



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και
Διοίκησης
Τομέας Επιχειρησιακής Έρευνας

***«Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής
ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές
και διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο»***



Διπλωματική εργασία:
Φραγκιουδάκη Μαρία

Επιβλέπων καθηγητής:
Κ. Κανέλλος Φώτιος

Χανιά, Απρίλιος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου κ. Κανέλλο Φώτιο για την ανάθεση και επίβλεψη της εργασίας μου, καθώς και για την σημαντική βοήθειά του για την εκπόνηση της διπλωματικής, για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις του και την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της.

Επιπλέον, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και στον άντρα μου για την αμέριστη συμπαράσταση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

...και στην Ελένη!

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ολοκληρωμένη μελέτη και παρουσίαση τεσσάρων μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συγκεκριμένα γίνεται μια αναλυτική περιγραφή στα φωτοβολταϊκά συστήματα και τα αιολικά πάρκα, ενώ γίνεται και αναφορά στα μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα και στην βιομάζα. Επιπρόσθετα, γίνεται μια περιγραφή των τρόπων με τους οποίους γίνεται η διασύνδεση των εξεταζόμενων αυτών τεχνολογιών με το δίκτυο καθώς και μια σύντομη αναφορά στους περιορισμούς λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της μεγάλης διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας περιγράφονται αναλυτικά τα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς γίνεται μια εκτενής αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία, στις κατηγορίες των τεχνολογιών των φωτοβολταϊκών και στη σύνδεση αυτών με το δίκτυο. Τέλος, γίνεται μια βασική οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης ενός φωτοβολταϊκού πάρκου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται αναλυτικά η τεχνολογία των αιολικών πάρκων, ο άνεμος και τα συστατικά του, η δομή και οι τεχνολογίες των ανεμογεννητριών, καθώς αναφέρονται επιπλέον και θέματα υψηλής διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ειδικά των αιολικών πάρκων σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, γίνεται μια αναφορά στη σύνδεση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο και μια οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης ενός αιολικού σταθμού.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στα υδροηλεκτρικά πάρκα και κυρίως στα μικρά υδροηλεκτρικά, καθώς αυτά θεωρούνται ως ΑΠΕ. Επιπλέον, αναφέρονται τα είδη των μικρών υδροηλεκτρικών, τα μέρη που απαρτίζουν έναν υδροηλεκτρικό σταθμό, καθώς επίσης γίνεται μια σύντομη περιγραφή στα είδη των στροβίλων και στους τρόπους σύνδεσης των υδροηλεκτρικών σταθμών με το δίκτυο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στην βιομάζα ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, στους διάφορους τύπους βιομάζας, στις μεθόδους μετατροπής της βιομάζας, στα βασικά χαρακτηριστικά της καθώς και στους τρόπους χρήσης της.

Τέλος, σε όλα τα κεφάλαια αναφέρεται η παρούσα κατάσταση των ανανεώσιμων αυτών πηγών ενέργειας που υφίσταται τόσο στον ελληνικό χώρο όσο και στον ευρωπαϊκό χώρο.

ABSTRACT

The purpose of this study is the comprehensive research and presentation of four types of renewable energy. Specifically, to comprise an analytic description of photovoltaic systems and wind parks, and a short reporting on small hydroelectric schemes and biomass. Furthermore, there is a description of the connection interface with the network of these technologies and a brief reference to operating restrictions of a power system due to the high penetration of renewable energy sources.

The first chapter of this study deals with photovoltaic systems comprising a detailed description of solar radiation, the categories of photovoltaic technology and their connections to the network. Finally, a basic financial assessment method of the viability of the investment of a photovoltaic park is provided.

The second chapter of the study referred to the technology of wind farms, the wind and its components, the structure and the technology of wind turbines and additional reports of high penetration of renewable energy sources, especially wind farm issues in a power system. Finally, is being a reference to the connection of wind farms to the grid and an economic evaluation of the investment of a wind farm.

The third chapter of the study deals with hydroelectric plants and especially with small hydros. Furthermore, the types of small hydroelectric plants, the parts constituting their power system, as well as the types of turbines and ways of connecting them to the network are described.

The fourth chapter is a brief reference to the biomass as a renewable energy source, the various types of biomass, methods of converting biomass, key features and methods of its use.

Finally, the present situation of the above renewable energy types both in Greece and Europe is analyzed.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	20
1. Φωτοβολταϊκά Συστήματα	21
1.1. Εισαγωγή	21
1.2. Ηλιακή Ακτινοβολία	22
1.3. Ιστορική Αναδρομή	24
1.4. Ο ήλιος και η ηλιακή ακτινοβολία	27
1.4.1. Προσδιορισμός της θέσης του ήλιου	29
1.4.2. Ημερήσια τροχιά του ηλίου	30
1.4.3. Ορισμός των γωνιών για ηλιακούς συλλέκτες	31
1.4.4. Απευθείας, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία	33
1.4.5. Ιχνηλασία ενός και δύο αξόνων	36
1.4.6. Μέση μηνιαία ηλιακή ένταση	37
1.5. Ημιαγωγός	41
1.6. Ένωση p-n	43
1.7. Πόλωση της διόδου	44
1.7.1. Ορθή πόλωση της διόδου	44
1.7.2. Ανάστροφη πόλωση της διόδου	45
1.8. Μαθηματική ανάλυση των περιοχών λειτουργίας της ένωσης p-n	45
1.9. Χαρακτηριστική I-V της ένωσης p-n	46
1.10. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο	47
1.11. Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών	49
1.11.1. Συμβατικά Φωτοβολταϊκά (μεγάλου πάχους)	49
1.11.1.1. Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου	49
1.11.1.2. Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου	53
1.11.1.3. Ταινίας Πυριτίου (Ribbon Πυρίτιο)	55
1.11.2. Φωτοβολταϊκά thin film	57
1.11.2.1. Άμορφο Πυρίτιο (a-Si)	59

1.11.2.2.	Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)	60
1.11.2.3.	Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe ₂ ή CIS).....	60
1.11.2.4.	Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe).....	61
1.11.3.	Άλλες Τεχνολογίες	62
1.11.3.1.	Νανοκρυσταλλικά Φωτοβολταϊκά πυριτίου.....	62
1.11.3.2.	Οργανικά Φωτοβολταϊκά.....	63
1.12.	Μελλοντική Εξέλιξη	64
1.12.1.	Νέες Μορφές Φωτοβολταϊκών.....	64
1.12.2.	Ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκών σε Κτίρια	66
1.13.	Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	69
1.14.	Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου	70
1.15.	Ισοδύναμο Κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	72
1.16.	Χαρακτηριστική Ρεύματος- Τάσης φωτοβολταϊκού στοιχείου	74
1.16.1.	Χαρακτηριστική I-V.....	74
1.16.2.	Παράγοντες που επηρεάζουν την χαρακτηριστική I-V	75
1.16.2.1.	Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	75
1.16.2.2.	Η θερμοκρασία	77
1.16.2.3.	Άλλοι Παράγοντες	78
1.17.	Φωτοβολταϊκά πλαίσια και Συλλέκτες	78
1.17.1.	Σύνδεση σε σειρά.....	79
1.17.2.	Παράλληλη σύνδεση	81
1.17.3.	Άλλες Συνδέσεις	83
1.18.	Το Φωτοβολταϊκό Σύστημα	83
1.18.1.	Μετατροπείς	84
1.18.1.1.	Μετατροπέας DC- DC (Converter).....	84
1.18.1.2.	Μετατροπέας AC-DC (Converter).....	85
1.18.1.3.	Μετατροπέας DC-AC (Inverter).....	85
1.18.2.	Συσσωρευτές.....	95
1.19.	Σύνδεση των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο	96

1.20.	Είδη φωτοβολταϊκών συστημάτων	99
1.20.1.	Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα	99
1.20.2.	Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα	100
1.20.3.	Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα	101
1.21.	Τρόποι στήριξης φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	102
1.22.	Προσανατολισμός και Απόδοση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	108
1.23.	Οικονομική αξιολόγηση φωτοβολταϊκών συστημάτων	109
1.24.	Βιβλιογραφία.....	114
2.	Αιολική Ενέργεια	119
2.1.	Ιστορική Αναδρομή	120
2.2.	Αιολική ενέργεια στην Ευρώπη	122
2.3.	Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα	127
2.4.	Μελλοντική εξέλιξη ανεμογεννητριών	128
2.5.	Άνεμος	132
2.5.1.	Αιολικός Άτλαντας.....	133
2.5.2.	Κατανομές Weibull και Rayleigh	135
2.5.3.	Η ισχύς του ανέμου	139
2.5.4.	Εξάρτηση ταχύτητας ανέμου από το ύψος	142
2.6.	Κατασκευαστική Δομή	145
2.6.1.	Κατηγορίες ανεμογεννητριών	145
2.6.2.	Κατακόρυφου άξονα	146
2.6.3.	Οριζόντιου άξονα	148
2.7.	Δομή Ανεμογεννήτριας	150
2.7.1.	Πύργος.....	151
2.7.2.	Πτερύγια	153
2.7.3.	Μηχανισμός μεταβλητού βήματος πτερυγίων (pitch)	153
2.7.4.	Φρένο	154
2.7.5.	Γεννήτρια	154
2.7.6.	Σύστημα προσανεμισμού (yaw drive)	154

2.7.7. Κιβώτιο ταχυτήτων.....	155
2.7.8. Ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης	156
2.7.9. Θάλαμος	156
2.8. Μηχανικό σύστημα μετάδοσης κίνησης	156
2.8.1. Ισοδύναμο μοντέλο τριών ελαστικά συνδεδεμένων μαζών.....	158
2.9. Συνθήκη μεγιστοποίησης μηχανικής ισχύος πτερυγίων	161
2.10. Κατηγοριοποίηση ανεμογεννητριών	165
2.11. Θέματα υψηλής αιολικής διείδυσης	170
2.12. Ικανότητα Μεταφοράς.....	171
2.13. Ρύθμιση φορτίου- συχνότητας	172
2.14. Τεχνικές απαιτήσεις κωδίκων	173
2.14.1. Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο	173
2.14.2. Έλεγχος της ενεργού ισχύος και συχνότητας	175
2.14.3. Έλεγχος της άεργου ισχύος και τάσης.....	175
2.14.4. Όρια τάσης και συχνότητας	176
2.15. Εποπτεία και έλεγχος αιολικού πάρκου	177
2.15.1. Το σύστημα SCADA.....	179
2.16. Σύνδεση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο	181
2.16.2. Τοπολογίες σύνδεσης αιολικών πάρκων	181
2.16.2.2. Σύνδεση AC	181
2.16.2.3. Σύνδεση AC/DC	182
2.16.2.4. Σύνδεση DC	183
2.16.2.5. Το σύστημα HVDC	185
2.16.2.6. Το σύστημα HVAC	186
2.16.2.7. Το σύστημα HVDC βασισμένο σε LCC	186
2.16.2.8. Το σύστημα HVDC βασισμένο σε VSC	187
2.17. Οικονομική Μελέτη αιολικού πάρκου	189
2.17.1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτρια	189
2.17.2. Συντελεστής χρησιμοποίησης ανεμογεννήτριας.....	190

2.17.3. Αξιολόγηση αιολικού πάρκου	191
2.17.4. Μέθοδοι αξιολόγησης της επένδυσης.....	194
2.18. Βιβλιογραφία.....	197
3. Υδροηλεκτρική ενέργεια	202
3.1. Ιστορική αναδρομή	206
3.2. Υδροηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα	207
3.3. Επιπτώσεις στο περιβάλλον	209
3.4. Μέρη ενός υδροηλεκτρικού σταθμού	210
3.4.1. Φράγματα και υδροφράκτες	211
3.4.2. Στόμιο εισόδου	212
3.4.3. Κανάλι.....	213
3.4.4. Αγωγοί πτώσης	214
3.4.5. Υδροστρόβιλοι	215
3.4.5.1. Υδροστρόβιλοι Kaplan και έλικας	215
3.4.5.2. Υδροστρόβιλοι Francis.....	218
3.4.5.3. Υδροστρόβιλοι Pelton	219
3.4.5.4. Υδροστρόβιλοι εγκάρσιας ροής	221
3.4.5.5. Υδροστρόβιλοι Turgo.....	222
3.4.6. Αυλάκια απαγωγής	224
3.4.7. Σύστημα μετάδοσης της κίνησης.....	224
3.4.8. Γεννήτρια	225
3.4.9. Εξοπλισμός ελέγχου και προστασίας	226
3.5. Ισχύς υδροηλεκτρικού σταθμού.....	227
3.6. Τρόποι σύνδεσης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού στο δίκτυο	228
3.6.1. DC σύνδεση.....	228
3.6.2. AC σύνδεση.....	230
3.6.2.1. AC διασυνδεδεμένο σύστημα.....	231
3.6.2.2. AC αυτόνομο σύστημα	233
3.7. Βιβλιογραφία.....	235

4. Βιομάζα	237
4.1. Ορισμός	237
4.2. Η βιομάζα στην Ελλάδα	239
4.3. Η βιομάζα στη Ευρώπη	240
4.4. Τύποι βιομάζας	243
4.4.1. Ενεργειακή καλλιέργεια	244
4.4.2. Υπολειμματικές μορφές βιομάζας	244
4.5. Μετατροπή βιομάζας σε ενέργεια	245
4.5.1. Θερμοχημικές μέθοδοι	246
4.5.1.1. Καύση	246
4.5.1.2. Αεριοποίηση	247
4.5.1.3. Πυρόλυση	248
4.5.1.4. Υδρογονοδιάσπαση	249
4.5.2. Βιολογικές/ Βιοχημικές μέθοδοι	250
4.5.2.1. Αναερόβια Χώνευση	250
4.5.2.2. Υδρόλυση	251
4.5.2.3. Ζύμωση	251
4.5.3. Μηχανικές διαδικασίες	252
4.5.3.1. Εστεροποίηση	252
4.6. Βασικά χαρακτηριστικά βιομάζας	252
4.6.1. Περιεκτικότητα σε υγρασία	252
4.6.2. Περιεκτικότητα σε τέφρα	254
4.6.3. Θερμογόνος δύναμη	255
4.6.4. Περιεκτικότητα σε πτητική ύλη	255
4.6.5. Πυκνότητα και ενεργειακή πυκνότητα	255
4.7. Κύριες χρήσεις βιομάζας	256
4.7.1. Παραγωγή θερμότητας	256
4.7.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	257
4.7.3. Συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ισχύος	257

4.7.4. Παραγωγή καυσίμων	258
4.7.4.1. Βιοντίζελ.....	258
4.7.4.2. Βιοαιθανόλη.....	259
4.8. Βιβλιογραφία.....	260

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σχήμα 1 Ηλιοφάνεια στην Ελλάδα	23
Σχήμα 2 Ποσοστό συμμετοχής των κυρίαρχων χωρών στην εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ	26
Σχήμα 3 Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε πάνελ ανά τον κόσμο	28
Σχήμα 4 Ύψος και αζιμούθιο του ήλιου [58]	29
Σχήμα 5 Ηλιακός χάρτης για την περιοχή της Αθήνας	30
Σχήμα 6 Ορισμός γωνιών σε συλλέκτη	31
Σχήμα 7 Γωνία πρόσπτωσης θ [58]	32
Σχήμα 8 Απευθείας, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία [6]	33
Σχήμα 9 Ιχνηλασία ενός άξονα	36
Σχήμα 10 Ιχνηλασία δύο αξόνων	37
Σχήμα 11 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη ατόμων βορίου και φωσφόρου [10]	42
Σχήμα 12 Ένωση p-n [39]	43
Σχήμα 13 Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση διόδου p-n [26]	44
Σχήμα 14 Χαρακτηριστική I-V	46
Σχήμα 15 Επίπεδα φωτοβολταϊκού πλαισίου	47
Σχήμα 16 Μέθοδος Czochranski	50
Σχήμα 17 Κοπή με τη μέθοδο των πολλαπλών συρμάτων	51
Σχήμα 18 Δομικό διάγραμμα της διαδικασίας παρασκευής ενός στοιχείου μονοκρυσταλλικού πυριτίου[24]	52
Σχήμα 19 Μέθοδος Bridgman [24]	54
Σχήμα 20 Μέθοδος block casting [24]	55
Σχήμα 21 Edge defined Film Fed Growth Process	56
Σχήμα 22 String Ribbon Process (STR)	57
Σχήμα 23 Δομή του ηλιακού στοιχείου CIS [24]	61
Σχήμα 24 Δομή του ηλιακού στοιχείου CdTe [24]	61
Σχήμα 25 Στρώσεις οργανικού φωτοβολταϊκού συστήματος [47]	63
Σχήμα 26 Εύκαμπτο φωτοβολταϊκό [47]	64
Σχήμα 27 Ημι-διαπερατά φωτοβολταϊκά [47]	65
Σχήμα 28 Ημι-διαπερατά φωτοβολταϊκά [47]	65
Σχήμα 29 Πρώτη Γενιά BIPV [47]	66
Σχήμα 30 Δεύτερη Γενιά BIPV [47]	67
Σχήμα 31 Τρίτη Γενιά BIPV [47]	67
Σχήμα 32 Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε κτίρια	68

Σχήμα 33 Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου [28]	71
Σχήμα 34 Κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου	72
Σχήμα 35 Χαρακτηριστική I-V	74
Σχήμα 36 Maximum Power Point (MPP)	75
Σχήμα 37 Καμπύλες ηλιακής έντασης	76
Σχήμα 38 Καμπύλες θερμοκρασίας	77
Σχήμα 39 Συνδεσμολογία σε σειρά	79
Σχήμα 40 Τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά [48]	80
Σχήμα 41 Παράλληλη συνδεσμολογία	81
Σχήμα 42 Τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα παράλληλα [48]	82
Σχήμα 43 Φωτοβολταϊκό Σύστημα	84
Σχήμα 44 Μονοφασικός αντιστροφέας με μισή γέφυρα [57]	87
Σχήμα 45 Μονοφασικός αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα [57]	88
Σχήμα 46 Τριφασικός αναστροφέας [33]	89
Σχήμα 47 Κεντρικός αντιστροφέας [64]	90
Σχήμα 48 Αντιστροφέας κλάδων [64]	91
Σχήμα 49 Αντιστροφέας πολλαπλών κλάδων [64]	92
Σχήμα 50 Πολλαπλός αναστροφέας για συστήματα με διαφορετικούς προσανατολισμούς [33]	92
Σχήμα 51 Αντιστροφείς για ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ [38]	93
Σχήμα 52 Τεχνολογίες αντιστροφέων [38]	94
Σχήμα 53 Τυπική διάταξη σύνδεσης παραγωγού στο δίκτυο [55]	97
Σχήμα 54 Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα [48]	99
Σχήμα 55 Διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό Σύστημα [48]	100
Σχήμα 56 Υβριδικό Σύστημα	101
Σχήμα 57 Πάνελ με στήριξη σταθερής γωνίας κλίσης	103
Σχήμα 58 Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες (Trackers)	105
Σχήμα 59 Τοποθέτηση Φωτοβολταϊκών σε κτίριο	106
Σχήμα 60 Απευθείας τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε κτίριο	106
Σχήμα 61 Αντικατάσταση οροφής από Φωτοβολταϊκά πάνελ	107
Σχήμα 62 Ανεμόμυλοι στο οροπέδιο Λασιθίου	121
Σχήμα 63 Εγκατεστημένη Ισχύς στην Ευρώπη για το έτος 2013 [58]	123
Σχήμα 64 Εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη τα έτη 2012-2013 [58]	124
Σχήμα 65 Ποσοστό συνεισφοράς σε αολική ενέργεια κάθε χώρας για το έτος 2013 [58]	125
Σχήμα 66 Ποσοστά παραγόμενης ισχύος από όλες τις πηγές ενέργειας για το έτος 2013 [58]	126

Σχήμα 67 Άνοδος της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος από το έτος 1996 έως το έτος 2013 [58]	126
Σχήμα 68 Συνολικά εγκατεστημένα MW ανά χρόνο [62]	127
Σχήμα 69 Εγκατεστημένα MW ανά περιοχή [62]	128
Σχήμα 70 Νέες ιαπωνικές ανεμογεννήτριες [11].....	129
Σχήμα 71 Πειραματικό μοντέλο [11].....	130
Σχήμα 72 Ανεμοηλιογέφυρα [11]	131
Σχήμα 73 Ανεμογεννήτρια σε δρόμο υψηλής ταχύτητας [11]	132
Σχήμα 74 Αιολικός Άτλας Ευρώπης.....	134
Σχήμα 75 Αιολικός Άτλας Ελλάδας.....	135
Σχήμα 76 Συνάρτηση Πυκνότητας Κατανομής Weibull με $C=8$ και $k=1,2,3$ [31].....	136
Σχήμα 77 Παράδειγμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας Weibull για δεδομένες τιμές ταχύτητας ανέμου [39]	137
Σχήμα 78 Συνάρτηση Πυκνότητας Κατανομής Rayleigh για $C=4,6,8$ [31].....	139
Σχήμα 79 Καμπύλη αεροδυναμικού συντελεστή[22]	141
Σχήμα 80 Πιθανή μορφή του οριακού στρώματος της ταχύτητας του ανέμου[18]	144
Σχήμα 81 Οι δύο κύριοι τύποι ανεμογεννητριών [39]	145
Σχήμα 82 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα τύπου Darrieus [39]	147
Σχήμα 83 Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Άξονα τύπου Savonius [39]	148
Σχήμα 84 Σχηματική αναπαράσταση μιας Α/Γ οριζόντιου άξονα [18]	149
Σχήμα 85 Δομικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας [19].....	150
Σχήμα 86 Ανεμογεννήτριες με χαλύβδινους σωληνοειδείς πύργους	151
Σχήμα 87 Πύργοι τύπου δικτυώματος	152
Σχήμα 88 Κιβώτιο ταχυτήτων ανεμογεννήτριας κατά την κατασκευή του [37]	155
Σχήμα 89 Μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης.....	157
Σχήμα 90 Ισοδύναμο μοντέλο τριών ελαστικά συνδεδεμένων στρεφόμενων μαζών [42]	159
Σχήμα 91 Αεροδυναμική ισχύς της Ανεμογεννήτριας [42]	162
Σχήμα 92 Χαρακτηριστική βέλτιστης ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων-ταχύτητας ανέμου [42]	164
Σχήμα 93 Γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο [26].....	167
Σχήμα 94 Γεννήτρια διπλής τροφοδότησης [26]	168
Σχήμα 95 Σύνδεση σύγχρονης γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα ή γεννήτρια μονίμων μαγνητών με το δίκτυο [26].....	170
Σχήμα 96 Απαιτήσεις FRT του γερμανικού Κώδικα για Α/Π [30]	174
Σχήμα 97 Σύστημα SCADA	180
Σχήμα 98 Τοπολογία σύνδεσης AC [54]	182

Σχήμα 99 Τοπολογία σύνδεσης AC/DC [54]	183
Σχήμα 100 Τοπολογία σύνδεσης DC [54]	184
Σχήμα 101 Τοπολογία σύνδεσης DC αιολικού πάρκου σε συνδεσμολογία σε σειρά [54].....	185
Σχήμα 102 Σύστημα μεταφοράς με μετατροπής πηγών ρεύματος LCC [54]	187
Σχήμα 103 Σύστημα μεταφοράς με μετατροπείς πηγών τάσης VSC [54].....	188
Σχήμα 104 Υδροστροβίλοι παλαιάς τεχνολογίας [5]	202
Σχήμα 105 (α) Υδροηλεκτρικό έργο με λεκάνη αποθήκευσης και φράγμα, (β) Υδροηλεκτρικό έργο με εκτροπή μέρους της ροής του ποταμού (run of the river) και ανοιχτή διώρυγα προσαγωγής του νερού [4]	204
Σχήμα 106 Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ [5]	208
Σχήμα 107 α) ΥΗΣ σε κανάλι παράλληλο σε ποτάμι β) ΥΗΣ σε ποτάμι (ΥΗΣ φυσικής ροής) [3].....	210
Σχήμα 108 Υδατοφράκτης Ασπρόκρεμμου, Επαρχία Πάφου	212
Σχήμα 109 Εγκατάσταση υδροστροβίλου Kaplan [3]	216
Σχήμα 110 Υδροστροβίλος τύπου Kaplan.....	217
Σχήμα 111 Τουρμπίνα Kaplan	217
Σχήμα 112 Εγκατάσταση στροβίλου Francis [3]	218
Σχήμα 113 Υδροτουρμπίνα τύπου Francis	219
Σχήμα 114 Τροχός τύπου Pelton [3].....	219
Σχήμα 115 Εγκατάσταση υδροστροβίλου τύπου Pelton [3]	220
Σχήμα 116 1) Ο υδροστροβίλος εγκάρσιας ροής (Michell) 2) Η εγκάρσια τομή του στροβίλου 3) Διάταξη των πτερυγίων του στροβίλου εγκάρσιας ροής [10]	221
Σχήμα 117 Τα πτερύγια του δρομέα και η δέσμη του νερού σε ένα υδροστροβίλο Turgo.....	222
Σχήμα 118 Εύρος λειτουργίας των διαφόρων τύπων στροβίλων [10]	223
Σχήμα 119 Αυτόνομο σύστημα DC που τροφοδοτείται από ένα μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό [4]	228
Σχήμα 120 DC υβριδικό αυτόνομο σύστημα με υδροηλεκτρικό σταθμό και φωτοβολταϊκό [4].....	230
Σχήμα 121 Υδροηλεκτρικός σταθμός με γεννήτρια επαγωγής συνδεδεμένος στο κεντρικό δίκτυο [4]	232
Σχήμα 122 Υδροηλεκτρικός σταθμός με σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης και πλήρη έλεγχο ισχύος και τάσεως [4]	233
Σχήμα 123 Υδροηλεκτρικός σταθμός με σύγχρονη γεννήτρια που τροφοδοτεί αυτόνομο AC σύστημα [4].....	234
Σχήμα 124 Τύποι βιομάζας [20]	243
Σχήμα 125 Διαδικασίες μετατροπής βιομάζας, προϊόντα και αγορές [7]	245

Σχήμα 126 Σχηματική διάταξη εγκατάστασης αεριοποίησης/ συνδυασμένου κύκλου (BIG/CC) [7]	248
Σχήμα 127 Διαδικασία πυρόλυσης	249
Σχήμα 128 Σχηματική αξιοποίησης βιομάζας με αναερόβια χώνευση [7]	250
Σχήμα 129 Ενεργειακή πυκνότητα στερεών βιοκαυσίμων [20]	256
Σχήμα 130 Παγκόσμια παραγωγή αιθανόλης και βιοντίζελ [20]	259

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Ποσότητα ρύπων που αποφεύγεται από την παραγωγή μιας ηλιακής κιλοβατώρας από φωτοβολταϊκό σύστημα	22
Πίνακας 2 Απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος ανάλογα με την κλίση του [38]	108
Πίνακας 3 Συντελεστής τριβής α για διάφορες επιφάνειες.....	143
Πίνακας 4 Υπολογισμός των ετήσιων ταμειακών ροών ενός αιολικού πάρκου	193
Πίνακας 5 Εύρος υψών πτώσης [10]	223
Πίνακας 6 Τομείς αξιοποίησης της βιομάζας [20]	240
Πίνακας 7 Πρωτογενής παραγωγή ενέργειας από στερεή βιομάζα στην Ε.Ε. [20]	241
Πίνακας 8 Πρωτογενής παραγωγή ενέργειας (σε Mtoe) από στερεή βιομάζα στα κράτη-μέλη της Ε.Ε. [20].....	242
Πίνακας 9 Ενεργειακές καλλιέργειες μεγάλης κλίμακας [2]	244
Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά πρώτης ύλης [7]	246
Πίνακας 11 Περιεκτικότητα πηγών βιομάζας σε υγρασία [20]	253
Πίνακας 12 Περιεκτικότητα πηγών βιομάζας σε τέφρα [20]	254

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ανανεώσιμη ενέργεια είναι η ενέργεια που αντλείται από πηγές, οι οποίες δεν εξαντλούνται ή αντικαθίστανται και ο όρος ΑΠΕ αναφέρεται κυρίως:

- ✓ Στην αιολική ενέργεια με τις γνωστές ανεμογεννήτριες, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική
- ✓ Στην ηλιακή ενέργεια μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, είτε πιο σπάνια με τη συγκέντρωση των ηλιακών ακτινών μέσω ηλιακών συλλεκτών ώστε να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες και σε τελικό στάδιο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- ✓ Στα μικρά υδροηλεκτρικά (<10 KW), στα οποία γίνεται εκμετάλλευση υδάτινων ρευμάτων(τεχνητά φράγματα κ.τ.λ.) για τα οποία δεν χρειάζονται μεγάλα έργα αποθήκευσης
- ✓ Στις κυψέλες καυσίμου, οι οποίες μετατρέπουν την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική με τη χρήση δεξαμενών και ηλεκτρολυτών
- ✓ Στην ενέργεια των θαλασσίων κυμάτων
- ✓ Στην γεωθερμική ενέργεια, στην οποία εκμεταλλευόμαστε τα εσωτερικά στρώματα της γης
- ✓ Στην ενέργεια της Βιομάζας, η οποία εκμεταλλεύεται φυτικά και ζωικά υπολείμματα, από τα οποία με κατάλληλες θερμοχημικές επεξεργασίες μπορούν να παραχθούν καύσιμα

Πρακτικά, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν εξαντλούνται ποτέ και δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον. Στη σημερινή εποχή γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική η ανάγκη αξιοποίησης εναλλακτικών πηγών ενέργειας εξαιτίας αφενός της ολοένα αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης και αφετέρου της μείωσης των αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων και των ζημιολόγων επιπτώσεων της χρήσης τους στο περιβάλλον. Το ενδιαφέρον για στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι παγκόσμιο, καθώς με την πάροδο των χρόνων γίνεται ολοένα πιο εφικτό οικονομικά και αποδοτικά.

Από τις παραπάνω μορφές ανανεώσιμων πηγών στην παρούσα διπλωματική θα γίνεται εκτενείς αναφορά κυρίως στα φωτοβολταϊκά συστήματα και στα αιολικά πάρκα, καθώς θα γίνει και επιπλέον αναφορά στα μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα και στη βιομάζα.

1. Φωτοβολταϊκά Συστήματα

1.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μέσω της χρήσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί έναν ανεξάντλητο ενεργειακό πόρο, που παρέχει ανεξαρτησία, σχετική προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ικανά να λειτουργούν αυτόνομα και αξιόπιστα χωρίς την παρουσία κάποιου χειριστή, το οποίο αποτελεί ένα τεράστιο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής. Επιπρόσθετα, το όφελος προς το περιβάλλον είναι τεράστιο. Μπορεί να σκεφτεί κανείς ότι η κάθε μία κιλοβατώρα ηλεκτρισμού που προμηθευόμαστε από το δίκτυο της ΔΕΗ παράγεται από ορυκτά καύσιμα, πράγμα το οποίο επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με ένα τουλάχιστον κιλό διοξειδίου του άνθρακα. Ενδεικτικά, ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα ενός κιλοβάτ, αποτρέπει κάθε χρόνο την έκλυση 1,4 τόνων διοξειδίου του άνθρακα, όσο δηλαδή θα απορροφούσαν δύο στρέμματα δάσους. Επιπλέον, υπάρχει και η αποφυγή άλλων επικίνδυνων ρύπων, όπως τα αιωρούμενα μικροσωματίδια, τα οξείδια του αζώτου και οι ενώσεις του θείου. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται παρουσίαση της ποσότητας των ρύπων σε γραμμάρια, η έκλυση των οποίων αποφεύγεται για κάθε ηλιακή κιλοβατώρα που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

	CO ₂	SO ₂	NO _x	PM ₁₀
Λιγνίτη	1.482	1-1,8	1,17-1,23	1,1
Πετρελαίο υ (χαμηλού θείου)	830	3,5	1,5	0,34
Φυσικού αερίου	475	0,017	0,6	-
Μέσου ενεργειακού μείγματος χώρας	1.062	CO ₂ :διοξείδιο του άνθρακα, SO ₂ :διοξείδιο του θείου, NO _x : οξείδια του αζώτου, PM ₁₀ : μικροσωματίδια		

Πίνακας 1 Ποσότητα ρύπων που αποφεύγεται από την παραγωγή μιας ηλιακής κιλοβατώρας από φωτοβολταϊκό σύστημα

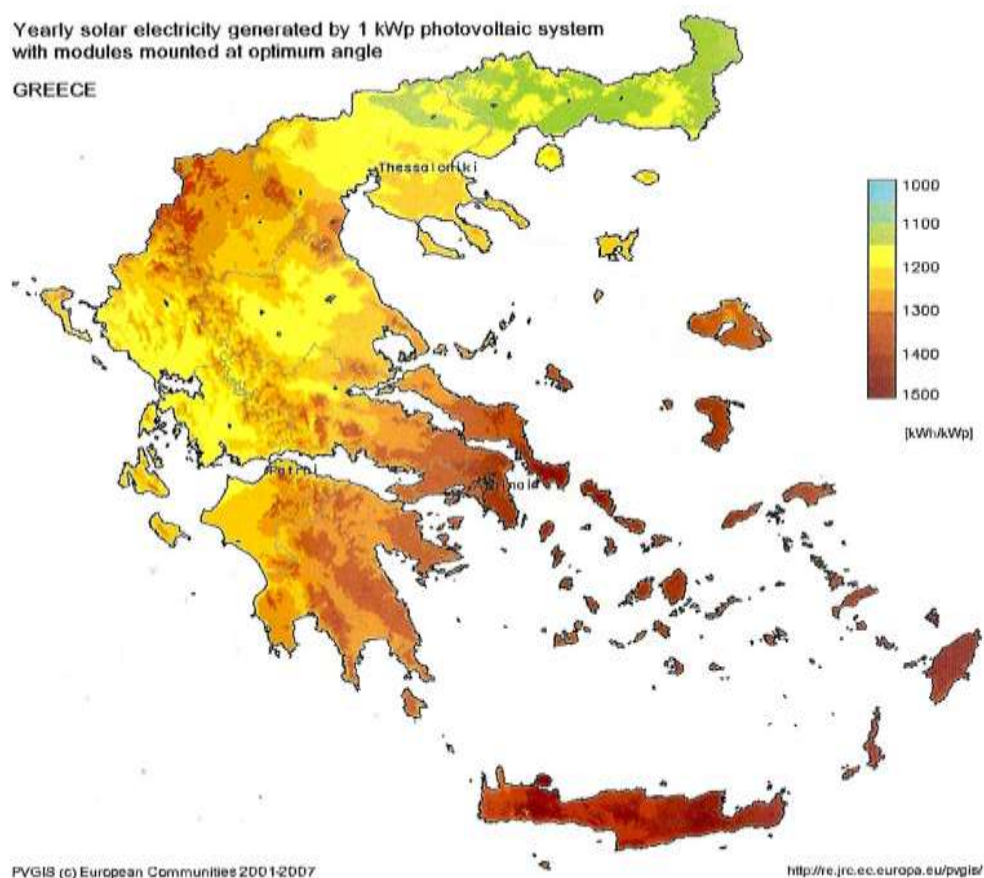
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αντέχουν στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες και κάτω από αντίξοες καιρικές συνθήκες, όπως χαλάζι, άνεμος, αλμυρότητα, σκόνη και ατμοσφαιρική ρύπανση. Το ηλιακό τους κύτταρο δεν αλλοιώνεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του και έχει αρκετά μεγάλη διάρκεια ζωής. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα είναι αρκετά λειτουργικά καθώς προσφέρουν επεκτασιμότητα της ισχύος τους και δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας.

1.2. Ηλιακή Ακτινοβολία

Ο ήλιος από τη φύση του είναι μια πηγή, η οποία παράγει ακόρεστα φως και θερμότητα. Με τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας υπάρχει μεγάλη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων βασίζεται στις ιδιότητες ορισμένων στοιχείων του περιοδικού πίνακα, τα οποία εμφανίζουν ηλεκτρική τάση στα άκρα τους, στην περίπτωση πρόσπτωσης φωτός στην επιφάνειά τους. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται ημιαγωγοί στους οποίους θα γίνει αναφορά πιο αναλυτικά στη συνέχεια. Οι ημιαγωγοί αυτοί, με την κατάλληλη επεξεργασία μικρού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια συνθέτουν το πλήθος των φωτοβολταϊκών στοιχείων που αποτελείται ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Η ηλιακή ακτινοβολία προσφέρεται ανεξάντλητα στον πλανήτη Γη, όχι συνεχόμενα αλλά και σε διαφορετική ένταση από περιοχή σε περιοχή. Επιπλέον, υπάρχουν κάποιες απώλειες στην ατμόσφαιρα, οι οποίες μειώνουν σημαντικά την ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ένα μέγεθος μετρήσιμο στη διάρκεια του έτους, (είναι δυνατός ο υπολογισμός της ετήσιας ηλιακής ενέργειας σε kWh/m²). Η τιμή της ετήσιας ηλιακής ενέργειας διαφέρει από περιοχή σε περιοχή ανάλογα με τη γεωγραφική θέση της περιοχής, την εποχή του χρόνου καθώς και την ενδεχόμενη νεφοκάλυψη.

Η Ελλάδα ως χώρα είναι από τις περιοχές με καλά ποσοστά σε ηλιακή ενέργεια, άρα κατ' επέκταση και από τις πιο κατάλληλες για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων για την εκμετάλλευσή της. [6]



Σχήμα 1 Ηλιοφάνεια στην Ελλάδα

Πηγή: <https://web.jrc.ec.europa.eu/callsfortender/>

1.3. Ιστορική Αναδρομή

Στην σημερινή εποχή η αυξανόμενη μόλυνση του περιβάλλοντος και η εξάντληση των ορυκτών ενεργειακών πόρων οδήγησε τον άνθρωπο στην συνεχώς αυξανόμενη χρήση και ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η τεχνολογίες κατασκευής των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχουν αναπτυχθεί ραγδαία από το παρελθόν μέχρι σήμερα κάνοντας τη χρήση τους εφικτή ακόμα και στις στέγες των σπιτιών.



Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έγινε γνωστό αρχικά το 1839 από τον Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel (1820-1891), ο οποίος ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά τη διάρκεια πειραμάτων του στο εργαστήριο με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια.



Στη συνέχεια, το 1876 ο Άγγλος William Grylls Adams (1836-1915) σε συνεργασία με τον φοιτητή του Day παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (SE) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως.



Το 1918, ο Πολωνός Jan Czochralski (1885-1953) πρόσθεσε τη μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si), στην οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια, με τη σχετική έρευνά του, η οποία χρησιμοποιείται με κάποιες βελτιώσεις ακόμα και σήμερα.



Το 1949, ο Nevill Francis Mott (1905-1996), σε συνεργασία με τον Walter H. Schottky (1886-1976), ανέπτυξαν τη θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ, η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει.

Η δημιουργία του πρώτου ηλιακού κελιού έγινε στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson. Η απόδοσή του ήταν 6%. Το 1958, τέσσερα χρόνια μετά, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσαρτάται στο χώρο των διαστημικών εφαρμογών όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στο δορυφόρο

Vanguard I. Το σύστημα αυτό λειτούργησε για οχτώ ολόκληρα χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Από το σημείο αυτό και μετά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές και η τεχνολογία τους έχει δεχτεί ραγδαία ανάπτυξη. Η μεγαλύτερη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται το 1962 στην Ιαπωνία από την SHARP, σε έναν φάρο, με την εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος να κυμαίνεται στα 242Wp περίπου.

Προβλήματα στο υψηλό κόστος παραγωγής περιόρισαν τη χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Τις δεκαετίες που ακολούθησαν ο κυριότερος χρήστης των φωτοβολταϊκών ήταν η NASA. Ενδεικτικές τιμές στα φωτοβολταϊκά το 1956 ήταν από 500 δολάρια ανά εγκατεστημένο Watt, ενώ στα επόμενα δεκατέσσερα χρόνια, το 1970, η τιμή πέφτει στα 100 δολάρια ανά εγκατεστημένο Watt. Το 1973, οι βελτιώσεις στις μεθόδους παραγωγής φέρνουν το κόστος των φωτοβολταϊκών στα 50 δολάρια ανά εγκατεστημένο Watt.

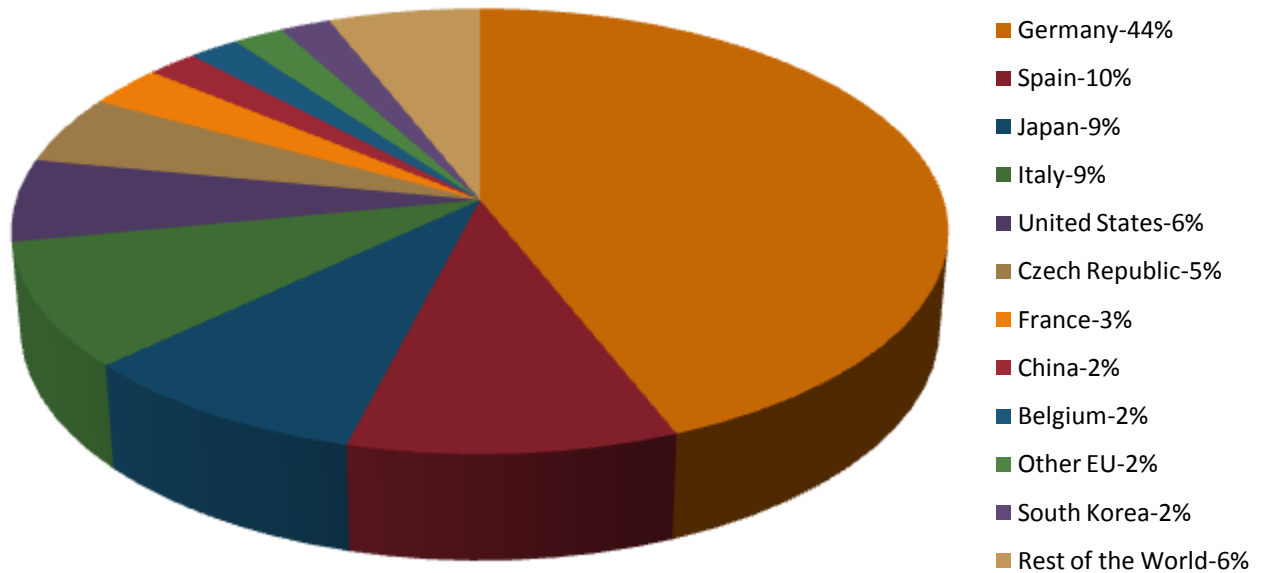
Το 1980 γίνεται η πρώτη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στην Καλιφόρνια, από την ARCO SOLAR, η οποία αγγίζει το ένα MW, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου δύο αξόνων (dual-axis trackers). Στα επόμενα χρόνια η εξέλιξη είναι ραγδαία, φτάνοντας την παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών το 1983 στα 22MW και το συνολικό κέρδος στα 250.000.000 δολάρια.

Το 1999 η εταιρία SpectroLab σε συνεργασία με το NREL αναπτύσσουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση που άγγιξε το 32,3%. Το φωτοβολταϊκό αυτό στοιχείο αποτελούταν από τρεις στρώσεις υλικών και ήταν ειδικό για εφαρμογές σε συγκεντρωτικά συστήματα CPV. Την ίδια χρονιά το ρεκόρ στην απόδοση του thin film φτάνει το 18,8%. Η παραγωγή όλων των φωτοβολταϊκών πάνελ φτάνει συνολικά τα 200MW.

Το 2004 η ανοδική πορεία των φωτοβολταϊκών είναι γεγονός. Μεγάλες εταιρίες ανέβασαν τις πωλήσεις των φωτοβολταϊκών με τη μαζική παραγωγή τους και η τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων κυμάνθηκε στα 6,5 ευρώ ανά Watt. Οι κυρίαρχες χώρες στην κατασκευή και πώληση φωτοβολταϊκών είναι η Γερμανία και η Ιαπωνία, καθώς και πολλές αναπτυσσόμενες χώρες αρχίζουν είτε να παράγουν εξοπλισμό είτε να κατασκευάζουν εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών. Η συνολική παραγωγή το 2004 άγγιξε τα 1.200MW ενώ το κέρδος άγγιξε τα 6.500.000.000 δολάρια.

Σήμερα στις οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες υπάρχουν μεγάλες αποδόσεις στα κρυσταλλικά υλικά και αρκετές χώρες, όπως η Γερμανία και η Ιαπωνία, έχουν επενδύσει τεράστια κονδύλια με σκοπό την ευρύτερη εκμετάλλευση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. [35]

Solar PV Capacity, Top 10 Countries, 2010



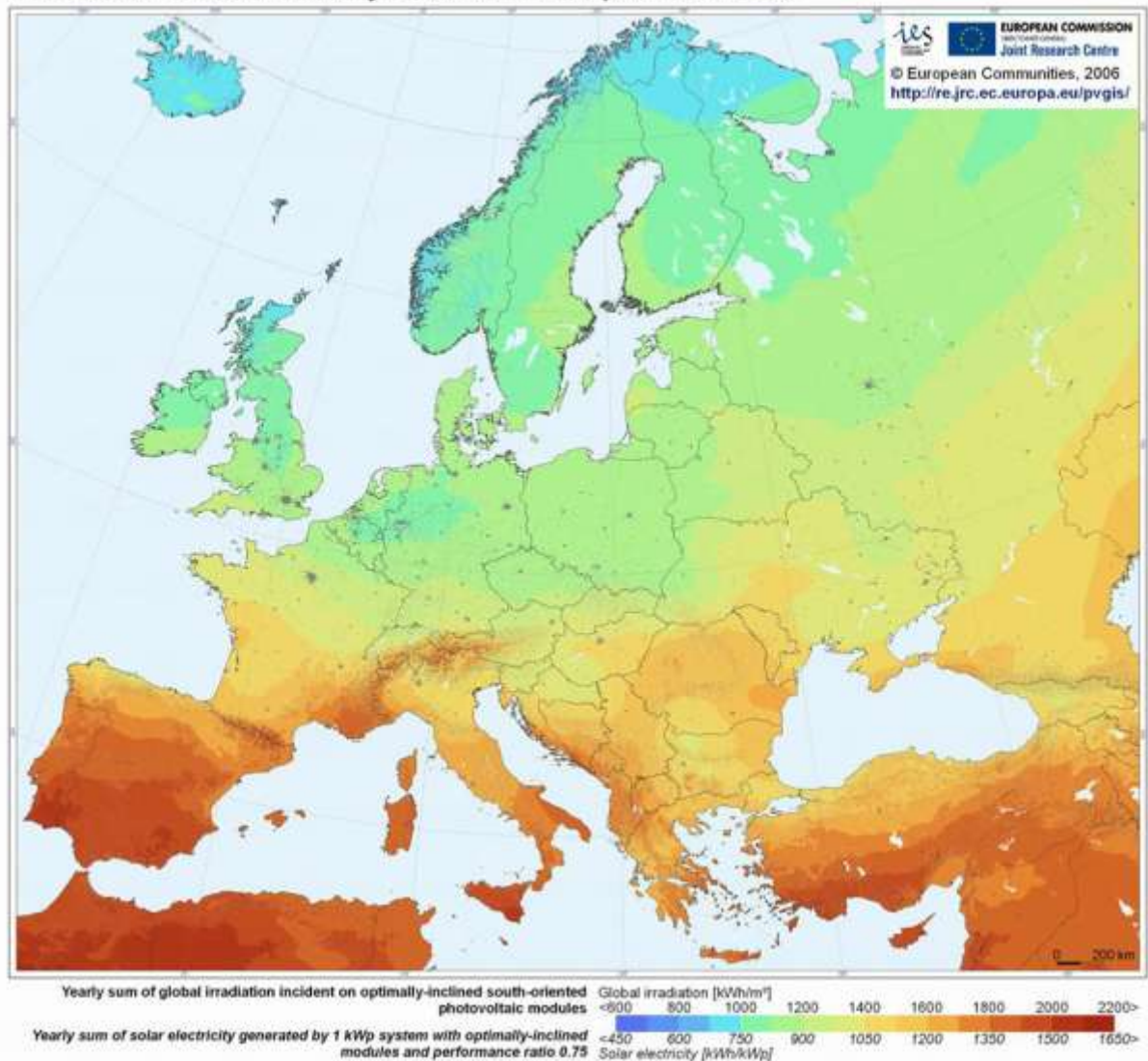
Σχήμα 2 Ποσοστό συμμετοχής των κυρίαρχων χωρών στην εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ

1.4. Ο ήλιος και η ηλιακή ακτινοβολία

Ο ήλιος χαρακτηρίζεται ως ένα τυπικό αστέρι μάζας 2×10^{30} kg, ακτίνας 700.000 km και ηλικίας 5×10^9 χρόνια ζωής. Επιπλέον, έχει διάμετρο $1,39 \times 10^9$ m και η απόστασή του από τη Γη υπολογίζεται στα $1,5 \times 10^{11}$ μέτρα. Η θερμοκρασία, η οποία επικρατεί στον πυρήνα του ήλιου είναι 8×10^6 έως 40×10^6 K περίπου ενώ η πυκνότητά του είναι περίπου εκατό φορές μεγαλύτερη από του νερού. Η ενέργεια, η οποία παράγεται στο εσωτερικό του μέσα σε θερμοκρασίες, οι οποίες κυμαίνονται σε εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου, μεταφέρεται στην εξωτερική επιφάνεια της σφαίρας, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλιακή ακτινοβολία, η οποία διοχετεύεται στο διάστημα.

Ένα ποσοστό της ηλιακής ενέργειας χάνεται και δεν φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Λόγω της ατμόσφαιρας η ηλιακή ενέργεια χάνεται λόγω διαφόρων παραγόντων, οι οποίοι την διαχέουν, την απορροφούν ή την ανακλούν. Σε σχετικά ήπιες καιρικές συνθήκες, το ποσό της ηλιακής ενέργειας το οποίο φτάνει κατά τις μεσημεριανές ώρες στο επίπεδο της θάλασσας αντιστοιχεί περίπου σε 1000 W/m^2 . Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει ετήσια σε εγκατεστημένα πάνελ ανά τον κόσμο διαφέρει σημαντικά από περιοχή σε περιοχή. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η ετήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε βέλτιστα προσανατολισμένα φωτοβολταϊκά πάνελ.

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



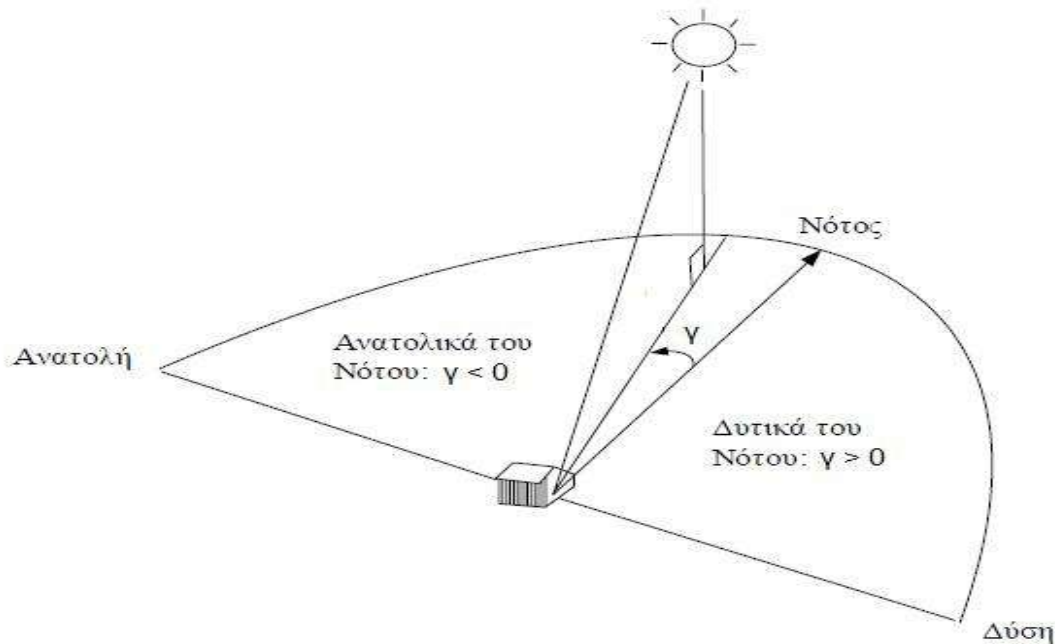
Σχήμα 3 Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε πάνελ ανά τον κόσμο

Πηγή: <https://web.jrc.ec.europa.eu/callsfortender/>

Όπως παρατηρείται στο παραπάνω σχήμα, η μέση ηλιακή ακτινοβολία στον παγκόσμιο χάρτη είναι μεγαλύτερη κοντά στους τροπικούς, ενώ παρουσιάζεται πιο μειωμένη κοντά στον ισημερινό λόγω των νεφώσεων που επικρατούν στην περιοχή. Στα γεωγραφικά πλάτη που βρίσκονται υψηλότερα η ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρότερη λόγω του ότι στις περιοχές αυτές ο ήλιος βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος.

1.4.1. Προσδιορισμός της θέσης του ήλιου

Για να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης του ήλιου χρειάζεται να υπολογιστεί η γωνία ύψους β του ήλιου καθώς και η αζιμουθιακή γωνία ϕ . Θεωρητικά, ισχύει ότι η αζιμουθιακή γωνία είναι θετική στην περίπτωση που ο ήλιος είναι ανατολικά του νότου και αρνητική στην περίπτωση που ο ήλιος είναι δυτικά του νότου.[5]



Σχήμα 4 Ύψος και αζιμούθιο του ήλιου [58]

Η γωνία του ύψους του ήλιου μπορεί να προσδιοριστεί από την παρακάτω σχέση:

$$\sin \beta = \sin \delta * \sin \phi + \cos \delta * \cos \phi * \cos \omega \quad [1.1]$$

Η αζιμουθιακή γωνία υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\cos \phi = \frac{\sin \beta * \sin \delta - \sin \delta}{\cos \beta * \cos \delta} \quad [1.2]$$

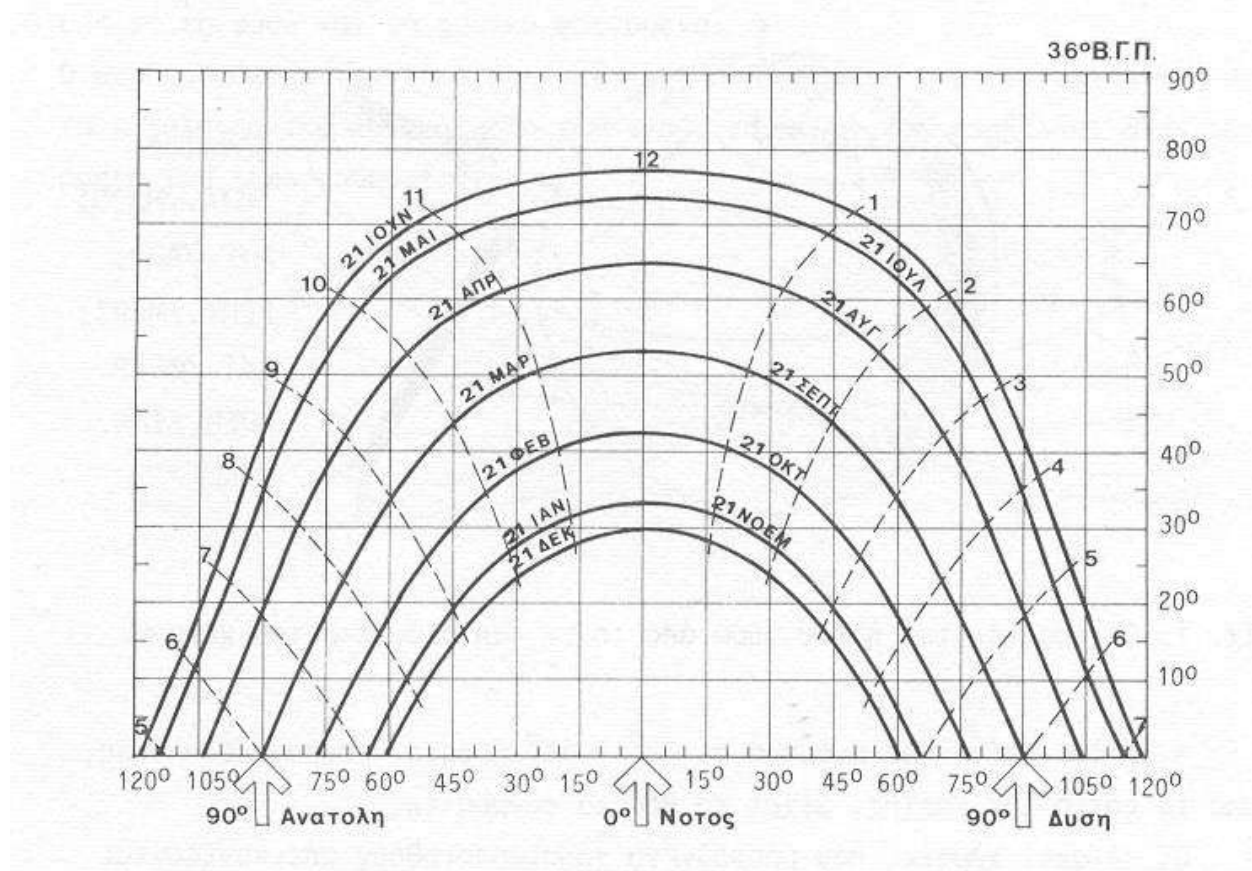
Όπου

β : το ύψος του ηλίου για την συγκεκριμένη περιοχή

ϕ s: το ηλιακό αζιμούθιο ως προς το νότο για τη συγκεκριμένη περιοχή και ώρα

1.4.2. Ημερήσια τροχιά του ηλίου

Η ημερήσια τροχιά του ηλίου εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και την ημέρα του έτους. Τα διαγράμματα, τα οποία παρουσιάζουν τις τροχιές του ηλίου για ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος ονομάζονται ηλιακοί χάρτες. Στους ηλιακούς χάρτες προσδιορίζεται η θέση του ήλιου για κάθε μήνα του έτους (γωνία αζιμούθιου- γωνία ύψους ηλίου) για όλες τις ώρες της ημέρας. Να σημειωθεί ότι η μέτρηση γίνεται μια συγκεκριμένη ημέρα κάθε μήνα (συνήθως την 21^η).



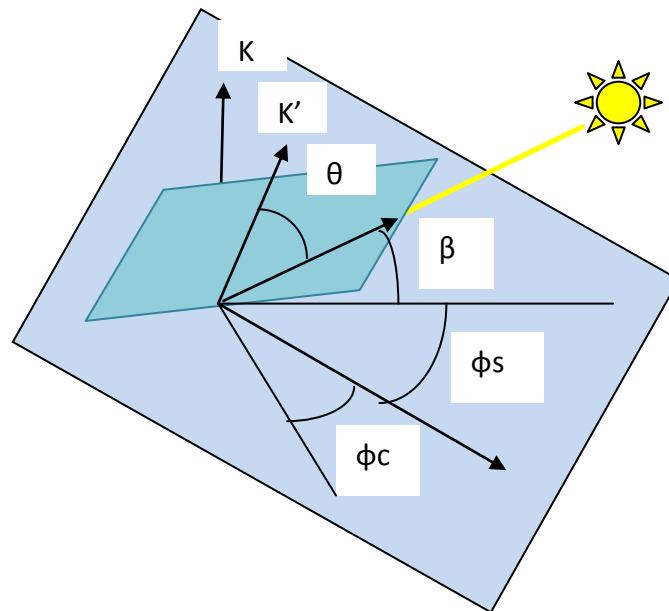
Σχήμα 5 Ηλιακός χάρτης για την περιοχή της Αθήνας

Πηγή: <https://sites.google.com/site/wildwaterwall/eliaka-spitia/2-eliasmos-ktiriou>

Στον παραπάνω ηλιακό χάρτη είναι δυνατόν να παρατηρηθούν εφτά τροχιές του ήλιου. Η χαμηλότερη τροχιά παρατηρείται τον Δεκέμβριο (χειμερινό ηλιοστάσιο) , ενώ η υψηλότερη τον Ιούνιο (θερινό ηλιοστάσιο). Επιπλέον, τον Μάρτιο και τον Σεπτέμβριο παρατηρείται η εαρινή και η φθινοπωρινή ισημερία αντίστοιχα.

Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος απεικονίζονται οι γωνίες αζιμούθιου ως προς το νότο, ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο με γωνία αζιμούθιου 0° . Αριστερά και δεξιά του νότου παρουσιάζονται η ανατολή και η δύση με γωνία 90° . Στον κάθετο άξονα παρουσιάζονται οι γωνίες ύψους του ηλίου για όλες τις ώρες της ημέρας και για όλους τους μήνες. Τέλος, οι καμπύλες που εμφανίζονται με διακεκομμένη γραμμή περιγράφουν τις ηλιακές ώρες από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου.

1.4.3. Ορισμός των γωνιών για ηλιακούς συλλέκτες



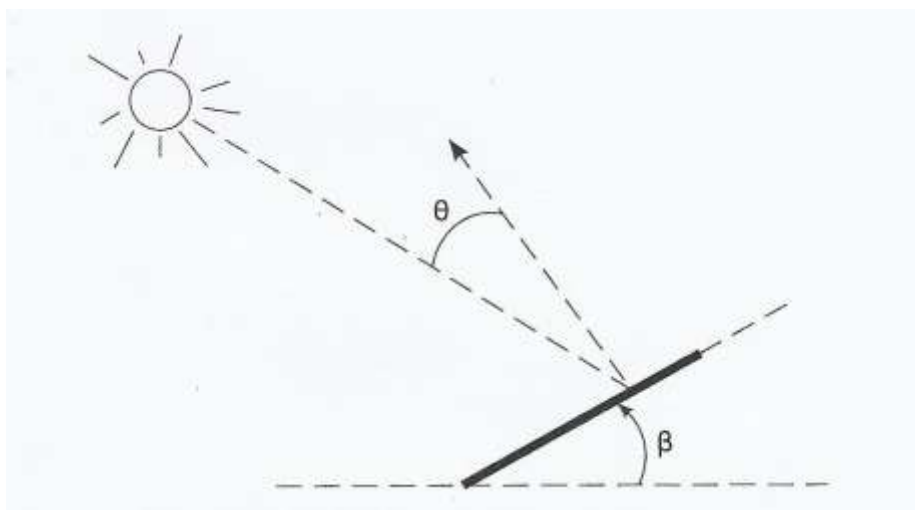
Σχήμα 6 Ορισμός γωνιών σε συλλέκτη

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται οι γωνίες οι οποίες καθορίζουν τη θέση ενός ηλιακού συλλέκτη ως προς τον ήλιο και είναι οι εξής:

- Γωνία πρόσπτωσης θ : ως γωνία πρόσπτωσης θ ορίζουμε την γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτινών και της καθέτου K' στην επιφάνεια του συλλέκτη. Υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\cos\theta = \cos\beta \cos(\varphi_s - \varphi_c) * \sin\Sigma + \sin\beta * \cos\Sigma \quad [1.3]$$

όπου Σ : η κλίση του συλλέκτη

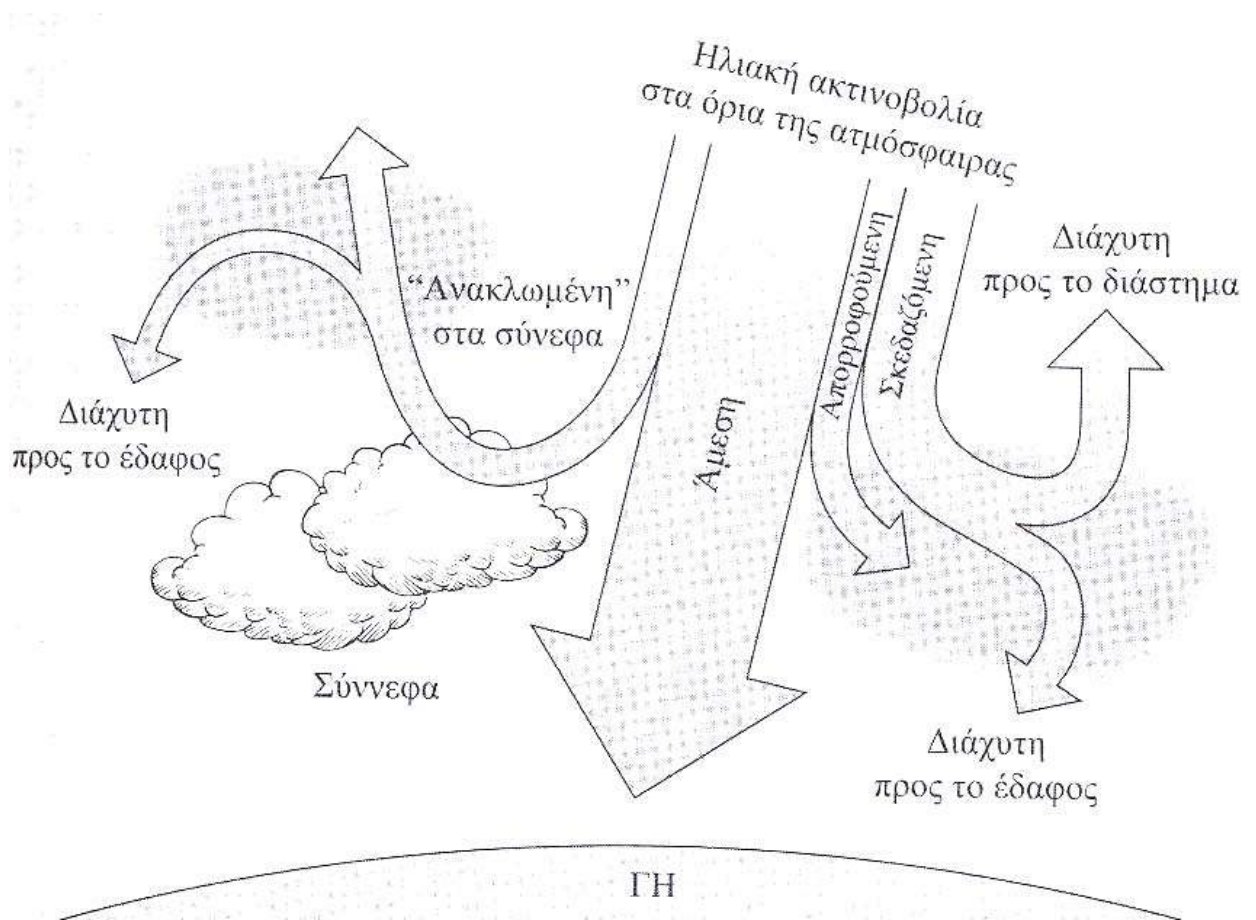


Σχήμα 7 Γωνία πρόσπτωσης θ [58]

- Το ύψος του ηλίου β : το οποίο είναι η γωνία μεταξύ του συλλέκτη και του οριζόντιου επιπέδου και ισχύει $\theta + \beta = 90^\circ$
- Γωνία αζιμούθιου φ_s : η γωνία αζιμούθιου περιγράφει την κατεύθυνση προς την οποία είναι στραμμένη η επιφάνεια, όπου $\varphi_s > 0$ όταν ο ήλιος είναι ανατολικά του νότου και $\varphi_s < 0$ όταν είναι δυτικά του νότου

- Γωνία ζενίθ θ : η γωνία ζενίθ ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτινών και της κατακόρυφης K ως προς το έδαφος
- Γωνία ϕ : η γωνία ϕ είναι η γωνία προσανατολισμού του πλαισίου ως προς το νότο

1.4.4. Απευθείας, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία



Σχήμα 8 Απευθείας, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία [6]

Η ηλιακή ακτινοβολία καθώς εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης, ένα μέρος αυτής μόνο φθάνει στην επιφάνεια της Γης χωρίς να υποστεί σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται απευθείας ή άμεση. Μπορούμε να υπολογίσουμε την απευθείας ηλιακή ένταση σε καθαρό ουρανό από την παρακάτω σχέση[7]:

$$I_{BC} = I_B * \cos\theta \quad [1.4]$$

Όπου,

θ : η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας

I_B : η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία καθαρού ουρανού

I_{BC} : η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία καθαρού ουρανού που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Ένα άλλο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας υπόκειται σε σκέδαση από τα μόρια της ατμόσφαιρας καθώς και από υδρατμούς, σκόνη και καπνό που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, φθάνοντας στην επιφάνεια της Γης με αλλαγμένη διεύθυνση. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια ορίζεται από την παρακάτω σχέση[7]:

$$I_{DH} = C * I_B \quad [1.5]$$

Όπου,

$$C = 0.095 + 0.04 * \sin\left(\frac{360}{365}(d - 100)\right) \quad [1.6]$$

d : η ημέρα του χρόνου

Έτσι η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε συλλέκτη με κλίση Σ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{DC} = 0.5 * C * I_{DH} * (1 + \cos\Sigma) \quad [1.7]$$

Επιπλέον, ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται από διάφορα εμπόδια μπροστά από το συλλέκτη, η οποία ονομάζεται ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση υποθέτοντας ότι είναι ίση προς όλες τις κατευθύνσεις[7]:

$$I_{RC} = 0.5 * \rho * IB * (\sin\beta + C) * (1 + \cos\Sigma) \quad [1.8]$$

Όπου,

ρ : συντελεστής αντανάκλασης οριζόντιας επιφάνειας μπροστά από το συλλέκτη με τιμές $0,1 < \rho < 0,8$ με τυπική το 0,2

Τέλος, ολική ή συνολική ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη ονομάζεται το άθροισμα της απευθείας, της διάχυτης και της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας η οποία υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση[7]:

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} \quad [1.9]$$

Όπου,

I_C : η συνολική ηλιακή ένταση στο συλλέκτη

I_{BC} : η απευθείας ηλιακή ένταση στο συλλέκτη

I_{DC} : η διαχεόμενη ηλιακή ένταση στο συλλέκτη

I_{RC} : η ανακλώμενη ηλιακή ένταση στο συλλέκτη

1.4.5. Ιχνηλασία ενός και δύο αξόνων

Αναφορικά με τα συστήματα περιστρεφόμενων βάσεων στήριξης, αυτά διαφοροποιούνται σε ενός και δύο αξόνων. Στην περίπτωση των βάσεων με ένα άξονα περιστροφής επιτυγχάνεται η διατήρηση της επιφάνειας του συλλέκτη σε σταθερή κλίση με προσανατολισμό ίσο με το ηλιακό αζιμούθιο ϕ_s .

Επιπλέον, στην ιχνηλασία ενός άξονα η γωνία πρόσπτωσης θ είναι ίση με την ηλιακή γωνιακή απόκλιση δ . Σε αυτή την περίπτωση, η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{BC} = I_B * \cos \delta \quad [1.10]$$

Ενώ η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$I_{DC} = 0.5 * C * I_B * (1 + \cos (90^\circ - \beta + \delta)) \quad [1.11]$$



Σχήμα 9 Ιχνηλασία ενός άξονα

Πηγή: <http://www.econews.gr/2014/10/27/fotovoltaika-epidotisi-platforma-118410/>

Στην ιχνηλασία δύο αξόνων η γωνία πρόσπτωσης θ είναι ίση με 0° , ενώ η γωνία προσανατολισμού του πλαισίου είναι ίση με την αζιμούθια γωνία $\phi_s = \phi_c$. Επιπλέον, η γωνία στήριξης του συλλέκτη εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Sigma = 90^\circ - \beta \quad [1.12]$$

όπου β : το ύψος του ηλίου

Τέλος, όλη η απευθείας ηλιακή ένταση προσπίπτει επάνω στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ενώ η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$I_{DC} = 0.5 * C * I_B (1 + \cos(90^\circ - \beta)) \quad [1.13]$$



Σχήμα 10 Ιχνηλασία δύο αξόνων

Πηγή: <https://gigaom.com/2008/10/01/the-daily-sprout-232/>

1.4.6. Μέση μηνιαία ηλιακή ένταση

Για τον προσδιορισμό της μέσης μηνιαίας ηλιακής έντασης πρώτα θα γίνει αναφορά στο δείκτη καθαρότητας K_T , ο οποίος αποτυπώνει τη συχνότητα με την οποία εμφανίζονται περίοδοι με διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας (π.χ. αίθριες και συννεφιασμένες ημέρες). Ο δείκτης καθαρότητας είναι ο λόγος της μέσης οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας στην τοποθεσία προς τη μέση οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα.

$$K_T = \frac{\overline{I_H}}{I_0} \quad [1.14]$$

Ένας υψηλός δείκτης καθαρότητας εκφράζεται σε καθαρό ουρανό και μεγάλη απευθείας ηλιακή ακτινοβολία. Αντιθέτως, χαμηλός δείκτης καθαρότητας εκφράζεται σε συννεφιασμένο ουρανό και μεγάλη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία.

Η μέση οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\overline{I_0} = \frac{24}{\pi} * \left(1 + 0,034 * \cos\left(\frac{360 * n}{365}\right) \right) * SC * (\cos L * \cos \delta * \sin H_{SR} + H_{SR} * \sin L * \sin \delta) \quad [1.15]$$

όπου

SC: η ηλιακή σταθερά (1, 37 KW/m²)

H_{SR}: η γωνία της ώρας ανατολής του ηλίου

Στην παρακάτω σχέση παρουσιάζεται η συσχέτιση της οριζόντιας διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας και της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας:

$$\overline{I_{DH}} = \overline{I_H} * (1.39 - 4.027 * K_T + 5.531 * K_T^2 - 3.108 * K_T^3) \quad [1.16]$$

Η μέση διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο συλλέκτη εκφράζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\overline{I_{DC}} = \overline{I_{DH}} * \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \quad [1.17]$$

$$\overline{I_{RC}} = \rho * \overline{I_H} * \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad [1.18]$$

όπου

$\overline{I_{DC}}$ = η μέση διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη

$\overline{I_{RC}}$ = η μέση ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη

Επιπλέον, οι παρακάτω σχέσεις δίνουν τη μέση απευθείας ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια καθώς και τη μέση απευθείας ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη:

$$\overline{I_{BH}} = \overline{I_H} - \overline{I_{DH}} \quad [1.19]$$

$$I_{BC} = I_{BH} * \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \quad [1.20]$$

$$\frac{\cos \theta}{\sin \theta} = R_B \quad [1.21]$$

όπου

R_B : είναι ο συντελεστής κλίσης της ηλιακής ακτινοβολίας

Για συλλέκτη κλίσης Σ με νότιο προσανατολισμό η μέση τιμή του συντελεστή κλίσης της ηλιακής ακτινοβολίας εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\overline{R_B} = \frac{\cos(L-\Sigma) * \cos \delta * \sin H_{SRC} + H_{SRC} * \sin(L-\Sigma) * \sin \delta}{\cos L * \cos \delta * \sin H_{SR} + H_{SR} * \sin L * \sin \delta} \quad [1.22]$$

όπου

H_{SR} : η γωνία της ώρας ανατολής του ήλιου (rad)

H_{SRC} : η γωνία της ώρας ανατολής του ήλιου για τον συλλέκτη (rad)

Σ : η γωνία στήριξης του συλλέκτη

L : το γεωγραφικό πλάτος

δ: η ηλιακή γωνιακή απόκλιση

με

$$H_{SR} = \cos^{-1}(-\tan L * \tan \delta) \quad [1.23]$$

$$H_{SRC} = \min\{\cos^{-1}(-\tan L * \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(L - \Sigma) * \tan \delta)\} \quad [1.24]$$

Τέλος, η μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο συλλέκτη εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{I}_C = \bar{I}_H * \left(1 - \frac{\bar{I}_{DH}}{\bar{I}_H}\right) + \bar{I}_{DH} * \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2}\right) + \rho * \bar{I}_H * \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2}\right) \quad [1.25]$$

όπου

\bar{I}_H : η μέση οριζόντια συνολική ηλιακή ακτινοβολία

\bar{I}_{DH} : η μέση οριζόντια διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία

ρ: ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους

Σ: η γωνία στήριξης του συλλέκτη

1.5. Ημιαγωγός

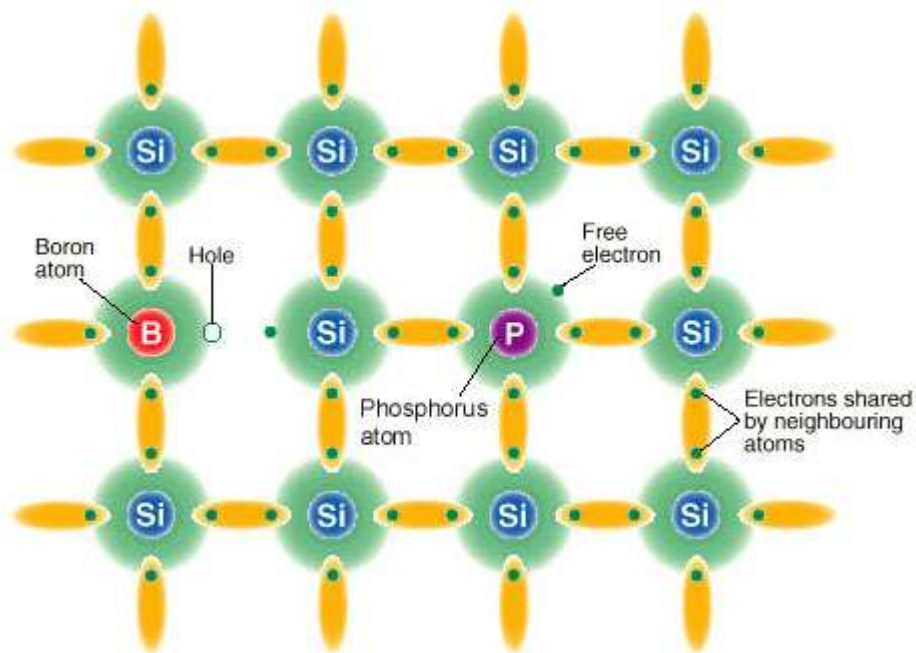
Η τεχνολογία του φωτοβολταϊκού φαινομένου βασίζεται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία , τα οποία παράγονται από ημιαγώγιμα υλικά του περιοδικού πίνακα. Το πιο σύνηθες υλικό κατασκευής των φωτοβολταϊκών είναι το πυρίτιο (Si) , με ατομικό αριθμό 14.

Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός και διαθέτει έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1.1eV. Ως υλικό το πυρίτιο είναι το υλικό που χρησιμοποιείται κατά κόρον στις διατάξεις ηλεκτρονικής για αρκετές δεκαετίες. Οι ιδιότητες του υλικού αυτού είναι καλά μελετημένες και είναι ένα υλικό που διατίθεται στην αγορά σε τεράστιες ποσότητες, με καλή χημική καθαρότητα καθώς και τελειότητα κρυσταλλικής δομής, δοκιμασμένο με επιτυχία σε πληθώρα τεχνολογικών μεθόδων. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του πυριτίου είναι η ανοχή και η αξιοπιστία του σε ακραίες καιρικές συνθήκες, σε επίγειες καθώς και σε διαστημικές εφαρμογές. Το πυρίτιο ως υλικό βρίσκεται σε αφθονία στην επιφάνεια του εδάφους, όμως το συναντάμε υπό τη μορφή οξειδίου στο περιβάλλον, και πιο συγκεκριμένα με τη μορφή διοξειδίου του πυριτίου (SiO₂). Επομένως, για την απόκτηση υψηλής καθαρότητας και τη χρησιμοποίησή του θα χρειαστεί προηγουμένως καλή επεξεργασία.

Το πυρίτιο περιλαμβάνει στην εξωτερική του στοιβάδα τέσσερα ηλεκτρόνια αλλά διαθέτει σταθερή κρυσταλλική δομή έχοντας συμπληρωμένη την εξωτερική του στοιβάδα, οπότε εκ φύσεως δεν επιδιώκει ούτε να διώξει αλλά ούτε και να προσελκύσει ηλεκτρόνια. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα της “νόθευσης” του πυριτίου με στοιχεία, τα οποία διαθέτουν ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο (π.χ. το Βόριο), ούτως ώστε να δημιουργείται ένας κρύσταλλος δεκτικός σε φορτία τύπου p (θετικό) ή τύπου n (αρνητικό) αντίστοιχα όταν χρησιμοποιούνται στοιχεία με ένα περισσότερο ηλεκτρόνιο.

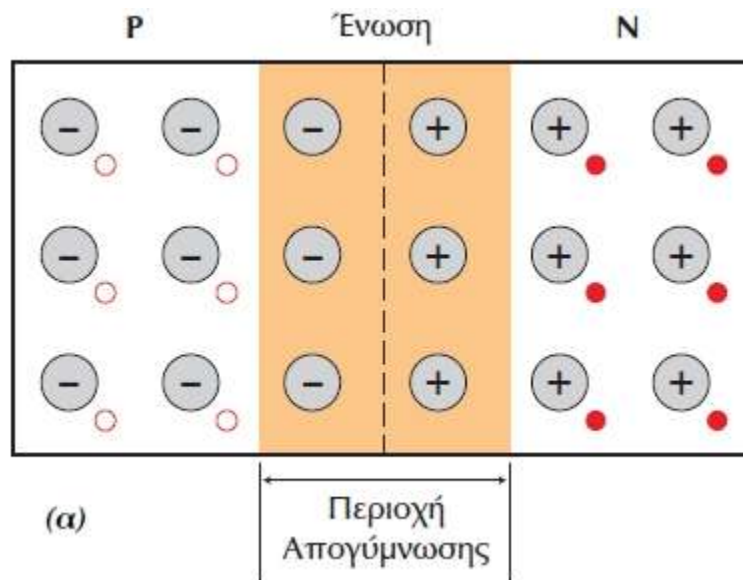
Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, ένα μέρος της διεγείρει ηλεκτρόνια, τα οποία μπορούν να κινούνται σχετικά ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Λόγω της ανάπτυξης ηλεκτρικού πεδίου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια υποχρεώνονται να κινηθούν προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων προκαλεί την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο έχει ισχύ, η οποία καθορίζεται από τη ροή των ηλεκτρονίων και την εφαρμοζόμενη τάση στο φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Λόγω της τεχνολογίας των ημιαγώγιμων υλικών υπήρξε η δυνατότητα αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η ενδεχόμενη χρήση αγώγιμων υλικών , όπως τα μέταλλα, θα βοηθούσε σε αυξανόμενη ροή ηλεκτρονίων, όμως θα παρουσίαζε πολύ χαμηλή τάση πεδίου.[11]



Σχήμα 11 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη ατόμων βορίου και φωσφόρου [10]

1.6. Ένωση p-n



Σχήμα 12 Ένωση p-n [39]

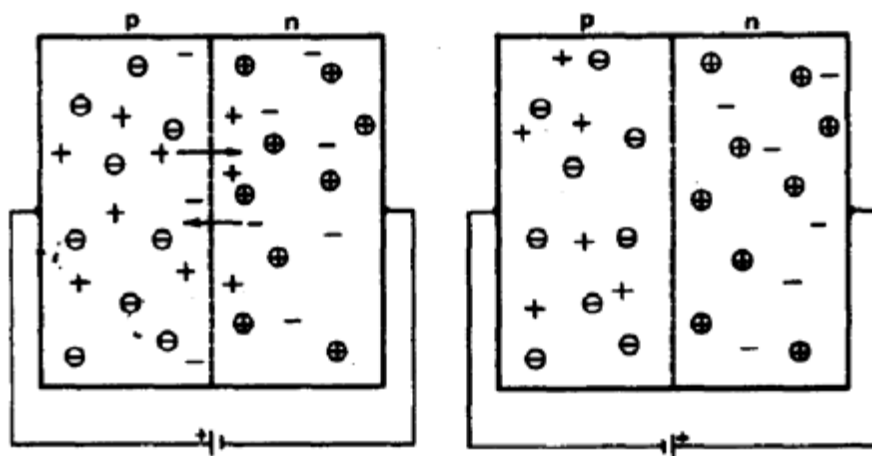
Οι ημιαγωγοί για να έχουν καλή απόδοση στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές θα πρέπει να έχουν πολύ μεγάλη καθαρότητα καθώς επίσης το κρυσταλλικό τους πλέγμα δεν πρέπει να έχει προβλήματα στη δομή του. Τα άτομα των υλικών αυτών συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς, οι οποίοι έχουν την τάση να σπάνε λόγω της πρόσπτωσης της ακτινοβολίας επάνω τους. Έτσι απελευθερώνονται ηλεκτρόνια (αρνητικοί φορείς τύπου n) και αφήνουν κενές θέσεις, τις οπές (θετικοί φορείς τύπου p). Λόγω της ασυμμετρίας που έχουν οι δύο περιοχές στη συγκέντρωση ηλεκτρονίων και οπών, ενεργοποιείται στην περιοχή της επαφής τους το φαινόμενο της διάχυσης και έτσι ηλεκτρόνια από την περιοχή n που υπάρχουν περίσσεια μετακινούνται στην περιοχή p .

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία στον ημιαγωγό τύπου n μιας περιοχής δεξιά στη διεπαφή p - n όπου είναι αυξημένο το θετικό φορτίο. Η αντίστροφη διαδικασία συμβαίνει από τον ημιαγωγό τύπου n προς τον ημιαγωγό τύπου p με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας περιοχής αριστερά της διεπαφής p - n όπου είναι αυξημένο το αρνητικό φορτίο. Ανάμεσα στις περιοχές αυτές υπάρχει η περιοχή απογύμνωσης (φράγμα δυναμικού), η οποία αναπτύσσεται σε θερμοκρασία δωματίου (περίπου 0,7 V) και εμποδίζει την περαιτέρω διάχυση οπών και ελεύθερων ηλεκτρονίων.

1.7. Πόλωση της διόδου

1.7.1. Ορθή πόλωση της διόδου

Κατά την ορθή πόλωση της διόδου p-n, ο αρνητικός πόλος της πηγής E συνδέεται στο τμήμα τύπου n της διόδου, ενώ ο θετικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα τύπου p της διόδου. Έτσι τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή E, μέσω του τμήματος τύπου n, προς την περιοχή της ένωσης όπου επανασυνδέονται με τις οπές, οι οποίες σχηματίζονται από την απομάκρυνση των ηλεκτρονίων προς τον θετικό πόλο της πηγής E διαμέσου του τμήματος τύπου p. Η περιοχή απογύμνωσης μειώνεται και οι φορείς διασχίζουν εύκολα την επαφή. Επιπλέον, αυξάνοντας την τάση E, αυξάνεται το ρεύμα I που διαρρέει την ένωση εκθετικά, και το συνολικό ρεύμα I οφείλεται στην κίνηση των οπών καθώς και των ελεύθερων ηλεκτρονίων.



Σχήμα 13 Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση διόδου p-n [26]

1.7.2. Ανάστροφη πόλωση της διόδου

Κατά την ανάστροφη πόλωση ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα τύπου p της διόδου και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου n της διόδου. Επομένως γίνεται επανασύνδεση των οπών του τμήματος p με τα ηλεκτρόνια, τα οποία έρχονται από την πηγή, και τα ηλεκτρόνια του τμήματος n κατευθύνονται προς τον θετικό πόλο της πηγής.

Στην ανάστροφη πόλωση, η περιοχή απογύμνωσης αυξάνεται λόγω της απομάκρυνσης των οπών και των ηλεκτρονίων και το φράγμα δυναμικού εξισώνεται με την τάση E. Όταν το φράγμα δυναμικού ΔV και η τάση ανάστροφης πόλωσης εξισωθούν, η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μηδενίζεται ($I=0$).

1.8. Μαθηματική ανάλυση των περιοχών λειτουργίας της ένωσης p-n

Στην περιοχή ορθής πόλωσης, το ρεύμα σε μια δίοδο p-n όπου επιβάλλεται μια τάση u δίνεται από τη σχέση:

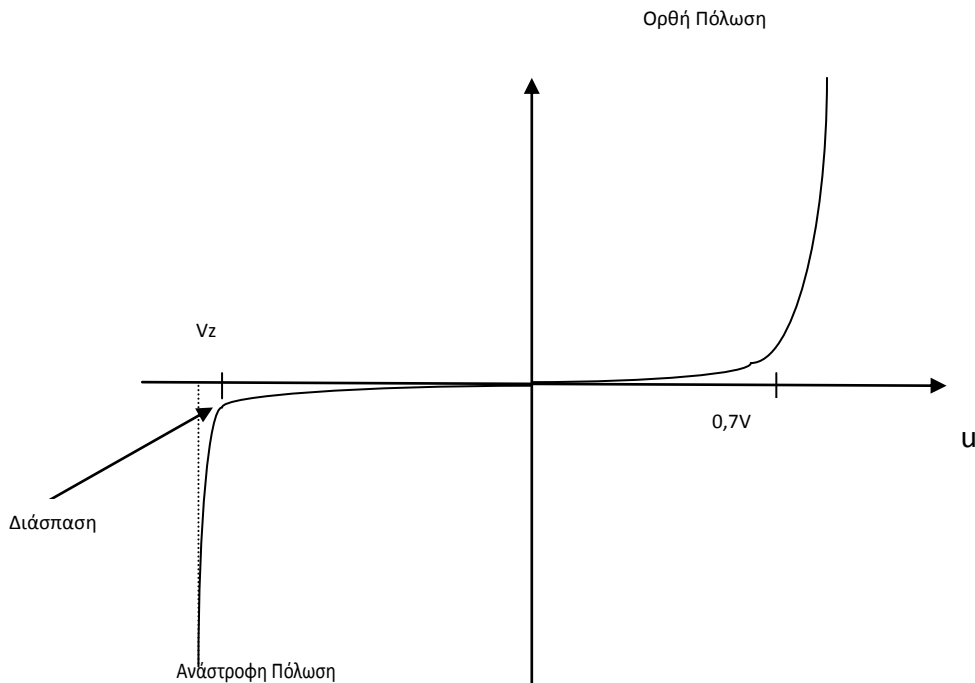
$$I = I_S * \left(\left(e^{u/nV_T} \right) - 1 \right) \quad [1.26]$$

$$\text{με } V_T = \frac{kT}{q}$$

Όπου:

- I : το ρεύμα της διόδου
- u: η τάση στους ακροδέκτες της διόδου
- I_S : το ρεύμα κορεσμού, το οποίο είναι ανάλογο του εμβαδού της διατομής της διόδου. Η τιμή του εξαρτάται από τη θερμοκρασία.
- n: ο συντελεστής εκπομπής, ο οποίος εξαρτάται από το υλικό της διόδου και παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2
- V_T : η θερμική τάση (σε θερμοκρασία δωματίου είναι περίπου 25mV)
- K: η σταθερά Boltzmann ($1.602 \cdot 10^{-23}$ joules/Kelvin)
- T: η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin ($=273+\text{θερ}/\text{σία σε } ^\circ\text{C}$)
- q: το φορτίο του ηλεκτρονίου ($1.602 \cdot 10^{-19}$ coulomb)

1.9. Χαρακτηριστική I-V της ένωσης p-n



Σχήμα 14 Χαρακτηριστική I-V

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, και παρατηρώντας το παραπάνω σχήμα, στην ορθή πόλωση της διόδου όσο αυξάνεται η τάση, υπάρχει αρχικά μια εκθετική μικρή αύξηση του ρεύματος έως ότου η τάση φτάσει την τιμή της τάσης στο γόνατο ($0,7\text{ V}$). Στην τάση αυτή υπάρχει μεγάλη αύξηση του ρεύματος.

Αντιθέτως, στην ανάστροφη πόλωση υπάρχει ένα πολύ μικρό ρεύμα (σχεδόν σταθερό), του οποίου η τιμή αυξάνεται ελάχιστα έως ότου η τάση u φτάσει μια ορισμένη τιμή, η οποία ονομάζεται τάση διάσπασης ή Zener, όπου το ρεύμα αυξάνεται απότομα.

Συμπερασματικά, υπάρχουν τρεις περιοχές στην χαρακτηριστική I-V της ένωσης p-n. Η περιοχή ορθής πόλωσης με $u > 0$, η περιοχή ανάστροφης πόλωσης με $V_z < u < 0$ και η περιοχή διάσπασης με $u < V_z$.

1.10. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο

Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Για την σωστή λειτουργία του πλαισίου απαιτείται η προστασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων που το απαρτίζουν, από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, γι' αυτό χρησιμοποιούμε γυαλί ή πλαστικό ή και τα δύο για την προστασία τους.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι πλαισίων, και ανάλογα με τον τύπο των στοιχείων τους και τη χρήση τους ποικίλει η κατασκευή τους.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από διάφορα επίπεδα όπως είναι:

- Γυαλί
- Συμπυκνωμένο πολυμερές υλικό για την ενθυλάκωση των στοιχείων (EVA)
- Στοιχεία
- Συμπυκνωμένο υλικό (EVA)
- Γυαλί
- Κενό αέρος
- Γυαλί

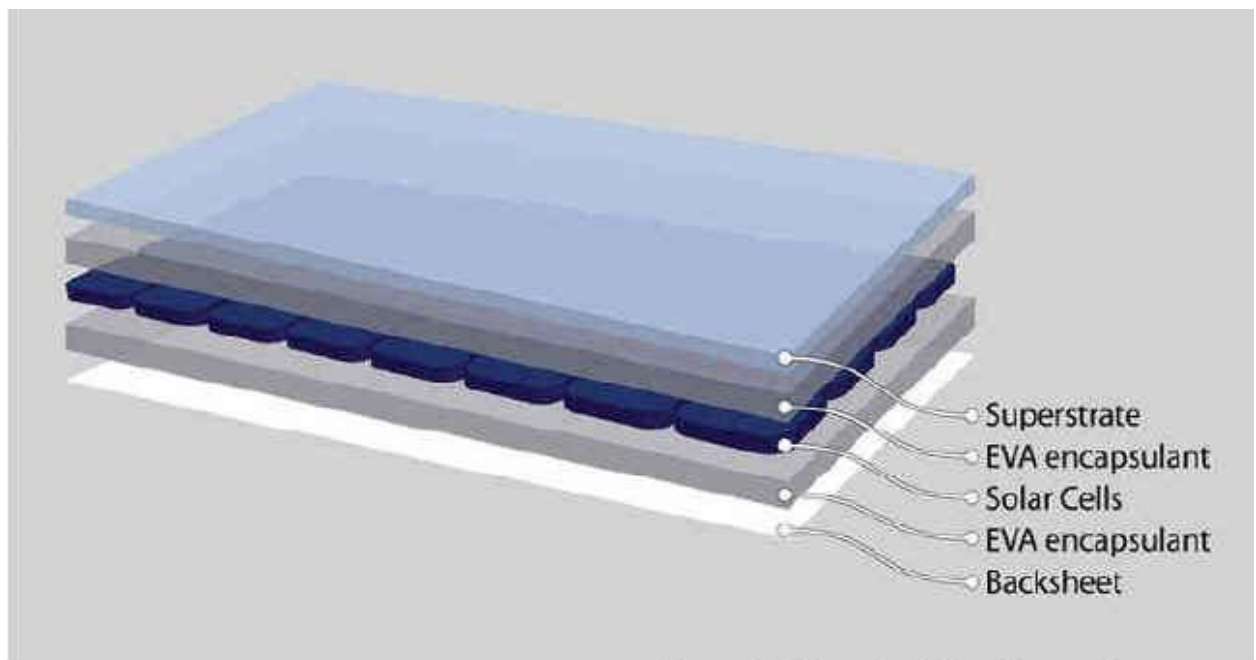


Figure 1. Schematic of the solar panel (Source: Madico)

Σχήμα 15 Επίπεδα φωτοβολταϊκού πλαισίου

Πηγή: http://www.interpv.net/tech/tech_view.asp?idx=272&part_code=040260114&page=2

Το ειδικό γυαλί που χρησιμοποιείται και καλύπτει εξωτερικά τα πλαίσια είναι διαφανές και αντανακλά τη θερμότητα.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρέπει να είναι όμοια, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Ο βέλτιστος τρόπος χρησιμοποίησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων για την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας είναι η τοποθέτησή τους πάνω σε περιστρεφόμενα στηρίγματα ώστε να ακολουθούν την πορεία του ηλίου.[4]

1.11. Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών

1.11.1. Συμβατικά Φωτοβολταϊκά (μεγάλου πάχους)

1.11.1.1. Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου

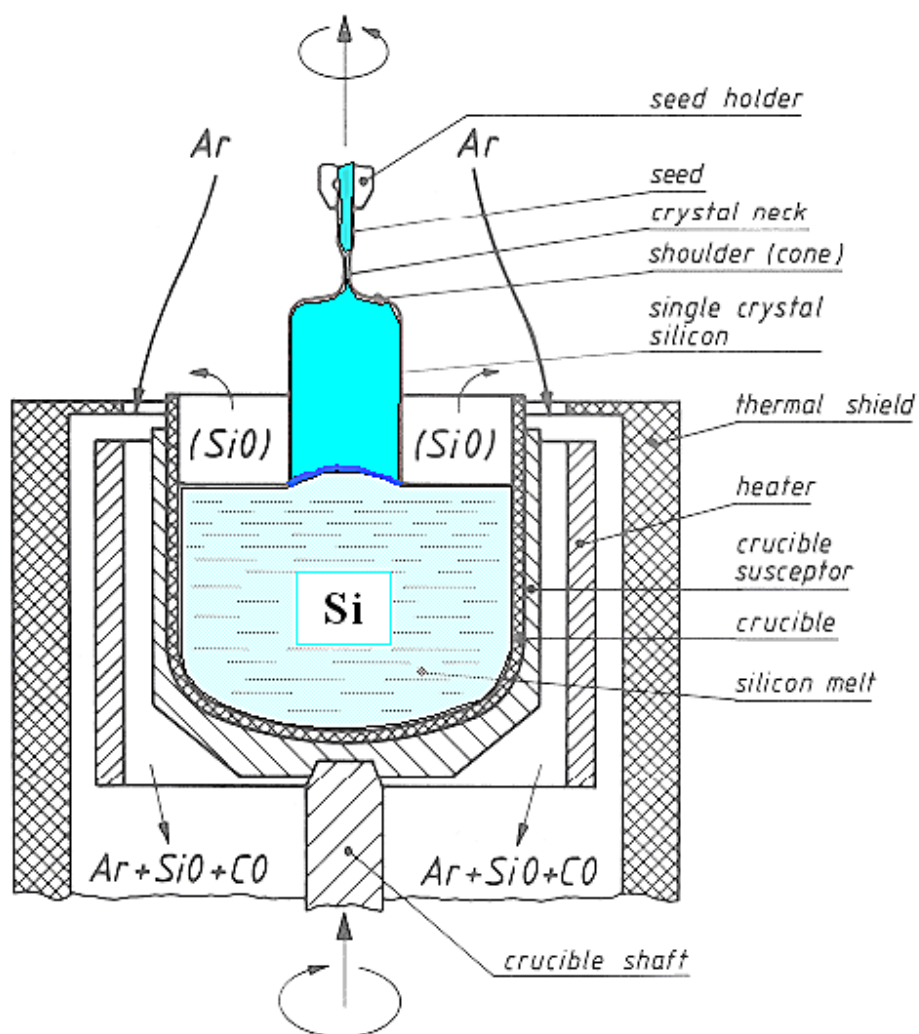
Σαν υλικό το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο διαθέτει μια ομοιόμορφη μοριακή δομή. Λόγω της υψηλής του ομοιομορφίας σε σύγκριση με υλικά που δεν έχουν τη μορφή κρυστάλλου, το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης η_{946} (η αναλογία της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από το ηλιακό στοιχείο προς την διαθέσιμη από την ηλιακή ακτινοβολία ισχύ). Στο εμπόριο η απόδοση των μονοκρυσταλλικών στοιχείων κυμαίνεται από 14-18%.

Το πυρίτιο δεν βρίσκεται στη φύση σε καθαρή μορφή αλλά με τη μορφή διοξειδίου. Για τον λόγο αυτό υπόκεινται σε επεξεργασία για την παραγωγή καθαρού πυριτίου. Αρχικά, το υλικό θερμαίνεται στους 1800 °C παρουσία άνθρακα για την αφαίρεση των προσμίξεων. Το πυρίτιο το οποίο εξάγεται από αυτή τη διαδικασία διαθέτει μια καθαρότητα 98% και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μεταλλουργική βιομηχανία, ενώ δεν είναι κατάλληλο υλικό ως ημιαγωγός.

Για το λόγο αυτό το εξαγώγιμο υλικό υπόκειται και περαιτέρω επεξεργασία κατά την οποία σε πρώτο στάδιο γίνεται ανάτηξη και έπειτα αντίδραση με υδροχλώριο (HCl), το οποίο μετατρέπει το πυρίτιο σε τριχλωροσιλάνιο (SiHCl_3) που είναι ένα υγρό πτητικό. Στη συνέχεια με τη μέθοδο της κλασματικής απόσταξης το υλικό αποχωρίζεται διάφορες προσμίξεις, ενώ τέλος το υλικό ανάγεται με υδρογόνο και συμπυκνώνεται. Η παραπάνω διαδικασία εμπεριέχει αρκετή σπατάλη ενέργειας και αυτός είναι ένας από τους λόγους υψηλού κόστους κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το παραγόμενο προϊόν είναι ένα υψηλής καθαρότητας πυρίτιο, το οποίο όμως δεν διαθέτει την επιθυμητή δομή.

Για το λόγο αυτό, το εξαγώγιμο πυρίτιο υπόκειται σε κρυσταλλική ανάπτυξη συνήθως με τη μέθοδο Czochranski, η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, κατά την οποία το υλικό τήκεται μέσα σε ένα κυλινδρικό δοχείο σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1400 °C. [6]

Beginning of crystal growth

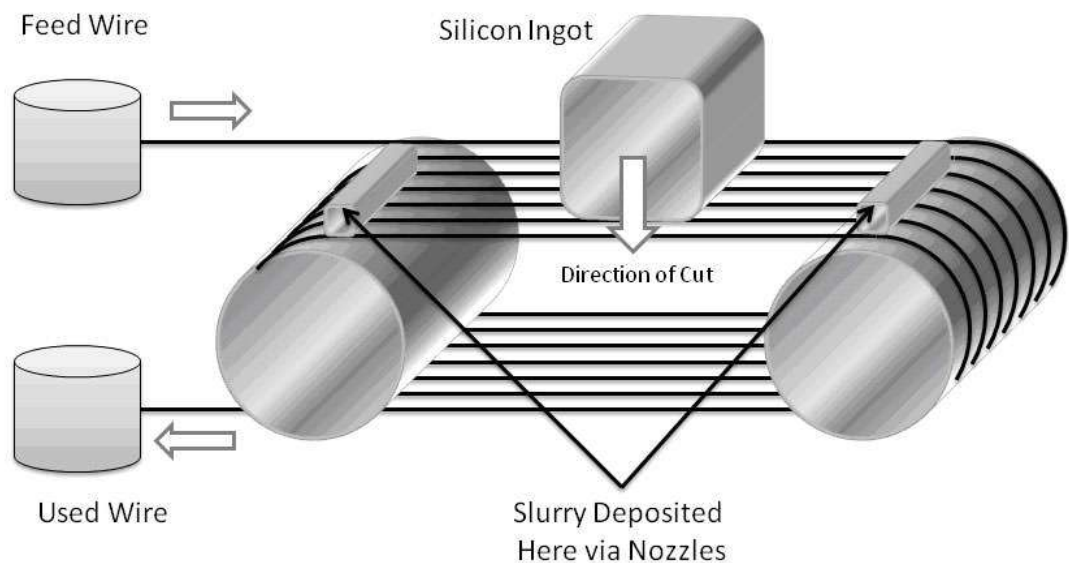


Σχήμα 16 Μέθοδος Czochralski

Πηγή: http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_6/illustr/i6_1_1.html

Στη συνέχεια ένα πολύ μικρό κομμάτι κρυσταλλικού πυριτίου τοποθετείται σε επαφή με την επιφάνεια του λιωμένου πυριτίου, και το κυλινδρικό δοχείο βρίσκεται σε συνεχή περιστροφική κίνηση. Το κομμάτι του πυριτίου λειτουργεί σαν πυρήνας κρυστάλλωσης και έτσι το πυρίτιο επικάθεται σε αυτό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διόγκωση και το σχηματισμό ενός μεγάλου κρύσταλλου πυριτίου με τη συνεχή ανύψωση από το λιωμένο πυρίτιο. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι η μετατροπή του πυριτίου σε κυλινδρική μορφή με διάμετρο δέκα εκατοστά και ένα μέτρο μήκος.

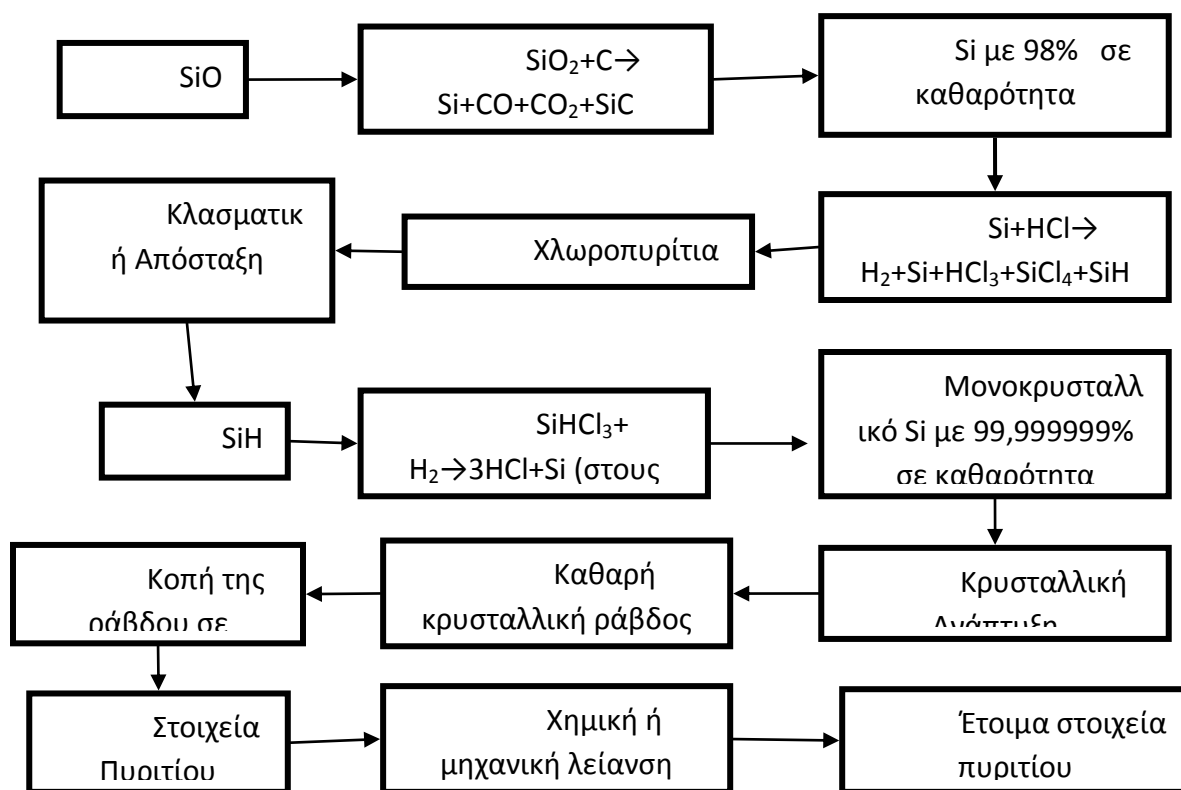
Ο κύλινδρος, ο οποίος δημιουργήθηκε κόβεται σε λεπτούς δίσκους (κυλινδρικές πλάκες), πάχους από 150 μm έως 500 μm για τις 48 ηλιακές εφαρμογές. Το κόστος της όλης διαδικασίας είναι αρκετά υψηλό λόγω του ότι το πυρίτιο είναι ένα πάρα πολύ σκληρό υλικό και ένα μεγάλο ποσοστό που πολλές φορές αγγίζει το 50% χάνεται κατά τη διαδικασία της κοπής. Η μέθοδος κοπής που περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα είναι μια μέθοδος που περιορίζει το ποσοστό των απωλειών λόγω του ότι η κοπή γίνεται με πολύ λεπτή διαμαντένια ίνα. Έπειτα, γίνεται λείανση των δίσκων για την απομάκρυνση των ελαττωμάτων της κοπής και σχηματίζονται σε διόδους τύπου p και n με επίταξη, διάχυση ή εμφύτευση προσμίξεων.



Σχήμα 17 Κοπή με τη μέθοδο των πολλαπλών συρμάτων

Τέλος, γίνεται η συγκόληση των ηλεκτροδίων στην εμπρόσθια και την πίσω όψη των δίσκων, η αλληλοσύνδεση των έτοιμων αυτών στοιχείων, καθώς και η κάλυψη της εμπρόσθιας επιφάνειας των στοιχείων με ένα αντιανακλαστικό επίστρωμα για την μείωση της ανάκλασης του φωτός και η στεγανή συσκευασία σε πλαίσια.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής του μονοκρυσταλλικού πυριτίου.



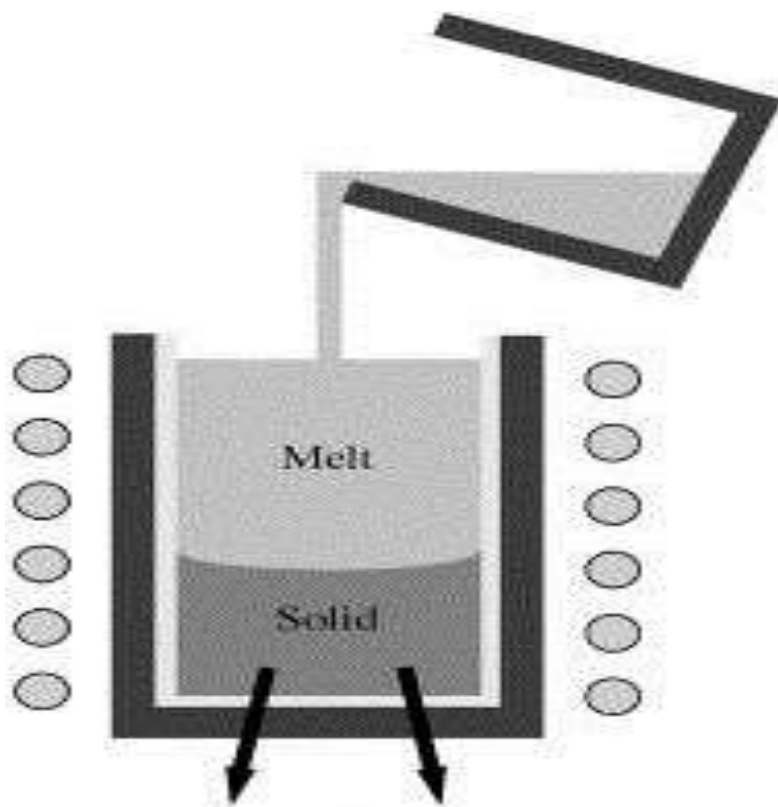
Σχήμα 18 Δομικό διάγραμμα της διαδικασίας παρασκευής ενός στοιχείου μονοκρυσταλλικού πυριτίου[24]

1.11.1.2. Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου

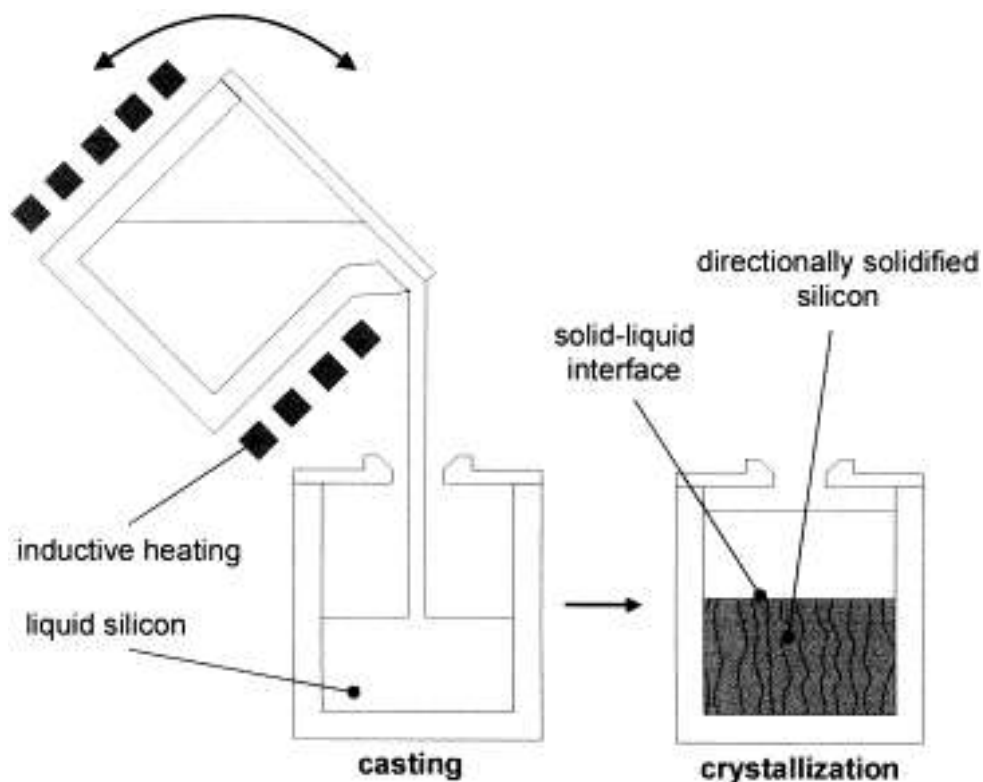
Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο ενώ περιέχει περιοχές μονοκρυσταλλικού πυριτίου, δεν διαθέτει την ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή του. Σε σύγκριση με τα μονοκρυσταλλικά, τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης της τάξεως του 10 με 14%.

Όσον αφορά την παραγωγή του, αυτή διαφέρει από αυτή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου, αφού δεν εκτελείται η μέθοδος Czochranski, αλλά η μέθοδος Bridgman. Στη μέθοδο αυτή, το υλικό τήκεται και τοποθετείται σε ένα δοχείο με τετραγωνική βάση, στο οποίο παραμένει έως ότου σταθεροποιηθεί. Μία άλλη μέθοδος, η οποία επίσης χρησιμοποιείται κατά κόρων είναι η μέθοδος block casting. Στη μέθοδο αυτή, το υλικό τήκεται επίσης σε ένα δοχείο, και στη συνέχεια μεταφέρεται σε ένα δεύτερο, στο οποίο και σταθεροποιείται. Το υλικό που παράγεται από τη διαδικασία αυτή είναι ένα στερεό πυρίτιο, το οποίο διαθέτει πολυκρυσταλλική δομή. Στη συνέχεια, το υλικό κόβεται με τον τρόπο τον οποίο προαναφέρθηκε και η διαδικασία τελειώνει όπως ακριβώς και αυτή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Σε σύγκριση, η διαδικασία παραγωγής του μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι αρκετά πιο ακριβή από αυτή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Επιπλέον, οι πλάκες οι οποίες παράγονται είναι σε τετραγωνική μορφή, η οποία βοηθάει στην ευκολότερη χρησιμοποίησή τους στη κατασκευή τετραγωνικών φωτοβολταϊκών στοιχείων αντίθετα με αυτούς του μονοκρυσταλλικού πυριτίου που διαθέτουν κυκλική μορφή. Ένα σημαντικό μειονέκτημά τους όμως είναι η μικρότερη απόδοσή τους σε σύγκριση με αυτούς του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. [6]



Σχήμα 19 Μέθοδος Bridgman [24]



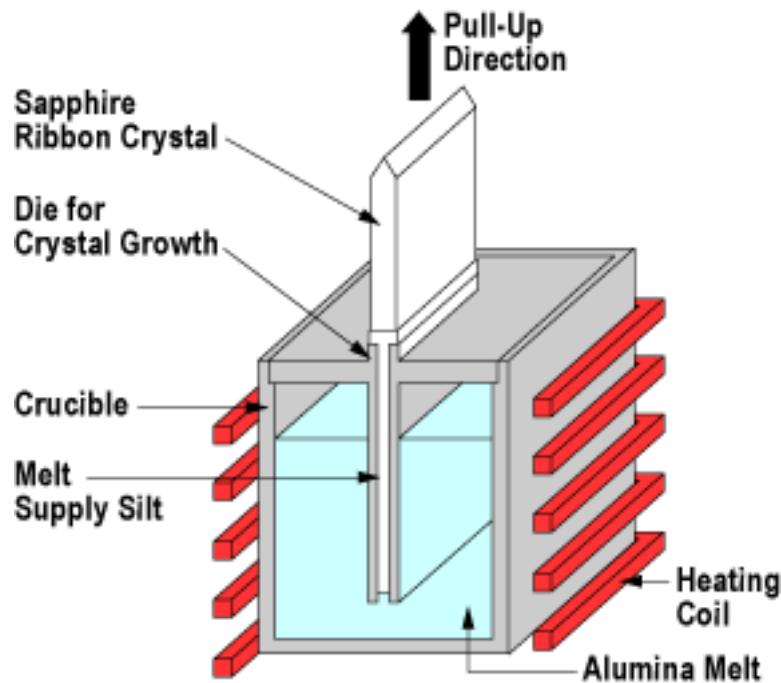
Σχήμα 20 Μέθοδος block casting [24]

1.11.1.3. Ταινίας Πυρίτιου (Ribbon Πυρίτιο)

Το Ribbon πυρίτιο είναι το πυρίτιο σε μορφή ταινίας. Η κατασκευή αυτή χρησιμοποιείται για μείωση του κόστους κατά τη διαδικασία κοπής, καθώς και μείωση των απωλειών καθαρού πυρίτιου, που προκαλούνται κατά τη διαδικασία κοπής του. Παρακάτω, αναφέρουμε συνοπτικά δύο τεχνικές, οι οποίες κατέληξαν σε εμπορική χρησιμοποίηση:

- **Edge defined Film Fed Growth Process (EFG)**

Στη διαδικασία αυτή υπάρχει ένα καλούπι, στο οποίο τοποθετείται το λιωμένο υλικό, το σχήμα του οποίου καθορίζει και τη μορφή της ταινίας. Τα παραγόμενα στοιχεία δεν διαθέτουν την ποιότητα των μονοκρυσταλλικών και η επιφάνεια τους παρουσιάζει ανωμαλίες. Η απόδοσή τους φτάνει έως και το 14,8% για στοιχεία που φτιάχτηκαν σε γραμμή παραγωγής και για εμπορικούς σκοπούς. [6]

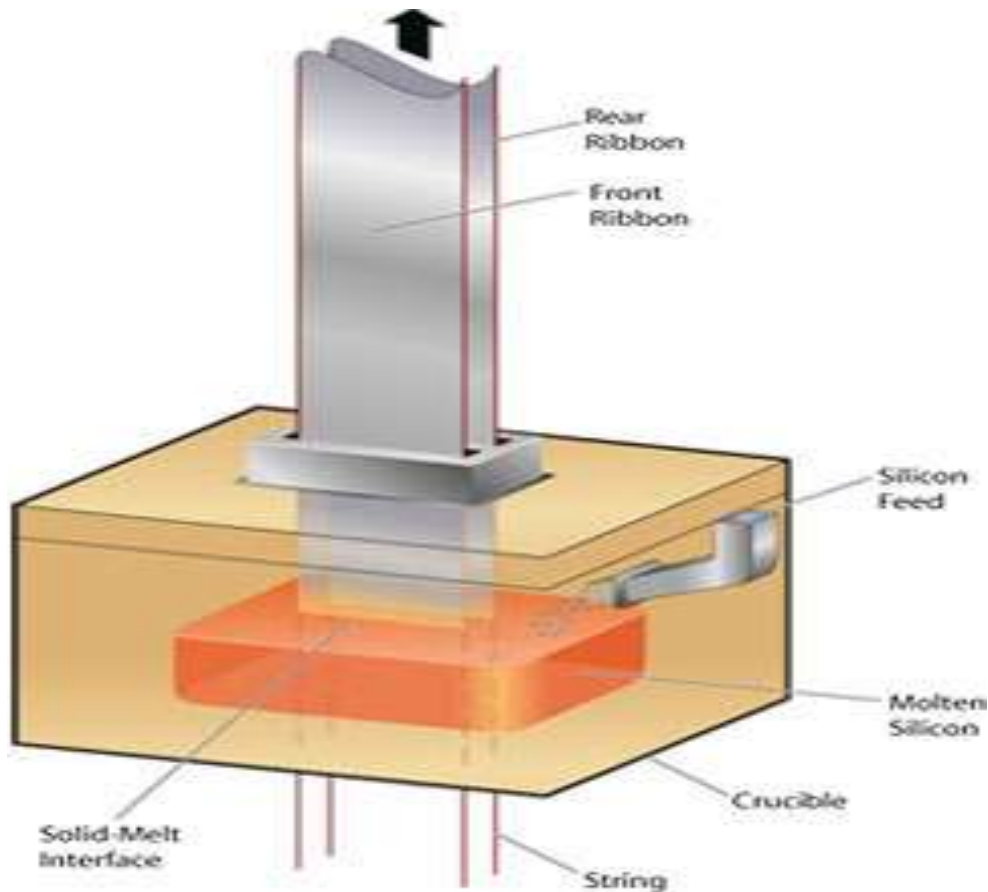


Σχήμα 21 Edge defined Film Fed Growth Process

Πηγή: <http://americas.kyocera.com/kicc/industrial/crystal.html>

- **String Ribbon Process (STR)**

Στην περίπτωση αυτή, δεν χρησιμοποιείται καλούπι και το πυρίτιο βγαίνει κατ' ευθείαν από το δοχείο. Στην τεχνική αυτή, υπάρχουν δύο λωρίδες που διαπερνούν την βάση του δοχείου και κινούνται ανοδικά με σταθερή ταχύτητα. Κατά το ξεκίνημα, υπάρχει ο πυρήνας, ο οποίος και δημιουργεί την αρχή της ταινίας του πυριτίου. Η ταχύτητα με την οποία κινούνται οι λωρίδες, καθορίζει και το πάχος της ταινίας πυριτίου και η απόδοσή του είναι της τάξεως του 14-15%.[6]



Σχήμα 22 String Ribbon Process (STR)

Πηγή: http://www.sneresearch.com/eng/info/show.php?c_id=3711&pg=4&s_sort=2&sub_cat=&s_type=&s_word=

1.11.2. Φωτοβολταϊκά thin film

Η τεχνολογία λεπτού φιλμ (thin film) ανακαλύφθηκε με σκοπό τη μείωση του κόστους λόγω του ότι μειώνεται και το υλικό το οποίο χρησιμοποιείται. Η τοποθέτηση μπορεί να γίνει κατ' ευθείαν επάνω σε γυαλί, κεραμικό υλικό ή οποιοδήποτε άλλο κατάλληλο υλικό υπόστρωμα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η ευκολία στη σύνδεσή τους με την εν σειρά συνδεσμολογία, φτιάχνοντας ολόκληρα πλαίσια κατά τη διαδικασία εναπόθεσης. Η διαδικασία αυτή, από την άλλη πλευρά πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά, για να αποφευχθούν τυχόν ατέλειες και ελαττώματα στην παραγωγή αρκετά μεγάλων σε έκταση επιφανειών.

Το κρυσταλλικό πυρίτιο λεπτού φιλμ είναι αρκετά λεπτό με πάχος της τάξεως των 5 έως 50μm. Παρόλο που το υλικό είναι αρκετά λεπτό, η απόδοσή του είναι αρκετά μεγάλη, λόγω του έξυπνου οπτικού σχεδιασμού του. Το ηλιακό φως διαγράφει, μέσω ανακλάσεων, τελική διαδρομή τριάντα φορές και πάνω, μεγαλύτερη από το πάχος του φιλμ.

Σημαντικό πλεονέκτημα επίσης είναι η χαμηλή ποσότητα πυριτίου που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του καθώς και η χαμηλή ποιότητα στο υλικό του υποστρώματος (π.χ. χαμηλής ποιότητας γυαλί, πυρίτιο, κεραμικά, γραφίτης κ.α.). Η απόδοση του υλικού αυτού αυξάνεται συνεχώς και σήμερα ξεπερνάει το 21%. Εκτός από την χρήση μικρότερης ποσότητας υλικού, ένα άλλο πλεονέκτημα είναι, η ικανότητα κατασκευής μονολιθικών πλαισίων ήδη κατά τη διαδικασία απόθεσης. Αυτό είναι συμφέρον από οικονομικής πλευράς, αλλά αρκετά απαιτητικό από τεχνικής πλευράς, διότι η επεξεργασία χωρίς ατέλειες αφορά μεγαλύτερη επιφάνεια.

Υπάρχει η δυνατότητα παρασκευής τους σε μεγάλες επιφάνειες ομοιόμορφα, με τις ενεργειακές απαιτήσεις για την παρασκευή τους να είναι αρκετά μειωμένες σε σχέση με την παρασκευή του κρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου, ενώ ταυτόχρονα απαιτούνται λιγότερες πρώτες ύλες για την παρασκευή τους καθώς το απαιτούμενο πάχος υμενίων είναι πολύ μικρό. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα εναπόθεσης των υμενίων σε φθηνά υποστρώματα, όπως γυαλί και πλαστικό, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που χρησιμοποιούνται κατά την εναπόθεση.

Η τεχνολογία λεπτών υμενίων (Thin Film) είναι σε φάση ανάπτυξης, αφού με την ανάπτυξη των διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας και τη χρήση διαφορετικών υλικών αναμένεται αύξηση της απόδοσης, σταθεροποίηση των χαρακτηριστικών τους και αύξηση της διείσδυσης στην αγορά. Σήμερα αποτελούν την πιο φθηνή επιλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων.[6]

1.11.2.1. Άμορφο Πυρίτιο (a-Si)

Το άμορφο πυρίτιο σαν υλικό εμφανίζει κάποια αταξία στη δομή του και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται στην κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων με τη μορφή κράματος με υδρογόνο. Με την προσθήκη υδρογόνου υπάρχει η δυνατότητα βελτίωσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του καθώς περιέχεται σε 10-40% ατομική αναλογία. Το άμορφο πυρίτιο είναι ένα υλικό που είναι βασισμένο στην τεχνολογία του λεπτού φιλμ που αναφέρθηκε παραπάνω.

Η βασική διαφορά του με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο είναι στο ενεργειακό διάκενο, το οποίο στο άμορφο πυρίτιο η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 1.12eV και 1.7eV περίπου. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του υλικού αυτού είναι η υψηλή απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας που επιτρέπει, η οποία μάλιστα πολλές φορές είναι σαράντα φορές υψηλότερη από αυτή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Όσον αφορά την ιδιότητά του, το άμορφο πυρίτιο συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου και για το λόγο αυτό αρκεί μια λεπτή επίστρωση στην κατασκευή του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Επιπλέον, μπορεί να γίνει χρήση του συγκεκριμένου υλικού και σε συνδυασμό με χαμηλού κόστους υποστρώματα, όπως το γυαλί, το πλαστικό και ο χάλυβας. Στην διαδικασία κατασκευής του απαιτείται χαμηλότερη θερμοκρασία προς όφελος της κατανάλωσης λιγότερης ενέργειας. Αυτό έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα ως προς το κόστος κατασκευής, το οποίο είναι πολύ χαμηλότερο ανά μονάδα επιφάνειας, σε σύγκριση με τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου.

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα του υλικού αυτού συμπεριλαμβάνεται ο χαμηλός βαθμός απόδοσής του, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 6-9% για στοιχεία του εμπορίου και φτάνει το 13% για στοιχεία που έχουν κατασκευαστεί σε εργαστήριο και η βαθμιαία μείωση του βαθμού απόδοσης. Η απόδοση είναι δυνατόν να μειωθεί μέσα σε μερικούς μήνες από 10% έως και 15%. [6]

1.11.2.2. Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το αρσενικούχο γάλλιο είναι ένα ακόμα υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων, το οποίο είναι ένας ημιαγωγός με ενεργειακό διάκενο 1.43 eV. Η τιμή αυτή είναι στη βέλτιστη περιοχή για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας με απόδοση περίπου στα 25-30%. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι το ενεργειακό διάκενο είναι άμεσο, ενώ ένα μειονέκτημά του είναι το αρκετά υψηλό κόστος παραγωγής, το οποίο είναι έως και πέντε φορές μεγαλύτερο από αυτό της παραγωγής κρυσταλλικού πυριτίου.

Το αρσενικούχο γάλλιο συναντάται κυρίως σε ηλιακά στοιχεία συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, στα οποία το υψηλό κόστος εξισώνεται με την υψηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας. Επιπλέον, το υλικό αυτό βρίσκει εφαρμογή σε διαστημικές εφαρμογές λόγω της υψηλής θερμικής αδράνειάς του και του υψηλού βαθμού απόδοσής του. Η απόδοση των στοιχείων του αρσενικούχου γαλλίου πέφτει στο μισό όταν θερμανθούν στους 200 °C, σε σύγκριση με την απόδοσή τους σε συνηθισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η μείωση στα στοιχεία πυριτίου παρατηρείται ήδη στους 120 °C.[6]

1.11.2.3. Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe₂ ή CIS)

Ο δισεληνιούχος ινδιούχος χαλκός είναι ένα ημιαγωγίμο υλικό είτε τύπου n είτε τύπου p, το οποίο έχει μια άμεση οπτική απορρόφηση με τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης που έχει μετρηθεί μέχρι σήμερα. Ο λόγος χαλκού- ινδίου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του, ενώ ο καλός έλεγχος της στοιχειομετρίας του θεωρείται ουσιώδης για αποδοτικές διατάξεις.

Η δημιουργία επαφών τύπου p-n είναι δυνατόν να κατασκευαστούν, αλλά δεν είναι αποδοτικές και σταθερές. Για το λόγο αυτό, οι καλύτερες μέχρι σήμερα ενώσεις είναι οι ετεροενώσεις με θειούχο κάδμιο (CdS). Το θειούχο κάδμιο μπορεί είναι μόνο τύπου n και έτσι ο δισεληνιούχος ινδιούχος χαλκός πρέπει να είναι μόνο τύπου p. Το θειούχο κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο 2.4eV, ενώ το CIS έχει ενεργειακό διάκενο 1eV και παράγεται ως κιονοειδής πολυκρυσταλλική μεμβράνη. Το θειούχο κάδμιο μπορεί να απορροφήσει έντονα όλη την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία από το πράσινο έως το μπλε άκρο φάσματος.

Στις βέλτιστες διατάξεις χρησιμοποιείται ένα πολύ λεπτό στρώμα θειούχου καδμίου της τάξεων των 0,03μm με στρώμα παραθύρου ενός υλικού με μεγάλο ενεργειακό διάκενο και υψηλή αγωγιμότητα. Ένα κατάλληλο υλικό για το στρώμα του παραθύρου είναι το οξείδιο του ψευδαργύρου. [6]

Μεταλλική πίσω επαφή
Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός
Θειούχο Κάδμιο
Διαφανής μπροστινή επιφάνεια
Γυάλινο υπόστρωμα

Σχήμα 23 Δομή του ηλιακού στοιχείου CIS [24]

Η Siemens έχει κάνει μια προσπάθεια ανόδου του συγκεκριμένου υλικού, φτάνοντας την απόδοσή του περίπου στο 10%. Ο δισεληνιούχος ινδιούχος χαλκός είναι ένα υλικό πολύπλοκο στην κατασκευή του, όμως μπορεί να προσφέρει χαμηλό κόστος σε ημιαγώγιμα υλικά καθώς και ελάχιστη μείωση της απόδοσης με την πάροδο μερικών χρόνων σε σύγκριση με το άμορφο πυρίτιο. Επιπλέον, λόγω του ότι είναι ένα αρκετά τοξικό αέριο, πρέπει να υπάρχουν υψηλά μέτρα ασφαλείας του προσωπικού κατά τη διάρκεια κατασκευής του.

1.11.2.4. Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το τελλουριούχο κάδμιο είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό, το οποίο αποτελείται από κάδμιο και τελλούριο, με υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και με ενεργειακό διάκενο πολύ κοντά στο ιδανικό. Ένας όγκος πάχους 1μm αρκεί για την απορρόφηση του 90% του ηλιακού φάσματος. Η δομή του ηλιακού στοιχείου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

Μεταλλική πίσω επαφή
Τελλουριούχο Κάδμιο
Θειούχο Κάδμιο
Διαφανής μπροστινή επιφάνεια
Γυάλινο υπόστρωμα

Σχήμα 24 Δομή του ηλιακού στοιχείου CdTe [24]

Στο εμπόριο υπάρχει ένα πλήθος τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την απόθεση του τελλουριούχου καδμίου και αφότου υποστούν μια επεξεργασία μετά την απόθεση, είναι σε θέση να παράγουν υψηλής ποιότητας υλικό και αποδοτικά ηλιακά στοιχεία. Υπάρχουν δύο τεχνολογίες παραγωγής τελλουριούχου καδμίου: η πλεγματική εκτύπωση και η ηλεκτροτυπία.

Στην τεχνολογία της πλεγματικής εκτύπωσης των στοιχείων τελλουριούχου καδμίου έχουμε μια παραγωγή χαμηλού κόστους και χαμηλού ρυθμού. Η διαδικασία που περιορίζει τον ρυθμό παραγωγής είναι η θερμοκρασιακή επεξεργασία της μελάνης εκτύπωσης μετά την απόθεση, η οποία απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 500 °C για μία ώρα ή και περισσότερο. Με βάση αυτή τη τεχνολογία υπάρχει παραγωγή βασικών μονάδων με απόδοση 6%, οι οποίες έχουν ελεγχθεί σε εξωτερικές συνθήκες. Παρόλα αυτά, η εμπορική τους διαθεσιμότητα είναι περιορισμένη.

Η δεύτερη τεχνολογία στη σειρά, αυτή της ηλεκτροτυπίας είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για τα στοιχεία του τελλουριούχου καδμίου, λόγω του χαμηλού κόστους και της περιορισμένης χρήσης του υλικού. Η εταιρία BP Solar έχει παράγει βασικές μονάδες με απόδοση της τάξεως των 10% και άνω, και στοιχεία με αποδόσεις τη τάξεως του 13%. Οι βασικές μονάδες έχουν ελεγχθεί σε εξωτερικές συνθήκες με ιδιαίτερη επιτυχία, όμως το κάδμιο είναι ένα ιδιαίτερα τοξικό υλικό, το οποίο κατά την παραγωγή του θα πρέπει να λαμβάνονται υψηλά μέτρα προστασίας του προσωπικού.[6]

1.11.3. Άλλες Τεχνολογίες

1.11.3.1. Νανοκρυσταλλικά Φωτοβολταϊκά πυριτίου

Τα νανοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα ή αλλιώς τα ηλιακά κύτταρα κβαντικών τελείων είναι κύτταρα βασισμένα σε νανοκρυστάλλους. Η τεχνολογία του είδους αυτού των φωτοβολταϊκών αναπτύσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και πολλά εργαστήρια υπόσχονται νέες πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες. Τα φωτοβολταϊκά αυτά παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως ευκαμψία, χαμηλό κόστος, είναι καθαρή πηγή ενέργειας και έχουν απόδοση έως 65%.

Τα φωτοευαίσθητα ηλιακά κύτταρα (DSSC) είναι φωτοβολταϊκά βασισμένα σε νανοδιάστατο ημιαγωγό. Κύτταρα λεπτού φιλμ, των οποίων ο ημιαγωγός βρίσκεται ανάμεσα στον φωτοευαίσθητοποιητή και τον ηλεκτρολύτη και βασίζονται στο φωτοηλεκτροχημικό φαινόμενο. Αυτό το χαμηλού κόστους σύστημα αναπτύχθηκε το 1991 από τους Michael Gratzel και Brian O' Regan στην Πολυτεχνική Σχολή της Λοζάνης. [48]

1.11.3.2. Οργανικά Φωτοβολταϊκά

Στα λεγόμενα ηλεκτροχημικά ή οργανικά στοιχεία η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται μέσω οργανικών συστημάτων. Τα πολυμερή ηλιακά κύτταρα (πλαστικά ηλιακά κύτταρα) είναι ένας τύπος οργανικών φωτοβολταϊκών. Η τεχνολογία αυτή είναι πολλά υποσχόμενη και παρουσιάζεται με τη μορφή λεπτού φιλμ.

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά συστήματα βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο. Η αρχική τους μορφή ήταν υγρή και στην πορεία των ερευνών έφτασε σε πηκτή, παχύρρευστη μορφή. Οι ερευνητές προσπαθούν να κατασκευάσουν όσο το δυνατόν πιο στερεά οργανικά στοιχεία, ώστε να σχηματιστεί το πάνελ. Λόγω της ρευστότητας της πρώτης ύλης (υγρό διάλυμα), τα οργανικά φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν ευκαμψία. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από πολυχρωμία, λόγω των χρωστικών ουσιών στο διάλυμα.

Σήμερα, η απόδοση αυτού του είδους φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει φτάσει το 2,5%, ενώ το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι το εξαιρετικά χαμηλό κόστος παρασκευής τους. Όμως, τα οργανικά φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν λιγότερο χρόνο ζωής από ότι τα συμβατικά φωτοβολταϊκά. [48]

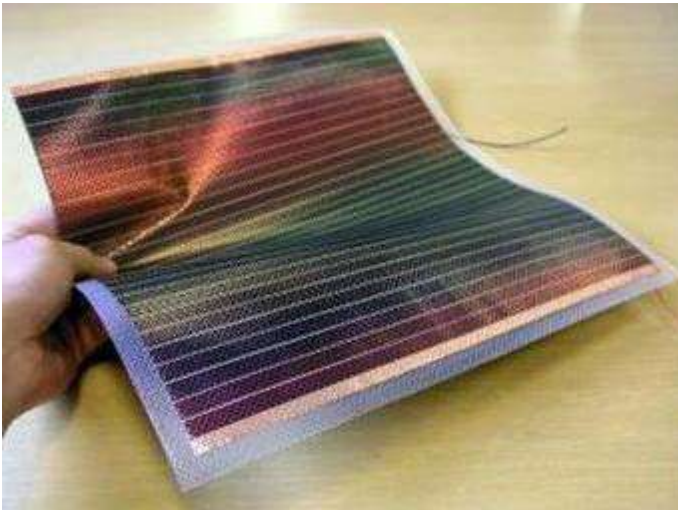


Σχήμα 25 Στρώσεις οργανικού φωτοβολταϊκού συστήματος [47]

1.12. Μελλοντική Εξέλιξη

1.12.1. Νέες Μορφές Φωτοβολταϊκών

Με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, τα φωτοβολταϊκά συνεχώς εξελίσσονται και αναπτύσσονται σε νέες πιο ενδιαφέρουσες αισθητικά μορφές. Το φωτοβολταϊκό κύτταρο, ως υλικό, εκτός της παραγωγή ρεύματος μπορεί να τοποθετηθεί σε κτίρια, αντικαθιστώντας το περίβλημά τους. Πρόκειται για μια νέα μορφή αρχιτεκτονικής των κτιρίων, η οποία θα έχει και υψηλό περιβαλλοντικό όφελος. Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά σε μία πληθώρα χρωμάτων, μεγεθών και σχημάτων. Επιπρόσθετα, θα υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός ευέλικτου υλικού με πλαστικότητα στη φόρμα και διαφορετική διαπερατότητα του φωτός ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες σχεδιασμού.



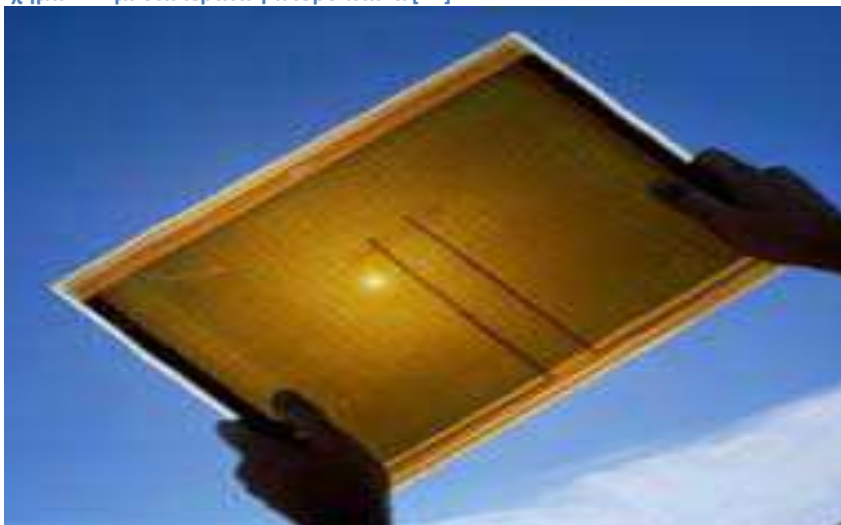
Σχήμα 26 Εύκαμπτο φωτοβολταϊκό [47]

Ανάλογα με το είδος του φωτοβολταϊκού, το υλικό και την επίστρωσή του, μπορούμε να συναντήσουμε μια πληθώρα χρωμάτων, καθώς για παράδειγμα, το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο ως υλικό ποικίλλει από σκούρο μαύρο σε σκούρο γκρι με μία ενιαία επίπεδη δομή. Αντίθετα, η δομή των πολυκρυσταλλικών στοιχείων παρουσιάζει μια μεγάλη ποικιλία χρωματιστών κρυστάλλων. Επιπλέον, τα οργανικά φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη πολυχρωμία, εφόσον κατασκευάζονται από έγχρωμα υγρά διαλύματα.

Τα φωτοβολταϊκά τεχνολογίας λεπτών υμενίων (thin film), αποτελούνται από εύκαμπτο υλικό είτε πυριτίου είτε οργανικών υλικών, το οποίο προσφέρει ένα ιδιαίτερα αισθητικό αποτέλεσμα με ποιοτική εμφάνιση και ελαστικότητα στο σχήμα τους. Τα φωτοβολταϊκά αυτής της τεχνολογίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε μορφή για επικάλυψη στέγης ή πρόσοψης κτιρίων. Με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι διαπερατά από τον ήλιο, προσφέροντας φυσικό φωτισμό και ορατότητα και στον εσωτερικό χώρο των κτιρίων. Προσφέρουν επίσης διαφορετική διαπερατότητα φωτός και δυνατότητα επιλογής χρώματος. [48]



Σχήμα 27 Ημι-διαπερατά φωτοβολταϊκά [47]



Σχήμα 28 Ημι-διαπερατά φωτοβολταϊκά [47]

1.12.2. Ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκών σε Κτίρια

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία ενσωματώνονται σε κτίρια ονομάζονται Building Integrated Photovoltaics (BIPV). Τα φωτοβολταϊκά BIPV παρά το γεγονός ότι παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, αποτελούν ένα κομμάτι του ίδιου του κτιρίου και προσφέρουν μια πληθώρα σχεδιαστικών δυνατοτήτων.

Η εξέλιξη αυτού του είδους φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει χωριστεί σε τρεις γενιές, σε σχέση με τους τρόπους εφαρμογής που χρησιμοποιούσαν κάθε εποχή. Η πρώτη γενιά φωτοβολταϊκών BIPV, αποτελείται από φωτοβολταϊκά, τα οποία τοποθετούνται στις οροφές κτιρίων, στην ήδη υπάρχουσα μορφή τους. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το είδος του συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού.



Σχήμα 29 Πρώτη Γενιά BIPV [47]

Στην δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών BIPV ανήκουν αυτά τα οποία αντικαθιστούν τμήματα του περιβλήματος του κτιρίου και με τον τρόπο αυτό ελέγχουν τη λειτουργία τους. Στην γενιά αυτή, γίνεται προσπάθεια να γίνουν πολύ- λειτουργικά στοιχεία, γεγονός που μειώνει το σχετικό κόστος. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το είδος του φωτοβολταϊκού δεύτερης γενιάς.



Σχήμα 30 Δεύτερη Γενιά BIPV [47]

Η τρίτη γενιά BIPV εμφανίζεται το 1998 από την εταιρία United Solar Ononic, η οποία κατασκεύασε εύκαμπτα φωτοβολταϊκά ελάσματα, τα οποία ενσωματώνονται στα στοιχεία του κτιρίου και διατίθενται στο εμπόριο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το είδος του φωτοβολταϊκού τρίτης γενιάς.



Σχήμα 31 Τρίτη Γενιά BIPV [47]

Αυτού του τύπου τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια πληθώρα κτιριακών εγκαταστάσεων από σπίτια έως σχολεία, ξενοδοχεία και συγκροτήματα γραφείων. Σημαντική είναι η εφαρμογή τους σε βιομηχανικά και εμπορικά κτίρια, τα οποία καταναλώνουν μεγάλα ποσοστά σε ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά αυτά είναι ικανά να παρέχουν τις κατάλληλες προϋποθέσεις όσων αφορά την εμφάνιση, την προστασία από τις καιρικές συνθήκες και την στεγανότητα, τα υλικά, το φορτίο αέρα, την ασφάλεια κατασκευής καθώς και το κόστος.

Στο στάδιο του σχεδιασμού, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ο νότιος προσανατολισμός του φωτοβολταϊκού για τον προσανατολισμό του κτιρίου. Στο στάδιο της μελέτης για την κατασκευή, πρέπει να προβλεφθεί η θέση και η λειτουργία τους. Τα φωτοβολταϊκά προφανώς γίνονται σημαντικά στοιχεία του περιβαλλοντικού και κτιριακού συστήματος. Είναι αναγκασίμο να θεωρηθούν σαν ένα ολοκληρωμένο μέρος της ενεργειακής στρατηγικής του κτιρίου και της λειτουργικότητας του. [43] [48]



Σχήμα 32 Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε κτίρια
Πηγή: <http://www.4green.gr/>

1.13.Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Ουσιαστικά, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι η ικανότητα του υλικού του φωτοβολταϊκού στοιχείου να μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία που προσκρούει πάνω σε αυτό σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από μικρά πακέτα ενέργειας, τα λεγόμενα φωτόνια, τα οποία έχουν ενέργεια διαφορετική το κάθε ένα, η οποία εξαρτάται από το μήκος κύματος τους. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσκρούει στο φωτοβολταϊκό υλικό κάποια φωτόνια ανακλώνται και κάποια το διαπερνούν. Κάποια φωτόνια, των οποίων η ενέργεια είναι ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, απορροφώνται από το ημιαγώγιμο υλικό δημιουργώντας ένα χημικό δεσμό και ελευθερώνοντας ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι γίνεται μετάβαση από μια κατάσταση ισορροπίας σε μια κατάσταση κυκλοφορίας στο υλικό ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Οι ελεύθεροι αυτοί φορείς βρίσκονται στην περιοχή ένωσης p-n. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δέχονται την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου και κατευθύνονται στην περιοχή τύπου n και οι ελεύθερες οπές κατευθύνονται στην περιοχή τύπου p, προκαλώντας μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της διόδου.

Η κατεύθυνση των ηλεκτρονίων στην περιοχή τύπου n αντιστοιχεί στο λεγόμενο φωτόρρευμα (I_{sun}), η τιμή του οποίου είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Η τιμή της φασματικής απόκρισης και κατ' επέκταση του φωτορεύματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, εξαρτάται από πολλούς κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως ο συντελεστής απορρόφησης, ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, το πάχος του ημιαγωγού και το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων στα ηλεκτρόδια.

Επιπλέον, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων κάποια αναγκάζονται να κινηθούν προς την αντίθετη φορά, στην περιοχή τύπου p και έτσι παράγεται το ρεύμα διάχυσης I_d . Το ρεύμα διάχυσης υπακούει στις σχέσεις που διέπουν το ρεύμα ορθά πολωμένης διόδου.

Το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι το 25% της ενέργειας που δέχεται αλλά το πιο συνηθισμένο ποσοστό είναι λιγότερο από 15%.

Το ορατό φώς είναι μόνο ένα μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική. Αποτελείται από διαφορετικά μήκη κυμάτων, άρα και από διαφορετικά επίπεδα ενέργειας.

Εφόσον το φώς που πέφτει στο κύτταρο μεταφέρει διαφορετικά επίπεδα ενέργειας, κάποια από αυτά δεν θα έχουν αρκετή ενέργεια για να μπορέσουν να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια. Απλά θα περάσουν μέσα από το κύτταρο σαν να ήταν αυτό διαφανές. Μόνο ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας, το οποίο εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένο το κύτταρο, απαιτείται για να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Μερικά φωτόνια έχουν περισσότερη ενέργεια από ότι χρειάζεται για την απόσπαση ενός ηλεκτρονίου. Η επιπλέον ενέργεια χάνεται εκτός και αν η ενέργεια του φωτονίου είναι διπλάσια από την απαιτούμενη και ελευθερώσει δύο ηλεκτρόνια.

Αν χρησιμοποιούσαμε ένα υλικό που να απαιτεί λιγότερη ενέργεια για την απελευθέρωση ηλεκτρονίων, αυτό θα εξασθενούσε το ηλεκτρικό πεδίο και ότι θα κερδίζαμε σε ενέργεια θα το χάναμε σε τάση.

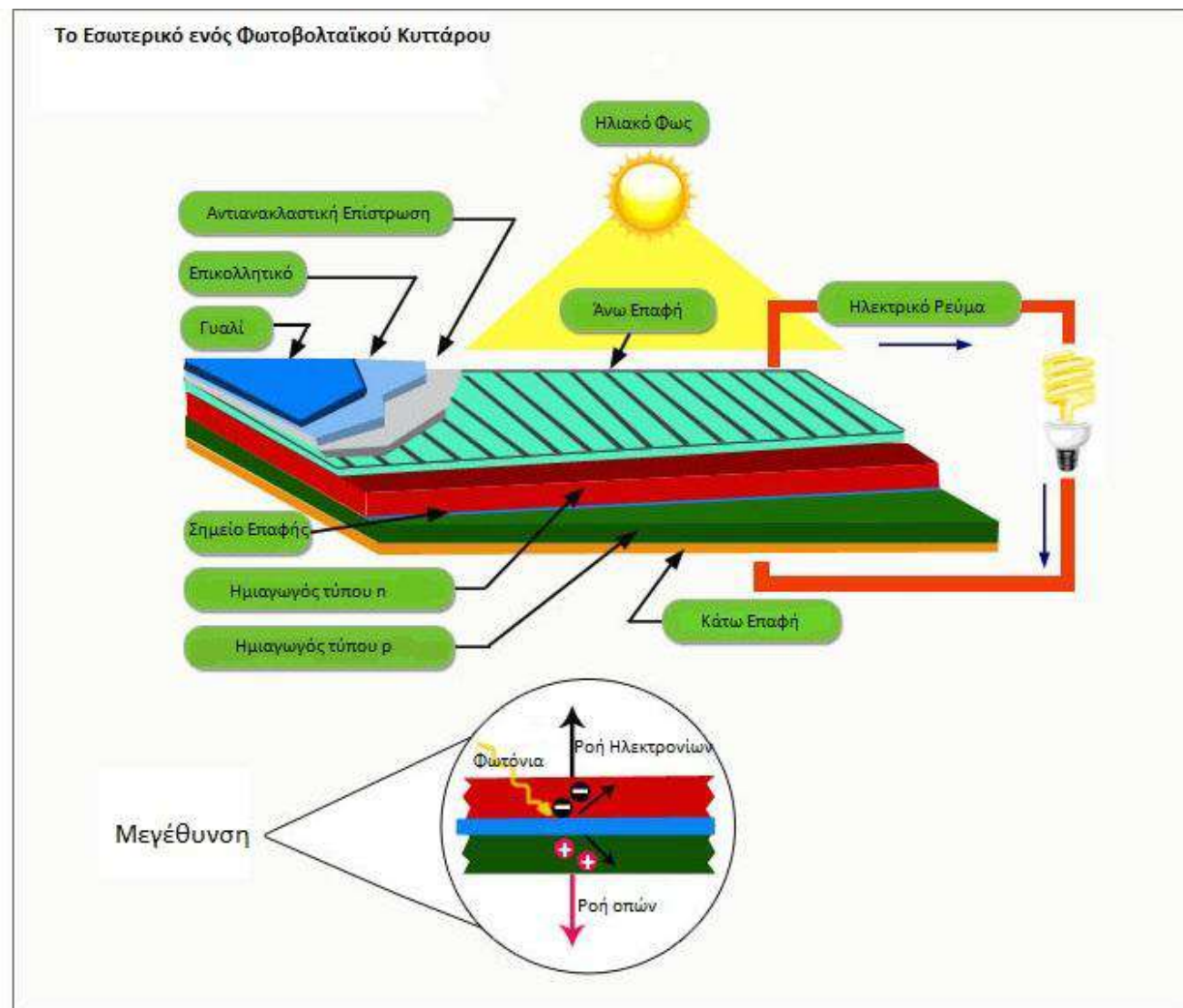
1.14. Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι προστατευμένα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που μπορεί να τους προκαλέσουν διάβρωση, είναι αεροστεγώς και υδατοστεγώς κλεισμένα μέσα σε ειδικό γυαλί και μονωτικό πλαστικό. Για λόγους αντοχής, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμά τους μεταλλικά ελάσματα αλουμινίου. Όλη αυτή η προστασία στα φωτοβολταϊκά στοιχεία υπάρχει ώστε να μην διαβρωθούν από τα καιρικά φαινόμενα ή από άλλους απρόβλεπτους παράγοντες, διότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάβρωση, τόσο πιο μειωμένη θα είναι και η απόδοση.

Τα μέρη από τα οποία αποτελούνται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παρατίθενται παρακάτω:

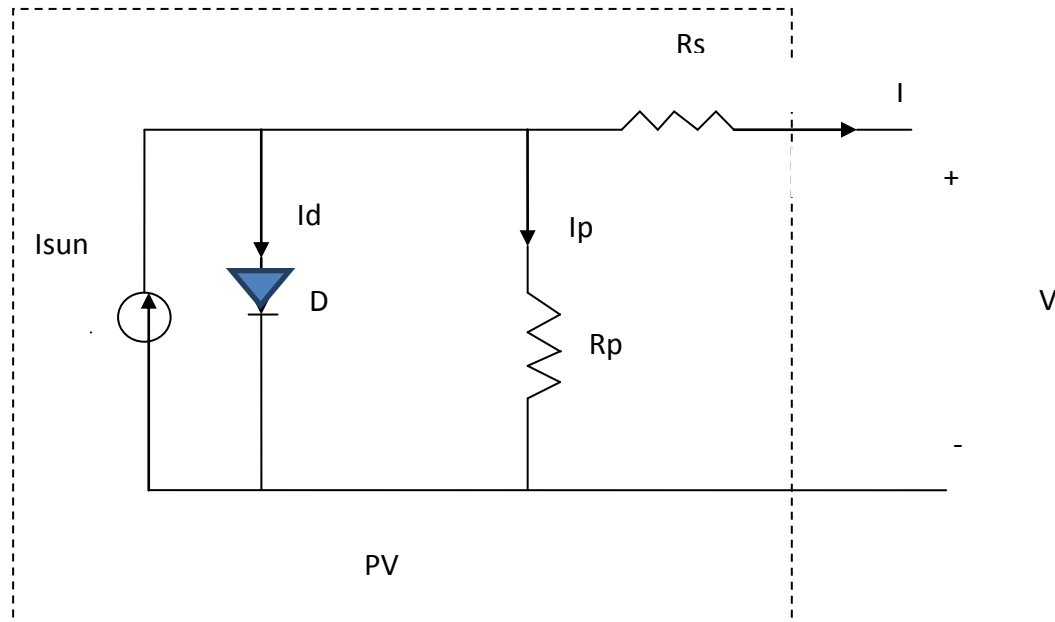
- Μεταλλική βάση
- Πυρίτιο τύπου P
- Πυρίτιο τύπου N
- Μη ανακλαστικό στρώμα επικάλυψης
- Μεταλλικά αγωγίμα ελάσματα

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από πολλά οριζόντια ελάσματα , όπως το μη ανακλαστικό στρώμα επικάλυψης, το στρώμα τύπου n, το στρώμα τύπου p και τα μεταλλικά αγώγιμα ελάσματα . Τα οριζόντια ελάσματα μαζεύουν τα διεγερμένα ηλεκτρόνια ,όπου στην συνέχεια διοχετεύονται στα κάθετα ελάσματα , τα οποία ονομάζονται ζυγοί. Οι ζυγοί των στοιχείων ενώνονται μεταξύ τους και έτσι έχουμε πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους τα οποία και αποτελούν το πλαίσιο. Κάθε πλαίσιο έχει δύο ακροδέκτες: το θετικό και τον αρνητικό πόλο. [29]



Σχήμα 33 Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου [28]

1.15.Ισοδύναμο Κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου



Σχήμα 34 Κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα, το ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελείται από μια ιδανική πηγή ρεύματος, η οποία μας δίνει το φωτόρευμα I_{sun} . Επιπλέον, υπάρχει σε αυτό μια αντίσταση απωλειών διαρροής R_p , η οποία αντιπροσωπεύει το ρεύμα διαρροής εντός του φωτοβολταϊκού στοιχείου (απόκλιση από το ρεύμα που θα έπρεπε να παίρνουμε από ένα ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο). Η αντίσταση R_p είναι παράλληλα συνδεδεμένη με μία δίοδο D , και η τιμή της σε πολύ καλής απόδοσης φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι μεγαλύτερη των $10^3 \Omega$.

Επιπλέον, το κύκλωμα περιλαμβάνει μια αντίσταση R_s συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο, η οποία οφείλεται στην αντίσταση μεταξύ του φωτοβολταϊκού στοιχείου και των ακροδεκτών του και στην αντίσταση του ημιαγωγού. Οι τυπικές τιμές της αντίστασης R_s για φωτοβολταϊκά στοιχεία σχετικά καλής ποιότητας κυμαίνονται σε τιμές από $0,1\Omega$ έως $0,3 \Omega$. [57]

Το ρεύμα στην έξοδο του φωτοβολταϊκού στοιχείου θα δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_{sun} - I_d - I_p = I_{sun} - I_d - \frac{V_d}{R_p} \quad [1.27]$$

Δεδομένου ότι :

$$I_d = I_S * \left(e^{V_d * q / kT} - 1 \right) \quad [1.28]$$

Το ρεύμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I = I_{sun} - I_S * \left(e^{V_d * q / k * T} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad [1.29]$$

Για την τάση V_d της διόδου και την τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου ισχύει η εξίσωση:

$$V = V_d - I * R_S \quad [1.30]$$

Σε περιπτώσεις απωλειών μικρότερων του 1% αποδεικνύεται μια καλή προσέγγιση για τις R_S και R_p :

$$R_S < \frac{0.01 * V_{OC}}{I_{SC}} \quad [1.31]$$

$$R_p > \frac{100 * V_{OC}}{I_{SC}} \quad [1.32]$$

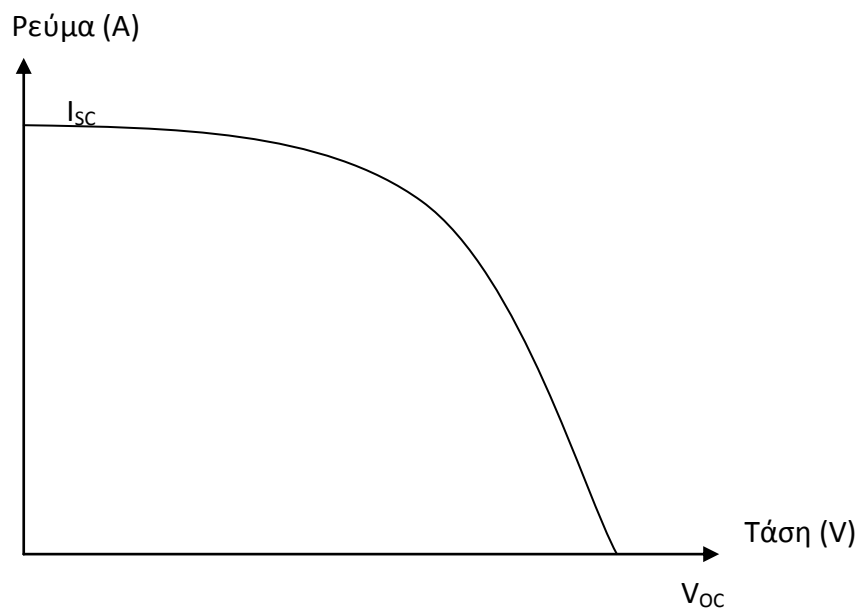
Όπου:

V_{OC} είναι η τάση ανοικτοκύκλωσης (η οποία προκύπτει με επίλυση της [27] για $I=0$ και $V_d=V_{OC}$)

I_{SC} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης (μπορούμε προσεγγιστικά να θεωρήσουμε ότι $I_{SC}=I_{sun}$).

1.16.Χαρακτηριστική Ρεύματος- Τάσης φωτοβολταϊκού στοιχείου

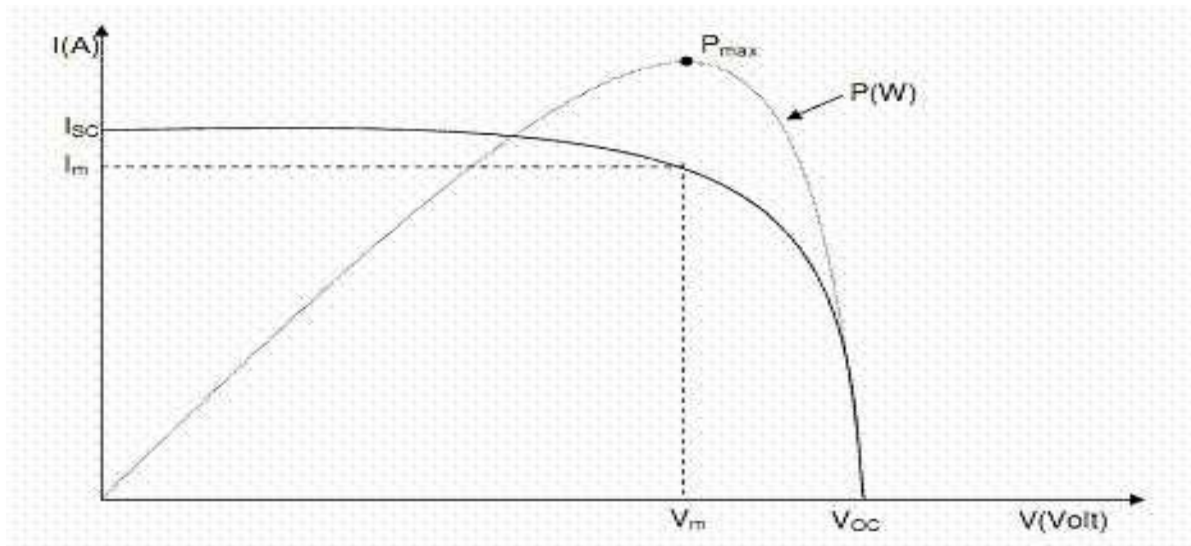
1.16.1. Χαρακτηριστική I-V



Σχήμα 35 Χαρακτηριστική I-V

Η παραπάνω γραφική παράσταση αποτελεί χαρακτηριστική ρεύματος- τάσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Στο παραπάνω σχήμα μπορεί να παρατηρηθεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και η τάση βραχυκύκλωσης V_{oc} .

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρείται το σημείο στο οποίο η ισχύς έχει τη μέγιστη τιμή της, το οποίο βρίσκεται στο λεγόμενο “γόνατο” της καμπύλης (Maximum Power Point (MPP)). Η μέγιστη ισχύς P_m αντιστοιχεί σε ένα μοναδικό ζεύγος τιμών της τάσης και του ρεύματος ($P_m = U_m \cdot I_m$). [47]



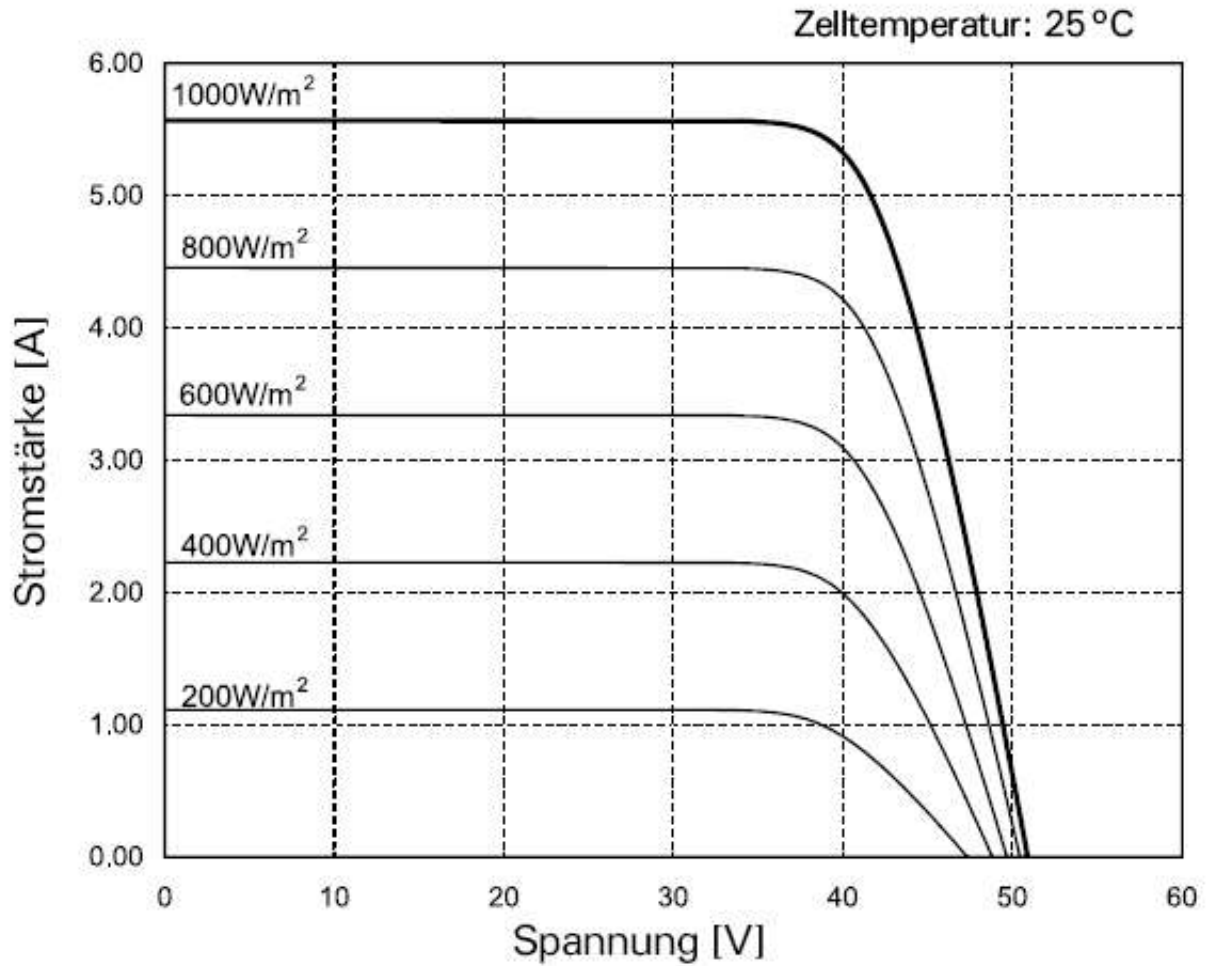
Σχήμα 36 Maximum Power Point (MPP)

Πηγή: <http://reviews.in.gr/agro/environment/article/?aid=1231113332>

1.16.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την χαρακτηριστική I-V

1.16.2.1. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

Στην περίπτωση την οποία η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} μεταβάλλεται γραμμικά ως προς την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η τάση ανοικτοκύκλωσης V_{oc} μεταβάλλεται ελάχιστα και η αντίσταση σειράς R_s μένει σχεδόν σταθερή. Στο παρακάτω σχήμα, παρατηρούνται για πέντε διαφορετικές τιμές της ηλιακής έντασης και τις αντίστοιχες καμπύλες με τις γραμμικές μεταβολές του ρεύματος. [11]



Σχήμα 37 Καμπύλες ηλιακής έντασης

Πηγή: <http://schoenau-ag.de/gr/produkte/pv-module/panasonic/sanyo-hit-215-214-210/>

Το ρεύμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$I = I_{sun} - I_s \left(e^{(V_d * q) / (k * T)} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad [1.33]$$

Επιπλέον, το σημείο μέγιστης ισχύος δίνεται από τη σχέση:

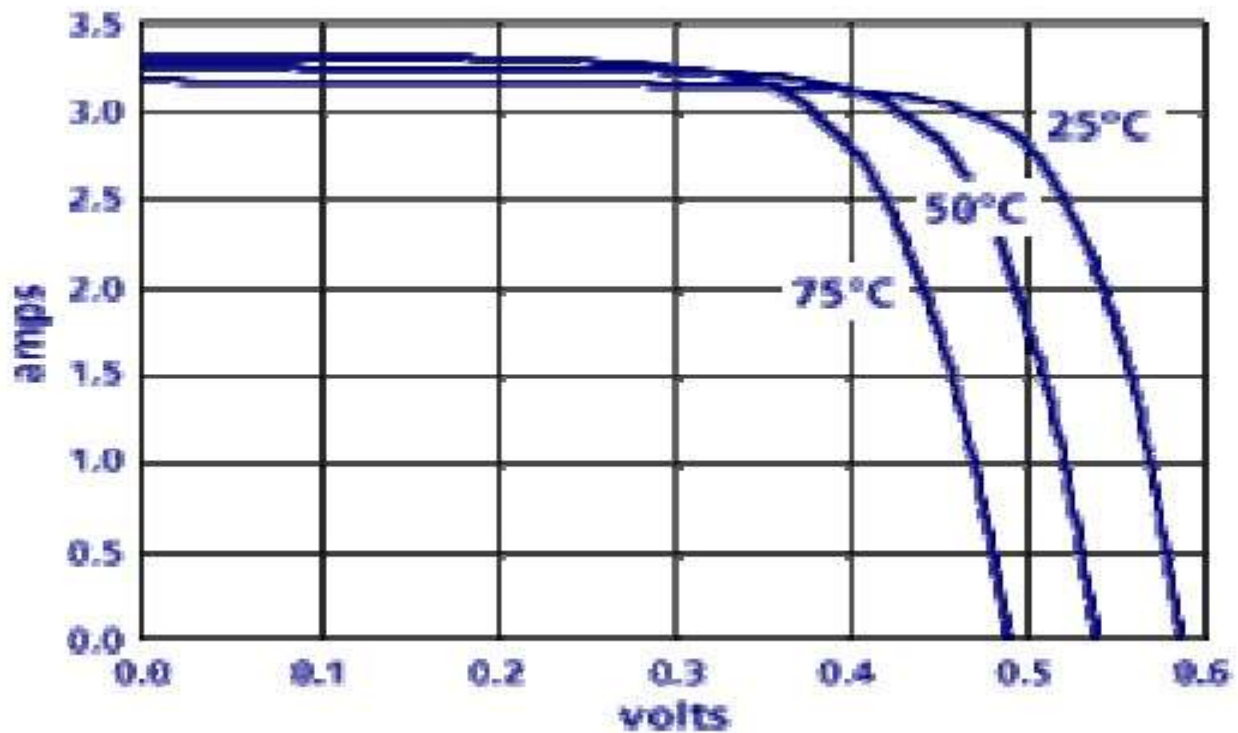
$$P_m = U_m * I_m \quad [1.34]$$

Οπότε με τα παραπάνω δεδομένα και εάν υποθέσουμε ότι η αντίσταση σειράς $R_s = 0$ για $V_d = V$ έχουμε την παρακάτω εξίσωση για το ρεύμα στο γόνατο :

$$I_m = I_{sun} - I_s * \left(e^{\frac{P_m * q}{I_m * k * T}} - 1 \right) - \frac{P_m}{I_m * R_p} \quad [1.35]$$

1.16.2.2. Η θερμοκρασία

Όταν υπάρχει μεταβολή της θερμοκρασίας στο φωτοβολταϊκό κύτταρο τότε το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} αυξάνεται ελάχιστα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επιπλέον, η τάση ανοικτοκύκλωσης V_{oc} μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία γεγονός που οφείλεται στην μεταβολή των χαρακτηριστικών αγωγής της διόδου. Η τιμή του φωτορεύματος I_{sun} με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται ελαφρά λόγω της αύξησης των φορέων στο φωτοβολταϊκό στοιχείο.[11]



Σχήμα 38 Καμπύλες θερμοκρασίας

Πηγή: http://gneng.blogspot.gr/p/blog-page_19.html

1.16.2.3. Άλλοι Παράγοντες

Τέλος, υπάρχουν και κάποιοι άλλοι παράγοντες, οι οποίοι μεταβάλλουν την χαρακτηριστική I-V αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι αντιστάσεις R_s και R_p , οι οποίες μεταβάλλουν σε μικρό βαθμό την καμπύλη I-V. Όσο η τιμή της αντίστασης σειράς R_s αυξάνεται, η περιοχή των τάσεων περιορίζεται (με σταθερό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}). Ενώ στην περίπτωση μείωσης της παράλληλης αντίστασης R_p προκαλείται έντονη κλίση του οριζόντιου τμήματος της καμπύλης (μείωση του ρεύματος κοντά στην τάση βραχυκύκλωσης V_{oc}).

Τέλος, το ανάστροφο ρεύμα κόρου επηρεάζει την χαρακτηριστική I-V καθώς η αύξησή του προκαλεί μείωση της τάσης βραχυκύκλωσης V_{oc} . [11]

1.17. Φωτοβολταϊκά πλαίσια και Συλλέκτες

Το πλήθος των φωτοβολταϊκών στοιχείων μέσα σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ομαδοποιούνται και συνδέονται κατάλληλα δημιουργώντας τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Ο συνδυασμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά και παράλληλα αποτελεί τον φωτοβολταϊκό συλλέκτη. Η τάση, η οποία παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο αντιστοιχεί σε 0,6 V. Οι συνδέσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων γίνονται σε σύνδεση σειράς έτσι ώστε η τάση η οποία παράγεται να είναι μεγαλύτερη.

Επιπλέον, πρέπει να υπάρχει και μια παράλληλη σύνδεση ανάμεσα στα φωτοβολταϊκά πλαίσια έτσι ώστε αντίστοιχα να αυξηθεί και το ρεύμα και αν παρουσιαστεί βλάβη σε κάποιο φωτοβολταϊκό στοιχείο η ισχύς που παράγεται στο σύστημα να μην είναι δυνατόν να μηδενιστεί. Με τον τρόπο αυτό τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παρατάσσονται σε σειρά και τοποθετούνται σε μεταλλική βάση στήριξης.

1.17.1. Σύνδεση σε σειρά

Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά δίνει τάση, η οποία εκφράζεται από το άθροισμα των τάσεων κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το ρεύμα σε μια εν σειρά συνδεσμολογία έχει την ίδια τιμή σε όλα τα σημεία της σύνδεσης, ίδιο με αυτό που παράγεται από το κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο.

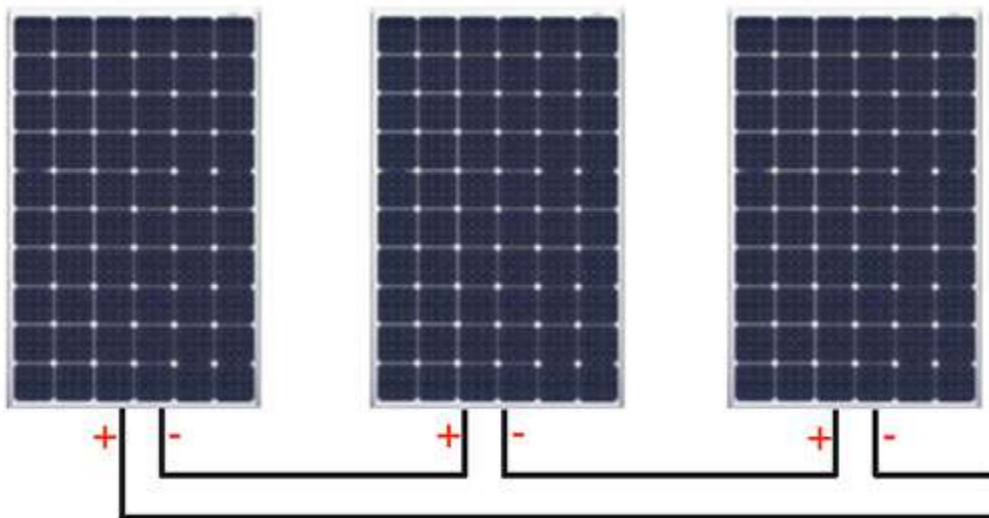
Για μια συνδεσμολογία σε σειρά ισχύει για το ρεύμα I η σχέση:

$$I = I_1 = I_2 \quad [1.36]$$

Και για την τάση U ισχύει η σχέση:

$$U = U_1 + U_2 \quad [1.37]$$

Στην παρακάτω εικόνα παρατηρείται μια σύνδεση τριών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά.



Σχήμα 39 Συνδεσμολογία σε σειρά

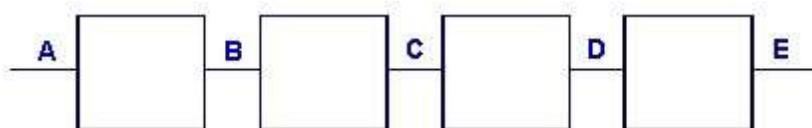
Πηγή: <https://www.solarquotes.com.au/panels/how-do-they-work/>

Στην περίπτωση την οποία N_s φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά είναι ίδια, η τάση στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$U_o = N_s * U_{\pi} \quad [1.38]$$

Όπου N_s , ο αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά και U_{π} , η τάση ενός πλαισίου.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η εν σειρά συνδεσμολογία τεσσάρων φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και η I-V χαρακτηριστική τους. [49]



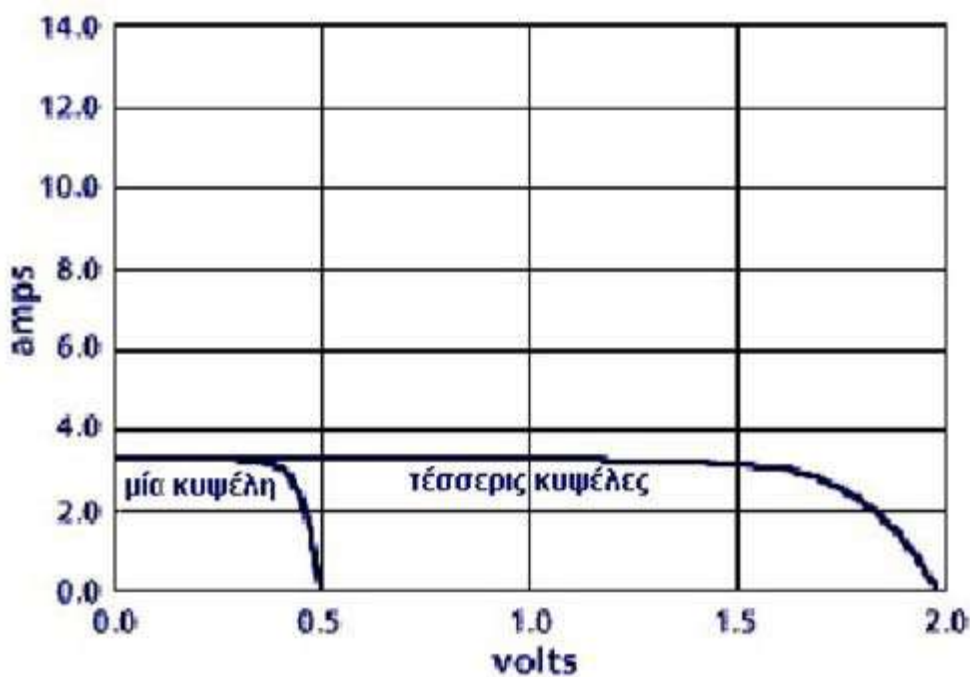
τάση μεταξύ A και B = 0.5 volts

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 40 Τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά [48]

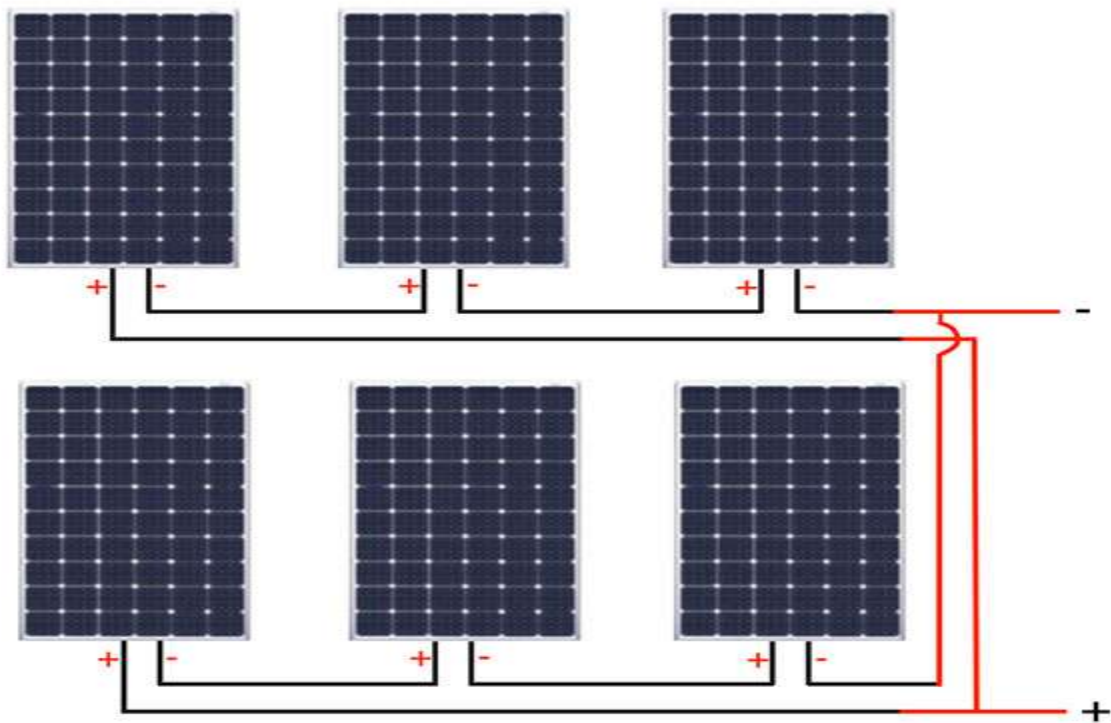
1.17.2. Παράλληλη σύνδεση

Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων παράλληλα μας δίνει υψηλότερο ρεύμα, ενώ η τάση είναι η ίδια σε κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο. Για μια παράλληλη συνδεσμολογία ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις ρεύματος και τάσης:

$$I = I_1 + I_2 \quad [1.39]$$

$$U = U_1 = U_2 \quad [1.40]$$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια παράλληλη συνδεσμολογία έξι φωτοβολταϊκών συλλεκτών.



Σχήμα 41 Παράλληλη συνδεσμολογία

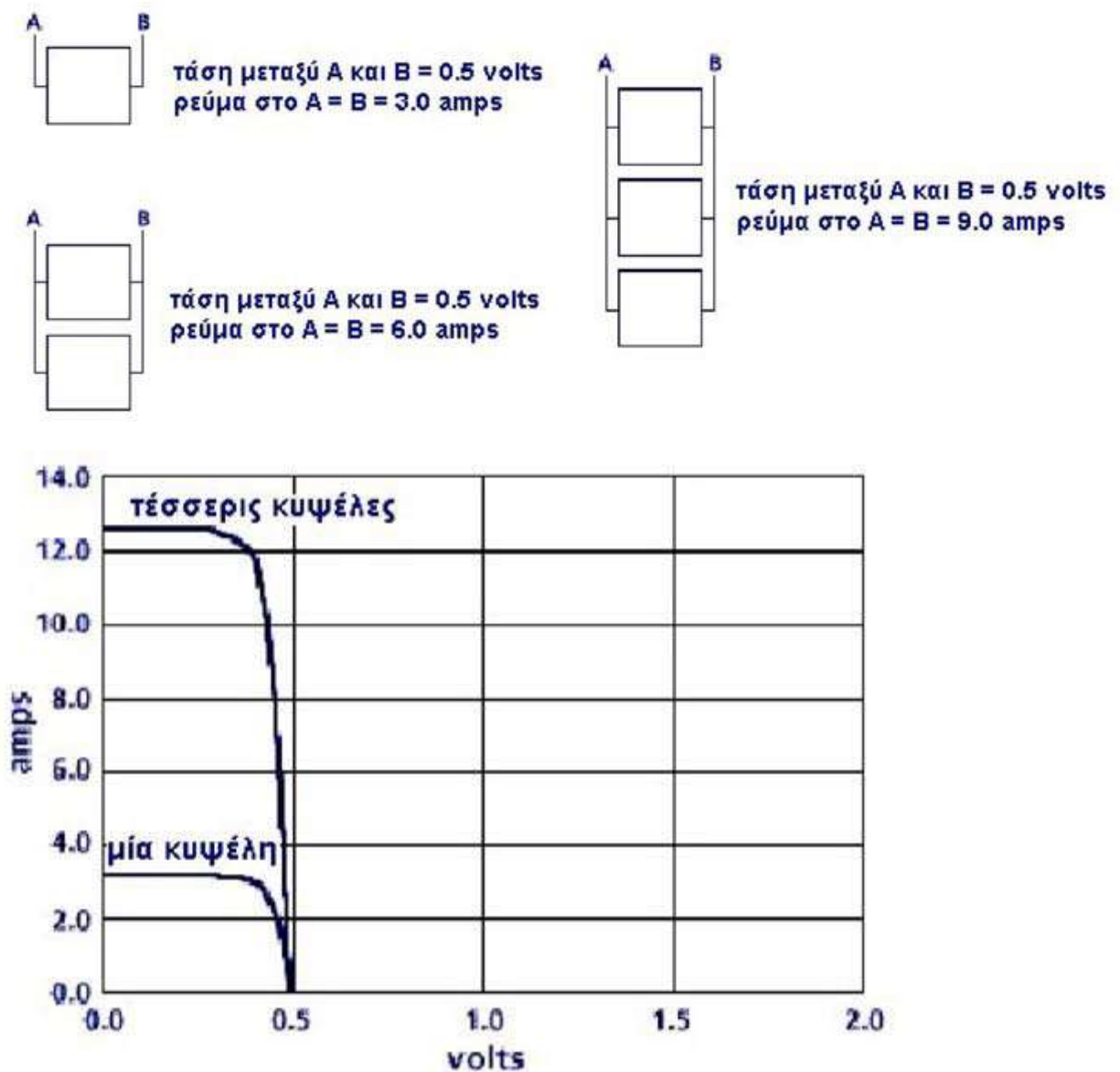
Πηγή: <https://www.solarquotes.com.au/panels/how-do-they-work/>

Το ρεύμα σε ένα φωτοβολταϊκό συλλέκτη , ο οποίος αποτελείται από N_p ίδια παράλληλα φωτοβολταϊκά στοιχεία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$U_o = N_p * I_{\pi} \quad [1.41]$$

Όπου N_p , ο αριθμός των πλαισίων, τα οποία είναι συνδεδεμένα παράλληλα και I_{π} το ρεύμα ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται η παράλληλη συνδεσμολογία τεσσάρων φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και η I-V χαρακτηριστική τους. [49]



Σχήμα 42 Τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα παράλληλα [48]

1.17.3. Άλλες Συνδέσεις

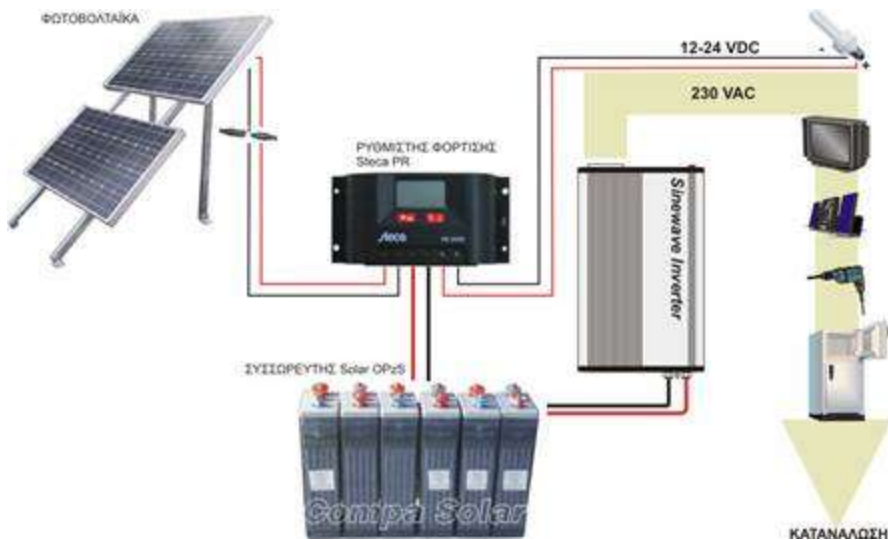
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να συνδεθούν και με κάποιους άλλους πιο περίπλοκους τρόπους, οι οποίοι θα αναφερθούν περιληπτικά. Ένας τρόπος είναι η σύνδεση σε διατάξεις αθροιστικές σταυρωτού δεσμού (Total Crossed Tied, TCT), η οποία προκύπτει από την SP διάταξη κάνοντας σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σταυρό σε κάθε σειρά του σημείου συνάντησης. Ένας επιπλέον τρόπος είναι σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης (bridge-linked) κατά την οποία όλα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αλληλοσυνδέονται με μια γεφυρωτή σύνδεση. Τέλος, υπάρχει και η σύνδεση σε διάταξη κυψέλης (honeycomb). [49]

1.18.Το Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Ένα σύνολο φωτοβολταϊκών πλαισίων όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα συνδέεται σε σειρά επάνω σε μια συνήθως επίπεδη επιφάνεια, η οποία μπορεί να είναι είτε σταθερή είτε περιστρεφόμενη. Οι επιμέρους σειρές συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα αυξάνοντας το συνολικό ρεύμα. Το σύνολο των φωτοβολταϊκών πλαισίων αυτών αποτελεί το φωτοβολταϊκό σύστημα.

Εκτός του συνόλου των φωτοβολταϊκών πάνελ ένα ολοκληρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα απαρτίζεται και από άλλα στοιχεία, τα οποία υπάρχουν ή όχι ανάλογα με τον τύπο του φωτοβολταϊκού συστήματος, δηλαδή εάν είναι αυτόνομο ή διασυνδεδεμένο (έννοιες που θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα).

Ένα από τα στοιχεία αυτά είναι ο μετατροπέας (inverter), ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο για τη σύνδεση με το δίκτυο και τη χρησιμοποίησή του από συσκευές. Επιπλέον, άλλα στοιχεία είναι οι συσσωρευτές, οι οποίοι αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια, οι ρυθμιστές της τάσης και του ρεύματος καθώς και κάποιες διατάξεις ελέγχου. Στη συνέχεια θα αναφερθούν τα επιμέρους αυτά στοιχεία πιο αναλυτικά.



Σχήμα 43 Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Πηγή: <http://www.solarwind.gr/?p=71>

1.18.1. Μετατροπείς

Οι μετατροπείς είναι ηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες κάνουν προσαρμογή της τάσης που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα στην τάση του ηλεκτρικού συστήματος αποθήκευσης καθώς και στην τάση του πιθανού εξυπηρετούμενου φορτίου. Οι μετατροπείς αυτοί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- ✚ Στους μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC-DC Converter)
- ✚ Στους μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή (AC-DC Converter)
- ✚ Στους μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη (DC-AC Inverter)

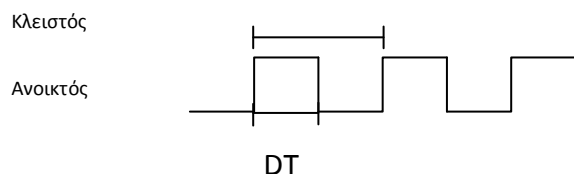
1.18.1.1. Μετατροπέας DC- DC (Converter)

Ο μετατροπέας (converter) συνεχούς τάσεως σε συνεχή κάνει προσαρμογή της τάσης του φωτοβολταϊκού στην τάση την οποία δέχεται ο συσσωρευτής ούτως ώστε να τον προστατεύσει από συνθήκες υπέρτασης. Στον μετατροπέα DC-DC υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης ενός μικροελεγκτή, ο οποίος υποχρεώνει το σύστημα να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, το οποίο καθορίζεται από τις υπάρχουσες καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία, επίπεδα ηλιοφάνειας). Ο ελεγκτής αυτός ονομάζεται ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker (MPPT)). Στην περίπτωση την οποία ένα φωτοβολταϊκό σύστημα διαθέτει συσσωρευτές, λειτουργεί πολύ κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος, το πιο πολύ μέρος της ημέρας, οπότε δεν απαιτείται ρυθμιστής ισχύος.

Η αρχή λειτουργίας ενός ελεγκτή MPPT περιλαμβάνει μια γεννήτρια φωτοβολταϊκού, έναν μετατροπέα ισχύος με MPPT και έναν αντιστάτη σαν φορτίο . Ο MPPT αυξομειώνει την τάση στην πλευρά του φωτοβολταϊκού ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία έτσι ώστε το φωτοβολταϊκό να αναγκάζεται να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος του ενώ στην έξοδο παρέχεται η ονομαστική τάση του φορτίου. Η μέση τιμή της τάσης στην έξοδο είναι εξαρτώμενη από το ποσοστό του χρόνου, D , όπου ο ηλεκτρονικός διακόπτης (τρανζίστορ) , ο οποίος ελέγχει την τάση στο φωτοβολταϊκό, είναι κλειστός. Έτσι αποδεικνύεται ότι:

$$\frac{V_{LOAD}}{V_{PV}} = \frac{D}{1 - D} \quad [1.42]$$

όπου $D = \frac{DT}{T}$



1.18.1.2. Μετατροπέας AC-DC (Converter)

Ο μετατροπέας (converter) της εναλλασσόμενης τάσεως σε συνεχή χρησιμοποιείται σε ένα υβριδικό σύστημα, μετατρέποντας την τάση, η οποία παράγεται π.χ. από την ανεμογεννήτρια ή το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος AC σε συνεχές DC.

1.18.1.3. Μετατροπέας DC-AC (Inverter)

Ο μετατροπέας (inverter) συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο είναι απαραίτητος στα φωτοβολταϊκά συστήματα , ειδικά στα διασυνδεδεμένα, λόγω της σύνδεσής τους με το δίκτυο. Ο inverter χρησιμοποιείται κατά κόρον σε εφαρμογές όπου από πηγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσεως γίνεται μετατροπή για χρήση από καταναλωτές εναλλασσόμενης τάσης όπως στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο της ΔΕΗ αλλά και στα αυτόνομα για χρήση του από συσκευές.

Οι inverters αποτελούνται από μια σειρά ηλεκτρικών διακοπών, οι οποίοι συνδυαστικά κατά τη λειτουργία τους δημιουργούν μια σειρά τετραγωνικών παλμών ορθών και ανεστραμμένων διαδοχικά (Inversion).

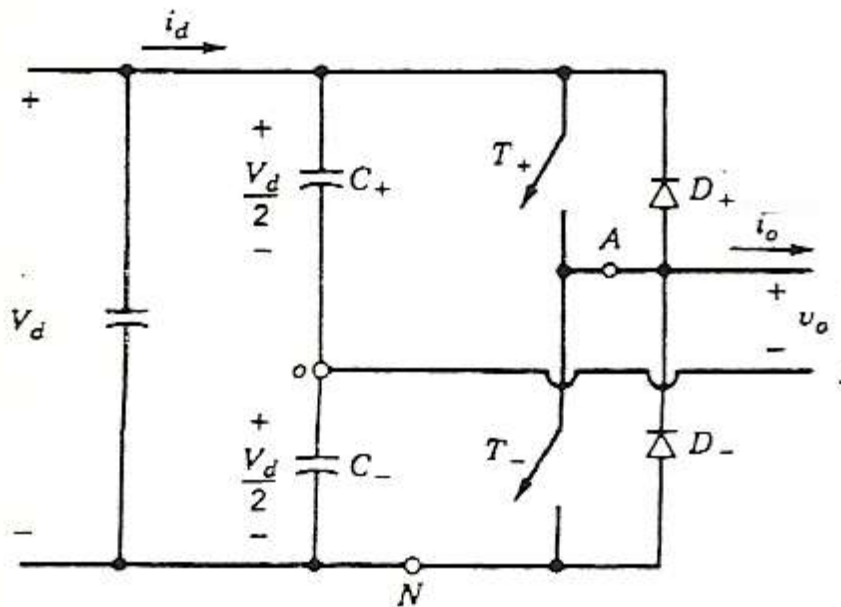
Οι inverters χωρίζονται σε αυτούς τους οποίους η είσοδός τους είναι μια πηγή τάσης DC και σε αυτούς που η είσοδός τους είναι μια πηγή ρεύματος DC. Όσον αφορά τους inverters πηγής τάσης μπορούν να διακριθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Inverters με διαμόρφωση εύρους παλμών:** στους inverters αυτούς η τάση εξόδου διακρίνεται από σταθερό πλάτος, ούτως ώστε ο inverter να είναι ικανός να ελέγχει τη συχνότητα και το πλάτος της εξόδου του. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών της εξόδου.
- **Inverters τετραγωνικής κυματομορφής:** στην περίπτωση των inverters τετραγωνικής κυματομορφής γίνεται έλεγχος του πλάτους της εισόδου ώστε να μπορέσει να ελεγχθεί το πλάτος της εξόδου. Η τάση εξόδου του inverter έχει τετραγωνική μορφή.
- **Inverters με απαλοιφή τάσης:** στους inverters απαλοιφής τάσης γίνεται έλεγχος της συχνότητας της τάσης εξόδου καθώς και το πλάτος της. Η τεχνική αυτή είναι ένας συνδυασμός των παραπάνω ενώ λειτουργεί μόνο με μονοφασικούς αντιστροφείς και όχι με τριφασικούς.

Επιπλέον, γίνεται μια κατηγοριοποίηση των inverter σε μονοφασικούς ημιγέφυρας, σε μονοφασικούς πλήρους γέφυρας και σε τριφασικούς. Στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνται περισσότερο οι αντιστροφείς πλήρους γέφυρας.

Μονοφασικοί αντιστροφείς ημιγέφυρας

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται ένας μονοφασικός αντιστροφέας ημιγέφυρας, ο οποίος όπως φαίνεται στα άκρα της εισόδου συνεχούς τάσεως συνδέονται σε σειρά δύο πυκνωτές. Στα άκρα του κάθε πυκνωτή αναπτύσσεται μια τάση, η οποία ισούται με $V_d/2$. Για να εξακολουθήσει να παραμένει σταθερό το δυναμικό στο σημείο 'ο' σε σχέση με το δυναμικό 'Ν' στον αγωγό πρέπει οι χωρητικότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται να είναι αρκετά μεγάλες.[25][34]

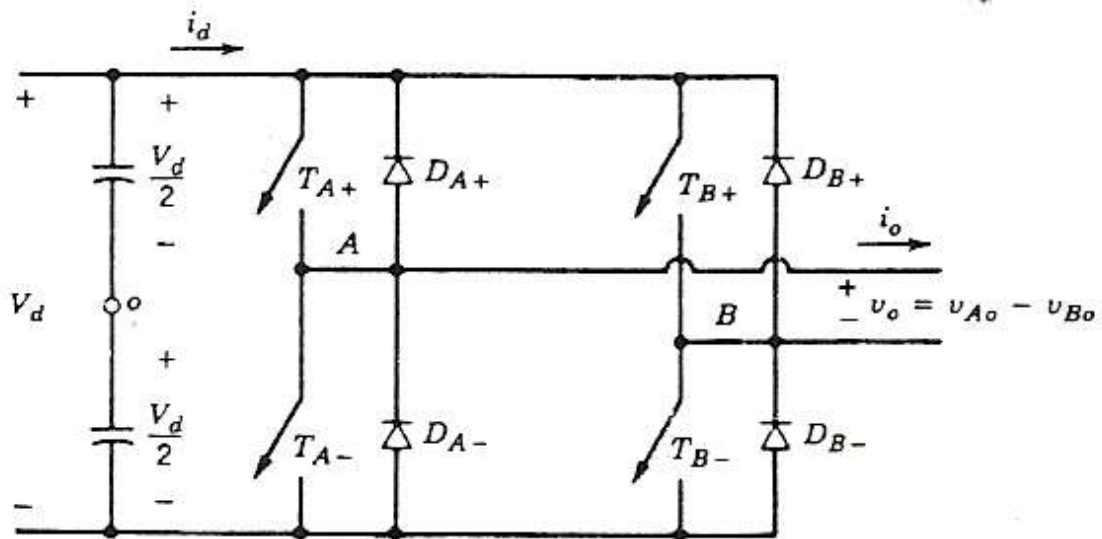


Σχήμα 44 Μονοφασικός αντιστροφέας με μισή γέφυρα [57]

✚ Μονοφασικός αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται ένας μονοφασικός αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα, ο οποίος περιλαμβάνει δύο αντιστροφείς με μισή γέφυρα και χρησιμοποιείται κατά κόρον σε διατάξεις όπου οι απαιτήσεις σε ισχύ είναι αρκετά μεγάλες. Ενώ η τάση εισόδου DC είναι ίδια με αυτή του μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας, η μέγιστη τάση της εξόδου του είναι διπλάσια.

Έτσι αποδεικνύεται ότι με την ίδια ισχύ, έχουμε το μισό ρεύμα εξόδου και ρεύμα διακοπών από ότι στον μονοφασικό αντιστροφέα ημιγέφυρας. Στον μονοφασικό αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα στην περίπτωση που τα επίπεδα της ισχύος είναι υψηλά υπάρχει σημαντικό πλεονέκτημα, καθώς απαιτούνται πιο λίγοι παραλληλισμοί ημιαγωγικών στοιχείων. [25][34]

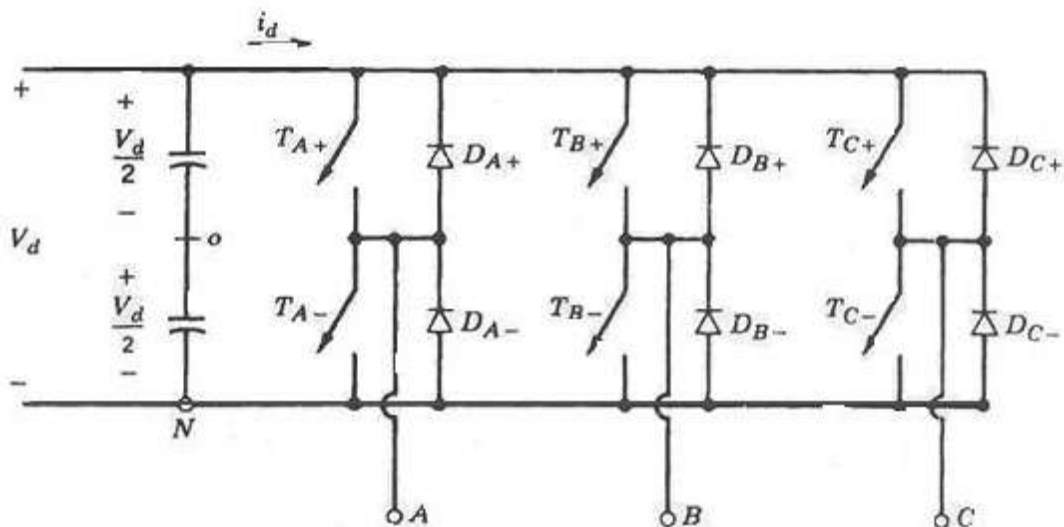


Σχήμα 45 Μονοφασικός αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα [57]

🌈 Τριφασικός αντιστροφέας

Τέλος, στους τριφασικούς αντιστροφείς, παρέχεται μια τριφασική πηγή τάσης ή έντασης, κατά την οποία, το πλάτος, η συχνότητα και η φάση είναι ελεγχόμενες κάθε στιγμή. Οι αντιστροφείς αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές μέσης και υψηλής ισχύος. Οι τριφασικοί αντιστροφείς χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε τριφασικές εφαρμογές, λόγω του ότι η τροφοδοσία ενός τριφασικού φορτίου με τρεις ξεχωριστούς μονοφασικούς αντιστροφείς είναι πολύπλοκη.

Όπως παρατηρείται και στο σχήμα που ακολουθεί ο τριφασικός αντιστροφέας απαρτίζεται από τρία τμήματα, ένα για κάθε φάση. Κάθε τμήμα είναι ίδιο με αυτό του αντιστροφέα ενός τμήματος.



Σχήμα 46 Τριφασικός αναστροφέας [33]

Να σημειωθεί ότι η ΔΕΗ επιβάλλει τη σύνδεση των inverters σε τριφασικό σύστημα όταν οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις ξεπερνούν τα 5kW, ενώ όταν οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις ξεπερνούν τα 100kW συνδέονται στο δίκτυο μέσης τάσης της ΔΕΗ. [25][34]

Μια επιπλέον κατηγοριοποίηση των inverters ανάλογα με την τεχνολογία διασύνδεσης των φωτοβολταϊκών πάνελ που χρησιμοποιείται είναι η ακόλουθη:

❖ Κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters)

Οι αντιστροφείς αυτοί παρουσιάζουν τα πιο υψηλά επίπεδα ισχύος από 30-50kW έως 1-2MW. Οι κεντρικοί αντιστροφείς τοποθετούνται σε σταθμούς μεγάλης ισχύος. Επιπλέον, είναι δυνατή η απευθείας σύνδεσή τους στο δίκτυο μέσης τάσης της ΔΕΗ μέσω μετασχηματιστών ανύψωσης 0,4/20kV.

Τα προηγούμενα χρόνια στους αντιστροφείς αυτούς χρησιμοποιούνταν θυρίστορ, τα οποία σήμερα έχουν αντικατασταθεί από τρανζίστορ IGBT με πιο υψηλές συχνότητες μεταγωγής, τα οποία με τη βοήθεια της ανάπτυξης των τεχνικών διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM), οδήγησαν τους κεντρικούς αντιστροφείς στην απόδοση ημιτονοειδών ρευμάτων στην έξοδο και στην μείωση της χρήσης φίλτρων.

Οι κεντρικοί inverters απαιτούν τη χρήση καλωδίων DC λόγω των εισόδων DC που περιλαμβάνουν και του μεγάλου αριθμού φωτοβολταϊκών πάνελ που πρέπει να συνδεθούν στην είσοδό τους. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένας κεντρικός αντιστροφέας της εταιρίας SMA. [39]



Σχήμα 47 Κεντρικός αντιστροφέας [64]

❖ Αντιστροφείς κλάδων ή στοιχειοσειρών (string inverters)

Οι αντιστροφείς κλάδων χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε φωτοβολταϊκούς σταθμούς μικρής έως και μέσης ισχύος. Οι αντιστροφείς κλάδων λειτουργούν μέσω της παράλληλης σύνδεσης ενός πλήθους κλάδων (strings) σε αντίστοιχες εισόδους του αντιστροφέα.

Οι αντιστροφείς αυτοί μπορούν να συνδεθούν μονοφασικά και τριφασικά, ενώ συνδέονται με ή χωρίς μετασχηματιστή. Επιπλέον, είναι ικανοί να συνδεθούν με ένα υψηλό αριθμό φωτοβολταϊκών πάνελ αρκεί να μην ξεπερνούν τις μέγιστες ρυθμίσεις ασφαλείας του συστήματος. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένας αντιστροφέας κλάδων. [39]



Σχήμα 48 Αντιστροφέας κλάδων [64]

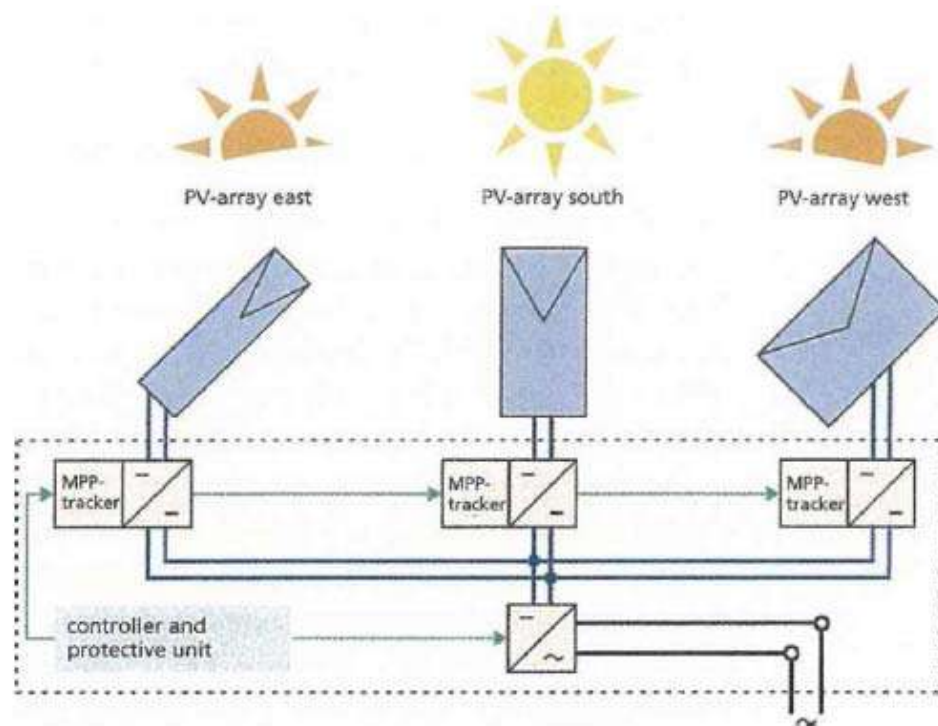
❖ Αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων ή στοιχειοσειρών (multi-string inverters)

Οι αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων ή στοιχειοσειρών χρησιμοποιούνται στην περίπτωση όπου είναι αναγκαία η σύνδεση διαφορετικών φωτοβολταϊκών πάνελ (πάνελ διαφορετικής ονομαστικής ισχύος, κατασκευαστή κ.τ.λ.). Στη σύνδεση αυτή κάθε είσοδος λειτουργεί ανεξάρτητα από τις άλλες εισόδους καθώς έχει ατομικούς ελεγκτές μέγιστης ισχύος και ατομικούς μετατροπείς.

Επιπλέον, η χρήση των αντιστροφέων πολλαπλών κλάδων ή στοιχειοσειρών είναι πιο διαδεδομένη σε περιπτώσεις όπου η διαθεσιμότητα των φωτοβολταϊκών πάνελ επιβάλλει τη σύνδεση διαφορετικών φωτοβολταϊκών πάνελ ή όταν διαφοροποιούνται τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης, τα οποία επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας (π.χ. κλίση του πάνελ, προβλήματα σκίασης κ.τ.λ.). Οι αντιστροφείς τέτοιου τύπου είναι περιορισμένοι στην παραγωγή τους λόγω της ιδιαίτερης χρήσης τους και ένα παράδειγμα τέτοιου αντιστροφέα παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.[39]



Σχήμα 49 Αντιστροφέας πολλαπλών κλάδων [64]



Σχήμα 50 Πολλαπλός αναστροφέας για συστήματα με διαφορετικούς προσανατολισμούς [33]

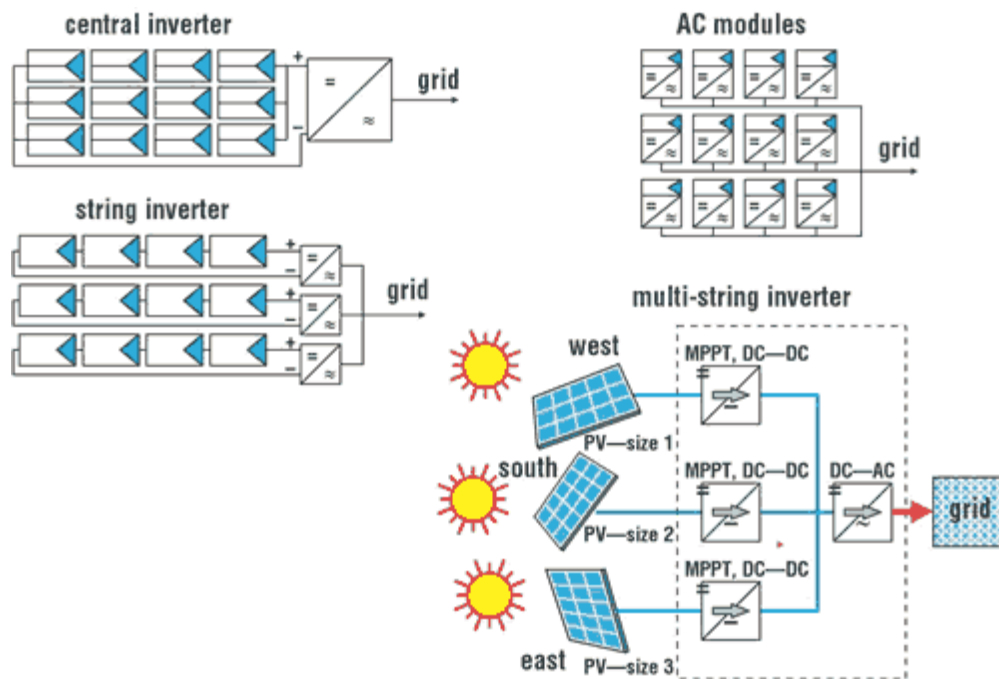
❖ **Αντιστροφέας με ενσωμάτωση σε φωτοβολταϊκά πάνελ (Module integrated inverters)**

Οι αντιστροφέας με ενσωμάτωση σε φωτοβολταϊκά πάνελ χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις χαμηλής ισχύος έως 300W. Οι αντιστροφέας αυτοί συνδέονται στην είσοδό τους με ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη βέλτιστη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάρκου αφού ο έλεγχος γίνεται σε κάθε πάνελ χωριστά. Οι αντιστροφέας αυτοί χρησιμοποιούνται περισσότερο σε μικρές οικιακές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις όπου υπάρχουν προβλήματα σκίασης. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται ένας αντιστροφέας αυτού του τύπου.[39]



Σχήμα 51 Αντιστροφέας για ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ [38]

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται όλες οι τεχνολογίες που περιγράψαμε παραπάνω σχηματικά.



Σχήμα 52 Τεχνολογίες αντιστροφών [38]

1.18.2. Συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό τη χρησιμοποίησή της μεταγενέστερα σε χρονικές περιόδους που δεν παράγεται ενέργεια (π.χ. τη νύχτα). Για την αποθήκευση της ενέργειας αυτής είναι απαραίτητη η εγκατάσταση μιας συστοιχίας ηλεκτρικών συσσωρευτών (μπαταρίες), οι οποίοι είναι μια πολύ καλή λύση σχετικά με την πυκνότητα αποταμιευμένης ενέργειας ανά μονάδα βάρους και όγκου της διάταξης. Τα πιο συνηθισμένα είδη συσσωρευτών είναι αυτά του μολύβδου, του νικελίου-καδμίου, ενώ ευρέως τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται και αυτός του μολύβδου –θεικού οξέως ($\text{Pb}/\text{H}_2\text{SO}_4$).

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που εκφράζουν και τις δυνατότητες ενός συσσωρευτή είναι η χωρητικότητά του C , η οποία εκφράζει το ηλεκτρικό φορτίο που αποθηκεύει στο εσωτερικό του με τη μορφή χημικής ενέργειας, και η ονομαστική τάση στους πόλους του. Στην περίπτωση της σύνδεσης των συσσωρευτών σε σειρά η τάση τους θα είναι το άθροισμα των επιμέρους τάσεων, ενώ η χωρητικότητά τους θα είναι ίση με τη χωρητικότητα του ενός. Στην περίπτωση της παράλληλης σύνδεσης τους η τάση θα είναι ίση με την ονομαστική και θα είναι κοινή για όλους τους συσσωρευτές, ενώ η χωρητικότητα θα είναι το πολλαπλάσιο της ονομαστικής χωρητικότητας C των συσσωρευτών.

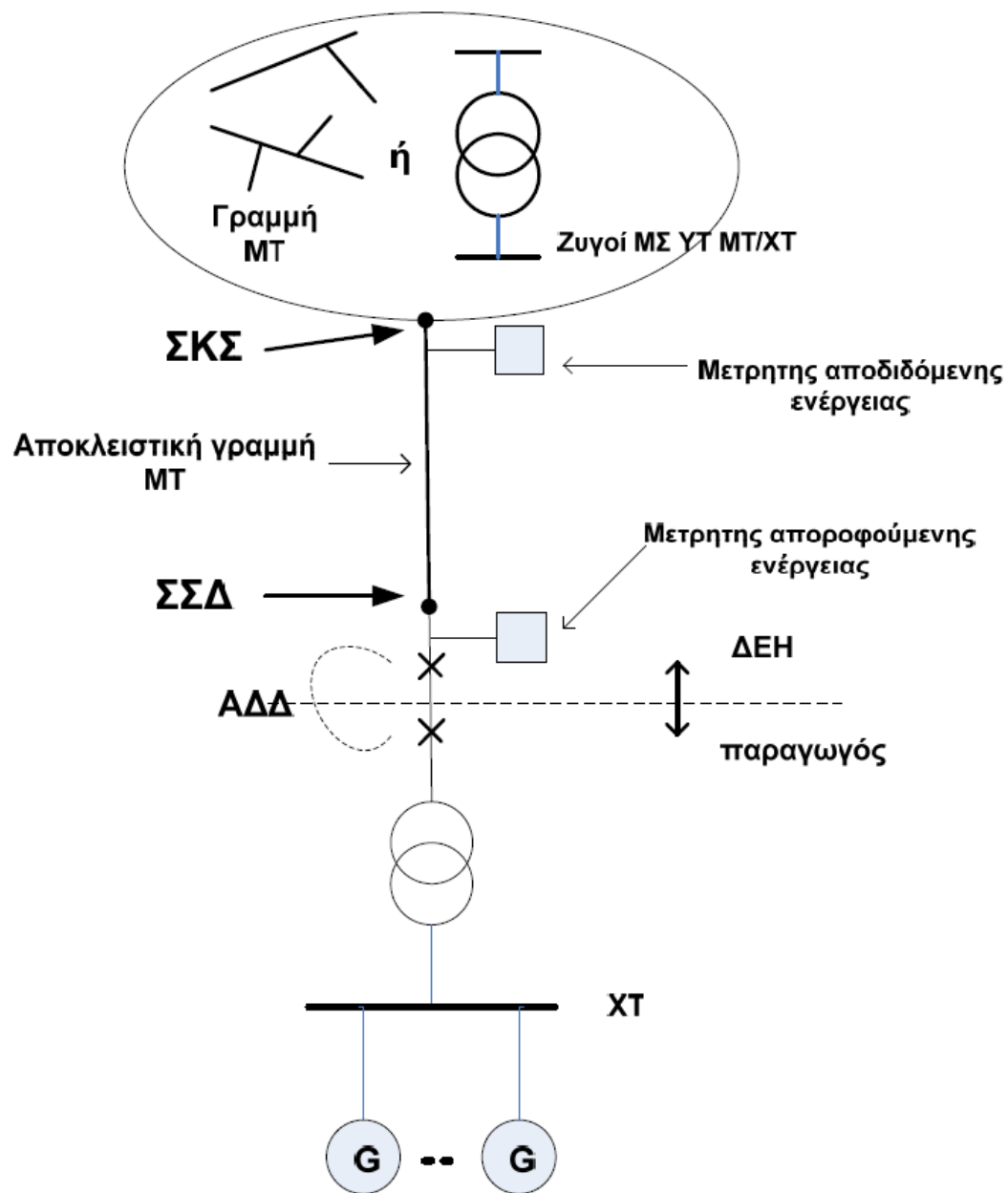
Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στη φόρτιση των συσσωρευτών, η οποία επιτυγχάνεται με εφαρμογή συνεχούς τάσης στους πόλους, η οποία γίνεται με χαμηλό ρεύμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο κατασκευαστής είναι αυτός ο οποίος δίνει το ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή. Σημασία έχει επίσης ο συσσωρευτής να μην ταλαιπωρείται με απότομες εκφορτίσεις, καθώς επίσης δεν πρέπει να υπάρχει παρατεταμένη φόρτιση σε υψηλή τάση στον συσσωρευτή (overcharging), καθώς ούτε και εκφόρτιση κάτω από ένα όριο (overdischarging).

Σε ένα ολοκληρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα απαραίτητη είναι και η εγκατάσταση ενός ελεγκτή φόρτισης ή ρυθμιστή φόρτισης. Ο ελεγκτής φόρτισης είναι μια ηλεκτρονική διάταξη, η οποία κάνει διαρκή έλεγχο σε όλη τη διάρκεια φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή. Εάν υπάρχει ενδεχόμενο υπερφόρτισης τότε ο ελεγκτής απομονώνει το σύστημα αποθήκευσης από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπου ακολουθείται από σταδιακή ελάττωση της στάθμης του ηλεκτρολύτη. Από την άλλη στην περίπτωση υπερεκφόρτισης, ο ελεγκτής φόρτισης προχωράει σε απομόνωση του συσσωρευτή από την κατανάλωση, η οποία επηρεάζει τον χρόνο ζωής του συσσωρευτή. Τέλος, οι ελεγκτές φόρτισης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στους παράλληλους ελεγκτές φόρτισης, των οποίων η μόνη πηγή ενέργειας είναι το φωτοβολταϊκό, και στους ελεγκτές φόρτισης σειράς, οι οποίοι δέχονται ενέργεια από οποιαδήποτε πηγή όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες κ.τ.λ. [21]

1.19.Σύνδεση των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο

Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών σταθμών στο δίκτυο της ΔΕΗ πρέπει να πραγματοποιείται βάση κάποιων γενικών αρχών για την αποφυγή προβλημάτων σε άλλους καταναλωτές καθώς και για να είναι δυνατή η συμβατότητα ανάμεσα στο δίκτυο διανομής και στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις των παραγωγών. Έτσι οι σταθμοί παραγωγής απαρτίζονται από συσκευές προστασίας και ρύθμισης της τάσης για τον σωστό έλεγχο του συστήματος.

Ο τρόπος διασύνδεσης μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης διαφέρει από κάποια άλλη λόγω του ότι λαμβάνονται υπ όψιν πολλοί παράγοντες και όχι μόνο η ονομαστική ισχύς του συστήματος. Υπάρχει η οδηγία από τη ΔΕΗ για όσες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις η ισχύς των οποίων ξεπερνά τα 100kW να μην δύναται να συνδεθούν στο δίκτυο χαμηλής τάσης, ενώ για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις των οποίων η ισχύς ξεπερνά τα 20MW να μην δύναται να συνδεθούν στο δίκτυο μέσης τάσης. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη σύνδεσης ενός παραγωγού στο δίκτυο για φωτοβολταϊκή εγκατάσταση που δεν ξεπερνά σε ισχύ τα 100kW.



Σχήμα 53 Τυπική διάταξη σύνδεσης παραγωγού στο δίκτυο [55]

Όπως παρατηρείται στο παραπάνω σχήμα, υπάρχουν μέσα διακοπής του ρεύματος φορτίου και ορατής απόζευξης ούτως ώστε όποτε αυτό απαιτείται από τη ΔΕΗ, ο παραγωγός να μπορεί να απομονώνεται από το δίκτυο. Σε εγκαταστάσεις χαμηλής ισχύος η απαίτηση ορατής απόζευξης γίνεται μέσω του κιβωτίου σύνδεσης και των ασφαλειών της παροχής. Στις εγκαταστάσεις υψηλής ισχύος η διακοπή γίνεται μέσω του αυτόματου διακόπτη διασύνδεσης (ΑΔΔ). Ο ΑΔΔ μπορεί να είναι είτε στην αρμοδιότητα της ΔΕΗ με έξοδα του παραγωγού, είτε στην αρμοδιότητα του παραγωγού με ρυθμίσεις που απαιτούνται από τη ΔΕΗ.

Το Σημείο Σύνδεσης στο Δίκτυο (ΣΣΔ) βρίσκεται στο δίκτυο μέσης τάσης όπου γίνεται η σύνδεση με την έξοδο των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων του παραγωγού. Στο σημείο αυτό γίνεται η εγκατάσταση των διατάξεων μέτρησης της ενέργειας του δικτύου που απορροφάται από τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Η παροχή, η οποία χρησιμοποιείται για την ενέργεια που προσφέρει ο παραγωγός στο δίκτυο και για την απορρόφηση των ιδιοκαταναλώσεων του υποσταθμού του είναι η ίδια. Κατ' επέκταση το ΣΣΔ χρησιμοποιείται σαν όριο για τον διαχωρισμό των αρμοδιοτήτων της ΔΕΗ και του παραγωγού.

Τέλος, το Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ) είναι το σημείο στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις του παραγωγού που μπορεί να συνδεθεί μελλοντικά κάποιος άλλος καταναλωτής ή παραγωγός. Το ΣΚΣ και το ΣΣΔ είναι δυνατόν να ταυτίζονται αλλά δεν είναι και απαραίτητο. Στην περίπτωση που μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση συνδέεται στο δίκτυο μέσης τάσης με αποκλειστική γραμμή, το ΣΚΣ και το ΣΣΔ διαφέρουν. Το ΣΣΔ εγκαθίσταται στο άκρο της γραμμής που είναι πιο κοντά στην φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ενώ το ΣΚΣ εγκαθίσταται στο άλλο άκρο της γραμμής.[56]

1.20.Είδη φωτοβολταϊκών συστημάτων

1.20.1. Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα ονομάζεται το σύστημα το οποίο λειτουργεί αυτοδύναμα χωρίς να συνδέεται με κάποιο ηλεκτρικό δίκτυο για άντληση περισσότερης ενέργειας ή πώληση της υπολειπόμενης παραγόμενης ενέργειας. Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε οικίες, οι οποίες είναι απομακρυσμένες και η σύνδεσή τους με τη ΔΕΗ είναι ασύμφορη ή δεν μπορούν καν να ηλεκτροδοτηθούν, σε γεωργικές ή κτηνοτροφικές μονάδες, οι οποίες είναι απομακρυσμένες από το δίκτυο της ΔΕΗ, σε τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις και αντλητικά συστήματα υδροδότησης, σε κινητές εγκαταστάσεις όπως τροχόσπιτα και πλωτά καθώς και σε αμυντικές ή διαστημικές εφαρμογές.

Στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα απαραίτητη είναι η χρήση συσσωρευτών για την αποθήκευση της ενέργειας και την μελλοντική χρησιμοποίησή της. Η χωρητικότητα των συσσωρευτών καθορίζει και περιορίζει την ενέργεια που θα αποθηκευτεί, όμως συσσωρευτές πολύ μεγάλης χωρητικότητας κοστίζουν πολύ ακριβά. Μια λύση είναι η εγκατάσταση γεννήτριας στο φωτοβολταϊκό σύστημα, η οποία θα τίθεται σε λειτουργία όποτε κρίνεται αναγκαίο. Επιπλέον, απαραίτητα στοιχεία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η φωτοβολταϊκή συστοιχία, ο ελεγκτής φόρτισης των συσσωρευτών καθώς και ο αντιστροφέας DC-AC (inverter). Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται μια οικία, η οποία διαθέτει ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα.[8]

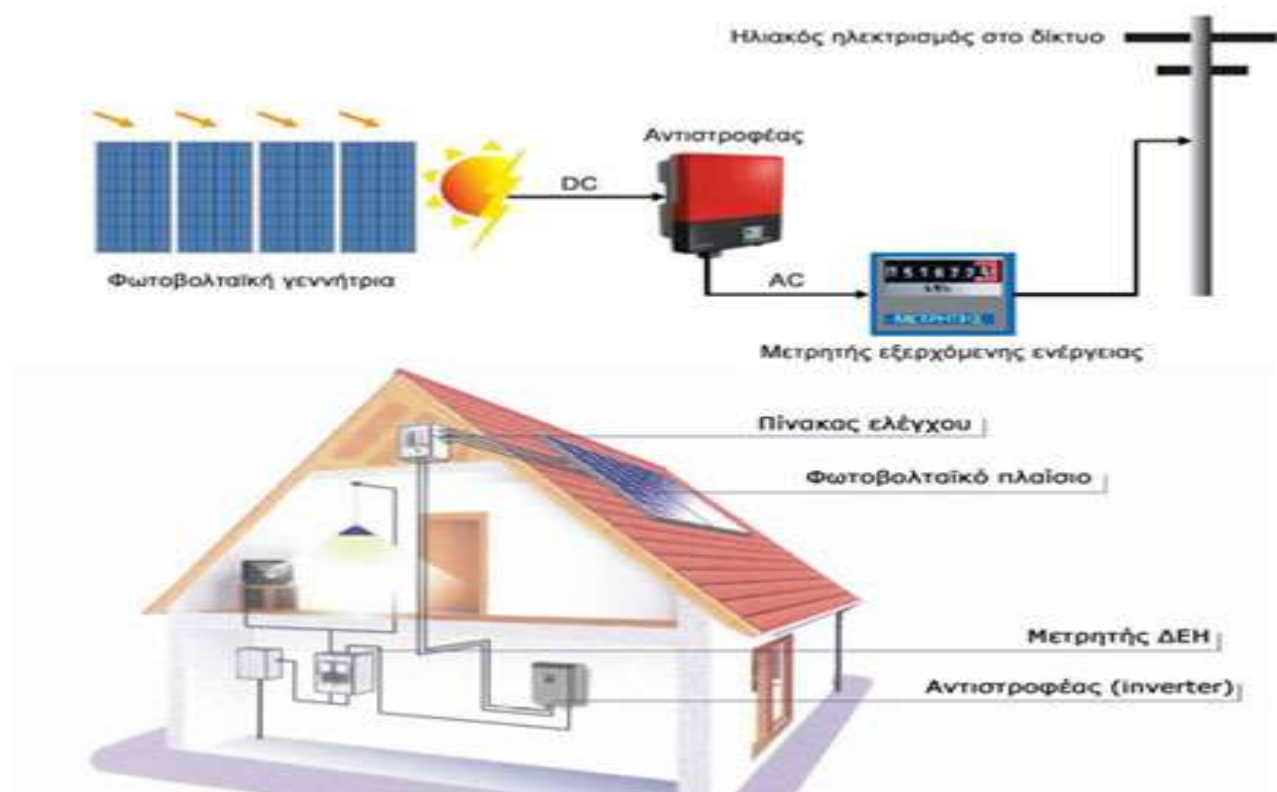


Σχήμα 54 Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα [48]

1.20.2. Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα

Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι το σύστημα το οποίο τροφοδοτεί με την ενέργειά του το δίκτυο. Στην περίπτωση του διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος η ενέργεια πωλείται στο διαχειριστή του συστήματος έναντι ορισμένης τιμής, η οποία καθορίζεται βάση νόμου. Υπάρχει για το λόγο αυτό εγκατεστημένος σε κάθε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ένας διπλός μετρητής, ο οποίος κάνει καταμέτρηση της εισερχόμενης και της εξερχόμενης ενέργειας.

Σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει και η δυνατότητα εγκατάστασης ενός συστήματος αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (UPS) για την κάλυψη αναγκών σε ρεύμα στην περίπτωση διακοπής του ρεύματος. Επιπλέον, απαραίτητος είναι εδώ ο αντιστροφέας (inverter), ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα το οποίο παράγεται σε εναλλασσόμενο για τη σύνδεση με το δίκτυο. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια οικία με εγκατεστημένο ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα.[8]

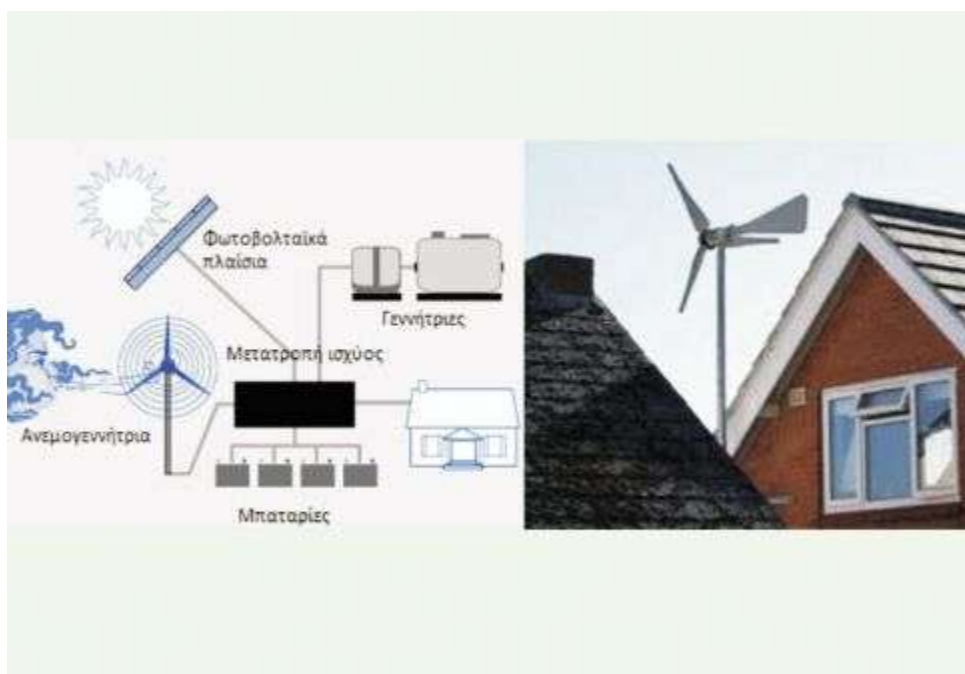


Σχήμα 55 Διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό Σύστημα [48]

1.20.3. Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα συνδυάζει το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο λαμβάνει από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο παράγεται από ανεμογεννήτριες, πετρελαιογεννήτριες, μικρές υδροηλεκτρικές γεννήτριες κ.τ.λ., ανάλογα με το μέγεθος των αναγκών σε ενέργεια αξιοποιώντας πλήρως τα πλεονεκτήματα των επιμέρους τεχνολογιών.

Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν σε περιοχές απομακρυσμένες, σε στρατιωτικές βάσεις καθώς και σε τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς και αναμεταδότες. Με τη χρήση των υβριδικών συστημάτων και τον συνδυασμό τους καλύπτονται κενά που δημιουργούν οι τεχνολογίες αυτές μεταξύ τους, εκμεταλλευόμενοι τα κλιματικά δεδομένα στην περιοχή. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα υβριδικό σύστημα. [8]



Σχήμα 56 Υβριδικό Σύστημα

Πηγή: http://www.4green.gr/data/fotovoltaiika/news/preview_news/89477.asp

1.21. Τρόποι στήριξης φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται σε ποικίλα μέρη από μεγάλες περιφραγμένες εκτάσεις και πλαγιές λόφων μέχρι και σε στέγες κτιρίων, στύλους και ικριώματα. Ανάλογα με τον τόπο εγκατάστασής τους, ο τρόπος στήριξης των φωτοβολταϊκών διαφέρει. Επιπλέον, έχουμε ποικίλους τρόπους στήριξης και σε φωτοβολταϊκά πάρκα με διαφορετικά κόστη και διαφορετικές αποδόσεις.

Πρέπει πάντα να γίνεται η σωστή μελέτη σε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο προτού γίνει η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών ώστε να γίνει εκτίμηση από ειδικούς για τις μετεωρολογικές συνθήκες στην περιοχή, για την ανακλαστικότητα του εδάφους, για το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και πολλούς άλλους παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν και καθορίζουν σε ένα μεγάλο βαθμό το είδος της στήριξης του φωτοβολταϊκού συλλέκτη. [5]

Οι τρόποι στήριξης χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

A. Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης

Η στήριξη αυτή υπάρχει στα περισσότερα φωτοβολταϊκά πάρκα λόγω του χαμηλού κόστους σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, καθώς και της αντοχής των φωτοβολταϊκών αυτού του τύπου σε αντίξοες καιρικές συνθήκες. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται ένα φωτοβολταϊκό με στήριξη αυτού του τύπου. [8][28]



Σχήμα 57 Πάνελ με στήριξη σταθερής γωνίας κλίσης

Στην περίπτωση που το φωτοβολταϊκό πάρκο βρίσκεται σε περιοχή όπου προσλαμβάνει την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη διάρκεια της ημέρας και δεν υπάρχουν εμπόδια που να την κρύβουν, τότε το φωτοβολταϊκό τοποθετείται σε νότιο αζιμουθιακό προσανατολισμό και έχει γωνία κλίσης, η οποία είναι κοντά στο γεωγραφικό πλάτος της περιοχής που είναι εγκατεστημένο το φωτοβολταϊκό πάρκο. Εάν η γωνία κλίσης που είναι τοποθετημένο το φωτοβολταϊκό είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος (ϕ) της περιοχής τότε η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε κάθετη γωνία στον φωτοβολταϊκό συλλέκτη δύο φορές το χρόνο.

Η βέλτιστη γωνία κλίσης για ένα φωτοβολταϊκό συλλέκτη καθορίζεται από διαφόρων ειδών παράγοντες όπως, οι υπάρχουσες μετεωρολογικές συνθήκες στην περιοχή εγκατάστασής του, οι οποίες προσδιορίζουν τη σχέση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (διάχυτη και απευθείας). Επιπλέον παράγοντες είναι ο βαθμός ανακλαστικότητας του εδάφους, καθώς και μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε γωνία του συλλέκτη, ώστε να βρεθεί η κατάλληλη. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται με ένα αισθητήρα, ο οποίος αποκαλείται πυρανόμετρο, για αρκετά χρόνια στην συγκεκριμένη περιοχή. Τέλος, εάν οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες τοποθετούνται σε περιοχές όπου κατά τη διάρκεια της ημέρας σκιάζονται από διάφορα εμπόδια, τότε ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης πρέπει να προσανατολιστεί κατάλληλα ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση.[8][28]

B. Στήριξη με δυνατότητα στροφής γύρω από ένα ή δύο άξονες

B1. Ένας Άξονας

Στην περίπτωση αυτή ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας με κατάλληλο μηχανισμό και στο τέλος της ημέρας επανέρχεται στη θέση αναμονής (νότος).

Ένας τρόπος στήριξης τέτοιου τύπου είναι το λεγόμενο αζιμουθιακό ηλιοτρόπιο όπου ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης περιστρέφεται ως προς τον κατακόρυφο άξονα , ούτως ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει κατακόρυφα στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη, ο οποίος έχει γωνία κλίσης σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον, υπάρχει και το ηλιοτρόπιο πολικού άξονα όπου ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης περιστρέφεται γύρω από τον άξονα $x-x'$, έχοντας γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. [8][28]

B2. Δύο Άξονες

Στην περίπτωση της περιστροφής του φωτοβολταϊκού συλλέκτη γύρω από δύο άξονες γίνεται διαδοχική περιστροφή με ηλεκτρικούς κινητήρες, οι οποίοι περιέχουν μειωτήρες και ελεγκτή στροφών καθώς και ειδικές διατάξεις για τον καθορισμό των κατάλληλων γωνιών στροφής. Τέτοιου είδους στήριξη χρησιμοποιείται στα λεγόμενα ηλιοτρόπια (Trackers) , τα οποία μετακινούνται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, με σκοπό η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει κάθετα στον φωτοβολταϊκό συλλέκτη. Όταν ο ήλιος δύει, ο συλλέκτης επιστρέφει ξανά στη θέση αναμονής (νότος), ενώ πριν ο ήλιος ανατέλλει ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης περιστρέφεται έτσι ώστε κατ' ευθείαν η ηλιακή ακτινοβολία να προσπέσει κάθετα σε αυτόν.

Τα trackers λόγω του μηχανισμού και της τεχνολογίας τους είναι αρκετά ακριβά καθώς απαιτούν ακριβό ηλεκτρικό μηχανισμό και ακριβή συντήρηση. Η αντικατάσταση σε τυχόν καταστροφή τους από ισχυρούς ανέμους είναι επίσης ακριβή και συχνή. Όμως η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος είναι σημαντικά υψηλότερη των συλλεκτών σταθερής στήριξης. [8][28]



Σχήμα 58 Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες (Trackers)

Πηγή:

<http://energyin.gr/2012/02/08/%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%BA%CE%BB%CE%AE%CF%81%CF%89%CF%83%CE%B7-%CF%84%CE%BF%CF%85-%CE%BC%CE%B5%CE%B3%CE%B1%CE%BB%CF%8D%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%85-%CF%86%CE%B2-%CF%83%CF%84%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CE%BF/>

Γ. Στήριξη σε κέλυφος κτιρίου

Η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών στην οροφή ενός κτιρίου γίνεται με ποικίλους τρόπους, ανάλογα με το είδος του κτιρίου. Πρέπει πάντα να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν το ύψος τοποθέτησής τους και η αντοχή τους στα φορτία από ισχυρούς ανέμους και από το βάρος των πλαισίων. Ένας τρόπος τοποθέτησης είναι σε κεκλιμένο επίπεδο, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα, με ξύλινα ή μεταλλικά στηρίγματα. Επιπλέον, υπάρχει ειδική τοποθέτηση στο εξωτερικό κέλυφος του κτιρίου, βοηθώντας στον καλό αερισμό και την ψύξη των φωτοβολταϊκών με κόστος χαμηλότερο από αυτών σε κεκλιμένο επίπεδο. Η τοποθέτηση αυτή απαιτεί καλή μόνωση στα σημεία στήριξης της βάσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται ένα φωτοβολταϊκό τοποθετημένο σε κεκλιμένο επίπεδο και ένα προσαρμοζόμενο στο εξωτερικό κέλυφος του κτιρίου. [8][28]



Σχήμα 59 Τοποθέτηση Φωτοβολταϊκών σε κτίριο

Ένας καινούριος τρόπος επίσης είναι η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών απευθείας στην οροφή του κτιρίου έτσι ώστε να επικαλύπτει το ένα το άλλο όπως τα κεραμίδια. Το κόστος της συγκεκριμένης κατασκευής είναι αρκετά χαμηλό όμως μειονεκτεί σε σύγκριση με άλλες κατασκευές όσων αφορά τη στεγανοποίηση του κτιρίου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η απευθείας τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών σε κτίριο. [8][28]



Σχήμα 60 Απευθείας τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε κτίριο

Πηγή: <http://60gr.wordpress.com/%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CE%B1-%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%B7%CF%83-%CF%87%CF%81%CE%B7%CF%83%CE%B7%CF%83/>

Τέλος, μια παρόμοια κατασκευή όπως η παραπάνω είναι η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών απευθείας στην οροφή του κτιρίου, όχι όμως ως ένα κομμάτι της οροφής αλλά αντικαθιστώντας την εξ' ολοκλήρου. Το κόστος της τεχνικής αυτής είναι αρκετά χαμηλό λόγω του ότι γίνεται ολική αντικατάσταση των δομικών υλικών της οροφής , τοποθετώντας και στηρίζοντας τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες σε στηρίγματα ίδια με αυτά που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη μιας απλής οροφής. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η εφαρμογή τεχνικών φωτισμού και ηλιοπροστασίας στο κτίριο. [8][28]



Σχήμα 61 Αντικατάσταση οροφής από Φωτοβολταϊκά πάνελ

Πηγή: http://www.4green.gr/data/fotovoltaiika/news/preview_news/88763.asp

1.22. Προσανατολισμός και Απόδοση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ο κατάλληλος προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη ανάλογα με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η κλίση τους να είναι σταθερή και η αζιμούθια γωνία επίσης σταθερή, έτσι ώστε η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη κατά τη διάρκεια του έτους.

Για όλο το έτος, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη στο βόρειο ημισφαίριο είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι 0° . Επιπροσθέτως, εάν οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες έχουν ως στόχο να παράγουν ως επί το πλείστον περισσότερη ενέργεια το καλοκαίρι, η κλίση του φωτοβολταϊκού συλλέκτη πρέπει να είναι 10° έως 15° μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ αντιθέτως το χειμώνα 10° έως 15° μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου.

Στον ακόλουθο πίνακα περιγράφεται η συσχέτιση της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ανάλογα με την κλίση του σε ποσοστό επί τις %.

Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	0°	30°	90°
			
Ανατολικός - Δυτικός	90%	85%	50%
Νοτιοανατολικός - Νοτιοδυτικός	90%	95%	60%
Νότιος	90%	100%	60%
Βορειοανατολικός - Βορειοδυτικός	90%	67%	30%
Βόρειος	90%	60%	20%

Πίνακας 2 Απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος ανάλογα με την κλίση του [38]

1.23.Οικονομική αξιολόγηση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Σκοπός της οικονομικής αξιολόγησης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι να αναλύσει και να υπολογίσει το κατά πόσο είναι αποδοτικό το σχέδιο επένδυσης του φωτοβολταϊκού πάρκου. Με την οικονομική αξιολόγηση γίνεται προσδιορισμός της συσχέτισης μεταξύ απόδοσης- κέρδους και επενδυσόμενου κεφαλαίου. [20]

Η οικονομική μελέτη είναι πολύ σημαντική για τον επενδυτή του φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς είναι απαραίτητο πριν από την απόφαση εγκατάστασής του να διερευνηθεί η αποδοτικότητα του πλάνου επένδυσης. Στην οικονομική αξιολόγηση πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν ποικίλα στοιχεία όπως:

- ✚ Ο χρόνος ζωής της επένδυσης
- ✚ Το μέγεθος του κεφαλαίου κίνησης
- ✚ Το κόστος που θα προκύψει από τα λειτουργικά έξοδα της επιχείρησης
- ✚ Τα έσοδα και οι πωλήσεις που θα προκύψουν
- ✚ Το συνολικό υπολογιζόμενο κόστος της επένδυσης και η χρονική κατανομή των εκροών
- ✚ Ο υπολογισμός του συνολικού μετοχικού κεφαλαίου, το μέγεθος των δανειακών κεφαλαίων και οι προϋποθέσεις επιχορήγησης των δανείων
- ✚ Ο υπολογισμός της υπολειμματικής αξίας της επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος στο τέλος του χρόνου ζωής της
- ✚ Ο καθορισμός του ύψους της φορολογίας, ο καθορισμός του ρυθμού απόσβεσης των πάγιων περιουσιακών στοιχείων, οι προβλεπόμενες επιχορηγήσεις από το κράτος και το ύψος του πληθωρισμού ανάλογα με το οικονομικό και νομικό περιβάλλον που επικρατεί τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο

Ακολούθως, δίνεται μια συνοπτική μεθοδολογία ανάλυσης της βιωσιμότητας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Ξεκινώντας την οικονομική μελέτη γίνεται υπολογισμός του αρχικού κόστους της επένδυσης (C_0), καθώς και καθορισμός της διάρκειας ζωής (n έτη) του φωτοβολταϊκού συστήματος. Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του κόστους αντικατάστασης των εξαρτημάτων του φωτοβολταϊκού πάρκου (π.χ. μπαταρίες, αντιστροφείς). Για τον υπολογισμό του κόστους αντικατάστασης είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του συντελεστή παρούσας αξίας για το κάθε εξάρτημα (X), ο οποίος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$PV_X = \frac{1}{(i + 1)^{j * n_{L,X}}} \quad [1.43]$$

όπου

$n_{L,X}$: ο χρόνος ζωής του X εξαρτήματος και $j=1,...,n_{R,X}$

με $n_{R,X}$ το ακέραιο μέρος του λόγου $\frac{n}{n_{L,X}}$

Αφού υπολογίστηκε ο συντελεστής παρούσας αξίας PV , το κόστος αντικατάστασης RC_X (Replacement Cost) του εξαρτήματος (X) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$RC_X = \sum_{j=1}^{n_{R,X}} PV_X * C_{O,X} \quad [1.44]$$

όπου

$C_{O,X}$: το κόστος της αγοράς του εξαρτήματος (X)

Έπειτα γίνεται ο υπολογισμός του ολικού κόστους συντήρησης και λειτουργίας ανά έτος (Cost of Operation and Maintenance) $C_{O,M}$. Το ολικό κόστος συντήρησης και λειτουργίας $C_{O,M}$ ανάγεται σε παρούσα αξία με χρήση του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου.

$$CR_{(i,n)} = \frac{i * (i + 1)^n}{(i + 1)^n - 1} \quad [1.45]$$

Η παρούσα αξία $PV_{C_{O,M}}$ του συνολικού κόστους συντήρησης και λειτουργίας θα είναι:

$$PV_{C_{O,M}} = \frac{C_{O,M}}{CR_{(i,n)}} \quad [1.46]$$

Τέλος , το ολικό κόστος του κύκλου ζωής της επένδυσης θα είναι:

$$LCC = C_0 + \sum_X RC_X + PV_{C_{O,M}} - RV \quad [1.47]$$

όπου

RV: η απομένουσα αξία του συστήματος στο τέλος της εξετάζουσας περιόδου

Το ετήσιο καθαρό οικονομικό όφελος (Net Annual Financial Profit) NAFP από τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$NAFP = DNAFP + INAFP \quad [1.48]$$

Οι συντελεστές DNAFP και INAFP είναι το άμεσο και το έμμεσο καθαρό ετήσιο οικονομικό όφελος αντίστοιχα και υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$DNAFP = (365\text{μέρες}) * \left(\frac{kWh}{\text{Ημέρα}}\right) * \left(\frac{\text{€}}{kWh}\right) \quad [1.49]$$

$$INAFP = 0.5 * DNAFP \quad [1.50]$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η καθαρή παρούσα αξία (NPV) του φωτοβολταϊκού συστήματος, η οποία εκφράζει την αξία σε χρηματικές μονάδες, η οποία προκύπτει από την προεξόφληση όλων των καθαρών χρηματοροών κάθε χρόνου για όλο το χρονικό διάστημα λειτουργίας του σχεδίου επένδυσης. Η καθαρή παρούσα αξία (NPV) υπολογίζεται από τον ακόλουθο γενικό τύπο:

$$NPV = \frac{NAFP}{CR_{(i,n)}} - C_0 + \frac{RV}{(1+i)^n} \quad [1.51]$$

Αυτό που έχει σημασία είναι εάν η τιμή της καθαρής παρούσας αξίας NPV είναι θετική ή αρνητική. Έτσι έχουμε τις εξής περιπτώσεις:

- NPV>0: το σχέδιο επένδυσης είναι αποδεκτό και η αποδοτικότητα είναι μεγαλύτερη από το επιτόκιο προεξόφλησης
- NPV<0: το σχέδιο επένδυσης είναι μη αποδεκτό και η αποδοτικότητα είναι μικρότερη από το επιτόκιο προεξόφλησης
- NPV=0: η αποδοχή του σχεδίου επένδυσης εξαρτάται και από άλλους παράγοντες και η αποδοτικότητα είναι οριακή

Η περίοδος αποπληρωμής της συνολικής επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος, δηλαδή η απαιτούμενη χρονική διάρκεια σε χρόνια για να μηδενιστεί η παρούσα αξία (NPV) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Payback_{period} = \frac{-\ln\left(\frac{NAFP - i * C_o}{NAFP - i * RV}\right)}{\ln(1 + i)} \quad [1.52]$$

Τέλος, το κόστος της παραγόμενης ενέργειας (C_E) υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C_E = \frac{LCC * CR_{(i,n)}}{E_{annual}} \quad [1.53]$$

όπου

E_{annual} : η παραγόμενη ενέργεια σε ένα χρόνο

Με αυτή τη σύντομη οικονομική μελέτη μπορεί εύκολα να γίνει μια ενδεικτική ποσοτική αξιολόγηση των επιπτώσεων που θα υπάρξουν από την αλλαγή μιας σημαντικής παραμέτρου στο οικονομικό μέρος της επένδυσης. Ανάλογα με την περίπτωση, άλλες επιπτώσεις αλληλοαναιρούνται, ενώ άλλες αλλάζουν εντελώς τα αρχικά συμπεράσματα προώθησης του επενδυτικού πλάνου.

1.24.Βιβλιογραφία

1. “Σχεδίαση ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος φ/β συστοιχίας μέσω διακριτού μοντελοποιημένου προβλεπτικού ελεγκτή ρεύματος για αποδοτική λειτουργία υπό ραγδαία μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες και μερική σκίαση”, Διπλωματική εργασία Βασίλειος Ε. Ρενιέρης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2013
2. “Υλοποίηση ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking-MPPT)”, Πτυχιακή εργασία Έλσον Μπάρδι, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Ηράκλειο, Απρίλιος 2011
3. “Μελέτη καθορισμού των βέλτιστων σημείων λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων”, Διπλωματική εργασία Κοσμά Χρήστου , Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Οκτώβριος 2010
4. “Σχεδιασμός ηλιακού ιχνηλάτη με μηχανισμό κίνησης δύο αξόνων, με τη βοήθεια του προγράμματος τρισδιάστατης σχεδίασης CATIA ”, Διπλωματική εργασία Μελετίου Γ. Ρεντούμη, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2013
5. “Ηλιακή γεωμετρία: Σύστημα παρακολούθησης της αζιμούθιας ηλιακής τροχιάς”, Διπλωματική εργασία Γεώργιος Α. Ρεϊτζόπουλος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2014
6. “Μελέτη για την κατασκευή φ/β σταθμού ισχύος 100kW στις εγκαταστάσεις του Τ.Ε.Ι. Πειραιά ”, Πτυχιακή εργασία Τσιτσεκτσιαν Στυλιανός & Ρούμπης Γρηγόριος, Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αιγάλεω, Οκτώβριος 2012
7. “Παραμετρική μελέτη μηδενισμού σκίασης ηλιακών συλλεκτών- κώδικας- εφαρμογές ”, Διπλωματική εργασία Σταμάτιος Κουλάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2010
8. “Ηλιακή Γεωμετρία: Προσδιορισμός της άμεσης ηλιακής δέσμης για εφαρμογή σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις για συντεταγμένες τόπου($37,96^{\circ}$, $-23,72^{\circ}$) και ($39,3^{\circ}$, $-22,38^{\circ}$) ”, Διπλωματική εργασία Ευαγγελία Ν. Κοντοπούλου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2012
9. “Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών ”, Υπουργείο περιβάλλοντος ενέργειας και κλιματικής αλλαγής- ΥΠΕΚΑ, Α' έκδοση, Αθήνα, Ιούλιος 2010
10. “Παραμετρική μελέτη θέρμανσης χώρων με εποχιακή αποθήκευση με χρήση του προγράμματος TRNSYS”, Διπλωματική εργασία Παναγιώτη Δ. Τσεκούρα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβρουάριος 2008
11. “Κατασκευή μικροϋπολογιστικού συστήματος για τη βελτίωση της απόδοσης φωτοβολταϊκής συστοιχίας ”, Διπλωματική εργασία Καρυδά Άρτεμις- Νεκταρία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ιούλιος 2010
12. “Ηλιακή ενέργεια- Φωτοβολταϊκά ”, Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας, Τ.Ε.Ι. Κρήτης

13. *“Ανάλυση και αξιολόγηση των κύριων μοντέλων προσδιορισμού των συνιστωσών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο- Ανάπτυξη ενός νέου εμπειρικού μοντέλου ”*, Διπλωματική εργασία Ευγενία Μεχλήρη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2007
14. *“Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα ”*, Heliosres- Renewable Energy Sources
15. *“Ηλιακή ενέργεια- Ηλιακή Γεωμετρία ”*, Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας, Τ.Ε.Ι. Κρήτης
16. *“Ηλιακή ενέργεια- Ηλιακοί Συλλέκτες ”*, Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας, Τ.Ε.Ι. Κρήτης
17. *“Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις διασυνδεδεμένων συστημάτων ”*, Διπλωματική εργασία Ξενάκης Αναστάσιος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2012
18. *“ Σχεδιασμός εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στοιχείων σε κτιριακό περιβάλλον λαμβάνοντας υπόψη το νέο θεσμικό πλαίσιο πώλησης ενέργειας στη ΔΕΗ”*, Πτυχιακή εργασία Ρομπογιαννάκης Φραγκίσκος , Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ηράκλειο
19. *“Ηπιες μορφές ενέργειας (Σχεδίαση φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο) ”*, Διπλωματική εργασία Βεργοπούλου Μαγδαληνής , Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
20. *“ Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα”*, Διπλωματική εργασία Αρκούδης Γεώργιος , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2007
21. *“ Συσσωρευτές στα φωτοβολταϊκά συστήματα, Αντιμετώπιση των συνηθισμένων προβλημάτων των συσσωρευτών μολύβδου οξέος στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα”*, Διπλωματική εργασία Τσιουμπρή Ελένη, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Οκτώβριος 2012
22. *“Ανάπτυξη των ΑΠΕ και επιπτώσεις στην απασχόληση. Η περίπτωση της Κύπρου”*, Διπλωματική εργασία Ανδρονίκου Ευγενούλα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2012
23. *“Σχεδίαση διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού σταθμού 100KW με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο της ΔΕΗ στο Πολυτεχνείο Κρήτης ”*, Διπλωματική εργασία Αθανασίας Αργυροπούλου, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Σεπτέμβριος 2008
24. *“Διαδραστικό σύστημα μοντελοποίησης και ανάλυσης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων”*, Διπλωματική εργασία Αβραμίδη Γεωργίου, Πανεπιστημιακό διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών, Θεσσαλονίκη, 2009
25. *“Μελέτη και εγκατάσταση φωτοβολταϊκού ”*, Διπλωματική εργασία Παναγιώτη Α. Δρόσου & Σπυρίδωνος Ν. Σχοινά, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ιούνιος 2010
26. *“Φωτοβολταϊκά συστήματα ”*, Διπλωματική εργασία Παναγιώτη Παναγιώτου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2007

27. “ Μοντέλο ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκής συστοιχίας”, Διπλωματική εργασία Αλεξάνδρα Δ. Πέππα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2008
28. “Οικονομική επίδραση της αυξημένης διείσδυσης των ΑΠΕ στα μεγέθη ενός μικροδικτύου ”, Διπλωματική εργασία Βασιλική Κατσίκη , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 2010
29. “Φωτοβολταϊκά συστήματα: τεχνολογία, θεσμικό πλαίσιο και επενδυτικό περιβάλλον ”, Διπλωματική εργασία Ίλια Χ. Παπακωνσταντίνου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
30. “Πειραματική μελέτη φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών υμενίων ”, Διπλωματική εργασία Ισίδωρος Σ. Λαγόπουλος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2011
31. “Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων ”, Διπλωματική εργασία Στέφανος Ε. Τετελένης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2011
32. “Ενεργειακή αυτονομία οικισμού με φωτοβολταϊκά συστήματα: Το παράδειγμα της Μηλιάς Χανίων ”, Διπλωματική εργασία Πολυπόρτης Μ. Αθανάσιος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2011
33. “ Τεχνικο- οικονομική διερεύνηση φωτοβολταϊκών για οικιακή χρήση”, Διπλωματική εργασία Δημήτριος Παναγόπουλος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2011
34. “Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε Κτίρια ”, Διπλωματική εργασία Κωνσταντίνα Α. Μπαμπαλή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούνιος 2011
35. “ Ανάπτυξη, προοπτικές και νομοθεσία της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας”, Διπλωματική εργασία Απόστολος Α. Ροδίτης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2011
36. “Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις διασυνδεδεμένων συστημάτων ”, Διπλωματική εργασία Ξενάκης Αναστάσιος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2012
37. “ Οικονομικά οφέλη μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής- Στοχαστική προσέγγιση”, Διπλωματική εργασία Βιολέτα Μ. Αργυροπούλου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2011
38. “ Ανάλυση λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων αμόρφου πυριτίου υπό συνθήκες μερικής σκίασης”, Διπλωματική εργασία Ευστράτιος Θ. Γεωργούλας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2013
39. “ Οδηγός μελέτης και υλοποίησης φωτοβολταϊκών έργων”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2011
40. “Μελέτη Ηλεκτρικών χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκών στοιχείων μικροκρυσταλλικού πυριτίου ”, Διπλωματική εργασία Σωτηρία Σ. Πεπέ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2012
41. “Τεχνολογία φωτοβολταϊκών συστημάτων ”, Ι. Φραγκιαδάκης, Εργαστήριο φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και εφαρμογών «Φωτοβολταϊκό πάρκο» 2008

42. *“Μελέτη υβριδικού φωτοβολταϊκού θερμικού ηλιακού (PV/T) συστήματος θέρμανσης νερού ”*, Διπλωματική εργασία Αρχοντούλα Νικολακοπούλου , Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2012
43. *“Διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο”*, Πτυχιακή εργασία Στυλιανοπούλου Κωνσταντίνα & Χατζηρόδου Εμμανουέλα, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας, Οκτώβριος 2009
44. *“ Σύγκριση απόδοσης και κόστους μιας τυπικής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σε παραδοσιακή κατοικία με φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου ή CIS”*, Διπλωματική εργασία Μαυροκέφαλου Ιωάννη, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Οκτώβριος 2010
45. *“Μέθοδοι βελτίωσης του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Μέτρηση του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων συναρτήσει της θερμοκρασίας ”*, Διπλωματική εργασία Ζαφειρίου Λάζαρου & Αποστόλου Αριστοτέλη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2010
46. *“Σύνθετες διατάξεις φωτοβολταϊκών και θερμικών ηλιακών συσκευών ”*, Διπλωματική εργασία Αποστολοπούλου Ι. Αντιγόνη, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2013
47. *“Ετήσια απόδοση διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών παλίσιων και εφαρμογή σε ενεργειακά αυτόνομη κατοικία ”*, Διπλωματική εργασία Κορομπίλης Δημήτριος , Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2012
48. *“Σύνθεση και μελέτη υβριδικών φωτοβολταϊκών κυττάρων: Νέα πρόκληση για το περιβάλλον και τα κτίρια ”*, Διπλωματική εργασία Τρυπαναγνωστοπούλου Μαρία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Μάιος 2010
49. *“Μέτρηση βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων και μελέτη της εξάρτησής του από τη θερμοκρασία ”*, Διπλωματική εργασία Γκατζή Χ. Αθανάσιου & Κατριάδακη Κ. Ιωάννη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2008
50. *“Τεχνοοικονομική μελέτη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά για τροφοδοσία γεωργικής μονάδας ”*, Διπλωματική εργασία Παπαδοπούλου Αθανασίου , Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ιούνιος 2011
51. *“Σχεδιασμός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος για την τροφοδότηση αγροικίας ”*, Διπλωματική εργασία Μπουγιούκου Φάνη, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Οκτώβριος 2010
52. *“Μελέτη επίπτωσης σύνδεσης φωτοβολταϊκών στα δίκτυα διανομής μέσης τάσης ”*, Διπλωματική εργασία Μαρία Ν. Θωμά, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2012
53. *“Οδηγίες για την εγκατάσταση φ/β συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις ”*, Τμήμα Φωτοβολταϊκών συστημάτων και διεσπαρμένης παραγωγής, Διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας ΚΑΠΕ, Αθήνα, Αύγουστος 2009

54. <http://www.cres.gr/kape/index.htm>
55. “Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε κτίρια ”, Διπλωματική εργασία Κωνσταντίνα Α. Μπαμπαλή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούνιος 2011
56. “Μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκών μεγάλης ισχύος σε σύνδεση με το δίκτυο ”, Διπλωματική εργασία Δαλαϊνας Δημήτρης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2009
57. “Έξομοίωση φωτοβολταϊκού συστήματος διασυνδεδεμένου στο δίκτυο χαμηλής τάσης ”, Διπλωματική εργασία Δώδα Σοφία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Οκτώβριος 2010
58. “Προβλήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων συνδεδεμένων στο δίκτυο”, Διπλωματική εργασία Ευσταθίου Σελίμη, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ιούλιος 2009
59. “Ηλιακή Γεωμετρία ”, Παρουσίαση Ιωάννη Κατσίγιαννη
60. <http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>
61. <http://solareis.anl.gov/guide/solar/pv/index.cfm>
62. «Photovoltaic Power Systems», compiled by Tracy Dahl
63. «Thin Film Photovoltaics», K. Zweibel, National Renewable Energy Laboratory, November 1998
64. «Nanotechnology- Enhanced Thin-Film Solar Cells: Analysis of global research activities with future prospects», Ying Guo, Alan L. Porter, Lu Huang
65. “Μελέτη διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των 100kW ”, Διπλωματική εργασία Γεώργιος Α. Κτενίδης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2008
66. “Μελέτη και κατασκευή συστήματος μετατροπής ενέργειας από φωτοβολταϊκή πηγή σε ηλεκτρική- παραλληλισμός με το δίκτυο 220V ”, Διπλωματική εργασία Κώστα Κωνσταντίνου, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ιούλιος 2012

2. Αιολική Ενέργεια

Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού έχει εμφανίσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια τόσο στην Ευρώπη όσο και στον υπόλοιπο κόσμο. Η αιολική ενέργεια, είναι η ενέργεια η οποία παράγεται με την εκμετάλλευση του ανέμου, η οποία έχει τεράστια χρησιμότητα για τη βιώσιμη ανάπτυξη, την εξοικονόμηση των ενεργειακών πόρων καθώς και στην περιβαλλοντική προστασία από τις κλιματικές αλλαγές που υφίσταται ο πλανήτης μας. Στη σύγχρονη εποχή, η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται κατά κόρον καθώς θεωρείται η πλέον συμφέρουσα ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Πολλοί είναι οι επιστήμονες οι οποίοι υποστηρίζουν ότι η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού είναι ικανή να λύσει το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα. Σε πολλές χώρες της Ευρώπης και όχι μόνο, η ενέργεια η οποία προέρχεται από τα αιολικά πάρκα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό των ενεργειακών αναγκών τους. Ήδη προβλέπεται ότι μέχρι το 2050, η ενέργεια η οποία προέρχεται από την εκμετάλλευση του ανέμου, θα είναι ικανή να καλύψει το ένα τρίτο των αναγκών του πλανήτη για ηλεκτρική ενέργεια.

Η αιολική ενέργεια περιλαμβάνει πληθώρα πλεονεκτημάτων μερικά από τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια[39]:

- Ο άνεμος είναι μια πηγή ενέργειας, η οποία παρέχεται δωρεάν και είναι ανεξάντλητη
- Τα αιολικά πάρκα προστατεύουν το περιβάλλον καθώς μειώνουν τους επικίνδυνους αέριους ρύπους, περιορίζουν το διοξείδιο του θείου, το μονοξείδιο του άνθρακα καθώς και τα καρκινογόνα μικροσωματίδια
- Η αιολική ενέργεια περιορίζει τις εκπομπές αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου καθώς μειώνει σημαντικά την έκλυση χιλιάδων τόνων διοξειδίου του άνθρακα κάθε χρόνο. Αντικατάσταση μιας συμβατικής πηγής ενέργειας ισχύος 1MW με μια ισοδύναμη ανεμογεννήτρια συνεπάγεται αποφυγή έκλυσης πάνω από 1500 τόνων διοξειδίου του άνθρακα, 6.5 τόνων διοξειδίου του θείου, 3.2 τόνων οξειδίων του αζώτου καθώς και 60 κιλών υδρογόνου σε ένα χρόνο
- Τα αιολικά πάρκα συμβάλουν στην τοπική ανάπτυξη, καθώς δεν περιορίζουν τις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες στην περιοχή εγκατάστασής τους
- Τέλος, η αιολική ενέργεια βοηθάει στην ενεργειακή ανεξαρτησία και στην ασφάλεια της κάθε χώρας που την εκμεταλλεύεται

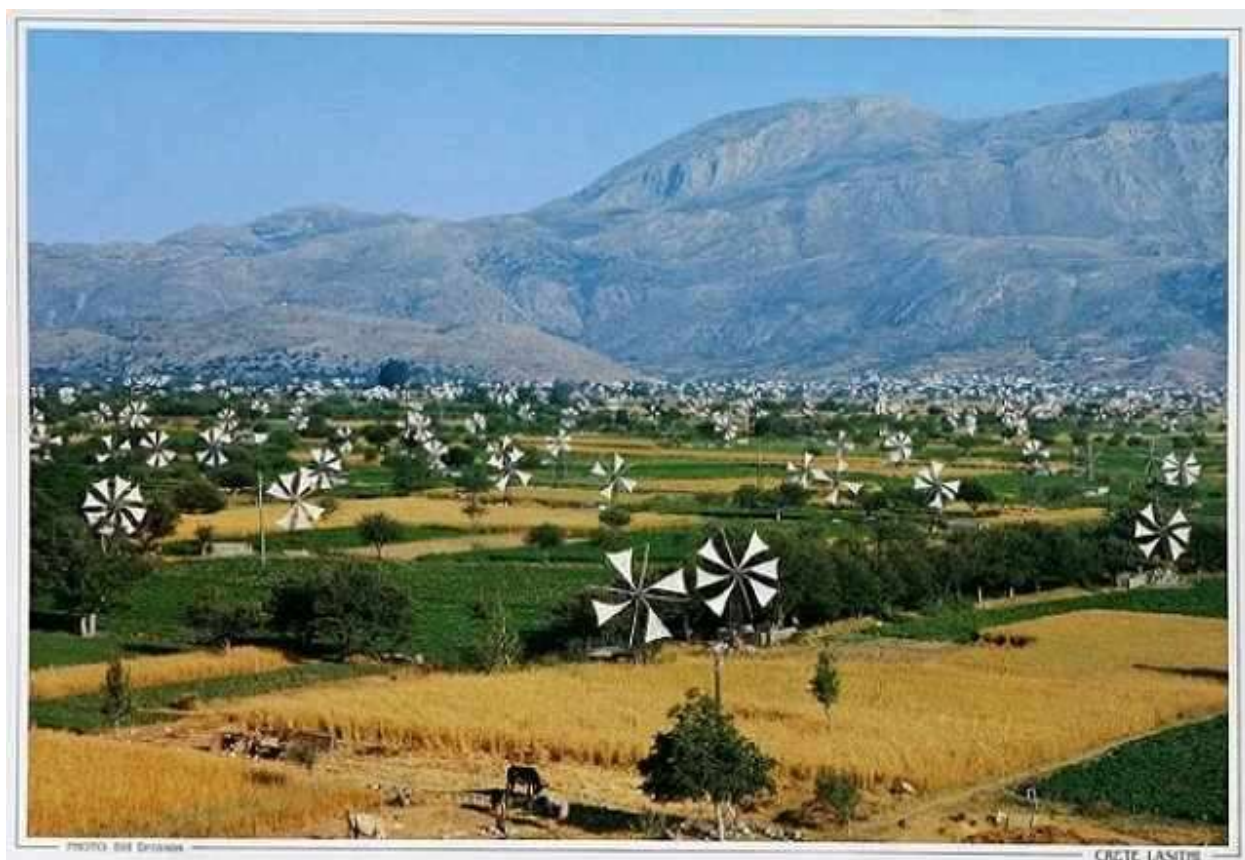
Τα μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας με την πάροδο των χρόνων τείνουν να μειώνονται όλο και περισσότερο. Κάποια από αυτά είναι τα εξής:

- Ο άνεμος είναι μια πηγή ενέργειας , η οποία δεν παρέχεται αδιάλειπτα και συνεχόμενα με αποτέλεσμα να μην φυσάει πάντα όταν απαιτείται ηλεκτρισμός
- Η αιολική ενέργεια είναι δύσκολα αποθηκεύσιμη. Η αποθήκευση μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω συσσωρευτών για τα μικρά αιολικά πάρκα είτε με αντλησιοταμίευση για τα μεγάλα αιολικά πάρκα
- Τα ιδανικά σημεία εγκατάστασης των αιολικών πάρκων βρίσκονται σε απομακρυσμένες και δύσβατες περιοχές
- Επιπλέον, υπάρχει το ενδεχόμενο πρόσκρουσης επάνω στις ανεμογεννήτριες αποδημητικών πουλιών, τα οποία δεν έχουν συνηθίσει την παρουσία των ανεμογεννητριών στο περιβάλλον
- Τέλος, η αιολική ενέργεια πρέπει να είναι ανταγωνιστική σε επίπεδο κόστους έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας

2.1. Ιστορική Αναδρομή

Οι πρώτοι λαοί, οι οποίοι εκμεταλλεύτηκαν την αιολική ενέργεια αρχικά για την κίνηση των πλοίων ήταν οι Πέρσες, οι Κινέζοι, οι Έλληνες και οι Αιγύπτιοι. Με την πάροδο των χρόνων η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε και με τους ανεμόμυλους για το άλεσμα των δημητριακών. Ο αρχαιότερος ανεμόμυλος δημιουργήθηκε στην Περσία (900-500 π.Χ.), ο οποίος ήταν κάθετου άξονα. Μια άλλη χρήση των ανεμόμυλων ήταν για την άντληση του νερού από πλημμυρισμένες περιοχές προς τη θάλασσα, η οποία πρωτοεμφανίστηκε στην Ολλανδία.

Στην Ελλάδα η εμφάνιση των πρώτων ανεμόμυλων υπήρξε στην περιοχή της ανατολικής Κρήτης με σκοπό την άντληση του ποτιστικού νερού από πηγάδια. Οι ανεμόμυλοι εκείνης της εποχής είναι σιδερένιοι με υφασμάτινα πανιά. Η συγκέντρωση των περισσότερων ανεμόμυλων παρουσιάζεται στο οροπέδιο του Λασιθίου, ενώ στη Σητεία, η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε για την άντληση νερού με τη βοήθεια ανεμόμυλων για την αποθήκευσή του για μελλοντική χρήση. Επιπλέον, ένας μεγάλος αριθμός ανεμόμυλων παρουσιάστηκε στις Κυκλάδες, τη Ρόδο, τη Χίο και σε πολλά άλλα νησιά του Αιγαίου με ανεμόμυλους οριζόντιου άξονα σε πέτρινη κατασκευή με πάνινα πτερύγια. Η πρώτη δημιουργία αιολικού πάρκου στη χώρα μας πραγματοποιήθηκε στην Κύθνο το 1982.



Σχήμα 62 Ανεμόμυλοι στο οροπέδιο Λασιθίου

Πηγή: <http://www.typoskritis.gr/index.aspx?aid=2386&cid=4>

Με την πάροδο των χρόνων, περίπου το 1900 η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρισμού στη Δανία και στη συνέχεια και στην Αμερική. Ο Δανός καθηγητής Poul LaCour στο Askov της Δανίας δημιούργησε ένα πειραματικό ανεμοκινητήρα με δύο ηλεκτρικές γεννήτριες για τη χρησιμοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για ηλεκτρόλυση με σκοπό το φωτισμό των κτιρίων ενός σχολείου. Το 1940 κατασκευάστηκε ένας πειραματικός δίπτερος ανεμοκινητήρας σημαντικής ισχύος στο Vermont των Η.Π.Α., ενώ κατά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο ένας μεγάλος αριθμός ανεμογεννητριών με δύο ή τρία πτερύγια κατασκευάστηκαν από την κατασκευαστική εταιρία F.L.Smidt.

Ένας από τους μαθητές του Poul LaCour, ο μηχανικός Johannes Juul ήταν ο πρώτος κατασκευαστής ανεμογεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος παγκοσμίως, η οποία εγκαταστάθηκε στο Vester Egesborg στη Δανία, ενώ ο ίδιος σχεδίασε για πρώτη φορά μηχανή, η οποία περιελάμβανε μηχανισμό φρένου για την κατάλληλη προστασία των μηχανών από τις υψηλότερες ταχύτητες του ανέμου. Από το 1930 και μετά και άλλες χώρες όπως η Ρωσία και η Γαλλία προσπάθησαν να εκσυγχρονίσουν τις ανεμογεννήτριες, χωρίς όμως το επιθυμητό αποτέλεσμα, με αρκετά προβλήματα στην αντοχή των υλικών.

Μετά τη λήξη του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου υπάρχει σημαντική ανάπτυξη των ανεμογεννητριών, κυρίως από τη Γαλλία, με σημαντικότερο επίτευγμα την ανεμογεννήτρια Best Romani, με τρία πτερύγια, διαμέτρου 30 μέτρων και απόδοση 800kW. Τέλος, την ίδια εποχή στο MIT της Αμερικής δημιουργούνται ακόμα πιο ισχυρές ανεμογεννήτριες με ισχύ 1MW.[11]

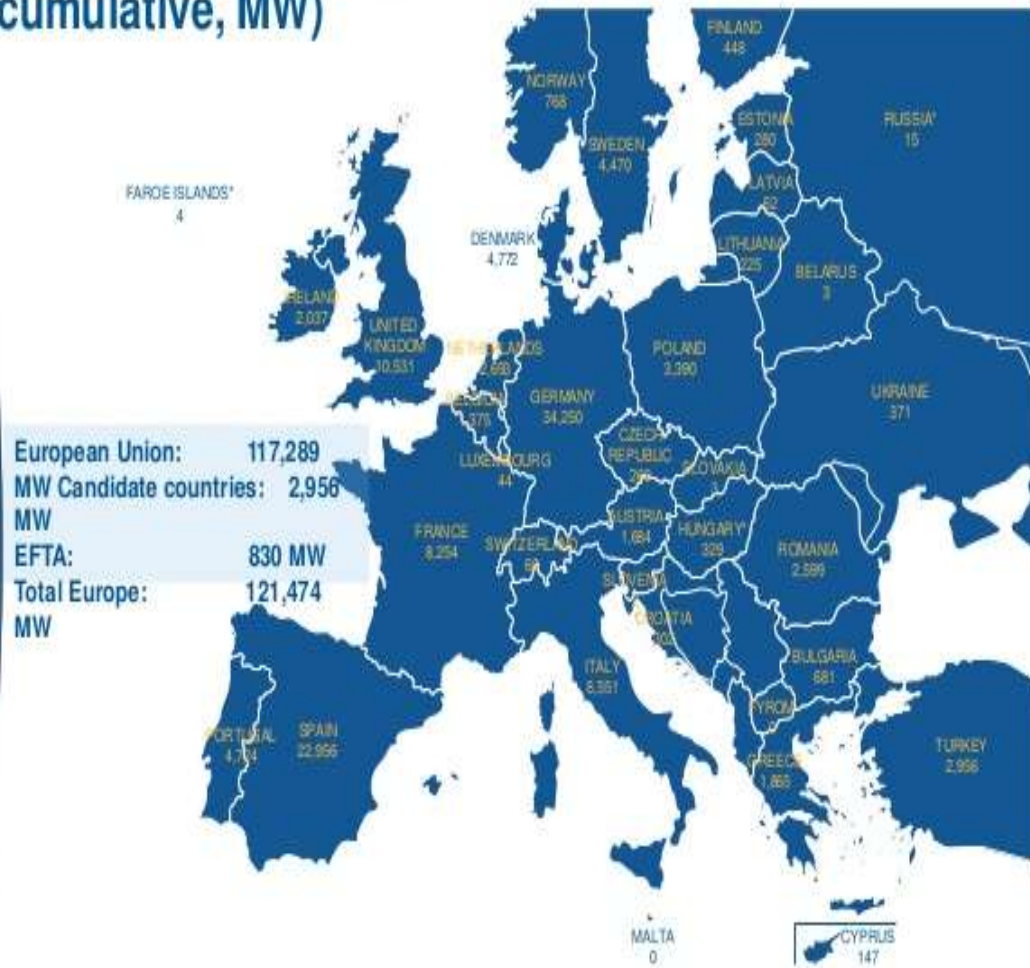
2.2. Αιολική ενέργεια στην Ευρώπη

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχει τεθεί ως στόχος έως το 2020, το 20% της ενέργειας να παρέχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, είναι αναγκαίο το ένα τρίτο της ευρωπαϊκής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ η αιολική ενέργεια θα πρέπει να συμμετέχει με ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 14% έως 18%.

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία της EWEA (European Wind Energy Association) περίπου 11.159MW αιολικής ενέργειας εγκαταστάθηκαν στην Ευρώπη το έτος 2013, με αύξηση 8% σε σύγκριση με το έτος 2012. Στην Ευρώπη αυτή τη στιγμή βρίσκονται εγκατεστημένα αιολικά πάρκα ισχύος 117,3GW από τα οποία, τα 110,7GW προέρχονται από χερσαία αιολικά πάρκα, ενώ τα 6,6GW προέρχονται από υπεράκτια αιολικά πάρκα. Η ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς έχει αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία δεκατρία χρόνια με ρυθμό 10%, από 3,2GW το 2000 σε 11,2GW το 2013.

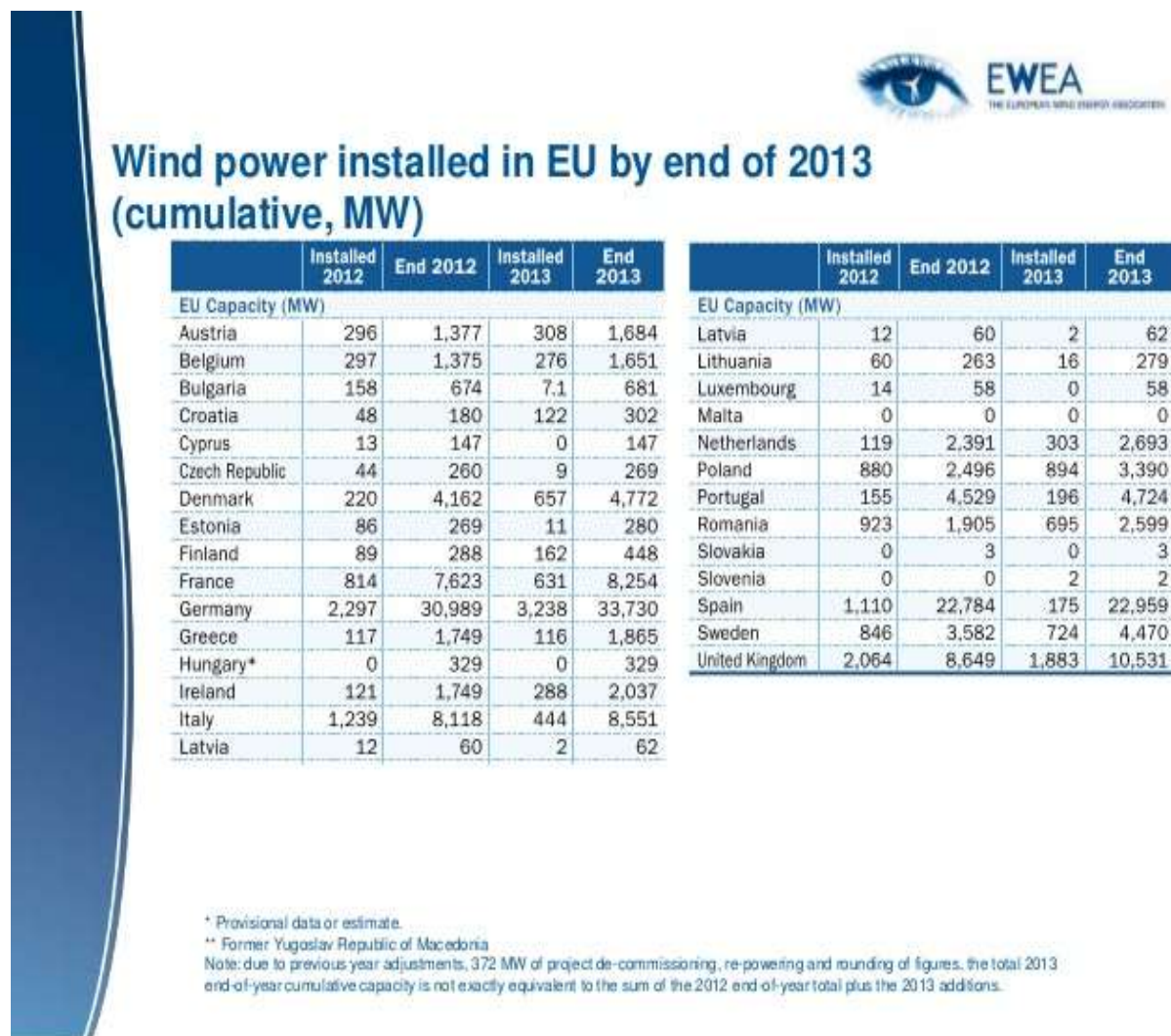
Η Γερμανία εξακολουθεί να είναι η πρώτη Ευρωπαϊκή χώρα με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ ακολουθούμενη από την Ισπανία, την Αγγλία και την Ιταλία. Περίπου δεκαπέντε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν εγκατεστημένη ισχύ που ξεπερνά το 1GW, ενώ οκτώ χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν εγκατεστημένη ισχύ που ξεπερνά τα 4GW. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη ανά χώρα για το έτος 2013.[9][11]

Wind power installed in Europe by end of 2013 (cumulative, MW)



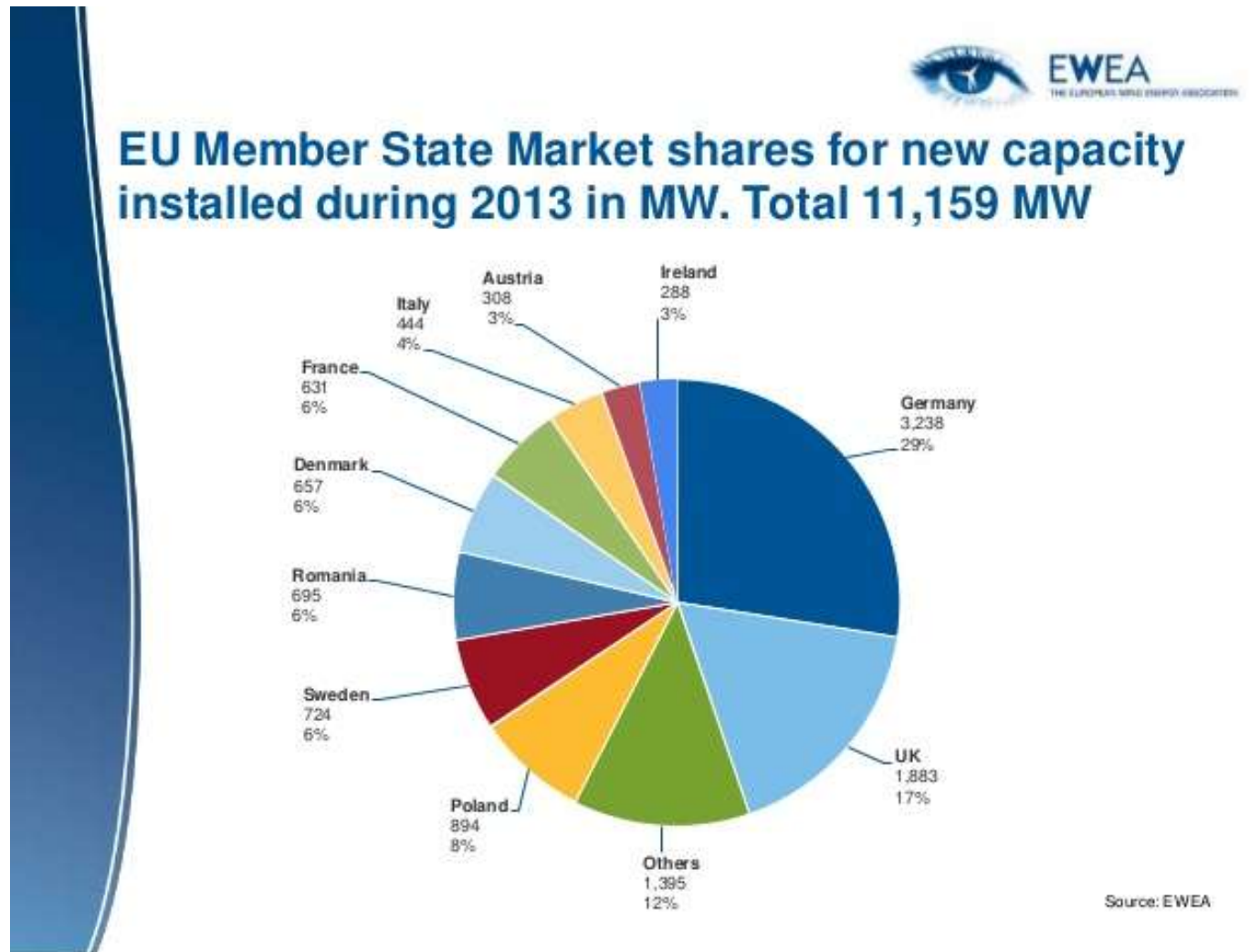
Σχήμα 63 Εγκατεστημένη Ισχύς στην Ευρώπη για το έτος 2013 [58]

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται μια πιο αναλυτική περιγραφή της εγκατεστημένης ισχύος σε χώρες της Ευρώπης για τα έτη 2012 και 2013.



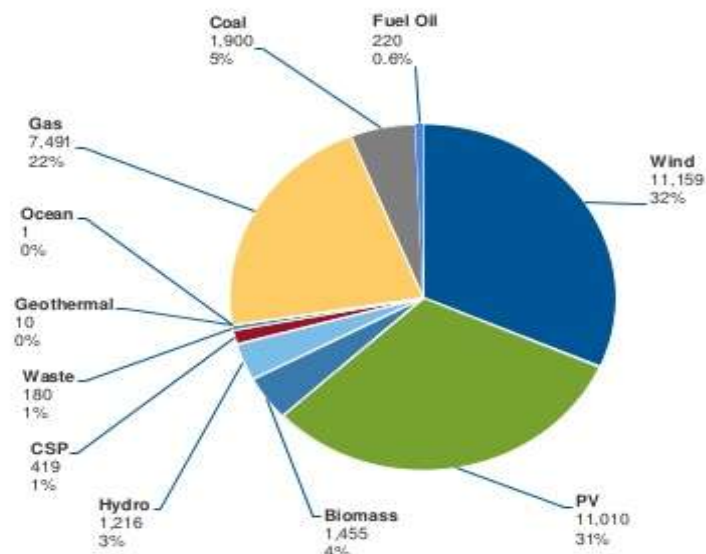
Σχήμα 64 Εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη τα έτη 2012-2013 [58]

Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζονται και άλλα στατιστικά στοιχεία προερχόμενα από τον EWEA έως το έτος 2013.



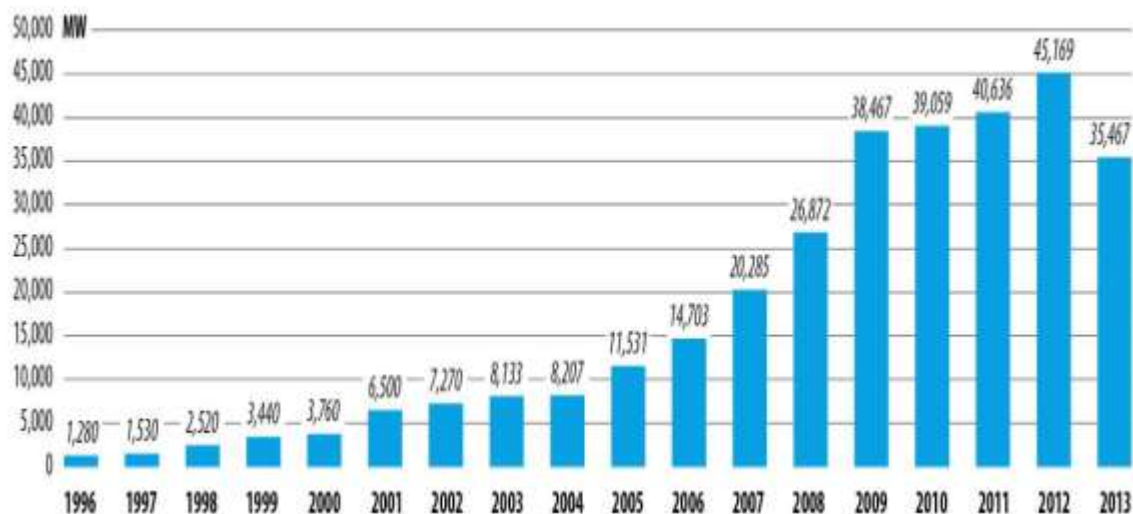
Σχήμα 65 Ποσοστό συνεισφοράς σε αιολική ενέργεια κάθε χώρας για το έτος 2013 [58]

Share of new power capacity installations in EU (total 35,181 MW)



Sources: Platts PowerVision
2013, EWEA, EPIA, ESTELA

Σχήμα 66 Ποσοστά παραγόμενης ισχύος από όλες τις πηγές ενέργειας για το έτος 2013 [58]



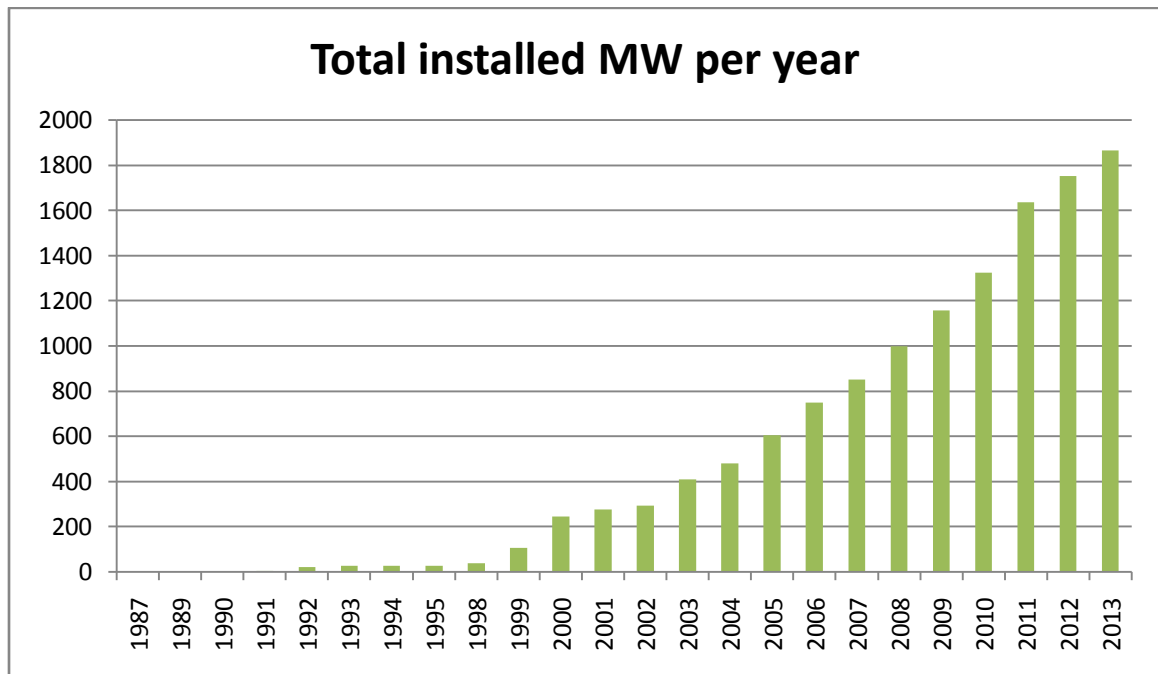
Σχήμα 67 Άνοδος της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος από το έτος 1996 έως το έτος 2013 [58]

2.3. Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

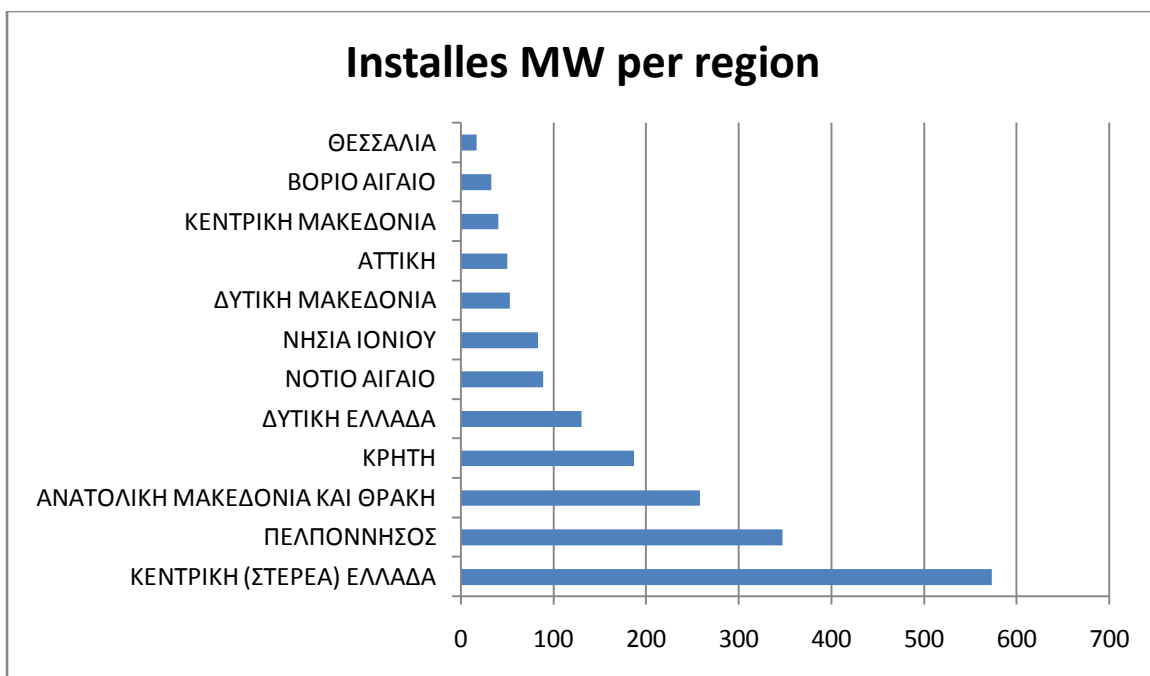
Η Ελλάδα είναι μια χώρα ευνοημένη λόγω των ισχυρών ανέμων που πνέουν στις νησιωτικές και στις παράλιες περιοχές. Η Ελλάδα ως χώρα είναι ικανή να καλύψει μέσω της αιολικής ενέργειας ένα μεγάλο μέρος των ηλεκτρικών αναγκών της. Κυρίως στα νησιά του Αιγαίου, στην Κρήτη και στην Ανατολική Στερεά Ελλάδα οι ταχύτητες του ανέμου κυμαίνονται από 6-7 m/sec, οι οποίες είναι αρκετά ικανοποιητικές.

Η Ελλάδα αντιμετωπίζει δυσκολίες σχετικά με την πρόσβαση και την μεταφορά των ανεμογεννητριών στις περιοχές εγκατάστασης λόγω των ανύπαρκτων υποδομών κυρίως στις ορεινές περιοχές όπου το αιολικό δυναμικό είναι αρκετά υψηλό. Η Κρήτη σαν νησί διαθέτει το μεγαλύτερο δυναμικό ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη Μεσόγειο.

Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζονται με αριθμούς όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για μια πιο αναλυτική περιγραφή.



Σχήμα 68 Συνολικά εγκατεστημένα MW ανά χρόνο [62]



Σχήμα 69 Εγκατεστημένα MW ανά περιοχή [62]

2.4. Μελλοντική εξέλιξη ανεμογεννητριών

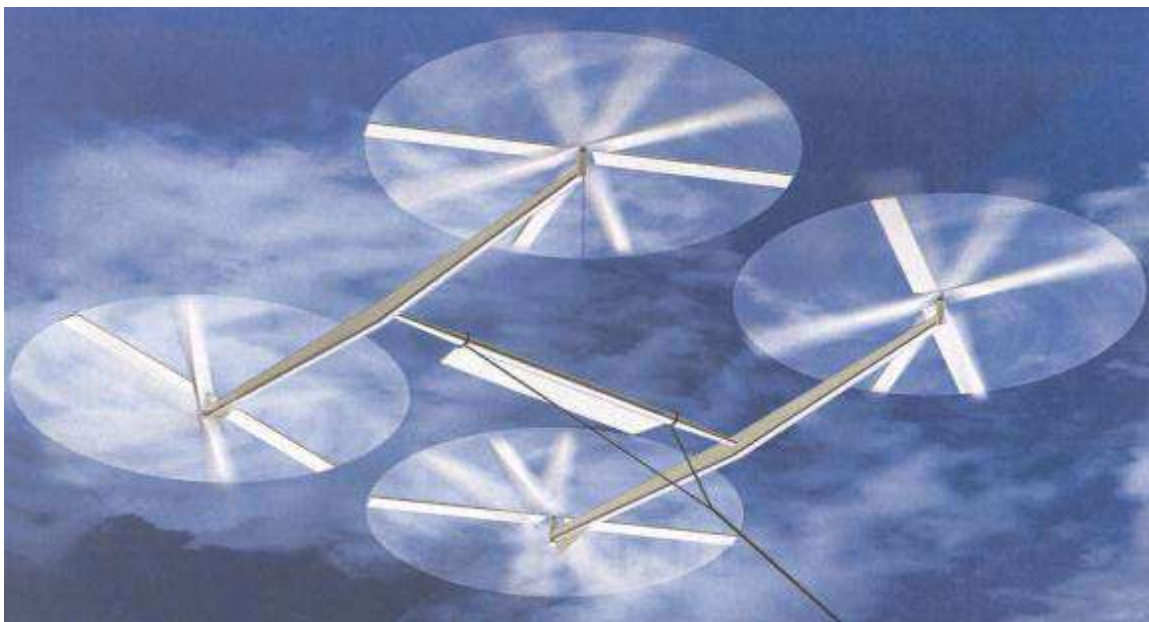
Στην προσπάθεια κατασκευής πιο σύγχρονων και πιο αποδοτικών ανεμογεννητριών βρίσκονται τα τελευταία χρόνια αρκετοί οργανισμοί σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο. Μια από αυτές τις προσπάθειες είναι και αυτή του πανεπιστημίου του Κιότο με την ανάπτυξη ενός συστήματος ανεμογεννήτριας με τριπλάσια παραγόμενη ισχύ από μια συμβατική ανεμογεννήτρια. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει ανεμογεννήτρια εξαγωνικής βάσης στήριξης και ονομάζεται σύστημα Windlens. Το σύστημα αυτό βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο ενώ ήδη έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον διαφόρων εταιριών σε Ευρώπη και Καναδά.



Σχήμα 70 Νέες ιαπωνικές ανεμογεννήτριες [11]

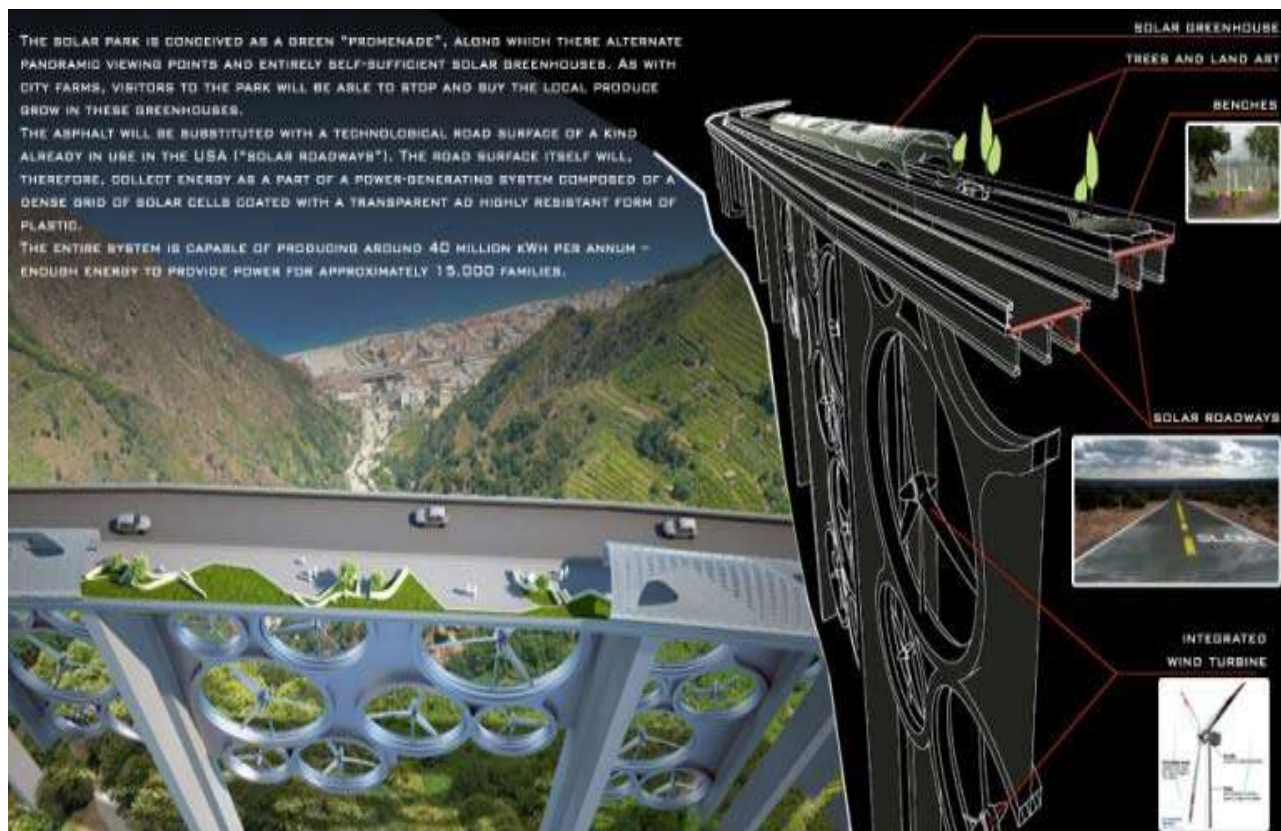
Μια ακόμη προσπάθεια είναι αυτή του Ινστιτούτου Αεροναυπηγικής του πολυτεχνείου του Ντελφτ της Ολλανδίας, το οποίο κατασκεύασε ένα σύστημα, το οποίο αποτελείται από ένα σκελετό χαρταετού και μια γεννήτρια, η οποία είναι εγκατεστημένη στην επιφάνεια φόρτωσης ενός φορτηγού. Το σύστημα αυτό πετάει σε κάποιο ύψος (περίπου 1000 μέτρα) δεμένο με ένα καλώδιο , ενώ το τράβηγμά του παράγει ρεύμα. Αυτό το σύστημα ανεμογεννήτριας θα ήταν ικανό να παράγει εκατοντάδες MW ηλεκτρικού ρεύματος.

Με βάση το σύστημα χαρταετού μια канаδική εταιρία δημιούργησε το σύστημα MARS το οποίο πετάει μόνο του με αέριο ήλιο. Το σύστημα MARS λειτουργεί με περσίδες στην επιφάνεια του σκελετού του, οι οποίες παγιδεύουν τον αέρα και προκαλούν περιστροφή του μπαλονιού γύρω από τον άξονά του. Στον άξονα βρίσκονται γεννήτριες, οι οποίες μετατρέπουν τις περιστροφές σε ενέργεια. Επιπλέον, η εταιρία Kitegen πειραματίζεται σε ένα σύστημα , το οποίο περιλαμβάνει ένα τεράστιο χαρταετό, ο οποίος ελέγχεται από ένα υπολογιστικό σύστημα και είναι συνδεδεμένο με ένα επίγειο καρουζέλ με την περιστροφή του οποίου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Όλα αυτά τα συστήματα βέβαια βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο.



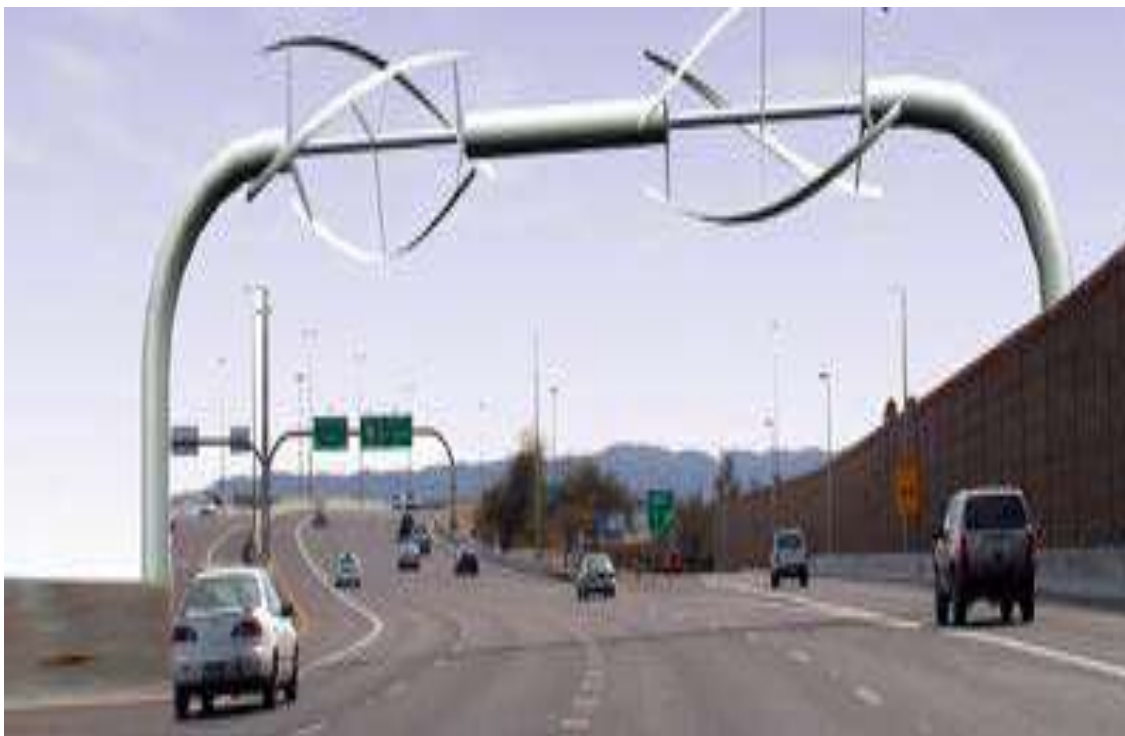
Σχήμα 71 Πειραματικό μοντέλο [11]

Επιπροσθέτως, άλλο ένα μοντέλο που βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο είναι η γέφυρα ‘Solar Wind’ από τους Ιταλούς σχεδιαστές Francesco Colarossi, Giovanna Saracino και Luica Saracino, η οποία περιλαμβάνει ανεμογεννήτριες ανάμεσα στις κολώνες της και στην επιφάνεια του δρόμου είναι τοποθετημένοι ηλιακοί συλλέκτες, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Η παραγόμενη ενέργεια του συστήματος αυτού είναι ικανή να καλύψει, σύμφωνα με τους σχεδιαστές του, δεκαπέντε χιλιάδες κατοικίες ετησίως.



Σχήμα 72 Ανεμοηλιογέφυρα [11]

Τέλος, η μελέτη τοποθέτησης ανεμογεννητριών σε δρόμους υψηλής ταχύτητας είναι μια ακόμα καινοτόμος λύση για τη συλλογή μέρους της ενέργειας που δαπανάται από τα οχήματα. Όπως παρατηρείται στο ακόλουθο σχήμα, ανεμογεννήτριες τοποθετούνται πάνω από το δρόμο, οι οποίες θα κινούνται από τον παραγόμενο άνεμο των οχημάτων.[11]



Σχήμα 73 Ανεμογεννήτρια σε δρόμο υψηλής ταχύτητας [11]

2.5. Άνεμος

Ο άνεμος προκαλείται λόγω της μη ομοιόμορφης θέρμανσης της επιφάνειας του εδάφους από τον ήλιο καθώς και λόγω της περιστροφής της γης. Η επιφάνεια της γης απορροφά θερμότητα, η οποία με τη σειρά της μεταφέρεται στον αέρα προκαλώντας διακυμάνσεις της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας καθώς και μεταβολές στην πίεση και την πυκνότητα του αέρα. Οι μεταβολές αυτές είναι η κύρια αιτία πρόκλησης δυνάμεων που ωθούν τον αέρα προς διάφορες κατευθύνσεις. Σύμφωνα με τον ορισμό της μηχανικής των ρευστών η κίνηση του ανέμου πραγματοποιείται από τις περιοχές της γης με υψηλή πίεση προς τις περιοχές με χαμηλή πίεση.

Λόγω της ανομοιογένειας της επιφάνειας του πλανήτη, η οποία απαρτίζεται από βουνά, ωκεανούς, δάση, ερήμους κ.τ.λ., υπάρχει μια ανομοιομορφία στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τις διάφορες αυτές περιοχές ανάλογα με την κατανομή του εδάφους, την ώρα της ημέρας καθώς και την ετήσια κατανομή του ανέμου. Λόγω των παραγόντων αυτών πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν η περιοχή, η οποία θα εγκατασταθεί το αιολικό πάρκο καθώς και το πώς θα σχεδιαστεί η τοποθέτησή του.

Στην κάθε υποψήφια περιοχή τοποθέτησης ενός αιολικού πάρκου πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν μετεωρολογικές μετρήσεις που γίνονται στη διάρκεια αρκετών χρόνων και με βάση αυτές θα μπορεί να γίνεται ο υπολογισμός της προβλεπόμενης ενεργειακής παραγωγής του αιολικού πάρκου.

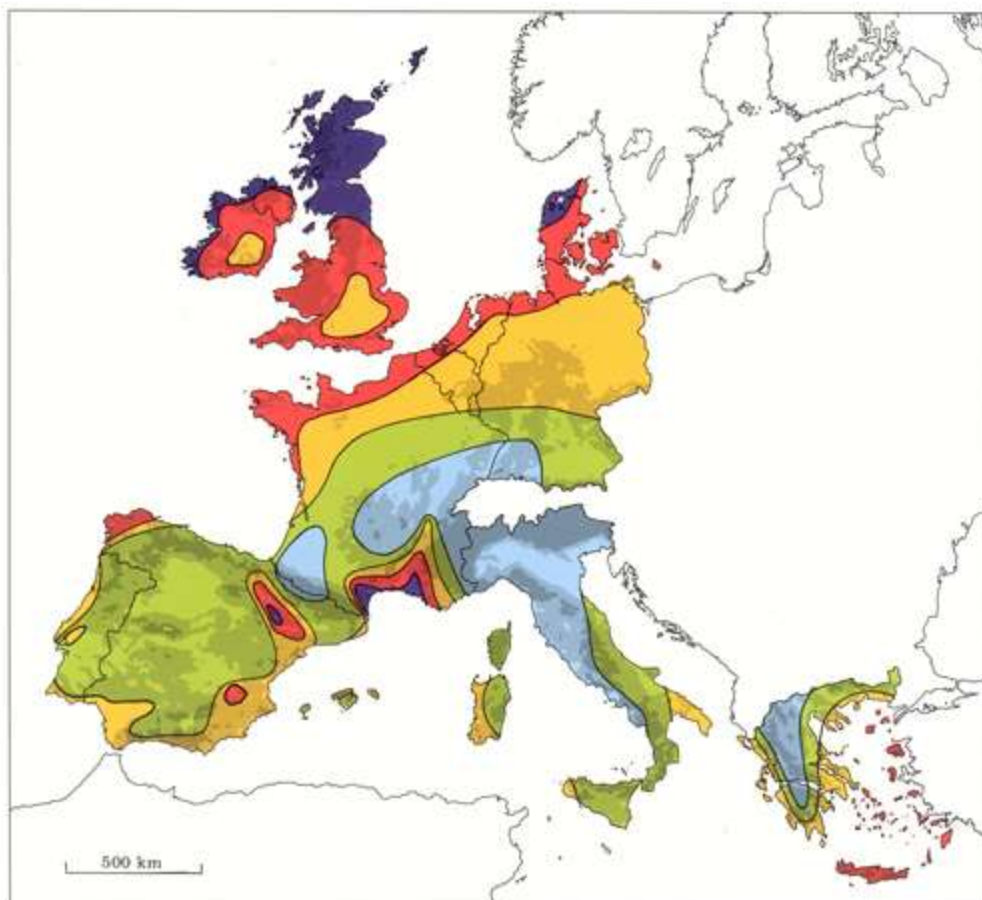
Ένας ακόμα παράγοντας, ο οποίος θα πρέπει να υπολογιστεί στην περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου είναι η κατεύθυνση του ανέμου. Η γνώση της κύριας κατεύθυνσης του ανέμου, της κατεύθυνσης δηλαδή από την οποία προέρχονται οι περισσότεροι άνεμοι καθώς και οι πιο ισχυροί είναι υψηλής σημασίας για τον προσδιορισμό της θέσης και της κατεύθυνσης της τοποθέτησης των ανεμογεννητριών στο αιολικό πάρκο. [39]

2.5.1. Αιολικός Άτλαντας

Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας των ανέμων ανά περιοχή στην επιφάνεια της γης υπάρχουν χάρτες οι οποίοι ονομάζονται αιολικοί άτλαντες (Wind Atlas), και οι οποίοι παρουσιάζουν τις μέσες ταχύτητες του ανέμου καθώς και την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου για κάθε χρόνο σε κάθε περιοχή.

Ο αιολικός άτλαντας προκύπτει βάση μετεωρολογικών μετρήσεων, οι οποίες έχουν καταγραφεί στη διάρκεια αρκετών ετών από μετρήσεις σε ύψος περίπου δέκα μέτρων από την επιφάνεια της γης. Το αιολικό δυναμικό της κάθε περιοχής διαφοροποιείται ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή και την εποχή του έτους. Σε περιοχές οι οποίες υπάρχει το ίδιο κλίμα, ο άνεμος έχει διαφορετική συμπεριφορά, όχι όμως σε μεγάλο βαθμό όπως σε παγκόσμια κλίμακα όπου εκεί παίζουν ρόλο η έκταση του εδάφους και του νερού, η τοπολογία της περιοχής, η γεωγραφία καθώς και το πιθανό ποσοστό βλάστησης.

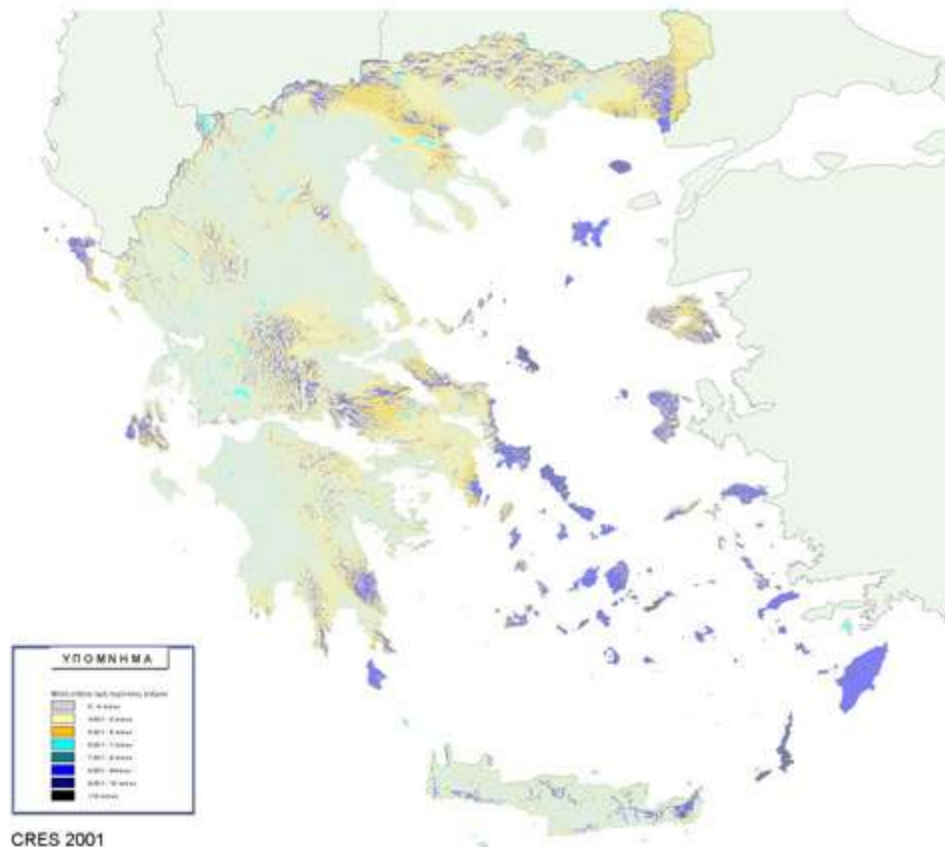
Είναι γεγονός ότι σε περιοχές όπως οι θάλασσες και οι ωκεανοί υπάρχουν σαφώς μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται ο αιολικός άτλαντας της Ευρώπης και της Ελλάδας αντίστοιχα.



Wind resources ¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions										
	Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²
	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Σχήμα 74 Αιολικός Άτλας Ευρώπης

Πηγή: <http://www.wind-energy-the-facts.org/appendix-a.html>



Η κατανομή Weibull βασίζεται σε δύο παραμέτρους. Στην παράμετρο κλίμακας ταχύτητας του ανέμου C και στην παράμετρο μορφής k . Η παράμετρος C στον ελληνικό χώρο υπολογίζεται σε τιμές από 5 έως 7, ενώ η παράμετρος k υπολογίζεται μεταξύ 1,5 και 2,0. Όσο μεγαλύτερη τιμή παίρνει η παράμετρος k , τόσο πιο μικρή διασπορά παρουσιάζεται στις ταχύτητες του ανέμου στην εκάστοτε περιοχή.[31]

Η σχέση η οποία εκφράζει μία κατανομή Weibull είναι η ακόλουθη:

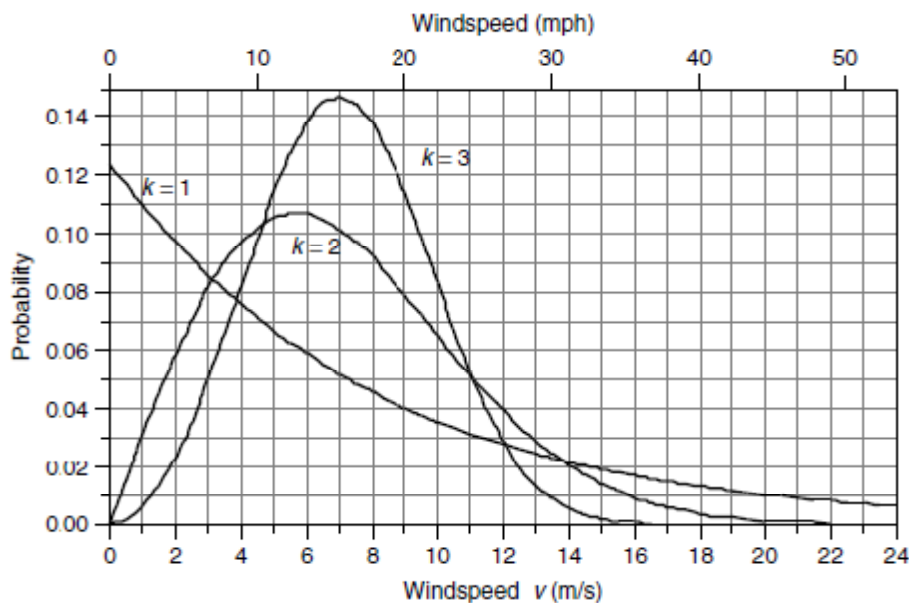
$$f(U) = \frac{k}{C} * \left(\frac{U}{C}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{U}{C}\right)^k} \quad [2.1]$$

όπου

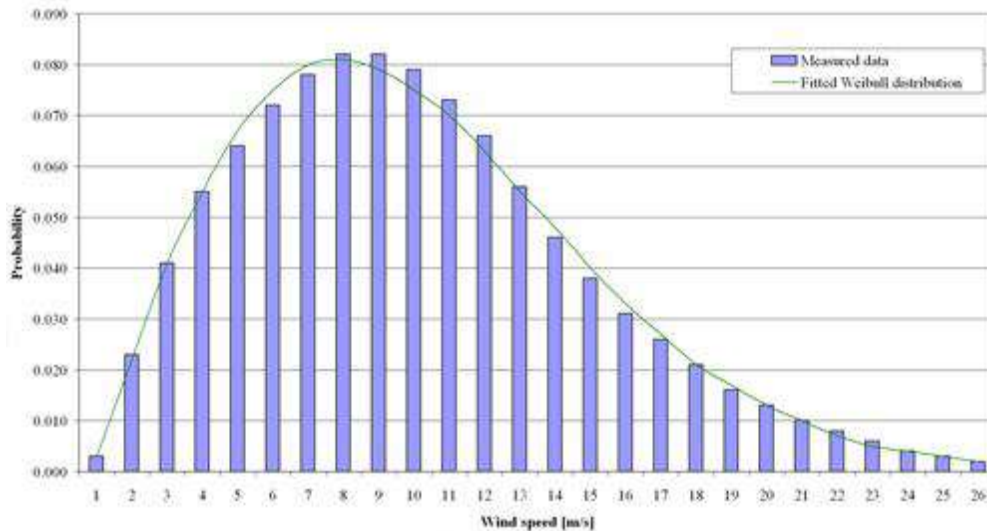
C : η παράμετρος κλίμακας ταχύτητας ανέμου

k : η παράμετρος μορφής

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας κατανομής Weibull



Σχήμα 76 Συνάρτηση Πυκνότητας Κατανομής Weibull με $C=8$ και $k=1,2,3$ [31]



Σχήμα 77 Παράδειγμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας Weibull για δεδομένες τιμές ταχύτητας ανέμου [39]

Η σωρευτική πιθανότητα η ταχύτητα U του ανέμου να είναι μικρότερη από κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου U_x , η οποία ακολουθεί κατανομή Weibull εκφράζεται από τη σχέση:

$$F(U \leq U_x) = \int_0^{U_x} f(U) dU = 1 - e^{-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k} \quad [2.2]$$

Έτσι προκύπτει ότι:

$$F(U \geq U_x) = e^{-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k} \quad [2.3]$$

Μια ειδική υποπερίπτωση της κατανομής Weibull είναι η κατανομή Rayleigh όταν η τιμή του k ισούται με 2. Εάν στην συνάρτηση κατανομής Weibull αντικαταστήσουμε όπου $k=2$ προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$F(U) = \frac{2U}{c^2} * e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^2} \quad [2.4]$$

Τότε η μέση ταχύτητα του ανέμου προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{U} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} * C \quad [2.5]$$

Και η κατανομή πιθανότητας του ανέμου διαμορφώνεται ως εξής:

$$f(U) = \frac{\pi * U}{2 * U^2} * e^{\frac{\pi}{4}(\frac{U}{\bar{U}})^2} \quad [2.6]$$

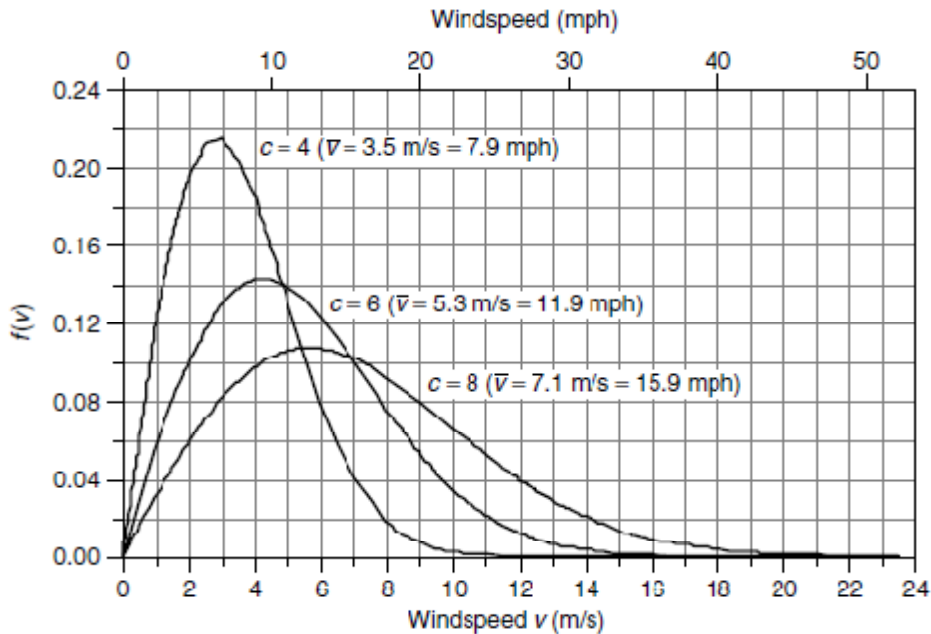
Τέλος, για τη μέση κυβική ταχύτητα του ανέμου προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\overline{U^3} = \frac{3C^3\sqrt{\pi}}{4} \quad [2.7]$$

Και

$$\overline{U^3} = \frac{6\overline{U^3}}{\pi} \quad [2.8]$$

Η κατανομή πιθανότητας Rayleigh χρησιμοποιείται κατά κόρον σε σύγκριση με την κατανομή πιθανότητας Weibull λόγω των απλοποιημένων μαθηματικών της πράξεων. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται μια συνάρτηση πυκνότητας κατανομής Rayleigh.



Σχήμα 78 Συνάρτηση Πυκνότητας Κατανομής Rayleigh για C=4,6,8[31]

2.5.3. Η ισχύς του ανέμου

Σκοπός μιας ανεμογεννήτριας είναι η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Η ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει κάποιες διατάξεις (οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια), οι οποίες προκαλούν μετακίνηση της ενέργειας στη γεννήτρια και κατόπιν την μεταφορά της στο ηλεκτρικό δίκτυο.[37]

Η αεροδυναμική ισχύς του ανέμου κινούμενου με ταχύτητα U που προσπίπτει σε πτερύγια ακτίνας R εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Pa = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad [2.9]$$

Όπου

ρ : η πυκνότητα του αέρα ($1,25 \text{ kg/m}^3$)

A : η επιφάνεια του δίσκου ακτίνας R που καλύπτουν τα πτερύγια σε μία περιστροφή τους (m^2), $A = \pi R^2$

U : η ισοδύναμη ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης των (m/s)

Την αεροδυναμική ισχύ που προκύπτει από τον παραπάνω τύπο προσπαθεί να εκμεταλλευτεί η ανεμογεννήτρια. Στην πραγματικότητα, η ισχύς η οποία τελικά εκμεταλλεύεται η ανεμογεννήτρια είναι πιο λίγη λόγω του ότι ένα μέρος της αεροδυναμικής ισχύος διατηρείται αφού ο άνεμος περάσει από τον ρότορα της ανεμογεννήτριας. Ένας επιπλέον λόγος είναι ότι ένα μέρος της ισχύος χάνεται λόγω εσωτερικών τριβών ανάμεσα στον αέρα και στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας.

Για το λόγο αυτό το τελικό ποσό ισχύος που προκύπτει συσχετίζεται με τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος C_p των πτερυγίων. Η μηχανική ισχύς των πτερυγίων είναι ανάλογη του συντελεστή C_p και προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) A U^3 \quad [2.10]$$

Όπου

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_m}{P_a} : \text{ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος των πτερυγίων}$$

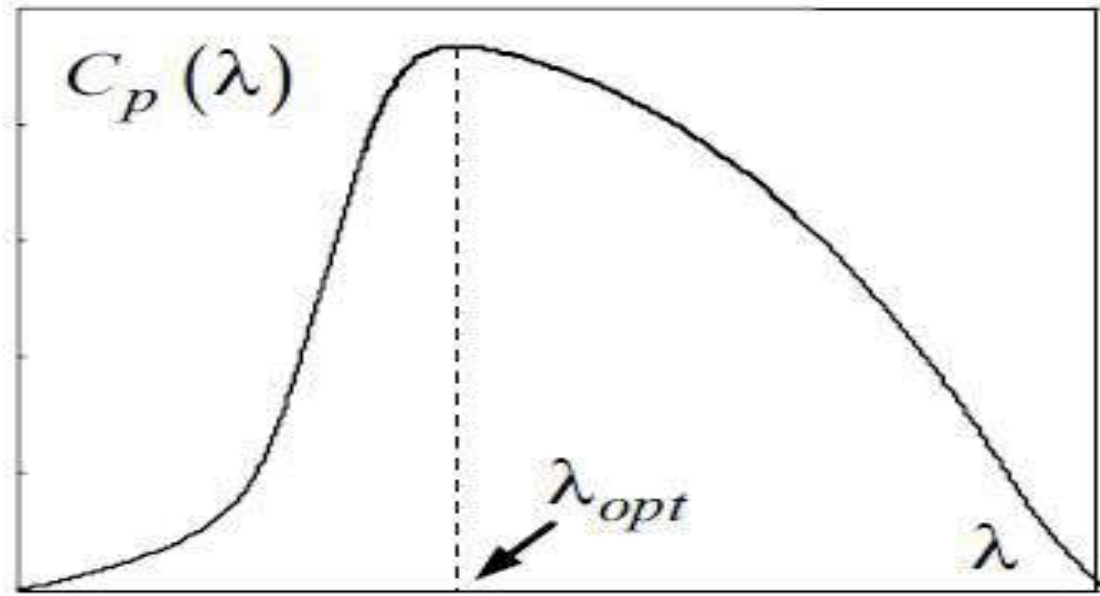
Με τον όρο λ εκφράζουμε τον λόγο της γωνιακής ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad [2.11]$$

Όπου

R : η ακτίνα των πτερυγίων

Η σχέση του συντελεστή ισχύος των πτερυγίων C_p και του συντελεστή λ είναι μη γραμμική και χαρακτηριστική της μορφή είναι αυτή του παρακάτω σχήματος:



Σχήμα 79 Καμπύλη αεροδυναμικού συντελεστή[22]

Με τον όρο β εκφράζεται η ελεγχόμενη γωνία κλίσης (pitch) των πτερυγίων. Η γωνία αυτή είναι η γωνία περιστροφής των πτερυγίων ως προς τον άξονά τους και χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου.

Τέλος, η ηλεκτρική ισχύς, η οποία εξάγεται από την ανεμογεννήτρια, προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$Pe = n_t * Pm \quad [2.12]$$

Όπου

Pm : η μηχανική ισχύς των πτερυγίων

n_t : ο συντελεστής απόδοσης του ηλεκτρομηχανολογικού μέρους της ανεμογεννήτριας

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση της αεροδυναμικής ισχύος P_a που αναφέρθηκε προηγουμένως προκύπτει και η μέση αεροδυναμική ισχύς των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας και εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{P}_a = \int_0^\infty P_a(U)f(U)dU = \int_0^\infty \frac{1}{2}pAU^3f(U)dU = \frac{1}{2}pA \int_0^\infty U^3f(U)dU = \frac{1}{2}pA\bar{U}^3 \quad [2.13]$$

Αντικαθιστώντας τη μέση κυβική ταχύτητα \bar{U}^3 με την υπόθεση ότι ακολουθεί κατανομή Rayleigh:

$$\bar{U}^3 = \frac{3c^3\sqrt{\pi}}{4} \quad [2.14]$$

προκύπτει η σχέση:

$$\bar{P}_a = \frac{1}{2}pA\bar{U}^3 = \frac{1}{2}pA\frac{3c^3\sqrt{\pi}}{4} = \frac{3}{8}\sqrt{\pi}pAc^3 \quad [2.15]$$

2.5.4. Εξάρτηση ταχύτητας ανέμου από το ύψος

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν πύργους, οι οποίοι φέρνουν τα πτερύγια σε αρκετά μεγάλο ύψος, στο οποίο ο αέρας έχει μεγαλύτερη ένταση και έτσι η ανεμογεννήτρια έχει καλύτερη απόδοση. Η ταχύτητα του ανέμου είναι εξαρτώμενη του ύψους από την επιφάνεια της γης και ο τρόπος μεταβολής της δίνεται από τη σχέση[18]:

$$\frac{U_H}{U_o} = \left(\frac{H}{H_o}\right)^a \quad [2.16]$$

Όπου

U_H : η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H

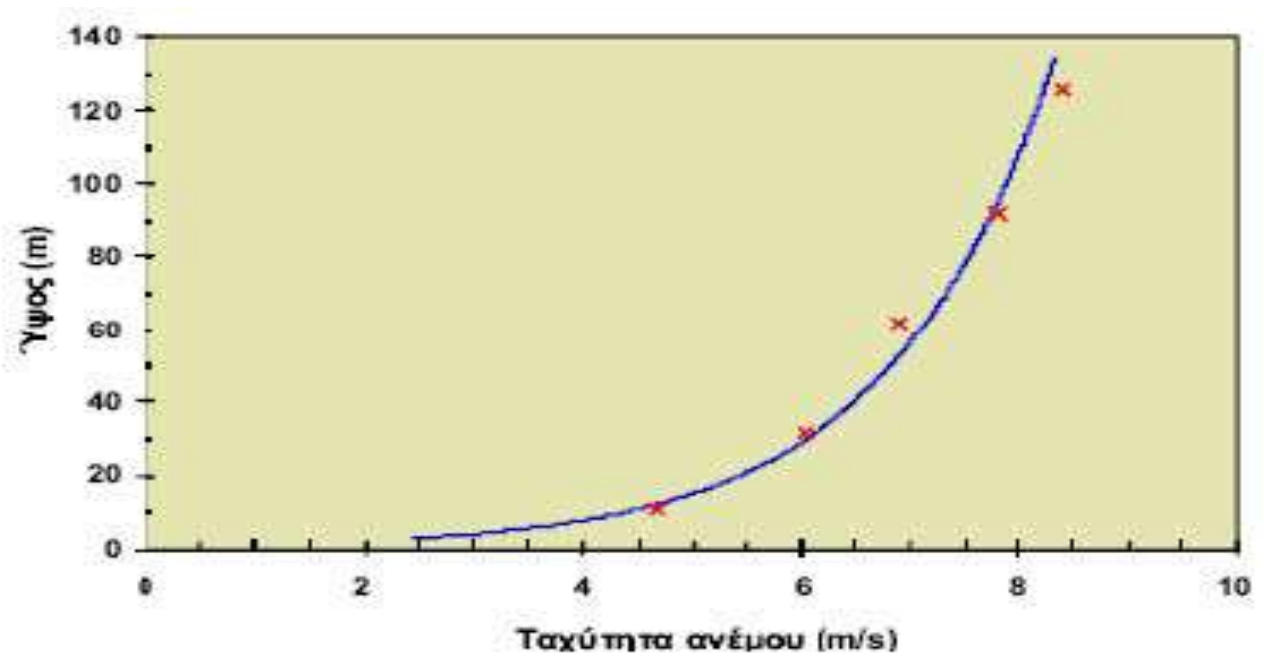
U_o : η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H_o

Η παράμετρος α είναι ο συντελεστής τριβής, ο οποίος είναι άμεσα εξαρτώμενος του είδους του εδάφους. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τιμές του α για διάφορα είδη επιφανειών της γης.

Τύπος Εδάφους	Συντελεστής Τριβής α
Λείο έδαφος, ήρεμη θάλασσα	0,1
Ψηλό χορτάρι	0,15
Ψηλοί σωροί, εμπόδια και θάμνοι	0,2
Δάσος, πολλά δένδρα και θάμνοι	0,25
Μικρή πόλη με δένδρα και δάση	0,3
Μεγάλη πόλη με ψηλά κτίρια	0,4

Πίνακας 3 Συντελεστής τριβής α για διάφορες επιφάνειες

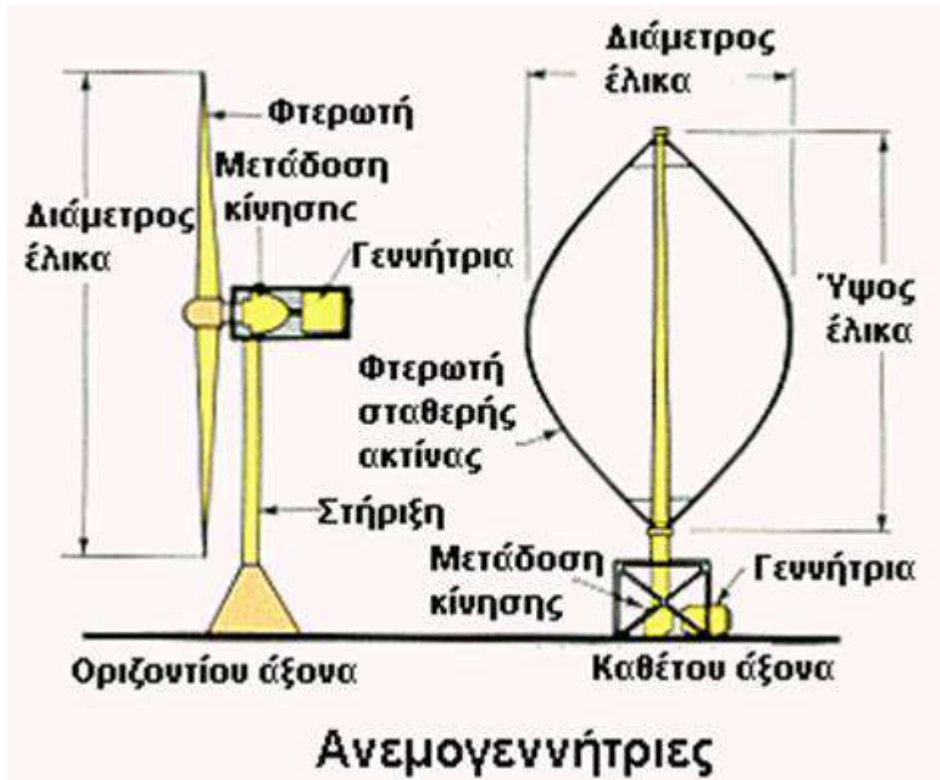
Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με το ύψος.



2.6. Κατασκευαστική Δομή

2.6.1. Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο τον οποίο χρησιμοποιούν για να εκμεταλλευτούν τον άνεμο: στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα και στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.



Σχήμα 81 Οι δύο κύριοι τύποι ανεμογεννητριών [39]

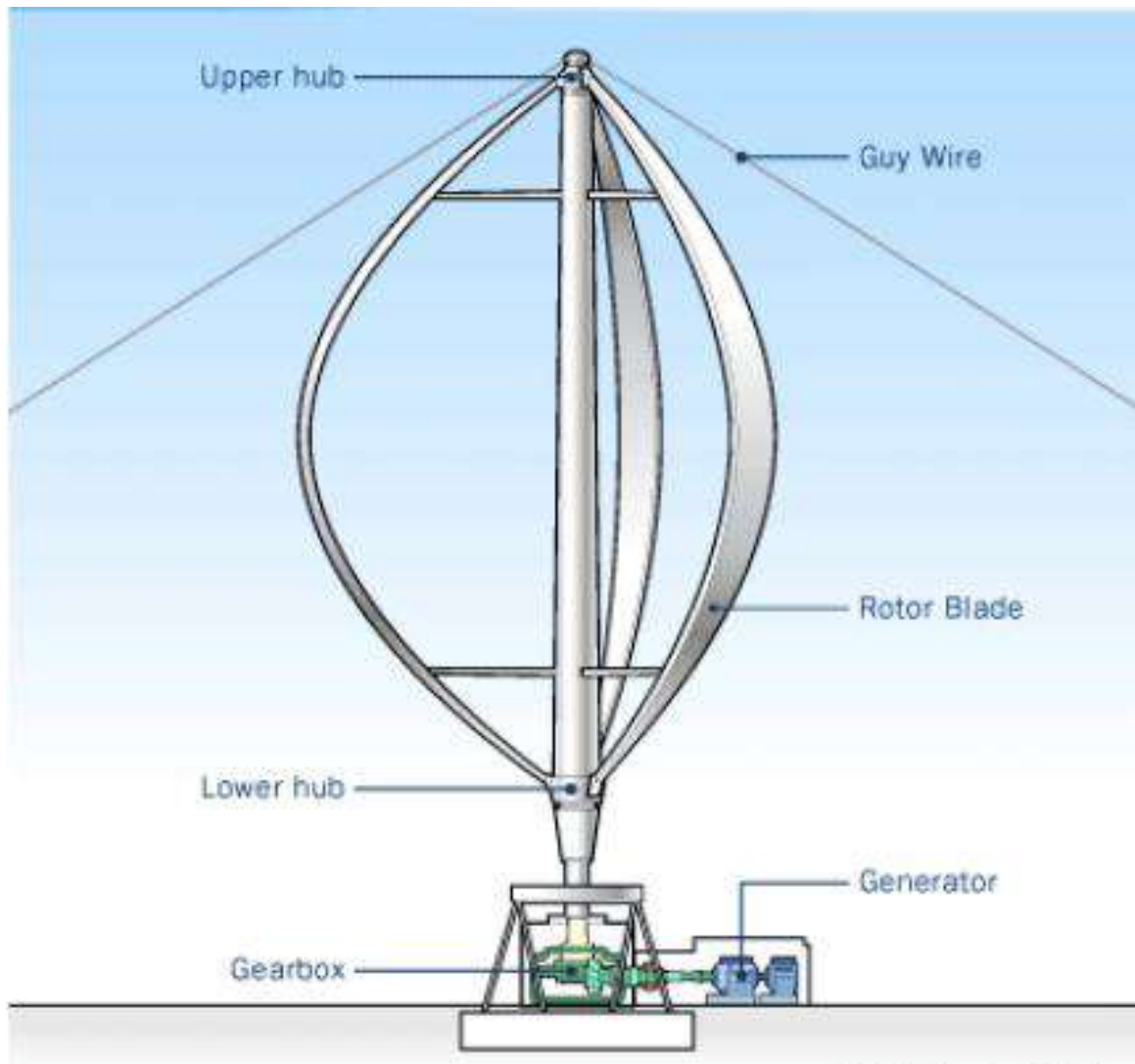
2.6.2. Κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν άξονα περιστροφής, ο οποίος είναι κάθετος στην επιφάνεια του εδάφους και στην κατεύθυνση που κινείται ο άνεμος. Οι ανεμογεννήτριες αυτές έχουν τη δυνατότητα προσαρμογής προς την κατεύθυνση που κινείται ο άνεμος αυτόματα. Επιπλέον, ο σχεδιασμός μιας ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα είναι απλός και έτσι το κατασκευαστικό της κόστος είναι πιο χαμηλό σε σχέση με μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Επιπρόσθετα, ο σχεδιασμός των πτερυγίων είναι τέτοιος ούτως ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος σπασίματος ή καταστροφής των πτερυγίων λόγω του αέρα σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, καθώς δεν κινούνται και με την ίδια ταχύτητα (στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα η ταχύτητα είναι αρκετά υψηλή).

Στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, το μηχανικό μέρος βρίσκεται κοντά στο έδαφος και έτσι η συντήρηση και η τοποθέτησή του είναι αρκετά εύκολη. Αυτό βέβαια εμπεριέχει και ένα μειονέκτημα καθώς ο δρομέας της ανεμογεννήτριας είναι πολύ κοντά στο έδαφος και έτσι η ανεμογεννήτρια δεν εκμεταλλεύεται πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Όμως, οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν μικρότερη απόδοση από αυτές του οριζόντιου άξονα με τις πρώτες να φτάνουν το 30% ενώ τις δεύτερες να ξεπερνούν το 50% λόγω της εκμετάλλευσης των μεγαλύτερων ταχυτήτων ανέμων και λόγω αδυναμίας των πρώτων σε αεροδυναμικά κενές περιοχές.

Διαδεδομένα μοντέλα ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι οι Darrieus και Savonius. Οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus παρουσιάστηκαν γύρω στο 1920 από το μηχανικό γαλλικής καταγωγής George Darrieus με το χαρακτηριστικό σχήμα C με σχοινοειδή πτερύγια. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια ανεμογεννήτρια αυτού του τύπου [3]:



Σχήμα 82 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα τύπου Darrieus [39]

Οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius παρουσιάστηκαν γύρω στο 1930 από τον μηχανικό φιλανδικής καταγωγής Sigard Savonius με την κατασκευαστική δομή σχήματος S. Οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius είχαν δημιουργηθεί με αρχικό σκοπό τις μετεωρολογικές προβλέψεις καιρικών συνθηκών και για την άντληση νερού. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται μια ανεμογεννήτρια τύπου Savonius:

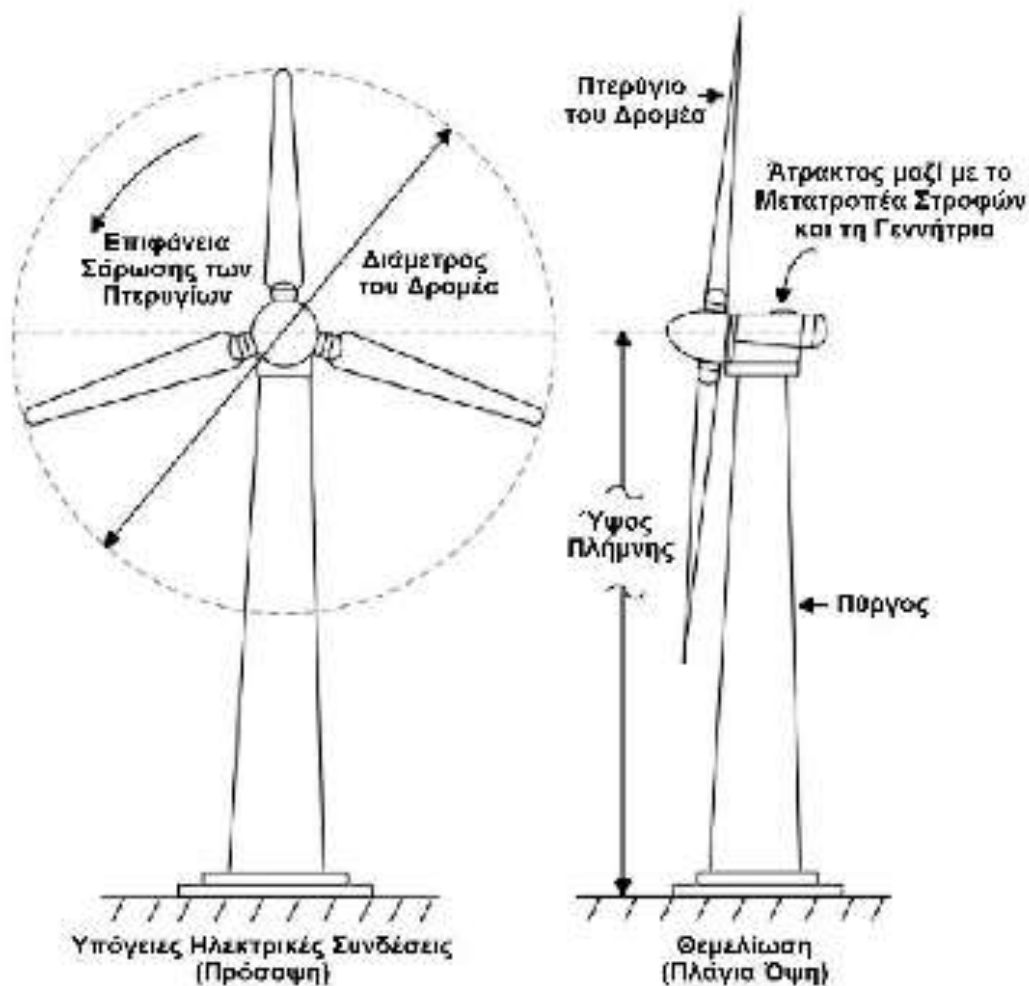


Σχήμα 83 Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Άξονα τύπου Savonius [39]

2.6.3. Οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν δρομέα , ο οποίος είναι τύπου έλικα και ο οποίος είναι οριζόντια διαταγμένος στην κατεύθυνση του ανέμου και στο έδαφος. Στην αγορά υπάρχουν ανεμογεννήτριες με ένα, δύο και τρία πτερύγια με πιο διαδεδομένες τις τελευταίες. Επιπλέον, μια άλλη κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι με κριτήριο το αν ο άνεμος συναντά πρώτα τα πτερύγια ή τον θάλαμο. Με βάση αυτή την κατηγοριοποίηση χωρίζονται σε ανεμογεννήτριες ανάντη και κατάντη της ροής του ανέμου.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες οριζώντιου άξονα έχουν λεπτά πτερύγια , τα οποία χαρακτηρίζονται από τη γωνία που σχηματίζουν με τον άξονα περιστροφής τους αποτελώντας χαρακτηριστικό κατασκευής της έλικας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν το κριτήριο του Betz η απόδοση της ανεμογεννήτριας οριζώντιου άξονα δεν μπορεί να ξεπεράσει το ποσοστό του 59%. Σημαντικό πλεονέκτημα μιας ανεμογεννήτριας οριζώντιου άξονα είναι ο μεγάλος αεροδυναμικός συντελεστής της, όμως η άτρακτος που εμπεριέχει τη γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων τοποθετείται στην κορυφή του πύργου κάνοντας την κατασκευή της ανεμογεννήτριας σύνθετη και αρκετά δαπανηρή. Τέλος, η έλικα πρέπει κάθε φορά να προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση του ανέμου και έτσι απαιτείται πρόσθετος σερβομηχανισμός. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται μια ανεμογεννήτρια οριζώντιου άξονα.[3]



Σχήμα 84 Σχηματική αναπαράσταση μιας Α/Γ οριζώντιου άξονα [18]

2.7. Δομή Ανεμογεννήτριας

Στις παρακάτω παραγράφους θα κάνουμε μια σύντομη αναφορά στα μέρη της ανεμογεννήτριας, τα οποία παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα[14]:



Σχήμα 85 Δομικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας [19]

2.7.1. Πύργος

Ο πύργος είναι το δομικό στοιχείο το οποίο στην ουσία στηρίζει το θάλαμο με τον μηχανισμό της ανεμογεννήτριας καθώς και τον ρότορα. Μέχρι σήμερα υπάρχουν δύο είδη πύργων: οι πύργοι σωληνωτού τύπου και οι πύργοι τύπου δικτυώματος.

Οι πύργοι σωληνωτού τύπου είναι σήμερα οι πιο διαδεδομένοι και τα υλικά κατασκευής τους είναι το τσιμέντο και τα χαλυβδόφυλλα. Για τη συντήρηση της ανεμογεννήτριας η πρόσβαση γίνεται μέσω χαλύβδινης πόρτας στη βάση του πύργου, ο οποίος είναι κωνικής μορφής, και μιας σκάλας στο εσωτερικό του πύργου που οδηγεί στο θάλαμο του μηχανισμού της ανεμογεννήτριας.

Οι σωληνοειδείς πύργοι είναι επικρατέστεροι λόγω της ασφαλούς στέγασης των οργάνων της ανεμογεννήτριας και της εσωτερικής σκάλας ή του ασανσέρ που οδηγεί στο θάλαμο μηχανισμού της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 86 Ανεμογεννήτριες με χαλύβδινους σωληνοειδείς πύργους

Πηγή: <http://www.econews.gr/2010/10/27/news-ypeka-anemogennitries/>

Οι πύργοι τύπου δικτυώματος κατασκευάζονται από χαλύβδινα δικτυώματα με τα στοιχεία του γαλβανισμένα σε υψηλή θερμοκρασία για την αποφυγή διαβρώσεων. Σαν είδος ανεμογεννήτριας είναι χαμηλού κόστους αλλά η χρήση τους έχει περιοριστεί λόγω της όχι πολύ καλής αισθητικής τους. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται μια ανεμογεννήτρια τέτοιου τύπου.



Σχήμα 87 Πύργοι τύπου δικτυώματος

Πηγή: http://konstantinosdavanelos.blogspot.gr/2012/12/blog-post_4760.html

2.7.2. Πτερύγια

Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να αποτελείται από ένα, δύο ή τρία πτερύγια (η πιο συνηθισμένη) ή να είναι πολύπτερη. Οι ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια είναι πιο όμορφες αισθητικά και έχουν μικρότερη καταπόνηση. Επιπλέον, είναι σε θέση να αναπτύξουν αρκετά μεγάλες ταχύτητες περιστροφής ενώ υπόκεινται σε πιο μικρή ώση λόγω του ανέμου.

Τα σύγχρονα πτερύγια είναι κατασκευασμένα από υλικό πλαστικού τύπου με υαλονήματα ενώ παλαιότερα χρησιμοποιούνταν σαν υλικά κατασκευής το ξύλο, ο χάλυβας και το αλουμίνιο. Συνήθως, το κάθε πτερύγιο είναι επικαλυμμένο με ειδικό υλικό για την προστασία του από την υπεριώδη ακτινοβολία ενώ στα πτερύγια τοποθετείται και μηχανισμός για τη προστασία από τους κεραυνούς.

Τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας έχουν τη δυνατότητα κίνησης με σταθερό ή μεταβλητό βήμα και την περιστροφή του ακροπτερυγίου τους (flap). Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες τα πτερύγια έχουν μήκη από 60m έως 100m, ισχύς των οποίων ξεκινά από 50W έως 5MW και ταχύτητες περιστροφής που ξεκινούν από 50m/s και κυμαίνονται έως και 100m/s. Το πλήθος των πτερυγίων αποτελεί τον δρομέα μιας ανεμογεννήτριας.

2.7.3. Μηχανισμός μεταβλητού βήματος πτερυγίων (pitch)

Ο μηχανισμός μεταβλητού βήματος των πτερυγίων σε μια ανεμογεννήτρια χρησιμοποιείται για την περιστροφή των πτερυγίων γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, ούτως ώστε να μεταβληθεί η γωνία προσβολής του πτερυγίου από τον άνεμο. Στην περίπτωση που η ένταση του ανέμου αρχίζει να μεγαλώνει, τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας στρέφονται γύρω από τον άξονά τους ούτως ώστε να μειώνεται και η αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης σε σχέση με τον άνεμο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας στα επιθυμητά όρια. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει διατήρηση της ταχύτητας περιστροφής στα κανονικά επίπεδα, καλύτερη αεροδυναμική απόδοση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, επιθυμητή ισχύς εξόδου καθώς και μικρότερη καταπόνηση των πτερυγίων.

2.7.4. Φρένο

Σκοπός της χρήσης του φρένου σε μια ανεμογεννήτρια είναι το σταμάτημα του δρομέα της ανεμογεννήτριας όποτε αυτό κρίνεται απαραίτητο. Το φρένο τοποθετείται συνήθως στον άξονα υψηλής ταχύτητας λόγω του ότι είναι μεγαλύτερων διαστάσεων και είναι πιο συμφέρον οικονομικά. Βέβαια η τοποθέτηση του φρένου στον άξονα χαμηλής ταχύτητας είναι πιο αποδοτική διότι προστατεύει καλύτερα τον δρομέα και το κιβώτιο ταχυτήτων.

2.7.5. Γεννήτρια

Η γεννήτρια της ανεμογεννήτριας είναι τοποθετημένη στην καμπίνα επάνω στον πύργο και σκοπός της είναι η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στην ουσία είναι μια μηχανή μετατροπής εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία εγκαθίσταται στην έξοδο του κιβωτίου ταχυτήτων. Οι γεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις σύγχρονες και στις ασύγχρονες (επαγωγικές). Οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν υψηλότερη απόδοση από τις ασύγχρονες λόγω του ότι μπορούν να ελέγχουν την άεργο ισχύ τους.

Κατάλληλοι ρυθμιστές στο εσωτερικό της γεννήτριας ρυθμίζουν τη θερμοκρασία της και στέλνουν σήματα στην οθόνη του ελεγκτή ούτως ώστε αν η θερμοκρασία ξεπεράσει κάποιο ορισμένο επιτρεπτό όριο η γεννήτρια κλείνει για λόγους ασφαλείας.

2.7.6. Σύστημα προσανεμισμού (yaw drive)

Σκοπός της εγκατάστασης του συστήματος προσανεμισμού στην ανεμογεννήτρια είναι η διαρκής μετακίνηση του άξονα περιστροφής της ατράκτου ούτως ώστε να ακολουθεί συνεχώς τη διεύθυνση του ανέμου. Ο σωστός προσανατολισμός της ανεμογεννήτριας είναι αποδοτικός για δύο λόγους. Αρχικά, διότι αφενός αυξάνει κατά πολύ την παραγωγή ενέργειας και αφετέρου ελαχιστοποιούνται τα φορτία στο δρομέα. Το σύστημα προσανεμισμού λαμβάνει δεδομένα από το ηλεκτρικό σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, το οποίο παίρνει πληροφορίες από τον ανεμοδείκτη που είναι τοποθετημένος στην κορυφή της ανεμογεννήτριας και στρέφεται ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου.

2.7.7. Κιβώτιο ταχυτήτων

Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα από τα κυριότερα εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας και βρίσκεται και αυτό στο θάλαμο επάνω από τον πύργο της ανεμογεννήτριας. Το κιβώτιο ταχυτήτων παρεμβάλλεται ανάμεσα στον άξονα χαμηλής και στον άξονα υψηλής ταχύτητας μεταφέροντας την κίνηση στο διαφορικό υψηλών στροφών αναγκάζοντάς το να στρέφεται με πενήντα φορές μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή του διαφορικού χαμηλών στροφών. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα κιβώτιο ταχυτήτων υπό κατασκευή.[37]



Σχήμα 88 Κιβώτιο ταχυτήτων ανεμογεννήτριας κατά την κατασκευή του [37]

2.7.8. Ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης

Η χρήση του ανεμόμετρου είναι για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου την οποία αποστέλλει στη συνέχεια στο σύστημα ελέγχου. Η χρήση του ανεμοδείκτη είναι η μέτρηση της διεύθυνσης του ανέμου και τα δεδομένα των μετρήσεων στέλνονται στο σύστημα προσανεμισμού ούτως ώστε να ρυθμίσει την ανεμογεννήτρια στην κατάλληλη θέση σε σχέση με τον άνεμο.

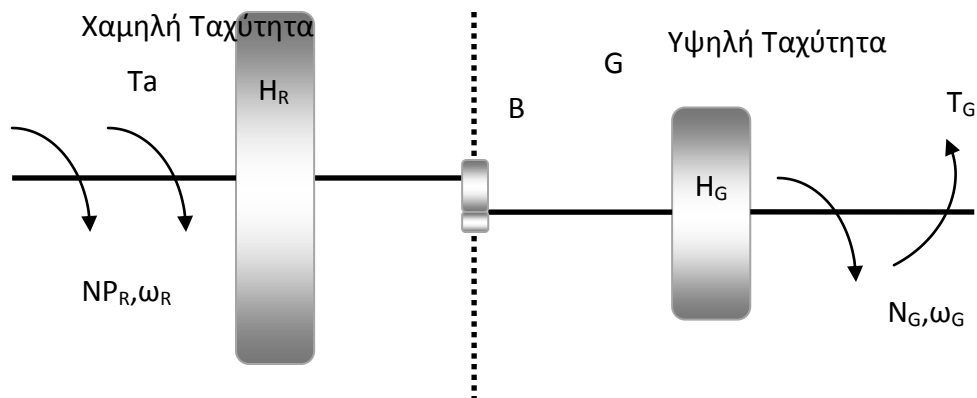
2.7.9. Θάλαμος

Ο θάλαμος στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα βρίσκεται στην κορυφή του πύργου όπου περιέχονται όλα τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας. Ο θάλαμος είναι κατασκευασμένος από συγκεκριμένο υλικό (fiberglass). Τα μηχανικά μέρη τα οποία εμπεριέχονται στο θάλαμο είναι οι άξονες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, το κιβώτιο ταχυτήτων, το φρένο, η γεννήτρια, το pitch control system, ο μηχανισμός προσανεμισμού, το σύστημα ψύξης και το υδραυλικό σύστημα που ρυθμίζει τη γωνία των πτερυγίων.

2.8. Μηχανικό σύστημα μετάδοσης κίνησης

Το μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης σε μια ανεμογεννήτρια απαρτίζεται από δύο άξονες και για την μοντελοποίηση του χρησιμοποιείται το ισοδύναμο μοντέλο δύο ελαστικά συνδεδεμένων μαζών. Η πρώτη μάζα του μοντέλου με αδράνεια (H_R) βρίσκεται αριστερά του κιβωτίου ταχυτήτων (GB) και αποτελείται από τα πτερύγια, ένα μέρος του κιβωτίου και τον άξονα χαμηλής ταχύτητας στροφών και η δεύτερη μάζα με αδράνεια (H_G) βρίσκεται δεξιά του κιβωτίου ταχυτήτων (GB) και αποτελείται από τον άξονα υψηλής ταχύτητας στροφών, ένα μέρος του κιβωτίου και τη γεννήτρια.

Όπως παρατηρείται στο ακόλουθο σχήμα, στην μάζα H_R ασκείται στον κινητήριο άξονα η αεροδυναμική ροπή T_a , ενώ στη μάζα H_G ασκείται η ροπή της γεννήτριας T_G σε φορά αντίθετη από αυτή της αεροδυναμικής ροπής. Η φορά της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα έχει την ίδια φορά με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας και αντίθετη της ροπής της.[30]



Σχήμα 89 Μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης

Σε ένα σύστημα όπως το παραπάνω η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$N_G = \frac{120f}{p} \text{ σε (στροφές ανά λεπτό ΣΑΛ)} \quad [2.17]$$

Όπου

f: η συχνότητα τροφοδοσίας της γεννήτριας

p: ο αριθμός των πόλων της ηλεκτρικής γεννήτριας

Ένας άλλος τύπος υπολογισμού της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας, αυτή τη φορά σε rad/s και όχι σε ΣΑΛ είναι ο ακόλουθος:

$$\omega_G = 2\pi f = \frac{\pi}{30} N_G \quad [2.18]$$

Επιπλέον, μπορούμε να υπολογίσουμε και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα με την ακόλουθη σχέση:

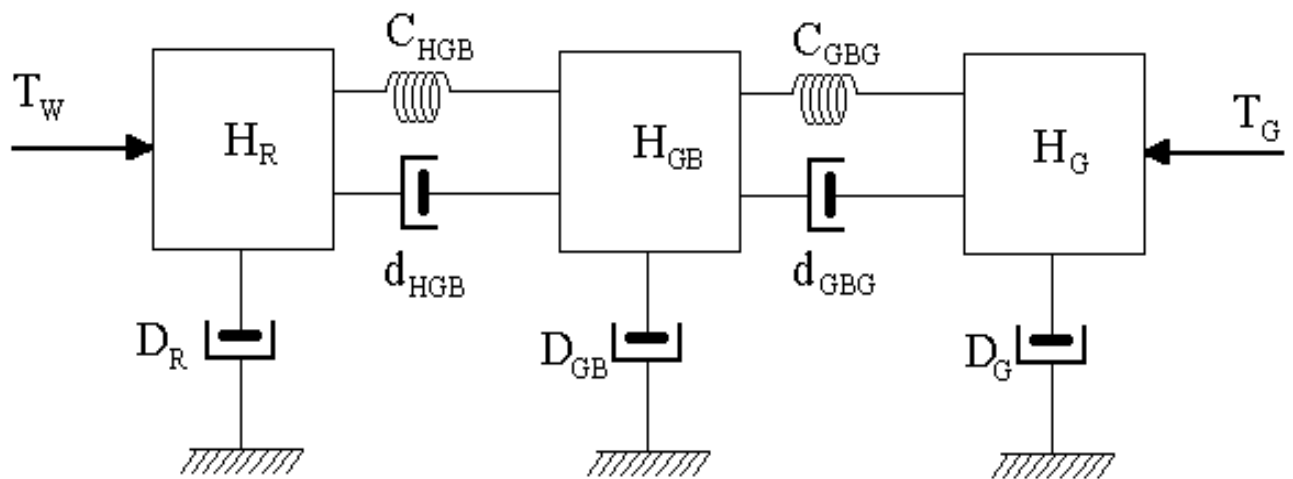
$$N_R = \frac{N_G}{k} = \frac{30\omega_G}{\pi k} \text{ σε (ΣΑΛ)} \quad [2.19]$$

Όπου $k = \frac{N_G}{N_R} = \frac{\omega_G}{\omega_R}$ και είναι ο λόγος μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων.

2.8.1. Ισοδύναμο μοντέλο τριών ελαστικά συνδεδεμένων μαζών

Το επικρατέστερο μοντέλο του μηχανικού συστήματος της ανεμογεννήτριας είναι αυτό των τριών ελαστικά συνδεδεμένων μαζών που παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα. Το μοντέλο αυτό είναι αρκετά ακριβές στα περισσότερα προβλήματα. Οι τρεις μάζες στο μοντέλο απεικονίζουν την πλήμνη, το κιβώτιο ταχυτήτων και τον δρομέα της γεννήτριας μιας ανεμογεννήτριας και τα στοιχεία ελαστικότητας κυριαρχούνται από τις ελαστικότητες των συνδέσμων.

Το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να αναπαραστήσει ότι σε κάθε πτερύγιο δρουν διαφορετικές αεροδυναμικές ροπές, οι οποίες είναι άμεσα εξαρτώμενες από τις ισοδύναμες ταχύτητες του ανέμου σε κάθε πτερύγιο. [29]



Σχήμα 90 Ισοδύναμο μοντέλο τριών ελαστικά συνδεδεμένων στρεφόμενων μαζών [42]

Στη συνέχεια θα γίνει μια περιγραφή των εξισώσεων της κίνησης N μαζών ελαστικά συνδεδεμένων μεταξύ τους. Η εξίσωση κίνησης κάθε μάζας ξεχωριστά δίνεται από την ακόλουθη μορφή:

$$2H\ddot{\theta}_m + D\ddot{\theta}_m + C\dot{\theta}_m = T \quad [2.20]$$

Όπου

$\Theta_m = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$ το $N \times 1$ διάνυσμα των γωνιακών θέσεων των σωμάτων

$\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]^T$ το $N \times 1$ διάνυσμα των γωνιακών ταχυτήτων των σωμάτων

$T = [T_1, T_2, \dots, T_N]^T$ το $N \times 1$ διάνυσμα των εξωτερικών ροπών των σωμάτων

$$H = \begin{bmatrix} H1 & & \\ & \ddots & \\ & & HN \end{bmatrix} \text{ ο διαγώνιος } N \times N \text{ πίνακας των σταθερών αδράνειας}$$

$$D = \begin{bmatrix} \dots & D_{i-1,i} & \dots \\ \dots & D_{i,i} & \dots \\ \dots & D_{i+1,i} & \dots \end{bmatrix} \text{ ο } N \times N \text{ τρι-διαγώνιος πίνακας απόσβεσης με διαγώνια}$$

στοιχεία το άθροισμα των στοιχείων απόσβεσης που καταλήγουν στην αντίστοιχη αδράνεια και μη διαγώνια στοιχεία (i,j) το αντίθετο του στοιχείου απόσβεσης μεταξύ των αδρανειών i και j.

$$C = \begin{bmatrix} \dots & C_{i-1,i} & \dots \\ \dots & C_{i,i} & \dots \\ \dots & C_{i+1,i} & \dots \end{bmatrix} \text{ ο } N \times N \text{ τρι-διαγώνιος πίνακας δυσκαμψίας με διαγώνια}$$

στοιχεία το άθροισμα των στοιχείων δυσκαμψίας που καταλήγουν στην αντίστοιχη αδράνεια και μη διαγώνια στοιχεία (i,j) το αντίθετο του στοιχείου δυσκαμψίας μεταξύ των αδρανειών i και j.

Στην περίπτωση του μοντέλου τριών ελαστικά συνδεδεμένων μαζών οι παραπάνω πίνακες διαμορφώνονται ως εξής:

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_R \\ \theta_{GB} \\ \theta_G \end{bmatrix} \quad [2.21]$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_{GB} \\ \omega_G \end{bmatrix} \quad [2.22]$$

$$H = \begin{bmatrix} H_R & 0 & 0 \\ 0 & H_{GB} & 0 \\ 0 & 0 & H_G \end{bmatrix} \quad [2.23]$$

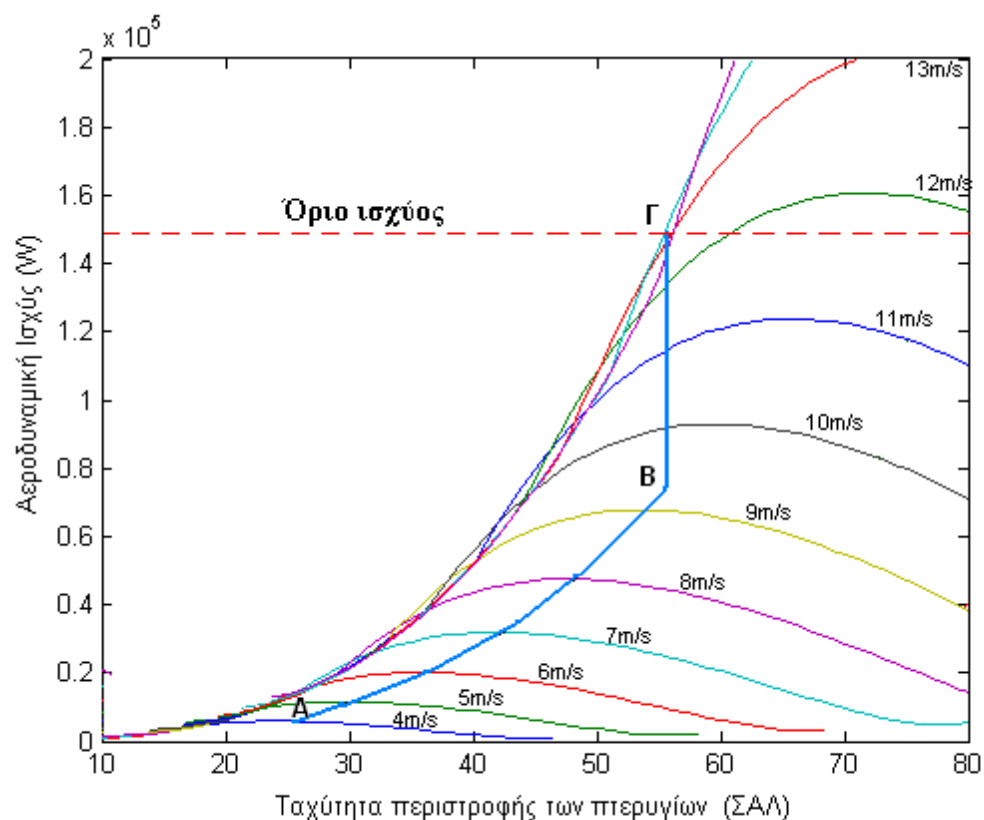
$$D = \begin{bmatrix} D_R + d_{HGB} & -d_{HGB} & 0 \\ -d_{HGB} & D_{GB} + d_{HGB} + d_{GBG} & -d_{HGB} \\ 0 & -d_{HGB} & D_G + d_{GBG} \end{bmatrix} \quad [2.24]$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{HGB} & -C_{HGB} & 0 \\ -C_{HGB} & C_{HGB} + C_{GBG} & -C_{GBG} \\ 0 & -C_{GBG} & C_{GBG} \end{bmatrix} \quad [2.25]$$

2.9. Συνθήκη μεγιστοποίησης μηχανικής ισχύος πτερυγίων

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου (η οποία θεωρείται ως μεταβλητό μέγεθος), ούτως ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη ταχύτητα για την καλύτερη απόδοση της ανεμογεννήτριας. Κάθε ανεμογεννήτρια ανάλογα με τις ιδιότητές της (επιφάνεια σάρωσης έλικας, αεροδυναμική, απόδοση του κιβωτίου ταχυτήτων, συνθήκες ανέμου στην περιοχή), διαθέτει μια χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας ισχύος. Η καμπύλη αυτή, εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα του ανέμου για κάθε ανεμογεννήτρια και στην παραγόμενη ενέργεια της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας.

Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας είναι αρκετά σημαντική λόγω της μοναδικότητας που τη χαρακτηρίζει, ενώ με βάση την καμπύλη αυτή μπορούν να συγκριθούν οι ανεμογεννήτριες μεταξύ τους. Επιπλέον, είναι πολύ σημαντικό κριτήριο για την επιλογή μιας συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας για μια συγκεκριμένη περιοχή. Από τις καμπύλες ισχύος-ταχύτητας πτερυγίων για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου φανερώνεται και η μέγιστη αεροδυναμική ισχύς, η οποία επιτυγχάνεται σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.



Σχήμα 91 Αεροδυναμική ισχύς της Ανεμογεννήτριας [42]

Στο σημείο στο οποίο οι καμπύλες πυκνώνουν περισσότερο παρουσιάζεται το φαινόμενο stall κατά το οποίο περιορίζεται η αεροδυναμική ισχύς της ανεμογεννήτριας. Με βάση το φαινόμενο αυτό όσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα του δρομέα το φαινόμενο stall εμφανίζεται σε πιο χαμηλή ταχύτητα ανέμου.

Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω η αεροδυναμική ισχύς του δρομέα εκφράζεται μέσω ενός αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p , ο οποίος εξαρτάται από το λόγο της ταχύτητας του ακροπτερυγίου και εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda = \frac{R\omega}{U} \quad [2.26]$$

Όπου

R: η ακτίνα πτερυγίου

ω : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

U: η ταχύτητα του ανέμου

Για τη βελτιστοποίηση του C_p :

$$C_p(\lambda) = C_{p, max} \Rightarrow \frac{d}{d\lambda} C_p(\lambda) = 0 \Rightarrow \lambda = \lambda_{max} \Rightarrow \frac{\omega_{opt} R}{U} = \lambda_{max} \quad [2.27]$$

Και

$$\omega_{opt} = \frac{\lambda_{max} U}{R} \Rightarrow \omega_{opt} \sim U \quad [2.28]$$

Όπου

λ_{max} : ο μέγιστος λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου

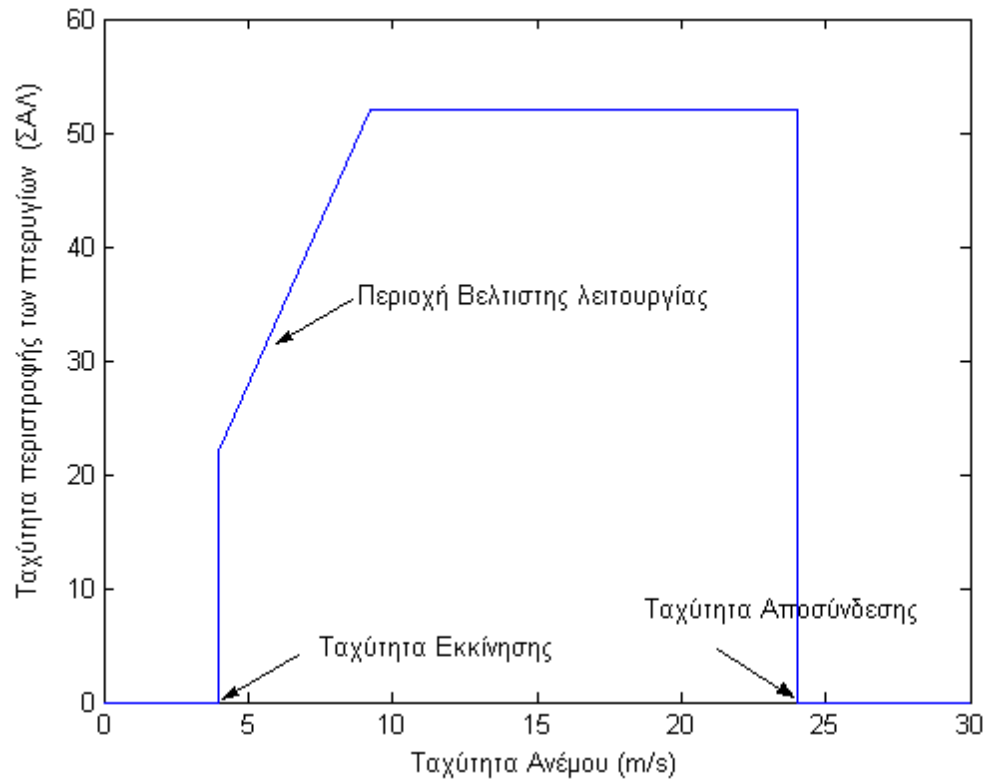
$C_{p, max}$: ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής

Η δυναμική συμπεριφορά του μηχανικού συστήματος της ανεμογεννήτριας επηρεάζεται από τις ριπές του ανέμου όταν ο άνεμος εμφανίζει υψηλές ταχύτητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία ταλαντώσεων, οι οποίες προκαλούν υπερφορτίσεις στο σύστημα της ανεμογεννήτριας. Κατά το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου πρέπει να καθορίζεται ο περιορισμός της μεταβλητότητας της ροπής, αναγκάζοντας την ανεμογεννήτρια να λειτουργεί σε μια περιορισμένη περιοχή ταχυτήτων ώστε να εκμεταλλεύεται το φαινόμενο stall.

Στην περίπτωση την οποία η αεροδυναμική ισχύς αυξάνεται πάνω από το όριο, επιβάλλεται άμεση ελάττωση των στροφών, η οποία όμως προκαλεί την ανάπτυξη επιβραδύνουσας ηλεκτρομαγνητικής ροπής αρκετά μεγαλύτερης από την ονομαστική.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η χαρακτηριστική της ταχύτητας περιστροφής ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Στο σχήμα παρατηρείται η περιοχή χαμηλών ταχυτήτων, η οποία αντιστοιχεί στην ενεργειακά βελτιστοποιημένη περιοχή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, ενώ παρατηρείται σταθερή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων σε υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Επιπλέον, παρατηρείται η ταχύτητα εκκίνησης και η ταχύτητα αποσύνδεσης, στις οποίες εκκινεί και αποσυνδέεται η ανεμογεννήτρια, οι οποίες προσδιορίζονται από τον κατασκευαστή της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 92 Χαρακτηριστική βέλτιστης ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων-ταχύτητας ανέμου [42]

2.10. Κατηγοριοποίηση ανεμογεννητριών

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους καθώς και ανάλογα με τον τύπο της γεννήτριας την οποία περιλαμβάνουν. Αρχικά, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους χωρίζονται σε ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών και ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.

Στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών, η ταχύτητα η οποία κινείται ο δρομέας διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου. Στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα του δρομέα καθορίζεται από κάποιους άλλους παράγοντες όπως τον σχεδιασμό της γεννήτριας, τη συχνότητα του δικτύου με το οποίο είναι συνδεδεμένη η ανεμογεννήτρια καθώς και από τη σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων. Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών είναι κατά τέτοιο τρόπο κατασκευασμένες έτσι ώστε να έχουν την καλύτερη αεροδυναμική απόδοση για μια καθορισμένη ταχύτητα ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών περιλαμβάνουν πυκνωτές, οι οποίοι ρυθμίζουν την άεργο ισχύ του συστήματος καθώς και μια επαγωγική γεννήτρια. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου έχουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως το χαμηλό τους κόστος, η απλοποιημένη τους κατασκευή, η στιβαρότητα και η αξιοπιστία τους. Ωστόσο έχουν και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία κάνουν τη χρήση τους περιορισμένη τα τελευταία χρόνια. Τέτοια μειονεκτήματα είναι η μειωμένη ενεργειακή απόδοση, οι μηχανικές καταπονήσεις που υφίσταται λόγω των υψηλών μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου και η έλλειψη ελέγχου της άεργου ισχύος του συστήματος.

Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχει υπερισχύσει η λειτουργία των μεταβλητών στροφών λόγω της πολύ πιο βελτιωμένης αεροδυναμικής τους συμπεριφοράς ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Σε κάθε μεταβολή της ταχύτητας γίνεται προσαρμογή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της ανεμογεννήτριας για βέλτιστα αποτελέσματα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είναι η ικανότητά τους να διατηρούν τη ροπή της γεννήτριας πιο σταθερή, με αποτέλεσμα μέσω της αλλαγής της ταχύτητας της γεννήτριας να εκλείπουν οι διακυμάνσεις του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών περιλαμβάνουν μια σύγχρονη ή ασύγχρονη (επαγωγική) γεννήτρια, της οποίας η σύνδεση με το δίκτυο γίνεται μέσω ενός μετατροπέα ισχύος. Τα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είναι η βέλτιστη ποιότητα ισχύος, η μειωμένη καταπόνηση των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας που τα κάνει να αντέχουν περισσότερο στο χρόνο, καθώς και η αυξημένη παραγωγή ισχύος. Τα μειονεκτήματα τους είναι το μεγάλο κόστος τους λόγω της πιο πολύπλοκης διάταξης του συστήματος καθώς και οι απώλειες στους μετατροπείς ισχύος.

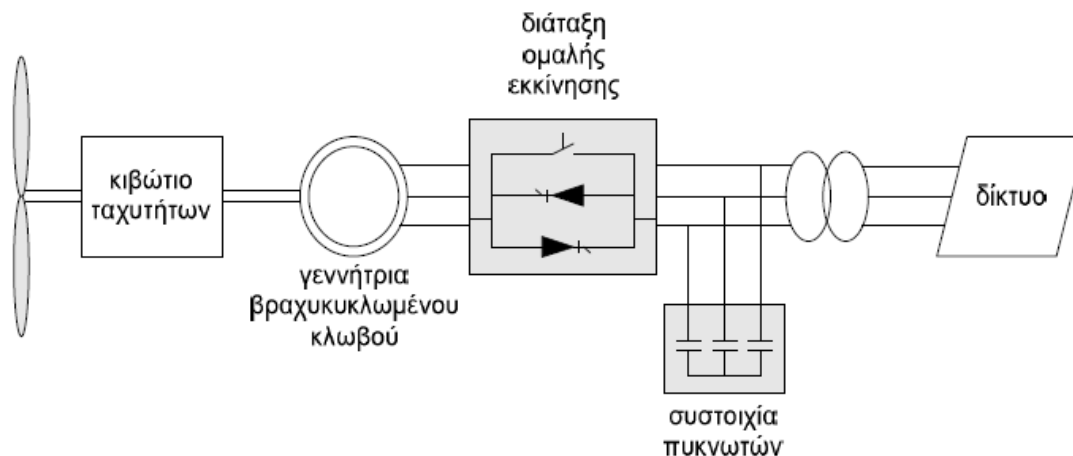
Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να διαχωριστούν και σε δύο ακόμα κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο της γεννήτριας. Οι δύο τύποι αυτοί είναι οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες (επαγωγικές) γεννήτριες. Οι ασύγχρονες γεννήτριες είναι πιο εύχρηστες και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες λόγω της απλότητάς τους και του μειωμένου κόστους τους. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των ασύγχρονων ανεμογεννητριών είναι η απαίτηση χρήσης άεργου ρεύματος μαγνήτισης από τον στάτη. Στις ασύγχρονες γεννήτριες το ρεύμα που χρειάζεται το λαμβάνει απορροφώντας άεργο ισχύ, η οποία είτε διοχετεύεται από το δίκτυο είτε από μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος.

Οι ασύγχρονες γεννήτριες χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: στις ασύγχρονες γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel cage) και στις ασύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor).

✓ Ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού

Το είδος της γεννήτριας αυτής χρησιμοποιείται τόσο στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών όσο και σε αυτές των μεταβλητών στροφών. Στην πρώτη περίπτωση η γεννήτρια συνδέεται απευθείας με το δίκτυο. Οι ασύγχρονες γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού έχουν μια ιδιαιτερότητα όσον αφορά την πραγματική ισχύ, την άεργο ισχύ, την τερματική τάση και την ταχύτητα του δρομέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή επιπλέον πραγματικής ισχύος σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου μόνο όταν η γεννήτρια απορροφήσει από το δίκτυο επιπλέον άεργο ισχύ.

Στην περίπτωση που η ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο, η άεργος ισχύς, η οποία απορροφάται είναι ανεξέλεγκτη προκαλώντας σημαντική αστάθεια στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση συστοιχιών πυκνωτών καθώς και σύγχρονων μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος ούτως ώστε να μειωθεί η απορροφημένη άεργος ισχύς από το δίκτυο. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά μια ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού.[26]



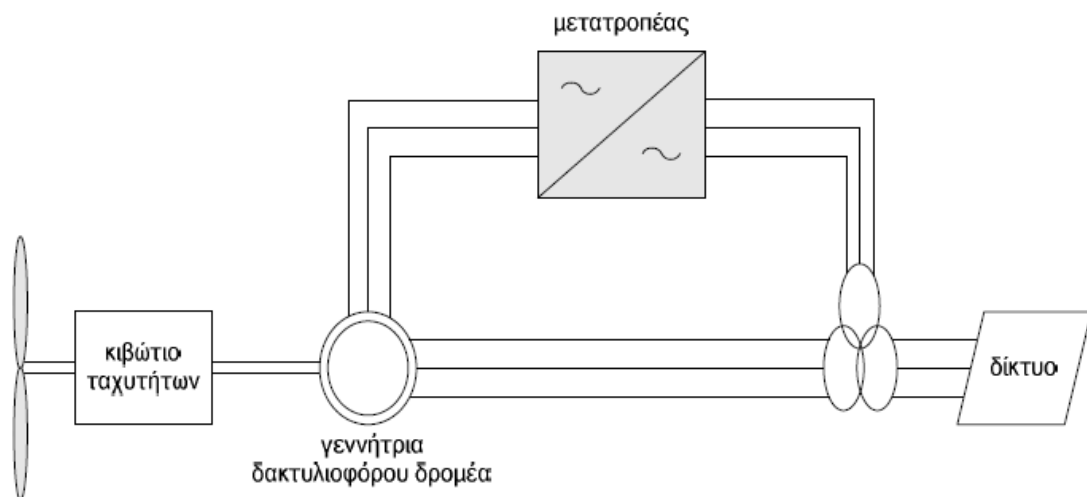
Σχήμα 93 Γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο [26]

✓ Ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα

Η ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα είναι γενικά λιγότερο αξιόπιστη στην κατασκευή της και πιο ακριβή σε σχέση με την ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Στις ασύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δρομέα μπορούν να ελεγχθούν εξωτερικά, έχοντας ως αποτέλεσμα να επηρεαστεί η τάση του δρομέα. Επιπλέον, η σύνδεση των τυλιγμάτων του δρομέα μπορεί να γίνει εξωτερικά χρησιμοποιώντας ψύκτες και δακτυλίους είτε με εξοπλισμό ηλεκτρονικών ισχύος. Οι ασύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (optislip) και στις γεννήτριες διπλής τροφοδότησης (double fed). [26]

✚ Ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης

Η ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης περιλαμβάνει μια γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο, ενώ τα τυλίγματα του δρομέα είναι συνδεδεμένα σε μια διάταξη AC/DC/AC με μετατροπείς πηγής τάσης. Η διπλή τροφοδότηση μεταφράζεται στο ότι η τάση στον στάτη παρέχεται από το δίκτυο ενώ η τάση στο δρομέα παρέχεται από το μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας ισχύος έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει τη διαφορά που παρουσιάζεται μεταξύ της μηχανικής και της ηλεκτρικής συχνότητας, δίνοντας ένα ρεύμα στο δρομέα με μεταβλητή συχνότητα. Με τον τρόπο αυτό, ο μετατροπέας ισχύος και οι ελεγκτές του είναι αυτοί οι οποίοι ελέγχουν τη συμπεριφορά της γεννήτριας. Η ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης έχει το σημαντικό πλεονέκτημα του ελέγχου της πραγματικής από την άεργο ισχύ ανεξάρτητα μέσω του ρεύματος του δρομέα. Επιπλέον, παράγει άεργο ισχύ, η οποία παρέχεται στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα που βρίσκεται συνδεδεμένος με το δίκτυο. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται μια ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.[26]



Σχήμα 94 Γεννήτρια διπλής τροφοδότησης [26]

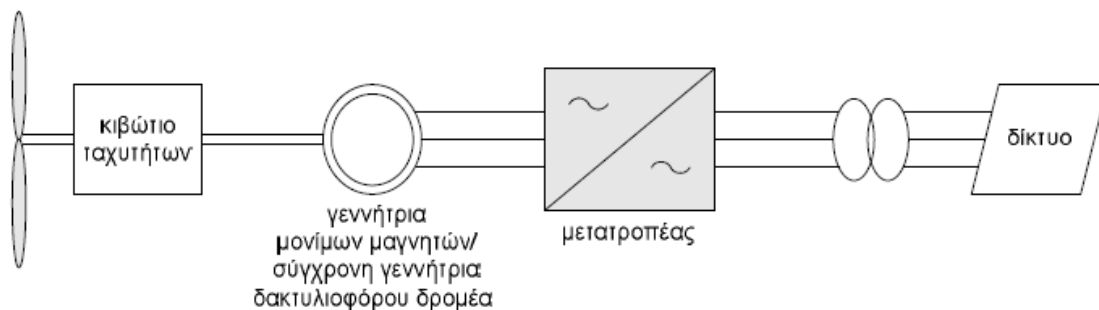
Οι σύγχρονες γεννήτριες σε σχέση με τις ασύγχρονες είναι πιο πολύπλοκες στην κατασκευή τους και έχουν υψηλότερο κόστος. Υπάρχει όμως ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις ασύγχρονες γεννήτριες στο ότι δεν απαιτούν άεργο ρεύμα μαγνήτισης. Οι σύγχρονες γεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα και στις σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών.[26]

✓ Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα

Στις καινούριες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα με πολλαπλούς πόλους και χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων, ενώ συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα, ο οποίος πραγματοποιεί λειτουργία με μεταβλητές στροφές και πιο ομαλή σύνδεση με το δίκτυο. Λόγω του ότι ο μετατροπέας είναι αρκετά ακριβός όπως και η κατασκευή της συγκεκριμένης γεννήτριας την κάνει να μειονεκτεί σε σύγκριση με άλλες λιγότερο δαπανηρές

✓ Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών

Οι σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών παρουσιάζουν ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των ασύγχρονων γεννητριών, και αυτό είναι η δυνατότητά τους να διεγείρονται μόνες τους και χωρίς τροφοδότηση, επιτρέποντας έτσι τη λειτουργία με υψηλή απόδοση υπό μεγάλο συντελεστή ισχύος. Όμως αυτή τους η ιδιότητα τις καθιστά πολύπλοκες στην κατασκευή καθώς επίσης και ακριβές στην αγορά τους. Επιπλέον, τα μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους είναι αρκετά ευαίσθητα στη θερμοκρασία και έτσι επιβάλλεται η εγκατάσταση συστήματος ψύξης, το οποίο αυξάνει ακόμα περισσότερο στο κόστος κατασκευής τους. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η απεικόνιση μιας σύγχρονης γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα ή σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών η οποία είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο.



Σχήμα 95 Σύνδεση σύγχρονης γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα ή γεννήτρια μονίμων μαγνητών με το δίκτυο [26]

2.11. Θέματα υψηλής αιολικής διείσδυσης

Η συνεχώς αυξανόμενη ενέργεια που προέρχεται από τα αιολικά πάρκα έχει δημιουργήσει την υψηλή διείσδυσή τους στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Όσο η διείσδυση αυτή ήταν σε χαμηλή κλίμακα τα αιολικά πάρκα δεν είχαν σημαντική επίδραση στο δίκτυο. Σήμερα λόγω της αυξημένης διείσδυσης υπάρχουν μείζονα ζητήματα στην αλληλεπίδραση των αιολικών πάρκων και του ηλεκτρικού δικτύου. Αυτό οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο λειτουργίας των δύο οντοτήτων.

Τα αιολικά πάρκα χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τον άνεμο, ο οποίος μεταβάλλεται συνεχώς και είναι δύσκολος στην πρόβλεψή του. Από την άλλη το ηλεκτρικό δίκτυο διαθέτει ρυθμιστές, οι οποίοι ελέγχουν την παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος. Άλλη μια διαφορά στον τρόπο λειτουργίας τους έγκειται στο γεγονός ότι οι ηλεκτρικοί σταθμοί αποτελούνται από ασύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες συνδέονται απ' ευθείας στο δίκτυο, ενώ οι ανεμογεννήτριες των αιολικών πάρκων χρησιμοποιούν γεννήτριες, οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέων, που αποτελούνται από ηλεκτρονικά ισχύος.

Στις αρχές ανάπτυξης των αιολικών πάρκων η διασύνδεσή τους με το δίκτυο γίνονταν μέσω των δικτύων διανομής. Με την αυξημένη παραγωγή της αιολικής ενέργειας η διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο γίνεται εφικτή μέσω του δικτύου μεταφοράς. Η αιολική παραγωγή, σε χώρες που ανήκουν στην Ευρώπη, απορροφάται κατά προτεραιότητα από το υφιστάμενο δίκτυο χωρίς όμως αυτό να τις περιορίζει στην αποκοπή της λειτουργίας τους για την διατήρηση της ασφάλειας του δικτύου. Κάποιες από τις χώρες αυτές αποζημιώνουν τους παραγωγούς των αιολικών πάρκων όπως συμβαίνει και στην Ελλάδα με ποσοστό που φτάνει έως και το 30% των περικοπών ενός χρόνου.

Η υψηλή διείσδυση της αιολικής παραγωγής στο σύστημα δημιουργεί επιπρόσθετα προβλήματα στο διαχειριστή του δικτύου, στα οποία πρέπει να ανταπεξέλθει. Τέτοια ζητήματα αφορούν την επίλυση προβλημάτων του συστήματος μεταφοράς, καθώς και την εξισορρόπηση της σχέσης φορτίου- συχνότητας μέσω της αύξησης της ευελιξίας των μονάδων. Επιπλέον, ένα ζήτημα είναι η σωστή και αποτελεσματική αντιμετώπιση των βυθίσεων της τάσης, από τα συστήματα αιολικής παραγωγής. Τέλος, πρέπει να διευθετηθούν ζητήματα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής και θέματα ελέγχου και τηλεμέτρησης της αιολικής παραγωγής.

2.12. Ικανότητα Μεταφοράς

Για την επίτευξη της αυξημένης διείσδυσης των αιολικών πάρκων είναι απαραίτητη η δημιουργία έργων για την ενίσχυση και την επέκταση του συστήματος διασύνδεσης καθώς και την κατασκευή νέων κυκλωμάτων, την αναβάθμιση των αγωγών στο υπάρχον δίκτυο και την εγκατάσταση συσκευών με στόχο τη βελτίωση της συμπεριφοράς της τάσης των ζυγών. Επιπλέον, υπάρχει η ανάγκη ενίσχυσης των υποσταθμών του δικτύου καθώς και η τοποθέτηση μετασχηματιστών μετατόπισης φάσης ούτως ώστε σε κάποιες περιπτώσεις να γίνεται σωστή κατανομή της ισχύος στα κυκλώματα.

Επιπρόσθετα, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην επέκταση των διασυνδέσεων με γειτονικές χώρες ούτως ώστε να υπάρχει αποτελεσματική εξισορρόπηση της ζήτησης με την παραγωγή. Τέλος, πρέπει να μελετηθεί η γεωγραφική διασπορά των αιολικών πάρκων κατά τη φάση της σχεδίασης, ούτως ώστε να αποφευχθεί η κατασκευή επιπλέον νέων έργων μεταφοράς.

Η αρμόδια αρχή, η οποία είναι υπεύθυνη για τη σωστή λειτουργία, εκμετάλλευση και διασφάλιση της συντήρησης και μέριμνας για την ανάπτυξη του συστήματος σε όλη την Ελλάδα είναι ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ- πρώην ΔΕΣΜΗΕ). Ο ΑΔΜΗΕ είναι μια ανώνυμη εταιρία ιδιοκτησίας κατά 51% του δημοσίου και κατά 49% ανήκει σε ελληνικές εταιρίες παραγωγής. Επιπλέον, ο ΑΔΜΗΕ είναι επιφορτισμένος με την ανάπτυξη διασυνδέσεων με άλλα δίκτυα ούτως ώστε να υπάρχει ασφαλής και αξιόπιστος εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια.

Ο ΑΔΜΗΕ έχει στον προγραμματισμό του την κατασκευή σημαντικών έργων μεταφοράς για την ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ελλαδικό δίκτυο. Τέτοιους έργα είναι τα έργα ανάπτυξης 400kV στην Πελοπόννησο και τη Θράκη, η διασύνδεση των Κυκλάδων καθώς υπό μελέτη βρίσκονται και έργα διασύνδεσης σε νησιά όπως η Κρήτη και το βορειοανατολικό Αιγαίο με σκοπό την ηλεκτροδότηση των νησιών αξιοποιώντας το αιολικό δυναμικό του Αιγαίου καθώς και τον περιορισμό και την κατάργηση της χρήσης πετρελαίου.[7]

2.13.Ρύθμιση φορτίου- συχνότητας

Σε ένα συμβατικό δίκτυο η συχνότητα βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση με την ενεργό ισχύ που διακινείται στο σύστημα και για το λόγο αυτό η ρύθμισή της καθιστά σημαντικό ζήτημα για την εξίσωση της παραγόμενης ισχύος με τη ζητούμενη. Το συμβατικό σύστημα παραγωγής υπακούει σε κάποιους περιορισμούς στη λειτουργία του όπως σε τεχνικά ελάχιστα, μέγιστα των μονάδων, στους ρυθμούς ανόδου/ καθόδου ,στον καθορισμό χρόνων εκκίνησης και διακοπής της λειτουργίας του και τέλος στην αποφυγή συχνών κύκλων εκκινήσεων και διακοπών.

Λόγω του ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξημένη αιολική διείσδυση των μονάδων ΑΠΕ, είναι αναγκαία η συμβολή τους στη ρύθμιση της συχνότητας του συστήματος διασφαλίζοντας την αξιοπιστία στη σύνδεσή τους με το δίκτυο. Η μαζική διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνει την ανάγκη για κατάλληλες υπηρεσίες εξισορρόπησης σε πραγματικό χρόνο για τη συχνότητα του συστήματος. Επιπλέον, υπάρχει απαίτηση για κατάλληλα κίνητρα μέσω της αγοράς για το συνδυασμό του στοχαστικού χαρακτήρα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και άλλες τεχνολογίες παραγωγής.

Η ανάγκη αύξησης της ευελιξίας των μονάδων στη ρύθμιση της παραγωγής φέρει αρκετές επιπτώσεις όπως οι δραστικές αλλαγές στο μείγμα παραγωγής και στην λειτουργία της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, υπάρχουν και άλλες επιπτώσεις που αφορούν την αύξηση του κόστους της ενέργειας καθώς και των επικουρικών υπηρεσιών.[3]

2.14.Τεχνικές απαιτήσεις κωδίκων

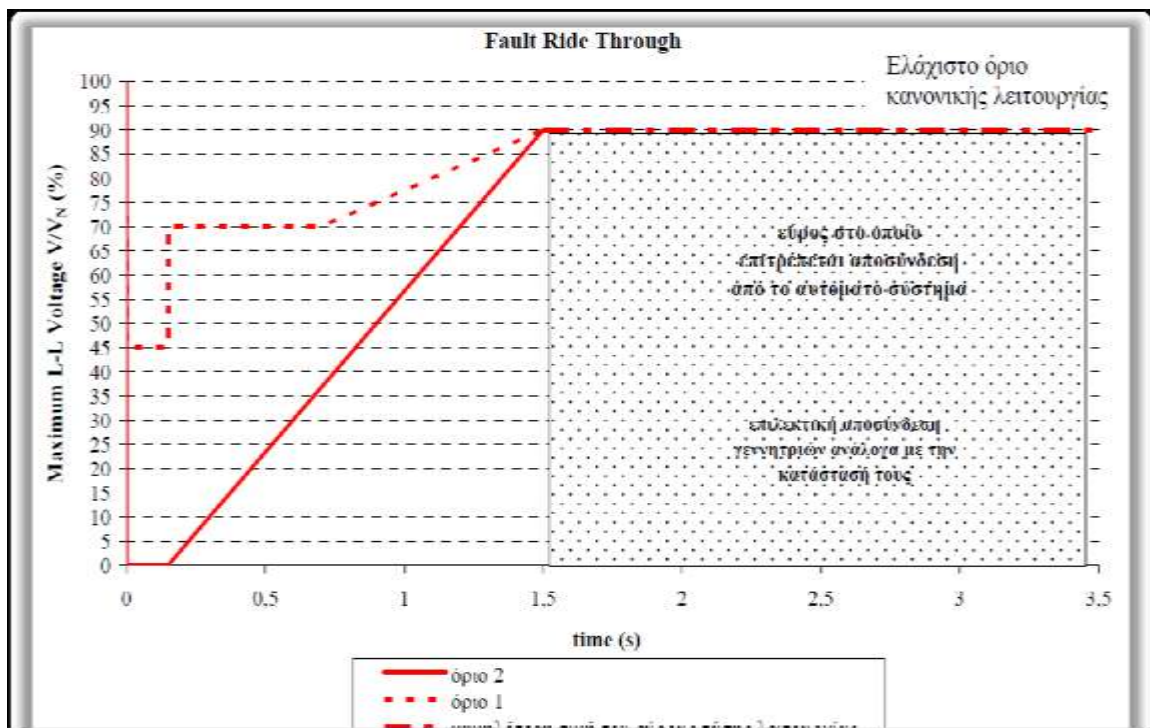
Σε χώρες όπου η αιολική διείσδυση είναι υψηλή προκειμένου να διασφαλιστεί η ομαλή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος δημιουργήθηκαν κάποιοι κώδικες διαχείρισης του συστήματος, οι οποίοι καθορίζουν τη συμπεριφορά των αιολικών σταθμών που συνδέονται στο δίκτυο. Ο πρώτος κώδικας εκδόθηκε το 2003 από τη γερμανική εταιρία E.ON. και μέχρι σήμερα πλήθος χωρών έχουν αναπτύξει αντίστοιχους κώδικες σύμφωνα με τις απαιτήσεις κάθε χώρας. Οι τεχνικές απαιτήσεις που τίθενται από τους κώδικες διαχείρισης του συστήματος αφορούν ζητήματα όπως[5]:

- Ανοχή σε βυθίσεις τάσης
- Απόκριση σε καταστάσεις σφαλμάτων του δικτύου
- Έλεγχος της ενεργού ισχύος και συχνότητας
- Έλεγχος της άεργου ισχύος και τάσης
- Εξαγωγή κανονισμών για τη σύνδεση αιολικών πάρκων στο δίκτυο
- Όρια τάσης και συχνότητας

2.14.1. Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και απόκριση κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο

Πολλές φορές στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας προκαλούνται διαταραχές ή βραχυκυκλώματα τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα τη βύθιση της τάσης του συστήματος. Ο χρόνος που διαρκεί μια βύθιση τάσης είναι άμεσα εξαρτώμενος από το χρόνο λειτουργίας των συστημάτων προστασίας του συστήματος και είναι της τάξης των δευτερολέπτων.

Παλαιότερα οι ανεμογεννήτριες για να προστατευτούν όταν η τάση έπεφτε πολύ συγκριτικά με την ονομαστική της τιμή αποσυνδέονταν από το δίκτυο. Ο σύγχρονος κώδικας διαχείρισης του συστήματος δεν επιτρέπει την άμεση αποσύνδεσή τους αλλά την παραμονή τους για ένα χρονικό διάστημα. Η απαίτηση αυτή του κώδικα ονομάζεται Fault Ride- Through (FRT) και αναπαριστάται από μια χαρακτηριστική τάσης – χρόνου.



Σχήμα 96 Απαιτήσεις FRT του γερμανικού Κώδικα για Α/Π [30]

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα, για διαταραχές που συμβαίνουν πάνω από την γραμμή ορίου 1 (με την διακεκομμένη γραμμή) δεν επιτρέπεται η αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας. Στην περίπτωση που οι βυθίσεις συμβαίνουν στην περιοχή μεταξύ του ορίου 1 και του ορίου 2, το αιολικό πάρκο είναι υποχρεωμένο να ανέχεται τη βύθιση χωρίς να αποσυνδέει τις ανεμογεννήτριες του από το δίκτυο. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατόν να συμβεί, γίνεται συμφωνία με τον διαχειριστή ακολουθώντας μια πιο ευνοϊκή γραμμή ορίου 2, αφού βέβαια ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος επανασύνδεσης μετά από την αναγκαία αποσύνδεση και εξασφαλιστεί η έγχυση άεργου ισχύος την ώρα της αποσύνδεσης, ούτως ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις του δικτύου.

Υπάρχει βέβαια και η περίπτωση πιθανής αστάθειας της ανεμογεννήτριας ή πιθανότητα ενεργοποίησης του συστήματος προστασίας της. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να γίνει μια σύντομη αποσύνδεση και ο επανασυγχρονισμός να γίνει σε διάστημα το πολύ δύο δευτερολέπτων με έγχυση άεργου ισχύος και θα πρέπει να αυξηθεί στην αρχική τιμή με ρυθμό έως και 10% της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας ανά δευτερόλεπτο.

Όταν η βύθιση τάσης βρίσκεται κάτω από το όριο 2 μπορεί να αποσυνδεθεί η ανεμογεννήτρια από το δίκτυο με επανασυγχρονισμό περίπου δύο δευτερολέπτων και ρυθμό αύξησης της ενεργού ισχύος έως και 10% της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας ανά δευτερόλεπτο. Εάν κάποιοι σταθμοί αποσυνδεθούν από το δίκτυο στην περίπτωση βύθισης τάσης οφείλουν να παράγουν ενεργό ισχύ έως και 10% της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας ανά δευτερόλεπτο και ρεύμα βραχυκύκλωσης στο δίκτυο. Τέλος, για βυθίσεις τάσης που συμβαίνουν στη γραμμοσκιασμένη περιοχή της γραφικής παράστασης μπορεί η ανεμογεννήτρια να αποσυνδεθεί από το αυτόματο σύστημα.[5]

2.14.2. Έλεγχος της ενεργού ισχύος και συχνότητας

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει πάντα να ικανοποιείται το ισοζύγιο παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος . Σε περιπτώσεις που το ισοζύγιο αυτό δεν ικανοποιείται δημιουργούνται αποκλίσεις στην ονομαστική τιμή της συχνότητας. Παλαιότερα, ακόμα και σε μικρές αποκλίσεις της συχνότητας η ανεμογεννήτρια αποσυνδεόταν άμεσα. Όμως οι κώδικες επιβάλλουν την παραμονή των ανεμογεννητριών στο δίκτυο και μάλιστα να παρέχουν απόκριση συχνότητας, δηλαδή να μεταβάλλουν την ενεργό ισχύ του συστήματος συναρτήσει των διακυμάνσεων της συχνότητας. Επιπλέον, οι κώδικες έχουν απαιτήσεις για τον περιορισμό της ενεργού ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας σε μια συγκεκριμένη τιμή αναφοράς , με ένα καθορισμένο ρυθμό μεταβολής της ενεργού ισχύος.

Η απαίτηση των κωδίκων για ενεργό ισχύ έχουν ως στόχο τη διατήρηση της συχνότητας σε σταθερό επίπεδο καθώς και την ικανοποίηση των προδιαγραφών ποιότητας ισχύος. Τέλος, οι απαιτήσεις για την ενεργό ισχύ βοηθούν στην αποφυγή της υπερφόρτωσης των γραμμών μεταφοράς καθώς και στην ελαχιστοποίηση των μεγάλων βηματικών τάσεων και ρευμάτων ζεύξης λόγω έναρξης ή τερματισμού της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.[5]

2.14.3. Έλεγχος της άεργου ισχύος και τάσης

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητο η τάση του συστήματος να διατηρείται μέσα στα καθορισμένα όρια λειτουργίας για την ικανοποίηση του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης άεργου ισχύος, όχι μόνο στο συνολικό σύστημα αλλά και στα επιμέρους υποσυστήματα του, λόγω του ότι η άεργος ισχύς δεν μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να γίνεται παραβίαση των ορίων τάσης.

Η ικανοποίηση του ισοζυγίου άεργου ισχύος σε επίπεδο συστήματος μεταφοράς πραγματοποιείται μέσω σύγχρονων γεννητριών στις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Όσο η αιολική διείσδυση αυξάνεται, τόσο η ρύθμιση της τάσης επηρεάζεται αρνητικά, προκαλώντας την αυξημένη συμμετοχή των καινούριων σταθμών στην ικανοποίηση του ισοζυγίου άεργου ισχύος. Πριν την ραγδαία αύξηση της αιολικής διείσδυσης τα αιολικά πάρκα διατηρούσαν τον συντελεστή ισχύος (ΣΙ) σε υψηλές τιμές, έτσι ώστε η κατανάλωση άεργου ισχύος από αυτούς να γινόταν όλο και πιο λίγη. Στα σημερινά αιολικά πάρκα υπάρχει απαίτηση από τους κώδικες η λειτουργία του αιολικού πάρκου να γίνεται μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος ΣΙ.

Το εύρος τιμών του ΣΙ είναι εξαρτώμενο από την ενεργό ισχύ του συστήματος και σε ορισμένα συστήματα εξαρτάται και από την τάση του συστήματος στο σημείο σύνδεσης του σταθμού. Η δυνατότητα ελέγχου του ΣΙ επιτρέπει στο αιολικό πάρκο να ρυθμίζει την άεργο ισχύ του με διάφορους τρόπους και βοηθάει τους αιολικούς σταθμούς να πραγματοποιούν ενεργό ρύθμιση της τάσης είτε στο σημείο σύνδεσής του είτε και σε πιο απόμακρα σημεία. [5]

2.14.4. Όρια τάσης και συχνότητας

Οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας συχνά, ακόμα και στην κανονική κατάσταση λειτουργίας τους, εμφανίζουν κάποιες τιμές τάσης και συχνότητας, οι οποίες αποκλίνουν από τις ονομαστικές τους τιμές. Ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις οι συμβατικοί σταθμοί πρέπει να συνεχίσουν να λειτουργούν για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος. Όταν οι αποκλίσεις της τάσης και της συχνότητας είναι πολύ υψηλές τότε ο σταθμός αποσυνδέεται από το δίκτυο για ορισμένο χρόνο για την προστασία του. Επιπλέον, λόγω του ότι τα συμβατικά ηλεκτρικά συστήματα είναι συγχρονισμένα οι μεγάλες αποκλίσεις συχνότητας (>1Hz) δεν είναι αποδεκτές και πρέπει να διαρκούν το ελάχιστο δυνατό χρονικό διάστημα. Σε ορισμένες αποκλίσεις τάσης και συχνότητας υπάρχει η δυνατότητα ο σταθμός να μειώνει την ενεργό ισχύ εξόδου του.

Τέτοιες αποκλίσεις τάσης και συχνότητας παρουσιάζονται και στα αιολικά πάρκα, τα οποία πρέπει και αυτά με τη σειρά τους να υπακούουν σε κάποια όρια τάσης και συχνότητας όπως και οι συμβατικοί ηλεκτρικοί σταθμοί. Κάποιοι κώδικες ορίζουν τις ίδιες προδιαγραφές και για τα αιολικά πάρκα και για τους συμβατικούς ηλεκτρικούς σταθμούς, ενώ κάποιοι άλλοι ορίζουν ξεχωριστές απαιτήσεις και διαφορετικά όρια.

2.15.Εποπτεία και έλεγχος αιολικού πάρκου

Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ειδικά των αιολικών πάρκων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί την ανάγκη όλο και μεγαλύτερων απαιτήσεων, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπ όψιν στις μεθόδους ένταξης και κατανομής του φορτίου στις μονάδες παραγωγής των σταθμών. Για την υλοποίηση των απαιτήσεων αυτών χρειάζεται η ανάπτυξη συστημάτων, τα οποία θα εποπτεύουν και θα ελέγχουν το αιολικό πάρκο καθώς και μεθόδων οι οποίες θα προβλέπουν την αιολική παραγωγή σε χρονικά διαστήματα που θα κυμαίνονται από μια ώρα μέχρι κάποιες ημέρες.

Η εποπτεία και ο έλεγχος των αιολικών πάρκων γίνεται μέσω των Κέντρων Ελέγχου Ενέργειας (ΚΕΕ). Λόγω της αυξημένης αιολικής διείσδυσης πλέον, υπάρχει η απαίτηση για εγκατάσταση αποκεντρωμένων ανεξάρτητων ΚΕΕ, τα οποία θα κάνουν άμεσο έλεγχο των πάρκων τους, ανταλλάσσοντας τα δεδομένα με το κεντρικό ΚΕΕ κάθε χώρας.

Για να γίνει εφικτός ο αποτελεσματικός έλεγχος στα αιολικά πάρκα είναι απαραίτητη η αναβάθμιση των ΚΕΕ και των μεθόδων πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής. Η παρακολούθηση και ο έλεγχος της λειτουργίας του αιολικού πάρκου από τα ΚΕΕ πρέπει να γίνεται σε πραγματικό χρόνο καταγράφοντας δεδομένα όπως η κατάσταση της λειτουργίας του αιολικού πάρκου και των κεντρικών μέσων ζεύξης με το σύστημα, ο έλεγχος της ενεργού και της άεργου ισχύος της εξόδου του συστήματος καθώς και ο έλεγχος της τάσης των ζυγών σύνδεσης με το σύστημα. Επιπλέον, τα ΚΕΕ είναι επιφορτισμένα με την καταγραφή της ταχύτητας του ανέμου και της θερμοκρασίας ή ακόμα και άλλων μετεωρολογικών δεδομένων που μπορούν να αξιοποιηθούν από τις μεθόδους πρόβλεψης.

Επιπλέον, τα ΚΕΕ έχουν τη δυνατότητα να υπολογίζουν τη μη παραγόμενη ισχύ των αιολικών πάρκων για την αναγνώριση των γεγονότων περιορισμού της παραγόμενης ισχύος και την κατανομή της απαιτούμενης μείωσης της ισχύος στο αιολικό πάρκο.

Τέλος, το ΚΕΕ ελέγχει τα αιολικά πάρκα σε πραγματικό χρόνο μέσω εντολών κατανομής. Οι εντολές κατανομής, ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε κώδικα και τα χαρακτηριστικά του αιολικού πάρκου μπορούν να ελέγχουν:

- Την ενεργό και την άεργο ισχύ εξόδου.
- Την πιθανότητα τα αιολικά πάρκα να μπορούν να συμμετάσχουν στη λειτουργία ρύθμισης της τάσης του συστήματος καθώς και τα επιθυμητά επίπεδα τάσης.
- Τον επιτρεπτό ρυθμό ανόδου και καθόδου της ενεργού ισχύος.
- Το περιθώριο της εφεδρείας ισχύος που θα πρέπει να διατηρούν τα αιολικά πάρκα για την συμμετοχή τους στη ρύθμιση συχνότητας.
- Την επιθυμητή απόκριση συχνότητας.

Λόγω του αυξανόμενου αριθμού των εγκαταστάσεων αιολικών πάρκων η άμεση κεντρική εποπτεία όλων των αιολικών πάρκων δυσκολεύει. Ένα πιθανό σενάριο είναι η εποπτεία και ο έλεγχος να περιορίζεται σε εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων μεγάλου μεγέθους, με ισχύ μεγαλύτερη των 10MW, ή εγκαταστάσεις που συνδέονται απευθείας στο σύστημα ΜΤ/ΥΤ. Ένα άλλο σενάριο είναι ο έλεγχος να γίνεται μέσω ιδιόκτητων συστημάτων από τους ίδιους τους παραγωγούς των αιολικών πάρκων, επιτρέποντας την καλύτερη επικοινωνία.

Μεγάλη σημασία πρέπει να δίνεται και στα χρονικά περιθώρια πρόβλεψης της παραγόμενης ισχύος των αιολικών πάρκων για την ανάγκη έγκαιρου προγραμματισμού του συνολικού συστήματος παραγωγής. Οι μέθοδοι πρόβλεψης μπορούν να είναι εγκατεστημένοι κεντρικά ως ανεξάρτητο λογισμικό είτε να είναι ενσωματωμένοι στο ευρύτερο σύστημα του ΚΕΕ. Ακόμα, η εγκατάστασή τους μπορεί να γίνει αποκεντρωμένα μέσω των περιφερειακών ΚΕΕ. Τέλος, ένα αναβαθμισμένο ΚΕΕ πρέπει να έχει τη δυνατότητα της εκτίμησης της ασφάλειας λειτουργίας του συστήματος έτσι ώστε να είναι δυνατός ο δυναμικός καθορισμός των επιτρεπτών περιθωρίων της διείσδυσης ισχύος από τα αιολικά πάρκα ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας.

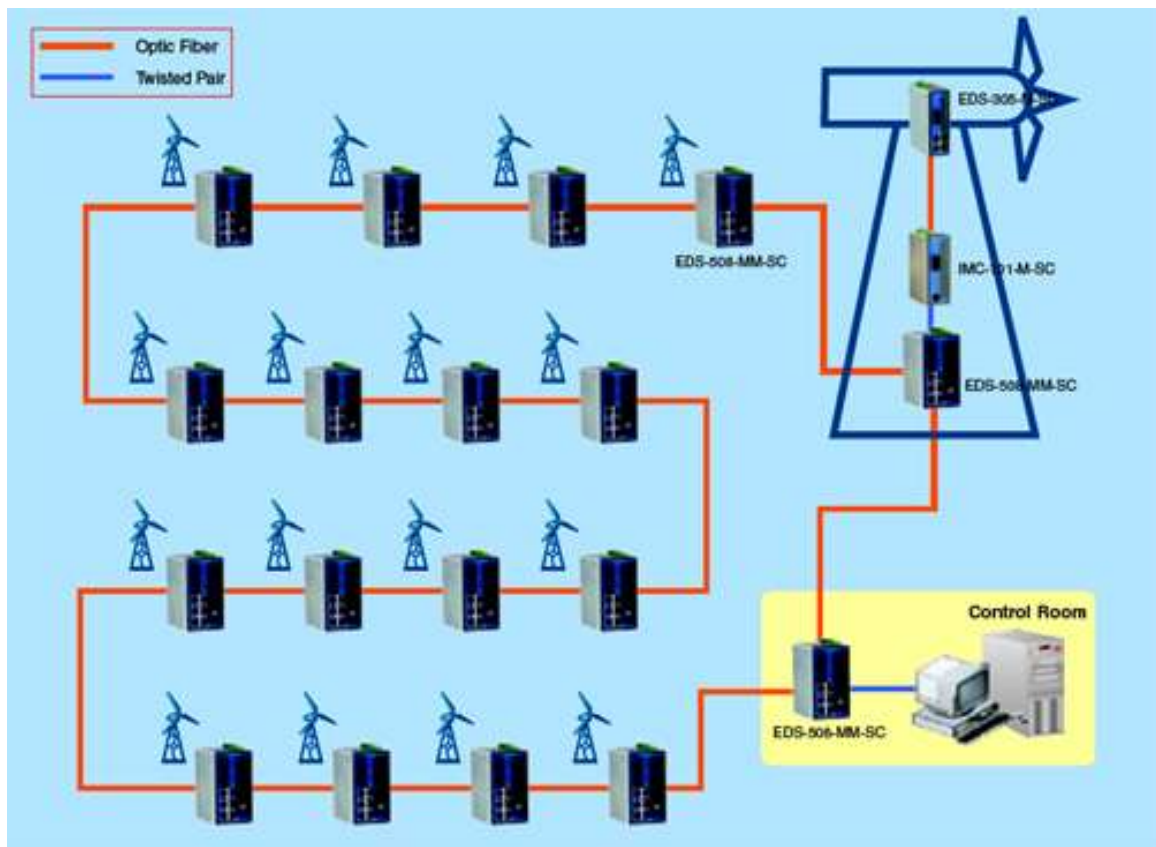
Για να είναι δυνατή η εποπτεία και ο έλεγχος ενός αιολικού πάρκου από το ΚΕΕ απαιτείται η ύπαρξη τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού (φερέσυχνα, οπτικές ίνες, μισθωμένες γραμμές κτλ.), πρωτόκολλα επικοινωνίας με το ΚΕΕ καθώς και Απομακρυσμένες Τερματικές Μονάδες (Remote Terminal Units-RTUs). Η επικοινωνία του ΚΕΕ με το αιολικό πάρκο γίνεται άμεσα μέσω του συστήματος SCADA μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιεί το ΚΕΕ.

2.15.1. Το σύστημα SCADA

Το σύστημα SCADA (Supervision , Control and Data Acquisition) είναι ένα σύστημα , το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και την εποπτεία των αιολικών πάρκων καθώς και για τη μεταφορά δεδομένων από απόσταση. Ο στόχος του συστήματος αυτού είναι ο διαρκής έλεγχος της παραγωγής ενέργειας του αιολικού πάρκου και η εποπτεία για τυχόν βλάβες , ούτως ώστε να προληφθούν εγκαίρως για την καλύτερη δυνατή απόδοση του αιολικού σταθμού. Τα δεδομένα αυτά είναι προσβάσιμα τόσο από τον ιδιοκτήτη του αιολικού πάρκου όσο και από τους κατασκευαστές των ανεμογεννητριών.

Ένα σύστημα SCADA αποτελείται από τον βασικό υπολογιστικό σταθμό ή κεντρικό διακομιστή και μια τελική μονάδα (MTU). Επιπρόσθετα, το σύστημα διαθέτει RTUs, τα οποία κωδικοποιούν και αποκωδικοποιούν τα σήματα από τον πραγματικό κόσμο και τα οποία εγκαθίστανται σε απομακρυσμένα σημεία με σκοπό την αποστολή και τη λήψη εντολών, καθώς και γραμμές επικοινωνίας (radio, καλωδιακή, τηλεφωνική). Επιπλέον, για την επικοινωνία όλων αυτών των μονάδων χρησιμοποιούνται καθορισμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας.

Το κεντρικό σύστημα του SCADA, το οποίο χρησιμοποιεί υπολογιστικές μονάδες έχει ως στόχο τη συλλογή πληροφοριών και την απεικόνισή τους σε έγχρωμες εικόνες, την εκτύπωση αναφορών , την απεικόνιση και τη στατιστική επεξεργασία των πληροφοριών καθώς και τη ρύθμιση της παραγωγής. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται ένα αιολικό πάρκο συνδεδεμένο με ένα σύστημα SCADA. [52]



Σχήμα 97 Σύστημα SCADA

Πηγή: http://konstantinosdavanelos.blogspot.gr/2013/03/blog-post_7724.html

2.16.Σύνδεση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο

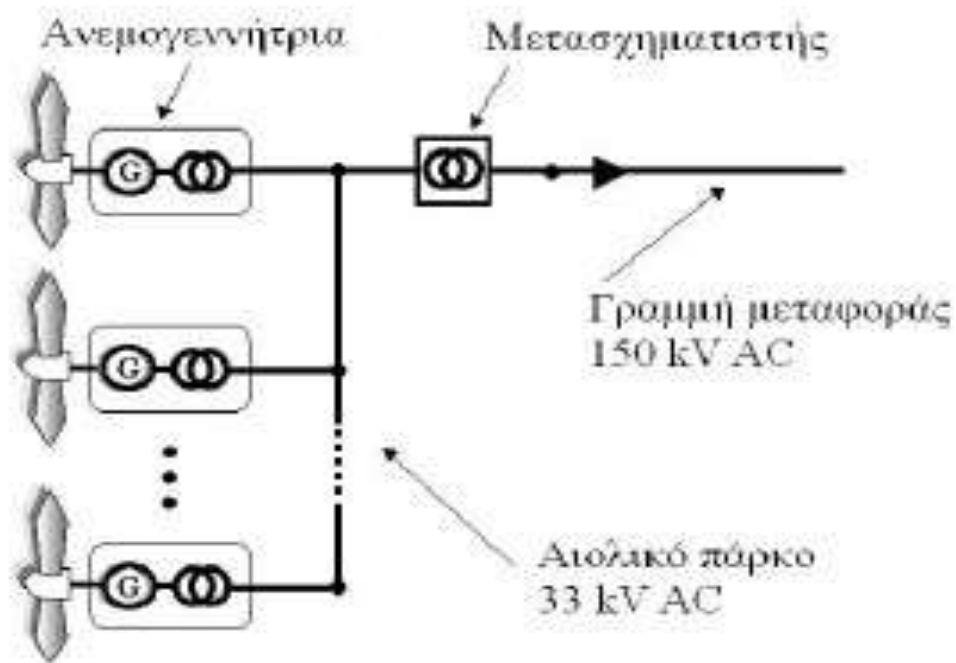
2.16.2. Τοπολογίες σύνδεσης αιολικών πάρκων

Τα περισσότερα αιολικά πάρκα είναι αναγκαίο να συνδέονται με το δίκτυο για τη διοχέτευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν σε αυτό. Οι συνδεσμολογίες σύνδεσης ποικίλουν και παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

2.16.2.2. Σύνδεση AC

Η σύνδεση AC χρησιμοποιείται κατά κόρον στα περισσότερα αιολικά πάρκα τόσο στην ξηρά όσο και στα υπεράκτια. Υπάρχει βέβαια διαφοροποίηση στη σύνδεσή τους ανάλογα με το μέγεθος της ισχύος που παράγουν τα αιολικά πάρκα, λόγω της διαφοράς στο κόστος κατασκευής τους. Στα αιολικά πάρκα τα οποία διαθέτουν λίγες ανεμογεννήτριες, το δίκτυο το οποίο χρησιμοποιείται είναι ακτινικής μορφής τόσο για τη σύνδεση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους όσο και για τη σύνδεση των ανεμογεννητριών στο δίκτυο. Για τη σύνδεση των ανεμογεννητριών τοποθετείται ένα καλώδιο σε σειρά το οποίο καταλήγει στο μετασχηματιστή του δικτύου για την ταυτόχρονη σύνδεση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους και τη σύνδεση των ανεμογεννητριών με το δίκτυο. Η σύνδεση αυτή έχει αρκετά χαμηλό κόστος και χρησιμοποιείται κατά κόρον στα μικρά αιολικά πάρκα.

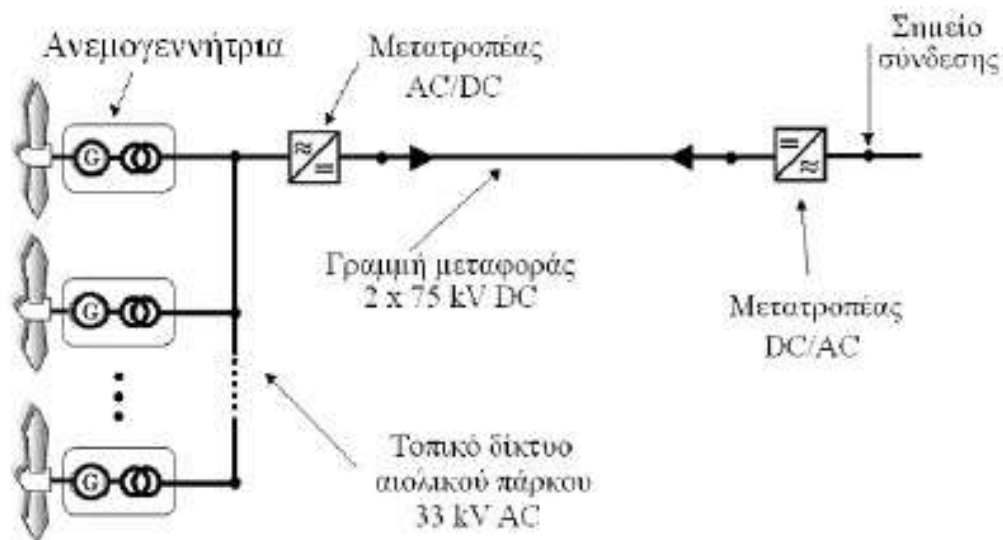
Στα μεγάλης ισχύς αιολικά πάρκα, η συνδεσμολογία διαφοροποιείται. Η σύνδεση των ανεμογεννητριών γίνεται σε ένα κόμβο μόνο που στην περίπτωση αυτή κάθε γεννήτρια επικοινωνεί ξεχωριστά. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός εσωτερικού δικτύου με πιο μικρή τάση μέχρι τον κόμβο. Από τον κόμβο και μετά υπάρχει ένας μετασχηματιστής που ανεβάζει την τάση ούτως ώστε να συνδέονται σε αυτό όλα τα εσωτερικά δίκτυα πριν από τη διασύνδεσή τους με το δίκτυο διανομής. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται μια τοπολογία σύνδεσης ενός μεγάλου αιολικού πάρκου με σύνδεση AC. [54]



Σχήμα 98 Τοπολογία σύνδεσης AC [54]

2.16.2.3. Σύνδεση AC/DC

Η σύνδεση των συστημάτων με AC/DC τοπολογία χρησιμοποιείται κυρίως για αιολικά πάρκα τα οποία συνδέονται σε μακρινό δίκτυο ή σε ανίσχυρο τοπικό δίκτυο. Στη σύνδεση AC/DC η σύνδεση των ανεμογεννητριών είναι ανεξάρτητη από το δίκτυο διανομής. Μεταξύ του δικτύου των ανεμογεννητριών και του δικτύου διανομής παρεμβάλλεται μια γραμμή DC για τη βέλτιστη και την πιο ποιοτική μεταφορά ισχύος. Το κόστος της συγκεκριμένης τοπολογίας δεν διαφέρει από εκείνο της τοπολογίας AC. Το μόνο κόστος είναι το διπολικό καλώδιο DC και οι μετατροπείς. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται μια τοπολογία σύνδεσης AC/DC.[54]

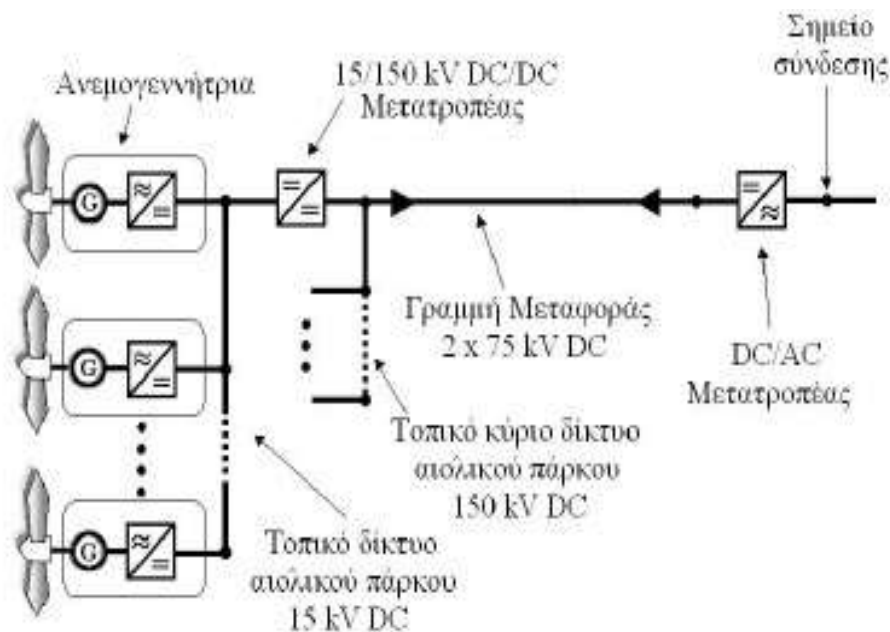


Σχήμα 99 Τοπολογία σύνδεσης AC/DC [54]

2.16.2.4. Σύνδεση DC

Η σύνδεση των ανεμογεννητριών με DC τοπολογία διαφέρει ανάλογα με το αν το αιολικό πάρκο είναι μεγάλο ή μικρό καθώς υπάρχει και μια σύνδεση DC αιολικού πάρκου σε σειρά. Στα μικρά αιολικά πάρκα με μικρό αριθμό ανεμογεννητριών η μορφή της συνδεσμολογίας είναι ίδια με αυτή της τοπολογίας AC μόνο που αντί του μετασχηματιστή, τοποθετείται ένας μετατροπέας DC ακολουθούμενος από ένα αντιστροφέα. Επιπλέον, στην έξοδο κάθε ανεμογεννήτριας τοποθετείται ένας ανορθωτής. Σε σύγκριση με την αντίστοιχη σύνδεση AC το κόστος κυμαίνεται ακριβώς στα ίδια επίπεδα.

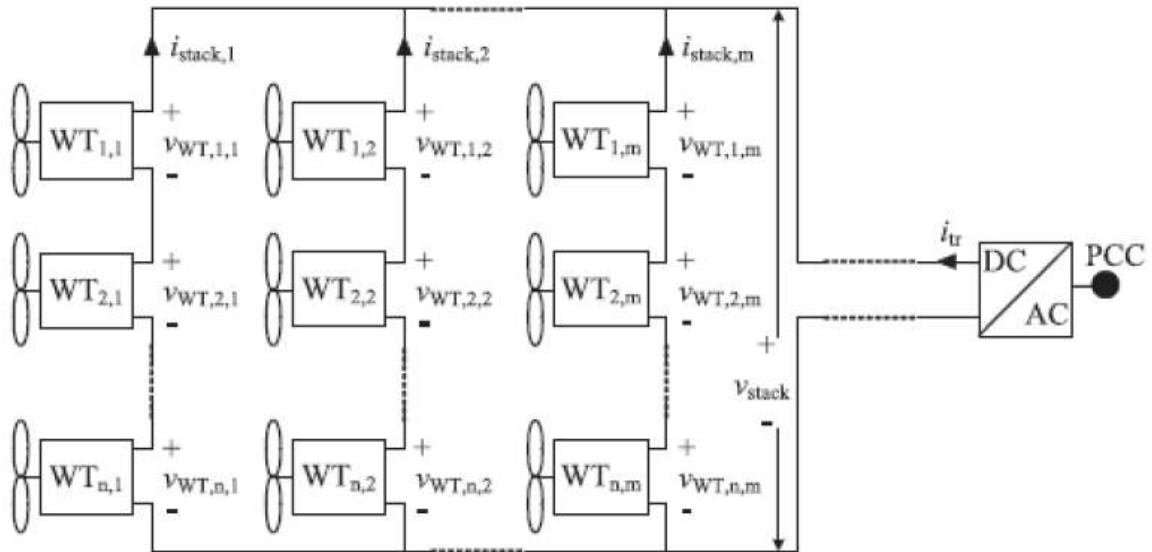
Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια τοπολογία DC για αιολικό πάρκο με πολλές ανεμογεννήτριες. Όπως παρατηρείται στο σχήμα σε κάθε σειρά ανεμογεννητριών τοποθετείται ένας μετατροπέας DC/DC με αποτέλεσμα μόνο όταν ένας μετατροπέας φτάσει τα 20-40kV να μπορεί να κάνει σύνδεση με τον αντιστροφέα. Στην περίπτωση που οι τιμές κυμαίνονται στα 5kV χρειάζεται ακόμα ένα στάδιο μετατροπής. [54]



Σχήμα 100 Τοπολογία σύνδεσης DC [54]

Επιπρόσθετα, υπάρχει μια ακόμα περίπτωση συνδεσμολογίας των ανεμογεννητριών σε σειρά, συνδέοντας όσες ανεμογεννήτριες είναι αρκετές ώστε να φτάσουν την ονομαστική τιμή του αντιστροφέα. Αυτή η σύνδεση έχει το πλεονέκτημα της εξάλειψης των ενδιάμεσων σταδίων μετατροπής και έτσι το συνολικό κόστος είναι μικρότερο. Στην περίπτωση της συνδεσμολογίας των ανεμογεννητριών σε σειρά χρειάζεται μόνο ένας αντιστροφέας, ο οποίος διαθέτει μεγάλο εύρος λειτουργίας μέχρι την ονομαστική του ισχύ ούτως ώστε να καλύψει τις ανάγκες του αιολικού πάρκου.

Το μόνο σημείο που πρέπει να δοθεί προσοχή είναι η ικανότητα των μετατροπέων από την πλευρά των ανεμογεννητριών να μπορούν να λειτουργήσουν σε αρκετά μεγάλες τάσεις ούτως ώστε στην περίπτωση βλάβης των ανεμογεννητριών, να είναι ικανοί να καλύψουν το κενό και να εξακολουθήσει το αιολικό πάρκο να λειτουργεί βέλτιστα. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια τοπολογία αιολικού πάρκου DC με σύνδεση των ανεμογεννητριών σε σειρά.



Σχήμα 101 Τοπολογία σύνδεσης DC αιολικού πάρκου σε συνδεσμολογία σε σειρά [54]

2.16.2.5. Το σύστημα HVDC

Το πρόβλημα της μεταφοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις αποτελεί ένα ζήτημα που απαιτεί επίλυση για τη βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Μια οικονομική και συμφέρουσα λύση αποτελεί το σύστημα μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC).

Το σύστημα αυτό παρουσιάζει μια οικονομική λύση παρέχοντας μια καλή ποιότητα ισχύος και ευστάθεια του συστήματος. Το συγκεκριμένο σύστημα παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως ο δυναμικός τρόπος απόσβεσης των ταλαντώσεων που παρουσιάζονται από τους μετατροπείς AC/DC και DC/AC καθώς και ο συγχρονισμός διαφόρων συχνοτήτων από διάφορες πηγές μέσω της γραμμής μεταφοράς. Στο σύστημα HVDC είναι βασισμένα και άλλα συστήματα μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας, τα οποία παρουσιάζονται στα ακόλουθα υποκεφάλαια.[54]

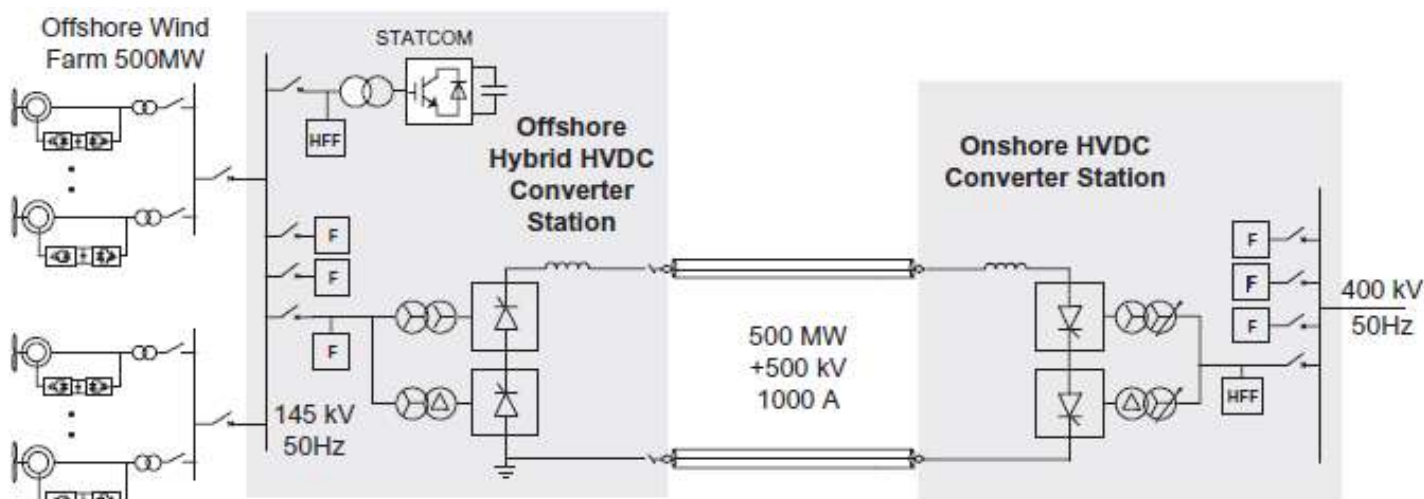
2.16.2.6. Το σύστημα HVAC

Το σύστημα HVAC είναι ένα σύστημα υψηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος, το οποίο χρησιμοποιείται στα αιολικά πάρκα μικρής κλίμακας. Ενώ αποτελεί μια πρακτική και οικονομική λύση, υπάρχουν περιορισμοί στη σχέση του μήκους της γραμμής με το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται καθώς και της άεργου ισχύος που παράγεται από τα καλώδια. Σημαντικό επίσης μειονέκτημα είναι ότι το μήκος της γραμμής δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 100km. Στις γραμμές εγκαθίστανται επιπλέον αντισταθμιστές άεργου ισχύος για τη βέλτιστη ποιοτικά παρεχόμενη ισχύ καθώς και για τον περιορισμό των ανώτερων αρμονικών που εισβάλουν στο δίκτυο.[54]

2.16.2.7. Το σύστημα HVDC βασισμένο σε LCC

Μια υποκατηγορία του συστήματος υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος είναι η χρήση του με προσθήκη μετατροπών πηγών ρεύματος (LCC). Το σύστημα αυτό όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα εφαρμόζεται σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο και αποτελείται από θυρίστορ, γεγονός που δυσχεραίνει τον έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος του συστήματος μεταφέροντας ανώτερες αρμονικές στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό στο σύστημα τοποθετούνται τεράστια φίλτρα αντιστάθμισης ανεβάζοντας το κόστος του συστήματος.

Μια εναλλακτική λύση για το πρόβλημα αυτό είναι η χρήση στατικού αντισταθμιστή (STATCOM). Με τη χρήση του STATCOM περιορίστηκε η άεργος ισχύς του συστήματος και η διατήρηση της συνεχούς τάσης μεταφοράς κατά τις στιγμιαίες βυθίσεις ή μεταβολές στο αιολικό πάρκο. Το σύστημα HVDC με LCC και στατικό αντισταθμιστή χρησιμοποιήθηκε από πολλές χώρες καθώς είναι ευρέως διαδεδομένο για τη μεταφορά μεγάλου ποσοστού παραγόμενης ενέργειας (>600MW), σε μεγάλες αποστάσεις (>100km). [54]

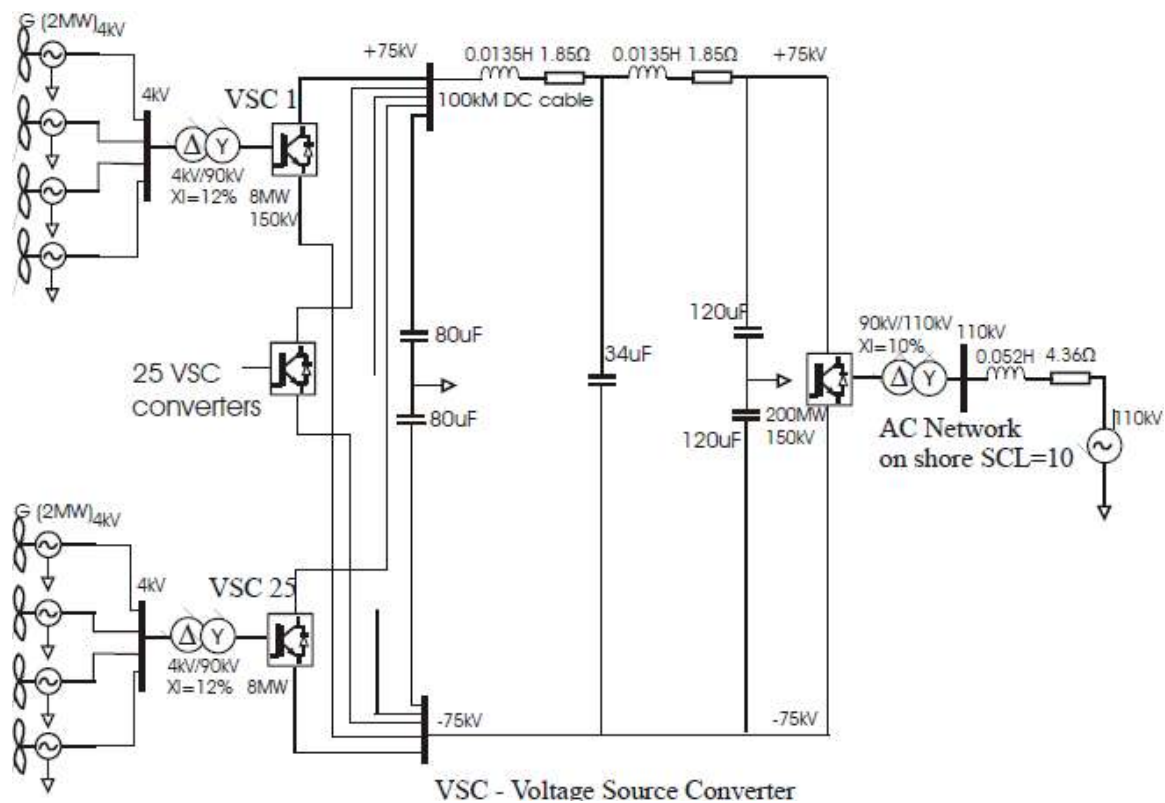


Σχήμα 102 Σύστημα μεταφοράς με μετατροπής πηγών ρεύματος LCC [54]

2.16.2.8. Το σύστημα HVDC βασισμένο σε VSC

Η υποκατηγορία αυτή του συστήματος υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος βασίζεται στη χρήση των μετατροπέων πηγής τάσης (VSC) αντικαθιστώντας τα θυρίστορ που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο με στοιχεία IGBT (διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης), τα οποία πλεονεκτούν στις ελεγχόμενες διακοπτικές διαδικασίες και στις μεγαλύτερες συχνότητες λειτουργίας. Το πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η χρήση μιας γραμμής, η οποία λειτουργεί ανεξάρτητα από τη διαφορά δυναμικότητας των δύο άκρων. Έτσι δεν είναι απαραίτητη η χρήση σταθεροποιητή ούτε από την πλευρά του αιολικού πάρκου, ούτε από την πλευρά του δικτύου.

Το σύστημα αυτό παρέχει πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως ο βέλτιστος και άμεσος έλεγχος της ενεργού και της άεργου ισχύος του συστήματος χωρίς τη χρήση αντισταθμιστών. Επιπλέον, αποφεύγεται η παρεμβολή αρμονικών στο δίκτυο και έτσι δεν είναι αναγκαία η χρήση φίλτρων για την εξάλειψή τους. Τέλος, το κόστος κατασκευής του συστήματος HVDC με VSC είναι μεν μεγαλύτερο, αλλά στο σύνολο της κατασκευής του είναι το ίδιο ή ακόμα και πιο λίγο σε σχέση με το σύστημα HVDC με LCC. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται ένα σύστημα HVDC με μετατροπείς πηγών τάσης VSC, το οποίο χρησιμοποιείται σε κατασκευές αρκετών χιλιομέτρων (>100km) για τη μεταφορά μεγάλου όγκου της παραγόμενης ισχύος από 200 έως και 900MW, με το πλεονέκτημα ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πέρα από αυτά τα όρια εάν κρίνεται απαραίτητο.[54]



Σχήμα 103 Σύστημα μεταφοράς με μετατροπείς πηγών τάσης VSC [54]

2.17. Οικονομική Μελέτη αιολικού πάρκου

2.17.1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτρια

Για την αξιολόγηση ενός αιολικού πάρκου πρέπει αρχικά να γίνει ο υπολογισμός της αναμενόμενης ενεργειακής παραγωγής. Ο υπολογισμός αυτός μεταφράζεται στην συνολική ηλεκτρική ενέργεια που είναι δυνατόν να παραχθεί στο συγκεκριμένο αιολικό πάρκο για την κατανομή ανέμου της περιοχής αυτής και για μια συγκεκριμένη καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας. Ο υπολογισμός της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται συνήθως για ένα έτος.

Στην περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου σε ένα μέρος ακολουθεί κατανομή πιθανότητα $f(U)$ τότε η ετήσια παραγόμενη ενέργεια από μια ανεμογεννήτρια δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E = 8760 \bar{P}_e = 8760 \int_0^{\infty} P_e(U) f(U) dU \quad [2.29]$$

Για διακριτή κατανομή πιθανότητας η ετήσια παραγόμενη ενέργεια από μια ανεμογεννήτρια δίνεται από τη σχέση:

$$E = 8760 \sum_{n=1}^N P_e(U_n) f(U_n) \Delta U \quad [2.30]$$

Όπου

U_n : η διακριτή τιμή της ταχύτητας ανέμου στο n διάστημα

ΔU : το βήμα μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου

N : το πλήθος των διαστημάτων μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου

2.17.2. Συντελεστής χρησιμοποίησης ανεμογεννήτριας

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης για μια ανεμογεννήτρια είναι ένας αδιάστατος αριθμός, ο οποίος παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1 και εκφράζει το λόγο της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς αυτή που θα παραγόταν στην περίπτωση την οποία η ανεμογεννήτρια λειτουργούσε στην ονομαστική της ισχύ συνεχώς κατά τη διάρκεια του έτους. Ο παρακάτω τύπος δείχνει τη σχέση αυτή:

$$E = 8760P_n UF \quad [2.31]$$

Όπου

P_n : η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας

UF : ο συντελεστής χρησιμοποίησης

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης είναι ένα σημαντικό μετρήσιμο μέγεθος καθώς μας εκφράζει τη βιωσιμότητα μιας ενεργειακής επένδυσης και παρουσιάζει το κατά πόσο κατάλληλη ήταν η τοποθέτηση μιας συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας σε ένα τόπο.

Υποθέτοντας ότι η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί την κατανομή Rayleigh , αποδεικνύεται ότι ο συντελεστής χρησιμοποίησης της ανεμογεννήτριας προσεγγίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$UF = 0.0087\bar{U} - \frac{P_n}{D^2} \quad [2.32]$$

όπου

\bar{U} : η μέση ταχύτητα του ανέμου (m/s)

D : η διάμετρος του δρομέα (m)

P_n : η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας (kW)

2.17.3. Αξιολόγηση αιολικού πάρκου

Ο κάθε επενδυτής όταν ξεκινάει να επενδύσει χρήματα στην εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου πρέπει να υπολογίσει εάν θα έχει απόσβεση της επένδυσης και πόσα χρόνια θα χρειαστούν για να την πετύχει. Η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου είναι μια επένδυση αρκετά μεγάλου μεγέθους και κάθε επιχειρηματίας αποζητά την απόσβεση στο πιο σύντομο χρονικό διάστημα. Η νομοθεσία κάθε κράτους προσπαθεί να προωθήσει την κατασκευή και ανέγερση των αιολικών πάρκων δίνοντας γενναιόδωρες επιδοτήσεις στους επενδυτές του με ποσοστό έως και 100% της επένδυσης.

Στην αρχή της δημιουργίας ενός αιολικού πάρκου γίνεται μια μελέτη για τον υπολογισμό των εσόδων και των εξόδων της κατασκευής του καθώς μελετούνται δείκτες οι οποίοι φανερώνουν το αν η επένδυση είναι αποδοτική ή όχι.

Για τον υπολογισμό των ετήσιων κοστών ενός αιολικού πάρκου θα χρειαστεί η κατανομή του κόστους κεφαλαίου σε όλη τη χρονική διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας και έπειτα η πρόσθεση σε αυτό του εκτιμώμενου κόστους λειτουργίας και συντήρησής της. Στην περίπτωση την οποία το ετήσιο κόστος κεφαλαίου προέρχεται από δάνειο, αυτό προκύπτει μέσω του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου CR, εξαρτώμενο από το επιτόκιο i και τη διάρκεια του δανείου n σε έτη.

Ο υπολογισμός του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$CR(i, n) = \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad [2.33]$$

Επιπλέον, οι ετήσιες πληρωμές P_y σε ένα τέτοιο δάνειο θα δίνονται από τη σχέση:

$$P_y = L * CR_{(i,n)} = L \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad [2.34]$$

Όπου

P_y : οι ετήσιες πληρωμές (€/ έτος)

L : το κεφάλαιο του δανείου (€)

i : το επιτόκιο (%)

n : η διάρκεια του δανείου (έτη)

Το ετήσιο συνολικό κόστος C_y είναι το άθροισμα της ετήσιας αποπληρωμής του δανείου P_y καθώς και των υπολοίπων ετήσιων κοστών λειτουργίας και συντήρησης C_{ry} , τα οποία υποθέτουμε ότι είναι σταθερά.

$$C_y = P_y + C_{ry} \quad [2.35]$$

Το μοναδιαίο κόστος της παραγόμενης ενέργειας δίνεται διαιρώντας το συνολικό ετήσιο κόστος C_y με την ετήσια παραγόμενη ενέργεια E .

$$C_e = \frac{C_y}{E} \sigma \epsilon \left(\frac{\text{€}}{kWh} \right) \quad [2.36]$$

Τα έξοδα ενός αιολικού πάρκου συμπεριλαμβάνουν το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης καθώς και τα έξοδα που απαιτούνται για τη λειτουργία και τη συντήρηση των ανεμογεννητριών . Τα έσοδα ενός αιολικού πάρκου συμπεριλαμβάνουν τις επιχορηγήσεις καθώς και τα ετήσια έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} In come_{elec} = E(kWh) & \left(\frac{\text{Αμοιβή για κάθε παραγόμενη kWh(€)}}{kWh} \right) \\ + & \left[\frac{\text{επιπλέον αμοιβή για πράσινη ενέργεια (€)}}{kWh} \right] \end{aligned} \quad [2.37]$$

Ο τρόπος υπολογισμού των ετήσιων ταμειακών ροών δίνεται από τον ακόλουθο πίνακα.

ΕΤΟΣ	Συνολικά έσοδα ανά έτος (€) (INC)	Συνολικά έξοδα ανά έτος (€) (EXP)	Ταμειακή ροή (€)(CSHFL)	Σωρευτική ταμειακή ροή (€) (TCSHFL)	Καθαρή παρούσα αξία (€) (NPV)
0	INC(0)	EXP(0)	$CSHFL(0)=INC(0)-EXP(0)$	$TCSHFL(0)=CSHFL(0)$	$NPV(0)=CSHFL(0)$
1	INC(1)	EXP(1)	$CSHFL(1)=INC(1)-EXP(1)$	$TCSHFL(1)=CSHFL(0)+CSHFL(1)$	$NPV(1)=\frac{CSHFL(1)}{1+i}$
.
.
.
n	INC(n)	EXP(n)	$CSHFL(n)=INC(n)-EXP(n)$	$TCSHFL(n)=\sum_n CSHFL(n)$	$NPV(n)=\frac{CSHFL(n)}{(1+i)^n}$
Όπου i: το επιτόκιο				ΣΥΝΟΛΟ	$NPV = \sum_n NPV(n)$

Πίνακας 4 Υπολογισμός των ετήσιων ταμειακών ροών ενός αιολικού πάρκου

όπου

INC: συνολικά έσοδα ανά έτος

EXP: συνολικά έξοδα ανά έτος

CSHFL: ταμειακή ροή

TCSHFL: σωρευτική ταμειακή ροή

NPV: καθαρή παρούσα αξία

i: επιτόκιο

2.17.4. Μέθοδοι αξιολόγησης της επένδυσης

- Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR)

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι ουσιαστικά το επιτόκιο προεξόφλησης που μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία, καθώς περιγράφει την απόδοση των κεφαλαίων (ιδιωτικά και μη) σε μια παραγωγική διαδικασία και εκφράζει το μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης της επένδυσης για όλη τη διάρκεια μελέτης της επένδυσης.[34]

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\sum_{n=0}^N \frac{CSHFL(n)}{(1 + \varepsilon)^n} = 0 \quad [2.38]$$

Όπου

n: ο αύξων αριθμός του έτους

CSHFL (n): η ταμειακή ροή το έτος n

Στην περίπτωση που ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) είναι μεγαλύτερος από το ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης, τότε η επένδυση θεωρείται συμφέρουσα. Εάν ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) είναι ίσος με το ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης, τότε η επένδυση θεωρείται οριακή και εφαρμόζεται όταν δεν υπάρχει άλλη εναλλακτική λύση καλύτερη, ενώ αν ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) είναι μικρότερος από το ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης, τότε η επένδυση απορρίπτεται.

- Διάρκεια απλής επανείσπραξης

Με βάση τη μέθοδο απλής επανείσπραξης γίνεται υπολογισμός του χρονικού διαστήματος που χρειάζεται έως ότου το μέγεθος των συσσωρευτικών καθαρών χρηματικών εισροών γίνει ίσο με το μέγεθος της αρχικής επένδυσης. Ο υπολογισμός της περιόδου αποπληρωμής δίνεται από τη σχέση[45]:

$$Payback\ period = \frac{Αρχικό\ κεφάλαιο - Επιχορηγήσεις}{INC\ per\ year - EXP\ per\ year} \quad [2.39]$$

όπου

INC per year: συνολικά έσοδα ανά έτος

EXP per year: συνολικά έξοδα ανά έτος

Αν το διάστημα το οποίο θα προκύψει είναι μικρότερο ή ίσο με ένα όριο που έχει ορίσει ο επενδυτής τότε η επένδυση θεωρείται δεκτή. Το όριο αυτό καθορίζεται από αρκετούς παράγοντες όπως είναι ο βαθμός επικινδυνότητας της επένδυσης όπου όσο μεγαλύτερος είναι τόσο γρηγορότερα διεκδικεί ο επενδυτής το κεφάλαιό του πίσω. Επιπλέον, καθορίζεται από την ύπαρξη περισσότερων ευκαιριών επένδυσης με γνωστούς χρόνους αποπληρωμής καθώς και από το ύψος των επιτοκίων του δανεισμού και του πληθωρισμού.

Τέλος, η μέθοδος αυτή δεν πρέπει να λαμβάνεται υπ όψιν ως πρωταρχικός δείκτης αξιολόγησης της επένδυσης λόγω του ότι δεν λαμβάνει υπ όψιν τη διαχρονική αξία του χρήματος ούτε τις ταμειακές ροές που πραγματοποιούνται μετά την περίοδο επανείσπραξης του κεφαλαίου επένδυσης.

- Δείκτης αποδοτικότητας

Ο δείκτης αποδοτικότητας μιας επιχείρησης υπολογίζεται με βάση την καθαρή παρούσα αξία προς το αρχικό κεφάλαιο που επενδύθηκε στο αιολικό πάρκο. Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης αποδοτικότητας τόσο πιο αποδοτική είναι η επένδυση και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Profit\ Ind = \frac{NPV}{Αρχικό\ κεφάλαιο} \quad [2.40]$$

2.18.Βιβλιογραφία

1. «Εγχειρίδιο τεχνικών απαιτήσεων για αιολικούς σταθμούς», Διαχειριστής ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
2. «Ικανότητα απορρόφησης αιολικής παραγωγής στην Πελοπόννησο», Διαχειριστής ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ΔΕΣΜΗΕ
3. «Μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας σε πραγματικό χρόνο για μελέτη ρύθμισης συχνότητας», Διπλωματική εργασία Νικόλαος Λ. Κατσουλάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2013
4. «Πίνακες έργων ανάπτυξης του συστήματος και εκτίμησης κόστους», Παράρτημα Ι, Ανεξάρτητος διαχειριστής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ΑΔΜΗΕ, Προκαταρκτικό σχέδιο Φεβρουάριος 2014
5. «Τεχνικές απαιτήσεις κωδικών για τη σύνδεση μεγάλων αιολικών πάρκων στο σύστημα», Διπλωματική εργασία Χρήστος Π. Πατσιούρας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2007
6. «Μοντέλα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής», Διπλωματική εργασία Ειρήνη Δ. Παντέρη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2007
7. «Διαμόρφωση της ηλεκτρικής αγοράς στην Ελλάδα τη δεκαετία 2010-2020», Διπλωματική εργασία Δημήτριος Τρ. Καββαθάς, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2012
8. «The European offshore wind industry- key trends and statistics 1st half 2014», A report by the European Wind Energy Association, EWEA, Ιούλιος 2014
9. «Wind in power- 2013 European statistics», European Wind Energy Association EWEA, Φεβρουάριος 2014
10. «Μελέτη των επιπτώσεων στη λειτουργία του ελληνικού συστήματος από την αιολική διείσδυση 5 έως 8 GW μέχρι το έτος 2025: Προϋποθέσεις και εκτίμηση του κόστους ομαλής ένταξής τους», Τελική τεχνική έκθεση, Ευάγγελος Ν. Διαλυνάς Καθηγητής Ε.Μ.Π., Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβρουάριος 2011
11. «Μελέτη αιολικού πάρκου ισχύος 2,4MW», Πτυχιακή εργασία Θυμάκης Γεώργιος – Τσουνής Δημήτριος, Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αθήνα, 2013
12. «Αιολική ενέργεια σε Ελλάδα και Ευρώπη», Διπλωματική εργασία Αναστασόπουλος Γεώργιος, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2010
13. «Επίδραση της μεγάλης κλίμακας διείσδυσης αιολικής παραγωγής στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας», Διπλωματική εργασία Παπαδόπουλος Ευθύμιος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2011
14. «Η επίδραση των διαφορετικών πολιτικών λειτουργίας στα μεγέθη ενός μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας», Διπλωματική εργασία Γεωργία Θ. Πιερή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2012

15. «Πρόβλεψη αιολικής παραγωγής στην Ελλάδα», Διπλωματική εργασία Ιπποκράτης Μπόμπορας- Συμεών Περσίδης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2013
16. «Τεχνικές απαιτήσεις για τη σύνδεση αιολικών σταθμών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας – Επισκόπηση κωδίκων άλλων χωρών και διαθέσιμων τεχνολογιών ανεμογεννητριών», Τεχνική Έκθεση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα , Δεκέμβριος 2006
17. «Όροι και προϋποθέσεις για σύνδεση εγκαταστάσεων ανεξάρτητων παραγωγών ΑΠΕ στο σύστημα μεταφοράς/ διανομής», Διαχειριστής συστήματος μεταφοράς Κύπρος,Εγχειρίδιο έκδοση 1.0, Μάιος 2011
18. «Εκτίμηση και ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων ΑΠΕ με έμφαση στα αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα», Διπλωματική εργασία Παπαδογιαννάκης Μιχάλης, ΤΕΙ Κρήτης, Χανιά , Σεπτέμβριος 2009
19. «Κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση πάρκων αιολικής ενέργειας στην Στερεά Ελλάδα», Πτυχιακή εργασία Παναγιώτης Πάτης, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
20. «Ανάλυση εσωτερικής στηρίξεως πτερυγίου ανεμογεννήτριας από σύνθετα υλικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων», Διπλωματική εργασία Γεώργιος Α. Μπαλόκας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα 2013
21. «Βέλτιστος δομικός σχεδιασμός ανεμογεννητριών », Διπλωματική εργασία Μπίρδας Μιχαήλ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
22. «Εγκατάσταση βιομηχανικού συστήματος οδήγησης ηλεκτρικών μηχανών αμφίδρομης ροής ισχύος για τον έλεγχο ανεμογεννήτριας», Διπλωματική εργασία Τσιούμας Ευάγγελος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2013
23. «Δημιουργία αρχείου ανεμολογικών δεδομένων και ανάπτυξη προγράμματος υπολογισμού καμπυλών Weibull για τη διαχείριση της αιολικής ενέργειας», Διπλωματική εργασία Δημητρίου Γκίκα του Δημητρίου, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα , Νοέμβριος 2011
24. «Σχεδιασμός και προσομοίωση της λειτουργίας στο Simulink/Matlab δίπτερης ανεμογεννήτριας ισχύος 40kW/60 kW/80 kW», Διπλωματική εργασία Σταμάτιος Α. Μπάρδης, Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά , Νοέμβριος 2010
25. «Σύγκριση κλασσικού και ελέγχου βασισμένου σε ασαφή λογική ανεμογεννήτριας μονίμων μαγνητών», Διπλωματική εργασία Μαρία Σ. Ρώτα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Οκτώβριος 2008
26. «Έλεγχος γεννητριών επαγωγής ανεμογεννητριών», Διπλωματική εργασία Καζαντζόγλου Φωτεινής, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά , Δεκέμβριος 2008

27. «Ανάλυση λειτουργίας και έλεγχος συστήματος ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών διασυνδεδεμένης στο δίκτυο», Διπλωματική εργασία Μάριος Β. Ντρέκο, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Οκτώβριος 2009
28. «Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής», Διπλωματική εργασία Κοτσαμπόπουλος Χ. Παναγιώτης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Μάρτιος 2010
29. «Συμμετοχή ανεμογεννήτριας αιολικού πάρκου υπό αποκοπή στη ρύθμιση φορτίου συχνότητας», Διπλωματική εργασία Ελένη Παυλίδου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Μάρτιος 2010
30. «Έλεγχος άεργου ισχύος από ανεμογεννήτρια για υποστήριξη τάσης δικτύου κατά τη διάρκεια σφάλματος», Διπλωματική εργασία Παναγιώτης Θ. Τσάκωνας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Οκτώβριος 2010
31. «Οικονομοτεχνική μελέτη αιολικού πάρκου στη δυτική Κρήτη με τη χρήση των λογισμικών WASP και RETSCREEN», Διπλωματική εργασία Μπαρμπαρήγου Μυρτώ, Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά , Ιούνιος 2011
32. «Σχεδίαση εξομοιωτή αδράνειας για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών – Εφαρμογή στο αυτόνομο σύστημα της Ρόδου», Διπλωματική εργασία Λάμπρος Ν. Παπαγγελής , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Μάρτιος 2013
33. «Μελέτη του ρόλου του υπεδάφους στη δυναμική απόκριση πυλώνων ανεμογεννητριών», Διπλωματική εργασία Τσιπιανίτης Δ. Αλέξανδρος, Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά 2013
34. «Αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα», Διπλωματική εργασία Σωκράτης Μηλαράς, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο & Πανεπιστήμιο Πειραιά , Αθήνα 2008
35. «Ανάλυση συστήματος μετάδοσης ισχύος ανεμογεννήτριας μεγάλης ισχύος», Πτυχιακή εργασία Κόλλιας Ιωάννης & Ντούπης Γιώργος, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά , Απρίλιος 2012
36. «Διερεύνηση της λειτουργίας συστήματος διασύνδεσης ανεμογεννήτριας με το δίκτυο χαμηλής τάσης- κατασκευή διάταξης ανύψωσης τάσης», Διπλωματική εργασία Ιωάννη Β. Γκαρτζώνη, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα , Ιανουάριος 2013
37. «Συγκριτική ανάλυση αιολικών συστημάτων και έλεγχος ισχύος σε σύστημα με ΑΜΔΤ (Ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδοσίας», Διπλωματική εργασία Μαρούδα Διονύση του Παναγιώτη, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2008
38. «Μελέτη και σχεδιασμός πτερύγωσης ανεμογεννήτριας», Διπλωματική εργασία Νουχάι Εσμεράλντ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Ηράκλειο , 2013
39. «Βελτιστοποίηση απόδοσης πάρκου ανεμογεννητριών με εφαρμογή μεταεριστικών μεθόδων», Διπλωματική εργασία Παχύ Παρασκευή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Ιούλιος 2012

40. «Σχεδιομελέτη και κατασκευή καλουπιού ανεμοπτερυγίου με σύγχρονες CAD/CAM-CAE υπολογιστικές μεθόδους και κατεργασίες», Πτυχιακή εργασία Θεόδωρος Γ. Παπαδουλής, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Χανιά 2011
41. «Μελέτη παραμέτρων ανεμογεννήτριας και εφαρμογή για παράκτιο αιολικό πάρκο στη Λήμνο», Διπλωματική εργασία Παπανδρέου Γεωργία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
42. «Συμβολή στην προσομοίωση και αναγνώριση ανεμογεννητριών με ασύγχρονη γεννήτρια για την δημιουργία μειωμένης τάξης ισοδύναμων μοντέλων», Διδακτορική εργασία Φώτης Δ. Κανέλλος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Νοέμβριος 2003
43. «Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διεύθυνσης», Διδακτορική διατριβή Γιάννη Δ. Μάργαρη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Ιούλιος 2011
44. «Οικονομική μελέτη και αξιολόγηση κατασκευής αιολικών πάρκων στην ελληνική επικράτεια», Διπλωματική εργασία Νικόλαος Χ. Αργυρός, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Φεβρουάριος 2011
45. «Μελέτη ανάπτυξης αιολικού πάρκου στην Κρήτη», Πτυχιακή εργασία Taulant Shembilli , Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης , Ιούνιος 2010
46. «Σχεδιασμός συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδότησης σε αυτόνομο σύστημα», Διπλωματική εργασία Λαμπριανίδης Στέφανος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη , Νοέμβριος 2013
47. «Ανάλυση διαθεσιμότητας και βαθμού χρησιμοποίησης αιολικών συστημάτων», Διπλωματική εργασία Γαρίνη Ευδοξία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα , Νοέμβριος 2012
48. «Αιολική ενέργεια- Μελέτη του αιολικού δυναμικού τεσσάρων περιοχών του νομού Θεσσαλονίκης», Πτυχιακή εργασία Βατάλης Αναστάσιος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης , Θεσσαλονίκη , Σεπτέμβριος 2013
49. «Ανάλυση, Μοντελοποίηση και έλεγχος ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης στάτη και δρομέα», Διπλωματική εργασία Βαγρόπουλος Ι. Στυλιανός, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη , Ιούλιος 2010
50. «Έλεγχος αιολικού συστήματος μεταβλητών στροφών με πολυπολική σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω ac/dc/ac μετατροπέα ισχύος», Διπλωματική εργασία Παναγιώτη Α. Μπακή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα , Ιανουάριος 2012
51. «Ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου και έλεγχος ανεμογεννήτριας συνδεδεμένης στο δίκτυο σε αυτόνομη λειτουργία εφοδιασμένη με διάταξη αποθήκευσης ενέργειας», Διπλωματική εργασία Στέφανου Γ. Δημητρακάκη, Πανεπιστήμιο Πατρών , Πάτρα , Μάρτιος 2014
52. «Προγράμματα SCADA- Βελτιστοποίηση λειτουργίας Α/Π», Διπλωματική εργασία Νώτη Βασιλική, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας, Αθήνα , Δεκέμβριος 2002

53. «Απαιτήσεις σύνδεσης αιολικών πάρκων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας», Διπλωματική εργασία Κωνσταντίνος Τσιριγωτάκης, Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά , Μάρτιος 2009
54. «Μελέτη υπεράκτιου αιολικού πάρκου και σύνδεσή του στο δίκτυο», Διπλωματική εργασία Ιωάννη Μπάρλα, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα , Οκτώβριος 2012
55. «Στρατηγικός προσδιορισμός έργων σύνδεσης νέων αιολικών πάρκων», Διαχειριστής ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ΔΕΣΜΗΕ, Αθήνα, Απρίλιος 2002
56. «Μελέτη ανάπτυξης συστήματος μεταφοράς περιόδου 2010-2014», Διαχειριστής ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ΔΕΣΜΗΕ
57. «Μελέτη ανάπτυξης δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για την ενσωμάτωση ΑΠΕ», Διπλωματική Εργασία Μελανίτη Μαρία- Άνθια, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
58. <http://www.ewea.org/>
59. <http://www.admie.gr/>
60. <http://www.desmie.gr/>
61. <http://www.lagie.gr/>
62. <http://eletaen.gr/>
63. <http://www.cres.gr/kape/index.htm>
64. <http://www.wind-energy-the-facts.org/appendix-a.html>
65. <http://www.sma-hellas.com/el.html>

3. Υδροηλεκτρική ενέργεια

Το νερό είναι ένας φυσικός πόρος, ο οποίος παρέχεται από τη φύση ανεξάντλητα χωρίς συνεχόμενη και σταθερή ροή με αποτέλεσμα η υδροηλεκτρική ενέργεια να κατατάσσεται στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η διαχείριση του νερού για την αξιοποίησή του στην παραγωγή ενέργειας πρέπει να πραγματοποιείται ορθολογικά για την εξυπηρέτηση των αναγκών με τον πιο αποδοτικό και βέλτιστο τρόπο. Η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας υφίσταται από τα αρχαία χρόνια με τους υδρόμυλους για την κοπή ξυλείας και το άλεσμα των δημητριακών. Τα υδροηλεκτρικά συστήματα παραγωγής ενέργειας υφίσταται για πάνω από εξήντα χρόνια. Στην Ελλάδα και κυρίως στο βορειοδυτικό μέρος της χώρας, όπου υπάρχουν οι πιο ορεινές περιοχές, υπάρχει σημαντική ανάπτυξη της υδροηλεκτρικής παραγωγής. Το υδροδυναμικό της χώρας σε ετήσια βάση κυμαίνεται περίπου στις 80TWh, ενώ το πλέον εκμεταλλεύσιμο οικονομικά υδροηλεκτρικό δυναμικό αγγίζει τις 12TWh.



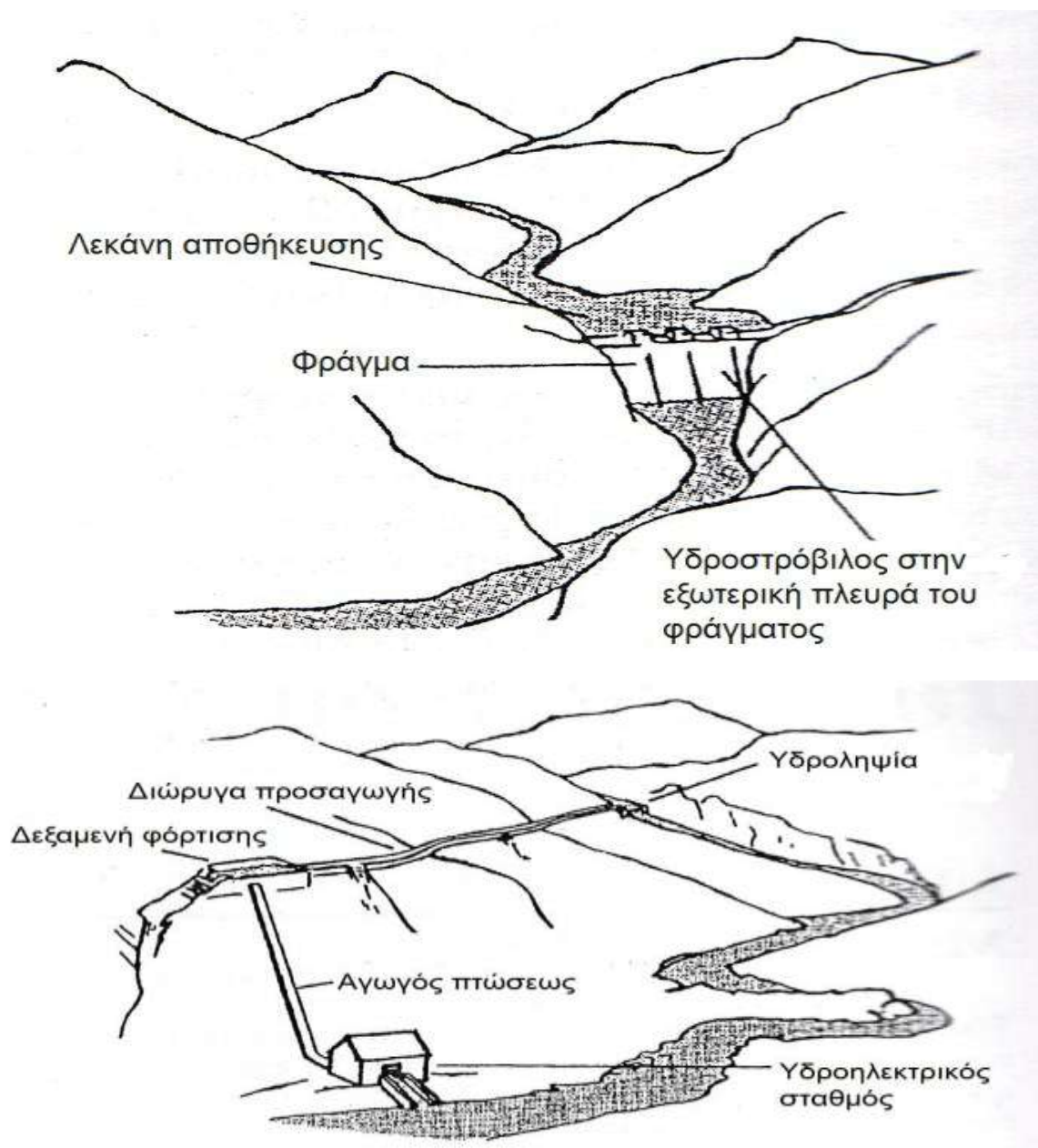
Σχήμα 104 Υδροστρόβιλοι παλαιάς τεχνολογίας [5]

Η ενέργεια του νερού μπορεί να κινεί υδροστροβίλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα υδροηλεκτρικά συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον όγκο της παραγόμενης ισχύος. Οι κύριες κατηγορίες υδροηλεκτρικών συστημάτων είναι τα μεγάλα υδροηλεκτρικά συστήματα, τα μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα και τα micro υδροηλεκτρικά συστήματα.

Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά συστήματα έχουν ονομαστική ισχύ πάνω από 10MW, τα οποία μπορούν να παράγουν τόση ηλεκτρική ενέργεια ώστε να είναι ικανά να τροφοδοτούν μεγάλες πόλεις. Τα μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα έχουν ονομαστική ισχύ μικρότερη από 10MW και μεγαλύτερη από 1MW, τα οποία μπορούν να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια εθνικά ηλεκτρικά δίκτυα. Τέλος, τα micro υδροηλεκτρικά συστήματα έχουν ονομαστική ισχύ από 100KW έως 1MW και μπορούν να τροφοδοτούν απομακρυσμένες και απομονωμένες περιοχές για την ηλεκτροδότηση μικρών κοινοτήτων ή βιοτεχνιών.

Επιπρόσθετα, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί κατηγοριοποιούνται και βάσει άλλων κριτηρίων, όπως η διαμόρφωσή τους, ο εξοπλισμός που τα απαρτίζει, ο τύπος εγκατάστασης, η χρήση της παραγόμενης ισχύος και πλήθος άλλων παραγόντων.

Μια κατηγοριοποίηση των υδροηλεκτρικών σταθμών γίνεται βάσει του τύπου της υδροληψίας και διακρίνονται στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς εκτροπής ή ροής ποταμού (run of the river schemes), στα οποία ένα μέρος της ροής του ποταμού εκτρέπεται και χρησιμοποιείται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς τη χρήση μεγάλων φραγμάτων για την αποθήκευση του νερού, και στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς αποθήκευσης (storage schemes), τα οποία χρησιμοποιούν απαραίτητα μεγάλα φράγματα. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι δύο κατηγορίες των υδροηλεκτρικών σταθμών.[4]



Σχήμα 105 (α) Υδροηλεκτρικό έργο με λεκάνη αποθήκευσης και φράγμα, (β) Υδροηλεκτρικό έργο με εκτροπή μέρους της ροής του ποταμού (run of the river) και ανοιχτή διώρυγα προσαγωγής του νερού [4]

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν πλήθος πλεονεκτημάτων μερικά από τα οποία είναι τα εξής:

- Στην περίπτωση που είναι απαραίτητη επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν να τεθούν αμέσως σε λειτουργία σε σύγκριση με τους θερμικούς σταθμούς που χρειάζονται αρκετό χρόνο προετοιμασίας
- Είναι μια μορφή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η οποία είναι φιλική προς το περιβάλλον, προστατεύοντάς το σε σύγκριση με άλλες μορφές ενέργειας
- Μπορούν να ικανοποιηθούν και άλλες ανάγκες όπως η άρδευση, η ύδρευση, η ανάσχεση χειμάρρων, η δημιουργία υγροτόπων καθώς μπορούν να γίνουν και κέντρα αναψυχής (π.χ. λίμνη Πλαστήρα), είτε να διεξάγονται σε αυτούς αθλητικές δραστηριότητες

Τα μειονεκτήματα των υδροηλεκτρικών σταθμών είναι τα ακόλουθα:

- Ο αρκετά μεγάλος χρόνος που χρειάζεται ώστε να κατασκευαστεί το έργο
- Το υψηλό κόστος αγοράς του εξοπλισμού του υδροηλεκτρικού σταθμού καθώς και το κόστος κατασκευής των φραγμάτων του σταθμού
- Η ενδεχόμενη αλλαγή στο περιβάλλον στην περιοχή του ταμιευτήρα λόγω της αλλαγής της χρήσης της γης, της ενδεχόμενης μετακίνησης του πληθυσμού, στην αλλαγή του κλίματος του τόπου καθώς και στην τροποποίηση της χλωρίδας και της πανίδας

3.1. Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτες περιγραφές που αναφέρονται στους υδρόμυλους και στους υδραυλικούς τροχούς γίνεται από βουδιστές και Ιησουίτες μοναχούς καθώς και από Ρωμαίους συγγραφείς. Οι πρώτοι όμως υδρόμυλοι παρουσιάστηκαν στην Ελλάδα στην περιοχή της Μακεδονίας, με αναφορά σε οδοντωτά συστήματα μετάδοσης κίνησης, τα οποία αποδίδονται στον Αριστοτέλη.

Η πιο μεγάλη απόδειξη ύπαρξης τεχνολογίας αυτού του τύπου είναι ο μηχανισμός των Αντικυθήρων, ένα εύρημα, το οποίο βοήθησε αρκετά στην διαμόρφωση της τεχνικής των υδραυλικών τροχών. Ο μηχανισμός αυτός οφείλεται σε δύο μαθητές αυλικούς, τον Μακεδόνα φιλόσοφο και τον Έρωνα τον Αλεξανδρέα. Ο 'λευκός άνθραξ', όπως αποκαλούνταν αυτή η μορφή ενέργειας, αποτελούσε μια κινητήριο δύναμη η οποία εξυπηρετούσε στην κίνηση υδροτροχών οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα για την άλεση δημητριακών και την κοπή ξυλείας.

Η εμφάνιση των υδροστρόβιλων έγινε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, ενώ τις τελευταίες δεκαετίες του 19^{ου} αιώνα κατασκευάστηκαν έργα μικρής ισχύος, λόγω του περιορισμού των τεχνικών μέσων της εποχής. Με την πάροδο των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας αναπτύχθηκαν εφαρμογές ηλεκτρισμού για την αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας. Έτσι περνάμε στην εποχή όπου η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική μέσω των υδροστρόβιλων και εν συνεχεία σε ηλεκτρική ενέργεια.

Μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο υπήρχε μεγάλη άνθηση των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων, με μονάδες μεγάλης ισχύος μερικών εκατοντάδων MW. Μετά την δεκαετία του 1980 υπάρχει μια έντονη κινητικότητα στη δημιουργία των μικρών υδροηλεκτρικών έργων και στην ανακαίνιση των παλιών υδροηλεκτρικών σταθμών που είχαν τεθεί εκτός λειτουργίας.[5]

3.2. Υδροηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, υπάρχει ένα πλήθος παλιών καθώς και σύγχρονων εγκαταστάσεων υδροηλεκτρικών σταθμών με σκοπό κυρίως την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος για την τροφοδότηση του δικτύου. Κυρίως στις περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας υπάρχει πολύ μεγάλο υδάτινο δυναμικό το οποίο αγγίζει το 30% του συνολικού φρέσκου νερού της χώρας. Οι περισσότεροι ποταμοί της ηπειρωτικής Ελλάδας έχουν τις πηγές τους στην οροσειρά της Πίνδου, στην οποία παρατηρούνται υψηλές βροχοπτώσεις καθώς η εδαφική κλίση είναι τέτοια ώστε υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης του υδάτινου δυναμικού από μεγάλες υψομετρικές διαφορές καθώς επίσης πλεονεκτεί στη δημιουργία δεξαμενών νερού και τεχνητών λιμνών.

Η συνολική εγκατεστημένη υδροηλεκτρική ισχύς φτάνει σήμερα στην Ελλάδα τα 3060MW , ενώ η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας κυμαίνεται στα 4000-5000GWh. Η ενέργεια, η οποία προέρχεται από υδροηλεκτρικούς σταθμούς καλύπτει ηλεκτρικά φορτία αιχμής. Τα μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ στην Ελλάδα παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα και είναι τα εξής:

- Συγκρότημα Αχελώου (925,6MW)
- Συγκρότημα Αλιάκμονα (879,3MW)
- Συγκρότημα Αράχθου (553,9MW)
- Υδροηλεκτρικός σταθμός Πλαστήρα (129,9MW)
- Υδροηλεκτρικός σταθμός Λάδωνα (70MW)



Σχήμα 106 Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ [5]

Στην Ελλάδα αυτή τη στιγμή λειτουργούν 16 μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί με εγκατεστημένη ισχύ 3060MW, που είναι περίπου το 20% της συνολικής ισχύος του διασυνδεδεμένου συστήματος. Η υδροηλεκτρική ισχύς όπως έδειχναν οι προβλέψεις θα έπρεπε να ήταν 6400GWh το χρόνο, ενώ η πραγματική μέση ισχύς όλων των υδροηλεκτρικών σταθμών κυμαίνεται στα 5000GWh.

3.3. Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί δημιουργούν κάποια προβλήματα στο περιβάλλον, τα οποία τείνουν να εξαλειφθούν στις νέες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Συγκεκριμένα, στις περιοχές όπου το νερό εκλαμβάνεται σε κάποια απόσταση από το σημείο στο οποίο εκβάλλει πίσω στο ποτάμι, το τμήμα του παρακαμφθέντος ποταμού υπάρχει περίπτωση να αποξηραθεί και να έχει δυσάρεστη όψη. Στους καινούριους υδροηλεκτρικούς σταθμούς υπάρχει η δυνατότητα εναπόθεσης αρκετού όγκου νερού ώστε να παρακάμπτει τους στροβίλους.

Επιπρόσθετα, ένας υδροηλεκτρικός σταθμός πρέπει να λάβει υπ όψιν την προστασία της χλωρίδας και της πανίδας του ποταμού. Ειδικότερα, σε ορισμένα συστήματα μικρού ύψους πτώσης, υπάρχει η δυνατότητα τα ψάρια να περνούν χωρίς κίνδυνο μέσα από τον υδροστροβίλο, χρησιμοποιώντας είδη προστασίας όπως φυσικά προπετάσματα και ηλεκτρικά ή υπερήχων. Επιπλέον, για τα αποδημητικά ψάρια υπάρχει και η δυνατότητα στους νέους υδροηλεκτρικούς σταθμούς της εγκατάστασης ιχθυόσκαλας.

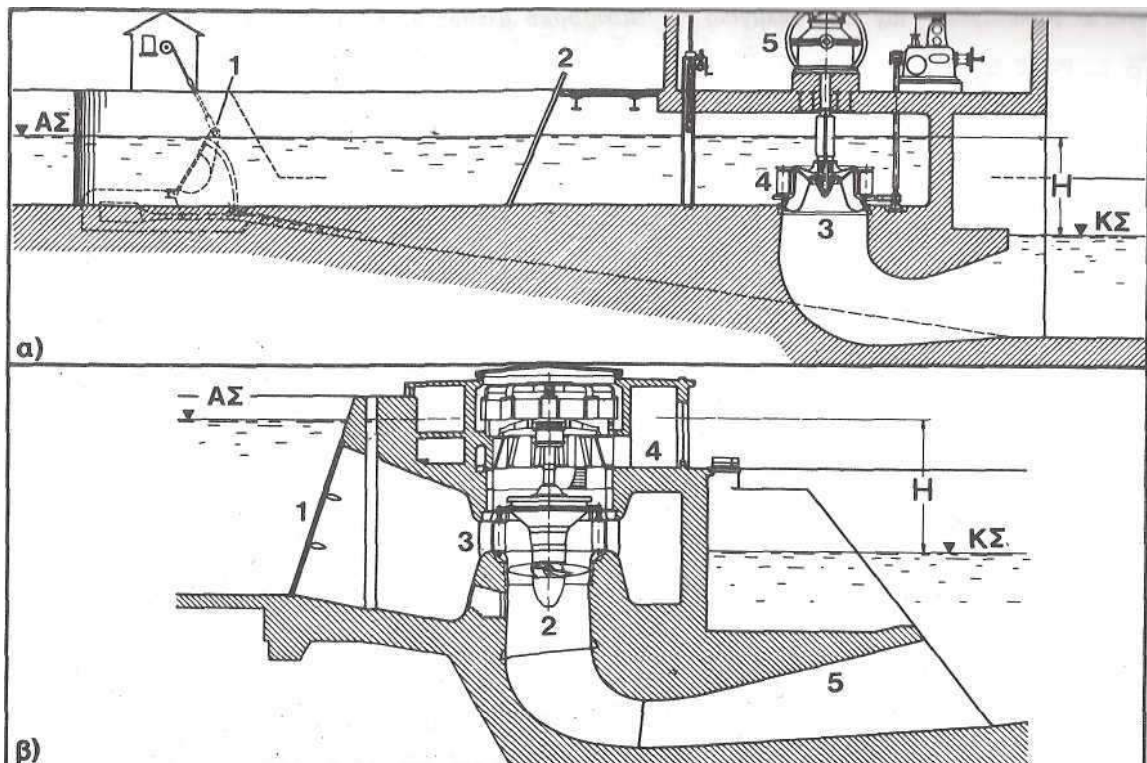
Ένα ακόμα ζήτημα είναι τα απορρίμματα που μαζεύονται στα ποτάμια, είτε φυσικά όπως κλαδιά, φύλλα, κορμοί δέντρων κ.τ.λ., είτε τεχνητά όπως πλαστικές σακούλες κ.τ.λ. Οι καινούριες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν σήτες, οι οποίες συλλέγουν όλα αυτά τα απορρίμματα από τα ποτάμια, και οι οποίες βοηθούν και στην προστασία των υδροστροβίλων αλλά και στον καθαρισμό των ποταμών.

Τέλος, υπάρχουν και άλλα ζητήματα που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής, όπως η έλλειψη της οξυγόνωσης του νερού, ο θόρυβος που προκαλείται από τον ηλεκτρικό εξοπλισμό, τα ηλεκτρικά καλώδια, την εμφάνιση της εγκατάστασης, καθώς και την διατάραξη ή αποσάθρωση της κοίτης του ποταμού αμέσως κατάντη των σωλήνων υδροληψίας του υδροστροβίλου.

3.4. Μέρη ενός υδροηλεκτρικού σταθμού

Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις διαχωρίζονται ανάλογα με το αν το νερό προέρχεται από την φυσική ροή του ποταμού (υδροηλεκτρικοί σταθμοί φυσικής ροής) ή αν το νερό προέρχεται από μια δεξαμενή (υδροηλεκτρικοί σταθμοί δεξαμενής). Οι υδροαντλητικοί σταθμοί είναι μια υποκατηγορία των υδροηλεκτρικών σταθμών δεξαμενής και χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης (νύχτα) , για να την δώσουν στο δίκτυο σε περιόδους αιχμής (μεσημέρι). Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας, απλή διαδικασία εκκίνησης, γρήγορη ρύθμιση της ισχύος και συμβάλουν στην προστασία του περιβάλλοντος , όμως το ποσό που δαπανάται για την κατασκευή τους είναι αρκετά μεγάλο.

Η αρχή λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του τρεχούμενου νερού σε μηχανική ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός υδροστρόβιλου, ο οποίος λειτουργεί ως μετατροπέας ενέργειας. Επιπρόσθετα, γίνεται χρήση ηλεκτρικής γεννήτριας, η οποία τοποθετείται στον ίδιο άξονα με τον υδροστρόβιλο, και μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Στο σχήμα που ακολουθεί παρατηρείται το σύστημα ενός υδροηλεκτρικού σταθμού, ο οποίος είναι τοποθετημένος σε ένα κανάλι παράλληλο σε ποτάμι και ενός υδροηλεκτρικού σταθμού φυσικής ροής σε ποτάμι αντίστοιχα.[3]



Σχήμα 107 α) ΥΗΣ σε κανάλι παράλληλο σε ποτάμι β) ΥΗΣ σε ποτάμι (ΥΗΣ φυσικής ροής) [3]

Στα ακόλουθα υποκεφάλαια θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των μερών, από τα οποία απαρτίζεται ένας υδροηλεκτρικός σταθμός.

3.4.1. Φράγματα και υδροφράκτες

Τα φράγματα είναι κατασκευές, οι οποίες χρησιμεύουν στην αύξηση του ύψους πτώσης του νερού σε ένα υδροηλεκτρικό σταθμό. Η εγκατάσταση φράγματος γίνεται κυρίως στους μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς με σκοπό την παραγωγή της απαιτούμενης ισχύος καθώς και την αποθήκευση του νερού για μελλοντική χρήση του σε περιόδους αιχμής. Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί συνήθως δεν περιλαμβάνουν υδροφράκτες λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής τους, όμως μπορούν να κατασκευαστούν φράγματα από σκυρόδεμα ή λιθοδομή με στέψη ενός μέτρου πάνω από την κοίτη του ποταμού για τη δημιουργία αρκετού βάθους στην είσοδο του καναλιού.[10]



Σχήμα 108 Υδατοφράκτης Ασπρόκρεμμου, Επαρχία Πάφου
Πηγή: <http://www.iandpcy.com/el/Asprokremmos-Dam-gr>

3.4.2. Στόμιο εισόδου

Το στόμιο εισόδου χρησιμοποιείται για να κατευθύνει το τρεχούμενο νερό στον αγωγό πτώσης ή στο κανάλι προσαγωγής. Το στόμιο εισόδου είναι ικανό να ελέγχει την αποδοτική ροή του νερού μέσα στο κανάλι καθώς είναι τοποθετημένο με ένα συγκεκριμένο προσανατολισμό ως προς το ρεύμα του ποταμού. Τοποθετώντας το στόμιο στο εσωτερικό της καμπύλης του αγωγού προστατεύεται το φράξιμο της εισόδου του καναλιού από ιζήματα που πιθανόν να μαζευτούν στην περιοχή. Ο πιο κατάλληλος προσανατολισμός της εισόδου του στομίου είναι η κεντρική γραμμή της να κείται παράλληλα ή έστω υπό μικρή γωνία κλίσης ως προς τον άξονα του υπερχειλιστή, ούτως ώστε να αποφεύγεται η συγκέντρωση ιζήματος και απορριμμάτων στην περιοχή.

Επιπρόσθετα, στην είσοδο του στομίου τοποθετούνται σχάρες για την αποφυγή της εισόδου απορριμμάτων στο κανάλι, γεγονός που θα έβαζε σε κίνδυνο τη σωστή λειτουργία του. Η σχάρα αυτή περιλαμβάνει πλαίσια, τα οποία είναι κατασκευασμένα από μια σειρά ισαπέχουσες παράλληλες μεταλλικές ράβδους, είτε από σκληρά πλαστικά. Τέλος, οι σχάρες μπορούν να τοποθετούνται στο πλαίσιο υποστήριξης με μπουλόνια από ανοξείδωτο χάλυβα, ή να ολισθαίνουν σε κάθετες ράγες ούτως ώστε να μπορούν να αφαιρεθούν στη συντήρηση ή στην επισκευή τους.[10]

3.4.3. Κανάλι

Όταν το τρεχούμενο νερό διέρχεται μέσα από το στόμιο εισόδου κατευθύνεται στον υδροστρόβιλο μέσω ενός καναλιού ή ενός σωλήνα κατάθλιψης. Στο κανάλι ενός υδροηλεκτρικού σταθμού, η παροχή είναι συνάρτηση της κατατομής της εγκάρσιας διατομής του, της τραχύτητας και της κλίσης του. Η διατομή των καναλιών ενός υδροηλεκτρικού σταθμού έχει τυποποιημένο σχήμα και η τραχύτητα της επιφάνειας των δομικών υλικών είναι γνωστή.

Μέσα στο κανάλι του υδροηλεκτρικού σταθμού η ταχύτητα κίνησης του τρεχούμενου νερού πρέπει να είναι ελεγχόμενη με κάποια όρια ελάχιστων τιμών για την αποφυγή καθίζησης ιζημάτων και την αποτροπή ανάπτυξης υδρόβιων φυτών, και κάποια όρια μέγιστων τιμών για την αποφυγή της διάβρωσης.

Στην περίπτωση την οποία παρουσιάζουν εμπόδια κατά μήκος του καναλιού πρέπει να δημιουργηθούν για την αποφυγή τους τεχνητά κανάλια είτε υποστηριζόμενα σε στύλους από υλικά όπως χάλυβα και σκυρόδεμα είτε με το σχηματισμό γεφύρωσης. Επιπρόσθετα, για την αποφυγή των εμποδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεστραμμένα σιφώνια, τα οποία αποτελούνται από μια διάταξη εισόδου και μια διάταξη εξόδου, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με ένα σωλήνα καμπυλωτής μορφής.

Τέλος, στο τελείωμα του καναλιού και πριν τον αγωγό πτώσης που ακολουθεί υπάρχει μια περιοχή, η οποία ονομάζεται περιοχή υδροληψίας. Η περιοχή αυτή χρησιμεύει στην αποταμίευση του πρόσθετου νερού, το οποίο χρειάζεται για την εκκίνηση του υδροστρόβιλου. Η περιοχή υδροληψίας πρέπει να αποτελείται από έναν υπερχειλιστή, μια σχάρα για τη συλλογή των απορριμμάτων, έναν εξαεριστήρα καθώς και ένα στόμιο αποστράγγισης. [10]

3.4.4. Αγωγοί πτώσης

Από την περιοχή της υδροληψίας στο τέλος του καναλιού, το νερό μεταφέρεται στον υδροστρόβιλο μέσω του αγωγού πτώσης. Η εγκατάσταση του αγωγού αυτού μπορεί να γίνει είτε υπόγεια είτε πάνω από τη γη, ανάλογα με το υλικό του αγωγού, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, και τη φύση του εδάφους καθώς και τις συνθήκες του περιβάλλοντος γενικά. Οι αγωγοί πτώσης πρέπει να μονώνονται και να καλύπτονται με τα κατάλληλα υλικά για την αποφυγή φθορών και διάβρωσης του αγωγού.

Στην περίπτωση που ο υδροστρόβιλος δεν βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία, υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις στη θερμοκρασία στο εσωτερικό του αγωγού, οι οποίες προκαλούν συστολές ή διαστολές στον αγωγό. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να εγκαθίστανται κατάλληλες διατάξεις στον αγωγό όπως αρμοί διαστολής ή σχεδιάζοντας τον αγωγό έτσι ώστε να έχει ελεύθερα κινούμενες καμπύλες.

Για την κατασκευή των αγωγών πτώσης χρησιμοποιείται μια πληθώρα υλικών όπως χάλυβας και πλαστικό. Ο χάλυβας χρησιμοποιείται συνήθως όταν υπάρχουν μεγάλες διαμέτροι και μεγάλα ύψη πτώσης λόγω της αντοχής του. Στα μεσαία και στα μικρά ύψη πιο κατάλληλο υλικό είναι το πλαστικό λόγω του εύκολου χειρισμού τους, της μη ανάγκης αντιδιαβρωτικής προστασίας, της χαμηλής τιμής του και της ελαφριάς κατασκευής του.

Ένας αγωγός πτώσης χαρακτηρίζεται από το υλικό που αποτελείται, το οποίο επιλέγεται ανάλογα με τις συνθήκες του εδάφους, το βάρος, το κατά πόσο προσιτό είναι, το σύστημα των αρμών καθώς και το κόστος κατασκευής του. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από τη διάμετρό του, η οποία επιλέγεται με στόχο τη μείωση των τριβών μέσα στον αγωγό πτώσης και τέλος, από το πάχος του τοιχώματος. Το πάχος του τοιχώματος διαλέγεται με βάση την αντοχή του στη μέγιστη υδραυλική πίεση και της μεταβατικής πίεσης κυματισμού που παρουσιάζεται κατά την απότομη μείωση ή αύξηση της παροχής του νερού. [10]

3.4.5. Υδροστρόβιλοι

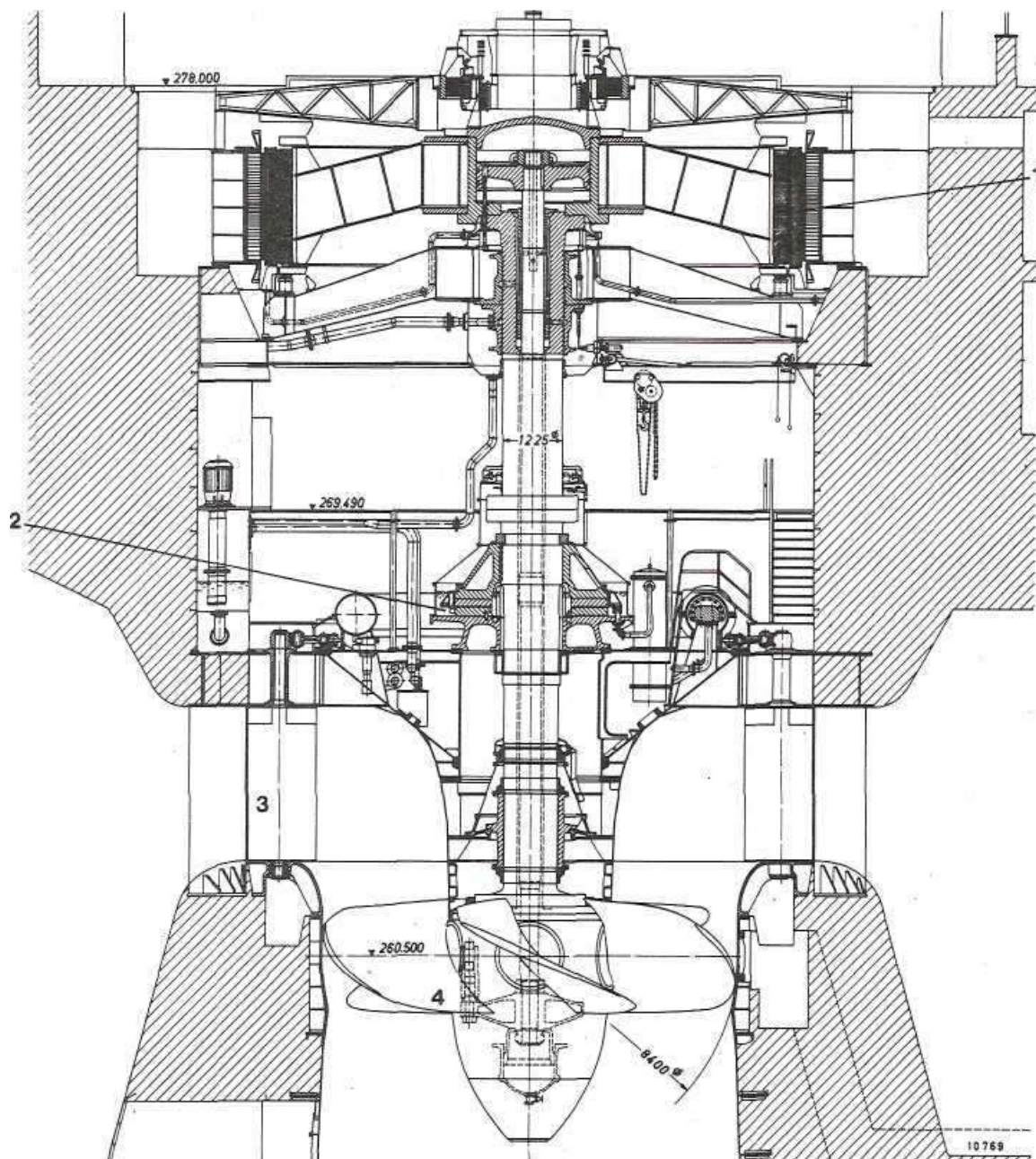
Ο αγωγός πτώσης που περιγράψαμε παραπάνω οδηγεί το τρεχούμενο νερό στον υδροστρόβιλο, ο οποίος είναι μια περιστρεφόμενη μηχανή, η οποία μετατρέπει τη δυναμική ενέργεια του νερού σε κινητική ενέργεια. Οι υδροστρόβιλοι χωρίζονται σε δύο ειδών κατηγορίες: στους υδροστρόβιλους ώσης και στους υδροστρόβιλους αντίδρασης.

Οι υδροστρόβιλοι ώσης κάνουν μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού σε κινητική, μέσω ενός ακροφυσίου από το οποίο προσπίπτει το νερό στους κάδους ή τα πτερύγια του δρομέα. Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης λειτουργούν κυρίως με την χρησιμοποίηση της ταχύτητας και της πίεσης του νερού για την ανάπτυξη μηχανικής ισχύος. Ο δρομέας του υδροστρόβιλου αντίδρασης γεμίζει εξ ολοκλήρου με νερό και η ταχύτητα όπως και η πίεση παρουσιάζουν μείωση από την είσοδο προς την έξοδο. Τα είδη των υδροστρόβιλων που υφίσταται αυτή τη στιγμή στην αγορά περιγράφονται στη συνέχεια.

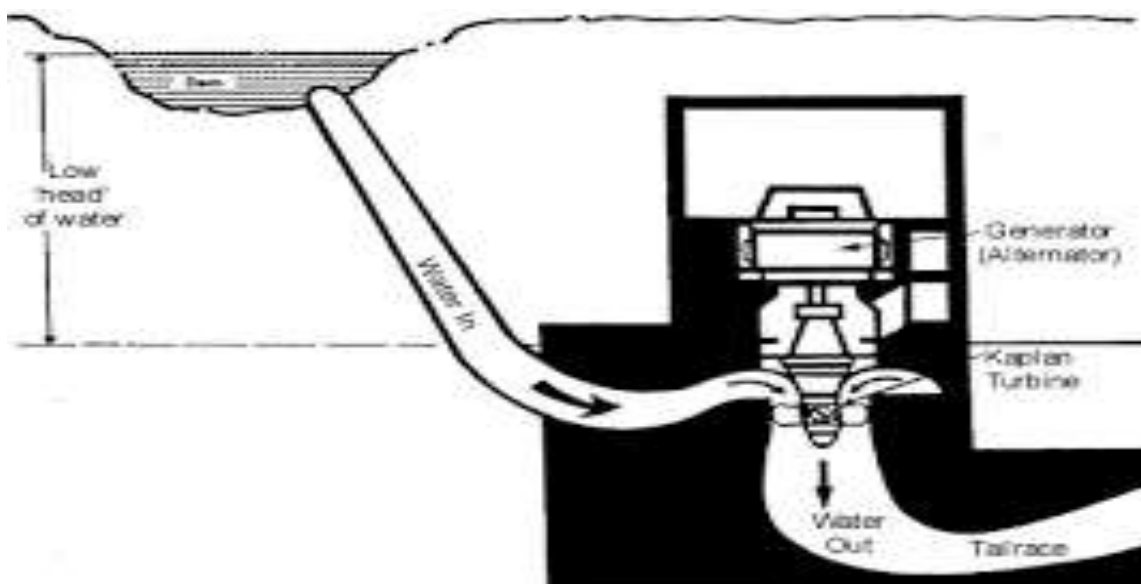
3.4.5.1. Υδροστρόβιλοι Kaplan και έλικας

Οι υδροστρόβιλοι τύπου Kaplan είναι υδροστρόβιλοι αξονικής ροής αντίδρασης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για μικρά ύψη πτώσης (<16m). Οι υδροστρόβιλοι τύπου Kaplan διαθέτουν πτερύγια δρομέα, τα οποία ρυθμίζονται καθώς και ρυθμιζόμενα ή μη οδηγά πτερύγια. Εάν σε έναν υδροστρόβιλο τύπου Kaplan ρυθμίζονται και τα δύο πτερύγια ο υδροστρόβιλος ονομάζεται διπλής ρύθμισης, ενώ στην περίπτωση που τα οδηγά πτερύγια είναι σταθερά τότε ο υδροστρόβιλος ονομάζεται απλής ρύθμισης.

Οι υδροστρόβιλοι τύπου Kaplan διαθέτουν σπειροειδές περίβλημα καθώς η ροή του νερού εισέρχεται ακτινικά προς το εσωτερικό του και ακολουθεί μια στροφή σε ορθή γωνία προτού μπει στο εσωτερικό του δρομέα με αξονική κατεύθυνση. Οι υδροστρόβιλοι τύπου έλικας αποτελούνται είτε από κινητά είτε από σταθερά οδηγά πτερύγια. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται η τουρμπίνα και η κατασκευαστική δομή του υδροστρόβιλου Kaplan.[3]

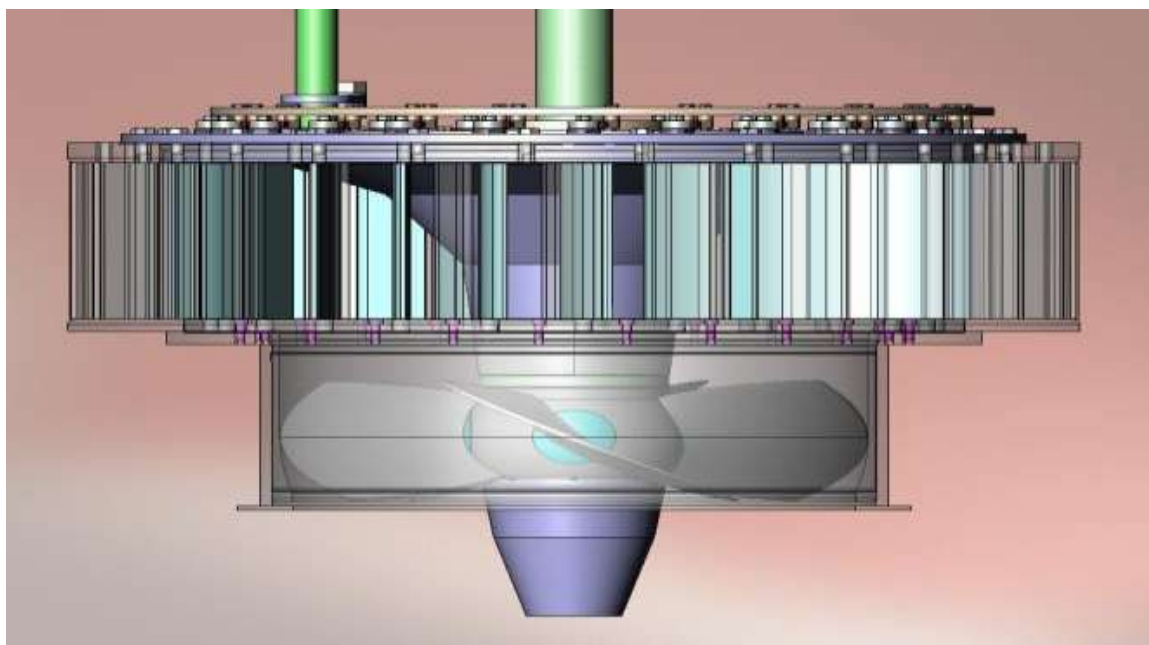


Σχήμα 109 Εγκατάσταση υδροστροβίλου Kaplan [3]



Σχήμα 110 Υδροστρόβιλος τύπου Kaplan

Πηγή: <http://www.see.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/hydro/large.html>

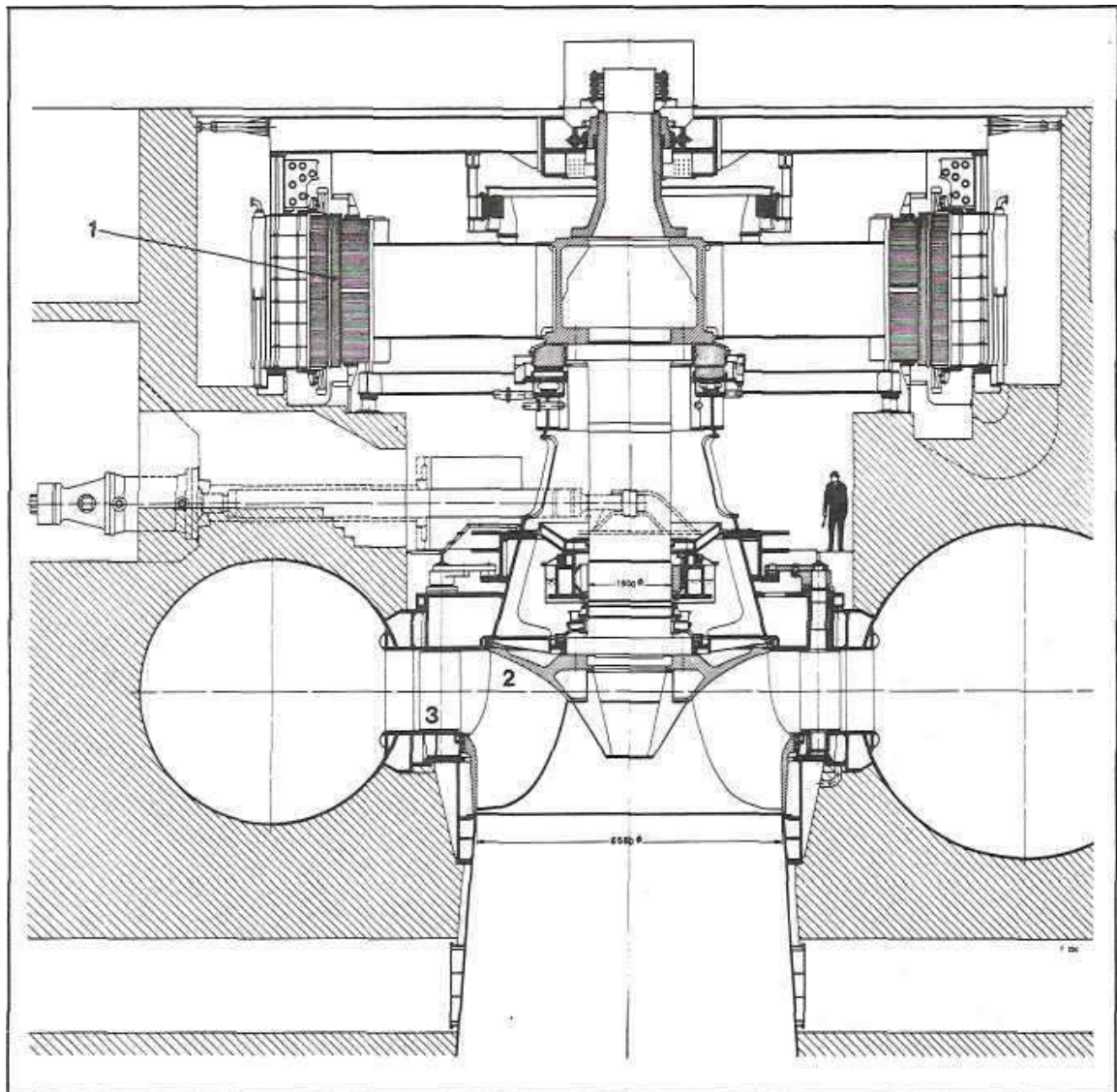


Σχήμα 111 Τουρμπίνη Kaplan

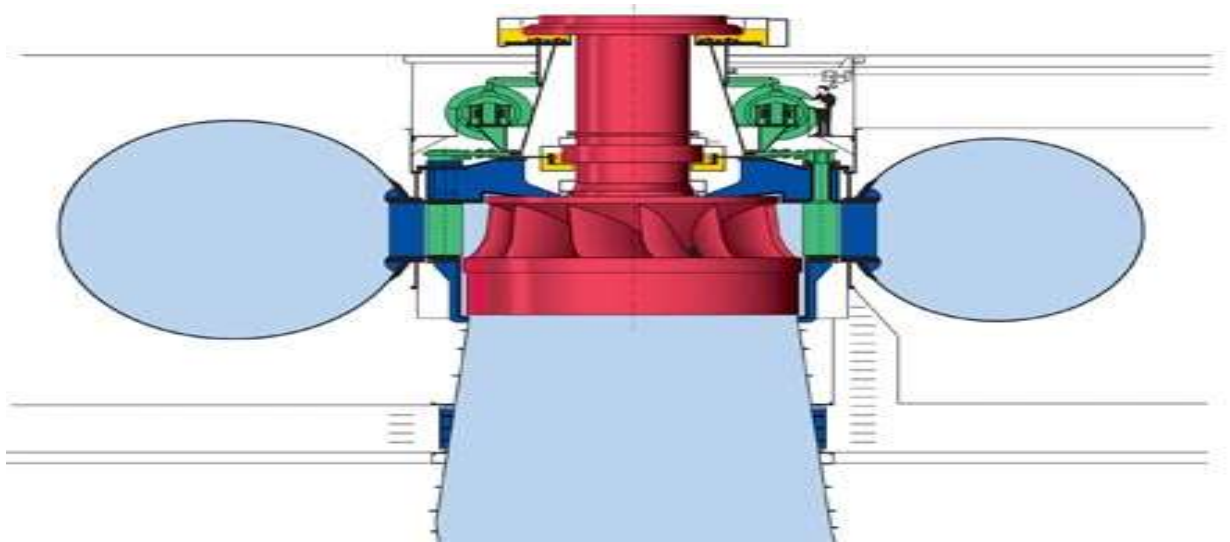
Πηγή: <http://www.orengine.com/en/orengine-international-hydro-turbines-kaplan.php>

3.4.5.2. Υδροστροβίλοι Francis

Οι υδροστροβίλοι τύπου Francis είναι επίσης υδροστροβίλοι αντίδρασης με ακτινική ροή, σταθερά πτερύγια δρομέα και ρυθμιζόμενα οδηγά πτερύγια. Οι υδροστροβίλοι τύπου Francis χρησιμοποιούνται για μεσαία ύψη πτώσης του νερού και περιλαμβάνουν συνήθως πλήθος σειρών πτερυγίων, τα οποία καθοδηγούν και ρυθμίζουν τη ροή του νερού προς το δρομέα, ενώ περικλείονται από ένα χυτοσιδηρό, ή χαλύβδινο σπειροειδές περίβλημα ούτως ώστε το νερό να μπορεί να διανέμεται γύρω από ολόκληρη της περίμετρο του δρομέα. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η κατασκευαστική δομή του υδροστροβίλου τύπου Francis.[3]



Σχήμα 112 Εγκατάσταση στροβίλου Francis [3]



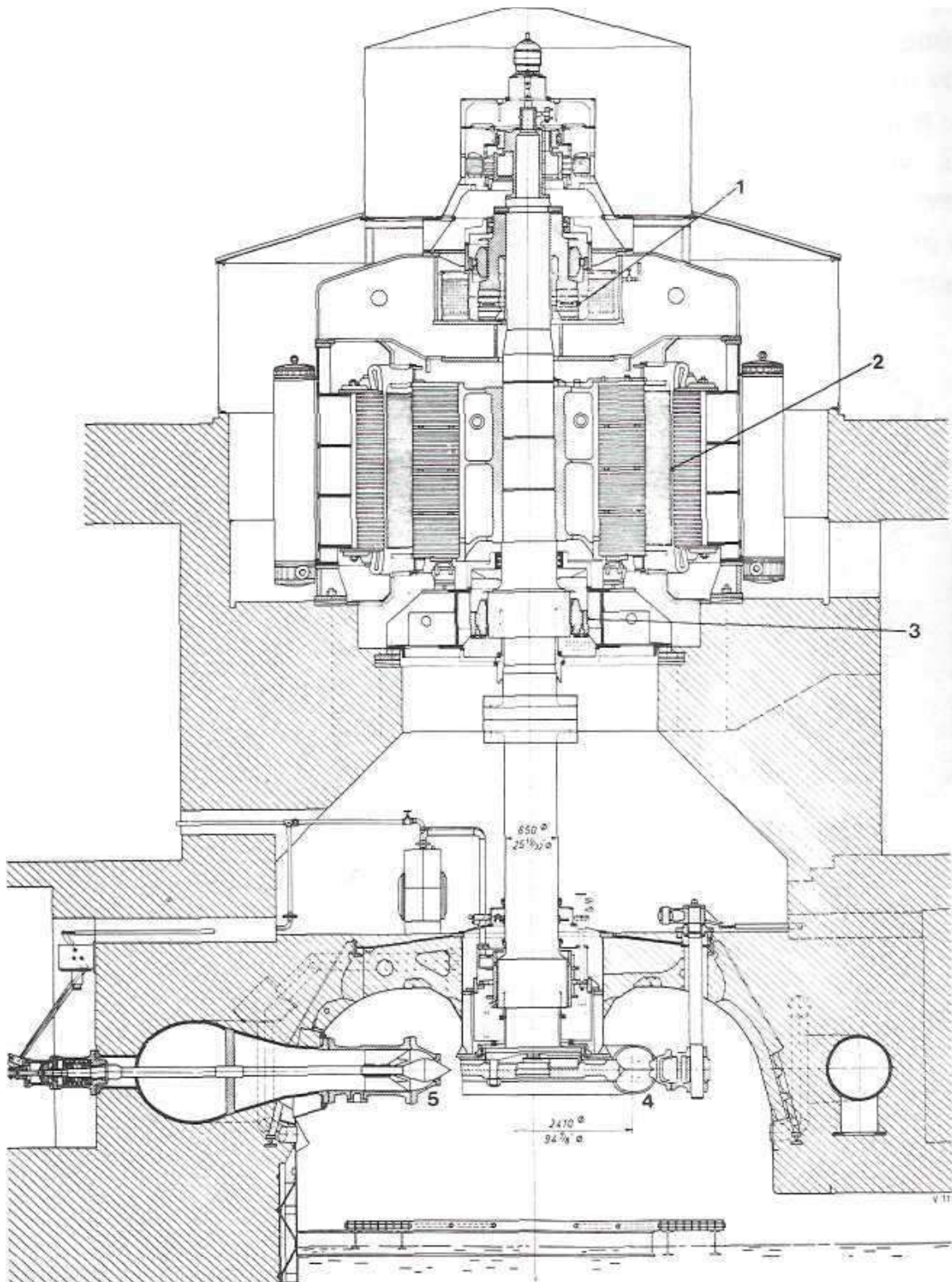
Σχήμα 113 Υδροτουρμπίνα τύπου Francis
Πηγή: http://en.wikipedia.org/wiki/Francis_turbine

3.4.5.3. Υδροστρόβιλοι Pelton

Οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton είναι υδροστρόβιλοι ώσης, οι οποίοι αποτελούνται από μία ή περισσότερες δέσμες, οι οποίες εκρέουν μέσα από ένα ακροφύσιο με μια βελονοβαλβίδα για τον έλεγχο της ροής. Οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton χρησιμοποιούνται σε μεγάλα και μεσαία ύψη πτώσης του νερού. Η ρύθμιση της ισχύος στον στρόβιλο επιτυγχάνεται μέσω βελονοειδών βαλβίδων, ενώ η υδροστατική πίεση στα πτερύγια είναι παντού η ίδια. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατασκευαστική δομή ενός υδροστρόβιλου τύπου Pelton.[3]



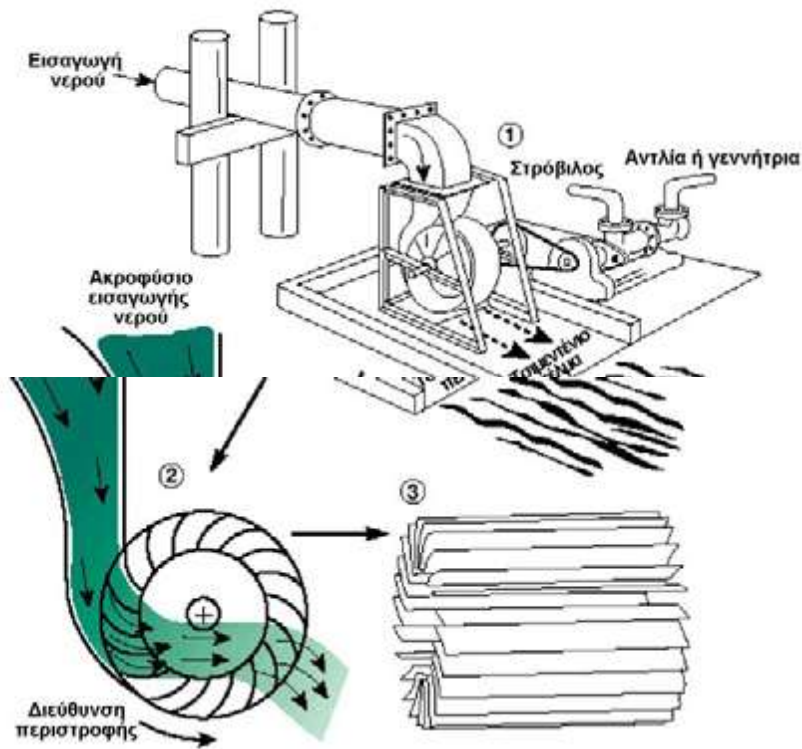
Σχήμα 114 Τροχός τύπου Pelton [3]



Σχήμα 115 Εγκατάσταση υδροστροβίλου τύπου Pelton [3]

3.4.5.4. Υδροστρόβιλοι εγκάρσιας ροής

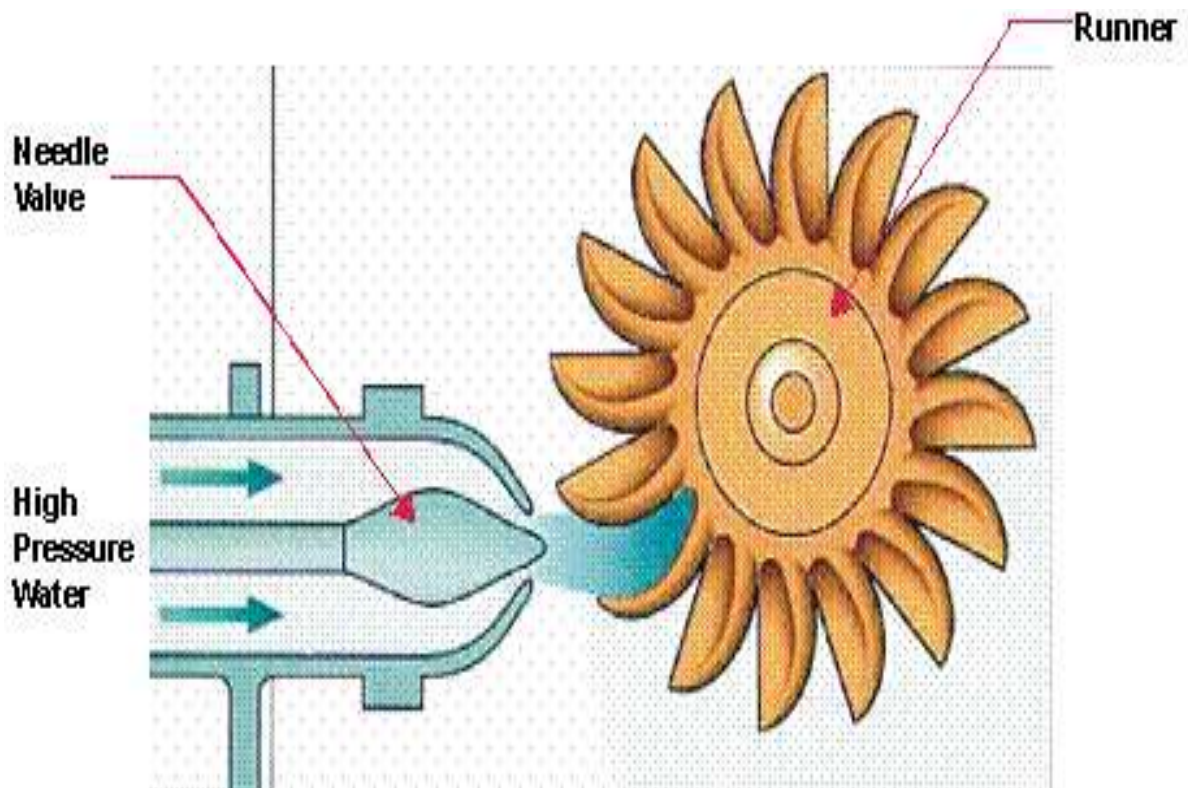
Οι υδροστρόβιλοι εγκάρσιας ροής ή υδροστρόβιλοι Michell είναι κατάλληλοι για ένα ρεύμα με μεγάλη παροχή και μικρό ύψος πτώσης του νερού. Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται ένας υδροστρόβιλος εγκάρσιας ροής (Michell). [4]



Σχήμα 116 1) Ο υδροστρόβιλος εγκάρσιας ροής (Michell) 2) Η εγκάρσια τομή του στροβίλου 3) Διάταξη των πτερυγίων του στροβίλου εγκάρσιας ροής [10]

3.4.5.5. Υδροστρόβιλοι Turgo

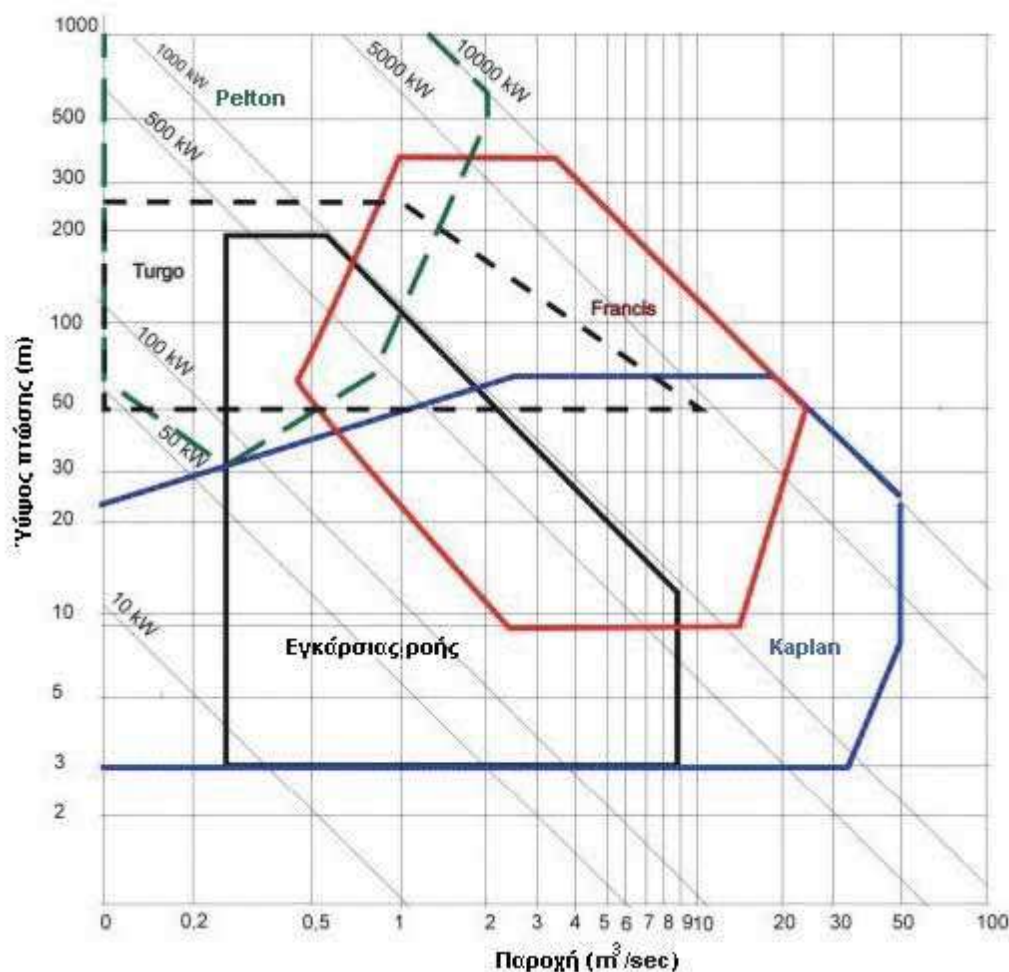
Οι υδροστρόβιλοι τύπου Turgo μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ύψη πτώσης του νερού από 30 έως 300m και είναι υδροστρόβιλοι τύπου ώσης, με τη διαφορά από τον Pelton στον κάδο του και στη δέσμη του νερού, η οποία προσπίπτει στο επίπεδο του δρομέα με γωνία κλίσης 20° . Όπως παρατηρείται και στο ακόλουθο σχήμα, η δέσμη του νερού εισέρχεται από τη μια πλευρά του δίσκου και εξέρχεται από την άλλη. Οι υδροστρόβιλοι τύπου Turgo διακρίνονται από μεγάλη ταχύτητα σύζευξης ενώ το τρεχούμενο νερό στο δρομέα παράγει μια αξονική δύναμη, η οποία απαιτεί την προσθήκη ενός ωστικού εδράνου στον άξονα του δρομέα.[4]



Σχήμα 117 Τα πτερύγια του δρομέα και η δέσμη του νερού σε ένα υδροστρόβιλο Turgo

Πηγή: <http://www.powerfromthelandscape.co.uk/how-to-develop-a-micro-hydro-scheme/equipment-and-installers>

Η επιλογή του κατάλληλου υδροστρόβιλου σε κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το ύψος πτώσης του νερού καθώς και η παροχή και η ταχύτητα του ρομέα. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα εύρη λειτουργίας των διαφόρων τύπων στροβίλων σε σχέση με το ύψος πτώσης και της παροχής.[10]



Σχήμα 118 Εύρος λειτουργίας των διαφόρων τύπων στροβίλων [10]

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

Πίνακας 5 Εύρος υψών πτώσης [10]

3.4.6. Αυλάκια απαγωγής

Μετά την είσοδο του νερού στον υδροστροβίλο, στη συνέχεια επιστρέφει στο ποτάμι μέσω μιας διόδου, η οποία ονομάζεται αυλάκι απαγωγής. Τα αυλάκια απαγωγής πρέπει να είναι κατάλληλα κατασκευασμένα, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η αντοχή στις υψηλές ταχύτητες εξόδου του υδροστροβίλου καθώς και να αποτρέπεται κατά τη διάρκεια υψηλών παροχών, η άνοδος του νερού στο αυλάκι.

Η στάθμη του νερού μέσα σε ένα αυλάκι απαγωγής καθορίζει τη λειτουργία του δρομέα του υδροστροβίλου και το διαθέσιμο καθαρό ύψος της πτώσης του νερού, επηρεάζοντας έτσι τα οικονομικά αποτελέσματα των συστημάτων μικρού ύψους πτώσης.[10]

3.4.7. Σύστημα μετάδοσης της κίνησης

Σε ένα υδροηλεκτρικό σύστημα στην περίπτωση που η ταχύτητα του υδροστροβίλου συμπίπτει με αυτή της γεννήτριας, οι άξονες των δύο αυτών εξαρτημάτων μπορούν να τοποθετηθούν στην ίδια ευθεία με άμεση σύνδεση. Έτσι αποφεύγονται οι απώλειες ισχύος και η συντήρησή τους είναι περιορισμένη.

Σε κάποιους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, συγκεκριμένα στους μικρούς, οι υδροστροβίλοι έχουν ταχύτητα περιστροφής λιγότερη από 400rpm, οπότε επιβάλλεται η χρήση ενός πολλαπλασιαστή ταχύτητας για την κάλυψη των 1000-1500rpm των τυποποιημένων γεννητριών. Η λύση αυτή είναι αποτελεσματική και οικονομική. Τα κιβώτια ταχυτήτων που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό χωρίζονται σε παράλληλου άξονα, επικυκλικό, ορθής γωνίας με κωνικά γρανάζια και μετάδοση κίνησης με ιμάντα. Η χρήση των κιβωτίων ταχυτήτων σε ένα υδροηλεκτρικό σταθμό αυξάνουν τα επίπεδα θορύβου, το κόστος καθώς και την απαιτούμενη συντήρηση. Τέλος, οι απώλειες τριβής μπορεί να αυξηθούν στο 2% της παραγόμενης ισχύος.[10]

3.4.8. Γεννήτρια

Η χρήση μιας γεννήτριας σε ένα υδροηλεκτρικό σταθμό είναι απαραίτητη για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας που εξάγει ο υδροστρόβιλος σε ηλεκτρική, ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί από το δίκτυο. Οι γεννήτριες που υπάρχουν αυτή τη στιγμή στην αγορά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες[10]:

- Σύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες αποτελούνται από ένα σύστημα διέγερσης DC, το οποίο συνδέεται με ένα ρυθμιστή τάσης με στόχο τον έλεγχο της τάσης πριν τη σύνδεση της με το δίκτυο καθώς και για την παροχή άεργου ισχύος που χρησιμοποιείται από τη γεννήτρια για τη σύνδεσή της με το δίκτυο. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι δυνατόν να λειτουργούν σε αυτονομία από το δίκτυο και να παράγουν ισχύ. Οι σύγχρονες γεννήτριες DC είναι πιο ακριβές από τις ασύγχρονες γεννήτριες AC και χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα στα οποία η παραγωγή της γεννήτριας αποτελεί ένα σημαντικό ποσό από το φορτίο του συστήματος ισχύος. Τέλος, οι σύγχρονες γεννήτριες χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: στις σύγχρονες γεννήτριες με τύλιγμα διέγερσης και στις σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών.

- Ασύγχρονες γεννήτριες

Οι ασύγχρονες γεννήτριες είναι επαγωγικοί κινητήρες κλωβού, οι οποίοι δεν έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης και αντλούν το ρεύμα διέγερσής τους από το δίκτυο απορροφώντας άεργο ισχύ. Σε σύγκριση με τις σύγχρονες γεννήτριες, οι ασύγχρονες δεν έχουν τη δυνατότητα να παράγουν όταν δεν είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο. Η αποδοτικότητά τους είναι μικρότερη από αυτή των σύγχρονων γεννητριών έως και 4%.

3.4.9. Εξοπλισμός ελέγχου και προστασίας

Για τη βέλτιστη αποδοτικότητα ενός υδροηλεκτρικού σταθμού χρησιμοποιούνται κάποιες διατάξεις ελέγχου στα όργανα του συστήματος, για την προστασία τους από τυχόν επιπλοκές. Στον υδροστρόβιλο του συστήματος τοποθετείται ένας ρυθμιστής στροφών, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της απόκλισης της ταχύτητας και την μετατροπή της σε μια μεταβολή της θέσης του σερβοκινητήρα. Οι ρυθμιστές στροφών μπορεί να είναι είτε μηχανικοί είτε ηλεκτρονικοί και παρέχουν αξιοπιστία, ακρίβεια ελέγχου και πολυχρηστικότητα στο σύστημα. Στην περίπτωση των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών που αποτελούνται από μικρούς υδροστρόβιλους η πιο οικονομική και αποτελεσματική λύση είναι η ρύθμιση των στροφών μέσω του φορτίου.

Επιπλέον, στη γεννήτρια για την ασφάλεια και την προστασία του δικτύου χρησιμοποιείται ένας εξοπλισμός για τον έλεγχο της γεννήτριας και για τη σύνδεσή της με το δίκτυο ή το απομονωμένο φορτίο. Ο εξοπλισμός αυτός συνήθως αποτελείται από ένα διακόπτη για τη γεννήτρια, μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης, έναν αποζεύκτη τήξης, διατάξεις ελέγχου της γεννήτριας καθώς και χάλκινους διακόπτες κατανομής κυκλώματος.

Τέλος, σε ένα μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό χρησιμοποιούνται κάποια συστήματα αυτόματου ελέγχου για τον έλεγχο δυσλειτουργιών σε όλα τα συστήματα της εγκατάστασης με προγραμματιζόμενους ελεγκτές και ευφυή συστήματα ελέγχου. Τα συστήματα αυτόματου ελέγχου μειώνουν κατά πολύ το κόστος της παραγωγής ενέργειας, ελαχιστοποιώντας τη συντήρηση και αυξάνοντας την αξιοπιστία του συστήματος.[10]

3.5. Ισχύς υδροηλεκτρικού σταθμού

Κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός υδροηλεκτρικού σταθμού είναι απαραίτητη η τεχνοοικονομική μελέτη σχεδιασμού καθώς και η εύρεση της κατάλληλης θέσης για την κατασκευή του. Η ισχύς που παράγει ένας υδροηλεκτρικός σταθμός είναι άμεσα εξαρτώμενη της παροχής και του ύψους πτώσης του νερού και το ποσό της παραγόμενης ενέργειας είναι άμεσα εξαρτώμενο από την ποσότητα του τρεχούμενου νερού καθώς και τη μεταβλητότητα της ροής του νερού κατά τη διάρκεια του χρόνου. Η ισχύς σε ένα υδροηλεκτρικό σταθμό υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο[2]:

$$P = n_t p Q g H \quad [3.1]$$

Όπου

n_t : η συνολική απόδοση του υδροηλεκτρικού σταθμού (ισούται με το γινόμενο των βαθμών απόδοσης των επιμέρους τμημάτων του υδροηλεκτρικού σταθμού)

ρ : 1000kg/m^3 : η πυκνότητα του νερού

$Q[\text{m}^3/\text{sec}]$: η παροχή νερού στον υδροστρόβιλο

$G=9.8\text{m/sec}^2$: η επιτάχυνση της βαρύτητας

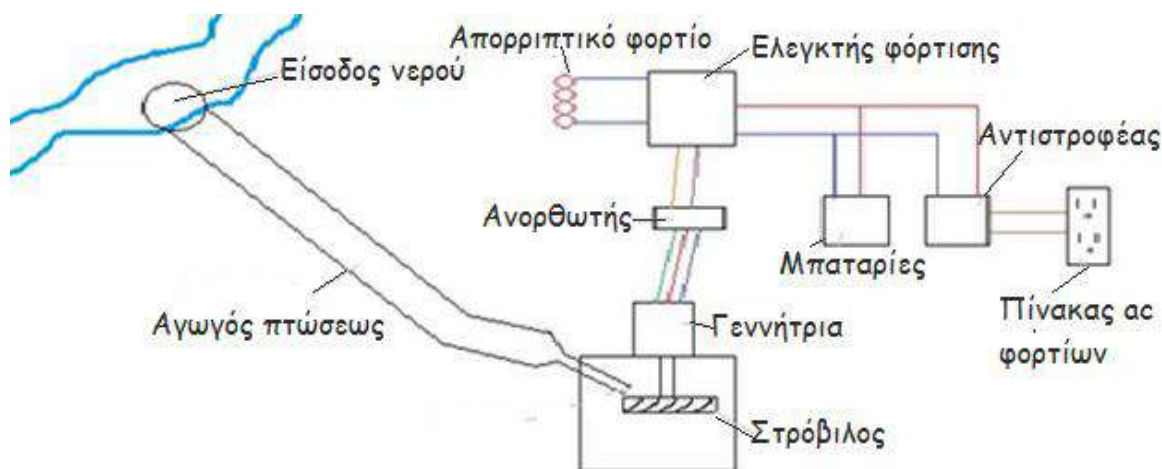
$H[\text{m}]$: το ύψος υδατόπτωσης ή υδραυλικό ύψος, που είναι ίσο με την κάθετη υψομετρική διαφορά της δεξαμενής φόρτισης με τον υδροστρόβιλο

3.6. Τρόποι σύνδεσης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού στο δίκτυο

Ένας υδροηλεκτρικός σταθμός ανάλογα με τις ανάγκες μπορεί να συνδεθεί και να τροφοδοτήσει ένα σύστημα DC είτε ένα σύστημα AC. Το DC σύστημα συνδέεται σε ένα αυτόνομο σύστημα, ενώ στο AC η γεννήτρια δύναται είτε να συνδεθεί στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο είτε να τροφοδοτήσει εξ ολοκλήρου ή με άλλες πηγές ένα αυτόνομο δίκτυο. Η επιλογή του είδους της γεννήτριας που χρησιμοποιείται σε κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό γίνεται με βάση τον τρόπο σύνδεσής της αλλά και με βάση το είδος και το μέγεθος των φορτίων.

3.6.1. DC σύνδεση

Στην περίπτωση που είναι απαραίτητη η σύνδεση και η τροφοδοσία μιας απομονωμένης εγκατάστασης π.χ. ένα σπίτι, τότε επιλέγεται η σύνδεση μέσω αυτόνομου DC συστήματος με μπαταρίες για την αποθήκευση της ενέργειας. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη ενός αυτόνομου DC συστήματος.

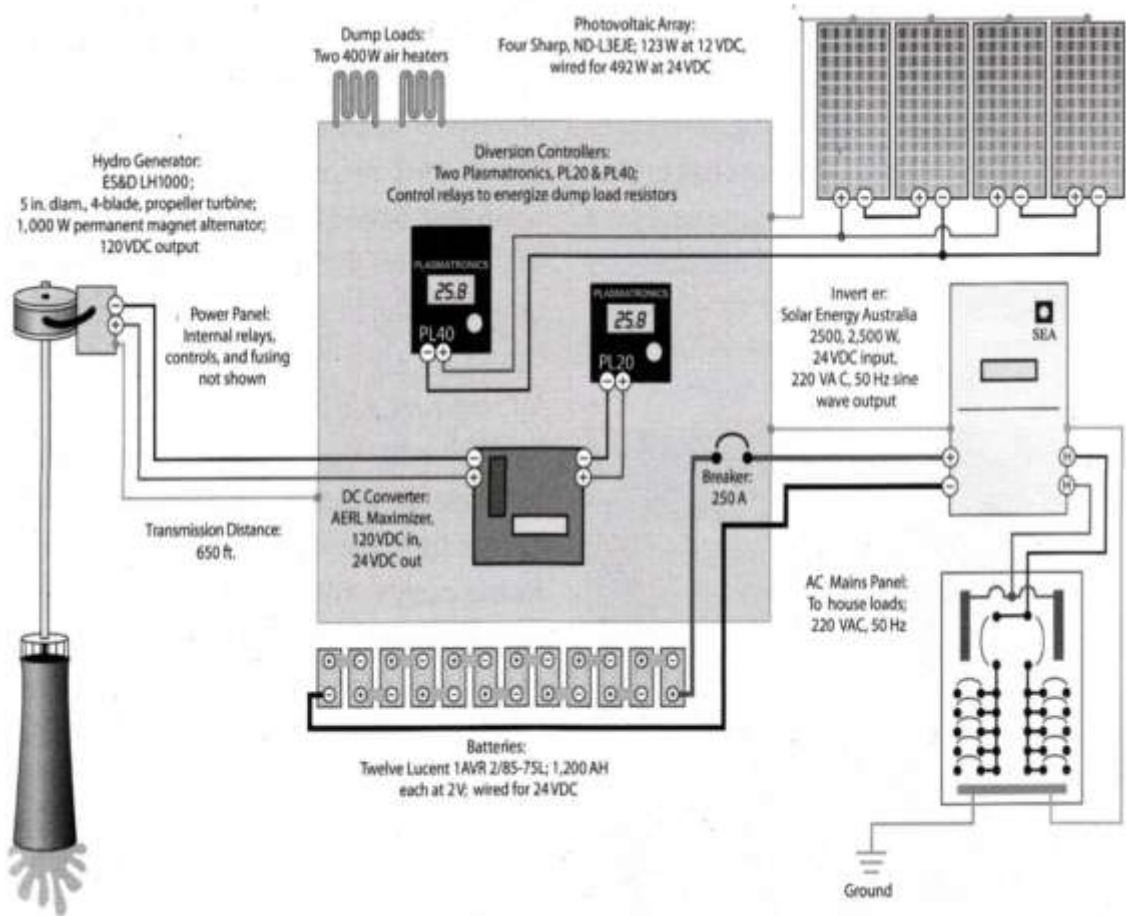


Σχήμα 119 Αυτόνομο σύστημα DC που τροφοδοτείται από ένα μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό [4]

Στο σύστημα αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα είδη γεννητριών (σύγχρονη με τύλιγμα διέγερσης ή μονίμων μαγνητών, γεννήτρια επαγωγής, γεννήτρια συνεχούς ρεύματος). Στην έξοδο της γεννήτριας τοποθετείται ένας τριφασικός ανορθωτής γέφυρας, ο οποίος μετατρέπει την τάση στην έξοδο της γεννήτριας ώστε να εξισωθεί με αυτή της συστοιχίας των μπαταριών. Επιπλέον, ανάμεσα στον ανορθωτή γέφυρας και στους συσσωρευτές τοποθετείται ένας ελεγκτής φόρτισης, ο οποίος εκτελεί τον έλεγχο της φόρτισης και της εκφόρτισης των μπαταριών.

Επιπρόσθετα, ένα άλλο σύστημα, το οποίο τοποθετείται με σκοπό την ασφαλή αποσύνδεση του αντιστροφέα από τις μπαταρίες για ενδεχόμενη συντήρηση είναι ο διακόπτης DC με ασφάλεια. Ο διακόπτης αυτός τοποθετείται μεταξύ του αντιστροφέα και των συσσωρευτών. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται ένα υβριδικό DC αυτόνομο σύστημα, το οποίο τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από ένα υδροηλεκτρικό σύστημα με υδροστρόβιλο τύπου προπέλας άμεσα συνδεδεμένο με μια σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών και από μία συστοιχία φωτοβολταϊκών.

Το σύστημα τροφοδοτεί μια κατοικία στην Αυστραλία, η οποία βρίσκεται 9,3 μίλια μακριά από το πιο κοντινότερο σημείο σύνδεσης στο κεντρικό δίκτυο. Ο πίνακας ισχύος του συστήματος αποτελείται από διακόπτες και ασφάλειες, από ένα DC/DC μετατροπέα και δύο ελεγκτές φόρτισης.[4]



Σχήμα 120 DC υβριδικό αυτόνομο σύστημα με υδροηλεκτρικό σταθμό και φωτοβολταϊκό [4]

3.6.2. AC σύνδεση

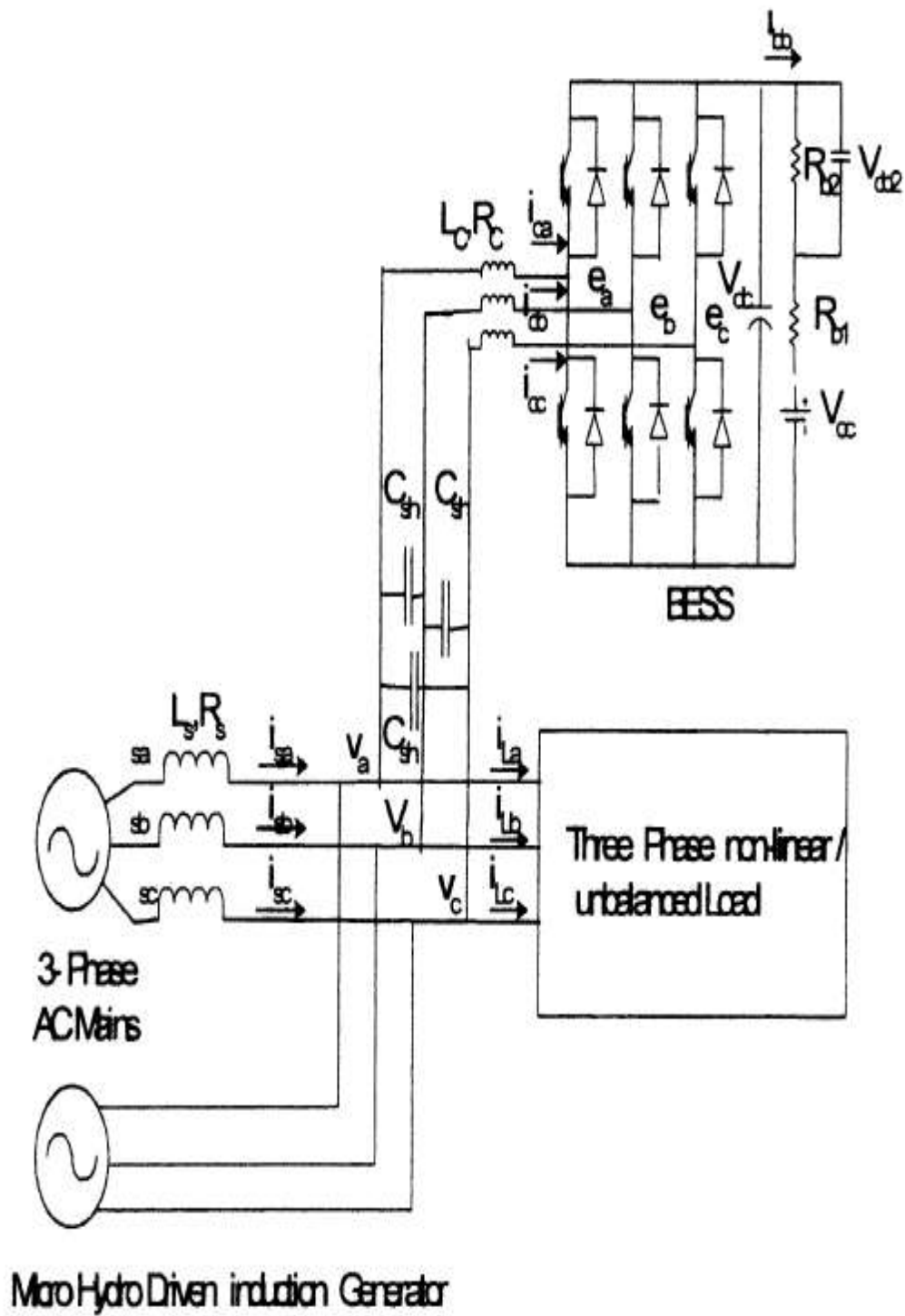
Η AC σύνδεση χρησιμοποιείται κυρίως για τη σύνδεση συστημάτων στο μέγεθος ενός οικισμού είτε τροφοδοτώντας το κύριο δίκτυο (διασυνδεδεμένο) είτε τροφοδοτώντας ένα αυτόνομο δίκτυο ως κύρια και μοναδική πηγή είτε στα πλαίσια ενός μικροδικτύου. Το κύριο όφελος μιας AC σύνδεσης είναι η δυνατότητα της σύνδεσης στον ίδιο ζυγό πολλών διαφορετικών πηγών, οι οποίες βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές.

Οι γεννήτριες, οι οποίες είναι κατάλληλες για μια AC σύνδεση είναι οι σύγχρονες γεννήτριες με τύλιγμα διέγερσης, οι σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών, οι γεννήτριες επαγωγής και οι γεννήτριες επαγωγής με διπλή τροφοδότηση.[4]

3.6.2.1. AC διασυνδεδεμένο σύστημα

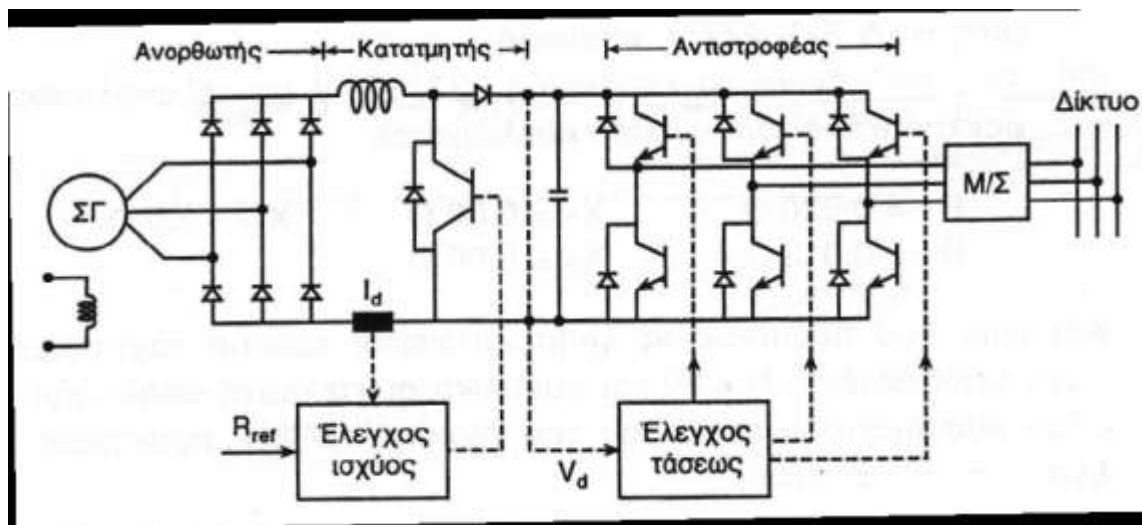
Ένας υδροηλεκτρικός σταθμός μικρής κλίμακας με ονομαστική ισχύ μικρότερη ή ίση των 100KW συνδέεται στο κύριο δίκτυο χαμηλής τάσης. Ο υδροηλεκτρικός σταθμός μπορεί είτε να συνδεθεί μόνος του στο δίκτυο είτε να προσαρτηθεί στα πλαίσια ενός διασυνδεδεμένου συστήματος. Το κεντρικό δίκτυο είναι αρμόδιο να ρυθμίζει την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τον υδροηλεκτρικό σταθμό με στόχο την εξασφάλιση της συγχρονισμένης λειτουργίας του. Επιπλέον, το κεντρικό δίκτυο θέτει κάποια όρια όπως η απαίτηση για αποσύνδεση του υδροηλεκτρικού σταθμού σε περίπτωση σφάλματος. Σε μια τέτοια σύνδεση είναι δυνατή η χρήση σύγχρονων γεννητριών με τύλιγμα διέγερσης ή μονίμων μαγνητών καθώς και γεννήτριες επαγωγής λαμβάνοντας μέτρα για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος της γεννήτριας.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένας μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός, ο οποίος διαθέτει μια γεννήτρια επαγωγής, και ο οποίος συνδέεται στο κεντρικό δίκτυο, ενώ όπως παρατηρείται στο σημείο σύνδεσής τους τοποθετείται ένα σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας με μπαταρίες. Η διάταξη αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας απαρτίζεται από ένα τριφασικό μετατροπέα πηγής τάσης με IGBT τεχνολογία, ένα επαγωγέα στην είσοδο (L_c, R_c) και ένα ηλεκτρολυτικό πυκνωτή (C_{dc}) παράλληλα με την μπαταρία στην DC πλευρά.[4]



Σχήμα 121 Υδροηλεκτρικός σταθμός με γεννήτρια επαγωγής συνδεδεμένος στο κεντρικό δίκτυο [4]

Τέλος, στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένας υδροηλεκτρικός σταθμός με σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης, το οποίο είναι συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο, με ένα τριφασικό αντιστροφέα με IGBT τεχνολογία και ένα μετασχηματιστή ανυψώσεων. Στο σύστημα αυτό περιλαμβάνονται και διατάξεις ελέγχου για τον αποδοτικό έλεγχο της άεργου ισχύος του δικτύου.



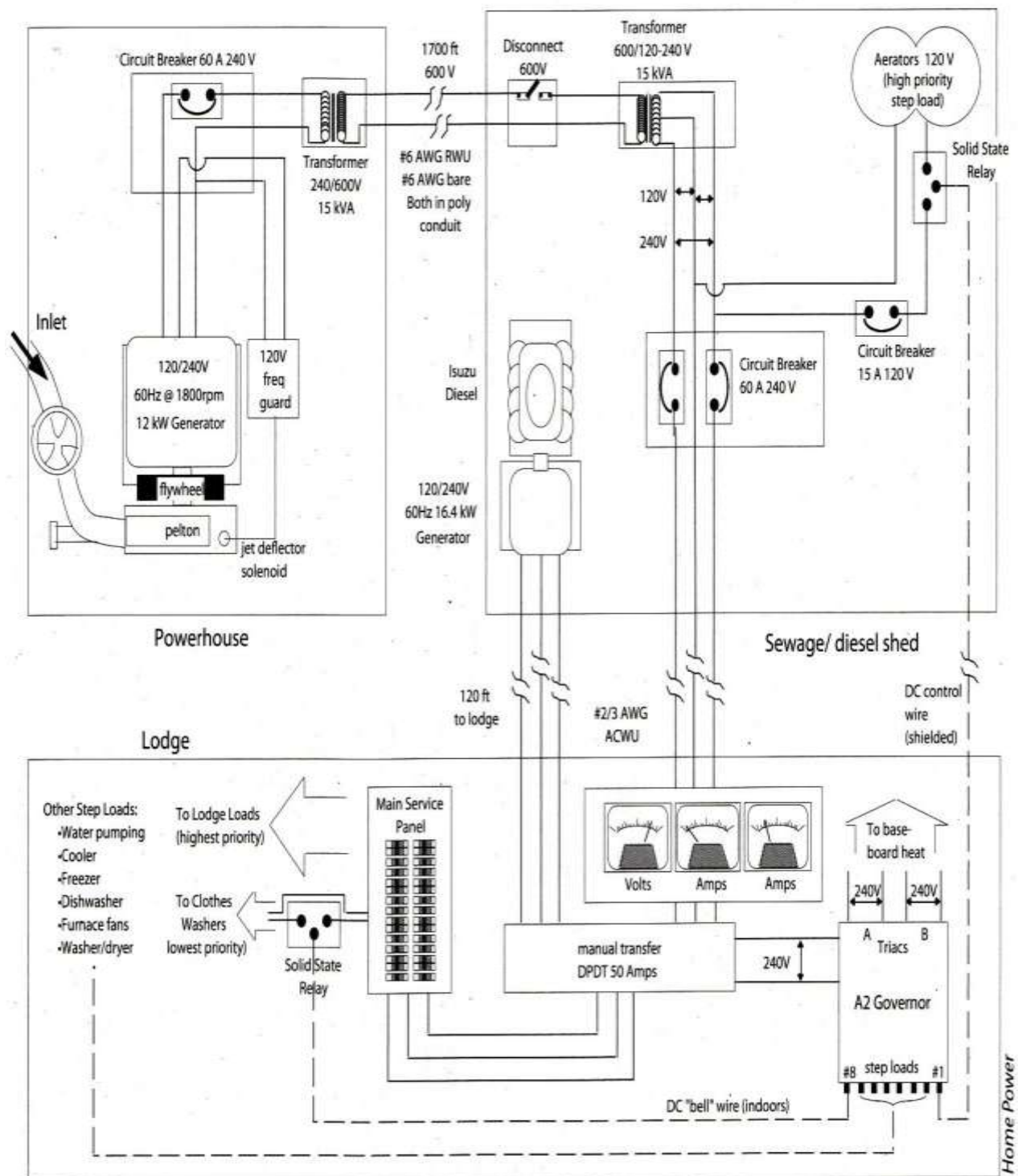
Σχήμα 122 Υδροηλεκτρικός σταθμός με σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης και πλήρη έλεγχο ισχύος και τάσεως [4]

3.6.2.2. AC αυτόνομο σύστημα

Όταν ένας υδροηλεκτρικός σταθμός τροφοδοτεί εξ ολοκλήρου ένα AC αυτόνομο σύστημα τότε πρέπει να υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις για την εγγυημένη κάλυψη των αναγκών φορτίων και τη διατήρηση της τάσης και της συχνότητας λειτουργίας των φορτίων. Σε ένα AC αυτόνομο σύστημα είναι προαιρετική η χρήση συσσωρευτών, ενώ ο υδροστρόβιλος μπορεί να είναι είτε σταθερών είτε μεταβλητών στροφών. Οι γεννήτριες που μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα τέτοιο σύστημα είναι οι σύγχρονες γεννήτριες με τύλιγμα διέγερσης, οι σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών και οι γεννήτριες επαγωγής κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η σύνδεση και η λειτουργία ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού με σύγχρονη γεννήτρια χωρίς ψήκτρες, το οποίο τροφοδοτεί ένα AC αυτόνομο μικρό δίκτυο. Η γεννήτρια του υδροηλεκτρικού σταθμού είναι τοποθετημένη στον ίδιο άξονα με έναν υδροστρόβιλο τύπου Pelton. Το σύστημα αυτό δεν διαθέτει συσσωρευτές και τα τροφοδοτούμενα AC φορτία διαχωρίζονται σε ομάδες διαφορετικής προτεραιότητας. Για την διατήρηση των σταθερών στροφών στην γεννήτρια και στον υδροστρόβιλο γίνεται

έλεγχος μέσω του ελεγκτή ηλεκτρικού φορτίου. Τέλος, το σύστημα περιλαμβάνει και μια εφεδρική ντιζελογεννήτρια για την περίπτωση που η γεννήτρια υποστεί βλάβη.[4]



Σχήμα 123 Υδροηλεκτρικός σταθμός με σύγχρονη γεννήτρια που τροφοδοτεί αυτόνομο AC σύστημα [4]

3.7. Βιβλιογραφία

1. «Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ Α.Ε. και η συμβολή τους στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της χώρας», Ι. Γ. Αργυράκης Μηχανολόγος- Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
2. «Βέλτιστη διαστασιολόγηση μικρών υδροηλεκτρικών έργων για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής», Ι. Κ. Καλδέλλης- Β. Κατσίρου- Αιμ. Κονδύλη- Γ. Κορμπάκης, Εργαστήριο ήπιων μορφών ενέργειας και προστασίας περιβάλλοντος, ΤΕΙ Πειραιά
3. «Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και περιβάλλον», Πτυχιακή εργασία Ισμαηλίδης Αναστάσιος, ΤΕΙ Κρήτης , Χανιά 2005
4. «Μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή μικρού υδροηλεκτρικού συστήματος με υδρογεννήτρια 350W για αγροτικές εφαρμογές χαμηλού κόστους», Διπλωματική εργασία Σταματία Ι. Γκιάλα- Φήκαρη , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Οκτώβριος 2012
5. «Εισαγωγή στην ενεργειακή τεχνολογία- Υδροηλεκτρική ενέργεια», Νίκος Μαμάσης και Ιωάννης Στεφανάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , 2010
6. «Μηνιαίο δελτίο ενέργειας», Ανεξάρτητος διαχειριστής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ΑΔΜΗΕ, Αθήνα , Νοέμβριος 2014
7. «Μελέτη σκοπιμότητας ίδρυσης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού», Διπλωματική εργασία Αντρέα Νικολάου Γαλούση, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Πειραιάς , 2009
8. «Μικρά υδροηλεκτρικά έργα στην Ήπειρο – Η συμβολή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο», Βαγγέλης Νικολάου- Γιώργος Σταμουλάκης- Κώστας Τσιτογιάννης, ΤΕΙ Ηπείρου
9. «Μικρά υδροηλεκτρικά έργα στις ορεινές περιοχές και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον», Διπλωματική εργασία Μαρίνα Νικ. Μέγα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Οκτώβριος 2009
10. «Οδηγός τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ», Ευρωπαϊκή επιτροπή,ΚΑΠΕ
11. «Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα. Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές», Πτυχιακή εργασία Καβουσανάκης Νίκος & Παπαδογιάννης Βασίλης, ΤΕΙ κρήτης, Ηράκλειο , 2012
12. «Pico hydro for village power», Phillip Maher and Nigel Smith, Μάιος 2001
13. «Η ποιότητα στα συστήματα εναλλακτικών μορφών ενέργειας με έμφαση στα φωτοβολταϊκά πάρκα», Διπλωματική εργασία Τζίμας Ευάγγελος, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη , Σεπτέμβριος 2011
14. «Υδροηλεκτρική ενέργεια και προοπτικές αξιοποίησής της στην Κύπρο: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας», Ευριπίδης Κυριακίδης- Ηλεκτρολόγος μηχανικός, Τμήμα ανάπτυξης υδάτων

15. «Ανάλυση υβριδικού συστήματος της Ιεράς Μονής Σίμωνος Πέτρας», Διπλωματική εργασία Ευδοξίας Κ. Παπαιωάννου & Νεκταρίου Ε. Ροηλίδη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2012
16. «Έλεγχος πραγματικής ισχύος αιολικού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο μέσω διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος», Διπλωματική εργασία Ειρήνης Βρακά, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Σεπτέμβριος 2012
17. «Λειτουργία και τεchnικοοικονομική μελέτη του μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού Σμοκόθου», Διπλωματική εργασία Ποτσίκας Βασιλική & Τσιγάρα Γεωργία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2010

4. Βιομάζα

Με τη συνεχόμενη ραγδαία αύξηση των αναγκών του πλανήτη σε κατανάλωση προϊόντων, η γεωργία παρουσιάζει ανικανότητα στο να ανταπεξέλθει. Η διάθεση των παραγόμενων προϊόντων είναι περιορισμένη και οι επιδοτήσεις των αγροτών έχουν μειωθεί σε μεγάλο βαθμό. Επιπλέον, παρουσιάζεται σημαντική μείωση των υδάτινων πόρων καθώς και υποβάθμιση του εδάφους λόγω της συστηματικής καλλιέργειας. Τέλος, η χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων για την γρήγορη και ασφαλή απόδοση των καλλιεργειών έχει συντελέσει στην επιβάρυνση της μόλυνσης του περιβάλλοντος και στη μείωση του αγροτικού εισοδήματος.

Για τη λύση των προβλημάτων αυτών έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια η αναδιάρθρωση της γεωργίας, τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Η ραγδαία ανάπτυξη των ενεργειακών καλλιεργειών, καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη χρήση των απορριμμάτων διαφόρων μορφών για την παραγωγή βιομάζας έχει σημαντικά αποτελέσματα καθώς δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον και κάνουν τον αγροτικό τομέα πιο ανταγωνιστικό, ενισχύοντας την απασχόληση εργατικού δυναμικού σε αυτόν.

4.1. Ορισμός

Με τον όρο βιομάζα εννοούμε την οργανική ύλη που προέρχεται από ενεργειακές καλλιέργειες, από τα κατάλοιπα των δασικών προϊόντων, από τα λήμματα και τα απορρίμματα των πόλεων, από τα ζωικά απόβλητα και τα υδρόβια φυτά. Η οργανική αυτή ύλη είναι διαθέσιμη σε ανανεώσιμη βάση καθώς αποτελεί μια αποθηκευμένη και δεσμευμένη μορφή ηλιακής ενέργειας, η οποία είναι το αποτέλεσμα που προκύπτει από τη φωτοσύνθεση των φυτικών οργανισμών. Σύμφωνα με τη δραστηριότητα αυτή η χλωροφύλλη, μια ουσία που περιέχεται στα φυτά, μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια με κάποιες διεργασίες, χρησιμοποιώντας διοξείδιο του άνθρακα, νερό και κάποια ανόργανα συστατικά του εδάφους.

Νερό + Διοξείδιο του Άνθρακα+ ηλιακή ενέργεια (φωτόνια) => Βιομάζα+ Οξυγόνο

Η βιομάζα είναι μια πηγή ενέργειας φιλική προς το περιβάλλον και ανεξάντλητη συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στην ενεργειακή επάρκεια καθώς και στην αντικατάσταση των εξαντλούμενων ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο κ.τ.λ.). Η βιομάζα δεν είναι μια καινούρια πηγή ενέργειας, καθώς από αρχαιοτάτων χρόνων ο άνθρωπος χρησιμοποιούσε την ξυλεία για θέρμανση, παρασκευή φαγητού κ.τ.λ.

Η χρήση της βιομάζας ως πηγή ενέργειας αποτελείται από πληθώρα πλεονεκτημάτων μερικά από τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- Η προστασία του πλανήτη από το φαινόμενο του θερμοκηπίου λόγω του περιορισμού των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα. Η βιομάζα έχει το πλεονέκτημα ότι ενώ παράγει διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) κατά την καύση της, οι ποσότητές του επαναδεσμεύονται κατά την παραγωγή της μέσω της φωτοσύνθεσης.
- Η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του θείου (SO_2), η οποία οφείλεται στην καύση των ορυκτών καυσίμων και κατ'επέκταση η προστασία της γης από το φαινόμενο της όξινης βροχής. Η βιομάζα περιέχει ελάχιστη ποσότητα σε θείο.
- Ο περιορισμός των εισαγωγών καυσίμων από τρίτες χώρες, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση συναλλάγματος καθώς και τη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης.
- Η περιφερειακή ανάπτυξη των χωρών λόγω της εκμετάλλευσης ανθρώπινου δυναμικού και της εξασφάλισης εργασίας στις γεωργικές περιοχές.

Η βιομάζα έχει και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία συσχετίζονται ως επί το πλείστον με τη δυσκολία στην εκμετάλλευσή της και είναι τα ακόλουθα:

- Η αυξημένη δυσκολία στην περισυλλογή, μετατροπή, μεταφορά και αποθήκευση της βιομάζας σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Ο αρκετά μεγάλος όγκος της καθώς και τα ποσοστά υγρασίας που περιέχει ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Η μεγάλη διασπορά καθώς και η εποχιακή παραγωγή της.
- Ο εξοπλισμός καθώς και οι εγκαταστάσεις που απαιτούνται για την αξιοποίηση της βιομάζας είναι αρκετά δαπανηρές.

Λόγω των παραπάνω παραγόντων που περιγράψαμε, το κόστος της βιομάζας παραμένει υψηλότερο από το πετρέλαιο, γεγονός το οποίο τείνει να μειώνεται αφενός λόγω της αύξησης της τιμής του πετρελαίου και αφετέρου λόγω των εξελιγμένων τεχνολογιών που τίθενται σε εφαρμογή για την αξιοποίηση της βιομάζας.

4.2. Η βιομάζα στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα η χρήση της βιομάζας παρουσιάζεται κυρίως στην καύση της στον οικιακό τομέα για θέρμανση, καθώς και στην καύση των υπολειμμάτων βιομάζας σε βιομηχανικές μονάδες κατεργασίας βάμβακος, τροφίμων ξυλείας κ.τ.λ., στις οποίες χρησιμοποιείται για την κάλυψη των ατομικών αναγκών της κάθε βιομηχανίας. Επιπλέον, στον ελλαδικό χώρο έχουν εγκατασταθεί δεκατρείς εταιρίες παραγωγής βιοντίζελ με δυναμικότητα 702ktoe καθώς και τέσσερις εταιρίες εμπορίας βιοντίζελ. Η εγκατεστημένη ισχύς ηλεκτρικής ενέργειας το έτος 2009 από βιομάζα ανέρχεται στα 41MW έναντι 22MW το έτος 2001.

Σύμφωνα με το ελληνικό σχέδιο δράσης και την εκδοθείσα απόφαση του υπουργείου, τα όρια της εγκατεστημένης ισχύος από βιομάζα ανέρχονται σε 200MW για το έτος 2014 και 350MW για το έτος 2020. Επιπρόσθετα, οι αιτήσεις που υποβλήθηκαν για χορήγηση άδειας παραγωγής από βιομάζα έως το έτος 2010 ανέρχονται σε 124 με συνολική ισχύ 1462MW, ενώ εκδόθηκαν 37 άδειες παραγωγής με συνολική ισχύ 443MW.

Ο αγροτικός τομέας στον ελλαδικό χώρο αποτελεί παραπάνω από το 5% του ΑΕΠ. Για το λόγο αυτό, εταιρίες οι οποίες ασχολούνται με τον τομέα της βιομάζας και των βιοκαυσίμων θα βρουν πληθώρα πρώτων υλών. Στην Ελλάδα, τα δασικά και τα γεωργικά υπολείμματα αντιστοιχούν ενεργειακά σε 3-4 εκατομμύρια τόνους πετρέλαιο το έτος, ενώ οι ενεργειακές καλλιέργειες έχουν παρουσιάσει ραγδαία άνοδο. Η αξιοποίηση της βιομάζας στην Ελλάδα επιδέχεται ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση καθώς σημαντικό ποσοστό της βιομάζας παραμένει ακόμα αναξιοποίητο, δημιουργώντας δυσάρεστες παρενέργειες όπως η εκδήλωση πυρκαγιών, η διάδοση ασθενειών κ.ά.

Τέλος, στην Ελλάδα περίπου δέκα εκατομμύρια στρέμματα καλλιεργήσιμης γης, τείνουν να εγκαταλειφτούν γεγονός που ωφελεί στην ενεργειακή καλλιέργεια των εκτάσεων αυτών με στόχο την αξιοποίηση της καλλιέργειας σε ενέργεια, η οποία αναμένεται να φτάσει τα 5-6 ΜΤΙΠ (1 ΜΤΙΠ = 10^6 ΤΙΠ, όπου ΤΙΠ= Τόνοι Ισοδύναμου Πετρελαίου), δηλαδή το 60% της κατανάλωσης πετρελαίου στη χώρα μας στη διάρκεια ενός έτους.

4.3. Η βιομάζα στη Ευρώπη

Στην Ευρώπη μετά την ενεργειακή κρίση το 1973, η βιομάζα αποτελεί μια σημαντική πηγή ενέργειας για την κάλυψη μεγάλου όγκου των ενεργειακών της αναγκών. Οι χώρες της Ευρώπης, οι οποίες είναι πρωτοπόρες στην αξιοποίηση και μελέτη της βιομάζας είναι η Δανία, η Ολλανδία, η Γερμανία, η Γαλλία και οι Σκανδιναβικές χώρες.

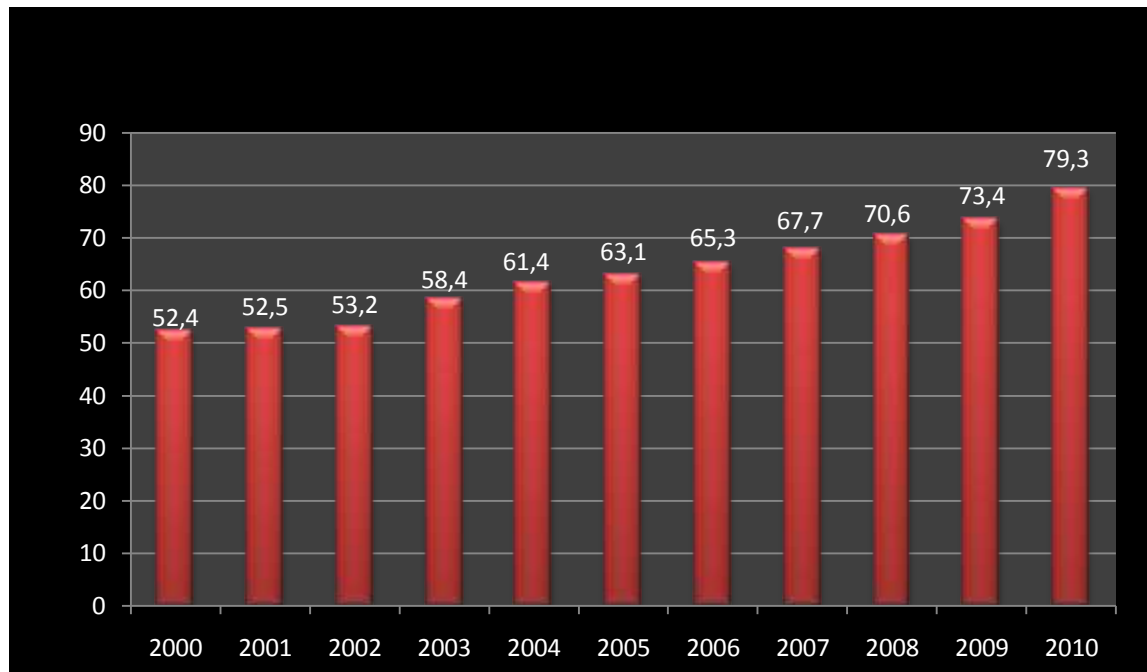
Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει κάνει σημαντικά βήματα στην οργάνωση της παραγωγής ενέργειας από βιομάζα με στόχο της απελευθέρωση της Ευρώπης από την εισαγωγή συμβατικών καυσίμων από άλλες ηπείρους. Το σχέδιο μελέτης της Ευρωπαϊκής Ένωσης περιλαμβάνει έρευνες για την οργάνωση της ταξινόμησης των πηγών βιομάζας σύμφωνα με την ποιότητα του καυσίμου και του ανεφοδιασμού του, για την ανάλυση των ενδεχόμενων ποσοτήτων παραγωγής, για την έρευνα που αφορά το κόστος μεταφοράς και τέλος για την μελέτη των πηγών που θα μπορούσαν να παράγουν βιομάζα. Οι εκτιμήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την χρησιμοποίηση της βιομάζας από διάφορους τομείς παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Mtoe	2003	2010	Διαφορά
Ηλεκτρισμός	20	55	35
Θέρμανση	48	75	27
Μεταφορές	1	19	18
Σύνολο	69 (2.9EJ)	149(6.2EJ)	80 (3.4EJ)

Πίνακας 6 Τομείς αξιοποίησης της βιομάζας [20]

Σύμφωνα με έρευνες της Ευρωπαϊκής Ένωσης αναμένεται μια εξοικονόμηση χρημάτων από τη χρήση της βιομάζας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της τάξεως του 25%. Το ποσοστό αυτό προέρχεται όχι από τη μείωση της τιμής της βιομάζας αλλά από την τεχνολογική ανάπτυξη των τεχνικών συγκομιδής, συλλογής και παραγωγής της βιομάζας.

Όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα, η ετήσια παραγωγή ενέργειας από στερεά βιομάζα άγγιξε τους 79,3Mtoe το έτος 2010 και συνεχίζει με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό.



Πίνακας 7 Πρωτογενής παραγωγή ενέργειας από στερεή βιομάζα στην Ε.Ε. [20]

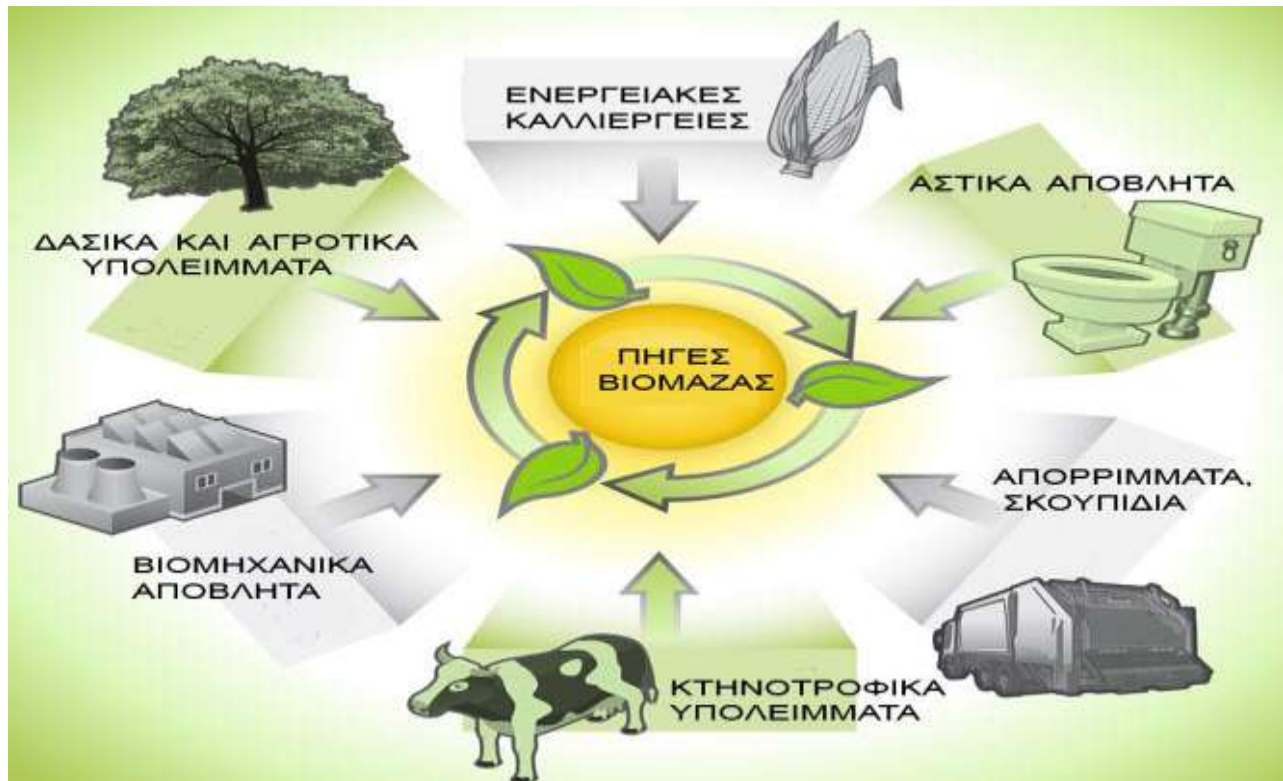
Η Γαλλία, η Σουηδία και η Γερμανία, ήταν τα κράτη- μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης που ήταν πρώτα στη λίστα παραγωγής ενέργειας από στερεή βιομάζα. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η πρωτογενής παραγωγή ενέργειας (σε Mtoe) από στερεή βιομάζα σε κράτη- μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα έτη 2009-2010.

	2009	2010
Germany	11.217	12.230
France	9.368	10.481
Sweden	8.621	9.202
Finland	6.473	7.680
Poland	5.190	5.865
Spain	4.494	4.751
Austria	4.097	4.529
Romania	3.838	3.583
Italy	2.76	3.019
Portugal	2.856	2.582
Czech Republic	1.968	2.094
Latvia	1.737	1.739
Denmark	1.422	1.657
Hungary	1.469	1.489
UK	1.357	1.442
Netherlands	1.014	1.033
Lithuania	1.002	1.002
Estonia	0.843	0.924
Belgium	0.722	0.858
Greece	0.799	0.812
Bulgaria	0.766	0.788
Slovakia	0.647	0.740
Slovenia	0.537	0.572
Ireland	0.189	0.197
Luxembourg	0.034	0.04
Cyprus	0.009	0.01
Malta	0.000	0.000
EU	73.430	79.318

Πίνακας 8 Πρωτογενής παραγωγή ενέργειας (σε Mtoe) από στερεή βιομάζα στα κράτη- μέλη της Ε.Ε. [20]

4.4. Τύποι βιομάζας

Οι τύποι βιομάζας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στην βιομάζα, η οποία προέρχεται από την ενεργειακή καλλιέργεια και η βιομάζα, η οποία προέρχεται από υπολείμματα (π.χ. αστικά απόβλητα, σκουπίδια κ.τ.λ.). Επιπλέον, κάποια υποθαλάσσια είδη βιομάζας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας όπως το φυτοπλαγκτόν.



Σχήμα 124 Τύποι βιομάζας [20]

4.4.1. Ενεργειακή καλλιέργεια

Με τον όρο ενεργειακή καλλιέργεια εννοούμε την καλλιέργεια διαφόρων ειδών καλλιεργούμενων ή άγριων φυτών με σκοπό τη χρησιμοποίησή τους στην παραγωγή βιομάζας. Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα υπάρχουν αρκετά ευνοϊκές συνθήκες λόγω του κλίματος της για την παραγωγή καλλιεργειών με μεγάλες στρεμματικές αποδόσεις. Τέτοιου είδους καλλιέργειες είναι τα καλάμια, η αγριαγκινάρα, ο σόργος ο σακχαρούχος, ο μίσχανθος, ο ευκάλυπτος και η ψευδοακακία, για τις οποίες γίνεται εντατική μελέτη για την καλλιέργειά τους στον ελλαδικό χώρο. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται μεγάλες ενεργειακές καλλιέργειες ανά τον κόσμο.[20]

Χώρα	Καλλιέργεια	Τελικό προϊόν	Χρήσεις	Τόνοι ή στρέμματα/έτος
Βραζιλία	Ζαχαροκάλαμο	Αλκοόλη	Καύσιμο μεταφοράς	9 εκατομμύρια τόνοι/ έτος
ΗΠΑ	Καλαμπόκι	Αλκοόλη	Καύσιμο μεταφοράς	4 εκατομμύρια τόνοι/ έτος
Γαλλία	Ζαχαρότευτλα, σιτάρι, κ.λ.π.	Αλκοόλη	Καύσιμο μεταφοράς	75,000 τόνοι/ έτος
Άλλες χώρες της Ε.Ε.	Ελαιοκράμβη & ηλίανθος	Βιοντήζελ	Καύσιμο μεταφοράς	500,000 τόνοι/ έτος
Σουηδία	ιτιά	Ψιλοτεμαχισμένο ξύλο	καύση	1,700,00 0 τόνοι/ έτος

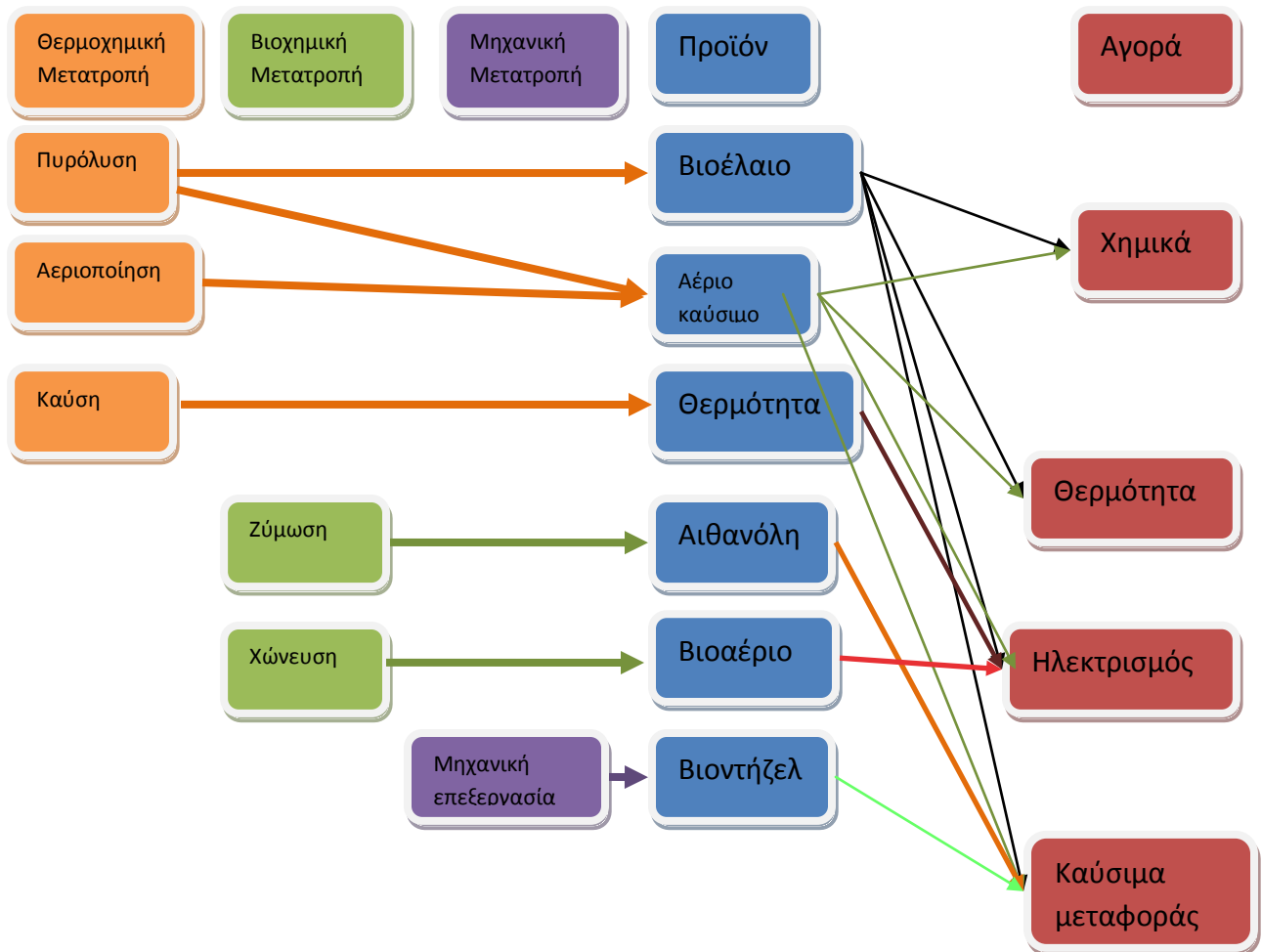
Πίνακας 9 Ενεργειακές καλλιέργειες μεγάλης κλίμακας [2]

4.4.2. Υπολειμματικές μορφές βιομάζας

Οι υπολειμματικές μορφές βιομάζας είναι υλικά τα οποία προκύπτουν από ανθρώπινες δραστηριότητες και φυσικά γεγονότα. Στον τομέα αυτόν περιλαμβάνονται τα αγροτικά υπολείμματα καθώς και τα υπολείμματα των δασών, τα ζωικά απόβλητα όπως η κοπριά των ζώων, τα απόβλητα της αγροτικής και της δασικής βιομηχανίας (π.χ. απόβλητα από εκκοκκιστήρια), τα απόβλητα της βιομηχανίας παραγωγής τροφίμων καθώς και τα δημοτικά και αστικά απορρίμματα. [20]

4.5. Μετατροπή βιομάζας σε ενέργεια

Η μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας, οι οποίες χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: τις θερμοχημικές, τις βιολογικές και τις μηχανικές μεθόδους. Οι μέθοδοι επεξεργασίας τροποποιούν τη βιομάζα, σε μορφές ενέργειας, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για θερμότητα, ηλεκτρισμό, είτε ως καύσιμα μεταφοράς.

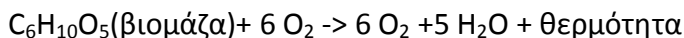


Σχήμα 125 Διαδικασίες μετατροπής βιομάζας, προϊόντα και αγορές [7]

4.5.1. Θερμοχημικές μέθοδοι

4.5.1.1. Καύση

Η καύση των προϊόντων της βιομάζας γίνεται σε διάφορα είδη καύσης όπως τζάκια, σόμπες και σε ειδικούς διαμορφωμένους καυστήρες σταθερής και ρευστοποιημένης κλίνης και λέβητες. Η καύση είναι μια μέθοδος κατά την οποία η χημική ενέργεια της βιομάζας μετατρέπεται σε θερμότητα. Η άμεση καύση των προϊόντων βιομάζας παρουσιάζεται στην ακόλουθη αντίδραση:



Ως επί το πλείστον στην καύση χρησιμοποιούνται τα προϊόντα ξυλείας και τα ποσά της παραγόμενης θερμότητας εξαρτώνται από την περιεκτικότητα της βιομάζας σε νερό, την ποσότητα του αέρα που χρειάζεται για την καύση καθώς και του βαθμού πληρότητας της καύσης. Τα προϊόντα βιομάζας που χρησιμοποιούνται για καύση είναι τα προϊόντα ξύλου όπως τα κούτσουρα, τα σύμπηκτα (pellets) καθώς και ο ελαιοπυρήνας, το πυρηνόξυλο, το κουκούτσι του ροδάκινου, οι φλοιοί ρυζιού, τα υπολείμματα των εκκοκκιστηρίων, το άχυρο, τα κλαδοδέματα κ.τ.λ. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών αυτών.

Βιομάζα	Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)	Υγρασία	Θερμ ογόνος δύναμη (kWh/kg)	Διαθεσιμότητα	Τιμή πώλησης (€/τόνο)
Πυρηνόξυλο	650	20	5,28	Νοέμβριο-Μάρτιο	42-60
Κουκούτσια ροδάκινου	540	5	5,67	Ιούλιο-Αύγουστο	50
Θρυμματισμένο ξύλο	175-200	25	4,22	Όλο το χρόνο	30
Pellets	650	<10	4,72	Όλο το χρόνο	150-170
Αχυρόμπαλα	100	15	4,0	Ιούνιο-Αύγουστο	50
Πετρέλαιο θέρμανσης					0,7€/λίτρο

Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά πρώτης ύλης [7]

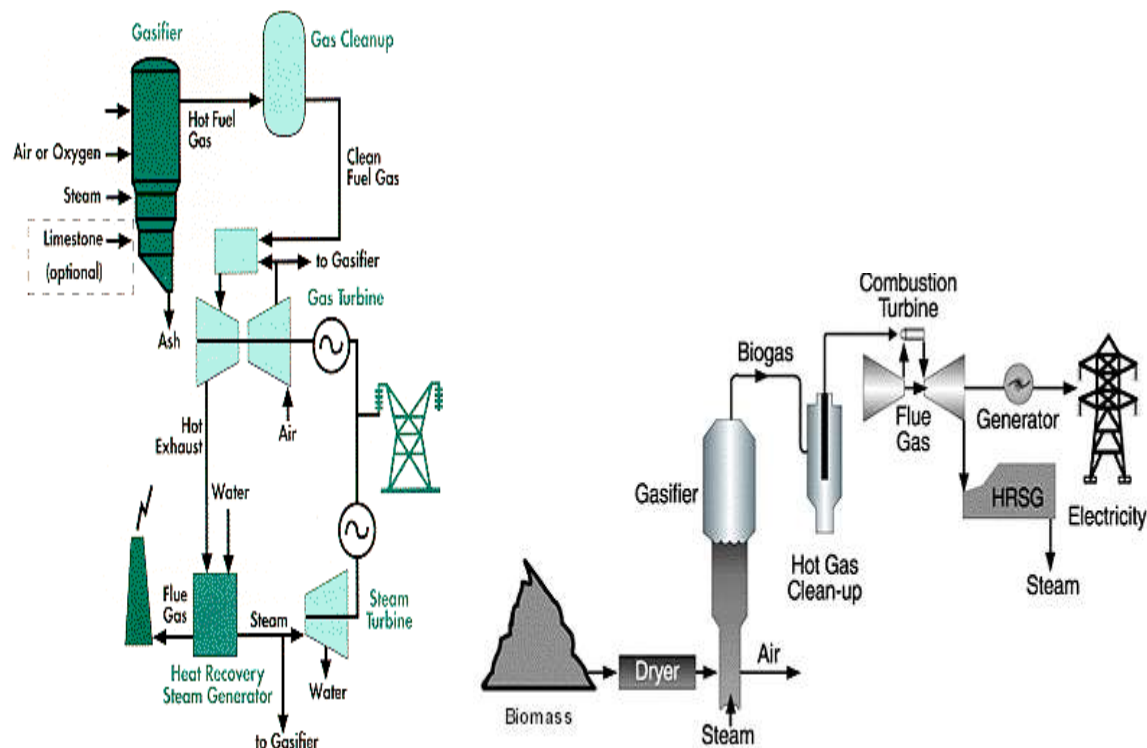
Με την καύση των προϊόντων βιομάζας παρουσιάζεται ελάχιστη ρύπανση του περιβάλλοντος από διοξείδιο του θείου, μικρές συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του αζώτου και άκαυστων αερίων υδρογονανθράκων.

Ένα παράδειγμα εργοστασίου, το οποίο κάνει καύση βιομάζας είναι το εκκοκκιστήριο βάμβακος στη Βοιωτία, το οποίο παράγει από 40.000-50.000 τόνους βάμβακος το έτος, 4.000-5.000 τόνους / έτος υπολείμματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για καύση με σκοπό την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των ιδίων αναγκών του εργοστασίου. [20]

4.5.1.2. Αεριοποίηση

Κατά τη διαδικασία της αεριοποίησης γίνεται μια ατελής καύση της βιομάζας με χρήση ή όχι οξυγόνου, για την παραγωγή αερίου σύνθεσης (μίγμα μονοξειδίου του άνθρακα, υδρογόνου και αζώτου). Έπειτα, το μίγμα αυτό υπόκειται επεξεργασία με καταλύτες για την μετατροπή του σε υποκατάστατο φυσικού αερίου ή σε μεθανόλη είτε σε αμμωνία.

Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα της καύσης του αερίου της βιομάζας που προκύπτει από τη διαδικασία της αεριοποίησης για την απελευθέρωση της χημικής του ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Μια ιδιαίτερα ελκυστική τεχνολογία είναι τα εργοστάσια συνδυασμένου κύκλου (BIG/CC) Biomass Integrated Gasification Combined Cycle.[20]



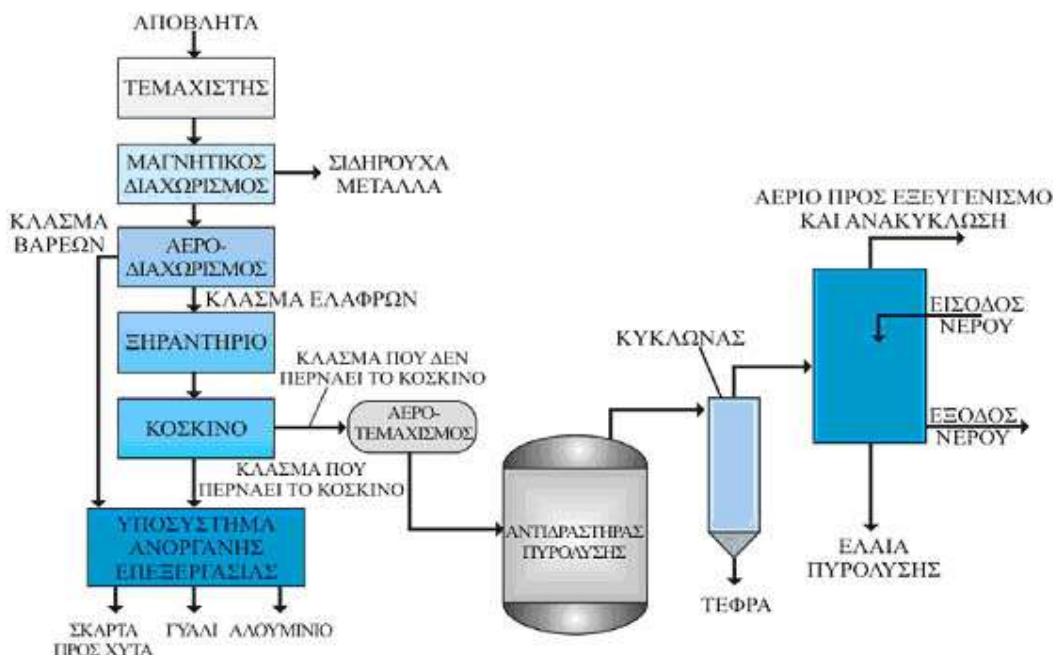
Σχήμα 126 Σχηματική διάταξη εγκατάστασης αεριοποίησης/ συνδυασμένου κύκλου (BIG/CC) [7]

4.5.1.3. Πυρόλυση

Ως πυρόλυση ονομάζουμε τη διαδικασία μετατροπής της βιομάζας σε υγρά (βιοέλαιο), στερεά και αέρια προϊόντα με τη θέρμανση της βιομάζας σε θερμοκρασία περίπου 500 °C. Μέσω της διαδικασίας της αστραπιαίας πυρόλυσης (flash pyrolysis) γίνεται αποκλειστική παραγωγή βιοελαίου με βαθμό απόδοσης έως και 80%.

Το βιοέλαιο που προκύπτει από την πυρόλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του πετρελαίου για τη θέρμανση κατοικιών, για λέβητες, φούρνους και μηχανές εσωτερικής καύσης. Επιπλέον, το βιοέλαιο μπορεί να υποστεί αεριοποίηση, από την οποία προκύπτει ένα συνθετικό αέριο, το λεγόμενο syngas, το οποίο έπειτα μετατρέπεται σε καύσιμο (sundiesel).

Με τη διαδικασία της πυρόλυσης, η ενεργειακή απόδοση της βιομάζας αγγίζει το ποσοστό του 90%, ενώ κατά την επεξεργασία καταναλώνεται το 10% των παραγόμενων προϊόντων. Για να εφαρμοστεί η διαδικασία της πυρόλυσης πρέπει η περιεκτικότητα της βιομάζας σε νερό να είναι μικρότερη από 40%. Τέλος, τα προϊόντα της πυρόλυσης χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών όπως για θέρμανση θερμοκηπίων, για οικιακή χρήση, για βιομηχανικές εφαρμογές καθώς και στην αποξήρανση σε ξηραντήρια γεωργικών προϊόντων.[20]



Σχήμα 127 Διαδικασία πυρόλυσης

Πηγή: <http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=96>

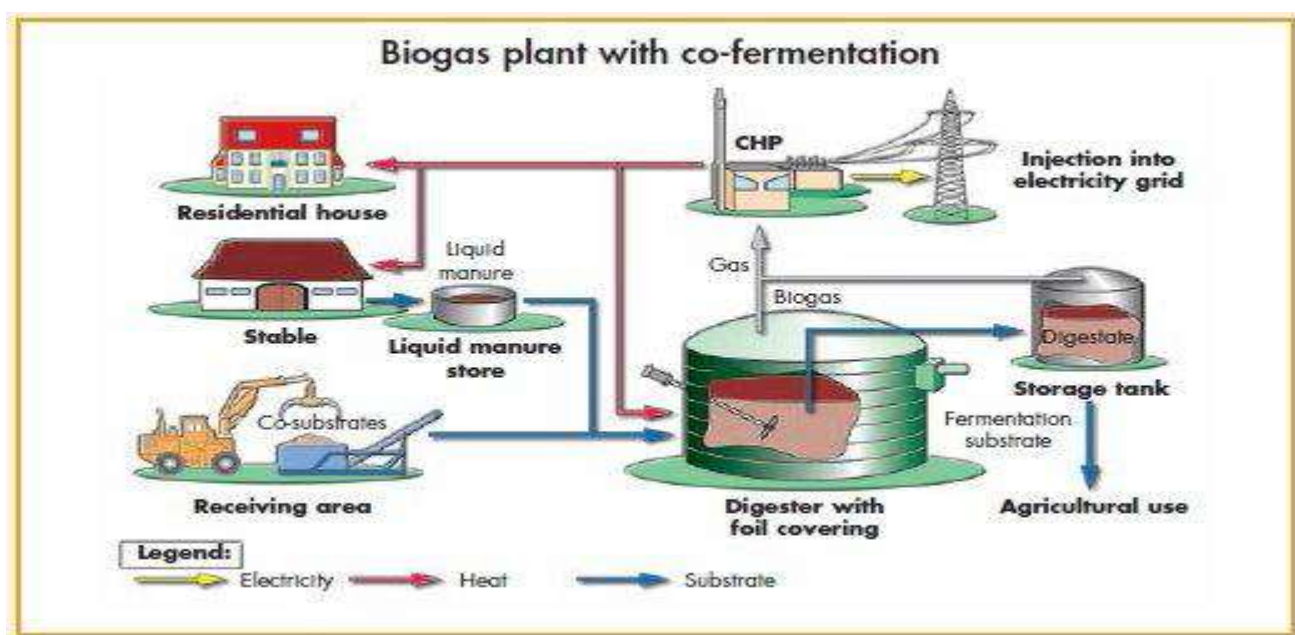
4.5.1.4. Υδρογονοδιάσπαση

Με την μέθοδο της υδρογονοδιάσπασης η βιομάζα εμπλουτίζεται με υδρογόνο για την μετατροπή της σε καύσιμο σε συνθήκες με θερμοκρασία 250-500 °C και πίεση 150atm. Το προϊόν, το οποίο προκύπτει από αυτή τη διαδικασία είναι ένα οξυγονωμένο ρευστό με μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα. Όμως οι εγκαταστάσεις, οι οποίες χρειάζονται και η τεχνολογία που χρησιμοποιείται είναι αρκετά δαπανηρή και έτσι το ενδιαφέρον για τη μέθοδο αυτή είναι περιορισμένο. [20]

4.5.2. Βιολογικές/ Βιοχημικές μέθοδοι

4.5.2.1. Αναερόβια Χώνευση

Για τη μέθοδο της αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιούνται βιομηχανικά, αστικά, ζωικά και αγροτικά απόβλητα για την επεξεργασία τους στην παραγωγή βιοαερίου. Η μέθοδος της αναερόβιας χώνευσης είναι η μέθοδος μετατροπής της βιομάζας, με τη χρήση μικροοργανισμών σε βιοαέριο, το οποίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας. Το βιοαέριο που προκύπτει είναι ένα μίγμα αερίων (μεθάνιο, υδρατμοί, διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο κ.τ.λ.), στο οποίο εν συνεχεία με την διαδικασία της ψύξης γίνεται επεξεργασία για την απομάκρυνση των υδρατμών και του υδρόθειου.[20]



Σχήμα 128 Σχηματική αξιοποίησης βιομάζας με αναερόβια χώνευση [7]

Η Γερμανία κατέχει την πρωτιά με 4.000 εργοστάσια παραγωγής βιοαερίου με παραγωγή 20MW στο δίκτυο. Το πιο μεγάλο εργοστάσιο παραγωγής βιοαερίου είναι το Pekun με δυναμικότητα 500kWe, το οποίο επεξεργάζεται 84.000t πολτούς και καλαμπόκι. Επιπλέον, εργοστάσια παραγωγής βιοαερίου υπάρχουν στην Δανία που φτάνουν σε αριθμό τα 284, ενώ η Αγγλία διαθέτει 30 μονάδες περίπου. Τέλος, μόνο η Σουηδία διαθέτει αγορά για οχήματα που κινούνται με βιοαέριο.

4.5.2.2. Υδρόλυση

Η υδρόλυση είναι μια μέθοδος παραγωγής βιοενέργειας που εφαρμόζεται σε βιομάζα, η οποία αποτελείται από κυτταρίνη και ημικυτταρίνη, για την επεξεργασία τους και την παραγωγή γλυκόζης. Η γλυκόζη, υπόκειται ζύμωση για την παραγωγή της αιθανόλης, η οποία μπορεί να παραχθεί από οποιαδήποτε ύλη περιέχει σημαντική ποσότητα σε σάκχαρα, άμυλο ή κυτταρίνη.

Οι πρώτες ύλες πρώτης γενιάς όπου χρησιμοποιείται ένα μικρό μέρος του φυτού για την παραγωγή αιθανόλης είναι:

Οι ύλες που περιέχουν σάκχαρα:

- Σακχαροκάλαμο, Ζαχαρότευτλα, Γλυκό σόργο

Οι ύλες που περιέχουν άμυλο:

- Καλαμπόκι, σιτάρι, σπόροι σόργου, κασάβα, πατάτες

Οι πρώτες ύλες δεύτερης γενιάς όπου χρησιμοποιείται όλο το φυτό για την παραγωγή αιθανόλης είναι:

- Δασικά υπολείμματα, ενεργειακές καλλιέργειες (λεύκες, ιτιές, switch grass), γεωργικά απόβλητα (άχυρο, βαγάσση, μίσχοι καλαμποκιού), αστικά απόβλητα

4.5.2.3. Ζύμωση

Η διαδικασία της αλκοολικής ζύμωσης πραγματοποιείται για την παραγωγή της βιοαιθανόλης μέσω της ζύμωσης σακχαρούχων καλλιεργειών, όπως το ζαχαροκάλαμο και τα ζαχαρότευτλα, και αμυλούχων καλλιεργειών όπως το σιτάρι και το καλαμπόκι. Μέσω της αλκοολικής ζύμωσης γίνεται άλεσμα της βιομάζας και έτσι το άμυλο μετατρέπεται σε σάκχαρα και έπειτα σε αλκοόλη, η οποία καθαρίζεται από προσμίξεις με απόσταξη. Ένας τόνος καλαμποκιού μπορεί να παράγει 450lt βιοαιθανόλης. Η βιοαιθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες οχημάτων ως αποκλειστικό καύσιμο είτε σε πρόσμιξη με τη βενζίνη. Τα στερεά υπολείμματα που απομένουν χρησιμοποιούνται σαν αγελαδοτροφή ή ως πρώτη ύλη σε εργοστάσιο αεριοποίησης.[20]

4.5.3. Μηχανικές διαδικασίες

4.5.3.1. Εστεροποίηση

Η εστεροποίηση είναι μια μηχανική μέθοδος μετατροπής των φυτικών ελαίων σε ελαιοεστέρες. Τα φυτικά έλαια, τα οποία χρησιμοποιούνται στη διαδικασία αυτή είναι συνήθως το ηλιέλαιο, το βαμβάκέλαιο, το κραμβέλαιο κ.τ.λ., τα οποία επεξεργάζονται με τη μέθοδο της συμπίεσης και άλλων μεθόδων διαχωρισμού. Στη συνέχεια, τα φυτικά έλαια με χρήση καταλύτη και αιθυλίου ή μεθυλίου μετασχηματίζονται σε αιθυλεστέρες ή μεθυλεστέρες (το λεγόμενο βιοντίζελ), τα οποία χρησιμοποιούνται ως βιοκαύσιμα για την κίνηση μηχανών. Τα υπολείμματα της διαδικασίας αυτής χρησιμοποιούνται ως ζωοτροφές.

Το βιοντίζελ σαν βιοκαύσιμο έχει μεγάλο βαθμό ανάπτυξης, ενώ ένα άλλο γνωστό καύσιμο είναι το RME (Rape Methyl Ester), το οποίο χρησιμοποιείται σαν βιοκαύσιμο στις πετρελαιομηχανές.[20]

4.6. Βασικά χαρακτηριστικά βιομάζας

Το πλήθος των διεργασιών μετατροπής της βιομάζας σε ενέργεια επηρεάζεται από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της. Τα χαρακτηριστικά αυτά επηρεάζουν από τεχνικής πλευράς τα έργα αξιοποίησης της βιομάζας αλλά και τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Οι κυριότερες και πιο καθοριστικές ιδιότητες περιγράφονται περιληπτικά στα ακόλουθα υποκεφάλαια.[20]

4.6.1. Περιεκτικότητα σε υγρασία

Η περιεκτικότητα σε υγρασία ενός προϊόντος βιομάζας είναι καθοριστικής σημασίας στις μεθόδους μετατροπής της καθώς όσο αυξάνεται το ποσοστό της τόσο μειώνεται η θερμογόνος δύναμή της. Κάποια υλικά χαρακτηρίζονται από χαμηλό ποσοστό υγρασίας, όπως π.χ. τα αγροτικά υπολείμματα με ποσοστό 10%, ενώ κάποια άλλα όπως το ξύλο έχουν υψηλής περιεκτικότητας υγρασία σε ποσοστό 50%.

Σε διεργασίες όπως οι βιοχημικές, τα υλικά που χρησιμοποιούνται μπορούν να έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, ενώ στις θερμοχημικές όπως η καύση, η υγρασία στα υλικά δημιουργεί προβλήματα. Άλλες πάλι θερμοχημικές διεργασίες όπως η αεριοποίηση απαιτούν ένα χαμηλό ποσοστό υγρασίας στα υλικά τους. Επιπλέον, η βιομάζα η οποία προέρχεται από τη γεωργία, έχει διαφορετική ποσότητα υγρασίας ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες κατά την περίοδο συγκομιδής της.

Πηγή Βιομάζας	Περιεκτικότητα σε υγρασία (υγρή βάση)
Θρύμματα ξύλου	10-60 %
Pellets ξύλου	8-12 %
Άχυρο	20-30 %
Πριονίδι	15-60 %
Υπολείμματα βαμβακιού	10-20 %
Switchgrass	30-70 %
Βαγάσση	40-60 %
Κοπριά αγελάδας	88-94 %
Κοπριά χοίρου	90-97 %
Κοπριά πουλερικού	75-80 %
Τυρόγαλα	93-97 %
Ενσίρωμα καλαμποκιού	65-75 %
Γλυκό σόργο	20-70 %
Αγριαγκινάρα	15-20 %

Πίνακας 11 Περιεκτικότητα πηγών βιομάζας σε υγρασία [20]

4.6.2. Περιεκτικότητα σε τέφρα

Η περιεκτικότητα ενός υλικού σε τέφρα εξαρτάται είτε από την σύσταση του ίδιου του υλικού, είτε από την εμφάνισή του σε αυτό, κατά τη διάρκεια περισυλλογής, μεταφοράς και επεξεργασίας του. Συνεπώς, το κάθε υλικό έχει δική του τιμή τέφρας, καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Η υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα δεν προσφέρει υψηλές αποδόσεις στα υλικά της βιομάζας λόγω της επίδρασής της στο ενεργειακό της περιεχόμενο.

Όταν εξετάζουμε το ποσοστό τέφρας σε ένα υλικό, δεν μας ενδιαφέρει μόνο η ποσότητα που περιλαμβάνεται, αλλά και η χημική της σύσταση λόγω της παραγωγής αποβλήτων, τα οποία πρέπει να επεξεργαστούν και να απομακρυνθούν. Στις θερμοχημικές διεργασίες, η τέφρα δεν πρέπει να υπάρχει σε υψηλό ποσοστό λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της εμφάνισης καθιζήσεων σε τμήματα του μηχανολογικού εξοπλισμού αυξάνοντας τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης. Στις βιοχημικές διεργασίες, η τέφρα μπορεί να αναστείλει τις διαδικασίες ζύμωσης και αναερόβιας χώνευσης των αποβλήτων. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι περιεκτικότητες σε τέφρα ορισμένων υλικών βιομάζας.

Πηγή Βιομάζας	Περιεκτικότητα σε τέφρα (%κ.β., ξηρή βάση)
Υπολείμματα βαμβακιού	7 %
Άχυρο σιταριού	4 %
Ξύλο λεύκας	1 %
Switchgrass	4 %
Ξύλο ελάτης	1 %
Άχυρο κριθαριού	6 %
Υπολείμματα ρυζιού	13 %
Υπολείμματα σακχαροκάλαμου	11 %

Πίνακας 12 Περιεκτικότητα πηγών βιομάζας σε τέφρα [20]

4.6.3. Θερμογόνος δύναμη

Η περιεκτικότητα ενός υλικού βιομάζας σε ενέργεια είναι υψίστης σημασίας για την μετατροπή της σε βιοκαύσιμα. Το πλήθος των συστατικών βιομάζας έχει διαφορετικές τιμές καύσης ανά υλικό λόγω των χημικών δομών τους και της περιεκτικότητάς τους σε άνθρακα. Επιπλέον, η παρουσία υψηλών ποσοστών ανόργανων συστατικών σε κάποια είδη βιομάζας επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή περιεκτικότητα των υλικών.

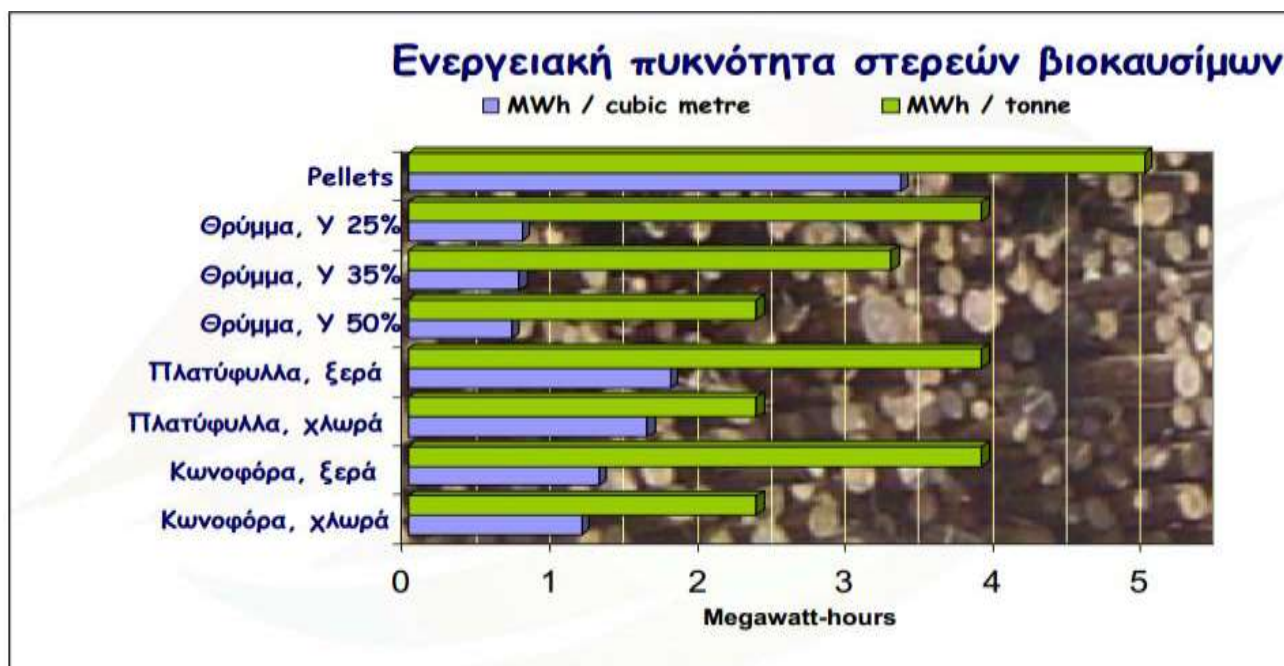
Η θερμογόνος δύναμη των καυσίμων της βιομάζας κυμαίνεται από 18-21MJ ανά κιλό καυσίμου. Συνήθως χαμηλές τιμές θερμογόνου δύναμης παρουσιάζονται στα καύσιμα, τα οποία προέρχονται από τον αγροτικό τομέα, ενώ οι υψηλότερες τιμές θερμογόνου δύναμης παρουσιάζονται στα νωπά καύσιμα και στους φλοιούς.

4.6.4. Περιεκτικότητα σε πτητική ύλη

Όταν ένα υλικό βιομάζας θερμανθεί σε θερμοκρασίες άνω των 500°C απελευθερώνεται από αυτό η πτητική ύλη, η οποία είναι υπεύθυνη για την ευκολία ανάφλεξης ενός υλικού. Στην περίπτωση των καυσίμων της βιομάζας, το μεγαλύτερο μέρος τους εξαερώνεται, χωρίς να προλάβουν να ενεργοποιηθούν οι ομοιογενείς αντιδράσεις καύσης στην αέρια φάση, επηρεάζοντας τη θερμική αποσύνθεση καθώς και την καύση των στερεών καυσίμων.

4.6.5. Πυκνότητα και ενεργειακή πυκνότητα

Η ενεργειακή πυκνότητα του υλικού παίζει ρόλο στην διαδικασία μεταφοράς και αποθήκευσης του καυσίμου καθώς επίσης και στη διαδικασία ελέγχου του συστήματος τροφοδοσίας του κλιβάνου. Για τη μεταφορά και το φόρτωμα ενός υλικού βιομάζας σε ένα μεταφορικό μέσο, παίζει μεγάλο ρόλο η ενεργειακή πυκνότητα καθώς όσο μικρότερη είναι τόσο μικρότερη είναι και η ποσότητα βιοενέργειας που θα φορτωθεί. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ενεργειακή πυκνότητα κάποιων ειδών στερεών βιοκαυσίμων.



Σχήμα 129 Ενεργειακή πυκνότητα στερεών βιοκαυσίμων [20]

4.7. Κύριες χρήσεις βιομάζας

4.7.1. Παραγωγή θερμότητας

Η χρησιμοποίηση της βιομάζας για την παραγωγή θερμότητας είναι μεγάλη καθώς πλήθος βιομηχανιών και οικισμών τη χρησιμοποιούν για τη θέρμανση του εσωτερικού τους χώρου. Η ανάπτυξη μικρών συστημάτων θέρμανσης για νοικοκυριά καθώς και τα μεγάλα συστήματα τηλεθέρμανσης για τη θέρμανση του νερού σε πολλά κτίρια έχουν αυξήσει την κατανάλωση της βιομάζας, γεγονός αρκετά ευνοϊκό για το περιβάλλον. Επιπλέον, μεγάλοι λέβητες για την καύση βιομάζας χρησιμοποιούνται και για τη θέρμανση του εσωτερικού των θερμοκηπίων.

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει καταφέρει να δημιουργήσει πιο βελτιωμένα αυτοματοποιημένα συστήματα που περιλαμβάνουν καταλυτικό μηχανισμό αερίων και τυποποιημένα καύσιμα.[12]

4.7.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η χρήση της βιομάζας είναι διαδεδομένη και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με την δυνατότητα καύσης υλικών βιομάζας σε σωρούς, σε εσχάρα, σε αιώρηση είτε σε ρευστοποιημένη κλίνη για την παραγωγή ατμού που στρέφει ένα στρόβιλο, ο οποίος οδηγεί μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Η καύση της βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρισμού αξιοποιείται κυρίως στις βιομηχανίες χάρτου και χαρτοπολτού, οι οποίες έχουν μεγάλη δυναμικότητα, με αποδόσεις παραγωγής ισχύος που κυμαίνονται από 15 έως 20%, ενώ νέες εγκαταστάσεις παραγωγής βρίσκονται σε κατασκευή με αποδοτικότητα έως και 30%.

Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα αεριοποίησης της βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με άμεση καύση της σε μηχανές, στρόβιλους και λέβητες. Στο άμεσο μέλλον συστήματα αεριοποίησης, τα οποία χρησιμοποιούν μικρο- αεριοστρόβιλους και κυψελίδες καυσίμου θα μπορούσαν να φανούν καινοτόμα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα.

Επιπλέον, μεγαλύτερα συστήματα που αποτελούνται από αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους συνδυασμένου κύκλου με αεριοποιητές (τεχνολογία BIGCC) , θα μπορούσαν να αυξήσουν την αποδοτικότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό έως και 50%. Όμως προς το παρόν, το κόστος παραγωγής για τα συστήματα αυτά παραμένει ακόμα υψηλό.[12]

4.7.3. Συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ισχύος

Ένα μεγάλο ποσοστό της βιομάζας χρησιμοποιείται για τη θέρμανση νοικοκυριών και βιομηχανιών. Σε χώρες όπου το δίκτυο τηλεθέρμανσης προϋπάρχει, για την παροχή θέρμανσης και ζεστού νερού, τότε μπορεί να γίνει χρήση κάποιων τεχνολογιών συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ισχύος (CHP) με την αντικατάσταση των ήδη υπαρχόντων λεβήτων. Χρησιμοποιώντας συστήματα CHP τα οικονομικά οφέλη είναι αρκετά υψηλά. Πρώτη η Σκανδιναβία ανέπτυξε σύστημα CHP από το 1980, καθώς ακολούθησε και η Δανία με συστήματα μικρότερης κλίμακας σε επίπεδο χωριού. [12]

4.7.4. Παραγωγή καυσίμων

4.7.4.1. Βιοντίζελ

Το πιο ευρέως διαδεδομένο βιοκαύσιμο σε όλο τον κόσμο, το οποίο χρησιμοποιείται είτε μόνο του είτε σε συνδυασμό με το συμβατικό ντίζελ είναι το βιοντίζελ. Το βιοντίζελ σαν καύσιμο είναι καθαρό, μη τοξικό ενώ έχει χαμηλές εκπομπές τοξικών αερίων όπως οξειδίων του θείου, μονοξειδίων του άνθρακα, άκαυστων υδρογονανθράκων και αιθάλης. Επιπλέον, διαθέτει υψηλά ποσοστά σε οξυγόνο, γεγονός που κάνει την καύση του λιγότερο ατελή και περιορισμένη σε ρύπους. Επιπρόσθετα, το ποσοστό εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνει, αφομοιώνεται από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης.

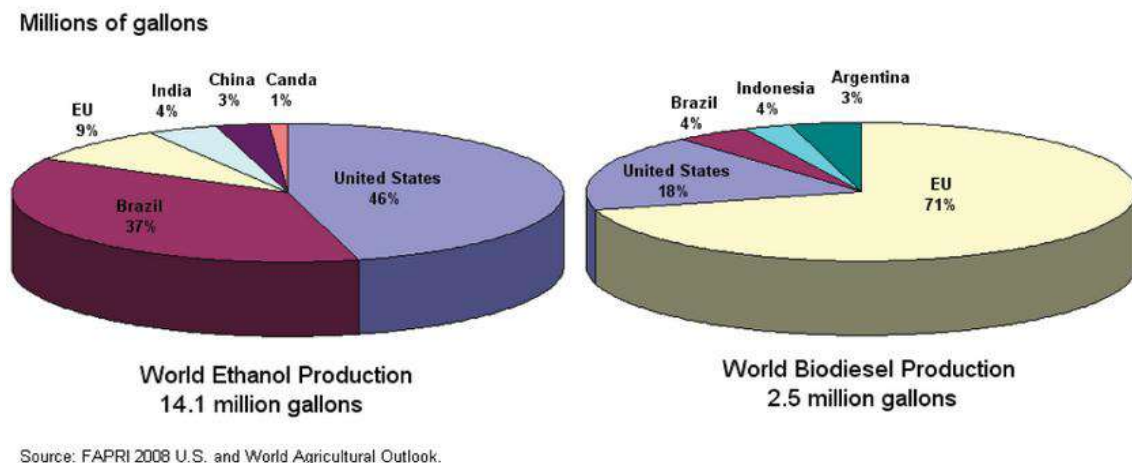
Το βιοντίζελ σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ παρουσιάζει παρόμοιες φυσικοχημικές ιδιότητες, ενώ πλεονεκτεί στο σημείο ανάφλεξής του κάνοντας τη χρήση του ασφαλέστερη. Επιπλέον, περιέχει πιο μικρή ποσότητα θείου, μεγαλύτερη λιπαντική πιθανότητα και μεγαλύτερο αριθμό κετανίου.

Επιπρόσθετα, λόγω της λιπαντικής του ικανότητας, γίνεται ανάμειξη του βιοντίζελ στο πετρελαϊκό ντίζελ από τα διυλιστήρια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επαναφορά της λιπαντικής ικανότητας του καυσίμου και κατ'επέκταση την εξοικονόμηση χρημάτων στα διυλιστήρια από την παράταση ζωής του πετρελαιοκινητήρα. Τέλος, το βιοντίζελ είναι απόλυτα συμβατό με τους ήδη υπάρχοντες πετρελαιοκινητήρες με αποτέλεσμα να μην χρειάζονται καμία μετατροπή ακόμα κι αν αυτό χρησιμοποιείται μόνο του χωρίς πρόσμιξη με το συμβατικό ντίζελ.[4]

4.7.4.2. Βιοαιθανόλη

Η βιοαιθανόλη είναι ένα βιοκαύσιμο, το οποίο χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο της βενζίνης και το οποίο παράγεται με τη μέθοδο της αλκοολικής ζύμωσης. Η βιοαιθανόλη προέρχεται από τη ζύμωση σακχάρων που παράγονται σε ενεργειακές καλλιέργειες όπως το σόργο, τα άχυρα, τα τεύτλα, τα σιτηρά, το καλαμπόκι, το ξύλο ιτιάς και άλλων δέντρων, το πριονίδι, ο μίσχανθος, η αγριαγκινάρα κ.α. Επιπλέον, μελετάται η παραγωγή βιοαιθανόλης από στερεά δημοτικά απόβλητα.

Η βιοαιθανόλη είναι υγρής μορφής, άχρωμη και διαυγής. Επιπλέον, έχει χαμηλή τοξικότητα, είναι βιοαποικοδομήσιμη και δεν προκαλεί ρύπανση του περιβάλλοντος. Με την τέλεια καύση της βιοαιθανόλης παράγεται νερό και διοξείδιο του άνθρακα. Επιπρόσθετα, έχει υψηλό αριθμό οκτανίων και αναμιγνύεται με τη βενζίνη για τον εμπλουτισμό της με οξυγόνο για πιο ολοκληρωμένη καύση και μείωση των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Η ανάμειξη βιοαιθανόλης και βενζίνης χρησιμοποιείται ευρύτατα στις ΗΠΑ με ποσοστό 10% βιοαιθανόλη και 90% βενζίνη (E10). Τα συμβατικά οχήματα για να κινηθούν με E10 χρειάζονται μετατροπή. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η παγκόσμια παραγωγή βιοαιθανόλης και βιοντίζελ.[4]



Σχήμα 130 Παγκόσμια παραγωγή αιθανόλης και βιοντίζελ [20]

4.8. Βιβλιογραφία

1. «Οικονομική αξιολόγηση παραγωγής θερμικής ενέργειας από βιομάζα», Η.Ι. Γουσγουριώτης- Ι.Α. Κατσιγιάννης- Π.Σ. Γεωργιάκης
2. «Πολυετείς ενεργειακές καλλιέργειες στην Ελλάδα- Τομέας Βιομάζας», Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας- ΚΑΠΕ 1998
3. «Ενεργειακή αξιοποίηση δασικής βιομάζας: Η περίπτωση του Μετσόβου», Διπλωματική εργασία Μπουτέτσιου Ελένη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Μέτσοβο , Οκτώβριος 2010
4. «Τα βιοκαύσιμα ως εναλλακτική πηγή ενέργειας- Η περιβαλλοντική τους διάσταση», Διπλωματική εργασία Δούσης Παναγιώτης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Φεβρουάριος 2010
5. «Αξιοποίηση της βιομάζας στον ελλαδικό χώρο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας», Διπλωματική εργασία Αντώνιος Π. Γεωργιάδης- Σωτήριος Β. Σωτηρίου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα , Ιούλιος 2011
6. «Αξιοποίηση βιοαερίου για παραγωγή ενέργειας και δυνατότητα ανατροφοδότησης στο δίκτυο φυσικού αερίου», Διπλωματική εργασία Σταυριανή Ν. Ρογκάκου, Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά , Οκτώβριος 2012
7. «Εισαγωγή στην ενεργειακή τεχνολογία- Ενέργεια από βιομάζα», Αλεξάνδρα Κατσίρη, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα , 2010-2011
8. «Ενεργειακά φυτά και βιοκαύσιμα», Διπλωματική εργασία Φίνος Λουκάς, Αλεξάνδρειο τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Θεσσαλονίκης , Θεσσαλονίκη
9. «Τεχνολογίες αξιοποίησης βιομάζας για την παραγωγή θερμικής ή/και ηλεκτρικής ενέργειας», Εμμανουήλ Κακαράς- Παναγιώτης Γραμμέλης- Κυριάκος Πανόπουλος- Σωτήρης Καρέλας- Μιχάλης Αγρανιώτης- Εμμανουήλ Καραμπίνης, Εβδομάδα Ενέργειας , Αθήνα , Νοέμβριος 2010
10. «Βιοκαύσιμα και ενεργειακές καλλιέργειες», Κ.Κίττας- Θ. Γέμτος- Σ. Φουντάς- Θ. Μπαρτζάνας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας , Βόλος
11. «Τεχνολογίες αξιοποίησης βιομάζας», Μ. Φούντη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο , Αθήνα
12. «Βιομάζα: Εναλλακτική πηγή ενέργειας για τη μείωση κόστους παραγωγής αγροτικών προϊόντων», Ανδρέας Στοϊμενίδης- Θωμάς Κωτσόπουλος- Γεράσιμος Μαρτζόπουλος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
13. «Ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας», Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας- Τμήμα Μηχανικών διαχείρισης ενεργειακών πόρων , Πτολεμαΐδα , Δεκεμβρίου 2007
14. «Σχεδιασμός και τεχνικοοικονομική αξιολόγηση μονάδων αξιοποίησης βιομάζας, σύγκριση με αντίστοιχες μονάδες συμβατικών στερεών καυσίμων», Διπλωματική

- εργασία Γεώργιος Παπακωνσταντόπουλος, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Πειραιάς, Μάιος 2012
15. «Παραγωγή βιοκαυσίμων στην Ελλάδα», Διπλωματική εργασία Μπόγια Ιωάννα, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2011
 16. Ανάπτυξη διβάθμιου συστήματος παραγωγής βιοαερίου από στερεά απόβλητα και βιομάζα», Διδακτορική διατριβή Κωνσταντίνος Γ. Δραβίλλας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2007
 17. «Χρήση φυτικών υπολειμάτων για την παραγωγή εναλλακτικής ενέργειας», Πτυχιακή εργασία Παπαϊωάννου Αθηνάς, Αλεξάνδρειο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2013
 18. «Σχεδιασμός φωτοβολταϊκών συστημάτων και διασύνδεση αυτών στο δίκτυο διανομής», Διπλωματική εργασία Κωνσταντίνου Α. Κοτινά- Αγγέλου Β. Μουζάκη- Χριστοπούλου, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ιούνιος 2010
 19. «Δυναμικό, προέλευση και χρήσεις της βιομάζας ξυλείας στην Κύπρο και αξιολόγηση των κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων», Πτυχιακή εργασία Άννα Σοφοκλέους, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός, 2012
 20. «Το δυναμικό της βιομάζας στην Ελλάδα και στην Ευρώπη», Διπλωματική εργασία Απόστολος Νεστοράτος- Γεώργιος- Ανέστης Στάθης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 2012
 21. <http://www.cres.gr/kape/index.htm>
 22. <http://www.admie.gr/>
 23. <http://www.desmie.gr/>
 24. «Energy Policies of IEA Countries- Greece», International Energy Agency- IEA, Review 2011
 25. «Annual report 2013», European Biomass Association AEBIOM, 2013
 26. «European Bioenergy Outlook», European Biomass Association AEBIOM, 2014
 27. <http://www.aebiom.org/>
 28. <http://www.iea.org/>
 29. <http://www.globalbioenergy.org/bioenergyinfo/global-initiatives/en/>
 30. <http://www.ypeka.gr/Default.aspx>