

## **ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ**

**Z. Θεοχάρη**, Πολιτικός Μηχανικός, Μ.Δ.Ε., Ε.Μ.Π.

**K. Μέμος**, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Δ. Κουτσογιάννης**, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,  
Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 157 80 Ζωγράφου

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Μελετάται η χωροχρονική δομή του σφάλματος του κυματικού μοντέλου πρόγνωσης WAM και οι προγνώσεις του, σε τρεις περιοχές : στο Αιγαίο Πέλαγος, στο Βόρειο και στο Νότιο Ινδικό Ωκεανό. Η πρόγνωση του ύψους κύματος, με βάση το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα ικανοποιητική αφού τα σφάλματά της κυμαίνονται σε ποσοστά που αγγίζουν το 55% σε ορισμένες περιπτώσεις. Για τη βελτίωση της πρόγνωσης, χρησιμοποιήθηκαν γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης. Σκοπός της πρώτης εφαρμογής είναι η αξιοποίηση μετρήσεων προκειμένου να βελτιωθεί με χρήση στοχαστικών μεθόδων η πρόγνωση του ύψους κύματος στο χώρο της λεκάνης του Αιγαίου Πελάγους. Οι στοχαστικές εφαρμογές στον τομέα των κυματισμών είναι σχετικά περιορισμένες και μάλιστα αφορούν μόνο σε επεξεργασία των χρονοσειρών των μετρήσεων σημειακά και όχι στο χώρο. Επιτυγχάνεται στην παρούσα εφαρμογή περιορισμένη αλλά σταθερή βελτίωση και απομάκρυνση του συστηματικού σφάλματος. Η πλήρης βελτίωση της πρόγνωσης και η ταύτιση αυτής με την πραγματικότητα αποδεικνύεται δύσκολη, γεγονός που αποδίδεται κυρίως στην πολυπλοκότητα της περιοχής μελέτης με το περίπλοκο ανάγλυφο, τα πολυάριθμα νησιά και τις βραχονησίδες. Η επιλογή της τοποθεσίας της δεύτερης εφαρμογής στο Βόρειο Ινδικό Ωκεανό παρέχει τη δυνατότητα παράκαμψης των δυσχερειών της λεκάνης του Αιγαίου Πελάγους. Σκοπός της δεύτερης εφαρμογής, είναι η βελτίωση της πρόγνωσης του ύψους κύματος στην παράκτια ζώνη, χρησιμοποιώντας δεδομένα ανοικτής θαλάσσης. Το τεθλασμένο μοντέλο παλινδρόμησης στο οποίο καταλήγουμε, χρησιμοποιεί τη μέτρηση του ύψους κύματος στα βαθιά και την πρόγνωση του ίδιου μεγέθους στα ρηχά, βελτιώνοντας σημαντικά την προγνωστική ικανότητα του αρχικού μοντέλου. Έτσι, ο συντελεστής προσδιορισμού αυξάνεται σημαντικά έως την τιμή 0.9. Η τρίτη εφαρμογή ολοκληρώνει την προσπάθεια να μελετηθεί η δομή του σφάλματος του μοντέλου WAM στα πλαίσια της εργασίας αυτής, με τη βοήθεια δορυφορικών μετρήσεων σε ορθογωνικό χωρίο  $20^{\circ} \times 20^{\circ}$  στο Νότιο Ινδικό Ωκεανό. Συνολικά, η έρευνα αυτή οδηγεί στον εντοπισμό της συστηματικότητας του σφάλματος στο χώρο και στο χρόνο καθώς και στις αιτίες εμφάνισής αυτού.

# WAVE FORECASTING ERRORS IN TIME AND SPACE

**Z. Theocharis**, Civil Engineer, MSc, NTUA

**C.D. Memos**, Professor, NTUA

**D. Koutsoyiannis**, Assoc.Professor, NTUA

Department of Civil Engineering, National Technical University of Athens (NTUA),

5 Heroon Polytechniou, 157 80 Zografou, Greece, tel:+30-210-7722851

Email: memos@hydro.ntua.gr

## ABSTRACT

In recent years, data assimilation and artificial neural network techniques have been used in a number of wave height forecast improvement efforts. In this work we present the application of linear and non-linear stochastic techniques to show that WAM background errors can be reasonably predicted by using a limited number of buoy observations. Re-run of the wave model is not required. The first assessment, conducted in the Aegean Sea, refers to the improvement of the significant wave height prediction in deep water. The results were checked against four pilot-study monitoring stations. The assessment had a two-fold scope. First, a study was conducted in a time domain fashion using four stochastic models whose explanatory variables are the WAM prediction and the measured wave height at previous steps. Two bivariate linear models, a trivariate linear model and two versions of a non-linear bivariate model were used and resulted in a significant forecast improvement, irrespectively of the application time period and of the location of the prediction. The coefficients of determination increased from approximately 0.7 (WAM) to over 0.9, suggesting that this method may be suitable for operational use. The second part of the application consists of a space-wise study including spatial stochastic modelling and wave information transfer aiming at expanding the improvement described above in space and especially in coastal regions. We found that wind information can help to improve the said prediction in time and space without using measurements or satellite observations, except for a calibration period. The applied stochastic methods show a somehow limited but steady improvement of the wave height prediction. To avoid the Aegean Sea complexity and peculiarity, further examination was conducted in two locations of the Indian Ocean. A nonlinear transformation in the stochastic models which is related to the swell content optimizes the improvement of the wave height prediction in intermediate waters by using the offshore measurement. The improvement of the wave height prediction yields high coefficients of determination ( $\sim 0.9$ ).

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρόγνωση ανεμογενών κυματισμών σε παγκόσμιο επίπεδο, πραγματοποιείται στην πλειονότητα των περιπτώσεων με αριθμητικά μοντέλα, τα οποία αναπαριστούν τις διεργασίες που συναντούμε στη φύση και αφορούν στην αλληλεπίδραση ανέμου, κύματος και στερεών ορίων. Έτσι, εφαρμόζονται διάφορα ολοκληρωμένα αριθμητικά μοντέλα κυματικής πρόγνωσης, τα οποία βασίζονται στην πρόγνωση του πεδίου ανέμου και κατ' επέκταση στην πρόγνωση των κυματισμών με δεδομένο εισόδου τον παραγόμενο άνεμο.

Ένα από αυτά είναι και το μοντέλο WAM του οποίου την πρόγνωση προσπαθούμε να βελτιώσουμε στην πλαίσια της παρούσας εργασίας με τη χρήση στοχαστικών μεθόδων. Το μοντέλο WAM είναι 3<sup>ης</sup> γενιάς, περιλαμβάνει δηλαδή τις μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις κυματισμών με μη παραμετρικό τρόπο.

Είναι αδιαμφισβήτητο ότι οι κυματισμοί έχουν άμεση σχέση, και μάλιστα σχέση αιτίου-αποτελέσματος, με τον άνεμο. Παρόλα αυτά, το σφάλμα της πρόγνωσης μπορεί να γίνει σημαντικό. Εξάλλου, η γνώση του πεδίου του ανέμου μπορεί κάποιες φορές να είναι ιδιαίτερα φτωγή, με αποτέλεσμα συχνά να μην είμαστε σίγουροι για την πηγή του σφάλματος: Βρίσκεται στο μοντέλο πρόγνωσης του κυματισμού ή στην περιγραφή του ανέμου; (Vincent and Resio, 1990). Αυτή η ερώτηση-διαπίστωση καθιστά τις μεθόδους βελτίωσης της πρόγνωσης των αριθμητικών μοντέλων ιδιαίτερα σημαντικές και προς τούτο ταχύτατα αναπτυσσόμενες κατά την τελευταία πενταετία.

Ας σημειωθεί ότι δύο σημαντικοί επιστήμονες του χώρου της κυματικής πρόγνωσης και μάλιστα δημιουργοί του μοντέλου WAM έχουν κάνει τις εξής παρατηρήσεις για αυτό:

- Το WAM κάνει πρόγνωση αλλά υποεκτιμά τα ύψη κύματος παγκοσμίως (Janssen et al., 1997)
- Η πρόγνωση κύματος δεν μπορεί να υπερβεί την ακρίβεια της πρόγνωσης του ανέμου (Young, 1999)

## 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Οι μέθοδοι βελτίωσης της πρόγνωσης του ύψους κύματος μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Τεχνικές αφομοίωσης δεδομένων (Data assimilation techniques, DA)
2. Τεχνικές νευρωνικών δικτύων (Neural network techniques, NN)
3. Στοχαστικές τεχνικές (stochastic techniques, ST)

### 2.1 ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΦΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Ένας από τους πιο διαδεδομένους πλέον τρόπους επιχειρησιακής αξιοποίησης των δορυφορικών δεδομένων είναι η τεχνική της αφομοίωσης δεδομένων από δορυφόρους, Data Assimilation (DA). Η τεχνική αφομοίωσης δεδομένων έχει ως σκοπό την βελτίωση της πρόγνωσης με τη εισαγωγή μεταγενέστερων δεδομένων του ανεμολογικού ή του κυματικού πεδίου που προέρχονται κυρίως από δορυφόρους και επανέναρξη του τρεξίματος των μοντέλων: υδροδυναμικού και κυματικού..

Τα μοντέλα πρόβλεψης κυματισμών, δίνουν συνήθως προγνώσεις για το επόμενο 72-ωρο (1<sup>st</sup> guess forecast). Κατά τη διάρκεια όμως των τριών ημερών πρώτης πρόγνωσης, οι δορυφόροι σαρώνοντας τη γήινη επιφάνεια, συλλέγουν δεδομένα τα οποία αφορούν την πρόγνωση αυτή με δύο τρόπους διότι πρόκειται για:

- ✓ Ανεμολογικά δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο κυματικό μοντέλο
- ✓ Κυματολογικά δεδομένα τα οποία μπορούν να χρησιμεύσουν στη σύγκριση με τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου

Η τεχνική αφομοίωσης κυματικών δεδομένων είναι προσφάτως εφαρμοσθείσα μέθοδος (εφαρμόζεται κατά τον τελευταίο χρόνο) και ακόμα ερευνάται αρκετά η βέλτιστη αξιοποίησή της.

Παρόλα αυτά, οι απαιτήσεις για μεγάλη κάλυψη από δεδομένα καθώς και η επανέναρξη του τρεξίματος των μοντέλων αποτελούν τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου. Ένας ακόμα περιορισμός της τεχνικής DA, είναι η έλλειψη απόδοσης της δομής των σφαλμάτων του μοντέλου.

Μια σχετική και αρκετά σημαντική εφαρμογή στον επιστημονικό χώρο της κυματικής πρόγνωσης επιτεύχθηκε προσφάτως από το ευρωπαϊκό κέντρο μετεωρολογικών προγνώσεων (ECMWF) που ολοκλήρωσε πρόσφατα τους υπολογισμούς του ονομαζόμενου ERA-40 πακέτου διορθωμένων τιμών δεδομένων 45 ετών, δηλαδή, την επανάλυση και διόρθωση μεγεθών που προέκυπταν από μαθηματικά μοντέλα, μεταξύ των οποίων και τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τα ανεμογενή κύματα. Οι υπολογισμοί παρήχθησαν από το ολοκληρωμένο σύστημα πρόβλεψης της ECMWF που χρησιμοποιεί την διαφορική τεχνική αφομοίωσης δεδομένων (DA). Το τελικό προϊόν, αποτελεί το πιο μακροχρόνιο και πλήρες σύνολο κυματικών δεδομένων σε υπολογιστικό πλέγμα  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  καλύπτοντας έτσι ολόκληρη τη γη.

Οι Caires και Sterl (2005), πρότειναν στη συνέχεια μια νέα μη παραμετρική μέθοδο διόρθωσης των δεδομένων ERA-40. Η μέθοδος αυτή προβλέπει το σφάλμα με "την εκμάθηση" σεναρίων αλληλουχίας καταστάσεων θάλασσας από ένα υποσύνολο των δεδομένων. Μάλιστα, οι ίδιοι συγγραφείς απέδειξαν ότι η τεχνική DA δεν παρουσιάζει σημαντική βελτίωση των ERA-40 συγκρίνοντας τα δεδομένα με δεδομένα του δορυφόρου TOPEX.

## 2.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Η τελευταία τάση που επικρατεί στο χώρο πρόγνωσης των κυματισμών είναι τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks). Στην εργασία των Tsai et al. (2001) γίνεται προσπάθεια πρόγνωσης των κυματισμών βάσει των παρατηρήσεων (χρονοσειρών) του κυματισμού και όχι με τη χρήση του ανεμολογικού καθεστώτος ως δεδομένου εισόδου. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Στα Νευρωνικά Δίκτυα ουσιαστικά χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος διάδοσης που αφορά την ιστορία καταστάσεων θάλασσας (back propagation algorithm) ο οποίος κατασκευάζεται ακολουθώντας μια διαδικασία "εκμάθησης" (learning process). Το μοντέλο εκτιμά τη σχέση που συνδέει τα βάρη μεταξύ γειτονικών σταθμών, βάσει βραχυπρόθεσμων δεδομένων, από τα οποία μπορεί να παραχθεί χρονοσειρά κυματισμών για πρόγνωση ή συμπλήρωση κενών με δεδομένα από γειτονικό σταθμό.

## 2.3 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Σε αντίθεση με τα μοντέλα μακροπρόθεσμης πρόγνωσης, τα οποία παράγουν πιθανότητες εμφάνισης ακραίων χαρακτηριστικών μιας κατάστασης θάλασσας σε ένα μεγάλο σχετικά περιθώριο, τα βραχυχρόνια μοντέλα ανάλυσης χρονοσειρών αναπαριστούν την μνήμη που διέπει τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κυματισμού στο χρονικό ορίζοντα μιας κατάστασης θάλασσας. Αυτό είναι σημαντικό, ιδιαίτερα σε καταστάσεις θάλασσας οι οποίες μπορεί να μη χαρακτηρίζονται μόνο από μια σημειακή ακραία κατάσταση. Η διαπίστωση αυτή ώθησε αρχικά τους ερευνητές στη χρήση των στοχαστικών μεθόδων, και συγκεκριμένα των μοντέλων αυτοπαλινδρόμησης, προκειμένου να περιγραφεί η χρονοσειρά της ανύψωσης της επιφάνειας της θάλασσας καθώς και το φάσμα της ( Scheffner et al. 1992).

Οι στοχαστικές εφαρμογές στον τομέα της πρόγνωσης των κυματισμών είναι σχετικά περιορισμένες και μάλιστα αφορούν μόνο σε επεξεργασία των χρονοσειρών των μετρήσεων που έχουν ληφθεί είτε από όργανα (buoys) είτε των οπτικών παρατηρήσεων από διερχόμενα πλοία. Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται για πρώτη φορά συνδυασμός των χρονοσειρών των μετρήσεων και των προγνώσεων του αριθμητικού μοντέλου WAM, προκειμένου να βελτιωθούν οι επιδόσεις της πρόγνωσης του τελευταίου σε άλλη τοποθεσία, με τη χρήση στοχαστικών μεθόδων.

## 3.ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τρεις περιοχές: το Αιγαίο Πέλαγος, ο Βόρειος και ο Νότιος Ινδικός Ωκεανός. Η πρώτη και βασικότερη παρατήρηση που μπορεί κάποιος να επισημάνει από μια απλή μελέτη των δεδομένων χρονοσειρών και στις τρεις περιοχές είναι ότι η πρόγνωση του σημαντικού ύψους κύματος που παρέχεται από το μοντέλο WAM, δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα ικανοποιητική: τα σφάλματά της κυμαίνονται σε ποσοστά της τάξεως:

- του 40% για την πρώτη περιοχή
- του 55% για τη δεύτερη περιοχή
- του 25% για την τρίτη περιοχή

και στην πλειονότητα των περιπτώσεων, εκτός από τη 2<sup>η</sup> εφαρμογή, πρόκειται για υποεκτιμήσεις της πραγματικότητας.

Η χωροχρονική κατανομή της υποεκτίμησης ή μη, οι αιτίες που οδηγούν σε αυτήν, η συστηματικότητα αυτών και οι διαφορετικοί παράγοντες που επηρεάζουν την προγνωστική ικανότητα των μοντέλων, η λογική της κατασκευής μοντέλων βελτίωσης όπως και πολλά άλλα συμπεράσματα, αντλήθηκαν και μάλιστα κλιμακωτά από κάθε εφαρμογή. Δηλαδή, η κάθε εφαρμογή με τα συμπεράσματά της φάνηκε ιδιαίτερα χρήσιμη για την επόμενη.

### 3.1 1<sup>η</sup> ΕΦΑΡΜΟΓΗ: ΑΙΓΑΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ

Στα πλαίσια της πρώτης εφαρμογής αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν τέσσερα μοντέλα παλινδρόμησης (3 γραμμικά και ένα μη γραμμικό) σε τέσσερις σταθμούς του Αιγαίου Πελάγους, προκειμένου να βελτιωθούν στο μέγιστο δυνατό βαθμό οι προγνώσεις του μοντέλου WAM σε πραγματικό χρόνο.

Η βελτίωση που επιτεύχθηκε με τη χρήση των παραπάνω μοντέλων:

- πραγματοποιήθηκε και στους τέσσερις σταθμούς
- πραγματοποιήθηκε και για τα τέσσερα μοντέλα
- επιτεύχθηκε για όλες τις περιόδους εφαρμογής (εύρος περιόδων εφαρμογής από 4 μήνες έως 2.5 χρόνια)
- περιέλαβε τόσο τις χαμηλές τιμές ύψους κύματος όσο και τις υψηλές, παρόλο που οι τελευταίες αποτελούσαν μικρό τμήμα των χρονοσειρών ύψους κύματος.

Κατά την εφαρμογή των μοντέλων παλινδρόμησης, οι παρακάτω παρατηρήσεις ενθάρρυναν την περαιτέρω έρευνα της χρήσης στοχαστικών τεχνικών στο χώρο:

- Οι τιμές πρόγνωσης συνέκλιναν κατά πολύ με την πραγματικότητα και ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  αυξήθηκε σημαντικά προσεγγίζοντας σχεδόν τη μονάδα ( $R^2 = 0.924$ ) σε όλες τις εφαρμογές.
- Παρατηρήθηκε εμφανής και καθολική προσέγγιση της πραγματικής μέσης τιμής καθώς και περιορισμός της τυπικής απόκλισης γύρω από την πραγματική τιμή, χωρίς να εμφανισθεί σημείο το οποίο να έχει μεγάλη απόκλιση με την πραγματικότητα (outlier).
- Επιτεύχθηκε μεγάλη σύγκλιση στα ύψη, τα μεγαλύτερα των 2 m, χωρίς να παρατηρηθεί συστηματικότητα του σφάλματος (υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση), όπως συνέβαινε αρχικά με τα αποτελέσματα του WAM.
- Κατά την εφαρμογή των μοντέλων σε τέσσερις περιπτώσεις σταθμών με διαφορετικά στατιστικά χαρακτηριστικά, οι συντελεστές βάρους που προσδιόριζαν το κάθε μοντέλο παρουσίασαν ακριβώς την ίδια συμπεριφορά και παρέμειναν στα ίδια επίπεδα, σε όλους τους σταθμούς και σε όλα τα χρονικά διαστήματα εφαρμογής.

Αυτή η συνολική εικόνα βελτίωσης της πρόγνωσης που περιγράφηκε παραπάνω οδήγησε και στο αρκετά σημαντικό συμπέρασμα που αφορά κατεξοχήν τη περαιτέρω σχετική έρευνα στο χώρο: ότι η σχέση που συνδέει τις μετρήσεις και τις αντίστοιχες προγνώσεις του WAM είναι δυνατόν να αποκρυπτογραφηθεί. Δηλαδή, υπάρχει η ένδειξη ότι το μοντέλο WAM υποεκτιμά με τον ίδιο τρόπο το πραγματικό ύψος κύματος καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου όπως συνέβη και στους τέσσερις σταθμούς με αποτέλεσμα οι ίδιοι συντελεστές να περιγράφουν ικανοποιητικά τόσο τη χειμερινή περίοδο με τα μεγάλα ύψη κύματος όσο και την καλοκαιρινή με τα χαμηλά ύψη κύματος και τις απότομες αλλαγές κατάστασης θάλασσας. Η αιτία του σφάλματος, δηλαδή, φαίνεται να είναι η ίδια και η οποία προκαλεί με τη σειρά της τη συστηματικότητα του σφάλματος του μοντέλου WAM στο σημαντικό ύψος κύματος.

Έτσι, χρήσιμο για την κατασκευή των μοντέλων βελτίωσης της πρόγνωσης στο χώρο θεωρήθηκε το συμπέρασμα ότι είναι σημαντικό να γίνει:

- διαχωρισμός καταστάσεων θάλασσας ανάλογα με την κατεύθυνση ανέμου και
- ανάλογη επιλογή σταθμού αναφοράς από νότια είτε από βόρεια το οποίο θα ομαδοποιούσε τη δομή του σφάλματος στο χώρο και το χρόνο.

Με γνώμονα τα παραπάνω, μελετήθηκαν, διάφορες περιπτώσεις εφαρμογής μοντέλων βελτίωσης της πρόγνωσης στο χώρο. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής δείχνουν ότι η εφαρμογή στοχαστικών μοντέλων σε στοιχεία σταθμού που βρίσκεται σε απόσταση από την περιοχή πρόγνωσης, βελτιώνει την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου WAM, σε μικρότερο όμως βαθμό από αυτόν όπου ο σταθμός μέτρησης βρίσκεται στην περιοχή πρόγνωσης. Τα συσχετογράμματα επιδεικνύουν τη συσχέτιση των καταστάσεων θάλασσας σε διαφορετικά σημεία της ίδιας λεκάνης, του Αιγαίου Πελάγους, και έτσι δίδουν τους

χρόνους υστέρησης για μεταφορά των καταστάσεων θάλασσας από τον ένα σταθμό στον άλλο, ανάλογα με την κατεύθυνση ανέμου. Η βελτίωση επιτυγχάνεται σε όλες τις περιπτώσεις και ο συντελεστής προσδιορισμού αυξάνεται κατά μέσο όρο από 0.72 σε 0.76. Αποδεικνύεται επίσης ότι επιτυγχάνεται πρόγνωση χωρίς συστηματικό σφάλμα πλέον.

Η δυσκολία στην επιτυχία μεγάλου συντελεστή προσδιορισμού και συνεπώς η δυσκολία προσέγγισης της πραγματικότητας αποδίδεται κυρίως στην πολυπλοκότητα της περιοχής μελέτης με το περίπλοκο ανάγλυφο, τα πολυάριθμα νησιά και τις βραχονησίδες. Αυτή είναι και η αιτία επιλογής της επόμενης εφαρμογής που αφορά την ανοιχτή θάλασσα του Βόρειου Ινδικού Ωκεανού. Με αυτή την επιλογή παρακάμπτονται οι δυσκολίες που προκύπτουν στη λεκάνη του Αιγαίου Πελάγους.

### 3.2 2<sup>η</sup> ΕΦΑΡΜΟΓΗ: ΒΟΡΕΙΟΣ ΙΝΔΙΚΟΣ ΩΚΕΑΝΟΣ

Τα δεδομένα της 2<sup>ης</sup> εφαρμογής καλύπτουν τις απαιτήσεις οι οποίες προέκυψαν από την 1<sup>η</sup> εφαρμογή:

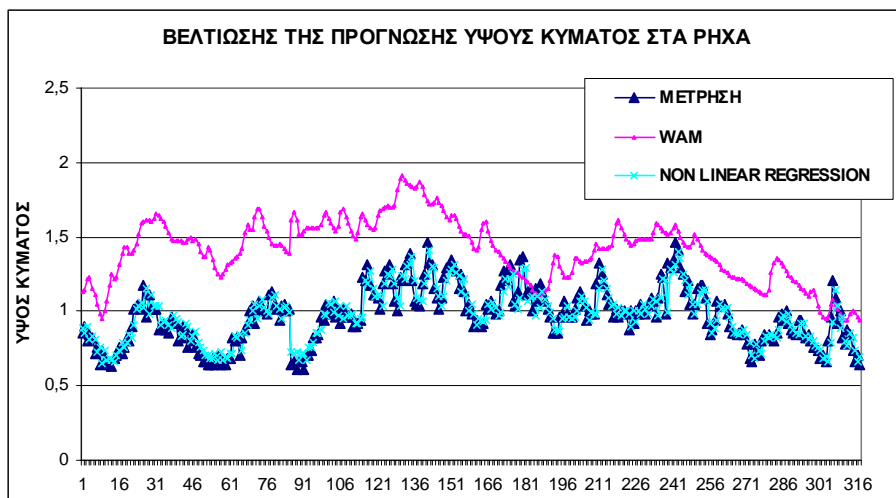
- Περιοχή ανοιχτής θάλασσας χωρίς περίπλοκο ανάγλυφο και παρεμβολές νησιών και βραχονησίδων.
- Κατάλληλη κλιματολογία και μεγάλα αναπτύγματα θάλασσας που ευνοούν την ανάπτυξη καταστάσεων θάλασσας υψηλής ενέργειας και επομένως μεγάλων κυματισμών

Μετά από κατάλληλη επιλογή σταθμών ανάλογα με τα ανεμολογικά δεδομένα αλλά και τις επιδιώξεις της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι δυνατόν να βελτιώσουμε την πρόγνωση του ύψους κύματος στην παράκτια ζώνη, χρησιμοποιώντας δεδομένα ανοιχτής θάλασσας (απόσταση 900km).

Καταλήξαμε, τελικά, αφού εξετάσαμε την ετεροσυσχέτιση μεταξύ των δύο περιοχών στα βαθειά και στα ρηχά, σε ένα τεθλασμένο μοντέλο παλινδρόμησης το οποίο χρησιμοποιώντας τη μέτρηση του ύψους κύματος στα βαθειά και την πρόγνωση του ίδιου μεγέθους στα ρηχά, βελτιώνει σημαντικά την πρόγνωση (Σχ.1).

Τελικά:

- Οι τιμές συγκλίνουν κατά πολύ με την πραγματικότητα, χωρίς βέβαια να επιτυγχάνεται ταύτιση, ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού R<sup>2</sup> αυξάνεται σημαντικά από 0.5 σε 0.9.
- Παρατηρείται προσέγγιση της πραγματικής μέσης τιμής καθώς και περιορισμός της τυπικής απόκλισης γύρω από την πραγματική τιμή
- Το διάστημα εφαρμογής είναι σχετικά μικρό και ο συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού R<sup>2</sup> που επιτυγχάνεται σχετικά μεγάλος.



**Σχήμα 1.** Βελτίωση της πρόγνωσης στο χώρο με χρήση μη γραμμικού στοχαστικού μοντέλου – Βόρειος Ινδικός Ωκεανός  
**Figure 1.** Improvement of spatial wave forecasting by a nonlinear stochastic model- North Indian Ocean

Τελικά, παρόλο που οι λεκάνες του Αιγαίου και του Ινδικού Ωκεανού είναι εντελώς διαφορετικές περιπτώσεις απο άποψη κλιματολογίας, αποθάλασσας και ρύθμισης μοντέλου, τα στοχαστικά εργαλεία αποδεικνύονται και πάλι χρήσιμα στην σημαντική βελτίωση της πρόγνωσης τοπικά αλλά και στο χώρο χωρίς να απαιτείται επανέναρξη εφαρμογής του φυσικού μοντέλου σε αντίθεση με την περίπτωση της τεχνικής αφομοίωσης δεδομένων από το δορυφόρο.

### 3.3 3<sup>η</sup> ΕΦΑΡΜΟΓΗ: ΝΟΤΙΟΣ ΙΝΔΙΚΟΣ ΩΚΕΑΝΟΣ

Η τρίτη εφαρμογή ολοκληρώνει την προσπάθεια να μελετηθεί η δομή του σφάλματος του μοντέλου WAM στα πλαίσια της εργασίας αυτής, με τη βοήθεια μετρήσεων από δορυφόρους αυτή τη φορά.

Από ένα σύνολο δεδομένων του μετεωρολογικού κέντρου της Αυστραλίας, επιλέγεται ένα χωρίο 20° x 20° στο Νότιο Ινδικό Ωκεανό όπου, με κατάλληλη επεξεργασία, προκύπτουν τα προς επεξεργασία δεδομένα: μετρήσεις του δορυφόρου (ανα 6-7 km) κατά μήκος των τροχιών του και οι αντίστοιχες προγνώσεις.

Ουσιαστικά, τα δεδομένα αποτελούν ένα σύνολο χρονικών συμπτώσεων μοντέλου και μέτρησης στο χώρο διότι στην επεξεργασία αυτή, κάθε μία από τις τροχιές αποτελεί, εφόσον πραγματοποιείται μέσα σε περίπου 3 λεπτά ανά 12 ώρες, μια «τομή» της επιφάνειας της θάλασσας για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Αναπαριστώντας αρχικά τις χρονοσειρές μετρήσεων και προγνώσεων παρατηρούνται αρκετές περιπτώσεις υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης σε διαφορετικά χωροχρονικά διαστήματα χωρίς όμως κάποια εμφανή τάση και δομή στο χώρο ή στο χρόνο. Στο σύνολο



των δεδομένων, το WAM εμφανίζεται να υποεκτιμά την πραγματικότητα εφόσον το μέσο σφάλμα ισούται με 0.11m.

Η πιθανότητα εμφάνισης του σφάλματος σε γεωγραφικό μήκος και πλάτος μας οδηγεί στη μελέτη του στο χώρο για το σύνολο του χρόνου των τριών μηνών, διακρίνοντας τα σφάλματα σε κατηγορίες (μεγάλα-μικρά, θετικά-αρνητικά).

Έτσι, καταλήγουμε στα εξής:

- Υφίστανται συγκεκριμένες περιοχές όπου ανεξαρτήτως του χρόνου στον οποίο διέρχεται ο δορυφόρος, το μοντέλο υπερεκτιμά την πραγματικότητα.
- Οι περιοχές υπερεκτίμησης που διακρίνονται είναι περιορισμένες σε σχέση με τις υπόλοιπες.
- Υφίστανται συγκεκριμένες περιοχές, όπου, ανεξαρτήτως του χρόνου στον οποίο διέρχεται ο δορυφόρος, το μοντέλο υποεκτιμά την πραγματικότητα.
- Υφίστανται τροχιές δειγματοληψίας μετρήσεων από το δορυφόρο κατά μήκος των οποίων εντοπίζεται *μόνο* υπερεκτίμηση και οι οποίες είναι ευδιάκριτες.

Προκειμένου να ερευνήσουμε τη συστηματικότητα του σφάλματος στο χρόνο, χωρίζουμε τα δεδομένα μας σε υποσύνολα της μιας εβδομάδας και αναλύουμε τη συμπεριφορά του σφάλματος σε μέγεθος και χώρο. Εμφανίζεται τότε μια ομοιόμορφη συμπεριφορά στη χωροχρονική δομή του σφάλματος και για τις 13 εβδομάδες μελέτης η οποία περιγράφεται ως εξής

- ✓ Όσο αυξάνονται οι τιμές του ύψους κύματος, αυξάνεται και το θετικό σφάλμα υποεκτίμησης.
- ✓ Αρνητικές τιμές του σφάλματος συνεπάγονται τιμές ύψους κύματος με μέσο όρο γύρω στα 5 μέτρα
- ✓ Χωρικός εντοπισμός των σφαλμάτων ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος
- ✓ Εμφάνιση αρνητικών σφαλμάτων για υψηλό μέσο όρο προγνώσεων του ύψους κύματος αλλά χαμηλό μέσο όρο μετρήσεων
- ✓ Εντοπισμός υπερεκτίμησης σε συγκεκριμένη χωρικά ζώνη

Τελικά, το μοντέλο WAM υποεκτιμά παγκοσμίως την πραγματικότητα. Η αιτία αυτού του φαινομένου δεν έχει εξηγηθεί πλήρως προς το παρόν αν και σημαντική θεωρείται η επιρροή της πρόγνωσης του ανέμου η οποία χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου στο κυματικό μοντέλο, όπως και η ανάλυση του μοντέλου. Παγκοσμίως, όσο πιο ακραίες τιμές του ύψους κύματος παρατηρούμε, τόσο πιο μεγάλο είναι το σφάλμα του μοντέλου.

Έτσι, οι πρώτες υποθέσεις για την εξήγηση των υποεκτιμήσεων σχετίζονται με τις παραπάνω παρατηρήσεις αλλά και με το κλίμα της περιοχής και την κατηγορία της κατάστασης θάλασσας. Δηλαδή, η εικόνα που μας δίνεται ανεξαρτήτως του χρόνου, υπονιάζει για συνύπαρξη υψηλών θετικών σφαλμάτων με υψηλές καταστάσεις θάλασσας.

Πράγματι, το κυματικό κλίμα στο Νότιο ημισφαίριο επηρεάζεται άμεσα από τη μετεωρολογία και πιο συγκεκριμένα από τους επικρατούντες ανέμους που αποτελούν και το αίτιο δημιουργίας των κυματισμών. Οι άνεμοι δημιουργούνται και αναπτύσσονται από το επίπεδο του ισημερινού προς τους πόλους με τη μορφή αντικυκλώνων για το Νότιο ημισφαίριο. Έτσι, όσο κινούμαστε προς τους πόλους, και κυρίως το Νότιο Πόλο όπου υπάρχει μεγάλο ανάπτυγμα θαλάσσης, τόσο αυξάνεται και το μέσο ύψος κύματος προς τα Νοτιοανατολικά, όπως ακριβώς συμβαίνει και στο χωρίο μελέτης.

Παρατηρήσεις όπως οι προηγούμενες όχι μόνο δεν εξηγούν τις αιτίες υπερεκτίμησης στην συγκεκριμένη περιοχή, αλλά επιτείνουν την ανάγκη για προσδιορισμό της αιτίας ύπαρξης και χωρικής κατανομής των αρνητικών σφαλμάτων.

Τελικά, η υπερεκτίμηση αποδίδεται στη μορφολογία της ευρύτερης περιοχής μελέτης και πιο συγκεκριμένα στην ύπαρξη συμπλέγματος μικροσκοπικών βραχονησίδων, διαστάσεων μικρότερων από  $0.5^\circ$  σε μια περιοχή δυτικά του χωρίου μελέτης, σε γεωγραφικό πλάτος μεταξύ  $-45^\circ$  και  $-55^\circ$  και σε γεωγραφικό μήκος  $69^\circ$ .

Αυτές οι βραχονησίδες, θεωρούνται η αιτία ύπαρξης και διασποράς του σφάλματος υπερεκτίμησης. Αυτό εξηγείται ως εξής: το μοντέλο, δεν λαμβάνει υπόψη κομμάτια ξηράς τα οποία είναι μικρότερα από την ανάλυσή του, δηλαδή τις 0.5 μοίρες. Έτσι, ενώ στην πραγματικότητα ο κυματισμός μειώνεται λόγω της ύπαρξης αυτών, το μοντέλο δεν είναι ικανό να προσομοιώσει αυτήν την μείωση με αποτέλεσμα να προβλέπει τους κυματισμούς οι οποίοι θα αναπτυσσότουσαν χωρίς την ύπαρξη των βραχονησίδων. Το σφάλμα επομένως δημιουργείται στη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή και διασπείρεται στη συνέχεια μέσω του καννάβου του μοντέλου σε μια ζώνη η οποία όπως προαναφέρθηκε, βρίσκεται μεταξύ  $-45$  και  $-55$  μοιρών.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Η ομαδοποίηση των σφαλμάτων στο χώρο καθώς και η μελέτη της χωρικής συστηματικότητάς τους είναι δυνατόν να βελτιώσει τις προγνώσεις του κυματικού μοντέλου που εξετάστηκε, χωρίς επέμβαση στο ίδιο το μοντέλο αλλά με χρήση χωρικών στοχαστικών μεθόδων βελτίωσης.

#### 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Caires, S. and A. Sterl. (2005). "A new non-parametric method to correct model data: Application to significant wave height from the ERA-40 reanalysis", *J. Atmospheric and Oceanic Tech.*, 22(4), pp.443-459.
- Janssen, P. A. E. M., B. Hansen, and J. Bidlot. (1997). "Verification of the ECMWF wave forecasting system against buoy and altimeter data" *Weather and Forecasting*, 12, 763-784.
- Scheffner, N. M., and L. E. Borgman. (1992). "Stochastic time series representation of wave data" *Journal of Waterways Port Coastal Ocean Engineering*, ASCE, 118(4), pp.1955-2012.
- Tsai, C.-P., C. Lin, J. N. Shen. (2001). "Neural network for wave forecasting among multi-stations", *J. Ocean Engineering*, 29, pp. 1683-1695.
- Vincent, C. L. and D. T. Resio. (1990). "Wave forecasting and hindcasting in deep and shallow water" In: Herbich, J. B (Ed.), *Handbook of Ocean and Coastal Engineering*, ASCE 125, 195-202.
- Young, I. R. (1999). *Wind generated ocean waves*, Elsevier Science, pp.45-80, pp.208-224.