

## ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Τα μικροφύκη ή το φυτοπλαγκτόν όπως έχουμε συνηθίσει να τα ονομάζουμε όταν



τα καλλιεργούμε σε εργαστηριακές ή συνθήκες παραγωγής, έχουν συνδεθεί νοηματικώς με χρήσιμους οργανισμούς σε ποικίλους τομείς, είτε αυτοί αφορούν τις υδατοκαλλιέργειες, είτε την εξαγωγή χρήσιμων προϊόντων (καρωτενοειδή, φαρμακευτικά, βιοκαύσιμα κ.λπ.). Και πραγματικά έτσι έχει η κατάσταση με τη σπουδαιότητα των φυκών (μικροφύκη και μακροφύκη) να αναγνωρίζεται και να εκτιμάται ολοένα και περισσότερο στην εποχή μας. Υπάρχει όμως και ένα μάλλον «σκοτεινό» και ενοχλητικό πεδίο στην όλη

κατάσταση των μικροφυκών και αυτό αφορά τις δραματικές επιπτώσεις που μπορεί να έχουν για τα ζώα και τον άνθρωπο οι ποικίλες τοξίνες που παράγουν τα μικροφύκη. Δεν παράγουν όμως όλα τα μικροφύκη τοξίνες και δεν τις παράγουν σε επικίνδυνο βαθμό όταν βρίσκονται σε μικρούς πληθυσμούς. Και για να το ξεκαθαρίσω από την αρχή τοξίνες παράγονται μόνο από τα μικροφύκη (είτε πλαγκτονικά είδη, είτε βενθικά). Τα μακροφύκη δεν παράγουν τοξίνες και δεν μας αφορούν εδώ. Από τα περίπου 26.000 είδη φυκών περί τα 350 παράγουν τοξίνες. Τα μικροφύκη αυτά ανήκουν και στο προκαρυωτικό υπερβασίλειο (κυανοβακτήρια) και στο ευκαρυωτικό (η πλειονότητα των μικροφυκών).

Η δράση των τοξινών που παράγονται από τα τοξικά μικροφύκη απασχολεί ολοένα και περισσότερο τους επιστήμονες και τους οργανισμούς προστασίας της υγείας των πολιτών επειδή η δηλητηρίαση από αυτές είναι «ύπουλη». Το νερό που είναι τοξικό δεν μυρίζει και δεν πικρίζει ώστε να προκαλέσει την άμεση αποστροφή του ανθρώπου. Αν για παράδειγμα σε δεξαμενές απ' όπου γίνεται υδροληψία πόσιμου νερού έχουν αναπτυχθεί τοξικά κυανοβακτήρια, το νερό αυτό είναι επικίνδυνο για την υγεία. Το ίδιο κι αν καταναλώσουμε θαλασσινά οστρακοειδή αναπτυγμένα σε νερό όπου υπάρχει έντονη ανάπτυξη τοξικών δινομαστιγωτών τα οποία καταναλώθηκαν (φαγώθηκαν) από αυτά τα θαλασσινά (μύδια, στρείδια, κ.λπ.). Τότε ο άνθρωπος κινδυνεύει πραγματικά επειδή στη σάρκα αυτών των θαλασσινών λόγω της βιολογικής διεργασίας της βιοσυσσώρευσης έχει συγκεντρωθεί μεγάλη ποσότητα τοξίνης. Ευτυχώς στις υπηρεσίες τις επιφορτισμένες με την προστασία της δημόσιας υγείας έχουν αναπτυχθεί και συνεχώς εξελίσσονται μέθοδοι ανίχνευσης και οδηγίες για αυτές τις τοξίνες. Ας διερευνήσουμε λοιπόν σε ένα συνοπτικό σύγγραμμα το πολύ σημαντικό πεδίο των τοξικών μικροφυκών για να εξοικειωθούν και με αυτές οι σπουδάζοντες τα φύκη.

**Γιώργος Χώτος, Μεσολόγγι 2018**

## ΤΟΞΙΚΑ ΜΙΚΡΟΦΥΚΗ

(Ένας συνοπτικός οδηγός των μικροφυκών που παράγουν τοξίνες)  
Γεωργίου Ν. Χώτου, καθηγητού Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας

Τα μικροφύκη και κυρίως αυτά που είναι πλαγκτονικής κατάστασης διαθέτουν την ικανότητα να παράγουν ποικίλες ουσίες οι οποίες είναι τοξικές για άλλους οργανισμούς. Αυτές οι ουσίες προσδίδουν στα κύτταρά τους μια μορφή άμυνας έναντι των οργανισμών που επιδιώκουν να τα καταναλώσουν (θηρευτές) ή να τα ανταγωνιστούν για τα διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά (φώσφορος, άζωτο, κ.λπ.) στο νερό.

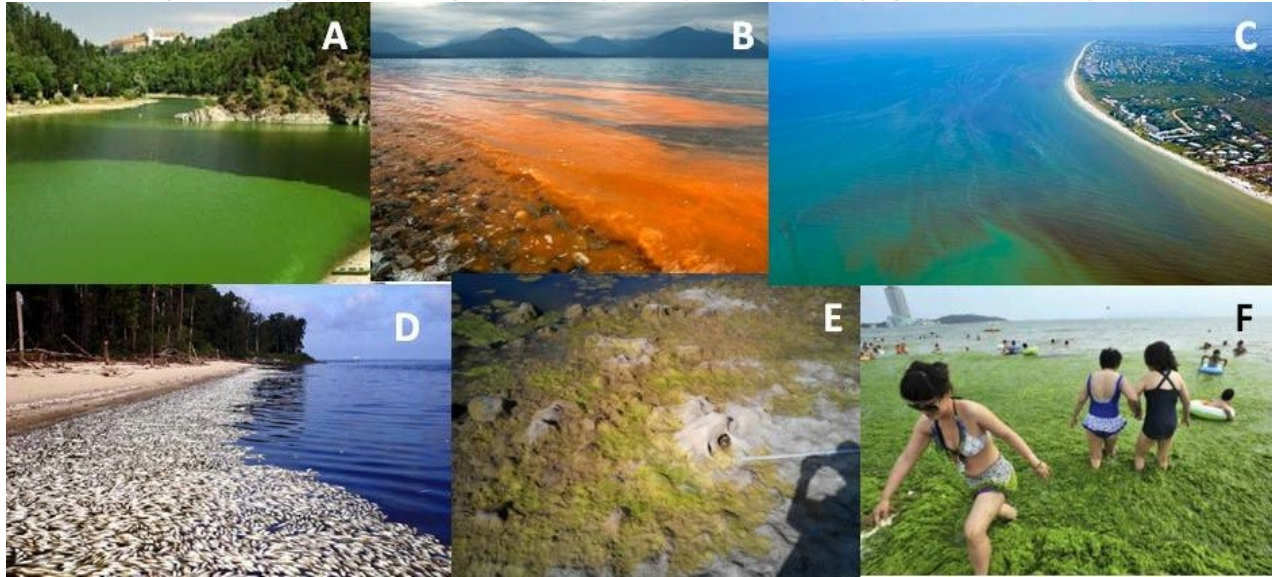
Αυτές οι χημικές ουσίες αποτελούν μέρος των στρατηγικών που έχουν εξελικτικώς αποκτήσει αυτά τα μικροφύκη για να αμύνονται και να επικρατούν έναντι άλλων ειδών που επιδιώκουν είτε να τα αφανίσουν είτε να τα ανταγωνιστούν. Άλλες στρατηγικές αποφυγής θηρευτών έχουν να κάνουν με ειδικές διαμορφώσεις του κυττάρου (π.χ. ακανθώδεις προεξοχές σε ορισμένα διάτομα), συσσωματώματα κυττάρων σε αποικίες, παραγωγή βλέννας, βιοφωσφορισμό κ.ά. Εδώ όμως θα μας απασχολήσουν μόνο οι παραγόμενες χημικές ουσίες οι οποίες καλούνται **τοξίνες**. Και καλούνται τοξίνες από ανθρωποκεντρική άποψη επειδή υπό κατάλληλες συνθήκες μπορούν να καταλήξουν μέσω των τροφικών πλεγμάτων (Σχήμα 3) από τα φύκη στον άνθρωπο ή σε οικόσιτα και μη οικόσιτα ζώα (ψάρια, πουλιά, υδρόβια θηλαστικά, κ.ά.) και να προκαλέσουν ποικιλία επώδυνων συμπτωμάτων μέχρι ακόμα και το θάνατο.

Πριν από κάθε τι άλλο πρέπει να ξεκαθαριστεί ό,τι αυτές οι τοξίνες παράγονται τόσο από μικροφύκη που ανήκουν στα **κυανοβακτήρια** και τις ονομάζουμε **κυανοτοξίνες** όσο και από τα ευκαρυωτικά μικροφύκη και τις ονομάζουμε **φυκοτοξίνες**.

Ειδικώς για τα κυανοβακτήρια που παράγουν τις κυανοτοξίνες, πρέπει να επισημανθεί ότι αυτά είναι είτε κυανοβακτήρια ανήκοντα ολοκληρωτικώς στην πλαγκτονική διαβίωση (φυτοπλαγκτόν) είτε στην βενθική διαβίωση υπό μορφή βιολογικού τάπητα (biological mat) νηματοειδών κυανοβακτηρίων (κυρίως) επί του πυθμένα. Τα πλαγκτονικά κυανοβακτήρια εκτός από τον έντονο χρωματισμό που προσδίδουν στο νερό (συνήθως πράσινο) δημιουργούν όταν υπάρχουν έντονες πληθυσμιακές εξάρσεις και ένα επιφανειακό στρώμα αφρού (scum), ένα σημάδι προειδοποίησης για τον άνθρωπο, δηλαδή ότι το νερό αυτό είναι έντονα ρυπασμένο αφενός και τοξικό αφετέρου.

Τα ευκαρυωτικά τοξινοπαραγωγά μικροφύκη από την άλλη πλευρά είναι όλα αποκλειστικώς πλαγκτονικά (φυτοπλαγκτόν). Τα τοξινοπαραγωγά κυανοβακτήρια είναι είδη των γλυκών νερών ενώ τα τοξινοπαραγωγά ευκαρυοφύκη είναι σχεδόν αποκλειστικώς θαλασσινά. Η τοξικότητα που χαρακτηρίζει τα νερά στα οποία υπάρχουν τέτοια τοξινοπαραγωγά μικροφύκη, είναι ιδιαίτερα έντονη όταν υπάρχουν έντονες «ανθίσεις» (πληθυσμιακές εξάρσεις-blooms) φυτοπλαγκτού οι οποίες αφενός αποτελούνται κυρίως από τέτοια μικροφύκη και αφετέρου με το τέλος της άνθισης τα νεκρά τους κύτταρα αποσυντιθέμενα ελευθερώνουν μαζικά τις

ενδοκυτταρικές τους τοξίνες καθιστώντας το νερό άκρως επικίνδυνο (Σχήμα 1). Επιπλέον οι ανθίσεις του φυτοπλαγκτού στα εύτροφα-ρυπασμένα νερά λόγω των πολλών θρεπτικών ουσιών (κυρίως φωσφορικά και νιτρικά ιόντα) που χύνονται εκεί, καταλήγουν στην υποβάθμιση του υδάτινου περιβάλλοντος και τελικώς στην έλλειψη οξυγόνου (από την αερόβιο αποικοδόμηση του νεκρού φυτοπλαγκτού), κατάσταση που συχνά καταλήγει σε μαζικούς θανάτους ψαριών από ασφυξία.



**Σχήμα 1.** Εικόνες από μαζικές πληθυσμιακές εξάρσεις (ανθίσεις – blooms) φυτοπλαγκτού (μικροφυκών). **A:** Κυανοβακτηρίων σε λίμνη. **B & C:** Ερυθρά παλίρροια (red tide) από δινομαστιγωτά (κόκκινο νερό στο B, καφε-κόκκινο στο C). **D:** Μαζικός θάνατος ψαριών από τοξίνες μικροφυκών. **E:** Επιφανειακό στρώμα μάζας κυανοβακτηρίων. **F:** «Ανεύθυνη» και επιπόλαιη κολύμβηση σε νερό με έντονη άνθιση μικροφυκών.

Οι ανθίσεις φυτοπλαγκτού αφορούν κάθε κατηγορία μικροφυκών, κυανοβακτηρίων (προκαρυωτικών) και ευκαρυωτικών φυκών (χλωροφύκη, κ.ά.). Αφορούν επίσης και ορισμένους τύπους μακροφυκών (π.χ. τα χλωροφύκη των γενών *Enteromorpha*, *Cladophora*, κ.ά) τα οποία μαζί με τα μικροφύκη δημιουργούν την παχιά επίστρωση της επιφάνειας του νερού σαν ένα «πράσινο τάπητα». Όμως η πιο επικίνδυνη κατάσταση δημιουργείται όταν στις ανθίσεις αυτές επικρατούν τα κυανοβακτήρια. Τότε έχουμε τις λεγόμενες **επιβλαβείς ανθίσεις φυτοπλαγκτού (Harmful Algal Blooms ή HAB)**. Και κάτι τέτοιο είναι το πιθανότερο να συμβεί λόγω της μεγάλης ικανότητας των κυανοβακτηρίων να επικρατούν σε μαζικότητα επειδή μπορούν και εκμεταλλεύονται καλύτερα από κάθε άλλη κατηγορία φωτοσυνθετικών οργανισμών τα άφθονα θρεπτικά στοιχεία του νερού και την έντονη ακτινοβολία που «λούζει» την επιφάνεια του νερού.

Δεν παράγουν όλα τα είδη κυανοβακτηρίων τοξίνες. Όμως αυτά που τις παράγουν είναι αρκετά είδη και απαντώνται σε όλα τα γλυκά νερά. Το αν θα επικρατήσουν αυτά τα τοξικά είδη έναντι των υπόλοιπων μη τοξικών ειδών είναι κάτι που δεν μπορεί να προβλεφθεί. Όμως επειδή οι τοξίνες αυτές μπορεί να έχουν δραματικές επιπτώσεις στην επαφή με τέτοιο νερό (κατάποση, βρέξιμο, εισπνοή) οι επιστήμονες έχουν δημιουργήσει μεθόδους ανίχνευσης των κυανοτοξινών.



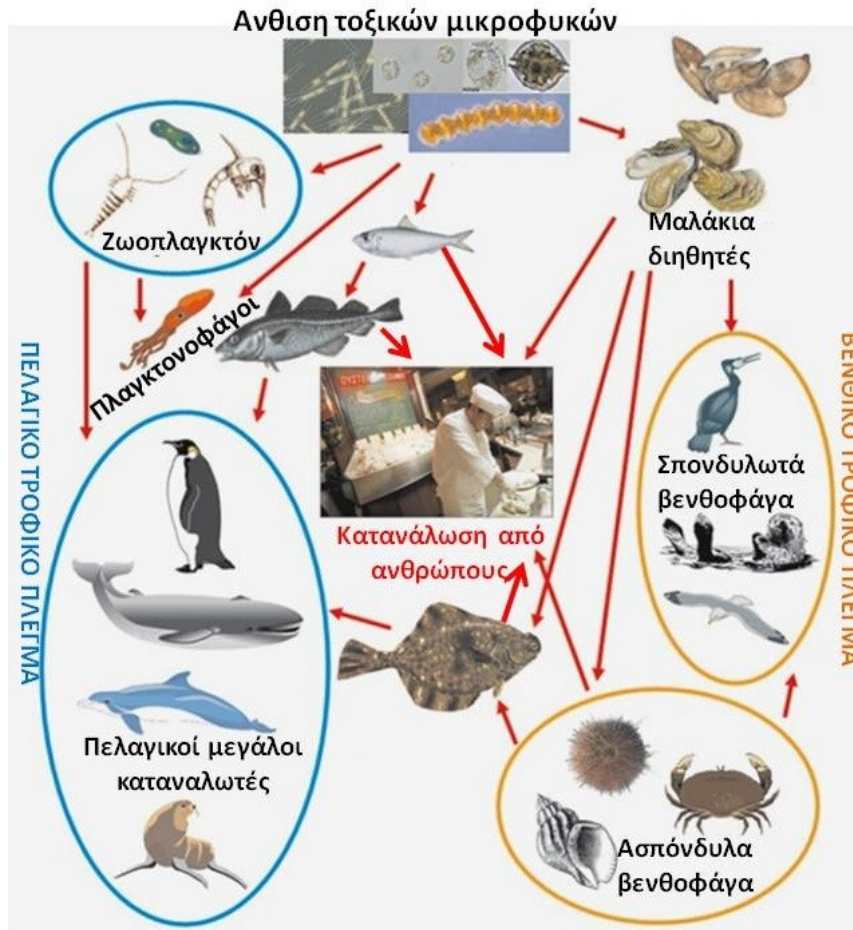
Στα αλμυρά νερά τις τοξίνες (φυκοτοξίνες) τις παράγουν κυρίως τα δινομαστιγωτά και δευτερευόντως τα διάτομα και τα απτόφυτα. Και εδώ η συσσώρευση των τοξινών στο νερό συμβαίνει όταν υπάρξουν οι κατάλληλες συνθήκες (πολλά θρεπτικά, θερμοκρασία, φως) για πληθυσμιακές εξάρσεις (ανθίσεις-blooms) αυτών των μικροφυκών. Διαβόητες είναι οι λεγόμενες «ερυθρές παλίρροιες» που προκαλούνται από ανθίσεις δινομαστιγωτών. Στην περίπτωση όμως των θαλασσινών νερών και συγκριτικά με τα γλυκά νερά, ο τρόπος της έκφρασης της τοξικότητας διαφέρει. Έτσι ενώ στα γλυκά νερά η τοξικότητα των κυανοτοξινών εκφράζεται μέσω της πιθανής κατάποσης (κυρίως) του νερού στο οποίο αναπτύχθηκαν τοξικά κυανοφύκη, στα αλμυρά νερά η τοξικότητα εκφράζεται λόγω της κατανάλωσης μαλακίων, καρκινοειδών ή ψαριών που ετράφησαν με τα τοξικά μικροφύκη.



**Σχήμα 2.** Ανθιση του απτόφυτου μικροφύκου *Prymnesium parvum*. **A:** Καφετί χρώμα του νερού. **B:** Συλλογή της μάζας των νεκρών ψαριών. **C:** Νεκρά ψάρια από την τοξίνη του *Prymnesium parvum*.

Μια άλλη διαφορά είναι ότι στα γλυκά νερά ακόμα και όταν έχουν ψοφήσει τα τοξικά κυανοβακτήρια και έχει απελευθερωθεί η τοξίνη τους (τότε ιδιαίτερα είναι που πλημμυρίζει το νερό με τοξίνες), τα νερά μπορεί να φαίνονται καθαρά μεν αλλά η τοξίνη παραμένει για αρκετό καιρό διαλυμένη στο λίγο ή πολύ στάσιμο νερό καθιστώντας το δηλητηριώδες. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει στα θαλάσσια νερά επειδή τα ρεύματα και η τεράστια μάζα του νερού δεν επιτρέπουν τη συσσώρευση και

παραμονή των τοξικών ουσιών στο ίδιο μέρος για μεγάλο χρονικό διάστημα. Συνεπώς η τοξική δράση των δινομαστιγωτών-διατόμων-απτοφύκων εκφράζεται κυρίως εμμέσως διά της κατανάλωσης ζώων που είχαν πρώτα καταναλώσει και συσσωρεύσει στη σάρκα τους τέτοια τοξικά μικροφύκη.



**Σχήμα 3.** Το περίπλοκο τροφικό πλέγμα που εμπλέκεται στη μεταφορά των τοξινών που παράγονται από μικροφύκη, από τους καταναλωτές 1<sup>ου</sup> επιπέδου (π.χ. μύδια) σε καταναλωτές ανώτερων τροφικών επιπέδων. Με τη διαδικασία της βιοσυσσωρεύσης η τοξίνη φθάνει σε μεγάλες συγκεντρώσεις στη σάρκα των ζώων που τελικώς καταναλώνει ο άνθρωπος.

Οι ανθίσεις του φυτοπλαγκτού στη θάλασσα δημιουργούν το φαινόμενο της λεγόμενης «ερυθράς παλίρροιας» (red tide), μια καθιερωμένη ονομασία όχι όμως και τόσο ακριβής μια και το χρώμα που παίρνει το νερό κυμαίνεται από το καφέ έως το ερυθρό. Ερυθρές παλίρροιας δημιουργούνται κυρίως από ανθίσεις δινομαστιγωτών και κατά δεύτερο λόγο από απτόφυτα (π.χ. *Prymnesium parvum*, Σχήμα 2). Στην ερυθρά παλίρροια θα μπορούσαμε να εντάξουμε επίσης και τις τρομακτικές ωκεάνιες ανθίσεις του νηματοειδούς κυανοβακτηρίου *Trichodesmium* οι οποίες καλύπτουν εκτάσεις χιλιάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων αλλά επειδή είναι φαινόμενο κυρίως των ωκεάνιων περιοχών (ενώ των δινομαστιγωτών-απτοφύτων κυρίως των παράκτιων) δεν γίνεται εύκολα αντιληπτό. Πάντως κάθε τέτοιο φαινόμενο άνθισης φυτοπλαγκτού σαν τα παραπάνω αναφερόμενα εντάσσεται στον ορισμό της επιβλαβούς άνθισης φυτοπλαγκτού (HAB) επειδή με τον ένα ή άλλο τρόπο επιφέρει τοξίνωση του νερού.



Ο βαθμός έκλυσης της τοξίνης από τα κύτταρα των μικροφυκών στο νερό δεν είναι ξεκαθαρισμένος, όμως αυτό που είναι αδιαμφισβήτητο και σίγουρο είναι το ό,τι η τοξική δράση θα εμφανισθεί στους οργανισμούς που κατανάλωσαν αυτά τα μικροφύκη αφενός και αφετέρου στο ίδιο το νερό όταν τα κύτταρα των μικροφυκών ψοφήσουν μαζικά και αποσυντιθέμενα θα απελευθερώσουν τις τοξίνες τους. Τότε αδιαμφισβήτητα ένα τέτοιο νερό είναι ακατάλληλο για κάθε χρήση είτε αυτή είναι για πόση, είτε για μπάνιο, είτε για οποιαδήποτε επεξεργασία του.

Η άμεση επίπτωση των παραπάνω φαινομένων ανθίσεων-τοξίνωσης του νερού είναι οι **μαζικοί θάνατοι ψαριών** (fish kills) με τις δραματικές εικόνες των χιλιάδων νεκρών ψαριών ξεβρασμένων στις ακτές, ένα καταστροφικό φαινόμενο όχι μόνο για την αλιεία αλλά και για την υποβάθμιση του κάλλους του περιβάλλοντος που επιφέρει.

Σε μια προσπάθεια να κωδικοποιηθεί ένας γρήγορος-συμπαγής ενημερωτικός οδηγός για τις τοξίνες των φυκών, πρέπει να γίνουν κάποιες κατηγοριοποιήσεις ως προς το είδος των συγκεκριμένων τοξινών και των επιπτώσεών τους στα ζώα και στον άνθρωπο (Σχήμα 4). Αυτό αναλύεται παρακάτω.



**Σχήμα 4.** Οι δυσμενείς επιδράσεις των 2 δραστικότερων και συχνότερα εμφανιζόμενων κυανοτοξινών, μικροκυστίνη και κυλινδροσπερμοψίνη στον άνθρωπο και στα κατοικίδια ζώα.

## ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΟΞΙΝΩΝ

Το σύνολο των τοξινών που παράγονται από κυανοβακτήρια και ευκαρυωτικά μικροφύκη ομαδοποιείται σε 4 κατηγορίες ανάλογα με την προσβολή των ζωϊκών ιστών ή κυττάρων πρωταρχικώς του ανθρώπου (Σχήματα 4 & 5):

**νευροτοξίνες, ηπατοτοξίνες, κυτοτοξίνες και δερματοτοξίνες-γατροεντεροτοξίνες.**

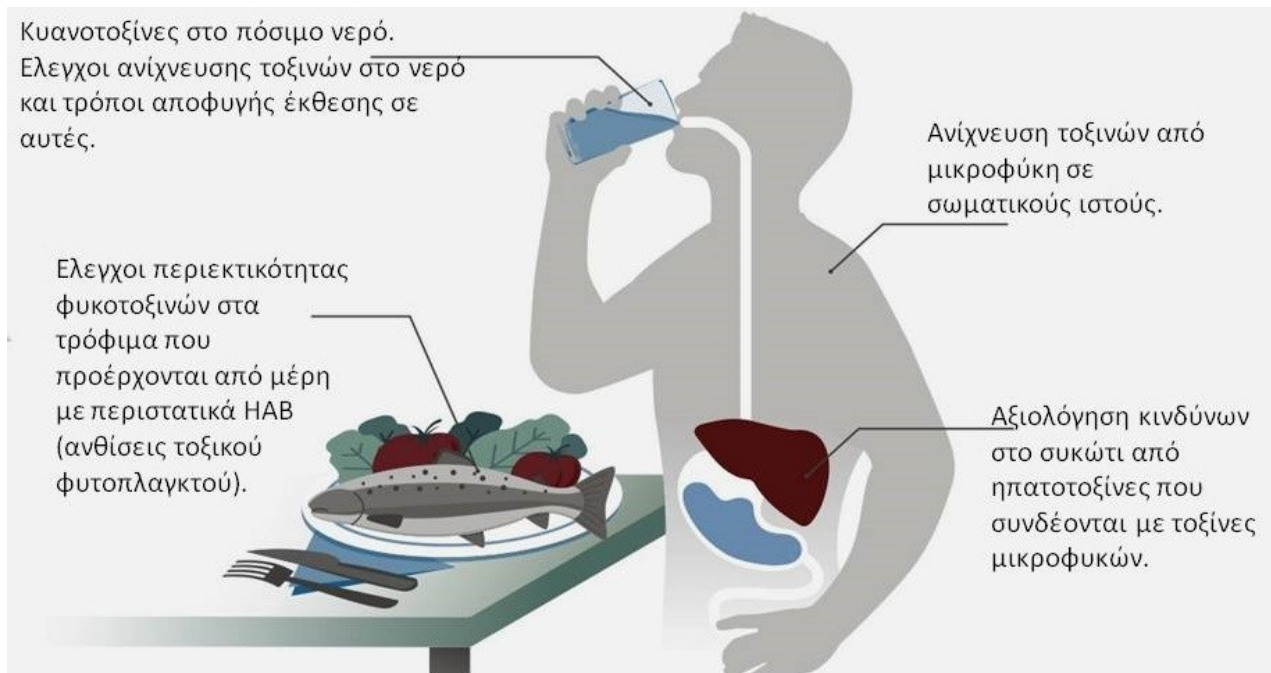
Αναλυτικότερα και συνοπτικώς όσον αφορά το μηχανισμό δράσης τους:

**Α) Νευροτοξίνες (Neurotoxins).** Οι νευροτοξίνες είναι διάφορα μακρομόρια όπως: ανατοξίνες, το αμινοξύ β-N μεθυλαμινο-L-αλανίνη (BMAA), σαξιτοξίνες, μπρεβιτοξίνες, δομοϊκό οξύ και νευροτοξίνες *Pfiesteria*. Οι νευροτοξίνες δρουν καταστροφικά στη λειτουργία του νευρικού συστήματος εμποδίζοντας κατά διάφορους τρόπους τη φυσιολογική επικοινωνία των νευρικών κυττάρων με τους μύες και μεταξύ τους (Σχήμα 7). Για παράδειγμα, οι ανατοξίνες αναστέλλουν τη δράση του ενζύμου ακετυλο-χολινεστεράση ο οποίο «αναγεννά» την νευροδιαβιβαστική (μεταξύ νευρικών κυττάρων) ουσία ακετυλχολίνη (Σχήμα 8). Αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι η έλλειψη ακετυλχολίνης και συνεπώς το σταμάτημα επικοινωνίας των νευρικών κυττάρων. Συνεπώς λόγω παύσης των νευρικών ερεθισμών το αποτέλεσμα είναι η αδυναμία συστολής των μυών που μπορεί να καταλήξει και στο θάνατο (αδυναμία εκτέλεσης αναπνευστικών κινήσεων). Οι σαξιτοξίνες, το δομοϊκό οξύ και οι μπρεβιτοξίνες εμποδίζουν τα νευρικά ερεθίσματα να φθάσουν στους μυς μέσω της αποδιοργάνωσης των διαύλων νατρίου των κυτοπλασματικών μεμβρανών. Η νευροτοξίνη *Pfiesteria* που παράγεται από το δινομαστιγωτό *Pfiesteria piscicida* καταστρέφει τα κύτταρα παράγοντας ελεύθερες ρίζες που βλάπτουν το DNA, οξειδώνουν πρωτεΐνες και λιπίδια και ενεργοποιούν τον κυτταρικό θάνατο (απόπτωση). Το BMAA καταστρέφει τα νευρικά κύτταρα.

**Β) Ηπατοτοξίνες (Hepatotoxins).** Οι ηπατοτοξίνες (μικροκυστίνη, νοδουλαρίνη) είναι κυκλικά πεπτιδικά πολυμερή τα οποία εμποδίζουν τη λειτουργία των πρωτεϊνικών φωσφατασών, ενζύμων που καταλύουν ουσιαστικές αντιδράσεις στον κυτταρικό μεταβολισμό. Τα μικροφύκη τις παράγουν για να αποτρέπουν την αύξηση άλλων ανταγωνιστικών μικροφυκών. Όταν μέσω της τροφικής αλυσίδας περάσουν στα ζώα διαταράσσουν και παραμορφώνουν τον κυτταροσκελετό των ηπατικών κυττάρων προκαλώντας αιμορραγία στο συκώτι.

**Γ) Κυτοτοξίνες (Cytotoxins).** Η αλκαλοειδούς φύσεως κυανοβακτηριακή κυτοτοξίνη κυλινδροσπερμοψίνη και οι παραγόμενες από δινομαστιγωτά οκαδαϊκό οξύ και δινοφυσίνη αποτελούν τις δραστικότερες τοξίνες που δρουν μέσω της παρεμπόδισης της κυτταρικής πρωτεϊνοσύνθεσης καθώς και μέσω γενετικών βλαβών που επιφέρουν.

**Δ) Δερματοτοξίνες-γατροεντεροτοξίνες.** Οι κυριότερες και δραστικότερες τοξίνες αυτής της κατηγορίας παράγονται από κυανοβακτήρια (απλυσλατοξίνη, λινγκμπιοτοξίνη). Στο θαλάσσιο περιβάλλον βενθικά κυανοβακτήρια του γένους *Lyngbya* που σχηματίζουν βιολογικούς “τάπητες” στον πυθμένα παράγουν κυρίως λινγκμπιοτοξίνη και άλλες τοξίνες που ερεθίζουν το δέρμα και είναι ύποπτες για πρόκληση νεοπλασιών. Στα γλυκά νερά άλλα κυανοβακτήρια πλαγκτικής διαβίωσης παράγουν λιποπολυσακχαρίτες οι οποίοι είναι ύποπτοι για πρόκληση φλεγμονών, πυρετού και γαστρεντερικού ερεθισμού στον άνθρωπο.



**Σχήμα 5.** Γενικό πλαίσιο ελέγχων για τοξίνες από φύκη στον άνθρωπο.

Οι παραπάνω τοξίνες δημιουργούν τα παρακάτω **συμπτώματα** και **ασθένειες** με έμφαση στα πιο γνωστά και επικίνδυνα.

**Α)** Οι νευροτοξίνες **ανατοξίνες** που παράγονται από ορισμένα στελέχη των κυανοβακτηρίων *Anabaena flos-aquae*, *Planktothrix*, κ.ά. καταστέλλουν τη νευρομυϊκή δραστηριότητα και μπορεί να φθάσουν μέχρι το θάνατο του ατόμου λόγω **αδυναμίας εκτέλεσης των αναπνευστικών κινήσεων των μυών**. Υπάρχει μέθοδος ηλεκτροχημικής ανίχνευσης του δείγματος νερού ύποπτου για ανατοξίνες.

**Β)** Το νευροτοξικό αμινοξύ  **$\beta$ -N μεθυλαμινο-L-αλανίνη (BMAA)** που παράγεται από όλα σχεδόν τα κυανοβακτήρια, στην περίπτωση του γένους *Nostoc* το οποίο συμβιώνει στις ρίζες των καλλιεργούμενων κυκαδωδών φυτών βρίσκει την πιο δραματική του έκφραση. Και αυτό συμβαίνει επειδή το αλεύρι που παρασκευάζεται σε ορισμένα μέρη του κόσμου (π.χ. Guam) από σπέρματα κυκαδωδών φυτών ή ζώα που είχαν τραφεί με κυκαδώδη, καταναλούμενα από ανθρώπους προκαλούν **άνοια (dementia)**.

**Γ)** Οι νευροτοξίνες **σαξιτοξίνη** και **μπρεβιτοξίνη** που παράγονται από κυανοβακτήρια και δινομαστιγωτά αντίστοιχα προκαλούν την λεγόμενη **Παραλυτική Δηλητηρίαση Οστρακοειδών (Paralytic Shellfish Poisoning– PSP)** ασθένεια που οφείλεται στην κατανάλωση οστρακοειδών τα οποία συσσωρεύσαν σαξιτοξίνη τοξίνες επειδή αναπτύχθηκαν σε νερά πλούσια στα παραπάνω τοξικά κυανοβακτήρια. Οι σαξιτοξίνες είναι πολύ ισχυρές σκοτώνοντας ποντίκια-πειραματόζωα εντός λεπτών μετά από ένεση με τοξίνη σε δόση ελάχιστη, της τάξης των 10  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Υπάρχει υποψία ότι και θάνατοι φαλαινών οφείλονται στις σαξιτοξίνες. Ευτυχώς για τον έλεγχο των σαξιτοξινών υπάρχουν μέθοδοι ελέγχου



είτε με φθορισμό είτε με χρήση ταινιών ελέγχου (test strips). Πιο ύπουλη όμως είναι η δηλητηρίαση από μπρεβιτοξίνη παραγόμενη από δινομαστιγωτά του γένους *Karenia*. Προκαλεί τη λεγόμενη **Νευρολογική Δηλητηρίαση Οστρακοειδών** (Neurological Shellfish Poisoning-**NSP**) η οποία εκδηλώνεται όχι μόνο από κατανάλωση δηλητηριασμένων οστρακοειδών αλλά και από εισπνοή σταγονιδίων νερού που δημιουργούνται από την εκτόξευσή τους στον αέρα (αεροζόλ) όταν τα κύματα σκάνε στην ακτή (και φυσικά στο νερό υπάρχει άνθιση *Karenia*). Η εισπνοή τους προκαλεί αναπνευστικά προβλήματα και ερεθισμό των μεμβρανών των ματιών και της ρινικής κοιλότητας. Η NSP όμως παρουσιάζει πολύ σοβαρότερα συμπτώματα που συνίστανται σε διάρροια, εμετό, κράμπες στομάχου, δύσπνοια, καρδιακή αρρυθμία τα οποία μπορεί να ρίξουν τον άνθρωπο σε κώμα ακόμα και στο θάνατο. Δυστυχώς δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα μέθοδος ελέγχου.

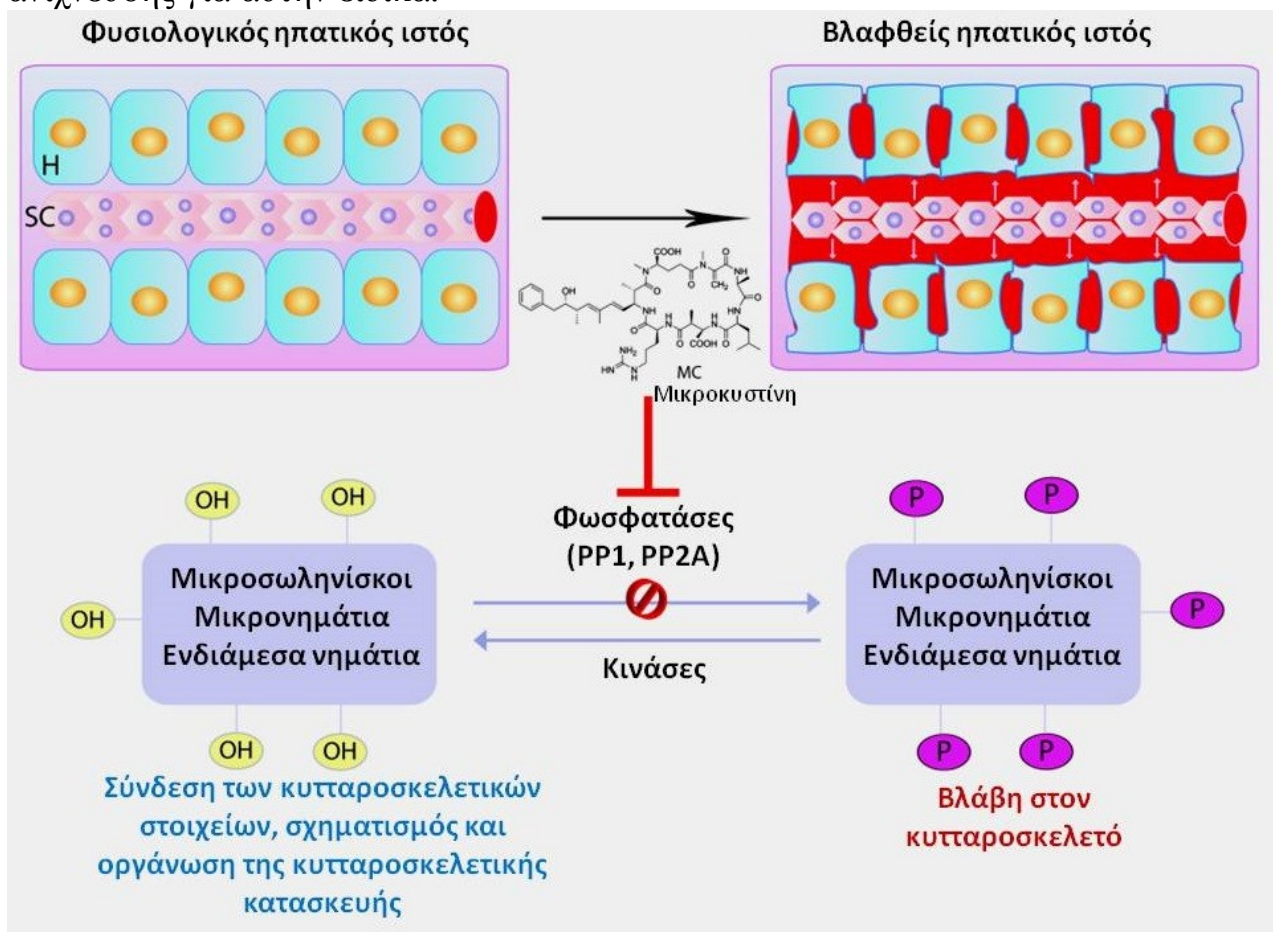
**Δ)** Η νευροτοξίνη **δομοϊκό οξύ** που παράγεται από ορισμένα είδη θαλάσσιων διατόμων και αποφύτων προκαλεί την **Αμνησιακή Δηλητηρίαση Οστρακοειδών** (Amnesiac Shellfish Poisoning-**ASP**) μετά από κατανάλωση οστρακοειδών που είχαν τραφεί με αυτά τα φύκη. Στους ανθρώπους η ασθένεια αυτή εκδηλώνεται με μόνιμη απώλεια πρόσφατης μνήμης λόγω εκφυλισμού του τμήματος του εγκεφάλου που ονομάζεται ιππόκαμπος. Το παράδοξο και συνάμα επικίνδυνο για τους ανυποψίαστους καταναλωτές μυδιών, στρειδιών, γαριδών, κ.ά. οστρακοειδών, είναι ότι τα οστρακοειδή τρεφόμενα με τα παραπάνω τοξικά μικροφύκη συσσωρεύουν στους ιστούς τους δομοϊκό οξύ χωρίς τα ίδια να παθαίνουν τίποτα. Εκτός από τους ανθρώπους η τοξίνη αυτή μπορεί να προκαλέσει θανάτους και σε θαλάσσια πτηνά (π.χ. πελεκάνους) μεταφερόμενη σε αυτά μέσω των τροφικών πλεγμάτων. Ευτυχώς διατίθεται στο εμπόριο μια εύχρηστη και ταχεία μέθοδος ελέγχου για ASP με χρήση ταινιών (test strips). Με συμπτώματα αμνησίας συνδέεται και η τοξίνη *Pfiesteria* αλλά τόσο η φύση της τοξίνης όσο και η ανίχνευσή της δεν έχουν ακόμα κατανοηθεί.

**Ε)** Οι κυανοβακτηριακής προέλευσης ηπατοτοξίνες **μικροκυστίνη** και **νοδουλαρίνη** αποτελούν πραγματικό κίνδυνο για τον άνθρωπο επειδή μπορεί να εμφανισθούν σε επικίνδυνες συγκεντρώσεις στο πόσιμο νερό των υδραγωγείων. Πόση τέτοιου νερού προκαλεί αδυναμία, ωχρότητα, βαριά αναπνοή, ψυχρά άκρα, εμετό, διάρροια και σε ιδιαίτερα βαριές προσβολές αιμορραγία του ήπατος που μπορεί να επιφέρει το θάνατο εντός 24ώρου από τη δηλητηρίαση. Ιδιαίτερα η μικροκυστίνη (Σχήμα 6) είναι πολύ τοξική και παρόλο που η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας συστήνει με οδηγία της ως ανώτατο όριο ασφαλείας το 1 μg/L στο πόσιμο νερό, η μικροκυστίνη μπορεί να φθάσει και τα 5 μg/L όταν υπάρξουν πληθυσμιακές «ανθίσεις» κυανοβακτηρίων *Microcystis*, *Anabaena*, *Planktothrix*. Φυσικά στους δημοτικούς σταθμούς επεξεργασίας του πόσιμου νερού γίνεται καθαρισμός αυτού και αφαιρούνται οι μικροκυστίνες μέσω του οζονισμού και της μικροδιήθησης του νερού, όμως ο συνεχής έλεγχος για μικροκυστίνες με καθιερωμένες χημικές μεθόδους αποτελεί συνεχή εργασία ρουτίνας. Το μεγάλο πρόβλημα το

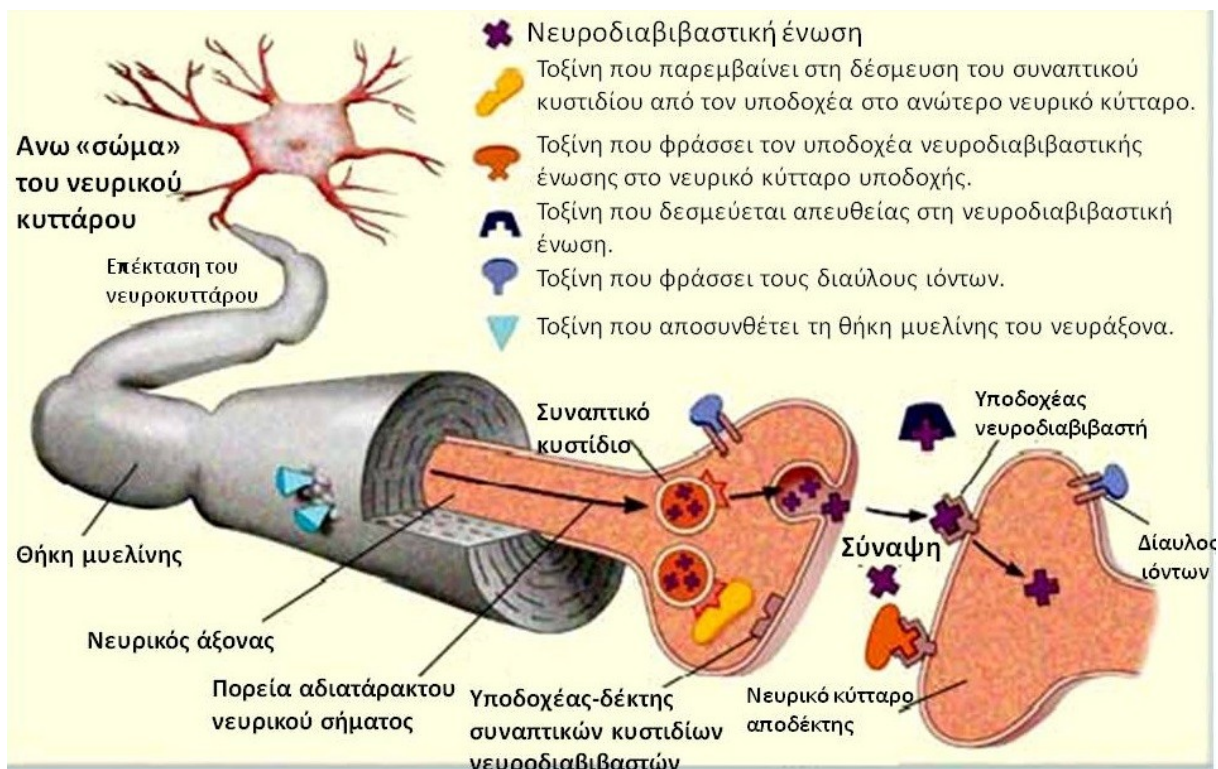
αντιμετωπίζουν οι μη αναπτυγμένες χώρες του κόσμου όπου για πόση χρησιμοποιούνται φυσικά ανεπεξέργαστα νερά.

**ΣΤ)** Οι κυτοτοξίνες με δραστικότερη την κυανοβακτηριακή **κυλινδροσπερμουψίνη** προκαλούν στα θηλαστικά θάνατο των κυττάρων στο συκώτι (ήπαρ), στα νεφρά, στον σπλήνα, στους πνεύμονες και στο έντερο. Οι τοξίνες οκαδαϊκό οξύ και δινοφυσίνη που παράγονται από δινομαστιγωτά συσσωρεύονται μέσω της τροφικής αλυσίδας στη σάρκα των οστρακοειδών και όταν αυτά καταναλωθούν από ανθρώπους προκαλούν τη λεγόμενη **Διαρροϊκή Δηλητηρίαση Οστρακοειδών** (Diarrhetic Shellfish Poisoning – **DSP**). Ευτυχώς έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται μια ταχεία μέθοδος ελέγχου τοξικότητας των οστρακοειδών πριν αυτά διακινηθούν για κατανάλωση.

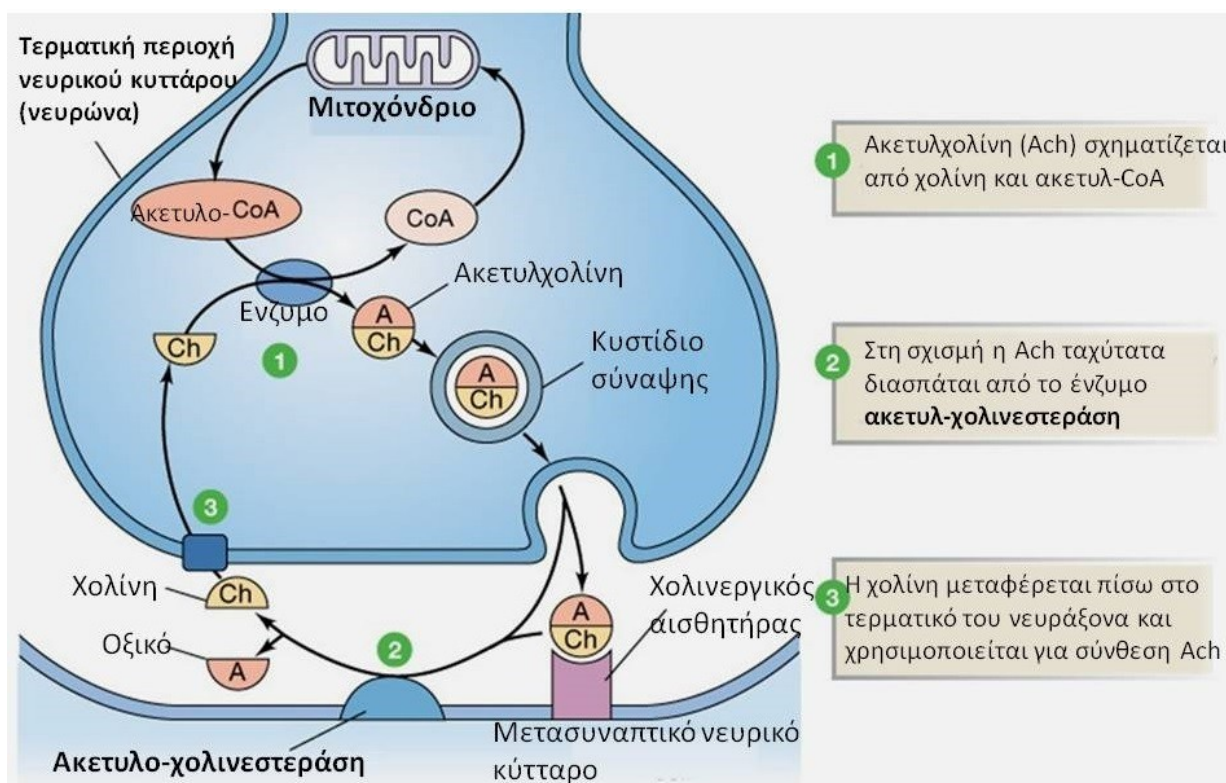
**Ζ)** Τα τοξικά **αζασπιρα-οξέα** παραγόμενα από το δινομαστιγωτό *Azadinium spirosum* αν και σπάνια δίδουν περιστατικά, προκαλούν εντούτοις τη λεγόμενη **Αζασπιρική Δηλητηρίαση Οστρακοειδών** (Azaspiracid Shellfish Poisoning-**AZP**) η οποία μετά από κατανάλωση δηλητηριασμένων οστρακοειδών (π.χ. μύδια) εκδηλώνεται με γαστρεντερικές διαταραχές, διάρροια και κράμπες στομάχου. Δεν έχει ολοκληρωθεί η έρευνα για την τοξίνη αυτή ούτε υπάρχει ειδικό τεστ ανίχνευσης για αυτήν ειδικά.



**Σχήμα 6.** Παραστατικοποίηση της δράσης της κυανοτοξίνης μικροκυστίνη (ηπατοτοξίνη) στον ηπατικό ιστό (συκώτι). Η βλάβη που επιφέρει στη δομή των ηπατικών κυττάρων διά της αποδιοργάνωσης της δομής του όλου ιστού, έχει ως αποτέλεσμα την αιμορραγία του συκωτιού.



**Σχήμα 7.** Οι διάφοροι μηχανισμοί βλαπτικής δράσης των νευροτοξινών στο νευρικό κύτταρο.



**Σχήμα 8.** Παράσταση του μηχανισμού δράσης του ενζύμου ακετυλο-χολινεστεράση. Το ένζυμο αυτό διασπά συνεχώς την νευροδιαβιβαστική ουσία ακετυλχολίνη για να ξαναχρησιμοποιηθεί το μόριο της χολίνης. Αν παρεμποδιστεί η δράση του ενζύμου αυτού από νευροτοξίνη δεν θα υπάρχει αρκετή διαθέσιμη χολίνη και δεν θα μπορεί συνεπώς να συντίθεται ακετυλχολίνη με αποτέλεσμα το σταμάτημα της διαβίβασης νευρικών σημάτων (απουσία μορίων ακετυλχολίνης).



## ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑΣ

Ανθρωποι που κατανάλωσαν ψάρια των τροπικών κοραλλιογενών υφάλων (π.χ. μπαρακούντα) μπορεί να δηλητηριασθούν από τη σάρκα τους και να εμφανίσουν τη λεγόμενη **δηλητηρίαση ciguatera**. Η ciguatera οφείλεται στις νευροτοξίνες **σιγκουατοξίνη** (ciguatoxin) και **μαϊτοτοξίνη** (maitotoxin) οι οποίες προέρχονται από το **δινωμαστιγωτό** μικροφύκος *Gambierdiscus toxicus* το οποίο αναπτύσσεται στην επιφάνεια των κοραλλιογενών υφάλων γενικώς. Το μικροφύκος αυτό αποτελεί τροφή για φυτοφάγα ψάρια-βοσκητές τα οποία με τη σειρά τους καταναλώνονται από σαρκοβόρα ψάρια-θηρευτές. Διά της βιοσυσσωρευσης η τοξίνη συγκεντρώνεται στα ψάρια αυτά τα οποία αλιευόμενα μπορεί να καταναλωθούν από τους ανυποψίαστους ανθρώπους. Εκτός από τη δηλητηριασμένη σάρκα η περίπτωση αυτής της τοξίνης γίνεται ακόμα πιο επικίνδυνη αν καταναλωθούν συκώτι, αυγά ή το κεφάλι από τα ψάρια αυτά. Δυστυχώς δεν υπάρχουν σημάδια που να προειδοποιούν αν το ψάρι είναι μολυσμένο (π.χ. παράξενη οσμή ή γεύση του) οπότε το καλύτερο είναι να αποφεύγεται η βρώση τέτοιων ψαριών (μπαρακούντα, σμέρνες, τροπικά λαβράκια, σφυρίδες, amberjack, κ.λπ.). Τα συμπτώματα της δηλητηρίασης καθώς και η διάρκειά τους, εμφανίζονται έντονα ή ελαφρύτερα ανάλογα με την ποσότητα που καταναλώθηκε και περιλαμβάνουν διάρροια, εμετό, μούδιασμα, φαγούρα, υπερευαισθησία σε ζεστό και κρύο, ζαλάδες και γενική αδυναμία. Δεν υπάρχουν φάρμακα για την καταπολέμησή τους αλλά ευτυχώς δεν πρόκειται για θανατηφόρα δηλητηρίαση. Επισημαίνεται ξανά ότι αφορά δηλητηρίαση που εμφανίζεται μόνο στις περιοχές των κοραλλιογενών υφάλων. Παρόλο που η δηλητηρίαση ciguatera θεωρείται και πιστεύεται από τον κοινό άνθρωπο ότι οφείλεται σε δηλητηριασμένα ψάρια, η πρωτογενής αιτία της είναι και εδώ κάποιο τοξικό μικροφύκος και αυτός είναι ο λόγος που συμπεριλαμβάνεται στο παρόν.

Αντίθετα με τη δηλητηρίαση ciguatera, η περίπτωση της δηλητηρίασης από τη νευροτοξίνη **τετροδοτοξίνη** (**tetrodotoxin**) οφείλεται καθαρά στην τοξική σάρκα ψαριών της τάξης Tetraodontiformes (με πιο γνωστό το ψάρι μπαλόνη-*Fugu rubripes*). Η τετροδοτοξίνη οφείλεται σε ορισμένα συμβιωτικά βακτήρια του σώματος του ψαριού και η δράση της έγκειται στο κλείσιμο των διαύλων ιόντων των νευρικών συνάψεων με αποτέλεσμα παράλυση των μυών η οποία επιφέρει τον θάνατο. Τα ψάρια αυτά θεωρούνται λιχουδιά σε περιοχές της Ν.Α. Ασίας και μόνο ειδικευμένοι μάγειροι επιτρέπεται να τα μαγειρέψουν γνωρίζοντας πώς να αδρανοποιήσουν την τοξίνη αφαιρώντας προσεκτικά τα εντόσθια και μαγειρεύοντας κατάλληλα το ψάρι. Η περίπτωση της τετροδοτοξίνης δεν αφορά εμπλοκή μικροφυκών.

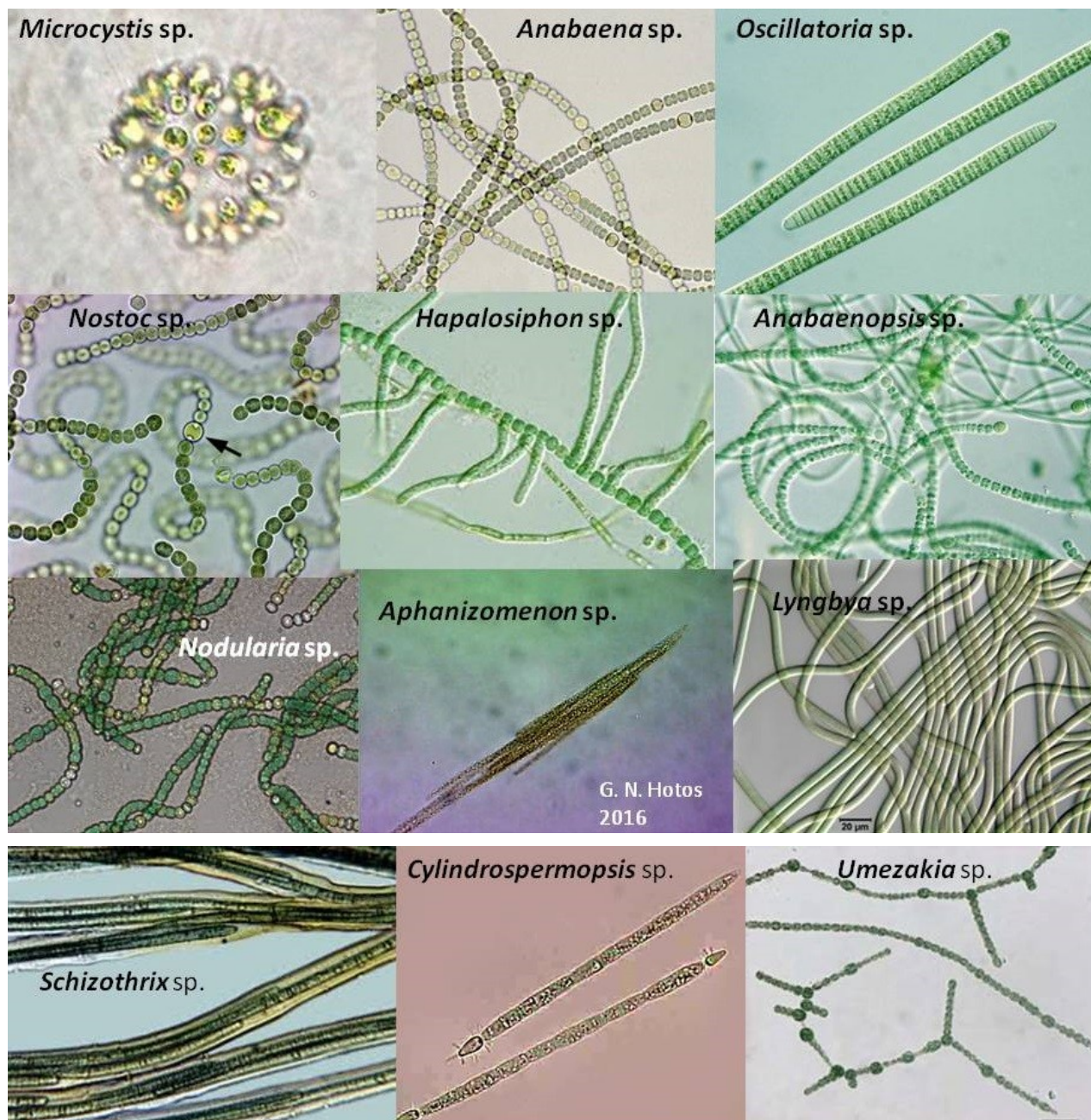
**Πίνακας 1.** Κυανοτοξίνες παραγόμενες από κυανοβακτήρια (Σχήμα 9) και τα όργανα του σώματος στα οποία επικεντρώνεται η βλαβερή δράση τους.

<b>Είδος τοξίνης</b>	<b>Όργανο-στόχος της τοξίνης στον άνθρωπο</b>	<b>Τοξινοπαραγωγά γένη κυανοβακτηρίων</b>
<b>Κυκλικά πεπτίδια</b>		
<b>Μικροκυστίνη (Microcystin)</b>	Συκώτι	<i>Microcystis, Anabaena, Oscillatoria, Nostoc, Hapalosiphon, Anabaenopsis</i>
<b>Νοδουλαρίνη (Nodularin)</b>	Συκώτι	<i>Nodularia</i>
<b>Αλκαλοειδή</b>		
<b>Ανατοξίνη-α (Anatoxin-a)</b>	Νευρικές συνάψεις	<i>Anabaena, Aphanizomenon, Oscillatoria</i>
<b>Ανατοξίνη-α(S) (Anatoxin-a(S))</b>	Νευρικές συνάψεις	<i>Anabaena</i>
<b>Απλυσλατοξίνη (Aplysatoxin)</b>	Επιδερμίδα	<i>Lyngbya, Schizothrix, Oscillatoria</i>
<b>Κυλινδροσπερμοψίνη (Cylindrospermopsin)</b>	Συκώτι	<i>Cylindrospermopsis, Aphanizomenon, Umezakia</i>
<b>Λινγκμπιοτοξίνη (Lyngbyotoxin)</b>	Επιδερμίδα, γαστρεντερικό σύστημα	<i>Lyngbya</i>
<b>Σαξιτοξίνη (Saxitoxin)</b>	Νευρικοί άξονες	<i>Cylindrospermopsis, Anabaena, Aphanizomenon, Lyngbya</i>
<b>Λιποπολυσακχαρίτες (Lipopolysaccharides-LPS)</b>	Δυνητικοί ερεθιστές, ερεθίζουν κάθε εκτεθειμένη επιφάνεια	Όλα

**Πίνακας 2.** Φυκοτοξίνες παραγόμενες από ευκαρυωτικά μικροφύκη ανήκοντα σε: δινομαστιγωτά, διάτομα, ραφιδοφύκη και απτόφυτα (Σχήματα 10 & 11) και τα σύνδρομα ασθενειών τα οποία προκαλούν (επεξηγήσεις στο κείμενο).

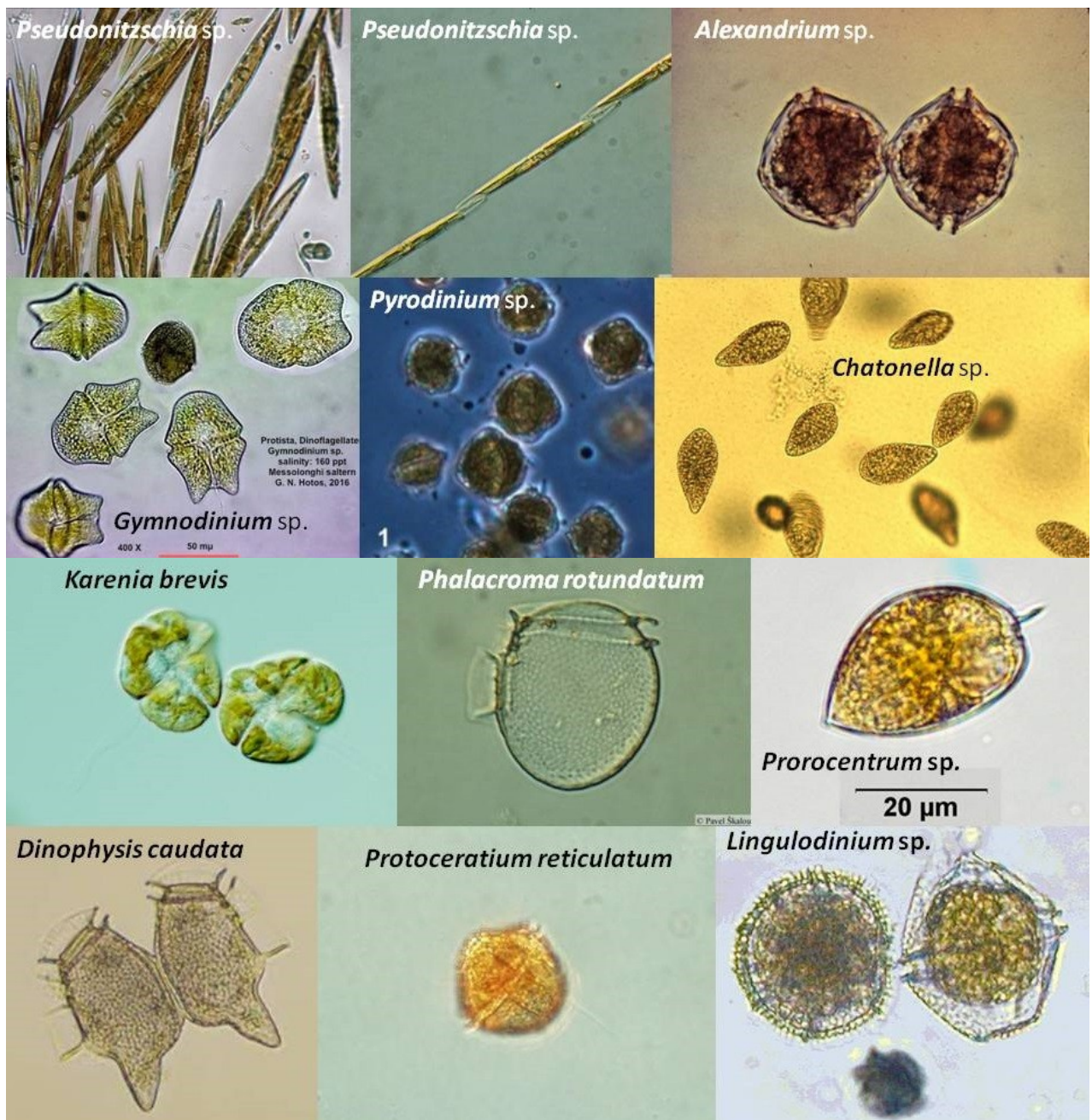
Είδος τοξίνης	Σύνδρομο της τοξίνης στον άνθρωπο – άλλα	Τοξινοπαραγωγά είδη μικροφυκών
Υδροφιλικές τοξίνες		
Δομοϊκό οξύ (Domoic acid)	ASP	<i>ΔΙΑΤΟΜΑ: Pseudonitzshia australis, P. calliantha, P. cuspidara, P. delicatissima, P. fraudulenia, P. galaxiae, P. multiseriis, P. multistriata, P. pseudodelicatissima, P. pungens, P. seriata, P. turgidula</i>
Σαξιτοξίνες (Saxitoxins)	PSP	<i>ΔΙΝΟΜΑΣΤΙΓΩΤΑ: Alexandrium angustitabulatum, A. catenella, A. fundyense, A. lusitanicum, A. minutum, A. tamarense, A. tamiyavanichii</i> <i>Gymnodinium catenatum,</i> <i>Pyrodinium bahamense</i>
Λιποφιλικές τοξίνες		
Μπρεβιτοξίνες (Brevetoxins)	NSP	<i>ΡΑΦΙΔΟΦΥΚΗ: Chatonella verruculosa</i> <i>ΔΙΝΟΜΑΣΤΙΓΩΤΑ: Karenia brevis, K. brevisulcata, K. mikimotoi, K. selliformis, K. papilionacea</i>
Οκαδαϊκό οξύ, δινοφυσίνες, πεκτενοτοξίνες (Ocadaic acid, Dinophysitoxins, Pectetoxines)	DSP	<i>ΔΙΝΟΜΑΣΤΙΓΩΤΑ: Phalacroma rotundatum, Prorocentrum arenarium, P. belizeanum, P. concavem, P. lima, P. acuminata, P. acuta, P. arenarium, Dinophysis caudata, D. fortii, D. mitra, D. norvegica, D. ovum, D. rotundata, D. sacculus, D. tripos</i>
Γεσοτοξίνες (Yessotoxins)	-	<i>ΔΙΝΟΜΑΣΤΙΓΩΤΑ: Protoceratium reticulatum, Lingulodinium polyedrum, Gonyaulax polyhedra</i>
Αζασπιραοξέα (Azaspiracids)	AZP	<i>ΔΙΝΟΜΑΣΤΙΓΩΤΑ: Azadinium spinosum</i>
Σπιρολίδες (Spirolides)	-	<i>ΔΙΝΟΜΑΣΤΙΓΩΤΑ: Alexandrium ostenteldii, A. peruvianum</i>
Γυμνοδιμίνες (Gymnodimines)	-	<i>ΔΙΝΟΜΑΣΤΙΓΩΤΑ: Karenia selliforme, Gymnodinium mikimotoi</i>
Πρυμνεσίνη (Prymnesin)	Θάνατοι ψαριών	<i>ΑΠΤΟΦΥΤΑ: Prymnesium parvum</i>
Απροσδιόριστη	Θάνατοι ψαριών-ASP	<i>ΔΙΝΟΜΑΣΤΙΓΩΤΑ: Pfiesteria piscicida</i>



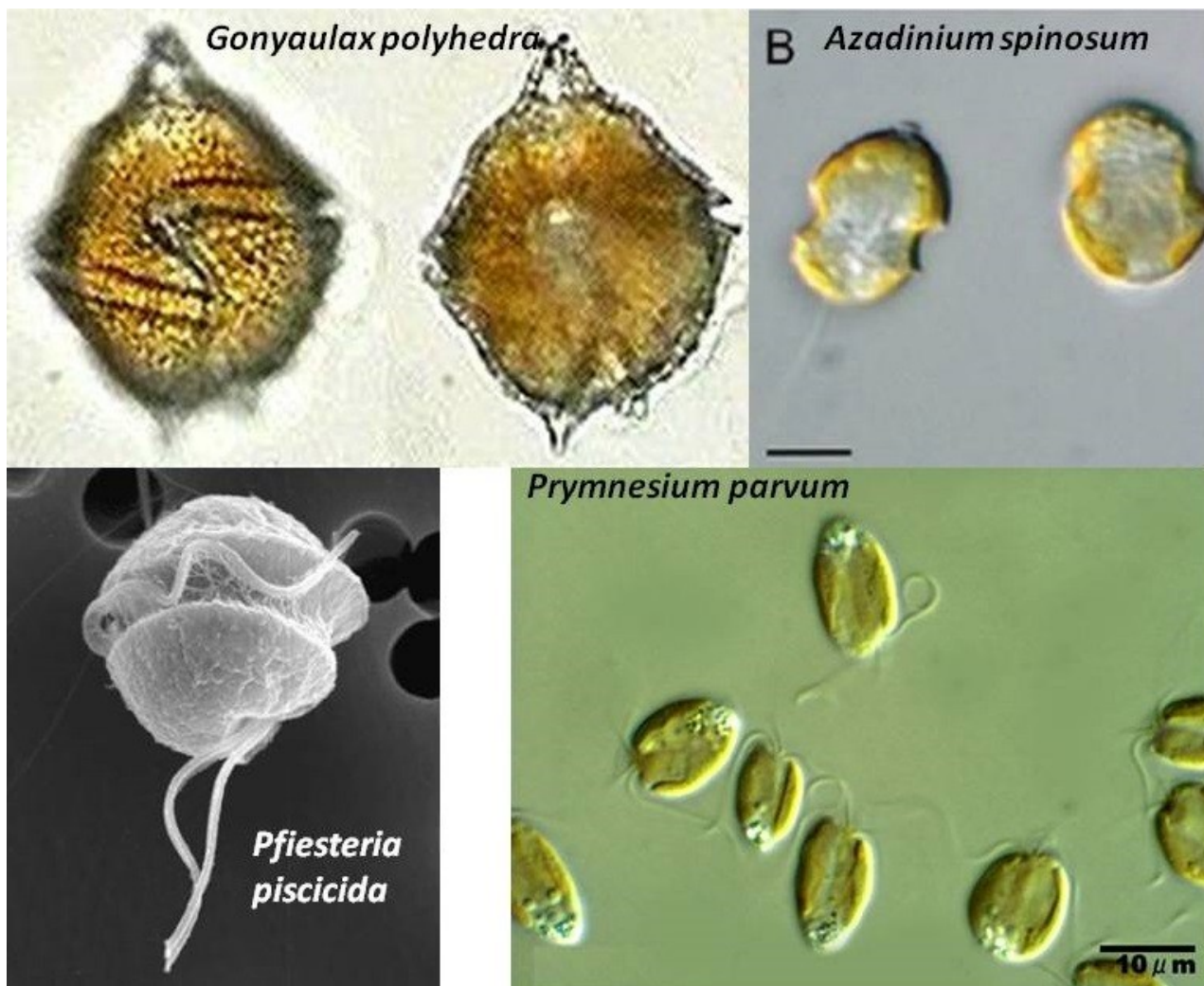


**Σχήμα 9.** Χαρακτηριστικές εικόνες κυανοβακτηρίων που παράγουν κυανοτοξίνες από τα συγκεκριμένα γένη και είδη που αναφέρονται στον Πίνακα 1. Αξιοσημείωτο το γεγονός ό,τι όλα ανήκουν στον νηματοειδή τύπο θαλλού με μόνο το *Microcystis* να είναι του μονοκύτταρου (κοκκοειδούς) τύπου και αυτό όμως να εμφανίζεται σε αποικιακή μορφή (μάζα συναθροισμένων κυττάρων).





**Σχήμα 10.** Χαρακτηριστικές εικόνες ευκαρυωτικών μικροφυκών που παράγουν φυκοτοξίνες από τα συγκεκριμένα γένη και είδη που αναφέρονται στον Πίνακα 2. Το *Pseudonitzschia* ανήκει στα διάτομα και το *Chatonella* στα ραφιδοφύκη. Τα υπόλοιπα στην εικόνα είναι δινομαστιγωτά.



**Σχήμα 11.** Χαρακτηριστικές εικόνες ευκαρυωτικών μικροφυκών που παράγουν φυκοτοξίνες από τα συγκεκριμένα γένη και είδη που αναφέρονται στον Πίνακα 2. Το *Pymnesium parvum* ανήκει στα απτόφυτα. Τα υπόλοιπα στην εικόνα είναι δινομαστιγωτά.

#### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ**

Το κείμενο και οι εικόνες του παρόντος δημιουργήθηκαν με επεξεργασμένη αποτύπωση από το συγγραφέα διάφορων προσεκτικά επιλεγμένων πληροφοριών που υπάρχουν σε βιβλία, επιστημονικές εργασίες και κείμενα αξιόπιστων πηγών του διαδικτύου. Για πληρέστερη σπουδή του θέματος συνιστάται μια αφοσιωμένη αναζήτηση λεπτομερέστερων πληροφοριών (μέσω λέξεων – κλειδιών) διά των διαφόρων μηχανών αναζήτησης. Το παρόν, σκοπό έχει να δημιουργήσει το αρχικό στέρεο έδαφος για ξεκίνημα αναζήτησης βαθύτερων γνώσεων σε ένα πεδίο που πλέον ο αναγνώστης του έχει καταλάβει «περί τίνος πρόκειται». Αν λοιπόν επιθυμήσει κάτι τέτοιο τα δύο θερμώς προτεινόμενα συγγράμματα είναι:

1. Algae. Graham, L., Graham, J. & L. Wilcox. 2009. Pearson Education Inc.
2. Gerssen, A., Pol-Hofsta, I., Poelman, M., Mulder, P., van den Top, H. & J. de Boer. 2010. Marine Toxins: Chemistry, Toxicity, Occurrence and Detection with Special Reference to the Dutch Situation. *Toxins*, 2, 878-904. Doi: 10.3390/toxins2040878.