

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1478

**«ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ Φ/Β ΣΤΟΝ  
ΚΑΘΑΡΙΣΜΟ ΝΕΡΟΥ ΜΕΣΩ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ  
ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ  
ΤΕΧΝΙΚΩΝ»**



**ΒΡΑΔΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ  
ΜΑΡΚΕΤΟΣ ΗΡΑΚΛΗΣ- ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΗΛΙΑΣ ΣΤΑΘΑΤΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2016**



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	4
ΤΟ ΝΕΡΟ.....	4
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
1.2 Η ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ.....	5
1.2 ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ .....	7
1.2.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	7
1.2.2. ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΗ ΓΗ.....	8
1.3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ.....	8
1.4 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ .....	9
1.5 Η ΑΝΕΡΧΟΜΕΝΗ ΑΓΟΡΑ ΤΟΥ ΕΜΦΙΑΛΩΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ .....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	20
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ .....	20
2.1 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ .....	20
2.2 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ- ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	23
2.3 ΗΛΙΑΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	24
2.4 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ .....	28
2.5 ΕΞΩΓΕΝΗΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΤΥΠΟΥ P ΚΑΙ N .....	35
2.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ .....	37
2.7 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	46
ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ .....	46
3.1 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ .....	46
3.1.1 ΔΙΗΘΗΣΗ .....	46
3.1.1.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ.....	48
3.1.2 ΔΙΥΛΙΣΗ .....	49
3.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ.....	50
3.2.1 ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΑ.....	50
3.2.1 ΧΛΩΡΙΩΣΗ .....	51
3.2.3 ΟΖΟΝΩΣΗ.....	51

3.2.4 ΥΠΕΡΙΩΔΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (UV) .....	54
3.2.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΡΟΦΗΣΗΣ.....	56
3.2.6 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΣΕ ΕΝΕΡΓΟ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	61
ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	61
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ .....	61
4.2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ .....	61
4.3 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	62
4.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ .....	63
4.4.1 ΧΛΩΡΙΟ .....	63
4.4.2 ΒΡΩΜΙΟ .....	64
4.4.3 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ .....	64
4.4.4 ΟΖΟΝΙΣΜΟΣ .....	65
4.4.5 ΘΑΛΑΜΟΣ UV ΑΚΤΙΝΩΝ .....	65
4.4.6 ΕΝΕΡΓΟ ΟΞΥΓΟΝΟ.....	66
4.4.7 ΙΟΝΙΣΜΟΣ .....	67
4.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ.....	67
4.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ ΑΛΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ .....	68
4.7 ΣΧΕΔΙΑΣΗ.....	72
4.7.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ .....	73
4.7.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ.....	74
4.7.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΩΝ.....	75
4.7.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ .....	77
4.7.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.....	80
4.7.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	83
4.7.7 ΕΠΙΛΟΓΗ INVERTER .....	85
4.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ .....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	87

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

### **ΤΟ ΝΕΡΟ**

#### **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το νερό είναι απαραίτητο για τη ζωή των ανθρώπων, τόσο γιατί αποτελεί το βασικότερο είδος διατροφής, όσο και γιατί αποτελεί μια από τις απαραίτητες πρώτες ύλες της πρωτογενούς παραγωγής, όπως είναι η γεωργία και η κτηνοτροφία, και της δευτερογενούς παραγωγής, όπως είναι η βιομηχανία. Αποδεικνύεται ότι το νερό, ως φυσικός πόρος που συμμετέχει σε κάθε παραγωγική - αναπτυξιακή διαδικασία, έχει υπεισέλθει δυναμικά και προσδιορίζει πλέον τη δυνατότητα ή την αδυναμία επέκτασης των παραγωγικών δραστηριοτήτων, καθορίζοντας και την αποδοτικότητα τους. Συγχρόνως, καθώς ο πληθυσμός της γης αυξάνεται και η παραγωγή αγαθών αναπτύσσεται και εντατικοποιείται, το νερό γίνεται συνεχώς πολυτιμότερο.

Το νερό ως φυσική πρώτη ύλη, δεν αποτελεί καρπό μιας συγκομιδής, όπως άλλοι φυσικοί πόροι, ενώ έχει μια ιδιαίτερη -κοινωνική και πολιτισμική αξία. Το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας της γης καλύπτεται από νερό, το οποίο όμως στο μεγαλύτερο ποσοστό του είναι πλούσιο σε διαλυμένα άλατα, με συνέπεια να είναι ακατάλληλο για κάλυψη ανθρώπινων αναγκών. Μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό υπόγειου και επιφανειακού νερού είναι κατάλληλο για χρήση από τον άνθρωπο. Αξίζει επίσης να παρατηρήσουμε ότι η ανανέωση του νερού, το οποίο είναι κατάλληλο για ανθρώπινη χρήση, σε ένα περιορισμένο χώρο ή μια τοπική κοινωνία εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν κάθε χρόνο, από τη φυσική προσφορά και ζήτησή του από τους χρήστες και τις παρεμβάσεις του ανθρώπου ιδιαίτερα στα ποιοτικά του χαρακτηριστικά. Οι επιβλαβείς αλλοιώσεις στην ποιότητα του νερού έχουν ως συνέπεια πολλές φορές την απαγόρευση χρήσης του ή τουλάχιστον τον περιορισμό των δυνατοτήτων χρησιμοποίησής του.

Ο ποιοτικός έλεγχος του νερού και η επιλογή της μεθόδου επεξεργασίας για τη χρήση του νερού ως ποσίμου ή για την επίτευξη των ποιοτικών απαιτήσεων για συγκεκριμένες βιομηχανικές εφαρμογές, αποτελεί γνωστικό αντικείμενο στο οποίο έχει κύρια συμμετοχή ο χημικός μηχανικός.

## 1.2 Η ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Εδώ και δυο εκατομμύρια χρόνια, με βάση τα μέχρι τώρα γνωστά στοιχεία, είναι βεβαιωμένη η παρουσία του ανθρώπου πάνω στον πλανήτη μας. Το χρονικό αυτό διάστημα είναι ελάχιστο, συγκριτικά με τα 3,5 δισεκατομμύρια χρόνια που είναι η πιθανή ηλικία της γης. Αιτία για τη δημιουργία της κοινωνίας και επομένως και για την ανάπτυξη των πρώτων πολιτισμών πάνω στη γη, δηλαδή των κοιτίδων του πολιτισμού μας, ήταν κατά κύριο λόγο το νερό. Ούτε φιλοσοφικές θεωρίες, αλλά ούτε και ιδέες ή αρχές οδήγησαν τον προϊστορικό άνθρωπο στη δημιουργία των πρώτων κοινοτήτων παρά μόνο η ανάγκη διαχείρισης του νερού.

Το λιώσιμο των πάγων της τελευταίας εποχής των παγετώνων της γης (60.000-10.000 π.Χ.) και τις κατακλυσμιαίες βροχές που ακολούθησαν διαδέχτηκε μια εποχή ξηρασίας των τότε σαβάνων (10.000-6.000 π.Χ.). Η κατάσταση αυτή ανάγκασε τον προϊστορικό άνθρωπο να αποσυρθεί σε περιοχές όπου υπήρχαν μεγάλα αποθέματα νερού και τέτοιες περιοχές ήταν τότε οι κοιλάδες των ποταμών Νείλου, Τίγρη, Ευφράτη, Ινδού και Κίτρινου ποταμού. Έτσι, ο νομάδας προϊστορικός άνθρωπος, που ζούσε μέχρι τώρα σαν συλλέκτης, κυνηγός και βοσκός, αναγκάστηκε να γίνει μόνιμα εγκατεστημένος γεωργός. Με τη μόνιμη εγκατάσταση του μεσολιθικού ανθρώπου, άρχισε και η νεολιθική εποχή σε αυτές τις περιοχές (6.000-5.000 π.Χ.), δηλαδή εκείνη η εποχή την οποία χαρακτήρισε ο γερμανός ανθρωπολόγος και φιλόσοφος Herbert Kuhn σαν τη μεγαλύτερη επανάσταση της ανθρωπότητας. Ο μέχρι τότε δισδιάστατα σκεπτόμενος κυνηγός και βοσκός, αρχίζει σιγά-σιγά να μεταβάλλεται στον τρισδιάστατα σκεπτόμενο δημιουργό.

Η συνεχώς αυξανόμενη ξηρασία ανάγκασε τον άνθρωπο, που μέχρι τώρα ζούσε ασυναίσθητα και συνεπώς αμέριμνα, "να βγάζει έκτοτε το ψωμί του με τον ιδρώτα του προσώπου του". Τελείωσε πια η εμφύτευσή του σε μια παραμυθένια φύση και στο εξής έπρεπε να κυβερνάει ο νους και όχι πλέον το ένστικτο. Μια μόνιμη εγκατάσταση στις περιοχές αυτές κάτω από δύσκολες τοπογραφικές, κλιματολογικές και υδρολογικές συνθήκες, είχε ως προϋπόθεση τη συγκέντρωση των ανθρώπων αυτών σε ομάδες εργασίας και κοινότητες, όπου με προγραμματισμένες και συντονισμένες πράξεις θα αντιμετώπιζονταν όχι μόνον οι ανάγκες ύδρευσης του πληθυσμού και άρδευσης των γεωργικών καλλιεργειών, αλλά και οι κίνδυνοι που

διέτρεχαν οι άνθρωποι αυτοί από τις καταστροφικές πλημμύρες των μεγάλων αυτών ποταμών και από τη θάλασσα. Με ομαδική εργασία άρχισαν να κατασκευάζουν προχώματα για την προστασία από τις πλημμύρες, φράγματα για την αποθήκευση του νερού προς ύδρευση και άρδευση σε περιόδους ξηρασίας, υπόγειους υδαταγωγούς κ.λ.π. Τελικά, η ανάγκη διαχείρισης των υδάτινων πόρων και ελέγχου των εκτεταμένων υδραυλικών εγκαταστάσεων οδήγησε τους ανθρώπους εκείνους στη δημιουργία των πρώτων συνεταιρισμών και κοινοτήτων. Τέτοιου είδους κοινότητες ήταν οι πρώτες πόλεις-χώρες των Σουμερίων (4.000- 3.000 π.Χ.). Η επιτευχθείσα συγκέντρωση της διοίκησης, του εμπορίου και της βιοτεχνίας, οδήγησε αναγκαστικά στη δημιουργία μεγαλουπόλεων (Ουρ, Νιππούρ, Ουρού και Βαβυλώνα στη Μεσοποταμία, Μέμφιδα και Θήβες στην Αίγυπτο, Mohenjo-Daro στις Ινδίες, Anyang στην Κίνα) με αποτέλεσμα την ανάπτυξη στις περιοχές αυτές πολιτισμών υψηλής στάθμης από την τρίτη χιλιετηρίδα π.Χ. Στην Αίγυπτο της εποχής των Φαραώ (2.000 π.Χ.) κατασκευάστηκε, με φράγμα στο Νείλο, η τεχνητή λίμνη Μέριδα, επιφάνειας περίπου 700 km<sup>2</sup>. Οι μεγάλες ποσότητες νερού που αποθηκεύονταν εκεί αρκούσαν για την άρδευση της περιοχής του δέλτα του Νείλου για όλο το χρόνο. Ο μυθικός πλούτος της Αιγύπτου της εποχής εκείνης οφειλόταν κυρίως στην ορθολογική διαχείριση των νερών του Νείλου.

Επίσης, κατά την αρχαιότητα η ύδρευση των κατοίκων αποτελούσε μια από τις πιο σοβαρές υποθέσεις της πολιτείας και οι εγκαταστάσεις ύδρευσης και αποχέτευσης προκαλούν ακόμη και σήμερα το θαυμασμό μας για την τελειότητά τους. Όχι δίχως λόγο λοιπόν οι αρχαιολόγοι κρίνουν το ύψος του πολιτισμού ενός αρχαίου λαού από την εύρεση ανάλογων εγκαταστάσεων ύδρευσης και αποχέτευσης. Η Ρώμη, για παράδειγμα, το 100 μ.Χ. χρειαζόταν 400.000 m<sup>3</sup> νερού ημερησίως, ποσότητα που είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτήν που χρειάζεται κατά μέσον όρο σήμερα μια πόλη 1,5 εκ. κατοίκων. Υπήρχαν μάλιστα στη Ρώμη, στην Έφεσο, στην Πέργαμο, αλλά και αρχαιότερα στην Κνωσό, εγκαταστάσεις για τον καθαρισμό των λυμάτων.

## 1.2 ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ

### 1.2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Το νερό αποτελεί το βασικότερο είδος διατροφής για τον άνθρωπο και συγχρόνως συμμετέχει σε κάθε σχεδόν παραγωγική διαδικασία. Ως φυσική πρώτη ύλη το νερό δεν αποτελεί τον καρπό μίας συγκομιδής και η ανανέωση του σε ένα περιορισμένο χώρο αποτελεί συνάρτηση των κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν, των ανθρώπινων παρεμβάσεων στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του και της φυσικής προσφοράς και ζήτησης από τους χρήστες.

Κατά τη διάρκεια της χρήσης του αναπόφευκτα παρεμβαίνουμε στα δύο κύρια χαρακτηριστικά του νερού, την ποιότητα και την ποσότητα, ενώ η παρέμβαση αυτή έχει προκαλέσει πολυάριθμα περιβαλλοντικά προβλήματα. Τα προβλήματα αυτά οφείλονται στις πρακτικές των αρδευτικών έργων, στις αλλαγές του επιφανειακού νερού από διάφορες ανθρώπινες κατασκευές, στα περιβαλλοντικά προβλήματα που συνδέονται με μεγάλες κατασκευές φραγμάτων, τεχνικών έργων (δρόμοι, γέφυρες κ.λπ.) με αλλαγές στο ανάγλυφο και στο υδρολογικό περιβάλλον.

Συνοπτικά μπορούμε να διακρίνουμε και να περιγράψουμε τα προβλήματα υδάτινων πόρων σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

α) προβλήματα που οφείλονται στην άνιση κατανομή στο χώρο και στο χρόνο της φυσικής προσφοράς και ζήτησης του νερού,

β) προβλήματα που δημιούργησε το είδος της ανάπτυξης και η διοικητική οργάνωση που ακολουθήθηκε, η οποία δεν παρείχε τη δυνατότητα συντονισμού και ενιαίας πολιτικής, γ) προβλήματα που δημιουργούνται από την έλλειψη ευαισθησίας και παιδείας του απλού πολίτη-χρήστη σχετικά με την ποιοτική και ποσοτική διαχείριση του νερού.

Χαρακτηριστικά της ανεπάρκειας υδάτινων πόρων στη χώρα μας, όπως και της έλλειψης ευαισθησίας στη διαχείριση, είναι η σύγκρουση στην πράξη των συμφερόντων και δραστηριοτήτων των αρμόδιων φορέων χρήσης π.χ. Υπουργείο Γεωργίας - Δ.Ε.Η στον Αλιάκμονα, πηγές κοινότητας Αραβησσού - ύδρευση Θεσσαλονίκης, Μόρνος - Αθήνα, πηγές κοινότητας Ριζωμάτων Ημαθίας - κοινότητα Δασκίου (αποχή των κατοίκων της κοινότητας Δασκίου από τις εκλογές).

Γίνεται φανερό λοιπόν ότι πρόκειται για ένα σύνθετο πρόβλημα που το αποτελούν και το συντηρούν πολλαπλές κοινωνικές παράμετροι και αντιθέσεις. Πιστεύοντας ότι



το βασικότερο πρόβλημα στον φυσικό αυτό πόρο είναι η έλλειψη ευαισθησίας σχετικά με τη διαχείριση, τη χρήση και την προστασία του, δίνονται στη συνέχεια οι βασικές έννοιες για τα ποιοτικά και τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του.

### 1.2.2. ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΗ ΓΗ

Η προέλευση του νερού ανάγεται στην αρχή της δημιουργίας της γης, όταν στην ατμόσφαιρα επικρατούσαν διάφορα αέρια (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> κ.λ.π.) και υδρατμοί. Οι υδρατμοί αυτοί με τη συνεχή πτώση της θερμοκρασίας στον πλανήτη μας συμπυκνώθηκαν και σχημάτισαν σταδιακά μάζες νερού. Διάφοροι ερευνητές συγκλίνουν στην άποψη ότι η ποσότητα του νερού (στις τρεις καταστάσεις του) που υπάρχει στη γη είναι της τάξης μεγέθους  $1,360 \times 10^6 \text{ km}^3$ .

Το 97,9% του νερού της γης είναι σε υγρή κατάσταση, ενώ το 97,25% του συνολικού νερού της γης είναι αλμυρό νερό, δύσκολα εκμεταλλεύσιμο με τα σημερινά τεχνολογικά μέσα. Από την τεράστια ποσότητα νερού που υπάρχει στη γη μόνο το 2,8% είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε άλατα (γλυκό νερό) και από αυτό το μεγαλύτερο μέρος 77,25% ή 2,1% του συνολικού είναι σε στερεά κατάσταση (πάγοι και χιόνια).

### 1.3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Όταν το νερό μεταβαίνει από την υγρή στην αέρια κατάσταση, απορροφά ποσό θερμότητας περίπου ίσο με 590 θερμίδες από την επιφάνεια εξάτμισης για κάθε γραμμάριο νερού, που εξατμίζεται. Υπάρχει ένα ποσό μέγιστης κατακράτησης υγρασίας από τον αέρα, το οποίο εξαρτάται από τη θερμοκρασία και ονομάζεται **υγρασία κορεσμού** του αέρα. Στον Πίνακα 1.2 δίνεται η υγρασία κορεσμού του αέρα για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αίσισε να γίνει καλύτερα κατανοητό πως οι θερμοκρασιακές μεταβολές της ατμόσφαιρας συμμετέχουν στον υδρολογικό κύκλο.

Με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας το νερό της θάλασσας και των ηπείρων (λίμνες, ποτάμια, έδαφος) εξατμίζεται. Στη συνέχεια οι υδρατμοί συμπυκνώνονται, σχηματίζουν σύννεφα τα οποία δίνουν βροχή, χιόνι, χαλάζι (κατακρημνίσματα), τα οποία η γη συλλέγει. Το νερό, επιφανειακό ή υπόγειο, καταλήγει πάλι στη θάλασσα, όπου μία νέα εξάτμιση θα συνεχίσει αυτό που ονομάζουμε "υδρολογικό κύκλο".

Υπολογίζεται, κατά προσέγγιση, ότι κάθε χρόνο 453.000-500.000 km<sup>3</sup> νερού εξατμίζονται από τις θάλασσες-ωκεανούς του πλανήτη μας. Από αυτήν την ποσότητα το 90% επιστρέφει με κατακρημνίσματα στη θάλασσα, ένα το 10% περίπου 41.000 m<sup>3</sup> μεταφέρεται στο ηπειρωτικό τμήμα, όπου προστίθενται και 72.000 m<sup>3</sup> εξατμιζόμενου νερού από την ηπειρωτική επιφάνεια της γης. Οι ποσότητες αυτές δημιουργούν τις ηπειρωτικές βροχές. Είναι φανερό ότι τα 3/4 των βροχοπτώσεων πέφτουν στους ωκεανούς ή στις θάλασσες και μόνο το 1/4 πέφτει στη γη.

Ένα μέρος του νερού που φτάνει στη γη ρέει επιφανειακά πάνω στο έδαφος και αφού διανύσει μια μικρή ή μεγάλη διαδρομή, συγκεντρώνεται σε μεγαλύτερους αγωγούς, τους ποταμούς, οι οποίοι με τη σειρά τους το οδηγούν στις λίμνες ή στις θάλασσες.

#### **1.4 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ**

Το νερό είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο με μοναδικές φυσικοχημικές ιδιότητες. Έχει την ικανότητα να διαλύει όλες τις ιοντικές και πολικές ενώσεις και να μεταφέρει διάφορα αιωρούμενα στερεά και γι' αυτό το λόγο το νερό ρυπαίνεται εύκολα. Διαλυμένα ή αιωρούμενα συστατικά αλλοιώνουν το χρώμα, την οσμή, τη γεύση και τη ολική ποιότητα του νερού, ώστε συχνά να καθίσταται ακατάλληλο για την πόση ή ακόμη για οικιακή και κτηνοτροφική χρήση.

Ο χημικός τύπος του νερού είναι H<sub>2</sub>O και το μοριακό του βάρος είναι 18. Δηλαδή ένα μόριο νερού αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα υδρογόνου, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα άτομο αποτελείται από δύο είδη σωματιδίων, τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνια. Ο πυρήνας βρίσκεται στο κέντρο του ατόμου, είναι θετικά φορτισμένος και συγκεντρώνει σχεδόν ολόκληρη την ατομική μάζα. Το ηλεκτρόνιο είναι αρνητικά φορτισμένο σωματίδιο το οποίο περιφέρεται γύρο από το θετικά φορτισμένο πυρήνα. Ο πυρήνας αποτελείται από δύο διαφορετικά είδη σωματιδίων, πρωτόνια και νετρόνια. Το πρωτόνιο έχει θετικό φορτίο ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου και μάζα περίπου 1800 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου. Το νετρόνιο έχει σχεδόν την ίδια μάζα με αυτή του πρωτονίου, αλλά δίχως ηλεκτρικό φορτίο. Ένας πυρήνας χαρακτηρίζεται από τον ατομικό αριθμό και το μαζικό αριθμό. Ατομικός αριθμός είναι ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα ενός ατόμου. Μαζικός αριθμός είναι ο συνολικός αριθμός των πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα, Κάθε

άτομο το οποίο χαρακτηρίζεται από έναν ατομικό και ένα μαζικό αριθμό, ονομάζεται νουκλίδιο.

Το άτομο του οξυγόνου έχει 8 ηλεκτρόνια (δύο στην εσωτερική και έξι στην εξωτερική στοιβάδα). Τα άτομα του υδρογόνου έχουν από ένα ηλεκτρόνιο. Η εξωτερική στοιβάδα του οξυγόνου χρειάζεται άλλα δύο ηλεκτρόνια για να συμπληρωθεί. Έτσι το οξυγόνο δεσμεύει δύο ηλεκτρόνια από δύο διαφορετικά άτομα υδρογόνου. Κατά συνέπεια το οξυγόνο και το υδρογόνο μοιράζονται τα ηλεκτρόνιά τους και το οξυγόνο κατορθώνει να συμπληρώσει την εξωτερική του στοιβάδα. Τα διάφορα ισότοπα διαφέρουν μόνο στον αριθμό των νετρονίων του πυρήνα, δηλαδή διαφέρουν στην ατομική μάζα και έχουν ίδιες χημικές ιδιότητες αλλά διαφορετικές φυσικές.

Το μόριο του νερού σχηματίζει ένα ισοσκελές τρίγωνο, η γωνία των δεσμών HOH είναι ίση με  $105^\circ$  και το μήκος του δεσμού O-H είναι  $0,96 \times 10^{-10}$  m (0,96 angstrom, Å). Το μόριο του νερού είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, αλλά έχει δύο πόλους. Η μοριακή διαμόρφωση του μορίου του νερού επιτρέπει την άνιση κατανομή ηλεκτρονίων και τη δημιουργία δίπολου με θετικό φορτίο ( $\delta^+$ ) στο υδρογόνο και αρνητικό φορτίο ( $\delta^-$ ) στο οξυγόνο. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ηλεκτρόνια που μοιράζονται το υδρογόνο και οξυγόνο βρίσκονται πιο συχνά γύρω από το άτομο οξυγόνου παρά γύρω από τα άτομα υδρογόνου. Ως εκ τούτου, γύρω από τα άτομα υδρογόνου υπάρχουν ασθενή θετικά φορτία, ενώ τα δύο ζεύγη ηλεκτρονίων στην εξωτερική στοιβάδα του ατόμου του οξυγόνου εξέχουν από το μόριο του νερού και δημιουργούν ένα ασθενές αρνητικό φορτίο. Όταν ένα μόριο έχει τέλεια συμμετρία (π.χ. βενζίνη) η κατανομή των ηλεκτρονίων είναι συμμετρική και το μόριο αυτό ονομάζεται μη πολικό.

Είναι δυνατόν, να αναπτυχθούν ελκτικές δυνάμεις μεταξύ του υδρογόνου ενός μορίου νερού με το οξυγόνο ενός άλλου μορίου νερού. Ο δεσμός αυτός ονομάζεται δεσμός υδρογόνου και είναι ηλεκτροστατικού τύπου. Ο δεσμός υδρογόνου απεικονίζεται με τρεις τελείες. Ο δεσμός υδρογόνου είναι μια ασθενής έως μέτρια ελκτική δύναμη μεταξύ ενός ατόμου υδρογόνου συνδεδεμένου ομοιοπολικά με ένα πολύ ηλεκτραρνητικό άτομο και με ένα ζεύγος ηλεκτρονίων ενός άλλου ηλεκτραρνητικού ατόμου, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ομοιοπολικός δεσμός είναι χημικός δεσμός που σχηματίζεται με το μοίρασμα ενός ζεύγους ηλεκτρονίων μεταξύ δύο ατόμων (Ebbing and Gammon, 1999). Το νερό δεν είναι το μόνο πολικό υγρό. Η αλκοόλη και

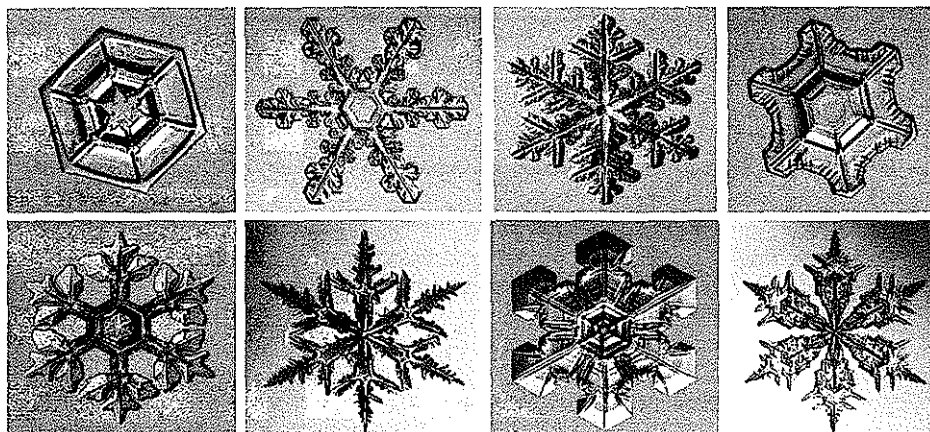
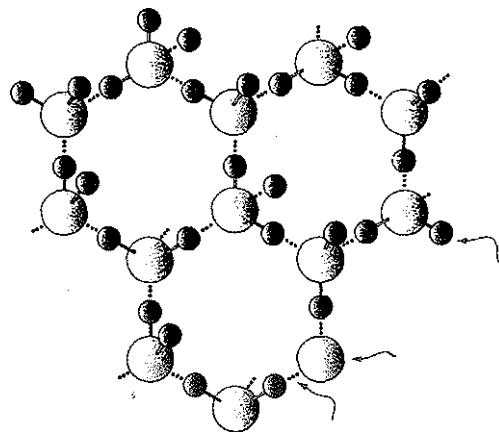
η ακετόνη είναι επίσης πολικά υγρά, αλλά σε κανένα άλλο υγρό οι δεσμοί υδρογόνου δεν είναι τόσοι πολλοί όσοι στο νερό.

Για κάθε άτομο οξυγόνου υπάρχουν τέσσερα άλλα άτομα οξυγόνου που το περιβάλλουν και σχηματίζουν ένα τετράεδρο. Ο δεσμός υδρογόνου επιτρέπει στα μόρια του νερού να δημιουργούν βραχύβια συμπλέγματα αποτελούμενα από μέχρι και 100 μόρια νερού. Τα συμπλέγματα αυτά διαρκώς σχηματίζονται και ανασυγκροτούνται σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, της τάξεως των  $10^{*12}$  δευτερολέπτων (Stumm and Morgan, 1981). Εξαιτίας του δεσμού υδρογόνου το νερό είναι σε υγρή μορφή και όχι αέρια όπως άλλες ενώσεις με περίπου το ίδιο μοριακό βάρος και σε τυπικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης το νερό έχει σχετικά μεγάλη πυκνότητα, δυναμικό ιξώδες και επιφανειακή τάση.

Οι φυσικές ιδιότητες του νερού ειδικό βάρος, πυκνότητα, δυναμικό ιξώδες, κινηματικό ιξώδες, επιφανειακή τάση και τάση ατμών εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Η επιφανειακή τάση είναι η ενέργεια που χρειάζεται για να αυξηθεί το εμβαδόν της επιφάνειας του νερού κατά μία μονάδα εμβαδού. Δηλαδή, η επιφανειακή τάση εκφράζει την ικανότητα του νερού να μειώνει στο ελάχιστο τον όγκο του. Η μεγάλη επιφανειακή τάση του νερού οφείλεται στο δεσμό υδρογόνου και είναι η αιτία που τα σταγονίδια της βροχής είναι σφαιρικά και ότι μια καρφίτσα επιπλέει πάνω στο νερό. Το δυναμικό και κινηματικό ιξώδες είναι ανάλογο της αντίστασης στη ροή μιας υγρής μάζας νερού. Με την αύξηση της θερμοκρασίας ελαττώνονται οι έλξεις μεταξύ των μορίων στο νερό και συνεπώς μειώνεται το δυναμικό και κινηματικό ιξώδες του νερού. Η τάση των ατμών είναι η μερική πίεση του ατμού πάνω από το νερό. Η μεγάλη τάση των ατμών του νερού επιτρέπει την εξάτμιση του και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες της θερμοκρασίας βρασμού. Όταν το νερό περιέχει άλατα, η θερμοκρασία βρασμού αυξάνεται. Αυτός είναι ο λόγος που η προσθήκη αλατιού στο νερό επιταχύνει το μαγείρεμα.

Εξάχνωση πάγου (μετατροπή πάγου απευθείας σε ατμό) επιτυγχάνεται με θέρμανση υπό σταθερή πίεση, χαμηλότερη από την πίεση στο τριπλό σημείο. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την αποξήρανση τροφίμων μέσω κατάψυξης. Κατεψυγμένα τρόφιμα τοποθετούνται σε πίεση μικρότερη από 0,00603 atm (κενό αέρος) και ο πάγος εξαχνώνεται, έτσι τα τρόφιμα διατηρούν το άρωμα και τη γεύση τους, σε αντίθεση με το αποτέλεσμα αποξήρανσης μέσω θέρμανσης.

Ο πάγος είναι μια ιδιόμορφη στερεά ουσία και μπορεί να υπάρξει σε 19 διαφορετικές μορφές, πολλές από τις οποίες έχουν παρατηρηθεί μόνο σε εργαστήριο. Η πιο συνηθισμένη μορφή πάγου πάνω στη γη είναι πάγος τύπου Ih (όπου το h=hexagonal, εξαγωνικός). Το Σχήμα 1.1 δείχνει τη δομή του πάγου τύπου Ih, όπου τα μόρια πάγου σχηματίζουν πλέγματα εξαγώνων με μεγάλους κενούς χώρους στον κρύσταλλο. Ο πάγος αυτός είναι ελαφρύς γιατί ένα  $\text{cm}^3$  πάγου τύπου Ih ζυγίζει 0,917 g, ενώ ένα  $\text{cm}^3$  νερού ζυγίζει 1,000 g στους 4 °C. Ο πάγος τύπου Ih μπορεί να συμπιεστεί και να πάρει 16 διαφορετικές κρυσταλλικές μορφές. Η πυκνότερη μορφή πάγου είναι ο πάγος τύπου X, του οποίου ένα  $\text{cm}^3$  ζυγίζει 2,51 g και μπορεί να δημιουργηθεί εκθέτοντας πάγο τύπου VII σε πίεση 600.000 atm. Σε αυτή την υπερβολικά υψηλή πίεση οι δεσμοί υδρογόνου εξαφανίζονται και το κάθε άτομο υδρογόνου βρίσκεται ανάμεσα σε δύο άτομα οξυγόνου (Finney, 2004). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο άνθρακας υπό πίεση 200.000 atm μετατρέπεται από γραφίτη σε διαμάντι



Σχήμα 1.1: Δομή του εξαγωνικού πάγου (τύπου Ih). Κάθε άτομο οξυγόνου περιβάλλεται τετραεδρικά από τέσσερα άτομα υδρογόνου, δύο σχηματίζουν το μόριο  $H_2O$  και τα άλλα δύο συγκρατούνται με δεσμούς υδρογόνου (τροποποιημένο σχήμα από τον Finney, 2004).

Επιφανειακή τάση είναι η δύναμη η οποία αντιστέκεται στην αύξηση της επιφάνειας ενός υγρού. Η ιδιότητα αυτή δεν υφίσταται στα αέρια. Η επιφανειακή τάση μπορεί να θεωρηθεί ως το μέγιστο επίπεδο ενέργειας που η επιφάνεια ενός υγρού μπορεί να αποθηκεύσει χωρίς να διασπαστεί. Εναλλακτικά ορίζεται ως η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που απαιτείται για να αυξηθεί μια διεπιφάνεια, ή η δύναμη ανά μονάδα μήκους η οποία συγκρατεί μια διεπιφάνεια από διάσπαση (Batchelor, 2000). Η επιφανειακή τάση μετράται σε μονάδες  $[N/m]$  και επομένως είναι δυνατόν να θεωρηθεί σαν μια τάση η οποία ασκείται επάνω σε μία πολύ λεπτή μεμβράνη (φίλμ).

Υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση στις δυνάμεις που ασκούνται στα μόρια που βρίσκονται σε μια διεπιφάνεια αέρα-υγρού και στο εσωτερικό του υγρού. Τα μόρια του υγρού τα οποία βρίσκονται στη διεπιφάνεια μεταξύ του υγρού και του αέρα δέχονται έλξη από άλλα μόρια του υγρού προς το εσωτερικό. Η έλξη αυτή δεν αντισταθμίζεται από ελκτικές δυνάμεις που προκύπτουν από την πλευρά του αέρα γιατί υπάρχουν ελάχιστα εξατμισμένα μόρια του υγρού στον αέρα. Η ανισορροπία των ελκτικών δυνάμεων προς το εσωτερικό του υγρού αντισταθμίζεται με τη δημιουργία της επιφανειακής τάσης κατά μήκος της διεπιφάνειας (Lu and Likos, 2004). Επομένως η επιφανειακή τάση βασίζεται πρωταρχικά σε ελκτικές και συγκολλητικές δυνάμεις οι οποίες είναι αμελητέες σε πολλά κλασικά προβλήματα εφαρμοσμένης μηχανικής, αλλά κυριαρχούν σε προβλήματα τριχοειδής αναρρίχησης σε λεπτούς σωλήνες, μηχανισμούς δημιουργίας φυσαλίδων και σχηματισμό υγρών σταγονιδίων (Street et al., 1996).

Η ενέργεια των μορίων που ευρίσκονται κοντά σε μια διεπιφάνεια αέρα-υγρού είναι μεγαλύτερη εκείνης που αντιστοιχεί σε ισάριθμα μόρια πιο βαθιά στο εσωτερικό του υγρού, θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε σύστημα τείνει προς την κατάσταση με την ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Ως εκ τούτου, και βάσει του δεύτερου θερμοδυναμικού αξιώματος, τα υγρά επιδιώκουν να ελαττώσουν την επιφάνειά τους. Αυτό εξηγεί

γιατί οι σταγόνες υγρών που παρατηρούμε στη φύση έχουν σφαιρική γεωμετρία. Αναθυμηθείτε ότι ο λόγος της επιφάνειας ενός γεωμετρικού σχήματος ως προς τον όγκο που καταλαμβάνει ελαχιστοποιείται όταν το γεωμετρικό σχήμα είναι σφαιρικό.

Για ευκολότερη μαθηματική προσομοίωση, η επιφανειακή τάση σε διεπιφάνεια αερίου- υγρού, συχνά θεωρείται ότι είναι μια συγκεντρωμένη δύναμη η οποία ενεργεί μόνο κατά μήκος της διεπιφάνειας. Δηλαδή η διεπιφάνεια θεωρείται σαν μια λεπτή μεμβράνη. Στην πραγματικότητα,  $\sigma_{GL}$  είναι η συνισταμένη της τάσης η οποία ενεργεί όχι μόνο στη διεπιφάνεια αλλά μέχρι και κάποιο βάθος από την επιφάνεια της υγρής φάσης.

### **1.5 Η ΑΝΕΡΧΟΜΕΝΗ ΑΓΟΡΑ ΤΟΥ ΕΜΦΙΑΛΩΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ**

Υπάρχει μια γενική δημόσια αντίληψη ότι το νερό της βρύσης δεν είναι όσο ασφαλές θα μπορούσε να είναι. Σε πολλά μέρη στην Ευρώπη και Βόρεια Αμερική το νερό της βρύσης είναι μόλις πόσιμο. Όμως, υπάρχουν περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα το νερό της πόλης της Νέας Υόρκης, όπου το νερό της βρύσης είναι όσο καλό είναι το εμφιαλωμένο νερό (Karolefski, 2002). Τα τελευταία χρόνια η ζήτηση του εμφιαλωμένου νερού αυξάνεται εκθετικά.

Στη Δυτική Ευρώπη η κατανάλωση εμφιαλωμένου πόσιμου νερού είναι σημαντικά αυξημένη τα τελευταία χρόνια. Ακόμη και μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970, υπήρξαν μεγάλες περιοχές στην Ευρώπη, ειδικά Ιταλία, Ισπανία και Πορτογαλία, όπου το νερό από τη βρύση δεν ήταν ασφαλές. Αυτή η κατάσταση έδωσε αφορμή στη δημιουργία μεγάλων ευρωπαϊκών εταιριών παραγωγής μεταλλικού νερού όπως η Perrier της Γαλλίας, η San Pellegrino της Ιταλίας και η Gerolsteiner της Γερμανίας.

Για την εξασφάλιση ασφαλούς πόσιμου νερού, στις αρχές του 20ου αιώνα, οι ΗΠΑ άρχισαν να απολυμαίνουν το νερό. Αλλά, το ενδιαφέρον για το εμφιαλωμένο νερό άρχισε στις τελευταίες δεκαετίες λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως η πτώση στην ποιότητα πόσιμου νερού σε μερικές περιοχές, η δημόσια αντίληψη, οι προτεινόμενοι υγιεινοί τρόποι ζωής, η ανάγκη για την κατάλληλη υδάτωση μετά από την άσκηση, και οι αποτελεσματικές εκστρατείες μάρκετινγκ από τις βιομηχανικές και παρασκευαστικές εταιρίες. Η εταιρία Nestle, η οποία παράγει το Perrier, ήταν πρωτοπόρος στην προώθηση της αγοράς εμφιαλωμένου νερού στις ΗΠΑ προς το τέλος της δεκαετίας του 1970.

Η παγκόσμια κατανάλωση εμφιαλωμένου νερού αυξήθηκε περίπου στο 6,7% το χρόνο για την περίοδο 2003-2008, παρά την υπερβολικά υψηλή τιμή του έναντι του νερού της βρύσης (Beverage Marketing Corporation, 2008). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1, ο ετήσιος παγκόσμιος μέσος όρος κατανάλωσης εμφιαλωμένου νερού ανά άτομο είναι 24,2 λίτρα.



**Πίνακας 1.1:** Παγκόσμια κατανάλωση εμφιαλωμένου νερού.Κατανάλωση ανά άτομο σε διάφορες χώρες\*

2008		Λίτρα ανά άτομο	
Κατάταξη	Χώρα	2003	2008
1	Μεξικό	157,1	223,7
2	Ιταλία	178,3	204,4
3	Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	96,2	150,3
4	Βέλγιο-Λουξεμβούργο	132,9	147,6
5	Γερμανία	117,3	141,6
6	Γαλλία	148,0	131,0
7	Ισπανία	126,8	120,8
8	Λίβανος	96,2	115,5
9	Ουγγαρία	61,3	110,5
10	ΗΠΑ	81,8	107,9
11	Ελβετία	96,1	99,6
12	Αυστρία	85,9	98,8
13	Ταϊλάνδη	76,8	98,4
14	Σλοβενία	77,6	98,4
15	Τσεχία	84,0	96,9
16	Κατάρ	74,2	96,9
17	Σαουδική Αραβία	88,2	95,4
18	Κροατία	62,1	94,6
19	Κύπρος	86,3	90,9
20	Βουλγαρία	43,2	87,4
	<b>Παγκόσμιος Μέσος όρος</b>	<b>22,7</b>	<b>29,9</b>

Οι δυτικοί Ευρωπαίοι είναι οι σημαντικότεροι καταναλωτές, πίνουν σχεδόν το μισό από το εμφιαλωμένο νερό όλου του κόσμου, με ένα μέσο όρο 85 λίτρα/άτομο/έτος. Ο πλέον σημαντικός λόγος για τον οποίο υπάρχουν πολλά μεταλλικά νερά (non-carbonated mineral water) είναι ότι η δημιουργία μιας επιχείρησης εμφιάλωσης νερού είναι σχετικά ανέξοδη, γιατί το κόστος μιας μηχανής εμφιάλωσης δεν είναι

υπερβολικό. Γενικά, η βιομηχανία εμφιάλωσης νερού έχει γίνει πολύ κερδοφόρα. Στον Πίνακα 1.2 φαίνεται ότι στις ΗΠΑ η κατανάλωση εμφιαλωμένου νερού αυξάνει σταθερά τα τελευταία χρόνια και τα ετήσια κέρδη πλησιάζουν τα 10 δισεκατομμύρια δολάρια.

<b>Έτος</b>	<b>Λίτρα ανά άτομο</b>	<b>Ετήσια αλλαγή (96)</b>	<b>Εκατομμύ ρια Δολάρια</b>
<b>2000</b>	<b>63,2</b>	<b>3,5</b>	<b>\$6.113,0</b>
<b>2001</b>	<b>68,9</b>	<b>8,6</b>	<b>\$6.880,6</b>
<b>2002</b>	<b>76,1</b>	<b>10,6</b>	<b>\$7.901,4</b>
<b>2003</b>	<b>81,8</b>	<b>7,2</b>	<b>\$8.526,4</b>
<b>2004</b>	<b>87,8</b>	<b>7,5</b>	<b>\$9.169,5</b>
<b>2005</b>	<b>96,2</b>	<b>9,7</b>	<b>\$10.007,4</b>
<b>2006</b>	<b>104,5</b>	<b>8,4</b>	<b>\$10.857,8</b>
<b>2007</b>	<b>109,8</b>	<b>5,3</b>	<b>\$11,551,5</b>
<b>2008</b>	<b>107,9</b>	<b>-1,8</b>	<b>\$11.178,5</b>

**Πίνακας 1.2:** Κατανάλωση ανά άτομο εμφιαλωμένου νερού και συνολικά κέρδη των εταιριών στις ΗΠΑ

Υπάρχουν διάφορα είδη εμφιαλωμένου νερού: (α) το φυσικό μεταλλικό νερό (natural mineral water) προέρχεται από υπόγεια νερά, τα οποία συνήθως προστατεύονται από τυπικούς κινδύνους ρύπανσης και χαρακτηρίζονται από ένα σταθερό επίπεδο μετάλλων και ιχνοστοιχείων, (β) το νερό φυσικής πηγής (spring water) προέρχεται από έναν υπόγειο σχηματισμό από τον οποίο το νερό εκρέει φυσικά στην επιφάνεια της ΓΠΣ (γ) καθαρισμένο νερό (purified water) προέρχεται από επιφανειακά ή υπόγεια νερά, τα οποία έχουν υποστεί επεξεργασία προκειμένου να είναι κατάλληλα για κατανάλωση από το κοινό και διαφέρει από το νερό της βρύσης μόνο από τον τρόπο που διανέμεται (στις φιάλες παρά μέσω του δικτύου ύδρευσης) και για την τιμή του, η οποία είναι πολύ πιο υψηλή, (δ) το αρτεσιανό νερό (artesian water) είναι νερό το οποίο προέρχεται από ένα πηγάδι που διαπερνά ένα υδροφόρο στρώμα (aquifer), όπου η πιεζομετρική στάθμη του νερού είναι υψηλότερη από την κορυφή του υδροφόρου

στρώματος, (ε) το νερό με ανθρακικό (sparkling water) το οποίο μετά από σχετική επεξεργασία και πιθανή προσθήκη διοξειδίου του άνθρακα, περιέχει το ίδιο ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα το οποίο είχε αρχικά στην πηγή (είναι διαφορετικό από τη σόδα εμπορίου), (ζ) το νερό γεώτρησης (well water) προέρχεται από υπόγεια υδροφόρα στρώματα.

Το νερό της βρύσης μπορεί να μολυνθεί από μια σειρά χημικών, μικροβιακών και φυσικών εστιών ρύπανσης. Ορισμένοι παράγοντες μπορούν να ελεγχθούν ευκολότερα στα εμφιαλωμένα νερά παρά στο νερό της βρύσης, το οποίο διοχετεύεται με τους σωλήνες του συστήματος διανομής. Εντούτοις, μερικές ουσίες μπορούν να αποδειχθούν πιο επικίνδυνες στα εμφιαλωμένα νερά παρά στο νερό της βρύσης. Αυτό οφείλεται στο ότι το εμφιαλωμένο νερό αποθηκεύεται για μεγάλες χρονικές περιόδους στα μπουκάλια και σε υψηλότερες θερμοκρασίες από το νερό που διανέμεται με το δίκτυο ύδρευσης. Έτσι, μερικοί μικροοργανισμοί που σε μικρές συγκεντρώσεις προκαλούν ελάχιστη ή καμία δημόσια ανησυχία, μπορούν να αυξηθούν σε υψηλά επίπεδα.

Τα πλαστικά μπουκάλια κατασκευάζονται από PET (polyethylene terephthalate, τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο). Για την παραγωγή PET, το 90% των παραγωγών χρησιμοποιούν τον καταλύτη (catalyst) τριοξείδιο του αντιμονίου ( $Sb_2O_3$  antimony trioxide), το οποίο θεωρείται από την Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (WHO) σαν πιθανό καρκινογόνο. Ανάλυση εμφιαλωμένων νερών από 15 Καναδικές και 48 Ευρωπαϊκές εταιρίες έδειξε ότι τα νερά περιείχαν μικρές συγκεντρώσεις αντιμονίου (Shotyk et al., 2006). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συγκεντρώσεις αντιμονίου στα εμφιαλωμένα νερά ήταν αρκετά μικρότερες (156 - 626 ng/L) από τις προτάσεις της WHO (20 pg/L) ή των ΗΠΑ (USEPA 6 μg/L). Σε μια άλλη μελέτη εμφιαλωμένων νερών από 132 εταιρίες σε 28 χώρες το εμφιαλωμένο νερό από δυο εταιρίες βρέθηκε να περιέχει συγκεντρώσεις αντιμονίου μεγαλύτερες των 2 pg/L, το οποίο είναι το επιτρεπτό όριο στην Ιαπωνία (Shotyk and Krachier, 2007).

Το εμφιαλωμένο νερό έχει επιπτώσεις και στο περιβάλλον, γιατί οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή το πλαστικών μπουκαλιών μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή ρύπανση. Επίσης, η πλειονότητα των πλαστικών μπουκαλιών δεν ανακυκλώνεται. Τα πλαστικά μπουκάλια συχνά συσσωρεύουν στους δρόμους και καταλήγουν στους χώρους υγειονομικής ταφής. Τα πλαστικά μπουκάλια είναι προτιμότερο να ανακυκλώνονται παρά να θάβονται στην ύπαιθρο, γιατί τα πλαστικά απόβλητα δεν είναι βιοδιασπώμενα. Δηλαδή, δεν αποδομούνται εύκολα από τη

δράση μικροοργανισμών. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα πλαστικά μπουκάλια που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, παραμένουν εκεί αμετάβλητα για εκατοντάδες χρόνια.

Το καθαρό νερό σε αρκετά οικονομική τιμή είναι βασικό δικαίωμα όλων. Προστατεύοντας τους ποταμούς και τα υδροφόρα στρώματα, μπορούμε να βοηθήσουμε τις δημόσιες υπηρεσίες ύδρευσης να παραδίδουν πόσιμο νερό καλής ποιότητας σε προσιτές τιμές. Έτσι βοηθάμε στο να μειωθεί η ζήτηση του εμφιαλωμένου νερού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ

#### 2.1 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προέρχεται (πηγάζει) από τον ήλιο. Πριν την εκτενή αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία κρίνεται σκόπιμο για την καλύτερη κατανόηση της ηλιακής ακτινοβολίας να αναφερθεί ο ορισμός και η βασική θεωρία που διέπει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία νοείται η εκπομπή υπό μορφή κύματος ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Η ενέργεια αυτή μεταδίδεται με την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία αποτελούνται από την ταυτόχρονη μετάδοση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου τα οποία ταλαντώνονται κάθετα μεταξύ τους και μεταδίδονται κάθετα στην διεύθυνση μετάδοσης. Η ταχύτητα μετάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο κενό προσδιορίζεται στα 300.000 km/h δηλαδή με την ταχύτητα του φωτός. Για να ορίσουμε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα χρησιμοποιούνται τρία βασικά γνωρίσματα – χαρακτηριστικά :

- Ø Το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) το οποίο ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ενός κύματος και έχει ως μονάδα μέτρησης είναι το μέτρο (m) και πιο ρεαλιστικά οι υποδιαίρεσεις του μέτρου όπως nm.
- Ø Την ταχύτητα (c) η οποία είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος και μετράται σε second (s)
- Ø Την συχνότητα (f) η οποία ορίζεται ως ο αριθμός των κυμάτων που περνούν από ένα σημείο σε μια δεδομένη χρονική στιγμή ως προς την μονάδα του χρόνου και η μονάδα μέτρησης της είναι το Hz

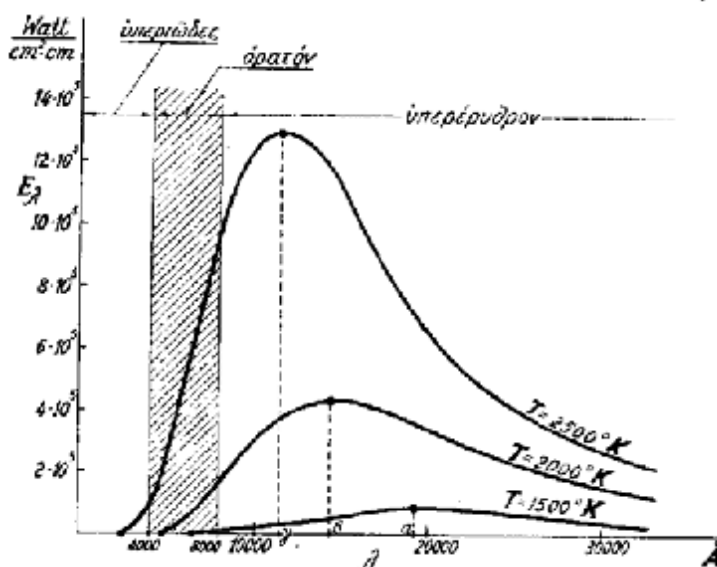
Η σχέση που συνδέει όλες τις παραπάνω ποσότητες είναι:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Η εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προέρχεται από τα δομικά στοιχεία της ύλης όπως άτομα, μόρια και ιόντα και συνδέεται με αυτά είτε από την θερμοκρασία των σωμάτων, όπου εκεί η ακτινοβολία ονομάζεται θερμική λόγω της θερμότητας που εκπέμπεται. Είτε για λόγους που δεν σχετίζονται με την θερμότητα

άλλα με την διέγερση και αυτοδιέγερση των δομικών μονάδων τις ύλης. Για παράδειγμα, ακτινοβολία εκπέμπεται κατά την αυτοδιέγερση ηλεκτρονίων τα οποία κινούνται από μια ενεργειακή στοιβάδα μεγαλύτερης ενέργειας σε μια στοιβάδα μικρότερης ενέργειας. Ο τρόπος της διέγερσης του ηλεκτρονίου, ή οποιαδήποτε άλλου δομικού στοιχείου της ύλης, μπορεί να επιτευχθεί είτε μετά από κρούση μεταξύ ηλεκτρονίου – ηλεκτρονίου όταν δρα ένα ηλεκτρικό πεδίο είτε μετά από απορρόφηση ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω το μήκος κύματος αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικότερα μεγέθη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αυτό γίνεται περισσότερο κατανοητό όταν εισάγεται η έννοια του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ως φάσμα νοείται το εύρος τιμών που καταλαμβάνει ένα μήκος κύματος. Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας χωρίζεται σε περιοχές όπως φαίνεται στο σχήμα (1) με ξεχωριστή ονομασία και διαφορετικές ιδιότητες.



Σχήμα 1: Το φάσμα του ορατού φωτός (nm)

Το προαναφερθέν εύρος τιμών προσδιορίζεται μεταξύ  $10^{-7}\mu\text{m}$  και  $10^{10}\mu\text{m}$  δηλαδή από τα μήκος κύματος των κοσμικών ακτίνων μέχρι το μήκος κύματος ραδιοφωνικών κυμάτων. Η ηλιακή ακτινοβολία ανήκει στην περιοχή του ορατού φωτός και συγκεκριμένα από 400 έως 700 nm όπως φαίνεται στο σχήμα 1.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι :

1. **Ένταση ακτινοβολίας:** Η οποία συμβολίζεται με  $I$  και ορίζεται ως ο ρυθμός πρόσπτωσης σε μια επιφάνεια της ακτινοβολούμενης ενέργειας στην μονάδα του χρόνου. Υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (2) και έχει μονάδα μέτρησης το  $W/m^2$ .

$$I = \frac{dU}{dt} \quad (2)$$

Όπου  $dU$  = στοιχειώδες ακτινοβολούμενη ενέργεια

2. **Ένταση ακτινοβολίας  $I_{(\lambda)}$ :** Ως ένταση της ακτινοβολίας ορίζεται η ποσότητα της ενέργειας  $dQ_{(\lambda)}$  μιας ακτινοβολίας μήκους κύματος  $\lambda$  η οποία διέρχεται κάθετα μιας στοιχειώδους επιφάνεια  $dA$  και υπολογίζεται μέσω της σχέσης (3) με μονάδες μέτρησης  $W/m^2$

$$I_{\lambda} = \frac{dQ}{dA} \quad (3)$$

Αντίστοιχα, τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ηλιακής ακτινοβολίας είναι :

1. **Άμεση ηλιακή ακτινοβολία:** Η οποία συμβολίζεται με  $H_b$  και εκφράζει την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γής χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση. Η μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολία πραγματοποιείται με κατάλληλα όργανα τα οποία μετρούν την ακτινοβολία σε μονάδες  $Joule/m^2$  αναλύοντας την σε δύο συνιστώσες την κάθετη και την παράλληλη στην επιφάνεια του συλλέκτη, με την παράλληλη συνιστώσα να μην συνεισφέρει στην μέτρηση διότι δεν υφίσταται μετατροπή της σε θερμική ενέργεια.
2. **Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία:** Η οποία συμβολίζεται με  $H_d$  αποτελεί την ακτινοβολία με προέλευση από το σύνολο του ουράνιου θόλου και σχηματίζεται από την σκέδαση της άμεσης ακτινοβολίας και από σωματίδια της ατμόσφαιρας ενώ η μονάδα μέτρησης της είναι το  $Joule/m^2$ .
3. **Ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία:** Η οποία συμβολίζεται με  $H_r$  και αποτελείται από την ανακλώμενη συνιστώσα της άμεση ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος ή γειτονικά σε αυτήν αντικείμενα.
4. **Ολική ηλιακή ακτινοβολία:** Η οποία συμβολίζεται με  $H$  και αποτελεί ο άθροισμα όλων των επιμέρους ηλιακών ακτινοβολιών (Άμεση, Διάχυτη και Ανακλώμενη) με μονάδες μέτρησης  $Joule/m^2$  ενώ οι τιμές της είναι

χαρακτηριστικές για κάθε ζώνη της χώρας ανά μήνα παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο και των μέσο όρο της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας ανά περιοχή.

Μετά την σύντομη αναφορά στο θεωρητικό πλαίσιο της ηλεκτρομαγνητικής και ηλιακής ακτινοβολίας η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην παρουσίαση των ιδιοτήτων της ηλιακής ακτινοβολίας και μετατροπή της σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων.

## **2.2 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ- ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

Ο ήλιος είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την ύπαρξη της ζωής. Αποτελεί το αστέρι με ακτίνα 700.000km, μάζα  $2 \times 10^{30}$ kg, με εσωτερική θερμοκρασία 15.000.000 K και επιφανειακή 5.800K. Η πηγή θερμότητας του ήλιου αντλείτε από αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις με μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο που ως προϊόν έχει την έκλυση και κατ επέκταση διάδοση ενέργειας προς το σύμπαν υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και σωματιδιακής φύσης.

Η μέση τιμή της ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια της γης είναι περίπου 600W/m<sup>2</sup>, όμως η πραγματική της τιμή της εξαρτάται σημαντικά από τη γεωγραφική θέση της περιοχής. Τα πρώτα στρώματα της ατμόσφαιρας της Γής δέχονται συνολικά 174 PW (Petawatts, δηλαδή  $10^{15}$  W ) ηλιακής ακτινοβολίας. Όπου, το 30% της εισερχόμενης ακτινοβολίας ανακλάται πάλι προς το διάστημα, ενώ η υπόλοιπη απορροφάται από τα σύννεφα, τους ωκεανούς και το έδαφος της γης.

Το φάσμα του ηλιακού φωτός προσομοιάζεται συνήθως με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας περίπου 5800 K, δηλαδή όση είναι κατά μέσο όρο η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ήλιου. Η διαμόρφωση του φάσματος είναι επαρκής για τη εξήγηση θερμικών εφαρμογών της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως π.χ. η θέρμανση νερού στους ηλιακούς θερμοσίφωνες όμως δεν συμβαίνει το ίδιο και για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διότι, αυτή καθορίζεται από τη φωτονική σύσταση της ακτινοβολίας. Το ηλιακό φως εμφανίζει μια πολύ ανώμαλη φασματική κατανομή, γεγονός που οφείλεται σε επιλεκτικές απορροφήσεις και σκεδάσεις στα συστατικά της ατμόσφαιρας που διασχίζει



Ενδεικτικά να αναφερθεί για την επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από το υψόμετρο της τοποθεσίας στην Γή που δέχεται την ακτινοβολία

Πιο συγκεκριμένα, έχει μετρηθεί ότι στη στάθμη της θάλασσας η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει περίπου τα  $950-1000 \text{ W/m}^2$ , ενώ η τιμή αυτή αυξάνεται κατά περίπου  $7.5 \text{ W/m}^2$  για κάθε  $100 \text{ m}$  της τοποθεσίας, διότι μειώνεται αντίστοιχα το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας που διασχίζουν οι ηλιακές ακτίνες.

Τέλος, από το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης, μόλις το 60% είναι άμεση, δηλαδή, σε δέσμη ακτινών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οπτικές εφαρμογές π.χ. να εστιαστούν με κάτοπτρα ή φακούς. Η υπόλοιπη χαρακτηρίζεται ως διάχυτη, διότι πριν φτάσει στην επιφάνεια του εδάφους έχει προηγουμένως πολλαπλώς σκεδαστεί και ανακλαστεί από τις επιφάνειες των διαφόρων σωματιδίων και σταγονιδίων που αιωρούνται στον αέρα, ανάλογα βέβαια με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και την απόσταση που διένυσε η ακτινοβολία μέσα σε αυτήν.

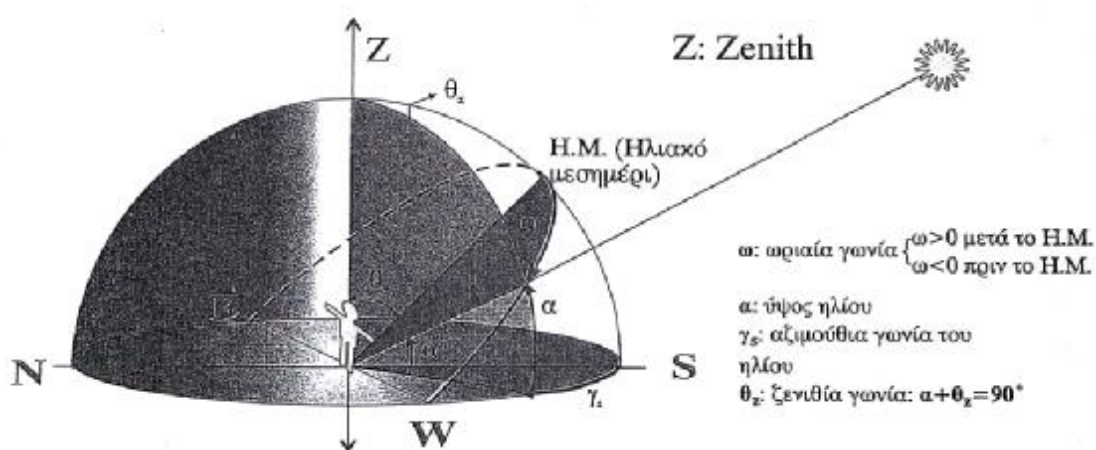
### **2.3 ΗΛΙΑΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

Η συλλογή της ηλιακής θερμικής ενέργειας αξιοποιείται κυρίως για λόγους παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού. Για την παραγωγή θερμότητας αρκεί τα άτομα που δομούν ένα υλικό σώμα να απορροφήσουν ενέργεια από τα φωτόνια (που προέρχονται από την ηλιακή ακτινοβολία) που προσκρούουν επάνω τους και με αυτήν την ανταλλαγή ενέργειας να αρχίσουν να διεγείρονται γύρω από τις θέσεις ισορροπίας τους στο πλέγμα και να προσκρούουν με τα γειτονικά τους άτομα και έτσι να υφίσταται μετάδοση της ενέργειας.

Η ποσότητα της ενέργειας η οποία θα καταλήξει στην επιφάνεια της γης μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σε άμεση εξάρτηση από τους παρακάτω παράγοντες

- 1) Το υψόμετρο
- 2) Την γεωγραφική θέση
- 3) Την υγρασία
- 4) Μετεωρολογικές συνθήκες
- 5) Τη θέση του ηλίου

Ένας ακόμη πολύ σημαντικός παράγοντας για την ηλιακή ακτινοβολία είναι η διαδρομή που θα διανύσει μέσα στην ατμόσφαιρα μέχρι το επίπεδο της θάλασσας. Η διαδρομή αυτή φέρει την ονομασία μάζα αέρα και αποτελεί έναν αριθμό που μας δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή που διένυσε η ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με την με την ιδανική και άρα μικρότερη διαδρομή που είναι η κάθετη στην επιφάνεια της γης ή αλλιώς ζενίθ



Εικόνα : Η απεικόνιση του ζενίθ και η ημερήσια τροχιά του Ηλίου

Στη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου της μάζας αέρα εμφανίζονται απώλειες που οφείλονται σε οπτικά φαινόμενα όπως σκέδαση και ανάκλαση. Πιο συγκεκριμένα, ένα μέρος της ακτινοβολίας σκεδαζείται στα σωματίδια της ατμόσφαιρας που συναντά και την μεταφορά της με ένα μικρό μέρος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας να επιστρέφει εκτός γήινης ατμόσφαιρας και με το υπόλοιπο να κατευθύνεται στην επιφάνεια της γης. Επίσης ένα δεύτερο μέρος της ακτινοβολίας υφίσταται ανάκλαση από σύννεφα αλλά και κατά την πρόσπτωση της στο έδαφος και διαχέεται στην ατμόσφαιρα

Σαν συμπέρασμα των παραπάνω φαινομένων παρατηρείται ότι η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης αποτελείται από μια άμεση και μια διάχυτη συνιστώσα με την πρώτη να αποτελεί την μη σκεδαζόμενη ακτινοβολία ενώ την δεύτερη να αντιπροσωπεύει την ακτινοβολία που έχει υποστεί σκέδαση. Κατά αντιστοιχία τα φωτόνια όταν προσπίπτουν σε μια επιφάνεια ένα μέρος τους απορροφάτε ένα άλλο ανακλάτε και ένα τελευταία διαπερνά την επιφάνεια της γης.

Η συλλογή της ηλιακής ενέργειας κρίνεται απαραίτητη διότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών μετασχηματίζοντας την σε άλλες μορφές ενέργειας

Στις μέρες μας η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται με πολλούς τρόπους με τον πιο δημοφιλή την θέρμανση νερού για οικιακές χρήσεις.. Η συλλογή του ηλιακού φωτός πραγματοποιείται με την βοήθεια ηλιακών συλλεκτών οι οποίοι χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τους συγκεντρωτικούς και τους μη συγκεντρωτικούς. Ειδικότερα, οι μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες, οι οποίοι θεωρούνται και η απλούστερη μορφή συλλέκτη, έχουν κοινή την περιοχή που προσπίπτει το φως με αυτήν που το απορροφά. Αντίθετα, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια συλλογής από την επιφάνεια απορρόφησης και μάλιστα πολλές φορές αυτή η διαφορά μπορεί να είναι και εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη. Στις εφαρμογές που απαιτούνται θερμοκρασίες κάτω των 100°C, όπως για παράδειγμα στην θέρμανση χώρων, χρησιμοποιούνται, γενικά, οι μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες επίπεδης επιφάνειας.

Τέλος μια ακόμη πολύ δημοφιλής εφαρμογή η οποία συνεχώς αναπτύσσεται και η αξιοποίηση της συμβάλει στην επίλυση του ενεργειακού προβλήματος του πλανήτη είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με την βοήθεια των ιδιοτήτων των ημιαγωγών οι οποίοι αποτελούν μια κατηγορία υλικών με ξεχωριστές ηλεκτρικές ιδιότητες.

### **Τρόποι μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας και διατάξεις υπολογισμού της**

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο συλλέκτη αποτελείται από τρεις συνιστώσες: την άμεση, τη διάχυτη και την ανακλώμενη. Η άμεση ακτινοβολία (direct radiation) είναι αυτή που λαμβάνεται από τον ήλιο χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα. Η μέτρηση της πραγματοποιείται με πυρανόμετρο όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα : Πυρανόμετρο μέτρησης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας

Υπολογίζεται σε συνάρτηση με την γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο συλλέκτη λαμβάνοντας υπόψη και τον προσανατολισμό του συλλέκτη, το ύψος και την αζιμούθια γωνία του ήλιου στην δεδομένη στιγμή της μέτρησης.

Η ηλιακή ακτινοβολία που έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα είναι η διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation) και μπορεί να διαχυθεί από σωματίδια και υγρασία ή και να ανακλαστεί από τα σύννεφα. Ένα μέρος της ανακλάται από το έδαφος στον ουρανό και από εκεί διαχέεται ξανά προς τα πίσω. Η διάχυτη ακτινοβολία είναι πολύ περισσότερο δύσκολο να υπολογιστεί από ότι η άμεση και μετράται με πυρανόμετρο όπως αυτό της παρακάτω εικόνας.



Εικόνα: Πυρανόμετρο υπολογισμού της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας

Τέλος η τελευταία συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο συλλέκτη είναι η ανακλώμενη ακτινοβολία η οποία προκύπτει από την ανάκλαση του φωτός σε κοντινές επιφάνειες στο συλλέκτη. Αυτή η συνιστώσα είναι εκμεταλλεύσιμη μόνο στην περίπτωση όπου ο συλλέκτης είναι κεκλιμένος, και όχι οριζόντιος. Η ανακλώμενη συνιστώσα μπορεί να προσφέρει μια σημαντική αύξηση της απόδοσης σε περίπτωση που κοντά στο συλλέκτη υπάρχουν επιφάνειες με μεγάλο

συντελεστή ανάκλασης όπως το χιόνι ή το νερό, αλλά σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να είναι αμελητέα.

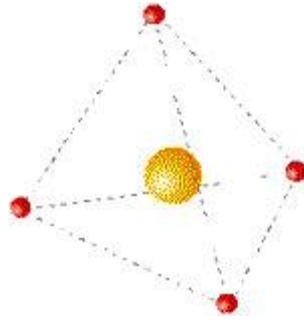
## 2.4 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Η αξιοποίηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τους ημιαγωγούς. Τα στερεά υλικά που είναι γνωστά με το όνομα ημιαγωγοί αποτελούν, τις τελευταίες δεκαετίες αντικείμενο εμπειριστατωμένων ερευνών τόσο σε θεωρητικό όσο και σε εφαρμοσμένο πεδίο. Οι εφαρμογές που προσφέρουν είναι πολυάριθμες και οι σημαντικότερες σχετίζονται με την ανορθωτική τους λειτουργία, όπως και τα φωτοηλεκτρικά κύτταρα αλλά και την δυνατότητα σμίκρυνσης διατάξεων ημιαγωγιμότητας που έχει μεγάλη εφαρμογή στην ανάπτυξη συστημάτων πληροφορικής.

Θέλοντας να δώσουμε έναν ορισμό για του ημιαγωγούς θα λέγαμε ότι αποτελούν την κατηγορία των στερεών της οποίας ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων βρίσκετε ανάμεσα στους μονωτές (μικρός αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων) και τα μέταλλα (μεγάλος αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων). Λόγω αυτής της ιδιότητας η ειδική αντίσταση που εμφανίζουν βρίσκεται μεταξύ των τιμών  $10^{-4} \Omega\text{m} - 10^{-7} \Omega\text{m}$  σε αντίθεση με τα μέταλλα τα οποία βρίσκονται στην περιοχή των  $10^{-8} \Omega\text{m}$  και τους μονωτές με τιμές άνω των  $10^{12} \Omega\text{m}$ . Ακόμη το ενεργειακό χάσμα ( $E_g$ ) μεταξύ των στοιβάδων τους είναι μικρότερο τον 2eV ενώ εμφανίζουν σημαντική μείωση της ειδικής τους αντίστασης με την αύξηση της θερμοκρασίας.

### Δομή και συμπεριφορά ενδογενούς ημιαγωγού

Κάθε τι υλικό έτσι και οι ημιαγωγοί αποτελούνται από άτομα τα οποία με την σειρά τους αποτελούνται από τον πυρήνα που είναι θετικά φορτισμένος και τα ηλεκτρόνια που περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα σε διάφορες κβαντισμένες στάθμες, και έχουν ίσο και αντίθετο φορτίο με αυτό του πυρήνα Σε ένα κρυσταλλικό ημιαγωγό τα ηλεκτρόνια σθένους που είναι τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας δημιουργούν δεσμούς μεταξύ τους και έτσι δημιουργείται η κρυσταλλική δομή.



Εικόνα : Η κρυσταλλική δομή του πυριτίου [<http://www.tmth.gr>]

Οι σημαντικότερες παράμετροι ενός ημιαγωγικού υλικού για τη λειτουργία ηλιακών κυττάρων είναι:

- Το ενεργειακό χάσμα
- ο αριθμός ελεύθερων φορέων (ηλεκτρονίων ή οπών) διαθέσιμων για την κατάσταση αγωγής και
- η «παραγωγή» και η επανασύνδεση των ελεύθερων φορέων (ηλεκτρονίων ή οπών) όταν πέφτει φως στο υλικό

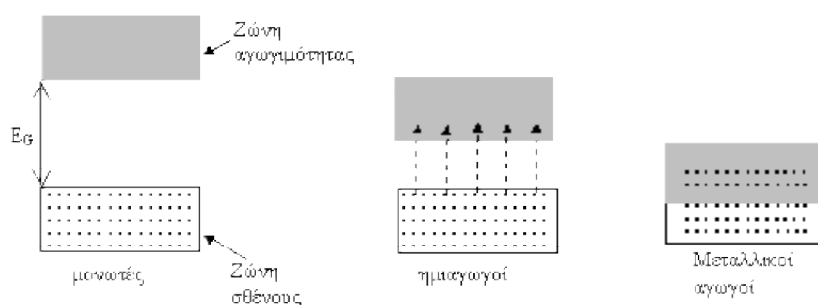
Το ενεργειακό χάσμα ενός ημιαγωγού είναι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να διεγερθεί ένα ηλεκτρόνιο που είναι κολλημένο στο δεσμό του, ώστε να φτάσει στην ελεύθερη κατάσταση, όπου μπορεί να συμμετέχει στην αγωγή ρεύματος. Η δομή των ενεργειακών ζωνών ενός ημιαγωγού δίνει την ενέργεια των ηλεκτρονίων στον κατακόρυφο άξονα και καλείται «διάγραμμα ζωνών». Το χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο ενός ημιαγωγού καλείται «ζώνη σθένους» ( $E_V$ ), ενώ το ενεργειακό επίπεδο στο οποίο ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να θεωρείται ελεύθερο (από τους ομοιοπολικούς δεσμούς, άρα να κινείται ως ρεύμα) καλείται «ζώνη αγωγιμότητας» ( $E_C$ ). Το ενεργειακό χάσμα ( $E_G$ ) είναι διαφορά (το χάσμα) στην ενέργεια μεταξύ της δεσμευμένης κατάστασης και της ελεύθερης, μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας. Επομένως, το ενεργειακό χάσμα είναι η ελάχιστη μεταβολή στην ενέργεια του ηλεκτρονίου που απαιτείται για να διεγείρει το ηλεκτρόνιο έτσι ώστε να μπορεί να συμμετέχει στην αγωγή ρεύματος.

Μόλις το ηλεκτρόνιο διεγερθεί και μεταβεί στη ζώνη αγωγιμότητας, είναι ελεύθερο να τριγυρίζει στον ημιαγωγό και να συμμετέχει στην αγωγή ρεύματος. Εντούτοις, η διέγερση ενός ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας θα επιτρέψει επίσης μια πρόσθετη διαδικασία αγωγής να πραγματοποιηθεί. Η διέγερση ενός ηλεκτρονίου στις

άκρες της ζώνης αγωγιμότητας αφήνει πίσω του ένα κενό διάστημα για ένα άλλο ηλεκτρόνιο. Ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό άτομο μπορεί να κινηθεί σε αυτό το κενό διάστημα. Όταν αυτό το ηλεκτρόνιο κινείται, αφήνει πίσω του ένα κενό διάστημα. Η συνεχής μετακίνηση του κενού για ένα ηλεκτρόνιο, αποκαλούμενου «οπή», μπορεί να θεωρηθεί ως μετακίνηση ενός θετικού φορτίου μέσω του κρυσταλλικού πλέγματος.

Συνεπώς, η διέγερση ενός ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας οδηγεί όχι μόνο στη μετάβαση του ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας, αλλά και στη δημιουργία μιας οπής στη ζώνη σθένους. Λέμε, χαρακτηριστικά, ότι δημιουργήθηκε ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Κατά συνέπεια, και το ηλεκτρόνιο και η οπή μπορούν να συμμετέχουν στην αγωγή ρεύματος και καλούνται «φορείς».

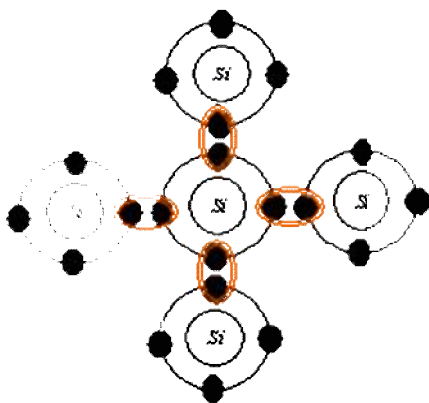
Η έννοια μιας κινούμενης «οπής» είναι ανάλογη με αυτήν μιας φυσαλίδας σε ένα υγρό. Αν και στην πραγματικότητα, το υγρό είναι που κινείται, είναι ευκολότερο να περιγράψει κανείς την κίνηση της φυσαλίδας που ακολουθεί την αντίθετη κατεύθυνση.



Εικόνα : Παρουσίαση των τριών τύπων ηλεκτρικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν τα στερεά [<http://users.sch.gr>]

### Συμπεριφορά ενδογενούς ημιαγωγού

Σε ένα κρυσταλλικό ημιαγωγό τα ηλεκτρόνια σθένους που είναι τα ηλεκτρόνια τις εξωτερικής στοιβάδας δημιουργούν δεσμούς μεταξύ τους και έτσι δημιουργείται η κρυσταλλική δομή.

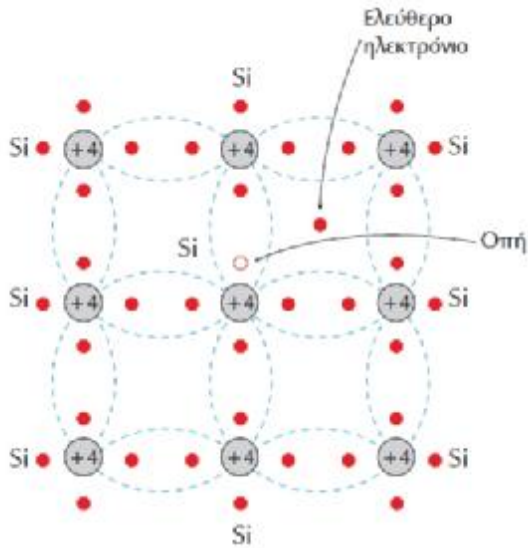


Εικόνα : Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με εμφανείς τους ομοιοπολικούς δεσμούς (κόκκινοι κύκλοι) που αναπτύσσονται στο πλέγμα

Στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός ( $T=0$  K) ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν μονωτής αφού όλα τα ηλεκτρόνια συμμετάσχουν στους δεσμούς. Αντίθετα σε θερμοκρασία διάφορη του μηδενός παρατηρούνται τα εξής:

Τα ηλεκτρόνια σθένους απορροφούν θερμική ενέργεια αυξάνοντας την εσωτερική ενέργεια τους με αποτέλεσμα το άτομο είτε να διεγείρεται θερμικά και αυτό να εκφράζεται ως ταλαντώσεις των ατόμων γύρω από την θέση ισορροπίας με έκλυση θερμότητας είτε αν η αύξηση αυτή της ενέργεια τους είναι αρκετά μεγάλη τέτοια ώστε να καθίσταται το ηλεκτρόνιο ικανό να μεταβεί στην ελεύθερη κατάσταση, δηλαδή από την ζώνη σθένους να περάσει στην ζώνη αγωγιμότητας και να κινείται ελεύθερα στον κρύσταλλο. Η ενεργειακή απόσταση ανάμεσα την ζώνη σθένους ( $E_c$ ) και την ζώνη αγωγιμότητας ( $E_v$ ) ονομάζεται ενεργειακό χάσμα ( $E_g$ ) και η ενέργεια που απαιτείται για την μετάβαση αυτή ονομάζεται ενέργεια ιονισμού που σε θερμοκρασία δωματίου, δηλαδή 300 K, είναι περίπου 0,66 eV.





Εικόνα : Απεικόνιση της κίνησης ηλεκτρονίου δημιουργώντας οπές και ελεύθερα ηλεκτρόνια [<http://users.sch.gr>]

Εγκαταλείποντας το ηλεκτρόνιο την θέση του δημιουργεί μια οπή δηλαδή ένα θετικό φορτίο που είναι ικανό να τραβήξει ένα ηλεκτρόνιο από το διπλανό άτομο και έτσι έχουμε την δημιουργία δυο φορέων αντίθετου φορτίου που κινούνται αντίθετα στον κρύσταλλο. Έτσι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ο ημιαγωγός παρουσιάζει αγωγιμότητα αφού κάποια από τα ηλεκτρόνια σθένους έχουν μεταβεί στην ζώνη αγωγιμότητας άρα και σε ελεύθερη κατάσταση.

Έτσι, δημιουργούνται ελεύθεροι φορείς και στις δύο ζώνες. Η συγκέντρωση αυτών των φορέων καλείται συγκέντρωση φορέων ενδογενούς ημιαγωγού (ή απλώς ενδογενής συγκέντρωση) και συμβολίζεται με  $n_i$ . Το ημιαγωγικό υλικό που δεν έχει νοθευτεί με προσμίξεις καλείται ενδογενές υλικό. Η ενδογενής συγκέντρωση είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας ή ο αριθμός των οπών στη ζώνη σθένους

Αυτός ο αριθμός φορέων εξαρτάται από το ενεργειακό χάσμα του υλικού και από τη θερμοκρασία του. Μεγάλο ενεργειακό χάσμα καθιστά δυσκολότερο για έναν φορέα να διεγερθεί θερμικά και να το ξεπεράσει. Έτσι, η ενδογενής συγκέντρωση είναι μικρότερη στα υλικά με υψηλότερο ενεργειακό χάσμα. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να μεταβεί στη ζώνη αγωγιμότητας, πράγμα το οποίο θα αυξήσει τη συγκέντρωση φορέων του ενδογενούς

ημιαγωγού. Αυτό μεταφράζεται άμεσα σε υψηλότερη απόδοση των ηλιακών κυττάρων.

### **Απορρόφηση Φωτός από Ημιαγωγό**

Όταν φως προσπίπτει σε ένα ημιαγωγό είναι δυνατόν να ανακλαστεί, να διαπεράσει τον κρύσταλλο ή να απορροφηθεί. Στην τελευταία περίπτωση κβαντισμένες ποσότητες ενέργειας δηλαδή τα φωτόνια απορροφούνται από τον κρύσταλλο και διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις ανάλογα με την ενέργεια του φωτονίου:

α)  $E < E_g$  η ενέργεια που προσλαμβάνει το ηλεκτρόνιο σθένους από το φωτόνιο είναι μικρότερη από το εύρος της απαγορευμένης ζώνης οπότε δεν μπορεί να μεταβεί στην ζώνη αγωγιμότητας, αλλά παρουσιάζεται μια ταλάντωση των ατόμων του κρυστάλλου χωρίς να χαλαρώσουν οι δεσμοί μεταξύ τους. Τα ηλεκτρόνια σθένους ανεβαίνουν σε μεγαλύτερες ενεργειακές καταστάσεις μη ευσταθείς και επιστρέφουν ξανά στην αρχική αποδίδοντας την ενέργεια που προσέλαβαν με μορφή θερμότητας

β)  $E = E_g$  η ενέργεια του φωτονίου που απορροφάται είναι ίση με το εύρος της απαγορευμένης ζώνης οπότε το ηλεκτρόνιο μπορεί να περάσει σε ελεύθερη κατάσταση αφήνοντας πίσω του στη ζώνη σθένους μια οπή

γ)  $E > E_g$  η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα οπότε έχουμε πάλι την δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής. Η περίσσεια ενέργεια αποδίδεται στα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας με την μορφή κινητικής ενέργειας

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι όταν φως προσπίπτει σε ένα ημιαγωγό αυξάνεται η αγωγιμότητα του αφού αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας αλλά και οι οπές στη ζώνη σθένους

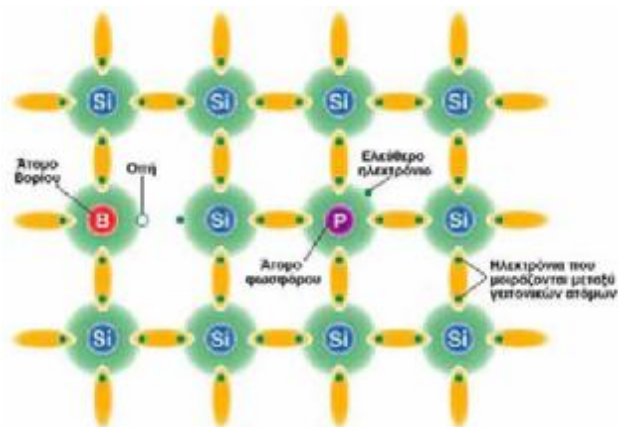
### **Προsmίξεις**

Είναι δυνατό να μετατοπιστεί η ισορροπία των ηλεκτρονίων και των οπών σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα μέσω προσμίξεων με άλλα άτομα (ντοπάρισμα). Άτομα με ένα περισσότερο ηλεκτρόνιο σθένους από ότι το πυρίτιο χρησιμοποιούνται για να παράγουν ημιαγώγιμο υλικό «τύπου-n». Αυτά τα άτομα-προsmίξεις είναι στοιχεία της ομάδας V του περιοδικού πίνακα και έχουν 5 ηλεκτρόνια σθένους (π.χ. φώσφορος). Προσφέροντας 4 ηλεκτρόνια για καθέναν από τους 4 ομοιοπολικούς δεσμούς με τα

άτομα του πυριτίου, εμφανίζεται περίσσεια ενός ηλεκτρονίου, που δεν ανήκει σε δεσμό. Με την έγχυση πολλών ατόμων φωσφόρου δημιουργούνται πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αυτά τα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε μια ενδιάμεση ενεργειακή στάθμη πολύ κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας, στη ζώνη δοτών. Έτσι, τους είναι πιο εύκολο απ' ό,τι πριν να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας, αν τους δοθεί ένα μικρό ποσό ενέργειας (μικρότερο από το ενεργειακό χάσμα EG).

Παρόμοια, άτομα με ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο σθένους χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία υλικών «τύπου-p». Τέτοια άτομα-προσμίξεις είναι στοιχεία της ομάδας III του περιοδικού πίνακα, π.χ. το βόριο. Αυτά έχουν μόνο 3 ηλεκτρόνια σθένους με τα οποία αλληλεπιδρούν με τα άτομα πυριτίου. Πιο συγκεκριμένα, όταν αντικατασταθεί ένα άτομο πυριτίου με ένα άτομο-πρόσμιξη (π.χ. βορίου) θα σχηματιστούν και πάλι 4 ομοιοπολικοί δεσμοί, αλλά από τον τέταρτο δεσμό θα λείπει ένα ηλεκτρόνιο. Αυτό συνεπάγεται το σχηματισμό μιας οπής. Τελικά, με την έγχυση πολλών ατόμων βορίου, τα οποία ονομάζονται λήπτες, δημιουργούνται πολλές οπές. Αυτές ανήκουν σε μια ενεργειακή κατάσταση, πολύ κοντά στη ζώνη σθένους, που λέγεται ζώνη ληπτών. Αυτό σημαίνει ότι είναι πολύ πιο εύκολο για μια οπή να μεταβεί στη ζώνη σθένους, αν αποκτήσει ένα μικρό ποσό ενέργειας. Τότε, όταν πάει στη ζώνη σθένους, θα μπορεί να συμμετέχει ελεύθερα στη δημιουργία ρεύματος.

Στα υλικά που έχουν ντοπαρισθεί, υπάρχουν πάντα περισσότεροι φορείς του ενός τύπου συγκριτικά με τον άλλο. Ο τύπος φορέων με την υψηλότερη συγκέντρωση καλείται «φορείς πλειονότητας», ενώ οι φορείς χαμηλότερης συγκέντρωσης καλούνται «φορείς μειονότητας». Προφανώς, σε ένα υλικό τύπου-n οι φορείς πλειονότητας είναι τα ηλεκτρόνια, ενώ οι φορείς μειονότητας είναι οι οπές.



Εικόνα : “Ντοπαρισμένο” πλέγμα πυριτίου με άτομα Βορίου και Φωσφόρου  
[<http://gneng.blogspot.gr>]

## 2.5 ΕΞΩΓΕΝΗΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΤΥΠΟΥ P ΚΑΙ N

Τα παραπάνω παραγόμενα φορτία αποτελούν την βασική διαδικασία του φωτοβολταϊκού φαινομένου χωρίς όμως να μπορούν να δώσουν ρεύμα από μόνα τους, αφού από μόνα τους τα ελεύθερα ηλεκτρόνια θα εκτελούσαν τυχαίους ελιγμούς, για σύντομο χρονικό διάστημα, και θα επανενώνονταν με τις οπές. Έτσι απαιτείται ένας επιπλέον μηχανισμός το λεγόμενο φράγμα δυναμικού που επιτυγχάνεται χάρη τις ιδιότητες των εξωγενή ημιαγωγών τύπου p και n

### Ημιαγωγός Τύπου n

Αν νοθεύσουμε ένα ημιαγωγό ενός τετρασθενούς στοιχείου (πχ πυρίτιο) με άτομα ενός πεντασθενούς στοιχείου ένα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους του πεντασθενούς στοιχείου περισσεύει στην δημιουργία των δεσμών. Έτσι αυτό το ηλεκτρόνιο δεν βρίσκεται ούτε στην ζώνη σθένους ούτε στην ζώνη αγωγιμότητας αλλά σε μια ενδιάμεση κατάσταση μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, σε στάθμη κοντά στην ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργώντας ένα νέο επίπεδο δοτών που σε θερμοκρασία δωματίου μεταπηδούν στην ζώνη αγωγιμότητας χωρίς τον κίνδυνο επανασύνδεσης αφού δεν έχουν αφήσει πίσω τους κάποια οπή αλλά ένα θετικό ιόν του πεντασθενούς στοιχείου.

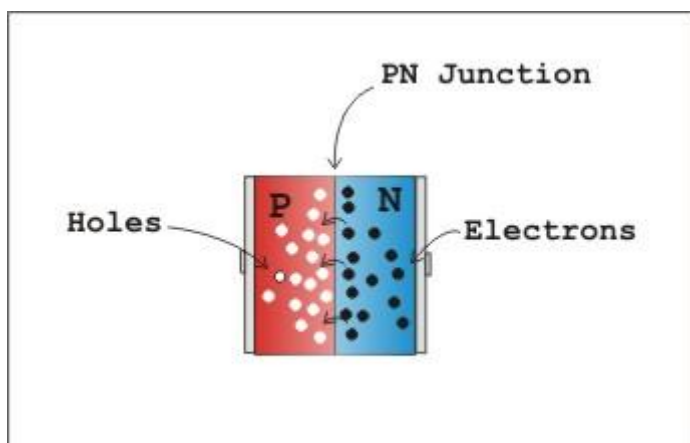
Οπότε στον εξωγενή ημιαγωγό τύπου n έχουμε περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας

### Ημιαγωγός Τύπου p

Αντίστοιχα αν νοθεύσουμε ένα ημιαγωγό ενός τετρασθενούς στοιχείου (πχ πυρίτιο) με άτομα ενός τρισθενούς στοιχείου στον τέταρτο δεσμό θα λείπει ένα ηλεκτρόνιο οπότε και θα έχουμε την δημιουργία μια οπής η οποία βρίσκεται σε ενδιάμεση κατάσταση αλλά αυτή την φορά σε στάθμη κοντά στην ζώνη σθένους. Έτσι ένας κρυσταλλός τύπου p έχει θετικά φορτία (οπές) ικανά να μετακινηθούν στο κρυσταλλικό πλέγμα.

## Επαφή pn

Όπως περιγράψαμε στις προηγούμενες παραγράφους σε ένα ημιαγωγό τύπου n οι φορείς πλειονότητας είναι τα ηλεκτρόνια (αρνητικά φορτία) ενώ στον τύπου p φορείς πλειονότητας είναι οι οπές (θετικά φορτία). Έτσι αν φέρω σε επαφή ένα ημιαγωγό τύπου p και έναν τύπου n, μέσω του φαινομένου της διάχυσης μεταπηδούν ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό τύπου n στον ημιαγωγό τύπου p και έτσι στην επιφάνεια επαφής των δυο ημιαγωγών δημιουργείται μια ανισορροπία φορτίων, με την πλευρά του τύπου p να φορτίζεται αρνητικά λόγω των ηλεκτρονίων που πέρασαν και την πλευρά του τύπου n θετικά λόγω της απώλειας των ηλεκτρονίων. Έτσι δημιουργείται γύρω από την επιφάνεια επαφής ένα φράγμα δυναμικού που αποτρέπει την περαιτέρω μεταπήδηση των ηλεκτρονίων από την πλευρά n στην πλευρά p, και αποτελεί τον απαραίτητο μηχανισμό για την αξιοποίηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου, η περιοχή γύρω από την επαφή ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης.



Εικόνα : Άποψη της επαφής pn [<http://www.imagesco.com>]

Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί τον τρόπο κατασκευής μιας διόδου επαφής p-n που όταν πολώνεται ορθά καταργείται το φράγμα δυναμικού και έχουμε ροή ρεύματος ενώ όταν πολώνεται ανάστροφα ενισχύεται η περιοχή απογύμνωσης και εμποδίζεται η ροή ρεύματος

## 2.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στηρίζεται στο φαινόμενο της φωτοδιέγερσης. Με αυτό, όταν φως προσπίπτει στον κρύσταλλο του ημιαγωγίου υλικού, παράγονται φορείς. Είναι ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας, ελεύθερα από ομοιοπολικούς δεσμούς για να κινούνται και οπές αντίστοιχα στη ζώνη σθένους.

Αυτός, όμως, ο μηχανισμός παραγωγής φορέων δεν επαρκεί για να μπορεί ο κρύσταλλος να δώσει ρεύμα από μόνος του. Ο λόγος είναι γιατί οι συγκεκριμένοι φορείς π.χ. τα ηλεκτρόνια, έχουν βέβαια αποκτήσει παραπάνω ενέργεια, έχουν απελευθερωθεί τελείως από το δεσμό τους, είναι στη ζώνη αγωγιμότητας (στην ανώτερη αυτή ενεργειακή κατάσταση), αλλά σε λίγο χάνουν τη μεγαλύτερη ενέργειά τους. Ελεύθερα, διανύουν άτακτα και χωρίς «χρήσιμο» προσανατολισμό κάποια απόσταση μέσα στον κρύσταλλο και τελικά, με τις συνεχείς συγκρούσεις με τα άτομα π.χ. του πυριτίου, χάνουν την ενέργεια που είχαν αποκτήσει. Έτσι, αναπόφευκτα, βρίσκονται να έχουν τόση ενέργεια, όση έχει ένα ηλεκτρόνιο που είναι εγκλωβισμένο σε έναν ομοιοπολικό δεσμό. Με άλλα λόγια, τα μέχρι πρότινος ελεύθερα ηλεκτρόνια, επανέρχονται στην προηγούμενη ενεργειακή τους κατάσταση, που χαρακτηριστικά ονομάζεται ζώνη σθένους και, έχοντας αποδώσει όλη την περίσσεια ενέργειά τους ως θερμότητα, επανέρχονται στους ομοιοπολικούς δεσμούς. Άρα και πάλι, δεν είναι ελεύθερα, αλλά δεμένα. Δεν μπορούν, πλέον, να δώσουν ρεύμα.

Για να λειτουργεί ως πηγή ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο, λοιπόν, απαιτείται κάτι παραπάνω. Πρόκειται για έναν μηχανισμό, το φράγμα δυναμικού (potential barrier). Σκοπός του θα είναι να εμποδίζει την τελείως άτακτη πορεία των φορέων που παράγονται από τη φωτοδιέγερση και να τους κατευθύνει. Εξ ορισμού, θέτει περιορισμούς στους φορείς ανάλογα με την ενέργεια που έχουν (δηλαδή τους εμποδίζει ή όχι) και τελικά, διαχωρίζει τους φορείς, πράγμα που οδηγεί σε παραγωγή τάσης. Πώς γίνεται αυτό:

Είναι φανερό ότι, με έναν κρύσταλλο πυριτίου (ή άλλου ημιαγωγού) και λειτουργώντας με τον παραπάνω τρόπο, η φωτοδιέγερση δεν αρκεί. Αυτό που κάνουμε είναι να φτιάξουμε μια επαφή pn, αντί να έχουμε έναν ενιαίο κρύσταλλο ημιαγωγού και μάλιστα ενδογενούς (μη ντοπαρισμένου). Όταν γίνει αυτό, αμέσως

αρχίζει μια διαδικασία διάχυσης. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που προέρχονται από το ντοπάρισμα (από τα άτομα-προσμίξεις, δότες) και που βρίσκονται στο υλικό τύπου-n, επειδή παρουσιάζουν μεγάλη συγκέντρωση σε αυτό το υλικό και πολύ μικρή στο υλικό τύπου-p, αρχίζουν να διαχέονται. Τείνουν να καταλάβουν, δηλαδή όλο το χώρο που τους διατίθεται, μαζί με αυτόν όπου σπανίζουν (υλικό τύπου-p). Ακριβώς το ίδιο συμβαίνει και με τις οπές που βρίσκονται, αρχικά, στο υλικό τύπου-p. Αυτή η μετακίνηση φορέων ισοδυναμεί με την ύπαρξη ρεύματος, που λέγεται ρεύμα διάχυσης.

Όταν τα ηλεκτρόνια διαπεράσουν την επαφή pn, βρίσκονται μέσα στο υλικό τύπου-p, δηλαδή σε ένα «εχθρικό περιβάλλον». Επειδή, μάλιστα, οι οπές είναι πάρα πολλές, όσον αφορά τη συγκέντρωσή τους, λόγω του ντόπινγκ, γίνεται αμέσως επανασύνδεση. Έτσι, η διάχυση οδηγεί σε πάρα πολλές επανασυνδέσεις κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών (επαφή) και είναι αναμενόμενο να μειωθεί σημαντικά ο αριθμός των οπών σε αυτήν την περιοχή του υλικού τύπου- p. Φυσικά, τα αντίστοιχα συμβαίνουν και στο υλικό τύπου- n.

Έχει τονιστεί, όμως, ότι ένα ντοπαρισμένο υλικό είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Τώρα, λοιπόν, που χάθηκαν πολλές οπές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια, μέσα στο υλικό τύπου-p, παύει να είναι εκεί ηλεκτρικά ουδέτερο. Κάποια από τα αρνητικά δεσμευμένα φορτία δεν καλύπτονται από θετικά, που ήταν οπές. Αυτά τα φορτία λέγονται ακάλυπτα (uncovered). Τελικά, παρουσιάζεται, συνολικά, αρνητικό φορτίο και ομοίως, στην άλλη πλευρά της επαφής, θετικό φορτίο. Πρόκειται για μια περιοχή κοντά στην επαφή, όπου λόγω επανασύνδεσης, όπως τονίστηκε, χάθηκαν φορείς πλειονότητας. Για αυτό, λέγεται περιοχή αραίωσης ή απογύμνωσης (depletion region).

Αυτό, όμως, που άλλαξε, τώρα, είναι το εξής: όσο γινόταν η διάχυση, ηλεκτρόνια μετακινούνταν προς την περιοχή τύπου-p. Ελεύθερα; Όχι τελείως. Όσο αναπτυσσόταν στην περιοχή τύπου- p αρνητικό φορτίο (κοντά στην επαφή πάντα), τόσο γινόταν και πιο δύσκολο για τα ηλεκτρόνια να προσεγγίσουν αυτήν την περιοχή, λόγω των απωθητικών δυνάμεων. Έτσι, η διάχυση, με την πάροδο του χρόνου, δυσχεραίνεται, ώσπου σταματάει (σχεδόν τελείως, αλλά όχι τελείως). Και πράγματι: Με την περιοχή απογύμνωσης που σχηματίστηκε, έχουμε και ένα ηλεκτρικό πεδίο, με

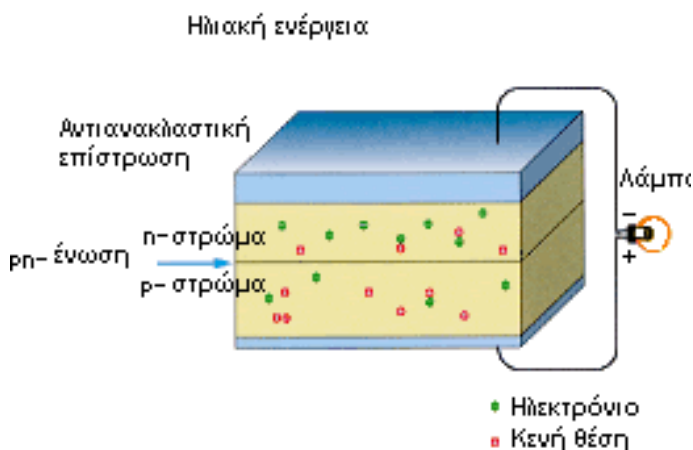
φορά αυτήν από τα θετικά φορτία προς τα αρνητικά (όπως πάντα κατά το νόμο του Coulomb). Αυτό το πεδίο εμποδίζει και σχεδόν σταματάει τελείως τη διάχυση.

Τώρα πια, που σχηματίστηκε η περιοχή απογύμνωσης και σε κατάσταση ισορροπίας, έχουμε δύο ρεύματα. Ένα πολύ μικρό ρεύμα διάχυσης και ένα ολίσθησης. Το πρώτο οφείλεται σε διάχυση. Πραγματικά, κάποιοι φορείς πλειονότητας της κάθε πλευράς του κρυστάλλου (π.χ. ηλεκτρόνια του υλικού τύπου-n), παρά το πεδίο που περιγράψαμε, επειδή θερμικά έτυχε να αποκτήσουν μεγάλη ενέργεια, καταφέρνουν να το περνούν και διαχέονται, τελικά, προς την άλλη πλευρά της επαφής. Το δεύτερο ρεύμα ονομάζεται ρεύμα ολίσθησης. Οφείλεται σε φορείς μειονότητας (π.χ. ηλεκτρόνια που βρίσκονται μέσα στο υλικό τύπου- p). Αυτοί οι φορείς δημιουργήθηκαν τυχαία και θερμικά. Δηλαδή, λόγω θερμότητας, κάποια ηλεκτρόνια αποκτούν τόση ενέργεια, ώστε αποδεσμεύονται από τον ομοιοπολικό δεσμό τους και μεταβαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Βέβαια, υπάρχει ο κίνδυνος αυτοί οι φορείς μειονότητας να επανασυνδεθούν, διότι βρίσκονται σε «εχθρικό περιβάλλον» (κοντά στους πολυάριθμους φορείς πλειονότητας του υλικού τύπου- p). Αν δε συμβεί αυτό και αν μπορέσουν να πλησιάσουν την επαφή, τότε κατευθείαν συλλέγονται από αυτήν. Τι σημαίνει αυτό; Σημαίνει ότι το πεδίο της περιοχής αραίωσης (το οποίο σε αυτήν την περίπτωση βοηθάει και δεν εμποδίζει) τα σπρώχνει με δύναμη προς το υλικό τύπου- n (προς την άλλη πλευρά της επαφής). Στην ισορροπία, τα δύο αυτά ρεύματα είναι ίσα και επομένως, η επαφή p-n παράγει μηδενικό ρεύμα.

Όταν, όμως συμβαίνει η φωτοδιέγερση, το φωτόνιο παράγει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής, αν βεβαίως έχει την απαιτούμενη ενέργεια. ``Μετακινεί`` ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας και μια οπή στη ζώνη σθένους. Έστω ότι το φωτόνιο προσπίπτει σε ένα σημείο του κρυστάλλου πυριτίου, όπου έχω υλικό τύπου-p. Το ηλεκτρόνιο που είναι ελεύθερο, πλέον, να κινείται μπορεί να υποστεί επανασύνδεση, διότι αποτελεί φορέα μειονότητας μέσα στο «εχθρικό περιβάλλον» του υλικού τύπου-p. Συνήθως, όμως, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να συμβαίνει η φωτοδιέγερση κοντά στην επαφή. Άρα, το ηλεκτρόνιο έχει πολλές πιθανότητες να συλλεγεί από το πεδίο της επαφής, συμμετέχοντας στο ρεύμα ολίσθησης για το οποίο έγινε λόγος προηγουμένως. Η οπή, που είναι φορέας πλειονότητας, εμποδίζεται από το ίδιο πεδίο (φράγμα δυναμικού) να διαχυθεί και να περάσει και αυτή την επαφή. Μένει, λοιπόν, κατά πάσα πιθανότητα, στο υλικό τύπου-p.



Το αποτέλεσμα: Αν συνεχιστεί η πρόσπτωση φωτονίων και η φωτοδιέγερση, έχουμε πολλά ηλεκτρόνια στο υλικό τύπου-n (πολλούς φορείς πλειονότητας) και πολλές οπές στο υλικό τύπου-p. Έγινε ο διαχωρισμός των φορέων για τον οποίον χρειαζόμαστε το φράγμα δυναμικού. Τα ντοπαρισμένα υλικά, όμως, είναι οπωσδήποτε ηλεκτρικά ουδέτερα. Άρα, τώρα που οι φορείς πλειονότητας αυξήθηκαν, το υλικό τύπου-n έγινε αρνητικά φορτισμένο και το υλικό τύπου-p, αντιστοίχως, θετικά φορτισμένο. Αυτή η παρουσία φορτίου από τη μία αρνητικού και από την άλλη θετικού, παράγει τάση. Έτσι, η επαφή p-n έγινε πηγή τάσεως. Επιπλέον, επειδή πολλά φωτόνια προσπίπτουν στα υλικά και αρκετά ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής δε συναντούν επανασύνδεση, το ρεύμα ολίσθησης μεγαλώνει. Κατά τη συμβατική του φορά, έχει κατεύθυνση προς τα έξω από το κύτταρο σε σχέση με την τάση. Σαν αποτέλεσμα έχουμε ισχύ να παράγεται και να εξέρχεται από το κύτταρο.



Εικόνα : Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από επαφή τύπου pn σε φωτοβολταϊκό κύτταρο [[http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/alternative/pv\\_cell.htm](http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/alternative/pv_cell.htm)]

## 2.7 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα φ/β ξεκίνησαν να κάνουν την εμφάνισή τους σχετικά νωρίς, παράλληλα με τη χρήση άλλων ΑΠΕ, αλλά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοση των φ/β συνεχώς βελτιωνόταν. Βασικός πελάτης των φ/β τα χρόνια που ακολούθησαν, είναι η NASA. Το υψηλό κόστος εγκατάστασης φ/β είναι ο πιο σημαντικός λόγος της μη ένθερμης αποδοχής από την αγορά. Για παράδειγμα, η τιμή των φ/β ξεκίνησε από τα 500\$ ανά εγκατεστημένο Watt το 1956,

ενώ, μετά από 14 χρόνια, το 1970 έφτασε τα 100\$/Watt. Το 1973, οι βελτιώσεις στις μεθόδους παραγωγής έφεραν το κόστος των φωτοβολταϊκών στα 50\$/Watt.

Η πρώτη εγκατάσταση φ/β που φτάνει στα επίπεδα του 1MW έγινε το 1980 στην Καλιφόρνια, από την εταιρεία ARCO Solar, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου 2 αξόνων. Η εξέλιξη αρχίζει πλέον να γίνεται με ταχύτερους ρυθμούς. Το 1983 η παγκόσμια παραγωγή φ/β έφτασε τα 22MW και ο συνολικός τζίρος τα 250.000.000\$.

Μερικά χρόνια αργότερα, το 1999, η εταιρία Spectrolab συνεργαζόμενη με το εργαστήριο National Renewable Energy Laboratory (NREL) των Η.Π.Α. αναπτύσσει ένα φ/β στοιχείο με απόδοση 32.3%. Την ίδια χρονιά το ρεκόρ στην απόδοση των Thin Films φτάνει στο 18.8%. Η παραγωγή όλων των τεχνολογιών των φ/β πλαισίων φτάνει συνολικά τα 200 MW.

Από το 2004 και μετά, η μαζική είσοδος μεγάλων εταιρειών στον χώρο των φ/β φέρνει την μαζική παραγωγή και αυτή με την σειρά της την τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων στα 6.5 €/Wh. Η Γερμανία και η Ιαπωνία κυριαρχούν στην κατασκευή φ/β πλαισίων και σε όλες τις αναπτυγμένες χώρες αρχίζουν να υιοθετούν τις τεχνολογίες των φ/β και να τις παγιώνουν στην συνείδηση των επενδυτών αλλά και των καταναλωτών ενέργειας. Η συνολική παραγωγή το 2004 έφτασε τα 1.200 MW ενώ ο τζίρος της ίδιας χρονιάς άγγιξε τα 6.500.000.000\$.

Στη σημερινή εποχή, με οικονομίες μεγάλης κλίμακας έχουν επιτευχθεί μεγάλες αποδόσεις στα κρυσταλλικά, κυρίως, υλικά και αρκετές χώρες με πρωτοπόρες την Γερμανία και την Ιαπωνία έχουν ήδη επενδύσει τεράστια κονδύλια με σκοπό την ευρύτερη εκμετάλλευση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Η παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών έχει αυξηθεί τα τελευταία είκοσι χρόνια. Από το 1982 τα φ/β συστήματα παρουσιάζουν μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης 15%. Ο μεγάλος αυτός ρυθμός ανάπτυξης που καταγράφεται προκύπτει από τη μείωση του κόστους και τις τεχνικές κατασκευαστικές βελτιώσεις στη σχεδίαση, τα υλικά και στην κατασκευή των ηλιακών στοιχείων που έχουν αυξήσει την απόδοση της λειτουργίας τους και έχουν μειώσει το κόστος. Είναι γεγονός ότι από την πρώτη τους εμφάνιση τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν παρουσιάσει είκοσι φορές πτώση τους

κόστους τους, ενώ αναμένεται αυτό να μειωθεί ακόμα περισσότερο και να φτάσει το 1,3 ευρώ ανά watt, μέχρι το 2030.

Τα συστήματα αυτά εάν καλύπτουν μεγάλη έκταση μπορούν να λειτουργήσουν είτε αυτόνομα τροφοδοτώντας με ηλεκτρική ενέργεια μία συγκεκριμένη μονάδα εξασφαλίζοντας το σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία της είτε ως διασυνδεδεμένα συστήματα με το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή τροφοδοτούν το δίκτυο με την παραγόμενη από αυτά ηλεκτρική ενέργεια για να μεταφερθεί και να καταναλωθεί αλλού.

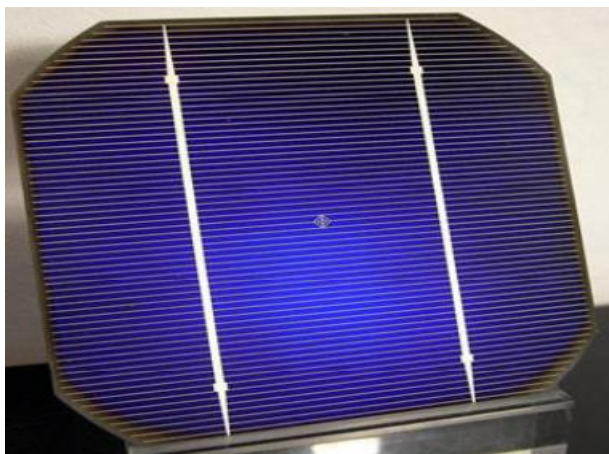
Τα φ/β συστήματα αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή ΑΠΕ (Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας) και είναι η πιο γνωστή μορφή στο ευρύ κοινό. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα τα οποία αναφέρονται παρακάτω. Ξεκινώντας από τα μειονεκτήματα, βασικό μειονέκτημα ενός φ/β είναι η ανάγκη κάλυψης μεγάλων εκτάσεων γης για την παραγωγή αξιόλογου ποσού ενέργειας. Αυτή η αλλαγή χρήσης της γης κοστίζει τόσο στο περιβάλλον όσο και στην γεωργία αφού περιορίζεται η παραγωγή τροφίμων. Επίσης, το κόστος αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά όμως, τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την εφαρμογή τους αποτελούν σημαντικό στοιχείο για την ανάπτυξή τους. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμά τους είναι μηδενικό αφού δεν προκαλούν θόρυβο, ούτε ρυπαίνουν. Ταυτόχρονα, μετά την εγκατάστασή τους δεν χρειάζονται ιδιαίτερη συντήρηση και απολαμβάνουν μεγάλη διάρκεια ζωής που μπορεί να ξεπεράσει τα είκοσι χρόνια. Τέλος, αποτελούν μια αξιόπιστη λύση ενεργειακής επάρκειας για περιοχές απομακρυσμένες και μη διασυνδεδεμένες με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Πιο συγκεκριμένα, για τα θερμικά ηλιακά συστήματα ακόμα και αν υπάρχει σύνδεση στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, η λειτουργία τους εξομαλύνει τις αιχμές φορτίου με αποτέλεσμα την αποφυγή πτώσης του. Αν υποθέσουμε ότι η παραγωγή και η κατανάλωση σε ένα τέτοιο ηλιακό σύστημα γίνεται τοπικά, αποφεύγονται οι απώλειες μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού, κάτι που αντιστοιχεί στην κατά 10% εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τη συμβατική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του δικτύου.

## Τύποι φ/β κελιών

Τα ηλιακά κελιά έχουν συνήθως τετράγωνο σχήμα πλευράς περίπου 10 εκατοστών. Ένα ηλιακό κελί παράγει πολύ μικρή ισχύ, μικρότερη από 2W και έτσι ενώνονται ηλεκτρικά σε συνέχεια ή παράλληλα σχηματίζοντας τα φ/β πάνελ. Οι κυριότεροι τύποι ηλιακών κελιών δίνονται αναλυτικά παρακάτω.

### I. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

Τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από ένα μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο πυριτίου. Τα κελιά αυτά κατασκευάζονται με μία διαδικασία γνωστή ως διαδικασία «Czochralski». Χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση της τάξης του 15-18% αλλά και από υψηλότερο κόστος. Τα ηλιακά κελιά κατασκευάζονται σε σχήμα κύκλου ή τετράγωνα. Το χρώμα τους είναι βαθύ μπλε έως μαύρο όταν διαθέτουν αντί-ανακλαστική (AR) επίστρωση ή γκρι. Στην Εικόνα που ακολουθεί διαφαίνεται ένα φ/β με μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.



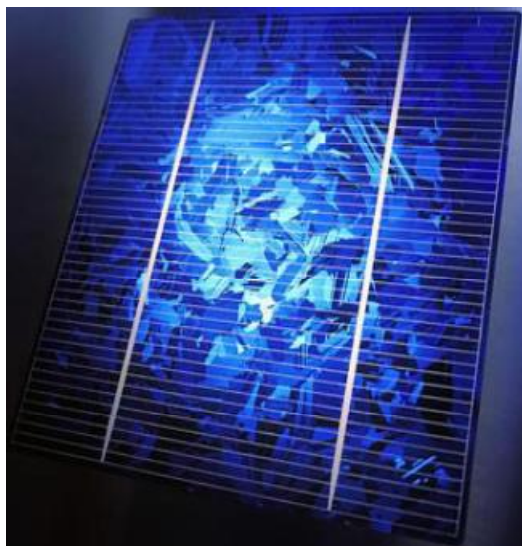
Εικόνα : Πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου

[Πηγή [http://www.m0ukd.com/Solar\\_Panels/](http://www.m0ukd.com/Solar_Panels/)]

### II. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Τα κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι πιο φθηνά από αυτά του μονοκρυσταλλικού πυριτίου αλλά και λιγότερο αποδοτικά. Όπως προκύπτει και από τον όρο, κατασκευάζονται από δίσκους πυριτίου που κόβονται από τετραγωνισμένους ράβδους πυριτίου. Η μέθοδος κατασκευής ενός πολυκρυσταλλικού κελιού απαιτεί πολύ μικρότερη ακρίβεια και κόστος σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά κελιά. Η

απόδοση τους κυμαίνεται από 13% έως 16% και κατασκευάζονται συνήθως σε τετράγωνο σχήμα. Το χρώμα τους είναι συνήθως μπλε (με αντί-ανακλαστική επίστρωση) ή γκρι-ασημί (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση). Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα φ/β αυτού του τύπου.



Εικόνες : Πλαίσιο άμορφου πυριτίου

[Πηγή [http://www.m0ukd.com/Solar\\_Panels/](http://www.m0ukd.com/Solar_Panels/) ]

### III. Άμορφο πυρίτιο

Το άμορφο πυρίτιο αποτελεί την πιο συνηθισμένη και πιο διαδεδομένη μορφή κελιών λεπτής μεμβράνης, τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ηλεκτρονικά προϊόντα ευρείας κατανάλωσης π.χ. υπολογιστές τσέπης. Το άμορφο πυρίτιο διαφέρει από το κρυσταλλικό στο ότι τα άτομα δεν είναι τοποθετημένα σε ακριβείς αποστάσεις μεταξύ τους και οι γωνίες των δεσμών τους δεν είναι συγκεκριμένες. Το άμορφο πυρίτιο μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα αγωγίμο υπόστρωμα, σε ένα στρώμα πάχους μερικών μικρομέτρων δημιουργώντας ένα κελί τεχνολογίας λεπτής μεμβράνης. Η διαδικασία τοποθέτησης επιτρέπει στο άμορφο πυρίτιο να έχει λιγότερο από 1% του πάχους ενός κρυσταλλικού κελιού. Σήμερα, ένα εμπορικό φ/β πλαίσιο με κελιά άμορφου πυριτίου έχει απόδοση 6-8%, ενώ τα κελιά μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται στο 13-18%. Τέλος, τα κελιά αυτά παρουσιάζουν μεγάλη απώλεια απόδοσης όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, γεγονός που τα καθιστά ακατάλληλα για χρήση στην Ελλάδα. Επίσης, δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής εύκαμπτων φ/β πλαισίων.

#### IV. Κελιά χαλκού-Ινδίου / Γαλλίου – Δισεληνιούχου

Αποτελεί μία από τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογίες, όπου κελιά λεπτού υμενίου κατασκευάζονται από έναν συνδυασμό χαλκού-ινδίου-δισεληνιούχου και χαλκού-γαλλίου-δισεληνιούχου (κελιά CIGS). Τα κελιά αυτά έχουν επιδείξει αποδόσεις της τάξης του 19,9%, που αποτελεί την υψηλότερη για κελιά λεπτού υμενίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ

#### 3.1 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ

##### 3.1.1 ΔΙΗΘΗΣΗ

Η διήθηση, η οποία ονομάζεται επίσης και διύλιση ή φιλτράρισμα, είναι η διαδικασία με την οποία καθαρίζει το νερό στη φύση. Τα επιφανειακά νερά που διηθούνται στο υπέδαφος καθαρίζονται από τα αιωρούμενα στερεά που προκαλούν θολερότητα. Τα αιωρούμενα στερεά κατακρατούνται/φιλτράρονται από τα εδαφικά στρώματα.

Η διεργασία της διήθησης αποτελεί μια από τις πιο βασικές μεθόδους για τον καθαρισμό νερού. Το νερό διηθείται συνήθως δια μέσου κλινών με πορώδη υλικά (π.χ. άμμο, κοκκώδη ενεργό άνθρακα). Η διήθηση εφαρμόζεται από πολύ παλαιά χρόνια. Υπάρχουν αρκετές αναφορές στην αρχαιότητα, που περιγράφουν τη διεργασία της διήθησης σε πορώδη κεραμικά υλικά.

Η διήθηση γίνεται μέσω φίλτρων, τα οποία ταξινομούνται σε σχέση με την πίεση του νερού σε (α) φίλτρα βαρύτητας, και (β) φίλτρα πίεσεως. Τα φίλτρα βαρύτητας είναι κατασκευές ανοικτές στην ατμόσφαιρα. Το νερό περνάει μέσα από το φίλτρο με τη βαρύτητα. Τυπικό πιεζομετρικό ύψος σε φίλτρα βαρύτητας είναι 2-3 m. Τα φίλτρα πίεσεως είναι κλειστά δοχεία με μεταλλικά τοιχώματα. Το νερό εισέρχεται στα φίλτρα αυτά με αρκετή πίεση.

Ταξινόμηση των φίλτρων διήθησης μπορεί να γίνει επίσης σύμφωνα με το ρυθμό διήθησης σε (α) βραδέα φίλτρα, και (β) ταχεία φίλτρα. Τα βραδέα ή χαμηλής ροής φίλτρα αποτελούνται από ένα στρώμα άμμου πάχους 60-120 cm το οποίο βρίσκεται πάνω από ένα στρώμα χαλικιών πάχους περίπου 30 cm. Τα χαλίκια τοποθετούνται σε μία κατασκευή στήριξης η οποία επιτρέπει και τη στράγγιση του φίλτρου. Η ροή του νερού μέσα από το φίλτρο γίνεται με την βαρύτητα. Τα πρώτα εκατοστά του βάθους της άμμου κατακρατούν μικροοργανισμούς και αιωρούμενα κολλοειδή/στερεά. Το επιφανειακό αυτό στρώμα ονομάζεται *schmutzdecke* (γερμανικά για το στρώμα με βρώμα). Όταν το στρώμα *schmutzdecke* μαζέψει πολλά στερεά και αναπτύξει αρκετό βιολογικό όγκο ώστε να αυξηθεί η πιεζομετρική απώλεια δια μέσω του φίλτρου, τότε το επιφανειακό στρώμα αντικαθίσταται με καθαρή άμμο.

Τα ταχεία φίλτρα αποτελούνται από ένα στρώμα άμμου πάχους 50-100 cm (υπάρχουν και ταχεία φίλτρα με πολλαπλά στρώματα πληρωτικού υλικού) τοποθετημένο πάνω σε ένα στρώμα από χαλίκι το οποίο είναι διαβαθμισμένο σε στρώσεις με συνολικό πάχος περίπου 40 cm. Τα χαλίκια στηρίζονται σε ειδικά σχεδιασμένο στραγγιστικό πυθμένα. Η παροχή νερού είναι περίπου 100 φορές μεγαλύτερη από ότι στα βραδέα φίλτρα. Ως εκ τούτου η απομάκρυνση των στερεών γίνεται σε όλο το βάθος του φίλτρου (deep bed filtration). Προφανώς, στα ταχεία φίλτρα συγκρατούνται μεγαλύτερες ποσότητες αιωρούμενων στερεών (ανά μονάδα χρόνου). Άρα, απαιτείται συχνός καθαρισμός του πληρωτικού υλικού. Ο καθαρισμός συνήθως γίνεται με παροχή νερού ή και αέρα από τον πυθμένα σε αντίθετη κατεύθυνση από τη ροή διήθησης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται διαστολή του στρώματος άμμου και διευκολύνεται το ξεκόλλημα και η μεταφορά των στερεών τα οποία έχουν αφαιρεθεί από το νερό κατά τη διάρκεια της διήθησης. Το νερό μετά τον καθαρισμό του φίλτρου παραλαμβάνεται από τα κανάλια που είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια του φίλτρου. Σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται και επιφανειακός καθαρισμός της άμμου με ακροφύσια τα οποία είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια του φίλτρου. Τα ακροφύσια μπορεί να είναι σταθερά ή περιστρεφόμενα

Παράμετρος/Χαρακτηριστικό	Βραδέα Φίλτρα	Ταχεία Φίλτρα
Ταχύτητα διήθησης (m/hr)	0,02 - 0,2	5 - 15
Μέγεθος μονάδας (m <sup>3</sup> )	1000 - 2000	50 - 100
Πάχος στρώματος διήθησης (cm)	60 - 120	50 - 100
Πάχος στρώματος με χαλίκι (cm)	30	40
Χαρακτηριστικά άμμου		
Ενεργό μέγεθος (mm)*	0,2 - 0,4	0,4 - 0,7
Συντελεστής ομοιομορφίας**	2 - 3	1,4 - 1,7
Υδραυλική απώλεια (m)	0,15 - 1,5	0,3 - 3
Χρόνος λειτουργίας μεταξύ καθαρισμών (hr)	500 - 1500	10 - 100
Ποσοστό καθαρισμένου νερού που χρησιμοποιείται στον καθαρισμό του φίλτρου(%)	0,2 - 0,6	1 - 6
Τύπος διήθησης	Επιφανειακή	Σε όλο το βάθος της κλίνης (deep bed filtration)
Αποτελεσματικότητα - καταλληλότητα	Βακτήρια, μέτρια θολαρότητα	Μεγάλη θολαρότητα

\* Το ενεργό μέγεθος αντιστοιχεί στη διάσταση ανοίγματος από κόσκινο που επιτρέπει 10% κατά βάρος των κόκκων να περάσουν ( $d_{10}$ ).

\*\* Συντελεστής ομοιομορφίας =  $d_{80}/d_{10}$ .

**Πίνακας 3.1: Σύγκριση φίλτρων βαρύτητας**



Άλλη ταξινόμηση των φίλτρων διήθησης, μπορεί να γίνει σύμφωνα με την κατεύθυνση της ροής του νερού, σε (α) φίλτρα καθοδικής ροής, (β) φίλτρα ανοδικής ροής, και (γ) φίλτρα ανοδικής και καθοδικής ροής.

Ταξινόμηση των φίλτρων διήθησης μπορεί να γίνει και βάσει του αριθμού στρωμάτων διήθησης σε (α) μονοστρωματικά και (β) πολυστρωματικά φίλτρα. Τα μονοστρωματικά φίλτρα διήθησης έχουν τυπικό πληρωτικό υλικό χαλαζιακή άμμο. Τα πολυστρωματικά φίλτρα συνήθως έχουν δύο με τρία στρώματα. Το στρώμα του πληρωτικού υλικού με το μεγαλύτερο μέγεθος και το ελαφρότερο υλικό τοποθετείται στο πάνω μέρος του φίλτρου και το στρώμα με το μικρότερο μέγεθος και το βαρύτερο υλικό στο κάτω μέρος.

### **3.1.1.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ**

Τα αιωρούμενα στερεά αφαιρούνται από το νερό κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διήθησης με μηχανισμούς μηχανικής παρεμπόδισης (στράγγισης). Ο μηχανισμός της στράγγισης παρατηρείται όταν το μέγεθος των στερεών είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος των διάκενων που υπάρχουν μεταξύ των συλλεκτών που πληρούν την κλίση διήθησης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στράγγιση μπορεί να επιτευχθεί είτε στην επιφάνεια της κλίνης ή βαθύτερα μέσα στην κλίση.

Εκτός από την αφαίρεση αιωρούμενων στερεών εξαιτίας του μηχανισμού στράγγισης, τα αιωρούμενα στερεά μπορούν να αφαιρεθούν από το νερό επίσης με τους μηχανισμούς: ανάσχεσης (interception), καθίζησης (sedimentation), και διάχυσης (diffusion). Ανάσχεση αιωρούμενων στερεών σε συλλέκτες (πληρωτικό υλικό) παρατηρείται όταν τα στερεά βρίσκονται σε γραμμές ροής πολύ κοντά στην επιφάνεια του συλλέκτη, ώστε να προκύψει σύγκρουση μεταξύ αιωρούμενων στερεών και συλλέκτη. Ο βαθμός ανάσχεσης αυξάνει με το μέγεθος των αιωρούμενων στερεών. Ο μηχανισμός της καθίζησης βασίζεται στη βαρύτητα και είναι ουσιαστικός μόνον όταν η ταχύτητα καταβύθισης των αιωρούμενων στερεών είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ταχύτητα διήθησης του νερού στην κλίση. Η μεταφορά μικρών αιωρούμενων στερεών (< 1 μm) ελέγχεται από το μηχανισμό της διάχυσης, ο οποίος βασίζεται στη θερμική κίνηση Brown.

### 3.1.2 ΔΙΥΛΙΣΗ

Το νερό περνά μέσα από παχύ στρώμα άμμου και διαυγάζει ακόμη περισσότερο καθώς η άμμος συγκρατεί στερεά υπολείμματα που έχουν μείνει σ' αυτό.

Η διύλιση επιτυγχάνεται με κοκκώδη υλικά σε κλίνες και εφαρμόζεται για την απομάκρυνση αργίλων, μικροοργανισμών και προϊόντων ιζηματοποίησης. Περιλαμβάνει πολλές παραλλαγές όπως η διήθηση χώρου, η διήθηση επιφάνειας κ.λ.π. που βασίζονται στη διήθηση του νερού, με βαρύτητα ή υπό πίεση, με διάφορους συνδυασμούς διηθητικών μέσων όπως η άμμος, ο ανθρακίτης και διάφορες συνθετικές ίνες και μεμβράνες. Τα φίλτρα της άμμου είναι διαδοχικά στρώματα λεπτού χαλικιού (4-8 mm) και χονδρής ή λεπτής άμμου με κατά το δυνατόν ομοιόμορφο μέγεθος κόκκων (1-1,6 mm). Τα πιο πολλά διυλιστήρια νερού αποτελούνται συνήθως από πολλές δίδυμες κλίνες άμμου ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης και τον όγκο του προς επεξεργασία νερού.



Εικόνα 1: Κλίνες διύλισης νερού στην Ε.Ε.Ν. Θεσσαλονίκης

Το νερό διέρχεται κατακόρυφα από το στρώμα του κοκκώδους υλικού το οποίο συγκρατεί τα κολλοειδή στερεά με τους μηχανισμούς προσρόφησης, καθίζησης και σουρώματος. Το μεγάλο μέγεθος κόκκων και συνεπώς και των κενών συνεπάγεται την ανάγκη μεγάλου πάχους διυλιστικού στρώματος (περίπου 2.0 m). Το διυλισμένο νερό συγκεντρώνεται στον υποδαπέδιο χώρο από όπου απομακρύνεται. Με την πάροδο του χρόνου τα κενά του διυλιστηρίου γεμίζουν και η διαπερατότητά του μικραίνει. Όταν η θολότητα του διυλισμένου νερού υπερβεί το ανώτατο επιτρεπτό όριο η διαδικασία της διύλισης διακόπτεται για να ακολουθήσει η διαδικασία έκπλυσης η οποία διαρκεί περίπου 10 min. Αέρας και νερό διοχετεύεται από κάτω προς τα επάνω στο στρώμα της άμμου διαμέσου του υποδαπέδιου χώρου. Το

ακάθαρτο νερό συλλέγεται από οριζόντιες διώρυγες και οδηγείται σε ειδική δεξαμενή εξισορρόπησης απ' όπου και πάλι διοχετεύεται στη γραμμή επεξεργασίας με σχετικά μικρή παροχή. Μετά την κροκίδωση - καθίζηση το νερό έχει συνήθως θολότητα μερικών NTU (Nephelometric Turbidity Units). Με τη διύλιση η θολότητα του νερού μειώνεται ακόμη και κάτω από 1,0 NTU. Η διύλιση συμβάλλει επίσης σημαντικά στην απομάκρυνση των μικροοργανισμών που διαφεύγουν από την προαπολύμανση και από την κροκίδωση - καθίζηση.

## 3.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ

### 3.2.1 ΑΠΟΛΥΜΑΝΤΙΚΑ

Απολύμανση είναι ο καθαρισμός του νερού (ή λυμάτων) από παθογόνους μικροοργανισμούς. Η απολύμανση έχει σκοπό την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών, δηλαδή την παρεμπόδιση της ανάπτυξης και αναπαραγωγής τους. Η απολύμανση δεν σημαίνει θανάτωση των μικροοργανισμών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μικροοργανισμοί καταστρέφονται μόνο με τη διαδικασία της αποστείρωσης. Η απολύμανση του νερού γίνεται με (α) χλωρίωση, (β) διοξείδιο του χλωρίου, (γ) οζόνωση, και (δ) υπεριώδη ακτινοβολία.

Μέθοδος	Υπέρ	Κατά
Χλωρίωση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αξιόπιστη</li> <li>• Φθηνή μέθοδος</li> <li>• Απλή τεχνολογία</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χαμηλή αποτελεσματικότητα για τους ιούς</li> <li>• Προβλήματα οσμής και γεύσης</li> <li>• Παραπροϊόντα</li> <li>• Ακριβή μέθοδος</li> <li>• Τοξικά παραπροϊόντα</li> </ul>
Διοξείδιο του χλωρίου	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αποτελεσματική τεχνολογία για τα βακτήρια και τους ιούς</li> <li>• Δεν συμβάλλει στη δημιουργία τριαλομεθανίων (THM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ακριβή μέθοδος</li> <li>• Χαμηλή αποτελεσματικότητα για τα βακτήρια (E. coli)</li> <li>• Ακριβή μέθοδος</li> <li>• Μη-αποτελεσματική μέθοδος για μεγάλους μικροοργανισμούς (π.χ. πρωτόζωα)</li> </ul>
Οζόνωση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ισχυρό οξειδωτικό</li> <li>• Δεν δημιουργεί THMs</li> <li>• Αποτελεσματική τεχνολογία για τους ιούς</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ακριβή μέθοδος</li> <li>• Χαμηλή αποτελεσματικότητα για τα βακτήρια (E. coli)</li> <li>• Ακριβή μέθοδος</li> <li>• Μη-αποτελεσματική μέθοδος για μεγάλους μικροοργανισμούς (π.χ. πρωτόζωα)</li> </ul>
UV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αποτελεσματική τεχνολογία για τα βακτήρια και τους ιούς</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ακριβή μέθοδος</li> <li>• Χαμηλή αποτελεσματικότητα για τα βακτήρια (E. coli)</li> <li>• Ακριβή μέθοδος</li> <li>• Μη-αποτελεσματική μέθοδος για μεγάλους μικροοργανισμούς (π.χ. πρωτόζωα)</li> </ul>

### 3.2.1 ΧΛΩΡΙΩΣΗ

Παρά τα ανεπιθύμητα παραπροϊόντα που παράγονται με την χλωρίωση του νερού, το χλώριο είναι το περισσότερο διαδεδομένο απολυμαντικό λόγω της βακτηριοκτόνου δράσης του. Το χλώριο αντιδρά με διάφορες οργανικές ενώσεις και παράγει χημικές ενώσεις αντικατάστασης, οι οποίες ονομάζονται τριαλογονομεθάνια ή τριαλομεθάνια (trihalomethanes, THM). Τα THM είναι διαλυτοί στο νερό χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες πολλοί από τους οποίους δημιουργούν σημαντικά προβλήματα ποιότητας στο νερό γιατί έχουν θεωρηθεί ως επικίνδυνα καρκινογόνα με αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία. Τα πλέον συνηθισμένα τριαλομεθάνια που παράγονται είναι: χλωροφόρμιο, βρωμοδιχλωρομεθάνιο, χλωροδιβρωμομεθάνιο, και βρωμοφόρμιο. Επίσης, το χλώριο δημιουργεί πολλά προβλήματα σε υδρόβιους οργανισμούς. Για τους λόγους αυτούς η USEPA (1985) συνιστά ότι το συνολικό υπολειμματικό χλώριο σε γλυκά, νερά δεν πρέπει να υπερβαίνει το όριο των 11 μg/L.

Το χλώριο είναι ένα πράσινο κίτρινο αέριο, 2,5 φορές βαρύτερο από τον αέρα. Υπό πίεση, το χλώριο μετατρέπεται σε υγρό με χρώμα κεχριμπάρι. Η επιτρεπτή συγκέντρωση του χλωρίου στην ατμόσφαιρα είναι 0,5 ppm. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις (>10 ppm) το χλώριο είναι επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Η διαλυτότητα του αερίου χλωρίου στο νερό είναι σχετικά μικρή και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση. Όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία, τόσο ελαττώνεται η συγκέντρωση του χλωρίου στο νερό και η απολυμαντική ικανότητα του χαμηλώνει.

### 3.2.3 ΟΖΟΝΩΣΗ

Στη δεκαετία του 1970 άρχισαν να αναγνωρίζονται τα σοβαρά προβλήματα με τις ενώσεις τριαλομεθανίων που δημιουργούνται κατά την απολύμανση του πόσιμου νερού ή λυμάτων με χλώριο από την αντίδραση του αερίου χλωρίου με τις διάφορες οργανικές ουσίες που τυχόν περιέχονται στα υπό επεξεργασία υγρά. Έτσι άρχισαν εντατικές ερευνητικές δραστηριότητες για την εξεύρεση εναλλακτικών απολυμαντικών μέσων, τα οποία θα είχαν την αποτελεσματικότητα του χλωρίου δίχως την παραγωγή ανεπιθύμητων παραπροϊόντων. Πολλές προκαταρκτικές μελέτες έδειξαν ότι το

ισχυρό οξειδωτικό όζον είναι πολύ αποτελεσματικό για την απολύμανση του πόσιμου νερού. Η έρευνα για την καλύτερη κατανόηση της κινητικής που έχουν σχέση με την τεχνολογία της οζόνωσης συνεχίζεται και σήμερα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διεργασία της οζόνωσης *απαρτίζεται από μια ετερογενή αντίδραση αερίου-υγρού και έχει τεράστιο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον γιατί είναι μια από τις λίγες πρακτικές εφαρμογές εκτός της χημικής βιομηχανίας όπου εμπλέκονται διάφορες αρχές της χημικής μηχανικής (π.χ. φαινόμενα μεταφοράς, χημική κινητική, σχεδιασμός αντιδραστήρων, κ.λ.π.).*

Το 1785, ο Ολλανδός χημικός Martinus van Marum υποψιάστηκε για πρώτη φορά την ύπαρξη μιας καινούργιας χημικής ένωσης στην οσμή που εκλύεται από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις των καταιγίδων. Τελικά, το 1840, ο Γερμανός καθηγητής χημείας του Πανεπιστημίου της Βασιλείας (Basel) Christian Friedrich Schonbein ανακάλυψε το όζον κατά τη διάρκεια πειραμάτων αργής οξείδωσης φωσφόρου και ηλεκτρόλυσης νερού και ονόμασε την εκλυόμενη αέρια ουσία όζον από την ελληνική λέξη όζω. Η χημική δομή του όζοντος σαν τριατομικό μόριο οξυγόνου,  $O_3$ , επιβεβαιώθηκε το 1863 από τον Ελβετό χημικό Jacques Louis. Η ύπαρξη του τρίτου ατόμου οξυγόνου στο μόριο του όζοντος το κάνει να είναι πολύ δραστικό, και γι' αυτό το λόγο το όζον είναι γνωστό και σαν ενεργό οξυγόνο.

Το όζον σε αέρια μορφή έχει χρώμα μπλε, σε υγρή μορφή χρώμα μαύρο-μπλε και σε στερεά μορφή μαύρο. Έχει χαρακτηριστική οσμή (φρέσκου και καθαρού αέρα) η οποία γίνεται αντιληπτή από την ανθρώπινη όσφρηση ακόμη και σε συγκεντρώσεις 0,01 - 0,04 ppm. Τόσο το υγρό όσο και το στερεό όζον είναι εξαιρετικώς ασταθή και διασπώνται εκρηκτικά προς αέριο οξυγόνο. Το μόριο του όζοντος έχει μη γραμμική διάταξη και τα 3 άτομα οξυγόνου σχηματίζουν γωνία  $116,8^\circ$  με μήκος δεσμών  $-O-O-$  1,278 Å. Η διαμόρφωση των ηλεκτρονίων έχει τέσσερις δομές. Οι δομές I και II παρουσιάζουν μια απλή αντιμετάθεση απλού και διπλού δεσμού. Επίσης σπανιότερα εμφανίζονται οι δομές III και IV εξαιτίας της έλξης των θετικά και αρνητικά φορτισμένων παρακείμενων ατόμων οξυγόνου, γιατί τα 3 άτομα οξυγόνου σχηματίζουν γωνία μικρότερη των  $120^\circ$ . Έχει υπολογιστεί ότι ο δεσμός μεταξύ δύο ατόμων οξυγόνου σε ένα μόριο όζοντος είναι ένας διπλός δεσμός με πιθανότητα 50%.

Οι τυπικές φυσικοχημικές ιδιότητες του όζοντος δίνονται στον Πίνακα 2

Ιδιότητα	Τιμή
Σχετική μοριακή μάζα	47,998
Σημείο βρασμού	-111,9 °C
Σημείο τήξης	-192,5 °C
Κρίσιμη θερμοκρασία	-12,1 °C
Κρίσιμος πίεση	5,53 MPa (54,6 atm)
Πυκνότητα (υγρή φάση)	1,358 g/mL (-112 °C)
	1,571 g/mL (-183 °C)
	1,614 g/mL (-195,4 °C)
Πυκνότητα (αέρια φάση)	2,144 g/mL (0 °C, 1atm)
Θερμοχωρητικότητα (αέρια φάση)	33,3 J/g·mol°C (-173 °C)
Δυναμικό ιξώδες (υγρή φάση)	1,57 mPa·s (-183 °C)
Επιφανειακή τάση	38,1 mN/m (-182,7 °C)
Διαλυτότητα στο νερό	0,105 g/100mL (0 °C)

## Πίνακα 2: Ιδιότητες του όζοντος

Η απολύμανση νερού με όζον γίνεται συνήθως σε καλυμμένες δεξαμενές όπου αέρας εμπλουτισμένος με αέριο όζον τροφοδοτείται στη μάζα του νερού με τη βοήθεια ειδικών ακροφυσίων. Το όζον διαλύεται στο νερό με εμφύσηση φυσαλίδων. Καλύτερη επαφή των δύο ρευστών (φυσαλίδων και νερό) επιτυγχάνεται μέσα σε μαιανδρικές δεξαμενές ή και με παράλληλη εφαρμογή μηχανικής ανάδευσης. Οι δεξαμενές είναι κλειστές ώστε το όζον στα απαέρια να μην καταλήγει στην ατμόσφαιρα του εργασιακού περιβάλλοντος, γιατί η συγκέντρωση του όζοντος στο εργασιακό περιβάλλον δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1 ppm. Επομένως τα απαέρια μεταφέρονται προς καταστροφή με χρήση θερμικού, χημικού, ή καταλυτικού μετατροπέα. Η πλέον εύχρηστη διαδικασία καταστροφής όζοντος στα απαέρια είναι η χρήση κλινών ενεργού άνθρακα. Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. όταν μετά το στάδιο απολύμανσης του νερού δεν ακολουθεί στάδιο αφαίρεσης οργανικού υλικού) είναι απαραίτητο να καταστραφεί και το υπολειπόμενο διαλυμένο όζον στο ρεύμα εξόδου από τη δεξαμενή απολύμανσης ώστε να αποφευχθεί η πιθανή βιολογική ανάπτυξη στο δίκτυο διανομής. Επίσης έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία ότι τα

υπολείμματα όζοντος είναι πιθανόν να έχουν σημαντική τοξικότητα σε υδρόβιους οργανισμούς.

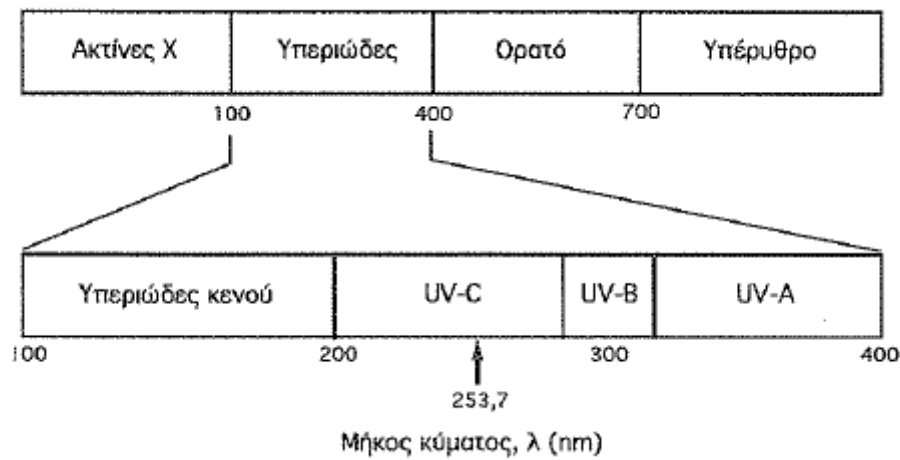
Για την αποτελεσματική διάλυση του όζοντος στο νερό χρησιμοποιούνται διάφοροι σχεδιασμοί αντιδραστήρων απολύμανσης με εμφύσηση φυσαλίδων. Οι δεξαμενές διάλυσης-επαφής κατασκευάζονται από μπετόν, ανοξείδωτο χάλυβα ή πλαστικό με ύψος νερού περίπου 4-5 m. Οι τυπικές δεξαμενές διάλυσης-επαφής όζοντος αποτελούνται από δύο έως πέντε θαλάμους σε σειρά. Η επαφή του νερού με τις φυσαλίδες μπορεί να είναι σε ομορροή ή αντιρροή.

Εξαιτίας της μεγάλης οξειδωτικής ισχύος του, το όζον χρησιμοποιείται όχι μόνο για την απολύμανση του νερού, αλλά και για απομάκρυνση του χρώματος του νερού, απομάκρυνση οσμών, απομάκρυνση σιδήρου, μαγγανίου και θείου, απομάκρυνση οργανικών υλικών, διάσπαση απορρυπαντικών. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα μεγάλο πλεονέκτημα του όζοντος είναι ότι δεν σχηματίζει τριαλο- μεθάνια (THMs) και έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία ότι η επεξεργασία νερού και υγρών αποβλήτων με όζον πριν την απολύμανση με χλώριο, ελαττώνει το σχηματισμό των THMs.

### 3.2.4 ΥΠΕΡΙΩΔΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (UV)

Η χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) για την απολύμανση πόσιμου νερού και υγρών αποβλήτων έχει αποδειχθεί ότι είναι μια αποδοτική μέθοδος για την καταστροφή βακτηρίων και ιών. Η απολύμανση με ακτινοβολία UV αποτελεί περισσότερο μία φυσική παρά χημική διαδικασία η οποία δεν παράγει ανεπιθύμητα επικίνδυνα παραπροϊόντα. Τα φωτόνια της ακτινοβολίας UV προσβάλλουν το DNA (deoxyribonucleic acid δεοξυριβονουκλεϊκό οξύ) και RNA (ribonucleic acid, ριβονου- κλεϊκό οξύ) των μικροοργανισμών ώστε να μην είναι δυνατή η αναπαραγωγή τους. Θα πρέπει να σημειωθεί όμως ότι ορισμένοι μικροοργανισμοί είναι ικανοί να επιδιορθώνουν τις βλάβες (reactivation) που έχει υποστεί το γενετικό τους υλικό και να αναιρέσουν την απολυμαντική επίδραση της ακτινοβολίας UV. Η επιδιόρθωση αυτή ονομάζεται φωτοεπιδιόρθωση (photoreactivation) γιατί βασίζεται στην έκθεση του κατεστραμμένου μικροοργανισμού σε ηλιακή ακτινοβολία.

Επομένως, η φωτοεπιδιόρθωση μπορεί να αποφθεχθεί αν το επεξεργασμένο νερό δεν παραμένει σε δεξαμενές οι οποίες είναι ανοικτές στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1: Τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και οι υποδιαιρέσεις της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Η ακτινοβολία UV, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, εκτείνεται στην περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που βρίσκεται μεταξύ των μηκών κύματος 100 nm και 400 nm και υποδιαιρείται σε τέσσερις σειρές που αντιστοιχούν στις ακτινοβολίες: υπεριώδες κενού (vacuum UV), UV-A, UV-B και UV-C. Η ακτινοβολία UV-A χαρακτηρίζεται ως ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (315 nm έως 400 nm) και προκαλεί το μαύρισμα της επιδερμίδας. Η ακτινοβολία UV-B χαρακτηρίζεται ως ακτινοβολία μεσαίου μήκους κύματος (280 nm έως 315 nm) και προκαλεί εγκαύματα ή και καρκίνο του δέρματος. Η ακτινοβολία UV-C χαρακτηρίζεται ως ακτινοβολία βραχέου μήκους κύματος (100 nm έως 280 nm), είναι η ισχυρότερη των τριών κατηγοριών υπεριώδους ακτινοβολίας και είναι πολύ αποτελεσματική για την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών.

Η ακτινοβολία UV παράγεται συνήθως από λάμπες ατμών υδραργύρου: χαμηλής πίεσης και έντασης, χαμηλής πίεσης και υψηλής έντασης, μέσης πίεσης και υψηλής έντασης. Οι λάμπες αυτές είναι στενόμακρες (π.χ. οι λάμπες χαμηλής πίεσης και έντασης έχουν διάμετρο 15 έως 20 mm και μήκος 75 έως 150 cm) και διαφέρουν από τις λάμπες φθορισμού στο ότι η επιφάνεια του γυαλιού δεν είναι καλυμμένη με φωσφορίζουσα ουσία, η οποία μετατρέπει την ακτινοβολία UV σε ακτινοβολία μικρότερης ενέργειας στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τα τυπικά χαρακτηριστικά των λαμπών UV δίνονται στον Πίνακα 3.



Παράμετρος	Χαμηλής πίεσης & χαμηλής έντασης	Χαμηλής πίεσης & υψηλής έντασης	Μέσης πίεσης & υψηλής έντασης
Κατανάλωση	70-100 W	200-500 W	2-5 kW
Απόδοση <sup>1</sup>	30-40%	25-35%	10-12%
Ισχύς <sup>2</sup>	25-27 W	60-400 W	-
Θερμοκρασία	35-45 °C	90-150 °C	600-800 °C
Πίεση	0,007 mm Hg	0,001-0,01 mm Hg	-
Μήκος	75-150 cm	Μεταβλητό	Μεταβλητό
Διάμετρος	15-20 mm	Μεταβλητό	Μεταβλητό

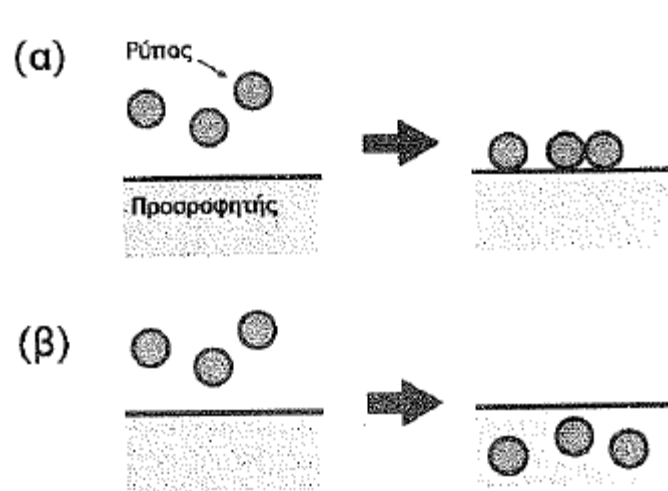
Πίνακα 3: Χαρακτηριστικά λαμπών UV

Σημαντικό μειονέκτημα της απολύμανσης πόσιμου νερού με ακτινοβολία UV είναι η απουσία υπολειμματικής δράσης, ώστε να είναι απαραίτητο μετά την επεξεργασία του νερού να προστεθεί μικρή δόση χλωρίου για την αντιμετώπιση πιθανής δευτερογενούς μόλυνσης στο δίκτυο διανομής ή στις δεξαμενές αποθήκευσης. Επίσης η απολύμανση πόσιμου νερού ή υγρών αποβλήτων με ακτινοβολία UV μπορεί να παρεμποδισθεί από την ύπαρξη αιωρούμενων στερεών σωματιδίων τα οποία αντανακλούν, διαθλάσουν και σκεδάζουν την ακτινοβολία UV.

### 3.2.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΡΟΦΗΣΗΣ

Το φαινόμενο κατά το οποίο ρύποι σε μορφή ιόντων ή μορίων μιας διαλυμένης στο νερό ουσίας ή αιωρούμενων στο νερό σωματιδίων (π.χ. ιοί, βακτήρια) συγκεντρώνονται στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό στερεών που αποτελούν το πληρωτικό υλικό φίλτρων διήθησης (π.χ. άμμο, κοκκώδη ενεργό άνθρακα) ή το στερεό σκελετό εδαφικών στρωμάτων ονομάζεται ρόφηση. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι ρόφησης: προσρόφηση και απορρόφηση. Προσρόφηση (adsorption) είναι η διαδικασία όπου μια διαλυμένη στο νερό ουσία ή ένα αιωρούμενο σωματίδιο προσκολλάται στην επιφάνεια ενός στερεού (προσοροφητή) και απορρόφηση (absorption) είναι η διαδικασία όπου μια διαλυμένη στο νερό ουσία ή ένα αιωρούμενο σωματίδιο διαπερνά την επιφάνεια και εισέρχεται στο εσωτερικό του προσροφητή. Οι διαδικασίες προσρόφησης και απορρόφησης απεικονίζονται στο Σχήμα 2. Βάσει των μηχανισμών οι οποίοι λαμβάνουν χώρα, οι διάφορες μορφές προσρόφησης κατατάσσονται σε τρεις

κατηγορίες: φυσική προσρόφηση (physical adsorption), χημική προσρόφηση (chemical adsorption) και εναλλαγή ιόντων (ion exchange).



Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση των διαδικασιών (α) προσρόφησης και (β) απορρόφησης

Η *φυσική* προσρόφηση οφείλεται στην επίδραση αδύνατων ελκτικών δυνάμεων van der Waals που ασκούνται μεταξύ των ρύπων και της επιφάνειας των στερεών ή τον προσροφητή (sorbent). Οι προσροφώμενοι ρύποι δεν παραμένουν σε ένα συγκεκριμένο σημείο αλλά μετακινούνται σχετικά ελεύθερα επάνω στην επιφάνεια του προσροφητή. Επίσης είναι δυνατόν να σχηματιστούν πολλαπλές στρώσεις ρύπων επάνω στην επιφάνεια των στερεών. Η φυσική προσρόφηση είναι μη εξειδικευμένη και πλήρως ανατρέψιμη διεργασία. Δηλαδή, οι προσροφημένοι ρύποι επιστρέφουν από τη στερεά φάση ξανά στην υδατική φάση όταν η συγκέντρωσή τους στο νερό μειωθεί. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται εκρόφηση (desorption). Όταν ο ρυθμός εκρόφησης είναι ίσος με το ρυθμό προσρόφησης επικρατούν συνθήκες ισορροπίας και ο προσροφητής (adsorbent, π.χ. πληρωτικό υλικό, έδαφος) θεωρείται εξαντλημένος, δηλαδή δεν έχει πλέον ικανότητα προσρόφησης άλλων ρύπων.

Η χημική προσρόφηση οφείλεται σε αρκετά ισχυρές ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των ρύπων και της επιφάνειας των στερεών προσροφητών, οι οποίες οδηγούν στο σχηματισμό χημικών ενώσεων. Επομένως, η χημική προσρόφηση είναι χημικά εξειδικευμένη διεργασία όπου οι προσροφώμενοι ρύποι δεν μετακινούνται επάνω στην επιφάνεια των στερεών. Οι ρύποι μπορούν να σχηματίσουν μόνο μια στρώση επάνω στην επιφάνεια του προσροφητή. Όταν η επιφάνεια του προσροφητή καλυφθεί πλήρως,

τότε το φαινόμενο της προσρόφησης σταματά. Η χημική προσρόφηση συνήθως δεν είναι ανατρέψιμη παρά μόνο όταν αυξηθεί η θερμοκρασία της επιφάνειας του προσροφητή.

Η εναλλαγή ιόντων είναι ένας μηχανισμός προσρόφησης όπου ένα ιόν εναλλάσσεται με ένα ή περισσότερα ιόντα από την επιφάνεια του προσροφητή με ίδιο συνολικό ηλεκτρικό φορτίο ή σθένος. Η εναλλαγή ιόντων βασίζεται σε ελκτικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις που προκύπτουν λόγω του αντίθετου ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ των ρύπων και της στερεάς επιφάνειας του προσροφητή (συλλέκτη). Τα πολυσθενή ιόντα έλκονται περισσότερο παρά τα μονοσθενή ιόντα από τη στερεά επιφάνεια και οι ελκτικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες για τα μικρότερου μεγέθους ιόντα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι αναμενόμενο για ιόντα τα οποία είναι προσροφημένα σε επιφάνειες στερεών μέσω ασθενών ελκτικών ηλεκτροστατικών δυνάμεων να αντικαθίστανται με ιόντα τα οποία σχηματίζουν μεγαλύτερες ελκτικές δυνάμεις. Ο μηχανισμός εναλλαγής ιόντων διαφέρει από το μηχανισμό φυσικής προσρόφησης μόνο στο ότι κατά την φυσική προσρόφηση μειώνεται η τιμή των ολικών διαλυμένων στερεών ενώ με την εναλλαγή ιόντων δεν παρατηρείται ουσιαστική μετατροπή στην τιμή των ολικών διαλυμένων στερεών λόγω του ότι γίνεται εναλλαγή ιόντων του ρύπου με άλλα ιόντα που ήδη παρευρίσκονταν στην επιφάνεια των στερεών προσροφητών.

Η συγκέντρωση των προσροφημένων στη στερεά φάση ρύπων,  $C^*$ , η οποία υπολογίζεται σε μονάδες  $[M/M, \text{μάζα ουσίας προς μάζα προσροφητή}]$ , εξαρτάται άμεσα από τη συγκέντρωση του ρύπου στην υδατική φάση σε θέση ισορροπίας,  $C_{eq}$ , η οποία υπολογίζεται σε μονάδες  $[M/L^3]$ . Στη βιβλιογραφία έχουν δημοσιευτεί αρκετές συσχετίσεις μεταξύ  $C_{eq}$  και τη συγκέντρωση των προσροφημένων στη στερεά φάση ρύπων σε θέση ισορροπίας,  $C^*_q$ . Τα μαθηματικά μοντέλα αυτά ονομάζονται ισοθερμικές συσχετίσεις γιατί αναφέρονται σε υδατικά διαλύματα τα οποία ευρίσκονται σε σταθερή θερμοκρασία και σε χημική ισορροπία.

### 3.2.6 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΣΕ ΕΝΕΡΓΟ ΑΝΘΡΑΚΑ

Προσρόφηση είναι το φαινόμενο μεταφοράς μάζας από την υγρή ή αέρια φάση στην επιφάνεια ενός στερεού. Πρόκειται για διεργασία συσσώρευσης των συστατικών τα οποία βρίσκονται σε ένα διάλυμα πάνω σε μια κατάλληλη επιφάνεια. Η προσρόφηση των συστατικών στο προσροφητικό μέσο πραγματοποιείται δια μέσου των ηλεκτροστατικών δυνάμεων που έλκουν το προσροφούμενο συστατικό από το διάλυμα στη στερεά επιφάνεια του προσροφητικού. Οι δυνάμεις ή ο μηχανισμός με τον οποίο το προσροφούμενο συστατικό έλκεται στην επιφάνεια του προσροφητικού υλικού, μπορεί να είναι φυσικές ή χημικές χωρίς σαφή προσδιορισμό μεταξύ των φυσικών και χημικών ηλεκτροστατικών δυνάμεων που αναπτύσσονται. Τα σπουδαιότερα προσροφητικά μέσα είναι ο ενεργός άνθρακας, τα συνθετικά πολυμερή και κάποια προσροφητικά μέσα που βασίζονται στο πυρίτιο. Όλα αυτά εφαρμόζονται για την απομάκρυνση οργανικών ενώσεων και ιχνοστοιχείων. Ο κονιορτοποιημένος ενεργός άνθρακας έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε ταμειυτήρες νερού και σε δεξαμενές καθίζησης, όπου ενεργεί τόσο σαν προσροφητικό μέσο των στοιχείων που προκαλούν οσμή και γεύση όσο και σαν εμπόδιο στην είσοδο του ηλιακού φωτός και συνεπώς στην ανάπτυξη μικροοργανισμών.



Εικόνα 2:Κλίνες ενεργού άνθρακα στην Ε.Ε.Ν. Θεσσαλονίκης

Ο ενεργός άνθρακας παράγεται από ποικίλες οργανικές πρώτες ύλες (ύλες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα), όπως ξύλο, ασφαλτούχα πετρώματα, λιγνίτη, τύρφη, κοκοφοίνικα κ.ά. Η πρώτη ύλη απανθρακώνεται απουσία αέρα στους 650° C περίπου ή οξειδώνεται με κατάλληλους ατμούς και αέρια, όπως ο υδρατμός και το διοξείδιο του άνθρακα, στους 850° C περίπου. Με τη θερμική επεξεργασία ο άνθρακας αποκτά πόρους με πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια (800-1200 m<sup>2</sup> /g). Στην επιφάνεια αυτή μπορεί να γίνει προσρόφηση των διαλυμένων οργανικών ουσιών οι οποίες υπάρχουν στο νερό. Υπάρχουν δύο είδη ενεργού άνθρακα, ο κοκκοποιημένος (Granular Activated Carbon GAC) και ο κονιορτοποιημένος (Powdered Activated Carbon PAC). Ο κοκκώδης (κοκκοποιημένος) ενεργός άνθρακας έχει συνήθως την κοκκομετρική σύνθεση της άμμου των διυλιστηρίων (0.1 – 1,0 mm). Η διάμετρος του κονιορτοποιημένου ενεργού άνθρακα κυμαίνεται μεταξύ 0.050 - 0.075 mm. Η προσροφητική ικανότητά του είναι μεγάλη γιατί μισό κιλό λεπτού κονιορτοποιημένου ενεργού άνθρακα περιέχει 1013 κόκκους ενώ 30 περίπου λίτρα κόκκων έχουν ολική επιφάνεια περίπου 28 Km<sup>2</sup> . Ο κοκκώδης ενεργός άνθρακας απομακρύνει αποτελεσματικά τα διαλυμένα οργανικά συστατικά ακόμα και όταν αυτά βρίσκονται στο νερό σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Οι οργανικές ουσίες προσροφώνται στη μεγάλη ειδική επιφάνεια του άνθρακα ενώ, παράλληλα, η βιολογική αποικοδόμηση ανοίγει ξανά τους πόρους και τις διόδους μεταξύ των κόκκων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ**

#### **4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ**

Μια σημαντική ανάγκη αποτελεσματικής απολύμανσης νερού προέρχεται από την χρήση κολυμβητικών δεξαμενών (πισίνες). Είτε πρόκειται για οικιακές πισίνες μικρών διαστάσεων (εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου), είτε για επαγγελματικές αθλητικών εγκαταστάσεων, το πρόβλημα σωστού καθαρισμού του νερού άπτεται της δημόσιας υγείας. Το γεγονός ότι κάθε πισίνα χρησιμοποιείται από πολλά άτομα επιβαρύνει το μικροβιολογικό φορτίο της. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις των κολυμβητηρίων που η καθημερινή ροή των ατόμων είναι μεγάλη, η απολύμανση του νερού πρέπει να γίνεται αποτελεσματικά και σε σύντομο χρονικό διάστημα ώστε να είναι δυνατή η εξυπηρέτηση του όγκου των χρηστών χωρίς να διακυβεύεται η ποιότητα των υπηρεσιών. Επιπλέον, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων γίνεται ανακύκλωση του νερού για λόγους οικονομίας που επιτείνει το πρόβλημα. Υπάρχει συγκεκριμένη νομοθεσία που καθορίζει τα όρια για την ποιότητα του νερού. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους απολύμανσης νερού, κάθε μια με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται μελέτη απολύμανσης νερού ιδιωτικής πισίνας εσωτερικού χώρου στην περιοχή της Πάτρας χωρητικότητας 140m<sup>3</sup>, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης άλατος, όπου η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα.

#### **4.2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ**

Η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών στο νερό ευνοείται από ορισμένους παράγοντες, όπως είναι το ουδέτερο pH, η παρουσία οργανικής ύλης που είναι η τροφή τους, καθώς και η ύπαρξη θρεπτικών συστατικών, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, τα οποία είναι απαραίτητα στη βιοσύνθεσή τους. Εξαιτίας του πολύ μικρού μεγέθους τους οι μικροοργανισμοί είναι δύσκολο να απομακρυνθούν πλήρως από το νερό μόνο με φυσικοχημικές διεργασίες, όπως είναι η καθίζηση και η

διήθηση, οπότε για να διασφαλισθεί η απουσία τους στο νερό απαιτείται η απολύμανσή του.

Απολύμανση είναι η επεξεργασία εκείνη του νερού που έχει ως σκοπό την καταστροφή ή την αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών που τυχόν περιέχει, ώστε να προστατευθεί η δημόσια υγεία. Πρωταρχικός σκοπός της απολύμανσης είναι η αναστολή του πολλαπλασιασμού και της επιβίωσης κάθε παθογόνου μικροοργανισμού μέσα στο σύστημα ύδρευσης. Γενικότερα, ως απολύμανση ορίζεται η επεξεργασία εκείνη που έχει ως σκοπό τη διατήρηση των μικροοργανισμών ενός ανοικτού ή κλειστού δικτύου νερού σε επίπεδα που δεν επηρεάζουν τη διεργασία. Είναι ουσιώδες να διευκρινισθεί η διαφορά μεταξύ της αποστείρωσης, η οποία σημαίνει πλήρη καταστροφή όλων των μικροοργανισμών και της απολύμανσης, η οποία χαρακτηρίζεται ως η εκλεκτική ελάττωση σε ανεκτά επίπεδα των μικροοργανισμών.

#### **4.3 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ**

Η ποιότητα νερού των κολυμβητικών δεξαμενών καθορίζονται με το άρθρο 15 της Γ1/443/73 Υγ. Διάταξης. Συγκεκριμένα το νερό της κολυμβητικής δεξαμενής θα πρέπει να ανανεώνεται συνεχώς καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας της, με ρυθμό που εξασφαλίζει την πλήρη ανανέωσή του σε χρόνο όχι μεγαλύτερο των 4 ωρών (ειδικές περιπτώσεις 6 ωρών). Η ανανέωση πρέπει να επιτυγχάνεται είτε με συνεχή ροή νέου καθαρού νερού, είτε με ανακυκλοφορία του νερού της δεξαμενής μετά από προηγούμενο καθαρισμό και απολύμανση. Για δεξαμενές άνω των 1250m<sup>3</sup> το σύστημα ανακυκλοφορίας πρέπει να λειτουργεί όλο το 24ωρο με δυνατότητα μείωσης του ρυθμού ανανέωσης στο μισό όταν δεν χρησιμοποιείται. Η τιμή του pH να διατηρείται από 7,2 έως 8,2. Το νερό να είναι διαυγές. Ο αριθμός των αναπτυσσομένων αποικιών μικροβίων (μετά 24 ώρες στους 37°C) δεν θα υπερβαίνει τα 200/cm<sup>2</sup>. Ο πιθανός αριθμός κολοβακτηριοειδών να είναι μικρότερος των 15/100cm<sup>2</sup> ενώ να μην υπάρχει κανένα κολοβακτηρίδιο *Escherichiacoli* (*Ecoli*) σε 100cm<sup>2</sup>. Τέλος, σε περίπτωση απολύμανσης με χλώριο, το υπολειμματικό χλώριο στο νερό της κολυμβητικής δεξαμενής να κυμαίνεται μεταξύ 0,4 και 0,7 mg/l.

#### 4.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ

Υπάρχουν πολλοί τρόποι απολύμανσης του νερού μιας πισίνας. Η αποτελεσματικότητα της απολύμανσης του νερού εξαρτάται από την σκληρότητα του νερού και το pH. Επιθυμητές τιμές κυμαίνονται από 7,2 έως 7,6 με ιδανική την 7,4. Βασικός λόγος για αυτό είναι ότι το pH του ανθρώπινου αίματος είναι 7,4. Επίσης η πλειοψηφία των απολυμαντικών μέσων του νερού είναι ανενεργή όταν το pH του νερού είναι υψηλότερο του 7.8 (π.χ. το χλώριο είναι μόλις 20% ενεργό άνω του pH 7.8). Η ρύθμιση του pH γίνεται με υγρά ή στερεά χημικά προϊόντα τα οποία μπορούν να αυξήσουν ή να μειώσουν την τιμή του (pH-Minus/pH+Plus).

##### 4.4.1 ΧΛΩΡΙΟ

Το πιο διαδεδομένο απολυμαντικό μέσο και πιο αποτελεσματικό είναι το χλώριο. Το χλώριο έχει την ικανότητα να εξουδετερώνει όλους τους παθογόνους οργανισμούς, όπως βακτηρίδια, κολοβακτηρίδια, ιούς, (ενεργούς ή μη), που τυχόν περιέχει το νερό της πισίνας.

Χρησιμοποιείται σε μορφή ταμπλέτας (200gr) και σε μορφή κόκκου, που διατηρεί το χαρακτηριστικό της αργής διάλυσης στο νερό. Στο στερεό χλώριο ανήκει επίσης και το χλώριο άμεσης διάλυσης, γνωστό ως χλώριο σοκ. Το τελευταίο, χρησιμοποιείται όταν έχει περάσει καιρός από την τελευταία χρήση της πισίνας, προληπτικά μετά από κάθε 15-20 μέρες χρήσης της πισίνας και οπωσδήποτε στο πρώτο ξεκίνημα της πισίνας. Υπάρχει και χλώριο σε αέρια ή υγρή μορφή, όμως επειδή η χρήση τους είναι πιο δύσκολη και επικίνδυνη (αέριο χλώριο), αποφεύγονται.

Βασικό μειονέκτημα του χλωρίου είναι ότι ο συνδυασμός του με τις αμίνες (οργανικές ενώσεις που παράγονται από το σάλιο, ούρα και ιδρώτα) δημιουργεί χλωραμίνες. Οι τελευταίες, εκτός από τη δυσοσμία που δημιουργούν, δεσμεύουν το χλώριο. Παράγονται ακόμα και αν έχουμε πολύ ελεύθερο χλώριο στο νερό και ο μοναδικός τρόπος να σπάσει ο δεσμός τους είναι η υπερχλωρίωση (χλωρίωση σοκ). Σε εσωτερικές πισίνες όπου δεν έχει υπάρχει κατάλληλο σύστημα εξαερισμού και αφύγρανσης, το χλώριο μπορεί να προκαλέσει αναπνευστική δυσφορία στους κολυμβητές. Για να αποφευχθούν τα προβλήματα αυτά απαιτείται η διατήρηση του pH στα ιδανικά επίπεδα. Στην περίπτωση αυτή η ποσότητα του χλωρίου στο νερό της



πισίνας είναι μικρότερη από την ποσότητα του χλωρίου που περιέχει το νερό της βρύσης (ΕΥΔΑΠ).

#### **4.4.2 ΒΡΩΜΙΟ**

Το βρώμιο χρησιμοποιείται σε στερεά κατάσταση. Χορηγείται σε μορφή ταμπλέτας αργής διάλυσης. Σαν απολυμαντικό παραμένει ενεργό ακόμα και όταν το pH είναι μεγαλύτερο του 7,8. Η αντίδραση του βρωμίου με τις οργανικές ενώσεις του νερού δεσμεύει μικρή ποσότητα αυτού σε αντίθεση με το χλώριο όπου δεσμεύεται μεγαλύτερη ποσότητα (δεσμευμένο χλώριο). Μένει δηλαδή περισσότερο ελεύθερο βρώμιο (απολυμαντικό μέσο) στο νερό. Οι αμίνες που παράγονται μέσα στο νερό παραμένουν ενεργές, χωρίς να δεσμεύουν το χλώριο του νερού και αυτό αυξάνει την απολυμαντική ικανότητα.

Η χρήση του βρωμίου σαν απολυμαντικό μέσο, δεν αντικαθιστά τη χρήση του χλωρίου. Μάλιστα, ο χημικός συνδυασμός που χρησιμοποιείται για την απολύμανση είναι 1/3 χλώριο και 2/3 βρώμιο. Επίσης, η χλωρίωση – σοκ παραμένει ως διαδικασία. Το κύριο μειονέκτημα του είναι η τιμή του, καθώς είναι μεγαλύτερη με αυτήν του χλωρίου. Λόγω της περιορισμένης ποσότητας χλωρίου που απαιτείται, δεν υπάρχει η οσμή του χλωρίου. Συνιστάται για χρήση σε κλειστούς χώρους, μικρές πισίνες και spa.

#### **4.4.3 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ**

Η ηλεκτρόλυση άλατος βασίζεται στην παραγωγή χλωρίου από το αλάτι, που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη. Η μορφή του χλωρίου που παράγεται δεν αφήνει ανεπιθύμητα κατάλοιπα. Η εγκατάσταση γίνεται εύκολα με την τοποθέτηση του θαλάμου ηλεκτρόλυσης στο σύστημα σωληνώσεων του μηχανήματος ανακυκλοφορίας και ενός πίνακα λειτουργίας, ο οποίος τοποθετείται κοντά στον πίνακα της πισίνας. Αρχικά, προστίθεται η απαραίτητη ποσότητα άλατος στο νερό της πισίνας. Στη συνέχεια, το αλατισμένο νερό, μέσω της ανακυκλοφορίας, περνάει από τον θάλαμο ηλεκτρόλυσης. Εδώ γίνεται η διάσπαση του άλατος (χλωριούχο νάτριο) και το χλώριο που παράγεται λειτουργεί ως απολυμαντικό μέσο καθώς διαχέεται στο νερό της πισίνας. Η ηλεκτρόλυση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε

θερμοκρασίες χαμηλότερες των 15°C. Επιπλέον, ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις όπως με το χλώριο.

Το χλώριο που παράγεται από το αλάτι είναι φιλικότερης μορφής από το βιομηχανικό χλώριο, με αποτέλεσμα να αφήνει καλύτερη αίσθηση στο δέρμα απ' ό,τι οι ταμπλέτες χλωρίου. Τα συστήματα ηλεκτρόλυσης έχουν παρουσιάσει αλματώδη αύξηση τα τελευταία χρόνια κυρίως λόγω της μείωσης του κόστους κατασκευής των ηλεκτροδίων και της απλοποιημένης συνολικής κατασκευής. Επιπλέον, οι κολυμβητές αναφέρουν καλύτερη ποιότητα νερού, λιγότερους ερεθισμούς και γενικά πιο ευχάριστη κολύμβηση. Στην Αυστραλία, το 90% των πισινών χρησιμοποιούν συστήματα ηλεκτρόλυσης άλατος για την απολύμανση του νερού. Τέλος επιτυγχάνεται χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τις ταμπλέτες.

#### **4.4.4 ΟΖΟΝΙΣΜΟΣ**

Το όζον (O<sub>3</sub>) θεωρείται εξίσου αποτελεσματικό με το χλώριο εναντίον των βακτηριδίων και των παθογόνων οργανισμών που περιέχονται στο νερό. Το αέριο ελευθερώνεται στο νερό της πισίνας με έγχυση από τον πυθμένα. Ο θάλαμος απαερίωσης (ειδικός θάλαμος για την απομόνωση του όζοντος από τον αέρα) κρατάει εντός του μια συγκεκριμένη στάθμη νερού. Το μείγμα που παράγεται, περνιέται από ενεργό άνθρακα και απελευθερώνεται μέσα στο νερό της πισίνας. Δεν έχει υπολειμματική δράση και για το λόγο αυτό χρειάζεται την παρουσία του χλωρίου ως συμπληρωματικού μέσου απολύμανσης, μειώνοντας απλά την απαιτούμενη ποσότητα αυτού.

Το πλεονέκτημα του έγκειται στην απουσία αναλωσίμων, καθώς ειδικές λάμπες υψηλής τάσης που χρησιμοποιούνται, το παράγουν από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Βασικό μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος του εξοπλισμού και της εγκατάστασης. Επίσης απαιτείται πάντα παροχή ρεύματος και επιμελή συντήρηση.

#### **4.4.5 ΘΑΛΑΜΟΣ UV ΑΚΤΙΝΩΝ**

Η χρήση της υπεριώδους ακτινοβολίας μπορεί να βοηθήσει στην εξουδετέρωση παθογόνων οργανισμών όπως βακτήρια, ιοί και πρωτόζωα. Η υπεριώδης ακτινοβολία

παράγεται σε ειδικό θάλαμο, μέσα από τον οποίο περνάει το νερό της πισίνας. Εκεί απολυμαίνεται, καθώς ακτινοβολείται. Η έκθεση των μικροοργανισμών, βακτηρίων, ιών, κ.λπ., στην UV ακτινοβολία επιφέρει ανεπανόρθωτες βλάβες στο γενετικό τους υλικό, γεγονός που τα καθιστά ανενεργά.

Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο του ως μέσο απολύμανσης, αλλά μόνο ως συμπληρωματικό κάποιου άλλου μέσου (π.χ. χλωρίου ή βρωμίου), γιατί δεν αφήνει απολυμαντικό κατάλοιπο στο νερό της πισίνας (sanitizingresidual). Επειδή μειώνει την περιεκτικότητα των χλωραμινών, ενισχύεται το ελεύθερο χλώριο και η απολύμανση είναι πιο αποτελεσματική. Απαιτείται πολύ καλή ανακυκλοφορία του νερού και με κατάλληλη ταχύτητα ροής στις σωληνώσεις, ώστε να εξασφαλιστεί ότι όλη η ποσότητα του νερού περνάει από το ηλεκτρόδιο. Επίσης, όταν υπάρχουν αιωρούμενα σωματίδια στο νερό, η αποτελεσματικότητα του συστήματος μειώνεται. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ως συμπληρωματικό μέσο, για να μειώσει την ποσότητα του κυρίως μέσου απολύμανσης, που μπορεί να είναι το χλώριο ή το βρώμιο.

#### **4.4.6 ΕΝΕΡΓΟ ΟΞΥΓΟΝΟ**

Το ενεργό οξυγόνο είναι το γνωστό ως οξυζενέ (υπεροξειδίο του υδρογόνου,  $H_2O_2$ ). Είναι η μοναδική ίσως μέθοδος απολύμανσης του νερού που καταργεί τελείως το χλώριο. Παρέχεται σε υγρή μορφή, αλλά και σε μορφή σκόνης. Η απολύμανση του νερού γίνεται σε δοσολογία  $250ml/50m^3$  νερού πισίνας. Το υγρό οξυγόνο που απελευθερώνεται στο νερό εξασφαλίζει ότι συνεχώς υπάρχει απολυμαντικό μέσο στην πισίνα.

Το οξυγόνο σε μορφή σκόνης είναι περισσότερο δραστικό και χρησιμοποιείται ως οξυγόνο σοκ, παρόμοια με το χλώριο σοκ. Το οξυγόνο σοκ χρησιμοποιείται σε δοσολογία  $1kg/100m^3$  όταν έχει περάσει καιρός από την τελευταία χρήση της πισίνας, προληπτικά μετά από κάθε 30 ημέρες χρήσης της πισίνας και οπωσδήποτε στο πρώτο ξεκίνημα της πισίνας. Η εφαρμογή του μπορεί να γίνει χειροκίνητα, αλλά και με την εγκατάσταση δοσομετρικού συστήματος. Χρειάζεται προσοχή γιατί είναι πολύ δραστικό στην απευθείας επαφή με το ανθρώπινο δέρμα.

Βασικό μειονέκτημα είναι ότι δεν δρα σε όλο το εύρος των βακτηριδίων (90%). Όταν η θερμοκρασία του νερού της πισίνας ανέβει πάνω από 28 βαθμούς Κελσίου, το

ενεργό οξυγόνο απενεργοποιείται πλήρως. Δεν ενδείκνυται για χρήση σε πισίνες που είναι ήδη βεβαρημένες με οργανικό φορτίο (π.χ. επαγγελματικές πισίνες), καθώς η αμμωνία που παράγεται, μειώνει την αποτελεσματικότητά του.

Σαν μέσο απολύμανσης είναι αποδεκτό, όμως η αποτελεσματικότητά του επηρεάζεται άμεσα από την τιμή του pH, που πρέπει να διατηρείται σε συγκεκριμένο εύρος (7.0 – 7.4), από τη θερμοκρασία του νερού και από το φορτίο της πισίνας. Δηλαδή εκτός από το αυξημένο κόστος εγκατάστασης, απαιτείται πολύ σχολαστική συντήρηση από την οποία εξαρτάται και η ποιότητα νερού της πισίνας.

#### **4.4.7 ΙΟΝΙΣΜΟΣ**

Στη συγκεκριμένη μέθοδο η απολύμανση νερού επιτυγχάνεται με ιόντα αργύρου και χαλκού, τα οποία εξουδετερώνουν τα οργανικά και ανόργανα παθογόνα στοιχεία αντίστοιχα. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των ιόντων, αποτελούνται από 97% χαλκό και 3% άργυρο. Αυτή η μέθοδος απολύμανσης, όπως και η προηγούμενη, δρα συμπληρωματικά στη χλωρίωση του νερού. Επιτυγχάνει μόνο τη μείωση των καταναλώσεων των άλλων χημικών.

Ο χαλκός είναι φωτοευαίσθητος και μπορεί να δημιουργήσει μαύρες ή πράσινες επικαθήσεις στα τοιχία της πισίνας, εφ' όσον είναι επενδυμένη με μεμβράνη. Πρόκειται για συμπληρωματική μέθοδο, για τη μείωση του χλωρίου στην πισίνα. Σε υπερδοσολογία έχει παρατηρηθεί πρασίνισμα του δέρματος και των μαλλιών των κολυμβητών.

#### **4.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ**

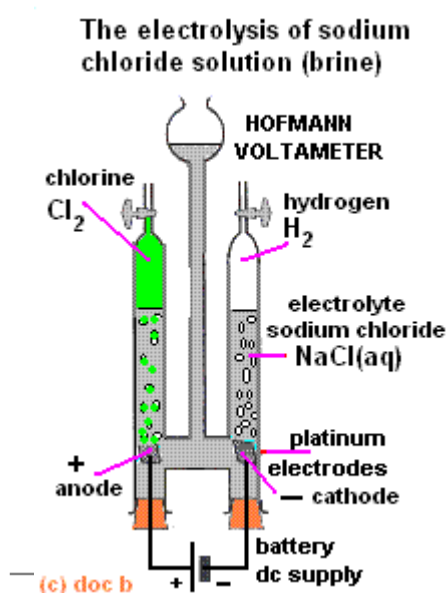
Με τον όρο ηλεκτρόλυση εννοείται η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων ενός κατάλληλου ηλεκτρολυτικού κελιού, όπου βρίσκεται το διάλυμα αποβλήτου και μέσα στο οποίο είναι εμβαπτισμένα τα 2 ηλεκτρόδια. Το σύστημα τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα από έναν ανορθωτή, τα άκρα του οποίου συνδέονται με τα ηλεκτρόδια του συστήματος (το θετικό άκρο του λειτουργεί ως άνοδος και το αρνητικό ως κάθοδος), οπότε πραγματοποιούνται οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις και στα 2 ηλεκτρόδια.

Η ηλεκτροχημική οξείδωση οργανικής ύλης πραγματοποιείται ουσιαστικά με 2 τρόπους. Ο πρώτος είναι η άμεση οξείδωση, η οποία λαμβάνει χώρα πάνω στο ηλεκτρόδιο ανόδου με ταυτόχρονη έκλυση οξυγόνου. Αρχικά, πραγματοποιείται η διάσπαση του μορίου του  $H_2O$  πάνω στην επιφάνεια του οξειδίου του μετάλλου και παράγονται προσροφημένες ρίζες υδροξυλίου. Στη συνέχεια, λαμβάνει χώρα η αντίδραση έκλυσης  $O_2$ , η οποία πραγματοποιείται σε δυναμικό  $\geq 1.23V/SHE$  (StandardHydrogenElectrode).

Ο δεύτερος η έμμεση, η οποία λαμβάνει χώρα στον κύριο όγκο του διαλύματος όπου μεταφέρονται διάφορα οξειδωτικά σώματα που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της διεργασίας, όπως το οξυγόνο, το χλώριο και οι υποχλωρίτες, συμβάλλοντας στην περαιτέρω μείωση του οργανικού φορτίου.

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτροχημική οξείδωση οργανικών ενώσεων είναι το υλικό κατασκευής της ανόδου. Η επιλογή του πρέπει να γίνεται προσεκτικά, καθώς το υλικό αυτό μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση της ηλεκτρόλυσης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται με πιο διαδεδομένο τύπο τον κυλινδρικό με κυλινδρική άνοδο τιτανίου (Ti). Πάνω στην επιφάνεια της ανόδου επικολλούνται στρώματα μεταλλικών οξειδίων του Rh, Pt, Ir, Pd, Ru, Zr ή κράμα αυτών. Πλέον κατασκευάζονται νέα είδη ηλεκτροδίων με επικάλυψη συνθετικού διαμαντιού με προσθήκη βορίου (Boron-Doped Diamond electrodes, BDD). Έχουν μεγάλη σταθερότητα διάβρωσης σε ηλεκτροχημικές εφαρμογές.

#### 4.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ ΑΛΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ



Η ηλεκτρόλυση γίνεται μέσα σε ειδικές συσκευές, που ονομάζονται ηλεκτρολυτικά στοιχεία και, συνήθως, αποτελούνται από ένα δοχείο που περιέχει έναν ηλεκτρολύτη σε κατάσταση τήξης ή σε υδατικό διάλυμα, μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και δύο ηλεκτρόδια που συνδέονται με αυτή. Τυπικό ηλεκτρολυτικό στοιχείο είναι η συσκευή Hofmann. Για ηλεκτρόλυση άλατος σε

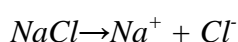
βιομηχανική κλίμακα χρησιμοποιείται η μέθοδος chloralkali.

Για να γίνει ηλεκτρόλυση, πρέπει η τάση της πηγής να είναι κατά ένα ορισμένο ποσό μεγαλύτερη από αυτήν που παρέχει ένα γαλβανικό στοιχείο το οποίο λειτουργεί με την αντίστροφη (αυθόρμητη) αντίδραση. Τα ηλεκτρόδια, που μπορεί να είναι ράβδοι ή επιφάνειες, αφενός συνδέονται με τους πόλους της πηγής και αφετέρου βρίσκονται σε επαφή με το τήγμα ή το διάλυμα του ηλεκτρολύτη. Το ηλεκτρόδιο το οποίο συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής αποτελεί την κάθοδο του ηλεκτρολυτικού στοιχείου, ενώ εκείνο που συνδέεται με τον θετικό πόλο της πηγής αποτελεί την άνοδο. Γενικά, είναι επιθυμητό τα ηλεκτρόδια να είναι αδρανή, δηλαδή να μην αντιδρούν με τον ηλεκτρολύτη ή τα προϊόντα της ηλεκτρόλυσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Κατά τη λειτουργία ενός ηλεκτρολυτικού στοιχείου, τα ηλεκτρόνια κατευθύνονται από τον αρνητικό πόλο της πηγής προς την κάθοδο του στοιχείου. Έτσι, η κάθοδος εμφανίζει περίσσεια ηλεκτρονίων και ασκεί έλξη στα κατιόντα του ηλεκτρολύτη που βρίσκονται γύρω από αυτή. Τα κατιόντα αυτά κινούνται προς την κάθοδο, όπου και εκφορτίζονται προσλαμβάνοντας ηλεκτρόνια. Αυτό δημιουργεί μία κλίση συγκέντρωσης γύρω από το ηλεκτρόδιο, οπότε νέα κατιόντα έρχονται με διάχυση στην περιοχή, τα οποία με τη σειρά τους έλκονται, οδεύουν προς την κάθοδο και εκφορτίζονται, κ.ο.κ.

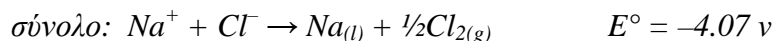
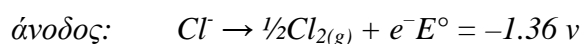
Σε αντίθεση με την κάθοδο, η άνοδος παρουσιάζει έλλειμμα ηλεκτρονίων και έλκει τα ανιόντα του ηλεκτρολύτη που βρίσκονται γύρω από αυτή. Τα ανιόντα αυτά κινούνται προς την άνοδο, όπου και εκφορτίζονται αποβάλλοντας ηλεκτρόνια. Αυτό δημιουργεί μία κλίση συγκέντρωσης γύρω από το ηλεκτρόδιο, οπότε νέα ανιόντα έρχονται με διάχυση στην περιοχή, τα οποία με τη σειρά τους έλκονται, οδεύουν προς την άνοδο και εκφορτίζονται, κ.ο.κ.

Στην υπό εξέταση περίπτωση, ο ηλεκτρολύτης είναι διάλυμα χλωριούχου νατρίου (NaCl- αλάτι). Καθώς το NaCl διαλύεται στο νερό καταστρέφεται το κρυσταλλικό πλέγμα και δημιουργούνται ελεύθερα κατιόντα νατρίου και ανιόντα χλωρίου:



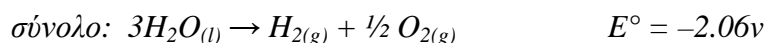
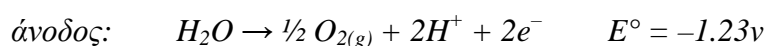
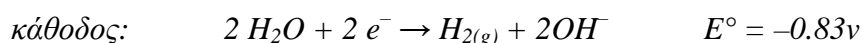
Κατά την ηλεκτρόλυση τα κατιόντα νατρίου οδεύουν προς την κάθοδο, όπου προσλαμβάνουν από ένα ηλεκτρόνιο (αναγωγή) και εκφορτίζονται τα ανιόντα χλωρίου κινούνται προς την άνοδο, όπου και εκφορτίζονται αποβάλλοντας ένα

ηλεκτρόνιο το καθένα (οξειδωση). Στην κάθοδο, τα άτομα νατρίου ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζοντας σφαιρίδια μεταλλικού νατρίου, ενώ η ένωση των ατόμων χλωρίου ανά δύο στην άνοδο έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό και την απελευθέρωση στοιχειακού χλωρίου. Η συνολική αντίδραση κατά την ηλεκτρόλυση τήγματος χλωριούχου νατρίου είναι:]

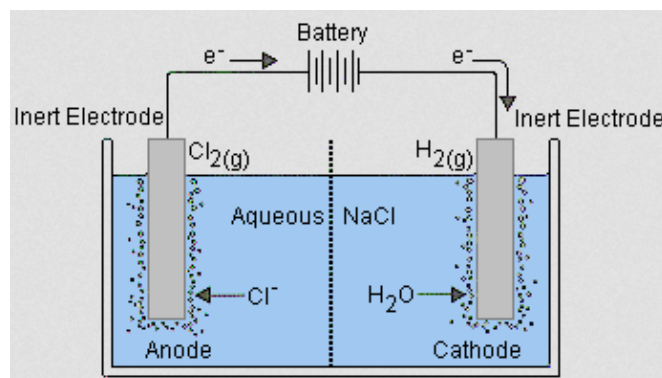
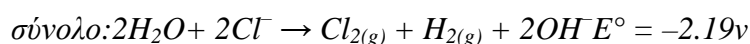
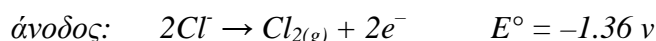
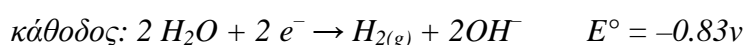


Σε κάθε στάδιο φαίνεται η τάση που απαιτείται σε Volt. Η συνολική τάση που απαιτείται για την πραγματοποίηση της ηλεκτρόλυσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 4,07 V.

Παράλληλα με την ηλεκτρόλυση του NaCl γίνεται και ηλεκτρόλυση του ίδιου του νερού (H<sub>2</sub>O). Η συνολική αντίδραση είναι:

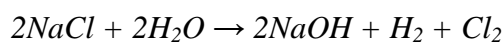


Στην κάθοδο, η αναγωγή του Na είναι ενεργειακά πιο δύσκολη από την αναγωγή του νερού, και υπερσχύει η δεύτερη. Στην άνοδο επίσης φαίνεται ότι η οξειδωση του Cl χρειάζεται περισσότερη ενέργεια από την οξειδωση του νερού. Όμως οι ηλεκτρολυτικές αντιδράσεις που περιέχουν οξυγόνο είναι αρκετά αργές, οπότε υπερσχύει η πρώτη. Συνεπώς:



Άρα η ελάχιστη συνολική τάση που απαιτείται για ηλεκτρόλυση άλατος σε υδατικό διάλυμα είναι 2.19 V. Από τις παραπάνω εξισώσεις φαίνεται ότι παράγεται αέριο χλώριο στην άνοδο και αέριο υδρογόνο στην

κάθοδο. Επίσης το νάτριο ( $Na^+$ ) αντιδρά με το υδροξύλιο ( $OH^-$ ) και παράγεται καυστική σόδα ( $NaOH$ ) που μένει ως κατάλοιπο. Από τα παραπάνω καταλήγουμε στη συνολική χημική αντίδραση



Το  $NaOH$  είναι ισχυρή βάση που επηρεάζει άμεσα το pH τείνοντας να κάνει το διάλυμα αλκαλικό. Για την εξισορρόπηση του pH στα επιθυμητά επίπεδα (7,4) προστίθεται υδροχλωρικό οξύ ( $HCl$ ) όταν η συγκέντρωση του υπάρχοντος παραγόμενου  $HCl$  δεν είναι αρκετή. Τα δύο αντιδρούν δημιουργώντας και πάλι αλάτι  $NaOH + HCl \rightarrow NaCl + H_2O$

Συνεπώς, το  $NaCl$  λειτουργεί ως ενδιάμεσο που διασπάται και επαναδημιουργείται προσφέροντας το απαιτούμενο χλώριο.

Με την παραπάνω μέθοδο, παράγεται το χλώριο που είναι το απολυμαντικό μέσο. Αν και ο τρόπος με τον οποίο το χλώριο καταστρέφει τους παθογόνους μικροοργανισμούς δεν είναι απόλυτα εξακριβωμένος, για τα βακτήρια η πιο πιθανή εξήγηση είναι ότι το χλώριο διαπερνά την κυτταρική μεμβράνη τους και αδρανοποιεί ορισμένα ένζυμα που είναι απαραίτητα για την επιβίωσή τους. Επειδή η αντίδραση χλωρίου-ενζύμων είναι αντιστρέψιμη, σε χαμηλές συγκεντρώσεις χλωρίου είναι δυνατόν τα ένζυμα να επανασχηματιστούν και να συνεχίσουν τη λειτουργία τους. Όταν το αέριο χλώριο αναμιγνύεται με το νερό σχηματίζεται υποχλωριώδες οξύ ( $HOCl$ ) σύμφωνα με την αντίδραση:



Το υποχλωριώδες οξύ είναι ασθενές και διασπάται στη συνέχεια σε ιόντα υδρογόνου ( $H^+$ ) και υποχλωριώδη ιόντα ( $OCl^-$ ):



Ανάλογα με την τιμή του pH στο νερό υπερισχύει το  $HOCl$  (χαμηλό pH) ή τα υποχλωριώδη ιόντα  $OCl^-$  (υψηλό pH). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η αναλογία των δύο ενώσεων συναρτήσει της τιμής του pH. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως έχει προαναφερθεί, το pH διατηρείται στην τιμή 7,4 οπότε θεωρούμε μια μέση τιμή συγκέντρωσης  $HOCl$  54% και  $OCl^-$  46% αντίστοιχα. Το τμήμα του συνολικά υπάρχοντος ενεργού χλωρίου, το οποίο βρίσκεται σε μορφή υποχλωριώδους οξέως  $HOCl$  και υποχλωριωδών ιόντων  $OCl^-$  είναι γνωστό ως ελεύθερο διαθέσιμο χλώριο ή υπολειμματικό χλώριο. Ενεργό χλώριο θεωρείται το



άθροισμα όλων των ενώσεων χλωρίου που υπάρχουν σε κάποια χρονική στιγμή στο νερό και έχουν απολυμαντική δράση.

<i>pH</i>	<i>HOCl %</i>	<i>OCl<sup>-</sup> %</i>
5	99,7	0,3
6	97,5	2,5
7	79,7	20,3
8	28,0	72,0
9	3,8	96,2

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απολυμαντική δράση του HOCl είναι ισχυρότερη από αυτήν των OCl<sup>-</sup>. Έχειδειχτεί ότι το HOCl είναι 80 φορές πιο ισχυρό από το OCl<sup>-</sup> στην καταστροφή των E.Coli και 300 – 500 φορές στην καταστροφή των κυστών Entamoebahistolytica και Giardia. Αυτό οφείλεται στο ότι οι περισσότεροι μικροοργανισμοί έχουν μέσα στο νερό αρνητικό φορτίο με αποτέλεσμα τα OCl<sup>-</sup>, λόγω του ομώνυμου φορτίου, να απωθούνται και να διεισδύουν δύσκολα στο κύτταρο, ενώ το HOCl πλησιάζει, διεισδύει ευκολότερα στο κύτταρο και αδρανοποιεί τα ένζυμα.

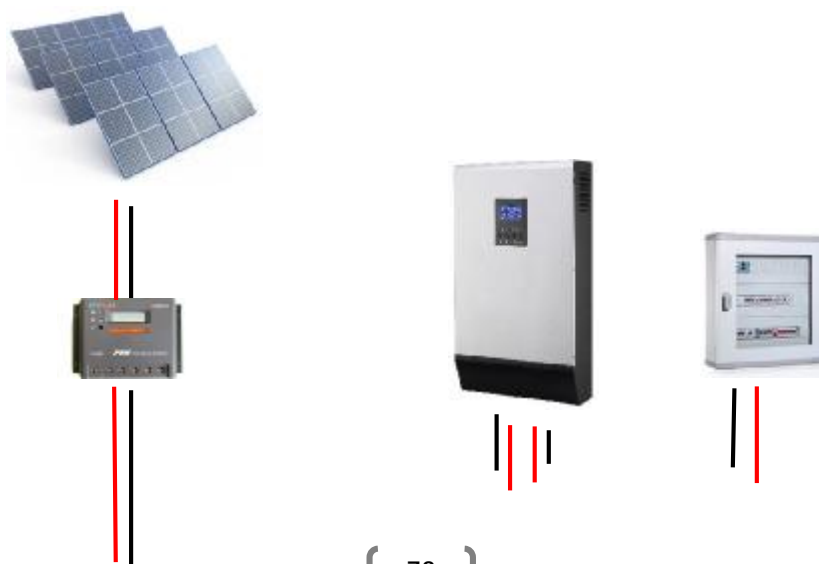
#### **4.7 ΣΧΕΔΙΑΣΗ**

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η σχεδίαση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος που θα τροφοδοτεί με την απαιτούμενη ενέργεια το σύστημα ηλεκτρόλυσης άλατος, για την αποτελεσματική απολύμανση κολυμβητικής δεξαμενής. Βασικό πρόβλημα είναι ο καθορισμός των αναγκών της συγκεκριμένης εγκατάστασης, ώστε να επιλεγεί ο κατάλληλος εξοπλισμός που θα συνδυάζει την επαρκή εξυπηρέτησή τους και το κόστος. Με βάση τον εξοπλισμό γίνεται στη συνέχεια υπολογισμός του ηλεκτρικού φορτίου, που ανάλογα την χρήση υπολογίζεται η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Γνωρίζοντας τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και τα μορφολογικά του υπό μελέτη κτηρίου επιλέγονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες), ο αναστροφέας (inverter) και το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (γεννήτρια).

#### 4.7.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στα απομονωμένα ή εκτός δικτύου συστήματα (stand-alone ή off-grid connected) και στα συνδεδεμένα στο δίκτυο (grid-connected). Τα τελευταία συνδέονται απευθείας στο εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής παροχής (AC) στο οποίο διοχετεύουν όλη την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Τα απομονωμένα ή εκτός δικτύου συστήματα έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό τους το ότι παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, κάτι το οποίο φανερώνει και το όνομά τους. Όταν η ενέργεια της φωτοβολταϊκής συστοιχίας καλύπτει εξ ολοκλήρου τις ανάγκες της εγκατάστασης, τότε το σύστημα ονομάζεται αυτόνομο. Όταν στην παραγωγή ενέργειας συμμετέχει και άλλη πηγή Α.Π.Ε. (π.χ. ανεμογεννήτρια) ή συμβατική πηγή καυσίμου (π.χ. ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος) τότε το σύστημα χαρακτηρίζεται ως υβριδικό.

Σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιείται συνήθως η DC συνδεσμολογία. Όλη η ενέργεια που απαιτείται παρέχεται από τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια φορτίζουν τις μπαταρίες μέσω ρυθμιστή φόρτισης, οι οποίοι πραγματοποιούν τη διαδικασία με βέλτιστο τρόπο. Ο αντιστροφέας μετατρέπει την χαμηλή συνεχή τάση των μπαταριών σε υψηλή εναλλασσόμενη για να τροφοδοτηθούν τα ηλεκτρικά φορτία. Οι σύγχρονοι αντιστροφέας παρέχουν τη δυνατότητα σύνδεσης ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους ή άλλης πηγής σε περίπτωση που η ενέργεια των μπαταριών δεν επαρκεί για τις ανάγκες του φορτίου. Το σύστημα όμως, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χαρακτηρίζεται υβριδικό και όχι αυτόνομο.





#### 4.7.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ

Η πισίνα υπό μελέτη είναι εσωτερικού χώρου και συνεπώς δεν επηρεάζεται από την UV ηλιακή ακτινοβολία. Η υπεριώδης ακτινοβολία καταστρέφει το χλώριο που παράγεται. Για να επιτευχθεί ικανοποιητική απολύμανση του νερού σύμφωνα με το πρότυπο DIN 19643(Deutsches Institut für Normung) απαιτούνται  $2 \text{ gr/m}^3$  (όρια  $1 - 3 \text{ gr/m}^3$ ) ενεργού χλωρίου ( $\text{Cl}_2$ ) για τις κλειστές πισίνες ή  $10 \text{ gr/m}^3$  για τις ανοικτές. Από τον τύπο της συνολικής χημικής αντίδρασης της ηλεκτρόλυσης, όπως εξετάστηκε παραπάνω, για την παραγωγή  $1 \text{ mol Cl}_2$  απαιτούνται  $2 \text{ mol NaCl}$ . Όμως  $2 \text{ gr/m}^3 \text{Cl}_2$  είναι  $(2 \text{ gr/m}^3) / (2 * 35,45) \text{ mol} = 0,0283 \text{ mol}$  που προκύπτει από την διαίρεση της διαθέσιμης μάζας με την ατομική μάζα. Η αναγκαία ποσότητα  $\text{NaCl}$  είναι  $0,0283 \text{ mol} * 2 = 0,0566 \text{ mol}$  δηλαδή  $0,0566 * (22,99 + 35,45) = 3,2 \text{ gr/m}^3$ .

Σύμφωνα με την νομοθεσία, το όλο νερό πρέπει να ανακυκλώνεται αφού καθαριστεί τουλάχιστον κάθε 4 ώρες. Η αναλογία του  $\text{Cl}_2$  είναι  $2 \text{ gr/m}^3$  οπότε για την συγκεκριμένη πισίνα χρειάζονται συνολικά  $2 \text{ gr/m}^3 * 140 \text{ m}^3 = 280 \text{ gr}$ . Δηλαδή πρέπει να παράγεται χλώριο με ρυθμό τουλάχιστον  $280 \text{ gr} / 4 \text{ h} = 70 \text{ gr} / \text{h}$ . Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά επιλέγεται η συσκευή ηλεκτρόλυσης άλατος BSV Pro75. Έχει ρυθμό παραγωγής  $70 \text{ gr} / \text{h}$  και αυτόματη μέτρηση και ρύθμιση του  $\text{Cl}$  και του  $\text{pH}$ . Διαθέτει σύστημα αυτοκαθαρισμού των ηλεκτροδίων αντιστρέφοντας την πολικότητα. Τροφοδοτείται με τάση  $220 \text{ V}$ , καταναλώνει  $385 \text{ W}$  και κοστίζει  $2500$  ευρώ.



Για να γίνει η ανακύκλωση του νερού απαιτείται αντλία. Για την συγκεκριμένη πισίνα χρειαζόμαστε να διαθέτει δυνατότητα ροής  $140 \text{ m}^3 / 4 \text{ h} = 35 \text{ m}^3 / \text{h}$ . Επειδή πρόκειται για ανακυκλοφορία νερού θα πρέπει να διαθέτει ενσωματωμένο προφίλτρο. Επιλέγεται το μοντέλο DAB euros swim 300M με μέγιστο ρυθμό κυκλοφορίας  $42 \text{ m}^3 / \text{h}$ . Καταναλώνει 2.8kW, τροφοδοτείται με 220V και κοστίζει 500 ευρώ. Για την ολοκλήρωση του συστήματος απαιτείται και κυρίως φίλτρο καθαρισμού το οποίο ηλεκτρικά δεν επηρεάζει το κύκλωμα. Το συνολικό κύκλωμα νερού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



- 1) Αντλία ανακύκλωσης νερού
- 2) Φίλτρο καθαρισμού
- 3) Ηλεκτρολυτικό στοιχείο
- 4) Πίνακας ελέγχου
- 5) Υγρό ρύθμισης pH

#### 4.7.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΩΝ

Για να υπολογιστεί η απαιτούμενη συνολική ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να είναι γνωστά όλα τα ηλεκτρικά φορτία καθώς και η χρονική διάρκεια που αυτά λειτουργούν. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητος ο καθορισμός της χρήσης της

εγκατάστασης και των συνηθειών των χρηστών. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, η πισίνα ανήκει σε επαγγελματικό χώρο (κολυμβητήριο) και λειτουργεί 8 ώρες την μέρα. Το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο αποτελείται από το σύστημα ηλεκτρόλυσης (το οποίο περιλαμβάνει αντλία, ηλεκτρολυτικό στοιχείο, πίνακα ελέγχου) καθώς και φωτισμό. Αφού η πισίνα είναι μικρότερη των 1250m<sup>3</sup> δεν απαιτείται από την νομοθεσία να ανανεώνεται το νερό συνεχώς οπότε το σύστημα ηλεκτρόλυσης λειτουργεί μόνο για τις ώρες χρήσης. Επειδή το σύστημα είναι αυτόνομο, ισχύ καταναλώνει και ο inverter. Θεωρούμε ότι λειτουργεί για 12 ώρες, όσες περίπου και οι ώρες παραγωγής ενέργειας, και τις υπόλοιπες είναι σε αναμονή. Επίσης ο φωτισμός θα λειτουργεί σε όλη την διάρκεια χρήσης. Η πλειοψηφία των κολυμβητηρίων εκμεταλλεύεται τον φυσικό φωτισμό, αλλά επειδή οι UV ακτίνες του ήλιου εμποδίζουν την χλωρίωση, τα παράθυρα τοποθετούνται ψηλά ώστε να μην υπάρχει άμεση επαφή της ηλιακής ακτινοβολίας με την πισίνα. Συνεπώς ο φυσικός φωτισμός δεν επαρκεί. Επιλέγονται 4 LED προβολείς ισχύος 20W ο καθένας. Η τεχνολογία LED συνδυάζει δυνατό φωτισμό (1900 LM ο καθένας), χαμηλή κατανάλωση και μικρό κόστος (20ευρώ ο καθένας). Οι καταναλώσεις υπολογίζονται στον παρακάτω πίνακα. Τέλος ο αυτόνομος αντιστροφέας που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της DC τάσης σε AC καταναλώνει 24W όταν είναι σε λειτουργία και 4W όταν είναι σε αναμονή. Θεωρούμε ότι είναι on για τις ώρες λειτουργίας του κολυμβητηρίου.

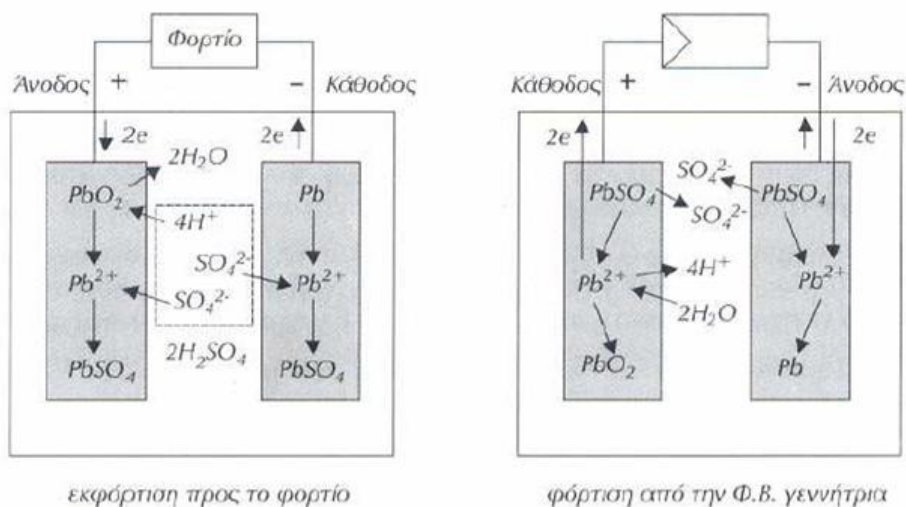
<b>Φορτίο</b>	<b>Ισχύς (W)</b>	<b>Χρόνος λειτουργίας (h)</b>	<b>Ενέργεια (Wh/ημερα)</b>
Αντλία ανακύκλωσης νερού	2800	8	22400
Ηλεκτρολυτικό στοιχείο και πίνακας ελέγχου	385	8	3080
Inverter (on)	24	8	192
Inverter (standby)	4	16	64
Φωτισμός LED	80	8	640
<b>Σύνολο</b>	<b>3293</b>		<b>26376</b>

#### 4.7.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Η τροφοδοτούμενη ηλιακή ενέργεια είναι ουσιαστικά μεταβαλλόμενη στο χρόνο, οπότε η επίτευξη αυτονομίας γίνεται με χρήση επαναφορτιζόμενων ηλεκτρικών συσσωρευτών (μπαταρίες). Οι βασικότεροι τύποι επαναφορτιζόμενων μπαταριών που υπάρχουν στην αγορά είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, νικελίου-καδμίου, νικελίου-υδριδίου μετάλλου και ιόντων λιθίου. Από αυτές μόνο οι πρώτες χρησιμοποιούνται στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα ενώ οι υπόλοιπες χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρές συσκευές όπως ρολόγια, ραδιόφωνα, φορητούς υπολογιστές κλπ.

Με απλοποιημένους όρους η μπαταρία μολύβδου-οξέος περιλαμβάνει δύο ηλεκτρόδια μολύβδου και διοξειδίου του μολύβδου, καθώς και τον ηλεκτρολύτη του θεικού οξέος διαλυμένο με νερό. Στις πρακτικές κατασκευές τα ηλεκτρόδια σχηματίζονται από πλέγμα μολύβδου (μερικές φορές σε μορφή κράματος με ασβέστιο ή αντιμόνιο), όπου το ενεργό υλικό φέρεται με τη μορφή μιας πορώδους δομής, η οποία προσφέρει μια μεγάλη περιοχή επιφάνειας για χημικές αντιδράσεις με τον ηλεκτρολύτη.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης το οξείδιο του μολύβδου σχηματίζεται στην κάθοδο και το θεικό οξύ ελευθερώνεται μέσα στον ηλεκτρολύτη. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης σχηματίζεται ο θεικός μόλυβδος και στα δύο ηλεκτρόδια και το θεικό οξύ απομακρύνεται από τον ηλεκτρολύτη. Η διάρκεια ζωής των μπαταριών μετρείται σε κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης. Ο σχηματισμός οξειδίου



μολύβδου κατά την φόρτιση, και ο επανασηματισμός θεικού μολύβδου κατά την εκφόρτιση, δεν είναι μια διαδικασία πλήρως αναστρέψιμη και γι' αυτό η

χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται. Η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη όσο βαθύτερη είναι η εκφόρτισή της. Έτσι η διάρκεια ζωής της μεταβάλλεται με το βάθος εκφόρτισής της.

Οι μπαταρίες που συνήθως χρησιμοποιούνται σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι τύπου OPzS και OPzV. Οι πρώτες είναι μπαταρίες ανοιχτού τύπου και ο ηλεκτρολύτης τους είναι σε υγρή μορφή. Έτσι κατά τη φόρτισή τους γίνεται ηλεκτρόλυση και παράγονται αέρια υδρογόνο και οξυγόνο. Γι' αυτό και πρέπει να τοποθετούνται σε καλά αεριζόμενους χώρους. Επίσης πρέπει να συντηρούνται κάθε 0,5 έως 3 χρόνια. Αντίθετα οι μπαταρίες τύπου OPzV είναι κλειστού τύπου, δηλαδή ο ηλεκτρολύτης τους είναι σε μορφή ζελέ και γι' αυτό δεν υπάρχει κίνδυνος διαρροής αερίων. Δεν χρειάζονται συντήρηση, ωστόσο είναι πιο ακριβές από τις αντίστοιχες μπαταρίες ανοιχτού τύπου. Και για τους δυο τύπους για βάθος εκφόρτισης 50% η διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 3500 κύκλους, ενώ φτάνουν τους 5000 κύκλους όταν εκφορτίζονται 45%. Τέλος υπάρχουν και οι μπαταρίες έλξης οι οποίες, επειδή χρειάζονται συχνή κατανάλωση και συμπλήρωση νερού, αποφεύγονται.

Η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι το πιο βασικό χαρακτηριστικό της αλλά δεν είναι σταθερή. Εξαρτάται από την θερμοκρασία και κάθε κατασκευαστής δίνει μία γραφική παράσταση που περιγράφει την σχέση αυτή. Γενικά ισχύει ότι αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση της χωρητικότητας. Επίσης ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την χωρητικότητα είναι ο ρυθμός εκφόρτισής τους που καθορίζεται από το ρεύμα εκφόρτισής τους. Γενικά όταν οι συσσωρευτές εκφορτίζονται αργά με μικρό ρεύμα εκφόρτισης μπορούν να δώσουν περισσότερη ενέργεια από όταν εκφορτίζονται γρήγορα με μεγάλο ρεύμα. Συνήθως οι κατασκευαστές ορίζουν τη χωρητικότητα για ρυθμό εκφόρτισης  $C_{10}$  που αντιστοιχεί σε ρεύμα  $1/10$  των Ah της μπαταρίας.

Κατά την φόρτιση, η τάση της μπαταρίας αυξάνεται. Για την προστασία της ο κατασκευαστής ορίζει ένα άνω όριο, την τάση διακοπής φόρτισης (charge cut-off voltage). Ομοίως και κατά την εκφόρτισή της η τάση της μειώνεται, οπότε ορίζεται ένα κάτω όριο, την τάση διακοπής εκφόρτισης (discharge cut-off voltage). Έτσι έχει οριστεί το επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας. Ο έλεγχος ώστε η τάση της μπαταρίας να κυμαίνεται μεταξύ των ορίων αυτών γίνεται από το ρυθμιστή φόρτισης. Από τα παραπάνω φαίνεται επίσης ότι η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας μπορεί να προσδιοριστεί από την τάση της (τάση ανοιχτού κυκλώματος).

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης χωρητικότητας των συσσωρευτών γίνεται με βάση την ημερήσια απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καθώς και το πόσες ημέρες αυτονομίας επιθυμείται. Για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση θεωρούμε μία ημέρα αυτονομίας. Υπολογίζεται η χωρητικότητα των μπαταριών ώστε να καλύπτεται το φορτίο μίας ημέρας. Η μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά ημέρα είναι 26376Wh. Η ενέργεια που δίνεται κατά την εκφόρτιση των συσσωρευτών, για να φτάσει στο φορτίο περνάει από τον αυτόνομο μετατροπέα (inverter). Ο inverter που έχει επιλεγεί, έχει βαθμό απόδοσης περίπου 95%. Συνεπώς

$$E_{\text{bat}} = 26376\text{Wh} / 0.95 = 27764\text{Wh}$$

Όμως η μπαταρία έχει επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης 80%. Επομένως πρέπει να έχει απαραίτητη χωρητικότητα ώστε αν είναι πλήρως φορτισμένη, να μπορεί να δώσει τις 27764Wh αν εκφορτιστεί μόνο κατά 80%

$$E_{\text{bat}} = 27764\text{Wh} / 0,8 = 34705\text{Wh}$$

Συνήθως τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν σε τάση 12V, 24V ή 48V. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα και επομένως τόσο μικρότερες οι ωμικές απώλειες. Επιλέγουμε 48V. Η χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah θα είναι

$$C = 34705\text{Wh} / 48\text{V} = 723\text{Ah}$$

Η χωρητικότητα αυτή θεωρούμε ότι αντιστοιχεί σε εκφόρτιση 8 ωρών, περίπου όσες είναι και οι ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης. Οι μπαταρίες συνήθως διατίθενται σε στοιχεία των 2V, 6V και 12V τα οποία συνδέονται σε σειρά για να δημιουργηθεί η τάση των 48V που ζητείται, και η χωρητικότητα κάθε στοιχείου πρέπει να είναι τουλάχιστον 723Ah. Επειδή το πλήθος των απαιτούμενων μπαταριών είναι μεγάλο, για να περιοριστεί το κόστος επιλέγονται 24 στοιχεία, 8 OPzS 800 της εταιρίας Powersafe, με χαρακτηριστικά 800Ah σε C<sub>8</sub>, 2V και τιμή 250 ευρώ το καθένα. Συνολικό κόστος μπαταριών 6000 ευρώ. Θεωρείται ότι η φόρτιση των μπαταριών γίνεται για 10 ώρες, όσες περίπου και οι ώρες ηλιοφάνειας μέσα στη μέρα. Συνεπώς το ρεύμα φόρτισης είναι  $I_{10} = 800\text{Ah} / 10\text{h} = 80\text{A}$ .



#### 4.7.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Ζητείται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να φορτίζει τις μπαταρίες μέσα σε μία μέρα. Για να υπολογιστεί το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων που χρειάζονται, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η ενέργεια που παράγει το καθένα. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, εξαρτάται πρωτίστως από την ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας. Η τελευταία διαφέρει ανάλογα την εποχή του έτους και την περιοχή. Επιπλέον, μέγιστη παραγωγή ενέργειας γίνεται όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα στο επίπεδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Όμως η τροχιά του ήλιου στον ουρανό εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχή της εγκατάστασης, και την εποχή του έτους. Για να συναντάνε κάθετα οι ηλιακές ακτίνες το φωτοβολταϊκό πρέπει αυτό να είναι σε κλίση, αντίστοιχη με την ηλιακή τροχιά. Επίσης, για να βλέπουν οι ηλιακές ακτίνες την μέγιστη επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πρέπει να έχει τοποθετηθεί με νότιο προσανατολισμό. Εξίσου σημαντικό είναι να υπάρχει πρόβλεψη ώστε άλλα αντικείμενα ή γειτονικά φωτοβολταϊκά να μην σκιάζουν την φωτοβολταϊκή επιφάνεια. Άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης είναι η θερμοκρασία, η οποία εξαρτάται από την εποχή και την περιοχή.

Όλοι αυτοί οι μεταβλητοί παράγοντες, πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την σχεδίαση. Από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο για την Ενέργεια και της Μεταφορές λαμβάνονται τα εξής στατιστικά στοιχεία για την Πάτρα

	$H_h$	$H_{33}$	$H_{59}$	$\Phi_{opt}$	$T$
Ιαν	2260	3620	4020	61	11.3
Φεβ	3020	4250	4450	53	11.7
Μαρ	4760	5850	5660	41	14.2
Απρ	5910	6390	5600	26	17.1
Μαϊ	7010	6820	5450	13	21.8
Ιουν	8050	7420	5580	6	25.9
Ιουλ	7650	7220	5540	9	28.7
Αυγ	6980	7260	6080	21	29.2
Σεπ	5540	6630	6210	37	24.7
Οκτ	3950	5410	5540	50	21.1
Νοε	2630	4160	4580	59	17.1

Δεκ	1940	3210	3620	63	12.9
Έτος	4980	5690	5200	33	19.6

όπου  $H_h$  η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια ( $Wh/m^2$ ) ανά μέρα,  $H_{33}$  η ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια με την μέση βέλτιστη κλίση  $33^\circ$  ( $Wh/m^2$ ) ανά μέρα,  $H_{59}$  η ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια με κλίση  $59^\circ$  ( $Wh/m^2$ ) ανά μέρα,  $\Phi_{opt}$  η βέλτιστη γωνία κλίσης ανά μήνα και  $T$  η μέση θερμοκρασία ημέρας (από ανατολή μέχρι δύση).

Επιλέγονται τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά της εταιρίας Solar Energy μοντέλο SE 260-265W, λόγω του ικανοποιητικού τους συντελεστή απόδοσης (σε ονομαστικές συνθήκες 15,7) και του κόστους τους (200 ευρώ το καθένα). Έστω ότι ο σχεδιασμός γίνεται με βάση τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο) που παρατηρείται η μικρότερη ηλιακή ισχύς. Έτσι καλύπτονται οι ενεργειακές απαιτήσεις τις εγκατάστασης στις χειρότερες συνθήκες. Η μέση βέλτιστη κλίση για τους μήνες αυτούς είναι  $(53^\circ+61^\circ+63^\circ)/3=59^\circ$ , η μέση θερμοκρασία ημέρας  $(11.3+11.7+12.9)/3=11.97^\circ C$ , και η μέση ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια με κλίση  $59^\circ$ ,  $(4020+4450+3620)/3=4030Wh/m^2$ .

Η απόδοση των Φ/Β στοιχείων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία ή για τα Φ/Β πλαίσια αντιστοιχεί στις συνθήκες ελέγχου STC. Έχει μετρηθεί ότι λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, τα ηλιακά στοιχεία αποκτούν κατά τη λειτουργία τους θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος κατά  $25^\circ C$  περίπου. Συνεπώς η μεταβολή του βαθμού απόδοσης είναι

$$\Delta n = 0.004 * T * n_{STC} = 0.0046 * 11.97 * 0.157 = 0.0075 = 0.75\%$$

Άρα ο νέος συντελεστής απόδοσης είναι  $n = n_{STC} - 0.75\% = 14.95\%$ . Επιπλέον η απόδοση του ΦΒ πλαισίου μειώνεται λόγω της αλλοίωσης των υλικών κατασκευής των ΦΒ στοιχείων. Για τη διαχρονική μείωση της απόδοσης λαμβάνεται ένας συντελεστής γήρανσης  $\sigma_\gamma = 0,90$ . Σημαντικό ρόλο παίζει και η ρύπανση της φωτοβολταϊκής επιφάνειας από σκόνη και ακαθαρσίες. Για πλαίσια που καθαρίζονται συχνά θεωρείται συντελεστής ρύπανσης  $\sigma_\rho = 0,95$ . Ο συνολικός συντελεστής διαμορφώνεται

$$n=0.1495*0.9*0.95=12.79\%$$

Η επιφάνεια του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι  $1,65\text{m}*0.992\text{m}=1.64\text{m}^2$ . Άρα η ενέργεια που θα παράγει μια μέση χειμωνιάτικη μέρα θα είναι

$$E_{\Phi B}=4030\text{Wh/m}^2*0.1279*1.64\text{m}^2=846\text{Wh}$$

Η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του ρυθμιστή φόρτισης ο οποίος έχει βαθμό απόδοσης 0.98. Άρα η λαμβανόμενη από τα φωτοβολταϊκά ενέργεια γίνεται

$$E_{\Phi B-B}=846\text{Wh}*0.98=828\text{Wh}$$

Η συνολική ενέργεια των μπαταριών είναι 34368Wh συνεπώς απαιτούνται

$$N=34705\text{Wh}/828\text{Wh}=42 \text{ φωτοβολταϊκά πλαίσια}$$

Το κόστος για τα πλαίσια είναι 8400 ευρώ. Ο σχεδιασμός αυτός εξασφαλίζει αυτονομία για το μεγαλύτερο τμήμα του έτους. Μόνο κατά τον μήνα Δεκέμβριο παρατηρείται έλλειμμα ενέργειας κατά περίπου 11%. Για να καλυφθεί θα χρειαζόνταν περίπου 4 ακόμα πλαίσια ανεβάζοντας το κόστος περίπου 1000 ευρώ. Αν ληφθεί υπόψη ότι ο συγκεκριμένος μήνας έχει πολλές αργίες και διακοπές που δεν θα χρησιμοποιείται η εγκατάσταση το επιπλέον κόστος δεν θεωρείται απαραίτητο.

Η εξασφάλιση της αυτονομίας τον χειμώνα όμως συνεπάγεται ότι κατά τους υπόλοιπους μήνες παράγεται περισσότερη ενέργεια από ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Αν ο σχεδιασμός γίνει με βάση τις μέσες ετήσιες τιμές των παραγόντων που επηρεάζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τότε λαμβάνονται οι εξής τιμές:  $\Phi=33^\circ$ ,  $T=19,6^\circ\text{C}$ ,  $H_{33}=5690$ . Κάνοντας τους υπολογισμούς όμοια με πριν

$$\Delta n=0.004*T*n_{\text{STC}}=0.004*19.6*0.157=0.014=1.23\%$$

$$n=(n_{\text{STC}}-\Delta n)*\sigma_\gamma*\sigma_\rho=0.122=12.3\%$$

$$E_{\Phi B}=n*H_{33}*1.64\text{m}^2=1147.8\text{Wh}$$

$$E_{\Phi B-B}=1147.8\text{Wh}*0.98=1124.8\text{Wh}$$

$N=34705\text{Wh}/1124.8\text{Wh}=31$  πλαίσια (λόγω συμμετρικής συνδεσμολογίας 32 φωτοβολταϊκά πλαίσια)

Το κόστος αυτών είναι 7360 ευρώ. Η συνολική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη, χρησιμοποιώντας λιγότερα πλαίσια και φυσικά με μικρότερο κόστος, από ότι με πριν. Όμως αν υπολογιστεί η ποσοστιαία διαφορά της μέσης προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας με την πραγματική τιμή, σε κλίση  $33^\circ$ , προκύπτει ότι για τους μήνες Οκτώβριο, Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο υπάρχει έλλειμμα ενέργειας 5.2%, 36.7%, 77%, 57% και 33.8% αντίστοιχα. Αν η εγκατάσταση ζητείται να λειτουργεί και αυτούς τους μήνες θα πρέπει το έλλειμμα αυτό να καλυφθεί από άλλη πηγή, συνήθως γεννήτρια πετρελαίου. Από προηγούμενα έχει υπολογιστεί το ημερήσιο φορτίο στα 3.265 W και 8 ώρες χρήσης δηλαδή περίπου 26.200 Wh. Με βάση τα ελλείμματα ενέργειας υπολογίζονται οι ώρες που πρέπει να λειτουργήσει η γεννήτρια (4.5kW). Συγκεκριμένα για τον Οκτώβριο έχουμε  $(31 \text{ μέρες}) \cdot (8 \text{ ώρες τη μέρα}) \cdot (5.2\% \text{ έλλειμμα}) = 12.4$  ώρες. Ομοίως, για Νοέμβριο 88 ώρες, Δεκέμβριο 191 ώρες, Ιανουάριο 141 ώρες, Φεβρουάριο 75 ώρες, και συνολικά 495 ώρες. Με κατανάλωση 2lt πετρελαίου/ώρα απαιτούνται περίπου 990lt πετρελαίου για να καλυφθεί ενεργειακά η εγκατάσταση. Η μέση τιμή πετρελαίου κίνησης είναι 1ευρώ/lt, οπότε κάθε χρόνο απαιτούνται περίπου 1.000 ευρώ σε καύσιμα. Στο κόστος αυτό προστίθεται και η αγορά της γεννήτριας που είναι περίπου 700 ευρώ.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, επειδή βασικός παράγοντας για την συγκεκριμένη εγκατάσταση είναι η αυτονομία και όχι η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ο σχεδιασμός γίνεται με βάση το χειρότερο δυνατό σενάριο. Θεωρούμε λοιπόν, 42 φωτοβολταϊκά πλαίσια συνολικής ονομαστικής ισχύος 11130Wr, τοποθετημένα με κλίση  $59^\circ$  σε κόστος 8400 ευρώ.

#### **4.7.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ**

Ο ρυθμιστής φόρτισης είναι μια συσκευή με ηλεκτρονικές διατάξεις η οποία φροντίζει ώστε η φόρτιση των συσσωρευτών να γίνεται σωστά. Σε περίπτωση που ο συσσωρευτής έχει φτάσει στη μέγιστη κατάσταση φόρτισης, τότε ο ρυθμιστής διακόπτει την διαδικασία της φόρτισης. Έτσι αποφεύγονται υπερτάσεις στον συσσωρευτή οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση των ορίων φόρτισης του

(SOC-State of Charge). Ταυτόχρονα, στη διαδικασία εκφόρτισης του συσσωρευτή, ο ρυθμιστής ελέγχει ώστε να αποφευχθούν οι συνέπειες της υπερεκφόρτισης.

Το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού, καθορίζεται από την τάση της μπαταρίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να μην λειτουργούν πάντα στο μέγιστο σημείο λειτουργίας και να παράγουν την μέγιστη ενέργεια. Για να αποφευχθούν αυτές οι απώλειες, ο ρυθμιστής φόρτισης περιέχει και έναν ανιχνευτή MaximumPowerPointTracking (MPPT). Σε τακτά χρονικά διαστήματα, μεταβάλλει ελάχιστα την τάση και μετρά την ισχύ. Αν είναι μεγαλύτερη από πριν το σημείο αυτό είναι βέλτιστο και στο επόμενο βήμα η μελέτη ξεκινά από αυτό. Αν όχι το σημείο που ήδη λειτουργούσε το κύκλωμα ήδη ήταν το ιδανικό. Υπάρχουν στην αγορά ρυθμιστές φόρτισης Pulse Width Modulation(PWM) που απλά προσαρμόζουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στην τάση των μπαταριών. Είναι φθηνότεροι αλλά οι MPPT αυξάνουν την απόδοση όλου του συστήματος.

Επιλέγεται το μοντέλο Blue Solar MPPT 150V/100A της εταιρίας Victron Energy για μέγιστη ισχύ φωτοβολταϊκών 5.800Wr και κόστος 650 ευρώ. Επειδή η συνολική ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών είναι μεγάλη απαιτούνται δύο ρυθμιστές φόρτισης, που στο καθένα συνδέονται τα μισά πλαίσια δηλαδή 21 ( $21 \cdot 265Wr = 5.565Wr < 5.800Wr$ ). Οι έξοδοι των δύο φορτιστών συνδέονται παράλληλα με τους 24 εν σειρά συσσωρευτές. Επειδή το πλήθος των φωτοβολταϊκών είναι σχετικά μικρό και κατά συνέπεια και η περιοχή που καταλαμβάνουν, δεν υπάρχουν ανομοιομορφίες στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των ακραίων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τέτοιες ανομοιομορφίες, που οφείλονται σε διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας λόγω μερικής νέφωσης ή τοπικής θερμοκρασίας, προκαλούν προβλήματα στην ενεργειακή διαχείριση της εγκατάστασης.

Κάθε ρυθμιστής φόρτισης έχει μέγιστη τάση εισόδου από τα πλαίσια 150V. Κάθε φωτοβολταϊκό έχει τάση ανοιχτοκυκλώματος 37,4V. Από τα 21 πλαίσια που αντιστοιχούν στον κάθε ρυθμιστή, συνδέονται τα 3 σε σειρά δημιουργώντας έναν κλάδο, και οι 7 κλάδοι παράλληλα. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης κάθε πλαισίου είναι 8.9A, οπότε το συνολικό ρεύμα από τους 7 κλάδους είναι  $7 \cdot 8.9A = 62.3A$ , τιμή εντός των χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου



ρυθμιστή. Συνολικό κόστος ρυθμιστών 1300 ευρώ.

#### 4.7.7 ΕΠΙΛΟΓΗ INVERTER

Ο αυτόνομος μετατροπέας είναι μια συσκευή με ηλεκτρονικές διατάξεις ο οποίος δέχεται στην είσοδό του συνεχή τάση και παράγει στην έξοδό του σταθερή ηλεκτρική τάση 230V και συχνότητας 50Hz. Έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί και αντίστροφα όταν δεν επαρκεί η ενέργεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων και έχουν εκφορτιστεί οι μπαταρίες, δηλαδή να δέχεται AC και να παράγει DC έτσι ώστε οι μπαταρίες να μπορούν να φορτιστούν από γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ορισμένες από τις βασικές λειτουργίες ενός μετατροπέα είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοση μετατροπής ακόμα και όχι κάτω από πλήρες φορτίο, η υψηλή ικανότητα υπερφόρτωσης στην έναρξη, η ανοχή απέναντι στις διακυμάνσεις της τάσης της μπαταρίας, η προστασία από βραχυκυκλώματα και υπερτάσεις. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγεται ο αυτόνομος αναστροφέας SunnyIsland 6.0H της εταιρίας SMA, κόστους 2500 ευρώ. Το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο είναι 3293W, ισχύς μικρότερη από αυτή που μπορεί να προσφέρει σε συνεχόμενη λειτουργία ο inverter (3700W). Επίσης ζητείται να αντέχει το ρεύμα εκφόρτισης των μπαταριών μέσα σε 8 ώρες όσες και οι ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης. Πράγματι  $I_8 = 800\text{Ah}/8 = 80\text{A} < 110\text{A}$ .



#### 4.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

Το συνολικό κόστος για την εγκατάσταση του συστήματος ηλεκτρόλυσης άλατος και φωτισμού είναι:

BSVPro75	2500
DABeurowswim 300M	500
Φίλτρο	600
Φωτισμός	80
Καθαρή αξία	3680
Σύνολο	4527

Το συνολικό κόστος εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι:

8 OPzS 800 (24 στοιχεία)	6000
Solar Energy SE 265W (42 πλαίσια)	8400
BlueSolar MPPT 150V/100A (2)	1300
SMASunnyIsland 6.0H	2500
Καθαρή αξία	18200
Σύνολο	22386

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Μανασής Μ, «Ποιοτικά Χαρακτηριστικά και Επεξεργασία Νερού», 2η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- 2) Piscinity pool life <http://www.piscinity.com>
- 3) ΦΕΚ-87/Β/24-1-73 Περί κολυμβητικών δεξαμενών μετά οδηγίων κατασκευής και λειτουργίας αυτών.
- 4) Μηναδάκης Χ Μ «Χημική Τεχνολογία», Μακεδονικές εκδόσεις.
- 5) “Electrochemistry”, Carl H. Hamann, Andrew Hamnett and Wolf Vielstich, Wiley-VCH (2007)
- 6) Νταρακάς Ε.«Βασικές παράμετροι ελέγχου ποιότητας νερού και λυμάτων» Θεσσαλονίκη 2009
- 7) Καραούλη Β Ε «Απολύμανση του πόσιμου νερού με χλωρίωση – Άλλες τεχνικές»
- 8) Benjamin M, West Virginia University, Design projects “salt chlorination device”
- 9) [www.michanikos.gr](http://www.michanikos.gr)
- 10) Χ. Πρωτογερόπουλος, Σ. Τσελεπής, Α. Ζαχαρίου, «Επιδεικτικό Έργο Εγκατάστασης Φωτοβολταϊκών Πλαισίων σε Κτίριο του ΚΑΠΕ, συνολικής Ισχύος 5 kWp» (2001)
- 11) Μπουνόβας Α.Δ., Διπλωματική Εργασία, «Μελέτη για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος σε μονοκατοικία στον νομό Ηρακλείου Κρήτης»
- 12) Ι.Ε. Φραγκιαδάκης «Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Εκδόσεις Ζήτη (2007)
- 13) Join Research Center (JRC), Institute for Energy and Transport (IET) <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/imaps/index.htm>
- 14) [Bergman](#) P., Reverse Osmosis and Nanofiltration, Amer Water Works Assn, 2007
- 15) Volk C., Roche P., Joret J.-C., Paillard H., (1997). Comparison of the effect of ozone, ozone-hydrogen peroxide system and catalytic ozone on the biodegradable organic matter of a fulvic acid solution, Wat. Res., 31( 3), 650-656.
- 16) Lekkas T., Kostopoulou M., Petsas A., Vagi M., Golfopoulos S., Stasinakis A., Thomaidis N., Pavlogeorgatos G., Kotrikla A., Gatidou G., Xylourgidis N.,



- Kolokythas G., Makri Ch., Babos D., Lekkas D., Nikolaou A., (2003). Monitoring priority substances of Directives 76/464/EEC and 2000/60/EC in Greek water bodies, *Journal of Environmental Monitoring*, 5, 593 – 597.
- 17) Kostopoulou M., Golfinopoulos S., Nikolaou A., Xilourgidis N., Lekkas T., (2000). Volatile organic compounds in the surface waters of Northern Greece, *Chemosphere*, 40, 527-532. 13. Babi K., Koumenides K., Nikolaou A., Mihopoulos N., Tzoumerkas F., Makri C., Lekkas T., (2003). Pilot-plant experiments for the removal of THMs, HAAs and DOC from drinking water by GAC adsorption-Galatsi water treatment plant, Athens, 8th Conference on Environmental Science & Technology, Lemnos, Greece, 2003, Vol.A., 52-63.
- 18) Clark R., Adams J., Lykins B., (1994). DBP control in drinking water: cost and performance, *J. Env. Engineer.*, 120 (4), 759-782. 7. Λέκκας Θ. (2002). Εναλλακτικές μέθοδοι απολύμανσης του πόσιμου νερού της ΕΥΔΑΠ, Ενδιάμεση έκθεση υποβληθείσα στην Εταιρεία Υδρευσης Αποχέτευσης Πρωτεύουσας. 8. Water Quality Division Disinfection Committee, (1992). Survey of water utility disinfection practices, *J. AWWA*, 84, 121-128.
- 19) Olympic engineering consulting, <http://www.oleng.eu>
- 20) <http://www.eshops.gr/catalog/product/view/id/4296/s/se-260-265-watt-photovoltaic-off-grid-stand-alone/category/803/>



