

Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

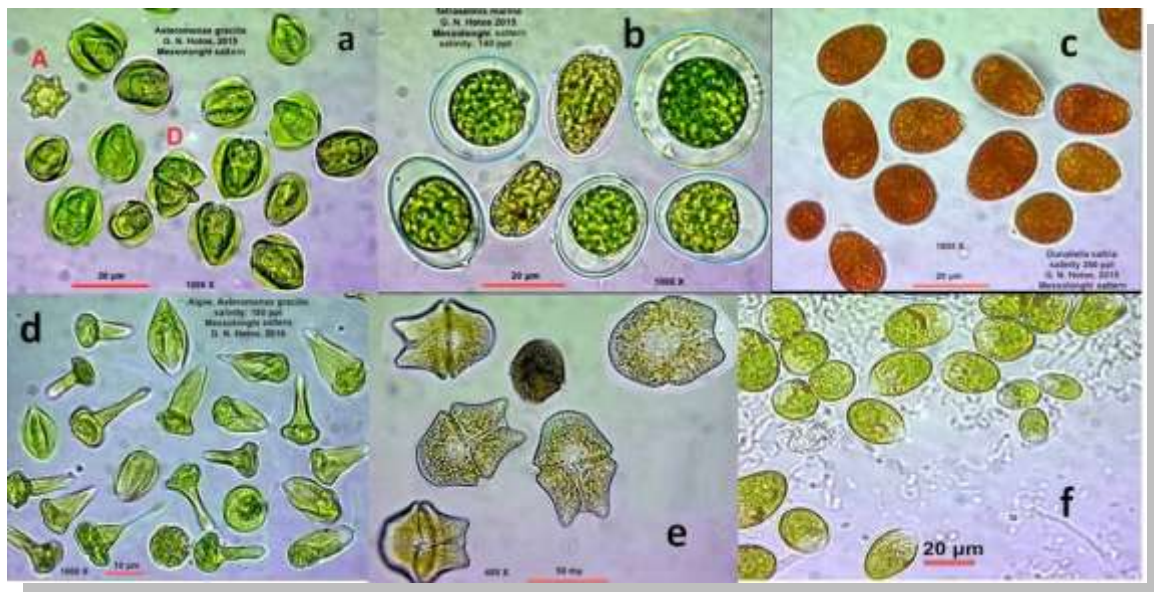
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΛΙΕΙΑΣ-ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΑΓΚΤΟΥ

# ΦΥΚΟΛΟΓΙΑ

(Μέρος 1<sup>ο</sup> Το κύτταρο και το νερό)

Γεώργιος Ν. Χώτος



Μεσολόγιο 2019

## Πρόλογος

Το να γράψεις κάτι δεν είναι δύσκολο, το να περιέχει αξία όμως το σύγγραμμά σου είναι κάτι που (συνήθως) μόνο ο χρόνος μπορεί να κατοχυρώσει. Αυτό το έχω βιώσει ανατρέχοντας σε παλιά καθιερωμένα βιβλία (οποιουδήποτε αντικειμένου) και διαπιστώνοντας το γλαφυρό, κατανοητό και ενίοτε διαχρονικώς χρήσιμο περιεχόμενό τους. Για παράδειγμα, ποιος επιστήμονας διαβάζοντας την «Καταγωγή των ειδών» του Καρόλου Δαρβίνου θα διανοηθεί να προτρέψει τους φοιτητές της βιολογίας να το αγνοήσουν; Εστω και αν ο Δαρβίνος δεν γνώριζε για χρωμοσώματα, γονίδια, γενετικούς συνδυασμούς και μεταλλάξεις. Όλα αυτά δηλαδή που συνθέτουν τη σημερινή εικόνα μας για την κληρονομικότητα και την εξέλιξη. Και όμως επειδή ακριβώς το πόνημα του Δαρβίνου έχει ψυχή, έχει ορθολογισμό και είναι καρπός επίπονης και γοητευτικής φυσιοδιφικής ζωής, αποτελεί και θα αποτελεί την έδραση της μόρφωσης για τον φιλοσοφημένο βιολόγο και γιατί όχι, πηγή έμπνευσης για αναζήτηση των μυστικών της ζωής.

Η υδρόβια ζωή και τα φύκη πάντοτε με γοήτευαν αλλά συνάμα και με «τρώμαζαν». Και σήμερα μετά από τόσα χρόνια «βιολογίας» μπορώ να το εκφράσω αυτό που πάντοτε συγκεχυμένα μέσα μου κρατούσα και αναριωτόμουνα για το αν είναι όντως έτσι. Εξηγούμαι. Στο πεδίο της Ιχθυολογίας, όπου ειδικεύθηκα μετά τις πανεπιστημιακές μου σπουδές στη βιολογία, προχώρησα σε θέματα κυρίως υδατοκαλλιεργητικά και διαχειριστικά. Όμως σε όλη μου την πορεία ανέκυπταν μυριάδες ζητήματα που ακουμπούσαν τη χημεία, τη βιολογία κυττάρου, τη φυσιολογία των ζώων, τους υδρολογικούς κύκλους των στοιχείων, τα φύκη, τη φωτοσύνθεση, τη γεωλογία, το νερό και τόσα άλλα συναφή και μη. Από όλο αυτό το πολύχρωμο και ζαλιστικό «πανηγύρι» της ζωής ψάχνοντας για κάτι ανέκυπτε και κάτι άλλο που ζητούσε απάντηση, τελειωμό δεν είχαν (και ούτε έχουν). Εδώ και χρόνια λοιπόν το ένιωσα να ξεκαθαρίζει μέσα μου ότι χρειάζεται ένας ολιστικός και συνεκτικός τρόπος μετάδοσης της γνώσης για τη φοιτητιώσα νεολαία μας. Ένας τρόπος τέτοιος που να συμπεριλαμβάνει στο εκάστοτε βιολογικό θέμα τη συνόψιση των βασικών διεργασιών της ζωής στο κυτταρικό επίπεδο. Δύσκολη υπόθεση βέβαια αλλά δεν πρέπει να την αγνοούμε ή παραβλέπουμε.

Αν αφήσουμε κατά μέρος τις αναλυτικές και εξειδικευμένες επιστημονικές εργασίες στις οποίες θα εντρυφήσει ένας ερευνητής σε ένα συνήθως πολύ ειδικό και στενό ερευνητικό πεδίο, υπάρχουν εξαιρετικά βιβλία γενικής φύσεως στις επιστήμες της ζωής και του φυσικού κόσμου. Σε αυτά τα γενικά βιβλία ο προπτυχιακός φοιτητής (και όχι μόνο) θα βρει απαντήσεις σε όλα τα βασικά θέματα. Και όχι μόνο θα βρει απαντήσεις αλλά διαβάζοντάς τα επισταμένως (κάτι που συνήθως ελάχιστοι το κάνουν) θα μορφωθεί και θα αποκτήσει «σοφία», δηλαδή εφελτήριο για τη μετέπειτα εξειδίκευσή του.

Ψάχνοντας κατάλαβα το τεράστιο μέγεθος του αντικειμένου με τα εκατοντάδες χιλιάδες είδη, τις ρευστές ταξινομικές κατατάξεις και τις συνεχείς ανακαλύψεις που προσετίθεντο στη βιολογία και τη χρήση τους.

Δεν είναι υπερβολή να πω ότι την τελευταία 20ετία έχουμε εισέλθει στην εποχή της φυκολογίας. Οι χρήσεις των φυκών στη ζωή μας θα καταλαμβάνουν ολοένα και πιο εμφανές και σημαντικό μερίδιο και αυτό είναι καλό τόσο από οικολογική όσο και από οικονομική άποψη.

Γεννάται λοιπόν το θέμα να μορφώσουμε επιστήμονες στα φύκη. Μια γενιά φυκολόγων καλά καταρτισμένων πρέπει να δημιουργηθεί στην Ελλάδα. Και για να γίνει αυτό θα πρέπει να αγαπήσουν τα φύκη. Και για να τα αγαπήσουν θα πρέπει να τα γνωρίσουν σωστά σε επιστημονικό βάθος. Ένα βάθος τέτοιο που αναγκαστικά θα προέλθει από κάποιο σύγγραμμα που θα ελκύει για μελέτη και θα ανοίγει ορίζοντες για εμπάθυση. Όμως το βάθος των γνώσεων θα πρέπει να είναι τέτοιο που να μην ξεφύγει σε κουραστικές και εξαντλητικές λεπτομέρειες που αποτελούν υποπεριπτώσεις ή για να το πω πιο τολμηρά σε «αλαζονική» παράθεση μοντέρνων (και συχνά δυσνόητων) αποσπασμάτων δημοσιεύσεων που σκοπό δεν έχουν παρά να αποδείξουν την ευρυμάθεια του συγγραφέα. Και για να κάνω πιο κατανοητό αυτό που λέω θα δώσω το παράδειγμα των συχνών, ανεύθυνων και δήθεν βαθυστόχαστων φιλοσόφων-κριτών της παιδείας μας που όταν αναφέρονται στο μάθημα της ιστορίας αποφαίνονται με στόμφο και αφόρητη κοινοτοπία εκστομίζοντας φράσεις όπως: *«αυτό το συμβάν δυστυχώς δεν το διδάσκουμε στα σχολεία»*. *«κάποτε να πούμε την ιστορική αλήθεια»*, *«την ιστορία δυστυχώς τη γράφουν οι νικητές»*, *«να το δούμε υπό την εξής οπτική ..»* και τα συναφή. Στην πραγματικότητα τα παιδιά μας (δυστυχώς η πλειονότητα) δεν γνωρίζουν στοιχειώδη ιστορία, δεν έχουν νοητική σύλληψη αρχαιότητας, μεσαιώνος, διαφωτισμού, μοντέρνων χρόνων. Δεν ξέρουν καλά-καλά τι σημαίνει 1821, 1913, 1922, 1940, 1967 κ.λπ. Αρα πριν φθάσουν να μάθουν το εναλλακτικό ή το εξειδικευμένο ως δημιουργήσουν μέσα τους τον στέρεο νοητικό «σκελετό» πάνω στον οποίο θα στηριχθεί η «σάρκα» των ιστορικών γεγονότων.

Παρόμοιο με το παραπάνω είναι και αυτό που με κυρίευσε ως δημιουργία για τα φύκη. Ένας νέος επιστήμονας χρειάζεται ένα κατάλληλο φυκολογικό βοήθημα. Ένα σύγγραμμα τίμιο, περιεκτικό, διαφωτιστικό και επιστημονικώς άρτιο. Ένα σύγγραμμα με χρηστικές απεικονίσεις (σχήματα και φωτογραφίες) για να καταλαβαίνει για ποιο οργανισμό και ποιο φαινόμενο του μιλάς. Θεωρώ γελοίο και ανεύθυνο να μην υπάρχουν φωτογραφίες για τα φύκη παρά μόνο ονόματα ειδών με δυσνόητους κωδικούς από κάποια μοντέρνα γενετική βάση δεδομένων. Αυτό είναι επιστημονικά σωστό σε μια ερευνητική εργασία, σε ένα γενικό σύγγραμμα όμως αφήνει τον αναγνώστη με μια στυφή γεύση.

Στην Ελλάδα βιβλίο φυκολογίας γραμμένο πρωτοτύπως δεν υπάρχει. Αυτό επιχειρώ εδώ όχι βέβαια ως καρπό μακροχρόνιας δικής μου έρευνας (αν και τέτοια υπάρχει) αλλά μάλλον ως προσπάθεια παρουσίασης όλων των πληροφοριών που συνέλεξα από (πολλές φορές) ετερόκλητες πηγές (πλην όμως επιβεβαιωμένων ως προς την ορθότητα). Το κάνω με σκοπό η φοιτητώσα νεολαία να το διαβάσει ως ανάγνωσμα κατανοητό και χρηστικό, ανατρέξιμο για διευκρινήσεις, όσο πρέπει βαθύ για τις βασικές διεργασίες της ζωής, κατατοπιστικό ταξινομικώς, ενημερωτικό ως προς τις

μοντέρνες τάσεις. Με λίγα λόγια αυτός/ή που θα το μελετήσει φθάνοντας στο τέλος να αισθανθεί και να πει νοητά: «θέλω να ασχοληθώ με τα φύκη, που να απευθυνθώ άραγε:».

Στο παρόν παρουσιάζω μόνο το ετοιμασθέν πρώτο μέρος που πραγματεύεται την απόκτηση ενέργειας από το κύτταρο και τις ιδιότητες του νερού με το οποίο η ζωή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη. Σταδιακώς θα εκδίδω και τα επόμενα κεφάλαια που ετοιμάζω με περιεχόμενο τα φύκη αυτά καθ' αυτά.



Γιώργος Χώτος  
Μεσολόγγι 2019

## Τα βασικά χαρακτηριστικά της ζωής

Σε κάθε απόπειρα να αναφερθούμε στα έμβια όντα, σε οποιοδήποτε τομέα των βιολογικών επιστημών και αν εντρυφήσουμε, πάντοτε θα περιφερόμαστε «γύρω», και θα οδηγούμαστε «προς», τον κεντρικό πυρήνα της ζωής, τι υπήρχε πριν, πως εξελίχθηκε και τι συμβαίνει τώρα. Κάθε τι που εξετάζουμε και είναι ζωντανό απαιτεί νοητική σύλληψη του τι σημαίνει ζωή και ποιες βασικές διεργασίες την καθορίζουν. Υπάρχουν διεργασίες κοινές σε όλους τους οργανισμούς οι οποίες βασίζονται σε χημικές αντιδράσεις που πρέπει να κατανοηθούν. Αν δεν κατανοηθούν κάθε γνώση είναι σαθρή, δεν θα οδηγήσει μακριά, μερικές φορές μάλιστα στο πουθενά ή ακόμα χειρότερα, στη λάθος κατεύθυνση. Και πριν από κάθε τι άλλο, ο ορισμός της ζωής (του συγγραφέα).

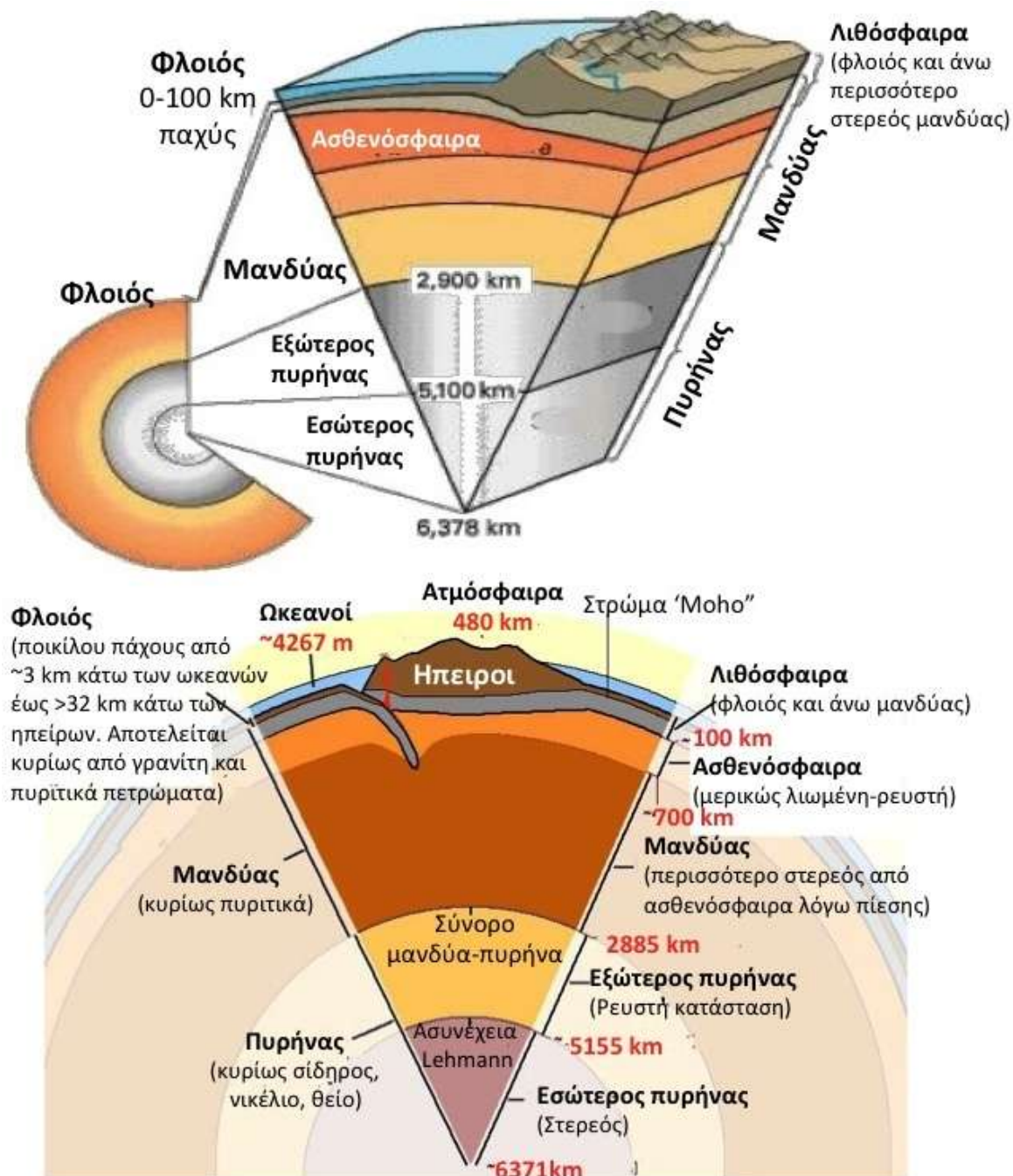
***Ζωή είναι η κυτταρική οντότητα η οποία ανταλλάσσει ύλη και ενέργεια με το περιβάλλον και η οποία αναπαράγεται βάσει μοριακού κώδικα, οι μη θνησιγόνες μεταλλάξεις του οποίου αλλάζουν βαθμιαία την οντότητα σε καινούργια.***

Ο παραπάνω ορισμός της ζωής (συμπιεσμένος λεκτικά στο έπακρο) εμπεριέχει την ιδιότητα της εξέλιξης, διότι: «*τίποτα στη βιολογία δεν έχει νόημα αν δεν ιδωθεί από την άποψη της εξέλιξης*» (Dobzhansky, 1973). Σε ένα σύγγραμμα λοιπόν όπως αυτό για τα φύκη, δεν είναι δυνατόν να μην δοθούν στοιχεία οικουμενικής ισχύος για τη ζωή, πολλά από τα οποία μάλιστα ως χημικές αντιδράσεις παραμένουν ίδια και अपαράλλαχτα από τότε που εμφανίστηκε για πρώτη φορά στον πλανήτη. Η κατανόηση του πως φτάσαμε μετά από δισεκατομμύρια χρόνια από τους προκαρυώτες στους ευκαρυώτες και από τα πρώτα οργανικά μόρια στη οξυγενή φωτοσύνθεση, δεν αποτίει μόνο σεβασμό και δέος μπροστά σε αυτό το ασύλληπτο «θαύμα», αλλά επειδή τα προαναφερόμενα εξακολουθούν να υπάρχουν και σήμερα, βοηθά τον μελετητή της βιολογίας (και όχι μόνο) να αποκτήσει γερό «αγκυροβόλιο» για κάθε εξόρμησή του στον ωκεανό της γνώσης.

### Η έναρξη της ζωής

Από τις σύγχρονες ενδείξεις φαίνεται ότι η ζωή άρχισε πριν 3,8 δισεκατομμύρια χρόνια στους πρωτο-σχηματισθέντες πριν 4,2 δισεκατομμύρια χρόνια ωκεανούς, σε μια Γη που σχηματίστηκε πριν 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια. Σε αυτό το συμπέρασμα οδηγούν τα απολιθώματα προκαρυωτικών πλασμάτων που βρέθηκαν σε Αυστραλία, Ν. Αφρική, Γροιλανδία σε ιζηματογενή πετρώματα που πιστεύεται ότι σχηματίστηκαν στον βυθό του αρχαίου ωκεανού.

Γεγονός αναμφισβήτητο είναι ότι η ζωή εμφανίστηκε και εξελίχθηκε στο νερό. Από την κρατούσα θεωρία του Bing Bang που δημιούργησε το σύμπαν πριν 15 δισεκατομμύρια χρόνια, μέχρι τη συμπύκνωση των στροβιλιζόμενων νεφών ύλης με τη δράση της βαρύτητας σε μορφώματα όπως ο ήλιος, η Γη και τα άλλα ουράνια σώματα του ηλιακού συστήματος του γαλαξία μας, δεν υπήρχε νερό σε υγρή μορφή. Ομως δεν υπήρξε νερό ούτε και με τη δημιουργία της σφαίρας που αποτέλεσε την πρωτο-Γη πριν 4,5 δ.χ.



Σχήμα 1. Η δομή της Γης και τα πάχη των στρωμάτων της.

Η πρωτο-Γη ένα σφαιρικό διάπυρο και ρευστό μάρφωμα, άρχισε σταδιακά να συμπυκνώνεται με τα βαρύτερα στοιχεία της (σίδηρο και νικέλιο) να συγκεντρώνονται στο κέντρο της σφαίρας και με τα ελαφρύτερα κατά στρώματα ομόκεντρων ζωνών πέριξ του βαρύ πυρήνα. Στη σημερινή Γη (Σχήμα 1) ο μανδύας αποτελεί το μετά τον πυρήνα παχύ στρώμα από σίδηρο και πυριτικό μαγνήσιο. Πάνω από τον μανδύα επικάθεται ο λεπτός (συγκριτικά με τα εσώτερα κελύφη) φλοιός. Ο φλοιός της Γης ποικίλλει σε πάχος από μόλις 4 - 10 km στο πυκνό στρώμα

βασάλτη κάτω από τους ωκεανούς, σε 35 – 60 km στο ελαφρύτερο γρανιτικό στρώμα που αποτελεί τις ηπείρους.

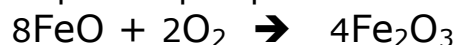
Από την περίοδο που η πρωτο-Γη ήταν μια διάπυρη σφαίρα, το κάλυμμα αερίων υδρογόνου ( $H_2$ ) και ηλίου ( $He$ ) που την περιέβαλλε σταδιακά χάθηκε στο διάστημα. Αφού ο φλοιός σιγά-σιγά στερεοποιήθηκε, η έντονη και συνεχής ηφαιστειακή δραστηριότητα δημιούργησε νέα ατμοσφαιρική σύνθεση με εκπομπές των αερίων, διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ), χλώριο ( $Cl_2$ ), άζωτο ( $N_2$ ), διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ), υδρογόνο ( $H_2$ ), και υδρατμούς ( $H_2O$ ). Οι αντιδράσεις μεταξύ αυτών των αερίων παρήγαγαν μια ατμόσφαιρα αποτελούμενη κυρίως από υδρατμούς και από σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ), αμμωνίας ( $NH_3$ ) και μεθανίου ( $CH_4$ ).



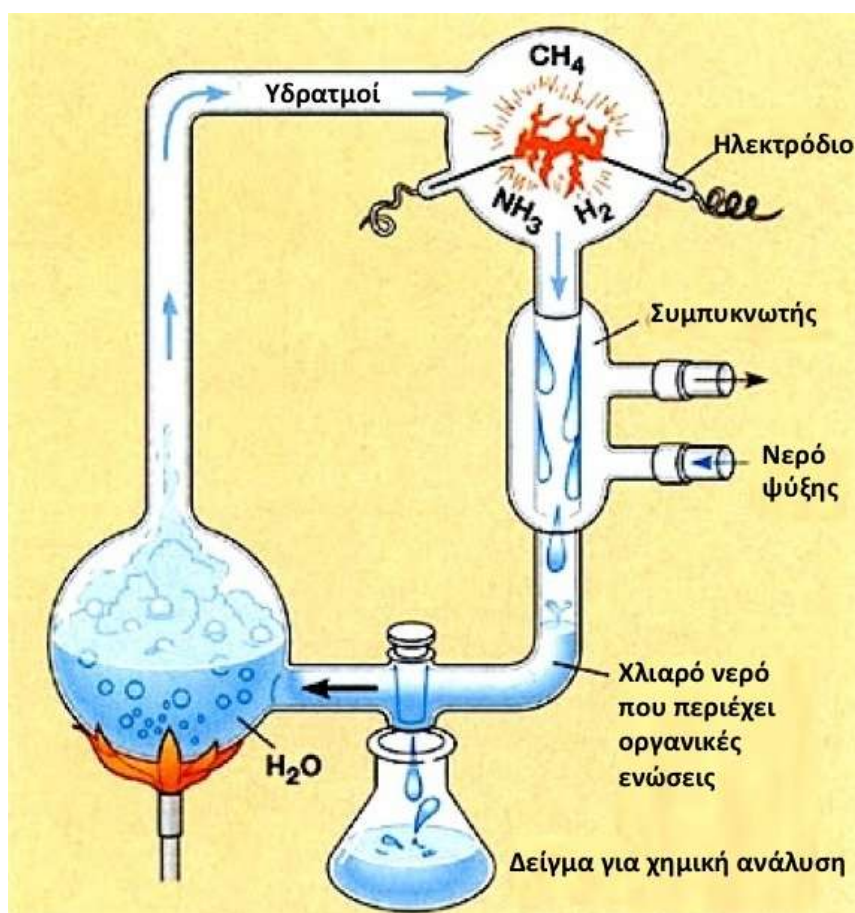
Σχήμα 2. Φαντασική αναπαράσταση της πρωτο-Γης με το νερό της.

Σταδιακά καθώς ο φλοιός κρύνει, οι υδρατμοί άρχισαν να συμπυκνώνονται και με τη δύναμη της βαρύτητας να πέφτουν ως υγρό νερό στην επιφάνεια της Γης. Τελικά και αφού ο φλοιός κρύωσε αρκετά (4,2 δ. Χ. πριν) το νερό γέμισε τις κοιλάδες της γης (Σχήμα 2) σχηματίζοντας τον πρωτόγονο ωκεανό (υδρόσφαιρα).

Το αέριο **οξυγόνο** ( $O_2$ ) που σήμερα αποτελεί το 21 % περίπου της ατμόσφαιρας, τότε δεν υπήρχε καθώς δεν ήταν μεταξύ των αερίων που εξέπεμπαν τα ηφαίστεια. Από τις αντιδράσεις όμως των παραπάνω αερίων σχηματιζόνταν και μια ποσότητα οξυγόνου μεν αλλά αυτό δεν συσσωρεύονταν, καθώς αναλώνονταν για να οξειδώσει το σίδηρο των ηφαιστειακών πετρωμάτων από την υποσιδηρούχα μορφή του ( $FeO$ ) στη σιδηρούχα ( $Fe_2O_3$ ) κατά την αντίδραση:



Το οξυγόνο ( $O_2$ ) της ατμόσφαιρας στην τωρινή Γη δεν χρησιμεύει μόνο για την αναπνοή των αερόβιων οργανισμών αλλά και για να μετατρέπεται σε όζον ( $O_3$ ) που συσσωρεύεται στα άνω ατμοσφαιρικά στρώματα και λειτουργεί ως ασπίδα (φίλτρο) για τις βλαβερές για τη ζωή **υπεριώδεις ακτίνες** (U.V.) του ηλίου (το γνωστό στρώμα του όζοντος). Στην πρωτο-Γη όμως και για δισεκατομμύρια χρόνια μετά, δεν υπήρχε στρώμα του όζοντος και η υπεριώδης ακτινοβολία κατέκλυζε την επιφάνειά της. Οι ωκεανοί περιείχαν αμμωνία ( $NH_3$ ), μεθάνιο ( $CH_4$ ), διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ), άζωτο ( $N_2$ ) και υδρογόνο ( $H_2$ ). Τα μόρια αυτά αντιδρώντας μεταξύ τους στο υδατικό περιβάλλον δημιούργησαν οργανικές ενώσεις και από αυτές προέκυψε η πρώτη κυτταρική οντότητα, δηλαδή η ζωή. Το σχήμα βέβαια αυτό είναι υπεραπλουστευτικό και δεν έχει τεκμηριωθεί. Το θέμα παραμένει ανοικτό σε υποθέσεις.



Σχήμα 3. Η διάταξη της συσκευής του διάσημου πειράματος των Miller και Urey το 1953 με το οποίο κατάφεραν να δημιουργήσουν αμινοξέα από ανόργανα μόρια, μιμούμενοι την υποτιθέμενη σύνθεση της αρχαίας ατμόσφαιρας.

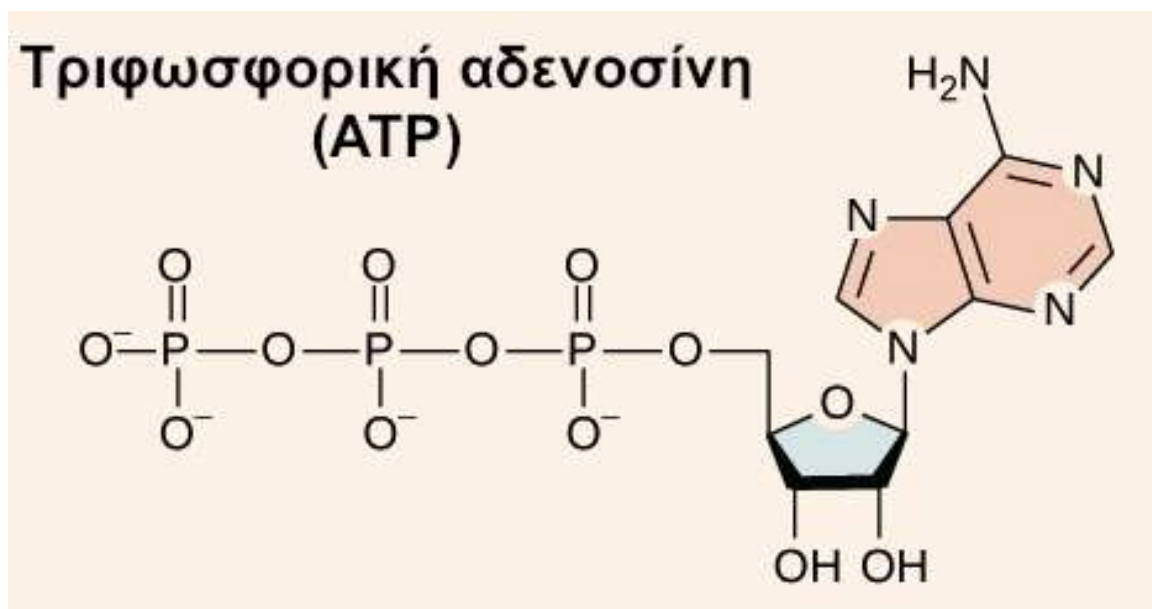
Οι προσπάθειες για να εξηγηθεί επιστημονικώς η πρωτοδημιουργία της ζωής ανατρέχουν πίσω στη δεκαετία του 1920 με τους O. I. Orpin και J. B. S. Haldane οι οποίοι πίστευαν ότι η ζωή ξεκίνησε με τη σύνθεση οργανικών μορίων από ανόργανα. Οργανικά μόρια εννοείται ότι είναι αυτά που παράγονται από οργανισμούς ήτοι, υδατάνθρακες, αμινοξέα, λίπη, νουκλεϊκά οξέα. Κατόπιν, το 1953, οι Urey και Miller με το περίφημο πείραμά τους παρουσίασαν ενδείξεις που δικαίωναν τους Orpin και Haldane. Χρησιμοποιώντας μια συσκευή όπως του Σχήματος 3 προκάλεσαν ηλεκτρικές εκκενώσεις σε ένα μίγμα από μεθάνιο, αμμωνία,



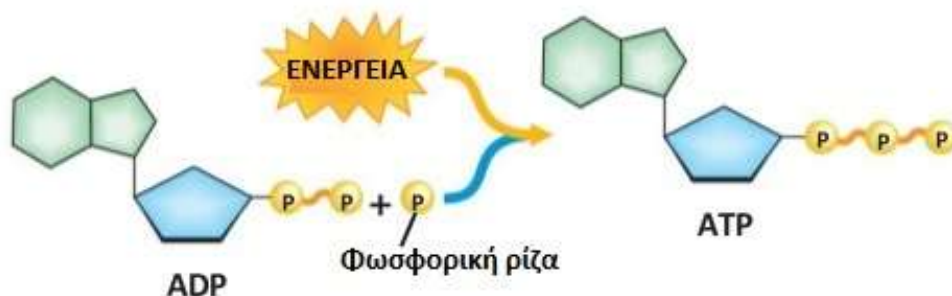
υδρατμούς και υδρογόνο. Με την ενέργεια που προσέδωσαν οι ηλεκτρικές εκκενώσεις πολύ σύντομα παρήχθησαν και ανιχνεύθηκαν οργανικά μόρια (κυρίως αμινοξέα).

Στον πρωτο-ωκεανό με το πλούσιο περιεχόμενο σε ανόργανα μόρια, δεν μπορούσαν βέβαια να υπάρξουν ηλεκτρικές εκκενώσεις, όμως εισέδουε σε ικανό βάθος η έντονη υπεριώδης ακτινοβολία το μικρό μήκος κύματος της οποίας της προσδίδει πολύ ενέργεια. Ίσως λοιπόν η UV να ήταν η πηγή ενέργειας για να προκληθεί η δημιουργία οργανικών μορίων, υδατάνθρακες για ενέργεια, αμινοξέα για αύξηση, νουκλεϊκά οξέα για αναπαραγωγή.

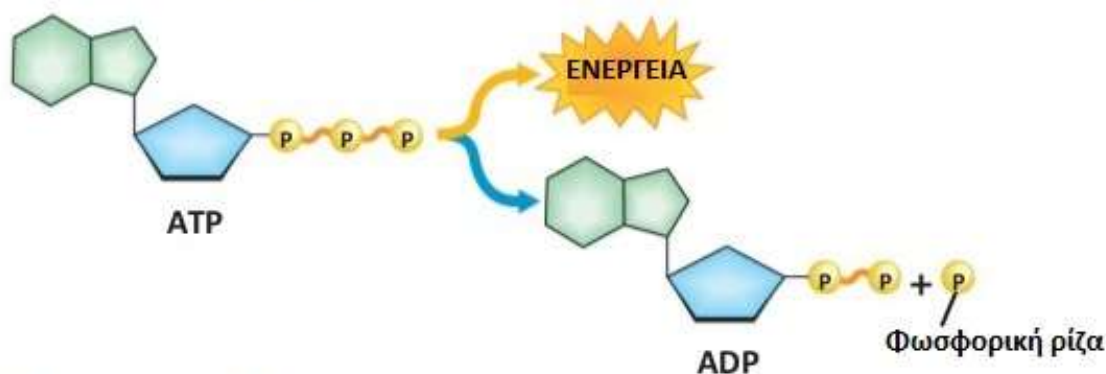
Εφόσον λοιπόν (κατά το παραπάνω σχήμα) οι ωκεανοί εμπλουτίστηκαν με τέτοια οργανικά μόρια και δοθέντος ασύλληπτα μακρού χρόνου, οι τυχαίοι συνδυασμοί αυτών κάποτε κατέληξαν στη δημιουργία του **ATP** (**τριφωσφορική αδενοσίνη**), του μορίου δηλαδή που χρησιμοποιούν όλα τα κύτταρα για αποθήκευση και παροχή ενέργειας στον μεταβολισμό τους (Σχήμα 4). Επίσης με την κατάλληλη διεύθυνση των νουκλεϊκών οξέων προέκυψαν δεοξυριβονουκλεϊκό οξύ (**DNA**) και ριβονουκλεϊκό οξύ (**RNA**), τα μόρια δηλαδή τα υπεύθυνα για τη βιολογική αναπαραγωγή. Περαιτέρω ανασυνδυασμοί των οργανικών μορίων δημιούργησαν τη βιολογική μεμβράνη η οποία κάλυψε το πρώτο προκαρυωτικό κύτταρο και του προσέδωσε πλέον την ικανότητα για αυτόνομη ύπαρξη. Το πρωτοκύτταρο μεταβολίζοντας «τροφή» (οργανικά, ίσως και ανόργανα μόρια) και υφιστάμενο μεταλλάξεις κατά την αναπαραγωγή του, εγκατέστησε και «άπλωσε» τη ζωή στη Γη.



Σχήμα 4. Η δομή του μορίου της τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP).



α) Σύνθεση του ATP με πρόσθεση μιας φωσφορικής ρίζας στο ADP. Η ενέργεια αποθηκεύεται στο ATP



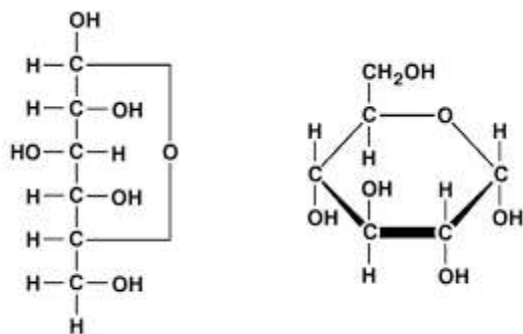
β) Διάσπαση του ATP με απελευθέρωση μιας φωσφορικής ρίζας. Απελευθερώνεται ενέργεια και το ATP γίνεται ADP

Σχήμα 5. Ο μηχανισμός με τον οποίο σχηματίζεται το ATP (άνω) και με τον οποίο διασπάται (κάτω) αποδίδοντας την ενέργεια που προσέλαβε όταν δημιουργούνταν (7,3 kcal/mol).

Τα απολιθώματα των πρώτων προκαρυωτικών (χωρίς πυρήνα) κυττάρων είναι παρόμοια με αυτά των σύγχρονων βακτηριδίων και των κυανοβακτηρίων (και αυτά βακτηρίδια είναι). Τα βασικά δομικά τους στοιχεία είναι το **κυτταρικό τοίχωμα**, η **κυτταρική μεμβράνη**, το **κυτταρόπλασμα**, το **χρωμόσωμα** και τα **ριβΟΣώματα**. Το κυτταρικό τοίχωμα παρέχει στο κύτταρο σχήμα και στήριξη. Η κυτταρική (ή πλασματική) μεμβράνη διαχωρίζει το υδαρές περιεχόμενο του κυττάρου (το κυτταρόπλασμα) από το εξωτερικό περιβάλλον και ρυθμίζει τη ροή χημικών και μεταβολικών προϊόντων προς τα μέσα και προς τα έξω του κυττάρου. Το χρωμόσωμα (ένα μόνο, μακρύ, κυκλικό και αναδιπλωμένο στους προκαρυώτες) κατέχει τη γενετική πληροφορία στο μόριο του DNA που περιέχει και η οποία πληροφορία μεταβιβάζεται από το DNA μέσω του RNA στα ριβΟΣώματα. Τα ριβΟΣώματα μεταφράζουν την πληροφορία σε παραγωγή πρωτεϊνών είτε δομικών, είτε ενζύμων που ελέγχουν την πορεία χημικών αντιδράσεων στο κύτταρο.

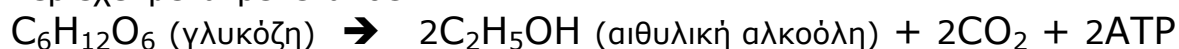
Στα **ευκαρυωτικά** κύτταρα όπου υπάρχει **πυρήνας** το όλο περιεχόμενο του κυττάρου που περικλείεται από την πλασματική μεμβράνη ονομάζεται **πρωτόπλασμα**. Το μέρος του πρωτοπλάσματος εκτός του πυρήνα ονομάζεται **κυτταρόπλασμα**.

Το πιθανότερο είναι ότι η πρώτη μορφή ζωής στον ωκεανό, ήταν ένα ετερότροφο κύτταρο το οποίο κάλυπτε τις ενεργειακές του ανάγκες απορροφώντας την τροφή του από προσχηματισμένα οργανικά μόρια. Τα μόρια του προσχηματισμένου ATP στο νερό πιθανώς χρησιμοποιήθηκαν ως η πρωταρχική πηγή ενέργειας από αυτά τα πρώτα κύτταρα. Το μόριο του ATP αποτελείται από μια μεγάλη μονάδα αδενοσίνης και 3 φωσφορικές ομάδες οι οποίες ενώνονται με δεσμούς υψηλής ενέργειας. Όταν ο δεσμός μεταξύ της μεσαίας και της εκτεθειμένης ακραίας φωσφορικής ομάδας σπάει, απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας (διαθέσιμη κατάλληλα για έργο) και το μόριο του ATP γίνεται διφωσφορική αδενοσίνη (ADP). Σε μια αντίστροφη διαδικασία και με δέσμευση ενέργειας τώρα, το ADP λαμβάνει μια φωσφορική ομάδα και ξαναγίνεται ATP (Σχήμα 5). Χωρίς επαρκή προμήθεια ATP το κύτταρο δεν έχει ενέργεια για να ζήσει. Η διαδικασία με την οποία τα οργανικά μόρια στο κύτταρο διασπώνται και η ενέργειά τους χρησιμοποιείται για να παράγει ATP, ονομάζεται **κυτταρική αναπνοή**. Στο αρχαίο περιβάλλον της Γης δεν υπήρχε ακόμα αέριο οξυγόνο και συνεπώς η κυτταρική αναπνοή των πρώτων οργανισμών γίνονταν με κάποιο αναερόβιο τρόπο. Η **αναερόβια αναπνοή** όπως τη γνωρίζουμε σήμερα (ζυμώσεις) εκτελείται από βακτήρια και μύκητες και στα ανώτερα ζώα στους μύες τους μέσω της γλυκόλυσης.



Σχήμα 6. Δύο διαφορετικές στερεοχημικές απεικονίσεις του μορίου της γλυκόζης (απλό σάκχαρο). Η γλυκόζη είναι μια ένωση με 6 άτομα άνθρακα και πολλά υδρογόνα. Η πλήρης οξείδωσή της αποδίδει 686 kcal/mol.

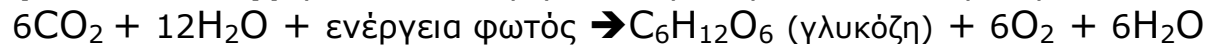
Κατά την αναερόβια αναπνοή το σάκχαρο **γλυκόζη** (Σχήμα 6) διασπάται σε δύο μικρότερα μόρια και μόνο ένα 7 % από την ενέργεια που περιέχει μετατρέπεται σε ATP.



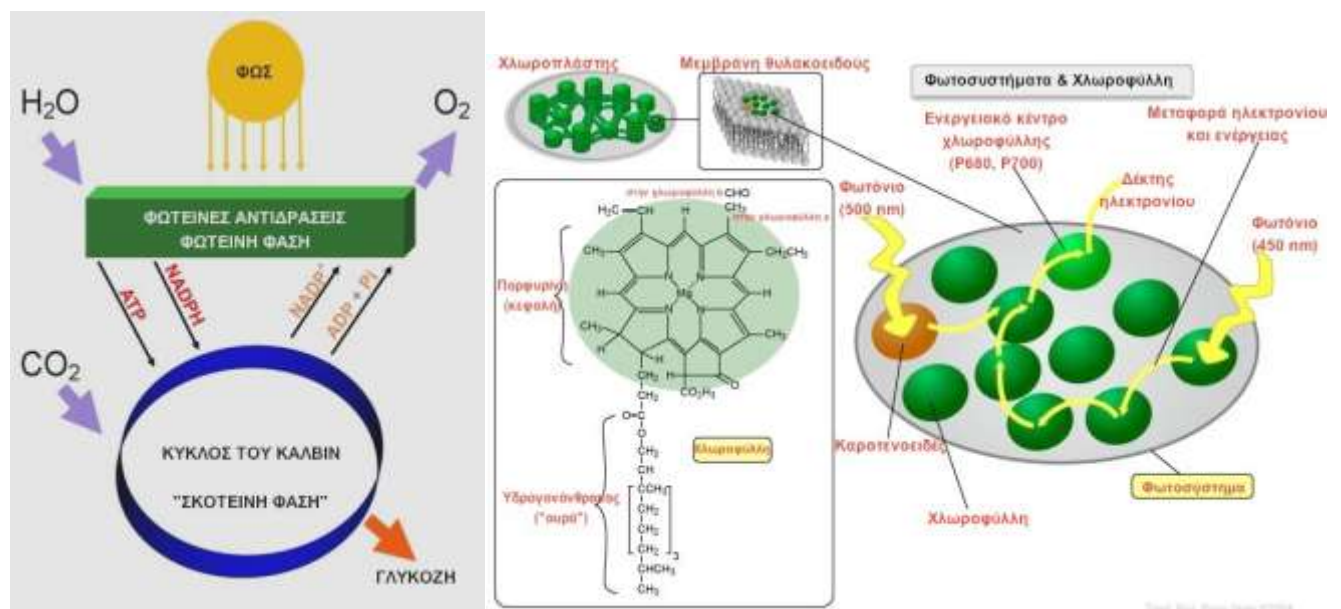
Με την αναερόβια αναπνοή κατά τα παραπάνω, το μεγαλύτερο μέρος (93 %) της ενέργειας της γλυκόζης δεν μετατρέπονταν σε ATP με αποτέλεσμα αυτός ο αναερόβιος τρόπος να είναι ανεπαρκής για να καλύπτει τις απαιτήσεις για ενέργεια των ολοένα και μαζικότερων αρχαίων πρωτόγονων οργανισμών. Η περισσότερη ενέργεια παρέμενε δεσμευμένη σε μόρια άλλα πλην του ATP και ως εκ τούτου μη διαθέσιμη για χρησιμοποίηση από το κύτταρο. Απαιτείτο λοιπόν ένας αποδοτικότερος τρόπος αναπνοής δηλαδή επί της ουσίας, ένας παραγωγικότερος μηχανισμός με τον οποίο μια φωσφορική ομάδα ( $\text{PO}_4^{---}$ ) προστίθεται στο χαμηλό ενεργειακώς ADP για να το κάνει ATP υψηλής ενέργειας.

Ακολούθησε μια ασύλληπτη μακρά πορεία εξέλιξης των κυτταρικών διεργασιών και μια από τις εκφάνσεις της ήταν ο τυχαίος εγκλεισμός εντός

του πρωτόγονου κυττάρου της χρωστικής **χλωροφύλλη** προκύπτοντας έτσι ένας φωτοσυνθετικός οργανισμός ο οποίος καλείται **αυτότροφος** επειδή μπορεί να παράγει οργανική ουσία από ανόργανη. Το **φωτόνια** του ηλίου πέφτοντας στο μόριο της χλωροφύλλης ενεργοποιούν ορισμένα **ηλεκτρόνια** της κάθε φορά και τα διεγείρουν σε μια ανώτερη ενεργειακή κατάσταση (Σχήμα 7) . Τα ηλεκτρόνια αυτά μεταφέρονται με ειδικά μόρια που αποτελούν την «**αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων**» κατά βήματα στη διάρκεια των οποίων το κάθε ηλεκτρόνιο χάνει βαθμιαία την πρόσθετη ενέργεια που είχε αποκτήσει και τελικώς επανέρχεται στη βασική του κατάσταση. Η ενέργεια που απελευθέρωσε το ηλεκτρόνιο χρησιμοποιείται από ειδικά ένζυμα για να προσθέτουν μια φωσφορική ομάδα στο ADP και να παράγεται έτσι ATP ενώ συνάμα παράγεται και ένα άλλο φορτισμένο ενεργειακώς μόριο το NADPH. Το κύτταρο έχοντας εξασφαλίσει αρκετή ενέργεια χρησιμοποιεί τα άφθονα μόρια του CO<sub>2</sub> που υπάρχουν παντού (ατμόσφαιρα και νερό) και παράγει την "τροφή" του ως το σάκχαρο γλυκόζη. Τα παραπάνω συνοπτικώς αποτελούν τη θαυμαστή διεργασία της **φωτοσύνθεσης** η οποία συνοψίζεται στην παρακάτω αντίδραση.

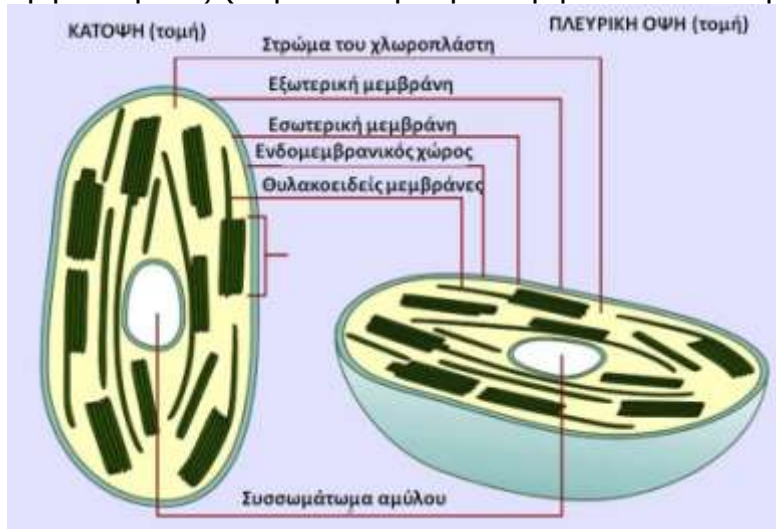


**Επισήμανση.** Το ATP που παράγεται κατά τη φωτοσύνθεση το χρειάζεται το κύτταρο για να παράγει τη γλυκόζη του μόνο. Η γλυκόζη αυτή κατά πως αναφέρθηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται κατόπιν από τα πρωτο-κύτταρα με αναερόβια διαδικασία για να παραχθεί (έστω με τον μη επαρκώς αποδοτικό τρόπο της αναερόβιας αναπνοής) το επιπλέον ATP που απαιτείται για τις βιοχημικές διεργασίες του κυττάρου.

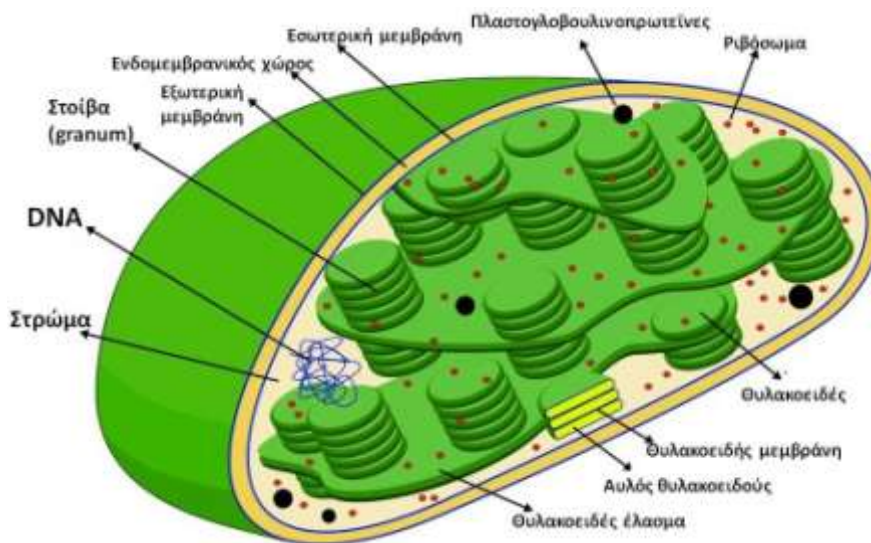


Σχήμα 7. Η δέσμευση της φωτεινής ενέργειας κατά τη φωτοσύνθεση και η μετατροπή της σε χημική υπό μορφή γλυκόζης (αριστερά) σε μια γενικευμένη αναπαράσταση. Μόριο χλωροφύλλης και ο ρόλος του στις θυλακοειδείς μεμβράνες των χλωροπλάστων όπου γίνεται η φωτοσύνθεση (δεξιά).

Οι παραπάνω συνοπτικώς αναφερθέντες χημικές διεργασίες παραγωγής γλυκόζης με πρώτη ύλη το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), νερό και φωτεινή ενέργεια, αποτελούν τη **φωτοσύνθεση** με το μόριο της **χλωροφύλλης** κεντρικό πρωταγωνιστή και με πεδίο δράσης τις **θυλακοειδείς μεμβράνες** οι οποίες είτε βρίσκονται απλωμένες μέσα στο κυτταρόπλασμα των προκαρυωτικών φωτοσυνθετικών κυανοβακτηρίων, είτε συγκροτημένες σε ειδικούς σχηματισμούς σε ειδικά οργάνια τους **χλωροπλάστες** (Σχήματα 8 & 9), στους ευκαρυωτικούς φωτοσυνθετικούς οργανισμούς (περισσότερα για τη φωτοσύνθεση στα επόμενα).



Σχήμα 8. Τομή χλωροπλάστη σε σχηματική αναπαράσταση. Απεικονίζονται οι θυλακοειδείς μεμβράνες και το αποθηκευμένο άμυλο που προήλθε από τη συντεθείσα γλυκόζη.



Σχήμα 9. Τομή χλωροπλάστη με τις στοιβες των θυλακοειδών και τα διάφορα έγκλειστα (DNA, ριβοσώματα, κ.ά.). Ο χλωροπλάστης περιβάλλεται από διπλή μεμβράνη.

Ετσι λοιπόν με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης άρχισε να παράγεται και να συσσωρεύεται στην ατμόσφαιρα το **αέριο οξυγόνο** ( $\text{O}_2$ ). Σύμφωνα με την κρατούσα σήμερα θεωρία, το πρώτο οξυγόνο αποτέλεσε δηλητήριο για τους τότε υπόλοιπους (πλην των φωτοσυνθετών βεβαίως) οργανισμούς που είχαν εξελιχθεί σε ανοξικές συνθήκες. Κάποιοι όμως από τους οργανισμούς αυτούς λόγω επωφελών μεταλλάξεων (εξέλιξη γαρ) κατάφεραν να επιβιώσουν και να αποτελέσουν τους προγόνους όλων των αερόβιων σημερινών ειδών.

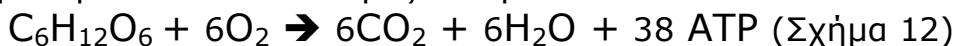
Η παρουσία του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα κατέστησε δυνατή μια νέα μορφή βιολογικής παραγωγής την **αερόβια χημειοσύνθεση**. Με τη νέα αυτή διαδικασία μόρια οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα και μια ποικιλία άλλων ανόργανων ενώσεων (κυρίως του θείου) αντιδρούσαν και με την οξειδωση των ανόργανων ενώσεων απελευθερώνονταν η αναγκαία ενέργεια για να συντεθούν οι πολύτιμοι υδατάνθρακες. Η παρακάτω αντίδραση είναι χαρακτηριστική της χημειοσύνθεσης των **χημειοαυτότροφων** οργανισμών.



Η παρουσία αυτών των χημειοσυνθετικών οργανισμών (βακτήρια) στον αρχαίο ωκεανό, σήμαινε ότι η αυτότροφη ζωή δεν περιοριζόταν μόνο στα άνω ευφωτικά στρώματα με τους φωτοσυνθέτες αλλά ήταν δυνατή και στα μεγάλα βάθη με μηδενικό επίπεδο φωτισμού.

Με τα παραπάνω συνοπτικώς εκτεθέντα επικεντρωθήκαμε μόνο στην παραγωγή υδατανθράκων (σάκχαρο γλυκόζη) από τους φωτοσυνθετικούς ή τους χημειοαυτότροφους οργανισμούς. Και αυτό επειδή η γλυκόζη αποτελεί το κύριο "καύσιμο" του οργανισμού για την παραγωγή ATP και συνάμα κομβικό μόριο παραγωγής και για άλλα δομικά μακρομόρια. Τα άλλα μακρομόρια (πρωτεΐνες, λίπη, οργανικά και νουκλεϊκά οξέα) συντίθενται από ανόργανες ενώσεις που υπήρχαν διαλυμένες στο νερό και περιείχαν άζωτο, φώσφορο, κάλιο, νάτριο, κ.ά. Όλα απορροφώνται από το κύτταρο και μετασχηματίζονται στα απαραίτητα μακρομόρια μέσω ειδικών μεταβολικών διεργασιών. Απαραίτητη προϋπόθεση βέβαια η ύπαρξη ενέργειας. Και ενέργεια σημαίνει ATP και ATP βεβαίως σημαίνει καύσιμο δηλαδή γλυκόζη.

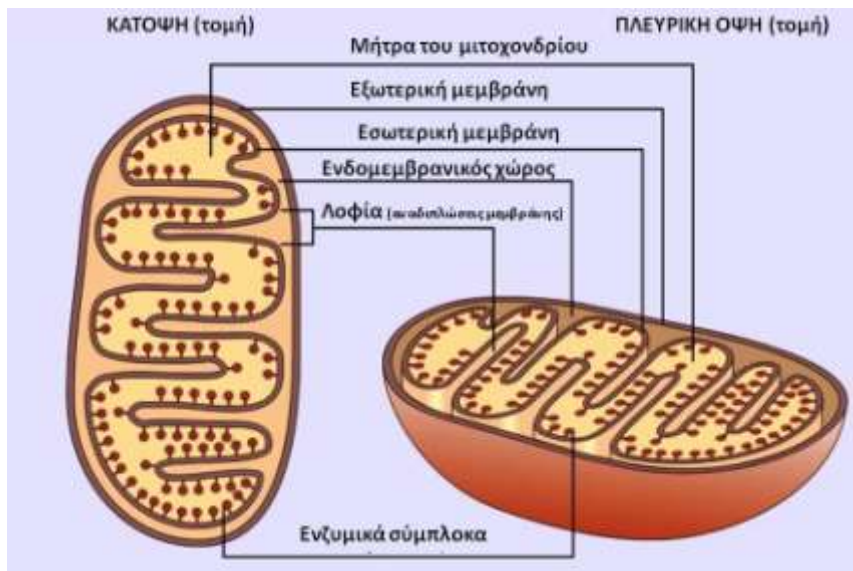
Η ολοένα και μεγαλύτερη παρουσία του αερίου οξυγόνου στην αρχαία ατμόσφαιρα προκάλεσε την ανάπτυξη ενός νέου τρόπου αναπνοής, τον αερόβιο, πολύ πιο αποδοτικού σε παραγωγή ATP από την αναερόβια κυτταρική αναπνοή. Αερόβια αναπνοή σημαίνει ότι γίνεται με τη χρησιμοποίηση του οξυγόνου και απελευθερώνει πολύ περισσότερη ενέργεια από την αναερόβια. Με την **αναερόβια** αναπνοή μόνο το 7 % της ενέργειας ενός μορίου γλυκόζης δεσμεύεται σε μόλις 2 μόρια ATP και διατίθεται στο κύτταρο, ενώ με την **αερόβια** το 60 % σε 38 μόρια ATP κατά την παρακάτω συνοπτική εξίσωση.



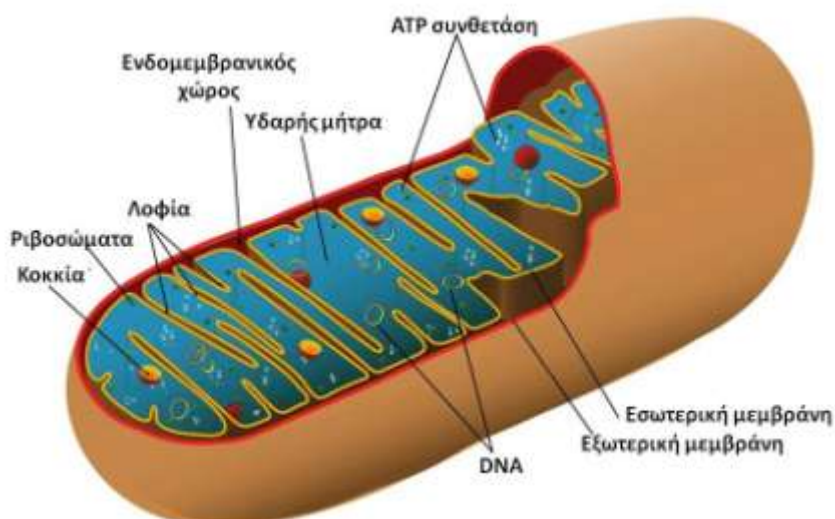
Η **αερόβια αναπνοή** φαίνεται ότι ήταν η κατάλληλη διαδικασία για την προσαρμογή της ζωής σε ευκαρυωτικού τύπου οργάνωση του κυττάρου, με κατάκλυση του ωκεανού σε ευκαρυωτικούς οργανισμούς από τους οποίους προήλθαν όλα τα αρτίγονα ευκαρυωτικά είδη, μονοκύτταρα ή πολυκύτταρα, φωτοσυνθέτοντα και μη, ζώα και φυτά, μύκητες και φυσικά ο άνθρωπος. Παράλληλα βέβαια εξελίσσονταν και οι βακτηριακής μορφής προκαρυώτες, αυτότροφοι και ετερότροφοι, αερόβιοι και αναερόβιοι.

**Αρτίγονα** = όρος που σημαίνει ότι το εξεταζόμενο είδος υπάρχει στην εποχή μας σε αντίθεση με τα γνωστά απολιθωμένα εξαφανισθέντα είδη.

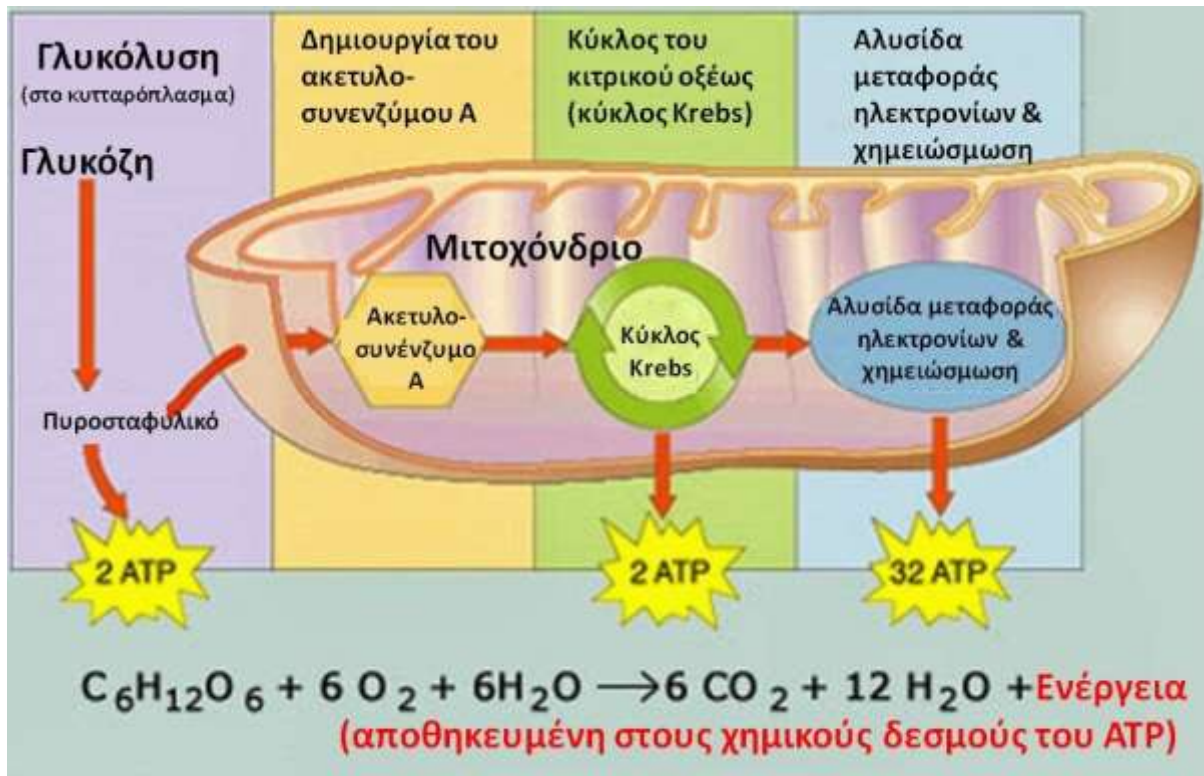
Η αερόβια αναπνοή ή ακριβέστερα **κυτταρική αναπνοή** αποτελείται από σειρά αντιδράσεων που σκοπό έχουν να απελευθερώσουν σταδιακά την ενέργεια του οξειδούμενου μορίου που είναι η γλυκόζη και τελικώς να μεταφέρουν αυτή την ενέργεια σε πολλά δημιουργούμενα μόρια ATP. Η κυτταρική αναπνοή αποτελείται από 3 διακριτές συνδεδεμένες αλληλουχικώς φάσεις, τη **γλυκόλυση** που γίνεται στο κυτταρόπλασμα, και τον **κύκλο του Krebs** (ή κύκλο του κιτρικού οξέως) και την **οξειδωτική φωσφορυλίωση** που γίνονται στα **μιτοχόνδρια**. Τα μιτοχόνδρια (Σχήματα 10 & 11) είναι κυτταρικά οργανίδια που προσφέρουν μεγάλη εσωτερική επιφάνεια μεμβρανών για να συμβούν στο μέγιστο δυνατό βαθμό οι διεργασίες της οξειδωτικής φωσφορυλίωσης (περισσότερα για τα μιτοχόνδρια στα επόμενα). Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι τα μιτοχόνδρια απαντούν μόνο στους ευκαρυωτικούς οργανισμούς. Στους αερόβιους (επειδή υπάρχουν και αναερόβιοι) προκαρυωτικούς οργανισμούς (βακτήρια-κυανοβακτήρια) η κυτταρική αναπνοή γίνεται στην επιφάνεια της εσωτερικής πλασματικής μεμβράνης του κυττάρου τους.



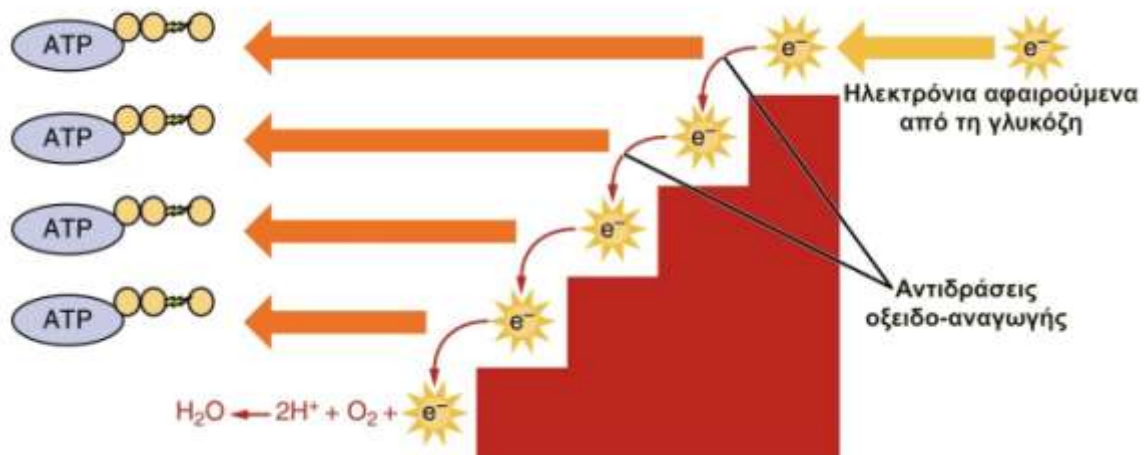
Σχήμα 10. Τομή μιτοχονδρίου σε σχηματική αναπαράσταση. Απεικονίζονται οι σχηματισμοί υπό μορφή λοφίων από τις αναδιπλώσεις της εσωτερικής μεμβράνης και τα πολλά ένζυμα στην επιφάνειά της.



Σχήμα 11. Ανάγλυφη όψη τομής μιτοχονδρίου όπου φαίνεται το υδαρές εσωτερικό (μήτρα), τα λοφία, ο ενδομεμβρανικός χώρος, κ.ά. Το μιτοχόνδριο περιβάλλεται από διπλή μεμβράνη.



Σχήμα 12. Η πορεία της οξειδωσης της γλυκόζης κατά την κυτταρική αναπνοή από το κυτταρόπλασμα στο μιτοχόνδριο και η παραγωγή ATP.



Σχήμα 13. Σχηματική νοητική αναπαράσταση της διαδρομής του ηλεκτρονίου στην αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETC) της κυτταρικής αναπνοής με την βαθμιαία μειούμενη ενέργειά του να δεσμεύεται στο ATP.

Η ζωή όμως στα αρχικά της στάδια και για μεγάλο διάστημα εντεύθεν παρέμενε αποκλειστικώς στο νερό και δεν είχε ακόμα αποικίσει την ξηρά. Αιτία για αυτό ήταν η έντονη υπεριώδης ακτινοβολία, θανατηφόρα για τα κύτταρα, που έλουζε κυριολεκτικά τον πλανήτη. Μόνο μέσα στο νερό με την προστασία που αυτό παρείχε από τη UV μπορούσαν τα κύτταρα να προστατεύονται. Σιγά-σιγά όμως από το οξυγόνο που παράγονταν και



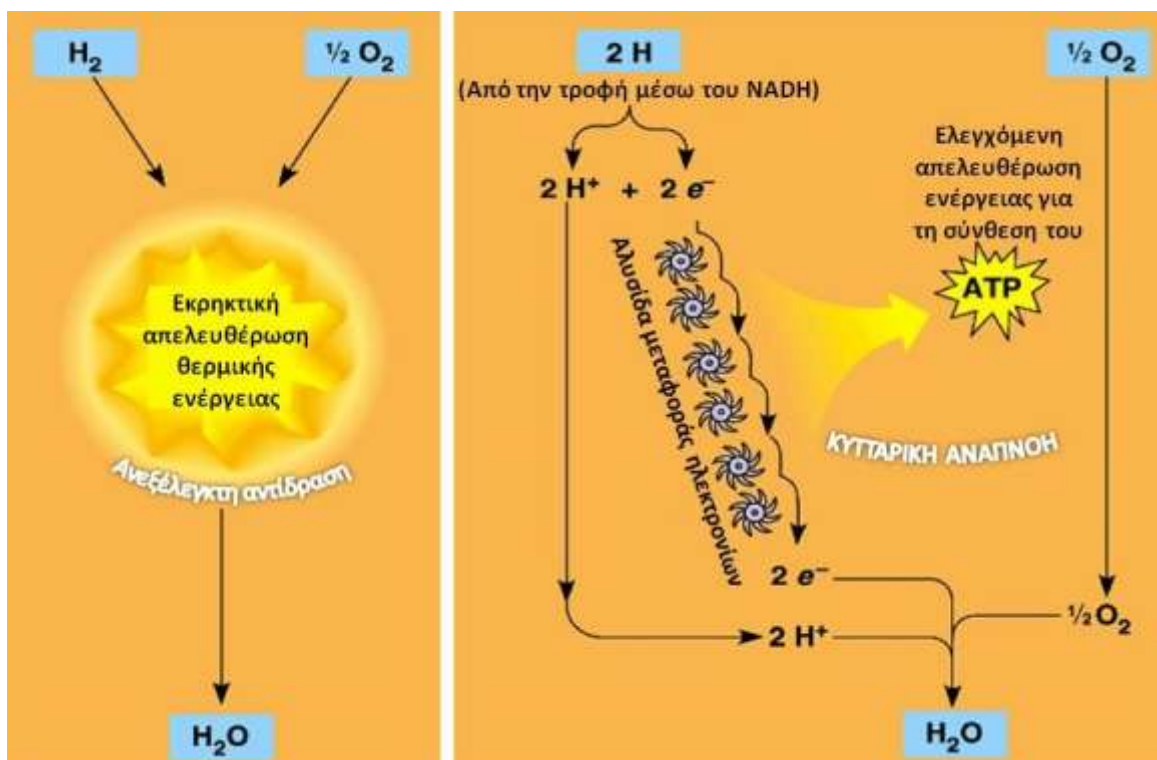
συσσωρεύονταν στην ατμόσφαιρα δημιουργήθηκε το στρώμα – ασπίδα του **όζοντος** ( $O_3$ ) που άφηνε να περάσουν προς τη Γη όλα τα μήκη κύματος του φωτός πλην της U.V. (ελάχιστη διέρχεται). Μετά από αυτό (πριν 1 δισεκατομμύριο χρόνια περίπου) η ζωή μπόρεσε να «βγει» και στην ξηρά.

Σήμερα η ζωή όπως την ξέρουμε βασίζεται στη φωτοσύνθεση τόσο για την τροφή που δημιουργεί όσο και για το οξυγόνο που αναπνέουμε και για την ενέργεια που μας παρέχει έμμεσα υπό τη μορφή των ορυκτών καυσίμων. Από τα ορυκτά καύσιμα ο άνθρωπος λαμβάνει τουλάχιστον το 90 % της ενέργειας που απαιτεί ο ανθρώπινος πολιτισμός. Λιγνίτης, άνθρακας, πετρέλαιο, αέριο, όλα αποτελούν προϊόντα της αρχαίας φωτοσύνθεσης με τα υπολείμματα των νεκρών κυττάρων να θάβονται στη Γη (ιζήματα) και να «σαπίζουν» σε κατάλληλο περιβάλλον με αποτέλεσμα ο άνθρακας των μορίων τους να μετασχηματίζεται σε υδρογονάνθρακες, την καύσιμη ύλη μας.

Μιλώντας για τη ζωή όλα περιστρέφονται γύρω από το κύτταρο. Ένας πολυκύτταρος οργανισμός ανεξαρτήτως του αν πρόκειται για ένα σκώληκα ή έναν άνθρωπο ζει εφόσον τα κύτταρά του ζουν και πολλαπλασιάζονται. Όλα τα κύτταρα ενός οργάνου, ενός ιστού ή και μεμονωμένα όπως στην περίπτωση των μονοκύτταρων οργανισμών, πρέπει να καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες προκειμένου ο οργανισμός να μπορέσει τελικώς να αναπαραχθεί. Οι ενεργειακές ανάγκες όμως καλύπτονται μόνο εφόσον το κύτταρο διαθέτει αποθεματοποιημένη ενέργεια συνεχώς δηλαδή άφθονο ATP το οποίο συνεχώς ξοδεύεται και αναδημιουργείται μέσω ενεργειακών διαδικασιών. Δηλαδή το κύτταρο πρέπει με σταθερές χημικές διεργασίες να δεσμεύει ενέργεια, να την αποθηκεύει στο ATP και το ATP κατόπιν να μεταφέρει αυτή την ενέργεια στις θέσεις όπου γίνονται οι βιοχημικές αντιδράσεις για να μπορέσουν να επιτελεσθούν αποτελεσματικά.

Μιλώντας για ενέργεια που απαιτείται για να παραχθεί κάθε έργο και ιδιαίτερα έργο στο κύτταρο, όλα οδηγούν στη νοητική σύλληψη του τι σημαίνει ενέργεια για τη ζωή. Ενέργεια σημαίνει κίνηση ατόμων και μορίων και ως καθαρότερη έκφραση αυτής είναι η θερμότητα η οποία εκφράζει την κινητική κατάσταση των στοιχείων. Αν επιχειρήσουμε να πάμε νοητικώς στο πως δημιουργείται θερμότητα (δηλαδή ενέργεια) τότε θα καταλήξουμε ότι απλώς αυτή αποτελεί μια εκδήλωση της αποθηκευμένης ενέργειας στα ηλεκτρόνια των ατόμων ή των μορίων. Όταν αντιδρούν δύο στοιχεία (άτομα ή μόρια) η ένωση-μόριο που προκύπτει είτε έχει μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο (αν απορρόφησε από αλλού ενέργεια) είτε χαμηλότερο (αν απελευθέρωσε ενέργεια). Για να μην πλατειάσουμε ας αναφέρουμε μόνο ότι στο κύτταρο την ενέργεια τη δημιουργούν οι αντιδράσεις που περιλαμβάνουν υδρογόνο (H) και οξυγόνο (O). Όμως για να τιθασευτεί αυτή η ενέργεια σε χρησιμοποιήσιμη μορφή πρέπει αφενός να παραχθεί σταδιακώς και ήρεμα και αφετέρου να πακεταριστεί σε πολλές ευέλικτες μικρές μονάδες (ATP). Και για να γίνει αυτό κατανοητό ας φανταστούμε την βίαιη αντίδραση του αερίου υδρογόνου ( $H_2$ ) με το οξυγόνο ( $1/2O_2$ ) όπου με την έκρηξη που

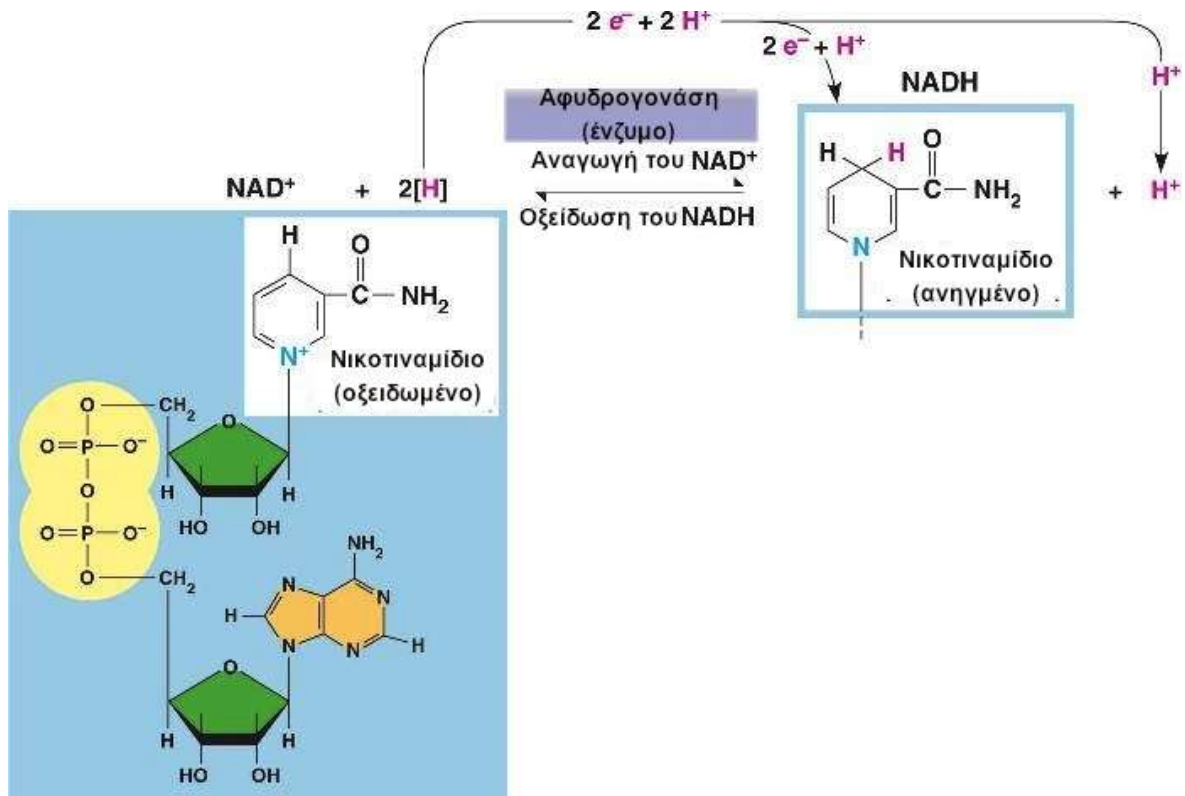
προκαλείται απελευθερώνεται πολλή θερμότητα που διαχέεται στο περιβάλλον και με τελικό προϊόν το νερό ( $H_2O$ ). Κάτι τέτοιο στο κύτταρο όπου χρησιμοποιούνται αυτά τα δύο στοιχεία θα ήταν καταστροφικό και συνάμα σπάταλο επειδή το κύτταρο χρειάζεται εκτός από ένα μικρό ποσό της όλη την υπόλοιπη θερμική ενέργεια να έχει αποθηκευθεί ως χρήσιμη χημική ενέργεια στα μόρια του ATP. Και το επιτυγχάνει αυτό απελευθερώνοντας την ενέργεια των υδρογόνων μέσω της μεταφοράς των ηλεκτρονίων τους (Σχήματα 13 & 14) κατά θαυμαστά τοποθετημένα διαδοχικά βήματα ελάττωσης της ενέργειάς των μέχρι που τελικά τα ηλεκτρόνια αυτά ενεργειακά εξαντλημένα δεσμεύονται από το οξυγόνο και σχηματίζεται νερό ( $H_2O$ ) ενώ η ενέργεια που έχασαν δεσμεύτηκε στα σχηματισθέντα μόρια του ATP. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται κυτταρική αναπνοή.



Σχήμα 14. Η σταδιακά τιθασευόμενη ενέργεια του υδρογόνου για να παραχθεί ATP μέσω της αλυσίδας μεταφοράς των ηλεκτρονίων του κατά την κυτταρική αναπνοή στο κύτταρο, σε αντίθεση με την ανεξέλεγκτη καύση του εκτός του κυττάρου.

Το **μόριο-καύσιμο** του οργανισμού από την οξείδωση του οποίου λαμβάνεται ενέργεια για να φορτιστεί το ADP σε ATP, είναι η **γλυκόζη**. Η γλυκόζη αρχικώς παράγεται από τους φωτοσυνθέτες με βασικά δομικά υλικά το  $CO_2$  και το  $H_2O$  και με ενέργεια την οποία προσφέρει ο ήλιος με τα φωτόνιά του. Κατόπιν με βάση τη γλυκόζη το κύτταρο συνθέτει πολύπλοκους υδατάνθρακες, λίπη, οργανικά οξέα και πρωτεΐνες. Όλα αυτά αποτελούν συστατικά του κυττάρου και συνάμα αποθήκες ενέργειας για να χρησιμοποιηθούν στις οξειδώσεις που θα παράγουν ATP με τη συνδρομή ορισμένων **συνενζύμων** ( $NADPH$ ,  $NADH$ ,  $FADH_2$ ) που διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στη μεταφορά ηλεκτρονίων και πρωτονίων ( $H^+$ ) από

κάποιο μόριο (οξειδούμενο) προς κάποιο άλλο (αναγόμενο). Συνάμα δρουν και κάποια άλλα συνένζυμα τα **κυτοχρώματα** (και άλλες συναφείς ενώσεις) τα οποία είναι μεταφορείς ηλεκτρονίων διότι η αφαίρεση πρωτονίων συνοδεύεται και από αφαίρεση ηλεκτρονίων τα οποία μεταφερόμενα σε κάποιο μόριο αποδέκτη αποδίδουν την ενέργειά τους με τρόπο τέτοιο που να προκαλείται χρήσιμο έργο.



Σχήμα 15. Η δομή του συνενζύμου NAD στην οξειδωμένη του κατάσταση ως NAD<sup>+</sup> και στην ανηγμένη του ως NADH προκειμένου να επιτελέσει το ρόλο του ως μεταφορέας πρωτονίων και ηλεκτρονίων στην κυτταρική αναπνοή.

Χωρίς να υπεισέλθουμε στην ανάλυση των βιοχημικών αντιδράσεων (υπάρχουν εξαιρετικά βασικά συγγράμματα για αυτό) που εμπλέκονται στις διεργασίες της ζωής, θα επιχειρηθεί εδώ μόνο η νοητική σύλληψη της κεντρικής ιδέας του πως το κύτταρο μπορεί και κινεί τη μηχανή του. Αυτό που έχει κεφαλαιώδη σημασία είναι να κατανοηθεί ότι οι χημικοί δεσμοί περιέχουν ενέργεια και ενώ το σπάσιμό τους την απελευθερώνει, ο σχηματισμός τους τη δεσμεύει. Χημικοί δεσμοί μεταξύ ατόμων σημαίνει βεβαίως ηλεκτρόνια τα οποία συμμετέχουν σε αυτούς (κυρίως ως ομοιοπολικοί δεσμοί) και με κάθε απελευθέρωση ατόμων από ένα χημικό δεσμό απελευθερώνονται και ηλεκτρόνια. Ατομα και ηλεκτρόνια συμμετέχουν έτσι στις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής οι οποίες είναι οικουμενικές στη μετατροπή της ενέργειας. Δηλαδή η αποθηκευμένη ενέργεια στους χημικούς δεσμούς ενός μορίου μεταφέρεται στους χημικούς κάποιου άλλου μορίου που σχηματίζεται.

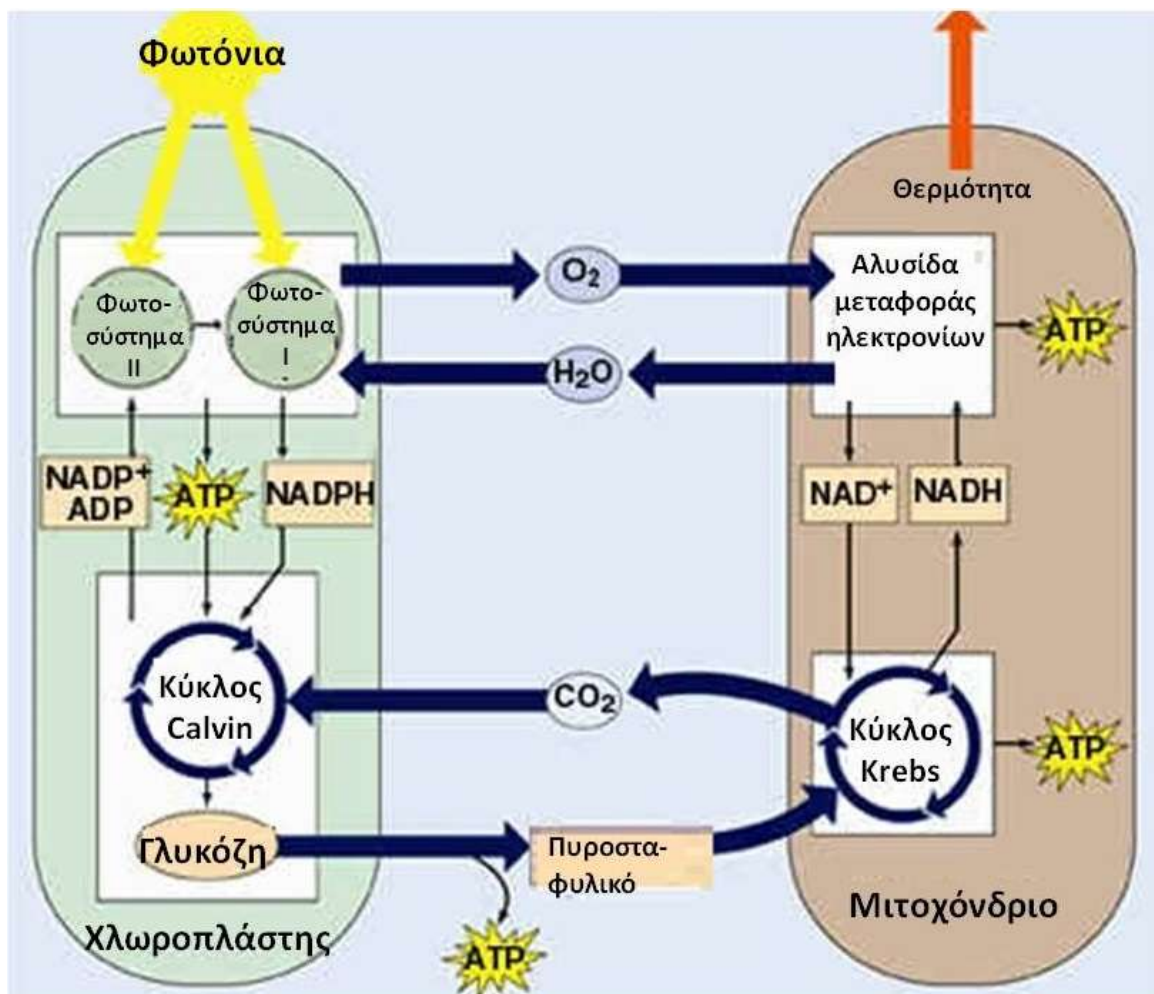
Για να επανέλθουμε όμως στην κυρίως ουσία που είναι η δημιουργία αποθέματος ενέργειας, ας εξετάσουμε το πως πρωτόνια (H<sup>+</sup>) και

ηλεκτρόνια ( $e^-$ ) εμπλέκονται άμεσα στο να παραχθεί ενέργεια υπό τη μορφή του ATP. Οι δύο βασικές διεργασίες παραγωγής ενέργειας είναι η φωτοσύνθεση που γίνεται μόνο από τους φωτοσυνθέτες (φυτά, φύκη και ορισμένα βακτήρια) και η κυτταρική αναπνοή που γίνεται από όλους τους οργανισμούς (φωτοσυνθέτες και μη φωτοσυνθέτες). Η φωτοσύνθεση δημιουργεί πρωτογενώς την ενέργεια (υπό τελική μορφή γλυκόζης) που θα παραλάβει κατόπιν η κυτταρική αναπνοή για να παράγει την τελικώς απαιτούμενη ενέργεια για κάθε βιοχημική δραστηριότητα.

Για να γίνουν όλα τα παραπάνω πρέπει να υπάρξει **μεταφορά ηλεκτρονίων** μέσω των κυτοχρωμάτων από κάποιο μόριο δότη ( $H_2O$  στη φωτοσύνθεση, γλυκόζη στην κυτταρική αναπνοή) προς ένα μόριο δέκτη ( $NADP^+$  στη φωτοσύνθεση, οξυγόνο στην κυτταρική αναπνοή). Τα μόρια δέκτες μετατρέπονται σε  $NADPH$  στη φωτοσύνθεση και  $H_2O$  στην κυτταρική αναπνοή. Τα ηλεκτρόνια δεν μεταφέρονται μόνα τους αλλά συνοδεύονται και από πρωτόνια ( $H^+$ ) τα οποία τα προμηθεύει το νερό ( $H_2O$ ) κατά τη διάσπασή του στη φωτοσύνθεση και η γλυκόζη ( $C_6H_{12}O_6$ ) κατά την οξειδωσή της στην κυτταρική αναπνοή. Έτσι τα  $NADP^+$ ,  $NAD^+$  και  $FAD$  γίνονται  $NADPH$ ,  $NADH$  (Σχήμα 15) και  $FADH_2$  αντίστοιχα (δηλαδή έχουν αναγωγική δύναμη) και μπορούν να μεταφέρουν τα υδρογόνα στις ενώσεις που συμμετέχουν στις αντιδράσεις που παράγουν ενέργεια για να δημιουργηθούν ακριβώς τα μόρια εκείνα που χρειάζεται το κύτταρο (γλυκόζη στη φωτοσύνθεση, προϊόντα διάσπασης της γλυκόζης στην κυτταρική αναπνοή). Με άλλα λόγια στη φωτοσύνθεση χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη νερό ( $H_2O$ ) και διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) για να παραχθεί γλυκόζη ( $C_6H_{12}O_6$ ) εμπιέχουσα ενέργεια και στην κυτταρική αναπνοή διασπάται η γλυκόζη για να απελευθερωθεί η ενέργεια και να παραχθεί ξανά νερό ( $H_2O$ ) και διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) (Σχήμα 16).

Η μεταφορά λοιπόν των πρωτονίων ( $H^+$ ) με τα κατάλληλα συνένζυμα είναι υψίστης σημασίας για τις βιοχημικές αντιδράσεις που παράγουν ενέργεια. Να διευκρινιστεί στο σημείο αυτό ότι τα  $NADH$  και  $FADH_2$  μεταφέρουν τα πρωτόνια τους (μαζί με τα ηλεκτρόνια) στη λεγόμενη **αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων** (Electron Transport Chain-ETC) στις εσωτερικές μιτοχονδριακές μεμβράνες όπου και αποδίδουν τα μεν ηλεκτρόνια στα κυτοχρώματα της ETC που βρίσκονται ενσωματωμένα στη μεμβράνη, τα δε πρωτόνια στο υδαρές εσωτερικό (μήτρα) του μιτοχονδρίου γινόμενα έτσι ξανά  $NAD^+$  και  $FAD$ . Δηλαδή ο κύριος ρόλος τους είναι η μεταφορά πρωτονίων και ηλεκτρονίων στην αναπνευστική αλυσίδα.

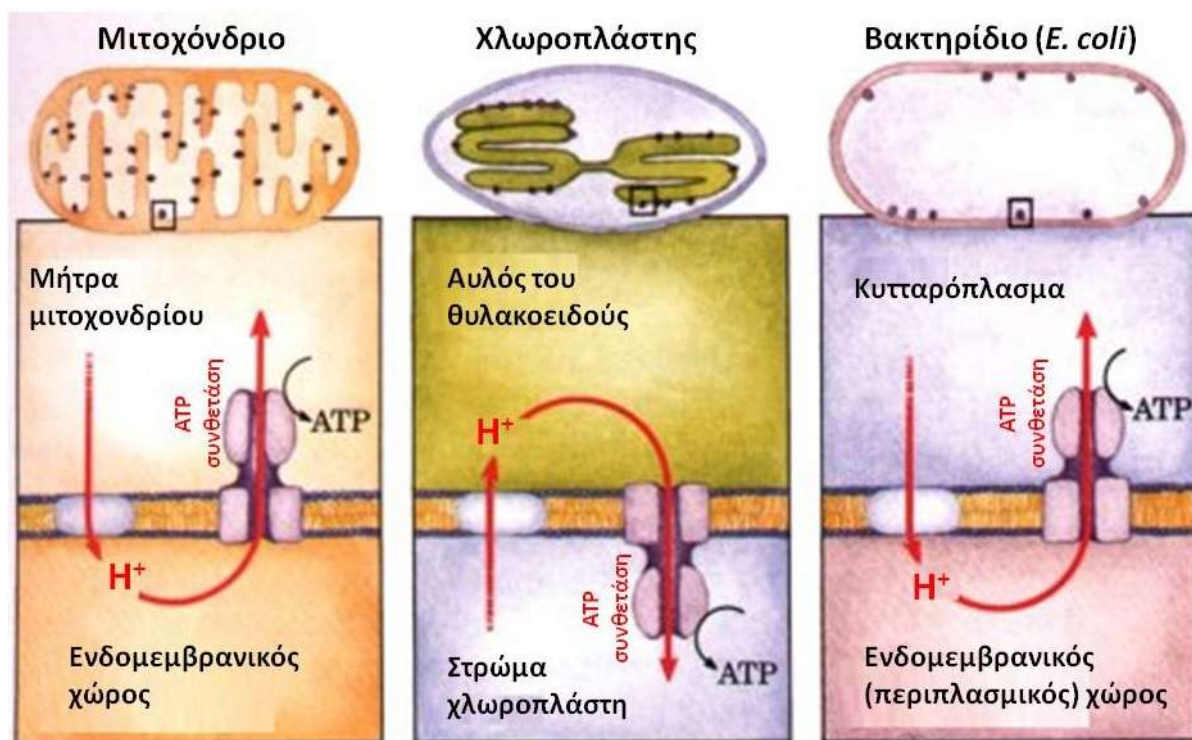
Παρόμοιο ρόλο με τα  $NADH$  και  $FADH_2$  στην κυτταρική αναπνοή (στα μιτοχόνδρια) επιτελεί το  $NADPH$  στη φωτοσύνθεση μόνο που εδώ το συνένζυμο αυτό χρησιμοποιείται για να μεταφέρει πρωτόνια (και ηλεκτρόνια) σε βιοσυνθετικές αντιδράσεις που γίνονται στον λεγόμενο κύκλο του Calvin κατά τον οποίο το  $CO_2$  ενσωματώνεται σε οργανικά μόρια που χρειάζονται υδρογόνα για να παραχθεί τελικώς γλυκόζη και να ξαναγίνει  $NADP^+$ .



Σχήμα 16. Συνολική σχηματική εικόνα της μεταφοράς της αρχικής φωτεινής ενέργειας και της μετατροπής της σε χημική (γλυκόζη) και τελικώς ATP (και κάποια θερμότητα που διαφεύγει) μεταξύ των δύο οργανιδίων του κυττάρου (χλωροπλάστη και μιτοχόνδριο) όπου γίνονται όλα αυτά.

Ανεξαρτήτως όμως της πηγής παραγωγής των πρωτονίων ( $H^+$ ) είτε αυτή είναι το νερό ( $H_2O$ ) στη φωτοσύνθεση, είτε η γλυκόζη ( $C_6H_{12}O_6$ ) στην κυτταρική αναπνοή, τα πρωτόνια που συσσωρεύονται στο υδαρές εσωτερικό του κάθε οργάνου (αυλός των θυλακοειδών στον χλωροπλάστη, μήτρα στο μιτοχόνδριο) είναι η κινητήριος δύναμη για να παραχθεί η ενέργεια που δεσμεύεται στο ATP. Ο μηχανισμός αυτός είναι θαυμαστός και μεγαλοφυής και ονομάζεται **χημειώσμωση**. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί είναι παρόμοιος και στη φωτοσύνθεση και στην κυτταρική αναπνοή. Στη μεν φωτοσύνθεση η παραγωγή του ATP γίνεται με μια χημειωσμητική διαδικασία που την ονομάζουμε **φωτοφωσφορυλίωση** στη δε κυτταρική αναπνοή **οξειδωτική φωσφορυλίωση**.

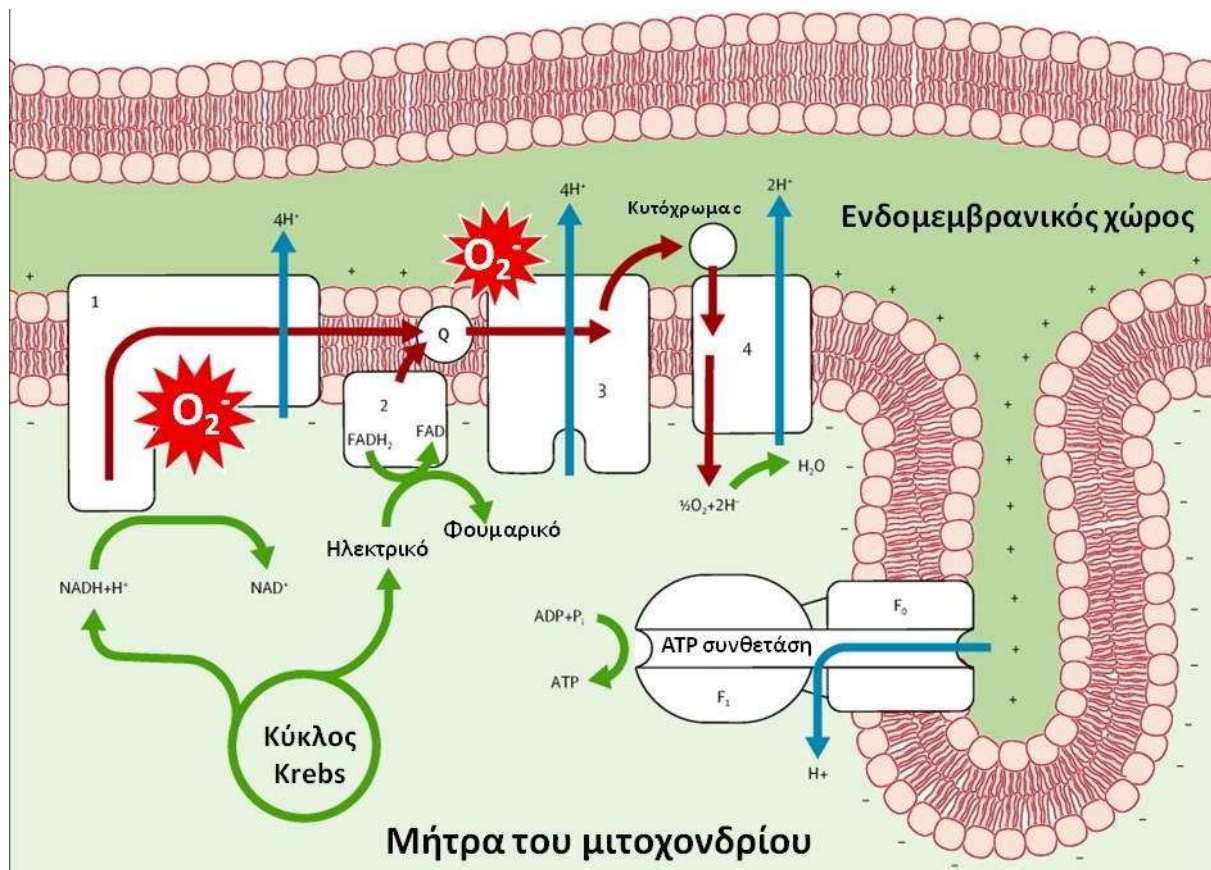
Η χημειώσωση βασίζεται στη δημιουργία διαφοράς συγκέντρωσης πρωτονίων ( $H^+$ ) μεταξύ των δύο πλευρών μιας μεμβράνης στους κλειστούς χώρους που δημιουργεί η μεμβράνη. Όταν πρόκειται για τις θυλακοειδείς μεμβράνες των χλωροπλάστων ο ένας χώρος (ο εσωτερικός) είναι αυτός που δημιουργείται μεταξύ του διπλού μεμβρανικού στρώματος του θυλακοειδούς (αυλός του θυλακοειδούς ή ενδομεμβρανικός χώρος ή εσωτερικό του θυλακοειδούς) και ο άλλος (ο εξωτερικός) αυτός που καταλαμβάνει το υδαρές εσωτερικό του χλωροπλάστη μεταξύ της χλωροπλαστικής εσωτερικής μεμβράνης και των θυλακοειδών, το γνωστό στρώμα του χλωροπλάστη. Αντίστοιχα στα μιτοχόνδρια ο εσωτερικός χώρος είναι αυτός που δημιουργείται μεταξύ της αναδιπλωμένης σε λοφία εσωτερικής μεμβράνης του μιτοχονδρίου και της εξωτερικής μεμβράνης του μιτοχονδρίου και καλείται ενδομεμβρανικός χώρος και ο εξωτερικός αυτός της μήτρας του μιτοχονδρίου (Σχήμα 17). Στα βακτήρια όπου δεν υπάρχουν ούτε χλωροπλάστες ούτε μιτοχόνδρια η αναγκαία διαμερισματοποίηση δημιουργείται μεταξύ των δύο πλευρών της εσωτερικής πλασματικής μεμβράνης (υπάρχει και εξωτερική που οριοθετεί το κύτταρο).



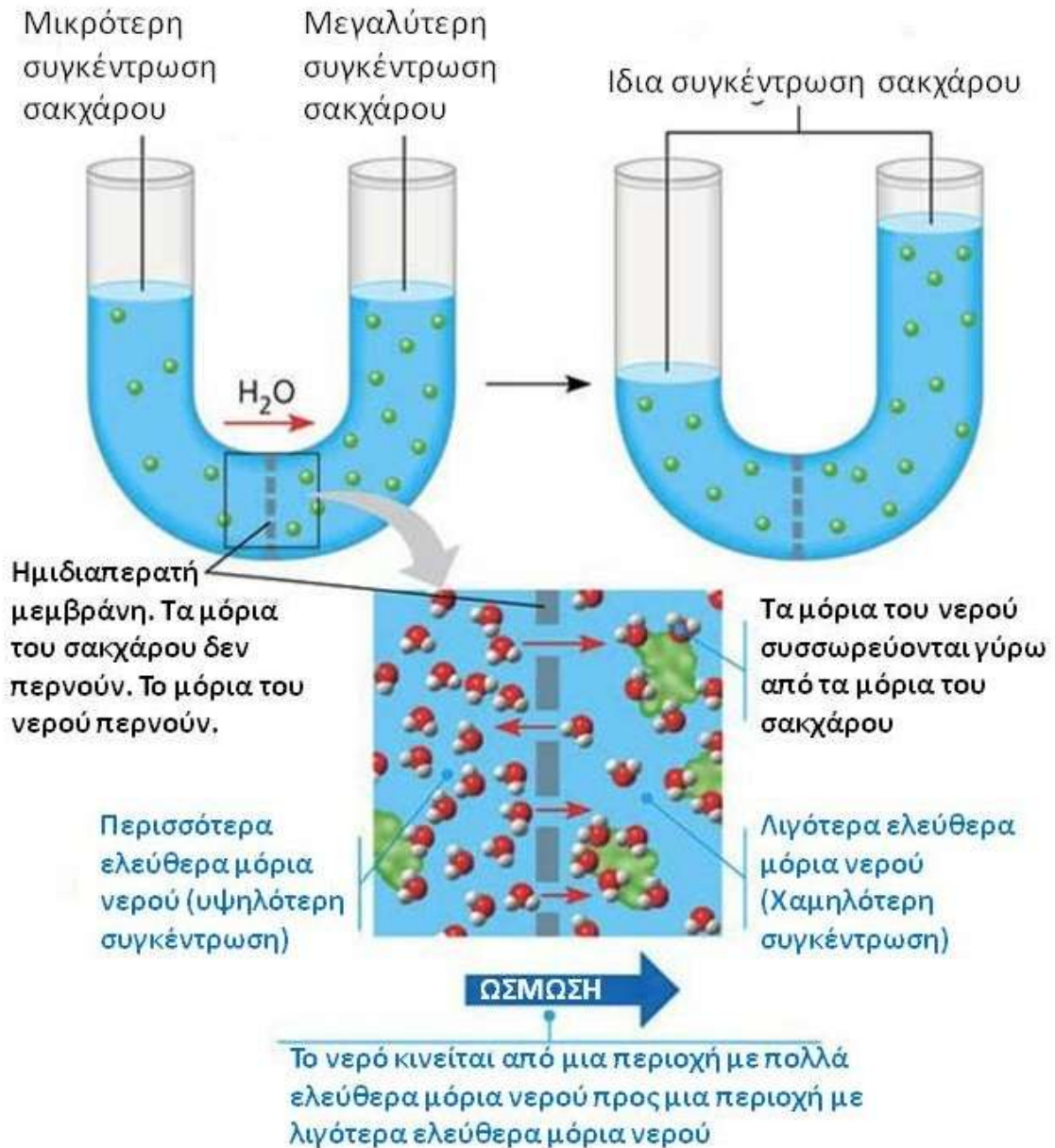
Σχήμα 17. Συγκριτικό παραστατικό σχήμα όπου φαίνεται η θέση της δημιουργίας διαμερισματοποίησης των χώρων όπου δημιουργούνται διαφορετικές συγκεντρώσεις πρωτονίων για να συμβεί η χημειώσωση μεταξύ των διαφορετικών πλευρών μιας βιολογικής μεμβράνης στο μιτοχόνδριο, το χλωροπλάστη και σε βακτηρίδιο.

Τα πρωτόνια που συσσωρεύονται στον ενδομεμβρανικό χώρο (των θυλακοειδών ή των λοφίων) είναι πολύ περισσότερα απ' ότι στο στρώμα του χλωροπλάστη ή στη μήτρα του μιτοχονδρίου. Μια και ως ιόντα δεν μπορούν με απλή διάχυση να περάσουν τη βιολογική μεμβράνη (αν μπορούσαν θα το έκαναν), δημιουργείται έτσι μια διαφορά συγκέντρωσης

ένθεν κακείθεν της μεμβράνης παρόμοια με αυτή στην κλασική ανάλυση του φαινομένου της **ώσμωσης** (Σχήμα 19). Ο μόνος δρόμος διέλευσης των πρωτονίων από την περιοχή της υψηλής συγκέντρωσής τους προς την περιοχή χαμηλής συγκέντρωσής τους προκειμένου να εξισορροπήσουν τις συγκεντρώσεις τους είναι από το διάυλο που σχηματίζει ένα πολύπλοκο πρωτεϊνικό μακρομόριο ενσφηνωμένο στη μεμβράνη, **η συνθάση (ή συνθετάση) του ATP** η οποία κινητοποιούμενη από τα πρωτόνια που διέρχονται μέσα της καταλύει την ένωση στο μόριο του ADP μιας φωσφορικής ομάδας (P<sub>i</sub>) δημιουργώντας έτσι ATP (Σχήμα 18). Φυσικά υπάρχουν πολλά μόρια συνθάσης του ATP κατά μήκος των μεμβρανών όπως άλλωστε και πολλά συγκροτήματα κυτοχρωμάτων μεταφοράς ηλεκτρονίων. Γενικώς αντιστοιχεί μια συνθάση του ATP σε κάθε συγκρότημα και γενικώς αυτά τα δύο μορφώματα εργάζονται συνδυασμένα καθώς κατά την πορεία των ηλεκτρονίων από το ένα κυτόχρωμα στο άλλο αντλούνται συνεχώς πρωτόνια από τη μήτρα του μιτοχονδρίου ή το στρώμα του χλωροπλάστη προς τον ενδομεμβρανικό χώρο χάρις στην ενέργεια που μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια. Πρόκειται για μια θαυμαστή συνδυασμένη δράση και γίνεται έτσι κατορθωτό ενάντια στην τάση της εξισορρόπησης των συγκεντρώσεων να μαζεύονται πολλά περισσότερα πρωτόνια κάπου για να δημιουργούν την αναγκαία "πίεση" της χημειώσμωσης.



Σχήμα 18. Σχηματική παράσταση της όλης εικόνας της άντλησης πρωτονίων από τη μήτρα του μιτοχονδρίου στον ενδομεμβρανικό χώρο και η διέλευσή τους από το μεγαλομόριο της ATP-συνθετάσης δημιουργώντας ATP.



Σχήμα 19. Προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητή η χημειώσμωση απεικονίζεται ο γενικός μηχανισμός της ώσμωσης κατά τον οποίο παρουσιάζεται η φυσική τάση κίνησης των μορίων του νερού διά μέσω μιας ημιδιαπερατής μεμβράνης, από μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσής των προς μία χαμηλή προκειμένου να υπάρξει εξίσωση των συγκεντρώσεών τους.

Αρα η δημιουργούμενη διαφορά συγκέντρωσης πρωτονίων μεταξύ των πλευρών μιας μεμβράνης είναι το αίτιο και η κινητήριος δύναμη για τη δημιουργία του ATP (υπάρχει και η φωσφορυλίωση υποστρώματος που γίνεται κατά τη γλυκόλυση στο κυτταρόπλασμα και κατά τον κύκλο Krebs στο μιτοχόνδριο αλλά παράγει πολύ λίγο ATP). Οπως προαναφέρθηκε (και αξίζει εδώ να ξανααναφερθεί) τα πρωτόνια που απαιτούνται για τη χημειώσμωση τα προμηθεύει στη μεν φωτοσύνθεση η διάσπαση του νερού που γίνεται από τη χλωροφύλλη-α στο κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος II (PS II), στη δε κυτταρική αναπνοή η αποδόμηση-



μετατροπή της γλυκόζης σε άλλα μόρια στον κύκλο του Krebs (Σχήμα 20). Ομως υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των δύο αυτών πηγών προμήθειας πρωτονίων ( $H^+$ ). Έτσι η διάσπαση του νερού κατά τη φωτεινή φάση της φωτοσύνθεσης ( $H_2O \rightarrow 2H^+ + O$ ) αποδίδει τα πρωτόνια εντός του αυλού του θυλακοειδούς (ενδομεμβρανικός χώρος) όπου συγκεντρώνονται πολλά (τα άτομα οξυγόνου συνενώνονται ανά δύο σχηματίζοντας  $O_2$  που διαφεύγει), ενώ στην κυτταρική αναπνοή τα πρωτόνια δεσμεύονται στα συνένζυμα NADH και  $FADH_2$  κατά τον κύκλο του Krebs που γίνεται στη μήτρα του μιτοχονδρίου.

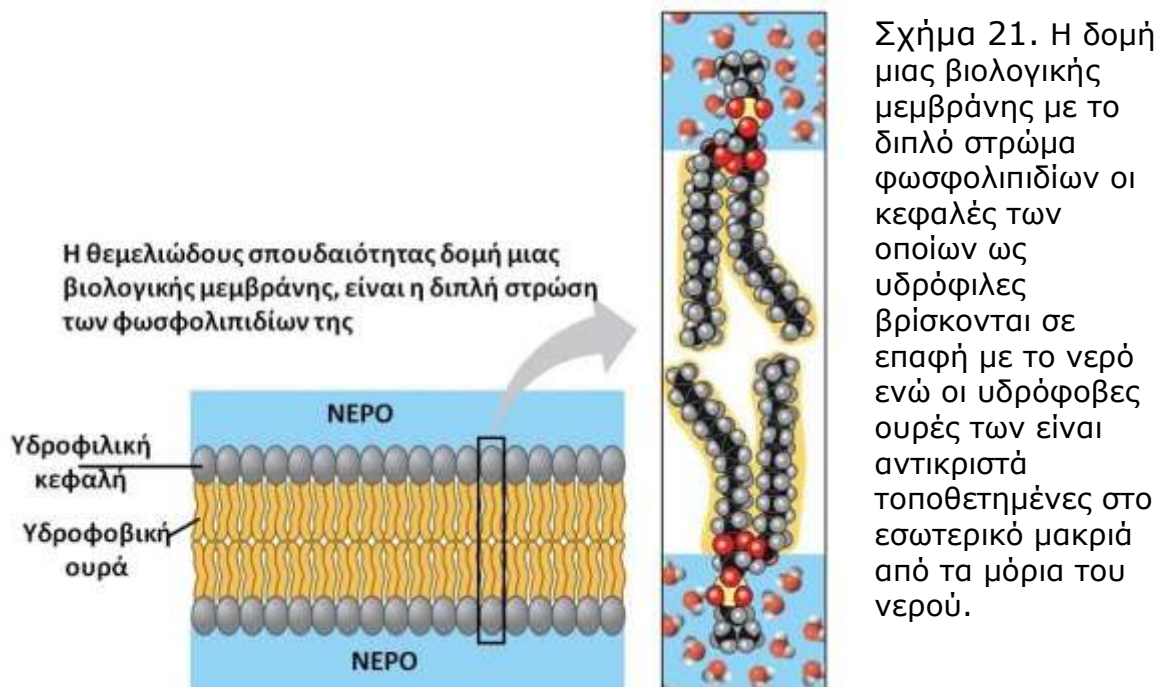


Σχήμα 20. Παραστατική σύνοψη των διαφορών και των κοινών χαρακτηριστικών στις διαδικασίες παραγωγής ATP μεταξύ χλωροπλάστη και μιτοχονδρίου. Η παραγωγή ATP στο χλωροπλάστη ονομάζεται φωτοφωσφορυλίωση και στο μιτοχόνδριο οξειδωτική φωσφορυλίωση.

Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι στη μεν φωτοσύνθεση η αναγκαία διαφορά συγκέντρωσης πρωτονίων μεταξύ των δύο πλευρών μιας μεμβράνης δημιουργείται κατά το μεγαλύτερο βαθμό άμεσα με τη διάσπαση του νερού που γίνεται από την πλευρά του συμπλόκου του φωτοσυστήματος II που βρίσκεται εντός του αυλού των θυλακοειδών μεμβρανών (η άλλη πλευρά του συμπλόκου που ενεργοποιείται από το φως "βλέπει" στο στρώμα), ενώ στην κυτταρική αναπνοή τα δεσμευθέντα στα NADH και  $FADH_2$  πρωτόνια στη μήτρα του μιτοχονδρίου πρέπει να απελευθερωθούν πρώτα αποδιδόμενα στα κυτοχρώματα της ETC και να μεταφερθούν (αντληθούν) στον ενδομεμβρανικό χώρο. Θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι και στη φωτοσύνθεση υπάρχει άντληση πρωτονίων από το στρώμα του χλωροπλάστη προς τον αυλό του θυλακοειδούς για να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διαφορά συγκέντρωσης. Και

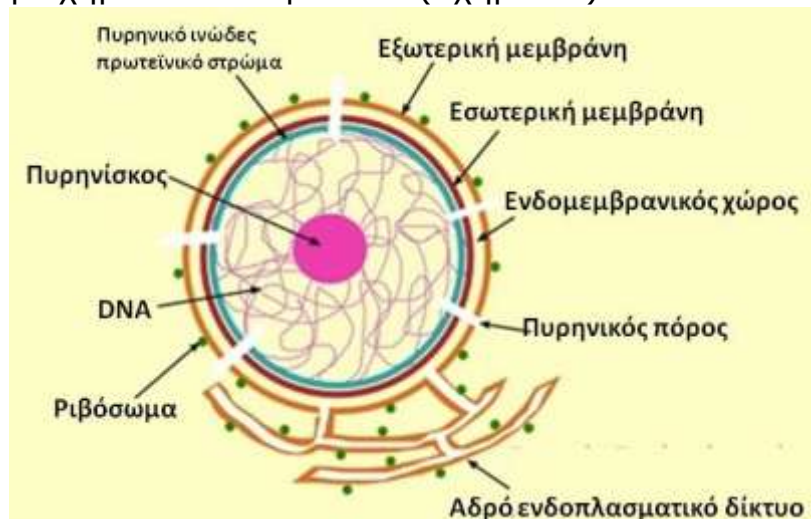
αυτό επιτυγχάνεται πάλι με τη δράση κυτοχρώματος που συμμετέχει στην αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων της φωτεινής αντίδρασης. Τα μεταφερόμενα πρωτόνια από το κυτόχρωμα της φωτοσύνθεσης προέρχονται από τα πρωτόνια που απελευθέρωσε το νερό και τα οποία πέρασαν από τον αυλό του θυλακοειδούς στο στρώμα μέσω της ATP-συνθάσης για να παραχθεί ATP. Ένα μέρος από αυτά θα ανάγει το  $\text{NADP}^+$  σε NADPH και ένα μέρος θα μεταφερθεί από το κυτόχρωμα πίσω στον αυλό του θυλακοειδούς.

Μια εύλογη απορία που μπορεί να προκύψει είναι η εξής. Όλα αυτά τα πρωτόνια που παράγονται είτε από τη διάσπαση του νερού στη φωτοσύνθεση είτε από τις μετατροπές των αρχικών μορίων της γλυκόζης κατά την κυτταρική αναπνοή τελικά τι γίνονται; Μήπως συσσωρεύονται τελικώς σε μεγάλο βαθμό είτε στο στρώμα είτε στη μήτρα με κίνδυνο να διαταράξουν ανεπανόρθωτα το επίπεδο του pH στα οργανίδια; Η απάντηση είναι όχι διότι δεν αφήνονται να συσσωρευτούν πολύ επειδή χρησιμοποιούνται κατάλληλα. Πιο συγκεκριμένα. Τα πλεονάζοντα πρωτόνια στη μήτρα του μιτοχονδρίου μαζί με τα ηλεκτρόνια της αλυσίδας μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETC) ενώνονται με το οξυγόνο και παράγουν νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ) το οποίο διέρχεται ανεμπόδιστα από τις βιολογικές μεμβράνες, δηλαδή τα πρωτόνια (και τα ηλεκτρόνια) εξαλείφονται με το νερό. Στη φωτοσύνθεση από την άλλη μεριά τα πρωτόνια ανάγουν το  $\text{NADP}^+$  σε NADPH το οποίο θα τα αποδώσει στον κύκλο του Calvin για να παραχθεί γλυκόζη. Θαυμαστός μηχανισμός ομοιοστασίας μεταξύ των τόσων άλλων που δημιουργούν την απίθανης πολυπλοκότητας κυτταρική οντότητα.

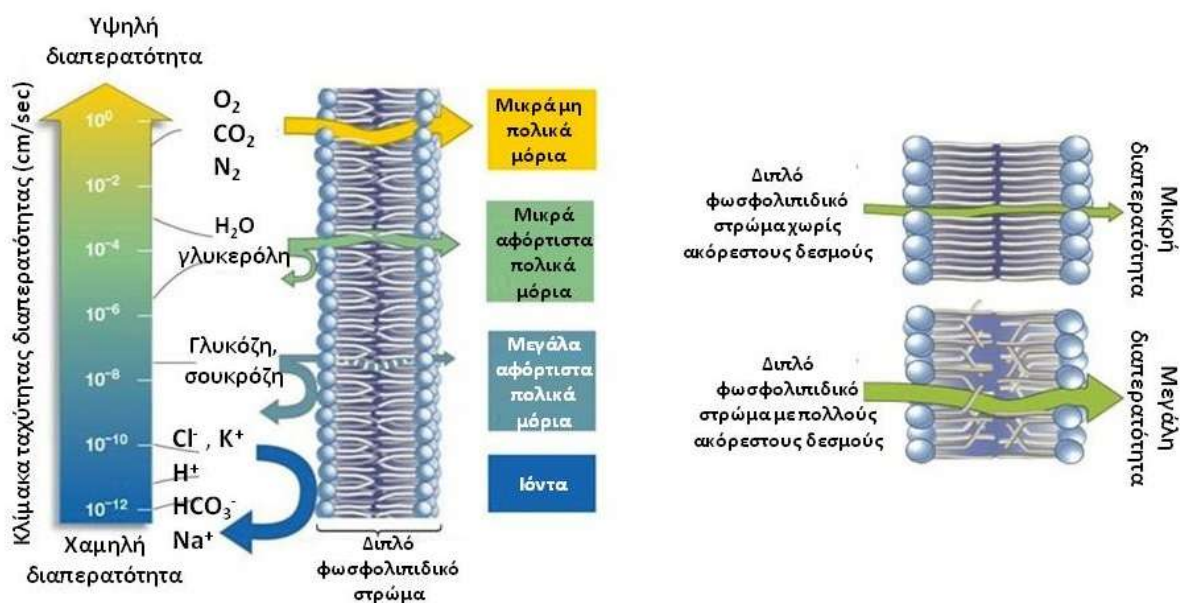


Για να δουλέψει αποτελεσματικά η χημειώσμωση προϋποθέτει την ύπαρξη **βιολογικών μεμβρανών** (Σχήμα 21) στις επιφάνειες των οποίων διαδραματίζονται όλα τα παραπάνω. Απαιτείται λοιπόν η κατανόηση του τι είναι μια βιολογική μεμβράνη και ποιές φυσικοχημικές ιδιότητες τη

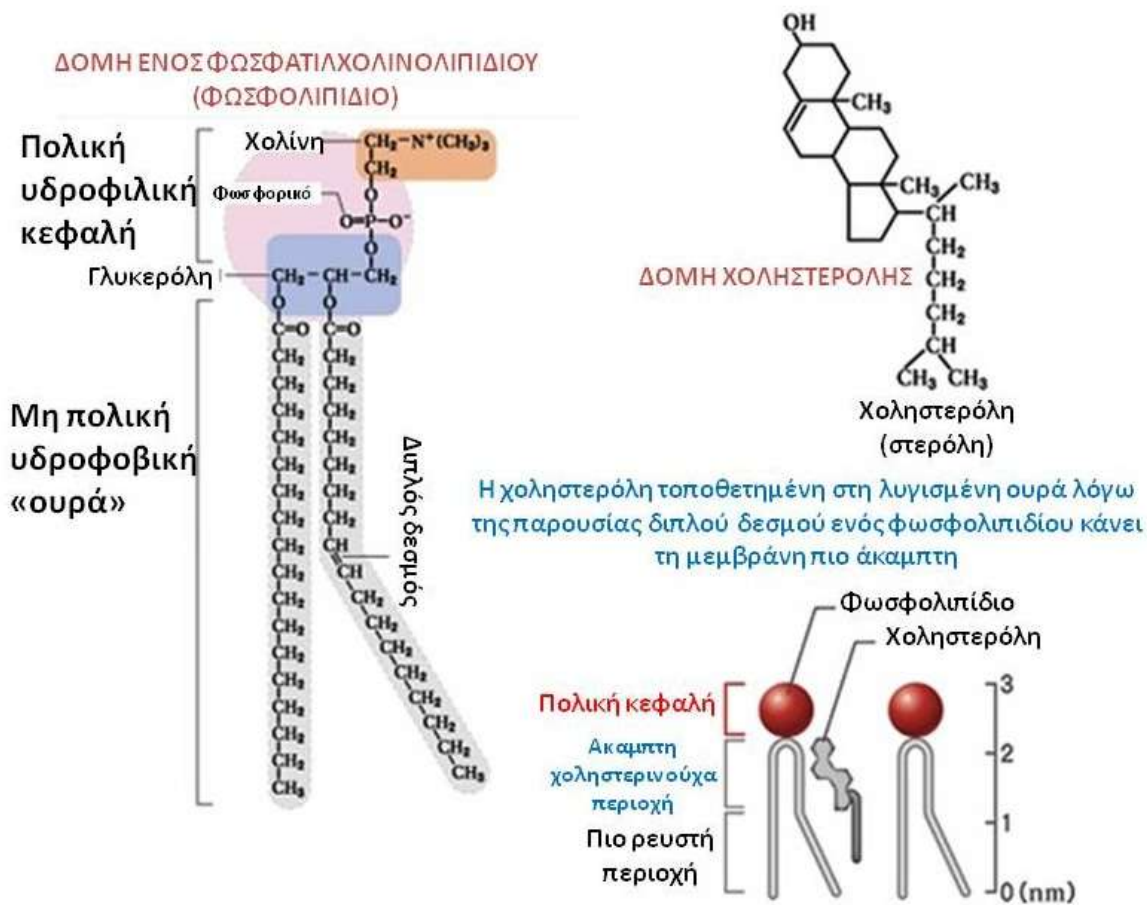
χαρακτηρίζουν έτσι ώστε να επιτελεί τον εκάστοτε βιολογικό της ρόλο. Δεν θα ήταν υπερβολή να πούμε ότι για να υπάρξει κυτταρική ζωή απαιτούνται μεμβράνες. Οι μεμβράνες οριοθετούν το κύτταρο σε σχέση με το εξωτερικό του περιβάλλον (**πλασματική μεμβράνη**), συγκροτούν οργανίδια εντός του κυττάρου (**πυρηνική μεμβράνη, μιτοχονδριακή μεμβράνη, κ.ά.**), ή αναδιπλώνονται μέσα στο κυτταρόπλασμα (π.χ. **ενδοπλασματικό δίκτυο**) για να προσφέρουν εκτεταμένες επιφάνειες βιοχημικών αντιδράσεων (Σχήμα 22).



Σχήμα 22. Παραστατική απεικόνιση μέρους του εσωτερικού ενός κυττάρου για να δειχθεί η συνέχεια της πυρηνικής μεμβράνης με το ενδοπλασματικό δίκτυο.



Σχήμα 23. Παραστατική απεικόνιση των ιδιοτήτων διαφορετικής διαπερατότητας μιας βιολογικής μεμβράνης σε διάφορους τύπους μορίων και ιόντων.



Σχήμα 24. Δομή ενός φωσφολιπιδίου μιας βιολογικής μεμβράνης. Όταν υπάρχει διπλός δεσμός η αλυσίδα του υδρογονάνθρακα της ουράς κάμπτεται και η ουρά γίνεται πιο εύκαμπτη με συνέπεια μεγαλύτερη ρευστότητα της μεμβράνης. Η υπερβολική ρευστότητα μετριάζεται από παρεμβαλλόμενα μόρια χοληστερόλης.

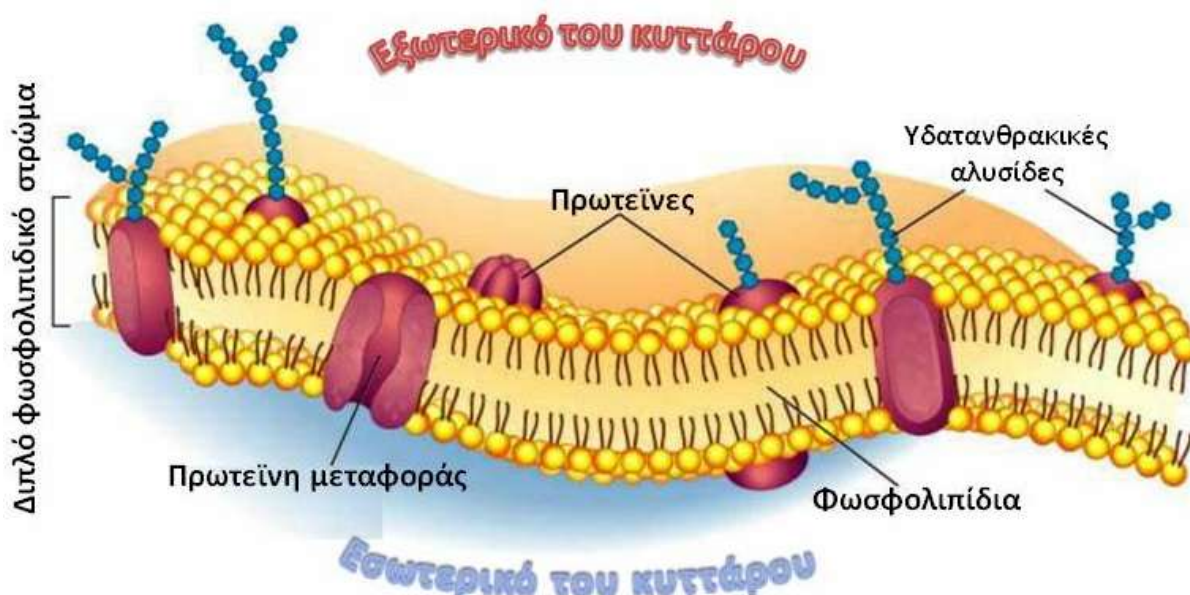
Η διαμερισματοποίηση των διαφόρων δομών και χώρων του κυττάρου που προκύπτει από τον περικλεισμό τους από μια βιολογική μεμβράνη, τους προσδίδει σχετική ανεξαρτησία σε σχέση με τα περίξ αυτών μικροπεριβάλλοντα επιτρέποντάς τους έτσι να επιτελούν την ιδιαίτερη λειτουργία τους. Αυτό όμως δεν σημαίνει αποκλεισμό από τα περίξ δρώμενα αλλά μάλλον ελεγχόμενη λειτουργία προς το καλό του κυττάρου ως όλον. Και ομιλούμε για ελεγχόμενη λειτουργία επειδή η βιολογική μεμβράνη δεν είναι μια αδιαπέραστη, συμπαγής, ή άκαμπτη δομή αλλά μάλλον μια δομή εξόχως ποικίλη και περίπλοκη που μπορεί να αποκλείει τη διαπέρασή της από κάποια μόρια, να επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση σε άλλα (κάποια εύκολα, κάποια πιο δύσκολα) και να μεταφέρει ενεργώς ορισμένα όταν απαιτείται να τη διασχίσουν (Σχήματα 23 & 26).

Οι μοναδικές ιδιότητες της βιολογικής μεμβράνης προκύπτουν από την ίδια τη δομή της η οποία είναι ίδια σε κάθε κύτταρο με ελαφρές μόνο διαφοροποιήσεις σε επιμέρους στοιχεία της. Η βιολογική μεμβράνη αποτελείται από μια διπλή στρώση φωσφολιπιδίων (φωσφατιλχολινολιπίδια) διατεταγμένων με τις πολικές υδροφιλικές

ομάδες τους (που αποτελούν την "κεφαλή" του φωσφολιπιδίου) προς το υδατικό τμήμα (εξωτερικό) της μεμβράνης και με τις διπλές μακρυές ανθρακικές αλυσίδες τους ("ουρά") που είναι μη πολικές και υδροφοβικές στο εσωτερικό.

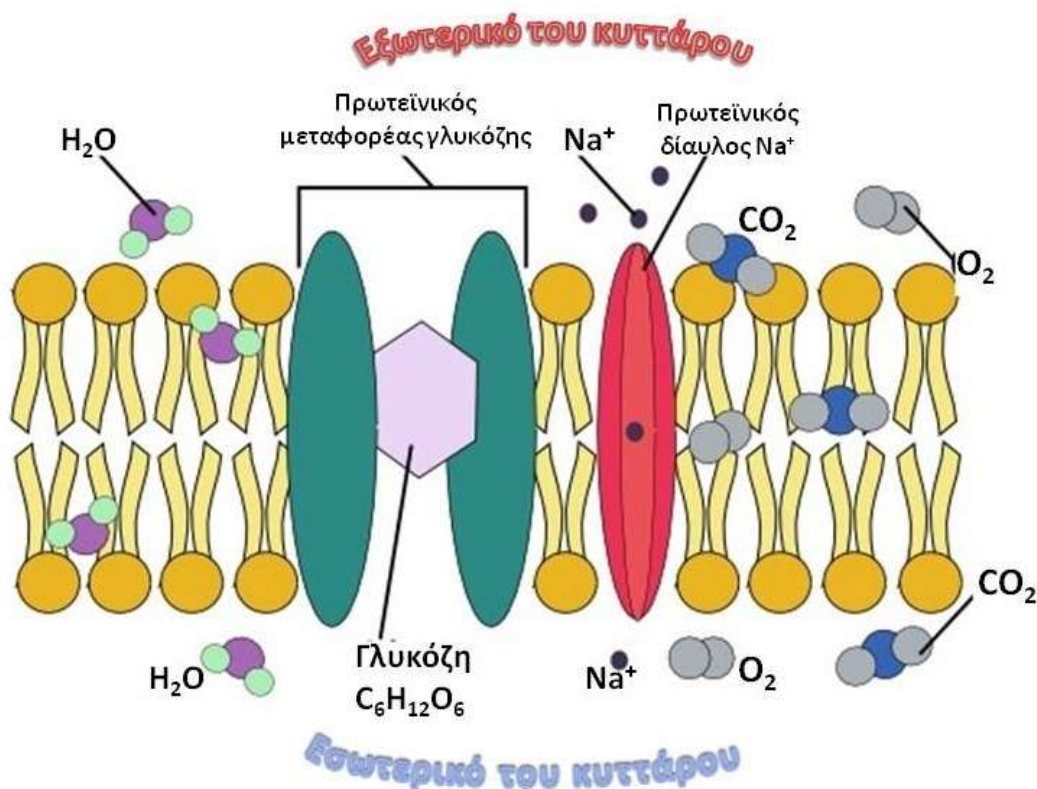
Κάθε φωσφολιπίδιο αποτελείται από ένα μόριο γλυκερόλης ( $C_3O_3H_8$ ) συνδεδεμένου μέσω των δύο πρώτων ατόμων του άνθρακα με δύο μακριές αλυσίδες υδρογονάνθρακα και με τον τρίτο του άνθρακα συνδεδεμένο μέσω ενός φωσφορικού με ένα μόριο χολίνης. Το σύμπλοκο φωσφορικού και χολίνης είναι ιονισμένο, άρα παρουσιάζει πολικότητα και είναι υδρόφιλο και το ονομάζουμε κεφαλή του φωσφολιπιδίου. Οι δύο αλυσίδες υδρογονανθράκων που αποτελούν την ουρά δεν είναι ιονισμένες άρα μη πολικές και συνεπώς υδρόφοβες. Ως εκ της κατασκευής των φωσφολιπιδίων όταν αυτά βρίσκονται μαζεμένα κάπου διατάσσονται λόγω των φυσικών δυνάμεων με τις ουρές τους απέναντι η μία στην άλλη και τις κεφαλές τους προς το υδαρές εξωτερικό μέρος. Έτσι δημιουργείται η μεμβράνη με το εσωτερικό της να απωθεί το νερό και το εξωτερικό της να έλκεται από το νερό.

Η σφιχτοδεμένη κατασκευή της μεμβράνης δεν είναι εντελώς άκαμπτη αλλά παρουσιάζει ποικίλη ρευστότητα δηλαδή πλαστικότητα ανάλογα με το αν υπάρχει ή όχι διπλός ακόρεστος δεσμός στη μακριά αλυσίδα του κάθε κεκορεσμένου υδρογονάνθρακα της ουράς. Αν υπάρχει τότε η ευθύτητα του υδρογονάνθρακα αλλοιώνεται, κάμπτεται και είναι πιο εύπλαστος από τον συνήθη που δεν έχει διπλό δεσμό. Ακόμα όμως και στις ουρές που έχουν διπλό δεσμό και είναι κεκαμμένες μπορούν να παρεμβάλλονται μόρια χοληστερόλης που συγκρατούν την υπερβολική ρευστότητα (Σχήμα 24).



Σχήμα 25. Τα διάφορα μακρομόρια των πρωτεϊνών και των υδατανθράκων τοποθετημένα στη μάζα της βιολογικής μεμβράνης.

Το όλο θέμα βέβαια παρουσιάζεται εδώ εντελώς συνοπτικά και πολύ απέχει από το να περιγράψει σε βάθος τις φυσικοχημικές ιδιότητες των φωσφολιπιδίων. Όμως αρκεί για να κατανοηθεί το ότι η βιολογική μεμβράνη είναι μια εύπλαστη κατασκευή με ικανοποιητική ρευστότητα και γι' αυτό το μοντέλο κατασκευής της ονομάζεται "ρευστού μωσαϊκού" (fluid mosaic). Και την ονομάζουν μωσαϊκό επειδή δεν αποτελείται μόνο από φωσφολιπίδια αλλά και από άλλα πρωτεϊνικά μακρομόρια ενσφηνωμένα στο διπλό στρώμα των φωσφολιπιδίων. Κάποιες από αυτές τις πρωτεΐνες διασχίζουν το πάχος της μεμβράνης και εξέχουν και από τις δύο πλευρές της, άλλες μόνο από τη μία, άλλες μετακινούνται στο εσωτερικό της και άλλες έχουν αλυσίδες υδατανθράκων ενωμένες στο εκτεθειμένο μέρος τους (Σχήμα 25). Ακριβώς αυτά τα μακρομόρια είναι που δίνουν στη μεμβράνη (ιδιαίτερα την πλασματική) τις βιολογικές της ιδιότητες καθώς επιτελούν ποικίλα έργα. Αλλά από αυτά παρέχουν δίοδο σε ιόντα (όπως η ATP συνθάση που επιτρέπει να περνούν τα πρωτόνια), άλλα μεταφέρουν με κατανάλωση ενέργειας (ATP) ιόντα και άλλα μόρια προς τη μία ή την άλλη πλευρά της μεμβράνης και άλλα που έχουν υδατάνθρακες ανιχνεύουν τη φύση άλλων μορίων (οι μεμβρανικές πρωτεΐνες έχουν πάντα τις προσκολλημένες υδατανθρακικές αλυσίδες προς το εξωτερικό μέρος της πλασματικής μεμβράνης).



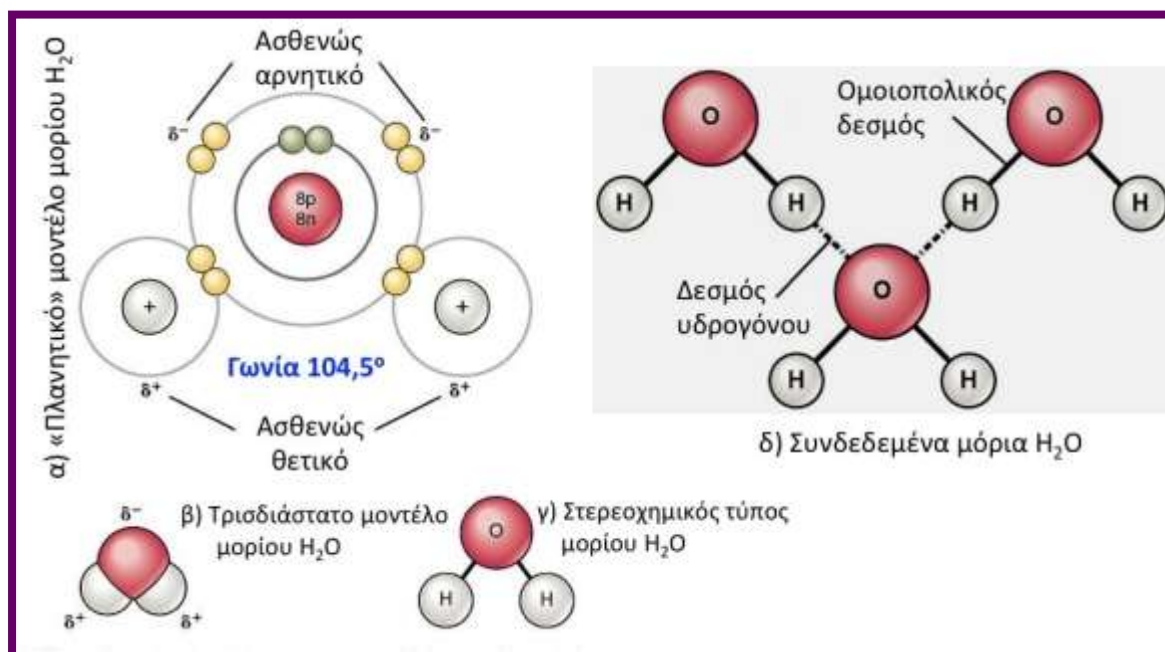
Σχήμα 26. Παραστατική απεικόνιση που δείχνει τη διαπερατότητα μιας πλασματικής μεμβράνης με σχεδόν ανεμπόδιστη διάχυση για τα μόρια του νερού ( $H_2O$ ), του αερίου οξυγόνου ( $O_2$ ) και του αερίου διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ). Τα ιόντα όπως το νάτριο ( $Na^+$ ) και τα μεγάλα μόρια όπως η γλυκόζη μεταφέρονται μόνο με τη βοήθεια μεμβρανικών πρωτεϊνών.

## Το νερό, η απαραίτητη προϋπόθεση για τη ζωή

### Η φύση του νερού

Το νερό ( $H_2O$ ) αποτελεί περί το 85 % ή και περισσότερο από τη μάζα του κυττάρου όλων των έμβιων όντων (ιδιαίτερος των υδρόβιων). Μέσα σε νερό συμβαίνουν οι χημικές αντιδράσεις και το νερό παρέχει στήριξη στα υδρόβια όντα. Το νερό είναι η μόνη χημική ένωση στη Γη που υφίσταται στη φύση σε τρεις φάσεις, **υγρή**, **στερεά** (πάγος) και **αέρια** (υδρατμοί) έχοντας συνάμα και αξιοθαύμαστες μοναδικές ιδιότητες. Έχει τη μεγαλύτερη **θερμοχωρητικότητα** από κάθε άλλο φυσικό υγρό στον πλανήτη, παράδοξα υψηλά σημεία τήξης και βρασμού για μια ουσία με το δικό του μοριακό βάρος (18), υψηλή επιφανειακή τάση και υψηλή διαλυτική ικανότητα για πολλές άλλες ουσίες. Η πιο παράδοξη όμως ιδιότητά του είναι το ό,τι είναι πυκνότερο στην υγρή του φάση αντί για τη στερεά (όπως είναι ο κανόνας για όλα τα άλλα υγρά).

Οι παραπάνω ιδιότητές του οφείλονται στο μοναδική διαμόρφωση του μορίου του (Σχήμα 27). Τα δύο άτομα υδρογόνου (H) σχηματίζουν μεταξύ τους (καθώς είναι ενωμένα με ομοιοπολικούς δεσμούς με το άτομο οξυγόνου) γωνία  $104,5^\circ$ .



Σχήμα 27. Παραστατική αποτύπωση του μορίου του νερού με τη διάταξη των ζευγών ηλεκτρονίων στους ομοιοπολικούς δεσμούς του, τα διαφορετικώς και αντιθέτως φορτισμένα άτομα του οξυγόνου και υδρογόνου, την πολικότητα που δημιουργείται, τη γωνία που σχηματίζουν και τις ηλεκτροστατικές έλξεις των υδρογόνων με άτομα οξυγόνου των γειτονικών μορίων νερού (δεσμοί υδρογόνου).

Αυτή η κατασκευή προκαλεί μια **ασυμμετρία** στην κατανομή των ηλεκτρικών φορτίων στο μόριο του νερού. Στη μεριά που είναι το κάθε άτομο υδρογόνου εμφανίζεται ελαφρώς θετικό φορτίο (+) ενώ στη απέναντι πλευρά που εκτίθεται μόνο το άτομο του οξυγόνου εμφανίζεται ελαφρώς

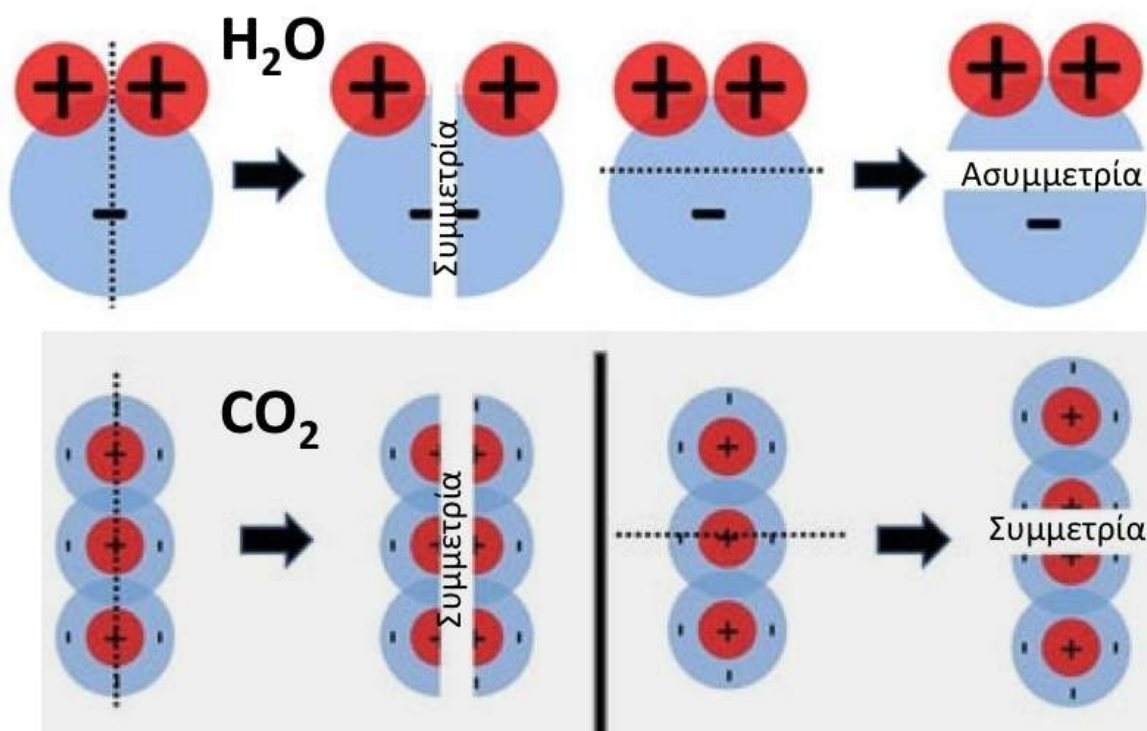
αρνητικό (-). Η αιτία για αυτό το χαρακτηριστικό έγκειται στη δομή των ατόμων του υδρογόνου και του οξυγόνου. Το άτομο οξυγόνου έχει ένα πυρήνα με 8 θετικώς φορτισμένα πρωτόνια (και 8 ουδέτερα νετρόνια) και περίξ του πυρήνα σε τροχιές, ίσο αριθμό αρνητικώς φορτισμένων ηλεκτρονίων (8). Το άτομο υδρογόνου έχει ένα πρωτόνιο στον πυρήνα και ένα ηλεκτρόνιο περίξ αυτού. Όλα τα στοιχεία στη φύση έχουν ίσο αριθμό ηλεκτρονίων και πρωτονίων στο άτομό τους. Οι διαφορές τους έγκεινται στον διαφορετικό αριθμό ηλεκτρονίων που διαθέτουν. Όσα ηλεκτρόνια και αν έχει το οποιοδήποτε άτομο στοιχείου, αυτά κατανέμονται σε τροχιές (στοιβάδες) περίξ του πυρήνα κατανεμημένα σε ομόκεντρους κύκλους (απλοποιημένη παράσταση μεν αλλά πρακτική). Η πρώτη στοιβάδα εγγύτερα του πυρήνα σε όλα τα στοιχεία (πλην του υδρογόνου) έχει πάντοτε 2 ηλεκτρόνια. Η εξώτατη στοιβάδα (η πλέον απομακρυσμένη από τον πυρήνα) έχει ποικίλο αριθμό (από 1 έως 8 το πολύ) ποτέ όμως περισσότερα από οκτώ. Η εξώτατη στοιβάδα είναι αυτή που καθορίζει τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του στοιχείου σε αντιδράσεις (ενώσεις) με άλλα στοιχεία. Το κάθε άτομο επιδιώκει να έχει συμπληρωμένη την εξωτάτη στοιβάδα του με οκτώ ηλεκτρόνια και επιδιώκει να το επιτύχει με την ένωσή του με άλλα άτομα.

Στην περίπτωση του οξυγόνου που η εξωτερική του στοιβάδα έχει 6 ηλεκτρόνια (έχει και 2 στην εσώτατη) επιδιώκει να αποκτήσει άλλα 2 για να καταστεί πλήρες (8 ηλεκτρόνια). Αυτό το επιτυγχάνει ενούμενο με 2 άτομα υδρογόνου που όπως προαναφέρθηκε κάθε υδρογόνο έχει σε μία και μοναδική στοιβάδα μόνο 1 ηλεκτρόνιο. Από την ένωση αυτή που γίνεται με δημιουργία κοινών (και για τα δύο άτομα) ζευγών ηλεκτρονίων, στην περίπτωση του νερού έχουμε το εξής. Το άτομο οξυγόνου δεχόμενο 1 ηλεκτρόνιο από το υδρογόνο και προσφέροντας 1 ηλεκτρόνιο από τα 6 του, δημιουργεί ένα κοινό ζευγάρι ηλεκτρονίων που το μοιράζεται με το υδρογόνο. Αυτό γίνεται με 2 άτομα υδρογόνου οπότε δημιουργούνται 2 κοινά ζεύγη ηλεκτρονίων. Τελικό αποτέλεσμα, το άτομο οξυγόνου αρχικώς είχε 6 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα, απέκτησε και 2 ζευγάρια ηλεκτρονίων ενούμενο με δύο υδρογόνα προσφέροντας το ίδιο από ένα ηλεκτρόνιο στο κάθε κοινό ζεύγος και έτσι ο τελικός απολογισμός δίδει: 6 ηλεκτρόνια που είχε αρχικά το οξυγόνο συν 2 ηλεκτρόνια (από ένα για το κάθε υδρογόνο) ίσον 8 ηλεκτρόνια και ικανοποίησε την τάση του για πλήρωση της εξωτερικής του στοιβάδας. Συνάμα και το κάθε άτομο υδρογόνου ικανοποίησε τη δική του τάση για πλήρωση με 2 ηλεκτρόνια της μίας και μοναδικής στοιβάδας του (1 που είχε και 1 που μοιράστηκε με το οξυγόνο). Σχηματίστηκε λοιπόν έτσι το μόριο του νερού (H<sub>2</sub>O) με τη δημιουργία 2 **ομοιοπολικών δεσμών**, όπου ομοιοπολικός σημαίνει δημιουργία ενός κοινού ζεύγους ηλεκτρονίων μεταξύ δύο ατόμων με το κάθε άτομο να προσφέρει από ένα ηλεκτρόνιο.

Στην περίπτωση όμως του μορίου του νερού ο πυρήνας του ατόμου του οξυγόνου που είναι πιο ογκώδης και μαζικότερος από τον πυρήνα του υδρογόνου, έλκει το κάθε κοινό ζεύγος ηλεκτρονίων με μεγαλύτερη δύναμη απ' ότι το έλκει ο πυρήνας του υδρογόνου με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια **πολικότητα φορτίων** στο μόριο, με ελαφρώς θετικό



φορτίο στο μέρος του υδρογόνου (πιο απομακρυσμένα τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια από το θετικό πυρήνα που έτσι «επικρατεί») και με ελαφρώς αρνητικό στο μέρος του οξυγόνου (πιο κοντά στον πυρήνα τα αρνητικά ηλεκτρόνια με το φορτίο τους να επικρατεί του θετικού πυρήνα). Δηλαδή στο μόριο του νερού υπάρχουν πόλοι (+ και -), είναι λοιπόν μόριο **πολικό (δίπολο)**. Και είναι δίπολο ακριβώς επειδή όπως προαναφέρθηκε υπάρχει η **ασυμμετρία** της γωνίας των  $104,5^\circ$  στο «τρίγωνο» που σχηματίζεται μεταξύ των υδρογόνων και του οξυγόνου. Εάν τα υδρογόνα με το οξυγόνο δεν σχημάτιζαν γωνία αλλά ήταν ενωμένα σε ευθεία γραμμή του τύπου H - O - H, τότε δεν θα υπήρχε ασυμμετρία και οι διαφορετικότητες φορτίων στα άτομα από τη διαφορετική έλξη των κοινών ζευγών ηλεκτρονίων μεταξύ οξυγόνου και υδρογόνων δεν θα δημιουργούσαν δίπολο σαν κι αυτό της ασυμμετρίας. Μια τέτοια περίπτωση είναι αυτή του μορίου του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) το οποίο από όποιο επίπεδο και αν εξετασθεί δεν παρουσιάζει ασυμμετρία καθώς τα πολύ ηλεκτραρνητικά άτομα του οξυγόνου έλκουν από τις δύο πλευρές του μορίου εξίσου και αντιθέτως τα ζεύγη των ηλεκτρονίων των ομοιοπολικών δεσμών με το άτομο του άνθρακα (Σχήμα 28). Έτσι η απόλυτη συμμετρία του διοξειδίου του άνθρακα το καθιστά μόριο μη πολικό.

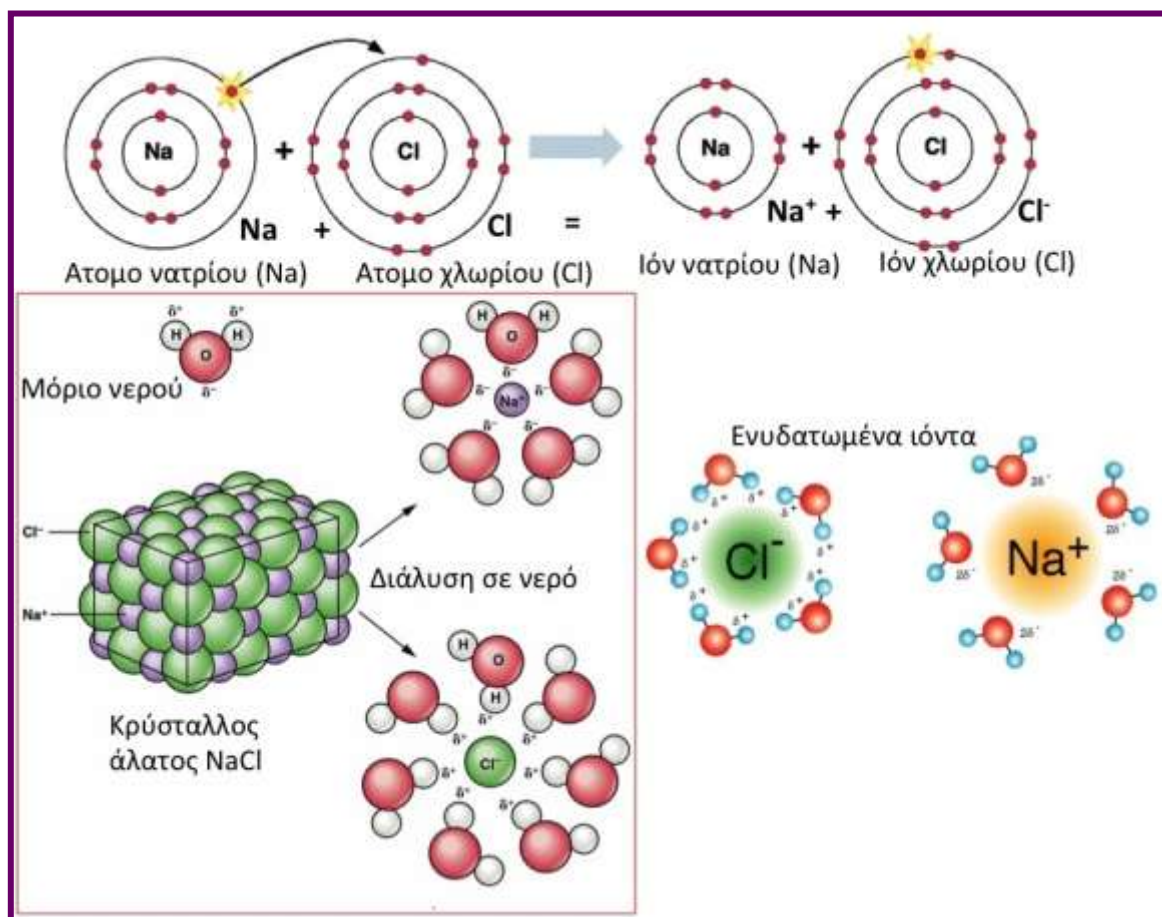


Σχήμα 28. Οι διαφορές μεταξύ του πολικού μορίου του νερού (όχι απόλυτα συμμετρικό) και του μη πολικού διοξειδίου του άνθρακα (απόλυτα συμμετρικό).

Αυτή λοιπόν η πολικότητα του μορίου του νερού το καθιστά εντελώς ιδιαίτερο με τις μοναδικές του ιδιότητες τις τόσο σημαντικές για τη ζωή. Και όλες αυτές οι ιδιότητες που απορρέουν από την πολικότητά του έχουν

κοινή συνισταμένη και εκφράζονται από τους λεγόμενους **δεσμούς υδρογόνου** που βρίσκουν την εντονότερη έκφρασή τους όπου εμπλέκονται τα μόρια του νερού.

Το κάθε μόριο νερού εξαιτίας της πολικότητάς του έλκει (και έλκεται από) τα γειτονικά του μόρια νερού με μια **ηλεκτροστατική δύναμη** μεταξύ της περιοχής του θετικά φορτισμένου υδρογόνου και της αρνητικά φορτισμένης του οξυγόνου. Αυτές οι έλξεις ονομάζονται δεσμοί υδρογόνου και μπορεί μεν να μην είναι τόσο ισχυροί όσο ένας ομοιοπολικός δεσμός, όμως είναι αρκούντως δυνατές ώστε να κρατούν τα άτομα (και τα μόρια όπου ανήκουν) «σφιχτά» ενωμένα (Σχήμα 27 δ). Δεσμοί υδρογόνου υφίστανται άλλωστε και μεταξύ παρόμοιων ή ανόμοιων μορίων μεγάλων ή μικρών αρκεί να υπάρχει πολικότητα και φυσικά υδρογόνο στο μόριο, με αποτέλεσμα να διατηρούνται τα μόρια αυτά (πρωτεΐνες, νουκλεϊκά οξέα, κ.ά.) στην κατάλληλη διαμόρφωση για να επιτελούν τον βιοχημικό τους ρόλο. Επιπροσθέτως οι δεσμοί υδρογόνου καθιστούν το νερό εξαιρετικό διαλύτη για πλήθος ουσιών που είναι ενωμένες ως ιόντα (ηλεκτρικά φορτισμένα άτομα ή μόρια) με **ιοντικό δεσμό**.



Σχήμα 29. Η φυσικοχημική εξήγηση της διάλυσης του άλατος χλωριούχου νατρίου (NaCl) στο νερό και η διάστασή του σε ιόντα Cl<sup>-</sup> και Na<sup>+</sup>.

Όταν μια ιοντική ένωση ατόμων τοποθετείται στο νερό οι δεσμοί μεταξύ των ιόντων της εξασθενούν. Το κλασικότερο παράδειγμα το αποτελεί η

τοποθέτηση άλατος χλωριούχου νατρίου (NaCl) στο νερό (Σχήμα 29). Το μόριο του NaCl δημιουργείται από τον ιοντικό δεσμό που προκύπτει μεταξύ των ιόντων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  τα οποία έλκονται από την έλξη των αντίθετων φορτίων τους και συγκρατούνται σε επαφή υπό τη μορφή κρυστάλλου άλατος. Και ιόντα γίνονται τα  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  όταν έρθουν σε επαφή τα άτομα του Na και του Cl. Το μεν άτομο Na έχει μόνο 1 ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στοιβάδα ενώ το άτομο Cl έχει 7 ηλεκτρόνια. Φυσική τάξη λοιπόν «οδηγεί» το Na να δώσει το ένα και μοναδικό του ηλεκτρόνιο στο Cl το οποίο έτσι θα ικανοποιήσει την τάση του για συμπλήρωση δάδας ηλεκτρονίων, αποκτώντας όμως συνάμα και αρνητικό φορτίο λόγω του επιπλέον ηλεκτρονίου, προέκυψε έτσι ιόν  $\text{Cl}^-$ . Συνάμα και το Na χάνοντας το ένα και μοναδικό του ηλεκτρόνιο της εξωτερικής του στοιβάδας απώλεσε μεν εξολοκλήρου αυτή τη στοιβάδα όμως ως εξωτερική του στοιβάδα λειτουργεί πλέον η αμέσως επόμενη εσωτερική που έχει οκτώ ηλεκτρόνια. Συνεπώς και το Na ικανοποίησε την ανάγκη του για δάδα ηλεκτρονίων. Όμως το άτομό του επειδή έχασε ένα ηλεκτρόνιο απέκτησε θετικό φορτίο, προέκυψε έτσι το ιόν  $\text{Na}^+$ .

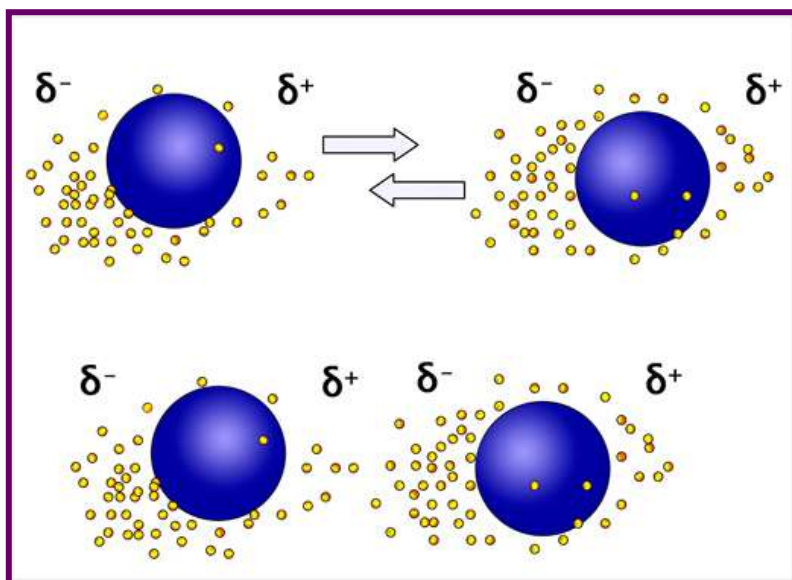
Όταν ο κρύσταλλος του άλατος NaCl (και κάθε άλλης ιοντικής ένωσης) εισέρχεται στο νερό, οι ηλεκτροστατικές ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των ιόντων του εξασθενούν στο 1/80στό της φυσικής τους έλξης. Τα ιόντα διαχωρίζονται και τα  $\text{Na}^+$  έλκονται από τον αρνητικό πόλο του νερού (οξυγόνο) ενώ τα  $\text{Cl}^-$  από το θετικό πόλο (υδρογόνο), έχουμε δηλαδή διάλυση του άλατος στο νερό. Κάθε ιόν περιβάλλεται από μόρια νερού που έχουν στραμμένο προς τη μεριά του την πλευρά εκείνη του διπόλου του νερού που έχει το αντίθετο φορτίο. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται **ενυδάτωση** των ιόντων. Αν συνεχιστεί η πρόσθεση άλατος στο νερό, κάποια στιγμή όλα τα μόρια της δεδομένης μάζας του νερού θα είναι ενωμένα ηλεκτροστατικά στα διαρκώς αυξανόμενα ιόντα και πλέον δεν θα υπάρχουν άλλα μόριά του διαθέσιμα για να τα περιβάλλουν (τα ιόντα). Το επιπλέον αλάτι δεν διαχωρίζεται πλέον σε ιόντα δηλαδή οι επιπλέον κρύσταλλοί του δεν διαλύονται. Εχουμε τότε την κατάσταση κορεσμού.

## Θερμικές ιδιότητες του νερού

### Σημεία πήξης και βρασμού

Η κλίμακα Κελσίου μέτρησης της θερμοκρασίας είναι βασισμένη στα θερμικά χαρακτηριστικά του νερού. Η θερμοκρασία πήξης του, εκεί δηλαδή που αλλάζει από υγρό σε πάγο, ορίζεται ως  $0\text{ }^\circ\text{C}$  και η θερμοκρασία βρασμού του όπου αλλάζει από υγρό σε αέριο (υδρατμός) ορίζεται ως  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Συγκρίνοντας το νερό με άλλες ενώσεις παρόμοιες με αυτό σε μοριακή δομή, θα παρατηρήσουμε ότι οι θερμοκρασίες πήξης και βρασμού του είναι "**παράδοξα**" υψηλές. Οι άλλες ενώσεις στο στενό εύρος των ατμοσφαιρικών συνθηκών υπάρχουν ως αέρια ενώ το νερό και υπό τις τρεις του καταστάσεις (πάγος, υγρό και αέριο). Η εξήγηση για αυτή του την παραδοξότητα έγκειται στις ενδομοριακές δυνάμεις που πρέπει να υπερνικηθούν για να μεταπέσει μια ένωση από μια κατάσταση σε μια άλλη.

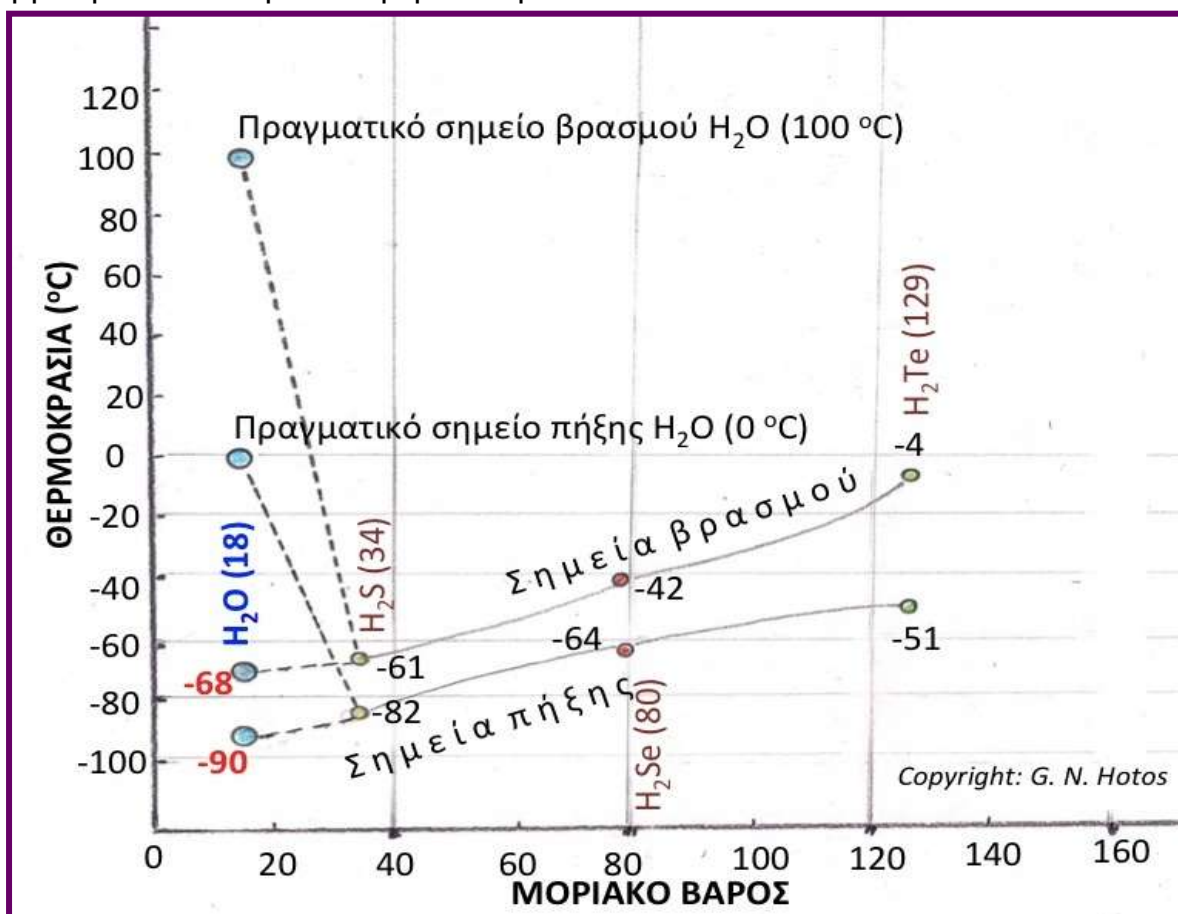
Μεταξύ των μορίων οποιασδήποτε ένωσης υφίσταται μια σχετικά ασθενής ηλεκτροστατική έλξη η οποία οφείλεται σε συνεχείς στιγμιαίες ανισοκατανομές των ηλεκτρονίων τους με αποτέλεσμα τα μόρια να γίνονται **παροδικά δίπολα**. Έτσι οι πυρήνες του ενός μορίου έλκονται από τα ηλεκτρόνια του γειτονικού του με μια ασθενή δύναμη μεν αλλά ικανή να υπερισχύει της ηλεκτρονιακής απωθητικής που υφίσταται κανονικά (Σχήμα 30). Οι συνεχείς και παροδικές αυτές διαμοριακές έλξεις οι οποίες ονομάζονται **δυνάμεις van der Waals**, αναπτύσσονται μόνο όταν τα μόρια βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους κάτι που συμβαίνει στη στερεή ή στην υγρή φάση τους όχι όμως και στην αέρια. Γενικώς, όσο βαρύτερο (μαζικότερο) το μόριο τόσο ισχυρότερη και η έλξη van der Waals μεταξύ των μορίων της εκάστοτε χημικής ένωσης. Αυτός είναι ο λόγος που όσο μεγαλύτερο είναι το μοριακό βάρος μιας ένωσης τόσο μεγαλύτερο ποσό ενέργειας απαιτείται για να υπερνικηθούν αυτές οι ελκτικές δυνάμεις και να επέλθει μια αλλαγή στην κατάσταση της ένωσης π.χ. από τη στερεά στη υγρή φάση ή από την υγρή στην αέρια. Έτσι εξηγείται το ό,τι το σημείο τήξεως και βρασμού αυξάνει όσο αυξάνει το μοριακό βάρος των ουσιών.



Σχήμα 30. Οι δυνάμεις van der Waals σε μια παραστατική απεικόνιση όπου φαίνονται οι συνεχώς μεταβαλλόμενες και παροδικές τοπικές διαφορές στην κατανομή των ηλεκτρονίων μεταξύ των μορίων που δημιουργούν τοπικές διαφορές στα ηλεκτρικά φορτία με συνέπεια έλξεις και απωθήσεις.

Όταν μια χημική ένωση αλλάζει από μια κατάσταση σε μια άλλη κάποια μορφή ενέργειας, συνήθως θερμότητα, προστίθεται ή αφαιρείται από τα μόριά της. Η θερμότητα δημιουργείται είτε από καύση, είτε από χημική αντίδραση, τριβή ή ακτινοβολία και μετράται σε θερμίδες. Μία **θερμίδα (cal)** ορίζεται ως η ποσότητα θερμότητας που προστίθεται σε 1 g νερού για να ανυψώσει τη θερμοκρασία του κατά 1 °C (μια μεγάλη θερμίδα Cal ή kcal = 1000 cal, όταν αναφέρονται θερμίδες στην τροφή, σε κατανάλωση ενέργειας, κ.λπ. εννοούνται kcal ή Cal εκτός και αν ρητώς ορίζεται διαφορετικώς). Το ποσό της ενέργειας που εμπεριέχεται στα μόρια σε μια οποιαδήποτε κατάσταση μετράται ως **θερμοκρασία**. Η θερμοκρασία αντιπροσωπεύει την **κινητική ενέργεια** ή ενέργεια κίνησης των μορίων από τα οποία αποτελείται η εξεταζόμενη ουσία. Όσο υψηλότερη η μετρούμενη θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα των μορίων.

Παρόμοια με το μόριο του νερού που περιέχει δύο άτομα υδρογόνου, είναι και τα μόρια των ενώσεων: υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ), υδροσελήνιο ( $\text{H}_2\text{Se}$ ) και υδροτελούριο ( $\text{H}_2\text{Te}$ ) με τη μόνη διαφορά ότι τα υδρογόνα είναι συνδεδεμένα αντί για οξυγόνο με άλλα άτομα. Τα μοριακά τους βάρη είναι 34, 80 και 129 αντιστοίχως. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 31 τα σημεία πήξης και βρασμού τους αυξάνουν ανάλογα με το μοριακό τους βάρος όπως προβλέπεται από τις δυνάμεις van deer Waals. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ) με μοριακό βάρος 18 θα έπρεπε να είχε σημείο πήξης στους  $-90^\circ\text{C}$  και σημείο βρασμού στους  $-68^\circ\text{C}$ , όμως έχει στους  $0^\circ\text{C}$  και  $100^\circ\text{C}$  αντίστοιχα. Αυτή η ασυμφωνία με τα αναμενόμενα εξηγείται από την πολικότητα του μορίου του νερού και από τους δεσμούς υδρογόνου που δημιουργούνται. Για να αλλάξει κατάσταση το νερό απαιτείται πολύ περισσότερη κινητική ενέργεια των μορίων του για να «σπάσουν» οι μεταξύ τους δεσμοί υδρογόνου, δηλαδή περισσότερη θερμότητα (συγκριτικά με τα παραπάνω μόρια στα οποία δεν υφίστανται δεσμοί υδρογόνου μια και το μόριό τους δεν παρουσιάζει πολικότητα). Εξ' αυτού του λόγου δικαιολογούνται και οι υψηλότερες θερμοκρασίες πήξης και βρασμού του νερού συγκριτικά με αυτά.



Σχήμα 31. Το "παράδοξο" του μορίου του νερού που έχει πολύ υψηλότερα σημεία τήξης και βρασμού συγκρινόμενο ως μοριακό βάρος με άλλα παρόμοια μόρια.

### Θερμοχωρητικότητα του νερού

Η θερμότητα που απαιτείται για να ανυψωθεί σε 1 g οποιασδήποτε ουσίας (εκτός του νερού) η θερμοκρασία του κατά 1 °C είναι μικρότερη από 1 cal, δηλαδή μικρότερη από αυτή του νερού και μάλιστα υπάρχουν μεταξύ των ουσιών (μέταλλο, ξύλο, πλαστικό, κ.λπ.) μεγάλες διαφορές όταν συγκρίνονται με το νερό, η θερμοχωρητικότητα του οποίου έχει καθιερωθεί ως πρότυπο αναφοράς. Η αιτία για αυτή τη διαφορά έγκειται στη ύπαρξη των δεσμών υδρογόνου μεταξύ των μορίων του νερού, δεσμών που απαιτούν περισσότερη ενέργεια απ' ότι σε άλλα μόρια που δεν έχουν τέτοιους δεσμούς για να σπάσουν και τα μόρια να κινηθούν ταχύτερα (δηλαδή μεγαλύτερη κινητική ενέργεια) και πιο απελευθερωμένα από την έλξη των γειτονικών τους μορίων. Από πρακτική άποψη (π.χ. στα σώματα του καλοριφέρ) το νερό απορροφά και διατηρεί περισσότερο τη θερμότητα που προσφέρεται σε μια δεδομένη μάζα του συγκριτικά με ίση μάζα μιας άλλης ουσίας για ίσο χρόνο και ένταση θέρμανσης.

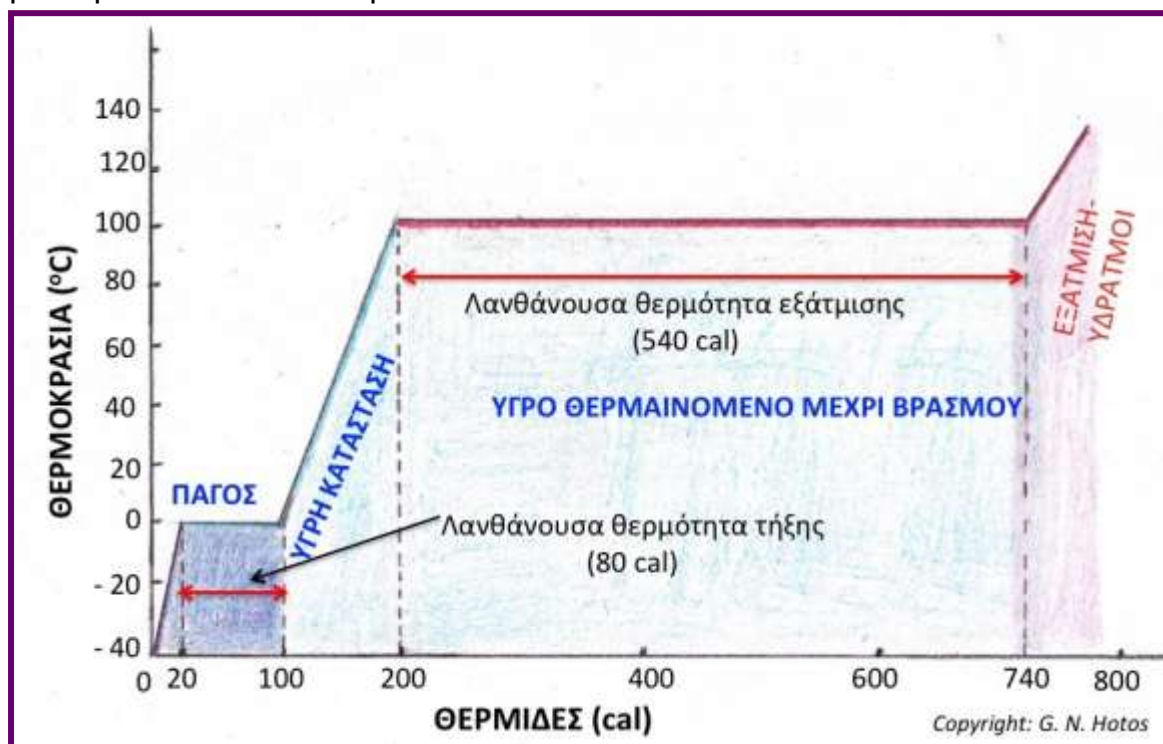
### Λανθάνουσες θερμότητες τήξης και εξάτμισης του νερού

Αποτέλεσμα της ασυνήθους και εξαιρετικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας του νερού είναι και οι αντίστοιχα υψηλές **λανθάνουσες θερμότητες** τήξης του πάγου και εξάτμισης του αναβράζοντος νερού (Σχήμα 32). Όταν προστίθεται συνεχώς θερμότητα σε ένα σώμα που βρίσκεται στη στερεά ή στην υγρή κατάσταση, προκαλείται αλλαγή στην κατάσταση του σώματος. Ένα στερεό μετατρέπεται σε υγρό σε μια θερμοκρασία που καλείται **σημείο τήξης** (το αντίστροφο καλείται **σημείο πήξης**) και ένα υγρό αλλάζει σε αέριο σε μια θερμοκρασία που καλείται **σημείο βρασμού** (το αντίστροφο καλείται **σημείο συμπύκνωσης**).

Όταν αλλάζει η κατάσταση οποιασδήποτε ουσίας, στη θερμοκρασία εκείνη όπου επέρχεται η αλλαγή δεν καταγράφεται για κάποιο ορισμένο χρόνο (ανάλογα με την ουσία) αλλαγή στη θερμοκρασία του έστω και αν εξακολουθεί να του προσφέρεται συνεχώς και σταθερά θερμότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή η θερμική ενέργεια που του προσδίδεται χρησιμοποιείται για να «σπάσει» σταδιακά τους δεσμούς μεταξύ των μορίων μέχρι του σημείου εκείνου που θα επέλθει η ολοκληρωτική αλλαγή στην κατάστασή του (π.χ. από πάγο σε υγρό νερό). Κατά τη διάρκεια του σπασίματος των δεσμών και μέχρι να ολοκληρωθεί η αλλαγή, δημιουργείται μίγμα των καταστάσεων της ουσίας, π.χ. μίγμα πάγου και υγρού. Όταν ολοκληρωθεί η αλλαγή (π.χ. όλη η μάζα του πάγου έγινε υγρό), η θερμοκρασία ανυψώνεται ξανά (εφόσον βέβαια εξακολουθεί η παροχή θερμότητας). Έτσι λοιπόν και ενώ η θερμοκρασία δεν αλλάζει, το ποσό της θερμότητας που προστίθεται σε 1 g μιας ουσίας που βρίσκεται στο σημείο τήξης, για να σπάσει όλους τους συνεκτικούς δεσμούς των μορίων και να ολοκληρώσει σε όλη του τη μάζα την αλλαγή της κατάστασής του από πάγο σε υγρό, ονομάζεται **λανθάνουσα θερμότητα τήξης**. Αντιστοίχως, η θερμότητα που απαιτείται στο σημείο βρασμού ονομάζεται **λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης** (ή ατμοποίησης).

Ο όρος «λανθάνουσα» χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις θερμότητες της τήξης και της εξάτμισης, επειδή η θερμότητα που πρέπει να προστεθεί

σε μια ορισμένη μάζα πάγου ή νερού για να τις μετατρέψει σε μάζα με υψηλότερη εμπειεχόμενη ενέργεια (νερό ή υδρατμό αντίστοιχα) συσσωρεύεται ως απόθεμα ή για να το πούμε μεταφορικά, ως «κρυφή» ενέργεια. Όταν οι υδρατμοί συμπυκνώνονται (γίνονται υγρό) απελευθερώνουν θερμότητα στην ατμόσφαιρα. Το ίδιο συμβαίνει αναλόγως και κατά την μετατροπή του υγρού νερού σε πάγο. Οι καταπληκτικά υψηλές λανθάνουσες θερμότητες τήξης και εξάτμισης του νερού είναι υπεύθυνες για την επίδρασή του σε πλανητικό επίπεδο στην επιφάνεια και στην ατμόσφαιρα της Γης. Αν δεν είχε αυτές τις ιδιότητες τότε οι κλιματικές αλλαγές θα ήταν εξαντλητικά απότομες και τα καιρικά φαινόμενα πολύ πιο ακραία.



Σχήμα 32. Η μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα τήξης και λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού ως αποτέλεσμα της μεγάλης θερμοχωρητικότητάς του.

Μια πρακτική εφαρμογή των παραπάνω συμβαίνει όταν χρησιμοποιούμε πάγο για ψύξη. Ένα κομμάτι πάγο σε ένα κλειστό μονωμένο θάλαμο μαζί με διάφορα τρόφιμα θα τα κρυώσει επειδή αφαιρείται θερμική ενέργεια από τα τρόφιμα και μεταφέρεται στα μόρια του νερού. Τα μόρια του νερού αλλάζουν κατάσταση και από πάγο καθώς λιώνει γίνονται νερό. Η μεταφορά θερμότητας από τα τρόφιμα προς τον πάγο είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική καθώς διαρκεί αρκετό διάστημα απορροφώντας μεγάλα ποσά θερμότητας λόγω της υψηλής λανθάνουσας θερμότητας τήξης του νερού. Δηλαδή ο πάγος παραμένει πάγος για μακρύ χρονικό διάστημα απορροφώντας συνεχώς θερμότητα από το περιβάλλον του μέχρι να λιώσει.

Μια παρόμοια εφαρμογή είναι και η ψύξη του αέρα μέσω του νερού. Όταν ο θερμός αέρας διοχετεύεται να περάσει διά μέσου μιας επιφάνειας

καλυμμένης με δροσερό νερό, τότε θα ο αέρας θα χάσει θερμότητα προς το νερό και θα γίνει δροσερότερος. Ο ιδρώτας επίσης των θηλαστικών προσφέρει ικανοποιητική ψύξη στο σώμα, επειδή το νερό έχει αφενός μεγάλη θερμοχωρητικότητα και αφετέρου ο ιδρώτας για να εξατμιστεί λόγω της υψηλής λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης θα έχει απορροφήσει πρώτα πολύ θερμότητα από την επιδερμίδα μέχρι να μετατραπεί σε ατμό, ο οποίος διαφεύγοντας θα πάρει μαζί του αυτή τη θερμότητα δροσίζοντας ικανοποιητικά το σώμα του ζώου.

Στο Σχήμα 32 αναπαριστώνται γραφικώς τα παραπάνω φαινόμενα. Ας δούμε τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας και αλλαγής κατάστασης του  $H_2O$  όταν βρίσκεται στη μορφή του πάγου στους  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ . Θεωρούμε τη μάζα του πάγου ως  $1\text{ g}$  και αρχίζουμε να της προσδίδουμε θερμότητα. Προσδίδοντας θερμότητα παρατηρούμε ανύψωση της θερμοκρασίας του πάγου. Μετά από παροχή  $20\text{ cal}$  θερμότητας καταγράφεται μια ανύψωση της θερμοκρασίας του πάγου από  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  σε  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Δηλαδή προσδώσαμε συνολικώς  $20\text{ cal}$  θερμότητας για να ανυψώσουμε τη θερμοκρασία  $1\text{ g}$  πάγου κατά  $40\text{ }^\circ\text{C}$ . Δηλαδή η θερμοχωρητικότητα του πάγου είναι  $20/40 = 0,5\text{ cal/g}$ , το ήμισυ απ' ό,τι του υγρού νερού. Συνεχίζοντας να προσθέτουμε θερμότητα παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία δεν αλλάζει (παραμένει  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ) παρά μόνο μετά από παροχή συνολικώς  $100\text{ cal}$  στο  $1\text{ g}$  του πάγου οπότε και μετατρέπεται σε υγρό νερό. Δηλαδή  $20\text{ cal}$  για να πάει ο πάγος από  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  στους  $0\text{ }^\circ\text{C}$  και άλλα  $80\text{ cal}$  για να πάει (διατηρούμενος πρακτικά στους  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ) από τη στερεά κατάσταση στην υγρή. Η θερμοκρασία θα παραμένει σταθερή στους  $0\text{ }^\circ\text{C}$  καθ' όλη τη διάρκεια πρόσθεσης αυτών των  $80\text{ cal}$  καθότι η προστιθέμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για να σπάσει τους δεσμούς μεταξύ των μορίων του νερού στη στερεά κατάστασή του. Η θερμοκρασία θα παραμένει σταθερή μέχρι να σπάσουν όλοι οι δεσμοί και το ενδιαμέσως δημιουργούμενο μίγμα υγρού και κρυστάλλων πάγου να μεταμορφωθεί ολοκληρωτικά σε υγρό νερό. Η ποσότητα της θερμότητας των  $80\text{ cal}$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του νερού και είναι η μεγαλύτερη μεταξύ όλων των άλλων κοινών υγρών ουσιών στη φύση.

Οι δεσμοί μεταξύ των μορίων που σπάνε όταν μετατρέπεται μια ουσία (οι περισσότερες από τις φυσικές) από τη στερεά της φάση στην υγρή είναι οι δεσμοί van der Waals. Στην περίπτωση όμως του νερού για να συμβεί αυτό, πρέπει να υπερνικηθούν όχι μόνο οι δυνάμεις van der Waals αλλά και οι δεσμοί υδρογόνου. Στην πραγματικότητα δεν χρειάζεται να σπάσουν όλοι οι δεσμοί υδρογόνου. Αρκεί να σπάσουν αρκετοί, τόσοι που να διαλύσουν τη συμπαγή δομή του πάγου σε μικρότερα κρυσταλλικά συσσωματώματα τα οποία περιβάλλονται από ξεχωριστά μόρια νερού έτσι που τα παγο-κρυσταλλικά συσσωματώματα να κινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο και τελικώς όλη η μάζα να αποκτά χαρακτηριστικά υγρού. Το υγρό νερό, ιδιαίτερα στις χαμηλές θερμοκρασίες κοντά στο σημείο πήξης μπορεί να χαρακτηριστεί ως **ψευδο-κρυσταλλικό υγρό**, καθώς υπάρχουν στη μάζα του πολλά παγο-κρυσταλλικά συσσωματώματα.

Καθώς προσθέτουμε και άλλη θερμότητα πέραν των  $100\text{ cal}$  που απαιτήθηκαν για να μετατραπεί το  $1\text{ g}$  πάγου σε υγρό νερό, παρατηρούμε



τη θερμοκρασία να ανυψώνεται ξανά. Ως γνωστόν απαιτείται 1 cal θερμότητας για να ανυψώσει τη θερμοκρασία 1 g νερού κατά 1 °C. Άρα απαιτούνται 100 cal για να φθάσει το νερό από τους 0 °C στους 100 °C στο σημείο βρασμού. Από το σημείο αυτό πρέπει να προστεθούν άλλα 540 cal θερμότητας χωρίς να παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι το υγρό νερό να μετατραπεί πλήρως σε ατμό. Τα 540 cal αντιπροσωπεύουν τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης.

Και από όλα τα παραπάνω γεννώνται ερωτήματα. Γιατί να απαιτείται τόσο μεγάλο ποσό θερμικής ενέργειας (540 cal) για να μετατραπεί 1 g νερού σε ατμό συγκριτικά με τα 100 cal που χρειάστηκαν για να μετατραπεί η ίδια μάζα πάγου σε νερό; Η εξήγηση έγκειται στο εξής: Για να γίνει ο πάγος υγρό δεν χρειάστηκε να σπάσουν όλοι οι δεσμοί υδρογόνου, αρκούσε να σπάσει ένας αριθμός από αυτούς έτσι που να ελευθερώσουν τους παγοκρυστάλλους από τη συμπαγή δομή τους και να τους επιτρέψουν ελευθερία κίνησης ανάμεσα στα ενδιάμεσα μοναδιαία μόρια του νερού (ρευσιτότητα). Όμως για να μετατραπεί το υγρό σε ατμό, πρέπει όλα τα μόρια του νερού να ελευθερωθούν από κάθε δεσμό υδρογόνου που τα συνέδεε μεταξύ τους και αυτό απαιτεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Ένα αέριο είναι μια κατάσταση της ύλης όπου όλα τα μόριά του κινούνται τυχαία πλήρως ελευθερωμένα από δεσμούς με γειτονικά μόρια εκτός της στιγμής κατά την οποία συγκρούονται.

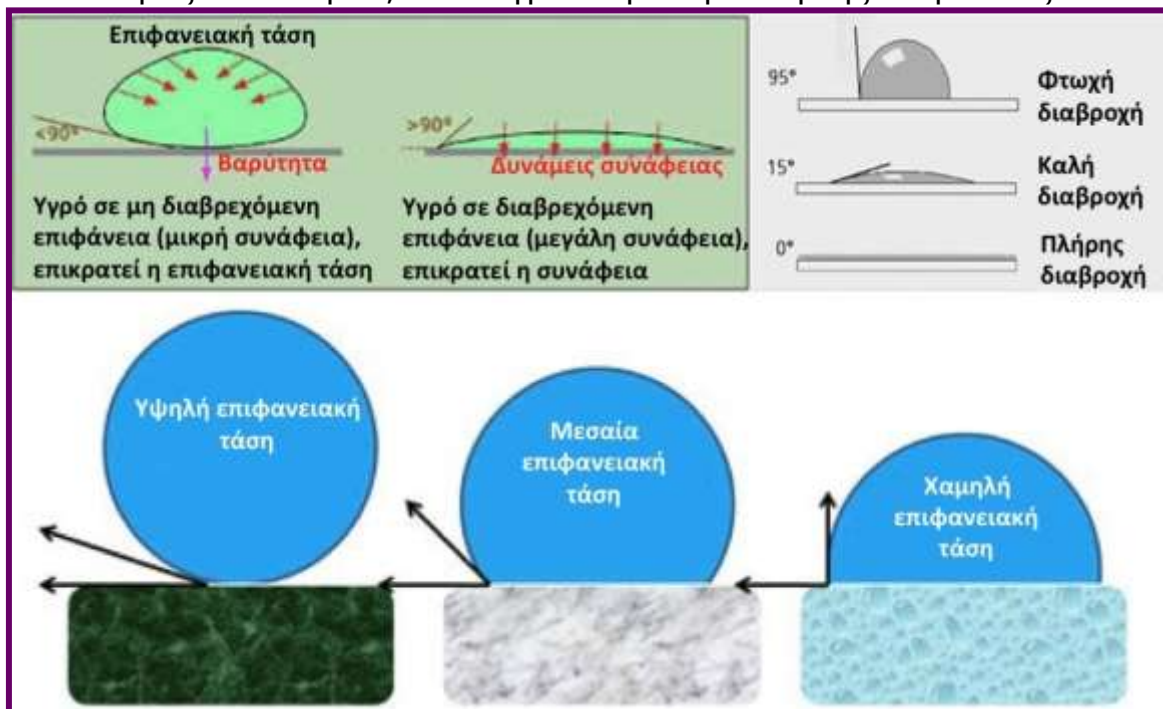
Από τα παραπάνω μπορεί να κατανοηθεί η σπουδαία επίδραση του νερού στη θερμοκρασιακή ισορροπία της Γης, καθώς απαιτούνται μεγάλα ποσά θερμότητας να απορροφηθούν ή να απελευθερωθούν όταν ο νερό αλλάζει φάση, ιδιαίτερα κατά την αλλαγή από υγρό σε αέριο ή το αντίστροφο. Όμως συμβαίνει στη φύση το φαινομενικώς παράδοξο τα επιφανειακά νερά των ωκεανών όπου συμβαίνει σε κολοσσιαία έκταση η αλλαγή από υγρό σε αέριο (εξάτμιση), να διατηρούνται σε σταθερή θερμοκρασία περί τους 20 °C. Το φαινόμενο αυτό έχει την εξήγησή του στην τεράστια μάζα νερού των ωκεανών. Τα μόρια του νερού στην επιφάνεια των ωκεανών απορροφούν θερμότητα από τα γειτονικά τους (45 cal για να μεταβούν από 20 °C στους 100 °C και 540 cal από τους 100 °C σε ατμό, για μάζα αναφοράς 1 g) ώστε να ελευθερωθούν από τους δεσμούς υδρογόνου και να διαφύγουν στην ατμόσφαιρα. Όλη αυτή η θερμότητα βρίσκεται αποθηκευμένη και διασκορπισμένη στην τεράστια μάζα του ωκεανού με την τεράστια θερμοχωρητικότητά του και χρησιμοποιείται τοπικώς και διαρκώς μόνο στο επιφανειακό στρώμα για να προκαλέσει την εξάτμιση. Η εξάτμιση αφαιρεί θερμική ενέργεια που είχε αποθηκευθεί από τον ήλιο στους ωκεανούς και τη μεταφέρει στην ατμόσφαιρα με την ανύψωση των υδρατμών, οι οποίοι κατόπιν την απελευθερώνουν καθώς συμπυκνώνονται και πέπτουν ως κατακρημνίσματα. Ο κύκλος της εξάτμισης-συμπύκνωσης επηρεάζει τα μέγιστα την επιφανειακή θερμοκρασία του πλανήτη μας και μάλιστα ο ρόλος του είναι ιδιαίτερα έντονος στις παράκτιες περιοχές με τους ήπιους χειμώνες και καλοκαίρια που εν γένει τις χαρακτηρίζουν. Όλα εξισορροπούνται και μετριάζονται από την απέραντη θερμοχωρητικότητα

των ωκεανών που αποθηκεύουν την ασύλληπτη ποσότητα ενέργειας που μας στέλνει ο ήλιος.

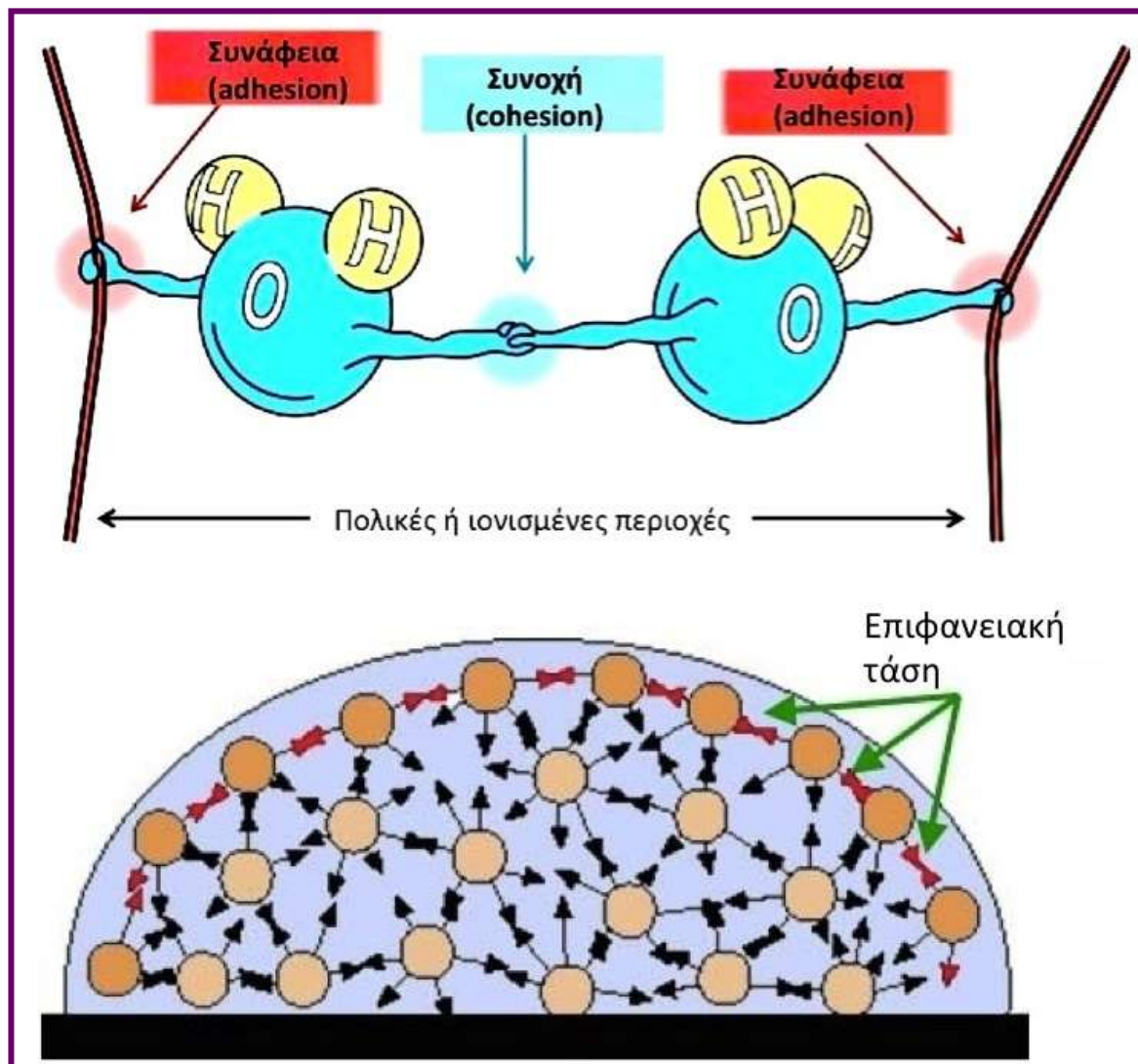
### Δυνάμεις συνοχής και συνάφειας, επιφανειακή τάση του νερού

Από όλα τα υγρά της φύσης μόνο ο υδράργυρος έχει μεγαλύτερη **επιφανειακή τάση** από το νερό. Με απλά λόγια επιφανειακή τάση είναι η ανθεκτικότητα της επιφάνειας ενός υγρού σε δυνάμεις που επιδιώκουν την αναταραχή της. Η συνοχή μεταξύ των μορίων του νερού λόγω των δεσμών υδρογόνου είναι πολύ μεγάλη και ανθίσταται σε φυσικές δυνάμεις που επιδιώκουν το διαχωρισμό τους. Λόγω αυτών των **δυνάμεων συνοχής** το νερό απλώνει ως κυρτή επιφάνεια όταν μια σταγόνα του αφεθεί κάπου ακριβώς επειδή τα ισχυρώς ενωμένα μόριά του συγκρατούνται στο ιδανικότερο σχήμα συνοχής μεταξύ των που είναι η σφαίρα (Σχήματα 33 & 34). Αυτός είναι και ο λόγος που όταν γεμίσουμε εντελώς ένα ποτήρι με νερό (Σχήμα 36) η ελεύθερη επιφάνεια του νερού καμπυλώνει (κυρτώνει).

Τα μόρια της επιφάνειας μη δεχόμενα ελκτικές δυνάμεις από τον υπερκείμενο αέρα παρά μόνο υδρογονικές δυνάμεις έλξης από τα υποκείμενα μόρια, συσσωρεύονται πυκνά στην επιφάνεια και η μεγαλύτερη έλξη των μορίων μεταξύ τους στο επιφανειακό στρώμα και με τα αμέσως αποκάτω τους μόρια, συγκριτικά με τις διαμοριακές έλξεις στην κάτωθι μάζα του νερού, καταλήγει στην κύρτωση της επιφάνειας.



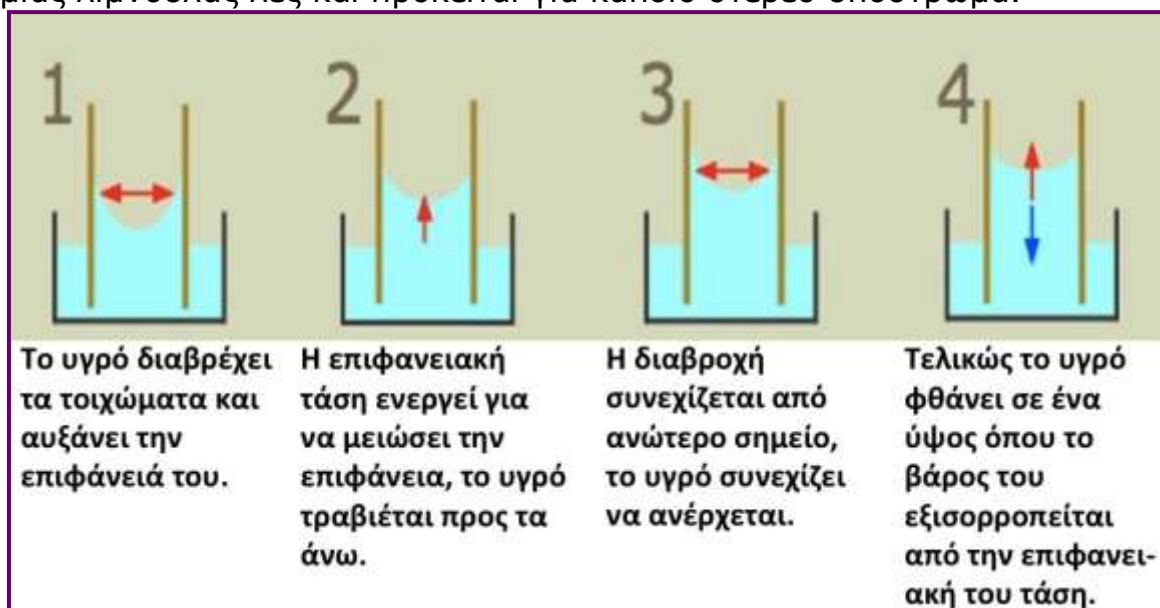
Σχήμα 33. Η μεγάλη επιφανειακή τάση του νερού και η σε συνδυασμό με τη διαφορετική διαβροχή (συνάφεια) διαφόρων επιφανειών διαμόρφωση του σχήματος μιας μικρής μάζας νερού επάνω σε μια επιφάνεια.



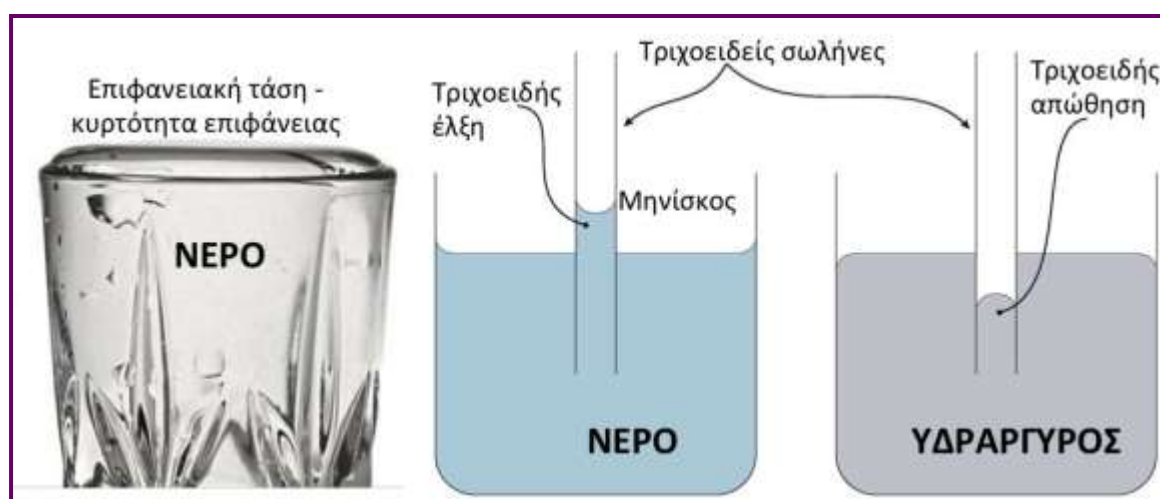
Σχήμα 34. Νοητική απεικόνιση του τι σημαίνει συνοχή και συνάφεια των μορίων του νερού (άνω) και που οφείλεται η καμπυλότητα της επιφάνειας μιας μικρής μάζας νερού επάνω σε μια επιφάνεια (κάτω).

Οι δεσμοί υδρογόνου εκτός από του να προκαλούν τη μεγάλη δύναμη συνοχής του νερού, προκαλούν και τη σχετιζόμενη με τη συνοχή ιδιότητα της **συνάφειας** του νερού με άλλα υλικά (Σχήμα 34). Ετσι όταν το νερό τοποθετείται σε ένα σχετικά στενό γυάλινο κύλινδρο γίνεται εμφανές το φαινόμενο του **μηνίσκου**. Δηλαδή στα σημεία επαφής του νερού με το δοχείο η επιφάνεια ανασηκώνεται ελαφρά σαν να θέλει να μεγιστοποιήσει την επαφή της με τα τοιχώματα (Σχήματα 35 & 36). Αυτό οφείλεται στις δυνάμεις που δημιουργούνται από την έλξη των θετικά φορτισμένων υδρογόνων του μορίου του νερού προς τα μη συνδεδεμένα ηλεκτρόνια των ατόμων του οξυγόνου που αποτελούν μέρος του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το δοχείο. Αυτές οι δυνάμεις σε συνδυασμό με τις δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων του νερού στην επιφάνεια, προκαλούν την χαρακτηριστική κοιλότητα της επιφάνειας του νερού στο φαινόμενο του μηνίσκου. Στις δυνάμεις συνοχής και συνάφειας οφείλεται και η ιδιότητα του νερού να **διαβρέχει** (να "προσκολλάται" καλά) σε

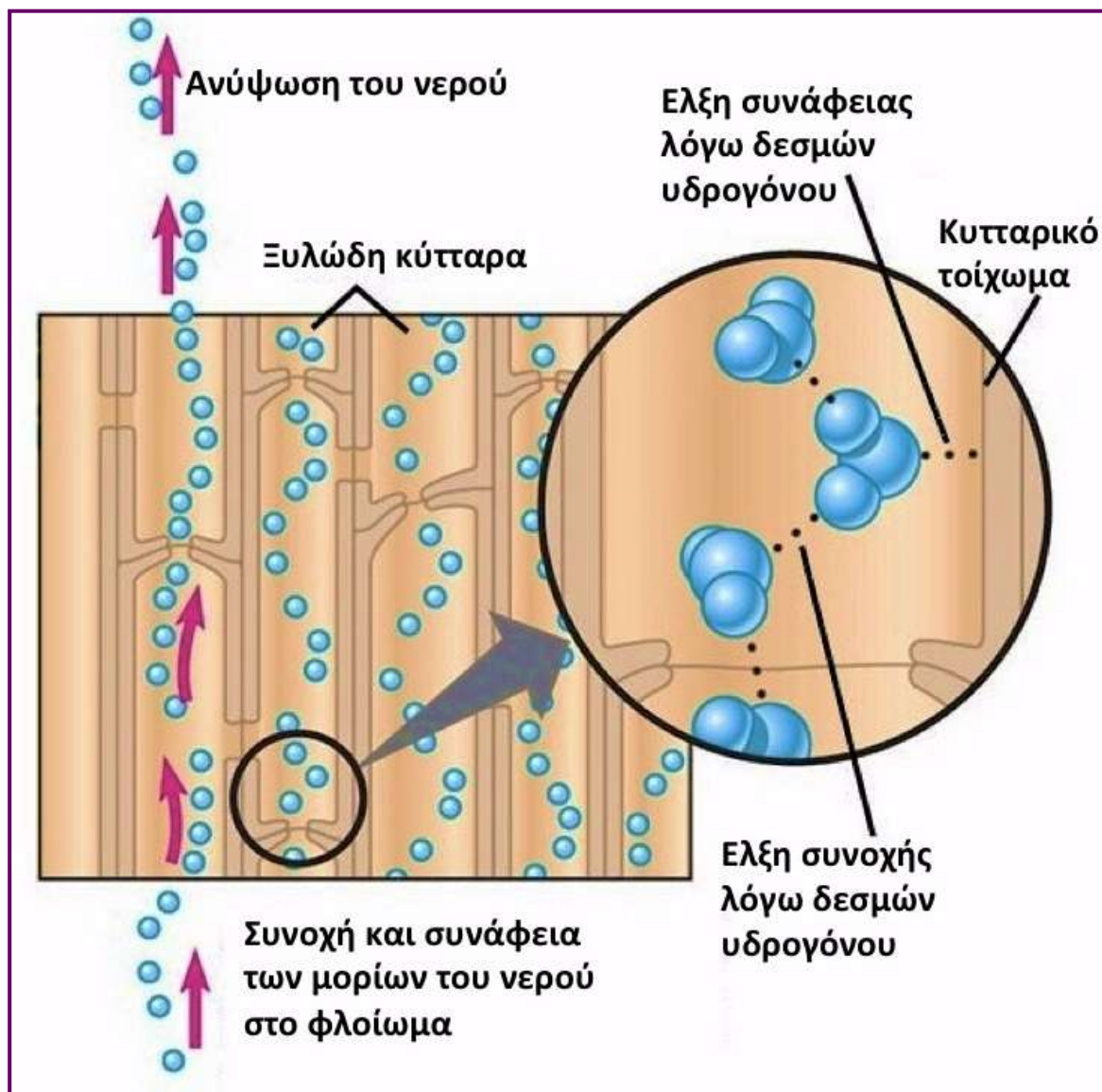
υλικά όπως γυαλί, οργανικές ουσίες, πέτρες, χώμα, κ.λπ. ιδιότητα υψίστης σημασίας για την ανάπτυξη μικροβιοσποικιών. Στις ίδιες δυνάμεις οφείλεται και το **τριχοειδές φαινόμενο** κατά το οποίο τα ενωμένα με δυνάμεις συνοχής μόρια του νερού και συνάμα με δυνάμεις συνάφειας με τα τοιχώματα στενών αγγείων (π.χ. του ξύλου), ανέρχονται στο αγγείο υπερνικώντας τη δύναμη της βαρύτητας (Σχήμα 37). Με αυτό το μηχανισμό το νερό που προσλαμβάνουν οι ρίζες ανέρχεται μέχρι τα φύλλα. Ίσως δεν υπάρχει καλύτερο παράδειγμα συνοψίσης των δυνάμεων που συνέχουν τα μόρια του νερού και καταλήγουν στην επιφανειακή του τάση, από την εικόνα ενός εντόμου που προχωρεί στην ήρεμη επιφάνεια μιας λιμνούλας λες και πρόκειται για κάποιο στέρεο υπόστρωμα.



Σχήμα 35. Ο τρόπος με τον οποίο το νερό ανέρχεται σε ένα σωλήνα μικρής διαμέτρου.



Σχήμα 36. Το φαινόμενο του μηνίσκου στο νερό.



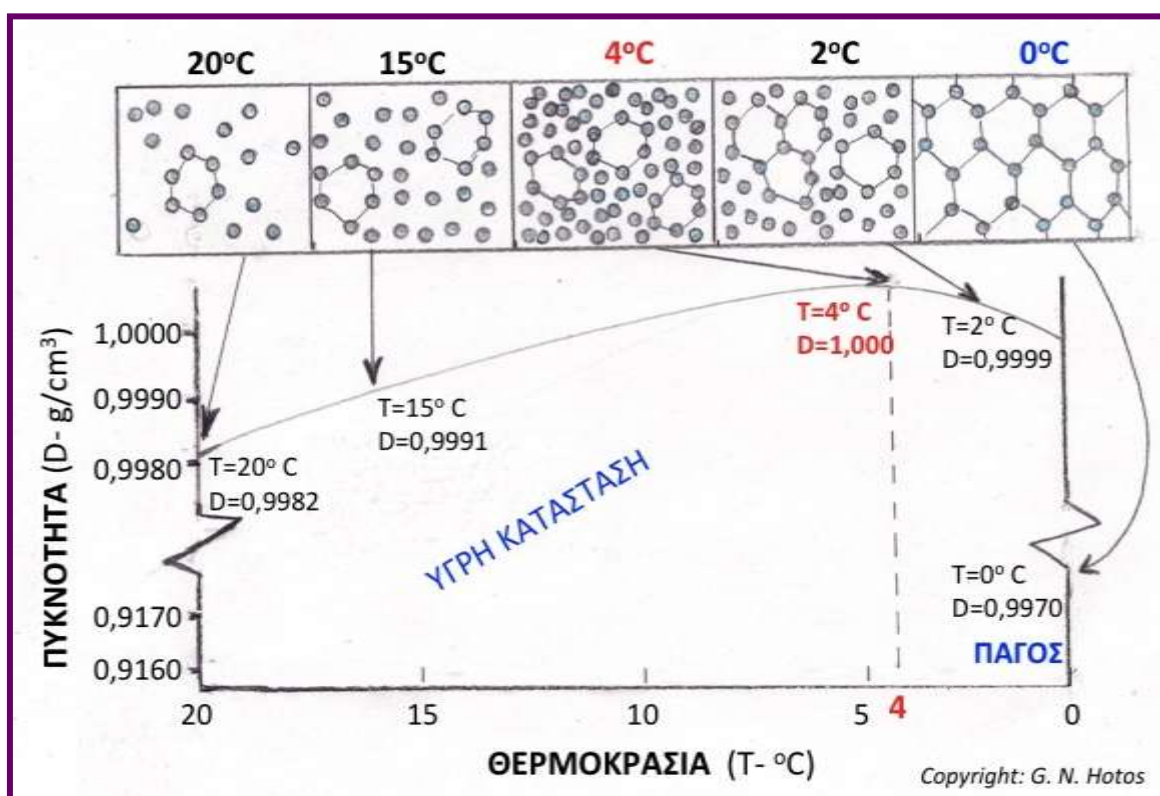
Σχήμα 37. Η ανύψωση-μεταφορά του νερού στο φλοιώμα των φυτών λόγω των δυνάμεων συνοχής των μορίων του και συνάφειας με τα τοιχώματα.

### Πυκνότητα του νερού

Η πυκνότητα του νερού στις διάφορες καταστάσεις του και ανάλογα με τη θερμοκρασία, καθορίζει τις μετακινήσεις της μάζας του στις φυσικές υδατοσυλλογές, λίμνες ή ωκεανούς. Ως **πυκνότητα** ορίζεται η μάζα που καταλαμβάνει αυτό το σώμα όταν περιέχεται σε μια μονάδα όγκου και πιο συγκεκριμένα:  $\text{g/cm}^3$ . Μια ουσία πυκνότερη από το νερό θα βυθίζεται και μια ελαφρύτερη θα επιπλέει. Η πυκνότητα επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και την αλατότητα. Κανονικά όπως συμβαίνει στις περισσότερες ουσίες, η μείωση της θερμοκρασίας παράγει αύξηση στην πυκνότητα της ουσίας επειδή ο ίδιος αριθμός μορίων της καταλαμβάνει λιγότερο χώρο καθώς έχασαν κινητική ενέργεια. Και στο νερό συμβαίνει αυτό αλλά εν μέρει. Στην περίπτωση του νερού όσο η θερμοκρασία του μειώνεται, η πυκνότητά του αυξάνεται, αλλά αυτό συμβαίνει μέχρι η θερμοκρασία να πέσει στους  $4\text{ }^\circ\text{C}$ . Αν η θερμοκρασία συνεχίζει να

μειώνεται, τότε από τους 4 °C μέχρι τους 0 °C η πυκνότητά του μειώνεται (Σχήμα 38).

Η παραπάνω (φαινομενικώς) «ανωμαλία» στη μεταβολή της πυκνότητας του νερού οφείλεται στη μοριακή του αρχιτεκτονική και στους δεσμούς υδρογόνου μεταξύ των μορίων του. Όταν η θερμοκρασία 1 g νερού μειώνεται από π.χ. τους 20 °C, τότε η μείωση της θερμικής ενέργειας που εμπεριέχεται στη μάζα του αντανακλάται στη μείωση της κινητικότητας των μορίων του (λιγότερη κινητική ενέργεια) και τα μη δεσμευμένα (με δεσμούς υδρογόνου) από αυτά καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται από τους 4 °C και προσεγγίζει το σημείο πήξης 0 °C, η μείωση στον όγκο του που οφείλεται στη μείωση της ενέργειας των αδέσμευτων μορίων του, αντισταθμίζεται από ένα άλλο φαινόμενο που αρχίζει να μεγεθύνεται. Οι ολοένα και περισσότερο σχηματιζόμενοι κρύσταλλοι πάγου που έχουν εξαεδρικό σχήμα και καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο με λιγότερα μόρια νερού στη δομή τους συγκριτικά με τα μη συμμετέχοντα σε κρυστάλλους μόρια, επικρατούν σταδιακώς. Τελικώς ο πάγος που σχηματίζεται στους 0 °C αποτελείται ολοκληρωτικώς από κρυστάλλους και έχει τη μικρότερη πυκνότητα, συνεπώς επιπλέει στο πυκνότερο υγρό νερό. Οι ιδιότητες του νερού και η βιολογική τους σημασία συνοψίζονται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 38. Η πυκνότητα του νερού στις διάφορες θερμοκρασίες και παραστατική νοητική απεικόνιση των διαφόρων καταστάσεων συνωστισμού των μορίων του εξαιτίας της κινητικής τους κατάστασης.

Πίνακας 1. Οι φυσικές ιδιότητες του νερού και η σημασία τους για τη ζωή.

| <b>Ιδιότητα</b>  | <b>Βιολογική σημασία</b>  |
|--|---|
| <b>Φυσική κατάσταση.</b> Το νερό είναι η μοναδική ουσία που ανευρίσκεται ως αέριο, υγρό ή στερεό στο θερμοκρασιακό εύρος της γήινης επιφάνειας.  | Ως αέριο (υδρατμοί) της ατμόσφαιρας μεταφέρει θερμότητα από θερμές (χαμηλά γεωγραφικά πλάτη) προς τις ψυχρές (υψηλά πλάτη) περιοχές της Γης.<br>Ως υγρό κυλά στη Γη διαλύοντας ανόργανα στοιχεία των πετρωμάτων μεταφέροντάς τα στη θάλασσα. Μεταφέρει θερμότητα μέσω των ωκεάνιων ρευμάτων. Αποτελεί πλέον του 85 % της ζωντανής μάζας και είναι το μέσο μέσα στο οποίο συμβαίνουν οι χημικές αντιδράσεις της ζωής.<br>Η μετατροπή του σε πάγο το χειμώνα στα ανώτερα γεωγραφικά πλάτη αυξάνει την επιφανειακή αλατότητα βοηθώντας έτσι τη βύθιση του βαρύτερου πλέον επιφανειακού και καλά οξυγονωμένου νερού το οποίο αποτελεί τη μόνη προμήθεια οξυγόνου για τα βάθη των ωκεανών. |
| <b>Διαλυτική ικανότητα.</b> Μπορεί να διαλύει περισσότερες ουσίες από κάθε άλλο υγρό.  | Το νερό των ωκεανών μεταφέρει διαλυμένα τα θρεπτικά που απαιτούνται για τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς και το οξυγόνο για την αναπνοή των ζώων. Διάλυση άλατος-αλατότητα.   |
| <b>Θερμοχωρητικότητα.</b> Έχει τη μεγαλύτερη μεταξύ όλων των κοινών υγρών.   | Εξαιτίας της θερμοχωρητικότητάς του είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας σταθερότητας του κλίματος. Ιδιαίτερα για τους ωκεανούς είναι η αιτία για το στενό θερμοκρασιακό εύρος των νερών τους σε κάθε τοποθεσία. Το νερό μπορεί να κερδίσει ή να χάσει μεγάλα ποσά θερμότητας χωρίς να αλλάξει πολύ η θερμοκρασία του, κάνοντάς το έτσι τον καλύτερο «μονωτή» για την ωκεάνια ζωή.   |
| <b>Λανθάνουσα θερμότητα πήξης.</b> Η θερμότητα που αποκτάται ή χάνεται από 1 g ουσίας που μεταβαίνει από στερεό σε υγρό ή το αντίστροφο χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας του. Για το νερό είναι 80 cal, η μεγαλύτερη από όλες τις ουσίες.                                 | Όταν σχηματίζεται πάγος το νερό χάνει θερμική ενέργεια προς την ατμόσφαιρα και μετριάζει το κρύο της. Όταν λιώνει ο πάγος απορροφάται ενέργεια από το πέριξ νερό. Αυτά τα φαινόμενα αποτρέπουν τους ωκεανούς των υψηλότερων γεωγραφικών πλατών να γίνουν θερμότεροι ή ψυχρότεροι από την -1,8 °C θερμοκρασία πήξης (παγοποίησης).   |
| <b>Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης.</b> Η θερμότητα που αποκτάται ή χάνεται από 1 g ουσίας που μεταβαίνει από υγρό σε αέριο ή το αντίστροφο χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας του. Για το νερό είναι 540 cal στη θερμοκρασία βρασμού του (100 °C) η μεγαλύτερη από όλες τις | Μεγάλα ποσά περίσσειας θερμικής ενέργειας αφαιρούνται από τους ωκεανούς των κατώτερων γεωγραφικών πλατών με την εξάτμιση και απελευθερώνονται ως κατακρημνίσματα στην ψυχρότερη ατμόσφαιρα των υψηλότερων γεωγραφικών πλατών. Αυτό το φαινόμενο συμβάλλει στο να μην γίνονται υπερβολικά ψυχρότεροι οι πόλοι, ούτε υπερβολικά θερμοί οι περιοχές στον ισημερινό.  |

ουσίες και 585 cal από τη θερμοκρασία των 20 °C, θερμοκρασία όπου συμβαίνει η περισσότερη από την εξάτμιση στην επιφάνεια των ωκεανών.

**Επιφανειακή τάση.** Υψηλότερη από όλα τα κοινά υγρά. Οι δυνάμεις συνοχής από τους δεσμούς υδρογόνου δημιουργούν στην επιφάνεια μια συνεκτική «επιδερμίδα» με πάχος ενός μορίου. Δημιουργεί τριχοειδή φαινόμενα.

Οργανισμοί όπως το *Halobates* χρησιμοποιούν αυτή την «επιδερμίδα» ως επιφάνεια βάδισης. Άλλοι όπως το *Glaucus* κρέμονται από κάτω της.

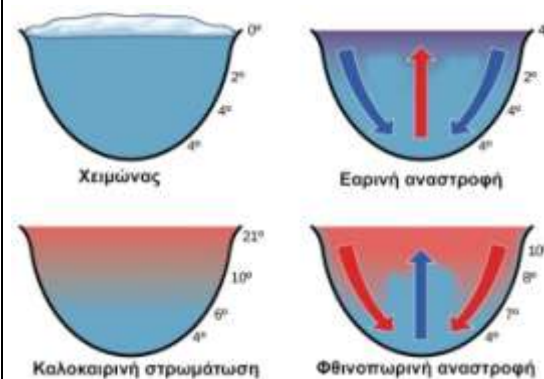


**Πυκνότητα.** Ορίζεται ως μάζα/όγκο ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Η πυκνότητα αυξάνεται με την αύξηση της αλατότητας και της πίεσης και με τη μείωση της θερμοκρασίας. Για το αποσταγμένο νερό η μέγιστη πυκνότητα παρουσιάζεται στους 4 °C.



Το πλαγκτόν που βρίσκεται στην επιφανειακή ζώνη με τη βοήθεια της επίπλευσης και του ιξώδους του νερού επηρεάζεται από την επίδραση της θερμοκρασίας στο νερό. Στο χαμηλότερης πυκνότητας θερμό νερό το πλαγκτόν πρέπει να είναι μικροσκοπικότερο και με αποφύσεις έτσι ώστε να αυξάνει το λόγο επιφάνεια / όγκο των κυττάρων του για να μειώνει το ρυθμό βύθισής του.

Στις λίμνες των ψυχρών περιοχών, το χειμώνα δεν παγώνει όλη η μάζα τους παρά μόνο η επιφάνεια, με τον πάγο που σχηματίζεται να καταλαμβάνει ως ελαφρύτερος μόνο το επιφανειακό στρώμα αφήνοντας υγρά τα κατώτερα και βαρύτερα στρώματα με τη ζωή που αυτά φιλοξενούν. Κατόπιν με την άνοδο της θερμοκρασίας την άνοιξη η θερμική αναστροφή αναμιγνύει όλη τη μάζα.





**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Στα παρακάτω διαχρονικά συγγράμματα ο αναγνώστης μπορεί να εντρυφήσει σε βάθος για τα όσα αναφέρθηκαν στο παρόν.

Bearman, G. (ed.). (1989). *The ocean basins: Their structure and evolution*. Pergamon Press. ISBN: 0-08-036366-0. 171 pages.

Berg, M. J., Tymoczko, L.J. & L. Stryer. (2002). *Biochemistry* (vol. I & II). Freeman & Company.

Cambell, A. N. (1990). *Biology*. Benjamin/Cummings Publishing Co. ISBN: 0-8053-1800-3. 1165 pages.

Parsons, R. T., Takahashi, M. & B. Hargrave. (1984). *Biological Oceanographic Processes*. Pergamon Press. ISBN: 0-08-030766-3. 330 pages.

Sienko, J. M. & R. A. Plane. (1979). *Chemistry: Principles and applications*. McGraw Hill. ISBN: 0-07-057321-2. 691 pages.

Thurman, V. H. & H. H. Webber. (1984). *Marine Biology*. Bell & Howell Co. ISBN: 0-675-20139-X. 445 pages.