



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για την ηλεκτροδότηση των περισσότερων νησιωτικών περιοχών είναι αναγκαία η χρήση εισαγόμενου πετρελαίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, την εξάρτηση από τις πετρελαιοπαραγωγούς χώρες αλλά και την έξοδο πολύτιμου συναλλάγματος από τη χώρα. Εκτός των παραπάνω η Ελλάδα ήδη βρίσκεται αντιμέτωπη με υπέρογκα πρόστιμα, της τάξης των δεκάδων εκατομμυρίων €, εξαιτίας της μη σωστής διαχείρισης των απορριμμάτων, κυρίως δε στις νησιωτικές περιοχές όπου δεν υπάρχουν οργανωμένα ΧΥΤΑ.

Για τους παραπάνω λόγους σε αυτήν τη διπλωματική μελετήσαμε το κατά πόσο είναι δυνατόν να ηλεκτροδοτήσουμε τα μη διασυνδεδεμένα νησιά αντικαθιστώντας το πετρέλαιο με ΑΠΕ και αξιοποιώντας τα απορρίμματα των νήσων, επιλέγοντας τη νήσο Νάξο ως τόπο εφαρμογής της μελέτης μας. Δημιουργήσαμε τέσσερα πιθανά σενάρια, όπου συνδυάσαμε τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά πάρκα, με ένα εργοστάσιο καύσης ΑΣΑ και με συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα οποία θα μας παρείχαν και την απαραίτητη αυτονομία.

Στο πρώτο σενάριο εκμεταλλευτήκαμε κυρίως την αιολική ενέργεια σχεδιάζοντας τρία αιολικά πάρκα, δημιουργήσαμε δύο φωτοβολταϊκά πάρκα και στο εργοστάσιο καύσης ΑΣΑ λάβαμε υπόψιν μας μονάχα την παραγωγή απορριμμάτων του νησιού. Για την αντλησιοταμίευση χρησιμοποιήσαμε το υπάρχον φράγμα Φανερωμένης, ώστε να μειωθεί το συνολικό κόστος. Στο δεύτερο σενάριο εκμεταλλευτήκαμε και τα απορρίμματα της γειτονικής Πάρου, κάτι που μας έδωσε τη δυνατότητα να καταργήσουμε το ένα μικρό αιολικό πάρκο, μειώνοντας και άλλο το κόστος της επένδυσης. Στο τρίτο σενάριο επιστρέψαμε στην αρχική ιδέα, αλλά για την αύξηση της αυτονομίας χρησιμοποιήσαμε και το φράγμα του Τσικαλαριού, που πρόκειται να κατασκευαστεί μέχρι το 2015, ενώ στο τέταρτο μελετήσαμε ένα συνδυασμό των παραπάνω, εκμεταλλευόμενοι και τα απορρίμματα της Πάρου, αλλά και το φράγμα Τσικαλαριού.

Αφού αποδείξαμε ότι μπορεί να επιτευχθεί ο στόχος από τεχνολογικής άποψης, μελετήσαμε το κατά πόσο συμφέρει από οικονομικής άποψης μία τέτοια επένδυση. Χρησιμοποιώντας οικονομικά κριτήρια όπως της Καθαρή Παρούσα Αξία, τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης και το Λόγο Όφελους – Κόστους, είδαμε ότι και τα τέσσερα σενάρια είναι οικονομικός αποδεκτά. Τελικά το τέταρτο σενάριο επιλέχτηκε ως το πλέον κατάλληλο, καθώς πέραν όλων των άλλων μας έδινε και τη μεγαλύτερη δυνατή αυτονομία σε περίπτωση δυσλειτουργίας των υπολοίπων ΑΠΕ.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>7</b>
1.1 Σκοπός και αντικείμενο της μελέτης.....	7
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργεια – Βασικές έννοιες.....	7
1.3 Κατηγοριοποίηση καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας.....	9
1.4 Επιλογή τοποθεσίας για την πραγματοποίηση της μελέτης.....	14
1.5 Επιλογή μεθόδων παραγωγής ενέργειας.....	16
<b>2. ΚΑΥΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΑΣΑ).....</b>	<b>19</b>
2.1 Εισαγωγή.....	19
2.2 Τεχνολογία.....	20
2.2.1 Τύποι εστιών καύσης.....	20
2.2.1.1 Μονάδες mass-fired.....	20
2.2.1.2 Μονάδες RDF-fired.....	20
2.2.2 Εισαγωγή στη μονάδα καύσης.....	21
2.2.2.1 Υποδοχή εισερχόμενων αποβλήτων.....	22
2.2.2.2 Αποθήκευση αποβλήτων και προεπεξεργασία.....	23
2.2.2.3 Τροφοδοσία αποβλήτων προς επεξεργασία.....	26
2.2.3 Θερμική επεξεργασία αποβλήτων – Εστίες Καύσης.....	27
2.2.3.1 Εστία κινούμενων σχαρών.....	28
2.2.3.2 Εστία περιστρεφόμενου κλιβάνου.....	35
2.2.3.3 Εστία ρευστοποιημένης κλίνης.....	38
2.2.4 Ανάκτηση ενέργειας και μετατροπή (Λέβητες).....	39
2.2.4.1 Κατασκευαστικές παραλλαγές.....	40
2.2.4.2 Παραγωγή ενέργειας στο λέβητα.....	41
2.2.5 Συστήματα ελέγχου εκπομπών και αέριας ρύπανσης.....	42
2.2.5.1 Σύσταση καυσαερίων.....	42
2.2.5.2 Επεξεργασία και έλεγχος.....	44
2.2.5.3 Απομάκρυνση ιπτάμενων σωματιδίων.....	46
2.2.5.4 Απομάκρυνση όξινων αερίων.....	50
2.2.5.5 Μείωση εκπομπών οξειδίων αζώτου (NO <sub>x</sub> ).....	55
2.2.5.6 Μείωση οργανικών ενώσεων.....	55
2.2.5.7 Μείωση εκπομπών υδραργύρου.....	56
2.2.5.8 Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O).....	57
2.2.6 Επεξεργασία και έλεγχος υδατικών υπολειμμάτων.....	57
2.2.6.1 Έλεγχος εκροής.....	57
2.2.6.2 Μέθοδοι επεξεργασίας.....	58
2.2.7 Επεξεργασία και έλεγχος στερεών υπολειμμάτων.....	58
2.2.7.1 Είδη υπολειμμάτων.....	59
2.2.7.2 Επεξεργασία υπολειμμάτων από την καύση και την επεξεργασία των καυσαερίων.....	59

<b>3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ.....</b>	<b>61</b>
3.1 Ηλιακή ακτινοβολία.....	61
3.1.1 Γενικά.....	61
3.1.2 Ηλιακή Γεωμετρία.....	62
3.1.3 Άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία.....	63
3.1.4 Ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο.....	65
3.1.5 Στατιστικά στοιχεία για τον Ελλαδικό χώρο.....	66
3.2 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία.....	67
3.2.1 Γενικά.....	67
3.2.2 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	67
3.2.3 Φωτοβολταϊκό Στοιχείο.....	69
3.2.4 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο.....	70
3.2.5 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία.....	71
3.2.6 Είδη Φωτοβολταϊκών Στοιχείων.....	72
3.2.7 Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	80
3.2.8 Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	82
3.2.9 Συνδέσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	82
3.2.10 Ηλεκτρικές Ιδιότητες Φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	83
3.2.10.1 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα.....	83
3.2.10.2 Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα.....	84
3.2.10.3 I-V χαρακτηριστική και STC.....	85
3.2.10.4 Απόδοση Φ/Β στοιχείου.....	86
3.3 Συστατικά Μέρη Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	87
3.3.1 Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια.....	87
3.3.2 Αντιστροφείς (Inverters).....	89
3.3.2.1 Γενικά.....	89
3.3.2.2 Τύποι αντιστροφέων.....	90
3.3.2.3 Ανώτερες Αρμονικές.....	93
3.3.3 Βάσεις στήριξης και ηλιοστάτες.....	93
<b>4. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....</b>	<b>96</b>
4.1 Εισαγωγή.....	96
4.2 Η αιολική ενέργεια στο πέρασμα του χρόνου.....	97
4.3 Μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου.....	100
4.4 Η Αιολική Ενέργεια και το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό.....	101
4.5 Ενεργειακά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας.....	107
4.6 Γενικά για τις ανεμογεννήτριες.....	108
4.7 Τρόποι συλλογής της αιολικής ενέργειας.....	110
4.8 Η δομή μιας ανεμογεννήτριας.....	111
4.9 Ασύγχρονες γεννήτριες.....	117
4.10 Σύγχρονες γεννήτριες.....	120
4.11 Είδη αιολικών πάρκων.....	121

<b>5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ.....</b>	<b>124</b>
<b>5.1 Αρχή αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας – Η υδραυλική         ενέργεια στην Ελλάδα.....</b>	<b>124</b>
<b>5.2 Συστήματα αντλησιοταμίευσης.....</b>	<b>127</b>
<b>5.2.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>127</b>
<b>5.2.2 Περιγραφή συστήματος αντλησιοταμίευσης – Το δίλημμα της         Σωλήνωσης.....</b>	<b>128</b>
5.2.2.1 Αντλίες.....	131
5.2.2.2 Αντλητική Εγκατάσταση.....	135
5.2.2.3 Υδροστρόβιλος.....	140
5.2.2.4 Υδροηλεκτρικό Έργο.....	145
<b>5.2.3 Λειτουργία συστήματος αντλησιοταμίευσης.....</b>	<b>148</b>
5.2.3.1 Περίπτωση αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος....	150
<b>5.2.4 Υβριδικά υδροηλεκτρικά συστήματα.....</b>	<b>156</b>
5.2.4.1 Σύστημα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση (ΑΕΑ).156	
5.2.4.2 Συνδυασμός συστήματος αντλησιοταμίευσης με θερμικά Συστήματα.....	166
5.2.4.3 Λειτουργία Υδροηλεκτρικών Μονάδων.....	167
<b>6. ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΝΗΣΙΩΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΑΠΕ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>168</b>
<b>6.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>168</b>
<b>6.2 Απαιτήσεις που πρέπει να καλυφθούν σε ηλεκτρική ενέργεια.....</b>	<b>168</b>
<b>6.3 Σενάριο 1<sup>ο</sup>.....</b>	<b>169</b>
<b>6.3.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Αιολικά Πάρκα.....</b>	<b>169</b>
6.3.1.1 Αιολικό δυναμικό και παράμετροι σχεδιασμού.....	169
6.3.1.2 Τοποθεσίες και διάταξη Α/Π.....	172
6.3.1.3 Μελέτη Αιολικών Πάρκων.....	172
<b>6.3.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Καύση ΑΣΑ.....</b>	<b>174</b>
6.3.2.1 Τρέχοντα δεδομένα παραγωγής απορριμμάτων.....	174
6.3.2.2 Υπολογισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύση ΑΣΑ.....	175
<b>6.3.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φωτοβολταϊκό Πάρκο..</b>	<b>178</b>
6.3.3.1 Ηλιακό δυναμικό και παράμετροι σχεδιασμού.....	178
6.3.3.2 Τοποθεσίες και διάταξη Φ/Β.....	180
<b>6.3.4 Αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας με χρήση υβριδικού                 συστήματος με αντλησιοταμίευση.....</b>	<b>181</b>
6.3.4.1 Λόγοι επιβολής χρήσης αποθηκευτικής μονάδας ενέργειας σε μοντέλο παραγωγής αυτόνομων ΑΠΕ.....	181
6.3.4.2 Διαστασιολόγηση αντλησιοταμίευσης.....	181

6.3.5	Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το πρώτο σενάριο.....	187
6.4	Σενάριο 2 <sup>ο</sup> .....	188
6.4.1	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Αιολικά Πάρκα.....	188
6.4.1.1	Τοποθεσίες και διάταξη Α/Π.....	188
6.4.1.2	Μελέτη Αιολικών Πάρκων.....	188
6.4.2	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Καύση ΑΣΑ.....	189
6.4.2.1	Τρέχοντα δεδομένα παραγωγής απορριμμάτων.....	189
6.4.2.2	Υπολογισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύση ΑΣΑ.....	189
6.4.3	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φωτοβολταϊκό Πάρκο..	191
6.4.3.1	Τοποθεσίες και διάταξη Φ/Β.....	191
6.4.4	Αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας με χρήση υβριδικού συστήματος με αντλησιοταμίευση.....	191
6.4.4.1	Διαστασιολόγηση αντλησιοταμίευσης.....	191
6.4.5	Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το δεύτερο σενάριο.....	192
6.5	Σενάριο 3 <sup>ο</sup> .....	193
6.5.1	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Αιολικά Πάρκα.....	193
6.5.1.1	Τοποθεσίες και διάταξη Α/Π.....	193
6.5.1.2	Μελέτη Αιολικών Πάρκων.....	194
6.5.2	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Καύση ΑΣΑ.....	194
6.5.2.1	Υπολογισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύση ΑΣΑ.....	194
6.5.3	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φωτοβολταϊκό Πάρκο..	195
6.5.3.1	Τοποθεσίες και διάταξη Φ/Β.....	195
6.5.4	Αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας με χρήση υβριδικού συστήματος με αντλησιοταμίευση.....	195
6.5.4.1	Διαστασιολόγηση αντλησιοταμίευσης.....	195
6.5.5	Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το τρίτο σενάριο.....	197
6.6	Σενάριο 4 <sup>ο</sup> .....	198
6.6.1	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Αιολικά Πάρκα.....	198
6.6.1.1	Τοποθεσίες και διάταξη Α/Π.....	198
6.6.1.2	Μελέτη Αιολικών Πάρκων.....	198
6.6.2	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Καύση ΑΣΑ.....	199
6.6.2.1	Τρέχοντα δεδομένα παραγωγής απορριμμάτων.....	199
6.6.2.2	Υπολογισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύση ΑΣΑ.....	199
6.6.3	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φωτοβολταϊκό Πάρκο..	199
6.6.3.1	Τοποθεσίες και διάταξη Φ/Β.....	199
6.6.4	Αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας με χρήση υβριδικού συστήματος με αντλησιοταμίευση.....	199

6.6.4.1 Διαστασιολόγηση αντλησιοταμίευσης.....	199
6.6.5 Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το τέταρτο σενάριο.....	200
<b>7. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΝΗΣΙΩΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΑΠΕ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>201</b>
7.1 Κόστη κατασκευής και συντήρησης.....	201
7.1.1 Αιολικό πάρκο.....	201
7.1.2 Φωτοβολταϊκό πάρκο.....	202
7.1.3 Μονάδα καύσης ΑΣΑ.....	203
7.1.4 Αντλησιοταμίευση.....	204
7.1.5 Συνολικά κόστη κατασκευής.....	205
7.2 Οικονομική Βιωσιμότητα.....	205
7.3 Συμπεράσματα.....	210
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....</b>	<b>212</b>

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Σκοπός και αντικείμενο της μελέτης

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να εξετάσει τη δυνατότητα απεξάρτησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των νησιωτικών περιοχών από το πετρέλαιο, και την αντικατάσταση αυτού με μονάδα παραγωγής ενέργειας βασισμένη σε ΑΠΕ και αξιοποίηση απορριμμάτων. Τελικός στόχος της μελέτης είναι η παρουσίαση μίας πρότασης, σύμφωνα με την οποία θα μπορούν να καλυφθούν πλήρως οι ανάγκες ηλεκτροδότησης μιας νησιωτικής περιοχής με χρήση μόνο καθαρών πηγών ενέργειας.

## 1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργεια – Βασικές έννοιες

Ο όρος «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας» (ΑΠΕ), σύμφωνα με την Οδηγία 2001/77/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 27ης Σεπτεμβρίου 2001, σημαίνει τις μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως π.χ. αιολική, ηλιακή και γεωθερμική ενέργεια, ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκή ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια, βιομάζα, αέρια εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής, αέρια εκλυόμενα από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και βιοαέρια.

Οι ήπιες μορφές ενέργειας ή «ανανεώσιμες πηγές ενέργειας» ή «νέες πηγές ενέργειας» είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχήν, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερο, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα.

Ως ανανεώσιμες πηγές θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (π.χ. του πετρελαίου ή του άνθρακα), όπως η ηλιακή και η αιολική. Ο χαρακτηρισμός «ανανεώσιμες» είναι κάπως καταχρηστικός, μια και ορισμένες από αυτές τις πηγές, όπως η γεωθερμική ενέργεια, δεν ανανεώνονται σε κλίμακα χιλιετιών. Τελευταία από την Ευρωπαϊκή Ένωση αλλά και πολλά κράτη υιοθετούνται νέες

πολιτικές για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που προάγουν τέτοιες εσωτερικές πολιτικές και για τα κράτη μέλη.

Οι ήπιες μορφές ενέργειας βασίζονται στην ουσία στην ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση τη γεωθερμική ενέργεια, η οποία είναι ροή ενέργειας από το εσωτερικό του φλοιού της γης, και την ενέργεια απ' τις παλίρροιες που εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα. Οι βασιζόμενες στην ηλιακή ακτινοβολία ήπιες πηγές ενέργειας είναι ανανεώσιμες, μιας και δεν πρόκειται να εξαντληθούν όσο υπάρχει ο ήλιος, δηλαδή για μερικά ακόμα δισεκατομμύρια χρόνια. Ουσιαστικά είναι ηλιακή ενέργεια «συσκευασμένη» κατά τον ένα ή τον άλλο τρόπο: η βιομάζα είναι ηλιακή ενέργεια δεσμευμένη στους ιστούς των φυτών μέσω της φωτοσύνθεσης, η αιολική εκμεταλλεύεται τους ανέμους που προκαλούνται απ' τη θέρμανση του αέρα ενώ αυτές που βασίζονται στο νερό εκμεταλλεύονται τον κύκλο εξάτμισης-συμπύκνωσης του νερού και την κυκλοφορία του. Η γεωθερμική ενέργεια δεν είναι ανανεώσιμη, καθώς τα γεωθερμικά πεδία κάποια στιγμή εξαντλούνται.

Χρησιμοποιούνται είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση) είτε μετατρέπομενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό απ' τις ήπιες μορφές ενέργειας είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η υψηλή όμως μέχρι πρόσφατα τιμή των νέων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής καθώς και πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση του παρόντος «στάτους κβο» στον ενεργειακό τομέα εμπόδισαν την εκμετάλλευση έστω και μέρους αυτού του δυναμικού. Ειδικά στην Ελλάδα, που έχει μορφολογία και κλίμα κατάλληλο για νέες ενεργειακές εφαρμογές, η εκμετάλλευση αυτού του ενεργειακού δυναμικού θα βοηθούσε σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία της χώρας.

Το ενδιαφέρον για τις ήπιες μορφές ενέργειας ανακινήθηκε τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα κυρίως των απανωτών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, αλλά και της αλλοίωσης του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής από τη χρήση κλασικών πηγών ενέργειας. Ιδιαίτερα ακριβές στην αρχή, ξεκίνησαν σαν πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα όμως λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια και, αν και αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής, ετοιμάζονται βήματα για παραπέρα αξιοποίησή τους. Το κόστος δε των εφαρμογών ήπιων μορφών ενέργειας πέφτει συνέχεια τα τελευταία είκοσι χρόνια και ειδικά η αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και η βιομάζα, μπορούν πλέον να ανταγωνίζονται στα ίσα παραδοσιακές πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια.

## 1.3 Κατηγοριοποίηση καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας

### 1. Συμβατικά καύσιμα:

- Λιγνίτης
- Πετρέλαιο
- Φυσικό αέριο

### 2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδραυλική ενέργεια
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια από τη θάλασσα

### 3. Ενέργεια από απορρίμματα

- Αποτέφρωση απορριμμάτων
- Παραγωγή καυσίμων με χρήση θερμικής επεξεργασίας
- Παραγωγή καυσίμων χωρίς χρήση θερμικής επεξεργασίας

Με τα συμβατικά καύσιμα δε θα ασχοληθούμε περαιτέρω σε αυτήν την μελέτη. Αντιθέτως, παρακάτω θα αναφέρουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των ΑΠΕ και των καυσίμων από αξιοποίηση απορριμμάτων.

### • Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

#### Αιολική ενέργεια

Γενικά αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται ήπια μορφή ενέργειας και περιλαμβάνεται στις «καθαρές» πηγές όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους. Η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων και πολύ αργότερα οι ανεμόμυλοι στη ξηρά.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.

## **Ηλιακή ενέργεια**

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών:

1. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα
2. Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα
3. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

## **Υδραυλική ενέργεια**

Η υδραυλική ενέργεια, όπως λέγεται η ενέργεια του νερού, είναι μία παραδοσιακή πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια από τον άνθρωπο. Το νερό πέφτοντας από κάποιο ύψος ή ρέοντας με μεγάλη ταχύτητα μπορεί να περιστρέψει τροχούς με πτερύγια (υδροστρόβιλους). Αυτήν την περιστροφή την αξιοποιούμε παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια σε ειδικές εγκαταστάσεις (υδροηλεκτρικοί σταθμοί).

## **Βιομάζα**

Με τον όρο βιομάζα εννοούμε τα καυσόξυλα, τα φυτικά και δασικά υπολείμματα, τα ζωικά απόβλητα, τα φυτά που καλλιεργούνται στις ενεργειακές φυτείες ειδικά για να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας, καθώς επίσης και τα αστικά απορρίμματα και τα υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων και της αγροτικής βιομηχανίας. Όλα τα παραπάνω υλικά μπορούμε να τα μετατρέψουμε σε ενέργεια.

Η ενέργεια που είναι δεσμευμένη στις φυτικές ουσίες προέρχεται από τον ήλιο. Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, τα φυτά μετασχηματίζουν την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα. Οι ζωικοί οργανισμοί αυτή την ενέργεια την προσλαμβάνουν με την τροφή τους και αποθηκεύουν ένα μέρος της. Αυτή την ενέργεια αποδίδει τελικά η βιομάζα, μετά την επεξεργασία και τη χρήση της. Είναι μια ανανεώσιμη

πηγή ενέργειας γιατί στην πραγματικότητα είναι αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια που δεσμεύτηκε από τα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση.

Η βιομάζα είναι η πιο παλιά και διαδεδομένη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ο πρωτόγονος άνθρωπος, για να ζεσταθεί και να μαγειρέψει, χρησιμοποίησε την ενέργεια (θερμότητα) που προερχόταν από την καύση των ξύλων, που είναι ένα είδος βιομάζας.

### **Γεωθερμική ενέργεια**

Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών, όσον αφορά τη θέρμανση, και το 20%, όσον αφορά τον ηλεκτρισμό, με γεωθερμική ενέργεια.

### **Ενέργεια από τη θάλασσα**

Η ενέργεια αυτή μπορεί να αποδεσμευτεί από τη θάλασσα με τρεις τρόπους:

1. *Ενέργεια από Παλίρροιες:* Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού
2. *Ενέργεια από κύματα:* Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας
3. *Ενέργεια από τους Ωκεανούς:* Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας

#### **• Ενέργεια από απορρίμματα**

### **Αποτέφρωση απορριμμάτων**

Ως αποτέφρωση ορίζεται η ταχεία μετατροπή της χημικής ενέργειας σε θερμική, με οξείδωση της οργανικής ύλης των αποβλήτων, υπό συνθήκες περίσσειας οξυγόνου. Τα ανόργανα συστατικά των απορριμμάτων

παραμένουν στο παραγόμενο στερεό υπόλειμμα. Τα κυριότερα είδη μονάδων αποτέφρωσης, που έχουν αναπτυχθεί, είναι δύο:

1. Μονάδες που απαιτούν ελάχιστη προεπεξεργασία των απορριμμάτων (μονάδες τύπου mass-fired)
2. Μονάδες όπου χρησιμοποιούνται απορριμματογενή καύσιμα (RDF ή SRF)

## **Παραγωγή καυσίμων με χρήση θερμικής επεξεργασίας**

### *Αεριοποίηση:*

Η αεριοποίηση αποτελεί μια επίσης σχετικά νέα και μη ευρέως διαδεδομένη, στην Ευρώπη, μέθοδο θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ. Αν και εφαρμόζεται με επιτυχία στη χημική βιομηχανία για αρκετές δεκαετίες, η αεριοποίηση των ΑΣΑ παρουσίασε δυσκολίες λόγω του χαμηλού θερμικού περιεχομένου τους και των μεταβολών της σύνθεσής τους. Για το λόγο αυτό οι προσπάθειες επικεντρώνονται τα τελευταία χρόνια στην αεριοποίηση απορριμματογενών καυσίμων, που έχουν μεγαλύτερο θερμικό περιεχόμενο και σταθερότερες ιδιότητες. Τα παραγόμενα αερίδια εξαρτώνται από το είδος του μέσου αεριοποίησης.

### *Πυρόλυση:*

Ως πυρόλυση ορίζεται η αποδόμηση των οργανικών ουσιών των απορριμμάτων, απουσία (ή παρουσία ελαχίστου) οξυγόνου. Η πυρόλυση αποτελεί μια σχετικά νέα θερμική διεργασία, η οποία αν και αναπτύχθηκε στα τέλη του 19ου αιώνα, άρχισε να εφαρμόζεται στην επεξεργασία ΑΣΑ τα τελευταία 20-30 χρόνια. Γενικά, δεν αποτελεί μια ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδο θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ, τουλάχιστον στην Ευρώπη, λόγω της μειωμένης ενεργειακής απόδοσης και οικονομικής βιωσιμότητάς της. Τα προϊόντα της πυρόλυσης είναι στερεά, υγρά και αέρια και η σύστασή τους εξαρτάται από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μονάδας, όπως τη θερμοκρασία και το χρόνο παραμονής των απορριμμάτων στον πυρολυτικό θάλαμο.

### *Αεριοποίηση με τη μέθοδο πλάσματος:*

Η αεριοποίηση πλάσματος αποτελεί την πιο σύγχρονη τεχνολογία επεξεργασίας απορριμμάτων. Πλάσμα ονομάζεται το αέριο που έχει ιονιστεί. Τα αέρια ιονίζονται όταν θερμανθούν σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (>5.000°C). Το πλάσμα δημιουργείται κατά την ηλεκτρική εκκένωση ενός αερίου. Υπό φυσιολογικές συνθήκες, τα αέρια δεν είναι αγωγιμα. Ωστόσο, αν εφαρμοστεί υψηλή τάση, τα αέρια χάνουν τις μονωτικές τους ιδιότητες και καθώς ο ηλεκτρισμός ρέει μέσα από αυτά, θερμαίνονται και άγουν ολόένα και περισσότερο. Τα ΑΣΑ εγχέονται στο

επάνω μέρος του θερμικού μετασχηματιστή (αεριοποιητής πλάσματος) και συσσωρεύεται στο σώμα του αντιδραστήρα. Το πλάσμα βρίσκεται στον πάτο του αντιδραστήρα και παράγει φλόγα μεταξύ 2.800-4.500 °C. Το οργανικό υλικό δεν καίγεται γιατί δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο, αλλά μετατρέπεται σε αέριο που αποτελείται από CO, H<sub>2</sub> και N. Αυτό το αέριο περιέχει ουσιαστική ενέργεια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλούς τρόπους.

## **Παραγωγή καυσίμων χωρίς χρήση θερμικής επεξεργασίας**

*Αναερόβια ζύμωση οργανικού κλάσματος ΑΣΑ:*

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μια διεργασία που λαμβάνει χώρα αυθόρμητα σε αναερόβια περιβάλλοντα, όπως οι ορυζώνες, τα έλη και οι χώροι διάθεσης αποβλήτων. Μπορεί ωστόσο να λάβει χώρα και κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε ειδικές εγκαταστάσεις, με στόχο τη μεγιστοποίηση του παραγόμενου μεθανίου, καθώς και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών προβλημάτων και οχλήσεων (π.χ. διαφυγή μεθανίου, οσμές). Κατά την αναερόβια χώνευση γίνεται ελεγχόμενη βιολογική αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων κάτω από συνθήκες έλλειψης οξυγόνου, με αποτέλεσμα την παραγωγή βιοαερίου (ένα μίγμα CH<sub>4</sub> και CO<sub>2</sub>) και ιλύος.

*Μηχανικής Βιολογικής Επεξεργασίας (ΜΒΕ):*

Στις μονάδες Μηχανικής Βιολογικής Επεξεργασίας δύναται να παραχθεί ένα διαχωρισμένο, σχετικά ομογενοποιημένο κλάσμα υψηλής θερμογόνου δύναμης, το οποίο αποτελείται από χαρτί, πλαστικά και άλλα καύσιμα υλικά, προς χρήση ως απορριμματογενές καύσιμο. Το καύσιμο αυτό ονομάζεται συχνότερα RDF. Άλλοι παρεμφερείς όροι που χρησιμοποιούνται είναι REF (Recovered Fuel), PPF (Paper and Plastic Fraction) και PEF (Processed Engineered Fuel), ενώ υπάρχουν και καύσιμα από χρησιμοποιημένα ελαστικά, τα TDF (Tire Derived Fuel). Τα απορριμματογενή καύσιμα από συσκευασίες PDF (Packaging Derived Fuel) και τα PEF είναι συνήθως ανώτερης ποιότητας από το RDF, καθώς αποτελούνται από στερεό καύσιμο κλάσμα υλικών, που ενώ έχουν διαχωριστεί στην πηγή, δεν οδηγούνται προς ανακύκλωση, όπως είναι οι χάρτινες συσκευασίες ροφημάτων και δοχεία PE/PET με προσμίξεις PVC. Πρόσφατα έχει αρχίσει επίσης να χρησιμοποιείται ο όρος SRF (Solid Recovered Fuel).

Δυο είναι οι τεχνολογίες παραγωγής απορριμματογενών καυσίμων από ΑΣΑ:

1. Η μηχανική και η βιολογική επεξεργασία των απορριμμάτων. Συνήθως τα συστήματα που χρησιμοποιούνται κατά τη μηχανική επεξεργασία των ΑΣΑ περιλαμβάνουν μείωση του μεγέθους, κοσκίνισμα, διαχωρισμό με αέρα και μαγνητικό διαχωρισμό. Ως αποτέλεσμα, μετά τη μηχανική επεξεργασία ανακτώνται υλικά προς ανακύκλωση, όπως επίσης καθίσταται δυνατή και η παραγωγή RDF, το οποίο αποτελείται κυρίως από πλαστικά χαρτί και ξύλα
2. Εκτός της μηχανικής επεξεργασίας, απορριμματογενές καύσιμο μπορεί να προκύψει και μετά τη βιολογική ξήρανση του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος απορριμμάτων. Αφού διαχωριστούν και στην περίπτωση αυτή τα αδρανή υλικά και τα μέταλλα, το εναπομένον κλάσμα, εκτός από χαρτί και πλαστικό, περιέχει επίσης μεγάλο ποσοστό ζυμώσιμων, τα οποία ξηραίνονται και σταθεροποιούνται. Κατά συνέπεια προκύπτει καύσιμο υψηλής θερμογόνου δύναμης κατάλληλο προς αποτέφρωση

Ο όρος RDF χρησιμοποιείται συχνότερα για απορριμματογενές καύσιμο που παράγεται κατά τη φάση της μηχανικής επεξεργασίας και αποτελείται κυρίως από πλαστικά, χαρτί και ξύλα. Το SRF είναι απορριμματογενές καύσιμο που πληροί τις προϋποθέσεις του προτύπου CEN/TC 343 και ως όρος χρησιμοποιείται συχνότερα για το καύσιμο που παράγεται μετά το πέρας της βιολογικής ξήρανσης.

#### **1.4 Επιλογή τοποθεσίας για την πραγματοποίηση της μελέτης**

Σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας έπαιξε η επιλογή της νησιωτικής περιοχής, αφού με βάση τα πληθυσμιακά, γεωγραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά αυτής έγινε η οριστική επιλογή των τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας που μελετήσαμε.

Το νησί έπρεπε να πληροί κάποιες προϋποθέσεις, ώστε η τελική πρόταση μας να είναι ρεαλιστική και πραγματοποιήσιμη. Οι προϋποθέσεις αυτές είναι οι παρακάτω:

- *Να μην υπάρχει σύνδεση με το Ηπειρωτικό δίκτυο:* Θα καθιστούσε ανώφελη τη μελέτη αυτή
- *Να έχει μεγάλη έκταση:* Για να γίνει πλήρης αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων, χρειάζεται συνδυασμός των εναλλακτικών τεχνολογιών, κάτι που απαιτεί μεγάλες εκτάσεις για τη δημιουργία των εγκαταστάσεων τους

- *Να έχει έναν ελάχιστο δυνατό πληθυσμό:* Αν ο πληθυσμός είναι μικρότερος από ένα  $x$  πλήθος, τότε η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι τόσο περιορισμένη, όπου κρίνεται ασύμφορη και οικονομικά και περιβαντολογικά η αντικατάσταση
- *Να έχει περιορισμένη τουριστική επισκεψιμότητα:* Μία μονάδα παραγωγής ενέργειας σχεδιάζεται να μπορεί να καλύψει τη μέγιστη ζήτηση ενέργειας που μπορεί να απαιτηθεί, λαμβάνοντας υπόψιν όμως και την ελαχιστοποίηση των επενδύσεων και του τελικού κόστους. Σε ένα νησί όπως η Πάρος για παράδειγμα, με 20000 μόνιμους κατοίκους, κατά τη διάρκεια της τουριστικής περιόδου ο συνολικός πληθυσμός μπορεί να τετραπλασιαστεί. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει η μελέτη μας να μπορεί να καλύψει τον συνολικό πληθυσμό της τουριστικής περιόδου, κατασκευάζοντας πολλές μεγάλες και κοστοβόρες εγκαταστάσεις, οι οποίες για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα θα είναι άχρηστες και δε θα είναι δυνατό να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια που θα παράγεται (δεδομένου ότι δεν έχουμε λάβει στα υπόψιν μας την ύπαρξη διασύνδεσης με το Ηπειρωτικό δίκτυο)
- *Να έχει υψηλά δυναμικά:* Μία περιοχή που είναι φτωχή σε αιολικό, ηλιακό και γεωλογικό δυναμικό, στην ουσία δεν έχει πρώτες ύλες για παραγωγή ενέργειας με ΑΠΕ
- *Να βρίσκεται σε σύμπλεγμα νησιών με κοντινές μεταξύ τους αποστάσεις:* Αυτό είναι απαραίτητο για δύο λόγους. Αρχικά θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί τις πρώτες ύλες των γειτονικών νήσων, δηλαδή τα απορρίμματα, και κατά δεύτερον θα μπορούσε μελλοντικά και με τις κατάλληλες τροποποιήσεις να παράγει ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών όλου του συμπλέγματος, ή τουλάχιστον μέρους αυτού
- *Είναι θεμιτό να υπάρχουν ήδη εγκαταστάσεις που θα μπορούσαμε να αξιοποιήσουμε στην πρότασή μας:* Αυτό θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά το κόστος

Αφού λάβαμε σοβαρά υπόψιν μας τα παραπάνω και έπειτα από μελέτη χαρτών δυναμικού, αλλά και γεωγραφικών και γεωλογικών μελετών, αποφασίσαμε να πραγματοποιήσουμε τη μελέτη αυτή για το νησί της Νάξου, που πιστεύουμε ότι πληροί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις. Είναι το μεγαλύτερο νησί των Κυκλάδων, με έκταση  $429\text{m}^2$  και πληθυσμός 21143 κατοίκων (σύμφωνα με την τελευταία απογραφή του 2011), ενώ δεν υπάρχει υπερβολικά μεγάλη διακύμανση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Βρίσκεται αρκετά κοντά στα γείτονα νησιά (και υπάρχει ήδη διασύνδεση με αυτά), έχει υψηλά μέσα δυναμικά σε ανέμους και

ηλιοφάνεια, και αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει ήδη τεχνητή λίμνη που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στην πρόταση μας. Γενικά το ανάγλυφο του νησιού και ο τρόπος με τον οποίο είναι μοιρασμένος ο πληθυσμός πάνω σε αυτό (αφήνοντας μεγάλο μέρος του ανεκμετάλλευτο) βοήθησε στην πραγματοποίηση μίας ρεαλιστικής μελέτης.



Εικόνα 1.1: Ο γεωφυσικός χάρτης της Νάξου

## 1.5 Επιλογή μεθόδων παραγωγής ενέργειας

Οι τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιήσαμε στη μελέτη αυτή επιλέχθηκαν με βάση:

- Την καλύτερη δυνατή απόδοση σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του νησιού

- Την ελάχιστη δυνατή ανάγκη εκτάσεων για τις εγκαταστάσεις
- Το μικρότερο δυνατό κόστος
- Την ελάχιστη δυνατή ενόχληση του τοπικού πληθυσμού

Με βάση τα παραπάνω λοιπόν σχεδιάσαμε ένα συνδυασμένο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η βασική πηγή ενέργειας είναι η αιολική, δεδομένης της καλύτερης απόδοσης και του υψηλού μέσου αιολικού δυναμικού της Νάξου.

Παράλληλα θα χρησιμοποιηθεί μία μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ, η οποία έχει τριπλό ρόλο. Αρχικά θα ενισχύσει την παραγωγή ενέργειας. Θα λειτουργεί υπό 24ωρου βάσης με σταθερή παραγωγή για να καλυφθούν τυχόν προβλήματα λόγω αδυναμίας λειτουργίας των ΑΠΕ, καθώς και μόνιμη κάλυψη των νυχτερινών ωρών όπου μέρος των ΑΠΕ δε δύναται να λειτουργήσει. Και τελικά θα δώσει λύση στο πρόβλημα της διαχείρισης απορριμμάτων που υπάρχει.

Αυτήν τη στιγμή στο νησί λειτουργούν 8 χώροι ημι-ελεγχόμενης διάθεσης και 16 χώροι μη ελεγχόμενης. Οι χωματερές αυτές μολύνουν το υπέδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα του νησιού, προκαλούν δυσοσμία, ενώ αποτελούν και πιθανές εστίες πυρκαγιάς. Μάλιστα σε αρκετούς από αυτούς πραγματοποιείται μη ελεγχόμενη καύση των απορριμμάτων μολύνοντας έτσι την ατμόσφαιρα με επικίνδυνους ρύπους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει παραπέμψει την Ελλάδα στο Ευρωπαϊκό δικαστήριο, για δεύτερη φορά μέσα σε 8 χρόνια, για τις παράνομες χωματερές και τους παράνομους χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων (ΧΥΤΑ), προτείνοντας την καταβολή υπέρογκων χρηματικών ποινών. συγκεκριμένα, εάν το Δικαστήριο συμφωνήσει με την πρόταση της Επιτροπής, τότε **η Ελλάδα θα πρέπει να καταβάλλει από 23.000.000 ευρώ έως 28.000.000 ευρώ εφάπαξ (ανάλογα με το πότε θα εκδοθεί η δεύτερη απόφαση του δικαστηρίου), καθώς και 71.193 ευρώ για κάθε ημέρα που δεν συμμορφώνεται**, μετρώντας από την ημέρα που θα εκδοθεί η δεύτερη απόφαση του Δικαστηρίου.

Η λύση της παραγωγής καυσίμων από τα απορρίμματα απορρίφθηκαν γιατί απαιτούσαν μεγαλύτερες επενδύσεις και απαιτήσεις σε εκτάσεις, χωρίς να προσφέρουν ανάλογη αύξηση στην παραγωγή ενέργειας. Εκτός αυτού η παραγωγή απορριμμάτων είναι περιορισμένη, οπότε κρίναμε ότι η αποδοτικότερη λύση είναι η αποτέφρωση.

Εκτός του αιολικού δυναμικού, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε και την ηλιοφάνεια του νησιού. Για αυτό και η συνολική παραγωγή θα ενισχυθεί με φωτοβολταϊκά πάρκα που είναι αρκετά οικονομικά στην εγκατάσταση.

Τέλος για να προβλεφθεί το σενάριο να υπάρξουν περίοδοι κατά τις οποίες δε θα είναι δυνατή η εκμετάλλευση των αιολικών και των φωτοβολταϊκών πάρκων, αποφασίσαμε τη μετατροπή του συστήματος σε υβριδικό με τη χρήση της μεθόδου της αντλιοταμίευσης. Δηλαδή τις ώρες που η παραγωγή ρεύματος θα υπερκαλύπτει τη ζήτηση, το πλεονάζων ρεύμα θα χρησιμοποιείται για την λειτουργία ενός συστήματος αντλιών, οι οποίες θα τροφοδοτούν με νερό μία τεχνητή λίμνη. Σε περιπτώσεις όπου η ζήτηση ρεύματος θα είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή (είτε λόγω υπερβολικής ζήτησης, είτε λόγω αδυναμίας λειτουργίας κάποιας μονάδας) το νερό θα δύναται να κινήσει έναν υδροστρόβιλο, ο οποίος και θα παράγει την απαραίτητη ενέργεια.

## 2. ΚΑΥΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΑΣΑ)

### 2.1 Εισαγωγή

Ο όρος καύση δεν αφορά την ανεξέλεγκτη καύση διαφόρων ειδών απορριμμάτων σε ανεξέλεγκτες χωματερές ή υπαίθριους χώρους αλλά τη θερμική καταστροφή των κατάλληλων προς καύση απορριμμάτων σε ειδικές εγκαταστάσεις, με ταυτόχρονη εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμότητας. Χρησιμοποιείται ως μέθοδος επεξεργασίας ενός πολύ ευρέως φάσματος αποβλήτων και αποτελεί συνήθως μέρος ενός πολύπλοκου συστήματος επεξεργασίας των αστικών στερεών αποβλήτων που προκύπτουν στην κοινωνία.

Τεχνολογικά, ο τομέας της καύσης έχει εξελιχθεί ταχύτατα τα τελευταία 10 – 15 χρόνια. Μεγάλο μέρος αυτής της αλλαγής οφείλεται στη νομοθεσία που αφορά συγκεκριμένα τη βιομηχανία και ειδικότερα, αναφέρεται στις μειωμένες αέριες εκπομπές από τις επιμέρους εγκαταστάσεις. Η συνεχής ανάπτυξη της διεργασίας είναι σε εξέλιξη, με τον τομέα να αναπτύσσει τεχνικές που περιορίζουν τις δαπάνες με παράλληλη διατήρηση ή και βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων.

Στόχος της διεργασίας είναι η μείωση του όγκου των αποβλήτων και της επικινδυνότητάς τους και ταυτόχρονα, η καταστροφή των βλαβερών ουσιών που απελευθερώνονται ή ενδέχεται να απελευθερώνονται κατά την καύση. Η διεργασία αυτή, επίσης, καθιστά δυνατή την ανάκτηση, όχι μόνο ενέργειας αλλά και μεταλλικών και/ή χημικών ουσιών από τα απόβλητα.

Πιο συγκεκριμένα, αποτέφρωση (πλήρης καύση) ορίζεται ως η ταχεία μετατροπή της χημικής ενέργειας σε θερμική, με ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών, της τάξεως των 800 με 1500°C, παρουσία φλόγας, με οξείδωση της οργανικής ύλης των αστικών στερεών αποβλήτων προς διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η καύση μπορεί να γίνει υπό συνθήκες περίσσειας (excess – air combustion) ή στοιχειομετρικής αναλογίας οξυγόνου (stoichiometric combustion). Με αυτόν τον τρόπο, η οργανική ύλη εξατμίζεται, αποσυντίθεται ή ακόμα, καταστρέφεται ενώ τα ανόργανα συστατικά παραμένουν στο παραγόμενο στερεό υπόλειμμα και ο τελικός όγκος των απορριμμάτων μειώνεται.

Κρίσιμο σημείο αποτελεί η εξασφάλιση της πλήρους καύσης των ΑΣΑ και η αποφυγή της ατελούς (έλλειψη οξυγόνου), η οποία ευθύνεται για την έκλυση επιβλαβών καυσαερίων.

Οπότε, απαραίτητο κρίνεται να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Σωστή αναλογία μίγματος (καύσιμης ύλης-οξυγόνου)
- Επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας ανάφλεξης
- Επαρκές καύσιμο και οξυγόνο στην εστία καύσης
- Συνεχής απομάκρυνση των υπολειμμάτων της καύσης
- Συνεχής απομάκρυνση των αερίων
- Τυρβώδης ροή των αερίων
- Επαρκής χρόνος παραμονής των αποβλήτων στο χώρο καύσης
- Ανακίνηση των απορριμμάτων και δημιουργία τύρβης
- Διατήρηση κατάλληλης θερμοκρασίας στον κλίβανο

## 2.2 Τεχνολογία

### 2.2.1 Τύποι εστιών καύσης

Υπάρχουν δύο τύποι συμβατικών μονάδων αποτέφρωσης. Οι μονάδες τύπου mass-fired που δεν απαιτούν προεπεξεργασία των απορριμμάτων και οι μονάδες που λειτουργούν με επεξεργασμένο RDF (refuse - derived fuel) ως καύσιμο.

#### 2.2.1.1 Μονάδες mass-fired

Οι μονάδες τύπου mass-fired είναι και η πλειονότητα των εγκατεστημένων μονάδων.

Πλεονεκτούν λόγω του ότι τα απορρίμματα εισάγονται χωρίς καμία προεπεξεργασία στη μονάδα καύσης, με αποτέλεσμα η λειτουργία της μονάδας να είναι πιο «βολική». Το γεγονός αυτό, όμως, εγκυμονεί και κινδύνους, όπως, για παράδειγμα, την εισαγωγή ογκωδών ή ιδιαίτερα επικίνδυνων αποβλήτων, που αντιμετωπίζονται με την αυστηρή επίβλεψη των εισαγομένων απορριμμάτων και με τη δυνατότητα χειροκίνητης διακοπής της εισαγωγής τους όποτε αυτό θεωρηθεί αναγκαίο από τον επιβλέποντα.

Οι διακυμάνσεις του ενεργειακού περιεχομένου των απορριμμάτων είναι τεράστιες στις μονάδες αυτές και εξαρτώνται και από το κλίμα, τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, τη σύσταση των αποβλήτων κλπ. Κατά συνέπεια, οι mass-fired εντάσσονται με σχετική δυσκολία σε ένα σύστημα ανάκτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 2.2.1.2 Μονάδες RDF-fired

Τα ανακτώμενα υλικά (γυαλί, σιδηρούχα μέταλλα και αλουμίνιο) διαχωρίζονται από τη μάζα των απορριμμάτων μηχανικά και συλλέγονται

για επεξεργασία και μελλοντική πώληση ή διάθεση. Το κλάσμα των υπόλοιπων υλικών (χαρτί, πλαστικό, λοιπά καύσιμα) ονομάζεται Καύσιμο από Σκουπίδια (RDF). Όσον αφορά τις μονάδες τύπου RDF-fired, δηλαδή, αυτές που χρησιμοποιούν αυτό το καύσιμο, παρουσιάζουν ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα.

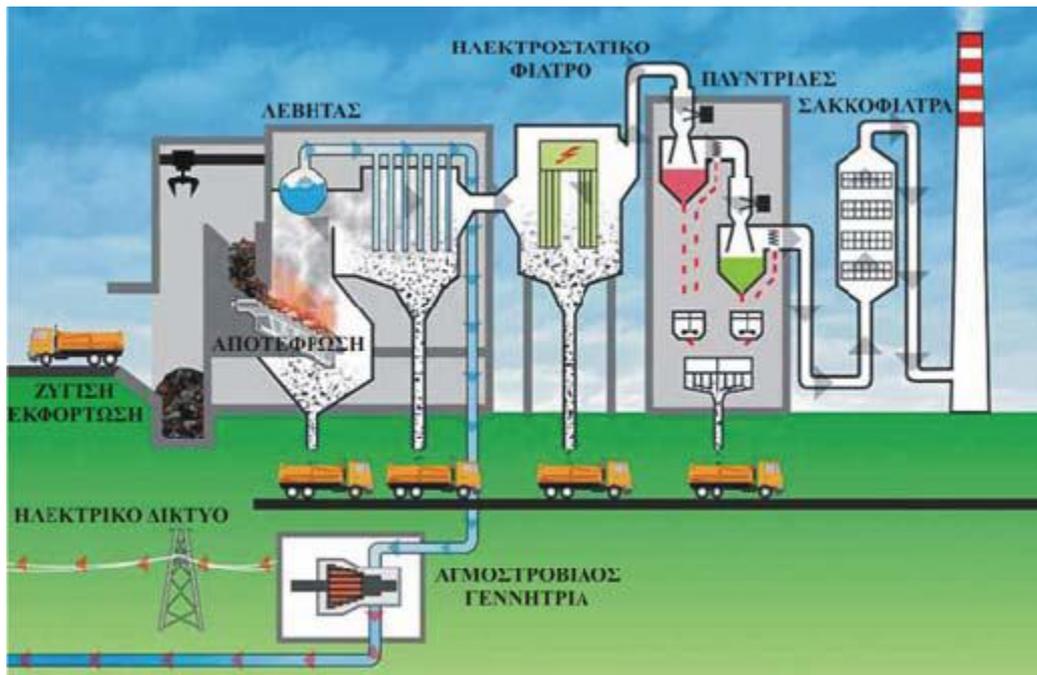
Εντάσσονται ευκολότερα σε δίκτυο ανάκτησης και διανομής ενέργειας γιατί το RDF έχει μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη (σε σχέση με τα μη επεξεργασμένα απορρίμματα) και πολύ μικρότερες διακυμάνσεις στο ενεργειακό περιεχόμενο. Επιπλέον, ο έλεγχος μιας μονάδας RDF-fired είναι ευκολότερος και ο χώρος που απαιτείται είναι λιγότερος, σε σχέση με μια μονάδα mass-fired ενώ τέλος, η προεπεξεργασία των απορριμμάτων για την παραγωγή RDF δίνει τη δυνατότητα απομάκρυνσης μιας σειράς κατηγοριών αποβλήτων, όπως το PVC, τα μέταλλα κ.α. τα οποία συνεισφέρουν στη δημιουργία επικίνδυνων ρύπων που μεταφέρονται με τα αέρια της μονάδας αποτέφρωσης. Ωστόσο, οι μονάδες αυτές χρησιμοποιούνται λιγότερο και αυτό γιατί προϋποθέτουν και την ύπαρξη μονάδας παραγωγής του.

### **2.2.2 Εισαγωγή στη μονάδα καύσης**

Η βασική δομή μιας μονάδας καύσης αποβλήτων περιλαμβάνει τις ακόλουθες ενέργειες:

1. Υποδοχή εισερχόμενων αποβλήτων
2. Αποθήκευση αποβλήτων και πρώτων υλών και προεπεξεργασία, όπου είναι απαραίτητο (επί τόπου ή σε άλλες εγκαταστάσεις)
3. Τροφοδοσία αποβλήτων προς επεξεργασία
4. Θερμική επεξεργασία αποβλήτων
5. Ανάκτηση ενέργειας και μετατροπή (λέβητας)
6. Καθαρισμός καυσαερίων
7. Απομάκρυνση καυσαερίων
8. Παρακολούθηση και έλεγχος των εκπομπών
9. Έλεγχος και επεξεργασία των λυμάτων (προερχόμενα από την επιτόπου αποστράγγιση, την επεξεργασία των καυσαερίων, την αποθήκευση)
10. Διαχείριση και επεξεργασία της προερχόμενης από την καύση τέφρας / τέφρας πυθμένα
11. Απομάκρυνση/ διάθεση στερεών υπολειμμάτων

Κάθε στάδιο από τα παραπάνω, προσαρμόζεται, όσον αφορά το σχεδιασμό, ανάλογα με το είδος των αποβλήτων που θα υποστούν επεξεργασία.



**Εικόνα 2.1:** Τυπική μονάδα αποτέφρωσης αστικών στερεών αποβλήτων με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

### 2.2.2.1 Υποδοχή εισερχόμενων αποβλήτων

Τα απορρίμματα εισέρχονται στην μονάδα καύσης είτε με απορριμματοφόρα (ΟΤΑ ή ιδιωτικών φορέων αποκομιδής), είτε μέσα σε κοντέινερ (οδικώς ή σιδηροδρομικώς) προερχόμενα από σταθμούς μεταφόρτωσης, καθώς επίσης και οδικώς από μεμονωμένους μικροπαραγωγούς (βιοτεχνίες, πολίτες) και κατά κανόνα υπόκεινται σε δειγματοληψία για προσδιορισμό της σύστασής τους. Στη δική μας περίπτωση η λύση των απορριμματοφόρων είναι μονόδρομος, καθώς η μικρή έκταση των νησιωτικών περιοχών κάνει οποιαδήποτε άλλη λύση ασύμφορη. Σε αυτό το στάδιο γίνεται πάντα έλεγχος και καταγραφή των εισερχόμενων φορτίων, με το σύστημα ζύγισης των στερεών αποβλήτων να είναι πρακτικό και να ελαχιστοποιεί το χρόνο παραμονής των οχημάτων σε αυτό. Η εναπόθεση γίνεται μέσω ανοιγμάτων ανάμεσα στην περιοχή παράδοσης και των δεξαμενών αποθήκευσης ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθούν για βοήθεια και μεταφορικές ταινίες. Για την αποφυγή της οσμής, του θορύβου και των εκπομπών από τα απόβλητα, η περίφραξη του χώρου παράδοσης μπορεί να είναι ένα αποτελεσματικό μέσο.

Για την εξασφάλιση της ομαλής προσαγωγής ιδίως σε ώρες αιχμής απαιτούνται μία σειρά από κατασκευαστικά μέτρα:

- Χώρος αναμονής οχημάτων πριν τις ζυγαριές
- Δύο ζυγαριές εισόδου, εφοδιασμένες με ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής

- Αίθουσα ξεφορτώματος (χώρος υποδοχής), κατά κανόνα με ράμπα προσέγγισης και θερμαινόμενη το χειμώνα. Η είσοδος και η έξοδος οχημάτων ελέγχονται με σηματοδότες και το ύψος της αίθουσας πρέπει να είναι επαρκές (γύρω στα 9,5m)
- Ζυγαριά εξόδου όπως και δεύτερη έξοδος χωρίς ζυγαριά για οχήματα με γνωστό (αποθηκευμένο στο σύστημα καταγραφής) καθαρό βάρος

Εκτός από τις διαδρομές εισόδου και εξόδου για τα απορριματοφόρα, προβλέπονται και διαδρομές για πυροσβεστικά οχήματα, προμηθευτές ανταλλακτικών, προσωπικό και επισκέπτες.

#### 2.2.2.2 Αποθήκευση αποβλήτων και προεπεξεργασία

Τα απορρίμματα χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια και προσάγονται στην εγκατάσταση αποτέφρωσης σε μη συνεχή βάση, αλλά η καύση τους πρέπει να είναι συνεχής και το καιόμενο υλικό όσο πιο ομοιογενές. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητος ένας χώρος αποθήκευσης και ομογενοποίησης μεταξύ της ασυνεχούς εισαγωγής και της συνεχούς καύσης, ο σχεδιασμός του οποίου γίνεται με προδιαγραφές ώστε να εξασφαλίζονται τα εξής:

1. Όσο το δυνατό μικρότερος χρόνος εκφόρτωσης.
2. Παραλαβή του συνόλου των προσκομιζόμενων απορριμμάτων.
3. Επίτευξη ομοιογένειας των προσκομιζόμενων προς τροφοδοσία απορριμμάτων
4. Απρόσκοπτη τροφοδοσία της εγκατάστασης.

Επίσης, ο σχεδιασμός του χώρου πρέπει να βασίζεται στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και γι' αυτό πρέπει:

1. Ο πυθμένας του χώρου πρέπει να έχει την κατάλληλη κλίση για την απομάκρυνση των στραγγισμάτων και των νερών έκπλυσης
2. Λόγω της δημιουργίας σκόνης πρέπει να προβλέπεται σύστημα απομάκρυνσης και ανανέωσης του αέρα
3. Για την αποφυγή έκλυσης οσμών πρέπει να αποφεύγεται η παραμονή των στερεών αποβλήτων στο χώρο για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των δύο ημερών

Η ομοιογένεια πριν από την καύση είναι απαραίτητη για τους ακόλουθους λόγους :

1. Δεν επιτρέπεται να εισέρχονται στην τάφρο υλικά επικίνδυνα για τη λειτουργία της εγκατάστασης (π.χ. εκρηκτικά)
2. Πρέπει να αποκλείονται συγκεκριμένα υλικά που επιβαρύνουν τα συστήματα κατακράτησης ρύπων και να τυγχάνουν ειδικής επεξεργασίας ως ειδικά απορρίμματα

Ένας καθολικός έλεγχος συνεπάγεται βέβαια υψηλό κόστος και στην πράξη υποκαθίσταται από δειγματοληπτικό έλεγχο, ο οποίος γίνεται ύστερα από ξεφόρτωμα είτε στο δάπεδο του χώρου είτε σε ειδική κυλιόμενη ταινία ελέγχου.

## **Ομογενοποίηση**

Τα απορρίμματα που προορίζονται για καύση καλύπτουν ένα ιδιαίτερα μεγάλο εύρος υλικών και συστατικών, γεγονός που δημιουργεί σοβαρές περιπλοκές στις φάσεις της καύσης και του καθαρισμού καυσαερίων. Ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση του απαιτούμενου εξοπλισμού δεν μπορεί να γίνει για τις μέγιστες αλλά για μέσες τιμές λειτουργίας και, ως εκ τούτου πρέπει να αποφευχθούν απότομες διακυμάνσεις της περιεκτικότητας σε επικίνδυνες ουσίες και της θερμογόνου δύναμης ώστε τα χαρακτηριστικά της καύσης να είναι πιο σταθερά. Επίσης, πρέπει να περιορισθεί και το μέγεθος των καιόμενων απορριμμάτων με γνώμονα το χρόνο παραμονής τους στην εστία καύσης αλλά και το μέγεθος του εξοπλισμού τροφοδοσίας στην εστία.

Αυτό επιτυγχάνεται με ανάμειξη και θρυμματισμό. Μέσα στο χώρο αποθήκευσης, γίνεται ανάμειξη των ΑΣΑ με τη χρήση των γερανών που υπάρχουν για την τροφοδοσία στη χοάνη ενώ τα ογκώδη απορρίμματα πάντα θρυμματίζονται πριν καούν. Για το θρυμματισμό των απορριμμάτων στις μονάδες καύσης χρησιμοποιούνται κυρίως περιστροφικοί κοπτήρες και κοπτήρες τύπου γκιλοτίνας. Οι κοπτήρες τύπου γκιλοτίνας χρησιμοποιούνται για ιδιαίτερα βαριά και ανθεκτικά απορρίμματα. Οι περιστροφικοί κοπτήρες ανήκουν στην κατηγορία των μύλων- κοπτήρων, εμφανίζονται σε μοντέλα με έναν ή δύο κοπτήρες, δουλεύουν σε 20-60 στροφές/μίν και έχουν μηχανισμό αυτόματου φρεναρίσματος και μερικής αναστροφής σε περίπτωση υπερφόρτισης.

## **Δεξαμενές αποθήκευσης (τάφροι)**

Οι δεξαμενές αποθήκευσης των απορριμμάτων διαστασιολογούνται για ενδιάμεση αποθήκευση ποσότητας 3-5 ημερών. Η δεξαμενή χωρίζεται στις ακόλουθες επιμέρους ζώνες:

- Ζώνη εκφόρτωσης
- Ζώνη ανάμιξης
- Ζώνη στοιβάγματος (κλίση του σωρού: 80-85°)

Υπάρχουν δύο κύριες κατασκευαστικές παραλλαγές της δεξαμενής, η δεξαμενή βάθους και η επιφανειακή, με τις σημερινές υψηλές απαιτήσεις σε μία μονάδα καύσης απορριμμάτων να μπορούν να εκπληρωθούν

καλύτερα με την επιφανειακή, αλλά στην πράξη να προτιμάται κάποια μέση λύση μεταξύ των δύο.

Η δεξαμενή βάθους είναι στενή και ψηλή. Η διαφορά ύψους μεταξύ του επιπέδου εκφόρτωσης και του δαπέδου της τάφρου είναι περίπου 10 m. Πλεονεκτήματά της είναι οι μικρές διαδρομές του γερανού και οι μικρές απαιτήσεις σε επιφάνεια. Μειονεκτήματα αποτελούν η δαπανηρή θεμελίωση (ασφάλιση έναντι ανώσεως στην περίπτωση που η κατασκευή φθάσει στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα), ο κίνδυνος αυτανάφλεξης (σε περιπτώσεις μεγάλου στοιβάγματος) και ο περιορισμένος διατιθέμενος χώρος (πλάτος τάφρου) για την ανάμιξη των απορριμμάτων.

Στην επιφανειακή δεξαμενή, η υψομετρική διαφορά μεταξύ επιπέδου εκφόρτωσης και δαπέδου τάφρου είναι 4-5 m. Το πλάτος της τίθεται κοντά στη μέγιστη διαδρομή του γερανού (30 m μείον το πλάτος της χοάνης τροφοδοσίας). Πλεονεκτήματα της παραλλαγής αυτής αποτελούν η φθηνή θεμελίωση και ο επαρκής διαθέσιμος χώρος για ανάμιξη των απορριμμάτων. Στα μειονεκτήματα κατατάσσονται η μεγάλη διαδρομή του γερανού και οι υψηλές απαιτήσεις σε επιφάνεια.

Η ζώνη εκφόρτωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί εν μέρει και ως ζώνη στοιβάγματος, με κλειστές τις θύρες των θέσεων εκφόρτωσης, υπό την προϋπόθεση, όμως, ότι πάντοτε θα υπάρχουν τουλάχιστον 4 διαθέσιμες θέσεις. Για την ανάμιξη των απορριμμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τμήματα των ζωνών εκφόρτωσης και στοιβάγματος. Από τη ζώνη ανάμιξης τα απορρίμματα μεταφέρονται με το γερανό είτε στη ζώνη στοιβάγματος είτε απευθείας στην εστία καύσης.

### **Πυροπροστασία στο χώρο της δεξαμενής**

Η δεξαμενή έχει αποδειχθεί το τμήμα εκείνο της εγκατάστασης καύσης με την υψηλότερη επικινδυνότητα έναντι πυρκαγιών. Ιδιαίτερα προβληματικός είναι ο έγκαιρος εντοπισμός τους, καθώς, κατά τη λειτουργία, το σύνηθες φαινόμενο της δημιουργίας συννέφων σκόνης καθιστούν δύσκολο τον άμεσο εντοπισμό του καπνού. Μέχρι στιγμής, όλα τα αυτόματα συστήματα πυροπροστασίας έχουν αποδειχθεί αναξιόπιστα, όμως ιδιαίτερα αποτελεσματικό μέτρο αποτελεί η ανύψωση του καιόμενου πυρήνα με το γερανό, ο οποίος μπορεί κατόπιν να οδηγηθεί απευθείας στην εστία καύσης (αφού εκκενωθεί προηγουμένως το φρεάτιο τροφοδοσίας). Γενικός κανόνας είναι ότι η εστία καύσης πρέπει να διατηρηθεί σε λειτουργία όσο το δυνατόν περισσότερο, καθώς ένα μεγάλο ποσοστό του καπνού αναρροφάται από την δεξαμενή ως πρωτεύων αέρας καύσης.

Κατά το σχεδιασμό του καλύμματος της αίθουσας της δεξαμενής πρέπει να προβλεφθεί ένα άνοιγμα επιφάνειας γύρω στο 15% της συνολικής επιφάνειας του καλύμματος για την απαγωγή του καπνού και της θερμότητας σε περίπτωση πυρκαγιάς.

### 2.2.2.3 Τροφοδοσία αποβλήτων προς επεξεργασία

#### **Φρεάτιο τροφοδοσίας**

Τα απόβλητα, από την δεξαμενή, απορρίπτονται μέσω εναέριου γερανού στο φρεάτιο τροφοδοσίας, το οποίο είναι κωνικά διαμορφωμένο σαν χοάνη στο επάνω μέρος και έπειτα, με υδραυλική ράμπα, εισέρχονται στην εστία.

Η κωνική διαμόρφωση σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει το περιεχόμενο μίας λήψης του γερανού. Το φρεάτιο έχει πλάτος ίσο με το πλάτος της σχάρας (ή ανάλογα με τον τύπο εστίας καύσης) και ύψος πάνω από ένα μέτρο, ενώ, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται, είναι κατασκευασμένο με διπλό υδρόψυκτο κέλυφος, υδρόψυκτες βαλβίδες και επένδυση από πυρίμαχα τούβλα ενώ προβλέπεται η δυνατότητα φραγής του κατά την εκκίνηση/διακοπή μέσω απλών ή διπλών υδραυλικών διαφραγμάτων, τα οποία ρυθμίζουν μια συνεχή ροή απορριμμάτων. Το σύστημα ρέπει να είναι προσαρμοσμένο στο ρυθμό και την ταχύτητα τροφοδοσίας της εγκατάστασης με βασική προϋπόθεση την ισομερή τροφοδοσία της εστίας καύσης ώστε να αποφευχθεί η ανεξέλεγκτη εισροή αέρα μέσα στην εστία.

#### **Γερανός**

Οι λειτουργίες που επιτελεί ο γερανός, για τον οποίο γίνεται αναφορά και πιο πάνω, είναι:

1. Η διαρκής κένωση των θέσεων εκφόρτωσης
2. Η ανάμιξη των απορριμμάτων
3. Το στοίβαγμα των απορριμμάτων
4. Η τροφοδοσία της εστίας καύσης
5. Η καταπολέμηση περιπτώσεων πυρκαγιάς

Κατά κανόνα υπάρχουν δύο γερανοί, με τον ένα ως εφεδρικό, οι οποίοι πρέπει να είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Η ισχύς προδιαγράφεται έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στο διπλάσιο της τροφοδοσίας κάθε εστίας καύσης. Η λειτουργία των γεραμών επιβλέπεται από τον οδηγό σε μία εξωτερική καμπίνα, η οποία μπορεί να εγκατασταθεί σε διάφορα σημεία όπως στον τοίχο κατά μήκος

της δεξαμενής, σε πλευρικό τοίχο ή και στους δύο πλευρικούς τοίχους (έναν για κάθε γερανογέφυρα). Για καμία από τις παραπάνω θέσεις δεν είναι εύκολα προσπελάσιμες ταυτοχρόνως όλες οι ζώνες (χοάνη, θέσεις εκφόρτωσης, ζώνη στοιβάγματος, ζώνη ανάμιξης) και για το σκοπό αυτό εγκαθίστανται κατά περίπτωση κάμερες επίβλεψης.

Στο σχεδιασμό της καμπίνας του οδηγού του γερανού πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα ακόλουθα στοιχεία:

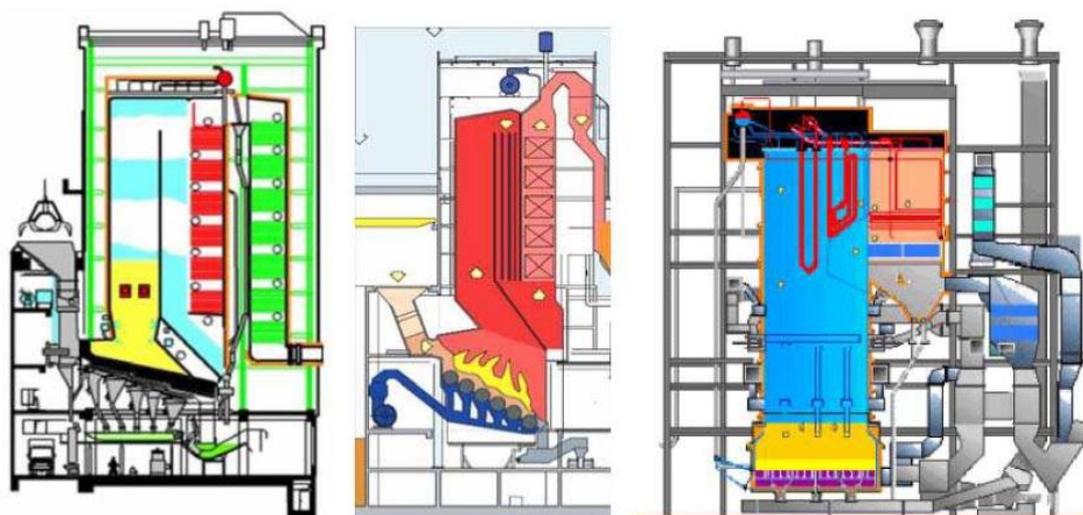
- Κλιματισμός
- Εγκατάσταση πλυσίματος (ή φυσήματος) για καθαρισμό των τζαμιών
- Εξασφαλισμένη οδός διαφυγής σε περίπτωση πυρκαγιάς
- Τουαλέτα

Στην περίπτωση πυρκαγιάς, είναι επιβεβλημένη η ιδιαίτερη προστασία του γερανού και της καμπίνας οδήγησης από τις όποιες επιπτώσεις.

### 2.2.3 Θερμική επεξεργασία αποβλήτων – Εστίες Καύσης

Διάφορες τεχνολογίες καύσης μπορεί να εφαρμοστούν ανάλογα με το είδος των προς επεξεργασία αποβλήτων, στην περίπτωση των ΑΣΑ όμως, η όλη διαδικασία της καύσης λαμβάνει χώρα σε ειδικές εστίες καύσης, η δυναμικότητα των οποίων κυμαίνεται από 8 έως 25 Mg/h και οι πλέον διαδεδομένοι τύποι αυτών είναι οι:

- εστία κινούμενων εσχάρων
- εστία περιστρεφόμενου κλιβάνου
- εστία ρευστοποιημένης κλίνης



**Εικόνα 2.2:** Τύποι Αποτεφρωτών (α)κινούμενων εσχάρων (β)περιστρεφόμενου κλιβάνου (γ) ρευστοποιημένης κλίνης.

Τα απόβλητα έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά, συνεπώς, αυτά απομακρύνονται άμεσα και στην πραγματικότητα ένα μικρό μόνο μέρος της καύσης γίνεται πάνω ή κοντά στον κλίβανο.

Η ανάφλεξη των στερεών αποβλήτων στις εγκαταστάσεις καύσης επιτυγχάνεται με χρήση ειδικού καυστήρα, ο οποίος λειτουργεί με βοηθητικό καύσιμο, κάνει την αρχική ανάφλεξη και εξασφαλίζει την ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία των καυσαερίων σε περιπτώσεις που απαιτείται.

Βασικές παράμετροι για την σωστή λειτουργία των εστιών καύσης είναι:

- Η επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας
- Ο επαρκής χρόνος καύσης
- Η επίτευξη συνθηκών στροβιλισμού/ομοιογενούς καύσης των αποβλήτων

#### 2.2.3.1 Εστία κινούμενων σχαρών

Οι σχάρες είναι στερεωμένες στα τοιχώματα της εστίας καύσης πάνω σε φέροντα μηχανισμό και μεταφέρουν τα στερεά απόβλητα, επιτυγχάνουν την ομοιόμορφη παροχή του αέρα, αναμοχλεύουν τα υλικά στη ζώνη κύριας καύσης και τέλος, μεταφέρουν την παραγόμενη τέφρα.

Φυσητήρας πρωτεύοντος αέρα καύσης διαχέει τον αέρα μέσω μικρών διάκενων ανάμεσα στα επίπεδα των σχαρών, στο στρώμα του καυσίμου και έπειτα, περισσότερος αέρας διαχέεται πάνω από το συνολικό όγκο των αποβλήτων, προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης καύση. Οι εστίες καύσης σχάρας αποτελούνται συνήθως από τα εξής μέρη:

1. Φρεάτιο τροφοδότησης
2. Μηχανική σχάρα (με ηλεκτρική ή υδραυλική κίνηση) και χοάνη υποδοχής των διαρροών από την εσχάρα
3. Φλογοθάλαμος
4. Δοχείο τέφρας
5. Σύστημα προσαγωγής αέρα καύσης
6. Σύστημα ελέγχου και ρύθμισης
7. Βοηθητικοί καυστήρες για την εκκίνηση και διακοπή, όπως επίσης και για την εξασφάλιση μίας ελάχιστης θερμοκρασίας καύσης

Τα απορρίμματα οδηγούνται στη σχάρα και τα φαινόμενα που συμβαίνουν επάνω σε αυτή διακρίνονται σε έξι επιμέρους ζώνες:

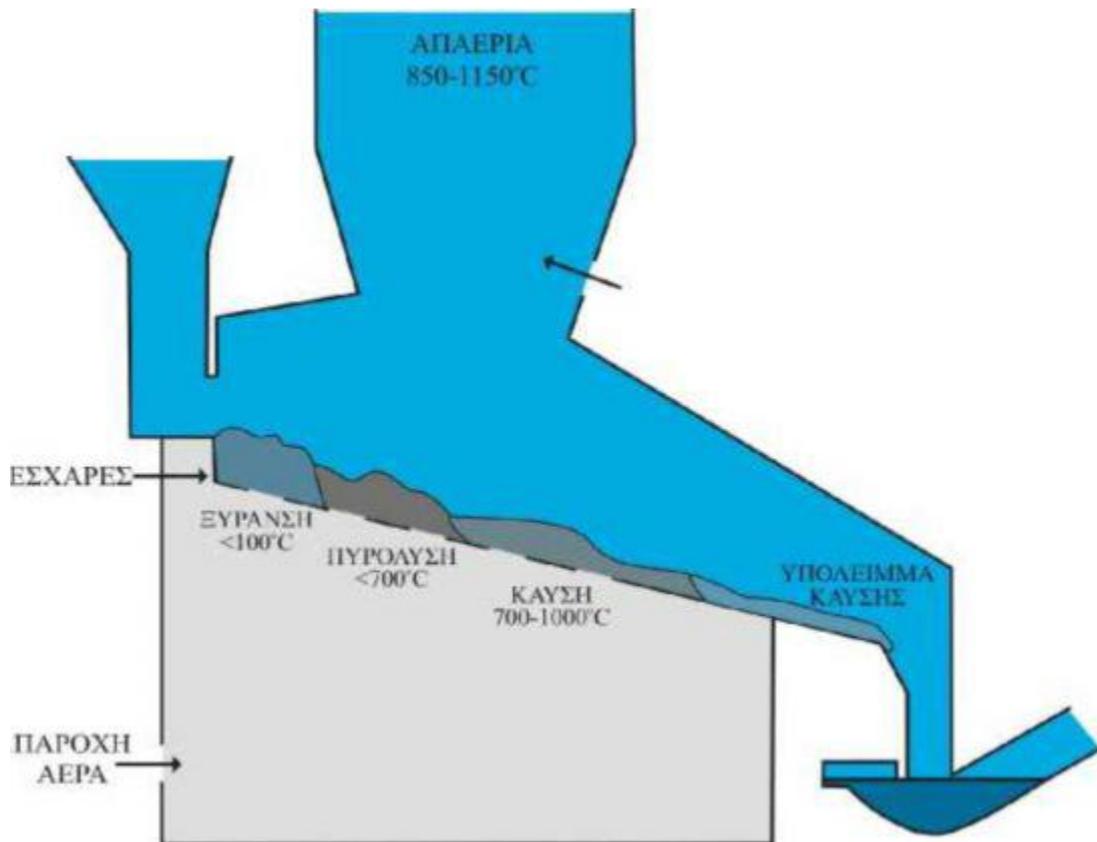
1. Ζώνη ξήρανσης (εκτείνεται στο αρχικό 20% του μήκους της σχάρας): Τα εισερχόμενα απορρίμματα παραλαμβάνουν θερμότητα με ακτινοβολία από τη φλόγα (ακτινοβολία αερίων και σωματιδίων) και

με συναγωγή από τον προθερμασμένο πρωτεύοντα αέρα καύσης, με αποτέλεσμα να εξατμίζεται η περιεχόμενη σε αυτά υγρασία και τα πτητικά συστατικά

2. *Ζώνη πυρόλυσης*: Αυξάνοντας τη θερμοκρασία εξατμίζονται διαρκώς περισσότερα πτητικά συστατικά
3. *Ζώνη ανάφλεξης*: Η απαραίτητη θερμότητα για την ανάφλεξη του στερεού υλικού προσδίδεται σε αυτό από επάνω με ακτινοβολία (από τη φλόγα και τα εσωτερικά τοιχώματα του φλογοθαλάμου)
4. *Ζώνη αεριοποίησης*: Η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας της πλήρους ανάφλεξης των απορριμμάτων προκαλεί αεριοποίηση μιας ποικιλίας υλικών που περιέχονται σε αυτά
5. *Ζώνη καύσης*: Ο εναπομένον άνθρακας οξειδώνεται πλήρως, ενώ στο φλογοθάλαμο καίγονται τα αέρια που παράχθηκαν από τις φάσεις της πυρόλυσης και της εξαερίωσης. Μεγάλη σημασία έχει η επαρκής ψύξη της σχάρας από τον πρωτεύοντα αέρα που τη διαρρέει
6. *Ζώνη ολοκλήρωσης της καύσης*: Η ολοκλήρωση της καύσης αποδίδει αρκετά αδρανοποιημένο (ανόργανο) στερεό υπόλειμμα στο τέλος της σχάρας

Οι προδιαγραφές που πρέπει να τηρούν οι σχάρες των μονάδων καύσης απορριμμάτων είναι:

- Ακριβής ρύθμιση του πρωτογενούς αέρα
- Καμία μεταβολή στις διαστάσεις των διαθεσίμων ανοιγμάτων ροής για τον πρωτογενή αέρα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της εγκατάστασης
- Αποφυγή ανομοιογενειών στον πρωτογενή αέρα
- Μεταβλητότητα της ταχύτητας πρόωσης στις επιμέρους ζώνες
- Καλή ανάμιξη
- Μικρή στροβίλωση σωματιδίων σκόνης
- Μικρές διαρροές υλικού από τη σχάρα (διαμέσου των ανοιγμάτων ροής αέρα)
- Αποφυγή της επικόλλησης τηγμένων υλικών στη σχάρα, όπως και της οξείδωσης των σχαρών
- Εύκολη αντικατάσταση των σχαρών
- Μακροί χρόνοι ακινησίας (διαστήματα συντήρησης)



Εικόνα 2.3: Χαρακτηριστικά της καύσης απορριμμάτων σε αποτεφρωτή με κινούμενες εσχάρες

Ο αέρας καύσης αναρροφάται από δύο θέσεις:

- Από την τάφρο απορριμμάτων
- Κάτω από το περίβλημα του λέβητα

και διαχωρίζεται στον **πρωτογενή** (που εισάγεται στο κάτω μέρος της σχάρας και τη διαρρέει) και στον **δευτερογενή** (ο οποίος εισάγεται επάνω από την σχάρα και μέσα στο φλογοθάλαμο με προορισμό την παραγωγή τύρβης και την ολοκλήρωση της καύσης).

*Πρωτογενής αέρας καύσης:*

- Η αναρρόφηση γίνεται από το χώρο της τάφρου απορριμμάτων της μονάδας (ή εναλλακτικά κάτω από το περίβλημα του λέβητα)
- Αποτελεί περίπου το 75% του συνολικά προσαγόμενου αέρα καύσης
- Υφίσταται κατά κανόνα διβάθμια προθέρμανση (1η βαθμίδα:μέχρι 120°C, 2η βαθμίδα:μέχρι 200°C)
- Χρησιμοποιείται φυγοκεντρικός ανεμιστήρας (τυπική περίπτωση: 1500 στροφές/λεπτό, στατική πίεση: 50 mbar (5000 Pa), ο οποίος εγκαθίσταται μέσα στο λεβητοστάσιο
- Υπάρχει δυνατότητα ρυθμιζόμενης κατανομής στις επιμέρους ζώνες της σχάρας

Δευτερογενής αέρα καύσης:

- Η αναρρόφηση γίνεται κάτω από το περίβλημα του λέβητα
- Αποτελεί περίπου το 25% του συνολικά προσαγόμενου αέρα καύσης
- Ο ανεμιστήρας τοποθετείται κυρίως κάτω από τη χοάνη απορριμμάτων και είναι στατικής πίεσης μέχρι 80 mbar
- Η προθέρμανση είναι δόκιμη μέχρι τους 100°C (βελτιώνεται η κινητική των χημικών αντιδράσεων του CO και του CH<sub>4</sub>)
- Η προσαγωγή γίνεται στη στένωση, στην περιοχή της πρώτης διαδρομής των καυσαερίων στο φλογοθάλαμο (παραγωγή τύρβης για καλή ανάμιξη) και εναλλακτικά στο επάνω μέρος του φλογοθαλάμου

Οι ακόλουθες απαιτήσεις επηρεάζουν το σχεδιασμό της εστίας καύσης σχαρών:

- Το μέγεθος, το σχήμα και την αρχή λειτουργίας των σχαρών. Το μέγεθος της σχάρας καθορίζει το μέγεθος της διατομής του θαλάμου καύσης
- Ο στροβιλισμός, η ομογενοποίηση, ο χρόνος παραμονής και
- Ο τρόπος ψύξης των καυσαερίων. Η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα ανώτατο όριο στην έξοδο της εστίας καύσης ώστε να αποφεύγεται η τήξη της θερμής ιπτάμενης τέφρας στο λέβητα, πράγμα που επιτυγχάνεται με μερική ψύξη

Για την εξασφάλιση της σωστής καύσης απαιτούνται:

- Καλή κατασκευή των σχαρών
- Βέλτιστη γεωμετρία του φλογοθαλάμου
- Παρεμβάσεις κατά τη λειτουργία ώστε να επιτευχθεί μείωση της τιμής O<sub>2</sub> σε 8% κ.ό. επί των ξηρών καυσαερίων

Κύριος προορισμός της σχάρας είναι η μεταφορά του καυσίμου (απορριμμάτων) μέσα στον αντιδραστήρα σε περίπου μία ώρα. Για το σκοπό αυτό πρέπει να σχεδιασθεί έναντι των ακόλουθων φορτίσεων:

- Μηχανική φόρτιση από το βάρος των απορριμμάτων
- Θερμική φόρτιση από την εκλυόμενη θερμότητα κατά την καύση
- Χημική φθορά (διάβρωση)
- Μηχανική φόρτιση εξαιτίας της κίνησης

## Κατηγορίες σχαρών

### *Κατηγορίες σχαρών βάσει της κατασκευής φλογοθαλάμου*

Υπάρχουν τρεις κατασκευαστικές παραλλαγές φλογοθαλάμων που οδηγούν σε τρεις διαφορετικές εστίες καύσης:

- *Εστία καύσης ομορροής* (μεγάλοι χρόνοι παραμονής σε υψηλές θερμοκρασίες, ιδιαίτερα ομογενής σύσταση καυσαερίων, ευνοϊκά χαμηλές τιμές μονοξειδίου του άνθρακα και οξυγόνου, πιθανά προβλήματα έναυσης σε περίπτωση χαμηλής θερμογόνου δύναμης)
- *Εστία καύσης αντιρροής* (ιδιαίτερα κατάλληλη για απορρίμματα με χαμηλή θερμογόνο δύναμη, συνήθως κατασκευάζεται με εσχάρα οπισθοδρόμησης, το καυσαέριο ρέει πάνω από τη ζώνη ξήρανσης-προκαλεί έντονες ανομοιογένειες)
- *Εστία καύσης μεσορροής* (μέση λύση των δύο παραπάνω-κλίνοντας προς την ομορροή, χαμηλότερες θερμοκρασίες φλογοθαλάμου και μικρότεροι χρόνοι παραμονής από ό,τι στην ομορροή)

### *Κατηγορίες εσχάρων βάσει του τρόπου τροφοδοσίας*

#### Σχάρες συνεχούς τροφοδοσίας

- *Ατέρμονη - κυλιόμενη σχάρα*: Τα απορρίμματα δεν αναδεύονται αλλά καίγονται στο ίδιο πάντα εσχάριο. Στην αρχή της εσχάρας πραγματοποιείται ξήρανση του φορτίου και στη συνέχεια καίγονται τα πτητικά
- *Κυλινδρική σχάρα*: Αποτελείται από κυλινδρικά εσχάρια, τα οποία λειτουργούν ανεξάρτητα και έχει κλίση 20-30°

#### Σχάρες ασυνεχούς τροφοδοσίας

- *Σχάρα Πρόωσης*: Αποτελούνται από τα εσχάρια τα οποία είναι το ένα τοποθετημένο πάνω στο άλλο σε σχηματισμό σκάλας και οι πρώτες σειρές προωθούν τα απορρίμματα στις επόμενες όπως το έμβολο. Η επιφάνεια της σχάρας χωρίζεται σε τέσσερις ζώνες. Στην πρώτη γίνεται ξήρανση των απορριμμάτων, στη δεύτερη καίγονται τα πτητικά, στην τρίτη γίνεται η καύση του εξανθρακώματος και στην τελευταία η καύση των υπολοίπων. Η σχάρα πρόωσης διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:
  1. *σχάρα εμπρόσθιας πρόωσης* και
  2. *σχάρα οπισθοδρόμησης* (τύπου Martin).
- *Σχάρα Αντώσεως*: Έχει μεγάλη κλίση και η κίνηση των εσχάρων επιτυγχάνεται με ωστήριους ράβδους και με έμβολα λαδιού.

## Ρύθμιση της εστίας

Καθοριστικά μεγέθη για τη ρύθμιση μίας εστίας καύσης με σχάρα είναι:

- Η ροή μάζας στη σχάρα
- Η ποσότητα αέρα καύσης
- Η κατανομή του αέρα καύσης σε πρωτογενή και δευτερογενή
- Η κατανομή του πρωτογενούς αέρα στις επιμέρους ζώνες της σχάρας
- Η κατανομή του δευτερογενούς αέρα σε διαφορετικά ακροφύσια
- Ο χρόνος παραμονής των απορριμμάτων στην εστία
- Η ανάδευση των απορριμμάτων στην σχάρα
- Το μήκος και μορφή της φλόγας στην σχάρα και στο φλογοθάλαμο

ενώ ως κριτήριο καλής καύσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξής παράμετροι:

- Χρονική διακύμανση της παραγωγής ατμού
- Περιεκτικότητα  $O_2$  στα καυσαέρια
- Περιεκτικότητα  $CO$  στα καυσαέρια
- Μορφή της φλόγας στο φλογοθάλαμο

Η ρύθμιση της εστίας δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και εξαρτάται από την πείρα και την τέχνη του προσωπικού.

## Προστασία σχαρών

Οι εστίες σχάρας πρέπει να επικαλύπτονται με υλικό υψηλής αντοχής σε μηχανικές καταπονήσεις καθώς και σε θερμικές και χημικές επιδράσεις. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δίνεται στην ανθεκτικότητα τους έναντι στο θείο και το χλώριο, τα οποία σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες, δημιουργούν έντονες διαβρωτικές συνθήκες.

## Συνηθισμένοι τύποι σχαρών

- *Σχάρα τύπου VKW*: αποτελείται από μία σειρά έξι κοίλων κυλίνδρων που μεταφέρουν προς τα κάτω τα στερεά απόβλητα υπό γωνία  $30^\circ$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο και επιτυγχάνουν την απαιτούμενη ανάδευση. Κάθε κύλινδρος μπορεί να κινηθεί με διαφορετική ταχύτητα ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης καύση. Οι ταχύτητες αυτές συνήθως κυμαίνονται από 0,5-5 κύκλους ανά ώρα
- *Σχάρα τύπου Martin*: αποτελείται από μία σχάρα που είναι εφοδιασμένη με κατακόρυφους άξονες διαδοχικά ακίνητους και κινητούς. Η κίνηση των αξόνων σπρώχνει το ρεύμα των ΑΣΑ προς

τα πάνω υπό γωνία 30° αντίθετα με το νεοεισερχόμενο υλικό, υποβοηθώντας έτσι την ξήρανση και την ανάφλεξή του

- *Σχάρα τύπου Volund*: αποτελείται από τρία επίπεδα που διαχωρίζονται από ένα φρεάτιο που επιτρέπει στο ρεύμα των ΑΣΑ να πέφτει από το ένα τμήμα στο άλλο. Σε κάθε επίπεδο, το υλικό αναδεύεται με τη βοήθεια υδραυλικών μηχανισμών
- *Σχάρα τύπου Von Roll*: Αποτελείται από μία σειρά επικλινών επιπέδων που έχουν τη δυνατότητα να μετακινηθούν με τη βοήθεια υδραυλικών βραχιόνων. Το ρεύμα των ΑΣΑ μετακινείται προς τα κάτω υπό γωνία 15°. Εντοπίζονται κυρίως σε ΗΠΑ και Ιαπωνία
- *Σχάρα τύπου De Bartolomeis*: Είναι πολυεπίπεδη, με δυνατότητα μεταβολής του αριθμού και της κλίσης των επιπέδων
- *Σχάρα τύπου Widmer & Ernst*: Η σημαντικότερη διαφορά της με τους άλλους τύπους είναι η δυνατότητά της για διπλή κίνηση και προς τις δύο κατευθύνσεις

### **Διαρροές σχάρας**

Συχνά, παρατηρείται διαρροή υλικού από την σχάρα στη συνολική ροή μάζας της τέφρας σε ποσοστό που ανέρχεται στο 1%, συνεπώς, η περιεκτικότητα της τέφρας σε άκαυστα, τα οποία αναμιγνύονται με αυτήν, επηρεάζεται ελάχιστα. Το υλικό αυτό, παρόλ' αυτά, ανακτάται κατά την αφαίρεση της τέφρας του πυθμένα ενώ είναι πιθανό να ανακυκλωθεί ώστε να οδηγηθεί και πάλι για καύση ή απλά για διάθεση. Προσοχή πρέπει να δοθεί όταν επανεισαχθεί στη χοάνη, ώστε να μην υπάρξει ανάφλεξη των αποβλήτων που βρίσκονται μέσα σε αυτήν. Ακόμη δεν έχει δοκιμασθεί πειραματικά η επανοδήγηση των διαρροών σχάρας στην εστία.

### **Δοχείο τέφρας πυθμένα**

Χρησιμοποιούνται για την ψύξη και απομάκρυνση των στερεών υπολλειμμάτων της καύσης που συσσωρεύονται στην σχάρα για την απομάκρυνση της οποίας ασκείται πίεση από έμβολα γεμάτα με νερό και έτσι σβήνεται η θερμή αυτή τέφρα.

Υπάρχουν δύο τύποι δοχείων για την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας:

#### **1. Δοχείο ωστηρίου, ασυνεχούς λειτουργίας:**

*Πλεονεκτήματα:*

- Μικρό περιεχόμενο σε νερό
- Μικρή μηχανική φθορά λόγω τριβής

*Μειονεκτήματα:*

- Κάποιος κίνδυνος στόμωσης («φρακαρίσματος»)
- Δυσκολίες κατά την εκκένωση
- Ανάγκη για πρόσθετη διάταξη οδήγησης στην αποθήκη τέφρας

## **2. Δοχείο κυλιόμενης ταινίας, συνεχούς λειτουργίας:**

*Πλεονεκτήματα:*

- Μικρός κίνδυνος στόμωσης
- Άμεση οδήγηση στην αποθήκη τέφρας

*Μειονεκτήματα:*

- Μεγάλη μηχανική φθορά λόγω τριβής
- Μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό

Το νερό που χρησιμοποιείται για την ψύξη διαχωρίζεται από την τέφρα της σχάρας και μπορεί να επανεισαχθεί στο δοχείο, πράγμα που χρησιμεύει στο να διατηρείται επαρκές το επίπεδο νερού μέσα σε αυτό, καθώς κάποια ποσότητά του απομακρύνεται είτε με την τέφρα είτε λόγω εξάτμισης. Ωστόσο, μια διαρροή είναι απαραίτητη ώστε να μην δημιουργείται συσσώρευση αλάτων. Το δοχείο είναι συνήθως πυρασφαλές και κατασκευασμένο ώστε να μην δημιουργούνται συσσωματώματα της τέφρας πυθμένα.

## **Εφεδρικοί καυστήρες**

Κατά την εκκίνηση, οι εφεδρικοί καυστήρες χρησιμοποιούνται κυρίως για τη θέρμανση του κλιβάνου σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, μέσω της οποίας θα περάσουν τα καυσαέρια. Οι εν λόγω καυστήρες ενεργοποιούνται συνήθως αυτόματα, όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από την καθορισμένη για τη λειτουργία του κλιβάνου τιμή. Κατά την διακοπή της λειτουργίας, χρησιμοποιούνται μόνο αν υπάρχουν ακόμα απόβλητα στο φούρνο.

### **2.2.3.2 Εστία περιστρεφόμενου κλιβάνου**

Η εστία περιστρεφόμενου κλιβάνου επεξεργάζεται με επιτυχία σχεδόν όλα τα απορρίμματα και τους ρύπους, ανεξαρτήτως είδους ή σύστασης και κυρίως κλινικά και επικίνδυνα απόβλητα, που άλλες τεχνολογίες δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν. Η θερμοκρασία λειτουργίας του κυμαίνεται από 500°C (ως αεριοποιητής) ως 1450°C (ως κλίβανος τήξης τέφρας). Όταν πρόκειται για συμβατική οξειδωτική καύση, η θερμοκρασία είναι γενικά γύρω στους 850°C.

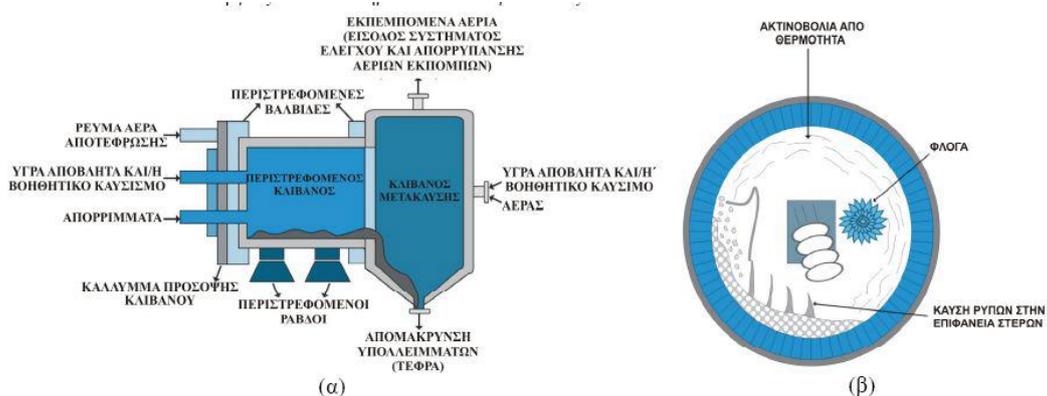
Γενικά, ανάλογα με τα εισαγόμενα απόβλητα, όσο υψηλότερη η θερμοκρασία λειτουργίας τόσο μεγαλύτερος ο κίνδυνος ζημιάς λόγω της θερμότητας στην πυρίμαχη επένδυση των κλιβάνων.

Το σύστημα περιστρεφόμενου κλιβάνου αποτελείται από:

- Το σύστημα υποδοχής
- Το δοσομετρικό σύστημα
- Τον περιστρεφόμενο κύλινδρο
- Το σύστημα παροχής αέρα
- Τον επιπλέον καυστήρα
- Το θάλαμο μετάκαυσης (τοποθετείται ώστε να διευκολυνθεί η πλήρης καύση των απορριμμάτων, λόγω του ότι ο χρόνος παραμονής τους είναι μικρός)
- Το σύστημα απομάκρυνσης της σκόνης και της σκωρίας

Ορισμένοι έχουν μανδύα ψύξης που λειτουργεί είτε με χρήση νερού είτε αέρα και συμβάλει στην επέκταση της ζωής των πυρίμαχων και συνεπώς, στην επέκταση του χρονικού διαστήματος μεταξύ κάθε παύσης λειτουργίας λόγω συντήρησης.

Στους συμβατικούς περιστρεφόμενους κλιβάνους, ο κύλινδρος είναι οριζόντιος και περιστρέφεται περί του άξονά του. Το υλικό (πρέπει να υπάρχει σταθερή και συνεχής παροχή) αναδεύεται, καίγεται και οδηγείται με την επίδραση της βαρύτητας στο άλλο άκρο λόγω της υπάρχουσας κλίσης ως προς τον οριζόντιο άξονα (2-4%), με αποτέλεσμα να έρχεται εντατικά σε επαφή με τον πρωτογενή αέρα που ρέει μέσα στον κλίβανο.



**Εικόνα 2.4:** Αποτεφρωτής περιστρεφόμενου κλιβάνου

Η καταστροφή των οργανικών επιτυγχάνεται με συνδυασμό υψηλών θερμοκρασιών και κατάλληλου χρόνου παραμονής. Όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία, τόσο μικρότερος ο χρόνος παραμονής που απαιτείται για την καύση, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και η γωνία κλίσης του κυλίνδρου. Γενικά, ο χρόνος κυμαίνεται από 30 ως 90 λεπτά για την ικανοποιητική εξουδετέρωση των αποβλήτων.

Τα στερεά υλικά τροφοδοτούνται στον καυστήρα μέσω μη περιστρεφόμενης χοάνης, τα υγρά διοχετεύονται μέσω ακροφυσίων στο εμπρόσθιο τοίχωμα του κλιβάνου ενώ η ιλύς μέσω υδρόψυκτου σωλήνα.

Ο χρόνος παραμονής των απορριμμάτων καθορίζει το βαθμό ανάμιξης τους εντός του κλιβάνου, δεδομένου ότι αυτός περιστρέφεται, όπως επίσης και το χρόνο επεξεργασίας τους. Η σύσταση των απαερίων καύσης αποτελεί δείκτη απόδοσης του κλιβάνου και δεδομένου ότι λειτουργεί με περίσσεια οξυγόνου, τα απαέρια θα πρέπει να περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις CO και υδρογονανθράκων και μειωμένες ποσότητες υπολειμμάτων αποτέφρωσης.

Βασικές παράμετροι λειτουργίας ενός τέτοιου είδους αποτεφρωτή είναι:

- η θερμοκρασία εξόδου του περιστροφικού κλιβάνου και του μετακαυστήρα, η οποία πρέπει να οδηγεί σε πλήρη αποτέφρωση των απορριμμάτων
- η εσωτερική πίεση του κλιβάνου, που πρέπει να είναι αρνητική για την αποφυγή αέριων εκπομπών και σωματιδίων στην ατμόσφαιρα
- ο ρυθμός παροχής αέρα (οξυγόνου) και των απορριμμάτων, έτσι ώστε οι συνθήκες λειτουργίας του καυστήρα να είναι οι βέλτιστες

*Η μέθοδος πλεονεκτεί επειδή:*

- Είναι δυνατό να υποστεί επεξεργασία μία μεγάλη ποικιλία αποβλήτων
- Δεν χρειάζεται προεπεξεργασία των απορριμμάτων
- Ο χρόνος παραμονής τους στον κλίβανο ελέγχεται εύκολα
- Επιτυγχάνεται αποτελεσματική επαφή με τον αέρα

*ενώ τα μειονεκτήματά της είναι τα εξής:*

- Λόγω της υψηλής στροβιλότητας και της τριβής που δημιουργείται στον κλίβανο, παράγεται μεγάλη ποσότητα σωματιδίων
- Απαιτείται μεγάλη ποσότητα περίσσειας αέρα (100-150%)
- Μεγάλο μέρος της θερμότητας χάνεται με τη στάχτη
- Συχνά, είναι αναγκαίος ένας θάλαμος μετάκαυσης

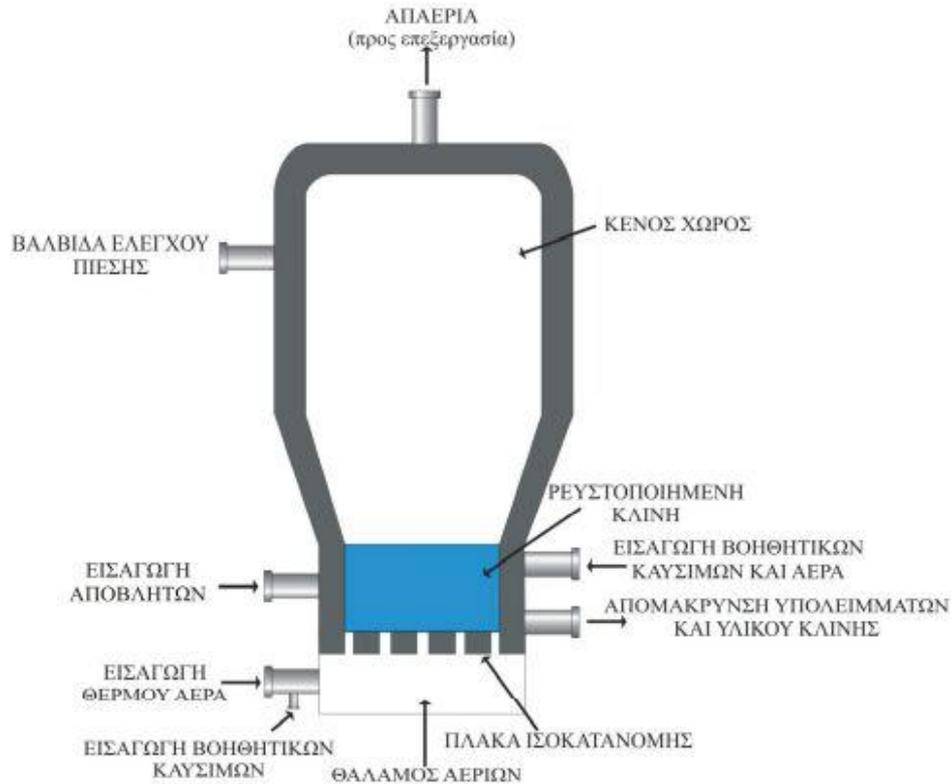
### 2.2.3.3 Εστία ρευστοποιημένης κλίνης

Η εστία ρευστοποιημένης κλίνης χρησιμοποιεί ένα στρώμα άμμου ή αλουμίνας (κλίνη), πάνω στο οποίο εισάγονται τα απορρίμματα. Κάτω από το στρώμα αυτό διοχετεύεται αέρας με τέτοια παροχή, ώστε ολόκληρη η κλίνη να βρίσκεται σε αιώρηση και σε θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία ανάφλεξης των υφιστάμενων ρύπων. Το παρεχόμενο οξυγόνο, οι έντονες συνθήκες ανάμιξης και η αυξημένη θερμοκρασία έχουν ως αποτέλεσμα την εξάτμιση και την καταστροφή των οργανικών ρύπων.

Η θερμοκρασία αποτελεί τη βασική λειτουργική παράμετρο για το συγκεκριμένο είδος αποτεφρωτών, η οποία ορίζεται σύμφωνα με την τροφοδοσία των απορριμμάτων, των παραγόμενων αερίων και ενός βοηθητικού υλικού καύσης. Η τιμή της κυμαίνεται μεταξύ 750 – 880°C, χαμηλότερη σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες αποτέφρωσης, γεγονός που οφείλεται στην καλή ανάμιξη του προς επεξεργασία απόβλητου. Το απαιτούμενο οξυγόνο καύσης και ο χρόνος παραμονής των απορριμμάτων αποτελούν επίσης σημαντικές παραμέτρους λειτουργίας ενός αποτεφρωτή ρευστοποιημένης κλίνης, οι οποίες καθορίζονται με βάση το ρυθμό τροφοδοσίας των προς επεξεργασία απορριμμάτων.

Οι εγκαταστάσεις ρευστοποιημένης κλίνης διακρίνονται σε τρία είδη:

- 1. Σταθερή:** Αποτελείται από έναν αδιαβατικό κυλινδρικό θάλαμο καύσης από πυρίμαχο υλικό και μία βαλβίδα σε μορφή δίσκου, μία σταθερή ρευστοποιημένη κλίνη και έναν θάλαμο μετάκαυσης. Στο κάτω μέρος του θαλάμου καύσης, τα απόβλητα αναμιγνύονται ομοιογενώς και διοχετεύονται στην κλίνη
- 2. Περιστροφική:** Ακροφύσιο κεκλιμένων πλακών, πλατιά χοάνη για την απομάκρυνση της τέφρας και μεγάλη παροχή καύσιμου είναι τα ειδικά χαρακτηριστικά που εγγυώνται την αξιόπιστη διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας μέσα στον πυρίμαχο θάλαμο καύσης γίνεται με ανακυκλοφορία των καυσαερίων πράγμα που επιτρέπει την χρήση καυσίμων με ευρύ φάσμα θερμογόνου δύναμης
- 3. Με ανακυκλοφορία:** Λειτουργεί με μεγάλες ταχύτητες αερίων που αφαιρούν το μεγαλύτερο μέρος των στερεών σωματιδίων των καυσαερίων που υπάρχουν μέσα στην κλίνη. Τα σωματίδια διαχωρίζονται έπειτα σε έναν κυκλώνα και επανεισέρχονται στον θάλαμο καύσης



**Εικόνα 2.4:** Τυπικός αποτεφρωτής ρευστοποιημένης κλίνης.

Τα κύρια πλεονεκτήματα μίας εστίας ρευστοποιημένης κλίνης περιλαμβάνουν την αποφυγή εμφάνισης τοπικών διαφορών θερμοκρασίας και επομένως μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων, που είναι αποτέλεσμα ατελούς καύσης που προκαλείται λόγω διαφορών θερμοκρασίας. Επίσης, είναι η δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης δύσκολων καυσίμων, με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και τέφρα και τέλος η αύξηση του βαθμού μετατροπής του καύσιμου και η πιο αποδοτική αξιοποίηση του αέρα καύσης, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερες απαιτήσεις περισσειας αέρα (στην προκείμενη περίπτωση περίπου 55% έναντι του συνήθους 100%).

#### 2.2.4 Ανάκτηση ενέργειας και μετατροπή (Λέβητες)

Όλες οι σύγχρονες εγκαταστάσεις ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων είναι εξοπλισμένες με συστήματα ανάκτησης θερμότητας τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τον σχεδιασμό και τις διαφορετικές παραμέτρους λειτουργίας ατμού, οι λεγόμενοι λέβητες, οι οποίοι βρίσκονται ανάμεσα από τον φλογοθάλαμο και το σύστημα καθαρισμού των καυσαερίων. Σε αυτούς λαμβάνει χώρα η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία από τα καυσαέρια στον κύκλο νερού-ατμού.

Η καύση είναι μία εξώθερμη διεργασία. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που παράγεται (15 - 40%) μεταφέρεται στα καυσαέρια, μέσω ψύξης των οποίων αυτή ανακτάται και επιπλέον, καθαρίζονται πριν απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα.

Στις εγκαταστάσεις καύσης, ο λέβητας επιτελεί δύο αλληλένδετες λειτουργίες:

- την ψύξη των καυσαερίων
- την μεταφορά της θερμότητας από τα καυσαέρια σε άλλο υγρό, συνήθως νερό, το οποίο μετατρέπεται μέσα στον λέβητα σε ατμό

Η ανάκτηση του ενεργειακού περιεχομένου της καύσιμης ύλης γίνεται μέσω παραγωγής ατμού, τα χαρακτηριστικά του οποίου καθορίζονται από τις τοπικές ενεργειακές απαιτήσεις και τους λειτουργικούς περιορισμούς (συνήθως είναι υπέρθερμος, σε θερμοκρασία 450-500 °C και πίεση 40-50 bar) και χρησιμοποιείται είτε ως πηγή θέρμανσης, είτε ως μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση ατμοστρόβιλων και γεννητριών. Η δυνατότητα αξιοποίησης του ατμού παίζει σημαντικό ρόλο στην οικονομική απόδοση των εγκαταστάσεων θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ καθώς είτε διοχετεύεται σε γειτονικές βιομηχανικές μονάδες, είτε χρησιμοποιείται για τηλεθέρμανση αστικών κέντρων, όπου οι τοπικές συνθήκες είναι ευνοϊκές. Αν δεν είναι εφικτή η αξιοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας του ατμού, τότε πρέπει να υγροποιηθεί, ώστε το νερό να μπορεί να ανακυκλωθεί στον ατμολέβητα. Στην περίπτωση αυτή η θερμότητα της υγροποίησης δεν αξιοποιείται, αλλά καταλήγει στο περιβάλλον.

Για την επίτευξη στεγανοποίησης, την αποφυγή της εισροής αέρα και τη θερμομόνωσή του, φέρει εξωτερική επένδυση και κατασκευάζεται από υλικά που είναι ανθεκτικά τόσο στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του όσο και στις μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές που παρατηρούνται ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό μέρος της όλης κατασκευής. Επίσης, υπάρχει και δεύτερο εξωτερικό στρώμα μόνωσης για το οποίο δεν απαιτούνται ειδικές αντοχές σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (πυρίμαχα τούβλα, υαλοβάμβακας κλπ).

#### 2.2.4.1 Κατασκευαστικές παραλλαγές

Οι λέβητες μονάδων καύσης απορριμμάτων κατασκευάζονται κατά κανόνα ως λέβητες φυσικής κυκλοφορίας. Μπορεί να γίνουν οι ακόλουθες διακρίσεις:

**Ανάλογα με το μέσο παραλαβής θερμότητας:**

- Λέβητας θερμού νερού
- Λέβητας κορεσμένου ατμού
- Λέβητας υπέρθερμου ατμού

**Ανάλογα με τη διάταξη των διαδρομών των καυσαερίων (μετάδοση θερμότητας με συναγωγή):**

- Λέβητας κατακόρυφων διαδρομών
- Λέβητας οριζόντιων διαδρομών

**Ανάλογα με τον αριθμό των διαδρομών των καυσαερίων:**

- Λέβητας τριών διαδρομών
- Λέβητας τεσσάρων διαδρομών
- Λέβητας πέντε διαδρομών

**Ανάλογα με την αρχή κατασκευής:**

- Κρεμάμενος λέβητας
- Εδρασμένος λέβητας

**Ανάλογα με τον τρόπο οδήγησης των καυσαερίων:**

- Αεραλωτός
- Υδραλωτός (συνηθέστερος)

**Ανάλογα με τη διεύθυνση περιροής των αυλών:**

- Οριζόντιος
- Κατακόρυφος



**Εικόνα 2.5:** Κάθετοι και Οριζόντιοι Λέβητες παραγωγής ατμού

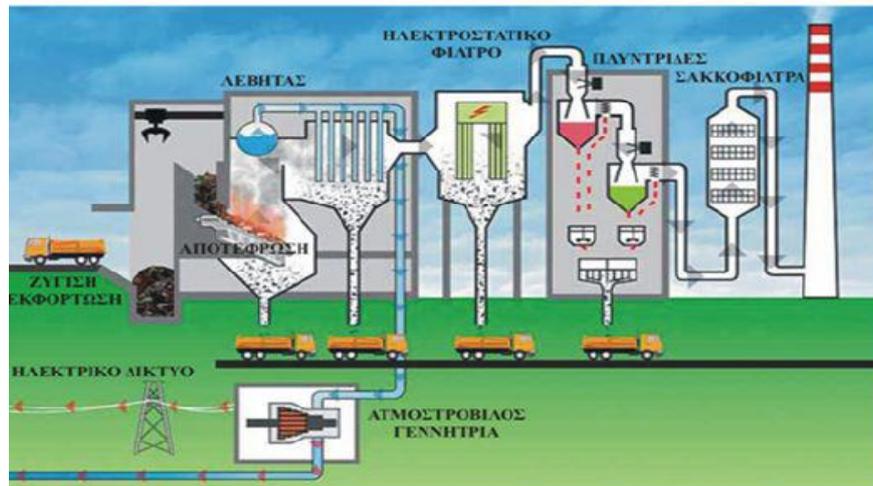
#### 2.2.4.2 Παραγωγή ενέργειας στο λέβητα

Οι εξωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της ενέργειας είναι:

- το είδος και η φύση των απορριμμάτων
- οι επιλογές τοποθεσίας της μονάδας. Η υψηλότερη απόδοση της ενεργειακής χρήσης των αποβλήτων μπορεί να επιτευχθεί όταν η θερμότητα που ανακτάται από τη διαδικασία αποτέφρωσης τροφοδοτείται συνεχώς και άμεσα ως τηλεθέρμανση, ατμός για την παραγωγική διαδικασία κλπ, ή σε συνδυασμό με την παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, η υιοθέτηση τέτοιων συστημάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την τοποθεσία του εργοστασίου, με την πιθανότητα να αυξάνεται η συνολική απόδοση όταν η μονάδα να βρίσκεται σε βολική θέση

- οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό του κύκλου ενέργειας. Τέτοιοι είναι οι: τροφοδοσία των αποβλήτων, οι δυνατότητες πωλήσεων ενέργειας, οι τοπικές συνθήκες που επικρατούν.



Εικόνα 2.5: Μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

## 2.2.5 Συστήματα ελέγχου εκπομπών και αέριας ρύπανσης

### 2.2.5.1 Σύσταση καυσαερίων

Κατά την αποτέφρωση προκύπτουν περίπου  $4.500-6.000\text{m}^3$  καυσαερίων ανά τόνο απορριμμάτων, τα οποία βρίσκονται σε θερμοκρασία περίπου  $1000^\circ\text{C}$ .

Οι ουσίες που εκπέμπονται στα αέρια της καύσης συνοψίζονται παρακάτω:

- **Διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ):** Ένας τόννος ΑΣΑ, με την καύση παράγει 0,7 ως 1,7 τόννους διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο εκλύεται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα και συνεπώς, συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου
- **Μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ):** Είναι τοξικό αέριο και προκύπτει από την ατελή καύση των οργανικών ενώσεων. Υψηλές συγκεντρώσεις του στα καυσαέρια πρέπει να αποφεύγονται καθώς μπορεί να σχηματιστεί εκρηκτικό μίγμα
- **Μεθάνιο:** Αν η καύση λαμβάνει χώρα κάτω από οξειδωτικές συνθήκες, τότε οι εκπομπές μεθανίου στα καυσαέρια είναι μηδενικές.

Ωστόσο, σχηματίζεται στο φρεάτιο τροφοδοσίας, όπου, λόγω της υποπίεσης, μεταφέρεται στην εστία καύσης ως πρωτογενής αέρας καύσης και εκεί μετατρέπεται

- **Υδροχλώριο:** Το 50% του χλωρίου που περιέχεται στα ΑΣΑ πρόερχεται από PVC, το οποίο κατά την καύση μετατρέπεται σε HCl. Μέρος αυτού μπορεί να αντιδράσει περαιτέρω προς σχηματισμό άλλων ρύπων (χλωρίδια μετάλλων, ανόργανες ενώσεις)
- **Υδροφθόριο:** Οι πηγές εκπομπής HF στις μονάδες καύσης είναι πιθανώς τα φθοριωμένα πλαστικά και τα φθοριωμένα υφάσματα
- **Οξείδια θείου:** Αν τα απορρίμματα περιέχουν θειούχες ενώσεις, τότε πιο πιθανός είναι ο σχηματισμός διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) κατά την καύση. Όμως, κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες, είναι πιθανός και ο σχηματισμός SO<sub>3</sub>. Πηγές θείου στα απορρίμματα είναι το χαρτί, οι γυψοσανίδες, λυματολάσπη κλπ
- **Οξείδια αζώτου:** Διάφορα οξείδια του αζώτου εκπέμπονται από τις μονάδες καύσης τα οποία μπορεί να είναι τοξικά, όξινα ή να έχουν επιπτώσεις στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Τα NO και NO<sub>2</sub> προέρχονται από την μετατροπή του αζώτου που περιέχεται στα απορρίμματα αλλά και στον αέρα καύσης. Στη δεύτερη περίπτωση, η ποσότητα που παράγεται είναι σημαντική σε θερμοκρασίες άνω των 1000°C
- **Διοξίνες/Φουράνια (PCDD/F):** Από τους πιο επικίνδυνους ρύπους των καυσαερίων είναι οι διοξίνες, γνωστές και ως πολυχλωριωμένες διβενζοδιοξίνες (PCDD), οι οποίες αποτελούνται από δύο αρωματικούς δακτυλίους ενωμένους με ένα ζεύγος ατόμων οξυγόνου. Εξίσου επικίνδυνοι ρύποι είναι και τα φουράνια (PCDF), τα οποία διαφέρουν από τις διοξίνες μόνο στο ότι οι δύο αρωματικοί δακτύλιοι συνδέονται με ένα άτομο οξυγόνου. Η επικινδυνότητα και τοξικότητα των παραπάνω ουσιών συμβαδίζει με ενδείξεις για τη συμβολή τους σε διαδικασίες καρκινογένεσης σε ανθρώπους. Οι διοξίνες και τα φουράνια παράγονται σχεδόν σε όλες τις διαδικασίες καύσης, σε μικρές ποσότητες. Παρόλ'αυτά, από εργαστηριακές δοκιμές, είναι γνωστό ότι μια θερμοκρασία δημιουργίας τους είναι οι 300°C και λαμβάνει χώρα στην αέρια φάση. Η δημιουργία διοξινών και φουρανίων ενθαρρύνεται με την αύξηση στην περιεκτικότητα του οξυγόνου ενώ βασική πηγή τους, κατά την αποτέφρωση των απορριμμάτων, θεωρείται η παρουσία οργανικών ενώσεων στα απορρίμματα, ιδιαίτερα στις συσκευασίες
- **Υδράργυρος (Hg):** Εντοπίζεται σε μπαταρίες, θερμόμετρα, οδοντικά αμαλγάματα. Είναι πολύ τοξικό μέταλλο και χωρίς επαρκή έλεγχο, η καύση απορριμμάτων που περιέχουν υδράργυρο αυξάνει πολύ τις εκπομπές. Συνήθως, αναπτύσσεται μία ισορροπία μεταξύ του

μεταλλικού υδραργύρου και του  $\text{HgCl}_2$ . Σε περιπτώσεις υψηλής συγκέντρωσης υδροχλωρίου στα καυσαέρια, παραμένει στη μορφή  $\text{HgCl}_2$ , που είναι πολύ πιο εύκολο να αφαιρεθεί από τα καυσαέρια

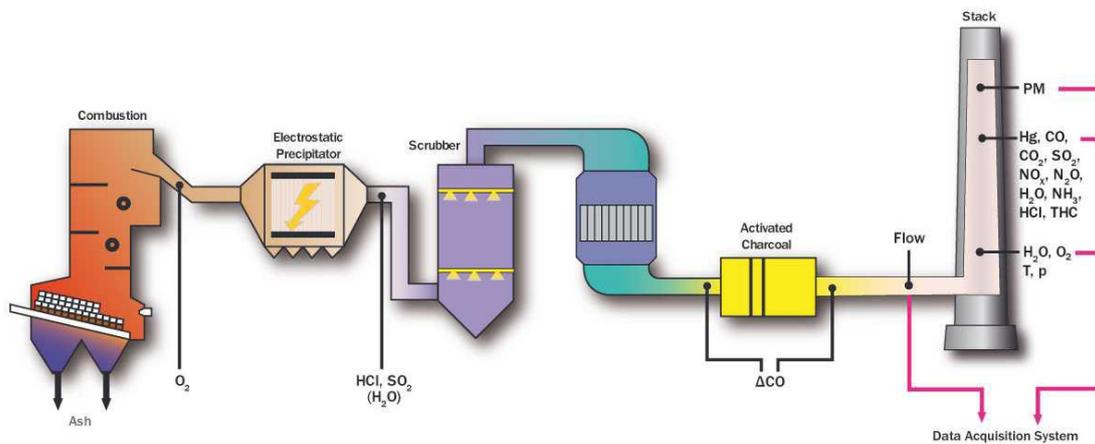
- **Βαρέα μέταλλα:** Τέτοια είναι το κάδμιο, που βρίσκεται σε μπαταρίες, το θάλλιο, το αντιμόνια, το αρσενικό, το χρώμιο, το νικέλιο κ.ά.. Πρόκειται για τοξικά και καρκινογενή μέταλλα και η κατακράτησή τους εξαρτάται από τον αποτελεσματικό διαχωρισμό τους από τη σκόνη στην οποία είναι δεσμευμένα λόγω της τάσης ατμών των ενώσεών τους, κυρίως των οξειδίων
- **Αμμωνία:** κατά την καύση ΑΣΑ, η αμμωνία προκύπτει σαν πρόσθετο κατά την επεξεργασία των καυσαερίων και πιο συγκεκριμένα, στην απομάκρυνση των νιτρικών οξέων

#### 2.2.5.2 Επεξεργασία και έλεγχος

Μετά τη διέλευσή τους από τον αμολέβητα, τα καυσαέρια διέρχονται από την εγκατάσταση καθαρισμού τους και κατόπιν διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα.

Η εγκατάσταση καθαρισμού καυσαερίων σε μία μονάδα καύσης απορριμμάτων δεν αποτελεί απλή βοηθητική εγκατάσταση, αλλά εξυπηρετεί άμεσα τον προορισμό της ίδιας της μονάδας καθώς ο καθαρισμός των καυσαερίων αποτελεί ένα σημαντικό τμήμα της θερμικής επεξεργασίας των απορριμμάτων. Αντιμετωπίζεται, λοιπόν, σφαιρικά ως μία φυσικοχημική επεξεργασία, καθώς φυσικές και χημικές διεργασίες εξελίσσονται τόσο κατά την καύση όσο και κατά τα επιμέρους στάδια του καθαρισμού καυσαερίων.

Ο βασικός στόχος του καθαρισμού των καυσαερίων σε μονάδες καύσης απορριμμάτων είναι ο διαχωρισμός των αερίων και των διαλυτοποιημένων στο καυσαέριο στερεών προϊόντων της καύσης, με περαιτέρω στόχο είτε την υλική τους αξιοποίηση είτε την ασφαλή απόθεση. Το δυναμικό των υλικώς αξιοποιήσιμων συστατικών στα καυσαέρια μονάδων καύσης απορριμμάτων είναι πάντως χαμηλό (π.χ. επανάκτηση  $\text{Hg}$ , χρήση του  $\text{Cl}$  για παραγωγή  $\text{HCl}$ , χρήση των οξειδίων του θείου για παραγωγή γύψου).



Εικόνα 2.6: Διάγραμμα ροής διεργασίας ελέγχου αέριας ρύπανσης

Ο σωστός σχεδιασμός και η κατάλληλη επιλογή των αντιρρυπαντικών συστημάτων για μονάδες αποτέφρωσης ΑΣΑ βασίζεται στη σύσταση και την ποσότητα των προς επεξεργασία καυσαερίων και στα επιτρεπτά όρια εκπομπών της όλης εγκατάστασης και είναι κομβικής σημασίας μιας και στα προϊόντα της καύσης των ΑΣΑ προκύπτουν εκπομπές φουρανίων και διοξινών, ουσίες άκρως τοξικές και επικίνδυνες για την ανθρώπινη υγεία, καθώς επίσης και εκπομπές βαρέων μετάλλων.

Το πρόβλημα του ελέγχου των εκπομπών ρύπων παρουσιάζεται πιο έντονο σε μονάδες αποτέφρωσης τύπου mass – fired, οι οποίες παρουσιάζουν υψηλές διακυμάνσεις στην ποσότητα και, ιδιαίτερα, τη σύσταση των τροφοδοτούμενων προς αποτέφρωση ΑΣΑ, οι οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι οι μονάδες αυτές λειτουργούν με απόβλητα τα οποία έχουν υποστεί μικρή προεπεξεργασία με αποτέλεσμα να εμφανίζουν έντονες διακυμάνσεις ως προς τη σύσταση, την περιεχόμενη υγρασία και τη θερμογόνο ικανότητα. Αντίθετα, σε μονάδες RDF-fired, το πρόβλημα ελέγχου των ρύπων παρουσιάζει μικρότερο βαθμό δυσκολίας και εστιάζεται κυρίως στον έλεγχο των εκπομπών διοξινών, φουρανίων και βαρέων μετάλλων.

Η επιλογή της πιο κατάλληλης στρατηγικής καθαρισμού των καυσαερίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές συνθήκες. Σημαντικούς παράγοντες αποτελούν :

- οι διοικητικές ρυθμίσεις (άδειες για υγρά απόβλητα, διάθεση των στερεών υπολειμμάτων)
- οι επιλογές και οι αγορές για μια ενδεχόμενη ανάκτηση και τέλος

- το κόστος της επένδυσης και το λειτουργικό κόστος του συνόλου του συστήματος

Για τον έλεγχο των εκπομπών έχουν θεσπιστεί αυστηρά όρια, για την επίτευξη των οποίων απαιτείται η χρήση προηγμένων συστημάτων ελέγχου. Για το λόγο αυτό, τα απαέρια της παραγωγικής διαδικασίας υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα, σύμφωνα και με την νομοθεσία.

Οι σημαντικότερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης απορριμμάτων αποσκοπούν στα παρακάτω στάδια καθαρισμού των καυσαερίων:

- Απομάκρυνση της ιπτάμενης τέφρας
- Απομάκρυνση των όξινων αερίων
- Απομάκρυνση συγκεκριμένων ρύπων όπως Hg ή PCDD/Fs
- Μείωση των οξειδίων του αζώτου

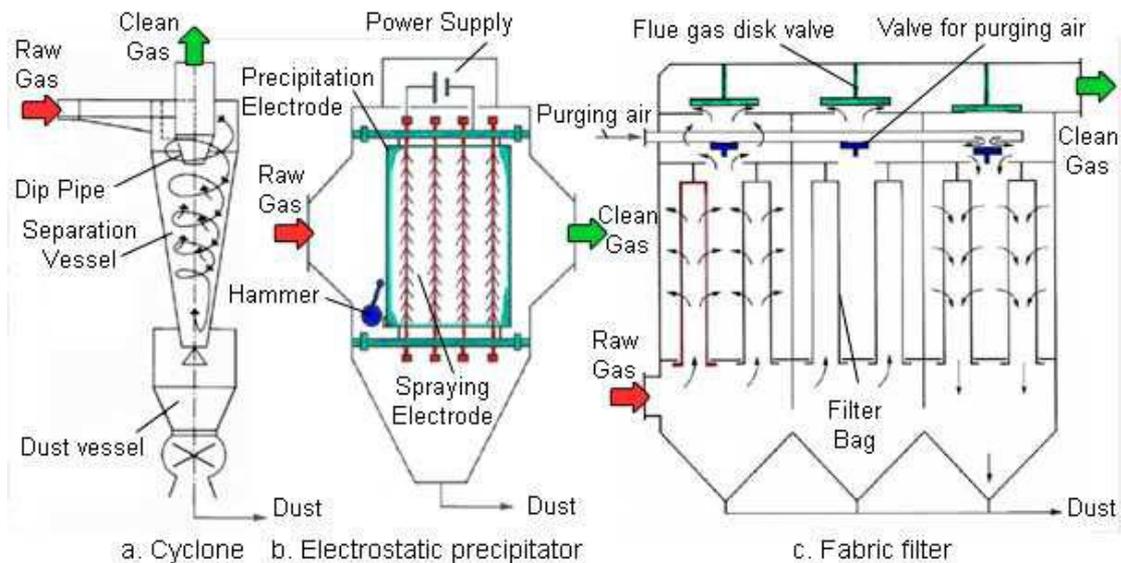
#### 2.2.5.3 Απομάκρυνση ιπτάμενων σωματιδίων

Τα ιπτάμενα σωματίδια ταξινομούνται είτε ανάλογα με το μέγεθος τους, είτε ανάλογα με την προέλευση τους. Σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 1μm θεωρούνται ως σκόνη και λόγω του μικρού μεγέθους δεν αποτίθενται στο έδαφος αλλά συμπεριφέρονται ως αέρια. Σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 10μm συνήθως εναποτίθενται στο έδαφος. Τα σωματίδια της τέφρας που συναντώνται στα καυσαέρια ενός λέβητα με διάμετρο 100μm ή μικρότερη ονομάζονται συνοπτικά ιπτάμενη τέφρα.

Η απόδοση συλλογής των σωματιδίων από τα καυσαέρια ποικίλει σημαντικά ανάλογα με το σύστημα αλλά συνήθως κυμαίνεται από 50% για απλά μηχανικά συστήματα, μέχρι και περισσότερο από 99% για τους ηλεκτροστατικούς κατακρημνιστές.

Το πρώτο βήμα στα περισσότερα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων είναι η απομάκρυνση της ιπτάμενης τέφρας, η οποία πραγματοποιείται μέσω:

- Κυκλώνων
- Ηλεκτροστατικών κατακρημνιστών (ESP)
- Σακκόφιλτρων



**Εικόνα 2.7:** Εξαρτήματα και Λειτουργία των τριών συστημάτων αφαίρεσης στερεών σωματιδίων

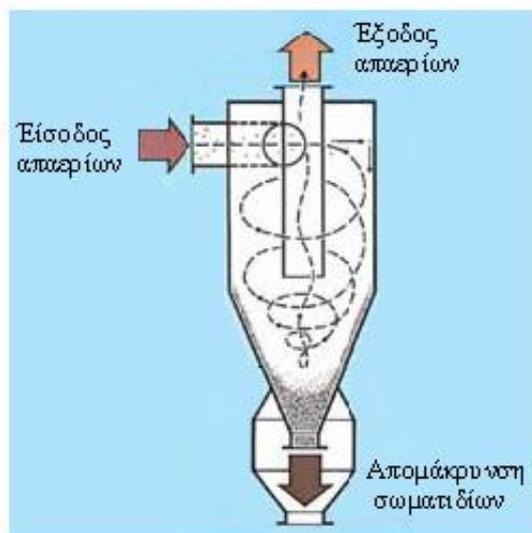
## Κυκλώνες

Η λειτουργία των κυκλώνων και των πολυκυκλώνων (χρήση πολλών μονάδων κυκλώνων) στηρίζεται στην αύξηση της φαινόμενης διαφοράς πυκνότητας μεταξύ στερεού και αερίου όταν ασκείται φυγόκεντρη δύναμη (πολλαπλασιασμός της επιτάχυνσης της βαρύτητας  $g$ ).

Τα καυσαέρια εισέρχονται εφαπτομενικά με υψηλή ταχύτητα σε έναν κάθετο κυλινδρικό θάλαμο με κωνικό πυθμένα. Τα στερεά σωματίδια συγκρούονται στα τοιχώματα του θαλάμου και εναποτίθενται στον πυθμένα από όπου και απομακρύνονται ενώ το αέριο διαφεύγει μέσω ενός κεντρικού σωλήνα.

Λόγω της περιορισμένης ικανότητας τους στην απομάκρυνση λεπτών σωματιδίων, οι κυκλώνες δεν συναντώνται πλέον σε σύγχρονες εγκαταστάσεις ή χρησιμοποιούνται για την προεπεξεργασία της ιπτάμενης τέφρας. Οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι γενικά χαμηλές καθώς δεν υπάρχει πτώση πίεσης μέσα από τον κυκλώνα.

Πλεονεκτήματά τους είναι η γερή κατασκευή και το ευρύ φάσμα θερμοκρασιών λειτουργίας τους. Διάβρωση, ιδιαίτερα στο σημείο πρόσπτωσης των καυσαερίων, μπορεί να εμφανιστεί όταν τα καυσαέρια είναι πλούσια σε σωματίδια.

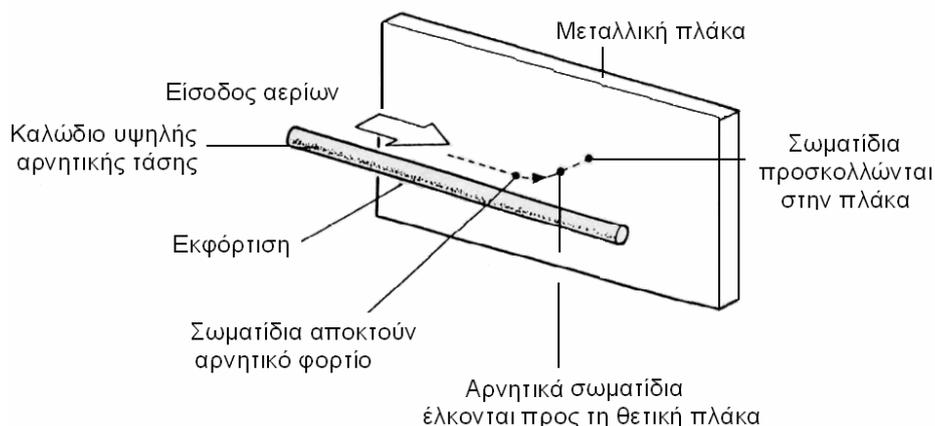


Εικόνα 2.7: Κυκλωνική διάταξη

## Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές (ESP, ElectroStatic Precipitator)

Λέγονται και ηλεκτροστατικά φίλτρα. Λόγω του απλού σχεδιασμού τους, της μικρής απώλειας πίεσης και της εύκολης λειτουργίας τους, οι ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο σε εγκαταστάσεις αποτέφρωσης απορριμμάτων για το διαχωρισμό της ιπτάμενης τέφρας όσο και σε άλλες διεργασίες ανάφλεξης, όπως σε εργοστάσια καύσης λιγνίτη. Ένας σύγχρονος ηλεκτροστατικός κατακρημνιστής εγγυάται ποσοστά απομάκρυνσης της τέφρας μεγαλύτερα από 99% στα σωματίδια με μεγέθη μεταξύ 0,01 και 100  $\mu\text{m}$ .

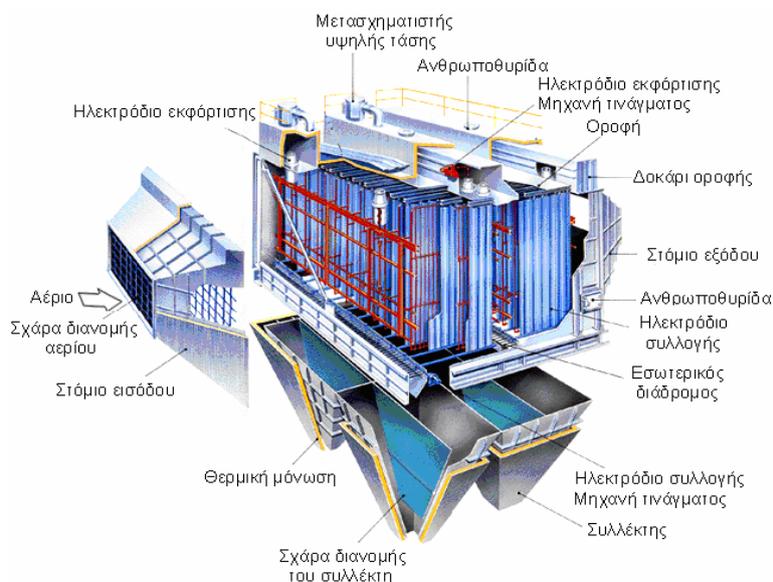
Η βασική αρχή λειτουργίας των ηλεκτροστατικών κατακρημνιστών φαίνεται στην εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8: Αρχή Λειτουργίας Ηλεκτροστατικού Κατακρημνιστή

Η ροή των καυσαερίων διοχετεύεται μέσω περασμάτων πλάτους 20-40cm που δημιουργούνται από ηλεκτρικά φορτισμένες μεταλλικές πλάκες (ηλεκτρόδια συλλογής) και η τάση λειτουργίας τους είναι υψηλή (από 30.000 μέχρι 60.000V). Λόγω του αρνητικού φορτίου που αποκτούν τα σωματίδια των καυσαερίων, αυτά έλκονται από τις γειωμένες πλάκες, που περιοδικά, με δονήσεις, καθαρίζονται από την συγκεντρωμένη ύλη. (αυστρια) Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται από 160 ως 260°C ενώ οι υψηλότερες αποφεύγονται καθώς μπορεί να αυξηθεί ο κίνδυνος σχηματισμού PCDD/F.

Η απόδοση της απομάκρυνσης της τέφρας επηρεάζεται κυρίως από την ηλεκτρική αντίστασή της, η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με τη σύσταση των αποβλήτων. Τέλος, υπάρχουν και οι υγροί ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές οι οποίοι βασίζονται στην ίδια τεχνολογική αρχή με τη διαφορά ότι οι γειωμένες πλάκες καθαρίζονται από τα σωματίδια με χρήση κάποιου υγρού, συνήθως νερού και χρησιμοποιούνται συνήθως όταν τα καυσαέρια που εισέρχονται είναι πιο ψυχρά ή περιέχουν υγρασία.



**Εικόνα 2.9:** Ηλεκτροστατικό φίλτρο

## Σακκόφιλτρα

Ακόμα μικρότερες εκπομπές από αυτές των ESP, ειδικότερα για τα μικρότερου μεγέθους σωματίδια, μπορούν να επιτευχθούν με τα σακκόφιλτρα.

Σ' αυτά, τα ακατέργαστα καυσαέρια περνούν από το εξωτερικό τμήμα προς το εσωτερικό, μέσα από υφασμάτινες σάκους που στηρίζονται σε μεταλλικά πλέγματα. Η ιπτάμενη τέφρα μένει στην εξωτερική επιφάνεια του φίλτρου και απομακρύνεται περιοδικά με την βοήθεια αέρα που φυσάει από το εσωτερικό. Αυτός ο καθαρισμός απελευθερώνει τα

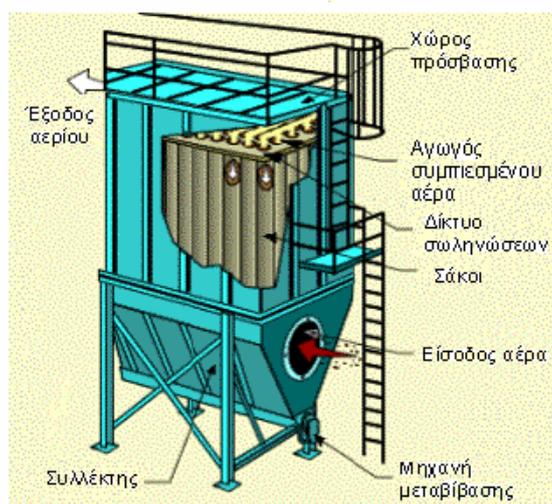
σωματίδια, τα οποία πέφτουν σε έναν συλλέκτη. Τα σακκόφιλτρα εγγυώνται συγκεντρώσεις σκόνης στα καθαρισμένα αέρια μικρότερες του  $1 \text{ mg/m}^3$ .

Το μέσο φιλτραρίσματος αποτελείται από ινώδη υλικά που πρέπει να παρουσιάζουν τις εξής ιδιότητες:

- επαρκή μηχανική αντοχή
- επαρκή αντίσταση σε θερμοκρασία
- αντοχή σε οξέα, καυστικά διαλύματα και υγρασία
- καλή διαπερατότητα του αέρα
- κατάλληλη γεωμετρία των κενών ανάμεσα στις ίνες για την καλή συλλογή της σκόνης

Η απόδοση του φιλτραρίσματος είναι μεγάλη για ένα ευρύ φάσμα μεγεθών των σωματιδίων όμως, για σωματίδια διαμέτρου μικρότερης του  $0,1 \mu\text{m}$  αυτή μειώνεται αλλά το ποσοστό παραγωγής αυτών από μονάδες καύσης είναι σχετικά πολύ μικρό.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στη μέθοδο αυτή είναι το υψηλό κόστος συντήρησης, καθώς τα φίλτρα έχουν διάρκεια ζωής 18-36 μήνες. Για σακκόφιλτρα χρησιμοποιούνται συνήθως είτε σάκκοι από Teflon, είτε υφασμάτινα φίλτρα από υαλοβάμβακα με διάφορα επιστρώματα.



**Εικόνα 2.10:** Σακκόφιλτρο

#### 2.2.5.4 Απομάκρυνση όξινων αερίων

Μετά την πρωτογενή καθίζηση της ιπτάμενης τέφρας στα συστήματα ελέγχου της αέριας ρύπανσης ακολουθεί, συνήθως, ο χημικός καθαρισμός των καυσαερίων από τα όξινα αέρια, τα οποία συνήθως απομακρύνονται με τη χρήση αλκαλικών αντιδραστηρίων.

Για τον καθαρισμό, λοιπόν, εφαρμόζονται οι ακόλουθες τεχνικές:

- Υγρή διεργασία
- Ημι-υγρή ή ημι-ξηρή διεργασία
- Ξηρή διεργασία

### **Υγρή διεργασία**

Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην απορρόφηση των αερίων συστατικών από ένα υγρό. Το ρεύμα των καυσαερίων τροφοδοτείται σε νερό, υπεροξείδιο του υδρογόνου ή/και σε διάλυμα έκπλυσης που περιέχει τμήμα του αντιδραστηρίου (π.χ. διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου).

Η διαθέσιμη επιφάνεια του υγρού που ελέγχει την μεταφορά μάζας από την αέρια στην υγρή φάση είναι ο πρωταρχικός παράγοντας αποτελεσματικότητας μιας τέτοιας διαδικασίας απορρόφησης. Έτσι, ο στόχος του σχεδιασμού τους είναι η επίτευξη μιας μεγάλης επιφάνειας επαφής μεταξύ του αερίου ρεύματος και της υγρής φάσης ώστε ο ρύπος να μεταφερθεί - διαλυθεί σ' αυτήν και να απομακρυνθεί από την αέρια φάση. Το προϊόν της αντίδρασης είναι υδατικό.

Φυσική ονομάζεται η απορρόφηση όταν χρησιμοποιείται νερό ενώ όταν προστίθεται στο νερό και μια ένωση που αντιδρά με το ρύπο, η ρόφηση ονομάζεται χημική. Στο χημικό καθαρισμό η διαλυμένη ένωση λειτουργεί ως συνεχής «καταβόθρα» (sink) για το ρύπο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός απομάκρυνσης του από το αέριο ρεύμα.

Η επιλογή διαλύτη (υγρής φάσης) γίνεται βασιζόμενη στις παρακάτω παραμέτρους:

- Διαλυτότητα των καυσαερίων. Γενικώς, επιδιώκεται ανάλογη χημική φύση με το προς απομάκρυνση αέριο
- Πτητικότητα του υγρού. Όσο πιο χαμηλή γίνεται για να μην υπάρχουν απώλειες, αφού το αέριο ρεύμα μετά την επαφή θα βγαίνει κορεσμένο
- Διαβρωτικότητα
- Ιξώδες. Επιδιώκεται χαμηλό ιξώδες για μικρή πτώση πίεσης, καλή ροή και καλοί συντελεστές μεταφοράς
- Χημική σταθερότητα
- Χαμηλό σημείο πήξης

Η χρήση πλυντρίδων είναι μια κοινή στρατηγική στις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης απορριμμάτων στην κεντρική Ευρώπη. Σήμερα, συναντάται ως μία εγκατάσταση δύο σταδίων ξεκινώντας με έναν όξινο καθαριστή και ακολουθείται από έναν ουδέτερο ή ελαφρώς αλκαλικό

καθαριστή. Ο όξινος είναι τύπου Venturi ή ψεκασμού και μειώνει τη θερμοκρασία των αερίων από 180-200°C στους 63-65°C. Στο δεύτερο στάδιο, χρησιμοποιούνται κυρίως πύργοι με πληρωτικό υλικό. Οι υγρές πλυντρίδες λειτουργούν με ή χωρίς (το δεύτερο προτιμάται στις μέρες μας) την αποδέσμευση υγρών εκροών.

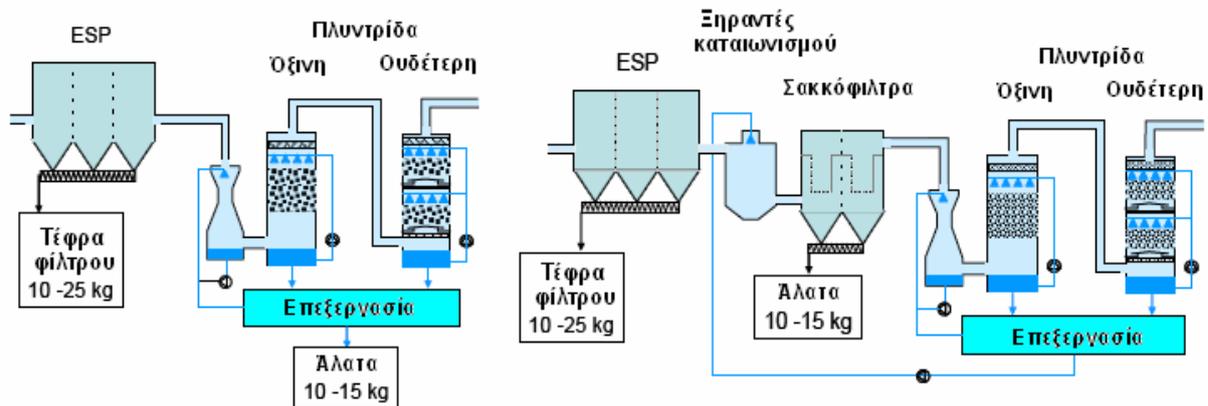
Τα συστήματα δύο σταδίων έχουν πολύ υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης για το αλογόνα HF, HCl, HBr, για τον υδράργυρο και για το SO<sub>2</sub> και έτσι, οι συγκεντρώσεις αυτών στα καυσαέρια μειώνονται πολύ κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια επομπών.

Στην πρώτη πλυντρίδα, τα HF, HCl, και HBr απορροφώνται εύκολα από το νερό, σχηματίζοντας αρκετά δυνατά οξέα. Αυτό προκαλεί τη μείωση του pH του διαλύματος της πλυντρίδας, το οποίο χρειάζεται για την αποτελεσματική απομάκρυνση του υδραργύρου, ο οποίος βρίσκεται κυρίως στα αερίδια με τη μορφή Hg<sub>2</sub><sup>+</sup> σχηματίζει ένα σταθερό χλωρίδιο σε υδατικό περιβάλλον που περιλαμβάνει ιόντα χλωρίου και παραμένει στο διάλυμα της πρώτης πλυντρίδας. Το δεύτερο στάδιο προορίζεται για την απομάκρυνση του SO<sub>2</sub>, το οποίο πρώτα απορροφάται από το υγρό.

Ένα αυξημένο pH θα οδηγούσε την ισορροπία σε ιοντική μορφή. Ως εκ τούτου, στη δεύτερη πλυντρίδα διατηρείται ένα ουδέτερο ή ελαφρώς αλκαλικό περιβάλλον με την ελεγχόμενη προσθήκη NaOH ή Ca(OH)<sub>2</sub> και το SO<sub>2</sub>, στην πραγματικότητα, εξουδετερώνεται. Το Ca(OH)<sub>2</sub> συνήθως προτιμάται καθώς ο καθιζάνων γύψος που προκύπτει, CaSO<sub>4</sub> • 6H<sub>2</sub>O απομακρύνεται εύκολα ή ακόμα και πωλείται.

Τα επιτρεπόμενα όρια για την εκροή των υγρών σε ένα σύστημα αποχέτευσης είναι πολύ αυστηρά και για την επίτευξή τους απαιτείται μεγάλη προσπάθεια, κυρίως για τον Hg και το Cd.

Οι αρχές συχνά απαγορεύουν την αποδέσμευση των υγρών αποβλήτων. Σ'αυτές τις περιπτώσεις οι διαλύτες καθαρισμού πρέπει να εξατμιστούν, κάτι το οποίο γίνεται με τη βοήθεια ψεκαστών ξήρανσης που βρίσκονται αμέσως μετά το βραστήρα. Τα στερεά υπολείμματα απομακρύνονται από τη ροή του αερίου με τη βοήθεια ενός σακκόφιλτρου. Μία άλλη μέθοδος για την εξάτμιση των διαλυτών καθαρισμού είναι με την ξήρανσή τους σε εξωτερικές συσκευές θερμαινόμενες με ατμό.



Εικόνα 2.11: Υγρή πλυντρίδα με εκροή υγρών αποβλήτων (αριστερά) και χωρίς (δεξιά)

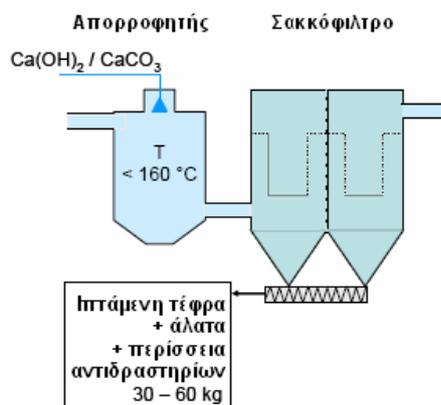
## Ημι-υγρή ή ημι-ξηρή διεργασία

Το απορροφητικό μέσο προστίθεται στο ρεύμα των καυσαερίων ως υδατικό διάλυμα. Σε αυτή τη διαδικασία, η θερμότητα των καυσαερίων χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του διαλύτη και εν τέλει, το προϊόν της αντίδρασης είναι ξηρό, δηλαδή, σε στερεά μορφή, το οποίο πρέπει να εναποτεθεί σε κάποιο επόμενο στάδιο, π.χ. σε σακκόφιλτρο.

## Ξηρή διεργασία

Η διεργασία των στεγνών πλυντρίδων είναι απλή και, κατά συνέπεια, φτηνή σε ότι αφορά το κόστος αγοράς τους και χρησιμοποιούνται σε πολλές εγκαταστάσεις σε όλο τον κόσμο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το απορροφητικό μέσο εισάγεται απευθείας στο ρεύμα των καυσαερίων σε ξηρή μορφή. Τα υπολείμματα καθαρισμού στις περισσότερες περιπτώσεις αφαιρούνται με σακκόφιλτρα.

Στην ξηρή πλυντρίδα μπορεί να γίνει χρήση διάφορων αντιδραστηρίων, όπως ασβεστόλιθος,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ , άσβεστος και  $\text{Ca(OH)}_2$ . Μία τυπική διάταξη στεγνής πλυντρίδας φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 2.12: Αρχή λειτουργίας στεγνής πλυντρίδας

Οι διάφορες διατάξεις πλυντριδων που εφαρμόζονται είναι:

- Καθαριστές με διάταξη Venturi
- Πύργοι με πληρωτικό υλικό
- Πύργοι με δίσκους
- Πύργοι ψεκασμού

### **Διάταξη venturi**

Στη διάταξη αυτή έχουμε ομοροή υγρού και αερίου ρεύματος. Στο στόμιο εισόδου του υγρού, λόγω της στένωσης, αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου και δημιουργούνται τύρβες οι οποίες ενισχύουν την αποτελεσματικότητα της απορρόφησης. Ταυτόχρονα, θετικά επιδρά στην απόδοση το γεγονός ότι ελλατώνεται και το μέγεθος των σταγονιδίων. Έπειτα, λόγω ελάττωσης της ταχύτητας, γίνεται ο διαχωρισμός αερίου και υγρού μίγματος και απομακρύνονται.

### **Πύργοι πληρωτικού υλικού**

Το αδρανές πληρωτικό υλικό που περιέχουν προσφέρει μεγάλη ειδική επιφάνεια( ανά μονάδα όγκου του πύργου) και μικρή αντίσταση στη ροή (πτώση πίεσης). Το υγρό ρέει σε λεπτό στρώμα (αντιροή) ενώ αν τα απαέρια περιέχουν και αιωρούμενα σωματίδια, η διάταξη δεν μπορεί να λειτουργήσει καθώς φράσσουν οι πόροι.

### **Πύργοι με δίσκους**

Περιέχουν οριζόντιους δίσκους σχεδιασμένους ώστε να προσφέρουν αυξημένη διεπιφάνεια αερίου-υγρού. Το υγρό ρέει από την κορυφή του πύργου, δημιουργώντας ένα λεπτό στρώμα πάνω στους δίσκους, οι οποίοι είναι διάτρητοι και το αέριο ρεύμα διέρχεται μέσα από τις οπές. Σε περίπτωση ύπαρξης σωματιδίων, η διάταξη δεν μπορεί να λειτουργήσει.

### **Πύργοι ψεκασμού**

Επεξεργάζονται μεγάλες παροχές αερίου με μικρή πτώση πίεσης και έχουν υψηλές αποδόσεις για χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων όμως χρησιμοποιούνται και για την απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων. Έχουν χαμηλότερη απόδοση από τα άλλα συστήματα αλλά και χαμηλότερο κόστος (πάγιο και λειτουργικό).

#### 2.2.5.5 Μείωση εκπομπών οξειδίων αζώτου (NOx)

Για τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου NOx ακολουθούνται δύο στρατηγικές:

- *Η μη καταλυτική απομάκρυνση (NSCR) που πραγματοποιείται με την έγχυση αμμωνίας ή κάποιου αντιδραστηρίου που παράγει αμμωνία στα καυσαέρια, σε θερμοκρασίες κοντά στους 1.000°C. Χωρίς καταλύτη, η αμμωνία και τα οξείδια του αζώτου σχηματίζουν νερό και άζωτο και η μέθοδος έχει απόδοση 50-60%. Μία μονάδα που χρησιμοποιεί την μέθοδο αυτή περιλαμβάνει σταθμό αποθήκευσης και τροφοδοσίας του αντιδραστηρίου, τη συσκευή για την έγχυσή του και τον αντιδραστήρα που ενσωματώνεται στο ρεύμα των καυσαερίων σε θερμοκρασίες μεταξύ 800-1.000°C. Σημαντικές παράμετροι για τη χρήση της μεθόδου είναι η καλή ανάμειξη των καυσαερίων και της αμμωνίας με τη δημιουργία τυρβών και η παρατήρηση του βέλτιστου ελάχιστου χρόνου παραμονής στον αντιδραστήρα*
- *Η επιλεκτική καταλυτική μείωση (SCR) κατά την οποία η αμμωνία αναμιγνύεται με αέρα, προστίθεται στα καυσαέρια και έπειτα αυτά περνούν από τον καταλύτη, ο οποίος βρίσκεται συνήθως σε μορφή πλέγματος (π.χ. πλατίνα, ρόδιο, ζεόλιθοι). Καθώς διέρχονται από τον καταλύτη, η αμμωνία αντιδρά με τα οξείδια του αζώτου προς παραγωγή υδρατμών και αζώτου. Για να είναι αποτελεσματική η μέθοδος, απαιτείται θερμοκρασία ανάμεσα από 180 ως 450°C, με το σύστημα στις περισσότερες μονάδες καύσης να λειτουργεί από 230-300°C. Η απόδοση της μεθόδου είναι πολύ υψηλή, πρακτικά πάνω από 90%*

#### 2.2.5.6 Μείωση οργανικών ενώσεων

Τα καυσαέρια περιλαμβάνουν ίχνη ενός ευρέως φάσματος οργανικών ειδών που περιλαμβάνουν αλογονωμένους αρωματικούς υδρογονάνθρακες, πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, βενζόλιο, τολουόλιο, ξυλόλιο και τέλος, πολυχλωριωμένες διβενζοδιοξίνες και διβενζοφουράνια.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- *Προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα:* ο ενεργός άνθρακας εγχέεται στη ροή του αερίου, δεσμεύει τις ενώσεις και τέλος, φιλτράρεται στα σακκόφιλτρα
- *Συστήματα επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης:* καταστρέφει τις διοξίνες και τα φουράνια, δεν τα δεσμεύει, χρειάζεται όμως ένα πολυεπίπεδο

και μεγαλύτερο σύστημα απ'ότι στη μείωση των NOx. Η απόδοση αγγίζει ποσοστά 98-99,9%

- *Καταλυτικά σακκόφιλτρα*: Είναι είτε εμποτισμένα με καταλύτη είτε ο καταλύτης αναμιγνύεται με τα υλικά παραγωγής των ινών που τα αποτελούν. Οι διοξίνες και τα φουράνια καταστρέφονται στον καταλύτη και προκειμένου να είναι γίνει αυτό, αντί να προσροφηθούν από τον καταλύτη, η θερμοκρασία των εισερχόμενων αερίων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 190°C
- *Εκ νέου καύση του άνθρακα προσρόφησης*: Είναι δυνατό η καθαρή εκπομπή διοξινών να μειωθεί με την εκ νέου καύση των προσροφημένων διοξινών με επανείσοδό τους στην εστία καύσης. Η μέθοδος χρησιμοποιείται εφόσον υπάρχουν ξεχωριστές διατάξεις για τη δέσμευση του υδραργύρου
- *Χρήση πλαστικών εμποτισμένων με άνθρακα για την προσρόφηση των PCDD/F*: Οι διοξίνες και τα φουράνια απορροφώνται από τέτοιου είδους πλαστικά (πολυπροπυλενίου κυρίως) που βρίσκονται στις υγρές πλυντρίδες, αυστήρα σε θερμοκρασίες 60-70°C καθώς και η παραμικρή μείωση μπορεί να έχει το αντίθετο αποτέλεσμα. Ωστόσο, το μέτρο αυτό μόνο του δεν είναι αποτελεσματικό καθώς οι συγκεντρώσεις εξόδου δεν είναι σύμφωνες με την Οδηγία 2000/76/EC
- *Ταχεία ψύξη των καυσαερίων*: Η μέθοδος περιλαμβάνει χρήση πλυντρίδας νερού για την ψύξη των καυσαερίων από τη θερμοκρασία καύσης αμέσως κάτω από τους 100°C. Συνεπώς, μειώνεται η παραμονή των καυσαερίων στις θερμοκρασιακές ζώνες στις οποίες μπορεί να προκληθεί εκ νέου σύνθεση PCDD/F

#### 2.2.5.7 Μείωση εκπομπών υδραργύρου

Οι πρωτογενείς τεχνικές μείωσης των εκπομπών υδραργύρου αφορούν την πρόληψη ή τον έλεγχο ύπαρξής τους στα απόβλητα με την αποτελεσματική ξεχωριστή διαλογή των αποβλήτων που περιέχουν βαρέα μέταλλα, με δειγματοληψία και ανάλυση των αποβλήτων όπου είναι αυτό δυνατό και άλλες παρόμοιες τεχνικές.

Οι δευτερογενείς τεχνικές αφορούν τη δέσμευσή του από το ρεύμα των καυσαερίων. Ο μεταλλικός υδράργυρος μπορεί να αφαιρεθεί με μετατροπή του σε ιοντική μορφή με την προσθήκη οξειδωτικών και έπειτα την εναπόθεσή του σε πλυντρίδα αλλά και με την άμεση εναπόθεσή του σε ζεόλιθους ή ενεργό άνθρακα.

#### 2.2.5.8 Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O)

Υπάρχουν δύο τρόποι μείωσης της εκπομπής CO<sub>2</sub>: η αύξηση της απόδοσης ανάκτησης ενέργειας και ο έλεγχος εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με επεξεργασία των καυσαερίων. Ωστόσο, μία νέα τεχνική που βρίσκεται υπό εξέταση είναι η παραγωγή ανθρακικού νατρίου από την αντίδραση του CO<sub>2</sub> των καυσαερίων με NaOH.

Για την αποφυγή εκπομπής N<sub>2</sub>O λαμβάνονται τα εξής μέτρα:

- μείωση της δόσολογίας του αντιδραστηρίου για τη μη καταλυτική απομάκρυνση των οξειδίων του αζώτου με βελτιστοποίηση της μεθόδου
- χρήση αμμωνίας αντί ουρίας στην παραπάνω μέθοδο
- επιλογή βέλτιστης θερμοκρασίας για την έγχυση του αντιδραστηρίου στην διαδικασία

#### 2.2.6 Επεξεργασία και έλεγχος υδατικών υπολειμμάτων

Οι πηγές από τις οποίες προέρχονται τα υδατικά απόβλητα είναι:

- από τη διεργασία: σε σημαντικό βαθμό από τα συστήματα επεξεργασίας των καυσαερίων σβέση της τέφρας στην ψύξη αερίων στους πύργους υγρής απορρόφησης σε μερικούς ηλεκτροστατικούς κατακρημνιστές
- από τη συλλογή, επεξεργασία και αποθήκευση της τέφρας πυθμένα
- από διάφορα άλλα ρεύματα της διεργασίας
- από χρήσεις νερού για υγιεινή
- από χρήση νερού ψύξης

Τα υγρά απόβλητα που προκύπτουν από την διεργασία και, ειδικά, από την επεξεργασία των καυσαερίων, περιέχουν μία ευρεία ποικιλία ρυπογόνων ουσιών, η συγκέντρωση των οποίων εξαρτάται από τη σύσταση των αποβλήτων αλλά και από το σχεδιασμό των συστημάτων επεξεργασίας των καυσαερίων.

##### 2.2.6.1 Έλεγχος εκροής

Για τον έλεγχο εκροής υδατικών αποβλήτων μπορούν να εφαρμοστούν τα ακόλουθα μέτρα:

1. *Εφαρμογή της βέλτιστης τεχνολογίας καύσης* καθώς εκτός από τη σταθερότητα της διαδικασίας, παρέχεται έλεγχος των εκπομπών στο νερό, όπου αυτό χρησιμοποιείται στη διαδικασία. Μία ατελής καύση

έχει αρνητικό αντίκτυπο στην σύνθεση των καυσαερίων και της ιπτάμενης τέφρας λόγω αύξησης στις ρυπογόνες ουσίες

- 2. Μείωση της κατανάλωσης του νερού στη διεργασία**, κυρίως με αύξηση της ανακυκλοφορίας των υδατικών ρευμάτων σε διατάξεις όπως οι υγρές πλυντρίδες, ή αύξηση της χρήσης εναλλακτικών, μη υδατικών τεχνολογιών

#### 2.2.6.2 Μέθοδοι επεξεργασίας

Τρεις βασικές μέθοδοι εφαρμόζονται για την επεξεργασία των υγρών αυτών αποβλήτων:

- 1. φυσικοχημική επεξεργασία** βασισμένη στη διόρθωση του pH και στην καθίζηση. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα ρεύμα με διαλυμένα άλατα, το οποίο αν δεν εξατμιστεί, θα πρέπει να απομακρυνθεί. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι: εξουδετώνονται τα ακάθαρτα υγρά απόβλητα, γίνεται κροκίδωση των ρύπων, η σχηματιζόμενη ιλύς ηρεμεί, αφυδατώνεται και έπειτα γίνεται διήθηση
- 2. εξάτμιση κατά τη διεργασία της καύσης με ψεκάσμο** σε ένα σύστημα ημι-υγρής επεξεργασίας ή οποιουδήποτε άλλου που χρησιμοποιεί σακκόφιλτρο. Σε αυτή την περίπτωση, τα άλατα ενσωματώνονται στα υπολλείμματα της επεξεργασίας των καυσαερίων
- 3. ξεχωριστή εξάτμιση των υγρών αποβλήτων.** Σε αυτή την περίπτωση, το εξατμισμένο νερό συμπυκνώνεται αλλά καθώς είναι, γενικά, καθαρό, μπορεί να απορριφθεί χωρίς περαιτέρω επεξεργασία

#### 2.2.7 Επεξεργασία και έλεγχος στερεών υπολειμμάτων

Τα υπολλείμματα που παράγονται από την αποτέφρωση, αντιστοιχούν στο 20-40% του βάρους των εισερχομένων απορριμμάτων και δημιουργούνται κυρίως στην σχάρα, απ' όπου απάγονται με ειδικό σύστημα και στις θερμαντικές επιφάνειες των λεβήτων, απ' όπου συγκεντρώνονται στις χοάνες κάτω από το λέβητα και μεταφέρονται για ψύξη. Στα συστήματα καθαρισμού εφαρμόζονται διάφορες, δοκιμασμένες και ασφαλείς τεχνολογίες με σκοπό την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, των οξέων, των οξειδίων του αζώτου, των διοξινών και άλλων που περιέχονται στα καυσαέρια.

### 2.2.7.1 Είδη υπολλειμμάτων

Τα υπολλείμματα μπορούν να διακριθούν σε αυτά που προέκυψαν από τη διαδικασία της καύσης και σε αυτά που προέκυψαν από τα συστήματα επεξεργασίας των καυσαερίων. Τα δεύτερα μπορεί να είναι ιπτάμενη τέφρα ή/και προϊόντα αντίδρασης και πρόσθετα που δεν έχουν αντιδράσει κατά την επεξεργασία των καυσαερίων.

Τα υπολλείμματα που προκύπτουν από την καύση είναι:

- η τέφρα από τον πυθμένα της εστίας καύσης: περιέχει βαρέα μέταλλα, άλατα
- η τέφρα από τον λέβητα
- η ιπτάμενη τέφρα

Τα υπολλείμματα που προκύπτουν από το σύστημα επεξεργασίας καυσαερίων είναι:

- υπολλείμματα από υγρή και ημι-υγρή επεξεργασία καυσαερίων. Πρόκειται για μίγματα ασβεστίου ή/και αλάτων νατρίου, κυρίως ως χλωριούχα και θειώδη/θειούχα άλατα και λιγότερο φθοριούχα καθώς και ιπτάμενη τέφρα που δεν απομακρύνθηκε σε προηγούμενο στάδιο. Συνεπώς, μπορεί να εντοπιστούν και βαρέα μέταλλα και διοξίνες-φουράνια
- λάσπη από την φυσικοχημική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων
- γύψος
- άλατα από την εξάτμιση των υδατικών αποβλήτων
- υπολλείμματα από το φιλτράρισμα των λυμάτων

### 2.2.7.2 Επεξεργασία υπολλειμμάτων από την καύση και την επεξεργασία των καυσαερίων

Όσον αφορά τα υπολλείμματα από την καύση, η μέθοδος επεξεργασίας τους έχει σκοπό την βελτίωση των παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα της παραγόμενης τέφρας ώστε να μιμηθεί την ποιότητα πρωτογενών υλικών κατασκευής καθώς, λόγω της υψηλής τους περιεκτικότητας σε ανόργανα στοιχεία, καθιστώνται κατάλληλα για χρήση ως οδικά ή κατασκευαστικά υλικά. Λόγω του μεγάλου όγκου παραγωγής τους και της χαμηλής επικινδυνότητάς τους, ανακύκλωση εφαρμόζεται κυρίως για την επεξεργασία της τέφρας πυθμένα από ΑΣΑ.

Τα πρωτογενή μέτρα που λαμβάνονται για τον έλεγχο εκροής των υπολλειμμάτων

Τα πρωτογενή μέτρα που λαμβάνονται για τον έλεγχο εκροής των υπολλειμμάτων περιλαμβάνουν βλετιστοποίηση του ελέγχου της διεργασίας της καύσης έτσι ώστε:

- να εγγυάται την τέλεια καύση των ενώσεων άνθρακα
- να ενισχύσει την εξάτμιση των βαρέων μετάλλων, όπως Hg και Cd

Για την επεξεργασία των στερεών υπολλειμμάτων, ακολουθούνται οι παρακάτω τεχνικές:

- *Στερεοποίηση και χημική σταθεροποίηση.* Στόχος της στερεοποίησης είναι η κινητικότητα ορισμένων ρύπων. Το στερεοποιημένο υλικό πρέπει να πληροί κάποια κριτήρια όπως καμία χημική αντίδραση με το νερό, μηχανική, χημική και βιοχημική σταθερότητα, καμία μόλυνση σε περίπτωση διάβρωσης
- *Διαχωρισμός μετάλλων.* Στόχος είναι η απομάκρυνση των σιδηρούχων μετάλλων, πράγμα που επιτυγχάνεται με τη χρήση μαγνητικών διαχωριστών
- *Διεργασίες έκπλυσης.* Στόχος είναι η απομάκρυνση των ευδιάλυτων ρύπων, όπως τα χλωριούχα, τα θειϊκά άλατα και τα βαρέα μέταλλα και γίνεται σε δύο στάδια. Αρχικά, η τέφρα αναμιγνύεται στο νερό, επιτυγχάνοντας pH 9-12 και τα στερεά διαχωρίζονται από το διάλυμα με φίλτρο υπό κενό. Έπειτα, τα ευδιάλυτα βαρέα μέταλλα απομακρύνονται με χρήση του οξέος νερού έκπλυσης που βγαίνει από την πλυντρίδα επεξεργασίας καυσαερίων. Το νερό αυτό καθαρίζεται περαιτέρω στα συστήματα επεξεργασίας των υδατικών αποβλήτων και η «ξεπλυμένη» τέφρα υφίσταται, έπειτα, θερμική επεξεργασία
- *Θερμική επεξεργασία.* Στόχος είναι η μείωση του όγκου των υπολλειμμάτων και του περιεχομένου σε οργανικές ενώσεις και βαρέα μέταλλα. Υπάρχουν τρεις τρόποι θερμικής επεξεργασίας, η διαφορά των οποίων έγκειται στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος: υαλοποίηση, τήξη, συσσωμάτωση. Ανεξαρτήτως διαδικασίας, το αποτέλεσμα είναι ένα πιο ομογενές και υλικό

### 3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

#### 3.1 Ηλιακή ακτινοβολία

##### 3.1.1 Γενικά

Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του ήλιου υπολογίζεται ότι είναι περίπου 6000 °K. Η τεράστια αυτή θερμοκρασία ηλιακής ακτινοβολίας εκπέμπει στη γη με μέγιστη πυκνότητα ροής περίπου 1,0 kW/m<sup>2</sup> και με μήκος κύματος μεταξύ 0,3 και 2,5 μm. Αυτή είναι η λεγόμενη μικρή ακτινοβολία κυμάτων.

Από την άλλη πλευρά, η θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα της Γης είναι περίπου 230 °K κατά μέσο όρο και στην επιφάνεια της Γης είναι περίπου 260-300 °K, η οποία παραμένει σε κατάσταση ισορροπίας εξαιτίας της εισερχόμενης ακτινοβολίας που αντανακλά πίσω στο διάστημα. Αυτή η εξερχόμενη ακτινοβολία εμφανίζεται σε ένα μήκος κύματος υπέρυθρης ζώνης συχνοτήτων μεταξύ 5 και 25 μm, το οποίο ονομάζεται μεγάλη ακτινοβολία κυμάτων.

Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στη Γη είναι 5,4 εκατ. exajoules (10<sup>18</sup> joules). 30% αυτής της ακτινοβολίας αντανακλάται πίσω από την ατμόσφαιρα και το υπόλοιπο 70% μπορεί να μετατραπεί σε διάφορες μορφές ενέργειας. Αυτό το 70% (3,8 exajoules) είναι 10.000 φορές το ποσοστό της κατανάλωσης των ορυκτών και πυρηνικών καυσίμων για το 2002.

Η συνολική ενέργεια στη μονάδα του χρόνου (ισχύς) που προέρχεται από μια πηγή ακτινοβολίας και προσπίπτει σε μια μοναδιαία επιφάνεια, αποτελεί την πυκνότητα ισχύος (*Irradiance*) ή ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μετράται σε W/m<sup>2</sup>. Συμβολίζεται γενικά με το γράμμα *G*. Η τιμή της σε ορισμένη ώρα και σημείο στην επιφάνεια της γης εξαρτάται έντονα από την θέση του ήλιου στον ουρανό, αλλά και τις μετεωρολογικές συνθήκες.

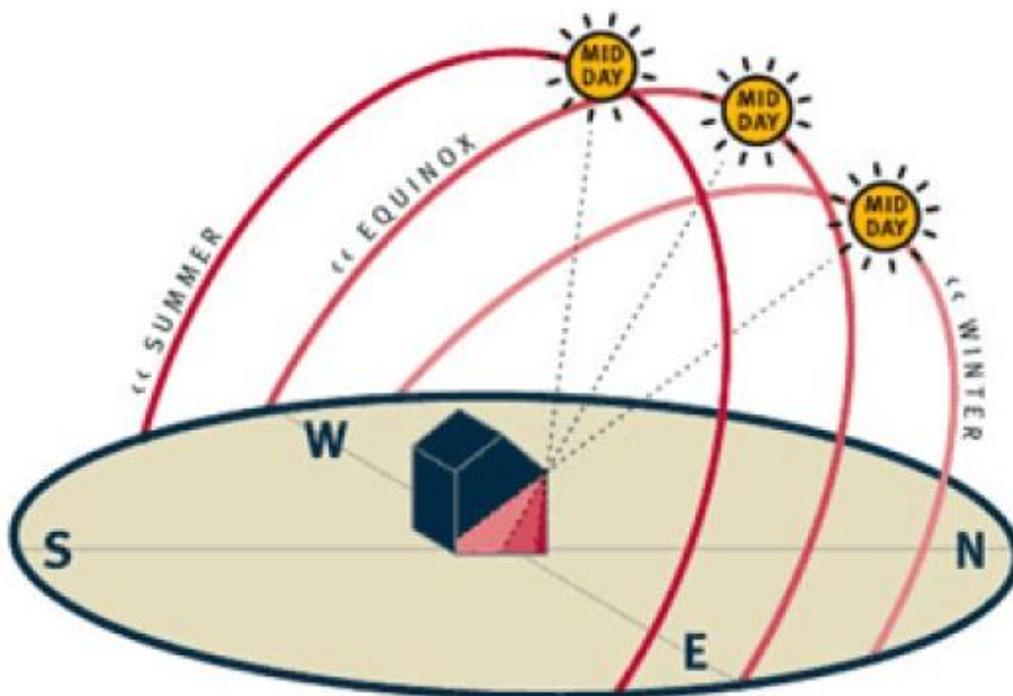
Η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στο διάστημα κυμαίνεται σε μικρά όρια περί μέση τιμή:  $G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$ , και ονομάζεται ηλιακή σταθερά.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, η οποία εξαρτάται από την κίνηση της γης περί τον ήλιο, μπορεί να υπολογίζεται με ακρίβεια, με βάση γεωμετρικές σχέσεις. Αντίθετα η μείωση που υφίσταται αυτή, κατά την διαδρομή της στην ατμόσφαιρα, εξαρτάται από την κατάστασή της και αποτελεί στατιστικό μέγεθος.

### 3.1.2 Ηλιακή Γεωμετρία

Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει τεράστιες διαφορές και είναι σε αναλογία με το χρόνο, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες, την υγρασία, κλπ. Επιπλέον, επηρεάζεται σημαντικά και από άλλους παράγοντες όπως η ρύπανση του περιβάλλοντος και τις ηλιακές κηλίδες.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η τοποθεσία που λαμβάνει την ακτινοβολία. Κατά την διάρκεια ενός έτους, λόγω της περιφοράς της γης γύρο από τον ήλιο, η τοποθεσία λαμβάνει διάφορες θέσεις και έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της απόκλισης  $\delta^\circ$ , η οποία είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της γραμμής που αρχίζει από το κέντρο της γης μέχρι το κέντρο του ήλιου και τον Ισημερινό. Οι ακραίες τιμές για το Βόρειο ημισφαίριο είναι  $+23,45^\circ$  στις 21 Ιουνίου και  $-23,45^\circ$  στις 21 Δεκεμβρίου.



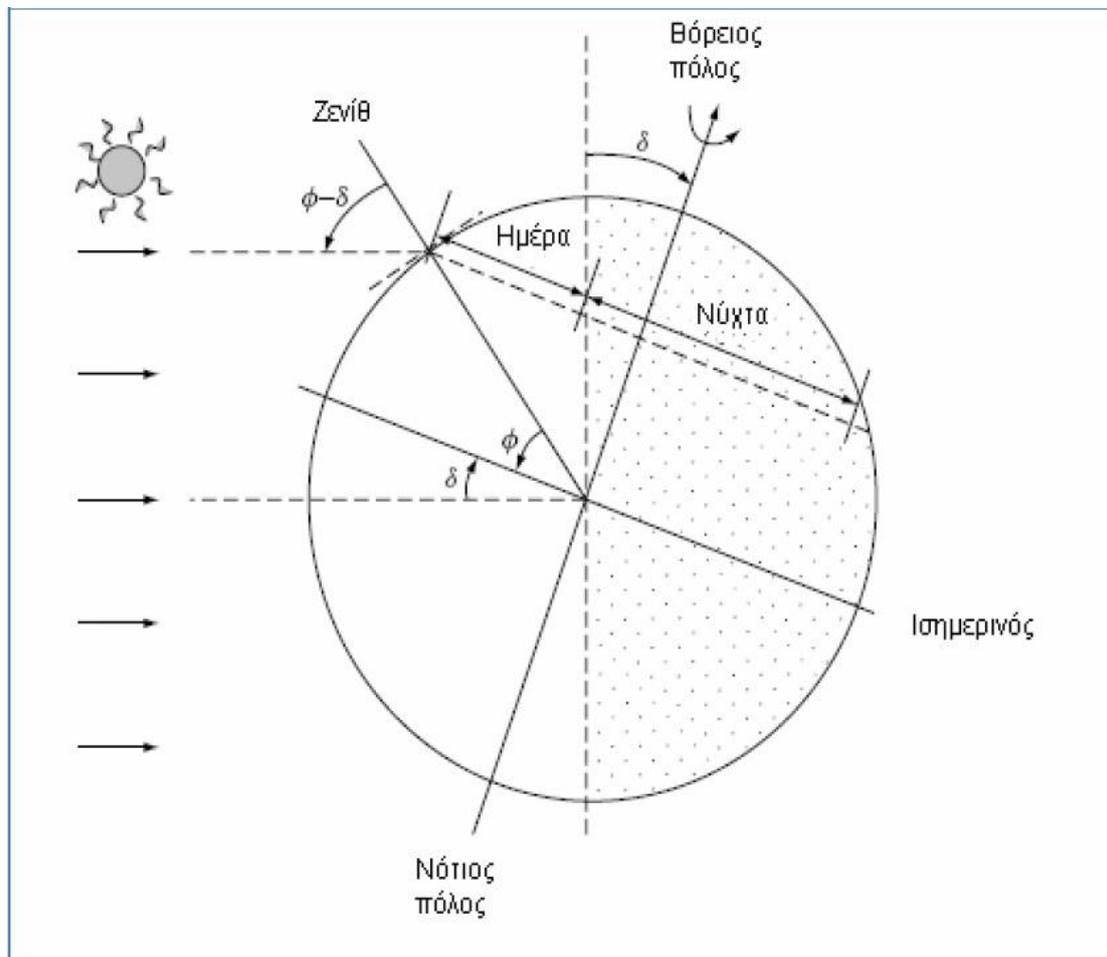
Εικόνα 3.1: Η τοποθεσία σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία

Η κλίση ενός θερμικού συστήματος ή μίας παράταξης Φ/Β πρέπει να είναι εντός αυτών των ορίων και ο καλύτερος προσανατολισμός για τα συστήματα αυτά είναι ο Νότιος (Βόρειο ημισφαίριο). Η βέλτιστη γωνία κλίσης για τα συστήματα αυτά, ανά πάσα στιγμή μπορεί να βρεθεί από τις εξισώσεις 3.1 και 3.2:

$$(\text{Γωνία κλίσης}) \beta^\circ = (\text{Γεωγραφικό πλάτος}) \varphi^\circ - (\text{Γωνία Απόκλισης}) \delta^\circ [3.1]$$

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) [3.2]$$

όπου  $n$  είναι η ημέρα του έτους που μας ενδιαφέρει. Οι γωνίες βόρεια του ισημερινού θεωρούνται θετικές και αυτές νότια αρνητικές.



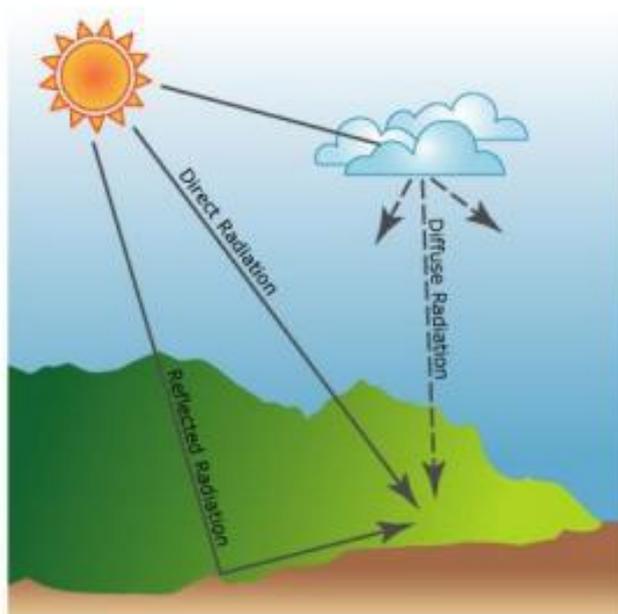
Εικόνα 3.2: Η βέλτιστη γωνία κλίσης

### 3.1.3 Άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία

Η συνολική ακτινοβολία (*global radiation*) που προσπίπτει σε μια επιφάνεια απαρτίζεται από τρία μέρη:

- Την *άμεση*  $I_b$  (direct ή beam radiation) που έρχεται κατευθείαν από τον ήλιο,
- Την *διάχυτη*  $I_d$  (diffuse radiation) που προέρχεται από ολόκληρο τον ουράνιο θόλο και γεννάται κατά τη σκέδαση της άμεσης ακτινοβολίας και
- Την *ανακλώμενη*  $I_r$  (reflected radiation) που προέρχεται από διάφορες γειτονικές επιφάνειες όταν η επιφάνεια αναφοράς είναι κοντά σε κτίρια, υψώματα ή δεν είναι οριζόντια οπότε δέχεται ακτινοβολία από το έδαφος

Σχηματικά:



Εικόνα 3.3: Τρόποι άφιξης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης

Επομένως η συνολική ακτινοβολία είναι:  $I = I_b + I_d + I_r$

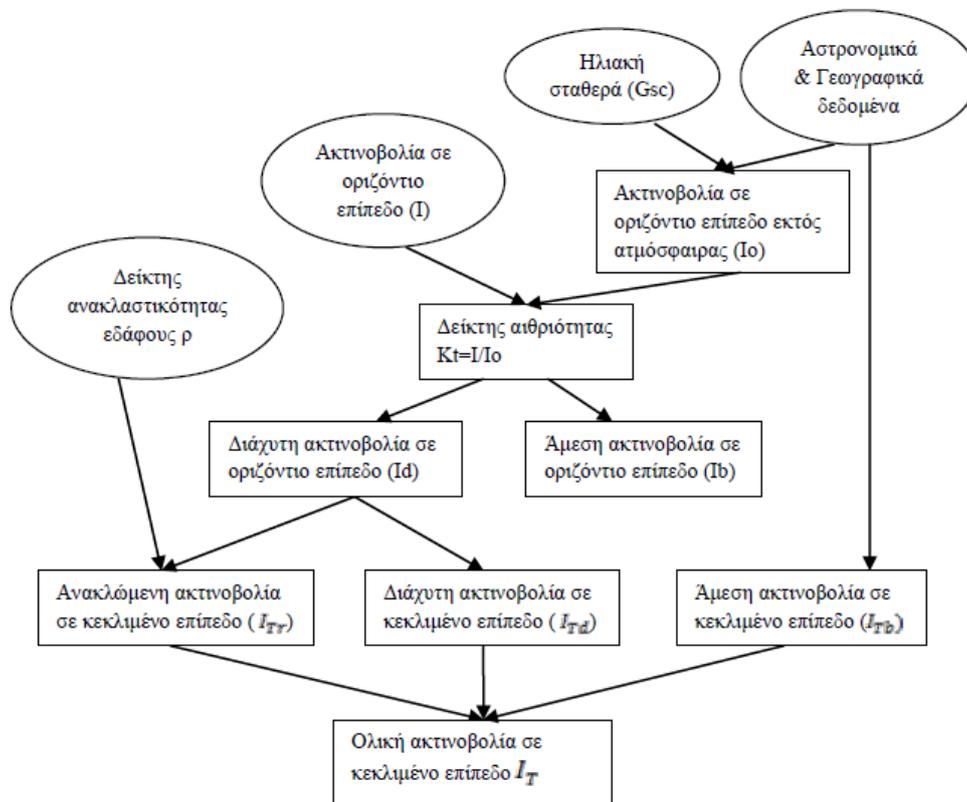
*Άμεση* είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο, έχει ορισμένη κατεύθυνση για ορισμένο επίπεδο αναφοράς και ορισμένη χρονική στιγμή. Με καθαρό ουρανό αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στο επίπεδο αναφοράς.

*Διάχυτη* είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από όλο τον υπόλοιπο ουράνιο θόλο, εκτός του ήλιου, λόγω κάλυψης της ατμόσφαιρας από σύννεφα, υδρατμούς, σκόνη. Για το επίπεδο αναφοράς, δεν έχει ορισμένη κατεύθυνση όπως η άμεση ακτινοβολία, αλλά προέρχεται από όλα τα σημεία του ουρανού.

Η *ανακλώμενη* ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στο επίπεδο αναφοράς μετά από ανάκλαση σε φυσικές ή τεχνικές επιφάνειες, που υπάρχουν στον περιβάλλοντα χώρο. Έτσι η γνώση της απαιτεί κάθε φορά καλή γνώση της τοπογραφίας του χώρου και του δείκτη ανακλαστικότητας των επιφανειών, που ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία. Οι Liu και Jordan δέχονται ως δείκτη ανακλαστικότητας του εδάφους  $p=0,2$  ενώ της επιφάνειας που είναι στρωμένη με χιόνι  $0,7$ .

### 3.1.4 Ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας δίνονται με τη μορφή της ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Ωστόσο, όλα τα ΦΒ και ηλιακά πάνελ είναι συνήθως σε κεκλιμένο επίπεδο, εξ ου και η ακτινοβολία που λαμβάνουν είναι διαφορετική. Επιπλέον, η σωστή ηλιακή ακτινοβολία για την κεκλιμένη θέση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Ως εκ τούτου, η ορθή ηλιακή ακτινοβολία πρέπει να υπολογιστεί. Η ακόλουθη προσέγγιση για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο είναι ένας συνδυασμός των εργασιών της Duffie και Beckman, Lorenzo και Markvart.



Εικόνα 3.4: Ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη για κάθε μία από τις συνιστώσες και ένας διορθωτικός συντελεστής.

Ο διορθωτικός συντελεστής για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία ( $R_b$ ), είναι ο λόγος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο ( $I_{b,T}$ ), προς αυτήν στο οριζόντιο επίπεδο ( $I_b$ ).

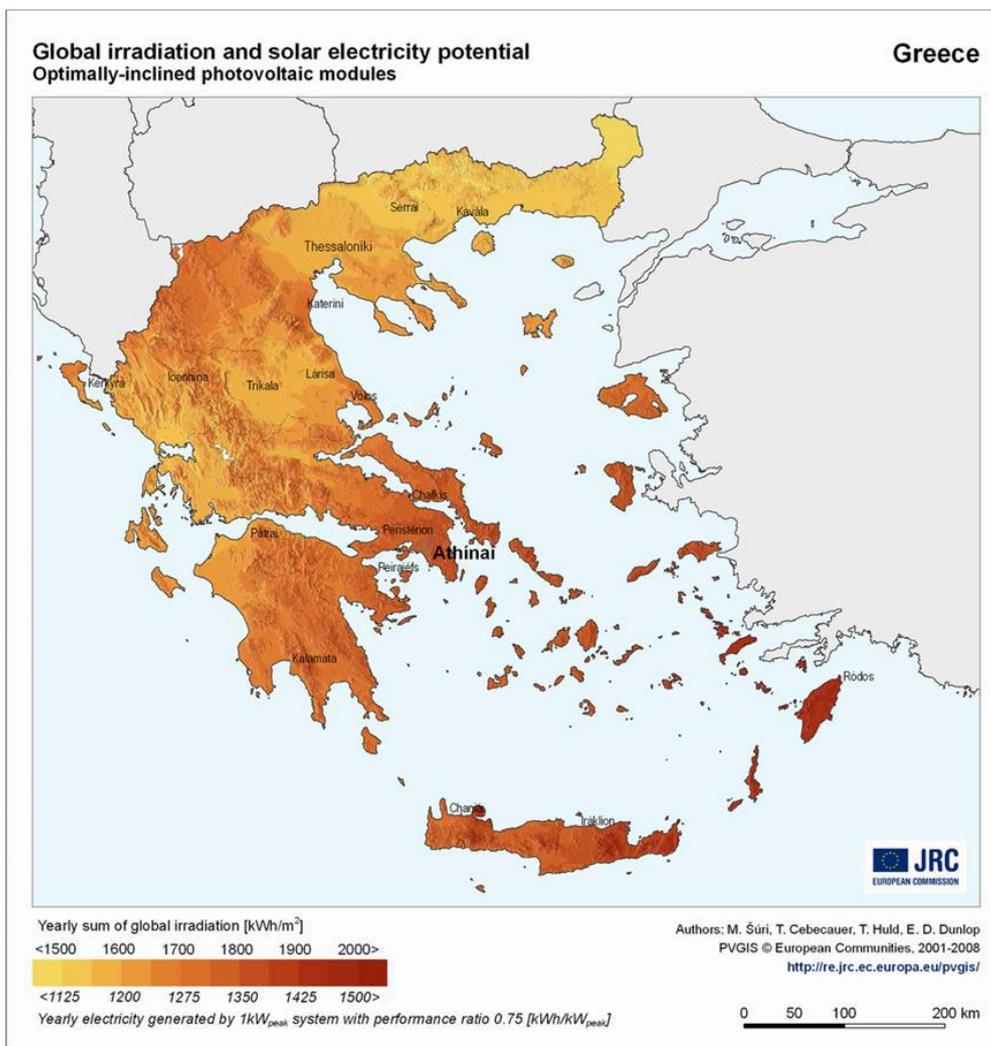
Ο υπολογισμός της συνιστώσας για την διάχυτη ακτινοβολία βασίζεται στην υπόθεση ότι η διάχυτη είναι ισοτροπική, δηλαδή είναι ομοιόμορφα κατανομημένη απ' τον ουράνιο θόλο. Ο διορθωτικός συντελεστής για την διάχυτη ακτινοβολία ( $R_d$ ) είναι ο λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο ( $I_{d,T}$ ) προς αυτήν στο οριζόντιο ( $I_d$ ).

Ο διορθωτικός συντελεστής για την ανακλώμενη ακτινοβολία ( $R_r$ ), είναι ο λόγος της ανακλώμενης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο ( $I_{r,T}$ ), προς αυτήν στο οριζόντιο ( $I_r$ ). Η ανακλώμενη όμως στο οριζόντιο επίπεδο είναι το γινόμενο του συντελεστή ανάκλασης  $\rho$  του εδάφους της γύρω περιοχής επί την ολική ηλιακή ακτινοβολία ( $I$ ) στο οριζόντιο. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και εδώ, υποθέτουμε ότι η ανακλώμενη είναι ισοτροπική.

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο  $I_T$ , είναι :

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + I_r \cdot R_r$$

### 3.1.5 Στατιστικά στοιχεία για τον Ελλαδικό χώρο



Εικόνα 3.5: Ετήσια ποσά ηλιακής ακτινοβολίας στον Ελλαδικό χώρο εκφρασμένα σε  $W/m^2$

Τα παραπάνω διαγράμματα αφορούσαν Φ/Β συστήματα με βέλτιστη κλίση. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πόσο επηρεάζει η κλίση των πλαισίων την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, με προϋπόθεση νότιου προσανατολισμού.

	<b>0°</b>	<b>30°</b>	<b>45°</b>	<b>60°</b>	<b>90°</b>
<b>ΑΘΗΝΑ</b>	1581	1730	1680	1549	1090
<b>ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ</b>	1403	1544	1505	1395	1000
<b>ΚΟΡΙΝΘΟΣ</b>	1526	1666	1617	1490	1050
<b>ΠΑΡΟΣ</b>	1629	1751	1685	1538	1058
<b>ΠΑΤΡΑ</b>	1479	1611	1563	1441	1018
<b>ΧΑΝΙΑ</b>	1630	1738	1667	1517	1033

Εικόνα 3.6: Συνολική ετήσια ακτινοβολία

## 3.2 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

### 3.2.1 Γενικά

Ο όρος «φωτοβολταϊκά» προέρχεται από το συνδυασμό της ελληνικής λέξης φως με τη λέξη Volt, το όνομα της μονάδας της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που πήρε το όνομά της από τον Ιταλό φυσικό Count Alessandro Volta.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Γάλλο Φυσικό Alexandre Edmond Becquerel το 1839, ο οποίος ανακάλυψε ότι μπορεί να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα όταν συγκεκριμένες κατασκευές εκτεθούν στο φως. Οι Αμερικάνοι Adams και Day το 1876 χρησιμοποιώντας έναν κρύσταλλο σεληνίου είχαν κάνει επίδειξη αυτού του φαινομένου. Η απόδοση σε αυτή την περίπτωση ήταν μόνο 1%.

Σήμερα τα φωτοβολταϊκά έχουν γίνει κομμάτι της καθημερινής μας ζωής. Η απόδοση τους κυμαίνεται από 10% ως 25% σε συγκεκριμένες συνθήκες αναφοράς. Οι αποδόσεις αυξάνονται αισθητά αν χρησιμοποιήσουμε σαν βάση αναφοράς το διάστημα. Ερευνητικές ομάδες σε εργαστηριακές συνθήκες έχουν πετύχει αποδόσεις άνω του 44%. Επίσης, υπό εξέλιξη μελέτη υπόσχεται απόδοση της τάξεως του 65% με χρήση της **τεχνολογίας κβαντικών σημείων**.

### 3.2.2 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιγράφεται ως η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων που συμβαίνει σε συγκεκριμένα υλικά όταν αυτά

εκτεθούν σε φωτεινή ακτινοβολία. Κάτι τέτοιο παρατηρείται στα φυσικά στοιχεία που ανήκουν στην ομάδα των ημιαγωγών καθώς και στις τεχνητές ημιαγώγιμες διατάξεις. Η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων μεταφράζεται ως δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δημιουργούμενων πόλων, δηλαδή έχουμε μια υποτυπώδη ηλεκτρική γεννήτρια.

Φέρνοντας σε επαφή τους ημιαγωγούς τύπου  $n$  και  $p$  σχηματίζεται ηλεκτρικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου  $n$  κινούνται προς τις κενές θέσεις του ημιαγωγού τύπου  $p$  για να τις καλύψουν. Στην ένωση των δύο υλικών επιτυγχάνεται ισορροπία και δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις δύο πλευρές. Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο  $p$  στο  $n$  αλλά όχι αντίστροφα. Όταν φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, κατάλληλου μήκους κύματος, προσπίπτουν σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο διεγείρουν ηλεκτρόνια και τα ελευθερώνουν δημιουργώντας παράλληλα αντίστοιχες οπές. Κάθε φωτόνιο με αρκετή ενέργεια θα ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο και θα δημιουργήσει μια οπή. Αν αυτό συμβεί κοντά στο ηλεκτρικό πεδίο ή αν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή βρεθούν κοντά στην ένωση  $p$ - $n$  ημιαγωγών, το πεδίο θα εξαναγκάσει το ηλεκτρόνιο να πάει στον ημιαγωγό  $n$  και θα οδηγήσει την οπή στο πυρίτιο  $p$ . Αυτό προκαλεί μεγαλύτερη ανισορροπία στην ηλεκτρική ουδετερότητα και αν χρησιμοποιηθεί μία εξωτερική αγωγή οδός τα ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από αυτή για να πάνε στην αρχική τους θέση από όπου το ηλεκτρικό πεδίο τα απομάκρυνε. Η ροή αυτή των ηλεκτρονίων δημιουργεί το ρεύμα, και το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί την τάση του ρεύματος.

Φέρνοντας σε επαφή τους ημιαγωγούς τύπου  $n$  και  $p$  σχηματίζεται ηλεκτρικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου  $n$  κινούνται προς τις κενές θέσεις του ημιαγωγού τύπου  $p$  για να τις καλύψουν. Στην ένωση των δύο υλικών επιτυγχάνεται ισορροπία και δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις δύο πλευρές. Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο  $p$  στο  $n$  αλλά όχι αντίστροφα. Όταν φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, κατάλληλου μήκους κύματος, προσπίπτουν σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο διεγείρουν ηλεκτρόνια και τα ελευθερώνουν δημιουργώντας παράλληλα αντίστοιχες οπές. Κάθε φωτόνιο με αρκετή ενέργεια θα ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο και θα δημιουργήσει μια οπή. Αν αυτό συμβεί κοντά στο ηλεκτρικό πεδίο ή αν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή βρεθούν κοντά στην ένωση  $p$ - $n$  ημιαγωγών, το πεδίο θα εξαναγκάσει το ηλεκτρόνιο να πάει στον ημιαγωγό  $n$  και θα οδηγήσει την οπή στο πυρίτιο  $p$ . Αυτό προκαλεί μεγαλύτερη ανισορροπία στην ηλεκτρική ουδετερότητα και αν χρησιμοποιηθεί μία εξωτερική αγωγή οδός τα

ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από αυτή για να πάνε στην αρχική τους θέση από όπου το ηλεκτρικό πεδίο τα απομάκρυνε. Η ροή αυτή των ηλεκτρονίων δημιουργεί το ρεύμα, και το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί την τάση του ρεύματος.

Θα μπορούσαμε να παρομοιάσουμε την φωτοβολταϊκή ηλεκτρική γεννήτρια σαν μια ανεπίστροφη βαλβίδα ηλεκτρονίων, δια της οποίας τα ηλεκτρόνια μπορούν να διέρχονται μόνο προς την μια κατεύθυνση. Όταν λοιπόν συμβεί κάποιο φωτόνιο να προσκρούσει πάνω σε ηλεκτρόνιο του υλικού, τότε θα του μεταδώσει μέρος της ενέργειάς του, αναγκάζοντάς το να «εκσφενδονιστεί» από την θέση ηρεμίας του. Εάν τώρα, η κατεύθυνση που θα λάβει το «εκσφενδονισμένο» ηλεκτρόνιο συμπίσει με την φορά της βαλβίδας ηλεκτρονίων τότε αυτό θα μετατοπισθεί σε σχέση με την αρχική του θέση και θα παγιδευτεί εκεί αφού η βαλβίδα αποτρέπει την επαναφορά του στην αρχική θέση. Κατόπιν τούτου, διαπιστώνουμε ότι, σε μία «πλευρά» του υλικού (πλευρά παγίδευσης) θα έχουμε περίσσεια ενός ηλεκτρονίου ενώ στην άλλη πλευρά (πλευρά εκσφενδονισμού) θα έχουμε έλλειμμα ενός ηλεκτρονίου, που συνεπάγεται διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού.

### 3.2.3 Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών και η καρδιά κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνει μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση ακτινοβολίας που δέχονται, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει τάση μέχρι 0.5-1.0 Volt και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40 mA ανά  $\text{cm}^2$  της επιφάνειάς του. Το ηλιακό κύτταρο είναι σχετικά μικρό σε διαστάσεις, περίπου  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Η τάση που παράγει το Φ/Β μεταβάλλεται ελάχιστα με την ένταση της ακτινοβολίας, σε αντίθεση με το παραγόμενο ρεύμα, το οποίο είναι ανάλογο της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν αυξάνεται δηλαδή η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνεται και το ρεύμα που παράγεται από το Φ/Β κύτταρο.

Τα Φ/Β κύτταρα έχουν σκούρο χρώμα, γεγονός που βοηθά στην απορρόφηση μεγαλύτερων ποσοστών ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και στην αύξηση της θερμοκρασίας του. Η αύξηση της θερμοκρασίας όμως, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης που δημιουργείται στα άκρα

του Φ/Β κυττάρου, συγκεκριμένα πάνω από τους 25 °C για κάθε ένα παραπάνω βαθμό υπάρχει αντίστοιχη μείωση της απόδοσης κατά 0,4%.

Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθορίζεται με κυριότερο κριτήριο την τιμή του ενεργειακού διάκενου του η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου. Ως συντελεστής απόδοσης ή απλούστερα ως απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 6 περίπου 25% και μπορούν να πραγματοποιηθούν με φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1.5 eV.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι οι ημιαγωγοί είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραεδρική κρυσταλλική δομή όπως το πυρίτιο (Si). Στα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και δε διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά. Όταν όμως απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή. Η ενέργεια που παρέχεται στο σώμα και κατανέμεται στα άτομα του, προκαλεί την ελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια αυτά σθένους απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους στο κρυσταλλικό πλέγμα, χάρη στην κινητική ενέργεια που αποκτήσαν και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα.

### **3.2.4 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο**

Τα ηλιακά κελιά χρησιμοποιούνται σπάνια μόνα τους. Συνήθως, κελιά με τα ίδια χαρακτηριστικά συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους ώστε να προκύψει μεγαλύτερη ισχύς με τη μορφή ενός Φ/Β πλαισίου. Τα ηλιακά κελιά έχουν συνήθως τετράγωνο σχήμα πλευράς περίπου 10 εκατοστών. Ένα ηλιακό κελί παράγει πολύ μικρή ισχύ (συνήθως λιγότερο από 2W) και μπορεί να συνδεθεί με άλλα σε σειρά ή παράλληλα.

Η παράλληλη σύνδεση κελιών αυξάνει την ένταση του ρεύματος, η οποία ισούται με το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων, ενώ η τάση στα άκρα του συνδυασμού παραμένει η ίδια με την τάση του κάθε κελιού. Η παράλληλη σύνδεση κελιών δεν χρησιμοποιείται συνήθως, καθώς η μεγαλύτερη ένταση ρεύματος απαιτεί και μεγαλύτερες διατομές αγωγών,

ενώ και οι απώλειες αυξάνονται με τη μείωση της τάσης. Για τους λόγους αυτούς, η σύνδεση των κελιών γίνεται συνήθως σε σειρά.

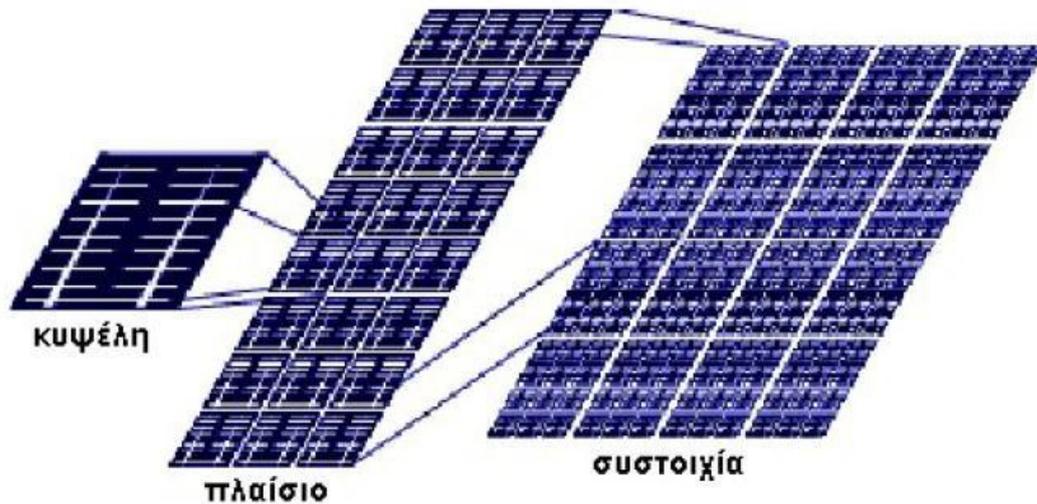
Η σύνδεση σε σειρά αυξάνει την τάση. Στη σύνδεση κελιών σε σειρά υπάρχει η ίδια ροή ρεύματος ανά κελί ενώ η τάση είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των κελιών.

Σε γενικές γραμμές, τα Φ/Β κελιά τοποθετούνται σε ένα ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πλαίσιο αυτό, τα κελιά συνδέονται σε σειρά, σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση επιθυμητής τάσης. Διαμορφώνεται έτσι το Φ/Β πλαίσιο, που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση Φ/Β γεννητριών.

Συνώνυμο σχεδόν με το Φ/Β πλαίσιο είναι το **Φ/Β πανέλο** (panel). Όπως και το πλαίσιο, έχει συναρμολογηθεί και προκατασκευαστεί και είναι έτοιμο για τοποθέτηση σε Φ/Β εγκατάσταση, αλλά με τη διαφορά ότι ένα πανέλο μπορεί να αποτελείται από περισσότερα χωριστά πλαίσια (το ένα δίπλα στο άλλο) που είναι σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. Τα τελευταία χρόνια σχεδόν όλες οι εταιρείες που κατασκευάζουν Φ/Β στοιχεία, δεν διαχωρίζουν τα πλαίσια από τα πανέλα. Το προϊόν που παράγεται ονομάζεται Φ/Β πλαίσιο (module) και διατίθεται σε ποικιλία, όσον αφορά στην ισχύ που παράγει, στην τάση και τελικά στις διαστάσεις του.

### 3.2.5 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία

Σε μια Φ/Β εγκατάσταση που έχει σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή λειτουργεί ως σταθμός παραγωγής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκατοντάδες ή και χιλιάδες Φ/Β πλαίσια. Όπως, είναι αναμενόμενο τα Φ/Β πλαίσια πρέπει να ομαδοποιηθούν και συνδεθούν κατάλληλα. Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός Φ/Β συστήματος, είναι σκόπιμο οι συνδέσεις των Φ/Β στοιχείων μέσα στα πλαίσια, αλλά και ανάμεσα στα πλαίσια να μην είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες. Με αυτό τον τρόπο, αν ένα Φ/Β σκιαστεί ή αν πάθει βλάβη δεν θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει το σύστημα. Η σύνδεση των πλαισίων στη σειρά ή παράλληλα γίνεται ώστε η ισχύς εξόδου της γεννήτριας να αποκτήσει την επιθυμητή τιμή



Εικόνα 3.7: Δομικά στοιχεία Φ/Β συστήματος

### 3.2.6 Είδη Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

Το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για να κατασκευαστούν φωτοβολταϊκά στοιχεία στην βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1,12 eV. Αν και οι δύο αυτές ιδιότητες του, δηλαδή έμμεσο και σχετικά μικρή τιμή ενεργειακού διακενου δεν είναι ιδεώδεις για την φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι ο ημιαγωγός που κυριάρχησε από την αρχή αλλά μέχρι και σήμερα, σαν υλικό κατασκευής Φ/Β στοιχείων.

Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι το πυρίτιο είναι το κύριο υλικό των διατάξεων ηλεκτρονικής για πολλές δεκαετίες κατά συνέπεια οι ιδιότητες του είναι καλά μελετημένες, το υλικό κυκλοφορεί στη αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες 600.000 τόνοι το χρόνο παγκοσμίως προκειμένου να κατασκευαστούν ατσάλι και κράματα . Μπορεί εύκολα να λιώσει και να μορφοποιηθεί. Ακόμα το υλικό κατασκευής του πυριτίου είναι πρακτικώς απεριόριστο, διότι το 60% του γήινου φλοιού είναι άμμος στο μεγαλύτερο μέρος του χαλαζίας ή διοξείδιο του πυριτίου. Είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό που υπάρχει στον πλανήτη μετά το οξυγόνο.

Παράλληλα, το πυρίτιο ως υλικό κατασκευής Φ/Β πλαισίων έχει δοκιμαστεί αρκετά χρόνια σε διάφορες εφαρμογές με αρκετά μεγάλη επιτυχία. Τέλος, Οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να διατηρηθούν μέχρι και στους **125°C** κάτι που επιτρέπει την χρήση του πυριτίου σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτός είναι και ο λόγος

που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου αντεπεξέρχονται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Τα Φ/Β στοιχεία πάντως μπορούν να χωριστούν σε πολλές μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό παρασκευής, τη δομή του βασικού υλικού καθώς και τον τρόπο παρασκευής. Μια κατηγοριοποίηση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα μπορούσε να γίνει με βάση το πάχος του υλικού που χρησιμοποιείται.

### Φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου μεγάλου πάχους

1. Φ/Β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si )



Εικόνα 3.8: Φωτοβολταϊκό κελί μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει μια ομοιόμορφη μοριακή δομή. Συγκρινόμενο με υλικά που δεν είναι σε μορφή κρυστάλλου, η υψηλή του ομοιομορφία έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης (δηλαδή την αναλογία της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από το ηλιακό στοιχείο προς την διαθέσιμη από την ηλιακή ακτινοβολία ισχύ). Η απόδοση των μονοκρυσταλλικών στοιχείων του εμπορίου κυμαίνεται από 14-18%. Εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 25%. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (**Czochralski**) και η μέθοδος FZ (**float zone**). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου.

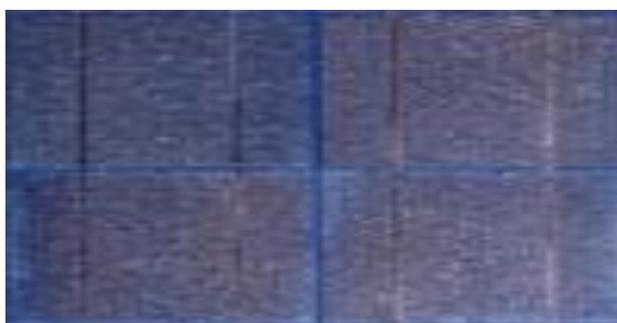
2. ΦΒ στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)



Εικόνα 3.9: Φωτοβολταϊκό κελί πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αποτελείται από περιοχές μονοκρυσταλλικού πυριτίου, αλλά δεν έχει την ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από τα στοιχεία που αποτελούνται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Ο βαθμός απόδοσης για μια βαθμίδα εμπορίου κυμαίνεται μεταξύ 12 και 15%. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20%. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου («χύτευση»), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά.

### 3. Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)



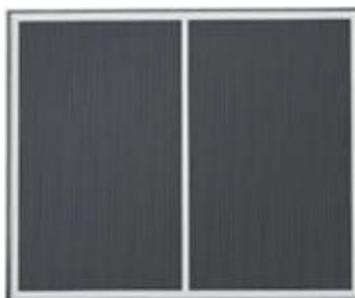
Εικόνα 3.10: Φωτοβολταϊκό κελί ταινίας πυριτίου

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου.

Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

### Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων (thin film)

#### 1. Κρυσταλλικό Πυρίτιο Λεπού Υμενίου (C-SiTFC)



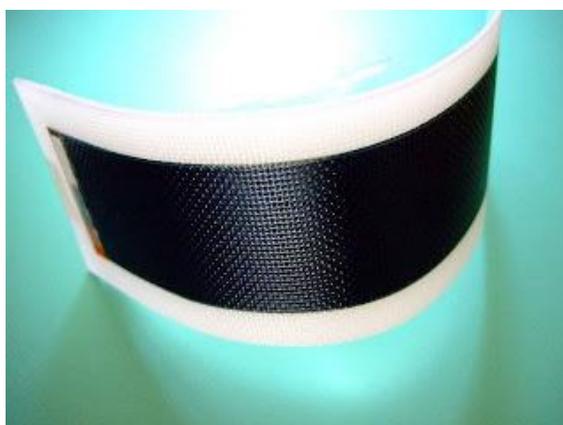
Εικόνα 3.11: Φωτοβολταϊκό κελί πυριτίου λεπού υμενίου

Οι πρώτες μελέτες σχετικά με λεπτότερο στρώμα πυριτίου έγιναν από τους M. Wolf και J.Lofersky στην προσπάθειά τους να βρουν τις ιδανικές παραμέτρους για υψηλή απόδοση του ηλιακού στοιχείου. Υπογράμμισαν ότι με τη μείωση του πάχους του ηλιακού στοιχείου η τάση ανοιχτοκυκλώσεως αυξάνεται εξαιτίας του περιορισμένου ρεύματος κόρου, το οποίο είναι πάλι αποτέλεσμα μειωμένου ενεργού όγκου της κυψέλης. Το ευρύ φάσμα τεχνολογικών πλεονεκτημάτων μαζί με τη δυναμική για μια εντυπωσιακή μείωση του κόστους παραγωγής τονίστηκαν επίσης και από τον Goetzberger.

Μετά από αυτές τις θεμελιώδεις έρευνες, χρειάστηκε λίγο παραπάνω από μια δεκαετία μέχρι ένας αυξημένος αριθμός ομάδων απομόνωσαν διάφορα τεχνολογικά προβλήματα και συνειδητοποίησαν ότι οι κυψέλες c-Si TFC μπορούν να τα λύσουν. Στις μέρες μας η κινητήριος δύναμη για την ανάπτυξη κυψελών κρυσταλλικού πυριτίου λεπτού υμενίου είναι η έμφυτη πιθανότητα για μείωση του κόστους παραγωγής των κυψελών, αν και αυτό το πλεονέκτημα δεν έχει πείσει ακόμα τις εταιρείες παραγωγής ηλιακών στοιχείων να το περάσουν στην γραμμή παραγωγής τους.

Παρόλο που το υπόστρωμα των c-SiTFC έχει πάχος μερικών μόνο  $\mu\text{m}$  (5 μέχρι 50 $\mu\text{m}$ ), έχει αποδειχθεί θεωρητικά, αλλά και στην πράξη ότι εμφανίζει αξιόλογη απόδοση. Το υπόστρωμα αποτελείται είτε από χαμηλής ποιότητας πυρίτιο είτε από άλλα υποστρώματα όπως γυαλί, κεραμικά ή γραφίτης, κάτι το οποίο κατεβάζει και το κόστος παραγωγής τους. Η επιλογή του υλικού του υποστρώματος καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην κυψέλη. Το κλειδί στην τεχνολογία είναι ο έξυπνος οπτικός σχεδιασμός, με αποτέλεσμα το φως μέσω ανακλάσεων να διαγράφει τελικά διαδρομή 30 φορές ή και περισσότερο, μεγαλύτερη από το πάχος του φιλμ. Υπάρχει εκτεταμένη έρευνα όσον αφορά το c-SiTFC που έχει αναδείξει την υψηλή απόδοση που μπορεί να πετύχει (μέχρι 21% κάτω από ιδανικές συνθήκες).

## 2. Αμορφο πυρίτιο (a-Si)



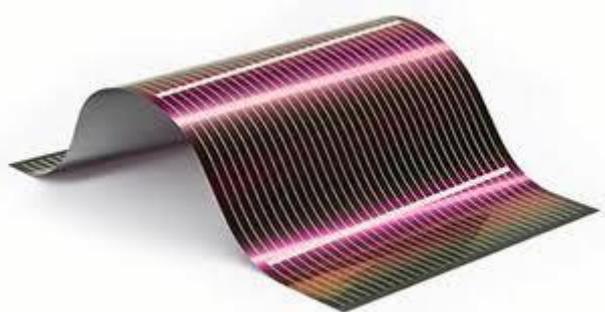
Εικόνα 3.12: Φωτοβολταϊκό κελί άμορφου πυριτίου

Το άμορφο πυρίτιο χρησιμοποιείται για την παραγωγή Φ/Β στοιχείων σύμφωνα με την τεχνολογία λεπτού φιλμ. Ως υλικό εμφανίζει μεγάλη αταξία στη δομή του και δεν έχει κρυσταλλική μορφή παρά ταύτα βρίσκει εφαρμογή στη Φ/Β τεχνολογία με τη μορφή κράματος με υδρογόνο. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Το κύριο πλεονέκτημα του είναι ότι έχει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και μάλιστα περίπου 40 φορές υψηλότερη από αυτή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Ως προς αυτή την ιδιότητά του το a-Si συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διάκενου, για αυτό μια λεπτή επίστρωση είναι αρκετή για την κατασκευή Φ/Β στοιχείων.

Η κατασκευαστική διαδικασία απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες και επομένως λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά Φ/Β, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία Έτσι το συνολικό κόστος του υλικού και του κόστους κατασκευής είναι χαμηλότερο ανά μονάδα επιφάνειας, συγκρινόμενο με τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου.

Τρία είναι τα κυριότερα μειονεκτήματά του. Ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ 6–9 % για στοιχεία του εμπορίου και φτάνει το 13% για στοιχεία που έχουν φτιαχτεί στο εργαστήριο και η βαθμιαία μείωση του βαθμού απόδοσης. Υπάρχουν αμφιβολίες αναφορικά με τη διάρκεια ζωής τους καθώς μέσα σε μερικούς μήνες μπορεί η απόδοση να μειωθεί αισθητά. Τέλος, έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν **διπλάσια επιφάνεια** σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

### 3. Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)



Εικόνα 3.13: Φωτοβολταϊκό κελί δισεληνοϊνδιούχου χαλκού

Το υλικό του δισηληνιούχου ινδιούχου χαλκού είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό, το οποίο μπορεί να είναι τύπου-n ή τύπου-p και έχει μια άμεση οπτική απορρόφηση με τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης που έχει μετρηθεί μέχρι σήμερα. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του CIS εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον λόγο χαλκού/ινδίου.

Σήμερα έχουν φτιαχτεί στοιχεία CIS, η απόδοση των οποίων πλησιάζει το 10%. Πλεονεκτούν σε σχέση με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου, καθώς δεν εμφανίζουν βαθμιαία πτώση της απόδοσης για μια περίοδο μερικών ετών. Επίσης προσφέρουν μεγάλη οικονομία σε ημιαγώγιμα υλικά. Από την άλλη όμως το CIS είναι ένα πολύπλοκο υλικό που δυσκολεύει την κατασκευή του. Τέλος, πολύ σημαντική είναι η ασφάλεια του προσωπικού κατά τη διάρκεια της κατασκευής του, αφού η παραγωγή του περιλαμβάνει το σεληνιούχο υδρογόνο, ένα εξαιρετικά τοξικό αέριο. Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

#### 4. Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)



Εικόνα 3.14: Φωτοβολταϊκό κελί αρσενικούχου γάλλιου

Το αρσενικούχο γάλλιο είναι ένας ημιαγωγός με ενεργειακό διάκενο 1,43 eV, τιμή η οποία είναι στη βέλτιστη περιοχή για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας με θεωρητική απόδοση περίπου 25-30%. Ένα ακόμη πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι το ενεργειακό διάκενο είναι άμεσο. Επομένως το GaAs συνδυάζει καταρχήν ιδανικά τις προϋποθέσεις για να χρησιμοποιηθεί ως υλικό κατασκευής ηλιακών Φ/Β στοιχείων.

Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές **ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων**. Το GaAs ως υλικό κατασκευής Φ/Β στοιχείων συναντάται συχνά σε διαστημικές εφαρμογές, αφού αντέχει σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του.

Το μειονέκτημά του είναι το υψηλό κόστος παραγωγής, περίπου πενταπλάσιο από αυτό του κρυσταλλικού πυριτίου. Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσενικό δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες.



**Εικόνα 3.15:** Φωτοβολταϊκό κελί τελουριούχου κάδμιου

Το τελουριούχο κάδμιο είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό που αποτελείται από κάδμιο και τελλούριο, το οποίο έχει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και το ενεργειακό του διάκενο είναι πολύ κοντά στο ιδανικό. Αρκεί ένα όγκος πάχους ενός μικρόμετρου για να απορροφηθεί το 90 % του ηλιακού φάσματος.

Υπάρχουν μερικές χαμηλού κόστους τεχνικές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόθεση του CdTe και όλες αυτές, μπορούν, αφού υποστούν μια επεξεργασία μετά την απόθεση, να παράγουν υλικό υψηλής ποιότητας και αποδοτικά ηλιακά στοιχεία. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές κατασκευής τέτοιων στοιχείων η απόδοση των οποίων έχει φτάσει έως 13%. Μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο είναι ένα τοξικό υλικό και θα πρέπει να λαμβάνονται αυξημένα μέτρα προστασίας κατά την παραγωγή του. Επιπλέον, η χρήση του καδμίου επιβάλλει την αναγκαστική ανακύκλωση τους μετά το τέλος της ζωής τους. Ανασταλτικός παράγοντας είναι επίσης και η έλλειψη του μεταλλοειδούς τελούριου στη φύση.

## Υβριδικές Τεχνολογίες



**Εικόνα 3.16:** Φωτοβολταϊκό κελί υβριδικής τεχνολογίας

Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χρησιμοποιούν συνδυασμό των παραπάνω τεχνολογιών και αποτελούνται από στρώσεις υλικών διάφορων τεχνολογιών.

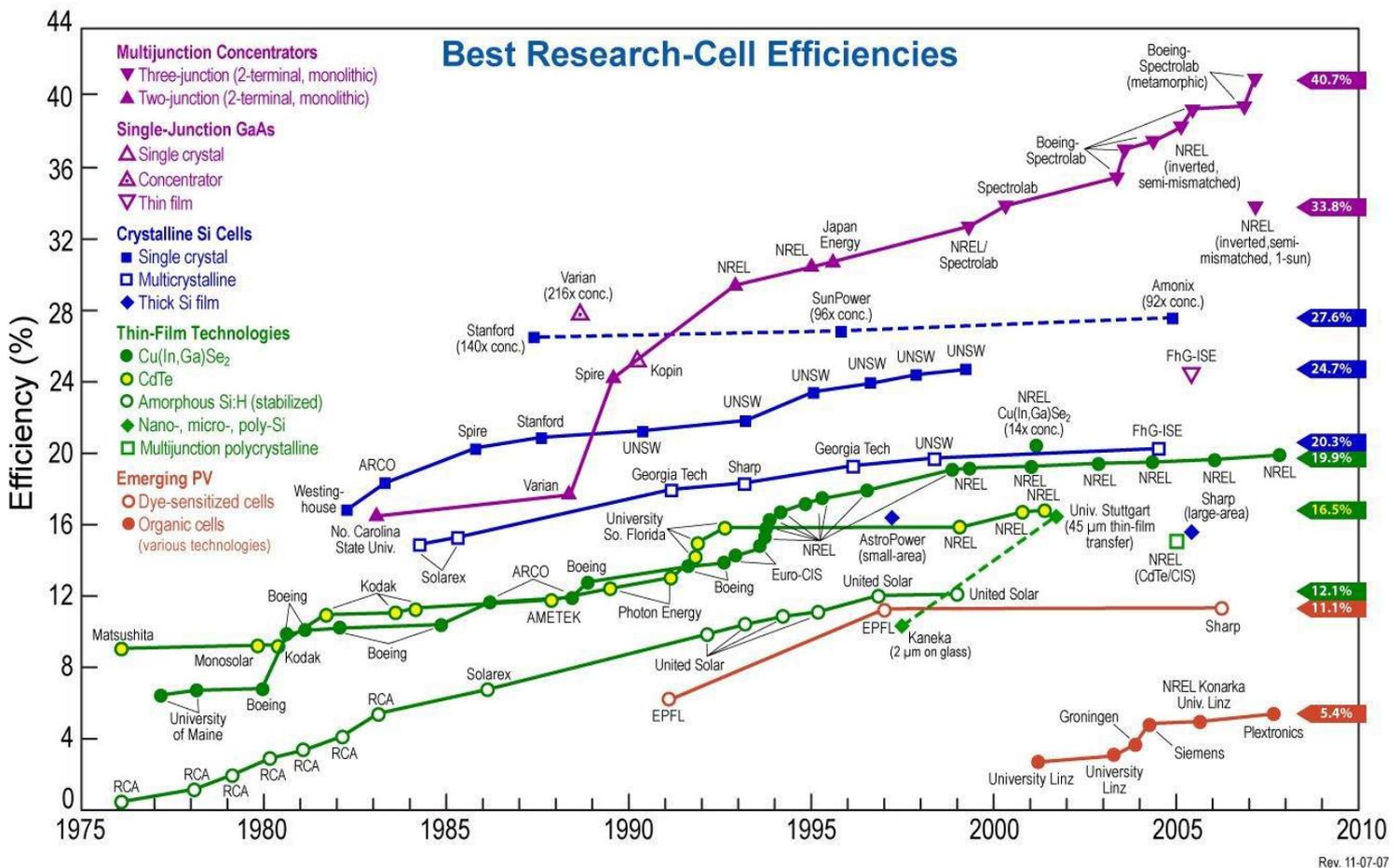
Η πιο γνωστή υβριδική τεχνολογία είναι η ετεροεπαφή με εσωτερικό λεπτό στρώμα ή Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer (HIT) η οποία αναπτύχθηκε από την εταιρία Sanyo Solar.

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι απαιτείται μικρότερη επιφάνεια για την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Σημαντικό πλεονέκτημα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία.

### Άλλες τεχνολογίες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι: τα νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si) και τα οργανικά/πολυμερή στοιχεία.

Όσον αφορά τα Φ/Β με οργανικά κελιά λειτουργούν με έναν λίγο διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες: αντί για ημιαγωγικές p-n επαφές, τα οργανικά κελιά χρησιμοποιούν οργανικά υλικά που λειτουργούν ως δότες και δέκτες ηλεκτρονίων. Το μεγάλο πλεονέκτημα χρήσης οργανικών υλικών είναι ότι επιτρέπουν την μεγάλης κλίμακας, χαμηλής θερμοκρασίας κατασκευή εύκαμπτων ηλιακών κελιών σε υποστρώματα πλαστικών. Η απόδοση των οργανικών κελιών είναι σήμερα της τάξης του 5-6%, ωστόσο η αύξηση της πρόκειται να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής ηλιακών κελιών.



Εικόνα 3.17: Αποδόσεις των διαφόρων τύπων Φ/Β

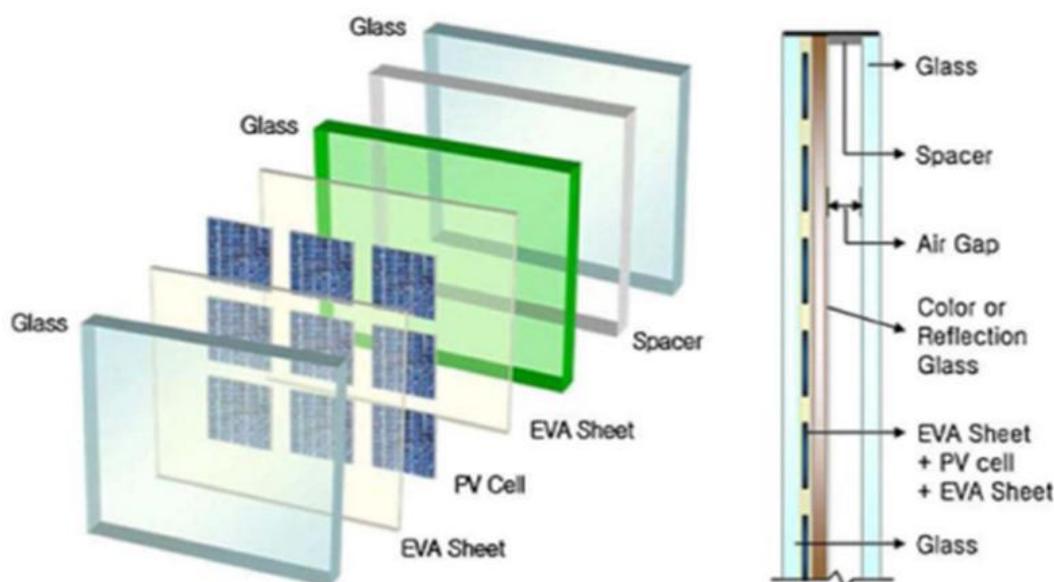
### 3.2.7 Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για να λειτουργήσει το πλαίσιο τα στοιχεία θα πρέπει να προστατεύονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι πλαισίων και εξαρτώνται από το είδος των φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς και την εφαρμογή τους. Το

φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από διάφορα στρώματα, τα οποία είναι:

- Ειδικό γυαλί
- Συμπυκνωμένο πολυμερές υλικό (Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Sheet) για την ενθυλάκωση των στοιχείων
- Ηλιακά στοιχεία
- Συμπυκνωμένο υλικό (EVA)
- Ειδικό γυαλί
- Κενό αέρος
- Ειδικό γυαλί

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περικλείονται συνήθως από δύο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικού, ενώ μερικές φορές εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, χρωματισμένα και αντανακλούν την θερμότητα. Το συμπυκνωμένο υλικό είναι συνήθως EVA, υλικό που εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 3.18: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμούς όπως προαναφέραμε παραπάνω προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε τάση και σε ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρέπει να είναι όμοια, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται επάνω σε περιστρεφόμενα στηρίγματα που ακολουθούν την τροχιά του ήλιου. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η

μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας άρα και τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

### 3.2.8 Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες φωτοβολταϊκών στοιχείων

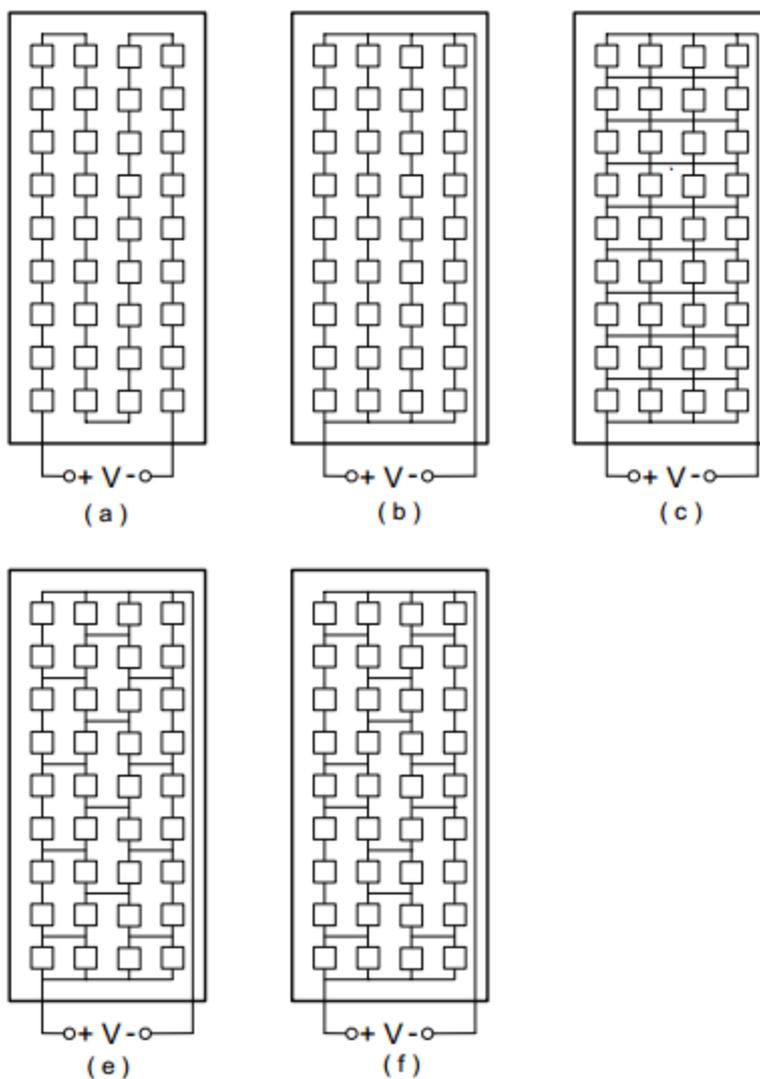
- Η όψη του φωτοβολταϊκού στοιχείου καλύπτεται από διαφανή ουσία (π.χ.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{MgF}_2$ ), η οποία χαρακτηρίζεται από δείκτη διάθλασης τέτοιο ώστε, για μια περιοχή μηκών κύματος, συνήθως γύρω στα 600nm, κοντά στο μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας (480nm), να ελαχιστοποιείται η ανακλώμενη συνιστώσα του φωτός (αντιανακλαστική επίστρωση)
- Το πάχος του φωτοβολταϊκού στοιχείου περιορίζεται στην ενεργό περιοχή του, στην οποία η απορροφώμενη Η/Μ ακτινοβολία προκαλεί το Φ/Β φαινόμενο. Αυτή είναι η περιοχή απογύμνωσης αυξημένη κατά το άθροισμα των μηκών διάχυσης κατά Debye, για τα ηλεκτρόνια και τις οπές, στα τμήματα που αποτελούν φορείς μειονότητας
- Τα μεταλλικά ηλεκτρόδια συλλογής των φορέων, πρέπει να βρίσκονται κοντά στην ενεργό περιοχή. Το πίσω ηλεκτρόδιο καλύπτει όλη την έκταση του Φ/Β και συνήθως αποτελείται, για λόγους κόστους και βάρους της διάταξης, από λεπτό και σχετικά πυκνό μεταλλικό πλέγμα

### 3.2.9 Συνδέσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με πέντε διαφορετικούς τρόπους :

1. Σε μια απλή σειρά όπου συνδέουμε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μεταξύ τους σε σειρά
2. Σε απλές παράλληλες σειρές ( Series – Parallel, SP ) όπου συνδέουμε φωτοβολταϊκά στοιχεία μεταξύ τους σε σειρά και αυτή τη σειρά τη συνδέουμε παράλληλα με άλλες σειρές. Συνήθως κάθε σειρά αποτελείται από 9 στοιχεία και κάθε πλαίσιο από 4 σειρές
3. Σε διατάξεις αθροιστικές σταυρωτού δεσμού ( Total – Crossed – Tied, TCT), που προκύπτει από την SP διάταξη συνδέοντας τα ηλεκτρικά συστήματα σταυρωτά σε κάθε σειρά του σημείου συνάντησης
4. Σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης (bridge – linked) στην οποία όλα τα στοιχεία αλληλοσυνδέονται με γεφυρωτή σύνδεση).
5. Σε διάταξη κυψέλης (honeycomb)

Η παράλληλη σύνδεση κελιών δεν χρησιμοποιείται συνήθως καθώς η μεγαλύτερη ένταση ρεύματος απαιτεί και μεγαλύτερες διατομές αγωγών, ενώ και οι απώλειες αυξάνονται με τη μείωση της τάσης. Για τους παραπάνω λόγους, η σύνδεση των κελιών γίνεται συνήθως εν σειρά.



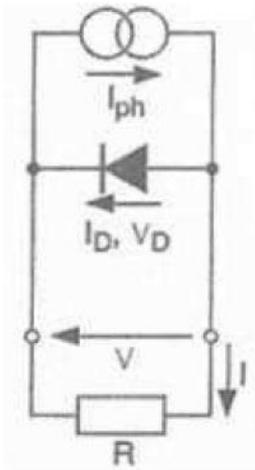
**Εικόνα 3.19:** Συνδεσμολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων (α) σε σειρά (β) σε παράλληλες σειρές (c) σε διατάξεις αθροιστικές σταυρωτού δεσμού (ε) σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης (f) σε διάταξη κυψέλης

### 3.2.10 Ηλεκτρικές Ιδιότητες Φωτοβολταϊκών στοιχείων

#### 3.2.10.1 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα

Μία ηλιακή κυψέλη που αποτελείται από ημιαγώγιμο υλικό τύπου p και τύπου n είναι, στην πραγματικότητα, μίας μεγάλης κλίμακας δίοδος

πυριτίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρουσιάζουν παρόμοιες ηλεκτρικές ιδιότητες. Στην εικόνα 3.20 φαίνεται το απλοποιημένο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, το οποίο μας δίνει μια πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του:



Ανοικτό κύκλωμα	Κλειστό κύκλωμα
$I_{ph} = I_0 \cdot (e^{\frac{q \cdot V}{\gamma \cdot k \cdot T}})$	$I_L = I_{ph} - I_0 \cdot (e^{\frac{R_s \cdot I_L}{\gamma \cdot k \cdot T}} - 1)$
$V = V_{oc} \approx \frac{\gamma \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right)$	

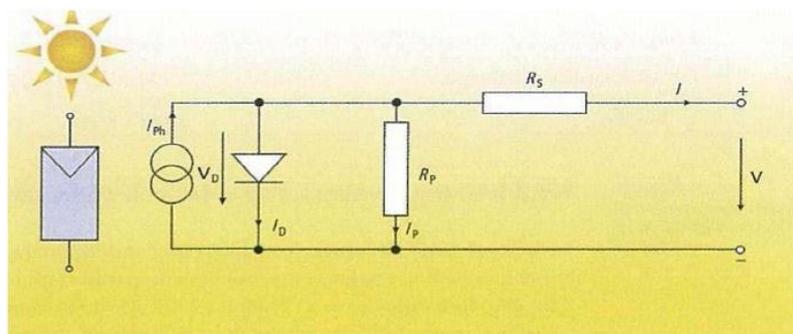
Όπου:  $I_0$  = αντίστροφο ρεύμα κόρου  
 $q = 1,6 \times 10^{-19}$  C, το φορτίο του ηλεκτρονίου  
 $T$  = η απόλυτη θερμοκρασία σε kelvin  
 $\gamma$  = ο συντελεστής ποιότητας διόδου  
 $k = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K, η σταθερά Boltzmann  
 $V$  = η τάση ανοικτού κυκλώματος

**Εικόνα 3.20:** Απλοποιημένο κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου.

Το μέγεθος  $\mu = \frac{\gamma k T}{q}$  ονομάζεται *θερμική τάση (V)*.

Στην οριακή περίπτωση που οι ακροδέκτες βραχυκυκλώνονται τότε το μέγιστο ρεύμα που κυκλοφορεί στο κύκλωμα είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , το οποίο μαζί με την τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}$  αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά του Φ/Β στοιχείου.

### 3.2.10.2 Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα



**Εικόνα 3.21:** Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα

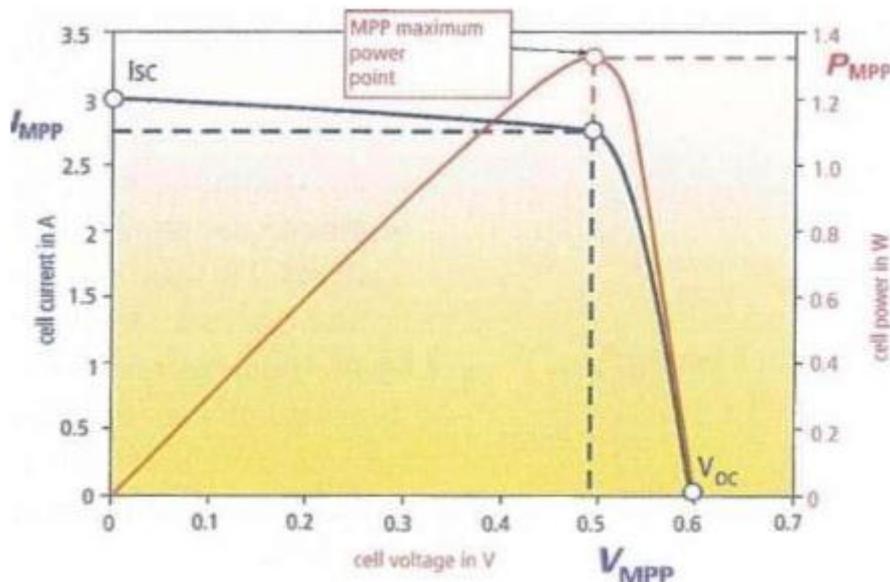
Το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα αποτελεί μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση. Σε αυτές περιλαμβάνονται και οι αντιστάσεις σειράς  $R_s$  και οι παράλληλες αντιστάσεις  $R_p$ . Επίσης εμφανίζονται οι διαρροές ρεύματος που περιγράφονται από τις παράλληλες αντιστάσεις  $R_p$ . Όπως

είναι αναμενόμενο, αυτές οι πρόσθετες αντιστάσεις μειώνουν την απόδοση του Φ/Β στοιχείου.

$$\text{Ισχύει ότι } I_L = I_{ph} - I_0 \cdot \left[ e^{\frac{V_L + (R_s \cdot I_L)}{\mu}} - 1 \right] \text{ (Για } R_p \rightarrow \infty)$$

### 3.2.10.3 I-V χαρακτηριστική και STC

Ένα πολύ σημαντικό διάγραμμα για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η I-V χαρακτηριστική τους.



Εικόνα 3.22: I-V χαρακτηριστική των φωτοβολταϊκών

Για να μεγιστοποιηθεί η αποδιδόμενη ισχύς απαιτείται μια ορισμένη τιμή της αντίστασης  $R_L$ , που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Αυτή η μέγιστη ισχύς προκύπτει από το μέγιστο εμβαδόν που μπορεί να εγγραφεί μέσα στην I - V χαρακτηριστική, και μέσα από το εμβαδόν αυτό ορίζεται ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό του Φ/Β στοιχείου, ο παράγοντας πλήρωσης (FF) . Οι τιμές του ρεύματος και της τάσης που αντιστοιχούν στη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ συμβολίζονται με  $I_m$  και  $V_m$  και ο παράγοντας πλήρωσης ορίζεται ως:

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{sc}}$$

Για να είμαστε σε θέση να συγκρίνουμε διαφορετικά Φ/Β στοιχεία ή πλαίσια μεταξύ τους, έχουν καθοριστεί μερικές ενιαίες συνθήκες για τον καθορισμό των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών σύμφωνα με τα οποία

υπολογίζεται η I-V χαρακτηριστική. Αυτές οι συνθήκες, όπως καθορίστηκαν κατά τα πρότυπα IEC 60904/DIN EN 60904 είναι:

- Κάθετη ακτινοβολία  $1000\text{W/m}^2$
- Θερμοκρασία Φ/Β στοιχείου  $25^\circ\text{C}$  με ανοχή  $2^\circ\text{C}$
- $AM = 1,5$

Η I-V καμπύλη χαρακτηρίζεται από τα εξής σημεία:

- Το Σημείο Μέγιστης Ισχύος (MPP). (Δίνεται σε  $W_p$ )
- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  είναι 5-15% μεγαλύτερο από το  $I_m$  (ρεύμα MPP). Το  $I_{sc}$  ισούται περίπου με  $3A$  για τα συνηθισμένα κρυσταλλικά στοιχεία
- Η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}$  είναι περίπου 0,5 ως 0,6 ενώ για τα άμορφα 0,6 ως 0,9

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαρτάται γραμμικά από την ηλιακή ακτινοβολία (διπλασιασμός της ακτινοβολίας επιφέρει διπλασιασμό του ρεύματος). Από την άλλη η τάση ανοικτοκύκλωσης παραμένει σχετικά σταθερή καθώς αλλάζει η ακτινοβολία. Μόνο όταν η ακτινοβολία πέσει κάτω από τα  $100\text{W/m}^2$  μειώνεται απότομα η τάση. Η εξάρτηση μεταξύ τάσης και ακτινοβολίας είναι λογαριθμική στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο την τάση είναι η θερμοκρασία.

#### 3.2.10.4 Απόδοση Φ/Β στοιχείου

Έστω ότι στην επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με ισχύ:  $P_{\pi\rho} = E \cdot S$ , όπου  $E$  η πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας και  $S$  το εμβαδό του στοιχείου. Η απόδοση του Φ/Β στοιχείου είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύς  $P_m$  προς την προσπίπτουσα ισχύ της ΗΜ ακτινοβολίας  $P_{\pi\rho}$ . Είναι δηλαδή:

$$\eta_c = \frac{P_m}{P_{\pi\rho}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{\pi\rho}} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{\pi\rho}}$$

Γενικά, η απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου εξαρτάται από τον τύπο του ημιαγωγού. Παρουσιάζει αύξηση όσο αυξάνεται η πυκνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και μείωση αν αυξηθεί η θερμοκρασία.

Η ονομαστική τιμή απόδοσης ενός Φ/Β στοιχείου εξαρτάται από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC και την συμβολίζουμε με  $\eta_{c,STC}$ . Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ο παράγον θερμοκρασίας  $\eta_T$ , ο οποίος απεικονίζει την επίδραση που έχει στο στοιχείο η μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με την θερμοκρασία κατά τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου  $\theta_{STC} = 25^\circ\text{C}$ . Έτσι η απόδοση δίδεται και από την σχέση:

$$\eta_c = \eta_T \cdot \eta_{c,STC}$$

### **3.3 Συστατικά Μέρη Φωτοβολταϊκών Συστημάτων**

#### **3.3.1 Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια**

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια αποτελείται από φωτοβολταϊκές συστοιχίες και είναι ένας διαφορετικός τρόπος να ονομάσουμε το σύνολο των φωτοβολταϊκών πανέλων. Αν και έχουμε αναφερθεί ήδη σε κάποιες προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιούνται, θα τις συνοψίσουμε προσθέτοντας και άλλες.

#### **Κυψέλη**

Ο συνδυασμός αποδοτικών κυψελών με όμοιες ηλεκτρικές ιδιότητες οδηγεί στον υψηλό βαθμό απόδοσης της Φωτοβολταϊκής γεννήτριας και τη μεγάλη διάρκεια ζωής της. Οι κυψέλες που διαθέτουν τρεις μπάρες τροφοδοσίας, μπορούν να διαχειριστούν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται αποτελεσματικότερα, επιτρέποντας στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να διανεμηθεί καλύτερα, περιορίζοντας παράλληλα τις ωμικές απώλειες μεταξύ των συνδέσεων των κυψελών.

#### **Ηλιακό γυαλί**

Αλλά ακόμα και για το ηλιακό γυαλί, οι επιλογές είναι ατελείωτες. Ο ρόλος του γυαλιού είναι να διοχετεύσει όσο το δυνατόν περισσότερο ηλιακό φως στην επιφάνεια της κυψέλης. Οι συμβατικοί (heavily-structured) τύποι γυαλιού τείνουν να προσελκύουν ρύπους, που με την πάροδο του χρόνου θα οδηγήσουν σε μείωση της παραγωγικής ικανότητας της μονάδας. Για τις Ευρωπαϊκές χώρες ιδανικός τύπος γυαλιού θεωρείται ο μικρο-δομημένος (micro - structured), γυαλί ειδικής επεξεργασίας καθώς μπορεί να αυτό-καθαρίζεται με τη βροχή.

#### **Πλαίσιο φωτοβολταϊκής γεννήτριας**

Τα πιο στιβαρά και σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι εκείνα που κατασκευάζονται από ανοδιωμένο αλουμίνιο και δεν πρέπει να φέρουν σε καμία περίπτωση κοιλότητες, για την αποφυγή σχηματισμού πάγου στην επιφάνειά τους κατά τους χειμερινούς μήνες.

#### **Κυτίο διασύνδεσης (junction box)**

Πρέπει να είναι ανθεκτικό στην φωτιά και δεν πρέπει να επιτρέπει την είσοδο της υγρασίας και του αέρα. Λανθασμένη κατασκευή ή

κακοτεχνίες μπορούν, υπό ορισμένες συνθήκες, να δημιουργήσουν κίνδυνο πυρκαγιάς για το σύνολο της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

### **Δίοδοι παράκαμψης**

Οι δίοδοι παράκαμψης βοηθούν τη βέλτιστη λειτουργία της Φωτοβολταϊκής γεννήτριας, ακόμη και υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες λειτουργίας ή συνθήκες μερικής σκίασης. Οι καλές φωτοβολταϊκές γεννήτριες έχουν αρκετές διόδους παράκαμψης, κάθε μια από τις οποίες συνδέεται με ένα μέγιστο αριθμό κυψελών (16-20).

### **Ανοχές ισχύος**

Οι θετικές ανοχές ισχύος θα οδηγήσουν σε βέλτιστη ενεργειακή παραγωγή, καθώς εξασφαλίζουν αξιόλογη αύξηση ισχύος.

### **Απόδοση σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας**

Κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν έχουμε πάντα ιδανικές συνθήκες ηλιοφάνειας, επομένως οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες πρέπει να έχουν υψηλή απόδοση και σε αυτές τις συνθήκες, για βέλτιστες δυνατές μέσες ετήσιες αποδόσεις ενέργειας.

### **Μηχανική Αντοχή σε ανεμοπιέσεις και φορτία χιονιού**

Τα μέγιστα επιτρεπόμενα μηχανικά φορτία της τάξης των 6.000 Pascal παρέχουν την απαραίτητη στατική ασφάλεια.

### **Εγγύηση προϊόντος**

Οι περίοδοι εγγυήσεων για τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες πρέπει να είναι τουλάχιστον 10έτη για το προϊόν ενώ οι εγγυήσεις απόδοσης ισχύος τουλάχιστον για 20 έτη.

### **Πιστοποιήσεις για την κατασκευή των Φωτοβολταϊκών**

Η πιστοποίηση κατασκευής των φωτοβολταϊκών γεννητριών σύμφωνα με ISO 9001 και ISO 14001 είναι σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα του παρεχόμενου προϊόντος.

### 3.3.2 Αντιστροφείς (Inverters)

#### 3.3.2.1 Γενικά

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα διασυνδεδεμένο με το δίκτυο για να μπορεί να διοχετεύει την ισχύ του σε αυτό, είναι απαραίτητο να μπορεί να μετατρέπει την συνεχή τάση εξόδου του σε εναλλασσόμενη με χαρακτηριστικά ίδια με αυτά του δικτύου, ώστε να μη δημιουργεί πρόβλημα στη λειτουργία του δικτύου και στη ποιότητα ισχύος που αυτό παρέχει. Την μετατροπή αυτή επιτυγχάνουμε μέσω του αντιστροφέα (Inverter) ή DC to AC Converter, η θέση του οποίου σε ένα σύστημα φαίνεται στο σχήμα. Τα χαρακτηριστικά που θέλουμε να επιτύχουμε στην έξοδο του αντιστροφέα είναι ημιτονοειδής ισχύς εξόδου σταθερού πλάτους, σταθερής συχνότητας και χωρίς απώλειες.

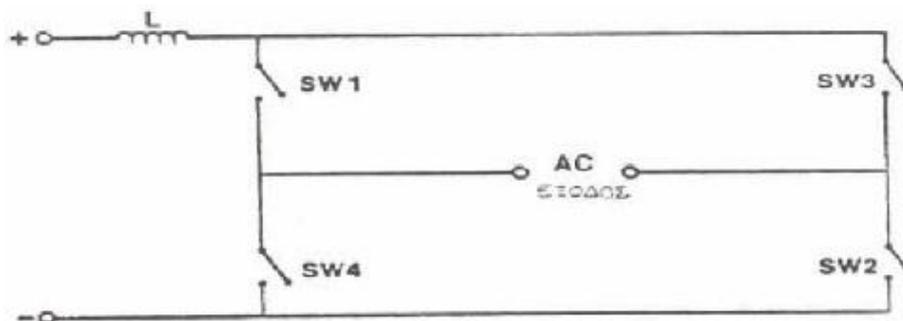
Με βάση αυτό το κριτήριο οι inverters διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Σε inverter τροποποιημένου ημίτονου (modified sine wave) και σε inverter καθαρού ημίτονου (pure/true sine wave). Ένας μετατροπέας inverter τροποποιημένου (διαμορφωμένου) ημίτονου, είναι σαφώς μικρότερου κόστους από ένα inverter (μετατροπέα) καθαρού ημίτονου ο οποίος βέβαια είναι κατάλληλος για όλες τις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές.

Ο μετατροπέας inverter τροποποιημένου (διαμορφωμένου) ημίτονου εμφανίζει υψηλή κατανάλωση έως και 20% σε σχέση με έναν μετατροπέα inverter καθαρού ημίτονου. Παράλληλα σε τηλεοράσεις και ηχοσυστήματα πιθανόν να ακούγεται βόμβος ενώ μοτέρ ηλεκτρικών συσκευών ή compressor ψυγείων ενδέχεται να μη λειτουργούν καθόλου.

Ο μετατροπέας καθαρού ημίτονου δεν παρουσιάζει κανένα από τα παραπάνω προβλήματα. Το μοναδικό μειονέκτημα που θεωρείται ότι έχουν οι inverter καθαρού ημίτονου είναι η υψηλότερη τιμή τους, αφού είναι 2 έως 3 φορές ακριβότεροι από έναν αντίστοιχο inverter τροποποιημένου ημίτονου. Για ψηφιακές ηλεκτρονικές συσκευές που διαθέτουν switching τροφοδοτικά συνιστάται η χρήση inverter με καθαρού ημίτονου. Απαραίτητη κρίνεται η χρήση μετατροπέας καθαρού ημίτονου σε ηλεκτρικές συσκευές που λειτουργούν με μοτέρ (π.χ. ψυγείο) απαιτούν στιγμιαία ρεύματα εκκίνησης ισχύος (κατά την εκκίνηση του μοτέρ) σε πολλαπλάσια Watt (π.χ. εξαπλάσια) από αυτά της κανονικής τους λειτουργίας. Επιπλέον, οι inverters μπορεί να είναι με μετασχηματιστή ή χωρίς. Στην επόμενη ενότητα να αναφερθούμε διεξοδικά.

Συνήθως για να επιτύχουμε ημιτονοειδή έξοδο του αντιστροφέα χρησιμοποιούμε ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος σαν διακόπτες όπως

τρανζίστορ ή θυρίστορ και η γενική τοπολογία του κυκλώματος του αντιστροφέα φαίνεται στο σχήμα :



Εικόνα 3.23: Τοπολογία κυκλώματος αντιστροφέα

Τα ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούμε έχουν την ιδιότητα να άγουν ή όχι ανάλογα με το αν τους δίνεται παλμός έναυσης από κάποιο ανεξάρτητο λογικό κύκλωμα ενώ η σβέση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με παλμούς (τρανζίστορ) είτε κάτω από ειδικές συνθήκες όπου το ρεύμα που διαρρέει το διακόπτη μηδενίζεται για κάποιο χρονικό διάστημα (θυρίστορ). Τα στοιχεία αυτά ανοιγοκλείνουν ανά ομάδες (1,2) και (3,4) για χρόνο μιας ημιπεριόδου, με μια συχνότητα ίση με την διπλάσια της συχνότητας του δικτύου ( $f=50\text{Hz}$ ) ή περίοδο  $T=1/2f=0.01\text{ sec}$ .

Το πηνίο στην είσοδο του αντιστροφέα χρειάζεται για να εξομαλύνει τις μεταβολές της τάσης που δημιουργούν οι διακόπτες, ενώ στην έξοδο υπάρχει συνήθως ένας μετασχηματιστής.

### 3.3.2.2 Τύποι αντιστροφέων

Υπάρχουν διάφορες τοπολογίες που μπορεί να υλοποιηθεί ένας αντιστροφέας. Η απλή τοπολογία παρουσιάζει υψηλό βαθμό απόδοσης αλλά η κυματομορφή και η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου δεν είναι αποδεκτή για τις περισσότερες εφαρμογές.

Τα μειονεκτήματα αυτά μπορούν να εξαλειφθούν εν μέρει με τη βοήθεια φίλτρων τα οποία όμως έχουν μεγάλο όγκο και κόστος. Άλλες πιο προχωρημένες τεχνικές μειώνουν τις απαιτήσεις σε φίλτρα αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες. Συνεπώς η επιλογή της τοπολογίας βασίζεται στην εύρεση της χρυσής τομής ανάμεσα σε αντικρουόμενες απαιτήσεις όσον αφορά το κόστος, την ποιότητα της τάσης εξόδου, το περιεχόμενο σε αρμονικές, τον όγκο κλπ.

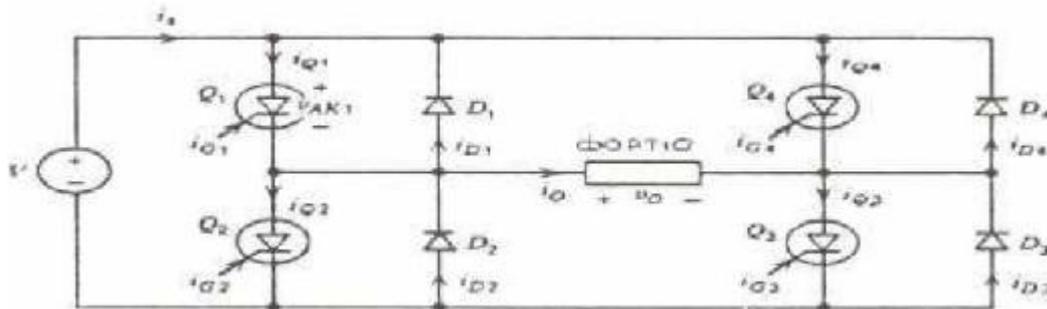
Αν και η τεχνολογία των αντιστροφέων είναι αρκετά ανεπτυγμένη, εν τούτοις δεν είναι αρκετά ξεκάθαρο ποια από τις πολλές τοπολογίες που υπάρχουν είναι η καταλληλότερη για κάθε φωτοβολταϊκή εφαρμογή. Ένας αντιστροφέας πρέπει να εκτελεί τρεις λειτουργίες που είναι

α) αντιστροφή, β) ρύθμιση της τάσης και γ) διαμόρφωση της κυματομορφής.

Οι αντιστροφείς που υπάρχουν μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το σβήσιμο των διακοπτικών τους στοιχείων όταν αυτά είναι θυρίστορ. Όταν η ενέργεια για το σβήσιμο των θυρίστορ παρέχεται από μια εξωτερική πηγή (δίκτυο) τότε ανήκουν στην κατηγορία των αντιστροφέων οδηγούμενων από το δίκτυο ή με φυσική μετάβαση. Όταν η ενέργεια αυτή προέρχεται από εσωτερικά κυκλώματα που περιέχουν στοιχεία όπως πυκνωτές τότε ανήκουν στην κατηγορία των αντιστροφέων με εξαναγκασμένη μετάβαση ή αυτοοδηγούμενοι αντιστροφείς. Οι αντιστροφείς που περιέχουν τρανζίστορ ανήκουν πάντα στην κατηγορία των φυσικά αυτοοδηγούμενων αντιστροφέων.

### Αντιστροφέας γέφυρας

Ένας από τους πιο καθιερωμένους αντιστροφείς είναι ο αντιστροφέας γέφυρας που φαίνεται στο σχήμα (μονοφασικός).



Εικόνα 3.24: Αντιστροφέας γέφυρας

Όταν το φορτίο δεν είναι απλά ωμικό αλλά περιέχει πυκνωτές ή και επαγωγούς, δηλαδή στοιχεία που αποθηκεύουν ενέργεια, τότε κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση των διόδων παράλληλα σε κάθε διακοπτικό στοιχείο. Αυτό γίνεται διότι σε αυτές τις περιπτώσεις το ρεύμα φορτίου δεν έχει πάντα το ίδιο πρόσημο με την τάση στο φορτίο και έτσι όταν τα θυρίστορ σβήνουν, το ρεύμα συνεχίζει να περνά μέσα από τις διόδους.

### Ρύθμιση τάσης σε ένα αντιστροφή

Σε πολλές εφαρμογές χρειάζεται ο βαθμιαίος έλεγχος του λόγου της DC τάσης εισόδου που μπορεί να μεταβάλλεται προς την AC τάση εξόδου που τροφοδοτεί το φορτίο. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με έναν AC ρυθμιστή τάσης μεταξύ της εξόδου του αντιστροφέα και του φορτίου που όμως δημιουργεί πολλές ανώτερες αρμονικές στην τάση εξόδου και αποφεύγεται, είτε με έναν DC/ DC μετατροπέα μεταξύ πηγής και ακροδεκτών εισόδου (αυξάνονται έτσι οι απώλειες του συστήματος λόγω

του επιπρόσθετου μετατροπέα και απαιτείται ένα επιπλέον φίλτρο στην είσοδο).

## Μέθοδος PWM

Ένας άλλος τρόπος να μεταβάλλουμε τον λόγο μεταξύ της DC τάσης εισόδου προς την AC τάση εξόδου είναι με την βοήθεια του κυκλώματος ελέγχου του αντιστροφέα. Οι τεχνικές που υπάρχουν διαφέρουν ως προς το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου πράγμα που καθορίζει την κατάλληλη κάθε φορά επιλογή. Οι τρεις πιο γνωστές τεχνικές χρησιμοποιούν διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse Width Modulation ή PWM) η οποία απαιτεί εξαναγκασμένη μεταγωγή και είναι:

1. διαμόρφωση με έναν παλμό
2. διαμόρφωση με πολλούς παλμούς και
3. διαμόρφωση με ημιτονοειδή παλμό.

Το κύκλωμα έλεγχου ελέγχει την έναυση και σβέση των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα που συνήθως είναι MOSFET ή IGBT για τέτοιες εφαρμογές. Οι συναρτήσεις ελέγχου αποτελούνται από ένα ημίτονο μεταβλητού πλάτους και μια τριγωνική κυματομορφή σταθερού πλάτους με μια συνεχή συνιστώσα, η οποία αναστρέφεται σε πολικότητα στο τέλος κάθε ημικύκλιου της τάσης εξόδου. Οι γωνίες έναυσης και σβέσης των διακοπτικών στοιχείων καθορίζονται από την τομή αυτών των δυο κυματομορφών ελέγχου. Η τάση εξόδου ελέγχεται με μεταβολή του πλάτους του ημίτονου. Αν αυτό γίνει πολύ μεγάλο τότε η χρονική μεταβολή της τάσης εξόδου πλησιάζει την τετραγωνική κυματομορφή.

Το ημίτονο (λέγεται σήμα αναφοράς) έχει μεταβλητό πλάτος  $A$  και συχνότητα  $f$ , ενώ η τριγωνική κυματομορφή (λέγεται και φορέας) έχει σταθερό πλάτος  $A_p$ , δηλαδή μια συνεχή συνιστώσα με μέτρο  $A_p$  και συχνότητα  $f_p$ . Το πλάτος του ημίτονου  $A$  γενικά μπορεί να πάρει τιμή μεγαλύτερη από το πλάτος του τριγώνου  $A_p$ . Ο αριθμός των παλμών ανά ημικύκλιο δίνεται από την σχέση  $2N = f_p/f$  και είναι πάντα ακέραιος. Ορίζονται δυο συντελεστές διαμόρφωσης: ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους  $MA = \Delta\delta_{ip}/A_p$  και ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας  $MF = f_p/f \sin$ . Όταν το τρίγωνο είναι μεγαλύτερο του ημίτονου έχουμε έξοδο με λογική στάθμη μηδέν ενώ όταν το ημίτονο είναι μεγαλύτερο του τριγώνου έχουμε λογική στάθμη μονάδα. Ουσιαστικά ο συγκριτής τροφοδοτεί την μονάδα παλμοδότησης των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης εξαρτάται από τα σημεία τομής των 2 κυματομορφών.

Αυξομειώνοντας το συντελεστή  $MA$  (από 0 έως 1) μεταβάλλεται το εύρος των παλμών της κυματομορφή που προκύπτει από τη σύγκριση. Όσο αφορά τον συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας  $MF$  πρέπει να

επισημανθεί ότι για χαμηλές τιμές του πρέπει να χρησιμοποιηθεί συγχρονισμένη διαμόρφωση (συγχρονισμός σήματος φορέα με σήμα αναφοράς), να είναι περιττός ακέραιος και πολλαπλάσιος του 3 για την απαλοιφή των κυριοτέρων αρμονικών από την πολική τάση.

Τονίζεται ότι η ΔΕΗ επιβάλλει τη σύνδεση των αντιστροφών σε τριφασικό σύστημα για εγκαταστάσεις άνω των 5kW, ενώ εγκαταστάσεις άνω των 100kW συνδέονται υποχρεωτικά στο δίκτυο Μέσης Τάσης (ΜΤ) της ΔΕΗ.

### 3.3.2.3 Ανώτερες Αρμονικές

Η συχνότητα στην έξοδο του αντιστροφέα καθορίζεται από το ρυθμό έναυσης και σβέσης των διακοπτικών στοιχείων και επομένως δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης αυτής μέσω του κυκλώματος παλμοδότησης του αντιστροφέα. Ωστόσο η διακοπτική λειτουργία του αντιστροφέα έχει συνήθως ως αποτέλεσμα μη ημιτονοειδείς κυματομορφές ρεύματος και τάσης στην έξοδο του, που σημαίνει ύπαρξη ανώτερων αρμονικών. Το φιλτράρισμα των αρμονικών δεν είναι εύκολο, ειδικά στην περίπτωση όπου η συχνότητα των ανώτερων αρμονικών μεταβάλλεται και βρίσκεται κοντά στην συχνότητα της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του βάρους, όγκου και κόστους του αντιστροφέα. Συνεπώς η δημιουργία κυματομορφών με το μικρότερο δυνατό αρμονικό περιεχόμενο και αρμονικές που να εντοπίζονται σε όσο δυνατό υψηλότερες συχνότητες (για ευκολότερο και οικονομικότερο φιλτράρισμα) αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους των κατασκευαστών αντιστροφών. Ταυτόχρονα θα μπορούσαμε να πούμε ότι για τον παραπάνω λόγο θα μπορούσαμε να έχουμε αντιστροφείς με πολύ μεγάλο συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας. Όμως κάτι τέτοιο δεν γίνεται στην πράξη διότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα λειτουργίας του αντιστροφέα τόσο μεγαλύτερες είναι οι διακοπτικές του απώλειες. Συνεπώς πρέπει να βρεθεί ένας συμβιβασμός μεταξύ των διακοπτικών απωλειών στα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα και του όγκου- κόστους των φίλτρων που θα τοποθετήσουμε στην έξοδο του.

### 3.3.3 Βάσεις στήριξης και ηλιοστάτες

Η στήριξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων γίνεται συνήθως με βάσεις αλουμινίου ή γαλβανισμένες (ή με συνδυασμό υλικών). Στο εμπόριο διατίθενται τυποποιημένες βάσεις για διάφορους τύπους πλαισίων. Τα πιο εξελιγμένα συστήματα στήριξης πληρούν τις προδιαγραφές DIN 1055, DIN 4113, DIN 18800 και έχουν μεγάλη αντοχή στην καταπόνηση. Η τοποθέτηση σε οικόπεδα γίνεται είτε με τσιμεντένιες βάσεις ή με πασσαλόπηξη ή με ειδικές βιδωτές βάσεις. Για τα κτίρια (δώματα και

στέγες) παρέχεται μια μεγάλη ποικιλία τυποποιημένων βάσεων στήριξης για όλες τις εφαρμογές.

Πέρα από τις σταθερές βάσεις, υπάρχουν και οι βάσεις που ρυθμίζονται κάθε εξάμηνο προκειμένου να επιλέγεται η βέλτιστη γωνία κλίσης ανά εποχή και όχι ανά έτος.

Οι ηλιοστάτες (trackers) είναι συστήματα στήριξης επί εδάφους που ακολουθούν την πορεία του ήλιου εκμεταλλευόμενοι περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία και αυξάνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος, αυξάνοντας παράλληλα το κόστος και τα λειτουργικά της επένδυσης. Διακρίνονται σε μονοαξονικούς και διαξονικούς και παρέχονται σε μεγάλη ποικιλία μεγεθών. Για να αποφεύγονται οι σκιάσεις μεταξύ τους, απαιτείται μεγαλύτερη έκταση απ' ότι για τις σταθερές βάσεις (συνήθως 1,5-3 φορές μεγαλύτερη έκταση).



Εικόνα 3.25: Μονοαξονικό και Διαξονικό Σύστημα

Στερεώνοντας τα **φωτοβολταϊκά** πάνω σε σύστημα με δύο άξονες παρακολούθησης του Ηλίου, μπορεί να συλλεχθεί μέχρι 25% περισσότερη ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός έτους, σε σύγκριση με την εγκατάσταση σταθερής κλίσης. Κάτι τέτοιο όμως αυξάνει την πολυπλοκότητα και έχει ως αποτέλεσμα μια χαμηλότερης αξιοπιστίας και υψηλότερου κόστους συντήρηση. Η μονού άξονα παρακολούθηση (ιχνηλάτηση) **tracker** είναι λιγότερο σύνθετη αλλά παρουσιάζει μικρότερο κέρδος. Ο προσανατολισμός μπορεί να ρυθμίζεται χειροκίνητα, εκεί που η προσφορά εργασίας είναι διαθέσιμη, αυξάνοντας έτσι τις όποιες απολαβές. Έχει υπολογιστεί ότι σε κλίματα με ηλιοφάνεια μια διάταξη επίπεδης κινούμενης πλάκας που έχει κατάλληλη ρύθμιση ώστε να στρέφεται προς τον ήλιο δυο φορές την ημέρα και να παίρνει την κατάλληλη κρίση τέσσερις φορές το χρόνο, μπορεί να συλλαμβάνει το 95% της ενέργειας, που συλλέγετε με ένα σύστημα δυο αξόνων παρακολούθησης πλήρως αυτοματοποιημένο.

Το σύστημα παρακολούθησης είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα φωτοβολταϊκά συστήματα, που λειτουργούν κάτω από συγκεντρωμένο ηλιακό φως. Η δομή αυτών των φωτοβολταϊκών συστημάτων εκτείνεται

από έναν απλό σχεδιασμό βασισμένο πάνω σε πλευρικούς ενισχυτικούς καθρέπτες μέχρι τα συγκεντρωτικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν υπερσύγχρονες οπτικές τεχνικές, για να αυξήσουν την είσοδο φωτός προς τα ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία κατά μερικές τάξεις του μεγέθους. Αυτά τα συστήματα πρέπει να προνοούν για ένα σημαντικό γεγονός, ότι δηλαδή συγκεντρώνοντας την ηλιακή ενέργεια ελαττώνουν το γωνιακό άνοιγμα των ακτινών, που το σύστημα μπορεί να δεχθεί. Η παρακολούθηση γίνεται απαραίτητη από τη στιγμή που ο λόγος συγκέντρωσης υπερβαίνει το 10 περίπου και το σύστημα μπορεί να μετατρέψει μόνο την άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας-ενέργειας.

## 4. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 4.1 Εισαγωγή

Οι άνεμοι παράγονται κυρίως από την άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο. Οι θάλασσες παρουσιάζουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα αφού εκτός από την εξάτμιση, η θερμότητα μεταφέρεται προς το εσωτερικό των υδάτινων μαζών. Έτσι κατά τη διάρκεια της ημέρας ο αέρας πάνω από λίμνες και θάλασσες παραμένει σχετικά κρύος, σε σχέση με τον αέρα τις στεριές που θερμαίνεται περισσότερο. Έτσι έχουμε και μια μείωση της πυκνότητάς του, με αποτέλεσμα την ανύψωσή του και τα κρύα βαρύτερα στρώματα του αέρα που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας κινούνται για να πάρουν τη θέση του πάνω από την ξηρά.

Με τον τρόπο αυτόν παράγονται τα τοπικά παραλιακά ρεύματα που κατά τη διάρκεια της νύχτας τα ρεύματα αυτά αντιστρέφονται επειδή η θερμοκρασία της ξηράς ελαττώνεται πολύ γρηγορότερα από αυτή του νερού και έτσι ο ψυχρότερος άρα και βαρύτερος αέρας της ξηράς κινείται προς τη θάλασσα όπου αναπληρώνει αυτόν που ανυψώνεται από την επιφάνειά της.

Παρόμοια τοπικά ρεύματα συμβαίνουν στις βουνοπλαγιές κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν ο θερμός αέρας ανυψώνεται κατά μήκος των θερμών πλαγιών υπό την επίδραση του ήλιου. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο σχετικά κρύος αέρας των πλαγιών κινείται προς τις πεδιάδες.

Κατά τον ίδιο τρόπο παράγονται και οι πλανητικοί άνεμοι λόγω της μεγαλύτερης θέρμανσης της επιφάνειας της γης κοντά στον ισημερινό απ' ότι στους πόλους. Επίσης έχουμε και τους εποχιακούς ανέμους, όπως οι Μουσσώνες, καθώς και τους ετήσιους ή Μελτέμια.

Οι τελευταίοι έχουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αφού η παρουσία τους είναι πολύ συχνή στην περιοχή του Αιγαίου. Είναι άνεμοι του καλοκαιριού, βόρειο-βορειοανατολικοί μέχρι και βορειοδυτικής διεύθυνσης που αρχίζουν να πνέουν από τις αρχές του Μαΐου και εξασθενούν στα μέσα του Οκτωβρίου. Τη μεγαλύτερη ένταση και συχνότητα τη παρουσιάζουν από τα μέσα του Ιουλίου έως τα μέσα του Σεπτεμβρίου, με μέγιστη ημερήσια διακύμανση τις απογευματινές ώρες, ενώ η ένταση τους ελαττώνεται τη νύχτα.

Στη γενική τους μορφή οι ανεμοκινητήρες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε άλλες πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας, όπως θερμική, ηλεκτρική και φυσικά μηχανική. Ο άνεμος όμως, είναι μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη σε όλες της τις παραμέτρους

πηγή ενέργειας. Η δέσμευση και χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής, είναι ως εκ τούτου μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Η σχεδίαση και η κατασκευή μιας αποδοτικής και παράλληλα οικονομικής ανεμομηχανής δεν είναι εύκολη δουλειά.

Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες ανεμομηχανές (που η επιστημονική ονομασία τους είναι «συστήματα μετατροπής» της αιολικής ενέργειας, ή πιο απλά «ανεμοκινητήρες», ή όταν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια «ανεμογεννήτριες»), χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα επιτεύγματα στην τεχνολογία των υλικών, στη μηχανολογία, στην ηλεκτρονική και στην αεροδυναμική, έχουν ανεβάσει σε υψηλά επίπεδα την απόδοσή τους, μειώνοντας συνεχώς το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

Η μελέτη ενός συστήματος ανεμογεννήτριας, περιλαμβάνει την αεροδυναμική σχεδίαση και τη μελέτη εφαρμογής, στην οποία περιλαμβάνονται η μηχανολογική μελέτη και σχεδίαση, η μελέτη του ηλεκτρολογικού συστήματος και τα ηλεκτρολογικά συστήματα ελέγχου και ασφαλείας. Η αεροδυναμική σχεδίαση αποτελεί προϋπόθεση για τον σχεδιασμό ενός συστήματος δέσμευσης και μετατροπής της ενέργειας του ανέμου, ενώ η ηλεκτρομηχανολογική μελέτη είναι το αμέσως επόμενο και αναγκαίο στάδιο για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, κατά τον αποδοτικότερο και πλέον συμφέροντα τεχνοοικονομικό τρόπο.

## **4.2 Η αιολική ενέργεια στο πέρασμα του χρόνου**

Η αξιοποίηση και η τιθάσευση του ανέμου απασχόλησε τον άνθρωπο για χιλιάδες χρόνια και ήταν ο ρυθμιστής για την ανάπτυξη και την εξέλιξη της ανθρωπότητας καθώς χρησιμοποιήθηκε τόσο στην ναυτιλία και την άρδευση όσο και στις αγροτικές καλλιέργειες. Η οικονομική και παραγωγική δραστηριότητα των αρχαίων χρόνων τονίζεται με την αναφορά στον διαχειριστή των ανέμων τον Αίολο στην Ελληνική μυθολογία, παρόμοιες αναφορές υπάρχουν σε κάθε αρχαίο πολιτισμό.

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον άνθρωπο για την κίνηση των ιστιοφόρων πλοίων, για εμπορικές συναλλαγές, συγκοινωνία και εξερευνήσεις. Ιστορικές αναφορές δείχνουν πως και άλλοι λαοί εκτός των Ελλήνων όπως οι Πέρσες, οι Αιγύπτιοι και οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν αιολικές μηχανές.

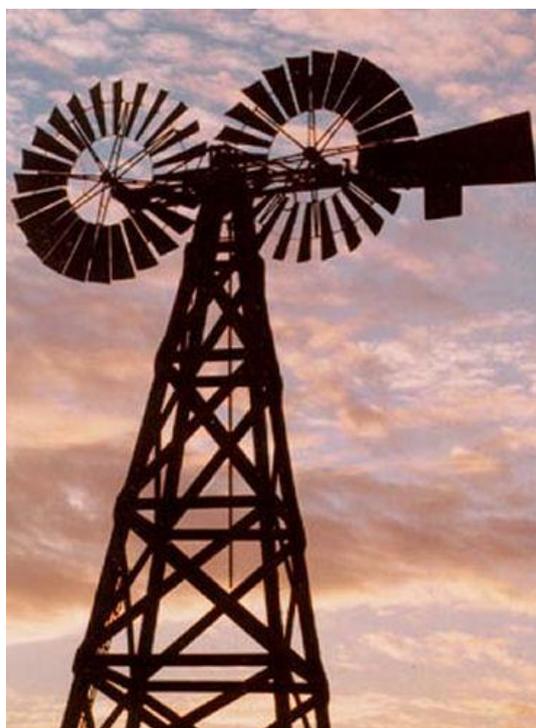
Οι κατασκευαστικές τεχνικές δείχνουν ότι χρησιμοποιούνταν ανεμόμυλοι με κάθετους άξονες προκειμένου να αξιοποιούν τις δυνατότητες του αέρα. Ανεμόμυλοι τέτοιας τεχνοτροπίας υπήρχαν κυρίως στις Αραβικές χώρες. Ενώ την ιδέα της τεχνοτροπίας αυτής την μετέφεραν αργότερα στην Ευρώπη οι σταυροφόροι.

Στην Ευρώπη όμως, κυριάρχησαν οι ανεμόμυλοι οριζόντιου άξονα, με μια ελαφριά κλίση των πτερυγίων, στις αρχές του Μεσαίωνα. Η χρήση της αιολικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, στη Δυτική Ευρώπη ξεκίνησε από την Αγγλία και την Ολλανδία τον Μεσαίωνα. Ανεμόμυλοι την εποχή αυτή χρησιμοποιούνταν κυρίως για άντληση νερού και για άλεσμα. Περισσότεροι από 200.000 ανεμόμυλοι είχαν εγκατασταθεί στη Βόρεια Ευρώπη. Στην Γερμανία στις αρχές του 20ου αιώνα, χρησιμοποιούνταν ακόμα περίπου 20.000 ανεμόμυλοι.

Από τον 19ο αιώνα και μετά, κυρίως στην Αμερική, διαδόθηκε ένας τύπος ανεμόμυλου γνωστός ως «western wheel». Οι κατασκευές αυτές είχαν πολλά πτερύγια, περίπου 20, ήταν φτιαγμένες από ατσάλι, και χρησιμοποιούνταν κυρίως για άρδευση. Τον 20ο αιώνα, ως τα τέλη της δεκαετίας του 1930, είχαν εγκατασταθεί περίπου 8 εκατομμύρια τέτοιες μονάδες.



**Εικόνα 4.1:** Ανεμόμυλος του Μεσαίωνα



**Εικόνα 4.2:** Ανεμόμυλος τύπου western wheel

Η πρώτη απόπειρα να χρησιμοποιηθεί αιολική μηχανή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έγινε στα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα, με την ανεμογεννήτρια συνεχούς ρεύματος ισχύος 12 kW η οποία κατασκευάστηκε από τον Brush στις ΗΠΑ.

Εντούτοις για μια μεγάλη περίοδο του εικοστού αιώνα υπήρχε ελάχιστο ενδιαφέρον για την χρήση της αιολικής ενέργειας. Κάποιες αξιοσημείωτες εξαιρέσεις ήταν η ανεμογεννήτρια των Αμερικανών Smith–Putnam η οποία κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ το 1941. Η

εντυπωσιακή για την εποχή της μηχανή είχε ατσάλινο ρότορα διαμέτρου 53 m και ονομαστική ισχύ 1250 kW.



**Εικόνα 4.3:** Η ανεμογεννήτρια Smith – Putnam

Επίσης η ανεμογεννήτρια του Gedser στη Δανία το 1957, ονομαστικής ισχύος 200kW, με ρότορα διαμέτρου 24 m και η ανεμογεννήτρια Hütter W34 το 1958, ονομαστικής ισχύος 100 kW, με ρότορα διαμέτρου 34 m.

Η ξαφνική αύξηση τις τιμές του πετρελαίου στην δεκαετία του 70 υποκίνησε μια σειρά από κυβερνητικά χρηματοδοτούμενα προγράμματα για έρευνα και ανάπτυξη ανεμογεννητριών. Στις ΗΠΑ αυτό οδήγησε στην κατασκευή μια σειράς πρωτοτύπων ανεμογεννητριών ξεκινώντας το 1975 με το μοντέλο Mod-0 διαμέτρου 38 m, ισχύος 100 KW και καταλήγοντας στο μοντέλο Mod-5B το 1987, με διάμετρο 97.5 m και ονομαστικής ισχύος 2.5 MW.

Παρόμοιες προσπάθειες έγιναν στην Σουηδία , Γερμανία και Βρετανία. Την εποχή αυτή υπήρχε μεγάλη αβεβαιότητα ως προς το ποια κατασκευαστική αρχιτεκτονική θα αποδειχθεί οικονομικά αποδοτικότερη, έτσι διερευνήθηκαν διάφορες καινοτόμες ιδέες. Στον Καναδά κατασκευάστηκε η ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα Darrieus με ισχύ 4MW.



Εικόνα 4.4: Το μοντέλο Mod-5B



Εικόνα 4.5: Ανεμογεννήτρια Darrieus

Ανεξάρτητα με την εξέλιξη στον τομέα των «μεγάλων» ανεμογεννητριών, σε χώρες όπως οι ΗΠΑ, η Δανία, η Γερμανία έγιναν ιδιαίτερες προσπάθειες να χρησιμοποιηθεί η αιολική ενέργεια σε μεγάλη κλίμακα.

Στην Καλιφόρνια τη δεκαετία του 1980 εγκαταστάθηκαν ανεμογεννήτριες με συνολική ισχύ περίπου 1500 MW. Στα πρώτα στάδια εξέλιξης χρησιμοποιούσαν ανεμογεννήτριες της τάξης των 50 kW. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν ανεμογεννήτριες της τάξης των 100, 150, 250 και 500 kW. Η εξέλιξη αυτή έκανε δυνατή την μαζική παραγωγή των ανεμογεννητριών. Γι' αυτό και μπορεί να παρατηρηθεί μια βελτίωση στον τομέα της αξιοπιστίας των συστημάτων αυτών. Σταδιακά η αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών οδήγησε σε μονάδες της τάξης των 500 – 1500 kW με πολλές δυνατότητες.

### 4.3 Μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου

Η χαμηλότερη περιοχή της ατμόσφαιρας, στην οποία βρίσκονται και οι περισσότερες κατασκευές, ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Εκεί, η κίνηση του ανέμου επιβραδύνεται από δυνάμεις τριβής και μεγάλα εμπόδια στην επιφάνεια της γης καθώς και από φαινόμενα που οφείλονται στο στροβιλισμό. Ο στροβιλισμός, ο οποίος μπορεί να είναι μηχανικής ή και θερμικής προέλευσης, προκαλεί απότομες μεταβολές

στην ταχύτητα του ανέμου σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και πλατών, γνωστές ως ριπές.

Από μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορα ύψη από το έδαφος, διαπιστώνουμε ότι:

- η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται συναρτήσει του ύψους από το έδαφος
- στην περιοχή υπάρχουν διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή στροβιλισμός
- ο στροβιλισμός διαδίδεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων

Προκειμένου να διαχωριστούν οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου που οφείλονται στο στροβιλισμό από τις πιο αργές, που οφείλονται σε μακρομετεωρολογικά φαινόμενα, χρησιμοποιείται το μέγεθος της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου,  $V$ , που δίνεται από την εξίσωση:

$$V = \frac{1}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} v(t) dt \quad (4.1)$$

όπου

$v(t)$ : η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου

$T$ : το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η ολοκλήρωση ώστε να υπολογιστεί η μέση τιμή

Η ενεργειακή φασματική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου έχει δύο περιοχές. Η περιοχή χαμηλών συχνοτήτων του φάσματος αντιστοιχεί στα μακρομετεωρολογικά φαινόμενα. Σε αυτήν περιλαμβάνονται οι μεταβολές του ανέμου που οφείλονται σε αλλαγές του καιρού από μέρα σε μέρα έως εβδομάδα (συνοπτικές μεταβολές) και οι μεταβολές του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές ανάμεσα στη στεριά και τη θάλασσα (ημερήσιες μεταβολές).

Η πλευρά των υψηλών συχνοτήτων αντιστοιχεί στα μικρομετεωρολογικά φαινόμενα και οι μεταβολές οφείλονται στο στροβιλισμό. Ο στροβιλισμός παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και στην απόδοση των ανεμογεννητριών, καθώς και στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος στο τροφοδοτούμενο δίκτυο.

#### **4.4 Η Αιολική Ενέργεια και το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό**

Ο υπολογισμός του τεχνικά αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία ακόμα και αν ληφθεί υπόψη μόνο η

διαθεσιμότητα του ανέμου και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιούμε. Η μέση μηνιαία ή ετήσια ταχύτητα ανέμου και ο βαθμός απόδοσης των ανεμογεννητριών δεν αρκούν για τον υπολογισμό. Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε ακριβώς την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου κατά την διάρκεια του έτους.

Πολλές φορές η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του χρόνου παριστάνεται με την βοήθεια της κατανομής Weibull (Εικόνα 4.6). Η συνάρτηση Weibull δίνεται από την εξίσωση:

$$p(V) = \frac{k}{V} \left( \frac{V}{C} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{V}{C} \right)^k} \quad (4.2)$$

όπου

$p(V)$ : η συχνότητα εμφάνισης της ταχύτητας του ανέμου  $V$

$C$ : παράμετρος κλίμακας ή χαρακτηριστική ταχύτητα του ανέμου

$k$ : παράμετρος μορφής

Στο συγκεκριμένο σχήμα δεχόμαστε μια μέση ταχύτητα ανέμου 7m/sec ενώ επειδή χρησιμοποιείται παράμετρος μορφής 2 (μια συνηθισμένη τιμή για την Β.Δ. Ευρώπη), συμπίπτει με την κατανομή Rayleigh. Για τα νησιά του Αιγαίου η παράμετρος μορφής κυμαίνεται από 1,4 ως 2, ενώ σε ορισμένα νησιά παίρνει μικρότερες τιμές όπως 1,22 (Ηράκλειο). Όσο μικρότερη είναι η τιμή της παραμέτρου τόσο η κατανομή γίνεται πιο ομοιόμορφη και οι ταχύτητες κοντά στην μέση είναι συχνότερες. Για να σχηματιστεί η καμπύλη της Εικόνα 4.6 απαιτείται πειραματικός προσδιορισμός της συχνότητας των ταχυτήτων του ανέμου και γνώση της μορφολογίας της περιοχής έτσι ώστε οι ταχύτητες να αναχθούν από το ύψος των μετεωρολογικών μετρήσεων στο ύψος του ρότορα της ανεμογεννήτριας. Αυτή η αναγωγή γίνεται με την βοήθεια της σχέσης:

$$\frac{U_1}{U_2} = \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^a \quad (4.3)$$

όπου

$a$ : παράμετρος που αυξάνεται όσο πιο έντονη γίνεται η μορφολογία και η τραχύτητα του εδάφους

άμμος	0.10
θερισμένο γρασίδι	0.13
ψηλό γρασίδι	0.19
προάστιο	0.32

**Πίνακας 4.1:** Τυπικές τιμές της παραμέτρου  $\alpha$

Γενικά είναι προτιμότερο για το προσδιορισμό της ταχύτητας του ανέμου να χρησιμοποιηθούν πίνακες του ευρωπαϊκού αιολικού άτλαντα που εκφράζουν την ταχύτητα του ανέμου συναρτήσει του ύψους και της τραχύτητας του εδάφους για τις περιοχές που μας ενδιαφέρουν.

Η ισχύς του ανέμου ορισμένης ταχύτητας είναι:

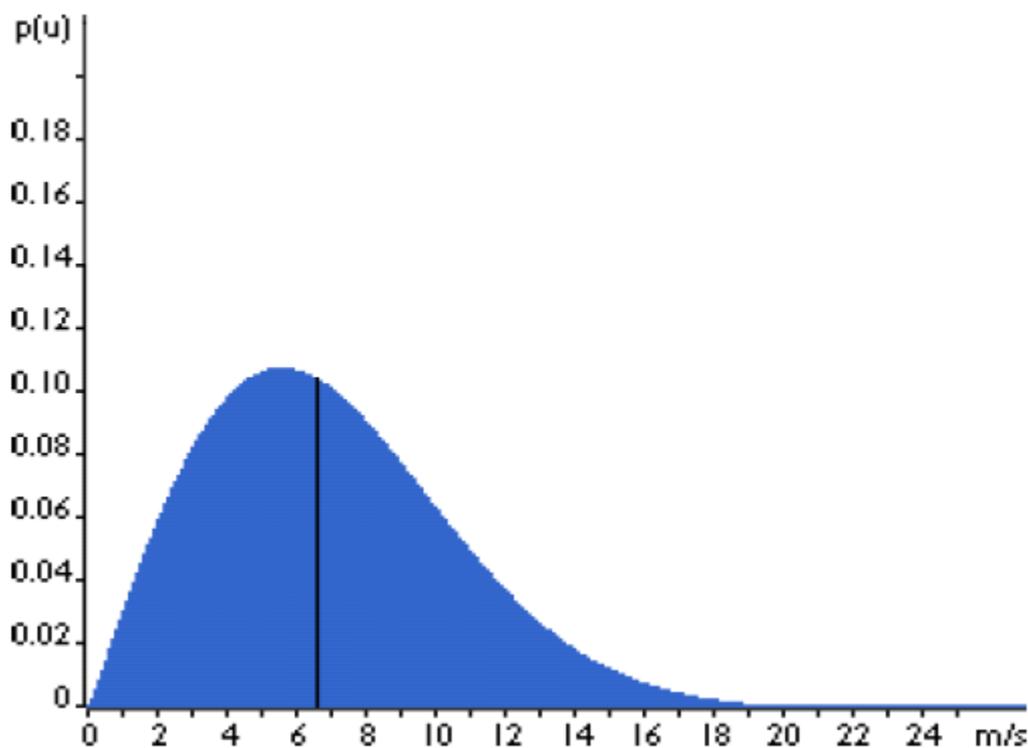
$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot u^3 \quad (4.4)$$

όπου

$\rho$ : είναι η πυκνότητα του αέρα

$A$ : είναι η επιφάνεια από όπου διέρχεται ο άνεμος

$u$ : είναι η ταχύτητα του ανέμου

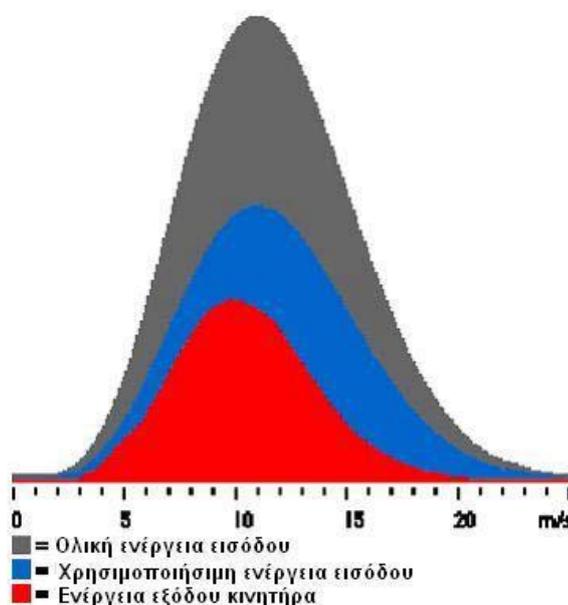


**Εικόνα 4.6:** Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ταχυτήτων ανέμου

Από την Εικόνα 4.6 φαίνεται ότι οι υψηλές ταχύτητες του ανέμου σπανίζουν, αλλά η συνεισφορά τους στην παραγόμενη ενέργεια είναι πολύ μεγάλη. Για τον υπολογισμό της αιολικής ισχύος δεν λαμβάνουμε υπόψη την μέση ταχύτητα αλλά πολλαπλασιάζουμε κάθε πιθανότητα μιας ορισμένης ταχύτητας ανέμου (από την Weibull) με την ισχύ που παράγεται σε αυτή την ταχύτητα. Έτσι σχηματίζεται η θεωρητική κατανομή της αιολικής ισχύος για κάθε ταχύτητα (Εικόνα 4.7, γκρι καμπύλη). Μια ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να παραλάβει όλη αυτή την ισχύ γιατί τότε ο αέρας που θα περνούσε πίσω από την έλικα της ανεμογεννήτριας δεν θα απομακρύνονταν διότι θα είχε μηδενική κινητική ενέργεια στην έξοδο.

Έτσι, δεν θα παραλάμβανε καθόλου ενέργεια επειδή ο στάσιμος αέρας στην έξοδο δεν θα επέτρεπε να εισαχθεί νέος. Στην αντίθετη περίπτωση θα διέρχονταν ο αέρας χωρίς καμία αντίσταση και δεν θα παράγονταν έργο. Έχει αποδειχτεί ότι μια ιδανική ανεμογεννήτρια θα πρέπει να μειώσει την αρχική ταχύτητα του αέρα κατά τα  $\frac{2}{3}$  της. Επιπλέον σύμφωνα με τον νόμο του Albert Betz (1919) η μέγιστη μηχανική ισχύς που μπορεί να παραχθεί από αιολική είναι ίση με 59,3% αυτής.

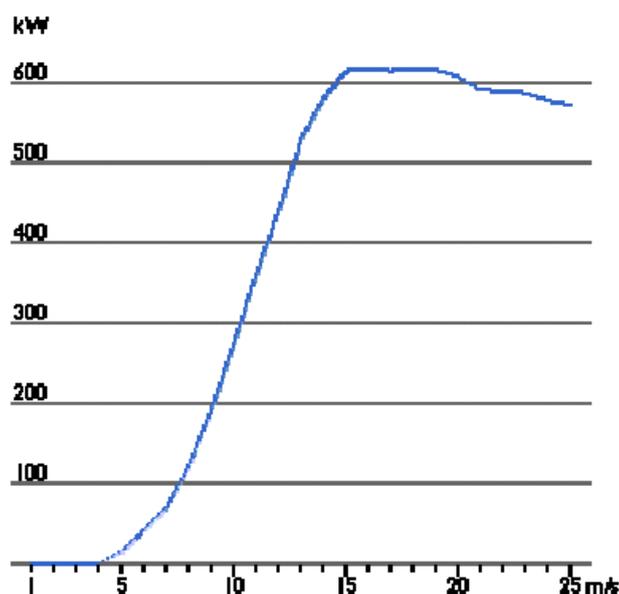
Όπως αναφέραμε, αν πολλαπλασιαστεί η ισχύς ανέμου για κάθε ταχύτητα με την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης αυτής της ταχύτητας τότε προκύπτει η γκρι καμπύλη της Εικόνα 4.7. Έτσι κάτω από την γκρι καμπύλη φαίνεται η θεωρητική ισχύς ανά  $m^2$  ροής αέρα (δεχόμενοι μια μέση ταχύτητα 7m/s και παράμετρο μορφής της Weibull 2). Η περιοχή κάτω από την μπλε καμπύλη αποτελεί το 59,3% της θεωρητικής, ενώ η κόκκινη περιοχή εκφράζει την πραγματική ηλεκτρική ισχύ που παράγεται από την ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 4.7: Συνάρτηση πυκνότητας ισχύος ανέμου και ανεμογεννήτρια

Συγκρίνοντας την μορφή των Εικόνων 4.6 και 4.7 συμπεραίνουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτρια κατά την διάρκεια ενός έτος παραλαμβάνεται σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της μέσης (γι' αυτό άλλωστε δεν μπορούμε να υπολογίσουμε το αιολικό δυναμικό από την μέση ταχύτητα).

Για να γίνει ο προσδιορισμός της κόκκινης περιοχής πρέπει να λάβουμε υπόψη την καμπύλη ισχύος (power curve) της ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη αυτή καθορίζει την απόδοση της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου και είναι διαφορετική για κάθε ανεμογεννήτρια. Μια τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας 600 kW δανικής κατασκευής φαίνεται στο Εικόνα 4.8.



**Εικόνα 4.8:** Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

Για τον προσδιορισμό της μέσης ετήσιας ισχύς (σύμφωνα με την μέθοδο Cliff) πρέπει να πολλαπλασιαστούν οι αντίστοιχες τιμές των Εικόνων 4.6 και 4.8 που ισχύουν για κάθε ταχύτητα ανέμου και να αθροιστούν τα γινόμενα. Δηλαδή με το πολλαπλασιασμό της πιθανότητας εμφάνισης μιας ταχύτητας ανέμου (Εικόνα 4.6) με την ισχύ που αποδίδει η ανεμογεννήτρια σε αυτή την ταχύτητα (Εικόνα 4.8) προσδιορίζεται η συνεισφορά της κάθε ταχύτητας του ανέμου στην μέση ετήσια ισχύ της ανεμογεννήτριας. Στην συνέχεια το άθροισμα αυτών των γινομένων (μέση ετήσια ισχύς) πολλαπλασιάζεται με την διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας και με τις 8760 ώρες του έτους. Η διαθεσιμότητα των σύγχρονων ανεμογεννητριών είναι τουλάχιστον 98%.

Επιπλέον πρέπει να λάβουμε υπόψη την μέση θερμοκρασία της περιοχής που εξετάζουμε, διότι κάθε καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας έχει υπολογιστεί για 15°C. Μια αύξηση της θερμοκρασίας θα οδηγούσε σε μείωση της πυκνότητας του αέρα άρα και

της ισχύος της ανεμογεννήτριας διότι τότε μετατοπίζεται η καμπύλη 3 προς τα κάτω σύμφωνα με τη σχέση ισχύος της ανεμογεννήτριας:

$$P' = 0,5 \cdot \rho \cdot u^3 \cdot A \cdot C_f \quad (4.5)$$

όπου

$C_f$ : ένας συντελεστής άνωσης (χαρακτηριστικός για κάθε ανεμογεννήτρια)

$\rho$ : η πυκνότητα του αέρα

$A$ : η επιφάνεια από όπου διέρχεται ο άνεμος

$u$ : η ταχύτητα του ανέμου

Ο συντελεστής άνωσης ή συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης  $C_f$  εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας που έχει ο άνεμος λίγο πριν τον ανεμοκινητήρα, το οποίο μετατρέπεται σε μηχανικό έργο στο δρομέα.

Δίνεται από τη σχέση :

$$C_f = 4a(1-a)^2 \quad (4.6)$$

όπου

$a$ : συντελεστής που ισούται με :

$$a = \frac{V1 - V0}{V1} \quad (4.7)$$

όπου

$V1$  ,  $V0$ : οι ταχύτητες του ανέμου αρκετά πριν και κοντά στο δρομέα

Παραγωγή του  $C_f$  ως προς  $a$  δίνει τη μέγιστη τιμή του η οποία είναι :

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 59\% \quad (4.8)$$

Αυτό είναι το όριο του Betz που αναφέρθηκε παραπάνω. Ο συντελεστής  $C_f$  είναι συνάρτηση της γεωμετρίας των πτερυγίων και του λόγου ταχύτητας προς την ταχύτητα του αέρα,  $\lambda$  που ορίζεται από την εξίσωση:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (4.9)$$

όπου

$\omega$ : γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων

R: ακτίνα των πτερυγίων

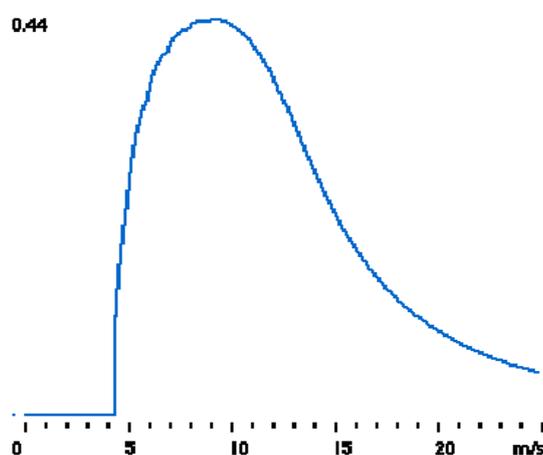
V: μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα

Το διάγραμμα της Εικόνας 4.8 είναι δεδομένο από τον κατασκευαστή. Από την σχέση 4.5 ή την Εικόνα 4.8 φαίνεται ότι είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Επιπλέον είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της μέσης ταχύτητας του ανέμου για διάφορες τιμές της παραμέτρου μορφής. Η καμπύλη αυτή εξάγεται με βάση την μέθοδο Cliff και συνήθως δίνεται μαζί με τα υπόλοιπα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας.

#### 4.5 Ενεργειακά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας

Για να προσδιοριστεί ο βαθμός απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου, πρέπει να διαιρεθεί κάθε ισχύς της αντίστοιχης καμπύλης (Εικόνα 4.8) με την θεωρητική ισχύ του ανέμου σε αυτή την ταχύτητα (σχέση 4.4). Έτσι προκύπτει ο βαθμός απόδοσης του της Εικόνας 4.9.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος μιας ανεμογεννήτριας που εξαρτάται από την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου κατά την διάρκεια του έτους, τον τόπο εγκατάστασής της και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της είναι ο συντελεστής εκμετάλλευσής της. Ο συντελεστής αυτός εκφράζει το λόγο της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας προς αυτήν που θα παράγονταν αν η ανεμογεννήτρια λειτουργούσε στην ονομαστική ισχύ της συνεχώς κατά την διάρκεια του έτους. Ο συντελεστής εκμετάλλευσής εκφράζει πόσο αξιοποιείται η ανεμογεννήτρια στον τόπο εγκατάστασής της.



Εικόνα 4.9: Βαθμός απόδοσης ανεμογεννήτριας

Είναι προφανές ότι κάθε ανεμογεννήτρια μπορεί να είναι βελτιστοποιημένη ώστε να αποδίδει καλύτερα σε ένα εύρος ταχυτήτων. Μεταβάλλοντας μεγέθη όπως το ύψος της ή την γωνία και τη γεωμετρία των πτερυγίων ή το μέγεθος των πτερυγίων ή το μέγεθος της γεννήτριας μεταβάλλεται η ενεργειακή συμπεριφορά της. Αλλάζοντας τα δύο τελευταία μεγέθη μεταβάλλεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, ενώ το ύψος της επηρεάζει μόνο την ταχύτητα του ανέμου. Γενικά οι ανεμογεννήτριες πρέπει να έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης στις ταχύτητες ανέμου που παράγεται η περισσότερη ενέργεια ετησίως (δηλαδή στο εύρος των συχνότερων υψηλών ταχυτήτων).

Για δεδομένο μέγεθος έλικα, όσο πιο μεγάλη είναι η γεννήτρια και όσο μεγαλύτερες οι ταχύτητες του ανέμου (αυτό επιτυγχάνεται αυξάνοντας το ύψος του ρότορα), τόσο πιο πολύ ενέργεια θα παράγεται, όμως συγχρόνως δεν θα αποδίδει ικανοποιητικά σε μικρές και μέσες ταχύτητες. Αντίθετα για την ίδια έλικα, όσο μικρότερη είναι η γεννήτρια τόσο καλύτερα θα αποδίδει σε αδύναμους ανέμους αλλά δεν θα αποδίδει ικανοποιητικά σε μεγάλες ταχύτητες.

Οι μικρές ανεμογεννήτριες παράγουν μικρά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, όμως δεν απαιτούν ισχυρό δίκτυο, παράγουν σχετικά πιο σταθερή ισχύ (διότι αποδίδουν καλύτερα σε μικρότερες ταχύτητες), απαιτούν μικρότερο κόστος θεμελίωσης και είναι αισθητικά πιο αποδεκτές από τους κατοίκους. Τέλος τα αιολικά πάρκα είναι προφανώς πιο αξιόπιστα όταν έχουν πολλές μικρές ανεμογεννήτριες.

Με βάση τα παραπάνω φαίνεται ότι μια μεγάλη ανεμογεννήτρια δεν είναι πάντα η καλύτερη λύση λόγω της οικονομίας κλίμακας, αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα των ανέμων και τις ανάγκες μας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι οι ανεμογεννήτριες παραλαμβάνουν περίπου μέσα σε 2-3 μήνες λειτουργίας όλη την ενέργεια που απαιτήθηκε για να κατασκευαστούν, ενώ οι παραθαλάσσιες ανεμογεννήτριες απαιτούν ακόμα λιγότερο χρόνο.

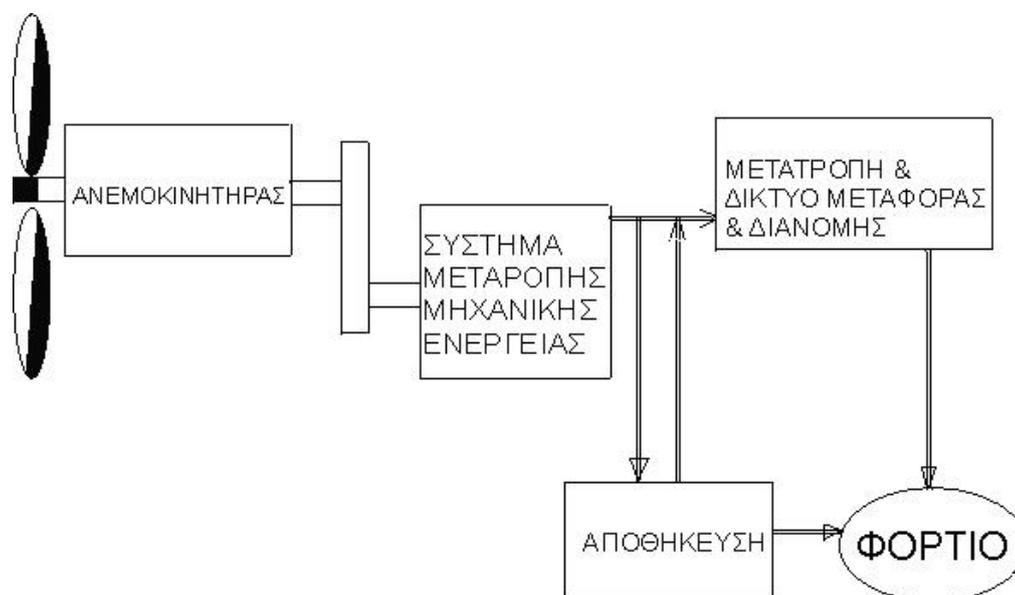
#### **4.6 Γενικά για τις ανεμογεννήτριες**

Ο ανεμοκινητήρας από την εποχή της εμφάνισης του μέχρι σήμερα έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζόντιου ή κάθετου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματα του (πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί, γεννήτρια κ.α.).

Εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί και στον τρόπο δέσμευσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς της ενέργειας του ανέμου που

μετατρέπεται από την ανεμογεννήτρια σε άλλη μορφή ενέργειας. Μια εικόνα των βασικών μερών που αποτελούν μια διάταξη εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας καθώς και της ροής ενέργειας παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.10.

Η διάταξη αυτή είναι μια γενική περίπτωση όπου η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με τη βοήθεια αεροδυναμικής διάταξης (π.χ. μιας έλικας). Αυτό το μηχανικό έργο μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο επί τόπου ή να χρειαστεί να μετατραπεί σε μια άλλη μορφή ενέργειας και να μεταφερθεί στον τόπο της ζήτησης.



**Εικόνα 4.10:** Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας

Παραδείγματα εκμετάλλευσης της παραγόμενης ενέργειας επί τόπου είναι αυτό της παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση του νερού που μπορεί να αποθηκευτεί, μεταφερθεί, και να καεί ως αέριο καύσιμο με μηδαμινή επιβάρυνση του περιβάλλοντος .

Στη δεύτερη που είναι και πιο ευρέως διαδεδομένη είναι αυτή της μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια λόγω της εύκολης μεταφοράς αλλά και της δυνατότητας που έχει να μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή θέλουμε.

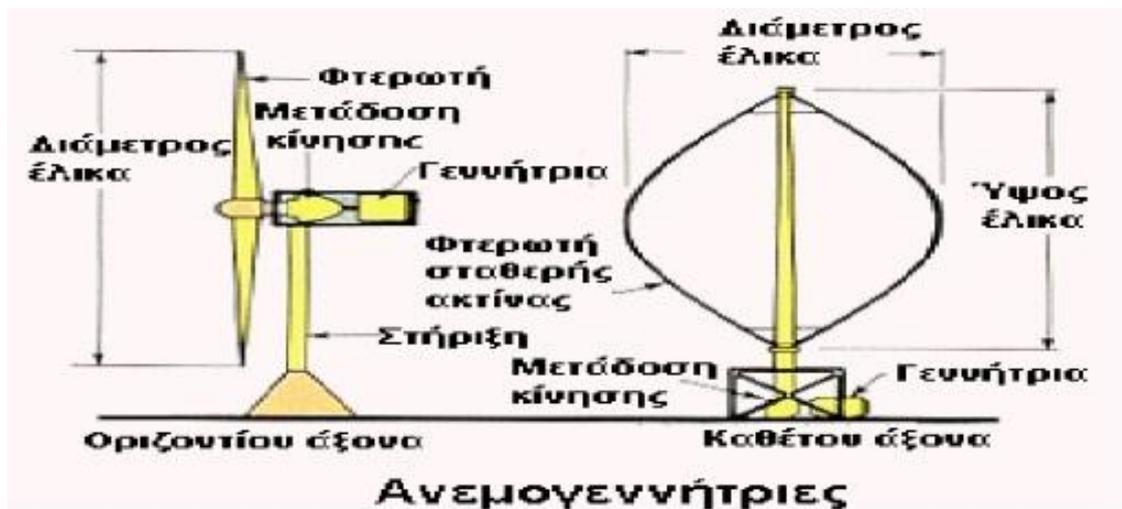
Βέβαια οι μεγάλες διακυμάνσεις της ενέργειας του ανέμου με το χρόνο πολλές φορές έχουν χρονική ασυμφωνία με την ζήτηση ενέργειας με αποτέλεσμα την αναγκαιότητα της αποθήκευσης της ενέργειας για τις χρονικές στιγμές στις οποίες η ισχύς του ανέμου πέφτει κάτω από ένα όριο.

## 4.7 Τρόποι συλλογής της αιολικής ενέργειας

Μέχρι σήμερα έχουν επινοηθεί και λειτουργήσει από αρχαιότατων χρόνων περισσότεροι τύποι ανεμομηχανών από οποιαδήποτε άλλο τύπο εφεύρεσης. Οι ανεμοκινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου σε:

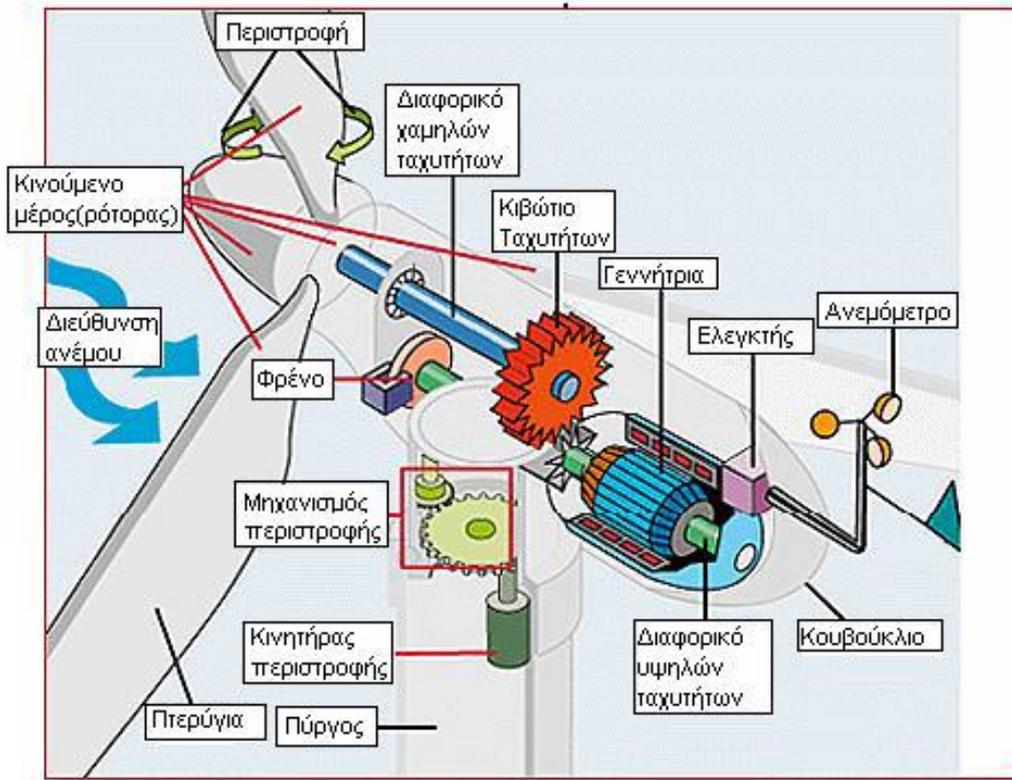
1. Οριζόντιου άξονα (Head on) στους οποίους ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου.
2. Οριζόντιου άξονα (Cross Wind) στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της Γης αλλά κάθετος στην κατεύθυνση του ανέμου.
3. Κάθετου άξονα στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης όπως και στην ροή του ανέμου (Savonius, Darrieus, Giromill κ.α) .

Επίσης έχουν επινοηθεί και άλλοι τύποι ανεμομηχανών όπως αυτοί του ηλιακού φωτός, Venturi, με διαχύτη ή συγκεντρωτή, αεροτομής και Magnus κ.α..



Εικόνα 4.11: Ανεμογεννήτριες οριζοντίου και καθέτου άξονα

## 4.8 Η δομή μιας ανεμογεννήτριας



Εικόνα 4.12: Βασικά δομικά στοιχεία ανεμογεννήτριας

Τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που απεικονίζεται στην Εικόνα 4.12 είναι τα εξής:

### Κουβούκλιο

Το κουβούκλιο περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένου του κιβωτίου ταχυτήτων, και της ηλεκτρικής γεννήτριας. Πρόσβαση στο εσωτερικό της ανεμογεννήτριας επιτρέπεται μέσω του πύργου. Αριστερά από το κουβούκλιο φαίνονται στην Εικόνα 4.12 τα κινούμενα μέρη της ανεμογεννήτριας (τα πτερύγια και η κεφαλή).

### Πτερύγια

Τα πτερύγια «συλλαμβάνουν» τον αέρα και μεταφέρουν την ισχύ του στην κεφαλή του ρότορα. Σε μια μοντέρνα ανεμογεννήτρια 1000kW κάθε πτερύγιο έχει μήκος 27 m και είναι σχεδιασμένο περίπου όπως ένα φτερό αεροπλάνου.

## **Κεφαλή**

Η κεφαλή του ρότορα είναι συνδεδεμένη με το διαφορικό χαμηλής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας.

## **Διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων**

Το διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων συνδέει την κεφαλή του ρότορα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Σε ανεμογεννήτρια 1000 kW ο ρότορας περιστρέφεται σχετικά αργά, περίπου 19 με 30 περιστροφές ανά λεπτό (rpm). Το διαφορικό περιέχει σωλήνες για το υδραυλικό σύστημα ώστε να μπορεί να λειτουργήσει το αεροδυναμικό φρένο.

## **Κιβώτιο ταχυτήτων**

Το κιβώτιο ταχυτήτων έχει το διαφορικό χαμηλών στροφών από αριστερά και μεταφέρει την κίνηση στο διαφορικό υψηλών στροφών (από δεξιά) κάνοντάς το να περιστρέφεται με ταχύτητα 50 φορές μεγαλύτερη από αυτή του διαφορικού χαμηλών στροφών.

## **Διαφορικό υψηλών ταχυτήτων**

Το διαφορικό υψηλών ταχυτήτων περιστρέφεται περίπου με 1500 στροφές ανά λεπτό (rpm) και οδηγεί την ηλεκτρική γεννήτρια. Το διαφορικό είναι εξοπλισμένο με ένα δισκόφρενο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Το μηχανικό φρένο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που το αεροδυναμικό φρένο υποστεί βλάβη ή η ανεμογεννήτρια επισκευάζεται.

## **Ηλεκτρική γεννήτρια**

Η ηλεκτρική γεννήτρια είναι μια σύγχρονη ή μια ασύγχρονη γεννήτρια. Στις τελευταίες ανεμογεννήτριες η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι μεταξύ 600 και 3000 kW.

## **Μηχανισμός περιστροφής**

Ο μηχανισμός περιστροφής χρησιμοποιεί ηλεκτρικές μηχανές (κινητήρας περιστροφής) για να στρέφει το κουβούκλιο απέναντι στον άνεμο. Ο μηχανισμός περιστροφής ελέγχεται από ηλεκτρονικό ελεγκτή ο οποίος αντιλαμβάνεται τη διεύθυνση του ανέμου χρησιμοποιώντας τον ανεμοδείκτη.

## **Ηλεκτρονικός ελεγκτής**

Περιέχει ένα υπολογιστή που παρακολουθεί διαρκώς την κατάσταση της ανεμογεννήτριας και ελέγχει τον μηχανισμό περιστροφής. Σε κάθε περίπτωση επιπλοκής, π.χ. υπερθέρμανση του κιβωτίου ταχυτήτων ή της γεννήτριας, σταματά αυτόματα την ανεμογεννήτρια και καλεί τον υπολογιστή του ελεγκτή της ανεμογεννήτριας μέσω μιας τηλεφωνικής σύνδεσης.

## **Ανεμόμετρο & ανεμοδείκτης**

Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης χρησιμοποιούνται για να μετρούν την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου. Τα ηλεκτρικά σήματα του ανεμόμετρου χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να αρχίσει την λειτουργία της όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια ελάχιστη τιμή. Ο υπολογιστής σταματά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας αυτόματα αν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ένα ανώτατο όριο προκειμένου να προστατεύσει την ανεμογεννήτρια και το περιβάλλον αυτής. Τα σήματα του ανεμοδείκτη χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να στρέφει αυτήν απέναντι στον άνεμο, μέσω του μηχανισμού περιστροφής.

## **Πύργος**

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει το κουβούκλιο και τα κινούμενα μέρη της. Γενικά είναι πλεονέκτημα ο πύργος να είναι ψηλός, αφού οι ταχύτητες του ανέμου αυξάνονται όσο απομακρύνεται από το έδαφος. Μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια 1000 kW θα έχει ένα πύργο μεταξύ 50 και 80 μέτρων (το ύψος ενός κτιρίου 17 έως 27 ορόφων).

## **Μονάδα ψύξης**

Η μονάδα ψύξης περιέχει ένα ηλεκτρικό ανεμιστήρα που χρησιμοποιείται για να ψύχει την ηλεκτρική γεννήτρια. Επιπλέον περιέχει μια μονάδα ψύξης με λάδι η οποία χρησιμοποιείται για να ψύχει το λάδι στο κιβώτιο ταχυτήτων. Μερικές ανεμογεννήτριες έχουν υδρόψυκτες γεννήτριες.

## **Υδραυλικό σύστημα**

Το υδραυλικό σύστημα χρησιμοποιείται για να επαναφέρει τα αεροδυναμικά φρένα της ανεμογεννήτριας.

### *Μορφή πτερυγίων*

Τα πτερύγια σε μεγάλες ανεμογεννήτριες περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους. Το πτερύγιο δέχεται τον άνεμο κατά μήκος του υπό διαφορετικές γωνίες. Η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται προς τη βάση του πτερυγίου. Οι πολύ μεγάλες γωνίες δεν έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Προκειμένου να υπάρχει ενιαία γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος του πτερυγίου, το πτερύγιο έχει μορφή περιστροφική.

### *Ο μηχανισμός περιστροφής της ανεμογεννήτριας*

Ο μηχανισμός περιστροφής της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται για να στρέφει το δρομέα της ανεμογεννήτριας απέναντι στον αέρα. Η ανεμογεννήτρια λέγεται ότι έχει σφάλμα περιστροφής, αν ο δρομέας δεν είναι κάθετος στη διεύθυνση του ανέμου. Το σφάλμα περιστροφής συνεπάγεται ότι θα αξιοποιείται από την ανεμογεννήτρια μικρότερο μέρος της ενέργειας του ανέμου. Αν όμως αυτό ήταν το μόνο που συνέβαινε, τότε ο έλεγχος περιστροφής θα ήταν ένας εξαιρετικός τρόπος ελέγχου της ισχύος εισόδου στο ρότορα της ανεμογεννήτριας. Εκείνο το μέρος του ρότορα, όμως, που βρίσκεται πλησιέστερα στη διεύθυνση από την όποια φυσάει θα δέχεται μεγαλύτερη δύναμη απ' ό,τι το υπόλοιπο μέρος του ρότορα. Απ' τη μια αυτό συνεπάγεται ότι ο ρότορας θα έχει την τάση να στρέφεται απέναντι στον αέρα αυτόματα. Απ' την άλλη, σημαίνει ότι τα πτερύγια θα γέρνουν μπρος και πίσω σε μια ταλαντευτική κίνηση σε κάθε περιστροφή του ρότορα. Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με σφάλμα περιστροφής δέχονται μεγαλύτερα φορτία κόπωσης απ' ό,τι ανεμογεννήτριες που είναι στραμμένες σε μια διεύθυνση κάθετη στον αέρα.

### *Κιβώτια ταχυτήτων*

Η ενέργεια της περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας μεταφέρεται στην γεννήτρια μέσω του άξονα χαμηλών ταχυτήτων, του κιβωτίου ταχυτήτων και του άξονα υψηλών ταχυτήτων. Στην περίπτωση που γινόταν χρήση μιας ηλεκτρικής τριφασικής γεννήτριας, απευθείας συνδεδεμένης με το τριφασικό δίκτυο η οποία είχε ένα, δύο, ή τρία ζεύγη πόλων, τότε η γεννήτρια αυτή θα έπρεπε να περιστρέφεται από 1000 ως 3000 στροφές ανά λεπτό. Αν υποθεθεί ότι ο ρότορας της ανεμογεννήτριας έχει διάμετρο 43 μέτρα τότε θα έπρεπε να περιστρέφεται με δυο φορές την ταχύτητα του ήχου. Ένα ακόμη ενδεχόμενο είναι να κατασκευαστεί μια αργόστροφη γεννήτρια με πολλά ζεύγη πόλων. Αν όμως η γεννήτρια αυτή συνδεόταν απευθείας με το δίκτυο, θα έπρεπε να έχει 100 ζεύγη πόλων για να φτάνει μια αξιοπρεπή ταχύτητα των 30 στροφών ανά λεπτό. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι ότι η μάζα του ρότορα πρέπει να είναι ανάλογη στο μέγεθος της ροπής το

οποίο δέχεται. Έτσι λοιπόν μια απευθείας οδηγούμενη γεννήτρια θα έπρεπε να είναι σε κάθε περίπτωση βαριά, γεγονός που σημαίνει υψηλό κόστος. Η πρακτική λύση είναι η χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων.



Εικόνα 4.13: Κιβώτιο ταχυτήτων ανεμογεννήτριας κατά την κατασκευή του

Το κιβώτιο ταχυτήτων σε μια ανεμογεννήτρια δεν «αλλάζει» ταχύτητες. Συνήθως έχει ένα λόγο ταχυτήτων ανάμεσα στην περιστροφή του δρομέα και της γεννήτριας. Για μια μηχανή 600 ή 750kW, ο λόγος ταχυτήτων είναι περίπου 1 προς 50.

#### *Πύργοι στήριξης*

Οι πύργοι των ανεμογεννητριών στηρίζουν το κουβούκλιο και τον ρότορα, μπορεί να είναι είτε χαλύβδινοι σωληνοειδείς πύργοι είτε δικτυωτοί πύργοι.

*Χαλύβδινοι σωληνοειδείς πύργοι:* Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν τέτοιου είδους πύργους, είναι κωνικοί, η διάμετρός τους δηλαδή αυξάνει προς τη βάση, προκειμένου να είναι ευσταθείς και να μειωθεί το χρησιμοποιούμενο υλικό.

*Δικτυωτοί πύργοι:* Οι πύργοι αυτοί κατασκευάζονται με χαλύβδινα δικτυώματα. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι το μειωμένο κόστος, αφού απαιτεί το μισό υλικό απ' ότι ο προηγούμενος. Το βασικό μειονέκτημά τους είναι η εμφάνισή τους. Για αισθητικούς λόγους οι πύργοι αυτοί έχουν εκλείψει.



**Εικόνα 4.14:** Ανεμογεννήτρια με χαλύβδινους σωληνοειδείς πύργους



**Εικόνα 4.15:** Ανεμογεννήτρια με δικτυωτό πύργο

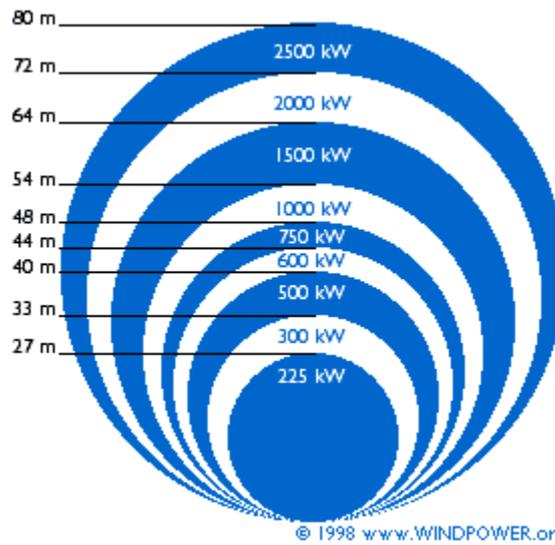
#### *Το μέγεθος των ανεμογεννητριών*

Η ισχύς εξόδου αυξάνεται όσο αυξάνει η επιφάνεια που καλύπτει ο δρομέας της ανεμογεννήτριας.

Όταν ένας αγρότης αναφέρεται στην έκταση που καλλιεργεί, θα περιγράψει την έκταση που καλλιεργεί σε τετραγωνικά μέτρα, σε στρέμματα. Με μια ανεμογεννήτρια είναι περίπου το ίδιο, μόνο που στην καλλιέργεια η επιφάνεια αναφέρεται σε οριζόντιο επίπεδο ενώ στην Α/Γ σε κάθετο.

Η επιφάνεια του δίσκου που καλύπτει ο ρότορας, καθώς και η ταχύτητα του ανέμου, φυσικά, καθορίζει την ενέργεια που παράγει η ανεμογεννήτρια.

Η παρακάτω Εικόνα 4.16 δίνει μια εικόνα των συνήθων μεγεθών των ανεμογεννητριών: Μια τυπική ανεμογεννήτρια 600kW θα έχει διάμετρο ρότορα 44m. Αν διπλασιαστεί η διάμετρος του ρότορα, τετραπλασιάζεται η επιφάνεια που καλύπτει. Αυτό σημαίνει ότι τετραπλασιάζεται και η ισχύς εξόδου.



**Εικόνα 4.16:** Μεγέθη συνήθων ανεμογεννητριών

Η διάμετρος του ρότορα μπορεί να διαφέρει λίγο από τα μεγέθη που δίνονται στο σχήμα, γιατί αρκετοί κατασκευαστές προσαρμόζουν τις μηχανές τους στις αιολικές συνθήκες κάθε περιοχής. Μια μεγάλη ανεμογεννήτρια, απαιτεί περισσότερη ισχύ (ισχυρότερους ανέμους) για να περιστραφεί. Αν λοιπόν εγκατασταθεί μια ανεμογεννήτρια σε μια περιοχή με χαμηλό αιολικό δυναμικό θα μεγιστοποιηθεί η ετήσια ενεργειακή παραγωγή αν για δεδομένο μέγεθος του ρότορα χρησιμοποιηθεί μια μικρότερη γεννήτρια (ή αντίστροφα για δεδομένη ισχύ γεννήτριας χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερος δρομέας). Για μηχανή 600 kW το μέγεθος του ρότορα μπορεί να κυμαίνεται από 39m ως 48m. Ο λόγος για τον οποίο θα αυξηθεί η παραγωγή ενέργειας από μια σχετικά μικρότερη μηχανή σε περιοχές με χαμηλό αιολικό δυναμικό είναι ότι η ανεμογεννήτρια θα δουλεύει για περισσότερες ώρες κατά τη διάρκεια του χρόνου.

#### 4.9 Ασύγχρονες γεννήτριες

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες στον κόσμο χρησιμοποιούν τριφασικές ασύγχρονες γεννήτριες με κλωβό. Αυτός ο τύπος γεννήτριας παρόλο που δεν χρησιμοποιείται ευρέως, είναι πολύ διαδεδομένος εκτός από την βιομηχανία των ανεμογεννητριών, και στα μικρά υδροηλεκτρικά.

Το περίεργο με αυτού του είδους τη γεννήτρια είναι ότι αρχικά είχε σχεδιαστεί ως ηλεκτρικός κινητήρας. Για την ακρίβεια το ένα τρίτο της παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης χρησιμοποιείται για τη λειτουργία ασύγχρονων κινητήρων μέσα σε εργοστάσια, αντλίες, ανελκυστήρες, και άλλες εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική.

Ένας λόγος επιλογής του κινητήρα αυτού είναι η αξιοπιστία του και ότι είναι σχετικά φθηνός. Η γεννήτρια έχει ακόμα κάποια χαρακτηριστικά που είναι χρήσιμα για τις ανεμογεννήτριες. Έχει αυξημένη δυνατότητα ολίσθησης, και μια ικανότητα υπερφόρτωσης.

Η ασύγχρονη γεννήτρια με κλωβό έχει ένα δρομέα ο οποίος τη διαφοροποιεί από τη σύγχρονη γεννήτρια. Ο δρομέας αποτελείται από μεταλλικές ράβδους (συνήθως αλουμινίου) που ενώνονται ηλεκτρικά με αλουμινένιους δακτυλίους. Ένα ισχυρό πλεονέκτημα αυτού του τύπου δρομέα είναι ότι προσαρμόζεται αυτόματα στα ζεύγη πόλων του στάτη.

Αν ο δρομέας περιστρέφεται ακριβώς στην σύγχρονη ταχύτητα τότε το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με ακριβώς την ίδια ταχύτητα, δεν υπάρχουν φαινόμενα επαγωγής, και δεν αλληλεπιδρά με το στάτη. Αν η ταχύτητα υπερβεί την σύγχρονη ταχύτητα τότε ο δρομέας περιστρέφεται γρηγορότερα από το μαγνητικό πεδίο με συνέπεια να παρέχεται στο δίκτυο ηλεκτρικό ρεύμα.

Η ταχύτητα της ασύγχρονης γεννήτριας μεταβάλλεται με την εφαρμοζόμενη περιστροφική δύναμη. Στην πράξη, η διαφορά μεταξύ της περιστροφικής ταχύτητας στη μέγιστη ισχύ και στη χαμηλή είναι πολύ μικρή, της τάξης του 1 %. Η διαφορά αυτή σε ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας καλείται ολίσθηση της γεννήτριας. Γι' αυτό μια γεννήτρια με δυο ζεύγη πόλων θα περιστρέφεται αργά στις 1500 rpm όταν είναι συνδεδεμένη με δίκτυο συχνότητας 50 Hz.

Αν η γεννήτρια παράγει τη μέγιστη ισχύ της θα λειτουργεί στις 1515 rpm. Η παρακάτω σχέση είναι ο ορισμός της ολίσθησης μιας ασύγχρονης μηχανής. Το μέγεθος  $s$  εκφράζει την ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από την σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4.10)$$

Στην κατάσταση ηρεμίας  $n = 0$  και επομένως  $s = 1$ , ενώ για  $n = n_s$  η  $s = 0$ . Αν ο δρομέας στραφεί γρηγορότερα από το στρεφόμενο πεδίο ( $n > n_s$ ), τότε η ολίσθηση γίνεται αρνητική και είναι η περίπτωση της λειτουργίας της μηχανής ως γεννήτρια.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι η γεννήτρια θα αυξάνει ή θα μειώνει ελαφρώς τις στροφές όταν η περιστροφική δύναμη μεταβάλλεται. Αυτό έχει ως συνέπεια μικρότερη καταπόνηση στο κιβώτιο ταχυτήτων, και αυτός είναι ένας από τους σοβαρότερους λόγους για τη χρήση ασύγχρονης γεννήτριας παρά σύγχρονης σε ανεμογεννήτριες που είναι άμεσα συνδεδεμένες με το δίκτυο.

Στην ασύγχρονη γεννήτρια, ο στάτης πρέπει πριν λειτουργήσει να μαγνητιστεί από το δίκτυο. Υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργήσει η ασύγχρονη γεννήτρια σε αυτόνομο δίκτυο, όμως, πρέπει να παρέχονται πυκνωτές που να δίνουν το απαραίτητο ρεύμα μαγνήτισης. Επίσης είναι απαραίτητο ο δρομέας να έχει έναν εναπομείναν μαγνητισμό όταν εκκινήσει η γεννήτρια. Σε άλλη περίπτωση θα χρειαστεί μπαταρία και ηλεκτρονικά ισχύος, ή μια μικρή ντιζελογεννήτρια για να εκκινήσει το σύστημα.

Μια ασύγχρονη μηχανή με δακτυλιοφόρο δρομέα (wound rotor) έχει ένα στάτη παρόμοιο με την ασύγχρονη μηχανή με κλωβό αλλά ένα δρομέα ο οποίος φέρει αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τύλιγμα όμοιο με το τύλιγμα του στάτη. Το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται ηλεκτρικά με το περιβάλλον (π.χ. αντιστάσεις) διαμέσου “slip rings” (δακτυλίους) και “brushes” (ψήκτρες). Έτσι γίνεται δυνατός ο εξωτερικός έλεγχος των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του ρότορα και με τον τρόπο αυτό επηρεάζεται η τάση του.

Στο δρομέα σχεδόν πάντα οι 3 φάσεις συνδέονται σε αστέρα και τα 3 άκρα τους συνδέονται με τους τρεις δακτυλίους. Οι δακτύλιοι μέσω των ψηκτρών συνδέονται με ένα εξωτερικό κύκλωμα, π.χ. με τρεις ωμικές αντιστάσεις συνδεδεμένες σε αστέρα, ή είναι βραχυκυκλωμένοι.

Εντούτοις δε δίνεται ισχύς στους δακτυλίους. Ο μοναδικός τους στόχος είναι να επιτρέψουν στην αντίσταση να τοποθετηθεί σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα κατά την εκκίνηση. Τέτοια διάταξη ομαλής εκκίνησης υπάρχει στις γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (optislip). Ο άλλος τύπος γεννήτριας με δακτυλιοφόρο δρομέα, ο διπλά τροφοδοτούμενος, παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Τοποθετώντας την αντίσταση σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα όχι μόνο μειώνεται το ρεύμα εκκίνησης, αλλά αυξάνεται και η ροπή εκκίνησης. Η ολίσθηση του δρομέα αλλάζει τροποποιώντας τη συνολική αντίσταση του ρότορα μέσω ενός μετατροπέα που συνδέεται στον άξονα του ρότορα. Ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο. Αυτή η αντίσταση αποκόβεται όταν η μηχανή έχει ξεκινήσει, ώστε να μοιάζει ο δρομέας ηλεκτρικά με το δρομέα σε μηχανή κλωβού.

Το βασικό πλεονέκτημα είναι η ελαχιστοποίηση του φορτίου στις ανεμογεννήτριες κατά τη διάρκεια των ριπών του ανέμου. Μέσω αυτού του συστήματος η γεννήτρια έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την ολίσθησή της (σε ένα μικρό εύρος τιμών) και να οδηγηθεί στη βέλτιστη ολίσθηση, εξασφαλίζοντας μικρότερες ταλαντώσεις στη ροπή εισόδου και στην ισχύ εξόδου.

Τα κύρια μειονεκτήματα της γεννήτριας με δακτυλιοφόρο δρομέα είναι ότι είναι πιο ακριβή και όχι τόσο στιβαρή όσο η γεννήτρια

βραχυκυκλωμένου κλωβού, το εύρος στο οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα περιορίζεται στο 0 – 10% καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του στάτη, ο έλεγχος της πραγματικής και άεργου ισχύος που επιτυγχάνεται δεν είναι αρκετά ικανοποιητικός, ένα ποσοστό ισχύος καταναλώνεται στη μεταβλητή αντίσταση του δρομέα.

#### 4.10 Σύγχρονες γεννήτριες

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι πιο πολύπλοκη και ακριβότερη σε σχέση με μια αντίστοιχη επαγωγική. Εμφανίζει όμως ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της επαγωγικής. Δεν απαιτεί άεργο ρεύμα μαγνήτισης.

Σε γενικές γραμμές η λειτουργία των σύγχρονων μηχανών έχει ως εξής:

- Όλες οι τριφασικές γεννήτριες χρησιμοποιούν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται από τρεις ηλεκτρομαγνήτες. Καθένας από τους τρεις ηλεκτρομαγνήτες είναι συνδεδεμένος με μια φάση του ηλεκτρικού δικτύου
- Καθένας από τους ηλεκτρομαγνήτες μετατρέπεται διαδοχικά από Νότιος σε Βόρειος πόλος και αντίστροφα. Η μεταβολή αυτή του μαγνητισμού αντικατοπτρίζει ακριβώς τη μεταβολή της τάσης της κάθε φάσης. Όταν η μια φάση βρίσκεται στο μέγιστο, οι άλλες δυο διαρρέονται από ρεύμα αντίθετης διεύθυνσης στη μισή τάση. Αφού οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι ανά 120 μοίρες, το μαγνητικό πεδίο θα κάνει μια πλήρη περιστροφή ανά κύκλο
- Η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια αν επιβληθεί στον δρομέα ρεύμα ώστε να τον εξαναγκάσει στην κυκλική κίνηση, αντί να τον περιστρέφει το ρεύμα του δικτύου. Πρέπει συνεπώς να υπάρχει ένας ισχυρός μαγνήτης για να παράγεται αρκετό ρεύμα. Όσο περισσότερη δύναμη εφαρμόζεται στο δρομέα τόσο περισσότερο ρεύμα παράγεται, η γεννήτρια όμως συνεχίζει να λειτουργεί στην ίδια ταχύτητα η οποία προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου και τους πόλους της μηχανής
- Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο, και να προκύψει ένα ανεξάρτητο τριφασικό δίκτυο. Εάν όμως αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο, θα πρέπει να διατηρηθεί σταθερή περιστροφική ταχύτητα προκειμένου να παραχθεί εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερή συχνότητα. Επομένως, με τέτοιου είδους γεννήτρια θα πρέπει συνήθως να χρησιμοποιείται έμμεση σύνδεση με το δίκτυο

Στην πράξη, σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες δεν χρησιμοποιούνται πολύ. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι γι' αυτό. Ένας είναι ότι οι μόνιμοι μαγνήτες τείνουν να απομαγνητιστούν όταν λειτουργούν κάτω από ισχυρά μαγνητικά πεδία όπως αυτά της γεννήτριας. Ένας άλλος είναι ότι ισχυροί μαγνήτες φτιάχνονται από σπάνια μέταλλα π.χ. Νεοδύνιο, και είναι πολύ ακριβοί.

Συνήθως οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούν στον δρομέα ηλεκτρομαγνήτες που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα το οποίο παρέχεται από το δίκτυο. Αφού όμως το δίκτυο παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα, πρέπει να προηγηθεί ένα στάδιο μετατροπής του εναλλασσομένου σε συνεχές ρεύμα.

Η ταχύτητα μιας γεννήτριας που είναι άμεσα συνδεδεμένη με το τριφασικό δίκτυο είναι σταθερή, προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, και από τα ζεύγη πόλων του στάτη. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες με σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούν γεννήτριες με δύο ή τρία ζεύγη πόλων. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται αυτές οι σχετικά υψηλής ταχύτητας γεννήτριες είναι η οικονομία σε μέγεθος και κόστος.

Η μέγιστη δύναμη την οποία μπορεί να «αντέξει» η γεννήτρια εξαρτάται από το μέγεθος του δρομέα. Για δεδομένη ισχύ εξόδου υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ μιας αργόστροφης, μεγάλης και άρα ακριβής γεννήτριας, ή μιας υψηλόστροφης και άρα φθηνότερης μικρότερης γεννήτριας.

#### **4.11 Είδη αιολικών παρκών**

Γενικά αιολικό πάρκο ονομάζεται μια ομάδα ανεμογεννητριών εγκατεστημένες στην ίδια τοποθεσία. Κάθε ανεμογεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ένα εσωτερικό δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης, το οποίο συνδέεται με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή ανύψωσης της τάσης. Υπάρχουν τρία βασικά είδη αιολικών παρκών τα χερσαία (onshore), τα πάρκα που βρίσκονται κοντά στην ακτή (nearshore) και τα παράκτια (offshore).

#### **Χερσαία Αιολικά Πάρκα (onshore)**

Χερσαία αιολικά πάρκα, ονομάζονται αυτά που κατασκευάζονται στις κορυφογραμμές περιοχών με μεγάλο σχετικά υψόμετρο τουλάχιστον τρία χιλιόμετρα προς το εσωτερικό από την πλησιέστερη ακτογραμμή. Αυτό συμβαίνει για την εκμετάλλευση της λεγόμενης τοπογραφικής επιτάχυνσης, την επιτάχυνση δηλαδή του ανέμου καθώς διασχίζει μια

κορυφογραμμή. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί και σε αύξηση της παραγόμενης ενέργειας.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην ακριβή τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, η οποία γίνεται μετά από αναλυτική παρακολούθηση των τοπικών ανέμων για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα πριν την εγκατάσταση.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η περιοχή στην οποία εγκαθίσταται το αιολικό πάρκο, αλλοιώνεται μόνο οπτικά και παραμένει αξιοποιήσιμη για γεωργία ή κτηνοτροφία.



**Εικόνα 4.17:** Αιολικό πάρκο στο όρος Παναχαϊκό Αχαΐας

### **Αιολικά Πάρκα κοντά στην ακτή**

Είναι τα πάρκα που βρίσκονται στην ξηρά εντός της ζώνης των τριών χιλιομέτρων από την ακτογραμμή ή στην θάλασσα εντός της ζώνης των δέκα χιλιομέτρων από την ακτογραμμή.

Αυτές οι τοποθεσίες είναι αποδοτικές για εγκατάσταση λόγω του ανέμου που δημιουργείται από την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ θάλασσας και ξηράς καθημερινά.



**Εικόνα 4.18:** Αιολικό πάρκο κοντά στην ακτή

### **Παράκτια Αιολικά Πάρκα (offshore)**

Είναι εγκατεστημένα σε θαλάσσιες περιοχές πέραν των δέκα χιλιομέτρων από την ακτή. Ακριβώς επειδή η επιφάνεια του νερού είναι ομαλότερη αυτής του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλότερη από την ξηρά, έτσι ο συντελεστής Χρησιμοποίησης ή συντελεστής Εκμετάλλευσης (Capacity Factor) είναι υψηλότερος των άλλων δυο τύπων αιολικών πάρκων.

Γενικά έχουν μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, οι πύργοι είναι ψηλότεροι των χερσαίων.

Η μεταφορά της ενέργειας γίνεται με υποθαλάσσιο καλώδιο, σε περιπτώσεις μεγάλων αποστάσεων από την ακτή χρησιμοποιείται μεταφορά με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης (HVDC) για ελαχιστοποίηση των απωλειών κατά την μεταφορά.



**Εικόνα 4.19:** Παράκτιο αιολικό πάρκο (offshore)

## 5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ

### 5.1 Αρχή αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας – Η υδραυλική ενέργεια στην Ελλάδα.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται από τη μετακίνηση του γλυκού νερού από τους ποταμούς και τις λίμνες. Το νερό αυτό διαθέτει δυνητική ενέργεια, η οποία εκφράζεται από τη στάθμη του ως προς τη στάθμη της θάλασσας. Η ενέργεια αυτή του νερού, η οποία επιδιώκεται να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια μέσω του υδροστροβίλου, είναι ανανεώσιμη καθώς προέρχεται από μία φάση του υδρολογικού κύκλου, τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις). Κινητήρια δύναμη του υδρολογικού κύκλου είναι η δράση του ήλιου, οπότε συνεπάγεται ότι η υδραυλική ενέργεια προέρχεται και αυτή από την ηλιακή ενέργεια.

Στην Εικόνα 5.1 που ακολουθεί, δίνεται η σχηματική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου.



Εικόνα 5.1: Ο υδρολογικός κύκλος

Μέρος της ποσότητας του νερού που προέρχεται από τις βροχοπτώσεις και την τήξη των χιονιών σε μια υδρολογική λεκάνη αποτελεί το επιφανειακό νερό των ποταμών και υδατορευμάτων γενικότερα. Το νερό

αυτό, χάρη στη βαρύτητα, ρέει συνεχώς προς χαμηλότερες στάθμες μέχρι να καταλήξει στη στάθμη της θάλασσας. Κατά την φυσική αυτή ροή στην κοίτη του υδατορεύματος, η δυνητική ενέργεια του νερού συνεχώς υποβαθμίζεται και μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω μηχανισμών υδραυλικών απωλειών, τύρβης και μεταφοράς υλικών. Εάν το νερό μιας φυσικής ροής συλλεγεί σε μια υψηλότερη στάθμη zE, οδηγηθεί σε μια χαμηλότερη στάθμη zA, αφού διέλθει μέσω ενός υδροστροβίλου γίνεται δυνατή η μετατροπή της ανά μονάδα μάζας ενέργεια:

$$g x (z_E - z_A)$$

της διερχόμενης παροχής σε μηχανική ενέργεια, αφού αφαιρεθούν οι πάσης φύσεως απώλειες.

Επειδή η παραγόμενη με τον τρόπο αυτό μηχανική ενέργεια, δηλαδή κινητήρια ροπή στη στρεφόμενη άτρακτο, δεν είναι δυνατόν να μεταφερθεί ικανοποιητικά στον τόπο κατανάλωσης, μετατρέπεται επί τόπου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας, κατευθείαν συζευγμένης στην άτρακτο του υδροστροβίλου. Για το λόγο αυτό, το σύνολο των έργων και του εξοπλισμού μέσω των οποίων η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ονομάζεται υδροηλεκτρικό έργο (ΥΗΕ).

Η υδροηλεκτρική ενέργεια ξεκίνησε να εφαρμόζεται σε υδροηλεκτρικά έργα (ΥΗΕ) μεγάλης κλίμακας από τα τέλη του 19ου αιώνα. Οι πρώτες σύγχρονες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις χτίστηκαν το 1882 στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτές οι πρώτες εγκαταστάσεις χρησιμοποίησαν έναν γρήγορα ρέοντα ποταμό ως πηγή ενέργειας. Μερικά έτη αργότερα, άρχισαν να χρησιμοποιούνται τα φράγματα ως τεχνητές περιοχές αποθήκευσης ύδατος στις καταλληλότερες θέσεις. Αυτά τα φράγματα ελέγχουν επίσης το ποσοστό ροής του νερού στους στροβίλους των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Αρχικά οι σταθμοί υδροηλεκτρικής παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος ήταν μικρής κλίμακας και ιδρύονταν δίπλα σε καταρράκτες κοντά στις πόλεις καθώς δεν ήταν δυνατό, εκείνη την περίοδο, να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις. Πλέον, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις είναι εφικτή, με αποτέλεσμα να έχει υπάρξει μεγάλης κλίμακας χρήση της υδροηλεκτρικής δύναμης καθιστώντας την οικονομικά βιώσιμη. Η μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις πραγματοποιείται με τη βοήθεια της υψηλής τάσης σε εναέρια ηλεκτροφόρα καλώδια αποκαλούμενα γραμμές μετάδοσης. Την τελευταία δεκαετία οι τεχνολογικές εξελίξεις επέτρεψαν τη μαζική εμπορική αξιοποίηση και της αιολικής ενέργειας.

- Μειονεκτήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας:
  1. Η σημαντική αρχική επένδυση που προϋποθέτει, λόγω των μεγάλων κλίμακας έργων
  2. Οι σημαντικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη δημιουργία τεχνητής λίμνης και την κατάκλυση μεγάλων εκτάσεων, τη διακοπή της συνέχειας του ποτάμιου οικοσυστήματος και τη διακοπή της τροφοδοσίας των κατάντη εκτάσεων με φερτές ύλες
- Πλεονεκτήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας:
  1. Αποτελεί καθαρή ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με μηδενικό κόστος καυσίμου και μηδενικές εκπομπές ρύπων
  2. Είναι εγχώρια πηγή ενέργειας και συνεισφέρει στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού, σε εθνικό επίπεδο
  3. Είναι διάσπαρτη γεωγραφικά και οδηγεί στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, αλλά δίνει και τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης τοπικών ενεργειακών πόρων
  4. Οι θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη δημιουργία λιμνών και νέων οικοσυστημάτων
  5. Μπορεί να αποτελέσει πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών, καθώς και να συμβάλει στην τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση σχετικών επενδύσεων
  6. Δεν παράγει ατμοσφαιρικούς ρύπους και θόρυβο (παρά μόνο μικρής έντασης και χρονικής διάρκειας στη φάση των κατασκευών)
  7. Η ευελιξία των μονάδων ενεργειακής μετατροπής που επιτρέπουν την προσαρμογή της παραγωγής στις απαιτήσεις της κατανάλωσης
  8. Η προστασία από πλημμύρες των κατάντη περιοχών και η ρύθμιση των εισροών που επιτρέπει την αξιοποίηση του νερού και για άλλες επιπρόσθετες χρήσεις

Κατά συνέπεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια εναρμονίζεται με την αρχή της αειφορίας. Από τα παραπάνω πλεονεκτήματα εκείνο που δίνει τη μεγαλύτερη ενεργειακή και οικονομική σημασία στην υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η ευελιξία των μονάδων ενεργειακής μετατροπής. Σε λιγότερο από ένα λεπτό μια τέτοια μονάδα μπορεί να τεθεί σε λειτουργία και να αναλάβει πλήρες φορτίο, κάτι που τη διαφοροποιεί σημαντικά από τις άκαμπτες λιγνιτικές μονάδες, για παράδειγμα. Αυτό επιτρέπει τη χρήση της υδροηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αιχμών της ζήτησης και της προσδίδει έτσι περίπου διπλάσια οικονομική αξία, σε σχέση με τη συμβατική θερμική ενέργεια. Για το λόγο αυτό, η αξιοπιστία

του όλου ενεργειακού συστήματος της χώρας βασίζεται κατά πολύ στις υδροηλεκτρικές μονάδες. Βέβαια, απαραίτητη προϋπόθεση για να υπάρχει αξιοπιστία αυτού του τύπου είναι η διαθεσιμότητα μεγάλου όγκου ταμίευσης νερού, ώστε να μπορεί να λειτουργούν οι μονάδες παραγωγής τις ώρες ακριβώς που χρειάζονται, ενώ τις υπόλοιπες ώρες οι εισροές νερού αποθηκεύονται προσωρινά. Η προϋπόθεση αυτή ικανοποιείται πάντα στα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, όχι όμως και στα μικρά που δεν περιλαμβάνουν ταμιευτήρα.

## **Η υδραυλική ενέργεια στην Ελλάδα**

Λόγω του ευνοϊκού τοπογραφικού ανάγλυφου, η Ελλάδα διαθέτει σημαντικό υδροδυναμικό, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου συγκεντρώνεται στο δυτικό και βόρειο τμήμα της, όπου βρίσκονται οι μεγάλοι ποταμοί Αχελώος, Άραχθος, Αώος, Αλιάκμονας και Νέστος. Παρόλα αυτά, μικρό μέρος του δυναμικού αυτού αξιοποιείται. Οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες εξάντλησαν σε μεγάλο ποσοστό την ανάπτυξη του υδροδυναμικού τους και κατά συνέπεια η ηλεκτροπαραγωγή από μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα δεν αναμένεται να συμβάλει ουσιαστικά στην υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων. Η Ελλάδα αποτελεί εξαίρεση καθώς μόνο το ένα τρίτο του οικονομικά εκμεταλλεύσιμου υδροδυναμικού χρησιμοποιείται ή βρίσκεται υπό αξιοποίηση. Διαθέτει επομένως η χώρα σοβαρά ανεκμετάλλευτα αποθέματα εγχώριων, καθαρών και ανανεώσιμων υδατικών ενεργειακών πηγών, για την αξιοποίηση των οποίων υπάρχει και όλη η απαιτούμενη εγχώρια τεχνογνωσία και η κατασκευαστική υποδομή.

### **5.2 Συστήματα αντλησιοταμίευσης**

#### **5.2.1 Εισαγωγή**

Όπως αναφέρθηκε, η ποσότητα της ισχύος που παράγεται από τις διατάξεις των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) κυμαίνεται σημαντικά σε ημερήσια, ωριαία και εποχιακή βάση λόγω της μεταβολής στη διαθεσιμότητα του ήλιου, του ανέμου και των άλλων ανανεώσιμων πηγών. Η διακύμανση αυτή σημαίνει ότι η ισχύς μερικές φορές δεν είναι διαθέσιμη, ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχει πλεόνασμα ισχύος. Δημιουργείται, επομένως, η ανάγκη της αποθήκευσης της ενέργειας για μικρά έως μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Σήμερα, η μόνη αξιόπιστη λύση αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα παρέχεται από τα συστήματα

αντλιοσταμείωσης και κυρίως από τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα, των οποίων οι μονάδες μετατροπής ενέργειας είναι αντιστρεπτές, δηλαδή μπορούν να λειτουργούν είτε ως στρόβιλοι (φάση παραγωγής) είτε ως αντλίες (φάση αποθήκευσης).

### **5.2.2 Περιγραφή συστήματος αντλιοσταμείωσης – Το δίλημμα της σωλήνωσης**

Ένα τυπικό σύστημα αντλιοσταμείωσης αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Μια αντλία ή ένα σύστημα αντλιών
- Έναν υδροστρόβιλο ή ένα σύστημα υδροστροβίλων
- Δύο δεξαμενές νερού, οι οποίες βρίσκονται σε ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους
- Ένα σύνολο σωληνώσεων για την άντληση νερού από την κάτω δεξαμενή προς την άνω
- Ένα σύνολο σωληνώσεων για την προσαγωγή νερού από την άνω δεξαμενή προς την κάτω μέσω του υδροστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Μια ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια σε κοινή άτρακτο με την αντλία και τον υδροστρόβιλο

Σε ένα σύστημα αντλιοσταμείωσης διακρίνουμε δύο βασικές σχεδιαστικές εκδοχές, αυτής της μονής σωλήνωσης και αυτής της διπλής σωλήνωσης, όπου δηλαδή υπάρχει ανεξάρτητη σωλήνωση για τον στρόβιλο και για τη λειτουργία των αντλιών.

#### **Μονή σωλήνωση**

Η περίπτωση της μονής σωλήνωσης εμφανίζει ασφαλώς το πλεονέκτημα της πιο οικονομικής λύσης, δεδομένου ότι μειώνονται τα έξοδα της εγκατάστασης. Ωστόσο, θέτει περιορισμό ως προς τη λειτουργία, δεδομένου ότι δεν επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία του στροβίλου με τις αντλίες. Για το λόγο αυτό, απαιτείται να καθοριστεί αν έχει προτεραιότητα λειτουργίας ο στρόβιλος ή οι αντλίες.

*Προτεραιότητα στις αντλίες:*

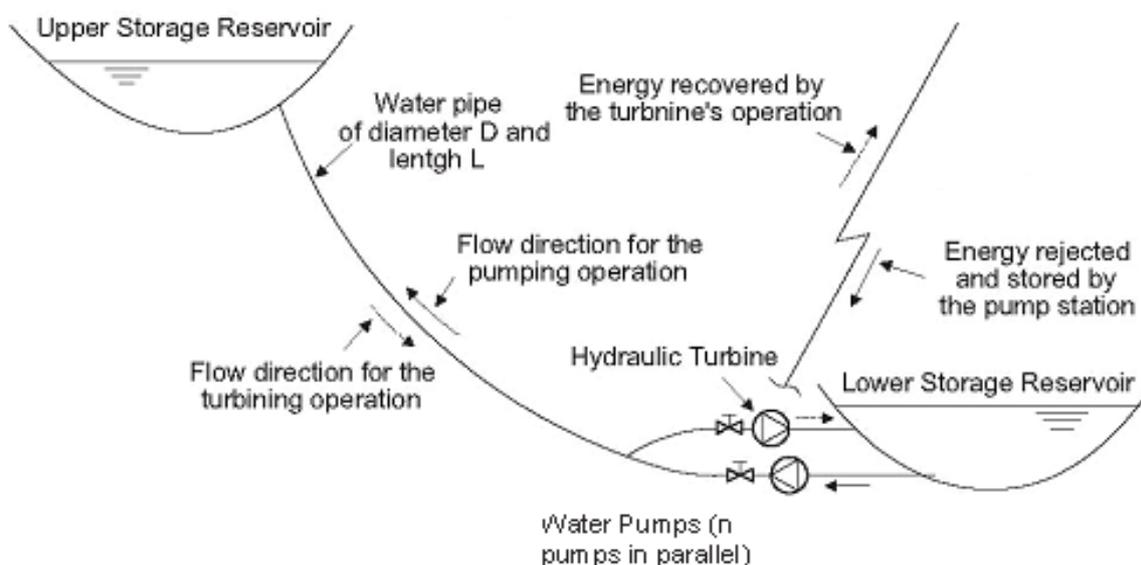
Στην περίπτωση που υπάρχουν διαστήματα κατά τα οποία η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις θερμικές μονάδες (συμβατικές ή πυρηνικές) ή από τις υδροηλεκτρικές μονάδες βάσεως (κατά τον ρου του ποταμού)

είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση, προτεραιότητα στη λειτουργία έχουν οι αντλίες. Σε αυτήν την περίπτωση, η παραγωγή της ενέργειας από τον στρόβιλο μπορεί να γίνει μονάχα τις ώρες που δεν γίνεται άντληση, δηλαδή τις ώρες που δεν υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα τις μεταμεσονύκτιες ώρες ή τις αργίες, που η ζήτηση είναι χαμηλή.

#### *Προτεραιότητα στο στρόβιλο:*

Στην περίπτωση που υπάρχουν διαστήματα που συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή των μονάδων βάσεως, τότε προτεραιότητα λειτουργίας έχει ο στρόβιλος έναντι των αντλιών. Αυτό συμβαίνει κυρίως τις ώρες αιχμής. Σε αυτήν την περίπτωση, ενδεχομένως να συμβεί να υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς και να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άντληση λόγω λειτουργίας του στρόβιλου.

Στην Εικόνα 5.2 που ακολουθεί, δίνεται σχηματικά ένα υδροηλεκτρικό σύστημα με μονή σωλήνωση.



**Εικόνα 5.2:** Υδροηλεκτρικό σύστημα με μονή σωλήνωση

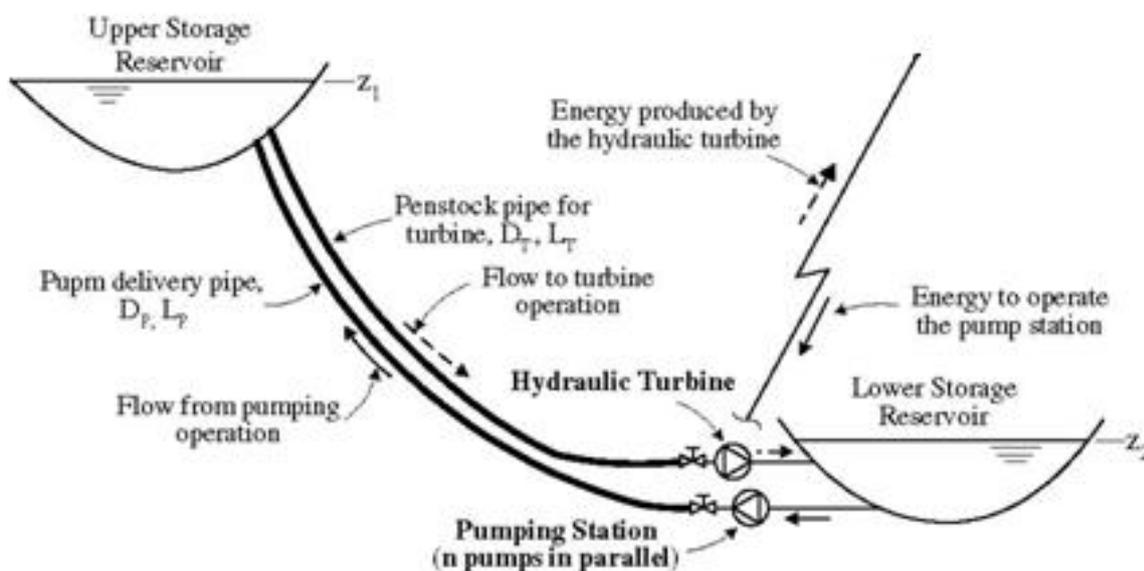
### **Διπλή σωλήνωση**

Θα μπορούσε να σκεφτεί κανείς ότι η διπλή σωλήνωση είναι περιττή, δεδομένου ότι εάν υπάρχει ανάγκης παραγωγής ενέργειας από το στρόβιλο και ταυτόχρονα υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς από τις θερμικές μονάδες ή από τις υδροηλεκτρικές μονάδες βάσεως, τότε θα μπορούσε να απορροφηθεί απευθείας περισσότερη ενέργεια από τις μονάδες αυτές. Ο

συλλογισμός αυτός είναι εσφαλμένος, λόγω των περιορισμών του δικτύου. Η άμεση δηλαδή απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να συμβεί πέραν της επιτρεπόμενης από το δίκτυο ενέργειας.

Παράλληλα, η χρονική κατανομή της απορριπτόμενης ισχύος δείχνει ότι η περικοπή καθορίζεται πρώτα από τη διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια και δεύτερον από τις διακυμάνσεις της ζήτησης. Σε ώρες αιχμής της ζήτησης και ταυτόχρονα περίσσειας ισχύος των μονάδων βάσεως, από τη μια υπάρχει περικοπή ισχύος και απαιτείται λειτουργία αντλιών για την εκμετάλλευση της περίσσειας ισχύος, από την άλλη πρέπει να λειτουργήσει ο στρόβιλος (π.χ. λόγω υψηλής ζήτησης). Εάν λειτουργεί η αντλία, θα απαιτηθεί χρόνος μέχρι να σταματήσει και να ξεκινήσει ο στρόβιλος, οπότε το βασικό πλεονέκτημα της άμεσης απόκρισης του στρόβιλου χάνεται.

Στην Εικόνα 5.3 που ακολουθεί, δίνεται σχηματικά ένα τυπικό σύστημα αντλιοσταμίου με διπλή σωλήνωση.



Εικόνα 5.3: Τυπικό σύστημα αντλιοσταμίου με διπλή σωλήνωση

Τόσο στην περίπτωση της μονής σωλήνωσης όσο και στην περίπτωση της διπλής που περιγράφηκαν ανωτέρω, οι τρεις μηχανές (αντλία – υδροστρόβιλος – κινητήρας /γεννήτρια) τοποθετούνται σε κοινή άτρακτο και η φορά περιστροφής είναι η ίδια ανεξαρτήτως λειτουργίας. Αξίζει βέβαια να αναφέρουμε ότι για τη μείωση των φθορών απαιτείται η ύπαρξη συμπλέκτη στα άκρα της ατράκτου, ώστε να μην περιστρέφεται άσκοπα η υδροδυναμική μηχανή που κάθε φορά δεν εργάζεται. Σε περίπτωση κατακόρυφης διάταξης, η αντλία τοποθετείται στο κατώτερο σημείο ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της σπηλαιώσης.

## **Μονή σωλήνωση με σύνθετη λειτουργία**

Στην περίπτωση αυτή υπάρχει η δυνατότητα διπλής ταυτόχρονης λειτουργίας με χρήση μονής σωλήνωσης. Πρόκειται για μια δεύτερη κατηγορία συστήματος αντλιοταμίευσης, το λεγόμενο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή που λειτουργεί είτε ως αντλία είτε ως στρόβιλος. Αυτή η προτεινόμενη λύση εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι είναι οικονομικότερη χωρίς να υστερεί λειτουργικά και θα παρουσιασθεί λεπτομερώς σε επόμενη παράγραφο.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι ανεξάρτητα των σχεδιαστικών εκδοχών που υιοθετούνται κάθε φορά σε ένα σύστημα αντλιοταμίευσης, οι μονάδες του συστήματος (αντλία – υδροστρόβιλος – ηλεκτρική μηχανή) τοποθετούνται σε στάθμη χαμηλότερη από αυτή της κατώτερης δεξαμενής για την αποφυγή εισροής αέρα, κάτι όμως που απαιτεί μεγάλο όγκο εκσκαφών. Επιπρόσθετα, οι μονάδες αυτές μπορούν να απομονωθούν από τις δύο δεξαμενές, μέσω βανών που τοποθετούνται στους αγωγούς κατάθλιψης και αναρρόφησης.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν, θα έλεγε κανείς ότι ένα σύστημα αντλιοταμίευσης, αποτελεί ένα συνδυασμό αντλητικής εγκατάστασης (αποταμίευσης ενέργειας) και υδροηλεκτρικού έργου (παραγωγή ενέργειας). Παρακάτω θα γίνει αναφορά για κάθε μέρος του τυπικού συστήματος ξεχωριστά και θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του.

### **5.2.2.1 Αντλίες**

#### **Εισαγωγή**

Οι αντλίες αποτελούν μια κατηγορία στροβιλομηχανών και ειδικότερα ανήκουν στις εργοστροβιλομηχανές και ορίζονται ως οι μηχανές μέσω των οποίων γίνεται εναλλαγή της μηχανικής ενέργειας (η οποία προσδίδεται από έναν κινητήρα στη στρεφόμενη άτρακτο και από αυτήν στην πτερωτή) σε ενέργεια ρευστού.

Σκοπός των αντλιών είναι η διακίνηση υγρών από μια δεξαμενή σε μια άλλη που βρίσκεται σε μεγαλύτερη συνήθως στάθμη. Οι αντλίες προσδίδουν ενέργεια στο υγρό η οποία αντιστοιχεί στην ενεργειακή αναβάθμιση του υγρού μεταξύ άνω και κάτω δεξαμενής και στην ενέργεια που δαπανάται λόγω υδραυλικών απωλειών στη σωλήνωση μέσω της οποίας γίνεται η διακίνηση του υγρού.

## Διαμόρφωση αντλιών

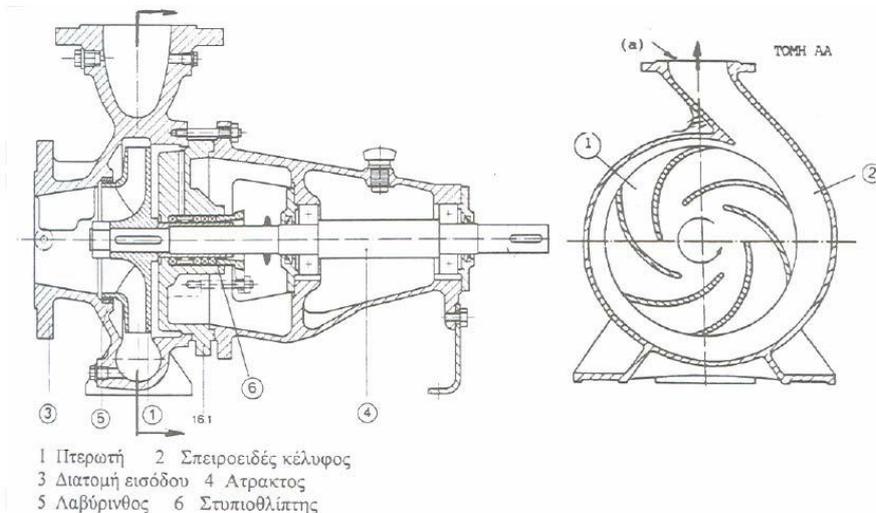
Τα κύρια μέρη μιας αντλίας είναι:

- Η πτερωτή, ένα στρεφόμενο τμήμα της μηχανής, στο οποίο λαμβάνει χώρα η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια του ρευστού
- Το τμήμα εισόδου, που εξασφαλίζει την οδήγηση του ρευστού από τη διατομή εισόδου της μηχανής μέχρι τη διατομή εισόδου της πτερωτής
- Το τμήμα εξόδου, ρόλος του οποίου είναι η συλλογή του ρευστού που εξέρχεται από την πτερωτή και η οδήγηση στην διατομή εξόδου της πτερωτής

Για να είναι δυνατή η λειτουργία της μηχανής θα πρέπει να υπάρχουν και άλλα τμήματα, τα οποία εξασφαλίζουν τη λειτουργία και τη συνεργασία των κύριων τμημάτων, όπως το εξωτερικό κέλυφος με το οποίο συνδέονται τα υπόλοιπα τμήματα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η στεγανότητα της μηχανής, η μεταφορά δυνάμεων και ροπών που αναπτύσσονται σε αυτά, η στρεφόμενη άτρακτος μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά της μηχανικής ροπής, τα έδρανα της ατράκτου, ο μηχανισμός στεγανότητας (στυθιοθλίπτες) κτλ.

Το ρευστό εισέρχεται στο τμήμα εισόδου, όπου εξασφαλίζεται η ομοιομορφία της ροής, που απαιτείται στην είσοδο της πτερωτής. Όταν εισέρχεται στην πτερωτή, το ρευστό είναι απαλλαγμένο συστροφής. Τέλος, συλλέγεται από το τμήμα εξόδου της αντλίας και οδηγείται στην έξοδο της μηχανής, όπου έχει ομοιόμορφη ροή και μια συγκεκριμένη τιμή πίεσης.

Στην Εικόνα 5.4 δίνεται σχηματικά η διαμόρφωση τυπικής φυγόκεντρης αντλίας με την πτερωτή σε πρόβολο.



**Εικόνα 5.4:** Διαμόρφωση τυπικής φυγόκεντρης αντλίας με την πτερωτή σε πρόβολο

## Η ροή της ενέργειας

Η ανά μονάδα μάζας ενέργεια  $H$  που παραλαμβάνει το υγρό από την αντλία, εκφρασμένη σε μέτρα στήλης υγρού (mΣΥ), ονομάζεται πραγματικό ολικό ύψος της αντλίας, και έτσι ορίζεται ως η διαφορά της ολικής ενέργειας της μονάδας μάζας του υγρού, εκφρασμένη σε μονάδες ύψους στήλης υγρού, μεταξύ της διατομής κατάθλιψης και της διατομής αναρρόφησης, δηλαδή:

$$H = H_{oa} - H_{oe} = \frac{c_a^2}{2g} + \frac{p_a}{\rho g} + z_a - \left( \frac{c_e^2}{2g} + \frac{p_e}{\rho g} + z_e \right) \quad (5.1)$$

Όπου με  $e$  συμβολίζεται η συμβατική διατομή εισόδου (διατομή αναρρόφησης) της αντλίας και με  $a$  η συμβατική διατομή εξόδου (διατομή κατάθλιψης), ενώ με  $c$  συμβολίζεται το μέτρο της απόλυτης ταχύτητας (κινητική ενέργεια) του υγρού, με  $p$  η στατική του πίεση (ενέργεια εντατικής κατάστασης) και με  $z$  το γεωδαιτικό ύψος ως προς μία στάθμη αναφοράς (δυναμική ενέργεια) στη συγκεκριμένη θέση.

Συμβολίζοντας με  $Q$  την παροχή όγκου του υγρού που διακινείται από την αντλία, η θεωρητική ισχύς  $N_i$ , δηλαδή η ανά μονάδα χρόνου ενέργεια που παραλαμβάνεται από το διερχόμενο υγρό είναι ίση προς:

$$N_i = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (5.2)$$

Όπου  $\gamma = \rho \times g$  είναι το ειδικό βάρος του υγρού, με τιμή στις συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας  $\gamma = 1000 \text{ kp/m}^3$ .

Η πραγματική ισχύς  $N$  που απορροφάται από τον κινητήρα της αντλίας για την διακίνηση της παροχής  $Q$  και την πρόσδοση ενέργειας  $H$  ανά μονάδα μάζας του υγρού θα είναι μεγαλύτερη από αυτή που παραλαμβάνεται από το υγρό, δηλαδή τη  $N_i$ , κατά τις διάφορες απώλειες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της αντλίας κατά τη λειτουργία της. Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ως:

$$\eta_p = \frac{N_i}{N} < 1 \quad (5.3)$$

Η μέγιστη τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης μιας αντλίας κυμαίνεται από 50% για μικρού μεγέθους αντλίες έως 85-90% για μεγάλου μεγέθους αντλίες ( $N > 50 \text{ MW}$ ).

Τελικά, η ισχύς που απαιτεί μια αντλία για να διακινήσει υγρό παροχής,  $Q$ , και να του προσδώσει ενέργεια ανά μονάδα μάζας του  $H$ , δίνεται από τη σχέση:

$$N = \gamma \cdot H \cdot Q / \eta_p \quad (5.4)$$

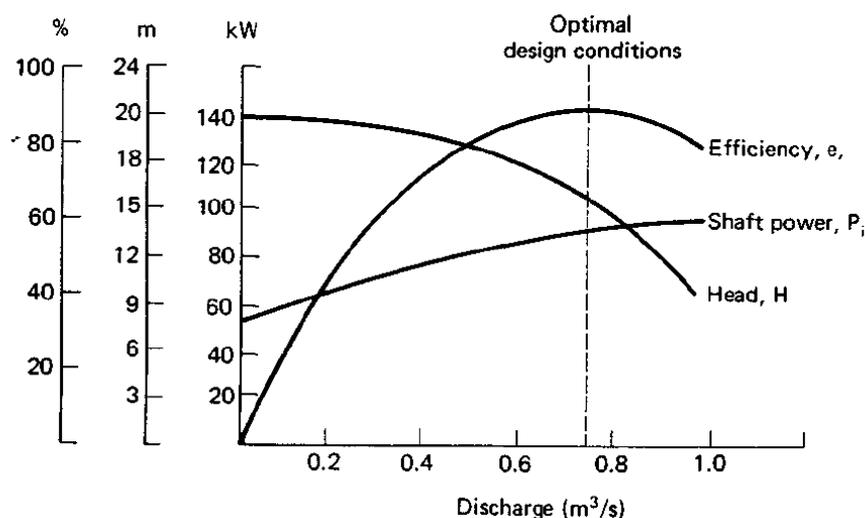
Σε μονάδες μετρικού συστήματος, όπου η ισχύς  $N$  εκφράζεται σε kW, το ειδικό βάρος  $\gamma$  σε  $\text{kp/m}^3$ , η παροχή  $Q$  σε  $\text{m}^3/\text{s}$  και το πραγματικό ολικό ύψος της αντλίας σε mΣΥ, η προηγούμενη εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$N = 9,81 \cdot Q \cdot H / \eta_p \quad (5.5)$$

### Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας αντλίας

Κάθε αντλία χαρακτηρίζεται από τις καμπύλες λειτουργίας της, οι οποίες δίνουν στοιχεία σχετικά με τη μεταβολή της απόδοσης, του ολικού ύψους και της ισχύος της περωτής συναρτήσει της παροχής υγρού, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

Στην Εικόνα 5.5 δίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας σταθερής ταχύτητας περιστροφής.

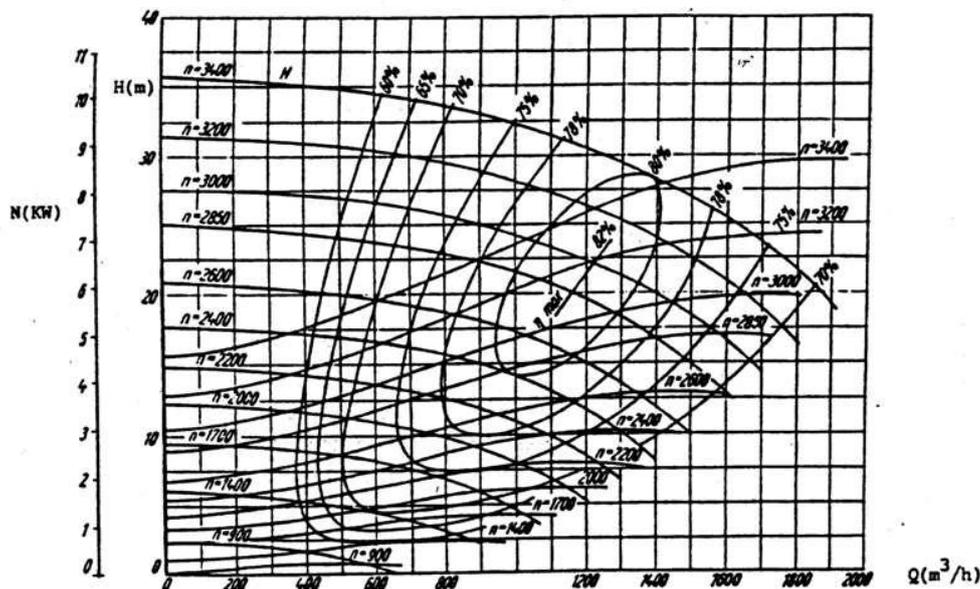


Εικόνα 5.5: Διάγραμμα χαρακτηριστικών καμπυλών φυγόκεντρης αντλίας

Παρατηρούμε ότι υπάρχει ένα σημείο όπου σημειώνεται ο μεγαλύτερος ο βαθμός απόδοσης της μηχανής, το οποίο ονομάζεται κανονικό σημείο λειτουργίας. Η αντλία επιδιώκεται να «δουλεύει» στα χαρακτηριστικά  $H$ ,  $Q$  του σημείου αυτού. Σε αντίθετη περίπτωση, η αντλία θα έχει μειωμένη απόδοση.

Όμως, μια αντλία είναι σε θέση να λειτουργεί σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής, για κάθε μία από τις οποίες υπάρχει μια διαφορετική καμπύλη λειτουργίας. Στην Εικόνα 5.6 που ακολουθεί, δίνονται οι καμπύλες λειτουργίας για διάφορες ταχύτητες περιστροφής καθώς και βρόγχοι ίσου βαθμού απόδοσης. Παρατηρούμε ότι εμφανίζεται μια

μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης για μια ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, η οποία καλείται κανονική ταχύτητα περιστροφής.



Εικόνα 5.6: Τυπική μορφή καμπυλών λειτουργίας για διάφορες ταχύτητες περιστροφής και βρόγχοι ίσου βαθμού απόδοσης

### 5.2.2.2 Αντλητική Εγκατάσταση

#### Εισαγωγή

Με τον όρο «αντλητική εγκατάσταση» περιγράφουμε μία εγκατάσταση η οποία περιλαμβάνει μία ή περισσότερες αντλίες, που διακινούν ένα υγρό μεταξύ δύο δεξαμενών, τις μηχανές κίνησης των αντλιών και το σύνολο των σωληνώσεων που συνδέουν τις δεξαμενές με την αντλία. Επιπλέον διαθέτει λοιπό ηλεκτρολογικό και μηχανολογικό εξοπλισμό, ο οποίος είναι απαραίτητος για τη λειτουργία, την ασφάλεια και τη συντήρησή της.

Δύο χαρακτηριστικά μεγέθη της εγκατάστασης είναι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού στις δύο δεξαμενές, η οποία μετράται ως προς μια κοινή στάθμη αναφοράς. Ως στάθμη αναφοράς χρησιμοποιείται συνήθως η επιφάνεια της θάλασσας. Αξίζει να αναφερθεί ότι ως δεξαμενή μπορεί να θεωρηθεί ένας ποταμός, ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, ένα δοχείο πίεσης ή απλά μια δεξαμενή. Ανάλογα με το αν η δεξαμενή είναι ανοιχτή ή κλειστή, διαφοροποιείται και η στατική πίεση που δέχεται το υγρό στην επιφάνειά του. Στην περίπτωση απλής ανοιχτής δεξαμενής, η στατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση  $H_B$ , που ως γνωστόν εξαρτάται από το υψόμετρο από το οποίο αναφερόμαστε. Η δεξαμενή που βρίσκεται σε χαμηλότερο ύψος και από την οποία το υγρό αναρροφάται, ονομάζεται δεξαμενή αναρρόφησης και η σωλήνωση που συνδέει την αντλία με τη δεξαμενή

αυτή, ονομάζεται σωλήνωση αναρρόφησης. Από την άλλη, η δεξαμενή που βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος και αποτελεί τον επιθυμητό προορισμό του υγρού, καλείται δεξαμενή κατάθλιψης, ενώ η σωλήνωση που τη συνδέει με την αντλία σωλήνωση κατάθλιψης.

Ως γεωδαιτικό ύψος αναρρόφησης  $h_e$  ορίζεται η διαφορά:

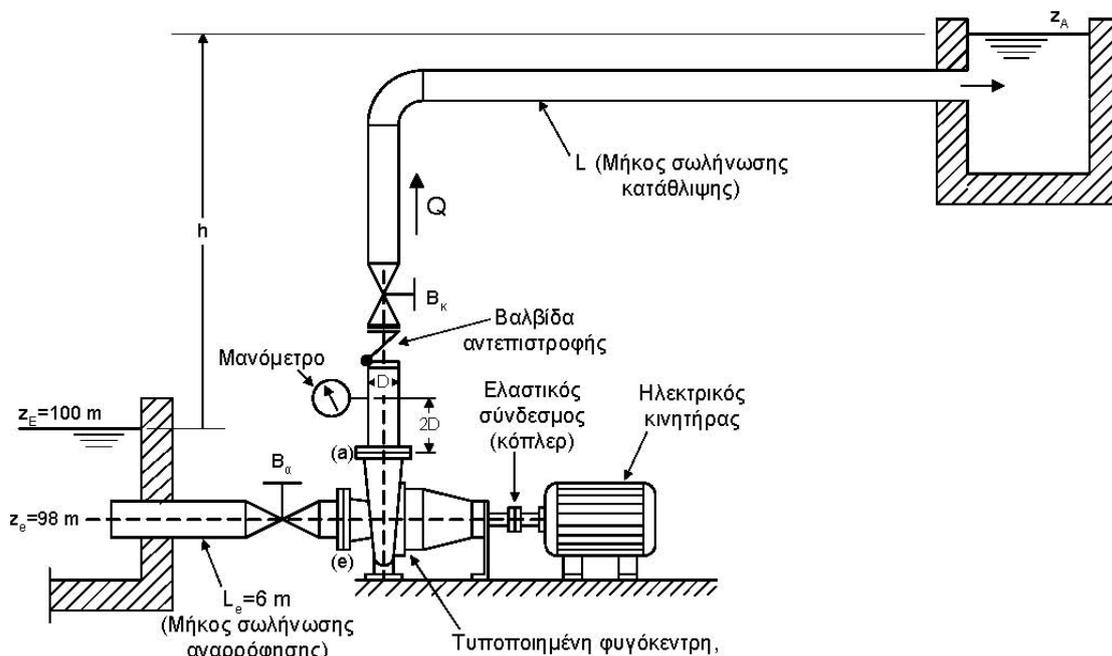
$$h_e = z_a - z_e \quad (5.6)$$

Όπου  $z_a$  είναι η στάθμη της αντλίας και  $z_e$  η στάθμη της δεξαμενής αναρρόφησης. Η στάθμη της αντλίας συμπίπτει με τη στάθμη της ατράκτου εάν αυτή είναι οριζόντια ή με τη στάθμη της διατομής εισόδου της πτερωτής αν η άτρακτος είναι κατακόρυφη.

Ως γεωδαιτικό ύψος κατάθλιψης  $h_a$  ορίζεται η διαφορά της στάθμης των δύο δεξαμενών, και είναι ανεξάρτητο από τη στάθμη τοποθέτησης της αντλίας:

$$h_a = z_A - z_a \quad (5.7)$$

Η διάταξη απλής αντλητικής εγκατάστασης απεικονίζεται στην Εικόνα 5.7 που ακολουθεί.



**Εικόνα 5.7:** Λεπτομερής σχηματική διάταξη απλής αντλητικής εγκατάστασης

Εφαρμόζοντας την εξίσωση Bernoulli, στις διατομές εισόδου (e) και εξόδου της αντλίας η ολική πίεση αντίστοιχα ισούται με:

$$H_{oe} = H_e + \frac{c_e^2}{2g} + z_e = H_B + z_E - \delta h_{fEe} \quad (5.8)$$

$$H_{oa} = H_a + \frac{c_a^2}{2g} + z_a = H_B + z_A + \delta h_{faA} \quad (5.9)$$

Όπου  $H_e$  και  $H_a$  είναι η στατική πίεση στις διατομές εισόδου και εξόδου, ενώ  $\delta h_{fEe}$  και  $\delta h_{faA}$  είναι οι υδραυλικές απώλειες στις σωληνώσεις αναρρόφησης και κατάθλιψης αντίστοιχα. Έχει θεωρηθεί ότι πρόκειται για μεγάλες δεξαμενές, στις οποίες η κινητική ενέργεια του υγρού είναι αμελητέα.

Από τις εξισώσεις (5.8) και (5.9) προκύπτει το ολικό ύψος της αντλίας  $H$ :

$$H = H_{oa} - H_{oe} = (z_A - z_E) + (\delta h_{faA} + \delta h_{fEe}) = h + \delta h_{fEA} \quad (5.10)$$

Όπου με  $\delta h_{fEA}$  συμβολίζονται οι ολικές απώλειες στις σωληνώσεις της εγκατάστασης. Δηλαδή η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που προσδίδει η αντλία στο υγρό είναι ίση με το άθροισμα της ενέργειας που απαιτείται για την ανύψωσή του και της ενέργειας που δαπανάται για τη ροή του εντός της σωλήνωσης.

Η τελευταία οφείλεται στις υδραυλικές απώλειες, οι οποίες διακρίνονται στις γραμμικές και τις εντοπισμένες απώλειες. Οι γραμμικές απώλειες οφείλονται στη συνεκτικότητα του ρευστού, είναι ανάλογες του μήκους του αγωγού και εκφράζονται από τη σχέση των Darcy – Weisbach (σε mΣΥ):

$$\delta h_{\text{ΓΡΑΜ}} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2g} \quad (5.11)$$

Όπου  $L$  είναι το μήκος του αγωγού,  $d$  είναι η εσωτερική του διάμετρος,  $c$  είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού και  $\lambda$  ο συντελεστής των γραμμικών απωλειών. Ο συντελεστής αυτός είναι συνάρτηση της σχετικής τραχύτητας του εσωτερικού του αγωγού και του αριθμού Reynolds της ροής, ο οποίος ως γνωστόν δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Re} = \frac{c \cdot d}{\nu} \quad (5.12)$$

Όπου  $\nu$  είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Ως σχετική τραχύτητα  $\varepsilon_s$  ορίζεται ο λόγος της μέσης τραχύτητας των τοιχωμάτων του αγωγού  $\varepsilon$  και της εσωτερικής διαμέτρου του  $d$ :

$$\varepsilon_s = \varepsilon / d \quad (5.13)$$

Η τραχύτητα των σωλήνων εξαρτάται από το υλικό κατασκευής τους, τον τρόπο κατασκευής τους και τον χρόνο χρήσης τους.

Όταν η ροή εντός αγωγού είναι στρωτή, δηλαδή ισχύει  $Re < 2300$ , ο συντελεστής γραμμικών απωλειών δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = 64 / Re \quad (5.14)$$

Σε περίπτωση όμως πλήρως ανεπτυγμένης τυρβώδους ροής, δηλαδή όταν  $Re > 4000$ , χρησιμοποιείται η σχέση των Colebrook – White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon_s}{3,71} \right) \quad (5.15)$$

Εύκολα συμπεραίνουμε ότι η επίλυση της παραπάνω σχέσης γίνεται με εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας. Από μια σειρά πειραμάτων, έχει καταρτιστεί το διάγραμμα Moody, το οποίο μας δίνει μια αρκετά καλή προσέγγιση της τιμής του συντελεστή.

Οι εντοπισμένες απώλειες εμφανίζονται κυρίως σε σημεία μεταβολής της διατομής του αγωγού και της κατεύθυνσης της ροής. Επιπλέον, εντοπισμένες απώλειες παρουσιάζονται και σε διάφορα μηχανολογικά εξαρτήματα που τοποθετούνται στις σωληνώσεις, όπως οι βάνες. Οι εντοπισμένες απώλειες δίνονται από τη σχέση:

$$\delta h_{\text{ΕΝΤΟΠ.}} = \zeta \cdot \frac{c^2}{2g} \quad (5.16)$$

Τέλος, στις υδραυλικές απώλειες εντάσσεται και η κινητική ενέργεια  $\frac{c_A^2}{2g}$  που έχει το υγρό όταν εισέρχεται στη μεγάλων διαστάσεων δεξαμενή κατάθλιψης, καθώς αυτή δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και ουσιαστικά χάνεται σε φαινόμενα τριβής και στροβιλισμών.

Λόγω της αρχής της συνέχειας της μάζας ασυμπίεστου ρευστού, η παροχή όγκου  $Q$  στα διάφορα τμήματα της σωλήνωσης είναι σταθερή και ίση με:

$$Q = c_i \cdot A_i \quad (5.17)$$

Όπου  $A_i$  είναι η διατομή του τμήματος  $i$  της σωλήνωσης.

Επομένως, με τα βάση τα παραπάνω, το άθροισμα όλων των απωλειών μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

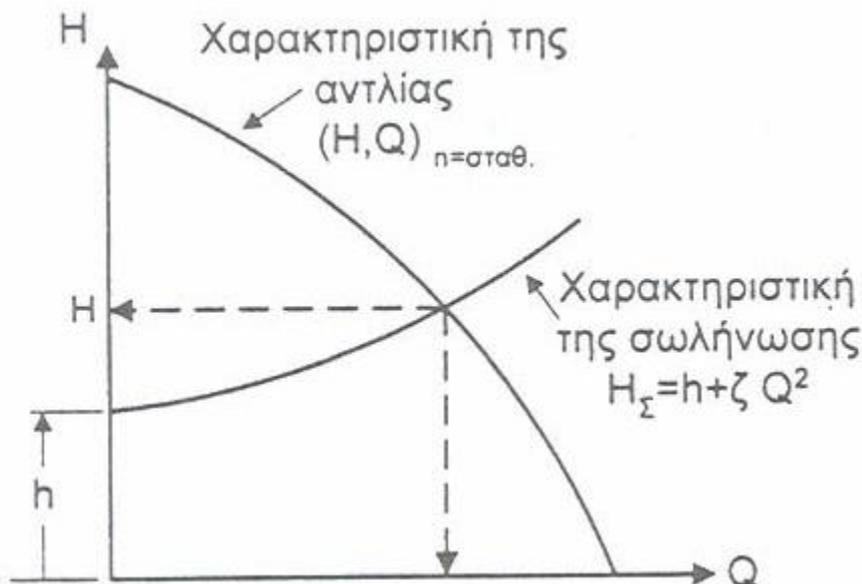
$$\delta h_{fEA} = \sum \lambda_i \frac{L_i \cdot c_i^2}{d_i \cdot 2g} + \sum \zeta_k \cdot \frac{c_k^2}{2g} + \frac{c_A^2}{2g} = \zeta_{EA} \cdot Q^2 \quad (5.18)$$

οπότε η εξίσωση (5.10) μετασχηματίζεται στην εξίσωση (5.19):

$$H_{\Sigma} = h + \zeta_{EA} \cdot Q^2 \quad (5.19)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη μαθηματική διατύπωση της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης της εγκατάστασης και εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ενέργεια που πρέπει να διατίθεται στο ρευστό, ώστε αυτό να μπορεί απρόσκοπτα να διακινείται μέσω της συγκεκριμένης σωλήνωσης. Λόγω της μορφής της χαράσσεται εύκολα σε κοινό διάγραμμα ( $H, Q$ ) με τη χαρακτηριστική της αντλίας. Από το σημείο της τομής του προκύπτει το σημείο της αντλητικής εγκατάστασης για τη δεδομένη ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, δηλαδή το σημείο στο οποίο η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που προσδίδει η συγκεκριμένη αντλία στο υγρό είναι ίση με την ενέργεια που απαιτείται για τη ροή του εντός σωλήνωσης και την ανύψωσή του.

Στην Εικόνα 5.8 που ακολουθεί, απεικονίζεται το σημείο λειτουργίας αντλιοστασίου.



**Εικόνα 5.8:** Σημείο λειτουργίας αντλιοστασίου

Το σημείο τομής των δύο χαρακτηριστικών καθορίζει τόσο τον βαθμό απόδοσης της αντλίας κατά τη λειτουργία της, όσο και την ισχύ που αυτή απορροφά. Όπως αναφέρθηκε, η σχέση που συνδέει το βαθμό απόδοσης

με την ισχύ που απορροφάται από την αντλία δίνεται από την εξίσωση (5.4):

$$N = \gamma \cdot H \cdot Q / \eta_p$$

Ακόμα, υπολογίζουμε την ηλεκτρική ισχύ σε kW, που απαιτείται για να απορροφήσει το υγρό παροχής Q ανά μονάδα μάζας H, λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες απώλειες κατά τη μετατροπή ενέργειας  $\eta_{mr}$ :

$$N_p = \frac{N}{\eta_{mr}} = \frac{9,81 \cdot H \cdot Q}{\eta_{mr} \cdot \eta_p} \Rightarrow N_p = \frac{9,81 \cdot H \cdot Q}{\eta} \quad (5.20)$$

Με τυπική τιμή του βαθμού απόδοσης του συστήματος αντλίας-κινητήρα:  $\eta=0,85$ .

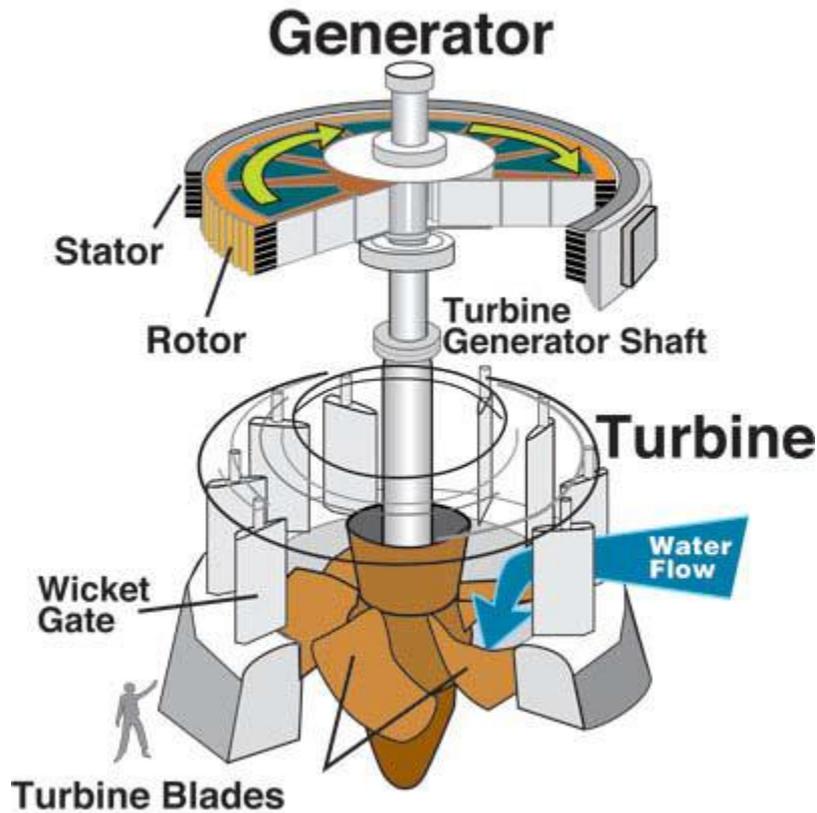
Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη της πιεζομετρικής γραμμής σε μια σωλήνωση. Αυτή αποτυπώνει τη μεταβολή της πίεσης απαλλαγμένης από τη συμβολή της κινητικής ενέργειας και δίνεται από τη σχέση:

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} + z \quad (5.21)$$

### 5.2.2.3 Υδροστρόβιλος

#### Εισαγωγή

Ως υδροστρόβιλος ορίζεται η μηχανή που μετατρέπει την ενέργεια ενός υγρού (νερού) σε μηχανική ενέργεια μέσω συνεχούς ροής του υγρού και σταθερής περιστροφικής κίνησης. Η μετατροπή της ενέργειας του διερχόμενου υγρού υπό σταθερή παροχή σε μηχανική ενέργεια γίνεται στο στρεφόμενο μέρος της μηχανής, το οποίο καλείται δρομέας, μέσω ανάπτυξης κινητήριας ροπής. Η κινητήρια ροπή μεταφέρεται στην άτρακτο του δρομέα, η οποία είναι συζευγμένη με την άτρακτο της ηλεκτρικής γεννήτριας, που με τη σειρά της μετατρέπει τη μηχανική ισχύ N σε ηλεκτρική ισχύ  $N_e$ . Στην Εικόνα 5.9 δίνεται η σχηματική απεικόνιση του υδροστρόβιλου σε τομή.



Εικόνα 5.9: Υδροστρόβιλος σε τομή

### Τύποι - Διαμόρφωση υδροστροβίλων

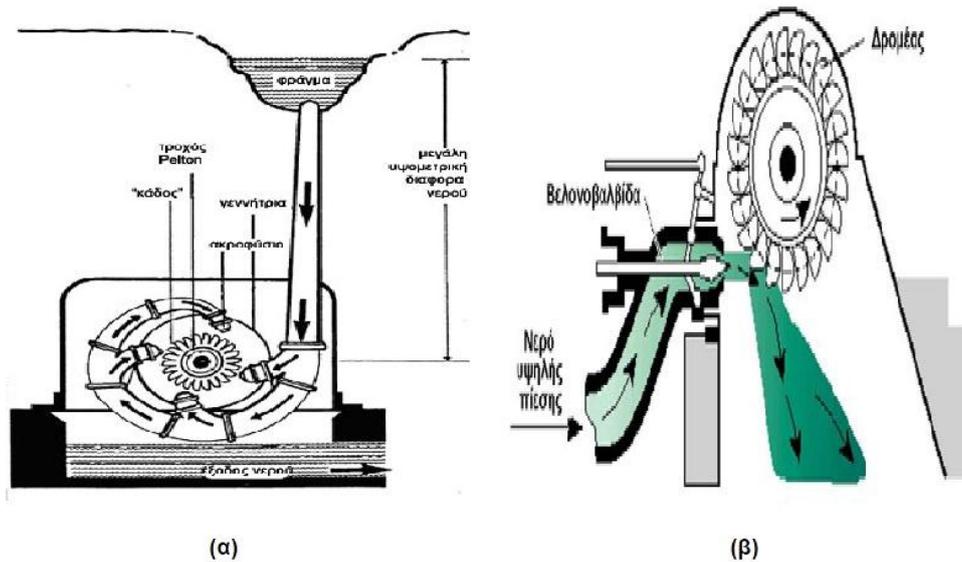
Οι σύγχρονοι υδροστρόβιλοι διακρίνονται σε 2 κατηγορίες:

1. Δράσεως ή μερικής προσβολής
2. Αντιδράσεως ή μερικής προσβολής

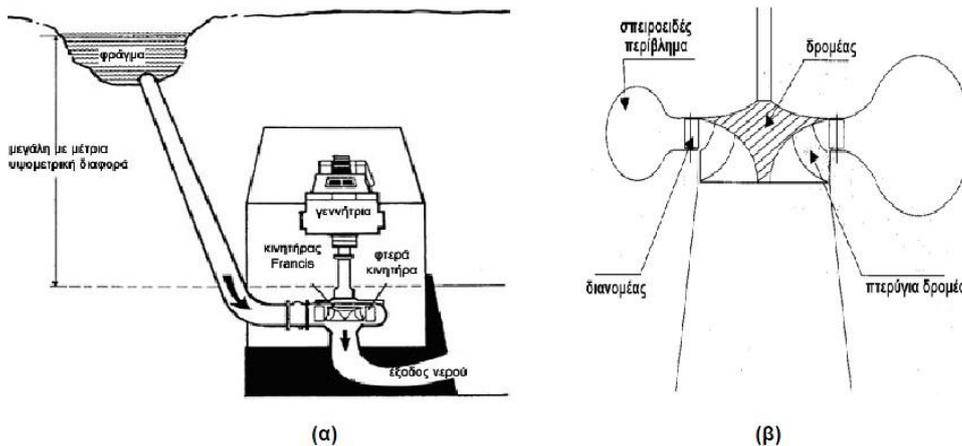
Η διάκρισή τους βασίζεται στο ότι στους υδροστροβίλους μερικής προσβολής, μόνο ένα τμήμα του δρομέα συμβάλλει στη μετατροπή της ενέργειας, ενώ στους ολικής προσβολής το αντίθετο. Ακόμα, στους μερικής προσβολής ο δρομέας λειτουργεί σε χώρο ομοιόμορφης στατικής πίεσης (μηδενικός βαθμός αντίδρασης), ενώ στους ολικής προσβολής η ροή μέσω του δρομέα γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης του υγρού.

Χαρακτηριστικοί τύποι υδροστροβίλων δράσεως είναι οι τύπου Pelton, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για μεσαία και μεγάλα ύψη πτώσης ( $H > 50$  m), ενώ στους υδροστροβίλους αντιδράσεως ανήκουν οι υδροστρόβιλοι τύπου Kaplan (αξονικής ροής) και Francis (ακτινικής και μικτής ροής), οι οποίοι χρησιμοποιούνται μικρά και μεσαία ύψη πτώσης αντίστοιχα. Στη συνέχεια, θα αναλυθεί σύντομα η διαμόρφωση των ίσως πιο διαδεδομένων τύπων υδροστροβίλων, Pelton και Francis.

Στις Εικόνες 5.10 και 5.11 που ακολουθούν, απεικονίζονται αντίστοιχα οι υδροστρόβιλοι Pelton και Francis.



Εικόνα 5.10: (α) Ρόδα Pelton(β) Κατακόρυφος στρόβιλος Pelton



Εικόνα 5.11: (α), (β) Υδροστρόβιλος Francis

Όπως και οι αντλίες, ένας υδροστρόβιλος έχει τρία κύρια μέρη. Το τμήμα εισόδου, τον δρομέα και το τμήμα εξόδου.

Το τμήμα εισόδου αποτελείται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια, σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή ενέργειας εντατικής κατάστασης του υγρού σε κινητική, διαμορφώνοντας δέσμη κυκλικής διατομής. Κάθε δέσμη προσπίπτει στον δρομέα με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ώθησης σε αυτόν κατά την περιφερειακή διεύθυνση και η οποία δημιουργεί κινητήρια ροπή. Στην περίπτωση υδροστρόβιλου Pelton, σε κάθε χρονική στιγμή, μόνο 2-3 σκαφίδια του δρομέα δέχονται τη δέσμη του νερού και τα οποία εναλλάσσονται διαδοχικά. Ο δρομέας είναι τοποθετημένος πάνω από την ελεύθερη στάθμη της διάρυγας απαγωγής για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας. Σε αντίθεση με τον Pelton, ο δρομέας Francis, αποτελείται από πτερύγια με δυνατότητα περιστροφής

ως προς τον δρομέα, τα οποία «απορροφούν» την ενέργεια του νερού και στρέφουν την άτρακτο του δρομέα. Το νερό που πέφτει από τον δρομέα λόγω βαρύτητας οδηγείται από το τμήμα εξόδου στη διώρυγα απαγωγής και στη συνέχεια στην κοίτη του υδατορεύματος ή σε δεξαμενή ανάλογα με την εφαρμογή.

## Η ροή της ενέργειας

Παρακάτω θα δοθούν οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν τον υδροστροβίλο, όπως έγινε με τις αντλίες.

Η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του υγρού  $H_i$  που διατίθεται στον υδροστροβίλο για να τη μετατρέψει σε μηχανική ενέργεια, εκφρασμένη σε μέτρα στήλης υγρού (mΣΥ), ονομάζεται ωφέλιμο ολικό ύψος του υδροστροβίλου, και έτσι ορίζεται ως η διαφορά της ολικής ενέργειας της μονάδας μάζας του υγρού, εκφρασμένη σε μονάδες ύψους στήλης υγρού (mΣΥ), μεταξύ της συμβατικής διατομής εισόδου  $e$  και της συμβατικής διατομής εξόδου  $a$  της διερχόμενης παροχής μάζας του υγρού, δηλαδή:

$$H_i = H_{oe} - H_{oa} = \frac{c_e^2}{2g} + \frac{p_e}{\rho g} + z_e - \left( \frac{c_a^2}{2g} + \frac{p_a}{\rho g} + z_a \right) \quad (5.22)$$

Όπου με  $c$  συμβολίζεται το μέτρο της απόλυτης ταχύτητας (κινητική ενέργεια) του υγρού, με  $p$  η στατική του πίεση (ενέργεια εντατικής κατάστασης) και με  $z$  το γεωδαιτικό ύψος ως προς μία στάθμη αναφοράς (δυναμική ενέργεια) στη συγκεκριμένη θέση.

Εισάγοντας την παροχή  $Q$ , η θεωρητική ισχύς του υδροστροβίλου  $N_i$ , δηλαδή η υδραυλική ισχύς που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, εκφράζεται ως εξής:

$$N_i = \gamma \cdot Q \cdot H_i \quad (5.23)$$

Όπου  $\gamma = \rho \times g$  είναι το ειδικό βάρος του υγρού, με τιμή στις συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας  $\gamma = 1000 \text{ kp/m}^3$ .

Αν συμβολίσουμε με  $\omega$  τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και με  $M$  την κινητήρια ροπή που αναπτύσσεται σε αυτόν, η πραγματική ισχύς  $N$  που αναπτύσσεται στην άτρακτο του υδροστροβίλου ίση με:

$$N = M \cdot \omega \quad (5.24)$$

Η πραγματική ισχύς  $N$  θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη θεωρητική ισχύ  $N_i$  της εξίσωσης (5.23) κατά τις ενεργειακές απώλειες της ίδιας της μηχανής. Οι ενεργειακές αυτές απώλειες οφείλονται κυρίως στις απώλειες λόγω τριβών της ροής δια μέσου της μηχανής και στις

απώλειες τριβής των εδράνων της ατράκτου. Για το λόγο αυτό ο ολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου ορίζεται ως:

$$\eta_T = \frac{N_i}{N} < 1 \quad (5.25)$$

και εκφράζει την ανά μονάδα χρόνου απώλεια ενέργειας σε τριβές, στροβιλισμούς κ.λ.π που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της μηχανής. Η ενέργεια αυτή των απωλειών μετατρέπεται τελικά σε θερμότητα και προσδίδεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στο διακινούμενο υγρό.

Τελικά, η πραγματική ισχύς του υδροστροβίλου δίνεται από τη σχέση:

$$N = \gamma \cdot H_i \cdot Q / \eta_T \quad (5.26)$$

Σε μονάδες μετρικού συστήματος, όπου η ισχύς  $N$  εκφράζεται σε kW, το ειδικό βάρος  $\gamma$  σε  $\text{kp/m}^3$ , η παροχή  $Q$  σε  $\text{m}^3/\text{s}$  και το πραγματικό ολικό ύψος του υδροστροβίλου σε mΣΥ, η προηγούμενη εξίσωση γράφεται ως εξής:

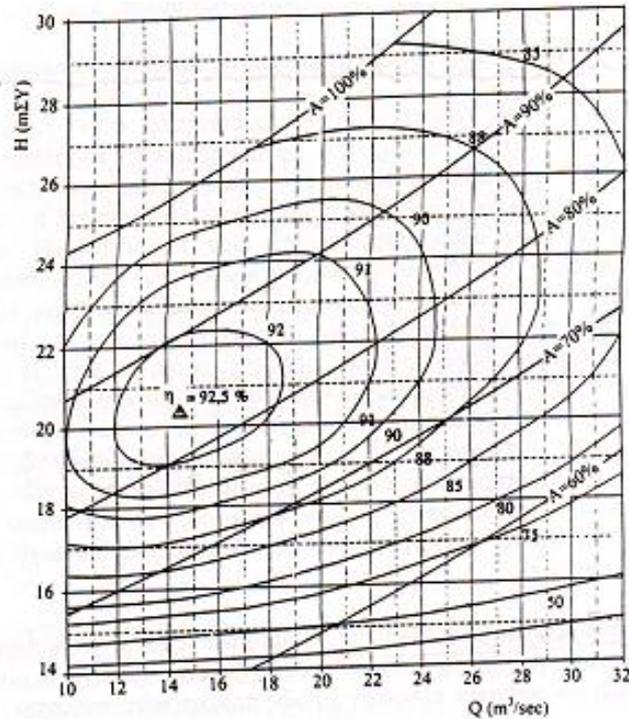
$$N = 9,81 \cdot Q \cdot H / \eta_T \quad (5.27)$$

### Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλου

Ως χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλου εννοούνται οι καμπύλες μεταβολής της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$  συναρτήσει της παροχής  $Q$  με παράμετρο το άνοιγμα  $A$  των ρυθμιστικών πτερυγίων (υδροστρόβιλοι αντιδράσεως) και για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες υδροστροβίλου έχουν τη μορφή πλέγματος καμπυλών με θετική κλίση και προκύπτουν από πρόσθεση στην θεωρητική καμπύλη ( $H_u, Q$ ), των υδραυλικών απωλειών και την κινητική ενέργεια στη διατομή εξόδου. Επίσης, στο ίδιο διάγραμμα χαράσσονται καμπύλες ίσου βαθμού απόδοσης, οι οποίες είναι κλειστές και ισοϋψείς. Στην κορυφή τους αντιστοιχεί το κανονικό σημείο λειτουργίας όπου εμφανίζεται ο μέγιστος ολικός βαθμός απόδοσης. Το κανονικό σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη τιμή του ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων και σε μια τιμή της παροχής και της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$  για τα οποία ικανοποιούνται δύο συνθήκες: η ροή στην είσοδο του δρομέα γίνεται χωρίς κρούση, και η συστροφή του υγρού στην έξοδο του δρομέα είναι σχεδόν μηδενική.

Στην Εικόνα 5.12 δίνεται ένα παράδειγμα χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας υδροστροβίλου, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.



**Εικόνα 5.12:** Παράδειγμα χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας υδροστροβίλου, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής

#### 5.2.2.4 Υδροηλεκτρικό Έργο

##### Εισαγωγή

Το υδροηλεκτρικό έργο σε μια εφαρμογή αντλησιοταμίευσης αποτελεί ουσιαστικά το αντίστροφο μιας αντλητικής εγκατάστασης.

Όπως αναφέρθηκε, το νερό που είναι αποθηκευμένο στην άνω δεξαμενή (δεξαμενή κατάθλιψης), διαθέτει δυνητική ενέργεια, η οποία εκφράζεται από τη στάθμη του ως προς τη στάθμη της θάλασσας. Η ενέργεια αυτή επιδιώκεται να εκμεταλλευτεί. Το νερό από την άνω δεξαμενή διέρχεται από τον υδροστρόβιλο μέσω σωλήνωσης, όπου μετατρέπεται η ενέργεια του ρευστού σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στην στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα. Στη συνέχεια, επειδή η παραγόμενη με τον τρόπο αυτό μηχανική ενέργεια δεν είναι δυνατόν να μεταφερθεί ικανοποιητικά στον τόπο κατανάλωσης, μετατρέπεται επί τόπου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας, κατευθείαν συζευγμένης στην άτρακτο του υδροστροβίλου. Τέλος, το νερό που εξέρχεται από τον υδροστρόβιλο είναι απαλλαγμένο συστροφής και οδηγείται στη κάτω δεξαμενή (δεξαμενή αναρρόφησης) μέσω σωλήνωσης.

## Η ροή της ενέργειας.

Σε ένα υδροηλεκτρικό έργο η ενέργεια του νερού ανά μονάδα μάζας του είναι η δυναμική ενέργεια, ίση προς την υδραυλική πτώση:

$$h = z_E - z_A \quad (5.28)$$

Η διαθέσιμη υδραυλική πτώση (ή καθαρό ύψος πτώσεως)  $H$ , δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του νερού την οποία ο υδροστρόβιλος καλείται να μετατρέψει σε μηχανική ενέργεια, θα είναι μειωμένη κατά τις απώλειες στο σύστημα προσαγωγής και θα δίνεται από τη σχέση:

$$H = h - \delta h_{fEe} \quad (5.29)$$

Όπου οι υδραυλικές απώλειες  $\delta h_{fEe}$  δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

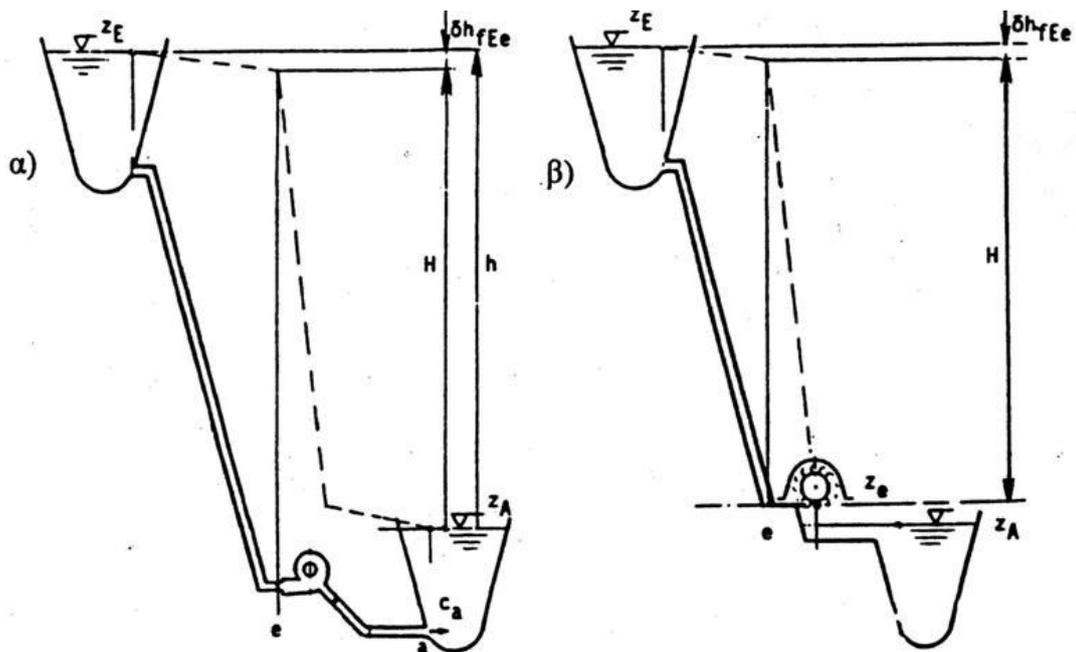
$$\delta h_{fEe} = k_e \cdot Q^2 \quad (5.30)$$

Δηλαδή είναι ανάλογες του τετραγώνου της παροχής, για ροή στην πλήρως τυρβώδη περιοχή (με  $e$  συμβολίσαμε τη διατομή εισόδου στον υδροστρόβιλο).

Στην περίπτωση υδροηλεκτρικής εγκατάστασης με υδροστρόβιλο δράσεως, όπως ο υδροστρόβιλος Pelton της εικόνας 5.10β, όπου η στάθμη του ακροφυσίου τροφοδοσίας είναι υψηλότερη από τη στάθμη απαγωγής, δηλαδή  $z_e > z_A$ , ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία του δρομέα, η διαθέσιμη στον υδροστρόβιλο υδραυλική πτώση είναι ίση προς:

$$H = h - \delta h_{fEe} - (z_e - z_A) = z_E - z_e - \delta h_{fEe} \quad (5.31)$$

Δεδομένου ότι η ενέργεια που αντιστοιχεί στην υψομετρική διαφορά ( $z_e - z_A$ ) δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί. Στην Εικόνα 5.13 που ακολουθεί, δίνεται σχηματικά η αξιοποίηση της υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροστρόβιλου αντιδράσεως και δράσεως.



**Εικόνα 5.13:** Αξιοποίηση υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροστροβίλου αντιδράσεως και δράσεως

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η διαθέσιμη υδραυλική ισχύς  $N_i$  θα είναι:

$$N_i = \gamma \cdot H \cdot Q \quad (5.32)$$

Δεδομένου όμως των απωλειών κατά την μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική στον υδροστρόβιλο, η παραγόμενη μηχανική ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$N = N_i / \eta_T \Rightarrow N = \gamma \cdot H \cdot Q / \eta_T \quad (5.33)$$

Όπου  $\eta_T$  είναι ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου.

Τέλος, έχουμε μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια  $N_T$  που θα παράγεται θα είναι μειωμένη κατά τις απώλειες της ηλεκτρικής γεννήτριας και του μετασχηματιστή. Έτσι, προκύπτει:

$$N_T = \eta_G \cdot \eta_{TR} \cdot N \quad (5.34)$$

Όπου  $\eta_G$  είναι ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας και  $\eta_{TR}$  είναι ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή.

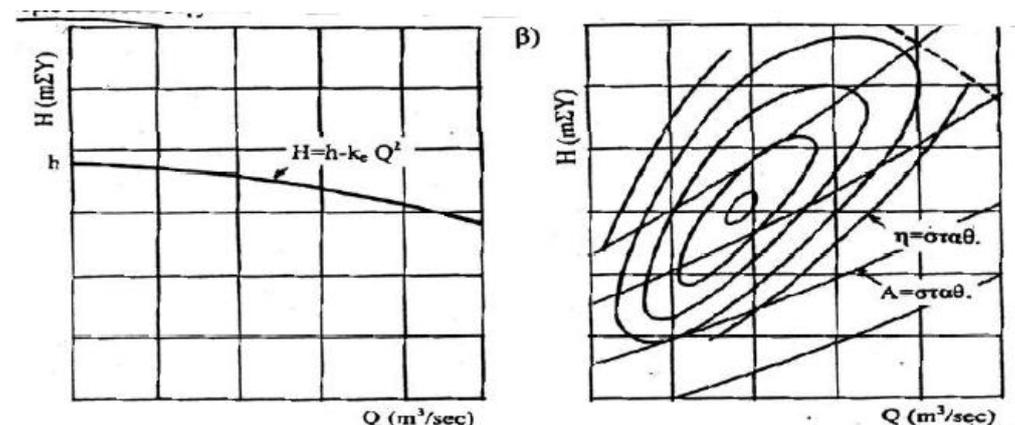
Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις και με μονάδες μετρικού συστήματος, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τον υδροστρόβιλο είναι ίση με:

$$N_T = 9,81 \cdot \eta_G \cdot \eta_{TR} \cdot \eta_T \cdot H \cdot Q \Rightarrow N = 9,81 \cdot \eta \cdot H \cdot Q \quad (5.35)$$

Με τυπική τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης του συστήματος υδροτροβίλου-γεννήτριας-μετασχηματιστή:  $\eta=0,85$ .

### Καθορισμός σημείου λειτουργίας

Όπως δείξαμε προηγουμένως, η διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H$  σε μια συγκεκριμένη εγκατάσταση εκφράζεται συναρτήσει της διακινούμενης παροχής  $Q$ , και έχει τη μορφή παραβολής (Εικόνα 5.14).



Εικόνα 5.14: Χαρακτηριστική σωλήνωσης και χαρακτηριστική υδροτροβίλου

Εάν ένας υδροστρόβιλος, με χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας όπως στην Εικόνα 5.14β, εγκατασταθεί σε υδραυλική εγκατάσταση με χαρακτηριστική όπως στην Εικόνα 5.14α, το μόνα δυνατά σημεία λειτουργίας είναι αυτά της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$  της εγκατάστασης. Χαράσσοντας τη χαρακτηριστική της εγκατάστασης, στο διάγραμμα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες του υδροτροβίλου, αντιλαμβανόμαστε ότι η λειτουργία του υδροτροβίλου στην εγκατάσταση έχει ένα συγκεκριμένο εύρος λειτουργίας. Αυτό το εύρος είναι ακόμα πιο περιορισμένο προκειμένου να επιτευχθεί ομαλή λειτουργία της μηχανής και συγχρόνως υψηλός βαθμός απόδοσης.

### 5.2.3 Λειτουργία συστήματος αντλησιοταμίευσης

Η φιλοσοφία λειτουργίας του συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι απλή. Η περίσσεια ενέργειας τροφοδοτεί τις αντλίες, μέσω των οποίων το εργαζόμενο μέσο (νερό) ανυψώνεται διά των σωληνώσεων ανόδου από την κάτω δεξαμενή στην άνω, δίνοντάς μας έτσι τη δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Όταν κάποια άλλη χρονική στιγμή χρειαζόμαστε ενέργεια, το νερό από την πάνω δεξαμενή αφήνεται να οδεύσει μέσω των

σωληνώσεων καθόδου προς την κάτω δεξαμενή, διερχόμενο δε μέσω των υδροστροβίλων παράγει την επιθυμητή ενέργεια.

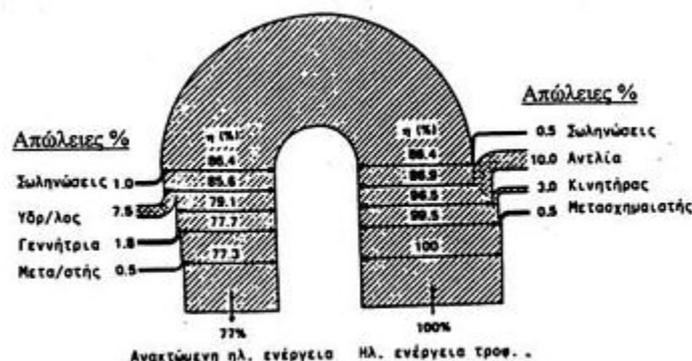
Οι διαστασιολογήσεις των δύο δεξαμενών είναι τέτοιες που να εξασφαλίζουν ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό από τον όγκο του αποθηκευμένου νερού θα χρησιμοποιείται και θα είναι ικανό για τις μετατροπές τις διατιθέμενης ενέργειας σε δυναμική και αντίστροφα, αποκλείοντας το ενδεχόμενο κάποια από τις δύο δεξαμενές να αδειάσει εντελώς.

Είναι πλέον πλήρως κατανοητό, ότι τα συστήματα αντλησιοταμίευσης έχουν διπλό όφελος:

1. Απορροφούν την περίσσεια ενέργειας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης μετατρέποντάς την σε υδραυλική ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται στον πάνω ταμιευτήρα
2. Αποδίδουν στο δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής την ενέργεια που έχουν αποταμιεύσει, ενώ, στις περισσότερες περιπτώσεις, παράγουν και πρωτογενή ενέργεια από την αξιοποίηση των φυσικών εισροών στον άνω ταμιευτήρα

Η εναλλαγή της λειτουργίας τους μεταξύ άντλησης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να συμβαίνει μια ή περισσότερες φορές την ημέρα, μια φορά την εβδομάδα ή μια φορά τον χρόνο. Βέβαια, οι δύο τελευταίες περιπτώσεις εναλλαγής της λειτουργίας απαιτούν την ύπαρξη δεξαμενής αποθήκευσης (άνω ταμιευτήρα) πολύ μεγάλης χωρητικότητας.

Είναι προφανές η διαδικασία αυτή μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδραυλική (άντληση) και στη συνέχεια η εκ νέου μετατροπή της σε ηλεκτρική (λειτουργία υδροστροβίλων) συνοδεύεται από απώλειες ενέργειας. Οι συνολικές απώλειες ενέργειας σε έναν κύκλο άντλησης – παραγωγής ενέργειας φθάνει στο 23% περίπου (σε ένα υδροηλεκτρικό έργο μεσαίου μεγέθους), όπως σχηματικά δίνεται στην Εικόνα 5.15.



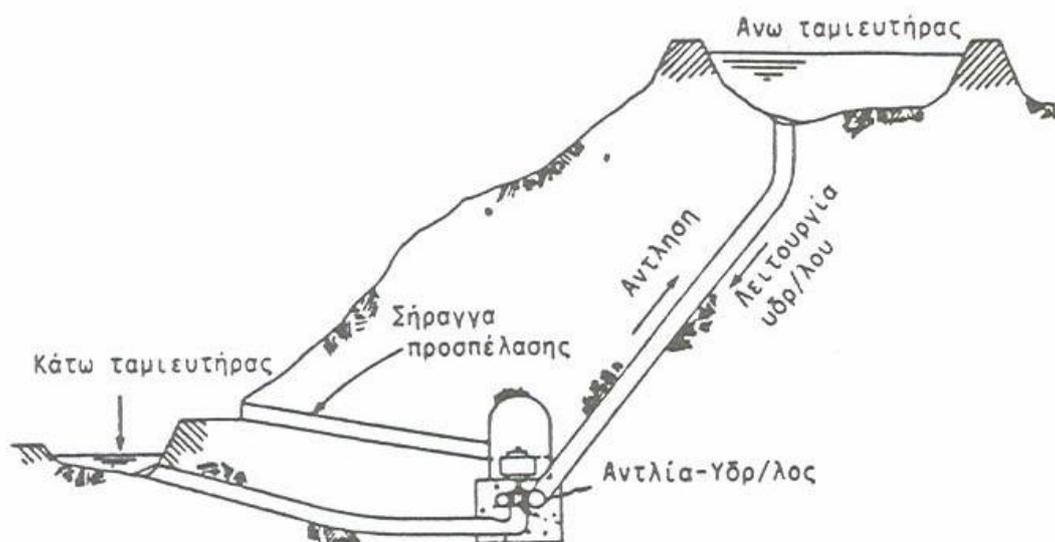
Εικόνα 5.15: Απώλειες ενέργειας

Όπως είναι αναμενόμενο, οι συνολικές απώλειες ενέργειας είναι αναλογικά μεγαλύτερες όσο το μέγεθος των μηχανών είναι μικρότερο.

### 5.2.3.1 Περίπτωση αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος

#### Εισαγωγή.

Όπως αναφέρθηκε, το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα αποτελεί μια δεύτερη κατηγορία συστήματος αντλιοσταμίου. Η εγκατάσταση αυτή είναι εξοπλισμένη με αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή, την ονομαζόμενη στροβίλοαντλία, η οποία έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε ως αντλία (φάση αποθήκευσης) είτε ως στρόβιλος (φάση παραγωγής) με αντιστροφή της φορά περιστροφής της περωτής (του δρομέα) και της φοράς της ροής. Στην Εικόνα 5.16 που ακολουθεί, δίνεται σχηματικά η διάταξη του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος.



**Εικόνα 5.16:** Διάταξη αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος

Όσον αφορά στη λειτουργία του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος, σε αυτό ενσωματώνεται ένα πρωτότυπο σύστημα διανομής. Σύμφωνα με αυτό, όταν η παροχή νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή λόγω άντλησης, είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη παροχή για τη λειτουργία του στρόβιλου, μέρος του αντλούμενου νερού πηγαίνει απευθείας στον στρόβιλο, και το υπόλοιπο στην άνω δεξαμενή. Δηλαδή η σωλήνωση μεταφέρει νερό προς τα πάνω. Όταν η παροχή της αντλητικής εγκατάστασης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του στρόβιλου, όλο το νερό από την άντληση κατευθύνεται στο στρόβιλο και

συμπληρωματικά χρησιμοποιείται νερό από την άνω δεξαμενή για να συμπληρωθεί η απαιτούμενη παροχή στροβίλου. Συνεπώς σε αυτήν την περίπτωση, η σωλήνωση μεταφέρει νερό από την άνω στην κάτω δεξαμενή.

### **Σύγκριση με τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης**

Το βασικό πλεονέκτημα του τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης (είτε με μονή είτε με διπλή σωλήνωση) είναι ότι κάθε μηχανή (υδροστρόβιλος και αντλία) επιλέγεται να λειτουργεί σε αντίστοιχο κανονικό σημείο λειτουργίας της. Αντίθετα, όπως θα γίνει φανερό και στη συνέχεια, στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα είναι ανάγκη να γίνεται συμβιβασμός στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της στροβιλοαντλίας. Βέβαια, το πρόβλημα αυτό έχει αρχίζει να ξεπερνιέται τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη αναστρέψιμων υδροδυναμικών μηχανών με δύο πτερωτές που μοιράζονται την ίδια άτρακτο και η μία λειτουργεί ως πτερωτή αντλίας και η άλλη ως δρομέας στροβίλου, επιτυγχάνοντας βέλτιστη λειτουργία και στις δύο περιπτώσεις.

Ωστόσο, το τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης χαρακτηρίζεται από σημαντικό κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, δεδομένου ότι είναι εξοπλισμένο από δύο υδροδυναμικές μηχανές και έναν συμπλέκτη, σε αντίθεση με το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα που περιλαμβάνει μόνο μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή. Επιπλέον, κάθε μονάδα καταλαμβάνει χώρο σημαντικά μεγαλύτερο σε σύγκριση με τη λύση της αναστρέψιμης υδροδυναμικής μηχανής.

Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφέρουμε ότι σε περιπτώσεις όπου η προβλεπόμενη συχνότητα εναλλαγής της λειτουργίας στροβίλου – αντλίας είναι υψηλή, το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα μειονεκτεί έναντι του τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι οι αναστρέψιμες μονάδες θα πρέπει πρώτα να σταματήσουν και στη συνέχεια να αρχίσουν να περιστρέφονται αντίστροφα, με αποτέλεσμα να πρόκειται για μια χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία.

Τέλος, σε περιπτώσεις που η διαθέσιμη υδραυλική πτώση είναι σημαντική και αντιστοιχεί σε υδροστρόβιλο τύπου Pelton, του οποίου η λειτουργία δεν μπορεί να αντιστραφεί και να λειτουργήσει ως αντλία, είναι απαραίτητη η λειτουργία ανεξάρτητης αντλίας που θα εξασφαλίζει την λειτουργία της αποταμίευσης.

## Λειτουργία αναστρέψιμης αντλίας – στροβίλου

Οι αναστρέψιμες υδροδυναμικές μηχανές εμφανίζουν συνήθως το ίδιο κατ' απόλυτη τιμή θεωρητικό ύψος πτερωτής τόσο για τη λειτουργία στροβίλου όσο για τη λειτουργία αντλίας ( $H_u = H_{u,T} = -H_{u,P}$ ), καθώς και την ίδια παροχή πτερωτής ( $Q_u = Q_{u,T} = -Q_{u,P}$ ).

Όμως, κατά τη λειτουργία της αντλίας, το πραγματικό ολικό ύψος  $H_P$  είναι μικρότερο από το αντίστοιχο θεωρητικό  $H_{u,P}$  κατά τις υδραυλικές απώλειες της ροής  $\delta h_P$  (από τη διατομή εισόδου μέχρι τη διατομή εξόδου της μηχανής), δηλαδή:

$$H_P = H_{u,P} - \delta h_P = H_u - \delta h_P \quad (5.36)$$

Αντίθετα, για τη λειτουργία της ίδιας μηχανής ως στροβίλου, η διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H_T$  είναι ίση προς το άθροισμα του θεωρητικού ύψους  $H_{u,T}$  και των αντίστοιχων υδραυλικών απωλειών:

$$H_T = H_{u,T} + \delta h_T = H_u + \delta h_T \quad (5.37)$$

Ανάλογα, κατά τη λειτουργία της αντλίας η παροχή  $Q_P$  δια μέσου της μηχανής είναι μικρότερη από την παροχή  $Q_u$  δια μέσου της πτερωτής και τις ογκομετρικές απώλειες  $\delta Q_P$ , δηλαδή:

$$Q_P = Q_{u,P} - \delta Q_P \quad (5.38)$$

Ομοίως, η πραγματική παροχή  $Q_T$  δια μέσου της μηχανής είναι μεγαλύτερη από την παροχή  $Q_u$  δια μέσου του δρομέα κατά τις ογκομετρικές απώλειες  $\delta Q_T$ :

$$Q_T = Q_{u,T} + \delta Q_T \quad (5.39)$$

Από τις σχέσεις (5.36) έως (5.39) παρατηρούμε ότι τα δύο σημεία λειτουργίας της πτερωτής δε συμπίπτουν. Η διαφορά αυτή στα σημεία λειτουργίας της ίδιας μηχανής για λειτουργία ως αντλίας και ως στροβίλου επιτείνεται από τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης και για τις δύο περιπτώσεις. Πράγματι:

1. Για τη λειτουργία ως αντλίας, η χαρακτηριστική της σωλήνωσης (σε απόλυτες τιμές) περιγράφεται από τη σχέση:

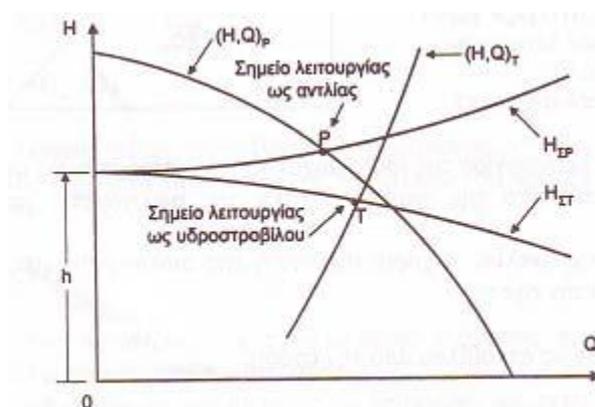
$$H_{\Sigma P} = h + \zeta \cdot Q^2 \quad (5.40)$$

2. Ενώ για τη λειτουργία ως στροβίλου από τη σχέση:

$$H_{\Sigma T} = h - \zeta \cdot Q^2 \quad (5.41)$$

Στις σχέσεις (5.40) και (5.41) με  $h$  συμβολίσθηκε η διαφορά μεταξύ άνω και κάτω ταμιευτήρα και με  $\zeta \times Q^2$  οι υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης.

Από τις ίδιες σχέσεις παρατηρούμε ότι το καθαρό ύψος της αντλίας είναι πάντα μεγαλύτερο από το καθαρό ύψος του στροβίλου. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη όσα αναφέρθηκαν, αν ληφθεί μέριμνα ώστε η μηχανή να λειτουργεί στο κανονικό σημείο λειτουργίας της ως αντλία, τότε το αντίστοιχο σημείο λειτουργίας ως στροβίλου θα διαφέρει σημαντικά από το αντίστοιχο κανονικό (Εικόνα 5.17). Αντίστοιχα συμβαίνουν εάν η μηχανή επιλεγεί ώστε να λειτουργεί ως στρόβιλος στο κανονικό σημείο λειτουργίας της. Στην περίπτωση αυτή η λειτουργία ως αντλίας θα γίνεται σε σημείο απομακρυσμένο από το αντίστοιχο κανονικό και μάλιστα με παροχή μικρότερη της αντίστοιχης κανονικής της. Γίνεται επομένως φανερό ότι η μελέτη της αναστρέψιμης υδροδυναμικής μηχανής προϋποθέτει ότι πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός στην επιλογή των κριτηρίων σχεδίασής της. Η επιλογή αυτή γίνεται ακόμα πιο δύσκολη αν ληφθεί υπόψη η διακύμανση της υψομετρικής διαφοράς  $h$  της εγκατάστασης.



**Εικόνα 5.17:** Διαφορά στο σημείο λειτουργίας για λειτουργία αντλίας και στροβίλου

Δεδομένου ότι η λειτουργία αντλίας με μερική παροχή είναι συνήθως ασταθής και λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη ότι η ροή δια μέσου της μηχανής για λειτουργία αντλίας είναι επιβραδυνόμενη, ενώ για την αντίστροφη λειτουργία ως στροβίλου επιταχυνόμενη, η εκλογή του σημείου λειτουργίας της αναστρέψιμης μηχανής επιλέγεται πλησιέστερα στο σημείο λειτουργίας της αντλίας. Το μέγιστο και το ελάχιστο ύψος στα οποία λειτουργούν οι μηχανές καθορίζονται από διάφορους παράγοντες. Για παράδειγμα μείωση του ύψους άντλησης, έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της παροχής, αλλά και αύξηση της απαιτούμενης ισχύος. Έτσι, το ελάχιστο ύψος άντλησης περιορίζεται από τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να απορροφήσει ο κινητήρας. Για το μέγιστο ύψος άντλησης πρέπει να ληφθούν υπόψη οι περιοχές ασταθούς λειτουργίας της μηχανής.

Το ελάχιστο ύψος στροβίλου περιορίζεται από την ικανότητα της μηχανής να επιταχύνει στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, ενώ

ταυτόχρονα η γωνία της βάνας δεν πρέπει να ξεπερνά μια συγκεκριμένη τιμή ασφαλείας, καθώς και από την ανάγκη ευσταθούς λειτουργίας της μηχανής κατά την διαδικασία αυτή. Είναι προφανές ότι το εύρος του ύψους λειτουργίας καθορίζεται από το μέγιστο ύψος άντλησης και το ελάχιστο ύψος στροβίλου. Ακόμα, η μηχανή εμφανίζει άλλες δύο περιοχές εργασίας. Όταν η φορά περιστροφής είναι όμοια με του στροβίλου, αλλά η παροχή είναι από την κάτω προς την άνω δεξαμενή ( $\eta > 0$ ,  $Q < 0$ ) έχουμε λειτουργία αντιστρόφου στροβίλου, ενώ όταν το νερό ρέει από την άνω προς την κάτω δεξαμενή και η φορά περιστροφής είναι ίδια με της αντλίας ( $\eta < 0$ ,  $Q > 0$ ), η μηχανή εργάζεται ως ρυθμιζόμενη αντίδραση.

### **Εκκίνηση της αντλίας στα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα**

Λόγω του μεγάλου μεγέθους των μηχανών των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών συστημάτων, ένα πρόβλημα που τίθεται σε αυτά είναι το πρόβλημα εκκίνησης των αντλιών αποταμίευσης. Για να γίνει περισσότερο κατανοητό το πρόβλημα αναφέρονται στη συνέχεια τα ακόλουθα στοιχεία (Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι, Δημήτριος Παπαντώνης):

- Η ισχύς την οποία απορροφά η αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής της και με κλειστά τα ρυθμιστικά πτερύγια (μηδενική παροχή) είναι της τάξεως του 35% της ονομαστικής της ισχύος
- Η ισχύς που απορροφά η αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής της με ανοιχτά τα ρυθμιστικά πτερύγια, αλλά κλειστή τη βάνα κατάθλιψης είναι της τάξεως του 65% της ονομαστικής ισχύος
- Το ολικό ύψος για μηδενική παροχή είναι μεγαλύτερο από το ολικό ύψος στο κανονικό σημείο λειτουργίας (για την κανονική ταχύτητα περιστροφής), διαφορετικά η χαρακτηριστική θα ήταν ασταθής
- Η ισχύς που απορροφά η αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής όταν είναι κενή από νερό (λειτουργία σε περιβάλλον αέρα) είναι της τάξεως του 1-3% της ονομαστικής ισχύος (πρόκειται ουσιαστικά για τις απώλειες των εδράνων)

*Διακρίνονται οι ακόλουθοι μέθοδοι εκκίνησης της αντλίας:*

### **Εκκίνηση με την πτερωτή γεμάτη νερό**

Στην περίπτωση αυτή η στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων παραμένει κλειστή, δηλαδή η παροχή είναι μηδενική. Με τον τρόπο αυτό η ισχύς που απορροφά η αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής,

είναι ίση με υο 35% της ονομαστικής. Ένας βοηθητικός υδροστροβίλος χρησιμοποιείται για την παροχή της ισχύος αυτής και τον συγχρονισμό της αντλίας, δηλαδή την επιτάχυνσή της στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής. Μετά το συγχρονισμό, τα ρυθμιστικά πτερύγια ανοίγουν μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Η λειτουργία με κλειστά πτερύγια συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας στο εσωτερικό της μηχανής για την απαγωγή της οποίας πρέπει να ληφθεί μέριμνα.

### **Εκκίνηση με την πτερωτή κενή (σε περιβάλλον αέρα):**

Στην περίπτωση αυτή τα ρυθμιστικά πτερύγια είναι κλειστά, ενώ η βάνα κατάθλιψης είναι ανοιχτή. Η πτερωτή εκκενώνεται από το νερό με την έγχυση αέρα υπό πίεση στο σπειροειδές κέλυφος. Αυτό συνεχίζεται μέχρι η στάθμη στην αναρρόφηση να πέσει κάτω από το κατώτερο σημείο της πτερωτής. Η αντλία επιταχύνεται εν κενό και συγχρονίζεται είτε μέσω ενός βοηθητικού υδροστροβίλου είτε μέσω σύζευξης στο δίκτυο, καταναλώνοντας πολύ μικρή ισχύ ίση με 1-3% της ονομαστικής. Στη συνέχεια η πτερωτή πληρώνεται με νερό. Επειδή η πλήρωση από την κάτω δεξαμενή προκαλεί κρουστικά φαινόμενα, αυτό μπορεί να γίνει από την άνω δεξαμενή ή και με άλλους τρόπους.

### **Ηλεκτρικές μηχανές των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών συστημάτων - Τεχνικές εκκίνησης**

Οι ηλεκτρικές μηχανές των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών συστημάτων είναι κατά κύριο λόγο σύγχρονες, λόγω της ικανότητάς τους να εναλλάσσουν εύκολα τη λειτουργία τους.

Οι διάφορες τεχνικές εκκίνησης των κινητήρων είναι οι ακόλουθες:

- Ύπαρξη βοηθητικού εξωτερικού κινητήρα
- Ύπαρξη βοηθητικού υδροστροβίλου
- Ασύγχρονη εκκίνηση με απευθείας σύνδεση στο δίκτυο
- Ασύγχρονη εκκίνηση με χαμηλή τάση τροφοδοσίας
- Σύγχρονη εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας

Στις πρώτες τέσσερις μεθόδους, κάθε μονάδα διαθέτει το δικό της εξοπλισμό εκκίνησης, ενώ στην εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας είναι δυνατή η εκκίνηση περισσότερων από μία μονάδων με κοινό εξοπλισμό. Αυτή αποτελεί και την πλέον διαδεδομένη μέθοδο και για το λόγο αυτό θα αναφερθεί πολύ συνοπτικά, καθώς οι υπόλοιπες παρουσιάζουν μια σειρά σοβαρών μειονεκτημάτων, η παρουσίαση των οποίων ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Όσον αφορά λοιπόν στη μέθοδο της σύγχρονης εκκίνησης με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας, αυτή παρουσιάζει μεγάλη αξιοπιστία και είναι κατάλληλη για την αρχική πλήρωση της άνω δεξαμενής. Ακόμα, η δυνατότητα εκκίνησης περισσότερων των μία μονάδων από έναν εκκινητή, οδηγεί σε μείωση του κόστους εξοπλισμού και λειτουργίας, καθώς και σε περιορισμένο συμπληρωματικό όγκο εκσκαφών. Η διαμόρφωση και το πλήθος των εκκινητών εξαρτάται από το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο θέλουμε να ολοκληρωθεί το ξεκίνημα μιας μονάδας και όλης της εγκατάστασης. Μια συνήθης διαμόρφωση είναι η ύπαρξη δύο οδηγήσεων, έτσι ώστε όταν απαιτείται η συντήρηση μιας να μην είναι αναγκαία η εκκίνηση με απευθείας σύνδεση στο δίκτυο.

#### **5.2.4 Υβριδικά υδροηλεκτρικά συστήματα**

Όπως αναφέρθηκε, ο συνδυασμός διαφορετικών τεχνολογιών είτε συμβατικών είτε ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ονομάζεται υβριδικό σύστημα. Τέτοια συστήματα μελετώνται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια με σκοπό τη μεγάλη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στα ηλεκτρικά δίκτυα, ιδιαίτερα στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, αλλά και συγχρόνως την παραγωγή ενέργειας σε συμφωνία με τις Ευρωπαϊκές και Εθνικές πολιτικές για την ενέργεια και το περιβάλλον.

*Σύμφωνα με το Νόμο 3468/2006, σε ένα υβριδικό σύστημα:*

- Η συνολική ενέργεια που απορροφά από το Δίκτυο, σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού
- Η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων του σταθμού Α.Π.Ε. δεν μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού αυτού, προσαυξημένη κατά ποσοστό μέχρι 20%

Στις υποενότητες που ακολουθούν, θα εξεταστούν τα υβριδικά υδροηλεκτρικά συστήματα και ειδικότερα τα συστήματα αντλησιοταμίευσης που συνδυάζονται με αιολικά πάρκα ή με θερμικά συστήματα, αποθηκεύοντας πάντα την περίσσεια της παραγόμενης ενέργειας ή της ενέργειας που δεν μπορεί να απορροφηθεί.

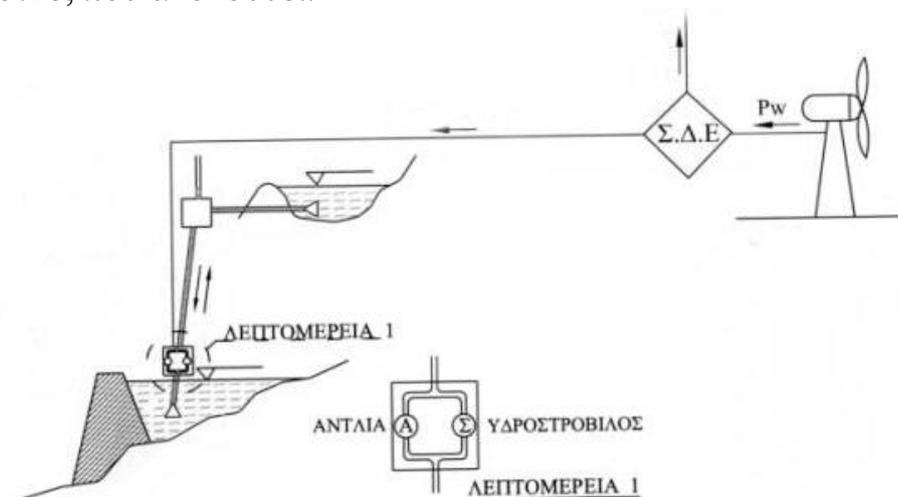
##### **5.2.4.1 Σύστημα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση (ΑΕΑ)**

#### **Εισαγωγή**

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή αιολικών μηχανών, παράλληλα με σύστημα αντλησιοταμίευσης. Ιδίως για τα

απομακρυσμένα, μη διασυνδεδεμένα ελληνικά νησιά, που χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, έντονη εξάρτηση από το πετρέλαιο, ενώ διαθέτουν πλούσιο αιολικό δυναμικό, τα συστήματα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση παρουσιάζονται ως μια τεχνικά κατάλληλη και αποδεκτή λύση.

Ένα τέτοιο υβριδικό υδροηλεκτρικό σύστημα απεικονίζεται στην Εικόνα 5.18, που ακολουθεί:



**Εικόνα 5.18:** Σχηματική απεικόνιση διάταξης συστήματος αντλησιοταμίευσης συνδυαζόμενο με αιολικό πάρκο

Το υβριδικό αυτό σύστημα αποτελείται από δύο δεξαμενές χωροθετημένες σε διαφορετικό υψόμετρο, σύστημα αντλιών, στροβίλου και σωληνώσεων και αιολικό πάρκο. Η ανεμογεννήτρια παριστάνει το αιολικό πάρκο, από το οποίο προέρχεται όλη η ενέργεια που παράγει το σύστημα. Το αιολικό πάρκο τροφοδοτεί το σύστημα με ηλεκτρική ισχύ  $P_w$ . Όπως θα δούμε και σε επόμενη παράγραφο, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Σ.Δ.Ε) ελέγχει αν η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς από το αιολικό πάρκο είναι μεγαλύτερη από τη στιγμιαία ζήτηση  $P_\phi$ .

Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση είναι ο εξής: το αιολικό πάρκο παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία στο βαθμό που δεν μπορεί να απορροφηθεί απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο αξιοποιείται για την άντληση του νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή. Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια του νερού και αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή. Όταν και όποτε παραστεί ανάγκη να μετατραπεί η ενέργεια αυτή σε ηλεκτρική για να καλύψει ανάγκες ηλεκτροδότησης (για παράδειγμα κατά τις ώρες αιχμής της ζήτησης, ή όταν δεν φυσάει άνεμος, και υπάρχει ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας), τότε ακολουθεί η αντίστροφη διαδρομή. Το νερό θα μεταφέρεται από τον πάνω στον κάτω ταμιευτήρια,

όπου ένας υδροστρόβιλος θα μετατρέπει την κίνηση του νερού σε ηλεκτρική και θα τη διοχετεύει πάλι πίσω στο δίκτυο

Σύμφωνα με τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), η εφαρμογή αιολικών μηχανών παράλληλα με σύστημα αντλησιοταμίευσης παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα ακόλουθα:

- Μια τέτοια εφαρμογή συμβάλλει στην αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού και τη μείωση της λειτουργίας των συμβατικών πετρελαϊκών μονάδων. Οι έντονες διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας αντιμετωπίζονται με την ύπαρξη του αποθηκευτικού συστήματος και ως εκ τούτου επιτυγχάνεται καλύτερη διαχείριση και διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό σύστημα. Παράλληλα, η αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος αυξάνεται με την ένταξη του υδροστρόβιλου, που αποτελεί μία ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής ενέργειας με δυνατότητα άμεσης απόκρισης
- Δεδομένου ότι η τιμή των καυσίμων αυξάνεται συνεχώς, η λειτουργία τέτοιων συστημάτων καθίσταται ανταγωνιστική
- Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από τα αιολικά πάρκα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub>. Αυτό σημαίνει μείωση του κόστους για τη ΔΕΗ και τους ιδιώτες παραγωγούς, το οποίο προφανώς καταλήγει στον καταναλωτή
- Αυξάνεται πάρα πολύ η εγχώρια παραγωγή και μειώνεται η εξάρτηση από εισαγωγές καυσίμων (όπως είναι το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο, ο λιθάνθρακας κτλ)
- Υπάρχουν σημαντικά κοινωνικά οφέλη, αφού το έργο συμβάλει στην περιφερειακή ανάπτυξη και στη δημιουργία απασχόλησης
- Το υβριδικό αυτό υδροηλεκτρικό σύστημα μπορεί να συνδυαστεί με μονάδες αφαλάτωσης που θα χρησιμοποιούν μέρος της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή πόσιμου νερού. Έτσι εξασφαλίζεται η διαθεσιμότητα του νερού, όχι μόνο για ενεργειακή χρήση, αλλά και για ύδρευση-άρδευση

Μοναδικό μειονέκτημα ενός τέτοιου υβριδικού υδροηλεκτρικού συστήματος είναι το κόστος κατασκευής του. Το κόστος ανά MW ενός υδροηλεκτρικού κυμαίνεται στα 2-3 εκατομμύρια ευρώ έναντι 1,3 εκατομμυρίων ευρώ για μια μονάδα λιθάνθρακα και 700.000 ευρώ για μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου (φυσικό αέριο). Αν και ακριβό στην κατασκευή του, είναι ωστόσο πολύ πιο φθηνό στη λειτουργία του συγκριτικά με τις συμβατικές μονάδες, δεδομένης της συνεχούς αύξησης των τιμών των καυσίμων.

Τέλος, δεδομένου ότι η απόδοση και η οικονομικότητα ενός συστήματος αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις λειτουργικές και τις σχεδιαστικές επιλογές, αναλύουμε στη συνέχεια τις διαφορετικές επιλογές που αφορούν στη διασύνδεση του συστήματος αυτού, τον προγραμματισμό της λειτουργίας του στροβίλου, τους περιορισμούς στην άμεση απορρόφηση ηλεκτρικής ισχύος από το δίκτυο, τη χρήση συμβατικής ισχύος για άντληση, την εγκατάσταση μονής ή διπλής σωλήνωσης.

### **Διασύνδεση του συστήματος αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση**

Γενικότερα, όσον αφορά στη διασύνδεση του συστήματος αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση διακρίνουμε δύο εναλλακτικές περιπτώσεις:

- Την **άμεση σύνδεση**, όπου το σύστημα αντλησιοταμίευσης συνδέεται με τα αιολικά πάρκα που θα συνεισφέρουν στην άντληση με ανεξάρτητη του δικτύου γραμμή μεταφοράς. Η σύνδεση αυτή συναντάται σε νησιά μικρού ή πολύ μεσαίου μεγέθους
- Την **έμμεση σύνδεση**, όπου το σύστημα αντλησιοταμίευσης συνδέεται με τα αιολικά πάρκα μέσω του κεντρικού δικτύου

### **Σύνδεση μονάδας αντλησιοταμίευσης με τα αιολικά πάρκα εντός ΑΕΑ**

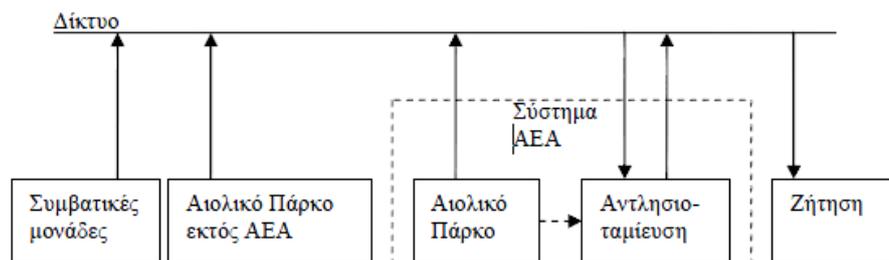
*Άμεση σύνδεση της μονάδας αντλησιοταμίευσης με τα αιολικά πάρκα:*

Η ύπαρξη άμεσης ανεξάρτητης σύνδεσης δίνει τη δυνατότητα στα αιολικά πάρκα να παρέχουν την απορριπτόμενη ισχύ στο σύστημα αντλησιοταμίευσης. Διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- Αν  $P_w > P_\phi$ , τότε το αιολικό πάρκο καλύπτει εξ' ολοκλήρου τη στιγμιαία ζήτηση φορτίου και η περίσσεια της παρεχόμενης από αυτό ενέργειας τροφοδοτεί την αντλία του υδροηλεκτρικού συστήματος προκειμένου να αποταμιευτεί μέσω της ανύψωσης του νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή. Αν υποθέσουμε ότι η πάνω δεξαμενή είναι γεμάτη, τότε είτε απορρίπτουμε την περίσσεια της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, είτε την αξιοποιούμε με κάποιο άλλο τρόπο (π.χ. αφαλάτωση), είτε μειώνουμε την παραγόμενη ισχύ από το αιολικό πάρκο
- Αν  $P_w < P_\phi$ , τότε όλη η ενέργεια που παράγεται από το αιολικό πάρκο διοχετεύεται στην κατανάλωση, ενώ παράλληλα παράγεται

ένα επιπλέον ποσό ενέργειας από τον υδροστρόβιλο για την κάλυψη της ζητούμενης ισχύος

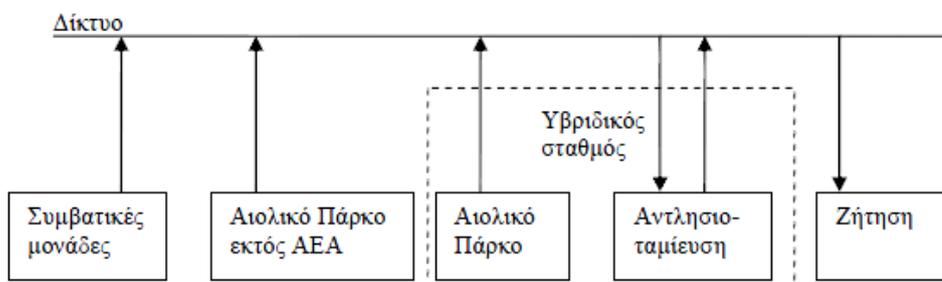
Αν μάλιστα κατά το σχεδιασμό του συστήματος προβλέπεται συμπληρωματικά η χρήση ισχύος από το δίκτυο και συνεπώς υπάρχει διασύνδεση μεταξύ μονάδας αντλησιοταμίευσης και κεντρικού δικτύου, τότε σε περίπτωση απώλειας των αιολικών οι αντλίες θα συνεχίσουν να λειτουργούν τραβώντας ισχύ από το κυρίως δίκτυο. Για να μη συμβεί αυτό απαιτείται πρόσθετο κατάλληλο σύστημα, το οποίο θα παρακολουθεί και θα προσαρμόζει κάθε στιγμή την κατανάλωση ισχύος των αντλιών στη διαθέσιμη αιολική ισχύ (Εικόνα 5.19).



**Εικόνα 5.19:** Άμεση σύνδεση συστήματος ΑΕΑ

*Έμμεση σύνδεση της μονάδας αντλησιοταμίευσης με τα αιολικά πάρκα:*

Στην περίπτωση αυτή, που θεωρείται και η πιο διαδεδομένη, το όλο σύστημα αποτελείται από τα αιολικά πάρκα εκτός του υβριδικού και το σύστημα ΑΕΑ (υβριδικός σταθμός) αποτελείται από τη μονάδα αποθήκευσης (αντλίες, στρόβιλος, δεξαμενές) και τα αιολικά πάρκα. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.20, τα αιολικά πάρκα εντός του υβριδικού, μέσω του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου, μπορούν να δώσουν ενέργεια στις αντλίες ή να καλύψουν μέρος της ζήτησης.



**Εικόνα 5.20:** Έμμεση σύνδεση συστήματος ΑΕΑ (μέσω του κεντρικού δικτύου)

Στη συνέχεια εξετάζεται η χρήση του κεντρικού δικτύου για παροχή αιολικής ισχύος για άντληση. Για την απορρόφηση από το δίκτυο αιολικής ισχύος πρέπει να ισχύει η σχέση:  $P_{w \rightarrow A}$

$$\frac{P_{w \rightarrow A}}{P_{\phi}} \leq \delta \quad (5.42)$$

Όπου  $\delta$  είναι η επιτρεπόμενη στιγμιαία συμμετοχή των αιολικών τη δεδομένη στιγμή (σε ποσοστό %).

Στην οριακή περίπτωση που ισχύει η ισότητα, εάν η απορριπτόμενη αιολική ισχύς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άντληση είναι  $P_{w \rightarrow Rej \rightarrow Pump}$  και αυτή διοχετευτεί μέσω του δικτύου, τότε θα έχει σαν αποτέλεσμα η ζήτηση που θα βλέπει το δίκτυο να αυξηθεί από  $P_{\phi}$  σε  $P_{\phi} + P_{w \rightarrow Rej \rightarrow Pump}$ , η αιολική ισχύς που θα απορροφηθεί από το δίκτυο θα είναι  $P_{w \rightarrow A} + P_{w \rightarrow Rej \rightarrow Pump}$  και ο λόγος θα γίνει:

$$\frac{P_{w \rightarrow A} + P_{w \rightarrow Rej \rightarrow Pump}}{P_{\phi} + P_{w \rightarrow Rej \rightarrow Pump}} > \frac{P_{w \rightarrow A}}{P_{\phi}} = \delta \quad (5.43)$$

Στην πράξη δηλαδή, θα εμφανιστεί στο δίκτυο αυξημένη ζήτηση λόγω της λειτουργίας των αντλιών, και η επιπλέον ζήτηση θα καλυφθεί από τα αιολικά.

Εάν στον περιορισμό της αιολικής ισχύος που πάει στην κατανάλωση, τεθεί περιορισμός στην ισχύ των αιολικών που πάει για άντληση, τότε τα συστήματα ΑΕΑ δεν θα μπορέσουν να συμβάλουν στην αύξηση της διείσδυσης των αιολικών και στην αξιοποίηση της περίσσειας αιολικής ισχύος. Για να μην υπάρχει περιορισμός, απαιτείται ένα σύστημα ελέγχου ή επικοινωνίας μεταξύ των διαχειριστών του ΑΕΑ και του ηλεκτρικού συστήματος που θα διασφαλίζει την ισορροπία μεταξύ κατανάλωσης αντλιών και παραγωγής αιολικών κάθε στιγμή.

Επιπρόσθετα, σε περίπτωση αύξησης της στιγμιαίας συμμετοχής πέραν του επιτρεπόμενου ορίου διείσδυσης, είναι απαραίτητο ο διαχειριστής να έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίζει τις αντλίες ως φορτία που μπορούν να περικοπούν εάν χρειαστεί. Δηλαδή, σε περίπτωση απώλειας των αιολικών ή πτώσης της συχνότητας στο δίκτυο, απαιτείται αυτόματη αποσύνδεση των αντλιών.

### **Σύνδεση αιολικού πάρκου εκτός ΑΕΑ με σύστημα ΑΕΑ**

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται συμπληρωματικά για άντληση ενέργεια από το δίκτυο (για παράδειγμα τις ώρες χαμηλής ζήτησης), τα αιολικά πάρκα εκτός υβριδικού συμμετέχουν έμμεσα και αυξάνουν τη διείσδυσή τους. Πράγματι, εάν μια δεδομένη χρονική στιγμή η ζήτηση είναι  $P_{\phi}$ , η δυνάμενη παραγόμενη αιολική ισχύς είναι  $P_w$  και η δυνάμενη να απορροφηθεί από το δίκτυο αιολική ισχύς είναι  $P_{w \rightarrow A}$ , σύμφωνα με

την εξίσωση (3.42). Εάν ο υβριδικός σταθμός χρησιμοποιήσει ενέργεια για άντληση από το δίκτυο, έστω  $P_{Grid \rightarrow Pumping}$ , τότε η ζήτηση θα διαμορφωθεί σε  $P_\phi + P_{Grid \rightarrow Pumping}$  και η δυνάμενη να απορροφηθεί αιολική ισχύς θα αυξηθεί και θα γίνει  $(P_\phi + P_{Grid \rightarrow Pumping}) \times \delta$ . Επομένως, ο υβριδικός σταθμός μπορεί έμμεσα να αυξήσει τη διείσδυση των εγκατεστημένων αιολικών εκτός υβριδικού, εφόσον οι αντλίες λειτουργούν με ενέργεια από το δίκτυο (μείγμα συμβατικής παραγωγής και αιολικών).

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση άπνοιας, τα αιολικά πάρκα δεν θα παράγουν ισχύ, οπότε η άντληση από το δίκτυο θα αντιστοιχεί σε συμβατική ισχύ. Αντίθετα, αν φυσάει, θα υπάρχει διαθέσιμη αιολική ισχύς για άντληση από τα αιολικά πάρκα του υβριδικού σταθμού, οπότε εκείνες τις ώρες δεν θα απαιτείται άντληση από το δίκτυο.

Συνεπώς, είναι φανερό ότι η έμμεση αυτή αύξηση της διείσδυσης των αιολικών εκτός υβριδικού είναι πολύ περιορισμένη και γενικά, ο υβριδικός σταθμός θα βοηθήσει στην αξιοποίηση της αιολικής ισχύος από τα αιολικά πάρκα εντός ΑΕΑ.

### **Σύνδεση αιολικού πάρκου εντός συστήματος ΑΕΑ με το δίκτυο**

Η σύνδεση των αιολικών πάρκων με το δίκτυο είναι απαραίτητη, προκειμένου να παρέχουν άμεσα ενέργεια, όταν το επιτρέπουν οι συνθήκες και οι περιορισμοί του δικτύου.

Γενικά, η ενέργεια που προσφέρεται από τα αιολικά πάρκα εντός συστήματος ΑΕΑ άμεσα στο δίκτυο αναμένεται να είναι σχετικά μικρή. Αυτό εξαρτάται από την εγκατεστημένη αιολική ισχύ εντός του υβριδικού σταθμού, αλλά και τη στιγμιαία επιτρεπόμενη διείσδυση των αιολικών, η οποία ενδεχομένως να αυξηθεί με την εγκατάσταση του στροβίλου ως στρεφόμενη εφεδρεία.

Σε επίπεδο λειτουργίας, για να μπορέσει να απορροφήσει το δίκτυο αιολική ισχύ από τα αιολικά πάρκα εντός του υβριδικού σταθμού, απαιτείται ένα εξελιγμένο σύστημα επικοινωνίας. Ο διαχειριστής του συστήματος πρέπει να ενημερώνεται κάθε στιγμή για τη δυνάμενη να παραχθεί αιολική ισχύ, ώστε να μπορεί να ζητήσει άμεση απορρόφηση της αιολικής ισχύος από τα αιολικά πάρκα εντός του υβριδικού σταθμού μέχρι να καλυφθεί η ικανότητα απορρόφησης του συστήματος.

### **Σύνδεση του συστήματος αντλησιοταμίευσης με το δίκτυο**

Είναι σημαντικό να συνδέεται το σύστημα αντλησιοταμίευσης με το δίκτυο, έτσι ώστε ο στροβίλος να παράγει και οι αντλίες να

καταναλώνουν. Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη παράγραφο, μπορεί να απαιτηθεί η ταυτόχρονη λειτουργία του στροβίλου και των αντλιών.

## Στόχος της λειτουργίας του ΑΕΑ

Στόχος της λειτουργίας του συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι η παροχή εγγυημένης ισχύος. Διακρίνονται τρεις βασικές επιλογές, καθεμία με διαφορετική φιλοσοφία και λογική:

1. *Κάλυψη των αιχμών - όταν η ζήτηση υπερβεί μια τιμή – από τον στρόβιλο:*

Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές μηνιαίες και εποχιακές διακυμάνσεις, ενώ παράλληλα είναι επιθυμητό ο στρόβιλος να έχει ένα κύκλο λειτουργίας ικανό να του εξασφαλίσει βιωσιμότητα, προτείνεται ο στρόβιλος να λειτουργεί καθημερινά και να καλύπτει τη ζήτηση όταν αυτή υπερβεί μια τιμή. Η τιμή αυτή ορίζεται σαν ένα ποσοστό της αιχμής της προηγούμενης μέρας, επιτρέποντας την κάλυψη των σχετικών αιχμών της ζήτησης. Δηλαδή, όταν η ζήτηση ξεπεράσει αυτήν την τιμή, τότε το επιπλέον φορτίο είναι επιθυμητό να το αναλάβει ο στρόβιλος. Η επιθυμητή παραγωγή του στροβίλου ορίζεται ως:

$$SP_T = P_\phi - L_A \quad (5.44)$$

Όπου:

$$L_A = (1 - a) \cdot peak \quad (5.45)$$

$P_\phi$  είναι η μέση ωριαία ζήτηση ισχύος,  $peak$  είναι η αιχμή των τελευταίων 24 ωρών και  $a$  είναι το άνω ποσοστό της ζήτησης που στοχεύει να καλύψει ο στρόβιλος.

Έτσι, εξασφαλίζεται αφενός η κάλυψη των ημερήσιων αιχμών της ζήτησης και αφετέρου η καθημερινή λειτουργία του στροβίλου - χρήσιμη για την οικονομική βιωσιμότητα του έργου.

2. *Σταθερή κάλυψη ενός ποσοστού της ζήτησης:*

Στην περίπτωση αυτή προσδιορίζεται η επιθυμητή παραγωγή του στροβίλου ως σταθερό ποσοστό  $a$  της ζήτησης. Ο στρόβιλος λειτουργεί συνεχώς όλο το εικοσιτετράωρο, με αποτέλεσμα να παρέχεται η δυνατότητα μεγαλύτερης εκμετάλλευσης του στροβίλου ως στρεφόμενη εφεδρεία με σκοπό την άμεση αύξηση της διείσδυσης των αιολικών. Η επιθυμητή παραγωγή του στροβίλου ορίζεται ως:

$$SP_T = a \cdot P_\phi \quad (5.46)$$

Αυτή η επιλογή επιτρέπει την ένταξη του στρόβιλου σε 24ωρη βάση, με στόχο την κάλυψη ενός συγκεκριμένου ποσοστού της ζήτησης, επομένως η παραγωγή του στρόβιλου αυξομειώνεται ανάλογα με τη διακύμανση της ζήτησης. Επομένως, ο στρόβιλος εξυπηρετεί αφενός την κάλυψη των αιχμών της ζήτησης και αφετέρου την άμεση αύξηση της στιγμιαίας διείσδυσης των αιολικών.

### 3. Σταθερή λειτουργία του στρόβιλου στα τεχνικά του ελάχιστα:

Η τρίτη επιλογή εξετάζει τη σταθερή ένταξη του στρόβιλου στα τεχνικά του ελάχιστα (π.χ. στο 30% του ονομαστικού του φορτίου) σε 24ωρη βάση, έτσι ώστε να βρίσκεται πάντα σε στρεφόμενη εφεδρεία και να επιτρέπει την αύξηση της στιγμιαίας διείσδυσης των αιολικών:

$$SP_T = 30\% \cdot P_T \quad (5.47)$$

## Σύγκριση

Με βάση όσα αναφέρθηκαν, είναι προφανές ότι η πρώτη επιλογή προέρχεται από την ανάγκη κάλυψης των αιχμών από τον στρόβιλο, η δεύτερη συνδυάζει την ικανοποιητική κάλυψη των αιχμών και την 24ωρη λειτουργία – εφεδρεία του στρόβιλου με σκοπό την αύξηση της διείσδυσης των αιολικών και η τρίτη γεννήθηκε από την ανάγκη του στρόβιλου να λειτουργήσει ως στρεφόμενη εφεδρεία και να αυξήσει την άμεση διείσδυση των αιολικών.

Τα παραπάνω μπορούν να διατυπωθούν και σε σχέση με την αθροιστική συνεισφορά του στρόβιλου με τα αιολικά. Δηλαδή:

1. Κάλυψη των αιχμών από τον στρόβιλο και τα αιολικά μαζί
2. Σταθερή κάλυψη ενός ποσοστού της ζήτησης από τον στρόβιλο και τα αιολικά μαζί
3. Σταθερή παραγόμενη ενέργεια αθροιστικά από τον στρόβιλο και τα αιολικά

Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ιδέα είναι ότι η αιολική ενέργεια - όταν είναι διαθέσιμη - λειτουργεί συμπληρωματικά για να καλύψει τις υποχρεώσεις του στρόβιλου, ενώ ο στρόβιλος αναλαμβάνει να αυξομειώνει την παραγωγή του και να καλύπτει τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο, ο στρόβιλος αναλαμβάνει να εξισορροπήσει τόσο τις διακυμάνσεις της ζήτησης, όσο και της διακυμάνσεις των αιολικών.

## Άντληση με χρήση συμβατικής ενέργειας

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η παραγόμενη ισχύς από το αιολικό πάρκο παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις λόγω της μεταβολής στη διαθεσιμότητα του ανέμου, είναι προφανές ότι αντίστοιχες διακυμάνσεις θα παρουσιάζει και η απορριπτόμενη κάθε φορά αιολική ισχύς, με αποτέλεσμα η διαθέσιμη υδραυλική ενέργεια να είναι μικρή και να ακολουθεί στοχαστική κατανομή ανά ημέρα του έτους. Συνεπώς, σε περίπτωση που δεν επιτρέπεται συμπληρωματικά η άντληση με χρήση συμβατικής ενέργειας περιορίζεται η εγγυημένη ισχύς που μπορεί να παρέχει ο στρόβιλος. Για την καλύτερη λοιπόν αξιοποίηση της απορριπτόμενης αιολικής ισχύος, καθώς και του στροβίλου απαιτείται η συμπληρωματική άντληση με χρήση συμβατικής ενέργειας.

Αν θα χρησιμοποιηθεί ή όχι για άντληση η διαθέσιμη συμβατική ισχύς εξαρτάται από δύο παράγοντες:

- Την διαθέσιμη αιολική ισχύ για άντληση τη συγκεκριμένη στιγμή. Η αιολική ισχύς έχει προφανώς προτεραιότητα στην άντληση
- Την ανάγκη για μετακίνηση νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή. Σε περίπτωση που η άνω δεξαμενή είναι γεμάτη, αποφεύγεται η αγορά ενέργειας από το δίκτυο. Παράλληλα, δίνεται το περιθώριο εάν τις επόμενες ώρες προκύψει διαθέσιμη αιολική ισχύς για άντληση, να μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Εισάγεται δηλαδή ένας έλεγχος που σχετίζεται με τη στάθμη του νερού στην άνω δεξαμενή, και ορίζει κάτω από ποια στάθμη ασφαλείας χρησιμοποιείται η διαθέσιμη από το δίκτυο ισχύς για άντληση

## Το δίλημμα της σωλήνωσης

Στην παράγραφο 5.2.2 παρουσιάσαμε αναλυτικά τις βασικές σχεδιαστικές εκδοχές σε ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης. Οι ίδιες σχεδιαστικές εκδοχές ακολουθούνται και στην περίπτωση που το σύστημα αντλησιοταμίευσης εφαρμόζεται παράλληλα με αιολικές μηχανές.

### *Μονή σωλήνωση*

Αν και πρόκειται για οικονομική λύση, δεν επιτρέπει τη ταυτόχρονη λειτουργία του στροβίλου και των αντλιών, οπότε καθορίζεται αν έχει προτεραιότητα λειτουργίας ο στρόβιλος ή οι αντλίες. Οι αντλίες έχουν προτεραιότητα στη λειτουργία όταν ο υβριδικός σταθμός στοχεύει στην εκμετάλλευση όσο το δυνατόν περισσότερης από την απορριπτόμενη αιολική ισχύ (δηλαδή κυρίως τις ώρες που ο άνεμος είναι χαμηλός και

δευτερευόντως τις ώρες που η ζήτηση είναι χαμηλή). Αντίθετα, ο στρόβιλος έχει προτεραιότητα λειτουργίας όταν ο υβριδικός σταθμός στοχεύει πρωταρχικά να υπηρετήσει τις ανάγκες του ηλεκτρικού συστήματος δίνοντας ισχύ στο δίκτυο όταν απαιτείται (π.χ. στις αιχμές της ζήτησης).

#### *Διπλή σωλήνωση*

Στην περίπτωση αυτή υπάρχει ανεξάρτητη σωλήνωση για τον στρόβιλο και για τη λειτουργία των αντλιών. Ο λόγος για τον οποίον μπορεί να απαιτείται η ταυτόχρονη λειτουργία του στροβίλου και των αντλιών δίνεται από τους περιορισμούς του δικτύου. Δεδομένου λοιπόν ότι η άμεση απορρόφηση της αιολικής ενέργειας δεν μπορεί να συμβεί πέραν της επιτρεπόμενης στιγμιαίας διείσδυσης των αιολικών, το υβριδικό σύστημα είναι μονόδρομος για να φθάσουμε σε μεγαλύτερη διείσδυση. Ακόμα, η ταυτόχρονη λειτουργία των δύο αυτών μηχανών είναι αναγκαία σε ώρες αιχμής της ζήτησης και ταυτόχρονα διαθέσιμο άνεμο, όπου από τη μία απαιτείται λειτουργία αντλιών για την εκμετάλλευση της περίσσειας αιολικής ισχύος και από την άλλη πρέπει να λειτουργήσει ο στρόβιλος (είτε λόγω υψηλής ζήτησης είτε λόγω απώλειας των αιολικών).

#### ***Μονή σωλήνωση με σύνθετη λειτουργία***

Επιτρέπει τη διπλή ταυτόχρονη λειτουργία του στροβίλου και των αντλιών με τη χρήση μονής σωλήνωσης. Το σύστημα αντλησιοταμίευσης περιλαμβάνει μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή που λειτουργεί είτε ως αντλία είτε ως στρόβιλος. Πρόκειται για την πιο οικονομική λύση, χωρίς να υστερεί λειτουργικά.

#### 5.2.4.2 Συνδυασμός συστήματος αντλησιοταμίευσης με θερμικά συστήματα

Ιδιαίτερα ελκυστικά μεγέθη εξάγονται επίσης από το συνδυασμό συστημάτων αντλησιοταμίευσης με θερμικά συστήματα για εξοικονόμηση σε περιπτώσεις λειτουργίας του συστήματος σε ισχύεις μεγαλύτερες από τις απαιτούμενες, λόγω τεχνικών ελαχίστων. Αποδεικνύεται ότι μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου και γρήγορη απόσβεση των αρχικών κεφαλαίων επένδυσης με τη χρήση συστήματος αντλησιοταμίευσης.

#### 5.2.4.3 Λειτουργία Υδροηλεκτρικών Μονάδων

Η βέλτιστη λειτουργία των Υδροηλεκτρικών Μονάδων αποσκοπεί στο να παράγεται κάθε ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από τις Υδροηλεκτρικές Μονάδες με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ύδατος. Έχει γίνει κατανοητό από τις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου ότι ο συνολικός βαθμός απόδοσης των Υδροηλεκτρικών Μονάδων εξαρτάται, εκτός από τα ηλεκτρομηχανολογικά τους χαρακτηριστικά (π.χ. βαθμοί απόδοσης γεννήτριας και στροβίλου), και από το ύψος στάθμης του ταμιευτήρα τους (ύψος πτώσης). Για το λόγο αυτό λαμβάνεται μέριμνα έτσι ώστε, όταν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, όχι μόνο να λειτουργούν σε φορτίο ώστε να εξασφαλίζεται ο καλύτερος ηλεκτρομηχανολογικός βαθμός απόδοσης, αλλά και το ύψος στάθμης του ταμιευτήρα τους να είναι το μέγιστο δυνατόν.

## **6. ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΝΗΣΙΩΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΑΠΕ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ.**

### **6.1 Εισαγωγή**

Για να προχωρήσουμε παρακάτω θα πρέπει να θέσουμε τις απαραίτητες παραμέτρους, σύμφωνα με τις οποίες θα στήσουμε αυτό το σύστημα παραγωγής.

Δεδομένου της μη ύπαρξης κάποιας συμβατικής πηγής ενέργειας, όπως επίσης και της μη διασύνδεσης στο Ηπειρωτικό δίκτυο, θα πρέπει το σύστημα που θα σχεδιάσουμε να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των κατοίκων του νησιού σε ηλ. ενέργεια όλο το 24ωρο και τις 365 μέρες το χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι στη σχεδίαση θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και εφεδρικές μονάδες, ώστε σε περίπτωση αστοχία λειτουργίας κάποιας, να μπορούμε να ηλεκτροδοτήσουμε το νησί. Εφόσον θέλουμε να αντικαταστήσουμε πλήρως την καύση ορυκτών πόρων, θα πρέπει να μπορούμε να καλύπτουμε τις ανάγκες των κατοίκων.

Για να βρούμε την βέλτιστη λύση θα εξετάσουμε τέσσερα σχεδιαστικά σενάρια. Ο βασικός κορμός τους θα είναι ίδιος, δηλαδή συνδυασμός των τεσσάρων τεχνολογιών που παρουσιάστηκαν έως τώρα, με βασική πηγή ενέργειας τα αιολικά πάρκα, αλλά με διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής στην τελική παραγωγή.

Επίσης πρέπει να αναφερθεί εδώ, ότι η τιμή πώλησης της kWh που θα χρησιμοποιηθεί στις μελέτες βιωσιμότητας της επιχείρησης, είναι διαφορετική για κάθε τεχνολογία. Οι τιμές αυτές είναι οι τρέχουσες τιμές αγοράς ρεύματος από τη ΔΕΗ σύμφωνα με την «Έκθεση για τον τομέα ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ στο πλαίσιο του σχεδιασμού αναμόρφωσης του μηχανισμού στήριξης» για το έτος 2012.

### **6.2 Απαιτήσεις που πρέπει να καλυφθούν σε ηλεκτρική ενέργεια**

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία της ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. και της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ), οι μηνιαίες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια έχουν τις τιμές που παρουσιάζονται στο πίνακα 6.1. Η αύξηση της μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που παρατηρείται κατά τους μήνες Μάιο-Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο-Σεπτέμβριο οφείλεται στην αύξηση του πληθυσμού λόγω τουριστικής περιόδου. Η τιμή της αιχμής του έτους αγγίζει τα 30MW.

	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Σύνολο
Κατανάλωση ηλ. Ρεύματος (GWh)	7,3	7,3	7,3	7,3	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	7,3	7,3	7,3	105,9

**Πίνακας 6.1:** Μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

Για να καταστήσουμε το νησί της Νάξου ενεργειακά αυτόνομο, με χρήση μόνο Ήπιων Πηγών Ενέργειας, τότε θα πρέπει το υβριδικό σύστημα που προτείνουμε να είναι ικανό να καλύψει τη μηνιαία ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια, ανεξαρτήτως εξωγενών παραγόντων (άπνοια, συννεφιά κτλ).

### 6.3 Σενάριο 1<sup>ο</sup>

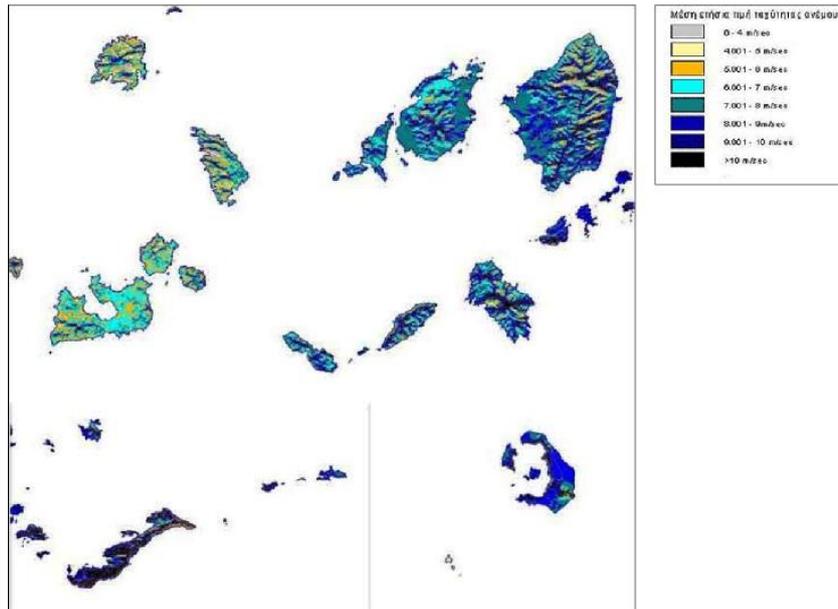
Στο αρχικό σενάριο θα παρουσιάσουμε και τη βασική διάρθρωση που θα έχουν οι μονάδες στο έργο αυτό. Σε αντίθεση με τα επόμενα σενάρια όμως, θα λάβουμε υπόψιν μας μονάχα τις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις του νησιού (για το τομέα της αντλησιοταμίευσης) και τα απορρίμματα που παράγονται μονάχα στη Νάξο (για τον τομέα της καύσης ΑΣΑ).

Τρία αιολικά πάρκα θα αναλάβουν το κύριο μέρος της παραγωγής, με το εργοστάσιο καύσης ΑΣΑ να συμπληρώνει, ενώ και δύο φωτοβολταϊκά πάρκα θα ενισχύουν την παραγωγή όποτε χρειάζεται (τους καλοκαιρινούς μήνες δηλαδή). Με το σύστημα της αντλησιοταμίευσης θα αποθηκεύουμε την περισσευούμενη ενέργεια, ώστε να μπορούμε να την αξιοποιήσουμε όποτε είναι απαραίτητο.

#### 6.3.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Αιολικά Πάρκα

##### 6.3.1.1 Αιολικό δυναμικό και παράμετροι σχεδιασμού

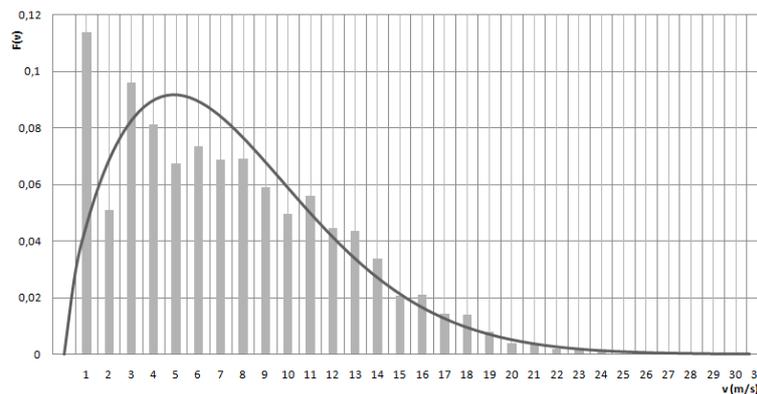
Η Νάξος είναι μία από τις περιοχές της Ελλάδος με το μεγαλύτερο μέσο ετήσιο αιολικό δυναμικό. Δεδομένου ότι μέχρι τώρα ελάχιστες επενδύσεις έχουν γίνει στο νησί για την εκμετάλλευση αυτού του δυναμικού, μας δίνεται η δυνατότητα να φτιάξουμε τον χάρτη αιολικής ενέργειας του νησιού και να εκμεταλλευτούμε πλήρως αυτήν την αέναη πηγή ενέργειας.



**Εικόνα 6.1:** Αιολικό δυναμικό Νάξου

Στην πρόταση μας λαμβάνουμε υπόψιν τις εξής παραμέτρους:

1. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό κάλυψης εδαφών από το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις ΑΠΕ
2. Την περιοχή Natura 2000, μέσα στην οποία δεν μπορούμε να τοποθετήσουμε Α/Γ
3. Την προφύλαξη των αρχαιολογικών χώρων
4. Η τοποθέτηση Α/Γ πρέπει να πραγματοποιηθεί με ελάχιστη απόσταση από κατοικημένη περιοχή άνω των 1000m
5. Τη συγκράτηση του κόστους σε λογικά επίπεδα



**Εικόνα 6.2:** Κατανομή Weibull για τη Νάξο

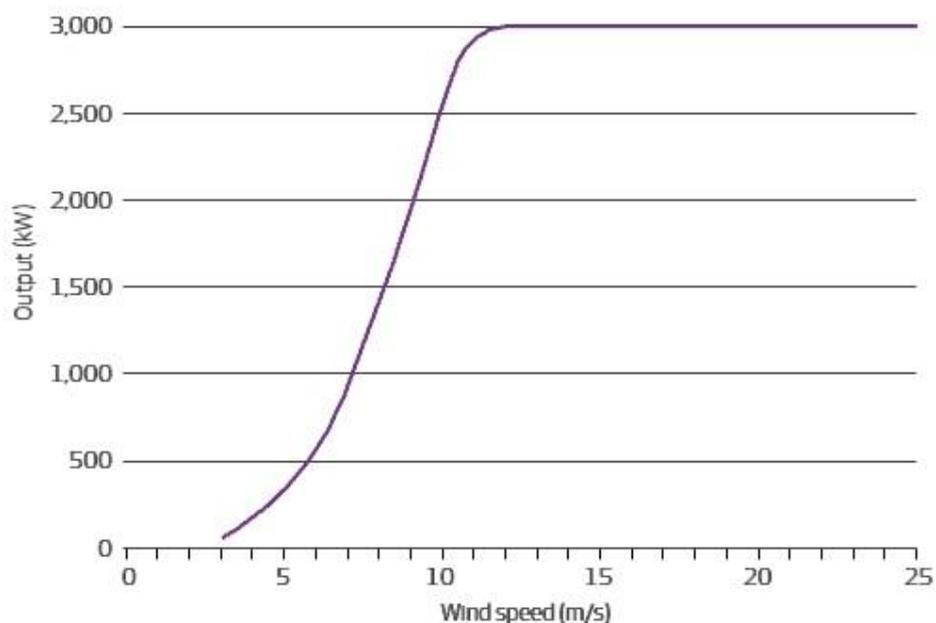
Σκοπός μας είναι η ανοικοδόμηση 19 Α/Γ μοιρασμένων σε 3 Α/Π με συνολική ονομαστική ισχύ 57MW. Οι Α/Γ που επιλέξαμε για τη μελέτη αυτή είναι κατασκευής της εταιρείας Vestas και συγκεκριμένα το μοντέλο V112 – 3.0MW. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μοντέλου και η καμπύλη ισχύος του φαίνονται παρακάτω.

## TECHNICAL DATA FOR V112-3.0 MW

<b>Power regulation</b>	pitch regulated with variable speed	<b>Electrical</b>	50 Hz/60 Hz
<b>Operating data</b>		Frequency	full scale converter
Rated power	3,000 kW	Converter type	permanent magnet generator
Cut-in wind speed	3 m/s	Generator type	
Rated wind speed	12 m/s	<b>Main dimensions</b>	
Cut-out wind speed	25 m/s	<b>Blade</b>	
Wind Class - IEC	IIA/IIIA	Length	54.6 m
Max. altitude	1,500 m	Max. chord	4 m
Operational temperature range	standard range -20°C to 40°C low temperature option -30°C to 40°C	<b>Nacelle</b>	
<b>Sound power</b>		Height for transport	3.3 m
7 m/s	100 dB(A)	Height installed	3.9 m
8 m/s	102.8 dB(A)	Width	3.9 m
10 m/s	106.5 dB(A)	Length	14 m
By 95% rated power	106.5 dB(A)	<b>Tower</b>	
<b>Rotor</b>		Max. section length	32.5 m
Rotor diameter	112 m	Max. diameter	4.2 m
Swept area	9,852 m <sup>2</sup>	<b>Hub</b>	
<b>Tower</b>		Height	3.9 m
Type	tubular steel tower	Diameter	3.2 m
Hub heights	84, 94 and 119 m	Max. weight per unit for transportation	70 metric tonnes

Εικόνα 6.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά Α/Γ Vestas V112 -3MW

### Power curve V112-3.0 MW



Εικόνα 6.4: Καμπύλη Ισχύος Α/Γ Vestas V90 – 3MW

### 6.3.1.2 Τοποθεσίες και διάταξη Α/Π

Όπως προανέφερα οι 19 Α/Γ θα μοιραστούν σε τρία αιολικά πάρκα (Συνολικά 57MW ονομαστικής ισχύος δηλαδή). Οι τοποθεσίες στις οποίες προτείνουμε να τοποθετηθούν, όπως και το πλήθος των Α/Γ που θα απαρτίσουν το κάθε πάρκο είναι οι εξής:

1. Α/Π Εγγαρές - Κινίδαρος - 24MW (8 Α/Γ)
2. Α/Π Αγιασός - 24MW (8 Α/Γ)
3. Α/Π ΝΑ Νάξος - 9MW (3 Α/Γ)

Για την μέτρηση της απόδοσης των ανεμογεννητριών, σχετικά με την ηλεκτρική ενέργεια την οποία παράγουν, σύμφωνα με την BWEA, υπάρχει ο παρακάτω γενικός τύπος:

$$\text{Παραγόμενη Ενέργεια} = B \times 0,30 \times 8760 \quad (6.1)$$

Όπου B είναι η ενέργεια που είναι ικανή να παράγει η ανεμογεννήτρια σε kW και 8760 είναι οι ώρες ενός έτους (365 x 24). Ο αριθμός 0,30 αποτελεί μία σταθερά η οποία περιλαμβάνει τις συνολικές απώλειες που πιθανότατα θα παρατηρηθούν στην ενέργεια που παράγεται λόγω των καιρικών συνθηκών, της τραχύτητας του εδάφους και των απωλειών που προκύπτουν λόγω γειτνίασης των ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο. Η BWEA (British Wind Energy Association) είναι ο οργανισμός που σχετίζεται με όλα τα θέματα μελέτης και αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας στη Μ. Βρετανία, από το 1978 τόσο σε χερσαίες, όσο και σε θαλάσσιες περιοχές.

### 6.3.1.3 Μελέτη Αιολικών Πάρκων

#### **Α/Π Εγγαρές - Κινίδαρος - 24MW (8 Α/Γ)**

Το Α/Π Εγγαρές – Κινίδαρος βρίσκεται στη Δυτική πλευρά του νησιού, στις κορυφές Κοράκια και Βουρλάς και απαρτίζεται από 8 Α/Γ συνολικής ονομαστικής ισχύος 24MW. Ο κοντινότερος κατοικημένος οικισμός είναι το χωριό Εγγαρές, σε απόσταση ενός 1km, και είναι εκτός της ζώνης Natura 2000.

Στην περιοχή αυτή η τιμή του μέσου αιολικού δυναμικού σύμφωνα με το χάρτη αιολικού δυναμικού του ΚΑΠΕ είναι 10m/s. Αυτό σημαίνει η πραγματική ισχύς της Α/Γ αυτής είναι 2,500MW, οπότε σύμφωνα με τον τύπο (6.1) έχουμε:

$$\text{Π.Ε.} = 2500 \times 0,30 \times 8760 = 6570000\text{kWh}$$

Άρα για το σύνολο του Α/Π μπορεί να παραχθούν 52560000kWh ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 6.5: Το Α/Π Εγγαρές - Κινίδαρος

#### Α/Π Αγιασσός - 24MW (8 Α/Γ)

Το Α/Π Αγιασσός βρίσκεται στα Νότια του νησιού, στις κορυφές Καβαλλάρη και Κούτσα και αποτελείται από οχτώ Α/Γ συνολικής ονομαστικής απόδοσης 24MW. Βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη του 1km από τους κοντινότερες κατοικημένες περιοχές και δεν είναι εντός της περιοχής Natura 2000.



Εικόνα 6.6: Το Α/Π Αγιασσός

Σύμφωνα πάντα με τον χάρτη του ΚΑΠΕ, και σε αυτήν την περιοχή το μέσο αιολικό δυναμικό είναι της τάξης των 10m/s. Οπότε η πραγματική ισχύς της κάθε Α/Γ διαμορφώνεται στα 2,500MW και ισχύει:

$$\text{Π.Ε.} = 2500 \times 0,30 \times 8760 = 6570000\text{kWh}$$

Άρα για το σύνολο του Α/Π μπορεί να παραχθούν 52560000kWh ηλεκτρικής ενέργειας.

### **Α/Π ΝΑ Νάξος - 9MW (3 Α/Γ)**

Το Α/Π ΝΑ Νάξος βρίσκεται στα ΝΑ του νησιού στις κορυφές Χοντρωπά και Μαυροπέτρι. Αποτελείται από επτά Α/Γ και πληροί όλες τις απαραίτητες προϋποθέσεις.



**Εικόνα 6.7:** Το Α/Π ΝΑ Νάξος

Στις κορυφές αυτές το αιολικό δυναμικό είναι της τάξης των 9m/s. Οπότε σύμφωνα με τον τύπο (6.1) έχουμε:

$$\text{Π.Ε.} = 1900 \times 0,30 \times 8760 = 4993200\text{kWh}$$

Οπότε τελικά μπορούν να παραχθούν 14979600kWh ηλεκτρικής ενέργειας.

## **6.3.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Καύση ΑΣΑ**

### **6.3.2.1 Τρέχοντα δεδομένα παραγωγής απορριμμάτων**

Σύμφωνα με την πρόσφατη μελέτη που πραγματοποίησε η ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε. για την κατασκευή ΧΥΤΑ στο νησί της Νάξου, τα απορρίμματα που παράγονται το χρόνο στο νησί φτάνουν τους 15450tn. Η μηνιαία παραγωγή απορριμμάτων προσεγγίζεται στον πίνακα 6.2 ο

οποίος είναι βασισμένος στην μελέτη που προανέφερα και στα δεδομένα του γραφείου καθαριότητας του Δήμου Νάξου.

	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Σύνολο
Παραγωγή απορ/μάτων (tn)	990	990	990	990	1704	1704	1704	1704	1704	990	990	990	15450

Πίνακας 6.2: Μηνιαία παραγωγή απορριμμάτων

### 6.3.2.2 Υπολογισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύση ΑΣΑ

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, στην μονάδα καύσης θα καταλήγουν περίπου 15000tn ΑΣΑ ετησίως, ενώ η θερμογόνο δύναμη των απορριμμάτων αυτών είναι 8,3MJ/kg. Στην πραγματικότητα η ποσότητα των ΑΣΑ θα είναι μικρότερη καθώς θα πρέπει να προηγηθεί κάποια διεργασία επιπλέον διαχωρισμού προτού τα ΑΣΑ οδηγηθούν για θερμική επεξεργασία. Αυτό σημαίνει ότι καθημερινά θα καίγονται περίπου 33000kg ΑΣΑ τη χειμερινή περίοδο και 56800kg ΑΣΑ τη θερινή περίοδο.

**Για τη χειμερινή περίοδο έχουμε:**

*Συνολική διαθέσιμη ενέργεια:*

$$\frac{33000 \frac{kg}{d} \times 8,3 \frac{MJ}{kg}}{24 \frac{hr}{d}} = 11412,5 \text{ MJ/hr}$$

Λόγω της χαμηλής παραγωγής απορριμμάτων κρίνεται λογικό η εγκατάσταση να αποτελείται από έναν καυστήρα, ένα στρόβιλο και μια γεννήτρια.

Στοιχείο	Απόδοση	
	Διακύμανση	Τυπική τιμή
Κλίβανος - λέβητας	40-68	63
Λέβητας	60-75	72
Αντιδραστήρας Πυρόλυσης		
-Συμβατικός	65-75	70
Αντιδραστήρας Αεριοποίησης		
-Θερό αέριο	70-80	75
-Ψυχρό αέριο	60-70	65
Στρόβιλος		
Combustion gas		
-Απλός κύκλος	8-12	10
-Αναγεννητικός κύκλος	20-26	24
Expansion gas	30-50	40
Ατμοστρόβιλος- γεννήτρια		
<12,5MW	24-30	29
>25MW	28-32	31,6
Γεννήτρια ηλεκτρισμού		
<10MW	88-92	90
>10MW	94-98	96

**Πίνακας 6.3:** Τυπικές τιμές απόδοσης συστημάτων θερμικής επεξεργασίας

Σύμφωνα και με τον πίνακα 6.3 θα ισχύουν τα εξής:

*Ενέργεια ατμού διαθέσιμη από τον καυστήρα:*

$$11412,5 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,7 = 7988,75 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}$$

*Μηχανική ενέργεια διαθέσιμη από τον ατμοστρόβιλο:*

$$7988,75 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,3 = 2396,63 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}$$

*Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της γεννήτριας:*

$$2396,63 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,96 = 2300,77 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}$$

*Η διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς είναι:*

$$2300,77 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,96 \times \frac{1\text{MWh}}{3600\text{MJ}} = 0,614\text{MW}$$

*Η ετήσια ηλεκτρική ενέργεια θα είναι (για τους μήνες της χειμερινής περιόδου):*

0,614MW x 5088hr = 3124,03MWh (Για τους 7 μήνες της χειμερινής περιόδου)

**Για τη θερινή περίοδο έχουμε:**

*Συνολική διαθέσιμη ενέργεια:*

$$\frac{56800 \frac{kg}{d} \times 8,3 \frac{MJ}{kg}}{24 \frac{hr}{d}} = 19643,3 \text{ MJ/hr}$$

*Ενέργεια ατμού διαθέσιμη από τον καυστήρα:*

$$19643,3 \frac{MJ}{hr} \times 0,7 = 13750,31 \frac{MJ}{hr}$$

*Μηχανική ενέργεια διαθέσιμη από τον αμοστρόβιλο:*

$$13750,31 \frac{MJ}{hr} \times 0,3 = 4125,09 \frac{MJ}{hr}$$

*Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της γεννήτριας:*

$$4125,09 \frac{MJ}{hr} \times 0,96 = 3960,09 \frac{MJ}{hr}$$

*Η διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς είναι:*

$$3960,09 \frac{MJ}{hr} \times 0,96 \times \frac{1MWh}{3600MJ} = 1,056MW$$

*Η ετήσια ηλεκτρική ενέργεια θα είναι (για τους μήνες της θερινής περιόδου):*

1,056MW x 3672hr = 3877,63MWh (Για τους 5 μήνες της θερινής περιόδου)

Άρα συνολικά για όλο το χρόνο θα έχουμε παραγωγή:

$$3124,03MWh + 3877,63MWh = 7001,66MWh$$

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από καύση ΑΣΑ έχει εξελιχθεί τόσο πολύ τα τελευταία χρόνια, που ουσιαστικά λύνει ένα μεγάλο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν όλες οι υπόλοιπες λύσεις διαχείρισης απορριμμάτων. Μπορούμε να την κατασκευάσουμε ακόμα και στο κέντρο της πόλης της Νάξου, χωρίς να δημιουργηθεί κανένα απολύτως πρόβλημα όχλησης. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι μερικές από τις μεγαλύτερες και αποδοτικότερες μονάδες καύσης στον κόσμο, βρίσκονται εντός μεγάλων αστικών κέντρων, χωρίς να προκαλείται καμία αντίδραση. Μάλιστα οι περισσότερες μονάδες από αυτές έχουν και ιδιαίτερο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, κάνοντας τες σημεία αναφοράς.

Εδώ θέλω απλά να σημειώσω ότι η μονάδα καύσης ΑΣΑ που λάβαμε υπόψιν είναι αρκετά μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και με υπερδιπλάσια ποσότητα απορριμμάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν μπορούσε να βρούμε τα απαραίτητα στοιχεία για κάποια μικρότερη μονάδα.



Εικόνα 6.8: Budapest WTE, Hungary



Εικόνα 6.9: Maishima, Japan

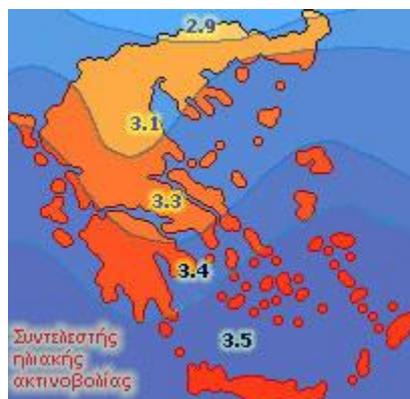


Εικόνα 6.10: Spittelau, Austria

### 6.3.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φωτοβολταϊκό Πάρκο

#### 6.3.3.1 Ηλιακό δυναμικό και παράμετροι σχεδιασμού

Η Νάξος βρίσκεται στη θερμότερη κλιματική ζώνη της χώρας, γεγονός που την κάνει κατάλληλη τοποθεσία για δημιουργία Φωτοβολταϊκού Πάρκου.



Εικόνα 6.11: Σχηματική Απεικόνιση κλιματικών ζωνών ελληνικής επικράτειας

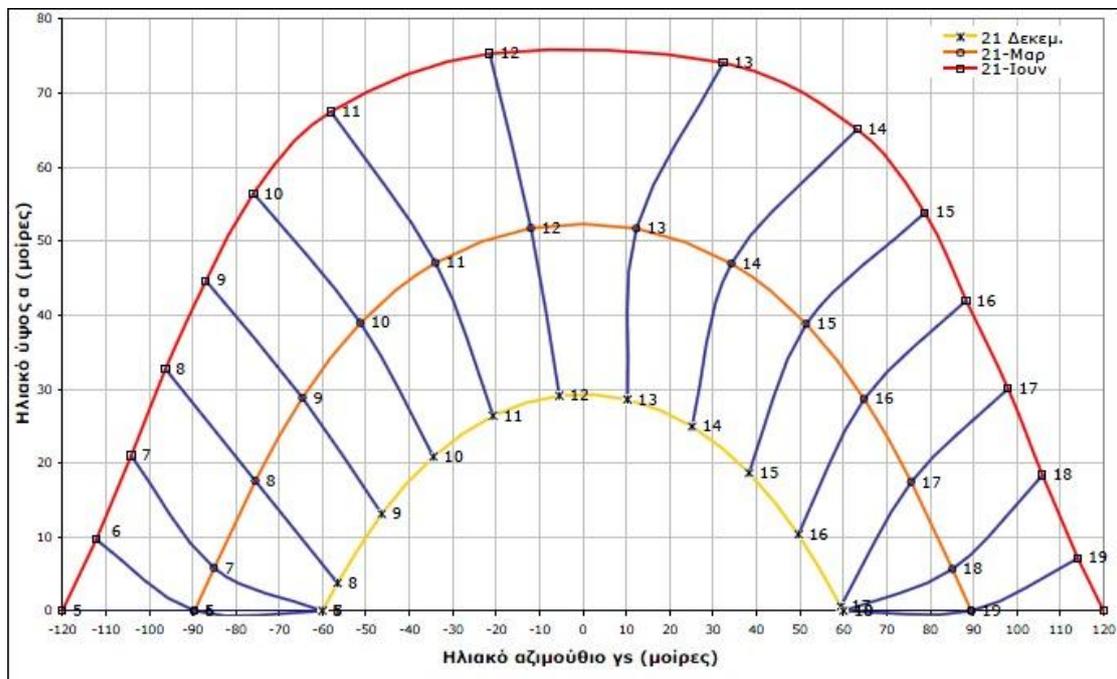
Ακολουθούν πίνακες με τα κλιματικά χαρακτηριστικά της Νάξου:

ΝΑΞΟΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση μηνιαία θερμοκρασία 24ώρου [°C]	12,1	12,2	13,3	16,1	19,5	23,3	24,9	24,8	22,8	19,6	16,3	13,6
Μέση ταχύτητα του ανέμου [km/h]	7,9	8,1	7,6	5,9	4,9	5,0	6,6	6,9	7,0	7,4	6,7	7,5
Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/(m <sup>2</sup> .mε)]	60,3	77,0	122,6	161,2	204,7	220,4	224,5	204,8	159,1	115,9	73,7	55,6
Μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/(m <sup>2</sup> .mε)]	25,5	32,7	51,3	66,2	81,9	85,2	85,0	73,9	56,1	41,1	27,5	22,7
Μέσος μηνιαίος συντελεστής αιθριότητας κτ.	0,41	0,45	0,50	0,55	0,60	0,63	0,64	0,64	0,61	0,56	0,49	0,42

**Πίνακας 6.4:** Μέση μηνιαία θερμοκρασία 24ώρου, μέση ταχύτητα του ανέμου, μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο και μέσος μηνιαίος συντελεστής αιθριότητας κτ

ΝΑΞΟΣ: Μέση Ακτινοβολία (kWh/m <sup>2</sup> )											
		Για κλίση επιφάνειας 90°					Για κλίση επιφάνειας 45°				
Μήνες	Οριζόντιο επίπεδο	Β	ΒΑ/ΒΔ	Α/Δ	ΝΑ/ΝΔ	Ν	Β	ΒΑ/ΒΔ	Α/Δ	ΝΑ/ΝΔ	Ν
ΙΑΝ	60	19	21	40	68	86	24	30	55	82	95
ΦΕΒ	77	24	27	47	69	83	30	42	67	91	103
ΜΑΡ	123	38	49	74	92	98	55	78	107	131	140
ΑΠΡ	161	50	67	90	97	91	98	112	137	152	157
ΜΙΑ	205	71	96	116	109	89	150	158	176	181	178
ΙΟΥΝ	220	80	105	122	109	85	171	175	188	188	182
ΙΟΥΛ	225	79	106	126	114	90	170	176	192	194	189
ΑΥΓ	205	64	92	120	119	102	134	151	178	190	190
ΣΕΠΤ	159	44	63	94	111	113	76	102	138	164	173
ΟΚΤ	116	32	38	69	100	119	38	62	100	135	152
ΝΟΕ	74	21	24	49	83	104	26	35	67	101	117
ΔΕΚ	56	17	19	39	70	89	21	26	52	81	95

**Πίνακας 6.5:** Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένες επιφάνειες με νότιο και τυχαίο προσανατολισμό



**Εικόνα 6.12:** Ηλιακή τροχιά για ελληνικές περιοχές με γεωγραφικό πλάτος 37°B

Τα παραπάνω στοιχεία είναι από την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010 (Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας).

### 6.3.3.2 Τοποθεσίες και διάταξη Φ/Β

Λόγω τη νομοθεσίας σχετικά με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε γήπεδα (αγροτεμάχια), που επιτρέπει την εγκατάσταση συστημάτων με ισχύ έως 500kWp (για συστήματα ισχύος 1MWp πρέπει να βρίσκεται το αγροτεμάχιο σε βιομηχανική περιοχή), θα δημιουργήσουμε δύο Φ/Β πάρκα, ονομαστικής ισχύος 500kWp το καθένα. Λόγω του υψηλού ορεινού όγκου στο κέντρο του νησιού, και φυσικά σεβόμενοι την τουριστική ανάπτυξη της περιοχής, επιλέχθηκαν δύο αγροτεμάχια στα νότια του νησιού δεκαπέντε στρεμμάτων το καθένα, στην πεδινή έκταση, ανάμεσα στα χωριά Αγ. Αρσένιο και Γαλανάδο.

Στο κάθε αγροτεμάχιο θα τοποθετηθούν 2200 φωτοβολταϊκά panel (οι βάσεις θα στηριχτούν με πασαλόμπηξη), τριφασικοί inverter και υποσταθμό Μέσης Τάσης με μετασχηματιστή.

Σύμφωνα με το Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) περιμένω τις παρακάτω αποδόσεις το χρόνο. Οι παραδοχές σχετικά με τις προβλεπόμενες απώλειες και η τοποθεσίες των αγροτεμαχίων φαίνονται στο πάνω μέρος των αποτελεσμάτων.

Location: 37°412" North, 25°23'34" East, Elevation: 28 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Nominal power of the PV system: 500.0 kW (crystalline silicon)  
 Estimated losses due to temperature and low irradiance: 10.3% (using local ambient temperature)  
 Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.4%  
 Other losses (cables, inverter etc.): 10.0%  
 Combined PV system losses: 21.3%

Fixed system: inclination=35°, orientation=0°

Month	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Jan	1530.00	47400	3.69	115
Feb	1740.00	48700	4.25	119
Mar	2310.00	71500	5.70	177
Apr	2570.00	77200	6.48	194
May	2720.00	84300	7.00	217
Jun	2870.00	86000	7.51	225
Jul	2890.00	89500	7.63	237
Aug	2900.00	89800	7.65	237
Sep	2680.00	80500	6.98	209
Oct	2260.00	70000	5.72	177
Nov	1770.00	53200	4.38	131
Dec	1510.00	46700	3.67	114
<b>Yearly average</b>	<b>2310</b>	<b>70400</b>	<b>5.90</b>	<b>179</b>
<b>Total for year</b>		<b>845000</b>		<b>2150</b>

$E_d$ : Average daily electricity production from the given system (kWh)  
 $E_m$ : Average monthly electricity production from the given system (kWh)  
 $H_d$ : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh·m<sup>-2</sup>)  
 $H_m$ : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh·m<sup>-2</sup>)

Location: 37°448" North, 25°23'8" East, Elevation: 10 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Nominal power of the PV system: 500.0 kW (crystalline silicon)  
 Estimated losses due to temperature and low irradiance: 10.3% (using local ambient temperature)  
 Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.5%  
 Other losses (cables, inverter etc.): 10.0%  
 Combined PV system losses: 21.3%

Fixed system: inclination=35°, orientation=0°

Month	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Jan	1540.00	47700	3.71	115
Feb	1750.00	49100	4.28	120
Mar	2330.00	72400	5.77	179
Apr	2600.00	77900	6.54	196
May	2740.00	85000	7.05	219
Jun	2890.00	86600	7.55	227
Jul	2900.00	89900	7.67	238
Aug	2910.00	90300	7.70	239
Sep	2710.00	81200	7.04	211
Oct	2290.00	71100	5.82	180
Nov	1800.00	53900	4.44	133
Dec	1530.00	47300	3.71	115
<b>Yearly average</b>	<b>2340</b>	<b>71000</b>	<b>5.95</b>	<b>181</b>
<b>Total for year</b>		<b>852000</b>		<b>2170</b>

Πίνακες 6.6 & 6.7: Μηνιαίες παραγωγές ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β πάρκα ονομαστικής ισχύος 500kW το καθένα

### **6.3.4 Αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας με χρήση υβριδικού συστήματος με αντλησιοταμίευση**

#### **6.3.4.1 Λόγοι επιβολής χρήσης αποθηκευτικής μονάδας ενέργειας σε μοντέλο παραγωγής αυτόνομων ΑΠΕ**

Με τις μέχρι τώρα μονάδες θεωρητικά έχουμε υπερκαλύψει την πιθανή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Δυστυχώς όμως οι αποδόσεις των ΑΠΕ εξαρτώνται κυρίως από απρόβλεπτους παράγοντες όπως η ηλιοφάνεια και η ταχύτητα του ανέμου. Για αυτό λοιπόν στη μελέτη αυτή πρέπει να συμπεριλάβουμε και μία ακόμα εναλλακτική λύση, ώστε να είμαστε καλυμμένοι ακόμα και απέναντι στο χειρότερο δυνατό σενάριο.

#### **6.3.4.2 Διαστασιολόγηση αντλησιοταμίευσης**

Για να δημιουργήσουμε μία μονάδα αντλησιοταμίευσης χρειαζόμαστε τα εξής:

- 1.** Μία δεξαμενή/τεχνητή λίμνη ως άνω ταμιευτήρα αποθήκευσης νερού
- 2.** Μία δεξαμενή/τεχνητή λίμνη/θάλασσα ως κάτω ταμιευτήρα
- 3.** Έναν υδροστρόβιλο (ή συστοιχία)
- 4.** Μία αντλία (ή συστοιχία)
- 5.** Μία γεννήτρια (ή συστοιχία)
- 6.** Έναν κινητήρα (ή συστοιχία)
- 7.** Την απαραίτητη σωλήνωση

Αλλά αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε την ισχύ που θέλουμε να μπορεί να παραχθεί, ώστε να μην υπάρξει πρόβλημα ηλεκτροφοδότησης του νησιού, ακόμα και στο χειρίστο δυνατό σενάριο.

Το σενάριο αυτό είναι να χρειαστεί να καλυφθούν οι ανάγκες του νησιού για μερικές μέρες μονάχα από την μονάδα παραγωγής καύσης ΑΣΑ και το αντλιοστάσιο, λόγω δυσλειτουργίας των αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων.

Αυτό σημαίνει ότι για κάθε μέρα που δε θα λειτουργούν οι ΑΠΕ θα πρέπει να μπορούμε να παράξουμε 365MWh από την καύση και την αντλησιοταμίευση, ώστε να μπορούν να καλύψουν την μέση ζήτηση μιας καλοκαιρινής μέρας. Δυστυχώς η μονάδα καύσης ΑΣΑ έχει παραγωγικότητα μονάχα μέχρι 26MWh την ημέρα (τη θερινή περίοδο), οπότε με την αντλησιοταμίευση θα πρέπει να καλύψουμε τις υπόλοιπες 339 MWh.

Η επόμενη σημαντική παράμετρος που πρέπει να υπολογίσουμε είναι οι διαστάσεις και η τοποθεσία όπου θα κατασκευάσουμε την δεξαμενή/τεχνητή λίμνη που θα έχει το ρόλο του άνω ταμιευτήρα

αποθήκευσης νερού. Όπως είχα αναφέρει και στην αρχή αυτής της μελέτης, είναι πολύ σημαντικό να μπορούμε να αξιοποιήσουμε τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις του νησιού, ώστε να μειώσουμε το τελικό συνολικό κόστος.

Μία από τις εγκαταστάσεις που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι το φράγμα Φανερωμένης και την τεχνητή λίμνη που δημιουργεί. Βρίσκεται στα ΒΔ του νησιού και μόλις 2χλμ από τις κοντινότερες ακτές. Τα χαρακτηριστικά της δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Χωρητικότητα (m <sup>3</sup> )	1.500.000
Ωφέλιμος όγκος (m <sup>3</sup> )	1.467.000
Μέγιστη επιφάνεια (m <sup>2</sup> )	177.000
Μήκος στέψης (m)	270
Πλάτος στέψης (m)	5
Ύψος (m)	49
Λεκάνη απορροής (km <sup>2</sup> )	25
Μέσο υψόμετρο λεκάνης απορροής (m)	362,5
Προϋπολογισμός (€)	15.912.758
Στεγάνωση	Κουρτίνα τσιμεντενέσεων
Χρήση	Άρδευση

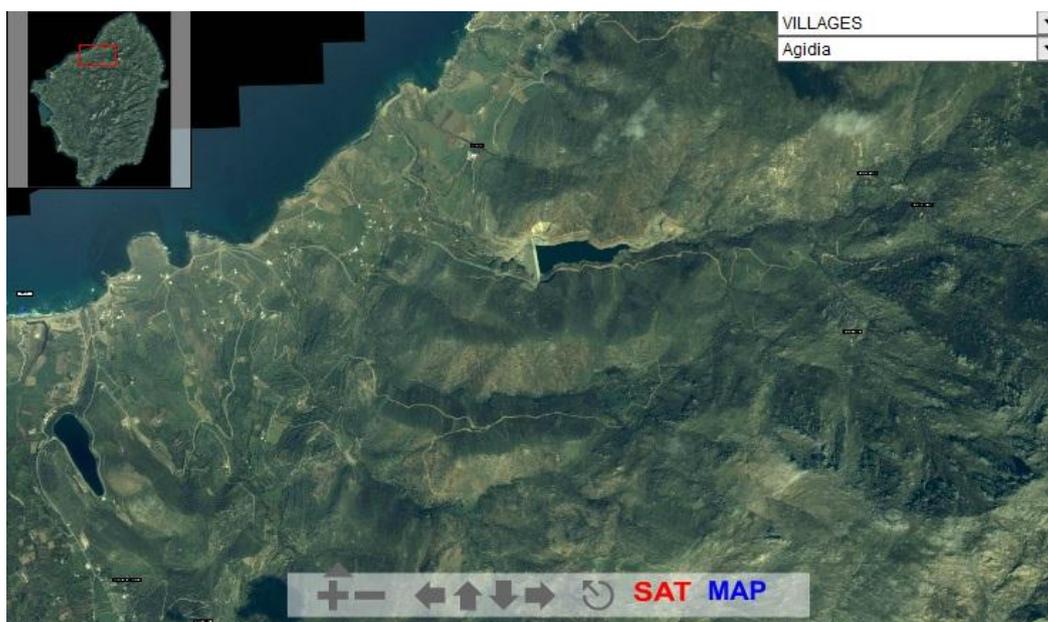
**Πίνακας 6.8:** Χαρακτηριστικά φράγματος Φανερωμένης και τεχνητής λίμνης



στέγη της δεξαμενής γίνεται σε υψόμετρο +19m από το επίπεδο της θάλασσας.



Εικόνα 6.15: Δορυφορική άποψη της λιμνοδεξαμενής Εγγαρών



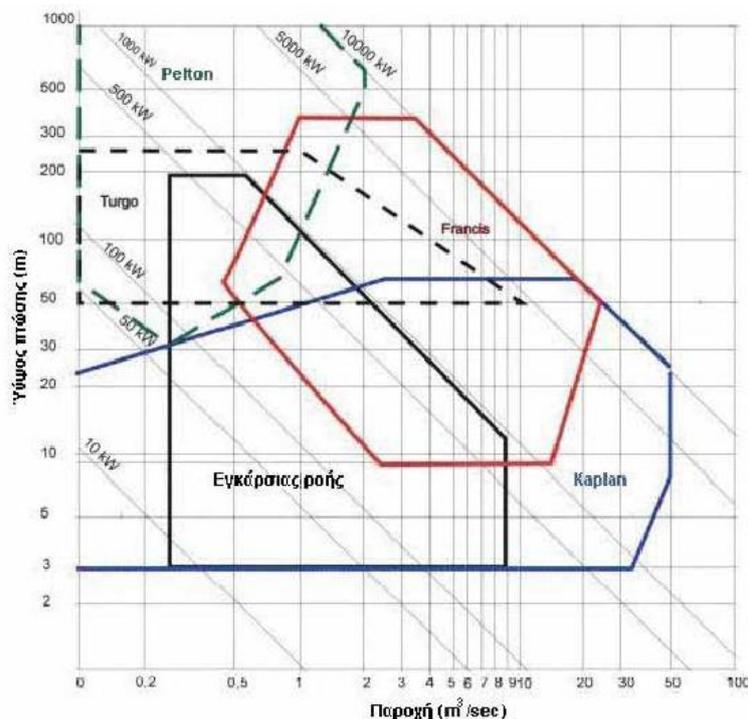
Εικόνα 6.17: Δορυφορική άποψη της αναφερόμενης περιοχής

Επειδή όμως τα ύδατα που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε είναι περιορισμένα, θα εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι ο άνω ταμιευτήρας μας είναι σχετικά κοντά στις ακτές και θα δημιουργήσουμε ένα αντλιοστάσιο, το οποίο θα μεταφέρει νερό από τη θάλασσα. Φυσικά επειδή δε θέλουμε να προκληθούν βλάβες στον μηχανολογικό εξοπλισμό του Υ/Η και επειδή το νερό μετά την έξοδο από το στρόβιλο πρέπει να

είναι κατάλληλο για άρδευση, θα δημιουργήσουμε κατάλληλου μεγέθους εγκαταστάσεις αφαλάτωσης.

Το ότι θα αρδεύουμε νερό από τη θάλασσα και θα τροφοδοτούμε μία άλλη λιμνοδεξαμενη, κάνει απαραίτητη την ύπαρξη δισωλήνιου συστήματος

Το ωφέλιμο ύψος πτώσης που μπορούμε να αξιοποιήσουμε είναι 100m. Δεδομένου ότι πρέπει από την λειτουργία των υδροστροβίλων να μπορούν να παραχθούν 339MWh ηλεκτρικής ενέργειας, και χρησιμοποιώντας το παρακάτω σχήμα:

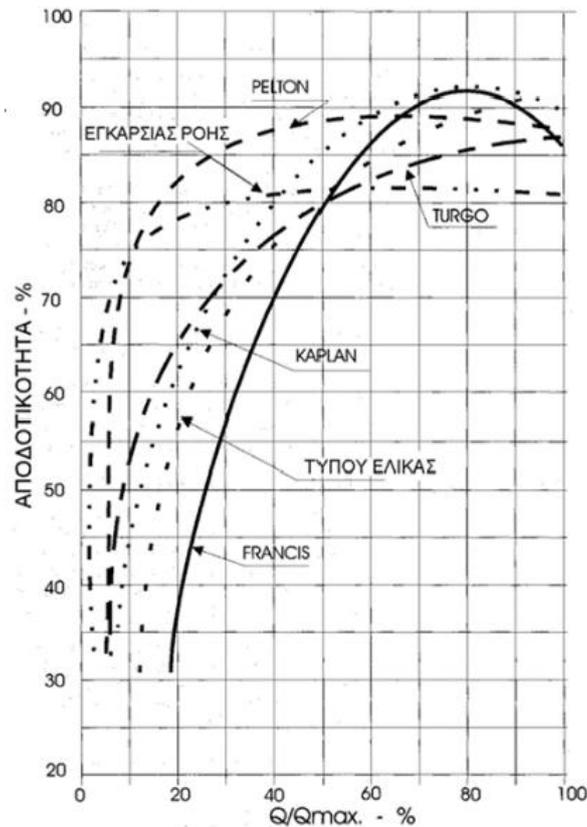


**Εικόνα 6.18:** Διάγραμμα χρήσης διαφόρων τύπων στροβίλων, ανάλογα με το ύψος πτώσης και της παροχής

Αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε τρεις υδροστρόβιλους, των 5MW τους οποίους θα μπορούμε να ενεργοποιούμε ξεχωριστά, ανάλογα με τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι υδροστρόβιλοι αυτοί θα είναι τύπου Pelton, γιατί είναι ο καταλληλότερος για το ύψος πτώσης που έχουμε, και επειδή συνήθως θα λειτουργεί με μικρότερες παροχές από την μέγιστη, είναι ο πιο αποδοτικός σε ασθενείς ροές.

Γνωρίζουμε ότι ο ωφέλιμος όγκος της λίμνης της Φανερωμένης είναι  $1467000\text{m}^3$ , όπως επίσης γνωρίζουμε ότι σύμφωνα με το μέγεθος των υδροστροβίλων που επιλέξαμε, και τον αριθμό, σε συνθήκες μέγιστης λειτουργίας η ροή θα είναι περίπου  $18\text{m}^3/\text{s}$ . Αυτό σημαίνει ότι σε συνθήκες πλήρους λειτουργίας η λίμνη μπορεί να τροφοδοτεί το σύστημα για περίπου μία μέρα. Από εκεί και πέρα θα πρέπει να υπάρχει αρκετή

ισχύς από τις αντλίες, ώστε να μπορούμε να αναπληρώσουμε την ποσότητα νερού που καταναλώνει το σύστημα.



**Εικόνα 6.19:** Μέση αποδοτικότητα για διάφορους τύπους στροβίλων σε σχέση με την παροχή

Για αυτόν το λόγο επιλέχτηκε ένα σύστημα πέντε αντλιών συνολικής ισχύος 17,5MW, τις οποίες και θα θέτουμε σε λειτουργία ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Το νερό θα τροφοδοτείτε από τη θάλασσα, αφού πρώτα περάσει από μονάδα αφαλάτωσης.

Παρότι έχουμε χρησιμοποιήσει δισωλήνιο σύστημα, και μπορούμε να επανατροφοδοτούμε τη λίμνη ταυτόχρονα, για να υπολογίσουμε τη μέγιστη παραγωγή ηλ. ενέργειας που μπορεί να αποδώσει θεωρούμε ότι μπορεί να παράγει μόνο τις μέρες που είναι γεμάτη. Άρα η συνολική παραγωγή θα είναι:

$$\text{Πρα. Παραγωγή} = \text{Θεωρητική} \times 0,5 = 131,4\text{GWh} \times 0,5 = 65,7\text{GWh}$$



**Εικόνες 6.20 & 6.21:** Το φράγμα Φανερωμένης

### 6.3.5 Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το πρώτο σενάριο

	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Σύνολο
Κατανάλωση ηλ. Ρεύματος (GWh)	7,3	7,3	7,3	7,3	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	7,3	7,3	7,3	105,85
Παραγωγή από:(GWh)													
Α/Π Εγκαρές - Κινίδαρος - 24MW	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	52,56
Α/Π Αγιασός - 24MW	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	52,56
Α/Π ΝΑ Νάξος - 21MW	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	14,9796
Σύνολο	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	120,0996
Παραγωγή απορ/μάτων (tn)	990	990	990	990	1704	1704	1704	1704	1704	990	990	990	15450
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από καύση ΑΣΑ (GWh)	0,446	0,446	0,446	0,446	0,776	0,776	0,776	0,776	0,776	0,446	0,446	0,446	7,002
Φωτοβολταϊκά - οικόπεδο 1 - 500kW	0,0474	0,0487	0,0715	0,0772	0,0843	0,086	0,0895	0,0898	0,0805	0,07	0,0532	0,0467	0,8448
Φωτοβολταϊκά - οικόπεδο 2 - 500kW	0,0477	0,0491	0,0724	0,0779	0,085	0,0866	0,0899	0,0903	0,0812	0,0711	0,0539	0,0473	0,8524
Σύνολο	0,0951	0,0978	0,1439	0,1551	0,1693	0,1726	0,1794	0,1801	0,1617	0,1411	0,1071	0,094	1,6972
Θεωρητική παραγόμενη ηλ. ενέργεια από Αντλιοσταμείωση	11,16	10,08	11,16	10,8	11,16	10,8	11,16	11,16	10,8	11,16	10,8	11,16	131,4
Μέγιστο δυνατό ποσοστό λειτουργίας	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Μέγιστη πραγματική παραγόμενη ηλ. ενέργεια από Αντλιοσταμείωση	5,58	5,04	5,58	5,4	5,58	5,4	5,58	5,58	5,4	5,58	5,4	5,58	65,7
Συνολικά παραγόμενη ηλ. ενέργεια	16,1294	15,5921	16,1782	16,0094	16,5336	16,3569	16,5437	16,5444	16,346	16,1754	15,9614	16,1283	194,4988

Πίνακας 6.9: Συγκεντρωτικά στοιχεία παραγωγής ηλ. ενέργειας

Συμμετοχή Α/Π	Συμμετοχή καύσης ΑΣΑ	Συμμετοχή Φ/Π	Συμμετοχή αντλ/ευσης
61,75%	3,60%	0,87%	33,78%

Πίνακας 6.10: Ποσοστιαία συμμετοχή ανά τεχνολογία

## 6.4 Σενάριο 2<sup>ο</sup>

Σε αυτό το σενάριο θα λάβουμε υπόψιν μας και την παραγωγή απορριμμάτων της Πάρου. Η Πάρος είναι το τρίτο σε μέγεθος νησί των Κυκλάδων, αλλά παρόλα αυτά δεν ξεπερνάει τα 200km<sup>2</sup>. Στο νησί ζούνε μόνιμα περίπου 20000 κάτοικοι σύμφωνα με τη απογραφή του 2011, αλλά την καλοκαιρινή περίοδο ο κόσμος πολλαπλασιάζεται.

Στην Πάρο αντιμετωπίζουν το ίδιο ακριβώς πρόβλημα σχετικά με την διαχείριση απορριμμάτων. Αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να λυθεί αν τα απορρίμματα στέλνονταν στη Νάξο για να αποτεφρωθούν στην μονάδα καύσης ΑΣΑ. Η απόσταση που χωρίζει τα νησιά είναι περίπου 3 ναυτικά μίλια, οπότε το κόστος δεν είναι μεγάλο, αλλά θα επιβαρύνει το δήμο της Πάρου.

Εξαιτίας αυτού μπορούμε να μην κατασκευάσουμε το μικρό Α/Π Νάξος, καθώς με την καύση ΑΣΑ μπορούμε να καλύψουμε την παραγωγή. Τα Φ/Β και η αντλησιοταμίευση θα παραμείνουν ως έχουν.

### 6.4.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Αιολικά Πάρκα

#### 6.4.1.1 Τοποθεσίες και διάταξη Α/Π

Θα ανεγερθούν 16 Α/Γ, οι οποίες και θα μοιραστούν σε δύο αιολικά πάρκα συνολικής ονομαστικής ισχύος 48MW. Οι τοποθεσίες στις οποίες προτείνουμε να τοποθετηθούν, όπως και το πλήθος των Α/Γ που θα απαρτίσουν το κάθε πάρκο είναι οι εξής:

1. Α/Π Εγγαρές - Κινίδαρος - 24MW (8 Α/Γ)
2. Α/Π Αγιασός - 24MW (8 Α/Γ)

#### 6.4.1.2 Μελέτη Αιολικών Πάρκων

##### **Α/Π Εγγαρές - Κινίδαρος - 24MW (8 Α/Γ)**

Όπως έχουμε ήδη υπολογίσει στο κεφάλαιο 6.3.1.3 η πραγματική ισχύς της Α/Γ αυτής είναι 2,500MW, οπότε σύμφωνα με τον τύπο (6.1) έχουμε:

$$\text{Π.Ε.} = 2500 \times 0,30 \times 8760 = 6570000\text{kWh}$$

Άρα για το σύνολο του Α/Π μπορεί να παραχθούν 52560000kWh ηλεκτρικής ενέργειας.

## Α/Π Αγιασός - 24MW (8 Α/Γ)

Ομοίως, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έχουμε πραγματοποιήσει στο κεφάλαιο 6.3.1.3, έχουμε:

$$\text{Π.Ε.} = 2500 \times 0,30 \times 8760 = 6570000\text{kWh}$$

Άρα για το σύνολο του Α/Π μπορεί να παραχθούν 52560000kWh ηλεκτρικής ενέργειας.

### 6.4.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Καύση ΑΣΑ

#### 6.4.2.1 Τρέχοντα δεδομένα παραγωγής απορριμμάτων

Στους 15450tn απορριμμάτων της Νάξου, θα προσθέσουμε ακόμα 10870tn αντιστοιχούν στα απορρίματα που παράγονται στην Πάρο το χρόνο, σύμφωνα το γραφείο καθαριότητας του Δήμου. Η μηνιαία παραγωγή απορριμμάτων προσεγγίζεται στον πίνακα 6.11.

	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Σύνολο
Παραγωγή απορ/μάτων (tn)	1640	1640	1640	1640	2968	2968	2968	2968	2968	1640	1640	1640	26320

Πίνακας 6.11: Μηνιαία παραγωγή απορριμμάτων

#### 6.4.2.2 Υπολογισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύση ΑΣΑ

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, στην μονάδα καύσης θα καταλήγουν περίπου 26000tn ΑΣΑ ετησίως, ενώ η θερμογόνο δύναμη των απορριμμάτων αυτών είναι 8,3MJ/kg. Αυτό σημαίνει ότι καθημερινά θα καίγονται περίπου 54667kg ΑΣΑ τη χειμερινή περίοδο και 98933kg ΑΣΑ τη θερινή περίοδο.

**Για τη χειμερινή περίοδο έχουμε:**

*Συνολική διαθέσιμη ενέργεια:*

$$\frac{54667 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \times 8,3 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}}{24 \frac{\text{hr}}{\text{d}}} = 18905,7 \text{ MJ/hr}$$

Σύμφωνα και με τον πίνακα 6.3 θα ισχύουν τα εξής:

*Ενέργεια ατμού διαθέσιμη από τον καυστήρα:*

$$18905,7 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,7 = 13233,99 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}$$

*Μηχανική ενέργεια διαθέσιμη από τον αμοστρόβιλο:*

$$13233,99 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,3 = 3970,197 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}$$

*Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της γεννήτριας:*

$$3970,197 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,96 = 3811,39 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}$$

*Η διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς είναι:*

$$3811,39 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,96 \times \frac{1\text{MWh}}{3600\text{MJ}} = 1,016\text{MW}$$

*Η ετήσια ηλεκτρική ενέργεια θα είναι (για τους μήνες της χειμερινής περιόδου):*

$$1,016\text{MW} \times 5088\text{hr} = 5169,4\text{MWh} \text{ (Για τους 7 μήνες της χειμερινής περιόδου)}$$

**Για τη θερινή περίοδο έχουμε:**

*Συνολική διαθέσιμη ενέργεια:*

$$\frac{98933 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \times 8,3 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}}{24 \frac{\text{hr}}{\text{d}}} = 34214,33\text{MJ/hr}$$

*Ενέργεια ατμού διαθέσιμη από τον καυστήρα:*

$$34214,33 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,7 = 23950,03 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}$$

*Μηχανική ενέργεια διαθέσιμη από τον ατμοστρόβιλο:*

$$23950,03 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,3 = 7185,01 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}$$

*Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της γεννήτριας:*

$$7185,01 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,96 = 6897,61 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}$$

*Η διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς είναι:*

$$6897,61 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \times 0,96 \times \frac{1\text{MWh}}{3600\text{MJ}} = 1,839\text{MW}$$

*Η ετήσια ηλεκτρική ενέργεια θα είναι (για τους μήνες της θερινής περιόδου):*

$$1,839\text{MW} \times 3672\text{hr} = 6752,81\text{MWh} \text{ (Για τους 5 μήνες της θερινής περιόδου)}$$

Άρα συνολικά για όλο το χρόνο θα έχουμε παραγωγή:

$$5169,4\text{MWh} + 6752,81\text{MWh} = 11922,21\text{MWh}$$

### **6.4.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φωτοβολταϊκό Πάρκο**

#### **6.4.3.1 Τοποθεσίες και διάταξη Φ/Β**

Το πλήθος, το μέγεθος και η τοποθεσίες των Φ/Β πάρκων παραμένουν ίδια σε αυτό το σενάριο, οπότε ίδια παραμένει και η πρόβλεψη παραγωγής ηλ. ενέργειας.

### **6.4.4 Αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας με χρήση υβριδικού συστήματος με αντλησιοταμίευση**

#### **6.4.4.1 Διαστασιολόγηση αντλησιοταμίευσης**

Ομοίως και τα στοιχεία και τα δεδομένα της αντλησιοταμίευσης παραμένουν σταθερά. Οπότε από 6.3.4 έχουμε:

$$\text{Πρα. Παραγωγή} = \text{Θεωρητική} \times 0,5 = 131,4\text{GWh} \times 0,5 = 65,7\text{GWh}$$

### 6.4.5 Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το δεύτερο σενάριο

	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Σύνολο
Κατανάλωση ηλ. Ρεύματος (GWh)	7,3	7,3	7,3	7,3	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	7,3	7,3	7,3	105,85
Παραγωγή από:(GWh)													
Α/Π Εγκαρές - Κινίδαρος - 24MW	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	52,56
Α/Π Αγιασός - 24MW	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	52,56
Σύνολο	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	105,1200
Παραγωγή απορ/μάτων (tn)	1640	1640	1640	1640	2968	2968	2968	2968	2968	1640	1640	1640	26320
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από καύση ΑΣΑ (GWh)	0,738	0,738	0,738	0,738	1,351	1,351	1,351	1,351	1,351	0,738	0,738	0,738	11,921
Φωτοβολταϊκά - οικόπεδο 1 - 500kW	0,0474	0,0487	0,0715	0,0772	0,0843	0,086	0,0895	0,0898	0,0805	0,07	0,0532	0,0467	0,8448
Φωτοβολταϊκά - οικόπεδο 2 - 500kW	0,0477	0,0491	0,0724	0,0779	0,085	0,0866	0,0899	0,0903	0,0812	0,0711	0,0539	0,0473	0,8524
Σύνολο	0,0951	0,0978	0,1439	0,1551	0,1693	0,1726	0,1794	0,1801	0,1617	0,1411	0,1071	0,094	1,6972
Θεωρητική παραγόμενη ηλ. ενέργεια από Αντλιοσταμείωση	11,16	10,08	11,16	10,8	11,16	10,8	11,16	11,16	10,8	11,16	10,8	11,16	131,4
Μέγιστο δυνατό ποσοστό λειτουργίας	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Μέγιστη πραγματική παραγόμενη ηλ. ενέργεια από Αντλιοσταμείωση	5,58	5,04	5,58	5,4	5,58	5,4	5,58	5,58	5,4	5,58	5,4	5,58	65,7
Συνολικά παραγόμενη ηλ. ενέργεια	15,1731	14,6358	15,2219	15,0531	15,8603	15,6836	15,8704	15,8711	15,6727	15,2191	15,0051	15,172	184,4382

Πίνακας 6.12: Συγκεντρωτικά στοιχεία παραγωγής ηλ. ενέργειας

Συμμετοχή Α/Π	Συμμετοχή καύσης ΑΣΑ	Συμμετοχή Φ/Π	Συμμετοχή αντλ/ευσης
56,99%	6,46%	0,92%	35,62%

Πίνακας 6.13: Ποσοστιαία συμμετοχή ανά τεχνολογία

## 6.5 Σενάριο 3<sup>ο</sup>

Το πρόβλημα της ύδρευσης και της άρδευσης στις Κυκλάδες είναι γνωστό εδώ και δεκαετίες. Για αυτόν το λόγο εξάλλου δημιουργήθηκε και το φράγμα Φανερωμένης. Όταν βέβαια σχεδιάστηκε, θεωρούσαν ότι με τα νερά του φράγματος αυτού θα μπορούσαν να λύσουν το πρόβλημα του νησιού, και ίσως να τροφοδοτούσαν με νερό και άλλα νησιά των Κυκλάδων, καθώς μέχρι και σήμερα τα νησιά αυτά τροφοδοτούνται με νερό από το Λαύριο. Από νωρίς όμως έγινε αντιληπτό ότι το φράγμα αυτό δεν έφτανε για να λυθεί το πρόβλημα, και για αυτό από το 1992 έχει εκπονηθεί μελέτη για το μεγαλύτερο φράγμα Τσικαλαριού.

Το φράγμα αυτό θα είναι ύψους 46 μέτρων, με ταμιευτήρα χωρητικότητας 3.000.000m<sup>3</sup> νερού και ωφέλιμου όγκου 2.850.000m<sup>3</sup>. Θα κατασκευαστεί επί της κοίτης του ποταμού Ποταμιάς, σε απόσταση σχεδόν 1 χλμ από την Κάτω Ποταμιά και ο ταμιευτήρας του φράγματος θα αποθηκεύει τα επιφανειακά νερά του χειμάρρου Ποταμιάς. Το 2012 πραγματοποιήθηκε η μειοδοτική διαδικασία και το φράγμα αυτό θα κατασκευαστεί από την εταιρεία «Σμίλη Α.Ε.».

Αυτό το έργο λοιπόν μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε για να αυξήσουμε την αυτονομία των μονάδων μας. Σύμφωνα με τη μελέτη που πραγματοποιήσαμε στο πρώτο σενάριο, το φράγμα Φανερωμένης μας δίνει τη δυνατότητα να ηλεκτροδοτήσουμε το νησί για μία μέρα δίχως τη χρήση των Α/Π ή των Φωτοβολταϊκών. Αυτά πάντα για τη θερινή περίοδο, όπου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυξημένη. Δυστυχώς όμως αυτό δεν μας προσφέρει την αυτονομία που έχουμε ανάγκη καθώς κανείς δεν μπορεί να αποκλείσει το ενδεχόμενο να υπάρξουν συνθήκες κατά τις οποίες τα Α/Π δε θα μπορούν να παράγουν, που θα είχαν μεγαλύτερη διάρκεια της μίας μέρας.

Στο σενάριο αυτό λοιπόν θα υπολογίσουμε το κατά πόσο η εκμετάλλευση αυτού του φράγματος θα μπορούσε να βοηθήσει στην πλήρη αυτονόμηση της μονάδας μας, σύμφωνα πάντα με τα δεδομένα του πρώτου σεναρίου, δηλαδή με την λειτουργία τριών Α/Π και τη χρήση μονάχα των απορριμμάτων της Νάξου.

### 6.5.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Αιολικά Πάρκα

#### 6.5.1.1 Τοποθεσίες και διάταξη Α/Π

Σύμφωνα με την αρχική μελέτη μας θα ανεγερθούν 19 Α/Γ, οι οποίες και θα μοιραστούν σε τρία αιολικά πάρκα (Συνολικά 57MW ονομαστικής ισχύος δηλαδή). Οι τοποθεσίες στις οποίες προτείνουμε να

τοποθετηθούν, όπως και το πλήθος των Α/Γ που θα απαρτίσουν το κάθε πάρκο είναι οι εξής:

1. Α/Π Εγγαρές - Κινίδαρος - 24MW (8 Α/Γ)
2. Α/Π Αγιασσός - 24MW (8 Α/Γ)
3. Α/Π ΝΑ Νάξος - 9MW (3 Α/Γ)

#### 6.5.1.2 Μελέτη Αιολικών Πάρκων

##### **Α/Π Εγγαρές - Κινίδαρος - 24MW (8 Α/Γ)**

Όπως έχουμε ήδη υπολογίσει στο κεφάλαιο 6.3.1.3 η πραγματική ισχύς της Α/Γ αυτής είναι 2,500MW, οπότε σύμφωνα με τον τύπο (6.1) έχουμε:

$$\text{Π.Ε.} = 2500 \times 0,30 \times 8760 = 6570000\text{kWh}$$

Άρα για το σύνολο του Α/Π μπορεί να παραχθούν 52560000kWh ηλεκτρικής ενέργειας.

##### **Α/Π Αγιασσός - 24MW (8 Α/Γ)**

Ομοίως, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έχουμε πραγματοποιήσει στο κεφάλαιο 6.3.1.3, έχουμε:

$$\text{Π.Ε.} = 2500 \times 0,30 \times 8760 = 6570000\text{kWh}$$

Άρα για το σύνολο του Α/Π μπορεί να παραχθούν 52560000kWh ηλεκτρικής ενέργειας.

##### **Α/Π ΝΑ Νάξος - 9MW (3 Α/Γ)**

Ομοίως για το Α/Π αυτό έχουμε υπολογίσει:

$$\text{Π.Ε.} = 1900 \times 0,30 \times 8760 = 4993200\text{kWh}$$

Άρα για το σύνολο του Α/Π μπορεί να παραχθούν 14979600kWh ηλεκτρικής ενέργειας.

#### **6.5.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Καύση ΑΣΑ**

##### 6.5.2.1 Υπολογισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύση ΑΣΑ

Στο κεφάλαιο 6.3.2.2 υπολογίσαμε ότι για όλο το χρόνο από την καύση απορριμμάτων θα έχουμε παραγωγή:

$$3124,03\text{MWh} + 3877,63\text{MWh} = 7001,66\text{MWh}$$

### 6.5.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φωτοβολταϊκό Πάρκο

#### 6.5.3.1 Τοποθεσίες και διάταξη Φ/Β

Το πλήθος, το μέγεθος και η τοποθεσίες των Φ/Β πάρκων παραμένουν ίδια σε αυτό το σενάριο, οπότε ίδια παραμένει και η πρόβλεψη παραγωγής ηλ. ενέργειας.

### 6.5.4 Αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας με χρήση υβριδικού συστήματος με αντλησιοταμίευση

#### 6.5.4.1 Διαστασιολόγηση αντλησιοταμίευσης

Με δεδομένο ότι πλέον έχουμε δύο φράγματα που μπορούμε να αξιοποιήσουμε, θα τα εξοπλίσουμε με μικρότερους υδροστρόβιλους και αντλίες. Φυσικά και τα δύο θα τροφοδοτούνται εκτός από τους χειμάρους, από τους οποίους τροφοδοτούνται φυσικά, και από τη θάλασσα, αφού φυσικά το νερό περάσει από διαδικασία αφαλάτωσης. Το ωφέλιμο ύψος πτώσης και του φράγματος Τσικαλαριού που μπορούμε να αξιοποιήσουμε είναι 100m. Τα χαρακτηριστικά των φραγμάτων δίνονται στον πίνακα 6.14.

	Φράγμα Φανερωμένης	Φράγμα Τσικαλαριού
Χωρητικότητα (m <sup>3</sup> )	1.500.000	3.000.000
Ωφέλιμος Όγκος (m <sup>3</sup> )	1.467.000	2.850.000
Ύψος (m)	49	46
Προϋπολογισμός (€)	15.912.758	25.290.620

Πίνακας 6.14: Χαρακτηριστικά φραγμάτων Φανερωμένης και Τσικαλαριού

Τα νερά αφού περάσουν από τους υδροστρόβιλους, και πριν μοιραστούν μέσω του συστήματος ύδρευσης/άρδευσης, θα φιλοξενοούνται σε δύο λιμνοδεξαμενές. Η μία είναι η λιμνοδεξαμενή Εγγαρών, για την οποία έχουμε αναφερθεί στο 6.3.4.2 και θα δέχεται τα νερά από το φράγμα Φανερωμένης, και η άλλη είναι η λιμνοδεξαμενή Ποταμιάς, που θα κατασκευαστεί για να δέχεται τα νερά του φράγματος Τσικαλαριού. Η λιμνοδεξαμενή αυτή θα έχει έκταση περίπου 50στρ., θα είναι χωμάτινης διατομής, ωφέλιμης χωρητικότητας 794.000m<sup>3</sup>, με ύψος αναχώματος 19m και με κλίση πρανών σε εσκαφή και αναχώματα 2,6:1 (μήκος : ύψος).

Στην εικόνα 6.22 βλέπουμε το χώρο που θα καταλαμβάνουν το φράγμα Τσικαλαριού και η λιμνοδεξαμενή Ποταμιάς, καθώς και τη θέση τους σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις του φράγματος φανερωμένης και της λιμνοδεξαμενής Εγγαρών.



Εικόνα 6.22: Η προβλεπόμενη θέση του φράγματος Τσικαλαριού και της λιμνοδεξαμενής Ποταμιάς

Αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε υδροστρόβιλους τύπου Pelton 3MW και να τοποθετήσουμε δύο στο φράγμα φανερωμένης και τρεις στο φράγμα Τσικαλαριού. Με αυτόν τον τρόπο θα έχουμε την ίδια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που είχαμε στο πρώτο σενάριο με τη διαφορά ότι πλέον θα μπορούμε να καλύψουμε την ηλεκτροδότηση του νησιού για 7 μέρες. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και αν τα Α/Π και τα φωτοβολταϊκά αδυνατούν να παράγουν ρεύμα για μία βδομάδα, η καύση ΑΣΑ και η αντλησιοταμίευση μπορούν να καλύψουν το πρόβλημα.

Για την τροφοδότηση των φραγμάτων θα χρησιμοποιηθούν 7 αντλίες συνολικής ισχύος 17,5MW, χωρισμένες σε δύο αντλιοστάσια, ώστε ακόμα και αν δεν υπάρξει η απαραίτητη βροχόπτωση, τα φράγματα να μπορούν να τροφοδοτηθούν με νερό δίχως προβλήματα και καθυστερήσεις. Η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας από την αντλησιοταμίευση θα παραμείνει ίδια με του αρχικού σεναρίου.

### 6.5.5 Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το τρίτο σενάριο

	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Σύνολο
Κατανάλωση ηλ. Ρεύματος (GWh)	7,3	7,3	7,3	7,3	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	7,3	7,3	7,3	105,85
Παραγωγή από:(GWh)													
Α/Π Εγκαρές - Κινίδαρος - 24MW	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	52,56
Α/Π Αγιασός - 24MW	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	52,56
Α/Π ΝΑ Νάξος - 21MW	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	1,2483	14,9796
Σύνολο	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	10,0083	120,0996
Παραγωγή απορ/μάτων (tn)	990	990	990	990	1704	1704	1704	1704	1704	990	990	990	15450
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από καύση ΑΣΑ (GWh)	0,446	0,446	0,446	0,446	0,776	0,776	0,776	0,776	0,776	0,446	0,446	0,446	7,002
Φωτοβολταϊκά - οικόπεδο 1 - 500kW	0,0474	0,0487	0,0715	0,0772	0,0843	0,086	0,0895	0,0898	0,0805	0,07	0,0532	0,0467	0,8448
Φωτοβολταϊκά - οικόπεδο 2 - 500kW	0,0477	0,0491	0,0724	0,0779	0,085	0,0866	0,0899	0,0903	0,0812	0,0711	0,0539	0,0473	0,8524
Σύνολο	0,0951	0,0978	0,1439	0,1551	0,1693	0,1726	0,1794	0,1801	0,1617	0,1411	0,1071	0,094	1,6972
Θεωρητική παραγόμενη ηλ. ενέργεια από Αντλιοσταμείωση	11,16	10,08	11,16	10,8	11,16	10,8	11,16	11,16	10,8	11,16	10,8	11,16	131,4
Μέγιστο δυνατό ποσοστό λειτουργίας	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Μέγιστη πραγματική παραγόμενη ηλ. ενέργεια από Αντλιοσταμείωση	5,58	5,04	5,58	5,4	5,58	5,4	5,58	5,58	5,4	5,58	5,4	5,58	65,7
Συνολικά παραγόμενη ηλ. ενέργεια	16,1294	15,5921	16,1782	16,0094	16,5336	16,3569	16,5437	16,5444	16,346	16,1754	15,9614	16,1283	194,4988

Πίνακας 6.15: Συγκεντρωτικά στοιχεία παραγωγής ηλ. ενέργειας

Συμμετοχή Α/Π	Συμμετοχή καύσης ΑΣΑ	Συμμετοχή Φ/Π	Συμμετοχή αντλ/ευσης
61,75%	3,60%	0,87%	33,78%

Πίνακας 6.16: Ποσοστιαία συμμετοχή ανά τεχνολογία

## 6.6 Σενάριο 4<sup>ο</sup>

Στο τελευταίο σενάριο λαμβάνουμε υπόψιν μας και τα απορρίμματα της Πάρου, αλλά και την αξιοποίηση του φράγματος Τσικαλαριού. Δηλαδή θα έχουμε την αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του εργοστασίου καύσης ΑΣΑ, χάρη στην οποία μπορούμε να μην κατασκευάσουμε το μικρό Α/Π, αλλά και την αυξημένη αυτονομία που μας προσφέρει η αξιοποίηση του φράγματος αυτού.

### 6.6.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Αιολικά Πάρκα

#### 6.6.1.1 Τοποθεσίες και διάταξη Α/Π

Θα ανεγερθούν 16 Α/Γ, οι οποίες και θα μοιραστούν σε δύο αιολικά πάρκα συνολικής ονομαστικής ισχύος 48MW. Οι τοποθεσίες στις οποίες προτείνουμε να τοποθετηθούν, όπως και το πλήθος των Α/Γ που θα απαρτίσουν το κάθε πάρκο είναι οι εξής:

3. Α/Π Εγγαρές - Κινίδαρος - 24MW (8 Α/Γ)

4. Α/Π Αγιασός - 24MW (8 Α/Γ)

#### 6.6.1.2 Μελέτη Αιολικών Πάρκων

##### **Α/Π Εγγαρές - Κινίδαρος - 24MW (8 Α/Γ)**

Όπως έχουμε ήδη υπολογίσει στο κεφάλαιο 6.3.1.3 η πραγματική ισχύς της Α/Γ αυτής είναι 2,500MW, οπότε σύμφωνα με τον τύπο (6.1) έχουμε:

$$\text{Π.Ε.} = 2500 \times 0,30 \times 8760 = 6570000\text{kWh}$$

Άρα για το σύνολο του Α/Π μπορεί να παραχθούν 52560000kWh ηλεκτρικής ενέργειας.

##### **Α/Π Αγιασός - 24MW (8 Α/Γ)**

Ομοίως, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έχουμε πραγματοποιήσει στο κεφάλαιο 6.3.1.3, έχουμε:

$$\text{Π.Ε.} = 2500 \times 0,30 \times 8760 = 6570000\text{kWh}$$

Άρα για το σύνολο του Α/Π μπορεί να παραχθούν 52560000kWh ηλεκτρικής ενέργειας.

## **6.6.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Καύση ΑΣΑ**

### **6.6.2.1 Τρέχοντα δεδομένα παραγωγής απορριμμάτων**

Στους 15450tn απορριμμάτων της Νάξου, θα προσθέσουμε ακόμα 10870tn αντιστοιχούν στα απορρίμματα που παράγονται στην Πάρο το χρόνο, σύμφωνα το γραφείο καθαριότητας του Δήμου.

### **6.6.2.2 Υπολογισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύση ΑΣΑ**

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήσαμε στο κεφάλαιο 6.4.2.2 η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την μονάδα καύσης ΑΣΑ θα είναι:

$$5169,4\text{MWh} + 6752,81\text{MWh} = 11922,21\text{MWh}$$

## **6.6.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φωτοβολταϊκό Πάρκο**

### **6.6.3.1 Τοποθεσίες και διάταξη Φ/Β**

Το πλήθος, το μέγεθος και η τοποθεσίες των Φ/Β πάρκων παραμένουν ίδια σε αυτό το σενάριο, οπότε ίδια παραμένει και η πρόβλεψη παραγωγής ηλ. ενέργειας.

## **6.6.4 Αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας με χρήση υβριδικού συστήματος με αντλησιοταμίευση**

### **6.6.4.1 Διαστασιολόγηση αντλησιοταμίευσης**

Στο σενάριο αυτό κάνουμε χρήση και των δύο φραγμάτων της νήσου Νάξου, με σκοπό τη μέγιστη δυνατή αυτονομία. Όμως, έχοντας αυξήσει την παραγωγή της μονάδας της καύσης, του θερινούς μήνες που χρειαζόμαστε περίπου 365MWh την ημέρα η μονάδα μπορεί να καλύψει τις 45MWh. Που σημαίνει ότι με την αντλησιοταμίευση θα πρέπει να παράγουμε 320MWh ημερησίως.

Για να το πετύχουμε αυτό θα εξοπλίσουμε το φράγμα Φανερωμένης με δύο υδροστρόβιλους τύπου Pelton ισχύος 2,5MW ο καθένας, ενώ το φράγμα Τσικαλαριού θα το εξοπλίσουμε με δύο υδροστρόβιλους τύπου Pelton ισχύος 3MW και ενός υδροστρόβιλου ίδιου τύπου αλλά ισχύος 2,5MW. Η τροφοδότηση των φραγμάτων θα γίνεται από 7 αντλίες συνολικής ισχύος 15MW, χωρισμένες σε δύο αντλιοστάσια. Με αυτόν τον συνδυασμό θα έχουμε 8 μέρες αυτονομία.

### 6.6.5 Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το τέταρτο σενάριο

	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Σύνολο
Κατανάλωση ηλ. Ρεύματος (GWh)	7,3	7,3	7,3	7,3	10,95	10,95	10,95	10,95	10,95	7,3	7,3	7,3	105,85
Παραγωγή από:(GWh)													
Α/Π Εγγαρές - Κινίδαρος - 24MW	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	52,56
Α/Π Αγιασός - 24MW	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	52,56
Σύνολο	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	8,76	105,1200
Παραγωγή απορ/μάτων (tn)	1640	1640	1640	1640	2968	2968	2968	2968	2968	1640	1640	1640	26320
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από καύση ΑΣΑ (GWh)	0,738	0,738	0,738	0,738	1,351	1,351	1,351	1,351	1,351	0,738	0,738	0,738	11,921
Φωτοβολταϊκά - οικόπεδο 1 - 500kW	0,0474	0,0487	0,0715	0,0772	0,0843	0,086	0,0895	0,0898	0,0805	0,07	0,0532	0,0467	0,8448
Φωτοβολταϊκά - οικόπεδο 2 - 500kW	0,0477	0,0491	0,0724	0,0779	0,085	0,0866	0,0899	0,0903	0,0812	0,0711	0,0539	0,0473	0,8524
Σύνολο	0,0951	0,0978	0,1439	0,1551	0,1693	0,1726	0,1794	0,1801	0,1617	0,1411	0,1071	0,094	1,6972
Θεωρητική παραγόμενη ηλ. ενέργεια από Αντλιοσταμείωση	10,044	9,072	10,044	9,72	10,044	9,72	10,044	10,044	9,72	10,044	9,72	10,044	118,26
Μέγιστο δυνατό ποσοστό λειτουργίας	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Μέγιστη πραγματική παραγόμενη ηλ. ενέργεια από Αντλιοσταμείωση	5,022	4,536	5,022	4,86	5,022	4,86	5,022	5,022	4,86	5,022	4,86	5,022	59,13
Συνολικά παραγόμενη ηλ. ενέργεια	14,6151	14,1318	14,6639	14,5131	15,3023	15,1436	15,3124	15,3131	15,1327	14,6611	14,4651	14,614	177,8682

Πίνακας 6.17: Συγκεντρωτικά στοιχεία παραγωγής ηλ. ενέργειας

Συμμετοχή Α/Π	Συμμετοχή καύσης ΑΣΑ	Συμμετοχή Φ/Π	Συμμετοχή αντλ/ευσης
59,10%	6,70%	0,95%	33,24%

Πίνακας 6.18: Ποσοστιαία συμμετοχή ανά τεχνολογία

## 7. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΝΗΣΙΩΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΑΠΕ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

### 7.1 Κόστη κατασκευής και συντήρησης

Μέχρι τώρα υπολογίσαμε το κατά πόσο θα ήταν τεχνικά εφικτό το να ηλεκτροδοτήσουμε το νησί της Νάξου χρησιμοποιώντας μονάχα ΑΠΕ και αξιοποιώντας απορρίμματα. Αφού λοιπόν είδαμε ότι είναι εφικτό, πρέπει να υπολογίσουμε και το κατά πόσο θα ήταν αποδοτικό ως επένδυση. Για αυτό θα υπολογίσουμε τα κόστη κατασκευής και συντήρησης κάθε τεχνολογίας που χρησιμοποιήσαμε σε κάθε σενάριο.

#### 7.1.1 Αιολικό πάρκο

Το αιολικό πάρκο εκ των πραγμάτων είναι και το ακριβότερο κομμάτι της επένδυσης αυτής, καθώς αφενός καλείται να καλύψει το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής και αφετέρου το κόστος αγοράς και εγκατάστασης των ανεμογεννητριών είναι ακόμα υψηλό. Στη δική μας περίπτωση επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε μονάχα έναν τύπο ανεμογεννήτριας, μάρκας Vestas. Σύμφωνα με την αντιπρόσωπο εταιρεία στην Ελλάδα, το κόστος του μοντέλου που επιλέξαμε είναι 3.000.000€ ανά μονάδα, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται τα έξοδα μεταφοράς και εγκατάστασης.

Τα έξοδα μεταφοράς και εγκατάστασης αγγίζουν περίπου το 40% του κόστους αγοράς των Α/Γ, ενώ από εκεί και πέρα υπάρχουν τα κόστη για τις απαραίτητες μελέτες, τα έργα πολιτικού μηχανικού, για τη δημιουργία του υποσταθμού κτλ. Στον πίνακα 7.1 βλέπουμε αναλυτικά τα κόστη για την κατασκευή των αιολικών πάρκων για κάθε σενάριο που μελετήσαμε.

	Κόστος αγοράς και εγκατάστασης Α/Π	€ (1ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (2ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (3ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (4ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος
1	Προκαταρκτικά έξοδα, Μελέτες, Επίβλεψη	550.000	0,64%	550.000	0,75%	550.000	0,64%	550.000	0,75%
2	Κόστος αγοράς Α/Γ	57.000.000	66,05%	48.000.000	65,42%	57.000.000	66,05%	48.000.000	65,42%
3	Μεταφορά και εγκατάσταση	22.800.000	26,42%	19.200.000	26,17%	22.800.000	26,42%	19.200.000	26,17%
4	Κόστος έργων πολιτικού μηχανικού:	2.000.000	2,32%	1.700.000	2,32%	2.000.000	2,32%	1.700.000	2,32%
5	Διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο	300.000	0,35%	300.000	0,41%	300.000	0,35%	300.000	0,41%
6	Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός (Η/Μ)	3.350.000	3,88%	3.350.000	4,57%	3.350.000	3,88%	3.350.000	4,57%
7	Αξία οικοπέδου	100.000	0,12%	70.000	0,10%	100.000	0,12%	70.000	0,10%
8	Αξία οικοπέδου υποσταθμού	100.000	0,12%	100.000	0,14%	100.000	0,12%	100.000	0,14%
9	Γενικά και τραπέζια έξοδα	100.000	0,12%	100.000	0,14%	100.000	0,12%	100.000	0,14%
	Σύνολο	86.300.000	100,00%	73.370.000	100,00%	86.300.000	100,00%	73.370.000	100,00%

**Πίνακας 7.1:** Κόστη κατασκευής Α/Π ανά σενάριο

Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στα προκαταρκτικά έξοδα, στις μελέτες, την επίβλεψη, τη διασύνδεση με το δίκτυο, τα γενικά τραπεζικά έξοδα και τα κόστη έργων πολιτικού μηχανικού, έχουμε λάβει υπόψιν και τα κόστη για τις υπόλοιπες μονάδες που απαρτίζουν κάθε σενάριο.

Εκτός όμως από τα κόστη αγοράς και εγκατάστασης υπάρχουν και τα κόστη συντήρησης των Α/Π, και τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 7.2.

Ετήσιο Λειτουργικό κόστος εγκατάστασης Α/Π	€ (1ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (2ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (3ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (4ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος
1 Ετήσιο Κόστος Αμοιβών	15.000	2%	15.000	2%	15.000	2%	15.000	2%
2 Συντελεστής Συντήρησης Η/Μ	67.000	8%	67.000	9%	67.000	8%	67.000	9%
3 Συντελεστής Συντήρησης έργων Πολιτικού Μηχανικού	10.000	1%	8.500	1%	10.000	1%	8.500	1%
4 Συντελεστής κόστους ασφάλισης Η/Μ	377.188	44%	320.938	43%	377.188	44%	320.938	43%
5 Συντελεστής κόστους ασφάλισης έργων Πολιτικού Μηχανικού	12.500	1%	10.625	1%	12.500	1%	10.625	1%
6 Γραμμή μεταφοράς ηλεκτρισμού	9.000	1%	9.000	1%	9.000	1%	9.000	1%
7 Τέλη & Δημοτικοί Φόροι: Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ υποχρεούνται στην καταβολή τέλους στο δήμο της περιοχής εγκατάστασης 3% του κύκλου εργασιών	358.317	42%	313.626	42%	358.317	42%	313.626	42%
Σύνολο	849.005	100%	744.689	100%	849.005	100%	744.689	100%

Πίνακας 7.2: Ετήσια κόστη συντήρησης Α/Π ανά σενάριο

### 7.1.2 Φωτοβολταϊκό πάρκο

Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών πάρκων τα πράγματα είναι πιο απλά, καθώς υπάρχουν εταιρείες που αναλαμβάνουν να σχεδιάσουν ένα πάρκο σύμφωνα με το χώρο που μπορούμε να διαθέσουμε, να το κατασκευάσουν και να μας το παραδώσουν έτοιμο, δίνοντας μας μονάχα μία τελική τιμή.

Στην δική μας περίπτωση επιλέξαμε τη δημιουργία δύο Φ/Β πάρκων ονομαστικής ισχύος 500kW το καθένα. Σύμφωνα με εταιρεία του χώρου αυτό στοιχίζει 1.130.000€, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται όμως η περίφραξη και τα συστήματα ασφαλείας και τηλεμετρίας. Για τις τιμές των οικοπέδων βασιστήκαμε στην αντικειμενική τους αξία, σύμφωνα με τους πίνακες του Υπουργείου.

Στους πίνακες 7.3 και 7.4 παρουσιάζουμε τα κόστη κατασκευής και συντήρησης των Φ/Β πάρκων.

	Κόστος αγοράς και εγκατάστασης Φ/Β	€ (1ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (2ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (3ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (4ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος
1	Κόστος αγοράς Φ/Β, εγκατάστασης και υποσταθμού	1.130.000	81%	1.130.000	81%	1.130.000	81%	1.130.000	81%
2	Αξία οικοπέδου	250.000	18%	250.000	18%	250.000	18%	250.000	18%
3	Περίφραξη, σύστημα ασφαλείας, σύστημα τηλεμετρίας	10.000	1%	10.000	1%	10.000	1%	10.000	1%
	Σύνολο	1.390.000	100%	1.390.000	100%	1.390.000	100%	1.390.000	100%

**Πίνακας 7.3:** Κόστη κατασκευής Φ/Β πάρκων ανά σενάριο

	Ετήσιο Λειτουργικό κόστος εγκατάστασης Φ/Β	€ (1ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (2ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (3ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (4ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος
1	Ετήσιο Κόστος Αμοιβών	15.000	40%	15.000	40%	15.000	40%	15.000	40%
2	Συντελεστής Συντήρησης Η/Μ	13.900	37%	13.900	37%	13.900	37%	13.900	37%
3	Συντελεστής κόστους ασφάλισης Η/Μ 0,625%	8.688	23%	8.688	23%	8.688	23%	8.688	23%
	Σύνολο	37.588	100%	37.588	100%	37.588	100%	37.588	100%

**Πίνακας 7.4:** Ετήσια κόστη συντήρησης Φ/Β πάρκων ανά σενάριο

### 7.1.3 Μονάδα καύσης ΑΣΑ

Για την κατασκευή της μονάδας καύσης ΑΣΑ υπολογίσαμε ότι θα χρειαστούμε συνολικά 30.600.000€. Όμως με αυτά τα χρήματα θα έχουμε φτιάξει μία μονάδα, όπου θα μπορεί να αξιοποιήσει την υπάρχουσα εισροή απορριμμάτων της Νάξου, αλλά θα μπορεί ακόμα να εκμεταλλευτεί και τα απορρίμματα γειτονικών νησιών, ώστε να αυξήσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οπότε και σε αυτήν την περίπτωση τα κόστη δεν διαφοροποιούνται σε κανένα σενάριο.

	Κόστος αγοράς και εγκατάστασης καύσης ΑΣΑ	€ (1ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (2ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (3ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (4ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος
1	Αξία γης και προετοιμασία	900.000	2,94%	900.000	2,94%	900.000	2,94%	900.000	2,94%
2	Έργα ΠΜ (κτίρια, θέρμανση, κλιματισμός, υγιεινή, πυρασφάλεια, κτλ)	5.700.000	18,63%	5.700.000	18,63%	5.700.000	18,63%	5.700.000	18,63%
3	Έργα διεργασιών (αποτεφρωτής και παραγωγή ατμού)	11.400.000	37,25%	11.400.000	37,25%	11.400.000	37,25%	11.400.000	37,25%
4	Καθαρισμός απαερίων και συγκέντρωση υγρών αποβλήτων	5.400.000	17,65%	5.400.000	17,65%	5.400.000	17,65%	5.400.000	17,65%
5	Εξοπλισμός ελέγχου και παρακολούθησης της λειτουργίας	3.900.000	12,75%	3.900.000	12,75%	3.900.000	12,75%	3.900.000	12,75%
6	Εξοπλισμός ενέργειας (τουρμπίνες, εναλλάκτες)	900.000	2,94%	900.000	2,94%	900.000	2,94%	900.000	2,94%
7	Επεξεργασία υπολειμμάτων	300.000	0,98%	300.000	0,98%	300.000	0,98%	300.000	0,98%
8	Παρακολούθηση έργου (project management) Συμπεριλαμβανομένων πιστοποιητικών συμμόρφωσης επιθεωρήσεων, τεχνικών ελέγχων και απόδοσης	1.050.000	3,43%	1.050.000	3,43%	1.050.000	3,43%	1.050.000	3,43%
9	Αρχική λειτουργία και εκπαίδευση προσωπικού, και άλλα έξοδα	1.050.000	3,43%	1.050.000	3,43%	1.050.000	3,43%	1.050.000	3,43%
	Σύνολο	30.600.000	100,00%	30.600.000	100,00%	30.600.000	100,00%	30.600.000	100,00%

**Πίνακας 7.5:** Κόστη κατασκευής μονάδων καύσης ΑΣΑ ανά σενάριο

Όπως βλέπουμε μεγάλο μέρος του κόστους αντιστοιχεί στα μηχανήματα και τα φίλτρα, που είναι υπεύθυνα για την κατακράτηση των επικίνδυνων ουσιών. Χάρη σε αυτά το εργοστάσιο μπορεί να κατασκευαστεί οπουδήποτε, χωρίς να δημιουργείται κανένα πρόβλημα όχλησης.

	Ετήσιο Λειτουργικό κόστος εγκατάστασης καύσης ΑΣΑ	€ (1ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (2ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (3ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (4ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος
1	Ετήσιο Λειτουργικό κόστος εγκατάστασης καύσης ΑΣΑ	1.500.000	100%	1.500.000	100%	1.500.000	100%	1.500.000	100%
	Σύνολο	1.500.000	100%	1.500.000	100%	1.500.000	100%	1.500.000	100%

Πίνακας 7.6: Ετήσια κόστη συντήρησης μονάδας καύσης ΑΣΑ ανά σενάριο

#### 7.1.4 Αντλησιοταμίευση

Εξαιτίας της απόφασης μας να αξιοποιήσουμε τις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις και να μην τις κατασκευάσουμε από την το συνολικό κόστος κατασκευής έπεσε κατακόρυφα, όπως και η ανάγκη να παρέμβουμε περαιτέρω στο φυσικό περιβάλλον του νησιού. Παρόλα αυτά στα δύο τελευταία σενάρια, με την ένταξη του φράγματος Τσικαλαριού στο έργο γίνεται αναγκαία η δημιουργία μίας ακόμα λιμνοδεξαμενής στη θέση Ποταμιά. Στους πίνακες που θα ακολουθήσουν βλέπουμε τα συνολικά κόστη κατασκευής και συντήρησης των έργων αντλησιοταμίευσης.

Το κόστος των μελετών για την δημιουργία συστήματος αντλησιοταμίευσης για τις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις έχει ήδη προσθεθεί στο αρχικό κόστος μελετών που παρουσιάσαμε στους πίνακες για τα κόστη των Α/Π. Αντίθετα όμως τα κόστη κατασκευής της λιμνοδεξαμενής Ποταμιάς καθώς και τα κόστη των μελετών για την εκμετάλλευση του φράγματος Τσικαλαριού φαίνονται στους πίνακες. Με την προσθήκη των μονάδων αφαλάτωσης δίνουμε λύση και στο πρόβλημα ύδρευσης που αντιμετωπίζει το νησί.

	Κόστος αγοράς και εγκατάστασης Αντλησιοταμίευσης	€ (1ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (2ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (3ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (4ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος
1	Μελέτη / Κατασκευή (είναι υπολογισμένη στο κόστος του Α/Π)	0	0,00%	0	0,00%	3.580.000	9,23%	3.580.000	11,65%
2	Μηχανολογικά	100.000	0,42%	100.000	0,42%	200.000	0,52%	200.000	0,65%
3	Υδροστρόβιλοι	10.300.000	43,10%	10.300.000	43,10%	13.500.000	34,81%	9.500.000	30,91%
4	Υποσταθμός	500.000	2,09%	500.000	2,09%	1.000.000	2,58%	1.000.000	3,25%
5	Αγωγοί πτώσης, κανάλια κτλ.	1.500.000	6,28%	1.500.000	6,28%	3.000.000	7,74%	3.000.000	9,76%
6	Αντλίες	9.000.000	37,66%	9.000.000	37,66%	12.400.000	31,98%	8.350.000	27,17%
7	Αφαλάτωση	2.500.000	10,46%	2.500.000	10,46%	5.100.000	13,15%	5.100.000	16,60%
	Σύνολο	23.900.000	100,00%	23.900.000	100,00%	38.780.000	100,00%	30.730.000	100,00%

Πίνακας 7.7: Κόστος κατασκευής αντλιοταμίευσης ανά σενάριο

Ετήσιο Λειτουργικό κόστος εγκατάστασης Αντλιοσταμίου	€ (1ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (2ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (3ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (4ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος
1 Ετήσιο Κόστος Αμοιβών	15.000	2%	15.000	2%	30.000	3%	30.000	4%
2 Συντελεστής Συντήρησης Υ/Σ, Αντλιών	436.000	57%	436.000	57%	620.000	61%	459.000	58%
3 Συντελεστής κόστους ασφάλισης Η/Μ 0,625%	136.250	18%	136.250	18%	193.750	19%	143.438	18%
4 Τέλη & Δημοτικοί Φόροι: Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ	173.152	23%	173.152	23%	173.152	17%	155.837	20%
Σύνολο	760.402	100%	760.402	100%	1.016.902	100%	788.275	100%

**Πίνακας 7.8:** Ετήσιο κόστος συντήρησης αντλιοσταμίου

### 7.1.5 Συνολικά κόστη κατασκευής

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται τα συνολικά κόστη κατασκευής και συντήρησης όλου του έργου για κάθε σενάριο.

Συνολικό κόστος επένδυσης	€ (1ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (2ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (3ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (4ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος
1 Αιολικά Πάρκα	86.300.000	60,69%	73.370.000	56,76%	86.300.000	54,94%	73.370.000	53,91%
2 Φωτοβολταϊκά Πάρκα	1.390.000	0,98%	1.390.000	1,08%	1.390.000	0,88%	1.390.000	1,02%
3 Παραγωγή από καύση ΑΣΑ	30.600.000	21,52%	30.600.000	23,67%	30.600.000	19,48%	30.600.000	22,49%
4 Αντλιοσταμίου	23.900.000	16,81%	23.900.000	18,49%	38.780.000	24,69%	30.730.000	22,58%
Σύνολο	142.190.000	100,00%	129.260.000	100,00%	157.070.000	100,00%	136.090.000	100,00%

**Πίνακας 7.9:** Συνολικό κόστος ανά σενάριο

Ετήσιο Λειτουργικό κόστος εγκατάστασης	€ (1ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (2ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (3ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος	€ (4ο Σενάριο)	Σχετικό κόστος
1 Αιολικά Πάρκα	849.005	27%	744.688	24%	849.005	25%	744.688	24%
2 Φωτοβολταϊκά Πάρκα	37.588	1%	37.588	1%	37.588	1%	37.588	1%
3 Παραγωγή από καύση ΑΣΑ	1.500.000	48%	1.500.000	49%	1.500.000	44%	1.500.000	49%
4 Αντλιοσταμίου	760.402	24%	760.402	25%	1.016.902	30%	788.275	26%
Σύνολο	3.146.995	100%	3.042.678	100%	3.403.495	100%	3.070.551	100%

**Πίνακας 7.10:** Συνολικό ετήσιο κόστος συντήρησης

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι όλα τα σενάρια που έχουμε μελετήσει βρίσκονται στα ίδια επίπεδα κόστους κατασκευής και συντήρησης.

### 7.2 Οικονομική Βιωσιμότητα

Για να υπάρχει λόγος να επενδύσουμε τό ποσό που χρειάζεται για την κατασκευή αυτής της μονάδας και τη συντήρηση της, θα πρέπει να μελετήσουμε και το κατά πόσο είναι βιώσιμη καθώς και τα επίπεδα κερδών που μπορεί να μας προσφέρει.

Θα πρέπει λοιπόν να υπολογίσουμε τα ετήσια κόστη (PVκόστους) και τις ετήσιες ωφέλειες (PVωφέλειας), το λόγο ωφέλειας-κόστους (B/C), την καθαρή παρούσα αξία (NPV) και το συντελεστή εσωτερικής

αποδοτικότητας (IRR) και με τη σύγκριση αυτών των τιμών μπορούμε να δούμε το κατά πόσο αυτή η επένδυση είναι βιώσιμη ή όχι. Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ότι πραγματοποιήσαμε αυτήν την μελέτη όπως θα το πράτταμε για τον ΟΤΑ, και όχι όπως θα ήταν απαραίτητο για μία εταιρεία.

### ***Ετήσια έσοδα***

Τα έσοδα ισούνται γενικά με το γινόμενο της τιμής πώλησης του προϊόντος επί την αντίστοιχη ετήσια παραγωγή. Έτσι, στην περίπτωση ενός εργοστασίου παραγωγής εμφιαλωμένου νερού, τα ετήσια έσοδα ισούνται με την ετήσια παραγωγή των φιαλών επί την τιμή πώλησης των. Το πρόβλημα της εκτίμησης των ετήσιων εσόδων είναι ένα αντικείμενο με ιδιαίτερες απαιτήσεις, καθώς προϋποθέτει τόσο την εκτίμηση της ζήτησης όσο και της τιμής πώλησης. Οι διακυμάνσεις στην τιμή του προϊόντος για κάποιες επενδύσεις (π.χ. εμφιαλωμένο νερό) μπορεί να μικρές. Το πρόβλημα αφορά κυρίως σε σφάλματα κακής εκτίμησης της μελλοντικής ζήτησης εξαιτίας μεταβολών στην αγορά.

### ***Ετήσιο κόστος λειτουργίας***

Το κόστος λειτουργίας καλύπτει όλη τη διαδικασία παραγωγής, σε σχέση με το είδος του παραγόμενου προϊόντος (π.χ. εμφιαλωμένο νερό) ή υπηρεσιών (π.χ. μαρίνα, βιολογικός καθαρισμός λυμάτων, κ.ά.), καθώς και τα γενικά έξοδα διάθεσης, διοίκησης, κ.λπ. Στον πίνακα των ταμειακών ροών δεν εισάγεται άμεσα το κόστος ιδιοκτησίας του εξοπλισμού, όπως συμβαίνει με το λειτουργικό κόστος, επειδή δεν αποτελεί ταμειακή εκροή. Το κόστος του κεφαλαίου για την αγορά του εξοπλισμού συμπεριλαμβάνεται στο συνολικό κόστος της επένδυσης, ενώ το κόστος λόγω φθοράς του μηχανήματος εκφράζεται μέσα από τη, συνήθως μηδενική, υπολειμματική αξία.

Αφετηρία υπολογισμού του κόστους λειτουργίας αποτελεί το σχέδιο εργασιών της επένδυσης, με τη βοήθεια του οποίου καταρτίζονται οι πίνακες των απαιτούμενων μηχανημάτων και του προσωπικού. Συχνά, το λειτουργικό κόστος εκφράζεται σε χρηματικές μονάδες ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος. Η πρακτική αυτή μολονότι είναι εύχρηστη θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή για την αποφυγή σφαλμάτων ειδικά, όταν χρησιμοποιούνται πληθωριστικές τιμές με διαφορετικό ρυθμό αύξησης ανά κατηγορία δαπάνης (π.χ. προσωπικό, καύσιμα). Πάντως, τα περισσότερα σφάλματα κατά την κοστολόγηση οφείλονται σε:

- παραδοχές σχετικά με την απόδοση του εξοπλισμού
- παραλήψεις κατά τον υπολογισμό των γενικών εξόδων

- λανθασμένες εκτιμήσεις για το κόστος ανταλλακτικών και συντήρησης των μηχανημάτων

### **Καθαρά Παρούσα Αξία (NPV)**

Η **Καθαρά Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)** ορίζεται ως η διαφορά της παρούσας αξίας των ετήσιων εισοδημάτων μείον την παρούσα αξία των ετήσιων εξόδων, συμπεριλαμβανομένων των επενδύσεων. Στην πράξη κι εφόσον έχει καταστρωθεί ο πίνακας των ταμειακών ροών, η ΚΠΑ υπολογίζεται ως η διαφορά των χρηματικών εισροών (καθαρών ταμειακών ροών μετά φόρων) μείον το κόστος των επενδύσεων, όπως, δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$ΚΠΑ = \sum_{\tau=1}^v \frac{ΚΤΡ_{\tau}}{(1+\varepsilon)^{\tau}} - E_0 \quad (7.1)$$

όπου: ΚΠΑ = η Καθαρά Παρούσα Αξία του σχεδίου

ΚΤΡ<sub>τ</sub> = η Καθαρή Ταμειακή Ροή το έτος τ

E<sub>0</sub> = η αρχική επένδυση το χρόνο τ=0

v = η διάρκεια ζωής του επενδυτικού σχεδίου

ε = το επιτόκιο προεξόφλησης

Για την Καθαρά Παρούσα Αξία:

- ΚΠΑ > 0, η επένδυση θεωρείται συμφέρουσα
- ΚΠΑ = 0, το οικονομικό αποτέλεσμα της επένδυσης είναι οριακό
- ΚΠΑ < 0, η επένδυση απορρίπτεται

### **Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης επί του Κεφαλαίου (IRR)**

Όταν το επιτόκιο προεξόφλησης για μια συγκεκριμένη χρηματοροή αυξάνει, η ΚΠΑ αξία της χρηματοροής μειώνεται. Ο **Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (ΕΒΑ)** του κεφαλαίου μπορεί να οριστεί ως το επιτόκιο προεξόφλησης που μηδενίζει τη χρηματοροή, δηλ. εκείνο το επιτόκιο που εξισώνει την αρχική επένδυση με την αξία όλων των μελλοντικών ταμειακών ροών. Η διαφορά μεταξύ του επιτοκίου που δίνεται από τον ΕΒΑ και του επιτοκίου της προεξόφλησης έγκειται στο γεγονός ότι το πρώτο προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά του πίνακα των ταμειακών ροών (για το λόγο αυτό καλείται και εσωτερική απόδοση) ενώ το επιτόκιο προεξόφλησης καθορίζεται εξωγενώς από τον επενδυτικό φορέα. Ο τύπος που δίνει τον ΕΒΑ είναι ο ακόλουθος:

$$ΚΠΑ = 0 = \sum_{\tau=1}^v \frac{ΚΤΡ_{\tau}}{(1+EBA)^{\tau}} - E_0 \quad (7.2)$$

όπου: ΚΤΡ<sub>τ</sub> = η Καθαρή Ταμειακή Ροή το έτος τ

E<sub>0</sub> = η αρχική επένδυση το χρόνο τ=0

v = η διάρκεια ζωής του επενδυτικού σχεδίου

EBA = το επιτόκιο προεξόφλησης που καθιστά την ΚΠΑ = 0

Για τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης του κεφαλαίου:

- EBA > από το ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης, η επένδυση θεωρείται συμφέρουσα
- EBA = με το ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης, η επένδυση θεωρείται οριακή, εφαρμόζεται όταν δεν υπάρχει καλύτερη εναλλακτική λύση
- EBA < από το ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης, η επένδυση απορρίπτεται

#### **Λόγος οφέλους – κόστους και Συνολικός Βαθμός Απόδοσης**

Το κριτήριο του **λόγου οφέλους – κόστους** (Benefit – Cost Ratio), γνωστό και ως **Λόγος Παρούσας Αξίας** - ΛΠΑ (Present Value Ratio), υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\Lambda\text{ΠΑ} = \frac{\sum_{\tau=1}^v \text{TP}_{\tau} (1 + \varepsilon)^{-\tau}}{E_0} \quad (7.3)$$

όπου: τ = το έτος

v = η διάρκεια ζωής του σχεδίου σε έτη

ΤΡ<sub>τ</sub> = η ταμιακή ροή κατά το αντίστοιχο έτος

ε = το επιτόκιο προεξόφλησης

Για τον Λόγος Παρούσας Αξίας:

- ΛΠΑ > 1, η επένδυση θεωρείται συμφέρουσα
- ΛΠΑ = 1, η επένδυση θεωρείται οριακή, μπορεί να υλοποιηθεί όταν δεν υπάρχει καλύτερη εναλλακτική λύση
- ΛΠΑ < 1, η επένδυση απορρίπτεται

Σύμφωνα με τα παραπάνω τα αποτελέσματα είναι στους πίνακες 7.11, 7.12 και 7.13.

	1ο Σενάριο	2ο Σενάριο	3ο Σενάριο	4ο Σενάριο
Ετήσια παραγόμενη ενέργεια	194.498,80	184.438,20	194.498,80	177.868,20
Συντελεστής χρήσης αντλησιοταμίευσης	0,50	0,50	0,50	0,50
Ετήσια παραγόμενη ενέργεια Α/Π (MWh)	120.099,60	105.120,00	120.099,60	105.120,00
Ετήσια παραγόμενη ενέργεια Φ/Β (MWh)	1.697,20	1.697,20	1.697,20	1.697,20
Ετήσια παραγόμενη ενέργεια καύση (MWh)	7.002,00	11.921,00	7.002,00	11.921,00
Ετήσια παραγόμενη ενέργεια αντλησιοταμίευση (MWh)	131.400,00	131.400,00	131.400,00	118.260,00
Τιμή πώλησης Α/Π (ευρο/MW)	99,45	99,45	99,45	99,45
Τιμή πώλησης Φ/Β (ευρο/MW)	252,62	252,62	252,62	252,62
Τιμή πώλησης καύση (ευρο/MW)	150,00	150,00	150,00	150,00
Τιμή πώλησης αντλησιοταμίευση (ευρο/MW)	87,85	87,85	87,85	87,85
Χρόνος επένδυσης	20,00	20,00	20,00	20,00
Βαθμός επένδυσης	5%	5%	5%	5%
<b>Ετήσιο όφελος</b>	<b>19.194.696,88 €</b>	<b>18.442.825,66 €</b>	<b>19.194.696,88 €</b>	<b>17.865.651,16 €</b>
<b>PNVωφέλειας</b>	<b>239.208.350,03 €</b>	<b>229.838.372,74 €</b>	<b>239.208.350,03 €</b>	<b>222.645.502,71 €</b>
κόστος συντήρησης Α/Π	849.005,00 €	744.688,00 €	849.005,00 €	744.688,00 €
κόστος συντήρησης Φ/Β	37.588,00 €	37.588,00 €	37.588,00 €	37.588,00 €
κόστος συντήρησης καύση	1.500.000,00 €	1.500.000,00 €	1.500.000,00 €	1.500.000,00 €
κόστος συντήρησης αντλησιοταμίευση	760.402,00 €	760.402,00 €	1.016.902,00 €	788.275,00 €
Κόστος εγκατάστασης	<b>142.190.000,00 €</b>	<b>129.260.000,00 €</b>	<b>157.070.000,00 €</b>	<b>136.090.000,00 €</b>
Ετήσιο κόστος συντήρησης	<b>3.146.994,51 €</b>	<b>3.042.677,87 €</b>	<b>3.403.494,51 €</b>	<b>3.070.550,14 €</b>
<b>PNVκόστους</b>	<b>39.218.507,49 €</b>	<b>37.918.491,62 €</b>	<b>42.415.064,44 €</b>	<b>38.265.841,65 €</b>

Πίνακας 7.11

Βαθμός επένδυσης	NPV (1ο Σενάριο)	NPV (2ο Σενάριο)	NPV (3ο Σενάριο)	NPV (4ο Σενάριο)
5%	57.799.842,54	62.659.881,12	39.723.285,59	48.289.661,06
6%	41.875.882,01	47.378.481,95	24.053.847,22	33.608.643,22
7%	27.819.587,59	33.889.385,11	10.222.222,94	20.649.511,07
8%	15.368.707,49	21.940.921,14	-2.029.647,32	9.170.482,81
9%	4.302.184,04	11.320.952,45	-12.919.287,93	-1.032.244,58
10%	-5.566.863,25	1.850.139,54	-22.630.592,35	-10.130.964,65
11%	-14.396.880,44	-6.623.570,06	-31.319.474,10	-18.271.755,98
12%	-22.322.591,79	-14.229.464,25	-39.118.504,08	-25.578.826,95
13%	-29.458.877,40	-21.077.787,48	-46.140.726,18	-32.158.090,70
14%	-35.903.972,10	-27.262.810,65	-52.482.805,09	-38.100.114,36
15%	-41.742.111,43	-32.865.370,21	-58.227.629,95	-43.482.558,47
16%	-47.045.725,80	-37.954.973,90	-63.446.473,49	-48.372.199,91
17%	-51.877.264,74	-42.591.551,27	-68.200.787,06	-52.826.613,69

Πίνακας 7.12

	1ο Σενάριο	2ο Σενάριο	3ο Σενάριο	4ο Σενάριο
Ετήσιο όφελος	19.194.696,88 €	18.442.825,66 €	19.194.696,88 €	17.865.651,16 €
NPV	57.799.842,54 €	62.659.881,12 €	39.723.285,59 €	48.289.661,06 €
Λόγος B/C	1,32	1,37	1,20	1,28
IRR (%)	9,39%	10,07%	7,81%	8,90%
περίοδος επανακτησης κεφαλαίου (ρ)	8,86	8,39	9,95	9,20

Πίνακας 7.13

### 7.3 Συμπεράσματα

Ο σκοπός της εργασίας αυτής ήταν να μελετήσουμε το κατά πόσο θα μπορούσαμε να καλύψουμε τις ανάγκες ενός νησιού σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας μονάχα ΑΠΕ και αξιοποιώντας τα απορρίμματα. Έπρεπε να υπολογίσουμε και το τεχνολογικό κομμάτι, δηλαδή το κατά πόσο θα ήταν εφικτό κάτι τέτοιο, αλλά και το χρηματοοικονομικό, δηλαδή το κατά πόσο θα ήταν ρεαλιστικά πραγματοποιήσιμο κάτι τέτοιο από επενδυτικής πλευράς.

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς μας καταλήξαμε ότι και τα τέσσερα σενάρια είναι αποδεκτά και από τεχνολογικής αλλά και από οικονομικής άποψη. Παρόλα αυτά ένα από τα τέσσερα είναι αυτό που θα μπορούσε να καλύψει και τις ανάγκες του νησιού σε ηλεκτρική ενέργεια, αλλά να του παρέχει την απαραίτητη αυτονομία, ώστε να μην χρειάζεται η ύπαρξη μεγάλων αποθεμάτων πετρελαίου.

Από αυτά τα τέσσερα λοιπόν το δεύτερο σενάριο φαίνεται να είναι και το πιο αποδοτικό από οικονομικής άποψης, σύμφωνα με τους οικονομικούς δείκτες που υπολογίσαμε. Όμως σε περίπτωση που για κάποιο χρονικό διάστημα είναι αδύνατη η λειτουργία των ΑΠΕ, η παραγωγή ενέργειας από καύση ΑΣΑ και από την αντλησιοταμίευση μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του νησιού μονάχα για μία μέρα περίπου. Σε περίπτωση λοιπόν που για κάποιες μέρες επικρατούν ακραία καιρικά φαινόμενα ή άπνοια, θα υπάρξει πρόβλημα τροφοδότησης του νησιού με ηλεκτρική ενέργεια.

Για τον ίδιο λόγο απορρίπτεται και το πρώτο σενάριο, που είναι το αμέσως πιο συμφέρων από οικονομικής άποψης, σύμφωνα πάντα με τους οικονομικούς δείκτες που υπολογίσαμε. Στην πράξη μάλιστα η ενεργειακή αυτονομία του νησιού σε αυτήν την περίπτωση είναι λίγο μικρότερη.

Ανάμεσα στο τρίτο και στο τέταρτο σενάριο, φαίνεται προτιμότερο το τέταρτο σενάριο από οικονομικής άποψης. Εκτός αυτού όμως έχει και τα προτερήματα του δεύτερου σεναρίου από οικολογικής άποψης, καθώς εκτός από το πρόβλημα της διαχείρισης των απορριμμάτων της Νάξου, δίνει λύσει και στο πρόβλημα της διαχείρισης των απορριμμάτων της Πάρου. Και χάρη στο φράγμα Τσικαλαριού και την αυξημένη παραγωγή ενέργειας από την καύση ΑΣΑ, έχουμε μία αυτονομία της τάξης των 8 ημερών, την οποία και θεωρούμε αρκετή, ώστε να βασίσουμε την ηλεκτροφοδότηση του νησιού σε αυτό το σενάριο.

Τα πλεονεκτήματα όμως μιας τέτοιας επένδυσης δεν σταματάνε εκεί. Αρχικά εφόσον το πετρέλαιο δεν θα είναι η βασική πηγή ενέργειας πλέον, δε θα χρειάζεται να φεύγει συνάλλαγμα για την αγορά του. Κάτι

που στην σημερινή οικονομική περίοδο που διανύουμε είναι πολύ σημαντικό. Εκτός αυτού, τουλάχιστον ως προς την περίπτωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ανεξαρτητοποιούμαστε από τους προμηθευτές του πετρελαίου, και τις εκάστοτε απαιτήσεις τους για την πώληση των αγαθών τους.

Με την εκμετάλλευση των φραγμάτων και την δημιουργία των δύο μονάδων αφαλάτωσης, δίνεται λύση σε ένα πραγματικά μεγάλο πρόβλημα των νησιωτικών περιοχών, και ιδιαίτερα των Κυκλάδων. Την παροχή φρέσκου, πόσιμου νερού. Μέχρι τώρα σε όλες τις Κυκλάδες πάντα υπήρχαν προβλήματα ύδρευσης και άρδευσης, και για να καλυφθούν οι ανάγκες των νησιών σε νερό, χρειαζόταν η μεταφορά του με πλοία από το λιμάνι του Λαυρίου. Χάρη στα δύο φράγματα όμως και του συστήματος που σχεδιάσαμε, θα μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες όχι μόνο της Νάξου, αλλά και των γειτονικών νησιών.

Ένα ακόμα ιδιαιτέρως σημαντικό πλεονέκτημα, είναι η δημιουργία θέσεων εργασίας, που τόσο έχουμε ανάγκη αυτήν την περίοδο. Ιδιαίτερα για την περίοδο της κατασκευής των μονάδων, θα χρειαστούν πλήθος εργατών και μηχανικών. Αλλά ακόμα και για την σωστή λειτουργία των μονάδων θα ανοίξουν θέσεις εργασίας, κάτι που θα κρατήσει και τους νέους του νησιού στον τόπο τους.

Και πάνω από όλα, όλα τα παραπάνω θα πραγματοποιηθούν χωρίς να προκληθεί καμία αλλοίωση στον τομέα του τουρισμού του νησιού, από τον οποίο και χρηματοδοτείται κυρίως. Αντίθετα ίσως και να υπάρξει και βελτίωση στον τομέα αυτό, καθώς και θα εξαληφθούν οι χωματερές, δε θα υπάρχει η μόλυνση από την καύση του πετρελαίου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (EWEA), [www.ewea.org](http://www.ewea.org).
2. Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), [www.eletaen.gr](http://www.eletaen.gr).
3. Δήμος Νάξου <http://www.e-naxos.eu/>
4. Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε. (ΔΕΗ – [www . de i . gr /](http://www.dei.gr/)).
5. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) <http://www.cres.gr/>
6. Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) <http://www.eletaen.gr/>
7. Global Wind Energy Council (GWEC) <http://www.gwec.net/>
8. European Wind Energy Association (EWEA) <http://www.ewea.org/>
9. <http://www.vestas.com/>
10. Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛ.ΣΤΑΤ.), <http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE>.
11. ΑΡΙΑΔΝΗ Α.Ε. Αναπτυξιακή Εταιρεία Επαρχίας Νάξου
12. Εγχειρίδιο ΑΠΕ για δυνητικούς χρήστες ΚΑΠΕ 2006
13. Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, «Μαθήματα Αιολικής Ενέργειας και Ανάπτυξης Αιολικών Πάρκων», Χρηματοδότηση: INTERREG IIC NORTH - Regional Wind Technology and Knowledge Transfer Strategies – Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Λασιθίου, Έτος έκδοσης: 2008.
14. «Η Ισχύουσα κατάσταση και οι προοπτικές ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας στον νησιωτικό χώρο του Αιγαίου». Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε) Draft 26/05/2004.

15. Μ.Π. Παπαδόπουλος, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, Αθήνα, 1997.
16. V. Akhmatov, “Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power”, PhD Thesis, Technical University of Denmark, April 2003.
17. M.R. Patel, “Wind and Solar Power Systems”, CRC Press, 1999.
18. Eduard Muljadi and C.P. Butterfield, “Pitch -Controlled Variable – Speed Wind Turbine Generation“, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, January / February 2001, pp. 240 -246.
19. Ian D. Bishop, David R. Miller. Visual assessment of off-shore wind turbines: The influence of distance, contrast, movement and social variables. Renewable Energy 2007; 32: 814-831.
20. «Διαχείριση οικιακού τύπου απορριμμάτων / Προβλήματα εθνικού σχεδιασμού / Ορθολογικές λύσεις». Αλέξανδρος. Π. Οικονομόπουλος. Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Φεβρουάριος 2007.
21. ΚΑΠΕ (2001), Οδηγός τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ.
22. «Εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης αιολικών πάρκων». Σταύρος Παπαθανασίου, Αθήνα, Νοέμβριος 2005.
23. ΔΕΣΜΗΕ, Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2006-2010, Αθήνα Ιανουάριος 2006
24. G.Caralis, A.Zervos, Analysis of the combined use of wind and pumped storage systems in autonomous Greek islands, 2007.
25. Δ. Παπαντώνης, Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, Εκδόσεις Συμείων, 2001.
26. MARCO SEMADENI, Storage of energy, Overview, Encyclopedia of Energy, Vol. 5(2004):719-738.
27. Υπουργείο Γεωργίας – Γενική Δ/ση Εγγ. Έργων & Γ.Δ., Τα φράγματα και οι λιμνοδεξαμενές του Υπουργείου Γεωργίας, 2003.

28. S.PAPAEFTHIMIOU, E. KARAMANOU, S. PAPATHANASSIOU, M. PAPADOPOULOS, Operating policies for wind-pumped storage hybrid power stations in island grids, IET Renewable Power Generation, Vol. 3, No. 3 (2009): 293-307.
29. Γ.Κάραλης, Ανάπτυξη και Ανάλυση Συστημάτων Ανεμοκινητήρων και Αντλιοσταμιευτήρων, 2008.
30. ΚΑΠΕ (2001), «Θεματικοί χάρτες, εκτίμηση του τεχνικά και οικονομικά εκμεταλλεύσιμου δυναμικού της αιολικής ενέργειας στον ελληνικό χώρο», ΚΑΠΕ, Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ενέργειας – ΕΠΕ Μέτρο 3.4, Σεπτέμβριος 2001.
31. Ρ.Α.Ε., 2007, Τιμολόγια πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή και Α.Π.Ε.(<http://www.rae.gr>)
32. Παναγιωτακόπουλος Δ., ‘Βιώσιμη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων’, Εκδόσεις ΖΥΓΟΣ, 2002.
33. Νόμος 3468/2006, Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης και λοιπές διατάξεις, Εφημερίς της κυβέρνησης της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος πρώτο, Αρ. Φύλλου 129, 27 Ιουνίου 2006.
34. «Εκτίμηση Γενικευμένων Επιπτώσεων Κόστους Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων». Σχέδιο τελικής έκθεσης. Προς Ινστιτούτο Τοπικής Αυτοδιοίκησης. Δ. Λάλας, Ε. Γεωργοπούλου, Ε. Γιδάρακος, Ρ. Γκέκας, Α. Λαζαρίδη, Α. Μαυρόπουλος, Σ. Μοιρασγένης, Ν. Σελλάς. Αθήνα. Απρίλιος 2007.
35. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. «Διαχείριση στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα / Η περίπτωση της Αττικής» Χ. Θεοχάρη, Κ. Αραβώσης, Βαρελίδης Π., Διαβάτης Η., Ζιώγας Χ., Ιατρού Σ., Μπούρκα Α., Οικονομόπουλος Α., Παπαρηγορίου Σ., Παντελάρας Π., Φραντζής Ι. Αθήνα, Νοέμβριος 2006.
36. Οδηγία 96/61/ΕΚ. «Για την ολοκληρωμένη πρόληψη και περιορισμό της ρύπανσης (IPPC) και οι ελληνικές προτάσεις για τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνολογίες». Διαχείριση Αποβλήτων. Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Επιχειρησιακό πρόγραμμα «Περιβάλλον». Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., Γενική Διεύθυνση Περιβάλλοντος.

37. ΦΕΚ723/2000, ‘Συμπλήρωση και εξειδίκευση της υπ’αριθ. 113944/1944/1997 κοινής Υπουργικής Απόφασης με θέμα: Εθνικός Σχεδιασμός διαχείρισης στερεών αποβλήτων (Γενικές κατευθύνσεις της πολιτικής διαχείρισης στερεών αποβλήτων)’
38. «Διαχείριση οικιακού τύπου απορριμμάτων / Προβλήματα εθνικού σχεδιασμού / Ορθολογικές λύσεις». Αλέξανδρος. Π. Οικονομόπουλος. Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Φεβρουάριος 2007.
39. Εφημερίς της κυβέρνησεως - ΝΟΜΟΣ 3851/2010: “Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής”, Φ.Ε.Κ. Α’.
40. Σκορδίλης Α., ‘Η θερμική επεξεργασία των απορριμμάτων και RDF’, Εκδόσεις Κόσμος, 1997
41. Ανδρεαδάκης Α. (2001) «Θερμική Επεξεργασία Αστικών Στερεών Απορριμμάτων (Α.Σ.Α.) και Ιλύων», Σημειώσεις Μαθήματος “Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων και Ιλύος”.
42. Γρηγοροπούλου Ε. και Κατσίρη Α. (2006) «Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων», Σημειώσεις Διατμηματικού Μαθήματος “Περιβάλλον και Ανάπτυξη”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
43. Alibardi L. and Cossu R. (2006) «Energy from Wastes and Biomasses: Opportunities and State of the Art», Proceedings Venice 2006: Biomass and Waste to Energy Symposium, Organized by International Waste Working Group (IWWG) and Environmental Sanitary Engineering Center (ESEC).
44. Bardos P. (2004). Composting of mechanically segregated fractions of Municipal Solid Waste: a Review. Technical report by r3 Environmental Technology Ltd funded by SITA Environmental Trust.
45. DEFRA (2005a). Advanced Biological Treatment of Municipal Solid Waste. Prepared by Enviros Consulting Ltd as part of the New Technologies Supporter Programme, DEFRA, UK.

46. RVF - The Swedish Association of Waste Management (2005) «Förbränning av avfall – en kunskapssammanställning om dioxiner» (Waste-to-energy, an inventory and review about dioxins).
47. Ι. Ε. Φραγκιαδάκης, ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, Εκδόσεις ΖΗΤΗ 2004.
48. Stephen J. Chapman, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Έκδοση Τζιόλα Θεσσαλονίκη 2003.
49. Deutsche Gesellschaft fur Sonnenenergie : ‘‘Planning and installing photovoltaic systems : a guide for installers, architects and engineer’’, second edition.
50. Ned Mohan, Tore A.Undeland, William P.Robbins : ‘‘Power Electronics’’, second edition . Μετάφραση: Νίκος Ι. Μάργαρης , Εκδόσεις Τζιόλα ,1996.
51. Παπαντώνης Δ., «Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα», Εκδόσεις Συμεών, 2007.
52. Παπαντώνης Δ., «Υδροδυναμικές Μηχανές, Αντλίες – Υδροστρόβιλοι», Εκδόσεις Συμεών, 2004.
53. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. «Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων» Μ. Δαμιανίδης, Δρ. Γ. Κατσαρός, Μ. Τόλης, Φ. Στεργιόπουλος Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2011.
54. Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ – [http :/ / www . helapco . gr /](http://www.helapco.gr/)): «Ένας πρακτικός οδηγός για επενδύσεις στα φωτοβολταϊκά»
55. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>
56. <http://www.q-green.net/#!e-shop---2012/c1sg6>
57. <http://www.egnatia.eu/page/>
58. <http://www.sofios.gr/index.php?/gr/projects/show/64>
59. <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=287>

60. <http://www.wtert.gr/>
61. J.K. KALDELLIS, D. ZAFIRAKIS, K.KAVADIAS, Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13 (2009): 378-392.
62. S.PAPAEFTHIMIOU, E. KARAMANOU, S. PAPATHANASSIOU, M. PAPADOPOULOS, Operating policies for wind-pumped storage hybrid power stations in island grids, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 3, No. 3 (2009): 293- 307.
63. K. PROTOPAPAS, S. PAPATHANASSIOU, Application of pumped storage to increase wind penetration in isolated island grids. In *Proceedings of European wind Energy Conference – EWEC, 2006, Athens, Greece.*
64. C. BUENO, J.A. CARTA, Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 10, No. 4 (2006): 312-340.
65. Αξιολόγηση και χρηματοοικονομική διοίκηση – Αποτίμηση κινδύνου και επενδύσεων , Π.Ε. Πετράκης , Αθήνα 1998 , ISBN 960-91016-0-7
66. “Economic elements of RES investments”. CRES, Athens 2003.