



Η έκδοση αυτή αποτελεί μέρος μιας σειράς τεσσάρων Οδηγών Κατάρτισης που παρήχθησαν από τη σύμπραξη του έργου του προγράμματος Leonardo Da Vinci 1999 με Αρ. Συμβολαίου: EL/99/2/011015/PI/II.1.1.b/FPI και ακρωνύμιο TEPRES, με τίτλο “Guide for the Training of Engineers in the Electricity Production Technologies from RES”. Η παρούσα αποτελεί την Ελληνική έκδοση του Οδηγού, η οποία συμπληρώνεται με τις αντίστοιχες της στην Αγγλική, τη Γαλλική και τη Γερμανική γλώσσα. Στη σύμπραξη του έργου TEPRES μετείχαν οι οργανισμοί: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ –Ελλάδα), ARMINES-Centre d’ Energieélique (Γαλλία) και Zentrum für rationelle Energieanwendung und Umwelt GmbH (ZREU - Γερμανία). Το ΚΑΠΕ ήταν ο Ανάδοχος και Συντονιστής φορέας του έργου TEPRES, το οποίο διήρκεσε από το Δεκέμβριο του 1999 έως τον Αύγουστο του 2001, ενώ την ευθύνη για το συντονισμό του συνόλου των δράσεων του έργου είχε ο Δρας Χαράλαμπος Μαλαματένιος (Υπεύθυνος του Τμήματος Εκπαίδευσης του ΚΑΠΕ).

Το Πρόγραμμα Δράσης της Ευρωπαϊκής Κοινότητας στον τομέα της Επαγγελματικής Κατάρτισης LEONARDO DA VINCI

Στις 6 Δεκεμβρίου του 1994, το Συμβούλιο Υπουργών της Ευρωπαϊκής Ένωσης υιοθέτησε το πρόγραμμα Leonardo Da Vinci για την υλοποίηση μιας Κοινοτικής πολιτικής επαγγελματικής κατάρτισης. Το πρόγραμμα αυτό, που αρχικά εφαρμόστηκε για πέντε χρόνια (1995-1999), είχε ως βασικό στόχο την υποστήριξη της ανάπτυξης πολιτικών και καινοτόμων δράσεων στα Κράτη Μέλη, πρωθωντας έργα στα πλαίσια διεθνών συμπράξεων οι οποίες περιελάμβαναν διάφορους οργανισμούς με εκπαιδευτικές δραστηριότητες.

Η θέσπιση του προγράμματος Leonardo Da Vinci επίσης αποσκοπούσε στην ορθολογική οργάνωση των Κοινοτικών δράσεων στον τομέα της επαγγελματικής κατάρτισης, παρέχοντας τη βάση για βελτίωση της ανταποδοτικότητας, ενώ διευκόλυνε την πρωθητη πρωτοβουλιών που είχαν αναπτυχθεί επιτυχώς στα πλαίσια των προγραμμάτων COMETT, PETRA, FORCE, LINGUA και EUROTECNET, και προσέθεσε νέες διαστάσεις. Το πρόγραμμα ήταν ανοικτό στα 15 Κράτη Μέλη της Ε.Ε., τα 3 μέλη του ΕΟΧ (Ισλανδία, Λιχτενστάιν και Νορβηγία), ενώ προοδευτικά επεκτάθηκε στις χώρες Κύπρο, Δημοκρατία της Τσεχίας, Εσθονία, Ουγγαρία, Λετονία, Λιθουανία, Ρουμανία, Πολωνία και Σλοβακία.

Το πρόγραμμα ανέκυψε σε μια περίοδο κατά την οποία η Λευκή Βίβλος για την “Ανάπτυξη, Ανταγωνιστικότητα και Απασχόληση” έδινε δυναμικά έμφαση στην κρίσιμη σημασία της επαγγελματικής κατάρτισης ως βασικού παράγοντα για την καταπολέμηση της ανεργίας και την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας των Ευρωπαϊκών επιχειρήσεων. Το πρόγραμμα είχε ως στόχο την ανταπόκριση στη ζήτηση για νέες ειδικότητες που προέκυψαν από την εξέλιξη των κοινωνιών και αντιμετωπίζει με συγκεκριμένα μέσα το πρόβλημα της απασχόλησης στην Ευρώπη, το οποίο αποτελεί επίσης προτεραιότητα της Λευκής Βίβλου για την “Εκπαίδευση και τη Μόρφωση - προς την Κοινωνία της Μόρφωσης”, που εγκρίθηκε από την Επιτροπή στις 29 Νοεμβρίου 1995.

Οι απόψεις που εκφράζονται στην παρούσα έκδοση δεν απηχούν κατ’ ανάκρι τις απόψεις της Ευρωπαϊκής Επιπροπής, η οποία συγχρηματοδότησε την παραγωγή του Οδηγού. Οι εταίροι (ΚΑΠΕ, ARMINES και ZREU) και η Ευρωπαϊκή Επιπροπή δεν παρέχουν οιαδήποτε εγγύηση, ρητή ή εξυπονοούμενη, όσον αφορά τις πληροφορίες που περιλαμβάνονται σε αυτήν την έκδοση, ούτε αναλαμβάνουν οποιαδήποτε ευθύνη όσον αφορά τη χρήση, ή τις όποιες ζημιές μπορούν να προκύψουν ως αποτέλεσμα της χρήσης, αυτών των πληροφοριών.



Εκπαίδευση και Πολιτισμός

Leonardo da Vinci

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LEONARDO DA VINCI 1999

Τίτλος έργου: “Guide for the Training of Engineers in the Electricity Production Technologies from Renewable Energy Sources”

Αριθμός Συμβολαίου: EL/99/2/011015/PI/II.1.1.b/FPI

Οδηγός Τεχνολογίων Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΓΓΕ

Παραγωγή:



ZREU

ΑΘΗΝΑ
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2001

1. ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.1. Η βασική ιδέα

1.1.2. Σχεδιασμός μικρών υδροηλεκτρικών έργων

1.2. Ο ΥΔΑΤΙΝΟΣ ΠΟΡΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΟΥ

1.2.1. Υδρολογία

1.2.2. Διαστασιολόγηση ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής

1.2.3. Ετήσια παραγωγή ενέργειας

1.2.4. Επιλογή θέσης και βασική διαμόρφωση

1.3. ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

1.3.1. Φράγματα και υδροφράκτες

1.3.2. Στόμια εισόδου

1.3.3. Κανάλια

1.3.4. Αγωγοί πτώσης

1.3.5. Αυλάκια απαγωγής

1.4. ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

1.4.1. Υδροστρόβιλοι

1.4.2. Κιβώτια ταχυτήτων και άλλοι πολλαπλασιαστές της ταχύτητας

1.4.3. Γεννήτριες

1.4.4. Εξοπλισμός ελέγχου

1.4.5. Πίνακας οργάνων του εξοπλισμού διανομής και εξοπλισμός προστασίας

1.4.6. Αυτόματος έλεγχος

1.4.7. Βοηθητικός ηλεκτρολογικός εξοπλισμός του σταθμού παραγωγής

1.5. ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ ΓΙΑ ΤΑ ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ

1.5.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

1.5.2. Οικονομικά στοιχεία των ΜΥΗ

1.5.3. Εμπόδια στην ανάπτυξη των ΜΥΗ

2. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1. Η ΙΣΧΥΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

2.1.1. Σχηματισμός των ανέμων

2.1.2. Πυκνότητα ισχύος του ανέμου

2.1.3. Μεταβλητότητα των ανέμων

2.1.3.1. Μεταβολή με το χρόνο

2.1.3.2. Εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου από το ύψος

2.1.3.3. Χωρικές μεταβολές

- 2.1.4. Παγκόσμιο αιολικό δυναμικό
- 2.1.5. Ιστορική αναδρομή και τρέχουσα ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας

2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

- 2.2.1. Υπόβαθρο
- 2.2.2. Δρομέας
- 2.2.3. Άτρακτος
 - 2.2.3.1. Κύριος άξονας
 - 2.2.3.2. Δισκόφρενο
 - 2.2.3.3. Μετάδοση της κίνησης
 - 2.2.3.4. Ηλεκτρογεννήτρια
 - 2.2.3.5. Σύστημα εκτροπής
- 2.2.4. Πύργος
 - 2.2.4.1. Σταθεροί σωληνωτοί πύργοι
 - 2.2.4.2. Σταθεροί δικτυωτοί πύργοι
 - 2.2.4.3. Ανυψούμενοι πύργοι με επίτονους
- 2.2.5. Έλεγχος της ισχύος
- 2.2.6. Ταχύτητα του δρομέα

2.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

- 2.3.1. Εύρος εφαρμογών των ανεμογεννητριών
 - 2.3.1.1. Κατηγορίες εφαρμογής
 - 2.3.1.2. Αιολικά πάρκα
 - 2.3.1.3. Κατανεμημένη παραγωγή
 - 2.3.1.4. Υβριδικά συστήματα ισχύος
- 2.3.2. Ενεργειακή παραγωγικότητα των αιολικών συστημάτων
 - 2.3.2.1. Επισκόπηση
 - 2.3.2.2. Εκτιμήσεις της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής
 - 2.3.2.3. Ο συντελεστής δυναμικού ως μέτρο της ενεργειακής παραγωγής
- 2.3.3. Αξιοπιστία των αιολικών συστημάτων
 - 2.3.3.1. Επίδραση των εξελίξεων στο σχεδιασμό και την κατασκευή
 - 2.3.3.2. Διαθεσιμότητα
 - 2.3.3.3. Ανταποδοτικότητα κόστους
- 2.3.4. Χαρακτηριστικά της παροχής ισχύος
 - 2.3.4.1. Συσχέτιση με το φορτίο
 - 2.3.4.2. Παραγωγή μεμονωμένης ανεμογεννήτριας και αιολικού πάρκου
 - 2.3.4.3. Ποιότητα ισχύος

3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

- 3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ
 - 3.1.1. Ιστορικό
 - 3.1.2. Ηλιακή ενέργεια
- 3.2. ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ
 - 3.2.1. Ιστορικό ανάπτυξης των ηλιακών κυψελών
 - 3.2.2. Μέθοδος παραγωγής ηλιακών κυψελών

3.2.3. Λειτουργία των ηλιακών κυψελών

3.3. Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ (ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ)

3.3.1. Συνιστώσες μιας Φ/Β συστοιχίας

3.3.1.1. Η κυψέλη

3.3.1.2. Συνδεσμολογία

3.3.1.3. Πλαίσιο

3.3.1.4. Ενθυλάκωση

3.3.1.5. Δίοδοι

3.3.1.6. Συστήματα έδρασης / παρακολούθησης

3.3.2. Λειτουργία των Φ/Β συστοιχιών

3.3.2.1. Σύνδεση εν σειρά

3.3.2.2. Σύνδεση εν παραλλήλω

3.3.2.3. Δίοδοι

3.3.2.4. Παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου

3.4. Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ

3.4.1. Οι αγορές των Φ/Β

3.4.2. Αυτόνομα συστήματα

3.4.2.1. Συνιστώσες και συντήρηση

3.4.2.2. Κόστη και οικονομικά στοιχεία

3.4.2.3. Υβριδικά Φ/Β συστήματα

3.4.3. Διασυνδεδεμένα συστήματα

3.5. ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ ΓΙΑ ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.5.1. Οικονομικά στοιχεία των φωτοβολταϊκών

3.5.2. Περιβαλλοντικές θεωρήσεις

4. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

4.2. ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

4.2.1. Συστήματα παραβολικών κοίλων

4.2.1.1. Παρούσα κατάσταση της τεχνολογίας των κοίλων

4.2.1.2. Δυνατότητες μείωσης του κόστους

4.2.1.3. Υφιστάμενες δυνατότητες διεθνώς

4.2.2. Συστήματα πύργου ισχύος (ή ηλιακού πύργου)

4.2.2.1. Παρούσα κατάσταση της τεχνολογίας των συστημάτων πύργου ισχύος

4.2.2.2. Δυνατότητες μείωσης του κόστους

4.2.2.3. Υφιστάμενα έργα

4.2.3. Εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής δίσκου/μηχανής

4.2.3.1. Παρούσα κατάσταση της τεχνολογίας των συστημάτων δίσκου

4.2.3.3. Υφιστάμενα έργα

4.3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

4.3.1. Επιδράσεις στο περιβάλλον

4.3.2. Απαιτήσεις σε νερό και γαίες

4.4. ΟΙ ΑΓΟΡΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΗΗ

4.4.1. Γενικά

4.4.2. Αγορές ηλεκτρισμού ελεγχόμενης τροφοδότησης

4.4.3. Κατανεμημένες αγορές ηλεκτρισμού

4.5. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

5. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

5.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1.1. Βασικές αρχές της γεωθερμίας

5.1.2. Γεωθερμικές πηγές

5.1.2.1. Υδροθερμικές πηγές

5.1.2.2. Γεω-πεπιεσμένες πηγές

5.1.2.3. Θερμά ξηρά πετρώματα

5.1.2.4. Μάγμα

5.1.3. Γεωθερμικό δυναμικό

5.1.4. Χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας

5.1.4.1. Παραγωγή ηλεκτρισμού

5.1.4.2. Άμεση χρήση

5.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

5.2.1. Βασικές αρχές

5.2.2. Διαδικασία ξηρού (ή άμεσου) ατμού

5.2.3. Διαδικασία ατμού αστραπιαίας ατμοποίησης

5.2.4. Δυαδικός κύκλος

5.2.5. Συνδυασμένες ή υβριδικές εγκαταστάσεις

5.2.6. Απόδοση των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής

5.2.7. Γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής για μικρά και μίνι δίκτυα

5.2.8. Διασυνδεδεμένοι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής

5.3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

5.3.1. Αναγνώριση και διερεύνηση

5.3.1.1. Μελέτες και εφαρμοζόμενες τεχνικές

5.3.1.2. Υποδομές

5.3.2. Διερευνητική γεώτρηση

5.3.3. Μελέτη σκοπιμότητας

5.3.3.1. Οικονομικότητα της γεωθερμικής ισχύος

5.3.4. Ανάπτυξη

5.3.4.1. Παραγωγική γεώτρηση

5.3.4.2. Σχεδιασμός των σωληνώσεων, των συστημάτων συλλογής ατμού και του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής

5.3.4.3. Κατασκευή και εκκίνηση λειτουργίας

5.4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- 5.4.1. Παγκόσμια κατανομή της γεωθερμικής χρήσης
- 5.4.2. Ανταγωνιστικότητα της γεωθερμικής ενέργειας
- 5.4.3. Προβλήματα παραγωγής και ρύπανσης
 - 5.4.3.1. Αποθέσεις μετάλλων
 - 5.4.3.2. Υδρολογικές αλλαγές
 - 5.4.3.3. Διάβρωση
 - 5.4.3.4. Ρύπανση
 - 5.4.3.5. Ρύποι στον γεωθερμικό ατμό
 - 5.4.3.6. Γεωθερμικά νερά
 - 5.4.3.7. Επανέγχυση
- 5.4.4. Το μέλλον της γεωθερμικής ενέργειας

6. ΒΙΟ-ΙΣΧΥΣ

6.1. Η BIOMAZA ΩΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΠΟΡΟΣ

- 6.1.1. Ορολογία
- 6.1.2. Ενεργειακός κύκλος της βιομάζας
- 6.1.3. Ηλεκτροπαραγωγή από τη βιομάζα (βιο-ισχύς)

6.2. ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

- 6.2.1. Υπολείμματα ξύλου
 - 6.2.1.1. Πριονίδια
 - 6.2.1.2. Αστικά υπολείμματα ξύλου
 - 6.2.1.3. Υπολείμματα δένδρων
 - 6.2.1.4. Δασικά υπολείμματα
- 6.2.2. Γεωργικά υπολείμματα
 - 6.2.2.1. Βαγάσση
 - 6.2.2.2. Φλοιοί ρυζιού
 - 6.2.2.3. Άχυρο
- 6.2.3. Ενεργειακές καλλιέργειες
- 6.2.4. Απόβλητα
 - 6.2.4.1. Βιομηχανικά απόβλητα
 - 6.2.4.2. Αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ)
 - 6.2.4.3. Ζωικά απόβλητα
 - 6.2.4.4. Αστικά λύματα

6.3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

- 6.3.1. Τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας
- 6.3.2. Απευθείας καύση (σταθμοί άμεσης καύσης)
 - 6.3.2.1. Καύση σταθερής κλίνης
 - 6.3.2.2. Καύση ρευστοποιημένης κλίνης
 - 6.3.2.3. Καυστήρες αιώρησης
- 6.3.3. Σύγκαυση με άνθρακα
 - 6.3.3.1. Περιγραφή
 - 6.3.3.2. Τροποποιήσεις και αναλογούντα κόστη
- 6.3.4. Ηλεκτροπαραγωγή με αεριοποίηση της βιομάζας

6.3.4.1. Περιγραφή του συστήματος
6.3.4.2. Επιλογές κύκλου ισχύος

6.4. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΒΙΟ-ΙΣΧΥΟΣ

- 6.4.1. Κατάσταση της αγοράς και δυναμικό αυτής
- 6.4.2. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις
 - 6.4.2.1. Ποιότητα του αέρα
 - 6.4.2.2. Ποιότητα των υδάτων
 - 6.4.2.3. Χρήσεις των γαιών
- 6.4.3. Οικονομικές επιπτώσεις
- 6.4.4. Εμπόδια για την περαιτέρω διείσδυση

7. ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

7.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

- 7.2.1. Εισαγωγή
- 7.2.2. Τεχνολογία μπαταριών
 - 7.2.2.1. Μπαταρίες μολύβδου-οξέως
 - 7.2.2.2. Αλκαλικές μπαταρίες
 - 7.2.2.3. Προηγμένες μπαταρίες
 - 7.2.2.4. Σύγκριση των διάφορων τύπων μπαταριών
 - 7.2.2.5. Διαστασιολόγηση μπαταριών
- 7.2.3. Αντλούμενα υδροηλεκτρικά
- 7.2.4. Ενεργειακή αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (ΕΑΣΑ)
- 7.2.5. Σφόνδυλοι
- 7.2.6. Υπεραγώγιμη μαγνητική ενεργειακή αποθήκευση (ΥΜΕΑ)
- 7.2.7. Εξελιγμένοι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές

7.3. ΕΛΕΓΚΤΕΣ (ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ) ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

- 7.3.1. Η βασική αρχή
- 7.3.2. Προστασία υπερφόρτισης
- 7.3.3. Προστασία βαθιάς εκφόρτισης
- 7.3.4. Προστασία από τις εξωτερικές επιδράσεις
- 7.3.5. Κύριοι τύποι των ελεγκτών φόρτισης

7.4. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΜΕΝΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

- 7.4.1. Αναγκαιότητα
 - 7.4.1.1. Κύρια χαρακτηριστικά των διασυνδεδεμένων αντιστροφέων
 - 7.4.1.2. Απαιτήσεις από τους διασυνδεδεμένους αντιστροφείς
- 7.4.2. Τύποι συνδεδεμένων στο δίκτυο αντιστροφέων
 - 7.4.2.1. Αντιστροφείς μετατροπής από το δίκτυο
 - 7.4.2.2. Αυτο-μετατρέψιμοι αντιστροφείς με διαμόρφωση του εύρους των παλμών και μετασχηματιστή 50 Hz

7.4.2.3. Αυτο-μετατρέψιμοι αντιστροφείς με διαμόρφωση του εύρους των παλμών και μετασχηματιστή ΥΣ

7.5. ΕΛΕΓΚΤΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

- 7.5.1. Ελεγκτές για αυτόνομες εφαρμογές αιολικών-ντίζελ
- 7.5.2. Υψηλής διείσδυσης στο ζυγό ΕΡ συστήματα αιολικών-ντίζελ
- 7.5.3. Συστήματα ζυγού ΣΡ

8. ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΕ

8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

8.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ Α.Π.Ε. ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

- 8.2.1. Παρούσα κατάσταση
- 8.2.2. Στρατηγικές για τις ΑΠΕ
- 8.2.3. Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας
- 8.2.4. Ολοκληρωμένα έργα ΑΠΕ

8.3. ΘΕΜΑΤΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ

- 8.3.1. Ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ
 - 8.3.1.1. Ο διαλείπων χαρακτήρας ορισμένων ΑΠΕ
 - 8.3.1.2. Προβλήματα σχετικά με την ασφάλεια της ενεργειακής ζήτησης και τη δυναμική συμπεριφορά των υβριδικών συστημάτων
 - 8.3.1.3. Διαχείριση ενέργειας και φορτίων
 - 8.3.1.4. Δυνατότητες ενεργειακής αποθήκευσης
- 8.3.2. Ταξινόμηση των ενσωματωμένων συστημάτων ΑΠΕ
 - 8.3.2.1. Μεμονωμένοι καταναλωτές και μικρές ομάδες
 - 8.3.2.2. Αυτόνομα και απομονωμένα δίκτυα
 - 8.3.2.3. Τοπική ενεργειακή τροφοδοσία
 - 8.3.2.4. Περιφερειακή ενεργειακή τροφοδοσία
- 8.3.3. Σύστημα μεταφοράς και διανομής
 - 8.3.3.1. Θέματα διασύνδεσης
 - 8.3.3.2. Λειτουργικά θέματα
- 8.3.4. Επίπεδα ενσωμάτωσης

8.4. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΕ

8.4.1. Κόστη και τιμές

- 8.4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος των ΑΠΕ
 - 8.4.2.1. Θέματα μεταφοράς για τις τεχνολογίες ΑΠΕ
 - 8.4.2.2. Κατανεμημένη ηλεκτροπαραγωγή
 - 8.4.2.3. Χρεώσεις άεργης ισχύος
 - 8.4.2.4. Πίστωση δυναμικού
- 8.4.3. Θεώρηση του περιβαλλοντικού εξωτερικού κόστους
- 8.4.4. Υποστήριξη των ΑΠΕ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Χαρακτηριστικά των τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης

Πρόλογος

Στις 10 Μαΐου του 2000, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε την πρόταση για μία “Οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου” για την προώθηση της ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) στην εσωτερική αγορά ηλεκτρισμού της Ε.Ε. Στρατηγικός στόχος της πρότασης είναι η δημιουργία ενός πλαισίου για τη σημαντική αύξηση μεσοπρόθεσμα του προερχόμενου από ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρισμού στην Ε.Ε. και η διευκόλυνση της πρόσβασής του στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Η προώθηση του ηλεκτρισμού από ΑΠΕ αποτελεί πρώτη προτεραιότητα. Η Λευκή Βίβλος για τις ΑΠΕ του 1997 ανέδειξ τον καίριο ρόλο τους σε σχέση με την ασφάλεια της τραφοδοσίας, την απασχόληση και το περιβάλλον, και πρότεινε έναν ενδεικτικό στόχο διπλασιασμού του μεριδίου των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της Ε.Ε. από 6 σε 12% μέχρι το 2010. Ο στόχος αυτός επικυρώθηκε από το Συμβούλιο το 1998. Ειδικότερα όσον αφορά τα περιβαλλοντικά ζητήματα, η αυξημένη χρήση ηλεκτρισμού από ΑΠΕ θα αποτελέσει ένα σημαντικό τμήμα των δράσεων που θα απαιτηθούν ώστε να εκπληρωθούν οι δεσμεύσεις που υιοθετήθηκαν από την Ε.Ε. στο Κίοτο σχετικά με τη μείωση των εκπομπών των αεριών του θερμοκηπίου.

Το μερίδιο του 12% των ΑΠΕ συνολικά στην ακαθάριστη εσωτερική ενέργειακή κατανάλωση της Λευκής Βίβλου έχει μεταφραστεί σε ένα συγκεκριμένο μερίδιο κατανάλωσης ηλεκτρισμού παραγόμενου από ΑΠΕ (22,1%, ή 12,5% χωρίς τα μεγάλα υδροηλεκτρικά), και η προώθηση των ΑΠΕ πρέπει να συνεισφέρει στην επίτευξη αυτού του συγκεκριμένου μεριδίου. Τα Κράτη Μέλη πρέπει να καθορίσουν εθνικούς στόχους (η πρόταση περιλαμβάνει ποσοτικές ενδείξεις για τους στόχους που πρέπει να επιλεγούν από τα επιμέρους Κράτη Μέλη) και τα μέτρα που απαιτούνται για την επίτευξή τους σε διάστημα όχι μεγαλύτερο του ενός έτους από την εφαρμογή της Οδηγίας. Η Επιτροπή έχει ως υποχρέωση να προτείνει τροποποιήσεις στους εθνικούς στόχους, εάν αυτοί δεν συνάδουν με τους στόχους της Κοινότητας.

Στο πλαίσιο αυτό, η σύμπραξη του έργου Leonardo Da Vinci 1999 με το ακρωνύμιο TEPRES της Γ.Δ. για την Εκπαίδευση και τον Πολιτισμό παρήγαγε τον “Οδηγό Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ” (σε τέσσερις εκδόσεις: Αγγλική, Γαλλική, Γερμανική και Ελληνική), σε μια προσπάθεια διευκόλυνσης της διαδικασίας διείσδυσης των ΑΠΕ τόσο σε εθνικό όσο και σε Ευρωπαϊκό επίπεδο. Στόχος αυτών των εκδόσεων είναι να αποτελέσουν ένα χρήσιμο βιόθημα για τους Μηχανικούς και άλλους επιστήμονες που πρόκειται (ή επιθυμούν) να απασχοληθούν στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρισμού με αξιοποίηση των ΑΠΕ.

Το υλικό που περιέχεται στους Οδηγούς παρήχθη από τους εταίρους του έργου TEPRES, που ήταν το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ – Συντονιστής του έργου), το Centre d' Energétique (Γαλλία), και το Zentrum für Rationelle Energieanwendung und Umwelt GmbH (Γερμανία). Οι ακόλουθες τεχνολογίες αναπτύσσονται κατά τρόπο αρκετά περιεκτικό:

- Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα (Κεφάλαιο 1),
- Αιολική Ενέργεια (Κεφάλαιο 2),
- Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Κεφάλαιο 3),
- Συγκεντρωτική Ηλιακά Συστήματα (Κεφάλαιο 4),
- Γεωθερμική Ενέργεια (Κεφάλαιο 5)
- Βιο-ισχύς (Κεφάλαιο 6),

Δύο ακόμη πεδία, ειδικότερα τα Κεφάλαια 7: “Βοηθητικές Τεχνολογίες” και 8: “Ενσωμάτωση των ΑΠΕ”, συμπληρώνουν τα περιεχόμενα των Οδηγών.

Το ΚΑΠΕ ήταν υπεύθυνο για τα Κεφάλαια 2, 5 και 6 (από τους Δρα Χαρ. Μαλαματένιο, κ. Π. Χουστουλάκη και κ. Στ. Μέγγο, αντίστοιχα), το Centre d' Energétique ανέλαβε τα Κεφάλαια 4, 7 και 8 (Δρ. Didier Mayer - Βοηθ. Διευθυντής, CENERG Sophia Antipolis), και από το ZREU παρήχθησαν τα Κεφάλαια 1 και 3 (με συγγραφείς τους κ.κ. J. Fenzl, Kl. Grepmeier και τις κ.κ. Al. Babeck, B. Bender). Η επεξεργασία όλων των κειμένων ώστε να παρουσιαστούν με ενιαία μορφή, καθώς και οι όποιες διορθώσεις ή προσθήκες απαιτήθηκαν, έγιναν από τον Δρα Χαρ. Μαλαματένιο (Υπεύθυνο του Τμ. Εκπαίδευσης του ΚΑΠΕ). Στη μετάφραση των κειμένων στα Ελληνικά συνεισέφερε το σύνολο του επιστημονικού προσωπικού του Τμ. Εκπαίδευσης του ΚΑΠΕ (Δρας Χαρ. Μαλαματένιος, κ.κ. Π. Χουστουλάκης, Στ. Μέγγος, Γ. Τσελεπής).

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.1. Βασική αρχή

Σχεδόν το ένα τέταρτο της ηλιακής ενέργειας που καταφθάνει στην επιφάνεια της γης προκαλεί την εξάτμιση του νερού από τις θάλασσες, τις λίμνες και τους νερόλακκους. Μέρος της ενέργειας αυτής χρησιμοποιείται για την ανύψωση των υδρατμών στην ατμόσφαιρα (έναντι στη βαρυτική έλξη της γης), όπου τελικά υγροποιείται και σχηματίζεται βροχή ή χιόνι. Όταν βρέχει στους λόφους ή χιονίζει στα βουνά, ένα μικρό ποσοστό της εισαγόμενης ηλιακής ενέργειας παραμένει αποθηκευμένο. Έτσι, σε οποιοδήποτε ύψος επάνω από τη στάθμη της θάλασσας το νερό αντιπροσωπεύει αποθηκευμένη “βαρυτική” ενέργεια.

Η ενέργεια αυτή διαχέεται στη φύση από δίνες και ρεύματα, καθώς το νερό ρέει κατηφορικά σε ρυάκια, χείμαρρους και ποτάμια μέχρι να φτάσει στη θάλασσα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του αποθηκευμένου νερού και όσο ψηλότερα βρίσκεται, τόσο περισσότερη είναι η ενέργεια που περιέχει. Έτσι, το αποθηκευμένο νερό σ' έναν ταμιευτήρα πίσω από ένα φράγμα περιέχει σημαντική “δυναμική” ενέργεια καθόσον, δοθείσης της ευκαιρίας, εάν σπάσει το φράγμα θα διαρρεύσει πολύ γρήγορα ο μεγάλος αυτός όγκος του νερού. Αυτό θα προκαλέσει όλεθρο στο κατόπι του, ως αποτέλεσμα της απότομης απελευθέρωσης ενός μεγάλου ποσού ενέργειας.

Για την απόληψη αυτής της ενέργειας σε μια ελεγχόμενη μορφή, μπορεί να εκτραπεί σ' ένα σωλήνα ένα μέρος ή όλο το νερό ενός φυσικού υδάτινου διαύλου. Στη συνέχεια, μπορεί να οδηγηθεί ως ένα ρεύμα νερού υπό πίεση σε ένα υδροτροχό ή στροβιλοτροχό, έτσι ώστε το νερό που προσπίπτει στα πτερύγια να προκαλεί την περιστροφή του τροχού και την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Στους νερόμυλους, μεγάλοι ξύλινοι υδροτροχοί περιστρέφονται αργά ώστε να στρέφουν τις μυλόπετρες για το άλεσμα του σιταριού. Παρόμοιες αρχές χρησιμοποιήθηκαν για την άντληση νερού, την κοπή ξύλων και την οδήγηση απλών μηχανών σε εργοστάσια. Σήμερα, ένας σύγχρονος στρόβιλος συνδέεται σε μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία στη συνέχεια μεταδίδεται στο σημείο όπου υπάρχει ζήτηση αυτής.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η μεγαλύτερη και πιο ώριμη εφαρμογή ανανεώσιμης ενέργειας, με περίπου 678.000 MW εγκατεστημένης ισχύος, τα οποία παρήγαγαν το 1998 πάνω από το 22% της ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως (2564 TWh/έτος). Στη Δυτική Ευρώπη, τα υδροηλεκτρικά συνεισέφεραν 520 TWh ηλεκτρικής ενέργειας το 1998, ή το 19% περίπου της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε. (αποφεύγοντας με τον τρόπο αυτό την εκπομπή περίπου 70 εκατομ. τόνων CO₂ ετησίως). Παρά το μεγάλο υφιστάμενο υδροηλεκτρικό δυναμικό, υπάρχουν ακόμη περιθώρια για περαιτέρω ανάπτυξη καθώς, σύμφωνα με τις περισσότερες εκτιμήσεις, αυτό αποτελεί μόνο το 10% περίπου του συνολικού παγκόσμιου βιώσιμου υδροδυναμικού.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα Μικρής κλίμακας Υδροηλεκτρικά Συστήματα (ΜΥΗΣ), εφόσον τα μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα εν γένει δεν θεωρούνται ως συστήματα αξιοποίησης των ΑΠΕ. Γενικά, υπάρχει η αντίληψη ότι τα μεγάλα

φράγματα μεταβάλλουν το οικοσύστημα, αφού εγκαθίστανται σε περιοχές φυσικών ρευμάτων και μειώνουν το οξυγόνο του νερού. Οι ταμιευτήρες είναι λίμνες αδρανούς ή λιμνάζοντος ύδατος, οπότε είναι αφιλόξενοι για τα ενδημικά είδη ψαριών. Κατάντη προκαλούν εναλλασσόμενες περιόδους λειψυδρίας ακολουθούμενες από ορμητικούς κυματισμούς που διαβρώνουν το έδαφος και τη βλάστηση.

Τα ΜΥΗΣ είναι κυρίως “συνεχούς ροής”, δηλαδή δεν περιλαμβάνουν σημαντική περισυλλογή νερού και επομένως δεν απαιτείται η κατασκευή μεγάλων φραγμάτων και ταμιευτήρων, αν και όπου αυτά υπάρχουν ήδη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα είναι επιβοηθητικά. Δεν υφίσταται κάποια γενική διεθνής παραδοχή για τον ορισμό των ΜΥΗΣ, το ανώτερο όριο των οποίων ποικίλλει μεταξύ 2,5 και 25 MW σε διάφορες χώρες, αλλά γίνεται γενικώς αποδεκτή η τιμή των 10 MW, όπως συμβαίνει με την Ευρωπαϊκή Εταιρεία Μικρών Υδροηλεκτρικών (ESHA).

Στα επόμενα, όπου γίνεται αναφορά σε ΜΥΗΣ θα εννοείται κάθε υδροηλεκτρικό σύστημα με ονομαστική ισχύ 10 MW ή μικρότερη. Αυτά μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω σε “μίνι υδροηλεκτρικά”, συνήθως οριζόμενα ως τα συστήματα εκείνα με ισχύ <500 kW, και σε “μικρο-υδροηλεκτρικά”, για τα σχήματα δυναμικού <100 kW. Όποιος ορισμός και αν χρησιμοποιηθεί για το μέγεθος, τα ΜΥΗΣ αποτελούν μια από τις πιο ήπιες προς το περιβάλλον μορφές παραγωγής ενέργειας, βασιζόμενα στη χρήση μιας μη ρυπογόνου ανανεώσιμης πηγής και απαιτώντας μικρές επεμβάσεις στον περιβάλλοντα χώρο.

Εξάλλου, έχουν το δυναμικό να επιδράσουν σημαντικά στην υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων καθώς, σε αντίθεση με πολλές άλλες ΑΠΕ, τα ΜΥΗΣ μπορούν γενικά να παράγουν ένα ποσό ηλεκτρισμού σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ανάλογα με τη ζήτηση (δηλ. δεν απαιτούν συστήματα αποθήκευσης ή εφεδρείας), τουλάχιστον στις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες υφίσταται επαρκής ροή νερού, και σε κόστος πολλές φορές ανταγωνιστικό των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι, ένας τυπικός ΜΥΗΣ των 5 MW υποκαθιστά 1400 τόνους/έτος ορυκτού καυσίμου, αποτρέπει την εκπομπή 16000 τόνων CO₂ και πάνω από 100 τόνων SO₂ ανά έτος, ενώ καλύπτει τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό περισσότερων από 5000 οικογενειών.

1.1.2. Σχεδιασμός των μικρών υδροηλεκτρικών

Κατά το σχεδιασμό των μικρών υδροηλεκτρικών απαιτούνται πολλά στάδια τεχνικών και οικονομικών μελετών για να προσδιοριστεί εάν μία θέση είναι κατάλληλη από τεχνικής και οικονομικής πλευράς. Η βιωσιμότητα του κάθε πιθανού έργου είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη θέση. Η παραγωγή ισχύος εξαρτάται από την παροχή και το ύψος της πτώσης του διαθέσιμου νερού. Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί εξαρτάται από την ποσότητα του διαθέσιμου νερού και τη μεταβλητότητα της ροής κατά τη διάρκεια του έτους.

Η οικονομικότητα μιας θέσης εξαρτάται από την ισχύ (δυναμικό) και την ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από το έργο, εάν μπορεί να πωληθεί η ισχύς, και από την τιμή πώλησης της ισχύος. Γενικά, η αξία της ισχύος που παράγεται για κατανάλωση σε

μια απομακρυσμένη κοινότητα είναι σημαντικά μεγαλύτερη απ' ό,τι για τα συστήματα που συνδέονται σε κεντρικό δίκτυο. Εντούτοις, οι απομακρυσμένες κοινότητες μπορεί να μην είναι σε θέση να χρησιμοποιούν όλη τη διαθέσιμη ενέργεια από τους ΜΥΗΣ ή να μην μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ενέργεια όταν αυτή είναι διαθέσιμη, λόγω εποχιακών μεταβολών στη ροή του νερού και στην ενεργειακή κατανάλωση.

Οι μελέτες σχεδιασμού είναι ουσιαστικά μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία συγκρίνονται συνεχώς τα κέρδη και τα κόστη του έργου. Ωστόσο, οι υπεύθυνοι ανάπτυξης πρέπει να προχωρήσουν στη λήψη μιας απόφασης για το κατά πόσο θα προβούν ή όχι σε μια πλήρη μελέτη σκοπιμότητας μέσω των ακόλουθων βημάτων:

1. Αναγνώριση της περιοχής.
2. Αξιολόγηση των διαθέσιμων για το σταθμό υδάτινων πόρων και, κατά συνέπεια, της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής του.
3. Προκαταρκτικός καθορισμός και αξιολόγηση του κόστους της εγκατάστασης.
4. Προκαταρκτική εκτίμηση των οικονομικών του έργου, μετά από διερεύνηση των εναλλακτικών επιλογών χρηματοδότησης, των επιχορηγήσεων που διατίθενται από τις εθνικές κυβερνήσεις ή από την Ε.Ε., των φορολογικών κινήτρων, κλπ.
5. Ανασκόπηση των ρυθμιστικών απαιτήσεων και των διοικητικών διαδικασιών.
6. Λήψη απόφασης για το εάν θα πραγματοποιηθεί ή όχι μια μελέτη σκοπιμότητας.

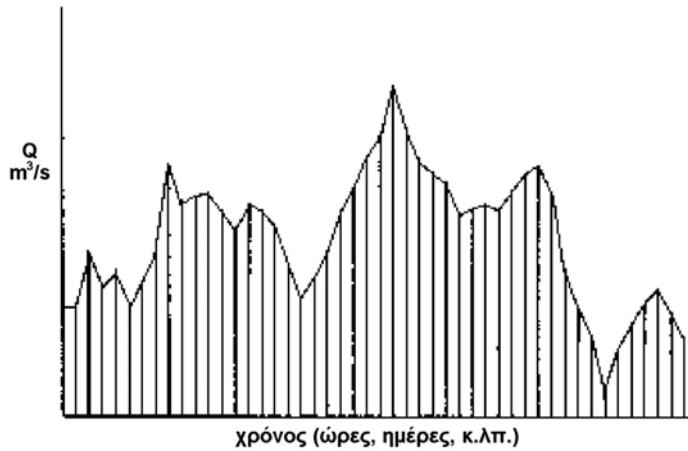
1.2. Ο ΥΔΑΤΙΝΟΣ ΠΟΡΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΟΥ

1.2.1. Υδρολογία

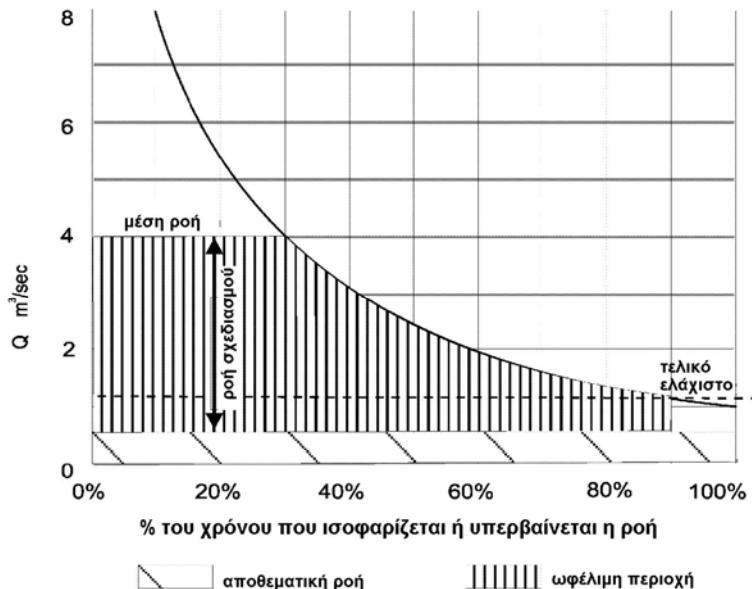
Το ουσιαστικό προαπαιτούμενο για την υδροηλεκτρική παραγωγή είναι ένα ρεύμα με ένα συνδυασμό επαρκούς παροχής και ύψους πτώσης (η κάθετη απόσταση της υδατόπτωσης για ηλεκτροπαραγωγή, δηλ. μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης στάθμης). Η ισχύς που παράγεται είναι ανάλογη του γινομένου αυτών των δύο μεταβλητών. Το ύψος πτώσης μπορεί να μετρηθεί εύκολα με μία τοπογραφική στάθμη και έναν ιστό, ή ακόμα και με ένα ταχόμετρο ή ένα κλισίμετρο, και αφότου καθοριστεί μπορεί να υποτεθεί ότι παραμένει αμετάβλητο ως προς το χρόνο.

Η παροχή, από την άλλη, επηρεάζεται από παράγοντες όπως είναι οι βροχοπτώσεις, η φύση του εδάφους, η κάλυψη της βλάστησης, η θερμοκρασία και η διάρθρωση της της χρήσης των γαιών στην περιοχή απορροής. Στην πραγματικότητα, η μέτρηση της παροχής σε ένα σημείο κάθε φορά έχει μικρή χρησιμότητα στη σχεδίαση, αφού η παροχή αυτή δεν θα είναι αντιπροσωπευτική της διαθέσιμης τον περισσότερο χρόνο παροχής. Έτσι, στη μελέτη οποιουδήποτε πιθανού υδροηλεκτρικού έργου εμπλέκεται η επιστήμη της υδρολογίας, δηλαδή η μελέτη της βροχόπτωσης και της ροής των ρευμάτων, η μέτρηση των λεκανών και των επιφανειών απορροής, της ικανότητας εξάτμισης και της επιφανειακής γεωλογίας, παράγοντες οι οποίοι στο σύνολό τους επηρεάζουν την ποσότητα της ροής και τη μεταβλητότητά της.

Το πρώτο ουσιαστικό βήμα για τη διαμόρφωση ενός ΜΥΗΣ είναι η εξεύρεση αρχείων της βροχόπτωσης και της ροής του ρεύματος στη συγκεκριμένη επιφάνεια και λεκάνη απορροής για όσο το δυνατό μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Στοιχεία σχετικά με τα επιφανειακά ύδατα και τη βροχόπτωση συλλέγονται σε κάθε χώρα και δημοσιεύονται ετησίως, αν και συχνά με σημαντική καθυστέρηση, από μία ή περισσότερες δημόσιες υπηρεσίες. Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (WMO) διατηρεί μια βάση δεδομένων, την HYDROINFO, η οποία, μεταξύ των άλλων στοιχείων, παρέχει και έναν κατάλογο των αρμόδιων για το σκοπό αυτό υπηρεσιών, για τις χώρες μέλη του.



Σχήμα 1.1. Τυπικό υδρογράφημα¹



Σχήμα 1.2. Τυπική καμπύλη διάρκειας της ροής (ΚΔΡ)

Με τη βοήθεια ενός υδρογραφήματος (σχήμα 1.1) που παρέχεται από την αρμόδια υπηρεσία, μπορεί να εξαχθεί μια καμπύλη διάρκειας της ροής (ΚΔΡ), όπως αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2, με την κατάταξη των δεδομένων κατά μέγεθος αντί χρονολογικά. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να εκτιμηθεί το δυναμικό της θέσης. Όπως

¹ Τα περισσότερα σχήματα που περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο αυτό έχουν αναπαραχθεί από τον Οδηγό: "Layman's guidebook on how to develop a small hydro site – Part I", ο οποίος

προβλέπεται, στο άμεσο μέλλον καθένας θα έχει πρόσβαση σε καλοσχεδιασμένες, μηχανοφραφημένες βάσεις υδρολογικών δεδομένων, το οποίο που θα διευκολύνει την εξεύρεση των καμπυλών διάρκειας της ροής για οποιαδήποτε πιθανή θέση.

1.2.2. Διαστασιολόγηση ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής

Η ΚΔΡ παρουσιάζει το ποσοστό του χρόνου κατά τη διάρκεια του οποίου η απορροή γίνεται ίση ή υπερβαίνει συγκεκριμένες τιμές και παρέχει έναν τρόπο για τον γρήγορο προσδιορισμό της ποσότητας του διαθέσιμου υδάτινου πόρου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από στροβίλους διαφορετικών μεγεθών. Αναφερόμενοι στο σχήμα 1.2, το οποίο αποτελεί την ΚΔΡ ενός ποταμού σε μια προτεινόμενη υδροηλεκτρική θέση, η διαθέσιμη από τη ροή ισχύς (P) προφανώς μεταβάλλεται με το χρόνο, δεδομένου ότι μεταβάλλεται η παροχή Q .

Υποθέτοντας, καταρχήν, ένα συνολικό βαθμό απόδοσης του ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού της τάξης του 0,81, η ισχύς P δίνεται από την εξίσωση:

$$P=8QH \quad (1.1)$$

όπου Q είναι η παροχή (m^3/s), και H είναι το καθαρό ύψος πτώσης (m). Εάν το ύψος πτώσης είναι σταθερό ή σχεδόν σταθερό, η εξίσωση (1.1) μπορεί να γραφτεί ως:

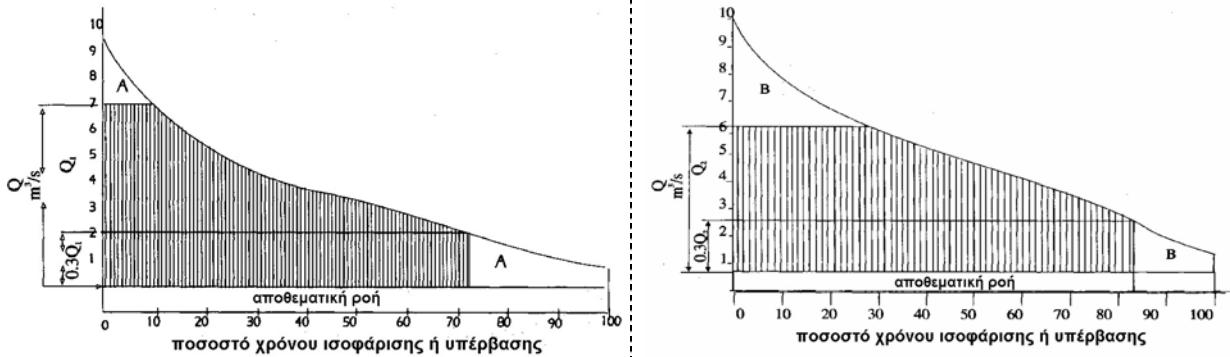
$$P=cQ \quad (1.2)$$

όπου c είναι μια σταθερά. Έτσι, κάθε συντεταγμένη της ΚΔΡ αντιπροσωπεύει ένα πιθανό δυναμικό ισχύος.

Δεν μπορεί όμως να αξιοποιηθεί όλη αυτή η ισχύς. Αρχικά, πρέπει να αφαιρεθεί από την ΚΔΡ η αποθεματική ροή, καθώς πρέπει να επιτρέπεται η συνέχιση της φυσικής ροής ανά πάσα στιγμή. Αυτή αντιστοιχεί στη μη γραμμοσκιασμένη ζώνη στη βάση της ΚΔΡ (σχήμα 1.2). Η υπόλοιπη περιοχή επάνω από αυτήν αποτελεί την οφέλιμη ροή. Εάν επρόκειτο να εγκατασταθεί ένας στρόβιλος για την αξιοποίηση όλης αυτής της περιοχής, αυτός θα έπρεπε να είναι πολύ μεγάλος και ακριβός, παρότι θα λειτουργούσε στο μέγιστο δυναμικό του για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Η ενέργεια που κερδίζεται, σε σύγκριση με κάποιο μικρότερο δυναμικό, δεν δικαιολογεί το επιπλέον κόστος του εξοπλισμού και των σωληνώσεων.

Υπάρχει ένας επιπλέον λόγος για την επιλογή μικρότερου δυναμικού, αφού κανένας στρόβιλος δεν μπορεί να λειτουργεί σε όλο το εύρος από τη μηδενική έως την ονομαστική του παροχή. Πολλοί μπορούν να λειτουργούν μόνο πάνω από το 60% περίπου της ονομαστικής παροχής τους. Ακόμη και ο καλύτερος δεν μπορεί, υπό την έννοια αυτή, να χρησιμοποιείται κάτω από το ένα πέμπτο της ονομαστικής παροχής. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η ονομαστική παροχή που επιλέγεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η διακοπή λειτουργίας στις χαμηλές παροχές.

Το σχήμα 1.3 απεικονίζει το γεγονός αυτό για ένα στρόβιλο του οποίου η διακοπή εκτιμάται στο 30% της ονομαστικής παροχής (ή σχεδιασμού). Οι περιοχές A και B είναι μη αξιοποιήσιμες, οπότε αν και ο σταθμός παραγωγής στην πρώτη περίπτωση έχει κατά 25% μεγαλύτερο δυναμικό από αυτόν της δεύτερης, είναι φανερό ότι παράγει ελάχιστα περισσότερη ενέργεια, με μια πολύ μεγαλύτερη επένδυση.



Σχήμα 1.3. Καμπύλες διάρκειας ροής για διαφορετικούς στροβίλους

1.2.3. Ετήσια παραγωγή ενέργειας

Η ετήσια παραγωγή ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί σε μια πρώτη προσέγγιση με τη μέτρηση της χρησιμοποιήσιμης περιοχής κάτω από την ΚΔΡ, τη μετατροπή της σε μια πραγματική ποσότητα νερού για έτος, και πολλαπλασιάζοντας την επί 9,8 (το ειδικό βάρος 1 m^3 νερού σε kN), επί το καθαρό ύψος πτώσης και επί το μέσο βαθμό απόδοσης (εκτιμάται σε 0,81). Το αποτέλεσμα είναι η ετήσια ενέργεια εκφρασμένη σε kJ (kiloJoules), τα οποία μετατρέπονται σε kWh διαιρώντας με το 3600. Αυτό το είδος προκαταρκτικής εκτίμησης συνήθως επαρκεί για να επιτρέψει τη λήψη μιας απόφασης σχετικά με τη διεξαγωγή μιας πιο λεπτομερούς μελέτης σκοπιμότητας.

1.2.4. Επιλογή θέσης και βασική διαμόρφωση

Δεδομένου ότι αναγκαίες απαιτήσεις για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι οι επαρκείς τιμές ύψους πτώσης και παροχής, η επιλογή της θέσης καθορίζεται από την ύπαρξη και των δύο αυτών χαρακτηριστικών. Καθόσον υπάρχουν τόσοι πολλοί αλληλουσχετιζόμενοι παράγοντες, είναι δύσκολο να καθοριστεί μια σαφής διαδικασία για την επιλογή μιας θέσης. Μια προκαταρκτική αναγνωριστική μελέτη θα πρέπει να περιλάβει τον καθορισμό του δυναμικού παραγωγής, την εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος, την αναγνώριση των απαιτούμενων εργασιών στο χώρο, τον προσδιορισμό των κρίσιμων ζητημάτων (περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί περιορισμοί), και μια προκαταρκτική μελέτη της οικονομικής βιωσιμότητας.

Τα μικρά υδροηλεκτρικά σχήματα μπορούν να είναι είτε μεγάλου είτε μικρού ύψους πτώσης, ανάλογα με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της διαθέσιμης θέσης. Οι θέσεις μεγάλου ύψους πτώσης γενικά κοστίζουν λιγότερο για την ανάπτυξή τους από τις θέσεις μικρού ύψους πτώσης, αφού για την ίδια παραγωγή ισχύος η ροή μέσω του στροβίλου και οι σχετικές υδραυλικές κατασκευές θα είναι μικρότερες. Σ' έναν ποταμό με μια συγκριτικά απότομη κλίση σ' ένα μέρος του ρου του, η υψομετρική διαφορά

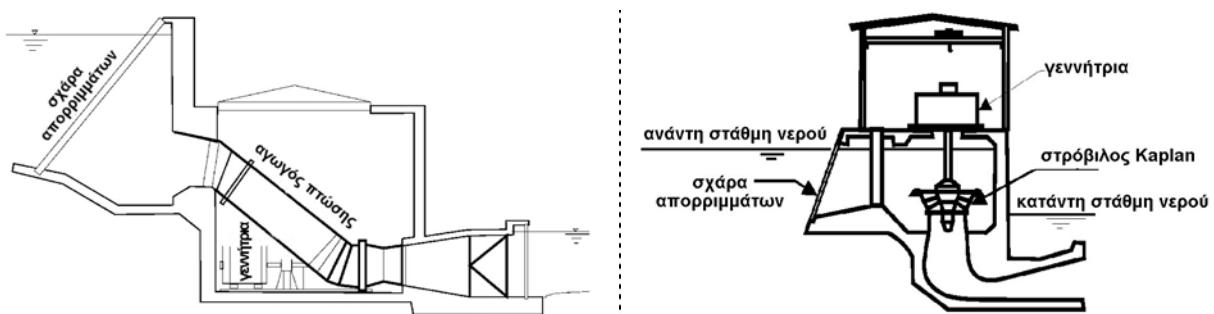
μπορεί να αξιοποιηθεί εκτρέποντας το σύνολο ή μέρος της ροής, και επιστρέφοντάς το στον ποταμό αφότου διέλθει από το στρόβιλο. Το νερό μπορεί να μεταφερθεί από την υδροληψία απευθείας στο στρόβιλο μέσω ενός σωλήνα κατάθλιψης.

Δυστυχώς, οι καταθλιπτικοί σωλήνες είναι ακριβοί, έτσι μια φθηνότερη εναλλακτική λύση παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4. Η εγκατάσταση περιλαμβάνει ένα φράγμα ή έναν υδροφράκτη, ένα στόμιο εισόδου από τον ποταμό, και ένα ισούψες ανοικτό κανάλι που εκτείνεται κατά μήκος της κοιλάδας του ποταμού καταλήγοντας σε μία περιοχή υδροληψίας, από όπου ένας σωλήνας κατάθλιψης άγει το νερό στο στρόβιλο στο σταθμό ισχύος. Εάν τα τοπογραφικά ή τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους είναι δυσμενή, το ανοικτό κανάλι μπορεί να μην αποτελεί την καλύτερη λύση. Σ' αυτές τις συνθήκες, ένας σωλήνας υποπίεσης, αν και συνήθως ακριβότερος, μπορεί να αποτελέσει μια οικονομικότερη λύση.



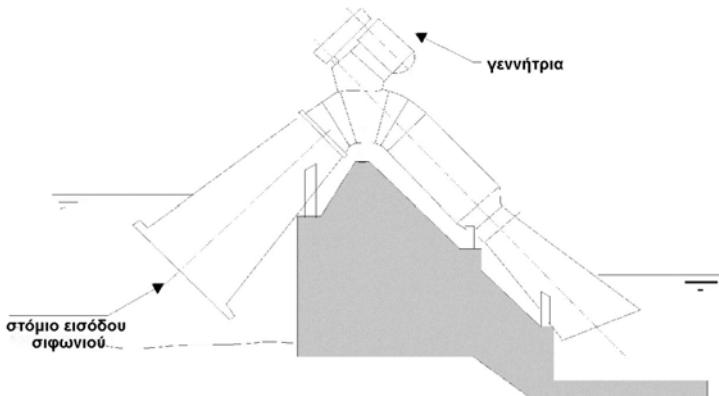
Σχήμα 1.4. Παράσταση ενός ΜΥΗ μεγάλου ύψους πτώσης

Όταν όλοι οι αγωγοί ισχύος, συμπεριλαμβανομένης της περιοχής υδροληψίας, είναι κατά κάποιο τρόπο καλυμμένοι, χρησιμοποιούνται φρεάτια εκτόνωσης για τη μείωση των πιθανών ξαφνικών έντονων διακυμάνσεων της πίεσης. Σε έργα μικρού ύψους πτώσης είναι δυνατές δύο διατάξεις. Η μία χρησιμοποιεί έναν υδροφράκτη εκτροπής και η δομή της (σχήμα 1.5 - αριστερά) είναι παρόμοια με την προαναφερθείσα για τα μεγάλα ύψη πτώσης, παρόλο που το κανάλι είναι συνήθως μικρού μήκους όπως και ο αγωγός πτώσης (ή δεν υπάρχει καθόλου). Η άλλη διάταξη περιλαμβάνει ένα φράγμα με ενσωματωμένο στόμιο εισόδου και σταθμό ισχύος (σχήμα 1.5 - δεξιά).



Σχήμα 1.5. Διατάξεις μικρών υδροηλεκτρικών χαμηλού ύψους πτώσης

Μια άλλη δυνατότητα είναι να εγκατασταθεί ένας σταθμός ηλεκτροπαραγωγής σε ένα υπάρχον συμβατικό φράγμα που έχει κατασκευαστεί για ποικίλες χρήσεις (έλεγχος ροής, άρδευση, απόσπαση ύδατος, κλπ.). Το νερό εισάγεται στο στρόβιλο μέσω του προκατασκευασμένου ως ενιαίο τμήμα της δομής του φράγματος αγωγού πτώσης ή, εάν το φράγμα δεν είναι πολύ υψηλό, μέσω ενός σιφωνικού στομίου εισόδου (σχήμα 1.6). Στη δεύτερη περίπτωση, ο αγωγός πτώσης φέρεται επάνω από το φράγμα πριν πάρει κλίση προς τον στρόβιλο, ο οποίος μπορεί να εδράζεται είτε στην κορυφή του φράγματος είτε, συνηθέστερα, στην κατάντη πλευρά. Στις περισσότερες σιφωνικές εγκαταστάσεις το ύψος πτώσης κυμαίνεται από 1,8 έως 11 m, αν και υπάρχουν κάποια παραδείγματα με ύψη πτώσης έως και 30 m.



Σχήμα 1.6. Μονάδα ηλεκτροπαραγωγής σε υπάρχον συμβατικό φράγμα

1.3. ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

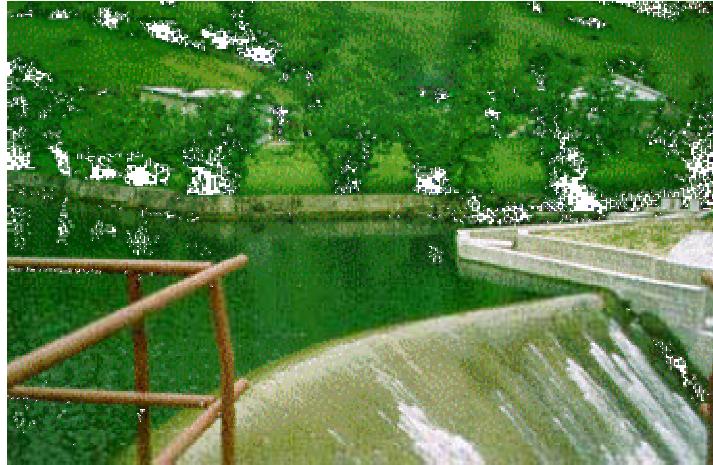
Μόλις επιλεγεί η περιοχή και αποφασιστεί η βασική διάταξη, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί με λεπτομέρεια το σχήμα. Στη συνέχεια περιγράφεται η λειτουργία όλων των δυνατών βασικών συνιστωσών και παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να σχεδιαστούν.

1.3.1. Φράγματα και υδροφράκτες

Τα φράγματα αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των υδροηλεκτρικών έργων μεγάλης κλίμακας και χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν το διαθέσιμο ύψος πτώσης ή/και για να δημιουργήσουν μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού. Όταν το έδαφος είναι σχετικά επίπεδο, ένα φράγμα που ανυψώνει τη στάθμη του νερού πίσω από αυτό μπορεί να παράσχει επαρκές ύψος πτώσης για την παραγωγή της απαιτούμενης ισχύος. Ένα φράγμα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση νερού σε περιόδους υψηλής ροής και τη διάθεσή του σε περιόδους χαμηλής ροής.

Λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής τους, στα σχήματα μικρής κλίμακας σπανίως χρησιμοποιούνται φράγματα. Πάντως, εάν είναι ευνοϊκές οι τοπογραφικές συνθήκες, μπορεί να δικαιολογηθεί η κατασκευή ενός φράγματος μικρής βαρύτητας για την αποθήκευση νερού κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης και τη διάθεσή του τις ώρες αιχμής, όταν οι τιμές του ηλεκτρισμού είναι υψηλότερες. Στα σχήματα εκτροπής, ένας

υδροφράκτης από σκυρόδεμα ή λιθοδομή με στέψη ένα μέτρο ή περισσότερο επάνω από την κοίτη του ποταμού (βλ. σχήμα 1.7) αρκεί για τη δημιουργία ενός επαρκούς βάθους νερού στο στόμιο εισόδου του καναλιού ή της σωλήνωσης.



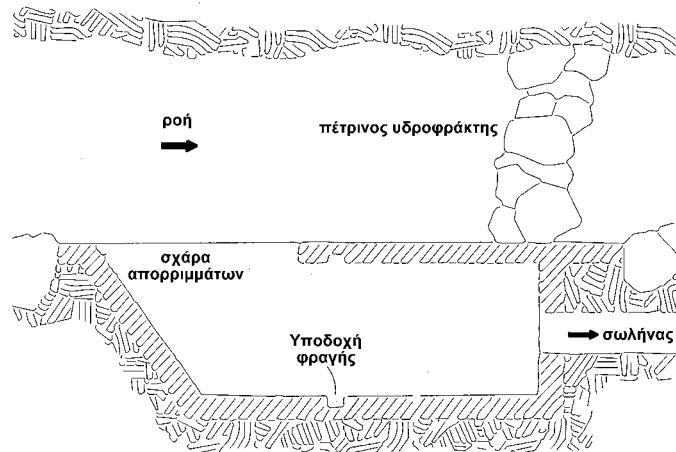
Σχήμα 1.7. Υδροφράκτης ενός μικρού υδροηλεκτρικού σχήματος εκτροπής

1.3.2. Στόμια εισόδου

Η λειτουργία της δομής του στομίου εισόδου είναι να κατευθύνει υπό ελεγχόμενες συνθήκες το νερό στον αγωγό πτώσης ή το κανάλι προσαγωγής. Το στόμιο εισόδου λειτουργεί ως μεταβάση μεταξύ ενός ρεύματος, που μπορεί να είναι από ένα ρυάκι μέχρι ένας ορμητικός χείμαρρος, και μίας ελεγχόμενης ως προς την ποιότητα και την ποσότητα ροής νερού. Η σχεδίασή του, βασιζόμενη σε γεωλογικές, υδραυλικές, δομικές και οικονομικές θεωρήσεις, απαιτεί ειδική προσοχή για να αποφευχθούν η περιπτή συντήρηση και λειτουργικά προβλήματα που δεν μπορούν να διορθωθούν εύκολα και θα πρέπει να υπομένονται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου.

Το βασικότερο κριτήριο στη σχεδίαση ενός στομίου εισόδου είναι ο προσανατολισμός του ως προς το ρεύμα, ως ένας τρόπος ελέγχου της ποσότητας και της ποιότητας του εισερχόμενου νερού. Οι ποταμοί τείνουν να αποθέτουν ιζήματα στις εσωτερικές πλευρές των καμπυλών, οπότε το στόμιο εισόδου δεν πρέπει να τοποθετείται στο εσωτερικό της καμπύλης, προκειμένου να αποφευχθεί το φράξιμο της εισόδου από ιζήματα. Δεν συνίσταται όμως ούτε η εξωτερική πλευρά μιας καμπύλης, αφού φερτές ύλες από το νερό μπορούν να βλάψουν τη λειτουργία του. Η ιδανική θέση εκτροπής είναι ένα σχετικά ευθύ τμήμα, σταθεροποιούμενο από επανθήσεις βράχων εάν είναι δυνατό, όπου να μπορεί να θεμελιωθεί ο υδροφράκτης.

Ο προσανατολισμός της εισόδου του στομίου ως προς το ρεύμα έχει μια καθοριστική επίδραση στη συσσώρευση απορριμμάτων μπροστά από τη σχάρα, η οποία μπορεί να αποτελέσει την αιτία για σημαντικά διαστήματα διακοπής της λειτουργίας και για δαπανηρή συντήρηση. Ο καλύτερος προσανατολισμός είναι η κεντρική γραμμή της εισόδου του στομίου να κείται παράλληλα ή υπό μικρή γωνία ως προς τον άξονα του υπερχειλιστή, ώστε να απομακρύνονται αυτόματα τα απορρίμματα από τις συχνές πλημμυρίδες που αντιπαρέρχονται τον υπερχειλιστή (σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8. Βέλτιστος προσανατολισμός της εισόδου της υδροληψίας

Μία από τις βασικές λειτουργίες του στομίου εισόδου είναι η ελαχιστοποίηση της ποσότητας των φερτών υλών και ιζημάτων που μεταφέρονται από το εισερχόμενο νερό, οπότε στην είσοδο του στομίου τοποθετούνται σχάρες απορριμμάτων για την αποτροπή της εισόδου πλωτών φερτών υλών και μεγάλων λίθων. Μία τέτοια σχάρα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πλαίσια που κατασκευάζονται από μία σειρά από ισαπέχουσες παράλληλες μεταλλικές ράβδους, ενώ πρόσφατα έχουν εμφανιστεί και σχάρες απορριμμάτων που κατασκευάζονται από σκληρά πλαστικά.

Καθόσον οι πλαστικές ράβδοι μπορούν να έχουν διατομές μορφής αεροτομής, με αυτές προκύπτει λιγότερη τύρβη και μικρότερες απώλειες ύψους πτώσης. Το διάκενο των ράβδων κυμαίνεται από ένα καθαρό πλάτος 12mm για τους μικρούς στροβίλους τύπου Pelton μεγάλου ύψους πτώσης μέχρι ένα μέγιστο 150mm για τους μεγάλους στροβίλους τύπου έλικας. Οι σχάρες μπορούν είτε να στερεώνονται στο πλαίσιο υποστήριξης με μπουλόνια από ανοξείδωτο χάλυβα, είτε να ολισθαίνουν σε κάθετες ράγες ώστε να αφαιρούνται και να αντικαθίστανται από φραγές όταν απαιτείται διακοπή της λειτουργίας για συντήρηση ή επισκευή.



Σχήμα 1.9. Μηχανικό χτένι στο στόμιο εισόδου ενός μικρού υδροηλεκτρικού

Οι σχάρες μπορούν να καθαρίζονται με το χέρι, και πρέπει να υπάρχει μια οριζόντια πλατφόρμα επάνω από την ανώτατη στάθμη του νερού για τη διευκόλυνση αυτής της λειτουργίας. Στα στόμια εισόδου ποταμών που περιέχουν μεγάλα ποσά φερτών υλών συνήθως προτιμείται η χρήση μηχανικών χτενιών (σχήμα 1.9). Όταν αναμένεται να εισέρχονται στο στόμιο εισόδου σημαντικές ποσότητες αιωρούμενων ιζημάτων, είναι σημαντικό να αφαιρούνται τα σωματίδια μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιώντας μία διάταξη κατακράτησης του ιζήματος.

Η ιζηματοπαγίδα μπορεί να τοποθετηθεί αμέσως κατάντη του στομίου ειςόδου, όπου μειώνεται η ταχύτητα της ροής. Όταν είναι καλά σχεδιασμένη πρέπει να είναι σε θέση να απομακρύνει όλα τα σωματίδια πάνω από 0,2 mm και ένα μεγάλο μέρος εκείνων με διαστάσεις μεταξύ 0,1 και 0,2 mm. Μια τέτοια κατασκευή είναι απαραίτητη για ύψη πτώσης πάνω από 100 m. Το στόμιο εισόδου πρέπει να έχει ενσωματωμένο έναν καλά σχεδιασμένο υπερχειλιστή, ώστε να διατηρείται σχετικά σταθερή η στάθμη του νερού από το κανάλι και μετά.

1.3.3. Κανάλια

Από το στόμιο εισόδου το νερό μεταφέρεται είτε κατευθείαν στο στρόβιλο μέσω ενός σωλήνα κατάθλιψης είτε με ένα κανάλι. Σε ένα κανάλι η παροχή είναι συνάρτηση της κατατομής της εγκάρσιας διατομής του, της κλίσης του, και της τραχύτητάς του. Η εφαρμογή της υδραυλικής θεωρίας παρέχει αρκετά ακριβή αποτελέσματα για τα τεχνητά κανάλια όπου η διατομή τους έχει τυποποιημένο σχήμα και είναι γνωστή η επιφανειακή τραχύτητα των δομικών υλικών (έδαφος, σκυρόδεμα, χάλυβας ή ξύλο).

Η ταχύτητα του νερού σ' ένα κανάλι πρέπει να διατηρείται επάνω από μια ελάχιστη τιμή για να αποτραπεί η ιζηματαπόθεση και η ανάπτυξη υδρόβιων φυτών, αλλά κάτω από μια μέγιστη τιμή ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση, ειδικά στα μη επενδεδυμένα κανάλια. Για να κρατηθεί η ιλύς σε αιώρηση μετά το στόμιο εισόδου, η ταχύτητα ροής πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,3-0,5 m/s. Εάν το κανάλι δεν έχει επένδυση και είναι κατασκευασμένο σε αρμώδες έδαφος, η ταχύτητα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0,4-0,6 m/s. Σε κανάλια με επένδυση τσιμέντου η ταχύτητα του διαυγούς νερού μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 10 m/s χωρίς κίνδυνο. Όταν το νερό περιέχει άμμο, χαλίκια ή πέτρες, είναι αποδεκτές ταχύτητες μέχρι 4 m/s.

Μπορεί να παρουσιαστούν εμπόδια κατά μήκος της ευθείας του καναλιού και για να παρακαμφθούν θα πρέπει αυτό να διέλθει πάνω, γύρω ή κάτω από αυτά. Η διάβαση ενός ρεύματος ή φαραγγιού απαιτεί τη χρήση ενός τεχνητού καναλιού, δηλ. κάποιου είδους επέκταση του καναλιού, με την ίδια κλίση και υποστηριζόμενο σε στύλους από σκυρόδεμα ή χάλυβα, ή σχηματίζοντας κάποια γεφύρωση. Οι σωλήνες από χάλυβα αποτελούν συχνά την καλύτερη λύση, επειδή αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως χορδή της κατασκευαζόμενης επιπόπου γεφύρωσης. Το πρόβλημα μπορεί επίσης να λυθεί με τη χρήση ανεστραμμένων σιφωνίων, τα οποία απαρτίζονται από μία διάταξη εισαγωγής και μία εξαγωγής οι οποίες συνδέονται με έναν καμπύλο σωλήνα.

Στο τέλος του καναλιού, αμέσως πριν από την είσοδο του αγωγού πτώσης, υπάρχει η περιοχή υδροληψίας. Αυτή, αν και μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να προσφέρει αποταμίευση νερού, συνήθως προσφέρει μόνο επαρκή αποταμίευση για την παροχή του πρόσθετου όγκου του νερού που απαιτείται κατά την εκκίνηση του στροβίλου. Πρέπει να περιλαμβάνει έναν υπερχειλιστή, ένα στόμιο αποστράγγισης, μια σχάρα απορριμάτων και έναν εξαεριστήρα.

1.3.4. Αγωγοί πτώσης

Από τη περιοχή υδροληψίας το νερό ματαφέρεται στο στρόβιλο μέσω ενός σωλήνα κατάθλιψης ή ενός αγωγού πτώσης. Οι αγωγοί πτώσης μπορούν να εγκατασταθούν επάνω ή κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ανάλογα με παράγοντες όπως είναι η φύση του εδάφους, το υλικό του αγωγού, οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος και οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, ένας εύκαμπτος και με μικρή διάμετρο πλαστικός αγωγός πτώσης μπορεί να τοποθετηθεί επί του εδάφους, ακολουθώντας το ανάγλυφό του με ελάχιστες ανάγκες για διαρρυθμίσεις. Διαφορετικά, πρέπει να θάβονται κάτω από το έδαφος μεγαλύτεροι αγωγοί πτώσης, υπό την προϋπόθεση ότι δεν απαιτούνται σημαντικές εκσκαφές σε βραχώδες έδαφος.

Η άμμος και τα χαλίκια που περιβάλλουν τον σωλήνα παρέχουν καλή μόνωση, και εξαλείφουν την ανάγκη για αγκυρώσεις και αρμούς διαστολής. Οι θαμμένοι αγωγοί πτώσης πρέπει να βάφονται και να καλύπτονται με προσοχή για να προστατεύεται η εξωτερική τους επιφάνεια από διάβρωση, αλλά, εφόσον δεν φθαρεί η προστατευτική επίστρωση κατά την εγκατάσταση, θα είναι ελάχιστη η περαιτέρω συντήρησή τους. Η λύση αυτή είναι η βέλτιστη από περιβαλλοντικής απόψεως, αφού το έδαφος μπορεί να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση και ο αγωγός δεν αποτελεί εμπόδιο στη μετακίνηση των άγριων ζώων.

Εάν ο στρόβιλος δεν λειτουργεί συνεχώς, ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι μεταβολές της θερμοκρασίας, οι οποίες προκαλούν θερμικές διαστολές ή συστολές. Η μετατόπιση μπορεί να διευθετηθεί με τη χρήση αρμών διαστολής ή σχεδιάζοντας τη διάταξη του σωλήνα με ελεύθερα κινούμενες καμπύλες. Ο αγωγός πτώσης συνήθως δομείται σε ευθείες ή σχεδόν ευθείες γραμμές, με αγκυρώσεις από σκυρόδεμα σε κάθε καμπύλη και έναν αρμό διαστολής ανάμεσα σε κάθε ζεύγος αγκυρώσεων. Οι αγκυρώσεις πρέπει να ανθίστανται στην ώση του αγωγού καθώς και στις δυνάμεις τριβής που προκαλούνται από τη διαστολή και τη συστολή του, οπότε πρέπει να θεμελιώνονται σε βράχο εάν είναι δυνατό.

Για τους αγωγούς πτώσης διατίθεται τελευταία μία ποικιλία υλικών. Για μεγάλα ύψη πτώσης και διαμέτρους, ο εργοστασιακά συγκολλημένος χάλυβας είναι πιθανώς η καλύτερη επιλογή. Πάντως, εάν διατίθενται στα απαιτούμενα μεγέθη, θα πρέπει να εξετάζονται και οι χαλύβδινοι σωλήνες σπειροειδούς μηχανικής συγκόλλησης, λόγω της χαμηλότερης τιμής τους. Στα μεσαία και μικρά ύψη πτώσης ο χάλυβας καθίσταται λιγότερο ανταγωνιστικός στις μικρές παροχές, επειδή η προβλεπόμενη προστασία κατά της διάβρωσης είναι η ίδια, ανεξάρτητα από το πάχος του τοιχώματος.

Μια ελκυστική λύση στις περιπτώσεις αυτές αποτελούν οι πλαστικοί σωλήνες, επειδή είναι φθηνότεροι, ελαφρύτεροι και πιο εύκολοι στο χειρισμό από τους χαλύβδινους, ενώ δεν χρειάζονται αντιδιαβρωτική προστασία. Για μικρότερης διαμέτρου σωλήνες, υπάρχει η επιλογή ανάμεσα στο βιομηχανικό χάλυβα, εφοδιασμένο με αρμούς με πείρους και υποδοχές και με στεγανωτικούς ελαστικούς δακτυλίους, που εξαλείφουν τις επιτόπιες συγκολλήσεις, ή με συγκόλλημένες φλάντζες που συνδέονται επιτόπου, στο απλό ή προεντεταμένο σκυρόδεμα, τους όλκιμους σιδερένιους σωλήνες με πείρους και υποδοχές και στεγανωτικές φλάντζες, το αμιαντοτσιμέντο, το ενισχυμένο με υαλονήματα πλαστικό (GRP), και σε πλαστικά από PVC ή πολυαιθυλένιο.

Ένας αγωγός πτώσης χαρακτηρίζεται από τα υλικά, τη διάμετρό του, το πάχος του τοιχώματος και τον τύπο των αρμών. Συγκεκριμένα:

- Το υλικό επιλέγεται σύμφωνα με τις συνθήκες του εδάφους, την προσιτότητα, το βάρος, το σύστημα των αρμών και το κόστος.
- Η διάμετρος επιλέγεται ώστε να μειώνονται οι απώλειες τριβής μέσα στον αγωγό πτώσης σε ένα αποδεκτό επίπεδο.
- Το πάχος του τοιχώματος επιλέγεται ώστε να αντέχει στη μέγιστη υδραυλική πίεση όχλησης, συμπεριλαμβανομένης της μεταβατικής πίεσης κυματισμού που εμφανίζεται κατά την ταχεία αύξηση ή μείωση της παροχής.

Η διάμετρος επιλέγεται ως αποτέλεσμα μιας αντιστάθμισης μεταξύ του κόστους του αγωγού και των απώλειών ισχύος. Οι απώλειες ύψους πτώσης αυξάνονται ραγδαία με την αύξηση της ταχύτητας του νερού. Για τη μεταφορά μιας ορισμένης παροχής, σ' ένα σωλήνα μικρής διαμέτρου απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα νερού απ' ό,τι σε έναν μεγαλύτερης διαμέτρου, επομένως θα είναι μεγαλύτερες και οι απώλειες πίεσης. Οι μικρής διαμέτρου σωλήνες είναι φθηνότεροι, αλλά οι απώλειες ισχύος αυτών είναι μεγαλύτερες από αυτές που δημιουργούνται σε σωλήνες μεγαλύτερης διαμέτρου.

Το πάχος του τοιχώματος εξαρτάται από το όριο θραύσης (και λυγισμού) του υλικού, τη διάμετρο του σωλήνα και τις πιέσεις λειτουργίας, συνυπολογιζομένων των μεταβατικών πιέσεων κυματισμού λόγω των απότομων κλεισιμάτων των βαλβίδων όταν λειτουργεί ο σταθμός. Οι συντελεστές ασφάλειας και οι ανοχές των πιέσεων κυματισμού εξαρτώνται από τα πρότυπα που εφαρμόζονται για την κατασκευή του σωλήνα. Στην Ευρώπη, οι αγωγοί πτώσης κατασκευάζονται με συγκόλληση προκαμπυλωμένων στις απαιτούμενες διαστάσεις χαλυβδόφυλλων, εκτός εάν διατίθεται σωλήνας σπειροειδούς συγκόλλησης με κατάλληλη διάμετρο και πάχος τοιχώματος.

1.3.5. Αυλάκια απαγωγής

Αφού περάσει μέσα από το στροβίλο το νερό επιστρέφει στον ποταμό μέσω ενός μικρού καναλιού που αποκαλείται αυλάκι απαγωγής. Οι στρόβιλοι ώσης μπορούν να έχουν σχετικά υψηλές ταχύτητες εξόδου, οπότε το αυλάκι απαγωγής πρέπει να είναι σχεδιασμένο εις τρόπον ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν θα υποσκαφθεί ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής. Μεταξύ του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής και του ρεύματος πρέπει να παρέχεται προστασία με ποδιές από θραυστούς λίθους ή σκυρόδεμα.

Η σχεδίαση θα πρέπει επίσης να εξασφαλίζει ότι, κατά τη διάρκεια σχετικά υψηλών παροχών, το νερό στο αυλάκι απαγωγής δεν θα ανέλθει τόσο ώστε να παρεμποδίσει τον δρομέα του στροβίλου. Η στάθμη του νερού στο αυλάκι απαγωγής επηρεάζει τη λειτουργία ενός στροβίλου αντίδρασης, ειδικότερα την απαρχή της σπηλαιώσης, ενώ καθορίζει και το διαθέσιμο καθαρό ύψος πτώσης, οπότε μπορεί να έχει καταλυτική επίδραση στα οικονομικά αποτελέσματα των συστημάτων μικρού ύψους πτώσης.

1.4. ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

1.4.1. Υδροστρόβιλοι

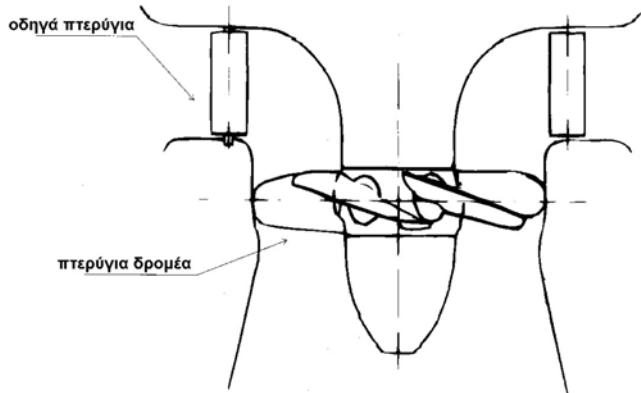
Όλες οι προαναφερθείσες δομές σχεδιάζονται για να μεταβιβάζουν το νερό στους στροβίλους, όπου τιθασεύεται η μεταφερόμενη από το νερό ισχύς. Η οικονομική σκοπιμότητα ενός προτεινόμενου σταθμού ηλεκτροπαραγωγής σε μία θέση με μια γνωστή καμπύλη διάρκειας ροής (ΚΔΡ) εξαρτάται πρωτίστως από τη σωστή επιλογή του υδροηλεκτρικού εξοπλισμού, η οποία αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία που εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από τη μορφή της ΚΔΡ, την ποσότητα της αποθεματικής ροής, την αξία της ενέργειας, το κόστος του εξοπλισμού, την ευκολία χρήσης και την αξιοπιστία του.

Ένας υδροστρόβιλος είναι μια περιστρεφόμενη μηχανή που μετατρέπει τη δυναμική ενέργεια του νερού σε μηχανική ενέργεια. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι στροβίλων, γνωστοί ως στρόβιλοι “ώσης” και “αντίδρασης”. Ο “στρόβιλος ώσης” μετατρέπει την δυναμική ενέργεια του νερού σε κινητική ενέργεια μιας δέσμης νερού η οποία εκρέει από ένα ακροφύσιο και προσπίπτει επάνω στους κάδους ή τα πτερύγια του δρομέα. Ο “στρόβιλος αντίδρασης” χρησιμοποιεί την πίεση αλλά και την ταχύτητα του νερού για να αναπτύξει μηχανική ισχύ. Ο δρομέας κατακλύζεται πλήρως και τόσο η πίεση όσο και η ταχύτητα μειώνονται από την είσοδο προς την έξοδο.

Οι περισσότεροι υφιστάμενοι στρόβιλοι μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- στρόβιλοι τύπου Kaplan και έλικας,
- στρόβιλοι τύπου Francis,
- στρόβιλοι τύπου Pelton και άλλοι στρόβιλοι ώσης.

Οι στρόβιλοι Kaplan και οι τύπου έλικας είναι αξονικής ροής στρόβιλοι αντίδρασης που γενικά χρησιμοποιούνται για μικρά ύψη πτώσης (συνήθως κάτω από 16 m). Ο στρόβιλος Kaplan έχει ρυθμιζόμενα πτερύγια δρομέα και μπορεί να διαθέτει ή όχι ρυθμιζόμενα οδηγά πτερύγια (σχήμα 1.10). Εάν είναι ρυθμιζόμενα και τα πτερύγια του δρομέα και τα οδηγά πτερύγια ο στρόβιλος περιγράφεται ως “διπλής ρύθμισης”, ενώ εάν είναι σταθερά τα οδηγά πτερύγια τότε λέγεται “απλής ρύθμισης”.

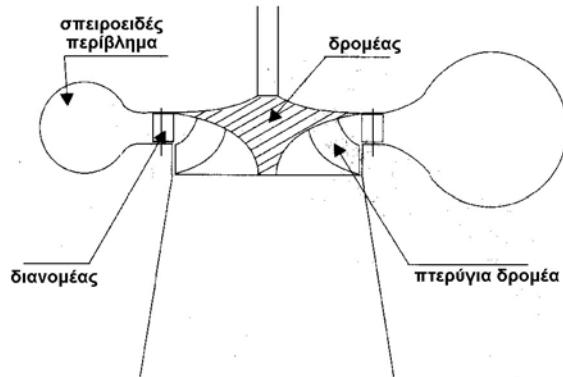


Σχήμα 1.10. Στρόβιλος τύπου Kaplan

Στη συμβατική του έκδοση ο στρόβιλος Kaplan έχει ένα σπειροειδές περίβλημα (είτε από χάλυβα είτε από σιδηροπαγές σκυρόδεμα). Η ροή εισάγεται ακτινικά προς το εσωτερικό και εκτελεί μια στροφή ορθής γωνίας προτού εισέλθει στον δρομέα με αξονική κατεύθυνση. Όταν ο δρομέας έχει σταθερά πτερύγια, ο στρόβιλος είναι γνωστός ως τύπου έλικας. Οι στρόβιλοι έλικας μπορούν να έχουν κινητά ή σταθερά οδηγά πτερύγια. Οι μη ρυθμιζόμενοι στρόβιλοι τύπου έλικας χρησιμοποιούνται μόνο όταν τόσο η παροχή ύδρευσης και το ύψος πτώσης παραμένουν πρακτικώς σταθερά.

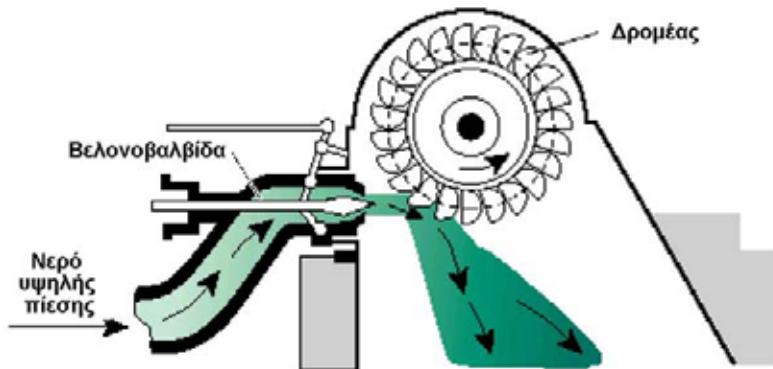
Από τους στροβίλους τύπου έλικας και Kaplan έχουν προκύψει οι βολβοειδείς και οι σωληνωτές μονάδες, όπου η ροή εισέρχεται και εξέρχεται με ελάχιστες αλλαγές στη διεύθυνση. Στο βολβοειδή στρόβιλο ο πολλαπλασιαστής και η γεννήτρια εγκλείονται μέσα σε ένα βολβό βυθισμένο στη ροή. Οι σωληνωτοί στρόβιλοι επιτρέπουν ποικίλες διαρρυθμίσεις, όπως μετάδοση κίνησης ορθής γωνίας, στροβίλους τύπου Straflo με αγωγούς σχήματος S, γεννήτριες με ιμαντοκίνηση, κλπ. Τα συστήματα μετάδοσης κίνησης ορθής γωνίας αποτελούν μια πολύ ελκυστική λύση, αλλά κατασκευάζονται μόνο μέχρι ένα μέγιστο όριο της τάξης των 2 MW.

Οι στρόβιλοι Francis είναι στρόβιλοι αντίδρασης ακτινικής ροής, με σταθερά πτερύγια δρομέα και ρυθμιζόμενα οδηγά πτερύγια, που χρησιμοποιούνται για μεσαία ύψη πτώσης. Ο δρομέας αποτελείται από κάδους που διαμορφώνονται από σύνθετες καμπύλες. Ένας στρόβιλος Francis περιλαμβάνει συνήθως ένα χυτοσιδηρό ή χαλύβδινο σπειροειδές περίβλημα για τη διανομή του νερού γύρω από ολόκληρη την περίμετρο του δρομέα, και αρκετές σειρές πτερυγίων που καθοδηγούν και ρυθμίζουν την ροή του νερού προς το δρομέα. Στο σχήμα 1.11 δίνεται η σχηματική παράσταση του στροβίλου αυτού του τύπου.

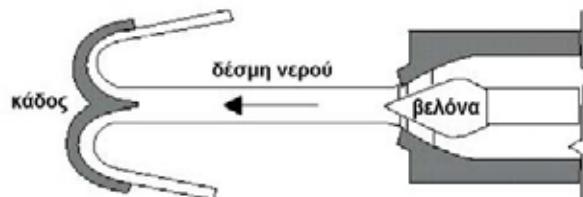


Σχήμα 1.11. Σχηματική παράσταση ενός στροβίλου Francis

Οι στρόβιλοι Pelton είναι στρόβιλοι ώσης με μία ή πολλαπλές δέσμες, καθεμία από τις οποίες εκρέει μέσα από ένα ακροφύσιο με μια βελονοβαλβίδα για τον έλεγχο της ροής. Αυτοί χρησιμοποιούνται για μεσαία και μεγάλα ύψη πτώσης. Το σχήμα 1.12 απεικονίζει έναν κατακόρυφο στρόβιλο Pelton και το σχήμα 1.13 τους άξονες των ακροφυσίων που κείνται στο ίδιο επίπεδο με τον δρομέα. Ορισμένοι κατασκευαστές έχουν αναπτύξει ειδικούς τύπους μηχανών, με περιορισμένο εύρος παροχής και ισχύος, οι οποίοι όμως μπορεί να είναι συμφέροντες υπό ορισμένες συνθήκες.

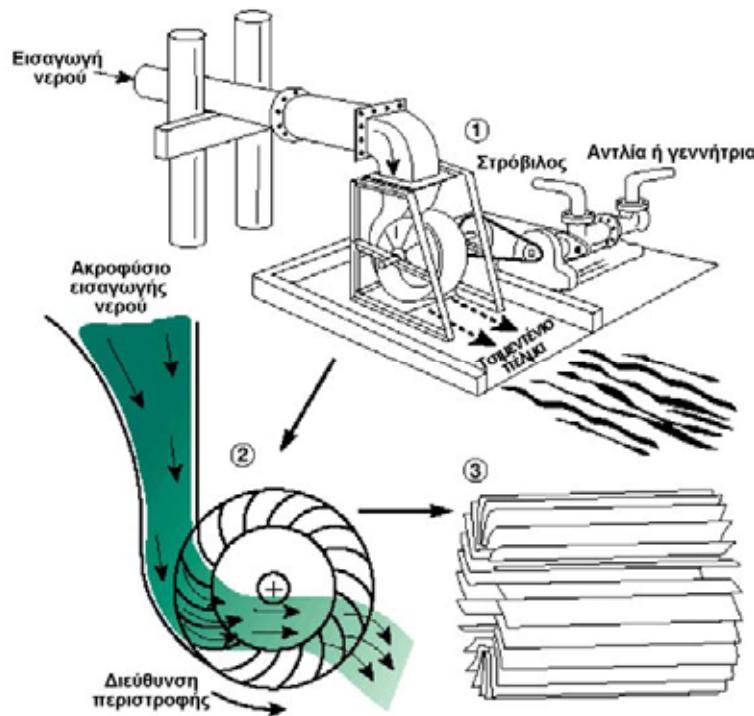


Σχήμα 1.12. Κατακόρυφος στρόβιλος Pelton



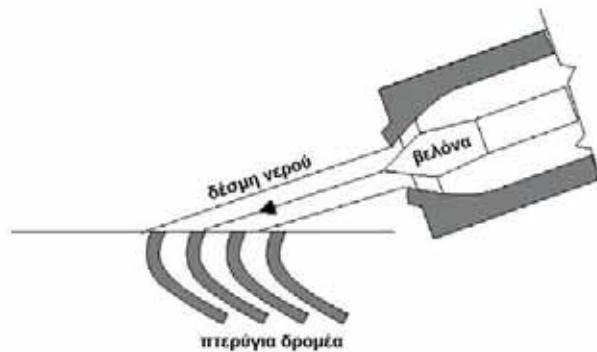
Σχήμα 1.13. Η μορφή του κάδου ενός στροβίλου Pelton και ο άξονας του ακροφυσίου

Ο στρόβιλος εγκάρσιας ροής, συχνά καλούμενος και στρόβιλος Ossberger, από μια επιχείρηση που τον κατασκευάζει για παραπάνω από 50 χρόνια, ή στρόβιλος Michell (σχήμα 1.14) χρησιμοποιείται για ένα ευρύ φάσμα υψών πτώσης επικαλύπτοντας αυτά των στροβίλων Kaplan, Francis και Pelton. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για ένα ρεύμα με μεγάλη παροχή και μικρό ύψος πτώσης.



Σχήμα 1.14. (1) Ο στρόβιλος εγκάρσιας ροής (Michell),
(2) Εγκάρσια τομή του στροβίλου,
(3) Διάταξη των πτερυγίων του στροβίλου εγκάρσια ροής
[Πηγή: Energy-wise Renewables – 4, Eeca, Οκτώβριος 1997]

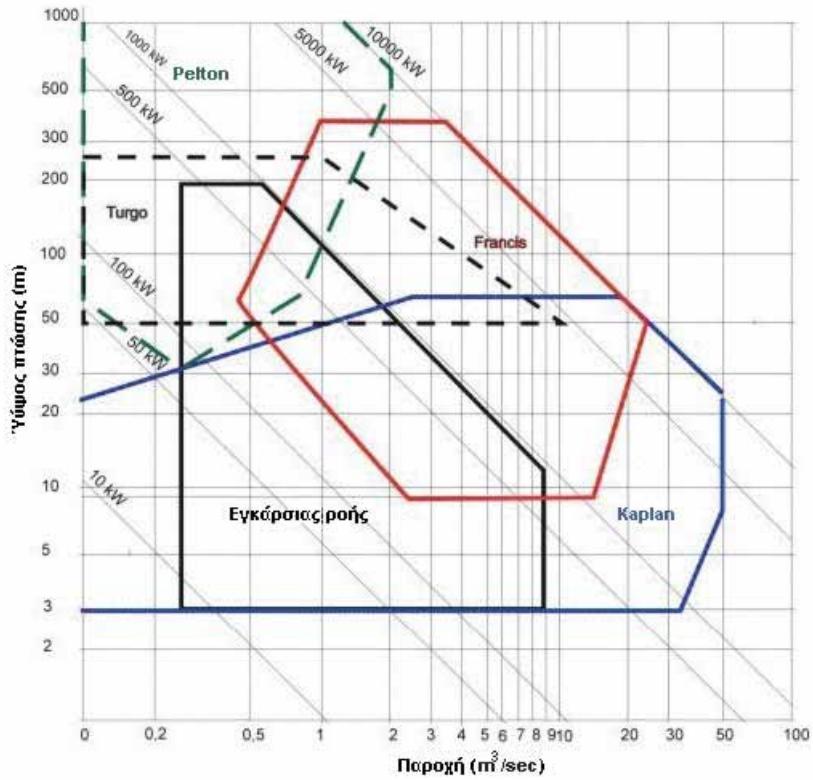
Ο στρόβιλος Turgo μπορεί να λειτουργεί σε ύψη πτώσης από 30 έως 300 m. Είναι στρόβιλος ώσης, όπως και ο Pelton, αλλά οι κάδοι του διαμορφώνονται διαφορετικά και η δέσμη του νερού προσπίπτει στο επίπεδο του δρομέα υπό γωνία 20° . Το νερό εισέρχεται στο δρομέα από τη μια πλευρά του δίσκου του και εξέρχεται από την άλλη (σχήμα 1.15). Η μεγαλύτερη ταχύτητα του δρομέα του Turgo, λόγω της μικρότερης διαμέτρου του έναντι των άλλων τύπων, καθιστά πιο πιθανή την άμεση σύζευξη του στροβίλου και της γεννήτριας. Πάντως, σε αντίθεση με έναν Pelton, το νερό που ρέει μέσω του δρομέα παράγει μια αξονική δύναμη, απαιτώντας την εγκατάσταση ενός ωστικού εδράνου στον άξονά του. Ένας στροβίλος Turgo μπορεί να είναι κατάλληλος σε μεσαία ύψη πτώσης, όπου διαφορετικά θα χρησιμοποιούνταν στρόβιλος Francis.



Σχήμα 1.15. Τα πτερύγια του δρομέα και η δέσμη του νερού σε ένα στρόβιλο Turgo

Η επιλογή του τύπου, της γεωμετρίας και των διαστάσεων του στροβίλου εξαρτάται κυρίως από το ύψος πτώσης, την παροχή και την ταχύτητα του δρομέα. Στο σχήμα

1.16 απεικονίζονται τα εύρη λειτουργίας διάφορων τύπων στροβίλων συναρτήσει του ύψους πτώσης και της παροχής. Καθεαυτό το ύψος πτώσης αποτελεί το πρώτο κριτήριο στην επιλογή του τύπου του προς εγκατάσταση στροβίλου. Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζεται το εύρος των υψών πτώσης που είναι κατάλληλα για τους διάφορους τύπους στροβίλων.



Σχήμα 1.16. Εύρος λειτουργίας των διάφορων τύπων στροβίλων

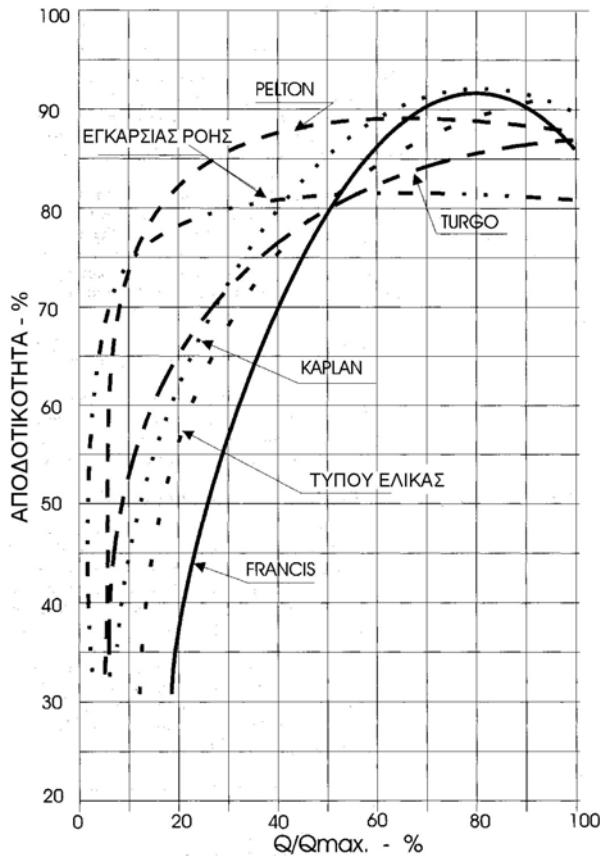
Πίνακας 1.1. Εύρος υψών πτώσης

Τύποι στροβίλων	Εύρος ύψους πτώσης (σε m)
Kaplan και έλικας	$2 < H < 15$
Francis	$4 < H < 100$
Pelton	$30 < H < 1000$
Εγκάρσιας ροής	$1 < H < 150$
Turgo	$50 < H < 250$

Για το ίδιο ύψος πτώσης, είναι δυσκολότερη η κατασκευή ορισμένων στροβίλων απ' ό,τι άλλων, συνεπώς είναι και ακριβότεροι. Για παράδειγμα, στα μικρά ύψη πτώσης, ένας στρόβιλος τύπου έλικας είναι φθηνότερος από ένα στρόβιλο Kaplan που έχει σχεδιασθεί για την ίδια ονομαστική παροχή. Σε ένα σχήμα μεσαίου ύψους πτώσης, ένας στρόβιλος εγκάρσιας ροής θα είναι φθηνότερος από έναν Francis, του οποίου ο δρομέας είναι πιο σύνθετος, αν και ο βαθμός απόδοσής του είναι μεγαλύτερος.

Όσον αφορά την παροχή, πρέπει να υπενθυμισθεί ότι οι στρόβιλοι δεν μπορούν να λειτουργούν από μηδενική ροή μέχρι την ονομαστική παροχή τους. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.17, το οποίο παρουσιάζει τη μέση αποδοτικότητα για διάφορους τύπους στροβίλων, η αποδοτικότητα ελαττώνεται απότομα κάτω από ένα ορισμένο ποσοστό της ονομαστικής παροχής. Από την άποψη αυτή, ο καλύτερος στρόβιλος δεν μπορεί

να χρησιμοποιηθεί κάτω από το 1/6 της ονομαστικής παροχής του, ενώ πολλοί μπορούν να λειτουργήσουν μόνο επάνω από το 40% αυτής.



Σχήμα 1.17. Μέση αποδοτικότητα διάφορων τύπων στροβίλων

Το εύρος των παροχών που πρέπει να χρησιμοποιούνται, συνεπώς και η παραγωγή ισχύος, κυμαίνεται αναλόγως εάν:

- α) η εγκατάσταση πρέπει να παρέχει ηλεκτρισμό σ' ένα μικρό δίκτυο, ή
- β) ο σταθμός έχει σχεδιαστεί για να συνδεθεί με ένα μεγάλο δίκτυο διανομής.

Στην πρώτη περίπτωση, πρέπει να επιλεγεί μια παροχή που να επιτρέπει την παραγωγή ηλεκτρισμού σχεδόν καθ' όλο το έτος. Στη δεύτερη, η ονομαστική παροχή πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να μεγιστοποιείται το καθαρό κέρδος από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας.

1.4.2. Κιβώτια ταχυτήτων και άλλοι πολλαπλασιαστές της ταχύτητας

Όταν ο στρόβιλος και η γεννήτρια λειτουργούν με την ίδια ταχύτητα και μπορούν να τοποθετηθούν έτσι ώστε οι άξονές τους να είναι σε ευθεία, η ενδεδειγμένη λύση είναι η άμεση σύζευξη τους. Τότε, ουσιαστικά δεν υφίστανται απώλειες ισχύος και είναι ελάχιστη η συντήρηση. Οι κατασκευαστές των στροβίλων προτείνουν τον τύπο της σύζευξης που πρέπει να χρησιμοποιείται (άκαμπτη ή εύκαμπτη), αν και συνήθως συστήνεται μια εύκαμπτη σύζευξη που μπορεί να ανεχθεί ορισμένη απόκλιση στην ευθυγράμμιση. Σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά στις μικρότερες ισχείς, οι στρόβιλοι

περιστρέφονται με λιγότερες από 400 rpm, οπότε απαιτείται ένας πολλαπλασιαστής ταχύτητας για να καλυφθούν οι 1000-1500 rpm των τυποποιημένων γεννητριών EP.

Για τα εύρη ισχύος που απαντώνται στα MYH έργα η λύση αυτή είναι συνήθως πιο οικονομική απ' ότι η χρήση μιας γεννήτριας ειδικής κατασκευής. Ο πολλαπλασιαστής ταχύτητας μπορεί να επιλεγεί από τους κάτωθι εμπορικά διαθέσιμους τύπους:

- κιβώτιο ταχυτήτων παράλληλου άξονα,
- επικυκλικό κιβώτιο ταχυτήτων,
- κιβώτιο ταχυτήτων ορθής γωνίας με κωνικά γρανάζια,
- μετάδοση κίνησης με ιμάντα.

Τα κιβώτια ταχυτήτων απαιτούν πρόσθετη συντήρηση και αυξάνουν αισθητά το επίπεδο θορύβου στο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον, οι απώλειες τριβής μπορεί να ανέλθουν στο 2% της παραγόμενης ισχύος. Οι επίπεδοι ή οι σχήματος V ιμάντες αποτελούν την απλούστερη και φθηνότερη λύση.

1.4.3. Γεννήτριες

Οι γεννήτριες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αν και οι πρώιμοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ήταν συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) ώστε να συνδυάζονται με τα πρώιμα εμπορικά ηλεκτρικά συστήματα, σήμερα χρησιμοποιούνται στην πράξη μόνο τριφασικές γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υφιστάμενου δικτύου, ο παραγωγός έχει δύο επιλογές:

- **Σύγχρονες γεννήτριες**, εξοπλισμένες με σύστημα διέγερσης ΣΡ (περιστρεφόμενο ή στατικό) συνδεόμενο με ένα ρυθμιστή τάσης, για τον έλεγχο της τάσης, της συχνότητας και της γωνίας φάσης πριν από τη σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο, και για την παροχή αμελητέου ποσοστού της άεργης ισχύος που απαιτείται από το σύστημα ισχύος όταν η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο. Με τη διακοπή της παράλληλης σύνδεσης, η σύγχρονη γεννήτρια θα συνεχίσει να παράγει σε τάση και συχνότητα που καθορίζονται από τον εξοπλισμό ελέγχου της. Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα από το δίκτυο και να παράγουν ισχύ δεδομένου ότι η ισχύς διέγερσης δεν εξαρτάται από το δίκτυο.
- **Ασύγχρονες γεννήτριες**, που είναι απλοί ηλεκτρικοί επαγωγικοί κινητήρες κλωβού, χωρίς δυνατότητα ρύθμισης της τάσης, οι οποίες λειτουργούν σε ταχύτητα άμεσα σχετιζόμενη με τη συχνότητα του συστήματος. Αντλούν το ρεύμα διέγερσή τους από το δίκτυο, απορροφώντας άεργο ισχύ. Αυτή μπορεί να αντισταθμιστεί με την προσθήκη συστοιχίας πυκνωτών. Δεν μπορούν να παράγουν όταν αποσυνδέονται από το δίκτυο, αφού δεν είναι ικανές να παρέχουν το δικό τους ρεύμα διέγερσης.

Οι σύγχρονες γεννήτριες EP είναι ακριβότερες από τις ασύγχρονες, τουλάχιστον για τις ισχείς μέχρι περίπου 2 MW, και χρησιμοποιούνται σε συστήματα ισχύος όπου η παραγωγή της γεννήτριας αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσοστό του φορτίου του συστήματος ισχύος. Οι ασύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται σε μεγάλα δίκτυα όπου η παραγωγή τους είναι ένα αμελητέο ποσοστό του φορτίου του συστήματος

ισχύος. Η αποδοτικότητά τους είναι 2 έως 4% μικρότερη από την αποδοτικότητα των σύγχρονων γεννητριών σε όλο το εύρος λειτουργίας τους.

1.4.4. Εξοπλισμός ελέγχου

Ο στρόβιλος συνήθως ελέγχεται από ένα ρυθμιστή στροφών, ο οποίος είναι ένας συνδυασμός συσκευών και μηχανισμών που ανιχνεύουν την απόκλιση της ταχύτητας και τη μετατρέπουν σε μια μεταβολή της θέσης του σερβοκινητήρα. Ειδικότερα, ένας αισθητήρας ταχύτητας ανιχνεύει την απόκλιση από το καθορισμένο σημείο και το σήμα απόκλισης μετατρέπεται και ενισχύεται ώστε να διεγείρει έναν ενεργοποιητή, υδραυλικό ή ηλεκτρικό, για τον έλεγχο είτε της παροχής του στροβίλου είτε του ηλεκτρικού φορτίου.

Οι ρυθμιστές στροφών μπορεί να είναι μηχανικοί ή ηλεκτρονικοί. Στο μηχανικό τύπο, ο αισθητήρας ταχύτητας είναι ένας μηχανισμός βαριδίων σφονδύλου που ελέγχει ένα υδραυλικό σύστημα ελαίου για την ενεργοποίηση μέσω σερβοκινητήρων των οδηγών πτερυγίων ή/και των πτερυγίων του δρομέα. Οι ηλεκτρονικοί ρυθμιστές στροφών ελέγχουν τον στρόβιλο μέσω σταδίων ενίσχυσης της ισχύος, τα οποία κανονικά περιλαμβάνουν μια υδραυλική μονάδα ισχύος. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η αυξημένη αξιοπιστία, η ακρίβεια του ελέγχου και η πολυχρηστικότητα.

Για μικρούς υδροστροβίλους που τροφοδοτούν αυτόνομα συστήματα, η απλούστερη και πιο ανέξοδη λύση είναι η ρύθμιση των στροφών μέσω του φορτίου. Σε πλήρες φορτίο, σταθερό ύψος πτώσης και σταθερή παροχή, ο στρόβιλος θα λειτουργεί στην ταχύτητα σχεδιασμού συντηρώντας έτσι πλήρες φορτίο στη γεννήτρια, η οποία θα λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα. Είναι διαθέσιμοι αξιόπιστοι και φθηνοί ηλεκτρονικοί ρυθμιστές στροφών που ενεργοποιούν και θέτουν εκτός λειτουργίας υφιστάμενες αντιστάσεις, διατηρώντας έτσι με ακρίβεια τη συχνότητα του συστήματος. Εάν η γεννήτρια συνδέεται σε ένα μεγάλο δίκτυο, η ρύθμιση της συχνότητας παρέχεται από το δίκτυο και ο ρυθμιστής στροφών είναι περιπτός.

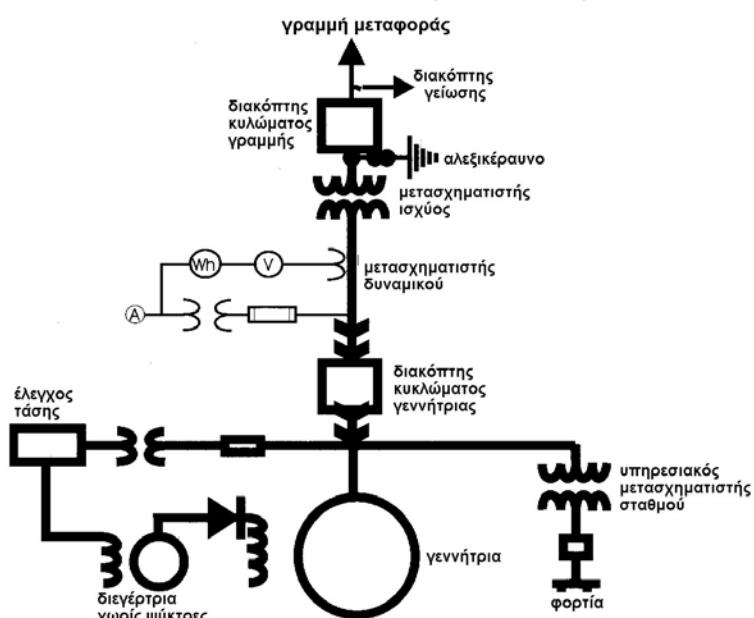
1.4.5. Πίνακας οργάνων του εξοπλισμού διανομής και εξοπλισμός προστασίας

Σε κάθε χώρα, οι κανονισμοί της ηλεκτρικής τροφοδοσίας θέτουν μια θεσμοθετημένη υποχρέωση στις δημόσιες επιχειρήσεις ηλεκτρισμού να διατηρούν την ασφάλεια και την ποιότητα της ηλεκτρικής τροφοδοσίας εντός κάποιων προκαθορισμένων ορίων. Ο ανεξάρτητος παραγωγός πρέπει να λειτουργεί την εγκατάστασή του κατά τέτοιο τρόπο ώστε η επιχείρηση ηλεκτρισμού να μπορεί να εκπληρώνει τις υποχρεώσεις της. Επομένως, για την ασφάλεια και την προστασία του εξοπλισμού απαιτείται η ύπαρξη διάφορων σχετικών ηλεκτρικών διατάξεων μέσα στο σταθμό ισχύος.

Ο εξοπλισμός διανομής είναι αναγκαίος για τον έλεγχο των γεννητριών και για τη σύζευξή τους με το δίκτυο ή το απομονωμένο φορτίο. Πρέπει να παρέχει προστασία για τις γεννήτριες, τον κύριο μετασχηματιστή και τον υπηρεσιακό μετασχηματιστή του σταθμού. Ο πίνακας οργάνων του εξοπλισμού διανομής συνήθως περιλαμβάνει ένα διακόπτη για τη γεννήτρια, μετασχηματιστές δυναμικού, μετασχηματιστές ρεύματος,

διατάξεις ελέγχου της γεννήτριας, έναν αποζεύκτη τήξης για την υπηρεσιακή ισχύ του σταθμού και τους χάλκινους διακόπτες κατανομής κυκλώματος.

Ο ανεξάρτητος παραγωγός είναι υπεύθυνος για τη διάταξη της γείωσης εντός της εγκατάστασής του. Αυτή πρέπει να σχεδιαστεί κατόπιν συνεννόησης με τη δημόσια επιχείρηση ηλεκτρισμού. Η διάταξη της γείωσης εξαρτάται από τον αριθμό των εν λειτουργία μονάδων καθώς και από τη διαμόρφωση και τη μέθοδο λειτουργίας του συστήματος του ίδιου του ανεξάρτητου παραγωγού. Στο σχήμα 1.18 απεικονίζεται το διάγραμμα ενός σταθμού παραγωγής με μία μονάδα, όπου διακρίνεται ο αποζεύκτης της γραμμής μεταφοράς στην πλευρά υψηλής τάσης, μαζί με τον αποζεύκτη της γεννήτριας και τις μετρητικές διατάξεις στην πλευρά χαμηλής τάσης. Πιο περίπλοκα αναμένονται τα πράγματα σε σταθμούς πολλαπλών μονάδων, όπου η ευελιξία και η συνέχεια των υπηρεσιών αποτελούν σημαντικές απαιτήσεις.



Σχήμα 1.18. Σχηματικό διάγραμμα ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με μία μονάδα

1.4.6. Αυτόματος έλεγχος

Τα μικρά υδροηλεκτρικά σχήματα συνήθως δεν επιτηρούνται και λειτουργούν μέσω συστήματος αυτομάτου ελέγχου. Επειδή κάθε εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής είναι διαφορετική, είναι σχεδόν αδύνατο να καθοριστεί γενικά ο βαθμός αυτοματοποίησης που θα πρέπει να περιλαμβάνει ένα δεδομένο σύστημα. Πάντως, μερικές απαίτησεις είναι αποδεκτές γενικώς:

- Όλος ο εξοπλισμός πρέπει να διαθέτει χειροκίνητους ελεγκτές και μετρητές εντελώς ανεξάρτητους από τον προγραμματιζόμενο ελεγκτή (PLC), για χρήση τους μόνο κατά την αρχική εκκίνηση και τις διαδικασίες συντήρησης.
- Το σύστημα πρέπει να περιλαμβάνει τους απαραίτητους ηλεκτρονόμους και διατάξεις για την ανίχνευση δυσλειτουργιών σοβαρής φύσης και, στη συνέχεια, για τη λήψη δράσεων ώστε να επανέλθει η μονάδα ή ολόκληρη η εγκατάσταση σε μία ασφαλή απενεργοποιημένη κατάσταση.

- Πρέπει να συλλέγονται και να είναι άμεσα διαθέσιμα για τη λήψη αποφάσεων δεδομένα σχετικά με τη λειτουργία της εγκατάστασης, και να αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων για τη μετέπειτα αξιολόγηση της απόδοσης του σταθμού.
- Πρέπει να συμπεριληφθεί ένα ευφυές σύστημα ελέγχου που να επιτρέπει τη λειτουργία της πλήρους εγκατάστασης σε ένα μη επιτηρούμενο περιβάλλον.
- Διευκολύνει, παρότι δεν απαιτείται, η εξ αποστάσεως πρόσβαση στο σύστημα ελέγχου και η παράκαμψη των αυτόματων αποφάσεων, με την προϋπόθεση ότι διακόπτεται ασφαλώς η λειτουργία του σταθμού σε περίπτωση δυσλειτουργίας.
- Κανονικά, το σύστημα πρέπει να μπορεί να επικοινωνεί με αντίστοιχες μονάδες ανάντη και κατάντη με σκοπό τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών λειτουργίας.
- Η πρόβλεψη των βλαβών συνιστά βελτίωση του συστήματος ελέγχου. Με τη χρήση ενός έμπειρου συστήματος, τροφοδοτούμενου με τα βασικά λειτουργικά δεδομένα, είναι δυνατό να προβλεφθούν κάποιες βλάβες προτού συμβούν και να ληφθούν διορθωτικά μέτρα έτσι ώστε να μην συμβεί η βλάβη.

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κόστος της παραγωγής ενέργειας μειώνοντας τη συντήρηση και βελτιώνοντας την αξιοπιστία, λειτουργώντας παράλληλα πιο αποτελεσματικά τους στροβίλους και παράγοντας περισσότερα kW από το διαθέσιμο νερό.

1.4.7. Βοηθητικός ηλεκτρολογικός εξοπλισμός του σταθμού παραγωγής

Η παραγωγή βοηθητικών φορτίων, ο φωτισμός και ο επικουρικός μηχανολογικός εξοπλισμός του σταθμού είναι δυνατό να απαιτούν από 1 έως 3% του δυναμικού του, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό ισχύει για τα μικρο-υδροηλεκτρικά (κάτω από 500 kW). Εάν ήταν διαθέσιμες, δύο εναλλακτικές τροφοδοσίες με αυτόματη εναλλαγή θα εξασφάλιζαν την κάλυψη σε μια μη επιτηρούμενη μονάδα. Οι σταθμοί ισχύος πάνω από 500 kW, ειδικά εάν είναι τηλε-ελεγχόμενοι, απαιτούν ένα σύστημα ΣΡ που περιλαμβάνει ένα φορτιστή μπαταριών, τις μπαταρίες του σταθμού και ένα πίνακα ελέγχου της διανομής του ΣΡ. Η χωρητικότητα σε αμπερώρια πρέπει να είναι τέτοια ώστε, σε μία απώλεια του ρεύματος φόρτισης, να εξασφαλίζεται ο πλήρης έλεγχος της εγκατάστασης για όσο διάστημα απαιτείται μέχρι να ληφθούν διορθωτικά μέτρα.

1.5. ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ ΓΙΑ ΤΑ ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

1.5.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Τα ΜΥΗ είναι στις περισσότερες περιπτώσεις "συνεχούς ροής", δηλαδή το τυχόν φράγμα είναι αρκετά μικρό, συνήθως μόνο ένας υδροφράκτης, και αποθηκεύεται εν γένει ελάχιστο ή καθόλου νερό. Τα έργα πολιτικού μηχανικού εξυπηρετούν μόνο τη λειτουργία ρύθμισης της στάθμης του νερού στο στόμιο εισόδου του υδροηλεκτρικού σταθμού, οπότε οι εγκαταστάσεις συνεχούς ροής δεν έχουν τα ίδια είδη δυσμενών επιπτώσεων στο τοπικό περιβάλλον με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά.

Φυσικά υπάρχουν κάποια περιβαλλοντικά προβλήματα, ειδικότερα όπου το νερό αποσπάται σε κάποια απόσταση από το σημείο στο οποίο εκβάλλει πίσω στον ποταμό. Τότε, το τμήμα του παρακαμθέντος ποταμού μπορεί να αποξηρανθεί ή να είναι δυσάρεστο στην όψη, εκτός εάν επιτρέπεται μια επαρκής ροή αντιστάθμισης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι νέες εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικών σχεδιάζονται έτσι ώστε να αφήνεται μία ικανοποιητική ποσότητα νερού να παρακάμπτει τους στροβίλους, το οποίο δεν είναι δύσκολο εκτός από τις περιόδους χαμηλής ροής.

Ένα άλλο θέμα που απαιτεί προσοχή είναι η ανάγκη αποφυγής κάθε επίπτωσης στα ψάρια και την ποτάμια χλωρίδα και πανίδα, αλλά οι σύγχρονες εγκαταστάσεις ΜΥΗ σχεδιάζονται με το πρόβλημα αυτό κατά νου. Μερικά συστήματα μικρού ύψους πτώσης επιτρέπουν στα ψάρια να περνούν αλώβητα μέσα από το στρόβιλο, αλλά εφαρμόζονται και διάφορα είδη στοιχείων προστασίας (φυσικά προπετάσματα, αλλά και ηλεκτρικά ή υπερήχων). Προκειμένου να διασφαλιστεί η ακίνδυνη παράκαμψη του υδροηλεκτρικού σταθμού από τα αποδημητικά ψάρια, όπως είναι ο σολομός, εγκαθίστανται ιχθυόσκαλες (ένα σύνολο μικρών υδατοπτώσεων μέσα σε ένα κανάλι).

Εξάλλου, οι στρόβιλοι πρέπει να προστατεύονται από τις φερτές ύλες που συνήθως βρίσκονται στα ποτάμια, είτε είναι φυσικές (φύλλα, κλαδιά, ή/και κορμοί δέντρων) είτε τεχνιτές (καρότσια, πλαστικά σακιά ή άλλα απορρίμματα). Αυτό γίνεται με τη χρήση σητών, των οποίων ο καθαρισμός συνιστά σημαντικό ποσοστό του λειτουργικού κόστους, ειδικά στις περιπτώσεις μικρού ύψους πτώσης όπου δίερχονται μεγάλες παροχές. Ευλόγως, αν και κάπως άδικα, απαγορεύεται δια νόμου στους χειριστές των υδροηλεκτρικών σταθμών να ξαναρίχνουν στον ποταμό τα απορρίμματα που συλλέγονται από τις σήτες. Έτσι, η συλλογή και η αποκομιδή των απορριμάτων σε έναν ΜΥΗΣ μπορούν να συμβάλλουν στο σημαντικό καθαρισμό προς γενικό όφελος του ποταμού κατάντη, με αρκετή πάντως επιβάρυνση για το χειριστή του σταθμού.

Υπάρχουν και κάποια άλλα ζητήματα περιβαλλοντικής επίπτωσης που σχετίζονται με την οξυγόνωση του νερού (ή την έλλειψή της), τη διατάραξη ή αποσάθρωση της κοίτης του ποταμού αμέσως κατάντη των σωλήνων υδροηληψίας του στροβίλου, το θόρυβο του ηλεκτρικού εξοπλισμού, τα ηλεκτρικά καλώδια, τη γενική εμφάνιση μιας εγκατάστασης, κλπ. Εντούτοις, είναι δυνατό όλα αυτά τα προβλήματα να αμβλυνθούν με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών σχεδιασμού και το τελικό προϊόν αποτελεί μια μακροβιότατη, αξιόπιστη και εν δυνάμει οικονομική πηγή καθαρής ενέργειας.

1.5.2. Οικονομικά στοιχεία των ΜΥΗ

Στην τελευταία πρόταση χρησιμοποιήθηκε ορθώς η φράση "εν δυνάμει οικονομική". Παραδόξως, κάνοντας χρήση των σύγχρονων συμβάσεων για τη χρηματοοικονομική αξιολόγηση, οι περισσότερες νέες εγκαταστάσεις ΜΥΗ εμφανίζονται να παράγουν σχετικά ακριβή ηλεκτρική ενέργεια, καθώς το υψηλό κόστος των αρχικών κεφαλαίων αποσβένεται συνήθως μόνο μετά από 10 με 20 χρόνια (αν και τα συστήματα αυτά εν γένει διαρκούν, χωρίς σημαντικά κόστη αντικατάστασης, για 50 χρόνια ή παραπάνω). Αντίθετα, η λειτουργία ενός παλαιότερου υδροηλεκτρικού που έχει αποσβέσει την

αρχική επένδυση είναι ολιγοδάπτανη καθώς οι μόνες δαπάνες σχετίζονται με τις σποραδικές συντηρήσεις και αντικαταστάσεις.

Για παράδειγμα, το μοναδιαίο κόστος κυριότητας ενός τυπικού ΜΥΗΣ μικρού ύψους πτώσης στη Μεγάλη Βρετανία μπορεί να είναι €0,07/kWh κατά τη διάρκεια των πρώτων δέκα ετών ενόσω αποπληρώνεται η αρχική επένδυση, αλλά στη συνέχεια, λόγω των χαμηλών τρεχούμενων δαπανών, το κόστος αυτό μειώνεται περίπου στο ένα δέκατο της ανωτέρω τιμής, δηλ. σε €0,007/kWh. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η παραγωγή κατά την πρώτη δεκαετία θα είναι σαφώς πιο δαπανηρή από την αγοραζόμενη από το δίκτυο ισχύ, καίτοι αφότου αποπληρωθεί η αρχική επένδυση οι τιμές της υδροηλεκτρικής ισχύος καθίστανται ελκυστικότατες. Πάντως, η πλειοψηφία των υποψήφιων χρηστών αναζητούν τα βραχυπρόθεσμα οφέλη από την επένδυση και αποκαρδιώνονται από την αρχική δεκαετία (ή παραπάνω) του υψηλού κόστους.

Γενικά, οι λήψεις αποφάσεων για τη χρήση μιας τεχνολογίας εξαρτώνται πρωτίστως από τα οικονομικά στοιχεία, επομένως φυσιολογικά υφίσταται η ανάγκη ελάττωσης του κόστους των ΜΥΗ. Τα υδροηλεκτρικά με το ελάχιστο κόστος είναι τα μεγάλου ύψους πτώσης, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος πτώσης τόσο μικρότερη ποσότητα νερού απαιτείται για μία ορισμένη ποσότητα ισχύος, οπότε χρειάζεται μικρότερος και χαμηλότερου κόστους εξοπλισμός. Επομένως, στις ορεινές περιοχές ακόμη και τα μικρά ρυάκια, εάν χρησιμοποιηθούν σε μεγάλα ύψη πτώσης, μπορούν να αποδώσουν σημαντικά επίπεδα ισχύος σε ελκυστικά χαμηλά κόστη.

Εντούτοις, οι θέσεις μεγάλου ύψους πτώσης τείνουν να βρίσκονται σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού, όπου η ζήτηση για ηλεκτρισμό είναι μικρή και οι μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς προς τα κύρια πληθυσμιακά κέντρα μπορούν να αποδυναμώσουν τα πλεονεκτήματα χαμηλού κόστους των απόμακρων συστημάτων μεγάλου ύψους πτώσης. Εξάλλου, οι θέσεις με μεγάλο ύψος πτώσης είναι σχετικά σπάνιες, ενώ η πλειοψηφία των καλύτερων στην Ευρώπη και άλλες αναπτυγμένες περιοχές έχουν ήδη αξιοποιηθεί. Συνεπώς, το σημαντικότερο πεδίο για επέκταση της χρήσης των ΜΥΗ είναι οι θέσεις μικρού ύψους πτώσης, αν και φυσικά υπάρχουν ακόμα προς εκμετάλλευση πολλές καλές θέσεις μεγάλου και μέσου ύψους πτώσης.

Δυστυχώς, οι περισσότερες θέσεις μικρού ύψους πτώσης προς το παρόν είναι στην καλύτερη περίπτωση μόνο οριακά ελκυστικές από οικονομικής πλευράς έναντι της συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα, και γι' αυτό το λόγο παραμένουν ανεκμετάλλευτες πολλές πιθανές περιοχές. Για παράδειγμα, στη Μεγάλη Βρετανία υπάρχουν περίπου 20.000 θέσεις υδρόμυλων εν αχρηστίᾳ, όλες μικρού ύψους πτώσης, οι οποίες χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν αλλά μέχρι τώρα δεν έχουν επαναχρησιμοποιηθεί. Παρόμοιες περιπτώσεις παρουσιάζονται σε πολλές άλλες χώρες.

1.5.3. Εμπόδια στην ανάπτυξη των ΜΥΗ

Η ανάπτυξη των ΜΥΗ μειονεκτεί λόγω μιας γενικής αποτυχίας αποδοχής παρόμοιας υποστήριξης με αυτή που δόθηκε για την Ε&ΤΑ και την καινοτομική λειτουργία άλλων μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό ενδεχομένως συνέβη επειδή:

- Επικρατεί ευρέως η λανθασμένη αντίληψη ότι η τεχνολογία των ΜΥΗΣ είναι ώριμη και πλήρως αναπτυγμένη και ότι επαρκούν από μόνες τους οι δυνάμεις της αγοράς για την εξέλιξή της, οπότε δεν χρειάζεται σημαντική θεσμική παρότρυνση ή υποστήριξη. Για το λόγο αυτό, τα ΜΥΗΣ συνήθως δεν συμπεριλαμβάνονται (ή έχουν ένα ελάχιστο μερίδιο συμμετοχής) στα προγράμματα που έχουν σκοπό να βοηθήσουν άλλα σχήματα ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στην πραγματικότητα, τουλάχιστο βραχυπρόθεσμα και σε παγκόσμια κλίμακα, υπάρχει πιθανώς μεγαλύτερο δυναμικό για την ανάπτυξη και βελτίωση των χαμηλότερου κόστους ΜΥΗΣ απ' ό,τι για την ανάπτυξη οιασδήποτε άλλης μορφής καθαρής ενέργειας - ωστόσο χρειάζεται υποστήριξη.
- Η οικονομική ανάλυση των μικρών υδροηλεκτρικών έργων γενικά δεν παρέχει καμία ιδιαίτερη πίστωση για την εξαιρετικά μακροχρόνια ωφέλιμη διάρκεια ζωής και τα χαμηλά λειτουργικά κόστη των ΜΥΗΣ, και τα υψηλά αρχικά κόστη τείνουν να τα κάνουν να φαίνονται ως οικονομικά μη ελκυστικά σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα, εκτός εάν διατίθενται χαμηλά προεξοφλητικά επιτόκια.
- Υπήρξε μια τάση ανάπτυξης των ΜΥΗΣ με τον ίδιο ακριβώς τρόπο με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά, η οποία οδηγεί σε υψηλές λειτουργικές δαπάνες σχεδιασμού και ενίστε σε λανθασμένη βελτιστοποίηση των συστημάτων, ώστε να μεγιστοποιείται η απόληψη ενέργειας αντί του να βελτιστοποιείται η οικονομική αποδοτικότητα.
- Υπάρχουν πολλά άλλα θεσμικά εμπόδια, ως αποτέλεσμα κυρίως των δυσκολιών που ανακύπτουν στις περισσότερες χώρες για την απόκτηση άδειας απόληψης νερού από τους ποταμούς, αλλά και λόγω των αντιλήψεων ότι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορεί να επιτρέασουν δυσμενώς το φάρεμα, την κωπηλασία και άλλες ποτάμιες δραστηριότητες αναψυχής (αν και στην πράξη τα καλά σχεδιασμένα υδροηλεκτρικά συστήματα μπορούν να αποφύγουν την πρόκληση οποιασδήποτε σοβαρής περιβαλλοντικής επίπτωσης στα ψάρια ή αλλού).
- Τέλος, σημειώνεται ότι, μεγάλο μέρος της ευθύνης για την ανάπτυξη των ΜΥΗΣ εναπόκειται σε μικρομεσαίες επιχειρήσεις οι οποίες στερούνται των προσβάσεων και των μέσων πολιτικής πίεσης που διαθέτουν άλλες βιομηχανίες, όπως των φωτοβολταϊκών ή των αιολικών συστημάτων.

Τα υδροηλεκτρικά είχαν ένα μακροχρόνιο και σημαντικό παρελθόν και πρέπει να έχουν τουλάχιστον ένα εξίσου σημαντικό μέλλον, ειδικότερα εάν ληφθεί υπόψη η αυξανόμενη συνειδητοποίηση ότι απαιτείται η όσο το δυνατό ταχύτερη ανάπτυξη των μεγάλης κλίμακας μεθόδων παραγωγής καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να αποφευχθεί κάποια μορφή κλιματολογικής καταστροφής. Επίσης, προσφέρουν έναν από τους πιο ελπιδοφόρους ενεργειακούς πόρους για την μακροπρόθεσμη βιώσιμη ανάπτυξη πολλών από τις φτωχότερες χώρες του κόσμου.

2.1. Η ΙΣΧΥΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

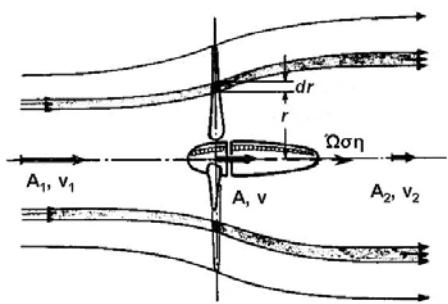
2.1.1. Σχηματισμός των ανέμων

Η αιολική ενέργεια είναι η κινητική ενέργεια του κινούμενου αέρα. Η ακανόνιστη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο προκαλεί τους ανέμους. Η θερμότητα που απορροφάται από το έδαφος ή το νερό μεταφέρεται στον αέρα, όπου προκαλεί διαφορές στη θερμοκρασία, την πυκνότητα και την πίεσή του. Με τη σειρά τους, οι διαφορές αυτές προκαλούν δυνάμεις που ωθούν τον αέρα ολόγυρα. Σύμφωνα με τη μηχανική των ρευστών, ο αέρας κινείται από τις υψηλής πίεσης προς τις χαμηλής πίεσης περιοχές του πλανήτη.

Σε παγκόσμια κλίμακα, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των τροπικών και των πόλων προκαλεί τους αληγείς ανέμους, οι οποίοι δρουν ως γιγαντιαίος εναλλάκτης θερμότητας εμποδίζοντας την περαιτέρω θέρμανση του ισημερινού και ψύξη των πόλων. Σε πολύ μικρότερη κλίμακα, οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του εδάφους και της θάλασσας και μεταξύ των βουνών και των κοιλάδων δημιουργούν συχνά ισχυρές αύρες. Η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζονται επίσης από άλλους παράγοντες, όπως είναι η περιστροφή της γης, τα τοπικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά και η τραχύτητα του εδάφους.

2.1.2. Πυκνότητα ισχύος του ανέμου

Ο άνεμος περιέχει ενέργεια η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό με τη χρήση των ανεμογεννητριών (Α/Γ). Η ποσότητα ηλεκτρισμού που παράγουν οι Α/Γ εξαρτάται από την ποσότητα της ενέργειας του διερχόμενου μέσω της επιφάνειας που σαρώνεται από τα πτερύγια της Α/Γ στη μονάδα του χρόνου ανέμου. Αυτή η ροή ενέργειας ονομάζεται πυκνότητα ισχύος του ανέμου. Ειδικότερα, οι δρομείς των Α/Γ ελαττώνουν την ταχύτητα του ανέμου από την αδιατάρακτη ταχύτητα v_1 πολύ πριν από το δρομέα στη μειωμένη ταχύτητα ροής του αέρα v_2 πίσω από αυτόν (σχ. 2.1).



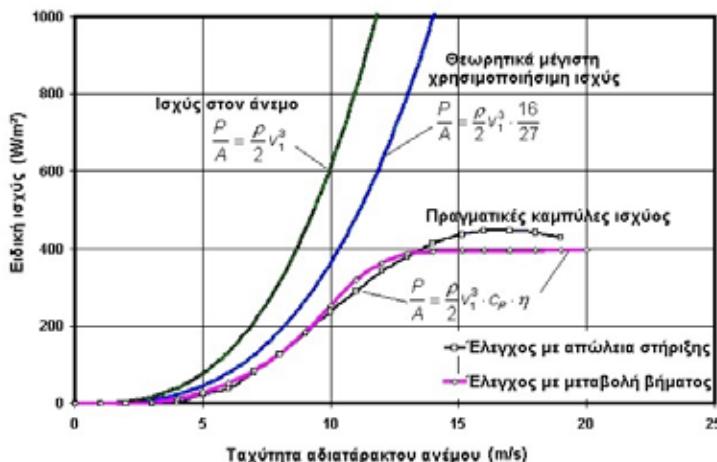
Σχήμα 2.1. Ροή του ανέμου μέσω μιας Α/Γ

Η διαφορά στην ταχύτητα του ανέμου είναι ένα μέτρο της αποσπώμενης από αυτόν κινητικής ενέργειας που περιστρέφει το δρομέα και την ηλεκτρική γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στο άλλο άκρο του συστήματος μετάδοσης της κίνησης. Η ισχύς που θεωρητικά εξάγεται από μια Α/Γ περιγράφεται από την εξίσωση:

$$P = c_P \cdot \eta \cdot \frac{\rho}{2} v_1^3 \cdot A \quad (2.1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), c_p ο συντελεστής ισχύος, η η μηχανική/ηλεκτρική αποδοτικότητα, και A το εμβαδό του δίσκου του δρομέα.

Σε ιδανικές συνθήκες, η μέγιστη τιμή του c_p (γνωστή ως "όριο Betz") είναι: $16/27 = 0,593$, δηλαδή μια A/Γ μπορεί θεωρητικά να αποσπάσει το 59,3% του ενεργειακού περιεχόμενου της ροής του αέρα. Υπό πραγματικές συνθήκες, όμως, ο συντελεστής ισχύος δεν υπερβαίνει την τιμή $c_p=0,5$, αφού περιλαμβάνει όλες τις αεροδυναμικές απώλειες της A/Γ . Πράγματι, στις περισσότερες τεχνικές δημοσιεύσεις η τιμή του c_p περιλαμβάνει όλες τις απώλειες και, στην ουσία, αποτελεί συντόμευση του $c_p \cdot \eta$. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται διαφορετικά περιεχόμενα και απολήψεις ισχύος ανάλογα με το συντελεστή ισχύος και τις αποδοτικότητες μιας A/Γ .



Σχήμα 2.2. Παραγόμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας του δίσκου του δρομέα συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

Όπως προκύπτει από την εξίσωση (2.1), ένα βασικό ζήτημα της πυκνότητας ισχύος του ανέμου αποτελεί η εξάρτησή της από τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι, εάν διπλασιαστεί η ταχύτητα, η ισχύς που περιέχεται στον άνεμο θα αυξηθεί κατά οκτώ φορές. Στην πράξη, όμως, η σχέση μεταξύ της παραγόμενης ισχύος μιας A/Γ και της ταχύτητας του ανέμου δεν είναι τόσο ρητή. Όπως φαίνεται από τις καμπύλες του σχήματος 2.2, η πραγματική καμπύλη ισχύος μιας A/Γ περιγράφεται συνήθως ως προς τέσσερις διακριτές περιοχές της ταχύτητας του ανέμου, οι οποίες αναλύονται στον πίνακα 2.1 (ενδεικτικές τιμές αυτές του σχήματος 2.2).

Πίνακας 2.1. Οι τέσσερις περιοχές της καπύλης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας

Περιοχή λειτουργίας	Περιγραφή λειτουργίας: Παραγόμενη ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου	Ενδεικτικό εύρος ταχύτητας του ανέμου (αναφορικά με το σχήμα 2.2)
Περιοχή 1	Οι ταχύτητες του ανέμου είναι πολύ μικρές για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.	0 έως ταχύτητα "εκκίνησης" - 0 έως 4 m/s.
Περιοχή 2	Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος αυξανόμενη με την ταχύτητα του ανέμου.	Ταχύτητα "εκκίνησης" έως "ονομαστική" ταχύτητα του ανέμου - 4 έως 13 m/s.
Περιοχή 3	Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με σταθερό ρυθμό (ονομαστική ισχύς). Η απόδοση των πτερυγίων της A/Γ μειώνεται σκόπιμα καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου.	"Ονομαστική" ταχύτητα ανέμου έως ταχύτητα "διακοπής" - 13 έως 20 m/s (ή περισσότερο).
Περιοχή 4	Δεν παράγεται ισχύς. Οι άνεμοι είναι πολύ	Ταχύτητα "διακοπής" έως τοχύ-

	δυναμικοί ώστε να δικαιολογείται η πρόσθετη αντοχή και δαπάνη για το μικρό αριθμό ωρών ανά έτος πέραν της ταχύτητας "διακοπής".	τητα "επιβίωσης" - 20 m/s (ή περισσότερο) έως την ονομαστική ταχύτητα επιβίωσης σε θυελλώδεις ανέμους.
--	---	--

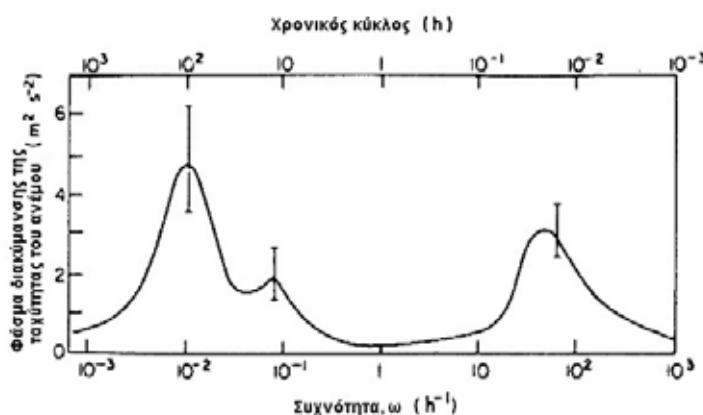
Από τις τέσσερις αυτές περιοχές, η A/Γ παράγει και παρέχει ισχύ μόνο στο εύρος των ταχυτήτων του ανέμου που καθορίζονται από τις περιοχές 2 και 3. Στην περιοχή 1 (κάτω από την ταχύτητα εκκίνησης) δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια στον άνεμο ώστε να παραχθεί εκμεταλλεύσιμη ισχύς. Στην περιοχή 4 (πέρα από την ταχύτητα διακοπής) η παραγόμενη ισχύς διατηρείται σταθερή ή αρχίζει να μειώνεται, ενώ σε πολύ δυνατούς ανέμους μπορεί και να διακόπτεται η λειτουργία της A/Γ για να αποτραπεί κάποια ζημία σε αυτή. Τότε, οι άνεμοι είναι πάρα πολύ δυναμικοί για να δικαιολογηθεί η πρόσθετη δομική αντοχή και το επιπλέον κόστος σχετικά με το μικρό αριθμό ωρών ανά έτος κατά τις οποίες παρατηρούνται ταχύτητες ανέμου εντός της περιοχής 4.

Η πυκνότητα ισχύος του ανέμου εξαρτάται επίσης από την πυκνότητα του αέρα. Αυτή σε μεγαλύτερα ύψη μειώνεται και, κατά συνέπεια, μειώνεται και η διαθέσιμη ισχύς. Η επίδραση αυτή μπορεί να επιφέρει μείωση στην παραγωγή ισχύος των A/Γ σε ψηλά βουνά κατά τουλάχιστον 40% έναντι της ισχύος που θα μπορούσε να παραχθεί με τις ίδιες ταχύτητες ανέμου στο επίπεδο της θάλασσας. Η πυκνότητα του αέρα εξαρτάται αντίστροφα από τη θερμοκρασία, οπότε οι πιο χαμηλές θερμοκρασίες ευνοούν τις μεγαλύτερες πυκνότητες του αέρα και τη μεγαλύτερη παραγωγή αιολικής ισχύος.

2.1.3. Μεταβλητότητα των ανέμων

2.1.3.1. Μεταβολή με το χρόνο

Για να προβλεφθεί επακριβώς η απόδοση των A/Γ, πρέπει να είναι γνωστή όχι μόνο η μέση ταχύτητα του ανέμου σε μια συγκεκριμένη θέση, αλλά και ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου με το χρόνο. Με το μετασχηματισμό μιας μακράς χρονικής σειράς ταχυτήτων του ανέμου στο πεδίο συχνότητας ως φάσμα ισχύος μπορεί να προσδιοριστεί η χρονική κλίμακα της ενέργειας του ανέμου (σχήμα 2.3). Είναι χρήσιμο να γίνεται διάκριση μεταξύ των μεταβολών σε τρεις χρονικές κλίμακες, ειδικότερα στη βραχεία (δευτερόλεπτα έως λεπτά), μέση (ώρες έως ημέρες) και μακρά (εβδομάδες έως έτη).



Σχήμα 2.3. Χαρακτηριστικό φάσμα διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου

Οι μεταβολές στη βραχεία χρονική κλίμακα συνήθως δεν είναι πολύ σημαντικές για την αξιολόγηση του αιολικού πόρου, εκτός εάν ο άνεμος είναι πολύ τυρβώδης ή αλλάζει συχνά διεύθυνση. Σε μεμονωμένες Α/Γ οι απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες διακυμάνσεις στην παραγόμενη ισχύ (και πρόσθετη φθορά στις συνιστώσες της Α/Γ, οπότε αυξημένες δαπάνες επισκευής και συντήρησης). Εντούτοις, σε αιολικές εγκαταστάσεις που περιέχουν πολλές Α/Γ, η επίδραση αυτή τείνει να εξαλειφθεί καθώς οι διαφορετικές μηχανές δέχονται ριπές ανέμου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Για το λόγο αυτό, κανονικά η μέση τιμή των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου που προορίζονται για την αξιολόγηση μιας πιθανής θέσης αιολικού έργου λαμβάνεται σε μία περίοδο 10 λεπτών έως μίας ώρας.

Οι μεταβολές που υφίστανται μεταξύ ωρών και ημερών είναι πολύ σημαντικές για την αξιολόγηση της αιολικής πηγής. Τα αρχεία των ταχυτήτων του ανέμου εμφανίζουν συνήθως μεγάλες διακυμάνσεις που διατηρούνται έως και αρκετές ημέρες, οι οποίες απεικονίζουν διερχόμενες θύελλες και καιρικά μέτωπα. Εξάλλου, σε πολλές θέσεις παρουσιάζεται μια ημερήσια διαμόρφωση της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, με τους μέγιστους ανέμους να εμφανίζονται συχνά το απόγευμα. Σημαντική επίδραση στις επιδόσεις των αιολικών εγκαταστάσεων έχουν επίσης οι μηνιαίες και εποχιακές μεταβολές. Ο βαθμός και ο χρόνος εμφάνισης των εποχιακών μεταβολών εξαρτώνται από την περιοχή.

Μπορεί να υφίστανται και αλλαγές στη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου από έτος σε έτος, οφειλόμενες σε περιφερειακά κλιματικά φαινόμενα. Για να εξαχθεί η εποχιακή συμπεριφορά του ανέμου απαιτείται τουλάχιστον ένα έτος μετρήσεων. Πέραν αυτού τα οφέλη από τις παρατεταμένες μετρήσεις φθίνουν σημαντικά, και ένα ή δύο έτη μετρήσεων συνήθως επαρκούν για την πρόβλεψη των μακροπρόθεσμων μέσων ταχυτήτων του ανέμου και της μεταβλητότητας της ταχύτητας με αποδεκτή ακρίβεια. Στον πίνακα 2.2 παρατίθενται οι χρονικές κλίμακες, η ομάδα που ενδιαφέρεται για κάθε μία από αυτές περισσότερο και οι αιτίες για το ενδιαφέρον αυτό.

Πίνακα 2.2. Χρονικές κλίμακες των αιολικών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής

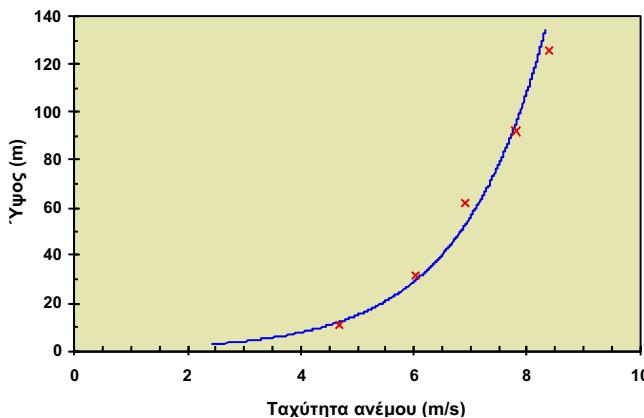
Χρονική κλίμακα	Ενδιαφερόμενοι	Αιτία ενδιαφέροντος
Δεκάδες δευτερόλεπτα ή λιγότερο	Σχεδιαστές ανεμογεννητριών	Δομική αντοχή σε φορτία προκαλούμενα από τον άνεμο, δομικές δονήσεις και καμπτική αστοχία συνιστωσών. Πιθανές διακυμάνσεις της τάσης και συχνότητας.
Δεκάδες πρώτα λεπτά έως ώρες	Χειριστές ηλεκτρικών δικτύων	Δυνατότητα παρακολούθησης ή αντιστάθμισης της μεταβαλλόμενης ισχύος που παρέχεται από το σύστημα. Πρόβλεψη του ανέμου.
Μία ημέρα	Χειριστές ηλεκτρικών δικτύων	Προβλεψιμότητα ενός ημερήσιου κύκλου και της παραγωγής σε μερικές καταστάσεις του ανέμου. Συσχέτιση με την ημερήσια κατανομή του φορτίου.
Από μήνα σε μήνα	Προγραμματιστές και χειριστές ηλεκτρικών δικτύων	Προβλεψιμότητα των εποχιακών μεταβολών και της παραγωγής στις περισσότερες καταστάσεις ανέμου. Συσχέτιση με την εποχιακή κατανομή του φορτίου.
Ένα έτος	Χειριστές ηλεκτρικών δικτύων και οικονομική κοινότητα	Προβλεψιμότητα της ετήσιας παραγωγής στα περισσότερα ανεμολογικά καθεστώτα. Δυνατότητα κάλυψης της οφειλής ενός μέσου ανεμολογικού έτους.

Από έτος σε έτος	Οικονομική κοινότητα	Διαχρονική μεταβλητότητα και δυνατότητα κάλυψης της οφειλής ενός έτους με υποδεέστερους ανέμους.
------------------	----------------------	--

2.1.3.2. Εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου από το ύψος

Η σχέση για την εξαγόμενη ισχύ από μια Α/Γ δείχνει ότι η ενεργειακή παραγωγή της Α/Γ εξαρτάται από την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στη θέση, την πυκνότητα του αέρα, το μέγεθος του δρομέα και τον τεχνικό σχεδιασμό. Ειδικά, το ύψος του πύργου επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή παραγωγή, λόγω της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος επάνω από το επίπεδο του εδάφους, φαινόμενο γνωστό ως διάτμηση του ανέμου. Ο βαθμός της διάτμησης του ανέμου εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες, την ατμοσφαιρική μίξη και την τραχύτητα του εδάφους.

Η τραχύτητα του εδάφους επιδρά στη διάτμηση του ανέμου καθορίζοντας το πόσο επιβραδύνεται ο άνεμος κοντά το έδαφος. Σε περιοχές με υψηλό βαθμό τραχύτητας, όπως τα δάση ή οι πόλεις, οι ταχύτητες του ανέμου κοντά στην επιφάνεια τείνουν να είναι μικρές και η διάτμηση του ανέμου μεγάλη, ενώ το αντίστροφο ισχύει σε περιοχές με μικρή τραχύτητα, όπως είναι οι επίπεδοι, ανοικτοί αγροί. Η διάτμηση του ανέμου μπορεί να ελαττωθεί πολύ ή να εξαλειφθεί όπου υπάρχει μια απότομη αλλαγή στο ύψος του πεδίου, όπως μια απότομη ακρογιαλιά ή κορυφογραμμή. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται μια πιθανή μορφή του οριακού στρώματος της ταχύτητας του ανέμου.



Σχήμα 2.4. Τυπική καθ' ύψος κατανομή της ταχύτητας του ανέμου

Μια συνηθισμένη προσέγγιση για την καθ' ύψος κατανομή της ταχύτητας του ανέμου είναι η λογαριθμική:

$$v = V_R \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \quad (2.2)$$

όπου v είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος h , V_R η ταχύτητα τριβής, και z_0 το μήκος τραχύτητας, το οποίο σχετίζεται με την κάλυψη βλάστησης της περιοχής (από διάφορες πηγές διατίθενται πίνακες για τις τιμές του μήκους της τραχύτητας). Μερικές φορές χρησιμοποιείται ένας εκθετικός νόμος για την περιγραφή της κατανομής του ανέμου:

$$v = V_R \left(\frac{h}{h_R} \right)^\alpha \quad (2.3)$$

όπου ν_R είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς h_R . Ο εκθέτης α εξαρτάται από τα στοιχεία τραχύτητας του εδάφους και συχνά λαμβάνει την τιμή 1/7.

Η ατμοσφαιρική μίξη συνήθως ακολουθεί έναν ημερήσιο κύκλο οδηγούμενο από την ηλιακή θέρμανση. Στο ύψος της πλήμνης μιας Α/Γ, ο κύκλος αυτός προκαλεί συχνά αύξηση της ταχύτητας του ανέμου την ημέρας και μείωσή της τη νύχτα. Εντούτοις, το εύρος της μεταβολής μεταξύ νύχτας και ημέρας εν γένει μειώνεται καθώς αυξάνεται το ύψος της πλήμνης. Σε ύψος περίπου 10m η ημερήσια μεταβολή μπορεί να είναι πολύ έντονη, αλλά καθώς αυτό αυξάνεται στα 50m αυτή εξασθενεί ή μπορεί ακόμη και να εξαφανιστεί. Η λογαριθμική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου [εξίσ. (2.2)] μπορεί και πάλι να εφαρμοσθεί στα χαμηλότερα 100m, με κατάλληλες διορθώσεις ώστε να ληφθούν υπόψη οι ανωτέρω μεταβολές στην ατμοσφαιρική ευστάθεια.

Για την εξοικονόμηση χρημάτων, οι μετρήσεις του ανέμου μερικές φορές λαμβάνονται σε χαμηλότερο ύψος από αυτό του πύργου της Α/Γ. Στην περίπτωση αυτή, είναι απαραίτητο να μετρηθεί η διάτμηση του ανέμου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της ημέρας και σε διαφορετικές εποχές προκειμένου να προβλεφθεί με ακρίβεια η απόδοση μιας εγκατάστασης αιολικής ενέργειας. Η διάτμηση μπορεί να μετρηθεί με την παρακολούθηση των ταχυτήτων του ανέμου σε δύο ή τρία ύψη ενός πύργου.

2.1.3.3. Χωρικές μεταβολές

Όπως έχει αποδειχθεί, τα χαρακτηριστικά του αιολικού πόρου μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ γειτονικών θέσεων. Για προφανείς λόγους, οι ισχυρότεροι άνεμοι συνήθως βρίσκονται σε καλά εκτεθειμένες τοποθεσίες. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως οι λόφοι και οι κορυφογραμμές, μπορούν να επιταγχύνουν τον άνεμο κατά το πέρασμά του από αυτά. Μια κορυφογραμμή είναι συνήθως ιδανική όταν είναι προσανατολισμένη κάθετα προς την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου και έχει μια μέση κλίση.

Πάντως, ενίστε μπορεί να παρατηρηθούν ισχυροί άνεμοι σε μη προφανείς θέσεις. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι ιδανικές για αιολικές μονάδες οι φαρδιές διαβάσεις αφού διοχετεύουν τους ανέμους που περνούν επάνω από μια οροσειρά, και καθώς μπορεί να δημιουργούνται αύρες από τον ψυχρό αέρα που καταβυθίζεται από τις κορυφές των βουνών στις κοιλάδες. Για την πρόβλεψη των ταχυτήτων του ανέμου σε σύνθετα εδάφη, επάνω από κτήρια και άλλα εμπόδια, και την ορογραφία της θέσης έχει αναπτυχθεί πληθώρα εργαλείων, μεταξύ των οποίων και περίπλοκα υπολογιστικά μοντέλα. Πάντως, δεν υπάρχει υποκατάστατο των άμεσων μετρήσεων.

2.1.4. Παγκόσμιο αιολικό δυναμικό

Οι παγκόσμιοι άνεμοι αποτελούν έναν καλό ενεργειακό πόρο και κατανέμονται εξίσου σε μεγάλες περιοχές του πλανήτη. Από εκτιμήσεις για τον πόρο προκύπτει ότι, η παρούσα ζήτηση ενέργειας παγκοσμίως ισοδυναμεί με το 1% περίπου της συνολικής ενέργειας των παγκόσμιων ανέμων. Προκειμένου να αξιολογηθεί αυτός ο πόρος είναι απαραίτητο να παρέχεται κάποια εκτίμηση για την ποσότητά του που είναι προσιτή,

λαμβάνοντας υπόψη την τεχνολογία και τους περιορισμούς στη χρήση των γαιών σε κάθε περιοχή.

Το 1981 ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (WMO) διεξήγαγε τη μελέτη του παγκόσμιου αιολικού πόρου, μια προκαταρκτική εκτίμηση του οποίου αποδόθηκε ως ένας χάρτης αιολικής ενέργειας σε Watts/m^2 στα 10m επάνω από το έδαφος, όπου χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από το διεθνές δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών. Όμως, οι σταθμοί αυτοί δεν είχαν σχεδιαστεί για αξιολόγηση της αιολικής ενέργειας, οπότε τα στοιχεία τους συμπληρώθηκαν με πληροφορίες για τα ανώτερα στρώματα του αέρα και την τοπογραφία προκειμένου να βοηθηθεί η προεκβολή των δεδομένων.

Ο χάρτης δίνει μια γενική εικόνα του παγκόσμιου αιολικού πόρου. Δεν σημειώνονται όλες οι περιοχές με δυναμικό υψηλής ταχύτητας ανέμου, μερικές επειδή καλύπτουν μια πολύ μικρή έκταση, κάποιες επειδή υπάρχουν λίγα δεδομένα γι' αυτές, και άλλες λόγω τοπικών επιδράσεων που δεν έχουν ληφθεί πλήρως υπόψη. Επίσης, στην παρουσίαση των δεδομένων δεν γίνεται καμία θεώρηση των όποιων περιορισμών υφίστανται στη χρήση των γαιών και έτσι δεν παρέχεται εκτίμηση για την προσιτότητα του πόρου. Πολλές χώρες έχουν αναλύσει τον δικό τους αιολικό πόρο, όπως οι ΗΠΑ όπου έχουν διεξαχθεί μελέτες για ολόκληρη τη χώρα και για επιλεγμένες περιοχές.

Ο ευρωπαϊκός αιολικός πόρος έχει εκτιμηθεί στον Ευρωπαϊκό Αιολικό Άτλαντα. Για το σύνολο της Ευρώπης έχουν παραχθεί χάρτες που παρουσιάζουν την ταχύτητα (σε m/s) και την ισχύ του ανέμου (σε Watts/m^2) στα 50m επάνω από το έδαφος και για διάφορους τύπους ανάγλυφου. Τα αρχικά ανεμολογικά δεδομένα ελήφθησαν από κατάλληλους μετεωρολογικούς σταθμούς με μακροχρόνιες καταγραφές. Στη συνέχεια αυτά διορθώθηκαν ώστε να ληφθεί υπόψη η τοπογραφία, το ανάγλυφο του εδάφους και κάθε προστατευμένη από τον αέρα θέση, πριν από την προεκβολή τους σε άλλες περιοχές.

Η διασπορά των δεδομένων υποδηλώνει και πάλι ότι δεν διευκρινίζονται μερικές πεπερασμένες περιοχές με υψηλή ταχύτητα ανέμου. Επίσης, δεν διευκρινίζονται και κάποιες περιοχές χαμηλής ταχύτητας ανέμου, π.χ. προστατευμένες κοιλάδες σε μια περιοχή με υψηλές ταχύτητες ανέμου. Τέλος, δεν γίνεται κάποια κρίση για το προσιτό δυναμικό, και για το λόγο αυτό πολλές ευρωπαϊκές χώρες έχουν διεξάγει τις δικές τους εθνικές ή περιφερειακές έρευνες. Επίσης, πολλές άλλες χώρες αξιολογούν τον αιολικό τους πόρο τελευταία, ειδικά η Ινδία και η Κίνα, οι οποίες έχουν ήδη αναλάβει δεσμεύσεις σχετικά με τη χρήση της αιολικής ενέργειας.

2.1.5. Ιστορική αναδρομή και τρέχουσα ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας

Η δομή των διασυνδεδεμένων αιολικών συστημάτων έχει εξελιχθεί από το πρώιμο Δανέζικο μοντέλο της δεκαετίας του '70 σε αυτό των μεγάλων Καλιφορνέζικων και των νεώτερων ευρωπαϊκών εγκαταστάσεων αιολικών πάρκων. Καθώς τα αιολικά πάρκα της Καλιφόρνιας σχεδιάστηκαν και εγκαταστάθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '80, οι εγκαταστάσεις στη Δανία τη δεκαετία του '70 και αργότερα αποτελούνταν εν γένει από μικρές συστάδες μηχανών διασκορπισμένες γεωγραφικά σε ένα μεγάλο

μέρος της χώρας. Τυπικά, μία διασυνδεδεμένη αιολική εγκατάσταση αποτελούνταν από το πολύ τρείς ή περισσότερες Α/Γ.

Οι ντόπιοι αγρότες, κατασκευαστές και άλλοι πολίτες δημιούργησαν συνεταιρισμούς για να έχουν στην κατοχή τους και να λειτουργούν τις ανεμογεννήτριες, και για να χρησιμοποιούν και να πωλούν την παραγόμενη από τις μηχανές ισχύ. Αντίθετα, το μοντέλο της Καλιφόρνιας αφορούσε το σχηματισμό αιολικών πάρκων, δηλαδή μιας εμπορικής συνάθροισης μεγάλου αριθμού μηχανών σε στενή γεωγραφική εγγύτητα. Οι πρόσφατες ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις ακολούθησαν το μοντέλο της Καλιφόρνιας, παρότι υπάρχουν διαφορές στα μεγέθη των εγκαταστάσεων (που οφείλονται κυρίως σε διαφορετικούς περιορισμούς στη χρήση των γαιών).

Το 1999 εγκαταστάθηκε παγκοσμίως το ποσό ρεκόρ των 3.900 MW νέου δυναμικού παραγωγής αιολικής ενέργειας, ενώ περίπου 2.500 MW τέθηκαν σε λειτουργία το 1998. Το 2000 εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως 3.800 MW νέου αιολικού δυναμικού, αντιπροσωπεύοντας ετήσιες πωλήσεις 4 δισεκατομμυρίων δολαρίων και ωθώντας τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ στα 17.300 MW περίπου, αρκετά για να παράγουν κάπου 37 δισεκατομμύρια kWh ηλεκτρικής ενέργειας κατ' έτος. Η αύξηση αυτού του έτους αφορούσε κυρίως την Ευρώπη, αφού σ' αυτήν εγκαταστάθηκαν περίπου 3.500 MW από το νέο δυναμικό, από τα οποία τα μισά (1.668 MW) στη Γερμανία.

Από το 1993, η αγορά νέων Α/Γ για παραγωγή καθαρής ισχύος από τον άνεμο στην Ευρώπη αναπτύσσεται με ρυθμό άνω του 40% ετησίως. Αυτό ώθησε την Ευρωπαϊκή Εταιρεία Αιολικής Ενέργειας (EWEA) να αυξήσει το στόχο της για την περιοχή κατά 50%, από 40 GW σε 60 GW εγκατεστημένης ισχύος το 2010, από τα οποία τα 5 GW θα είναι υπεράκτια. Για το 2020, ο νέος στόχος που έχει τεθεί από την EWEA είναι για 150 GW, που θα παρέχουν ηλεκτρισμό σε 75 εκατομ. ανθρώπους. Περισσότεροι από 20.000 Ευρωπαίοι απασχολούνται στη βιομηχανία αιολικών, της οποίας το μερίδιο στις συνολικές πωλήσεις παγκοσμίως το 1999 ήταν πάνω από 90%.

Στην κατασκευή και εγκατάσταση των Α/Γ απασχολούνται, κατά μέσο όρο, έξι άτομα ετησίως για κάθε MW νεοκατασκευαζόμενων Α/Γ. Για τη λειτουργία και τη συντήρηση απασχολούνται από 100 έως 450 άτομα για κάθε TWh παραγόμενου ηλεκτρισμού ετησίως, όπου ο αριθμός ποικίλλει ανάλογα με την ηλικία και τον τύπο των Α/Γ. Σε κάθε θέση εργασίας στην κατασκευή, εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση των Α/Γ αναλογεί τουλάχιστον άλλη μία σε σχετικούς τομείς της βιομηχανίας, δηλαδή για συμβουλευτικές και νομικές υπηρεσίες, προγραμματισμό, έρευνα, χρηματοδότηση, πωλήσεις, μάρκετινγκ, δημοσιότητα και εκπαίδευση.

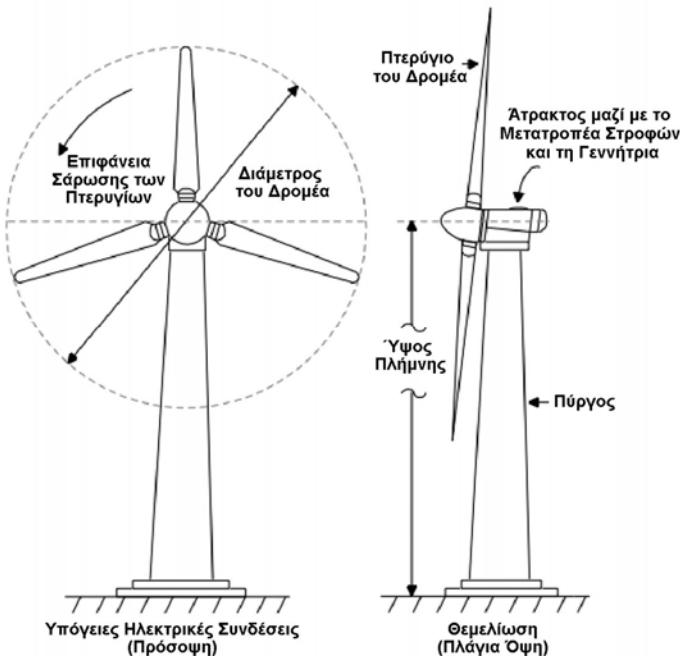
2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

2.2.1. Γενικά

Στο σχήμα 2.5 απεικονίζεται ένα γενικό σύστημα Α/Γ Οριζόντιου Άξονα (ΑΓΟΑ). Μία εξίσου εφικτή εναλλακτική σχεδίαση είναι η Α/Γ Κάθετου Άξονα (ΑΓΚΑ), που δεν είναι

όμως τόσο συνήθης όσο η ΑΓΟΑ στα πρόσφατα έργα. Αν και δεν υφίσταται κάποια γενική μέθοδος για την ταξινόμηση των υποσυστημάτων των Α/Γ, οι συνιστώσες του σχήματος 2.5 θα μπορούσαν να διαιρεθούν σε τέσσερα (4) βασικά υποσυστήματα:

1. Τον δρομέα, συνήθως αποτελούμενο από δύο ή τρία πτερύγια, μια πλήμνη μέσω της οποίας συνδέονται τα πτερύγια με τον χαμηλής ταχύτητας κινητήριο άξονα και, μερικές φορές, υδραυλικά ή μηχανικά οδηγούμενα συστήματα συνδέσμων για τη μεταβολή του βήματος του συνόλου ή μέρους των πτερυγίων.
2. Την άτρακτο, η οποία γενικά περιλαμβάνει ένα μετατροπέα στροφών και μία γεννήτρια, άξονες και συνδέσμους, ένα κάλυμμα για ολόκληρη την άτρακτο, και συχνά ένα μηχανικό δισκόφρενο και ένα σύστημα εκτροπής.
3. Τον πύργο και τη θεμελίωση που στηρίζει το δρομέα και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης (άτρακτος).
4. Τους ηλεκτρικούς ελεγκτές και καλωδιώσεις, καθώς και τον εξοπλισμό εποπτείας και ελέγχου.



Σχήμα 2.5. Σχηματική αναπαράσταση μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Η ακολουθία των συμβάντων κατά την παραγωγή και μεταφορά της αιολικής ισχύος από μια ανεμογεννήτρια μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- α. Καθώς ο άνεμος αλληλεπιδρά με το δρομέα της Α/Γ παράγεται μια ροπή.
- β. Η σχετικά χαμηλή συχνότητα περιστροφής του δρομέα αυξάνεται μέσω ενός μετατροπέα στροφών, του οποίου ο άξονας εξόδου περιστρέφει μια γεννήτρια.
- γ. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη γεννήτρια διέρχεται μέσω του συστήματος ελέγχου και των αποζευκτών της Α/Γ και ενισχύεται σε μια μέση τάση από το μετασχηματιστή.
- δ. Το σύστημα καλωδίωσης της θέσης μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στο μετασχηματιστή της θέσης μέσω του συστήματος ελέγχου και αποζευκτών της θέσης, ο οποίος ενισχύει την τάση στην τιμή του δικτύου.

ε. Το δίκτυο ισχύος μεταβιβάζει τον ηλεκτρισμό στην περιοχή τελικής χρήσης του.
στ. Υποσταθμοί μετασχηματιστών μειώνουν την τάση στις οικιακές ή βιομηχανικές
τιμές και τα τοπικά δίκτυα χαμηλής τάσης μεταβιβάζουν την ηλεκτρική ενέργεια
στις οικίες, τα γραφεία και τα εργοστάσια.

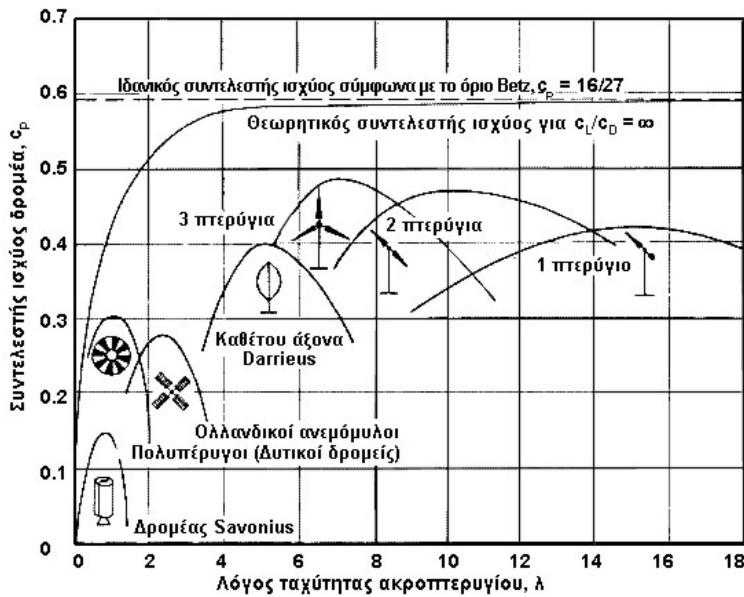
2.2.2. Δρομέας

Στην αιολική βιομηχανία έχει αναπτυχθεί μία τεχνολογία πτερυγίων δρομέα αρκετά
ιδιάζουσα που έχει συντελέσει στην εμπορική παραγωγή σήμερα μεγάλων δρομέων
με διάμετρο μέχρι 66m για A/G της τάξης του MW, ενώ έχουν δοκιμαστεί δρομείς με
διαμέτρους μέχρι 100m (Growian, MOD5B). Η σχεδίαση των πτερυγίων του δρομέα
έχει προοδεύσει με τις γνώσεις από την πτερυγική τεχνολογία, και χρησιμοποιεί τις
αεροδυναμικές ανωστικές δυνάμεις που υφίσταται μια αεροτομή σ' ένα κινούμενο
ρεύμα αέρα. Την αεροδυναμική απόδοση του πτερυγίου επηρεάζουν τόσο η μορφή
του πτερυγίου όσο και η γωνία του σε σχέση με τη σχετική κατεύθυνση του ανέμου.

Το σύστημα του δρομέα μπορεί να τοποθετηθεί είτε "ανάτη" του πύργου και της
ατράκτου, δεχόμενο έτσι τον άνεμο αδιατάρακτο από τον πύργο, είτε "κατάντη" του
πύργου, το οποίο επιτρέπει την αυτο-ευθυγράμμιση του δρομέα με την κατεύθυνση
του ανέμου (εκτροπή), αλλά προκαλεί την παρέκκλιση του ανέμου από τον πύργο και
τη μετατροπή του σε τυρβώδη πριν φθάσει στο δρομέα (σκίαση πύργου). Οι A/G
μπορεί να έχουν διάφορους αριθμούς πτερυγίων δρομέα. Ο κανόνας είναι ότι όσο
μικρότερος είναι ο αριθμός των πτερυγίων τόσο ταχύτερα περιστρέφεται ο δρομέας.
Το μέτρο γι' αυτό είναι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου λ, που ορίζεται ως ο λόγος
της ταχύτητας στο ακροπτερύγιο προς την ταχύτητα του ανέμου.

Οι σύγχρονες A/G σχεδιάζονται για την παραγωγή ηλεκτρισμού και οι δρομείς τους
οδηγούν ηλεκτρογεννήτριες με κατά κανόνα υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Έτσι, οι
δρομείς των A/G πρέπει να περιστρέφονται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερες ταχύτητες
προκειμένου να μειωθούν οι μάζες των γραναζιών μετάδοσης της κίνησης και των
γεννητριών. Συνεπώς, ο αριθμός των πτερυγίων του δρομέα πρέπει να είναι μικρός,
εν γένει όχι πάνω από τρία. Μόνο οι γνωστοί ανεμόμυλοι δυτικού τύπου διαθέτουν
12 έως 20 πτερύγια ή ακόμα περισσότερα, αλλά λόγω της υψηλής μηχανικής τους
ροπής εφαρμόζονται στις άμεσα οδηγούμενες εμβολοφόρες αντλίες νερού.

Κανονικά, οι 3-πτέρυγοι δρομείς έχουν λόγους ταχύτητας ακροπτερυγίου σχεδιασμού
της τάξης του 6 έως 8, οι 2-πτέρυγοι δρομείς 10 έως 12, και οι 1-πτέρυγοι δρομείς
ακόμα μεγαλύτερες τιμές (σχήμα 2.6). Από την άλλη, οι εμπορικές A/G με υψηλές
ταχύτητες ακροπτερυγίου έχουν το μειονέκτημα των υψηλών εκπομπών θορύβου
από το δρομέα. Σε γενικές γραμμές, το επίπεδο έντασης του θορύβου του δρομέα
αυξάνεται με την έκτη δύναμη της ταχύτητας ακροπτερυγίου, και αυτός είναι ο λόγος
για τον οποίο οι σχεδιαστές εμπορικών A/G δεν υπερβαίνουν τα 70 m/s.

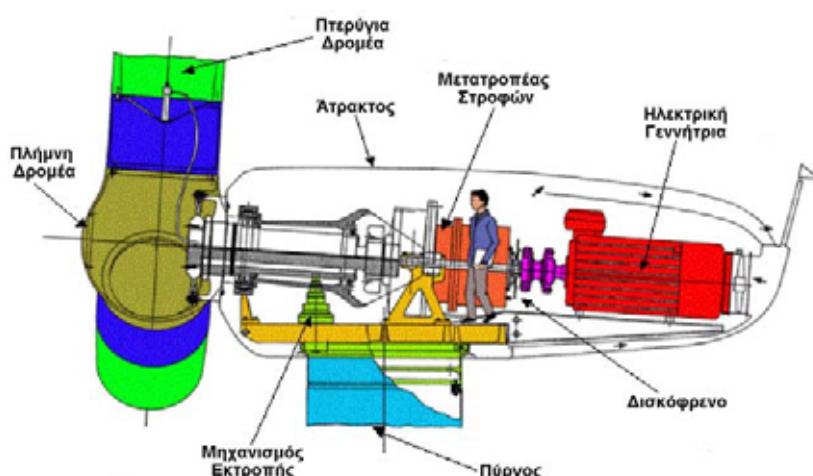


Σχήμα 2.6. Τυπικά διαγράμματα $c_p-\lambda$ για μία πληθώρα διατάξεων/πτερυγίων Α/Γ

Η διάρκεια ζωής ενός δρομέα συσχετίζεται με τα μεταβαλλόμενα φορτία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες που αντιμετωπίζει κατά τη λειτουργία του. Επομένως, οι εγγενείς μηχανικές ιδιότητες και ο σχεδιασμός του δρομέα επηρεάζουν την ωφέλιμη διάρκεια ζωής του. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των σύγχρονων πτερυγίων ανεμογεννητριών μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. ξύλο (συμπεριλαμβανομένων των συνθετικών από αντικολλητά φύλλα ξύλου),
2. συνδυασμοί συνθετικών (συνήθως πολυεστέρας ή εποξική μήτρα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού), και
3. μέταλλα (κυρίως κράματα χάλυβα ή αλουμινίου).

2.2.3. Άτρακτος



Σχήμα 2.7. Σχηματική παράσταση της ατράκτου μιας Α/Γ

Η άτρακτος στεγάζει το σύστημα μετάδοσης της κίνησης και την ηλεκτρογεννήτρια της Α/Γ, μαζί με το μηχανισμό εκτροπής και όλο τον εξοπλισμό ελέγχου. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζονται σχηματικά οι μηχανισμοί της ατράκτου μιας μέσου/μεγάλου

μεγέθους Α/Γ. Το προσωπικό συντήρησης μπορεί να εισέλθει στην áτρακτο από τον πύργο της ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του εξοπλισμού που εγκλείεται στην áτρακτο μιας τυπικής Α/Γ.

- **Κύριος áξονας:** Ο κύριος áξονας, προκειμένου να μεταφέρει την αρχική ροπή από το σύστημα του δρομέα στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, στηρίζεται συνήθως σε áδρανα. Λόγω των υψηλών φορτίων ροπής, ο κύριος áξονας είναι ευπαθής σε αστοχία κόπωσης. Κατά συνέπεια, γι' αυτό το εξάρτημα είναι ενδεδειγμένες οι αποτελεσματικές προ-συντήρησης, μη-καταστρεπτικές δοκιμές. Σε μια σύγχρονη Α/Γ 600 kW ο δρομέας περιστρέφεται σχετικά αργά, με περίπου 19 έως 30 περιστροφές ανά λεπτό (RPM).
- **Δισκόφρενο:** Το δισκόφρενο μπορεί να εγκαθίσταται στον κύριο áξονα πριν από το μετατροπέα στροφών ή μετά από αυτόν στον áξονα υψηλής ταχύτητας. Στη δεύτερη περίπτωση, απαιτείται ένα πιο μικρό (και φθηνότερο) σύστημα πέδης προκειμένου να παρέχεται η απαραίτητη ροπή για την επιβράδυνση του δρομέα. Εντούτοις, αυτή η διάταξη δεν παρέχει άμεσο έλεγχο του δρομέα και, σε περίπτωση αστοχίας του μετατροπέα στροφών, χάνεται η δυνατότητα ελέγχου της πέδησης του δρομέα.
- **Μετάδοση της κίνησης:** Η ηλεκτρική παραγωγή των Α/Γ πρέπει να είναι συμβατή με τη συχνότητα (50-60 Hz) και την τάση του τοπικού δικτύου διανομής. Η συχνότητα του δρομέα είναι συνήθως περίπου 0,5 Hz, οπότε η αύξηση της συχνότητας προκύπτει από το συνδυασμό ενός μετατροπέα στροφών και μιας πολυ-πολικής γεννήτριας. Οι περισσότερες εμπορικές γεννήτριες έχουν 4 ή 6 ζεύγη πόλων, οπότε απαιτείται σχέση μετάδοσης περίπου 25:1. Η απλούστερη μέθοδος οδήγησης της γεννήτριας είναι η απευθείας από το δρομέα χωρίς μετατροπέα στροφών, ενώ όταν εξαλείφονται οι απώλειες ισχύος του μετατροπέα στροφών βελτιστοποιείται και η απόδοση της ενεργειακής μετατροπής.
Τότε όμως απαιτούνται ειδικές γεννήτριες χαμηλής ταχύτητας, με μεγάλες διαμέτρους ρότορα/στάτορα και περίπου 50 πόλους, για να επιτευχθεί η κατάλληλη συχνότητα (τέτοιος εξοπλισμός διατίθεται στο εμπόριο από μικρό μόνο αριθμό κατασκευαστών). Οι μικρού μεγέθους Α/Γ (50-150 kW) διαθέτουν μια ή δύο βαθμίδες μετάδοσης παράλληλου áξονα (με ελικοειδή γρανάζια για ελαχιστοποίηση του θορύβου και των απώλειών). Οι μεγαλύτερες εμπορικές Α/Γ (150-750 kW) συχνά διαθέτουν επικυκλικά ή πλανητικά συστήματα μετάδοσης της κίνησης, όπου ο áξονας της εξόδου είναι στην ίδια ευθεία με τον κύριο áξονα (έτσι μειώνονται οι τάσεις και οι απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης), με αντίστοιχη μείωση του μεγέθους.
- **Ηλεκτρογεννήτρια:** Αυτή μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του áξονα εισόδου σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι γεννήτριες των Α/Γ είναι λίγο ασυνήθιστες, σε σχέση με άλλες μονάδες ηλεκτρογεννητριών που συνήθως συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο. Ένας λόγος γι' αυτό είναι ότι, αυτές πρέπει να είναι συμβατές με τις διατάξεις του δρομέα και του μετατροπέα στροφών στην είσοδο, και στην έξοδο

με τη διανομή της εταιρείας ηλεκτρισμού (εάν συνδέονται με το δίκτυο) ή με τις τοπικές απαιτήσεις ισχύος (εάν αποτελούν μέρος ενός αυτόνομου συστήματος). Εάν μια διασυνδεδεμένη Α/Γ είναι εξοπλισμένη με μια ηλεκτρογεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος (ΕΡ), αυτή πρέπει να παράγει ισχύ σε φάση με την τροφοδοσία του δικτύου της εταιρείας ηλεκτρισμού.

Πολλές διασυνδεδεμένες Α/Γ διαθέτουν επαγωγικές γεννήτριες ΕΡ διεγειρόμενες από πυκνωτές, των οποίων το ρεύμα μαγνήτισης προέρχεται από το δίκτυο, και έτσι εξασφαλίζεται ότι η συχνότητα εξόδου της γεννήτριας ταυτίζεται με αυτή της εταιρείας ηλεκτρισμού, ενώ ρυθμίζεται και η ταχύτητα του δρομέα εντός κάποιων ορίων. Οι σύγχρονες γεννήτριες παράγουν ηλεκτρισμό σε συγχρονισμό με τη συχνότητα του περιστρεφόμενου άξονά τους, οπότε η ταχύτητα του δρομέα πρέπει να συμπίπτει ακριβώς με τη συχνότητα εφοδιασμού της εταιρείας ηλεκτρισμού. Οι πολύ μικρές Α/Γ μπορεί να έχουν γεννήτριες που παράγουν συνεχές ρεύμα, το οποίο χρησιμοποιείται έπειτα για την τροφοδοσία φορτίων χαμηλής τάσης (συνήθως 12 Volt), τη φόρτιση συστοιχιών μπαταριών ή, μέσω ενός αντιστροφέα, για την παροχή ΕΡ υψηλότερης τάσης σ' ένα ηλεκτρικό δίκτυο.

- **Σύστημα εκτροπής:** Προκειμένου να εξαχθεί όσο το δυνατόν περισσότερη από την κινητική ενέργεια του ανέμου, ο άξονας του δρομέα πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένος με την κατεύθυνση του αέρα. Οι μικρές ανάντη Α/Γ (μέχρι 25 kW) χρησιμοποιούν συνήθως ουραίους ανεμοδείκτες για να παραμένει η μηχανή ευθυγραμμισμένη με τον άνεμο. Εντούτοις, οι μεγαλύτερες Α/Γ με ανάντη δρομείς απαιτούν ενεργό έλεγχο της εκτροπής για την ευθυγράμμιση της μηχανής με τον άνεμο. Όταν συμβεί μια αλλαγή στην κατεύθυνση του ανέμου αισθητήρες ενεργοποιούν το μηχανισμό ελέγχου της εκτροπής, ο οποίος περιστρέφει την άτρακτο και το δρομέα έως ότου ευθυγραμμιστεί κατάλληλα η Α/Γ. Οι κατάντη μηχανές όλων των μεγεθών μπορεί να διαθέτουν παθητικό έλεγχο εκτροπής, δηλαδή μπορούν να ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του ανέμου από μόνες τους χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ουραίου ανεμοδείκτη ή οδηγού εκτροπής.

2.2.4. Πύργος

Ο πύργος μιας Α/Γ υποστηρίζει το σύστημα της ατράκτου (που μπορεί να ζυγίζει αρκετούς τόνους) και ανυψώνει το δρομέα σε ένα ύψος όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι σημαντικά μεγαλύτερη και λιγότερο διαταραγμένη απ' ό,τι στο επίπεδο του εδάφους, λόγω της επίδρασης της διάτμησης του ανέμου. Σε περιοχές με μεγάλη τραχύτητα εδάφους η ύπαρξη ενός ψηλού πύργου αποτελεί πλεονέκτημα, καθώς τα πτερύγια των δρομέων στις Α/Γ με σχετικά χαμηλούς πύργους υπόκεινται σε πολύ διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (και διαφορετική κάμψη) όταν φέρονται στην ανώτερη και κατώτερη θέση τους, το οποίο αυξάνει τα φορτία κόπωσης στην Α/Γ. Συχνά οι κατασκευαστές παραδίδουν τις Α/Γ με ύψος πύργου ίσο με τη διάμετρο του δρομέα.

Συνεπώς, η δομή του πύργου πρέπει να είναι ανθεκτική στα σημαντικά φορτία που οφείλονται στη βαρύτητα, την περιστροφή και την ώση του ανέμου. Επιπλέον, ο πύργος πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει στις περιβαλλοντικές επιδράσεις σε

ολόκληρη τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού της Α/Γ, η οποία μπορεί να είναι 20 έτη ή περισσότερο. Η αξία του πύργου μιας Α/Γ αποτελεί εν γένει περίπου το 20% της συνολικής τιμής. Για έναν πύργο ύψους περίπου 50m, το πρόσθετο κόστος για άλλα 10m πύργου είναι περίπου €17.500. Επομένως, είναι αρκετά σημαντικό για το τελικό κόστος της ενέργειας να κατασκευάζονται οι πύργοι όσο το δυνατόν πιο βέλτιστα. Οι συνήθεις τύποι των πύργων είναι οι εξής:

- **Σταθεροί σωληνωτοί πύργοι:** Αυτοί κατασκευάζονται από κωνικά λεπτυνόμενο χάλυβα ή σκυρόδεμα. Οι περισσότερες μεγάλες Α/Γ τελευταία παραδίδονται με σωληνωτούς χαλύβδινους πύργους, οι οποίοι κατασκευάζονται σε τμήματα των 20 έως 30m με φλάντζες στα άκρα και συναρμολογούνται επιτόπου. Οι πύργοι είναι κωνικοί (η διάμετρός τους αυξάνεται προς τη βάση – σχήμα 2.8 αριστερά) ώστε να αυξάνεται η αντοχή τους και, συγχρόνως, να εξοικονομείται υλικό. Οι πύργοι από σκυρόδεμα με πλέγμα είναι γενικά λιγότερο εύκαμπτοι από τους χαλύβδινους, παρέχοντας έτσι βελτιωμένες ιδιότητες απόσβεσης (δεν διαβιβάζουν ούτε ενισχύουν τις προκαλούμενες από την περιστροφή ταλαντώσεις).
- **Σταθεροί δικτυωτοί πύργοι:** Οι πύργοι αυτοί κατασκευάζονται από συγκολλημένες χαλύβδινες κατατομές. Η ανέγερση τους είναι σχετικά φθηνή και απαιτούν λιγότερο στιβαρά θεμέλια από τους σωληνωτούς πύργους, λόγω της εξάπλωσης των δομικών φορτίων σε ευρύτερη έκταση. Έτσι, το βασικό πλεονέκτημά τους είναι στο κόστος, αφού ένας δικτυωτός πύργος απαιτεί μόνο το ήμισυ του υλικού ενός ελεύθερα ιστάμενου σωληνωτού με παρόμοια ακαμψία. Βασικό μειονέκτημα των δικτυωτών πύργων (σχήμα 2.8-δεξιά) είναι η οπτική τους εμφάνιση, αν και το ζήτημα αυτό είναι σαφώς υποκειμενικό.



Σχήμα 2.8. Α/Γ με σωληνωτό χαλύβδινο πύργο (αριστερά) και δικτυωτό πύργο (δεξιά)

- **Ανυψούμενοι πύργοι με επίπονους:** Αυτοί έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα κόστους έναντι των άλλων τύπων, δεδομένου ότι μπορούν να ανυψωθούν ή να

χαμηλωθούν με τη βοήθεια μιας μηχανής ανύψωσης φορτίων, χωρίς την ανάγκη για γερανό. Επομένως, είναι δυνατή η συντήρηση του δρομέα και της ατράκτου στο έδαφος. Η διάμετρος των πύργων με επίτονους είναι, στην πράξη, πολύ μικρότερη απ' ό,τι των σωληνωτών πύργων. Οι πύργοι με επίτονους, μαζί με τις δικτυωτές διατάξεις, έχουν λιγότερη επίδραση λόγω σκίασης του πύργου από τους σωληνωτούς. Πάντως, απαιτούν μεγαλύτερο εμβαδόν εδάφους λόγω της ανάγκης για αρκετά ευρεία εξάπλωση των επίτονων, το οποίο μπορεί να αποτελεί μειονέκτημα εάν χρησιμοποιούνται μηχανές για τις καλλιέργειες γύρω από τις βάσεις των Α/Γ. Η βοσκή των ζώων δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα.

2.2.5. Έλεγχος της ισχύος

Με την αύξηση της ταχύτητας ροής του αέρα, οι αεροδυναμικές ανωστικές δυνάμεις στα πτερύγια του δρομέα αυξάνονται με την 2^η δύναμη και η παραγόμενη από την Α/Γ ενέργεια με την 3^η δύναμη της ταχύτητας του ανέμου, το οποίο απαιτεί έναν πολύ αποτελεσματικό και άμεσης δράσης έλεγχο ισχύος του δρομέα ώστε να αποφευχθεί η μηχανική και ηλεκτρική υπερφόρτωση στο σύστημα μετάδοσης ενέργειας της Α/Γ. Στις σύγχρονες Α/Γ εφαρμόζονται δύο διαφορετικές αρχές αεροδυναμικού ελέγχου για να περιοριστεί η παραγωγή ισχύος στην ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Η πιο παθητική από αυτές είναι γνωστή ως "έλεγχος με απώλεια στήριξης", ενώ η ενεργή είναι ο "έλεγχος με μεταβολή του βήματος".

Στην πρώτη περίπτωση την παραγωγή ισχύος καθορίζουν οι εγγενείς αεροδυναμικές ιδιότητες του πτερυγίου, και δεν υπάρχει κανένα κινούμενο μέρος που να ρυθμίζεται. Η συστροφή και το πάχος του πτερυγίου του δρομέα μεταβάλλονται κατά το μήκος αυτού με τέτοιο τρόπο ώστε να προκαλείται τύρβη πίσω από το πτερύγιο όποτε αυξάνεται πολύ η ταχύτητα του ανέμου. Αυτή η τύρβη αναγκάζει μέρος από την ενέργεια του ανέμου να διασκορπιστεί, ελαχιστοποιώντας την παραγωγή ισχύος στις υψηλότερες ταχύτητες. Οι μηχανές με έλεγχο απώλειας στήριξης διαθέτουν επίσης αερόφρενα στα ακροπτερύγια που φέρουν το δρομέα σε ακινησία, εάν χρειαστεί για οποιοδήποτε λόγο να σταματήσει η Α/Γ.

Στη δεύτερη περίπτωση, η γωνία των πτερυγίων του δρομέα μπορεί να ρυθμίζεται ενεργά από το σύστημα ελέγχου της μηχανής. Το σύστημα ελέγχου μεταβολής του βήματος έχει ενσωματωμένη πέδη, καθώς τα πτερύγια ακινητοποιούνται όταν είναι πλήρως "πτερυγωμένα". Κατά το παρελθόν, η πλειοψηφία των μικρού και μεσαίου μεγέθους συστημάτων Α/Γ χρησιμοποιούσαν τον απλό έλεγχο απώλειας στήριξης, αλλά τελευταία, με την αύξηση του μεγέθους των Α/Γ, οι κατασκευαστές προτιμούν όλο και περισσότερο το σύστημα ελέγχου μεταβολής του βήματος, το οποίο παρέχει περισσότερες δυνατότητες για παρέμβαση στη λειτουργία της Α/Γ.

Τα τελευταία χρόνια εμφανίστηκε και ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω ελέγχων, η "ενεργός απώλεια στήριξης". Στην περίπτωση αυτή, το βήμα του πτερυγίου του δρομέα στρέφεται σε κατεύθυνση προς την απώλεια στήριξης και όχι προς τη θέση πτερυγώματος (μικρότερη άνωση), όπως γίνεται στα κανονικά συστήματα μεταβολής του βήματος. Τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι ότι:

- απαιτούνται πολύ μικρές αλλαγές της γωνίας βήματος,
- είναι δυνατός ο έλεγχος ισχύος υπό συνθήκες μερικής ισχύος (ασθενείς άνεμοι),
- τα πτερύγια του δρομέα φέρονται σε θέση πτερυγώματος για χαμηλά φορτία σε σφοδρούς ανέμους.

2.2.6. Ταχύτητα του δρομέα

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες συνδέονται στο δίκτυο με δύο τρόπους. Με τον απλό άμεσο συγχρονισμό μιας επαγγελματικής ηλεκτρογεννήτριας, ο δρομέας λειτουργεί με σχεδόν σταθερή ταχύτητα επειδή το ισχυρό δίκτυο διατηρεί τη συχνότητα της γεννήτριας και η μόνη διακύμανση στην ταχύτητα περιστροφής προκαλείται από το εύρος ολίσθησης της γεννήτριας. Με τη βοήθεια ενός συστήματος αντιστροφέα μεταξύ της γεννήτριας της Α/Γ και του δικτύου, η Α/Γ αποσυνδέεται από τη συχνότητα του δικτύου και μπορεί να περιστρέψεται με μεταβλητές ταχύτητες.

Για πολλά χρόνια, στην παγκόσμια αγορά κυριάρχησαν οι άμεσα συνδεδεμένες στο δίκτυο Α/Γ λόγω της τεχνικής τους απλότητας, αλλά οι διάφορες θετικές πτυχές της λειτουργίας με μεταβλητή ταχύτητα του δρομέα μετέβαλαν το υφιστάμενο καθεστώς ανάπτυξης. Όπως αναφέρθηκε, η αεροδυναμικά βελτιστοποιημένη διαμόρφωση των Α/Γ βασίζεται σε μια σταθερή συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων του ανέμου και του ακροπτερυγίου του δρομέα, τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ. Έτσι, προκειμένου να διατηρηθεί η μέγιστη αεροδυναμική αποδοτικότητα, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα πρέπει να μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.

Ως αποτέλεσμα, οι νέες μεγάλες Α/Γ της τάξης του MW χρησιμοποιούν ολοένα και περισσότερο μεταβλητή ταχύτητα του δρομέα προκειμένου να εκμεταλλεύονται τα αντίστοιχα τεχνικά οφέλη. Για να προσαρμόζεται καλύτερα η λειτουργία του δρομέα στο σημείο αεροδυναμικού σχεδιασμού (σχήμα 2.6), οι κατασκευαστές εγκαθιστούν συχνά επαγγελματικές γεννήτριες δύο ταχυτήτων που επιτρέπουν την αλλαγή ταχύτητας του δρομέα σε δύο βήματα. Σε μικρές ταχύτητες ανέμου η γεννήτρια λειτουργεί με μικρή ταχύτητα περιστροφής (μεγαλύτερος αριθμός πόλων) και σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου με μεγάλη ταχύτητα περιστροφής (μικρότερος αριθμός πόλων).

2.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

2.3.1. Εύρος εφαρμογών των ανεμογεννητριών

2.3.1.1. Κατηγορίες εφαρμογής

Οι ηλεκτροπαραγωγές Α/Γ έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από τις μεμονωμένες, αυτόνομες εγκαταστάσεις έως τις μεγάλες διατάξεις ανεμογεννητριών, που μπορεί να συνδέονται σε υπάρχον δίκτυο ή να συνδυάζονται με άλλες μη-συνδεμένες στο δίκτυο πηγές ενέργειας. Το εύρος των εφαρμογών μπορεί να ομαδοποιηθεί σε τρεις κλάσεις. Τα αιολικά πάρκα, δηλ. οι μεγάλες σειρές Α/Γ που συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο, διαμορφώνουν το ένα άκρο του φάσματος εφαρμογών. Από την άποψη του

εγκατεστημένου δυναμικού και του οικονομικού αντίκτυπου, την περίοδο αυτή τα αιολικά πάρκα αποτελούν τη μεγαλύτερη κατά πολύ κλάση εφαρμογής των Α/Γ.

Οι άλλες δύο κλάσεις εφαρμογής χρησιμοποιούν συνήθως μικρότερο αριθμό Α/Γ με μικρότερο μέγεθος μονάδας. Αυτές είναι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται για διασυνδεδεμένη, κατανεμημένη παραγωγή και Α/Γ που συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας και μπορούν να λειτουργούν χωρίς την ανάγκη ύπαρξης μεγαλύτερου ηλεκτρικού δικτύου. Αυτά είναι τα αποκαλούμενα “υβριδικά” συστήματα. Και οι δύο κλάσεις έχουν ιστορικά προηγούμενα τόσο στις ΗΠΑ όσο και στην Ευρώπη.

2.3.1.2. Αιολικά πάρκα

Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από σειρές Α/Γ που διασυνδέονται ηλεκτρικά ώστε η ισχύς τους να αποδίδεται στο δίκτυο της εταιρείας ηλεκτρισμού. Από την άποψη της ροής ηλεκτρικής ισχύος, ένα αιολικό πάρκο λειτουργεί παράλληλα με το συμβατικό δυναμικό παραγωγής της εταιρείας ηλεκτρισμού για την κάλυψη των απαιτήσεων σε ισχύ του συνδεδεμένου φορτίου. Οι σειρές μπορεί να αποτελούνται από εκατοντάδες μηχανών με ένα συνδυασμένο δυναμικό ισχύος του αιολικού πάρκου της τάξης των εκατοντάδων MW. Σχεδόν πάντοτε οι συμβατικές πηγές παρέχουν το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος που απαιτείται από το φορτίο.

Γενικά, η αναλογία του δυναμικού αιολικής παραγωγής προς το συνολικό δυναμικό (αιολικό συν συμβατικό) που εξυπηρετεί ένα ηλεκτρικό φορτίο σε οποιαδήποτε δεδομένη χρονική στιγμή υπολογίζεται από την αιολική διείσδυση WP:

$$WP = \frac{\text{Αιολικό Δυναμικό}}{\text{Αιολικό Δυναμικό} + \text{Συμβατικό Δυναμικό}} \quad (2.4)$$

Για παράδειγμα, υποτίθεται ότι σε μία δεδομένη στιγμή της ημέρας το ηλεκτρικό φορτίο είναι 1.100 MW και ότι η ζήτηση αυτή καλύπτεται από συνδυασμό αιολικών και συμβατικών πηγών ηλεκτροπαραγωγής. Εάν το υφιστάμενο αιολικό δυναμικό είναι 100 MW και το συμβατικό δυναμικό 1.000 MW, τότε σ' αυτή τη χρονική στιγμή η τιμή της αιολικής διείσδυσης θα είναι 0,0909 ή 9,1%.

Με την τρέχουσα ηλεκτρική τεχνολογία των Α/Γ, η μέγιστη τιμή αιολικής διείσδυσης με την οποία τα περισσότερα ηλεκτρικά συστήματα είναι ασφαλή κυμαίνεται μεταξύ 10 και 15%. Το άνω όριο στην ποσότητα της αιολικής ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρικό σύστημα αντικατοπτρίζει τις ανησυχίες γύρω από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ισχύος που παρέχεται από το αιολικό σύστημα, που είναι η ποιότητα ισχύος. Ειδικότερα, η ανησυχία σχετίζεται με την επίδραση της χρονικά μεταβαλλόμενης αιολικά παραγόμενης ισχύος στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια της τάσης και της συχνότητας της συνδυασμένης ισχύος που παρέχεται στο φορτίο.

Η αποδεκτή τιμή διείσδυσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι οι λεπτομέρειες της αιολικής τεχνολογίας, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των συμβατικών πηγών παραγωγής, και η δυναμικότητα και το μήκος των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τις πηγές με το φορτίο. Το άνω όριο στην ποσότητα της

αιολικής ενέργειας που μπορεί να συνδυαστεί με τις συμβατικές πηγές δεν αποτελεί αυστηρό περιορισμό, και η τιμή του θα αυξηθεί με την απόκτηση περισσότερης λειτουργικής εμπειρίας, τις αλλαγές της τεχνολογίας και την πιο στενή συσχέτιση των συστημάτων ελέγχου των αιολικών και των συμβατικών πηγών.

Η εντατική ανάπτυξη των συστημάτων αυτών τα προηγούμενα 15 έτη οδήγησε στην αύξηση του μοναδιαίου μεγέθους τους (τελευταία, οι δυναμικότητες ισχύος των Α/Γ που σχεδιάζονται πρωτίστως για χρήση σε αιολικά πάρκα κυμαίνονται από περίπου 300 kW έως 1,5 MW, με τις αντίστοιχες διαμέτρους δρομέων να κυμαίνονται από 35 έως 65m), καθώς και στη θεαματική βελτίωση της αξιοπιστίας και των οικονομικών τους. Τα οικονομικά των διασυνδεδεμένων αιολικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας προσεγγίζουν σήμερα εκείνα κάποιων συμβατικών συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής.

Στην περίπτωση που το c_p φθάσει το θεωρητικό του μέγιστο (όριο “Betz”), η ταχύτητα του ανέμου v_2 πίσω από το δρομέα είναι μόνο το 1/3 της ταχύτητας v_1 μπροστά από αυτόν (σχήμα 2.1). Έτσι, οι Α/Γ που εγκαθίστανται σε ένα αιολικό πάρκο παράγουν λιγότερη ενέργεια λόγω της μείωσης της ταχύτητας του ανέμου που προκαλείται από τις Α/Γ που βρίσκονται μπροστά τους. Οι απώλειες ενέργειας μπορούν να μειωθούν με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των Α/Γ, καθώς ο άνεμος πίσω από μια Α/Γ θα επιταχυνθεί ξανά από το περιβάλλον αιολικό πεδίο. Ένα καλά σχεδιασμένο αιολικό πάρκο μπορεί να εμφανίζει λιγότερο από 10% απώλειες λόγω των φαινομένων αμοιβαίας αλληλεπίδρασης.

Όπως υπάρχει ένα εύρος μεγεθών των Α/Γ, έτσι υπάρχει και ένα εύρος μεγεθών των αιολικών πάρκων. Τα μεγάλα πάρκα της Καλιφόρνιας είναι στο ένα άκρο αυτού του φάσματος, με το άλλο άκρο να αντιστοιχεί σε μια μικρή συστοιχία Α/Γ που εξυπηρετεί μια δημοτική εταιρεία ηλεκτρισμού, ένα συνεταιριστικό αγρόκτημα, ή μια βιομηχανική μονάδα. Ανεξάρτητα από το μέγεθος, τα βασικά χαρακτηριστικά ενός αιολικού πάρκου είναι ότι:

- 1) οι Α/Γ διασυνδέονται σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο,
- 2) το αιολικό δυναμικό παραγωγής συνήθως αποτελεί εν γένει μικρό ποσοστό του συμβατικού δυναμικού που τροφοδοτεί το φορτίο του ηλεκτρικού συστήματος (χαμηλές τιμές αιολικής διείσδυσης), και
- 3) οι Α/Γ απαιτούν κάποιου είδους ηλεκτρική υποστήριξη από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ανάλογα με τις λεπτομέρειες της γεννήτριας και των άλλων ηλεκτρικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σε μια Α/Γ, η υποστήριξη μπορεί να κυμαίνεται από μια απλή αναφορά στη συχνότητα (για το συγχρονισμό του αιολικά παραγόμενου ηλεκτρισμού με αυτόν των συμβατικών πηγών) μέχρι την κατανάλωση άεργης ισχύος (απαιτείται για τη λειτουργία των γεννητριών των Α/Γ). Ανεξάρτητα από το μέγεθος του αιολικού πάρκου, χρησιμοποιούνται τυποποιημένες ηλεκτρικές τεχνικές και συνιστώσες (π.χ. μετασχηματιστές και προστατευτικός εξοπλισμός διανομής) για τη σύνδεση των Α/Γ με το δίκτυο. Η Α/Γ αποτελεί τη μόνη μη-τυποποιημένη ηλεκτρική συνιστώσα.

2.3.1.3. Κατανεμημένη παραγωγή

Είναι πιθανό οι ανεμογεννήτριες να επαναφέρουν στη μνήμη τους ανεμόμυλους άντλησης νερού που χρησιμοποιούνταν ευρέως το πρώτο ήμισυ αυτού του αιώνα σε αγροκτήματα και φάρμες παγκοσμίως. Αυτές οι πρώιμες, μικρής κλίμακας Α/Γ έχουν πλέον εκτοπιστεί από τα εξελιγμένα και αποδοτικότερα ισοδύναμα τους που κυρίως χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Αν και δεν υπάρχουν τεχνικοί λόγοι για τους οποίους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες μονάδες, το μοναδιαίο μέγεθος των συστημάτων αυτών κυμαίνεται συνήθως από 1 έως 50 kW. Προορίζονται για μεμονωμένη χρήση ή κατά μικρές συστοιχίες, ενώ μπορούν να συνδέονται ή όχι στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο. Στην πρώτη περίπτωση καλούνται συστήματα κατανεμημένης αιολικής παραγωγής.

Από την πλευρά της εταιρείας ηλεκτρισμού αλλά και των πελατών, η κατανεμημένη παραγωγή μπορεί να είναι χρήσιμη για την παροχή υποστήριξης τέλους γραμμής της τάσης σ' ένα εκτεταμένο δίκτυο. Τα κατανεμημένα αιολικά συστήματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτική λύση στην επέκταση του δικτύου σε απόμακρα φορτία. Όπως παρατηρείται, οι εφαρμογές των αιολικών συστημάτων διαμορφώνουν ένα συνεχές σύνολο και σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι σαφής η διάκριση μεταξύ ενός αιολικού πάρκου και ενός κατανεμημένου συστήματος. Η μόνη διαφορά μπορεί να αφορά το μέγεθος ή τον αριθμό των Α/Γ που χρησιμοποιούνται.

Όταν δεν υφίσταται σύνδεση με το δίκτυο, η ηλεκτρική ισχύς είναι μη ελεγχόμενη. Μόνο το φορτίο και η παραγωγή της Α/Γ καθορίζουν την ποιότητα ισχύος και τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας. Κατά συνέπεια, το φορτίο πρέπει να είναι ικανό να χρησιμοποιεί αυτού του είδους τη μη ελεγχόμενη ισχύ χωρίς να προξενείται ζημία ούτε στο φορτίο ούτε στη γεννήτρια της Α/Γ. Σχετικές εργασίες βρίσκονται σε εξέλιξη ώστε να βελτιωθεί αυτή η κατάσταση, όπου ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει αυτή που έχει ως στόχο την επιτυχή σύνδεση ενός επαγγεικού κινητήρα απευθείας με μια μη διασυνδεδεμένη Α/Γ. Στα παραδείγματα εφαρμογής περιλαμβάνονται οι Α/Γ που χρησιμοποιούνται για άντληση ύδατος, παραγωγή πάγου και για παραγωγή ψύξης.

2.3.1.4. Υβριδικά συστήματα ισχύος

Τα υβριδικά συστήματα ισχύος χρησιμοποιούν ανεμογεννήτριες, ενδεχομένως και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μαζί με ντηζελογεννήτριες για να μορφώσουν το ισοδύναμο μιας μικρογραφίας δίκτυου. Μολονότι το μέγεθος μονάδας των Α/Γ στις εφαρμογές αυτές συνήθως κυμαίνεται από 1 ως 50 kW, έχουν εγκατασταθεί και πολύ μεγαλύτερες μηχανές και υβριδικά συστήματα ισχύος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ντηζελογεννήτριες, ενεργειακή αποθήκευση (π.χ. μπαταρίες) και, όπου είναι εφικτό, με άλλες ΑΠΕ, π.χ. φωτοβολταϊκά ή υδροηλεκτρικά συστήματα.

Όταν χρησιμοποιούνται με τον τρόπο αυτό, τα συστήματα αυτά συχνά ονομάζονται υβριδικά συστήματα ισχύος. Εν γένει χρησιμοποιούνται όπου δεν υφίσταται καθόλου δίκτυο. Λόγω της στενής σύζευξης και ελέγχου όλων των πηγών ηλεκτροπαραγωγής και κάποιων (ή/και όλων) από τα συνδεδεμένα φορτία, η αιολική συνιστώσα των υβριδικών συστημάτων ισχύος μπορεί να επιτύχει 100% διείσδυση. Δηλαδή, υπό τις

κατάλληλες ανεμολογικές συνθήκες, το σύστημα αιολικής ενέργειας μπορεί να παρέχει σχεδόν όλη την ισχύ που απαιτείται από το φορτίο.

2.3.2. Ενεργειακή παραγωγικότητα των αιολικών συστημάτων

2.3.2.1. Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια του έτους, υπάρχουν στιγμές κατά τις οποίες δεν πνέει άνεμος ή πνέει με ταχύτητες κάτω από την ταχύτητα εκκίνησης μιας Α/Γ. Προφανώς, τα αιολικά συστήματα δεν παράγουν ενέργεια καθ' όλες τις 8.760 ώρες ενός έτους. Ακόμα και όταν ένα αιολικό σύστημα παράγει ενέργεια, αυτό δεν γίνεται πάντα στην πλήρη ονομαστική του ισχύ. Έτσι απαιτείται ένα μέτρο της ενεργειακής παραγωγικότητας του αιολικού συστήματος όπως είναι ο συντελεστής δυναμικού CF , μια περιγραφική παράμετρος που καθορίζεται και χρησιμοποιείται στην ηλεκτρική βιομηχανία.

Ως ενεργειακός λόγος, η παράμετρος αυτή δεν παρέχει καμία πληροφορία για τις φυσικές διεργασίες που συνδέονται με τη μετατροπή της ενέργειας που περιέχεται στον άνεμο σε ηλεκτρική ενέργεια. Απαιτείται, λοιπόν, μία περιγραφή της σχέσης μεταξύ της παραγόμενης ισχύος μιας Α/Γ ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου (καμπύλη ισχύος) καθώς και η μεταβολή των ταχυτήτων του ανέμου σε μια δεδομένη χρονική περίοδο (κατανομή συχνότητας της ταχύτητας του ανέμου). Οι συναρτήσεις αυτές μαζί περιγράφουν το συνδυασμό των χαρακτηριστικών της ηλεκτροπαραγωγής από την Α/Γ με αυτά του καθεστώτος του ανέμου στο οποίο λειτουργεί η Α/Γ, και χρησιμοποιούνται για να προβλεφθεί ή να εκτιμηθεί η ενεργειακή της παραγωγή.

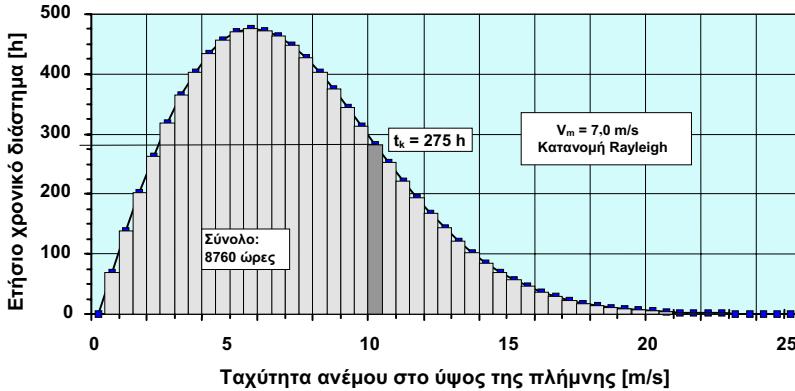
Αφού ληφθούν υπόψη οι απώλειες στο σύστημα συλλογής της ηλεκτρικής ενέργειας, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ανεμογεννητριών σ' ένα αιολικό πάρκο, και άλλες απώλειες, μπορούν να αθροιστούν οι παραγωγές των μεμονωμένων Α/Γ ώστε να διαμορφωθεί μια εκτίμηση για την ενεργειακή παραγωγή του αιολικού πάρκου. Αυτές οι εκτιμήσεις ή προβλέψεις συνηθέστερα γίνονται για ένα ημερολογιακό έτος και είναι γνωστές ως η «ετήσια ενεργειακή παραγωγή» της Α/Γ ή του αιολικού πάρκου.

2.3.2.2. Εκτίμηση της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής

Η ένταση του αιολικού πόρου περιγράφεται ποσοτικά από την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου. Η καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ αποτελεί την ποσοτική συσχέτιση μεταξύ της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και της προσπίπτουσας ταχύτητας του ανέμου. Οι δύο αυτές συναρτήσεις μαζί καθορίζουν την ετήσια ενεργειακή παραγωγή (EEP), και τόσο αυτές όσο και η μεταξύ τους συσχέτιση επεξηγούνται στα επόμενα. Στη γραφική παράσταση του σχήματος 2.9 παρουσιάζεται η διακριτή εκδοχή μιας υποθετικής/μετρημένης κατανομής της ταχύτητας του ανέμου στη θέση εγκατάστασης της Α/Γ.

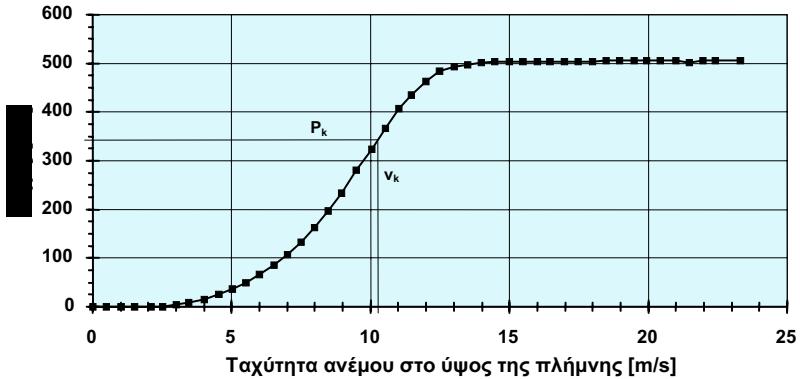
Η συνάρτηση κατανομής της ταχύτητας του ανέμου $F(v)\cdot\Delta v$ παρέχει τον αριθμό των ωρών ανά έτος που η ταχύτητα του ανέμου κείται μέσα στο διάστημα της ταχύτητας του ανέμου ή ζώνη πλάτους Δv , μεταξύ των τιμών v και $v+\Delta v$ (για το σχήμα 2.9, $\Delta v=$

0,5 m/s). Ο δείκτης k καθορίζει τις ζώνες της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι, η ζώνη $k=21$ αντιστοιχεί στη ζώνη που οριοθετεί το φάσμα από 10 έως 10,5 m/s, με μέση ταχύτητα $v_k=10,25$ m/s. Το ύψος της ράβδου για $k=21$ υποδηλώνει ότι η ταχύτητα του ανέμου κείται μέσα σ' αυτό το διάστημα για περίπου 275 ώρες/έτος. Το άθροισμα όλων των ράβδων είναι 8.760 ώρες (αριθμός ωρών σ' ένα έτος).



Σχήμα 2.9. Ιστόγραμμα της ετήσιας ταχύτητας του ανέμου ($v_k=10,25$ m/s, $t_k=275$ h)

Στο σχήμα 2.10 απεικονίζεται η καμπύλη ισχύος για μία υποθετική A/G 500 kW στην τυπική πυκνότητα του αέρα (1,225 kg/m³). Η καμπύλη ισχύος $P(v)$ είναι η συνεχής συνάρτηση που προσδιορίζει την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Η διακριτή εκδοχή, που αντιστοιχεί στα μικρά τετραγωνικά σύμβολα, υποδηλώνεται με το P_k όπου ο ακέραιος δείκτης k είναι ο ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιείται για την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου.

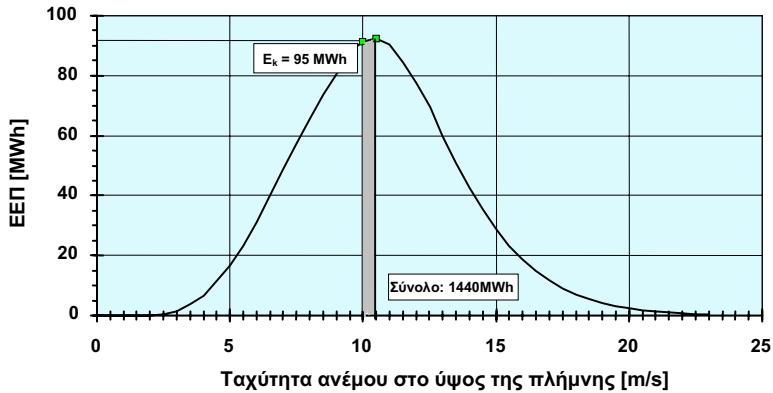


Σχήμα 2.10. Καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας 500 kW ($P_k=345$ kW, $v_k=10,25$ m/s)

Οι δύο αυτές συναρτήσεις, δηλ. η κατανομή συχνότητας της ταχύτητας του ανέμου και η καμπύλη ισχύος της A/G, όταν πολλαπλασιαστούν μεταξύ τους (σχήμα 2.11) και αθροιστούν για όλες τις ταχύτητες του ανέμου (όλες τις τιμές του δείκτη k) παρέχουν μια εκτίμηση της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής:

$$ΕΕΠ = (\text{ώρες/έτος}) \cdot Δv \cdot \sum_{k=1}^N (F_k \cdot P_k) = (8760 \text{ ώρες/έτος}) \cdot (0,5 \text{ m/s}) \cdot \sum_{k=1}^N (F_k \cdot P_k) \quad (2.5)$$

όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των ζωνών. Η σχέση (2.5) μπορεί να εφαρμοσθεί για να εκτιμηθεί η ετήσια ενεργειακή παραγωγή (σε Wh/έτος) η οποία αναμένεται από την A/G με μια συγκεκριμένη καμπύλη ισχύος που λειτουργεί στο καθεστώς ανέμου που περιγράφεται από την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου.



Σχήμα 2.11. Παράδειγμα της εκτιμούμενης ενέργειας στη ζώνη k ($E_k=95 \text{ MWh}$)

2.3.2.3. Ο συντελεστής δυναμικού ως μέτρο της ενεργειακής παραγωγής

Ο συντελεστής δυναμικού CF_{Yr} (για ένα έτος) είναι ένα μέτρο της ετήσιας απόδοσης ενεργειακής παραγωγής της γεννήτριας. Ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής (ή εκτιμούμενης) παραχθείσας ενέργειας προς την ενέργεια που θα παραγόταν εάν η Α/Γ λειτουργούσε κάθε ώρα του έτους σε πλήρη ονομαστική ισχύ:

$$CF_{Yr} = \frac{\text{Παραγωγή Ενέργειας / έτος}}{\text{Ονομαστική Ισχύς} \times 8760 \text{ ώρες / έτος}} \quad (2.6)$$

Οι τιμές του συντελεστή δυναμικού κυμαίνονται εξ ορισμού από 0 έως 100%. Στις πιο αποδοτικές αιολικές εγκαταστάσεις διεθνώς έχουν επιτευχθεί τιμές του συντελεστή δυναμικού από 24 έως 30%, με 28% να αντιστοιχεί σε μια αρκετά καλή μονάδα.

Για παράδειγμα, εάν ένα αιολικό σύστημα 100 MW παρήγαγε 245 εκατομ. kWh κατά τη διάρκεια ενός ορισμένου έτους, ο αντίστοιχος συντελεστής δυναμικού θα ήταν:

$$CF_{Yr} = \frac{245 \cdot 10^6 \text{ kWh}}{(100 \text{ MW} \times 8760 \text{ ώρες})} = 0.28$$

Αντίστοιχα, η εξίσωση (2.6) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η ετήσια ενεργειακή παραγωγή μίας υποθετικής Α/Γ 500 kW που λειτουργεί με ένα συντελεστή δυναμικού 0,28. Το αποτέλεσμα τότε είναι $1,226 \times 10^6 \text{ kWh/έτος}$. Όταν εξετάζονται οι τιμές CF των αιολικών συστημάτων πρέπει να εξακριβώνεται η περίοδος αναφοράς. Αυτή είναι συνήθως ένα έτος, αλλά συντελεστές δυναμικού μπορεί να καθορίζονται και για ένα μήνα.

Εάν σ' αυτόν τον μήνα υφίστανται πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου, τότε η αντίστοιχη τιμή του CF μπορεί να είναι παραπλανητική εάν εκληφθεί ως μέση ετήσια τιμή. Από την άλλη, πρέπει να αναφερθεί ότι οι συμβατικές πηγές είναι κι αυτές διακοπτόμενες κατά διαφορετικό τρόπο, δεδομένου ότι υπόκεινται σε διάφορους τύπους διακοπών λειτουργίας, π.χ. λόγω συντήρησης, δυσλειτουργιών, κλπ. Οι συντελεστές δυναμικού των συμβατικών συστημάτων ισχύος είναι σημαντικά μεγαλύτεροι από αυτούς των ανεμογεννητριών/αιολικών πάρκων με τυπικές τιμές μεταξύ 60 και 70%, ανάλογα με τον τύπο της εγκατάστασης, την ηλικία της και άλλους παράγοντες.

2.3.3. Αξιοπιστία των αιολικών συστημάτων

2.3.3.1. Επίδραση των εξελίξεων στο σχεδιασμό και την κατασκευή

Οι πρώτης γενιάς ανεμογεννήτριες που εγκαταστάθηκαν στην Καλιφόρνια στις αρχές της δεκαετίας του '80 αντιμετώπισαν πολλές αστοχίες (μερικές αρκετά θεαματικές), οι οποίες εν μέρει οφείλονταν στην ανεπαρκή κατανόηση της επίδρασης των δυνάμεων ρίπησης του ανέμου στον τρόπο αστοχίας λόγω κάμψης ή κόπωσης των δομικών συνιστωσών. Με τη σημαντικά βελτιωμένη γνώση της πραγματικής δομής των ριπών του ανέμου, την ανάπτυξη και διάδοση βελτιωμένων εργαλείων προσομοίωσης και σχεδίασης, τις βελτιωμένες τεχνικές κατασκευής και την εμπειρία από εκατομμύρια ώρες λειτουργίας, έχει βελτιωθεί εντυπωσιακά η αξιοπιστία των σημερινών Α/Γ.

Οι βελτιώσεις στην αξιοπιστία αφορούν όχι μόνο τις κύριες δομικές συνιστώσες, αλλά και τα υποσυστήματα υποστήριξης της Α/Γ, όπως είναι για παράδειγμα το σύστημα ελέγχου μέσω Η/Υ της Α/Γ, και τα συστήματα εκτροπής και μεταβολής του βήματος. Επίσης, βελτιώθηκαν τα προγράμματα διασφάλισης ποιότητας και επιθεώρησης των κατασκευαστών. Από την άλλη, οι σχεδιαστές έχουν δώσει ιδιαίτερη προσοχή στην επισκευασιμότητα και τη συντηρησιμότητα των υποσυστημάτων των Α/Γ.

Εξάλλου, έχει επεκταθεί το διάστημα μεταξύ των σημαντικών γενικών επισκευών, για παράδειγμα από πέντε σε δέκα έτη ή/και περισσότερο. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι μέτρησης αυτών των βελτιώσεων και της τρέχουσας αξιοπιστίας, στους οποίους περιλαμβάνονται ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών για τις κύριες συνιστώσες και τα υποσυστήματα, ο μέσος χρόνος για επισκευή και το κόστος για την επιδιόρθωση μιας βλάβης. Ένα μέτρο της αξιοπιστίας ολόκληρου του συστήματος που χρησιμοποιείται συχνά είναι η διαθεσιμότητα.

2.3.3.2. Διαθεσιμότητα

Η τιμή της διαθεσιμότητας Α ενός αιολικού πάρκου για μια ορισμένη χρονική περίοδο μπορεί να προκύψει από τις τιμές ημερήσιας διαθεσιμότητας κάθε Α/Γ. Γενικά, για μία καθορισμένη χρονική περίοδο (π.χ. μία ημέρα, εβδομάδα, ένα μήνα ή ένα έτος), η διαθεσιμότητα ορίζεται ως ο λόγος των ωρών που το αιολικό σύστημα ήταν σε θέση να παράγει ισχύ προς τον αριθμό των ωρών αυτής της χρονικής περιόδου:

$$A = \frac{\text{Ωρες εν δυ νάμει Λειτουργίας της Ανεμογεννήτριας}}{\text{Σύνολο Ωρών στης Περιόδου}} \quad (2.7)$$

Ένας άλλος, πιο δύσκολος στον καθορισμό του και εν γένει διφορούμενος ορισμός είναι ο λόγος των πραγματικών ωρών λειτουργίας προς τον αριθμό των ωρών που οι ταχύτητες του ανέμου βρίσκονταν εντός του εύρους λειτουργίας. Ανεξάρτητα του πώς καθορίζεται, η βέλτιστη τιμή διαθεσιμότητας θα ήταν 100%, που σημαίνει ότι το σύστημα δεν θα έχει καμία διακοπή λειτουργίας ή δυσλειτουργία που να το εμποδίζει από το να παράγει ισχύ. Τα σύγχρονα αιολικά πάρκα επιτυγχάνουν συνήθως τιμές

διαθεσιμότητας 98% ή περισσότερο, αρκετά επάνω από το 60% ή/και λιγότερο των αρχών της δεκαετίας του '80.

2.3.3.3. Ανταποδοτικότητα κόστους

Το κόστος της αιολικής ενέργειας έχει μειωθεί εντυπωσιακά κατά τα τελευταία 15 έτη, καθώς έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία και οι Α/Γ έχουν καταστεί φθηνότερες και πιο παραγωγικές. Υπάρχουν δύο κύρια ζητήματα τα οποία επηρεάζουν το κόστος του ηλεκτρισμού που παράγεται από τον άνεμο, επομένως και την τελική του τιμή:

- Οι τεχνικοί παράγοντες, όπως είναι η ταχύτητα του ανέμου και η φύση των Α/Γ (διαθεσιμότητα, ο τρόπος διάταξής τους, κλπ.).
- Η οικονομική προοπτική αυτών που αναπτύσσουν και χρηματοδοτούν τα έργα, π.χ. το επιτόκιο απόδοσης που απαιτείται στο κεφάλαιο και το χρονικό διάστημα κατά το οποίο αποπληρώνεται το κεφάλαιο.

Έτσι, το κόστος της αιολικής ενέργειας στην Ολλανδία μειώθηκε κατά ένα συντελεστή τρία μεταξύ των ετών 1985 και 1995, και στη Γερμανία κατά το ένα τρίτο μεταξύ του 1991 και του 1994. Οι τιμές της ενέργειας μειώθηκαν ακόμα ταχύτερα (έπεισαν στο μισό τα τελευταία 9-10 χρόνια), και αυτές λόγω των μικρότερων τιμών των Α/Γ, της υψηλότερης αποδοτικότητας και διαθεσιμότητας των χρησιμοποιούμενων μηχανών, και των χαμηλότερων δαπανών λειτουργίας και συντήρησης. Η τρέχουσα τιμή της ενέργειας που αντιστοιχεί σ' ένα μέσο κόστος αιολικού πάρκου €850/kW είναι 9,6 c€/kWh στα 5 m/s, ελαττούμενη σε 3,4 c€/kWh για 10 m/s (οι ταχύτητες του ανέμου αναφέρονται στο ύψος της πλήμνης).

Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται από:

- το κόστος κεφαλαίου – για την κατασκευή της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής και τη σύνδεσή της με το δίκτυο,
- τις τρέχουσες δαπάνες - για τη λειτουργία, την τροφοδοσία και τη συντήρηση της εγκατάστασης,
- τη χρηματοδότηση, δηλ. το κόστος εξόφλησης των επενδυτών και των τραπεζών.

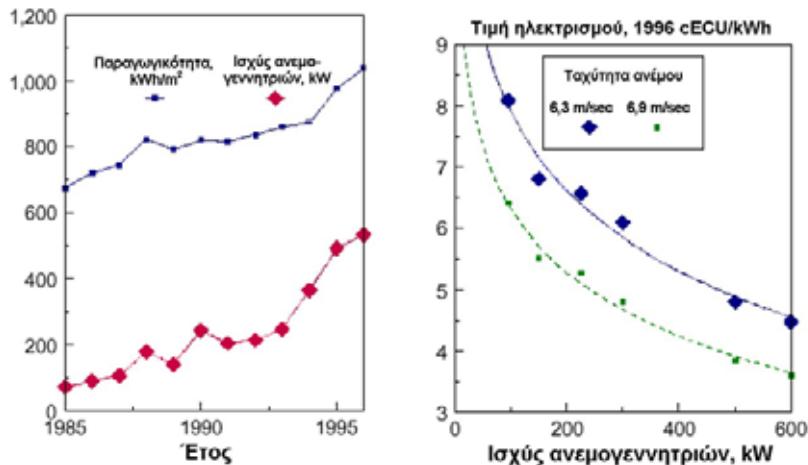
Για τις Α/Γ δεν υφίστανται δαπάνες καυσίμου, αφού ο άνεμος είναι ελεύθερος. Μόλις αποπληρωθεί το έργο, οι μόνες τρέχουσες δαπάνες αφορούν τη λειτουργία και συντήρηση (Λ&Σ) της εγκατάστασης. Το κόστος κεφαλαίου κυμαίνεται μεταξύ του 75 και 90% του συνολικού κόστους.

Το κόστος μιας Α/Γ σήμερα είναι μεταξύ €600-900/kW. Τα κόστη προετοιμασίας και εγκατάστασης του έργου προσθέτουν άλλα €200-250/kW, ανάλογα με τον αριθμό και το μέγεθος των μηχανών στο αιολικό πάρκο, και την τοποθεσία. Αυτό ανεβάζει το συνολικό κόστος της αιολικής ενέργειας σε περίπου €1.000 ανά kW εγκατεστημένης ισχύος. Με την πάροδο του χρόνου έχει αλλάξει το οικονομικότερο μέγεθος της Α/Γ, το οποίο συνεχίζει να αυξάνει. Όσο πιο μεγάλες είναι οι μηχανές, τόσο λιγότερες απαιτούνται για ένα δεδομένο δυναμικό, και αυτό επιφέρει εξοικονόμηση στα κόστη

εργοταξίου και Λ&Σ. Για παράδειγμα, τα κόστη εργοταξίου μπορούν να μειωθούν κατά 25% περίπου από τις μηχανές μεγέθους 300 kW στις μηχανές του 1 MW.

Οι τρέχουσες δαπάνες Λ&Σ περιλαμβάνουν τη συντήρηση, το μίσθωμα των γαιών, τα αναλώσιμα, τις επισκευές, την ασφάλιση, τη διοίκηση, κλπ. Αυτά τα κόστη ποικίλλουν μεταξύ των χωρών και των αιολικών πάρκων, αλλά οι εμπειρίες από τη Δανία και τη Γερμανία δείχνουν ότι το ετήσιο κόστος Λ&Σ για τις νέες Α/Γ εγκατεστημένης ισχύος μεταξύ 0,5 και 1,5 MW είναι περίπου 0,6 έως 1,0 c€/kWh, το μισό του οποίου αφορά το κόστος ασφάλισης (το κόστος Λ&Σ είναι γύρω στα €25/kW/έτος για μηχανές των 200 kW, το οποίο κατέρχεται περίπου στα €15/kW/έτος για τις μηχανές των 500 kW). Για μηχανές που λειτουργούν πάνω από 10 έτη τα κόστη αυτά μπορεί να ανέλθουν στο επίπεδο των 1,5 έως 2 c€/kWh.

Ο τρόπος με τον οποίο έχει αυξηθεί το μέγεθος και η παραγωγικότητα των μηχανών τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται στο σχήμα 2.12 (τα δεδομένα αφορούν τη Δανία). Το μέσο μέγεθος των εγκατεστημένων Α/Γ στη Δανία αυξήθηκε από 71 kW το 1985 σε 523 kW το 1996. Η παραγωγικότητα των νέων μηχανών αυξήθηκε από 673 σε 1037 kWh/m² κατά τα ίδια έτη. Έχει επίσης εξετασθεί η σύνδεση μεταξύ του μεγέθους των Α/Γ και των τιμών της ενέργειας, η οποία καταδεικνύει μια μείωση κατά 44% από τις πρώιμες μηχανές των 95 kW σ' αυτές με μέγεθος 600 kW (σχήμα 2.12 - δεξιά).



Σχήμα 2.12. Μεγέθη, παραγωγικότητα και τιμές ενέργειας των Α/Γ στη Δανία
[Πηγή: "Wind Energy in Europe – The Facts", 1997]

2.3.4. Χαρακτηριστικά της παροχής ισχύος

Το σημαντικότερο τεχνικό χαρακτηριστικό της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από αιολικά συστήματα είναι η μεταβολή της με το χρόνο, το οποίο απεικονίζει τη χρονική μεταβλητότητα του αιολικού πόρου. Στα επόμενα εξετάζονται το εύρος των χρονικών κλιμάκων και οι επιπτώσεις τους στην απόδοση του αιολικού συστήματος.

2.3.4.1. Συσχέτιση με το φορτίο

Ως γνωστόν, όλα τα ηλεκτρικά φορτία έχουν μία σημαντική προβλέψιμη συνιστώσα. Για παράδειγμα, η ωριαία ζήτηση κατά τη διάρκεια μιας θερινής ή χειμερινής ημέρας

είναι αρκετά γνωστή, όπως είναι και η κατανομή της ζήτησης από μήνα σε μήνα. Οι ημερήσιες και μηνιαίες κατανομές του φορτίου μπορούν να συγκριθούν με την παρελθούσα ή την αναμενόμενη ηλεκτρική παραγωγή ενός αιολικού πάρκου. Κατά συνέπεια, άπας και υπάρχει μια συσχέτιση μεταξύ των χρονικών κατανομών του αιολικά παραγόμενου ηλεκτρισμού και της ζήτησης του φορτίου, στο αιολικό σύστημα μπορεί να αποδοθεί μία τιμή δυναμικού πέραν αυτής της ενέργειας.

Όσο πιο συσχετισμένες είναι αυτές οι κατανομές, τόσο πιο αξιόπιστα μπορεί να καλύψει μέρος του φορτίου η αιολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Ανάλογα με το δυναμικό και τη διάρθρωση του κόστους των συμβατικών πηγών και με το βαθμό της αιολικής διείσδυσης, η αιολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι πιο ωφέλιμη και πολύτιμη απ' ό,τι διαφορετικά.

2.3.4.2. Παραγωγή μεμονωμένης Α/Γ και αιολικού πάρκου

Παρατηρείται μια σημαντική διαφορά στα βραχυπρόθεσμα (δευτερόλεπτα έως λεπτά) χρονικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής ισχύος από μια μεμονωμένη Α/Γ σε σχέση με αυτά ενός αιολικού πάρκου. Σ' ένα σημαντικό εύρος των ταχυτήτων λειτουργίας, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μιας μεμονωμένης Α/Γ συμπίπτει άμεσα με τα χρονικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής του ανέμου που προσπίπτει σε αυτή. Η αδράνεια του δρομέα ομαλοποιεί τις διακυμάνσεις του ανέμου της τάξης του δευτερολέπτου ή λιγότερο, όμως οι συνιστώσες διακύμανσης του ανέμου με περιόδους μεγαλύτερες από αυτή μπορούν να αναπαραχθούν στην παραγόμενη ισχύ μιας μεμονωμένης Α/, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος ελέγχου της Α/Γ.

Το σύστημα ελέγχου της Α/Γ μπορεί να συμβάλει στην εξομάλυνση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν οι ταχύτητες του ανέμου είναι αρκετά υψηλές ώστε, εν όψει των μεταβαλλόμενων ταχυτήτων εισροής του ανέμου, το σύστημα ελέγχου ρυθμίζει την αποδοτικότητα των αεροδυναμικών πτερυγίων της Α/Γ έτσι ώστε να διατηρηθεί η ηλεκτρική παραγωγή σε μια σταθερή τιμή, ίση με την ονομαστική ισχύ της Α/Γ.

Από την άλλη, η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ενός αιολικού πάρκου είναι συνήθως αρκετά πιο ομαλή σε σχέση με αυτήν μιας μεμονωμένης Α/Γ. Ο βαθμός εξομάλυνσης εξαρτάται από τη γεωγραφική έκταση του πάρκου, τη μέση ταχύτητα του ανέμου, τα χαρακτηριστικά ελέγχου των Α/Γ και, τέλος, από τις λεπτομέρειες του ανάγλυφου του εδάφους και από τον τρόπο που επηρεάζουν τη διανομή των ταχυτήτων του ανέμου μέσα στο αιολικό πάρκο. Η κύρια αιτία της εξομάλυνσης αυτής είναι ότι η δομή των ριπών του ανέμου, στο χώρο και το χρόνο, καθίσταται εν γένει όλο και περισσότερο ασυσχέτιστη σε αποστάσεις μεγαλύτερες από αρκετές διαμέτρους του δρομέα.

Σε σχέση με τις διακυμάνσεις μιας μεμονωμένης Α/Γ, η πλήρης έλλειψη συσχέτισης θα υποδήλωνε ότι οι διακυμάνσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος του αιολικού πάρκου μειώνονται με την τετραγωνική ρίζα του αριθμού των ασυσχέτιστων μηχανών της μονάδας που συμβάλλουν στην παραγωγή. Έτσι, μπορεί να εφαρμοστεί η ίδια αρχή εξομάλυνσης πεδίου της συγκεντρωτικής παραγωγής των αιολικών πάρκων.

Όπως και με τις Α/Γ σ' ένα μεμονωμένο αιολικό πάρκο, μια τέτοια εξομάλυνση θα μπορούσε να προκύψει ως αποτέλεσμα της έλλειψης συσχέτισης των διακυμάνσεων στα πεδία του ανέμου που προσπίπτουν στα κατανεμημένα αιολικά πάρκα.

2.3.4.3. Ποιότητα ισχύος

Καθόσον τα αιολικά πάρκα συχνά συνδέονται στο δίκτυο της εταιρείας ηλεκτρισμού, οι υπεύθυνοι προγραμματισμού και διαχείρισης του συστήματος της εταιρείας αυτής ενδιαφέρονται για τα τεχνικά χαρακτηριστικά της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Όπως αναφέρθηκε ήδη, το σημαντικότερο από αυτά τα χαρακτηριστικά, τα οποία λαμβανόμενα ως σύνολο αναφέρονται ως "ποιότητα ισχύος", είναι η μεταβλητότητα με το χρόνο. Άλλες παράμετροι της ποιότητας ισχύος περιλαμβάνουν το συντελεστή ισχύος, την αρμονική παραμόρφωση, τις διακυμάνσεις της τάσης και τις αποκλίσεις της συχνότητας. Η σχετική τους βαρύτητα εξαρτάται από το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο και την επιλογή των Α/Γ.

Οι πρώιμες Α/Γ με επαγωγικές γεννήτριες διέθεταν ανεπαρκή ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό αντιστάθμισης της άεργης ισχύος, με αποτέλεσμα οι εταιρείες ηλεκτρισμού να υφίστανται αυξημένες απώλειες μεταφοράς και δυσκολία ελέγχου της τάσης του συστήματος. Οι χειριστές των αιολικών μονάδων αναγκάστηκαν να βελτιώσουν την ποιότητα της παρεχόμενης στο δίκτυο ισχύος όταν οι εταιρείες ηλεκτρισμού άρχισαν να χρεώνουν για την υποστήριξη των υπέρμετρων VAr [άεργος ισχύς]. Οι εταιρείες απαιτούν πλέον οι μικροί παραγωγοί που χρησιμοποιούν επαγωγικές γεννήτριες να παρέχουν στο σημείο της διασύνδεσης συντελεστή ισχύος κοντά στη μονάδα. Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας παρέχει ένα πλήρες φάσμα ελέγχου του συντελεστή ισχύος σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας, ακόμη και κατά τη διακοπή λειτουργίας της Α/Γ.

Οι αρμονικές είναι ανεπιθύμητες παραμορφώσεις της ημιτονοειδούς τάσης ΕΡ της εταιρείας ηλεκτρισμού και των κυματομορφών του ρεύματος, οι οποίες χρήζουν προσοχής λόγω της ζημιάς που μπορεί να προκληθεί τόσο στον εξοπλισμό διανομής της εταιρείας ηλεκτρισμού όσο και στις συσκευές των πελατών. Μερικές αιολικές εγκαταστάσεις πρώτης γενιάς χρησιμοποιούσαν παλαιότερα συστήματα αντιστροφής ΕΡ (διατάξεις γεφυρών 6-παλμικών θυρίστορ χωρίς εξωτερική διόρθωση αρμονικών ή φιλτράρισμα), με αποτέλεσμα την παραγωγή αρμονικών χαμηλότερης τάξης. Τα προηγμένα συστήματα αντιστροφέων που διατίθενται σήμερα παράγουν ισχύ με πολύ μικρή αρμονική παραμόρφωση. Πλέον, με την προσθήκη διατάξεων διόρθωσης των αρμονικών και τη χρήση προηγμένων ηλεκτρονικών ισχύος στις Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας, οι αρμονικές δεν προκαλούν σημαντικά προβλήματα.

Όταν οι Α/Γ λειτουργούν, η παραγωγή ισχύος τους μεταβάλλεται από δευτερόλεπτο σε δευτερόλεπτο, ανάλογα με την ένταση και την τύρβη του ανέμου. Η επίδραση του πύργου, καθώς τα πτερύγια περιστρέφονται πίσω του, εισάγει επίσης μια περιοδική διαταραχή στην παραγόμενη ισχύ, που είναι μεγαλύτερη στις υψηλότερες ταχύτητες του ανέμου. Αυτές οι διακυμάνσεις της ισχύος προκαλούν μεταβολές της τάσης στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο, το λεγόμενο "τρεμόπαιγμα". Τα όρια στο τρεμόπαιγμα που

μπορεί να προκαλέσει ο τυχόν συνδεδεμένος εξοπλισμός καθορίζονται από σχετικά πρότυπα που τίθενται ώστε να αποφευχθεί η διαταραχή σε άλλους καταναλωτές. Το τρεμόπαιγμα είναι πιθανό να αποτελεί πρόβλημα μόνο στις μικρές ομάδες ή σε μεμονωμένες Α/Γ, ειδικά τις μεγάλες μηχανές που συνδέονται σε χαμηλότερες τάσεις.

Οι ρυθμιζόμενες με απώλεια στήριξης Α/Γ παράγουν λιγότερες διαταραχές από αυτές με μεταβολή του βήματος. Οι Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας έχουν πολύ μικρή επίδραση, ενώ αυτές με επαγωγικές γεννήτριες (συνηθέστερες) μπορούν επίσης κατά την εκκίνησή τους να προκαλέσουν διαταραχές. Αυτό αποτελεί κατά κανόνα πρόβλημα του παρελθόντος, καθώς στα περισσότερα μοντέλα εγκαθίστανται μονάδες "ήπιας εκκίνησης". Πάντως, πρέπει επίσης να εξετάζεται η απότομη μεταβολή της τάσης που θα εμφανιστεί όταν διακοπεί η λειτουργία της Α/Γ ενώ βρίσκεται σε πλήρη ισχύ, λόγω ισχυρών ανέμων. Συνήθως γίνεται αποδεκτό ότι, υπό κανονικές συνθήκες, είναι απίθανο να διακοπεί η λειτουργία περισσότερων της μίας ή δύο Α/Γ ταυτόχρονα.

Οι εταιρείες ηλεκτρισμού που χειρίζονται αιολικές μονάδες συνδεδεμένες σε ασθενή, απομονωμένα δίκτυα μπορεί να βρίσκουν δυσκολία στη διατήρηση της κανονικής συχνότητας του συστήματος, η οποία μεταβάλλεται όταν οι ριπές ανέμου προκαλούν την ταχεία αλλαγή της παραγόμενης ισχύος των αιολικών μονάδων. Αν και αυτό δεν αποτελεί συνήθως πρόβλημα στις περιοχές των αιολικών πάρκων, προκειμένου να διεισδύσει περισσότερη αιολική ενέργεια σε ένα σύστημα απαιτείται:

- η χρήση σύγχρονων Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με ηλεκτρονικό έλεγχο ισχύος και διασύνδεση με το δίκτυο (το ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος μπορεί να ελέγχεται ώστε να περιορίζει την παραγωγή ισχύος των Α/Γ κατά τις περιόδους ριπιζόντων ή ισχυρών ανέμων), ή/και
- αυτόματος έλεγχος της παραγωγής με επιπρόσθετη στρεφόμενη εφεδρεία.

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

3.1.1. Ιστορικό

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία, γνωστά ως “φωτοβολταϊκά” ή “Φ/Β”, αποτελούν μία προσέγγιση υψηλής τεχνολογίας για την άμεση μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο όρος “φωτό” προέρχεται από το φως, το δε “βολτ” οφείλεται στον Alessandro Volta (1745-1827), έναν πρωτοπόρο στη μελέτη του ηλεκτρισμού. Έτσι, “φωτοβολταϊκό” στην κυριολεξία σημαίνει “φωτο-ηλεκτρικό”. Εννοιολογικά, στην απλούστερή της μορφή μια Φ/Β διάταξη είναι μια ηλιακά τροφοδοτούμενη μπαταρία, όπου το μόνο αναλώσιμο είναι το φως που την τροφοδοτεί. Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη, η λειτουργία είναι φιλική προς το περιβάλλον και, εάν η διάταξη προστατεύεται σωστά από την επίδραση του περιβάλλοντος, κανένα τμήμα δεν υφίσταται φθορά.

Επειδή το φως του ήλιου είναι διαθέσιμο παντού, οι φωτοβολταϊκές διατάξεις έχουν πολλά πρόσθετα οφέλη που τις καθιστούν εφαρμόσιμες και αποδεκτές από όλους τους κατοίκους του πλανήτη. Τα Φ/Β συστήματα είναι πολυ-συναρτησιακά, οπότε η ηλεκτροπαραγωγή τους μπορεί τυπικά να προσαρμοστεί σε κάθε εφαρμογή, από καταναλωτικές χρήσεις χαμηλής ισχύος – ρολόγια, μικρούς υπολογιστές χειρός και φορτιστές μικρών μπαταριών – μέχρι σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις, όπως η ηλεκτροπαραγωγή σε κεντρικούς σταθμούς των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού.

Επιπλέον, στα φωτοβολταϊκά συστήματα προσαρμόζονται εύκολα τυχόν προσθήκες ισχύος, σε αντίθεση με τις πιο συμβατικές μεθόδους, όπως αυτές των ορυκτών ή των πυρηνικών καύσιμων, οι οποίες απαιτούν εγκαταστάσεις πολλών MWatt για να είναι οικονομικά εφικτές. Τα Φ/Β συστήματα παρέχουν τόσα πολλά πλεονεκτήματα ώστε, μόλις μειωθεί κατά άλλη μία τάξη μεγέθους το σχετικά υψηλό αρχικό κόστος τους, η εξάπλωσή τους αναμένεται να είναι ευρύτατη στα τέλη του 21^{ου} αιώνα.

3.1.2. Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ακτινοβολία παρέχει ένα τεράστιο ποσό ενέργειας στη Γη. Το συνολικό ποσό ενέργειας που ακτινοβολείται από τον ήλιο στην επιφάνεια της γης είναι ίσο με 10.000 φορές περίπου την ετήσια παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση. Κατά μέσο όρο, προσπίπτουν 1700 kWh σε κάθε τετραγωνικό μέτρο κάθε χρόνο. Το φως του ήλιου που φθάνει στην επιφάνεια της γης αποτελείται κυρίως από δύο συνιστώσες, συγκεκριμένα το άμεσο φως και το έμμεσο ή διάχυτο φως, το οποίο είναι το φως που έχει διασκορπιστεί από τα μόρια της σκόνης και του νερού στην ατμόσφαιρα.

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες χρησιμοποιούν όχι μόνο την άμεση συνιστώσα του φωτός αλλά παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και με νεφοσκεπή ουρανό. Συνεπώς, αποτελεί παρεξήγηση ότι τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν μόνο με απόλυτη ηλιοφάνεια, οπότε δεν είναι κατάλληλα για χρήση σε εύκρατα κλίματα. Αυτό δεν ισχύει, αφού τα Φ/Β χρησιμοποιούν τόσο τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία όσο και το άμεσο φως του ήλιου. Για να προσδιοριστεί το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής ενός Φ/Β σε μια συγκεκριμένη

Θέση, είναι σημαντικό να εκτιμηθεί η μέση συνολική ηλιακή ενέργεια που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια ενός έτους, αντί να γίνεται αναφορά στη στιγμιαία ακτινοβολία.

Μέσω των Φ/Β κυψελών, η ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Όταν το φως του ήλιου προσπίπτει σε μια κυψέλη παράγεται συνεχές ρεύμα (ΣΡ) και, θέτοντας ένα ηλεκτρικό φορτίο από την άλλη, το ρεύμα αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί. Πάντως, δεν μπορεί να μετατραπεί όλο το φως σε ηλεκτρισμό, καθώς οι Φ/Β κυψέλες χρησιμοποιούν κυρίως το ορατό φως. Μεγάλο μέρος της ηλιακής ενέργειας κείται στην υπέρυθρη – ή θερμή - και την υπεριώδη ακτινοβολία, γεγονός που εξηγεί τις χαμηλές τιμές των θεωρητικών αποδοτικοτήτων μετατροπής (20-30%). Πρακτικές ατέλειες, π.χ. ανομοιογένειες, μπορούν να μειώσουν ακόμα περαιτέρω την απόδοση μιας Φ/Β κυψέλης.

Το ποσό της ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ένα Φ/Β στοιχείο σχετίζεται άμεσα με την ένταση της φωτεινής ενέργειας που προσπίπτει επάνω στην επιφάνεια μετατροπής. Έτσι, όσο μεγαλύτερος είναι ο διαθέσιμος ηλιακός πόρος, τόσο μεγαλύτερο είναι το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής. Για παράδειγμα, οι τροπικοί προσφέρουν έναν καλύτερο πόρο για παραγωγή ηλεκτρισμού από αυτόν που είναι διαθέσιμος σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Εξάλλου, είναι προφανές ότι ένα Φ/Β σύστημα δεν παράγει ηλεκτρισμό κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ είναι σημαντικό να μην σκιάζονται τα στοιχεία. Εάν απαιτείται ηλεκτρισμός πέρα από τις ώρες που υφίσταται το φως της ημέρας, ή εάν αναμένονται εκτεταμένες περίοδοι κακοκαιρίας, είναι απαραίτητο κάποιο είδος συστήματος αποθήκευσης.

Προκειμένου να αποληφθεί όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ενέργεια, η Φ/Β κυψέλη πρέπει να προσανατολίζεται προς τον ήλιο. Εάν οι κυψέλες έχουν σταθερή θέση, πρέπει να βέλτιστοποιηθεί ο προσανατολισμός τους ως προς το νότο και η γωνία κλίσης τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η βέλτιστη γωνία κλίσης κυμαίνεται σε ένα εύρος περίπου 15° του γεωγραφικού πλάτους της θέσης. Για παράδειγμα, η βέλτιστη γωνία κλίσης για τα διασυνδεδέμενα Φ/Β συστήματα στη Δυτική Ευρώπη είναι περίπου 35° . Για περιοχές πλησιέστερα στον ισημερινό αυτή η γωνία κλίσης θα είναι μικρότερη, ενώ για περιοχές πλησιέστερα στους πόλους θα είναι μεγαλύτερη.

Μια απόκλιση της γωνίας κλίσης κατά 30 μοίρες από τη βέλτιστη γωνία θα οδηγήσει σε απώλειες μικρότερες από το 10% της μέγιστης παραγωγής. Τα Φ/Β στοιχεία είναι στην πραγματικότητα πιο αποδοτικά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, οπότε για να εξασφαλιστεί ότι δεν υπερθερμαίνονται, είναι σημαντικό να τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται στον αέρα να κινείται ελεύθερα γύρω από αυτά. Αυτό αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική θεώρηση σε τοποθεσίες που το μεσημέρι είθισται να εμφανίζονται εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες. Οι ιδανικές συνθήκες λειτουργίας ενός Φ/Β είναι οι σχετικά ψυχρές, φωτεινές και ηλιόλουστες ημέρες.

3.2. ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ

Οι ηλιακές κυψέλες είναι συσκευές που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, είτε άμεσα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, είτε έμμεσα με αρχική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα ή χημική ενέργεια. Οι πιο κοινές μορφές των ηλιακών κυψελών βασίζονται στο φωτοβολταϊκό (Φ/Β) φαινόμενο, κατά το οποίο το φως προσπίπτοντας σε μία ημιαγωγική διάταξη δύο στρωμάτων παράγει μία φωτο-τάση ή διαφορά δυναμικού μεταξύ των στρωμάτων. Αυτή η τάση είναι ικανή να οδηγήσει ένα ρεύμα μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο ωφέλιμο έργο.

3.2.1. Ιστορικό ανάπτυξης των ηλιακών κυψελών

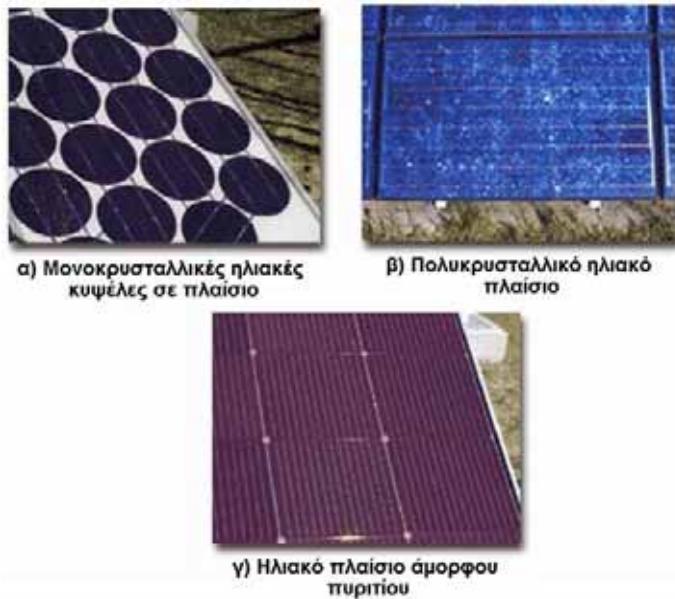
Αν και πρακτικά οι ηλιακές κυψέλες είναι διαθέσιμες μόνο από τα μέσα της δεκαετίας του '50, η επιστημονική έρευνα του φωτοβολταϊκού φαινομένου άρχισε το 1839, όταν ο Γάλλος επιστήμονας Henri Becquerel ανακάλυψε ότι θα μπορούσε να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα εστιάζοντας μια πηγή φωτός επάνω σε ορισμένα χημικά διαλύματα. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά σε ένα στερεό υλικό (σε αυτήν την περίπτωση το μεταλλικό σελήνιο) το 1877.

Το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για πολλά χρόνια στα φωτόμετρα, τα οποία όμως απαιτούσαν πολύ μικρά ποσά ισχύος. Προτού γίνει δυνατή η κατασκευή αποδοτικών ηλιακών κυψελών ήταν αναγκαία η βαθύτερη κατανόηση των επιστημονικών αρχών, η οποία οφείλεται στους Einstein (1905) και Schottky (1930). Το 1954, οι Chapin, Pearson και Fuller ανέπτυξαν μία ηλιακή κυψέλη πυριτίου που μετέτρεπε το 6% του προσπίπτοντος σε αυτό ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, και αυτό το είδος κυψέλης χρησιμοποιήθηκε από το 1958 σε εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως οι εν τροχιά διαστημικοί δορυφόροι.

Οι εμπορικά διαθέσιμες σήμερα ηλιακές κυψέλες πυριτίου μπορούν να μετατρέψουν σε ηλεκτρισμό το 18% περίπου του προσπίπτοντος σε αυτές ηλιακού φωτός, με κόστος κατά πολύ μικρότερο αυτού που είχαν πριν από τριάντα χρόνια. Τελευταία αναπτύχθηκε μια σειρά μεθόδων για την εφαρμοσμένη παραγωγή ηλιακών κυψελών πυριτίου (άμορφου, μονοκρυσταλλικού, πολυκρυσταλλικού), καθώς και κυψελών που κατασκευάζονται από άλλα υλικά με δυνατότητα εμπορικής εκμετάλλευσης, όπως είναι ο δισεληνιούχος ινδικός χαλκός ($CuInSe_2$), το τελλουριούχο κάδμιο ($CdTe$), κλπ.

3.2.2. Μέθοδος παραγωγής ηλιακών κυψελών

Οι κυψέλες πυριτίου κατασκευάζονται με τη χρήση μονοκρυσταλλικών ή πολυκρυσταλλικών δισκίων ή λεπτών μεμβρανών. Τα μονοκρυσταλλικά δισκία κόβονται σε φέτες (πάχους περίπου 1/3 έως 1/2 mm) από μια μεγάλη μονοκρυσταλλική ράβδο που έχει θερμανθεί περίπου σε $1400^{\circ}C$, η οποία είναι μια πολύ δαπανηρή διεργασία. Το πυρίτιο πρέπει να είναι πολύ υψηλής καθαρότητας και να έχει μια σχεδόν τέλεια κρυσταλλική δομή (βλ. σχήμα 3.1.a). Τα πολυκρυσταλλικά δισκία κατασκευάζονται με μια διεργασία χύτευσης, κατά την οποία λειωμένο πυρίτιο χύνεται σε ένα καλούπι και αφήνεται να στερεοποιηθεί. Κατόπιν τεμαχίζεται σε δισκία (σχήμα 3.1.β).



Σχήμα 3.1. Ηλιακά πλαίσια

[Πηγή: <http://renewable.greenhouse.gov.au/technologies/pv/pv.html>]

Καθόσον τα πολυκρυσταλλικά δισκία κατασκευάζονται με χύτευση, η παραγωγή τους είναι αρκετά φθηνότερη, αλλά δεν είναι τόσο αποδοτικά όσο τα μονοκρυσταλλικά, λόγω ατελειών στην κρυσταλλική δομή που οφείλονται στη διεργασία της χύτευσης. Σχεδόν το ήμισυ του πυριτίου χάνεται ως σκόνη κοπής σ' αυτές τις δύο διεργασίες. Το άμορφο πυρίτιο, μία από τις τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης, παράγεται με την εναπόθεση πυριτίου από ένα αέριο αντιδραστήριο, όπως το σιλάνιο (SiH_4), επάνω σε ένα υπόστρωμα γυαλιού, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1.γ.

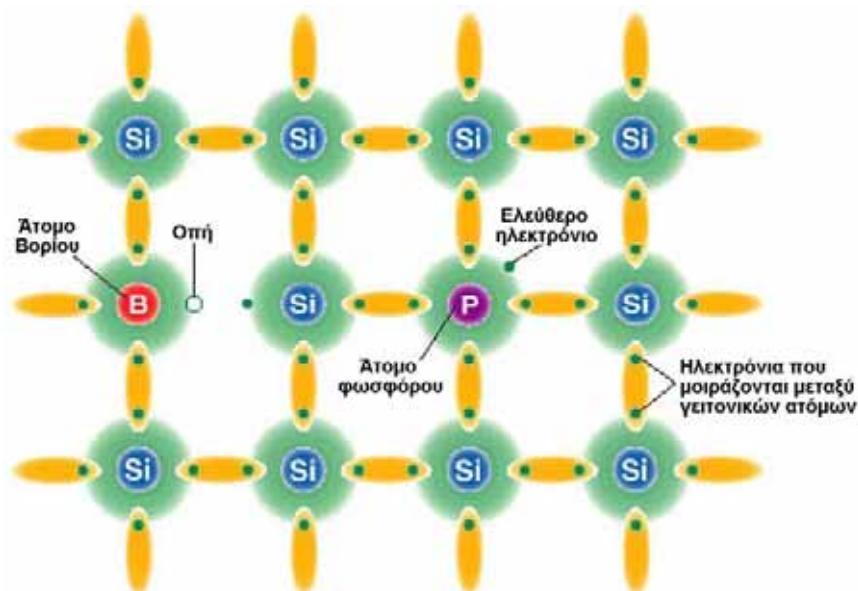
Ο τύπος ηλιακής κυψέλης υπό μορφή λεπτής μεμβράνης μπορεί να εφαρμοστεί ως μεμβράνη σε χαμηλού κόστους υποστρώματα, π.χ. γυαλί ή πλαστικό. Οι υπόλοιπες τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης περιλαμβάνουν το λεπτό πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, κυψέλες δισεληνιούχου ινδικού / θειούχου καδμίου, τελλουριούχου καδμίου / θειούχου καδμίου και αρσενιούχου γαλλίου. Οι κυψέλες αυτού του είδους διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως είναι η ευκολότερη απόθεση και συναρμολόγηση, η ικανότητα να εναποτίθενται επάνω σε φθηνά υποστρώματα ή υλικά οικοδομών, η ευκολία για μαζική παραγωγή, και η καταλληλότητά τους σε μεγάλες εφαρμογές.

Κατά την παραγωγή των ηλιακών κυψελών το πυρίτιο περιέχει άτομα πρόσμιξης τα οποία εισάγονται έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια περιοχή p-τύπου και μία n-τύπου, οπότε εμφανίζεται μια επαφή p-n. Η πρόσμιξη αυτή μπορεί να επιτευχθεί με διάχυση υπό υψηλή θερμοκρασία, κατά την οποία τα δισκία τοποθετούνται σε ένα φούρνο και το υλικό πρόσμιξης εισάγεται ως ατμός (υπάρχουν πολλές άλλες μέθοδοι πρόσμιξης του πυριτίου). Στην κατασκευή μερικών διατάξεων λεπτής μεμβράνης η εισαγωγή των προσμίξεων μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης των μεμβρανών ή των στρώσεων.

Ένα άτομο πυριτίου έχει 4 σχετικά αδύναμα δέσμια ηλεκτρόνια (σθένους), τα οποία συνδέονται με γειτονικά άτομα. Εάν αντικατασταθεί ένα άτομο πυριτίου με ένα άτομο

που έχει 3 ή 5 ηλεκτρόνια σθένους, θα παραχθεί με τον τρόπο αυτό είτε ένας χώρος χωρίς κανένα ηλεκτρόνιο (μια οπή), είτε ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο που μπορεί να κινείται πιο ελεύθερα από τα άλλα. Αυτό αποτελεί τη βάση της πρόσμιξης. Κατά τη πρόσμιξη ρ-τύπου η δημιουργία πλεοναζόντων οπών επιτυγχάνεται με ενσωμάτωση στο πυρίτιο ατόμων με 3 ηλεκτρόνια σθένους, συνήθως βορίου, ενώ στην πρόσμιξη η-τύπου η δημιουργία πρόσθετων ηλεκτρονίων επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση ενός ατόμου με 5 ηλεκτρόνια σθένους, συχνότερα φωσφόρου (σχήμα 3.2).

Από τη στιγμή που δημιουργείται μια επαφή ρ-η, κατασκευάζονται ηλεκτρικές επαφές στην εμπρόσθια και την οπίσθια επιφάνεια της κυψέλης με εξάτμιση ή επιφανειακή εκτύπωση μετάλλου επάνω στο δισκίο. Το οπίσθιο μέρος αυτού μπορεί να καλυφθεί πλήρως από μέταλλο, αλλά το εμπρόσθιο πρέπει να έχει κάποια δομή πλέγματος ή λεπτές γραμμές μετάλλου, ειδάλλως το μέταλλο θα εμπόδιζε τον ήλιο να φθάσει στο πυρίτιο και δεν θα προέκυπτε οιαδήποτε παραγωγή από τα προσπίπτοντα φωτόνια.



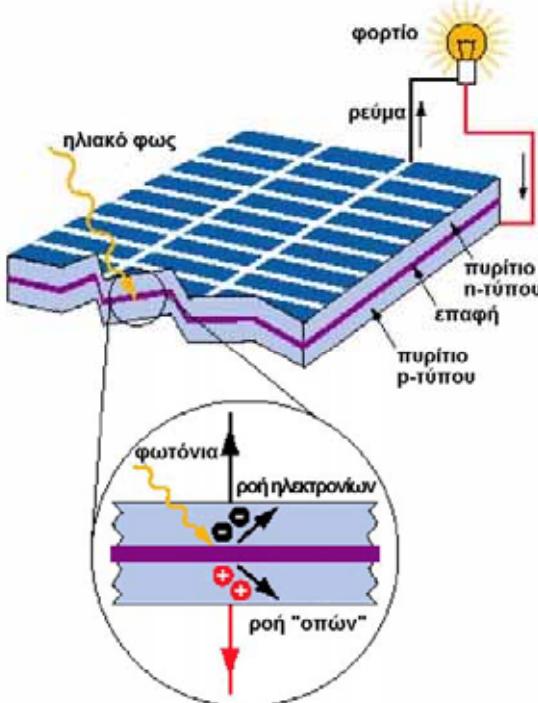
Σχήμα 3.2. Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα πρόσμιξης

3.2.3. Λειτουργία των ηλιακών κυψελών

Για να γίνει αντιληπτή η λειτουργία μιας Φ/Β κυψέλης, πρέπει να κατανοηθεί η φύση τόσο του υλικού όσο και του ηλιακού φωτός. Οι ηλιακές κυψέλες αποτελούνται από δύο τύπους υλικών, συνήθως πυρίτιο ρ-τύπου και η-τύπου. Σε συγκεκριμένα μήκη κύματος το φως είναι σε θέση να ιονίσει τα άτομα στο πυρίτιο, και το εσωτερικό πεδίο που παράγεται από την επαφή ρ-η διαχωρίζει μερικά από τα θετικά φορτία ("οπές") από τα αρνητικά φορτία (ηλεκτρόνια) μέσα στη φωτοβολταϊκή συσκευή.

Οι οπές παρασύρονται στο θετικό ή ρ-στρώμα και τα ηλεκτρόνια στο αρνητικό ή η-στρώμα. Παρότι τα αντίθετα φορτία έλκονται μεταξύ τους, τα περισσότερα από αυτά μπορούν να επανασυνδυαστούν μόνο εάν διέλθουν από ένα κύκλωμα έξωθεν του υλικού, εξαιτίας του εσωτερικού φράγματος δυναμικού. Έτσι, εάν κατασκευαστεί ένα κύκλωμα, όπως αυτό του σχήματος 3.3, είναι δυνατό να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς

από τις κυψέλες υπό φωτισμό, αφού τα ελεύθερα ηλεκτρόνια πρέπει να διέλθουν μέσω του φορτίου για τον επανασυνδυασμό τους με τις θετικές οπές.



Σχήμα 3.3. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε μια ηλιακή κυψέλη

Η ποσότητα της διαθέσιμης ισχύος από μια Φ/Β συσκευή καθορίζεται από:

- τον τύπο και την επιφάνεια του υλικού,
- την ένταση του ηλιακού φωτός (έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία), και
- το μήκος κύματος του ηλιακού φωτός.

Ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από μια ηλιακή κυψέλη προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι γνωστός ως αποδοτικότητα της κυψέλης.

Οι ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου, για παράδειγμα, δεν μπορούν προς το παρόν να μετατρέψουν περισσότερο από 25% της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια, επειδή η ακτινοβολία στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος δεν διαθέτει αρκετή ενέργεια για να διαχωρίσει τα θετικά και αρνητικά φορτία στο υλικό. Οι ηλιακές κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν αποδοτικότητα μικρότερη από 20% τη στιγμή αυτή, και οι κυψέλες άμορφου πυριτίου μόνο 10% περίπου, λόγω των μεγαλύτερων εσωτερικών απωλειών ενέργειας από αυτές του μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Για την ποσοτικοποίηση των επιδόσεων των ηλιακών κυψελών έχει διεξαχθεί πλήθος εργαστηριακών δοκιμών και έχουν καθιερωθεί κάποιες συνθήκες ως βιομηχανικά πρότυπα για τις δοκιμές, οι Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμών (ΠΣΔ), συγκεκριμένα:

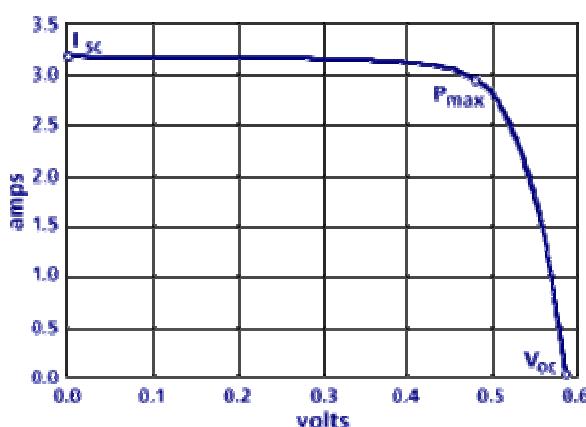
- Θερμοκρασία = 25°C ,
- Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας = 1000 W/m^2 ,

- Αέρια μάζα = AM 1,5.

Η αέρια μάζα αναφέρεται στο πάχος της ατμόσφαιρας το οποίο διαπερνά το ηλιακό φως και αποτελεί ένα σημαντικό δείκτη των χαρακτηριστικών του διαθέσιμου φωτός, αφού οι ηλιακές κυψέλες αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Εάν ο ήλιος βρίσκεται κατ' ευθείαν από πάνω, η αέρια μάζα ισούται με 1.

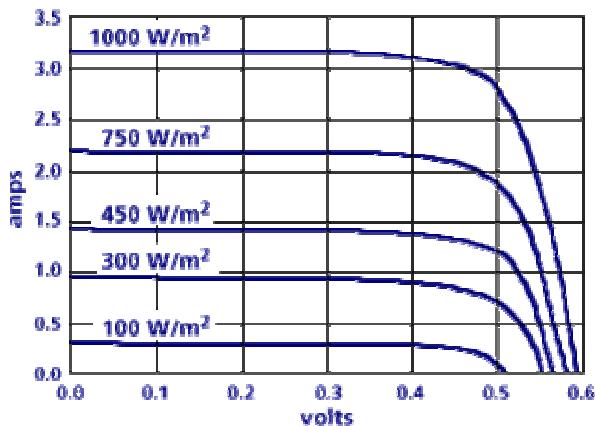
Η ποσότητα του παραγόμενου ρεύματος εξαρτάται από την τάση, και η σχέση αυτή απεικονίζεται στην καμπύλη I-V της κυψέλης. Αυτή χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η απόδοση της κυψέλης και για τη σύγκριση μεταξύ τους κυψελών υπό ορισμένες συνθήκες. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η καμπύλη I-V μίας κυψέλης κρυσταλλικού πυριτίου στις ΠΣΔ. Παρατηρείται ότι, αριστερά του γόνατος της καμπύλης το ρεύμα μεταβάλλεται ελάχιστα με μεγάλες μεταβολές της τάσης, ενώ στα δεξιά μεταβάλλεται σημαντικά με μικρές μεταβολές αυτής. Γι' αυτόν τον τύπο κυψέλης εν γένει ισχύουν:

- I_{sc} (ρεύμα βραχυκυκλώματος) = 3,36 A,
- V_{oc} (τάση ανοιχτού κυκλώματος) = 0,6 V,
- P_{max} (σημείο μέγιστης ισχύος) = 1,5 W,
- I_{max} (ρεύμα στο P_{max}) = 3 A,
- V_{max} (τάση στο P_{max}) = 0,5 V.



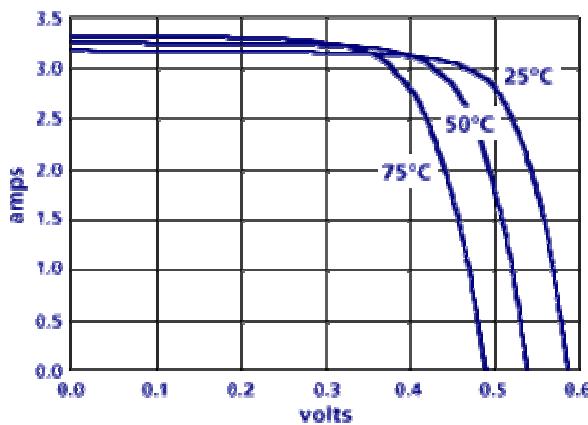
Σχήμα 3.4. Η καμπύλη I-V μίας τυπικής κυψέλης κρυσταλλικού πυριτίου σε ΠΣΔ

Η παραγόμενη ισχύς από την κυψέλη είναι σχεδόν ευθέως ανάλογη προς την ένταση του ηλιακού φωτός (για παράδειγμα, εάν υποδιπλασιαστεί η ένταση του ηλιακού φωτός θα υποδιπλασιαστεί και η παραγόμενη ισχύς). Ένα σημαντικό γνώρισμα των Φ/Β κυψελών είναι ότι η τάση της κυψέλης δεν εξαρτάται από το μέγεθός της, και παραμένει σχετικά σταθερή με τη μεταβολή της έντασης του φωτός. Εντούτοις, το ρεύμα σε μια διάταξη είναι σχεδόν ευθέως ανάλογο προς την ένταση του φωτός και το μέγεθός της. Αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5. Παραγωγή ρεύματος και τάσης μιας ηλιακής κυψέλης υπό διαφορετικές εντάσεις φωτός

Η παραγόμενη από μια ηλιακή κυψέλη ισχύς μπορεί να αυξηθεί αρκετά με τη χρήση ενός μηχανισμού παρακολούθησης της τροχιάς που να διατηρεί τη Φ/Β διάταξη απευθείας κάθετη προς τις ακτίνες του ήλιου, ή συγκεντρώνοντας το φως του ήλιου με τη βοήθεια φακών ή κατόπτρων. Εντούτοις, υπάρχουν όρια στη διαδικασία αυτή, λόγω της πολυπλοκότητας των μηχανισμών και της αναγκαίας ψύξης των κυψελών. Η παραγωγή ρεύματος είναι σχετικά σταθερή σε υψηλότερες θερμοκρασίες αλλά η τάση μειώνεται (κατά 0,0023 Volts περίπου για κάθε αύξηση ενός βαθμού Κελσίου), προκαλώντας έτσι τη μείωση της ισχύος με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το σχήμα 3.6 απεικονίζει τα χαρακτηριστικά μιας κυψέλης σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (οι άλλες συνθήκες παραμένουν ίδιες).



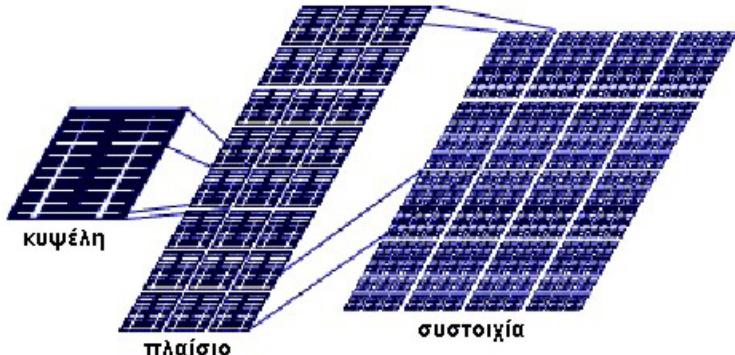
Σχήμα 3.6. Επίδραση της θερμοκρασίας στις καμπύλες I-V μιας τυπικής κυψέλης κρυσταλλικού πυριτίου

3.3. Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ (ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ)

Ο όρος “συστοιχία” αναφέρεται συνήθως στις συνιστώσες που εξετάζονται σε αυτό το χωρίο, συγκεκριμένα αφορά όλα τα πλαίσια ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, την καλωδίωση και τις διόδους τους, καθώς και τη βάση της συστοιχίας.

3.3.1. Συνιστώσες μιας Φ/Β συστοιχίας

Οι κυψέλες ομαδοποιούνται σε πλαίσια και τα πλαίσια συναθροίζονται για να διαμορφώσουν μια συστοιχία, όπως αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.7. Ανάλογα με την εφαρμογή, η συστοιχία μπορεί να αποτελείται από μία κυψέλη, ένα πλαίσιο, ή πολλά πλαίσια.



Σχήμα 3.7. Συνιστώσες μιας Φ/Β συστοιχίας

3.3.1.1. Η κυψέλη

Μια τυπική ηλιακή κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχει βαθύ μπλε χρώμα και ζυγίζει λιγότερο από 10 gr. Το μήκος και το πλάτος της είναι περίπου 10cm, ανάλογα με τον κατασκευαστή. Η μεμονωμένη κυψέλη παράγει, υπό βέλτιστες συνθήκες, κατά προσέγγιση 1,5 Watts στα 0,5 Volts. Από μόνο του αυτό δεν είναι πολύ χρήσιμο για τις περισσότερες ηλεκτρικές εφαρμογές. Προκειμένου να παραχθεί ωφέλιμη ισχύς, οι κυψέλες συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα, ενώ μερικές φορές κόβονται σε μικρότερα τεμάχια.

Η κοπή των κυψελών γίνεται για δύο κυρίως λόγους. Ο πρώτος είναι για την αύξηση της τάσης. Εάν απαιτείται μόνο λίγο ρεύμα σε υψηλή τάση, τότε κόβοντας τις κυψέλες στη μέση και με την καλωδίωσή τους σε σειρά μπορεί να δημιουργηθεί ένα μικρό πλαίσιο. Κάθε κομμάτι θα παράγει την ίδια τάση με ολόκληρη την κυψέλη, αλλά με λιγότερο ρεύμα (για παράδειγμα, εάν μια κυψέλη κοπεί στη μέση, το κάθε ήμισυ θα παράγει περίπου 0,5 Volts και 1,5 Amps). Ο άλλος λόγος για την κοπή των κυψελών είναι για την αύξηση της πυκνότητας συσκευασίας τους.

Οι κυψέλες με εγκοπές δημιουργούν μη ωφέλιμη επιφάνεια στις γωνίες τους και αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί κόβοντας τις κυψέλες σε ορθογώνια παραλληλόγραμμα. Το ίδιο γίνεται μερικές φορές και σε εφαρμογές όπου είναι κρίσιμες οι επιδόσεις και ο χώρος περιορισμένος. Τα μειονεκτήματα της κοπής των κυψελών είναι ότι με αυτή τη διεργασία συχνά σπαταλούνται τμήματα της κυψέλης, ενώ είναι ιδιαίτερα πιθανό ένα ποσοστό κυψελών να υποστεί βλάβη κατά την κοπή. Ο κατασκευαστής μπορεί να παρέχει δεδομένα για τις ακριβείς διαστάσεις και ανοχές συγκεκριμένων κυψελών του. Κατά τον υπολογισμό του συνολικού εμβαδού της κυψέλης είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη ότι μερικές κυψέλες έχουν γωνίες με εγκοπές.

3.3.1.2. Συνδεσμολογία

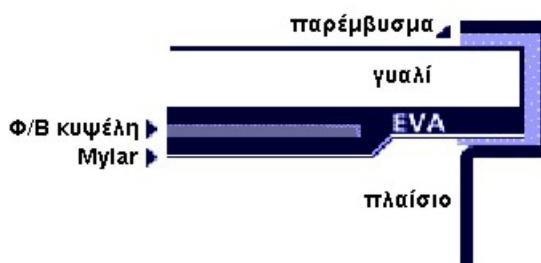
Οι κυψέλες συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους για να συστήσουν μια συνδεσμολογία, όπως συχνά ονομάζεται αυτή η διάταξη. Οι κυψέλες διασυνδέονται με συγκόλληση των ακροδεκτών τους από την κορυφή της μίας στη βάση της επόμενης. Αυτό γίνεται εν γένει εργοστασιακά με ειδικές μηχανές. Είναι σημαντικό να μην υφίστανται φθορές οι κυψέλες κατά τη διεργασία, να είναι ανθεκτικές οι συνδέσεις, και να διατηρείται το κατάλληλο διάστημα μεταξύ των κυψελών. Εάν οι κυψέλες ακουμπούν μεταξύ τους μπορεί να προκύψουν προβλήματα ηλεκτρικών βραχυκυκλωμάτων καθώς επίσης και προβλήματα σκίασης, ενώ αυξάνεται η πιθανότητα ραγίσματός τους. Τα υπερβολικά μεγάλα κενά μεταξύ των κυψελών σπαταλούν πολύτιμη επιφάνεια.

3.3.1.3. Πλαίσιο

Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται συνήθως σε σειρά, διαμορφώνοντας ένα σύνολο που ονομάζεται πλαίσιο. Το Φ/Β πλαίσιο εν γένει αποτελεί τη μικρότερη αυτοτελή μονάδα σε μια συστοιχία, καθώς είναι μία ομάδα κυψελών που έχουν συνδεθεί μεταξύ τους και στη συνέχεια τοποθετηθεί σε ένα κέλυφος ως αυτόνομη μονάδα. Ο αριθμός των κυψελών ενός πλαισίου καθορίζεται συνήθως από τις ανάγκες τάσης του συστήματος και οι περισσότεροι κατασκευαστές παράγουν πλαίσια τα οποία διαστασιολογούνται σύμφωνα με τις τάσεις των χρησιμοποιούμενων μπαταριών. Ένα τυπικό πλαίσιο για φόρτιση μιας μπαταρίας 12 Volt έχει 33 έως 36 κυψέλες (πρέπει να παρέχει πάνω από 12 Volt για να φορτίσει τη μπαταρία). Σημειώνεται ότι η λέξη πλαίσιο μπορεί να αναφέρεται είτε σε ένα μόνο πλαίσιο είτε σε ένα σύνολο πλαισίων.

3.3.1.4. Ενθυλάκωση

Οι ηλιακές κυψέλες χρειάζονται προστασία και υποστήριξη. Για το λόγο αυτό σχεδόν πάντα τοποθετούνται σε κέλυφος, με κάποιο τρόπο που να τις προστατεύει και να τις μονώνει ηλεκτρικά. Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η εγκάρσια τομή ενός τυπικού πλαισίου που χρησιμοποιείται σε οικιακές ή απομονωμένες εφαρμογές, ή σε Φ/Β σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Τα περισσότερα πλαίσια ενθυλακώνονται σε κάποιο πολυμερές υλικό, όπως ο οξικός εστέρας αιθυλενίου-βινυλίου (EVA), το οποίο στη συνέχεια τοποθετείται μεταξύ γυαλιού στην επάνω επιφάνεια και Mylar ή Tedlar στην κάτω. Οι ακμές σφραγίζονται με ένα στεγανωτικό παρέμβυσμα και υποστηρίζονται από ένα πλαίσιο. Έχουν γίνει επίσης κατασκευές από εύκαμπτα ελάσματα.



Σχήμα 3.8. Τομή ενός τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί παράγοντες που εξετάζονται κατά την επιλογή των υλικών για την ενθυλάκωση, με τη σημασία τους να εξαρτάται από την εφαρμογή. Τα πιο σημαντικά από τα χαρακτηριστικά της ενθυλάκωσης είναι τα εξής:

- **Ηλεκτρική ειδική αντίσταση**

Το υλικό πρέπει να είναι ηλεκτρικός μονωτής. Είναι σημαντικό να απομονωθεί η τάση της συστοιχίας και να προστατεύεται η συστοιχία από οιεσδήποτε εξωτερικές τάσεις.

- **Μετάδοση του φωτός**

Ιδανικά, η ενθυλάκωση δεν πρέπει να εμποδίζει το φως να προσεγγίσει τις κυψέλες.

- **Μετάδοση της θερμότητας**

Οι ηλιακές κυψέλες είναι αποδοτικότερες σε χαμηλές θερμοκρασίες. Είναι χρήσιμο να υπάρχει, εάν είναι δυνατό, ένα υλικό ενθυλάκωσης με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απομάκρυνση της θερμότητας από τις κυψέλες.

- **Θερμική διαστολή**

Σε μερικές θέσεις η θερμοκρασία του πλαισίου είναι αρκετά χαμηλότερη του σημείου πήξης το χειμώνα και αρκετά επάνω από τους 40°C το καλοκαίρι. Είναι, επομένως, σημαντικό η ενθυλάκωση να μην συστέλλεται ή διαστέλλεται σημαντικά λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών.

- **Βάρος**

Για μερικές εφαρμογές, το βάρος αποτελεί έναν από τους παράγοντες επιλογής του υλικού ενθυλάκωσης.

- **Ανθεκτικότητα**

Πολλά πλαίσια τοποθετούνται σε εξωτερικό χώρο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και υπόκεινται σε ανέμους, βροχές, ήλιο, χαλάζι, και χιόνια. Αυτά όμως αναμένεται να λειτουργήσουν για είκοσι τουλάχιστον έτη, οπότε το υλικό ενθυλάκωσης πρέπει να είναι ικανό να αντεπεξέλθει σε αυτές τις συνθήκες χωρίς σημαντικό βαθμό φθοράς.

3.3.1.5. Δίοδοι

Οι ηλιακές συστοιχίες μερικές φορές διαθέτουν διόδους φραγής και παράκαμψης. Αυτές είναι μικρές συσκευές που περιορίζουν την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος και αναλύονται περαιτέρω στο σχετικό με τη λειτουργία των συστοιχιών χωρίο.

3.3.1.6. Συστήματα έδρασης / παρακολούθησης

Μερικές συσκευές, όπως τα ηλιακά ρολόγια ή οι υπολογιστές χειρός, ενσωματώνουν την ηλιακή κυψέλη στην ίδια τη συσκευή. Με τις πρόσφατες εξελίξεις στα υλικά των ηλιακών κυψελών, αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ως υλικά κατασκευής της στέγης των κτιρίων. Εντούτοις, οι περισσότερες εφαρμογές των Φ/Β χρειάζονται κάποια βάση για την υποστήριξη και τοποθέτησή τους. Οι βάσεις αυτές μπορεί να είναι από απλές κατασκευές για τη συγκράτηση ενός πλαισίου σε μια στέγη (πιθανώς με μόνιμη κλίση υπό κάποια γωνία), μέχρι σύνθετες διατάξεις παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου σε δύο άξονες. Η πολυπλοκότητα της βάσης στήριξης καθορίζεται

από τις ανάγκες του συστήματος και το διαθέσιμο κεφάλαιο. Περαιτέρω πληροφορίες παρατίθενται στο χωρίο για τη λειτουργία των συστοιχιών.

3.3.2. Λειτουργία των Φ/Β συστοιχιών

Γενικά, ένα Φ/Β πλαίσιο ή μια συστοιχία επηρεάζεται από το περιβάλλον με τον ίδιο τρόπο που επηρεάζεται και μία Φ/Β κυψέλη. Η τάση μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία και το ρεύμα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η έκθεση στις ηλιακές ακτίνες.

3.3.2.1. Σύνδεση εν σειρά

Όταν ηλιακές κυψέλες (ή πλαίσια) συνδέονται εν σειρά, μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος της συνδεσμολογίας με τις μεθόδους που περιγράφονται στη συνέχεια. Αυτό προϋποθέτει ότι οι συνθήκες λειτουργίας για τις κυψέλες είναι οι ίδιες και ότι οι κυψέλες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά I-V.

- *Ρεύμα*

Το ρεύμα σε μία εν σειρά συνδεσμολογία κυψελών είναι το ίδιο σε κάθε σημείο της συνδεσμολογίας, ίδιο με αυτό που παράγεται από μία κυψέλη. Εάν μία κυψέλη με χαρακτηριστικά χαμηλού ρεύματος συνδεθεί σε μια συνδεσμολογία με άλλες κυψέλες που έχουν χαρακτηριστικά υψηλότερου ρεύματος, η συνδεσμολογία θα περιοριστεί στο ρεύμα της κυψέλης χαμηλού ρεύματος.

$$I_{\text{σειράς}} = (I_{\max} \text{ μίας κυψέλης}) \quad (3.1)$$

- *Τάση*

Η τάση σε μία συνδεσμολογία κυψελών είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων κάθε κυψέλης. Υποθέτοντας όμοιες κυψέλες, η τάση μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

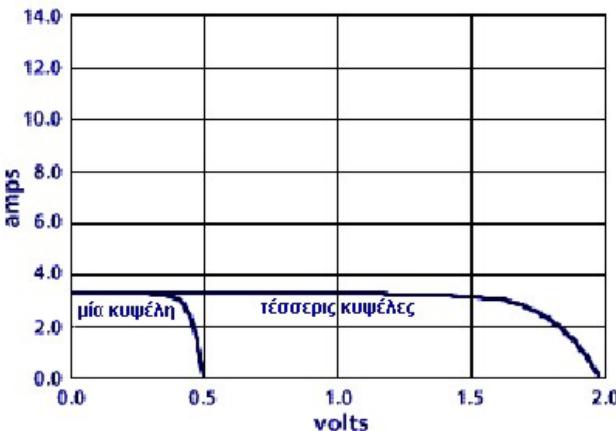
$$V_{\text{σειράς}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) \times (V_{\max} \text{ μίας κυψέλης}) \quad (3.2)$$

- *Ισχύς*

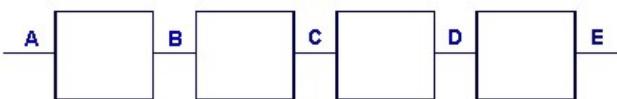
Η παραγόμενη ισχύς από μία συνδεσμολογία κυψελών ισούται με το ρεύμα της συνδεσμολογίας - σχέση (3.1) - πολλαπλασιαζόμενο με την τάση της σχέσης (3.2):

$$\begin{aligned} P_{\text{σειράς}} &= I_{\text{σειράς}} \times V_{\text{σειράς}} \Rightarrow \\ P_{\text{σειράς}} &= (I_{\max} \text{ μίας κυψέλης}) \times (\text{Αριθμός κυψελών}) \times (V_{\max} \text{ μίας κυψέλης}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Σημειώνεται ότι, μπορεί οι μεμονωμένες κυψέλες να λειτουργούν σε διαφορετικές τάσεις, αλλά κάθε μία κυψέλη θα λειτουργεί με το ίδιο ρεύμα όπως και οι άλλες στη συνδεσμολογία. Το σχήμα 3.9 παρουσιάζει το πώς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά I-V των μεμονωμένων κυψελών για να διαμορφώσουν την καμπύλη I-V της εν σειρά συνδεσμολογίας. Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται μία εν σειρά συνδεσμολογία από τέσσερις κυψέλες και τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος αυτών.



Σχήμα 3.9. Τυπικές καμπύλες I-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες εν σειρά



τάση μεταξύ A και B = 0.5 volts

A και C = 1.0 volts

A και D = 1.5 volts

A και E = 2.0 volts

ρεύμα στο A = B = C = D = E = 3.0 amps

Σχήμα 3.10. Τέσσερις ηλιακές κυψέλες συνδεδεμένες εν σειρά

3.3.2.2. Σύνδεση εν παραλλήλω

Εάν οι κυψέλες (ή τα πλαίσια) συνδεθούν παράλληλα, μπορεί να γίνει μία εκτίμηση του ρεύματος, της τάσης και της ισχύος τους με τις μεθόδους που περιγράφονται στη συνέχεια, υποθέτοντας και πάλι ότι οι συνθήκες λειτουργίας είναι οι ίδιες και ότι οι κυψέλες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά I-V.

▪ Ρεύμα

Το παραγόμενο ρεύμα από μια ομάδα κυψελών συνδεδεμένων παράλληλα ισούται με το άθροισμα των μεμονωμένων ρευμάτων κάθε κυψέλης. Υποθέτοντας παρόμοιες κυψέλες, το ρεύμα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$I_{\text{παραλληλ}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) \times (I_{\max} \text{ μίας κυψέλης}) \quad (3.4)$$

▪ Τάση

Η τάση μεταξύ δύο κόμβων μιας ομάδας κυψελών συνδεδεμένων εν παραλλήλω είναι ίση με την τάση κάθε κυψέλης:

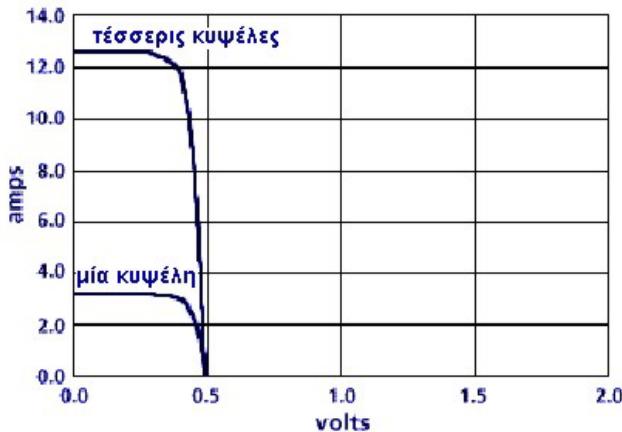
$$V_{\text{παραλληλ}} = (V_{\max} \text{ μίας κυψέλης}) \quad (3.5)$$

▪ Ισχύς

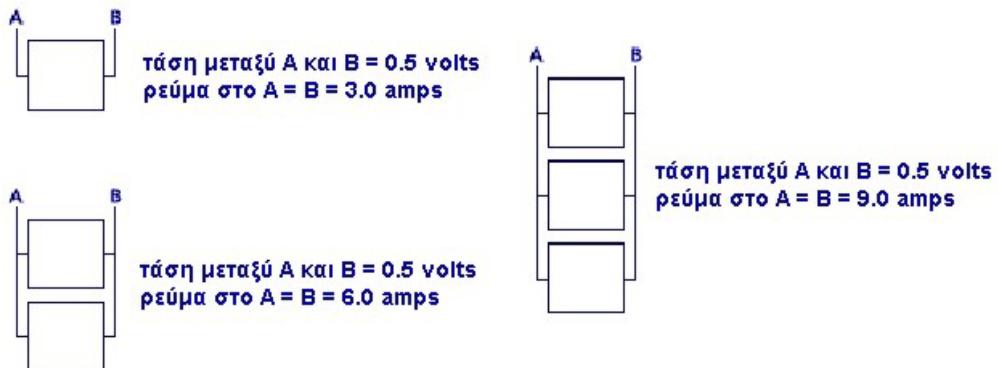
Η παραγόμενη ισχύς από κυψέλες εν παραλλήλω είναι ίση με το παράλληλο ρεύμα - εξίσωση (3.4) - πολλαπλασιασμένο με την παράλληλη τάση της εξίσωσης (3.5):

$$\begin{aligned} P_{\text{παραλληλ}} &= I_{\text{παραλληλ}} \times V_{\text{παραλληλ}} \Rightarrow \\ P_{\text{παραλληλ}} &= (\text{Αριθμός κυψελών}) \times (I_{\max} \text{ μίας κυψέλης}) \times (V_{\max} \text{ μίας κυψέλης}) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Σημειώνεται ότι, όταν μια ομάδα κυψελών συνδέεται παράλληλα, οι μεμονωμένες κυψέλες μπορεί να παράγουν διαφορετικά ρεύματα, αλλά κάθε κυψέλη θα λειτουργεί στην ίδια τάση. Στο παρακάτω σχήμα 3.11 παρουσιάζεται το πώς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά I-V των μεμονωμένων κυψελών για να διαμορφώσουν την καμπύλη I-V της ομάδας των κυψελών εν παραλλήλω. Στο σχήμα 3.12 απεικονίζονται ομάδες κυψελών εν παραλλήλω και τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος αυτών.



Σχήμα 3.11. Καμπύλες I-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα



Σχήμα 3.12. Μία, δύο, και τρεις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα

3.3.2.3. Δίοδοι

▪ Δίοδοι παράκαμψης

Οι δίοδοι παράκαμψης χρησιμοποιούνται για την προστασία των συνδεσμολογιών εν σειρά των κυψελών. Εν γένει, ένα πλαίσιο προσφέρεται από τον κατασκευαστή με ενσωματωμένη μια δίοδο παράκαμψης, η οποία συνδέεται παράλληλα με ολόκληρο το πλαίσιο. Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, η δίοδος δεν κάνει τίποτα εκτός από το να καταναλώνει μία ελάχιστη ποσότητα ισχύος. Εάν σκιαστεί ή υποστεί βλάβη μέρος του πλαισίου, η δίοδος παράκαμψης εκτρέπει το ρεύμα μέσω αυτής και γύρω από το πλαίσιο. Χωρίς τη δίοδο, το πλαίσιο που σκιάζεται ή έχει υποστεί βλάβη διαχέει το ρεύμα υπό μορφή θερμότητας και τελικά καταστρέφεται.

▪ Δίοδοι φραγής

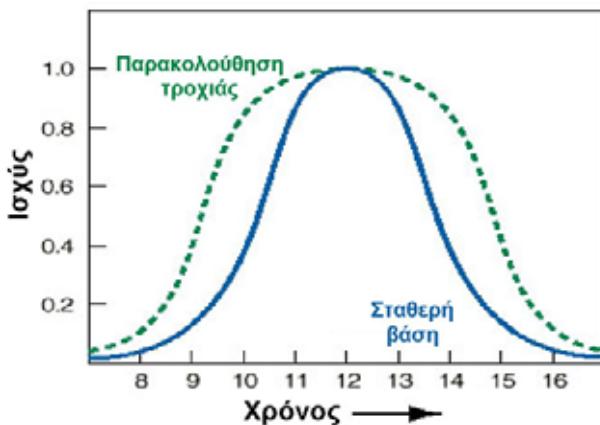
Οι δίοδοι φραγής εγκαθίστανται για να αποτρέψουν την αντιστροφή της ροής του ρεύματος προς τα πλαίσια. Μια δίοδος φραγής συνδέεται συνήθως εν σειρά μεταξύ

της συστοιχίας και των μπαταριών. Αντ' αυτού, εάν ένας αριθμός συνδεσμολογιών συνδέονται εν σειρά, οι δίοδοι φραγής μπορούν να συνδεθούν εν σειρά με κάθε μία συνδεσμολογία. Ενίοτε ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στα Φ/Β συστήματα για τη ρύθμιση της ισχύος εξαλείφει την ανάγκη προσθήκης μιας διόδου φραγής.

3.3.2.4. Παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου

Ένα πλαίσιο το οποίο φέρεται κάθετα στις ακτίνες του ήλιου λαμβάνει περισσότερο φως από ένα άλλο που δεν είναι προσανατολισμένο προς τον ήλιο. Η πορεία του ήλιου στον ουρανό αλλάζει τόσο με την ώρα της ημέρας όσο και με την ημέρα του έτους. Αυτό σημαίνει ότι, για να παράγει ένα πλαίσιο τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας, πρέπει να είναι σε θέση να περιστραφεί για να ακολουθήσει την τροχιά του ήλιου. Τα σταθερά πλαίσια τοποθετούνται ώστε να αντικρίζουν τον ισημερινό υπό μια ορισμένη γωνία και δεν κινούνται. Αν και τα πλαίσια αυτά δεν μπορούν να παράγουν τόση ισχύ όση τα πλαίσια με παρακολούθηση της τροχιάς, έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι πιο οικονομικά και συντηρούνται ευκολότερα. Η πλειοψηφία των πλαισίων είναι σταθερά.

Σε μερικές περιπτώσεις, τα σταθερά πλαίσια ρυθμίζονται χειροκίνητα. Αυτό μπορεί να γίνει μερικές φορές το χρόνο ώστε να ληφθούν υπόψη οι εποχιακές αλλαγές της πορείας του ήλιου ή, ενίοτε, μερικές φορές την ημέρα. Με τη χειροκίνητη ρύθμιση των πλαισίων μπορεί να αποληφθεί ένα σημαντικό μέρος του φωτός που θα συλλεγόταν μέσω ενός συστήματος παρακολούθησης. Τα συστήματα αυτά μπορούν σχεδόν να διπλασιάσουν την παραγωγή μιας συστοιχίας (σχήμα 3.13), ενίοτε όμως απαιτείται προσεκτική ανάλυση για να προσδιοριστεί εάν το αυξημένο κόστος και η μηχανική πολυπλοκότητα της χρήσης ενός τροχιοδεικτικού συστήματος είναι συμφέρουσα.



Σχήμα 3.13. Παραγόμενη ισχύς από μία συστοιχία με και χωρίς σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου

Στην παρακολούθηση τροχιάς μονού άξονα τα πλαίσια κινούνται κατά μήκος ενός άξονα για να ακολουθούν την πορεία του ήλιου (σχ. 3.14 - αριστερά). Σχεδόν πάντα ακολουθείται η μεταβαλλόμενη ανύψωση του ήλιου στον ουρανό, αντί της κίνησής του από ανατολή προς δύση. Στην παρακολούθηση τροχιάς διπλού άξονα (σχ. 3.14 - δεξιά) τα πλαίσια κινούνται κατά μήκος δύο αξόνων. Μερικές συστοιχίες, όπως αυτές με συγκεντρωτικές κυψέλες, απαιτούν παρακολούθηση της τροχιάς σε δύο άξονες,

επειδή οι κυψέλες χρησιμοποιούν μόνο την άμεση ακτινοβολία και η απόδοσή τους μειώνεται σημαντικά εάν δεν είναι ακριβώς κάθετες στις ακτίνες του ήλιου.



Σχήμα 3.14. Παρακολούθηση τροχιάς μονού άξονα (αριστερά) και συγκεντρωτικές κυψέλες με παρακολούθηση τροχιάς διπλού άξονα (δεξιά)
[Πηγή: <http://aurora.crest.org/pv/array/components/index.htm>]

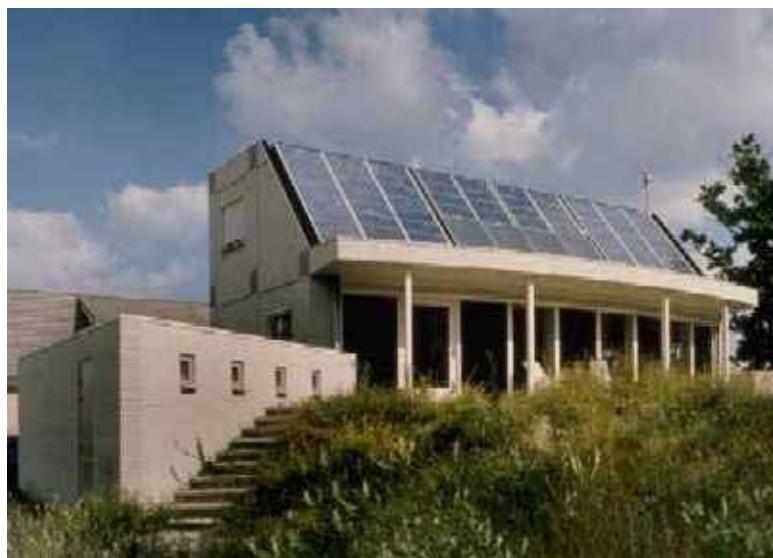
3.4. Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ

3.4.1. Οι αγορές των Φ/Β

Πολλοί άνθρωποι τελευταία ενδιαφέρονται για το μέλλον του πλανήτη. Οι συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες αναγνωρίζονται ευρέως ως κύριο αίτιο της καταστροφής του περιβάλλοντος, από την άποψη τόσο της εξάντλησης των φυσικών πόρων όσο και της ρύπανσης. Τα Φ/Β και οι άλλες ανανεώσιμες ενεργειακές τεχνολογίες κερδίζουν ευρεία αποδοχή ως ένας τρόπος διατήρησης και βελτίωσης του βιοτικού επίπεδου χωρίς να βλάπτεται το περιβάλλον. Όλο και περισσότερες εταιρείες παραγωγής ενέργειας ανταποκρίνονται στις επιθυμίες των καταναλωτών συμπεριλαμβάνοντας τα Φ/Β στον παραγωγικό μηχανισμό τους.

Η ενσωμάτωση Φ/Β σε στέγες και προσόψεις κτιρίων αναμένεται να αποτελέσει μια κύρια εφαρμογή τους σε πολλές βιομηχανικές χώρες (σχήμα 3.15). Ήδη η Ιαπωνία, η Γερμανία, η Ολλανδία και η Ελβετία σημειώνουν πρόοδο προς την κατεύθυνση των κατανεμημένων Φ/Β συστημάτων. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να αποτρέψουν διάφορα κόστη, όπως την αγορά γης και οικοδομικών υλικών και τις δαπάνες μεταφοράς και διανομής, είτε πλήρως είτε μερικώς. Το συνολικά διαθέσιμο δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής από στέγες στις χώρες του ΟΟΣΑ υπολογίζεται ότι είναι περίπου 1100 GW_p , το οποίο επαρκεί για να καλύψει το 14-19% της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρισμού των χωρών αυτών που εκτιμάται σε 6800 TWh.

Παρ' όλα αυτά, οι εγκαταστάσεις μέσης και μεγάλης κλίμακας θα αποτελέσουν τη σημαντικότερη εφαρμογή των Φ/Β. Οι ΗΠΑ και η Ιταλία πρωτοπορούν διεθνώς στην ανάπτυξη Φ/Β συστημάτων μεγάλης κλίμακας. Κάποιες χώρες επίσης επιζητούν την εξέλιξη "περίσσειας" εκτάσεων, για παράδειγμα κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων και των σιδηροτροχιών, με την ενσωμάτωση Φ/Β σε ηχοφράκτες (σχήμα 3.16). Αναπτύσσονται επίσης Φ/Β συγκεντρωτές για εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, οι οποίοι χρησιμοποιούν μεγάλους ανακλαστήρες για τη συγκέντρωση του ηλιακού φωτός επάνω σε κυψέλες μικρού εμβαδού. Αυτό μειώνει την ποσότητα του Φ/Β υλικού που απαιτείται και μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερα κόστη.



Σχήμα 3.15. Κατοικία μηδενικών ενεργειακών αναγκών στο Zandvoort (Ολλανδία)
Πηγή: [http://www.euronet.nl/users/oke/PVPS/pv/sa_syst.htm]



Σχήμα 3.16. Ηχοφράκτης με Φ/Β πλαίσια στο επάνω μισό κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου A27 στην Ουτρέχτη (Ολλανδία)
Πηγή: [http://www.euronet.nl/users/oke/PVPS/pv/sa_syst.htm]

Σύμφωνα με στοιχεία του 1998, η παγκόσμια παραγωγή Φ/Β κυψελών και πλαισίων ανέρχεται σε 135 MW περίπου, σταθερά και εντυπωσιακά πάνω από τα μόλις 40

MW το 1990. Οι παγκόσμιες πωλήσεις αυξάνονταν με ένα μέσο ρυθμό 15% κατ' έτος κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, αν και αυτός ο ρυθμός ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή και την εφαρμογή. Εν γένει υφίσταται μια ρεαλιστική δυνατότητα για συνέχιση της επέκτασης της αγοράς με ένα ρυθμό 15-20% την επόμενη δεκαετία. Με αυτό το ρυθμό, η παγκόσμια παραγωγή θα ανέλθει στο επίπεδο των 1.000 MW μέχρι το 2010, και τα Φ/Β μπορούν να καταστούν μια βιομηχανία της τάξης των 5 έως 8 δισεκατομμυρίων δολαρίων.

3.4.2. Αυτόνομα συστήματα

Για πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, όπου το ηλεκτρικό δίκτυο κατά μεγάλο μέρος περιορίζεται στις κύριες αστικές περιοχές και ένα σημαντικό ποσοστό του αγροτικού πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση στις πλέον βασικές ενεργειακές υπηρεσίες, τα Φ/Β σήμερα θεωρούνται ευρέως ως το καλύτερο και πιο οικονομικό μέσο παροχής ενός μεγάλου μέρους των στερούμενων υπηρεσιών. Με βάση τις ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις για παροχή των βασικών ενεργειακών υπηρεσιών σε κάθε κάτοικο του αναπτυσσόμενου κόσμου, το αντίστοιχο δυναμικό των Φ/Β εκτιμάται ότι ανέρχεται σε 16 GW_p (περίπου 15 W_p ανά κάτοικο).

Τα Φ/Β πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις ακόλουθες εφαρμογές:

- **Συστήματα άντλησης:** για παροχή νερού σε χωριά, για άρδευση του εδάφους ή πότισμα εκτρεφομένων ζώων.
- **Συστήματα ψύξης:** ιδιαίτερα για τη συντήρηση εμβολίων, αίματος και άλλων αναλώσιμων ζωτικής σημασίας σε προγράμματα υγειονομικής περίθαλψης.
- **Φωτισμός:** για κατοικίες και κοινοτικά κτίρια, όπως σχολεία και κέντρα υγείας, ώστε να επιτραπεί και μετά τη δύση του ηλίου η συνέχιση των εκπαιδευτικών και παραγωγικών δραστηριοτήτων.
- **Σταθμοί φόρτισης μπαταριών:** για την επαναφόρτιση των μπαταριών οι οποίες χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία ηλεκτρικών συσκευών, από φακούς και ραδιόφωνα έως τηλεοράσεις και συστήματα φωτισμού.
- **Ηλιακά συστήματα κατοικιών:** για παροχή ενέργειας στον οικιακό φωτισμό και σε άλλες συσκευές ΣΡ, όπως τηλεοράσεις, ραδιόφωνα, ραπτομηχανές, κλπ.

Στον πίνακα 3.1 παρέχονται και άλλα παραδείγματα αυτών των εφαρμογών.

Πίνακας 3.1. Αυτόνομες εφαρμογές σε αναπτυσσόμενες χώρες

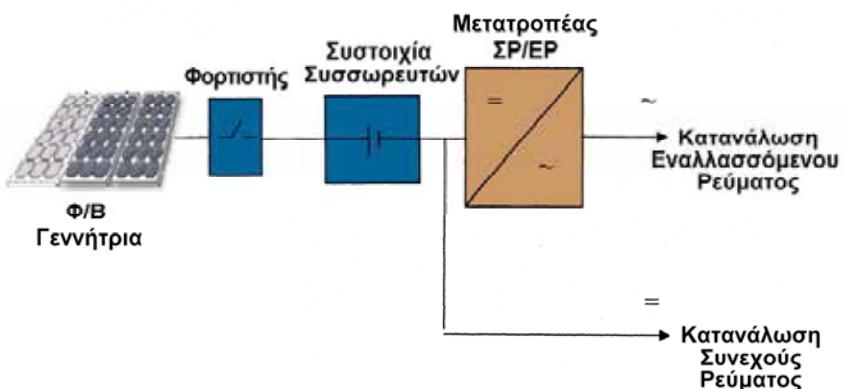
Γεωργία	<ul style="list-style-type: none"> - Αντληση νερού. - Ηλεκτρική περίφραξη για εκτρεφόμενα ζώα και διαχείριση βοσκοτόπων.
Κοινοτικό Επίπεδο	<ul style="list-style-type: none"> - Άντληση νερού, συστήματα αφαλάτωσης και απορρύπανσης. - Φωτισμός για σχολεία και άλλα κοινοτικά κτίρια.
Οικιακός Τομέας	<ul style="list-style-type: none"> - Φωτισμός, για τη διευκόλυνση της μελέτης και δραστηριοτήτων παραγωγής εισοδήματος, και για τη γενικότερη βελτίωση του βιοτικού επίπεδου. - Τηλεόραση, ραδιόφωνο, και άλλες μικρές συσκευές. - Αντληση νερού.
Υγειονομική περίθαλψη	<ul style="list-style-type: none"> - Φωτισμός για τους θαλάμους, το χειρουργείο και τους χώρους του προσωπικού. - Ιατρικός εξοπλισμός. - Ψύξη εμβολίων.

	<ul style="list-style-type: none"> - Επικοινωνίες (τηλέφωνο, συστήματα ραδιοεπικοινωνιών). - Αντληση νερού. - Φωτισμός ασφάλειας.
Μικρές επιχειρήσεις	<ul style="list-style-type: none"> - Συστήματα φωτισμού, για την επέκταση των ωρών λειτουργίας και την αύξηση της παραγωγικότητας. - Ηλεκτρική ισχύς για ελαφρύ εξοπλισμό, όπως ραπτομηχανές, ψυγεία, μύλοι σιταριού, φόρτιση μπαταριών. - Φωτισμός και ραδιόφωνο σε εστιατόρια, καταστήματα και άλλες εγκαταστάσεις.

3.4.2.1. Συνιστώσες και συντήρηση

Τα Φ/Β συστήματα είναι πολυσυναρτησιακά, το οποίο δεν σημαίνει μόνο εύκολη μεταφορά και γρήγορη εγκατάσταση, αλλά επιτρέπει επίσης την εύκολη επέκτασή τους εάν αυξηθούν οι απαιτήσεις ισχύος. Τα συστήματα για αυτόνομες εφαρμογές (σχήμα 3.17) μπορεί να περιλαμβάνουν όλες ή μερικές από τις ακόλουθες βασικές συνιστώσες:

- Μία Φ/Β γεννήτρια (ένα μόνο πλαίσιο ή μία συστοιχία αρκετών πλαισίων) και ένα σύστημα υποστήριξης.
- Εξοπλισμό ρύθμισης της ισχύος (προαιρετικά - συνήθως περιέχονται μετατροπείς ΣΡ/ΕΡ και εξοπλισμός ελέγχου και προστασίας).
- Αποθήκευση ενέργειας (προαιρετικά - συνήθως παρέχεται από μπαταρίες).
- Καλωδιώσεις.
- Ένα φορτίο (π.χ. φωτιστικά, αντλίες, ψυγεία, ραδιόφωνο, τηλεόραση).



Σχήμα 3.17. Σχηματική παράσταση ενός αυτόνομου Φ/Β συστήματος

Ο εξοπλισμός ηλεκτροπαραγωγής των Φ/Β δεν διαθέτει κινούμενα μέρη, το οποίο γενικά περιορίζει τις απαιτήσεις για συντήρηση στο ελάχιστο και οδηγεί σε μακρούς χρόνους λειτουργίας. Καθαυτά τα πλαίσια συνήθως λειτουργούν για είκοσι περίπου έτη και οι απαιτήσεις τους περιορίζονται στον περιστασιακό καθαρισμό τους ώστε να αφαιρούνται οι επικαθίσεις ρύπων. Η πλειοψηφία των άλλων συνιστωσών, συχνά καλούμενες και εξοπλισμός εξισορρόπησης (BOS), χρήζουν συντήρησης κάθε δέκα ή περισσότερα έτη, εάν ακολουθούνται απλά μέτρα προληπτικής συντήρησης.

Οι μπαταρίες που απαιτούνται συνήθως στις περισσότερες εκτός δικτύου εφαρμογές, εκτός από την άντληση ύδατος, αποτελούν την περίοδο αυτή το αδύνατο σημείο των Φ/Β συστημάτων και εν γένει χρειάζονται αντικατάσταση κάθε πέντε περίπου χρόνια.

Είναι σημαντικό οι μπαταρίες, αλλά και όλες οι συνιστώσες του συστήματος, να είναι αποδεκτής ποιότητας. Όπου έχουν αποτύχει κατά το παρελθόν τα Φ/Β συστήματα για τεχνικούς λόγους, αυτό γενικά οφειλόταν σε ελλιπή σχεδιασμό του συστήματος ή σε ανεπιτυχή επιλογή των συνιστωσών BOS, παρά σε αστοχία ενός Φ/Β πλαισίου. Ως εκ τούτου, αξιόλογες ερευνητικές προσπάθειες διεθνώς στοχεύουν αυτή τη στιγμή στη βελτίωση της απόδοσης των συνιστωσών BOS.

3.4.2.2. Κόστη και οικονομικά στοιχεία

Από την άποψη του μέσου μοναδιαίου ενεργειακού κόστους, που υπολογίζεται με τη χρήση των παραδοσιακών λογιστικών τεχνικών, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από Φ/Β δεν μπορεί ακόμα να ανταγωνιστεί τις αποδοτικές συμβατικές κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής. Εξάλλου, η μεγάλη πλειοψηφία των Φ/Β εγκαταστάσεων μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνταν για εφαρμογές μικρής σχετικά ισχύος σε θέσεις που δεν έχουν άμεση πρόσβαση σε κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Στις περιπτώσεις αυτές, τα Φ/Β επιλέγονται επειδή προσφέρουν μια ασφαλή και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ισχύος, και αποτελούν συχνά τη φθηνότερη ενεργειακή επιλογή.

Όπως και σε κάθε παρόμοιο αγαθό, η συνολική τιμή αγοράς ενός Φ/Β συστήματος προκύπτει από όλα τα εγγενή κόστη για την παραγωγή των επιμέρους συνιστωσών, τη μεταφορά και την εγκατάστασή τους. Μπορεί επίσης να υπάρχουν κόστη σχετικά με τη σχεδίαση και την τεχνική μελέτη του συστήματος, καθώς και για την αγορά γης - ειδικά στα έργα μεγάλης κλίμακας. Εντούτοις, υπάρχουν πολλοί άλλοι παράγοντες που πρέπει να εξετάζονται:

- Οι περισσότεροι κατασκευαστές Φ/Β συστημάτων προσφέρουν κάποια μορφή έκπτωσης για συμφωνίες μαζικής αγοράς.
- Ο εισαγόμενος από ξένες χώρες εξοπλισμός υπόκειται σε φόρο εισαγωγής.
- Όταν τα συστήματα αγοράζονται μέσω αντιπροσώπου, συνήθως υφίσταται μια προσαύξηση για τη διεκπεραίωση, και γενικά θα πρέπει να καταβληθεί κάποιου είδους φόρος επί των πωλήσεων.

Έτσι είναι δύσκολο να καθοριστεί η συνολική τιμή, η οποία ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή, το μέγεθος του συστήματος και τη θέση τοποθέτησης. Πάντως, το κόστος της Φ/Β συστοιχίας είναι σημαντικός παράγοντας και αποτελεί συνήθως το 30-50% του συνολικού κόστους, ενώ τα BOS συνεισφέρουν κατά ένα αντίστοιχο ποσοστό. Για παράδειγμα, ένα μικρό οικιακό σύστημα φωτισμού για τροφοδοσία δύο ή τριών λαμπτήρων φθορισμού είναι τυπικά της τάξης των 50 W_p και κοστίζει περίπου €500, ενώ ένα Φ/Β ψυγείο για διατήρηση εμβολίων μπορεί να απαιτεί μια συστοιχία 200 W_p, της οποίας η συνολική τιμή ανέρχεται περίπου σε €5000.

Κατά συνέπεια, τα Φ/Β συστήματα αποτελούν μια ελκυστική επιλογή σε αγροτικές περιοχές όπου δεν είναι διαθέσιμη σύνδεση με το δίκτυο, αν και υπό όρους απλής αποπληρωμής τα Φ/Β μπορεί συχνά να παρουσιάζονται ως μη ελκυστικά, λόγω των υψηλών αρχικών τους δαπανών. Εντούτοις, με την κοστολόγηση σε όλο τον κύκλο ζωής, στην οποία υπολογίζονται όλες οι δαπάνες αντικατάστασης καυσίμων και

εξοπλισμού που υφίστανται σε όλη τη ζωή του συστήματος, τα Φ/Β συγκρίνονται συχνά ευνοϊκά με τις εναλλακτικές επιλογές, οι οποίες τείνουν να έχουν μικρότερα αρχικά κόστη αλλά απαιτούν σημαντικά μεγαλύτερες λειτουργικές δαπάνες.

Η υποκατάσταση των συμβατικών τεχνολογιών με Φ/Β μπορεί να επιφέρει διάφορες θετικές επιπτώσεις που είναι δύσκολο να προστικοποιηθούν άμεσα σε οικονομικούς όρους, αλλά εντούτοις παρέχουν σημαντικά οικονομικά και κοινωνικά οφέλη. Για παράδειγμα, σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες κηροζίνης, τα Φ/Β μπορούν να παρέχουν καλύτερα επίπεδα φωτισμού, καθιστώντας εφικτή τη συνέχιση των εκπαιδευτικών και παραγωγικών δραστηριοτήτων και μετά τη δύση του ηλίου με τη μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς και την αποφυγή των επιβλαβών αναθυμιάσεων.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας έχει επισημάνει ότι τα Φ/Β προσφέρουν μια πιο αξιόπιστη υπηρεσία ψύξης σε σχέση με άλλες επιλογές ηλεκτρικής τροφοδοσίας. Αυτό έχει οδηγήσει σε αυξημένη δραστικότητα των αποθεμάτων εμβολίων, το οποίο με τη σειρά του έχει βοηθήσει στη μείωση της θνησιμότητας. Όταν συγκρίνονται τα Φ/Β με τις εναλλακτικές λύσεις πρέπει να εξετάζονται παράγοντες αυτού του είδους, ακόμα και εάν δεν είναι εύκολο να αξιολογηθεί η ανταποδοτικότητα του κόστους.

3.4.2.3. Υβριδικά Φ/Β συστήματα

Αν και τα Φ/Β συστήματα γενικά διαθέτουν μέσα αποθήκευσης της ενέργειας για να καλύψουν μια καθορισμένη περίοδο ανεπαρκούς ηλιοφάνειας, μπορεί να υπάρξουν παρατεταμένες περίοδοι κακοκαιρίας οπότε απαιτείται μια εναλλακτική πηγή ώστε να εξασφαλιστεί η παραγωγή ισχύος. Τα υβριδικά Φ/Β συστήματα συνδυάζουν μια Φ/Β γεννήτρια με μια άλλη πηγή ισχύος, συνήθως μια ντιζελογεννήτρια, ή και με κάποια άλλη ανανεώσιμη πηγή, π.χ. μια ανεμογεννήτρια. Η Φ/Β γεννήτρια διαστασιολογείται συνήθως ώστε να ικανοποιεί τη ζήτηση φορτίου βάσης, ενώ η εναλλακτική παροχή τίθεται σε λειτουργία μόνο όταν είναι αναγκαίο. Αυτή η ρύθμιση παρέχει όλα τα οφέλη των Φ/Β όσον αφορά το χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, αλλά επιπλέον εξασφαλίζει μια εγγυημένη τροφοδοσία.

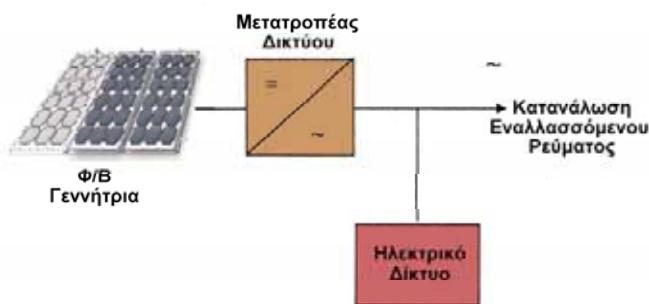
Τα υβριδικά μπορούν επίσης να αποτελέσουν μια λογική προσέγγιση σε καταστάσεις όπου οι περιστασιακές αιχμές ζήτησης είναι σημαντικά υψηλότερες από τη ζήτηση φορτίου βάσης. Δεν έχει νόημα να διαστασιολογείται ένα σύστημα ώστε να μπορεί να ικανοποιεί τη ζήτηση αποκλειστικά με Φ/Β εάν, για παράδειγμα, το κανονικό φορτίο είναι μόνο το 10% του μέγιστου. Αντίστοιχα, μια ντιζελογεννήτρια διαστασιολογημένη έτσι ώστε να ικανοποιεί τη ζήτηση αιχμής θα λειτουργούσε υπό μερικό φορτίο μη αποδοτικά τον περισσότερο χρόνο. Σε μια τέτοια κατάσταση, ένα υβριδικό σύστημα Φ/Β-ντίζελ θα ήταν ο ιδανικός συνδυασμός.

3.4.3. Διασυνδεδεμένα συστήματα

Μια διαφορετική προσέγγιση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η εφαρμογή των διασυνδεδεμένων Φ/Β συστημάτων, στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται στο δίκτυο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικούς τύπους συστημάτων:

- Οι αυτοπαραγωγοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν για την ίδια κατανάλωσή τους μικρά διαδραστικά Φ/Β συστήματα. Το πλεόνασμα της ενέργειας τροφοδοτείται στο δίκτυο, ενώ σε περιόδους έλλειψης (π.χ. τη νύχτα) καταναλώνεται ενέργεια από το δίκτυο.
- Στους εμπορικής κλίμακας κεντρικούς σταθμούς με πεδία Φ/Β συστοιχιών, τους οποίους διαχειρίζονται οι εταιρίες ηλεκτρισμού όπως και τις άλλες εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής, όλη η παραγωγή ΣΡ του πεδίου των συστοιχιών, που γενικά είναι της τάξης των MW, μετατρέπεται σε ΕΡ και στη συνέχεια τροφοδοτείται στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, απ' όπου κατόπιν διανέμεται στους πελάτες.

Σ' ένα διασυνδεδεμένο σύστημα (σχήμα 3.18) το δίκτυο ενέργει όπως μία μπαταρία με απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης. Επομένως, η συνολική αποδοτικότητα ενός διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος θα είναι καλύτερη από την αποδοτικότητα ενός αυτόνομου συστήματος αφού, λαμβάνοντας υπόψη ότι πρακτικά δεν υπάρχει όριο στη ικανότητα αποθήκευσης, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί πάντοτε να αποθηκεύεται, ενώ στις αυτόνομες εφαρμογές οι μπαταρίες θα είναι ενίστε πλήρως φορτισμένες οπότε η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να αποβληθεί.



Σχήμα 3.18. Σχηματική παράσταση διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος

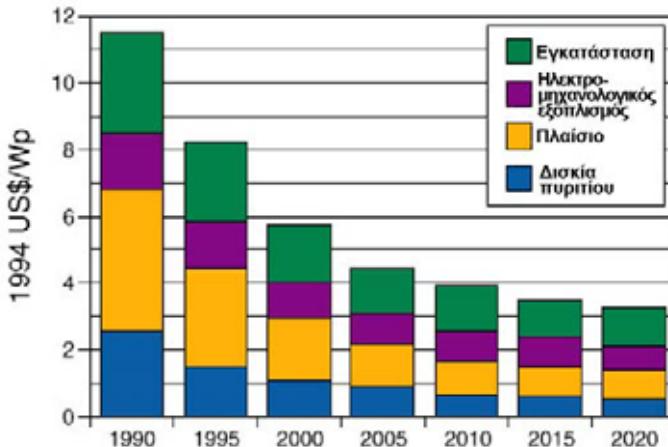
Στις βιομηχανικές χώρες, όπου γενικά είναι εύκολη η σύνδεση στο κύριο δίκτυο, τα Φ/Β συστήματα δεν αποτελούν μια οικονομικά ελκυστική επιλογή. Ένα Φ/Β σύστημα στέγησ 1,5 kW_p, για παράδειγμα, έχει τυπικό κόστος εγκατάστασης περίπου €10.000. Το κόστος του παραγόμενου ηλεκτρισμού εξαρτάται από τη συνολική αποδοτικότητα και τη διάρκεια ζωής του συστήματος, τη διαθεσιμότητα της πηγής, και το εικαζόμενο προεξοφλητικό επιτόκιο, αλλά ενδεικτικά κυμαίνεται μεταξύ €0,35-0,65/kWh. Πάντως, αυτό δεν απεικονίζει ακριβώς την πραγματικότητα, αφού συχνά δεν προσδίδεται κάποια νομισματική αξία στα οφέλη που αποφέρουν τα Φ/Β. Η πιο αποδεκτή "προστιθέμενη αξία" του ηλιακού ηλεκτρισμού είναι ότι δεν μολύνει το περιβάλλον.

3.5. ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ ΓΙΑ ΤΑ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.5.1. Οικονομικά στοιχεία των Φ/Β

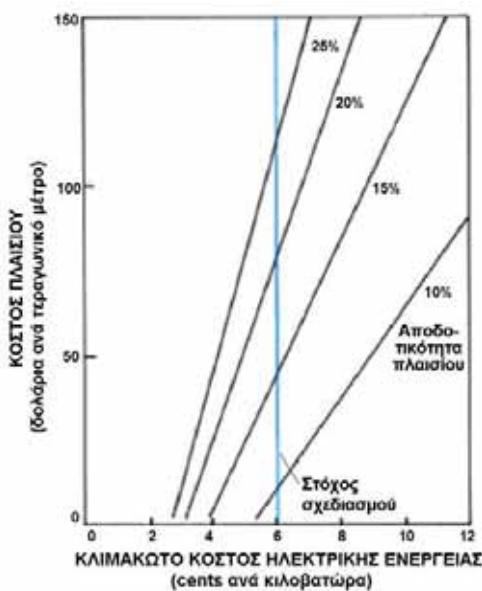
Προκειμένου να υπάρξει ευρεία χρήση των φωτοβολταϊκών, τα κόστη τους πρέπει να είναι ανταγωνιστικά με εκείνα των συμβατικών μορφών ηλεκτρισμού. Η μέση τιμή του ηλεκτρισμού είναι €0,017 - 0,15 ανά kWh, ενώ τα Φ/Β παράγουν σήμερα ηλεκτρική

ενέργεια με €0,5 - 0,6/kWh. Επομένως, τα κόστη πρέπει να μειωθούν κατά πέντε φορές περίπου για να είναι ανταγωνιστικά στη χονδρική αγορά ηλεκτρισμού. Όπως προκύπτει από το σχήμα 3.19, όπου απεικονίζεται το σχετικό ποσοστό του κόστους κάθε στοιχείου ενός Φ/Β συστήματος, οι κυψέλες συνιστούν ένα σημαντικό ποσοστό του τελικού κόστους, κυρίως λόγω της απαίτησης για υψηλής καθαρότητας πυρίτιο.



Σχήμα 3.19. Κόστη ενός Φ/Β συστήματος και μείωση αυτών με το χρόνο
[Πηγή: <http://renewable.greenhouse.gov.au/technologies/pv/pv.html>]

Το κόστος της φωτοβολταϊκής ενέργειας επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, με πιο σημαντικούς την αποδοτικότητα του πλαισίου, τη διάρκεια ζωής και το κόστος ανά μονάδα επιφάνειας. Το σχήμα 3.20 παρουσιάζει τις συσχετίσεις του κόστους και της αποδοτικότητας του πλαισίου που οδηγούν σε ειδικά κόστη του ηλεκτρισμού, για διάρκεια ζωής 30 ετών του πλαισίου και βάσει διάφορων οικονομικών υποθέσεων. Από αυτές προκύπτει ότι τα πλαίσια μικρότερης αποδοτικότητας πρέπει να κοστίζουν λιγότερο από τα πλαίσια υψηλής αποδοτικότητας για την παραγωγή ηλεκτρισμού με το ίδιο κόστος. Συνεπώς, υπάρχει μια επιβάρυνση για την υψηλότερη αποδοτικότητα.



Σχήμα 3.20. Συσχετίσεις μεταξύ του κόστους και της αποδοτικότητας των πλαισίων που οδηγούν σε ειδικά κόστη ηλεκτρικής ενέργειας
[Πηγή: <http://www.nrel.gov/research/pv/docs/pvpaper.html>]

Παρόμοιες καμπύλες ισχύουν για τα συγκεντρωτικά συστήματα, αλλά σ' αυτά είναι αναγκαίες υψηλότερες αποδοτικότητες ώστε να αντισταθμιστούν τα υψηλότερα κόστη των συστημάτων εξισορρόπησης που σχετίζονται με τους απαραίτητους φακούς ή κάτοπτρα και τα τροχιοδεικτικά συστήματα. Και στις δύο περιπτώσεις, μπορεί να αντισταθμιστεί η αποδοτικότητα με τα σχετικά με τη θέση εγκατάστασης κόστη (π.χ. για τις γαίες, την καλωδίωση και τη δομή στήριξης) ώστε να επιτευχθεί το ίδιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγγυημένη ανθεκτικότητα των Φ/Β ενισχύει την οικονομική αποδοτικότητά τους, ειδικά σε εφαρμογές όπου η συντήρηση αποτελεί κύριο μέλημα.

Η παγκόσμια εμπορική παραγωγή φωτοβολταϊκών ετησίως ανέρχεται σε 60 MW και κατανέμεται περίπου εξίσου στις ΗΠΑ, την Ιαπωνία και την Ε.Ε. Οι περισσότερες από τις αγορές υπάγονται στην κατηγορία υψηλής αξίας, δηλαδή είναι αγορές όπου τα σημερινά Φ/Β συστήματα ανταγωνίζονται τους παραδοσιακούς τρόπους παροχής της ηλεκτρικής ισχύος. Οι εφαρμογές αυτές είναι κατά κύριο λόγο απομακρυσμένες από το ηλεκτρικό δίκτυο, εξυπηρετώντας ανάγκες όπως η άντληση νερού, η εξ αποστάσεως επικοινωνία, η ψύξη, οι φωτεινοί σηματοδότες, ο φωτισμός έκτακτης ανάγκης, η προστασία σωληνώσεων από τη διάβρωση και η ηλεκτροδότηση χωριών.

Ανταγωνισμός υπάρχει κυρίως με τις ντιζελογεννήτριες και με την επέκταση των ηλεκτρικών γραμμών μεταφοράς. Το κόστος επέκτασης του δικτύου είναι τέτοιο που, εάν ένα ηλεκτρικό φορτίο βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη του μισού χιλιομέτρου από την υπάρχουσα γραμμή, τα Φ/Β θα είναι οικονομικώς αποδοτικά συγκρινόμενα με την επέκταση της γραμμής. Καθώς μειώνεται το κόστος των Φ/Β συστημάτων, ο αριθμός των οικονομικά αποδοτικών εφαρμογών τους αυξάνεται. Ο τελικός στόχος, δηλαδή η μαζική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αναμένεται να επιτευχθεί στα επόμενα 10 έως 20 χρόνια, όταν οι τιμές των Φ/Β θα πέσουν κάτω από το €0,1/kWh. Εξάλλου, αναμένεται να δρομολογηθούν διάφορες αγορές από τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού πριν την επέκταση αυτών των αγορών μεγάλης ισχύος.

Η ανάπτυξη της αγοράς συνδέεται άμεσα με τη συνεχή ελάττωση του κόστους των Φ/Β σε σχέση με τις συμβατικές παροχές. Η βιομηχανία θα πρέπει να κατασκευάσει μεγαλύτερες και πιο επικερδείς εγκαταστάσεις παραγωγής που να εκμεταλλεύονται τις διαθέσιμες οικονομίες κλίμακας. Οι επενδύσεις σε αυτές τις νέες εγκαταστάσεις θα απαιτήσουν την εξεύρεση βιώσιμων αγορών. Την απαραίτητη ώθηση στην αγορά θα μπορούσε να δώσει η ανάληψη πολλών και μεγάλης αξίας εφαρμογών, μεταξύ των οπίων και τα διεθνή προγράμματα εξηλεκτρισμού των αγροτικών περιοχών.

3.5.2. Περιβαλλοντικές θεωρήσεις

Τα Φ/Β συστήματα προκαλούν ελάχιστα περιβαλλοντικά προβλήματα. Ο εξοπλισμός παραγωγής παράγει ηλεκτρισμό αθόρυβα και δεν εκπέμπει κανενός είδους επιβλαβή αέρια κατά τη λειτουργία του. Το βασικό υλικό για τα πιο συνήθη πλαίσια (πυρίτιο) είναι εντελώς αβλαβές και διατίθεται εν αφθονίᾳ. Πιθανοί κίνδυνοι πάντως υπάρχουν, σχετιζόμενοι με την παραγωγή ορισμένων από τις λιγότερο συνήθεις τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης. Οι δύο πιο ελπιδοφόρες επιλογές, το τελλουριούχο κάδμιο και ο δισεληνιούχος ινδικός χαλκός, περιέχουν μικρές ποσότητες σουλφιδίου του καδμίου,

το οποίο θέτει ενδεχόμενους κινδύνους από το κάδμιο κατά την παραγωγή των πλαισίων. Ευτυχώς, υφίστανται δοκιμασμένες μέθοδοι που διέπουν την διαχείριση τέτοιων σύνθετων ουσιών, οι οποίες υιοθετούνται καθ' όλη τη διαδικασία παραγωγής.

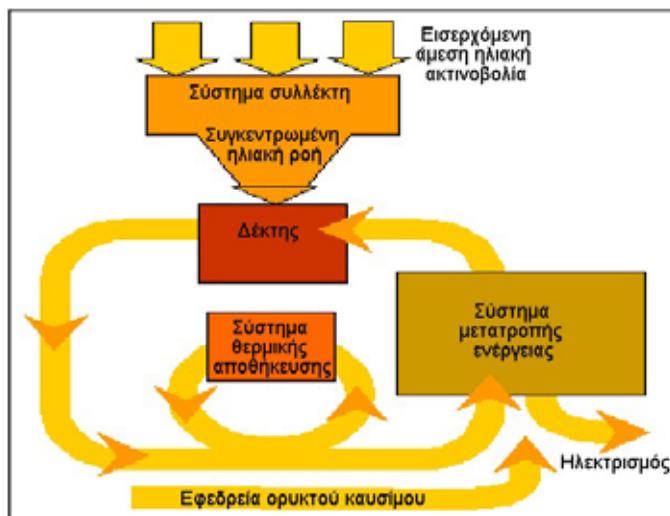
Μια κριτική σχετικά με τα πρώτα Φ/Β πλαίσια ήταν ότι κατανάλωναν περισσότερη ενέργεια κατά την παραγωγή τους από όση παρήγαγαν κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Με τις σύγχρονες μεθόδους παραγωγής και τις βελτιωμένες αποδοτικότητες λειτουργίας αυτός ο ισχυρισμός πλέον δεν ευσταθεί. Η ακριβής ενεργειακή απολαβή εξαρτάται προφανώς από τον διαθέσιμο ηλιακό πόρο και τον βαθμό στον οποίο το σύστημα είναι λειτουργικό. Τα υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας και ένας υψηλός συντελεστής αξιοποίησης αποφέρουν πιο γρήγορες ενεργειακές απολαβές απ' ότι εάν υπάρχει λιγότερο ηλιακό φως και λιγότερη χρήση, αλλά συνήθως η απόσβεση επιτυγχάνεται εντός δύο ετών.

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλιακή ενέργεια έχει υψηλή εξεργειακή τιμή καθώς προέρχεται από διαδικασίες που συντελούνται στην επιφάνεια του ήλιου σε ισοδύναμες θερμοκρασίες μέλανος σώματος της τάξης των 5.800 K. Για να καταστεί η ηλιακή ροή εκμεταλλεύσιμη για τεχνικές διεργασίες και εμπορικές εφαρμογές, έχουν αναπτυχθεί ή βρίσκονται υπό ανάπτυξη διαφορετικές τεχνολογίες εστίασης για διάφορες εμπορικές εφαρμογές. Τα συγκεντρωτικά θερμικά ηλιακά συστήματα αναμφισβήτητα θα συμβάλουν σημαντικά κατά τις αμέσως επόμενες δεκαετίες στην αποδοτική και οικονομική ανανεώσιμη και καθαρή ενεργειακή τροφοδοσία.

Οι τεχνολογίες ηλιακής συγκέντρωσης είναι διατάξιες που συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια εστιάζοντας την ηλιακή ακτινοβολία σ' ένα σημείο ή μία γραμμή εστίασης, και μπορούν να εφαρμοσθούν για την ενεργοποίηση χημικών αντιδράσεων ή για παραγωγή ηλεκτρισμού. Τα ηλιακά συστήματα χημικής ενέργειας αξιοποιούν τις εν λόγω τεχνολογίες ηλιακής συγκέντρωσης για την ενεργοποίηση θερμοχημικών, φωτοχημικών ή ηλεκτροχημικών διεργασιών. Οι εφαρμογές αυτών των τεχνολογιών βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο και είναι πολλά υποσχόμενες μελλοντικά.

Τα πλέον ώριμα συστήματα Ηλεκτροπαραγωγής με Ηλιακή Συγκέντρωση (ΗΗΣ) που χρησιμοποιούν τεχνολογίες αυτού του είδους βρίσκονται ήδη στο στάδιο της εμπορευματοποίησης, και μονάδες ισχύος πολλών MW παράγουν τη φθηνότερη ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια παγκοσμίως τα τελευταία 15 έτη. Τα τελικά στάδια της ηλεκτροπαραγωγής με χρήση συστημάτων ΗΗΣ είναι όμοια με αυτά της συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής (σχήμα 4.1), καθώς η τελική διεργασία ενεργειακής μετατροπής βασίζεται στη χρήση ατμού ή αερίου για την περιστροφή στροβίλων ή την κίνηση ενός εμβόλου σε μία μηχανή Stirling. Πάντως, σ' ένα σύστημα ΗΗΣ ο ατμός ή το θερμό αέριο παράγεται μέσω της συγκέντρωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.1. Βασικές αρχές της τεχνολογίας Ηλεκτροπαραγωγής με Ηλιακή Συγκέντρωση

Όλες οι τεχνολογίες ηλιακής θερμικής ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνουν έναν αριθμό βασικών σταδίων:

- Συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός συστήματος συλλεκτών.
- Συγκέντρωση (ή εστίαση) της ακτινοβολίας σε ένα δέκτη.
- Μετατροπή της από το δέκτη σε θερμική ενέργεια.
- Μεταφορά της θερμικής ενέργειας στο σύστημα ενεργειακής μετατροπής.
- Μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό.

Πολλά τέτοια συστήματα είναι δυνατά, τα οποία μάλιστα μπορούν να συνδυάζονται με άλλες ανανεώσιμες και μη τεχνολογίες σε υβριδικά συστήματα. Ωστόσο θεωρείται, ειδικότερα από το πρόγραμμα SolarPaces της Διεθνούς Επιτροπής Ενέργειας (IEA), ότι οι τρεις πολλά υποσχόμενες αρχιτεκτονικές θερμικής ηλιακής ηλεκτροπαραγωγής, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την τεχνική που χρησιμοποιείται για τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας, είναι:

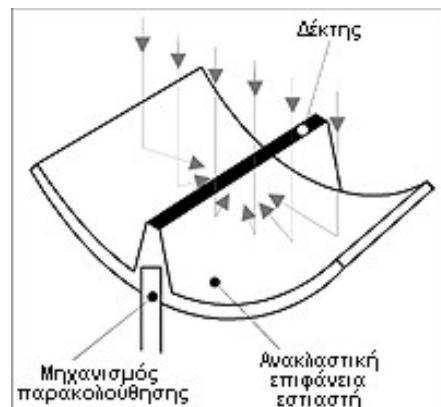
- τα παραβολικά κοίλα,
- οι ηλιακοί πύργοι ισχύος, και
- τα συστήματα δίσκου.

4.2. ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

4.2.1. Συστήματα παραβολικών κοίλων

4.2.1.1. Παρούσα κατάσταση της τεχνολογίας των κοίλων

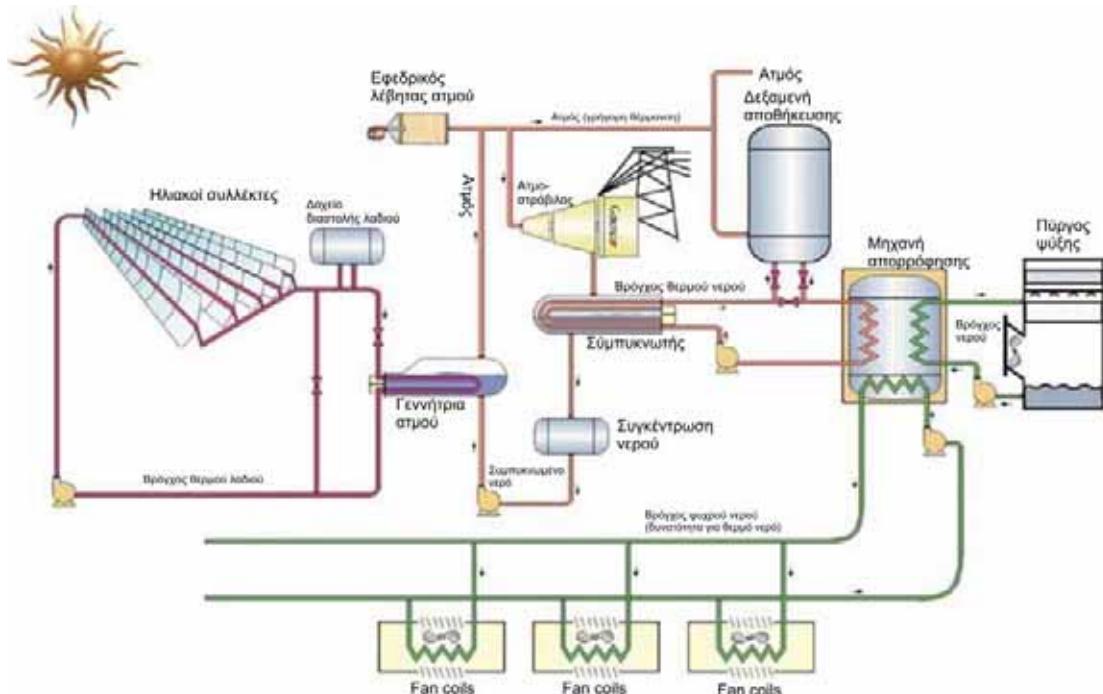
Η ανακλαστική επιφάνεια ενός παραβολικού κοίλου συγκεντρώνει το ηλιακό φως σε ένα σωληνωτό δέκτη που είναι τοποθετημένος κατά μήκος της εστιακής γραμμής του κοίλου και ζεσταίνει το ρευστό που ρέει στο σωλήνα, το οποίο κατόπιν μέσω σωληνώσεων μεταφέρεται σε έναν ατμοστρόβιλο. Εν γένει τα κοίλα σχεδιάζονται ώστε να παρακολουθούν τον ήλιο κατά μήκος ενός άξονα, συνήθως κατά τον άξονα βορά – νότου. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράσχει θερμότητα διεργασιών ή για να ενεργοποιήσει χημικές αντιδράσεις, αλλά είναι πιο γνωστή για τις εφαρμογές της που παρέχουν ηλεκτρική ισχύ. Ο λόγος συγκέντρωσης των παραβολικών κοίλων κυμαίνεται από 10 μέχρι 100, ενώ η θερμοκρασία ανέρχεται στους 400°C.



Τα συναθροιζόμενα σε πεδία συλλεκτών παραβολικά κοίλα τη στιγμή αυτή παρέχουν όλη την εμπορικά παραγόμενη ηλιακή θερμική ισχύ, με ένα συνολικό εγκατεστημένο δυναμικό πάνω από 350 MW στην Καλιφόρνια, που αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 90% της εγκατεστημένης ηλιακής ισχύος παγκοσμίως. Σ' αυτά τα Συστήματα Ηλιακής Ηλεκτροπαραγωγής (SEGS - σχήμα 4.2) χρησιμοποιείται ένα θερμικό έλαιο ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, το οποίο αντλείται μέσα από μια σειρά

συμβατικών εναλλακτών θερμότητας που παράγουν υπέρθερμο ατμό στους 390°C για τη λειτουργία ενός στροβίλου. Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός διοχετεύεται στη συνέχεια στο δίκτυο της τοπικής εταιρείας ηλεκτρισμού.

Οι σταθμοί αυτοί λειτουργούν στη βάση μιας αναλογίας 75% από ηλιακά και 25% από φυσικό αέριο. Σήμερα, έχουν συσσωρευτεί πάνω από 110 σταθμο-έτη εμπειρίας από τις 9 υπό λειτουργία μονάδες, οι οποίες κυμαίνονται από 14 έως 80 MW. Από το 1991 δεν έχει κατασκευαστεί καμία νέα μονάδα, καθώς οι ελαττούμενες τιμές των ορυκτών καυσίμων και οι μειωμένες φορολογικές ελαφρύνσεις στις ΗΠΑ είχαν ως αποτέλεσμα οι βραχυπρόθεσμες οικονομικές εκτιμήσεις για μελλοντικούς σταθμούς να καθίστανται μη ελκυστικές.



Σχήμα 4.2. Διάγραμμα λειτουργίας ενός σταθμού ηλιακών/κύκλου Rankine τύπου SEGS

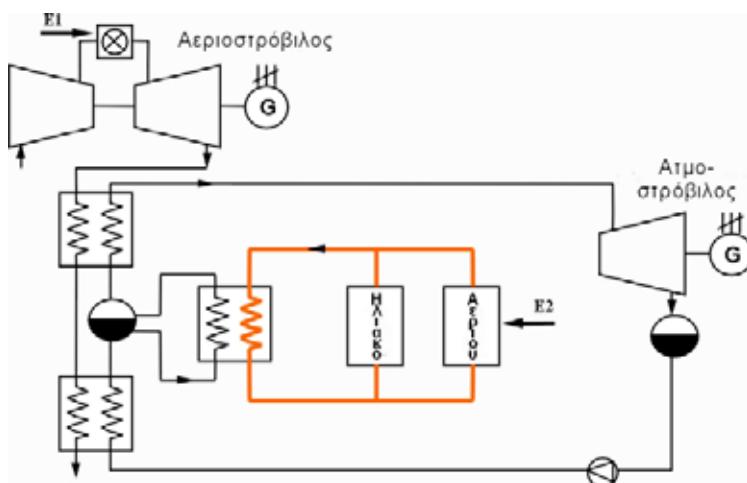
Η απόδοση των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής SEGS συνέχισε να βελτιώνεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Η ετήσια διαθεσιμότητα του ηλιακού πεδίου, που ορίζεται ως η δυνατότητά του να λειτουργεί, ξεκίνησε από ένα ικανοποιητικό επίπεδο της τάξης του 96-97% και σταδιακά ανήλθε στο 99,5%, με την εξέλιξη των τεχνικών συντήρησης και την επίλυση των όποιων προβλημάτων με τα ανταλλακτικά. Στη μονάδα του Kramer Junction επετεύχθη η κατά 30% μείωση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης.

Σε καθαρή βάση, η ετήσια αποδοτικότητα μετατροπής της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια του SEGS VI ανήλθε το 1997 σε 10,8%. Ωστόσο, τον Ιούλιο του ίδιου έτους η μέγιστη στιγμιαία τιμή μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό ανήλθε σε περίπου 21%. Η μέγιστη τιμή της θερμικής αποδοτικότητας του ηλιακού πεδίου ήταν 60%. Επίσης, αναφέρθηκε ετήσιος συντελεστής δυναμικού (το ποσοστό του έτους που η τεχνολογία μπορεί να αποδώσει ηλιακή ενέργεια στην ονομαστική ισχύ) 24%. Οι επιδόσεις αυτές αφορούν εγκαταστάσεις που λειτουργούν επί δέκα έτη. Βάσιμες

προβλέψεις που αφορούν τα εξελιγμένα κοίλα ανάγουν τον ετήσιο βαθμό απόδοσης στο επίπεδο του 15-16% και τον συντελεστή δυναμικού στο 25-70%.

4.2.1.2. Δυνατότητες μείωσης του κόστους

Οι προβλέψεις για τα κόστη των εγκαταστάσεων παραβολικών κοίλων βασίζονται στην εμπειρία των SEGS και την υφιστάμενη κατάσταση της ανταγωνιστικής αγοράς. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες σκοπιμότητας, τα κόστη των σταθμών τύπου SEGS υπολογίζονται σε περίπου \$2700/kW και των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου με ενσωματωμένα ηλιακά (ISCCS - σχήμα 4.3) σε περίπου \$850/kW. Το κόστος του ηλιακού πεδίου εκτιμάται αυτή τη στιγμή στα \$275 ανά εγκατεστημένο m². Η ανάλυση κόστους για τις συνιστώσες ή τα υποσυστήματα του ηλιακού πεδίου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.3. Σχηματική παράσταση ενός συστήματος ISCCS



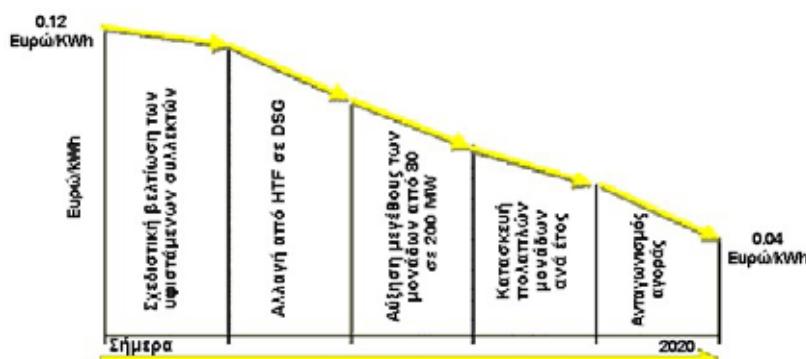
Σχήμα 4.4. Κατανομή κόστους του συστήματος συλλογής

Ωστόσο, έχει προσδιοριστεί ένας αριθμός δυνατοτήτων που πιθανώς θα οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του σταθμισμένου κόστους του ηλεκτρισμού (βλ. σχήμα 4.5) και στη βελτίωση της απόδοσης της υφιστάμενης τεχνολογίας των κοίλων:

- Το μέγεθος της εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής: Η αύξηση του μεγέθους της μονάδας αποτελεί έναν από τους ευκολότερους τρόπους μείωσης του κόστους του ηλιακού ηλεκτρισμού από εγκαταστάσεις παραβολικών κοίλων. Από μελέτες έχει προκύψει ότι, διπλασιάζοντας το μέγεθος μειώνονται κατά περίπου 12 έως

14% το κόστος κεφαλαίου, επηρεάζοντας αισθητά την οικονομία κλίμακας και τη λειτουργία και συντήρηση.

- ISCCS: Είναι μια προτεινόμενη διάταξη που αξιοποιεί τον κύκλο βάσης του ατμού σε μία μονάδα συνδυασμένου κύκλου για τη μετατροπή της θερμικής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Παρόλο που υπολείπεται κάποια σχεδιαστική εργασία, από τις αρχικές μελέτες προκύπτει ότι η διάταξη ISCCS μπορεί να μειώσει το κόστος της ηλιακής ισχύος μέχρι και 22% ως προς το μικτό κόστος της ισχύος μίας συμβατικής μονάδας SEGS (με 25% ορυκτό καύσιμο) παρόμοιου μεγέθους.
- Εξελιγμένοι κοίλοι συλλέκτες: Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.4, η κατασκευή αναλογεί στο 40% περίπου του κόστους του ηλιακού πεδίου, ενώ οι δέκτες και οι ανακλαστήρες στοιχίζουν ο καθένας 20-25% του συνολικού κόστους. Μπορούν να διερευνηθούν σχεδιάσεις μικρότερου κόστους για τη χαλύβδινη κατασκευή, ενώ αναμένεται να συνεχιστούν οι βελτιώσεις στους δέκτες.
- Άμεση παραγωγή ατμού: Σύμφωνα με αυτήν την αρχή, παράγεται άμεσα ατμός στους συλλέκτες παραβολικού κοίλου. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται κόστος εξαλείφοντας την ανάγκη για το σύστημα του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας και μειώνονται οι απώλειες που σχετίζονται με τη χρήση εναλλάκτη θερμότητας για την παραγωγή του ατμού. Μία πιλοτική εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας βρίσκεται σε εξέλιξη στην Plataforma Solar de Almeria (Ισπανία).
- Ανάπτυξη πάρκων ηλιακής ισχύος: Η ανάπτυξη πολλαπλών σταθμών στην ίδια τοποθεσία υπό τη μορφή ενός πάρκου ηλιακής ισχύος παρέχει μία δυνατότητα σημαντικής ελάττωσης του κόστους των σταθμών ΗΗΣ. Με την κατασκευή πέντε μονάδων ταυτόχρονα στα πλαίσια ενός έργου που αναπτύσσεται σταδιακά, στην πράξη μπορεί να μειωθεί το κόστος κατά 25 με 30% σε σχέση με ένα ενιαίο έργο.
- Χρέωση χαμηλού κόστους: Εν τέλει, ένας αριθμός φορέων έχουν επισημάνει ότι μπορεί να εφαρμοσθεί χρέωση χαμηλού κόστους για τα έργα ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές. Μια διαθεσιμότητα δανεισμού με 2% αντί 9,5% μπορεί να μειώσει το σταθμισμένο κόστος του ηλεκτρισμού περισσότερο από 30%.



Σχήμα 4.5. Δυνατότητες μείωσης του κόστους της τεχνολογίας των παραβολικών κοίλων

4.2.1.3. Υφιστάμενες δυνατότητες διεθνώς

Η διεθνής αγορά οδηγείται από τα εσωτερικά ενεργειακά προγράμματα κάθε χώρας και ενθαρρύνεται από τη θετική στάση της Παγκόσμιας Υπηρεσίας Περιβάλλοντος (GEF) και της Παγκόσμιας Τράπεζας σχετικά με την ανάπτυξη και την εφαρμογή των συστημάτων ΗΗΣ (σχήμα 4.6). Τέτοιες ευκαιρίες παρέχονται στις αναπτυσσόμενες χώρες και, τα τελευταία χρόνια, γίνονται σχετικές συζητήσεις με τους ειδικούς για τον ενεργειακό σχεδιασμό, τις εταιρείες ηλεκτρισμού και κυβερνητικές υπηρεσίες στην Ιndia, το Μεξικό, την Αίγυπτο, την Ιορδανία, το Μαρόκο, την Ελλάδα, τη Βραζιλία, το Ιράν, την Κίνα και την Ισπανία.

Παρόλο που είναι αδύνατο να προβλεφθούν πόσες από αυτές τις πρωτοβουλίες θα αναπτυχθούν στα αμέσως προσεχή έτη, είναι σαφές ότι δυνατότητες υπάρχουν. Οι περισσότερες χώρες έχουν εστιάσει στην τεχνολογία των παραβολικών κοίλων καθώς αυτή βρίσκεται ήδη σε εμπορικό στάδιο, αναγνωρίζοντας όμως ότι οι πύργοι ισχύος και τα συστήματα δίσκου/μηχανής μπορεί να καταστούν μια οικονομικά πιο αποδοτική επιλογή κάποια στιγμή στο μέλλον.

Πίνακας 4.1. Υφιστάμενη κατάσταση των έργων παραβολικών κοίλων

Χώρα	Στοιχεία εγκατάστασης	Κατάσταση
Ινδία	135 MW _e ISCCS με 35 MW _e ηλιακή ισχύ	Επιχορήγηση από GEF 49 εκατ. US \$ και δάνειο από KfW 100 εκατ. US \$
Αίγυπτος	140 MW _e ISCCS με 35 MW _e ηλιακή ισχύ	Εγκεκριμένη επιχορήγηση από GEF 40 με 50 εκατομμύρια US \$
Μαρόκο	150 MW _e ISCCS με 30-50 MW _e ηλιακή ισχύ	Δεσμευμένη επιχορήγηση από GEF 40 με 50 εκατομμύρια US \$
Μεξικό	310 MW _e ISCCS με 40 MW _e ηλιακή ισχύ	Δεσμευμένη επιχορήγηση από GEF 40 με 50 εκατομμύρια US \$
Ελλάδα (Κρήτη)	50 MW _e SEGS - Έργο THESEUS	Ανάπτυξη IPP, επιχορήγηση από το πρόγραμμα Thermie της ΕΕ
Ισπανία	50 MW _e SEGS	Αναμένονται τα αποτελέσματα για την ηλιακή τιμολόγηση
ΗΠΑ (Νεβάδα)	30 MW _e SEGS	Αναμένονται τα αποτελέσματα για το πρότυπο ηλιακού χαρτοφυλακίου

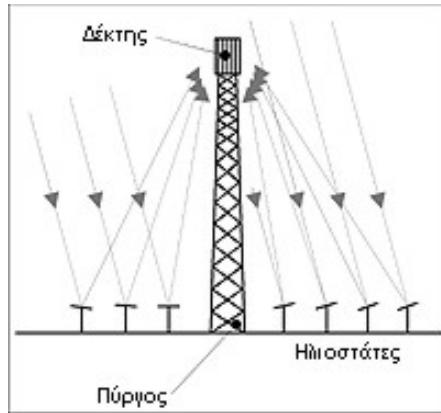


Σχήμα 4.6. Φωτογραφίες από σταθμό ηλεκτροπαραγωγής παραβολικών κοίλων
[Αριστερά: Kramer Junction – Δεξιά: Gould Electronics]

4.2.2. Συστήματα πύργου ισχύος (ή ηλιακού πύργου)

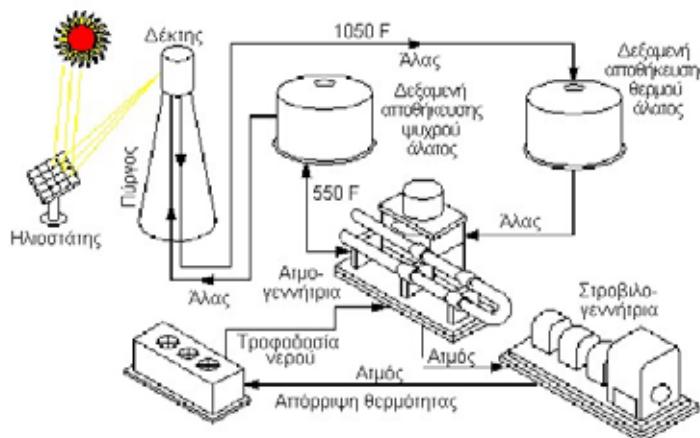
4.2.2.1. Παρούσα κατάσταση της τεχνολογίας των συστημάτων πύργου ισχύος

Στα συστήματα πύργου ισχύος, οι ηλιοστάτες παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου με μηχανισμό δύο αξόνων ο οποίος ακολουθεί τις γωνίες αζιμουθίου και ανύψωσης ώστε να ανακλάται και να συγκεντρώνεται το άμεσο ηλιακό φως σε ένα κεντρικό δέκτη που είναι τοποθετημένος σε πύργο. Από εκεί η ενέργεια μεταφέρεται σ' ένα ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, το οποίο στη συνέχεια διοχετεύεται προαιρετικά στο σύστημα αποθήκευσης και, εν τέλει, στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής που μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρισμό και τροφοδοτεί το δίκτυο.



Οι πύργοι ισχύος καθορίζονται με βάση τις επιλογές που γίνονται για το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, το μέσο αποθήκευσης και τον κύκλο μετατροπής της ισχύος. Το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας μπορεί να είναι νερό / ατμός, τηγμένο νιτρικό άλας, υγρό μέταλλο ή αέρας. Η θερμική αποθήκευση μπορεί να παρέχεται από υλικά αλλαγής φάσης ή κεραμικούς πλίνθους. Εξάλλου, όσον αφορά τον κύκλο ισχύος, χρησιμοποιούνται συστήματα μετατροπής ατμού κύκλου Rankine με πιθανή εναλλακτική λύση αυτή των συστημάτων μετατροπής ανοικτού κύκλου Brayton.

Τα συστήματα πύργου ισχύος συνήθως επιτυγχάνουν λόγους συγκέντρωσης από 300 έως 1500, μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες μέχρι 1500°C και έχουν σχετικά μεγάλο μέγεθος, συνήθως 10 MW ή περισσότερο. Στα συστήματα πύργου ισχύος που αναπτύσσονται τελευταία χρησιμοποιείται είτε νιτρικό άλας είτε αέρας ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας. Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα των κύριων ενεργειακών ροών σε μια ηλιακή μονάδα ηλεκτροπαραγωγής τήγματος.



Σχήμα 4.7. Διάγραμμα ενεργειακών ροών μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής πύργου ισχύος με σύστημα αποθήκευσης τηγμένου άλατος

Σε ένα σύστημα ηλιακού πύργου ισχύος τηγμένου άλατος, αντλείται υγρό άλας στους 290°C από μία "ψυχρή" δεξαμενή αποθήκευσης μέσα από το δέκτη όπου θερμαίνεται στους 565°C, και από εκεί προς μία "θερμή" δεξαμενή όπου αποθηκεύεται. Όταν

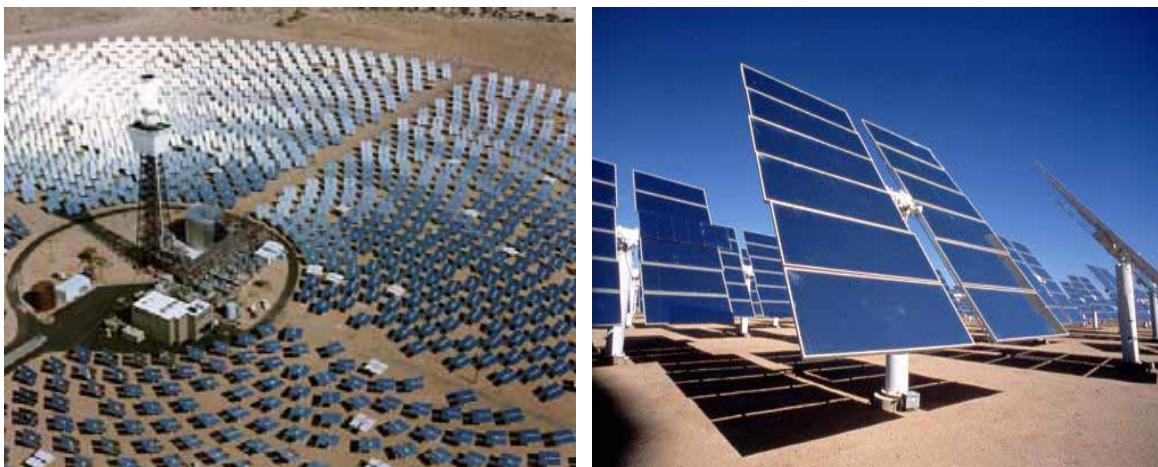
απαιτείται ηλεκτρική ισχύς από το σταθμό, το ζεστό άλας αντλείται σε ένα σύστημα ατμοπαραγωγής όπου παράγεται υπέρθερμος ατμός για ένα συμβατικό σύστημα στροβίλου/γεννήτριας κύκλου Rankine. Από τον ατμοπαραγωγό το άλας επιστρέφει στην ψυχρή δεξαμενή όπου αποθηκεύεται, και στη συνέχεια οδηγείται πάλι στο δέκτη για να αναθερμανθεί.

Ο καθορισμός του βέλτιστου μεγέθους αποθήκευσης για την κάλυψη των αναγκών τροφοδοσίας με ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί ένα σημαντικό τμήμα της διαδικασίας σχεδιασμού του συστήματος. Οι δεξαμενές αποθήκευσης μπορούν να σχεδιάζονται με αρκετή χωρητικότητα ώστε να ενεργοποιείται ένας στρόβιλος σε πλήρη ισχύ μέχρι και για 13 ώρες. Το πεδίο των ηλιοστατών που περιβάλλει τον πύργο διατάσσεται έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η ετήσια απόδοση της εγκατάστασης. Σε μία τυπική εγκατάσταση, η συλλογή της ηλιακής ενέργειας γίνεται με ένα ρυθμό που υπερβαίνει το μέγιστο που απαιτείται ώστε να τροφοδοτείται με ατμό ο στρόβιλος.

Κατά συνέπεια, το σύστημα θερμικής αποθήκευσης μπορεί να φορτίζεται την ίδια στιγμή που η εγκατάσταση παράγει ηλεκτρική ισχύ υπό πλήρες δυναμικό. Ο λόγος της θερμικής ισχύος που παρέχεται από το σύστημα των συλλεκτών προς τη μέγιστη θερμική ισχύ που απαιτείται από τη στροβιλο-γεννήτρια είναι γνωστός ως «ηλιακό πολλαπλάσιο». Με ένα ηλιακό πολλαπλάσιο 2,7 περίπου, ένα εγκατεστημένο στην έρημο Mojave της Καλιφόρνιας σύστημα πύργου ισχύος τηγμένου άλατος μπορεί να σχεδιαστεί για ετήσιο συντελεστή δυναμικού της τάξης του 65%, όταν οι ηλιακές τεχνολογίες χωρίς αποθήκευση περιορίζονται σε αντίστοιχες τιμές κοντά στο 25%.

Όλες οι εκτιμήσεις της ετήσιας παραγωγής ενέργειας βασίζονται σε προσομοιώσεις που γίνονται με τον υπολογιστικό κώδικα SOLERGY. Τα δεδομένα αυτού του κώδικα (ανακλαστικότητα κατόπτρου, αποδοτικότητα δέκτη, χρόνοι εκκίνησης, παρασιτική ισχύς, διαθεσιμότητα εγκατάστασης, κλπ.) βασίζονται σε στοιχεία μετρήσεων που ελήφθησαν από τον ισχύος 10 MW σταθμό Solar One και από τη δοκιμή ενός μικρού (~1MW) συστήματος δέκτη τηγμένου άλατος που διεξήχθη στα τέλη της δεκαετίας του 1980, αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμα συνολικά ενεργειακά στοιχεία από κάποιον εν λειτουργία πύργο ισχύος τηγμένου άλατος. Η συλλογή στοιχείων αυτού του είδους αποτελεί έναν από τους κύριους στόχους του επιδεικτικού έργου Solar Two.

Από το σταθμό ηλεκτροπαραγωγής Solar Two αναμένεται μία ετήσια αποδοτικότητα μετατροπής της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια της τάξης του 8,5%. Προκειμένου να εξοικονομηθούν αρχικά κεφάλαια, ο σταθμός (σχήμα 4.8) διαστασιολογήθηκε ώστε να έχει ετήσιο συντελεστή δυναμικού 20% και θερμική αποθήκευση για λειτουργία τριών ωρών. Στην πρώτη εμπορική μονάδα αναμένεται να επιτευχθεί αποδοτικότητα μετατροπής και ετήσιος συντελεστής δυναμικού 15 και 43% αντίστοιχα. Σύμφωνα με εύλογες προβλέψεις, για τα εξελιγμένα συστήματα πύργου ισχύος αναμένονται τιμές της αποδοτικότητας μετατροπής από ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια και του ετήσιου συντελεστή δυναμικού της τάξης των 20% και 77%, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.8. Φωτογραφίες από το σταθμό ηλεκτροπαραγωγής πύργου ισχύος 10 MW_e Solar Two

4.2.2.2. Δυνατότητες μείωσης του κόστους

Τα κόστη που παρουσιάζονται για τα συστήματα πύργου ισχύος συνήθως βασίζονται στα πραγματικά που προέκυψαν από τις εργασίες του Solar Two, όπως αυτά έχουν δηλωθεί από την εταιρεία Southern California Edison. Οι εκτιμήσεις για τα κόστη κεφαλαίου και Λ&Σ από το έτος 2000 και μετά συμφωνούν με τις εκτιμήσεις που περιέχονται σε μελέτες του IEA. Οι συνολικές απαιτήσεις κεφαλαίου για την πρώτη εφαρμογή εμπορικής κλίμακας είναι περίπου 4.400 \$/kW, με πρόβλεψη για το 2030 τα 2.500 \$/kW. Το κόστος του ηλιακού πεδίου προβλέπεται να μειωθεί από τα \$475 σε \$200 ανά εγκατεστημένο m². Η κατανομή του κόστους για τις συνιστώσες ή/και τα υποσυστήματα του ηλιακού πεδίου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9. Κατανομή του κόστους για το πεδίο των συλλεκτών

Εάν στεφθεί με επιτυχία το Solar Two, η τεχνολογία του πύργου ισχύος θα βρεθεί στο κατώφλι της τεχνολογικής ετοιμότητας για εμπορικές εφαρμογές. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί κόστος ηλεκτροπαραγωγής μικρότερο των 0,2 \$/kWh για τις πρώτες εμπορικές εγκαταστάσεις. Πάντως, απαιτούνται περαιτέρω πρόοδοι όσον αφορά την κλιμάκωση των μεγεθών και την E&TA για συγκεκριμένα υποσυστήματα προκειμένου να μειωθεί το κόστος και να αυξηθεί η αξιοπιστία μέχρι το βαθμό που η τεχνολογία θα καταστεί μια ελκυστική οικονομική επένδυση.

Πολλά υποσχόμενες εργασίες βρίσκονται τελευταία υπό εξέλιξη στα ακόλουθα πεδία:

- Κλιμάκωση μεγέθους των συστημάτων: Θεωρητικά, για να είναι ανταγωνιστικός ένας πύργος ισχύος με την τεχνολογία των συμβατικών καυσίμων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερος του Solar Two. Ως ένας άλλος πιθανός τρόπος για την υποβοήθηση της διείσδυσης στην αγορά εξετάζονται επίσης τα υβριδικά σχήματα με ορυκτά καύσιμα, τα οποία απαιτούν μόνο ένα ενδιάμεσο μέγεθος μερικών δεκάδων MW. Τα πλεονεκτήματα μιας εγκατάστασης μειωμένου μεγέθους επιφέρουν κλιμακούμενο κίνδυνο και μειωμένη επένδυση κεφαλαίου.
- Ηλιοστάτες: Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί σχετικά λίγοι ηλιοστάτες και το κόστος τους είναι υψηλό (>250 \$/m²). Καθώς αυξάνεται η ζήτηση για ηλιακή ισχύ, θα αναπτυχθούν μέθοδοι μαζικής παραγωγής των ηλιοστατών οπότε θα μειωθεί σημαντικά το κόστος τους, καθόσον οι τιμές σχετίζονται άμεσα με τους ετήσιους ρυθμούς παραγωγής. Για μια υψηλή παραγωγή (της τάξης των 50.000 τεμ./έτος) μπορεί να επιτευχθεί μείωση του κόστους κατά ένα συντελεστή 3 έως 4.
- Δέκτης: Προκειμένου να βελτιωθεί η αποδοτικότητα και να μειωθούν οι ανάγκες συντήρησης, απαιτούνται μικρότεροι και απλούστεροι δέκτες. Ήδη βρίσκεται σε εξέλιξη η ανάπτυξη εξελιγμένων δεκτών και για τα δύο συνήθη ρευστά μεταφοράς της θερμότητας, δηλαδή για το τηγμένο άλας (καινούργια κράματα χάλυβα για τις σωληνώσεις του δέκτη) και τον αέρα (σχεδίαση νέου δέκτη ογκομετρικού αέρα).
- Τηγμένο άλας: Τα τηγμένα νιτρικά άλατα, παρόλο που αποτελούν ένα εξαιρετικό μέσο αποθήκευσης της θερμότητας, μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα όταν χρησιμοποιούνται ως ρευστά λόγω της σχετικά υψηλής θερμοκρασίας τήξης τους (220°C). Για να διατηρηθεί τηγμένο το άλας πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα αρκετά σύνθετο σύστημα παρακολούθησης της θερμότητας. Ο κίνδυνος και, εν τέλει, τα κόστη Λ&Σ θα μπορούσαν να μειωθούν μέσω σχεδιαστικών βελτιώσεων και της τυποποίησης.

Τελικά, καθώς ωριμάζει η σχετική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής και αναπτύσσονται μεγαλύτεροι και πιο εξελιγμένοι σταθμοί, τα κόστη του ηλεκτρισμού θα καταστούν ανάλογα αυτών της ηλεκτροπαραγωγής καθαρά με άνθρακα. Αυτό προκύπτει επίσης και από τα στοιχεία του παρακάτω πίνακα 4.2, όσον αφορά τους υφιστάμενους και τους προβλεπόμενους δείκτες απόδοσης και κόστους για την τεχνολογία του ηλιακού πύργου ισχύος.

Πίνακας 4.2. Δείκτες απόδοσης και κόστους για την τεχνολογία του πύργου ισχύος

	Μονάδες	Τεχνολογία Solar Two	Πρώτη εμπορική μονάδα	Τεχνολογία 2005	Τεχνολογία 2010	Τεχνολογία 2020
Μέγεθος εγκατάστασης	MW	10	30	100	200	200
Μέγεθος ηλιακού πεδίου	m ²	81 000	275 000	883 000	2 477 000	2 477 000
Δέκτης	MW	43	145	470	1 400	1 400
Ατμοστρόβιλος	MW	10	30	100	200	200
Θερμική αποθήκευση	ώρες	3	7	6	13	13
Ετήσιος συντελεστής δυναμικού	%	20	43	44	65	75

Συνολική αποδοτικότητα	%	8,5	15	16	17	20
Συνολικό κόστος	€/kW	-	4 350	3 270	2 700	2 700

4.2.2.3. Υφιστάμενα έργα

Οι επιδεικτικές δράσεις που σχετίζονται με την τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα των υβριδικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ηλιακού πύργου ισχύος (εγκαταστάσεις ISCCS) στην Ευρώπη είναι τόσο ουσιώδεις όσο αυτές των σταθμών ηλιακών κοίλων. Τα δύο έργα κεντρικού δέκτη (SOLGAS και Colón Solar) που χρηματοδοτούνται από την Ε.Ε. είχαν καθιερώσει μία στρατηγική διείσδυσης στην αγορά βασιζόμενη στην ενσωμάτωση 20MW κεκορεσμένου ατμού παραγόμενου από ηλιακή ενέργεια σ' ένα συμβατικό σταθμό που μετασκευάζεται σε μονάδα συνδυασμένου κύκλου με την προσθήκη ενός αεριοστροβίλου, τα οποία όμως δυστυχώς διακόπηκαν το 1998 μετά τη φάση της λεπτομερούς σχεδίασής τους για οικονομικούς λόγους.

Από την Ισπανική εταιρία ABENGOA προωθείται μία μονάδα πύργου ισχύος 10MW_e βασιζόμενη στον Γερμανικής τεχνολογίας δέκτη - αποθήκη θερμότητας ογκομετρικού αέρα PHOEBUS και σε χιλιάδες μονάδες ηλιοστατών γυαλιού-μετάλλου Ισπανικής κατασκευής, η οποία βασίζεται στη σχεδίαση Colón Solar διευρυμένη έως και 90 m² ανά μονάδα (Planta Solar PS10 στο Sanlúcar, Σεβίλλη - Νότια Ισπανία). Το 35% της επένδυσης για το έργο επιδοτήθηκε από το πρόγραμμα ENERGIE του 5^{ου} Π.Π. της Ε.Ε. στην προκήρυξη υποβολής προτάσεων του 1999, ενώ θα λάβει πίστωση βάσει του Ισπανικού Βασιλικού Διατάγματος. Έχει προγραμματιστεί να αρχίσει καθαρή ετήσια παραγωγή 20 GWh ηλεκτρισμού το 2002 και από αυτή αναμένεται να τεκμηριωθούν κόστη κεφαλαίου εγκατάστασης για τους σταθμούς ηλιακού πύργου της τάξης των €2.700/kW_e.

Ένα δεύτερο έργο μονάδας με πύργο ισχύος των 10 MW_e αναπτύσσεται από έναν ισπανο-αμερικανικό βιομηχανικό όμιλο που συστάθηκε από τις Ghersa, Boeing και Bechtel για μία πιθανή θέση στην Córdoba της Ισπανίας, η οποία βασίζεται στην αμερικανική τεχνολογία δέκτη και αποθήκευσης θερμότητας τηγμένου άλατος. Κύρια στοιχεία της εγκατάστασης είναι το μεγάλο μέγεθος της θερμικής αποθήκευσης τηγμένου άλατος, η οποία είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέπει την εικοσιτετράωρη λειτουργία του σταθμού αποκλειστικά με ηλιακή ενέργεια, και η χρήση ενός νέου τύπου Ισπανικού ηλιοστάτη χαμηλού κόστους με μειωμένες διαστάσεις.

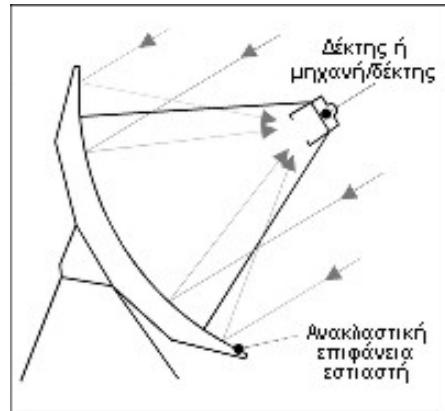
4.2.3. Συστήματα δίσκου/μηχανής

4.2.3.1. Παρούσα κατάσταση της τεχνολογίας των συστημάτων δίσκου

Ένας δίσκος συγκεντρώνει την άμεση ηλιακή ενέργεια σε ένα δέκτη στο εστιακό του σημείο, όπου απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως θερμότητα ή να υποστηρίξει χημικές διεργασίες, αλλά η συνηθέστερη εφαρμογή της είναι η ηλεκτροπαραγωγή. Η θερμική ενέργεια μπορεί να

μεταφερθεί σε μία κεντρική γεννήτρια για μετατροπή ή μπορεί να μετατραπεί άμεσα σε ηλεκτρισμό με μία ενσωματωμένη στο δέκτη γεννήτρια.

Οι δίσκοι παρακολουθούν την τροχιά του ήλιο σε δύο άξονες και, για το λόγο αυτό, είναι τα πιο αποδοτικά συστήματα συλλεκτών, καθώς είναι συνεχώς στραμμένα προς τον ήλιο. Οι λόγοι συγκέντρωσης κυμαίνονται συνήθως από 600 έως 2000 και μπορούν να επιτευχθούν θερμοκρασίες πάνω από 1.500°C . Το ιδανικό σχήμα για τον εστιαστή είναι το παραβολοειδές εκ περιστροφής. Ορισμένοι ηλιακοί εστιαστές προσεγγίζουν το σχήμα αυτό με πολλαπλά κάτοπτρα σφαιρικής διαμόρφωσης στηριζόμενα σε ένα σκελετό από δοκούς ενίσχυσης.



Καινοτομία στη σχεδίαση των εστιαστών αποτελεί η χρήση τεταμένων μεμβρανών, κατά την οποία μία λεπτή ανακλαστική μεμβράνη τεντώνεται μέσω μιας στεφάνης ή ενός τσαταλιού, ενώ χρησιμοποιείται μια δεύτερη μεμβράνη για να κλείσει τον πίσω χώρο. Στο χώρο αυτό δημιουργείται μερικό κενό, δημιουργώντας έτσι ένα κατά προσέγγιση σφαιρικό σχήμα στην ανακλαστική μεμβράνη. Το κλάσμα ανάσχεσης, το οποίο ορίζεται ως το κλάσμα της ανακλώμενης ηλιακής ροής που διέρχεται μέσω του ανοίγματος του δέκτη, είναι συνήθως πάνω από 95%. Σε ονομαστική μέγιστη άμεση κάθετη ηλιακή ακτινοβόληση 1 kW/m^2 , ένα συγκεντρωτικό σύστημα δίσκου/Stirling 25 kW έχει περίπου 10 μέτρα διάμετρο.

Μολονότι έχουν εξετασθεί για τα συστήματα που χρησιμοποιούν ενσωματωμένες στο δίσκο μηχανές τόσο οι μηχανές κύκλου Rankine όσο και οι κύκλου Brayton, αλλά και οι θερμικές μηχανές νατρίου, η προσοχή έχει στραφεί στα συστήματα μηχανής τύπου Stirling. Πάντως, ο ανταγωνισμός ανάμεσα στις μηχανές Stirling και Brayton είναι έντονος. Τα συστήματα δίσκου/μηχανής χαρακτηρίζονται από υψηλή αποδοτικότητα, πολυσυναρτησιακότητα, αυτονομία λειτουργίας, καθώς και από μία εγγενή υβριδική δυνατότητα (ικανότητα να λειτουργούν είτε με ηλιακή ενέργεια είτε με ορυκτό καύσιμο ή και με τα δύο μαζί).

Από όλες τις ηλιακές τεχνολογίες, ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό έχει αναφερθεί στα συστήματα δίσκου/μηχανής (29,4%), και για το λόγο αυτό έχουν το δυναμικό να καταστούν μία από τις λιγότερο ακριβέστερες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας. Η πολυσυναρτησιακότητα των συστημάτων δίσκου/μηχανής επιτρέπει την αυτόνομη χρήση τους για απόμακρες εφαρμογές ή την ομαδοποίησή τους για εφαρμογές ηλεκτροδότησης σε μικρά δίκτυα ή απομονωμένα σημεία του δικτύου. Τα συστήματα δίσκου/μηχανής μπορούν επίσης να λειτουργούν υβριδικά με κάποιο συμβατικό καύσιμο ώστε να παρέχουν εμπορεύσιμη ισχύ.

Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται στο στάδιο της τεχνικής εξέλιξης και απομένουν κάποια προβλήματα προς επίλυση που αφορούν τις ηλιακές συνιστώσες και την εμπορική διαθεσιμότητα μιας τέτοιας μηχανής. Τα συστήματα δίσκου/μηχανής δεν διατίθενται

αυτή τη στιγμή στο εμπόριο, παρά μόνο ως πρωτότυπα. Το σύστημα δίσκου/Stirling 25 kW που αναπτύχθηκε από την McDonnell Douglas Aerospace (MDA) στα μέσα της δεκαετίας του '80 αντιπροσωπεύει την τεχνολογία του έτους βάσης (1997).

Εάν στεφθούν με επιτυχία τα υφιστάμενα συντονισμένα εγχειρήματα δίσκου/μηχανής, τα συστήματα αυτά μπορεί να καταστούν εμπορικά διαθέσιμα εντός της επόμενης πενταετίας. Ως παράδειγμα αναφέρεται ότι, μία κοινοπραξία γερμανικών εταιρειών (Schlaich, Bergermann & Partner) σε συνεργασία με την Steinmüller (συστήματα συλλεκτών) και την SOLO Kleinmotoren (μηχανές Stirling) έχει αναπτύξει μία μονάδα 9-10 kW. Έξι τέτοιες μονάδες λειτουργούν επιτυχώς στην Ισπανία, από τις οποίες οι τρεις λειτουργούν με επιτυχία συνεχώς από το 1992 και συσσωρεύοντας λειτουργική εμπειρία άνω των 30.000 ωρών.

Όσον αναφορά τις επιδόσεις, η εταιρεία Southern California Edison λειτούργησε ένα σύστημα MDA σε καθημερινή βάση από το 1986 μέχρι το 1988. Κατά το τελευταίο έτος της λειτουργίας του επετεύχθη ετήσια αποδοτικότητα 12%, παρόλη τη σημαντική μη διαθεσιμότητά του. Χωρίς τις διακοπές λειτουργίας, υπολογίζεται ότι επιτεύχθηκαν ηλιακές αποδοτικότητες μεγαλύτερες από 23%. Επομένως, μία ετήσια αποδοτικότητα της τάξης του 23% αποτελεί λογική πρόβλεψη για τα βραχυπρόθεσμα συστήματα.

Καθώς τα συστήματα δίσκου/μηχανής χρησιμοποιούν θερμικές μηχανές, έχουν την έμφυτη ικανότητα να λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα. Η χρήση του ίδιου εξοπλισμού μετατροπής της ισχύος σημαίνει ότι απαιτείται μόνο η προσθήκη ενός καυστήρα ορυκτού καυσίμου για να καταστεί δυνατή η υβριδική λειτουργία. Στα συστήματα δίσκου/Brayton η προσθήκη υβριδικής δυνατότητας είναι άμεση, ενώ δεν ισχύει το ίδιο στην περίπτωση των δίσκου/Stirling. Η αποδοτικότητα με βάση την ανωτέρα θερμογόνο δύναμη ενός συστήματος δίσκου/Brayton και ενός δίσκου/Stirling που λειτουργούν υβριδικά αναμένεται να είναι περίπου 30% και 33%, αντίστοιχα. Με την τεχνολογία MDA επιτεύχθηκε ένας ετήσιος συντελεστής δυναμικού 12,5%, ενώ λαμβάνοντας υπόψη την υβριδική δυνατότητα αναμένεται ένας ετήσιος συντελεστής δυναμικού 50%, που αντιστοιχεί σ' ένα ηλιακό κλάσμα 50%.

4.2.3.2. Δυνατότητες μείωσης του κόστους

Τα σημερινά κόστη κεφαλαίου εγκατεστημένου σταθμού μιας αρχικής αυτόνομης μονάδας 9-10 kW_e δίσκου/Stirling κυμαίνονται από 10.000 έως 14.000 Euro/kW_e, ενώ για τις βραχυπρόθεσμες μονάδες θα είναι 7.100 Euro/kW_e (με ρυθμό παραγωγής 100 μονάδων ανά έτος). Ο περισσότερο εφικτός βραχυπρόθεσμος στόχος για το κόστος του ηλεκτρισμού είναι να πέσει κάτω από τα 0,15 Euro/kWh. Μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, τα συστήματα δίσκου/Stirling θα παρουσιάσουν δραστική μείωση στα κόστη εγκατεστημένου συστήματος, όπως προβλέπεται βάσει του αυξανόμενου αριθμού μονάδων δίσκου που παράγονται μαζικά.

Στόχος του Ευρωπαϊκού προγράμματος Euro-Dish είναι η μείωση του κόστους από τα €7.100/kW_e (100 μονάδες/έτος) σε €3.700/kW_e (1000 μονάδες/έτος), στη συνέχεια

σε €2.400/kW_e (3000 μονάδες/έτος) και, τέλος, στα €1.600/kW_e (10.000 μονάδες/έτος), αλλά όχι παρακάτω λόγω της εξαιρετικά πολυσυναρτησιακής τεχνολογίας. Η κατανομή του κόστους ενός συνήθους συστήματος δίσκου/μηχανής παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10. Κατανομή κόστους των συστημάτων δίσκου/μηχανής

Οι εμπειρικές τάσεις όσον αφορά τα κόστη των συστημάτων ηλιακού δίσκου δείχνουν μια δραστική μείωση του κόστους των εγκατεστημένων συλλεκτών τύπου δίσκου με την πάροδο του χρόνου: €1.250/m² (40 m² Shenandoah, ΗΠΑ 1982), €300/m² (91 m² MDAC, ΗΠΑ 1985), €200/m² (44 m² LaJet, ΗΠΑ 1986) και €150/m² (44 m² γερμανικοί δίσκοι τεταμένης μεμβράνης SBP, 1992). Το μεσο- και μακροπρόθεσμο κόστος των εγκατεστημένων συλλεκτών τύπου δίσκου προβλέπεται να κυμανθεί από 125 έως 105 €/m² για υψηλούς ρυθμούς παραγωγής.

Για τα συστήματα δίσκου πρέπει να αντιμετωπιστούν τα ακόλουθα επιμέρους βασικά τεχνικά ζητήματα για την ομαλή πορεία τους στην αγορά:

- Βελτιώσεις του ανακλαστήρα και του δέκτη του δίσκου, οι οποίες περιλαμβάνουν καλύτερες οπτικές ιδιότητες για τα κάτοπτρα, ελαφρότερα κάτοπτρα και δομές στήριξης, καλύτερα συστήματα ελέγχου, βελτιωμένους υβριδικούς δέκτες σωλήνων θερμότητας, ανάπτυξη αυτομάτου συστήματος για τον τηλεχειρισμό και τον εξ αποστάσεως έλεγχο.
- Βελτιώσεις του συστήματος με χρήση προσαρμοσμένων στις ηλιακές διεργασίες μηχανών Stirling και Brayton (αεριοστρόβιλος), με εξελιγμένους δέκτες σωλήνων θερμότητας και ογκομετρικού αέρα.
- Αποδεδειγμένα αξιόπιστη μακροπρόθεσμη λειτουργία των εξελιγμένων μονάδων δέκτη/μηχανής Stirling.
- Βελτιώσεις στην ικανότητα ενσωμάτωσης των συστημάτων με τη μείωση των παρασιτικών φορτίων, τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών εκκίνησης, καλύτερες στρατηγικές ελέγχου και την υβριδική λειτουργία των μηχανών Stirling ή Brayton.

4.2.3.3. Υφιστάμενα έργα

Στην Ευρώπη, ένα πρώτο επιδεικτικό πρόγραμμα βιομηχανικού δίσκου/Stirling προς απόδειξη της ικανότητας συνεχούς λειτουργίας του λειτουργεί επιτυχώς στο PSA, με έξι προ-εμπορικές Γερμανικές μονάδες δίσκου/Stirling ονομαστικής ισχύος 9-10 kW_e (τρία συστήματα DISTAL I από το 1992 και τρία συστήματα DISTAL II από το 1997).

Τα συστήματα DISTAL I έχουν συμπληρώσει πάνω από 30.000 ώρες λειτουργίας συνολικά μέχρι σήμερα. Τελευταία αναπτύσσονται και δοκιμάζονται για να αποδειχθεί η αξιοπιστία του συστήματος πολλά υποσχόμενοι προηγμένοι τύποι δεκτών σωλήνα θερμότητας και κινητήρες Stirling.

Στα πλαίσια του προγράμματος E&TA EuroDish, με τη συγχρηματοδότηση της Ε.Ε., από το 1998 τελούν υπό δοκιμή στο PSA νέες μονάδες δίσκου/Stirling 9-10 kW_e, με στόχο τη μείωση του κόστους με την εξέλιξη των δομών για εμπορευματοποιημένα Ευρωπαϊκά συστήματα δίσκου-Stirling. Ένας ισπανικός όμιλος, σε συνεργασία με την κοινοπραξία SES, πρωθιόνυ μία μελέτη σκοπιμότητας και ένα μικρό επιδεικτικό έργο που χρησιμοποιεί μία μονάδα δίσκου/Stirling 25 kW_e της McDonnell Douglas (MDA) για εγκατάσταση στη Νοτιοανατολική Ισπανία.

Στις νοτιοδυτικές ΗΠΑ τέθηκε σε λειτουργία για παρατεταμένες δοκιμές μία πρώτη βιομηχανική σειρά από πέντε αμερικάνικα πρωτότυπα συστήματα 25 kW_e δίσκου/Stirling δεύτερης γενιάς, αλλά αυτά τα μεγάλα έργα αμερικανικών ηλιακών δίσκων (σχήμα 4.11) είναι πολύ πιθανό να περικοπούν ή να διακοπούν στο άμεσο μέλλον λόγω της μείωσης των δημόσιων κονδυλίων E&TA. Στη νότια Αυστραλία, από το 1994 τελεί υπό επιστημονική εξέταση στο Εθνικό Πανεπιστήμιο της Αυστραλίας ένα πρώτο πιλοτικό πειραματικό έργο “μεγάλου δίσκου” 400 m² με δυναμικό παραγωγής μέχρι 150 kW_{th}.



Σχήμα 4.11. Φωτογραφίες από συστήματα δίσκου/Stirling

[Αριστερά: Δίσκος One Omnium G του SERI – Δεξιά: Κέντρο δοκιμών της Αριζόνας]

Ο δίσκος αυτός αποτελεί μία άλλη προσέγγιση στη φιλοσοφία των μικρών μονάδων που περιγράφηκε στα προηγούμενα, και έχει σχεδιαστεί για ηλεκτροπαραγωγή με τη χρήση μίας γεννήτριας ατμομηχανής 50 kW_e ή για εφαρμογές συμπαραγωγής. Αυτή τη στιγμή, η κυβέρνηση της Αυστραλίας χρηματοδοτεί ένα έργο ηλιακού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής 2,6 MW_{th} αποτελούμενου από δεκαοκτώ τέτοιες μονάδες που θα εισάγουν ηλιακά παραγόμενο ατμό απευθείας στον ατμοστρόβιλο ενός υφιστάμενου σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με άνθρακα, στο Newcastle της Νέας-Νότιας Ουαλίας. Μία αυστραλέζικη μονάδα δίσκου συλλεκτών έχει πουληθεί σε ένα ισραηλιτικό κέντρο

ηλιακών δοκιμών στην έρημο Negev για να χρησιμοποιηθεί ως πλατφόρμα ηλιακών δοκιμών έρευνας και ανάπτυξης.

4.3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

4.3.1. Επιδράσεις στο περιβάλλον

Όσον αφορά τις εγκαταστάσεις παραβολικών κοίλων, περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορεί να προκληθούν λόγω της εκχύλισης ή διαρροής του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας. Το ρευστό είναι συνήθως κάποιος αρωματικός υδρογονάνθρακας που μπορεί να έχει χαρακτηρισθεί, ανάλογα με τη χώρα ή την πολιτεία, ως επικίνδυνο υλικό. Όταν συμβεί διαρροή, το μολυσμένο έδαφος μεταφέρεται σε μία εγκατάσταση βιολογικής αποκατάστασης εντός του σταθμού όπου με χρήση γηγενών βακτηρίων του χώματος αποσυντίθεται το ρευστό μέχρις ότου η συγκέντρωσή του μειωθεί σε αποδεκτά επίπεδα. Εκτός από τις διαρροές ρευστού, κατά την κανονική λειτουργία λαμβάνει χώρα και κάποιο επίπεδο εκπομπών ατμών του ρευστού από το σώμα των βαλβίδων και τα στεγανωτικά των αντλιών.

Παρότι η οσμή αυτών των εκπομπών ατμών είναι συχνά έκδηλη, οι εκπομπές κείνται εντός των επιτρεπομένων ορίων. Κατά τη λειτουργία των σταθμών ηλιακού πύργου ισχύος δεν απελευθερώνονται επικίνδυνες εκπομπές υγρών ή αερίων. Εάν προκύψει διασπορά άλατος, αυτό θα στερεοποιηθεί προτού συμβεί κάποια σημαντική μόλυνση του εδάφους. Το άλας συλλέγεται με ένα φτυάρι και μπορεί να ανακυκλωθεί, εάν αυτό απαιτείται. Όταν οι δύο αυτές τεχνολογίες υβριδοποιούνται με κάποιο συμβατικό σταθμό ορυκτών καυσίμων, τότε εκπομπές θα απελευθερώνονται από το μη ηλιακό τμήμα του σταθμού.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων δίσκου/μηχανής είναι ελάχιστες. Οι μηχανές Stirling είναι γνωστές για την αθόρυβη λειτουργία τους, σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης βενζίνης ή ντίζελ, ενώ ακόμα και οι μηχανές Brayton υψηλής ανάκτησης αναφέρεται ότι είναι σχετικά αθόρυβες. Η μεγαλύτερη πηγή θορύβου από ένα σύστημα δίσκου/Stirling είναι ο ανεμιστήρας της ψυκτικής μονάδας. Από την άλλη, τα συστήματα αυτά δεν έχουν διαδοθεί αρκετά ώστε να αποτιμηθούν ρεαλιστικά οι οπτικές επιπτώσεις τους. Τα συστήματα μπορεί να έχουν μεγάλο ύψος κατατομής, εκτεινόμενα έως και 15 μέτρα επάνω από το έδαφος.

Πάντως, όσον αφορά την αισθητική δεν θα πρέπει να θεωρούνται ως επιβλαβή, αφού τα συστήματα δίσκου/μηχανής προσομοιάζουν με τους δορυφορικούς δίσκους, οι οποίοι είναι γενικά αποδεκτοί από το κοινό. Εξάλλου, οι εκπομπές από αυτά τα συστήματα είναι εξαιρετικά χαμηλές. Πέρα από την πιθανότητα διασποράς μικρών ποσοτήτων ελαίου μηχανής ή ψυκτικού υγρού ή γράσου από το κιβώτιο ταχυτήτων, τα συστήματα αυτά δεν παράγουν υγρά απόβλητα όταν λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια. Ακόμα και όταν λειτουργούν με ορυκτό καύσιμο, τα συστήματα σταθερής ροής καύσης που χρησιμοποιούνται τόσο στις μονάδες Stirling όσο και στις Brayton έχουν ως αποτέλεσμα εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα εκπομπών.

4.3.2. Απαιτήσεις σε νερό και γαίες

Η διαθεσιμότητα του νερού μπορεί να αποτελεί σημαντικό ζήτημα στις περιοχές που είναι οι πιο κατάλληλες για τις μονάδες παραβολικών κοίλων. Το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης νερού στις εγκαταστάσεις SEGS (περίπου 90%) χρησιμοποιείται από τους πύργους ψύξης. Η κατανάλωση του νερού κανονικά είναι η ίδια με αυτή οιουδήποτε σταθμού ηλεκτροπαραγωγής κύκλου Rankine με πύργους υγρής ψύξης που παράγει το ίδιο επίπεδο ηλεκτρικής ισχύος. Προκειμένου να μειωθεί σημαντικά η κατανάλωση νερού της μονάδας (μέχρι και 90%), μπορούν να χρησιμοποιούνται πύργοι ξηρής ψύξης. Ωστόσο, αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη μέχρι και 10% μείωση του βαθμού απόδοσης της μονάδας.

Όσον αφορά την τεχνολογία του πύργου ισχύος, τα μεγέθη που αναφέρονται είναι περίπου τα ίδια με αυτά των σταθμών SEGS, στην περιοχή από 3 έως 8 m³ ανά παραγόμενη MWh. Τα συστήματα δίσκου/μηχανής δεν χρειάζονται νερό για την ψύξη της μηχανής. Σε ορισμένες θέσεις απαιτείται μία ελάχιστη ποσότητα νερού για τον καθαρισμό των κατόπτρων. Οι απαιτήσεις σε γαίες κάθε τεχνολογίας συνοψίζονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3. Απαιτήσεις γαιών για κάθε τεχνολογία

Μονάδες	Παραβολικών κοίλων	Πύργου ισχύος		Δίσκου/ μηχανής	
		SEGS	Προηγμένοι	Solar Two	Προηγμένοι
Μέγεθος ισχύος	MW	80	320	10	200
Έκταση γαιών	m ² /MWh	7,5	8,5	27	11
					0,025
					3,5

4.4. ΟΙ ΑΓΟΡΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΗΣ

4.4.1. Γενικά

Εξαιτίας της εμφάνισης των ανεξάρτητων παραγωγών ηλεκτρισμού (ΑΠΗ) και της απελευθέρωσης της αγοράς ενέργειας, υφίσταται ένας έντονος ανταγωνισμός στη βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής για να κερδηθεί μερίδιο της αγοράς. Το περιθώριο κέρδους στα ενεργειακά έργα είναι μικρό και, κατά συνέπεια, οι ΑΠΗ είναι διστακτικοί στο να ρισκάρουν σε μια προηγμένη τεχνολογία όπως είναι αυτή των σταθμών ΗΗΣ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολη η εισαγωγή μιας νέας τεχνολογίας στην αγορά.

Το να εισαχθεί μια νέα τεχνολογία στην αγορά απαιτεί ελκυστικά οικονομικά κίνητρα. Η επίλυση των προβλημάτων φορολόγησης μπορεί να συνεισφέρει στη βελτίωση της οικονομικής ανταγωνιστικότητας των μονάδων ΗΗΣ στον ίδιο βαθμό με τις εξελίξεις στην τεχνολογία. Πρόσφατες μελέτες στις ΗΠΑ έχουν καταδείξει ότι η φορολογική πολιτική μπορεί να επηρεάσει το σταθμισμένο κόστος του ηλεκτρισμού από έναν ηλιακό σταθμό έως και κατά το ένα τρίτο. Εάν ένας σταθμός ΗΗΣ φορολογείται με τον ίδιο τρόπο όπως και ένας ισοδύναμος σταθμός ορυκτών καυσίμων, στον ηλιακό

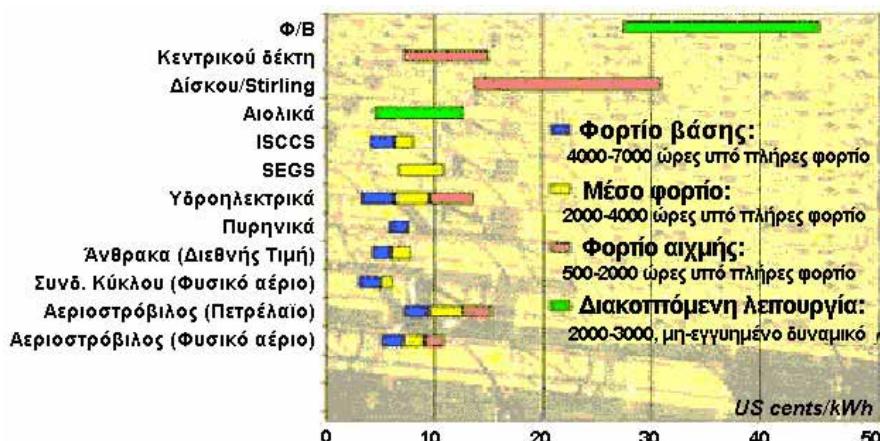
σταθμό, λόγω της έμφυτης έντασης κεφαλαίου του, θα αναλογεί πολύ μεγαλύτερος φόρος ανά kWh καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του.

Μολαταύτα, οι τεχνολογίες ΗΗΣ είναι ικανές να καλύψουν τις απαιτήσεις δύο κύριων αγορών της ηλεκτρικής ενέργειας:

- τις μεγάλης κλίμακας αγορές ελεγχόμενης τροφοδότησης, οι οποίες αποτελούνται από διασυνδεδεμένα στο δίκτυο ηλεκτρικά φορτία αιχμής και βάσης,
- τις ταχέως αναπτυσσόμενες κατανεμημένες αγορές, στις οποίες περιλαμβάνονται τόσο διασυνδεδεμένες όσο και απομακρυσμένες / αυτόνομες εφαρμογές.

Με κατάλληλες στρατηγικές εμπορευματοποίησης, τα συστήματα ΗΗΣ μπορούν να αρχίσουν να διεισδύουν στην αγορά, ακόμα και υπό την παρούσα κατάσταση του έντονου ανταγωνισμού.

Στο σχήμα 4.12 συγκρίνεται το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από σταθμούς ΗΗΣ στην Καλιφόρνια (SEGS, Κεντρικό Δέκτη, Δίσκου/Stirling) με αυτής που παράγεται από τεχνολογίες ορυκτών καυσίμων, πυρηνικής ενέργειας και άλλων ανανεώσιμων πηγών.



Σχήμα 4.12. Σύγκριση του κόστους του ηλεκτρισμού μεταξύ διάφορων τεχνολογιών

Ανταγωνιστές των τεχνολογιών παραβολικού κοίλου και πύργου ισχύος αποτελούν οι σημερινοί συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής ορυκτών καυσίμων, ειδικότερα οι σύγχρονοι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο κατά τη λειτουργία τους σε μέσα φορτία ή βάσης. Ανταγωνιστές της τεχνολογίας δίσκου/μηχανής είναι τα συμβατικά συστήματα αυτόνομης ηλεκτροπαραγωγή μικρής κλίμακας με ονομαστική ισχύ μονάδας από μερικά kW_e μέχρι περίπου 10 MW_e, για λειτουργία σε φορτία αιχμής ή μέσα φορτία σε απόμακρες περιοχές, π.χ. οι γεννήτριες με βενζινοκίνητες ή πετρελαιοκίνητες μηχανές, ειδικά σε αναπτυσσόμενες χώρες της εύκρατης ζώνης και σε νησιά με σχετικά υψηλά κόστη καυσίμων.

4.4.2. Αγορές ηλεκτρισμού ελεγχόμενης τροφοδότησης

Στις αγορές ηλεκτρισμού ελεγχόμενης τροφοδότησης κυριαρχεί ο ηλεκτρισμός που παράγεται από ορυκτά καύσιμα και διανέμεται από τα κεντρικά δίκτυα. Η ισχύς

πρέπει να παράγεται αναλόγως της ζήτησης με σκοπό να καλύπτει μεταβαλλόμενα φορτία καθώς και να επιβάλλει τη μέγιστη τιμή. Τα χαμηλά κόστη στον κύκλο ζωής αποτελούν τον βασικό οδηγό των επενδυτικών αποφάσεων στην αγορά αυτή και οι εξελιγμένοι σταθμοί αερίου και άνθρακα αντιπροσωπεύουν τη συμβατική τεχνολογία που εξυπηρετεί αυτή την αγορά.

Χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες αποθήκευσης και υβριδοποίησης, οι ελεγχόμενης τροφοδότησης τεχνολογίες κοίλων και πύργου ισχύος μπορούν να απευθυνθούν σε αυτήν την αγορά. Κατά την παρούσα περίοδο αυτές παρέχουν τον χαμηλότερου κόστους, υψηλότερης αξίας διαθέσιμο ηλιακό ηλεκτρισμό και έχουν τη δυνατότητα να είναι οικονομικώς ανταγωνιστικές της ενέργειας από ορυκτά καύσιμα στο απώτερο μέλλον. Προς το παρόν το Σταθμισμένο Κόστος του Ηλεκτρισμού είναι υψηλότερο αυτού των ανταγωνιστικών συμβατικών τεχνολογιών, πάντως τελευταία παρέχονται χρηματοδοτικά κίνητρα σε πολλές χώρες που θα βοηθήσουν τα ΗΗΣ να ξεπεράσουν το οικονομικό εμπόδιο.

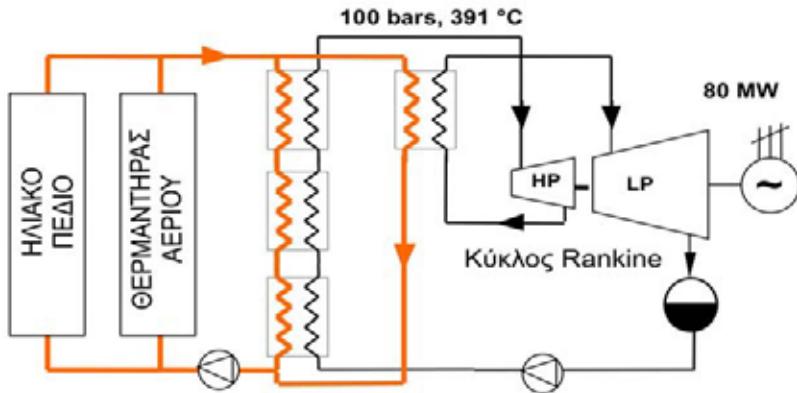
4.4.3. Κατανεμημένες αγορές ηλεκτρισμού

Η τάση τελευταία στις εφαρμογές κατανεμημένης ηλεκτρικής ισχύος είναι η ανάπτυξη τεχνολογιών που μπορούν να λειτουργούν αξιόπιστα για φορτία που κυμαίνονται από μερικά kW μέχρι αρκετά MW. Η πλειονότητα αυτών των εφαρμογών αφορά, προς το παρόν, την ηλεκτροδότηση απομακρυσμένων περιοχών όπου δεν υπάρχει δίκτυο. Οι κύριοι ανταγωνιστές εκεί είναι οι γεννήτριες ντιζελομηχανών. Επίσης, οι εταιρείες ηλεκτρισμού δείχνουν ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις διασυνδεδεμένες εφαρμογές, στις οποίες η ηλιακή γεννήτρια εγκαθίσταται σε κρίσιμα σημεία του συστήματος μεταφοράς και διανομής (Μ&Δ) παρέχοντάς τους αξία, όχι μόνο από την άποψη της παραγόμενης ενέργειας αλλά και με τη μετάθεση των αναβαθμίσεων των υποδομών Μ&Δ που θα απαιτούνταν για την κάλυψη της αύξησης του φορτίου και τη διατήρηση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος. Ανταγωνιστικά με την ΗΗΣ και τις άλλες τεχνολογίες ΑΠΕ (όπως τα Φ/Β και τα αιολικά) στην αγορά αυτή θα καταστούν επίσης τα μικρά συστήματα αεριοστροβίλων.

Η κατάλληλη για τις κατανεμημένες εφαρμογές τεχνολογία ΗΗΣ είναι το σύστημα δίσκου/μηχανής. Κάθε μονάδα αυτού του τύπου (10 έως 50 kW) είναι ένα ανεξάρτητο σύστημα ισχύος σχεδιασμένο για αυτόματη εκκίνηση και λειτουργία χωρίς επιτήρηση. Μπορούν να εγκατασταθούν πολλαπλά συστήματα δίσκου/μηχανής σε μία θέση για να παρέχουν όση ισχύ απαιτείται και το σύστημα μπορεί να επεκταθεί εύκολα με πρόσθετες μονάδες ώστε να εξυπηρετηθεί η μελλοντική αύξηση της ζήτησης. Το σύστημα μπορεί να σχεδιαστεί μόνο για ηλιακές εφαρμογές, να υβριδοποιηθεί εύκολα με ορυκτά καύσιμα που επιτρέπουν την ηλεκτροπαραγωγή χωρίς ηλιακό φως, ή να συνδιαστεί με συστήματα μπαταριών για αποθήκευση της ενέργειας προς μετέπειτα χρήση. Η υψηλή αξία της κατανεμημένης ισχύος παρέχει δυνατότητες για εμπορική εφαρμογή στα πρώιμα στάδια της τεχνολογικής ανάπτυξης.

4.5. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Το δεύτερο ήμισυ της δεκαετίας του '80, ετέθησαν σε λειτουργία στην έρημο Mojave (νότια Καλιφόρνια) εννέα ηλιακοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής από 14 έως 80 MW, φθάνοντας συνολικά τα 354 MW, οι οποίοι και βρίσκονται ακόμα σε λειτουργία. Οι ηλιακοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής τύπου SEGS της εταιρείας Luz χρησιμοποιούν ως κύριο καύσιμο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και, καθώς λειτουργούν με φυσικό αέριο ως βιοθητικό καύσιμο, δεν χρειάζονται κάποια μονάδα αποθήκευσης. Αυτές οι μονάδες χρησιμοποιούνται στην Καλιφόρνια για την κάλυψη της ζήτησης αιχμής. Η παραγωγικότητά τους είναι περίπου 400 kWh/m^2 συλλεκτικής επιφάνειας, το οποίο σημαίνει μια μέση ετήσια παραγωγή της τάξης των 170 GWh για μία μονάδα 80 MW.



Σχήμα 4.13. Σχηματική παράσταση του σταθμού SEGS IX

Ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής SEGS IX που βρίσκεται στη λίμνη Harper αποτελεί τον πιο πρόσφατο σταθμό (80 MW) που κατασκευάστηκε από την εταιρεία Luz, και παρουσιάζεται διαγραμματικά στο σχήμα 4.13. Ο σταθμός αυτός απαρτίζεται από διάφορες συνιστώσες, τα χαρακτηριστικά στοιχεία των οποίων παρουσιάζονται στο πίνακα 4.4, ειδικότερα:

- Ένα ηλιακό πεδίο, στο οποίο συνάζονται 888 συλλέκτες παραβολικού κοίλου LS3, προσανατολισμένοι στον άξονα βορά – νότου.
- Ένα θερμαντήρα φυσικού αερίου, ο οποίος παρέχει τη δυνατότητα θέρμανσης του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας παράλληλα με το ηλιακό πεδίο, όταν δεν μπορεί να επιτευχθεί η βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας μόνο με το ηλιακό τμήμα. Αυτό συνήθως συμβαίνει αργά το απόγευμα ή τις νεφελώδεις ημέρες.
- Έναν ατμοπαραγωγό που τροφοδοτεί το στρόβιλο με υπέρθερμο ατμό. Η απαιτούμενη θερμότητα λαμβάνεται από το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας μέσω εναλλακτών θερμότητας.
- Μία στροβιλογεννήτρια 80 MW η οποία τροφοδοτεί με ηλεκτρισμό το δίκτυο. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της είναι περίπου 30 έτη, με ημερήσιες εκκινήσεις και διακοπές.
- Χρησιμοποιούνται πύργοι ψύξης.

Ο σταθμός SEGS IX κατασκευάστηκε ώστε να παρέχει 250 GWh το χρόνο, το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου 3000 ώρες λειτουργίας υπό ονομαστική ισχύ. Προκειμένου να

υπάρξει όφελος από τα πλεονεκτήματα του νόμου PURPA (Νόμος Ρυθμιστικών Πολιτικών για τις Επιχειρήσεις Κοινής Ωφέλειας) των ΗΠΑ όσον αφορά τις ΑΠΕ, το 75% της παραγωγής πρέπει να προέρχεται από το ηλιακό τμήμα της εγκατάστασης. Χωρίς αποθήκευση ενέργειας, αυτή η μονάδα ηλεκτροπαραγωγής λειτουργεί για την κάλυψη φορτίων αιχμής.

Πίνακας 4.4. Χαρακτηριστικά του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής SEGS IX

ΘΕΣΗ		
Τοποθεσία		Λίμνη Harper (Καλιφόρνια, 35°Β)
Ετήσια άμεση κάθετη ακτινοβολία	kWh/m ²	2 727
Απαιτήσεις γαιών	ha	169
ΗΛΙΑΚΟ ΠΕΔΙΟ		
Αριθμός συλλεκτών LS3		888
Αριθμός μεμονωμένων κατόπτρων		198 912
Εμβαδόν ηλιακού πεδίου (φωτοφράκτης)	m ²	483 960
Θερμοκρασία εξόδου του ηλιακού πεδίου	°C	391
Ρευστό μεταφοράς θερμότητας		Διφαινύλιο / Οξείδιο Διφαινυλίου
Όγκος ρευστού	m ³	1 289
Όγκος δοχείου διαστολής	m ³	567
Αντλίες κυκλοφορίας του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας		
ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ LS3		
Επιφάνεια φωτοφράκτη	m ²	545
Αριθμός μεμονωμένων κατόπτρων		224
Πλάτος	m	5,76
Μήκος	m	95,2
Διάμετρος σωλήνα	m	0,07
Συντελεστής συγκέντρωσης		82
Μέση εστιακή απόσταση	m	2,12
Απόσταση μεταξύ δύο σειρών	m	17,3
Οπτική απόδοση		0,8
Ανακλαστικότητα κατόπτρων		0,94
Μεταδοτικότητα του σωλήνα		0,965
Εκπεμπτικότητα του σωλήνα στους 350 °C		0,19
Απορροφητικότητα του σωλήνα		0,96
Μέγιστη αποδοτικότητα συλλέκτη		0,68
Ετήσια θερμική αποδοτικότητα		0,49
ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑΚΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ		
Μικτή ισχύς της στροβιλογεννήτριας	MW	89
Καθαρή ηλεκτρική ισχύς	MW	80
Ισχύς του θερμαντήρα φυσικού αερίου	MW	251
Παροχή του ατμοπαραγωγού	tons/h	357
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟ		
Πίεση συμπύκνωσης	mbar	80
Ονομαστικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine – ηλιακή λειτουργία		0,338
Ονομαστικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine – λειτουργία με φυσικό αέριο		0,324

5.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1.1. Βασικές αρχές της γεωθερμίας

Γεωθερμική ισχύς είναι η θερμική (αρχικά) και η ηλεκτρική (σε δεύτερο στάδιο) ισχύς που παράγεται από την περιεχόμενη στη Γη θερμική ενέργεια (γεωθερμική ενέργεια). Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας από θερμοδυναμικής πλευράς βασίζεται στη διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ μιας μάζας υπόγειου πετρώματος και νερού και μιας μάζας νερού ή αέρα στην επιφάνεια της γης. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας επιτρέπει την παραγωγή θερμικής ενέργειας που μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί άμεσα είτε να μετατραπεί σε μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια.

Γενικά, οι θερμοκρασίες στη Γη αυξάνονται αυξανομένου του βάθους, σε 200-1000°C στη βάση του φλοιού και πιθανώς μέχρι 3500-4500°C στο κέντρο της. Η θερμότητα που παράγει γεωθερμικές βαθμίδες προέρχεται από δύο πηγές, τη ροή θερμότητας από τον κατώτερο φλοιό και το μανδύα, και τη θερμική ενέργεια που παράγεται στον άνω φλοιό από τη ραδιενέργο διάσπαση ισοτόπων του ουράνιου, θορίου και καλίου. Εντούτοις, μερικά γρανιτικά πετρώματα στον άνω φλοιό έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε ουράνιο και θόριο, παράγοντας έτσι αφύσικα μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας και αυξημένη ροή θερμότητας προς την επιφάνεια της γης.

Οι θερμικές βαθμίδες υπολογίζονται θεωρώντας ότι η θερμότητα κινείται προς την επιφάνεια της Γης μόνο με τη θερμική αγωγή μέσω στερεών πετρωμάτων. Εντούτοις, η θερμική ενέργεια μεταδίδεται επίσης προς την επιφάνεια με μετακίνηση τετηγμένων πετρωμάτων (μάγμα) και με την κυκλοφορία νερού μέσω επικοινωνούντων πόρων και ρωγμών. Αυτές οι διαδικασίες υπερθέτονται στις περιφερειακές βαθμίδες όπου επικρατεί η αγωγή και προκαλούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες κοντά στην επιφάνεια της Γης. Οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από τέτοιες υψηλές θερμοκρασίες είναι οι βασικοί υποψήφιοι για γεωθερμική διερεύνηση και ανάπτυξη.

Η εμπορική διερεύνηση και ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας μέχρι σήμερα έχει εστιαστεί σε φυσικούς γεωθερμικούς ταμιευτήρες - όγκους πετρωμάτων με υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 350°C), αλλά και με υψηλό πορώδες (διάκενο πόρων, συνήθως γεμάτοι με νερό) και υψηλή περατότητα (δυνατότητα μεταφοράς ρευστού). Η θερμική ενέργεια αντλείται με γεωτρήσεις στους ταμιευτήρες. Η θερμότητα του πετρώματος μεταφέρεται με αγωγή στο ρευστό, το οποίο στη συνέχεια ρέει προς το φρέαρ και έπειτα προς την επιφάνεια της Γης.

Εντούτοις, οι φυσικοί γεωθερμικοί ταμιευτήρες αποτελούν ένα μικρό μόνο μέρος των άνω 10 km του γήινου φλοιού. Το υπόλοιπο αφορά πετρώματα με σχετικά χαμηλή περατότητα, η θερμική ενέργεια των οποίων δεν μπορεί να αντληθεί χωρίς την τεχνητή θραύση τους με εκρηκτικές ύλες ή υδροβιολή. Έχουν γίνει πειράματα που περιλαμβάνουν την τεχνητή θραύση θερμών πετρωμάτων και μπορεί κάποτε να αποδειχθεί οικονομικά εφικτή η εξαγωγή ενέργειας με την κυκλοφορία νερού μέσα από ένα δίκτυο τέτοιων τεχνητών καταγμάτων.

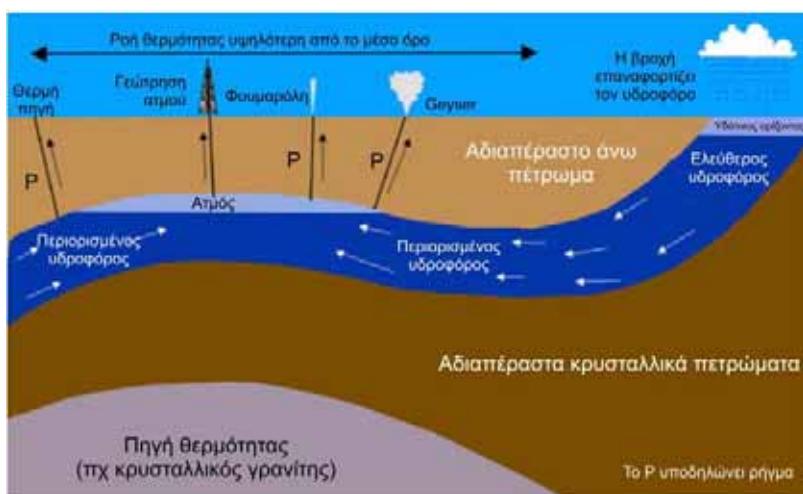
5.1.2. Γεωθερμικές πηγές

Υπάρχουν τέσσερις τύποι γεωθερμικών πηγών, πιο συγκεκριμένα οι υδροθερμικές, οι γεω-πεπιεσμένες, τα θερμά ξηρά πετρώματα και το μάγμα. Από αυτές μόνο οι υδροθερμικές πηγές αξιοποιούνται εμπορικά προς το παρόν.

5.1.2.1. Υδροθερμικές πηγές

Όλοι οι ταμιευτήρες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα για παραγωγή ηλεκτρισμού ονομάζονται υδροθερμικά συστήματα συναγωγής και τα χαρακτηρίζει η κυκλοφορία επιφανειακού νερού σε μικρά έως μέσα βάθη (100m έως 4,5km). Η κινητήρια δύναμη των συστημάτων αυτών είναι η βαρύτητα, δρούσα λόγω της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ του κρύου νερού αναπλήρωσης που κινείται προς τα κάτω, και του ζεστού θερμικού νερού που κινείται προς τα πάνω. Τα υδροθερμικά συστήματα μπορεί να οδηγούνται είτε από ένα υποκείμενο νέο πυριγενές έγκλεισμα, είτε απλά από την κυκλοφορία του νερού σε βάθος μέσω ρωγμών και καταγμάτων.

Οι υδροθερμικές πηγές απαιτούν τρία βασικά συστατικά, ειδικότερα μια θερμική πηγή (π.χ. κρυσταλλωμένο μάγμα), έναν υδροφόρο ορίζοντα που περιέχει προσπελάσιμο νερό, και ένα στεγανό πέτρωμα που να σφραγίζει τον υδροφόρο ορίζοντα (σχήμα 5.1). Η γεωθερμική ενέργεια αντλείται με τη διάτρηση του υδροφόρου ορίζοντα και την εξαγωγή του θερμού νερού ή ατμού. Οι υψηλής θερμοκρασίας υδροθερμικές πηγές (με θερμοκρασίες από 180°C έως πάνω από 350°C) συνήθως θερμαίνονται από θερμό τηγμένο πέτρωμα, ενώ οι χαμηλής θερμοκρασίας πηγές (από 100 έως 180°C) μπορούν να δημιουργηθούν με οποιαδήποτε διαδικασία.



Σχήμα 5.1. Αναπαράσταση των κύριων χαρακτηριστικών μιας γεωθερμικής περιοχής
[Πηγή: Boyle, 1998]

Ανάλογα με τη φυσική κατάσταση του ρευστού των πόρων, δύο είδη υδροθερμικών συστημάτων συναγωγής μπορούν να διακριθούν, συγκεκριμένα τα:

- α) υπερίσχυσης υγρού, στα οποία όλοι οι πόροι και οι ρωγμές γεμίζουν με υγρό νερό που βρίσκεται σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλότερες από αυτή του βρασμού υπό ατμοσφαιρική πίεση, εξαιτίας της πίεσης του υπερκείμενου νερού, και

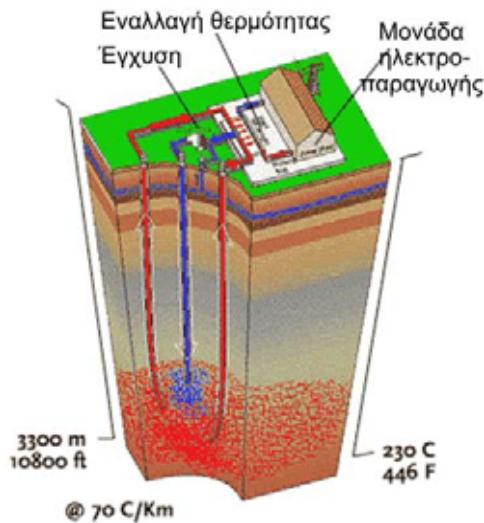
β) υπερίσχυσης ατμού, όπου οι μεγαλύτεροι πόροι και ρωγμές είναι πλήρεις ατμού.

Οι ταμιευτήρες υπερίσχυσης υγρού παράγουν είτε νερό είτε μίγμα νερού και ατμού, ενώ οι ταμιευτήρες υπερίσχυσης ατμού παράγουν μόνο ατμό, ως επί το πλείστον υπέρθερμο. Οι φυσικοί γεωθερμικοί ταμιευτήρες εμφανίζονται και ως περιφερειακοί υδροφόροι ορίζοντες, όπως ο ασβεστόλιθος Dogger της λεκάνης του Παρισιού στη Γαλλία και οι ψαμμίτες της οροσειράς Pannonian της κεντρικής Ουγγαρίας.

5.1.2.2. Γεωπεπιεσμένες πηγές

Σε μερικές ταχέως καθιζάνουσες νέες ιζηματογενείς λεκάνες, όπως η βόρεια λεκάνη του Κόλπου του Μεξικού, οι πορώδεις ψαμμίτες των ταμιευτήρων διαιρούνται από επεκτάσεις ρηγμάτων σε μεμονωμένους ταμιευτήρες σε βάθος περίπου 3-6km, όπου μπορεί η πίεση του ρευστού να υπερβαίνει αυτήν της στήλης ύδατος, πλησιάζοντας αυτήν του υπερκείμενου πετρώματος. Ο στεγανός σχιστόλιθος που περιβάλλει τον διαιρεμένο ψαμμίτη εμποδίζει τη διαφυγή του νερού των πόρων και η θερμοκρασία του κυμαίνεται μεταξύ 90 και 200°C. Στους πεπιεσμένους ταμιευτήρες η ενέργεια δεν είναι μόνο θερμική, αλλά περιλαμβάνει ένα ίσο ποσό ενέργειας λόγω του διαλυμένου στο νερό μεθανίου (χημική ενέργεια), συν ένα μικρό ποσό μηχανικής/υδραυλικής ενέργειας λόγω των υψηλών πιέσεων των ρευστών.

5.1.2.3. Θερμά ξηρά πετρώματα



Σχήμα 5.2. Η τεχνολογία των θερμών ξηρών πετρωμάτων

Τα θερμά ξηρά πετρώματα (HDR) είναι ένας θερμαινόμενος γεωλογικός σχηματισμός που δημιουργείται με τον ίδιο τρόπο όπως οι υδροθερμικές πηγές, αλλά δεν περιέχει νερό αφού δεν υπάρχουν οι υδροφόροι ορίζοντες ή οι ρωγμές που απαιτούνται για να οδηγήσουν το νερό στην επιφάνεια (σχήμα 5.2). Το νερό αντλείται προς τα κάτω με μια γεώτρηση για να προκληθεί υδραυλική ρωγμή και να σχηματισθεί ταμιευτήρας. Έπειτα, το νερό κυκλοφορεί υπό πίεση μέσα στις ρωγμές απορροφώντας θερμότητα, πριν επανέλθει στην επιφάνεια μέσω ενός ή περισσότερων φρεατίων παραγωγής. Η πηγή αυτή είναι πρακτικά απεριόριστη και πιο προσιτή από τις υδροθερμικές πηγές.

5.1.2.4. Μάγμα

Το μάγμα, η μεγαλύτερη γεωθερμική πηγή, είναι τηγμένο πέτρωμα που βρίσκεται σε βάθη 3 - 10km και παραπάνω, και άρα δεν είναι προσπελάσιμο. Η θερμοκρασία του κυμαίνεται από 700 έως 1200°C. Η πηγή αυτή δεν έχει ερευνηθεί καλά μέχρι σήμερα.

5.1.3. Γεωθερμικό δυναμικό

Η γεωθερμική ενέργεια, υπό την ευρύτερη έννοια, είναι η φυσική θερμότητα της γης. Η θεωρητικά κατάλληλη για άμεση εφαρμογή ανακτήσιμη θερμική ενέργεια εκτιμάται σε $2,9 \times 10^{24}$ Joule, δηλαδή 10000 φορές περίπου την υφιστάμενη ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας παγκοσμίως. Πάντως, το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας αυτής βρίσκεται πολύ πιο κάτω από το βάθος των γεωτρήσεων, ακόμη και με τις πιο αισιόδοξες προβλέψεις τεχνολογικής ανάπτυξης. Η γεωθερμική ενέργεια έχει προς το παρόν ιδιαίτερο οικονομικό δυναμικό μόνο σε περιοχές όπου συγκεντρώνεται θερμό νερό ή ατμός σε βάθη μικρότερα των 3 km σε περιορισμένους όγκους, κατ' αναλογία με το πετρέλαιο στους εμπορικούς ταμιευτήρες πετρελαίου.

Η τεχνολογία των γεωτρήσεων για τα γεωθερμικά ρευστά είναι παρόμοια με αυτή του πετρελαίου. Εντούτοις, καθώς το ενεργειακό περιεχόμενο ενός βαρελιού πετρελαίου είναι πολύ μεγαλύτερο από μία ισοδύναμη ποσότητα θερμού νερού, οι οικονομικές απαιτήσεις για διαπερατότητα των διατάξεων και παραγωγικότητα των γεωθερμικών γεωτρήσεων είναι πολύ υψηλότερες απ' ό,τι για τις πετρελαιοπηγές. Τα γεωθερμικά φρέατα παραγωγής προς το παρόν έχουν βάθη συνήθως 2km, και σπάνια πάνω από 3km. Εκμεταλλεύσιμα γεωθερμικά συστήματα υφίστανται σε διάφορα γεωλογικά περιβάλλοντα.

Τα υψηλής θερμοκρασίας πεδία που χρησιμοποιούνται για συμβατική παραγωγή ισχύος (με θερμοκρασία πάνω από 150°C) κατά ένα μεγάλο μέρος περιορίζονται σε περιοχές με νέα ηφαιστειακή, σεισμική και μαγματική δραστηριότητα. Από την άλλη, χαμηλής θερμοκρασίας πηγές βρίσκονται στις περισσότερες χώρες, διαμορφουμένες από τη βαθιά κυκλοφορία του επιφανειακού νερού κατά μήκος των ρηγμάτων και των ρωγμών, και από νερό που βρίσκεται σε πετρώματα υψηλού πορώδους, όπως είναι ο φαμίτης και ο ασβεστόλιθος, σε ικανοποιητικά βάθη ώστε να θερμαίνεται από τη γήινη γεωθερμική βαθμίδα. Πηγές θερμότητας σε θερμούς αλλά ξηρούς (χαμηλού πορώδους) σχηματισμούς πετρωμάτων βρίσκονται στις περισσότερες χώρες, αλλά δεν είναι ακόμα οικονομικά εκμεταλλεύσιμες.

5.1.4. Χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας

Αν και η γεωθερμική ενέργεια βρίσκεται παντού κάτω από την επιφάνεια της Γης, η χρήση της είναι δυνατή μόνο όταν ικανοποιούνται συγκεκριμένες συνθήκες:

- (1) Η ενέργεια πρέπει να είναι προσπελάσιμη μέσω γεωτρήσεων, συνήθως σε βάθη μικρότερα των 3 km αλλά ενδεχομένως και σε βάθη 6-7 km, σε ιδιαίτερα ευνοϊκά περιβάλλοντα (όπως στη βόρεια λεκάνη του Κόλπου του Μεξικού).

- (2) Εν αναμονή επίδειξης της τεχνολογίας και των οικονομικών για τη διάρρηξη και την παραγωγή ενέργειας από πετρώματα χαμηλής περατότητας, το πορώδες των ταμιευτήρων και η διαπερατότητα πρέπει να είναι αρκετά υψηλά ώστε να επιτρέπουν την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων θερμού νερού.
- (3) Δεδομένου ότι σημαντικό μέρος του κόστους μιας γεωθερμικής εγκατάστασης αφορά τη γεώτρηση και καθώς το κόστος ανά μέτρο αυξάνεται με το βάθος, όσο πιο ρηχά βρίσκεται συσσωρευμένη η γεωθερμική ενέργεια τόσο το καλύτερο.
- (4) Τα γεωθερμικά ρευστά μπορούν να μεταφερθούν οικονομικά με σωληνώσεις στην επιφάνεια της Γης μόνο για μερικές δεκάδες χιλιόμετρα, οπότε οιαδήποτε εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής ή άμεσης χρήσης πρέπει να βρίσκεται στη (ή κοντά στη) γεωθερμική ανωμαλία.

Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται οι βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συνήθως ανάλογα με τη θερμοκρασία της πηγής.

Πίνακας 5.1. Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση της γεωθερμίας

Θερμοκρασία ταμιευτήρα	Ρευστό ταμιευτήρα	Συνήθης χρήση	Τεχνολογία που συνήθως επιλέγεται
Υψηλή θερμοκρασία (> 220°C)	Νερό ή ατμός	Ηλεκτροπαραγωγή	<ul style="list-style-type: none"> • Ακαριαίος ατμός • Συνδυασμένος κύκλος (ακαριαία ατμοποίηση & δυαδικός)
		Άμεση χρήση	<ul style="list-style-type: none"> • Άμεση χρήση ρευστού • Εναλλάκτες θερμότητας • Αντλίες θερμότητας
Ενδιάμεση θερμοκρασία (100-220°C)	Νερό	Ηλεκτροπαραγωγή	<ul style="list-style-type: none"> • Δυαδικός κύκλος
		Άμεση χρήση	<ul style="list-style-type: none"> • Άμεση χρήση ρευστού • Εναλλάκτες θερμότητας • Αντλίες θερμότητας
Χαμηλή θερμοκρασία (50-150°C)	Νερό	Άμεση χρήση	<ul style="list-style-type: none"> • Άμεση χρήση ρευστού • Εναλλάκτες θερμότητας • Αντλίες θερμότητας

5.1.4.1. Παραγωγή ηλεκτρισμού

Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού έχει διαδοθεί λόγω διάφορων παραγόντων. Οι χώρες όπου επικρατούν οι γεωθερμικές πηγές επιθυμούν να αναπτύξουν τους ιδίους πόρους τους αντί του να εισάγουν καύσιμα για παραγωγή ηλεκτρισμού. Σε χώρες όπου διατίθενται πολλές εναλλακτικές πηγές για παραγωγή ηλεκτρισμού, περιλαμβανομένης της γεωθερμίας, αυτή προτιμάται καθώς δεν μπορεί να μεταφερθεί προς πώληση, ενώ μέσω αυτής επιτρέπεται η χρήση των συμβατικών καυσίμων για ανώτερους και καλύτερους σκοπούς από την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Επίσης, ο γεωθερμικός ατμός αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική λύση παραγωγής ηλεκτρισμού λόγω των περιβαλλοντικών οφελών και επειδή τα μεγέθη των μονάδων είναι μικρά (συνήθως κάτω των 100MW). Επιπλέον, οι γεωθερμικοί σταθμοί μπορούν να ανεγερθούν ταχύτερα από αυτούς που χρησιμοποιούν συμβατικά και πυρηνικά καύσιμα, οι οποίοι, για οικονομικούς λόγους, πρέπει να έχουν πολύ μεγάλο μέγεθος. Εξάλλου, τα ηλεκτρικά συστήματα είναι πιο αξιόπιστα εάν οι πηγές τροφοδοσίας τους δεν συγκεντρώνονται σε ένα μικρό αριθμό από μεγάλες μονάδες.

Η διεργασία που χρησιμοποιείται για την ηλεκτροπαραγωγή ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της γεωθερμικής πηγής. Σχεδόν όλες οι πηγές που έχουν ήδη εξερευνηθεί είναι του υδροθερμικού τύπου (ζεστό νερό υπό πίεση), η εκμετάλλευση των οποίων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Εάν η θερμοκρασία της πηγής είναι κάτω από 204°C, το γεωθερμικό φρέαρ εξοπλίζεται με αντλία που δημιουργεί ικανή πίεση στη γεωθερμική άλμη ώστε να διατηρείται ως ζεστό νερό υπό πίεση. Για τις άνω των 204°C πηγές η καταλληλότερη μέθοδος παραγωγής είναι η φυσική ροή από το φρέαρ, η οποία αποφέρει ένα ακαριαία ατμοποιούμενο μίγμα άλμης και ατμού.

5.1.4.2. Άμεση χρήση

Εξίσου σημαντική παγκοσμίως είναι και η άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας, συχνά σε θερμοκρασίες ταμιευτήρων μικρότερες των 100°C. Η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται άμεσα για θέρμανση κτιρίων (ανεξάρτητες κατοικίες, συγκροτήματα διαμερισμάτων, μέχρι ολόκληρες κοινότητες), δροσισμό κτιρίων (με χρήση μονάδων απορρόφησης βρωμιούχου λιθίου), θέρμανση θερμοκηπίων και εδάφους, και για την παροχή ζεστού ή χλιαρού νερού για οικιακή χρήση, επεξεργασία προϊόντων (π.χ. την παραγωγή χαρτιού), καλλιέργεια οστρακοειδών και ψαριών, θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών, και για θεραπευτικούς σκοπούς.

Οι γεωθερμικές πηγές παρέχουν σήμερα άμεσα αξιοποιήσιμη θερμική ισχύ πάνω από 12.000 MW σε περισσότερες από 30 χώρες παγκοσμίως. Οι κύριες θέσεις όπου γίνεται άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας στην Ευρώπη είναι η Ισλανδία (30% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, κυρίως για θέρμανση χώρων), η λεκάνη του Παρισιού (νερό ~70°C χρησιμοποιείται για την τηλεθέρμανση των κοινοτήτων Melun, Creil και Villeneuve la Garenne), και η λεκάνη Pannonian στην Ουγγαρία.

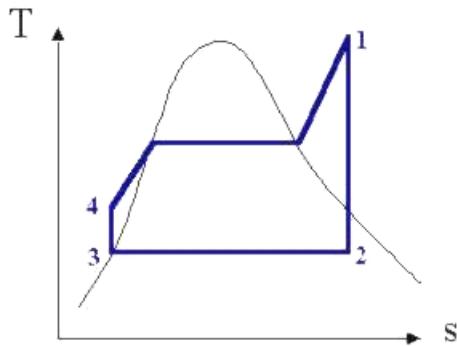
5.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

5.2.1. Βασικές αρχές

Τρεις είναι οι κύριοι τύποι των γεωθερμικών σταθμών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ο τύπος του σταθμού καθορίζεται κυρίως από τη φύση της γεωθερμικής πηγής της εν λόγω θέσης. Η διαδικασία ηλεκτροπαραγωγής από μία γεωθερμική πηγή (ή από ατμό σε μία συμβατική εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής) περιλαμβάνει μια διεργασία γνωστή ως κύκλο Rankine. Ο κύκλος αυτός, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3, περιλαμβάνει ένα λέβητα, στρόβιλο, γεννήτρια, συμπυκνωτή, υδραντλία τροφοδοσίας, πύργο ψύξης και υδραντλία ψύξης.

Κορεσμένος ή υπέρθερμος ατμός εισάγεται στο στρόβιλο (στάδιο 1) και εκτονώνεται ισεντροπικά μέχρι την πίεση εξόδου στο στάδιο 2. Έπειτα, ο ατμός συμπυκνώνεται υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία σε κεκορεσμένο υγρό (στάδιο 3). Η θερμότητα που απάγεται από τον ατμό στο συμπυκνωτή συνήθως μεταφέρεται στο νερό ψύξης. Έπειτα, το κεκορεσμένο υγρό ρέει μέσω της αντλίας, η οποία αυξάνει την πίεση στην

πίεση του λέβητα (στάδιο 4), όπου το νερό θερμαίνεται κατ' αρχήν στη θερμοκρασία κορεσμού, βράζει και υπερθερμαίνεται, μέχρι το στάδιο 1. Κατόπιν επαναλαμβάνεται ολόκληρος ο κύκλος.

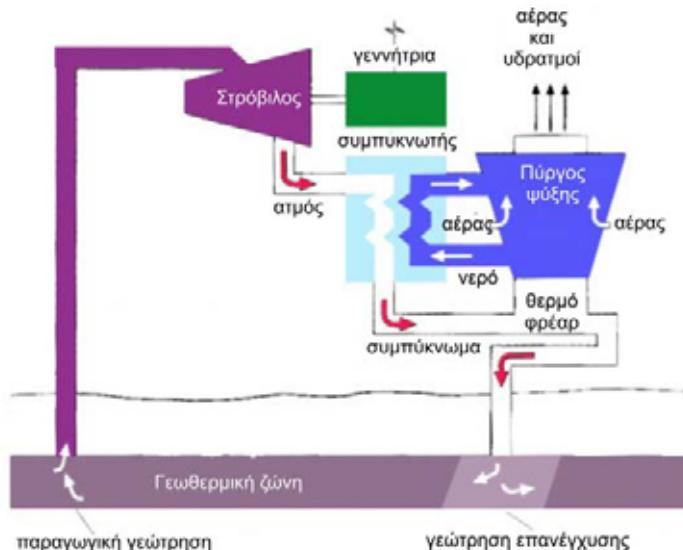


Σχήμα 5.3. Το διάγραμμα T-s του κύκλου Rankine

Συνοψίζοντας, ένας σταθμός παραγωγής είναι απλά ένας κύκλος που διευκολύνει τη μετατροπή της ενέργειας από μία μορφή σε άλλη. Αν και το ενεργειακό περιεχόμενο του τελικού προϊόντος (ηλεκτρισμός) εκφράζεται συνήθως σε kWh, ο υπολογισμός της απόδοσης του σταθμού συχνά γίνεται σε μονάδες Btu (1 kWh είναι ενεργειακά ισοδύναμη με 3413 Btu). Ο σημαντικότερος υπολογισμός για ένα σταθμό παραγωγής αφορά το πόση από την τροφοδοτούμενη ενέργεια (καύσιμο) απαιτείται για να παραχθεί μια δεδομένη ποσότητα ηλεκτρισμού, και για να γίνει αυτός πρέπει να είναι γνωστή η αποδοτικότητα της μονάδας.

5.2.2. Διαδικασία ξηρού (ή άμεσου) ατμού

Αυτός ήταν ο πρώτος τύπος γεωθερμικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής (Ιταλία, 1904). Οι σταθμοί αυτοί χρησιμοποιούν τον ατμό όπως φθάνει από τις υδροθερμικές γεωτρήσεις παραγωγής (χωρίς την ανάγκη οποιουδήποτε εξοπλισμού διαχωρισμού και έγχυσης της άλμης), τον οποίο κατευθύνουν στη μονάδα στροβίλου/γεννήτριας για να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς. Ο ατμός έπειτα συμπυκνώνεται και επιστρέφει στο γεωθερμικό ταμευτήρα μέσω μιας γεώτρησης επανέγχυσης (σχήμα 5.4).

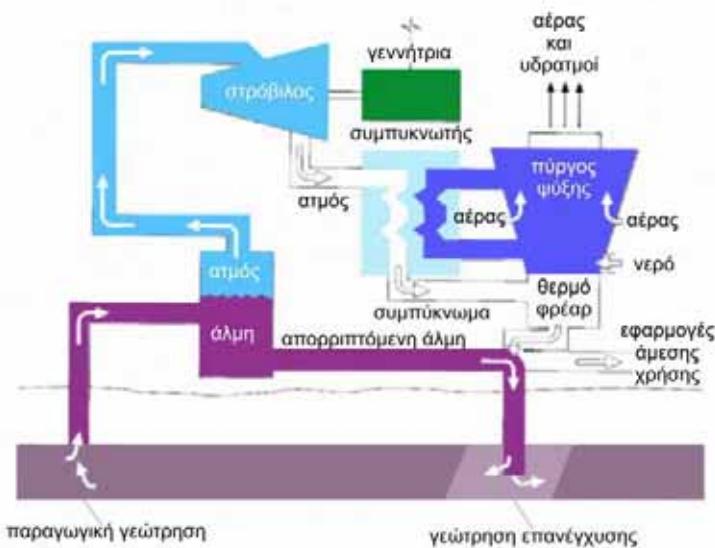


Σχήμα 5.4. Σχηματικό διάγραμμα μιας μονάδας ξηρού ατμού

Στις ΗΠΑ, εγκαταστάθηκαν προσφάτως μονάδες ξηρού ατμού ισχύος 55 και 110 MW στα Geysers της Καλιφόρνιας, που αποτελούν τη μεγαλύτερη πηγή γεωθερμικής ισχύος στον κόσμο. Δυστυχώς, οι πηγές ατμού είναι οι σπανιότερες απ' όλες τις γεωθερμικές πηγές και υπάρχουν μόνο σε λίγες περιοχές στον κόσμο. Προφανώς, οι σταθμοί άμεσου ατμού δεν είναι εφαρμόσιμοι σε πηγές χαμηλής θερμοκρασίας.

5.2.3. Διαδικασία ακαριαίου ατμού

Η συνηθέστερη διαδικασία είναι αυτή του ακαριαίου ατμού, η οποία χρησιμοποιεί διαχωριστές για την απόληψη του ατμού από ένα αναβλύζον γεωθερμικό φρέαρ. Ειδικότερα, μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ακαριαίου ατμού (σχήμα 5.5) διοχετεύει το ζεστό νερό από ένα υδροθερμικό παραγωγικό φρέαρ σε μία δεξαμενή ακαριαίας ατμοποίησης, όπου μια πτώση στην πίεση μετατρέπει το νερό σε ατμό. Ο ατμός περιστρέφει τη στροβιλογεννήτρια που παράγει ηλεκτρισμό, κατόπιν συμπυκνώνεται και, με όσο ζεστό νερό δεν μετατράπηκε σε ατμό, επιστρέφει στον ταμιευτήρα μέσω μιας γεώτρησης επανέγχυσης.



Σχήμα 5.5. Σχηματικό διάγραμμα μιας μονάδας ακαριαίου ατμού

Ανάλογα με τη θερμοκρασία της πηγής, μπορεί να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν δύο στάδια δεξαμενών ακαριαίας ατμοποίησης. Στην περίπτωση αυτή, το νερό που διαχωρίζεται στη δεξαμενή του πρώτου σταδίου οδηγείται στη δεξαμενή ακαριαίας ατμοποίησης δεύτερου σταδίου όπου διαχωρίζεται περισσότερος (αλλά χαμηλότερης πίεσης) ατμός. Το νερό που απομένει στη δεξαμενή αυτή οδηγείται εν συνεχείᾳ προς απόρριψη. Η επονομαζόμενη εγκατάσταση διπλής ακαριαίας ατμοποίησης παρέχει ατμό υπό δύο διαφορετικές πιέσεις στο στρόβιλο.

Για τη μέγιστη αποδοτικότητα της διαδικασίας αυτής χρησιμοποιείται ένας στρόβιλος διπλής εισόδου, ο οποίος παρέχει τη δυνατότητα μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια του μεγαλύτερου μέρους του ατμού που διατίθεται για παραγωγή από το γεωθερμικό φρέαρ. Εάν η πηγή έχει υψηλό επίπεδο αιωρούμενων και διαλελυμένων στερεών, μπορεί να είναι αναγκαία η ενσωμάτωση εξοπλισμού ελέγχου των επικαθήσεων στο

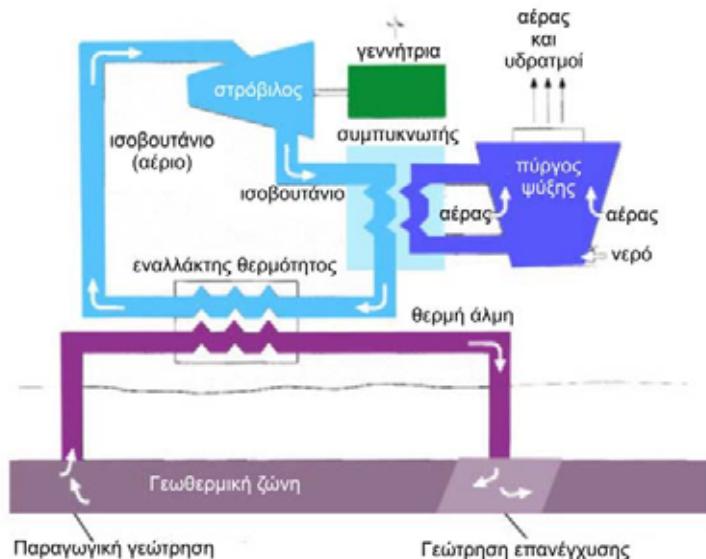
δοχείο ακαριαίας ατμοποίησης του ατμού στην είσοδο της μονάδας και εξοπλισμού αποκατάστασης των στερεών στην έξοδο αυτής. Αυτό προφυλάσσει τον εξοπλισμό της μονάδας από απόφραξη και επιτρέπει τη διατήρηση ενός καθαρού υπόλοιπου άλμης για επανέγχυση στον ταμιευτήρα.

Εάν υφίστανται σημαντικές ποσότητες μη συμπυκνώσιμων αερίων, μπορεί να είναι αναγκαία η εγκατάσταση εξοπλισμού αποβολής των αερίων από το συμπυκνωτή για να μην αυξηθεί η αντίθλιψη στο σύστημα και, εξ αιτίας αυτού, να μειωθεί η απόδοση της διαδικασίας. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής ακαριαίου ατμού συμπύκνωσης υφίστανται σε μεγέθη από 5 έως πάνω από 100 MW_e. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ατμού, την περιεκτικότητα σε αέρια, τις πιέσεις, και το σχεδιασμό της μονάδας, απαιτούνται 6 έως 9 τόνοι ατμού ανά ώρα για να παραχθεί 1 MW ηλεκτρικής ισχύος.

Οι μικρές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής (κάτω των 10 MW) συνήθως καλούνται μονάδες κεφαλής της πηγής, καθώς χρειάζονται τον ατμό από ένα μόνο φρέαρ και εγκαθίστανται πλησίον αυτού στην εξέδρα της γεώτρησης για τη μείωση του κόστους των σωληνώσεων. Οι μονάδες αυτές συχνά δεν έχουν συμπυκνωτή και ονομάζονται μονάδες αντίθλιψης. Είναι φθηνές και απλές στην εγκατάσταση, αλλά μη αποδοτικές (συνήθως απαιτούνται 10-20 τόνοι ατμού ανά ώρα για κάθε MW ηλεκτρισμού) και μπορεί να έχουν μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

5.2.4. Δυαδικός κύκλος

Μια πιο αποδοτική αξιοποίηση της πηγής μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση της δυαδικής διαδικασίας σε πηγές με θερμοκρασία μικρότερη από 180°C. Η διαδικασία αυτή κανονικά χρησιμοποιείται όταν γίνεται άντληση των φρεάτων, και παρουσιάζεται στο σχήμα 5.6. Η υπό πίεση γεωθερμική άλμη αποδίδει τη θερμική της ενέργεια σε ένα δεύτερο ρευστό σε εναλλάκτες θερμότητας (καλούμενοι λέβητες ή εξατμιστές) και επανεισάγεται μέσω ενός φρέατος εισαγωγής στον ταμιευτήρα. Σε μερικές μονάδες χρησιμοποιούνται δύο εναλλάκτες θερμότητας εν σειρά, ο πρώτος για προθέρμανση και ο δεύτερος για την εξάτμιση (εξατμιστής).



Σχήμα 5.6. Σχηματικό διάγραμμα μιας μονάδας δυαδικού κύκλου

Το δεύτερο ρευστό (γνωστό και ως "ρευστό ισχύος") έχει χαμηλότερη θερμοκρασία βρασμού από τη γεωθερμική άλμη και έτσι μετατρέπεται σε ατμό στην έξοδο των εναλλακτών θερμότητας, ενώ ως υγρό αντλείται χωριστά πριν διέλθει από αυτούς. Το ατμοποιημένο, υψηλής πίεσης ρευστό περνά στη συνέχεια μέσα από ένα στρόβιλο που οδηγεί μια ηλεκτρογεννήτρια, και όταν εξέρχεται από αυτόν συμπυκνώνεται σε συμβατικούς συμπυκνωτές και αντλείται πίσω στους εναλλάκτες. Αυτή η διαδικασία έχει ένα σαφές περιβαλλοντικό πλεονέκτημα, αφού και τα δύο ρευστά (γεωθερμικό και ισχύος) είναι απομονωμένα από το περιβάλλον.

Παλαιότερα, τα ρευστά ισχύος στους δυαδικούς σταθμούς χαμηλής θερμοκρασίας ήταν ψυκτικά ρευστά CFC (τύπου Freon). Στις σύγχρονες μονάδες χρησιμοποιούνται ψυκτικά ρευστά τύπου HFC (υδρογονάνθρακες - ισοβούτανιο, πεντάνιο, κλπ.), όπου το συγκεκριμένο ρευστό επιλέγεται ώστε να είναι συμβατό με τη θερμοκρασία της γεωθερμικής πηγής. Οι σταθμοί δυαδικού κύκλου είναι οι πλέον κατάλληλοι για τις γεωθερμικές εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας. Τελευταία, διατίθεται στο εμπόριο ετοιμοταράδοτος εξοπλισμός δυαδικού κύκλου σε μονάδες από 200 έως 1.000 kW.

5.2.5. Συνδυασμένες ή υβριδικές εγκαταστάσεις

Οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου συνήθως συνδυάζουν τις τεχνολογίες συμβατικού ατμοστροβίλου και δυαδικού κύκλου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται υψηλότερες συνολικές αποδοτικότητες αξιοποίησης, καθώς ο συμβατικός ατμοστρόβιλος είναι πιο αποδοτικός στην παραγωγή από υψηλής θερμοκρασίας ατμό και ο δυαδικός κύκλος από το μικρότερης θερμοκρασίας διαχωρισμένο νερό. Επίσης, αντικαθιστώντας το σύστημα συμπυκνωτή – πύργου ψύξης ενός συμβατικού σταθμού με μία δυαδική μονάδα, η διαθέσιμη θερμότητα από τη συμπύκνωση του εξερχόμενου από τον ατμοστρόβιλο ατμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω παραγωγή ισχύος.

Έτσι, μπορούν να σχεδιαστούν οι ακόλουθες υβριδικές ή συνδυασμένες μονάδες:

- Εγκαταστάσεις άμεσου ατμού / δυαδικού κύκλου.
- Εγκαταστάσεις απλής ακαριαίας ατμοποίησης / δυαδικού κύκλου.
- Ολοκληρωμένες εγκαταστάσεις απλής και διπλής ακαριαίας ατμοποίησης.
- Υβριδικά συμβατικά-γεωθερμικά συστήματα.

Τέτοιες μονάδες έχουν κατασκευαστεί στις ΗΠΑ, τις Φιλιππίνες και τη Νέα Ζηλανδία, με μεγέθη από 10 έως πάνω από 100 MW_e. Οι αποδοτικότητες των μονάδων αυτών, από την άποψη της παραγόμενης ισχύος για τη συνολική ροή ρευστού (ατμού και νερού) των φρεάτων, είναι αρκετά υψηλότερες από των συμβατικών, λόγω κυρίως της πρόσθετης ισχύος που παράγεται με την αξιοποίηση της θερμότητας της άλμης.

5.2.6. Απόδοση των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής

Η σύγχρονη προσέγγιση στη μέτρηση της απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων είναι η εφαρμογή του 2^{ου} θερμοδυναμικού νόμου ως βάση αξιολόγησης. Για το σκοπό

αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως η έννοια του διαθέσιμου έργου ή ενέργειας. Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής αποτελούν ένα άριστο παράδειγμα εφαρμογής της αποδοτικότητας αξιοποίησης η_u του 2^{ου} νόμου. Δεδομένου ότι οι γεωθερμικοί σταθμοί δεν λειτουργούν υπό έναν κύκλο αλλά ως μια σειρά διεργασιών, δεν εφαρμόζεται η θερμική απόδοση του κύκλου η_{th} των συμβατικών εγκαταστάσεων.

Η μόνη περίπτωση όπου έχει νόημα η εφαρμογή της θερμικής απόδοσης του κύκλου η_{th} στις γεωθερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής είναι οι δυαδικοί σταθμοί. Όμως, και τότε η θερμική απόδοση πρέπει να χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την αξιολόγηση του κλειστού κύκλου που περιλαμβάνει το δευτερεύων ρευστό, και όχι της συνολικής λειτουργίας που περιλαμβάνει τη ροή του γεωθερμικού ρευστού από τα φρέατα παραγωγής μέσα από την εγκατάσταση και, τελικά, πίσω στο σύστημα απόρριψης. Η αποδοτικότητα αξιοποίησης η_u μετρά το πόσο καλά μία μονάδα μετατρέπει την εξέργεια (ή το διαθέσιμο έργο) της πηγής σε ωφέλιμη παραγωγή.

Η αποδοτικότητα αξιοποίησης ενός γεωθερμικού σταθμού είναι:

$$\eta_u = \frac{\dot{W}}{\dot{m}e} \quad (5.1)$$

όπου \dot{W} είναι η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, \dot{m} η απαιτούμενη συνολική παροχή μάζας του γεωθερμικού ρευστού, και e η ειδική ενέργεια του ρευστού στις συνθήκες του ταμιευτήρα, η οποία ορίζεται ως εξής:

$$e = h(P_1, T_1) - h(P_0, T_0) - T_0[s(P_1, T_1) - s(P_0, T_0)] \quad (5.2)$$

Η ειδική ενθαλπία h και εντροπία s εκτιμώνται στις συνθήκες του ταμιευτήρα (P_1, T_1) και στην "αδρανή κατάσταση" (P_0, T_0). Αυτή αντιστοιχεί στις συνθήκες περιβάλλοντος στη θέση εγκατάστασης. Ως T_0 (σε βαθμούς Kelvin) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη η θερμοκρασία σχεδιασμού υγρού βιολβού, όταν εφαρμόζεται σύστημα υγρής ψύξης, ή η θερμοκρασία σχεδιασμού ξηρού βιολβού, για αερόψυκτο συμπυκνωτή.

Οι σταθμοί άμεσου ατμού λειτουργούν με εντυπωσιακές εξεργειακές αποδοτικότητες, συνήθως 50-70%, ενώ οι σταθμοί δυαδικού κύκλου παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος αποδόσεων (15-50%). Όλα αυτά αναφέρονται στη "μικτή" απόδοση μιας μονάδας, αλλά σε κάθε μονάδα υφίστανται ηλεκτρικά φορτία απαραίτητα για τη λειτουργία της (π.χ. για τους ανεμιστήρες, τις αντλίες και τα συστήματα ελέγχου), τα "παρασιτικά φορτία". Η "καθαρή" απόδοση του σταθμού περιλαμβάνει την κατανάλωση και αυτών των συσκευών για την εκτίμηση της απόδοσης του σταθμού από την άποψη της καθαρής παραγωγής ισχύος που διατίθεται στον ιδιοκτήτη προς χρήση ή πώληση.

5.2.7. Γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή για μικρά και μίνι δίκτυα

Μικροί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έως 100 kW, και συνήθως 1-5 MW, μπορούν να παρέχουν κατανεμημένη παραγωγή σε μεγάλα δίκτυα ή να αποτελούν μια σημαντική πηγή παραγωγής για μικρότερα δίκτυα ισχύος. Αν και επικρατεί η αντίληψη ότι οι γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής είναι σταθμοί βάσης που λειτουργούν 24 ώρες την ημέρα για 365 ημέρες το έτος, αυτό δεν ισχύει πάντα. Πράγματι, οι σταθμοί

αυτοί μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να ακολουθούν τη ζήτηση του φορτίου, όπως μπορεί να απαιτείται σε εφαρμογές μίνι δικτύων.

Οι μικρές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής κατασκευάζονται συνήθως με τη χρήση μιας πολυσυναρτησιακής προσέγγισης που μειώνει τις δαπάνες κατασκευής της μονάδας, και μπορούν να εγκατασταθούν δίπλα στις γεωτρήσεις, οπότε συνολικά το έργο έχει ελάχιστη περιβαλλοντική επίπτωση. Οι μονάδες αυτές έχουν διαδραματίσει ιδιαίτερο ρόλο στην ανάπτυξη και αποδοχή της γεωθερμίας. Ευκαιρίες για μικρά γεωθερμικά έργα υπάρχουν σε πολλές περιοχές του αναπτυσσόμενου κόσμου. Οι αγροτικές περιοχές έχουν πιεστικές ενεργειακές ανάγκες και ο ηλεκτρισμός που παράγεται από μικρούς, τοπικούς γεωθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής (με δυναμικό κάτω από 5MW) θα μπορούσε να καλύψει πολλές από αυτές.

Αυτού του είδους οι σταθμοί θα μπορούσαν να καλύψουν τις αγορές αυτές σχεδόν εξ ολοκλήρου σε χώρες όπου ισχυρές εθνικές ή περιφερειακές πολιτικές προωθούν την εφαρμογή τους. Πάντως, για τα έργα αυτά συχνά απαιτείται κάποια κυβερνητική παρέμβαση, καθώς αντιμετωπίζουν ειδικές οικονομικές και λειτουργικές προκλήσεις που σχετίζονται με το μικρό τους μέγεθος. Το κλειδί για την επιτυχία ενός μικρής κλίμακας γεωθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής είναι το να μην κατασκευάζεται μία υπερμεγέθης σε σχέση με τη ζήτηση μονάδα, και να διερευνάται πάντοτε η δυνατότητα ενσωμάτωσης ενός συστήματος άμεσης χρήσης του ζεστού νερού για τη βελτίωση των οικονομικών της μονάδας.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: Μίνι-δίκτυο (< 5MW_e)

Θέση:	Fang, Ταϊλάνδη (σχήμα 5.7)
Περιγραφή:	<p>Από το Δεκέμβριο του 1989, η Electricity Generating Authority (EGAT) της Ταϊλάνδης παράγει θερμικά ρευστά από τρεις αβαθείς γεωτρήσεις (βάθους 150 m) στη γεωθερμική περιοχή Fang, με παροχή περίπου 60 τόνους/ώρα (θερμοκρασία εισόδου 120°C). Αυτά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού σε μία μονάδα ORMAT 0,3 MW_e (με 85-90% συντελεστή διαθεσιμότητας). Η προκαταρκτική οικονομική μελέτη έδειξε ότι το κόστος παραγωγής του ηλεκτρισμού είναι 6,3-8,6 c/kWh (τιμές 1995), θεωρώντας επιπόκιο 5% και συντελεστή δυναμικού 90%.</p> <p>Επίσης, η EGAT εγκατέστησε μία παγολεκάνη κλιματισμού και ένα ξηραντήριο προϊόντων που χρησιμοποιούν το απορριπτόμενο από τη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ζεστό νερό (80°C) για να επιδείξει την κάθετη αξιοποίηση στον τοπικό πληθυσμό. Το τμήμα επεξεργασίας τροφίμων του Royal Recommended Project κατασκευάζει τελευταία ένα νέο μεγαλύτερο ξηραντήριο που θα χρησιμοποιεί τη γεωθερμική πηγή για τη συντήρηση προϊόντων. Παράλληλα, το εθνικό πάρκο Mae Fang κατασκεύασε ένα δημόσιο λουτρό και μία σάουνα για την εξυπηρέτηση των επισκεπτών. Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας στη περιοχή Fang είναι επιτυχής, έστω και σε πολύ μικρή κλίμακα, και το έργο αυτό - γνωστό ως το πρώτο «πολυδύναμο έργο» στην Ταϊλάνδη - μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες γεωθερμικές πηγές.</p>

Σύστημα:

Η μονάδα ORMAT 300 kW είναι δυαδικού κύκλου. Ρευστό 120°C περνά από εναλλάκτη θερμότητας όπου θερμαίνεται ένα ρευστό λειτουργίας με σημείο βρασμού μικρότερο από 100°C. Αυτό είναι ένα οργανικό ρευστό, π.χ. ισοπεντάνιο, που ατμοποιείται και χρησιμοποιείται για την οδήγηση του στροβίλου, ενώ στη συνέχεια συμπυκνώνεται σε ένα συμπυκνωτή κελύφους με σωληνώσεις. Τέλος, το ρευστό επιστρέφει στον εναλλάκτη και σχηματίζει κλειστό βρόχο. Το ψυγμένο ρευστό του ταμιευτήρα (80°C) χρησιμοποιείται για την πραγολεκάνη κλιματισμού και το ξηραντήριο.



Σχήμα 5.7. Ο μικρός (300 kW) πολυσυναρτησιακός δυαδικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής στο Fang (Ταϊλάνδη)

5.2.8. Γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή με σύνδεση στο δίκτυο

Οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες υψηλής θερμοκρασίας μπορούν να παράσχουν ατμό για την άμεση οδήγηση ατμοστροβίλων σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Οι πρόσφατα αναπτυγμένες τεχνολογίες δυαδικού κύκλου παρέχουν τη δυνατότητα χρήσης του μεγαλύτερου μέρους της θερμότητας της πηγής για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ κερδίζει έδαφος και ο συνδυασμός της συμβατικής ακαριαίας ατμοποίησης με την τεχνολογία δυαδικού κύκλου (συνδυασμένος κύκλος). Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μεγέθους έως 100 MW συνδέονται στα εθνικά δίκτυα και χρησιμοποιούνται συνήθως ως μονάδες βάσης, λειτουργώντας υπό πλήρη ισχύ 365 ημέρες το χρόνο. Αυτός ο τύπος παραγωγής είναι διαδεδομένος στην Ινδονησία και τις Φιλιππίνες.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: Διασυνδεδεμένη ηλεκτροπαραγωγή

Θέση: Γεωθερμικό πεδίο Kamojang, Ιάβα, Ινδονησία (σχήμα 5.8)

Περιγραφή: Το γεωθερμικό πεδίο Kamojang βρίσκεται στη δυτική Ιάβα της Ινδονησίας και ανακαλύφθηκε από τους Ολλανδούς το 1920, κατά την περίοδο του αποικισμού. Η αρχική διερεύνηση έγινε το 1973 με τη συνεργασία των κυβερνήσεων της Ινδονησίας και της Νέας Ζηλανδίας. Ήταν το πρώτο επιχειρησιακό γεωθερμικό πεδίο της Ινδονησίας και λειτουργεί εμπορικά παράγοντας ηλεκτρισμό από το 1983 (την περίοδο αυτή παράγονται 140 MW_e). Το πεδίο βρίσκεται σε προστατευόμενο και παραγωγικό δάσος και σε δάσος-βιότοπο. Περιβαλλοντικές μελέτες δείχνουν ότι οι γεωθερμικές δραστηριότητες δεν είχαν καμία επίπτωση στο φυσικό οικοσύστημα.

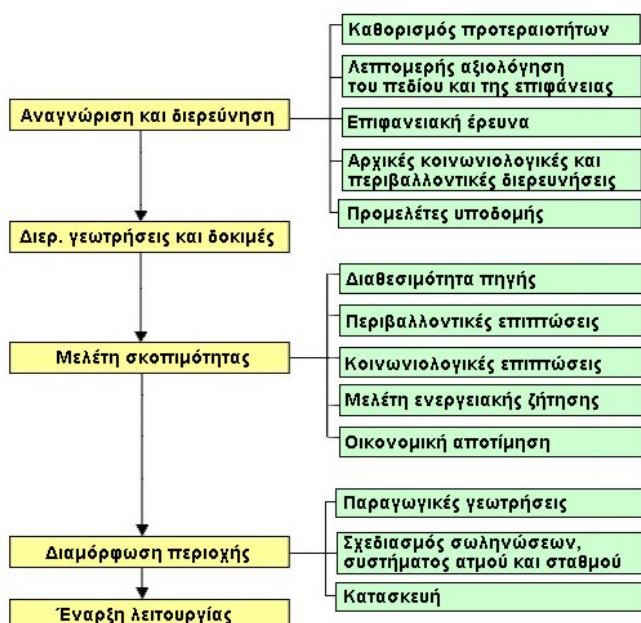
Σύστημα: Τρεις μονάδες στροβίλων συμπυκνώματος της Mitsubishi (1x30 MW_e και

$2 \times 55 \text{ MW}_e$) είναι σε χρήση. Αυτές τροφοδοτούνται με ατμό από 26 φρέατα με μέση βέλτιστη πίεση στην κεφαλή του φρέατος περίπου 15 bar (πίεση εισόδου στους στροβίλους 6,5 bar). Ο στρόβιλος των 30 MW λειτουργεί από το 1983 και οι μονάδες των 55 MW από το 1987. Η παραγωγή συνδέεται με μια γραμμή μεταφοράς 150 kV και αποδίδεται στο δίκτυο του Bandung. Οι στρόβιλοι εμφανίζουν υψηλή αξιοπιστία με μέσους συντελεστές ισχύος, διαθεσιμότητας και φορτίου 85%, 90% και 97,5% αντίστοιχα, παρότι κάθε στρόβιλος απαιτεί εκτεταμένη επισκευή κάθε χρόνο για την αφαίρεση από τα ππερύγια των επικαθίσεων πυριτίου. Μελέτες προσομοίωσης του ταμιευτήρα δείχνουν ότι το υφιστάμενο βεβαιωμένο δυναμικό έχει δυνατότητα παραγωγής 140 MW_e μέχρι το έτος 2021, που αντιστοιχεί σε ζωή 38 ετών για τη μονάδα I (30 MW) και 34 ετών για τις μονάδες II & III (50 MW κάθε μια).



Σχήμα 5.8. Η εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής του γεωθερμικού πεδίου Kamojang στην Ιάβα (Ινδονησία)

5.3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ



Σχήμα 5.9. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας ανάπτυξης των γεωθερμικών έργων

Όπως συμβαίνει με όλα τα μεγάλου μεγέθους έργα, τα σχετικά με τη γεωθερμία έργα αναπτύσσονται ακολουθώντας μία σειρά λογικών σταδίων, τα οποία συνοψίζονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 5.9. Κανονικά, οι αποφάσεις για τη μετάβαση στα επόμενα στάδια λαμβάνονται σταδιακά καθ' όλη την πορεία του έργου.

5.3.1. Αναγνώριση και διερεύνηση

Οι γεωθερμικές πηγές συνήθως εντοπίζονται και καθορίζονται από ένα κλιμακούμενο πρόγραμμα εντατικότερης (και πιο δαπανηρής) διερεύνησης που οδηγεί τελικά σε μία σειρά γεωτρήσεων για να περιγραφεί με βεβαιότητα η πηγή. Από τις αναγνωριστικές έρευνες θα προσδιοριστούν οι καταλληλότερες πιθανές περιοχές με την αναγνώριση του ευνοϊκού γεωλογικού τοπίου και τον εντοπισμό οιωνδήποτε θερμών πηγών ή άλλης θερμικής επιφανειακής εκδήλωσης. Οι αναγνωριστικές μελέτες περιλαμβάνουν τη χαρτογράφηση κάθε θερμής πηγής ή άλλων επιφανειακών θερμικών ιδιομορφιών και τον προσδιορισμό των ευνοϊκών γεωλογικών δομών.

Η χημική σύσταση των εκβαλλόμενων ρευστών αποκαλύπτει πληροφορίες για τον βαθύτερο ταμιευτήρα, π.χ. για τη θερμοκρασία και τα χαρακτηριστικά του ρευστού. Οι γεωλογικές μελέτες παρέχουν πληροφορίες για την πιθανή κατανομή και έκταση των υδροφόρων οριζόντων, καθώς και για το πιθανό καθεστώς της θερμικής πηγής και της ροής θερμότητας. Οι περιοχές που προσδιορίζονται ως έχουσες υψηλό δυναμικό ή ευνοούνται λόγω της εγγύτητάς τους σε κάποιο κέντρο χρήσης της ενέργειας θα διερευνηθούν με πιο αναλυτικές επιστημονικές μεθόδους.

Πέρα από τις λεπτομερείς γεωλογικές και γεωχημικές μελέτες, μπορεί να εφαρμοσθεί μία σειρά γεωφυσικών τεχνικών περιλαμβανομένων των ερευνών ειδικής αντίστασης, βαρύτητας και μαγνητισμού. Η διερεύνηση της ειδικής αντίστασης, ειδικότερα, μπορεί να εντοπίσει ανωμαλίες άμεσα συνδεόμενες με την παρουσία γεωθερμικών ρευστών. Η ερμηνεία όλων αυτών των μελετών οδηγεί στον καθορισμό προτεραιοτήτων για τους στόχους των προγραμμάτων ερευνητικών γεωτρήσεων. Με την εφαρμογή της ενδεδειγμένης επιστημονικής μεθόδου και ανάλυσης κατά τις αρχικές αυτές φάσεις αυξάνεται η πιθανότητα επιτυχίας των επακόλουθων γεωτρήσεων και αναπτύξεων.

Εάν από τη διερεύνηση προκύψουν πολύ καλές ενδείξεις για την παρουσία χρήσιμου θερμικού ταμιευτήρα, η πηγή εξετάζεται με τη διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων έτσι ώστε να μπορέσουν να μετρηθούν οι πραγματικές υπεδάφιες θερμοκρασίες και να δοκιμαστεί η παραγωγικότητα του ταμιευτήρα. Συνεπώς, το πρόγραμμα διερεύνησης πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να αναδειχθεί τελικά ο αναμενόμενος τύπος της πηγής, η ποσότητα της ενέργειας που αναμένεται να παραχθεί από το έργο και το χρονικό πλαίσιο της ανάπτυξης.

Εξάλλου, πολλά γεωθερμικά πεδία με προοπτικές βρίσκονται σε μακρινές θέσεις και συχνά σε ενεργές ηφαιστειακές περιοχές των αναπτυσσόμενων χωρών. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι απαιτήσεις για υποδομές μπορεί να είναι μεγάλες και, πιθανότατα, δαπανηρές. Σ' αυτές μπορεί να περιλαμβάνονται έργα οδοποιίας, γέφυρες, λιμενικές

εγκαταστάσεις και επικοινωνίες, ενώ, εάν υλοποιηθεί το έργο, εν συνεχεία οι δαπάνες δικτύωσης για τη διανομή της ισχύος μπορεί να είναι πολύ υψηλές.

5.3.2. Διερευνητική γεώτρηση

Τα αποτελέσματα των διάφορων διερευνητικών γεωλογικών δραστηριοτήτων που περιγράφονται παραπάνω, στην πλειοψηφία των έργων ανάπτυξης της γεωθερμίας οδηγούν σε μια φάση διερευνητικών γεωτρήσεων. Τα γεωθερμικά φρέατα, είτε είναι διερευνητικά είτε παραγωγικά, διανοίγονται με τη χρήση τεχνολογιών περιστροφικής γεώτρησης που έχουν υιοθετηθεί κατά μεγάλο μέρος από τη βιομηχανία πετρελαίου, και σε μικρότερη κλίμακα από τις έρευνες για νερό και ορυκτά. Οι τεχνολογίες αυτές τροποποιούνται ώστε να αντεπεξέρχονται στις σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες και τα χαρακτηριστικά των σχηματισμών πετρωμάτων που απαντώνται.

Συνήθως, τα γεωθερμικά φρέατα διανοίγονται σε βάθη που κυμαίνονται από 200 έως 1500m για τα πεδία χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας, και από 700 έως 3000m περίπου βάθος για τα πεδία υψηλής θερμοκρασίας. Οι γεωτρήσεις διανοίγονται με γεωτρύπανο σε μία σειρά από στάδια, όπου το κάθε στάδιο έχει μικρότερη διάμετρο από το προηγούμενο, και καθένα από αυτά κλείνεται με χαλύβδινα πλαίσια, τα οποία τσιμεντάρονται επί τόπου πριν τη διάνοιξη του επόμενου σταδίου. Το τελικό τμήμα/τα της γεώτρησης κλείνεται με ένα μη-τσιμενταρισμένο διάτρητο χιτώνιο. Η διάταξη μιας τυπικής γεωθερμικής γεώτρησης μπορεί να είναι κατακόρυφη (ευθεία) ή κεκλιμένη.

Στόχος αυτής της φάσης είναι να αποδειχθεί η ύπαρξη μιας εκμεταλλεύσιμης πηγής και να προδιαγραφούν η έκταση και τα χαρακτηριστικά της. Ένα πρόγραμμα διερευνητικών γεωτρήσεων μπορεί να περιλάβει φρέατα αβαθούς θερμοκρασιακής κλίσης, φρέατα διερεύνησης "λεπτής οπής", και παραγωγικού μεγέθους φρέατα διερεύνησης. Ο αριθμός και ο τύπος των γεωτρήσεων που θα περιληφθούν σε ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα καθορίζονται από το μέγεθος και το στόχο του έργου.

Τα φρέατα θερμοκρασιακής κλίσης διανοίγονται με τρυπάνια συχνά σε βάθη που κυμαίνονται από 2 έως 200m (σε σπάνιες περιπτώσεις μέχρι 500m βάθος) και με διάμετρο από 50 έως 150mm. Τα φρέατα διερεύνησης κυμαίνονται από 200 έως 3000m βάθος, με διάμετρο τελικής οπής από 100 έως 220mm. Τα φρέατα αυτά πρέπει να διανοίγονται με μια εξέδρα γεώτρησης πλήρως εξοπλισμένη ώστε να λειτουργεί υπό τις συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης της πηγής.

Η στρατηγική των διερευνητικών γεωτρήσεων περιλαμβάνει τη διάνοιξη τριών έως πέντε φρεάτων, ανάλογα με το μέγεθος του προγραμματισμένου έργου. Τα συνήθη κόστη των φρεάτων "λεπτής οπής" κυμαίνονται από \$250 έως \$1000 ανά μέτρο βάθους, δηλαδή απαιτείται ποσό \$450.000 έως \$1.000.000 για ένα φρέαρ με βάθος 1500m. Στα μεγαλύτερα έργα τα φρέατα διανοίγονται κάθετα ή με εκτροπή της κατεύθυνσης από επιμέρους εξέδρες γεώτρησης, ενώ τα μικρότερα έργα μπορεί να χρησιμοποιούν μία εξέδρα γεώτρησης και φρέατα με εκτροπή της κατεύθυνσης.

5.3.3. Μελέτη σκοπιμότητας

Οι λεπτομερείς αποτιμήσεις της πηγής και οι μελέτες σκοπιμότητας ενοποιούν τις πληροφορίες από τις έρευνες επιφανείας και τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων ώστε να εκτιμηθεί η βιώσιμη παραγωγική ικανότητα ενός ταμιευτήρα με τη χρήση της υφιστάμενης τεχνολογίας ανάπτυξης. Άλλες μελέτες περιλαμβάνουν εκτιμήσεις:

- των δαπανών για υποδομές,
- της ζήτησης ισχύος,
- του κόστους των σχετικών με την προετοιμασία της θέσης, την εγκατάσταση και την εκκίνηση της λειτουργίας εργασιών μηχανικού,
- των σχετικών περιβαλλοντικών και κοινωνιολογικών προγραμμάτων και δαπανών,
- των απαιτούμενων οδών, κτηρίων και υπηρεσιών,
- της διαδικτύωσης και σύνδεσης με τα δίκτυα.

Εξάλλου, στη φάση αυτή πρέπει να λάβει χώρα ο προκαταρκτικός σχεδιασμός των συστημάτων και των σωληνώσεων συλλογής του ατμού, αλλά και να γίνει η επιλογή της τεχνολογίας, του μεγέθους και της σχεδίασης του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Το κόστος των γεωθερμικών εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής βαρύνεται πολύ με τις αρχικές δαπάνες. Η διάνοιξη των φρεάτων και η κατασκευή των σωληνώσεων αρχίζουν πριν από την κατασκευή της μονάδας, ενώ για το σχεδιασμό του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής είναι αναγκαία η πληροφορία για την πηγή από τη γεώτρηση.

Η τελική ανάπτυξη του πεδίου ολοκληρώνεται μαζί με τη μονάδα. Οι σχετικές με την κατασκευή και λειτουργία ενός γεωθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής δαπάνες ποικίλλουν ευρέως και εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι:

- ο τύπος της πηγής (ατμός ή ζεστό νερό),
- η θερμοκρασία της πηγής,
- η παραγωγικότητα του ταμιευτήρα,
- το μέγεθος της εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής (διαβάθμιση),
- ο τύπος της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής (μονοβάθμιας ακαριαίας ατμοποίησης, δυαδικού κύκλου, κλπ.),
- οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί,
- το κόστος του κεφαλαίου,
- το κόστος των εργατικών.

Οι τρεις πρώτοι παράγοντες επηρεάζουν τον αριθμό των γεωτρήσεων που πρέπει να διανοιχτούν για μια δεδομένη ισχύ της εγκατάστασης. Με βάση τις συνήθεις δαπάνες και το δυναμικό ισχύος των παραγωγικών γεωτρήσεων, μία μόνο γεώτρηση μπορεί να κοστίσει \$100-400/kW. Οι επόμενοι τρεις παράγοντες καθορίζουν το κόστος του συστήματος μετατροπής της ενέργειας, και οι δύο τελευταίοι το κόστος λειτουργίας της μονάδας, δηλ. την εξόφληση των οφειλών και τη λειτουργία και συντήρηση (Λ&Σ). Ο πίνακας 5.2 συνοψίζει την επίδραση της ονομαστικής ισχύος και της θερμοκρασίας της πηγής στο κόστος του σταθμού για τις μικρού μεγέθους δυαδικές μονάδες.

Πίνακας 5.2. Κόστη κεφαλαίου και Λ&Σ για μικρές γεωθερμικές μονάδες δυαδικού κύκλου (1993\$)

[Πηγή: DiPippo, 1998]

Καθαρή ισχύς (kW)	Θερμοκρασία πηγής (°C)			Συνολικό κόστος Λ&Σ (\$/έτος)
	100	120	140	
	Κύριο κόστος (\$/kW)			
100	2.535	2.210	2.015	19.100
200	2.340	2.040	1.860	24.650
500	2.145	1.870	1.705	30.405
1.000	1.950	1.700	1.550	44.000

Οι δαπάνες κεφαλαίου ανά kW μεταβάλλονται αντιστρόφως προς τη θερμοκρασία και την ονομαστική ισχύ, ενώ οι ετήσιες δαπάνες Λ&Σ (οι οποίες κυμαίνονται από 1,5 έως 4,5 cents ανά παραγόμενη kWh) αυξάνονται με την ονομαστική ισχύ αλλά δεν εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του ρευστού (στο παρουσιαζόμενο εύρος). Αυτές οι δαπάνες είναι ευμενείς όταν συγκρίνονται με αυτές των άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και είναι απολύτως ευμενείς για τις απομακρυσμένες τοποθεσίες όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται συνήθως από ντιζελομηχανές.

Οι δαπάνες Λ&Σ για τις γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής εξαρτώνται επίσης από τη συμβατική τιμή του ηλεκτρισμού. Δηλαδή, η υψηλότερη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά σημαντικό το να παραμένει εν λειτουργίᾳ ο σταθμός όσο το δυνατό πλησιέστερα στο 100% του χρόνου, και τότε δικαιολογούνται οι υψηλότερες δαπάνες συντήρησης. Οι περισσότερες γεωθερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής έχουν συντελεστή διαθεσιμότητας άνω του 90% (δηλ. μπορούν να παράγουν ηλεκτρισμό πάνω από το 90% του χρόνου), αλλά όταν οι συντελεστές διαθεσιμότητας ανέρχονται στο 97 ή 98% μπορεί αυτές να είναι πιο δαπανηρές.

Οι τρεις πιο βασικές παράμετροι όσον αφορά το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι το μέγεθος της εγκατάστασης, η θερμοκρασία της πηγής και το βάθος του παραγωγικού φρέατος. Προφανώς, το κόστος αυτό μειώνεται με την αύξηση των τιμών των πρώτων δύο από τις ανωτέρω παραμέτρους, ενώ αυξάνεται (σχεδόν γραμμικά) με την αύξηση του βάθους του παραγωγικού φρέατος. Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζεται το σύνηθες κόστος της μονάδας ισχύος από γεωθερμικούς σταθμούς, βάσει ενός προεξοφλητικού επιπολού 10% και για συντελεστή δυναμικού 90% (για έργα που κατασκευάζονται σε αναπτυσσόμενες χώρες).

Πίνακας 5.3. Κόστος της μονάδας ισχύος (σε cents/kWh) από τρεις κύριους τύπους γεωθερμικών μονάδων

	Πηγή Υψηλής Ποιότητας	Πηγή Μέτριας Ποιότητας	Πηγή Χαμηλής Ποιότητας
Μικρές μονάδες (<5 MW)	5,0 - 7,0	5,5 - 8,5	6,0 - 10,5
Μέσες μονάδες (5-30 MW)	4,0 - 6,0	4,5 - 7,0	Μη κατάλληλη
Μεγάλες μονάδες (>30 MW)	2,5 - 5,0	4,0 - 6,0	Μη κατάλληλη

Με το μοναδιαίο κόστος παραγωγής από ντιζελ να κυμαίνεται από 10 μέχρι και 20 cents/kWh, η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί πολύ ελκυστική επιλογή, ειδικά για τις απομακρυσμένες εκτός δικτύου περιοχές και τα μικρά νησιά, όπου η παραγωγή από ντιζελ είναι συχνά η μόνη λύση. Εξάλλου, μπορεί να είναι ελκυστική η άμεση χρήση

του απορριπτόμενου από την ηλεκτροπαραγωγή νερού χαμηλής θερμοκρασίας και είναι προς όφελος της ανάπτυξης ολόκληρης της μονάδας η δυνατότητα αυτή να εκτιμηθεί σε αρχικό στάδιο, ώστε η όποια ρύθμιση να μπορέσει να ενσωματωθεί στα σχέδια των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας-ατμού του πεδίου.

5.3.4. Ανάπτυξη

5.3.4.1. Παραγωγική γεώτρηση

Ως απόληξη μιας επιτυχούς φάσης διερεύνησης, μπορεί να αναληφθεί άμεσα ή μετά από την ολοκλήρωση μιας πιο μακροπρόθεσμης περιόδου δοκιμών της πηγής και μελετών σκοπιμότητας η δέσμευση ανάπτυξης μιας αρχικής φάσης παραγωγής ενός έργου. Θα αναπτυχθεί μία στρατηγική παραγωγικών γεωτρήσεων με βάση το φρέαρ διερεύνησης και δεδομένα της πηγής, από την οποία θα προκύψουν οι θέσεις των γεωτρήσεων, οι κατατομές των οπών και των πλαισίων, και μια αλληλουχία για τις γεωτρήσεις. Οι θέσεις των γεωτρήσεων διατάσσονται έτσι ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές μεταξύ των φρεάτων και συνήθως είναι τέτοιες ώστε οι παραγωγικές ζώνες κάθε φρέατος να διαχωρίζονται από μία απόσταση 300 έως 500m.

Προφανώς απαιτούνται πλήρως εξοπλισμένες για γεωθερμική παραγωγή εξέδρες γεώτρησης διαστασιολογημένες στο μέγεθος του παραγωγικού φρέατος. Η σχεδίαση των παραγωγικών φρεάτων και η διαδικασία γεώτρησης είναι παρόμοιες με αυτές που υλοποιούνται κατά τη διερευνητική φάση του έργου, όπως περιγράφηκε ήδη. Εντούτοις, στην περίπτωση όπου αντιμετωπίζονται πολύ υψηλές διαπερατότητες του ταμιευτήρα, μπορεί να απαιτούνται φρέατα μεγάλης διαμέτρου. Η διάνοιξη τέτοιων φρεάτων είναι συνήθης σε ταμιευτήρες όπου υπερισχύει ο ατμός, όπως είναι το γεωθερμικό πεδίο Darajat στην Ινδονησία.

Το κόστος των παραγωγικών γεωτρήσεων είναι σε γενικές γραμμές το ίδιο με αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω για τα φρέατα διερεύνησης/παραγωγής, εντούτοις είναι σύνηθες να υπεισέρχεται κάποια μείωση σ' αυτά τα κόστη καθώς αποκτάται εμπειρία σε κάθε πεδίο. Η διάνοιξη ενός παραγωγικού φρέατος μεγάλης διαμέτρου συνήθως είναι περίπου 20% πιο ακριβή από ενός φρέατος τυποποιημένου μεγέθους. Ανάλογα με τη φύση της πηγής, θα απαιτηθεί επίσης ένας αριθμός φρεάτων επανέγχυσης.

5.3.4.2. Σχεδίαση του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής

Από μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των μελετών των πηγών, των περιβαλλοντικών και κοινωνιολογικών επιπτώσεων, του δυναμικού παραγωγής και της ζήτησης ισχύος σχεδιάζεται μια κατάλληλα διαστασιολογημένη εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής. Στη σχεδίαση, η οποία πέραν του σταθμού περιλαμβάνει ακόμη τις σωληνώσεις και τα συστήματα συλλογής του ατμού, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ένα ευρύ φάσμα παραγόντων, όπως η θερμοκρασία της πηγής, η χημεία και η περιεκτικότητα σε αέρια του ρευστού, και το κατάλληλο μέγεθος της μονάδας. Οι μεταβλητές σχεδίασης βελτιστοποιούνται για να εξασφαλιστεί ότι οι σχεδιαστικές λύσεις που επιλέγονται είναι οι πιο οικονομικά αποτελεσματικές και ενεργειακά αποδοτικές.

5.3.4.3. Κατασκευή και εκκίνηση λειτουργίας

Ένα γεωθερμικό έργο μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Παραδοσιακά, τα γεωθερμικά έργα αναπτύσσονταν μέσω ενός αριθμού ξεχωριστών συμβάσεων κατασκευής και προμήθειας, ενώ το σχεδιασμό και τη διαχείρισή τους αναλάμβαναν σύμβουλοι μηχανικοί. Τελευταία, η τάση είναι να εφαρμόζεται η μέθοδος της ολοκληρωμένης μελέτης και εκτέλεσης ("με το κλειδί στο χέρι"). Τα πλεονεκτήματά της είναι ότι παρέχει μεγαλύτερο περιθώριο για καινοτομία στους προμηθευτές, μειώνει τους κινδύνους υπέρβασης του κόστους και, το πιο σημαντικό, αποδίδει την ευθύνη και την υπαιτιότητα για την απόδοση της μονάδας σε μία οντότητα.

Συχνά, αυτός ο τύπος μεθόδου υλοποίησης είναι επωφελής, καθώς δύναται να προσελκύσει χρηματοδότηση για το έργο. Ένα παράδειγμα χρηματοδοτούμενου γεωθερμικού έργου που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο υλοποίησης με πολλαπλές συμβάσεις είναι ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής στο Kamojang της δυτικής Ιάβας (βλ. περίπτωση εφαρμογής). Πάντως, οι πιο πρόσφατες γεωθερμικές αξιοποιήσεις στην Ινδονησία, όπως στο Salak και το Wayang Windu, έχουν κατασκευαστεί με χρήση της μεθόδου ολοκληρωμένης μελέτης και εκτέλεσης.

5.4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.4.1. Παγκόσμια κατανομή της γεωθερμικής αξιοποίησης

Οι άνθρωποι έχουν χρησιμοποιήσει τη γεωθερμική ενέργεια για πολλούς αιώνες σε εφαρμογές όπως είναι η θέρμανση χώρων και νερού, το μαγείρεμα, και τα ιαματικά λουτρά. Ο πρώτος γεωθερμικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής κατασκευάστηκε το 1904 στο Larderello της Ιταλίας, είχε ονομαστική ισχύ 250 kW και χρησιμοποιούσε γεωθερμικό ατμό για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ο δεύτερος γεωθερμικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής κατασκευάστηκε τη δεκαετία του '50 στο Wairakei της Νέας Ζηλανδίας, και ακολούθησαν τα Geysers της Καλιφόρνιας στη δεκαετία του '60. Σήμερα υπάρχει ένα δυναμικό 12.000 MW άμεσης χρήσης και πάνω από 8.000 MW ηλεκτροπαραγωγής από γεωθερμικές πηγές παγκοσμίως.

Για να γίνει αντιληπτή η συμμετοχή της γεωθερμικής ενέργειας, αναφέρεται ότι αυτό το δυναμικό αντιστοιχεί στο 0,4% περίπου του συνολικά εγκατεστημένου δυναμικού παραγωγής παγκοσμίως. Οι κυριότεροι χρήστες της γεωθερμίας (άμεσα και έμμεσα) είναι οι ΗΠΑ, οι Φιλιππίνες, η Ιταλία, το Μεξικό, η Ισλανδία, η Ινδονησία, η Ιαπωνία και η Νέα Ζηλανδία. Στον πίνακα 5.4 εντοπίζεται η υφιστάμενη ηλεκτροπαραγωγή από γεωθερμία κατά σειρά μεγέθους ανά χώρα. Η ισχύς των 8.246 MW ηλεκτρικής ενέργειας του 1999 ήταν κατά 40% μεγαλύτερη από την εγκατεστημένη ισχύ το 1990.

Πίνακας 5.4. Παγκοσμίως εγκατεστημένο γεωθερμικό δυναμικό (σε MW_e) ανά χώρα

Χώρα	1990	1999
ΗΠΑ	2775	2850
Φιλιππίνες	891	1848
Ιταλία	545	769
Μεξικό	700	753
Ινδονησία	145	590
Ιαπωνία	215	530
Νέα Ζηλανδία	283	345
Ισλανδία	45	140
Κόστα Ρίκα	0	120
ΕΛ Σαλβαδόρ	95	105
Νικαράγουα	70	70
Κένυα	45	45
Κίνα	19	32
Γουατεμάλα	0	29
Τουρκία	20	20
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς	5867	8246

Πηγή: International Geothermal Association (1998) - Ενημέρωση με στοιχεία δημοσιευμένα το 1999.

Άλλες χώρες με παραγωγή μικρότερη από 20 MW είναι η Αργεντινή, η Αυστραλία, η Αιθιοπία, η Γαλλία (Γουαδελούπη), η Πορτογαλία (Αζόρες), η Ρωσία και η Ταϊλάνδη. Οι πρώτοι γεωθερμικοί σταθμοί χρηματοδοτήθηκαν και λειτουργήθηκαν κυρίως από εθνικές υπηρεσίες ηλεκτρισμού σε όλο τον κόσμο, με εξαίρεση την Καλιφόρνια όπου η ανάπτυξη του πεδίου των Geysers υλοποιήθηκε από ιδιωτικές ηλεκτρικές εταιρείες. Με τη σημερινή διεθνή τάση για απελευθέρωση της ενεργειακής βιομηχανίας, ιδιώτες εγκαταστάτες έχουν αναμιχθεί αμεσότερα τόσο στην αξιολόγηση όσο και στην ανάπτυξη των πηγών. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για την Ινδονησία και τις Φιλιππίνες.

Η αγορά κυριαρχείται από τις μονάδες ακαριαίου ατμού, αλλά κατά τα τελευταία δέκα χρόνια έχουν εγκατασταθεί πολλές μικρότερης κλίμακας μονάδες δυαδικού κύκλου, αλλά και αρκετές συνδυασμένες μονάδες (ακαριαίας ατμοποίησης/δυαδικού κύκλου). Η πλειοψηφία των γεωθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής διεθνώς αποτελούν μονάδες βάσης, δηλαδή λειτουργούν 24 ώρες την ημέρα για 365 ημέρες το έτος. Θεωρώντας ένα συντελεστή φορτίου 80% και ένα μέσο κόστος του ατμού 5 cent ανά kWh, η γεωθερμική ισχύς κοστολογείται σε περίπου 3 δισεκατομμύρια US\$ ετησίως.

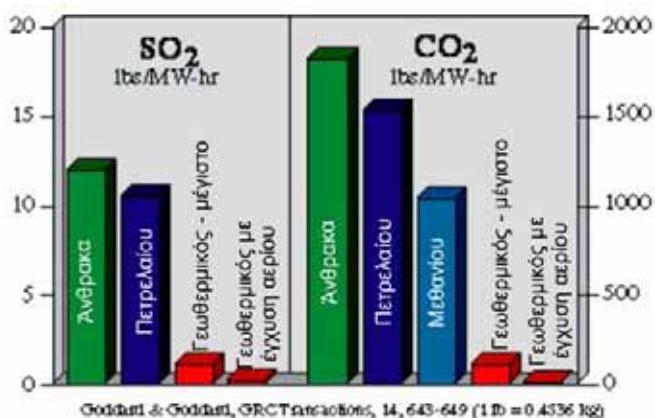
5.4.2. Ανταγωνιστικότητα της γεωθερμικής ενέργειας

Η γεωθερμική ενέργεια παράγεται εμπορικά σε μία κλίμακα εκατοντάδων MW για περισσότερο από τρεις δεκαετίες δεδομένου ότι διαθέτει διάφορα θετικά γνωρίσματα που την καθιστούν ανταγωνιστική προς τις συμβατικές πηγές ενέργειας και μερικές άλλες ΑΠΕ. Ειδικότερα:

- Αποτελεί έναν τοπικό ενεργειακό πόρο που μπορεί να μειώσει τη ζήτηση για εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα.

- Έχει σημαντική θετική επίδραση στο περιβάλλον με την αντικατάσταση της καύσης των ορυκτών καυσίμων.
- Είναι αποδοτική και ανταγωνιστική με τις συμβατικές πηγές ενέργειας.
- Οι γεωθερμικοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν συνεχώς, χωρίς εμπόδια που επιβάλλονται από τις καιρικές συνθήκες, αντίθετα από άλλες ΑΠΕ.
- Διαθέτει εγγενή ικανότητα αποθήκευσης και είναι καταλληλότερη για την κάλυψη της ζήτησης του φορτίου βάσης.
- Είναι μία αξιόπιστη και ασφαλής ενεργειακή πηγή που δεν απαιτεί αποθήκευση ή μεταφορά των καυσίμων.

Επιπλέον, η νεώτερη γενιά των γεωθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής εκπέμπει μόνο 136 gr διοξειδίου του άνθρακα ανά kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά μέσο όρο, έναντι των 453 gr/kWh CO₂ μιας μονάδας με καύσιμο φυσικό αέριο ή των 1042 gr/kWh CO₂ από ένα θερμικό σταθμό άνθρακα. Στο σχήμα 5.10 παρέχεται μια σύγκριση των εκπομπών SO₂ (κύριο αίτιο της όξινης βροχής) και CO₂ (ένα αέριο του θερμοκηπίου και της παγκόσμιας κλιματικής μεταβολής) μεταξύ εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής με καύσιμο άνθρακα και πετρέλαιο, και γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με ή χωρίς έγχυση των αερίων αποβλήτων πίσω στο έδαφος.

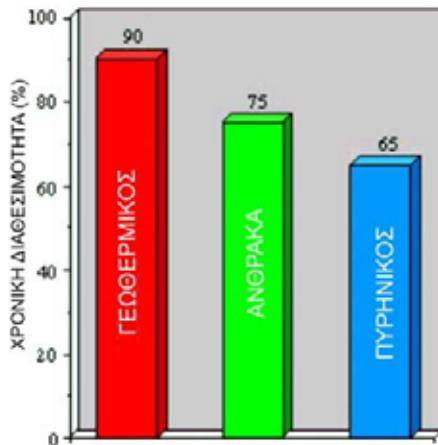


Σχήμα 5.10. Συγκρίσεις εκπομπών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής διαφόρων καυσίμων

Αυτή τη στιγμή, οι ΑΠΕ με το μέγιστο δυναμικό και τις χαμηλότερες εκπομπές στην Ευρώπη, βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα, είναι η υδραυλική και η γεωθερμική ενέργεια. Σημειώνεται επίσης ότι οι συντελεστές δυναμικού των υδροηλεκτρικών και των γεωθερμικών σταθμών στην Ευρώπη είναι τη στιγμή αυτή πάνω από 70%, ενώ οι τυπικές τιμές για τα ηλιακά και τα αιολικά συστήματα είναι 20-35%. Ο συντελεστής διαθεσιμότητας της γεωθερμικής ενέργειας, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που μπορεί να παράγεται η ονομαστική ενέργεια, εξαρτάται κυρίως από τη φύση της πηγής και κατά δεύτερο λόγο από τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού.

Η εμπειρία δείχνει ότι η διαθεσιμότητα των γεωθερμο-ηλεκτρικών μονάδων συχνά είναι άνω του 90%. Το ιστόγραμμα του σχήματος 5.11 παρουσιάζει μία σύγκριση των ποσοστών του χρόνου, κατά μέσο όρο, που οι εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής γεωθερμίας, άνθρακα και πυρηνικών είναι διαθέσιμες για να παράγουν ηλεκτρισμό (δηλ. το συντελεστή διαθεσιμότητας). Υπό αυτές τις περιστάσεις, ο συντελεστής της

εγκατάστασης, που ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που η μονάδα πραγματικά παράγει ενέργεια, είναι σχεδόν ίσος με το συντελεστή διαθεσιμότητας.



Σχήμα 5.11. Συντελεστές διαθεσιμότητας τριών τύπων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής

Τόσο οι υψηλής όσο και οι χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμικοί σταθμοί ισχύος μπορούν να κατασκευαστούν ως πολυσυναρτησιακές μονάδες. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την δαπάνη αρχικού κεφαλαίου και κατανέμει την επένδυση, ενώ καθιστά εφικτή την αξιολόγηση της διαθεσιμότητας της πηγής πριν αρχίσει η πλήρης λειτουργία και επιτρέπει την απολαβή εσόδων στην πρώτη δυνατή ευκαιρία, βελτιώνοντας με τον τρόπο αυτό την οικονομική απόδοση ολόκληρου του σχήματος και μειώνοντας την έκθεση σε γεωλογικούς κινδύνους ή ρίσκα εξόρυξης.

Τα κόστη, συνεπώς και η οικονομική βιωσιμότητα των έργων γεωθερμικής ενέργειας, εξαρτώνται αυστηρά από τις ειδικές συνθήκες της θέσης και τον τύπο της εφαρμογής. Σημειώνεται ότι, το κόστος παραγωγής του ηλεκτρισμού είναι πιο ευαίσθητο στο ειδικό κόστος διάνοιξης των φρεάτων και στην παραγωγικότητα κάθε φρέατος, που κυμαίνεται σημαντικά μεταξύ διαφορετικών χωρών. Η διακύμανση των τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων που ενέχονται στην υλοποίηση των γεωθερμικών έργων (το ειδικό κόστος του πεδίου συν το κόστος εγκατάστασης) σημαίνει ότι κάθε ένα από αυτά έχει ένα μοναδικό κόστος παραγωγής και δεν είναι δυνατή μια ευρεία γενίκευση.

Η συνολική ανταγωνιστικότητα της γεωθερμικής ενέργειας καθορίζεται επίσης με τη σύγκρισή της τόσο με τις συμβατικές όσο και με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συνήθως το κόστος της ενέργειας στηρίζεται σε τυποποιημένες χρηματοοικονομικές αναλύσεις. Η χρηματοδότηση των γεωθερμικών έργων από τις υπηρεσίες διεθνούς χρηματοδότησης τελευταία βασίζεται στη διεξαγωγή μιας ανάλυσης ελαχίστου κόστους, ως μέρος της διαδικασίας τους για δανειοδότηση των ενεργειακών έργων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, αυτή τη στιγμή στην Ευρώπη το χαμηλότερο κόστος των συμβατικών καυσίμων, ειδικά του φυσικού αερίου, με αυστηρά οικονομικά κριτήρια καθιστά ανταγωνιστικές μόνο τις καλύτερες από τις γεωθερμικές πηγές. Εντούτοις, η γεωθερμική ενέργεια θα μπορούσε να γίνει πιο ανταγωνιστική προς τις συμβατικές πηγές ενέργειας εάν η σύγκριση δεν περιορίζόταν αυστηρά στα οικονομικά κριτήρια

αλλά λαμβάνονταν υπόψη και άλλοι παράγοντες, όπως τα σκιώδη κόστη και οι οικονομικές συνέπειές τους (γνωστά ως "εξωτερικά κόστη").

Τα σχετικά εξωτερικά κόστη της συμβατικής παραγωγής γίνονται εξωτερικά οφέλη στην περίπτωση της γεωθερμίας (όπως και για τις άλλες ΑΠΕ), και αποτελούν μία παράμετρο που αλλάζει ουσιαστικά το επίπεδο ανταγωνιστικότητας προς όφελος της γεωθερμικής ενέργειας. Αυτά μπορούν να ποσοτικοποιηθούν σε χρηματικούς όρους και θα πρέπει να αποτελούν έναν αναγνωρισμένο παράγοντα για λόγους σύγκρισης. Εάν μεταξύ των παραμέτρων της επένδυσης περιληφθούν οι εξωτερικοί παράγοντες, τότε μπορούν να πραγματωθούν τα πλήρη κοινωνικά και οικονομικά οφέλη.

Η απαλλαγή του επενδυτή από αυτή την "προστιθέμενη αξία" δεν πρέπει να ληφθεί ως επιδότηση αλλά ως αναδιάταξη των οικονομικών οφελών που απορρέουν από το έργο. Έχει υπολογιστεί ότι το εξωτερικό κόστος των συμβατικών καυσίμων είναι 10 φορές σχεδόν μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κόστος των ανανεώσιμων και το 50% σχεδόν του συνολικού οικονομικού κόστους (έναντι 1% στην περίπτωση των ΑΠΕ). Η ποσοτικοποίηση των εξωτερικοτήτων αποτελεί κρίσιμη πτυχή για τη δίκαιη εκτίμηση της γεωθερμικής ενέργειας, με την οποία επίσης αποφεύγεται η επιβολή προστίμων σε έργα που αξιολογούνται καθαρά στη βάση μιας ανάλυσης ταμειακών ροών.

5.4.3. Προβλήματα παραγωγής και ρύπανσης

Στα κύρια προβλήματα κατά την παραγωγή γεωθερμικής ισχύος περιλαμβάνονται οι αποθέσεις μετάλλων, οι μεταβολές στις υδρολογικές συνθήκες και η διάβρωση του εξοπλισμού. Προβλήματα ρύπανσης προκύπτουν κατά το χειρισμό των γεωθερμικών αποβλήτων, τόσο του νερού όσο και του ατμού.

5.4.3.1. Αποθέσεις μετάλλων

Σε μερικά πεδία όπου επικρατεί το νερό μπορεί να υπάρξουν αποθέσεις μετάλλων από το ζέων γεωθερμικό ρευστό. Για παράδειγμα, η απόθεση πυριτίου στα φρέατα προκάλεσε προβλήματα στο πεδίο του Salton Sea (Καλιφόρνια). Συχνότερα, μπορεί να περιοριστεί η ανάπτυξη ενός πεδίου από το σχηματισμό αποθέσεων ανθρακικών αλάτων ασβεστίου στα φρέατα ή στα πετρώματα της περιοχής, όπως για παράδειγμα συνέβη στην Τουρκία και τις Φιλιππίνες. Τα πεδία με ζεστά νερά και υψηλά ολικά ανθρακικά άλατα τελευταία αντιμετωπίζονται με καχυποψία. Κατά την απόρριψη των θερμών υγρών αποβλήτων στην επιφάνεια, η απόθεση πυριτίου στους αγωγούς και τους διαύλους του νερού μπορεί να προκαλέσει προβλήματα.

5.4.3.2. Υδρολογικές αλλαγές

Η εκτεταμένη παραγωγή από τα φρέατα αλλάζει τις τοπικές υδρολογικές συνθήκες. Η ελάττωση της πίεσης του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να προκαλέσει βρασμό στο νερό των πετρωμάτων (που οδηγεί σε μεταβολές των χαρακτηριστικών του ρευστού της γεώτρησης), τη διείσδυση κρύου νερού από τις παρυφές του πεδίου, ή μεταβολές στη χημεία του νερού λόγω των μειωμένων θερμοκρασιών και συγκεντρώσεων των

αερίων. Μετά από την παρατεταμένη άντληση ζεστού νερού από πετρώματα μικρής αντοχής μπορεί να συμβεί τοπική γαιόχωση (μέχρι μερικά μέτρα) και να μειωθεί σε ένταση η αρχική φυσική θερμική δραστηριότητα. Κάποιες μεταβολές συμβαίνουν σε όλους τους τομείς και απαιτείται η καλή κατανόηση της γεωλογίας και της υδρολογίας ενός συστήματος προκειμένου να μπορέσει να συνταιριαστεί ο ρυθμός άντλησης της γεώτρησης με τη μακροπρόθεσμη δυνατότητα αυτής να παρέχει ρευστό.

5.4.3.3. Διάβρωση

Τα γεωθερμικά νερά προκαλούν την ταχεία διάβρωση των περισσότερων κραμάτων μετάλλων, αλλά αυτό δεν αποτελεί σοβαρό πρόβλημα κατά τη χρήση τους εκτός από τις περιοχές όπου αντλούνται υψηλής θερμοκρασίας όχινα ύδατα (πολύ σπάνια), για παράδειγμα σε ενεργές ηφαιστειακές ζώνες. Το σύνηθες βαθύ γεωθερμικό νερό έχει σχεδόν ουδέτερο pH. Οι κυριότερες επιπτώσεις διάβρωσης μετάλλων που πρέπει να αποφεύγονται είναι η διάβρωση με στίγματα σουλφιδίου και χλωριδίου ορισμένων ανοξείδωτων και υψηλής αντοχής χαλύβων και η ταχεία διάβρωση των κραμάτων χαλκού. Το υδρόθειο, ή τα προϊόντα οξείδωσής του, προκαλεί επίσης την πιο ταχεία από την κανονική υποβάθμιση των οικοδομικών υλικών, π.χ. του σκυροδέματος, των πλαστικών, και των βαφών.

5.4.3.4. Ρύπανση

Από τις μη ηχομονωμένες γεωτρήσεις εκροής μπορεί να προκύψει υψηλό επίπεδο θορύβου (μέχρι 120 dB), ενώ οι εκτονώσεις των φρεάτων μπορεί να ψεκάσουν αλατούχα και πυριτιούχα ρευστά στα φυτά και τα κτίρια. Με την εφαρμογή ορθών πρακτικών μπορούν να μειωθούν οι επιδράσεις αυτές σε αποδεκτά επίπεδα. Οι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, λόγω της χαμηλότερης αποδοτικότητάς τους, εκπέμπουν περισσότερους υδρατμούς ανά μονάδα ισχύος από τους σταθμούς με ορυκτά καύσιμα. Ο ατμός από τους σιγαστήρες των κεφαλών των φρεάτων και τους πύργους ψύξης των σταθμών μπορεί να προκαλέσει τοπικά μια αυξημένη τάση για σχηματισμό ομίχλης και χειμερινού πάγου.

Τα απόβλητα γεωθερμικά νερά που ελευθερώνονται σε υδάτινους διαύλους μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα θερμικής ρύπανσης, εκτός εάν αραιώνονται κατά 100:1 τουλάχιστο. Οι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να έχουν τέσσερα κύρια ρεύματα αποβλήτων. Μεγάλοι όγκοι απορριπτόμενου ζεστού αλατούχου νερού παράγονται στα υδροθερμικά πεδία. Μη καθαρός υδρατμός αναδύεται από τους πύργους ψύξης των σταθμών, οι οποίοι παράγουν επίσης μια ροή συμπυκνώματος που περιέχει ποικίλες συγκεντρώσεις αμμωνίας, σουλφιδίων, ανθρακικών αλάτων, και βορίου. Απόβλητα αέρια διαφεύγουν από τις εξόδους απαερίωσης των αντλιών.

Οι γεωθερμικοί ατμοί ποικίλουν ευρέως ως προς τα περιεχόμενα αέρια (συχνά 0,1-5%), τα οποία είναι κυρίως διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, μεθάνιο και αμμωνία. Η απαγωγή του υδρόθειου μπορεί να προκαλέσει αντιδράσεις εάν δεν διασκορπίζεται επαρκώς, και σ' ένα μεγάλο γεωθερμικό σταθμό κοντά σε κοινότητες με χαμηλή ανοχή στις οσμές χρειάζεται μία μονάδα παγίδευσης του θείου (διεργασίας Stretford).

Η επίπτωση της διασποράς των σουλφιδίων στα δέντρα και τα φυτά φαίνεται να είναι μικρή. Η χαμηλή συγκέντρωση ραδονίου στον ατμό (3-200 nanocuries/kg ή 0,1-7,4 kilobecquerels/kg), όταν διασκορπίζεται είναι απίθανο να έχει επιπτώσεις στην υγεία. Ο υδράργυρος των γεωθερμικών ρευστών (1-10 µg/kg) τελικά απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, αλλά οι δημιουργούμενες συγκεντρώσεις δεν είναι επικίνδυνες.

Η σύσταση των γεωθερμικών νερών ποικίλλει ευρέως. Στις πρόσφατες ηφαιστειακές περιοχές αυτά είναι συνήθως αραιά (< 0,5%) αλατούχα διαλύματα, αλλά τα νερά στις ιζηματογενείς λεκάνες ή τις ενεργές ηφαιστειακές περιοχές έχουν ιδιαίτερα μεγάλη συγκέντρωση σε άλμες. Σε σύγκριση με τα επιφανειακά, τα περισσότερα γεωθερμικά νερά περιέχουν υπερβολικές συγκεντρώσεις βορίου, φθοριδίων, αμμωνίας, πυριτίου, υδρόθειου και αρσενικού. Στα συνήθη αραιά γεωθερμικά νερά, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων, π.χ. σιδήρου, μαγγανίου, μολύβδου, ψευδαργύρου, καδμίου και θαλλίου, σπάνια υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα για το πόσιμο νερό επίπεδα. Πάντως, οι συμπυκνωμένες άλμες μπορεί να περιέχουν ικανά επίπεδα βαρέων μετάλλων.

Λόγω της σύνθεσής τους, τα απόβλητα γεωθερμικά νερά ή συμπυκνώματα μπορούν να επιδράσουν αρνητικά στις παροχές πόσιμου ή αρδευτικού νερού και την υδρόβια ζωή. Η αμμωνία μπορεί να αυξήσει την ανάπτυξη φυκιών στους υδάτινους διαύλους και να ευνοήσει τον ευτροφισμό τους, ενώ η εισχώρηση του βορίου στα αρδευτικά ύδατα μπορεί να έχει επιπτώσεις σε ευαίσθητα φυτά, όπως τα εσπεριδοειδή. Μικρές ποσότητες ιζήματος μεταλλικού σουλφιδίου, που περιέχουν αρσενικό, αντιμόνιο και υδράργυρο, μπορεί να συσσωρευτούν στα ιζήματα των ρυακιών και να προκαλέσουν ανεπιθύμητα υψηλές (πάνω από 0,5 ppm) συγκεντρώσεις υδραργύρου στα ψάρια.

5.4.3.5. Επανέγχυση

Το πρόβλημα της επιφανειακής διάθεσης μπορεί να αποφευχθεί με την επανέγχυση των απορριπτόμενων νερών ή συμπυκνωμάτων πίσω στα έγκατα μέσω φρεάτων απόρριψης. Η επανέγχυση του συμπυκνώματος ατμού εμφανίζει λίγα προβλήματα και εφαρμόζεται στην Ιταλία και τις ΗΠΑ. Μια πιο δύσκολη περίπτωση επανέγχυσης συνιστούν οι πολύ μεγαλύτεροι όγκοι του διαχωριζόμενου απόβλητου ζεστού νερού (περίπου 50 μετρικοί τόνοι ανά MW_e) στα πεδία υπερίσχυσης νερού.

Η απόθεση πυριτίου και ανθρακικών αλάτων μπορεί να προκαλέσει αποφράξεις στις σχισμές των πετρωμάτων, εάν δεν ικανοποιούνται οι κατάλληλες θερμοκρασιακές, χημικές και υδρολογικές συνθήκες στο βάθος απόρριψης. Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να είναι απαραίτητη πριν την επανέγχυση η χημική επεξεργασία της άλμης. Η επιλεκτική επανέγχυση του νερού στο θερμικό σύστημα μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση των πιέσεων του υδροφόρου ορίζοντα και στην απόληψη περισσότερης θερμότητας από το πέτρωμα. Ένα επιτυχές σύστημα επανέγχυσης νερού λειτουργεί για αρκετά χρόνια στο Ahuachapan του Ελ Σαλβαδόρ.

5.4.4. Το μέλλον της γεωθερμικής ενέργειας

Οι προβλέψεις σχετικά με την ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας συνδέονται στενά με τις εξελίξεις στην τιμή του πετρελαίου. Παρότι έχει αποδειχθεί ότι ο τομέας μπορεί να επεκταθεί και σ' ένα πλαίσιο χαμηλών τιμών βαρελιού, η επίδραση του παράγοντα αυτού παραμένει καθοριστική. Η πρόβλεψη των διακυμάνσεων του πετρελαίου πάντως είναι αρκετά δύσκολη, γι' αυτό και έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικά σενάρια για το μέλλον. Στο πρώτο θεωρείται μια σχετικά χαμηλή τιμή του πετρελαίου για τα έτη 2005 και 2010. Το δεύτερο σενάριο βασίζεται σε μια αύξηση της τιμής του βαρελιού που θα ευνοούσε την ανάπτυξη των ΑΠΕ, συνεπώς και των γεωθερμικών εγκαταστάσεων. Στην περίπτωση αυτή, το εγκατεστημένο δυναμικό θα μπορούσε να φθάσει τα 32.250 MW_e για ηλεκτροπαραγωγή και τα 69.500 MW_{th} για άμεση χρήση.

Με βάση τα τωρινά μεγέθη, η πρόβλεψη αυτή αντιστοιχεί σε τετραπλασιασμό των δύο τομέων. Πάντως, τα μεγέθη αυτά αποτελούν χονδρικές εκτιμήσεις και δεν πρέπει να ληφθούν σε καμία περίπτωση ως ακριβή στοιχεία. Αυτό συμβαίνει επειδή, πέρα από την επίπτωση της τιμής των ορυκτών καυσίμων, ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι το επίπεδο των βεβαιωμένων γεωθερμικών αποθεμάτων. Η γνώση του πλανήτη Γη είναι ακόμα, κυριολεκτικά αλλά και μεταφορικά, "επιφανειακή". Θα μπορούσαν να εμφανιστούν νέα κοιτάσματα και νέες τεχνολογίες και να μεταβληθούν εντελώς οι τάσεις που θα έχουν παρατηρηθεί μέχρι τότε.

Οι μόνες εμπορικά βιώσιμες γεωθερμικές πηγές βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα φαίνεται ότι θα συνεχίσουν να είναι οι υδροθερμικές. Μόνες αυτές αντιπροσωπεύουν μια τεράστια πηγή ενέργειας, αφού υπολογίζεται ότι θα μπορούσαν να παραχθούν βραχυπρόθεσμα ή μεσοπρόθεσμα από τις γνωστές υδροθερμικές πηγές 80 GW γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Μακροπρόθεσμα, οι τεχνολογικές εξελίξεις θα διευκολύνουν την αξιοποίηση της ενέργειας στα θερμά ξηρά πετρώματα και τους γεωπεπιεσμένους ταμιευτήρες, που αντιπροσωπεύουν μια πηγή ενέργειας ουσιαστικά απεριόριστη και αποτελούν το μέλλον της αειφόρου γεωθερμίας.

Σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρισμού, υπάρχει μια ομάδα χωρών που φαίνεται ότι μελλοντικά θα κυριαρχήσουν στον τομέα, μεταξύ των οποίων είναι οι Φιλιππίνες, η Ινδονησία και το Μεξικό. Από την άλλη, οι ΗΠΑ μάλλον δεν θα επαναλάβουν τους ρυθμούς ανάπτυξης της δεκαετίας του '80 και θα χάσουν την ηγετική τους θέση από τις Φιλιππίνες. Όσον αφορά την Ευρωπαϊκή Ένωση, οι ενεργές χώρες στο πεδίο της ηλεκτροπαραγωγής παραμένουν η Ιταλία, η Πορτογαλία και η Γαλλία, που όμως φιλοδοξούν να αυξήσουν την εγκατεστημένη ισχύ τους. Έτσι, η Ιταλία προβλέπεται να φθάσει στα 946 MW_e μέχρι το 2005, η Πορτογαλία 45 MW_e και η Γαλλία 20 MW_e. Με τον τρόπο αυτό, το εν λειτουργία στην Ε.Ε. δυναμικό θα ανέλθει σε 1.011 MW_e το 2005 και σε 1.200 MW_e μέχρι το 2010. Τα μεγέθη αυτά υπερβαίνουν τους στόχους της Λευκής Βίβλου, που είναι τα 1.000 MW_e έως το 2010.

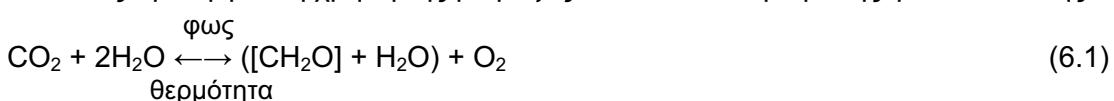
6.1. Η BIOMAZA ΩΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΠΟΡΟΣ

6.1.1. Ορολογία

"Βιομάζα" είναι ένας επιστημονικός όρος για τη ζώσα ύλη, ειδικότερα κάθε οργανική ύλη που προέρχεται από τα φυτά ως αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής διεργασίας. Ο όρος βιομάζα επίσης χρησιμοποιείται για να δηλώσει τα προϊόντα που προέρχονται από ζώντες οργανισμούς – ξύλο από τα δένδρα, φυτά συγκομιδής, μέρη φυτών και γεωργικά υπολείμματα, π.χ. κλαδιά, μίσχοι και φύλλα, καθώς και τα υδρόβια φυτά και τα ζωικά απόβλητα. Από την άποψη αυτή, τα ορυκτά καύσιμα, π.χ. ο άνθρακας και το πετρέλαιο, είναι στην πραγματικότητα απολιθωμένη βιομάζα.

Αν και η βιομάζα χρησιμοποιείται κυρίως ως τροφή, χαρτί, ξυλεία και χημικά, τόσο αυτή όσο και τα υποπροϊόντα της μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως πηγές για την κάλυψη πολλών ενεργειακών αναγκών. Η "βιοενέργεια", δηλ. η ενέργεια από βιομάζα, είναι αποθηκευμένη χημική ενέργεια και περιλαμβάνει κάθε στερεό, υγρό ή αέριο καύσιμο, οιαδήποτε ποσότητα ηλεκτρισμού ή ωφέλιμο χημικό παράγωγο που προέρχονται από οργανική ουσία, είτε άμεσα από τα φυτά είτε έμμεσα από φυτικής προέλευσης βιομηχανικά, εμπορικά ή αστικά απόβλητα, ή από γεωργικά και δασικά υπολείμματα. Έτσι, η βιοενέργεια μπορεί να προέρχεται από ένα μεγάλο εύρος πρώτων υλών και να παράγεται με ποικίλους τρόπους.

Το ενεργειακό περιεχόμενο της βιομάζας φυτικής προέλευσης αρχικά προκύπτει από την ηλιακή ενέργεια μέσω μιας διεργασίας γνωστής ως φωτοσύνθεση [σχέση (6.1)]. Στη φύση, όλη η βιομάζα αποσυντίθεται στα στοιχειώδη μόρια της με απελευθέρωση θερμότητας. Κατά τις διεργασίες μετατροπής (π.χ. καύση), η βιομάζα απελευθερώνει την ενέργειά της, συχνά υπό μορφή θερμότητας, και ο άνθρακας επανοξειδώνεται σε CO₂ ώστε να αντικατασταθεί αυτό που απορροφήθηκε όσο αναπτυσσόταν το φυτό. Συνεπώς, η ενεργειακή χρήση της βιομάζας είναι το αντίστροφό της φωτοσύνθεσης.



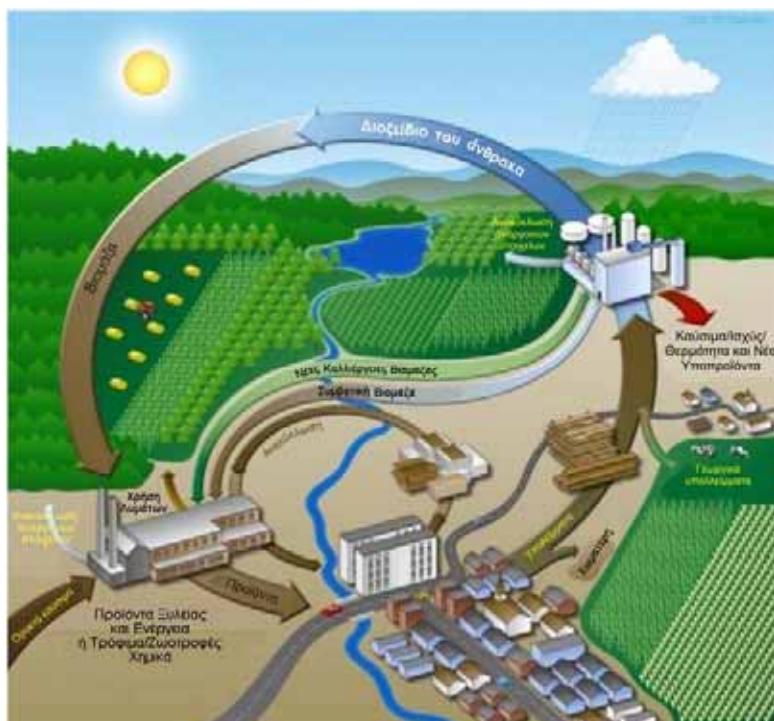
Η μόνη φυσικά ευρισκόμενη πηγή ενέργειας με άνθρακα που τα αποθέματά της είναι ικανά ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων είναι η βιομάζα. Αντίθετα από αυτά, η βιομάζα είναι ανανεώσιμη καθώς απαιτείται μόνο μια σύντομη χρονική περίοδος για να αναπληρωθεί ό,τι χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας. Εν γένει, για τις διάφορες τελικές χρήσεις υιοθετούνται διαφορετικοί όροι. Έτσι, ο όρος "βιοισχύς" περιγράφει τα συστήματα που χρησιμοποιούν πρώτες ύλες βιομάζας αντί των συνήθων ορυκτών καυσίμων (φυσικό αέριο, άνθρακα) για ηλεκτροπαραγωγή, ενώ ως "βιοκαύσιμα" αναφέρονται κυρίως τα υγρά καύσιμα μεταφορών που υποκαθιστούν πετρελαϊκά προϊόντα, π.χ. βενζίνη ή ντίζελ.

Σημειώνεται ότι, σε ορισμένες χώρες (κυρίως στις ΗΠΑ), τα αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ) δεν θεωρούνται ως βιομάζα, παρότι είθισται να καίγονται για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, αν και το μεγαλύτερο

μέρος της μάζας των ΑΣΑ προέρχεται από φυτικές ουσίες και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία ενεργειακών συστημάτων ειδικής κατασκευής, τα ΑΣΑ περιέχουν επίσης έναν αριθμό πιθανά τοξικών υλικών, όπως κατεργασμένα με κρεόζωτο ξύλα, μπαταρίες που περιέχουν υδράργυρο, και άλλα βλαβερά προϊόντα.

Συνεπώς, στα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής ΑΣΑ πρέπει να αφαιρούνται τα υλικά αυτά από τις πρώτες ύλες πριν την καύση τους, ή να φιλτράρονται πολύ προσεκτικά τα καυσαέρια για την αποφυγή τοξικών εκπομπών. Η συνήθης βιομάζα δεν περιέχει τοξικά χημικά και, όταν χρησιμοποιείται σε σύγχρονα συστήματα ισχύος, παράγει λιγότερες εκπομπές από τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο στα επόμενα χρησιμοποιείται ο όρος «απόβλητα» σε αντίθεση με την «αγνή» βιομάζα.

6.1.2. Ενεργειακός κύκλος της βιομάζας



Σχήμα 6.1. Σχηματική αναπαράσταση του ενεργειακού κύκλου της βιομάζας
[Πηγή: BIN]

Η βιοενέργεια παράγεται σε κύκλο. Η αέναη χρήση των φυσικών ενεργειακών ροών μιμείται τους οικολογικούς κύκλους της Γης και ελαχιστοποιεί την εκπομπή ρύπων στον αέρα, τους ποταμούς και τους ακεανούς. Το μεγαλύτερο μέρος του άνθρακα για τη δημιουργία της προσλαμβάνεται από την ατμόσφαιρα και αργότερα επιστρέφει σ' αυτήν. Οι θρεπτικές ουσίες για τη δημιουργία της λαμβάνονται από το έδαφος και στη συνέχεια επιστρέφουν σ' αυτό. Τα υπολείμματα ενός σταδίου του κύκλου συνιστούν τις εισροές του επόμενου σταδίου, όπως φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 6.1.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα με τη διεργασία ανάπτυξης των φυτών (φωτοσύνθεση) και μετατρέπεται σε φυτική βιομάζα (δένδρα,

χορτάρια, άλλες καλλιέργειες). Η βιομάζα συγκομιδής, μαζί με τα δασικά και γεωργικά υπολείμματα, μπορεί να μετατραπεί σε δομικά υλικά, χαρτί, καύσιμα, τρόφιμα, ζωοτροφή και άλλα προϊόντα, όπως χημικά φυτικής προέλευσης (κεριά, καθαριστικά, κλπ.). Μερικές καλλιέργειες μπορεί να φύονται για οικολογικούς σκοπούς, π.χ. για φιλτράρισμα των γεωργικών απορροών, σταθεροποίηση του εδάφους, δημιουργία καταφυγίων για τα ζώα, καθώς και για παραγωγή βιοενέργειας.

Η μονάδα επεξεργασίας στερεής βιομάζας (εργοστάσιο κάτω αριστερά) μπορεί να παράγει θερμότητα διεργασιών και ηλεκτρισμό. Τα οργανικά υποπροϊόντα και οι ανόργανες ουσίες από αυτήν μπορεί να επιστρέφονται στο έδαφος, ανακυκλώνοντας έτσι κάποια από τα θρεπτικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των φυτών, π.χ. κάλιο και φώσφορο. Επιλεγμένα αστικά απορρίμματα μπορούν να συνδυαστούν με δασικά και γεωργικά υπολείμματα, ζωικά απόβλητα και καλλιέργειες βιομάζας για την τροφοδοσία μιας διαφορετικού τύπου κατεργασίας της βιομάζας. Η νέα αυτή μονάδα (βιοδιυλιστήριο - εργοστάσιο πάνω δεξιά) θα μπορούσε να παράγει ένα φάσμα προϊόντων, όπως καύσιμα, χημικά, νέα βιολογικά υλικά, και ηλεκτρισμό.

Ένα σημαντικό συμπαραγόμενο μερικών διεργασιών θα μπορούσαν να είναι οι ζωοτροφές. Αυτές οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας της βιομάζας θα εφάρμοζαν αποδοτικές μεθόδους ελαχιστοποίησης των αποβλήτων και θα ανακύκλωναν τις θρεπτικές ουσίες και τα οργανικά υλικά στο έδαφος, βιοθώντας με τον τρόπο αυτό το κλείσιμο του κύκλου. Η πόλη στο κάτω μέρος του σχήματος αντιπροσωπεύει όλα τα προϊόντα της βιομάζας (τροφή, υλικά και ενέργεια) που χρησιμοποιούνται από τον ανθρώπινο πληθυσμό. Τα υπολείμματα από την πόλη (χαρτιά και ξυλεία, αστικά απορρίμματα, βιθρολύματα, κλπ.) υπόκεινται σε ανάκτηση υλικών και ενέργειας, και μερικά μπορούν να ανακυκλωθούν απευθείας σε νέα προϊόντα.

Καθ' όλο τον κύκλο, από τη βιομάζα απελευθερώνεται CO₂ πίσω στην ατμόσφαιρα – από τις μονάδες επεξεργασίας και από τις αστικές και αγροτικές κοινότητες – με λίγη ή καμία καθαρή προσθήκη άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Με τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης των ενεργειακών καλλιέργειών ώστε να προστίθεται χούμος στο έδαφος, μπορεί να συμβεί μέχρι και κάποια καθαρή δέσμευση ή μακροπρόθεσμη καθήλωση του CO₂ στην ενόργανη ύλη του εδάφους. Η ενέργεια που τροφοδοτεί τον κύκλο και προνοεί για το ανθρώπινο γένος προέρχεται από τον ήλιο, και θα συνεχίσει τη δράση της αυτή για πολλές γενεές με σταθερό κόστος και χωρίς τον κίνδυνο εξάντλησής της.

6.1.3. Ηλεκτροπαραγωγή από βιομάζα (βιο-ισχύς)

Από πολλές απόψεις ο ηλεκτρισμός από βιομάζα είναι διαφορετικός από τις άλλες ΑΠΕ στο ότι η αρχική ενεργειακή πηγή περιλαμβάνει ένα πλήθος πρώτων υλών με ποικίλες ιδιότητες. Για την παραγωγή ισχύος από βιομάζα πρέπει να συνεργάζονται δύο εντελώς διαφορετικού χαρακτήρα συστήματα, δηλαδή ένα σύστημα τροφοδοσίας που παράγει, συλλέγει και παραδίδει το καύσιμο, και ένας σταθμός που παράγει (και διαθέτει) τον ηλεκτρισμό. Στα επόμενα περιγράφονται οι υφιστάμενες και μελλοντικές τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σ' αυτά τα συστήματα και ο τρόπος με τον οποίο το ένα επιδρά στο άλλο.

Η χρήση της βιομάζας για ηλεκτροπαραγωγή έχει αυξηθεί την τελευταία δεκαετία. Στις ΗΠΑ, η παραγωγή ηλεκτρισμού από βιομάζα αυξανόταν κατά 7% κάθε χρόνο μεταξύ του 1990 και 1994, φθάνοντας τις 59.000 GWh το 1994. Μια τέτοια εξέλιξη θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια βιομηχανία δυναμικότητας περίπου 30 GW, που θα παράγει 150.000 έως 200.000 GWh ηλεκτρισμού το 2020. Η ενέργεια από βιομάζα στην Ευρώπη σήμερα αντιστοιχεί στο 2% περίπου της συνολικής κατανάλωσης, και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προβλέπει ότι αυτή η τιμή θα φθάσει το 15% μέχρι το 2010.

Αντίθετα με τα άλλα συστήματα ΑΠΕ που απαιτούν ακριβές εξελιγμένες τεχνολογίες (όπως είναι τα φωτοβολταϊκά ηλιακά), η βιομάζα μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό με εξοπλισμό και σταθμούς ίδιου τύπου με αυτούς που τώρα λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα. Πολλές καινοτομίες στην ηλεκτροπαραγωγή με ορυκτά καύσιμα μπορούν επίσης να εφαρμοστούν στη χρήση των καυσίμων από βιομάζα. Πάντως, εξαιτίας διάφορων παραγόντων που αναλύονται στη συνέχεια, η ανάπτυξη αυτής της ΑΠΕ δεν είναι η επιθυμητή.

Οι περισσότεροι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με βιομάζα που λειτουργούν σήμερα χαρακτηρίζονται από χαμηλές αποδοτικότητες του λέβητα και του θερμικού σταθμού, λόγω των ιδιοτήτων των καυσίμων αλλά και του μικρού μεγέθους των περισσότερων εγκαταστάσεων, ενώ είναι δαπανηρή και η κατασκευή τους. Για την κατασκευή των καλύτερων από τις μονάδες αυτές σήμερα απαιτούνται περίπου \$2.000 ανά εγκατεστημένο kW, με θερμική αποδοτικότητα περίπου 40%, ενώ οι μεγάλοι σταθμοί άνθρακα κοστίζουν περίπου \$1.500 ανά kW, με θερμική αποδοτικότητα 45%. Έτσι, η κύρια πρόκληση στη χρήση της βιομάζας για ηλεκτροπαραγωγή είναι η ανάπτυξη πιο αποδοτικών και φθηνότερων συστημάτων.

Τα εξελιγμένα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής από βιομάζα απαιτούν αναβάθμιση καυσίμου, βελτίωση της καύσης και του κύκλου, και καλύτερη επεξεργασία των καυσαερίων. Οι μελλοντικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής με βάση τη βιομάζα πρέπει να παρέχουν ανώτερη περιβαλλοντική προστασία με χαμηλότερο κόστος, συνδυάζοντας τις εξελιγμένες διαδικασίες προετοιμασίας, μετατροπής και καύσης της βιομάζας με τον καθαρισμό των καυσαερίων. Στα συστήματα αυτού του είδους περιλαμβάνονται η καύση ρευστοποιημένης κλίνης, η ενσωματωμένη αεριοποίηση της βιομάζας και οι αεριοστρόβιλοι με εξωτερική καύση βιομάζας.

6.2. ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Οι πρώτες ύλες βιομάζας που χρησιμοποιούνται, ή αξιολογείται η χρήση τους, για την τροφοδοσία των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής συνήθως εμπίπτουν σε μία από τις ακόλουθες γενικές κατηγορίες:

- ξύλο (δασικό ξύλο, υπολείμματα ξύλου, και λόχμες σύντομου κύκλου),
- γεωργικά υπολείμματα, που περιλαμβάνουν τη βαγάσση (ζαχαροκαλαμόσκονη), τα υπολείμματα ελιάς, κελύφη ρυζιού και άχυρα,

- ενεργειακές καλλιέργειες (όπως είναι ο μίσκανθος, η φάλαρις και το αρούντο),
- απόβλητα, τα οποία περιλαμβάνουν τα αστικά στερεά απόβλητα, καύσιμο από σκουπίδια, λύματα και κοπριά.

Εκτός των αποβλήτων, το παγκόσμιο δυναμικό των πρώτων υλών «αγνής» βιομάζας παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2 παρακάτω (σύμφωνα με το Υπ. Ενέργειας των ΗΠΑ).

Παγκόσμιοι Πόροι Βιοισχύος: Ενεργειακό Δυναμικό άνω των 5 GW



Σχήμα 6.2. Χάρτης γεωγραφικής κατανομής των πρώτων υλών βιομάζας

Σήμερα, οι πιο συμφέρουσες οικονομικά μορφές της βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι τα υπολείμματα, δηλαδή τα οργανικά υποπροϊόντα τροφών, ινών, και δασικής παραγωγής. Συνήθως χρησιμοποιούνται το πριονίδι, τα κελύφη ρυζιού και η βαγάσση. Κοντά σε αστικά και βιομηχανικά κέντρα είναι επίσης συνήθη υλικά χαμηλού κόστους από υπολείμματα καθαρού ξύλου (άχρηστες παλέτες και κασόνια, υπολείμματα ξυλουργείων, κλπ.). Η χρήση των υπολειμμάτων βιομάζας ως καύσιμο μπορεί να αποτρέψει τις αγορές συμβατικών καυσίμων, μειώνοντας παράλληλα το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της απόρριψής τους.

Στο μέλλον μπορεί να απαιτηθούν μεγαλύτερες ποσότητες καυσίμων βιομάζας για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια. Διάφοροι οργανισμοί παγκοσμίως μελετούν και αναπτύσσουν δένδρα και πόες ταχείας ανάπτυξης που θα μπορούσαν να καλλιεργούνται, κυρίως σε ακαλλιέργητες γεωργικές εκτάσεις, ειδικά για χρήση τους ως καύσιμα. Με την ανάπτυξη οικονομικά συμφερόντων ενεργειακών καλλιεργειών μπορούν να αυξηθούν κατά πολύ οι διαθέσιμες για ηλεκτροπαραγωγή ποσότητες βιομάζας. Έτσι, εάν φυτεύονταν ενεργειακές καλλιέργειες στο 4% περίπου των γαιών εντός μίας ακτίνας 80 km, θα μπορούσαν να καλύψουν πλήρως τις ανάγκες σε καύσιμα μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής με βιομάζα των 100 MW.

6.2.1. Υπολείμματα ξύλου

Το ξύλο είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο καύσιμο βιομάζας για παραγωγή θερμότητας και ισχύος. Οι πιο οικονομικές πηγές ξυλοκαυσίμων είναι συνήθως τα υπολείμματα ξύλου από τις βιομηχανίες (πριονίδια), τα άχρηστα ξύλινα προϊόντα ή τα υπολείμματα ξυλαποθηκών που προέρχονται από χωματερές, καθώς και τα αβλαβή θρύμματα ξύλου από οικοδομές και κατεδαφίσεις. Πρόσφατες μελέτες στις ΗΠΑ δείχνουν ότι οι ποσότητες των διαθέσιμων βιομηχανικών και αστικών υπολειμμάτων ξύλου υπερβαίνουν τα 39 εκατομμύρια τόνους ξηράς ουσίας ετησίως - αρκετές για να παράσχουν πάνω από 7.500 MW νέας βιο-ισχύος, ή για το διπλασιασμό της εγκατεστημένης ισχύος στις ΗΠΑ.

6.2.1.1. Πριονίδια

Τα υπολείμματα ξύλου από τη βιομηχανία χάρτου και πολτού, τα ξυλουργεία και άλλους βιομηχανικούς χρήστες ξύλου χρησιμοποιούνται συχνά για την παραγωγή ηλεκτρισμού από βιομάζα. Αυτά τα υπολείμματα είναι συνήθως πολύ καθαρά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο σε ένα μεγάλο εύρος συστημάτων ισχύος βιομάζας. Σε πολλές περιπτώσεις, τα πριονίδια χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού και ηλεκτρισμού εντός της εγκατάστασης όπου παράγονται.

6.2.1.2. Αστικά υπολείμματα ξύλου

Μεγάλες ποσότητες αστικών υπολειμμάτων ξύλου απορρίπτονται στις χωματερές, για παράδειγμα τα απαρχαιωμένα ξύλινα προϊόντα, οι σπασμένες ξύλινες παλέτες και κάσες, και τα ακατέργαστα καθαρά υλικά οικοδομών και κατεδαφίσεων. Τα υλικά αυτά μπορούν να εκτραπούν σε μονάδες ανάκτησης που διαχωρίζουν το καθαρό ξύλο από τα άλλα υλικά (π.χ. βαριά μέταλλα, συνήθως λόγω του χρώματος που μένει στο ξύλο). Το καθαρό ξύλο, με χαμηλή υγρασία μέχρι 5%, μπορεί να χρησιμοποιηθεί παραγωγικά ως καύσιμο βιομάζας και υλικά διαμόρφωσης ανοικτών χώρων.

6.2.1.3. Υπολείμματα δένδρων

Τα ξυλώδη υπολείμματα των κήπων αποτελούν μια άλλη μεγάλη πηγή ξύλου που προς το παρόν καταλήγουν στις χωματερές. Παρόμοια υλικά επίσης παράγονται από το κλάδεμα των δένδρων που βρίσκονται κοντά σε οδούς, σιδηροδρομικές γραμμές και ηλεκτρικά συστήματα (π.χ. γραμμές μεταφοράς του ρεύματος). Μερικές φορές, τα κλαδιά των δένδρων εισαγόμενα στο λίπασμα μετατρέπονται σε εδαφικό κάλυμμα, ή αλέθονται και χρησιμοποιούνται για επικάλυψη των χωματερών. Πάντως, σταθερό καταναλωτή αυτών των υλικών μπορούν να αποτελέσουν κάποια ενεργειακά έργα.

6.2.1.4. Δασικά υπολείμματα

Τα δασικά απόβλητα περιλαμβάνουν μη χρησιμοποιούμενα υπολείμματα υλοτομίας, μη εμπορεύσιμα δέντρα, νεκρά ξύλα, και άλλα μη εμπορικά δέντρα που πρέπει να κοπούν από πυκνά, ασθενή ή ευπυρόβλητα δάση. Η αποψίλωση των δασών, που είναι απαραίτητη για να βοηθηθούν μερικά δάση να επανακτήσουν τη φυσική τους υγεία, επίσης παρέχει μια μεγάλη ποσότητα υπολειμμάτων ξύλου που μπορούν να

μετατραπούν σε ηλεκτρισμό ή βιοκαύσιμα. Εξαιτίας της διασποράς και της μακρινής τους θέσης, η ανάκτηση των υπολειμμάτων αυτών είναι αρκετά πιο δύσκολη και δαπανηρή από αυτή των αστικών υπολειμμάτων ξύλου.

6.2.2. Γεωργικά υπολείμματα

Μεγάλες ποσότητες υπολειμμάτων συγκομιδής παράγονται κάθε χρόνο παγκοσμίως και μένουν αχρησιμοποίητες. Αυτά περιλαμβάνουν γεωργικά κατάλοιπα όπως άχυρα σιτηρών, στελέχη καλαμποκιού (φύλλα, μίσχοι και κότσαλα), κλαδέματα οπωρώνων, φλοιοί ρυζιού και βαγάσση. Τα υπολείμματα του καλαμποκιού μόνο μπορούν να παράγουν πάνω από την τριπλάσια ποσότητα υπολειμμάτων που διατίθεται σήμερα από όλες τις μορφές των υπολειμμάτων ξύλου (εκτός των δασικών). Η γεωργική πρακτική συνήθως είναι τα υπολείμματα αυτά να επιστρέφονται στο χώμα, να καίγονται, να αφήνονται να αποσυντίθενται, ή να αποτελούν απόθεμα βοσκής.

Τα περισσότερα γεωργικά υπολείμματα δεν έχουν ακόμα χρησιμοποιηθεί ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή. Ωστόσο, μπορούν να παράσχουν μια αξιόλογη πηγή βιομάζας εάν αναπτυχθούν υποδομές τροφοδοσίας που να τα αποδίδουν οικονομικά σε μονάδες ισχύος που μπορούν να τα χρησιμοποιήσουν ως καύσιμα. Πράγματι, ένας αριθμός μελετών για τη γεωργία και τη βιομάζα έχουν καταλήξει στο ότι είναι δυνατό να αφαιρείται και να αξιοποιείται ένα μέρος των υπολειμμάτων των καλλιεργειών για παραγωγή ενέργειας, παρέχοντας μεγάλους όγκους υλικού χαμηλού κόστους. Αυτά τα υπολείμματα θα μπορούσαν να υποστούν επεξεργασία μετατροπής τους σε υγρά καύσιμα ή να καιούν/αεριοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

6.2.2.1. Βαγάσση

Ο πολτός που απομένει μετά το θρυμματισμό του ζαχαροκάλαμου για την εκχύμωσή του ονομάζεται βαγάσση. Αυτή συνηθίζεται να χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ζάχαρης ως καύσιμο για τη συμπαραγωγή ατμού (για την παραγωγή της ζάχαρης) και ηλεκτρισμού, για επιτόπια χρήση και πώληση στις εταιρείες ηλεκτρισμού. Το περιεχόμενο σε τέφρα συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 4-11% (του ξηρού βάρους), αλλά η θερμοκρασία τήξης της τέφρας είναι υψηλή. Ο κύριος παραγωγός ηλεκτρισμού από βαγάσση είναι οι ΗΠΑ, όπου τέτοιες εγκαταστάσεις συμπαραγωγής λειτουργούν στη Φλόριντα, τη Χαβάη, και τη Λουιζιάνα. Η βαγάσση αποτελεί επίσης σημαντική ενεργειακή πηγή για μερικά κράτη όπως η Αυστραλία, το Πακιστάν, η Ινδία, η νήσος Reunion, η Ταϊλάνδη, και άλλα στην Αφρική, τη Νότια Ασία και τη Νότια Αμερική.

6.2.2.2. Φλοιοί ρυζιού

Το ρύζι είναι μετά το σιτάρι η δεύτερη πιο διαδεδομένη καλλιέργεια στον κόσμο ως προς την παραγόμενη ποσότητα και την καλλιεργούμενη έκταση, αποτελεί δε την κύρια τροφή για περισσότερο από το μισό του πληθυσμού της Γης. Οι φλοιοί είναι ένα κατάλοιπο της επεξεργασίας του ρυζιού (περίπου το 20% του ακατέργαστου ρυζιού είναι φλοιός). Αντί να πετιούνται οι φλοιοί μπορούν να χρησιμοποιούνται από τα εργοστάσια του ρυζιού για την παραγωγή ατμού και ηλεκτρισμού. Αυτό γίνεται ήδη

σε αρκετές μονάδες στο Αρκάνσας, τη Λουζιάνα και την Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Σε χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία, το Πακιστάν, η Ταϊλάνδη και το Βιετνάμ, όπου παράγεται ρύζι σε μεγάλες ποσότητες, οι φλοιοί του ρυζιού θα μπορούσαν να αποτελέσουν σημαντική πηγή καυσίμου για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης σε ηλεκτρισμό και να υποκαταστήσουν τη χρήση και τις εισαγωγές των ορυκτών καυσίμων.

6.2.2.3. Άχυρο

Το άχυρο έχει χαμηλές θερμοκρασίες τήξης της τέφρας και μπορεί να γίνει κολλώδες σε θερμοκρασίες μέχρι 550-600°C. Η ενίστε υψηλή περιεκτικότητα σε χλώριο, ειδικά στις παραθαλάσσιες περιοχές, μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στους εναλλάκτες θερμότητας των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, όπου σχετικά παραδείγματα έχουν εντοπιστεί σε μερικές μονάδες καύσης άχυρου στη Δανία. Η περιεκτικότητα σε χλώριο μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ των παραθαλάσσιων περιοχών και αυτών της ενδοχώρας κατά ένα συντελεστή της τάξης του πέντε.

6.2.3. Ενεργειακές καλλιέργειες

Διάφοροι οργανισμοί διεθνώς, όπως εθνικά εργαστήρια, γεωργικοί και δασικοί όμιλοι, εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής και άλλες κυβερνητικές υπηρεσίες, εργάζονται ώστε να καταστήσουν τις ενεργειακές καλλιέργειες βιώσιμη πηγή καυσίμου στο εγγύς μέλλον. Οι καλλιέργειες αυτές είναι φυτείες που αναπτύσσονται και καλλιεργούνται ειδικά για χρήση τους ως καύσιμα, και επιλέγονται προσεκτικά ώστε να αναπτύσσονται ταχέως, να είναι ανθεκτικές στην ξηρασία και τα παράσιτα, και να έχουν εύκολη συγκομιδή ώστε να επιτρέπουν ανταγωνιστικές τιμές όταν χρησιμοποιούνται ως καύσιμα.

Οι ενεργειακές καλλιέργειες περιλαμβάνουν ταχείας αναπτύξεως δέντρα, θάμνους και πόες. Ως παραδείγματα ειδών υπό εξέταση αναφέρονται τα υβρίδια λεύκας, η ιτιά, το αρούντο και ο ευκάλυπτος. Οι ενεργειακές καλλιέργειες μπορούν να αναπτυχθούν σε αγροτικές εκτάσεις που δεν χρησιμοποιούνται για καλλιέργεια τροφών, ζωοτροφών ή ινών. Αυτές περιλαμβάνουν γαίες που αποσύρονται από χρήση για λόγους ελέγχου των τιμών, και άλλες γεωργικές εκτάσεις που θεωρούνται ασύμφορες για παραγωγή τροφίμων. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές γεωργικές καλλιέργειες, οι ενεργειακές απαιτούν λιγότερη συντήρηση και αγωγή με λιπάσματα και παρασιτοκτόνα.

Η περίοδος μεταξύ των συγκομιδών για τις ξυλώδεις ενεργειακές καλλιέργειες κυμαίνεται από 3 έως 10 έτη, ανάλογα με το είδος του δέντρου, και η περίοδος μεταξύ των φυτεύσεων μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 20 χρόνια. Πέρα από την αξία τους ως καύσιμα, οι ενεργειακές καλλιέργειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για το έλεγχο της διάβρωσης, την αναβάθμιση του εδάφους, και ως φυσικά φίλτρα για την παρεμπόδιση της διαφυγής των θρεπτικών στοιχείων από το έδαφος προς τους υδροφόρους ορίζοντες.

Εκτός των άλλων, οι ενεργειακές καλλιέργειες μπορούν να επιφέρουν οικονομικά οφέλη στους γεωργούς. Ένα τυπικό σύγχρονο αγρόκτημα παράγει συνήθως μόνο ένα ή δύο κύρια εμπορεύσιμα προϊόντα, π.χ. καλαμπόκι, σόγια, γάλα ή κρέας. Το

καθαρό εισόδημα της όλης επιχείρησης είναι συχνά ευάλωτο, μεταξύ των άλλων, στις διακυμάνσεις της ζήτησης της αγοράς, τα απρόσμενα έξοδα παραγωγής και τον καιρό. Καθώς οι τροφοδοτούμενες με βιομάζα μονάδες ηλεκτροπαραγωγής απαιτούν αρκετά σταθερή τροφοδοσία σε καύσιμο καθ' όλο το έτος, η ανάπτυξη ενεργειακών καλλιεργειών μπορεί να επιφέρει τη σταθεροποίηση του εισοδήματος των γεωργών που θα επιλέξουν να διευρύνουν το φάσμα της παραγωγής τους.

6.2.4. Απόβλητα

6.2.4.1. Βιομηχανικά απόβλητα

Μεγάλες ποσότητες υπολειμμάτων και υποπροϊόντων παράγονται από τη βιομηχανία τροφίμων, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν ως ενεργειακές πηγές. Τα απόβλητα αυτά υλικά προέρχονται από όλους τους τομείς της βιομηχανίας αυτής, από την παραγωγή κρέατος μέχρι τη ζαχαροπλαστική. Τα στερεά απόβλητα περιλαμβάνουν φλοιούς και υπολείμματα φρούτων και λαχανικών, τρόφιμα που δεν ανταποκρίνονται στα πρότυπα ποιότητας, πολτό και ίνες από την εξαγωγή ζάχαρης και αμύλου, κατακάθια φίλτρων και καφέ. Αυτά συνήθως αποβάλλονται σε χώρους ταφής και η εταιρεία τροφίμων πληρώνει για την απόρριψή τους.

Ρεύματα υγρών αποβλήτων παράγονται από το πλύσιμο του κρέατος, των φρούτων και των λαχανικών, τη λεύκανση των φρούτων και των λαχανικών, το προ-μαγείρεμα των κρεάτων, πουλερικών και ψαριών, από εργασίες καθαρισμού και επεξεργασίας, καθώς και από την οινοποιεία. Αυτά τα ρευστά απόβλητα περιέχουν ζάχαρα, άμυλα, και άλλες διαλυμένες και στερεές οργανικές ύλες, αλλά σε αραιή μορφή. Το δυναμικό να υποστούν τα βιομηχανικά αυτά απόβλητα αναερόβια χώνευση για την παραγωγή βιοαέριου ή ζύμωση για την παραγωγή αιθανόλης υπάρχει, και ήδη υφίστανται αρκετά εμπορικά παραδείγματα μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια.

6.2.4.2. Αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ)

Κάθε χρόνο συλλέγονται εκατομμύρια τόνοι οικιακών αποβλήτων και το μεγαλύτερο μέρος τους απορρίπτεται σε χώρους ταφής. Η σύσταση των ΑΣΑ κυμαίνεται ανάλογα με τη θέση και τον τύπο της υπηρεσίας συλλογής. Έχει βρεθεί ότι η μέση σύσταση των ΑΣΑ στην Αυστραλία είναι 46% σηπτικά υλικά (σηπόμενη οργανική ουσία), 24% χαρτί, 26% πλαστικό, γυαλί και μέταλλο, και 4% άλλα. Η πηγή βιομάζας σε αυτά τα ΑΣΑ αποτελείται από τα σηπτικά, το χαρτί και το πλαστικό, και κατά μέσο όρο είναι το 80% των συνολικά συλλεγόμενων ΑΣΑ. Η χαμηλότερη θερμογόνος δύναμή τους είναι εν γένει γύρω στα 8-12 GJ/τόνο.

Τα ΑΣΑ μπορούν να μετατραπούν σε ενέργεια με άμεση καύση ή μέσω φυσικής αναερόβιας χώνευσης στο χώρο ταφής τους. Στους χώρους ταφής, το αέριο που παράγεται από την φυσική αποσύνθεση των ΑΣΑ (περίπου 50% μεθάνιο και 50% διοξείδιο του άνθρακα) συλλέγεται από τα συσσωρευμένα υλικά και καθαρίζεται πριν να τροφοδοτήσει μηχανές εσωτερικής καύσης ή αεριοστρόβιλους για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού.

6.2.4.3. Ζωικά απόβλητα

Υπάρχει μια ποικιλία ζωικών αποβλήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγές ενέργειας από βιομάζα. Οι πιο συνήθεις πηγές είναι οι κοπριές από τα χοιρινά, τα κοτόπουλα και τα βοοειδή (σε εκτροφεία), καθώς τα ζώα αυτά εκτρέφονται σε περιορισμένο χώρο παράγοντας μεγάλη ποσότητα αποβλήτων σε μικρή έκταση. Στο παρελθόν αυτά τα απόβλητα περισυλλέγονταν και πωλούνταν για λίπασμα ή απλά σκορπίζονταν στους αγρούς, αλλά η εισαγωγή αυστηρότερων ελέγχων για τις οσμές και τη μόλυνση του νερού επιβάλει πλέον κάποια μορφή διαχείρισής τους. Αυτό παρέχει επιπλέον κίνητρα για τη μετατροπή των αποβλήτων σε ενέργεια.

Μια συνήθης μέθοδος μετατροπής αυτών των αποβλήτων υλικών είναι μέσω της αναερόβιας χώνευσης, η οποία περιγράφεται παρακάτω. Το προϊόν της αναερόβιας χώνευσης είναι ένα βιοαέριο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ή να καεί άμεσα για μαγειρική ή θέρμανση χώρων και νερού.

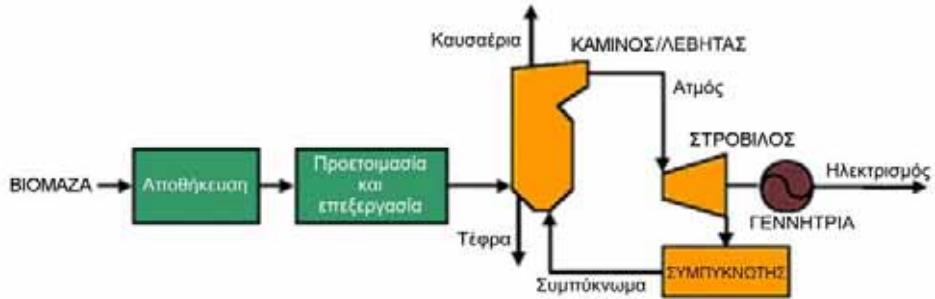
6.2.4.4. Αστικά λύματα

Τα αστικά λύματα αποτελούν μια πηγή ενέργειας βιομάζας που είναι αρκετά όμοια με τα άλλα ζωικά απόβλητα που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τη μόνη διαφορά ότι αυτά υφίστανται επεξεργασία εδώ και πολλά χρόνια στις αναπτυγμένες χώρες. Ενέργεια μπορεί να εξαχθεί από τα αστικά λύματα μέσω της αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή βιοαέριου. Η παραμένουσα λάσπη μπορεί στη συνέχεια να αποτεφρωθεί ή να υποστεί πυρόλυση, ώστε να παραχθεί περισσότερο βιοαέριο και βιοέλαιο.

6.3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

6.3.1. Τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας

Οι τεχνολογίες κύριας μετατροπής της βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι η άμεση καύση, η αεριοποίηση και η πυρόλυση. Η άμεση καύση αντιστοιχεί στην οξείδωση της βιομάζας με περίσσεια αέρα, η οποία παρέχει θερμά καυσαέρια που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού στους τομείς εναλλαγής θερμότητας των λεβήτων. Κατόπιν, ο ατμός χρησιμοποιείται για την ηλεκτροπαραγωγή, εκτονούμενος μέσω ατμοστροβίλου σ' έναν κύκλο Rankine (σχήμα 6.3). Συνήθως, σ' έναν κύκλο ατμού συμπύκνωσης παράγεται μόνο ηλεκτρισμός, ενώ σ' έναν κύκλο ατμού με απομάστευση συμπαράγονται ηλεκτρισμός και ατμός.



Σχήμα 6.3. Σύστημα ατμοστροβίλου άμεσης καύσης

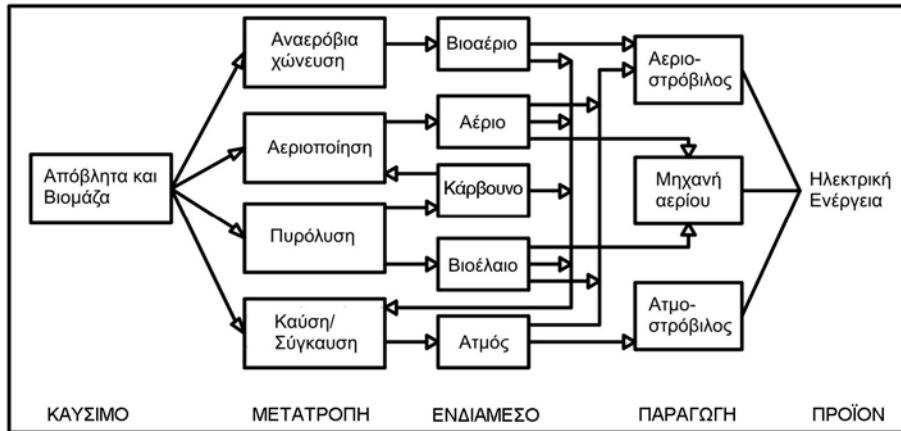
Στους κύκλους αεριοποίησης με βάση τον αέρα, η βιομάζα οξειδώνεται μερικώς με υποστοιχειομετρικές ποσότητες οξυγόνου, παρουσία ατμού, παρέχοντας ενέργεια για τη θερμική μετατροπή της υπόλοιπης βιομάζας σε αέρια και οργανικούς ατμούς. Για την παραγωγή ηλεκτρισμού, τα καθαρισμένα αέρια της αεριοποίησης (αεριογόνο) τροφοδοτούνται απευθείας σ' ένα λέβητα ή στο θάλαμο καύσης ενός βιομηχανικού ή τροποποιημένου αεροπορικού στροβίλου. Στους κύκλους έμμεσης αεριοποίησης χρησιμοποιείται εξωτερική πηγή θερμότητας, αντί για οξυγόνο, για να προσδώσει την ενέργεια για την αεριοποίηση με ατμό υψηλής θερμοκρασίας του οργανικού μέρους της βιομάζας σε ατμούς και αέρια.

Έμμεση θέρμανση εφαρμόζεται επίσης στις διεργασίες πυρόλυσης για τη μετατροπή της βιομάζας σ' ένα μίγμα αερίων και οργανικών ατμών. Ως πυρόλυση ορίζεται η θερμική καταστροφή των οργανικών υλικών εν απουσίᾳ οξυγόνου. Συνεπώς, τεχνικά, η έμμεση αεριοποίηση είναι μια διεργασία πυρόλυσης. Εν προκειμένω, εάν το κύριο προϊόν της πυρόλυσης είναι αέριο η διαδικασία θεωρείται αεριοποίηση, ενώ εάν είναι συμπυκνώσιμοι ατμοί η διαδικασία θεωρείται πυρόλυση. Συνήθως στις διεργασίες της πυρόλυσης δεν προστίθεται ατμός.

Όλες αυτές είναι τεχνολογίες θερμικής μετατροπής. Εξ άλλου, η αναερόβια χώνευση είναι μια βιολογική διεργασία με την οποία τα οργανικά απόβλητα μετατρέπονται σε βιοαέριο, ένα μίγμα μεθανίου (40-75% κατ' όγκο) και διοξειδίου του άνθρακα. Η διεργασία βασίζεται στην αποδόμηση των οργανικών μακρο-μορίων της βιομάζας από φυσικά υφιστάμενους πληθυσμούς βακτηριών. Η βιομετατροπή λαμβάνει χώρα απουσία αέρα σε χωνευτήρες, δηλ. στεγανά δοχεία που παρέχουν ιδανικές συνθήκες ώστε τα βακτήρια να ζυμώσουν (χωνεύσουν) την οργανική ύλη σε βιοαέριο.

Κατά την αναερόβια χώνευση, μετατρέπονται σε βιοαέριο συνήθως το 30-60% των εισαγόμενων στερεών. Τα συμπαραγόμενα είναι ένα αχώνευτο υπόλειμμα (λάσπη) και διάφορες υδατοδιαλυτές ουσίες. Η αναερόβια χώνευση της εξαιρετικά υγρής βιομάζας και των αποβλήτων είναι μια καθιερωμένη και εμπορικά δοκιμασμένη τεχνολογία. Το βιοαέριο, είτε αυτούσιο είτε μετά από εμπλουτισμό του με CH_4 , μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας και/ή ηλεκτρισμού μέσω μηχανών αερίου, ντίζελ ή διπλού καυσίμου, σε ισχείς μέχρι 10 MW_e. Η μέση παραγωγικότητα είναι 0,2-0,3 m³ βιοαερίου ανά kg ξηρών στερεών.

Σήμερα, το 80% της παραγωγής βιοαερίου στις βιομηχανικές χώρες προέρχεται από εμπορικά εκμεταλλεύσιμους χώρους ταφής απορριμάτων. Η παραγωγή και χρήση του αερίου καυσίμου που προκύπτει από τα ΑΣΑ μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική λύση για ηλεκτροπαραγωγή. Πάντως, στις περισσότερες περιπτώσεις, η ενέργεια που παράγεται στη διεργασία της χώνευσης αποτελεί υποπροϊόν της αφού, όπως και με την αποτέφρωση, κύριος στόχος είναι η επεξεργασία των αποβλήτων και όχι η παραγωγή ενέργειας. Στο σχήμα 6.4 παρουσιάζονται συνοπτικά όλες οι παραπάνω τεχνολογίες κύριας μετατροπής της βιομάζας.



Σχήμα 6.4. Σύνοψη των οδών μετατροπής της βιομάζας για ηλεκτροπαραγωγή

6.3.2. Απευθείας καύση (σταθμοί άμεσης καύσης)

Από τις διάφορες τεχνολογίες κύριας μετατροπής της βιομάζας ή των αποβλήτων, τα συστήματα καύσης είναι καθιερωμένα και αποτελούν ώριμη τεχνολογία, ειδικότερα η καύση του ξύλου, ενίοτε σε συνδυασμό με άλλους τύπους βιομάζας ή αποβλήτων. Οι σύγχρονοι σταθμοί μεγάλης κλίμακας συνδυάζουν την αποτέφρωση των ΑΣΑ με μια αυξανόμενη καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, για παραγωγή έως και 45 MW_e. Υπάρχουν πολλά σχετικά παραδείγματα, ειδικότερα στις Σκανδιναβικές χώρες και τις ΗΠΑ. Υπό ανάπτυξη βρίσκεται η καύση ενεργειακών καλλιεργειών σε ειδικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και είναι σε εξέλιξη κάποια επιδεικτικά έργα. Η καύση της βιομάζας μπορεί να διακριθεί σ' ένα φάσμα διαφορετικών τεχνολογιών που μπορούν να ταξινομηθούν ως καύση είτε "σταθερής κλίνης" είτε "ρευστοποιημένης κλίνης".

6.3.2.1. Καύση σταθερής κλίνης

Η καύση σταθερής κλίνης, επίσης γνωστή ως τροφοδοτούμενη καύση, χρησιμοποιεί μηχανικές διατάξεις που τροφοδοτούν και αναφλέγουν το καύσιμο σε μια κλίνη στη βάση της καμίνου. Ο αέρας της καύσης διέρχεται μέσα από τη σχάρα επάνω στην οποία κάθεται το καύσιμο. Η παροχή του αέρα περιορίζεται έτσι ώστε το καύσιμο να μην αναδεύεται και να παραμένει σε επαφή με άλλα στερεά. Οι καυστήρες σταθερής κλίνης μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη μέθοδο με την οποία τροφοδοτείται το καύσιμο στη σχάρα.

Στους τροφοδότες υπερπλήρωσης (ή τροφοδότες κινούμενων σχαρών) το καύσιμο τροφοδοτείται με τη βαρύτητα στο ένα áκρο της επιφάνειας της σχάρας και το βάθος της επιφάνειάς του ρυθμίζεται από μια θύρα καυσίμου στην είσοδο της καμίνου. Η σχάρα μετακινείται αργά κατά μήκος της καμίνου όπως ένας ανοικτός ταινιόδρομος, ενώ η τέφρα και τα κατάλοιπα αποβάλλονται συνεχώς στο άλλο áκρο της σχάρας. Αυτό το είδος σχάρας έχει σχεδιαστεί για καύση άνθρακα. Εάν καίγεται βιομάζα, τότε μπορεί τα κόστη συντήρησης να είναι υψηλότερα και να μειωθεί η αποδοτικότητα του λέβητα λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών του αέρα καύσης.

Οι τροφοδότες διασκορπισμού περιλαμβάνουν μία αερόψυκτη μετακινούμενη σχάρα, αλλά αξιοποιούν το πλεονέκτημα της καύσης εν αιωρήσει. Οι διανομείς του καυσίμου ωθούν το καύσιμο μέσα στην εστία επάνω από μια αναφλέγουσα κλίνη καυσίμου (ανάλογα με το είδος του καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιούνται είτε μηχανικοί είτε πνευματικοί ρίππες). Τα λεπτά σωματίδια καίγονται αιωρούμενα ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια πέφτουν και καίγονται στην κινούμενη σχάρα. Λόγω της αρχής της καύσης εν αιωρήσει, τα καύσιμα πρέπει να είναι σχετικά ξηρά (περιεκτικότητα σε υγρασία μικρότερη από 50%) και να έχουν το κατάλληλο μέγεθος.

Πρέπει να διατηρείται ένα στρώμα τέφρας στη σχάρα για να την προστατεύει από τη θερμική διάβρωση που μπορεί να προκύψει από τη διακοπτόμενη λειτουργία της. Η τέφρα της βιομάζας είναι συχνά τριππική καθώς περιέχει πολύ πυρίτιο, το οποίο μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μεγάλα κόστη συντήρησης της σχάρας. Ένα επιπλέον μειονέκτημα αυτού του τύπου της καύσης είναι ότι μπορεί να υφίσταται σημαντικό ποσό αιωρούμενης τέφρας και άκαυστου άνθρακα στα καυσαέρια, το οποίο επιφέρει μειωμένες αποδόσεις της καύσης και του λέβητα. Αντιθέτως, πλεονέκτημα θεωρείται η ικανότητα ανταπόκρισης αυτών των τροφοδοτών στις μεταβολές του φορτίου με τη ρύθμιση της ταχύτητας μετακίνησης και του αέρα εισόδου.

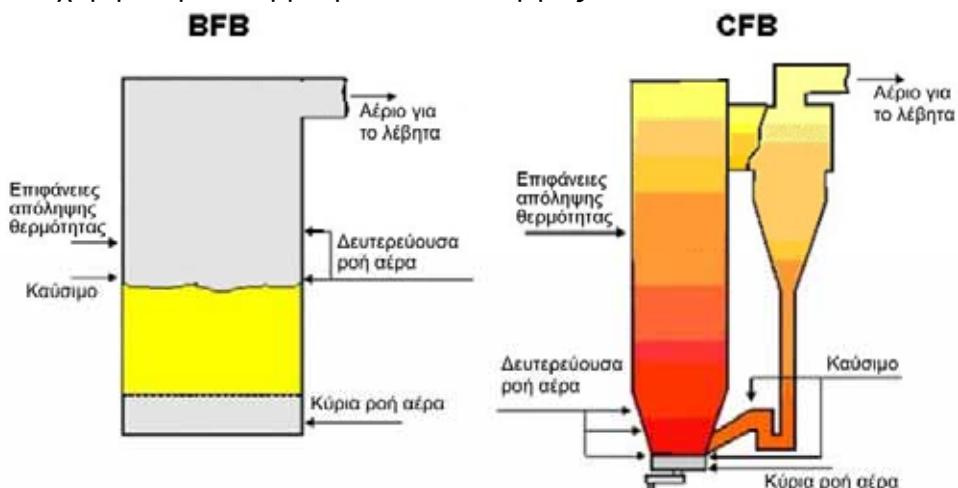
Η εστία επικλινούς σχάρας είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη στα συστήματα καύσης βιομάζας. Επιτρέπει την προξήρανση του καυσίμου στο επάνω μέρος της καμίνου πριν αυτό πέσει λόγω βαρύτητας σε μια παλινδρομούσα χαμηλότερα μέσα στην εστία σχάρα, όπου λαμβάνει χώρα η καύση. Καθώς η σχάρα είναι υδρόψυκτη ή αερόψυκτη, δεν χρειάζεται στρώμα τέφρας για την προστασία της, πράγμα που την κάνει καταλληλότερη για καύσιμα βιομάζας χαμηλής τέφρας.

6.3.2.2. Καύση ρευστοποιημένης κλίνης

Η καύση ρευστοποιημένης κλίνης χαρακτηρίζεται από την υψηλή ταχύτητα του αέρα μέσα στην κλίνη του καυσίμου που του προσδίδει ιδιότητες ρευστού. Η κλίνη περιέχει κανονικά αδρόκοκκη άμμο που βοηθά την ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα και αυξάνει τη μεταφορά θερμότητας στο καύσιμο για την ξήρανση και ανάφλεξή του. Ο διαχωρισμός του καυσίμου και των άλλων σωματιδίων της κλίνης γίνεται επάνω από την «ελάχιστη ταχύτητα ρευστοποίησης», η οποία είναι συνάρτηση του μεγέθους των κόκκων, της πυκνότητας και της πτώσης πίεσης μέσω της κλίνης. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα, η κλίνη μπορεί να μετατραπεί από κοχλάζουσα σε τυρβώδη και κατόπιν σε περιδινούμενη κλίνη με αυξανόμενους ρυθμούς ανακύκλωσης.

Οι εμπορικές διατάξεις ταξινομούνται είτε ως καύσης κοχλάζουσας ρευστοποιημένης κλίνης (BFB) είτε ως καύσης περιδινούμενης ρευστοποιημένης κλίνης (CFB), μπορεί να βρίσκονται υπό πίεση ή όχι και να χρησιμοποιούν αέρα ή οξυγόνο. Στο σύστημα BFB η ταχύτητα του αέρα είναι συνήθως 1-3 m/s προκαλώντας διαταραχή στην άμμο της κλίνης και διαχωρισμό των κόκκων. Το κύριο ρεύμα του αέρα τροφοδοτείται στον πυθμένα της κλίνης μέσω ακροφυσίων από αεροφυλάκιο, ενώ ο δευτερεύων αέρας ρέει στην εστία επάνω από την κλίνη. Η θερμοκρασία της κλίνης διατηρείται και ελέγχεται τροποποιώντας το λόγο του κύριου και του δευτερεύοντος αέρα, ή με την επανακυκλοφορία μέρους των καυσαερίων.

Σ' ένα σύστημα CFB η ταχύτητα του αέρα επάνω από το αεροφυλάκιο είναι συνήθως 4-9 m/s. Η άμμος μπορεί να κυκλοφορεί στην εστία βοηθώντας τη μετάδοση της θερμότητας. Τα καυσαέρια και τα παρασυρόμενα στερεά αφήνουν την εστία και περνούν μέσα από κυκλώνες που συλλέγουν τα σωματίδια και τα επιστρέφουν στην περιοχή ακριβώς επάνω από το αεροφυλάκιο. Όπως και στο λέβητα BFB, υπάρχουν τροφοδοσίες κύριου και δευτερεύοντος αέρα (βλ. σχήμα 6.5). Δεν υπάρχει διακριτή επιφάνεια κλίνης και η καύση γίνεται σε όλη την εστία. Τα συστήματα CFB είναι εν γένει πιο ακριβά από τις άλλες επιλογές, αλλά μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές NO_x λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας.



Σχήμα 6.5. Λέβητες BFB και CFB

Οι καυστήρες ρευστοποιημένης κλίνης είναι τεχνικά πολυπλοκότεροι με αντίστοιχα μεγαλύτερα κόστη σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας. Γενικά, υπάρχει ένα όριο στην περιοχή των 8 MW_{th} επάνω από το οποίο αρχίζουν να πλεονεκτούν οικονομικά έναντι των καυστήρων σταθερής κλίνης. Από την άλλη, η καύση ρευστοποιημένης κλίνης εμφανίζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα έναντι της σταθερής κλίνης:

- Η υψηλή θερμική αδράνεια της κλίνης παρέχει συνθήκες για σταθερή ανάφλεξη, ασχέτως προς τη μεταβλητότητα της ποιότητας του καυσίμου. Επομένως, είναι ανθεκτική σε μεγαλύτερο εύρος χαρακτηριστικών των καύσιμων.
- Ο έλεγχος της θερμοκρασίας της κλίνης επιτρέπει τη χρήση ποικιλίας καυσίμων με διάφορες ιδιότητες τέφρας, ενώ αποφεύγεται η τήξη της τέφρας στην κλίνη.
- Οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες καύσης σημαίνουν και χαμηλές εκπομπές NO_x.

- Αν προστεθεί ασβεστόλιθος στο υλικό της κλίνης τότε είναι δυνατή η επιτόπια δέσμευση του SO₂, αν και αυτό δεν είναι απαραίτητο για τα καύσιμα βιομάζας αφού έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο.

Στο εμπόριο διατίθενται μονάδες BFB μέχρι 100 MW_e και CFB μέχρι 400-600 MW_e. Οι λέβητες CFB έχουν αποδεδιγμένη δυνατότητα καύσης περίπου 70 διαφορετικών καυσίμων, μόνα ή με σύγκαυση. Οι λέβητες BFB έχουν αποδείξει την εφικτότητά τους για καύσιμα βιομάζας ή αποβλήτων με όμοια χαρακτηριστικά ειδικά στις μικρότερες ισχείς, αρχίζοντας από τα 5 MW_{th} με καλά επεξεργασμένο καύσιμο. Μια βελτιωμένη έκδοση των CFB προσφέρει μια ακόμα πιο ανταγωνιστική, ευέλικτη και φιλική προς το περιβάλλον λύση για την καύση των κατώτερης ποιότητας καυσίμων και διάφορων αποβλήτων σε μικρότερης κλίμακας μονάδες ηλεκτροπαραγωγής (<10 MW_e).

6.3.2.3. Καυστήρες αιώρησης

Μια πρόσφατη εξέλιξη που χρησιμοποιείται σε σχετικά λίγες εγκαταστάσεις αποτελεί η εν αιωρήσει καύση κονιορτοποιημένου ξύλου σε ειδικούς λέβητες βιομάζας. Η εν αιωρήσει καύση έχει επίσης εφαρμοσθεί σε ασβεστοκάμινους και μελετάται από τη βιομηχανία ηλεκτρισμού για εφαρμογές σύγκαυσης. Οι απαιτήσεις για επιτυχημένη εν αιωρήσει καύση, δηλ. υγρασία τροφοδοσίας κάτω από 15% και μέγεθος σωματιδίου μικρότερο από 1,5 mm, επιφέρουν υψηλότερες αποδόσεις του λέβητα (έως 80%) σε σχέση με την καύση τσιπ υγρού ξύλου υγρασίας 50-55% σε συστήματα τροφοδότη σχάρας ή ρευστής κλίνης αποδοτικότητας 65%.

Καλύτερη απόδοση επίσης προκύπτει με το μικρότερο μέγεθος εστίας. Η υψηλότερη απόδοση αντισταθμίζεται από το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας για ξήρανση και θρυμματισμό. Επιπλέον, πρέπει να χρησιμοποιούνται ειδικοί καυστήρες, π.χ. οι σπειροειδείς κυκλωνικοί και οι κατακόρυφοι κυλινδρικοί. Στις εγκαταστάσεις αυτού του είδους περιλαμβάνονται η μονάδα Oxford Energy ισχύος 27 MW στο Williams της Καλιφόρνια, το εργοστάσιο ξυλείας για εσωτερικές επενδύσεις ASSI Lövholmen στη Piteå της Φινλανδίας, ο μύλος Klabin do Parana στο Monte Alegre της Βραζιλίας, και ο μύλος E.B. Eddy στην Espanola του Οντάριο.

6.3.3. Σύγκαυση με άνθρακα

6.3.3.1. Περιγραφή

Η βιομάζα αποτελεί οικονομική πηγή όταν το καύσιμο είναι πολύ φθηνό ή δωρεάν. Τότε η αποδοτικότητα δεν αποτελεί βασικό οικονομικό κριτήριο και, ως εκ τούτου, οι υφιστάμενες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής βιομάζας έχουν θερμικές τιμές στο εύρος από 13.000 έως 20.000 Btu/kWh ή/και υψηλότερες, όταν οι ατμολέβητες με καύσιμο άνθρακα της βιομηχανίας ηλεκτροπαραγωγής έχουν πολύ καλύτερες θερμικές τιμές, της τάξης των 9.000 έως 13.000 Btu/kWh. Πάντως, ένας αριθμός μεγάλων εταιρειών ηλεκτρισμού διεθνώς αξιολογούν τη σύγκαυση βιομάζας σε υφιστάμενους σταθμούς άνθρακα, κυρίως λόγω των περιβαλλοντικών οφελών που μπορεί να προκύψουν.

Η σύγκαυση βιομάζας-άνθρακα, δηλαδή η ταυτόχρονη καύση δυο διαφορετικών καυσίμων στον ίδιο λέβητα, συντελεί στη μείωση των εκπομπών CO₂ από την καύση των ορυκτών καυσίμων, του σχηματισμού SO₂ μέσω της ελάττωσης του δέσμου στο καύσιμο θείου, του σχηματισμού NO_x μέσω της ελάττωσης του δέσμου στο καύσιμο αζώτου, ενώ παρέχει και έναν τρόπο για την αντιμετώπιση των εκπομπών τοξικών ουσιών στον αέρα. Όταν γίνεται σύγκαυση με βιομάζα, η ποσοστιαία μείωση του CO₂ για τη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής είναι περίπου ίση με το ποσοστό της συνολικής εισαγόμενης θερμότητας στο λέβητα που προέρχεται από τις πρώτες ύλες βιομάζας.

Εξάλλου, στα εν δυνάμει οφέλη της σύγκαυσης με καύσιμα βιομάζας περιλαμβάνεται η τροφοδοσία με χαμηλού κόστους καύσιμα, η αύξηση της ποικιλίας καυσίμων για τις εταιρείες ηλεκτρισμού και η παροχή διεξόδου για τα υπολείμματα των βιομηχανικών πελατών. Η σύγκαυση εκμεταλλεύεται τα καλύτερα στοιχεία κάθε τεχνολογίας και καθιστά δυνατή την επίτευξη πολύ καλύτερης απόδοσης μετατροπής των καυσίμων βιομάζας σε ηλεκτρισμό, σε σύγκριση με τη συνήθη πρακτική στους λέβητες που χρησιμοποιούν 100% βιομάζα ως καύσιμο. Έτσι μπορούν να επιτευχθούν θερμικές τιμές της τάξης των 11.000 Btu/kWh, όταν στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύσιμο ξύλο η αντίστοιχη τιμή είναι 14.000 ή παραπάνω.

Από την άλλη, δοκιμές και υπολογισμοί πιστοποιούν ότι, όταν γίνεται σύγκαυση με το 7-10% της εισροής θερμότητας να προέρχεται από βιομάζα, η πτώση στη συνολική απόδοση του λέβητα κυμαίνεται από 0,3 έως 1,0 μονάδες της συνήθους στις δοκιμές τιμής του 85% περίπου για τους λέβητες άνθρακα. Έτσι, υφίσταται ένα αντίτιμο απόδοσης λόγω του πιστοποιού βιομάζας που μετατρέπεται λιγότερο αποδοτικά απ' ό,τι αυτό του άνθρακα. Πάντως, οι αριθμοί αυτοί δείχνουν ότι το αντίτιμο είναι μικρό σε σχέση με τη μεγάλη διαφορά μεταξύ των ήδη εν χρήσει λεβήτων βιομάζας για ηλεκτροπαραγωγή και των υφιστάμενων στη βιομηχανία ηλεκτρισμού λεβήτων άνθρακα, το οποίο κυμαίνεται από 3% (το 0,3% του 100/10 διαιρούμενο με 0,85) μέχρι ένα μέγιστο 16% (το 1,0% του 100/7 διαιρούμενο με 0,85).

6.3.3.2. Τροποποιήσεις και αναλογούντα κόστη

Τα πιο κρίσιμα στοιχεία όσον αφορά το κόστος της λειτουργίας της σύγκαυσης είναι το κόστος του καυσίμου και το κόστος κεφαλαίου των μετατροπών του σταθμού ισχύος ώστε να καταστεί δυνατή η σύγκαυση του καυσίμου βιομάζας με τον άνθρακα. Η οικονομικότητα της σύγκαυσης βιομάζας καθορίζεται από το κατά πόσο τα οφέλη στις δαπάνες για καύσιμα, μέσω των καυσίμων βιομάζας που αντικαθιστούν τον πιο ακριβό άνθρακα, μπορούν να υπερκαλύψουν το κόστος μετασκευής της μονάδας και οποιαδήποτε προστιθέμενα κόστη εργατικών και συντήρησης προκύπτουν από τη λειτουργία του συστήματος σύγκαυσης.

Το κόστος καυσίμου εδώ είναι στην πραγματικότητα η διαφορά μεταξύ του κόστους του καυσίμου βιομάζας και του κόστους του άνθρακα που αντικαθίσταται από αυτό. Τα κόστη κεφαλαίου για την ανέγερση μιας διάταξης σύγκαυσης διαφέρουν ανάλογα με το εάν η βιομάζα αναμιγνύεται με τον άνθρακα ή καίγεται χωριστά από αυτόν. Η ανάμιξη δεν απαιτεί ξεχωριστή οδό ροής και ψεκασμού για το καύσιμο βιομάζας και

είναι συνήθως πολύ φθηνότερη, της τάξης των \$50/kW έναντι των \$200/kW για τη χωριστή τροφοδοσία. Σημειώνεται ότι αυτά τα κόστη εκφράζονται ανά μονάδα ισχύος της βιομάζας και όχι της συνολικής ισχύος της μονάδας.

Έτσι, ένας λέβητας 100MW_e με σύγκαυση στο 10% της θερμότητας λαμβάνει 10MW_e από το καύσιμο βιομάζας και το κόστος των \$200/kW των βασικών μετατροπών για ένα σύστημα χωριστής τροφοδοσίας σημαίνει ένα συνολικό κεφάλαιο \$2.000.000 για τη μετασκευή. Το μοναδιαίο κόστος ανά μονάδα συνολικής ισχύος είναι \$20/kW. Για ένα λέβητα άνθρακα 250 MW_e με σύστημα ανάμιξης καυσίμων που παρέχει τη δυνατότητα σύγκαυσης στο 2% της θερμότητας, η ισχύς από βιομάζα είναι 5 MW_e και το ανά μονάδα κόστος των \$50/kW συνεπάγεται ένα σύνολο \$250.000. Ανά μονάδα συνολικής ισχύος του λέβητα, αυτή αποτελεί μια δαπάνη της τάξης του \$1/kW.

Στις συνήθεις μονάδες άνθρακα, δηλαδή αυτές που καταναλώνουν κονιορτοποιημένο άνθρακα και είναι γνωστές ως "λέβητες PC", η διαφορά μεταξύ της αναμεμιγμένης και χωριστής τροφοδοσίας σχετίζεται με μια βασική διαφοροποίηση στο κλάσμα της εισροής θερμότητας στο λέβητα που μπορεί να προέλθει από το καύσιμο βιομάζας, το γνωστό ως "επίπεδο σύγκαυσης". Στο ανωτέρω παράδειγμα της αναμεμιγμένης τροφοδοσίας το επίπεδο αυτό ήταν 2%, που σημαίνει ότι το 2% της θερμότητας στο λέβητα οφείλεται στο κλάσμα της βιομάζας, βάσει των θερμογόνων δυνάμεων (σε Btu/lb ή kJ/kg) και των παροχών μάζας των καυσίμων. Η περίπτωση της χωριστής τροφοδοσίας αντιστοιχούσε σε επίπεδο σύγκαυσης 10%.

Αυτά τα παραδείγματα του 2% για αναμεμιγμένη και 10% για χωριστή τροφοδοσία αποτελούν τυπικά παραδείγματα σύγκαυσης στους συνήθεις λέβητες PC. Στους πιο σπάνιους λέβητες κυκλωνικού τύπου υπάρχει μια βασική διαφορά, καθώς οι λέβητες αυτοί καταναλώνουν θρυμματισμένο, αντί για κονιορτοποιημένο, άνθρακα, μπορούν δηλ. να καίνε επιτυχώς άνθρακα με μεγαλύτερα μεγέθη κόκκων καθώς λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Οι καυστήρες είναι μεγάλοι κυκλωνικοί κύλινδροι με οριζόντιο προσανατολισμό όπου οι μεγάλοι κόκκοι του άνθρακα καίγονται σε μια δίνη υγρού που σχηματίζεται από τηγμένη τέφρα στα τοιχώματα των κυλίνδρων.

Δεδομένου ότι επιδέχονται μεγαλύτερα μεγέθη κόκκων καυσίμου και δεν απαιτούν το άλεσμα του καυσίμου σε πολύ μικρό μέγεθος, καθώς μάλιστα δεν διαθέτουν καν τους μύλους που κονιορτοποιούν όλη την τροφοδοσία καυσίμου στους λέβητες PC, στις κυκλωνικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής δεν ισχύει το όριο του 2% στο επίπεδο της σύγκαυσης που εφαρμόζεται στις περισσότερες μονάδες PC. Το επίπεδο του 10% σ' έναν κυκλωνικό λέβητα μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση της μεθόδου τροφοδοσίας αναμεμιγμένου καυσίμου, η οποία είναι οικονομικότερη τόσο από την άποψη της λειτουργίας όσο και από αυτήν του αρχικού κεφαλαίου.

Στην τροφοδοσία αναμεμιγμένου καυσίμου η ανάμιξη του καυσίμου βιομάζας με τον άνθρακα γίνεται κατά τη διάρκεια μιας βάρδιας της εργατομέρας, και το καύσιμο παρέχεται στο λέβητα καθ' όλη την ημέρα χωρίς επιπλέον ειδική εργασία. Η χωριστή τροφοδοσία πλεονεκτεί στο ότι ανά πάσα στιγμή ελέγχεται η προσθήκη ή αφαίρεση σύγκαυσης βιομάζας, που όμως αντισταθμίζεται από την αμοιβή του πρόσθετου

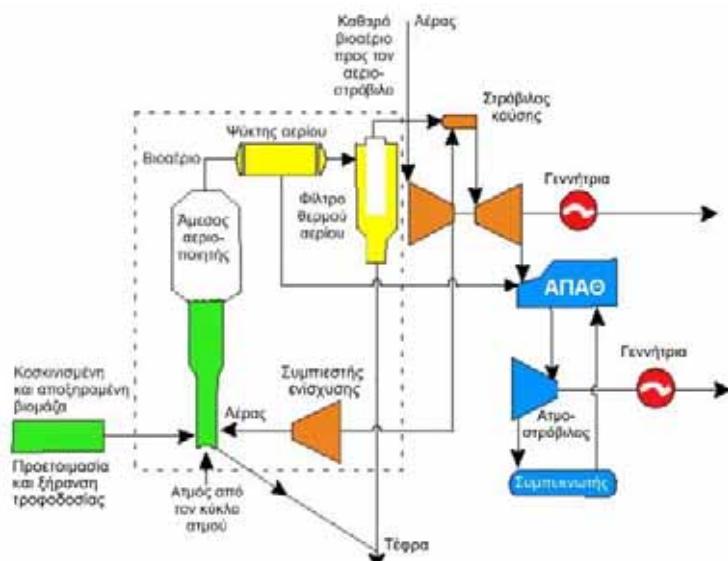
μέλους του προσωπικού λειτουργίας που απαιτείται σε κάθε βάρδια. Ίσως υπάρξουν αυτόματα συστήματα ώστε να περιοριστεί η ανάγκη για επιπλέον προσωπικό σε όλες τις βάρδιες, τα οποία όμως μπορεί να προσθέσουν κόστη κεφαλαίου και συντήρησης που θα μειώσουν ή εξαλείψουν τα όποια οφέλη στα λειτουργικά έξοδα.

6.3.4. Ηλεκτροπαραγωγή με αεριοποίηση της βιομάζας

6.3.4.1. Περιγραφή του συστήματος

Η αεριοποίηση της βιομάζας, δηλαδή η μετατροπή της σε αέριο καύσιμο χαμηλής ή μέσης θερμογόνου δύναμης, περιλαμβάνει δύο διεργασίες. Η πρώτη, η πυρόλυση, μέσω μιας σειράς σύνθετων αντιδράσεων απελευθερώνει σε θερμοκρασίες κάτω των 600°C τα πτητικά συστατικά του καυσίμου, στα οποία περιλαμβάνονται αέριοι υδρογονάνθρακες, CO, CO₂, υδρογόνο, πίσσες και υδρατμοί. Τα καύσιμα βιομάζας τείνουν να έχουν περισσότερα πτητικά συστατικά (70-86% σε ξηρά βάση) από τον άνθρακα (30%), οπότε η πυρόλυση είναι αναλογικά σημαντικότερη στην αεριοποίηση της βιομάζας απ' ό,τι σε αυτήν του άνθρακα.

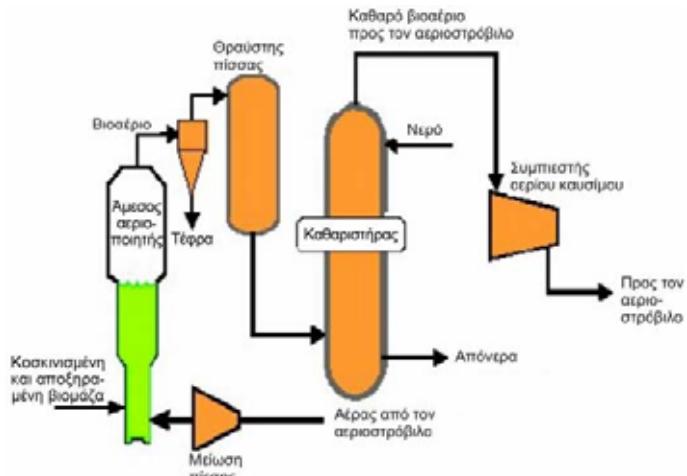
Τα υποπροϊόντα της πυρόλυσης που δεν αεριοποιούνται είναι γνωστά ως κάρβουνο και αποτελούνται κυρίως από στερεό άνθρακα και τέφρα. Στη δεύτερη διεργασία της αεριοποίησης, τη μετατροπή του κάρβουνου, ο άνθρακας που παραμένει μετά την πυρόλυση υφίσταται την κλασική αντίδραση αεριοποίησης (δηλ. ατμός + άνθρακας) και/ή καύση, η οποία παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την πραγμάτωση των αντιδράσεων της πυρόλυσης και αεριοποίησης του κάρβουνου. Λόγω της υψηλής της αντιδραστικότητας (σε σχέση με τον άνθρακα και άλλα στερεά καύσιμα), όλη η τροφοδοτούμενη βιομάζα, περιλαμβανομένου του κάρβουνου, κανονικά μετατρέπεται σε προϊόντα αεριοποίησης σε ένα μόνο πέρασμα μέσω μιας διάταξης αεριοποιητή.



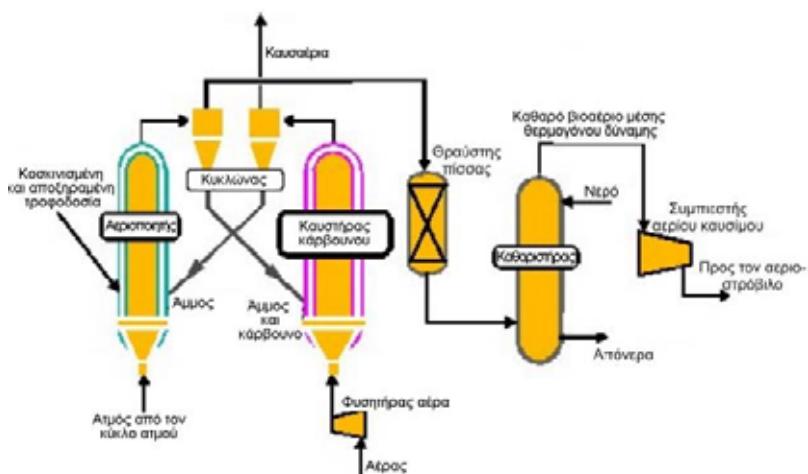
Σχήμα 6.6. Σχηματική παράσταση ενός συστήματος συνδυασμένου κύκλου με ενσωματωμένη αεριοποίηση βιομάζας (IGCC)

Ανάλογα με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου αεριοποιητή, οι ανωτέρω αντιδράσεις μπορούν να λάβουν χώρα σε ένα μόνο δοχείο αντιδραστήρα ή να διαχωριστούν σε

διαφορετικά δοχεία. Στους άμεσους αεριοποιητές η πυρόλυση, η αεριοποίηση και η καύση γίνονται σε ένα δοχείο, ενώ στους έμμεσους η πυρόλυση και η αεριοποίηση γίνονται σε ένα δοχείο και η καύση σε άλλο. Στο σύστημα συνδυασμένου κύκλου με ενσωματωμένη αεριοποίηση (IGCC) του σχήματος 6.6, εντός της διακεκομμένης γραμμής διακρίνεται ένας άμεσος αεριοποιητής υψηλής πίεσης. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται και οι άλλες δυνατές επιλογές αεριοποιητών, ειδικότερα ο άμεσος αεριοποιητής χαμηλής πίεσης (σχ. 6.7) και ο έμμεσος αεριοποιητής (σχ. 6.8).



Σχήμα 6.7. Άμεσος αεριοποιητής χαμηλής πίεσης



Σχήμα 6.8. Έμμεσος αεριοποιητής

Στην άμεση αεριοποίηση, εισάγεται απευθείας αέρας και ενίοτε ατμός στο μοναδικό δοχείο του αεριοποιητή. Στην έμμεση αεριοποίηση, ένα αδρανές μέσο μεταφοράς της θερμότητας, π.χ. άμμος, μεταφέρει την παραγόμενη στον καυστήρα θερμότητα προς τον αεριοποιητή για να ενεργοποιηθούν οι αντιδράσεις πυρόλυσης και αεριοποίησης του κάρβουνου. Οι έμμεσοι αεριοποιητές λειτουργούν με σχεδόν ατμοσφαιρική πίεση, ενώ συστήματα άμεσης αεριοποίησης έχουν αναπτυχθεί και για μεγαλύτερες πιέσεις. Όλοι οι αεριοποιητές μπορούν να ενταχθούν στο ευρύτερο σύστημα του σχήματος 6.6 και έχουν χρησιμοποιηθεί σε μία τουλάχιστον πρόσφατη μελέτη σχεδίασης.

Πάντως, υπάρχουν αρκετοί πρακτικοί περιορισμοί σε κάθε τύπο αεριοποιητή. Λόγω της αραιωτικής επίδρασης του αζώτου του αέρα, το αέριο καύσιμο από έναν άμεσο

αεριοποιητή έχει χαμηλή θερμογόνο δύναμη ($5,6\text{-}7,5 \text{ MJ/Nm}^3$), οπότε απαιτείται αυξημένη ροή καυσίμου προς τον αεριοστρόβιλο. Έτσι, για να διατηρηθεί η συνολική παροχή μάζας (καυσίμου + αέρα) μέσα από το στρόβιλο εντός των ορίων σχεδίασης, συνήθως αφαιρείται μία ποσότητα αέρα από τον συμπιεστή και χρησιμοποιείται στον αεριοποιητή, η οποία είτε ενισχύεται ελαφρώς σε πίεση είτε εκτονώνεται σε σχεδόν ατμοσφαιρική πίεση, ανάλογα με την πίεση λειτουργίας του άμεσου αεριοποιητή.

Η θερμογόνος δύναμη του αερίου καυσίμου μπορεί να αυξηθεί σε $12,8\text{-}13,8 \text{ MJ/Nm}^3$ εάν αντί για αέρα χρησιμοποιηθεί οξυγόνο, αν και η παραγωγή του είναι ακριβή. Καθώς οι αντιδράσεις παραγωγής του καυσίμου στον έμμεσο αεριοποιητή γίνονται σε χωριστό δοχείο, το παραγόμενο αέριο καύσιμο δεν περιέχει αραιωτικά αζώτου και είναι μέσης θερμογόνου δύναμης ($13\text{-}18,7 \text{ MJ/Nm}^3$), αρκετά κοντά σ' αυτήν του φυσικού αερίου ($\sim 38 \text{ MJ/Nm}^3$). Έτσι, το αέριο καύσιμο από έναν έμμεσο αεριοποιητή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μη τροποποιημένο αεριοστρόβιλο χωρίς εξαέρωση.

Η πίεση λειτουργίας του αεριοποιητή επηρεάζει όχι μόνο το κόστος και το μέγεθος του εξοπλισμού, αλλά και τις διασυνδέσεις με την υπόλοιπη εγκατάσταση, μεταξύ των οποίων και τα απαραίτητα συστήματα καθαρισμού. Καθώς οι αεριοστρόβιλοι λειτουργούν σε αυξημένες πιέσεις, το παραγόμενο από τους αεριοποιητές χαμηλής πίεσης αέριο καύσιμο πρέπει να συμπιέζεται. Αυτό ευνοεί τον καθαρισμό σε χαμηλή θερμοκρασία, αφού σε κάθε περίπτωση το αέριο καύσιμο πρέπει να ψύχεται πριν από τη συμπίεση. Ο αέρας για έναν αεριοποιητή χαμηλής πίεσης μπορεί να εξαχθεί από τον αεριοστρόβιλο και να ελαττωθεί η πίεσή του (άμεσος, χαμηλής πίεσης αεριοποιητής) ή να παρασχεθεί ανεξάρτητα (έμμεσος αεριοποιητής).

Η υψηλής πίεσης αεριοποίηση ευνοεί τον θερμό, υπό πίεση καθαρισμό του καυσίμου αερίου και την τροφοδοσία του στον θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου σε υψηλή θερμοκρασία ($\sim 538^\circ\text{C}$) και ικανοποιητικά υψηλή πίεση για τον έλεγχο της ροής και της πτώσης πίεσης στο θάλαμο καύσης. Ο αέρας για έναν υψηλής πίεσης άμεσο αεριοποιητή εξάγεται από τον αεριοστρόβιλο και συμπιέζεται πριν από την εισαγωγή του στον αεριοποιητή. Πάντως, για να υπάρξει πλήρης εκμετάλλευση της λειτουργίας υπό πίεση, πρέπει να αναπτυχθεί ένας αριθμός βιοηθητικών συστημάτων.

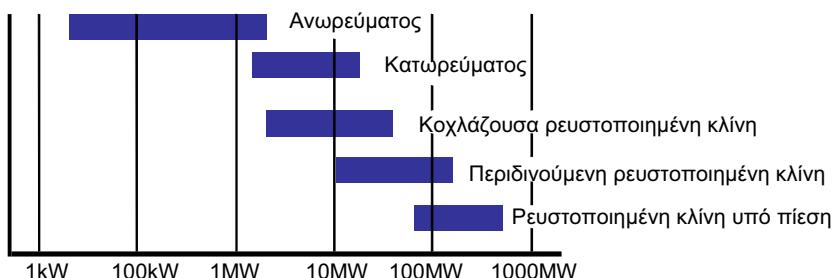
Η ψύξη, ο εν ψυχρώ καθαρισμός και η συμπίεση του αερίου καυσίμου επιβαρύνουν με εξοπλισμό ένα σύστημα έμμεσου αεριοποιητή και μειώνουν την απόδοσή του έως και 10%. Από την άλλη, τα υψηλής πίεσης λειτουργίας δοχεία του αεριοποιητή και καθαρισμού του αερίου και τα εξεζητημένα συστήματα τροφοδοσίας προσθέτουν κόστη και πολυπλοκότητα στα συστήματα αεριοποίησης υψηλής πίεσης, παρά τη μεγαλύτερη αποδοτικότητά τους. Από τα αποτελέσματα αρκετών μελετών προκύπτει ότι, προς το παρόν, υπάρχει μικρή διαφορά στο κόστος του ηλεκτρισμού μεταξύ των συστημάτων που εφαρμόζουν αεριοποίηση υψηλής και χαμηλής πίεσης.

Άλλη βασική παράμετρος είναι ο τύπος του αντιδραστήρα αεριοποίησης. Αυτοί κατά βάση λειτουργούν με τις ίδιες με τους παρεμφερείς θαλάμους καύσης αρχές και περιλαμβάνουν μονάδες σταθερής/κινητής κλίνης (κατωρεύματος ή ανωρεύματος), διάφορα συστήματα ρευστοποιημένης κλίνης, και αντιδραστήρες συρόμενης κλίνης.

Εξ αυτών, η σταθερή/κινητή κλίνη είναι η πιο απλή στην κατασκευή, τον έλεγχο και τη λειτουργία, και το σύστημα κατωρεύματος μπορεί να παράγει αέριο που απαιτεί μόνο περιορισμένο καθαρισμό ως προς την πίσσα και τα σωματίδια ώστε να καταστεί κατάλληλο για καύση σε μηχανές εσωτερικής καύσης και αεριοστροβίλους.

Ένα άλλο σημαντικό γνώρισμα της μονάδας αυτής είναι ότι, με τη χρήση προσθέτων όπως ο ασβεστόλιθος και ο δολομίτης μπορούν να παραμείνουν στην τέφρα μεγάλα ποσά όξινων αερίων (υδροχλώριο και υδρόθειο). Τα συστήματα ρευστοποιημένης και συρόμενης κλίνης, από την άλλη, παρότι ευπροσάρμοστα, είναι γενικά πιο δύσκολα στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία τους, πιο ακριβά, και προς το παρόν θεωρούνται ακατάλληλα για μικρής κλίμακας εφαρμογές κάτω του 1 MW.

Η επιλογή για μία εφαρμογή από ένα μεγάλο εύρος αεριοποιητών καθορίζεται από τα οικονομικά, και είναι συνάρτηση του μεγέθους, του τύπου και της διαθεσιμότητας του καυσίμου. Το σχήμα 6.9 παρουσιάζει την ενδεειγμένη επιλογή ανάλογα με τον τύπο και την ικανότητα του καυσίμου, παρότι πολλές από τις τεχνολογίες δεν έχουν ακόμα δοκιμαστεί στην αναγραφόμενη κλίμακα. Επιδεικτικά έργα επαληθεύουν το δυναμικό των τεχνολογιών της βιομάζας, ειδικότερα στις μεγάλες κλίμακες, αν και οι πλήρως εμπορικές εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής ακόμη κυοφορούν υψηλά τεχνικά ρίσκα.



Σχήμα 6.9. Δυναμικό εφαρμογής διάφορων τύπων αεριοποιητών βιομάζας
[Πηγή: Rensfelt, 1997]

6.3.4.2. Επιλογές κύκλου ισχύος

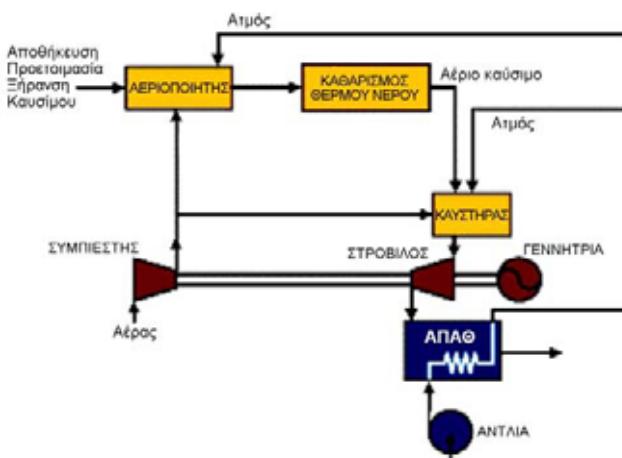
Η αεριοποίηση και η παραγωγή καθαρού αερίου καυσίμου παρέχει ένα ευρύ φάσμα επιλογών ισχύος, όπως είναι η χρήση προηγμένων συστημάτων ισχύος με καλύτερες αποδοτικότητες από αυτές των ατμοστροβίλων. Στο κάτω όριο της κλίμακας κόστους, οι αεριοποιητές που συνδυάζονται με έναν υψηλής απόδοσης αεριοστρόβιλο απλού κύκλου παρέχουν απλότητα και αποδοτικότητες συγκρίσιμες με αυτές του κύκλου Rankine. Ένας αεριοποιητής βιομάζας ρευστοποιημένης κλίνης (που δεν χρειάζεται απαραίτητα ατμό) μπορεί να αποτελεί την καλύτερη επιλογή γι' αυτόν το συνδυασμό.

Παραδοσιακά, η φτωχή απόδοση υπό μερικό φορτίο έχει περιορίσει τη χρήση των αεριοστροβίλων απλού κύκλου για ηλεκτροπαραγωγή αιχμής. Σύμφωνα με την τάση που διαμορφώνεται στις μεγάλης κλίμακας μονάδες, οι συνδυασμένοι κύκλοι αερίου και ατμού μαζί με τις παραλλαγές τους (π.χ. αεριοστρόβιλος έγχυσης ατμού - STIG, στρόβιλος υγρού αέρα - HAT) παρέχουν αποδοτικότητες του κύκλου ισχύος που

πλησιάζουν το 50% (6800 Btu/kWh). Η τεχνολογία αυτή είναι εμπορικά διαθέσιμη και αναμένεται να βελτιωθεί όσο οι κατασκευαστές των στροβίλων συναγωνίζονται για βελτιωμένη αποδοτικότητα, ρύθμιση των NO_x , και διαθεσιμότητα.

Ο αεριοστρόβιλος έγχυσης ατμού αποτελεί μία διασκευή του συνδυασμένου κύκλου, στον οποίο τα καυσαέρια του στροβίλου χρησιμοποιούνται σ' έναν ατμοπαραγωγό ανάκτησης θερμότητας (ΑΠΑΘ), παρέχοντας ευελιξία για εφαρμογές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού/ατμού. Όταν μειώνεται η ζήτηση για ατμό διεργασιών, ο ατμός από τον ΑΠΑΘ μπορεί να εγχυθεί στο θάλαμο καύσης και/ή στις βαθμίδες του στροβίλου. Ο εγχύομενος ατμός αποτελεί πρόσθετη μάζα που χρησιμοποιείται για να υποβοηθηθεί η οδήγηση του στροβίλου χωρίς να καταναλώνεται ισχύς στον συμπιεστή.

Καθώς η ειδική θερμότητα του μίγματος ατμού/αέρα είναι διπλάσια αυτής του αέρα, όταν χρησιμοποιείται έγχυση ατμού μπορεί να εξαχθεί περισσότερη ισχύς από τον στρόβιλο, ενώ ελαττώνονται η φλόγα και οι θερμοκρασίες του αερίου και εμποδίζεται ο ανεξέλεγκτος σχηματισμός NO_x έως και κατά 80%. Με την προσθήκη διάψυξης του συμπιεστή στον κύκλο STIG (ISTIG – σχ. 6.10) μπορεί μέχρι και να διπλασιαστεί η παραγωγή ενός αεριοστροβίλου απλού κύκλου, αθώντας την ολική αποδοτικότητα του κύκλου ισχύος πάνω από το 50%.



Σχήμα 6.10. Κύκλος αεριοστροβίλου έγχυσης ατμού με ενσωματωμένη αεριοποίηση

6.4. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΒΙΟ-ΙΣΧΥΟΣ

6.4.1. Κατάσταση της αγοράς και δυναμικό αυτής

Με εκτιμώμενο εγκατεστημένο δυναμικό παραγωγής 14.000 MW κατ' έτος, η βιομάζα αποτελεί τη μεγαλύτερη μη υδροηλεκτρική ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρισμού διεθνώς. Η βιομηχανία της βιομάζας διαφέρει από τις άλλες ανανεώσιμες στο ότι εμπλέκει τόσο τις γεωργικές και δασοκομικές κοινότητες όσο και τη βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό δημιουργεί εντάσεις και παρανοήσεις, καθώς συχνά οι απόψεις γύρω από τα πλεονεκτήματα των μακροπρόθεσμων συμβολαίων καυσίμου και τις συμβατικές υποχρεώσεις που αυτά συνεπάγονται για τις εταιρίες προμήθειάς του (συχνά πολύ μικρές) είναι πολύ διαφορετικές.

Αυτή η κατάσταση έχει αναχθεί σε βασικό εμπόδιο στην ανάπτυξη των ενεργειακών καλλιεργειών και γίνονται ακόμα προσπάθειες να βρεθούν μορφές συνεργασίας που να αντιμετωπίζουν αυτές τις διαφορές και να παρέχουν δίκαιες αποδόσεις και στις δύο πλευρές. Η πλειοψηφία των σχημάτων μετατροπής της βιομάζας σε ηλεκτρισμό αναπτύχθηκε στη χαρτοβιομηχανία και τη δασική βιομηχανία, όπου οι μεγάλες συμπράξεις και η ανάγκη διαχείρισης των αποβλήτων ήταν κρίσιμοι παράγοντες για την επιτυχία. Πέρα από τους τομείς αυτούς, τα εν λόγω σχήματα έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία μόνο σε χώρες όπου υλοποιήθηκαν ειδικές πολιτικές, περιλαμβανομένων των φοροαπαλλαγών και των επιδοτήσεων.

Τα μη διασυνδεδεμένα πολυσυναρτησιακά συστήματα παρέχουν την πιο μεγάλη ευκαιρία διεθνούς εξάπλωσης για τη βιο-ισχύ. Βραχυπρόθεσμα, είναι πιο πιθανό να βρεθεί αγορά για τον ηλεκτρισμό από βιομάζα εκεί όπου:

- τα υπολείμματα βιομάζας δημιουργούν πρόβλημα διάθεσης των αποβλήτων,
- η διάθεση χαμηλού κόστους υπολειμμάτων βιομάζας συνδυάζεται με μια έντονη αύξηση της ζήτησης για ηλεκτρισμό, ή
- οι φιλο-περιβαλλοντικές πολιτικές και οι ανησυχίες γύρω από την κλιματική αλλαγή ενθαρρύνουν την εφαρμογή του.

Η κατάσταση σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες εμπίπτει στην πρώτη και δεύτερη περίπτωση. Αν και η βιομάζα εκεί χρησιμοποιείται περισσότερο στη μαγειρική και τη θέρμανση χώρων, ένα σημαντικό ποσό χρησιμοποιείται και στη βιομηχανία για την παραγωγή ατμού διεργασιών και ηλεκτρισμού. Οι εν λόγω χρήσεις αφορούν σχεδόν αποκλειστικά τους τομείς της μεταποίησης γεωργικών προϊόντων και ξύλου. Μέχρι πρόσφατα, οι προτεραιότητες γι' αυτούς ήταν η απόρριψη των υπολειμμάτων και το μικρότερο δυνατό κόστος κεφαλαίου σε σχέση με την απαιτούμενη διαθεσιμότητα.

Η αποδοτικότητα (συνήθως κάτω από 20% και συχνά μονοψήφια) δεν υπήρξε ποτέ προτεραιότητα αφού σπάνια υπήρχε πελάτης για την περίσσεια του ηλεκτρισμού που θα προέκυπτε από τις βελτιώσεις. Όσο όμως οι αναπτυσσόμενες χώρες επεκτείνουν την ηλεκτρική τους υποδομή, οι μονάδες αγρο-επεξεργασίας αποτελούν μια καλή ευκαιρία για την ανάπτυξη πηγών ηλεκτρισμού χαμηλού κόστους με την εγκατάσταση πιο αποδοτικού εξοπλισμού παραγωγής. Για παράδειγμα, ένα τυπικό ζαχαρουργείο μπορεί να εξάγει μέχρι και 8 MW_e υλοποιώντας απλές βελτιώσεις, ενώ η παραγωγή αυτή θα μπορούσε να διπλασιαστεί με την εγκατάσταση πιο εξελιγμένης τεχνολογίας.

Σύμφωνα με προβλέψεις, εάν εφαρμοστούν κατάλληλες πολιτικές και αναπτυχθεί και διαδοθεί η τεχνολογία, στο εγγύς μέλλον η βιομάζα θα αποδώσει σημαντικά ποσοστά ηλεκτρισμού σε πολλά κράτη. Ως παράδειγμα των κινήσεων σ' αυτήν την κατεύθυνση αναφέρεται η Βραζιλία, όπου τα προσεχή χρόνια αναμένονται μεγάλα ελλείμματα ισχύος σε τμήματα της χώρας λόγω της έλλειψης υδροηλεκτρικών έργων χαμηλού κόστους. Δεδομένου του μεγάλου πόρου βιομάζας και της βιομηχανίας ζάχαρης και αλκοόλ, είναι φυσικό οι αρχές της χώρας να στραφούν στον ηλεκτρισμό από βιομάζα.

Έτσι, πρόκειται να κατασκευαστεί ένας σταθμός ηλεκτροπαραγωγής 30 MW_e με αεριοποίηση που θα τροφοδοτηθεί αρχικά με τσιπς από μία φυτεία ευκαλύπτου. Εξάλλου, 150 οινοπνευματοποιίες ζαχαρότευτλων στο Sao Paulo με δυναμικό ισχύος περίπου 200 MW_e, που διαθέτουν παλιούς, μη αποδοτικούς ατμοστροβίλους, έχουν συμφωνήσει να επενδύσουν στην τεχνολογία των αεριοστροβίλων, ώστε κατά τα επόμενα δεκαπέντε χρόνια να παράσχουν στις τρεις εταιρείες ηλεκτρισμού της πολιτείας ένα δυναμικό της τάξης των 3000 MW_e, από την ίδια ποσότητα τεύτλων.

Στις ΗΠΑ, που εμπίπτουν στην τρίτη κατηγορία αγοράς, το εγκατεστημένο δυναμικό από βιομάζα είναι περίπου 8000 MW_e, όπου χρησιμοποιούνται κυρίως υπολείμματα βιομάζας με τις παραδοσιακές τεχνολογίες μετατροπής. Με το Εθνικό Πρόγραμμα Βιο-ισχύος προβλεπόταν να προστεθούν άλλα 6000 MW_e από βιομάζα μέχρι το τέλος του 2000, στα πλαίσια μιας συνεργατικής στρατηγικής όπου εμπλέκεται η βιομηχανία, η ερευνητική κοινότητα, οι ρυθμιστικές αρχές, οι εν δυνάμει χρήστες, και οι πολιτειακές και ομοσπονδιακές υπηρεσίες. Σύμφωνα με πρόσφατες προβλέψεις, μέχρι το 2010 το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής από βιομάζα θα έχει ανέλθει σε 26.000 MW_e περίπου στις ΗΠΑ και σε 50.000 MW_e παγκοσμίως.

Όσον αφορά την Ε.Ε., η παραγωγή ηλεκτρισμού από βιομάζα είναι σημαντική στις Σουηδία, Φιλανδία, Αυστρία και Δανία, κυρίως σε σχήματα ΣΗΘ στις βιομηχανίες χάρτου (έπεται η δασική βιομηχανία), και σε μεγάλα συστήματα τηλεθέρμανσης. Στις άλλες χώρες η βιομάζα χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή σε μικρότερη κλίμακα και συνήθως σε αγορές αιχμής ως συμπαραγωγή, ή ως τρόπος συμμόρφωσης με τις φιλοπεριβαλλοντικές πολιτικές. Καθώς η αεριοποίηση και οι άλλες προηγμένες διεργασίες βρίσκονται ακόμα σε εξελικτικό και επιδεικτικό στάδιο, η τεχνολογία που κυρίως χρησιμοποιείται είναι αυτή του συμβατικού κύκλου ατμού, ενώ εφαρμογές σύγκαυσης με άνθρακα υπάρχουν στη Σουηδία.

Όσον αφορά τα απόβλητα, ο ρυθμός αξιοποίησης δεν εξαρτάται μόνο από το κόστος και τη διαθεσιμότητα των εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας, αλλά και από τις εθνικές πολιτικές διαχείρισης των αποβλήτων. Για παράδειγμα, η υιοθέτηση της Κοινοτικής Οδηγίας για τις χωματερές στην Ε.Ε., βάσει της οποίας θα απαγορεύεται η ταφή των οργανικών υλικών χωρίς προηγούμενη επεξεργασία, θα επιτάχυνε την εφαρμογή εγκαταστάσεων καύσης των ΑΣΑ. Εάν επιτευχθεί η επιδιωκόμενη εκτροπή του 25-30% των αποβλήτων προς καύση μέχρι το 2010, η δυνατή παραγωγή ισχύος στην Ε.Ε. υπολογίζεται να είναι της τάξης των 2000 έως 2400 MW_e.

Εκτός της Ε.Ε., οι βελτιώσεις στις πρακτικές διαχείρισης των αποβλήτων οδηγούν επίσης σε μια επέκταση της αγοράς και σε πιθανές ευκαιρίες εξαγωγών, κυρίως στη Βόρεια Αμερική και την Ιαπωνία, όπου έχει αναπτυχθεί υποδομή για την επεξεργασία των αποβλήτων. Εκτιμάται ότι, μέχρι το 2010 η διεθνής αγορά θα ανέλθει σε περίπου 5500 MW_e, δημιουργώντας 22.000 θέσεις εργασίας παγκοσμίως. Η διεθνής αγορά για τη χρήση του αέριου των χωματερών εκτιμάται ότι μέχρι το 2010 θα ισοδυναμεί με 4500 MW_e. Μέχρι τώρα έχει αναπτυχθεί μόνο το 15% αυτής, με πάνω από το 50% αυτής στις ΗΠΑ και τον Καναδά.

6.4.2. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η χρήση της βιομάζας για ηλεκτροπαραγωγή εμπεριέχει πολύπλοκα περιβαλλοντικά ζητήματα. Υπάρχει μια γενική ομολογία για τα παγκόσμια οφέλη από τη χρήση της βιομάζας (αέρια θερμοκηπίου), τα οποία όμως δεν έχουν δημοσιοποιηθεί επαρκώς και έτσι δεν έχουν γίνει κατανοητά στους λήπτες των αποφάσεων και το ευρύ κοινό. Το κλειδί για την επιτυχημένη ανάπτυξη της βιοϊσχύος είναι η αποδοτική χρήση της πηγής με σύγχρονα συστήματα μετατροπής που μεγιστοποιούν την παραγόμενη ενέργεια και ελαχιστοποιούν τα υποπροϊόντα των διεργασιών μετατροπής.

6.4.2.1. Ποιότητα του αέρα

Η ηλεκτροπαραγωγή με χρήση βιομάζας ή ορυκτών καυσίμων παράγει αερολύματα, όπως διοξείδιο του θείου (SO_2), οξείδια του αζώτου (NO_x) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Η χρήση της βιο-ισχύος παρέχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- **Μειωμένες εκπομπές θείου:** Οι περισσότερες μορφές βιομάζας περιέχουν πολύ μικρά ποσά θείου, οπότε ένας σταθμός ηλεκτροπαραγωγής βιομάζας εκπέμπει ελάχιστο διοξείδιο του θείου (SO_2), που είναι αίτιο της όξινης βροχής. Ο άνθρακας περιέχει συνήθως μέχρι 5% θείο και η σύγκαυση με βιομάζα μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές SO_2 του σταθμού σε σχέση με τη λειτουργία μόνο με άνθρακα. Υπάρχει μια σχέση περίπου ένα προς ένα μεταξύ της μείωσης του SO_2 και του ποσοστού της εισροής θερμότητας από βιομάζα (π.χ. η χρήση βιομάζας στο 5% της εισροής θερμότητας σε μία μονάδα ηλεκτροπαραγωγής άνθρακα θα μειώσει τις εκπομπές SO_2 περίπου κατά 5%).
- **Μειωμένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου:** Πρόσφατα τεστ σύγκαυσης βιομάζας σε αρκετούς σταθμούς άνθρακα παγκοσμίως έχουν επιδείξει ότι οι εκπομπές των NO_x μπορούν να μειωθούν σε σχέση με τη λειτουργία μόνο με άνθρακα. Έτσι, με την προσεκτική ρύθμιση της διεργασίας της καύσης, η μείωση των NO_x είναι διπλάσια του λόγου της εισροής θερμότητας από βιομάζα, δηλαδή για σύγκαυση βιομάζας στο 5% της εισροής θερμότητας θα επιτευχθεί μείωση των NO_x της μονάδας κατά 10%. Εξάλλου, ακόμα μεγαλύτερες μειώσεις στα NO_x μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση της βιομάζας σε διάταξη μετάκαυσης, όπου έως και το 20% του καυσίμου του λέβητα εγχύεται επάνω από την κύρια ζώνη καύσης.
- **Μειωμένες εκπομπές άνθρακα:** Τα φυτά κατά την ανάπτυξή τους απορροφούν CO_2 . Όταν η παραγωγή της βιο-ισχύος αντιμετωπίζεται ως συνεχής κύκλος, π.χ. καλλιεργώντας ενεργειακά φυτά ή επαναφυτεύοντας αγροτεμάχια, αποτελεί έναν τρόπο ανακύκλωσης του άνθρακα. Έτσι, μπορεί η βιο-ισχύς να θεωρηθεί ως μία λύση ηλεκτροπαραγωγής που δεν διαταράσσει το ισοζύγιο του άνθρακα.
- **Μείωση άλλων εκπομπών:** Αέριο μεθάνιο (CH_4) παράγεται στις χωματερές από την αποσύνθεση υλικού βιομάζας, αλλά και από την αποσύνθεση της ζωικής κοπριάς, είτε αυτή επιστρώνεται στο έδαφος είτε αφήνεται ακάλυπτη σε στέρνες. Το μεθάνιο (το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου) εκτονώνεται συνήθως κατ' ευθείαν στον αέρα, αλλά μπορεί να συλλεχθεί και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

- **Μειωμένες οσμές:** Η χρήση της ζωικής κοπριάς και του αερίου των χωματερών για την παραγωγή ενέργειας μπορεί να μειώσει τις οσμές που συνδέονται με τις συμβατικές εφαρμογές απόρριψης ή εδάφους.

6.4.2.2. Ποιότητα των υδάτων

Η ζωική κοπριά περιέχει άζωτο, φώσφορο, κάλιο, χλώριο, και μικρά ποσά θείου, που μπορεί να μολύνουν το νερό. Κανονικά, η κοπριά χρησιμοποιείται ως λίπασμα ή χωνεύεται σε στέρνες παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας των λυμάτων. Και οι δύο αυτές εφαρμογές εδάφους μπορούν να προκαλέσουν τη διήθηση των παραπάνω ουσιών στα υπόγεια ύδατα ή την άμεση απόληξή τους σ' έναν υδροφόρο με την απορροή των όμβριων υδάτων. Η χρήση της ζωικής κοπριάς ως πηγής καυσίμου περιορίζει τη μόλυνση των υδάτων μειώνοντας την απορροή των ουσιών αυτών.

6.4.2.3. Χρήσεις των γαιών

Τα ξυλώδη υλικά και τα υπολείμματα των κήπων αποτελούν το 20% περίπου του συνολικού ποσού των μη βλαβερών αποβλήτων που οδηγούνται στις χωματερές. Ένα μέρος των υλικών αυτών είναι μολυσμένο και κατάλληλο μόνο για απόρριψη. Η χρήση των "καθαρών" αποβλήτων ως καύσιμο αποσπά μία ποσότητα από τα υλικά που απορρίπτονται στις χωματερές, επεκτείνοντας έτσι τη ζωή/χωρητικότητά τους. Αυτή η πρακτική επίσης εξαλείφει τις εκπομπές μεθανίου που θα προέρχονταν από την ενταφιασμένη βιομάζα.

Από την άλλη, οι ενεργειακές καλλιέργειες αναπτύσσονται σε υπο-αξιοποιούμενες γεωργικές εκτάσεις. Γενικά, δεν αντικαθιστούν βοσκότοπους, υδροβιότοπους, φυσικά δάση ή γεωργική γη υψηλής αξίας, ενώ απαιτούν λιγότερα παρασιτοκόνα και ζιζανιοκόνα σε σχέση με τις άλλες καλλιέργειες, μειώνοντας έτσι την απορροή χημικών στα επιφανειακά ή υπόγεια ύδατα. Τα συστήματα των ριζών συγκρατούν το χώμα και μειώνουν τη διάβρωση, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα των επιφανειακών υδάτων, φιλτράρουν τα γεωργικά χημικά εμποδίζοντάς τα να εισέλθουν στα ρυάκια, και ανακόπτουν τα θρεπτικά στοιχεία από το να εισέλθουν στα υπόγεια ύδατα.

6.4.3. Οικονομικές επιπτώσεις

Από τη βιομάζα μπορεί να ωφεληθεί η ενεργειακή ασφάλεια των κρατών καθώς, με τη διεύρυνση του φάσματος των πηγών τροφοδοσίας τους, οι χώρες οχυρώνονται, ενδυναμώνουν την οικονομία τους, και βελτιώνουν το εμπορικό τους ισοζύγιο. Ένα εξίσου βασικό όφελος είναι η ανάπτυξη της αγροτικής οικονομίας, αφού η βιομάζα είναι ογκώδης και η μεταφορά της ακριβή, οπότε οι εγκαταστάσεις μετατροπής της θα πρέπει να είναι κοντά στους τόπους διάθεσής της. Εξάλλου, οι αγρότες αναζητούν άλλες εμπορικές καλλιέργειες ή πηγές εσόδων ενώ, όσο αναπτύσσεται ο πληθυσμός πέρα από τις αστικές και προαστιακές περιοχές, τόσο μεγαλώνουν οι ανάγκες για ηλεκτροδότηση των αγροτικών περιοχών.

Η χρήση των υπολειμμάτων των καλλιεργειών ως καυσίμων για ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να βελτιώσει τα οικονομικά της γεωργίας μειώνοντας το κόστος απόρριψης και παρέχοντας εναλλακτικές πηγές εσόδων. Οι ενεργειακές καλλιέργειες ανοίγουν μία εντελώς νέα αγορά για τη γεωργία, που έχει το δυναμικό να αποτελέσει μια σταθερή πηγή εισοδήματος στην αγροτική κοινωνία. Για παράδειγμα, σύμφωνα με εκτιμήσεις του Ινστιτούτου EPRI, η παραγωγή 5 πεντάκις εκατ. Btu ηλεκτρισμού σε 20 εκατ. εκτάρια γης θα αύξανε το γεωργικό εισόδημα κατά \$12 δισεκατ. ετησίως (για σύγκριση, οι ΗΠΑ καταναλώνουν περίπου 90 πεντάκις εκατ. Btu ανά έτος).

Τέλος, δεν είναι πλέον επιθυμητή για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών η κατασκευή μεγάλων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής βάσης, ειδικά στις περισσότερο απομακρυσμένες περιοχές. Οι μικρές εγκαταστάσεις βιο-ισχύος έχουν μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μπορούν να λειτουργούν με τις τοπικά παραγόμενες πρώτες ύλες. Συμπερασματικά, η χρήση της βιομάζας επιφέρει τριπλό όφελος στον αγροτικό πληθυσμό, αφού διατηρεί τον πλούτο κοντά, αμείβει τους αγρότες για την παραγωγή των καυσίμων βιομάζας και παρέχει καθαρή ενέργεια.

6.4.4. Εμπόδια για την περαιτέρω διείσδυση

Το κύριο εμπόδιο στην ευρεία αποδοχή του ηλεκτρισμού από βιομάζα είναι το κόστος απόδοσής του, που μπορεί να είναι μέχρι και τριπλάσιο του κόστους του ηλεκτρισμού που παράγεται από ορυκτά καύσιμα. Καίτοι οι υφιστάμενοι φόροι και επιχορηγήσεις μπορούν να καταστήσουν εφικτή την εφαρμογή, θα πρέπει να διατηρηθούν σε παραδεκτά επίπεδα και τελικά να αποσυρθούν. Επομένως, η αντιμετώπιση των τριών στοιχείων που διαμορφώνουν το μοναδιαίο κόστος του ηλεκτρισμού, δηλαδή το κεφάλαιο, το καύσιμο και η λειτουργία, είναι άμεσης προτεραιότητας.

Οι σύγχρονες τεχνολογίες μετατροπής (δηλ. αεριοποίηση και πυρόλυση) παρέχουν μεγάλες αποδοτικότητες ηλεκτροπαραγωγής. Πάντως, αυτές δεν έχουν δοκιμαστεί εμπορικά και αντιμετωπίζουν πολλά εμπόδια πριν καταστούν πλήρως αποδεκτές και ενσωματωθούν στις παραδοσιακές ενεργειακές αγορές, π.χ. προβλήματα:

- τεχνολογικά και λειτουργίας και συντήρησης ($\Lambda & \Sigma$),
- χρηματοδότησης και σχετικών δαπανών,
- τροφοδοσίας καυσίμων και προμηθειών,
- αποδοχής από την αγορά και καθιέρωσης.

Έτσι, παρότι σήμερα υπάρχουν επιδεικτικές εφαρμογές σύγκαυσης και αεριοποίησης σε αρκετές εταιρείες ηλεκτρισμού, τα εναπομείναντα τεχνολογικά εμπόδια αφορούν:

- Την εμπορευσιμότητα της τέφρας – Από διάφορα εθνικά και διεθνή πρότυπα δεν επιτρέπεται η παρουσία οργανικών υλών στην τέφρα που χρησιμοποιείται για επίστρωση. Από δοκιμές έχει προκύψει ότι η τέφρα της σύγκαυσης δεν επηρεάζει τις ιδιότητες αντοχής, και γίνονται προσπάθειες για την αλλαγή των προτύπων.
- Τη διάβρωση – Το υψηλό περιεχόμενο σε χλώριο μερικών ποωδών καλλιεργειών έχει προκαλέσει διάβρωση στους εναλλάκτες θερμότητας. Η απελευθέρωση των

ενώσεων χλωρίου μπορεί να εμποδιστεί με πρόσθετα θείου. Οι προκύπτουσες εκπομπές πάντως μπορεί να αναιρέσουν τις θετικές επιπτώσεις της βιομάζας.

- Τις εκπομπές NO_x – Γενικά, με τη σύγκαυση βιομάζας προκύπτουν χαμηλότερες εκπομπές NO_x από αυτές του άνθρακα. Πάντως, για ορισμένες καλλιέργειες έχει παρατηρηθεί ότι τα επίπεδα NO_x αυξάνουν. Ένα στάδιο μετάκαυσης με βιοάεριο ή φυσικό αέριο συνιστάται για τη μείωση των εκπομπών NO_x .

Στη χρήση της βιομάζας για ηλεκτροπαραγωγή μεγάλη σημασία έχουν τα οικονομικά εμπόδια. Ένα μέρος του κόστους συνδέεται με τον κίνδυνο, πραγματικό ή υποθετικό, της αδοκίμαστης τροφοδοσίας με καύσιμο (π.χ. μικρού κύκλου θάμνοι) ή τεχνολογίας μετατροπής (αεριοποίηση, πυρόλυση, σύγκαυση). Αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με την εμπλοκή των μεγάλων, οικονομικά σταθερών εταιρειών ηλεκτρισμού, οι οποίες πάντως εστιάζουν στα τελικά κέρδη και είναι επιφυλακτικές με τις τεχνολογίες αβέβαιης βιωσιμότητας. Τα κρατικά κίνητρα είναι σημαντικά στον τομέα αυτό.

Η προμήθεια του καυσίμου έχει αναχθεί σε ένα από τα πιο περίπλοκα θέματα της εγκατάστασης υπηρεσιών βιο-ισχύος. Τα καύσιμα αυτά στην καλύτερη περίπτωση είναι καθαρά υποπροϊόντα ξύλου από εγκαταστάσεις αρχικής επεξεργασίας δασικών προϊόντων, όπως είναι τα πριονιστήρια ή οι μονάδες χάρτου και πολτού. Πάντως, όταν η κατάλληλη μονάδα δεν βρίσκεται εντός μιας εφικτής ακτίνας μεταφοράς (π.χ. κάτω από 80 km), πρέπει να βρεθούν αξιόπιστες εναλλακτικές πηγές. Ένα σημαντικό θέμα είναι η ποιότητα και η ποσότητα των υλικών που παραδίδονται στη μονάδα, οι οποίες πρέπει να είναι σταθερές και αξιόπιστες για την αποδοτική λειτουργία της.

Η αποδοχή από την αγορά και η καθιέρωση είναι το βασικότερο εμπόδιο στη χρήση της βιο-ισχύος, συμπεριλαμβανομένων πολλών σχετιζόμενων με την απελευθέρωση της αγοράς και την παγκόσμια θέρμανση κινητήριων δυνάμεων και εμποδίων. Οι κινητήριες δυνάμεις της αγοράς ειδικότερα περιλαμβάνουν:

- τα Πρότυπα Χαρτοφυλάκια για τις Ανανεώσιμες Πηγές και άλλες πρωτοβουλίες,
- τις πιθανές εμπορικές πιστώσεις για τον άνθρακα,
- τη σύγκαυση ως το φθηνότερο μέσο για την επίτευξη περιστολών του άνθρακα,
- τη δημόσια απαίτηση για οικολογική ενέργεια,
- πιθανά κρατικά κίνητρα,
- την ανάπτυξη των γεωργικών και αγροτικών οικονομιών.

7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

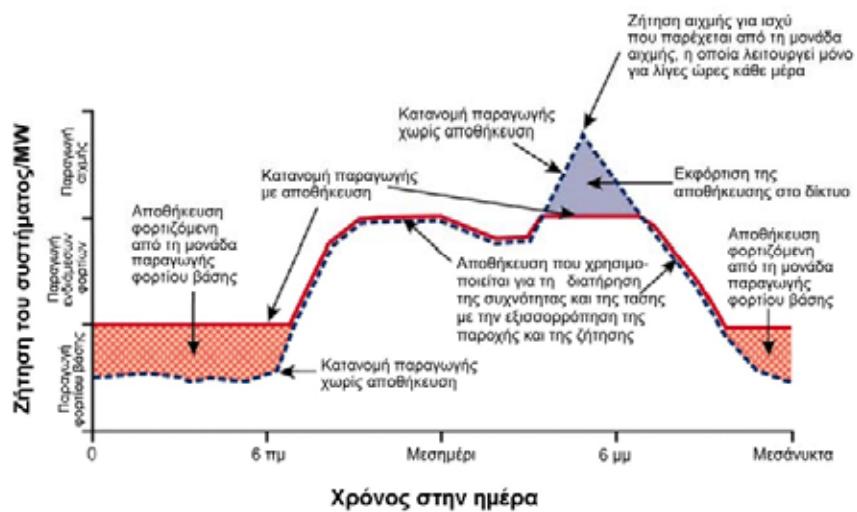
Η ποσότητα της ισχύος που παράγεται από τις διατάξεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), όπως είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι ανεμογεννήτριες, κυμαίνεται σημαντικά σε ωριαία, ημερήσια και εποχιακή βάση λόγω της μεταβολής στη διαθεσιμότητα του ήλιου, του ανέμου και των άλλων ανανεώσιμων πηγών. Η διακύμανση αυτή σημαίνει ότι η ισχύς μερικές φορές δεν είναι διαθέσιμη όταν απαιτείται ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχει πλεόνασμα ισχύος.

Η κυμαίνομενη παραγωγή από τις διατάξεις ΑΠΕ επίσης συνεπάγεται ότι απαιτείται εξοπλισμός ρύθμισης και ελέγχου της ισχύος για να μετατραπεί αυτή η παραγωγή σε μία μορφή (τάση, ρεύμα και συχνότητα) που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις ηλεκτρικές συσκευές. Στα επόμενα εξετάζονται οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση, τη ρύθμιση και τον έλεγχο της παραγωγής από τα συστήματα των ΑΠΕ, περιλαμβανομένων των συστημάτων ισχύος απομακρυσμένων περιοχών (RAPS) και των διασυνδεδεμένων στο δίκτυο εγκαταστάσεων.

7.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

7.2.1. Εισαγωγή

Η ενεργειακή αποθήκευση μπορεί να ενσωματωθεί στα συστήματα παραγωγής των ΑΠΕ, είτε στις αυτόνομες είτε στις διασυνδεδεμένες στο δίκτυο εγκαταστάσεις. Για τα αυτόνομα συστήματα η μονάδα αποθήκευσης είναι σημαντική για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και τη χρησιμοποίησή της όταν υφίσταται έλλειμμα στις ΑΠΕ. Στα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα, η μονάδα αποθήκευσης προσθέτει αξία στις διακοπτόμενες ανανεώσιμες πηγές διευκολύνοντας τον καλύτερο συσχετισμό της τροφοδοσίας με τη ζήτηση.



Σχήμα 7.1. Η αρχή της ενεργειακής αποθήκευσης

Σε συνδυασμό με την ανανεώσιμη πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αυξήσει την αξία του ηλεκτρισμού που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά

(Φ/Β) και τα αιολικά συστήματα, καθιστώντας ικανή την τροφοδοσία να συμπίπτει με την περίοδο μέγιστης ζήτησης της κατανάλωσης (σχήμα 7.1). Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να διευκολύνει την ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα των διακοπτόμενων ΑΠΕ, όπως είναι τα αιολικά και τα ηλιακά συστήματα, στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης παρέχουν στις ανανεώσιμες πηγές ευελιξία εγκατάστασης με ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η αποθήκευση μπορεί επίσης να διαδραματίσει έναν ευέλικτο και πολυπαραγοντικό ρόλο στο δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού όσον αφορά την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων. Ως παραγωγική πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση στις λειτουργικές δαπάνες ή την επένδυση κεφαλαίων. Τέοια παραδείγματα είναι η στρεφόμενη εφεδρεία για την προσωρινή υποστήριξη της παραγωγής, η ρύθμιση της συχνότητας για τις αυτόνομες μονάδες, η αναβολή εγκατάστασης δυναμικού νέων μονάδων παραγωγής. Επίσης, τα βάσει στρατηγικής εγκατεστημένα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να αυξήσουν τη χρησιμοποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού μεταφοράς και διανομής (Μ&Δ) και έτσι να μετατοπιστεί ή εξαλειφθεί η ανάγκη για δαπανηρές προσθήκες Μ&Δ.

Η ενεργειακή αποθήκευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της έντασης στις μεμονωμένες γραμμές μεταφοράς που είναι κοντά στη μέγιστη ονομαστική τιμή με τη μείωση του φορτίου αιχμής του υποσταθμού. Μεταξύ των ειδικών οφελών για τη Μ&Δ είναι η ευστάθεια των γραμμών μεταφοράς για σύγχρονη λειτουργία ώστε να αποτραπεί η καθίζηση του συστήματος, η ρύθμιση της τάσης ώστε να μην ξεφεύγει από το 5% της καθορισμένης τιμής, και η αναβολή της κατασκευής ή αναβάθμισης των γραμμών Μ&Δ, μετασχηματιστών, συστοιχιών πυκνωτών και υποσταθμών. Καθώς εξελίσσεται η αναδόμηση του συστήματος, μπορούν να ανακύψουν ευκαιρίες για τους χειριστές των ανεξάρτητων συστημάτων προκειμένου να εφαρμόσουν την αποθήκευση για να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση των περιφερειακών φορτίων.

Τέλος, η ενεργειακή αποθήκευση μπορεί να εξυπηρετήσει τους πελάτες ως μία επιλογή ελεγχόμενης διαχείρισης από μέρους της ζήτησης που επίσης μπορεί να παράσχει ανταποδοτικές υπηρεσίες, περιλαμβανομένων της ποιότητας ισχύος σε βυθίσεις ή κυματισμούς που διαρκούν λιγότερο από 5 δευτερόλεπτα, της αδιάλειπτης τροφοδοσίας με ηλεκτρικό ρεύμα σε διακοπές λειτουργίας που διαρκούν για περίπου 10 λεπτά, και της μείωσης της ζήτησης αιχμής ώστε να ελαττωθούν οι λογαριασμοί του ηλεκτρισμού. Έχουν αναπτυχθεί ή τελούν υπό ανάπτυξη διάφορες τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης για εφαρμογές ηλεκτρικής ισχύος, κάθε μία από τις οποίες συνοψίζεται στα επόμενα.

7.2.2. Τεχνολογία μπαταριών

Τελευταία, η εξέλιξη της τεχνολογίας αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως επικεντρώνεται στις διατάξεις αποθήκευσης μπαταριών. Σε μια χημική μπαταρία, η φόρτιση προκαλεί αντιδράσεις σε ηλεκτροχημικές ενώσεις ώστε να αποθηκευτεί υπό χημική μορφή η ενέργεια από μια γεννήτρια. Αντίστροφες χημικές αντιδράσεις αναγκάζουν τον ηλεκτρισμό να εκρεύσει από την μπαταρία κατά τη ζήτηση. Σήμερα

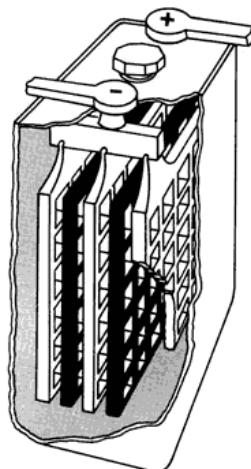
υπάρχουν σε χρήση ή τελούν υπό ανάπτυξη μία πληθώρα τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης μπαταρίας.

Οι τρέχουσες δραστηριότητες Ε&ΤΑ θα οδηγήσουν σε σημαντικές βελτιώσεις στο κόστος και την απόδοση των συστημάτων αποθήκευσης μπαταρίας. Προς το παρόν εμπορικά διαθέσιμες είναι οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου-οξέως και οι VRLA (ρυθμιζόμενες με βαλβίδα μολύβδου-οξέως), καθώς επίσης και μερικές αλκαλικές μπαταρίες (NiCd, NiMH). Οι μπαταρίες βρωμιδίου του ψευδάργυρου και λιθίου αποτελούν δύο εξελιγμένες μπαταρίες που βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης. Κάθε μία από αυτές τις τεχνολογίες έχει ιδιαίτερες δυνατότητες και αδυναμίες.

7.2.2.1. Μπαταρίες μολύβδου-οξέως

Βασικά, η τεχνολογία μπαταριών εμβάπτισης μόλυβδου σε οξύ για τα συστήματα αποθήκευσης ΑΠΕ αποτελεί την εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα μιας τεχνολογίας παρόμοιας με αυτήν που εφαρμόζεται στις μπαταρίες των αυτοκινήτων. Οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου σε οξύ κατασκευάζονται σε μεγάλους αριθμούς για πολλές χρήσεις και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και η τεχνολογία τους είναι πολύ οικεία στους κατασκευαστές. Πάντως, υπάρχουν μερικοί βασικοί περιορισμοί:

- απαιτούν συχνή συντήρηση για την αναπλήρωση του νερού που χάνεται κατά τη λειτουργία,
- είναι βαριές και δύσκολες στη μεταφορά τους,
- είναι περιορισμένη η αναμενόμενη μείωση στο κόστος τους.



Τα πλεονεκτήματα των μπαταριών εμβάπτισης μολύβδου-οξέως εντοπίζονται στη σχετικά μεγάλη διάρκεια της ζωής τους, την ανθεκτικότητά τους και την εμπορική διαθεσιμότητα της τεχνολογίας. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες των μπαταριών αυτών να αιτιολογούν καλύτερα τα αποκτήματά τους, και να αποσβένουν το κόστος των συστημάτων τους σε μακρά χρονική περίοδο. Οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου-οξέως είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μπαταρίες σε εφαρμογές Φ/Β.

Οι μπαταρίες VRLA χρησιμοποιούν την ίδια βασική ηλεκτροχημική τεχνολογία με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως, αλλά αυτές φράσσονται με μία βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης ώστε ουσιαστικά είναι σφραγισμένες. Επιπλέον, ο όξινος ηλεκτρολύτης είναι ακινητοποιημένος. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη προσθήκης νερού στις κυψέλες για να διατηρείται η κατάλληλη λειτουργία του ηλεκτρολύτη, ή ανάμιξης του ηλεκτρολύτη για να αποτρέπεται η διαστρωμάτωση. Η ανακύκλωση του οξυγόνου και οι βαλβίδες των VRLA αποτρέπουν τον εξαερισμό των αερίων υδρογόνου και οξυγόνου καθώς και την είσοδο αέρα στις κυψέλες.

Το υποσύστημα των μπαταριών μπορεί να χρειάζεται να αντικαθίσταται συχνότερα απ' ό,τι με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως, αυξάνοντας το σταθμισμένο κόστος του

συστήματος. Τα βασικά πλεονεκτήματα των VRLA έναντι των κυψελών εμβάπτισης σε οξύ είναι:

- η δραματική μείωση της απαραίτητης συντήρησης για να διατηρείται η μπαταρία σε λειτουργία,
- οι κυψέλες των μπαταριών μπορούν να συσσωματώνονται πιο στενά λόγω της ερμητικά κλειστής κατασκευής και του ακινητοποιημένου ηλεκτρολύτη, οπότε έτσι μειώνεται το ίχνος και το βάρος της μπαταρίας.

Τα μειονεκτήματα των VRLA είναι ότι είναι λιγότερο στιβαρές από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως, ενώ είναι πιο ακριβές και έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής. Οι VRLA θεωρούνται ως μη χρήζουσες συντήρησης και ασφαλείς, και έχουν καταστεί πολύ δημοφιλείς για την εφεδρική τροφοδοσία ισχύος σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών, καθώς επίσης και για την αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε περιπτώσεις όπου δεν μπορούν να διατεθούν ειδικοί χώροι για την τοποθέτηση των μπαταριών.

7.2.2.2. Αλκαλικές μπαταρίες

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου (NiCd) χρησιμοποιούνται ευρέως στις επικοινωνίες και τον ιατρικό εξοπλισμό και παρέχουν λογικές δυναμικότητες ενέργειας και ισχύος. Έχουν μεγαλύτερο κύκλο ζωής από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως, μπορούν να χρησιμοποιούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες (έως και τους -50°C) και μπορούν να επαναφορτιστούν ταχέως. Τέτοιες μπαταρίες έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε υπό ανάπτυξη ηλεκτρικά οχήματα. Τα κύρια προβλήματα με τις μπαταρίες NiCd είναι τα υψηλά κόστη των πρώτων υλών, η ανακυκλωσιμότητα, η τοξικότητα του καδμίου, και οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί στην επαναφορτισμότητα.

Οι μπαταρίες νικελίου - υδριδίου μετάλλου (NiMH) χρησιμοποιούνται προς το παρόν στους υπολογιστές, τον ιατρικό εξοπλισμό και σε άλλες εφαρμογές. Προσφέρουν πλεονεκτήματα ενέργειας και ισχύος και οι συνιστώσες τους είναι ανακυκλώσιμες. Τα κύρια προβλήματα των μπαταριών NiMH είναι το υψηλό κόστος τους, η υψηλή θερμοκρασία που δημιουργείται κατά τη φόρτιση, η ανάγκη ελέγχου της απώλειας υδρογόνου και η χαμηλή αποδοτικότητα των κυψελών τους.

7.2.2.3. Προηγμένες μπαταρίες

Μεταξύ των προηγμένων μπαταριών που μπορούν να υποστηρίζουν εφαρμογές των ΑΠΕ είναι το σύστημα ψευδάργυρου/βρωμιδίου, όπου χρησιμοποιείται ένας ρέοντας υδάτινος ηλεκτρολύτης βρωμιδίου του ψευδάργυρου. Ο μεταλλικός ψευδάργυρος αποτίθεται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, ενώ το βρωμίδιο που παράγεται στο θετικό αποθηκεύεται σε εξωτερικές δεξαμενές. Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των μπαταριών αυτών είναι το χαμηλό κόστος, η πολυ-συναρτησιακότητα, η ευκολία μεταφοράς, το χαμηλό βάρος και η ευέλικτη λειτουργία. Εξαιτίας της χημικής φύσης των αντιδραστηρίων και των συνθηκών λειτουργίας σε θερμοκρασία δωματίου, το περίβλημα και οι συνιστώσες μπορούν να κατασκευάζονται από χαμηλού κόστους και ελαφρά υλικά διαμορφώσιμου πλαστικού και άνθρακα.

Τα κύρια μειονεκτήματα των μπαταριών ψευδάργυρου/βρωμιδίου επικεντρώνονται γύρω από τις απαιτήσεις συντήρησης, συμπεριλαμβανομένης της συντήρησης των αντλιών που απαιτούνται για την κυκλοφορία του ηλεκτρολύτη, και την κάπως χαμηλότερη ηλεκτρική απόδοση. Επίσης, ο ψευδάργυρος που επικάθεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης πρέπει να αφαιρείται εντελώς περιοδικά. Άλλες προηγμένες μπαταρίες περιλαμβάνουν τις μπαταρίες ιόντος λιθίου και πολυμερούς λιθίου που λειτουργούν σε ή κοντά στις θερμοκρασίες περιβάλλοντος και μπορούν να καταστούν κατάλληλες για εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Οι επαναφορτίζομενες μπαταρίες λιθίου έχουν εισαχθεί ήδη στην αγορά για τα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης και άλλο φορητό εξοπλισμό σε μεγέθη μικρού κομβίου και κυλινδρικού πρίσματος. Στα πλεονεκτήματα των μπαταριών λίθιου περιλαμβάνεται η υψηλή ειδική ενέργεια τους (τέσσερις φορές αυτή των μπαταριών μολύβδου-οξέως) και η διατήρηση της φόρτισης. Εντούτοις, παραμένει μια επίμοχθη πρόκληση η διεύρυνση στα μεγέθη, τα επίπεδα ισχύος και τον κύκλο ζωής που απαιτούνται για τις μεγάλες εφαρμογές.

7.2.2.4. Σύγκριση των διάφορων τύπων μπαταριών

Ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος τύπος μπαταριών στις εφαρμογές ΑΠΕ είναι οι μολύβδου-οξέως επειδή είναι φθηνές και ευρέως διαθέσιμες. Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου χρησιμοποιούνται σε ψυχρά κλίματα, όπως είναι οι πολικές περιοχές. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η διάρκεια ζωής κάθε τύπου είναι ισάξια. Εντούτοις, σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας μία κυψέλη νικελίου-καδμίου διαρκεί περισσότερο για τους ακόλουθους λόγους:

- δεν διαβρώνονται εύκολα οι πλάκες της,
- δεν αντιμετωπίζει το φαινόμενο της θείωσης και της διαστρωμάτωσης.

Στο εγγύς μέλλον οι κυλινδρικές και οι επίπεδης πλάκας μπαταρίες μολύβδου-οξέως θα κυριαρχήσουν στην αγορά. Οι πλακέ μπαταρίες νικελίου-καδμίου εφαρμόζονται εξίσου καλά στις εφαρμογές των ΑΠΕ, καθώς λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και μπορούν να αποφορτίζονται έως και κάτω από το 10% της ονομαστικής τους χωρητικότητας. Είναι όμως πιο ακριβές και έτσι χρησιμοποιούνται μόνο όταν αναμένονται υψηλή αξιοπιστία ή αντίξοες κλιματικές συνθήκες. Το πλήρες εύρος των χαρακτηριστικών λειτουργίας των διάφορων τύπων μπαταριών παρέχεται στον πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1. Χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων μπαταριών

Τύπος	Θερμοκρασίες λειτουργίας	Ειδική ενέργεια (Wh/kg)	Αριθμός κύκλων επαναφόρτισης	Ειδική ισχύς (W/kg) διαρκής/30s	Αποδοτικότητα (φόρτιση – εκφόρτιση)	Κόστος (€/kWh)
Pb/acid/PbO ₂	-20°C - +50°C	25 - 45	300 – 1500	80 / 150	0,75 – 0,85	110 - 230
NiCd – NiMH	-40°C - +40°C	25 - 65	1000 – 2000	75 / 250	0,60 – 0,75	400 – 1200
Zn-Br	Περιβάλλοντος	60 - 70	500	90 / 110	0,65 – 0,70	300

Πολυμερούς Li	+60°C - +90°C	110 -150	300 - 600	50 / 250	0,90	150 – 200*
Ιόντων Li	0°C – 50°C	80 -120	200 - 1000	50 / 200	0,85	250 – 400*

* αναμενόμενο κόστος στη φάση της βιομηχανικής παραγωγής

7.2.2.5. Διαστασιολόγηση μπαταριών

Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις στη διαστασιολόγηση των μπαταριών για τις εφαρμογές ΑΠΕ:

- Σε αυτόνομες εφαρμογές, μερικοί υπεύθυνοι ανάπτυξης συστημάτων έχουν διαστασιολογήσει τις μπαταρίες ώστε να παρέχουν υποστήριξη 3 έως 7 ημερών.
- Η στρατηγική διαστασιολόγησης για τις διασυνδεδεμένες στο δίκτυο εφαρμογές εξαρτάται από τις χρήσεις του συστήματος και τα τιμολόγια της τοπικής εταιρείας ηλεκτρισμού. Για παράδειγμα, στις εφαρμογές ποιότητας ισχύος απαιτούνται μπαταρίες διαστασιολογημένες ώστε να παρέχουν σχεδόν στιγμιαίες εκφορτίσεις πλήρους ισχύος για μόνο 15 λεπτά υποστήριξης. Μια εφαρμογή εξομάλυνσης αιχμών για ένα σύστημα ΑΠΕ μπορεί να απαιτεί από την μπαταρία την ενίσχυση της παραγωγής της γεννήτριας ώστε να ανταποκρίνεται στα φορτία αιχμής για 1-2 ώρες ημερησίως. Εάν δεν είναι σημαντική η διαφορά μεταξύ της κοστολόγησης του ηλεκτρισμού εντός και εκτός των ωρών αιχμής, τότε η μπαταρία μπορεί να διαστασιολογηθεί για μία ώρα λειτουργίας και, όταν δεν είναι διαθέσιμη η μονάδα ΑΠΕ, ο ιδιοκτήτης της εγκατάστασης μπορεί να αγοράζει ενέργεια από το δίκτυο. Πάντως, εάν η διαφορά μεταξύ των εντός και εκτός αιχμής τιμολογίων είναι σημαντική, τότε πρέπει να διεξαχθεί μία οικονομική ανάλυση για να καθοριστεί το βελτιστού μέγεθος του συστήματος των μπαταριών.

Διάφοροι υπεύθυνοι ανάπτυξης βελτιστοποιούν την εγκατάσταση ΑΠΕ αλλά όχι το σύστημα των μπαταριών, επιλέγοντας 7-10 ώρες υποστήριξης με μπαταρίες στις περιπτώσεις διακοπής της λειτουργίας. Σε πολλές περιπτώσεις, οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ απαιτούν μόνο ελάχιστη υποστήριξη από μπαταρίες ώστε να προστεθεί αξία στην παραγόμενη από τις ΑΠΕ ηλεκτρική ενέργεια. Εάν το σύστημα μετάδοσης έχει μεγάλο φορτίο, οι μπαταρίες μπορούν να αποθηκεύσουν την ανανεώσιμη ενέργεια που θα χανόταν κατά τις ώρες στις οποίες περιορίζεται η υπηρεσία της μετάδοσης, αποδίδοντας αργότερα την ηλεκτρική ενέργεια.

7.2.3. Αντλούμενα υδροηλεκτρικά

Τα αντλούμενα υδροηλεκτρικά βρίσκονται σε χρήση από το 1929, καθιστώντας τα την παλαιότερη από τις τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης κεντρικού σταθμού. Στην πραγματικότητα, έως το 1970 ήταν η μόνη εμπορικά διαθέσιμη επιλογή αποθήκευσης για τις εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Οι συμβατικές εγκαταστάσεις αντλούμενων υδροηλεκτρικών αποτελούνται από δύο μεγάλους ταμιευτήρες, έναν που βρίσκεται στο βασικό επίπεδο και ένα δεύτερο σε διαφορετική στάθμη. Το νερό αντλείται στον άνω ταμιευτήρα όπου μπορεί να αποθηκευτεί ως δυναμική ενέργεια.

Στο σχήμα 7.2 παρουσιάζεται μια τέτοια εγκατάσταση αποθήκευσης με άντληση που βρίσκεται στο Turlough Hill της Ιρλανδίας.



Σχήμα 7.2. Εναέρια άποψη των άνω και κάτω ταμιευτήρων της εγκατάστασης αποθήκευσης με άντληση στο Turlough Hill (Ιρλανδία)

Κατά τη ζήτηση, το νερό απελευθερώνεται πίσω προς τον χαμηλότερο ταμιευτήρα, διερχόμενο μέσα από υδροστροβίλους που παράγουν ηλεκτρική ισχύ μέχρι 1000 MW. Στα εμπόδια αύξησης της χρήσης αυτής της τεχνολογίας περιλαμβάνονται οι υψηλές δαπάνες κατασκευής και οι μακροί χρόνοι υλοποίησης, καθώς επίσης και γεωγραφικοί, γεωλογικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί που σχετίζονται με τη σχεδίαση των ταμιευτήρων. Τελευταία, οι προσπάθειες που στοχεύουν στην αύξηση της χρήσης της υδραυλικής αποθήκευσης με άντληση στρέφονται στην ανάπτυξη υπόγειων δραστηριοτήτων.

7.2.4. Ενεργειακή αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (ΕΑΣΑ)

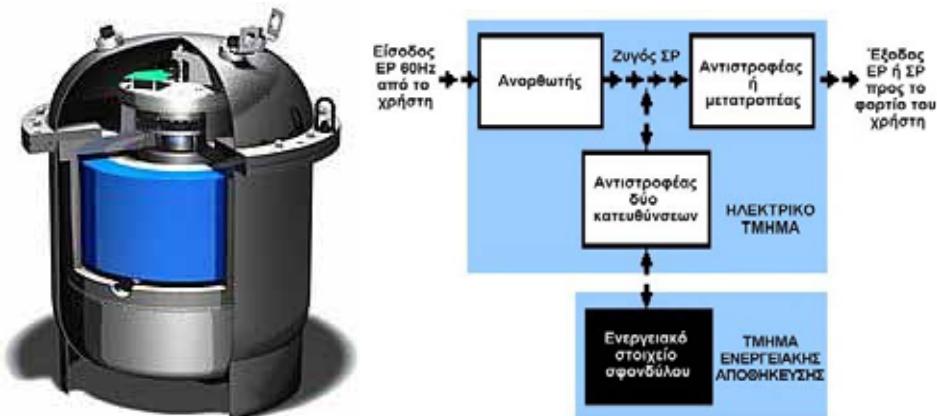
Στις εγκαταστάσεις ΕΑΣΑ χρησιμοποιείται ενέργεια εκτός αιχμής για να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί αέρας σε ένα αεροστεγές υπόγειο φυλάκιο. Κατά τη ζήτηση, ο αέρας αποδεσμεύεται από το φυλάκιο, θερμαίνεται και εκτονώνεται σ' ένα στρόβιλο καύσης για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Την περίοδο αυτή, οι κατασκευαστές μπορούν να παράσχουν εξοπλισμό ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα για εγκαταστάσεις που κυμαίνονται από 5 έως 350 MW. Από μελέτες έχει προκύψει ότι η τεχνολογία αυτή είναι ανταγωνιστική με τους στροβίλους καύσης και τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου, ακόμη και χωρίς να λαμβάνονται υπόψη μερικά από τα μοναδικά οφέλη της ενεργειακής αποθήκευσης.

7.2.5. Σφόνδυλοι

Οι σφόνδυλοι χρησιμοποιούνται προς το παρόν για διάφορες μη ηλεκτροπαραγωγές εφαρμογές. Εντούτοις, πρόσφατα οι ερευνητές άρχισαν να διερευνούν την ενεργειακή αποθήκευση και για τις εφαρμογές αυτού του είδους. Μια διάταξη αποθήκευσης

σφονδύλου αποτελείται από ένα σφόνδυλο που περιστρέφεται σε πολύ υψηλή ταχύτητα και μία ενσωματωμένη ηλεκτρική συσκευή που μπορεί να λειτουργεί είτε ως κινητήρας για να περιστρέψει το σφόνδυλο και να αποθηκεύει ενέργεια, είτε ως γεννήτρια για να παράγει ηλεκτρική ισχύ κατά τη ζήτηση με χρήση της ενέργειας που αποθηκεύτηκε στο σφόνδυλο (βλ. σχήμα 7.3).

Η χρήση μαγνητικών τριβέων και ενός θαλάμου υπό κενό βοηθά στη μείωση των ενεργειακών απωλειών. Ο βελτιστος σχεδιασμός των σφονδύλων επηρεάζεται από τη σωστή συσχέτιση μεταξύ της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών των υλικών, με αποτέλεσμα οι μηχανικοί να έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη υλικών με υψηλούς λόγους λειτουργικής αντοχής προς πυκνότητα. Οι σφόνδυλοι έχουν προταθεί για τη βελτίωση του εύρους, των επιδόσεων και της ενεργειακής αποδοτικότητας των ηλεκτρικών οχημάτων, ενώ η ανάπτυξη σφονδύλων για τα ηλεκτρικά συστήματα έχει στραφεί στις εφαρμογές ποιότητας ισχύος.

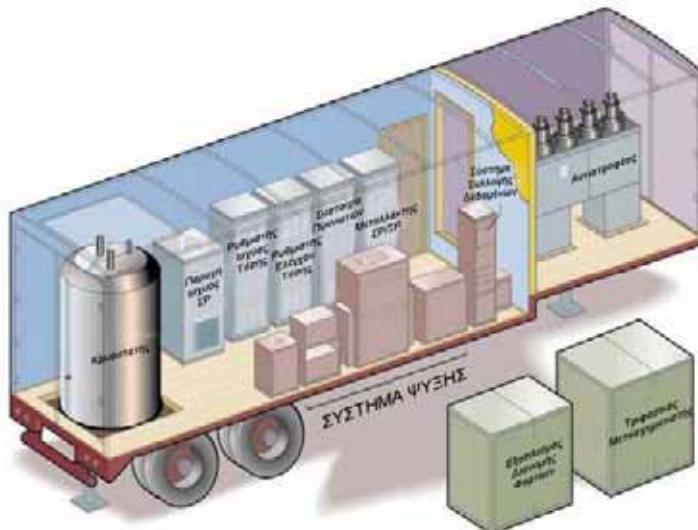


Σχήμα 7.3. Σχηματική άποψη μιας ενεργειακής μονάδας σφονδύλου και της λειτουργίας της

7.2.6. Υπεραγώγιμη μαγνητική ενεργειακή αποθήκευση (ΥΜΕΑ)

Σε ένα σύστημα υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης αποθηκεύεται ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος σε ένα πηνίο από υπεραγώγιμο υλικό. Για να διατηρηθεί το πηνίο στην υπεραγώγιμη κατάστασή του, βυθίζεται σε υγρό ήλιο που περιέχεται σε έναν μονωμένο υπό κενό κρυοστάτη. Η παραγωγή ενέργειας από ένα τέτοιο σύστημα εξαρτάται πολύ λιγότερο από το ρυθμό εκφόρτισης απ' ό,τι αυτή των μπαταριών. Τα συστήματα ΥΜΕΑ έχουν επίσης μεγάλο κύκλο ζωής και, κατά συνέπεια, είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν σταθερή, πλήρη ανακύκλωση και συνεχή ρυθμό λειτουργίας.

Αν και η διεξαγόμενη έρευνα αφορά τα μεγαλύτερα συστήματα της τάξης των 10 έως 100 MW, πρόσφατα έχει εστιαστεί σε μικρότερες διατάξεις της τάξης των 1 έως 10 MW. Οι διατάξεις μικρο-συστημάτων διατίθενται για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Στο σχήμα 7.4 παρατίθεται η σχηματική άποψη μιας μονάδας ΥΜΕΑ με απόδοση 3 MW πραγματικής ισχύος και ένα χρόνο απόκρισης <0,5ms. Αυτή η μονάδα μπορεί να συνδεθεί σε δίκτυα μεταφοράς από 69 έως 500 kV.



Σχήμα 7.4. Σχηματική άποψη μιας μονάδας ΥΜΕΑ απόδοσης 3 MW

7.2.7. Εξελιγμένοι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές

Οι υπερ-πυκνωτές βρίσκονται στα πρώιμα στάδια της ανάπτυξής τους ως τεχνολογία ενεργειακής αποθήκευσης για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής έχει συνιστώσες που σχετίζονται τόσο με μια μπαταρία όσο και με έναν πυκνωτή. Συνεπώς, η τάση ενός στοιχείου περιορίζεται σε μερικά Volt. Ειδικότερα, η φόρτιση αποθηκεύεται από τα ίοντα σε μία μπαταρία. Άλλα, όπως συμβαίνει και με ένα συμβατικό πυκνωτή, δεν συμβαίνει χημική αντίδραση κατά την απόδοση της ενέργειας. Ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής αποτελείται από δύο αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια, ένα διαχωριστή, τον ηλεκτρολύτη και συλλέκτες ρεύματος.



Χωρητικότητα	2700 Farads (-10% / +30%)
Τάση	2,5 V
Ονομαστικό ρεύμα	625 A (5 sec ρυθμός εκκένωσης στα 0,5V)
Μέγεθος	161 x 61,5 x 61,5 mm
Βάρος	725 gr
Θερμοκρασία	-40°C έως 70 °C
Διαρροή	6 mA (μετά από 72 ώρες)

Σχήμα 7.5. Αποψη ενός υπερ-πυκνωτή του εμπορίου και τα χαρακτηριστικά του

Προς το παρόν, υπερ-πυκνωτές πιο λίγο μικρού μεγέθους, της τάξης των 7 ως 10 Watt, διατίθενται ευρέως στο εμπόριο για εφαρμογές ποιότητας ισχύος από την πλευρά του καταναλωτή και βρίσκονται συνήθως σε οικιακές ηλεκτρικές συσκευές (βλ. σχήμα 7.5). Η εξέλιξη για τους πυκνωτές μεγαλύτερης κλίμακας έχει εστιαστεί στα ηλεκτρικά οχήματα. Τελευταία, η ποιότητα ισχύος μικρής κλίμακας (<250 kW) θεωρείται ως η πιο ελπιδοφόρος ηλεκτροπαραγωγική χρήση για τους εξελιγμένους πυκνωτές.

7.3. ΕΛΕΓΚΤΕΣ (ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ) ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Στον πίνακα που παρατίθεται στο Παράρτημα συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά κάθε συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης. Οι μπαταρίες, οι σφόνδυλοι, τα ΥΜΕΑ και οι εξελιγμένοι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές χρησιμοποιούνται σε κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής, ενώ τα υδροηλεκτρικά με άντληση και τα ΕΑΣΑ είναι μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις. Όλες οι εκτιμήσεις κόστους αφορούν τα πλήρη συστήματα με υποσυστήματα ρύθμισης της ισχύος, συστήματα ελέγχου, υπηρεσίες αερισμού και ψύξης, και άλλες συνιστώσες ευστάθειας της μονάδας. Στην περίπτωση των τεχνολογιών παραγωγής με ΑΠΕ, ως πιο κατάλληλα συστήματα αποθήκευσης προς το παρόν φαίνονται να είναι μπαταρίες.

Οι μπαταρίες έχουν εγκατασταθεί σε αυτόνομα Φ/Β και αιολικά συστήματα για πάνω από δύο δεκαετίες σε όλο τον κόσμο, και υποστηρίζουν την παραγωγή από ΑΠΕ σε τέσσερα τουλάχιστον πεδία μεγεθών:

- 1) κάτω από 1 kW - ηλεκτροδότηση υπαίθρου,
- 2) από 1 έως 5 kW - οικιακός τομέας,
- 3) από 10 έως 100 kW - εμπορική, βιομηχανική χρήση ή σε επίπεδο χωριού, και
- 4) πάνω από 1 MW - παραγωγή για υποστήριξη του δικτύου.

Μεγάλο μέρος της δραστηριότητας που χρηματοδοτείται από τη βιομηχανία των Φ/Β έχει εστιαστεί στις εφαρμογές αγροτικής ή οικιακής κλίμακας με υποστήριξη από υπερδιαστασιολογημένες μπαταρίες, ενώ μεγάλο μέρος της δραστηριότητας που χρηματοδοτείται από τους κατασκευαστές μπαταριών έχει εστιαστεί στις εφαρμογές βιομηχανικής κλίμακας με μικρή υποστήριξη μπαταριών.

Οι μπαταρίες δεν σχεδιάζονται ειδικά για τα συστήματα ΑΠΕ, παρότι είναι σε εξέλιξη ερευνητικές εργασίες για να ληφθεί υπόψη η ιδιαίτερη συμπεριφορά της μονάδας αποθήκευσης, ειδικότερα στα αυτόνομα συστήματα ΑΠΕ. Το σύνολο των μπαταριών που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα μικρά Φ/Β συστήματα αρχικά σχεδιάστηκαν για χρήση τους σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων βαθιάς εκφόρτισης ή οχημάτων αναψυχής, όπου η επαναφόρτιση ελέγχεται προσεκτικά και είναι πλήρης για κάθε κύκλο. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής της φόρτισης των μπαταριών για προστασία της συστοιχίας από υπερφόρτιση και υπερ-εκφόρτιση.

7.3.1. Η βασική αρχή

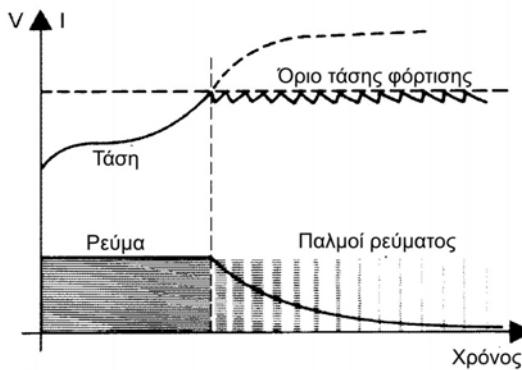
Η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας εξαρτάται από την αυστηρή τήρηση των συνθηκών λειτουργίας που καθορίζονται από τον κατασκευαστή. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι ικανοποιούνται οι συνθήκες, οι οποίες περιγράφονται από περιοριστικές τιμές, χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής φόρτισης. Η κύρια λειτουργία του είναι να προστατεύει την μπαταρία από υπερφόρτιση και βαθιά εκφόρτιση, και για να το επιτύχει αυτό ο ελεγκτής φόρτισης δεν μπορεί να αποφύγει τις διακοπές λειτουργίας του συστήματος ΑΠΕ όταν ανακύπτουν οι περιοριστικές τιμές, ειδικότερα με την αποσύνδεση κάποιου φορτίου όταν έχει ανακύψει το όριο της τάσης εκφόρτισης.

Η διαχείριση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας για λόγους ελέγχου συνήθως γίνεται μέσω μετρήσεων της τάσης, παρότι αναπτύσσονται κάποιες μέθοδοι για τη βελτίωση αυτής της κατάστασης μέσω της καταμέτρησης των αμπερωρίων ή χρήσης του αλγορίθμου SOC. Τα περισσότερα από τα συστήματα ΑΠΕ που περιλαμβάνουν αποθήκευση μπαταριών μολύβδου-οξέως διαθέτουν ένα σύστημα ελέγχου στο οποίο έχουν καθοριστεί κατώφλια τάσης για την προστασία της μπαταρίας:

- Ένα κατώφλι υψηλής τάσης για την αποφυγή υπερφόρτισης της μπαταρίας που οδηγεί σε υδρόλυση του ηλεκτρολύτη και διάβρωση των πλακών. Το κατώφλι αυτό ονομάζεται συχνά Αποσύνδεση Υψηλής Τάσης (AYT).
- Ένα κατώφλι χαμηλής τάσης προκειμένου να αποφευχθεί η βαθιά εκφόρτιση της μπαταρίας, που συχνά ονομάζεται Αποσύνδεση Χαμηλής Τάσης (AXT).
- Δύο ενδιάμεσα κατώφλια επανασύνδεσης της μπαταρίας στο σύστημα: η Επανασύνδεση Υψηλής Τάσης και η Επανασύνδεση Χαμηλής Τάσης.

7.3.2. Προστασία υπερφόρτισης

Προκειμένου να εξασφαλιστεί πλήρης φόρτιση της αποθήκης ενέργειας, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως φορτίζονται σύμφωνα με το αποκαλούμενο χαρακτηριστικό IV. Στην αρχή της διαδικασίας φόρτισης η μπαταρία λαμβάνει το μέγιστο ρεύμα φόρτισης, αλλά όταν ανακύπτει η τάση πέρατος φόρτισης, το μέσο ρεύμα φόρτισης μειώνεται αργά μέχρι μηδενισμού, ενώ η τάση διατηρείται σε ένα σταθερό επίπεδο (σχήμα 7.6). Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας. Η τάση πέρατος της φόρτισης εξαρτάται από τον τύπο της μπαταρίας, π.χ. για τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως 12V με υγρό ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούνται σε στάσιμες εγκαταστάσεις οι παραγωγοί συστήμουν μια τάση πέρατος της φόρτισης περίπου 14,4V.



Σχήμα 7.6. Κατανομές της τάσης και του ρεύματος κατά τη διάρκεια της φόρτισης

Εάν η μπαταρία του συστήματος ΑΠΕ δεν είναι εγκατεστημένη σε χώρο με σχεδόν σταθερή θερμοκρασία αλλά αντ' αυτού είναι εκτεθειμένη σε μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, ο καλύτερος τρόπος για να εξασφαλιστεί μια μακρά λειτουργική ζωή σε συνδυασμό με υψηλή οικονομική αποδοτικότητα είναι να προσαρμοστούν τα κατώφλια μεταστροφής για προστασία από υπερφόρτωση (τάση πέρατος φόρτισης, κατώφλι απεμπλοκής για έλεγχο δύο βημάτων) στη θερμοκρασία της μπαταρίας και του περιβάλλοντός της. Διαφορετικά, η μπαταρία μπορεί να υποστεί ζημία λόγω της

υπερφόρτωσης στις υψηλές θερμοκρασίες και, από την άλλη, δεν θα είναι σε θέση να αποδώσει την πλήρη ονομαστική χωρητικότητά της σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Ένας συντελεστής θερμοκρασίας -4 ή -5 mV/Κ(στοιχείο) συνιστά έναν καλό πρακτικό κανόνα για τον καθορισμό της θερμοκρασιακά αντισταθμιζόμενης τάσης πέρατος της φόρτισης της μπαταρίας. Συνεπώς, η τάση πέρατος της φόρτισης μιας μπαταρίας 12 V (6 στοιχείων), που ανέρχεται στα 14,4 V στους 20°C, πρέπει να μειωθεί στα 13,8 V για μία θερμοκρασία λειτουργίας 40°C. Λόγω του κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης, οι μπαταρίες υγρού ηλεκτρολύτη τελικά αναπτύσσουν ζώνες διαφορετικής πυκνότητας οξεώς στον ηλεκτρολύτη τους. Αυτό το φθοροποιό φαινόμενο μπορεί να αποφευχθεί με τη διατήρηση του ηλεκτρολύτη καλά αναμεμιγμένου.

Η προκαλούμενη από την περιορισμένου χρόνου υπερφόρτιση αεριοποίηση του ηλεκτρολύτη δημιουργεί φυσαλίδες οξυγόνου και υδρογόνου που εξασφαλίζουν την ανάμιξη των στρωμάτων διαφορετικής πυκνότητας του οξεώς. Μέχρι τώρα, το βάρος στην ανάπτυξη διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης έχει δοθεί στην αποτροπή υπερφόρτισης των μπαταριών με παράλληλη βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Η πιο εύκολη από αυτές είναι η απλή αποσύνδεση της γεννήτριας ΑΠΕ όταν η μπαταρία προσεγγίζει σε ένα κατώφλι τάσης, το οποίο στην περίπτωση των μπαταριών μολύβδου-οξεώς είναι περίπου 2,4 Volts/στοιχείο.

Προκειμένου να αποφευχθεί μια τέτοια αποσύνδεση, μερικοί ελεγκτές διαχειρίζονται την επαναφόρτιση της μπαταρίας κατά ένα κυμαινόμενο τρόπο, επιτρέποντας σε ένα ασθενές ρεύμα να επαναφορτίσει την μπαταρία όταν ανακύψει η AYT, ώστε η τάση να μην υπερβεί ποτέ την AYT. Κάποιοι άλλοι ρυθμιστές εμφανίζουν μια λειτουργία "ωθούμενης φόρτισης", η οποία εφαρμόζεται όταν ανακύπτει συχνά η AXT ώστε να αντιμετωπισθεί η στρωματοποίηση του ηλεκτρολύτη και να υποβοηθηθεί ο επανασυνδυασμός του θειικού μολύβδου με το μόλυβδο ή το διοξείδιο του μολύβδου.

Αυτή η "ωθούμενη φόρτιση" επιτρέπει την αύξηση της AYT μέχρι τα 2,5 ή 2,7 Volts/στοιχείο. Η διαφορά μεταξύ των ρυθμιστών αυτών έγκειται ουσιαστικά στη συχνότητα "ώθησης της φόρτισης". Πάντως, αυτό το είδος επαναφόρτισης δεν πρέπει να είναι πάρα πολύ συχνό καθώς μπορεί να προκαλέσει άλλα προβλήματα, π.χ. διάβρωση και έκχυση. Οι κατασκευαστές μπαταριών προτείνουν να χρησιμοποιείται αυτή η "ωθούμενη φόρτιση" μία φορά κάθε τρεις εβδομάδες.

Έχει αναπτυχθεί και μία άλλη στρατηγική ρύθμισης (PWM: διαμόρφωση του εύρους των παλμών), βάσει των αποτελεσμάτων μιας μελέτης των εργαστηρίων Sandia, κατά την οποία διαμορφώνεται το ρεύμα επαναφόρτισης που αποδίδεται από μία Φ/Β συστοιχία οδηγώντας σε:

- καλύτερο επανασυνδυασμό των κρυστάλλων του θειικού μολύβδου,
- καλύτερη αποδοτικότητα της επαναφόρτισης,
- μεγαλύτερο χρόνο ζωής της μπαταρίας,
- ελάττωση των αερίων της μπαταρίας μειώνοντας την περίοδο επαναφόρτισης.

Αυτή η στρατηγική ρύθμισης αρχίζει στην πρώτη φάση με μία συνήθη επαναφόρτιση (πλήρες ρεύμα Φ/Β συστοιχίας) μέχρι μία δεδομένη τάση της μπαταρίας. Κατόπιν το ρεύμα διαμορφώνεται, καθώς εφαρμόζεται στην μπαταρία ένα μέσο σταθερό ρεύμα με μεταβαλλόμενη περίοδο.

7.3.3. Προστασία βαθιάς εκφόρτισης

Μόλις η τάση της μπαταρίας καταστεί μικρότερη της ΑΧΤ, το φορτίο αποσυνδέεται από την μπαταρία και δεν μπορεί να επανασυνδεθεί μέχρις ότου επαναφορτιστεί αρκετά η μπαταρία. Είναι πολύ σημαντικό να επιλέγεται η σωστή τάση αποκοπής. Για να αποφεύγεται η βαθιά εκφόρτιση σε κάθε περίπτωση, η τάση αποκοπής πρέπει να προσαρμόζεται στο ρεύμα εκφόρτισης (πίνακας 7.2).

Πίνακας 7.2. Όρια της τάσης εκφόρτισης για τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως

Ρεύμα εκφόρτισης I_D^1	Τάση εκφόρτισης V_D [Volts]
I_{10}	1,80 – 1,85
I_{20}	1,85 – 1,90
I_{50}	1,90 – 1,95
I_{100}	1,95 – 2,00

Εάν χρησιμοποιούνται ελεγκτές φόρτισης με σταθερό όριο πέρατος φόρτισης, η τιμή αυτή δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 1,9V/στοιχείο, δηλ. 11,4V για μια μπαταρία 12V, και συνιστάται το κατώφλι αυτό να είναι σταθερό για όλες τις θερμοκρασίες. Προκειμένου να αποτρέπεται η αποσύνδεση του φορτίου λόγω βραχέων παλμών υψηλού ρεύματος, π.χ. κατά την εκκίνηση ενός κινητήρα, η αποκοπή του φορτίου πρέπει να καθυστερεί για τουλάχιστον μερικά δευτερόλεπτα. Οι ελεγκτές φόρτισης εκτίθενται σε πολλές πηγές φθοράς τόσο κατά την εγκατάσταση όσο και κατά τη λειτουργία τους και, προκειμένου να λειτουργούν σωστά, πρέπει να ενσωματώνουν τις μορφές προστασίας που περιγράφονται στα επόμενα.

7.3.4. Προστασία από τις εξωτερικές επιδράσεις

Προστασία από την υγρασία: Πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ της άμεσης επαφής με το νερό (βροχή, ψεκασμός νερού) και της υψηλής υγρασίας του αέρα. Το περίβλημα του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να είναι καλά σφραγισμένο για να προστατεύεται από την είσοδο νερού (κλάση προστασίας υψηλού IP, όπου είναι δυνατόν IP 65). Όπου είναι υψηλή η υγρασία του αέρα, είναι κατάλληλο ένα περίβλημα με κάποιο βαθμό κυκλοφορίας του αέρα. Επιπλέον, η προστασία μπορεί να επιτευχθεί με την ύπαρξη αρκετού διακένου μεταξύ των ηλεκτρονικών συνιστωσών, την κατάλληλη επιλογή του υλικού του πίνακα οργάνων, και με την ειδική επίστρωση του πίνακα αυτού.

¹ Είθισται να ορίζεται η ονομαστική χωρητικότητα στους 20°C, εκφορτίζοντας την μπαταρία μέσω ενός σταθερού ρεύματος εκφόρτισης για 10 ώρες, δηλ. το I_{10} . Στις εφαρμογές των Φ/Β συχνά παρατηρούνται πολύ ασθενέστερα ρεύματα, π.χ. I_{100} , το οποίο είναι το ρεύμα που αντιστοιχεί στο 1/100 της ονομαστικής χωρητικότητας των μπαταριών. Έτσι, για ονομαστική χωρητικότητα 100 Ah, το I_{10} είναι 10A και το I_{100} είναι 1A.

Προστασία από ανακριβή λειτουργία: Το συνηθέστερο λάθος κατά την εγκατάσταση ενός ελεγκτή φόρτισης είναι η αντιστροφή της πολικότητας των συνδέσεων. Έτσι, είναι απαραίτητο να προστατεύονται οι είσοδοι στη γεννήτρια και την μπαταρία από την αντιστροφη σύνδεση των πόλων με τις λεγόμενες διόδους ελεύθερης κύλισης και μια κατάλληλη ασφάλεια.

Προστασία από υπέρταση: Τόσο η είσοδος όσο και η έξοδος του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να προστατεύονται από τις βραχυχρόνιες αιχμές της τάσης.

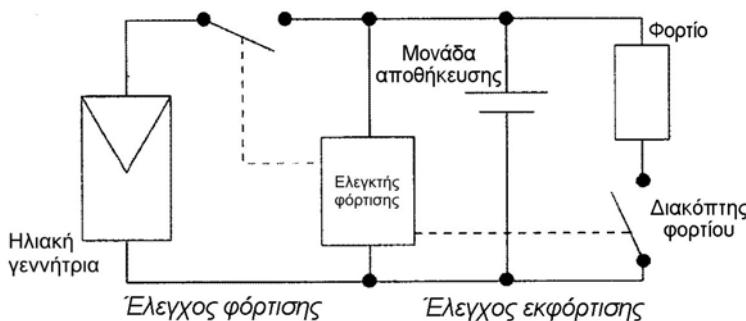
Προστασία από υπερφόρτωση: Είναι πιθανό να υπερβαίνεται η ονομαστική τιμή του ρεύματος του στοιχείου στην πλευρά της εισόδου, π.χ. όταν ανακλάται επιπλέον φως επάνω στο ηλιακό Φ/Β στοιχείο. Επομένως, πρέπει να ενσωματώνονται αντίστοιχες προστασίες στον ελεγκτή φόρτισης. Στην πλευρά της εξόδου, η προστασία από υπερφόρτωση θα πρέπει να παρέχεται από κάποια ασφάλεια.

7.3.5. Κύριοι τύποι των ελεγκτών φόρτισης

Δύο κύριοι τύποι των ελεγκτών φόρτισης μπορούν να διακριθούν, συγκεκριμένα:

- Ο σειριακός ελεγκτής: Με αυτόν διακόπτεται η σύνδεση μεταξύ της γεννήτριας και της μονάδας αποθήκευσης της ενέργειας όταν ανακύπτει το όριο φόρτισης, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.7. Για την αποσύνδεση μπορούν να χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι, διπολικά τρανζίστορ ή MOSFET. Η αρχή της σειριακής ρύθμισης προέρχεται από την κλασική τεχνολογία φόρτισης και χρησιμοποιείται επίσης στις διασυνδεδεμένες στο δίκτυο διατάξεις φόρτισης. Συχνά αναφέρεται ότι, το μειονέκτημα αυτής της αρχής σε σχέση με την εναλλακτική είναι ότι ο σειριακός ελεγκτής υπόκειται στις απώλειες που υφίστανται στο διακόπτη.

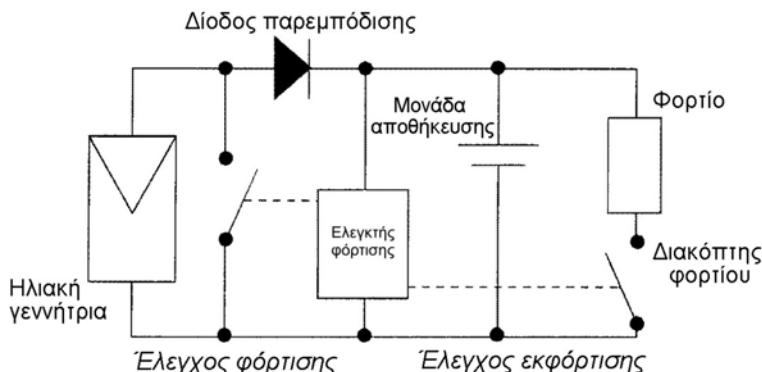
Αυτό όμως έχει πάψει να ισχύει από τότε που αναπτύχθηκαν και εφαρμόσθηκαν οι ημιαγωγικοί διακόπτες με πολύ χαμηλή αντίσταση ενεργοποίησης. Οι απώλειες φόρτισης και των δύο τύπων ελεγκτών είναι πλέον της ίδιας τάξης. Πάντως, είναι κρίσιμο υπό ορισμένες συνθήκες ότι εάν έχουν εξαντληθεί εντελώς οι μπαταρίες μπορεί να μην είναι πλέον δυνατό το κλείσιμο του κυκλώματος φόρτισης, το οποίο οδηγεί στην πλήρη καταστροφή της μπαταρίας. Όταν η τάση πέσει κάτω από το όριο βαθιάς εκφόρτισης, το φορτίο αποσυνδέεται από την μπαταρία ώστε να προστατευθεί από τη βαθιά εκφόρτιση.



Σχήμα 7.7. Ελεγκτής φόρτισης με σειριακή ρύθμιση

- Ο ελεγκτής διακλάδωσης (βραχυκυκλώματος):** Όταν γίνεται εκμετάλλευση των ειδικών ιδιοτήτων των ηλιακών κυψελών, μπορεί να εφαρμοστεί μια στρατηγική ελέγχου η οποία αποφεύγει τα μειονεκτήματα της σειριακής ρύθμισης. Έτσι, στο κύκλωμα που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.8, η γεννήτρια απλά βραχυκυκλώνεται μέσω ενός ηλεκτρονικού διακόπτη όταν φορτιστεί πλήρως η μπαταρία. Η τάση κατά μήκος του διακόπτη ή του τρανζίστορ τότε σχεδόν μηδενίζεται.

Πάντως, η απώλεια αυτή δεν επηρεάζει την ενεργειακή ισορροπία του Φ/Β συστήματος, καθώς υφίσταται μόνο όταν φορτίζεται πλήρως η μπαταρία και δεν απαιτείται ούτως ή άλλως η ηλιακή ενέργεια. Σε αντίθεση με τους περισσότερους σειριακούς ελεγκτές, αυτή η διαδικασία λειτουργεί αξιόπιστα ακόμα και όταν έχει εξαντληθεί εντελώς η δυναμικότητα των μπαταριών (τάση <9V), αφού μέχρις ότου επαναφορτιστεί η μπαταρία δεν χρειάζεται η ενεργοποίηση του διακόπτη βραχυκυκλώματος. Για την αποφυγή του βραχυκυκλώματος της μπαταρίας είναι απαραίτητη μια δίοδος φραγής, η οποία επίσης χρησιμεύει για την αποτροπή της εκφόρτισης μέσω της γεννήτριας κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Σχήμα 7.8. Ελεγκτής φόρτισης με ρύθμιση βραχυκυκλώματος (αρχή παρέκκλισης)

- Ελεγκτές PWM:** Αυτοί εφαρμόζουν μια τεχνική μεταστροφής υψηλής συχνότητας. Ο ρυθμιστής ανοιγοκλείνει γρήγορα τη διάταξη ελέγχου. Όταν εκφορτίζονται οι μπαταρίες η μονάδα θα ανοίξει πλήρως. Καθώς φθάνει η μπαταρία σε κατάσταση πλήρους φόρτισης, η μονάδα θα αρχίσει να ανοιγοκλείνει τη διάταξη ελέγχου ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης που απαιτείται. Όταν η μπαταρία έχει φορτιστεί πλήρως δεν επιτρέπεται στο ρεύμα να ρεύσει προς αυτήν. Στα ηλιακά συστήματα η τεχνική PWM χρησιμοποιείται εν σειρά με τα ηλιακά πλαίσια. Στα αιολικά συστήματα χρησιμοποιείται ένα φορτίο εκτροπής (απόρριψης) για να εκτρέπεται η πλεονάζουσα ενέργεια από τις μπαταρίες.

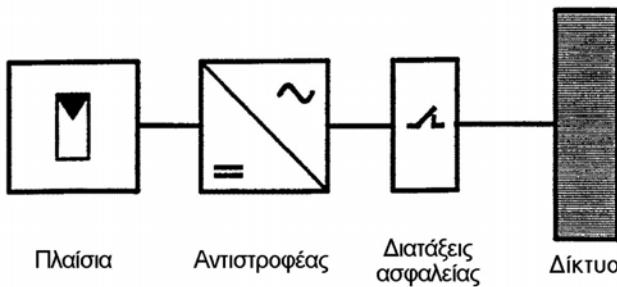
7.4. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΜΕΝΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

7.4.1. Αναγκαιότητα

Τα συστήματα των ΑΠΕ παρέχουν συχνά συνεχές ρεύμα (ΣΡ) χαμηλής τάσης από μπαταρίες, ηλιακά πλαίσια ή ανεμογεννήτριες. Για να χρησιμοποιηθεί απευθείας αυτή η ισχύς ΣΡ απαιτούνται ειδικές μη τυποποιημένες συσκευές, οι οποίες μπορεί να

διατίθενται για εκδρομικές και άλλες φορητές ή χαμηλής ισχύος εφαρμογές. Μερικές συσκευές, π.χ. τα ψυγεία, είναι σχετικά ακριβές. Η ηλεκτρική ενέργεια που διατίθεται από το κύριο δίκτυο ηλεκτρισμού παρέχεται υπό μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ), οπότε οι περισσότερες συσκευές κατασκευάζονται ώστε να είναι συμβατές με αυτήν την τροφοδοσία. Η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται από τη συσκευή είναι γνωστή ως φορτίο στο σύστημα.

Από την άλλη, ένα Φ/Β σύστημα που εγκαθίσταται στη στέγη μιας κατοικίας για την παραγωγή ενός μέρους της αναγκαίας ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιεί το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρισμού για αποθήκευση (σχήμα 7.9). Εάν παράγεται περισσότερος ηλιακός ηλεκτρισμός από αυτόν που απαιτείται στιγμιαία, το πλεόνασμα μπορεί να αποδοθεί στο δίκτυο. Αντιστρόφως, κατά τη διάρκεια των νεφώσεων και τη νύκτα μπορεί να χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο για την τροφοδοσία της κατοικίας. Κατά τη διάρκεια μιας διακοπής της τροφοδοσίας, ένα συνδεδεμένο στο δίκτυο φωτοβολταϊκό σύστημα δεν παρέχει ισχύ στην κατοικία, επειδή χρειάζεται το δίκτυο για τον καθορισμό της συχνότητας και της τάσης.



Σχήμα 7.9. Διάγραμμα κυκλώματος ενός συνδεδεμένο στο δίκτυο Φ/Β συστήματος

Εξάλλου, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.10, όπου παρουσιάζεται ένα συνδεδεμένο στο δίκτυο Φ/Β σύστημα, τα διασυνδεδεμένα συστήματα ΑΠΕ περιλαμβάνουν συνήθως τις ακόλουθες συνιστώσες:

- τη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής,
- έναν αντιστροφέα,
- το κύκλωμα ασφάλειας (σύνδεση με το δίκτυο).

Ο αντιστροφέας είναι η καρδιά του συστήματος, καθώς μετατρέπει το συνεχές ρεύμα από τις μονάδες σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο σχεδιασμός ενός διασυνδεδεμένου συστήματος ΑΠΕ αρχίζει με την επιλογή του κατάλληλου αντιστροφέα. Αυτό καθορίζει την τάση του συστήματος στην πλευρά του ΣΡ και η γεννήτρια μπορεί στη συνέχεια να διαμορφωθεί σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά εισόδου του αντιστροφέα.

7.4.1.1. Κύρια χαρακτηριστικά των διασυνδεδεμένων αντιστροφέων

Ο αντιστροφέας είναι η πιο σημαντική συνιστώσα ενός διασυνδεδεμένου συστήματος ΑΠΕ μετά τη γεννήτρια. Η δράση του αφορά στη μετατροπή του ΣΡ που παράγεται από τον μετατροπέα ΑΠΕ σε συμβατό με το δίκτυο ΕΡ 50 Hz. Σε αντίθεση με τους μετατροπείς που προορίζονται για αυτόνομη λειτουργία, εκείνοι που προορίζονται για παράλληλη με το δίκτυο λειτουργία πρέπει να ανταποκρίνονται εξίσου καλά στα

χαρακτηριστικά του δίκτυου όπως και στις επιδόσεις της γεννήτριας. Καθώς μέσω του αντιστροφέα ρέει όλο το ρεύμα, οι ιδιότητές του επιδρούν καταλυτικά στη συμπεριφορά και τη λειτουργία του συστήματος ΑΠΕ.

Πέραν της αποδοτικής μετατροπής του ΣΡ σε ΕΡ, τα ηλεκτρονικά των αντιστροφέων περιλαμβάνουν επίσης στοιχεία που καθορίζουν τον ημερήσιο ρυθμό λειτουργίας. Αυτά, στην περίπτωση των Φ/Β συστημάτων, εξασφαλίζουν ότι η λειτουργία εκκινεί τη σωστή ώρα το πρωί, μόλις τα ηλιακά στοιχεία δεχτούν αρκετή ισχύ. Οι ανεπιτυχείς προσπάθειες εκκίνησης απαιτούν ενέργεια από το δίκτυο και θα πρέπει να αποφεύγονται από τα καλά συστήματα ελέγχου. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V μετατοπίζεται σύμφωνα με τις διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας των στοιχείων.

Ο ευφυής έλεγχος του αντιστροφέα περιλαμβάνει την παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP), δηλαδή τη συνεχή αναπροσαρμογή στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας, και χρησιμοποιείται με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία για τη βελτιστοποίηση της προσαρμογής μεταξύ των πλαισίων και της συστοιχίας των μπαταριών. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί ένα μετατροπέα από ΣΡ σε ΣΡ με μία διάταξη που μετράει την εισερχόμενη ισχύ από το στοιχείο και ρυθμίζει την τάση ώστε να αποδίδεται η μέγιστη ισχύς στη συστοιχία των μπαταριών ανεξάρτητα από την τάση αυτής.

Επίσης, στον αντιστροφέα ενσωματώνονται προστατευτικές διατάξεις, οι οποίες αποσυνδέουν αυτόμata το σύστημα εάν εμφανιστούν ανωμαλίες στο δίκτυο ή στη γεννήτρια ΑΠΕ (σχήμα 7.9). Μερικά μοντέλα αντιστροφέων εξοπλίζονται περαιτέρω με καταγραφικά δεδομένων και υπολογιστές για μετρήσεις, τα οποία επιτρέπουν τη συνεχή καταγραφή της ισχύος, της τάσης, του ρεύματος και άλλων λειτουργικών παραμέτρων. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να μεταβιβάζονται κατά διαστήματα μέσω μιας σειριακής σύνδεσης σε ένα φορητό υπολογιστή και να υφίστανται ανάλυση.

Οι διασυνδεδεμένοι αντιστροφέις μπορούν να λειτουργούν σύμφωνα με τις κάτωθι διαφορετικές αρχές:

- Η έξοδος του αντιστροφέα θεωρείται ως μία ρυθμιζόμενη πηγή ρεύματος. Η χρονική διακύμανση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ρυθμίζεται ύστοι ώστε να αποκρίνεται στη διακύμανση της επικρατούσας τάσης του δίκτυου. Εάν η τάση του δίκτυου παρεκκλίνει σημαντικά από την ημιτονοειδή κυματομορφή, αυτή η κυματομορφή θα υποστεί αντιγραφή από έναν αντιστροφέα που λειτουργεί με αυτήν την αρχή.
- Ανεξαρτήτως της κυματομορφής της τάσης του δίκτυου, ο αντιστροφέας παρέχει εσωτερικά ρυθμιζόμενο ρεύμα στο δίκτυο με ημιτονοειδή διαμόρφωση, το οποίο ρέει συγχρονισμένα με την τάση του δίκτυου.
- Ο αντιστροφέας επιχειρεί τη βελτίωση της ατελούς κυματομορφής της τάσης του δίκτυου παρέχοντας ηλεκτρισμό με την κατάλληλη κυματομορφή. Αυτό καθίσταται εφικτό καλύτερα όταν το συνδεδεμένο δίκτυο έχει χαμηλότερη ισχύ (υψηλότερη σύνθετη αντίσταση) απ' ό,τι με τα ισχυρά δίκτυα.

7.4.1.2. Απαιτήσεις από τους διασυνδεδεμένους αντιστροφείς

Εάν ληφθούν ως χαρακτηριστικό παράδειγμα τα Φ/Β συστήματα, οι απαιτήσεις τους από τους συνδεδεμένους στο δίκτυο αντιστροφείς είναι οι ακόλουθες:

- Αυτόματη εκκίνηση λειτουργίας το πρωί.
- Υψηλή αποδοτικότητα υπό μερικό φορτίο.
- Καθορισμένη λειτουργία κατά την υπερφόρτωση.
- Λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) της Φ/Β γεννήτριας.
- Τροφοδοσία των ηλεκτρονικών εσωτερικού ελέγχου από την ηλιακή γεννήτρια.
- Χαμηλή διακύμανση στην τάση της ηλιακής γεννήτριας.
- Ανοχή του αντιστροφέα σε συνθήκες βραχυκυκλώματος και ανοικτού κυκλώματος.
- Επαρκής εξοπλισμός, απλή λειτουργία από το χρήστη.
- Αυτόματη αποσύνδεση από το δίκτυο κατά την απόκλιση της τάσης ή συχνότητας.
- Γαλβανική απομόνωση της Φ/Β γεννήτριας από το δίκτυο.
- Ενσωματωμένη στον αντιστροφέα παρακολούθηση της σύνδεσης της γείωσης.
- Συντελεστής ισχύος: $\cos \phi > 0,9$.
- Χαμηλό περιεχόμενο αρμονικών στην ισχύ EP που παρέχεται στο δίκτυο.

7.4.2. Τύποι συνδεδεμένων στο δίκτυο αντιστροφέων

Υπάρχουν διάφοροι βασικοί τύποι συνδεδεμένων στο δίκτυο αντιστροφέων, που όλοι έχουν διαφορετικές ιδιότητες:

- Αντιστροφείς μετατροπής από το δίκτυο (διατάξεις θυρίστορ).
- Αυτο-μετατρέψιμοι αντιστροφείς με διαμόρφωση του εύρους των παλμών και μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας (ΧΣ).
- Αυτο-μετατρέψιμοι αντιστροφείς με διαμόρφωση του εύρους των παλμών και μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας (ΥΣ).

7.4.2.1. Αντιστροφείς μετατροπής από το δίκτυο

Οι αντιστροφείς μετατροπής από το δίκτυο είναι σχετικά φθηνοί, αφού οι συνιστώσες τους προέρχονται από ήδη υπάρχουσες στην τεχνολογία των μονάδων οδήγησης διατάξεις θυρίστορ, ενώ είναι απλοί και ανθεκτικοί. Κανονικά παρέχουν τριφασική ισχύ στο δίκτυο. Όλοι σχεδόν οι αντιστροφείς για το φάσμα υψηλότερης ισχύος (άνω των 100 kW) κατασκευάζονται σύμφωνα με αυτήν την αρχή.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά των αντιστροφέων με θυρίστορ είναι τα ακόλουθα:

- Το θυρίστορ μπορεί να επιτρέψει τη διέλευση του ρεύματος αλλά όχι τη διακοπή του.
- Για τη μετατροπή απαιτείται η τάση του δικτύου.
- Ο αντιστροφέας διαθέτει τα χαρακτηριστικά μίας πηγής ρεύματος.
- Υψηλό περιεχόμενο σε αρμονικές, επειδή η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται στο δίκτυο κατά παλμούς (օρθογώνιους ή τραπεζοειδείς).

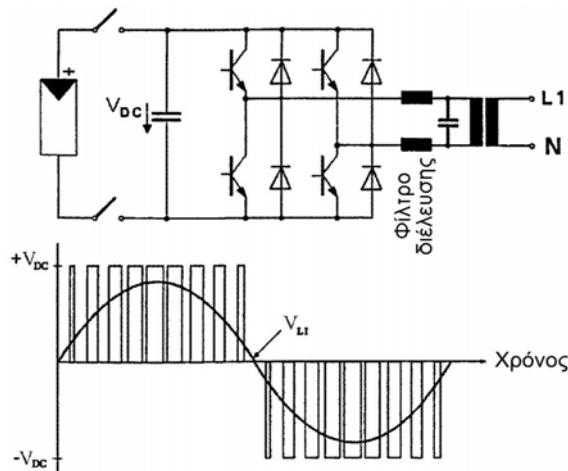
- Η άεργος ισχύς προέρχεται από το δίκτυο, επειδή το ρεύμα είναι εκτός φάσης με την τάση του δικτύου (γωνία έναυσης).
- Οι διακοπές της τάσης του δικτύου προκαλούν υστέρηση του αντιστροφέα.

7.4.2.2. Auto-μετατρέψιμοι αντιστροφείς με διαμόρφωση του εύρους των παλμών και μετασχηματιστή 50 Hz

Με τους αυτο-μετατρέψιμους αντιστροφείς, δεν απαιτείται η τάση του δικτύου για τη διακοπή της λειτουργίας των ημιαγωγών ισχύος. Έτσι, οι διατάξεις αυτές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν κατά την αυτόνομη λειτουργία. Το τμήμα τελικής ισχύος εξοπλίζεται με άμεσης δράσης ημιαγωγικούς διακόπτες:

- διπολικά τρανζίστορ,
- MOSFET (τρανζίστορ επίδρασης στο πεδίο ισχύος με μονωμένη πύλη),
- IGBT (διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη).

Στους αυτο-μετατρέψιμους αντιστροφείς, η ημιτονοειδής μορφή του ρεύματος εξόδου επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση του εύρους των παλμών με μια υψηλή συχνότητα. Στην αγορά διατίθενται ειδικά βελτιστοποιημένοι αντιστροφείς για Φ/B στο φάσμα μικρότερης ισχύος (1-5 kW), οι οποίοι συνήθως εξοπλίζονται με τρανζίστορ MOSFET και έχουν εκ φύσεως χαμηλό περιεχόμενο αρμονικών, οπότε δεν απαιτούνται πρόσθετα φίλτρα. Ο συντελεστής παραμόρφωσης είναι δυνατό να διατηρηθεί κάτω από το 1% με τις διατάξεις μεταστροφής που συνηθίζονται σήμερα.

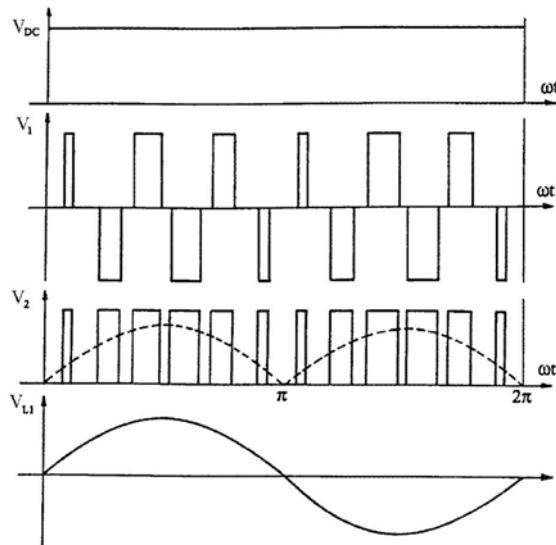
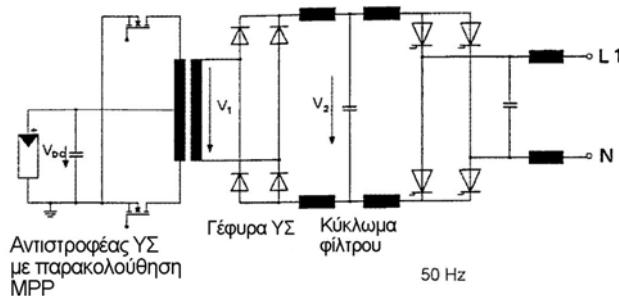


Σχήμα 7.10. Auto-μετατρέψιμος αντιστροφέας με διαμόρφωση εύρους παλμών

Η αρχή λειτουργίας αυτού του τύπου του αντιστροφέα παρουσιάζεται στο σχήμα 7.10. Η τάση της ηλιακής γεννήτριας διαμορφώνεται με μεταβλητό εύρος παλμών και εναλλασσόμενη πολικότητα στο μετασχηματιστή του δικτύου μέσω του κυκλώματος της γέφυρας, που αποτελείται από τέσσερις ηλεκτρονικές συνιστώσες μεταστροφής. Το εύρος των παλμών ελέγχεται έτσι ώστε η πλευρά του ΕΡ να έχει ένα ελάχιστο περιεχόμενο αρμονικών.

7.4.2.3. Auto-μετατρέψιμοι αντιστροφείς με διαμόρφωση του εύρους των παλμών και μετασχηματιστή ΥΣ

Όλοι οι προαναφερθέντες αντιστροφέίς περιλαμβάνουν ένα μετασχηματιστή 50 Hz για διαχωρισμό του δυναμικού και προσαρμογή της τάσης. Στις βελτιστοποιημένες διατάξεις χρησιμοποιούνταν ένας σπειροειδής μετασχηματιστής για τη μείωση των απωλειών του πυρήνα σιδήρου. Η ενσωμάτωση των μετασχηματιστών YΣ ήταν μια περαιτέρω προσπάθεια για να μειωθεί η εσωτερική κατανάλωση, ενώ κατέστησε επίσης δυνατή τη μείωση του βάρους και των διαστάσεων. Εδώ, οι μετασχηματιστές από φερρίτη εξασφαλίζουν τη γαλβανική απομόνωση μεταξύ του δικτύου και της γεννήτριας. Στο κύκλωμα του αντιστροφέα που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.11 αποφεύγεται ο μεγάλος και βαρύς μετασχηματιστής 50 Hz με τη χρήση μικρότερων μετασχηματιστών από φερρίτη.



Σχήμα 7.11. Αρχή μεταστροφής ενός αντιστροφέα με μετασχηματιστή YΣ

Ο αντιστροφέας αποτελείται από διάφορες βαθμίδες:

- **Αντιστροφέας YΣ:** Το ΣΡ από τη γεννήτρια μετασχηματίζεται σε ΕΡ υψηλής συχνότητας σε έναν αυτο-μετατρέψιμο αντιστροφέα. Η συχνότητα μεταστροφής είναι 10.000 έως 50.000 Hz. Επίσης, σ' αυτή τη βαθμίδα γίνεται ο έλεγχος MPP με διαμόρφωση του εύρους των παλμών. Ο μετασχηματιστής YΣ εξασφαλίζει τη γαλβανική απομόνωση της γεννήτριας και των δυναμικών του δικτύου. Λόγω της υψηλής συχνότητας, οι πυρήνες των κελυφών YΣ έχουν περίπου το μέγεθος μιας γροθιάς και αποτελούνται από υλικό φερρίτη που είναι ευαίσθητος σε κτυπήματα.

- **Ανορθωτής ΥΣ:** Στη βαθμίδα αυτή ανορθώνεται το υψηλής συχνότητας ΕΡ από το μετασχηματιστή. Οι δίοδοι που χρησιμοποιούνται εδώ πρέπει να είναι σε θέση να μεταστρέφουν τις υψηλές συχνότητες με ιδιαίτερα χαμηλές απώλειες.
- **Κύκλωμα φίλτρου:** Η τάση διαμόρφωσης του εύρους των παλμών εξομαλύνεται σε μια ημιτονοειδή μορφή σε αυτό το χαμηλής περατότητας φίλτρο.
- **Γέφυρα 50 Hz:** Κάθε δεύτερο ημιτονοειδές ημι-κύμα αντιστρέφεται και συνδέεται με το δίκτυο μέσω κυλινδρικών επαγωγικών πηνίων σ' αυτή τη βαθμίδα. Καθώς αυτή βρίσκεται απευθείας στην τάση του δικτύου, πρέπει να δίνεται προσοχή στη διηλεκτρική αντοχή των χρησιμοποιούμενων θυρίστορ ή IGBT.

7.5. ΕΛΕΓΚΤΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στα συστήματα με διάφορες πηγές ισχύος απαιτούνται εξελιγμένοι ελεγκτές αυτών. Οι ελεγκτές αυτοί συνήθως ελέγχονται μέσω Η/Υ, όπου ο ελεγκτής τροφοδοτείται με δεδομένα που υποδεικνύουν την κατάσταση του συστήματος και στη συνέχεια, εάν είναι απαραίτητο, ο μικροεπεξεργαστής μεταβάλλει τη λειτουργία του συστήματος. Οι λειτουργίες που εκτελούνται από τους ελεγκτές του συστήματος περιλαμβάνουν:

- την αποσύνδεση ή επανασύνδεση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας,
- την αποσύνδεση ή επανασύνδεση των φορτίων,
- την υλοποίηση κάποιας στρατηγικής διαχείρισης των φορτίων,
- την εκκίνηση των ντιζελογεννητριών εάν η τάση των μπαταριών είναι πολύ χαμηλή ή εάν αυξηθεί πολύ το φορτίο,
- το συγχρονισμό των πηγών ισχύος ΕΡ (π.χ. αντιστροφείς και ντιζελογεννήτριες),
- τη διακοπή της λειτουργίας των επιμέρους συστημάτων εάν ανακύψουν συνθήκες υπερφόρτωσης,
- την παρακολούθηση και καταγραφή των βασικών παραμέτρων του συστήματος.

7.5.1. Ελεγκτές για αυτόνομες εφαρμογές αιολικών-ντίζελ

Οι μονάδες αυτές παρέχουν εποπτικό έλεγχο των ντιζελογεννητριών και των Α/Γ ώστε να αποδίδουν αδιάλειπτη ισχύ βιομηχανικού επιπέδου σε απόμακρες θέσεις. Η μορφωματική, προ-συσσωματωμένη σχεδίασή τους επιτρέπει την προσαρμογή τους σε ποικιλία εφαρμογών χωρίς την ανάγκη δαπανηρών κατά παραγγελία κατασκευών. Οι ελεγκτές συνδυάζουν μία δοκιμασμένη μονάδα μικροεπεξεργαστή ελέγχου με τελειοποιημένο λογισμικό ελέγχου, και το αποτέλεσμα των αξιόπιστων λειτουργιών ελέγχου και παρακολούθησής τους είναι η ευσταθής, υψηλής ποιότητας ισχύς βιομηχανικού επιπέδου.

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των ελεγκτών είναι τα ακόλουθα:

- Δοκιμασμένη, ώριμη τεχνολογία από τη βιομηχανία ελέγχου των γεννητριών.
- Εύκολη ενσωμάτωση διαφόρων στοιχείων του συστήματος, περιλαμβανομένων των σύγχρονων πυκνωτών, των περιστροφικών μεταλλακτών, των συνιστωσών ηλεκτρικής αποθήκευσης, και ελέγχων για κρίσιμο-μη κρίσιμο φορτίο (εξάλειψη των δαπανών για σχεδιασμό κατά παραγγελία εξοπλισμού).

- Αυτόματη λειτουργία μόνο της γεννήτριας σε περίπτωση βλάβης (η απώλεια του συστήματος ελέγχου δεν θα οδηγήσει σε απώλεια ισχύος).
- Ευέλικτη αρχιτεκτονική του συστήματος, ικανή να ενσωματώσει όλο το εύρος των υφιστάμενων πακέτων ελέγχου των ντιζελογεννητριών και ανεμογεννητριών.

Κατά τη λειτουργία τους, οι ελεγκτές αυτοί μεταστρέφουν ένα υβριδικό σύστημα αιολικών/ντιζελ μεταξύ τεσσάρων καταστάσεων λειτουργίας. Σε περιόδους άπνοιας, το σύστημα λειτουργεί ως “μόνο ντιζελ”, θέτοντας τις γεννήτριες εντός και εκτός για μέγιστη αποδοτικότητα του καυσίμου. Όταν υπάρχει αρκετός άνεμος για παραγωγή ηλεκτρισμού, ο ελεγκτής θα μειώσει την παραγωγή των ντιζελογεννητριών ώστε να καλυφθεί το φορτίο. Εάν ο άνεμος ανέλθει ακριβώς στο σημείο όπου ο Α/Γ μπορούν να καλύψουν το φορτίο από μόνες τους, ο ελεγκτής θα θέσει τη μία ντιζελογεννήτρια σ’ ένα ελάχιστο επίπεδο λειτουργίας και θα απορρίψει την πλεονάζουσα αιολική ισχύ σ’ ένα δευτερεύον θερμικό φορτίο.

Η προσθήκη αποθήκευσης μπαταριών θα επέτρεπε σ’ αυτή τη φάση τη διακοπή λειτουργίας της γεννήτριας. Όταν η αιολική ισχύς είναι άφθονη ώστε να επιτρέπει ένα περιθώριο ασφάλειας, ο ελεγκτής θα σταματήσει την τελευταία ντιζελογεννήτρια και θα χρησιμοποιήσει το θερμικό φορτίο για την απορρόφηση της περίσσειας ισχύος. Το θερμικό φορτίο είναι μεταβλητό και ενεργεί μαζί με το σύγχρονο πυκνωτή ή τον περιστροφικό μεταλλάκτη για τη διατήρηση της ευστάθειας της ισχύος. Ο ελεγκτής εξασφαλίζει τις αδιάλειπτες μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων λειτουργίας και την αποδοτικότερη χρήση τόσο του πετρελαίου ντιζελ όσο και του αιολικού πόρου.

Ο ελεγκτής συνίσταται από μία σειρά ψηφιακών μονάδων ελέγχου που σχεδιάζονται ειδικά για εφαρμογές ελέγχου της ισχύος. Αυτές είναι:

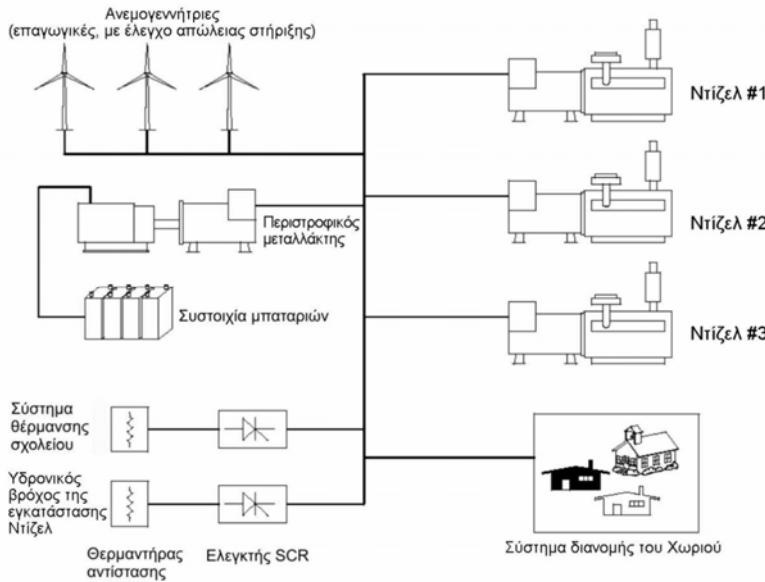
1. **Ο ελεγκτής αιολικών/ντιζελ που διαχειρίζεται την αλληλουχία (έλεγχος εκκίνησης-διακοπής)** των μονάδων ισχύος (ανεμογεννήτριες, γεννήτριες ντιζελ, συστήματα αποθήκευσης, σύγχρονοι πυκνωτές, περιστροφικοί μεταλλάκτες και φορτία απόρριψης). Ο ελεγκτής αυτός ενημερώνεται για τη φόρτιση των διατάξεων των ντιζελογεννητριών, την παραγωγή ισχύος των Α/Γ, και την κατάσταση του ελεγκτή δευτερεύοντος φορτίου. Από τις πληροφορίες αυτές, ο ελεγκτής αιολικών/ντιζελ λαμβάνει αποφάσεις για τη μεταβολή της κατάστασης των κυρίων συνιστωσών του συστήματος ισχύος στο συνολικό σύστημα.
2. **Ελεγκτής αιολικής ισχύος:** Οι Α/Γ εφοδιάζονται από τους κατασκευαστές τους με τους κανονικούς ελέγχους τους. Ο ελεγκτής της αιολικής ισχύος στέλνει ένα σήμα “άδειας λειτουργίας” στον ελεγκτή της Α/Γ για να της επιτρέψει να εκκινήσει, και διασυνδέεται με τα συστήματα ελέγχου της για να εποπτεύει τη λειτουργία της.
3. Ο ελεγκτής δευτερεύοντος φορτίου, ο οποίος σχεδιάζεται ώστε να μεταστρέψει ένα σύνολο δυαδικών φορτίων απόρριψης προκειμένου να συμπίπτει η συνολική ηλεκτρική ζήτηση με την παραγόμενη ισχύ. Ο ελεγκτής δευτερεύοντος φορτίου θα ενεργεί για τον έλεγχο της συχνότητας του κύριου ζυγού κατά τη λειτουργία σε υψηλά επίπεδα διείσδυσης της αιολικής ισχύος.
4. **Ελεγκτής ενεργειακής αποθήκευσης:** Αυτός είναι μία αυτοτελής λογισμική μονάδα που παρέχει έλεγχο γενικής εποπτείας αλλά και της κατάστασης σ’ ένα σύστημα

αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. μια συστοιχία μπαταριών. Ο ελεγκτής παρέχει υποστήριξη στα φορτία κατά τη λειτουργία αποκλειστικά με αιολικά.

5. *Μονάδες μηχανών/γεννητριών*: Κάθε μηχανή πρέπει να διαθέτει ένα σύστημα για τον έλεγχό της και έναν ηλεκτρονικό ρυθμιστή. Αυτά είναι συνήθεις συνιστώσες εξοπλισμού όλων των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών ντίζελ και ελέγχουν βασικές λειτουργίες των μηχανών. Κάθε γεννήτρια πρέπει να διαθέτει έναν αυτόματο ρυθμιστή τάσης ως τμήμα του συνήθους εξοπλισμού της. Το σύστημα ελέγχου των μηχανών καθορίζει την αλληλοδιαδοχή και το συγχρονισμό τους, καθώς και την κατανομή του φορτίου και της άεργης ισχύος μεταξύ των γεννητριών.
6. *Ελεγκτής του σύγχρονου πυκνωτή*: Αποτελείται από μία σύγχρονη γεννήτρια με ιππάριο συμπλοκής για την εκκίνηση και έναν αυτόματο ρυθμιστή της τάσης. Το συγχρονισμό και τον έλεγχο της μονάδας υλοποιεί ένας συνήθης ελεγκτής ισχύος με προσαρμογές στο λογισμικό. Στις εφαρμογές με αποθήκευση μπαταριών, ο σύγχρονος πυκνωτής αντικαθίσταται από έναν περιστροφικό μεταλλάκτη, ο οποίος αναλαμβάνει τις λειτουργίες του σύγχρονου πυκνωτή, μαζί με τη φόρτιση της μπαταρίας και την αντιστροφή.
7. *Μονάδα επεξεργασίας μηνυμάτων*: Πρόκειται για μία υπολογιστική πλατφόρμα εργασίας σε Η/Υ που συλλέγει δεδομένα από τις διάφορες πλατφόρμες ελέγχου. Αυτό το υποσύστημα είναι δυνατό να διαμορφωθεί με μία οθόνη που εξυπηρετεί τη σύνδεση με έναν τοπικό χειριστή. Η μονάδα επεξεργασίας μηνυμάτων δρα ως μια διάταξη συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων μέσω της οποίας μπορούν να ανακτηθούν τα δεδομένα λειτουργίας μέσω τηλε-ζεύξης. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατό μία εταιρεία ηλεκτρισμού ή κάποιος άλλος απόμακρος προμηθευτής να συνδέεται σε πραγματικό χρόνο με το σύστημα ελέγχου. Η μονάδα είναι ικανή να επικοινωνεί με χρήση του δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου, του διαδικτύου, μόντεμ ασύρματου, μικροκυμάτων ή δορυφορικού, ή μέσω κινητού τηλεφώνου.
8. *Είσοδοι/έξοδοι μέσω δικτύου*: Για να καταστεί δυνατός ο διεξοδικός έλεγχος των επικουρικών απαιτήσεων της εγκατάστασης, όπως είναι τα περιβαλλοντικά και τα θερμικά συστήματα, ή των ειδικών εφαρμογών των φορτίων απόρριψης, όπως είναι οι ηλεκτρικές θερμάστρες, η αφαλάτωση ή η παγοποίια, η αρχιτεκτονική του συστήματος πρέπει να επιτρέπει την προσθήκη περαιτέρω εισόδων/εξόδων και ικανότητας επεξεργασίας στα δίκτυα επικοινωνιών Modbus ή Echelon. Αυτό το χαρακτηριστικό παρέχει ευελιξία στην αρχιτεκτονική του συνολικού ελέγχου ώστε να ανταποκρίνεται σε πληθώρα εφαρμογών χωρίς να απαιτούνται παράλληλα κατά παραγγελία συστήματα ελέγχου ή να υπάρχουν δυσμενείς επιπτώσεις στο κόστος των επιμέρους συνιστώσων.

7.5.2. Υψηλής διείσδυσης στο ζυγό EP συστήματα αιολικών-ντίζελ

Τα υψηλής διείσδυσης στο ζυγό EP συστήματα αιολικών-ντίζελ απαιτούν σύνθετους ελέγχους, και από μηχανολογικής πλευράς χρειάζονται σημαντικές προσπάθειες για την περαιτέρω εξέλιξή τους. Η αρχιτεκτονική του ζυγού EP προκύπτει ότι είναι η πιο αποδοτική επιλογή από οικονομικής πλευράς για τα μεγαλύτερα ($> 100 \text{ kW}$) υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής (σχήμα 7.12). Η κρίσιμη παράμετρος είναι η ένταξη των συστημάτων. Οι επιμέρους συνιστώσες ενός συστήματος EP μπορούν να είναι εξίσου αξιόπιστες με αυτές ενός συστήματος ΣΡ.



Σχήμα 7.12. Παράδειγμα ενός υβριδικού συστήματος ζυγού ΕΡ περιλαμβανομένων των συστημάτων ελέγχου

Οι βασικές αρχές ελέγχου των υβριδικών συστημάτων ισχύος στο ζυγό ΕΡ είναι οι ακόλουθες:

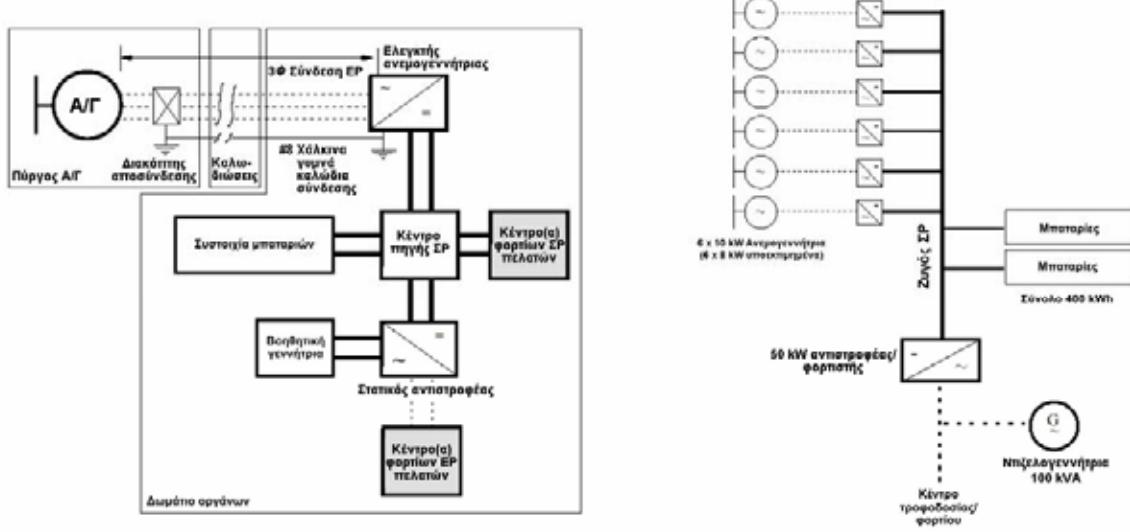
1. Η συχνότητα ελέγχεται διατηρώντας μία ισορροπία πραγματικής ισχύος μεταξύ:
 - των φορτίων απόρριψης,
 - του ελέγχου της ισχύος προς και από την αποθήκη ενέργειας,
 - του φορτίου των ντίζελογεννητριών, σύμφωνα με τον τύπο γεννήτριας:
 - συνήθης ντίζελ, ή
 - ντίζελ μεταβλητής ταχύτητας,
 - των ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας με ελεγχόμενη παραγωγή.
2. Η τάση ελέγχεται διατηρώντας μία ισορροπία της άεργης ισχύος με τη χρήση:
 - ρυθμιστή της τάσης των ντίζελογεννητριών,
 - σύγχρονο πτυκνωτή,
 - στατικό αντισταθμιστή των VAR.

7.5.3. Συστήματα ζυγού ΣΡ

Τα υβριδικά συστήματα ζυγού ΣΡ, όπως αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.13, έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ελέγχου που συνήθως περιλαμβάνουν:

- Υπέρβαση τάσης των μπαταριών - ρυθμιστές αιολικών και Φ/Β.
- Χαμηλή τάση των μπαταριών (διάχυση φορτίου) - αντιστροφέα.
- Αντιστάθμιση των μπαταριών - ρυθμιστές αιολικών και Φ/Β.
- Βοηθητική εκκίνηση / παύση της γεννήτριας - αντιστροφέας ή κέντρο πηγής ΣΡ.
- Δεν απαιτείται κεντρικός ελεγκτής για την παρακολούθηση όλων των πηγών και των φορτίων.
- Οι περισσότεροι έλεγχοι ανακύπτουν από την τάση του ζυγού ΣΡ (τάση της συστοιχίας των μπαταριών).

- Δεν λειτουργούν επίσης τα συστήματα εποπτείας της κατάστασης της φόρτισης ή ελέγχου με ενεργειακές καταγραφές (π.χ. καθαρά Αμπερ-ώρια).
- Κάποιοι προτιμούν να διαθέτουν χειροκίνητη βοηθητική ισχύ, ελεγχόμενη μέσω επιτόπιων χειρισμών.



Μεμονωμένη ανεμογεννήτρια

Πολλές ανεμογεννήτριες

Σχήμα 7.13. Αρχιτεκτονική ενός συστήματος ζυγού ΣΡ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Τεχνολογία	Μέγεθος της εγκατάστασης	Δυνατές/πραγματικές εφαρμογές για παραγωγή ηλεκτρισμού	Αποδοτικότητα	Διαθεσιμότητα στο εμπόριο	Εκπιμώμενο κόστος συστήματος
Μπαταρίες	Από 100W έως 20 MW	- Στρεφόμενη εφεδρεία - Ενσωμάτωση σε ΑΠΕ - Εφαρμογές Μ&Δ - Ποιότητα ισχύος - Εξομάλυνση αιχμών	0,7 - 0,9	(Μολύβδου-οξεώς, αλκαλικές) Οχι (Ψευδ./βραυμδίου, Λιθίου)	200 - 300 €/kW (τάξης kW) 750 - 1000 €/kW (δεκάδες MW, 2 hrs) 500 - 600 €/kW (δεκάδες MW, 0,5 hr) 400 - 600 €/kW (2 MW, 10-20 sec)
Αντλούμενα υδροηλεκτρικά	'Εως 2,1 GW	- Εξισορρόπηση φορτίου - Στρεφόμενη εφεδρεία - Εξομάλυνση αιχμών - Εφαρμογές Μ&Δ - Στρεφόμενη εφεδρεία	0,75	Ναι	300 - 500 €/kW
ΕΑΣΔ	25 MW έως 350 MW	- Επιστρέψιμη στροφή - Στρεφόμενη εφεδρεία	0,7	Ναι	350 - 500 €/kW (εκπιμήσεις εμπορικών μονάδων)
Σφρόνδυλοι	Της τάξης του kW	Ποιότητα σιχύος	0,7 - 0,9	(Χαλύβδινοι, χαμηλές σ.α.λ.) Οχι (Εξελιγμένα συνθετικά)	Χαλύβδινοι: 300 €/kW (1MW, 15sec) Εξελιγμένοι: 6 000 €/kW (~1 kW) 3 000 €/kW (~20 kW)
ΥΜΕΑ	Από 1 - 10 MW (μικρο-ΥΜΕΑ) Έως 10-100 MW	- Εφαρμογές Μ&Δ - Ποιότητα ισχύος	0,9 - 0,95	Ναι (μικρο-ΥΜΕΑ) Οχι (μεγαλύτερες μονάδες)	500 - 1000 €/kW (1-2MW, 1sec)
Υπερπτυκνωτές	7 - 10 W ειπωτικοί 10 - 20 kW πρωτότυποι	Ποιότητα σιχύος	0,9 - 0,95	(Χαμηλή τάση, ισχύς αναμονής) Οχι (Ποιότητα ισχύος)	500 €/kW

8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο στόχος της Ευρωπαϊκής Κοινότητας για διπλασιασμό του παρόντος μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέχρι το 2010, φθάνοντας έτσι η συμμετοχή τους στο 12% της πρωτογενούς κατανάλωσης της Ε.Ε., θεωρείται γενικά ως ένας ρεαλιστικός στόχος και ένα αναγκαίο πρώτο βήμα για την εναρμόνιση με τις διεθνείς δεσμεύσεις για την προστασία του περιβάλλοντος. Παρά την αξιόλογη τεχνολογική πρόοδο που έχει επιτευχθεί τελευταία και την αυξανόμενη ανταγωνιστικότητα των τεχνολογιών ΑΠΕ, η ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα των ανανεώσιμων πηγών στο Ευρωπαϊκό ενεργειακό σύστημα δεν είναι εύκολη υπόθεση.

Οι διαθέσιμες τεχνικές επιλογές μπορούν να ικανοποιήσουν τις διάφορες φιλοδοξίες μόνο όταν εξετάζονται στα πλαίσια ενός συνολικού σχεδιασμού και χρησιμοποιούνται σε σύνθετα σχήματα που στόχο έχουν τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας. Αυτό σημαίνει ότι, πρέπει να γίνουν σημαντικές αλλαγές στις υπάρχουσες ενεργειακές υποδομές ώστε να εισαχθούν οι ΑΠΕ κατά ένα βέλτιστο τρόπο. Εξάλλου, εάν ο μακροπρόθεσμος στόχος είναι να διαδραματίσουν οι ανανεώσιμες πηγές εξέχοντα ρόλο στη συνολική ενεργειακή τροφοδοσία, πρέπει να λάβει χώρα μια ριζική ανανέωση των ενεργειακών υποδομών.

Κατά βάση, τα διάφορα συστήματα και σχήματα ΑΠΕ είναι θεμιτό να αποτελούνται αποκλειστικά από τεχνολογίες ανανεώσιμων μέχρι και στο 100% της τροφοδοσίας από κεντρικά συστήματα ΑΠΕ, καθώς και η ενσωμάτωση των αποκεντρωμένων σχημάτων ΑΠΕ στα υφιστάμενα ενεργειακά συστήματα. Στην πράξη, η ενεργειακή τροφοδοσία συχνά περιλαμβάνει ενεργειακές πηγές ορυκτών καυσίμων για λόγους υποστήριξης και εφεδρείας, ειδικά όταν τα συστήματα ΑΠΕ εισάγονται σε συστήματα τροφοδοσίας με υφιστάμενους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ορυκτών καυσίμων. Επίσης, όταν εφαρμόζονται μεμονωμένα οι τεχνολογίες των ΑΠΕ μειονεκτούν σε σύγκριση με την ικανότητα των παραδοσιακών τεχνολογιών παραγωγής με ορυκτά καύσιμα να παρέχουν σταθερή ισχύ με αποδεκτά υψηλές τιμές δυναμικού.

Για το λόγο αυτό, προκειμένου να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό των τεχνολογιών ΑΠΕ, θα πρέπει αυτές να χρησιμοποιούνται μαζί κατά ένα ολοκληρωμένο τρόπο που να περιλαμβάνει υβριδικά σχήματα. Αυτά τα ολοκληρωμένα συστήματα μπορεί να αποτελούνται από τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες ΑΠΕ, αποθήκευσης ενέργειας ή/και με τεχνολογίες ρύθμισης της ισχύος, και μπορούν να εφαρμόζονται σε διαφορετικές διαμορφώσεις (κεντρικά συστήματα για τοπική τροφοδοσία ηλεκτρισμού ή κατανεμημένα συστήματα για περιφερειακή ηλεκτρική τροφοδοσία), προσαρμοσμένες στις συνθήκες και τις δυνατότητες της κάθε συγκεκριμένης τοποθεσίας, ώστε να εξασφαλίζουν σταθερή και αξιόπιστη ισχύ.

Εν τέλει, τα συστήματα ΑΠΕ μπορούν να αναπτυχθούν σε βασισμένα αποκλειστικά στις ΑΠΕ σχήματα που περιλαμβάνουν νέους τύπους κομιστών ενέργειας, όπως το υδρογόνο, σε συνδυασμό με νέους τρόπους παροχής και διαχείρισης της ζήτησης της ενέργειας από τους τελικούς χρήστες. Τελευταία έχει γίνει ευρέως αποδεκτό ότι η τεχνική πρόοδος είναι μία αναγκαία αλλά όχι και ικανή συνθήκη για τη διείσδυση σε

μεγάλη κλίμακα των ΑΠΕ. Όσον αφορά το κόστος των τεχνολογιών ΑΠΕ, οι ατέλειες της υφιστάμενης αγοράς περιορίζουν ακόμα την καθιέρωση δίκαιου ανταγωνισμού με τα συμβατικά συστήματα. Αυτό μπορεί να απειλήσει σοβαρά την περαιτέρω εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ στην εσωτερική αγορά ηλεκτρισμού της Ε.Ε. και, έτσι, να υποσκαφθεί η συμμόρφωση με τους στόχους που τέθηκαν στη Λευκή Βίβλο για τις ΑΠΕ και με τις δεσμεύσεις του Κιότο.

Η πρόταση της Επιτροπής για μία Οδηγία για «την προώθηση του ηλεκτρισμού από ΑΠΕ στην εσωτερική αγορά ηλεκτρισμού» παρέχει ένα ισχυρό πλαίσιο για την ελαχιστοποίηση των σχετικών κινδύνων. Οι πρόσφατες εμπειρίες σε διάφορες χώρες ή περιφέρειες της Ε.Ε. καταδεικνύουν ότι υπάρχουν τρόποι για επιτυχή υλοποίηση των συστημάτων ΑΠΕ, ακόμα και σε μία αγορά που απελευθερώνεται με ταχείς ρυθμούς. Τέλος, οι νέοι περιορισμοί για την προστασία του περιβάλλοντος και την αέναη ανάπτυξη καθιερώνουν ένα πολύ θετικό πλαίσιο, ευνοώντας την επιλογή των ΑΠΕ έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας.

8.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ Α.Π.Ε. ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

8.2.1. Παρούσα κατάσταση

Τελευταία παρατηρείται μία σημαντική αύξηση του ενδιαφέροντος που επιδεικνύουν κυβερνήσεις, οι ενεργειακοί σχεδιαστές, εταιρείες ηλεκτρισμού και ιδιώτες επενδυτές για την ένταξη των τεχνολογιών ΑΠΕ στο χαρτοφυλάκιο ενεργειακής τροφοδοσίας. Μακροπρόθεσμος στόχος της Ευρωπαϊκής πολιτικής είναι μία σημαντική συνεισφορά (12% το έτος 2010) από προερχόμενη από την Ευρώπη ανανεώσιμη ενέργεια, η οποία ειδικά για τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής προγραμματίζεται να ανέλθει στο 22,1% της ακαθάριστης κατανάλωσης ηλεκτρισμού μέχρι το 2010 (12,5% χωρίς τα μεγάλα υδροηλεκτρικά). Ο στόχος αυτός επηρεάζεται από το αυξανόμενο ενδιαφέρον σχετικά με τα εξωτερικά κόστη (τα σχετικά με τις εκπομπές CO₂ και άλλα).

Οι πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες ΑΠΕ σήμερα βασίζονται στον άνεμο, τη βιομάζα και την ηλιακή ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή αλλά και για παραγωγή θερμότητας. Προς το παρόν οι εφαρμογές των ΑΠΕ αφορούν κυρίως μία τεχνολογία ΑΠΕ κάθε φορά, π.χ. αιολικά πάρκα, Φ/Β συστήματα, κλπ. Μέχρι τώρα η Έρευνα και Ανάπτυξη (Ε&Α) διεθνώς γύρω από τα υβριδικά συστήματα ΑΠΕ έχει εστιαστεί κυρίως στα συστήματα αιολικών / ντίζελ, ενώ τα μελλοντικά προγράμματα προβλέπεται να επικεντρωθούν περισσότερο σε συστήματα ΑΠΕ στα οποία θα ενσωματώνονται αρκετές από τις τεχνολογίες αυτές.

Οι προσπάθειες Ε&Α στο πεδίο των ΑΠΕ βρίσκονται σε συμφωνία με τις εθνικές και Ευρωπαϊκές πολιτικές για την ενέργεια, και από το πρόγραμμα Πλαίσιο της Ε.Ε. έχουν διατεθεί σημαντικές χρηματοδοτήσεις για την ανάπτυξη των τεχνολογιών ΑΠΕ, ιδιαίτερα των υβριδικών. Υπάρχουν επίσης συμπληρωματικά εθνικά προγράμματα Ε&Α που εστιάζουν σε διαφορετικούς τομείς των ΑΠΕ, ανάλογα με τους εθνικούς πόρους και τις προτεραιότητες. Σε καθαρά οικονομική βάση, όταν δηλαδή δεν

συνυπολογίζονται τα εξωτερικά κόστη, οι τεχνολογίες των ΑΠΕ δεν είναι ακόμα πλήρως ανταγωνιστικές με τις υπάρχουσες τεχνολογίες ενεργειακής τροφοδοσίας.

Πάντως, προβλέπεται γενικά ότι οι νέες τεχνολογίες ΑΠΕ (αιολικά, φωτοβολταϊκά, θερμικά ηλιακά, βιομάζα κλπ.) θα καταστούν σταδιακά οικονομικώς ανταγωνιστικές προς τις εγκαταστάσεις των πυρηνικών και των ορυκτών καυσίμων, ενώ κάποιες από αυτές, όπως τα αιολικά, θα είναι πλήρως ανταγωνιστικές μέσα σε ένα χρονικό ορίζοντα από 10 έως 20 χρόνια (η τεχνολογία των αιολικών είναι ήδη ανταγωνιστική στις περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό). Σε δεύτερο επίπεδο, η παραπάνω προσπάθεια συμπληρώνεται με δράσεις διάδοσης που στόχο έχουν τη δημιουργία μίας “κρίσιμης μάζας” για τη δυναμική ανάπτυξη της αγοράς.

Χαρακτηριστικά αυτού του σταδίου είναι οι συνθήκες για ένα σταθερό και ευνοϊκό πλαίσιο που να αντικατοπτρίζει τα κοινωνικά και τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα των ΑΠΕ. Τελευταία, τα ήδη εφαρμοζόμενα ή υπό συζήτηση συστήματα διάδοσης δίνουν έμφαση σε στοιχεία της αγοράς (ανταγωνισμός, δημοσιονομικά κίνητρα) και υποδεικνύουν ένα τρίτο επίπεδο διάδοσης. Έτσι, τελευταία έχουν αυξηθεί τα μέτρα “έμμεσης” υποστήριξης, κυρίως ευνοϊκά τιμολόγια πώλησης του ηλεκτρισμού από ΑΠΕ και χαμηλότοκα δάνεια, που σταδιακά καθίστανται πολύ πιο σημαντικά από τα εργαλεία “άμεσης” υποστήριξης (επιχορηγήσεις, επιδοτήσεις, κλπ.).

Κανονικά, το ποσοστό “υποστήριξης” που περιέχεται στις πληρωμές του ηλεκτρισμού από ΑΠΕ που διοχετεύεται στο δίκτυο είναι το κυριότερο μεμονωμένο υποστηρικτικό μέτρο (965 Μ€ κατ’ έτος). Η συνολική ενίσχυση των ΑΠΕ στην Ε.Ε., σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο, είναι στην πραγματικότητα 1,7 Β€ περίπου, για συνολική δαπάνη (ενίσχυση συν τις αντίστοιχες ιδιωτικές επενδύσεις) της τάξης των 2,9 Β€. Οι ετήσιες επενδύσεις που απαιτούνται προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος του μεριδίου 12% των ΑΠΕ στην ενεργειακή τροφοδοσία το 2010 εκτιμώνται στη Λευκή Βίβλο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής σε 6,8 Β€ περίπου. Προφανώς, παρόλη την πρόοδο που έχει επιτευχθεί, στο μέλλον θα χρειαστούν σημαντικές πρόσθετες προσπάθειες.

8.2.2. Στρατηγικές για τις ΑΠΕ

Η μόνη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που είχε αξιοποιηθεί σε σημαντικό βαθμό πριν το 1990 είναι η υδροηλεκτρική, κυρίως τα μεγάλα υδροηλεκτρικά. Από τότε υπήρξε σημαντική ανάπτυξη για όλες τις νέες ΑΠΕ, σε ποσοστό 15-30% ετησίως. Η εξέλιξη αυτή οφείλεται σε διάφορα υποστηρικτικά μέτρα τόσο των κυβερνήσεων όσο και της Ευρωπαϊκής Κοινότητας. Πάντως, η συνολική συνεισφορά των ΑΠΕ στην αγορά ηλεκτρισμού της Ε.Ε. παραμένει ακόμα μικρή, γύρω στο 3% εάν εξαιρεθούν τα μεγάλα υδροηλεκτρικά. Εάν οι ευρωπαϊκές χώρες επιθυμούν να διαδραματίσουν οι ΑΠΕ έναν ουσιαστικό ρόλο στην ενεργειακή τροφοδοσία, χρειάζονται να επενδύσει και η βιομηχανία σε τεχνολογίες ΑΠΕ.

Αυτό θα συμβεί μόνο όταν οι εκπρόσωποι της βιομηχανίας αποκτήσουν εμπιστοσύνη στις συνθήκες ενός αξιόπιστου και ευνοϊκού μακροπρόθεσμου πλαισίου. Συνθήκες αυτού του είδους θα υπάρξουν μόνο εάν οι κυβερνήσεις θέτουν ξεκάθαρους στόχους,

αναγνωρίζουν και εξαλείφουν τα μη τεχνικά εμπόδια, και, εν τέλει, εφόσον παρέχουν οικονομική στήριξη. Η πλειοψηφία των κυβερνήσεων έχουν υιοθετήσει στρατηγικές προώθησης των ΑΠΕ ως ένα αναπόσπαστο τμήμα της εθνικής τους ενεργειακής πολιτικής. Οι στρατηγικές αυτές έχουν δημοσιευθεί υπό μορφή επίσημων κειμένων.

Η Λευκή Βίβλος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής έχει παρακινήσει τις κυβερνήσεις των Κρατών Μελών ώστε να προετοιμάσουν τις αντίστοιχες Πράσινες (Ιρλανδία) ή Λευκές (Ισπανία, Ιταλία) Βίβλους τους. Αυτές συνήθως περιλαμβάνουν στόχους και πολυετή Σχέδια Δράσης που αντιμετωπίζουν θέματα όπως η εγκατάσταση των συστημάτων ΑΠΕ, καθώς επίσης διοικητικά, νομικά και άλλα μέτρα και δράσεις προώθησης. Από την άλλη, πολλές χώρες (π.χ. Αυστρία, Φιλανδία, Σουηδία) παραδοσιακά διαθέτουν ένα υψηλό μερίδιο των ΑΠΕ στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, που βασίζεται κυρίως σε μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς και στη βιομάζα.

Παρόλο που το μερίδιο των ΑΠΕ στις χώρες αυτές είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τον υιοθετημένο στόχο της συμμετοχής των ΑΠΕ κατά 12% έως το 2010 σε όλη την Ε.Ε., οι εθνικές τους πολιτικές στοχεύουν στην περαιτέρω αύξηση της συνεισφοράς των ΑΠΕ. Η Δανία, η Ολλανδία, η Ελλάδα και η Ισπανία αποτελούν παραδείγματα χωρών που εκκίνησαν με μικρό μερίδιο ΑΠΕ τη δεκαετία του '70 και στη συνέχεια υιοθέτησαν μεσο- και μακροπρόθεσμους αντικειμενικούς στόχους και σχέδια δράσης με περιβαλλοντικούς στόχους (μείωση αερίων του θερμοκηπίου). Οι εθνικές εκθέσεις τους αποδεικνύουν ότι τέτοιοι στόχοι, βασιζόμενοι σε μία ευρεία πολιτική συναίνεση και επίπεδο αποδοχής, έχουν προοδευτικές και ενθαρρυντικές επιπτώσεις.

Για παράδειγμα, οι στόχοι της Ισπανίας για το 2000 είχαν υπερκαλυφθεί κατά σχεδόν 200% (περιλαμβανομένων των υπό κατασκευή έργων) ήδη από τα τέλη του 1997. Η Αυστρία δεν έχει εθνικούς αλλά περιφερειακούς στόχους. Μία από τις περιφέρειες, η Άνω Αυστρία, έχει ως τελικό στόχο την τροφοδοσία κατά 100% από ΑΠΕ τα προσεχή χρόνια. Ανάμεσα στις χώρες χωρίς εθνικούς στόχους (τουλάχιστον προς το παρόν) είναι η Γερμανία και η Γαλλία, οι χώρες με την υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση στην Ε.Ε. Δύο ομοσπονδιακά κρατίδια της Γερμανίας έχουν στόχους που ξεπερνούν αυτούς της Λευκής Βίβλου, η Βαυαρία με 13% της πρωτογενούς ενέργειας μέχρι το 2000, και το Schleswig-Holstein με 25% της τελικής ζήτησης ενέργειας έως το 2010.

8.2.3. Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας

Την 19^η Φεβρουαρίου του 1997 τέθηκε σε ισχύ η Οδηγία 96/92/ΕC για την Εσωτερική Αγορά Ηλεκτρισμού. Κάθε χώρα είχε ένα περιθώριο 2 ετών για να προσαρμόσει την εθνική της νομοθεσία. Μετά την Οδηγία για τη διαφάνεια των τιμών (90/377/EG - από 29/6/1990) για τον ηλεκτρισμό και το φυσικό αέριο και αυτήν για τη διακίνηση του ηλεκτρισμού (90/547/EG - από 20/10/1990), η εν λόγω Οδηγία αποτελεί το τελευταίο βήμα για την απελευθέρωση του τομέα του ηλεκτρισμού στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Η Οδηγία καθιερώνει κοινούς κανόνες για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή του ηλεκτρισμού. Επίσης, θέτει τους κανόνες που σχετίζονται με την οργάνωση και τη λειτουργία του ηλεκτρικού τομέα, ειδικότερα:

- την πρόσβαση στην αγορά,
- τα κριτήρια και τις διαδικασίες που θα εφαρμόζονται για την υποβολή προτάσεων και την εκχώρηση των αδειοδοτήσεων,
- τη λειτουργία των συστημάτων.

Η Οδηγία υποδεικνύει τους ελάχιστους στόχους που πρέπει να επιτευχθούν:

- Το μερίδιο των εθνικών αγορών που έπρεπε να είχε απελευθερωθεί μέχρι τον Φεβρουάριο του 1999 υπολογίστηκε με βάση το ποσοστό του ηλεκτρισμού που καταναλώνεται στην Ε.Ε. από τους τελικούς πελάτες με κατανάλωση άνω των 40 GWh ανά έτος (βάσει της κατανάλωσης ανά εγκατάσταση, περιλαμβανομένης της ιδιο-παραγωγής). Κατά μέσο όρο, η προκύπτουσα απελευθέρωση της αγοράς στην Κοινότητα κατά την ημερομηνία αυτή θα έπρεπε να ήταν περίπου 23%.
- Το μερίδιο των εθνικών αγορών που απελευθερώνεται θα αυξάνεται σταδιακά σε μία περίοδο έξι ετών. Το 2000, το όριο της Κοινοτικής κατανάλωσης μειώνεται από τις 40 GWh στις 20 GWh ετήσιας ηλεκτρικής κατανάλωσης, και το 2003 θα πρέπει να μειωθεί περαιτέρω στις 9 GWh.

Τα Κράτη Μέλη καθορίζουν εντός της επικράτειάς τους εκείνους τους καταναλωτές που έχουν το νόμιμο δικαίωμα να συνάπτουν συμβάσεις προμήθειας ηλεκτρισμού, υπό την προϋπόθεση ότι στην παραπάνω κατηγορία πρέπει να περιληφθούν όλοι οι τελικοί χρήστες με κατανάλωση άνω των 100 GWh/έτος (συνολική κατανάλωση της εγκατάστασης, μαζί με την ιδιο-παραγωγή). Αυτοί είναι οι “επιλέξιμοι καταναλωτές”. Οι εταιρείες διανομής, εάν δεν έχουν ήδη χαρακτηριστεί ως επιλέξιμοι καταναλωτές, έχουν τη δυνατότητα να συνάπτουν συμβάσεις για την ποσότητα του ηλεκτρισμού που καταναλώνεται από τους πελάτες τους που έχουν χαρακτηριστεί ως επιλέξιμοι εντός του συστήματος διανομής τους, με σκοπό να τους τροφοδοτούν.

Τον Μάρτιο του 2000, τέσσερα Κράτη Μέλη, συγκεκριμένα η Σουηδία, η Φιλανδία, η Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο, είχαν απελευθερώσει πλήρως την αγορά του ηλεκτρισμού σ' αυτά. Η Δανία έχει σχεδόν εξ ολοκλήρου ανοίξει την αγορά της (90%). Στο Βέλγιο, την Ελλάδα και την Ιρλανδία έχει διοθεί, λόγω των ιδιαίτερων τεχνικών χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών τους συστημάτων, μία παράταση 1, 2 και 1 ετών αντίστοιχα για να εφαρμόσουν τις δεσμεύσεις που υποδεικνύονται από την Οδηγία.

Η Ελλάδα άνοιξε την αγορά ηλεκτρισμού της το Φεβρουάριο του 2001 (34,5%), και το Βέλγιο και η Ιρλανδία άρχισαν να ανοίγουν τις αγορές τους στις 19 Φεβρουαρίου του 2000 κατά 33 και 30%, αντίστοιχα. Η Γαλλία έχει επιλέξει την ελάχιστη δυνατή απελευθέρωση, και άνοιξε την αγορά της μόλις τον Ιανουάριο του 2000 (με σχεδόν ένα χρόνο καθυστέρηση) σε ποσοστό 30%. Τα άλλα Κράτη Μέλη έχουν διαφορετικά επίπεδα απελευθέρωσης που κυμαίνονται από 30 ως 45% (Αυστρία 30%, Ιταλία 35%, Πορτογαλία 30%, Ολλανδία 32%, Ισπανία 42%).

8.2.4. Ολοκληρωμένα έργα ΑΠΕ

Έχει συνειδητοποιηθεί ότι οι τεχνολογίες ΑΠΕ θα πρέπει να εφαρμόζονται σε μεταξύ

τους συνδυασμούς, ώστε να αλληλοσυμπληρώνονται και να βελτιώνονται οι τιμές του δυναμικού τους. Προς το παρόν ελάχιστοι κατασκευαστές έχουν ως στόχο ειδικά τα συστήματα, αλλά υπάρχουν προμηθευτές υβριδικών συστημάτων αιολικών/ντίζελ (συστήματα Α/Γ και ντιζελογεννητριών, μαζί με ακόμα μία τεχνολογία ΑΠΕ, συνήθως Φ/Β) με αναπτυξιακές στρατηγικές που στοχεύουν στα ολοκληρωμένα συστήματα ΑΠΕ. Παρόλο που δεν υφίσταται ευρεία εφαρμογή των ολοκληρωμένων συστημάτων ΑΠΕ, έχει ήδη υλοποιηθεί ένας αριθμός από πιλοτικές εγκαταστάσεις και επιδεικτικά έργα, των οποίων η λειτουργία προσθέτει στη συσσώρευση εμπειρίας.

Η ανάπτυξη και εφαρμογή των ολοκληρωμένων συστημάτων ΑΠΕ στοχεύει προς το παρόν στην τροφοδοσία με ηλεκτρισμό των δικτύων, με θερμότητα για χρήση της σε τηλε-θέρμανση και ως θερμότητα διεργασιών, και με κομιστές ενέργειας όπως το βιοαέριο και τα βιοκαύσιμα (και στο απώτερο μέλλον υδρογόνο από ηλεκτρόλυση). Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών έχει επίσης διερευνηθεί η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο αστικό περιβάλλον με τη χρήση παθητικών και ενεργητικών συστημάτων. Έχει σχεδιαστεί ένας αριθμός από πιλοτικά έργα για τη σύγχρονη αστικοποίηση (αρχές "ηλιακής πόλης"), στα οποία λαμβάνονται υπόψη οι νέες τεχνικές κλιματισμού με σκοπό να αναπτυχθεί μία νέα ηλιακή και βιοκλιματική αρχιτεκτονική.

Προσοχή έχει επίσης δοθεί στις δυνατότητες παραγωγής νερού από ολοκληρωμένα συστήματα ΑΠΕ, ειδικά σε περιοχές όπως η Μεσόγειος όπου η παροχή φυσικού νερού είναι περιορισμένη. Ήδη διερευνάται μία νέα μέθοδος παραγωγής νερού σε αέναη βάση και με ένα ανεκτό για το ευρύ κοινό κόστος. Ταυτόχρονα, αναπτύσσονται διάφορα εργαλεία σχεδίασης για τη μοντελοποίηση των συστημάτων σε διάφορα επίπεδα, εκτιμώντας της πηγές και την απόδοσή τους, αλλά πρακτικά δεν έχουν καθιερωθεί κάποια πρότυπα ή συμφωνημένα κριτήρια αξιολόγησης.

8.3. ΘΕΜΑΤΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ

Υπάρχει ένας αριθμός από τεχνικές επιλογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιοποίηση των ΑΠΕ, σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής και τη διαθεσιμότητα των τοπικών πόρων. Ωστόσο, για την αύξηση της τεχνικής απόδοσης και τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ΑΠΕ, είναι ανάγκη να προαχθούν νέες αποδοτικές λύσεις που συνίστανται βασικά στην αξιοποίηση των συνεργιών μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών των ΑΠΕ αλλά και μεταξύ ανανεώσιμων και συμβατικών, συμπεριλαμβανομένων της διαχείρισης και αποθήκευσης της ενέργειας ή/και των τεχνολογιών ρύθμισης της ισχύος. Πάντως, η μαζική χρήση των ΑΠΕ σε υφιστάμενες υποδομές, η οποία μπορεί να επιφέρει μη επιθυμητές επιπτώσεις και διατάξεις, θα πρέπει να προσαρμόζεται στις συνθήκες της κάθε συγκεκριμένης θέσης έτσι ώστε να ξεασφαλίζεται εγγυημένη και αξιόπιστη τροφοδοσία.

8.3.1. Ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ

Αρκετά θέματα τεχνικής υφής αφορούν την ηλεκτροπαραγωγή με τη χρήση υψηλών επιπέδων διείσδυσης των ΑΠΕ. Αυτά περιγράφονται εν συντομίᾳ στα επόμενα.

8.3.1.1. Ο διαλείπων χαρακτήρας ορισμένων ΑΠΕ

Ως προς τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να λειτουργούν είτε συνεχώς είτε διακοπτόμενα. Οι αιολικές και ηλιακές εφαρμογές καθώς και αυτές των θαλασσίων κυμάτων δημιουργούν μία αρκετά διακοπτόμενη ενεργειακή παραγωγή, ενώ οι μονάδες βιομάζας, υδροηλεκτρικών και οι συμβατικές μπορούν να λειτουργούν συνεχώς. Προφανώς, οι διαλείπουσες πηγές δεν μπορούν να καλύπτουν αξιόπιστα τις αιχμές, εκτός εάν η παραγόμενη ενέργεια αποθηκεύεται σε κάποιο σύστημα αποθήκευσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, οι εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής με βιομάζα λειτουργούν όπως οι συμβατικές μονάδες και έτσι η ενσωμάτωσή τους δεν επηρεάζει τη σταθερότητα του ηλεκτρικού συστήματος.

Αντίθετα, για την εισαγωγή ενός υψηλού δυναμικού αιολικών πάρκων και ηλιακών θερμικών σταθμών σ' ένα ηλεκτρικό σύστημα προαπαιτείται η διενέργεια κατάλληλων μελετών, τόσο για τη μόνιμη κατάσταση όσο και για τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Το επίπεδο διαλειπτότητας ποικίλει μεταξύ των διάφορων τεχνολογιών ΑΠΕ. Επίσης, είναι σημαντικό να τονιστεί η διαφορά ανάμεσα στην προβλεψιμότητα και τη διαλειπτότητα. Κάποιες ΑΠΕ, όπως η παλιρροιακή, είναι διαλείπουσες αλλά προβλέψιμες. Η ηλιακή από Φ/Β στοιχεία είναι διαλείπουσα αλλά προβλέψιμη σε κάποιο βαθμό. Και οι δύο αυτές πηγές είναι πιο διαλείπουσες από τον άνεμο αφού η μεταβλητότητα της παραγωγής τους είναι μεγαλύτερη, ενώ υπάρχουν (προβλέψιμες) περίοδοι όπου τόσο η ηλιακή όσο και η παλιρροιακή ενέργεια μηδενίζονται.

Παρότι η παραγόμενη ισχύς από μεμονωμένες ανεμογεννήτριες (Α/Γ) παρουσιάζει σημαντική βραχυχρόνια μεταβλητότητα, όταν αυτές ομαδοποιούνται εντός ενός αιολικού πάρκου – ακόμα καλύτερα όταν πολλά αιολικά πάρκα αναπτύσσονται σε μία ευρεία έκταση – η συνδυασμένη δράση τους είναι πολύ πιο ομαλή. Η συνολική παραγωγή των αιολικών σπάνια μεταβάλλεται αρκετά γρήγορα ώστε να προκαλέσει πρόβλημα σε ένα σύστημα που πρέπει να είναι ικανό να αντιπαρέρχεται απότομες και σημαντικές απώλειες ισχύος, όπως περιγράφηκε ανωτέρω. Ο ρυθμός μεταβολής της αιολικής παραγωγής είναι πολύ μικρότερος από το εγκατεστημένο δυναμικό, και πραγματικά πολύ μικρός εντός μιας βραχυχρόνιας κλίμακας.

Από γερμανικά δεδομένα προερχόμενα από 1500 ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 350 MW περίπου, προέκυψε ότι ο μέσος ωριαίος ρυθμός μεταβολής ήταν $\pm 1\%$ του εγκατεστημένου δυναμικού. Οι μέγιστες μεταβολές που παρατηρήθηκαν σε μία ώρα ήταν μία μείωση κατά 23% και μία αύξηση 14%. Σε 4-ωρα διαστήματα οι μέγιστες μεταβολές ήταν μεγαλύτερες, στο $\pm 50\%$. Ανάλογα αποτελέσματα προέκυψαν από τη μελέτη έξι αιολικών πάρκων στη Βόρεια Ιρλανδία. Το μέγεθος της διακύμανσης της αιολικά παραγόμενης ισχύος σε μισά ωρα διαστήματα παρουσιάστηκε να είναι κυρίως εντός ενός εύρους 0-10%, και πολύ σπάνια να ξεπερνά το 20%. Ακόμα μεγαλύτερη προσοχή στην πρόβλεψη της παραγόμενης αιολικής ενέργειας έχει δοθεί στη Δανία.

Προς το παρόν οι εταιρείες ηλεκτρισμού της Δανίας χρησιμοποιούν δύο μοντέλα για το σκοπό αυτό, αλλά τον Απρίλιο του 2000 επρόκειτο να συγχωνευθούν αυτά ώστε

να προκύψει μία ανώτερη μέθοδος που θα βρίσκει εφαρμογή από όλες τις εταιρείες. Ορισμένοι άνεμοι, όπως οι θαλάσσιες αύρες ή άλλοι άνεμοι που προκαλούνται από θερμικά φαινόμενα, έχουν διάρθρωση που συμπίπτει αρκετά με τις φυσικές αιχμές της ζήτησης, για παράδειγμα όταν δυναμώνει ο άνεμος κατά τη δύση του ηλίου. Στα θερμά κλίματα μία ανάλογη κατάσταση προκύπτει με τα Φ/Β, καθώς στην υψηλότερη ηλιακή ακτινοβολία ανακύπτει και η μέγιστη ζήτηση για κλιματισμό. Στα ψυχρότερα κλίματα ισχύει το αντίθετο, δηλαδή η μεγαλύτερη ζήτηση είναι το χειμώνα, περίπου στις 5:30 μ.μ., όταν έχει δύσει ο ήλιος.

8.3.1.2. Ασφάλεια της ζήτησης ενέργειας και δυναμική συμπεριφορά των υβριδικών συστημάτων

Τα τυπικά υβριδικά συστήματα αποτελούνται από μία γεννήτρια ντίζελ, μία Φ/Β γεννήτρια και πιθανά από άλλες γεννήτριες, όπως ανεμογεννήτριες, υδροστροβίλους, κλπ., που αλληλοσυμπληρώνονται μεταξύ τους για την τροφοδοσία με ηλεκτρισμό. Μία συστοιχία μπαταριών, πιθανώς και άλλες μονάδες βραχυχρόνιας αποθήκευσης της ενέργειας, εξασφαλίζουν τη διαθεσιμότητα της ισχύος ανά πάσα χρονική στιγμή. Η ισχύς διανέμεται στα φορτία με τάση ΕΡ της συνήθους συχνότητας και εύρους.

Η ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων με χρήση αποκλειστικά ανανεώσιμων πηγών ενέργειας απαιτεί περαιτέρω δυναμικότητες αποθήκευσης. Προκειμένου η εν λόγω τεχνολογία να αντεπεξέλθει στην πληθώρα των εφαρμογών και των διαφορετικών απαιτήσεων σε ισχύ, έχει ιδιαίτερη σημασία η βελτίωση της αξιοπιστίας και της προσαρμοστικότητάς της για την προώθηση της ευρείας εφαρμογής των υβριδικών συστημάτων που χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες ΑΠΕ.

8.3.1.3. Διαχείριση ενέργειας και φορτίων

Η λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων με αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας εξελιγμένους αλγόριθμους, ικανούς να προβλέψουν τα φορτία και την ανανεώσιμη ισχύ. Ο απώτερος στόχος πρέπει να είναι η διατήρηση υψηλού επιπέδου αξιοπιστίας και ασφάλειας του συστήματος έναντι των δυναμικών διαταραχών. Έτσι, είναι αναγκαία η ανάπτυξη ενός ευπροσάρμοστου προηγμένου συστήματος ελέγχου που θα επιτυγχάνει τη βέλτιστη χρησιμοποίηση πολλαπλών ΑΠΕ, συμβουλεύοντας τους χειριστές για τις πιθανές επιδράσεις.

Οι τεχνικοί περιορισμοί που επιβάλλονται από τη διαθεσιμότητα και τη μεταβλητότητα των ΑΠΕ, καθώς επίσης και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής θα ελαττωθούν με την ανάπτυξη ενός προηγμένου συστήματος ελέγχου, το οποίο θα διασφαλίζει την ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος. Αντί να επιχειρείται η προσαρμογή της ηλεκτροπαραγωγής στη ζήτηση των καταναλωτών, η φιλοσοφία της “διαχείρισης των φορτίων” περιλαμβάνει μία αντίστροφη προσέγγιση και την ανάληψη δράσης για την τροποποίηση του φορτίου ώστε να αναγκασθεί να προσαρμοστεί στη διαθέσιμη ισχύ.

Όταν αξιολογείται η δυνατότητα εφαρμογής του ελέγχου των φορτίων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η συμπεριφορά των καταναλωτών. Αυτοί θα πρέπει να υπομείνουν μία σύνθετη δομή τιμολόγησης και να συνεργαστούν για τη χρονική κλιμάκωση των φορτίων τους. Το κίνητρο πάντοτε είναι η εξαιρετικά φθηνή ηλεκτρική ενέργεια για τους καταναλωτές κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και το αποτέλεσμα μπορεί να είναι η εξομάλυνση της ημερήσιας καμπύλης της ισχύος, το χαμηλό κόστος παραγωγής της ενέργειας, οι περιορισμένες απαιτήσεις για αποθήκευση, και η χρήση ενός πολύ μεγάλου ποσοστού της παραγόμενης ενέργειας.

8.3.1.4. Δυνατότητες ενεργειακής αποθήκευσης

Η φύση του ηλεκτρικού φορτίου, η μεταβλητότητα των ΑΠΕ και τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου εισάγουν την αναγκαιότητα για αποθήκευση της ενέργειας. Οι διατάξεις που εφαρμόζονται για αποθήκευση της ενέργειας παρουσιάζουν την ίδια ποικιλία με τις τεχνολογίες άμεσης χρήσης της. Η ενεργειακή αποθήκευση διακρίνεται σε βραχείας, μέσης και μακράς περιόδου. Από τεχνικής πλευράς, οι τεχνολογίες αποθήκευσης μπορούν να ομαδοποιηθούν με βάση τις μορφές της αποθηκευόμενης ενέργειας, δηλαδή μηχανική, θερμική ή ηλεκτρική. Στις κυριότερες διαθέσιμες επιλογές περιλαμβάνονται οι μπαταρίες, οι υδραυλικοί ή πνευματικοί συσσωρευτές, οι σφόνδυλοι και η αποθήκευση με άντληση. Κάποιες ειδικές εφαρμογές, όπως είναι η αφαλάτωση νερού, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως έμμεση αποθήκευση.

8.3.2. Ταξινόμηση των ενσωματωμένων συστημάτων ΑΠΕ

Είναι φανερό ότι υφίσταται ένα εύρος περιοχών που διαφέρουν σ' ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων, όπως είναι το μέγεθος, η πυκνότητα του πληθυσμού, οι κλιματολογικές συνθήκες, οι τεχνοτροπίες της δόμησης, τα πολιτισμικά πρότυπα, η διαθεσιμότητα σε πηγές και, φυσικά, στα χαρακτηριστικά του ενεργειακού συστήματος. Πάντως, αυτό που ενδιαφέρει κατά την εξέταση των προοπτικών ενσωμάτωσης των ΑΠΕ σε μία περιοχή μπορεί να περιοριστεί σ' ένα μικρό αριθμό χαρακτηριστικών όπως είναι:

- η πυκνότητα κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, σε σύγκριση με τη διαθεσιμότητα των ΑΠΕ,
- η διαθεσιμότητα και το είδος της ενεργειακής υποδομής,
- η διάρθρωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης,
- το μέγεθος.

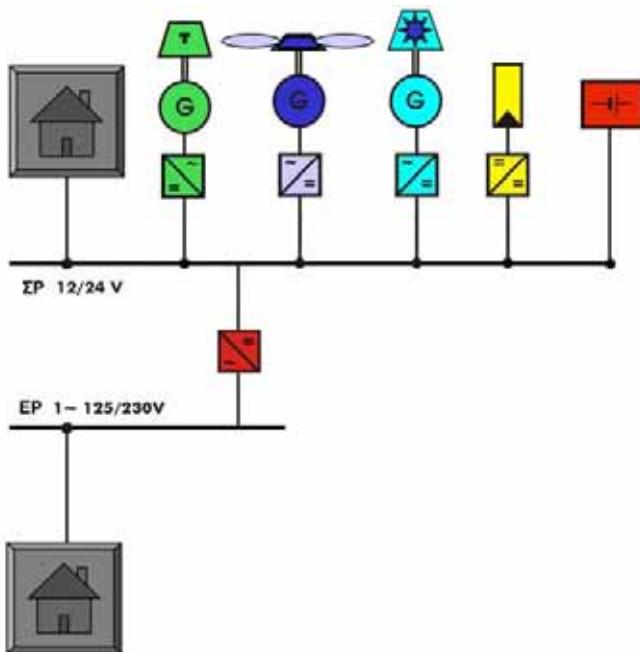
Μπορούν να εφαρμοσθούν διαφορετικοί συνδυασμοί των τεχνολογιών ΑΠΕ ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος του ενεργειακού συστήματος στο οποίο πρόκειται να ενσωματωθούν. Οι συνδυασμοί αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν ως ενσωματωμένα συστήματα ΑΠΕ για:

- μεμονωμένους καταναλωτές και μικρές ομάδες,
- αυτόνομα και απομονωμένα δίκτυα,
- τοπική ενεργειακή τροφοδοσία,
- περιφερειακή ενεργειακή τροφοδοσία.

Στη συνέχεια γίνεται μια περιεκτική παρουσίαση των παραπάνω συστημάτων.

8.3.2.1. Μεμονωμένοι καταναλωτές και μικρές ομάδες

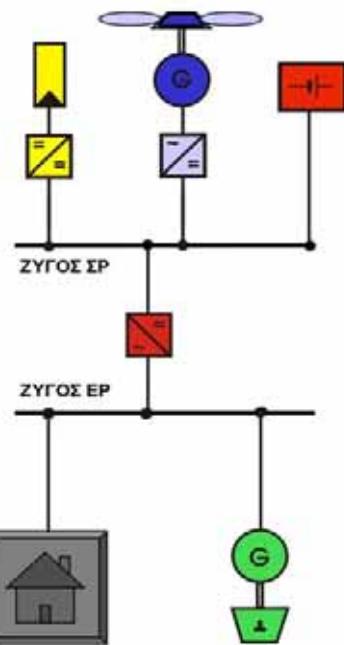
Τα φωτοβολταϊκά έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την τροφοδοσία μικρών και πολύ μικρών καταναλώσεων. Τα οικιακά ηλιακά συστήματα μέχρι 100 Watt περίπου που απαρτίζονται από Φ/Β στοιχεία, μπαταρίες και ελεγκτές φόρτισης αποτελούν μία από τις πιο καθιερωμένες εφαρμογές. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται περισσότερη ισχύς καθίστανται συχνά πιο ελκυστικές οι Α/Γ και οι εγκαταστάσεις βιομάζας, λόγω των οικονομικών τους επιδόσεων. Στο σχήμα 8.1 εικονίζεται ένα αυτόνομο σύστημα ΣΡ χαμηλής ισχύος, όπου το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος χρησιμοποιείται μόνο σε έκτακτη ανάγκη, όταν υπάρξει διακοπή στην τροφοδοσία των ΑΠΕ. Ο αναστροφέας είναι προαιρετικός, ενώ οι αιολικές και οι υδροηλεκτρικές μονάδες μπορούν να είναι εγκατεστημένες σε κάποια απόσταση.



Σχήμα 8.1. Σχηματική παράσταση ενός αυτόνομου συστήματος ΣΡ χαμηλής ισχύος
[Πηγή: ISET]

8.3.2.2. Αυτόνομα και απομονωμένα δίκτυα

Γενικά, ο αποκεντρωμένος εξηλεκτρισμός των τοπικών κοινωνικών και περιφερειακών δομών με την ανέγερση ή την επέκταση αυτόνομων δικτύων παρουσιάζει ένα πολύ σημαντικό δυναμικό για την αξιοποίηση σε μεγάλη κλίμακα των ΑΠΕ διεθνώς. Για μεσαία φορτία και τροφοδοσία σε τοπικό επίπεδο προτείνονται οι ηλιακές εφαρμογές, οι Α/Γ και οι σταθμοί βιομάζας. Τα αδύναμα ή αυτόνομα δίκτυα απαιτούν συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος. Στο σχήμα 8.2 παρουσιάζεται ένα τέτοιο σύστημα, του οποίου η ισχύς κυμαίνεται από 1 έως 10 kW. Σε σύγκριση με την προηγούμενη (σχήμα 8.1), η διάταξη αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μία λύση προ-εξηλεκτρισμού που παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης με ένα μεγαλύτερο δίκτυο σε μεταγενέστερο στάδιο.



Σχήμα 8.2. Αυτόνομο σύστημα της τάξης του 1 έως 10 kW
[Πηγή: ISET]

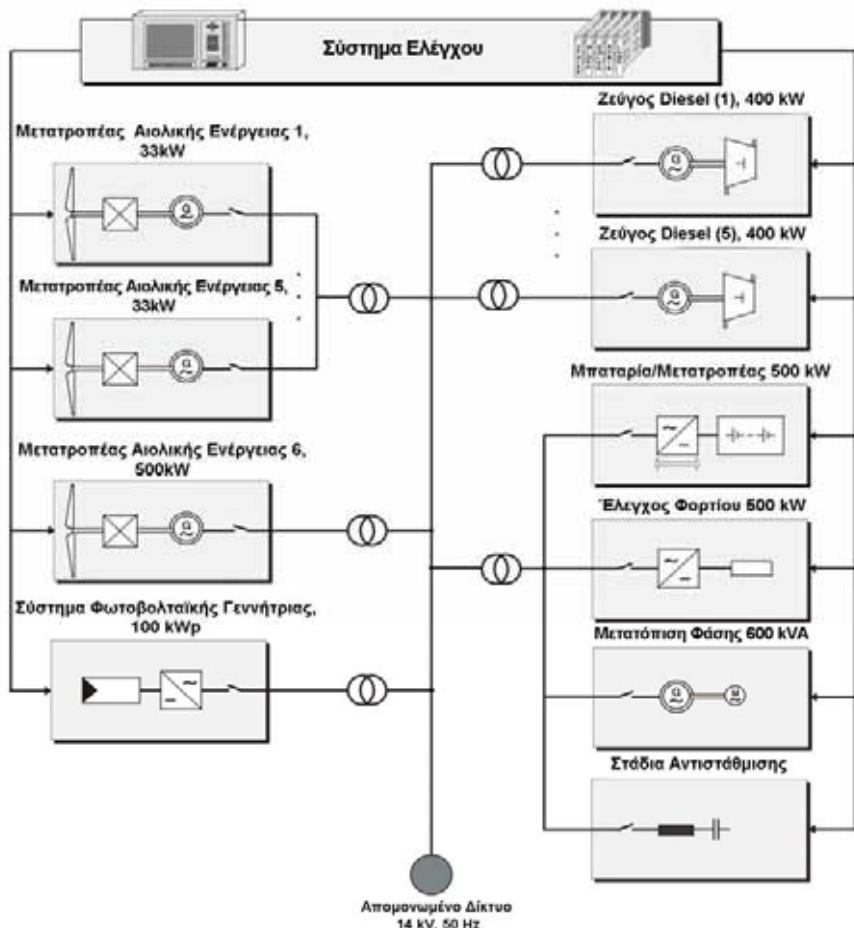
8.3.2.3. Τοπική ενεργειακή τροφοδοσία

Στην κατηγορία αυτή μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ των αγροτικών και αστικών περιοχών, με βάση τη σύγκριση της πυκνότητας της ενεργειακής κατανάλωσης με τη διαθεσιμότητα των ΑΠΕ. Στις αστικές περιοχές η εισροή από τις ΑΠΕ είναι πολύ μικρότερη της πυκνότητας κατανάλωσης. Η κύρια πηγή ανανεώσιμης ενέργειας είναι ο ήλιος, με σχετικά περιορισμένη διαθεσιμότητα άλλων ΑΠΕ. Στην περίπτωση των αγροτικών περιοχών η εισροή των ΑΠΕ βρίσκεται στα ίδια επίπεδα με την πυκνότητα της ενεργειακής κατανάλωσης. Συνήθως υφίσταται μία σημαντική διαθεσιμότητα πολλών ΑΠΕ (ηλιακή, αιολική, βιομάζα, υδραυλική).

8.3.2.4. Περιφερειακή ενεργειακή τροφοδοσία

Αυτά τα συστήματα αποτελούν μεγάλης κλίμακας εφαρμογές όλων των διαθέσιμων τεχνολογιών. Τα μεγάλα υβριδικά συστήματα είναι κυρίως συστήματα αιολικών/ντίζελ, όπως αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 8.3, το οποίο παρουσιάζει τη διάταξη του υπάρχοντος δικτύου που τροφοδοτεί το νησί της Κύθνου (υπάρχει επίσης και ένα φωτοβολταϊκό πάρκο). Η επιλογή μεταξύ των εναλλακτικών δυνατοτήτων εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- την κοινωνική αποδοχή,
- την τεχνολογική αξιοπιστία,
- τη διαθεσιμότητα των πηγών,
- την οικονομική αποδοτικότητα,
- ζητήματα προστασίας του περιβάλλοντος.



Σχήμα 8.3. Το δίκτυο του υβριδικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής της Κύθνου
[Πηγή: ISET]

Οι αντικειμενικοί στόχοι των συστημάτων αυτών είναι:

- η κάλυψη των αναγκών κατά τρόπο αέναο,
- η εκμετάλλευση των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας,
- η χρήση των περισσότερο ώριμων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών ΑΠΕ.

Επιπρόσθετοι αντικειμενικοί στόχοι όσον αφορά στην ηλεκτροπαραγωγή είναι:

- η κάλυψη της μέγιστης μέσης καθαρής ωριαίας παραγωγής, και
- η παροχή στο ηλεκτρικό σύστημα ενός επαρκούς περιθωρίου ασφαλείας.

8.3.3. Σύστημα μεταφοράς και διανομής

Τα συστήματα ΑΠΕ, όπως οι Α/Γ ή τα ΜΥΗ, συνήθως εγκαθίστανται σε αγροτικές περιοχές ή σε υψίπεδα, όπου η ηλεκτρική σύνδεση με τον πλησιέστερο υποσταθμό ηλεκτρισμού μπορεί να είναι αδύναμη, και όπου η τοπική ζήτηση ηλεκτρισμού μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερη από το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής του συστήματος ΑΠΕ. Ένας τρόπος καθορισμού της "αντοχής" του ηλεκτρικού δικτύου είναι μέσω του βαθμού σφάλματος, ο οποίος αποτελεί ένα μέτρο του ρεύματος που θα ρεύσει όταν υπάρξει μία βλάβη στο δίκτυο.

Ο βαθμός σφάλματος στην άκρη ενός μεγάλου μήκους ηλεκτρικού κυκλώματος είναι σημαντικά μικρότερος από αυτόν στο κέντρο ενός διασυνδεδεμένου δικτύου, για παράδειγμα σε μία πόλη ή σε μία βιομηχανική περιοχή. Σε μία θέση χαμηλού βαθμού σφάλματος, η επίδραση των συστημάτων ΑΠΕ μπορεί να είναι αρκετά σημαντική ώστε να παρενοχλεί άλλους τοπικούς καταναλωτές. Για το λόγο αυτό, είναι μερικές φορές αναγκαίο να ενισχυθεί το δίκτυο ή να συνδεθούν οι μετατροπείς των ΑΠΕ σε μία υψηλότερη τάση ή σε ισχυρότερο τμήμα του δικτύου σε αρκετή απόσταση, το οποίο όμως αυξάνει το κόστος. Συστήματα υψηλότερης τάσης, όπως τα συστήματα μεταφοράς των 400 kV ή 275 kV έχουν υψηλότερα επίπεδα βλάβης. Γενικά, όσο χαμηλότερη είναι η τάση τόσο πιο αδύναμο θα είναι το σύστημα.

Στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης, οι τάσεις των συστημάτων διανομής στις αγροτικές περιοχές είναι 132, 33 και 11 kV. Το σύστημα των 11 kV είναι το πιο εκτεταμένο, αλλά στις αγροτικές περιοχές είναι απίθανο να μπορεί να υποστηρίξει περισσότερα από ένα ως τρία μεγαβάτ (MW) ηλεκτροπαραγωγής. Στις αγροτικές ή ορεινές περιοχές, είθισται το πλησιέστερο σημείο του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου να είναι μία υπέργεια γραμμή αντί ενός υπόγειου καλωδίου. Κάθε υπέργεια γραμμή με δύο μόνο καλώδια μεταφέρει ένα μονοφασικό σύστημα και, συνήθως, θα χρειαστεί ενίσχυση εάν πρόκειται να εγκατασταθούν γεννήτριες.

8.3.3.1. Θέματα διασύνδεσης

Στα θέματα διασύνδεσης περιλαμβάνονται οι αρμονικές, η παροχή άεργης ισχύος, η ρύθμιση της τάσης και ο έλεγχος της συχνότητας.

Αρμονικές: Οι αρμονικές είναι μη επιθυμητές παραμορφώσεις των ΕΡ ημιτονοειδών κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος της εταιρείας ηλεκτρισμού. Οι αρμονικές αποτελούν πρόβλημα λόγω της πιθανότητας πρόκλησης βλάβης τόσο στο δίκτυο διανομής της εταιρείας ηλεκτρισμού όσο και στον εξοπλισμό των καταναλωτών. Κάποια από τα αιολικά πάρκα πρώτης γενιάς στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ήταν εξοπλισμένα με παλαιότερα συστήματα μετατροπής, όπως αυτά που χρησιμοποιούν διατάξεις γέφυρας με 6-παλμικά θυρίστορ χωρίς εξωτερική διόρθωση ή φιλτράρισμα των αρμονικών, με αποτέλεσμα την παραγωγή αρμονικών χαμηλής τάξης.

Τα διαθέσιμα σήμερα προηγμένα συστήματα μετατροπής ΣΡ σε ΕΡ παράγουν έξοδο με πολύ μικρή παραμόρφωση αρμονικών, σημαντικά μικρότερη από αυτήν που καθορίζεται στα σχετικά πρότυπα Παρακολούθησης της Ποιότητας της Ισχύος. Με την προσθήκη διατάξεων διόρθωσης των αρμονικών και με την παρούσα τάση για τη χρήση προηγμένων ηλεκτρονικών ισχύος σε Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας, οι αρμονικές δεν αποτελούν πλέον σημαντικό μέλημα για τις εταιρείες ηλεκτρισμού.

Παροχή άεργης ισχύος: Οι πρώτες μονάδες ΑΠΕ που χρησιμοποιούσαν επαγωγικές γεννήτριες είχαν εγκατασταθεί με ανεπαρκή εξοπλισμό για αντιστάθμιση της άεργης ισχύος, με αποτέλεσμα οι εταιρείες ηλεκτρισμού να αντιμετωπίζουν αυξημένες απώλειες γραμμών και προβλήματα στον έλεγχο της τάσης του συστήματος. Όταν οι εταιρείες άρχισαν τις χρεώσεις για την υποστήριξη των υπέρμετρων VAR (άεργος

ισχύς), οι χειριστές των εγκαταστάσεων ΑΠΕ οδηγήθηκαν από οικονομικούς λόγους στη βελτίωση της ποιότητας της ισχύος που διοχετεύουν στο ηλεκτρικό σύστημα.

Οι εταιρείες ηλεκτρισμού σήμερα απαιτούν από τους μικρούς παραγωγούς που χρησιμοποιούν επαγγελματικές γεννήτριες να παρέχουν στο σημείο της διασύνδεσης συντελεστή ισχύος κοντά στο ένα. Πάντως, η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιείται στις σύγχρονες Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας έχει επιδείξει τις δυνατότητές της για πλήρη έλεγχο του συντελεστή ισχύος υπό όλες τις συνθήκες λειτουργίας, ακόμα και όταν η Α/Γ έχει τεθεί εκτός λειτουργίας.

Ρύθμιση της τάσης: Όταν λειτουργούν οι Α/Γ, για παράδειγμα, η παραγωγή ισχύος τους μεταβάλλεται από δευτερόλεπτο σε δευτερόλεπτο, ανάλογα με την ένταση και την τύρβη του ανέμου. Η επίδραση του πύργου, καθώς τα πτερύγια περιστρέφονται πίσω του, εισάγει επίσης μία περιοδική διαταραχή στην παραγόμενη ισχύ, η οποία είναι μεγαλύτερη σε υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Στην περίπτωση των συστημάτων μετατροπής ΑΠΕ, αυτές οι διακυμάνσεις της ισχύος προκαλούν διακυμάνσεις της τάσης στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο, που είναι γνωστές ως τρεμόπαιγμα.

Τα όρια στο τρεμόπαιγμα που μπορεί να προκαλέσει κάθε συνδεδεμένος εξοπλισμός ορίζονται σε σχετικές αναφορές και έχουν τεθεί προκειμένου να αποτρέπονται οι διαταραχές στους άλλους καταναλωτές. Το τρεμόπαιγμα είναι πιθανό να αποτελέσει πρόβλημα στην περίπτωση μικρών οιμάδων ή μεμονωμένων μετατροπέων ΑΠΕ, ειδικότερα για μεγάλες μηχανές που συνδέονται σε χαμηλές τάσεις. Για παράδειγμα, οι ρυθμιζόμενες με απώλεια στήριξης Α/Γ παράγουν μικρότερη διαταραχή από τις ρυθμιζόμενες με μεταβολή του βήματος, ενώ πολύ μικρή είναι η επίδραση των Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας.

Η δυσκολία στον έλεγχο της ρύθμισης της τάσης εντείνεται όταν η εγκατάσταση ΑΠΕ βρίσκεται σε μία απομακρυσμένη περιοχή και συνδέεται με την εταιρεία ηλεκτρισμού μέσω γραμμών μεταφοράς που είχαν αρχικά σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν μόνο τα φορτία στην περιοχή. Οι δυνατές λύσεις για τις εταιρείες ηλεκτρισμού περιλαμβάνουν τις νέες γραμμές μεταφοράς, διευθετήσεις με εναλλακτικές γραμμές, την προσθήκη στατικών ή προσαρμοζόμενων ελεγκτών της άεργης ισχύος, καθώς και την περικοπή των σταθμών ΑΠΕ. Από μελέτες που εκπονήθηκαν βάσει οικονομικών αναλύσεων για κάθε μία από τις παραπάνω εναλλακτικές λύσεις, προέκυψε ότι η επιλογή με το χαμηλότερο κόστος είναι να περικόπτεται η παραγωγή της εγκατάστασης ΑΠΕ και να αποζημιώνεται αναλόγως ο ιδιοκτήτης της.

Έλεγχος συχνότητας: Οι εταιρείες ηλεκτρισμού που λειτουργούν εγκαταστάσεις ΑΠΕ συνδεδεμένες σε αδύναμα, απομονωμένα δίκτυα μπορεί να έχουν δυσκολία στο να διατηρήσουν την κανονική συχνότητα του συστήματος. Για παράδειγμα, η συχνότητα του συστήματος κυμαίνεται όταν ριπές ανέμου προκαλούν γρήγορες μεταβολές στην παραγόμενη ισχύ των Α/Γ. Παρότι η διατήρηση κανονικής συχνότητας στο σύστημα δεν αποτέλεσε πρόβλημα στις περιοχές των αιολικών πάρκων της Καλιφόρνιας, έχει εντούτοις κατ' επανάληψη αναφερθεί σε διάφορα νησιωτικά συστήματα.

Σύμφωνα με μία μελέτη του EPRI, η μείωση του δυναμικού ή η αύξηση της ζήτησης κατά 10 MW ανά λεπτό, προκαλούμενη από ένα συνδυασμό μεταβολών στην ισχύ που παράγεται από ένα σύστημα ΑΠΕ και/ή μη προγραμματισμένων αλλαγών στα φορτία, θα έθετε εκτός κανονικής λειτουργίας το σταθμό παραγωγής που ακολουθεί το φορτίο, με αποτέλεσμα την απώλεια της ικανότητας ρύθμισης της συχνότητας του συστήματος σε αποδεκτά όρια. Το συμπέρασμα της μελέτης είναι ότι, προκειμένου να ενταχθούν περισσότερες ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα απαιτείται:

- η χρήση σύγχρονων μετατροπέων ΑΠΕ με ηλεκτρονικό έλεγχο της ισχύος και διασύνδεση στο δίκτυο (π.χ. μπορεί να ελέγχεται το σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος ώστε να ελαττώνεται η παραγωγή των Α/Γ κατά τη διάρκεια ισχυρών ή ριπιζόντων ανέμων) ή/και
- ο αυτόματος έλεγχος της ηλεκτροπαραγωγής με πρόσθετη στρεφόμενη εφεδρεία.

Σε άλλες περιπτώσεις, οι βραχυπρόθεσμες μεταβολές της παραγόμενης ισχύος από ένα σταθμό ΑΠΕ είναι μικρές σε σχέση με τις συνήθεις διακυμάνσεις του φορτίου και για το λόγο αυτό δεν επηρεάζουν σημαντικά τις υπηρεσίες παρέκκλισης και κύλισης του διαθέσιμου δυναμικού ρύθμισης του συστήματος.

8.3.3.2. Λειτουργικά θέματα

Στα λειτουργικά θέματα περιλαμβάνονται οι εφεδρείες, η δέσμευση και η οικονομική διεκπεραίωση των μονάδων, η ευστάθεια του συστήματος και οι επιπτώσεις στο σύστημα μεταφοράς και διανομής.

Εφεδρεία λειτουργίας: Οι εταιρείες ηλεκτρισμού διατηρούν εφεδρείες λειτουργίας για τη διασφάλιση της επαρκούς απόδοσης του συστήματος και την προφύλαξή του από ξαφνική απώλεια τροφοδοσίας, αγορές εκτός συστήματος, απρόοπτες διακυμάνσεις του φορτίου και/ή απρόοπτες διακοπές λειτουργίας των γραμμών μεταφοράς. Οι εφεδρείες διακρίνονται περαιτέρω σε στρεφόμενες και μη. Συνήθως, οι μισές από τις εφεδρείες λειτουργίας του συστήματος είναι περιστρεφόμενες, έτσι ώστε μία ξαφνική απώλεια στην παραγωγή να μην καταλήξει σε απώλεια φορτίου, με το υπόλοιπο να είναι ικανό να εξυπηρετήσει το φορτίο εντός 10 λεπτών. Κάθε πιθανή μεταβολή στο φορτίο ή στην παραγωγή που δεν μπορεί να προβλεφθεί θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν καθορίζεται η ποσότητα της λειτουργικής εφεδρείας που θα διατηρείται.

Το ακριβές σημείο στο οποίο αρχίζει η υποβάθμιση των οικονομικών του συστήματος από την ενσωμάτωση της διαλείπουσας ηλεκτροπαραγωγής, π.χ. από αιολικά, είναι ασαφές, αλλά σύμφωνα με κάποιες μελέτες αυτό εντοπίζεται σε επίπεδα διείσδυσης άνω του 5%. Η διαλειπτότητα καθίσταται αύξουσας ανησυχίας για τους χειριστές του συστήματος στην Καλιφόρνια, ιδιαίτερα κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης, καθώς η διείσδυση των αιολικών εκεί αγγίζει αυτό το επίπεδο. Καθώς οι αγορές του ηλεκτρισμού γίνονται πιο ανταγωνιστικές, η ικανότητα πρόβλεψης και ελέγχου της ανανεώσιμης πηγής θα αυξήσει την αξία των ΑΠΕ για τις εταιρείες ηλεκτρισμού.

Δέσμευση και οικονομική διεκπεραίωση των μονάδων: Η δέσμευση των μονάδων αφορά τον προγραμματισμό της λειτουργίας μεμονωμένων σταθμών του ηλεκτρικού συστήματος ώστε να καλύπτεται η αναμενόμενη ζήτηση. Οι μονάδες εντάσσονται στο πρόγραμμα βάσει των χρονοδιαγραμμάτων συντήρησης, των δαπανών εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας των γεννητριών, των ελάχιστων απαιτήσεων σε καύσιμο, και της εποχιακής διαθεσιμότητας των διαλειπουσών πηγών, όπως είναι τα αιολικά και τα υδροηλεκτρικά. Ο προγραμματισμός αυτός έχει ένα ορίζοντα τουλάχιστον 24 ωρών. Η πιο συντηρητική προσέγγιση για τη δέσμευση των μονάδων και την οικονομική τους διεκπεραίωση είναι να παραβλεφθεί η οποιαδήποτε συνεισφορά από τις διασυνδεδεμένες ΑΠΕ.

Πάντως, η παραγωγή των αιολικών μονάδων μπορεί να είναι αρκετά προβλέψιμη, όπως στην περίπτωση της περιοχής Altamont Pass στην Καλιφόρνια, λόγω των εποχιακών και ημερήσιων ανεμολογικών χαρακτηριστικών που έχουν παρατηρηθεί κατά την πολυετή λειτουργία του αιολικού πάρκου ή ως αποτέλεσμα προγραμμάτων παρακολούθησης της αιολικής πηγής. Περαιτέρω έρευνα απαιτείται για την ανάπτυξη της ικανότητας ακριβούς πρόβλεψης της παραγωγής ενός σταθμού ΑΠΕ σε ωριαία βάση για χρονικές περιόδους που κυμαίνονται από μία ημέρα μέχρι μία εβδομάδα.

Σταθερότητα του συστήματος: Οι μεγάλες Α/Γ συνήθως διαθέτουν πτερύγια μεγάλης διαμέτρου και μικρής ταχύτητας περιστροφής συνδεόμενα με μία ηλεκτρογεννήτρια μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων με μεγάλη σχέση μετάδοσης. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη αδράνεια του στροβίλου και μικρή μηχανική ακαμψία μεταξύ του στροβίλου και της γεννήτριας, που παρέχει στις μεγάλες Α/Γ εξαιρετική ευστάθεια στα μεταβατικά φαινόμενα. Η εμπειρία από τη λειτουργία των αιολικών πάρκων στην Καλιφόρνια επιβεβαιώνει ότι οι παροδικές διακυμάνσεις των Α/Γ λόγω αυξομειώσεων της ταχύτητας ή διαταραχών του δικτύου δεν οδηγούν σε αστάθεια του συστήματος. Δεν ισχύει όμως το ίδιο για όλες τις ΑΠΕ.

Επιπτώσεις στο σύστημα μεταφοράς και διανομής: Τα συστήματα ΑΠΕ μπορούν να επηρεάσουν τα συστήματα μεταφοράς και διανομής τροποποιώντας τη ροή ισχύος σχεδιασμού ή προκαλώντας μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης. Επίσης, ένα μέλημα αποτελεί η “νησιδοποίηση”, κατά την οποία ένας σταθμός ΑΠΕ μπορεί να θέσει υπό τάση μία γραμμή που αλλιώς θα ήταν ανενεργή. Η εμπειρία από τη λειτουργία των αιολικών μονάδων δεν έχει καταδείξει ότι η προστασία ή η ασφάλεια του συστήματος αποτελεί πρόβλημα. Έχουν προσδιοριστεί περιπτώσεις που μπορεί να οδήγησαν σε νησιδοποίηση της λειτουργίας στο παρελθόν, και έχουν δοκιμαστεί τόσο εξοπλισμός όσο και σχήματα για την ανίχνευσή της. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η εγκατάσταση εξοπλισμού απεμπλοκής άμεσης μετάβασης σχεδιάζεται ώστε να απεμπλέκονται τα συστήματα ΑΠΕ για να αποτρέπεται η νησιδοποίησή τους.

8.3.4. Επίπεδα ενσωμάτωσης

Το επίπεδο διείσδυσης των ΑΠΕ επηρεάζεται ιδιαίτερα από τον τύπο και τον βαθμό προσαρμογής της υφιστάμενης ενεργειακής υποδομής. Μπορούν να διακριθούν τρία επίπεδα ενδεικτικά της έκτασης που μπορούν να συνεισφέρουν οι ΑΠΕ στη συνολική

ενεργειακή τροφοδοσία. Τα επίπεδα αυτά είναι επίσης ενδεικτικά του χρόνου και των αλλαγών που απαιτούνται προκειμένου να επιτευχθεί μία σημαντική συνεισφορά των ΑΠΕ και ορίζονται ως ακολούθως:

- I-1: μέγιστο επίπεδο ενσωμάτωσης χωρίς τροποποίηση της υφιστάμενης υποδομής.
- I-2: μέγιστο επίπεδο ενσωμάτωσης με βελτιστοποιημένη ενεργειακή υποδομή για την προσαρμογή των ΑΠΕ.
- I-3: μέγιστο επίπεδο ενσωμάτωσης με μία νέα ενεργειακή υποδομή.

Αυτά τα τρία επίπεδα θα πρέπει να ερμηνευτούν ως ένα εύρος μεριδίων περισσότερο παρά ως ξεροί αριθμητικοί δείκτες. Στα υπό κατασκευή ενεργειακά συστήματα, η ενεργειακή υποδομή μπορεί να σχεδιαστεί εξ αρχής για την αποδοτική προσαρμογή των ΑΠΕ, οπότε το επίπεδο I-3 μπορεί πρακτικά να επιτευχθεί βραχυπρόθεσμα. Αντίθετα, σε υπάρχοντα ενεργειακά συστήματα με μεγάλη ανάπτυξη της ενεργειακής υποδομής, θα χρειαστούν δεκαετίες πριν να μπορέσουν οι ΑΠΕ να διαδραματίσουν ένα σημαντικό ρόλο στο σύστημα ενεργειακής τροφοδοσίας. Το 40% περίπου της ενέργειας καταναλώνεται σε αστικές περιοχές με ευρέως ανεπτυγμένη υποδομή.

Για να επιτευχθεί η αξιόλογη συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο πρέπει να γίνουν σοβαρά βήματα σχεδιασμού στην παρούσα φάση. Ο καθορισμός των ορίων διείσδυσης των ΑΠΕ σ' ένα ηλεκτρικό σύστημα, ώστε να αποφευχθούν δυσάρεστες διαταραχές της λειτουργίας του, είναι ένα πολύπλοκο θέμα που εξαρτάται από πολλές και ποικίλες παραμέτρους οι οποίες δεν είναι πάντα ξεκάθαρα καθορισμένες. Στα επόμενα περιγράφεται μία μέθοδος για την εκτίμηση των ορίων διείσδυσης των ΑΠΕ σε μικρά ηλεκτρικά συστήματα.

Σε πρώτη φάση, πρέπει να επιλεγούν τα διάφορα σενάρια που αφορούν τις πιθανές εγκαταστάσεις ΑΠΕ, λαμβάνοντας υπόψη τις λειτουργικές συνθήκες του ηλεκτρικού συστήματος κατά τη διάρκεια της ελάχιστης ετήσιας ζήτησης. Για καθένα από αυτά τα σενάρια πρέπει να εξεταστεί η επίδραση στο δίκτυο διανομής, θεωρώντας σταθερή τάση και συχνότητα στους ζυγούς τροφοδοσίας του. Η διασπορά των μονάδων ΑΠΕ στο δίκτυο είναι γενικά προς όφελος των μικρών ηλεκτρικών συστημάτων και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Συνήθως επιλέγονται τρία σενάρια (ελάχιστη-μέση-μέγιστη διείσδυση) και η ανάλυση του καθενός περιλαμβάνει τα εξής:

α) Η λειτουργία ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής κάτω από διαφορετικές συνθήκες προσομοιώνεται για μία χρονική περίοδο (π.χ. ένα μήνα ή έτος) λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες χρονοσειρές του φορτίου και την εκτιμούμενη ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ. Σε πρωταρχικής σημασίας ανάγεται η απαραίτητη “στρεφόμενη εφεδρεία” των συμβατικών μονάδων, καθώς η αβεβαιότητα των ΑΠΕ προστίθεται στην αβεβαιότητα των μεταβολών του φορτίου. Αυτό μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$P_{SR} = \mu P_W + \lambda P_L \quad (8.1)$$

όπου μ και λ είναι συντελεστές που εκφράζουν το σφάλμα στην εκτίμηση της ισχύος P_W που αναμένεται από τις ΑΠΕ και του φορτίου P_L , σε χρονικό διάστημα ίσο με αυτό που απαιτείται για την εκκίνηση μιας νέας συμβατικής μονάδας (π.χ. $\mu = 0,4$, $\lambda = 0,1$).

Τότε, το πρόβλημα μπορεί να αναλυθεί ως ακολούθως. Για κάθε χρονικό διάστημα t (π.χ. κάθε 1 λεπτό) πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη σχέση.

$$P_L = \sum_{i=1}^n P_{Di} + P_W \pm P_S \quad (8.2)$$

όπου P_{Di} είναι η ισχύς που παράγεται από τη μονάδα i , και P_S η αποθηκευμένη ισχύς (εάν υπάρχει εξοπλισμός αποθήκευσης), που υπόκεινται στους περιορισμούς:

$$\sum_{i=1}^n P_{Di} + P_{SR} = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_{NDi}$$

$$\beta_i P_{NDi} \leq P_{Di} \leq \alpha_i P_{NDi}$$

όπου α_i και β_i είναι συντελεστές που εκφράζουν τα όρια φόρτισης της μονάδας i , η ονομαστική ισχύ της οποίας είναι P_{NDi} (π.χ. $\alpha_i=1,1$ και $\beta_i=0,2$, για μία συγκεκριμένη διάρκεια). Πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη και άλλοι τεχνικοί περιορισμοί, όπως τα χρονικά διαστήματα που απαιτούνται για την εκκίνηση και τη διακοπή λειτουργίας μίας μονάδας, κλπ.

Στον πίνακα 8.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής ενός υπολογιστικού προγράμματος βάσει των παραπάνω αρχών. Τα κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα:

- Ντιζελοκίνητος σταθμός ηλεκτροπαραγωγής:

Εγκατεστημένη ισχύς: 3 x 2700 kW

2 x 1200 kW

Μέγιστη / ελάχιστη ζήτηση: 4800 / 1800 kW

- Αιολικά πάρκα:

Σενάριο 1: Χωρίς Α/Γ

2: 7 x 100 kW + 8 x 55 kW = 1140 kW

3: 1 x 1140 kW + 8 x 225 kW = 2940 kW

- Περίοδος προσομοίωσης: Ένας μήνας.

Πίνακας 8.1. Αποτελέσματα εφαρμογής

	ΣΕΝΑΡΙΟ		
	1	2	3
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (kWh)			
Κατανάλωση φορτίου	2330588	2330588	2330254
Απώλειες ενέργειας	-	-	334
Παραγωγή από ντίζελ	2330588	2002122 (86%)	1712623 (73,5%)
Παραγωγή από Α/Γ	-	328461 (14%)	617631 (26,5%)
Διαφυγούσα ενέργεια	-	22941 (1,0%)	259786 (11,1%)
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ			

- Πετρέλαιο ντίζελ (kg)		502311	429078
- Βενζίνη (kg)		5573	8872
- Ειδική κατανάλωση πετρελαίου (kg/kWh)		0,254	0,256
 ΑΡΙΘ. ΕΚΚΙΝΗΣΕΩΝ/ΔΙΑΚΟΠΩΝ ΤΩΝ ΝΤΙΖΕΛΟΜΗΧΑΝΩΝ	 40	 49	 67

Αξίζει να σημειωθεί ότι, στην περίπτωση μικρής διείσδυσης των αιολικών (όπως στο σενάριο 2, όπου τα επίπεδα διείσδυσης είναι $1140/4800=24\%$ σε ισχύ ή 14% σε ενέργεια) δεν υφίσταται “απώλεια ενέργειας”, δηλαδή το σύστημα είναι πάντα ικανό να καλύπτει τη ζήτηση. Αντίθετα, στην περίπτωση μεγάλης διείσδυσης των αιολικών (όπως στο σενάριο 3: $2940/4800=61\%$ σε ισχύ ή $26,5\%$ σε ενέργεια) προκύπτουν σημαντικές απώλειες ενέργειας, παρότι χρησιμοποιείται ένα σχετικά μεγάλο ποσοστό αιολικών, με αποτέλεσμα ένα ποσοστό διαφυγούσης αιολικής ενέργειας της τάξης του 11% της συνολικής κατανάλωσης. Από την άλλη, δεν υπάρχει κάποια σημαντική αλλαγή στην ειδική κατανάλωση πετρελαίου των ντιζελοκίνητων μονάδων, αλλά μια σημαντική αύξηση στον αριθμό των εκκινήσεων / διακοπών τους.

β) Η παραπάνω ανάλυση γίνεται θεωρώντας κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Όμως, πρέπει επίσης να εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος υπό “μη φυσιολογικές συνθήκες”, με την προσομοίωση των ακόλουθων περιπτώσεων:

- (1) Ταχείες μεταβολές της αιολικής ισχύος, που ακολουθούν τις ριπτές του ανέμου ή τη σύνδεση – αποσύνδεση των ανεμογεννητριών.
- (2) Βραχυκυκλώματα στο δίκτυο διανομής.

Η ανάλυση μπορεί να διεξαχθεί με την προσομοίωση σε Η/Υ της συμπεριφοράς του συστήματος για επιλεγμένες διαταραχές. Οι διαταραχές τύπου (1) αντιμετωπίζονται με την αντίδραση των μέσων ρύθμισης των συμβατικών μονάδων παραγωγής (όπως είναι οι ρυθμιστές στροφών και τάσης), ενώ για τις διαταραχές του τύπου (2) έχει μεγάλη σημασία ο ρόλος των μέσων προστασίας. Η κατάλληλη μοντελοποίηση της λειτουργίας και της αντίδρασης όλου αυτού του εξοπλισμού είναι κρίσιμη για την ακριβή και αξιόπιστη προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος.

8.4. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΕ

Τα οικονομικά θέματα αναφέρονται σε όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ανταγωνιστικότητα των ΑΠΕ ως προς τα συμβατικά καύσιμα ή ενεργειακές μορφές και γενικά θεωρούνται ως πρωταρχικός παράγοντας για τον ακριβή καθορισμό των ποσοστών διείσδυσης των ΑΠΕ στην αγορά. Υπάρχουν πολλά ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη σε σχέση με τα θέματα αυτά, τα οποία είναι αλληλοεξαρτώμενα και ο χειρισμός τους απαιτεί μία συστηματική και ολοκληρωμένη θεώρηση.

8.4.1. Κόστη και τιμές

Τα κόστη και οι τιμές είναι οι κύριες κινητήριες δυνάμεις της αγοράς, οριοθετώντας τον ανταγωνισμό μεταξύ των διαφορετικών εναλλακτικών ενέργειακών λύσεων. Παρά τις εντυπωσιακές μειώσεις του κόστους που συνόδευσαν την τεχνική αναβάθμιση και την ταχεία ανάπτυξη των τεχνολογιών ΑΠΕ στην αγορά, οι περισσότερες εφαρμογές ΑΠΕ μεγάλης κλίμακας είναι προς το παρόν πιο ακριβές από τις ανταγωνιστικές πηγές παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού. Η αναμενόμενη περαιτέρω πτώση του κόστους παραγωγής μαζί με τη διείσδυσή τους στην αγορά δεν είναι πιθανό να καταστήσει τις ΑΠΕ ικανές να ανταγωνιστούν με τις συμβατικές τεχνολογίες / καύσιμα στο βραχυπρόθεσμο και μεσοπρόθεσμο μέλλον.

Εκτός αυτού, μια τέτοια διαδικασία είναι πολύ αργή, ακριβώς λόγω των πολλαπλών εμποδίων που δυσχεραίνουν τη διείσδυση στην αγορά, όπως είναι το άδικο σύστημα τιμολόγησης. Οι τιμές είναι οι ενδείξεις που αντικατοπτρίζουν τα κόστη παραγωγής των αγαθών και της χρησιμότητάς τους για την κοινωνία. Εάν δεν συνυπολογίζονται όλα τα κόστη και παραβλέπονται οι συντελεστές εκμετάλλευσης, τότε οι τιμές δίνουν λάθος σήμα στην αγορά. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τις ΑΠΕ, καθώς η χρήση τους συνδέεται με σημαντικά περιβαλλοντικά και κοινωνικά πλεονεκτήματα, τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη στις αποφάσεις της αγοράς.

Επιπλέον, τα συμβατικά καύσιμα και οι τεχνολογίες επωφελούνται ακόμη (άμεσα και έμμεσα) από σημαντικές δημόσιες επιχορηγήσεις, οι οποίες αυξάνουν περαιτέρω τις υπάρχουσες διαφορές κόστους. Οι εταιρείες ηλεκτρισμού ενδιαφέρονται περισσότερο για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής (μέγιστη κατανάλωση) στο ηλεκτρικό δίκτυο, γιατί με τον τρόπο αυτό μπορούν να επιτύχουν εξοικονόμηση με τη χρήση ηλεκτρισμού που παράγεται από λιγότερο αποδοτικές μονάδες. Σύμφωνα με μία μελέτη για το κοινωνικό κόστος και τα πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας του Ινστιτούτου AKF της Δανίας, ο ηλεκτρισμός από αιολικά μπορεί να είναι κατά 30 με 40% πιο πολύτιμος για το δίκτυο απ' ό,τι εάν παραγόταν εντελώς απρογραμμάτιστα.

Σε ορισμένες περιοχές οι εταιρείες ηλεκτρισμού, όταν αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια από ιδιώτες παραγωγούς ΑΠΕ, εφαρμόζουν μεταβλητά τιμολόγια ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Οι ιδιοκτήτες των συστημάτων ΑΠΕ συνήθως εισπράττουν λιγότερο από την κανονική τιμή κατανάλωσης του ηλεκτρισμού, καθώς η τιμή αυτή συνήθως περιλαμβάνει την αμοιβή της εταιρείας ηλεκτρισμού για τη λειτουργία και συντήρηση του ηλεκτρικού δικτύου, συν τα κέρδη της. Έτσι, οι ευρέως αποδεκτές αδυναμίες των υφιστάμενων μηχανισμών κοστολόγησης και τιμολόγησης είναι το κύριο εμπόδιο που πρέπει να ξεπεραστεί ώστε να καθιερωθούν δίκαιοι κανόνες ανταγωνισμού.

8.4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος των ΑΠΕ

8.4.2.1. Θέματα μεταφοράς για τις τεχνολογίες ΑΠΕ

Οι δασμοί για την πρόσβαση και τις υπηρεσίες μεταφοράς τελούν υπό αναθεώρηση καθώς η βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρισμού μεταβαίνει από ένα ελεγχόμενο σε ένα

ανταγωνιστικό περιβάλλον. Η διάρθρωση του δασμού μεταφοράς θα καθορίσει την κατανομή του κόστους της μεταφοράς στους χρήστες του συστήματος μεταφοράς και, τελικά, στους αντίστοιχους καταναλωτές. Η διάρθρωση αυτή μπορεί να έχει αντίκτυπο στα κόστη μεταφοράς των διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής και των ενεργειακών πηγών, επηρεάζοντας έτσι τα οικονομικά των τεχνολογιών αυτών. Ο δασμός μεταφοράς σχεδιάζεται έτσι ώστε να ανακτώνται τόσο τα οριακά όσο και τα σταθερά κόστη του συστήματος μεταφοράς.

Το περιθωριακό κόστος της μεταφοράς για την ολοκλήρωση οιασδήποτε δεδομένης μεταβίβασης ισχύος, που περιλαμβάνει τις απώλειες, τις επικουρικές υπηρεσίες (π.χ. εφεδρείς ισχύος) και το όποιο κόστος συμφόρησης, αποτελεί συνήθως ένα μικρό κλάσμα του πρόσθετου κόστους που περιλαμβάνεται στα τιμολόγια μεταφοράς. Ο δασμός μεταφοράς επίσης ανεβάζει τις τιμές πολύ πάνω από το περιθωριακό κόστος για την ανάκτηση του σταθερού κόστους του συστήματος μεταφοράς. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση του σταθερού κόστους (καθ' υπέρβαση του περιθωριακού κόστους) μπορεί να έχει επίπτωση στην τιμή του ηλεκτρισμού, και έτσι να επηρεάσει τον ανταγωνισμό μεταξύ των προμηθευτών ηλεκτρικής ενέργειας.

Για παράδειγμα, κάποια τιμολόγια μεταφοράς μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα ένας απομακρυσμένος προμηθευτής να πληρώνει αναίτια τέλη μεταφοράς σε αρκετούς διακινητές, το άθροισμα των οποίων υπερβαίνει κατά πολύ το περιθωριακό κόστος της μεταφοράς. Ο πιο διαδεδομένος τύπος δασμού μεταφοράς είναι η τιμολόγηση γραμματόσημου. Η τιμή ενός γραμματόσημου είναι η σταθερή χρέωση ανά μονάδα ενέργειας που μεταφέρεται εντός μιας συγκεκριμένης ζώνης, ανεξάρτητα από την απόσταση που θα διακινηθεί η ενέργεια. Άλλοι δασμοί μεταφοράς περιλαμβάνουν τις τιμολογήσεις μεγαβάτ-χιλιόμετρο και συμφόρησης. Οι τιμές κατά μεγαβάτ-χιλιόμετρο αντικατοπτρίζουν ρητά το κόστος της μεταφοράς βάσει τόσο της ποσότητας της ροής ενέργειας όσο και της απόστασης μεταξύ των σημείων παραλαβής και παράδοσης.

Η τιμολόγηση συμφόρησης εφαρμόζεται για να καταμερισθεί το διαθέσιμο δυναμικό μεταφοράς με την αύξηση της τιμής στους χρήστες των γραμμών μεταφοράς καθώς προσεγγίζεται το μέγιστο δυναμικό μεταφοράς. Προς το παρόν, οι δασμοί μεταφοράς βασίζονται στην τιμολόγηση συμβατικής πορείας. Μία τιμή συμβατικής πορείας είναι αυτή που ακολουθεί μία συμφωνημένη μεταξύ των συμμετεχόντων στη συναλλαγή φανταστική πορεία μεταφοράς. Πάντως, η τιμολόγηση αυτή δεν αντικατοπτρίζει τις πραγματικές ροές ενέργειας μέσω του δικτύου μεταφοράς, που περιλαμβάνουν ροές βρόχου και παράλληλης πορείας. Εναλλακτικά στην τιμολόγηση συμβατικής πορείας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχήματα τιμολόγησης που βασίζονται στη ροή ισχύος.

Οι δασμοί που περιλαμβάνουν χρεώσεις για σταθερό δυναμικό μεταφοράς (λήψη-ήπληρωμή) ή για την απόσταση της μεταφοράς αυξάνουν το κόστος μεταφοράς στις μονάδες παραγωγής με χαμηλό συντελεστή δυναμικού (π.χ. λόγω της διαλείπουσας λειτουργίας, όπως οι εγκαταστάσεις των αιολικών) ή όταν αυξάνεται η απόσταση της μεταφοράς (π.χ. απομακρυσμένοι σταθμοί, όπως οι μονάδες που λειτουργούν με βιομάζα). Υπό ένα τέτοιο καθεστώς, τα συστήματα που αξιοποιούν συγκεκριμένες τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας που έχουν εκ φύσεως χαμηλούς συντελεστές

δυναμικού, μεγάλη απόσταση από τα κέντρα φορτίου και διαλείπουσα λειτουργία θα επιβαρυνθούν με σχετικά αυξημένα κόστη μεταφοράς απ' ό,τι άλλες τεχνολογίες.

Το πόσο ανταγωνιστικές θα καταστούν τελικά οι τεχνολογίες ΑΠΕ θα εξαρτηθεί από το κόστος παραγωγής του ηλεκτρισμού από αυτές, μαζί με τα κόστη μεταφοράς, τα κίνητρα που προωθούν την κατανάλωση ή μειώνουν το κόστος της παραγωγής, και την ελαστικότητα των καταναλωτών ως προς την τιμή της πράσινης ενέργειας. Οι προστιθέμενες στο κόστος της παραγωγής από ΑΠΕ υψηλές τιμές των υπηρεσιών μεταφοράς θα μπορούσαν να μειώσουν τη ζήτηση για τις ΑΠΕ ακόμα και με τα προγράμματα οικολογικής τιμολόγησης. Πάντως, μία δασμολόγηση μεταφοράς που οδηγεί σε υψηλά σχετικά κόστη σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές μπορεί να επιφέρει μία ευκαιρία στις περιοχές αυτές για κατανεμημένη ηλεκτροπαραγωγή με τη χρήση ΑΠΕ που θα είναι ανταγωνιστική των κεντρικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.

8.4.2.2. Κατανεμημένη ηλεκτροπαραγωγή

Κατά την πρώιμη ανάπτυξη της βιομηχανίας ηλεκτρισμού, ο ηλεκτρισμός παρεχόταν με τη χρήση κατανεμημένης ηλεκτροπαραγωγής (ορισμένες φορές συναντάται και ως κατανεμημένες πηγές), όπου η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά ή στην ίδια τη θέση της ζήτησης. Παρόλο που η κατανεμημένη παραγωγή έχει υποκατασταθεί από τους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής - το οποίο κατέστη δυνατό χάρη στην ανάπτυξη επαρκών, αξιόπιστων και αποδοτικών συστημάτων μεταφοράς - μπορεί να συμβεί ένα πισωγύρισμα εξαιτίας της απελευθέρωσης της αγοράς. Η παραγωγή θα τιμολογείται ανταγωνιστικά στα πλαίσια της απελευθέρωσης, αλλά η μεταφορά και η διανομή (Μ&Δ) θα συνεχίσει να είναι ελεγχόμενη.

Οι κανονισμοί Μ&Δ υφίστανται σημαντικές αλλαγές, όπου οι ιδιοκτήτες των γραμμών μεταφοράς χρειάζεται να ελευθερώσουν την πρόσβαση σε αυτές, και οι υπηρεσίες μεταφοράς υφίστανται μετάβαση όσον αφορά την "αποδέσμευση" των υπηρεσιών και των τιμών τους. Στα πλαίσια αυτών των αποδεσμευμένων υπηρεσιών, οι ιδιοκτήτες των γραμμών μεταφοράς πρέπει να παρέχουν ένα ξεκάθαρο και συγκεκριμένο δασμολόγιο για μια πληθώρα υπηρεσιών πρόσβασης στη μεταφορά (π.χ. χρεώσεις σημείο προς σημείο έναντι των σχετικών με το δίκτυο, διακοπτόμενες σε σχέση με τις μη-διακοπτόμενες), αλλά και μια ποικιλία υπηρεσιών διεκπεραίωσης και διαχείρισης της ισχύος (π.χ. αποθέματα δυναμικού, έλεγχος τάσης και διοίκηση).

Η κατανεμημένη παραγωγή μπορεί να έχει τη δυνατότητα σε κατάλληλες αγορές να είναι ανταγωνιστική με το κόστος του ηλεκτρισμού από κεντρικούς σταθμούς, στο οποίο περιλαμβάνεται το κόστος της μεταφοράς (περιλαμβανομένων των απωλειών και των βιοθητικών εφεδρειών), των εν λειτουργίᾳ υποσταθμών, και των γραμμών μεταφοράς και του εξοπλισμού διανομής στους τελικούς χρήστες. Τα κόστη Μ&Δ μπορεί να ποικίλουν σημαντικά μεταξύ των διάφορων θέσεων με την αποδέσμευση των τιμών. Αυτά μπορεί να είναι σχετικά χαμηλά για καταναλωτές που λαμβάνουν ηλεκτρική ισχύ από σταθμούς που βρίσκονται κοντά σε κύριες γραμμές μεταφοράς ή σε υποσταθμούς. Για πελάτες που είναι εγκατεστημένοι αρκετά μακριά από τις κύριες

γραμμές μεταφοράς, ή σε περιορισμένες περιοχές του δικτύου, τα κόστη Μ&Δ μπορεί να είναι πολλαπλάσια του μέσου κόστους.

Η κατανεμημένη παραγωγή μπορεί να αποδειχθεί ελκυστική σε περιοχές όπου μπορεί να μεταθέσει χρονικά τις επενδύσεις σε Μ&Δ ή όπου μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία προς τον καταναλωτή. Οι τεχνολογίες ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή μικρής κλίμακας που έχουν παρουσιάσει σημαντικές μειώσεις κόστους και βελτιώσεις στα λειτουργικά χαρακτηριστικά μπορεί να είναι ανταγωνιστικές και να παράσχουν οφέλη (π.χ. φιλικότητα προς το περιβάλλον, ελάχιστη χρήση γαιών) που δεν προσφέρονται από τους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Στο μέλλον οι κυψέλες καυσίμου, οι ανεμογεννήτριες, τα ηλιακά πλαίσια και ορισμένες τεχνολογίες βιομάζας μπορεί να ανταποκρίνονται σε αυτά τα κριτήρια.

8.4.2.3. Χρεώσεις άεργης ισχύος

Τα περισσότερα συστήματα ΑΠΕ (αιολικά, υδροηλεκτρικά, κλπ.) είναι εξοπλισμένα με ασύγχρονες γεννήτριες, τις γνωστές και ως επαγωγικές γεννήτριες. Οι γεννήτριες αυτές χρειάζονται ρεύμα από το ηλεκτρικό δίκτυο για να δημιουργηθεί ένα μαγνητικό πεδίο εντός αυτών προκειμένου να λειτουργήσουν, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται το εναλλασσόμενο ρεύμα του ηλεκτρικού δικτύου κοντά σ' αυτές (μετατόπιση φάσης). Αυτό μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να μειώσει (ή σε ορισμένες περιπτώσεις να αυξήσει) την αποδοτικότητα της μεταφοράς του ηλεκτρισμού στο γειτονικό δίκτυο, λόγω της κατανάλωσης άεργης ισχύος.

Στα περισσότερα μέρη διεθνώς οι εταιρείες ηλεκτρισμού απαιτούν να εξοπλίζονται τα συστήματα ΑΠΕ με μεταστρέψιμες συστοιχίες πυκνωτών που να αντισταθμίζουν εν μέρει αυτό το φαινόμενο (για τεχνικούς λόγους δεν επιθυμούν πλήρη αντιστάθμιση). Εάν το σύστημα δεν πληρεί τις προδιαγραφές της εταιρείας ηλεκτρισμού, μπορεί ο ιδιοκτήτης να πρέπει να υποστεί πρόσθετες χρεώσεις. Πάντως, αυτό δεν αποτελεί εν γένει πρόβλημα για τους ιδιοκτήτες των συστημάτων ΑΠΕ, καθώς οι πετειραμένοι κατασκευαστές συνήθως παραδίδουν τα συστήματά τους σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές της τοπικής εταιρείας ηλεκτρισμού.

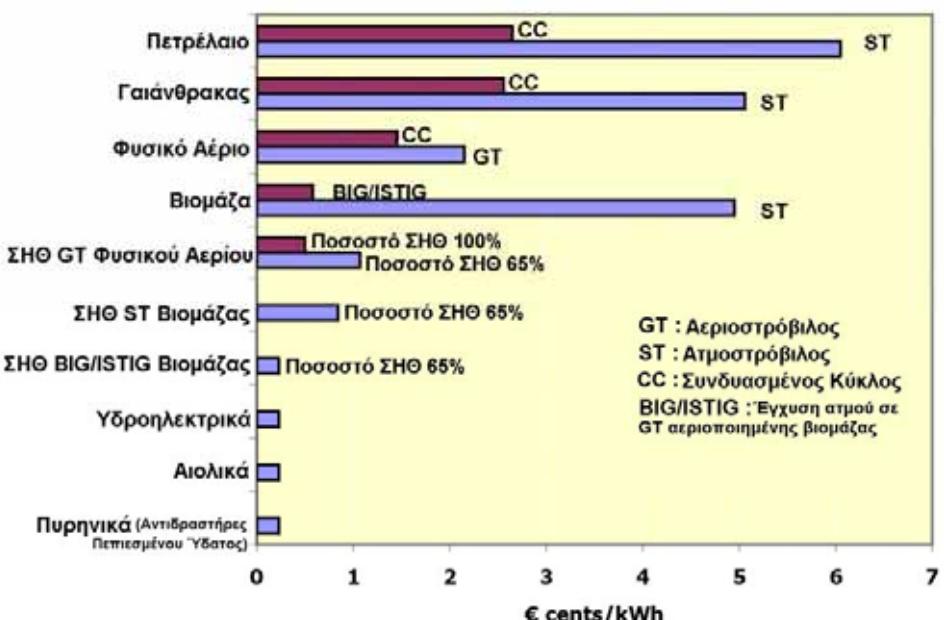
8.4.2.4. Πίστωση δυναμικού

Για να γίνει κατανοητή η έννοια της πίστωσης δυναμικού, είναι σκόπιμο να εξεταστεί από την αντίθετη πλευρά, τα τιμολόγια του ηλεκτρισμού. Ως εκ τούτου, οι μεγάλοι ηλεκτρικοί πελάτες συνήθως χρεώνονται τόσο για την ποσότητα της ενέργειας που χρησιμοποιούν όσο και για τη μέγιστη ποσότητα ισχύος που απορροφούν από το δίκτυο, δηλ. οι πελάτες που επιθυμούν να καταναλώσουν πολύ ενέργεια και γρήγορα πρέπει να πληρώσουν περισσότερο. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι έτσι υποχρεώνεται η εταιρεία ηλεκτρισμού να έχει διαθέσιμο μεγαλύτερο συνολικό δυναμικό παραγωγής (περισσότερες μονάδες παραγωγής). Οι εταιρείες ηλεκτρισμού πρέπει να εξετάζουν το ενδεχόμενο αύξησης του δυναμικού ηλεκτροπαραγωγής οποτεδήποτε παρέχουν πρόσβαση στο δίκτυο σε νέους καταναλωτές.

Πάντως, με ένα μέτριο αριθμό συστημάτων ΑΠΕ στο δίκτυο, αυτά συμπεριφέρονται σχεδόν ως “αρνητικοί καταναλωτές”, το οποίο σημαίνει ότι μεταθέτουν την ανάγκη για εγκατάσταση πρόσθετου δυναμικού ηλεκτροπαραγωγής. Για το λόγο αυτό, πολλές εταιρείες ηλεκτρισμού πληρώνουν κάθε χρόνο ένα ορισμένο ποσό στους ιδιοκτήτες των συστημάτων ΑΠΕ ως πίστωση δυναμικού. Το ακριβές επίπεδο της πίστωσης αυτής ποικίλει. Σε ορισμένες χώρες πληρώνεται βάσει ενός αριθμού μετρήσεων της παραγόμενης ισχύος κατά τη διάρκεια του έτους, ενώ σε άλλες περιοχές εφαρμόζεται κάποια άλλη μέθοδος. Τέλος, σε έναν αριθμό περιοχών δεν δίνεται καμία πίστωση δυναμικού, καθώς θεωρείται ότι αποτελεί μέρος του ενεργειακού τιμολογίου. Σε κάθε περίπτωση, η πίστωση ισχύος συνήθως είναι ένα αρκετά μέτριο ποσό κατ’ έτος.

8.4.3. Θεώρηση του περιβαλλοντικού εξωτερικού κόστους

Η χρήση των ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας θεωρείται υπεύθυνη για την σε σημαντικό βαθμό υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Ειδικότερα, είναι ευρέως γνωστό ότι οι εκπομπές στην ατμόσφαιρα προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, οι οποίες δεν λαμβάνονται υπόψη επαρκώς κατά τη λήψη των σχετικών με την ενέργεια αποφάσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ποιότητα του αέρα και άλλα περιβαλλοντικά στοιχεία θεωρούνται ως κοινά αγαθά και δεν τιμολογούνται από τον υπάρχοντα μηχανισμό της αγοράς.



Σχήμα 8.4. Περιβαλλοντικά εξωτερικά κόστη της ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρώπη
[Πηγή: Μελέτη ExternE της ΓΔΧΙΙ]

Έτσι, στην τιμή των συμβατικών πηγών ενέργειας δεν περιλαμβάνονται τα κόστη που επιβάλλονται στην κοινωνία λόγω των ποικίλων περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και στο φυσικό και κοινωνικό περιβάλλον (π.χ. καλλιέργειες, δάση, υδάτινοι πόροι, φυσικά οικοσυστήματα, κτίρια, πολιτιστικά μνημεία, κλπ.). Κατά την τελευταία δεκαετία έχουν αναληφθεί εντατικές προσπάθειες για την εκτίμηση του εξωτερικού κόστους που σχετίζεται με την παραγωγή και τη χρήση της ενέργειας. Όλες οι σχετικές μελέτες (μεταξύ των οποίων και το έργο ExternE της E.E.) έχουν

καταδείξει ότι τα περιβαλλοντικά εξωτερικά κόστη πολλών συμβατικών τεχνολογιών μπορεί να υπερβαίνουν τα αντίστοιχα ιδιαίτερα κόστη.

Το μεγαλύτερο μέρος αυτού του εξωτερικού κόστους (βλ. σχήμα 8.4) αναφέρεται στο φαινόμενο της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας και στις επιδράσεις στη νοσηρότητα και τη θνησιμότητα λόγω των ατμοσφαιρικών ρύπων. Είναι ξεκάθαρο ότι οι ΑΠΕ, οι οποίες είναι απαλλαγμένες από κάθε τύπο ατμοσφαιρικών εκπομπών, υφίστανται μια άνιση μεταχείριση στην παρούσα αγορά και η ενσωμάτωση του εξωτερικού κόστους θα μεταβάλει σημαντικά την παρούσα αντίληψη για τη σχετική οικονομική ελκυστικότητα των ανταγωνιζόμενων ενεργειακών τεχνολογιών.

8.4.4. Υποστήριξη των ΑΠΕ

Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος από τεχνολογίες ΑΠΕ, από τις οποίες κάποιες παρέχουν ηλεκτρισμό και άλλες θερμότητα, κάποιες είναι μικρής κλίμακας και αποκεντρωμένες ενώ άλλες είναι της τάξης των πολλών MW, κάποιες είναι οικονομικά ανταγωνιστικές ενώ άλλες χρειάζονται ακόμα πρόσθετη υποστήριξη, ορισμένες είναι “κλασικές” και άλλες βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο. Αυτή η ποικιλομορφία απαιτεί ευέλικτα και προσαρμοσμένα στην εκάστοτε περίπτωση μέτρα προώθησης. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικές μορφές υποστήριξης.

Τα κύρια σχήματα υποστήριξης είναι:

- *Επιδοτήσεις για έρευνα και ανάπτυξη.*
- *Επενδύσεις κεφαλαίου ή δάνεια για επενδύσεις.*
- *Εγγυημένες τιμές σε συνδυασμό με κάποια δέσμευση για αγορά από τις εταιρείες ηλεκτρισμού: Το επίπεδο των εγγυημένων τιμών ποικίλει σημαντικά από χώρα σε χώρα, όπου οι διακανονισμοί στη Γερμανία, τη Δανία, την Ισπανία και την Ιταλία παρέχουν, κατά μέσο όρο, τις υψηλότερες τιμές στους παραγωγούς ηλεκτρισμού από ΑΠΕ.*
- *Σύστημα υποβολής προσφορών: Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, η Πολιτεία αποφασίζει το επιθυμητό επίπεδο των ΑΠΕ, σύμφωνα με το συνδυασμό πηγών (αιολική, βιομάζα, ηλιακή, απόβλητα, κλπ.) που υπαγορεύει η δημόσια πολιτική. Στη συνέχεια προκηρύσσει μία σειρά διαγωνισμών για την προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μετέπειτα θα παρέχεται βάσει συμβολαίου. Τέλος, η ηλεκτρική ενέργεια πωλείται από την αρμόδια αρχή για τον καθορισμό των τιμών με την επιβολή τέλους αδιακρίτως σε όλους τους οικιακούς καταναλωτές ηλεκτρισμού.*
- *Εκούσια σχήματα πράσινης τιμολόγησης: Οι καταναλωτές εκουσίως μπορούν να επιλέξουν να υποστούν μία πρόσθετη επιβάρυνση για ηλεκτρισμό από ΑΠΕ. Τότε αυτοί πληρώνουν μέρος ή το σύνολο του επιπλέον κόστους που συνεπάγεται η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ.*
- *Θεσμικές/συναινετικές διαδικασίες και ρυθμίσεις στους οικοδομικούς κανονισμούς και τις οδηγίες σχεδιασμού: Αντικειμενικός στόχος είναι η μείωση ή η εκλογίκευση των σχεδιαστικών φραγμών. Για παράδειγμα, ο υποχρεωτικός χαρακτηρισμός*

από τις τοπικές αρχές επιλέξιμων ζωνών για την ανάπτυξη των ΑΠΕ (όπως στη Δανία) διευκολύνει επίσης την ανάπτυξη των ανανεώσιμων.

- **Υποστήριξη μέσω του συστήματος φορολόγησης:**
 - φόρμες απαλλαγής ή επιστροφή των ενεργειακών φόρων, όπου υπάρχουν (στη Φινλανδία επιστρέφεται ο φόρος ηλεκτρισμού, στη Δανία επιστρέφεται ο φόρος για το CO₂, στη Σουηδία δίνεται ένα περιβαλλοντικό επιμίσθιο στους παραγωγούς αιολικής ενέργειας),
 - χαμηλότερα ποσοστά ΦΠΑ σε ορισμένα συστήματα ΑΠΕ, όπως συμβαίνει με τα θερμικά ηλιακά στην Ελλάδα και την Πορτογαλία,
 - φοροαπαλλαγές για επενδύσεις σε μικρής κλίμακας έργα ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ,
 - εισαγωγή φόρων για τα SO₂ και NO_x όπως στη Δανία και τη Σουηδία, που ευνοεί ιδιαίτερα την ανάπτυξη των αιολικών και υδροηλεκτρικών σταθμών.

ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα

1. "Layman's guidebook on how to develop a small hydro site", παραχθέν στα πλαίσια συμβολαίου της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, Γ.Δ. για την Ενέργεια, από την Ευρωπαϊκή Εταιρεία Μικρών Υδροηλεκτρικών (ESHA), 1997.
2. Nigel, S., 1997. "Motors as Generators for Micro-Hydro Power", Intermediate Technology Publications, United Kingdom.
3. Harvey, A., 1991. "Micro-hydro design manual - A guide to small-scale water power schemes", Intermediate Technology Publications, United Kingdom.
4. Fraenkel et al, 1993. "Micro-hydro power - A guide for development workers", Intermediate Technology Publications, United Kingdom.
5. Ιστοσελίδα "International Small-hydro Atlas": <http://www.small-hydro.com/>
6. Ιστοσελίδα: http://www.geocities.com/wim_klunne/hydro/index.html

Αιολική Ενέργεια

1. "Wind Energy in Europe - The Facts". Παραχθέν στα πλαίσια έργου του Προγρ. ALTENER για την Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, DG-TREN, από την Ευρωπαϊκή Εταιρεία Αιολικής Ενέργειας (EWEA), Λουξεμβούργο, 1999 (Volume 1: Technology, Volume 2: Costs, prices and values, Volume 3: Industry and employment, Volume 4: The environment, Volume 5: Market development).
2. Gipe, P., 1995. "Wind Energy comes of Age", John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, Sussex, ISBN 0-47110924X.
3. "Wind Energy", Ed. S. M. Hock, Mechanical Engineering Publications Ltd, ISBN 0-7918 0950 1, 1993.
4. "Wind Energy Conversion Systems", Ed. L. L. Freris, Prentice Hall, ISBN 0-13-960527-4, 1991.
5. "Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering", Ed. D. A. Spera, American Society of Mechanical Engineering, ISBN 0-7918-1205-7, 1994.
6. Troen I., and Petersen E.L., 1989. "European Wind Atlas", Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.
7. Ιστοσελίδα "Danish Wind Turbine Manufacturers Association": <http://www.windpower.dk>

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

1. Green, M.A., 1982, "Solar Cells-Operating Principles, Technology, and System Applications", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
2. Stone, J. L., 1993. "Photovoltaics: Unlimited Electrical Energy From the Sun", September 1993 issue of *Physics Today*.

3. "Solar Electricity", Ed. Th. Markvant, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1995.
4. Aurora educational web site (funded by the US DoE and produced by the Center for Renewable Energy and Sustainable Technology – CREST):
<http://aurora.crest.org/pv/index.htm>
5. Ιστοσελίδα "Australian Renewable Energy":
<http://renewable.greenhouse.gov.au/technologies/pv/pv.html>
6. Ιστοσελίδα του "IEA Photovoltaic Power Systems Programme":
http://www.euronet.nl/users/oke/PVPS/pv/sa_syst.htm
7. Ιστοσελίδα του "US DoE National Renewable Energy Laboratory's (NREL)":
<http://www.nrel.gov/research/pv/>

Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα

1. "Towards the 21st Century, IEA/SolarPACES Strategic Plan", *SolarPACES Brochure*, March 1996.
2. Kolb, G., and Tyner, C., 1997, "Solar Thermal Electricity", *IEA Workshop on the Mitigation of Greenhouse Gas Emissions*, Paris, France, September 15–16.
3. "Solar Thermal Power and Solar Chemical Energy Systems, SolarPACES Program of the International Energy Agency", *SolarPACES Brochure*, Birmingham, United Kingdom, September 1994, with 1998 update.
4. DeLaquil, P., Kearney, D., Geyer, M., & Diver, D., 1993, "Solar Thermal Electric Technology", *Renewable Energy, Sources for Fuels and Electricity*, Ed. T. B. Johansson, H. Kelly, A. Reddy, and R. Williams, Island Press, Washington, D.C.
5. Mancini, T., Kolb, G., and Prairie, M., 1996, "Solar Thermal Power", *Advances in Solar Energy, An Annual Review of Research and Development*, Ed. K. Boer, American Solar Energy Society, Inc., Boulder, Colorado.
6. U.S. Department of Energy and Electric Power Research Institute, *Renewable Energy Technology Characterizations*, EPRI TR-109496, December 1977.
7. Trieb, F. and Meinecke, W., "Solar Thermal Power Stations, A Program Proposal for their Market Introduction", *EUREC Newsletter No. 8*, EUREC Agency, Leuven, Belgium, April 1998.

Γεωθερμική Ενέργεια

1. Brown, G. 1996, "Geothermal energy", in *Renewable energy- power for a sustainable future*, Ed. G. Boyle, Oxford University Press, Oxford.
2. Wright, P.M. 1998, "The earth gives up its heat", *Renewable Energy World*, Vol.1, No 3, pp.21-25.
3. Fridleifsson, I., 1996, "The role of Geothermal Energy in the World", *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, Vol. 17, No 3.
4. DiPippo, R., 1999, "Small Geothermal Power Plants: Design, Performance and Economics", *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, Vol. 20, No 2.

5. Ιστοσελίδα του World Bank Group:
<http://www.worldbank.org/html/fpd/energy/geothermal/index.htm>
6. Ιστοσελίδα του European Geothermal Energy Council (EGEC) - European Geothermal Information Network:
<http://www.geothermie.de/egec-geothernet.htm>
7. Ιστοσελίδα του Geothermal Education Office (GEO): <http://geothermal.marin.org/>

Bιο-ισχύς

1. "Learning from experiences with Alternative Fuels in Electric Power Generating Plants", CADDET Analyses Series No 26, December 1999.
2. Bain, R.L., P. Overend, R.P., and Craig, K.R., 1996, "Biomass-fired Power Generation", Conference Paper: "*Biomass Usage for Utility and Industrial Power*", Snowbird Resort and Conference Center, Snowbird, UT, April 29 - May 3 1996, Engineering Foundation, NY.
3. Morris, D., 1994, "The Economics of Plant Matter Derived Electricity". Πρακτικά του Συνεδρίου με τίτλο: "*Renewable Electricity: Farming a Sustainable Energy Crop*", Collegeville, Minnesota, March 22, 1994.
4. Overend, R., 2000. "Biomass gasification – the enabling technology", *Renewable Energy World*, James & James, Sept-Oct 2000.
5. Mann, M.K., P.L Spath, 1997. "Life cycle assessment of a biomass gasification combined-cycle system", National Renewable Energy Laboratory Report for the US Department of Energy, NREL/TP-430-23076, 94pp.
6. Lundberg, H., M Morris, and E Rensfelt, 1998. "Biomass gasification for energy production", *The World Directory of Renewable Energy*, James and James, London, pp. 75-82.
7. Tillman, D.A., Plasynski, S., and Hughes, E., 1999. "Biomass cofiring in coal-fired boilers: test programs and results". Proceedings of 4th Biomass Conference of the Americas, Oakland. Elsevier Science Ltd., UK, pp 1287-1291.
8. Ιστοσελίδα του "US DoE BioPower Program": <http://www.eren.doe.gov/biopower/>

Γενικά περί ΑΠΕ

1. "New renewable energy resources: A Guide to the Future", World Energy Council, Kogan Page Ltd, London, 1994.
2. Ιστοσελίδα ATLAS (με τη χρηματοδότηση του επιδεικτικού υπο-προγράμματος 'THERMIE' του 4^{ου} Προγράμματος Πλαισίου για Ε&ΤΑ):
http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/home.html
3. Ιστοσελίδα "EuroREX (European Renewable Energy Exchange)":
<http://www.eurorex.com/>
4. Ιστοσελίδα "AGORES, the official European Commission Web-site for Renewable Energy Sources": <http://www.agores.org/>

5. "Energy for the future: Renewable sources of energy", White Paper of the European Commission for a Community Strategy and Action Plan, European Commission, 1997; [COM(97)599 final (26/11/1997)].
6. "The European Renewable Energy Study", ALTENER Programme, CEC DGXVII, 1994.
7. "The Evolving Renewable Energy Market", IEA Renewable Energy Working Party Report, 48 pp; 1999.
8. "The Future for Renewable Energy: prospects and directions", EUREC Agency, published by James & James London, December 1996; ISBN 1-873936-70-2.