

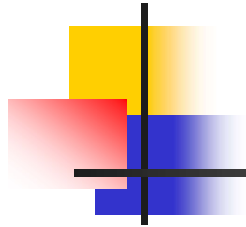
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜ. ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Ενεργειακή Διαχείριση & Εξοικονόμηση Ενέργειας

ΔΙΑΛΕΞΗ 11: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΕ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ
ΜΕΡΟΣ Β

Δρ. Τριανταφυλλιά Νικολάου

Βιβλιογραφία: Ι. Κατσίγιαννης, Σεμινάρια Ενεργειακών Επιθεωρητών ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ



4. Συστήματα Βιομάζας

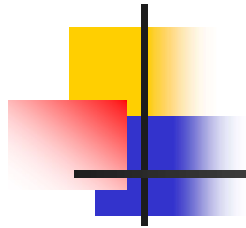


Τι είναι η βιομάζα

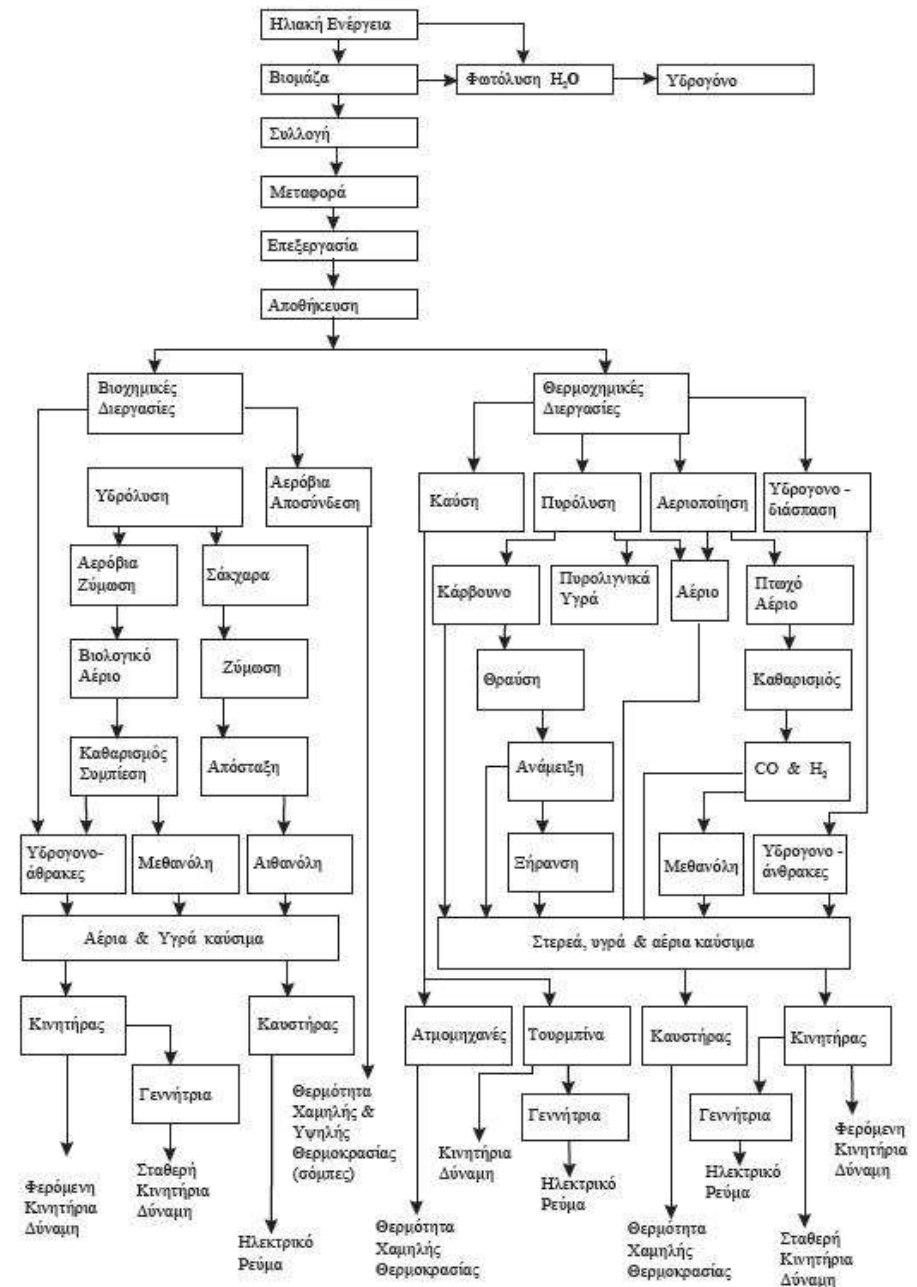
Η βιομάζα αποτελεί μία βασική πηγή ενέργειας και προέρχεται από την εκμετάλλευση φυτικών, ζωικών και δασικών προϊόντων και υπολειμμάτων, αστικών λυμάτων και απορριμμάτων για την παραγωγή ενέργειας. Συγκεκριμένα η βιομάζα προέρχεται από:

- προϊόντα, υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυτικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής
- υποπροϊόντα που προέρχονται από την επεξεργασία των υλικών αυτών
- αστικά λύματα και απορρίμματα (υγρά και στερεά οργανικά απόβλητα)
- φυσικές ύλες που προέρχονται από φυσικά ή τεχνητά οικοσυστήματα (δάση, φυτά)

Διαδικασία παρασκευής βιομάζας



Η βιομάζα παράγεται από τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας, με βασικές πρώτες ύλες το νερό και τον άνθρακα. Από την επεξεργασία της βιομάζας παράγονται στερεά, υγρά και αέρια καύσιμα, για παραγωγή λιπασμάτων, τροφών και βιομηχανικών υλικών.



Μέθοδοι ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας

Θερμοχημικές (ξηρές) διεργασίες: Αντιδράσεις που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Χρησιμοποιούνται για τα είδη της βιομάζας με αναλογία άνθρακα και αζώτου μεγαλύτερη από 30 και υγρασία μικρότερη από 50%

- **Απευθείας καύση:** Είναι η πιο ανεπτυγμένη και διαδεδομένη τεχνολογία. Εκτός των άλλων, χρησιμοποιούνται σκουπίδια και άλλου είδους απόβλητα σε αρκετά εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής, με θερμογόνο δύναμη το 24% του άνθρακα
- **Πυρόλυση:** Ενδόθερμη διαδικασία, κατά την οποία τα σώματα θερμαίνονται, απουσία οξυγόνου, σε υψηλές θερμοκρασίες, που κυμαίνονται από 500÷600°C και πίεση λίγο μεγαλύτερη της 1 Atm. Παράγει βιοάνθρακα (θερμογόνο δύναμη 22÷33 MJ/kg), βιοέλαιο (20÷30 MJ/kg) και βιοαέριο (7÷10 MJ/kg)
- **Αεριοποίηση:** Θέρμανση παρουσία περιορισμένων ποσοτήτων οξυγόνου ή αέρα με σκοπό την μέγιστη απελευθέρωση μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και H₂. Ακολουθεί την πυρόλυση και παράγει μίγμα αερίων θερμογόνου δύναμης 4÷7 MJ/m³. Απόδοση μεθόδου 60÷70%
- **Υδρογονοδιάσπαση:** Αντίδραση H₂ με τη βιομάζα προς παραγωγή μεθανίου και αιθανίου



Μέθοδοι ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας

Βιοχημικές (υγρές) διεργασίες: Είναι αποτέλεσμα μικροβιακής δράσης. Χρησιμοποιούνται για προϊόντα και υπολείμματα, όπως λαχανικά, κοπριά, κ.λπ., με αναλογία άνθρακα και αζώτου μικρότερη από 30 και υγρασία μεγαλύτερη από 50%

- **Αερόβια χώνευση** από μικροοργανισμούς (παρουσία αέρα)
- **Αναερόβια χώνευση** από μικροοργανισμούς (απουσία αέρα), π.χ., αναερόβια μετατροπή της κυτταρίνης, αναερόβια επεξεργασία αστικών λυμάτων
- **Αλκοολική ζύμωση:** Διάσπαση της γλυκόζης (περιέχεται σε αγροτικά και δασικά προϊόντα και υποπροϊόντα που μένουν ανεκμετάλλευτα, π.χ., υπολείμματα των σιτηρών και του αραβόσιτου) και παραγωγή βιοαιθανόλης



Γιατί η βιομάζα δεν συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου;

- Η καύση της βιομάζας παράγει την ίδια ποσότητα CO₂ με τα ορυκτά καύσιμα, που είναι όμως περίπου η ίδια με αυτή που έχει απορροφήσει το φυτό κατά τη διάρκεια ανάπτυξής του, μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. ($6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$)
Προϋποθέσεις: Επανακαλλιέργεια και ενυπολογισμός χρόνου ανάπτυξης φυτού
- Σε μερικές περιπτώσεις (πυρόλυση, αεριοποίηση) μπορεί και να υπάρχει αρνητικό ισοζύγιο παραγωγής CO₂



Θερμαντική αξία βιομάζας

Χαρακτηριστικά	Θερμαντική αξία (MJ/kg)
Αγριαγκινάρα	14,5
Ευκάλυπτος	19,0
Καλάμι	18,6
Κλαδοδέματα ελιάς	22,0
Μίσχανθος	17,3
Σόγια	21,0
Υπολείμματα αμυγδαλιάς	18,9
Υπολείμματα βελανιδιάς	19,8
Υπολείμματα καπνού	15,3
Υπολείμματα μηλιάς	26,3



Καλλιέργεια αγριαγκινάρας

- Από την φυτική βιομάζα που αναπτύσσεται στην Ελλάδα, η αγριαγκινάρα θεωρείται το πιο ενεργειακό φυτό, καθώς είναι πολυετές (άνω των 7 ετών) και με μεγάλη απόδοση παραγωγή βιομάζας από 1200 έως 3000 kg/στρέμμα, ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας, ποτιστική ή μη
- Επιπλέον, η καλλιέργεια αγριαγκινάρας έχει ελάχιστες απαιτήσεις σε λίπασμα και καθόλου ζιζανιοκτόνα, διότι το ίδιο το φυτό είναι ισχυρό ζιζάνιο (εισβολέας)



Παραγωγή θερμικής ενέργειας από βιομάζα

- Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση κτιρίων με:
 - Τζάκι
 - Σόμπα
 - Σύστημα κεντρικής θέρμανσης
- Πολλά σπίτια χρησιμοποιούν για θέρμανση τζάκια ή σόμπες με την καύση ξύλων
- Ενώ τα παλαιότερα τζάκια/σόμπες είχαν χαμηλούς βαθμούς απόδοσης, τα σύγχρονα τζάκια/σόμπες έχουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση ολόκληρης της κατοικίας



Ενεργειακά τζάκια

- Τα ενεργειακά τζάκια μπορούν να τροφοδοτήσουν με θερμό νερό και μια κεντρική εγκατάσταση θέρμανσης με δίκτυο διανομής και τερματικές μονάδες απόδοσης θερμότητας όπως τα κλασικά σώματα ακτινοβολίας (άβακες-radiators), η οποία μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις θέρμανσης μιας μέσης κατοικίας
- Στην περίπτωση αυτή η εστία καύσης (τζάκι) διαθέτει ενσωματωμένο εναλλάκτη νερού, ο οποίος τοποθετείται μετά τον χώρο καύσης και πριν τον καπναγωγό της εστίας, μέσω του οποίου κυκλοφορεί το θερμό νερό που τροφοδοτεί το δίκτυο διανομής της κεντρικής εγκατάστασης θέρμανσης
- Τα ενεργειακά τζάκια μπορούν να καταναλώνουν κάθε τύπο στερεάς βιομάζας, τυποποιημένης ή μη



Αποδόσεις σε τζάκια/σόμπες

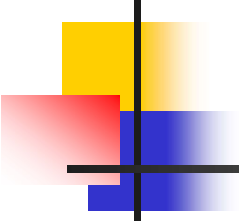
Τζάκια	Απόδοση	Σόμπες	Απόδοση
Ανοικτής εστίας	0,1	Μη αεροστεγής	0,3
Ανοικτής εστίας με φυσική κυκλοφορία ζεστού αέρα	0,2	Αεροστεγής	0,5
Κλειστής εστίας με φυσική ή τεχνητή κυκλοφορία αέρα ή νερού	0,7	Αντίστροφης έλξης καυσαερίων, με θυρίδες	0,6
Κλειστής εστίας με προθέρμανση αέρα	0,8	Αεροστεγής με καταλυτικό φίλτρο	0,9

Ενεργειακό τζάκι



Ενεργειακή σόμπα





Παραγωγή θερμικής ενέργειας από βιομάζα

- Για την παραγωγή θερμικής ενέργειας στα κτίρια πέρα από τα τζάκια/σόμπες, η πιο κατάλληλη εφαρμογή καύσης βιομάζας είναι οι λέβητες στερεών βιοκαυσίμων
- Οι λέβητες αυτοί καταναλώνουν κυρίως υποπροϊόντα ξύλου ή βιοκαυσίμων όπως είναι:
 - τα θρύμματα ξύλου (wood chips)
 - τα συσσωματώματα ξύλου (wood pellets)



Θρύμματα ξύλου (wood chips)

- Τα θρύμματα βιοκαυσίμων είναι μικρά τεμάχια ξύλου μήκους 5÷50mm
- Η ποιότητα των θρυμμάτων εξαρτάται από την πρώτη ύλη και την διαδικασία παραγωγής
- Τα θρύμματα ξύλου διαχωρίζονται σε τρεις βασικούς τύπους



Τύποι θρυμμάτων ξύλου

- **Θρύμματα από δασικά υπολείμματα:** κλαδιά, κορυφές δέντρων και κορμοί δένδρων. Αυτά τα θρύμματα είναι κατάλληλα για μεγάλους λέβητες κυρίως τηλεθέρμανσης
- **Θρύμματα από βιομάζα που παράγονται σε πριονιστήρια:** έχουν καλύτερες ιδιότητες καύσης αλλά είναι πολύ υγρά και δεν ενδείκνυται για μικρούς λέβητες
- **Θρύμματα βιομάζας από αραίωμα χωρίς κλαδιά και φύλλα που περνάνε από διαδικασία ξήρανσης πριν το θρυμματίσματος:** η υγρασία τους είναι περίπου 30% και το μέγεθός τους ποικίλει ανάλογα την διαδικασία θρυμματίσματος. Είναι κατάλληλα για όλους τους λέβητες. Μικρού μεγέθους θρύμματα εφαρμόζονται σε μικρής ισχύος λέβητες



Θρύμματα ξύλου (wood chips)





Χαρακτηριστικά θρυμμάτων ξύλου

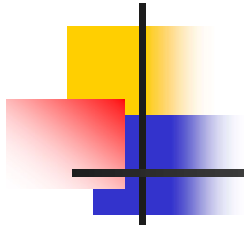
- Είναι διαθέσιμα τοπικά
- Η παραγωγή τους ενισχύει την τοπική αγορά εργασίας
- Είναι πιο φθηνά από τα συσσωματώματα
- Απαιτούν μεγαλύτερο χώρο αποθήκευσης
- Δεν υπάρχει ομοιομορφία στο καύσιμο και κατά συνέπεια καλή ποιότητα καύσης
- Απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για τη λειτουργία και συντήρηση του συστήματος θέρμανσης



Συσσωματώματα ξύλου (wood pellets)

- Τα συσσωματώματα ξύλου είναι τυποποιημένο κυλινδρικό βιολογικό καύσιμο που παρασκευάζεται με την συμπίεση ξηρών πριονιδιών, ή/και σκόνη ξύλου, ή/και μικρών τεμαχιδίων, τα οποία προέρχονται από καθαρά υπολείμματα ξύλου, κυρίως βιομηχανιών επεξεργασίας ξύλου
- Για την παραγωγική διαδικασία των συσσωματωμάτων δεν χρησιμοποιούνται κόλλες, ή άλλα χημικά πρόσθετα, παρά μόνο υψηλή συμπίεση και ατμός
- Σε ορισμένες διαδικασίες παραγωγής, χρησιμοποιούνται βιολογικά πρόσθετα σε μικρή περιεκτικότητα

Συσσωματώματα ξύλου (wood pellets)





Χαρακτηριστικά συσσωματωμάτων ξύλου

- Είναι προϊόν βιομηχανίας και συνήθως δεν υπάρχει διαθέσιμο τοπικά
- Λιγότερα οφέλη για την τοπική κοινωνία
- Έχουν μεγαλύτερο κόστος (βιομηχανικό προϊόν)
- Απαιτούν μικρότερο χώρο αποθήκευσης (περίπου το 1/3)
- Η ομοιομορφία στο καύσιμο είναι αρκετά καλή και συντελεί στην καλή ποιότητα καύσης και την υψηλή αξιοπιστία
- Έχουν αυξημένη θερμογόνο δύναμη σε σχέση με τα θρύμματα



Χαρακτηριστικά συσσωματωμάτων ξύλου

- Τα συστήματα θέρμανσης έχουν λιγότερες απαιτήσεις για τη λειτουργία και συντήρησή τους
- Περιέχουν λιγότερη υγρασία
- Παράγουν λιγότερη στάχτη
- Τα συσσωματώματα πρέπει να μην περιέχουν άλλα συστατικά ή προσμίξεις που αυξάνουν σημαντικά το ποσό της στάχτης, καθώς και να έχουν συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες, ώστε να μη θρυμματίζονται εύκολα σε σκόνη
- Για το λόγο αυτό, σε πολλές χώρες υπάρχουν πρότυπα για την ποιότητα των συσσωματωμάτων



Τυπικές τιμές ιδιοτήτων συσσωματωμάτων και θρυμμάτων

Χαρακτηριστικά	Θρύμματα ξύλου	Συσσωματώματα ξύλου
Θερμογόνος δύναμη (GJ/tn)	13,4	17,0
Θερμογόνος δύναμη (kWh/kg)	3,7	4,7
Θερμογόνος δύναμη (kWh/m ³)	744	3077
Υγρασία	30%	8%
Πυκνότητα (kg/m ³)	200	650
Τέφρα	1,0%	0,5%



Λέβητες καύσης στερεάς βιομάζας

- Οι λέβητες καύσης στερεάς βιομάζας που υπάρχουν διαθέσιμοι στην αγορά είναι υψηλής τεχνολογίας και μπορούν να καλύψουν τόσο το φορτία αιχμής όσο και τα μερικά φορτία
- Παρόλα αυτά, είναι προτιμότερο να κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος θέρμανσης σε κτιριακές εγκαταστάσεις, να προτιμάται η εγκατάσταση δύο αντί ενός λέβητα στην περίπτωση που υπάρχει έντονη διακύμανση φορτίου
- Οι σύγχρονοι λέβητες στερεάς βιομάζας ισχύος 50÷500 kW (40.000÷ 500.000 kcal/h)



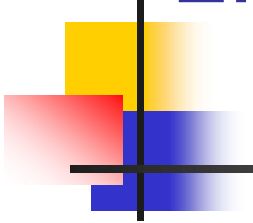
Χαρακτηριστικά λεβήτων καύσης στερεάς βιομάζας

- Απόδοση καύσης >85%
- Χαμηλές εκπομπές αερίων ρύπων μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και τέφρας σε πλήρες φορτίο
- Δυνατότητα διακύμανσης της αποδιδόμενης ισχύος ανάλογα το απαιτούμενο φορτίο
- Δυνατότητα ελέγχου της καύσης μέσω τηλεχειρισμού
- Αυτοματοποιημένη λειτουργία για ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων συντήρησης
- Κατάλληλοι για λειτουργία και σε κτίρια κατοικιών



Κόστος λεβήτων καύσης στερεάς βιομάζας

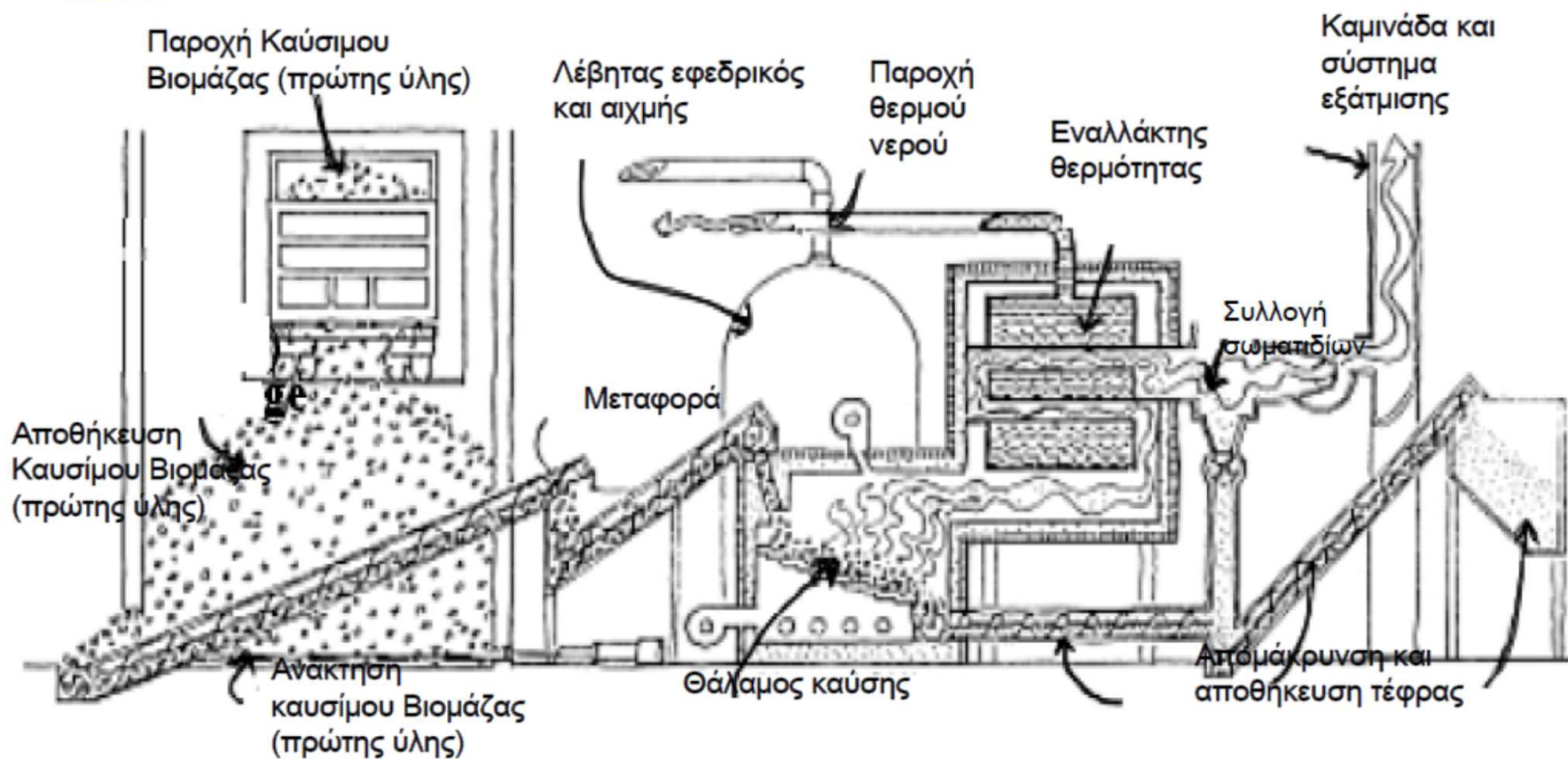
- Το κόστος των μονάδων λεβήτων με στερεά βιομάζα είναι 2÷3 φορές μεγαλύτερο σε σχέση με τους συμβατικούς λέβητες πετρελαίου και φυσικού αερίου (120÷200€/kW), ανάλογα την θερμική ισχύ
- Ταυτόχρονα απαιτείται η διαμόρφωση χώρου αποθήκευσης της βιομάζας, κατασκευή η οποία αυξάνει σημαντικά τα αρχικό κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης



Εκπομπές ρύπων από καμινάδες λεβήτων (500÷600 kW)

Εκπομπές (mg/m ³ καυσαερίων)	SO ₂	NO _x	Τέφρα	CO	NMVOC
Λέβητας πετρελαίου	130	78.2	0	2.3	<3
Λέβητας αερίου	0	44.5	0	14.8	0
Λέβητας συμπύκνωσης αερίου	0	12.2	0	7.4	0
Λέβητας θρυμμάτων ξύλου	27	81	24	6	<1

Περιγραφή συστήματος λέβητα καύσης στερεάς βιομάζας



Λέβητας καύσης στερεάς βιομάζας – τροφοδοσία από αυτόματο κοχλία



Μεταφορά και αποθήκευση βιομάζας



Μεταφορά και αποθήκευση βιομάζας



Μεταφορά και αποθήκευση βιομάζας





Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα

- Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα στα κτίρια, χρησιμοποιούνται κυρίως συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ) με τυπική τεχνολογία ατμοστρόβιλων
- Οι μικρού μεγέθους ατμοστρόβιλοι (<25 MW) είναι συνήθως ακριβοί και με μικρές αποδόσεις
- Πολύ μεγάλες μονάδες ατμοστρόβιλων μπορεί να έχουν 30÷40% ηλεκτρική απόδοση
- Σήμερα αναπτύσσονται συνεχώς νέας τεχνολογίας συστήματα προκειμένου να αυξηθεί η απόδοσή τους



Συστήματα ΣΗΘ

- Ενδείκνυται σε περιπτώσεις κτιρίων των οποίων τα θερμικά φορτία είναι τουλάχιστον 50% μεγαλύτερα από τα ηλεκτρικά φορτία (π.χ., νοσοκομεία, ξενοδοχεία, κλπ)
- Η θερμότητα που παράγεται από ένα σύστημα ΣΗΘ μπορεί να αξιοποιηθεί για τη θέρμανση χώρων ή/και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης ή/και την ψύξη χώρων (μέσω μονάδας απορρόφησης)
- Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μπορεί να καλύψει τις ηλεκτρικές ανάγκες για ηλεκτρικές συσκευές, φωτισμό, κλπ



Κόστος συστημάτων ΣΗΘ

- Το κόστος κυμαίνεται ανάμεσα στις 2500-5000 €/kW_e, ανάλογα με το αν το σύστημα είναι διασυνδεδεμένο στο δίκτυο ή αυτόνομο (οπότε και απαιτούνται συσσωρευτές)
- Για κάθε 1 kWh_e (ηλεκτρικής ενέργειας) παράγονται περίπου 2 kWh_{th} (θερμικής ενέργειας)



Τύποι συστημάτων ΣΗΘ

- Υπάρχουν μονάδες συμπαραγωγής με κινητήρα εσωτερικής καύσης που λειτουργούν με φυσικό αέριο, Diesel, προπάνιο, ή βιοαέριο
- Υπάρχουν επίσης τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ξηρή βιομάζα με επικρατέστερο καύσιμο το πυρηνόξυλο λόγω της υψηλής θερμογόνου δύναμης που διαθέτει

Χαρακτηριστικά και κόστος αγοράς καυσίμων ΣΗΘ (έτος 2011)

Είδος καυσίμου	Θερμογόνος δύναμη	Κόστος	Ενδεικτικό κόστος (€/kWh)
Πετρέλαιο κίνησης	8700kcal/lt	1,52€/lt	0,150
Πετρέλαιο θέρμανσης	8400kcal/lt	0,92€/lt	0,091
Φυσικό αέριο	8900kcal/m ³	0,72€/m ³	0,073
Προπάνιο	10300kcal/kg	0,65€/kg	0,085
Πυρηνόξυλο	3700kcal/kg	0,045€/kg	0,010
Βιαέριο	2500÷5500kcal/m ³	Ανάλογα με την τεχνολογία παραγωγής	
Βιομάζα	3000÷4000kcal/kg	0,09€/kg	0,021
Τυποποιημένη Βιομάζα	3500÷5000kcal/kg	0,30€/kg	0,070



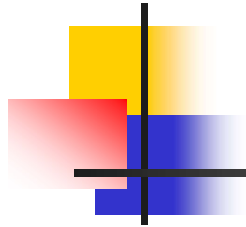
Χαρακτηριστικά συστημάτων ΣΗΘ εσωτερικής καύσης

- Χρησιμοποιούν κινητήρες εσωτερικής καύσεως που υπάρχουν διαθέσιμοι στο εμπόριο και παρουσιάζουν αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης
- Η ισχύς τους κυμαίνεται από μερικά kW έως 2MW, και για τον λόγο αυτό θεωρούνται τα πλέον κατάλληλα για ιδιωτικές εφαρμογές
- Μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες σε:
 - Κατοικίες
 - Επιχειρήσεις
 - Ξενοδοχεία
 - Νοσοκομεία
 - Εργοστάσια
 - ...



Πλεονεκτήματα συστημάτων ΣΗΘ εσωτερικής καύσης

- Είναι συστήματα που μπορούν να λειτουργούν συνεχώς και χωρίς μεγάλο θόρυβο
- Δεν παρουσιάζουν προβλήματα κατά τις αλλαγές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος όπως για παράδειγμα τα συστήματα αεριοστροβίλων
- Το κόστος είναι σχετικά χαμηλό και φτάνει περίπου τα 500 €/kW_e, εκτός στερεάς βιομάζας
- Το κόστος συντήρησης είναι πολύ χαμηλό, και απαιτείται κάθε 4000 ώρες λειτουργίας
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, πάνω από 60.000 ώρες
- Σύντομος χρόνος εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος



5. Συστήματα Κανονικής Γεωθερμίας



Γεωθερμική ενέργεια

- Με τον όρο "γεωθερμική ενέργεια" περιγράφεται η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης
- Η ενέργεια αυτή φθάνει στην επιφάνεια της γης και στη συνέχεια ακτινοβολείται στο διάστημα, παράλληλα αποθηκεύεται και σε υπόγειους ή επιφανειακούς σχηματισμούς με τη μορφή θερμών ατμών, υπόγειων θερμών νερών καθώς και θερμών ξηρών πετρωμάτων
- Η θερμοκρασία του υπεδάφους αυξάνεται από την επιφάνεια προς το εσωτερικό της γης
- Η κανονική γεωθερμική βαθμίδα είναι περίπου 1°C ανά 30m
- Σημαντικό πλεονέκτημα της γεωθερμικής ενέργειας έναντι των λοιπών ΑΠΕ είναι η μόνιμη παροχή ενέργειας καθ' όλο το έτος, χωρίς διακυμάνσεις



Γεωθερμικά πεδία

Ανάλογα με τη θερμοκρασία του υπεδάφους ή του ρευστού χωρίζονται σε:

- **Υψηλής Ενθαλπίας**, όταν η θερμοκρασία των παραγόμενων ρευστών ξεπερνά τους 150°C. Τα ρευστά αυτά αποτελούνται στις περισσότερες περιπτώσεις από μίγμα υγρού ατμού και θερμού νερού
- **Μέσης Ενθαλπίας**, με θερμοκρασίες ρευστών μεταξύ 150 ÷ 100°C
- **Χαμηλής Ενθαλπίας**, με θερμοκρασίες ρευστών μεταξύ 100 ÷ 25°C
- **Περιβαλλοντική, Κανονική, Ομαλή, Αβαθής, ή Πολύ Χαμηλής Ενθαλπίας**, με θερμοκρασίες αντίστοιχες των μέσων ετησίων του αέρα περιβάλλοντος – συνήθως μικρότερες των 25°C
- **Παγετός, Πάρα Πολύ Χαμηλής Ενθαλπίας, ή Permafrost**, με θερμοκρασίες μικρότερες των 0°C)



Γεωθερμικός κλιματισμός

- Ο γεωθερμικός κλιματισμός (θέρμανση και ψύξη) χώρων με χρήση της θερμότητας της γης άρχισε να αναπτύσσεται σημαντικά τη δεκαετία του 1980, ακολουθώντας την εμφάνιση και την ευρεία διάδοση των αντλιών θερμότητας (heat pumps)
- Οι πολλοί διαθέσιμοι τύποι αντλιών θερμότητας επιτρέπουν την εκμετάλλευση με οικονομικό τρόπο του θερμικού περιεχομένου υλικών χαμηλής θερμοκρασίας, όπως είναι το έδαφος ή οι ρηχοί υδροφόροι ορίζοντες και οι τεχνητές ή φυσικές συγκεντρώσεις νερού (θάλασσα, λίμνες, δεξαμενές νερού, κλπ)
- Η αρχή λειτουργίας των γεωθερμικών συστημάτων θέρμανσης & ψύξης κτηρίων, βασίζεται στην εκμετάλλευση της θερμότητας της γης



Χαρακτηριστικά υπεδάφους

- Στο υπέδαφος κάθε τόπου η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν σταθερή όλο το έτος, χωρίς έντονες διακυμάνσεις
- Η θερμοχωρητικότητα των υλικών του υπεδάφους είναι ιδιαίτερα υψηλή και συγκρινόμενη με την θερμοχωρητικότητα του αέρα, που αποτελεί την κύρια πηγή θερμότητας για τις αντλίες θερμότητας που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις κλιματισμού, θεωρείται ότι τείνει στο άπειρο
- Επομένως, δημιουργείται η δυνατότητα άντλησης ή απορρόφησης μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας στο υπέδαφος, χωρίς να μεταβάλλονται οι θερμοκρασιακές του συνθήκες



Δομή γεωθερμικών εφαρμογών κανονικής γεωθερμίας

Οι γεωθερμικές εφαρμογές (κανονικής γεωθερμίας) για θέρμανση/ψύξη κτηρίων αποτελούνται από τρία κύρια μέρη:

- Την αντλία θερμότητας (ΑΘ)
- Τη σύνδεση με τη γη (διατάξεις με εναλλάκτες θερμότητας)
- Το σύστημα διανομής κλιματισμού (θέρμανσης/ψύξης και ζεστού νερού χρήσης) στο εσωτερικό του κτηρίου

Η αρχή λειτουργίας των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας είναι η αυτή με των εγκαταστάσεων κλιματισμού με πηγή τον αέρα ή με ενδιάμεσο μέσο το νερό με την ιδιαιτερότητα ότι στην περίπτωση της γης το σύστημα κλιματισμού υπόκειται σε ειδικούς περιορισμούς



Σύγκριση θερμοκρασιών υπεδάφους και περιβάλλοντος

- Στην Ελλάδα, η μέση ετήσια τιμή της θερμοκρασίας του υπεδάφους, σε βάθος $>2\text{m}$, είναι της τάξης των $16\div 20^{\circ}\text{C}$
- Αντίστοιχα, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος το **θέρος** μπορεί να φτάσει και τους $40\div 42^{\circ}\text{C}$, ενώ το **χειμώνα** τους $0\div 2^{\circ}\text{C}$
- Η αξία των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας ορίζεται ακριβώς από το γεγονός ότι η σταθερότητα της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας στο υπέδαφος και η διατήρησή της στη μέση ετήσια τιμή της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος συντελεί στη λειτουργία των αντλιών θερμότητας σε **υψηλούς βαθμούς απόδοσης**



Στοιχεία αντλιών θερμότητας

- Οι βασικοί συντελεστές που χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση των αντλιών θερμότητας είναι ο **COP** (συντελεστής απόδοσης θερμότητας), ο **EER** (παράγοντας απόδοσης ψύξης), και ο **SEER** (αναλογία ενεργειακής αποδοτικότητας εποχικής περιόδου)
- Ο COP και ο EER δείχνουν αντίστοιχα την αναλογία της θέρμανσης ή της ψύξης που παρέχεται από μια μονάδα σχετικά με το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για να την παραγάγει
- Ο συντελεστής SEER δίνει το λόγο της θερμικής ενέργειας που παρήγαγε η αντλία θερμότητας, προς την ενέργεια που κατανάλωσε μέσα σε ένα έτος ή σε μια εποχή λειτουργίας θέρμανσης ή και ψύξης



Στοιχεία αντλιών θερμότητας

- Οι αντλίες θερμότητας είναι συσκευές που λειτουργούν όπως τα κοινά ψυγεία. Η μόνη διαφορά εντοπίζεται στην αντιστρέψιμη λειτουργία των αντλιών θερμότητας, δηλαδή στην ικανότητά τους να παρέχουν τόσο ψύξη όσο και θέρμανση
- Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας στο διάστημα $0\div 30^{\circ}\text{C}$ και όσο περισσότερο αυτή πλησιάζει τη θερμοκρασία χρήσης, τόσο υψηλότερος είναι και ο συντελεστής COP (EER)
- Επειδή ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας εξαρτάται κατά σημαντικό ποσοστό από τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, δηλαδή του περιβάλλοντα αέρα ή της διαθέσιμης λιθογραφικής μάζας, η τιμή του COP δεν είναι σταθερή

Γεωλογικοί παράμετροι που επιδρούν στα θερμικά χαρακτηριστικά εδαφών και πετρωμάτων

- Τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών
- Τα φυσικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων
- Η πραγματική πυκνότητα ή ειδικό βάρος (particle or true density)
- Η φαινόμενη πυκνότητα ή το βάρος ανά μονάδα όγκου (bulk density)
- Το πορώδες του εδάφους (porosity)
- Η υγρασία του εδάφους (soil moisture content)
- Η ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό (volumetric water content)
- Η ειδική θερμότητα (specific heat capacity)
- Η ειδική θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity)
- Η ειδική θερμική διαχυτότητα (thermal diffusivity)



Μέση ειδική θερμοχωρητικότητα των εδαφών, C (J/m³/K)

Ορίζεται ως το άθροισμα των θερμοχωρητικοτήτων των συστατικών από τα οποία αποτελείται το έδαφος

$$C = m_s \times c_s + m_w \times c_w + m_a \times c_a + m_o \times c_o$$

"m_s" η μάζα (kg) των στερεών συστατικών του εδάφους

"c_s" η ειδική θερμότητα (J/kg/K) του ξηρού εδάφους (μπορεί να θεωρηθεί σταθερή στην τιμή των 0,73kJ/kg/K)

"m_w" η μάζα (kg) του εδαφικού νερού

"c_w" η ειδική θερμότητα (J/kg/K) του νερού που περιέχεται στους πόρους του εδάφους

"m_a" η μάζα (kg) του αέρα που περιέχεται στο έδαφος

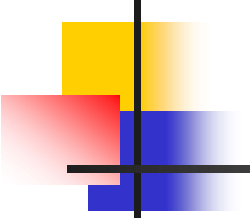
"c_a" η ειδική θερμότητα (J/kg/K) αέρα που υπάρχει στους πόρους

"m_o" η μάζα (kg) της οργανικής ύλης

"c_o" η ειδική θερμότητα (J/kg/K) της οργανικής ύλης του εδάφους

Τιμές των θερμικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών

Υλικό	Φαινόμενη πυκνότητα (*10 ³ kg/m ³)	Ειδική θερμότητα (J/kg/K)	Θερμοχωρητικότητα (*10 ³ J/m ³ /K)	Θερμική αγωγιμότητα (W/m/K)
Χαλαζίας	2,65	733	1942	8,4
Εδάφη	2,65	733	1942	2,9
Εδάφη με οργανική ύλη	1,30	1926	2503	0,25
Νερό	1,00	4186	4186	0,6
Πάγος	0,900.	2093	1883	2,5
Αέρας	0,0012	1005	1,20	0,026



Συστήματα αξιοποίησης γεωθερμίας σε κτήρια

Για την εκμετάλλευση του εδάφους ως πηγής θερμότητας (ή απόρριψης θερμότητας) χρησιμοποιούνται οι παρακάτω διατάξεις:

- **Κλειστά Συστήματα:** είναι οι γεωθερμικοί εναλλάκτες κλειστού κυκλώματος που σκοπό έχουν την συναλλαγή θερμότητας με το έδαφος. Είναι κατασκευασμένοι από δίκτυα σωληνώσεων εντός του εδάφους όπου κυκλοφορεί διάλυμα νερού – γλυκόλης. Διακρίνονται σε:
 - Οριζόντιους γεωθερμικούς εναλλάκτες θερμότητας
 - Κατακόρυφους γεωθερμικούς εναλλάκτες θερμότητας
- **Ανοιχτά συστήματα:** βασίζονται στην άντληση των υπεδαφικών ή επιφανειακών υδάτων και εκμετάλλευση της περιεχόμενης σε αυτά θερμικής ενέργειας

Συστήματα αξιοποίησης γεωθερμίας σε κτήρια





Οριζόντιοι γεωθερμικοί εναλλάκτες θερμότητας

- Στην εγκατάσταση αυτή δημιουργείται συναλλαγή θερμότητας με το έδαφος τοποθετώντας σωλήνες κατάλληλης διαμέτρου σε οριζόντια διάταξη
- Ο τρόπος τοποθέτησης μπορεί να είναι είτε σε ενιαία οριζόντια εκσκαφή είτε σε τάφρους
- Η τοποθέτηση γίνεται σε βάθος από 1,0÷5,0m με πυκνότητα 0,5÷1m ή σε σπείρες
- Η επίδραση μεταξύ δυο παραλλήλων σωληνώσεων εξαρτάται από τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών του εδάφους
- Σημαντική αξία έχει και ο όγκος του αποθηκευμένου νερού, εντός του εναλλάκτη



Οριζόντιοι γεωθερμικοί εναλλάκτες θερμότητας

- Ο οριζόντιος εναλλάκτης συνιστάται σε κατασκευές με επάρκεια περιβάλλοντα χώρου και για μη βραχώδη εδάφη
- Πλεονέκτημα αποτελεί η ευκολία κατασκευής και το χαμηλό κόστος
- Η αναμενόμενη απόδοση του οριζοντίου εναλλάκτη για απόσταση μεταξύ δυο οριζοντίων σωλήνων ίση με 1m και βάθος 1m δεν μπορεί να είναι μικρότερη των 15W/m μήκους ή αντίστοιχα ανά m² επιφανείας

Οριζόντιοι γεωθερμικοί εναλλάκτες θερμότητας





Κατακόρυφοι γεωθερμικοί εναλλάκτες θερμότητας

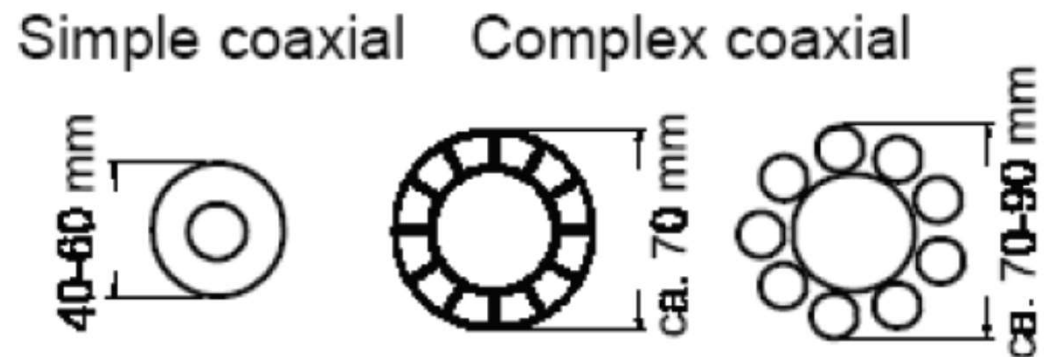
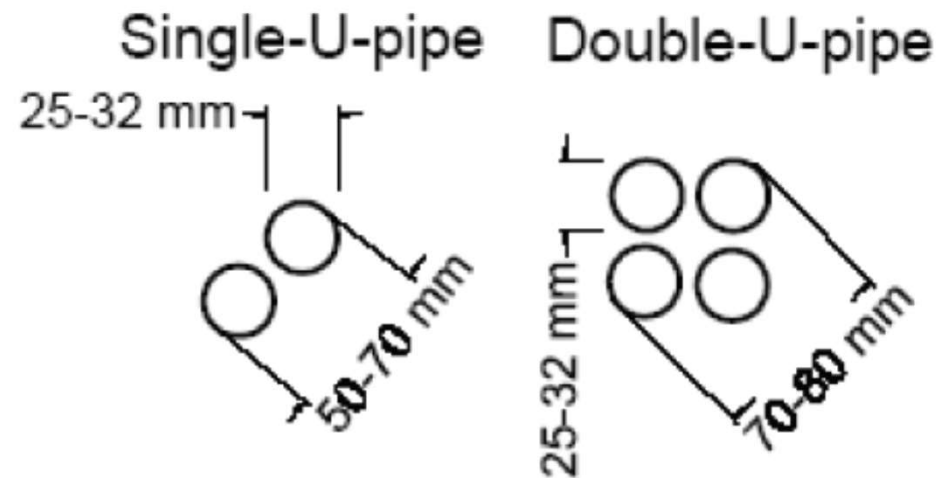
- Όταν οι συνθήκες δεν επιτρέπουν την εγκατάσταση οριζόντιου συστήματος, για την συναλλαγή θερμότητας με το υπέδαφος, χρησιμοποιείται ο κατακόρυφος εναλλάκτης
- Η ανάπτυξη του γεωθερμικού εναλλάκτη γίνεται με σωλήνες κατακόρυφα εντός γεωτρήσεων διαμέτρου 6"÷8" και βάθους μέχρι 120m
- Το πλήθος των γεωτρήσεων είναι συνάρτηση της ισχύος της εγκατάστασης
- Οι κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες εφαρμόζονται σε εγκαταστάσεις με περιορισμένο περιβάλλοντα χώρο ανεξαρτήτως σύστασης υπεδάφους



Κατακόρυφοι γεωθερμικοί εναλλάκτες θερμότητας

- Η απόσταση μεταξύ των γεωεναλλακτών εξαρτάται από τα θερμικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους και τον καταμερισμό των φορτίων
- Ως γενικός κανόνας, απόσταση μεγαλύτερη των 7m αποτελεί απόσταση ασφάλειας για περιοχές με ισοδύναμη ετήσια μεταβολή του φορτίου
- Περιοχές με ομοιόμορφα φορτία, π.χ., μόνο θέρμανση ή μόνο θερινό κλιματισμό κατά τη μεγαλύτερη περίοδο του έτους, δημιουργούν προϋποθέσεις με δυσμενή επίδραση και μεγιστοποίηση της απόστασης των κατακόρυφων εναλλακτών
- Η ελάχιστη απόδοση των κατακόρυφων γεωεναλλακτών δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 30W/m βάθους

Τύποι κατακόρυφων γεωθερμικών εναλλακτών



Αναμενόμενες αποδόσεις κατακόρυφων γεωθερμικών εναλλακτών

Υλικά Τυποποιημένες τιμές	Ειδική θερμική απόδοση	
	Για 1800h λειτουργίας εποχιακά (W/m)	Για 2400h λειτουργίας εποχιακά (W/m)
Φτωχό υπέδαφος (ξηρό ίζημα) ($k < 1,5 \text{ W/mK}$)	25	20
Κανονικό στρώμα βράχου (διαποτισμένο ίζημα, $k = 1,5 \sim 3,0 \text{ W/mK}$)	60	50
Στρώμα βράχου με υψηλή θερμική αγωγιμότητα ($k > 3,0 \text{ W/mK}$)	84	70
Τύποι πετρών/πετρωμάτων:		
Αμμοχάλικο, άμμος, ξηρό	<25	<20
Αμμοχάλικο, άμμος, υγρό	65÷80	55÷65
Αμμοχάλικο και άμμος με το ισχυρό ρεύμα υπόγειου νερού, για τα ενιαία συστήματα	80÷100	80÷100
Αργίλος, loam, υγρασία	35÷50	30÷40
Ασβεστόλιθος (στερεός)	55÷70	45÷60
Ψαμμίτης	65÷80	55÷65
Όξινος βράχος (π.χ. γρανίτης)	65÷85	55÷70
Όξινος βράχος (π.χ. Βασάλτης)	40÷65	35÷55
Gneiss	70÷85	60÷70

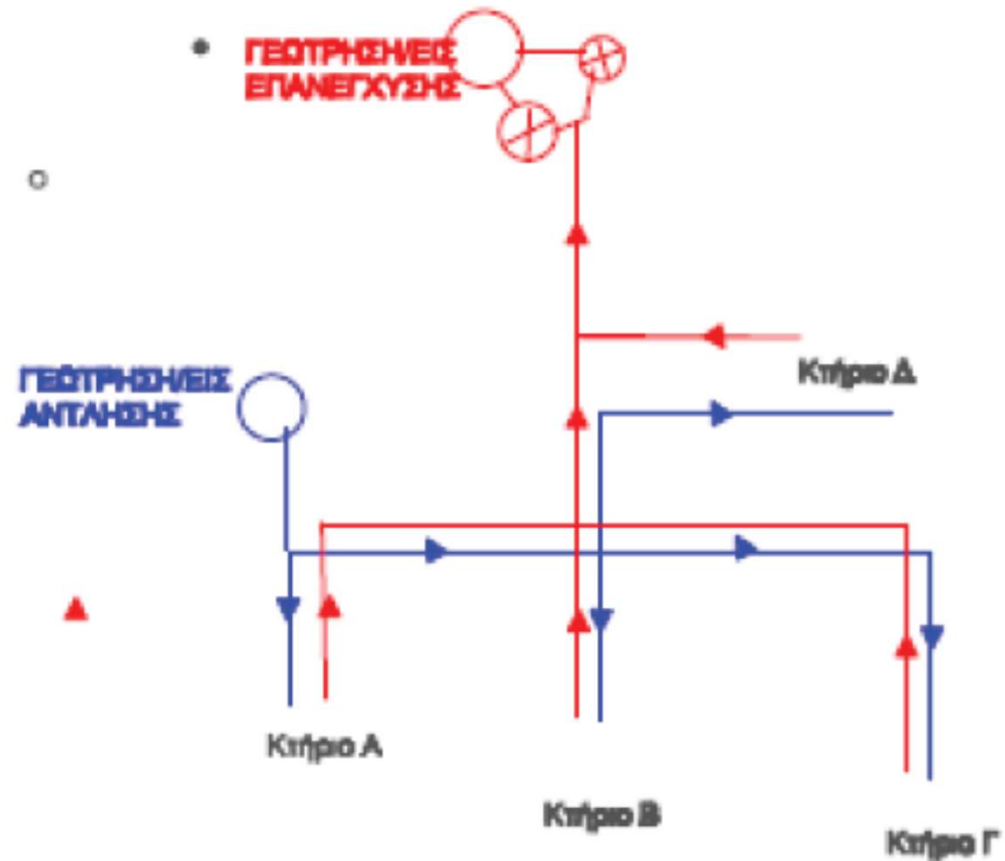
Χαρακτηριστικές συγκεκριμένες ικανότητες αφαίρεσης για τους εναλλάκτες θερμότητας γεωτρήσεων (διπλού U σωλήνες)



Δίκτυα ανοικτού κυκλώματος

- Χαρακτηριστικό του συστήματος αυτού είναι η άντληση υπογείων υδάτων και η θερμική εκμετάλλευσή τους με την απόρριψη ή απορρόφηση θερμότητας
- Το νερό αντλείται από τον υδροφόρο ορίζοντα του υπεδάφους, μπορεί όμως να είναι και θαλασσινό νερό ή νερό παρακείμενης λίμνης ή ποταμού
- Μετά τη χρήση του το νερό επιστρέφει πίσω στην πηγή
- Η χρήση της μεθόδου αυτής προτείνεται για περιοχές με πλούσια υδροφορία και όταν η κατώτερη στάθμη άντλησης από γεώτρηση δεν υπερβαίνει τα 50m

Δίκτυα ανοικτού κυκλώματος





Πρακτικές πληροφορίες συστημάτων γεωθερμίας

- Το κόστος εγκατάστασης ενός συστήματος γεωθερμικών αντλιών θερμότητας ανέρχεται σε $500 \div 1.000 \text{ €/kW}_{\text{th}}$ για τα ανοιχτά συστήματα και σε $1.000 \div 1.500 \text{ €/kW}_{\text{th}}$ για τα κλειστά συστήματα
- Λάθη στο σχεδιασμό των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας, ειδικά στην περίπτωση των κατακόρυφων γεωεναλλακτών, δημιουργεί τον κίνδυνο υπερθέρμανσης (το καλοκαίρι) ή υπόψυξης (το χειμώνα), και επομένως μειωμένης απόδοσης
- Η υπερδιαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη οδηγεί σε μεγαλύτερο κόστος κατασκευής και μερική εκμετάλλευση των δυνατοτήτων με αποτέλεσμα την επιμήκυνση του χρόνου απόσβεσης του αρχικού κόστους
- Για την περίπτωση των μικρού μεγέθους συστημάτων, η γνώση των γεωλογικών στοιχείων της περιοχής ίσως να είναι αρκετή για το σχεδιασμό και την κατασκευή της εγκατάστασης. Στην περίπτωση εκτεταμένων εγκαταστάσεων (ειδικά στις κατακόρυφες γεωτρήσεις) κρίνεται απαραίτητη η δοκιμή απόδοσης των εναλλακτών
- Στην περίπτωση κατασκευής κατακόρυφων συστημάτων, είναι σημαντικό ζήτημα η κατάλληλη επιλογή σωληνώσεων, ώστε να αντέχουν στα βάθη γεώτρησης (π.χ., χαλκοσωλήνες)



Εφαρμογές γεωθερμικής ενέργειας υψηλότερων θερμοκρασιών

- Η γεωθερμική ενέργεια **υψηλής** ενθαλπίας χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατεστημένη ισχύς των γεωθερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο ανέρχεται σε 6.000 MW_e περίπου
- Η γεωθερμική ενέργεια **χαμηλής** και **μέσης** ενθαλπίας βρίσκει σε διεθνές επίπεδο πολλές εφαρμογές στη γεωργία, τη γεωργική βιομηχανία, την κτηνοτροφία – ιχθυοκαλλιέργεια και τη θέρμανση χώρων

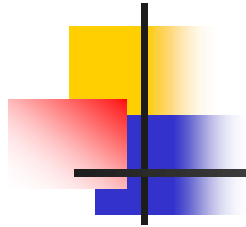


Εφαρμογές γεωθερμικής ενέργειας υψηλότερων θερμοκρασιών

- Είναι τεχνολογικά δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με χρήση γεωθερμικών ρευστών θερμοκρασίας των 80°C και άνω, με την εφαρμογή του κύκλου των οργανικών ρευστών Rankine
- Με γεωθερμικά ρευστά θερμοκρασίας άνω των 60°C είναι δυνατή και οικονομικά βιώσιμη η αφαλάτωση νερού και η τηλεθέρμανση κτιρίων
- Είναι δυνατό να γίνουν και γεωργικές εκμεταλλεύσεις, είτε σε συνδυασμό με τις προαναφερθείσες χρήσεις (όταν τα νερά απόρριψης είναι της τάξεως των 45°C και άνω), είτε αυτόνομα όταν η θερμοκρασία των γεωθερμικών είναι κατώτερη των 45°C

Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρισμού με χρήση γεωθερμίας





6. Συστήματα Αιολικής Ενέργειας

Άνεμος και ατμοσφαιρική κυκλοφορία

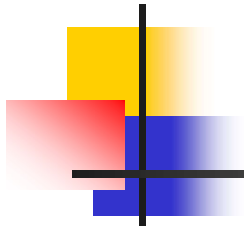
Η γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία οφείλεται κυρίως στην ηλιακή ακτινοβολία και στην περιστροφή της Γης. Συγκεκριμένα:

- Διαφορετική θερμοκρασία μεταξύ ισημερινού και πόλων (διαφορετική ακτινοβολία) → Συνεχή κίνηση αερίων μαζών από τους πόλους προς τον ισημερινό (ψυχρές επιφανειακές μάζες) και αντίστροφα (θερμές μάζες)
- Η περιστροφή της Γης → κίνηση ψυχρών επιφανειακών μαζών προς Δυτικά και θερμών μαζών σε μεγαλύτερο ύψος προς Ανατολικά
- Ανομοιομορφία θερμικής συμπεριφοράς ξηράς και θάλασσας – ανομοιόμορφη ψύξη → ζώνες διαφορετικής θερμοκρασίας → πεδία στατικής πίεσης

Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου

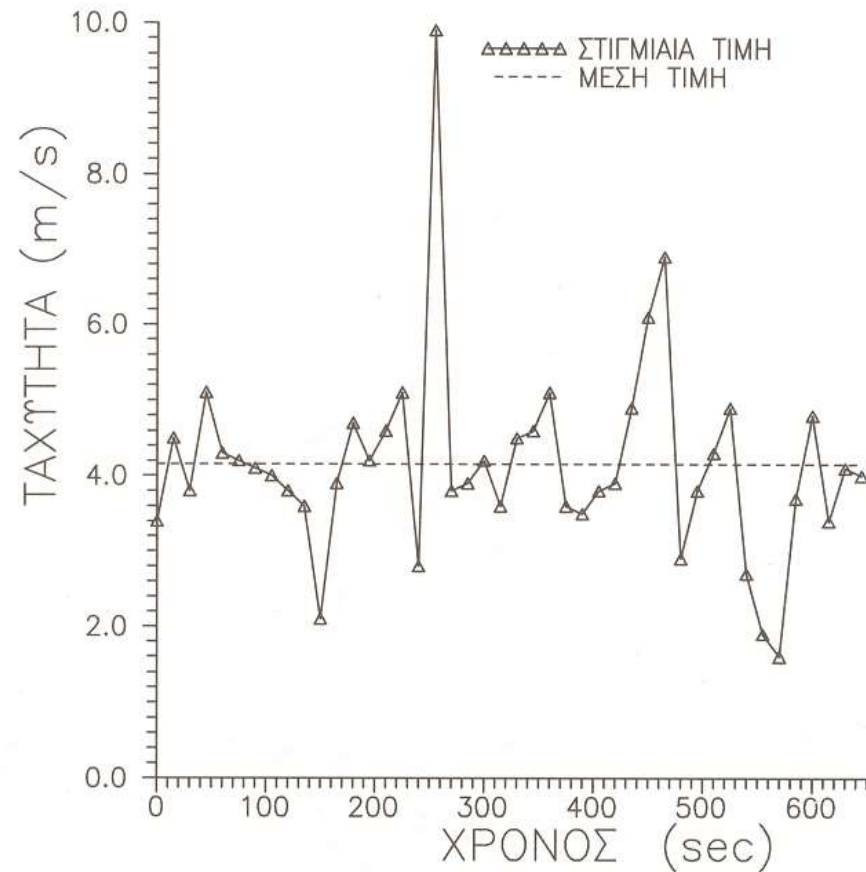
Η γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου είναι απαραίτητη στις μελέτες εκτίμησης της ενέργειας που περικλείει ο άνεμος. Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης αιολικών συστημάτων θα πρέπει να γνωρίζουμε:

- Την ταχύτητα του ανέμου
- Την διεύθυνση του ανέμου
- Τον στροβιλισμό του ανέμου
- Την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος
- Την κατανομή του ανέμου



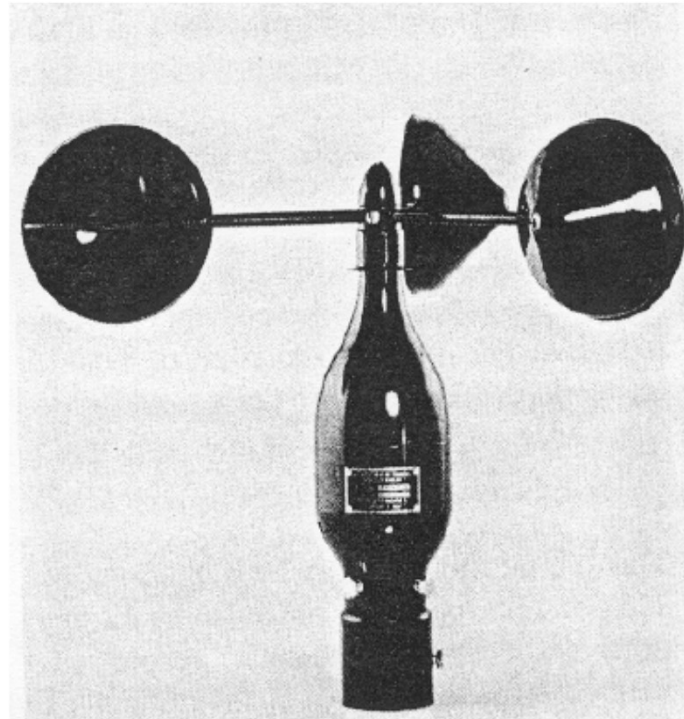
Ταχύτητα Ανέμου (V)

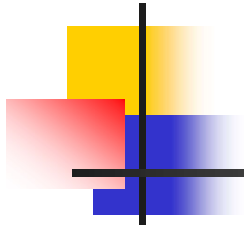
Διανομή Ταχύτητας



Μέτρηση ταχύτητας ανέμου

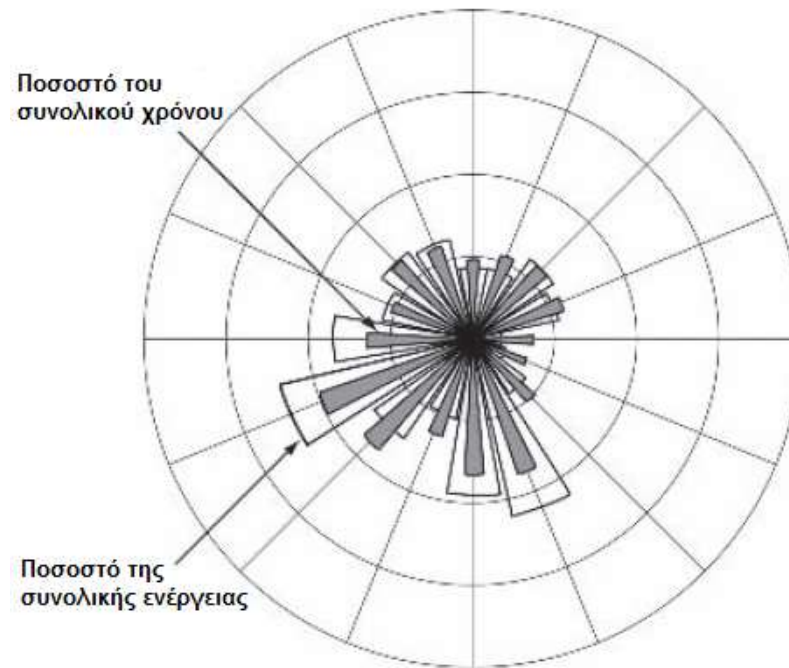
Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου γίνεται με το *ανεμόμετρο*





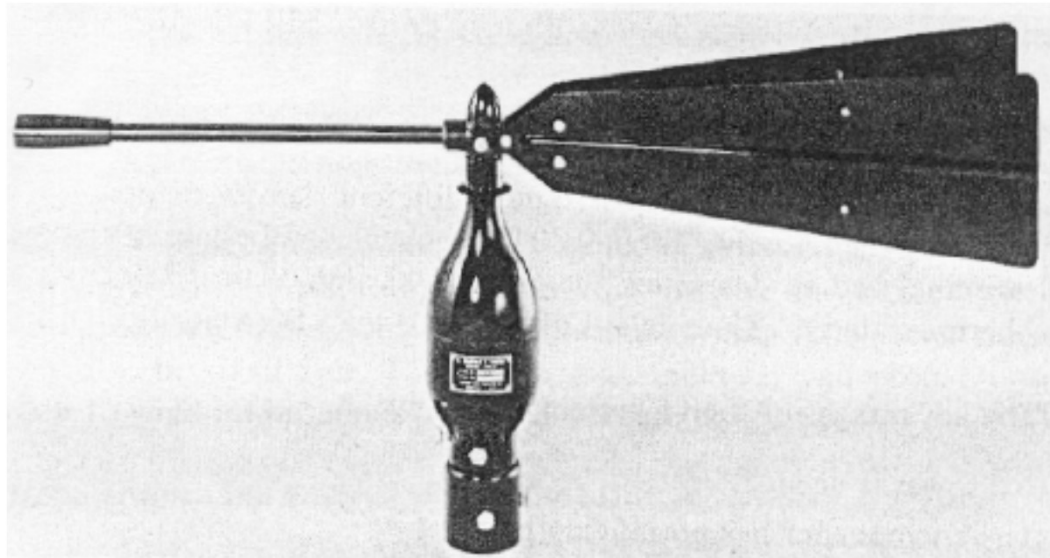
Διεύθυνση του ανέμου

Μετράται σε μοίρες έχοντας ως αναφορά τον πραγματικό βορρά. Απεικονίζεται στο ροδόγραμμα

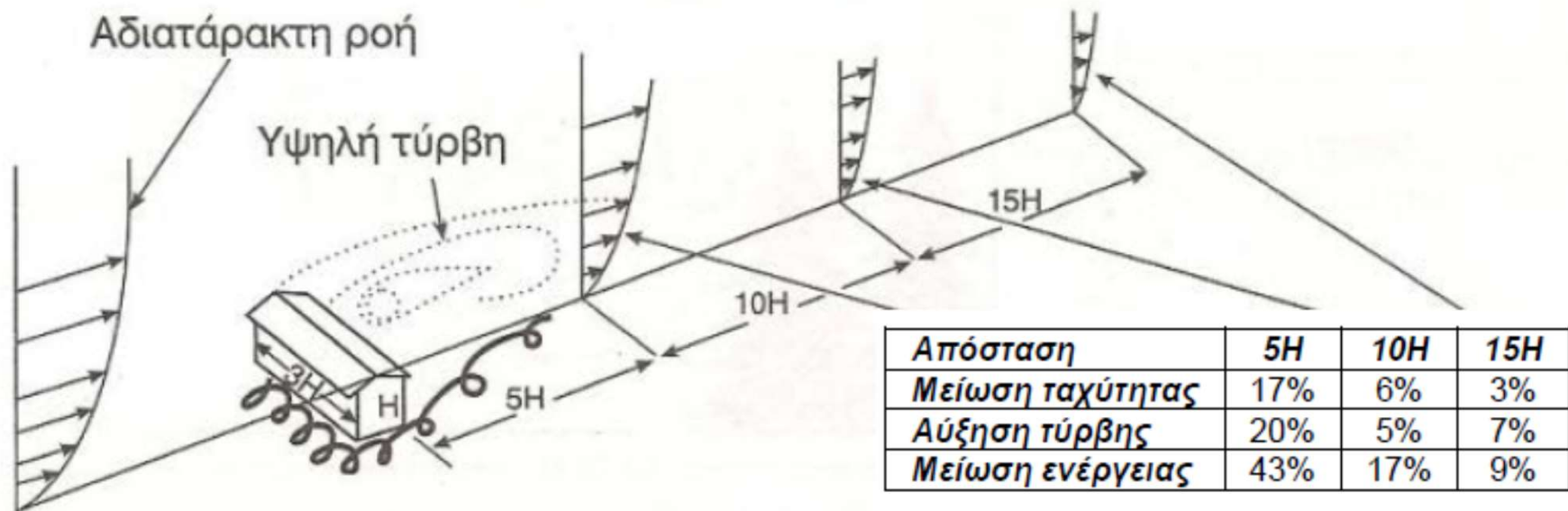


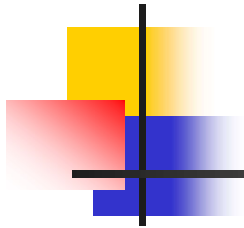
Μέτρηση διεύθυνσης του ανέμου

Η μέτρηση της διεύθυνσης του ανέμου γίνεται με τον *ανεμοδείκτη*

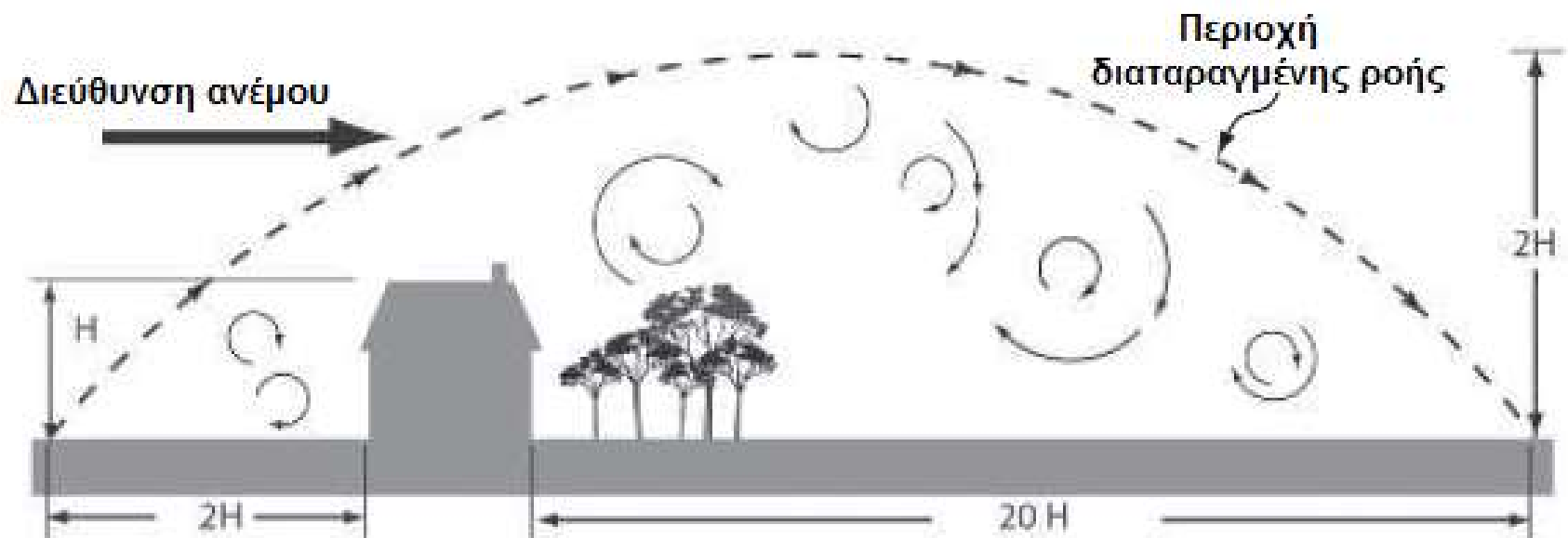


Στροβιλισμός ανέμου

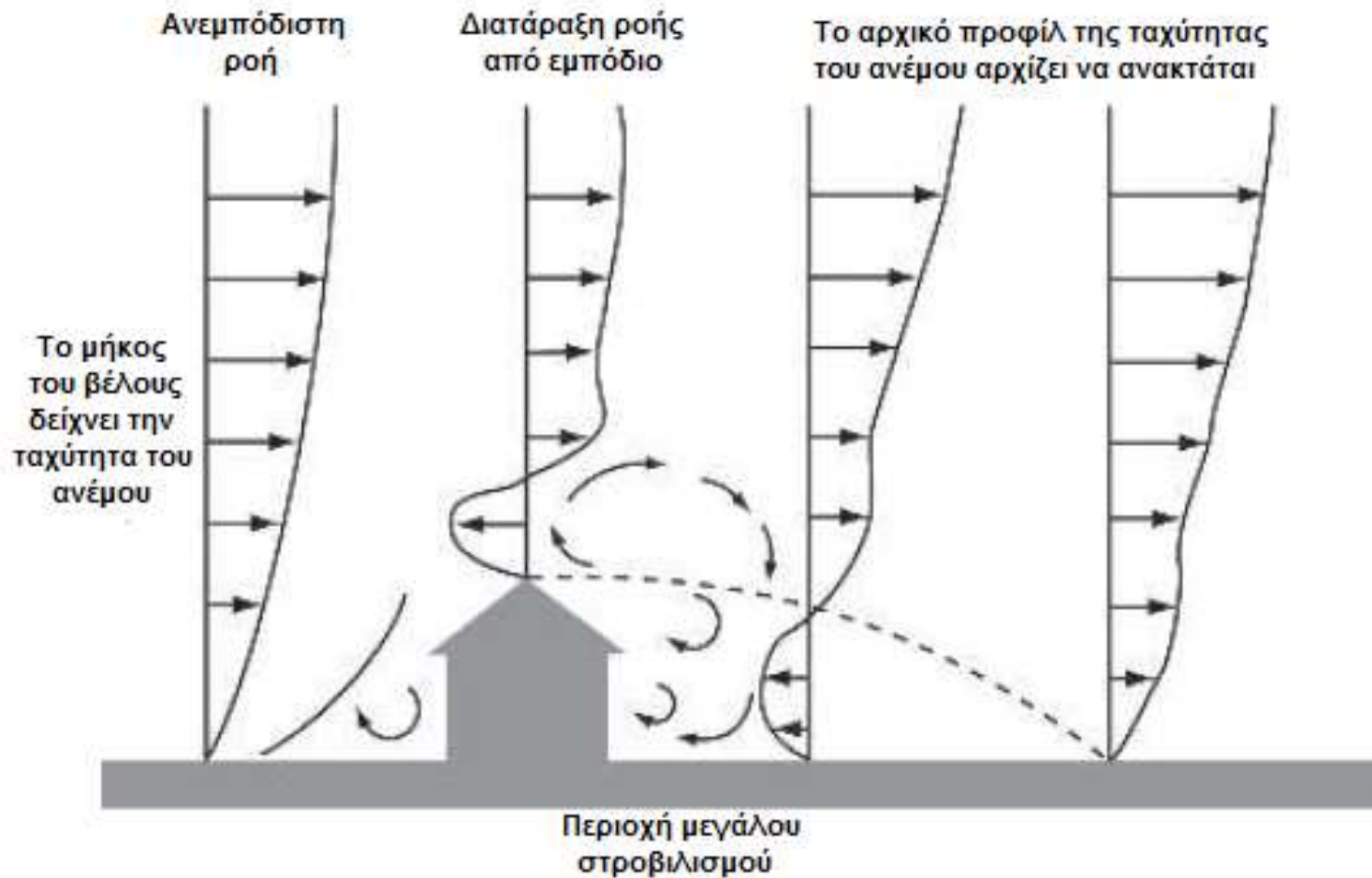




Στροβιλισμός ανέμου



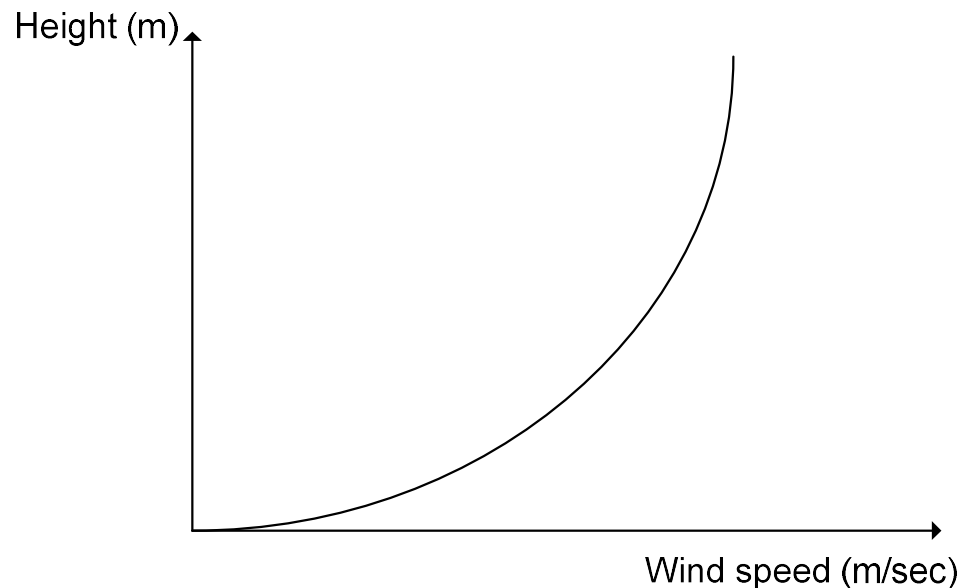
Στροβιλισμός ανέμου



Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος – Εκθετικός νόμος

$$\frac{V_{z1}}{V_{z2}} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^{\alpha}$$

V_{z1} (m/sec): Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος z_1
 V_{z2} (m/sec): Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς z_2
 α : Δείκτης τραχύτητας εδάφους (κυμαίνεται από 0.1 έως 0.45)

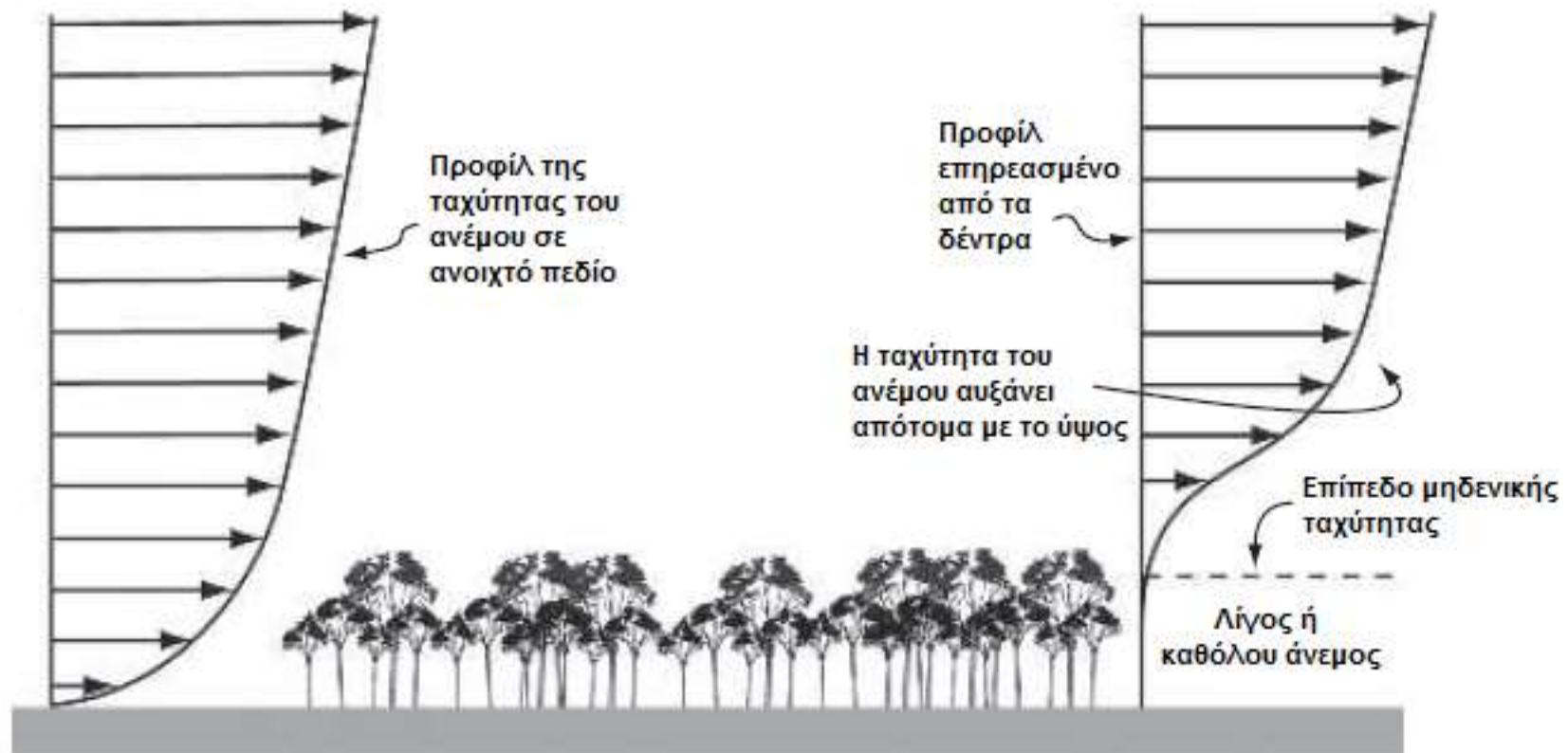




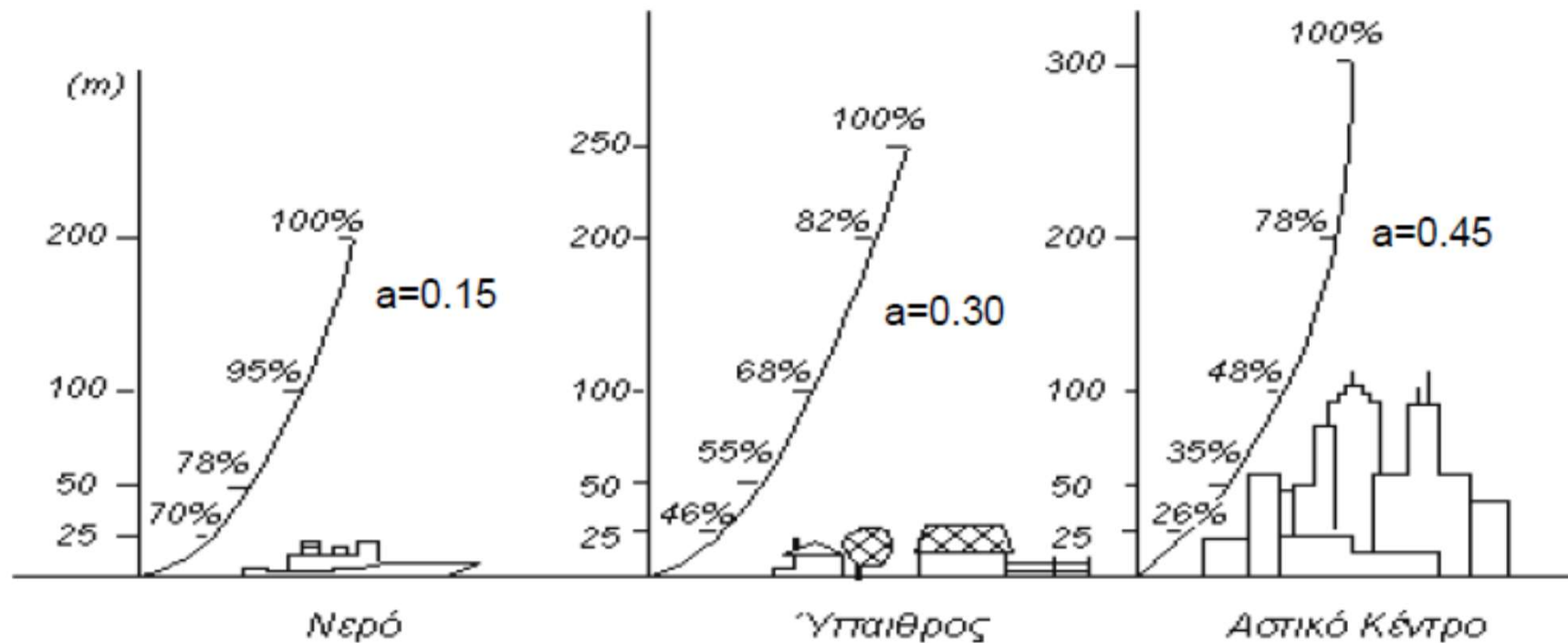
Παράμετροι εκθετικού νόμου

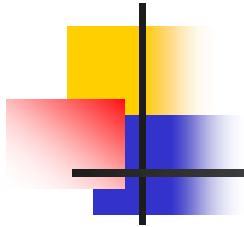
Κατηγορία τραχύτητας	Είδος εδάφους	<i>a</i>
0	Εξομαλυμένο (θάλασσα, χιόνι, άμμος)	0,10÷0,13
1	Μέτρια βλάστηση (χαμηλή βλάστηση, καλλιέργειες, αγροτικές περιοχές)	0,13÷0,20
2	Τραχύ έδαφος (δάση, προάστια πόλεων)	0,20÷0,27
3	Πολύ τραχύ έδαφος (αστικές περιοχές, υψηλά κτίρια)	0,27÷0,45

Επίδραση εμποδίων στο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου



Επίδραση τραχύτητας στην ταχύτητα του ανέμου





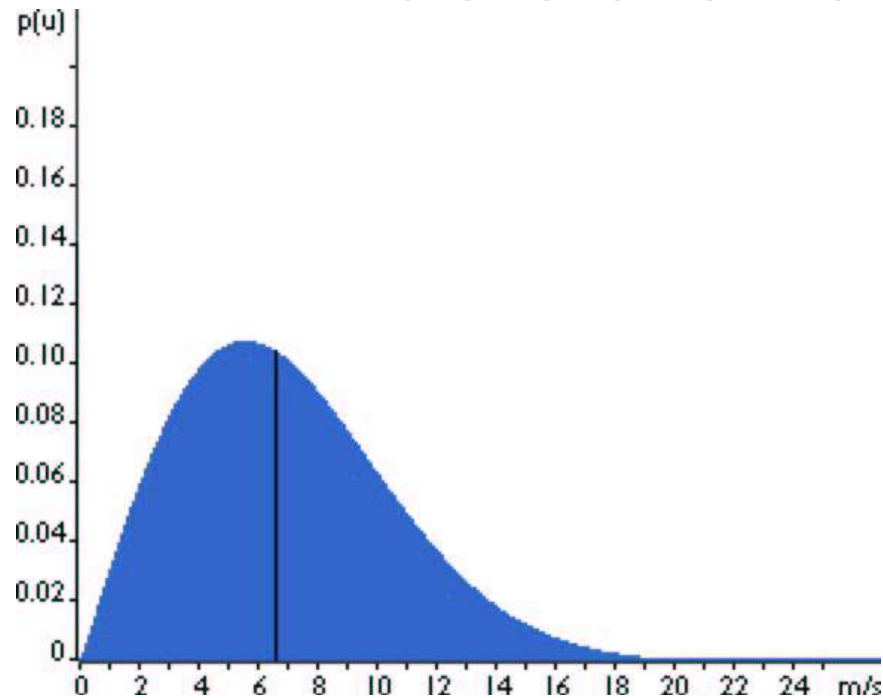
Κατανομή ανέμου

Ο άνεμος ακολουθεί την κατανομή Weibull:

$$P(V) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}$$

k : Παράμετρος σχήματος ($1 < k < 3$)

c : Παράμετρος κλίμακας





Προσεγγιστικός υπολογισμός παραμέτρων κατανομής Weibull

Οι παράμετροι k και c της κατανομής Weibull υπολογίζονται προσεγγιστικά από τις σχέσεις:

$$k = \left(\frac{\sigma_V}{\bar{V}} \right)^{-1,086}$$

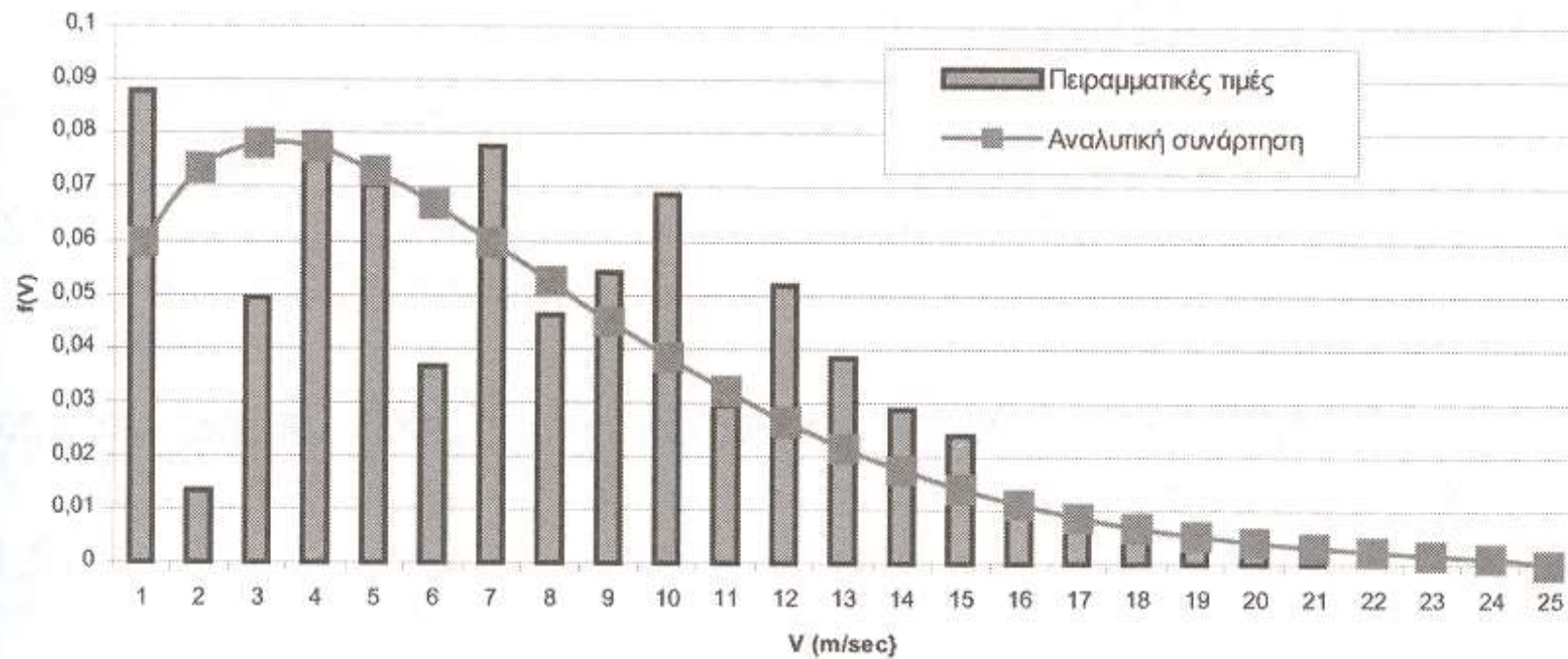
$$c = 1,128 \cdot \bar{V}$$

σ_V : τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου

\bar{V} : μέση ταχύτητα του ανέμου

Κατανομή ανέμου

Διανομή Πυκνότητας Πιθανότητας Ανεμολογικών Μετρήσεων





Ισχύς αέριας δέσμης

Η ισχύς P_{air} μιας αέριας δέσμης είναι ίση με:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

όπου:

ρ : πυκνότητα αέρα

A : επιφάνεια (για μια ανεμογεννήτρια αντιστοιχεί στην επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων της)

V : ταχύτητα του ανέμου

Η τιμή της πυκνότητας ρ του αέρα εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση P και την (απόλυτη) θερμοκρασία T του μέρους που θέλουμε να μελετήσουμε σύμφωνα με το νόμο των ιδανικών αερίων:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T}$$

όπου R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων



Ανεμογεννήτριες (Α/Γ)

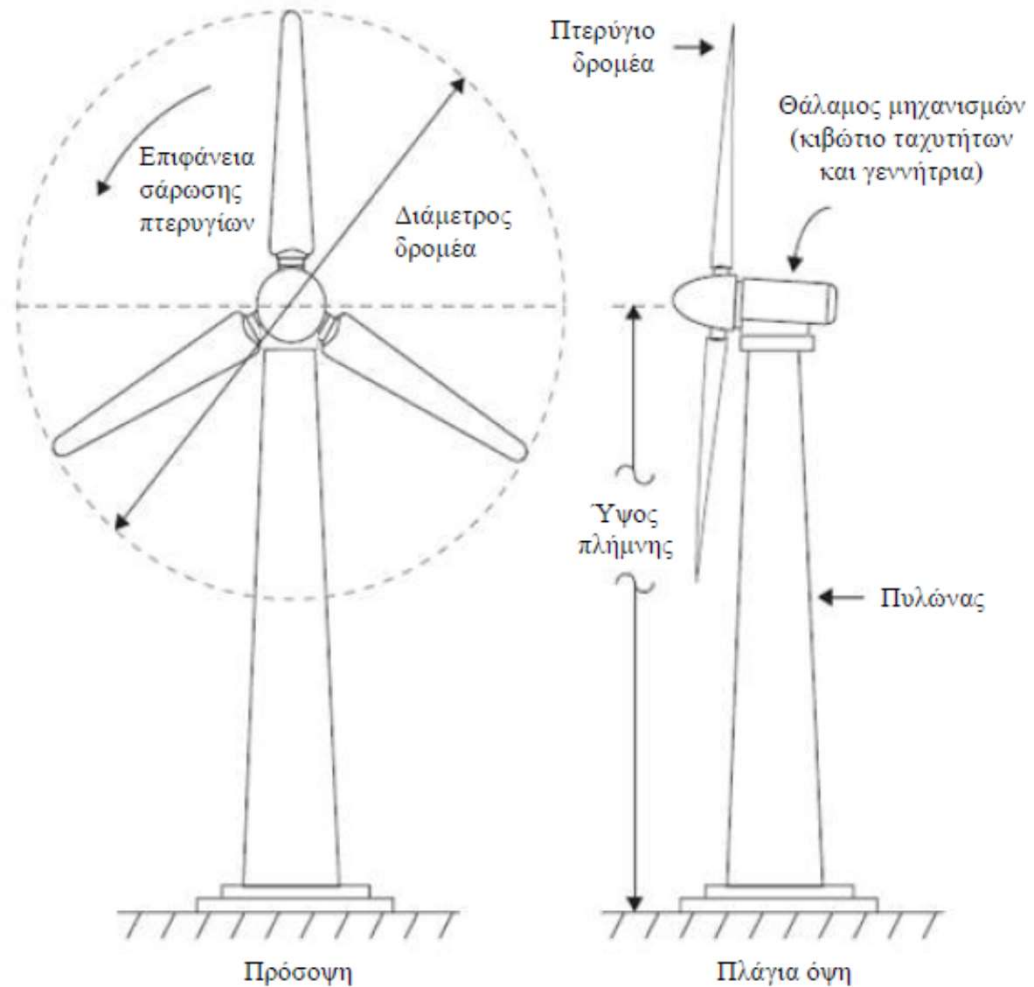
- Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια
- Οι Α/Γ μπορεί να είναι δύο τύπων:
 - Οριζόντιου άξονα
 - Κατακόρυφου άξονα
- Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα παρουσιάζουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα και έχουν κυριαρχήσει στην πράξη



Ταξινόμηση μεγεθών Α/Γ

Μέγεθος Α/Γ	Ισχύς εξόδου (kW)	Ύψος πύργου (m)	Διάμετρος ρότορα (m)	Επιφάνεια σάρωσης (m²)
micro	Μικρότερη από 1	-	Μικρότερη από 2.1	Μικρότερη από 3.5
Μικρό	1 με 50	5 με 30	2.1 με 16	3.5 με 200
Μεσαίο	50 με 1000	30 με 70	16 με 55	200 με 2400
Μεγάλο	Πάνω από 1000	Πάνω από 50	Πάνω από 55	Πάνω από 2400

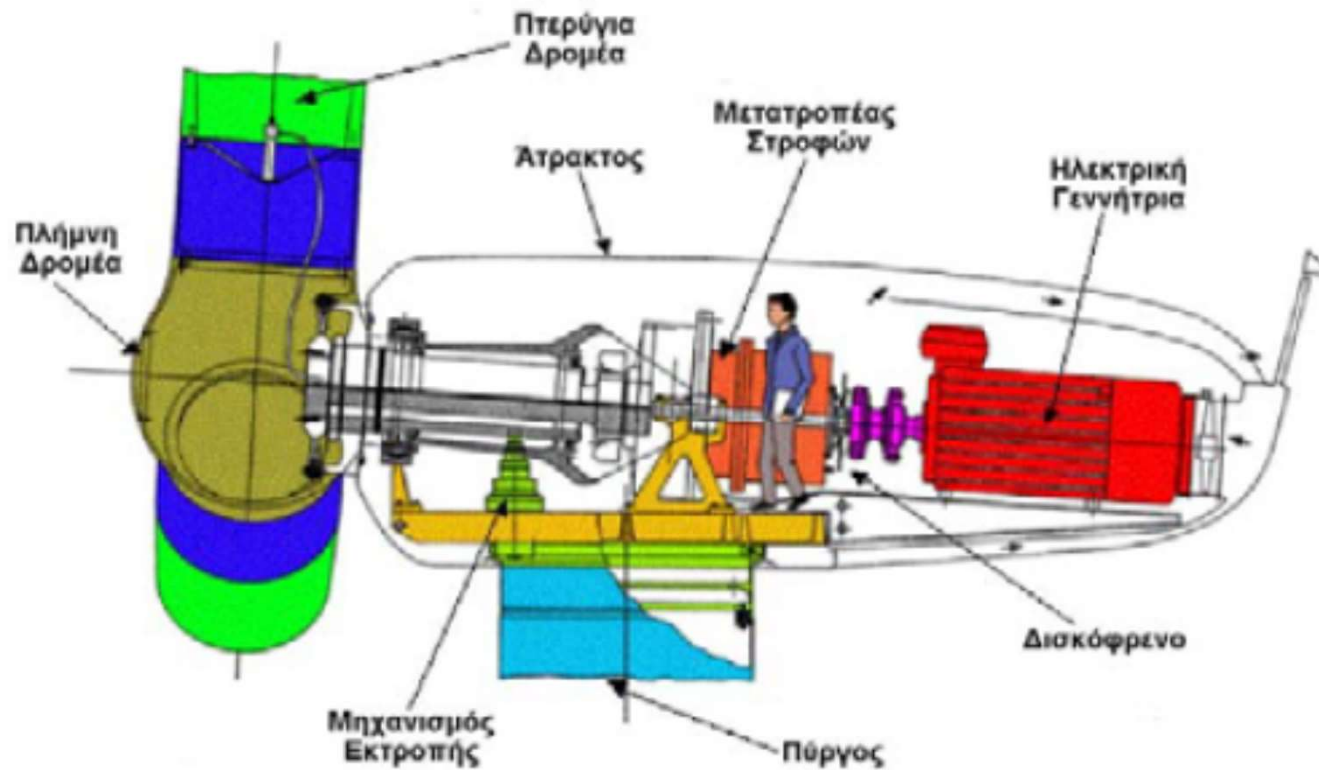
Τμήματα Α/Γ οριζόντιου άξονα



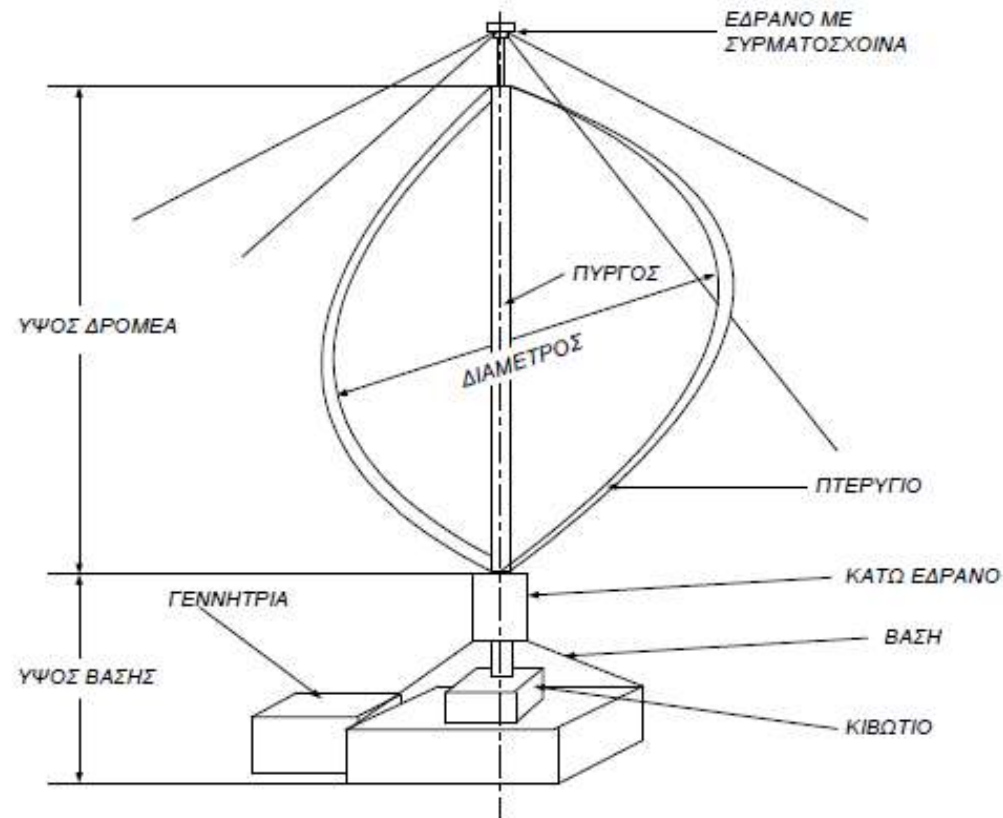
Προσήνεμη και υπήνεμη διάταξη Α/Γ οριζώντιου άξονα



Θάλαμος μηχανισμών μεγάλης Α/Γ οριζόντιου άξονα



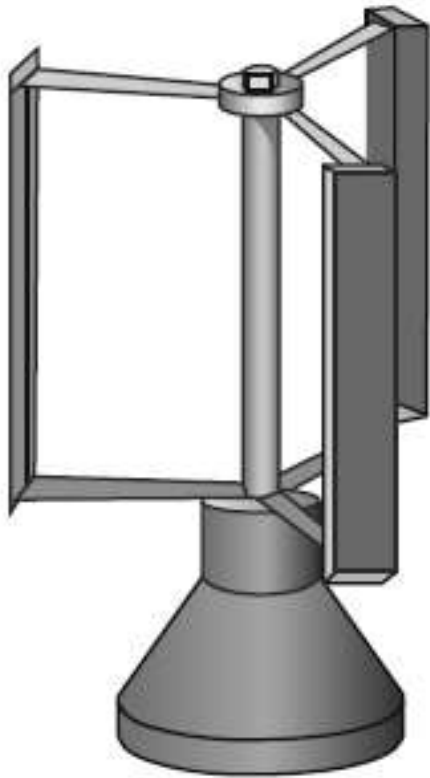
Τμήματα Α/Γ κατακόρυφου άξονα



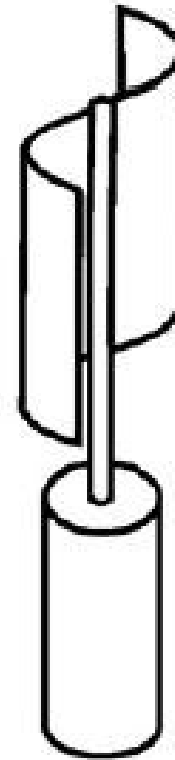
Darrieus



Α/Γ κατακόρυφου άξονα



H-Rotor



Savonius

Συντελεστής ισχύος ανεμογεννήτριας

Στην πραγματικότητα η Α/Γ εκμεταλλεύεται ένα ποσοστό από την ισχύ του αέρα. Το ποσοστό αυτό καθορίζεται από τον *συντελεστή ισχύος* C_p της Α/Γ, ο οποίος αποτελεί στην ουσία τον αεροδυναμικό βαθμό της πτερωτής. Ακόμα και για μια ιδανική πτερωτή, ο συντελεστής ισχύος δεν μπορεί να υπερβεί το όριο του Betz (59,3%), δηλαδή:

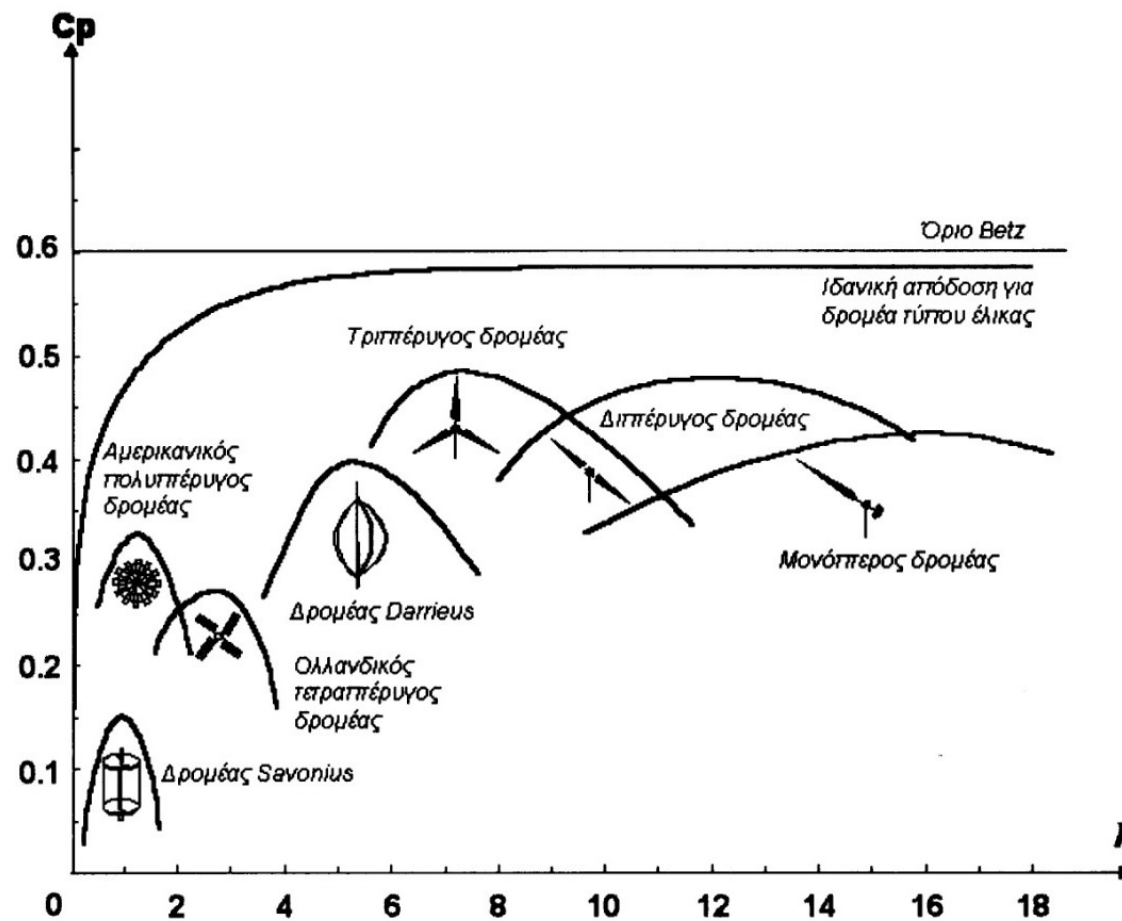
$$C_p \leq (16/27) = 0,593$$

Η ισχύς $P_{A/G}$ που αποδίδει η Α/Γ είναι τελικά:

$$P_{A/G} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot n_{H/M}$$

όπου $n_{H/M}$ είναι ο ηλεκτρικός και μηχανικός βαθμός απόδοσης της Α/Γ

Απόδοση Α/Γ διαφόρων τύπων





Ωφέλιμη αιολική ισχύς

Εκτός από τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, υπάρχουν και άλλοι περιορισμοί που μειώνουν σημαντικά το πραγματικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό μιας περιοχής από μία Α/Γ:

- Για μικρές ταχύτητες ανέμου η ανεμογεννήτρια δεν περιστρέφεται επειδή οι απώλειες κενού φορτίου (τριβές στον άξονα, μειωτήρα, κλπ) είναι μεγαλύτερες από την παραγόμενη ισχύ της μηχανής. Η ταχύτητα στην οποία αρχίζει η λειτουργία της Α/Γ ονομάζεται *ταχύτητα έναρξης λειτουργίας* V_{in} (τυπικές τιμές V_{in} : 2÷5 m/sec).
- Από μια τιμή της ταχύτητας του ανέμου και μετά η ωφέλιμη ισχύς της Α/Γ παραμένει για λειτουργικούς λόγους περίπου σταθερή, με αποτέλεσμα να χάνεται ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας του ανέμου ιδιαίτερα σε υψηλές ταχύτητες. Η μικρότερη ταχύτητα του ανέμου στην οποία έχουμε ονομαστική ισχύ της μηχανής ονομάζεται *ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας* V_R (συνήθως $V_R=10÷15$ m/sec).
- Λόγοι ασφάλειας της εγκατάστασης επιβάλλουν τη διακοπή λειτουργίας της μηχανής σε πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η *ταχύτητα διακοπής λειτουργίας* V_{out} κυμαίνεται μεταξύ 20 m/sec και 25 m/sec.



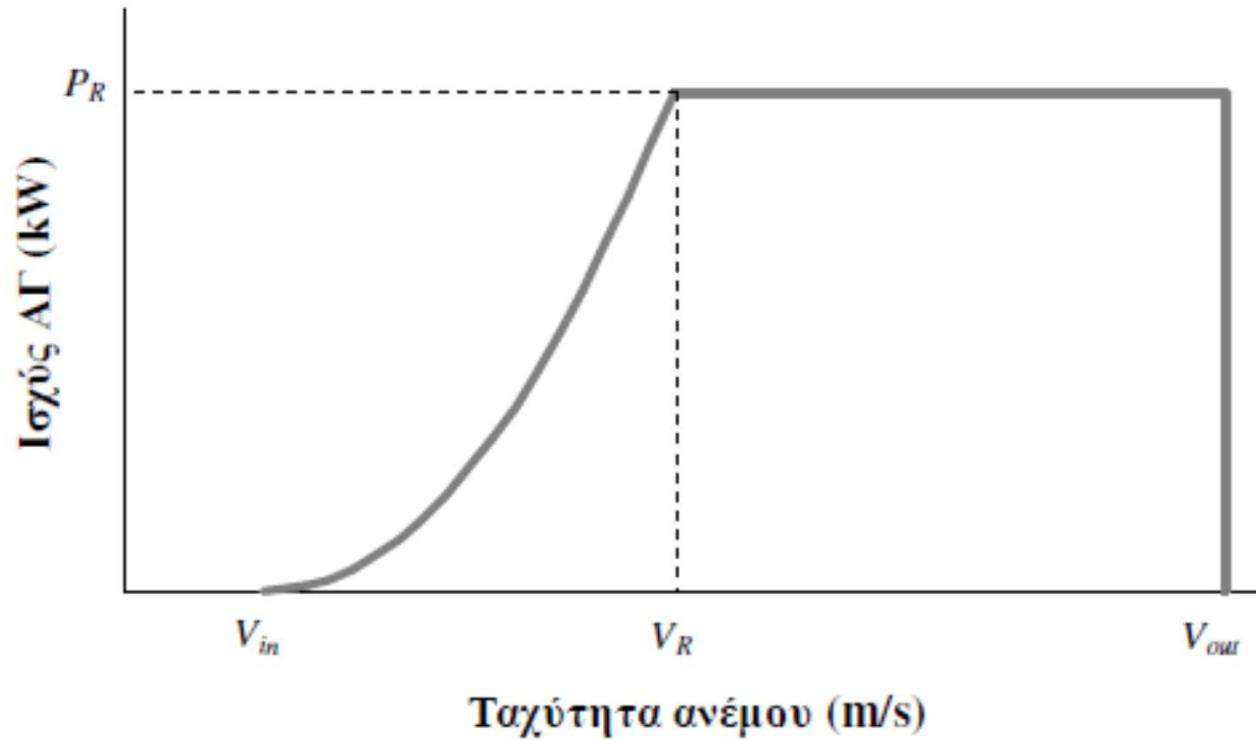
Αρχές ελέγχου Α/Γ

- Για τον έλεγχο ισχύος της Α/Γ είναι απαραίτητη είτε η ρύθμιση του βήματός της, είτε ο κατάλληλος αεροδυναμικός σχεδιασμός και η αξιοποίηση του φαινομένου "απώλειας στήριξης".
- Με τη διαδικασία **ρύθμισης βήματος** (pitch control) επιχειρείται η περιστροφή του πτερυγίου γύρω από το διαμήκη άξονά του, με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής γωνίας προσβολής κατά το μήκος του πτερυγίου ώστε να υλοποιούνται οι απαιτήσεις ισχύος της μηχανής.
- Ο μηχανισμός **απώλειας στήριξης** (stall control) βασίζεται στο αεροδυναμικό φαινόμενο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος από τμήμα ή το σύνολο του πτερυγίου, εφόσον η γωνία προσβολής του πτερυγίου ξεπεράσει ορισμένα αεροδυναμικά όρια. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε απότομη μείωση της ισχύος της μηχανής.

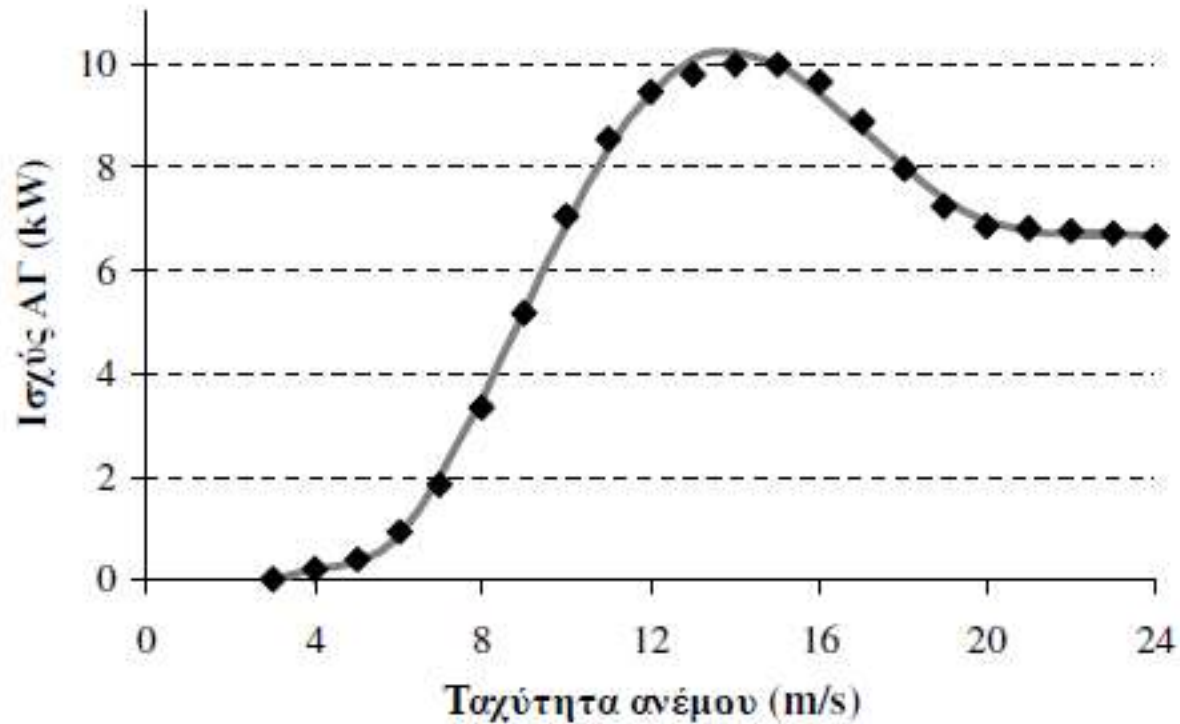
Μηχανισμός ρύθμισης βήματος



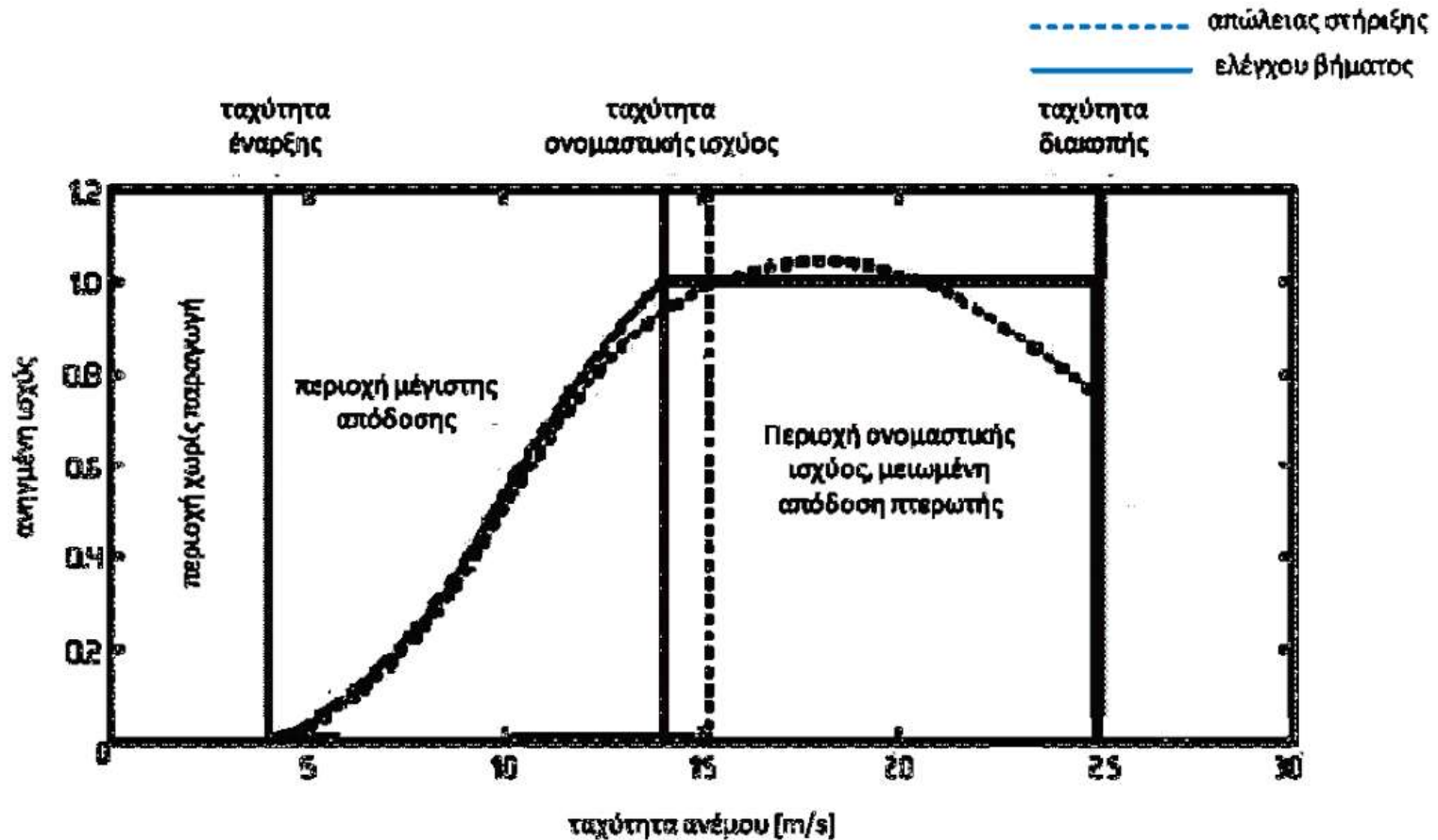
Καμπύλη ισχύος Α/Γ με μηχανισμό ρύθμισης βήματος



Καμπύλη ισχύος Α/Γ με μηχανισμό απώλειας στήριξης



Καμπύλες λειτουργίας Α/Γ ελέγχου βήματος και απώλειας στήριξης



Αποδοτικότητα μικρών Α/Γ και ονομαστική ισχύς

- Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι ονομαστική ισχύς των μικρών Α/Γ δεν αναφέρεται σε τυποποιημένες συνθήκες. Πολλές φορές αυτό έχει ως αποτέλεσμα δύο διαφορετικές Α/Γ να αποδίδουν ίδια ονομαστική ισχύ σε ταχύτητες ανέμου που διαφέρουν κατά πολύ μεταξύ τους (π.χ., 11 m/s και 15 m/s)
- Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η χρήση της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ ως κριτήριο αποδοτικότητας
- Ένα πολύ πιο αντιπροσωπευτικό κριτήριο είναι τα στοιχεία ετήσιας παραγωγής ενέργειας που δίνουν οι κατασκευαστές Α/Γ για δεδομένες ταχύτητες ανέμου. Βάσει αυτών των στοιχείων, μπορούν να παρατηρηθούν διαφορές στην ενεργειακή παραγωγή Α/Γ ίδιας ονομαστικής ισχύος ακόμα και μεγαλύτερες του 25%!



Αποδοτικότητα μικρών Α/Γ και ονομαστική ισχύς

- Για πιο ρεαλιστικούς υπολογισμούς, σε σχέση με την παραγωγή ενέργειας που δηλώνει ο κατασκευαστής, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η μείωση εξαιτίας της παρουσίας στροβιλισμών
- Μια ρεαλιστική επιλογή των συντελεστών μείωσης λόγω στροβιλισμών είναι:
 - 15% για μια περιοχή χωρίς σημαντικά εμπόδια τριγύρω
 - 20% για περιοχή με φράχτες και χαμηλά κτίρια
 - 25% για μια πιο πυκνοκατοικημένη περιοχή, που έχει τριγύρω δέντρα, σπίτια και άλλα κτίρια



Θόρυβος μικρών Α/Γ

- Οι μικρές Α/Γ παράγουν θόρυβο, και καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει, αυξάνεται και ο θόρυβος
- Ο θόρυβος μιας Α/Γ παράγεται κυρίως από τα περιστρεφόμενα πτερύγια και δευτερευόντως από τη γεννήτρια
- Ο ανεπιθύμητος θόρυβος μπορεί να μειωθεί με την επιλογή Α/Γ που λειτουργεί σε χαμηλές στροφές λειτουργίας. Επιπλέον, η επιλογή αυτή αυξάνει και τη διάρκεια ζωής της Α/Γ
- Ένας άλλος τρόπος μείωσης του θορύβου είναι η εγκατάσταση της Α/Γ σε μεγαλύτερο ύψος

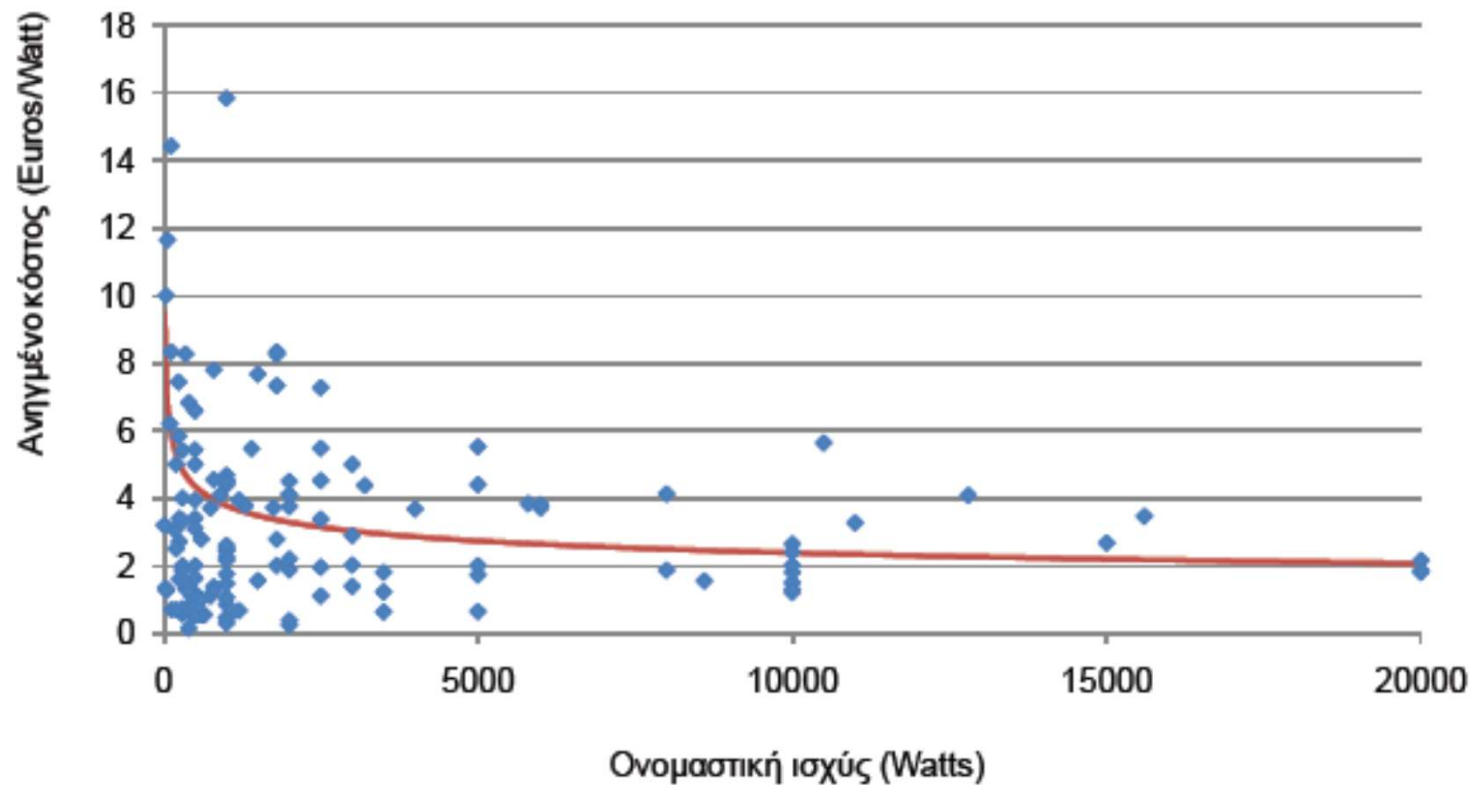


Κόστος μικρών Α/Γ

- Το κόστος των μικρών Α/Γ κυμαίνεται μεταξύ 1500 και 5000 €/kW
- Στο κόστος αυτό δεν περιλαμβάνεται μόνο το κόστος της γεννήτριας, αλλά και αυτό του πυλώνα, των μπαταριών και του μετατροπέα συχνότητας (εάν απαιτούνται στην εγκατάσταση), της καλωδίωσης και της εγκατάστασης της Α/Γ. Σε αρκετές περιπτώσεις τα παραπάνω κόστη είναι μεγαλύτερα από αυτό της γεννήτριας
- Σημαντικοί παράγοντες είναι η συστηματική και κατάλληλη επιθεώρηση και συντήρηση των Α/Γ. Υπό αυτή την προϋπόθεση, η διάρκεια ζωής των Α/Γ μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 20 και 30 χρόνων
- Αναλυτικές οδηγίες σχετικά με τη συντήρηση των μικρών Α/Γ περιέχονται στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή
- Σχετικά με τις επιθεωρήσεις των μικρών Α/Γ, συστήνεται να γίνονται δύο φορές το έτος (άνοιξη και φθινόπωρο) σε ημέρες άπνοιας
- Το ετήσιο κόστος συντήρησης εκφράζεται ως ποσοστό του κόστους εγκατάστασης και κυμαίνεται μεταξύ 2÷4%

Κόστος μικρών Α/Γ

ΚΟΣΤΟΣ ΑΓΟΡΑΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ





Χρόνος απόσβεσης Α/Γ

- Ο χρόνος απόσβεσης της εγκατάστασης αποτελεί τον πιο κοινό δείκτη αξιολόγησης μιας επένδυσης
- Μια απλοποιημένη προσέγγιση στην εκτίμηση του χρόνου απόσβεσης αποτελεί ο υπολογισμός του χρόνου όπου τα συνολικά ετήσια έσοδα γίνονται ίσα ή ξεπερνούν τα έξοδα συντήρησης προστιθέμενα στο κόστος αγοράς και εγκατάστασης έως τη συγκεκριμένη χρονιά
- Ο παραπάνω υπολογισμός δε λαμβάνει υπόψη τη χρονική μεταβολή των οικονομικών μεγεθών και ως εκ τούτου δεν μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα



Τεχνική διαθεσιμότητα Α/Γ

- Η τεχνική διαθεσιμότητα "Δ" μιας εγκατάστασης εκφράζει την ικανότητα ασφαλούς λειτουργίας της εγκατάστασης από τεχνικής σκοπιάς και δε συνδέεται άμεσα με το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό της περιοχής
- Η εμφάνιση ισχυρής έντασης ανέμων αυξάνει την πιθανότητα βλάβης των εγκαταστάσεων και κυρίως εμποδίζει τη γρήγορη και αποτελεσματική αποκατάσταση πιθανών βλαβών
- Επιπλέον, σε νησιωτικές (απομονωμένες) περιοχές, η επιδείνωση των καιρικών συνθηκών μπορεί να καθυστερήσει τη μετάβαση των εξειδικευμένων συνεργείων συντήρησης
- Μια αιολική εγκατάσταση δεν είναι τεχνικά διαθέσιμη, ακόμα και αν φυσούν άνεμοι ικανής έντασης, σε περιπτώσεις τυχαίων βλαβών, προγραμματισμένης συντήρησης, λειτουργίας μηχανισμών αυτοπροστασίας αλλά και αδυναμίας του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου να απορροφήσει την αποδιδόμενη ενέργεια, όταν η Α/Γ είναι διασυνδεδεμένη
- Στις μικρές εγκαταστάσεις Α/Γ η τεχνική διαθεσιμότητα κυμαίνεται μεταξύ $0,7 \div 0,9$

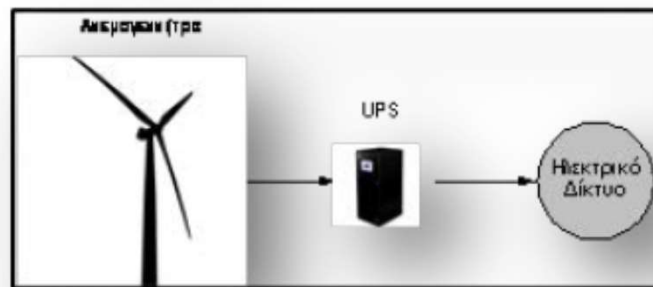


Συντελεστής χρησιμοποίησης Α/Γ

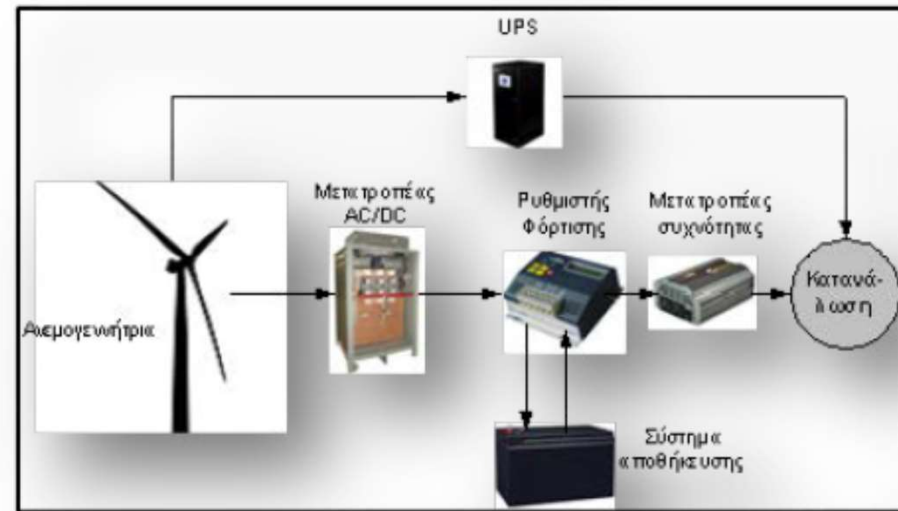
Η πραγματική αποδοτικότητα μιας Α/Γ υπολογίζεται μέσω του συντελεστή χρησιμοποίησης (ΣΧ). Ο ΣΧ αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο ετήσιος ΣΧ διαιρεί την ενέργεια που παράγει η Α/Γ σε ένα χρόνο E_{WTyear} (σε kWh) με την ενέργεια που θα παράγαγε θεωρητικά η ΑΓ εάν λειτουργούσε στην ονομαστική της ισχύ P_R (σε kW) και για τις 8760 ώρες του έτους. Στον υπολογισμό της E_{WTyear} έχει ληφθεί υπόψη η τεχνική διαθεσιμότητα "Δ" της αιολικής εγκατάστασης

$$\text{Ετήσιος } \Sigma\chi = \frac{E_{WTyear}}{P_R \cdot 8760 \text{ h}}$$

Α/Γ σε κτήρια: διασυνδεδεμένη και αυτόνομη εγκατάσταση



Διασυνδεδεμένη εγκατάσταση



Αυτόνομη εγκατάσταση



Α/Γ σε κτήρια: διασυνδεδεμένη και αυτόνομη εγκατάσταση

Τυπικές παραδοχές **διασυνδεδεμένου συστήματος:**

- μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης σταθεροποιητή τάσης (UPS): 95%÷98%

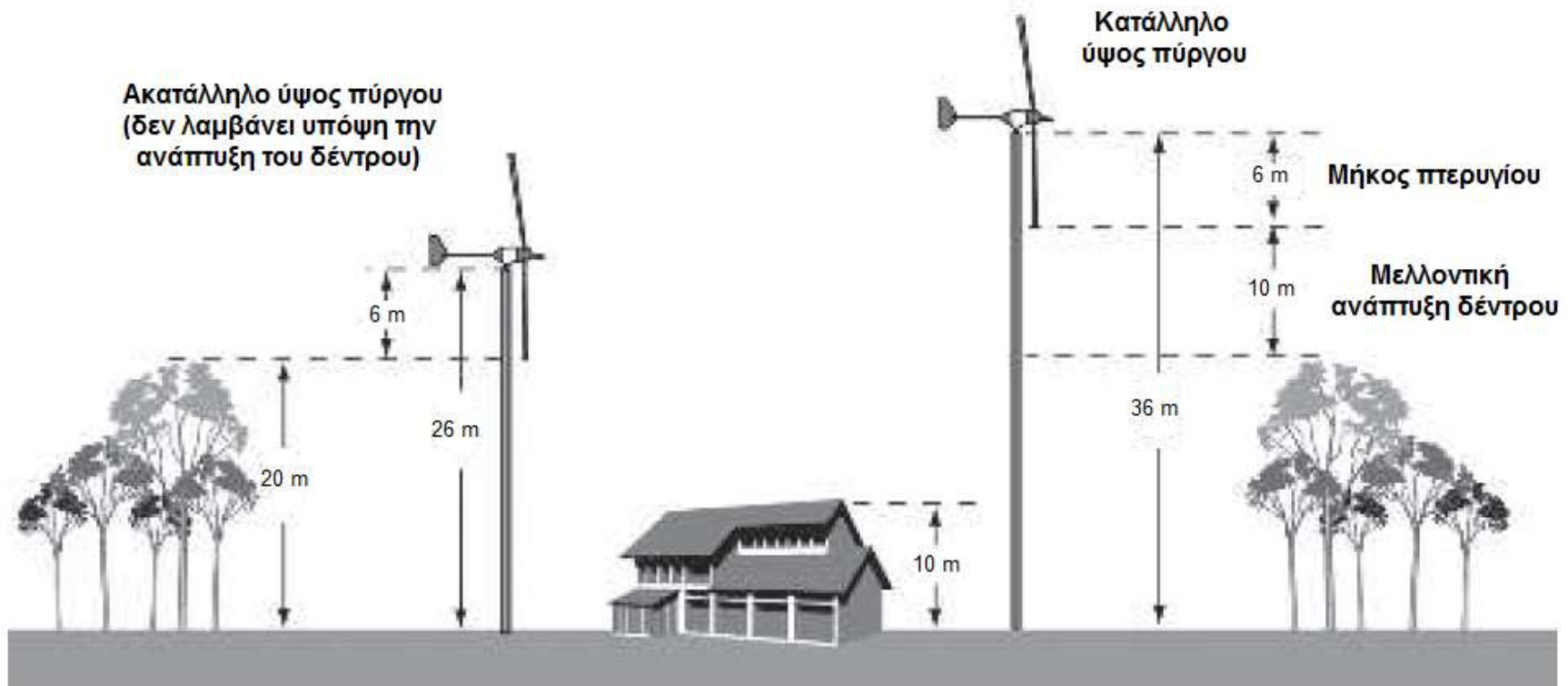
Τυπικές παραδοχές **αυτόνομου συστήματος:**

- μέση ετήσια απόδοση μετατροπέα AC/DC (converter): 90%÷96%
- μέση ετήσια απόδοση ρυθμιστή φόρτισης 87%÷93%
- μέση ετήσια απόδοση μετατροπέα συχνότητας (inverter): 90%÷96%
- απώλειες καλωδιώσεων μεταφοράς: 1%÷4%
- συνολική απόδοση συστήματος αποθήκευσης και απόδοσης της αποθηκευμένης ενέργειας στο μετατροπέα συχνότητας: 80%÷90%

Τοποθέτηση Α/Γ στον περιβάλλοντα χώρο κτηρίου



Επίπεδο δέντρων και επιλογή ύψους μικρών Α/Γ



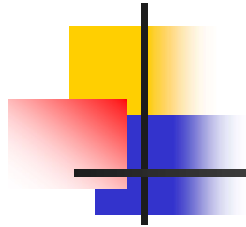
Τοποθέτηση Α/Γ επάνω σε κτήρια





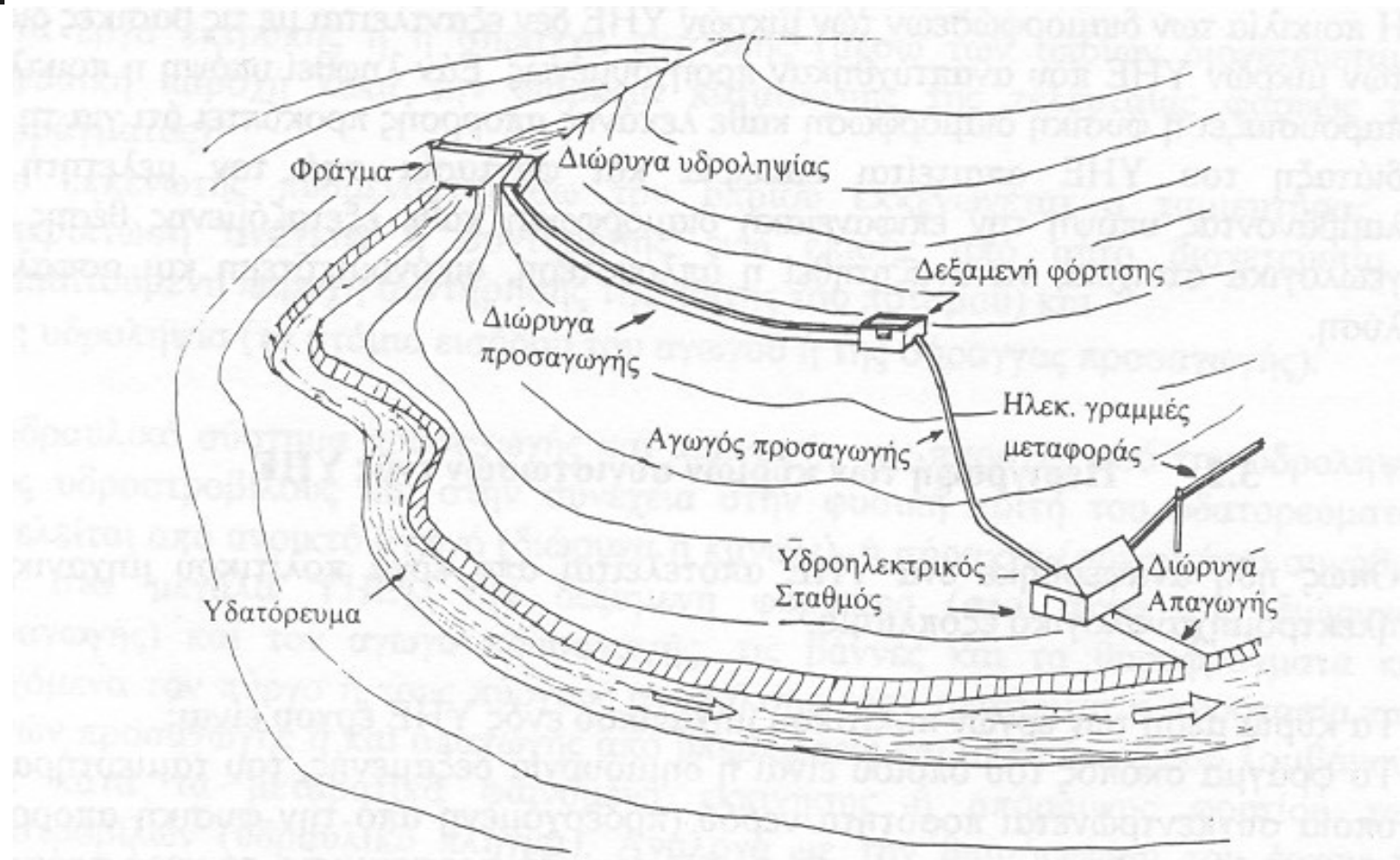
Ενσωμάτωση Α/Γ σε κτήρια





Άλλες τεχνολογίες ΑΠΕ και αποθήκευσης ενέργειας

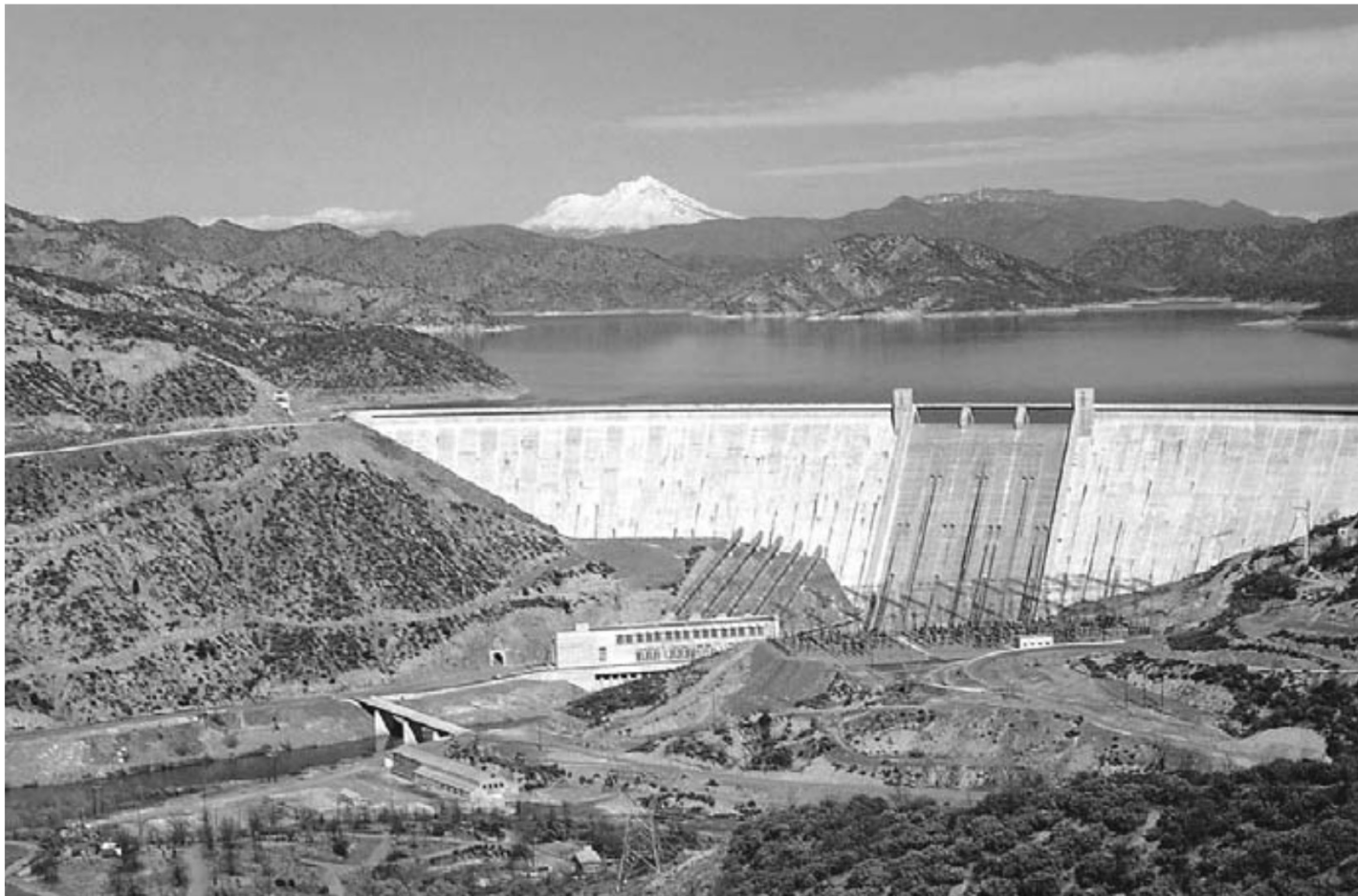
Διαμόρφωση μικρού υδροηλεκτρικού έργου (ΥΗΕ)



Εγκαταστάσεις μικρών ΥΗΕ

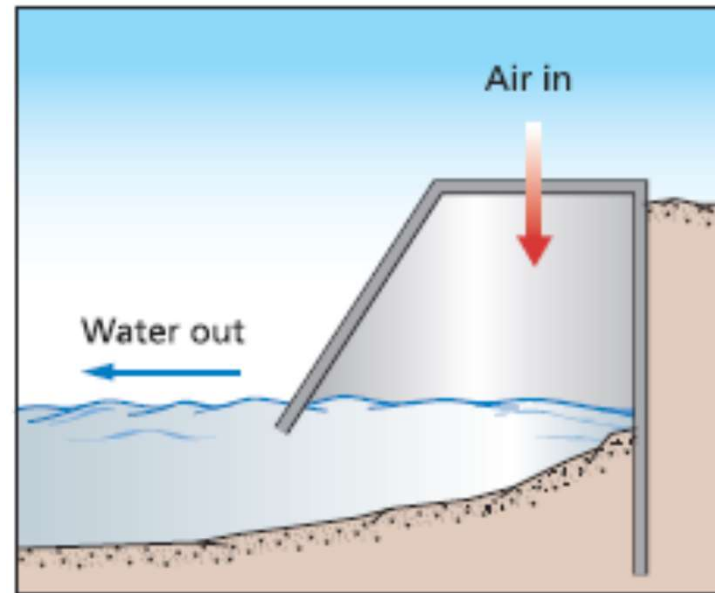
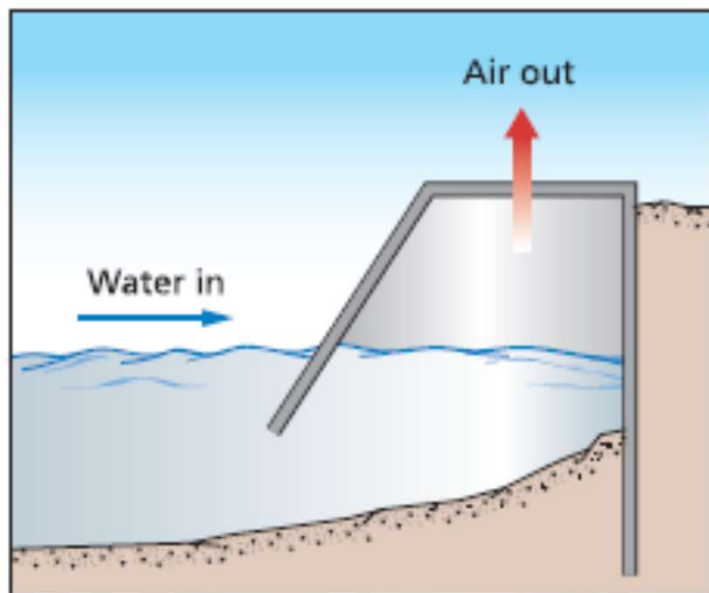


Μεγάλο ΥΗΕ



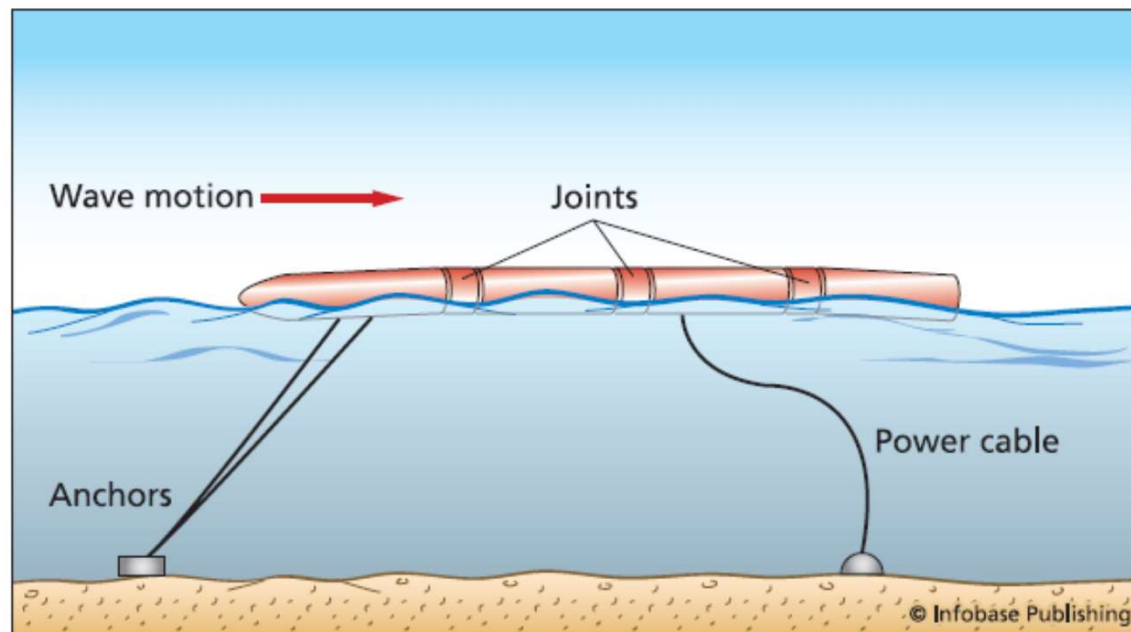
Κυματική ενέργεια – Ταλαντευόμενη στήλη νερού

Έχει την αρχή λειτουργίας της τρόμπας του ποδηλάτου



Κυματική ενέργεια – Σύστημα Pelamis

Αποτελείται από 4 κυλινδρικά τμήματα που ενώνονται με 3 αρθρώσεις. Καθώς το κύμα περνά διαμέσου των κυλίνδρων, τείνει να κάμψει τις αρθρώσεις. Η δύναμη κάμψης χρησιμοποιείται από μια αντλία, που στέλνει λάδι σε έναν κινητήρα, ο οποίος περιστρέφει τη γεννήτρια (παρόμοια με ένα ΥΗΕ).



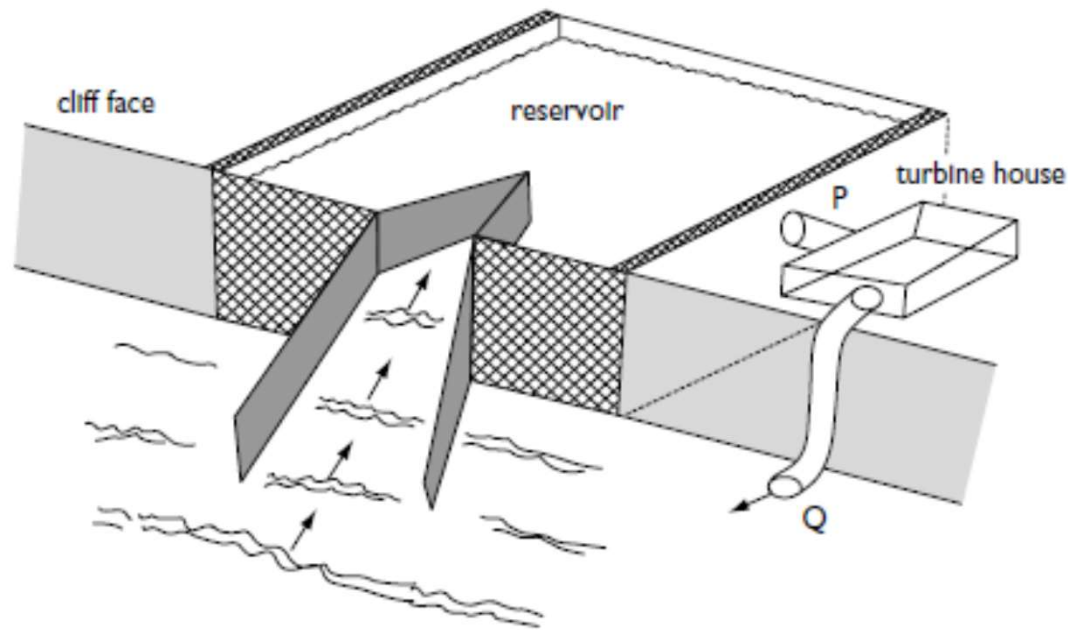
Κυματική ενέργεια – Σύστημα Pelamis

Συστήματα τέτοιου τύπου έχουν εγκατασταθεί στην Πορτογαλία και τη Σκωτία



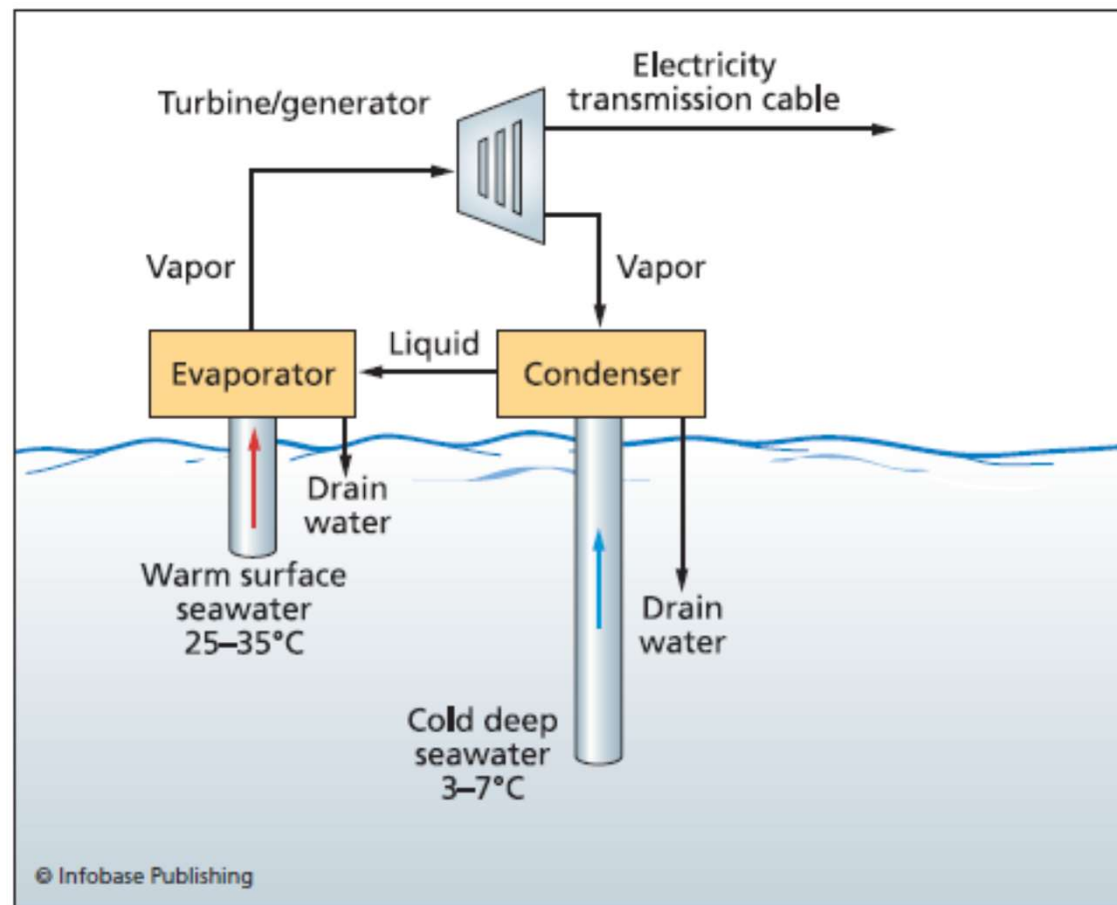
Κυματική ενέργεια – Συστήματα που «συλλαμβάνουν» το νερό

Λειτουργεί αντίστοιχα με ένα ΥΗΕ χαμηλού υδροδυναμικού ύψους



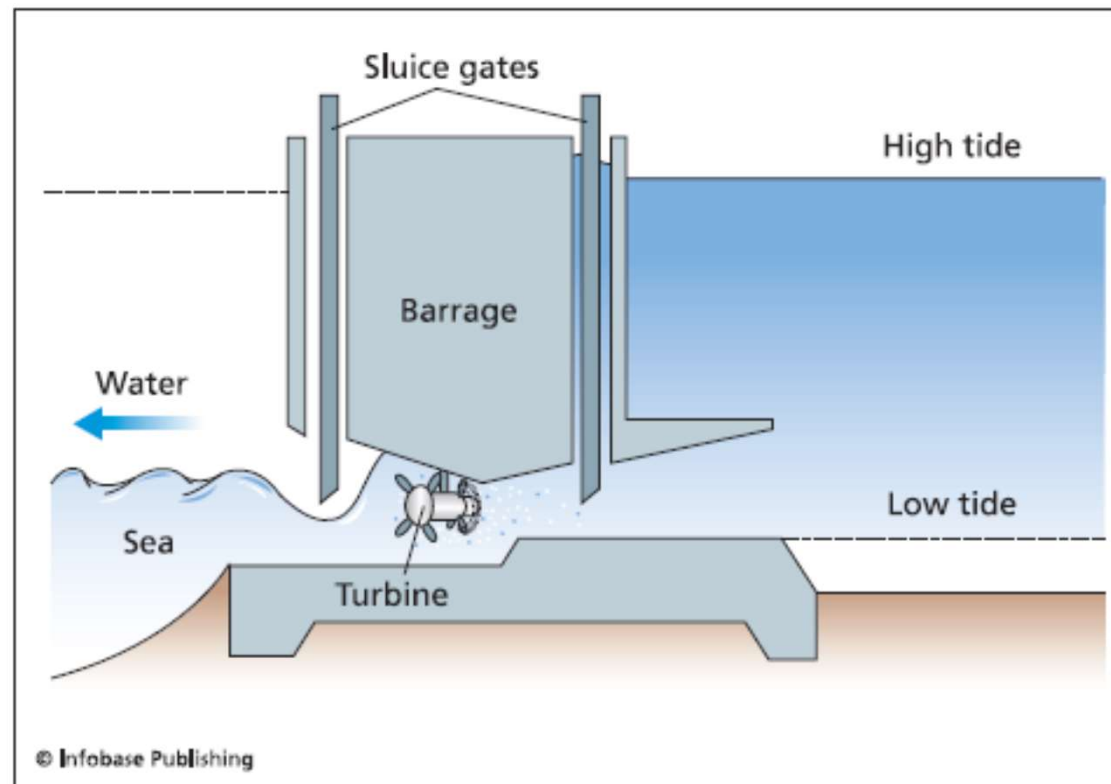
Θερμική μετατροπή ενέργειας ΤΩΝ ΩΚΕΑΝΩΝ

- Με διαφορά θερμοκρασίας 20°C , η θεωρητική απόδοση είναι 6.7%
- Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις της αντλίας, η απόδοση πέφτει στο 2-3%
- Βάθος της τάξης των 1000m
- Για την παραγωγή 1MW απαιτείται παροχή ζεστού νερού $4\text{m}^3/\text{s}$ και κρύου νερού $2\text{m}^3/\text{s}$



Παλιρροιακή ενέργεια με χρήση φράγματος

Λειτουργεί αντίστοιχα με ένα ΥΗΕ χαμηλού υδροδυναμικού ύψους



Εγκατάσταση στη Γαλλία (Βρετάνη)



Παλιρροιακή ενέργεια – Γεννήτριες χωρίς φράγμα

Αντίστοιχη τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκμετάλλευση μεγάλων θαλάσσιων ρευμάτων (π.χ., Gulf Stream)

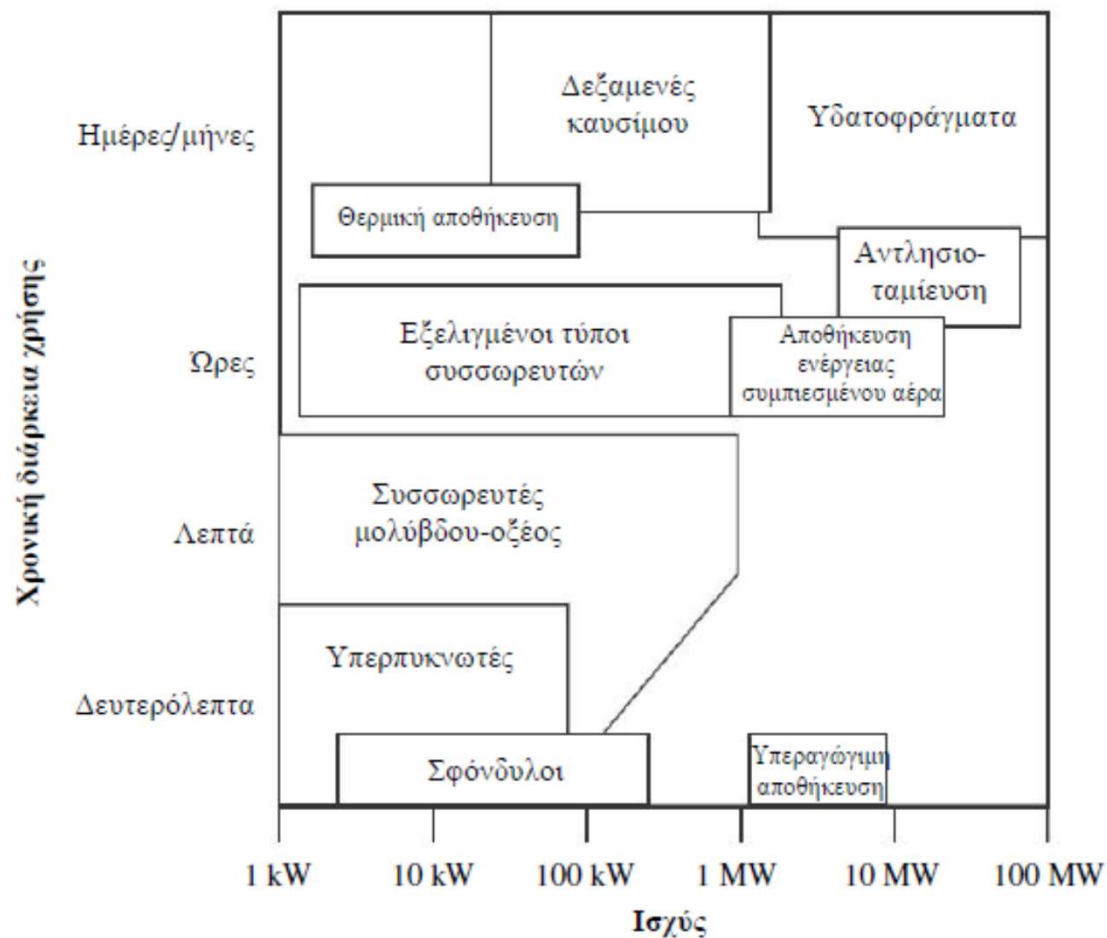




Αποθήκευση ενέργειας

- Ηλεκτρική αποθήκευση (για παροχή εφεδρείας και εξομάλυνση καμπύλης φορτίου ή αποφυγή αποκοπής παραγωγής από ΑΠΕ)
 - Μπαταρίες
 - Αντλησιοταμίευση
 - Σφόνδυλοι (Flywheels)
 - Λοιπές αποθηκευτικές διατάξεις (αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα, υπεραγώγιμη αποθήκευση, υπερπυκνωτές, κλπ)
- Μη ηλεκτρική αποθήκευση
 - Θερμική Ενέργεια (ψύξη/θέρμανση)
 - Παραγωγή και διάθεση Υδρογόνου

Εφαρμογές Αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας



Σύνοψη εφαρμογών και πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας

Αποθηκευτική Διάταξη	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμογές Ισχύος	Εφαρμογες Ενέργειας	Συνήθης εφαρμογή
Μπαταρίες ροής (flow): PSB, VRBr, ZnBr	Υψηλή χωρητικότητα, ανεξάρτητη εκτίμηση ισχύος - ενέργειας	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	/		Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών
Μολύβδου - οξέος	Χαμηλό αρχικό κόστος	Περιορισμένος κύκλος ζωής σε βαθιά εκφόρτιση		-	Εξομάλυνση αιχμών
Ni - Cd	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, απόδοση			/	Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Li - ion	Υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή απόδοση	Υψηλό κόστος παραγωγής, απαιτεί ειδικό κύκλωμα φόρτισης		-	Κινητή τηλεφωνία, υποσταθμοί ενέργειας
NaS	Υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή απόδοση	Κόστος παραγωγής, μέτρα ασφαλείας (λόγω σχεδιασμού)			Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Σφόνδυλοι (flywheels)	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας		-	Εξομάλυνση ισχύος για λίγα λεπτά
SMES (Υπεραγωγήμη Μαγνητική Αποθήκευση),	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλό κόστος παραγωγής			Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
E.C Capacitors[257]	Μεγάλος κύκλος ζωής, υψηλή απόδοση	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας		/	Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
Αντλησιοταμίευση (pumped storage)	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία			Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλο χρονικό διάστημα
Ενεργειακή Αποθήκευση Συμπιεσμένου αέρα CAES	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία για τις χρησιμοποιούμενες κοιλότητες			Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλο χρονικό διάστημα

| : πλήρως κατάλληλο και λογικό

/ : λογικό για αυτή την εφαρμογή

- : εφικτό αλλά όχι αρκετά πρακτικό ή οικονομικό
κανένα σύμβολο:

μη

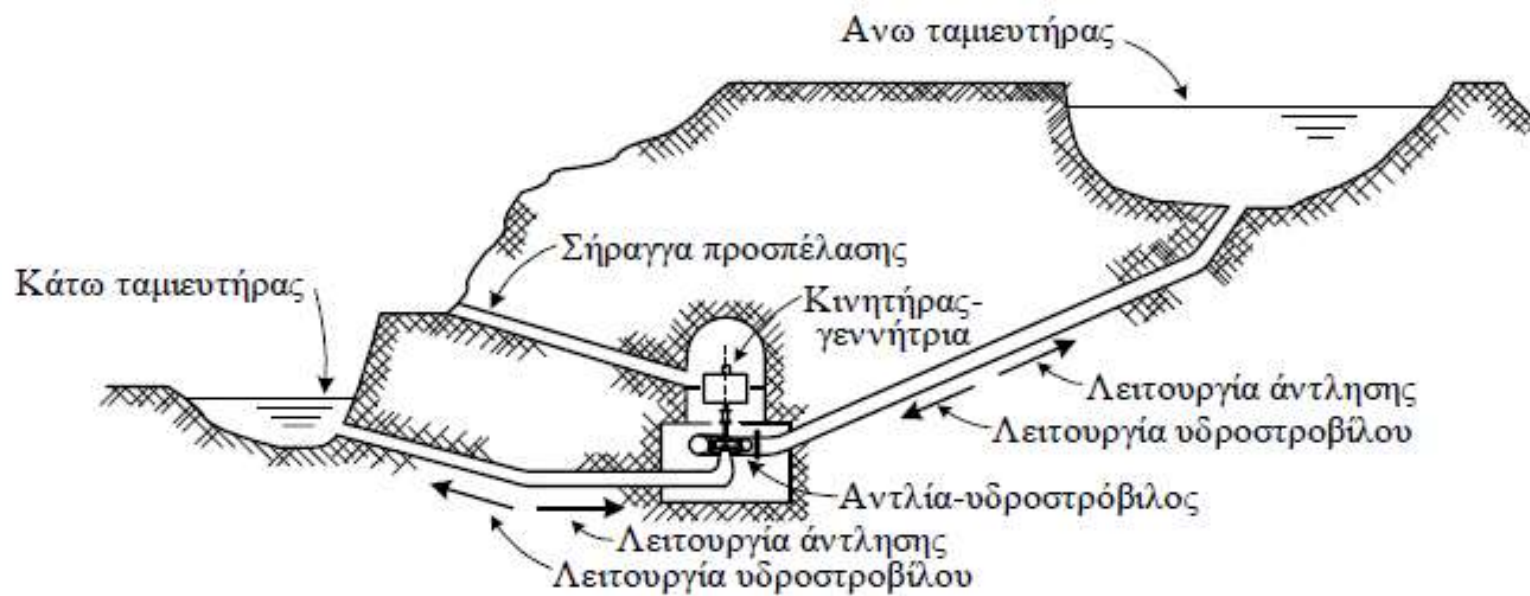
εφικτό

ή

μη

οικονομικό

Αντλησιοταμίευση



Αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (CAES)

