

ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ E-WAVE: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

Γαλάνης Γ.^{1,2}, Ζωδιάτης Γ.¹, Hayes D.¹, Νικολαΐδης Α.¹, Γεωργίου Γ.¹, Στυλιανού Σ.¹, Κάλλος Γ.²,
Καλογερί Χ.², Chu P.C.³, Χαράλαμπος Α.⁴, Σαββίδου Κ.⁵, Μιχαηλίδης Σ.⁵

¹ Ωκεανογραφικό Κέντρο, Πανεπιστήμιο Κύπρου, P.O. Box 20537, Λευκωσία, Κύπρος

² Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Πανεπιστημιούπολη,
Κτήριο Φυσικής V, Αθήνα, Ελλάδα

³ Department of Oceanography, Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943, USA

⁴ Ενεργειακό Γραφείο Κυπρίων Πολιτών, Οδός Λεύκωνος 20, 2064 Στρόβολος, Λευκωσία, Κύπρος

⁵ Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου, Λεοφόρος Νίκης 28, Λευκωσία, Κύπρος

Η κυματική ενέργεια, η ενέργεια δηλαδή που μπορεί να παραχθεί από τον θαλάσσιο κυματισμό, είναι μια εναλλακτική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας που δεν έχει ακόμη αξιοποιηθεί στον ίδιο βαθμό με άλλες μορφές «καθαρής» ενέργειας παρά τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει όπως η χαμηλή μεταβλητότητα που διευκολύνει την ενσωμάτωσή της στο γενικό δίκτυο. Στα πλαίσια του προγράμματος E-wave, που συντονίζεται από το Ωκεανογραφικό Κέντρο του Πανεπιστημίου της Κύπρου, γίνεται μια ολοκληρωμένη προσπάθεια μελέτης αυτής της μορφής ενέργειας στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου με έμφαση την αποκλειστική οικονομική ζώνη της Κύπρου. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα τεχνικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην κατεύθυνση αυτή, τα οποία περιλαμβάνουν αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης ατμοσφαιρικών και κυματικών διεργασιών αλλά και νέες στατιστικές μεθόδους για την εκτίμηση της κατανομής του ενεργειακού δυναμικού, καθώς και τα πρώτα αποτελέσματα του προγράμματος.

Λέξεις κλειδιά: Κυματική ενέργεια, αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης-προσομοίωσης ατμοσφαιρικών και κυματικών παραμέτρων

THE E-WAVE PROJECT: ESTIMATION OF WAVE POWER POTENTIAL IN CYPRUS

Galanis G.^{1,2}, Zodiatis G.¹, Hayes D.¹, Nikolaidis A.¹, Georgiou G.¹, Stylianou S.¹, Kallos G.²,
Kalogeri C.², Chu P.C.³, Charalampous A.⁴, Savidou K.⁵, Michaelides S.⁵

¹ Oceanography Centre, University of Cyprus, P.O. Box 20537, Nicosia, Cyprus

² Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group, Department of Physics, University of Athens, University
Campus, Building PHYSICS V, Athens, Greece

³ Department of Oceanography, Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943, USA

⁴ Cyprus Energy Agency, 20 Lefkonos str, Strovolos, Nicosia, Cyprus

⁵ Meteorological Service of Cyprus, 28 Nikis Avenue, Nicosia, Cyprus

The wave energy, that is the energy that can be captured by the sea waves, is an alternative form of renewable energy which has not been exploited so far as other forms of “clean” energy despite some critical advantages that it possess like the low variability that allows the easier adaptation to the general grid. The E-wave project, coordinated by the Oceanographic Institute of the University of Cyprus, targets to an integrated study of the wave energy in the area of eastern Mediterranean and especially over the Exclusive Economic Zone of Cyprus. In this paper, the models used and developed in this project are presented, including numerical atmospheric/wave systems and statistical methodologies developed for the estimation of the wave energy potential, while some first results are discussed.

Keywords: Wave Energy, Numerical atmospheric and wave prediction-simulation models

1. Εισαγωγή

Η παγκόσμια οικονομική συγκυρία και ιδιαίτερα η ραγδαία αύξηση των τιμών του πετρελαίου, σε συνδυασμό με τις προειδοποιήσεις της επιστημονικής κοινότητας για τα προβλήματα της υπερθέρμανσης του πλανήτη και την πιθανή κλιματική αλλαγή, αλλά και τα ερωτηματικά σχετικά με την ασφάλεια των πυρηνικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας, έχουν διαμορφώσει ένα νέο ενεργειακό πλαίσιο πολιτικής για την Ευρωπαϊκή Ένωση στρέφοντας την πλειοψηφία των κρατών-μελών στην υιοθέτηση και ενσωμάτωση νέων μορφών ενέργειας με ιδιαίτερη έμφαση στις ανανεώσιμες πηγές.

Στο πλαίσιο αυτό, μια νέα μορφή ανανεώσιμης ενέργειας έρχεται στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια: Η κυματική ενέργεια, η ενέργεια δηλαδή που μπορεί να παραχθεί από τον θαλάσσιο κυματισμό. Πρόκειται για μία από τις πλέον σταθερές πηγές «καθαρής» ενέργειας με σημαντικά μικρότερο βαθμό αβεβαιότητας και μεταβλητότητας και άρα με συγκριτικά πλεονεκτήματα στην ενσωμάτωσή της στο δίκτυο παραγωγής. Από την άλλη μεριά, οι επιπτώσεις στο τοπικό περιβάλλον από την εγκατάσταση θαλάσσιων πάρκων εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας είναι συνήθως περιορισμένες ενώ υπάρχουν και νέες δυνατότητες συνδυασμένης ανάπτυξης υποδομών, όπως για παράδειγμα λιμενοβραχίονες, μονάδες αφαλάτωσης κ.α., που λειτουργούν παράλληλα με τις πλατφόρμες παραγωγής ενέργειας.

Το Ωκεανογραφικό Κέντρο του Πανεπιστημίου της Κύπρου σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο Αθηνών, το Naval Postgraduate School των Ηνωμένων Πολιτειών, την Μετεωρολογική Υπηρεσία της Κύπρου και το Ενεργειακό Γραφείο Κυπρίων Πολιτών συνεργάζονται στα πλαίσια του προγράμματος E-wave με στόχο την μελέτη και καταγραφή της κυματικής ενέργειας στην περιοχή της Κύπρου και της Ανατολικής Μεσογείου γενικότερα. Κύριος στόχος του προγράμματος είναι η δημιουργία ενός ψηφιακού χάρτη υψηλής ανάλυσης που θα αποτυπώνει το ενεργειακό δυναμικό καθώς και τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά του ανέμου και των θαλάσσιων κυμάτων στην Αποκλειστική Οικονομική Ζώνη (ΑΟΖ) της Κύπρου και την ευρύτερη ανατολική Λεβαντίνη. Επίσης, με τη βοήθεια νέων υπολογιστικών μοντέλων θα μπορούν να πραγματοποιηθούν βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες προβλέψεις και ποσοτικοποιήσεις της κυματικής ενέργειας στην πιο πάνω περιοχή.

Για την επίτευξη των στόχων αυτών, χρησιμοποιούνται μια σειρά από μοντέλα προσομοίωσης ατμοσφαιρικών και κυματικών διεργασιών τελευταίας γενιάς ενώ αναπτύσσονται, στα πλαίσια του έργου, νέα μαθηματικά/στατιστικά συστήματα που εξασφαλίζουν τη βέλτιστη τοπική προσαρμογή των αποτελεσμάτων, την εκτίμηση του ενεργειακού δυναμικού βάσει των τοπικών περιβαλλοντολογικών χαρακτηριστικών, και την μελέτη της χωρο-χρονικής κατανομής του.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα τεχνικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια του προγράμματος E-wave, οι νέες μέθοδοι που αναπτύσσονται καθώς και τα πρώτα αποτελέσματα του έργου. Πιο συγκεκριμένα, στην παράγραφο 2 περιγράφονται τα μοντέλα προσομοίωσης των ατμοσφαιρικών και κυματικών παραμέτρων στην περιοχή ενδιαφέροντος καθώς και νέες στατιστικές μέθοδοι για την τοπική προσαρμογή των αποτελεσμάτων των προηγούμενων μοντέλων και για την εκτίμηση του αντίστοιχου ενεργειακού δυναμικού. Στην τρίτη παράγραφο παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα του έργου ενώ τα βασικά συμπεράσματα συνοψίζονται στην παράγραφο 4.

2. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν

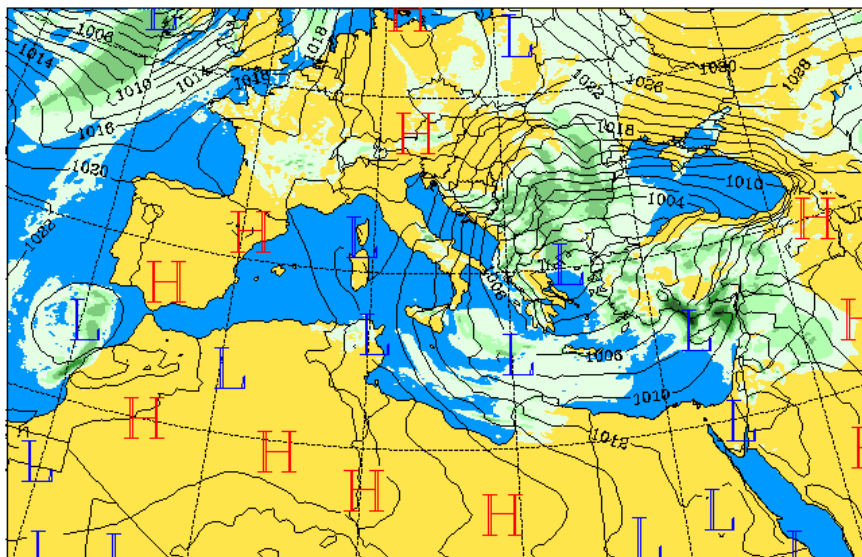
Για την υποστήριξη των δραστηριοτήτων του προγράμματος E-wave, χρησιμοποιήθηκαν δύο αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης ατμοσφαιρικών και κυματικών διεργασιών ενώ αναπτύχθηκαν και νέα συστήματα για την εξάλειψη τυχόν συστηματικών σφαλμάτων στις προσομοιώσεις αλλά και εκτίμησης της αντίστοιχης κυματικής ενέργειας.

2.1. Το ατμοσφαιρικό μοντέλο Skiron/Eta

Για την προσομοίωση των ατμοσφαιρικών διεργασιών και ιδιαίτερα της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SKIRON (Kallos 1997, Papadopoulos et al. 2001, Katsafados 2003). Πρόκειται για ένα φυσικό, μη υδροστατικό μοντέλο βασισμένο στο ατμοσφαιρικό μοντέλο

πρόγνωσης καιρού Eta/NCEP (Janjic, 1994) και συμπληρωμένο με μια σειρά από ρουτίνες προ- και μετά- επεξεργασιών, ικανό να προσομοιάσει με επιτυχία φαινόμενα όπως οι κατακόρυφες κινήσεις του ανέμου, η τύρβη και το ενεργειακό ισοζύγιο της επιφάνειας του εδάφους. Το μοντέλο Skiron είναι κατάλληλο για τοπικές και μέσης κλίμακας προσομοιώσεις, σε περιοχές με ποικίλα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά και σε μεγάλο εύρος αναλύσεων.

Στην έκδοση που χρησιμοποιήθηκε για το πρόγραμμα E-wave, το σύστημα ΣΚΙΡΩΝ βασίστηκε σε αρχικά μετεωρολογικά δεδομένα από το NCEP/GFS system ανάλυσης 0.5° , δεδομένα επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας στην ίδια ανάλυση και δεδομένα βλάστησης και τοπογραφίας σε ανάλυση $2'$. Το πεδίο του SKIRON καλύπτει όλη την περιοχή της Μεσογείου με οριζόντιο πλέγμα 0.05×0.05 km (Εικόνα 1).



Εικ. 1: Το πεδίο του μη- υδροστατικού συστήματος SKIRON.

2.2. Το κυματικό μοντέλο WAM.

Για την ασφαλή εκτίμηση του θαλάσσιου κλίματος στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου, στα πλαίσια του προγράμματος E-wave πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις του θαλάσσιου κυματισμού για χρονική περίοδο δέκα ετών (2001-2010). Για τις προσομοιώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε η τελευταία έκδοση του κυματικού μοντέλου WAM-ECMWF parallel version, Cycle 33R1 (Janssen 2000; Janssen 2004; Bidlot et al. 2007). Πρόκειται ένα μοντέλο τρίτης γενιάς που βασίζεται στον υπολογισμό ενεργειακού φάσματος (wave spectrum) ανεμογενών κυμάτων, ευρέως χρησιμοποιούμενο και από τα πλέον αξιόπιστα. Στην έκδοση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε έχει ενσωματωθεί ένα νέο υπολογιστικό σχήμα το οποίο λαμβάνει υπόψη περισσότερα σημεία του πλέγματος ολοκλήρωσης εξασφαλίζοντας την πιο ομαλή προσομοίωση του θαλάσσιου κυματισμού, καθώς επίσης νέα παραμετροποίηση για ολοκλήρωση του μοντέλου σε ρηγά νερά (Janssen and Onorato, 2007) και νέο σχήμα εκτίμησης ακραίων τιμών (Mori and Janssen, 2006).

Οι προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν κάλυψαν την ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου ($30^{\circ}\text{N} - 41^{\circ}\text{N}$, $15^{\circ}\text{E} - 37^{\circ}\text{E}$) ώστε να αναπαρασταθούν επιτυχώς επί της περιοχής ενδιαφέροντος (Λεβαντίνη, $30.0^{\circ}\text{N}-38.0^{\circ}\text{N}$, $27.5^{\circ}\text{E}-36.5^{\circ}\text{E}$, βλ. Εικόνα 2) τα μεγάλης περιόδου μεταφερόμενα κύματα (swell) που επικρατούν συνήθως. Χρησιμοποιήθηκαν ατμοσφαιρικά δεδομένα (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου) από το σύστημα Skiron (βλ. παράγραφο 2.1) ενώ η ολοκλήρωση έγινε σε ιδιαίτερα υψηλή διακριτική ικανότητα ($1/60 \times 1/60$ degrees) παρέχοντας δεδομένα σε 3-ωρα χρονικά διαστήματα για ένα ευρύ φάσμα κυματικών παραμέτρων: Σημαντικό ύψος και διεύθυνση κύματος, μέση και μέγιστη περίοδος κυματισμού, ανεμογενής και μεταφερόμενη συνιστώσα καθώς και μέγιστο αναμενόμενο ύψος κύματος. Το φάσμα της κυματικής ενέργειας διακριτοποιήθηκε σε 25 συχνότητες (εύρος $0.0417-$

0.54764 Hz λογαριθμικά αυξανόμενο) και 24 - ίσου εύρους - διαστήματα διευθύνσεων. Για τις αυξημένες ανάγκες σε υπολογιστικό χώρο και χρόνο που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκε ο υπερυπολογιστής του Naval Postgraduate School στο Monterey των Ηνωμένων Πολιτειών. Πρόκειται για ένα cluster που αποτελείται από 144 nodes με 8 πυρήνες στο κάθε ένα και συνολικά 1152 επεξεργαστές, 1.17TB RAM μνήμη και 112TB χωρητικότητα αποθήκευσης.



Εικόνα 2. Η περιοχή ολοκλήρωσης του κυματικού μοντέλου. Με κόκκινο πλαίσιο σημειώνεται η περιοχή ενδιαφέροντος του προγράμματος E-wave.

2.3. Στατιστικά μοντέλα τοπικής προσαρμογής και εκτίμησης ενέργειας.

Τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης-προσομοίωσης ατμοσφαιρικών και κυματικών παραμέτρων προσφέρουν σήμερα στην επιστημονική κοινότητα αλλά και στα επιχειρησιακά κέντρα που τα χρησιμοποιούν εξαιρετικά αποτελέσματα ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται σε μέση ή μεγάλη κλίμακα. Σε προσομοιώσεις όμως που εστιάζουν σε τοπικά χαρακτηριστικά είναι πιθανή η εμφάνιση συστηματικών σφαλμάτων. Πρόκειται για ένα πολυπαραμετρικό γνωστό πρόβλημα στο οποίο συνεισφέρουν τόσο οι δυσκολίες παραμετροποίησης ορισμένων φυσικών φαινομένων όσο και η αδυναμία προσομοίωσης διεργασιών που συντελούνται σε κλίμακες μικρότερες από τη διακριτική ικανότητα του μοντέλου (subgrid scale phenomena).

Μία ικανοποιητική απάντηση στα παραπάνω προβλήματα μπορεί να δοθεί με τη χρήση στατιστικών μεθόδων που, λαμβάνοντας υπόψη και τοπικές μετρήσεις-παρατηρήσεις, μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τυχόν συστηματικές αποκλίσεις των μοντέλων. Στην παρούσα μελέτη, για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε μία στατιστική μεθοδολογία βασισμένη σε φίλτρα Kalman (Kalman 1960, Kalman and Bucy 1961, Kalnay 2002, Galanis and Anadranistakis 2002, Crochet 2004, Louka et al. 2008, Galanis et al. 2011). Πρόκειται για στατιστικούς αλγόριθμους που, χρησιμοποιώντας μεθόδους ελαχίστων τετραγώνων, συνδυάζουν παρατηρήσεις και αποτελέσματα των μοντέλων εκτιμώντας στατιστικά βάρη που μειώνουν τις αντίστοιχες αποκλίσεις. Το βασικό πλεονέκτημα των φίλτρων Kalman είναι η εύκολη προσαρμογή σε κάθε μεταβολή των παρατηρούμενων τιμών καθώς και το γεγονός ότι χρειάζεται να συμπεριλάβουν μικρό εύρος προηγούμενης πληροφορίας.

Στα πλαίσια του έργου E-wave χρησιμοποιήθηκε ένα γραμμικό φίλτρο Kalman για τη διόρθωση των τιμών του σημαντικού ύψους κύματος (H_s). Ο βασικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε είναι:

$$\mathbf{x}^t(t_{i+1}) = \mathbf{x}^t(t_i) + \boldsymbol{\eta}(t_i), \quad \mathbf{y}_i^o = \mathbf{H}_i[\mathbf{x}^t(t_i)] + \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (1)$$

όπου με $y_i^o = a_{0,i} + a_{1,i} \cdot Hs_i + \varepsilon_i$ συμβολίζεται το σφάλμα του μοντέλου τη χρονική στιγμή t_i , $\mathbf{x}(t_i) = [a_{0,i} \ a_{1,i}]^T$ είναι το διάνυσμα των συντελεστών το οποίο πρέπει να εκτιμηθεί από το φίλτρο και $\eta(t_i)$, ε_i τα μη συστηματικά σφάλματα.

Τα τελικά-φιλτραρισμένα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το σημαντικό ύψος κύματος (H_s) και την περίοδο (T_e) του κυματισμού χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του διαθέσιμου ενεργειακού δυναμικού βάσει του τύπου (βλ. Pontes M.T., 1998):

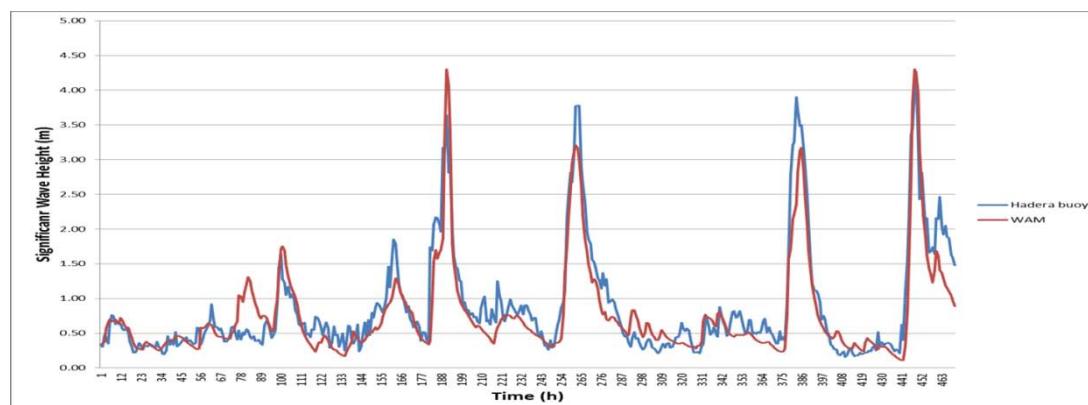
$$P = \frac{\rho \cdot g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (2)$$

όπου ρ η πυκνότητα του νερού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Τα δεδομένα που προέκυψαν για την κυματική ενέργεια προσεγγίστηκαν μέσω μιας σειράς από στατιστικούς ελέγχους (fitting tests) με στόχο τον προσδιορισμό της κατανομής που τα περιγράφει κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν Kolmogorov-Smirnov και Anderson-Darling tests (D'Agostino et. al., 1986) καθώς και μια σειρά από κατανομές: Logistic, Normal, Gamma, Log-Gamma, Log-Logistic, Lognormal, Weibull, Generalized Logistic.

3. Αποτελέσματα

Παρά το γεγονός ότι το πρόγραμμα E-wave δεν έχει ακόμη ολοκληρωθεί, κάποια πρώτα συμπεράσματα μπορούν να στοιχειοθετηθούν βάσει των αρχικών αποτελεσμάτων του προγράμματος, τα οποία συζητούνται στην παράγραφο αυτή.

Η προσομοίωση θαλάσσιου κυματισμού ελέγχθηκε ως χρησιμοποιώντας έναν πλωτήρα (buoy) που βρίσκεται στην περιοχή του λιμανιού της Hadera στο Ισραήλ. Τα σχετικά αποτελέσματα (βλ. Εικόνα 3) δείχνουν εξαιρετική προσαρμογή μεταξύ μοντέλου και παρατηρήσεων.



Εικόνα 3. Σύγκριση ύψους κύματος μεταξύ του μοντέλου WAM και παρατηρήσεων

Σε ότι αφορά την πρόγνωση κυματικής ενέργειας, η προσοχή μας εστιάζεται στις δύο βασικές παραμέτρους που την επηρεάζουν: Το σημαντικό ύψος και την περίοδο κυματισμού που υπολογίζονται από το ενεργειακό φάσμα S του κύματος ως εξής:

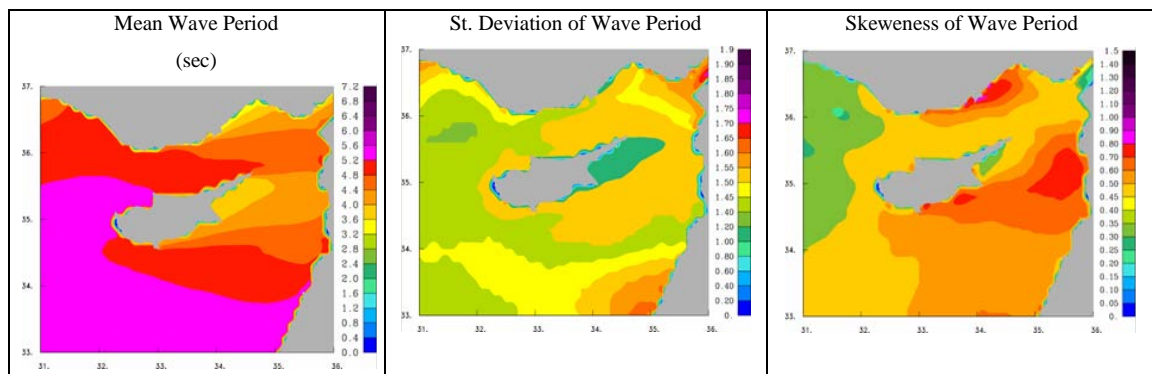
$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4\sqrt{\int_0^\infty S(f)df}, \quad T_{m(-1)} = \frac{m_{(-1)}}{m_0} = \frac{\sqrt{\int_0^\infty f^{-1}S(f)df}}{\sqrt{\int_0^\infty S(f)df}} \quad (3)$$

Οι συνιστώσες αυτές μελετώνται ως προς τις μέσες τιμές, τις τυπικές αποκλίσεις και το δείκτη συμμετρίας τους (skewness):

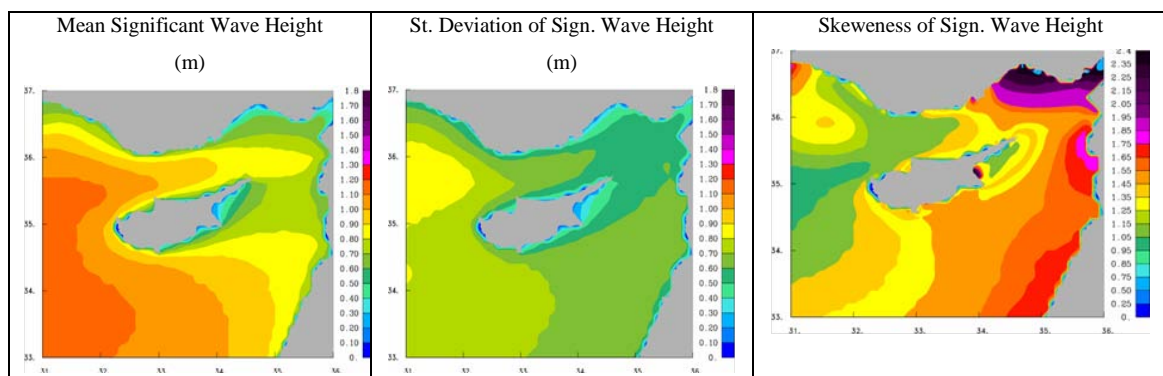
- *Mean value:* $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i)$,
- *Standard Deviation:* $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (X(i) - \mu)^2}$
- *Skewness:* $g_1 = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (X(i) - \mu)^3}{\sigma^3}$

όπου $X(i)$ είναι οι τιμές του δείγματος και N το μέγεθός του.

Η υπό μελέτη περιοχή, και ιδιαίτερα η δυτική ακτογραμμή της Κύπρου, χαρακτηρίζεται από μεταφερόμενα - μεγάλης περιόδου - κύματα (μέση περίοδος μεγαλύτερη των 5 sec) η οποία μάλιστα εμφανίζει σχετικά χαμηλή μεταβλητότητα και ικανοποιητική συμμετρία όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Από την άλλη μεριά, το σημαντικό ύψος κύματος εμφανίζει σχετικά χαμηλές τιμές στην περιοχή με επίσης χαμηλή μεταβλητότητα (Εικόνα 5).

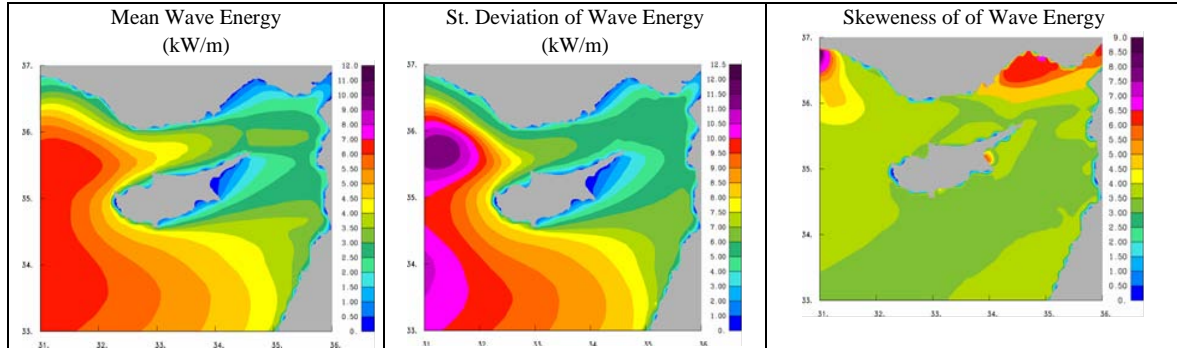


Εικόνα 4. Η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η συμμετρία (skewness) της μέσης περιόδου κύματος στην περιοχή ενδιαφέροντος του προγράμματος κατά τη χρονική περίοδο Οκτώβριος 2008 – Μάρτιος 2009.



Εικόνα 5. Η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η συμμετρία (skewness) του σημαντικού ύψους κύματος στην περιοχή ενδιαφέροντος του προγράμματος κατά τη χρονική περίοδο Οκτώβριος 2008 – Μάρτιος 2009.

Τα παραπάνω αποτελέσματα οδηγούν σε ικανοποιητικές τιμές ενεργειακού δυναμικού κατά μήκος της δυτικής ακτής της Κύπρου που βρίσκεται κατά μέσο όρο στην περιοχή των 5 kW/m με υψηλές όμως τιμές μεταβλητότητας:



Εικόνα 6. Η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η συμμετρία (skewness) του ενεργειακού δυναμικού στην περιοχή ενδιαφέροντος του προγράμματος κατά τη χρονική περίοδο Οκτώβριος 2008 – Μάρτιος 2009.

Οι παραπάνω εκτιμώμενες τιμές ενεργειακού δυναμικού μελετήθηκαν και ως προς την στοχαστική τους κατανομή. Πιο συγκεκριμένα, μια σειρά από ανεξάρτητους ελέγχους προσαρμογής απέδειξε ότι η κατανομή Lognormal, με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - m}{v} \right)^2}}{xv\sqrt{2\pi}} \quad (4)$$

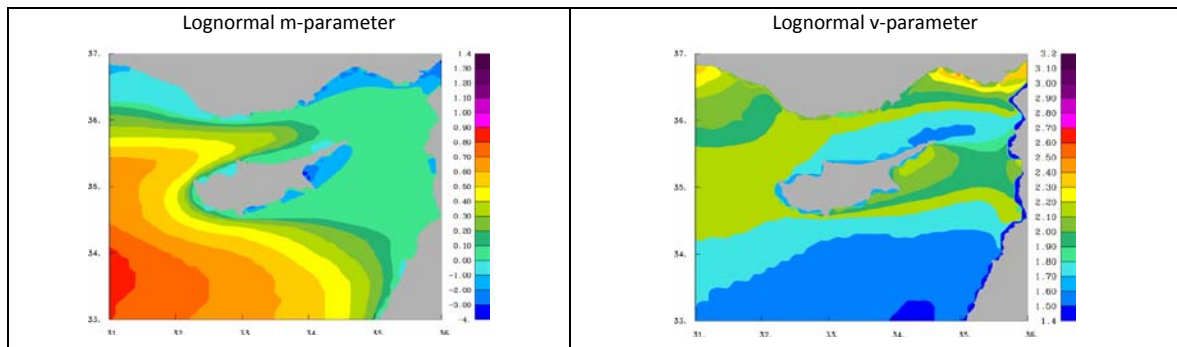
είναι αυτή που περιγράφει με το βέλτιστο τρόπο τα δεδομένα για την κυματική ενέργεια στην περιοχή της Κύπρου, όπου οι παράμετροι m , v ορίζονται από την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση:

$$m = \ln\left(\frac{\mu^2}{\sqrt{\sigma + \mu^2}}\right), \quad v = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma}{\sqrt{1 + \mu^2}}\right)} \quad (5)$$

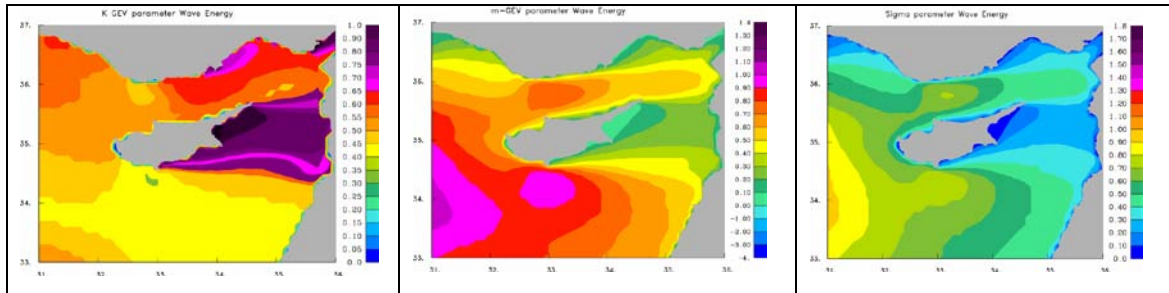
Καλή προσαρμογή εμφάνισε και η Generalized Extreme Value distribution (GEV):

$$f(x; k, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}} e^{-\left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}} \quad (6)$$

όπου μ είναι η παράμετρος θέσης (location parameter) της κατανομής, σ η scale και k η shape parameter.



Εικόνα 7. Η χωρική κατανομή των παραμέτρων της κατανομής Lognormal



Εικόνα 8. Η χωρική κατανομή των παραμέτρων της κατανομής GEV

Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί η χωρική μεταβλητότητα των τιμών των προηγούμενων κατανομών (Εικόνες 7 και 8) γεγονός που σημαίνει ότι σε οποιοδήποτε σύστημα βελτιστοποίησης ή αξιοποίησης των αποτελεσμάτων αυτών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ακριβής θέση του σημείου ενδιαφέροντος και οι αντίστοιχες συνιστώσες-παραμέτροι της κατανομής των δεδομένων και να αποφεύγεται η χρήση χωρικά ομοιόμορφων τεχνικών, όπως για παράδειγμα συστήματα αφομοίωσης δεδομένων με σταθερούς πίνακες διασποράς.

4. Συμπεράσματα

Το πρόγραμμα E-wave είναι η συνισταμένη της δουλειάς των επιστημόνων του Ωκεανογραφικού Κέντρου της Κύπρου, της Ομάδας Αριθμητικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού του Πανεπιστημίου Αθηνών, του Ocean Analysis Laboratory του US-Naval Postgraduate School, του Ενεργειακού Γραφείου Κυπρίων Πολιτών και της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας της Κύπρου σε θέματα εκτίμησης του ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από τον θαλάσσιο κυματισμό στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή της Κύπρου.

Για τον σκοπό αυτό, εγκαταστάθηκαν στα υπολογιστικά συστήματα των συνεργαζόμενων φορέων δύο μοντέλα πρόγνωσης περιβαλλοντολογικών παραμέτρων πολύ υψηλής ακρίβειας: Το ατμοσφαιρικό μοντέλο Eta/Skiron και το μοντέλο πρόγνωσης θαλάσσιου κυματισμού WAM τα οποία εκτέλεσαν προσομοιώσεις για μία περίοδο 10 ετών (2001-2010). Επιπλέον, για την τοπική προσαρμογή των αποτελεσμάτων του κυματικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα Kalman που εξασφαλίζουν τον συνυπολογισμό των τοπικών χαρακτηριστικών της περιοχής ενδιαφέροντος και την ελαχιστοποίηση τυχόν συστηματικών σφαλμάτων ενώ μία νέα στατιστική διαδικασία αναπτύχθηκε για την εκτίμηση του ενεργειακού δυναμικού στην περιοχή ενδιαφέροντος και την κατανόηση της χώρο-χρονικής κατανομής του.

Οι δραστηριότητες και τα μέχρι σήμερα αποτελέσματα του E-wave παρουσιάζονται σε ιστοσελίδα που αναπτύχθηκε ειδικά για τους σκοπούς του έργου: <http://www.oceanography.ucy.ac.cy/ewave/>.

Από τα μέχρι σήμερα, προκαταρκτικά αποτελέσματα, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η δυτική ακτογραμμή της Κύπρου εμφανίζει αυξημένες τιμές ενεργειακού δυναμικού με σχετικά υψηλές τιμές μεταβλητότητας. Αυτό είναι αποτέλεσμα των κυμάτων μεγάλης περιόδου (swell) που επικρατούν στην περιοχή. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι τα εκτιμώμενα μεγέθη του διαθέσιμου ενεργειακού δυναμικού είναι σαφώς μικρότερα από αυτά που εμφανίζονται στη Βόρεια ακτογραμμή της Ευρώπης, όπου εμφανίζεται σήμερα η μεγαλύτερη κινητικότητα σε θέματα κυματικής ενέργειας, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την σωστή επιλογή των εργαλείων-μηχανών παραγωγής κυματικής ενέργειας.
- Οι κατανομές που περιγράφουν με τον βέλτιστο τρόπο τη στοχαστική κατανομή της κυματικής ενέργειας στην περιοχή είναι οι Lognormal και Generalized Extreme Value.
- Οι παράμετροι των προηγούμενων κατανομών εμφανίζουν σημαντική χωρική μεταβλητότητα κάτι που πρέπει να συνυπολογίζεται σε μελέτες εκτίμησης των μέσων αλλά και ακραίων τιμών ενέργειας καθώς και σε συστήματα βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων.

Το πρόγραμμα E-wave αναμένεται να ολοκληρωθεί μέχρι το τέλος του 2012 με την ανάπτυξη μιας σειράς από ηλεκτρονικούς και συμβατικούς χάρτες και τον εντοπισμό περιοχών με αυξημένο ενδιαφέρον. Μέσω των τεχνικών εργαλείων και μεθοδολογιών που αναπτύσσονται στην κατεύθυνση αυτή επιδιώκεται, επιπλέον, η προαγωγή της επιστημονικής γνώσης σε θέματα μοντελοποίησης ατμοσφαιρικών και κυματικών παραμέτρων και εφαρμογής τους στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Acknowledgments. Η εργασία αυτή εντάσσεται στα πλαίσια του προγράμματος E-wave και χρηματοδοτείται από το Ινστιτούτο Προώθησης και Έρευνας της Κυπριακής Δημοκρατίας.

5. Βιβλιογραφικές Αναφορές

- D'Agostino R. B. and Stephens M.A., 1986: Goodness-of-fit Techniques, New York: Marcel Dekker.
- Bidlot J., Janssen P., Abdalla S. and Hersbach H., 2007. A revised formulation of ocean wave dissipation and its model impact. ECMWF Tech. Memo. 509. ECMWF, Reading, United Kingdom, 27pp.
- Crochet P., 2004. Adaptive Kalman filtering of 2-metre temperature and 10-metre wind-speed forecasts in Iceland, *Meteor. Appl.*, 11, 173–187.
- Galanis, G. and Anadranistakis M., 2002. A one dimensional Kalman filter for the correction of near surface temperature forecasts, *Meteor. Appl.* 9, 437–441.
- Galanis G., Chu P.C. and Kallos G., 2011. Statistical post processes for the improvement of the results of numerical wave prediction models. A combination of Kolmogorov-Zurbenko and Kalman filters, *Journal of Operational Oceanography*, Vol. 4, No 1, pp. 23-31.
- Janssen P., 2000. ECMWF wave modeling and satellite altimeter wave data. In D. Halpern (Ed.), *Satellites, Oceanography and Society*, pp. 35–36, Elsevier.
- Janssen P., 2004. *The Interaction of Ocean Waves and Wind*. Cambridge, University Press, 300pp.
- Janssen P. and Onorato M., 2007. The Intermediate Water Depth Limit of the Zakharov Equation and Consequences for Wave Prediction. *J. Phys. Oceanogr.* 37, 2389–2400.
- Janjic, Z. I., 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes, *Mon. Weather Rev.*, 122, 927–945.
- Kallos G., 1997. The Regional weather forecasting system SKIRON. Proceedings, Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments, 15-17 October 1997, Athens, Greece, 9 pp.
- Kalman, R.E., 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems, *Trans. ASME Ser. D* 82, 35–45.
- Kalman R.E. and Bucy, R.S., 1961. New results in linear filtering and prediction problems, *Trans. ASME Ser. D* 83, 95–108.
- Kalnay, E., 2002, *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*, Cambridge University Press, Cambridge, 341pp.
- Katsafados, P., 2003. Factors and parameterizations that determine the performance of limited area models in long-range forecasts, Ph.D. Thesis, School of Physics, University of Athens, Greece, 257pp.
- Louka P., Galanis G., Siebert N., Kariniotakis G., Katsafados P., Pytharoulis I., and Kallos G., 2008. Improvements in wind speed forecasts for wind power prediction purposes using Kalman filtering, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.96, 2348-2362.
- Mori N. and Janssen P.A.E.M., 2006. On kurtosis and occurrence probability of freak waves, *J. Phys. Oceanogr.* 36, 1471-1483.
- Papadopoulos, A., Katsafados, P. and Kallos, G., 2001. Regional weather forecasting for marine application. *Global Atmos. Ocean Syst.* 8 (2–3), 219–237.
- Pontes M.T., 1998: Assessing the European Wave Energy Resource, *Transaction of ASME* Vol. 120, pp. 226-231.