

**CLEAN ENERGY PROJECT ANALYSIS:  
RETScreen® ENGINEERING & CASES TEXTBOOK**



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ :  
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΓΩΝ ΑΙΟ-  
ΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

*CANMET Energy Technology  
Centre - Varennes (CETC)*

In collaboration with:



---

**Disclaimer**

This publication is distributed for informational purposes only and does not necessarily reflect the views of the Government of Canada nor constitute an endorsement of any commercial product or person. Neither Canada, nor its ministers, officers, employees and agents make any warranty in respect to this publication nor assume any liability arising out of this publication.

© Minister of Natural  
Resources Canada 2001 - 2004.

---



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	3
1.1 Περιγραφή των Ανεμοκινητήρων.....	5
1.2 Αγορές εφαρμογών αιολικής ενέργειας.....	7
1.2.1 Εφαρμογές εκτός – δικτύου.....	7
1.2.2 Εφαρμογές εντός – δικτύου.....	8
2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ RETSCREEN ΕΡΓΩΝ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	11
2.1 Τυπική Ενεργειακή Παραγωγή.....	12
2.1.1 Κατανομή ταχύτητας ανέμου.....	12
2.1.2 Ενεργειακή καμπύλη.....	13
2.1.3 Τυπική Ενεργειακή Παραγωγή.....	13
2.2 Ακαθάριστη Ενεργειακή Παραγωγή.....	14
2.3 Αποδιδόμενη Ανανεώσιμη Ενέργεια.....	15
2.3.1 Συλλεγόμενη ανανεώσιμη ενέργεια.....	15
2.3.2 Βαθμός απορρόφησης και αποδιδόμενη ανανεώσιμη ενέργεια.....	15
2.3.3 Διαθέσιμη πλεονάζουσα ανανεώσιμη ενέργεια.....	16
2.3.4 Ειδική απόδοση.....	16
2.3.5 Συντελεστής δυναμικότητας αιολικής εγκατάστασης.....	17
2.4 Έλεγχος εγκυρότητας.....	17
2.4.1 Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλου RETScreen συγκρινόμενο με ωριαίο μοντέλο.....	17
2.4.2 Έλεγχος εγκυρότητας μοντέλου RETScreen συγκρινόμενο με καταγεγραμμένα δεδομένα.....	21
2.5 Σύνοψη.....	22
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	23

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΡΓΩΝ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

*Ανάλυση Έργων Καθαρής Ενέργειας: Το RETScreen Engineering & Cases είναι ένα ηλεκτρονικό εγχειρίδιο για επαγγελματίες και πανεπιστημιακούς φοιτητές. Το κεφάλαιο αυτό καλύπτει την ανάλυση έργων αιολικής ενέργειας με τη χρήση του RETScreen International Clean Energy Project Analysis Software, και συμπεριλαμβάνει την λεπτομερή περιγραφή των αλγορίθμων και του τεχνολογικού υπόβαθρου στο οποίο στηρίζεται το λογισμικό RETScreen. Μια συλλογή περιπτώσεων μελετών (case studies) με επισημάνσεις, επεξεργασμένες λύσεις και πληροφορίες για το πως τα έργα εφαρμόζονται στην πράξη, είναι διαθέσιμη στο RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre Website [www.retscreen.net](http://www.retscreen.net).*

### 1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΥΠΟΒΑΘΡΟ<sup>1</sup>

Η κινητική ενέργεια του ανέμου είναι μια υποσχόμενη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας με σημαντικό δυναμικό σε πολλά μέρη του κόσμου. Η ενέργεια που μπορεί να συλληφθεί από τις ανεμογεννήτριες εξαρτάται πολύ από την τοπική μέση ταχύτητα του ανέμου. Περιοχές που συνήθως παρουσιάζουν ελκυστικό αιολικό δυναμικό είναι οι παράκτιες περιοχές, οι ηπειρωτικές περιοχές με ανοικτό ορίζοντα και οι νησιωτικές. Μερικές ορεινές περιοχές παρουσιάζουν επίσης καλό αιολικό δυναμικό. Παρά τους γεωγραφικούς περιορισμούς, υπάρχει αφθονία εδαφών στις περισσότερες περιοχές του κόσμου όπου η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας μπορεί να καλύψει σημαντικό ποσοστό των αναγκών σε ηλεκτρισμό (Rangi et al., 1992).



*Εικόνα 1. Εγκατάσταση αιολικού πάρκου 39.6 MW στην Ισπανία.*

- 
1. Αποσπάσματα αυτού του κειμένου προέρχονται από τις δύο ακόλουθες εκθέσεις του CANMET: *Wind Energy Basic Information*, Backgrounder, εκδοθείσα από την Canadian Wind Energy Association (CanWEA), και, *Canadian Wind Energy Technical and Market Potential*, των Rangi R., Templin J., Carpentier M. και Argue D., εκδόσεις Energy, Mines and Resources Canada (CANMET), ON, Canada, October 1992.

Η παγκόσμια ζήτηση σε ανεμογεννήτριες αυξάνει ταχύτατα τα τελευταία 15 χρόνια. Μόνο το έτος 2001, η βιομηχανία αιολικής ενέργειας εγκατέστησε αιολική ισχύ περίπου 5.500 MW. Σταθμοί με μεγαλύτερη από 24.000 MW εγκατεστημένης αιολικής ισχύος υπολογίζεται αυτή τη στιγμή ότι λειτουργούν ανά τον κόσμο (Wind Power Monthly, 2001). Κατά πολύ, αυτή η ανάπτυξη προέρχεται από την ανάγκη για εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν ‘καθαρότερα’ καύσιμα. Στην Εικόνα 1 φαίνεται ένα αιολικό πάρκο μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών που κατατάσσεται στην κατηγορία των πολλαπλών MW. Τη τελευταία δεκαετία, η ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από μια μόνο τυπική στροβιλομηχανή έχει αυξηθεί από τα 100 kW στο 1 MW περίπου, ακόμα και σε εγκαταστάσεις εκτός ξηράς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Αποτέλεσμα όλης αυτής της προόδου αποτελεί το ότι σε πολλές περιοχές του κόσμου, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικές εγκαταστάσεις υψηλής κλίμακας, πραγματοποιείται με οικονομικό κόστος, ανταγωνίσιμο με αυτό των συμβατικών εγκαταστάσεων παραγωγής ισχύος (πυρηνικά, πετρέλαιο, άνθρακας).



*Εικόνα 2: Ανεμοκινητήρες των 2 MW σε ενδοθαλάσσιο αιολικό πάρκο των 40 MW στην Δανία.*

Πέρα από τις εφαρμογές υψηλής κλίμακας, υπάρχει ένας αριθμός άλλων εφαρμογών όπως, μεσαίας κλίμακας, σε απομονωμένα και μη-διασυνδεδεμένα στο κεντρικό δίκτυο συστήματα, για άντληση νερού ή με μικρότερη ηλεκτρική συνεισφορά για φόρτιση μπαταριών.

Οι εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας είναι γενικά περισσότερο οικονομικά βιώσιμες σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δυναμική ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητάς του. Παρ' όλα αυτά, πρακτικά η παραγωγή ισχύος μιας ανεμογεννήτριας είναι συνήθως ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου. Η διαφορά αυτή σχετίζεται με τα αεροδυναμικά, μηχανικά και ηλεκτρικής μετατροπής χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από μια ανεμογεννήτρια αυξάνει κατά περίπου 20 % για κάθε 10% αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η επιλογή της θέσης εγκατάστασης είναι κρίσιμη για την οικονομική βιωσιμότητα του εγχειρήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή η ανθρώπινη αντίληψη του ανέμου συνήθως βασίζεται σε βραχυπρόθεσμες παρατηρήσεις ακραίων καιρικών φαινομένων όπως μια θύελλα ή ένα ψυχρό ρεύμα αέρα, καθεμία από αυτές τις 'ταχύτητες ανέμου' θα μπορούσε λανθασμένα να ερμηνευτεί ως αντιπροσωπευτική μιας ανεμώδους περιοχής. Η σωστή εκτίμηση της αιολικής πηγής είναι βασικός και σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας.

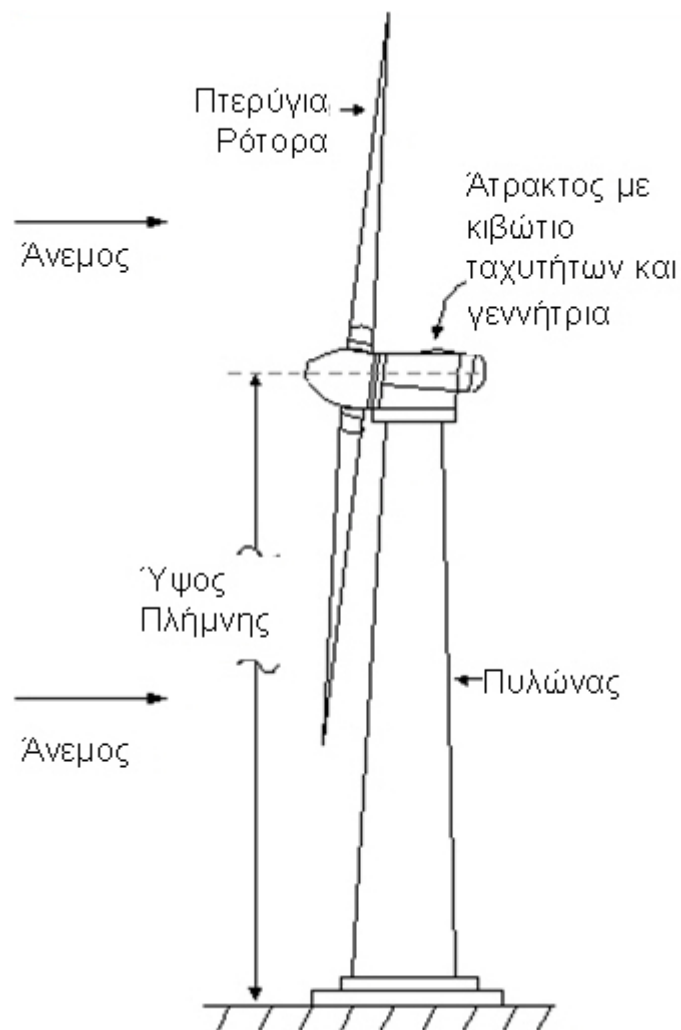
## 1.1 Περιγραφή των Ανεμοκινητήρων

Η τεχνολογία ανεμοκινητήρων έχει φθάσει κατά τη διάρκεια των τελευταίων 15 ετών σε ώριμη κατάσταση, ως αποτέλεσμα του διεθνούς εμπορικού ανταγωνισμού, της μαζικής παραγωγής και των συνεχιζόμενων τεχνικών επιτευγμάτων στην έρευνα και την ανάπτυξη (R&D). Οι πρότερες ανησυχίες, ότι οι ανεμοκινητήρες ήταν ακριβοί και αναξιόπιστοι, έχουν μετριασθεί κατά μεγάλο μέρος. Οι δαπάνες για εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας έχουν μειωθεί και η τεχνική διαθεσιμότητα ανεμοκινητήρων είναι τώρα σαφώς άνωθεν του 97 %. Οι συντελεστές δυναμικότητας των αιολικών εγκαταστάσεων έχουν βελτιωθεί επίσης από 15% σε πάνω από 30% σήμερα, για περιοχές με καλό αιολικό δυναμικό (Rangi et Al, 1992).

Τα σύγχρονα αιολικά ενεργειακά συστήματα λειτουργούν αυτόματα. Οι ανεμοκινητήρες εξαρτώνται από τις ίδιες αεροδυναμικές δυνάμεις που δημιουργούνται στα πτερύγια ενός αεροπλάνου, ώστε να προκληθεί περιστροφή. Ένα ανεμόμετρο που μετρά συνεχώς την ταχύτητα του αέρα είναι μέρος των περισσότερων συστημάτων ελέγχου των ανεμοκινητήρων. Όταν η ταχύτητα του αέρα είναι αρκετά υψηλή για να υπερνικήσει την τριβή στο δρομέα του ανεμοκινητήρα, οι έλεγχοι επιτρέπουν στο στροφέιο να περιστραφεί, με αποτέλεσμα τη μικρή φυσικά ποσότητα ισχύος. Αυτή η ταχύτητα του ανέμου στην οποία ο ανεμοκινητήρας ξεκινάει ονομάζουμε ταχύτητα έναρξης λειτουργίας ( $V_{cut-in}$ ) και είναι συνήθως ένα ελαφρύ αεράκι της τάξης των 4 m/s. Η παραγωγή ισχύος αυξάνεται γοργά καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται. Όταν η παραγωγή φθάσει στη μέγιστη ισχύ σύμφωνα με την οποία έχουν σχεδιαστεί τα μηχανολογικά εξαρτήματα, τα συστήματα ελέγχου επεμβαίνουν και σταθεροποιούν την ισχύ στην ονομαστική της τιμή. Η ταχύτητα του ανέμου στην οποία επιτυγχάνεται η ονομαστική ισχύς της μηχανής-γεννήτριας καλείται ονομαστική ταχύτητα ανέμου και είναι συνήθως ένας ισχυρός άνεμος περίπου 15 m/s. Τελικά, εάν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί κατά πολύ παραπάνω, το σύστημα ελέγχου κλείνει τον ανεμοκινητήρα για λόγους ασφαλείας. Αυτή η ταχύτητα του ανέμου διακοπής της λειτουργίας είναι συνήθως περίπου 25 m/s.

Τα βασικά τμήματα των σύγχρονων συστημάτων αιολικής ενέργειας συνίστανται στα εξής:

- Δρομέας, με 2 ή 3 πτερύγια, ο οποίος μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια του άξονα του δρομέα.
- Κιβώτιο ταχυτήτων που συναρμολύει τον αργά στρεφόμενο άξονα του δρομέα με την ηλεκτρική γεννήτρια.
- Πύργος στήριξης του δρομέα σε μεγάλο ύψος για την εκμετάλλευση των μεγαλύτερων ταχυτήτων του αέρα.
- Στερεή θεμελίωση για την αποτροπή κατάρρευσης του ανεμοκινητήρα από ισχυρούς ανέμους και/ή κάτω από συνθήκες παγετού.
- Συστήματα ελέγχου για την έναρξη και διακοπή της λειτουργίας του ανεμοκινητήρα και τη παρακολούθηση της σωστής λειτουργίας των μηχανισμών.



Εικόνα 3: Διάταξη ανεμοκινητήρα οριζοντίου άξονα.



Στην Εικόνα 3 φαίνεται διάταξη ενός τυπικού ανεμοκινητήρα οριζοντίου άξονα. Ο ανεμοκινητήρας κάθετου άξονα είναι ένας εξίσου εφαρμόσιμος εναλλακτικός σχεδιασμός, αν και δεν συνηθίζεται σε πρόσφατες υλοποιήσεις εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας.

## 1.2 Αγορές εφαρμογών αιολικής ενέργειας

Οι αγορές αιολικής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν βάσει της τελικής τεχνολογικής της χρήσης. Οι εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας συνηθίζονται για εφαρμογές εκτός – δικτύου (μη διασυνδεδεμένα συστήματα). Εντούτοις, οι μεγαλύτερες αγοραστικές δυνατότητες απαντώνται σε εφαρμογές εντός – δικτύου (διασυνδεδεμένα συστήματα).

### 1.2.1 Εφαρμογές εκτός – δικτύου

Ιστορικά, η αιολική ενέργεια ήταν ανταγωνιστικότερη στις απομακρυσμένες περιοχές, μακριά από το ηλεκτρικό δίκτυο και όπου υπήρχαν σχετικά μικρές απαιτήσεις ισχύος, λιγότερες από 10 kW. Σε αυτές τις εφαρμογές εκτός – δικτύου, η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται κύρια για τη φόρτιση μπαταριών που αποθηκεύουν την ενέργεια που συλλαμβάνεται από τις ανεμογεννήτριες και την παρέχουν στο χρήστη σύμφωνα με την ζήτηση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4. Η άντληση νερού, λαμβάνοντας υπόψη και την σχετικά μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας για μελλοντική χρήση του νερού, αποτελεί επίσης μια βασική ιστορική εφαρμογή της αιολικής ενέργειας.



*Εικόνα 4: Ανεμοκινητήρας 10 kW εκτός – δικτύου στο Μεζικό.*

## 1.2.2 Εφαρμογές εντός – δικτύου

Στις εφαρμογές εντός δικτύου το σύστημα αιολικής ενέργειας τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια άμεσα το ηλεκτρικό δίκτυο. Δύο τύποι εφαρμογών εντός – δικτύου μπορούν να διακριθούν.

1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με διασύνδεση σε απομονωμένο δίκτυο (τυπικές μονάδες των 10 ως 200 kW).
2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με διασύνδεση σε κεντρικό δίκτυο (τυπικές μονάδες των 200 kW ως 2 MW).

- Απομονωμένα δίκτυα

Απομονωμένα δίκτυα αναπτύσσονται συνήθως σε απομακρυσμένες (π.χ. νησιωτικές) περιοχές. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι συχνά σχετικά ακριβή εξαιτίας του υψηλού κόστους μεταφοράς καυσίμων (π.χ. diesel) σε αυτές τις απομονωμένες περιοχές. Εντούτοις, εάν στην περιοχή πνέουν ικανοποιητικής έντασης άνεμοι, μια μικρή μονάδα αιολικής ενέργειας θα μπορούσε να εγκατασταθεί, για να συνδράμει στην κάλυψη μέρους των ηλεκτρικών αναγκών. Αυτές οι εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας κανονικά αναφέρονται ως αιολικά-diesel υβριδικά συστήματα. Ο πρωταρχικός ρόλος του συστήματος αιολικής ενέργειας είναι να μειώσει το ποσό κατανάλωσης καυσίμου diesel. Ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.



*Εικόνα 5: Ανεμοκινητήρας 50 kW απομονωμένου δικτύου στην Αρκτική.*



## - Κεντρικά δίκτυα

Οι εφαρμογές αιολικής ενέργειας με διασύνδεση σε κεντρικά δίκτυα γίνονται ολοένα και πιο διαδεδομένες. Σε περιοχές με αξιόλογο αιολικό δυναμικό, ανεμογεννήτριες μεγαλύτερης κλίμακας τοποθετούνται πολλές μαζί, και δημιουργείται έτσι ένα αιολικό πάρκο με δυναμικότητα πολλών MW. Αν η γη μέσα στο αιολικό πάρκο είναι εύφορη τότε χρησιμοποιείται συνήθως για γεωργικούς σκοπούς. Μια άλλη συνήθης προσέγγιση στην ανάπτυξη μονάδων αιολικής ενέργειας αποτελεί η εγκατάσταση ενός ή περισσότερων ανεμογεννητριών μεγάλης ισχύος από ιδιώτες, επιχειρήσεις ή συνεταιρισμούς.

Ένα αιολικό πάρκο, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6, αποτελείται από έναν αριθμό ανεμογεννητριών (που εγκαθίστανται συχνά σε σειρές κάθετες στην κατεύθυνση του επικρατούντος ανέμου), τους δρόμους πρόσβασης, τις ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς και έναν υποσταθμό, ένα σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου και ένα κτίριο συντήρησης για τα μεγαλύτερα πάρκα. Η ανάπτυξη μιας εγκατάστασης αιολικής ενέργειας περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της αιολικής πηγής (αιολικό δυναμικό), την απόκτηση όλων των εγκρίσεων και των αδειών, το σχεδιασμό και τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών, μηχανολογικών και πολιτικού μηχανικού υποδομών, το σχεδιάγραμμα των ανεμοκινητήρων, την αγορά του εξοπλισμού, την κατασκευή και την επίβλεψη-διαχείριση της εγκατάστασης.



*Εικόνα 6: Αιολικό πάρκο στις Ηνωμένες Πολιτείες*

Η αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού και οι εγκρίσεις για την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου είναι συχνά οι πιο χρονοβόρες διαδικασίες. Αυτές μπορούν να πάρουν μέχρι 4 έτη, στην περίπτωση ενός μεγάλου αιολικού πάρκου, που απαιτεί μια περιεκτική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ίδια η κατασκευή μπορεί κανονικά να ολοκληρωθεί μέσα σε ένα έτος. Ο ακριβής προσδιορισμός του αιολικού δυναμικού σε ένα δεδομένο τόπο είναι μια από τις σημαντικότερες πτυχές στην ανάπτυξη μιας εγκατάστασης αιολικής ενέργειας, δεδομένου ότι το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό κάποιας τοποθεσίας μπορεί να προσκρούει στο κόστος παραγωγής ενέργειας. Στην περίπτωση που μια προμελέτη δείχνει ότι μια προτεινόμενη εγκατάσταση αιολικής ενέργειας θα μπορούσε να είναι οικονομικά βιώσιμη, συνιστάται η λήψη ανεμολογικών μετρήσεων για τουλάχιστον ένα χρόνο στην ακριβή θέση της μελλοντικής εγκατάστασης (Brothers, 1993), (CanWEA, 1996) και (Lynette et Al, 1992). Στην

Εικόνα 7 φαίνεται η εγκατάσταση μετεωρολογικού ιστού ύψους 40 m. στο κέντρο ενεργειακής τεχνολογίας CANMET στη Varennes του Καναδά.



*Εικόνα 7: Ιστός μετεωρολογικών μετρήσεων ύψους 40 m.*

Για πολύ μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις (π.χ. φόρτιση μπαταριών εκτός – δικτύου και άντληση νερού), το κόστος παρακολούθησης του ανέμου θα μπορούσε να είναι πραγματικά υψηλότερο από το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του ανεμοκινητήρα. Σ' αυτή την περίπτωση μια λεπτομερής αξιολόγηση των αιολικών πόρων κανονικά δεν συνιστάται.

## 2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ RETSCREEN ΕΡΓΩΝ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

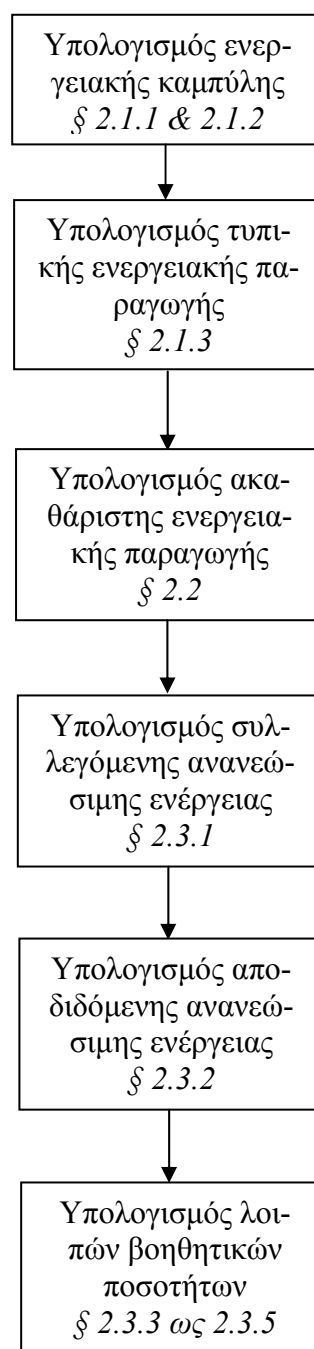
Το μοντέλο RETScreen International για έργα αιολικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως για την αξιολόγηση της παραγωγής ενέργειας, του κόστους κύκλου ζωής, τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, για εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας κεντρικού, απομονωμένου και εκτός δικτύου για ποικιλία μεγεθών, από μεγάλης κλίμακας αιολικά πάρκα πολλαπλών-Α/Γ έως μικρής κλίμακας ενός ανεμοκινητήρα υβριδικά συστήματα.

Έξι φύλλα εργασίας (*Ενεργειακό Μοντέλο, Δεδομένα Εξοπλισμού, Ανάλυση Κόστους, Ανάλυση Μείωσης Εκπομπών Αερίων του Θερμοκηπίου (Ανάλυση ΑΤΘ), Οικονομική Σύνοψη και Ευαισθησία - Ανάλυση Κινδύνου*) περιέχονται στο ενιαίο αρχείο εργασίας.

Τα φύλλα εργασίας «*Ενεργειακό Μοντέλο*» και «*Δεδομένα Εξοπλισμού*» ολοκληρώνονται πρώτα. Το φύλλο εργασίας «*Ανάλυση Κόστους*» πρέπει έπειτα να συμπληρωθεί, ακολουθούμενο από την «*Οικονομική Σύνοψη*». Τα φύλλα εργασίας «*Ανάλυση ΑΤΘ*» και «*Ευαισθησία*» είναι προαιρετικά. Το φύλλο εργασίας «*Ανάλυση ΑΤΘ*» παρέχεται για να βοηθήσει στην εκτίμηση της δυνατότητας μετρίασμού αερίων του θερμοκηπίου (ΑΤΘ) από το υπό εξέταση έργο. Το φύλλο εργασίας «*Ευαισθησία*» παρέχεται για να βοηθήσει στην εκτίμηση της ευαισθησίας των σημαντικών οικονομικών δεικτών, σε σχέση με τις βασικές τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους. Γενικά, ο χρήστης εργάζεται από επάνω προς τα κάτω σε κάθε ένα από τα φύλλα εργασίας. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός του εγχειρήματος σε σχέση με τη χρήση ενέργειας και κόστους.

Για να βοηθηθεί ο χρήστης να χαρακτηρίσει ένα σύστημα αιολικής ενέργειας πριν αξιολογήσει το κόστος και την ενεργειακή του συμπεριφορά, προτείνονται μερικές τιμές, όπως ο 'συνιστώμενος βαθμός απορρόφησης αιολικής ενέργειας' για εγκαταστάσεις απομονωμένων δικτύων και εκτός - δικτύου. Οι προτεινόμενες ή εκτιμώμενες τιμές, που είναι βασισμένες στις παραμέτρους εισόδου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα πρώτο βήμα στην ανάλυση και δεν είναι απαραίτητα οι βέλτιστες τιμές.

Σ' αυτή την ενότητα περιγράφονται οι διάφοροι αλγόριθμοι του RETScreen που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί, σε ετήσια βάση, η παραγωγή ενέργειας αιολικών συστημάτων. Διάγραμμα ροής των αλγορίθμων φαίνεται στην Εικόνα 8. Ο υπολογισμός της καμπύλης ενέργειας και της τυπικής ενεργειακής παραγωγής περιγράφεται στην υπο-ενότητα 2.1. Η ακαθάριστη ενεργειακή παραγωγή, που λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της θερμοκρασίας και της ατμοσφαιρικής πίεσης, υπολογίζεται στην υπο-ενότητα 2.2. Ο υπολογισμός της καθαρής παραγωγής ενέργειας και της αποδιδόμενης ανανεώσιμης ενέργειας καλύπτεται στην υπο-ενότητα 2.3. Μια επιβεβαίωση του μοντέλου RETScreen για εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας παρουσιάζεται στην υπο-ενότητα 2.4.



Εικόνα 8. Διάγραμμα ροής μοντέλου αιολικών έργων.

Οι κύριοι περιορισμοί του μοντέλου είναι η μη-δυνατότητα ανάλυσης αυτόνομων συστημάτων αιολικής ενέργειας που απαιτούν αποθήκευση ενέργειας και ανεμοκινητήρων κάθετου άξονα. Επίσης, το μοντέλο απευθύνεται πρωταρχικά σε τεχνολογίες ‘χαμηλής διείδυσης’. Για να γίνει η κατάλληλη ανάλυση τεχνολογιών ‘υψηλής διείδυσης’ (υπό εξέλιξη σήμερα για συστήματα diesel απομονωμένου δικτύου), ο χρήστης θα πρέπει προσεκτικά να αξιολογήσει τον ‘βαθμό απορρόφησης της αιολικής ενέργειας’ και μάλλον θα χρειαστεί περισσότερες πληροφορίες. Παρ’όλα αυτά για την πλειοψηφία των αιολικών συστημάτων που έχουν εγκατασταθεί σήμερα ανά τον κόσμο, οι παραπάνω περιορισμοί δεν έχουν καμμία επιρροή.

## 2.1 Τυπική Ενεργειακή Παραγωγή

Το RETScreen υπολογίζει τη τυπική ενεργειακή παραγωγή από τους ανεμοκινητήρες. Είναι η ενέργεια που ένας ή περισσότεροι ανεμοκινητήρες θα παραγάγουν υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης. Ο υπολογισμός βασίζεται στην καμπύλη ενεργειακής παραγωγής του επιλεγμένου ανεμοκινητήρα (που εισάγεται στο φύλλο εργασίας «Δεδομένα Εξοπλισμού») και στη μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης για την προτεινόμενη περιοχή.

### 2.1.1 Κατανομή ταχύτητας ανέμου

Η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου, όταν αυτή απαιτείται (υπο-ενότητα 2.1.2), υπολογίζεται στο RETScreen ως συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull. Αυτή η κατανομή χρησιμοποιείται συχνά στην αιολική ενεργειακή μηχανική, μιας και συμφωνεί καλά στην παρατηρούμενη μακροπρόθεσμη κατανομή των μέσων ταχυτήτων ανέμου για πληθώρα περιοχών. Σε μερικές περιπτώσεις το μοντέλο χρησιμοποιεί επίσης τη κατανομή Rayleigh, η οποία είναι μια ειδική περίπτωση της κατανομής Weibull, όπου ο παράγοντας μορφής (που περιγράφεται κατωτέρω) είναι ίσος με 2.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull εκφράζει τη πιθανότητα  $p(x)$  να υφίσταται ταχύτητα ανέμου  $x$  κατά την διάρκεια του έτους, όπως παρακάτω (Hiester και Pennel, 1981):

$$p(x) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{x}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{C}\right)^k\right] \quad (1)$$

Αυτή η έκφραση είναι έγκυρη για  $k > 1$ ,  $x \geq 0$ , και  $C > 0$ . Το  $k$  είναι ο παράγοντας μορφής, ορισμένος από τον χρήστη. Ο παράγοντας μορφής τυπικά κυμαίνεται από 1 έως 3. Για δεδομένη μέση ταχύτητα ανέμου, μικρός παράγοντας μορφής υποδηλώνει σχετικά ευρεία κατανομή ταχυτήτων ανέμου γύρω από τη μέση τιμή, ενώ μεγάλος παράγοντας μορφής υποδηλώνει σχετικά στενή κατανομή ταχυτήτων ανέμου. Μικρός παράγοντας μορφής λογικά οδηγεί σε υψηλότερη ενεργειακή παραγωγή για δεδομένη μέση ταχύτητα ανέμου. Το  $C$  είναι ο παράγοντας κλίμακας και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση (Hiester και Pennel, 1981):

$$C = \frac{\bar{x}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2)$$

Όπου  $\bar{x}$  είναι η μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου και  $\Gamma$  η συνάρτηση Γάμμα.

Σε μερικές περιπτώσεις, το μοντέλο υπολογίζει τη κατανομή ταχύτητας ανέμου από την πυκνότητα της αιολικής ισχύος *WPD* του τόπου, παρά από την ταχύτητα του ανέμου. Οι σχέσεις μεταξύ της πυκνότητας αιολικής ισχύος *WPD* και της μέσης ταχύτητας ανέμου  $\bar{v}$  είναι:

$$WPD = \sum_{x=0}^{x=25} 0.5 \rho x^3 p(x) \quad (3)$$

$$\bar{v} = \sum_{x=0}^{x=25} x p(x) \quad (4)$$

Όπου  $\rho$  είναι πυκνότητα του αέρα και  $p(x)$  η πιθανότητα να φυσάει άνεμος ταχύτητας  $x$  κατά τη διάρκεια του έτους.

### 2.1.2 Ενεργειακή καμπύλη

Τα δεδομένα της ενεργειακής καμπύλης προσδιορίζουν το συνολικό ποσό της ενέργειας που ένας ανεμοκινητήρας παράγει μέσα σ' ένα εύρος μέσων ετήσιων ταχυτήτων ανέμου. Στο RETScreen, η ενεργειακή καμπύλη προσδιορίζεται σε εύρος 3 έως 15 m/s μέσων ετήσιων ταχυτήτων ανέμου, και παρίσταται γραφικά στο φύλλο εργασίας «Δεδομένα Εξοπλισμού».

Ο χρήστης μπορεί να ορίσει τα δεδομένα της ενεργειακής καμπύλης με την επιλογή μεταξύ τριών ακόλουθων πηγών δεδομένων: *Standard*, *Custom* και *User-defined*. Για τις περιπτώσεις *Standard* και *Custom*, το μοντέλο χρησιμοποιεί τα δεδομένα της καμπύλης ισχύος του ανεμοκινητήρα που εισάγονται από το χρήστη και τη συνάρτηση πιθανότητας Weibull που περιγράφηκε στην υπο-ενότητα 2.1.1, ώστε να υπολογίσει τα δεδομένα της ενεργειακής καμπύλης. Στην περίπτωση *User-defined*, ο χρήστης εισάγει άμεσα τα δεδομένα της ενεργειακής καμπύλης.

Στις περιπτώσεις *Standard* και *Custom*, ο χρήστης ορίζει τη καμπύλη ισχύος του ανεμοκινητήρα ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου ανά διαστήματα του 1 m/s, από 0 m/s ως 25 m/s. Κάθε σημείο στην ενεργειακή καμπύλη,  $E_{\bar{v}}$ , υπολογίζεται έπειτα ως εξής :

$$E_{\bar{v}} = 8760 \sum_{x=0}^{25} P_x p(x) \quad (5)$$

Όπου  $\bar{v}$  είναι η θεωρούμενη μέση ταχύτητα ανέμου ( $\bar{v} = 3,4,\dots,15$  m/s),  $P_x$  είναι η ισχύς του ανεμοκινητήρα στην ταχύτητα ανέμου  $x$  και  $p(x)$  η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull για την ταχύτητα ανέμου  $x$ , υπολογισμένη για μέση ταχύτητα ανέμου  $\bar{v}$ .

### 2.1.3 Τυπική Ενεργειακή Παραγωγή



Η τυπική ενεργειακή παραγωγή είναι η ενέργεια που παράγεται από τους ανεμοκινητήρες υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης. Ο υπολογισμός βασίζεται στη μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πλήμνης που επικρατεί στη προτεινόμενη περιοχή. Η ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πλήμνης είναι συνήθως σημαντικά υψηλότερη από την ταχύτητα του ανέμου που μετρείται στο ύψος του ανεμόμετρου λόγω αποκοπής του οριακού στρώματος του αέρα. Το μοντέλο χρησιμοποιεί την ακόλουθη εκθετική εξίσωση για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας στο ύψος της πλήμνης [ Gipe, 1995 ]:

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_0} = \left( \frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (6)$$

Όπου  $\bar{V}$  η μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πλήμνης  $H$ ,  $\bar{V}_0$  η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του ανεμόμετρου  $H_0$  και  $\alpha$  εκθέτης αποκοπής του αέρα. Οι τιμές του  $H$ ,  $H_0$ ,  $\bar{V}_0$  και  $\alpha$  ορίζονται από τον χρήστη<sup>2</sup>.

Από την στιγμή που η ετήσια μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης έχει υπολογιστεί, η τυπική ενεργειακή παραγωγή  $E_U$  υπολογίζεται από την ενεργειακή καμπύλη (υπο-ενότητα 2.1.2) για την τιμή  $\bar{V}$ .

## 2.2 Ακαθάριστη Ενεργειακή Παραγωγή

Η ακαθάριστη ενεργειακή παραγωγή είναι η συνολική ετήσια ενέργεια που παράγεται από το σύστημα αιολικής ενέργειας, πριν από οποιαδήποτε απώλειες, λόγω συνθηκών ταχύτητας ανέμου, ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας του τόπου. Χρησιμοποιείται στο RETScreen για να καθοριστεί η αποδιδόμενη ανανεώσιμη ενέργεια (υπο-ενότητα 2.3). Η ακαθάριστη ενεργειακή παραγωγή  $E_G$  υπολογίζεται ως εξής:

$$E_G = E_U c_H c_T \quad (7)$$

Όπου  $E_U$  είναι η τυπική ενεργειακή παραγωγή και  $c_H$  και  $c_T$  συντελεστές πίεσης και θερμοκρασίας, που δίνονται από τις σχέσεις:

$$c_H = \frac{P}{P_0} \quad (8)$$

$$c_T = \frac{T_0}{T} \quad (9)$$

Όπου  $P$  η ετήσια μέση ατμοσφαιρική πίεση,  $P_0$  η τυπική ατμοσφαιρική πίεση των 101,3 kPa,  $T$  η ετήσια μέση απόλυτη θερμοκρασία και  $T_0$  η τυπική απόλυτη θερμοκρασία των 288.1 K.

---

2. Η ίδια εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος των 10 m, θέτοντας  $H=10m$ . Αυτή η τιμή της ταχύτητας υπολογίζεται για να υπάρχει κοινό μέτρο σύγκρισης μεταξύ περιοχών όπου οι ταχύτητες του ανέμου μετρώνται σε διαφορετικό ύψος.

## 2.3 Αποδιδόμενη Ανανεώσιμη Ενέργεια

Το μοντέλο RETScreen υπολογίζει την ανανεώσιμη ενέργεια που παραδίδεται στο ηλεκτρικό δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες απώλειες. Εξετάζεται επίσης το ποσό της αιολικής ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο ή το φορτίο, στις ειδικές περιπτώσεις εφαρμογών απομονωμένου δικτύου και εκτός δικτύου.

### 2.3.1 Συλλεγόμενη ανανεώσιμη ενέργεια

Η συλλεγόμενη ανανεώσιμη ενέργεια ισούται με το παραγόμενο καθαρό ενεργειακό ποσό από το σύστημα αιολικής ενέργειας:

$$E_C = E_G c_L \quad (10)$$

Όπου  $E_G$  η ακαθάριστη ενεργειακή παραγωγή και  $c_L$  ο συντελεστής απωλειών που υπολογίζεται ως:

$$c_L = (1 - \lambda_a) (1 - \lambda_{s\&i}) (1 - \lambda_d) (1 - \lambda_m) \quad (11)$$

Όπου  $\lambda_a$  οι απώλειες διάταξης,  $\lambda_{s\&i}$  οι απώλειες από επικάθιση χώματος και πάγου στα πτερύγια,  $\lambda_d$  οι απώλειες από τους χρόνους διακοπής και  $\lambda_m$  άλλες διάφορες απώλειες. Οι συντελεστές  $\lambda_a$ ,  $\lambda_{s\&i}$ ,  $\lambda_d$  και  $\lambda_m$  ορίζονται από το χρήστη στο φύλλο εργασίας «Ενεργειακό Μοντέλο».

### 2.3.2 Βαθμός απορρόφησης και αποδιδόμενη ανανεώσιμη ενέργεια

Το μοντέλο υπολογίζει την αποδιδόμενη αιολική ενέργεια  $E_D$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_D = E_C \mu \quad (12)$$

Όπου  $E_C$  η συλλεχθείσα ανανεώσιμη ενέργεια (εξίσωση 10) και  $\mu$  ο βαθμός απορρόφησης. Ο βαθμός απορρόφησης αιολικής ενέργειας είναι το ποσοστό της συλλεγόμενης αιολικής ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί από το απομονωμένο δίκτυο ή το σύστημα εκτός – δικτύου. Για εφαρμογές κεντρικού δικτύου, αυτό το ποσοστό είναι πάντα ίσο με 100%, δεδομένου ότι το δίκτυο υποτίθεται ότι είναι αρκετά μεγάλο ώστε πάντα να απορροφά όλη την ενέργεια που παράγεται από το σύστημα. Για τις εφαρμογές απομονωμένου δικτύου και εκτός – δικτύου, ο χρήστης εισάγει την τιμή του βαθμού απορρόφησης.

Για εφαρμογές απομονωμένου δικτύου και εκτός – δικτύου, το μοντέλο υπολογίζει ένα προτεινόμενο βαθμό απορρόφησης αιολικής ενέργειας. Βρίσκεται με παρεμβολή στον Πίνακα 1, όπου το επίπεδο διείδυσης ανέμου (WPL) ορίζεται ως:

$$WPL = \frac{WPC}{PL} 100 \quad (13)$$

Όπου  $WPC$  η συνολική ονομαστική ισχύς της αιολικής εγκατάστασης και  $PL$  το φορτίο αιχμής προσδιορισμένο από τον χρήστη. Ο όρος  $WPC$  προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του αριθμού των ανεμοκινητήρων επί την ονομαστική τους ισχύ.

Average Wind Speed (m/s)	Wind Penetration Level (WPL)			
	0%	10%	20%	30%
0	100%	100%	100%	100%
4.9	100%	98%	96%	93%
5.6	100%	98%	94%	90%
6.3	100%	98%	93%	87%
6.9	100%	97%	92%	84%
8.3	100%	96%	90%	82%

Πίνακας 1: Προτεινόμενοι βαθμοί απορρόφησης αιολικής ενέργειας για εφαρμογές απομονωμένου δικτύου και εκτός – δικτύου.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, ο προτεινόμενος βαθμός απορρόφησης αιολικής ενέργειας ποικίλλει σύμφωνα με τη μέση ταχύτητα και το επίπεδο διείσδυσης του ανέμου. Ας σημειωθεί ότι αυτό είναι βασισμένο στην ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης του ανεμοκινητήρα. Οι τιμές του Πίνακα 1 προέρχονται από προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται για να προσδιοριστεί το ποσό της αποδιδόμενης αιολικής ενέργειας από τα αιολικά πάρκα που εγκαθίστανται σε απομακρυσμένες περιοχές (δηλ. εφαρμογές απομονωμένου δικτύου και εκτός – δικτύου). Οι προσομοιώσεις λαμβάνουν υπόψη συνδυασμούς κατανομών αιολικού δυναμικού, φορτίου και καμπυλών απόδοσης του συστήματος. Λεπτομερή αποτελέσματα μπορούν να βρεθούν στην εργασία των Rangì et al. (1992).

Το μοντέλο παρέχει μόνο προτεινόμενες τιμές για επίπεδα διείσδυσης ανέμου σε ποσοστό μικρότερο από 25%. Εντούτοις, εάν το επίπεδο διείσδυσης του ανέμου είναι μεγαλύτερο από 3% και η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης είναι 8,3 m/s ή υψηλότερη, τότε το μοντέλο δεν παρέχει προτεινόμενες τιμές. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι βαθμοί απορρόφησης αιολικής ενέργειας θα ποικίλουν ευρέως ανάλογα με τη ρύθμιση του συστήματος και τις στρατηγικές ελέγχου που υιοθετούνται.

### 2.3.3 Διαθέσιμη πλεονάζουσα ανανεώσιμη ενέργεια

Η πλεονάζουσα διαθέσιμη ανανεώσιμη ενέργεια  $E_X$  είναι απλά η διαφορά της συλλεχθείσας αιολικής ενέργειας  $E_C$  και της αποδιδόμενης αιολικής ενέργειας  $E_D$ :

$$E_X = E_C - E_D \quad (14)$$

### 2.3.4 Ειδική απόδοση

Η ειδική απόδοση  $Y$  ισούται με το λόγο της συλλεχθείσας ανανεώσιμης ενέργειας  $E_C$  προς την συνολική επιφάνεια σάρωσης των δρομέων:

$$Y = \frac{E_C}{N A} \quad (15)$$

Όπου  $N$  ο αριθμός των ανεμοκινητήρων και  $A$  η επιφάνεια σάρωσης του δρομέα ενός ανεμοκινητήρα.

### 2.3.5 Συντελεστής δυναμικότητας αιολικής εγκατάστασης

Ο συντελεστής δυναμικότητας μιας αιολικής εγκατάστασης  $PCF$  αντιπροσωπεύει το λόγο της μέσης παραγόμενης ισχύος από την εγκατάσταση σε ένα έτος προς την ονομαστική της ισχύ (ικανότητα). Υπολογίζεται ως εξής (Li και Priddy, 1985):

$$PCF = \left( \frac{E_C}{WPC h_Y} \right) 100 \quad (16)$$

Όπου  $E_C$  η συλλεχθείσα ανανεώσιμη ενέργεια, σε kWh,  $WPC$  η ισχύς της αιολικής εγκατάστασης, σε kW, και  $h_Y$  ο αριθμός των ωρών ενός έτους.

## 2.4 Έλεγχος εγκυρότητας

Πολύαριθμοι εμπειρογνώμονες έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη, τη δοκιμή και την επικύρωση του μοντέλου RETScreen. Περιλαμβάνονται ειδικοί στη μοντελοποίηση συστημάτων αιολικής ενέργειας, σε οικονομικά και επενδύσεις, στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και μετεωρολόγοι.

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει δύο ολοκληρωμένα παραδείγματα ελέγχου εγκυρότητας. Κατ' αρχάς, οι προβλέψεις του μοντέλου RETScreen συγκρίνονται με τα αποτελέσματα από ένα λογισμικό ωριαίας προσομοίωσης. Κατόπιν, οι προβλέψεις του μοντέλου συγκρίνονται με τα ετήσια δεδομένα που έχουν μετρηθεί σε ήδη εγκατεστημένο σύστημα αιολικής ενέργειας.

### 2.4.1 Έλεγχος εγκυρότητας του μοντέλου RETScreen συγκρινόμενο με ωριαίο μοντέλο

Σε αυτή την υπο-ενότητα οι προβλέψεις του μοντέλου RETScreen συγκρίνονται με αποτελέσματα από λογισμικό ωριαίας προσομοίωσης. Το χρησιμοποιούμενο ωριαίο λογισμικό είναι το HOMER, ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για αυτόνομα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος (NREL, 2001). Το HOMER χρησιμοποιεί τις ωριαίες προσομοιώσεις για να βελτιστοποιήσει το σχεδιασμό υβριδικών συστημάτων παραγωγής ισχύος. Μπορεί να μοντελοποιήσει οποιονδήποτε συνδυασμό ανεμοκινητήρων, φωτοβολταϊκών συστοιχιών, παραγωγή ισχύος από diesel και μπαταρίες αποθήκευσης. Στην παρούσα επικύρωση δεν χρησιμοποιούνται οι ικανότητες βελτιστοποίησης του HOMER. Το πρόγραμμα χρησιμοποιείται μόνο ως εργαλείο προσομοίωσης. Οι δοκιμές έγιναν για δύο περιπτώσεις: ένα μικρό αιολικό πάρκο που συνδέθηκε με ένα απομονωμένο δίκτυο και ένα μεγάλο αιολικό πάρκο συνδεδεμένο σε κεντρικό δίκτυο.

- Μικρό αιολικό πάρκο

Για την πρώτη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε μια αιολική εγκατάσταση παραγωγής ισχύος στο Kotzebue της Αλάσκας, μία μικρή παράκτια κοινότητα περίπου 50 χλμ βόρεια του αρκτικού κύκλου (CADDET, 2001). Το σύστημα περιλαμβάνει 10 Α/Γ με συνδυασμένη ικανότητα 500 kW. Πρόκειται για κοινοπραξία μεταξύ του Αμερικανικού Υπουργείου Ενέργειας, του Ερευνητικού Κέντρου Ηλεκτρικής Ισχύος (EPRI), και των Αρχών Ενέργειας Αλάσκας και Ανάπτυξης Βιομηχανικών Εξαγωγών Αλάσκας (AEA/AIDEA). Το σύστημα τροφοδοτεί ένα μικρό τοπικό δίκτυο, με συνολικό πληθυσμό 3.500 ατόμων και είναι σχεδιασμένο για να ικανοποιεί περίπου 6% της συνολικής ζήτησης της πόλης σε ηλεκτρική ενέργεια. Η διάταξη του συστήματος συνοψίζεται στον *Πίνακα 2*.

Turbines	Atlantic Orient Corporation AOC 15/50
Number of turbines	10
Rotor diameter	15 m
Swept area	177 m <sup>2</sup>
Hub height	24 m
Grid type	Isolated local grid
Local grid peak load	3.6 MW

*Πίνακας 2: Διάταξη αιολικού συστήματος στο Kotzebue.*

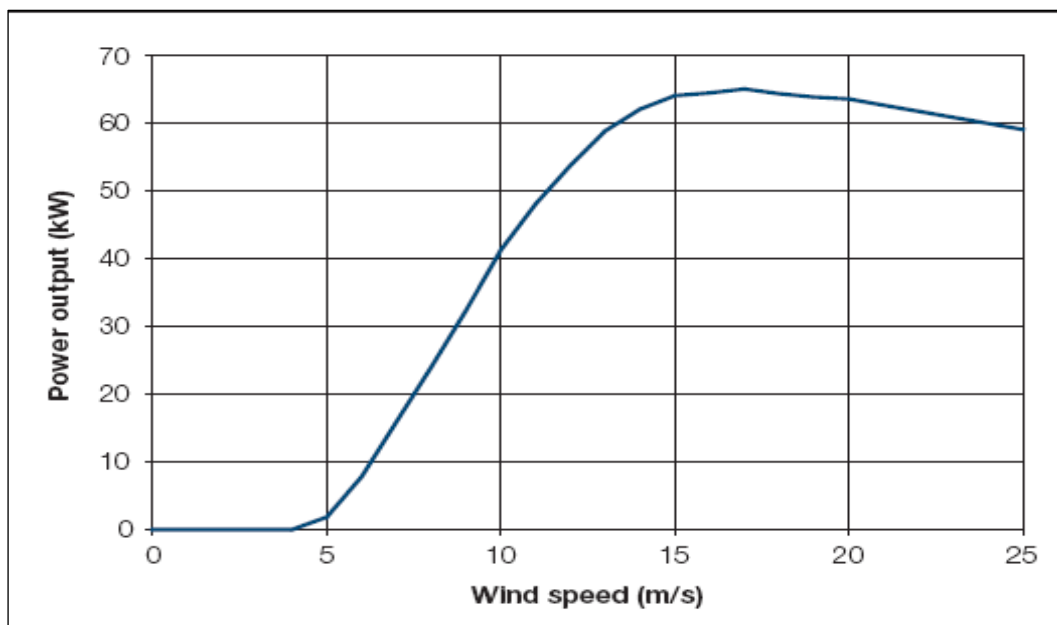
Η καμπύλη παραγωγής ισχύος των AOC 15/50 παρουσιάζεται στην *Εικόνα 9*. Τα ίδια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν και για τα δύο προγράμματα λογισμικού. Χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από την μετεωρολογική βάση δεδομένων του Kotzebue/Wien, AK. Το RETScreen και το HOMER διαφέρουν στον τύπο της ταχύτητας του ανέμου που απαιτούν. Το HOMER απαιτεί τις μηνιαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου (που παρουσιάζονται στον *Πίνακα 3*) και από αυτές πραγματοποιεί στοχαστική εκτίμηση των ωριαίων τιμών. Το RETScreen απαιτεί απλά την ετήσια μέση ταχύτητα του ανέμου, η οποία είναι ίση με 5,8 m/s (όλες οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου μετριοούνται στα 9,4 m). Και στα δύο μοντέλα, χρησιμοποιήθηκε κατανομή Weibull, με παράγοντα μορφής 2,0. Η ετήσια μέση ατμοσφαιρική πίεση είναι 101,1 kPa και η ετήσια μέση θερμοκρασία είναι -6°C.

Το RETScreen απαιτεί τον εκθέτη αποκοπής του αέρα για να υπολογίσει αυτόματα τη ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης. Η τιμή του εκθέτη που χρησιμοποιήθηκε είναι 0,14 και η ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται σε 6,6 m/s. Στο HOMER πρέπει να εισαχθεί ένας παράγοντας κλίμακας-ταχύτητας. Ο παράγοντας αυτός τέθηκε ίσος με 6.6/5.8 ή 1.138 έτσι ώστε το RETScreen και το HOMER να χρησιμοποιούν την ίδια μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πλήμνης.

Η σύγκριση μεταξύ HOMER και RETScreen απαιτεί την επίδειξη σωστής κρίσης, επειδή τα δύο προγράμματα δεν απαιτούν απαραίτητα τα ίδια δεδομένα εισόδου, ούτε απαραίτητα προβαίνουν στις απαραίτητες διορθώσεις για τα ίδια φυσικά φαινόμενα. Από πολλές απόψεις, το RETScreen τείνει να είναι πιο λεπτομερές στην περιγραφή του συστήματος. Παραδείγματος χάριν, το RETScreen υπολογίζει αυτόματα το συντελεστή ρύθμισης πίεσης και το συντελεστή ρύθμισης θερμοκρασίας. Στο HOMER, αυτές οι τιμές πρέπει να εισαχθούν από τον χρήστη με έναν παράγοντα κλίμακας εκθετικής μορφής. Παρομοίως, το RETScreen επιτρέπει στο χρήστη



να προσδιορίσει τις απώλειες διάταξης, τις απώλειες από την επικάθιση χόματος και πάγου στο δρομέα και τις απώλειες από τους χρόνους διακοπής. Σ' αυτές δεν υπάρχει αντιστοιχία στο HOMER. Τέλος το RETScreen επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει ένα βαθμό απορρόφησης αιολικής ενέργειας, όπου πάλι δεν υπάρχει κάτι αντίστοιχο στο HOMER. Για αυτούς τους λόγους, η σύγκριση έχει νόημα εάν χρησιμοποιούνται οι τιμές της τυπικής ενεργειακής παραγωγής που υπολογίζονται από το RETScreen παρά της αποδιδόμενης ανανεώσιμης ενέργειας.



Εικόνα 9: Καμπύλη ισχύος A/T AOC 15/50

Month	Average Wind Speed (m/s)
Jan	6.5
Feb	5.5
Mar	5.3
Apr	5.4
May	5.1
Jun	5.6
Jul	5.7
Aug	5.8
Sep	6.1
Oct	6.2
Nov	6.7
Dec	6.0
<b>Yearly Average</b>	<b>5.8</b>

Πίνακας 3: Μέσες ταχύτητες ανέμου στο Kotzebue, AK

Στον Πίνακα 4 συγκρίνεται η προβλεφθείσα ετήσια παραγωγή ενέργειας από το RETScreen και το HOMER. Όπως φαίνεται η συμφωνία των δύο προγραμμάτων είναι εξαιρετική. Στην υπο-ενότητα 2.4.2 θα δειχθεί επίσης, ότι επιτυγχάνεται συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα με την χρησιμοποίηση της πραγματικής αποδιδόμενης ανανεώσιμης ενέργειας, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή παραγωγή τις διάφορες απώλειες και τις επιδράσεις της πίεσης και θερμοκρασίας.

RETScreen Unadjusted Energy Production (MWh)	HOMER Total Energy Production (MWh)	Difference
1,532	1,515	+1.12%

Πίνακας 4: Σύγκριση των προβλεπόμενων ετήσιων παραγωγών ενέργειας-Μικρό αιολικό πάρκο

- Μεγάλο αιολικό πάρκο

Η δεύτερη δοκιμή αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο αιολικό πάρκο συνδεδεμένο σε κεντρικό δίκτυο. Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος είναι τα εξής:

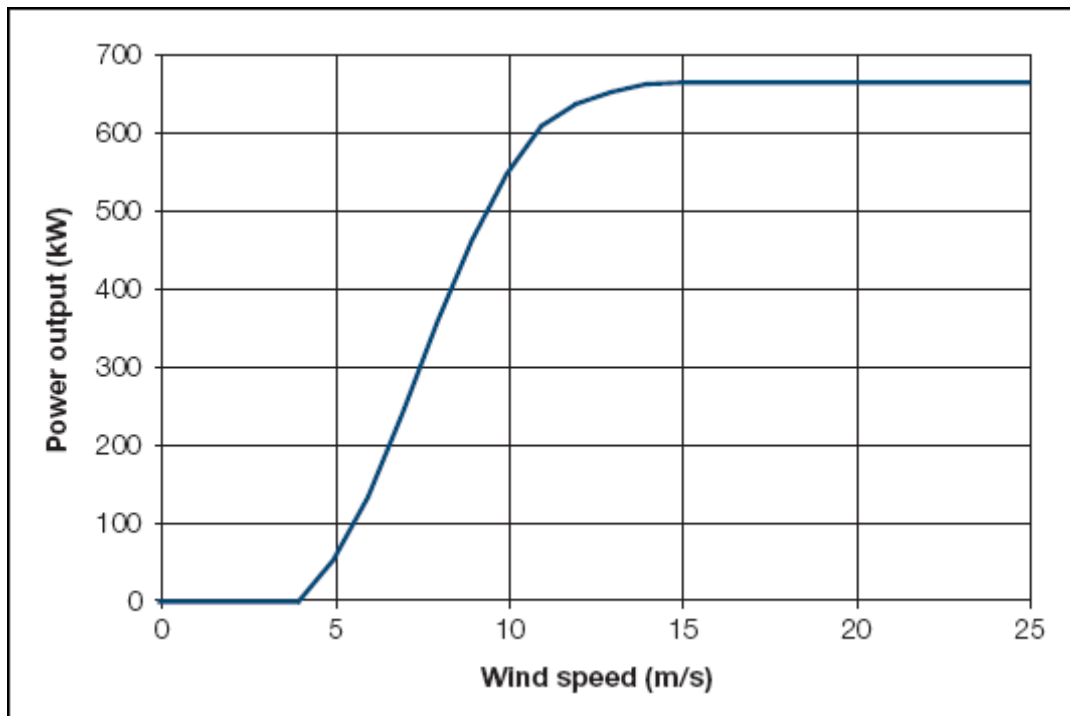
- 76 Α/Γ Vestas V47-600 kW (ύψος πλήμνης 55 m, διάμετρος 47m)
- Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου: 8,1 m/s
- Μέση ετήσια θερμοκρασία: 12 °C
- Υψόμετρο: 250 m, μέση ετήσια ατμοσφαιρική πίεση: 98,4 kPa
- Κατανομή ταχύτητας ανέμου Weibull, παράγοντας μορφής: 1,8
- Εκθέτης αποκοπής αέρα: 0,14

Η καμπύλη παραγωγής ισχύος της Α/Γ Vestas V47-600 kW φαίνεται στην *Εικόνα 10*. Στο RETScreen η μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πλήμνης λαμβάνει τιμή 10,3 m/s. Όπως και στην περίπτωση του μικρού αιολικού πάρκου, έτσι και δω έπρεπε να εισαχθεί στο HOMER ένας παράγοντας κλίμακας-ταχύτητας ανέμου ίσος με  $10,3/8,1$  ή 1,272 για να χρησιμοποιούν και τα δύο προγράμματα την ίδια μέση ταχύτητα ανέμου.

Όπως και πριν, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της τυπικής ενεργειακής παραγωγής που υπολογίστηκαν από το RETScreen, παρά η πραγματική αποδιδόμενη ανανεώσιμη ενέργεια, ώστε να γίνει η σύγκριση με το HOMER. Η σύγκριση φαίνεται στον Πίνακα 5. Για άλλη μια φορά, η συμφωνία των δύο προγραμμάτων είναι εξαιρετική.

RETScreen Unadjusted Energy Production (GWh)	HOMER Total Energy Production (GWh)	Difference
258.2	265.2	-2.64%

Πίνακας 5: Σύγκριση των προβλεπόμενων ετήσιων παραγωγών ενέργειας-Μεγάλο αιολικό πάρκο



Εικόνα 10: Καμπύλη ισχύος Vestas V47-600 kW.

#### 2.4.2 Έλεγχος εγκυρότητας του μοντέλου RETScreen συγκρινόμενο με καταγεγραμμένα δεδομένα.

Για το μικρό αιολικό πάρκο της υπο-ενότητας 2.4.1 υπάρχουν διαθέσιμα ετήσια καταγεγραμμένα δεδομένα και έτσι μπορεί να γίνει πειραματική επιβεβαίωση του RETScreen

Οι 10 Α/Γ του συστήματος εγκαταστάθηκαν σε διάφορες φάσεις. Δεδομένα για την ηλεκτρική παραγωγή από τις Α/Γ 1-3 είναι διαθέσιμα για τα έτη 1998 και 1999, ενώ για τις Α/Γ 4-10 από τον Ιούλιο του 1999 μέχρι τον Ιούνιο του 2000. Διαγράμματα της ηλεκτρικής παραγωγής μπορούν να βρεθούν στο CADDET (2001). Επίσης, ο Bergey (2000) αναφέρεται κι αυτός στην απόδοση του συστήματος των 10 Α/Γ. Για τη χρησιμοποίηση αυτών των στοιχείων πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η πρώτη διετία των ετών παραγωγής ενός συστήματος, μερικές φορές δεν είναι αντιπροσωπευτική, λόγω αρχικών δυσχερειών και προβλημάτων ρύθμισης.

Οι καταγραφείσες ταχύτητες του ανέμου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 6, χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στο RETScreen. Ελλείπει επιπρόσθετων πληροφοριών, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες συντηρητικές εκτιμήσεις: βαθμός απορρόφησης αιολικής ενέργειας 95%, απώλειες διάταξης 3%, απώλειες από επικαθίσεις χώματος και πάγου στο δρομέα 5% και 5% για τις διάφορες άλλες απώλειες. Οι απώλειες από τους χρόνους διακοπής είναι δύσκολο να εκτιμηθούν. Σύμφωνα με το CADDET (2001) οι Α/Γ ήταν διαθέσιμες στο 96% του χρόνου, εντούτοις μ' αυτό το δεδομένο δεν λαμβάνονται υπόψη πολλοί χρόνοι διακοπής για προγραμματισμένη συντήρηση και αποτυχίες δικτύωσης, στοιχεία τα οποία πρέπει να περιληφθούν στη τιμή που χρησιμοποιείται από το RETScreen. Γι' αυτό το λόγο, η παράμετρος "άλλες απώλειες χρόνων διακοπής" εκτιμήθηκε χονδρικά σε 10%. Πιθανόν η τιμή αυτή να είναι πολύ χαμηλή, δεδομένων των σκληρών συνθηκών στις οποίες υποβάλλεται το σύστημα και εξαιτίας του ότι βρίσκεται ακόμα "στην παιδική ηλικία του".

Ο Πίνακας 6 συνοψίζει τις προβλέψεις του RETScreen έναντι της πραγματικής ενεργειακής παραγωγής. Το RETScreen προβλέπει την πραγματική ηλεκτρική παραγωγή, εκτός από το 1999, όπου η ενεργειακή παραγωγή της παρακολουθούμενης εγκατάστασης εμφανίζεται υποδεέστερη. Παραδείγματος χάρη, κατά τη σύγκριση της παραγωγής των Α/Γ 1-3 το 1998 και το 1999, φαίνεται ότι οι 3 Α/Γ παράγαν 23% λιγότερη ενέργεια το 1999 αν και ο μέσος άνεμος ήταν 10% υψηλότερος από το 1998. Επίσης, η μέση παραγωγή ανά Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 5,4 m/s ήταν 69,5 MWh το 1999 σύμφωνα με το CADDET (2001) ενώ ήταν 117,0 MWh (ή 68% περισσότερο) το 1999/2000 για την ίδια μέση ταχύτητα του ανέμου 5,4 m/s σύμφωνα με τον Bergey (2000). Πάλι αυτές οι αποκλίσεις μπορούν να οφείλονται στα προβλήματα που παρουσιάστηκαν στην εγκατάσταση τα πρώτα-πρώτα έτη λειτουργίας της, που από τότε έχουν πλέον επιλυθεί. Εντούτοις, η σύγκριση των προβλέψεων του RETScreen με τα πραγματικά στοιχεία είναι αποδεκτή και αυτό, μαζί με την θεωρητική σύγκριση (μοντέλο με μοντέλο) της υπο-ενότητας 2.4.1, επιβεβαιώνει την επάρκεια του RETScreen για προμελέτες σκοπιμότητας έργων αιολικής ενέργειας.

Period	Turbines	Average Wind Speed (m/s)	RETScreen Prediction (MWh)	Actual Electricity Production (MWh)	Difference
1998*	1-3	4.9	250	270.9	-8%
1999*	1-3	5.4	317	208.6	+52%
July 1999-June 2000*	4-10	5.1	646	546.9	+18%
1999-2000**	1-10	5.4	1,057	≈1,170	-10%

Πίνακας 6: Σύγκριση προβλέψεων του RETScreen με τα δεδομένα παρακολούθησης για το Kotzebue, AK

\* Από CADDET (2001)

\*\* Από Bergey (2000)

## 2.5 Σύνοψη

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό RETScreen παρουσιάστηκαν λεπτομερώς. Το μοντέλο χρησιμοποιεί την καθορισμένη από τον χρήστη καμπύλη ισχύος και τη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Weibull της ταχύτητας του ανέμου, για να υπολογίσει την ενεργειακή καμπύλη του ανεμοκινητήρα. Η ενεργειακή παραγωγή προσαρμόζεται έπειτα σύμφωνα με τις επιδράσεις της πίεσης και θερμοκρασίας, καθώς επίσης και για τις διάφορες καθορισμένες από τον χρήστη απώλειες. Στην περίπτωση εφαρμογών απομονωμένου δικτύου και εκτός – δικτύου, ο υπολογισμός της αποδιδόμενης αιολικής ενέργειας λαμβάνει υπόψη το βαθμό απορρόφησης της. Η σύγκριση των προβλέψεων του μοντέλου RETScreen με αποτελέσματα από λογισμικό ωριαίας προσομοίωσης και με καταγεγραμμένα δεδομένα δείχνει ότι η ακρίβεια του RETScreen είναι άριστη και ενδείκνυται για προμελέτες σκοπιμότητας, ακόμη δε περισσότερο αν ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι το RETScreen απαιτεί μόνο 1 τιμή για τα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου έναντι 8.760 μετρήσεων για τα περισσότερα μοντέλα ωριαίας προσομοίωσης.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Bergey, M., *Small Wind Systems For Rural Energy Supply*, Village Power 2000, Washington, DC, USA, 2000.

Brothers, C., *Wind Generation Systems for Remote Communities - Market Assessment and Guidelines for Wind Turbines Selection*, Canadian Electrical Association, Project no. 9123 G 880, 1993.

CADDET, *Technical Bulletin no. 143*, 2001.

Canadian Wind Energy Association (CanWEA), *Wind Energy Basic Information*, Back-grounder Published with Support from CANMET, 1996.

Conover, K., *Wind Energy Financial Due Diligence*, R. Lynette & Associates, Seminar on Opportunities for Finance and Investment in Wind Energy, 1994.

Elliot, D. et al., *Wind Energy Resource Atlas of the United States*, SERI, 1986.

Gipe, P., *Wind Energy Comes of Age*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1995.

Hiester, T.R. and Pennell, W.T., *The Siting Handbook for Large Wind Energy Systems*, WindBooks, New York, NY, USA, 1981.

Le Gourières, D., *Wind Power Plants: Theory and Design*, Pergamon Press, 1982.

Leng, G., Dignard-Bailey, L., Bragagnolo, J., Tamizhmani, G. and Usher, E., *Overview of the Worldwide Photovoltaic Industry*, Report no. 96-41-A1 (TR), CANMET Energy Diversification, Research Laboratory, Natural Resources Canada, Varennes, QC, Canada, J3X 1S6, 1996.

Li, K.W. and Priddy, A.P., *Power Plant System Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1985.

Lynette, R. and Ass., *Technical and Economic Potential for Wind Energy Development in Ontario*, Prepared for Independent Power Producers' Society of Ontario, 1992.

NREL, *HOMER, The Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*, Available from National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, CO 80401-3393, USA, 2001.

Rangi, R., Templin, J., Carpentier, M. and Argue, D., *Canadian Wind Energy Technical and Market Potential*, EAETB, Energy, Mines and Resources Canada, 1992.

Reid, R., *Application de l'éolien aux réseaux non-reliés*, Hydro-Québec, Congrès de l'ACFAS, Montreal, QC, Canada, 1996.

SunMedia GmbH, *Wind Turbine Market: Types, Technical Characteristics, Prices*, 1999.

Vesterdal, J., *The Potential of Wind Farms*, ELSAM, 1992.

WECTEC, *Évaluation du potentiel éolien du Québec*, Report Prepared for the Ministère des Ressources naturelles du Québec, 1996.