



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Π.Μ.Σ.: «Περιβαλλοντική Μηχανική»**  
**Κατεύθυνση: «Περιβαλλοντική Διαχείριση, Βιώσιμη**  
**Ενέργεια και Κλιματική Αλλαγή»**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ**  
**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.**

**ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΑΚΗ ΜΑΡΙΑ**

Χωροχρονική Μοντελοποίηση της  
Μεταβλητότητας του Σημαντικού Ύψους  
Κύματος για τον Προσδιορισμό του  
Θαλάσσιου Ενεργειακού Δυναμικού:  
Εφαρμογές πεδίου στο Αιγαίο και το Ιόνιο  
Πέλαγος

**Τριμελής Εξεταστική επιτροπή:**

**Επ. Καθηγήτρια Κολοκοτσά Διονυσία**  
(επιβλέπουσα καθηγήτρια)

**Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος**  
**Δρ. Βαρουχάκης Εμμανουήλ (συνεπιβλέπων)**

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ  
ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.

### **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κ. Κολοκοτσά Διονυσία, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το παρόν θέμα και τη συνεχή καθοδήγησή της, καθώς και τον Δρ.Βαρουχάκη Εμμανουήλ για την πολύτιμη βοήθειά του και την επιστημονική υποστήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά την μητέρα μου για την υλική και ηθική υποστήριξη όλο το διάστημα των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, λόγω των σημαντικών περιβαλλοντικών μεταβολών και την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας καθώς και την κατασπατάληση των φυσικών πόρων έχει δημιουργηθεί έντονη συζήτηση γύρω από την χρήση οικολογικών πηγών ενέργειας και αξιοποίηση των ΑΠΕ.

Γενικότερα η παραγωγή ενέργειας από υδάτινους πόρους και κυρίως από την δυναμική των κυμάτων είναι ιδιαίτερα αξιοποιήσιμη σε περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Ωστόσο, η αιφορική φύση των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας από το κυματικό δυναμικό οφείλει όχι μόνο να σέβεται τα ιδιαίτερα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής αλλά και τα νομοθετικά όρια που θέτει κάθε εμπλεκόμενη αρχή, είτε αυτά είναι θεσμοθετημένα είτε όχι, καθώς και την κοινή γνώμη εφόσον συχνά, η ανεξέλεγκτη χρήση ΑΠΕ έχει δημιουργήσει πλήθος κοινωνικών αντιδράσεων.

Για την βιωσιμότητα μίας θαλάσσιας εγκατάστασης η οποία μπορεί να καταλαμβάνει αρκετά μεγάλη έκταση, οφείλουν να έχουν μελετηθεί τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά και η δυναμικότητα της περιοχής εγκατάστασης.

Στην Ελλάδα μεγάλο μέρος της ηπειρωτικής έκτασης έχει καλυφθεί από ΑΠΕ ενώ οι υδάτινοι πόροι δεν προτιμώνται για ενεργειακή εκμετάλλευση, εκτός από τα υδροηλεκτρικά φράγματα τα οποία είναι η μόνη τέτοια εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας και για αρκετά χρόνια έχει καλύψει μεγάλο μέρος των ενεργειακών αναγκών της χώρας. Ωστόσο, στην Ελλάδα, η οποία έχει ακτογραμμή μήκους 16.000km ( $\approx$  20% της συνολικής ακτογραμμής της Ευρώπης) και αιολικό δυναμικό, κυρίως στην περιοχή του Αιγαίου, το οποίο προκαλεί έντονους κυματισμούς, το εκτιμώμενο κυματικό δυναμικό φτάνει έως τα 10-11kW/m μετώπου κύματος. Νέες τεχνολογίες εκμετάλλευσης κυματικού δυναμικού κάνουν ολοένα πιο αισθητή την παρουσία τους, σε δοκιμαστικό ακόμα επίπεδο, αλλάζοντας με αργούς ρυθμούς το ισοζύγιο παραγωγής από ΑΠΕ.

Η χαρτογράφηση της κυματικής ισχύος στην Ελλάδα είναι σε πρώιμο στάδιο. Έχουν γίνει προσπάθειες κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο αλλά και από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών για την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού της χώρας.

Το αντικείμενο μελέτης της εργασίας είναι η χωροχρονική ανάλυση των δεδομένων κυματισμού, από 10 σταθμούς παρατήρησης στον θαλάσσιο ελλαδικό χώρο, με τη χρήση γεωστατιστικών μεθόδων και στοχαστικών δυναμικών μοντέλων χωρικής κατάστασης για τον προσδιορισμό του κυματικού δυναμικού στην Ελλάδα, προκειμένου να εξεταστούν οι δυνατότητες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα κύματα. Κύριες περιοχές ενδιαφέροντος είναι τα νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου πελάγους τα οποία δεν διαθέτουν ενεργειακή αυτονομία.

Η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας στηρίζεται στην χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών με εφαρμογή του λογισμικού ArcGIS 10.2, το οποίο έχει τη δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων και αλλαγής αυτών σε περίπτωση εισαγωγής νέων παραμέτρων.

Στο πρώτο κεφάλαιο, περιγράφεται το ζήτημα της εκμετάλλευσης του κυματικού δυναμικού ώστε να κατανοηθεί η αναγκαιότητα δημιουργίας σύγχρονου Άτλαντα για την αποτύπωση του. Επίσης, αναφέρονται κάποιες βασικές έννοιες και οι πιο συχνές εγκατεστημένες τεχνολογίες που αφορούν το ζήτημα της κυματικής ενέργειας. Στη συνέχεια του πρώτου κεφαλαίου, γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση παρόμοιων περιπτώσεων χαρτογράφησης του κυματικού δυναμικού, πιο συγκεκριμένα αναλύεται η μεθοδολογία του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών για την δημιουργία του Άτλαντα Ανέμου και Κύματος καθώς αναφέρονται και ορισμένα στοιχεία για τη βάση δεδομένων του «ΠΟΣΕΙΔΩΝ», από την οποία εξήχθησαν τα στοιχεία των μετρητών που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην γεωστατιστική ανάλυση και τις εξισώσεις που βοηθούν στην χωρική εκτίμηση μέσω των μεθόδων Kriging και CoKriging.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων και για τη δημιουργία βάσης δεδομένων που αφορούν το σημαντικό ύψος κύματος και την περίοδο του κύματος καθώς και τη σημειακή ισχύ. Τέλος, αναλύονται οι εξισώσεις από τις οποίες προέκυψε η ισχύς για κάθε εποχή και μετρητή και τα σφάλματα κάθε χάρτη.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, εμφανίζονται τα αποτελέσματα της εργασίας, οι χάρτες σημαντικού ύψους κύματος με την μέθοδο του Kriging και του CoKriging, οι χάρτες που απεικονίζουν την ισχύ και τα σφάλματα της κάθε διαδικασίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύονται τα αποτελέσματα της εργασίας και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που βγήκαν καθ' όλη την διαδικασία, από τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων ως την υλοποίηση των χαρτών καθώς αξιολογούνται τα αποτελέσματα. Τέλος, σχολιάζονται τα σφάλματα των 3 σεναρίων που εφαρμόστηκαν για την παραγωγή των χαρτών και τη βέλτιστη αναπαράσταση του σημαντικού ύψους κύματος και της ισχύος.

## ABSTRACT

Over the recent years, due to the significant environmental changes, the increasing demand of energy, and also the waste of natural sources, have increased the use of renewable energy sources ('RES') – more ecological and sustainable sources, such as water power.

The potential of energy by water, and particularly by wave, is specially reclaimed in the regions which are not connected with the energy network. However, wave power installations should respect the special environmental characteristics but also to adhere to the laws of every involved authority and the public needs. This is not always the case, with the uncontrolled use of RES triggering reactions in the local communities. Such an example is the sustainable spatial sea planning: it may occupy enormous spaces, and should be preceded by studying and analyzing of the special environmental characteristics and the potential in the region of installation.

In Greece, huge spaces of land are already used for RES. On the contrary, the water energy resources are not preferred for energy exploitation. Hydroelectric dams are an exception, with such power installations providing part of the country's energy needs. Nevertheless, Greece has 16.000km length of coastline ( $\approx 20\%$  of the overall coastline of Europe) and especially around the region of Aegean islands, where big and powerful waves are created, with an estimated wave potential raised over the 10kW/m of wavefront. This is particularly topical now that new technologies for the exploitation of wave potential have been presented, initially in trial mode, by changing the energy balance of producing energy by RES.

The mapping of wave power in Greece is at an early stage. They have only been efforts at a research level, including the Greek Marine research Center, to assess the country's wave potential.

The subject of this study is the space-time analysis of wave data from ten observation stations of Greece. The study used geostatistical methods and stochastic dynamic spatial situation models to determine the wave potential in Greece to examine the potential for electricity wave generation. The main areas of interest were the islands of the Aegean and Ionian Sea that are not energy independent.

The methodology of this thesis is based on GIS using the software ArcGIS 10.2. This data insertion and manipulation against new parameters, creating a dynamic model.

The first chapter describes the issue of the exploitation of wave capacity and the need of modern Atlas for mapping the wave potential. Also, basic concepts and technologies are introduced, which are most commonly installed for wave energy. The chapter is a bibliographic review of similar mapping cases of wave potential, focusing on the methodology of Greek Marine Research Centre for the creation of Atlas Wind and Wave and some information about the database of "Poseidon" from which exported data of the used parameters.

The second chapter analyses the geostatistical analysis and the equations which access the spatial interpolation by using methods of Kriging and CoKriging.

The third chapter explains the methodology applied for data processing and analysis. It also describes so a database for the significant wave height and period of the wave and the wave power. Finally, it analyses the equations used to indicate the power for each time and buoys and the errors in each map.

The fourth chapter presents the results of the study, the significant wave height maps with the Kriging method and CoKriging, depicting the power and the errors of each process.

The fifth chapter further analyses the results of the work and the conclusions that emerged throughout the process: from the collection and processing of data and the implementation of maps as the results are evaluated. It concludes discussing the errors of three scenarios, which were applied for the production of maps and the best representation of the significant wave height and power.

## TABLE OF CONTENTS

|   |    |
|---|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....  | 15 |
| 1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....  | 15 |
| 1.1 Περιγραφή προβλήματος .....   | 15 |
| 1.2 Βιβλιογραφική Έρευνα .....  | 16 |
| 1.3 Έρευνα τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσια κύματα ..... | 21 |
| 1.4 Μεθοδολογία ΕΛΚΕΘΕ.....   | 27 |
| 1.5 Βασικές εννοιες για την παραγωγή κυματικής ενέργειας .....                  | 29 |
| 1.6 Δεδομένα ΠΟΣΕΙΔΩΝ.....  | 29 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....  | 31 |
| 2. Γεωστατιστική Ανάλυση .....  | 31 |
| 2.3 Χωρική εκτίμηση .....   | 36 |
| 2.6 Εξαγωγή σφαλμάτων .....   | 43 |
| 2.7 Διερευνητική Ανάλυση Χωρικών Δεδομένων .....                                | 43 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....  | 45 |
| 3. Μεθοδολογία Παραγωγής Χαρτών .....   | 45 |
| 3.1 Έρευνα δεδομένων .....  | 45 |
| 3.2 Επεξεργασία Κυματικών Δεδομένων.....  | 46 |
| 3.3 Δευτερεύουσα Πληροφορία .....   | 48 |
| 3.4 Δημιουργία πρώτων απεικονίσεων .....  | 49 |
| 3.5 Εισαγωγή νέων σημείων (Hindcast) .....                                      | 50 |
| 3.6 Δημιουργία τελικών χαρτών σημαντικού ύψους κυματος.....                     | 52 |
| 3.7 Επεξεργασία δεδομένων σημαντικού ύψους κυματος και περιόδου κυματος .....   | 53 |
| 3.8 Δημιουργία βάσης δεδομένων για σημειακή ισχύ και χωρική απεικόνιση .....    | 53 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....  | 55 |
| 4. Αποτελέσματα .....   | 55 |
| 4.1 Οριοθέτηση περιοχής μελέτης .....   | 55 |
| 4.2 Ημιβαριογράμματα .....  | 56 |
| 4.3 Χαρτογράφηση Σημαντικού ύψους κύματος .....                                 | 61 |
| 4.4 Χαρτογράφηση Κυματικής Ενεργειακής Ισχύος .....                             | 67 |
| 4.5 Σφάλματα Μεθόδων.....   | 73 |



|   |    |
|---|----|
| 4.6 Διαγράμματα Q-Q plot.....                                     | 75 |
| 4.7 Περιοχές κατάλληλες για εκμετάλλευση κυματικής ενέργειας..... | 86 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....  | 90 |
| 5. Συμπεράσματα-Συζήτηση.....                                     | 90 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....  | 94 |
| 6. Βιβλιογραφία-Πηγές.....  | 94 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....   | 99 |

### Κατάλογος χαρτών

|  |    |
|--|----|
| Χάρτης 1:Παράδειγμα χάρτη σημαντικού ύψους κύματος, με τη μεθοδολογία του ΕΛΚΕΘΕ .....                           | 28 |
| Χάρτης 2: Σύνολο σημείων μέτρησης αιολικού δυναμικού .....   | 49 |
| Χάρτης 3:Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για την περίοδο του Χειμώνα, CoKriging με επιπλέον μηδενικά σημεία..... | 52 |
| Χάρτης 4: Περιοχή Μελέτης .....  | 55 |
| Χάρτης 5: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Χειμώνας, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....                      | 61 |
| Χάρτης 6:Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Άνοιξη, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....                         | 61 |
| Χάρτης 7:Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Καλοκαίρι, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....                      | 62 |
| Χάρτης 8:Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Φθινόπωρο, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....                      | 62 |
| Χάρτης 9: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για 26 σημεία, Χειμώνας, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....        | 63 |
| Χάρτης 10: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για 26 σημεία, Άνοιξη, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....         | 63 |
| Χάρτης 11: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για 26 σημεία, Καλοκαίρι, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....      | 64 |
| Χάρτης 12: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για 26 σημεία, Φθινόπωρο, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....      | 64 |
| Χάρτης 13: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Χειμώνας, μέθοδος CoKriging, GIS ArcMap 10.1 .....                   | 65 |
| Χάρτης 14: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Άνοιξη, μέθοδος CoKriging, GIS ArcMap 10.1 .....                     | 65 |
| Χάρτης 15: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Καλοκαίρι, μέθοδος CoKriging, GIS ArcMap 10.1 .....                  | 66 |
| Χάρτης 16: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Φθινόπωρο, μέθοδος CoKriging, GIS ArcMap 10.1 .....                  | 66 |
| Χάρτης 17: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Χειμώνας, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....                   | 68 |
| Χάρτης 18: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Άνοιξη, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....                     | 68 |
| Χάρτης 19: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Καλοκαίρι, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....                  | 69 |
| Χάρτης 20: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Φθινόπωρο, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....                  | 69 |
| Χάρτης 21: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Χειμώνας, μέθοδος Kriging, GIS <ωArcMap 10.1 .....                 | 71 |

|   |    |
|---|----|
| Χάρτης 22: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Άνοιξη, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 .....    | 71 |
| Χάρτης 23: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Καλοκαίρι, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 ..... | 72 |
| Χάρτης 24: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Φθινόπωρο, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1 ..... | 72 |
| Χάρτης 25: Σημεία εκμετάλλευσης κυματικού δυναμικού .....                                       | 89 |

## Κατάλογος εικόνων

|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 1: Περιοχές με το μεγαλύτερο κυματικό δυναμικό στον κόσμο[3] .....   | 16 |
| Εικόνα 2: Εγκατάσταση της LIMPET υδάτινης παλλόμενης στήλης στην περιοχή Isle της Wagen Islay[31] .....   | 23 |
| Εικόνα 3: Off-shore εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από παλλόμενη υδάτινη στήλη[30] .....  | 23 |
| Εικόνα 4: Εικόνα καναλιού TAPCHAN, Toftestallen - Øygarden, Νορβηγία[32] .....  | 24 |
| Εικόνα 5: Λειτουργία κωνικού καναλιού[33] .....   | 24 |
| Εικόνα 6: Πτερύγια αγκυροβολημένο στο βυθό της θάλασσας, (Vantaa, Φινλανδία) μετατροπείς ενέργειας που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της ταλαντωμένης κίνηση των πλακών των συστημάτων [35]. ..... | 25 |
| Εικόνα 7: Oyster, έως και το έτος 2010 είχε σχεδιαστεί μοντέλο που έχει ονομαστική ισχύ 2,5MW[36] .....   | 25 |
| Εικόνα 8: Salter duck, ταλαντώμενη μύτη με τη βοήθεια ενός βαριδίου [37] .....  | 26 |
| Εικόνα 9: Σημειακός απορροφητής, Powerbuoy ή OPT [38] .....   | 26 |
| Εικόνα 10: Μετατροπείς κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική, Ηράκλειο Κρήτης [39] .....   | 26 |
| Εικόνα 11: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με Pelamis sea-snake[37] .....   | 27 |
| Εικόνα 12: Εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας Pecém, Brazil, Ceará State .....   | 27 |
| Εικόνα 13: Χάρτης εμφάνισης της θέσης των σταθμών μέτρησης .....  | 30 |
| Εικόνα 14: Σύστημα κύριων αξόνων (KA1, KA2) σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων x και y και ισοϋψής καμπύλη (έλλειψη) του ημιβαριογράμματος[50] .....  | 33 |
| Εικόνα 15: Επεξηγηματικό διάγραμμα λειτουργίας CoKriging .....  | 42 |

## Κατάλογος Πινάκων

|  |    |
|--|----|
| Πίνακας 1: Ανάλυση χρονοσειρών .....   | 47 |
| Πίνακας 2: Σύγκριση των τιμών του ΕΛΚΕΘΕ με τις τιμές στα σημεία δειγματοληψίας .....  | 51 |
| Πίνακας 3: Σύνολο ημιβαριογραμμάτων σημαντικού ύψους κύματος .....   | 58 |
| Πίνακας 4: Σύνολο ημιβαριογραμμάτων κυματικού δυναμικού .....  | 60 |
| Πίνακας 5: Τιμές σημείων με μέγιστο ύψος κύματος ανά Εποχή, με βάση τους χάρτες της μεθόδου CoKriging (Χάρτης 13, Χάρτης 14, Χάρτης 15, Χάρτης 16) ..... | 67 |
| Πίνακας 6: Σημαντικές τιμές κυματικού δυναμικού, σύμφωνα με τους χάρτες των 10 αρχικών σημείων .....   | 70 |

|   |    |
|---|----|
| Πίνακας 7: Σημαντικές τιμές κυματικού δυναμικού, σύμφωνα με τους χάρτες των 26 σημείων..... | 73 |
| Πίνακας 8: Σφάλματα και δείκτες συσχέτισης .....  | 74 |
| Πίνακας 9: Ποιότητα Διαγραμμάτων Συσχέτισης .....   | 85 |

### **Κατάλογος διαγραμμάτων**

|  |    |
|--|----|
| Διάγραμμα 1: Παρουσίαση χαρακτηριστικών στοιχείων ημιβαριογράμματος .....  | 35 |
| Διάγραμμα 2: Διάγραμμα μεθοδολογίας για την παραγωγή χαρτών.....   | 45 |
| Διάγραμμα 3: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας.....  | 75 |
| Διάγραμμα 4: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας .....                                     | 75 |
| Διάγραμμα 5: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας.....             | 76 |
| Διάγραμμα 6: Measured- Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας.....  | 76 |
| Διάγραμμα 7: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο CoKriging, Χειμώνας.....           | 76 |
| Διάγραμμα 8: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο CoKriging, Χειμώνας..... | 76 |
| Διάγραμμα 9: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη.....  | 77 |
| Διάγραμμα 10: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη.....                                       | 77 |
| Διάγραμμα 11: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη.....              | 77 |
| Διάγραμμα 12: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη.....    | 77 |
| Διάγραμμα 13: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο CoKriging, Άνοιξη .....           | 78 |
| Διάγραμμα 14: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο CoKriging, Άνοιξη ..... | 78 |
| Διάγραμμα 15: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Καλόκαιρι.....  | 78 |

|   |    |
|---|----|
| Διάγραμμα 16: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Καλόκαιρι .....                                      | 78 |
| Διάγραμμα 17: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι .....             | 79 |
| Διάγραμμα 18: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι .....   | 79 |
| Διάγραμμα 19: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο CoKriging, Καλοκαίρι .....           | 79 |
| Διάγραμμα 20: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο CoKriging, Καλοκαίρι ..... | 79 |
| Διάγραμμα 21: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο .....  | 80 |
| Διάγραμμα 22: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο .....  | 80 |
| Διάγραμμα 23: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο .....             | 80 |
| Διάγραμμα 24: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο .....             | 80 |
| Διάγραμμα 25: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο CoKriging, Φθινόπωρο .....           | 81 |
| Διάγραμμα 26: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο CoKriging, Καλοκαίρι ..... | 81 |
| Διάγραμμα 27: Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας .....   | 81 |
| Διάγραμμα 28: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας .....   | 81 |
| Διάγραμμα 29: Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας .....                                | 82 |
| Διάγραμμα 30: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας .....                      | 82 |
| Διάγραμμα 31: Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη .....   | 82 |
| Διάγραμμα 32: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη .....   | 82 |
| Διάγραμμα 33: Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη .....                                  | 83 |
| Διάγραμμα 34: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη .....                        | 83 |

|   |    |
|---|----|
| Διάγραμμα 35:Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι.....  | 83 |
| Διάγραμμα 36: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι.....                                     | 83 |
| Διάγραμμα 37:Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι .....            | 84 |
| Διάγραμμα 38: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι.....  | 84 |
| Διάγραμμα 39:Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο.....  | 84 |
| Διάγραμμα 40: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο.....                                     | 84 |
| Διάγραμμα 41:Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο .....            | 85 |
| Διάγραμμα 42: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο ..... | 85 |
| Διάγραμμα 43: Μέση Διακύμανση ελάχιστων τιμών σημαντικού ύψους κύματος στις περιοχές με μέγιστο κυματικό δυναμικό .....                                   | 86 |
| Διάγραμμα 44: Μέση Διακύμανση μέγιστων τιμών σημαντικού ύψους κύματος στις περιοχές με μέγιστο κυματικό δυναμικό .....                                    | 87 |
| Διάγραμμα 45: Μέση Διακύμανση ελάχιστων τιμών ενεργειακής ισχύος στις περιοχές με μέγιστο κυματικό δυναμικό .....   | 88 |
| Διάγραμμα 46: Μέση Διακύμανση μέγιστων τιμών ενεργειακής ισχύος στις περιοχές με μέγιστο κυματικό δυναμικό .....  | 88 |

## Συντομογραφίες

|          |   |   |
|----------|---|---|
| ΑΠΕ      | Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας                               |   |
| BWEA     | British Wind Energy Association                           | Βρετανική Ένωση Αιολικής Ενέργειας                      |
| DMI      | Danish Meteorological Institute                           | Μετεωρολογικό Ινστιτούτο Δανίας                         |
| EMEC     | European Marine Energy Centre                             | Ευρωπαϊκό Κέντρο Θαλάσσιας Ενέργειας                    |
| ESDA     | Exploratory Spatial Data Analysis                         | Διερευνητική Ανάλυση Χωρικών Δεδομένων                  |
| GIS      | Geographic Information System                             |   |
| JONSWAP  | (Joint) North Sea Wave Project                            | Κυματικό έργο Βόρειας θάλασσας                          |
| MAE      | Mean absolute error                                       | Μέσο Απόλυτο Σφάλμα                                     |
| MIKE 21  | Off-shore/Nearshore wave model                            | Υπεράκτιο/ Παράκτιο Κυματικό Μοντέλο                    |
| OSW/NSW  |   |   |
| MSPE     | Mean Squared Prediction Error                             | Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα Πρόβλεψης                       |
| NASA     | National Aeronautics and Space Administration             | Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος            |
| NCEP     | National Centers for Environmental Prediction             | Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προβλέψεων                |
| NOAA     | National Oceanic and Atmospheric Administration           | Εθνικής Υπηρεσίας Ωκεανών και ατμοσφαιρικής Διαχείρισης |
| OWC      | Oscillating Water Column                                  | Ταλαντώμενη υδάτινη στήλη                               |
| Q-Q plot | Quantile-Quantile plot                                    |   |
| SMHI     | Swedish Meteorological and Hydrological Institute         | Σουηδικό Μετεωρολογικό και Υδρολογικό Ινστιτούτο        |
| SWAM     | Synchronous Wavelength Acoustic Modeling                  |   |
| SWAN     | Simulating WAVes Nearshore                                | Προσομοίωση κυμάτων κοντά στην ακτή                     |
| TAPCHAN  | Tapered Channel   | Κωνικό Κανάλι   |
| WAM      | Mediterranean Wave Forecast                               | Κυματική πρόγνωση Μεσογείου                             |
| ΓΣΠ      | Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών                          |   |
| ΕΕ       | Ευρωπαϊκή Ένωση   |   |
| ΕΛΚΕΘΕ   | Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών                         |   |
| ΕΜΥ      | Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία                             |   |
| ΥΠΕΚΑ    | Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής |   |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

#### 1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Μεγάλο μέρος της ενέργειας που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα (40-50% του ενεργειακού ισοζυγίου) εξαρτάται από ηλεκτροπαραγωγή με εισαγόμενα καύσιμα και αγορά ενέργειας από τρίτους. Δεν αξιοποιούνται σε μεγάλο βαθμό οι ΑΠΕ, με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται το περιβάλλον και οι διακυμάνσεις των τιμών στα καύσιμα να επηρεάζουν άμεσα την οικονομία της χώρας. Κρίνεται επιτακτική η ανάγκη αξιοποίησης των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών καθώς οφείλουν να επιτευχθούν και οι στόχοι που έχουν τεθεί από την ευρωπαϊκή ένωση έως το 2030. Οι στόχοι αυτοί κρίνουν ότι είναι εφικτή η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 40% τουλάχιστον σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 και η άντληση του 27% τουλάχιστον της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης από ΑΠΕ.

Όπως αναφέρεται και στο Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ, του ΥΠΕΚΑ, κρίνεται ότι για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, πρέπει να τεθούν σε εφαρμογή μεγάλα έργα ΑΠΕ καθώς και να επεκταθεί και αναβαθμιστεί το ηλεκτρικό δίκτυο για την ανάπτυξη ενός διεσπαρμένου τρόπου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνεπώς, θεωρείται αναγκαία η εύρεση και εκμετάλλευση είτε νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είτε χρήσης των ήδη υπαρχόντων και όχι τόσο διαδεδομένων στην Ελλάδα όπως για παράδειγμα οι παράκτιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (θαλάσσια αιολικά πάρκα, εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από κύματα κλπ.).

Ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να προέρθει από τα τεράστια ποσά ενέργειας που υπάρχουν στις θάλασσες και τους ωκεανούς και αποτελούν αντικείμενο συστηματικών ερευνών από τη δεκαετία του 1960[1]. Το πλεονέκτημα της κυματικής ενέργειας είναι η διαθεσιμότητα και η πυκνότητά της καθώς και ότι πλέον είναι πολύ καλά προβλέψιμη[2]. Το εύρος των εφαρμογών εκμετάλλευσης του θαλάσσιου δυναμικού καλύπτεται από την εφαρμογή τριών τομέων εφαρμογών. Την αξιοποίηση της παλιρροϊκής ενέργειας, την ενέργεια από τα θαλάσσια κύματα και αυτήν που προέρχεται από τη θερμοκρασιακή βαθμίδα των ωκεανών και ονομάζεται ωκεάνια ενέργεια[1].

Στην παρούσα εργασία θα αναλυθούν παράμετροι και στοιχεία που αφορούν την ενέργεια που προκύπτει από την εκμετάλλευση των επιφανειακών θαλάσσιων κυμάτων. Το ενεργειακό δυναμικό δεν είναι ισομερώς καταμεμημένο γεωγραφικά, ούτε μπορεί να αξιοποιηθεί πλήρως με την σημερινή τεχνογνωσία.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, οι περιοχές με το ισχυρότερο κυματικό δυναμικό εμφανίζονται περιμετρικά των ηπείρων κυρίως στις δυτικές τους ακτές. Οι βόρειες και νότιες εύκρατες ζώνες είναι αυτές που αποτελούν αξιοσημείωτες περιοχές εκμετάλλευσης σε σχέση με τις περιοχές που ορίζονται εκατέρωθεν του ισημερινού[3].



Τα υψηλότερα επίπεδα κυματικής ενέργειας στον πλανήτη μας εμφανίζονται στην περιοχή του Ανατολικού Ατλαντικού και του Νότιου Ειρηνικού. Σε ετήσια βάση, ο μέσος όρος κυματικής ισχύος ανά μέτρο μετώπου κύματος κυμαίνεται στον Α. Ατλαντικό σε 25-70 kW/m, στην Β. Θάλασσα 10-25 kW/h και στο Αιγαίο, όπου παρουσιάζονται οι υψηλότερες τιμές κυματικής ισχύος στην Μεσόγειο, 4-11 kW/m. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό για τα κράτη μέλη της Ε.Ε. υπολογίζεται συνολικά σε 150-230 TWh/έτος, από τα οποία 5-9 TWh/έτος αντιστοιχούν στις ελληνικές θάλασσες[4].



Εικόνα 1: Περιοχές με το μεγαλύτερο κυματικό δυναμικό στον κόσμο[3]

Η παρούσα τεχνολογία καλύπτει ορισμένο αριθμό δυνατοτήτων για την αξιοποίηση της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων. Αφορά κυρίως τις εγκαταστάσεις που τοποθετούνται στην ακτή ή κοντά σε αυτήν. Οι εγκαταστάσεις σε αρκετά μεγαλύτερη απόσταση από την ακτή (offshore), θα μπορούσαν να παράγουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, βρίσκονται όμως σε δοκιμαστικό στάδιο στην Ελλάδα καθώς και σε αρκετές χώρες.

Το ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, για την εκμετάλλευση του κυματικού δυναμικού, δημιουργεί την ανάγκη της αποτύπωσης των σημαντικότερων και των λιγότερο σημαντικών περιοχών εκμετάλλευσης στον θαλάσσιο ελλαδικό χώρο. Το κύριο ερώτημα είναι εάν η κυματική ενέργεια μίας περιοχής είναι επαρκής ώστε να δικαιολογεί το κόστος της εγκατάστασης μία μονάδας μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική και την αποθήκευσή της προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες μίας περιοχής ή ενός συνόλου δραστηριοτήτων.

---

## 1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ

Τα στοιχεία που συγκεντρώνονται σε βάσεις δεδομένων και αφορούν το σημαντικό ύψος κύματος και την περίοδο του κύματος, δεν είχαν εξ αρχής σκοπό την αξιοποίηση τους για την παραγωγή κυματικής



ενέργειας, αλλά την κατασκευή σημαντικών τεχνικών έργων (κυματοθραύστες, λιμάνια κλπ.) καθώς και την πρόβλεψη μετεωρολογικών συνθηκών που αφορούν τον κλάδο της Ναυσιπλοΐας[5].

Σήμερα δημιουργούνται Άτλαντες θαλασσών για τους εξής σκοπούς:

- Προετοιμασία και υλοποίηση θαλάσσιων έργων(βραχυχρόνια, μακροχρόνια σχέδια)
- Σχεδιασμός και κατασκευή υπεράκτιων και παράκτιων έργων
- Εκτίμηση του διαθέσιμου ενεργειακού δυναμικού(άνεμος, κύμα) σε μια περιοχή
- Εποχιακή και ετήσια πρόβλεψη της μεταβλητότητας του ενεργειακού δυναμικού
- Διαχείριση και προστασία του παράκτιου περιβάλλοντος καθώς και τον υποθαλάσσιου οικοσυστήματος
- Τουριστική και οικιστική ανάπτυξη παράκτιων περιοχών και νησιών
- Ανάλυση τρωτότητας παράκτιων κατοικημένων περιοχών
- Μελέτη σκοπιμότητας για την εκμετάλλευση αιολικού/κυματικού δυναμικού σε συγκεκριμένες θαλάσσιες περιοχές
- Μακροπρόθεσμη κλιματική μεταβλητότητα[6]

Η Βρετανική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (BWEA) έχει θεωρήσει ότι η παγκόσμια δυνατότητα παραγωγής κυματικής ενέργειας υπολογίζεται περί τα 1-10 TW. Αναφέρεται ότι οι συσκευές που εκμεταλλεύονται το κύμα για την παραγωγή ενέργειας μπορούν γενικά να παράγουν σημαντικά υψηλότερα ποσά ενέργειας σε σχέση με τα υπεράκτια ή χερσαία αιολικά πάρκα. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα της ενέργειας των κυμάτων είναι η ικανότητα να προβλέψουμε την παραγωγή ενέργειας εκ των προτέρων με περισσότερη ακρίβεια σε σχέση με την αιολική ενέργεια, η οποία όμως είναι ουσιαστικής σημασίας για την επιτυχή ενσωμάτωση της διαλείπουσας παροχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε εθνικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας[7].

Ανά τον κόσμο γίνεται σημαντική προσπάθεια χαρτογράφησης του σημαντικού ύψους κύματος με σκοπό την αξιολόγηση και την εκμετάλλευσή του με χρήση μοντέλων πρόβλεψης και επί τόπου ή δορυφορικών μετρήσεων.

Στην περιοχή Lanzarote, των Κανάριων νήσων, έχουν προκύψει αποτελέσματα από τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων από 9 σημεία και την ανάλυση των χρονοσειρών τους για 51 έτη. Τα αποτελέσματα του κυματικού δυναμικού αφοράν απλούς αριθμητικούς υπολογισμούς για σημειακές απεικονίσεις και όχι προσομοιώσεις κυμάτων σε όλο το φάσμα της περιοχής μελέτης[8].

Στην περιοχή της Πορτογαλίας έχει αναπτυχθεί το σύστημα ONDATATLAS, μία ηλεκτρονική βάση δεδομένων που περιέχει ετήσια και μηνιαία δεδομένα για περισσότερα από 75 σημεία μέτρησης, τιμές και πιθανότητες για τα μεγέθη: σημαντικού ύψους κύματος, περιόδου κύματος, ενέργειας από κύματα και κατεύθυνσης κυμάτων. Τα στοιχεία αυτά επεξεργάζονται μέσω του μοντέλου τρίτης γενιάς MAR3G, παρόμοιο του WAM, και παρουσιάζουν σημειακά αποτελέσματα περιμετρικά της ακτής[9].

Άλλο μοντέλο τρίτης γενιάς που αναπτύχθηκε στο πνεύμα του μοντέλου WAM είναι το WAVEWATCH III από το NOAA / NCEP. Πρόκειται για μια περαιτέρω ανάπτυξη του μοντέλου WAVEWATCH, το οποίο αναπτύχθηκε στο Delft University of Technology και του WAVEWATCH II, που αναπτύχθηκε από τη NASA. Το τελευταίο, ωστόσο, διαφέρει από τους προκατόχους του σε πολλά σημαντικά σημεία, όπως στις εξισώσεις, στη δομή του, στις αριθμητικές μεθόδους και στις φυσικές παραμετροποιήσεις. Το εν λόγω μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της συμπεριφοράς και έντασης των κυμάτων στην περιοχή της Αυστραλίας[10], καθώς επίσης σε οργανισμούς παρατήρησης και πρόβλεψης παγκοσμίως. Το εθνικό κέντρο περιβαλλοντικών προβλέψεων (NCEP) διατηρεί μία βάση μετεωρολογικών δεδομένων από το 1999, η οποία αφορά προβλέψεις του αιολικού και κυματικού δυναμικού μέσω του μοντέλου WAVEWATCH III. Βασίζεται στην εισαγωγή δύο δεδομένων για την πρόβλεψη των κυμάτων, τους πάγους και του ανέμου, συμπεριλαμβανομένης της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και της θάλασσας. Το σημαντικό ύψος κύματος προκύπτει μέσω στατιστικής μεθόδου που υπολογίζει το σφάλμα των μετρητών και την συμφωνία των προβλεπόμενων και των μετρούμενων τιμών να ανέρχεται στο 0,9 στις περισσότερες περιπτώσεις. Δημιουργούνται έτσι οι χάρτες που απεικονίζουν παγκοσμίως το μέσο ετήσιο σημαντικό ύψος κύματος από το 2002 έως το 2009. Τα σφάλματα και οι δείκτες συμφωνίας των μετρούμενων και των προβλεπόμενων τιμών, δείχνουν ότι στις περισσότερες περιοχές το μοντέλο καταδεικνύει σημαντική ακρίβεια στις προβλέψεις του[11].

Ένα όχι τόσο συχνό σε χρήση μοντέλο όσο το WAVEWATCH και το WAM είναι το μοντέλο Mike21 NSW. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας ισχύος που μπορεί να παραχθεί από τα κύματα στα νησιά Orkney της Σκωτίας. Για τον σκοπό αυτόν, ελήφθησαν δεδομένα σημαντικού ύψους κύματος, έντασης του ανέμου, κατεύθυνσης των κυμάτων και μέσης περιόδου κύματος από τη βάση δεδομένων του EMEC, ενώ σημαντικό στοιχείο που επηρέασε τα αποτελέσματα αποτέλεσε η βαθυμετρία. Αναφέρεται ότι για τον εν λόγω υπολογισμό δύο μεγέθη είναι αρκετά, το σημαντικό ύψος κύματος και η περίοδος των κυμάτων. Παρόλα αυτά, ο υπολογισμός αυτός κρύβει δύο αδυναμίες. Δεν περιγράφει την κατεύθυνση του κύματος και σε ιδιαίτερα ακραία φαινόμενα ο υπολογισμός είναι μη αντιπροσωπευτικός. Συνεπώς, η ισχύς που υπολογίζεται αφορά ουσιαστικά τη μέση εκμεταλλεύσιμη ένταση της κυματικής ενέργειας[5]. Όμοιο μοντέλο (MIKE 21 OSW) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ενέργειας των κυμάτων και τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων (από το 1994 έως και το 2004), για την περιοχή της Βαλτικής, της Δανίας και της Βόρειας Θάλασσας, από το Σουηδικό Μετεωρολογικό και Υδρολογικό Ινστιτούτο (SMHI). Από την ανάλυση αυτή φαίνεται να προκύπτουν αρκετά υποσχόμενα μεγέθη εκμετάλλευσης στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας, αλλά και στη Βαλτική [12].

Πιο συγκεκριμένα, το Μετεωρολογικό ινστιτούτο της Δανίας, χρησιμοποιεί για την πρόγνωση του κυματισμού το μοντέλο WAM Cycle4.5. Το μοντέλο αυτό υπολογίζει την κυματική ενέργεια ως συνάρτηση της θέσης, του χρόνου, της περιόδου του κύματος και της κατεύθυνσης. Τα δεδομένα εξόδου του DMI-WAM αφορούν ωριαίους χάρτες υπολογισμού του ύψους κύματος, της περιόδου και της κατεύθυνσης των κυμάτων. Το μοντέλο αυτό έχει συσταθεί για την παρακολούθηση των περιοχών της

Βόρειας θάλασσας, της Βαλτικής, των δανέζικων υδάτων και της Μεσογείου[13]. Πιο συγκεκριμένα, το DMI χρησιμοποιεί 3 τύπους στατιστικών μοντέλων για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που αφορούν το σημαντικό ύψος κύματος: στατιστικά στοιχεία με βάση τα δεδομένα του κυματικού μοντέλου, δορυφορικές παρατηρήσεις και παρατηρήσεις από πλωτά σημεία παρατήρησης (φάρους). Το ινστιτούτο παρουσιάζει τα δεδομένα εξόδου σε χάρτες απεικόνισης του σημαντικού ύψους κύματος και σε γραφήματα στα οποία παρουσιάζεται η συχνότητα και η μέση μηνιαία τιμή του σημαντικού ύψους κύματος για κάθε περιοχή παρατήρησης[14].

Ένα τροποποιημένο μοντέλο WAM, που παρέχει 35% μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι το αρχικό μοντέλο, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του ανέμου και των κυμάτων στον Ινδικό Ωκεανό με στοιχεία από το 1998 έως 2009, τα οποία έχουν προέρθει από το αρχείο NCEP / NOAA. Τα σημαντικότερα στάδια της έρευνας αποσκοπούσαν στη χαρτογράφηση του σημαντικού ύψους κύματος, την εποχιακή και ετήσια εκτίμηση της μεταβλητότητας του και την 12ετή πρόβλεψη της τάσης μεταβολής του σημαντικού ύψους κύματος[15].

Συχνά χρησιμοποιείται πάνω από μία μέθοδος και μοντέλα πρόβλεψης. Στην παράκτια περιοχή Nagapatinam, στην ακτή του κόλπου της Βεγγάλης, πραγματοποιήθηκαν διάφορες αριθμητικές προσεγγίσεις και με τα μοντέλα τρίτης γενιάς WAM και SWAN, μοντέλα ικανά να κάνουν έγκυρες κυματικές προβλέψεις. Μέσω της διαδικασίας που ακολουθείται έχει προκύψει ότι η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο πρόβλεψης των κυματισμών και συχνά λαμβάνεται υπόψιν σαν δευτερεύουσα πληροφορία στη μοντελοποίηση. Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η συσχέτιση του σημαντικού ύψους κύματος, με τις παλίρροιες και την ταχύτητα του ανέμου. Επίσης σημαντικά αποτελέσματα προκύπτουν σε περιοχές όπως η συγκεκριμένα όπου λαμβάνουν χώρα ακραία μετεωρολογικά φαινόμενα και είναι δύσκολο να σχεδιαστεί η παράκτια τριτογενής δραστηριότητα της περιοχής[16].

Άλλα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τον ίδιο σκοπό είναι το SWAM(αναπτύχθηκε στο Delft University of Technology) σε μία μικρή παράκτια περιοχή της βόρειας Ισπανίας[17], το DWD για την απεικόνιση του κυματικού δυναμικού στην περιοχή του Βόρειου Ατλαντικού και τη συσχέτιση των προβλέψεων για 3 μήνες μεταξύ του μοντέλου και των δορυφορικών μετρήσεων[18], το μοντέλο MIKE 21 NSW για την προσομοίωση του ενεργειακού δυναμικού των κυμάτων περιμετρικά της Σαρδηνίας[19] καθώς και το μοντέλο JONSWAP για την πρόβλεψη του σημαντικού ύψους κύματος και της κυματικής περιόδου στη λίμνη Οντάριο. Στο τελευταίο εγχείρημα συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της τελευταίας πρόβλεψης με αυτά της μεθόδου kriging. Οι αριθμητικές συγκρίσεις των δεικτών συσχέτισης έδειξαν ότι η μέθοδος kriging υπερτερεί των κλασικών μεθόδων[20].

Αρκετά ενδιαφέρον πεδίο έρευνας αποτελούν περιοχές υπεράντλησης κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου όπως το Ιράν. Η περιοχή αυτή εκτός από σημαντικό σημείο άντλησης κοιτασμάτων, αποτελεί ικανό σημείο εκμετάλλευσης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυμάτων. Οι D.

Khojasteh και R. Kamali αξιολόγησαν τη θαλάσσια περιοχή περιμετρικά και μελέτησαν τη συμπεριφορά δύο τύπων σημειακών απορροφητών κυματικής ενέργειας ώστε να διευκολύνουν περιπτώσεις προμήθειας των υπεράκτιων πλατφορμών άντλησης με την ενέργεια που απαιτείται[21]. Ομοίως, για συγκεκριμένη τεχνολογία εκμετάλλευσης κυματικού δυναμικού (Pelamis), χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SWAN για την προσομοίωση του σημαντικού ύψους κύματος και την ενεργειακή ισχύ, για τα νησιά Αζόρες[22].

Μία σημαντική μελέτη ενεργειακού δυναμικού των κυμάτων πραγματοποιήθηκε το 2012 από το Ινστιτούτο έρευνας και περιβαλλοντικής προστασίας της Ιταλίας για την περιοχή της Μεσογείου. Μέχρι εκείνη τη στιγμή δεν είχε εγκατασταθεί κάποια μονάδα παραγωγής κυματικής ενέργειας στην περιοχή εκτός από δοκιμαστικές μονάδες, σε αντίθεση με τις χώρες που συνορεύουν με ωκεάνιες εκτάσεις όπως η Ιρλανδία, η Πορτογαλία, η Ισπανία, η Νορβηγία και το Ηνωμένο Βασίλειο[23] (χώρες με μέσες ετήσιες τιμές κυματικής ισχύος ανά μέτρο μετώπου κύματος της τάξης των 30 – 70 kW/m [4]) όπου λόγω των έντονων κυματισμών σημειώνονται σημαντικές καταβόθρες κυματικής ενέργειας. Οι προσομοιώσεις αφορούν δεδομένα μετρητών-σημαδούρων (buoys) και δορυφορικά δεδομένα και χρησιμοποιείται η έκδοση του κυματικού μοντέλου WAM Cycle 4.5.3. Οι δείκτες συμφωνίας των μετρητών και των προβλεπόμενων τιμών δείχνουν μεγάλη ακρίβεια του μοντέλου[23].

Στον Ελληνικό χώρο χρησιμοποιούνται κυρίως μοντέλα προσομοίωσης για την πρόβλεψη κυματισμών και αφομοίωσης δεδομένων για την πρόβλεψη καιρού (βροχής, ανέμου, θερμοκρασίας) από τις Ελληνικές υπηρεσίες πρόγνωσης καιρού (EMY, METEO, ΠΟΣΕΙΔΩΝ, ΣΚΥΡΟΝ). Βασιζόμενοι σε προσομοιώσεις κυματικών χαρακτηριστικών που λαμβάνονται μέσω μεθόδων ανασύνθεσης (Hindcast) του κυματικού κλίματος και με τη βοήθεια ιστορικών μετεωρολογικών δεδομένων από το δίκτυο Ποσειδών, το ΕΛΚΕΘΕ διερεύνησε το κυματικό κλίμα των θαλάσσιων περιοχών της Ελλάδος για την περίοδο 1995-2004[24]. Στην μελέτη «10-year high resolution study of wind, sea waves and wave energy assessment in the Greek offshore areas», αναλύεται το αιολικό και κυματικό δυναμικό του ελλαδικού χώρου, για περίοδο μελέτης 10 ετών, από το 2001 έως και το 2010. Στις προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο WAM. Είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης τρίτης γενιάς. Όπως αναφέρεται, συχνά χρησιμοποιούνται δευτερεύουσες παράμετροι στη δημιουργία μοντέλων που αφορούν την ενέργεια που παράγεται μέσω των κυμάτων. Στη συγκεκριμένη μελέτη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σημαντικού ύψους κύματος, της κυματικής ισχύος καθώς και χάρτες που απεικονίζουν την ταχύτητα του ανέμου και την αιολική ισχύ. Αποδεικνύεται ότι οι περιοχές με έντονο κυματικό δυναμικό αφορούν τις δυτικές και νότιες ελληνικές θάλασσες[25].

Η έρευνα που αφορά τον τομέα του κυματικού δυναμικού καταδεικνύει ότι παρά τις φυσικές δυνατότητες των κυμάτων, συμπεριλαμβάνουν πλεονεκτήματα όσον αφορά οικονομικές και περιβαλλοντικές σκοπιμότητες ακόμα και σε περιοχές με μέτρια επίπεδα κυματικής ενέργειας. Η βιώσιμη εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας εμπεριέχει επίσης την εκτίμηση των κοινωνικών και θεσμικών όρων που αφορούν θέματα διατήρησης της φύσης, συμπεριλαμβανομένων πτυχών όπως τα βιομηχανικά και στρατιωτικά συμφέροντα, αρχαιολογικοί χώροι ή προστατευόμενες υποθαλάσσιες περιοχές[12]. Συνεπώς, δευτερεύον,

αλλά εξίσου σημαντικός τομέας, κρίνεται ο τομέας της βιώσιμης και αειφορικής χωροθέτησης των παράκτιων και υπεράκτιων εγκαταστάσεων.

Ο στόχος αυτός συχνά επιτυγχάνεται με χρήση ΓΣΠ και πολυκριτηριακής ανάλυσης. Σε μία περιοχή της νοτιοδυτικής πλευράς της Πορτογαλίας, για παράδειγμα, γίνεται οριοθέτηση των κατάλληλων και λιγότερο κατάλληλων περιοχών χωροθέτησης συστημάτων παραγωγής κυματικής ενέργειας. Οι παράγοντες που μπορούν να εισαχθούν στην πολυκριτηριακή ανάλυση είναι το βάθος και ο τύπος πυθμένα της θάλασσας, τα υπάρχοντα υποβρύχια καλώδια, οι προστατευόμενες θαλάσσιες περιοχές, τα λιμάνια, η ακτογραμμή, η τοποθεσία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, οι στρατιωτικές ζώνες άσκησης, το σημαντικό ύψος κύματος, η περίοδος και η ισχύς [26]. Οι μέθοδοι GIS μπορούν να βοηθήσουν στον καθορισμό κατάλληλης θαλάσσιας πολιτικής χωροθέτησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και επίσης στον εντοπισμό των υφιστάμενων πολιτικών που ενδέχεται να απαιτούν τροποποίηση εάν ένα κράτος επιθυμεί να συνεχίσει και να υποστηρίξει την ανάπτυξη συστημάτων παραγωγής ενέργειας μέσω των κυμάτων [7].

---

### 1.3 ΕΡΕΥΝΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΥΜΑΤΑ

Η εκμετάλλευση του κυματικού δυναμικού για παραγωγή ενέργειας συγκεντρώνει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μονάδες ΑΠΕ. Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα των εγκαταστάσεων αυτών είναι τα εξής:

- χαμηλοί δείκτες ρύπανσης σε επίπεδο κύκλου ζωής
- αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας
- απεξάρτηση από εισαγωγές ορυκτών καυσίμων
- προοπτικές οικονομικής ανάπτυξης σε απομακρυσμένες και υποβαθμισμένες περιοχές
- τόνωση της βιομηχανικής παραγωγής, δημιουργία θέσεων εργασίας
- εκμετάλλευση περιοχών με έντονο κυματικό δυναμικό που δεν ενδείκνυνται για άλλου είδους τριτογενών δραστηριοτήτων
- παράλληλη χρήση εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας για άλλους σκοπούς (πχ κυματοθραύστες)

Η ακουστική και οπτική όχληση καθώς και οι επιπτώσεις στη χλωρίδα και την πανίδα των παράκτιων περιοχών θεωρούνται ήπιες σε σχέση με την εγκατάσταση άλλων σταθμών παραγωγής όπως offshore θαλάσσια αιολικά πάρκα.

Το κυριότερο μειονέκτημα των εγκαταστάσεων αυτής της φύσης είναι το λειτουργικό κόστος και το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Το υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας μπορεί να αντισταθμισθεί μόνον με την αξιοποίηση του κυματικού δυναμικού στον μέγιστο δυνατό βαθμό. Η τεχνολογική εξέλιξη

έχει οδηγήσει μέχρι στιγμής σε σημαντική βελτίωση του δείκτη απόδοσης για τις περισσότερες τεχνολογίες, ενώ τα περιθώρια βελτίωσης παραμένουν μεγάλα[4].

Η πρώτη τεχνολογία παραγωγής ενέργειας από κύματα σχεδιάστηκε στις αρχές του 1799 [27]. Ενώ υπάρχουν αναφορές ερευνών που αφορούν τεχνολογίες παραγωγής κυματικής ενέργειας από το 1940. Ο Yoshio Masuda σχεδίασε πρώτος μία πλωτή τεχνολογία-κατασκευή, προκάτοχο της παλλόμενης υδάτινης στήλης, η οποία διατέθηκε στην αγορά στην Ιαπωνία από το 1965 [28]. Δεδομένης της πετρελαϊκής κρίσης του 1970, κινητοποιήθηκε μεγάλο μέρος μεταγενέστερων ερευνητών προς την αξιοποίηση των θαλάσσιων κυμάτων. Η λογική της πρώτης περιόδου μελετών ήταν η εξής: ότι σε μεγάλο βάθος, αρκετά μακριά από την ακτή τα κύματα ήταν εντονότερα και μόνο εκεί άξιζε η αξιοποίησή τους παρά το υψηλό κόστος παραγωγής ενέργειας [29].

Η πρώτη εγκατάσταση τύπου κωνικού καναλιού που αναλύεται παρακάτω δημιουργήθηκε το 1985 στις ακτές ενός νησιού της Νορβηγίας με το όνομα TAPCHAN (TAPered CHANel) [1]. Παρόλο όμως, που οι μηχανές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα κύματα έχουν δοκιμαστεί και σχεδιαστεί αρκετές δεκαετίες πριν δεν έχουν μπει ευρέως σε ώριμη εμπορική εφαρμογή όπως άλλες ΑΠΕ[2].

Οι εγκατεστημένες και υπό δοκιμή τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την περιοχή εγκατάστασής τους. Έτσι, διαχωρίζονται σε τεχνολογίες που είναι εγκατεστημένες στις ακτές ή κοντά σε αυτές και σε αυτές που τοποθετούνται σε συνθήκες ανοιχτής θαλάσσης(off-shore)[1].

Ανάμεσα στους μετατροπείς κυματικής ενέργειας, οι πιο ευρέως διαδεδομένοι είναι οι σημειακή απορροφητές της κυματικής ενέργειας για κύματα υψηλής συχνότητας και η ταλαντευόμενη στήλη ύδατος που είναι πιο αποτελεσματική σε μέτριας συχνότητας κύματα[27].

---

### 1.3.1 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΑΚΤΕΣ Η ΚΟΝΤΑ ΣΤΙΣ ΑΚΤΕΣ

---

#### ΠΑΛΛΟΜΕΝΗ ΥΔΑΤΙΝΗ ΣΤΗΛΗ (OSCILLATING WATER COLUMN)

---

Είναι οι συσκευές που έχουν δοκιμαστεί περισσότερο στην κατηγορία των συσκευών που τοποθετούνται σε μικρή απόσταση από την ακτή ή πάνω στην ακτή [1]. Είναι ουσιαστικά μία ταλαντευόμενη στήλη ύδατος που χρησιμοποιείται ως έμβολο εντός ενός κυλίνδρου. Το νερό εισέρχεται στο κατώτερο άκρο του κυλίνδρου, ο οποίος είναι βυθισμένος λίγο πιο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ανυψώνοντας τη στάθμη του νερού που βρίσκεται μέσα του και συμπιέζοντας τον αέρα που βρίσκεται από πάνω. Στο άλλο άκρο της στήλης είναι τοποθετημένος ένας στρόβιλος ο οποίος εκτρέπεται κάθε φορά λόγω της κίνησης του αέρα (πίεσης και αποσυμπίεσης) και μέσω μίας ηλεκτρογεννήτριας παράγει ηλεκτρική ενέργεια(Εικόνα 2).

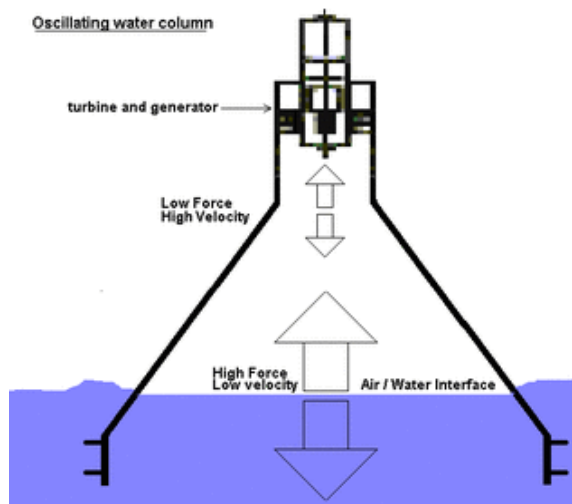
Το θετικό στην χρήση του συστήματος αυτού είναι ότι όντας εγκατεστημένο στην ακτή έχει ευκολότερη πρόσβαση στο δίκτυο και η συντήρησή του δεν απαιτεί υπεράκτια έργα. Αντιθέτως, το κόστος κατασκευής του είναι αρκετά υψηλό και η εγκατάσταση ίσως προκαλεί αισθητική όχληση[3].



Ομοίως, όταν το ίδιο σύστημα εγκατασταθεί σε ανοιχτή θάλασσα (off-shore), (Εικόνα 3) τα μειονεκτήματα είναι αρκετά. Όπως όλες οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις, είναι δύσκολες στη συντήρηση, στην εγκατάσταση υποβρύχιων καλωδίων και στην μεταφορά ενέργειας από τη θάλασσα στη στεριά. Πέραν των απωλειών ενέργειας λόγω μεταφοράς, το κόστος συντήρησης και εγκατάστασης είναι αρκετά υψηλό. Το πλεονέκτημα των εγκαταστάσεων που βρίσκονται σε συνθήκες ανοιχτής θαλάσσης είναι ότι εκμεταλλεύονται μεγάλο μέρος της κυματικής ενέργειας πριν αυτή εξασθενήσει λόγω των τριβών με τον πυθμένα της θάλασσας[30].



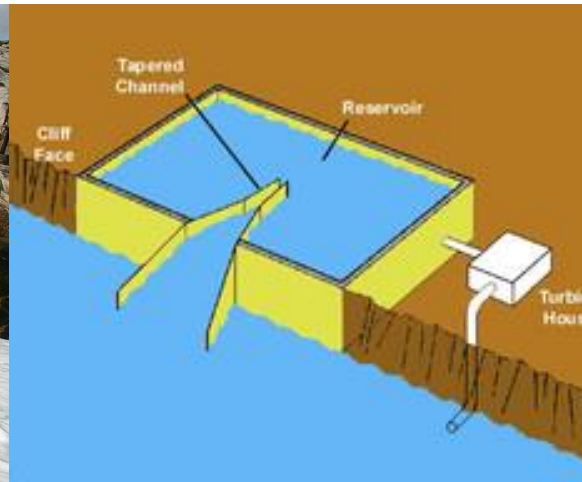
Εικόνα 2: Εγκατάσταση της LIMPET υδάτινης παλλόμενης στήλης στην περιοχή Isle της Wagen Islay[31]



Εικόνα 3: Off-shore εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από παλλόμενη υδάτινη στήλη[30]

### ΚΩΝΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ (TAPERED CHANNELS)

Το κωνικό κανάλι, ή TAPCHAN είναι μία απλή συσκευή (όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5) εγκατεστημένη πολύ κοντά στην ακτή (Εικόνα 4). Η λειτουργία της έγκειται στη δημιουργία ενός καναλιού που συνδέει την όχθη της ακτής με μία δεξαμενή. Το κανάλι αυτό έχει κωνικό σχήμα και εκλεπτύνεται στην είσοδο της δεξαμενής με σκοπό την ανύψωση της στάθμης του νερού και την υπερχειλίση του στο επίπεδο της συλλογής. Ο κύκλος λειτουργίας της εγκατάστασης κλείνει καθώς το νερό διοχετεύεται μέσω ενός αγωγού στη θάλασσα εκτρέποντας έναν υδροστρόβιλο λόγω της δυναμικής ενέργειας που έχει αναπτυχθεί λόγω της ανύψωσης[1].



Εικόνα 4: Εικόνα καναλιού TAPCHAN, Toftestallen - Øygarden, Νορβηγία[32] Εικόνα 5: Λειτουργία κωνικού καναλιού[33]

### ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ (OSCILLATING FLAPS)

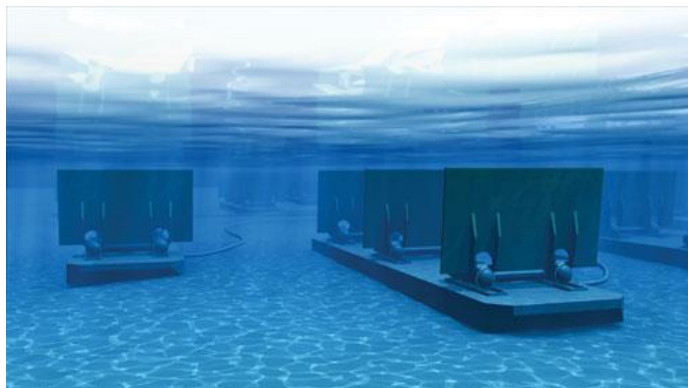
Η αρχή λειτουργίας της συσκευής έγκειται στην ύπαρξη πτερυγίων ταλάντωσης λόγω της περιοδικής κίνησης των κυμάτων. Τα πτερύγια αυτά είτε είναι πακτωμένα στον βυθό της θάλασσας και κινούνται λόγω των κυμάτων της επιφάνειας είτε ακουμπάν στην επιφάνεια και κινούνται λόγω της πρόσπτωσης των κυμάτων πάνω τους[34]. Σε αρκετές εγκαταστάσεις, πίσω από τα πτερύγια είναι τοποθετημένος ένας ταμιευτήρας που επιτρέπει την είσοδο και έξοδο του νερού και συνεπώς την παραγωγή ενέργειας από την κίνηση τους [1]. Το κιβώτιο στο οποίο συγκεντρώνεται το νερό πίσω από τα πτερύγια έχει σε ορισμένες περιπτώσεις τη δυνατότητα συσσώρευσης και αποθήκευσης μεγάλου όγκου νερού και συνεπώς ενέργειας, ώστε να εξομαλύνεται η ροή της παραγόμενης ενέργειας μέσω ενός υδροστρόβιλου πριν επιστρέψει στη θάλασσα[34].

#### 1.3.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΚΤΕΣ ΣΗΜΕΙΑ

### ΕΠΙΠΛΕΟΥΣΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ (FLOAT PUMPS) Η ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ (OSCILLATING WAVE SURGE CONVERTER)

Η αρχή λειτουργίας των αντλιών έγκειται στην ύπαρξη ενός είδους πτερυγίου το οποίο κινείται πάνω κάτω καθώς τα κύματα προσπίπτουν πάνω του (Εικόνα 6, Εικόνα 7). Η κινητική ενέργεια του πτερυγίου με διάφορους τρόπους (ανάλογα με το είδος της συσκευής) μεταφέρεται σε ένα είδος στροβίλου ο οποίος τροφοδοτεί μία ηλεκτρογεννήτρια[1].





Εικόνα 6: Πτερύγια αγκυροβολημένο στο βυθό της θάλασσας, (Vantaa, Φινλανδία)μετατροπείς ενέργειας που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της ταλαντωμένης κίνησης των πλακών των συστημάτων [35].



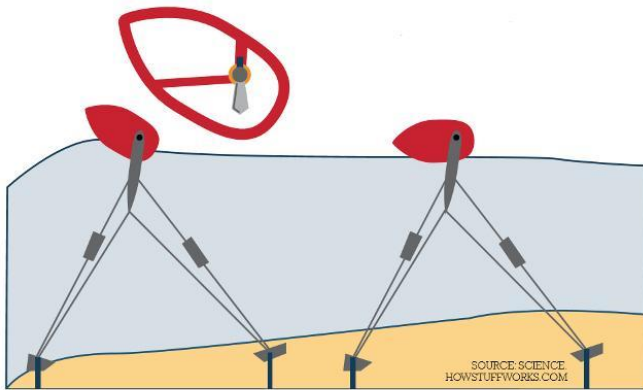
Εικόνα 7: Oyster, έως και το έτος 2010 είχε σχεδιαστεί μοντέλο που έχει ονομαστική ισχύ 2,5MW[36].

### ΠΛΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ (PONTOONS) Η ΣΗΜΕΙΑΚΟΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (POINT ABSORBER WAVE ENERGY CONVERTER)

Μία ευρύτερη κατηγορία αποτελείται από πλωτά έργα (pontoons, snakes and ducks). Η ομαδοποίηση αυτή έγκειται στο γεγονός ότι οι συσκευές αυτές έχουν κοινά χαρακτηριστικά, αποτελούνται δηλαδή από αρκετά επιπλέοντα κομμάτια τα οποία παράγουν ενέργεια λόγω της περιοδικής κίνησης των κυμάτων.

Μια από τις πρώτες συσκευές κυματικής ενέργειας που ανήκει σε αυτήν την κατηγορία, ονομάζεται πάπια του Salter (Εικόνα 8), λόγω του εφευρέτη του, Stephen Salter. Επινόηθηκε στη δεκαετία του 1970 και αποτελείται από ένα μεγάλο αγκυροβολημένο τμήμα στο οποίο είχε τοποθετηθεί ένα ελαφρύτερο αρθρωτό "ράμφος"[34]. Το ένα άκρο του είναι σταθερά αγκυροβολημένο και το «ράμφος» ταλαντώνεται πάνω-κάτω, χωρίς να προκαλεί κάποια μεταβολή στους κυματισμούς. Αυτή η κίνηση έγινε αντικείμενο εκμετάλλευσης για την παροχή ενέργειας[37].

Πολλές διαδοχικές παρόμοιες συσκευές εγκαθίστανται σε πλέγμα και ονομάζονται σημειακοί απορροφητές. Οι συσκευές αυτές έχουν το προνόμιο να απορροφούν ενέργεια από όλες τις κατευθύνσεις μέσω της κίνησής τους στην επιφάνεια του νερού ή κοντά σε αυτήν. Τέτοιες συσκευές είναι για παράδειγμα τα WaveStar, Wavebob, OPT (Εικόνα 9)[2].



Εικόνα 8: Salter duck, ταλαντώμενη μύτη με τη βοήθεια ενός βαριδίου [37]



Εικόνα 9: Σημειακός απορροφητής, Powerbuoy ή OPT [38]



Εικόνα 10: Μετατροπείς κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική, Ηράκλειο Κρήτης [39]

Νέες και παλιότερες τεχνολογίες έχουν χρησιμοποιηθεί και δοκιμαστεί όπως για παράδειγμα οι PowerBuoy, Wave Swing, Aquabuoy[38] και η λειτουργία τους έγκειται στην παραπάνω λογική.

Τέλος, οι συσκευές «Νερόφιδο» οι οποίες αποτελούνται από κωνικά τμήματα στοιχισμένα και εφραπτόμενα μέσω υδραυλικών αρθρώσεων[34]. Οι συσκευές αυτές, υπό διαφορετική κατηγοριοποίηση θα ανήκαν στην κατηγορία των συσκευών μακρόστενης μορφής(attenuator), η οποία αποτελείται από επιμήκεις κατασκευές με μικρή μετωπική επιφάνεια, που λειτουργούν παράλληλα με τον κυματισμό και κινούνται στην επιφάνεια, παράγοντας ενέργεια, όπως αναφέρθηκε, μέσω υδραυλικού μηχανισμού. Εκτός από τη συσκευή «Νερόφιδο»-Pelamis (Εικόνα 11), στην ίδια κατηγορία ανήκουν οι συσκευές Oceantech και Dexawave[2].



Εικόνα 11: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με Pelamis sea-snake[37]



Εικόνα 12: Εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας Pecém, Brazil, Ceará State

## ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ (PIEZOELECTRIC DEVICES)

Οι συσκευές αυτές οφείλουν τη λειτουργία τους στην χρήση πιεζομετρικών υλικών. Καθώς τα κύματα προσπίπτουν πάνω τους δημιουργούν αύξηση της πίεσης που ευνοεί της συνθήκες κυκλοφορίας ηλεκτρικού ρεύματος. Τα υλικά αυτά παράγουν ηλεκτρική τάση όταν τίθενται υπό πίεση. Η πίεση αυτή μπορεί να προέρθει από μικρές δονήσεις, από εφελκυσμό, είτε κάμψη. Η χρήση τους είναι σε πρώιμο στάδιο αν και η εγκατάστασή τους είναι πολυδιάστατη. Μπορούν να εγκατασταθούν είτε κοντά στο βυθό είτε στην επιφάνεια της θάλασσας και να συνδυάσουν πλήθος τεχνολογιών[34].

Πολλές επιπλέον συσκευές έχουν θέσει τα θεμέλιά τους σε κάποια από τις παραπάνω λειτουργίες και χρησιμοποιούνται σε εμπορικό είτε δοκιμαστικό επίπεδο.

### 1.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΛΚΕΘΕ

Το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών κινήθηκε πρώτο, μετά το 1992, για τη δημιουργία Άτλαντα παρακολούθησης και πρόγνωσης των κυματισμών. Ο μοναδικός Άτλαντας μέχρι το έτος 2004 όπου έγινε η εν λόγω μελέτη ήταν βασισμένος σε οπτικές παρατηρήσεις και εκδόθηκε το έτος 1992.

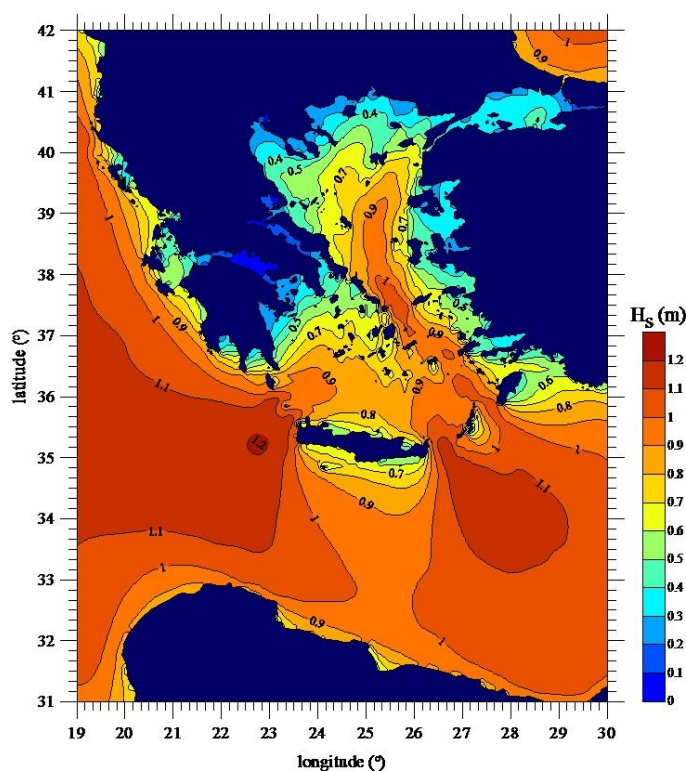
Το ΕΛΚΕΘΕ στηρίχτηκε στην εξαγωγή χαρτών(Χάρτης 1) με τη βοήθεια μετρήσεων και όχι οπτικής παρατήρησης. Οι μετρήσεις προήρθαν από τη βάση δεδομένων του Ποσειδών. Τα δεδομένα αριθμητικής ανασύνθεσης έχουν παραχθεί μέσω αριθμητικών μοντέλων χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης, με χρήση του κυματικού μοντέλου WAM-Cycle 4.

Τα δεδομένα του ήδη υπάρχοντος Άτλαντα έχουν διάρκεια 10 ετών (1995-2004) και χρονικό βήμα 3 ωρών.

Το μοντέλο WAM λαμβάνει υπόψη αρκετά κυματικά δεδομένα όπως είναι: η κυματική διάδοση στο χώρο και στο χρόνο, η επίδραση του ανέμου, η διάθλαση των κυματισμών, οι τετραδικές μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις κυματισμών, η θραύση των κυματισμών και οι επιδράσεις τριβής βυθού. Τα κριτήρια αυτά συγκεντρώνονται για την ανάλυση του μοντέλου στη σχέση που ορίζει τις πηγές και τις καταβόθρες της κυματικής ενέργειας.

Στη μεθοδολογία συλλογής των δεδομένων παρατηρείται ότι το σύνολο των 6 σταθμών μέτρησης που έχουν προτιμηθεί, έχουν το μεγαλύτερο εύρος χρονοσειρών. Επίσης, σημαντικό στοιχείο είναι ότι τα 6 σημεία δεν αναφέρονται σε κοινά χρονικά διαστήματα και τα αντίστοιχα δειγματικά μεγέθη δεν είναι τα ίδια. Επιπρόσθετο σφάλμα του συστήματος συλλογής δεδομένων είναι η περιστασιακή διακοπή λειτουργίας των μετρητών. Σε κάθε περίπτωση όμως τα αποτελέσματα του Άτλαντα θεωρείται ότι εξασφαλίζουν τη στατιστική αξιοπιστία τους.

Τα αποτελέσματα που προέρχονται από αριθμητική προσομοίωση αναπαριστούν τη μέση κατάσταση των ελληνικών θαλασσών[40].



Χάρτης 1: Παράδειγμα χάρτη σημαντικού ύψους κύματος, με τη μεθοδολογία του ΕΛΚΕΘΕ



---

### 1.5 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για να προσδιοριστεί η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί μέσω των κυμάτων και οι περιοχές με αξιόλογο κυματικό δυναμικό οφείλουν να έχουν αποσαφηνιστεί οι βασικές έννοιες και αρχές που διέπουν τα βασικά μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και οι εξισώσεις που διέπουν την κυματική ενέργεια.

Συνήθως, τα κύματα περιγράφονται από 4 παραμέτρους. Το σημαντικό ύψος κύματος, το μήκος κύματος, την περίοδο και την συχνότητά τους.

Το σημαντικότερο μέγεθος για την παραγωγή κυματικής ενέργειας είναι το σημαντικό ύψος κύματος. Το **σημαντικό ύψος κύματος ( $H_m0$ )** σε μια περιοχή είναι η μέση τιμή ύψους (από κορυφή σε κοιλία) του ενός τρίτου των υψηλότερων κυμάτων[41]. Το πιθανό αναμενόμενο μέγιστο ύψος κύματος μπορεί να φτάσει μέχρι δύο φορές το υπολογιζόμενο σημαντικό ύψος κύματος[42].

Εξίσου σημαντικό μέγεθος για τον προσδιορισμό του κυματικού δυναμικού είναι η **περίοδος των κυμάτων( $T$ )**. Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να περάσουν δυο διαδοχικές κορυφές από ένα ορισμένο σημείο[43]. Ένα ακόμα μέγεθος που αφορά τον χρόνο είναι η συχνότητα, δηλαδή ο αριθμός των κυμάτων που διέρχεται από ένα συγκεκριμένο σημείο κάθε δευτερόλεπτο[44].

Λιγότερο σημαντικά μεγέθη είναι το μήκος κύματος και η ταχύτητα. Ως **μήκος κύματος( $\lambda$ )** ορίζεται η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών, ενώ η **ταχύτητα διάδοσης ( $c$  ή  $U$ )** προσεγγιστικά υπολογίζεται από τον λόγο του μήκους κύματος προς την περίοδο του[43].

---

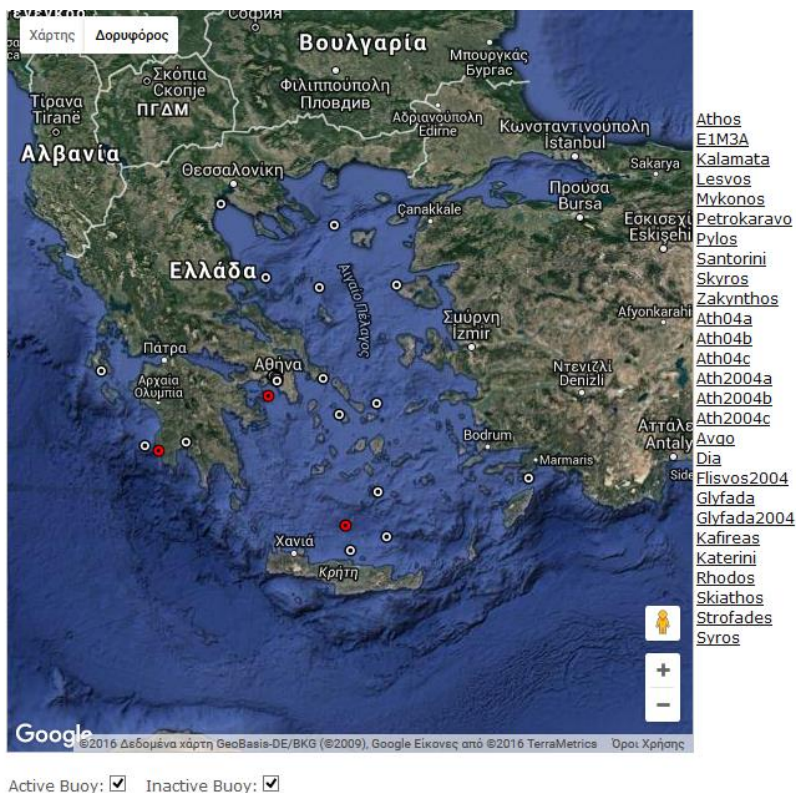
### 1.6 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΣΕΙΔΩΝ

Τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί κατά την πολυετή λειτουργία του δικτύου σταθμών του ΠΟΣΕΙΔΩΝ είναι διαθέσιμα μέσω μιας δικτυακής εφαρμογής που επικοινωνεί με την βάση δεδομένων του συστήματος. Η βάση δεδομένων περιέχει παλιότερα και νέα στοιχεία και ενημερώνεται καθημερινά.

Επιπλέον δεδομένα είναι διαθέσιμα όπως η ακριβής θέση των αισθητήρων και των μετρητών και η περίοδος λειτουργίας τους. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για ερευνητικούς σκοπούς καθώς και στα μοντέλα πρόγνωσης του καιρού.

Το επιχειρησιακό κέντρο λαμβάνει τα δεδομένα ανά τρεις ώρες. Οι ωκεανογραφικές μετρήσεις έχουν πολύ μικρή πυκνότητα και συχνά παρουσιάζουν σφάλματα και αμφιλεγόμενης αξιοπιστίας τιμές. Τα φαινόμενα δυσλειτουργίας των σταθμών είναι εύκολο να διακριθούν και οφείλονται σε δυσλειτουργίες των αισθητήρων, προβλήματα στην αγκύρωση των σταθμών αλλά και στην μετάδοση των δεδομένων[45].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σταθμοί μέτρησης του δικτύου(Εικόνα 13). Οι ενεργοί σταθμοί είναι σημειωμένοι με κόκκινο και οι μη ενεργοί με άσπρο. Δεξιά εμφανίζονται τα ονόματα των ενεργών και των ανενεργών σταθμών[46].



Εικόνα 13: Χάρτης εμφάνισης της θέσης των σταθμών μέτρησης

Τα σημεία που αποτυπώνονται στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 13) δεν είναι αυτά που θα χρησιμοποιηθούν ως σημεία δειγματοληψίας για την εξαγωγή των χαρτών σημαντικού ύψους κύματος και του κυματικού δυναμικού. Παρακάτω αναλύεται η διαδικασία επιλογής των σημείων δειγματοληψίας με βάση τη σύγκριση των χρονοσειρών που αντιστοιχούν σε κάθε έναν από τους εικονιζόμενους σταθμούς.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2. ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

#### 2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΩΡΙΚΗΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ

Η μέτρηση του σημαντικού ύψους κύματος καθώς και αρκετών άλλων περιβαλλοντικών παραμέτρων πραγματοποιείται σε διακριτά σημεία στον χώρο. Η διαδικασία της χωρικής παρεμβολής δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας μίας χωρικά συνεχούς εικόνας του σημαντικού ύψους κύματος και της κυματικής ενέργειας που παράγεται τοπικά η οποία απορρέει από τα αρχικά σημεία της δειγματοληψίας. Με την εισαγωγή της τεχνικής της χωρικής παρεμβολής στα ΓΣΠ δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας μίας ολοκληρωμένης εικόνας για την κυματική κατάσταση του θαλάσσιου ελλαδικού χώρου βασισμένη στα αρχικά σημεία των μετρήσεων (σημεία δειγματοληψίας).

Η διαδικασία που ακολουθεί, μετά τη συλλογή δεδομένων και της βάσης δεδομένων που δημιουργείται, είναι η χωρική μοντελοποίηση και η εφαρμογή των τεχνικών παρεμβολής που θα επιλεγθούν ώστε αντί για διακριτά σημεία τα οποία χαρακτηρίζονται από μία τιμή σημαντικού ύψους κύματος, να δημιουργηθεί ένας Άτλαντας χωρικής απεικόνισης των ζωνών με μικρότερη η μεγαλύτερη τιμή σημαντικού ύψους κύματος.

Η διαδικασία **χωρικής παρεμβολής** (spatial interpolation) είναι η διαδικασία συσχέτισης των τιμών του δείγματος με σκοπό την ανεύρεση των αντίστοιχων τιμών τα οποία χαρακτηρίζουν σημεία της περιοχής μελέτης στα οποία δεν έχει γίνει δειγματοληψία[47]. Στην περίπτωση της εργασίας αυτής χρησιμοποιείται παρεμβολή για να μετατραπούν τα σημειακά δεδομένα σε ένα συνεχές πεδίο καθώς τα σημεία της δειγματοληψίας δεν καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος.

Η χωρική παρεμβολή μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο σε περιπτώσεις συνεχών πεδίων, υποθέτοντας δηλαδή ότι τα δεδομένα του χαρακτηριστικού είναι συνεχή σε όλο το χώρο. Επιπλέον, η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται η μέθοδος χωρικής παρεμβολής βασίζεται στον νόμο του Tobler, ο οποίος υποστηρίζει ότι «όλες οι θέσεις σχετίζονται μεταξύ τους αλλά οι κοντινές θέσεις σχετίζονται περισσότερο μεταξύ τους από ότι οι απομακρυσμένες»[48], [49].

**Οι μέθοδοι παρεμβολής** μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον αριθμό των γειτονικών γνωστών σημείων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση ενός άγνωστου σημείου. Έτσι, υπάρχουν οι **τοπικές μέθοδοι εκτίμησης** (local estimation methods) και οι **γενικές μέθοδοι εκτίμησης** (global estimation methods). Οι τοπικές μέθοδοι εκτιμούν την τιμή του άγνωστου σημείου με βάση τα γειτονικά σημεία που περιβάλλουν την περιοχή, ενώ αντιθέτως, οι γενικές μέθοδοι εκτιμούν το φαινόμενο για το σύνολο της περιοχής μελέτης χρησιμοποιώντας όλα τα σημεία δειγματοληψίας. Βασικό πλεονέκτημα των τοπικών μεθόδων εκτίμησης είναι η μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς καθορίζονται τα γειτονικά σημεία στα οποία βασίζεται η πληροφορία εξόδου. Αντιθέτως, μειονέκτημα θεωρείται η ανάγκη καθορισμού της περιοχής μελέτης που θεωρείται ως γειτονιά από τον εκάστοτε ερευνητή[47].

Συνεπώς, ένα σημαντικό συμπέρασμα της διαδικασίας είναι ότι επιδιώκεται η ομοιότητα και η συσχέτιση των γειτονικών τιμών καθώς και η ομαλή μεταβλητότητα στις τιμές ενός συνεχούς πεδίου μελέτης.

Η χωρική παρεμβολή ωστόσο, αποτελεί μία εμπειρική προσέγγιση της πραγματικότητας καθώς τα αποτελέσματα της εξαρτώνται από τις επιλογές του ερευνητή, καθώς και από τη φύση του μεγέθους που εξετάζεται κάθε φορά.

Οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, τις **Ντετερμινιστικές** (deterministic methods) και τις **Γεωστατιστικές μεθόδους** (geostatistical methods) με βάση την αρχή λειτουργίας των μοντέλων που χρησιμοποιούν και τις σχέσεις από τις οποίες απορρέει η χωρική επιφάνεια[47].

Οι **ντετερμινιστικές μέθοδοι** χρησιμοποιούν **μαθηματικά μοντέλα** για την παραγωγή της χωρικής επιφάνειας χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις σχέσεις μεταξύ των πραγματικών μεγεθών και χωρίς να εξάγουν εκτίμηση των σφαλμάτων με τις προβλεπόμενες τιμές.

Οι **γεωστατιστικές μέθοδοι** χρησιμοποιούν **στατιστικά μοντέλα** για την παραγωγή της χωρικής επιφάνειας, αυτοσυσχετίζοντας τα δεδομένα εισαγωγής και παρέχοντας εκτίμηση για το αναμενόμενο σφάλμα της διαδικασίας. Μειονέκτημα τους, σε αντίθεση με τις ντετερμινιστικές, είναι ότι είναι πολύπλοκες και απαιτείται η λήψη αρκετών αποφάσεων σχετικά με τις παραμέτρους του μοντέλου. Επιπλέον, η μεταβλητότητα των δεδομένων αναλύεται σε διαφορετικές διευθύνσεις και περιγράφεται από ένα ανισότροπο ημιβαριόγραμμα.

Και τα δύο μοντέλα μπορούν να είναι **ανισότροπα**, αλλά βασίζονται σε διαφορετικές έννοιες[47].

Το χαρακτηριστικό της **ανισοτροπίας** εξαρτάται από τη συσχέτιση των δεδομένων. Όταν η χωρική αυτοσυσχέτιση εξαρτάται μόνο από την απόσταση μεταξύ δύο σημείων τότε το εξεταζόμενο φυσικό μέγεθος είναι **ισοτροπικό**. Στην περίπτωση που η χωρική αυτοσυσχέτιση διαφέρει ανά διεύθυνση. Οι δύο βασικοί τύποι ανισοτροπίας είναι η **γεωμετρική** (geometric) και η ανισοτροπία **ζώνης** (zonal).[50]

Η **γεωμετρική ανισοτροπία** χαρακτηρίζεται από το ημιβαριόγραμμα, το οποίο φτάνει στο ίδιο κατώφλι ή άνω φράγμα του ημιβαριογράμματος ανεξαρτήτως διεύθυνσης αλλά εμφανίζει διαφορετικό εύρος. Ενώ η **ανισοτροπία ζώνης** έχει διαφορετικό κατώφλι ανά διεύθυνση.

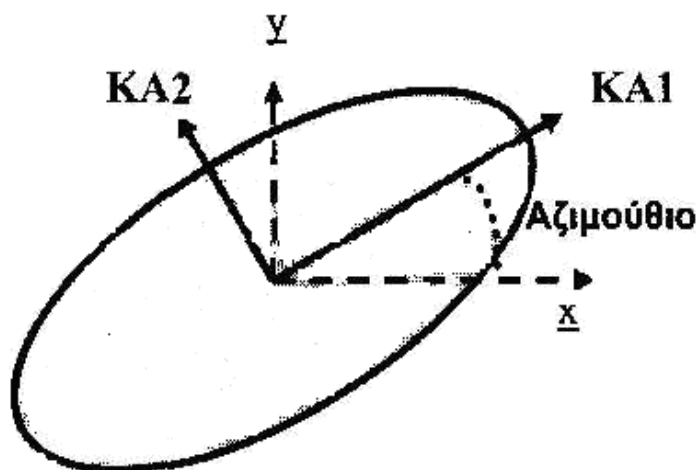
Εφόσον η γεωμετρική ανισοτροπία χαρακτηρίζεται από το ίδιο κατώφλι ανεξαρτήτως διεύθυνσης, έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιηθεί μετατρέποντας το τρισδιάστατο διάνυσμα σε ισοτροπικό μέγεθος ακολουθώντας την εξίσωση:

$$h = \sqrt{\left(\frac{h_x}{a_x}\right)^2 + \left(\frac{h_y}{a_y}\right)^2 + \left(\frac{h_z}{a_z}\right)^2} \quad [1]$$

όπου  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ : το εύρος (range) της κατεύθυνσης  $x, y, z$  αντίστοιχα.



Για κάθε ζεύγος ανισοτροπίας σε ένα ημιβαριόγραμμα δίνεται ένα **αζιμούθιο** (azimuthal direction), μια **γωνιακή ανοχή** (angular tolerance) και ένα **εύρος** (bandwidth).[47]



Εικόνα 14: Σύστημα κύριων αξόνων (KA1, KA2) σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων x και y και ισοϋψής καμπύλη (έλλειψη) του ημιβαριογράμματος[50]

Σε πολλές περιπτώσεις οι καμπύλες αυτές έχουν την μορφή ελλείψεως καθώς αυτό συμβαίνει για διάφορα πρότυπα ημιβαριογράμματος, όπως το εκθετικό και το γκαουσιανό ανισοτροπικό ημιβαριόγραμμα. Η γωνία προσανατολισμού είναι τότε η γωνία που σχηματίζει ο μεγάλος άξονας (KA1) της έλλειψης με τον οριζόντιο άξονα του συστήματος συντεταγμένων (Εικόνα 14)[50].

Η ανισοτροπία μοντελοποιείται ως τυχαίο σφάλμα και η επιρροή της μπορεί να ποσοτικοποιηθεί και να ληφθεί υπόψη στην πρόβλεψη. Η ανισοτροπία μπορεί να εντοπιστεί όταν οι παράμετροι ενός ημιβαριογράμματος αλλάζουν με διαφορετικό τρόπο σε αποκλίνουσες διευθύνσεις σε μικρές και ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ ζευγών σημείων[47].

Η γενική μορφή της εξίσωσης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τιμών του ημιβαριογράμματος ( $r$ ) είναι η εξής:

$$r = \frac{1}{2} N \sum_{i=1}^N [z(s_i + d) - z(s_i)]^2 \quad [2]$$

Όπου:

$z(s_i)$  = η μετρούμενη τιμή στην θέση  $i$

$N$  = ο αριθμός των σημείων για τις οποίες υπάρχει μέτρηση

d: η απόσταση μεταξύ των δύο δειγμάτων

Ουσιαστικά, το ημιβαριόγραμμα αυξάνεται ανάλογα με την απόσταση μεταξύ των σημείων, όχι πάντα γραμμικά, ενώ αντιστρόφως η συνάρτηση συσχέτισης μειώνεται καθώς όσο τα σημεία δειγματοληψίας απομακρύνονται, μειώνεται η συσχέτιση μεταξύ τους. Οι τιμές του ημιβαριογράμματος αυξάνονται όσο τα σημεία απομακρύνονται εφόσον το ημιβαριόγραμμα δείχνει τη διαφορά των διακυμάνσεων του πεδίου συναρτήσει της απόστασης[50].

## 2.2 ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΗΜΙΒΑΡΙΟΓΡΑΜΜΑ

Το **ημιβαριόγραμμα** αποτελεί το βασικό εργαλείο χωρικής ανάλυσης της μεθόδου. Είναι η γραφική παράσταση της ημιμεταβλητότητας  $\gamma(h)$  ως προς την απόσταση  $h$  μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας, το οποίο παρέχει την πληροφορία της συσχέτισης των τυχαίων τιμών της συνάρτησης και των μεταξύ τους αποστάσεων στο χώρο.

Στον άξονα  $x$  δίνονται η αποστάσεις, δηλαδή το εύρος των κλάσεων και στον άξονα  $y$  τοποθετείται η μέση ημιμεταβλητότητα  $\gamma(h)$  για κάθε κλάση σημείων. Για τη δημιουργία ενός ημιβαριογράμματος, κάθε ζευγάρι σημείων πρέπει να ομαδοποιηθεί βάσει της μεταξύ τους απόστασης, μιας και είναι δύσκολο να απεικονιστούν όλα τα ζεύγη σε ένα διάγραμμα. Το διάγραμμα αυτό καλείται **εμπειρικό ημιβαριόγραμμα** (empirical semivariogram) ενώ η απεικόνιση όλων των ζευγών χωρίς ομαδοποίηση αποτελεί το νέφος του βαριογράμματος (αποτελείται από το σύνολο των σημείων του πειραματικού ημιβαριογράμματος)

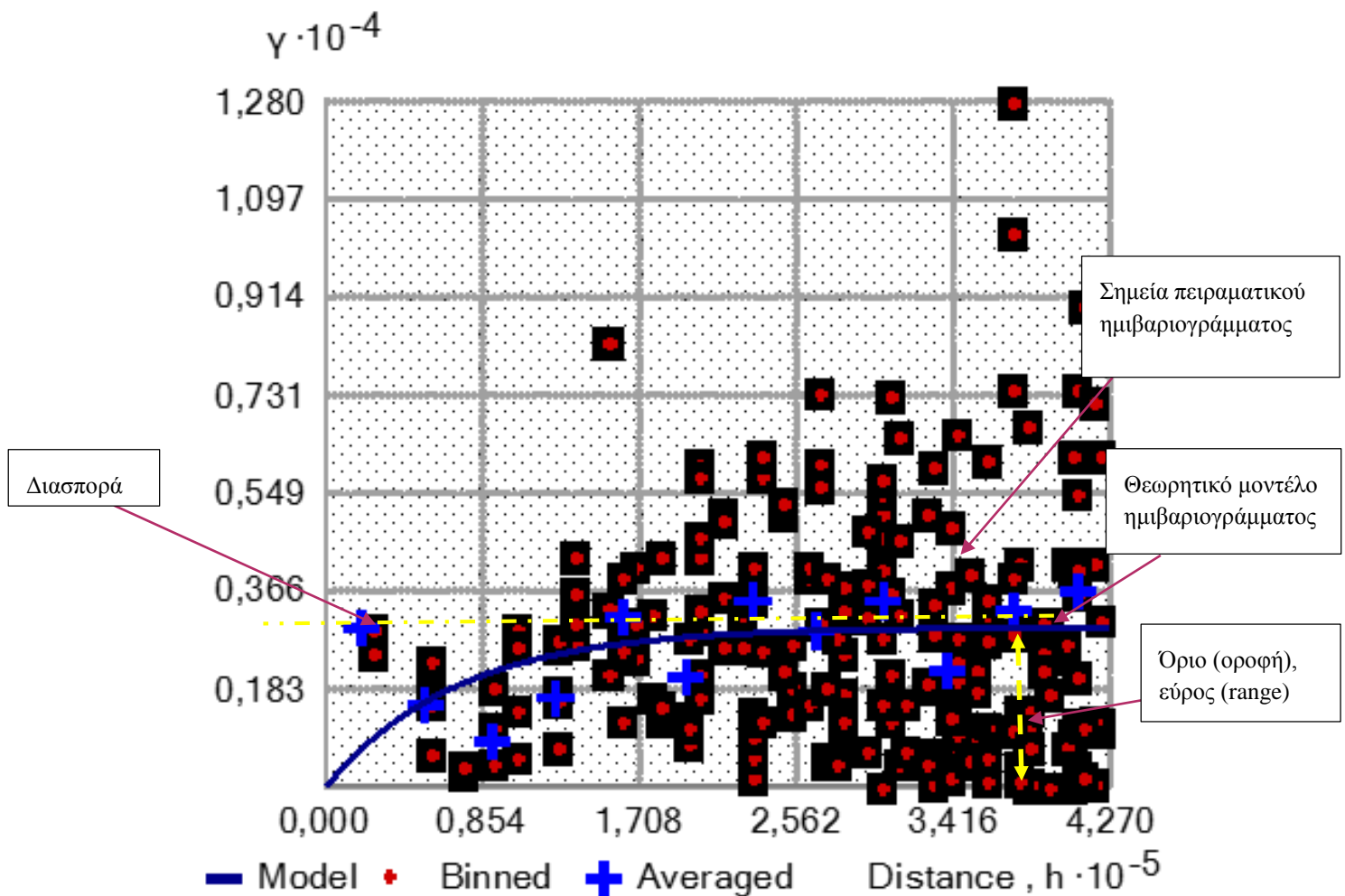
Η ημιμεταβλητότητα  $\gamma(h)$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(s_i) - Z(s_i + h)]^2 \quad [3]$$

Όπου  $n$  ο αριθμός των ζευγαριών των σημείων δειγματοληψίας και  $h$  η μεταξύ τους απόσταση.

Μετά τη δημιουργία του εμπειρικού ημιβαριογράμματος ακολουθεί η προσαρμογή κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων (**θεωρητικό ημιβαριόγραμμα**) που να περιγράφουν με τη μεγαλύτερη δυνατή σαφήνεια τη χωρική διακύμανση της φυσικής ιδιότητας που εξετάζεται. Ο σκοπός ύπαρξης του θεωρητικού ημιβαριογράμματος είναι ότι το εμπειρικό δεν παρέχει πληροφορία για όλες τις πιθανές διευθύνσεις και αποστάσεις.

Τα χαρακτηριστικά ενός ημιβαριογράμματος παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα:



Διάγραμμα 1: Παρουσίαση χαρακτηριστικών στοιχείων ημιβαριογράμματος

- Το φαινόμενο πυρήνα ποσοτικοποιεί την διασπορά του δειγματικού σφάλματος καθώς και την μικρής κλίμακας μεταβλητότητα, π.χ. την χωρική μεταβλητότητα που υπάρχει σε αποστάσεις μικρότερες από τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων του δείγματος.
- Το «όριο» (οροφή) είναι η τιμή που πλησιάζει ασυμπτωτικά το δειγματικό ημιβαριόγραμμα.
- Η «κλίμακα» (scale) είναι η διαφορά της «οροφής» από το «φαινόμενο πυρήνα» και δηλώνει την μεταβλητότητα των συσχετισμένων διακυμάνσεων.

- Το μήκος συσχέτισης είναι η απόσταση στην οποία το ημιβαριόγραμμα προσεγγίζει πολύ κοντά, π.χ. κατά 95-97%, την τιμή οροφής.
- Η διασπορά είναι η μέση τετραγωνική απόκλιση κάθε τιμής του δείγματος από την μέση τιμή και δηλώνεται από την διακεκομμένη οριζόντια γραμμή στο σχήμα.
- Το **πειραματικό ημιβαριόγραμμα** παρουσιάζει τις ομάδες των ζευγών με τις αντίστοιχες δειγματικές τιμές του ημιβαριογράμματος.
- Το **θεωρητικό μοντέλο ημιβαριογράμματος** αποτελεί μια συνεχή θεωρητική καμπύλη που προσαρμόζεται στο πειραματικό.

Τα πιο συνηθισμένα μοντέλα ημιβαριογραμμάτων που συναντώνται συχνά σε πρακτικές εφαρμογές είναι το εκθετικό, το γκαουσιανό, το σφαιρικό, το γενικευμένο, το δυναμονομικό ή αλγεβρικό και το φαινόμενο πυρήνα. Το εκθετικό μοντέλο χαρακτηρίζει κατανομές με απότομες χωρικές μεταβολές σε αντίθεση με το γκαουσιανό το οποίο χαρακτηρίζει ομαλότερες αυξομειώσεις. Το αλγεβρικό μοντέλο χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις εξάρτησης με μεγάλη χωρική εμβέλεια ενώ το μοντέλο πυρήνα αντιστοιχεί σε μεταβολές που συντελούνται σε αποστάσεις μικρότερες από τη διακριτική ικανότητα που επιτρέπει το δείγμα.

Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού της χωρικής εκτίμησης τυχαίου πεδίου είναι με την μέθοδο των Σπαρτιάτικών Μοντέλων Τυχαίων Πεδίων. Στην συγκεκριμένη μέθοδο για να προσδιοριστεί η χωρική εξάρτηση του τυχαίου πεδίου απαιτείται ο υπολογισμός ενός αριθμού παραμέτρων και στατιστικών περιορισμών χωρίς να είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του ημιβαριογράμματος[50].

---

### 2.3 ΧΩΡΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ

Δύο διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση ενός τυχαίου πεδίου σε σημεία που δεν υπάρχουν ακριβείς μετρήσεις είναι η **χωρική εκτίμηση** και η **προσομοίωση**. Οι δύο αυτές γεωστατιστικές διαδικασίες έχουν ως στόχο τον προσδιορισμό της χωρικής εξάρτησης των τιμών του πεδίου με απώτερο στόχο την χαρτογράφηση μίας ολόκληρης περιοχής[51].

Ουσιαστικά, η χωρική εκτίμηση περιλαμβάνει όλες τις μαθηματικές διαδικασίες οι οποίες επιτρέπουν των υπολογισμό των τιμών του πεδίου στα σημεία όπου αγνοούνται οι μετρήσεις. Η χωρική εκτίμηση αφορά είτε ένα σημειακό στοιχείο ενός πεδίου είτε μία γενική τιμή που χαρακτηρίζει ολόκληρη την περιοχή.

Η βασική ιδέα της χωρικής εκτίμησης είναι πως η εκτιμώμενη τιμή δίνεται από έναν συνδυασμό γραμμικό ή μη γραμμικό των γειτονικών ως προς αυτό, σημείων. Οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι που βασίζονται στη γραμμική παρεμβολή σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος είναι γνωστές ως Kriging[51].

Αντιθέτως, η διαδικασία της προσομοίωσης παράγει πολλές πιθανές καταστάσεις του πεδίου. Αποσκοπεί στη παραγωγή πολλών εναλλακτικών σεναρίων, τα οποία είναι εφικτά με βάση τις υπάρχουσες μετρήσεις.

## 2.4 ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ KRIGING

Η γεωστατιστική αποτελεί **κλάδο της Εφαρμοσμένης στατιστικής** που ασχολείται με φαινόμενα που μεταβάλλονται στο χώρο.

Έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς διάφορες μέθοδοι γεωστατιστικής ανάλυσης με σκοπό τον προσδιορισμό **της χωρικής κατανομής μεταβλητών** σε σημεία για τα οποία η προσδιοριζόμενη τιμή δεν είναι γνωστή [50]. Η φύση των μεταβλητών αυτών μπορεί να είναι οικονομικής ή περιβαλλοντικής σημασίας. Η κλασικές γεωστατιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, όπως για παράδειγμα η μέθοδος Kriging, διέπονται από ισχυρούς μαθηματικούς περιορισμούς ως προς την εφαρμογή τους. Η μη επαρκής κάλυψη των περιορισμών αυτών από το δείγμα των μετρήσεων έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή εκτιμήσεων με αρκετά υψηλό σφάλμα [52].

Η Γεωστατιστική ανάλυση έχει συμπεριλάβει ένα σύνολο στατιστικών τεχνικών για τον προσδιορισμό τυχαίων μεταβλητών που τοποθετούνται στο χώρο. Η χωρική διακύμανση αυτή χαρακτηρίζεται ως τυχαία. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται στατιστικές μέθοδοι όπως προσδιορισμός της μέσης τιμής και διασποράς για τις σημειακές μετρήσεις της μεταβλητής. Η μαθηματική έννοια του τυχαίου πεδίου, που χαρακτηρίζει τις μετρήσεις, τις συνδέει με τους νόμους που διέπουν τη θεωρία πιθανοτήτων, στη συγκεκριμένη περίπτωση ως θεωρία τυχαίων πεδίων [50].

Η επιστήμη της γεωστατιστικής εφαρμόστηκε αρχικά στους κλάδους της γεωλογίας, της μεταλλειολογίας και της υδρολογίας με σκοπό να προσδιοριστούν, με στατιστική ακρίβεια, τα φυσικά μεγέθη του προσδιορίζουν ένα σημείο για το οποίο δεν υπάρχει αντίστοιχη μέτρηση.

Ορισμένες από τις εφαρμογές που γίνεται χρήση γεωστατιστικής ανάλυσης είναι οι εξής:

- Στην έρευνα κοιτασμάτων, στην ποσοτικοποίηση και εκτίμηση του βάθους, της έκτασης και της περιεκτικότητας του κοιτάσματος
- Στην ωκεανογραφία, στην χαρτογράφηση του βάθους και των χαρακτηριστικών του βυθού καθώς και στην ανάλυση των κυματισμών
- Στην ανάλυση ανομοιογενών υλικών (χαρακτηρισμός τους πορώδες τους)
- Στην χαρτογράφηση συγκεντρώσεων ρύπων που διαχέονται διαμέσου των περιβαλλοντικών μέσων (αέρας, νερό, έδαφος, υπόγειοι υδροφορείς)
- Στην τοπογραφική ανάλυση και στα γεωγραφικά συστήματα πληροφορίας (ΓΣΠ)
- Στην ανάλυση βροχοπτώσεων σε περιπτώσεις έλλειψης επαρκούς δεδομένων

- Στην εκτίμηση περιβαλλοντικών κινδύνων που αφορούν τη δημόσια υγεία για την εκτίμηση των απαραίτητων περιβαλλοντικών ορίων που πρέπει να τηρούνται με βάση τη νομοθεσία.

Η μέθοδος Kriging που θα χρησιμοποιηθεί και στην συγκεκριμένη εργασία, είναι όπως προαναφέρθηκε, μία από τις πιο συχνές γεωστατιστικές μεθόδους [50].

## 2.5 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Το **τυχαίο πεδίο** αφορά το σύνολο των μεταβλητών που περιγράφουν μία χωροχρονική μεταβολή ενός φυσικού μεγέθους, για παράδειγμα τη χωροχρονική μεταβολή των κυματισμών. Οι συναρτήσεις που περιγράφουν τα δεδομένα των τυχαίων πεδίων δεν υπακούν σε κάποια μαθηματική έκφραση ή συνάρτηση. Τα τυχαία πεδία διέπονται από ιδιαίτερες μαθηματικές ιδιότητες καθώς αλληλεξαρτώνται από φυσικά μεγέθη για διαφορετικά σημεία του χώρου. Αυτές τους οι ιδιότητες τα καθιστούν ξεχωριστά των ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών.

Τα τυχαία πεδία προσδιορίζονται με βάση τη φύση των τιμών που εμπεριέχονται σε αυτά. Έτσι, αν ένα πεδίο περιλαμβάνει τιμές μόνο από ένα μετρήσιμο σύνολο αριθμών ονομάζεται πεδίο διακριτών τιμών. Αν οι τιμές του πεδίου προέρχονται από ένα συνεχές διάστημα πραγματικών αριθμών ονομάζεται πεδίο συνεχών τιμών. Όταν η μεταβολή των τιμών ορίζεται σε έναν συνεχή χώρο, δημιουργείται ένα πεδίο συνεχούς χώρου ενώ όταν η μεταβολή ορίζεται στις θέσεις ενός πλέγματος (κάνναβος) ονομάζεται πλεγματικό. Τα πλεγματικά πεδία χρησιμοποιούνται συχνά για την κατανομή του δείγματος σε έναν συγκεκριμένο χώρο, καθώς ευνοούν και τη σύγκριση της απόδοσης των διαφορετικών γεωστατιστικών μεθόδων στο ίδιο πλεγματικό πεδίο.

Στην πράξη, οι μετρήσεις αντιπροσωπεύουν ένα πεπερασμένο πλήθος σημείων, η κατανομή των οποίων στο χώρο δεν έχει κατ' ανάγκη τη συμμετρία ενός κανονικού πλέγματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις το δίκτυο των σημείων δειγματοληψίας είναι ανομοιογενές (άτακτο πλέγμα και εξωπλεγματική κατανομή).

Η έννοια του τυχαίου πεδίου διέπεται από τις έννοιες της τυχειότητας και της αλληλεξάρτησης των φυσικών μεγεθών που απλώνονται στον χώρο. **Τυχειότητα** είναι η κατάσταση κατά την οποία η γνώση ενός φυσικού μεγέθους δεν μπορεί να προσδιοριστεί με απόλυτη ακρίβεια λόγω ορισμένων περιορισμών που αφορούν την παράλληλη μεταβολή άλλων φυσικών μεγεθών στο χώρο καθώς και τον περιορισμένο αριθμό δείγματος. **Χωρική εξάρτηση** είναι το ιδιαίτερο γνώρισμα των τυχαίων πεδίων που δίνει τη δυνατότητα της εξάρτησης των τιμών του πεδίου σε διαφορετικά σημεία, μεταξύ τους.

Η κατανομή πιθανότητας ενός τυχαίου πεδίου δίνει τη δυνατότητα αλληλεξάρτησης μίας τιμής από τα γειτονικά σημεία του πλέγματος [50].

Σημαντικό χαρακτηριστικό των τυχαίων πεδίων αποτελεί η **χωρική εξάρτηση**. Δύο από τους συχνότερους τρόπους προσδιορισμού της είναι το ημιβαριόγραμμα και η συνάρτηση συσχέτισης. Στόχος είναι η περιγραφή της εξάρτησης δύο σημείων στο χώρο, με την στατιστική έννοια, καθώς και οι δύο συναρτήσεις

αναφέρονται σε ζεύγη σημείων, συνεπώς η τιμή τους εξαρτάται από την παράμετρο της απόστασης των σημείων. Ο όρος στατιστική έννοια, περιγράφει τη φύση της εξάρτησης, η οποία προκύπτει ως μία μέση τιμή όλων των ζευγών που λαμβάνονται υπόψιν. [50] Στη συγκεκριμένη εργασία, θα χρησιμοποιηθούν ημιβαριογράμματα (semivariogram) για τον προσδιορισμό της χωρικής εξάρτησης.

#### ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ KRIGING

Οι μέθοδοι της γεωστατιστικής ανάλυσης στηρίζονται σε διεργασίες αυτοσυσχέτισης των δεδομένων. Συγκεκριμένα η μέθοδος Kriging βασίζεται αρχικά στην εκτίμηση του βαριογράμματος και των συναρτήσεων συμμεταβλητότητας των στατιστικά εξαρτώμενων τιμών και στη συνέχεια στην πρόβλεψη των τιμών στα σημεία που δεν έχει γίνει δειγματοληψία με χρήση των τεχνικών παλινδρόμησης [47].

**To Kriging** είναι μία προηγμένη γεωστατιστική διαδικασία που παράγει κατ' εκτίμηση μία επιφάνεια με βάση διάσπαρτες τιμές πάνω σε ένα ορισμένο χωρίο. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους παρεμβολής, η μέθοδος αυτή δημιουργεί ένα περιβάλλον με βάση τις τιμές που εισάγονται ώστε να αποτυπωθεί η χωρική τους συμπεριφορά δίνοντας την ευκαιρία στο χρήστη να επιλέξει την καλύτερη μέθοδο εκτίμησης για τη δημιουργία της επιφάνειας εξόδου. Βασίζεται σε στατιστικά μοντέλα που περιλαμβάνουν την συσχέτιση των σημείων όπου υπάρχουν μετρήσεις. Εξαιτίας αυτού, έχει τη δυνατότητα να παρέχει κάποιο μέτρο βεβαιότητας και ακρίβεια στις προβλέψεις. Η μέθοδος Kriging υποθέτει ότι η απόσταση μεταξύ των σημείων του δείγματος αντανακλά μία χωρική συσχέτιση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγήσει τη μεταβολή των παρεμβαλλόμενων προβλεπόμενων τιμών, ενισχυόμενη από το γεγονός ότι τα γειτονικά σημεία που θα επιλεγούν καθορίζουν την τιμή εξόδου.

Επίσης, περιλαμβάνει στατιστική ανάλυση των δεδομένων και θεωρείται η πιο κατάλληλη μέθοδος για χωρικά συσχετιζόμενα μεγέθη που αφορούν κυρίως γεωλογικά φαινόμενα [53].

Η εφαρμογή της μεθόδου Kriging εκφράζεται κατά περίπτωση με πέντε υπομεθόδους. Οι μέθοδοι αυτοί εφαρμόζονται κατά περίπτωση. Για παράδειγμα **το απλό Kriging** (Simple Kriging) εφαρμόζεται όταν η μέση τιμή του πεδίου είναι σταθερή και γνωστή σε όλη την περιοχή  $\Omega$ , δηλαδή  $m_X(s)=m_X$ , όπου  $m_X$  μία γνωστή σταθερά. **Το κανονικό Kriging** (Ordinary Kriging) εφαρμόζεται όταν η μέση τιμή του πεδίου θεωρείται σταθερή στη γειτονιά  $\omega(u)$  του σημείου εκτίμησης, αλλά η τιμή της  $m_X(s)$  μπορεί να μεταβάλλεται από γειτονιά σε γειτονιά. Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι το  $m_X(u)$  είναι άγνωστο. Μία Τρίτη υποκατηγορία είναι **το Καθολικό Kriging** με πρότυπο τοπικής τάσης (Universal Kriging), το οποίο εφαρμόζεται όταν η μέση τιμή του πεδίου μεταβάλλεται εντός της γειτονιάς του σημείου εκτίμησης. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ως πρότυπο τάσης ένας γραμμικός συνδυασμός γνωστών συναρτήσεων (π.χ., περιοδικών συναρτήσεων και πολυωνύμων). **To Kriging δεικτών (Indicator Kriging)** χρησιμοποιείται αν η συνάρτηση κατανομής είναι έντονα ασύμμετρη με σημαντική πυκνότητα πιθανότητας στις υψηλές τιμές. Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί το κανονικό (ή ακόμα και το λογαριθμοκανονικό) πρότυπο πιθανότητας. Το Kriging δεικτών υπολογίζει την πιθανότητα η τοπική τιμή να υπερβαίνει ένα καθορισμένο όριο.



Επανάληψη της διαδικασίας για πολλαπλές τιμές του ορίου (multiple indicator Kriging) επιτρέπει την εκτίμηση της αθροιστικής κατανομής πιθανότητας. Τέλος,, το συνδυαστικό Kriging (Cokriging): Χρησιμοποιείται προκειμένου να συμπεριληφθούν στην διαδικασία εκτίμησης ιδιότητες συσχετισμένες με τις εκτιμώμενες μεταβλητές. Επομένως, οι εξισώσεις του συνδυαστικού Kriging περιλαμβάνουν και την διασταυρωμένη συνάρτηση συμμεταβολής των μεταβλητών [54].

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται η μέθοδος κανονικού και συνδυαστικού Kriging και υλοποιείται μέσω του λογισμικού πακέτου ArcMap 10.2

Οι εκτιμήσεις που βασίζονται στην μέθοδο Kriging ανεξαρτήτως του είδους τους ακολουθούν την παρακάτω εξίσωση:

$$\hat{Z}(s_0) - m = \sum_{i=1}^N \lambda_i [Z(s_i) - m(s_0)] \quad [4]$$

όπου:

$Z(s_i)$ : η μετρούμενη τιμή στην θέση  $i$

$\lambda_i$ : ένα άγνωστο βάρος- σημαντικότητας για την μετρούμενη τιμή στη θέση  $i$

$s_0$ : η θέση στην οποία γίνεται η πρόβλεψη.

$N$ : ο αριθμός των σημείων για τις οποίες υπάρχει μέτρηση

$m$ : ένας γνωστός στατικός μέσος, σταθερός για ολόκληρο τον τομέα ο οποίος υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των δεδομένων.

$m(s_0)$ : ο μέσος όρος των γειτονικών σημείων που έχουν οριστεί από τον εκάστοτε χρήστη της μεθόδου

Τα βάρη  $\lambda_i$  στη διαδικασία Kriging προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση, αν θεωρήσουμε έναν τετραγωνικό πίνακα  $(N_0+1) \times (N_0+1)$ .

$$\sum_{i=1}^{s_i \in s_0} \lambda_i \gamma_z(s_i, s_j) + \mu = \gamma_z(s_j, s_0), \quad j = 1, \dots, N_0 \quad [5]$$

$$\sum_{i=1}^{s_i \in s_0} \lambda_i = 1 \quad [6]$$

όπου:

$N_0$ : ο αριθμός των σημείων μέσα στην περιοχή μελέτης (γειτονιά)



$\gamma_z(s_i, s_j)$ : η τιμή ημιμεταβλητότητας μεταξύ δύο σημείων δειγματοληψίας

$\gamma_z(s_j, s_0)$ : η τιμή ημιμεταβλητότητας μεταξύ του σημείου δειγματοληψίας και του εκτιμώμενου σημείου πρόβλεψης

$\mu$ : ο συντελεστής Lagrange για την συνθήκη αμεροληψίας

Η μέθοδος Kriging έχει τη δυνατότητα εκτίμησης της διακύμανσης του σφάλματος (σχετική αβεβαιότητα). Για τη μέθοδο του απλού Kriging ο δείκτης αυτός εξαρτάται από το μοντέλο ημιμεταβλητότητας, καθώς και τις αποστάσεις μεταξύ των τιμών [50].

Σε άλλες παρόμοιες μεθόδους (inverse distance weighted) η τιμή  $\lambda_i$  εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση μεταξύ των σημείων πρόβλεψης και μέτρησης. Στη μέθοδο Kriging τα βάρη βασίζονται όχι μόνο στην απόσταση αυτή, αλλά και στη χωρική διάταξη των υπόλοιπων σημείων μέτρησης εκτός από τις τιμές τους. Η τιμή αυτή είναι προσαρμοσμένη στο μοντέλο και ποσοτικοποιείται αυτομάτως, ανάλογα με τις επιλογές συσχέτισης του χρήστη [55].

Η εκτιμώμενη διακύμανση ορίζεται από την εξίσωση:

$$\sigma_E^2 = E \left[ \{Z(s_0) - \hat{Z}(s_0)\}^2 \right] \quad [7]$$

Και δίνεται από την επόμενη εξίσωση, όπου ο συντελεστής Lagrange αντισταθμίζει την αβεβαιότητα της μέσης τιμής.

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα εκτίμησης δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_E^2(s_0) = \sum_{i \in S_0} \lambda_i \gamma_z(s_i, s_0) + \mu \quad [8]$$

Ουσιαστικά, η διακύμανση έχει οριστεί ως σταθμισμένος μέσος όρος του ημιβαριογράμματος από το εκτιμώμενο σημείο  $s_0$  έως όλα τα σημεία αναφοράς  $s_j$ , προσθέτοντας και τον πολλαπλασιαστή Lagrange. [50].

Η μέθοδος **CoKriging** χρησιμοποιεί πληροφορίες από διάφορους τύπους μεταβλητών. Η κύρια μεταβλητή που μας ενδιαφέρει είναι η  $Z_1$ , και όλοι οι άλλοι τύποι μεταβλητών χρησιμοποιούνται για να κάνουν καλύτερες προβλέψεις. Οι δευτερεύουσες τιμές επηρεάζουν τις μεταβλητές  $Z_1$ , χωρίς να εμφανίζονται στα αποτελέσματα.

Η αρχή λειτουργίας της εντολής εξηγείται καλύτερα με τις εξής εξισώσεις:

$$Z_1(s) = \mu_1 + \varepsilon_1(s)$$

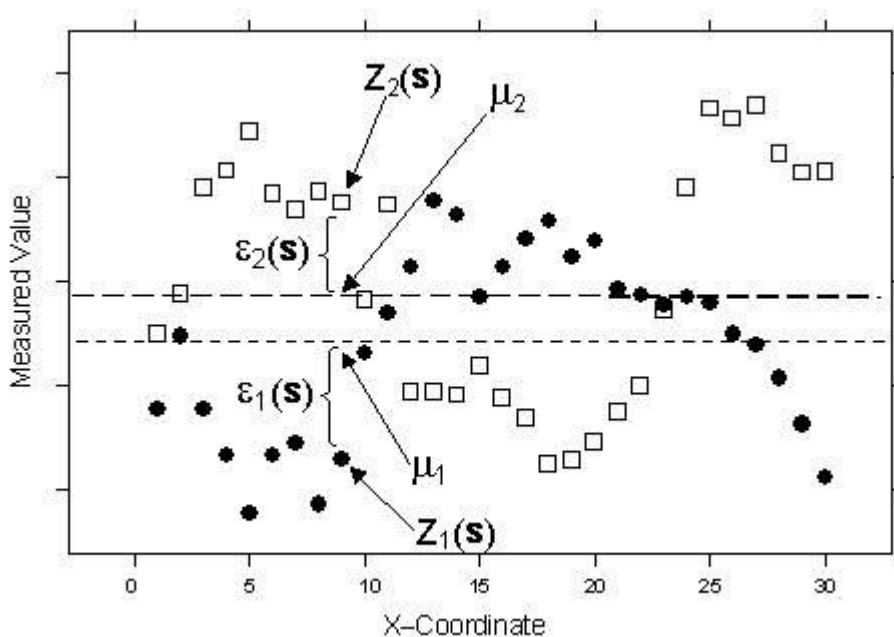
$$Z_2(s) = \mu_2 + \varepsilon_2(s)$$

όπου:

$\mu_1$  και  $\mu_2$ : άγνωστες σταθερές

$\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$ : τυχαία σφάλματα

οπότε για τις τιμές δεν υπάρχει καμία συσχέτιση. Η τακτική CoKriging προσπαθεί να προβλέψει την μεταβλητή  $Z_1(s_0)$  ακριβώς όπως τη μέθοδο kriging αλλά χρησιμοποιεί την συ-μεταβλητή  $Z_2(s)$  σε μία προσπάθεια να εξαχθούν καλύτερα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η ακόλουθη εικόνα έχει τα ίδια δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την απλή μέθοδο kriging, μόνο που εδώ προστίθεται η δεύτερη μεταβλητή.



Εικόνα 15: Επεξηγηματικό διάγραμμα λειτουργίας CoKriging

Στο εν λόγω παράδειγμα, για κάθε τοποθεσία  $s$  έχει τόσο  $Z_1(s)$  όσο και  $Z_2(s)$ . Τα δεδομένα που αποτυπώνονται στο διάγραμμα (Εικόνα 15) είναι αυτοσυσχετισμένα. Η κύρια μεταβλητή που μας ενδιαφέρει είναι  $Z_1$ , και οι δύο αυτοσυσχετίσης και αλληλοσυσχετίση χρησιμοποιούνται για να κάνουν καλύτερες προβλέψεις[53].

---

## 2.6 ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Τα σφάλματα υπολογίστηκαν για κάθε έναν από τους εμφανιζόμενους χάρτες για το σημαντικό ύψος κύματος και την ισχύ.

Η ακρίβεια του μοντέλου αξιολογήθηκε μέσω μιας σειράς στατιστικών μέτρων για την εκτίμηση της απόδοσης. Δύο κοινές στατιστικές παράμετροι για παρόμοιες προσεγγίσεις μοντελοποίησης είναι το μέσο σφάλμα τετραγώνου πρόβλεψης (MSPE) και το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE).

Μέσο σφάλμα τετραγώνου πρόβλεψης (mean square prediction error):

$$MSPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [H(t) - \tilde{H}(t)]^2 \quad [9]$$

Μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |H(t) - \tilde{H}(t)| \quad [10]$$

Όπου:

$H(t)$ : η προβλεπόμενη μέτρηση (predicted value)

$\tilde{H}(t)$ : η τιμή παρατήρησης (observed value)

$N$ : το μήκος της χρονοσειράς (length of time series)

Ο τροποποιημένος δείκτης συμφωνίας είναι ένας αδιάστατος δείκτης ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 έως 1. Εκφράζει τη συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων και παρατηρούμενων τιμών με βέλτιστη τιμή συμφωνίας το 1.

$$IoA' = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N |\tilde{H}(t) - H(t)|}{\sum_{t=1}^N (|H(t) - \bar{H}(t)| + |\tilde{H}(t) - \bar{H}(t)|)} \quad [11]$$

Οι δείκτες αυτοί εφαρμόζονται παρακάτω με σκοπό να ελεγχθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και κατ' επέκταση των απεικονίσεων. [56]

---

## 2.7 ΔΙΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΩΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι μέθοδοι Διερευνητικής Ανάλυσης Χωρικών Δεδομένων (Exploratory Spatial Data Analysis–ESDA) επιτρέπουν την κατανόηση της χωρικής κατανομής, της χωρικής δομής και την ανίχνευση χωρικής εξάρτησης ή αυτοσυσχέτισης στα χωρικά δεδομένα. [49]

Οι μέθοδοι ESDA στο ArcGIS 10.2 αποτελούν μέρος της εργαλειοθήκης Geostatistical Analyst. Μέσω αυτής παρέχεται η δυνατότητα προσδιορισμού της τάσης των δεδομένων, κατανόησης της χωρικής αυτοσυσχέτισης και της κατανομής των δεδομένων.

Για να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι μέσω της εντολής Explore Data δημιουργούνται:

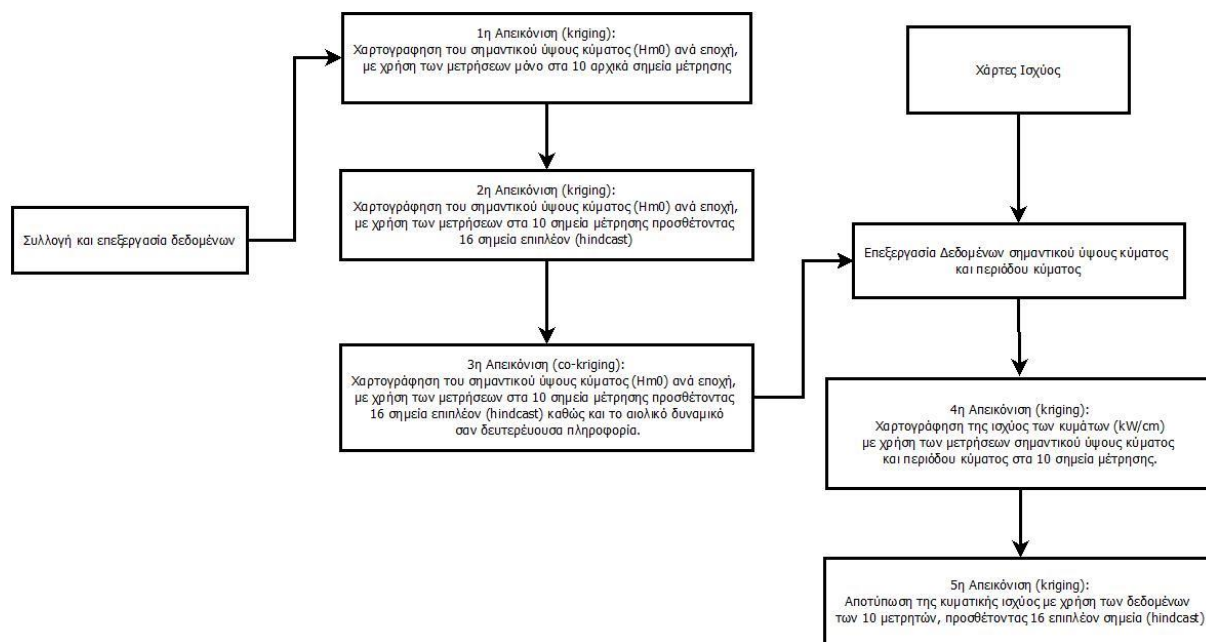
- Ιστόγραμμα(Histogram)
- Κανονικά και γενικά διαγράμματα ποσοστιαίων σημείων (Normal & General Q-Q Plots)
- Ανάλυση Τάσης (Trend Analysis)
- Χάρτες Voronoi (Voronoi Map)
- Νέφος ημιβαριογράμματος/συμμεταβλητότητας (Semivariogram/Covariance Cloud) [57]

Στην εργασία αυτή, για να γίνει αντιληπτή τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά η διαφορά μεταξύ των προβλεπόμενων και μετρούμενων τιμών, παρατίθενται τα διαγράμματα Q-Q plot καθώς και παρατηρούμενων και μετρούμενων τιμών παράλληλα ώστε συγκρίνοντας τις γραμμές τάσης, να γίνει μία ποιοτική απεικόνιση των διαφορών και των αποκλίσεων των τιμών παρατήρησης και την πρόβλεψη του μοντέλου.

Η γραφική παράσταση Q-Q plot είναι ουσιαστικά ένας τρόπος σύγκρισης της κατανομής των δεδομένων με μία τυπική κανονική κατανομή, η οποία παρέχει ένα άλλο μέτρο της κανονικότητας των δεδομένων. Όσο πιο κοντά είναι τα σημεία στην ευθεία γραμμή (1:1) τόσο πιο κοντά το δείγμα ακολουθεί μία κανονική κατανομή.[57]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΑΡΤΩΝ



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα μεθοδολογίας για την παραγωγή χαρτών

Στο Διάγραμμα 2 εμφανίζεται συνοπτικά η πορεία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία των τελικών χαρτών και στη συνέχεια αναλύονται τα βήματα για την επίτευξη των στόχων που θέτονται στο διάγραμμα.

Το διάγραμμα δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα DIA software, το οποίο είναι κατάλληλο για την παραγωγή διαγραμμάτων ροής.

#### 3.1 ΈΡΕΥΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων του “ΠΟΣΕΙΔΩΝ”. Η επιλογή των σταθμών μέτρησης έγινε με βάση τα έτη που βρέθηκαν μετρήσεις για το σημαντικό ύψος κύματος ( $H_{m0}$ ) για κάθε σταθμό. Επιλέχθηκαν οι σταθμοί με τις μεγαλύτερες χρονοσειρές, τα πιο πρόσφατα στοιχεία και αυτοί που θα μπορούσαν να καλύψουν πλήρως το χωρικό εύρος μελέτης. Επίσης, για κάθε σταθμό συλλέχθηκαν

δεδομένα της περιόδου του κύματος για να διεξαχθεί μελέτη του κυματικού δυναμικού της θαλάσσιας περιοχής.

Οι δορυφορικές εικόνες δεν προτιμήθηκαν καθώς τα στιγμιότυπα δεν ήταν αρκετά για να καλύψουν της ανάγκες της έρευνας.

Επιπλέον στοιχεία που συλλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων του geodata.gov αφορούν την ακτογραμμή(coastline) της Ελλάδας (ηπειρωτικής και νησιωτικής) και το σχηματικό αρχείο(shape file) της ΕΕ και της Ασίας.

### 3.2 ΕΠΕΞΕΓΑΣΙΑ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

#### ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

Δημιουργήθηκε ένας πίνακας (Πίνακας 1) με τις χρονικές περιόδους που λειτουργούσαν όλοι οι μετρητές από το 1999 έως το έτος 2012. Για τη διευκόλυνση της χωρικής ανάλυσης, στον πίνακα που ακολουθεί τοποθετήθηκαν ορισμένοι μετρητές μαζί. Η ομαδοποίηση αυτή προέκυψε λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των σταθμών μέτρησης του ύψους κύματος για διαφορετικές περιόδους αλλά παράλληλα με βασικό κριτήριο την αλληλοσυμπλήρωση των χρονοσειρών τους. Με την ομαδοποίηση τους επιτεύχθηκε διεύρυνση του χρονικού εύρους μελέτης καθώς δεν υπήρχαν αρκετοί μετρητές με συνεχόμενες περιόδους μέτρησης. Οι μετρήσεις που αφορούν το σημαντικό ύψος κύματος καθώς και την περίοδο κύματος αφορούν 14 έτη, από το 1999 έως και το 2012.

| b/Y                                 | '99 | '00 | '01 | '02 | '03 | '04 | '05 | '06 | '07 | '08 | '09 | '10 | '11 | '12 | Active<br>/year |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|
| Ath04a-<br>Flisvos2004-<br>Ath2004a |     |     |     |     | √   | √   |     |     |     |     |     |     |     |     | 2/14            |
| Ath04b-<br>Glyfada-<br>Ath2004b     | √   | √   |     |     | √   | √   |     |     |     |     |     |     |     |     | 4/14            |
| Athos                               |     |     | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | 12/14           |
| Ath04c-<br>Glyfada04-<br>Ath2004c   |     |     | √   | √   | √   | √   |     |     |     |     |     |     |     |     | 4/14            |
| Petrokaravo                         |     |     |     |     |     |     |     |     | √   | √   | √   | √   | √   | √   | 6/14            |
| Avgo-<br>E1M3A                      |     | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   | √   |     | 12/14           |



**ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.**

|                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |       |
|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|
| Dia             | ✓ | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 2/14  |
| Kafireas        |   | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 1/14  |
| Katerini        |   |   | ✓ | ✓ | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 3/14  |
| Lesvos          | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 14/14 |
| Mykonos         | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 14/14 |
| Rhodos          | ✓ | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 2/14  |
| Santorini       | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 14/14 |
| Skyathos        | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 1/14  |
| Kalamata        | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |   | 13/14 |
| Skyros          |   |   |   |   |   |   |   |   | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 6/14  |
| Strofades-Pylos |   |   |   |   |   |   |   |   | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 6/14  |
| Syros           | ✓ | ✓ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 2/14  |
| Zakynthos       |   |   |   |   |   |   |   |   | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 6/14  |
|                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |       |

**Πίνακας 1: Ανάλυση χρονοσειρών**

Από τον Πίνακα 1 προκύπτουν 6 σταθμοί με μεγάλες χρονοσειρές εκ των οποίων όλες είναι συνεχόμενες χρονικά και 4 επιπλέον σταθμοί οι οποίοι έχουν λιγότερα έτη μετρήσεων αλλά βρίσκονται αρκετά κοντά στο έτος που πραγματοποιείται η έρευνα αυτή. Επίσης έχουμε την τύχη οι σταθμοί να είναι ισόχωρα τοποθετημένοι στην επιφάνεια της Ελλάδας. Όπως φαίνεται από τον πίνακα τα κοινά έτη μετρήσεων είναι από το 2007 έως και το 2011, δηλαδή 5 έτη παρατήρησης.

### ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Επιλέχθηκαν 10 σταθμοί μέτρησης (Athos, Petrokaravo, E1M3A, Lesvos, Mykonos, Santorini, Kalamata, Skyros, Pylos, Zakynthos) ορισμένες από τις μετρήσεις των ομαδοποιημένων στοιχείων απορρίφθηκαν καθώς δεν συμπεριλαμβάνονταν στα έτη προτίμησης. Έτσι, οι ομαδοποιημένοι σταθμοί δεν χρησιμοποιήθηκαν. Τα δεδομένα αφορούν το ύψος κύματος μεμονωμένων σταθμών μέτρησης καθώς και την περίοδο των κυμάτων. Οι χρονοσειρές δημιουργήθηκαν μέσω δειγματοληψίας ανά 3 ώρες για κάθε έναν από τους σταθμούς που αναφέρονται. Ορισμένες περιόδους έχουν αφαιρεθεί λόγω μη αποδεκτών τιμών δειγματοληψίας (αρνητικές τιμές, πολύ μεγάλες τιμές, τιμές που προκύπτουν από σφάλμα του μετρητή)

### ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ- ΕΠΟΧΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Ο εποχιακός μέσος όρος προέκυψε, για κάθε έναν από τους σταθμούς μέτρησης, για τη δημιουργία των χαρτών σημαντικού ύψους κύματος. Πιο αναλυτικά, χωρίστηκαν οι χρονοσειρές ανά εποχή και

υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων που είχαν εξαχθεί μέσω της βάσης δεδομένων του «ΠΟΣΕΙΔΩΝ», εφόσον αφαιρέθηκαν οι μετρήσεις που ήταν εμφανές ότι αντιστοιχούσαν σε σφάλμα του μετρητή. Ομοίως εξήχθησαν δεδομένα για την περίοδο των κυμάτων, ώστε να υπολογιστεί στη συνέχεια η ισχύς.

Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε μέσω των υπολογιστικών φύλλων του Microsoft Excel 2013, χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα για την εξαγωγή των εσφαλμένων τιμών καθώς και οι αντίστοιχες συναρτήσεις για τον υπολογισμό του μέσου όρου σημαντικού ύψους κύματος ανά εποχή.

Οι εποχές ορίζονται ημερολογιακά ως εξής:

Χειμώνας: 1 Δεκεμβρίου - τέλος Φεβρουαρίου

Ανοιξη: 1 Μαρτίου - τέλος Μαΐου

Καλοκαίρι: 1 Ιουνίου – τέλος Αυγούστου

Φθινόπωρο: 1 Σεπτεμβρίου – τέλος Νοεμβρίου

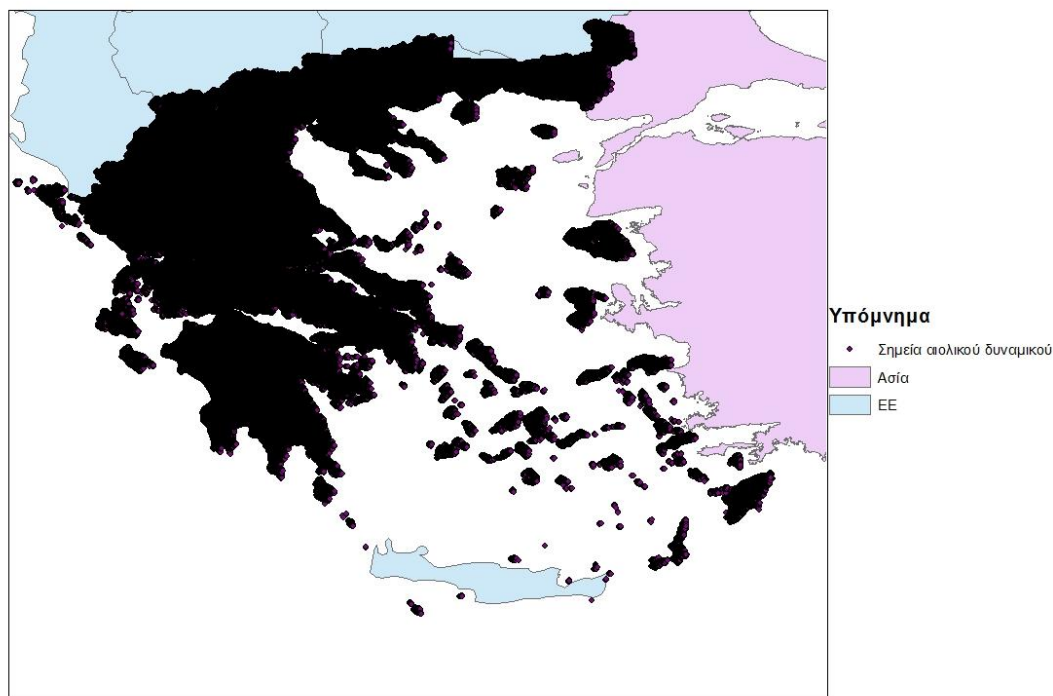
Σε ορισμένες περιπτώσεις οι ημέρες που αντιστοιχούσαν σε κάθε μήνα ήταν αρκετά περιορισμένες λόγω των τιμών που είχαν αφαιρεθεί. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως σε σταθμούς που δεν είχαν αρκετά χρόνια λειτουργίας πριν το 2007 και κυρίως στις πρώτες μετρήσεις που είχαν αποθηκευτεί στη βάση δεδομένων του «ΠΟΣΕΙΔΩΝ».

---

### 3.3 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ

Ως δευτερεύουσα πληροφορία έχουν εισαχθεί δεδομένα αιολικού δυναμικού. Τα δεδομένα αυτά αφορούν την ηπειρωτική Ελλάδα και αφορούν την αιολική ισχύ στη στεριά και στα παράλια (ακτογραμμή). Τα στοιχεία συλλέχθηκαν σε μορφή shapefile από τη βάση δεδομένων του geodata.gov. και τοποθετήθηκαν στον χάρτη πρόβλεψης του σημαντικού ύψους κύματος. Τα στοιχεία του αιολικού δυναμικού αφορούν σημειακές μετρήσεις.

Στον επόμενο χάρτη φαίνονται τα σημεία που καλύπτουν την ηπειρώτική Ελλάδα και τα νησιά και αφορούν το αιολικό δυναμικό. (Χάρτης 2)



Χάρτης 2: Σύνολο σημείων μέτρησης αιολικού δυναμικού

Η δευτερεύουσα αυτή πληροφορία έχει εισαχθεί καθώς το αιολικό δυναμικό επηρεάζει άμεσα την ένταση και την περίοδο των κυμάτων.

Η περιοχή της Κρήτης αποτελεί εξαίρεση αυτής της διαδικασίας. Δεν υπάρχουν για την έκταση του νησιού ψηφιοποιημένα δεδομένα αιολικού δυναμικού. Παρόλα αυτά, οι περιοχές περιμετρικά του νησιού της Κρήτης περιέχουν δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται στη διαδικασία CoKriging και επηρεάζουν το αποτέλεσμα.

### 3.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΩΤΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει καθιερωθεί η γεωστατιστική μεθοδολογία για την αντιμετώπιση ενός μεγάλου εύρους προβλημάτων χωρικής παρεμβολής και εκτίμησης περιβαλλοντικών δεδομένων. Η γεωστατιστική ανάλυση, αφορά την χωρική μεταβλητότητα των δεδομένων. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των χωροχρονικών δεδομένων σε σχέση με τα χωρικά είναι η αύξηση της διαθέσιμης πληροφορίας για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου και της τελικής εκτίμησης.

**Το Kriging** είναι μία προηγμένη γεωστατιστική διαδικασία που παράγει κατ' εκτίμηση μία επιφάνεια με βάση διάσπαρτες τιμές πάνω σε ένα ορισμένο χωρίο. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους παρεμβολής, η μέθοδος αυτή δημιουργεί ένα περιβάλλον με βάση τις τιμές που εισάγονται ώστε να αποτυπωθεί η χωρική τους συμπεριφορά δίνοντας την ευκαιρία στο χρήστη να επιλέξει την καλύτερη μέθοδο εκτίμησης για τη δημιουργία της επιφάνειας εξόδου. Βασίζεται σε στατιστικά μοντέλα που περιλαμβάνουν την συσχέτιση των σημείων όπου υπάρχουν μετρήσεις. Εξαιτίας αυτού, έχει τη δυνατότητα να παρέχει κάποιο μέτρο βεβαιότητας και ακρίβεια στις προβλέψεις.

Αρχικά δημιουργήθηκαν χάρτες με απλό kriging για την απεικόνιση του σημαντικού ύψους κύματος (Πίνακας 2). Η ποιότητα τους δεν ήταν επαρκής, συνεπώς έπρεπε να δημιουργηθεί μία νέα βάση δεδομένων η οποία να συσχετίζει το σημαντικό ύψος κύματος με κάποιο εξίσου σχετικό με τον κυματισμό στοιχείο. Γι αυτόν τον σκοπό, χρησιμοποιήθηκε η αιολική ισχύς, καθώς η ένταση των ανέμων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον σχηματισμό των κυμάτων. Για την εισαγωγή της δευτερεύουσας πληροφορίας δημιουργήθηκαν χάρτες με τη μέθοδο CoKriging.

### 3.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΝΕΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ (HINDCAST)

Εφόσον η δευτερεύουσα πληροφορία αφορά την ηπειρωτική Ελλάδα και τα δεδομένα για το σημαντικό ύψος κύματος αφορούν μόνο τον θαλάσσιο Ελλαδικό χώρο, έχουν εισαχθεί δεδομένα σε ορισμένα σημεία ώστε να οριστεί η τιμή του σημαντικού ύψους κύματος στην ακτή. Να οριοθετηθεί δηλαδή η ακτή ως σημείο έναρξης, σημείο με σημαντικό ύψος κύματος 0. Τα hindcast έχουν θεωρηθεί με τη βοήθεια δεδομένων σύμφωνα με τους χάρτες που έχουν δημιουργηθεί από τον ΕΛΚΕΘΕ. Ουσιαστικά δεν ταυτίστηκαν οι μετρήσεις με αυτές των χαρτών της αρμόδιας αρχής. Συμπληρώθηκαν τα σημεία με μετρήσεις σχετικές με αντίστοιχα σημεία πάνω στο χάρτη που είχε δημιουργήσει αρχικά, με απλό kriging. Οι πρώιμη απεικόνιση εδώ αποκτά ιδιαίτερο νόημα για τον προσδιορισμό των σημείων που δεν είχαμε αξιόλογες μετρήσεις. Τα δεδομένα που συμπληρώθηκαν, εκτός των μηδενικών, θεωρήθηκαν συγκρίνοντας τα σημεία στα οποία δεν υπήρχαν μετρήσεις, με σημεία που ταυτίζονται με αυτά στα οποία υπήρχε σταθμός μέτρησης.

Για να χρησιμοποιηθεί η πληροφορία των χαρτών του ΕΛΚΕΘΕ αρχικά συγκρίθηκαν οι τιμές κάθε σημείου, με το αντίστοιχο σημείο πρόβλεψης στον αντίστοιχο χάρτη του ΕΛΚΕΘΕ.

|             | Εποχές    |         |          |         |           |         |        |          |
|-------------|-----------|---------|----------|---------|-----------|---------|--------|----------|
|             | Καλοκαίρι |         | Χειμώνας |         | Φθινόπωρο |         | Άνοιξη |          |
| Σταθμοί     | Μετρ.     | ΕΛΚΕΘΕ. | Μετρ.    | ΕΛΚΕΘΕ. | Μετρ.     | ΕΛΚΕΘΕ  | Μετρ.  | ΕΛΚΕΘΕ   |
| Athos       | 0,42      | 0,3-0,4 | 1,2      | 1-1,1   | 0,86      | 0,6-0,7 | 0,75   | 0,6-0,7  |
| E1M3A       | 0,77      | 0,7-0,8 | 1,22     | 1,1-1,2 | 0,86      | 0,8-0,9 | 0,93   | 0,9-1,00 |
| Petrokaravo | 0,41      | 0,3     | 0,63     | 0,3-0,6 | 0,52      | 0,3-0,4 | 0,45   | 0,4-0,3  |
| Pylos       | 0,64      | 0,6-0,7 | 1,42     | 1,3-1,4 | 0,84      | 0,8-0,9 | 0,93   | 0,9-1,00 |
| Lesvos      | 0,57      | 0,5-0,7 | 1,05     | 1-1,1   | 0,75      | 0,7-0,8 | 0,75   | 0,7-0,8  |

|           |      |          |      |           |      |          |      |         |
|-----------|------|----------|------|-----------|------|----------|------|---------|
| Mykonos   | 0,95 | 0,9-1,00 | 1,1  | 1,3       | 1,02 | 0,9-1,00 | 0,89 | 0,9     |
| Santorini | 0,71 | 0,7      | 1,11 | 0,9-1,00  | 0,81 | 0,6-0,7  | 0,88 | 0,7-0,8 |
| Kalamata  | 0,22 | 0,2-0,3  | 0,49 | 0,4-0,5   | 0,32 | 0,2-0,4  | 0,35 | 0,3-0,4 |
| Skyros    | 0,56 | 0,4-0,5  | 1,16 | 1,00-1,10 | 0,89 | 0,7-0,8  | 0,8  | 0,6-0,7 |
| Zakynthos | 0,56 | 0,5-0,6  | 1,22 | 1,1-1,2   | 0,86 | 0,7-0,8  | 0,76 | 0,6-0,7 |

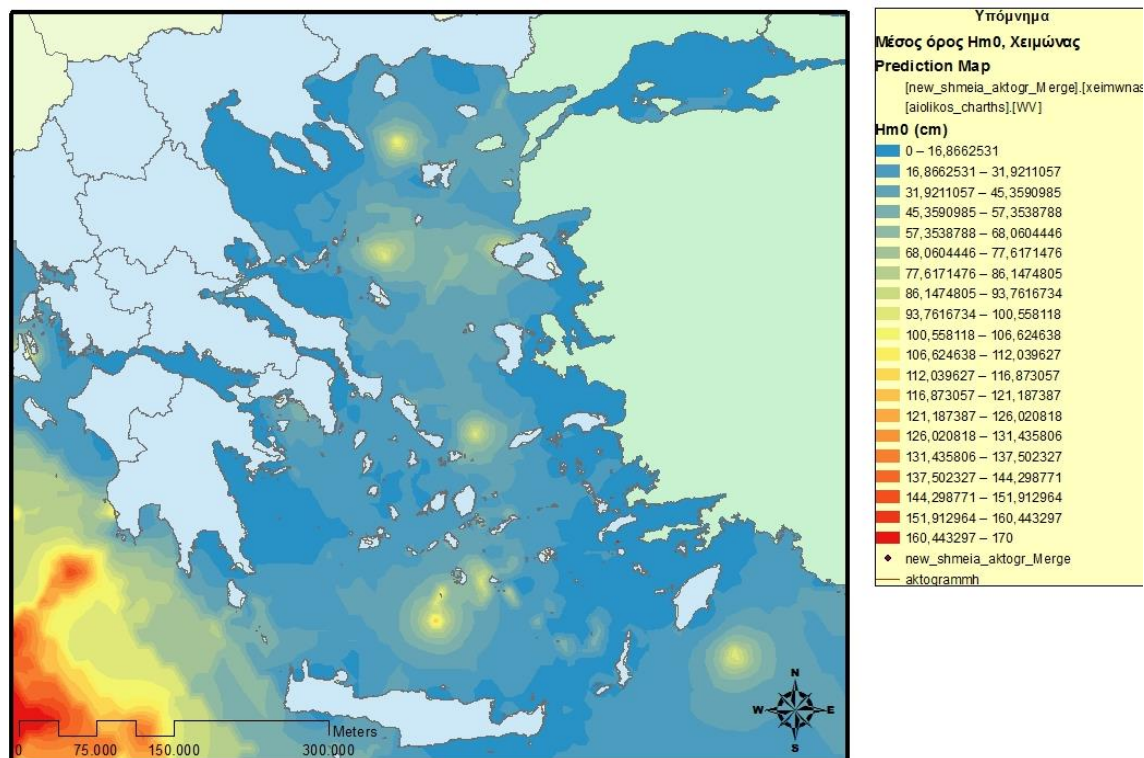
Πίνακας 2: Σύγκριση των τιμών του ΕΛΚΕΘΕ με τις τιμές στα σημεία δειγματοληψίας

Από τον Πίνακα 2 προκύπτει ότι τα σημεία δειγματοληψίας βρίσκονται συχνά, αρκετά κοντά ή και μέσα στις κλάσεις που έχουν δημιουργηθεί στους Άτλαντες κυμάτων του ΕΛΚΕΘΕ. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές των 15 σημείων που θα προστεθούν αργότερα, έχουν μεγάλες πιθανότητες να συσχετίζονται, όχι πάντα απόλυτα στις τιμές, με τα αντίστοιχα σημεία των χαρτών του Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι χάρτες με τα 10 σημεία δειγματοληψίας και τέλος συμπληρώθηκαν τα επιπλέον 15 σημεία. Εφόσον δεν εμφανίζεται μεγάλη διαφορά στις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος στα σημεία δειγματοληψίας και στις αντίστοιχες κλάσεις των χαρτών της αρμόδιας αρχής, δεν είναι λάθος να θεωρηθούν συγκριτικά τα επιπλέον σημεία που επιλέγονται.

Τέλος, δημιουργείται μία βάση δεδομένων η οποία αποτελείται από τα 10 αρχικά σημεία μετρήσεων, 13 σημεία αρκετά κοντά στην ακτή και 2 σε μεγάλη απόσταση από αυτήν. Τα σημεία που προστίθενται έχουν ως σκοπό να οριοθετήσουν την περιοχή της στεριάς (μηδενικά σημεία), να ορίσουν κάποια μέγιστα και ελάχιστα σημεία για τα οποία δεν υπάρχουν μετρήσεις και κοντινοί σταθμοί, καθώς και για να ομαλοποιηθούν οι προβλέψεις.

Κατά τη διαδικασία επιλογής των σημείων έγιναν αρκετές δοκιμές. Μία εξ αυτών ήταν να καλυφθεί όλη η ακτογραμμή με μηδενικά σημεία για να οριστεί πλήρως η στεριά. Έτσι, ψηφιοποιήθηκε όλη η έκταση της ακτογραμμής της Ελλάδας και της Τουρκίας καθώς προστέθηκαν και τα επιπλέον σημεία αρκετά μακριά από την ακτή. Η προσπάθεια αυτή ήταν η πιο επιτυχής εκ των δοκιμών για την επιλογή των 25 σημείων. Εν τέλει, λόγω του έντονου ανάγλυφου της ακτογραμμής, των πολύ κλειστών κόλπων και των πολλών γειτονικών σημείων που βοηθούν στην πρόβλεψη, κατά τη διαδικασία του Kriging, η ποιότητα των ενδιάμεσων αυτών χαρτών αμφισβητείται. Η εικόνα που δίνεται από την παραπάνω διαδικασία υστερεί διαβαθμίσεων. Ένα δείγμα της χαρτογράφησης με τα επιπλέον μηδενικά σημεία κατά μήκος όλης της ακτογραμμής εμφανίζεται στον επόμενο χάρτη. (Χάρτης 3)



**Χάρτης 3:Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για την περίοδο του Χειμώνα, CoKriging με επιπλέον μηδενικά σημεία**

Στο Παράρτημα Α εμφανίζονται συγκεντρωτικά όλοι οι χάρτες που έχουν εξαχθεί από την διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω.

### 3.6 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Όπως σε όλους τους χάρτες που δημιουργήθηκαν για τις ανάγκες της εργασίας, έτσι κι εδώ, εισάγονται τα αρχικά δεδομένα που αφορούν την οριοθέτηση του σημείου μελέτης. Εισάγεται η ακτογραμμή, το σχηματικό αρχείο της Ευρώπης και αυτό της Ασίας. Σε κάθε χάρτη εισάγονται τα 10 σημεία των μετρητών(buoys) και αυτά με τα αρχικά 10 σημεία και τα επιπλέον 16 Hindcast σημεία. Η βάση δεδομένων που έχει δημιουργηθεί για τα σημεία που εισάγονται, ανάλογα με τη σκόπιμα του χάρτη, είναι πλήρως ενημερωμένη με το σημαντικό ύψος κύματος(cm) και την περίοδο του κύματος(s) για κάθε ένα σημείο και κάθε εποχή (Χειμώνας, Άνοιξη, Καλοκαίρι, Φθινόπωρο), καθώς και την υπολογιζόμενη ενεργειακή ισχύ (kW/cm) ομοίως.

Όσον αφορά τη δημιουργία των τελικών χαρτών σημαντικού ύψους κύματος, έχει εισαχθεί η δευτερεύουσα πληροφορία που αφορά το αιολικό δυναμικό για την ηπειρωτική Ελλάδα καθώς και το συμπληρωμένο με



τα hindcast σημεία αρχείο. Τέλος, χρησιμοποιείται η μέθοδος CoKriging ώστε οι τελικοί χάρτες να εμπεριέχουν τη δευτερεύουσα πληροφορία.

### 3.7 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

Για κάθε έναν σταθμό επιλέχθηκαν οι περίοδοι που είχαν καταγραφεί δεδομένα για το σημαντικό ύψος κύματος και την περίοδο των κυμάτων ταυτόχρονα. Οι καταγραφές αρκετές φορές έπαυαν να υπάρχουν, υπήρξε μία ασυνέχεια στις μετρήσεις. Συνεπώς, επιλέχθηκαν με ιδιαίτερη προσοχή οι περίοδοι καταγραφών πριν ξεκινήσει η επεξεργασία. Οι χρονοσειρές που διακόπτονται δεν έχουν συμπληρωθεί με κάποια μέθοδο καθώς αφορούσαν μικρές χρονικές περιόδους και οι υπολογισμοί που αναφέρονται στη συνέχεια έγιναν με βάση τις καταγραφές που κρίθηκε ότι ήταν ορθές. Αρχικά, προσδιορίστηκε ο εποχιακός μέσος όρος για το σημαντικό ύψος κύματος, στη συνέχεια για κάθε καταγραφή η ισχύς και τέλος, ο εποχιακός μέσος όρος της ισχύος για κάθε μετρητή.

### 3.8 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΙΣΧΥ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ

Η βάση δεδομένων που αφορά την εποχιακή ισχύ αφορά μόνο τα σημεία στα οποία υπήρχαν μετρητές. Στη συνέχεια έπρεπε να προσδιοριστεί η ισχύς στα σημεία που είχαν θεωρηθεί για την καλύτερη απεικόνιση του σημαντικού ύψους κύματος. Ακολουθώντας την ίδια μέθοδο με αυτή των hindcast για το σημαντικό ύψος κύματος, συμπληρώθηκαν τα αντίστοιχα σημεία. Δημιουργήθηκαν δύο σενάρια για την επίτευξη της εν λόγω απεικόνισης. Το πρώτο αφορά μόνο τα σημεία για τα οποία υπήρξαν καταγραφές σημαντικού ύψους κύματος και περιόδου κύματος. Το δεύτερο σενάριο αφορά τη διαδικασία συμπλήρωσης των σημείων Hindcast με αντίστοιχη μεθοδολογία αυτής της συμπλήρωσης των σημείων για το σημαντικό ύψος κύματος, δηλαδή κρίνοντας ως αρμόδια και έγκυρη πηγή τους χάρτες του ΕΛΚΕΘΕ, συγκρίθηκαν οι τιμές στα σημεία των μετρητών με σημεία στα οποία δεν υπήρχε δυνατότητα καταγραφής και συμπληρώθηκε η τιμή της ισχύος αναλογικά με τα πρώτα.

Σύμφωνα με την εκτίμηση για την παραγωγή κυματικής ενέργειας που πραγματοποιήθηκε στη μεσόγειο κατά μήκος των Ιταλικών ακτών, για τον υπολογισμό της κυματικής ισχύος χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$J = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2 \quad [12]$$

Όπου:

J: η ροή ενέργειας ή ισχύς ενέργειας των κυμάτων σε W/m μήκους μετώπου κύματος

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ )

$\rho$ : η πυκνότητα του θαλασσινού νερού ( $= 1025 \text{ kg/m}^3$ )

Hs: το σημαντικό ύψος κύματος

Te: η περίοδος κύματος [23]

Στους χάρτες που ακολουθούν εμφανίζονται οι τιμές της κυματικής ισχύος για την περιοχή του Ελλαδικού χώρου. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος kriging με τα αρχικά σημεία των 10 μετρητών και στη συνέχεια η ίδια μέθοδος με 26 σημεία (10 των μετρητών και 16 επιπλέον σημεία που έχουν θεωρηθεί, hindcast). Για να υπάρξει ομοιομορφία στην εξαγωγή των χαρτών, έγιναν οι ίδιες επιλογές στο εύρος και στην κλίμακα των προβλεπόμενων τιμών για κάθε χάρτη.

Σημαντική πληροφορία για την τελική απόφαση χωροθέτησης εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης του κυματικού δυναμικού είναι η αξιολόγηση των σημείων με υψηλή κυματική ισχύ. Οι περιοχές αυτές οφείλουν να έχουν, συνήθως, τα εξής χαρακτηριστικά:

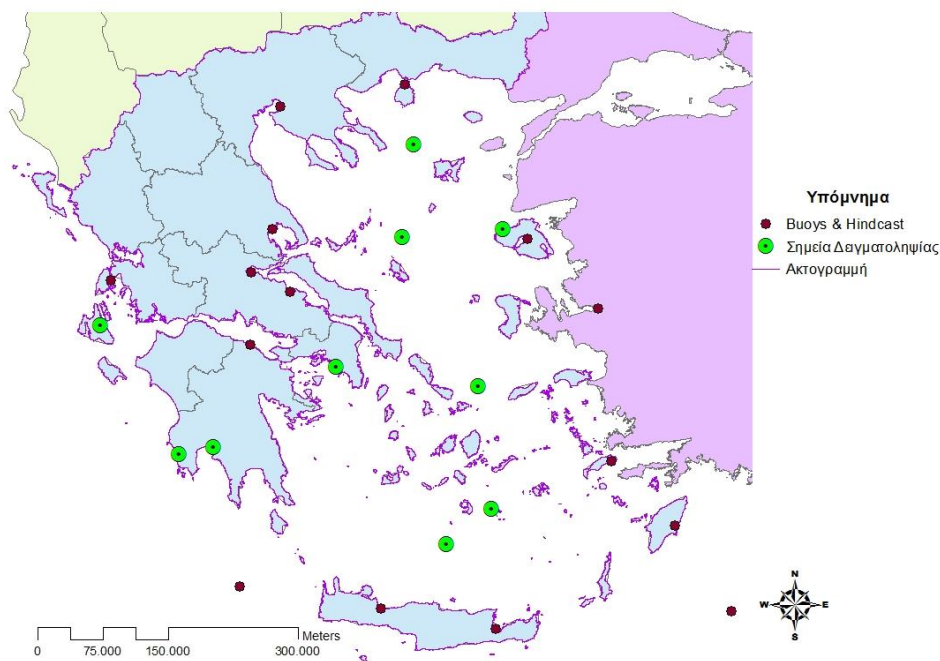
- Σημαντικό ύψος κύματος μεγαλύτερο των 0,9m και περίοδο κύματος 6 seconds[58]
- Μικρές εποχιακές μεταβολές
- Μεταβολές οι οποίες να μην υποεκτιμούν το μέγιστο ύψος κύματος που οφείλει να χαρακτηρίζει την περιοχή εγκατάστασης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 4.1 ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Αρχικά οριοθετείται η περιοχή μελέτης, εισάγονται τα σημεία δειγματοληψίας καθώς και τα επιπλέον σημεία που προστέθηκαν για τη δημιουργία των χαρτών με hindcast δεδομένα.



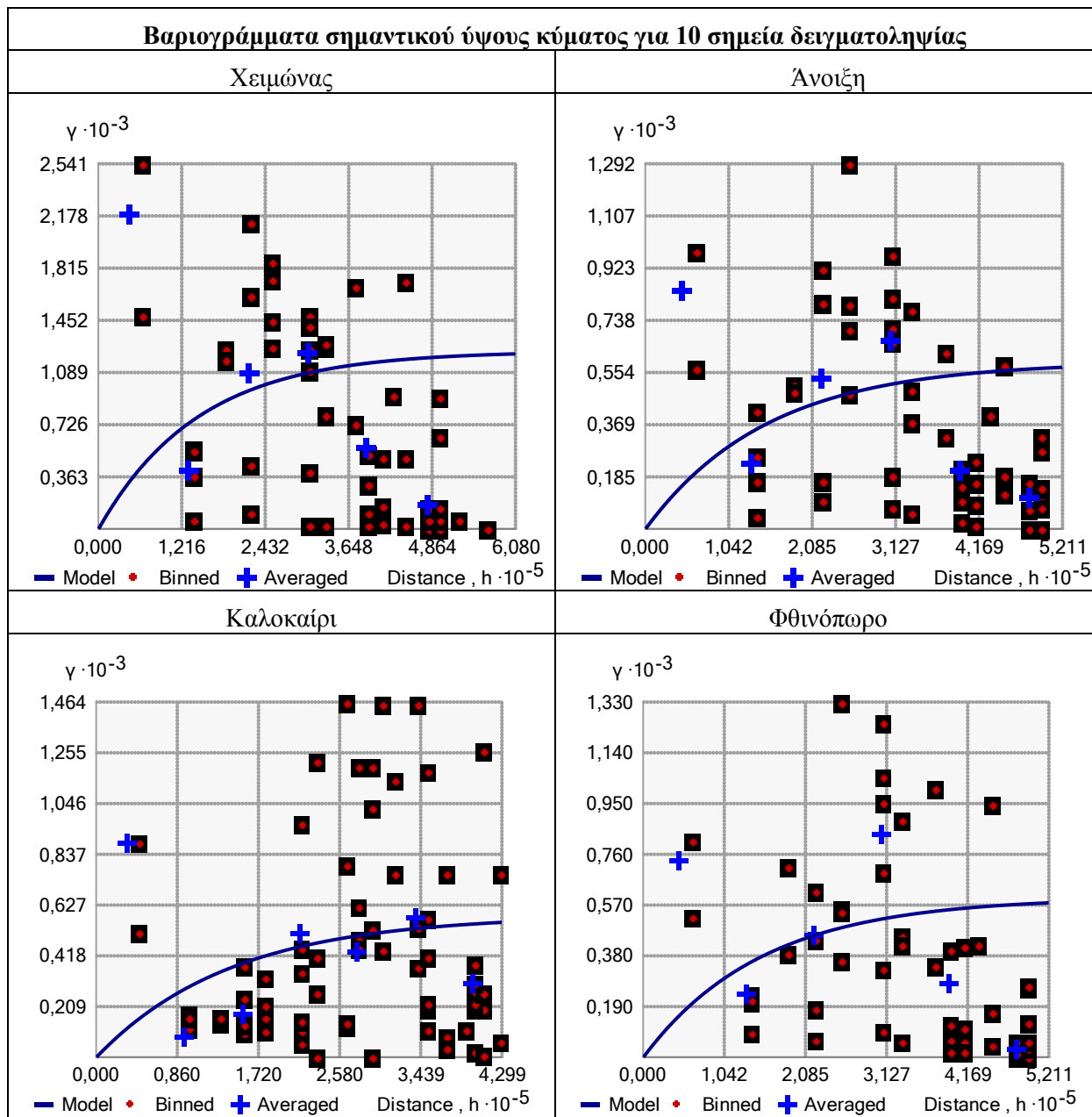
Χάρτης 4: Περιοχή Μελέτης

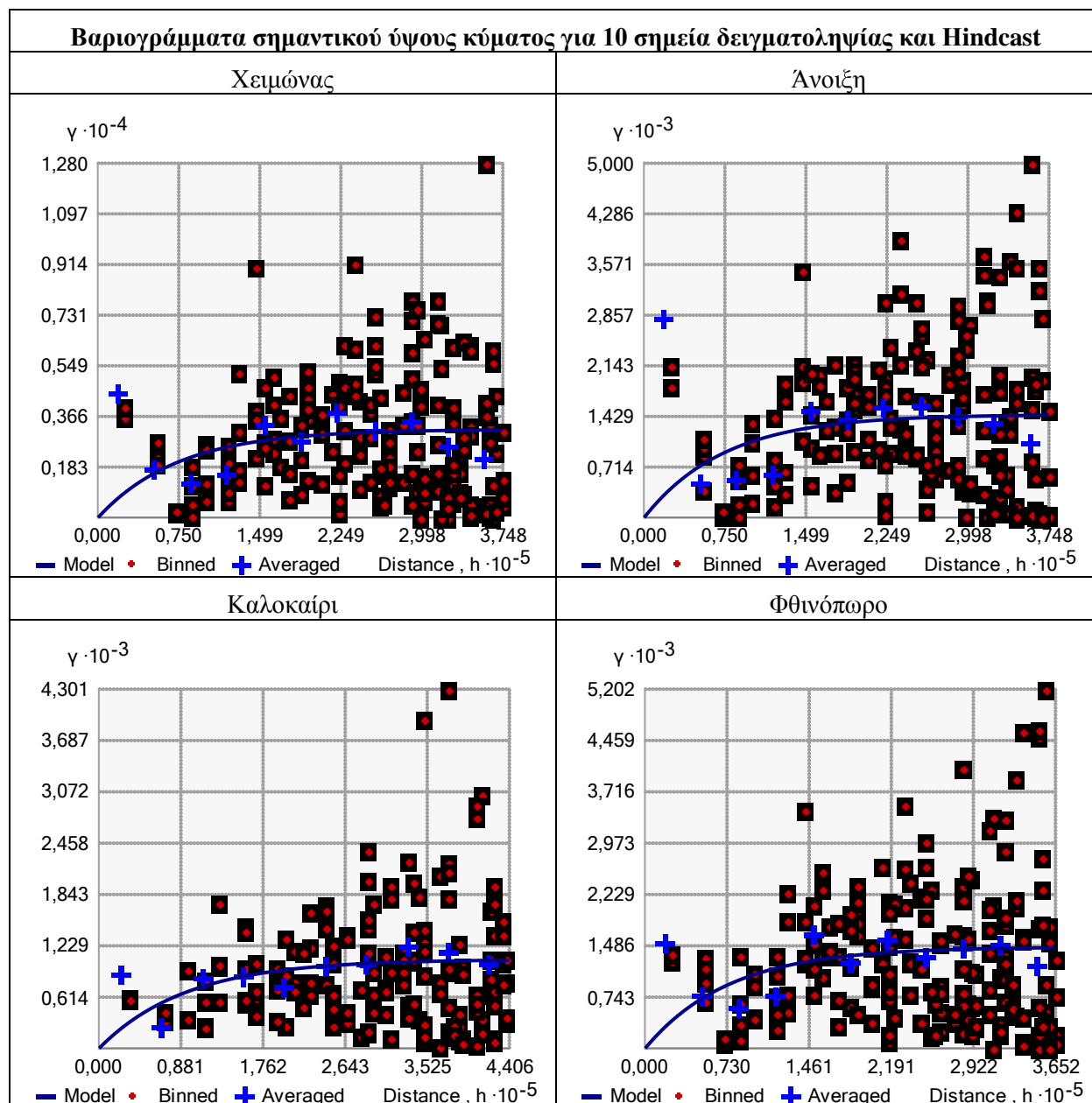
Η περιοχή μελέτης αποτελείται από την επιφάνεια του θαλάσσιου ελλαδικού χώρου. Στον χάρτη τοποθετούνται τα σημεία δειγματοληψίας, τα επιπλέον σημεία που έχουν προστεθεί(hindcast) καθώς και το σχηματικό αρχείο(shapefile) της ακτογραμμής.

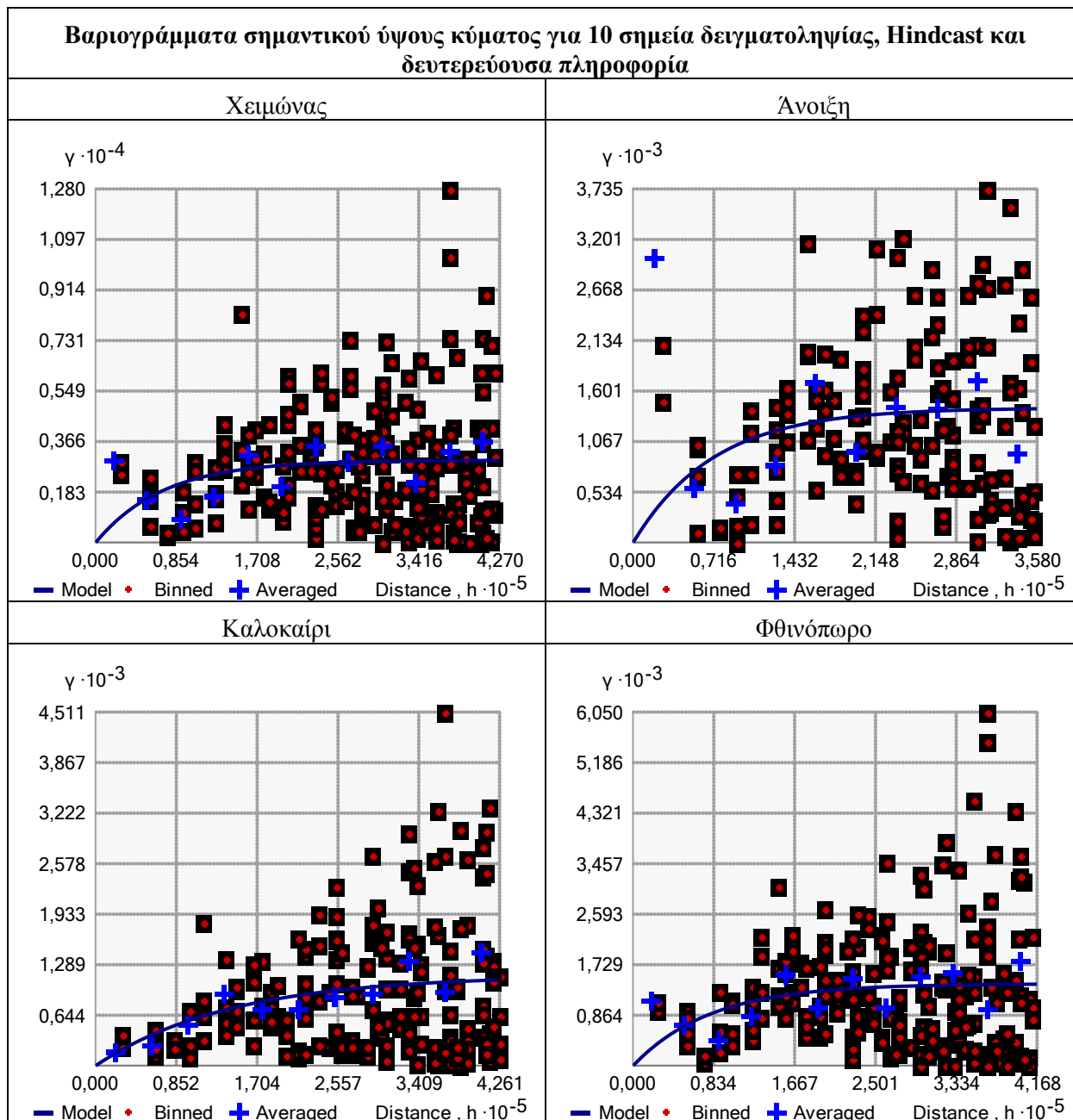
Τα επιπλέον σημεία που προστέθηκαν αποτελούν σημαντικό παράγοντα χωροθέτησης της περιοχής μελέτης. Ο σκοπός που διατελούν στην οριοθέτηση της περιοχής μελέτης είναι καθοριστικός. Πιο αναλυτικά, τα σημεία που έχουν τοποθετηθεί περιμετρικά της ηπειρωτικής Ελλάδας καθώς και στα παράλια της Τουρκίας, αποτελούν ορόσημα του εδάφους. Χωρίς τα σημεία αυτά, περιοχή μελέτης θεωρείται το νοητό τετράγωνο που σχηματίζεται περιμετρικά της ακτογραμμής.

## 4.2 ΗΜΙΒΑΡΙΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

Πριν τη δημιουργία των πρώτων χαρτών απεικόνισης εξάγονται τα διαγράμματα που υποδεικνύουν την συσχέτιση των δεδομένων. Τα ημιβαριογράμματα, εμφανίζονται κατά τη διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου και εμφανίζονται στη συνέχεια για κάθε μία από τις περιπτώσεις δημιουργίας χαρτών σημαντικού ύψους κύματος.





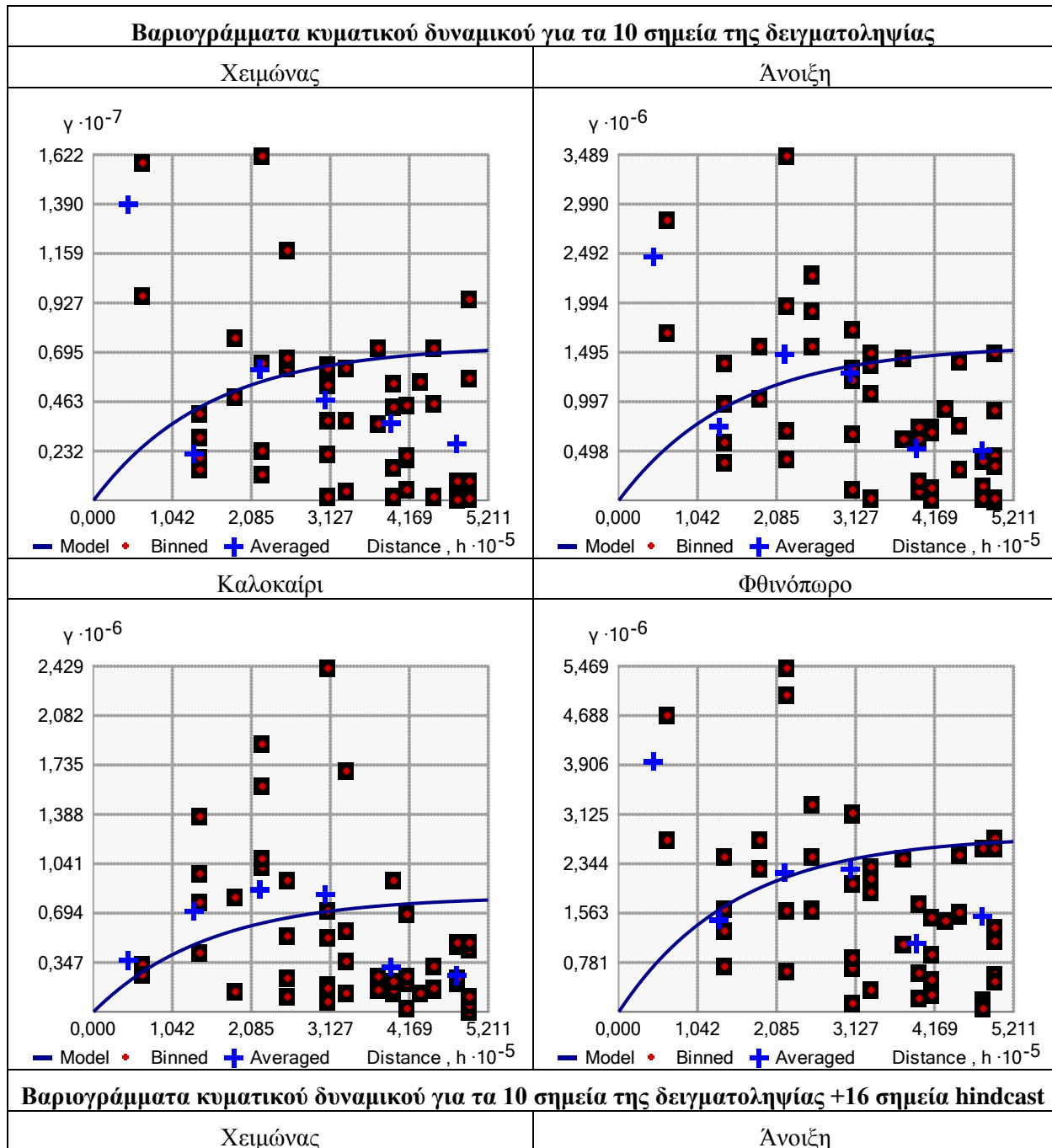


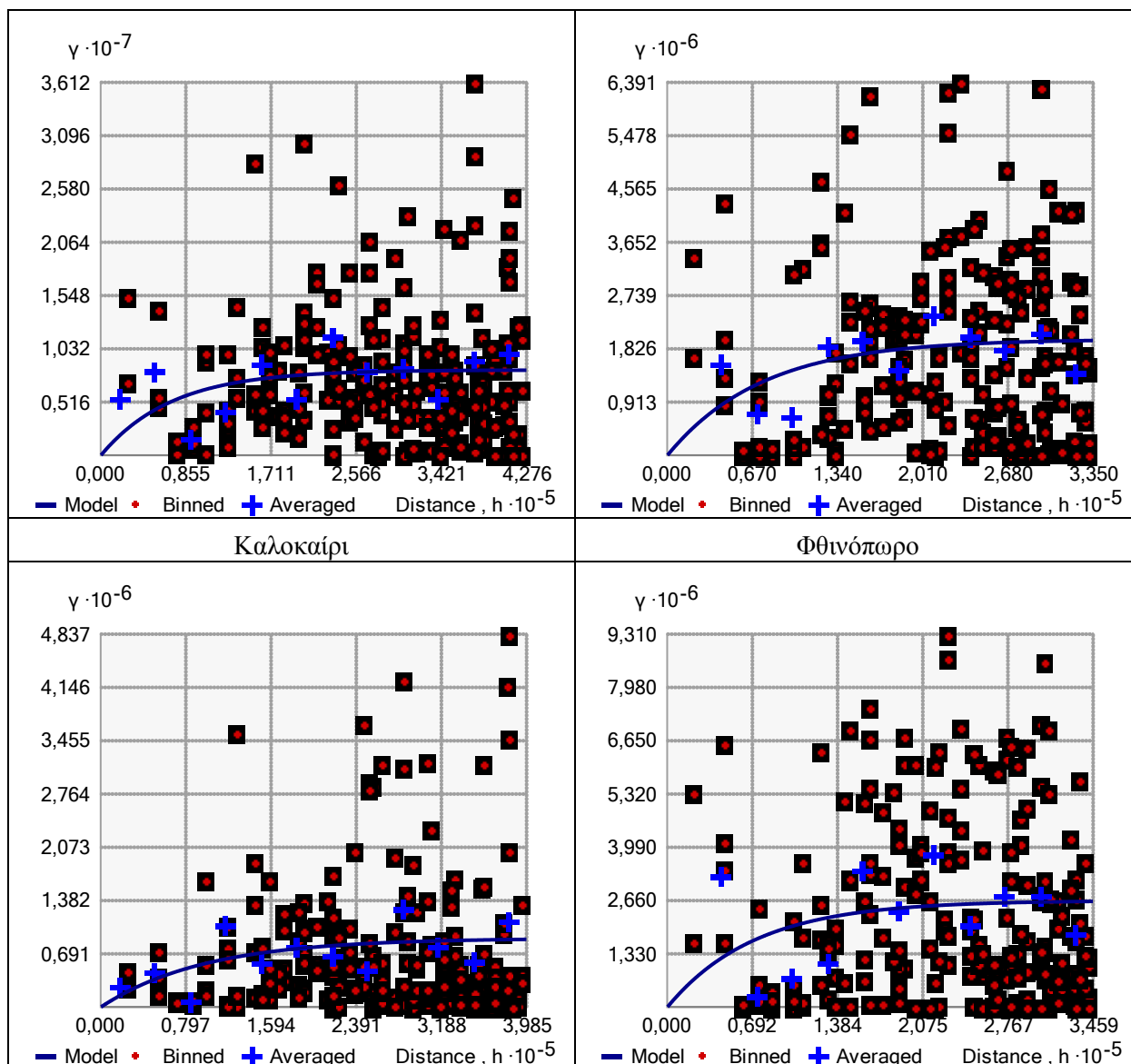
Πίνακας 3: Σύνολο ημιβαριογραμμάτων σημαντικού ύψους κύματος

Παρατηρείται ότι όσο προστίθενται νέα δεδομένα, αρχικά τα hindcast σημεία και στη συνέχεια η δευτερεύουσα πληροφορία του αιολικού δυναμικού, τα θεωρητικά ημιβαριογράμματα βελτιώνονται. Αυτό συμβαίνει καθώς αυξάνονται τα σημεία αυτοσυσχέτισης και το θεωρητικό ημιβαριόγραμμα προσαρμόζεται καλύτερα στο μέσο όρο των πειραματικών δεδομένων (νέφος).



Στη συνέχεια, εμφανίζονται τα βαριογράμματα που προκύπτουν κατά τη διαδικασία εξαγωγής των χαρτών κυματικής ισχύος.





Πίνακας 4: Σύνολο ημιβαριογραμμάτων κυματικού δυναμικού

Ομοίως, τα ημιβαριογράμματα που προκύπτουν κατά την εξαγωγή των χαρτών κυματικής ισχύος βελτιώνονται καθώς προστίθενται τα επιπλέον σημεία (hindcast). Είναι προφανές ότι οι τιμές των μέσων όρων του δείγματος και των τιμών πρόβλεψης είναι αρκετά κοντά στο θεωρητικό μοντέλο ημιβαριογράμματος.

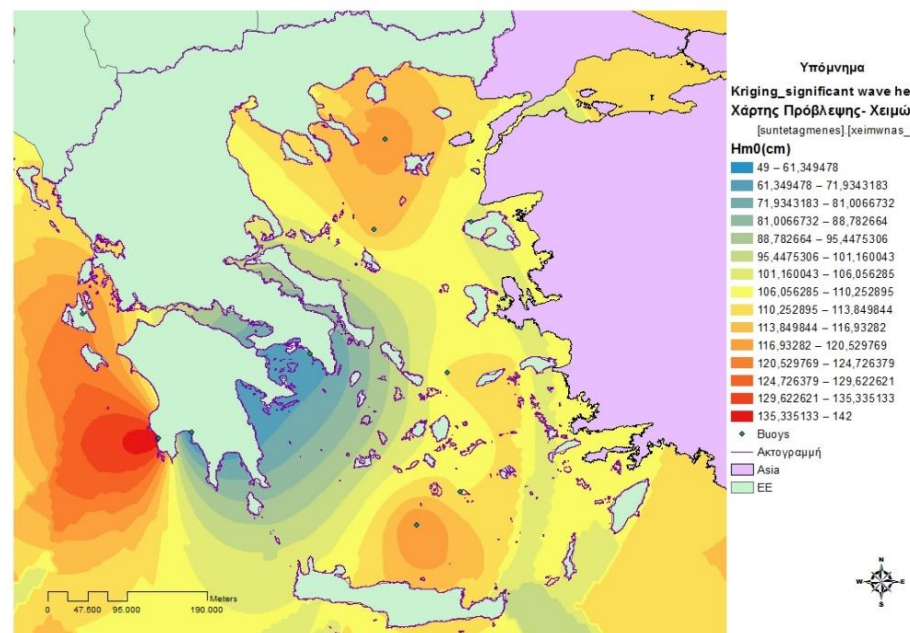
### 4.3 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Στη συνέχεια, δημιουργούνται οι χάρτες του σημαντικού ύψους κύματος και της κυματικής ισχύος.

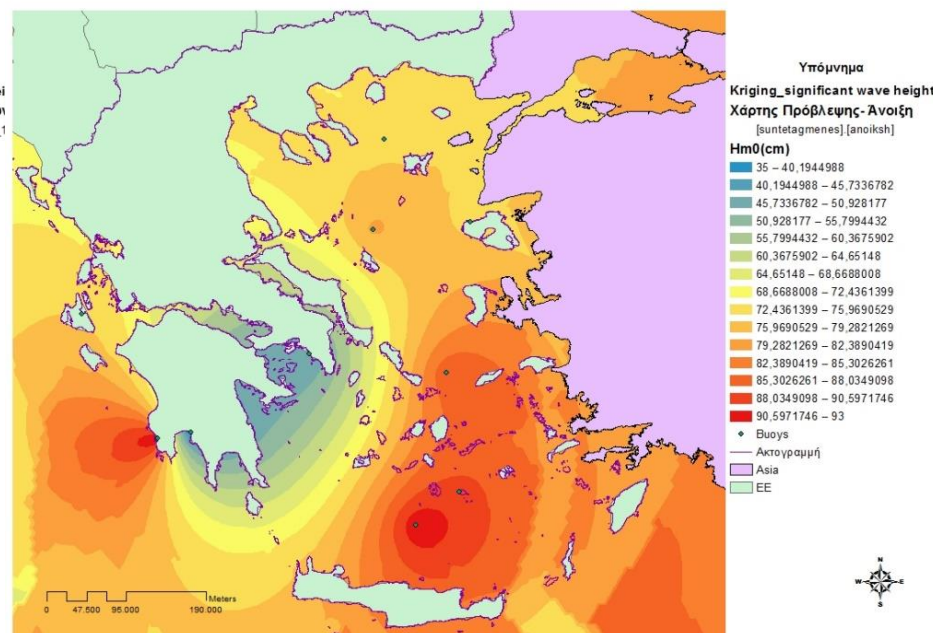
Αρχικά, εμφανίζονται οι χάρτες του **σημαντικού ύψους κύματος** με τη μέθοδο **Kriging**, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα **10 σημεία της δειγματοληψίας**. (Χάρτης 5, Χάρτης 6, Χάρτης 7, Χάρτης 8)

#### Χειμώνας

#### Άνοιξη



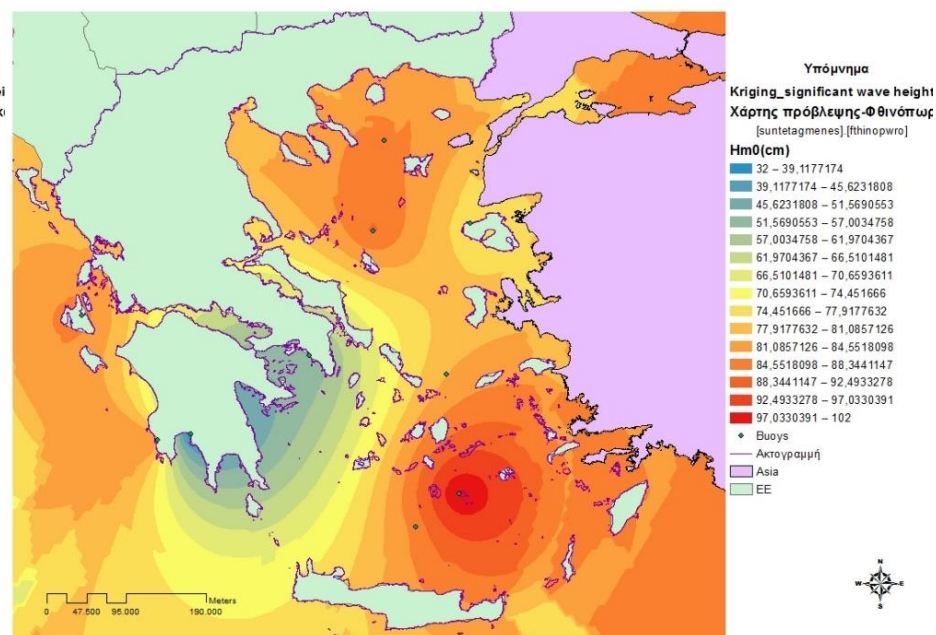
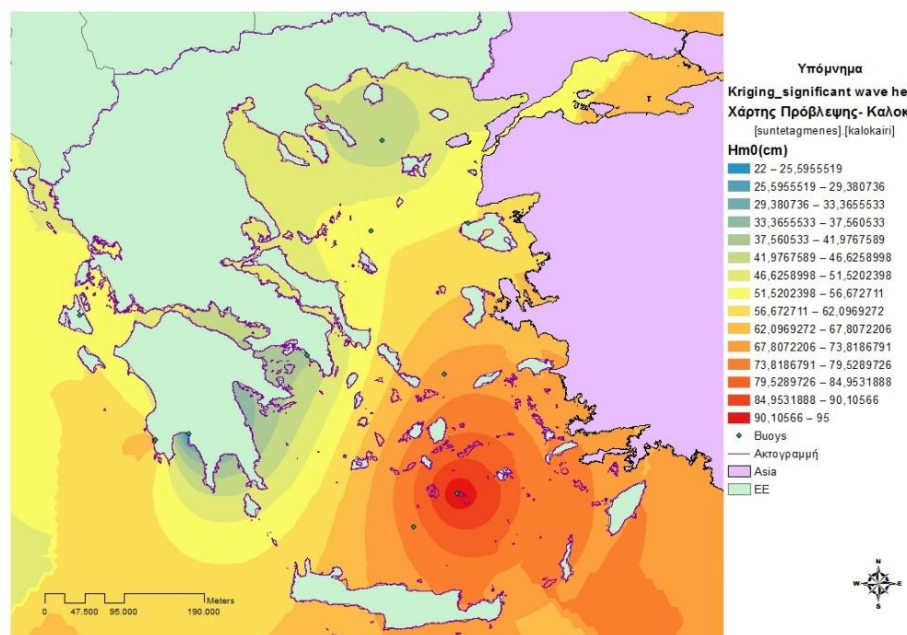
Χάρτης 5: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Χειμώνας, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1



Χάρτης 6: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Άνοιξη, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1

## Καλοκαίρι

## Φθινόπωρο



Χάρτης 7:Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Καλοκαίρι, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1

Χάρτης 8:Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Φθινόπωρο, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1

Η απεικόνιση του σημαντικού ύψους κύματος στους πρώτους χάρτες, στους οποίους χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα σημεία των μετρητών, φαίνεται να απέχουν αρκετά από την πραγματικότητα. Είναι φανερή η αδυναμία της χαρτογράφησης αυτής στα εξής σημεία:

- Δεν έχει οροθετηθεί ο χώρος όπου βρίσκεται η στεριά
- Φαίνεται σε πολύ κλειστούς κόλπους να εμφανίζονται μεγάλες τιμές σημαντικού ύψους κύματος της τάξης των 0,6-0,8m.
- Δεν υπάρχει καμία διαβάθμιση των τιμών του σημαντικού ύψους κύματος από τη στεριά προς την ανοιχτή θάλασσα
- Σε ορισμένα σημεία μειώνεται το σημαντικό ύψος κύματος, ενώ δεν υπάρχει κάποιο στοιχείο που να δικαιολογεί αυτή την απότομη μείωση

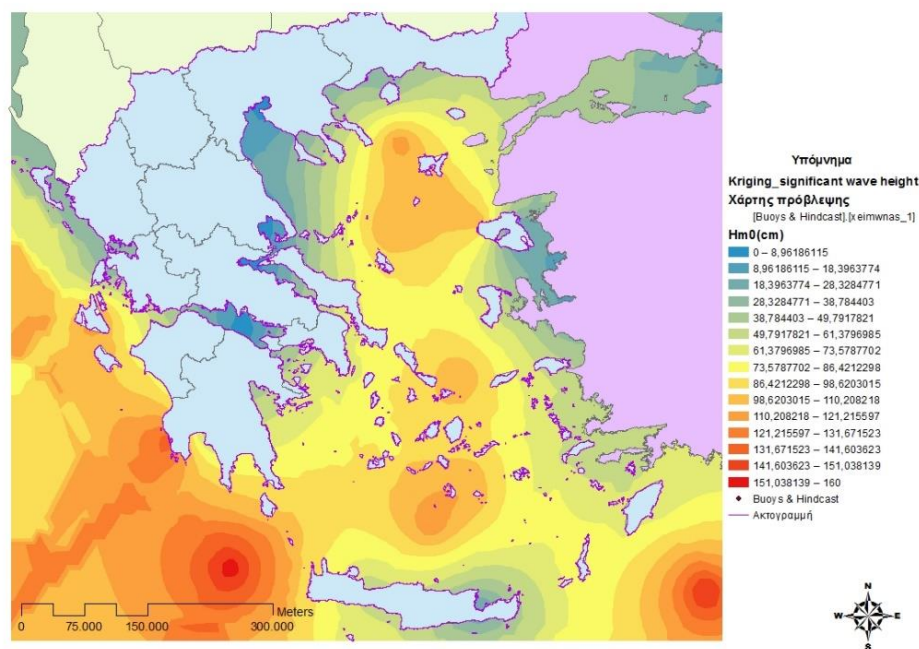


Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται απαραίτητη η συμπλήρωση των στοιχείων που έχουν εισαχθεί. Σε αρκετά σημεία περιμετρικά της Πελοποννήσου, στα εσωτερικά των κόλπων που σχηματίζονται καθώς και περιμετρικά της ηπειρωτικής Ελλάδας θα προστεθούν μηδενικά στοιχεία καθώς και μέγιστες και ελάχιστες τιμές σύμφωνα με τους πρώτους 4 χάρτες όπως περιγράφεται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της εργασίας.

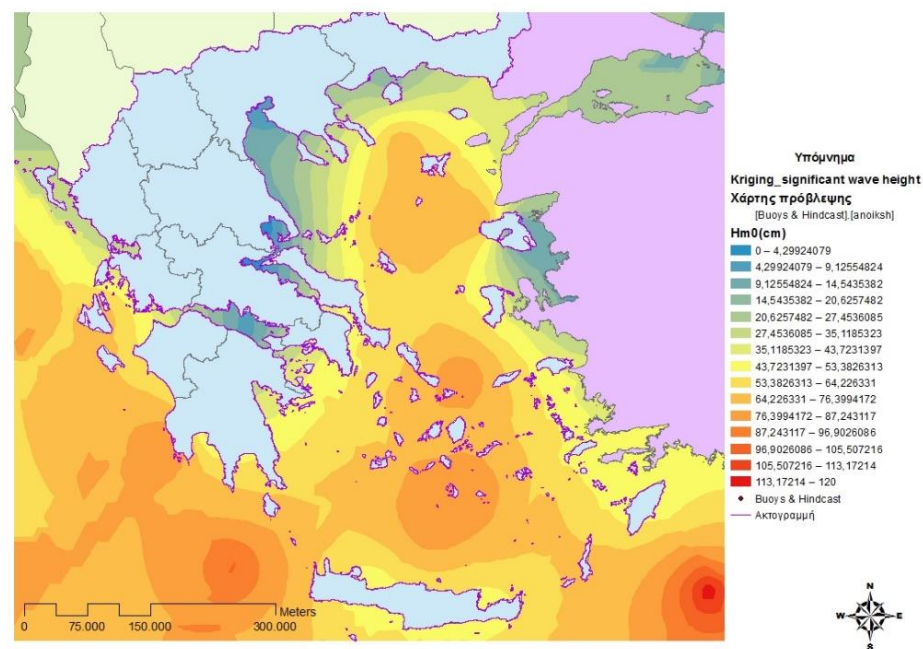
Έτσι, δημιουργούνται οι χάρτες του **σημαντικού ύψους κύματος** με τη μέθοδο **Kriging**, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τα **10 σημεία της δειγματοληψίας**, αλλά **επιπλέον 16 σημεία** τα οποία έχουν προστεθεί σε αυτά.

## Χειμώνας

## Άνοιξη

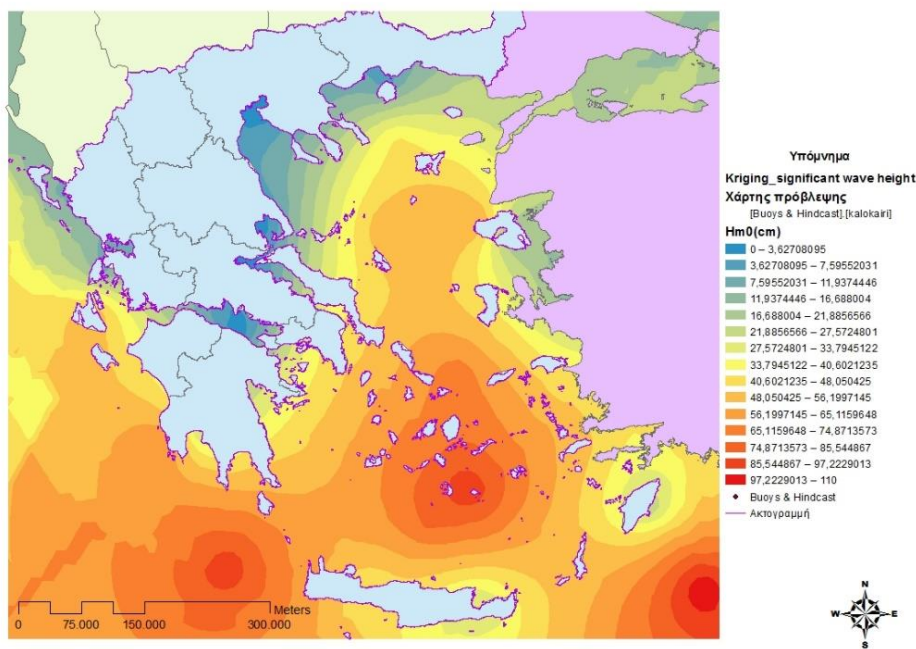


Χάρτης 9: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για 26 σημεία, Χειμώνας, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1



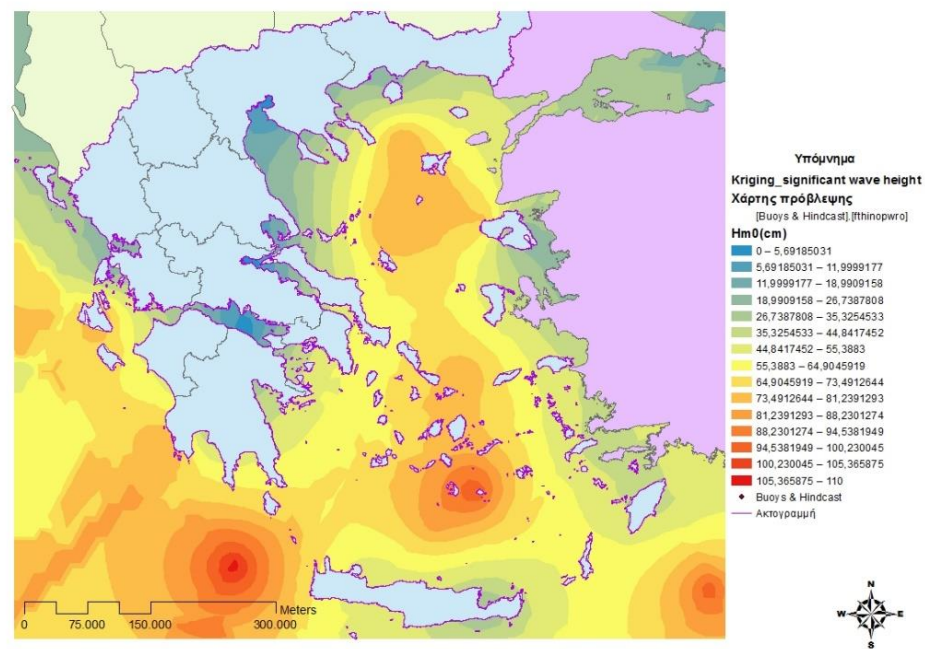
Χάρτης 10: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για 26 σημεία, Άνοιξη, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1

## Καλοκαίρι



Χάρτης 11: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για 26 σημεία, Καλοκαίρι, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1

## Φθινόπωρο



Χάρτης 12: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος για 26 σημεία, Φθινόπωρο, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1

Από τους παραπάνω κιάλας χάρτες (Χάρτης 9, Χάρτης 10, Χάρτης 11, Χάρτης 12), που απεικονίζουν το πρώιμο στάδιο της διεργασίας χαρτογράφησης του σημαντικού ύψους κύματος, προκύπτουν οι περιοχές με τις μεγαλύτερες και τις μικρότερες τιμές του, καθώς στους δεύτερους, όπου πλέον έχει οροθετηθεί η περιοχή της στεριάς, των κόλπων και των έντονων αλλαγών στο ανάγλυφο της ακτογραμμής, φαίνεται να σχηματίζονται πιο ομαλά contours τα οποία αντιπροσωπεύουν καλύτερα την μέση κατάσταση που επικρατεί για κάθε εποχή στον Ελλαδικό θαλάσσιο χώρο. Επιπλέον, από τους παραπάνω 8 χάρτες προκύπτει ότι τα σημεία στα οποία το σημαντικό ύψος κύματος είναι μεγαλύτερο δεν αλλάζουν ιδιαίτερα, εκτός από το σημείο νότια της Πελοποννήσου και δυτικά της Κρήτης στο οποίο έχει προστεθεί ένα επιπλέον σημείο. Σαφώς, δεν δημιουργούνται έντονες αδικαιολόγητες αλλαγές, καθώς στα σημεία στα οποία υπήρξε το φαινόμενο αυτό έχουν προστεθεί επιπλέον στοιχεία.

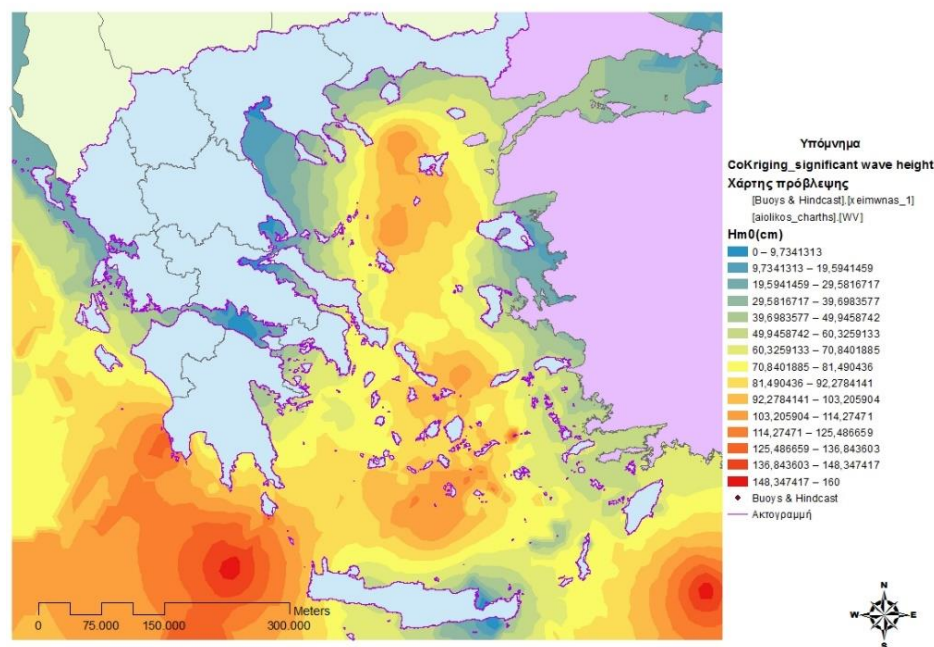


Παρόλο που έχουν εισαχθεί τα νέα σημεία και έχει βελτιωθεί η ποιότητα των χαρτογραφήσεων, στους επόμενους χάρτες προστίθεται η δευτερεύουσα πληροφορία του αιολικού δυναμικού. Το αιολικό δυναμικό επιλέγεται καθώς για μεγάλης κλίμακας χαρτογραφήσεις του σημαντικού ύψους κύματος, θεωρείται ότι ο άνεμος είναι ο πλέον υπεύθυνος για τη δημιουργία των κυματισμών, κυρίως στις περιοχές μακριά της στεριάς. Οι περιοχές οι οποίες παρουσιάζουν σημαντικό πρόβλημα ακόμα και με την εισαγωγή των επιπλέον 16 σημείων είναι οι περιοχές περιμετρικά των νησιών του Αιγαίου. Η δευτερεύουσα πληροφορία είναι σημαντική για τις τιμές αυτές καθώς εξομαλύνει, όπως φαίνεται παρακάτω, αυτές τις διαφορές.

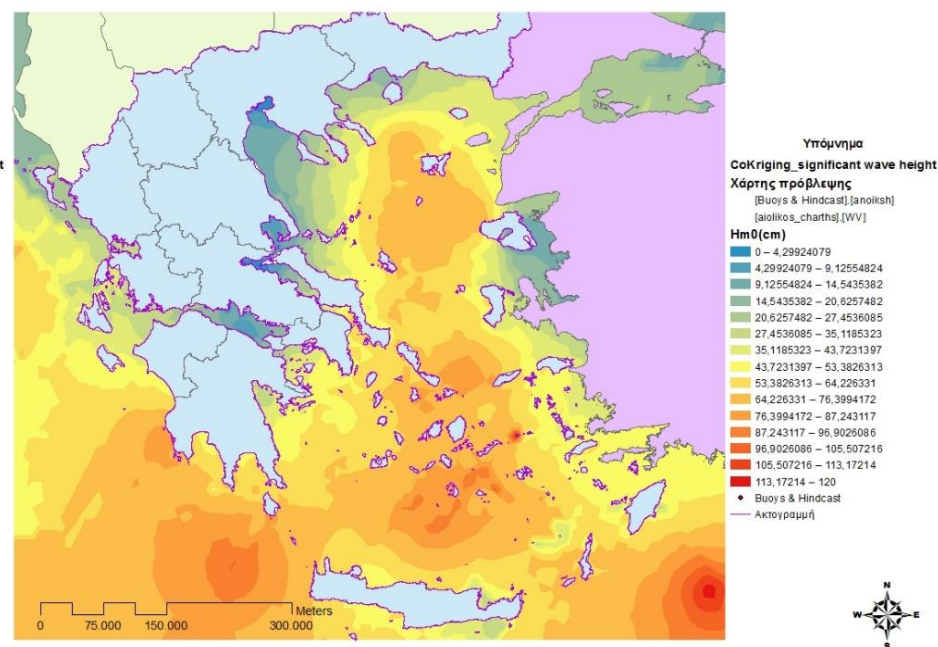
Για τους παραπάνω λόγους χρησιμοποιείται η μέθοδος **CoKriging** για σημαντικό ύψος κύματος με τις τιμές των 26 σημείων, 10 μετρητών και 16 σημείων hindcast και εισαγωγή της Δευτερεύουσας πληροφορίας του Αιολικού Δυναμικού.

### Χειμώνας

### Άνοιξη



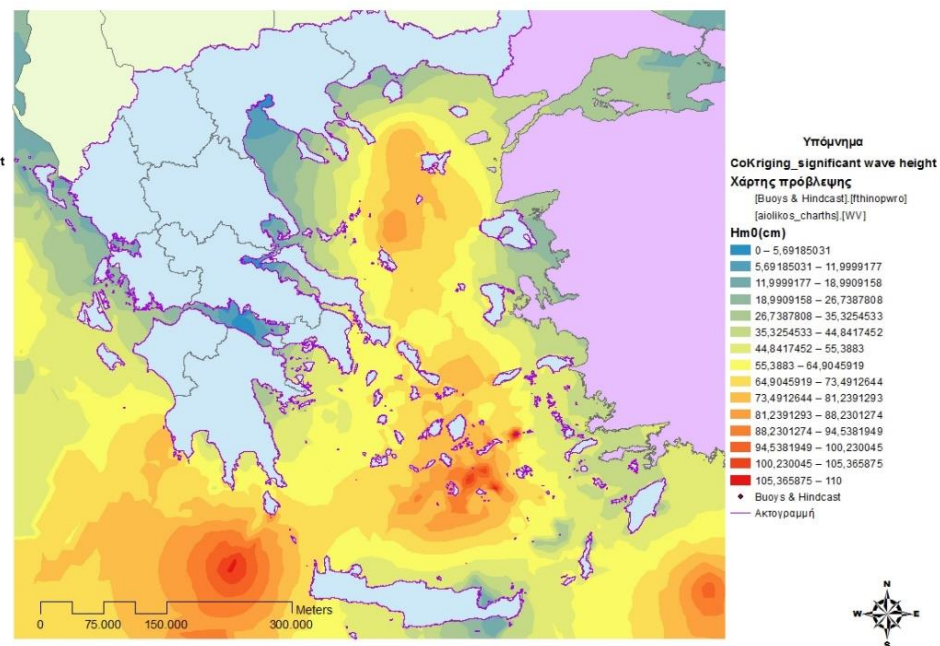
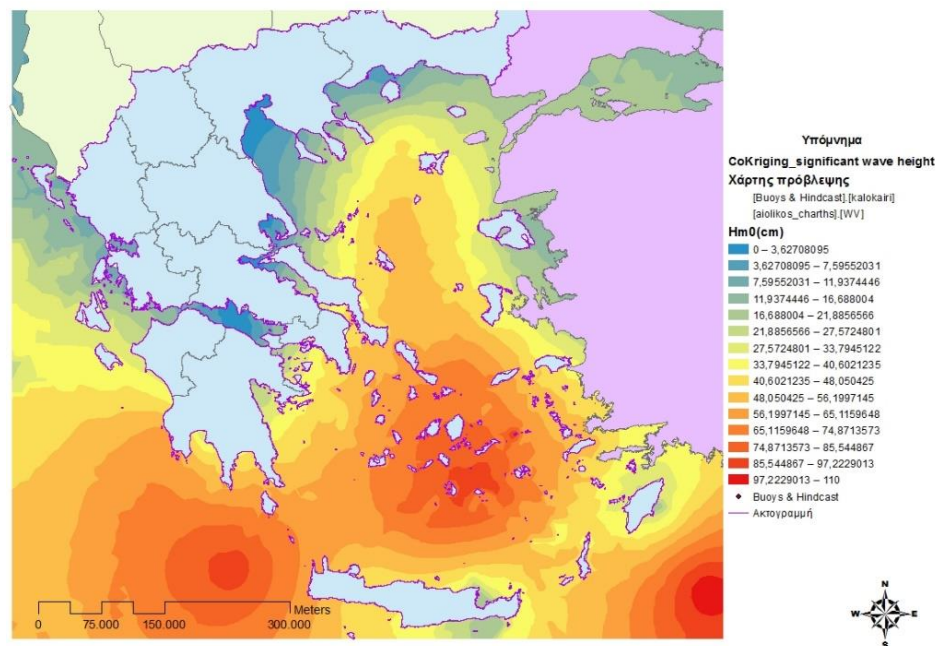
Χάρτης 13: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Χειμώνας, μέθοδος CoKriging, GIS ArcMap 10.1



Χάρτης 14: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Άνοιξη, μέθοδος CoKriging, GIS ArcMap 10.1

## Καλοκαίρι

## Φθινόπωρο



Χάρτης 15: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Καλοκαίρι, μέθοδος CoKriging, GIS ArcMap 10.1

Χάρτης 16: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος, Φθινόπωρο, μέθοδος CoKriging, GIS ArcMap 10.1

Με την εισαγωγή της δευτερεύουσας πληροφορίας και των 16 σημείων έχουν βελτιωθεί εμφανώς οι χάρτες του σημαντικού ύψους κύματος.

Στην περιοχή του Ιονίου και των νησιών του Αιγαίου φαίνεται να εξομαλύνονται τα contours περιμετρικά της στεριάς. Όμοια συμπεριφορά παρατηρείται στη βόρεια και την ανατολική Ελλάδα. Επίσης, στις περιοχές περιμετρικά της ηπειρωτικής Ελλάδας ομαλοποιείται η μετάβαση από τη μηδενική στις ανώτερες, σε τιμή, κλάσεις. Τέλος, το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στις περιοχές των κλειστών κόλπων και των στενών θαλάσσιων περασμάτων.

Παρακάτω, εμφανίζεται ο πίνακας με τα σημεία τα οποία, ανά εποχή, παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές σημαντικού ύψους κύματος

| <b>Εποχή/Σημαντικά<br/>σημεία</b> | <i>Δ. Κρήτη και Ν.<br/>Πελοπόννησος</i> | <i>Α. Κάρπαθος και<br/>ΒΑ. Ρόδος</i> | <i>ΝΔ.<br/>Πελοποννήσος</i> | <i>Α.<br/>Σποράδες</i> | <i>Τήνος-<br/>Ικαρία</i> | <i>Σαντορίνη</i> |
|-----------------------------------|---|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|------------------|
| <b>Χειμώνας (m)</b>               | 0,8-1,6                                 | 0,7-1,6                              | 0,5-0,9                     | 0,9-1,25               | 0,9-1,15                 | 0,9-1,25         |
| <b>Άνοιξη(m)</b>                  | 0,6-0,9                                 | 0,7-1,2                              | 0,9-1,35                    | 0,5-0,76               | 0,5-0,76                 | Έως 0,87         |
| <b>Καλοκαίρι(m)</b>               | 0,6-0,97                                | 0,48-1,1                             | 0,4-0,65                    | 0,4-0,56               | 0,56-0,75                | Έως 0,97         |
| <b>Φθινόπωρο(m)</b>               | 0,7-1,1                                 | 0,55-0,95                            | 0,55-0,8                    | 0,65-0,88              | 0,65-0,81                | 0,94-1,1         |

Πίνακας 5: Τιμές σημείων με μέγιστο ύψος κύματος ανά Εποχή, με βάση τους χάρτες της μεθόδου CoKriging (Χάρτης 13, Χάρτης 14, Χάρτης 15, Χάρτης 16)

#### 4.4 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

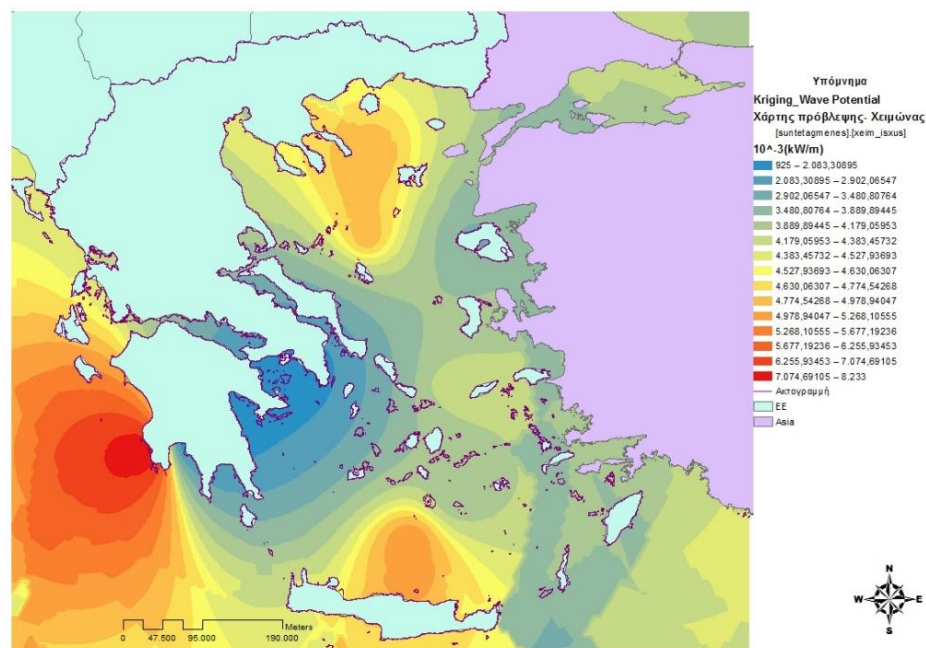
Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο δημιουργήθηκαν οι ακόλουθοι χάρτες για την ενεργειακή ισχύ που παράγεται ανά μέτρο μήκους μετώπου κύματος.

Αρχικά χρησιμοποιείται η μέθοδος **Kriging** λαμβάνοντας υπόψη τα **10 σημεία δειγματοληψίας**.

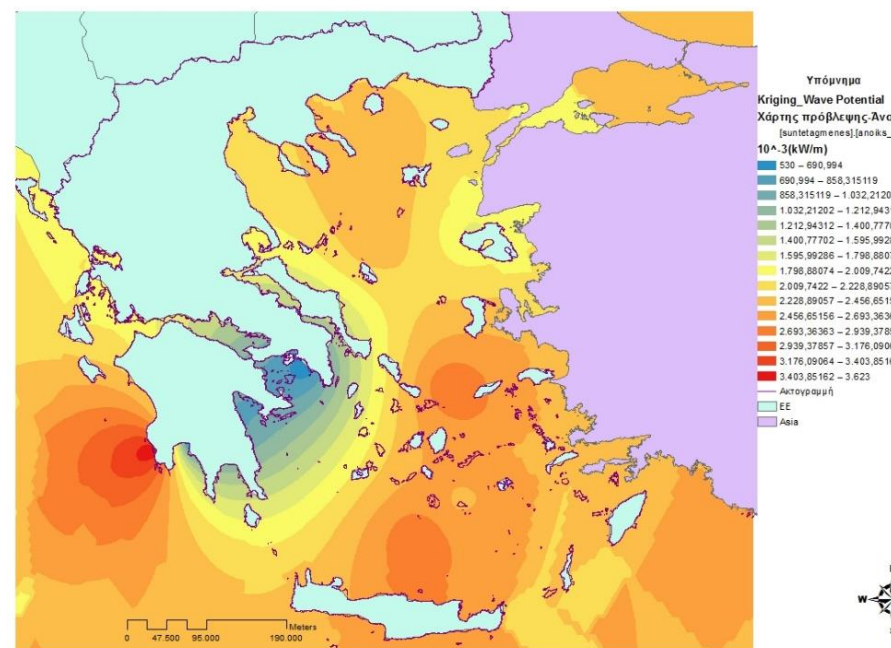


## Χειμώνας

## Άνοιξη



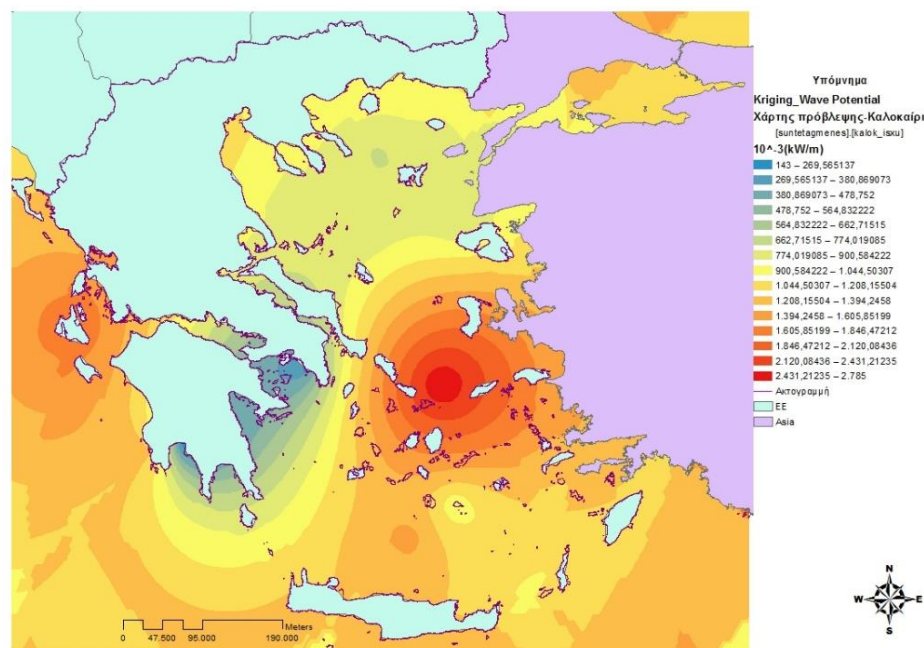
Χάρτης 17: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Χειμώνας, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1



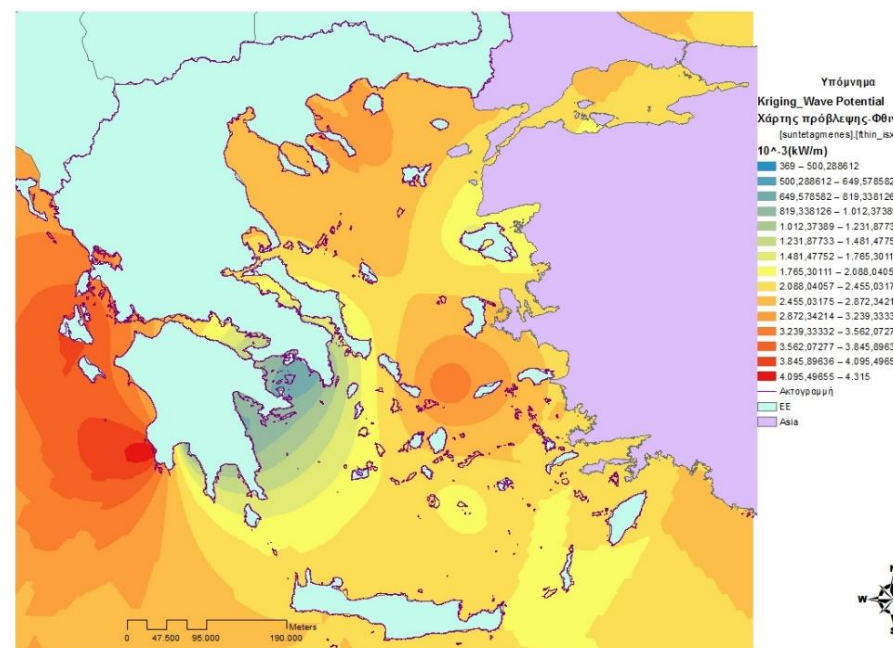
Χάρτης 18: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Άνοιξη, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1

## Καλοκαίρι

## Φθινόπωρο



Χάρτης 19: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Καλοκαίρι, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1



Χάρτης 20: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Φθινόπωρο, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1

Αν και οι τιμές των επιπλέον σημείων δεν έχουν εισαχθεί, τα contours φαίνεται να είναι πιο ομαλά σε σχέση με τη μέθοδο kriging στους χάρτες του σημαντικού ύψους κύματος. Η σύγκριση αυτή φαίνεται αόριστη, συνεπώς τα ημιβαριογράμματα αποκτούν ιδιαίτερη σημασία για την επικύρωση οπτικών συμπερασμάτων όμοιων με αυτό.

Αν ληφθούν υπόψη τα διαγράμματα των ημιβαριογραμμάτων (Πίνακας 4) δεν συναντάμε σημαντικές διαφορές στην αυτοσυσχέτιση των δεδομένων, καθώς είναι εμφανής η ανάγκη βελτίωσης της ποιότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων.

Οι τιμές της κυματικής ισχύος των σημαντικότερων σημείων, που έχουν οριστεί από τους χάρτες του σημαντικού ύψους κύματος, εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα συγκεντρωτικά(Πίνακας 6).

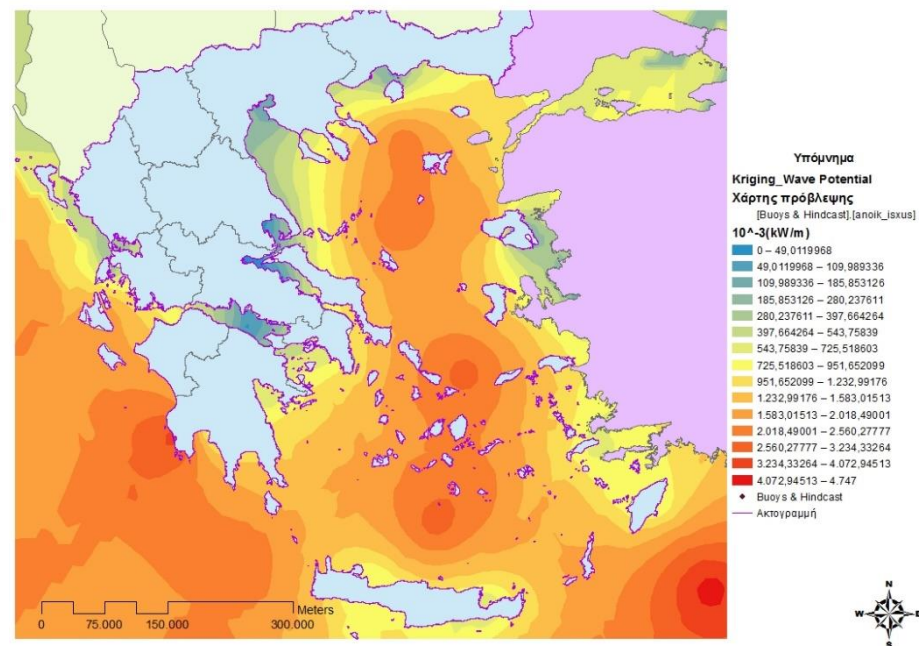
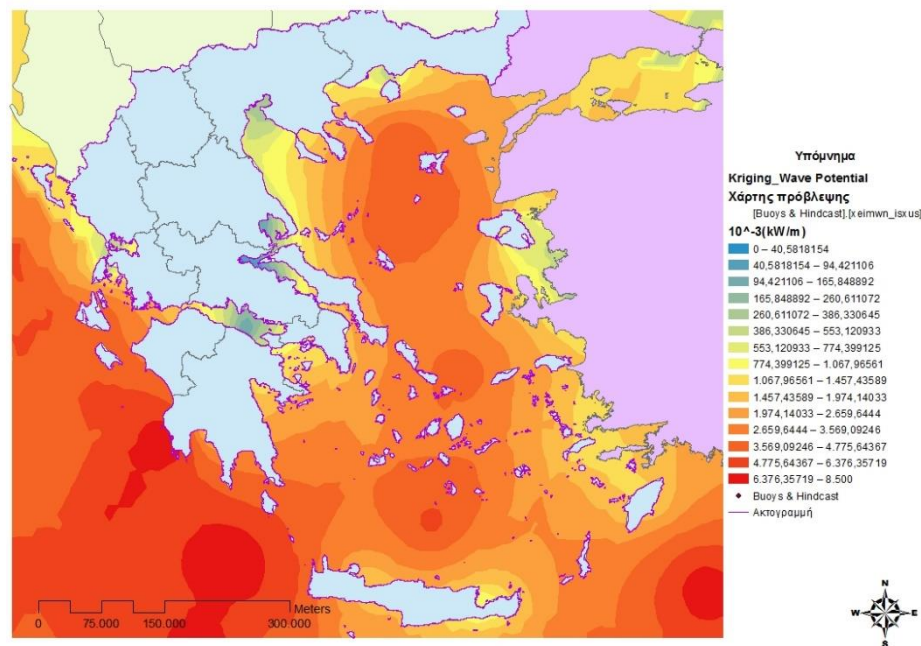
| <b>Εποχή/Σημαντικά σημεία</b> | <i>Δ. Κρήτη και Ν. Πελοπόννησος</i> | <i>Α. Κάρπαθος και ΒΑ. Ρόδος</i> | <i>ΝΔ. Πελοποννήσος</i> | <i>Α. Σποράδες</i> | <i>Τήνος-Ικαρία</i> | <i>Σαντορίνη</i> |
|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|------------------|
| <b>Χειμώνας (kW/m)</b>        | 4,2-4,6                             | 3,9-4,4                          | 5,2-8,2                 | 4,2-4,9            | 4,2-4,5             | 3,9-4,6          |
| <b>Άνοιξη(kW/m)</b>           | 2-2,5                               | 2,2-2,5                          | 2,5-3,6                 | 2,2-2,5            | 2,5-2,9             | 2-2,5            |
| <b>Καλοκαίρι(kW/m)</b>        | 0,9-1,2                             | 1,2-1,4                          | 1-1,4                   | 0,78-0,9           | 2,1-2,8             | 0,9-1,2          |
| <b>Φθινόπωρο(kW/m)</b>        | 2-2,8                               | 1,8-2,5                          | 2,8-4,3                 | 2,4-2,9            | 2,5-3,2             | 1,8-2,5          |

**Πίνακας 6:Σημαντικές τιμές κυματικού δυναμικού, σύμφωνα με τους χάρτες των 10 αρχικών σημείων**

Στη συνέχεια δημιουργούνται χάρτες κυματικής ισχύος με τη μέθοδο Kriging. Λαμβάνονται υπόψη 26 τιμές, 10 των μετρητών δειγματοληψίας και 16 επιπλέον τιμές hindcast. Οι βάσεις δεδομένων για τη δημιουργία των απεικονίσεων έχουν δημιουργηθεί με τον τρόπο που περιγράφεται στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο (Υποκεφάλαιο 3.8).

## Χειμώνας

## Άνοιξη



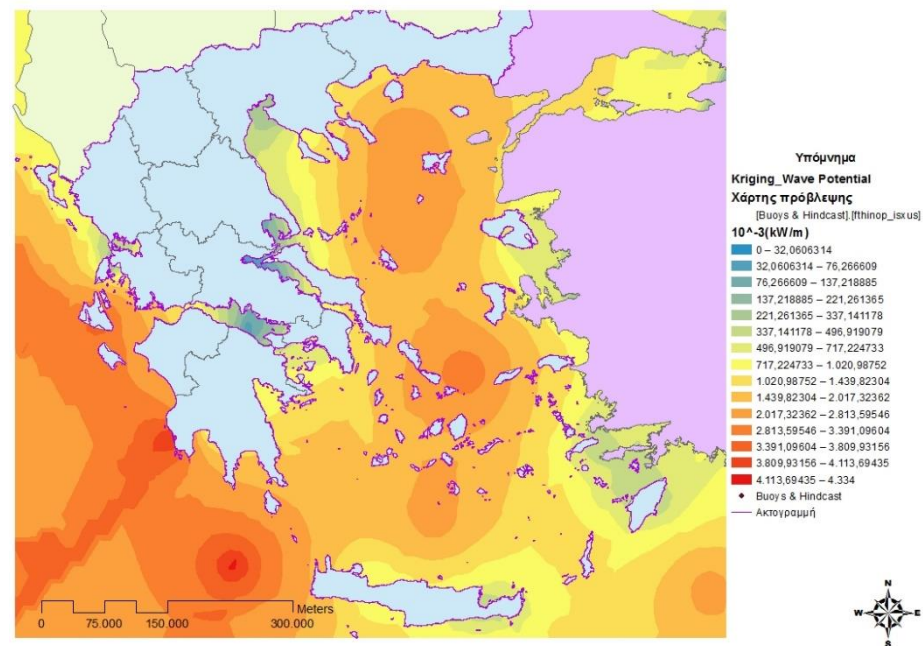
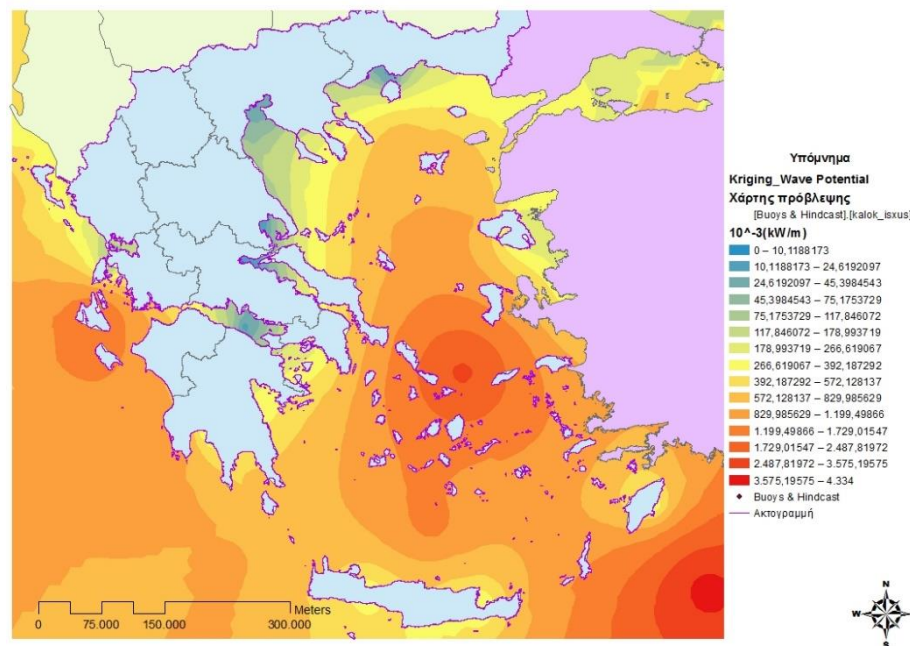
Χάρτης 21: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Χειμώνας, μέθοδος Kriging, GIS <ωArcMap 10.1

Χάρτης 22: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Άνοιξη, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1



## Καλοκαίρι

## Φθινόπωρο



Χάρτης 23: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Καλοκαίρι, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1

Χάρτης 24: Χάρτης ενεργειακής ισχύος κυμάτων, Φθινόπωρο, μέθοδος Kriging, GIS ArcMap 10.1

Οι χάρτες που απεικονίζουν το κυματικό δυναμικό παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές κατά την εισαγωγή των επιπλέον σημείων. Ενώ θα ήταν αναμενόμενο τα επιπλέον σημεία να αυξήσουν το εύρος και την ποιότητα των διαβαθμίσεων, ουσιαστικά μειώνουν τις σταδιακές αλλαγές και δημιουργούν ιδιαίτερους σχηματισμούς στον θαλάσσιο χώρο. Παρόλα αυτά, λόγω της διαφορετικής κλίμακας που χρησιμοποιείται, αν συγκριθούν δύο χάρτες της ίδιας εποχιακής περιόδου, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις τιμές ανά σημείο.

| Εποχή/Σημαντικά σημεία | Δ. Κρήτη και Ν. Πελοπόννησος | Α. Κάρπαθος και ΒΑ. Ρόδος | ΝΔ. Πελοποννήσος | Α. Σποράδες | Τήνος-Ικαρία | Σαντορίνη |
|------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|-------------|--------------|-----------|
| Χειμώνας (kW/m)        | 3,6-8,5                      | 2,6-8,5                   | 3,6-8,5          | 2,7-4,8     | 2,7-4,8      | 2,7-4,8   |
| Άνοιξη(kW/m)           | 2-3,2                        | 1,6-4,7                   | 1,2-4            | 2-3,2       | 1,5-2,6      | 2-2,6     |
| Καλοκαίρι(kW/m)        | 0,5-1,2                      | 1,2-3,6                   | 1,2-1,8          | 0,6-1,2     | 1,2-3,6      | 0,6-1,2   |
| Φθινόπωρο(kW/m)        | 2,8-4,3                      | 0,7-2                     | 2,8-4,1          | 2-2,8       | 2-3,4        | 1,4-2,8   |

Πίνακας 7: Σημαντικές τιμές κυματικού δυναμικού, σύμφωνα με τους χάρτες των 26 σημείων

Οι τιμές του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 7) φαίνεται να υπερεκτιμούν την ενεργεια που παράγεται από τα κύματα στον θαλάσσιο χώρο σε σχέση με τις τιμές που εμφανίζονται στον προηγούμενο πίνακα (Πίνακας 6) και αφορούν μόνο τα 10 αρχικά σημεία.

Τα σφάλματα και οι δείκτες συσχέτισης, που παρουσιάζονται παρακάτω, εξακριβώνουν τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε σύγκριση με τις πειραματικές και Hindcast μετρήσεις. Οι τιμές αυτές θα βοηθήσουν να γίνει κατανοητός ο λόγος επιλογής και απόρριψης ορισμένων χαρτών καθώς και η επιλογή της καλύτερης μεθοδολογίας για των απεικόνιση του σημαντικού ύψους κύματος και του ενεργειακού δυναμικού.

#### 4.5 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΩΝ

Σύμφωνα με τις σχέσεις [9]-[11] έχουν εξαχθεί τα παρακάτω σφάλματα και δείκτες τα οποία βοηθούν στο να κριθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Για κάθε χάρτη και κάθε εποχή έχουν υπολογιστεί οι δείκτες MSPE, MAE, IoA’.

| Hm0         |                 |                 |                 |                 |       |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| <b>MSPE</b> | <u>0,143832</u> | <u>0,059028</u> | <u>0,035835</u> | <u>0,061033</u> | 0     |
| <b>MAE</b>  | <u>0,272834</u> | <u>0,166804</u> | <u>0,142461</u> | <u>0,189314</u> | 0     |
| <b>IoA’</b> | <u>0,912867</u> | 0,221386        | 0,567280        | <u>0,815601</u> | 0 - 1 |

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ  
ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.

|   |                 |                 |                 |                 |       |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| <b>Hm0 με<br/>hindcast</b>                  | <u>0,309862</u> | <u>0,124237</u> | <u>0,097655</u> | <u>0,130778</u> | 0     |
| <b>MSPE</b>                                 | 0,493199        | 0,31662         | <u>0,26791</u>  | 0,328824        | 0     |
| <b>MAE</b>                                  | <u>0,712644</u> | <u>0,657272</u> | 0,628522        | <u>0,695751</u> | 0 - 1 |
| <b>IoA'</b>                                 |                 |                 |                 |                 |       |
| <b>Hm0 με<br/>hindcast με<br/>CoKriging</b> | <u>0,268301</u> | <u>0,123313</u> | <u>0,084132</u> | <u>0,104758</u> | 0     |
| <b>MSPE</b>                                 | 0,445405        | <u>0,298</u>    | <u>0,230191</u> | <u>0,290508</u> | 0     |
| <b>MAE</b>                                  | <u>0,666015</u> | 0,610946        | 0,531208        | 0,630622        | 0 - 1 |
| <b>IoA'</b>                                 |                 |                 |                 |                 |       |
| <b>Ισχύς με<br/>Kriging</b>                 | 9,193468        | 1,109068        | 0,804116        | 3,235976        | 0     |
| <b>MSPE</b>                                 | 2,252093        | 1,893945        | 0,740574        | 1,519445        | 0     |
| <b>MAE</b>                                  | <u>0,917745</u> | <u>0,935443</u> | <u>0,904554</u> | <u>0,944016</u> | 0 - 1 |
| <b>IoA'</b>                                 |                 |                 |                 |                 |       |
| <b>Ισχύς με<br/>hindcast με<br/>Kriging</b> | 9,817087        | 2,219016        | 1,309438        | 2,388708        | 0     |
| <b>MSPE</b>                                 | 2,663616        | 1,270789        | 0,784145        | 1,31331         | 0     |
| <b>MAE</b>                                  | <u>0,758173</u> | <u>0,737814</u> | <u>0,753685</u> | <u>0,678795</u> | 0 - 1 |
| <b>IoA'</b>                                 |                 |                 |                 |                 |       |

Πίνακας 8: Σφάλματα και δείκτες συσχέτισης

Στον πίνακα αυτόν (Πίνακας 8) υπογραμμίζονται οι τιμές οι οποίες είναι μεν στο εύρος των αναμενόμενων τιμών, καλύπτουν δε το προσδοκώμενο αποτέλεσμα.

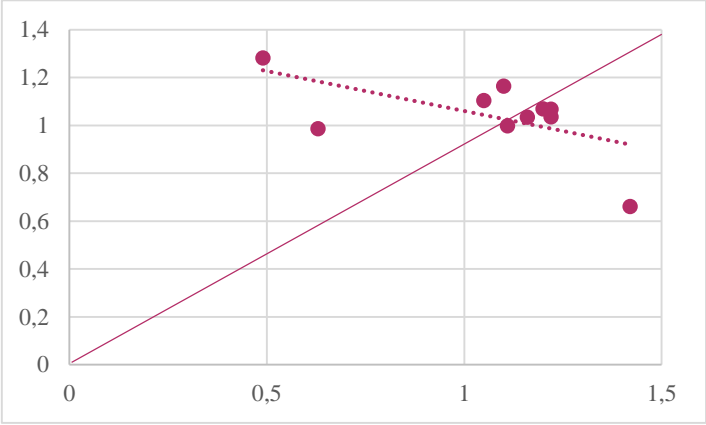
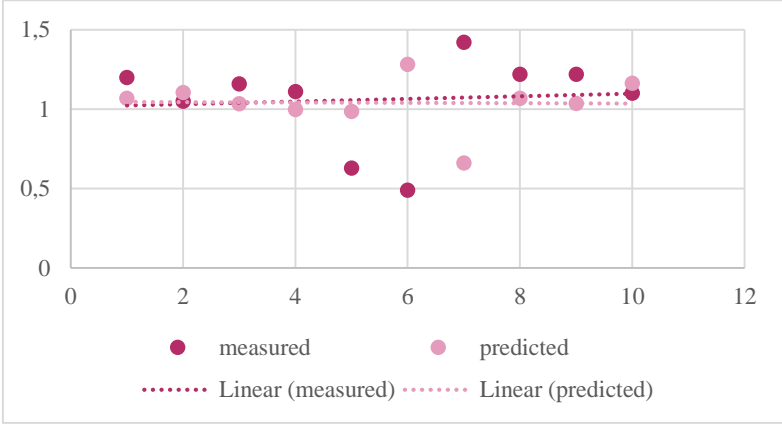
Στη συνέχεια εμφανίζονται τα διαγράμματα συσχέτισης των μετρούμενων τιμών και των τιμών που έχουν προκύψει από τη μέθοδο Kriging και CoKriging. Τα διαγράμματα αυτά δημιουργήθηκαν με σκοπό την «ποιοτική», κατά κάποιον τρόπο, απεικόνιση των αποτελεσμάτων του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 8).

#### 4.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ Q-Q PLOT

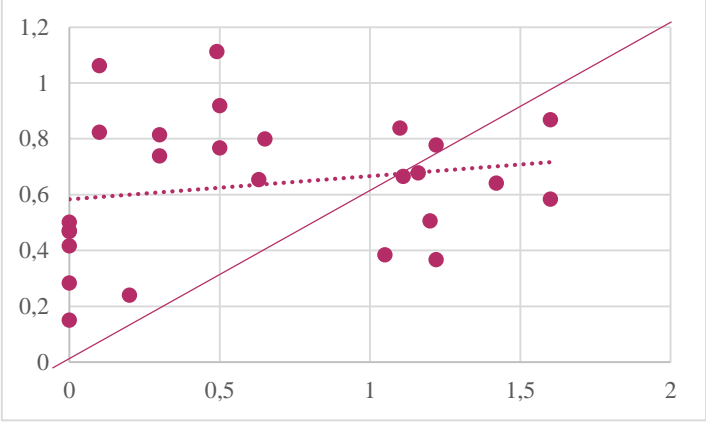
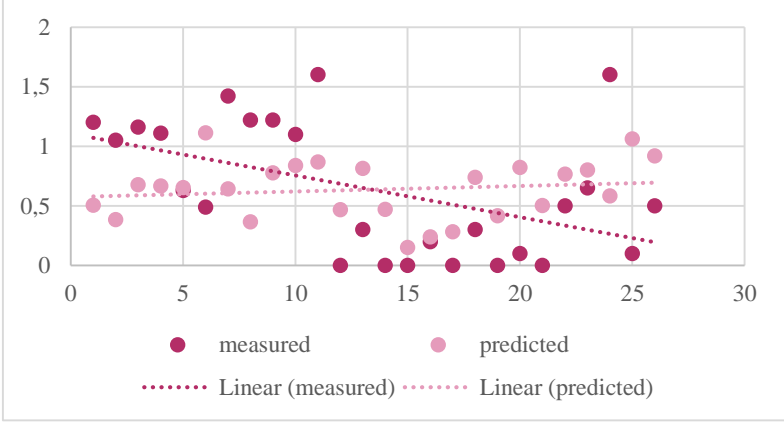
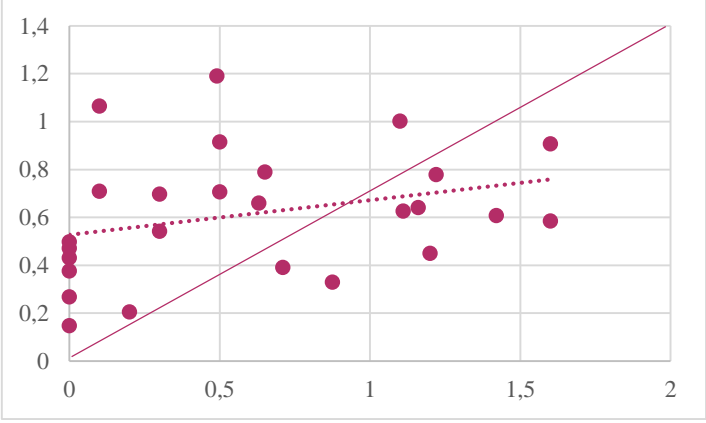
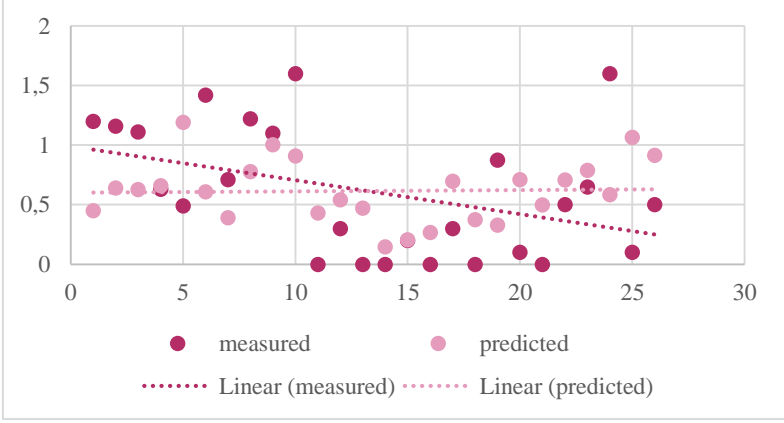
Εμφανίζονται για κάθε εποχή και για κάθε μεθοδολογία τα διαγράμματα:

- Q-Q plot
- Τιμών παρατήρησης(μετρήσεων) – μοντέλου (προβλεπόμενες)

Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν στο Excel 2013, τοποθετήθηκαν οι γραμμές τάσεων και στα διαγράμματα Q-Q plot η προσδοκώμενη γραμμή τάσης ώστε να γίνει αντιληπτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων και να κριθεί ευκολότερα η ακρίβεια των μεθόδων από τις οποίες έχουν προκύψει η Άτλαντες σημαντικού ύψους κύματος και ισχύος.

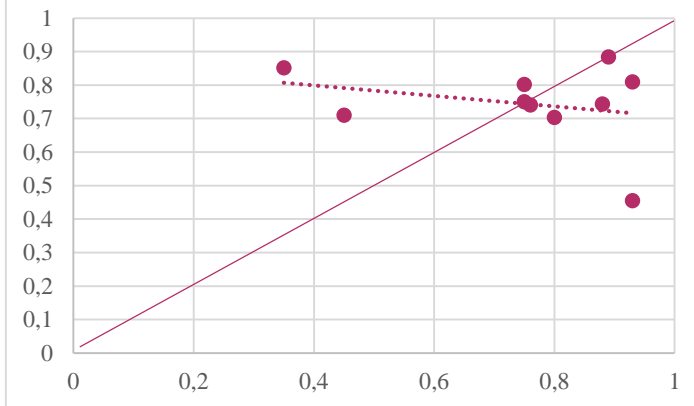
|                  | Q-Q Plot  | Measured-Predicted   |
|------------------|---|--|
| <b>Χειμώνας</b>  |   |  |
| Hm0 με 10 σημεία |  <p>Διάγραμμα 3: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας</p> |  <p>Διάγραμμα 4: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας</p> |

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.

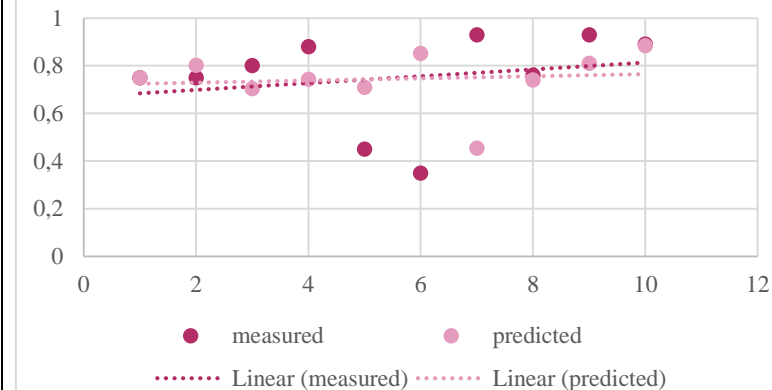
|                                       |  |   |
|---------------------------------------|--|---|
| <p>Hm0 με 26 σημεία</p>               |  <p>Διάγραμμα 5: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας</p>    |  <p>Διάγραμμα 6: Measured- Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας</p>   |
| <p>Cokriging<br/>Hm0 με 26 σημεία</p> |  <p>Διάγραμμα 7: Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο CoKriging, Χειμώνας</p> |  <p>Διάγραμμα 8: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο CoKriging, Χειμώνας</p> |
|                                       |  |   |
| <p>Άνοιξη</p>                         |  |   |

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.

Hm0 με 10 σημεία

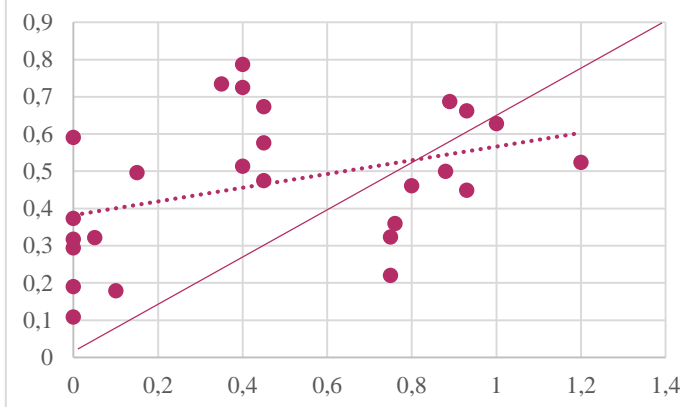


Διάγραμμα 9:Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη

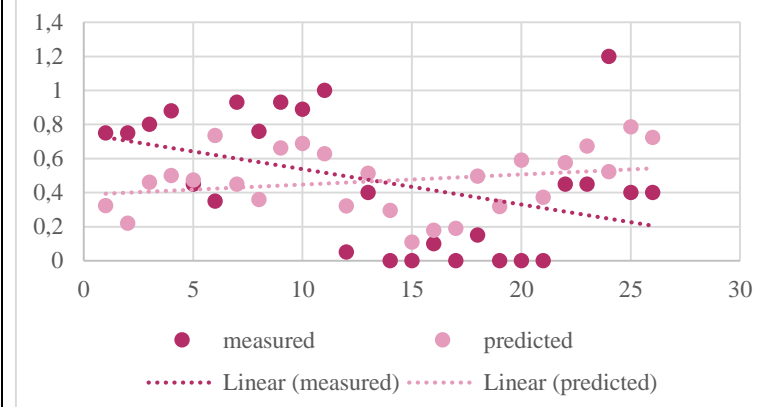


Διάγραμμα 10: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη

Hm0 με 26 σημεία

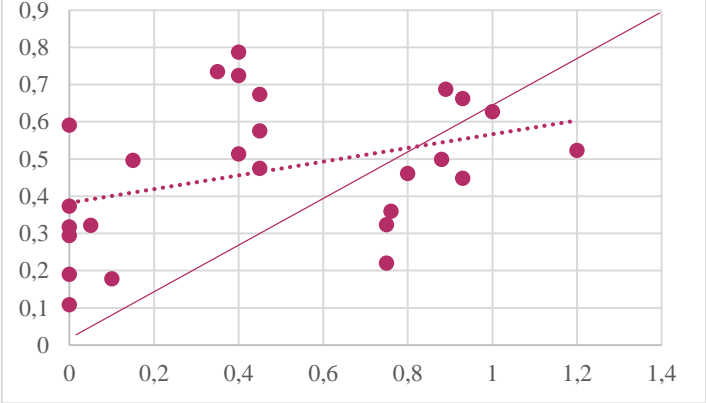
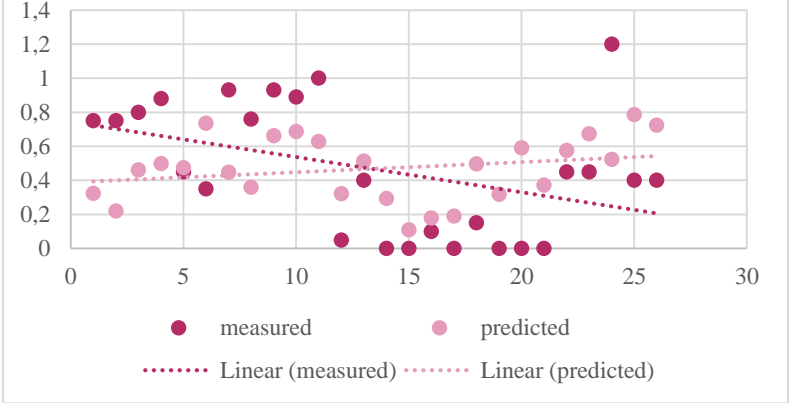
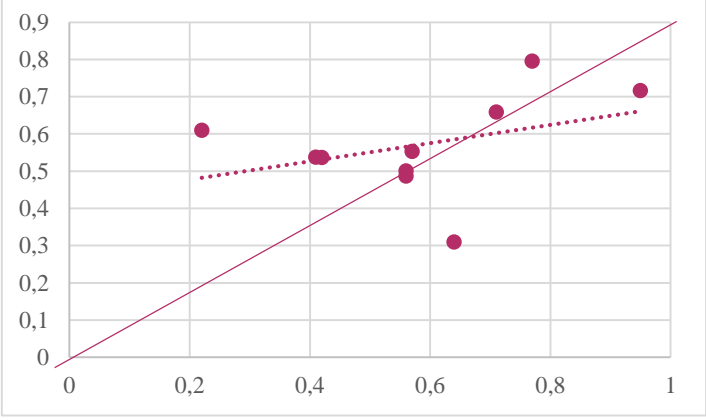
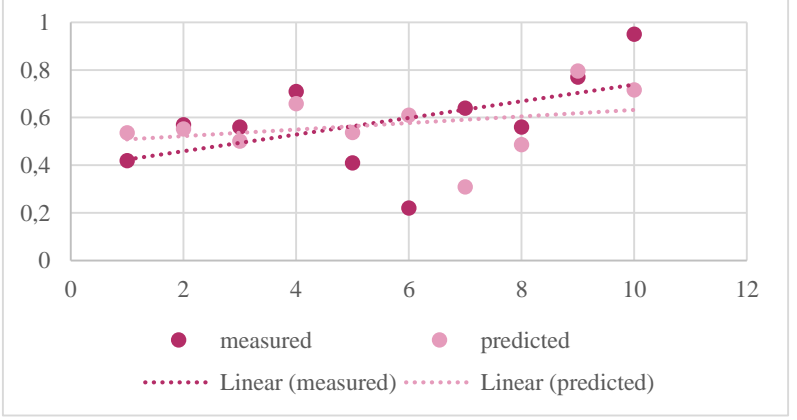


Διάγραμμα 11:Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη



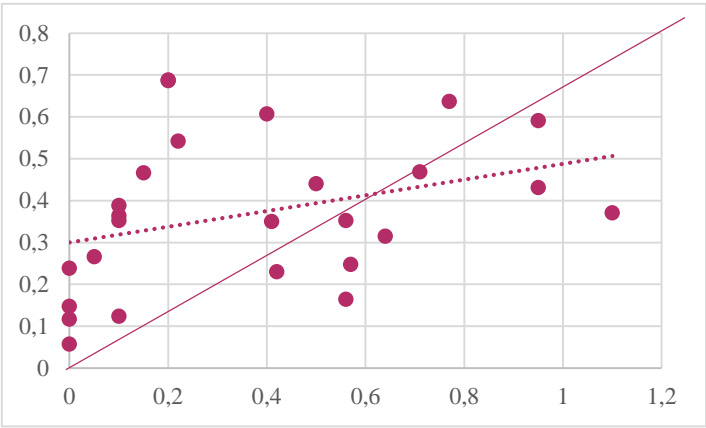
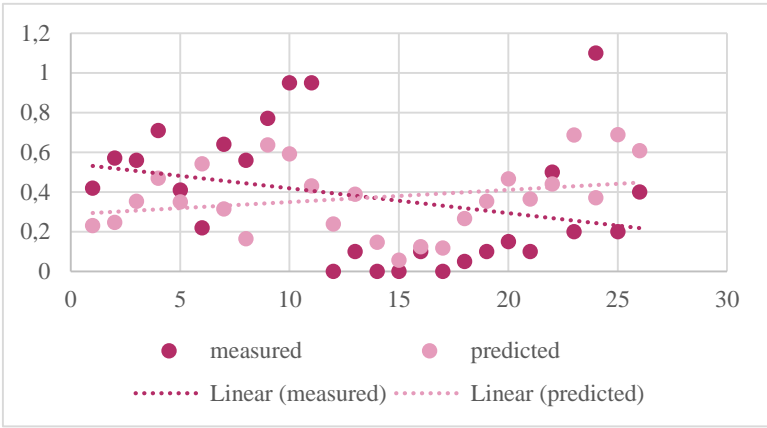
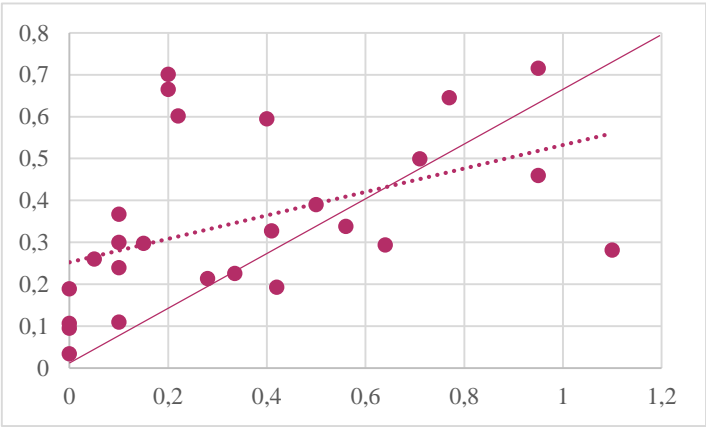
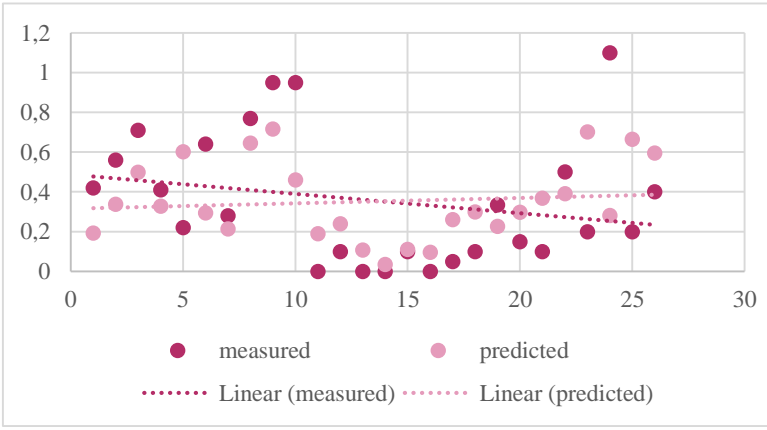
Διάγραμμα 12: Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.

|   |  |   |
|---|--|---|
| <p>Cokriging<br/>Hm0 με 26<br/>σημεία</p> |  <p>Διάγραμμα 13:Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast,με τη μέθοδο CoKriging, Άνοιξη</p> |  <p>Διάγραμμα 14:Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast,με τη μέθοδο CoKriging, Άνοιξη</p> |
| <p>Καλοκαίρι<br/>Hm0 με 10<br/>σημεία</p> |  <p>Διάγραμμα 15:Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι</p>                                 |  <p>Διάγραμμα 16:Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι</p>                                 |

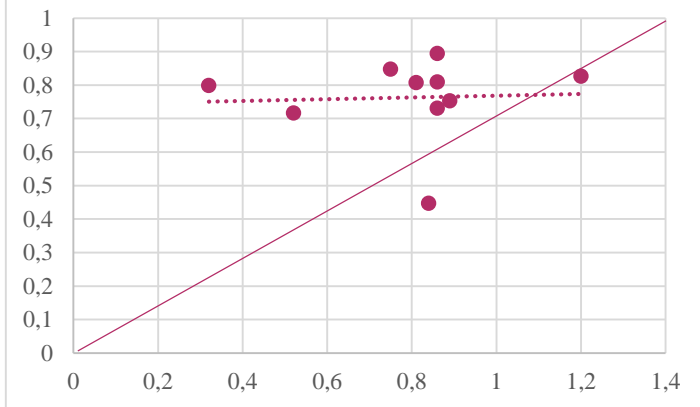


ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.

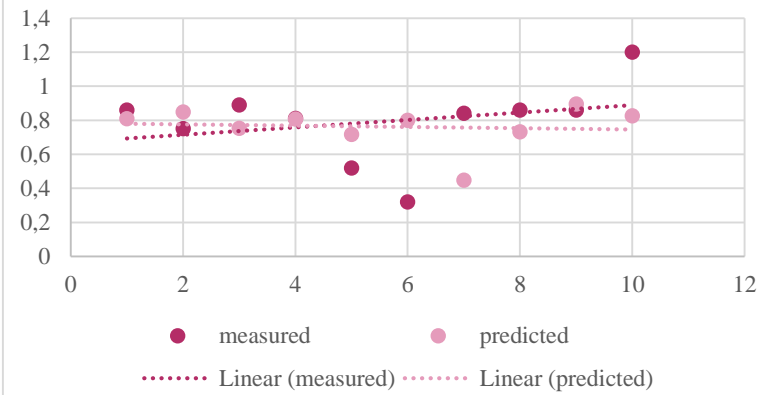
|                                       |  |   |
|---------------------------------------|--|---|
| <p>Hm0 με 26 σημεία</p>               |  <p>Διάγραμμα 17:Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast,με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι</p>    |  <p>Διάγραμμα 18:Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast,με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι</p>    |
| <p>Cokriging<br/>Hm0 με 26 σημεία</p> |  <p>Διάγραμμα 19:Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast,με τη μέθοδο CoKriging, Καλοκαίρι</p> |  <p>Διάγραμμα 20:Measured-Predicted Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast,με τη μέθοδο CoKriging, Καλοκαίρι</p> |
|                                       |  |   |
| <p>Φθινόπωρο</p>                      |  |   |

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ  
ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.

Hm0 με 10  
σημεία

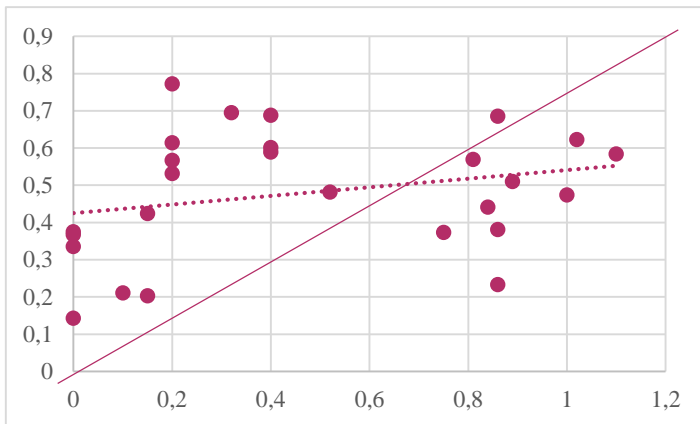


Διάγραμμα 21:Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο

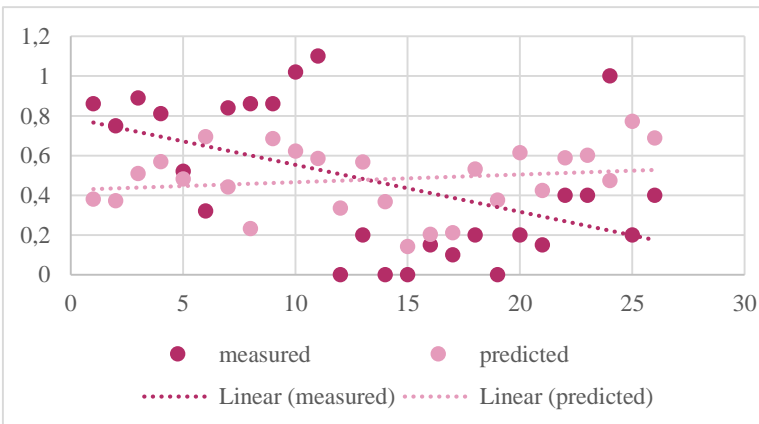


Διάγραμμα 22:Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο

Hm0 με 26  
σημεία

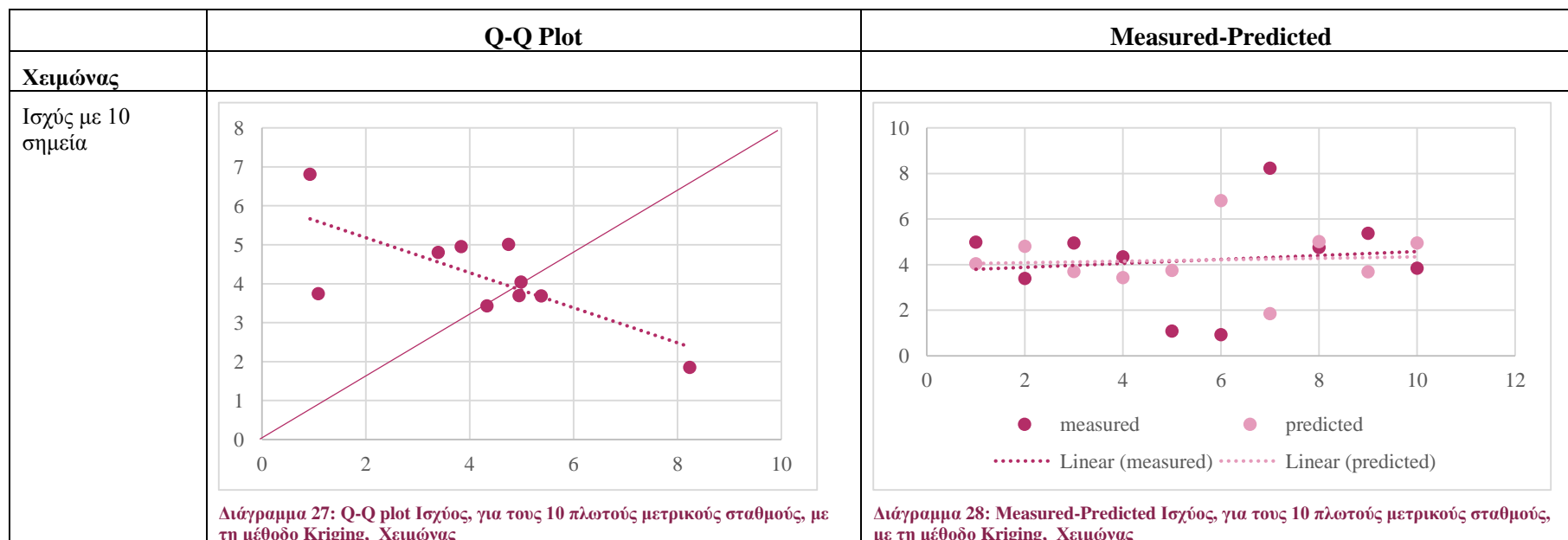
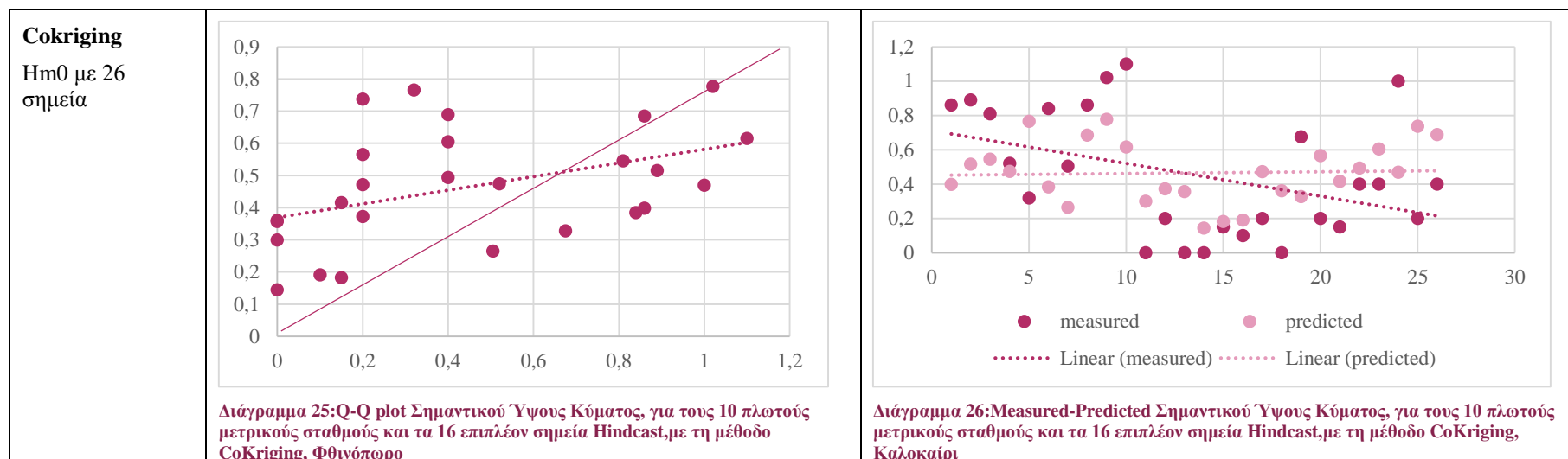


Διάγραμμα 23:Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο

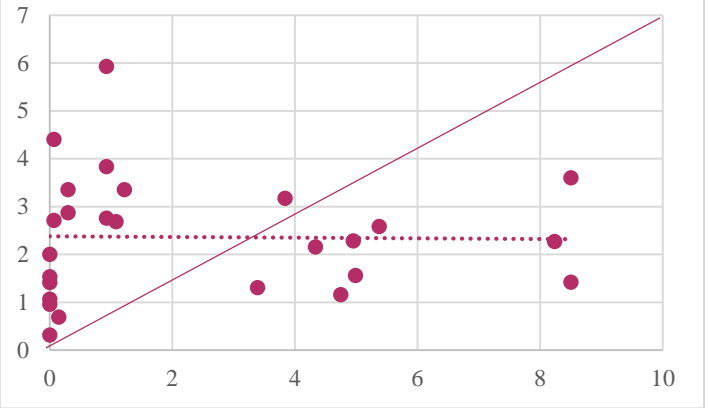
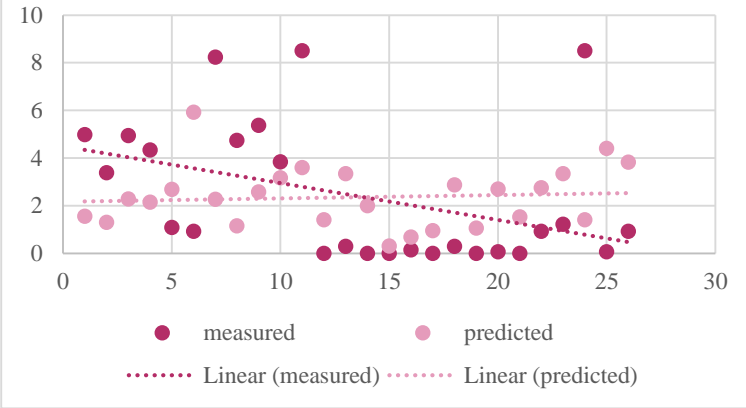
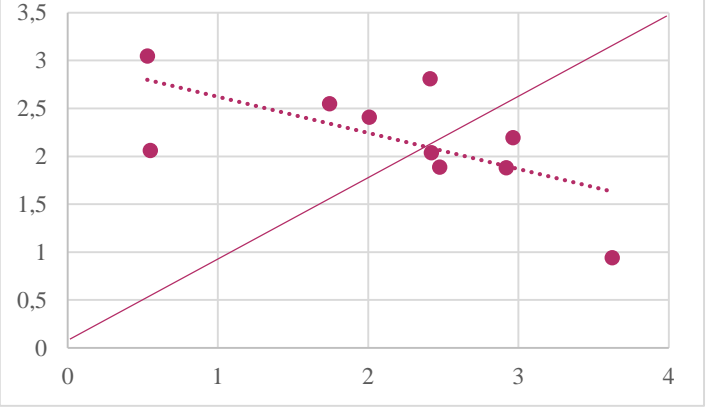
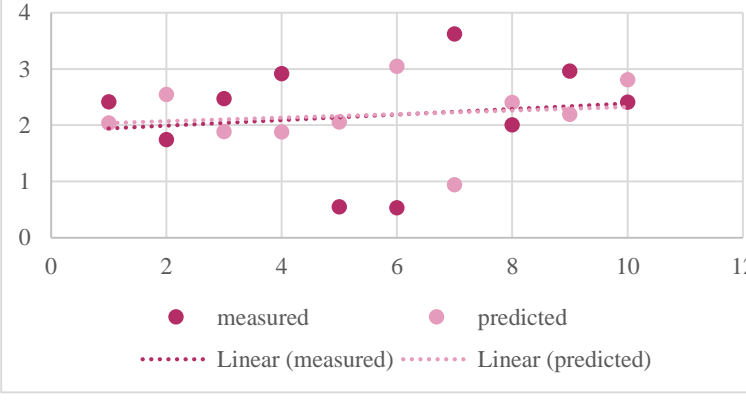


Διάγραμμα 24:Q-Q plot Σημαντικού Ύψους Κύματος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο

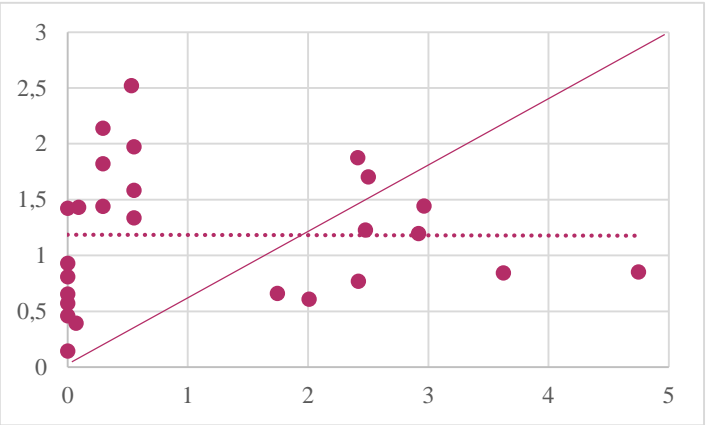
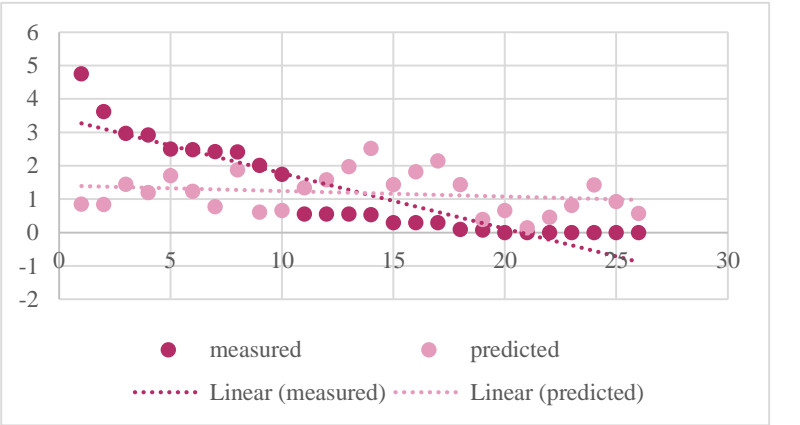
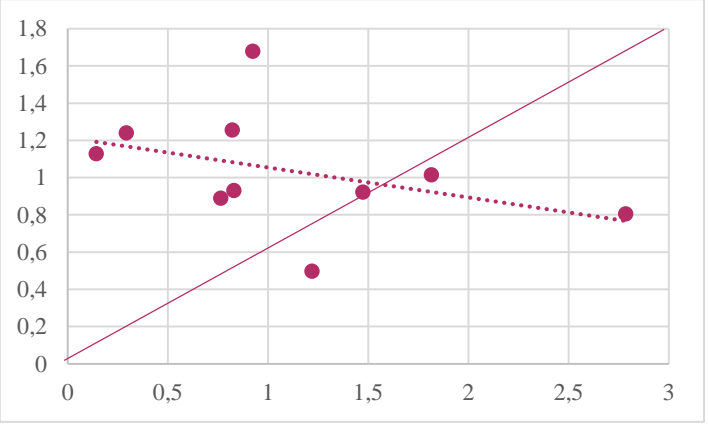
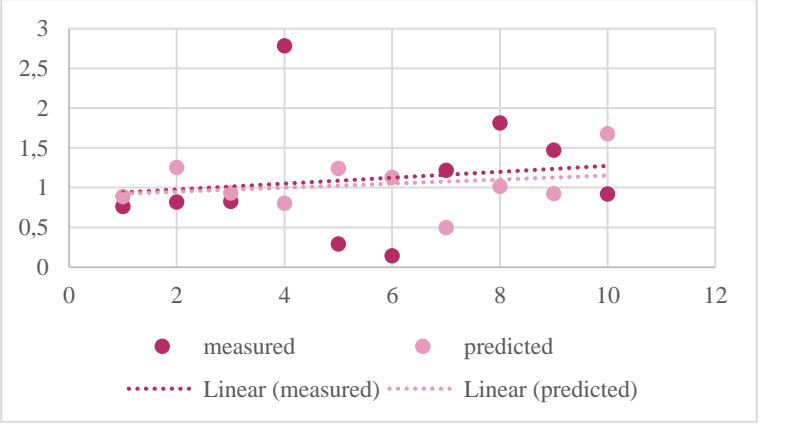
ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.



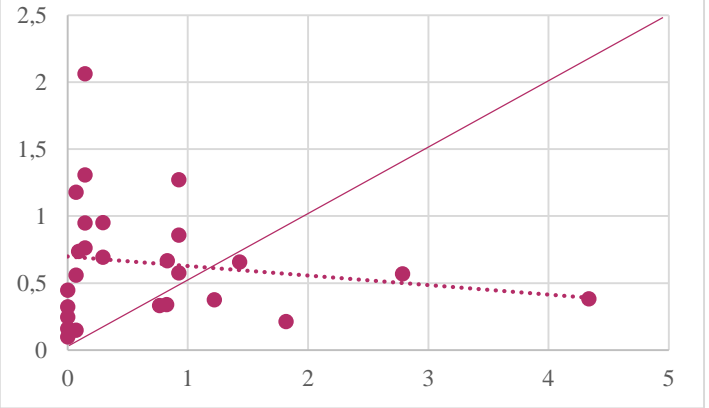
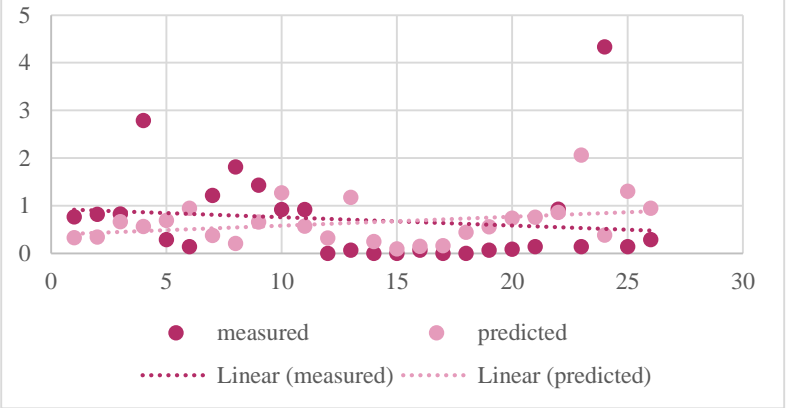
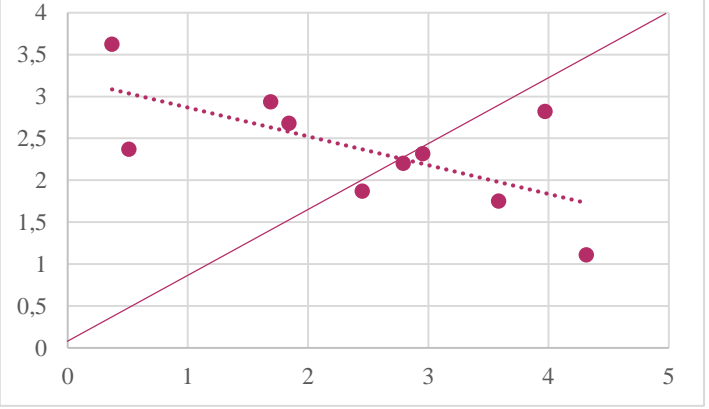
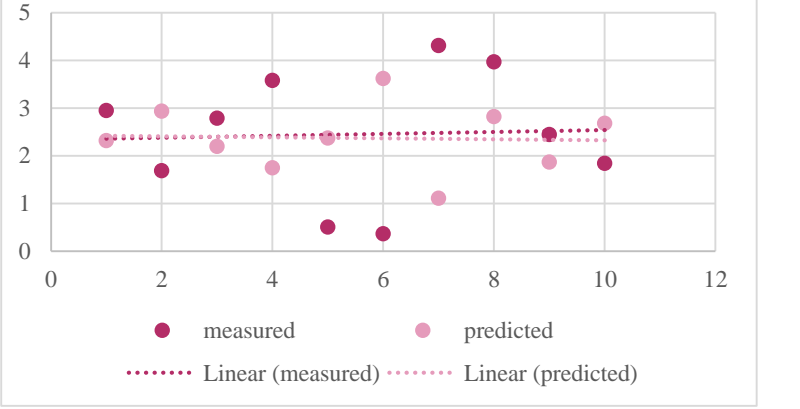
ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ  
ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.

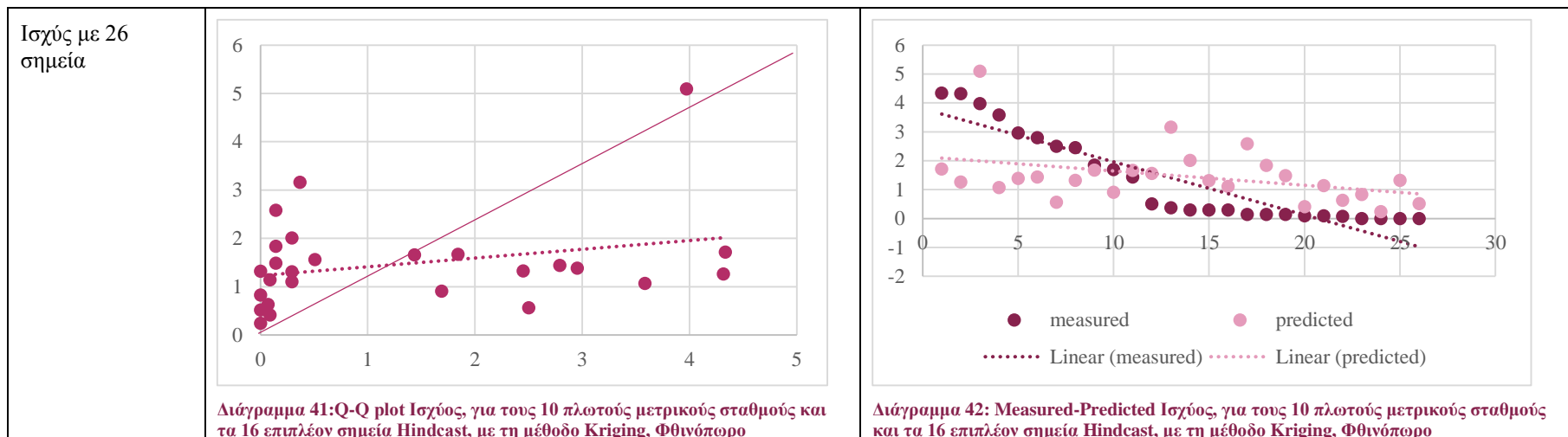
|                               |  |   |
|-------------------------------|--|---|
| <p>Ισχύς με 26<br/>σημεία</p> |  <p>Διάγραμμα 29: Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας</p> |  <p>Διάγραμμα 30: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Χειμώνας</p> |
| <p>Ανοιξη</p>                 |  |   |
| <p>Ισχύς με 10<br/>σημεία</p> |  <p>Διάγραμμα 31: Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη</p>                                     |  <p>Διάγραμμα 32: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη</p>                                     |

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.

|                           |  |   |
|---------------------------|--|---|
| <p>Ισχύς με 26 σημεία</p> |  <p>Διάγραμμα 33: Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη</p> |  <p>Διάγραμμα 34: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Άνοιξη</p> |
| <p>Καλοκαίρι</p>          |  |   |
| <p>Ισχύς με 10 σημεία</p> |  <p>Διάγραμμα 35: Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι</p>                                |  <p>Διάγραμμα 36: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι</p>                                |

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.

|                           |   |  |
|---------------------------|---|--|
| <p>Ισχύς με 26 σημεία</p> |  <p>Διάγραμμα 37: Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι</p> |  <p>Διάγραμμα 38: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς και τα 16 επιπλέον σημεία Hindcast, με τη μέθοδο Kriging, Καλοκαίρι</p> |
| <p>Φθινόπωρο</p>          |   |  |
| <p>Ισχύς με 10 σημεία</p> |  <p>Διάγραμμα 39: Q-Q plot Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο</p>                                   |  <p>Διάγραμμα 40: Measured-Predicted Ισχύος, για τους 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς, με τη μέθοδο Kriging, Φθινόπωρο</p>                                   |



Είναι εμφανές ότι όσο προστίθενται νέα στοιχεία, επιπλέον σημεία, δευτερεύουσα πληροφορία, παρατηρείται όλο και μεγαλύτερη συσχέτιση ανάμεσα στις μετρούμενες και τις προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου.

Από την ποιοτική απεικόνιση της συσχέτισης, που αφορά μόνο την εικόνα των διαγραμμάτων προκύπτει ο παρακάτω πίνακας αξιολόγησης τους. (Πίνακας 9)

| Ποιότητα διαγραμμάτων/<br>διαγράμματα | $Hm0$    | $Hm0$ με Hindcast | $Hm0$ με hindcast<br>και CoKriging | Ισχύς με αρχικά<br>σημεία | Ισχύς με hindcast |
|---------------------------------------|----------|-------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------|
| Καλή συσχέτιση                        | m-p      | Q-Q plot          | Q-Q plot                           | m-p                       |                   |
| Μέτρια-<br>συσχέτιση                  | Q-Q plot |                   | m-p                                |                           |                   |
| Κακή συσχέτιση                        |          | m-p               |                                    | Q-Q plot                  | Q-Q plot, m-p     |

Πίνακας 9: Ποιότητα Διαγραμμάτων Συσχέτισης

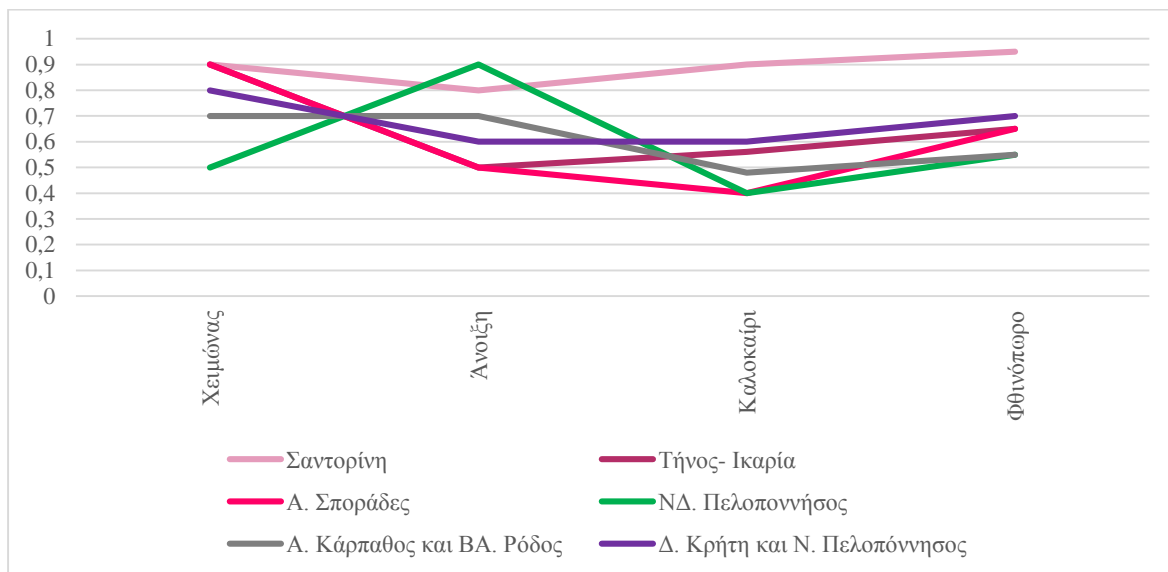


Τα διαγράμματα που δίνουν μία επαρκώς καλή εικόνα συσχέτισης είναι τα Q-Q plot για κάθε μήνα των 26 σημείων συσχέτισης του σημαντικού ύψους κύματος καθώς και αυτά στα οποία εισάγεται η δευτερεύουσα πληροφορία. Τα διαγράμματα μετρούμενων παρατηρούμενων τιμών δεν αποτελούν καλή εικόνα καθώς η μόνη μέθοδος που παίρνουμε επαρκή αποτελέσματα είναι αυτή των 26 σημείων για τις περισσότερες από τις περιόδους που μελετάται.

Για τα διαγράμματα που αφορούν την ισχύ δεν συμβαίνει το αντίστοιχο. Λαμβάνονται επαρκή αποτελέσματα όσον αφορά τα διαγράμματα μετρούμενων παρατηρούμενων τιμών για την απεικόνιση με τα 10 σημεία ενώ για αυτήν με τα 26 δεν λαμβάνονται ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα διαγράμματα Q-Q δεν δίνουν σημαντικά αποτελέσματα σε καμία από τις περιπτώσεις που αφορούν την παραγόμενη κυματική ενέργεια.

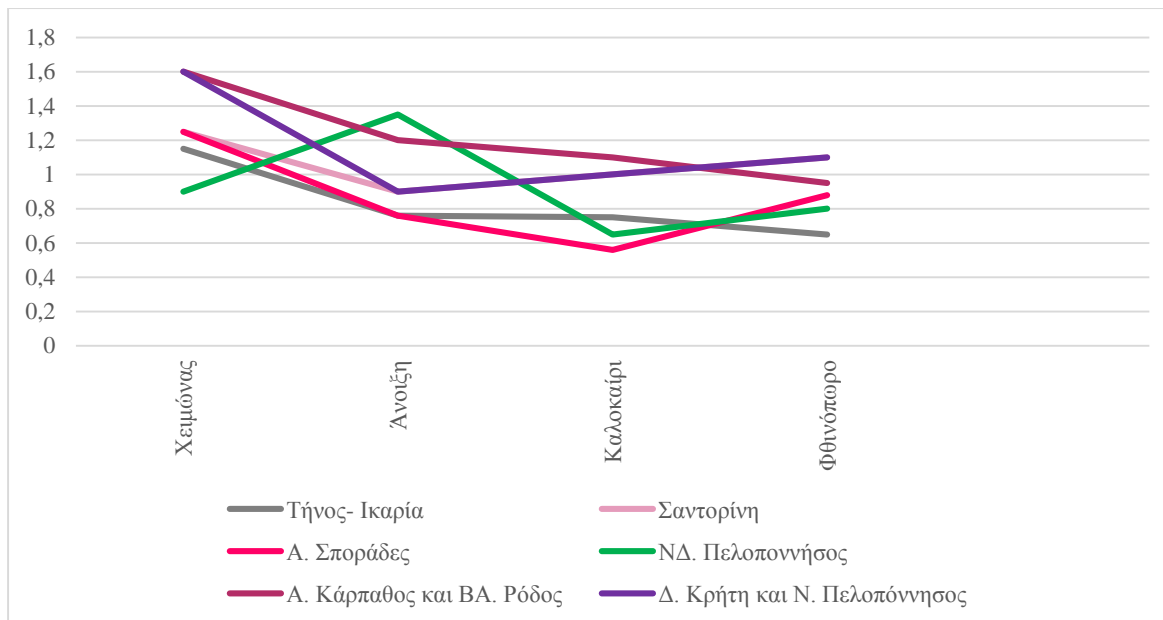
#### 4.7 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΕΣ ΓΙΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Αρχικά, ελέγχεται το πρώτο κριτήριο ως προς το **ελάχιστο όριο σημαντικού ύψους κύματος** για τη λειτουργία μίας εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας.



Διάγραμμα 43: Μέση Διακύμανση ελάχιστων τιμών σημαντικού ύψους κύματος στις περιοχές με μέγιστο κυματικό δυναμικό

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.



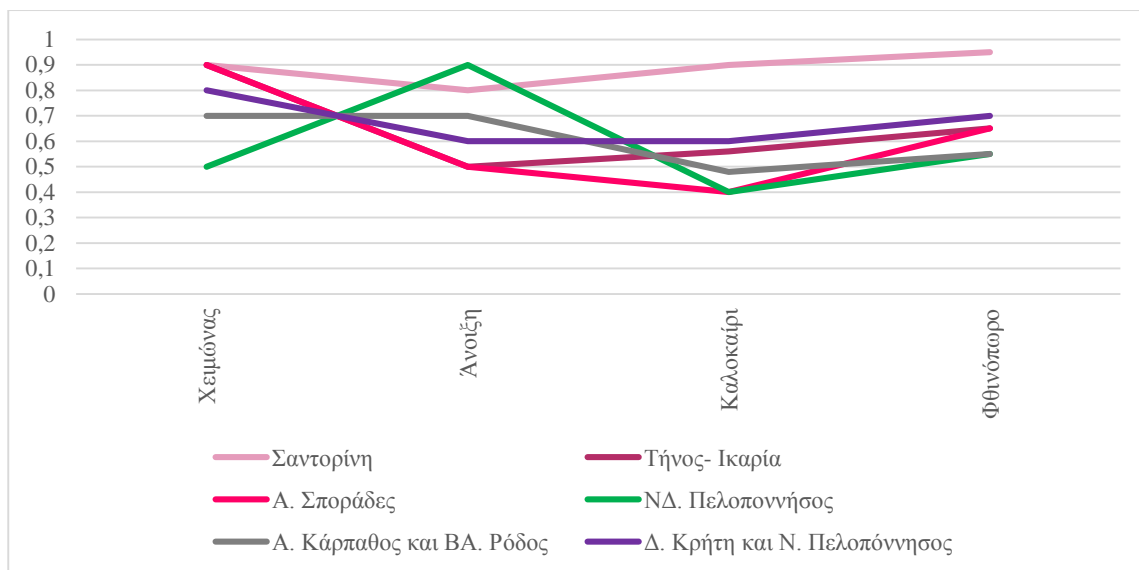
Διάγραμμα 44: Μέση Διακύμανση μέγιστων τιμών σημαντικού ύψους κύματος στις περιοχές με μέγιστο κυματικό δυναμικό

Από τα διαγράμματα (Διάγραμμα 43, Διάγραμμα 44) που δημιουργήθηκαν προκύπτει ότι το μέγιστο όριο των κλάσεων κάθε περιοχής κυμαίνεται αρκετά κοντά στην τιμή των 0,9m σημαντικού ύψους κύματος. Παρόλα αυτά, η περιοχή Ανατολικά των Σποράδων καθώς και η ευρύτερη περιοχή της Ικαρίας και της Τήνου, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος του έτους παρουσιάζουν μέγιστα μικρότερα κατά μέσο όρο των 0,9m.

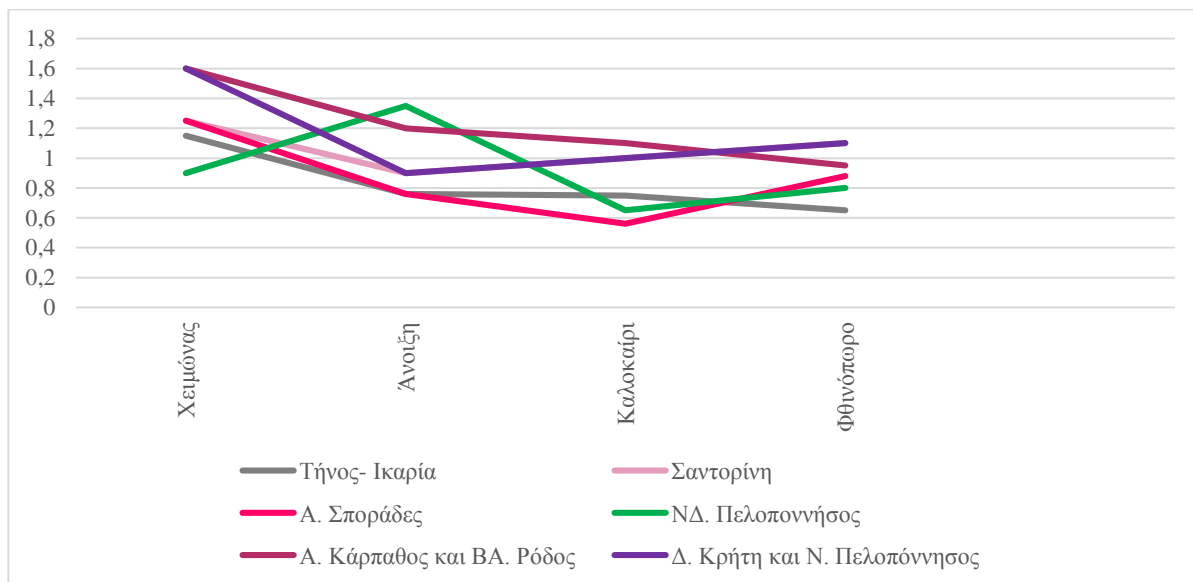
Στη συνέχεια, ελέγχονται οι περιοχές που δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές στις τιμές της ενέργειας που παράγεται από τους κυματισμούς σε W/m μετώπου κύματος.

Κρίνεται ότι κατά μέσο όρο, μία περιοχή υψηλού κυματικού δυναμικού είναι κατάλληλη για εγκατάσταση μονάδας παραγωγής ενέργεια όταν η μέση εποχιακή ισχύ ξεπερνάει τα 0,9kW/m. Το μέγεθος αυτό υπολογίζεται κατά μέσω όρο από τον πίνακα του παραρτήματος Γ, κατά προσέγγιση.

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Γ.Σ.Π.



Διάγραμμα 45: Μέση Διακύμανση ελάχιστων τιμών ενεργειακής ισχύος στις περιοχές με μέγιστο κυματικό δυναμικό



Διάγραμμα 46: Μέση Διακύμανση μέγιστων τιμών ενεργειακής ισχύος στις περιοχές με μέγιστο κυματικό δυναμικό

Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στις τιμές των μέγιστων και ελάχιστων τιμών του μέσου όρου του σημαντικού ύψους κύματος δεν αποτελούν εμπόδιο στην εγκατάσταση σταθμών εκμετάλλευσης της ενέργειας που παράγεται από τα κύματα.

Η περιοχή που βρίσκεται νοτιοδυτικά της Πελοποννήσου φαίνεται να παρουσιάζει αρκετές διακυμάνσεις εποχιακά, αποτελεί όμως σημαντικό σημείο ενεργειακής εκμετάλλευσης καθώς αποτελεί μία από τις περιοχές με αξιοσημείωτες τιμές σημαντικού ύψους κύματος. Πλεονέκτημα, για τις περισσότερες περιοχές που εμφανίζονται στον χάρτη με τα σημαντικότερα σημεία εκμετάλλευσης, είναι η μικρή απόσταση από την ηπειρωτική Ελλάδα καθώς και τα νησιά του Αιγαίου.

Τέλος, στον επόμενο χάρτη σημειώνονται οι περιοχές όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές σημαντικού ύψους κύματος καθώς και κυματικής ισχύος(Χάρτης 25).



Χάρτης 25:Σημεία εκμετάλλευσης κυματικού δυναμικού

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η χαρτογράφηση του σημαντικού ύψους κύματος και του κυματικού δυναμικού στον Ελλαδικό χώρο έγινε με χρήση γεωστατιστικών αναλύσεων που αφορούν την χωρική μεταβλητότητα των δεδομένων μέσω της πλέον γνωστής μεθόδου Kriging. Τα δεδομένα που αφορούν την εργασία αυτή απορρέουν από 10 πλωτούς μετρικούς σταθμούς της βάσης δεδομένων του ΠΟΔΕΙΔΩΝ και χρονικής διάρκειας 5 ετών(2007-2011).

Για να καταλήξουμε στα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα και τους τελικούς χάρτες απεικόνισης του σημαντικού ύψους κύματος και του κυματικού δυναμικού υπολογίστηκαν τα σφάλματα και οι δείκτες συσχέτισης των αποτελεσμάτων(Πίνακας 8).

Όσον αφορά τους Άτλαντες σημαντικού ύψους κύματος, προκύπτει ότι αυτοί στους οποίους έχουν εισαχθεί τα επιπλέον 16 σημεία και η δευτερεύουσα πληροφορία του Αιολικού δυναμικού, αποτελούν αυτούς με την καλύτερη ακρίβεια. Αν και οι πρώτες απεικονίσεις, σε ορισμένες περιπτώσεις δίνουν πιο ακριβοί αποτελέσματα για ορισμένους δείκτες, για τους υπόλοιπους οι τιμές είναι μη επαρκείς. Για τον λόγο αυτό, οι εν λόγω Άτλαντες (με τα 26 σημεία και την δευτερεύουσα πληροφορία) θεωρούνται περισσότερο αντιπροσωπευτικοί έχοντας ικανοποιητικούς δείκτες MSPE και IoA', και μέτριες τιμές του δείκτη MAE. Επιπλέον, τα διαγράμματα (Q-Q plot, Measured-Predicted) που αφορούν αυτούς του Άτλαντες, εμφανίζουν καλή συσχέτιση συγκριτικά με τις προηγούμενες προσεγγίσεις πριν εισαχθούν οι προαναφερθείσες πληροφορίες. Συνεπώς, οι χάρτες που επιλέγονται για την απεικόνιση του σημαντικού ύψους κύματος είναι οι: Χάρτης 13, Χάρτης 14, Χάρτης 15, Χάρτης 16, που αφορούν την προηγούμενη περιγραφή.

Από τους Άτλαντες σημαντικού ύψους κύματος προκύπτει συγκεντρωτικά ότι:

- Κατά την χειμερινή περίοδο, δυτικά της Κρήτης και νότια της Πελοποννήσου οι τιμές του σημαντικού ύψους κύματος κυμαίνονται από 0,8m έως 1,5-1,6 m, ανατολικά της Καρπάθου και βορειοανατολικά της Ρόδου από 0,7 έως 1,5-1,6, στις νοτιοδυτικές ακτές της Πελοποννήσου από 0,5 έως 0,9m, ανατολικά των Σποράδων από 0,9-1,25m και στο κεντρικό αιγαίο, ανάμεσα στην Τίνο και την Ικαρία από 0,9m έως 1,15m καθώς περιμετρικά της Σαντορίνης από 0,9 έως 1,25m.
- Την περίοδο της Άνοιξη, στα δυτικά της Κρήτης και νότια της Πελοποννήσου παρατηρούνται τιμές από 0,6m έως 0,9 m, ανατολικά της Καρπάθου και βορειοανατολικά της Ρόδου από 0,7 έως 1,2m, στις νοτιοδυτικές ακτές της Πελοποννήσου από 0,9 έως 1,35m, ανατολικά των σποράδων και στο κεντρικό αιγαίο , ανάμεσα στην Τίνο και την Ικαρία από 0,5-0,76m με μέγιστη τιμή σημαντικού ύψους κύματος περιμετρικά της Σαντορίνης να φτάνει για την συγκεκριμένη εποχή έως και τα 0,87m.

- Κατά την καλοκαιρινή περίοδο, το σημαντικό ύψος κύματος διαμορφώνεται ως εξής: στην δυτική πλευρά της Κρήτης και νότια της Πελοποννήσου από 0,6m έως 0,97 m, ανατολικά της Καρπάθου και βορειοανατολικά της Ρόδου από 0,48 έως 1,1m, στις νοτιοδυτικές ακτές της Πελοποννήσου από 0,4 έως 0,65m, ανατολικά των Σποράδων και στο κεντρικό Αιγαίο από 0,4 έως 0,56m, ανάμεσα στην Τίνο και την Ικαρία από 0,56 έως 0,75m με μέγιστη τιμή περιμετρικά της Σαντορίνης να φτάνει για την συγκεκριμένη εποχή τα 0,97m.
- Τέλος, την περίοδο του Φθινοπώρου: δυτικά της Κρήτης και νότια της Πελοποννήσου οι τιμές του σημαντικού ύψους κύματος κυμαίνονται από 0,7m έως 1,1 m, ανατολικά της Καρπάθου και βορειοανατολικά της Ρόδου από 0,55 έως 0,95m, στις νοτιοδυτικές ακτές της Πελοποννήσου από 0,55 έως 0,80m, ανατολικά των Σποράδων και στο κεντρικό αιγαίο από 0,65 έως 0,88m, ομοίως ανάμεσα στην Τίνο και την Ικαρία, με μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος περιμετρικά της Σαντορίνης από 0,94-1,1m.

Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται κατά την περίοδο του Φθινοπώρου και του Χειμώνα. Τα σημεία τα οποία ξεχωρίζουν για το μέγιστο ύψος κύματος είναι δυτικά της Κρήτης και νότια της Πελοποννήσου, ανατολικά της Καρπάθου και στην ευρύτερη περιοχή της νήσου Σαντορίνης.

Όσον αφορά το κυματικό δυναμικό, οι δείκτες συσχέτισης και τα σχετικά σφάλματα φαίνεται να ικανοποιούν αρκετά τις προσδοκίες της μελέτης. Αν υποθέσουμε ότι λαμβάνουμε υπόψιν τους δείκτες καλύτερης συσχέτισης που εμφανίζουν οι χάρτες καθώς και τα αντίστοιχα βαριογράμματα της διαδικασίας δημιουργίας των χαρτών σημαντικού ύψους κύματος, θεωρούμε πιο αντιπροσωπευτικούς τους χάρτες που εμπεριέχουν επιπλέον σημεία και δευτερεύουσα πληροφορία. (Χάρτης 17, Χάρτης 18, Χάρτης 19, Χάρτης 20)

Από τους Άτλαντες της ισχύος των κυμάτων προκύπτουν συγκεντρωτικά τα εξής συμπεράσματα:

- Κατά τη χειμερινή περίοδο, δυτικά της Κρήτης, νότια και νοτιοδυτικά της Πελοποννήσου οι τιμές της κυματικής ισχύος κυμαίνονται από 3,6 kW/m έως 8,5 kW/m, ανατολικά της Καρπάθου και βορειοανατολικά της Ρόδου από 2,6 έως 8,5 kW/m, ανατολικά των Σποράδων από 2,7 έως 4,8 kW/m, ομοίως στο κεντρικό αιγαίο, ανάμεσα στην Τίνο και την Ικαρία καθώς και περιμετρικά της Σαντορίνης.
- Την περίοδο της Άνοιξη, στα δυτικά της Κρήτης και νότια της Πελοποννήσου παρατηρούνται τιμές από 2 kW/m έως 3,2 kW/m, ανατολικά της Καρπάθου και βορειοανατολικά της Ρόδου από 1,6 έως 4,7 kW/m, στις νοτιοδυτικές ακτές της Πελοποννήσου από 1,2 έως 4 kW/m, ανατολικά των Σποράδων από 2 έως 3,2 kW/m, στο κεντρικό Αιγαίο, ανάμεσα στην Τίνο και την Ικαρία από 1,5-2,6 kW/m και περιμετρικά της Σαντορίνης φτάνει για την συγκεκριμένη εποχή έως 1,2 kW/m.



- Κατά την καλοκαιρινή περίοδο, το σημαντικό ύψος κύματος διαμορφώνεται ως εξής: στην δυτική πλευρά της Κρήτης και νότια της Πελοποννήσου από 0,5 kW/m έως 1,2 kW/m, ανατολικά της Καρπάθου και βορειοανατολικά της Ρόδου καθώς και ανάμεσα στην Τίνο και την Ικαρία από 1,2 έως 3,6 kW/m, στις νοτιοδυτικές ακτές της Πελοποννήσου από 1,2 έως 1,8 kW/m, ανατολικά των Σποράδων και στο κεντρικό Αιγαίο καθώς και περιμετρικά τις Σαντορίνης συναντώνται τιμές που κυμαίνονται από 0,6 έως 1,2 kW/m
- Τέλος, την περίοδο του Φθινοπώρου: δυτικά της Κρήτης και νότια της Πελοποννήσου οι τιμές της κυματικής ισχύος κυμαίνονται από 2,8 έως 4,3 kW/m, ανατολικά της Καρπάθου και βορειοανατολικά της Ρόδου από 0,7 έως 2 kW/m, στις νοτιοδυτικές ακτές της Πελοποννήσου από 2,8 έως 4,1 kW/m, ανατολικά των Σποράδων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2-2,8 και στο κεντρικό αιγαίο από 2 έως 3,4. Ανάμεσα στην Τίνο και την Ικαρία η τιμές του κυματικού δυναμικού εμφανίζουν τιμές από 2 έως 3,4 kW/m και περιμετρικά της Σαντορίνης από 1,4 έως 2,8 kW/m.

Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται κατά την περίοδο του Φθινοπώρου και του Χειμώνα. Τα σημεία τα οποία ξεχωρίζουν για το μέγιστο ύψος κύματος είναι δυτικά της Κρήτης και νότια της Πελοποννήσου, ανατολικά της Καρπάθου και στην ευρύτερη περιοχή της νήσου Σαντορίνης.

Τα ημιβαριογράμματα και οι δείκτες σφαλμάτων συνάδουν μεταξύ τους. Στους χάρτες τους οποίους το αντίστοιχο ημιβαριόγραμμα είναι καλής ποιότητας φαίνεται να αντιστοιχούν δείκτες με ικανοποιητική τιμή. Επιπλέον, τα ημιβαριογράμματα παρουσιάζουν αρκετά καλή εικόνα αυτοσυσχέτισης των σημείων της δειγματοληψίας και των hindcast σημείων με τα θεωρητικό ημιβαριόγραμμα που σχηματίζεται. Αυτό, εξηγεί την αρκετά καλή και ομαλή εικόνα των ισοβαρών καμπύλων που σχηματίζονται κατά τη διαδικασία της χαρτογράφησης με τη μέθοδο kriging.

Συνοπτικά, οι περιοχές οι οποίες είναι κατάλληλες για εκμετάλλευση είναι αυτές που το κυματικό δυναμικό δεν υποτιμάται ιδιαίτερα λόγω εποχιακών μεταβολών. Οι περιοχές αυτές στον Ελλαδικό χώρο είναι οι εξής:

- Δυτικά της Κρήτης και Νότια της Πελοποννήσου
- Ανατολικά της Καρπάθου και Βορειοανατολικά της Ρόδου
- Στα Νοτιοδυτικά παράλια της Πελοποννήσου
- Στην περιοχή περιμετρικά της Σαντορίνης

Αναλυτικότερα, οι περιοχές αυτές αποτελούν κυρίως κατά την περίοδο του χειμώνα, περιοχές με αξιόλογο κυματικό δυναμικό, άξιο εκμετάλλευσης. Οι μέγιστες τιμές σύμφωνα με τα αποτελέσματα που φαίνονται στους παραγόμενους άτλαντες παρουσιάζονται είτε στα Νοτιοδυτικά παράλια της Πελοποννήσου, είτε αρκετά μακριά από την ακτή, στις περιοχές κοντά στην Κάρπαθο και τη Ρόδο και στα δυτικά της Κρήτης.

Επιπλέον περιοχές παρουσιάζονται στον Χάρτη 25 τα οποία αν και παρουσιάζουν αξιοσημείωτο κυματικό δυναμικό, δεν αποτελούν τις μέγιστες τιμές που θα μπορούσαν να παρατηρηθούν. Παρόλα αυτά, όλες οι περιοχές που είναι σημειωμένες στον εν λόγω χάρτη αποτελούν αξιόλογες πηγές κυματικής ενέργειας με εξαίρεση την εποχή του καλοκαιριού (για ορισμένες εξ αυτών).

Είναι σημαντικό, τέλος, να αναφερθεί ότι η περαιτέρω μελέτη ανά περιοχή είναι χρήσιμη καθώς παρατηρούνται ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που ευνοούν την εγκατάσταση νέων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας μέσω των κυμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΗΓΕΣ

- [1] Θ. Τσούτσος, Ι. Κανάκης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Τεχνολογίες και Περιβάλλον*, Παπασωτηρί, Αθήνα, 2013.
- [2] Μ. Παναγιωτόπουλος, Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις συστημάτων αξιοποίησης Κυματικής Ενέργειας, in: n.d.
- [3] Oscillating Water Column (OWC), (n.d.). <http://owcwaveenergy.weebly.com/> (accessed July 17, 2016).
- [4] Γ. Λεμονής, Κυματική ενέργεια στην Ευρώπη, Εθνικές Δραστηριότητες και προοπτικές αξιοποίησης, (n.d.).
- [5] T.W. Matt Folley, Bjoem Elsaesser, Analysis of the wave energy resource at the European Marine Energy Centre, *Renew. Energy*. 34 (2010) 1709–1715.  
[http://aquamarinepower.com/sites/resources/Published papers/2472/Analysis of the wave energy resource at the European Marine Energy Centre.pdf](http://aquamarinepower.com/sites/resources/Published%20papers/2472/Analysis%20of%20the%20wave%20energy%20resource%20at%20the%20European%20Marine%20Energy%20Centre.pdf)  
<http://pure.qub.ac.uk/portal/en/publications/analysis-of-the-wave-energy-resource-at-the-european-marine-energy>.
- [6] Ε.Κ. Οικονόμου, Περιοχές κυματικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού και η χωροθέτηση τους στο Αιγαίο, (n.d.).
- [7] R. Prest, T. Daniell, B. Ostendorf, Using GIS to evaluate the impact of exclusion zones on the connection cost of wave energy to the electricity grid, *Energy Policy*. 35 (2007) 4516–4528.  
doi:10.1016/j.enpol.2007.02.033.
- [8] J.P. Sierra, D. González-Marco, J. Sospedra, X. Gironella, C. Möso, A. Sánchez-Arcilla, Wave energy resource assessment in Lanzarote (Spain), *Renew. Energy*. 55 (2013) 480–489.  
doi:10.1016/j.renene.2013.01.004.
- [9] M.T. Pontes, R. Aguiar, H. Oliveira Pires, A nearshore wave energy Atlas for Portugal, *J. Chem. Inf. Model*. 53 (2013) 1689–1699. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [10] Waves & Swell Maps , Australia Significant Wave Height, (n.d.).  
<http://www.marineweather.net.au/models/?lt=wzcountry&lc=aus&mt=ww3> (accessed July 29, 2016).
- [11] A. Chawla, D. Spindler, H.L. Tolman, A Thirty Year Wave Hindcast Using The Latest NCEP Climate Forecast System, (2011) 1–11.
- [12] U. Henfridsson, V. Neimane, K. Strand, R. Kapper, H. Bernhoff, O. Danielsson, M. Leijon, J.

- Sundberg, K. Thorburn, E. Ericsson, K. Bergman, Wave energy potential in the Baltic Sea and the Danish part of the North Sea, with reflections on the Skagerrak, *Renew. Energy*. 32 (2007) 2069–2084. doi:10.1016/j.renene.2006.10.006.
- [13] J. Woge Nielsen, Wave model DMI-WAM, Ocean Ice Serv. - Danish Meteorol. Inst. (2016).
- [14] J. Saabye, J. Woge Nielsen, DMI-Wave height statistics, (2014).  
<http://ocean.dmi.dk/wavestat/index.uk.php> (accessed July 29, 2016).
- [15] V.G. Polnikov, STATISTICAL PROPERTIES OF A WIND-WAVE FIELD IN INDIAN OCEAN AND ITS CLIMATE VARIABILITY, 12th Int. Work. Wave Hindcasting Forecast. 3rd Coast. Hazards Symp. (2011) 73–74.
- [16] R.D. Sathiya, V. Vaithyanathan, Estimation of significant wave height using satellite data, *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* 4 (2012) 5332–5338.
- [17] F.J. Mendez, M. Menendez, C. Izaguirre, P. Camus, I.J. Losada, High resolution coastal wave climate in the Western Mediterranean, *Geophys. Res. Abstr.* 13 (2011) 12849–12849.
- [18] X. Li, S. Lehner, T. Bruns, Global numerical wave model validation using ENVISAT ASAR Wave Mode and Radar Altimeter Data, (n.d.) 1–24.
- [19] D. Vicinanza, P. Contestabile, V. Ferrante, Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy), *Renew. Energy*. 50 (2013) 506–521. doi:10.1016/j.renene.2012.07.015.
- [20] M. Ozger, Z. Sen, Triple diagram method for the prediction of wave height and period, *Ocean Eng.* 34 (2007) 1060–1068. doi:10.1016/j.oceaneng.2006.05.006.
- [21] D. Khojasteh, R. Kamali, Evaluation of wave energy absorption by heaving point absorbers at various hot spots in Iran seas, *Energy*. 109 (2016) 629–640. doi:10.1016/j.energy.2016.05.054.
- [22] L. Rusu, C. Guedes Soares, Wave energy assessments in the Azores islands, *Renew. Energy*. 45 (2012) 183–196. doi:10.1016/j.renene.2012.02.027.
- [23] L. Liberti, A. Carillo, G. Sannino, Wave energy resource assessment in the Mediterranean , the Italian perspective, (2013). doi:10.1016/j.renene.2012.08.023.
- [24] T. Soukissian, A. Prospathopoulos, M. Hatzinaki, M. Kabouridou, Assessment of the Wind and Wave Climate of the Hellenic Seas Using 10-Year Hindcast Results, *Open Ocean Eng. J.* 1 (2008) 1–12. doi:10.2174/1874835X00801010001.
- [25] G. Emmanouil, G. Galanis, C. Kalogeri, G. Zodiatis, G. Kallos, 10-year high resolution study of wind, sea waves and wave energy assessment in the Greek offshore areas, *Renew. Energy*. 90 (2016) 399–419. doi:10.1016/j.renene.2016.01.031.
- [26] A. Nobre, M. Pacheco, R. Jorge, M.F.P. Lopes, L.M.C. Gato, Geo-spatial multi-criteria analysis for wave energy conversion system deployment, *Renew. Energy*. 34 (2009) 97–111. doi:10.1016/j.renene.2008.03.002.

- [27] Z. Deng, Z. Huang, A.W.K. Law, Wave power extraction from a bottom-mounted oscillating water column converter with a V-shaped channel, *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 470 (2014) 20140074–20140074. doi:10.1098/rspa.2014.0074.
- [28] A.F. de O. Falcao, Wave energy utilization: A review of the technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 899–918. doi:10.1016/j.rser.2009.11.003.
- [29] Colin Barras, Plenty of wave energy to be harvested close to shore, *New Sci.* (2010). <https://www.newscientist.com/article/mg20627595-700-plenty-of-wave-energy-to-be-harvested-close-to-shore/> (accessed July 17, 2016).
- [30] Christopher Fernandes, Oscillating Water Columns, (n.d.). <http://owc-wec.weebly.com/oscillating-water-columns.html> (accessed July 18, 2016).
- [31] N. Kim, M. Niels, The Danish Wave Energy Programme, 1997. [http://www.oecos.com/CEM/cem8-1\\_nielsen.htm](http://www.oecos.com/CEM/cem8-1_nielsen.htm).
- [32] Coastal and Oceanic photography in full storm - and in beautiful weather, (n.d.). [http://www.tunliweb.no/SM/alb\\_havet.htm](http://www.tunliweb.no/SM/alb_havet.htm) (accessed July 18, 2016).
- [33] Tapered Channel Wave Energy, (n.d.). <http://taperedchannelwaveenergy.weebly.com/> (accessed July 18, 2016).
- [34] MARINE POWER GENERATION TECHNOLOGIES:WAVE POWER, (n.d.). <http://machineryequipmentonline.com/electrical-power-generation/marine-power-generation-technologieswave-power/> (accessed July 18, 2016).
- [35] W. Karen, Wave-energy conversion, *Compos. Technol.* (2010). <http://www.compositesworld.com/articles/wave-energy-conversion> (accessed July 20, 2016).
- [36] Oyster Wave Power Find out about the Oyster hydro-electric wave energy converter from Aquamarine Power, (2014). <http://www.reuk.co.uk/Oyster-Wave-Power.htm> (accessed July 20, 2016).
- [37] B. Rachel, Wave energy: Harnessing wave power, (2016). <http://eandt.theiet.org/magazine/2016/06/harnessing-the-waves.cfm> (accessed July 20, 2016).
- [38] J. Melorose, R. Perroy, S. Careas, Technology White Paper on Wave Energy Potential on the U.S. Outer Continental Shelf, *Statew. Agric. L. Use Baseline* 2015. 1 (2015). doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [39] Wellenenergie von SINN Power, (n.d.). <http://www.sinnpower.com/> (accessed July 20, 2016).
- [40] Hellenic Centre for Marine Research, Wave and Wind Atlas of the Hellenic Seas, 2007.
- [41] N.W.S. US Department of Commerce, NOAA, Significant Wave Height, (n.d.). [http://www.srh.noaa.gov/key/?n=marine\\_sigwave](http://www.srh.noaa.gov/key/?n=marine_sigwave) (accessed July 19, 2016).

- [42] Πρόγνωση Κυματισμού για τη Μαύρη Θάλασσα, (n.d.). [http://www.poseidon.hcmr.gr/waves\\_forecast\\_gr.php?area\\_id=bsea](http://www.poseidon.hcmr.gr/waves_forecast_gr.php?area_id=bsea) (accessed July 19, 2016).
- [43] M. Olsen, Wave Concepts and Terminology for Students and Teachers, (2011).
- [44] Environment and Climate Change Canada, Met 101: National Marine Weather Guide Chapter 3: Sea State, (n.d.). [https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=279AC7ED-1&offset=3&toc=show#c3\\_2](https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=279AC7ED-1&offset=3&toc=show#c3_2).
- [45] Διαχείριση και έλεγχος της ποιότητας δοδωμένων του δικτύου σταθμών του ΠΟΣΕΙΔΩΝΑ, (n.d.). [http://www.poseidon.hcmr.gr/article\\_view\\_gr.php?id=125](http://www.poseidon.hcmr.gr/article_view_gr.php?id=125) (accessed July 18, 2016).
- [46] Buoy Locations, (n.d.). [http://env1.hcmr.gr/db\\_poseidon/locations.php](http://env1.hcmr.gr/db_poseidon/locations.php) (accessed July 18, 2016).
- [47] Ε.Β. Παπαδοπούλου, Χρήση ντετερμινιστικών και γεωστατιστικών μεθόδων παρεμβολής για τη δημιουργία ψηφιακών ισόσειστων καμπύλων σε περιβάλλον GIS. Εφαρμογή σε δεδομένα ισχυρών σεισμών του ελλαδικού χώρου., 2014.
- [48] Δ. Καλύβας, ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ, (n.d.). <http://docplayer.gr/3822945-Geografika-systimata-pliroforion-horiki-analysi-kai-horiki-paremvoli-dionysios-kalyvas.html> (accessed August 28, 2016).
- [49] Σ. Καλογύρου, Χωρική Ανάλυση, Μεθοδολογία και εφαρμογές με τη γλώσσα R, 2015.
- [50] E.A. Varouchakis, Geostatistical Analysis and Space-Time Models of Aquifer Levels: Application to Mires Hydrological Basin in the Prefecture of Crete, Technical University of Crete, 2012.
- [51] Δ. Χριστόπουλος, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Εισαγωγής Στην Έρευνα Κοιτασμάτων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2004.
- [52] D.T. Hristopulos, Spartan Gibbs Random Field Models for Geostatistical Applications, SIAM J. Sci. Comput. (2003).
- [53] Understanding cokriging, Esri. (n.d.). <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/guide-books/extensions/geostatistical-analyst/understanding-cokriging.htm#>.
- [54] P. Goovaerts, Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford Univ. Press. New York. (1997).
- [55] An overview of the Raster Interpolation toolset, Esri. (n.d.). <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/an-overview-of-the-interpolation-tools.htm>.
- [56] E.A. Varouchakis, K. Spanoudaki, D.T. Hristopulos, G.P. Karatzas, G.A. Corzo Perez, Stochastic Modeling of Aquifer Level Temporal Fluctuations Based on the Conceptual Basis of the Soil-Water Balance Equation, Soil Sci. 181 (2016) 224–231. doi:10.1097/SS.000000000000157.
- [57] ArcGIS Geostatistical Analyst Tutorial, (2006) 40.

[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/pdf/Geostatistical\\_Analyst\\_Tutorial.pdf](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/pdf/Geostatistical_Analyst_Tutorial.pdf).

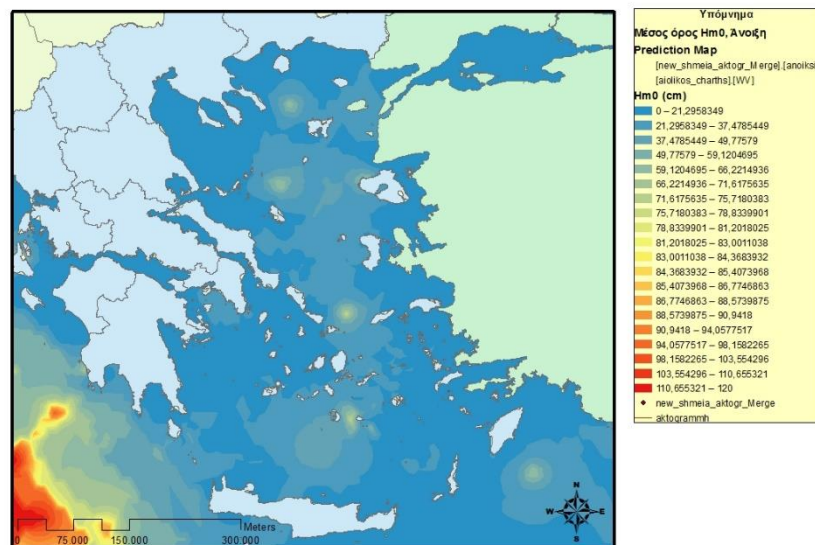
- [58] Specifications | Hann-Ocean, (n.d.). <http://www.hann-ocean.com/products/drakoo-wave-energy-converter/specifications/> (accessed September 1, 2016).



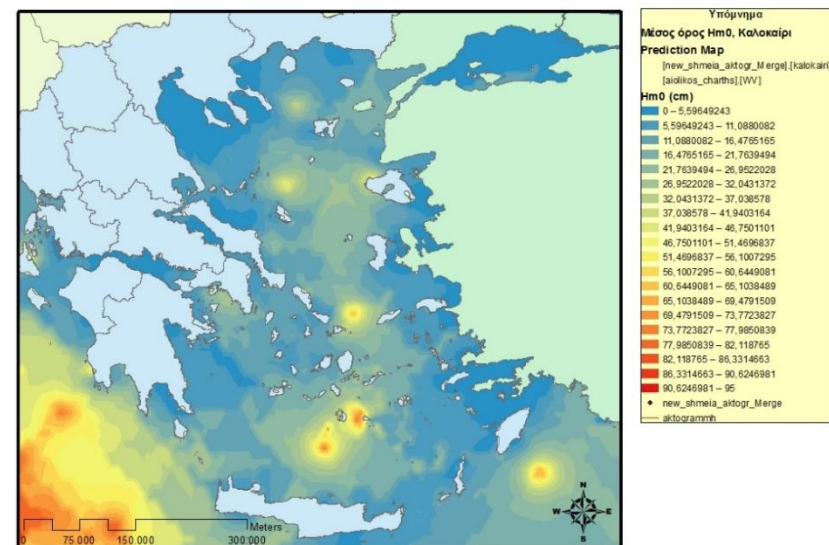
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Παράρτημα Α:** Χάρτες σημαντικού ύψους κύματος, μέθοδος CoKriging, με επιπλέον μηδενικά σημεία σε όλη την έκταση της ακτογραμμής της Ελλάδας και της Τουρκίας

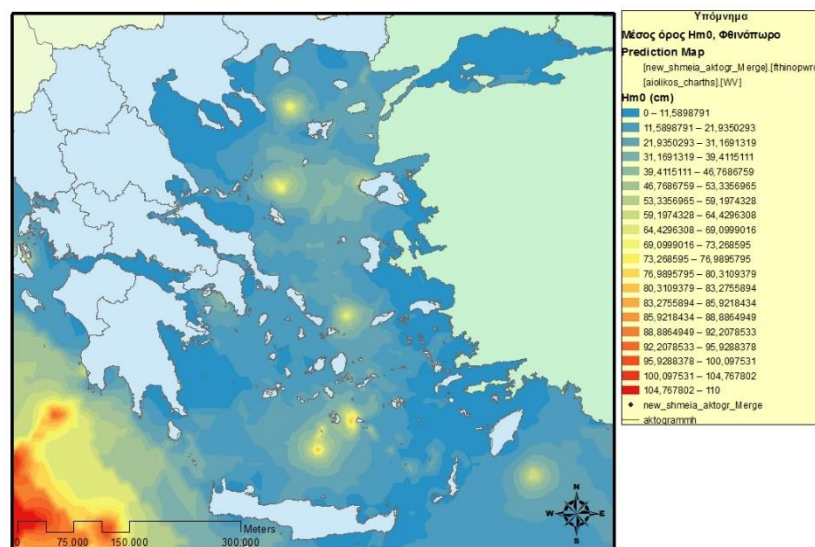
Μέσος Όρος σημαντικού υψους κύματος για την εποχή της Άνοιξης



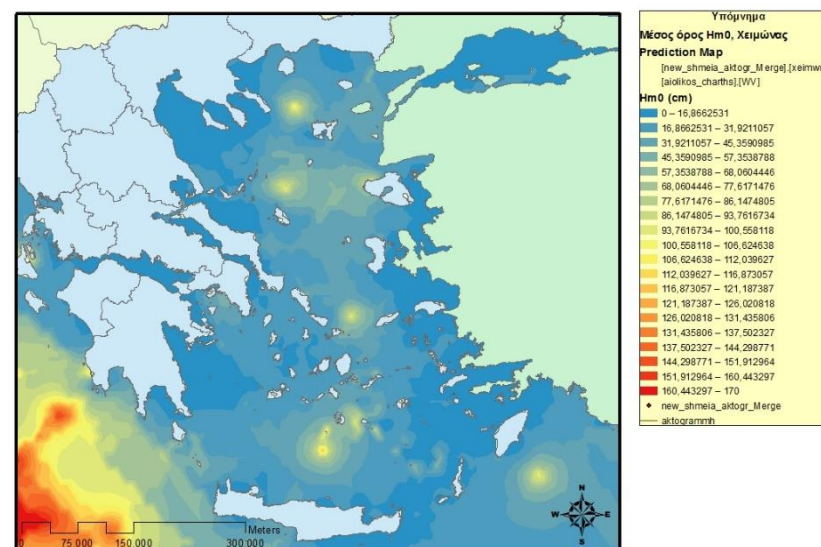
Μέσος Όρος σημαντικού υψους κύματος για την εποχή του Καλοκαιριού



Μέσος Όρος σημαντικού υψους κύματος για την εποχή του Φθινοπώρου



Μέσος Όρος σημαντικού υψους κύματος για την εποχή του Χειμώνα



## Παράρτημα Β: Βήματα διαδικασίας Kriging και CoKriging στο ArcMap 10.2

**Βήμα 1<sup>ο</sup>:** Ξεκινώντας τη διαδικασία επιλέγονται τα στοιχεία με βάση τα οποία θα πραγματοποιηθεί το Kriging ή το CoKriging.

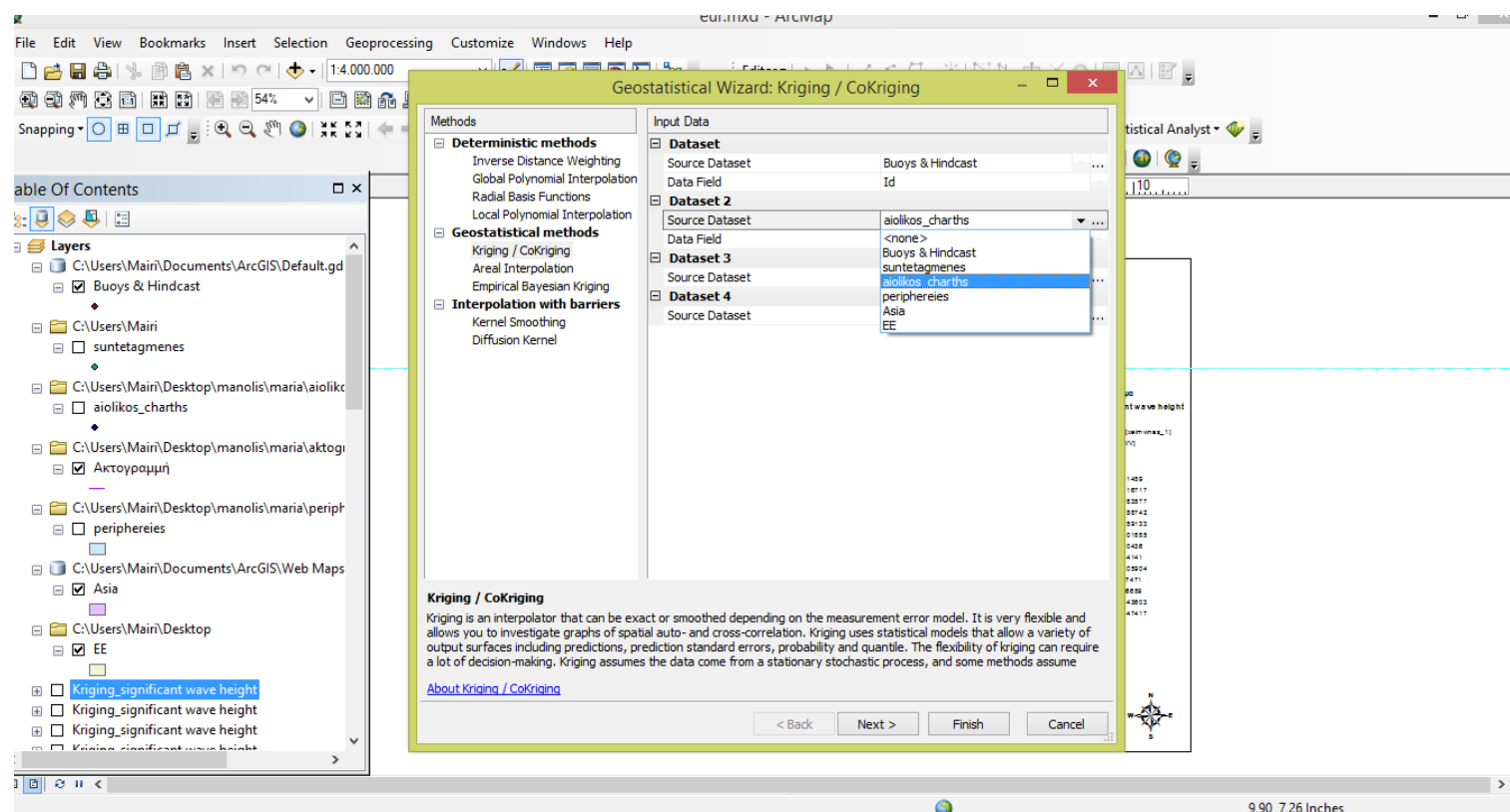


Figure 1B: Πρώτο βήμα μεθόδου Kriging, ArcMap 10.2

**Βήμα 2<sup>ο</sup>:** Επιλέγεται το είδος του Kriging που εξυπηρετεί την κάθε μέθοδο και το είδος των δεδομένων εξόδου

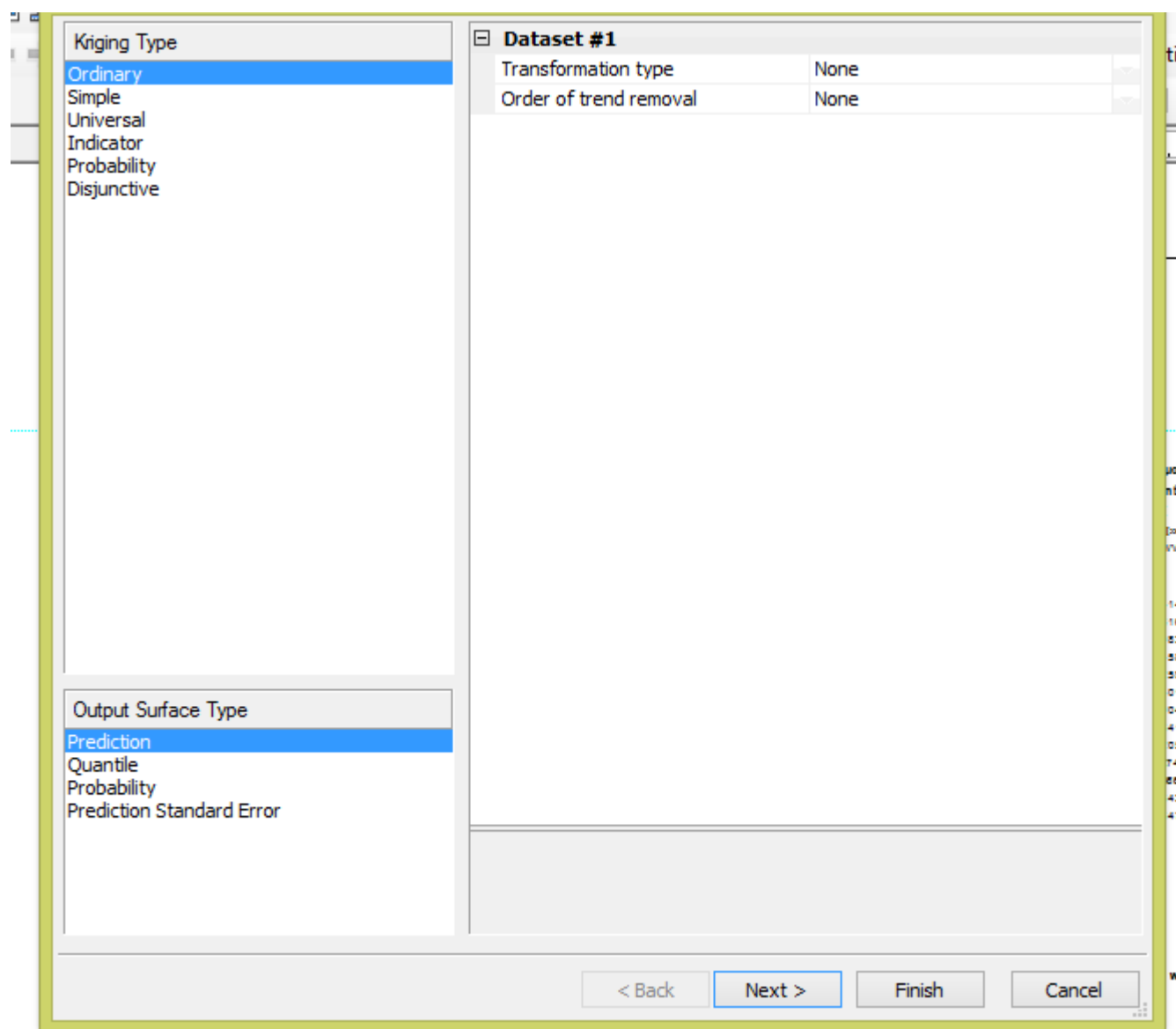


Figure 2B: Δεύτερο βήμα μεθόδου Kriging, ArcMap 10.2

**Βήμα 3<sup>ο</sup>:** Έχοντας επιλέξει σαν διαδικασία αυτή της εξαγωγής προγνώσεων και τη μέθοδο του κανονικού Kriging εμφανίζεται η καρτέλα του ημιβαριογράμματος. Επιλέγεται η εξίσωση του θεωρητικού ημιβαριογράμματος ώστε να εφαρμόζει κατάλληλα στα θεωρητικά σημεία.

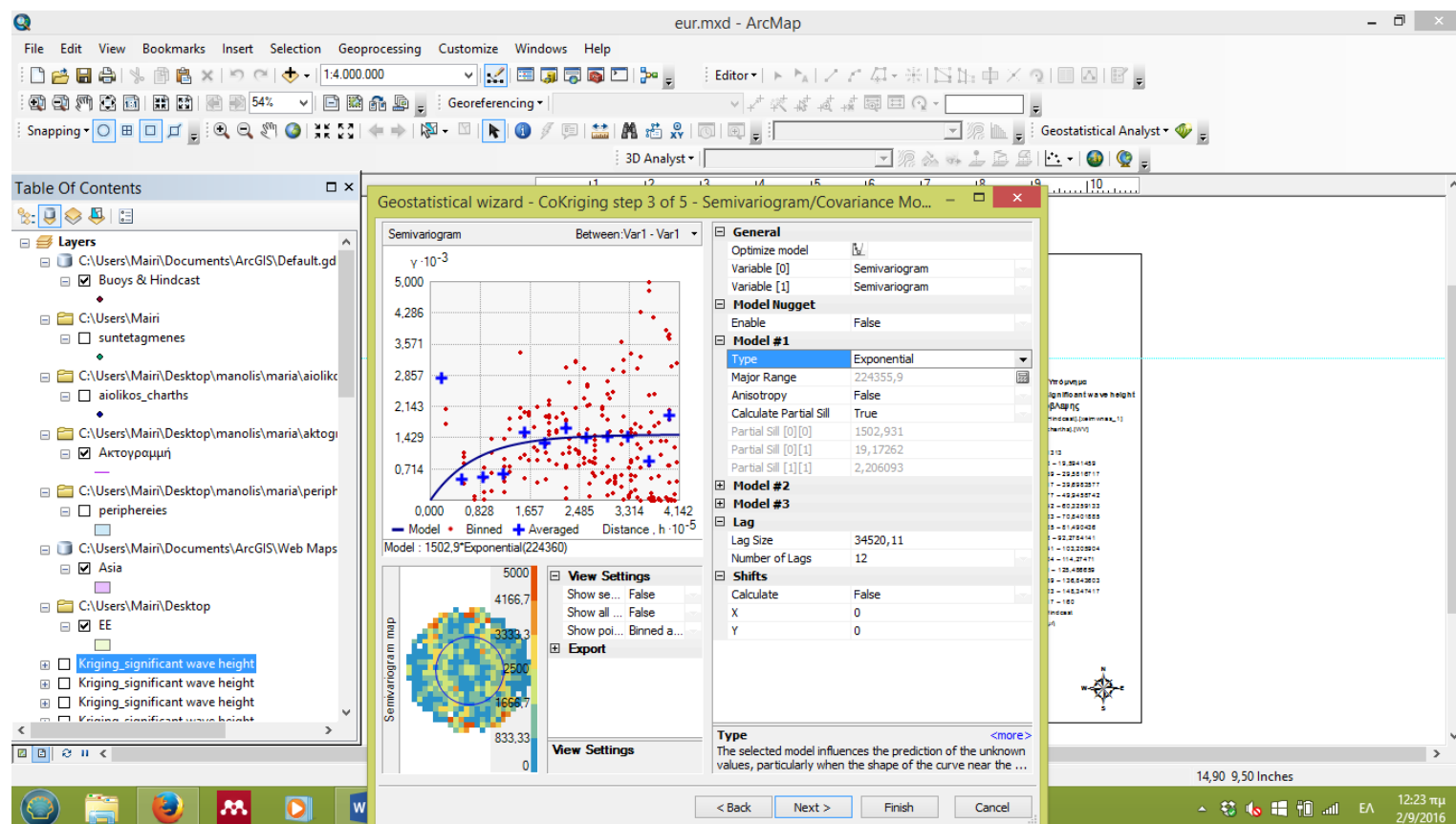


Figure 3B: Τρίτο βήμα μεθόδου Kriging, ArcMap 10.2

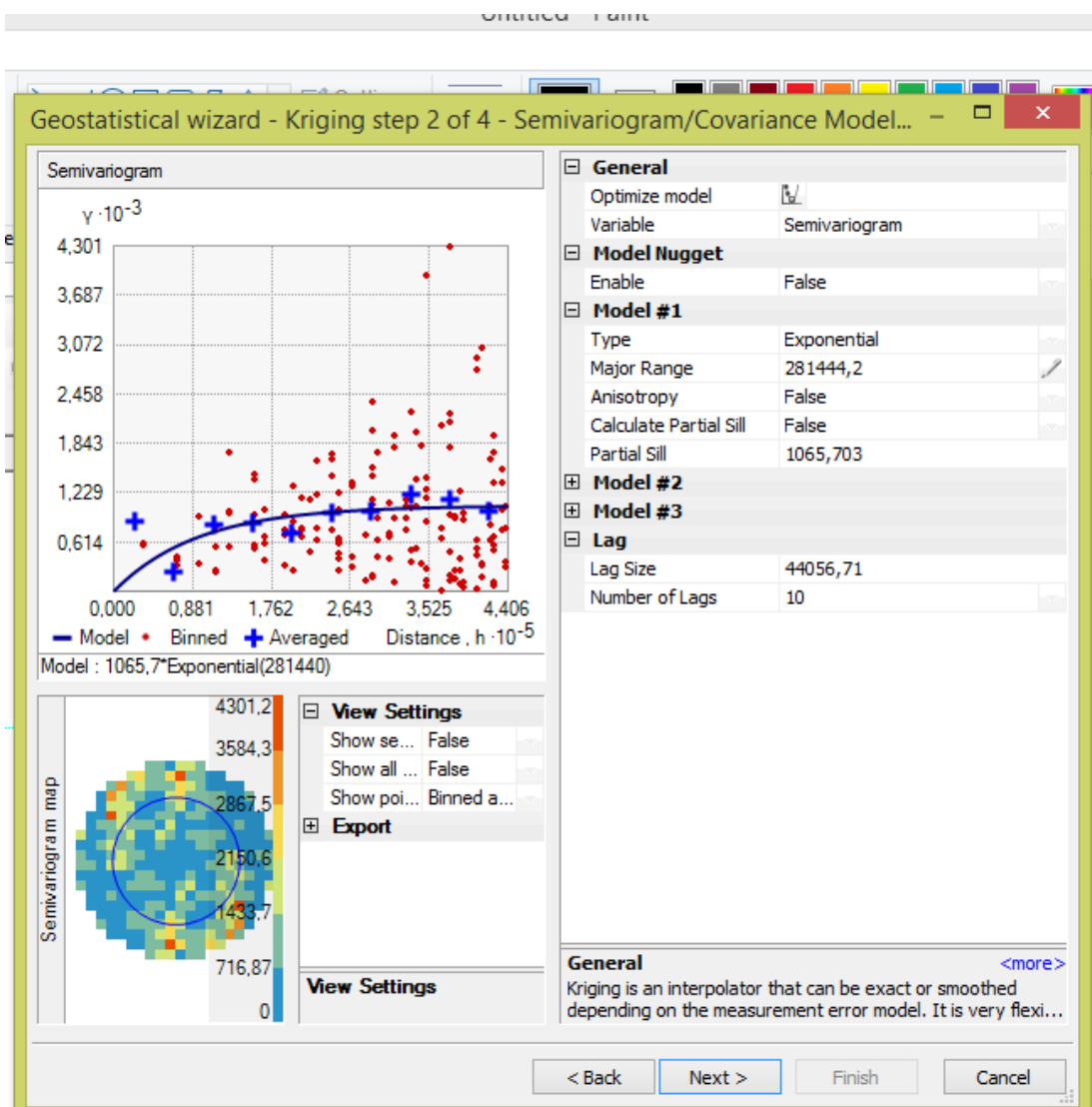


Figure 4B: Τέταρτο βήμα μεθόδου Kriging, ArcMap 10.2



**Βήμα 3<sup>ο</sup>:** Επιλέγεται το πλήθος των γειτονικών σημείων με τα οποία συσχετίζεται η πληροφορία της δειγματοληψίας ώστε να γίνει η αναμενόμενη πρόβλεψη.

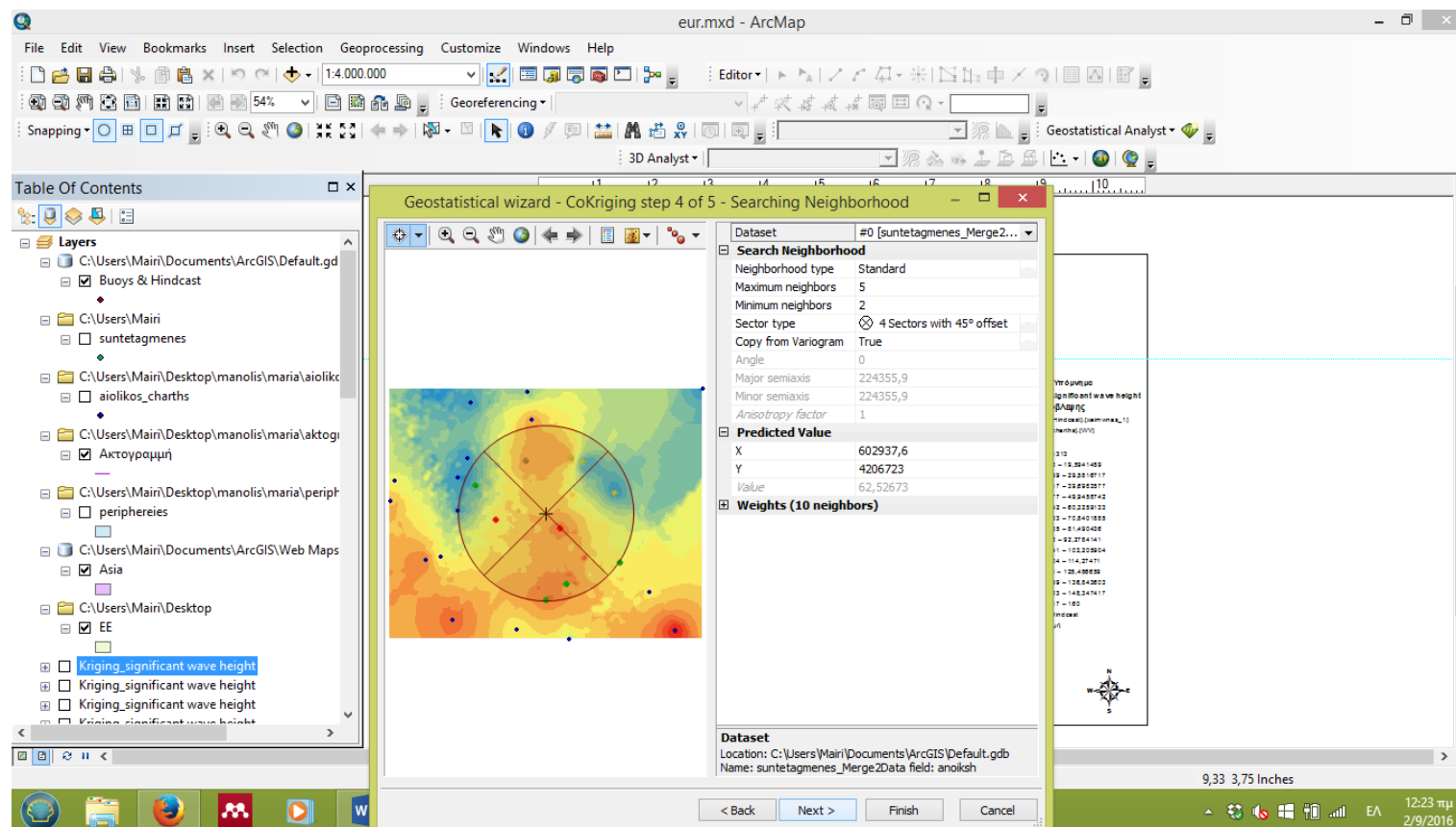


Figure 5B: Πέμπτο βήμα μεθόδου Kriging, ArcMap 10.2

**Βήμα 4<sup>ο</sup>:** Εμφανίζεται η συσχέτιση των τιμών της δειγματοληψίας με της τιμές πρόβλεψης.

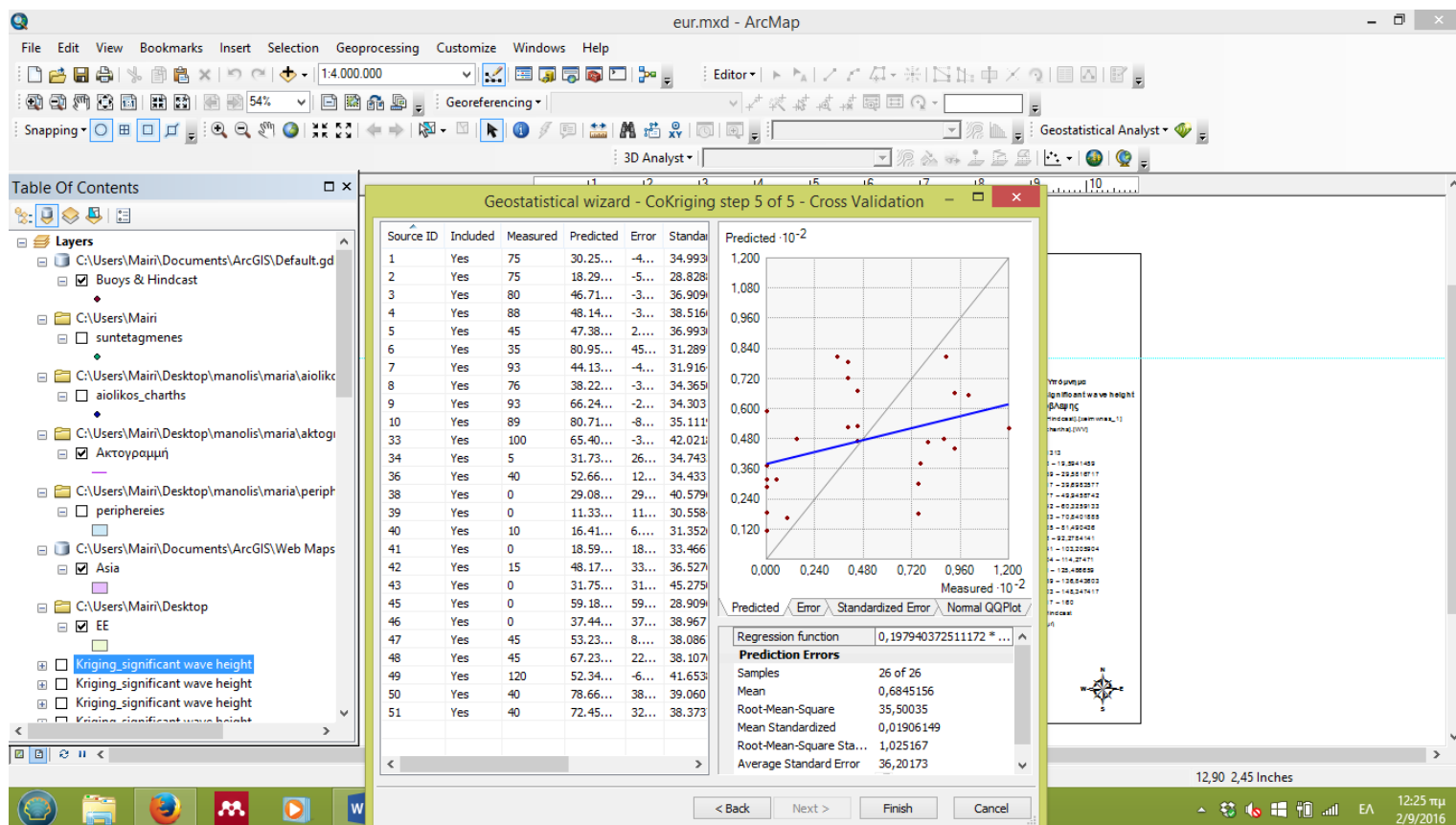


Figure 6B: Έκτο βήμα μεθόδου Kriging, ArcMap 10.2

**Παράρτημα Γ:** Παράδειγμα πίνακα εύρεσης ισχύος για συγκεκριμένη εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας από κυματισμούς.

### Power Output Scatter Diagram

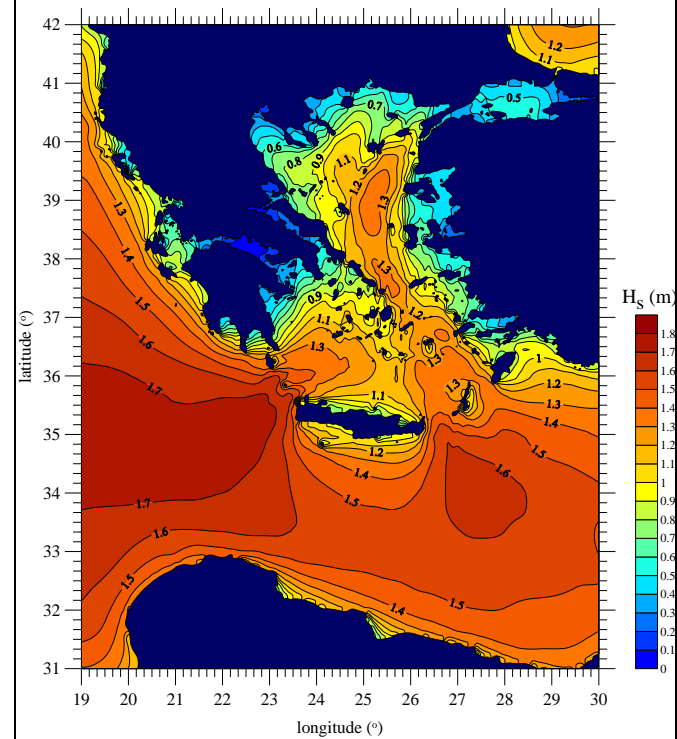
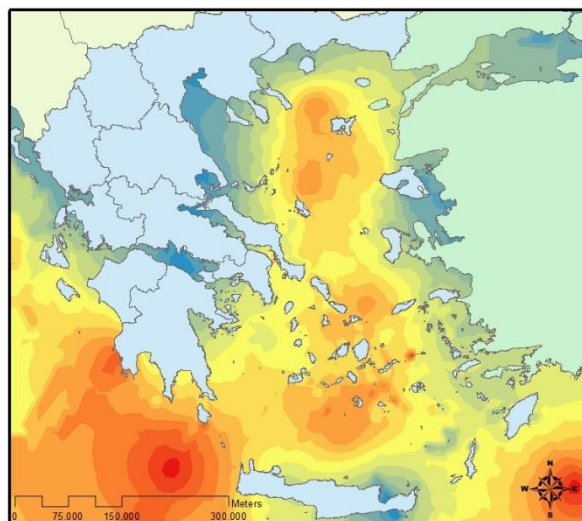
| $T_p$ (s) \ $H_s$ (m) | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.2                   | 0.04 | 0.10 | 0.15 | 0.17 | 0.16 | 0.14 | 0.11 | 0.09 | 0.07 | 0.01 |
| 0.3                   | 0.08 | 0.25 | 0.37 | 0.43 | 0.41 | 0.35 | 0.28 | 0.20 | 0.15 | 0.03 |
| 0.4                   | 0.15 | 0.45 | 0.68 | 0.78 | 0.75 | 0.64 | 0.50 | 0.40 | 0.29 | 0.04 |
| 0.5                   | 0.26 | 0.72 | 1.10 | 1.30 | 1.22 | 1.03 | 0.81 | 0.63 | 0.46 | 0.07 |
| 0.6                   | 0.37 | 1.07 | 1.64 | 1.87 | 1.80 | 1.54 | 1.20 | 0.93 | 0.68 | 0.10 |
| 0.7                   | 0.52 | 1.52 | 2.24 | 2.55 | 2.45 | 2.10 | 1.68 | 1.33 | 0.95 | 0.14 |
| 0.8                   | 0.68 | 1.98 | 2.92 | 3.33 | 3.21 | 2.74 | 2.19 | 1.74 | 1.30 | 0.18 |
| 0.9                   | 0.88 | 2.51 | 3.69 | 4.00 | 4.00 | 3.47 | 2.77 | 2.21 | 1.65 | 0.25 |
| 1                     | 0.88 | 2.51 | 3.69 | 4.00 | 4.00 | 3.47 | 2.77 | 2.21 | 1.65 | 0.25 |
| 1.1                   | 0.88 | 2.51 | 3.69 | 4.00 | 4.00 | 3.47 | 2.77 | 2.21 | 1.65 | 0.25 |
| 1.2                   | 0.88 | 2.51 | 3.69 | 4.00 | 4.00 | 3.47 | 2.77 | 2.21 | 1.65 | 0.25 |
| 1.3                   | 0.88 | 2.51 | 3.69 | 4.00 | 4.00 | 3.47 | 2.77 | 2.21 | 1.65 | 0.25 |

Figure 7Γ: Power Output Scatter Diagram[58]

**Παράρτημα Δ:** Πίνακας σύγκρισης των χαρτών σημαντικού ύψους κύματος της μελέτης και του ΕΛΚΕΘΕ.

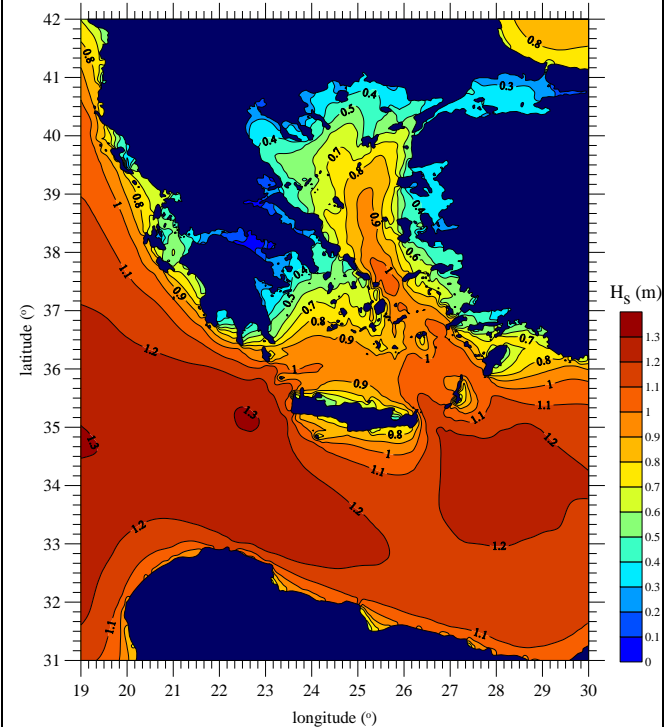
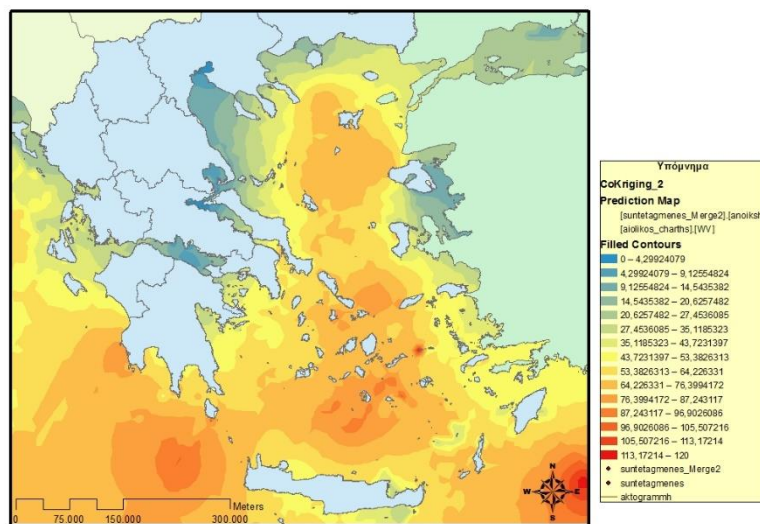
| Wave_wind_atlas_MC | WAVE-WIND_ATLAS_ELKETHE |
|--------------------|-------------------------|
| Χειμώνας           |                         |

Μέσος Όρος σημαντικού υψους κύματος για την εποχή του Χειμώνα



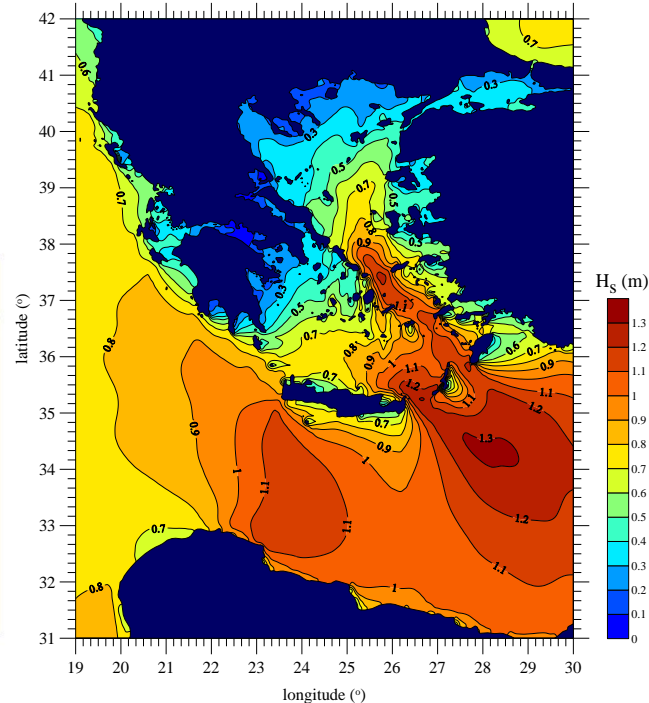
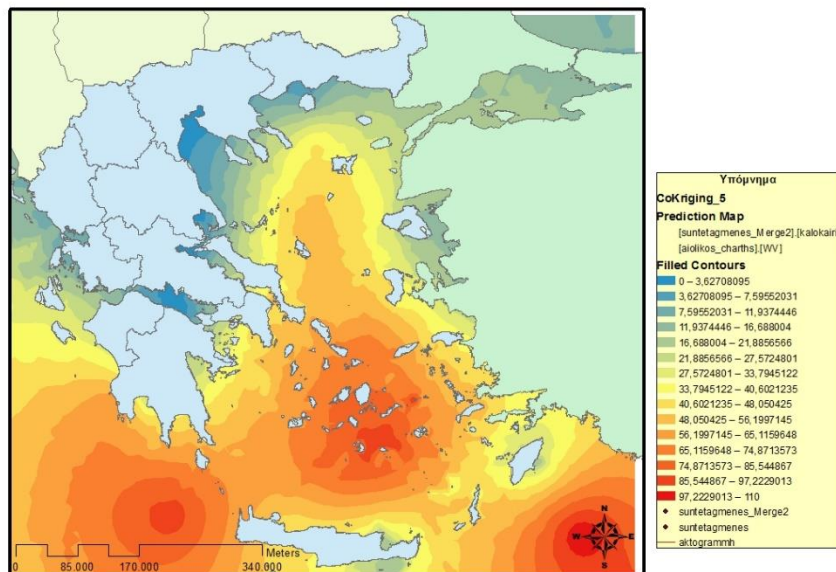
Ανοιξη

Μέσος Όρος σημαντικού υψους κύματος για την εποχή της Άνοιξης



Καλοκαίρι

Μέσος Όρος σημαντικού υψους κύματος για την εποχή του Καλοκαιριού



Φθινόπωρο



Μέσος Όρος σημαντικού υψους κύματος για την εποχή του Φθινοπώρου

