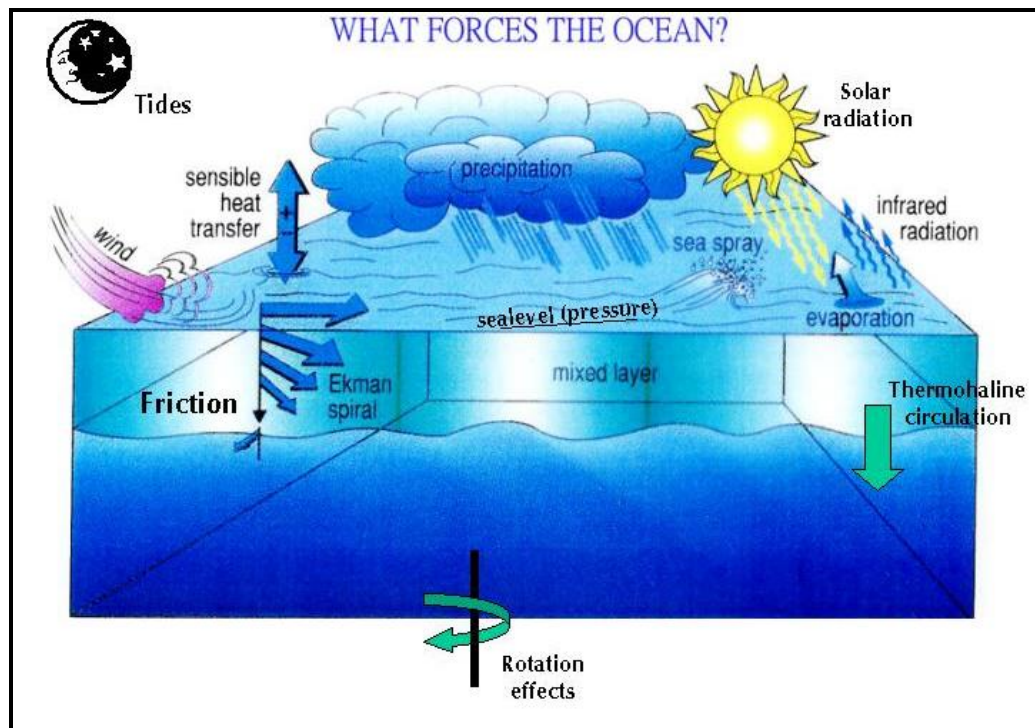


ΦΥΣΙΚΗ ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΑ

Γεώργιος Συλαίος, Καθηγητής ΔΠΘ
Κόκκος Νικόλαος, Διδάκτωρ ΔΠΘ



ΞΑΝΘΗ 2019

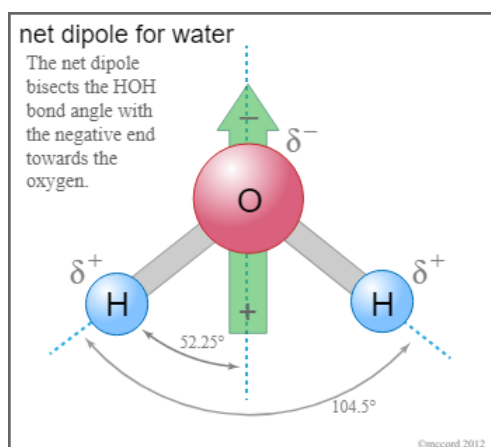
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ

1. Διερευνώντας την Ηλεκτρική Πολικότητα του Νερού

Το θαλασσινό νερό είναι ένα σύνθετο διάλυμα διαλυμένων μετάλλων, ιχνοστοιχείων και αλάτων. Αποτελείται από καθαρό νερό κατά 96,5% και άλατα, διαλελυμένα αέρια, οργανικές ουσίες και αιωρούμενα στερεά κατά 3,5% κατά βάρος. Η φύση του ωκεάνιου νερού είναι όμοια με αυτή του απεσταγμένου νερού, με τη μόνη διαφορά ότι η σύσταση του ωκεάνιου νερού μεταβάλλεται από: (1) την επίδραση των θαλάσσιων οργανισμών στο νερό, και (2) την επίδραση των γεωλογικών σχηματισμών που περιβάλλουν τον Παγκόσμιο Ωκεανό.

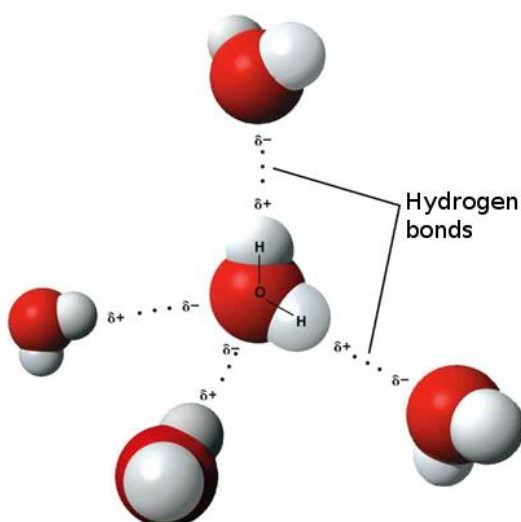
Το νερό είναι η μόνη ουσία στο πλανήτη Γη που βρίσκεται **ταυτόχρονα και στις τρεις φάσεις της ύλης**, δηλ. τη στερεά (με τη μορφή του πάγου), την υγρή (με τη μορφή του νερού) και την αέρια (με τη μορφή των υδρατμών). Η χημική σύσταση του νερού του προσδίδει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και μοναδικές ιδιότητες που θα μελετήσουμε στη συνέχεια. Το νερό αποτελείται από δύο άτομα θετικά φορτισμένου υδρογόνου (τοποθετημένα σε γωνία 105° μεταξύ τους) και ένα μόνο άτομο αρνητικά φορτισμένου οξυγόνου. Τα άτομα οξυγόνου και υδρογόνου συγκρατούνται στο μόριο νερού από τις **ηλεκτροστατικές δυνάμεις van der Waals**.



Σχήμα 1.1. Διάταξη ατόμου οξυγόνου (O) και δύο ατόμων υδρογόνου (H) στο μόριο νερού. Η γωνία μεταξύ των θετικά φορτισμένων ατόμων είναι 105° , η οποία είναι πολύ κοντά στη γωνία ενός τετραέδρου.

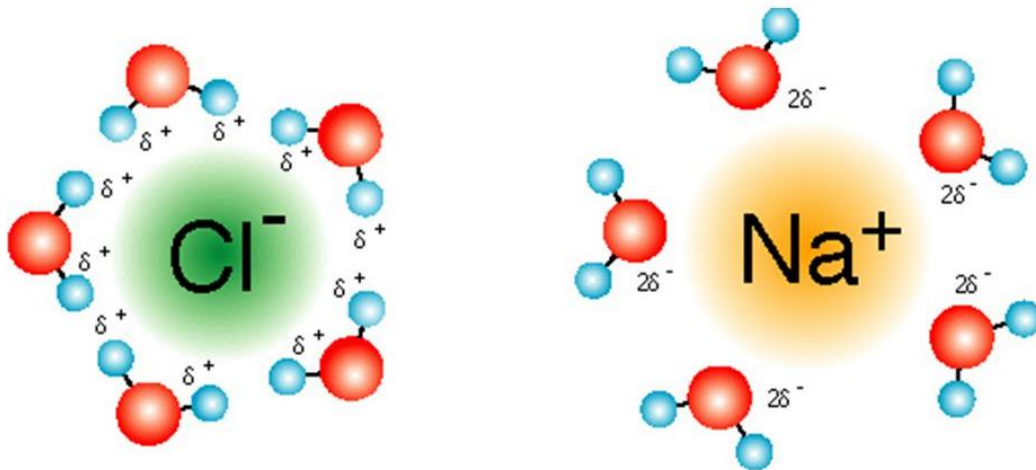
Τα ηλεκτρόνια των ατόμων υδρογόνου βρίσκονται τοποθετημένα ελαφρά προς τη πλευρά του ατόμου οξυγόνου, αφήνοντας τα πρωτόνια των ατόμων υδρογόνου μερικώς εκτεθειμένα. Η διάταξη αυτή έχει σαν αποτέλεσμα το μόριο του νερού να παρουσιάζει ελαφρά **ηλεκτρική πολικότητα (electric polarization)** και να συμπεριφέρεται σαν **ηλεκτρικό δίπολο (electric dipole)** (Σχήμα 1.1).

Αποτέλεσμα της πολικότητας του μορίου του νερού είναι ότι όταν μόρια νερού βρεθούν σε κοντινή απόσταση τείνουν να συνδεθούν μεταξύ τους αναπτύσσοντας ένα **δεσμό υδρογόνου (hydrogen bond)** ο οποίος συνδέει τα αντίθετα φορτισμένα ιόντα. Η διπολική φύση του νερού του δίνει τη δυνατότητα **πολυμερισμού**, δηλ. την αλληλοεπίδραση πέντε τουλάχιστον μορίων νερού σε μία ενιαία τετραεδρική διάταξη (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2. Ανάπτυξη δεσμού υδρογόνου μεταξύ των μορίων νερού.

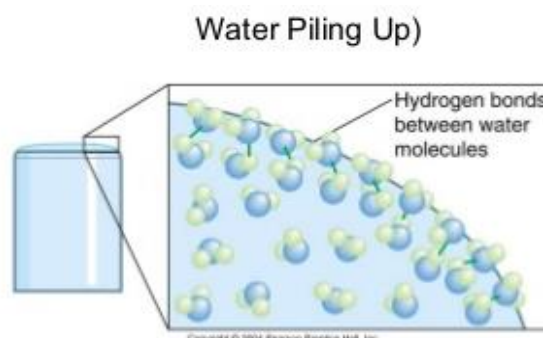
Αυτή η μοριακή πολικότητα έχει σαν αποτέλεσμα την **υψηλή διηλεκτρική σταθερά (high dielectric constant)** του νερού (δηλ. την δυνατότητα να αντιστέκεται σε εφαρμοζόμενα ηλεκτρικά πεδία), και την υψηλή διαλυτική ικανότητα. Το νερό έχει **υψηλή διαλυτική ικανότητα (high dissolving capacity)**, δηλ. είναι ικανό να διαλύει τις περισσότερες ουσίες από κάθε άλλο υγρό. Σαν αποτέλεσμα, οι διαλυμένες ουσίες, αυξάνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού. Η ιδιότητά του αυτή επεξηγεί την μεγάλη παρουσία αλάτων στον ωκεανό (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3. Το χλωριούχο νάτριο (NaCl) είναι το κύριο συστατικό του άλατος στο νερό.

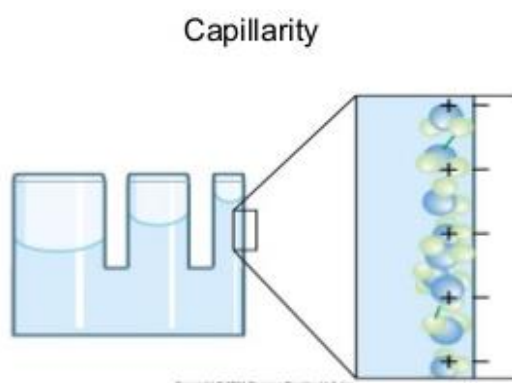
Το διάγραμμα δείχνει πως στην ένυδρη μορφή του προκαλεί τα μόρια του νερού να έλκονται μεταξύ τους, π.χ., τα θετικά φορτισμένα υδρογόνο-κατιόντα με τα χλωρο-ιόντα και με τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα οξυγόνου με τα θετικά ιόντα νατρίου.

Ένα σημαντικό ποσό ενέργειας καταναλώνεται στη σύνδεση των μορίων αυτών, γεγονός που εξηγεί την ικανότητα του ωκεανού να απορροφά θερμική ενέργεια την οποία δύσκολα αποδίδει στο περιβάλλον. Στις αλυσίδες αυτές μπορούν να διεισδύσουν θετικά φορτισμένα ιόντα Na^+ και αρνητικά φορτισμένα ιόντα Cl^- δημιουργώντας το αλμυρό νερό των ωκεανών. Η αλυσιδωτή αυτή δομή των μορίων νερού του δίνει πολύ **αυξημένη επιφανειακή τάση (high surface tension)**, η οποία εμφανίζεται στην επιφάνεια του ωκεανού με τη μορφή μικροκυματώσεων (ripples) των οποίων η γενεσιουργός δύναμη είναι η τριβή μεταξύ αέρα και νερού (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4. Προσανατολισμός αλυσίδων μορίων νερού στην επιφάνεια, ώστε να οριοθετηθεί η διεπιφάνεια νερού - αέρα. Παρατηρούμε ότι η επιφάνεια του νερού σε δοχεία μεγάλου πλάτους είναι κυρτή.

Σε δοχεία μικρότερης διατομής, η διεπιφάνεια νερού – αέρα είναι κοίλη καθώς τα θετικά φορτισμένα άτομα υδρογόνου προσανατολίζονται προς τα τοιχώματα του δοχείου και έλκονται από το αρνητικά φορτισμένο γυαλί (Σχήμα 1.5).

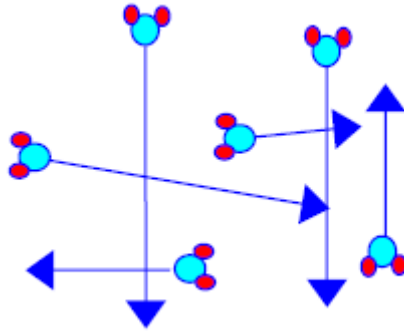


Σχήμα 1.5. Συμπεριφορά νερού σε δοχεία μικρότερης διατομής όπου η επιφανειακή τάση ορίζει μία κοίλη διεπιφάνεια νερού – αέρα.

Γενικά, η επιφανειακή τάση είναι μία ιδιότητα του νερού που χαρακτηρίζει την τάση του να συμπεριφέρεται σαν μία «τεντωμένη μεμβράνη» στην επιφάνειά του. Η επιφανειακή τάση είναι υπεύθυνη για την **τριχοειδή δράση** του νερού, δηλαδή την τάση του να ανέρχεται στο εσωτερικό στενών σωλήνων καθώς και να εισχωρεί σε μικρά ανοίγματα στο έδαφος ή στις ίνες μίας χαρτοπετσέτας.

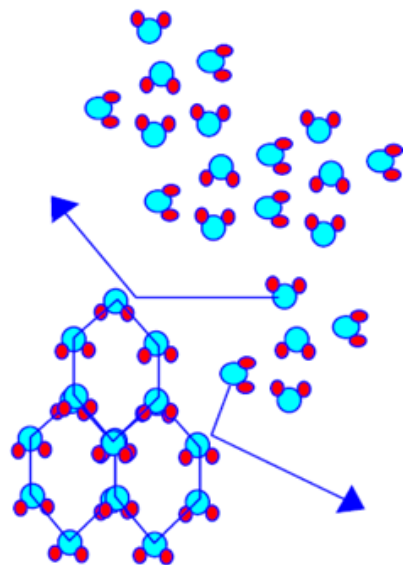
2. Από τον Πάγο στο Νερό και τους Υδρατμούς

Όπως είπαμε το νερό είναι η μόνη χημική ένωση που απαντάται στην Γη σε τρεις φάσεις: αέρια, υγρή και στερεή. Όταν το νερό βρίσκεται στην αέρια φάση, με την μορφή υδρατμών, τότε η εσωτερική ενέργεια κάθε μορίου νερού υπερβαίνει την επίδραση των δεσμών υδρογόνου (Σχήμα 1.6). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα μόρια υδρατμών να κινούνται προς διάφορες κατευθύνσεις με ελάχιστη αλληλεπίδραση (έλξη ή απώθηση) λόγω των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διπόλου του νερού, όπως αναλύθηκαν παραπάνω. Η ταχύτητα κίνηση των μορίων είναι ανάλογη της θερμοκρασίας τους. Σε περίπτωση σύγκρουσης μορίων υδρατμών, τότε διασπώνται στα μεταξύ τους ιόντα.



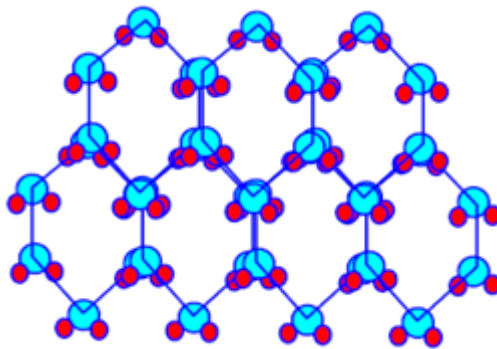
Σχήμα 1.6. Κινήσεις μορίων υδρατμού με τυχαίο τρόπο και χωρίς μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις.

Συμπύκνωση (Condensation) είναι η διεργασία μετατροπής της αέριας σε υγρή φάση. Όταν οι υδρατμοί ψυχθούν τα μόρια τους αποκτούν χαμηλότερα επίπεδα ενέργειας. Τότε κινούνται πιο κοντά μεταξύ τους με αποτέλεσμα οι δεσμοί υδρογόνου να γίνονται σημαντικοί και να επιδρούν στα μόρια. Η συμπύκνωση ξεκινά να συμβαίνει σε θερμοκρασία 100°C, όταν είμαστε στο επίπεδο της θάλασσας. Μόλις οι υδρατμοί συμπυκνωθούν, το νερό αλλάζει φάση και περνά από την αέρια στην υγρή. Τα μόρια προσανατολίζονται με βάση τους δεσμούς υδρογόνου. Κατά βάση επικρατούν δύο διατάξεις μορίων νερού: α) αυτή η οποία χαρακτηρίζεται από χαλαρή δομή, που επικρατεί στο εσωτερικό της υδάτινης στήλης, και β) η δομημένη διάταξη, στην οποία αναπτύσσονται αλυσίδες δεσμών υδρογόνου και εμφανίζεται στην επιφάνεια της θάλασσας (Σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.7. Διατάξεις μορίων νερού (σε υγρή φάση), στο εσωτερικό της υδάτινης στήλης (άνω σχήμα), στην επιφάνεια της θάλασσας (κάτω σχήμα).

Κατά την ψύξη του νερού κάτω από τους 0°C αυτό περνά στην στερεή φάση και μετατρέπεται σε πάγο. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται συνεχώς η εσωτερική ενέργεια των μορίων για να κινηθούν ελεύθερα περιορίζεται, οπότε αυτά διατάσσονται σε αλυσίδες εξαγώνων. Οι δεσμοί υδρογόνου παίζουν τον πλέον σημαντικό ρόλο σε αυτές τις διατάξεις, καθώς συγκρατούν τα μόρια νερού σε αυτές τις διατάξεις. Καθώς στις διατάξεις των εξαέδρων οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων είναι αυξημένες, ο αριθμός των μορίων νερού ανά μονάδα όγκου πάγου είναι συγκριτικά μικρότερος από τον αντίστοιχο αριθμό μορίων ανά μονάδα όγκου νερού σε υγρή φάση (Σχήμα 1.8). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η μάζα ανά μονάδα όγκου στον πάγο να είναι μικρότερη της αντίστοιχης μάζας ανά μονάδα όγκου του νερού, οπότε **η πυκνότητα του πάγου είναι χαμηλότερη αυτής του νερού**. Αυτός είναι ο λόγος που ο πάγος επιπλέει του νερού στη θάλασσα.



Σχήμα 1.8. Εξαγωνική διάταξη μορίων νερού στο πάγο, υπό την επίδραση δεσμών υδρογόνου.

3. Κύριες Θερμικές Ιδιότητες Νερού

Οι κύριες θερμικές ιδιότητες του νερού συνοψίζονται παρακάτω:

Το νερό διαθέτει υψηλή θερμοχωρητικότητα (Heat Capacity) η οποία οφείλεται στη παρουσία των δεσμών υδρογόνου. Η θερμοχωρητικότητα εκφράζει την θερμότητα που χρειάζεται ένα σώμα για θερμανθεί ή να ψυχθεί και εκφράζει την ικανότητα του σώματος να αποθηκεύει θερμότητα κατά την θέρμανσή του. Η θερμοχωρητικότητα ορίζεται ως η μεταβολή της θερμικής ενέργειας ενός σώματος ως προς την μεταβολή της θερμοκρασίας του. Δηλαδή:

$$C = \frac{\Delta E}{\Delta T} \quad (1.1)$$

όπου ΔE η μεταβολή της θερμικής ενέργειας και ΔT η μεταβολή της θερμοκρασίας που παράγεται ως αποτέλεσμα της αλλαγής της θερμικής ενέργειας.

Η θερμοχωρητικότητα C έχει μονάδες $\text{Joule}/^\circ\text{C}$ ή $\text{Joule}/^\circ\text{K}$.

Ως **ειδική θερμοχωρητικότητα ή ειδική θερμότητα (specific heat)** σε συνθήκες σταθερής πίεσης C_p ορίζεται η θερμική ενέργεια που απαιτείται να αποδοθεί σε ένα σώμα μάζας 1 kg για να ανυψωθεί η θερμοκρασία του κατά 1°C . Ουσιαστικά το γινόμενο της ειδικής θερμότητας επί την μάζα είναι η θερμοχωρητικότητα. Το νερό διαθέτει την υψηλότερη ειδική θερμότητα, άρα και θερμοχωρητικότητα από όλα τα στερεά και υγρά σώματα, με την εξαίρεση της υγρής αμμωνίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νερό να έχει την δυνατότητα να απορροφά μεγάλες ποσότητες θερμότητας από το περιβάλλον προκαλώντας περιορισμένη αύξηση της θερμοκρασίας του. Για το λόγο αυτό η θάλασσα δεν εμφανίζει τις απότομες μεταβολές στη θερμοκρασία της που εμφανίζει η ατμόσφαιρα. Η ειδική θερμότητα σε συνθήκες σταθερής πίεσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C_p = \frac{Q}{m \times \Delta T} \quad (1.2)$$

Συνεπώς, οι διαστάσεις της ειδικής θερμότητας είναι ενέργεια ανά μονάδα μάζας και ανά βαθμό θερμοκρασιακής μεταβολής. Οι μονάδες ειδικής θερμότητας στο σύστημα SI είναι $\text{J}/(^\circ\text{K kg})$.

Έστω μία μάζα νερού βρίσκεται στους 20°C τότε η θερμότητα που απαιτείται για να μεταβάλλουμε την θερμοκρασία της κατά 1°C (ή αντίστοιχα 1°K) είναι $4182 \text{ J}/(^\circ\text{K kg})$. Ωστόσο, η ειδική θερμότητα μεταβάλλεται σημαντικά με την θερμοκρασία, με αποτέλεσμα ο πάγος να έχει $C_p = 2093 \text{ J}/(^\circ\text{K kg})$, δηλ. σχεδόν την μισή τιμή αυτής του νερού. Αντίστοιχα, η ειδική θερμότητα του αέρα είναι $1006 \text{ J}/(^\circ\text{K kg})$ και του ξηρού εδάφους είναι μόλις $800 \text{ J}/(^\circ\text{K kg})$.

Οι συνέπειες των παραπάνω είναι: α) Η ηλιακή ακτινοβολία διεισδύει βαθύτερα στο νερό από ότι στο έδαφος, β) Καθώς το νερό είναι ρευστό, η θέρμανσή του προκαλεί οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις υδάτινων μαζών, άρα **θαλάσσια ρεύματα θερμότητας**, γ) Η εξάτμιση νερού από την θάλασσα είναι πολύ πιο αυξημένη σε σχέση με την εξάτμιση εδαφικού νερού, δ) Η εξάτμιση νερού στη θάλασσα μειώνει την θερμοκρασία του νερού στην θάλασσα, ε) Η θάλασσα έχει μεγαλύτερη

θερμοχωρητικότητα από το έδαφος (σχεδόν πενταπλάσια), στ) Κατά το καλοκαίρι η ξηρά είναι πολύ θερμότερη από την θάλασσα, ενώ κατά τον χειμώνα η ξηρά είναι πολύ ψυχρότερη από την θάλασσα. Γενικά, η ξηρά (έδαφος) έχει υψηλές εποχικές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ενώ ο ωκεανός έχει χαμηλή εποχική θερμοκρασιακή διακύμανση.

Το νερό διαθέτει υψηλά Σημεία Στερεοποίησης και Βρασμού, τα οποία ορίζουν το άνω και κάτω όριο της κλίμακας Κελσίου.

0°C → Σημείο Στερεοποίησης (Freezing Point)

100 °C → Σημείο Βρασμού (Boiling point)

Το νερό διαθέτει υψηλή Λανθάνουσα Θερμότητα Υγροποίησης και Εξάτμισης. Η θερμότητα (μορφή ενέργειας) μετριέται σε **θερμίδες (calories) ή Joules**. Υπάρχουν δύο είδη θερμότητας στο εσωτερικό μιας μάζας νερού: α) η **αισθητή θερμότητα** (sensible heat), η οποία όταν ανταλλάσσεται με το περιβάλλον μεταβάλλει την θερμοκρασία του σώματος, και β) η **λανθάνουσα θερμότητα** (latent heat), η οποία όταν προσδίδεται σε ένα σώμα οδηγεί στην αλλαγή της φάσης του αλλά όχι στην αλλαγή της θερμοκρασίας του.

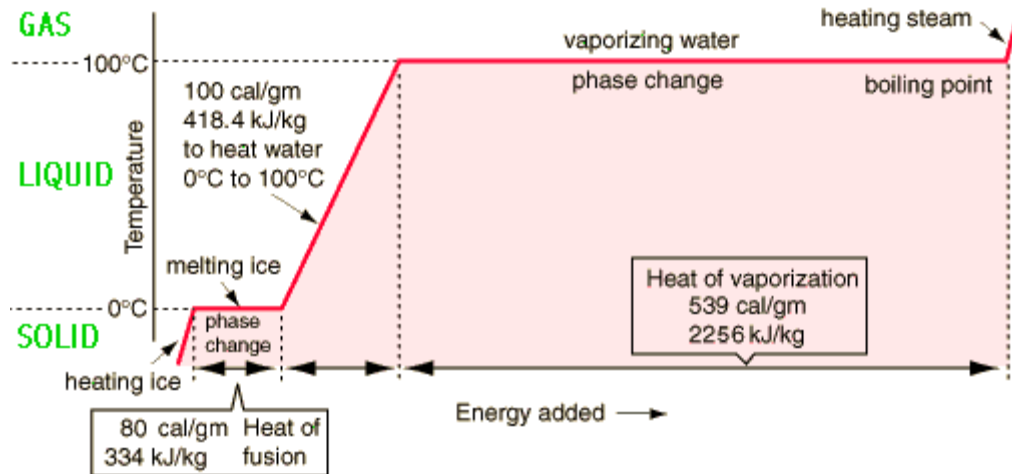
Η μέτρηση της θερμοκρασίας μίας υδάτινης μάζας εκφράζει την εσωτερική θερμότητά της. Για παράδειγμα, αν της προσδώσουμε επιπλέον εσωτερική θερμότητα τότε η θερμοκρασία της θα αυξηθεί. Η λανθάνουσα θερμότητα δεν χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμοκρασίας της. **Χρησιμοποιείται μόνο για να διασπαστούν οι δεσμοί υδρογόνου μεταξύ των μορίων νερού**. Συνεπώς, η λανθάνουσα θερμότητα δεν μεταβάλλει την θερμοκρασία μίας υδάτινης μάζας, μεταβάλλει όμως την φυσική της κατάσταση, δηλ. την φάση της.

Το Σχήμα 1.9 παρουσιάζει την συνδυασμένη μεταβολή της φυσικής κατάστασης και της θερμοκρασίας μίας μάζας νερού όταν της προσδίδουμε θερμότητα. Έστω ένα κομμάτι πάγου σε αρχική θερμοκρασία -20 °C (αριστερό τμήμα του σχήματος 1.9). Επιπλέον, κάθε θερμίδα ενέργειας (1 cal) αντιστοιχεί σε 4.184 J. Καθώς ο πάγος έχει ειδική θερμότητα $C_p = 2.093 \text{ J}/(^\circ\text{K kg})$, αυτό σημαίνει ότι για κάθε θερμίδα (1 cal = 4.184 J) που του προσδίδουμε η θερμοκρασία του πάγου ανεβαίνει κατά περίπου 2 °C.

Απαιτούνται λοιπόν 10 cal (ή 500 KJ) ώστε το 1 kg πάγου να φτάσει από τους $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ στους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Μόλις η θερμοκρασία γίνει $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, τότε παρά το γεγονός ότι προσδίδουμε επιπλέον θερμότητα η θερμοκρασία σταματά να μεταβάλλεται. Ο πάγος μεταβάλλει την φάση του από την στερεή σε υγρή, η πρόσθετη θερμότητα που του προσδίδουμε χρησιμοποιείται για να διασπαστεί η εξαεδρική διάταξη του πάγου. Με βάση το *Σχήμα 1.9*, απαιτούνται 80 cal/gr (ή 333 KJ/kg) για να διασπαστούν όλα τα εξαέδρα και να μεταβληθεί η φάση του πάγου. Η **λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης (Melting Latent Heat)** είναι η θερμότητα που απαιτείται ώστε 1 γραμ. μίας ουσίας να μεταβάλλει τη φάση της από στερεά σε υγρή (η μετατροπή αυτή της φάσης της συνοδεύεται από τη διάλυση των εσωτερικών δεσμών). Η λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης του νερού είναι της τάξης των 80 cal/gr ή 333 KJ/kg.

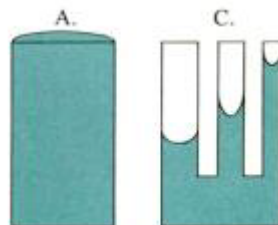
Όταν όλοι δεσμοί υδρογόνου έχουν διασπαστεί, τότε το νερό (σε υγρή πλέον φάση) αυξάνει την θερμοκρασία του κατά $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ για κάθε θερμίδα που του αποδίδουμε. Απαιτούνται έτσι 100 cal (ή 418,2 KJ/kg) για να αυξηθεί η θερμοκρασία 1 γραμμαρίου στους $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Μόλις φτάσουμε στους $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ η θερμοκρασία και πάλι δεν μεταβάλλεται παρά την προσθήκη επιπλέον θερμότητας. Απαιτούνται 540 cal/gr (ή 2.260 KJ/kg) για να διασπαστούν όλοι οι εσωτερικοί δεσμοί υδρογόνου που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων νερού. Η **λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (Evaporation Latent Heat)** είναι η θερμότητα που απαιτείται ώστε 1 γραμ. μίας ουσίας να μεταβάλλει τη φάση της από υγρή σε αέρια (διάλυση εσωτερικών δεσμών). Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού είναι 540 cal/gr ή 2.260 KJ/kg (*Σχήμα 1.9*). Μόλις εξατμιστεί όλη η μάζα νερού και πλέον βρισκόμαστε στην φάση των υδρατμών, τότε η θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ για κάθε 1 cal που τους αποδίδεται.



Σχήμα 1.9. Διάγραμμα μεταβολών φάσης και απαιτούμενης θερμότητας για το απεσταγμένο νερό.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν οι ενεργειακές ανάγκες α) μεταβολής θερμοκρασίας του νερού εντός μίας φάσης, και β) μεταβολής της κατάστασής του, δηλ. το πέρασμα από την μία φάση στην άλλη. **Αν το διάγραμμα κινηθεί αντίθετα, δηλ. η θερμοκρασία μειώνεται, τότε η θερμότητα αποδίδεται στο περιβάλλον.** Συνεπώς κατά την συμπύκνωση των υδρατμών, λόγω μείωσης θερμοκρασίας, αποδίδεται ποσότητα θερμότητας στο περιβάλλον ίση με την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Αντίστοιχα, κατά τον σχηματισμό πάγου αποδίδεται στο περιβάλλον ποσότητα θερμότητας ίση με την λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης.

Το νερό διαθέτει υψηλή Επιφανειακή Τάση (Surface Tension) η οποία οφείλεται στους ισχυρούς δεσμούς υδρογόνου οι οποίοι στην επιφάνεια του νερού είναι δεσμοί οριζόντιας διεύθυνσης. Παρατηρείται η εμφάνιση τριχοειδών φαινομένων σε περίπτωση γυάλινου δοχείου μικρής διατομής και η εμφάνιση κυρτώδους επιφάνειας σε περίπτωση πλαστικού δοχείου μεγάλης διατομής (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10. Κοίλες διεπιφάνειες νερού σε τριχοειδή αγγεία και κυρτή διεπιφάνεια σε δοχεία μεγάλης διατομής.

Η έννοια του μοριακού και κινηματικού ιξώδους

Μία άλλη σημαντική φυσικοχημική παράμετρος του νερού είναι το μοριακό ιξώδες. Ως μοριακό ιξώδες ορίζουμε την αντίσταση κάθε ρευστού στην κίνηση, δηλ. στην ροή. Η διατμητική τάση η οποία εμφανίζεται στην επιφάνεια, τον πυθμένα και τα πλευρικά όρια του ωκεανού λόγω τριβής οδηγεί στον ορισμό του μοριακού (δυναμικού) ιξώδους του θαλασσινού νερού ως:

$$\mu = \frac{\tau}{\left(\frac{dV}{dy}\right)} \quad (1.3)$$

όπου τ είναι η διατμητική τάση και dV/dy ο ρυθμός διάτμησης του νερού. Το ιξώδες εκφράζει την εσωτερική τριβή που αναπτύσσεται σε ένα ρευστό, άρα και στο θαλασσινό νερό.

Ένα ρευστό με υψηλό ιξώδες αναπτύσσει υψηλή εσωτερική τριβή και αντιστέκεται έντονα στην ροή. Αν η θάλασσα είχε πολύ υψηλό ιξώδες θα ήταν πολύ δύσκολο για τους οργανισμούς να κινηθούν καθώς θα συναντούσαν υψηλή εσωτερική αντίσταση. Αν αντίθετα αποκτούσε πολύ χαμηλό ιξώδες, τότε η εσωτερική αντίσταση του ρευστού θα ήταν ελάχιστη και οργανισμοί όπως το πλαγκτόν θα βυθιζόταν πολύ εύκολα. Το δυναμικό ιξώδες επηρεάζεται από την θερμοκρασία και την αλατότητα του νερού. Μονάδες μοριακού δυναμικού ιξώδους στο SI είναι ($N \times \text{sec}/m^2$). Ενδεικτική τιμή του δυναμικού ιξώδους είναι $10^{-3} N \times \text{sec}/m^2$.

Μία άλλη σημαντική φυσικοχημική παράμετρος του νερού είναι το κινηματικό ιξώδες (ν), που ορίζεται ως:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.4)$$

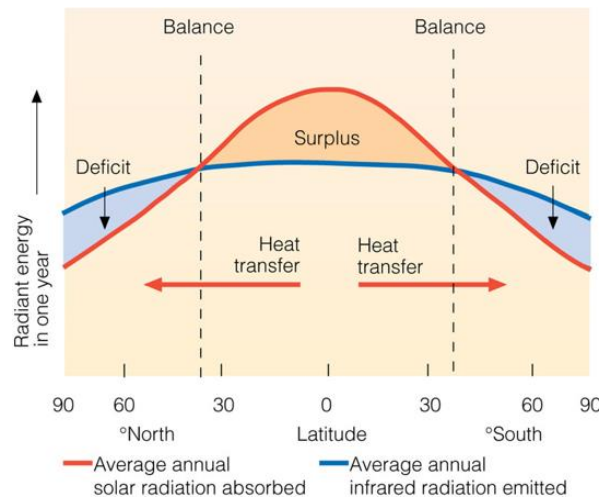
Η παράμετρος του κινηματικού ιξώδους συνδυάζει τα χαρακτηριστικά του ιξώδους και της πυκνότητας του ρευστού. Το κινηματικό ιξώδες του θαλασσινού νερού είναι $1.8 \times 10^{-6} m^2/\text{sec}$ στους $0^\circ C$ και $1.0 \times 10^{-6} m^2/\text{sec}$ στους $20^\circ C$. Από αυτό προκύπτει ότι όσο η θερμοκρασία του ωκεανού αυξάνει, το ιξώδες μειώνεται άρα μειώνεται η εσωτερική αντίσταση του νερού. Αντίστοιχη σχέση υπάρχει και για την αλατότητα, γεγονός που δείχνει ότι ένας οργανισμός που κινείται στο γλυκό νερό απαιτείται να καταναλώσει υψηλότερα ποσά ενέργειας για να διασχίσει την ίδια απόσταση σε σχέση με έναν οργανισμό στο θαλασσινό νερό.

3. Θερμικές Ανταλλαγές Υδρόσφαιρας – Ατμόσφαιρας κατά τον Υδρολογικό Κύκλο

Γνωρίζουμε ότι το νερό εξατμίζεται στους 100°C. Ωστόσο, η μέση θερμοκρασία των ωκεανών είναι 20 °C περίπου. Για να εξατμισθεί 1 γραμ νερού στους 20 °C απαιτεί θερμότητα 585 cal. Η επιπλέον θερμότητα που απαιτείται προσφέρεται από τα γειτονικά μόρια νερού. Άρα, η θερμότητα μεταφέρεται από τα γειτονικά μόρια νερού σε αυτό που θα εξατμισθεί. Έτσι εξηγείται η ελαφρά πτώση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας κατά την εξάτμιση. Συνεπώς η εξάτμιση αποτελεί διεργασία ψύξης της επιφάνειας της θάλασσας η οποία χάνει θερμότητα ίση με τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης.

Ουσιαστικά η εξάτμιση μεταφέρει θερμότητα από τον ωκεανό στην ατμόσφαιρα με τη μορφή υδρατμών. Καθώς η εξάτμιση είναι εντονότερη στις τροπικές και υπο-τροπικές ζώνες, η υπερβάλλουσα θερμότητα που μεταφέρεται από τη θάλασσα στην ατμόσφαιρα κινείται προς τις πολικές περιοχές για να εξισοροποιηθεί το έλλειμμα θερμότητας (Σχήμα 1.11). Η υγραποίηση των υδρατμών αποδίδει τη θερμότητα στο περιβάλλον και επηρεάζει σημαντικά το παράκτιο κλίμα.

Για παράδειγμα, κατά τον υδρολογικό κύκλο η εξάτμιση στην θάλασσα των τροπικών και υπο-τροπικών περιοχών είναι αυξημένη, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται μάζα από την υδρόσφαιρα στην ατμόσφαιρα, αλλά και ενέργεια με την μορφή της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης. Καθώς χάνει θερμότητα, η θάλασσα στις περιοχές αυτές ψύχεται ελαφρά. Στην συνέχεια οι υδρατμοί δημιουργούν νέφη, τα οποία κινούνται σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, όπου ψύχονται με αποτέλεσμα την συμπύκνωση των υδρατμών και την απόδοσης της θερμότητας που περικλείουν στο περιβάλλον. Με τον τρόπο αυτό η βροχή συμβάλει στην ελαφρά άνοδο της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας στις υπο-πολικές περιοχές.



Σχήμα 1.11. Μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας από τον ωκεανό στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης στις τροπικές και υπο-τροπικές περιοχές και οριζόντια μεταφορά θερμότητας προς τις ζώνες μεγαλύτερου γεωγραφικού πλάτους μέσω ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι ο υδρολογικός κύκλος δεν είναι μόνο μια διαδικασία ανταλλαγής και μεταφοράς μάζας μεταξύ υδρόσφαιρας (ωκεανοί) και ατμόσφαιρας, αλλά και μία διαδικασία ανταλλαγής και μεταφοράς θερμότητας μεταξύ ωκεανών και ατμόσφαιρας. Αυτό αποδεικνύει τον σημαντικό ρόλο των ωκεανών στην ρύθμιση του κλίματος της Γης. Παρόμοιος όπως θα δούμε παρακάτω είναι ο ρόλος των ωκεανών στην εξομάλυνση του κλιματικών συνθηκών ανάμεσα στις τροπικές και πολικές περιοχές με στην μεταφορά θερμότητας μέσω των θαλασσίων ρευμάτων (π.χ., το Gulf Stream).