et al., 2007). Στη λίμνη Παμβώτη ανιχνεύθηκαν μικροκυστίνες σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονταν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους υπό παρακολούθηση από 0,16 έως 27 µg/L, όταν και σαξιτοξίνες ανιχνεύθηκαν και αναφέρθηκαν για πρώτη φορά, με μέγιστη συγκέντρωση 2,1 µg/L (Gkelis et al., 2014).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 Πολιτικές προστασίας για τη δημόσια υγεία, κατευθυντήριες οδηγίες και σχετικές νομοθεσίες

Τα κυανοβακτήρια φαίνεται πως μπορούν να προκαλέσουν διάφορα σοβαρά προβλήματα σε παγκόσμιο επίπεδο, με τη συνηθέστερη αιτιολογία να αποτελεί την παγκόσμια ανάπτυξη ενοχλητικών και επιβλαβών ανθίσεων σε επιφανειακά ύδατα, κυρίως εξαιτίας της υπερβολικής χρήσης των διαφόρων λιπασμάτων σε γεωργικές περιοχές, καθώς και λόγω των λυμάτων που απορρίπτονται στα υδάτινα αυτά περιβάλλοντα. Παράλληλα, η εναλλαγή και συνήθως υπερθέρμανση του κλίματος αποτελεί ένα βασικό παράγοντα για την εμφάνιση του εν λόγω φαινομένου (Paerl και Huisman, 2009; Schindler, 2006, Schindler et al., 2008), είτε εξαιτίας των βραχυπρόθεσμων επιπτώσεων της θέρμανσης είτε λόγω άλλων προγενέστερων παραγόντων και καταστάσεων και εξαιτίας της παρατεταμένης ή επίμονης αύξησης στη στήλη του ύδατος (Carey et al., 2012; Jeppesen et al., 2007). Ο ευτροφισμός και το κλίμα μπορεί να δράσουν μαζί για να υποστηρίξουν την άνθηση των κυανοβακτηρίων (Brookes & Carey, 2011, Carey et al., 2012), αν και τα στοιχεία για τις συνεργιστικές αλληλεπιδράσεις φαίνεται να εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τροφική κατάσταση αλλά και τα εμπλεκόμενα ταξινομικά είδη κυανοβακτηρίων (Rigosi et al., 2014; Visser et al., 1996).

Τα τοξικά κυανοβακτήρια άρχισαν να αναγνωρίζονται ευρύτερα ως δυνητικός κίνδυνος για την υγεία τη δεκαετία του 1980, δημοσιεύθηκαν διάφορες περιπτώσιολογικές μελέτες που απέδιδαν την ασθένεια σε κυανοβακτηριακές τοξίνες (βλ. Kuiper-Goodman et al., 1999, Chorus et al., 2000) και πολλές περιπτώσεις θανάτων ζώων κατά μήκος των υδάτινων ρευμάτων που προσβλήθηκαν από άνθηση κυανοβακτηρίων εφιστούσαν την προσοχή του κοινού στο θέμα. Η πρόοδος στην αποσαφήνιση των χημικών δομών ενός αριθμού κυανοτοξινών και στη διαθεσιμότητα μεθόδων χημικής ανίχνευσης κατάλληλων για αναλύσεις ρουτίνας επιταχύνθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και στα τέλη της δεκαετίας του 1990 μια ευρύτερη κατανόηση τόσο των τρόπων δράσης όσο και της εμφάνισής τους ήταν διαθέσιμο (Chorus & Bartram, 1999).

Οι πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί υποδεικνύουν πως, ανάμεσα στις χημικές ουσίες που εντοπίζονται στο νερό ή αξιοποιούνται για κατανάλωση ή και αναψυχή, οι κυανοτοξίνες θα

μπορούσαν εύκολα να συμπεριλαμβάνονται στις ουσίες εκείνες που παρουσιάζονται με μεγαλύτερη συχνότητα σε δυνητικά και ενδεχόμενα επικίνδυνες συσσωρεύσεις. Κατά το έτος 1998, ήταν η πρώτη φορά που ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας οδηγήθηκε στην ανάγκη για δήλωση –δημοσίευση μιας παροδικής κατευθυντήριας εκτίμησης για το πόσιμο νερό στα  $1 \mu\text{g L}^{-1}$  αναφορικά με μια ιδιαίτερα συνηθισμένη κυανοτοξίνη, τη λεγόμενη μικροκυστίνη-LR (ή αλλιώς MCYST-LR), στο σχετικό παράρτημα στον Τόμο No.2 των κατευθυντήριων οδηγιών του ΠΟΥ για την ποιότητα του πόσιμου ύδατος (βλ. Chorus & Bartram, 1999). Από εκείνη την περίοδο και έπειτα, ο αριθμός των κρατών που έχουν καλεστεί να διαχειριστούν την απειλή της συσσώρευσης αυτής της κυανοτοξίνης έχει αυξηθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα πολλά κράτη να συζητούν σήμερα για την πιο κατάλληλη και αποτελεσματική στρατηγική διαχείριση –ρύθμιση. (Dittmann et al., 2013; Ferrao-Filho & Kozlowsky-Suzuki, 2011; Ibelings & Havens, 2008; Kozlowsky-Suzuki et al., 2012).

Υπάρχουν βεβαίως πληροφορίες και καταγραφές για περισσότερες κυανοτοξίνες που παρουσιάζονται στο πόσιμο νερό. Συζήτηση γινόταν συχνά κατά την τελευταία εικοσαετία για τη κυλινδροσπερμοψίνη (εν συντομία CYN), τις νευροτοξίνες, όπως είναι για παράδειγμα η σαξιτοξίνη (ή αλλιώς STX) ή τις ανατοξίνες (εν συντομία ATX) (Seifert et al., 2007; van Apeldoorn et al., 2007; Metcalf et al., 2008; van der Merwe et al., 2012), καθώς και δεδομένα σχετικά με νέες κατηγορίες που μπορεί να προκύψουν κατά τη διαδικασία της διερεύνησης των κυανοτοξινών (Neilan et al., 2013).

Οι κανονισμοί, οι σχετικές διατάξεις και οι κατευθυντήριες οδηγίες, βέβαια, έχουν προσπαθήσει πολύ να περιορίσουν και να ελέγξουν τις συγκεντρώσεις και την ανάπτυξη των κυανοβακτηρίων και των τοξινών που εκκρίνουν αυτά, είτε αναφέρονται σε διάφορες μικροκυστίνες είτε σε άλλες τάξεις και είδη τοξινών, που για την πλειονότητα αυτών, οι πληροφορίες για την τοξικότητα είναι ελλιπείς και μη ικανές να καθορίσουν τα όρια της συλλογής τους (Neilan et al., 2013; van der Merwe et al., 2012; Wiedner et al., 2003). Επιπλέον, η αναλογία των διαφόρων κυανοτοξινών τύπου MCYST ενδέχεται να αλλάξει με τις αλλαγές του περιβάλλοντος (Tonk et al., 2005).

Ωστόσο, οι μεγαλύτερες δυνατές συσσωρεύσεις της κυανοτοξίνης σε ένα συγκεκριμένο και καθορισμένο υδάτινο οικοσύστημα εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τις συναθροίσεις της μάζας των κυανοβακτηρίων που παρουσιάζονται στο εκάστοτε υδάτινο

περιβάλλον. Ειδικότερα, η συγκέντρωση μέσω του σχηματισμού αφρού (δηλαδή η συσσώρευση επιπλεόντων κυανοβακτηρίων στην επιφάνεια της λίμνης σε περιόδους ήρεμου καιρού) μπορεί να αυξήσει τα επίπεδα τοξινών κατά τάξεις μεγέθους. Συνεπώς, η συγκέντρωση των κυανοβακτηρίων που εμφανίζεται θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως βάση ή κίνητρο για την επαγρύπνηση και την εκτίμηση του ενδεχόμενου κινδύνου πριν χρειαστεί ή χωρίς να χρειαστεί να αναλυθούν οι συγκεντρώσεις και τα είδη ή οι επιβλαβείς επιπτώσεις των τοξινών (Lawton & Codd, 1991). Ταυτοχρόνως, φαίνεται πως μερικά κράτη εφαρμόζουν πλαίσια και κανονισμούς σε βαθμό συναγερμού και θεωρήσεις που στηρίζονται στην επικινδυνότητα, σύμφωνα με τον αριθμό των κυανοβακτηρίων, άλλοτε σε εθνικές διατάξεις και άλλοτε σε κανονισμούς ή οδηγίες που αναφέρονται σε συμπληρωματικές διατάξεις ως προς τη ρύθμιση και διαχείριση των υπερβολικά αυξημένων συγκεντρώσεων των κυανοτοξινών (Neilan et al., 2013; Falconer & Humpage, 2005).

Ωστόσο, λείπουν πιο πρόσφατες μελέτες που επιβεβαιώνουν ότι αυτή η οδός έκθεσης είναι σχετική και η πρόσληψη μέσω της αναρρόφησης συνήθως περιλαμβάνει επίσης κατάποση, επομένως τουλάχιστον εν μέρει συμβαίνει μέσω της στοματικής οδού. Βέβαια, οι οδηγίες και οι κανονισμοί ή διατάξεις που έχουν αναφερθεί έως σήμερα επικεντρώνονται στα βασικά στοιχεία και σημεία της στοματικής έκθεσης, που αφορούν κατά κανόνα στην κατάποση των τοξινών μέσω της κατανάλωσης του πόσιμου ύδατος, καθώς και στην αναψυχή ή στην πρόσληψη των ουσιών μέσα από την κατανάλωση ψαριών, θαλασσινών και μαλακίων από περιβάλλοντα γλυκού ύδατος (Neilan et al., 2013).

Η βιβλιογραφία που αναφέρεται σε διερεύνηση της έκθεσης σε τοξίνες μέσω του πόσιμου νερού (Falconer & Humpage, 2005; Hitzfeld et al., 2000; Zamyadi et al., 2012) φαίνεται πως είναι αρκετά εκτεταμένη στους τρόπους έκθεσης, κυρίως για μορφές που αφορούν στην ψυχαγωγία και αναψυχή (Backer et al., 2010; Chorus et al., 2000) και πρόσληψη μέσω τροφής (Ibelings & Chorus, 2007). Η έμφαση στο πόσιμο ύδωρ μπορεί να αποδοθεί στο σπουδαίο ρόλο και τη σημασία του ως βάση για την ανθρώπινη ζωή, με την καθημερινή κατανάλωση ύδατος, που δεν μπορεί να προβλέψει την ενδεχόμενη έκθεση στις κυανοτοξίνες.

Από την άλλη μεριά, σε κράτη όπου πραγματοποιείται καλή και ποιοτική επεξεργασία του πόσιμου ύδατος, δε φαίνεται να μειώνονται οι ανθίσεις των κυανοβακτηρίων και η συγκέντρωση των κυανοτοξινών. Η προσωρινή κατευθυντήρια οδηγία του 1998 του ΠΟΥ

αναφέρεται στην τιμή  $1 \mu\text{g L}^{-1}$  για τη μεγαλύτερη συγκέντρωση της τοξίνης MCYST-LR στο πόσιμο ύδωρ και στηρίχθηκε σε εργαστηριακές έρευνες με ποντίκια (Chorus et al., 2000).

Πέραν της έκκρισης τοξινών, τα κυανοβακτήρια θεωρούνται απειλητικά στοιχεία για τη σύσταση και ποιότητα του πόσιμου ύδατος (Visser et al., 2005) εξαιτίας της ιδιαιτερότητάς τους να δημιουργούν ενδοκυτταρικά κενοτόπια αερίου (Walsby et al., 1991). Τα κενοτόπια αερίου προσφέρουν στα κυανοβακτήρια άνοση, με τέτοιον τρόπο ώστε ελλείπει ανάμειξης υδατικού σώματος, τα κυανοβακτηριακά κύτταρα και οι αποικίες που αιωρούνται στο νερό μπορεί να επιπλέουν στην επιφάνεια της λίμνης και να συσσωρεύονται σε πυκνά επιφανειακά αποβράσματα. Δεδομένου ότι οι μικροκυστίνες είναι κυρίως ενδοκυτταρικές, όταν η βιομάζα συσσωρεύεται, οι συγκεντρώσεις της μικροκυστίνης αυξάνονται πολλαπλά και η αξιολόγηση κινδύνου πρέπει να ληφθεί υπόψη. Τα υπολείμματα οδηγούνται συχνά προς την ακτή, εκεί όπου η επικινδυνότητα της έκθεσης των ανθρώπων ή άλλων ζώων με τόσο αυξημένες συγκεντρώσεις κυανοβακτηρίων και κυανοτοξινών που εκκρίνουν είναι σημαντικά υψηλότερος (Ibelings et al., 2003; Saker & Griffiths, 2000).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε τις συνηθέστερες και σπουδαιότερες εθνικές οδηγίες, που περιλαμβάνουν τους κανονισμούς για τα κύρια αίτια στοματικής έκθεσης, π.χ. πόσιμο νερό και αναψυχή, και συμπεριλαμβανομένων εκείνων για τα τρόφιμα από εκείνες τις λίγες χώρες που έχουν εφαρμόσει ορισμένους κανονισμούς. Η πλειονότητα των κρατών που ρυθμίζουν τις τιμές των κυανοτοξινών αναφέρουν όρια για τις συσσωρεύσεις στο πόσιμο ύδωρ καθώς και στο νερό που αξιοποιείται για ψυχαγωγικές αιτίες. Τα όρια για τις συγκεντρώσεις των κυανοτοξινών καθορίζονται κυρίως για το MCYST ή πιο εξειδικευμένα για την τοξίνη MCYST-LR, ενώ υπάρχουν και άλλες κυανοτοξίνες που ορίζονται πιο σπάνια στις περισσότερες χώρες ανά τον κόσμο (Zamyadi et al., 2012).

Σε ορισμένα κράτη, μάλιστα, οι κανονισμοί και οι διατάξεις για τις συσσωρεύσεις των τοξινών των κυανοβακτηρίων στο νερό υποστηρίζονται και ενισχύονται από την εφαρμογή πρωτοκόλλων και στρατηγικών σε βαθμό συναγερμού, με σκοπό την ανάδειξη της απειλητικής εμφάνισης και ανάπτυξης της εκάστοτε κυανοτοξίνης. Αναφορικά με το πόσιμο ύδωρ, τέτοιες οδηγίες και κανονισμοί παρουσιάζονται για παράδειγμα στην Αυστραλία, τη Φινλανδία, τη Σιγκαπούρη, τη Γαλλία και τη Νέα Ζηλανδία (Neilan et al., 2013).

## 4.2 Στρατηγικές διαχείρισης και περιορισμού των κυανοβακτηρίων και των κυανοτοξινών

Τα περισσότερα κράτη ανά τον κόσμο ορίζουν μέσω κανονισμών για το πόσιμο νερό την επιτρεπόμενη τιμή για τη συγκέντρωση των κυανοτοξινών σύμφωνα με την προσωρινή κατευθυντήρια οδηγία του ΠΟΥ για την τοξίνη MCYST-LR στην τιμή του 1 μg/L ή αξιοποιούν την κατεύθυνση του TDI (ημερήσια πρόσληψη) που αναφέρεται σε όρια της τιμής για 0,04 μg ανά kg σωματικού βάρους με ελάχιστες διακυμάνσεις και τροποποιήσεις ανά κράτος (αναφορικά συνήθως με την ποσότητα ύδατος που καταναλώνεται ή/και σύμφωνα με το μέσο σωματικό βάρος). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι εναλλαγές ανάμεσα στα επιτρεπτά όρια της συγκέντρωσης των κυανοτοξινών μεταξύ των χωρών να είναι μικρές και πιο αναλυτικά φαίνεται πως τα όρια κυμαίνονται συνήθως μεταξύ του 1,0 και 1,5 μg/L (Azevedo et al., 2008 στο Chorus, 2012).

Υπάρχουν ορισμένα κράτη, όπως για παράδειγμα ο Καναδάς, η Τσεχία και η Σιγκαπούρη (Azevedo et al., 2008 στο Chorus, 2012) που δηλώνουν ρητά οδηγίες και κανονισμούς αποκλειστικά για την τοξίνη MCYST-LR, ενώ σε άλλες περιπτώσεις αναφέρονται και οι μικροκυστίνες που δηλώνονται ως ισοδύναμα στοιχεία της τοξίνης MCYST-LR, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στην Αυστραλία, τη Γαλλία και τη Φινλανδία (Bertrand et al., 2006 στο Chorus, 2012). Άλλες κυανοτοξίνες που μπορεί να αναφέρονται σε σχετικούς κανονισμούς (αλλά όχι απαραίτητα σε ρητά νομικά πλαίσια) συμπεριλαμβάνουν το CYN (1 μg/L στην Αυστραλία και τη Νέα Ζηλανδία ή 15 μg/L στη Βραζιλία), το STX (3 μg/L στην Αυστραλία, τη Νέα Ζηλανδία και τη Βραζιλία) ή ATX (3,7 μg/L στον Καναδά, 6 μg/L στη Νέα Ζηλανδία) (Bertrand et al., 2006, στο Chorus, 2012). Ο Καναδάς έχει εφαρμόσει μια προσωρινή Μέγιστη Αποδεκτή Συγκέντρωση (PMAC) για το MCYST-LR 1,5 μg/L σε επεξεργασμένο πόσιμο νερό, με στόχο την προστασία από το άθροισμα όλων των MCYST (Azevedo et al., 2008 στο Chorus, 2012).

Στις ΗΠΑ δεν υπάρχει ρητό νομοθετικό πλαίσιο ή κατευθυντήριες οδηγίες για τα όρια των επιτρεπτών επιπέδων κυανοτοξινών στο πόσιμο ύδωρ (ή στο ύδωρ που αφορά σε δραστηριότητες αναψυχής), παρόλο που τα κυανοβακτήρια και οι κυανοτοξίνες που εκκρίνουν αποτελούν βασικό στοιχείο στη λίστα των ενδεχόμενων ουσιών που μολύνουν το πόσιμο ύδωρ και απειλούν τη δημόσια υγεία. Η Δανία (Christoffersen & Warming 2012, στο

Chorus, 2012) επίσης δεν έχει συγκεκριμένους κανονισμούς και διατάξεις για τα επίπεδα των κυανοτοξινών στο πόσιμο ύδωρ ή το νερό αναψυχής, ωστόσο η συγκομιδή των μυδιών επιτρέπεται αποκλειστικά και μόνο έπειτα από έλεγχο για την παρουσία κυανοτοξινών.

Μια νέα εντολή τέθηκε σε εφαρμογή το 2011 – εφαρμογή των κανονισμών της ΕΕ για την υγιεινή των τροφίμων και τον έλεγχο των προϊόντων ζωικής προέλευσης – που στοχεύει ειδικά στην παρακολούθηση των φυκών και των τοξινών τους για τοποθεσίες αναπαραγωγής και συγκομιδής μυδιών, ως εκ τούτου στοχεύει στο θαλάσσιο περιβάλλον (*Mytilus edulis* και θαλάσσιες τοξίνες). Σήμερα, ο κανονισμός αυτός που αφορά στην ΕΕ δεν αξιοποιείται για τη διαφύλαξη από τις κυανοτοξίνες στα θαλασσινά του γλυκού νερού. Η Γαλλία ορίζει επίσης την πρωταρχική εστίαση στα θαλασσινά, ενώ αναγνωρίζει ότι σύμφωνα με μια χρόνια TDI 0,04 mg ανά kg σωματικού βάρους ημερησίως, η ημερήσια κατανάλωση ψαριών 86 g και η πρόσληψη 2 L πόσιμου νερού την ημέρα (σε mg/L), το όριο για ενήλικες που καταναλώνουν είδη γλυκού νερού θα είναι 5,6 mg MCYST ανά κιλό ψαριού (για βρώσιμα μέρη ψαριών). Για παιδιά με χαμηλότερο σωματικό βάρος και χαμηλότερη κατανάλωση, η οριακή τιμή θα είναι 1,4 mg/L ψαριού. Κάτι αντίστοιχο ισχύει και στην Ελλάδα, η οποία αναγνωρίζει πως μια μερίδα 300g κυπρίνου θα υπερέβαινε το TDI για τη δια βίου κατανάλωση 14 φορές.

Μια ευρύτερη έννοια της εκτίμησης κινδύνου (που χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλούς τομείς εκτός από τη δημόσια υγεία, π.χ. και στον ασφαλιστικό κλάδο), ενώ χρησιμοποιεί τις διαθέσιμες πληροφορίες για τις γενικές ιδιότητες του κινδύνου, εστιάζει στη ρύθμιση ή την κατάσταση, π.χ. ζητεί να εκτιμηθεί πόσο μεγάλος μπορεί να είναι ο κίνδυνος που προκαλείται από έναν συγκεκριμένο κίνδυνο στη συγκεκριμένη περίπτωση (στο πλαίσιο αυτής της έννοιας, η γενική αξιολόγηση τοξικότητας που συζητήθηκε παραπάνω θα ήταν «χαρακτηρισμός κινδύνου» αντί για εκτίμηση κινδύνου) (Carmichael et al., 2001). Ένας βασικός παράγοντας που μπορεί να επιδράσει στις εθνικές θεωρήσεις για τον προσδιορισμό των κατευθυντήριων οδηγιών θεωρείται η εμπειρία. Οι Brownson et al. (2009) εξηγούν ότι η δημόσια υγειονομική περίθαλψη που βασίζεται σε στοιχεία στηρίζεται σε ποσοτικές (π.χ. επιδημιολογικά πειράματα, εργαστηριακά πειράματα σε ζώα ή οικολογικά) καθώς και σε ποιοτικές (π.χ. αφηγηματικές αναφορές). Ωστόσο, οι διάφορες ασυνεπείς και αμφίβολες πληροφορίες εμφανίζουν διακυμάνσεις ανάμεσα στα κράτη σύμφωνα με την εμπειρία ανά έθνος σε σχέση για παράδειγμα με το πόσο μεγάλος είναι ο βαθμός του ευτροφισμού και οι ενδεχόμενες απειλές ή βλάβες λόγω των τοξινών όπως για παράδειγμα οι περιπτώσεις του *PalmIsland* της

Αυστραλίας ή του *Caruaru* στην Βραζιλία (Carmichael et al., 2001) που οδήγησαν τους ανθρώπους ακόμη και σε θάνατο (βλ. Chorus et al., 2000). Αντίθετα, σε πολλές περιοχές της βόρειας Γερμανίας με ευτροφισμό και ανθοφορία να επικρατούν ευρέως για αρκετές δεκαετίες χωρίς να έχει γίνει εμφανής η ανθρώπινη ασθένεια, παρά την εντατική ψυχαγωγική χρήση του νερού, που ήταν και οι πρώτες συζητήσεις στις αρχές της δεκαετίας του 1990 για την ανάγκη αντιμετώπισης των κυανοβακτηρίων (Zamyadietal., 2012).



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, είναι εμφανές πως η παρουσία και ανάπτυξη των κυανοβακτηρίων στο υδάτινο περιβάλλον μπορεί να έχει πολύ αρνητικές επιπτώσεις για τον άνθρωπο, την ευρύτερη δημόσια υγεία και τα οικοσυστήματα που επηρεάζει. Τα κυανοβακτήρια μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα σε διάφορες περιοχές και περιβάλλοντα με αλμυρό ή γλυκό νερό, εντός των σπηλαίων, καθώς και σε καλλιέργειες ή ξηρά εδάφη (Moore et al., 2008). Μπορούν επίσης να συμβιώσουν με άλλους ζώντες οργανισμούς. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις, τα κυανοβακτήρια εμφανίζονται ως απειλή για τη δημόσια υγεία, εφόσον ενδέχεται να επιβαρύνουν το υδάτινο περιβάλλον όπου συσσωρεύονται και να οδηγήσουν σε μόλυνση του χώρου και των οργανισμών που ο ίδιος φιλοξενεί.

Η ανασκόπηση της υπάρχουσας σχετικής βιβλιογραφίας έδειξε πως οι κυανοτοξίνες που εκκρίνονται από τα κυανοβακτήρια μπορούν να επιφέρουν ήπιες έως και πολύ σοβαρές διαταραχές στους ανθρώπους ή και σε άλλους ζώντες οργανισμούς, λόγω της υψηλής νευροτοξικότητας ή ηπατοτοξικότητας που προκαλούν (Papadimitriou et al., 2010). Οι κυανοτοξίνες των κυανοβακτηρίων εντοπίζονται συχνά στο πόσιμο νερό και ευθύνονται για περιπτώσεις δηλητηριάσεων σε πολλές περιοχές ανά τον κόσμο και ιδίως στην Αυστραλία και την Κίνα.

Για το λόγο αυτό, λοιπόν, ο Π.Ο.Υ. έχει καθορίσει για το πόσιμο νερό αλλά και τους διάφορους υδάτινους χώρους, όπως είναι για παράδειγμα εκείνοι οι χώροι του υδάτινου περιβάλλοντος για αθλητικές δραστηριότητες (κολυμβητήρια) και υδάτων ψυχαγωγίας, τα επιτρεπόμενα όρια των συγκεντρώσεων των κυανοβακτηρίων, στο βαθμό εκείνο που δεν προκαλούν διαταραχές και εμπόδια για την υγεία και ευημερία των ανθρώπων και του οικοσυστήματος (Papadimitriou et al., 2010). Ωστόσο, το παγκόσμιο ζήτημα της κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει σταδιακά σε υψηλότερη θερμοκρασία στα υδάτινα περιβάλλοντα, καθώς και σε παρατεταμένα διαστήματα ξηρασίας, που έχουν με τη σειρά τους προκαλέσει την αυξημένη τάση κατά την ανάπτυξη των συγκεντρώσεων των κυανοβακτηρίων, που συσσωρεύονται στους διάφορους υδάτινους χώρους παγκοσμίως (Triantis et al., 2010).

Συνοψίζοντας, η παγκόσμια κλιματική κρίση που περιλαμβάνει την αύξηση της θερμοκρασίας στους υδάτινους χώρους και οι παρατεταμένες περιόδους της ξηρασίας, συνδυαστικά με τα υψηλά επίπεδα που εμφανίζονται συχνά σε τέτοια περιβάλλοντα, έχουν επιφέρει ένα μείζον

και απαιτητικό –περίπλοκο ζήτημα της δημόσιας υγείας και της απειλής του φυσικού περιβάλλοντος. Οι συνθήκες αυτές των τελευταίων δεκαετιών της κλιματικής αλλαγής έχουν οδηγήσει σε αυξημένες και συχνά υπερβολικές –μαζικές συγκεντρώσεις των κυανοβακτηρίων, ελευθερώνοντας πολλαπλά επίπεδα διαφόρων επιβλαβών για την υγεία τοξινών, που σε συνεχή επαφή και έκθεση μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη σωματική κυρίως ευημερία των ανθρώπων (Berg et al., 2002).

Το ζήτημα της υψηλής και μαζικής συγκέντρωσης των κυανοβακτηρίων δεν αποτελεί μονάχα ένα διεθνές προβληματισμό, αλλά εντοπίζεται συχνά πλέον και στον ελλαδικό χώρο, γεγονός που θα πρέπει να ευαισθητοποιήσει περισσότερο τους αρμόδιους φορείς στην Ελλάδα. Σημαντική είναι λοιπόν η υιοθέτηση μιας διαφορετικής στάσης και συμπεριφοράς των αρμόδιων φορέων για τη διαχείριση αλλά και την πρόληψη του εν λόγω φαινομένου, προκειμένου να διατηρηθεί και να διασφαλιστεί τόσο η δημόσια υγεία όσο και η ομαλή ανάπτυξη των οικοσυστημάτων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abed, R. M., Dobrestov, S., Al-Kharusi, S., Schramm, A., Jupp, B., & Golubic, S. (2011). Cyanobacterial diversity and bioactivity of inland hypersaline microbial mats from a desert stream in the Sultanate of Oman. *Fottea*, 11(1), 215-224.
- Allan, I.J., Mills, G.A., Vrana, B., Knutsson, J., Holmberg, A., Guigues, N., Laschi, S., Fouillac, A.M., Greenwood, R., 2006. Strategic monitoring for the European Water Framework Directive. *TRAC – Trends Anal. Chem.* 25 (7), 704–715.
- Amos, R., & Qiang, Hu. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*, 2nd Edition ISBN: 978-0-470-67389-8 J. Wiley Blackwell. 2013, p.736.
- Anagnostidis K., Economou-Amilli A., Overbeck J. *Anabaena azollae* Strasb. and the periphyton of *Azolla filiculoides* Lam. in lake Trichonis and the lagoon of Aetolikon, Hellas (Greece) *Archiv für Hydrobiologie*. 1988;133(3):321–343.
- Anagnostidis K., Economou-Amilli A., Pantazidou A. Studies on microflora of Perama Cave, Ioannina, Greece. *Bulletin de la Société Spéléologique de Grèce*. 1982;18 (1-2):458–530.
- Anagnostidis K., Economou-Amilli A., Roussomoustakaki M. Epilithic and chasmolithic microflora (Cyanophyta, Bacillariophyta) from marbles of the Parthenon-Acropolis, Athens, Greece. *Nova Hedwigia*. 1983;38:227–288.
- Anagnostidis K., Economou-Amilli A., Tsangridis A. Taxonomic and floristic studies of algae from rice-fields of Kalochorion-Thessaloniki, Greece. *Nova Hedwigia*. 1981;34:1–66.
- Arnon, S. S., Schechter, R., Inglesby, T. V., Henderson, D. A., Bartlett, J. G., Ascher, M. S., ... & Working Group on Civilian Biodefense. (2001). Botulinum toxin as a biological weapon: medical and public health management. *Jama*, 285(8), 1059-1070.
- Azevedo, M. D. P., Werner, V. R., Dogo, C. R., Rios, F. R., & Carvalho, L. D. (2008). Review of toxic species of Cyanobacteria in Brazil. *Algological studies*, 126(1), 251-265.
- Backer, L.C., McNeel, S.V., Barber, T., Kirkpatrick, B., Williams, C., Irvin, M., Zhou, Y., Johnson, T.B., Nierenberg, K., Aubel, M., LePrell, R., Chapman, A., Foss, A., Corum, S., Hill, V.R., Kieszak, S.M., Cheng, Y.-S., 2010. Recreational exposure to microcystins during algal blooms in two California lakes. *Toxicon* 55 (5), 909–921.

Berg, M. J., Tymoczko, L.J. & L. Stryer. Biochemistry (vol. I & II). Freeman & Company.  
Cambell, A. N. (1990). Biology. Benjamin/Cummings Publishing Co. ISBN: 0-8053-1800 3.  
2002, p. 1165.

Berg, G. M., Balode, M., Purina, I., Bekere, S., Béchemin, C., & Maestrini, S. Y. (2002).  
Plankton community composition in relation to availability and uptake of oxidized and  
reduced nitrogen. *Aquatic Microbial Ecology*, 30(3), 263-274.

Bertrand, E., Legeas, M., & Brient, L. (2006). Perspective pour la gestion des risques liées à la  
présence des cyanobactéries: vers une meilleure évaluation de l'exposition. In 3èmes Journées  
scientifiques du GIS Cyanobactéries (GRISCYA).

Bouaïcha, N., & Corbel, S. (2016). Cyanobacterial toxins emerging contaminants in soils: a  
review of sources, fate and impacts on ecosystems, plants and animal and human  
health. *InTech Rijeka*, 21, 105-26.

Bravakos Panos, Kotoulas Georgios, Skaraki Katerina, Pantazidou Adriani, Economou-Amilli  
Athena. A polyphasic taxonomic approach in isolated strains of Cyanobacteria from thermal  
springs of Greece. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 2016;98:147–160.

Brookes, J.D., Carey, C.C., 2011. Resilience to blooms. *Science* 334 (6052), 46–47.

Brownson, R.C., Fielding, J.E., Maylahn, C.A., 2009. Evidence-based public health: a  
fundamental concept for public health practice. *Annu. Rev. Public Health* 30, 175–201.

Carey, C.C., Ibelings, B.W., Hoffmann, E.P., Hamilton, D.P., Brookes, J.D., 2012.  
Ecophysiological adaptations that favour freshwater cyanobacteria in a changing climate.  
*Water Res.* 46 (5), 1394–1407.

Carmichael, W.W., The toxins of cyanobacteria. *Scientific American*, vol. 270, no. 1, 1994, p.  
78-86.

Carmichael, W.W., Azevedo, S., An, J.S., Molica, R.J.R., Jochimsen, E.M., Lau, S., Rinehart,  
K.L., Shaw, G.R., Eaglesham, G.K., 2001. Human fatalities from cyanobacteria: chemical and  
biological evidence for cyanotoxins. *Environ. Health Perspect.* 109 (7), 663–668.

Chorus, I. (Ed.), 2012. Current Approaches to Cyanotoxin Risk Assessment, Risk  
Management and Regulations in Different Countries. Umweltbundesamt, Berlin.

Chorus, I., Bartram, J. (Eds.), 1999. Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management. E & FN Spon, 400pp.

Chorus, I., Falconer, I.R., Salas, H.J., Bartram, J., 2000. Health risks caused by freshwater cyanobacteria in recreational waters. *J. Toxicol. Environ. Health Part B – Crit. Rev.* 3 (4), 323–347.

Christoffersen, K. S., & Warming, T. P. (2012). DENMARK: occurrence, monitoring, and management of cyanobacteria and their toxins in danish water bodies. Current approaches to Cyanotoxin risk assessment, risk management and regulations in different countries, 49.

Codd, G. A., Testai, E., Funari, E., & Svirčev, Z. (2020). Cyanobacteria, cyanotoxins, and human health. Water treatment for purification from cyanobacteria and cyanotoxins, 37-68.

Corbel, S., Mougín, C., & Bouaïcha, N. (2014). Cyanobacterial toxins: Modes of actions, fate in aquatic and soil ecosystems, phytotoxicity and bioaccumulation in agricultural crops. *Chemosphere*, 96, 1-15.

Cox, P. A. et al. 2016. Dietary exposure to an environmental toxin triggers neurofibrillary tangles and amyloid deposits in the brain, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(20152397), pp. 1– 10. doi: 10.1098/rspb.2015.2397.

Dittmann, E., Fewer, D.P., Neilan, B.A., 2013. Cyanobacterial toxins: biosynthetic routes and evolutionary roots. *FEMS Microbiol. Rev.* 37 (1), 23–43.

Driscoll, C. B., Meyer, K. A., Šulčius, S., Brown, N. M., Dick, G. J., Cao, H., ... & Dreher, T. W. (2018). A closely-related clade of globally distributed bloom-forming cyanobacteria within the Nostocales. *Harmful Algae*, 77, 93-107.

Drobac, D., Tokodi, N., Simeunović, J., Baltić, V., Stanić, D., & Svirčev, Z. (2013). Human exposure to cyanotoxins and their effects on health. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 64(2), 305-315.

European Environment Agency (2000). Environmental signals 2000. European Environment Agency regular indicator report. Copenhagen, Denmark.

Falconer, I. R., & Humpage, A. R. (1996). Tumour promotion by cyanobacterial toxins. *Phycologia*, 35(sup6), 74-79.

- Falconer, I. R. (1999). An overview of problems caused by toxic blue–green algae (cyanobacteria) in drinking and recreational water. *Environmental Toxicology: An International Journal*, 14(1), 5-12.
- Falconer, I.R., Humpage, A.R., 2005. Health risk assessment of cyanobacterial (bluegreen algal) toxins in drinking water. *Int. J Environ. Res. Public Health* 2 (1), 43–50.
- Färber Claudia, Wisshak Max, Pyko Ines, Bellou Nikoleta, Freiwald André. Effects of Water Depth, Seasonal Exposure, and Substrate Orientation on Microbial Bioerosion in the Ionian Sea (Eastern Mediterranean) *PLOS ONE*. 2015;10(4):e0126495.
- Fay, P. (1983). *The blue-greens:(cyanophyta-cyanobacteria)*. (No Title).
- Ferrao-Filho, A. da S., Kozlowsky-Suzuki, K., 2011. Cyanotoxins: bioaccumulation and effects on aquatic animals. *Mar. Drugs* 9, 2729–2772.
- Ghadouani, A., Pinel-Alloul, B., & Prepas, E. E. (2003). Effects of experimentally induced cyanobacterial blooms on crustacean zooplankton communities. *Freshwater Biology*, 48(2), 363-381.
- Gkelis, S., Papadimitriou T., Zaoutsos, N., Leonardos I., (2014). Anthropogenic and climate-induced change favors toxic cyanobacteria blooms: Evidence from monitoring a highly eutrophic, urban Mediterranean lake. *Harmful Algae*, 39, 322 -333.
- Gkelis, S., & Panou, M. (2016). Capturing biodiversity: linking a cyanobacteria culture collection to the “scratchpads” virtual research environment enhances biodiversity knowledge. *Biodiversity data journal*, (4).
- Guiry M. D., Guiry M. D. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>.
- Heindel K., Westphal H., Wisshak M. Data report: bioerosion in the reef framework, IODP Expedition 310 off Tahiti (Tiarei, Maraa, and Faaa sites) *Proceedings of the IODP*; 2009.
- Hirsch Peter. *The Family Pelonemataceae. The Prokaryotes*. 1981
- Hitzfeld, B.C., Hoger, S.J., Dietrich, D.R., 2000. Cyanobacterial toxins: removal during drinking water treatment, and human risk assessment. *Environ. Health Perspect.* 108, 113–122.

Ibelings, B.W., Chorus, I., 2007. Accumulation of cyanobacterial toxins in freshwater seafood and its consequences for public health: a review. *Environ. Pollut.* 150 (1), 177–192.

Ibelings, B.W., Havens, K.E., 2008. Cyanobacterial toxins: a qualitative meta-analysis of concentrations, dosage and effects in freshwater, estuarine and marine biota. In: Hudnell, H.K. (Ed.), *Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research Needs*. Springer, pp. 675–732.

Ibelings, B.W., Vonk, M., Los, H.F.J., van der Molen, D.T., Mooij, W.M., 2003. Fuzzy modeling of cyanobacterial surface waterblooms: validation with NOAAVHRR satellite images. *Ecol. Appl.* 13 (5), 1456–1472.

Ikawa, M., Sasner, J. J., & Haney, J. F. (2001). Activity of cyanobacterial and algal odor compounds found in lake waters on green alga *Chlorella pyrenoidosa* growth. *Hydrobiologia*, 443, 19-22.

Isbister, G. K., & Kiernan, M. C. (2005). Neurotoxic marine poisoning. *The Lancet Neurology*, 4(4), 219-228.

Jeppesen, E., Sondergaard, M., Meerhoff, M., Lauridsen, T.L., Jensen, J.P., 2007. Shallow lake restoration by nutrient loading reduction - some recent findings and challenges ahead. *Hydrobiologia* 584, 239–252.

Jevtovic-Todorovic, V., Hartman, R. E., Izumi, Y., Benshoff, N. D., Dikranian, K., Zorumski, C. F., ... & Wozniak, D. F. (2003). Early exposure to common anesthetic agents causes widespread neurodegeneration in the developing rat brain and persistent learning deficits. *Journal of Neuroscience*, 23(3), 876-882.

Kapusta, K., & Stańczyk, K. (2011). Pollution of water during underground coal gasification of hard coal and lignite. *Fuel*, 90(5), 1927-1934.

Komárek, J. (2016). A polyphasic approach for the taxonomy of cyanobacteria: principles and applications. *European Journal of Phycology*, 51(3), 346-353.

Komárek J, Kaštovský J., Mareš J., Johansen J. R. Taxonomic classification of cyanoprokaryotes (cyanobacterial genera) 2014, using a polyphasic approach. *Preslia*. 2014;86:295–335.

Koureas Dimitrios, Hardisty Alex, Vos Rutger, Agosti Donat, Arvanitidis Christos, Bogatencov Peter, Buttigieg Pier Luigi, Jong Yde de, Horvath Ferenc, Gkoutos Georgios, Groom Quentin, Kliment Tomas, Kõljalg Urmas, Manakos Ioannis, Marcer Arnald, Marhold Karol, Morse David, Mergen Patricia, Penev Lyubomir, Pettersson Lars, Svenning Jens-Christian, de Putte Anton van, Smith Vincent. Unifying European Biodiversity Informatics (BioUnify) Research Ideas and Outcomes. 2016;2:e7787.

Kozłowski-Suzuki, B., Wilson, A.E., Ferrao-Filho, A.d.S., 2012. Biomagnification or biodilution of microcystins in aquatic foodwebs? Meta-analyses of laboratory and field studies. *Harmful Algae* 18, 47–55.

Krishnan, A. V., Goldstein, D., Friedlander, M., & Kiernan, M. C. (2005). Oxaliplatin-induced neurotoxicity and the development of neuropathy. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*, 32(1), 51-60.

Kubickova, B., Babica, P., Hilscherová, K., & Šindlerová, L. (2019). Effects of cyanobacterial toxins on the human gastrointestinal tract and the mucosal innate immune system. *Environmental Sciences Europe*, 31(1), 1-27.

Kuiper-Goodman, T., Falconer, I., Fitzgerald, J., 1999. Human health aspects. In: Chorus, I., Bartram, J. (Eds.), *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring, and Management*. E&FNSpoon, London, pp. 113–153.

Lafarga, T., Aluko, R. E., Rai, D. K., O'Connor, P., & Hayes. Identification of bioactive peptides from a papain hydrolysate of bovine serum albumin and assessment of an antihypertensive effect in spontaneously hypertensive rats. *Food Research International*, 2019; 81, 91–99.

Lawton, L.A., Codd, G.A., 1991. Cyanobacterial (blue-green algal toxins) and their significance in UK and European waters. *J. Inst. Water Environ. Manage.* 5 (4), 460–465.

Lee, T. F., & Eggleston, P. M. (1989). Airborne algae and cyanobacteria. *Grana*, 28(1), 63-66.

Lee, S., Kim, J., & Lee, J. (2021). Colonization of toxic cyanobacteria on the surface and inside of leafy green: A hidden source of cyanotoxin production and exposure. *Food Microbiology*, 94, 103655.



Magalhaes, V. D., Marinho, M. M., Domingos, P., Oliveira, A. C., Costa, S. M., Azevedo, L. D., & Azevedo, S. M. F. O. (2003). Microcystins (cyanobacteria hepatotoxins) bioaccumulation in fish and crustaceans from Sepetiba Bay (Brasil, RJ). *Toxicon*, 42(3), 289-295.

Metcalf, J.S., Banack, S.A., Lindsay, J., Morrison, L.F., Cox, P.A., Codd, G.A., 2008. Cooccurrence of beta-N-methylamino-L-alanine, a neurotoxic amino acid with other cyanobacterial toxins in British waterbodies, 1990–2004. *Environ. Microbiol.* 10 (3), 702–708.

Mitrovic, S. M., Chessman, B. C., Bowling, L. C., & Cooke, R. H. (2006). Modelling suppression of cyanobacterial blooms by flow management in a lowland river. *River Research and Applications*, 22(1), 109-114.

Moore, S.K., V.L. Trainer, N.J. Mantua, M.S. Parker, E.A. Laws, L.C. Backer, and L.E. Fleming, Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health. *Environmental Health*, vol. 7, Suppl 2, 2008, p. S4.

Moustaka-Gouni, M., Vardaka, E., Tryfon, E., (2007). Phytoplankton species succession in a shallow Mediterranean lake (L. Kastoria, Greece): steady-state dominance of *Limnithrix redekei*, *Microcystis aeruginosa* and *Cylindrospermopsis raciboeskii*. *Hydrobiologia*, 575, 129-140

Muluye, T., Fetahi, T., Engdaw, F., & Mohammed, A. (2023). Cyanotoxins in African waterbodies: occurrence, adverse effects, and potential risk to animal and human health. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(11), 7519-7542.

Mur, R., Skulberg, O. M., & Utkilen, H. (1999). CYANOBACTERIA IN THE ENVIRONMENT.

Μπουρτσάλας, Α. Θέμελης, Ν. Καλογήρου, Ε. Περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης διαχείρισης Αστικών Στερεών Αποβλήτων (Α.Σ.Α.) για τις Περιφέρειες της Ελλάδος [Βιβλίο]. - Columbia :EarthEngineeringCenter, 2011.

Neilan, B.A., Pearson, L.A., Muenchhoff, J., Moffitt, M.C., Dittmann, E., 2013. Environmental conditions that influence toxin biosynthesis in cyanobacteria. *Environ. Microbiol.* 15 (5), 239–1253.

- Νταρακάς, Ε. (2011). Στοιχεία χημείας περιβάλλοντος. Σημειώσεις για το αντίστοιχο μάθημα του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη», ΑΠΘ.
- Paerl, H. W., & Millie, D. F. (1996). Physiological ecology of toxic aquatic cyanobacteria. *Phycologia*, 35(sup6), 160-167.
- Paerl, H.W., Huisman, J., 2009. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environ. Microbiol. Rep.* 1 (1), 27–37.
- Papadimitriou, T., I. Kagalou, V. Bacopoulos, and I.D. Leonardos, Accumulation of Microcystins in Water and Fish Tissues: An Estimation of Risks Associated with Microcystins in Most of the Greek Lakes *Environmental Toxicology*, vol. 25, no. 4, 2010, p. 418427.
- Papadopoulou-Mourkidou, E. (2002). Determination of triazine and chloroacetanilide herbicides in soils by microwave-assisted extraction (MAE) coupled to gas chromatographic analysis with either GC– NPD or GC– MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(18), 5026-5033.
- Rigosi, A., Carey, C.C., Ibelings, B.W., Brookes, J.D., 2014. The interaction between climate warming and eutrophication to promote cyanobacteria is dependent on trophic state and varies among taxa. *Limnol. Oceanogr.* 59 (1), 99–114.
- Sahoo D., & Seckbach, J. (Eds.). *The Algae World*. SPRINGER ISBN 978-94-017-7321-8, 2015.
- Saker, M. L., Nogueira, I. C., Vasconcelos, V. M., Neilan, B. A., Eaglesham, G. K., & Pereira, P. (2003). First report and toxicological assessment of the cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* from Portuguese freshwaters. *Ecotoxicology and environmental safety*, 55(2), 243-250.
- Saker, M.L., Griffiths, D.J., 2000. The effect of temperature on growth and cylindrospermopsin content of seven isolates of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanophyceae) from water bodies in northern Australia. *Phycologia* 39 (4), 349–354.
- Saqrane, S., & Oudra, B. (2009). CyanoHAB occurrence and water irrigation cyanotoxin contamination: ecological impacts and potential health risks. *Toxins*, 1(2), 113-122.

- Schindler, D.W., 2006. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnol. Oceanogr.* 51 (1), 356–363.
- Schindler, D.W., Hecky, R.E., Findlay, D.L., Stainton, M.P., Parker, B.R., Paterson, M.J., Beaty, K.G., Lyng, M., Kasian, S.E.M., 2008. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 105 (32), 11254–11258.
- Seifert, M., McGregor, G., Eaglesham, G., Wickramasinghe, W., Shaw, G., 2007. First evidence for the production of cylindrospermopsin and deoxy-cylindrospermopsin by the freshwater benthic cyanobacterium, *Lyngbya wollei* (Farlow ex Gornont) Speziale and Dyck. *Harmful Algae* 6 (1), 73–80.
- Skuja H. Süßwasseralgen aus Griechenland und Kleinasien. *Hedwigia.* 1937;77:15–73. German.
- Stanković S. Sur les particularités limnologiques de lacs égéens. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie.* 1931;5:158–196.
- Svrcek, C. and D.W. Smith, Cyanobacteria toxins and the current state of knowledge on water treatment options: a review. *Journal of Environmental Engineering and Science*, vol. 3, no. 3, 2004, p. 155-185.
- Tonk, L., Visser, P.M., Christiansen, G., Dittmann, E., Snelder, E., Wiedner, C., Mur, L.R., Huisman, J., 2005. The microcystin composition of the cyanobacterium *Planktothrix agardhii* changes toward a more toxic variant with increasing light intensity. *Appl. Environ. Microbiol.* 71 (9), 5177–5181.
- van Apeldoorn, M.E., van Egmond, H.P., Speijers, G.J.A., Bakker, G.J.I., 2007. Toxins of cyanobacteria. *Mol. Nutr. Food Res.* 51 (1), 7–60.
- van der Merwe, D., Sebbag, L., Nietfeld, J.C., Aubel, M.T., Foss, A., Carney, E., 2012. Investigation of a *Microcystis aeruginosa* cyanobacterial freshwater harmful algal bloom associated with acute microcystin toxicosis in a dog. *J. Vet. Diagn. Invest.* 24 (4), 679–687.
- Visser, P.M., Ibelings, B.W., vanderVeer, B., Koedood, J., Mur, L.R., 1996. Artificial mixing prevents nuisance blooms of the cyanobacterium *Microcystis* in Lake Nieuwe Meer, the Netherlands. *Freshw. Biol.* 36 (2), 435–450.

Walsby, A.E., Kinsman, R., Ibelings, B.W., Reynolds, C.S., 1991. Highly buoyant colonies of the cyanobacterium *Anabaena lemmermanni* form persistent surface waterblooms. *Arch. Fur Hydrobiol.* 121 (3), 261–280.

Whitton, B. A. (Ed.). (2012). *Ecology of cyanobacteria II: their diversity in space and time.* Springer Science & Business Media.

Wiedner, C., Visser, P.M., Fastner, J., Metcalf, J.S., Codd, G.A., Mur, L.R., 2003. Effects of light on the microcystin content of *Microcystis* strain PCC 7806. *Appl. Environ. Microbiol.* 69 (3), 1475–1481.

World Health Organization. (2004). *Guidelines for drinking-water quality* (Vol. 1). World Health Organization.

World Health Organization, W.H.O., *Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring, and management.* Genova. 1999.

Yokoyama, A., & Park, H. D. (2003). Depuration kinetics and persistence of the cyanobacterial toxin microcystin-LR in the freshwater bivalve *Unio douglasiae*. *Environmental Toxicology: An International Journal*, 18(1), 61-67.

Zamyadi, A., MacLeod, S.L., Fan, Y., McQuaid, N., Dorner, S., Sauve, S., Prevost, M., 2012. Toxic cyanobacterial breakthrough and accumulation in a drinking water plant: A monitoring and treatment challenge. *Water Res.* 46 (5), 1511–1523.