

Φυκολογία - ΒΙΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΥΚΩΝ

«Δεν νοείται να ασχολούμαστε με την αξιοποίηση των φυκών χωρίς πρώτα να έχουμε μελετήσει και κατανοήσει τη βιολογία των φυκών»

Ενδιαιτήματα και Μορφολογία φυκών



Γεώργιος Ν. Χώτος

Καθηγητής



Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας

Τμήμα Τεχνολογίας Αλιείας-Υδατοκαλλιέργειών

Εργαστήριο Καλλιέργειας Πλαγκτού

Μεσολόγγι, Ιούλιος 2018

Φυκολογία – Ενδιαιτήματα των φυκών

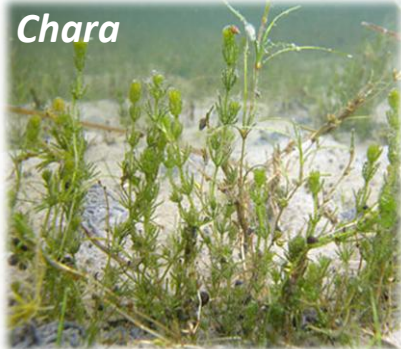
1

Τα **φύκη** μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο απαντώνται. Ετσι, αυτά που διαβιούν **συνεχώς μέσα στο νερό** καλούνται **υδροφυτικά** ενώ αυτά που ζουν σε περιβάλλον όχι μεν υδάτινο αλλά **υγρασμένο** διακρίνονται σε: **εδαφοφυτικά**, **αεροφυτικά**, **κρυοφυτικά** και αυτά που **συμβιώνουν** ή **παρασιτούν** σε οργανισμούς ως: **ενδοφυτικά**, **συμβιωτικά**, **ενδοζωοφυτικά** και **παρασιτικά**.

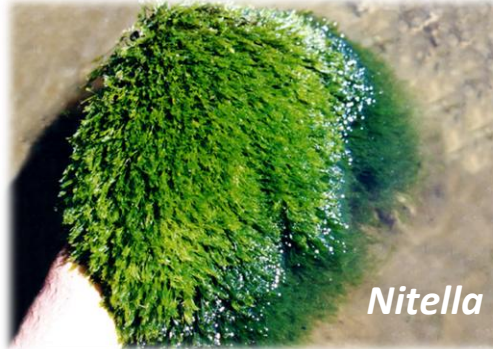
A. ΥΔΡΟΦΥΤΙΚΑ ΦΥΚΗ. Διακρίνονται σε:

A1. Βενθοφυτικά. Φύκη που αναπτύσσονται στον πυθμένα κάθε τύπου (λασπώδη ή πετρώδη) και κάθε είδους αλατότητας νερού π.χ. *Chara*, *Nitella* στα γλυκά νερά, *Laminaria*, *Ulva* στη θάλασσα).

Chara



Nitella



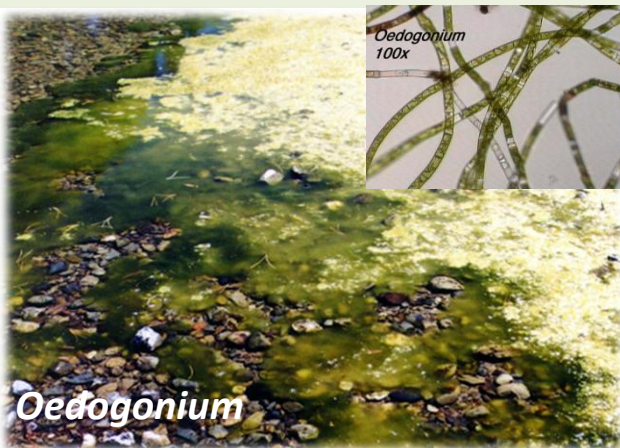
Laminaria



Ulva



A2. Παρακτιοφυτικά. Αναπτύσσονται στα ρηχά παράκτια μέρη λιμνών και δεξαμενών π.χ. *Oedogonium*, *Rivularia*, *Chaetophora*.



Oedogonium
100x

Rivularia



Chaetophora

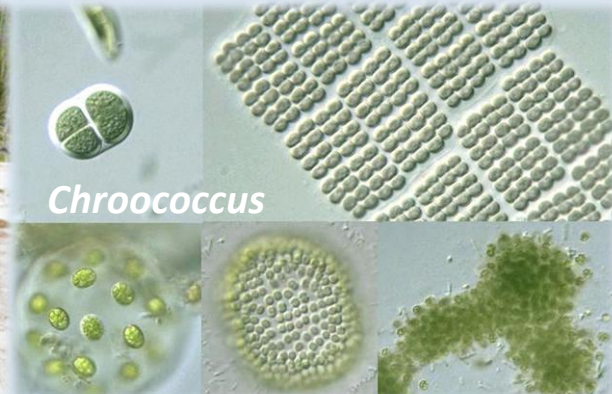


100 μm

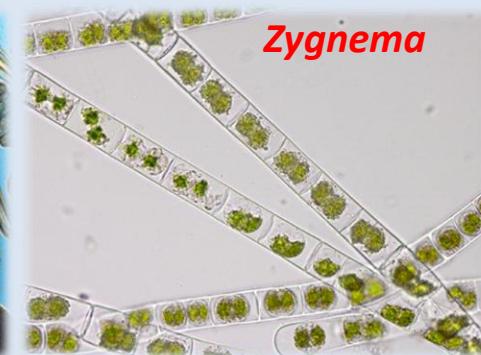
Φυκολογία – Ενδιαιτήματα των φυκών

2

A3. Θερμοφυτικά. Πρόκειται για κυανοβακτήρια κυρίως της οικογένειας Chroococaceae (άνω των 50 γενών και 150 ειδών) που αντέχουν σε νερά **θερμών πηγών** θερμοκρασίας μέχρι και 80 - 85 °C.

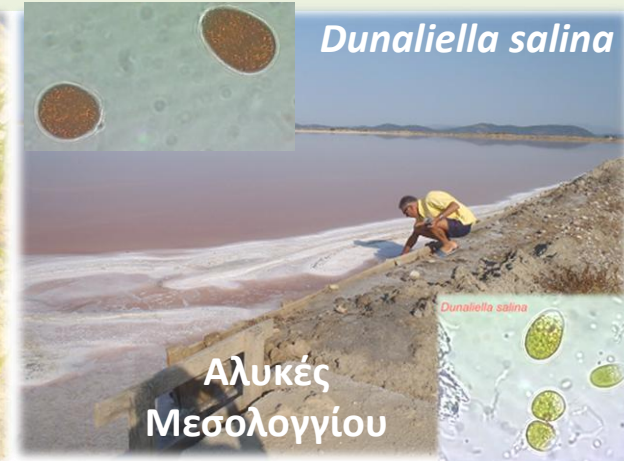
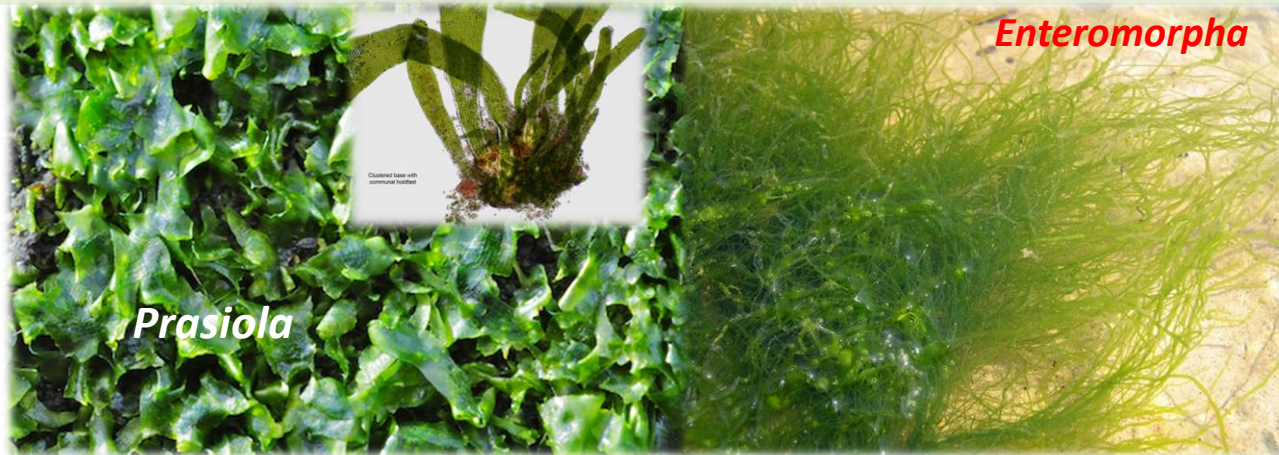


A4. Πλαγκτοφυτικά. Επιπλέοντα (κυρίως μονοκύτταρα) φύκη στα επιφανειακά νερά, διακρινόμενα περαιτέρω σε **ευπλαγκτοφυτικά** των ανοικτών νερών π.χ. **διάτομα** και είδη των Chlorococcales και **τυχοπλαγκτοφυτικά**, επιπλέοντα πολυκύτταρα φύκη που παρασυρόμενα από τα ρεύματα ή τα κύματα αναμιγνύονται στα παράκτια νερά σε μετακινούμενες μάζες π.χ. *Zygnema*, *Spirogyra*, *Nostoc*.

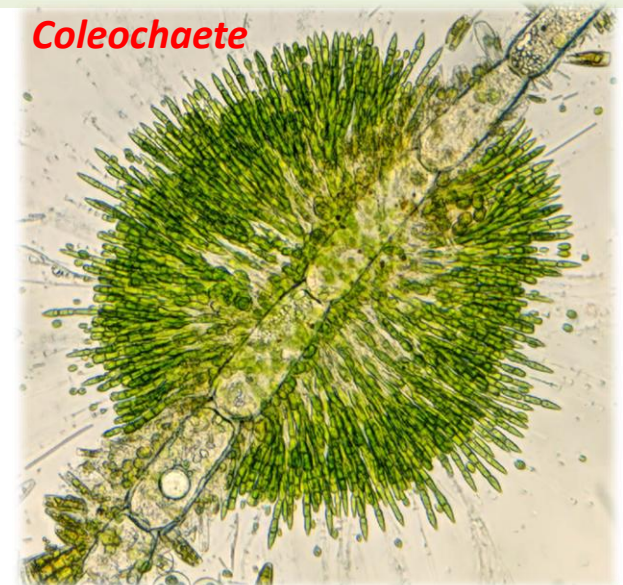


Φυκολογία – Ενδιαίτηματα των φυκών

A5. Αλατοφυτικά. Μπορούν και αναπτύσσονται σε εξαιρετικά υψηλή αλατότητα ορισμένων υπεράλμυρων λιμνών π.χ. *Prasiola*, *Enteromorpha* μέχρι και στα κρυσταλλοπήγια των αλυκών π.χ. *Dunaliella salina*.



A6. Επιφυτοφυτικά. Πάρα πολλά είδη φυκών αναπτύσσονται στην επιφάνεια υδρόβιων φυτών και μακροφυκών π.χ. *Rhizoclonium*, *Bulbochaete*, *Coleochaete*.

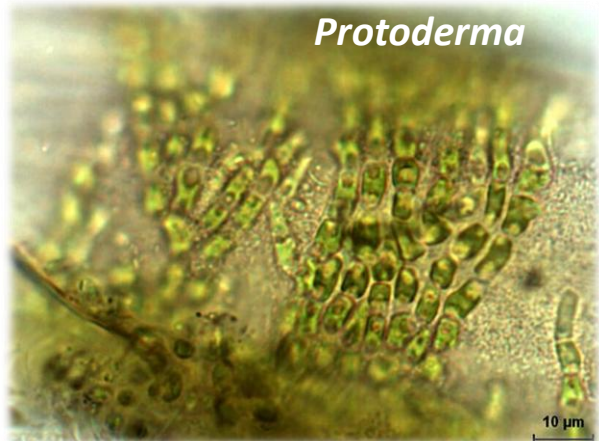


Φυκολονία – Ενδιαίτηματα των φυκών

4

A7.Επιζωοφυτικά. Αναπτύσσονται σε επιφάνειες ζώων είτε αυτές οι επιφάνειες είναι κελύφη (π.χ. στρείδια, σαλιγκάρια), είτε ψάρια, είτε καβούκι χελώνας (π.χ. *Protoderma*), είτε ανόστρακα καρκινοειδή (π.χ. *Characium* στα εμπρόσθια πλεοπόδια του *Branchipus*).

Protoderma



Characium



Branchipus



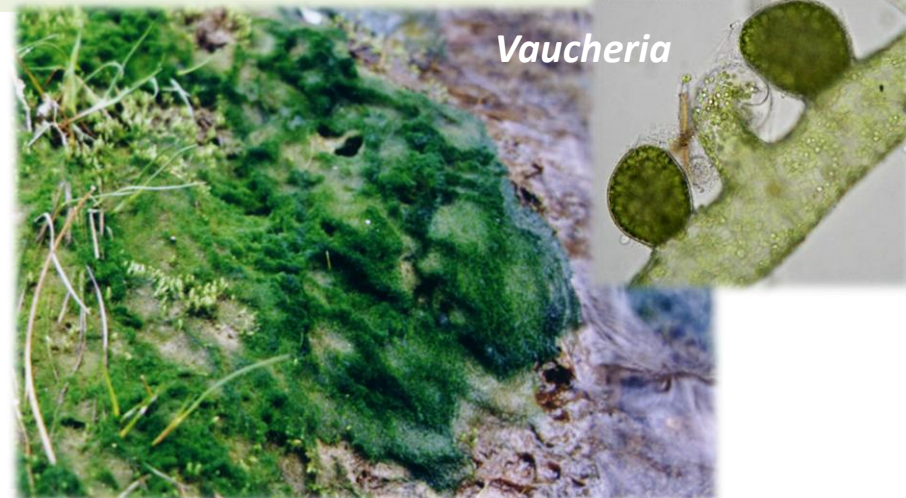
B. ΕΔΑΦΟΦΥΤΙΚΑ ΦΥΚΗ. Πρόκειται για χερσαία φύκη και ανάλογα με το αν αυξάνονται στην επιφάνεια του εδάφους, *Botrydium*, *Vaucheria*, *Protosiphon* ή μέσα σε αυτό (μέχρι βάθους 1 m, ετεροτροφικά), *Chlorella*, καλούνται **επιφανειοφυτικά** και **κρυπτοφυτικά** αντιστοίχως.

Botrydium



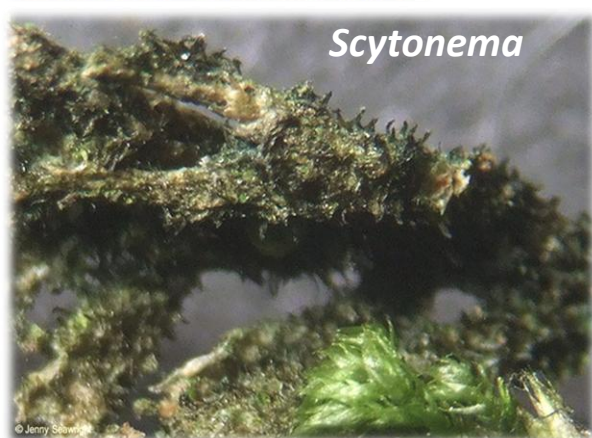
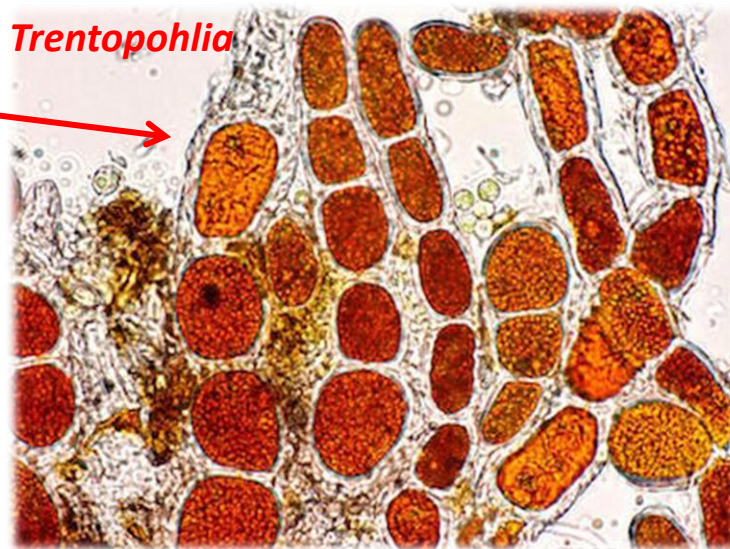
Protosiphon

Vaucheria



Φυκολογία – Ενδιαιτήματα των φυκών

Γ. ΑΕΡΟΦΥΤΙΚΑ. Πρόκειται για φύκη αναπτυσσόμενα σε **επιφάνειες εκτεθειμένες στον αέρα** αρκεί να υπάρχει υγρασία (υγροί βράχοι, τοίχοι, κορμοί, φράχτες, σύρματα, ζώα, κ.ά.). Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται εκ νέου και τα επιζωοφυτικά που αναφέρθηκαν παραπάνω μόνο που τώρα αφορά τα ζώα της χέρσου.



Φυκολογία – Ενδιαιτήματα των φυκών

Δ. ΚΡΥΟΦΥΤΙΚΑ. Φύκη που μπορούν να αυξάνονται στο χιόνι σε θερμοκρασίες παγετού και μάλιστα προσδίδουν στο χιόνι ποικίλες αποχρώσεις όπως κόκκινη, πράσινη ή κίτρινη. Πράσινη προσδίδουν είδη όπως: *Chlamydomonas*, *Ankistrodesmus*, *Mesotaenium*. Κόκκινα είδη όπως: *Chlamydomonas*, *Scotiella*, ορισμένα διάτομα.

Επιφάνεια χιονιού «χρωματισμένη» από κρούστα φυκών



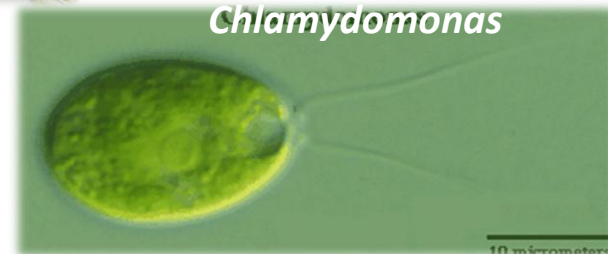
Mesotaenium



Ankistrodesmus

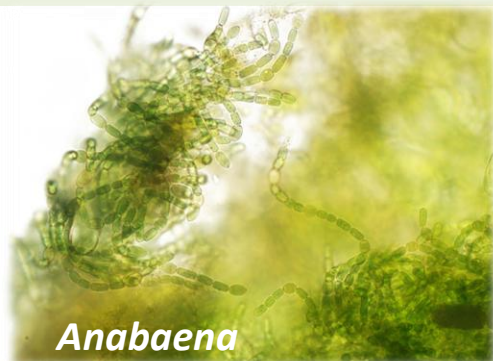


Scotiella



Chlamydomonas

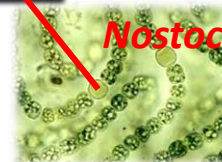
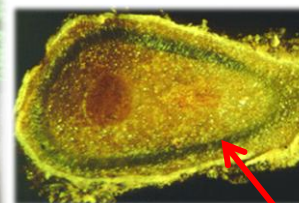
Ε. ΕΝΔΟΦΥΤΙΚΑ. Φύκη τα οποία αυξάνονται στο εσωτερικό των ιστών διαφόρων φυτών π.χ. το κυανοβακτήριο *Anabaena* στα φύλλα του περιδόφυτου *Azolla* και στις ρίζες του *Cycas* και το κυανοβακτήριο *Nostoc* στα *Anthoceros*, *Sphagnum*, *Cycas* και άλλα αγγειόσπερμα.



Anabaena



Azolla



Nostoc



Cycas

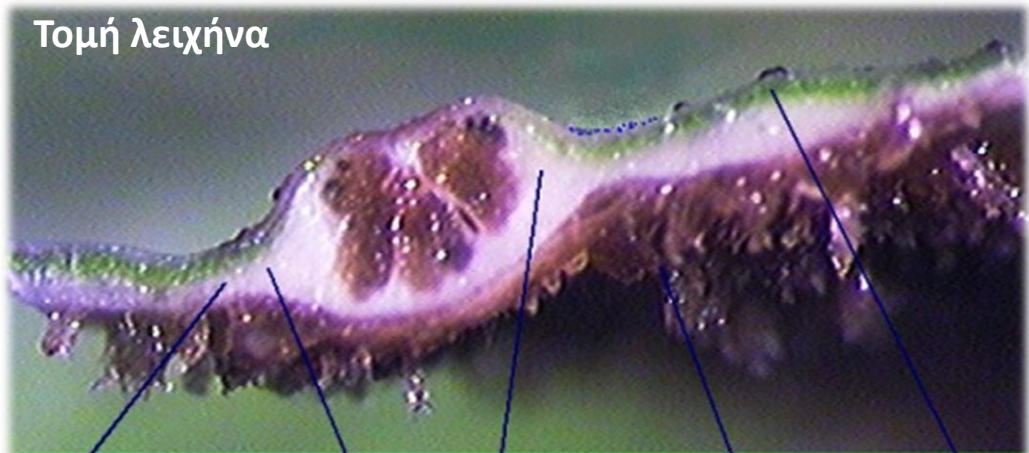
Φυκολογία – Ενδιαιτήματα των φυκών

7

Ε. ΣΥΜΒΙΩΤΙΚΑ, ΕΝΔΟΖΩΟΦΥΤΙΚΑ, ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΑ. Φύκη (κυανοβακτήρια, π.χ. *Nostoc*, *Rivularia*, ή ευκαρυωτικά φύκη, π.χ. *Chlorella*, *Trebouxia*) τα οποία **συμβιώνουν με μύκητες** και σχηματίζουν **λειχήνες** καλούνται **συμβιωτικά**. Αλλα ζουν στο εσωτερικό **ζώων ή πρωτοζώων** (π.χ. *Zoochlorella* εντός της *Hydra*, ή *Chlorella* εντός *Paramecium*) καλούνται **ενδοζωοφυτικά**. Για τα παρασιτικά βλέπε *Cephaleuros*.



Λειχήνες σε κορμό



Τομή λειχήνα

Μυελός μύκητα

Διόγκωση με
κυανοβακτήρια

Μυκήλιο εδρασης

Φύκη στην επιφάνεια



Hydra γεμάτη με κύτταρα
Zoochlorella



Chlorella σε *Paramecium*

Κυτταρική δομική οργάνωση

Όλα τα Φύλα των φυκών περιέχουν μονοκύτταρα είδη εκτός από τα φαιοφύκη (Phaeophyceae) στα οποία όμως απαντούν και μονοκύτταρες μορφές (αναπαραγωγικά κύτταρα).

Ως προς τον αριθμό των κυττάρων που απαρτίζουν το θαλλό τους τα φύκη διακρίνονται σε:

A. Μονοκύτταρα είδη στα οποία όλες οι διεργασίες της ζωής επιτελούνται από ένα μονήρες κύτταρο το οποίο ως προς την κίνηση διακρίνεται σε:

A1. Κινητικό φέρον μαστίγια, π.χ. *Tetraselmis*, *Rhodomonas*, *Isochrysis*, *Chlamydomonas*, κ.ά.

A2. Μη κινητικό χωρίς μαστίγια με αποστρογγυλεμένο ή επίμηκες κύτταρο ονομαζόμενα γενικώς κοκκοειδές κύτταρο (π.χ. **κοκκοειδή κυανοβακτήρια**).



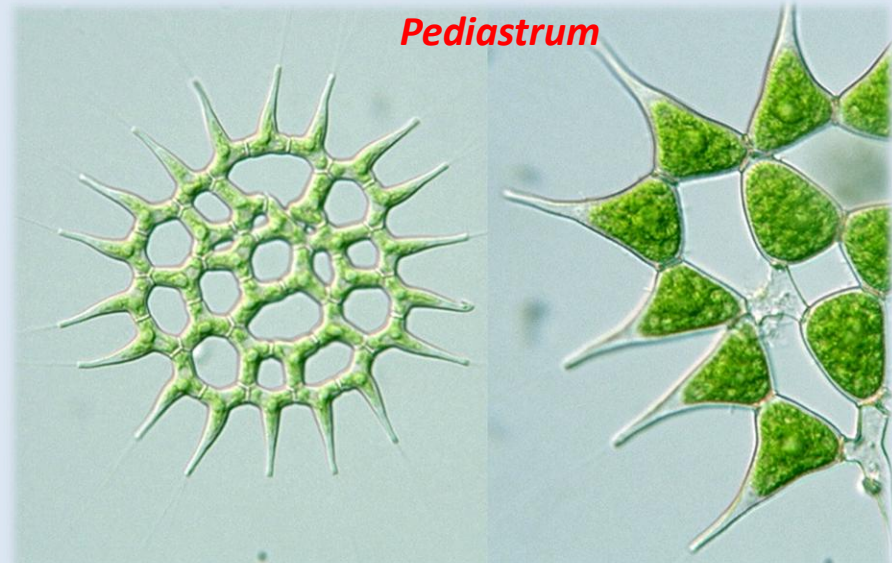
Κυτταρική δομική οργάνωση (συνέχεια)

B. Πολυκύτταρα. Είδη με πολυκυτταρικότητα είτε ως άθροισμα κυττάρων οργανωμένο σε ένα λειτουργικό **θαλλό** ποικίλης τμηματικής διαφοροποίησης ως προς τη μορφολογία και τη λειτουργία (π.χ. *Laminaria*), είτε άθροισμα κυττάρων (**αποικία**) τοποθετημένων σε οργανωμένη δομή (**κοινόβιο**) με διαφοροποίηση λειτουργιών (π.χ. *Volvox*), είτε σε μάλλον ακανόνιστα **συσσωματώματα** περιεχόμενα σε κάποια «συγκολλητική» ουσία.

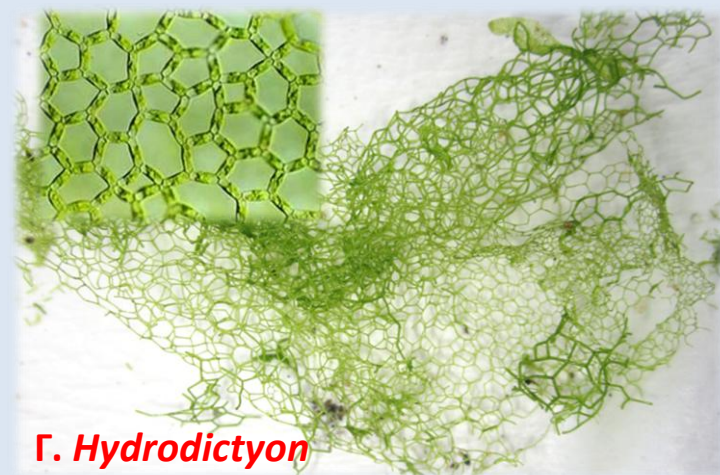
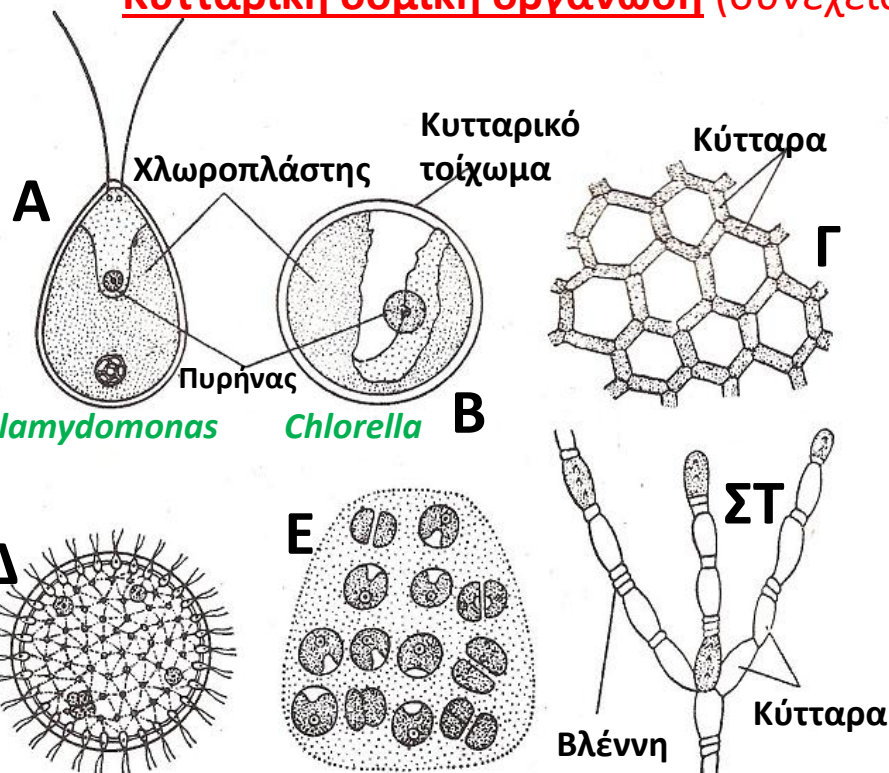
B1. Πολυκύτταρα συμμετρικώς αποικιακά

B1.1. Κινητική συμμετρική αποικία (π.χ. *Volvox*, *Pandorina*, *Eudorina*). Στα φύκη αυτά οι αποικίες-κοινόβια των κυττάρων έχουν καθορισμένο σχήμα και αριθμό κυττάρων για το κάθε είδος. Τα κύτταρα είναι μαστιγιοφόρα χωμένα μέσα σε βλεννώδη μήτρα ή είναι συγκρατούμενα μεταξύ τους από τοπικές εκκρίσεις βλέννας.

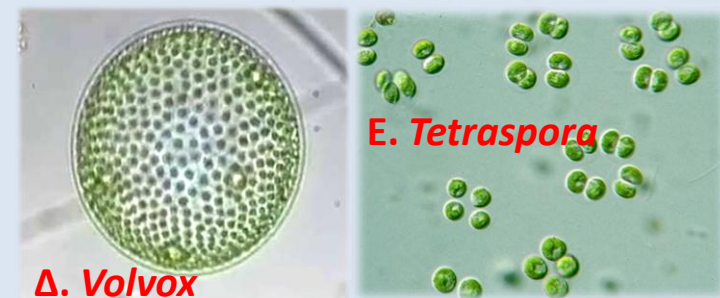
B1.2. Μη κινητική επίπεδη αποικία, στην οποία τα ομοιόμορφα κύτταρα δεν έχουν μαστίγια και είναι διατεταγμένα-ενωμένα με γεωμετρική κανονικότητα σε κοινόβια (π.χ. *Hydrodictyon*, *Pediastrum*) τα οποία δεν χαρακτηρίζονται από σφαιρικότητα (δηλαδή δεν δημιουργούν σφαίρα αλλά το κυτταρικό πλέγμα είναι απλωμένο σε ένα επίπεδο).



Κυτταρική δομική οργάνωση (συνέχεια)



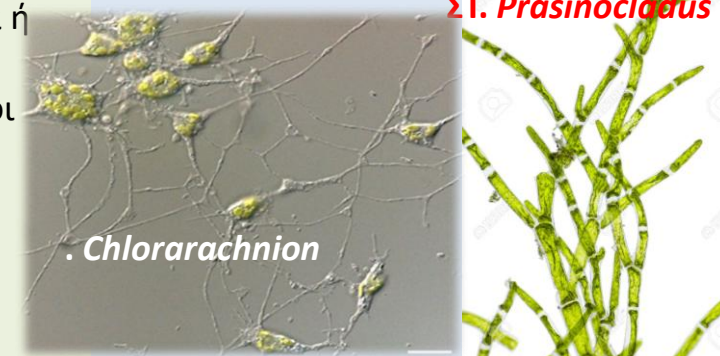
Γ. Hydrodictyon



Ε. Tetraspora

Δ. Volvox

ΣΤ. Prasinocladus



Chlorarachnion

B2. Πολυκύτταρα αυσσωματοειδή. Αποικίες χωρίς καθορισμένο σχήμα ή μέγεθος. Συσσωματώνονται σε ακανόνιστου σχήματος μάζες με όλα τα εμπεριεχόμενα κύτταρα να έχουν αναπαραγωγική ικανότητα. Διακρίνονται οι παρακάτω τύποι:

B2.1. Παλμελλοειδής μορφή. Κύτταρα ενσωματωμένα σε ακανόνιστη βλεννώδη μάζα, π.χ. *Tetraspora*, *Palmella*, *Gloeocapsa*.

B2.2. Δενδροειδής αποικία. Κύτταρα ενωμένα με βλέννα, δενδροειδής αύξησης π.χ. *Prasinocladus*, *Chaemosiphon*.

B2.3. Ριζοποδιακή αποικία. Αμοιβαδοειδή κύτταρα ενωμένα με κυτταροπλασματικές αποφύσεις για σχηματισμό αποικιών ποικίλου αριθμού κυττάρων, π.χ. *Chlorarachnion*.

Κυτταρική δομική ορνάνωση (συνέχεια)

B3. Νηματοιειδή. Μετά την κυτταρική διαίρεση τα θυγατρικά βλαστητικά κύτταρα παραμένοντα σε επαφή διατάσσονται σε ευθύγραμμο νημάτιο. Η νηματοιειδής μορφή διακρίνεται σε:

B3.1. Απλή ή αδιακλάδωτη νηματοιειδής, (π.χ. *Spirogyra*, *Ulothrix*).

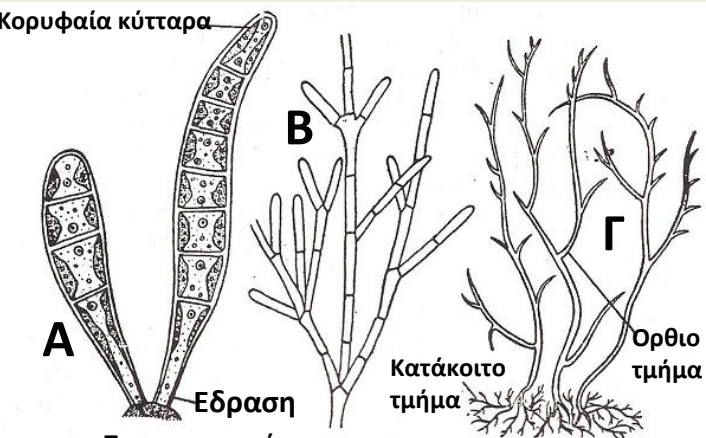
B3.2. Διακλαδιζόμενη νηματοιειδής, π.χ. *Cladophora*.

B3.3. Ετεροτριχοειδής νηματοιειδής. Διακλαδώσεις με κύτταρα διαφοροποιημένα σε κατάκοιτο (εξαπλωμένο) τμήμα και σε όρθιο (π.χ. *Chaetophora*, *Ectocarpus*, *Stigeoclonium*). Σε μερικά είδη ένα από τα τμήματα (κατάκοιτο ή όρθιο) είναι λίγο αναπτυγμένο ή σχεδόν ανύπαρκτο (π.χ. *Coleochaete*, *Draparnaldia*).

B3.4. Μονοαξονικός ψευδοπαρεγχυματοιειδής. Τα διακλαδιζόμενα νημάτια ενός κύριου αξονικού νηματίου βρίσκονται σε στενή επαφή κατά το μήκος τους ομοιάζοντας με παρεγχυματική κατασκευή, π.χ. *Polysiphonia*.

B3.5. Πολυαξονικός ψευδοπαρεγχυματοιειδής. Υπάρχουν πολλά νημάτια σε στενή επαφή μεταξύ των κύριων αξόνων και των διακλαδώσεών τους έτσι που να παράγεται μια πυκνή συμπαγής μάζα-φλοιός, π.χ. *Nemalion*.

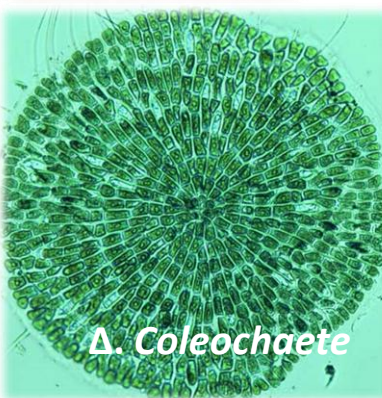
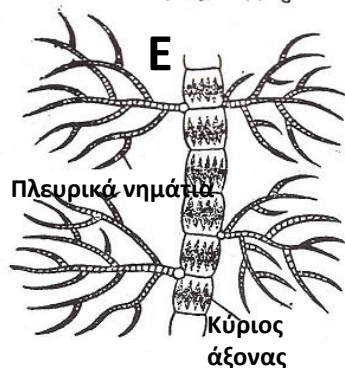
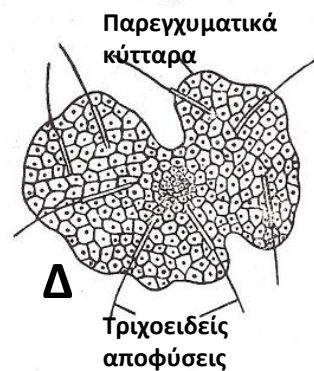
Κορυφαία κύτταρα



A. *Ulothrix*

B. *Cladophora*

Γ. *Stigeoclonium*



Δ. *Coleochaete*

Ε. *Draparnaldia*

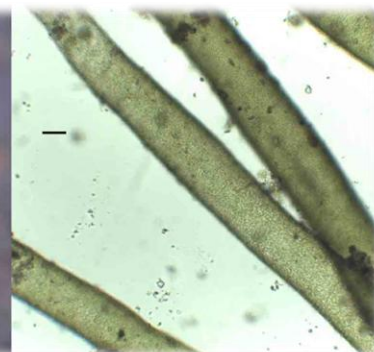
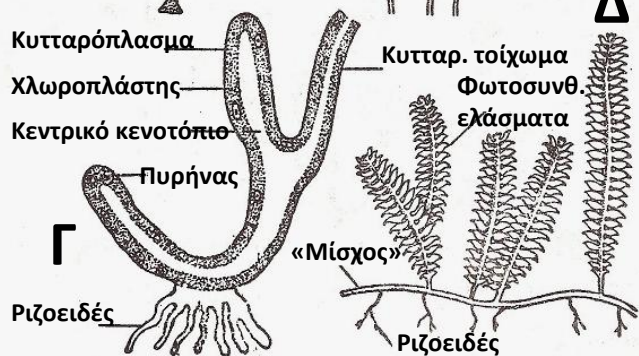
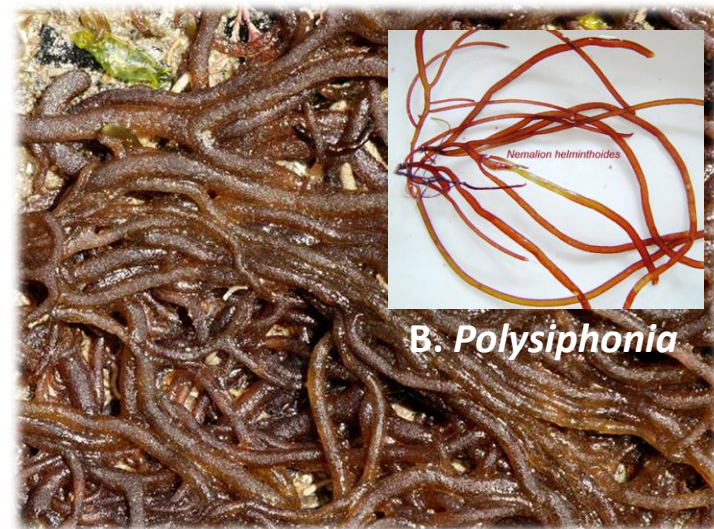
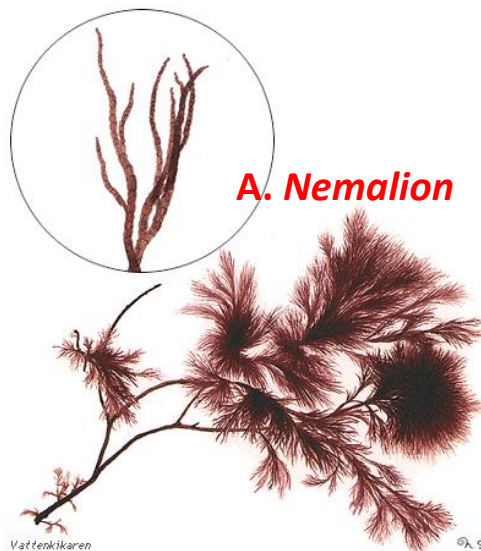
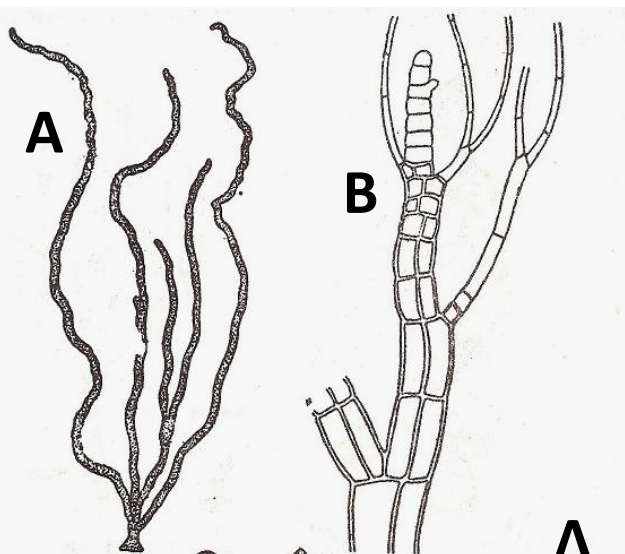


Κυτταρική δομική οργάνωση (συνέχεια)

B3.4. Μονοαξονικός ψευδοπαρεγχυματοειδής. Τα διακλαδιζόμενα νημάτια ενός κύριου αξονικού νηματίου βρίσκονται σε στενή επαφή κατά το μήκος τους ομοιάζοντας με παρεγχυματική κατασκευή, π.χ. *Polysiphonia*.

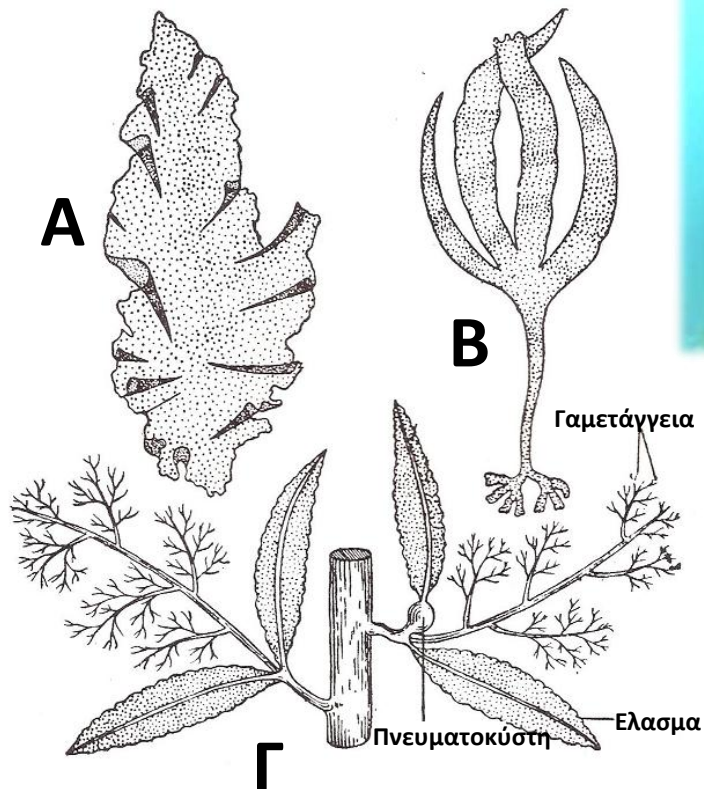
B3.5. Πολυαξονικός ψευδοπαρεγχυματοειδής. Υπάρχουν πολλά νημάτια σε στενή επαφή μεταξύ των κύριων αξόνων και των διακλαδώσεών τους έτσι που να παράγεται μια πυκνή συμπαγής μάζα-φλοιός, π.χ. *Nemalion*

B4. Σιφωνοειδής. Θαλλός συνκυτιακός πολυπήρνος, πολύπλοκος και μεγάλου μεγέθους, *Vaucheria*, *Caulerpa*.



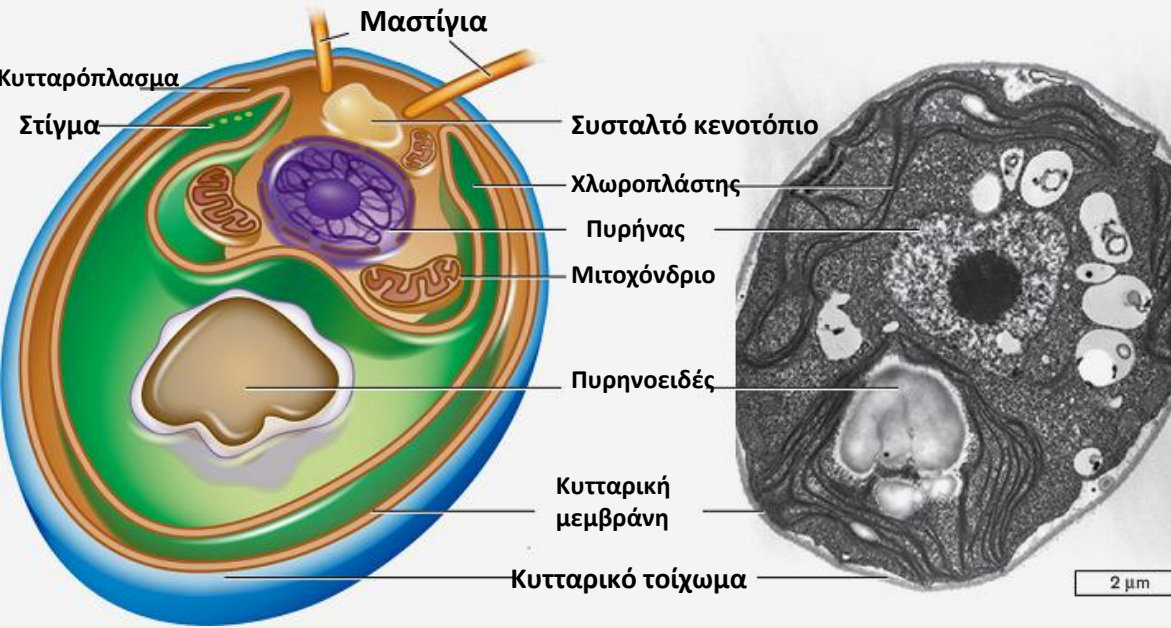
Κυτταρική δομική οργάνωση (συνέχεια)

B5. Παρεγχυματοειδής. Τυπική δομή των μακροφυκών (π.χ. *Ulva*, *Porphyra*, *Punctaria*, κ.ά.) στην οποία τα βλαστητικά κύτταρα διαιρούνται και αυξάνονται σε πολλά επίπεδα με αποτέλεσμα μια παχιά δομή παρεγχυματικού τύπου. Η μέγιστη και πλέον αναπτυγμένη μορφή του παρεγχυματικού τύπου ανευρίσκεται στα φαιοφύκη (π.χ. *Fucus*, *Laminaria*, κ.ά.) όπου ο θαλλός παρουσιάζει έντονη διαφοροποίηση (ριζοειδές, στύπος, ελάσματα, πνευματοκύστες) ακόμη και υποτυπώδες αγγειακό σύστημα (π.χ. *Macrocystis*, *Sargassum*, *Laminaria*). Η αύξηση γίνεται είτε από κυτταρικές διαιρέσεις όλων των κυτάρων (διάχυτη ικανότητα), είτε από ενδιάμεσα κύτταρα, είτε τριχοθαλλικώς δηλαδή τα διαιρούμενα βλαστητικά κύτταρα εντοπίζονται σε ενδιάμεσες περιοχές (μεριστωματικές) στη βάση νηματίων ή στις άκρες των θαλλικών ελασμάτων.



Φυκολογία – Ευκαρυωτικό vs Προκαρυωτικό φύκος ¹⁴

Ευκαρυωτικό κύτταρο φύκους *Chlamydomonas*

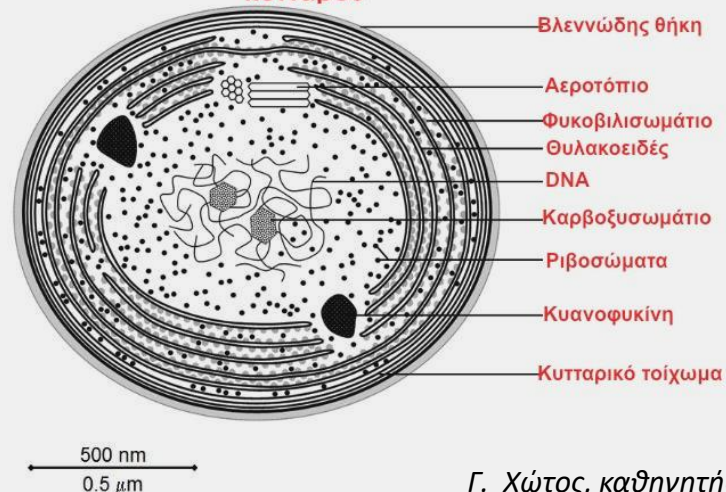


Στο ευκαρυωτικό φυκικό κύτταρο υπάρχουν **χλωροπλάστης(ες)** και **μιτοχόνδριο(α)** περιβαλλόμενα από **μεμβράνες** ενώ στο κυανοβακτηριακό αμφότερα απουσιάζουν. Στο χλωροπλάστη των φυκών (και όχι στα φυτά) υπάρχει το **πυρηνοειδές** (δεν περιβάλλεται από μεμβράνη) στο οποίο υπάρχει συγκεντρωμένη η περισσότερη ποσότητα του ενζύμου **rubisco** που καταλύει τη δέσμευση του CO₂. Στα κυανοβακτήρια το ρόλο αυτό επιτελεί το **καρβοξύσωμα**.

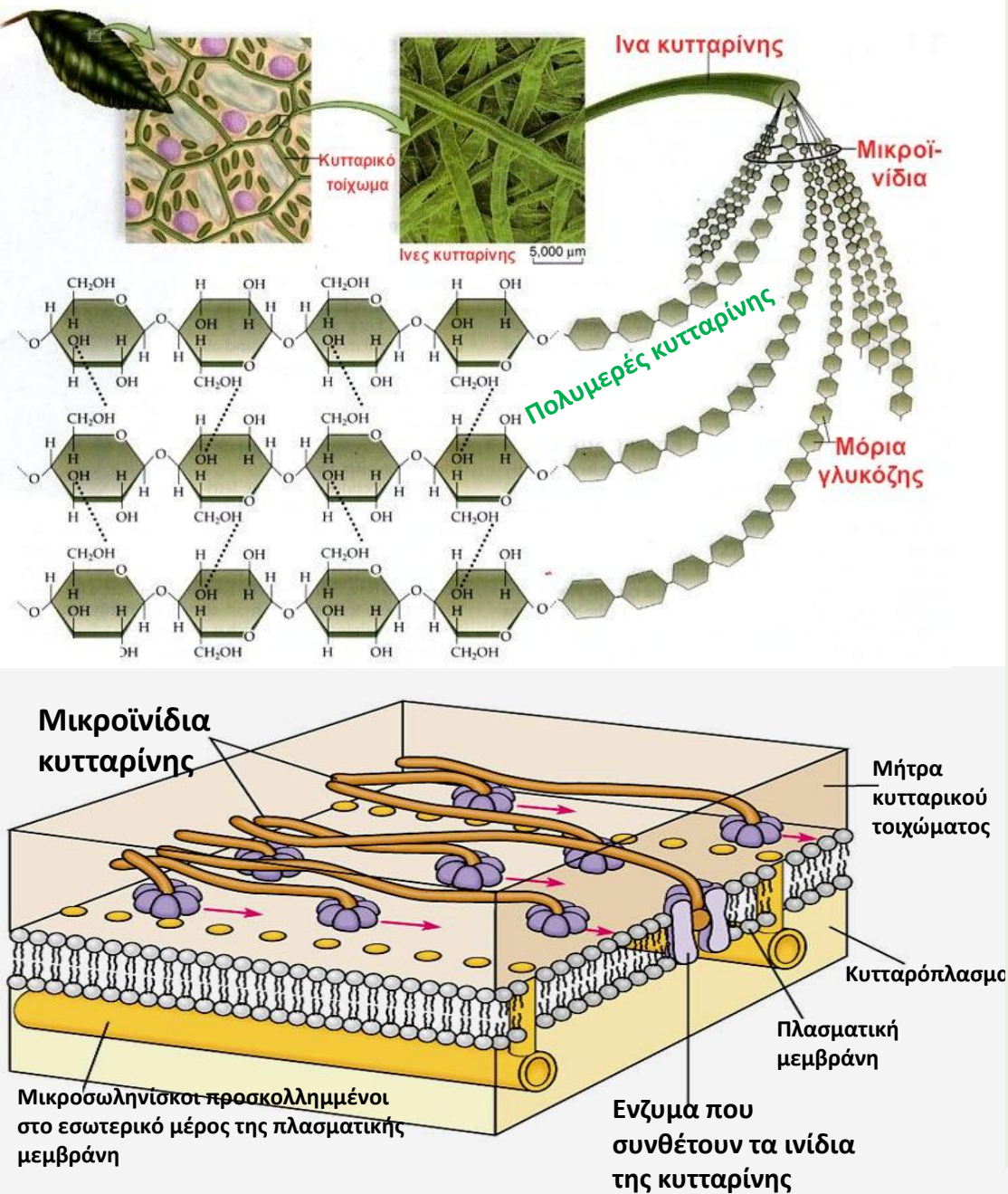
Στα κυανοβακτήρια δεν υπάρχουν

μαστίγια.

Διαγραμματική απεικόνιση κυανοβακτηριακού ΚΥΤΤΑΡΟΥ



Φυκολογία – Το κυτταρικό τοίχωμα των ευκαρυωτών¹⁵



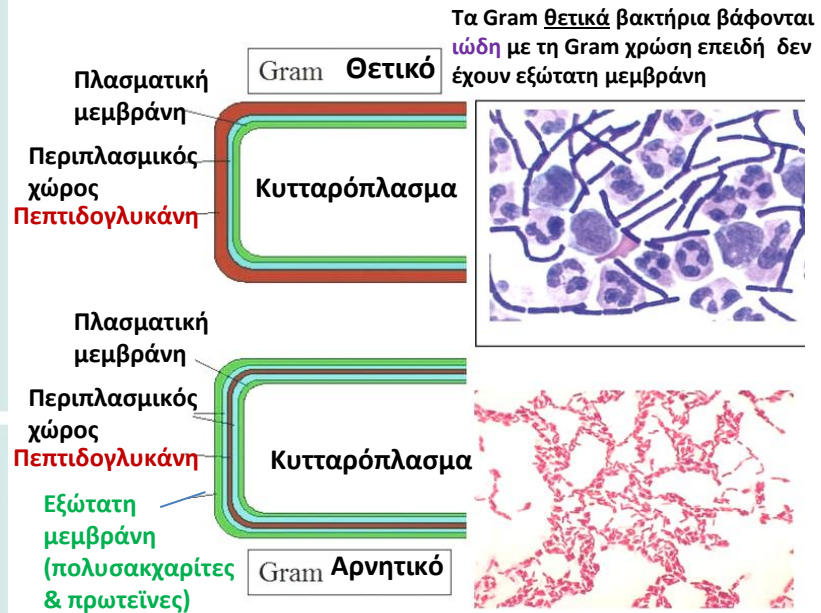
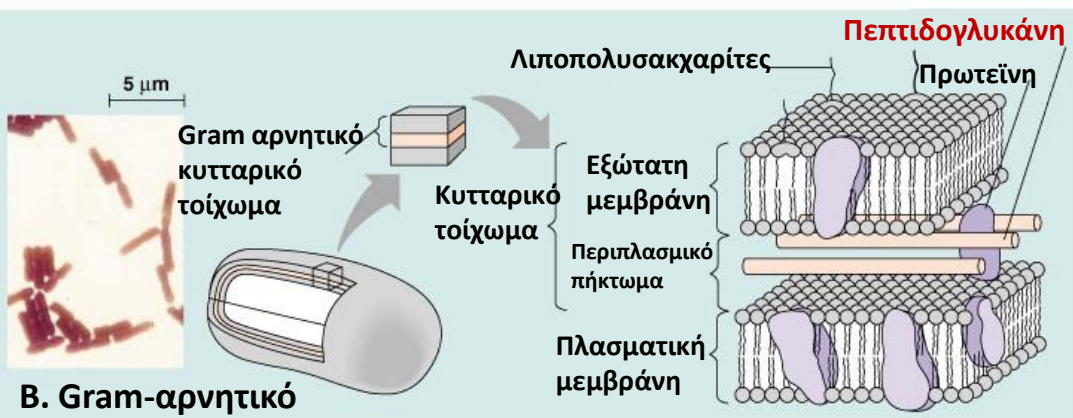
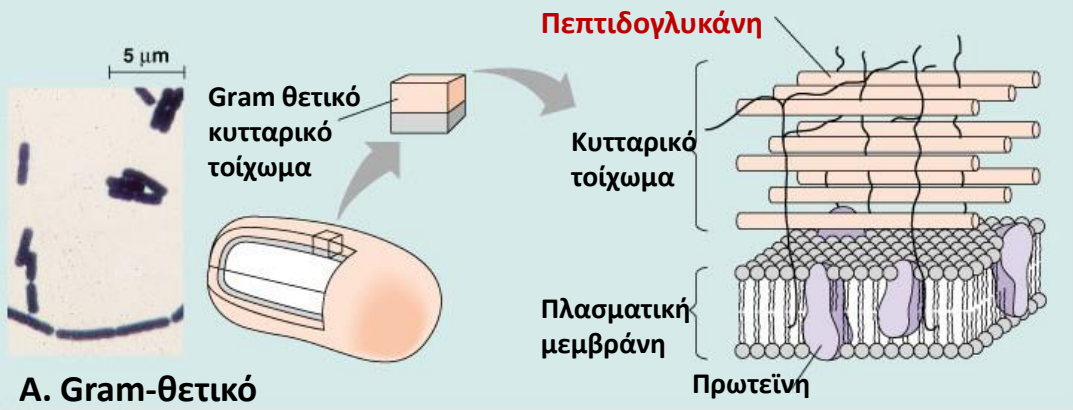
Το **κυτταρικό τοίχωμα** των φυκών αποτελείται από δύο συστατικά: **α)** ένα **ινώδες** μέρος το οποίο σχηματίζει τον «**δομικό σκελετό**» του τοιχώματος, και **β)** το **άμορφο** συστατικό το οποίο σχηματίζει τη **μήτρα** μέσα στην οποία βρίσκεται εκτεταμένο το ινώδες μέρος.

Το ινώδες μέρος αποτελείται από τον **πολυσακχαρίτη κυτταρίνη**. Η κυτταρίνη αποτελείται από μονομερή γλυκόζης μόνο, ή γλυκόζης και άλλων μονοσακχαριτών ενωμένους σε **μικροϊνίδια** τα οποία περιελλίσονται σε μεγαλύτερα ινίδια για να αποτελέσουν την **κυτταρινική μάζα**.

Στα **φαιοφύκη** (Phaeophyceae) εκτός από κυτταρίνη υπάρχουν και επιπρόσθετες ουσίες όπως **αλγινικό οξύ**, **φουκίνη**, **φουκοϊδίνη** και **ημικυτταρίνη**. Στα **ροδοφύκη** (Rhodophyta) το άμορφο μέρος του τοιχώματος αποτελείται από γαλακτάνες (πολυμερή της γαλακτόζης) όπως **άγαρ** και **καραγενάνη**. Στα **διάτομα** (Bacillariophyceae) αποτελείται από **χαλαζία** (πυρίτιο) ενσωματωμένο σε στρώμα πηκτινοειδούς φύσεως ενώ η κυτταρίνη ή άλλου τύπου πολυσακχαρίτες απουσιάζουν.

Τα μαστιγιοφόρα βλασθητικά κύτταρα των ευκαρυωτικών φυκών δεν έχουν κυτταρικό τοίχωμα όπως επίσης κυτταρικό τοίχωμα δεν διαθέτουν τα αναπαραγωγικά κύτταρα (γαμέτες και ζωοσπόρια) των φυκών παρά μόνο την πλασματική τους μεμβράνη.

Φυκολογία – Κυτταρικό τοίχωμα κυανοβακτηρίων 16



Τα Gram **αρνητικά** βακτήρια βάφονται **κόκκινα** με τη Gram χρώση επειδή έχουν εξώτατη μεμβράνη, τέτοια είναι τα κυανοβακτήρια

Στα **κυανοβακτήρια** το κυτταρικό τοίχωμα είναι κατασκευασμένο από βλεννοπολυμερή με κύρια συστατικά γλυκοζαμίνη, αμινοξέα, μουραμινικό οξύ, διαμινοπιμελικό οξύ και μικρή ποσότητα σακχάρων. Όλα αυτά μαζί συνθέτουν τα πολυμερή της **πεπτιδογλυκάνης**.

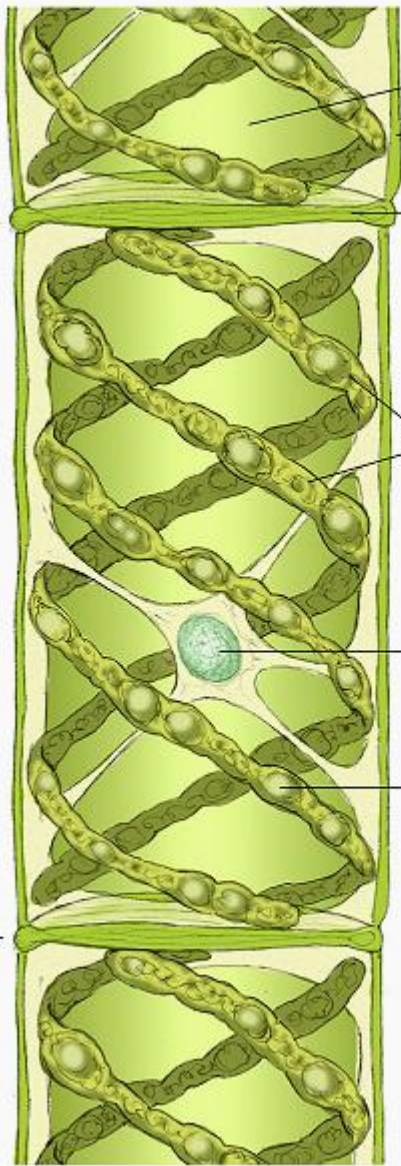
Τα βακτήρια γενικώς (συμπεριλαμβανομένων των κυανοβακτηρίων) διακρίνονται σε **2 κατηγορίες**. Αυτά που η εξώτατη στοιβάδα του κυτταρικού τοιχώματος αποτελείται από μια **παχιά στρώση πεπτιδογλυκάνης** και αυτά που έχουν **μια λεπτή στρώση πεπτιδογλυκάνης** και από πάνω της μια **μεμβράνη**.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα κυανοβακτήρια.

Η πρώτη κατηγορία χαρακτηρίζεται ως **Gram-θετική** (η πεπτιδογλυκάνη χρωματίζεται ιώδης από χρώση Gram) και η δεύτερη (κυανοβακτήρια) ως **Gram-αρνητική** (βλέπε σχήμα).

Νημάτιο *Spirogyra*

Κύτταρο *Spirogyra*



Κενοτόπιο

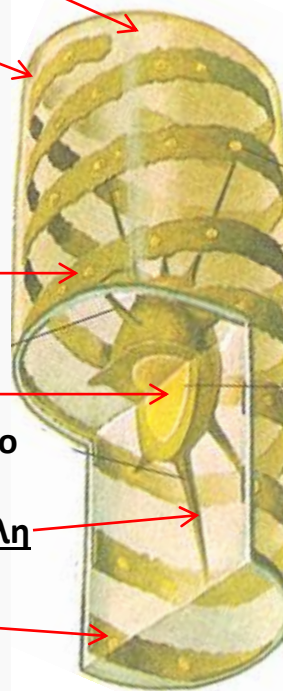
Κυτταρικό
τοίχωμα

Κυτταρινικός
δίσκος

2 ζωνοειδείς
χλωροπλάστες

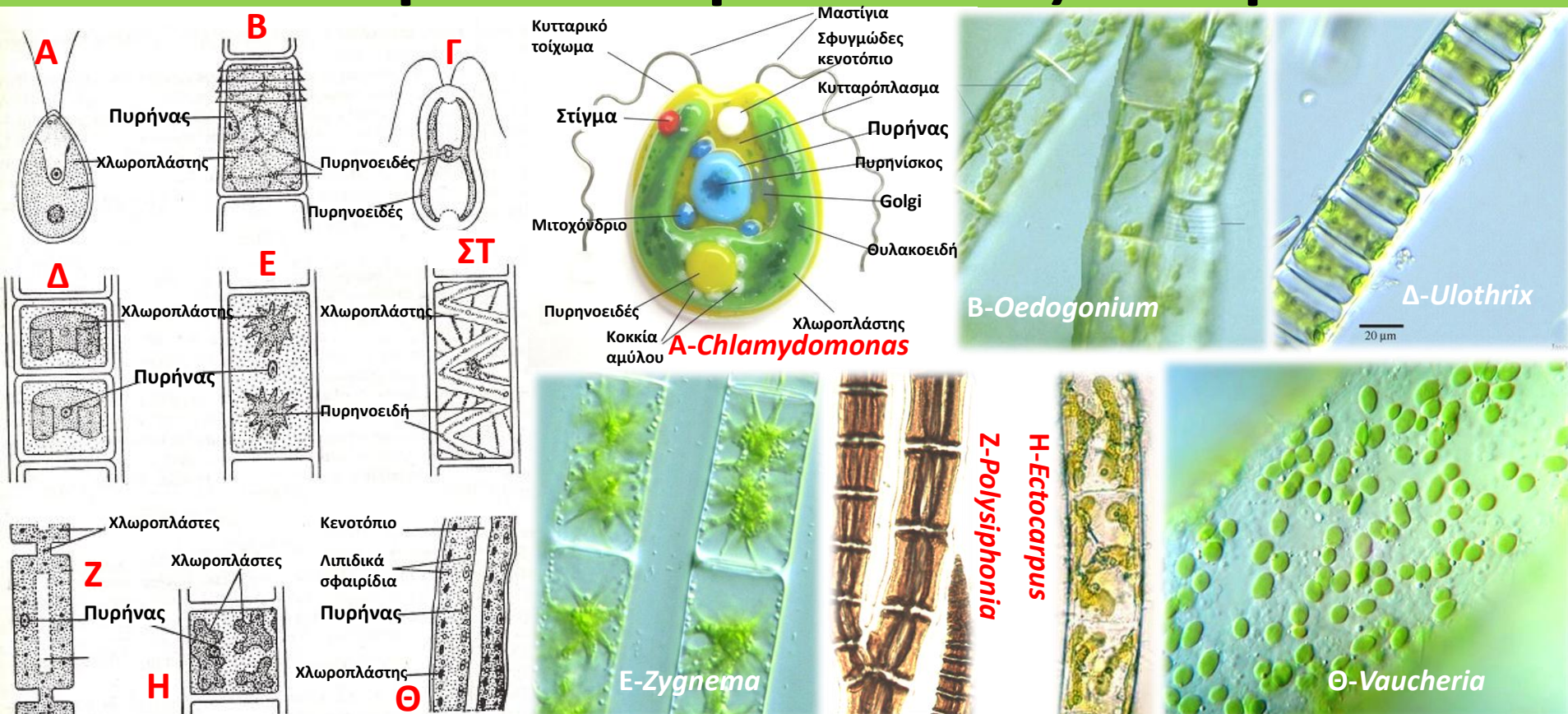
Πυρήνας
«αιωρούμενος» στο
κενοτόπιο μέσα σε
κυτοπλασμικά σκέλη

Πυρηνοειδής



Spirogyra, ένα από τα πλέον κοινά γένη φυκών (~300 είδη) των γλυκών νερών σχηματίζοντας πυκνές επιπλέουσες μάζες. Ο θαλλός του είναι **νηματοειδής** με τα νημάτια αποτελούμενα από ποικίλο αριθμό κυττάρων είτε επιπλέοντα είτε προσκολλημένα σε υπόστρωμα. Ο θαλλός του είναι **αδιακλάδωτος** με όλα τα κύτταρά του πανομοιότυπα. Εξωτερικά το νημάτιο καλύπτεται από **βλέννα**.

Κάθε κύτταρο περιέχει ένα μεγάλο **κενοτόπιο** γεμάτο με χυμό πλούσιο σε τανίνες. Το κυτταρόπλασμα είναι περιορισμένο στην περιφέρεια του κυττάρου με επεκτάσεις προς το κέντρο όπου διογκώνεται περιβάλλοντας τον πυρήνα. Ο **χλωροπλάστης** σχηματίζει μια **ταινιοειδή** περιέλιξη κατά μήκος του κυττάρου και περιέχει πολλά **πυρηνοειδή**. Αναπαράγεται βλαστητικώς και εγγενώς. Κυτταρίνη στο κυτταρικό τοίχωμα.



Οι **χλωροπλάστες** των ευκαρυωτικών φυκών ανήκουν στην κατηγορία των οργανιδίων του κυττάρου που ονομάζονται **πλαστίδια** και περιέχουν χρωστικές με παρουσία οπωσδήποτε χλωροφύλλης. Υπάρχουν και πλαστίδια που δεν έχουν χρωστικές και ονομάζονται λευκοπλάστες. Οι χλωροπλάστες περιβάλλονται οπωσδήποτε από **διπλή μεμβράνη** και σε ορισμένα Φύλα από 3 ή και 4 μεμβράνες.

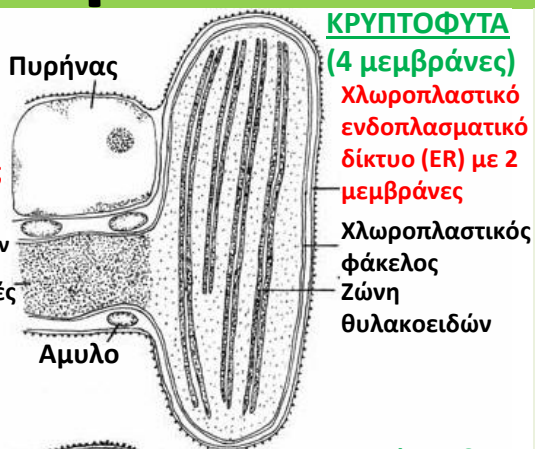
Ο **αριθμός**, το **σχήμα** και η **θέση** του/των χλωροπλάστη/ών ποικίλλει στα είδη των φυκών. Ακόμα και στο ίδιο γένος (π.χ. *Chlamydomonas*) μπορεί σε ένα είδος να είναι **κυπελλοειδούς** μορφής (A - *C. eugametos*) και σε άλλο (Γ - *C. alpinia*) **σχήματος** (H). Υπάρχουν χλωροπλάστες **δικτυωτού** σχήματος (B-Oedogonium), **αστεροειδείς** (E-Zygnema), **ζώνης** (Δ-Ulothrix), **περιέλιξης** (ΣΤ-Spirogyra), **δίσκου** (Z-Polysiphonia, Θ-Vaucheria), ή **ακανόνιστου** σχήματος (H-Ectocarpus).

Φυκολογία – Ποικιλία δομής των χλωροπλάστων 19

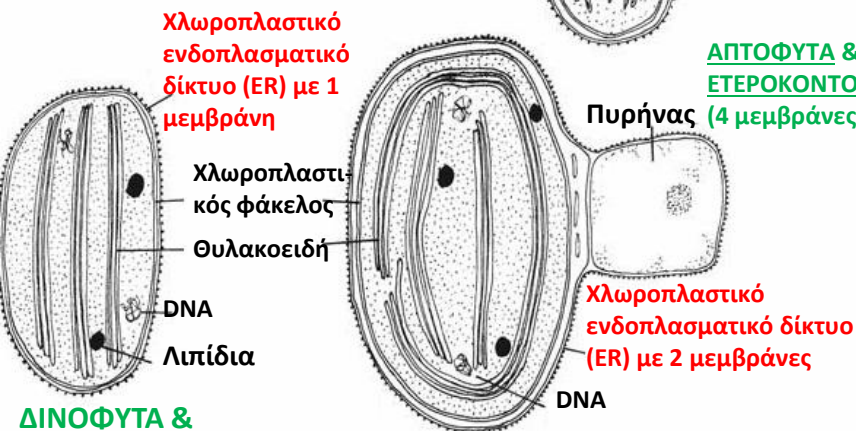
ΡΟΔΟΦΥΤΑ (2 μεμβράνες)



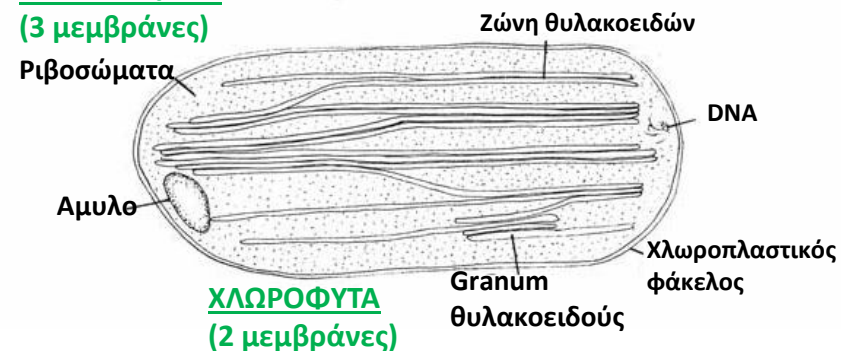
ΚΡΥΠΤΟΦΥΤΑ (4 μεμβράνες)



ΑΠΤΟΦΥΤΑ & ΕΤΕΡΟΚΟΝΤΟΦΥΤΑ (4 μεμβράνες)



ΔΙΝΟΦΥΤΑ & ΕΥΓΛΗΝΟΦΥΤΑ (3 μεμβράνες)



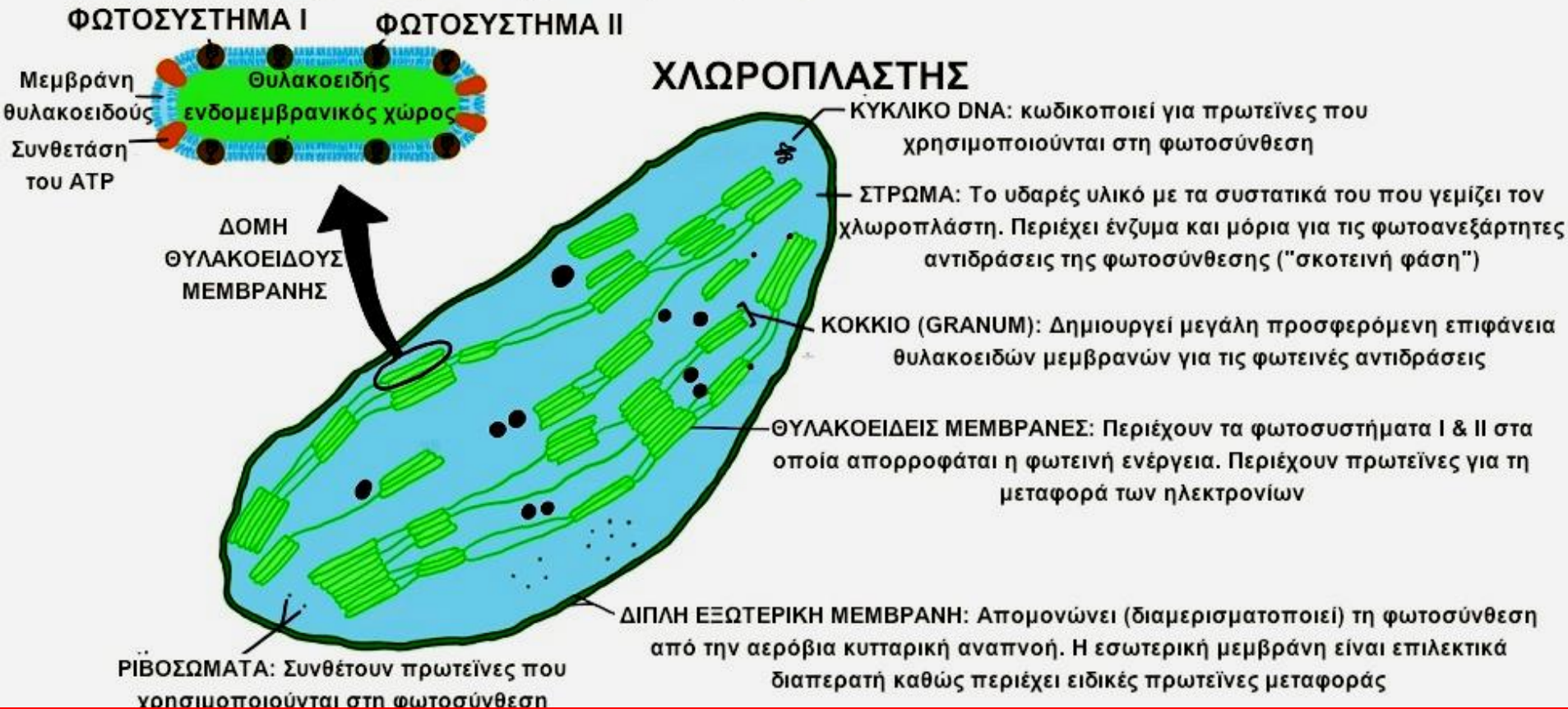
Οι χλωροπλάστες των φυκών είναι διαφορετικοί στη δομή τους από αυτούς των φυτών. Ετσι τα **θυλακοειδή** τους (φωτοσυνθετικές μεμβράνες) δεν σχηματίζουν πολύστιβα **κοκκία (grana)** όπως αυτά των φυτών αλλά μάλλον **δίστιβες ταινίες**. Εξάιρεση τα χλωρόφυτα (από τα οποία άλλωστε κατάγονται τα φυτά) όπου υπάρχουν μεν λίγα grana αλλά σε λεπτές στοίβες (τα grana δεν είναι τίποτα άλλο παρά τοπικές αναδιπλώσεις των θυλακοειδών).

Ως «αντανάκλαση» της διαδικασίας της **ενδοσυμβίωσης** ενός αρχέγονου **κυανοβακτηρίου** σε ένα **ευκαρυωτικό κύτταρο** και κατόπιν της ενδοσυμβίωσης ενός ευκαρυώτη σε άλλο ευκαρυώτη, οι χλωροπλάστες περιβάλλονται από 2, 3 ή 4 **μεμβράνες**. Σε αυτούς με 3 ή 4 μεμβράνες, η εξωτερική αποτελεί ή αποτέλεσε τμήμα του **ενδοπλασματικού δικτύου** και φέρει **ριβοσώματα**. Οι χλωροπλάστες διαθέτουν επίσης το δικό τους **DNA** το οποίο αποτελεί ένα απομεινάρι του αρχέγονου κυανοβακτηριακού DNA.

Οι χλωροπλάστες αποτελούν κατά κάποιο τρόπο **αυτοδύναμες οντότητες** μέσα στο κύτταρο καθώς **διαιρούνται** αυτόνομα, παράγουν αυτοτελώς **μακρομόρια** και φυσικά παράγουν φωτοσυνθετικώς **γλυκόζη** και την αποθηκεύουν ως **άμυλο**.

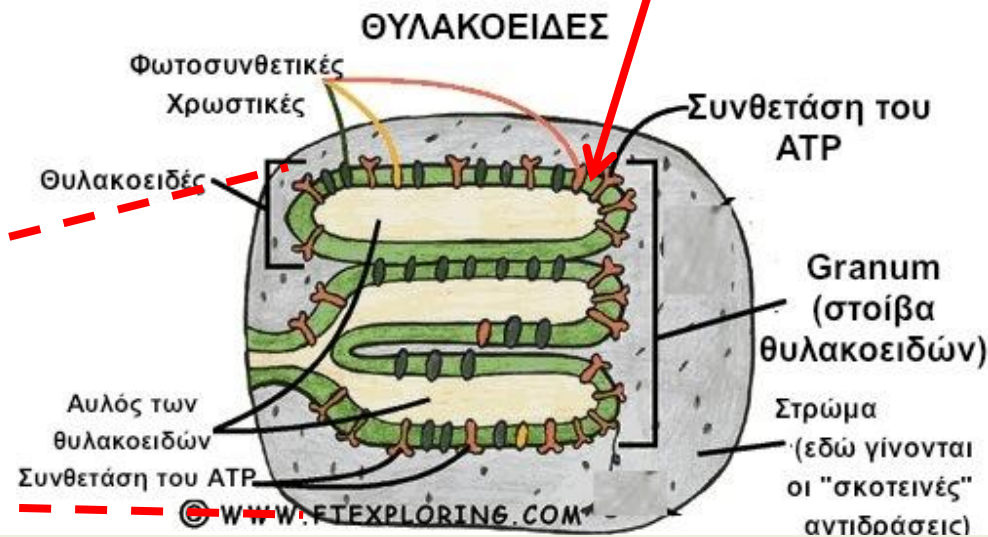
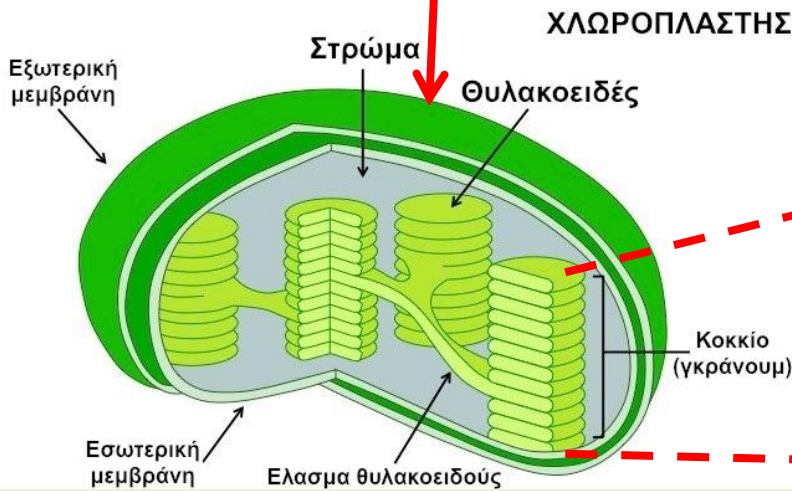
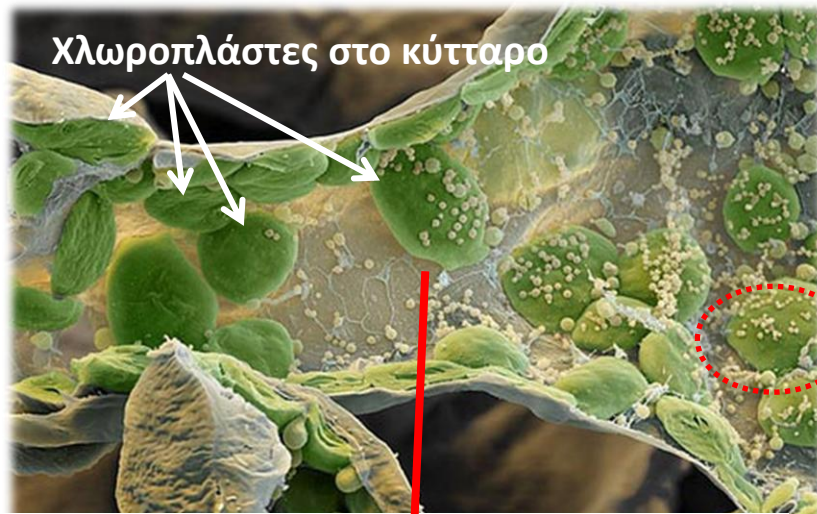
Φυκολονία – Τι γίνεται στο χλωροπλάστη 20

Θυλακοειδές: Το μέρος όπου γίνεται η φωτεινή αντίδραση

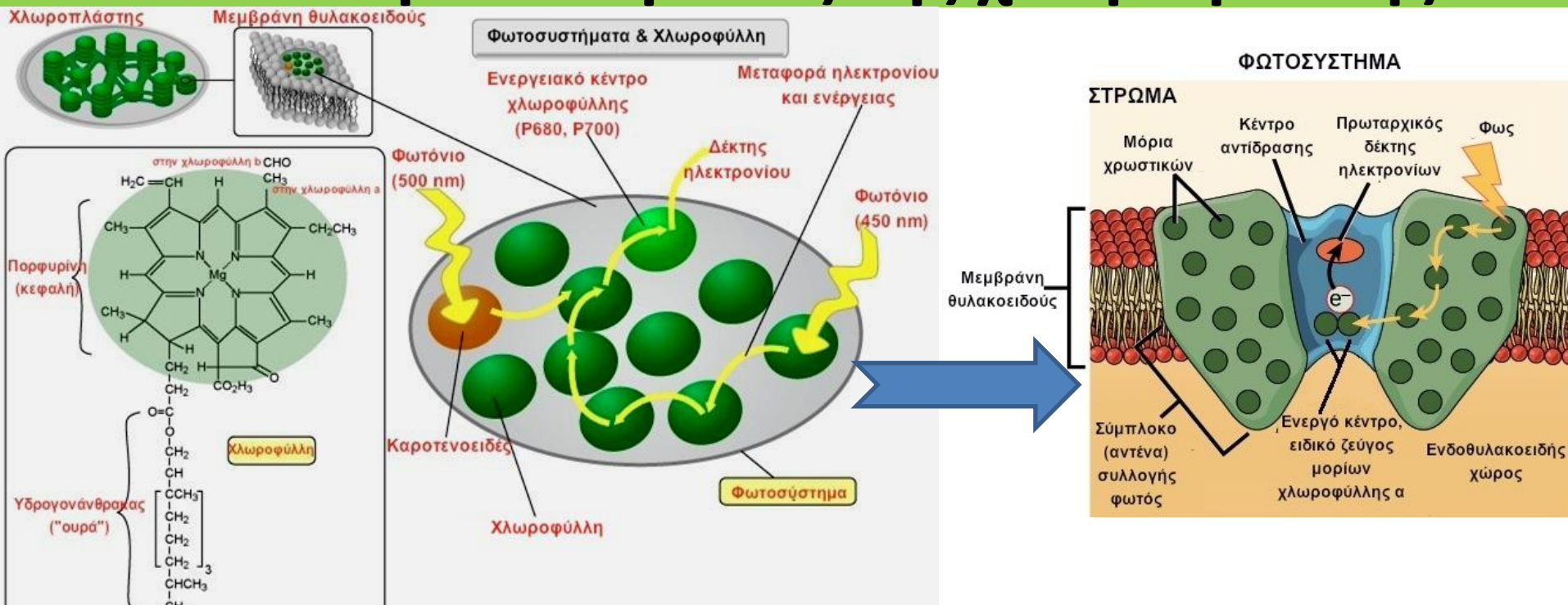


Τι να θυμόμαστε: Στο **στρώμα** των χλωροπλάστων με τη σειρά των αντιδράσεων που ανήκουν στον ονομαζόμενο «**κύκλο του Calvin**» ή αλλιώς «**σκοτεινή αντίδραση**» (υπό την έννοια ότι δεν απαιτείται φως για να συμβούν), γίνεται η **δέσμευση** του CO_2 και παράγεται **γλυκόζη** ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). Η **ενέργεια** για να συμβεί αυτό παράγεται ως **ATP** στο χλωροπλάστη και η **αναγωγική δύναμη** (παροχή υδρογόνων-H & ηλεκτρονίων προς σχηματισμό **NADPH**) παράγεται επίσης στο χλωροπλάστη κατά τη «**φωτεινή αντίδραση**». Οι φωτεινές αντιδράσεις γίνονται στην επιφάνεια των θυλακοειδών μεμβρανών και η «**καρδιά**» των αντιδράσεων είναι η **χλωροφύλλη** η οποία με τα ειδικά επικουρικά μόρια στο **κέντρο αντίδρασης διασπά το νερό** σε οξυγόνο και πρωτόνια και απελευθερώνει **ηλεκτρόνια**.

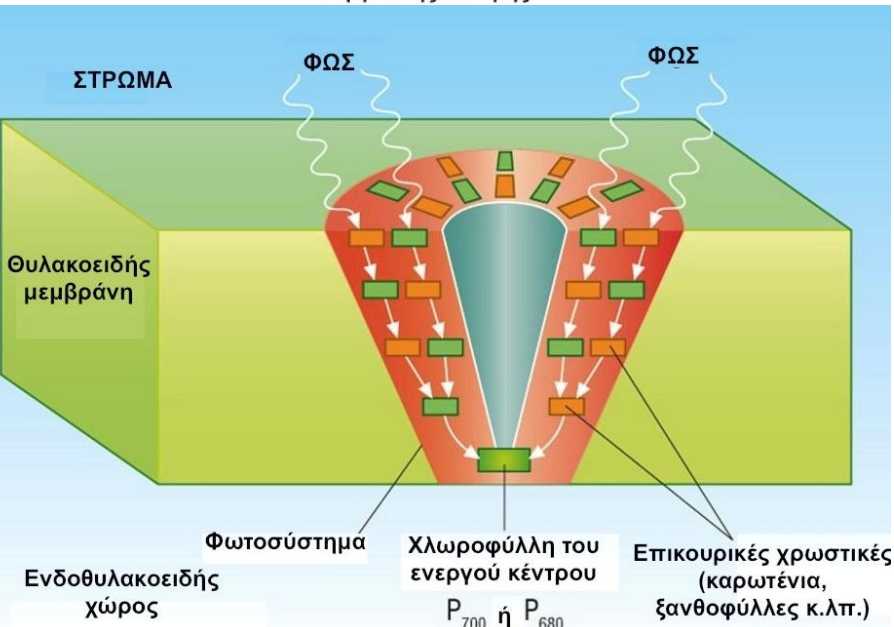
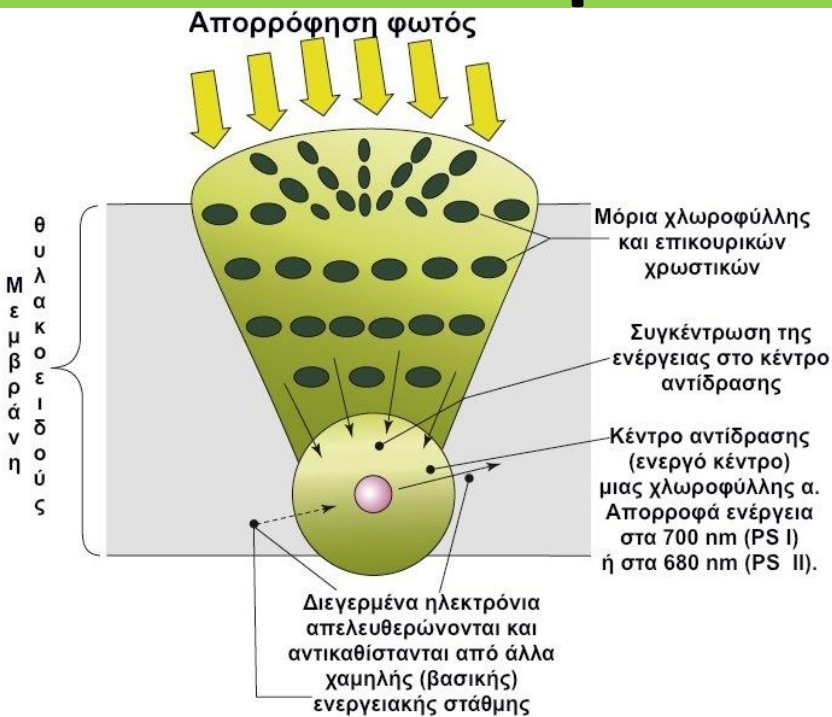
Φυκολογία – Ο χλωροπλάστης απεικονισμένος ²¹



Το λειτουργικό μέρος του χλωροπλάστη αποτελούν οι **θυλακοειδείς μεμβράνες** στο εσωτερικό του. Στην ουσία πρόκειται για **αναδιπλωμένες μεμβράνες** έτσι ώστε να προσφέρουν τη μεγαλύτερη δυνατή λειτουργική επιφάνεια στον περιορισμένο εσωτερικό χώρο του χλωροπλάστη. Στην **επιφάνεια** των **θυλακοειδών** μεμβρανών βρίσκονται οι **φωτοσυνθετικές χρωστικές** και τα άλλα ένζυμα που επιτελούν τη φωτοσύνθεση. Οι θυλακοειδείς μεμβράνες λόγω της αναδίπλωσής των δημιουργούν κλειστούς χώρους μεταξύ τους δηλαδή **ενδοθυλακοειδείς χώρους** ή αλλιώς **αυλούς** θυλακοειδών συνεχόμενων μεταξύ τους. Το υπόλοιπο εσωτερικό του χλωροπλάστη που περιβάλλει τα θυλακοειδή ονομάζεται **στρώμα** του χλωροπλάστη.



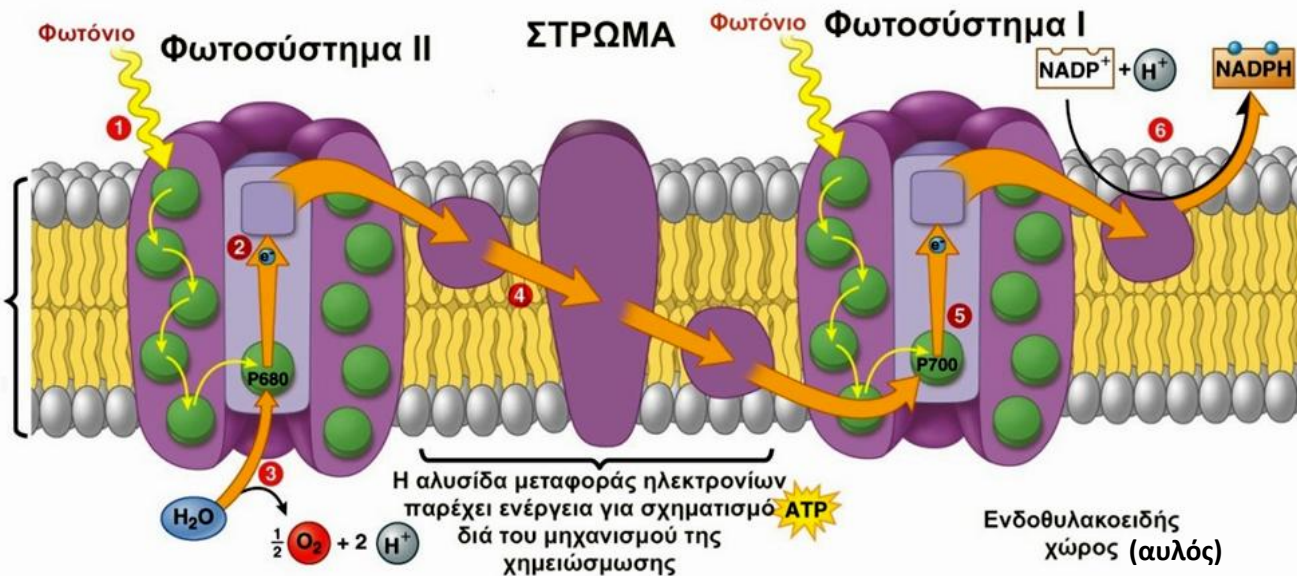
Η **βάση της φωτοσύνθεσης** εδράζεται πρωταρχικώς στο μόριο της **χρωστικής χλωροφύλλης** το οποίο υπάρχει σε όλους τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς. Η χλωροφύλλη μπορεί να διεγείρεται από ορισμένα μήκη κύματος του φωτός και να απελευθερώνει ηλεκτρόνια τα οποία κατόπιν μεταφερόμενα καταλλήλως θα παραγάγουν ATP και NADPH. Υπάρχουν διάφοροι τύποι χλωροφύλλης (a, b, c και d) ανάλογα με το είδος του οργανισμού όμως όλοι έχουν οπωσδήποτε **χλωροφύλλη-α**. Η χλωροφύλλη-α **απορροφά περισσότερο** στα μήκη κύματος **~440 nm (μπλε)** και **~670 nm (ερυθρό)**. Το **φωτοσύστημα** είναι μια περίπλοκη δομή με μόρια χλωροφύλλης και άλλων χρωστικών (**επικουρικές χρωστικές**) όπως **καρωτίνη, ξανθοφύλλες** ή και **φυκοβιλίνες**. Εκτός από χρωστικές υπάρχουν και εξειδικευμένες πρωτεΐνες. Οι χρωστικές αυτές βοηθούν με τη «συλλογή» όσο το δυνατόν περισσότερων φωτονίων που ανήκουν σε άλλα μήκη κύματος πέραν αυτών που απορροφά η χλωροφύλλη. Ετσι υποβοηθούν το έργο της **φωτοσυλλεκτικότητας** της χλωροφύλλης διοχετεύοντας σε αυτή την ενέργεια των φωτονίων. Πάντως όλη η ενέργεια που συλλέχθηκε από όλες τις χρωστικές (χλωροφύλλες και επικουρικές χρωστικές) του φωτοσυστήματος στο τέλος καταλήγει στο λεγόμενο **ενεργό κέντρο** του φωτοσυστήματος όπου διεγείρει το μόριο μιας **ειδικής χλωροφύλλης-α** για να διασπαστεί το νερό και να απελευθερωθούν-διεγερθούν-μεταφερθούν ηλεκτρόνια.



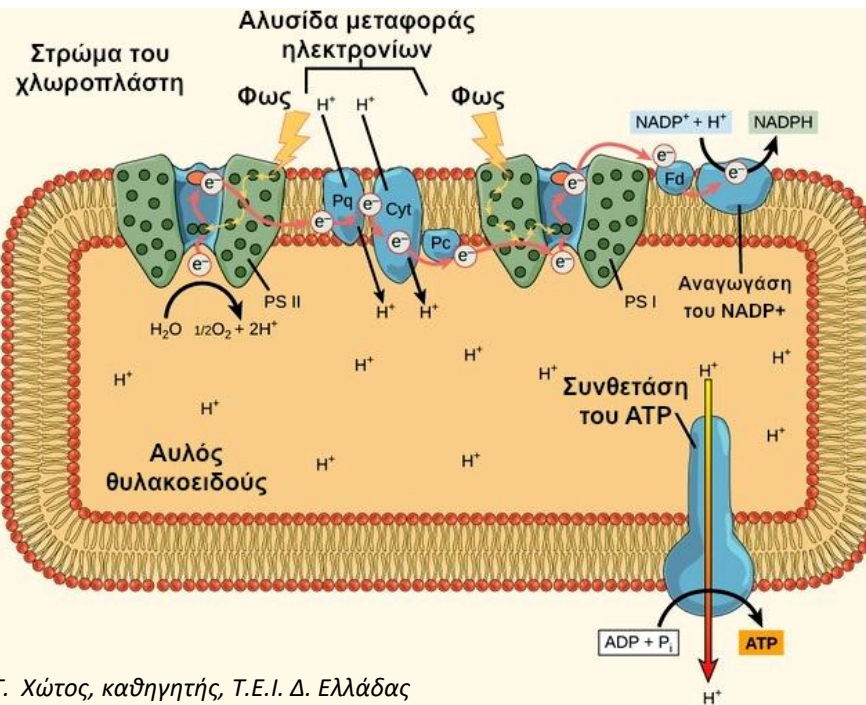
Το σύνολο των φωτοσυνθετικών χρωστικών που υπάρχει σε κάθε φωτοσύστημα των θυλακοειδών μεμβρανών του χλωροπλάστη, λειτουργεί ως μια «κεραία» που συλλαμβάνει όσο το δυνατόν περισσότερα φωτόνια και την ενέργειά τους τη διοχετεύει σαν «μέσω ενός χωνιού» στο ενεργό κέντρο με την ειδική χλωροφύλλη-α.

Φυκολογία – Τι κάνουν με το φως οι χλωροπλάστες; ²⁴

Θυλάκοειδής

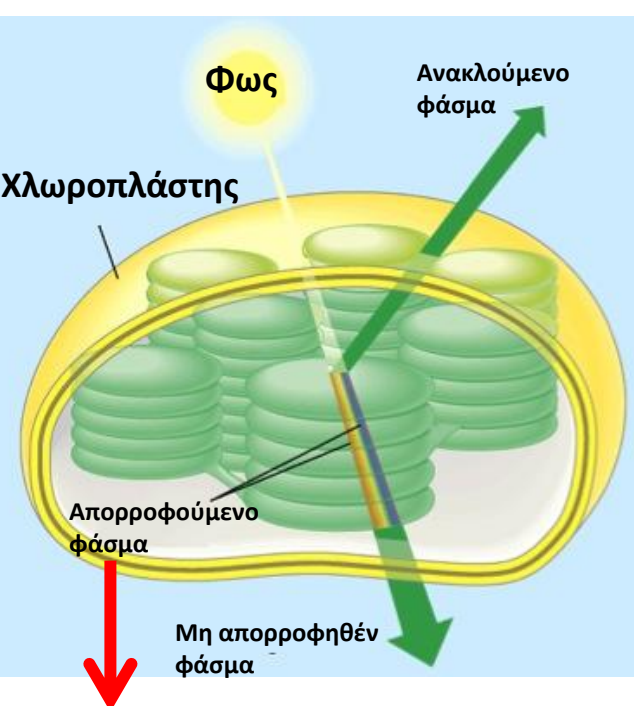


Η ενέργεια των φωτονίων (1) μεταφερόμενη μέσω των διεγερόμενων **χρωστικών** στο ενεργό κέντρο (**P680**) του **Φωτοσυστήματος II** (PSII), καταλύει (3) τη διάσπαση του νερού (H_2O) σε οξυγόνο (O) και 2 **πρωτόνια** (H^+) απελευθερώνοντας συνάμα 2 **ηλεκτρόνια** (e^-). Τα ηλεκτρόνια αυτά αναπληρώνουν τα 2 ηλεκτρόνια που απελευθερώνει το P680 λόγω των φωτονίων (2).

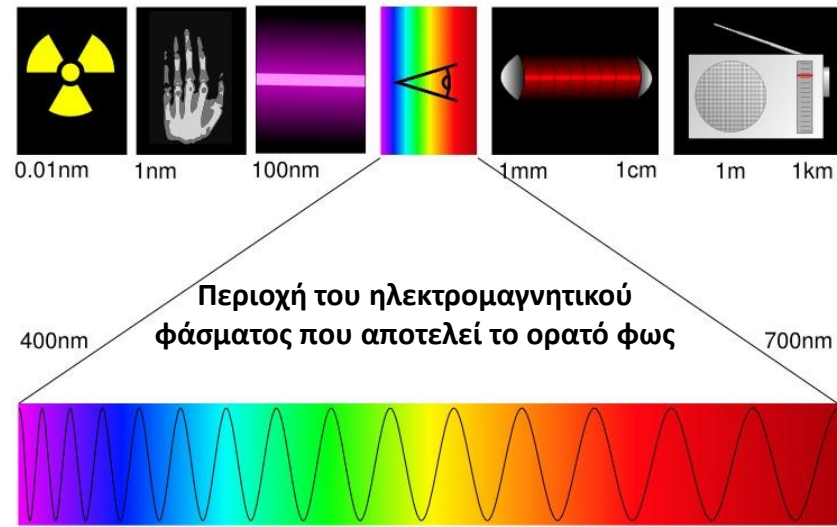
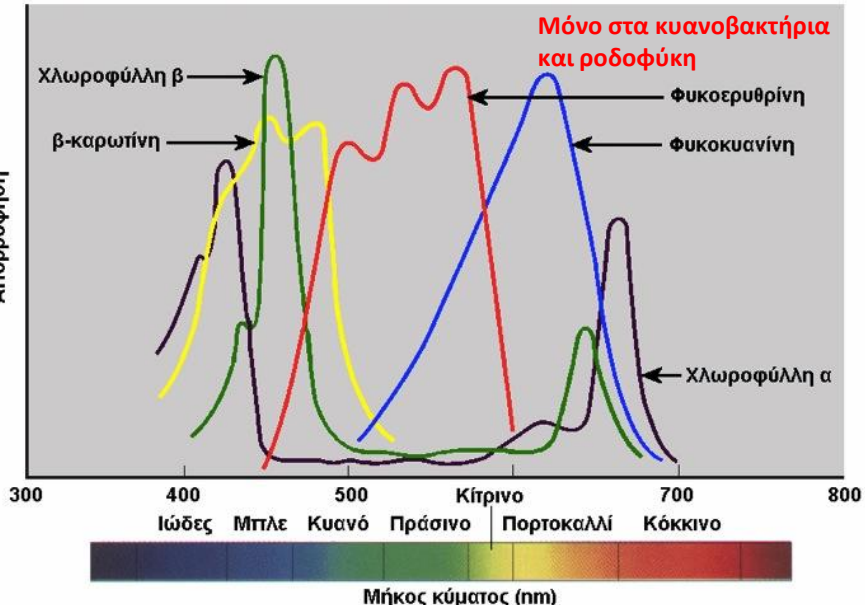
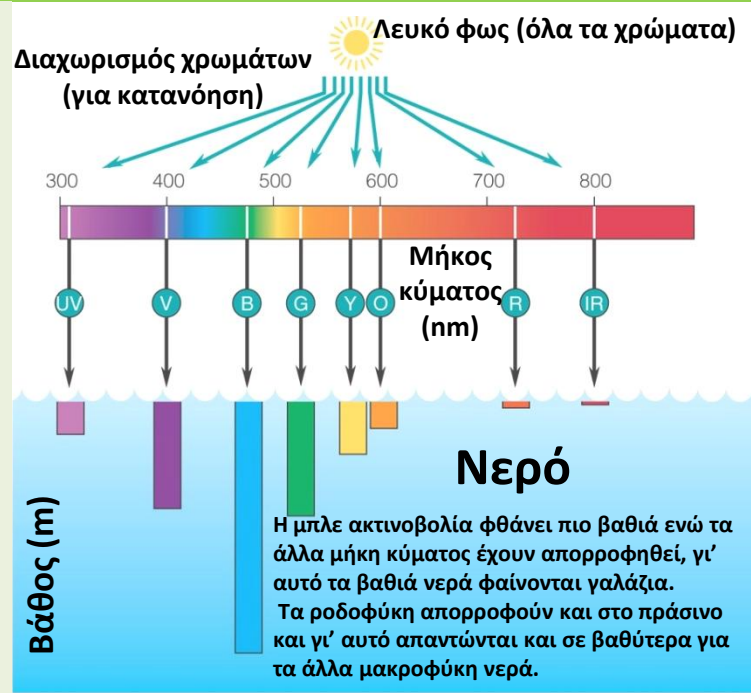


Τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται (4) μέσω ειδικών **μορίων-μεταφορέων** (πρωτεΐνες: **πλαστοκινόνη-κυτόχρωμα-πλαστοκυανίνη**) στο ενεργό κέντρο (P700) του **Φωτοσυστήματος I** (PSI) το οποίο με αυτά αναπληρώνει τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνει λόγω της διέγερσής του από το φως (5). Τα ηλεκτρόνια αυτά μέσω του **μεταφορέα** (φερροδοξίνη) τελικώς καταλήγουν στο **συνένζυμο NADP** και αυτό ανάγεται σε **NADPH** (6). Συνάμα κατά την πορεία των ηλεκτρονίων η πλαστοκινόνη και το κυτόχρωμα διεγερόμενα από το κάθε ηλεκτρόνιο μεταφέρουν πρωτόνια (H^+) από το **στρώμα** του χλωροπλάστη στον **αυλό** του **θυλακοειδούς**. Η υπερβολική συγκέντρωση πρωτονίων στον αυλό δημιουργεί «πίεση» να επανέλθουν στο στρώμα προς εξισορρόπηση της συγκέντρωσης (**χημειώσωση**). Διέρχονται έτσι από το ένζυμο **συνθάση** (ή **συνθετάση**) του **ATP** και παράγεται **ATP**.

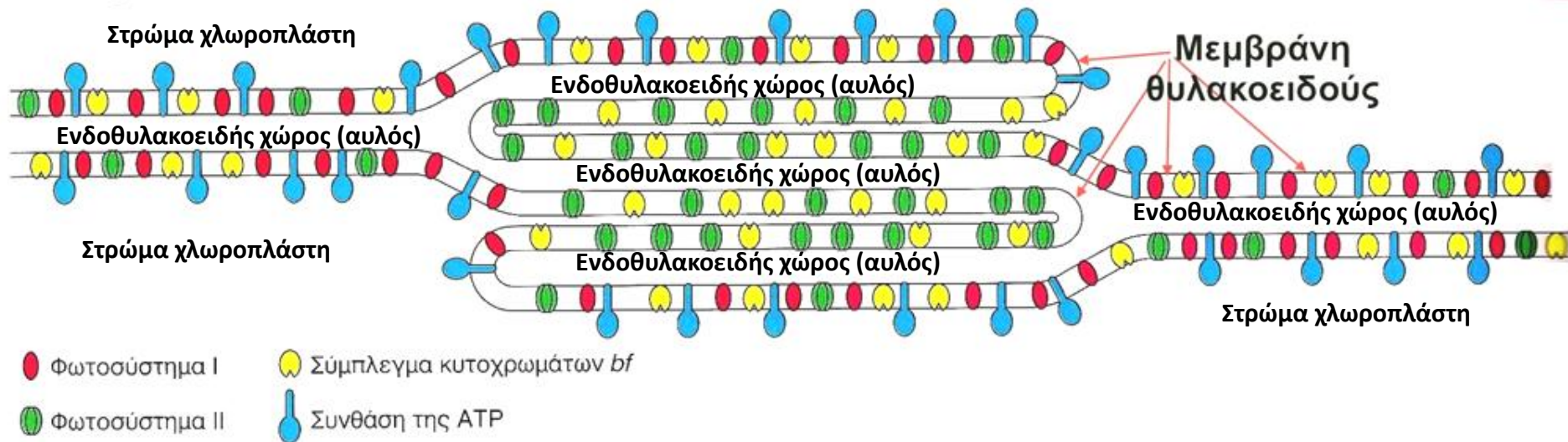
Φυκολογία – Φωτοσυνθετικώς χρήσιμο φως 25



Εκείνα μήκη κύματος που απορροφώνται από τις χρωστικές του χλωροπλάστη αποτελούν τη **Φωτοσυνθετικώς Χρήσιμη Ακτινοβολία (PAR-Photosynthetic Active Radiation)**. Ανάλογα με τη σύνθεση των διάφορων χρωστικών στα είδη των φυκών, παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις στην ικανότητά τους να απορροφούν ποικίλα μήκη κύματος.



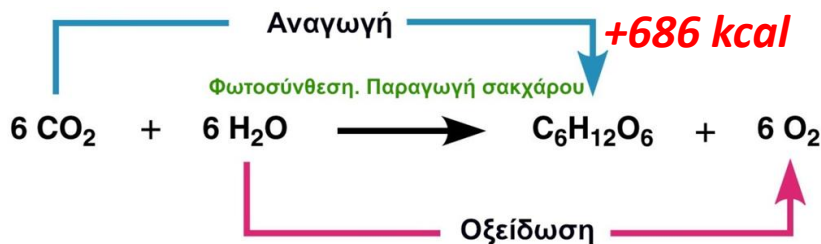
Φυκολογία – Κατανομή των συστημάτων στα θυλακοειδή ²⁶



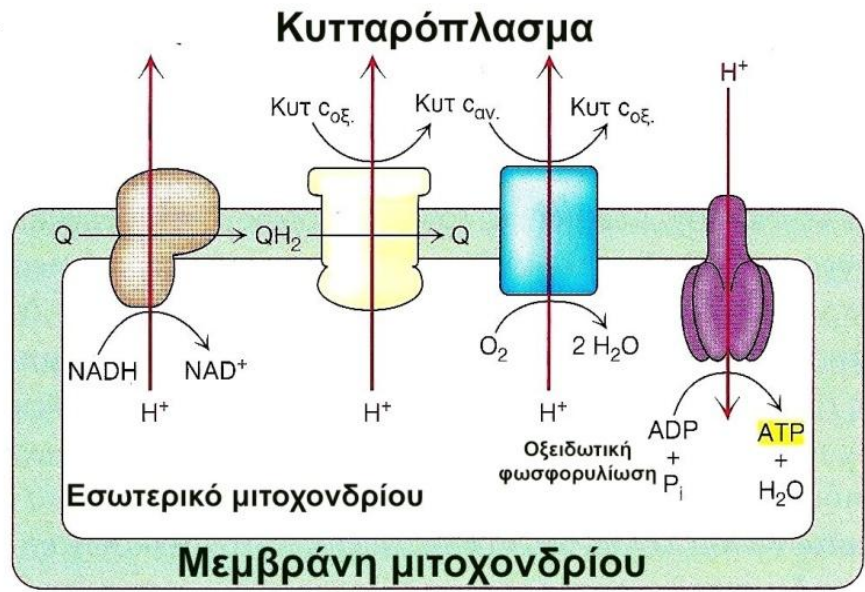
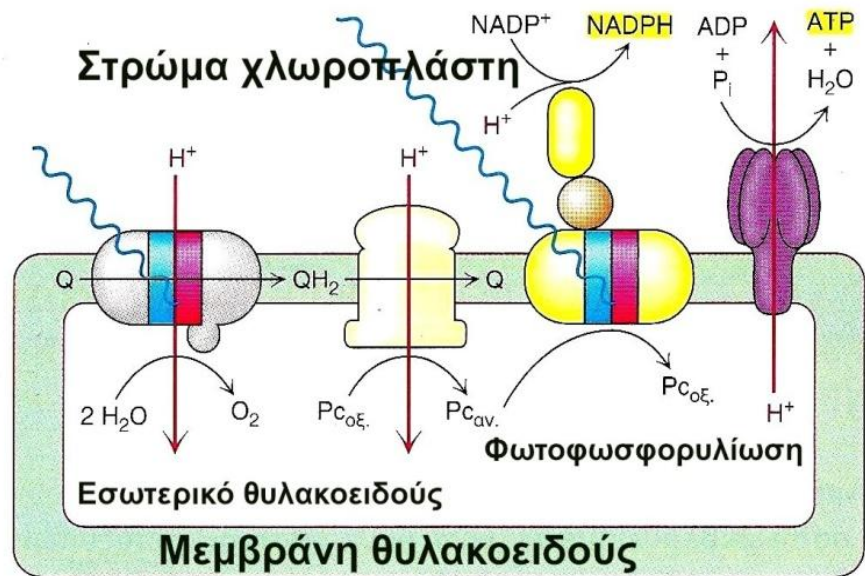
Τα μοριακά συστήματα που επιτελούν τις φυσικοχημικές αντιδράσεις της φωτεινής φάσης της φωτοσύνθεσης είναι τοποθετημένα με **ιδιαίτερη διάταξη** στις **θυλακοειδείς μεμβράνες**. Η διάταξη αυτή καθορίζεται με τη σειρά της από τη διαφοροποίηση των θυλακοειδών μεμβρανών σε **στοιβαγμένες** και **μη στοιβαγμένες** περιοχές. Το στοιβάγμα αυξάνει την ποσότητα των μεμβρανών σε ένα ορισμένο όγκο. Όμως μόνο οι μη στοιβαγμένες περιοχές έρχονται σε άμεση επαφή με το στρώμα του χλωροπλάστη. Στοιβαγμένες και μη στοιβαγμένες περιοχές διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τη σύστασή τους σε φωτοσυνθετικά συγκροτήματα. Το **φωτοσύστημα I** και η **συνθάση του ATP** βρίσκονται μόνο στις μη στοιβαγμένες περιοχές και στο μέτωπο των στοιβαγμένων που «βλέπει» προς το στρώμα. Αυτό είναι απαραίτητο για τη συνθάση του ATP διότι η κίνηση των πρωτονίων (H^+) κατά τη χημειώσμωση γίνεται μέσω της συνθάσης-ATP από τον αυλό του θυλακοειδούς προς το στρώμα για να παραχθεί ATP το οποίο θα χρησιμοποιηθεί εντός του στρώματος κατά τον κύκλο του Calvin. Είναι απαραίτητη επίσης αυτή η διάταξη διότι το φωτοσύστημα I θα ανάγει το $NADP^+$ σε $NADPH$ που πρέπει και αυτό να υπάρχει στο στρώμα για να συμμετάσχει στον κύκλο του Calvin.

Το **φωτοσύστημα II** που αφαιρεί ηλεκτρόνια από το νερό με ενέργεια από το φως και τα μεταβιβάζει στο σύμπλεγμα των **κυτοχρωμάτων** κατακλύζει μαζί με τα κυτοχρώματα τις στοιβαγμένες περιοχές. Όμως για να επιτελεσθεί πλήρως η φωτεινή φάση πρέπει τα **ηλεκτρόνια** που πέρασαν από το **φωτοσύστημα II** στα **κυτοχρώματα** να φθάσουν και στο **φωτοσύστημα I**. Αυτό όμως δεν αποτελεί πρόβλημα διότι τα **κυτοχρώματα** είναι **ταχύτατοι κινητοί μεταφορείς ηλεκτρονίων** μεταξύ των φωτοσυστημάτων που βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές της μεμβράνης (κυριολεκτικά «κολυμπούν» στη μεμβράνη !!).

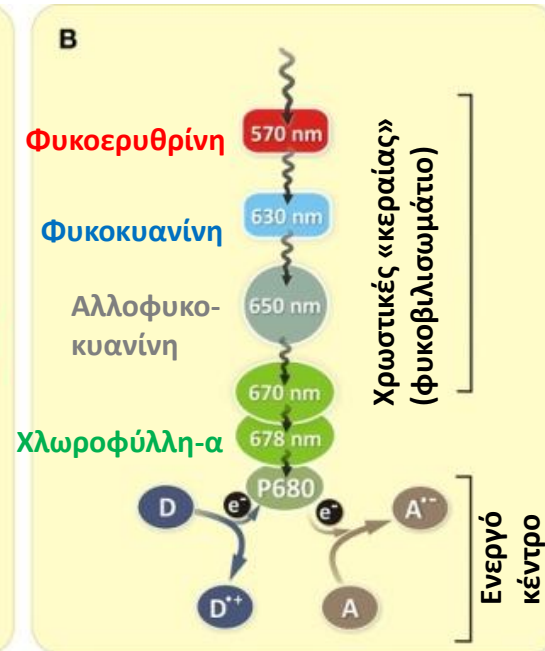
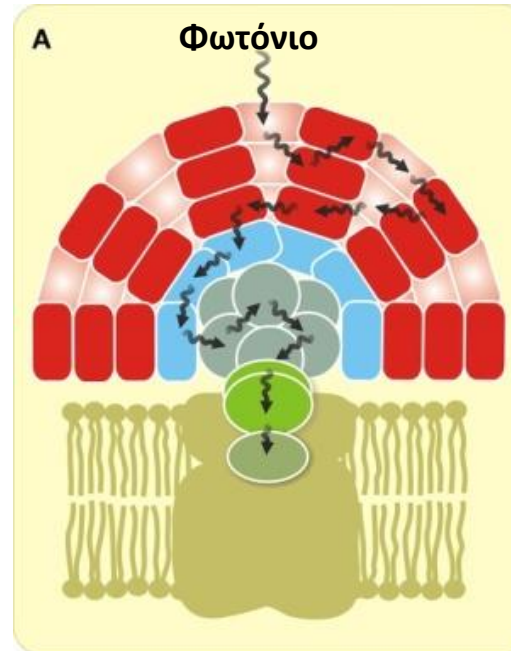
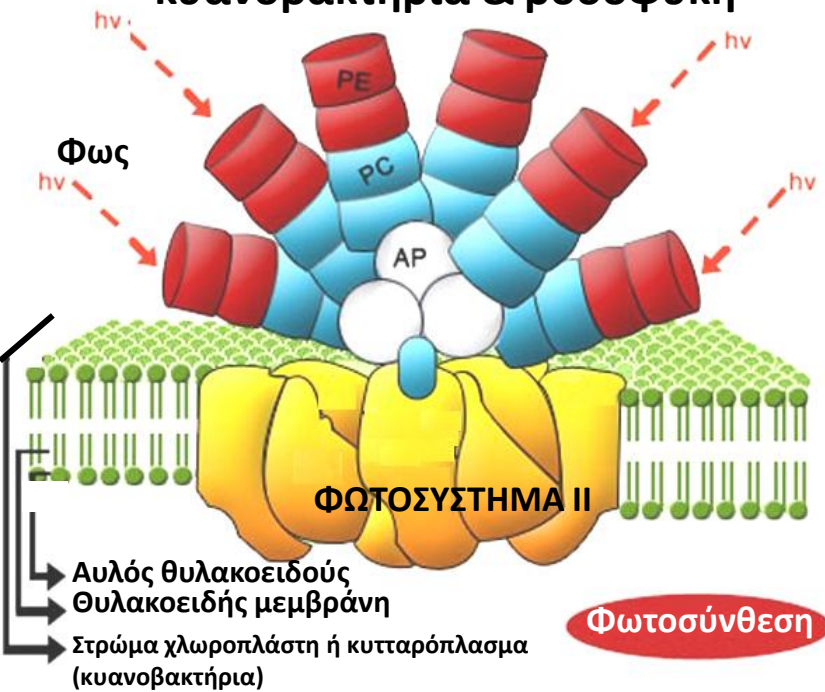
Φυκολογία – Χλωροπλάστης - Μιτοχόνδριο



Τόσο στο χλωροπλάστη όσο και στο μιτοχόνδριο γίνονται **ενεργειακοί μετασχηματισμοί** από ειδικά μακρομόρια, **χρωστικές-ένζυμα-κυτοχρώματα** στο χλωροπλάστη, **κυτοχρώματα-ένζυμα** στο μιτοχόνδριο. Και στα δύο οργανίδια η ενέργεια παράγεται από τη **μεταφορά ηλεκτρονίων** μεταξύ ειδικών **μεγαλομορίων-μεταφορέων**. Όλα τα μακρομόρια βρίσκονται επάνω σε **μεμβράνες (θυλακοειδείς στο χλωροπλάστη, μιτοχονδριακή στο μιτοχόνδριο)**. Κατά τη μεταφορά αυτή συμπλέκεται και η **δημιουργία διαφοράς συγκέντρωσης πρωτονίων (H^+)** μεταξύ των πλευρών της μεμβράνης. Η τάση που δημιουργείται για να εξισορροπηθούν οι συγκεντρώσεις των πρωτονίων τα αναγκάζει να περάσουν από το ένζυμο **συνθάση του ATP** και το έργο αυτό παράγει **ATP**. Ο χλωροπλάστης με ενέργεια από το φως παράγει τη **γλυκόζη**. Η ενέργεια της γλυκόζης απελευθερώνεται με **οξείδωση** στο μιτοχόνδριο. Στα κυανοβακτήρια το ρόλο του χλωροπλάστη επιτελούν θυλακοειδείς μεμβράνες στο κυτταρόπλασμα και το ρόλο του μιτοχονδρίου η διπλή κυτταροπλασματική μεμβράνη.



Φυκοβιλισώματα στα κυανοβακτήρια & ροδοφύκη

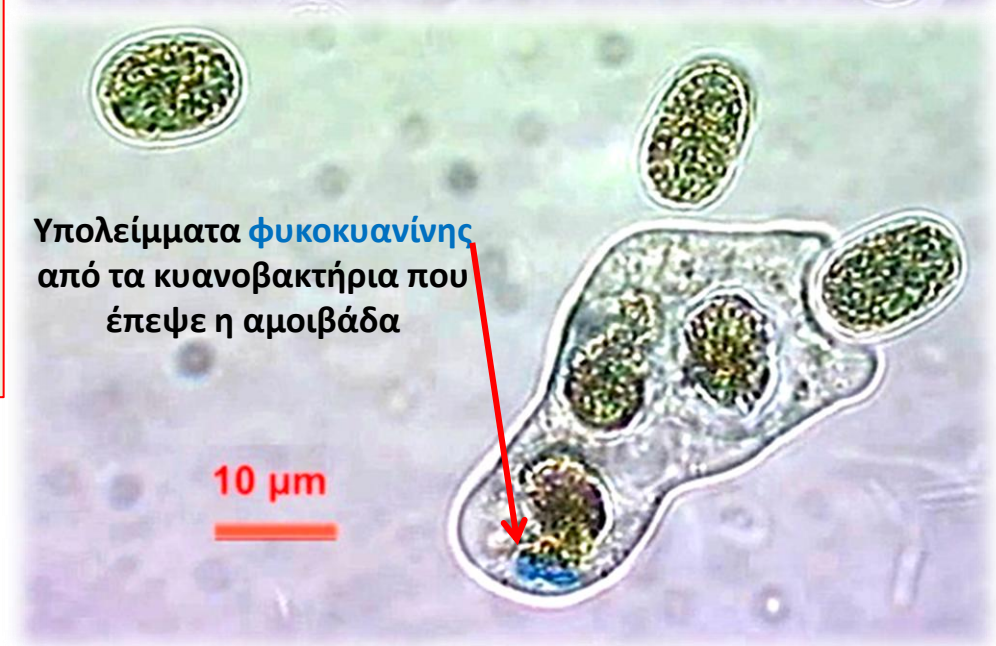
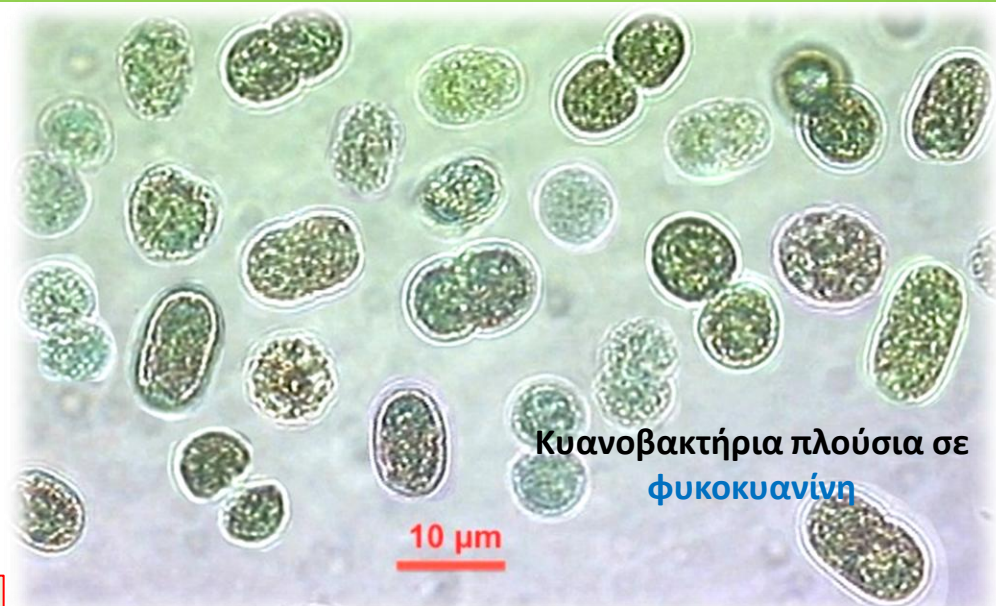
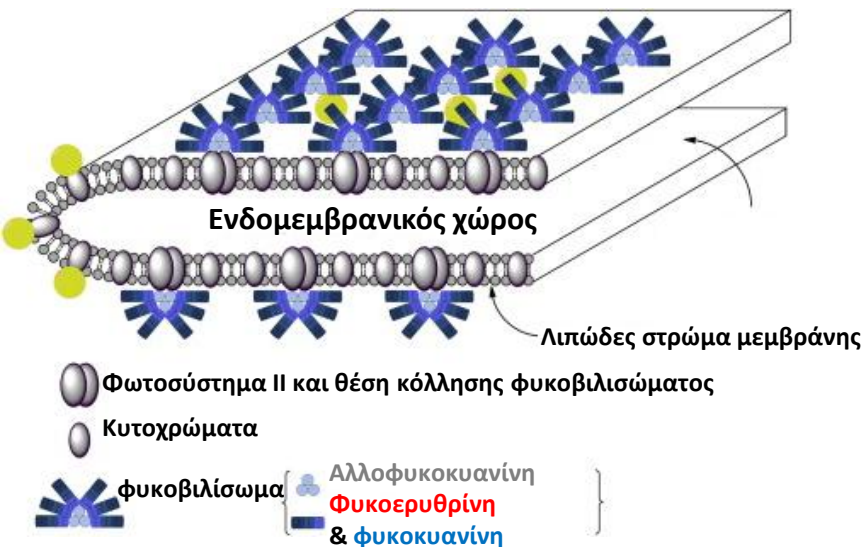


PE = Φυκοερυθρίνη
 PC = Φυκοκυανίνη
 AP = Αλλοφυκοκυανίνη

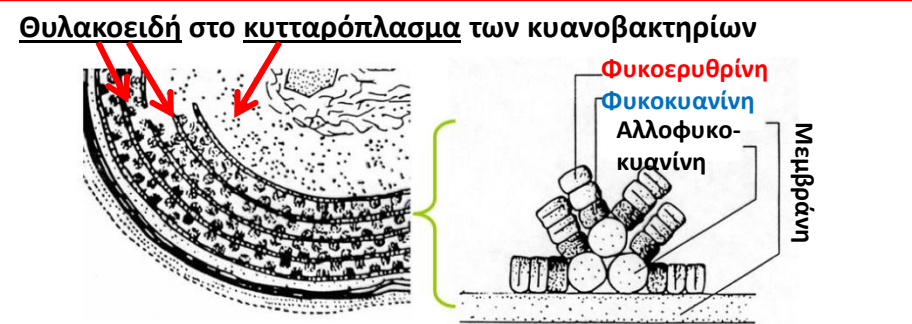
ΦΥΚΟΒΙΛΙΝΕΣ

Τα **φυκοβιλισώματα** που αποτελούνται από τις χρωστικές **φυκοερυθρίνη**, **φυκοκυανίνη** και **αλλοφυκοκυανίνη** (σε διαφορετικές αναλογίες ανάλογα με το φύκος) είναι μια θαυμαστή ειδική δομή **φωτοσυλλεκτικής κεραίας** που συλλέγει φωτόνια με μήκη κύματος ~570-650 nm (πράσινο-κίτρινο-πορτοκαλί του φάσματος) που καμιά άλλη από τις άλλες χρωστικές (χλωροφύλλες-καρωτίνη-ξανθοφύλλες) δεν μπορεί να απορροφήσει. Ετσι τα φύκη που διαθέτουν και φυκοβιλισώματα μπορούν και εκμεταλλεύονται καλύτερα μεγαλύτερο εύρος του φωτεινού φάσματος. Τα φυκοβιλισώματα παρουσιάζουν μια χαρακτηριστική δομή με τις **φυκοβιλίνες** τους (φυκοερυθρίνη, φυκοκυανίνη και αλλοφυκοκυανίνη) σε **6 στήλες-στοίβες** που εξέχουν **ακτινωτά** από την επιφάνεια του θυλακοειδούς προς το στρώμα του χλωροπλάστη. Εδράζονται στο σύμπλοκο του **φωτοσυστήματος II** (μόνο) το οποίο είναι βυθισμένο στη μεμβράνη και σε αυτό μεταβιβάζουν τη συλλεχθείσα φωτονική ενέργεια.

Φυκολογία – Τα φυκοβιλισώματα στα κυανοβακτήρια²⁹



Τα **φυκοβιλισώματα** βρίσκονται σε όλες τις επιφάνειες των **θυλακοειδών μεμβρανών** που γεμίζουν σαν ομόκεντροι κύκλοι το περιφερειακό μέρος του κυτταροπλάσματος του **κυανοβακτηριακού** κυττάρου. Έτσι προσφέρουν στο φως μια ανεμπόδιστη και μεγάλη επιφάνεια για να δεσμευθεί η ενέργεια των φωτονίων. Πρόκειται για πολύ αποτελεσματικό φωτοσυνθετικό σύστημα και είναι από τις βασικές αιτίες της συχνής ανάπτυξης **κυανοβακτηριακών ανθίσεων**.



Φυκολογία – Η πολύτιμη φυκοκυανίνη από τα κυανοβακτήρια



Η **φυκοκυανίνη** αποτελεί μια πολύτιμη εκμεταλλεύσιμο φυσική χρωστική που παράγεται από καλλιεργούμενα **κυανοβακτήρια** (π.χ. *Spirulina*). Ολο και πιο έντονα η βιομηχανία εκχυλίζει από τα κυανοβακτήρια **φυκοκυανίνη** και την εμπορεύεται για ποικίλες χρήσεις. Θεωρείται ισχυρό αντιοξειδωτικό και αντικαρκινικό και η καλύτερη **φυσική μπλε χρωστική** (π.χ. παγωτά, ζαχαρωτά).