

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών**

**Τομέας Τοπογραφίας**

**Διπλωματική Εργασία**

**ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΑΛΤΙΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ  
ΠΑΛΙΡΡΟΙΟΓΡΑΦΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ  
ΥΨΟΥΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΣΕ  
ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ**

**Νικόλαος Φλώκος**

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Μαρία Τσακίρη**

**Αθήνα Ιούλιος 2020**

## **Πνευματικά δικαιώματα**

Copyright © Νικόλαος Φλώκος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τον Τομέα Τοπογραφίας της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω την σύντροφό μου Σμαράγδα για την προτροπή της να ξεκινήσω τις σπουδές μου, στην στήριξη και την βοήθειά της όλα αυτά τα χρόνια. Η βοήθειά της και η στάση της έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση των σπουδών μου και την απόκτηση του Διπλώματος του Αγρονόμου Τοπογράφου Μηχανικού. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου Θανάση και Μαρία για όλη την βοήθεια που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης την συνάδελφο Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό Ειρήνη Ραπτάκη για την βοήθεια της και τις συμβουλές της σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την καθηγήτριά μου κ Μαρία Τσακίρη για την υποστήριξή της, τις καίριες παρατηρήσεις της και τις εύστοχες συμβουλές της κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Είχαμε μια εξαιρετική συνεργασία από την οποία απέκτησα εμπειρίες οι οποίες ακαδημαϊκά αλλά και επιστημονικά με έκαναν να νιώθω περισσότερη αυτοπεποίθηση.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας είναι ένας από τους βασικούς δείκτες της κλιματικής αλλαγής με πολλές επιπτώσεις στις παράκτιες περιοχές όπως πλημμύρες, διάβρωση των ακτογραμμών κ.α. Η δορυφορική Αλτιμετρία είναι πλέον μια ώριμη διαδικασία όσο αφορά τους ωκεανούς και τις ανοιχτές θάλασσες όμως τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας στις παράκτιες ζώνες παραμένουν σε μεγάλο βαθμό ανεκμετάλλευτα. Αυτό οφείλεται στις εγγενείς δυσκολίες στην διόρθωση του παλμού του δορυφόρου και στην επίδραση της στεριάς που έχουν μέχρι στιγμής οδηγήσει στη συστηματική επισήμανση και απόρριψη των δεδομένων ως λανθασμένα.. Υπάρχει δηλαδή ένα κενό παρατήρησης στις γνώσεις μας σχετικά με την παράκτια ζώνη. Η κάλυψη αυτού του κενού καθίσταται σημαντική καθώς ο αντίκτυπος της αύξησης της στάθμης της θάλασσας μπορεί να είναι καταστροφικός στις παράκτιες ζώνες με κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Σε αυτήν την εργασία, χρησιμοποιούνται ορισμένα σύνολα δεδομένων παράκτιας Αλτιμετρίας και γίνεται περιγραφή της μεθοδολογίας για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων και την επέκταση των δυνατοτήτων των τρεχόντων και των μελλοντικών αποστολών δορυφορικής Αλτιμετρίας στην παράκτια ζώνη (παράκτια δορυφορική Αλτιμετρία). Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται δεδομένα της αποστολής Sentinel 3 και CryoSat 2. Οι μετρήσεις της δορυφορικής Αλτιμετρίας με την χρήση του αλγόριθμου επαναπροσδιορισμού SAMOSA+ συγκρίνονται ικανοποιητικά με τις μετρήσεις των παλιρροιογράφων στις περιοχές μελέτης. Οι αλλαγές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας καταγράφονται χωρίς μεγάλες αποκλίσεις και από τα δύο σύνολα δεδομένων στην Αλεξανδρούπολη, στην Σύρο, στο Ηράκλειο και στο Κατάκολο. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν περαιτέρω περιθώρια βελτίωσης της ποιότητας και της ακρίβειας των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας και των παλιρροιογράφων ώστε να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η συνδρομή των παράκτιων περιοχών στην παγκόσμια αύξηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας.

**Λέξεις κλειδιά:** Ύψος επιφάνειας της θάλασσας, Δορυφορική Αλτιμετρία, Παράκτιες Περιοχές, Παλιρροιογράφος, Αλγόριθμος Επαναπροσδιορισμού Κυματομορφής

## **ABSTRACT**

Sea level change is one of the key indicators of climate change with numerous effects such as flooding, erosion of beaches etc. Satellite Altimetry over the open ocean is a mature discipline but the global altimetry data collected over the coastal ocean remain still largely unexploited. This is because of intrinsic difficulties in the corrections and issues of land contamination in the footprint that have so far resulted in systematic flagging and rejection of these data. There is however an observational gap in our knowledge regarding the coastal zone. Filling this gap becomes important when considering that the impact of sea level rise can be devastating on the coast with effects on society and ecosystems.

In this work, the relevant methodology to overcome these problems and extend the capabilities of current and future altimeters to the coastal zone (coastal altimetry) will be discussed and a number of coastal altimetry data sets will be used. Specifically, Sentinel 3 and CryoSat 2 data are used. Satellite Altimetry measurements retracked by the SAMOSA+ waveform retracker compare well with tide gauge measurements in the study areas. Changes in the Sea Surface Height (SSH) are determined without large deviations from both data sets in Alexandroupolis, Syros, Heraklion and Katakolo. Nevertheless, there is room for further improvement in the quality and accuracy of satellite Altimetry and tide gauge data to more accurately determine the contribution of coastal areas to global sea level rise.

**Keywords:** Sea Surface Heights (SSH), Satellite Altimetry, Coastal Areas, Tide Gauge, Waveform Retracker

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	x
1 Εισαγωγή .....	1
2 Δορυφορική Αλτιμετρία .....	6
2.1 Αρχή Λειτουργίας .....	6
2.2 Αλτιμετρία SAR με παρατηρήσεις Doppler .....	9
2.3 Η Δορυφορική Αλτιμετρία στις Παράκτιες Ζώνες και στα Ηπειρωτικά Ύδατα .....	13
2.4 Αποστολές Δορυφορικής Αλτιμετρίας SAR.....	16
2.4.1 Η Αποστολή CryoSat 2.....	16
2.4.2 Η Αποστολή Sentinel 3.....	17
2.5 Μελλοντικές αποστολές Δορυφορικής Αλτιμετρίας .....	19
2.5.1 CRISTAL (Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter).....	19
2.5.2 Sentinel 6/Jason CS .....	20
2.5.3 QUANLAN.....	22
2.5.4 COMPIRA (Coastal and Ocean Measurement Mission with Precise and Innovative Radar Altimeter) .....	23
2.5.5 SWOT (Surface Water and Ocean Topography).....	25
3 Τα Δεδομένα για τον Προσδιορισμό της Στάθμης της Θάλασσας.....	29
3.1 Επίπεδα Επεξεργασίας και Είδη Αλτιμετρικών Δεδομένων.....	29
3.2 Διεργασίες για την Παραγωγή Προϊόντων Επιπέδου 2 (L2) στην Αλτιμετρία SAR	31

3.2.1	Επαναπροσδιορισμός κυματομορφής (Waveform Retracking).....	32
3.2.2	Διορθώσεις απόστασης (range) και Γεωφυσικές διορθώσεις του ύψους της θάλασσας .....	36
3.3	Επιτόπου (in situ) Δεδομένα .....	41
3.3.1	Παλιρροιογράφοι (Tide Gauges) .....	41
3.3.2	Σημαντήρες GPS.....	42
4	Μεθοδολογία και Δεδομένα .....	44
4.1	Δορυφορικά Προϊόντα για την Παράκτια Αλτιμετρία.....	45
4.2	Η Υπηρεσία SARvatore της Διαδικτυακής Πύλης G-POD.....	48
4.3	Αλγόριθμος Επαναπροσδιορισμού κυματομορφής SAMOSA+.....	51
4.4	Δεδομένα Sentinel 3A και CryoSat 2.....	53
4.4.1	Επιλογή της τροχιάς αλτιμετρικού δορυφόρου .....	55
4.5	Δεδομένα Παλιρροιογράφων .....	57
4.5.1	Προεπεξεργασία δεδομένων Παλιρροιογράφου.....	57
4.5.2	Κατακόρυφη μετατόπιση του εδάφους (Vertical Land Motion) .....	58
4.5.3	Επεξεργασία μετρήσεων παλιρροιογράφων .....	59
5	Αποτελέσματα στις Περιοχές Μελέτης .....	61
5.1	Αποτελέσματα για την Αλεξανδρούπολη .....	62
5.1.1	Αποτελέσματα SLA Sentinel 3A.....	63
5.1.2	Αποτελέσματα SLA CryoSat 2.....	65
5.1.3	Μηνιαία αποτελέσματα SLA Sentinel 3A και παλιρροιογράφου .....	67
5.1.4	Μηνιαία αποτελέσματα SLA CryoSat 2 και παλιρροιογράφου .....	69
5.1.5	Αποτελέσματα ύψους επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) Sentinel 3A και CryoSat 2 .....	70
5.2	Αποτελέσματα για την Σύρο .....	74
5.2.1	Αποτελέσματα SLA Sentinel 3A.....	75

5.2.2	Μηνιαία αποτελέσματα SLA Sentinel 3A και παλιρροιογράφου .....	76
5.2.3	Αποτελέσματα ύψους επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) Sentinel 3A.....	77
5.3	Αποτελέσματα για το Ηράκλειο Κρήτης .....	79
5.3.1	Αποτελέσματα SLA Sentinel 3A .....	81
5.3.2	Μηνιαία αποτελέσματα SLA Sentinel 3A και παλιρροιογράφου .....	83
5.3.3	Αποτελέσματα ύψους επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) Sentinel 3A.....	85
5.4	Αποτελέσματα για το Κατάκολο.....	86
5.4.1	Αποτελέσματα SLA Sentinel 3A .....	87
5.4.2	Μηνιαία αποτελέσματα SLA Sentinel 3A και παλιρροιογράφου .....	88
5.4.3	Αποτελέσματα ύψους επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) Sentinel 3A.....	89
5.5	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα .....	91
6	Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	95
6.1	Συμπεράσματα .....	95
6.1.1	Συμπεράσματα για τα δεδομένα .....	95
6.1.2	Συμπεράσματα για την επεξεργασία.....	96
6.1.3	Συμπεράσματα για τα αποτελέσματα .....	97
6.2	Προτάσεις.....	99
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		101
Ελληνική Βιβλιογραφία.....		101
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....		101
Ιστοσελίδες .....		103



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1 Προϊόντα για την Παράκτια Αλτιμετρία (Coastal Altimetry).....	46
Πίνακας 5.1 Στατιστικά στοιχεία δεδομένων ανά τροχιά για τον δορυφόρο Sentinel 3A και τον παλιρροιογράφο για την Αλεξανδρούπολη.....	63
Πίνακας 5.2 Στατιστικά στοιχεία από τα δεδομένα του δορυφόρου CryoSat 2 και τον παλιρροιογράφο για την Αλεξανδρούπολη.....	63
Πίνακας 5.3 Στατιστικά στοιχεία δεδομένων για τον δορυφόρο Sentinel 3A και τον παλιρροιογράφο για την Σύρο.....	75
Πίνακας 5.4 Στατιστικά στοιχεία δεδομένων ανά τροχιά για τον δορυφόρο Sentinel 3A και τον παλιρροιογράφο για το Ηράκλειο.....	80
Πίνακας 5.5 Στατιστικά στοιχεία δεδομένων για τον δορυφόρο Sentinel 3A και τον παλιρροιογράφο για το Κατάκολο.....	86
Πίνακας 5.6 Συγκεντρωτικά μηνιαία αποτελέσματα μέσω των τιμών SLA (μέτρα) της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου για κάθε περιοχή μελέτης.....	93

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Αύξηση της στάθμης της θάλασσας όπως καταγράφεται από διαχρονικά δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας .....	1
Εικόνα 2.1 Αρχή Λειτουργίας της Δορυφορικής Αλτιμετρίας .....	8
Εικόνα 2.2 Μέσος Όρος Κυματομορφών για $n = 1$ , $n = 25$ και $n = 1000$ δείγματα σημάτων επιστροφής radar.....	9
Εικόνα 2.3 Διαδικασία συμπίεσης παλμού στην αλτιμετρία SAR.....	10
Εικόνα 2.4 Τα σήματα επιστροφής στην συμβατική αλτιμετρία και την αλτιμετρία SAR.....	12
Εικόνα 2.5 Εξέλιξη της γεωμετρίας του αποτυπώματος του σήματος στην περίπτωση της συμβατικής Αλτιμετρίας (κόκκινο χρώμα) και της Αλτιμετρίας SAR (πράσινο χρώμα).....	12
Εικόνα 2.6 Παράδειγμα επίδρασης της στεριάς στην κυματομορφή.....	14
Εικόνα 2.7 Δορυφόρος CryoSat 2.....	17
Εικόνα 2.8 Δορυφόρος Sentinel 3A.....	18
Εικόνα 2.9 Ύψος χιονιού στην Ανταρκτική.....	19
Εικόνα 2.10 Πάχος πάγου στην Αρκτική.....	19
Εικόνα 2.11 Λειτουργία αλτιμέτρου CRISTAL.....	20
Εικόνα 2.12 Ο δορυφόρος Sentinel 6 της ESA.....	21
Εικόνα 2.13 Ο δορυφόρος QUANLAN.....	22
Εικόνα 2.14 Παράμετροι Αλτιμέτρων και οργάνου Laser του δορυφόρου Quanlan.....	23
Εικόνα 2.15 Παράμετροι Αποστολής COMPIRA.....	24
Εικόνα 2.16 Τεχνική της λειτουργίας SWOT με τη χρήση του οργάνου KaRIn με συμβολομετρία SAR στις δύο λωρίδες αριστερά και δεξιά και ένα αλτίμετρο Jason στο ναδίρ του δορυφόρου.....	26

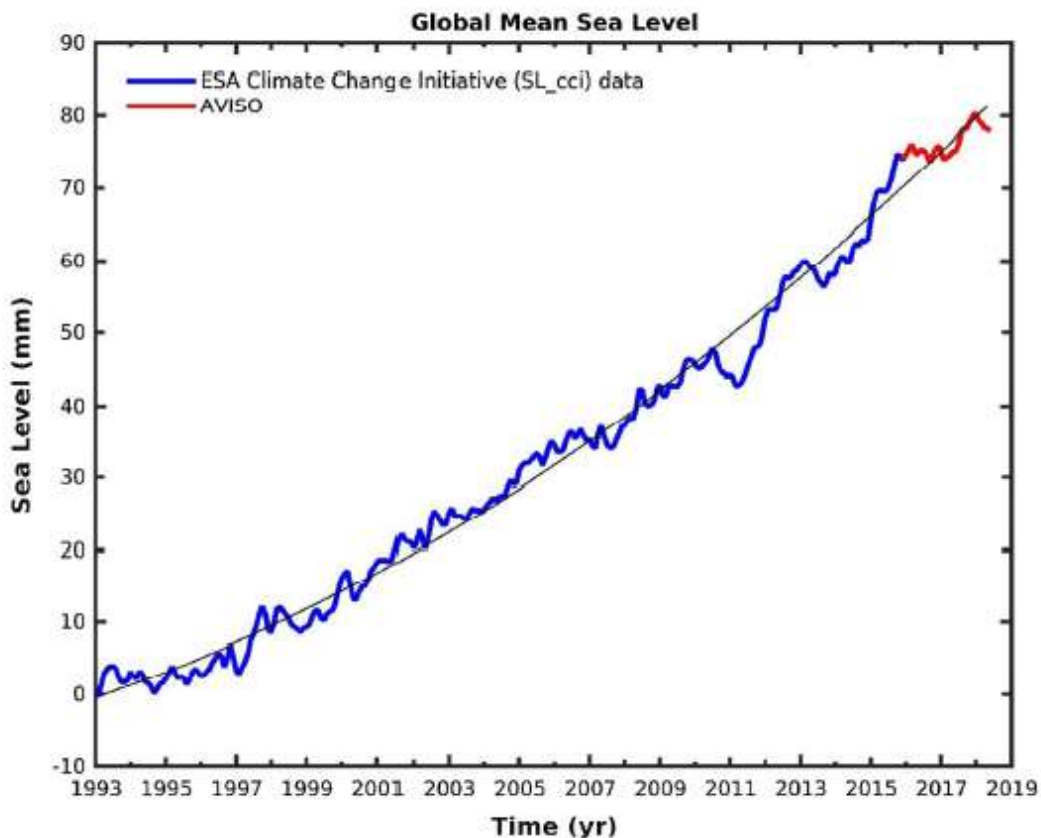
Εικόνα 2.17 Η κάλυψη της τροχιάς SWOT έως 78° Β και Ν μετά από 3 ημέρες αριστερά και οι πλήρεις 21 ημέρες πλήρους κύκλου δεξιά. Το χρώμα δείχνει τα εξελισσόμενα ρεύματα κατά μήκος της τροχιάς για κάθε ίχνος της στην επιφάνεια της γης.....	27
Εικόνα 3.1 Γεωφυσικές Παράμετροι.....	32
Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση της βασικής λειτουργίας της Δορυφορικής Αλτιμετρίας και των διορθώσεων που εφαρμόζονται στις παρατηρήσεις του υψομέτρου της επιφάνειας της θάλασσας.....	38
Εικόνα 3.3 Χάρτης με την κατανομή των παλιρροιογράφων.....	42
Εικόνα 3.4 Πλωτός Σημαντήρας GPS.....	43
Εικόνα 4.1 Υπηρεσία SARvatore για την αποστολή Sentinel 3.....	49
Εικόνα 4.2 Πεδία επιλογής των παραμέτρων της επεξεργασίας των δεδομένων στην υπηρεσία SARvatore για την αποστολή Sentinel 3.....	50
Εικόνα 4.3 Ηχόγραμμα κυματομορφής από τον δορυφόρο CryoSat 2. Στο πάνω διάγραμμα η παράμετρος $\tau$ (epoch) προσδιορίζεται από μία κυματομορφή και στο κάτω από είκοσι συνεχόμενες.....	52
Εικόνα 4.4 Αναζήτηση και επιλογή τροχιάς με την χρήση πολυγώνου στην Υπηρεσία SARvatore for Sentinel 3.....	56
Εικόνα 4.5 Συνδυασμός μετρήσεων δορυφορικής Αλτιμετρίας και παλιρροιογράφων για τον υπολογισμό της VLM με την χρήση δεκτών GNSS.....	59
Εικόνα 5.1 Χάρτης κλίμακας 1:150,000 με τις τροχιές του δορυφόρου Sentinel 3A στην Αλεξανδρούπολη.....	62
Εικόνα 5.2 Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 241 του δορυφόρου Sentinel 3A για την Αλεξανδρούπολη.....	64
Εικόνα 5.3 Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 335 του δορυφόρου Sentinel 3A για την Αλεξανδρούπολη.....	65
Εικόνα 5.4 Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή από τα δεδομένα του δορυφόρου CryoSat 2 για την Αλεξανδρούπολη.....	66

Εικόνα 5.5 Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα της τροχιάς 241 του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για την Αλεξανδρούπολη.....	67
Εικόνα 5.6 Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα της τροχιάς 335 του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για την Αλεξανδρούπολη.....	68
Εικόνα 5.7 Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα του δορυφόρου CryoSat 2 και του παλιρροιογράφου για την Αλεξανδρούπολη.....	69
Εικόνα 5.8 Χάρτης κλίμακας 1: 250.000 με την τροχιά 335 του δορυφόρου Sentinel 3A στην Σύρο.....	74
Εικόνα 5.9 Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 335 του δορυφόρου Sentinel 3A για την Σύρο.....	76
Εικόνα 5.10 Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα της τροχιάς 335 του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για την Σύρο.....	77
Εικόνα 5.11 Χάρτης κλίμακας 1:300,000 με τις τροχιές του δορυφόρου Sentinel 3A στο Ηράκλειο.....	79
Εικόνα 5.12 Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 007 του δορυφόρου Sentinel 3A για το Ηράκλειο.....	81
Εικόνα 5.13 Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 127 του δορυφόρου Sentinel 3A για το Ηράκλειο.....	82
Εικόνα 5.14 Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα της τροχιάς 007 του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για το Ηράκλειο.....	83
Εικόνα 5.15 Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα της τροχιάς 127 του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για το Ηράκλειο.....	84
Εικόνα 5.16 Χάρτης κλίμακας 1: 300.000 με την τροχιά 107 του δορυφόρου Sentinel 3A στο Κατάκολο.....	87
Εικόνα 5.17 Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή από τα δεδομένα του δορυφόρου Sentinel 3A για το Κατάκολο.....	88

Εικόνα 5.18 Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για το Κατάκολο.....	89
Εικόνα 5.19 Χάρτης με την τιμή της συσχέτισης σε σχέση με την θέση του διάμεσου των μετρήσεων του δορυφόρου και του παλιρροιογράφου Κλίμακα: 1: 4,000,000.....	91
Εικόνα 5.20 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέσων μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου για κάθε περιοχή μελέτης....	94

# 1 Εισαγωγή

Το ύψος της στάθμης της θάλασσας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες της κλιματικής αλλαγής γιατί εμπεριέχει τις αλλαγές πολλών παραμέτρων του κλίματος εξαιτίας ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και φυσικών διεργασιών. Στις αρχές του 20ού αιώνα η στάθμη της θάλασσας είχε ρυθμό ανόδου  $1.7 \pm 0.3$  χιλ./έτος όπως καταγράφεται από επιτόπου (in situ) μετρήσεις παλιρροιογράφων. Από το 1990 οι αλλαγές στο ύψος της στάθμης της θάλασσας προσδιορίζονται από τις παρατηρήσεις της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Ο ρυθμός της αύξησης της στάθμης της θάλασσας με βάση τις παρατηρήσεις της δορυφορικής Αλτιμετρίας εκτιμάται σε  $3.1 \pm 0.3$  χιλ./έτος, σχεδόν το διπλάσιο από την μέση τιμή του 20ού αιώνα (Cazenave et al., 2018).



**Εικόνα 1.1** Αύξηση της στάθμης της θάλασσας όπως καταγράφεται από διαχρονικά δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας (Cazenave et al., 2018)

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας στην Εικόνα 1.1 αντικατοπτρίζει την άνοδο της θερμοκρασίας των ωκεανών (μέσω της διαστολής των υδάτων) και το λιώσιμο των πάγων, δύο διεργασίες που είναι αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας του

πλανήτη. Ο πλανήτης σήμερα βρίσκεται σε θερμική ανισορροπία λόγω των συγκεντρώσεων αερίων στην ατμόσφαιρα, εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας, που δημιουργούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το 93% της θερμότητας αυτής απορροφάται από τους ωκεανούς ενώ το υπόλοιπο 7% είναι αυτό που ανεβάζει την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, θερμαίνει τις ηπείρους και λιώνει τους πάγους στους πόλους (*Ablain et al., 2017*).

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και οι επιπτώσεις της στις παράκτιες περιοχές γίνεται ολοένα και περισσότερο αντικείμενο έρευνας από την επιστημονική κοινότητα και θεωρείται εξαιρετικά μεγάλη απειλή για τις περιοχές αυτές εξαιτίας της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Σήμερα περίπου εξακόσια εκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε παράκτιες περιοχές, οι περισσότεροι συγκεντρωμένοι σε μεγάλες πόλεις, ο αριθμός των οποίων προβλέπεται να διπλασιαστεί μέχρι το 2060 (*Cazenave et al., 2018*).

Η δορυφορική Αλτιμετρία στα πάνω από είκοσι πέντε χρόνια της ύπαρξής της έχει αποδείξει πλήρως τις δυνατότητες στην καταγραφή και παρακολούθηση του ύψους της στάθμης της θάλασσας σε παγκόσμιο επίπεδο. Η διαχρονική της εξέλιξη μέσω μιας σειράς αλτιμετρικών αποστολών την έχει καταστήσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη της δυναμικής κατάστασης των θαλασσών και πολλών άλλων θαλάσσιων φαινομένων. Οι τιμές του ύψους της στάθμης της θάλασσας που προέρχονται από δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας συνδυάζονται σε μεγάλο βαθμό με τις τιμές των παλιρροιογράφων όμως ακρίβεια καλύτερη της τάξης 0.3 χιλ./έτος στον προσδιορισμό του ρυθμού ανόδου της στάθμης της θάλασσας από την δορυφορική Αλτιμετρία δεν έχει ακόμη επιτευχθεί. Οι βελτιώσεις και οι τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων ετών έχουν καταστήσει ρεαλιστικό σενάριο την επίτευξη της ακρίβειας αυτής από τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας.

Παρ' όλη την εξέλιξη της δορυφορικής Αλτιμετρίας υπάρχει ακόμη κενό στις παρατηρήσεις του ύψους της στάθμης της θάλασσας. Τις προηγούμενες δεκαετίες με τις προσπάθειες που έγιναν η ακρίβεια προσδιορισμού της στάθμης της θάλασσας έφτασε να είναι σε επίπεδο εκατοστού. Το μεγάλο όμως σε έκταση αποτύπωμα (footprint) του παλμού των δορυφόρων της συμβατικής Αλτιμετρίας (Low Resolution Mode ή LRM) στην επιφάνεια της θάλασσας μειώνει την ακρίβεια των μετρήσεων στις παράκτιες ζώνες. Εκεί επομένως έχει δημιουργηθεί ένα κενό στις παρατηρήσεις αφού οι παλιρροιογράφοι προσδιορίζουν την στάθμη της θάλασσας σε ένα τοπικό επίπεδο αναφοράς και επιπλέον πολλές παράκτιες περιοχές της γης δεν διαθέτουν παλιρροιογράφους.

Ένα μεγάλο βήμα στην βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού του ύψους της στάθμης της θάλασσας πραγματοποιήθηκε με την είσοδο της δορυφορικής Αλτιμετρίας στην εποχή SAR (Synthetic Aperture Radar). Με την τεχνολογία SAR κατέστη δυνατή η μείωση της έκτασης που καταλαμβάνει το αποτύπωμα του παλμού του δορυφόρου στην επιφάνεια της γης κατά μήκος της τροχιάς. Από τις πρώτες αποστολές της Αλτιμετρίας SAR διαπιστώθηκε η βελτίωση στην δειγματοληψία και τον τρόπο μέτρησης του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας στον ανοιχτό ωκεανό. Επιπλέον όμως διαπιστώθηκε η ανάγκη βελτίωσης των αλγορίθμων επεξεργασίας των κυματομορφών του ραντάρ του δορυφόρου (waveform retrackers), με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας των μετρήσεων της δορυφορικής Αλτιμετρίας στις παράκτιες ζώνες και στα ηπειρωτικά ύδατα.

Η σημασία και η ανάγκη δημιουργίας ενός ενιαίου συνόλου αλτιμετρικών δεδομένων στις παράκτιες ζώνες είναι μεγάλη. Οι παράκτιες περιοχές είναι ένα εξαιρετικά δυναμικό και δραστήριο τμήμα του θαλάσσιου περιβάλλοντος όπου λαμβάνουν χώρα σε μικρό χρονικό διάστημα αλληλεπιδράσεις μεταξύ θάλασσας και στεριάς σε μικρή κλίμακα. Όπως αναφέρθηκε οι παράκτιες ζώνες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις ζωές εκατομμυρίων ανθρώπων οι οποίοι είναι εκτεθειμένοι στις επιπτώσεις της ανόδου της στάθμης της θάλασσας και της κλιματικής αλλαγής γενικότερα. Είναι επομένως σημαντική η ανάπτυξη εργαλείων και τεχνικών για την παρακολούθηση της αύξησης της στάθμης της θάλασσας στις παράκτιες ζώνες και τον συνδυασμό των μετρήσεων αυτών με τις μετρήσεις του ανοιχτού ωκεανού με σκοπό την κάλυψη του ερευνητικού κενού.

Παρά την μεγάλη σημασία που έχουν τα παράκτια δεδομένα για τον προσδιορισμό του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας σε παγκόσμιο επίπεδο δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί πλήρως οι αλγόριθμοι επαναπροσδιορισμού των κυματομορφών (δηλαδή η διαδικασία εξαγωγής των γεωφυσικών παραμέτρων από τη ληφθείσα κυματομορφή). Τα σύνολα δεδομένων που έχουν δημιουργηθεί είναι σε πειραματικό στάδιο χωρίς να υπάρχει ακόμα ομοφωνία στην επιστημονική κοινότητα σχετικά με τις μεθόδους επεξεργασίας των δεδομένων στην παράκτια ζώνη. Κατά συνέπεια τα περισσότερα από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στην παράκτια ζώνη την τελευταία 25ετία εξακολουθούν να είναι σε μεγάλο βαθμό ανεκμετάλλευτα ή να επισημαίνονται ως λανθασμένα (flagged) στα υπάρχοντα προϊόντα της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Τα τελευταία χρόνια όμως οι διαστημικές υπηρεσίες δίνουν μεγάλη σημασία στα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας στις παράκτιες ζώνες με την ανάπτυξη αλγορίθμων για την αξιοποίηση των δεδομένων των περιοχών αυτών (Dinardo, 2020).



Η παρούσα εργασία έχει σκοπό την ανάδειξη των δυνατοτήτων της συνδυασμένης χρήσης δεδομένων από τους παλιρροιογράφους και από την δορυφορική Αλτιμετρία για τον προσδιορισμό του ύψους της στάθμης της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές. Η χρήση των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας σε παράκτιες περιοχές είναι πλέον εφικτή λόγω των αποστολών της Αλτιμετρίας SAR (Sentinel 3A και 3B, CryoSat 2 κλπ) και της προσπάθειας για την ανάπτυξη αλγορίθμων για την εξαγωγή αξιόπιστων μετρήσεων στις παράκτιες ζώνες. Οι αλγόριθμοι αυτοί εξαλείφουν τις επιδράσεις της στεριάς στο σήμα του δορυφόρου και με την γενικότερη βελτίωση της ποιότητας των διορθώσεων που εφαρμόζονται, οι τιμές στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) και στον προσδιορισμό των ανωμαλιών της στάθμης της θάλασσας (Sea Level Anomaly ή SLA) στις παράκτιες ζώνες έχουν βελτιωθεί σημαντικά.

Με την μεθοδολογία που ακολουθεί η παρούσα εργασία, έχει στόχο την ανάδειξη του τρόπου με τον οποίο πραγματοποιείται η διαχείριση του μορφότυπου των αρχείων που περιέχουν τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Ένας επιμέρους στόχος είναι ακόμα και χρήστες με μικρή εμπειρία στην επεξεργασία τέτοιας μορφής και όγκου δεδομένων να είναι σε θέση να μπορούν να προσδιορίσουν το ύψος της στάθμης της θάλασσας, έχοντας εφαρμόσει όλες εκείνες τις διορθώσεις που απαιτούνται, ώστε να προκύψουν τιμές SSH και SLA χωρίς τις επιδράσεις της στεριάς σε παράκτιες ζώνες.

Συγκεκριμένα στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η αρχή λειτουργίας της δορυφορικής Αλτιμετρίας, ουσιαστικά περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζεται η απόσταση του δορυφόρου από την επιφάνεια της θάλασσας. Στην συνέχεια περιγράφονται οι νέες δυνατότητες της δορυφορικής Αλτιμετρίας εξαιτίας της τεχνολογίας SAR και οι διαφορές της με την συμβατική (LRM) Αλτιμετρία. Ακόμη περιγράφονται οι περιορισμοί της δορυφορικής Αλτιμετρίας στις παράκτιες ζώνες, οι νέες αποστολές της Αλτιμετρίας SAR, οι μελλοντικές αποστολές με τις νέες δυνατότητες τους και τις καινοτομίες που θα φέρουν στον προσδιορισμό του ύψους της στάθμης της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές αλλά και στην μελέτη των ηπειρωτικών υδάτων και των παγετώνων στους πόλους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των διαφορετικών επιπέδων επεξεργασίας των αλτιμετρικών δεδομένων. Η επιλογή του επιπέδου της επεξεργασίας των αλτιμετρικών δεδομένων (επίπεδο 1 έως 4) υπαγορεύεται από το είδος και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται επίσης και οι κατηγορίες των διορθώσεων που εφαρμόζονται στα δεδομένα, γίνεται περιγραφή του είδους και της φύσης των διορθώσεων αυτών, καθώς και τα μεγέθη στα οποία εφαρμόζονται ώστε να εξαλειφθούν

οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια προσδιορισμού του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας. Αναφορά γίνεται επίσης και στα διαφορετικά μέσα με τα οποία πραγματοποιούνται οι επιτόπου (in situ) μετρήσεις του ύψους της στάθμης της θάλασσας.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται ειδικά στα δεδομένα εκείνα της δορυφορικής Αλτιμετρίας τα οποία έχουν επεξεργαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα στις παράκτιες ζώνες. Αναφέρονται επίσης τα βασικά χαρακτηριστικά και η μέθοδος με την οποία λειτουργεί ο αλγόριθμος επαναπροσδιορισμού της κυματομορφής (waveform retracker) SAMOSA+ που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας μέσω της πλατφόρμας G-POD (<http://gpod.eo.esa.int/>) της ESA καθώς και η μεθοδολογία επεξεργασίας των επιτόπου παρατηρήσεων από παλιρροιογράφους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας και των παλιρροιογράφων στις περιοχές μελέτης. Οι περιοχές που επιλέχθηκαν για τον προσδιορισμό του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) και των ανωμαλιών της στάθμης της θάλασσας (Sea Level Anomaly ή SLA) είναι η Αλεξανδρούπολη, η Σύρος, το Ηράκλειο και το Κατάκολο. Στις περιοχές αυτές τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την μορφή διαγραμμάτων SLA σε σχέση με την απόσταση από την ακτή, διαγραμμάτων με την μηνιαία τιμή SLA του παλιρροιογράφου και του δορυφόρου και με την μορφή χαρτών SSH.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις διαπιστώσεις και τα συμπεράσματα από την επεξεργασία των δεδομένων στις περιοχές μελέτης. Επίσης προτείνονται ορισμένες βελτιώσεις της μεθόδου επεξεργασίας των δεδομένων και κατά συνέπεια της ποιότητας των αποτελεσμάτων.

## 2 Δορυφορική Αλτιμετρία

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία με την οποία προσδιορίζεται το ύψος του δορυφόρου από την επιφάνεια της θάλασσας. Η διαδικασία αυτή είναι ο σκοπός της Δορυφορικής Αλτιμετρίας. Αρχικά αναφέρονται τα βασικά στοιχεία για την αρχή λειτουργίας της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά σε έναν νέο τρόπο προσδιορισμού της απόστασης δορυφόρος – επιφάνεια θάλασσας, η Αλτιμετρία SAR. Η Αλτιμετρία SAR και η εξέλιξή της μέσω της προόδου της τεχνολογίας κατάφερε να παρουσιάσει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιοχές όπου η συμβατική Αλτιμετρία αντιμετώπιζε προβλήματα. Στην Αλτιμετρία στις περιοχές αυτές, που είναι οι παράκτιες ζώνες και τα ηπειρωτικά ύδατα, αναφέρεται η παράγραφος 2.3. Τέλος το κεφάλαιο ολοκληρώνεται παρουσιάζοντας παρούσες και μελλοντικές αποστολές της Δορυφορικής Αλτιμετρίας, τα βασικά χαρακτηριστικά τους και τις καινοτομίες με τις οποίες θα καταστεί εφικτή η περαιτέρω μελέτη των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στις παράκτιες ζώνες αλλά και στον ανοιχτό ωκεανό.

### 2.1 Αρχή Λειτουργίας

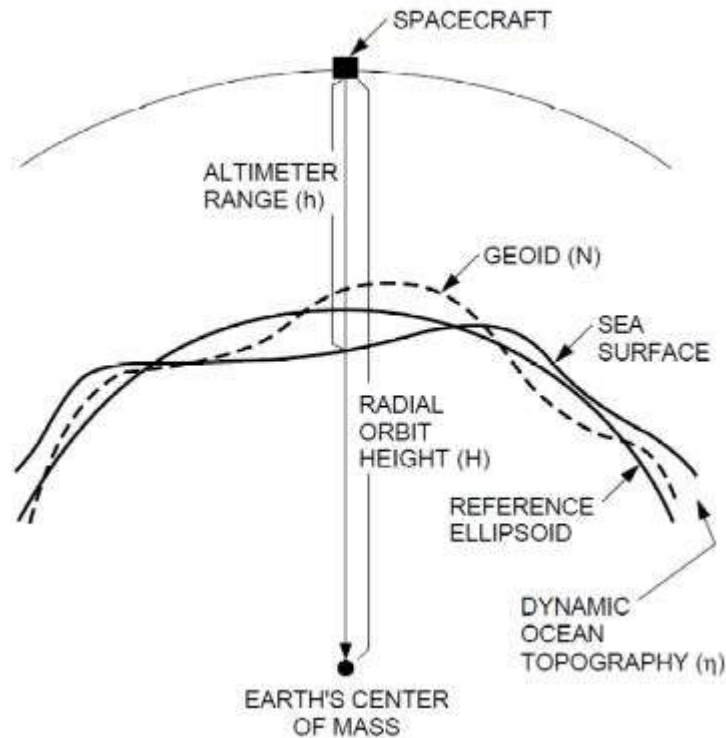
Η Δορυφορική Αλτιμετρία είναι μια τεχνική μέτρησης του υψομέτρου της θαλάσσιας επιφάνειας αλλά και των διακυμάνσεών της με ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από δορυφόρους προς την επιφάνειά της. Το δορυφορικό αλτίμετρο μετράει την αμφίδρομη απόσταση από την κεραία εκπομπής μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας. Βασικός στόχος είναι να προσδιοριστεί το απόλυτο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας με ακρίβεια  $\pm 1$  cm ως προς το κέντρο της Γης. Ο καθορισμός της επιφάνειας της θάλασσας μας δίνει πληροφορίες για το γεωειδές, την βαθυμετρία, τα ρεύματα και την κυκλοφορία των ωκεανών, την αλλαγή του κλίματος της Γης με την παρακολούθηση της αύξησης της στάθμης της θάλασσας, τις διαφοροποιήσεις στην πυκνότητα του υπεδάφους, τα φυσικά διαθέσιμα κ.α.

Το δορυφορικό αλτίμετρο εκπέμπει έναν παλμό μικροκυματικής ακτινοβολίας (radar) βραχείας χρονικής διάρκειας προς το σημείο ναδίρ της θέσης του δορυφόρου (το σημείο στην επιφάνεια της θάλασσας, ακριβώς κάτω από το δορυφόρο). Ο ηλεκτρομαγνητικός αυτός παλμός αλληλεπιδρά με την θαλάσσια επιφάνεια και μέρος της προσπίπτουσας

ακτινοβολίας επιστρέφει στον δορυφόρο, καταγράφεται και αναλύεται. Κατ' αυτόν τον τρόπο, προσδιορίζεται η απόσταση από τον δορυφόρο μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας. Επιπλέον, προσδιορίζονται η ταχύτητα του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, αλλά και το ύψος των κυμάτων της.

Οι συχνότητες εκπομπής των παλμών στην αλτιμετρία είναι κατά κανόνα στην Ka - band (35,7 GHz) και στην Ku - band (13,5 GHz) ενώ περιέχονται και παλμοί μικρότερων συχνοτήτων στην C (5,3 GHz) ή S (3,2 GHz) band. Συνήθως γίνεται η χρήση δύο διαφορετικών συχνοτήτων για τον ακριβέστερο υπολογισμό της επίδρασης της ιονόσφαιρας. Οι παλμοί από τον δορυφόρο μπορεί να είναι συνεχείς ή να έχουν βραχεία διάρκεια και η συχνότητα επανάληψης της εκπομπής του παλμού (Pulse Repetition Frequency - PRF) εξαρτάται από τις προδιαγραφές του ραντάρ που χρησιμοποιείται και τους σκοπούς της αποστολής. Για παράδειγμα στον δορυφόρο ENVISAT χρησιμοποιείται το αλτίμετρο RA - 2 (Radar Altimeter 2) το οποίο λειτουργεί στα 1800 Hz με συνεχές σύστημα μετάδοσης των παλμών. Το επιστρεφόμενο σήμα λαμβάνεται δειγματοληπτικά ανά τακτά σταθερά χρονικά διαστήματα και η δομή αλλά και τα χαρακτηριστικά του μετριοούνται ως συνάρτηση του χρόνου κατά αυτά τα δειγματοληπτικά χρονικά διαστήματα μερικών ns. Η συχνότητα των δειγμάτων του επιστρεφόμενου παλμού ονομάζεται κυματομορφή (waveform).

Ο χρόνος της αμφίδρομης διαδρομής του παλμού από τον δορυφόρο στην προσπίπτουσα επιφάνεια εξάγεται από την κυματομορφή και μετατρέπεται σε μέτρηση απόστασης η οποία είναι η απόσταση (Range) της κεραίας του δορυφόρου από την επιφάνεια της Γης. Πάνω από τους ωκεανούς οι κυματομορφές έχουν ένα χαρακτηριστικό σχήμα το οποίο μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά από το μαθηματικό μοντέλο Brown (*Brown, 1977*). Το μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ότι το επιστρεφόμενο σήμα είναι ένας συνδυασμός από στοιχειώδεις κατοπτρικές ανακλάσεις του παλμού, ομοιόμορφα κατανεμημένες στην επιφάνεια των κυμάτων και μια κατανομή ύψους κύματος που δημιουργείται από την κατάσταση της θάλασσας.

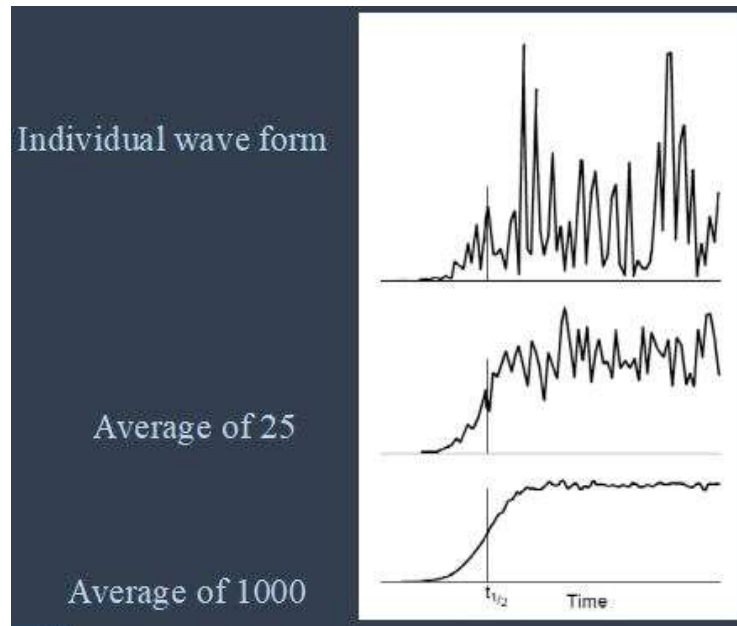


**Εικόνα 2.1** Αρχή Λειτουργίας της Δορυφορικής Αλτιμετρίας (Μερτίκας, 2016)

Για την μείωση του θορύβου του επιστρεφόμενου σήματος, χρησιμοποιείται ο μέσος όρος πολλαπλών διαδοχικών κυματομορφών. Τα προηγούμενα χρόνια γινόταν ο υπολογισμός ενός αριθμού κυματομορφών στον δορυφόρο, πριν την μετάδοσή τους στους σταθμούς επεξεργασίας στο έδαφος. Με την έλευση του δορυφόρου Sentinel 3 μεταδίδεται παγκοσμίως όλο το εύρος των δεδομένων στο έδαφος για πρώτη φορά. Παραδίδονται μειωμένου εύρους μέσοι όροι μετρήσεων, τυπικά μεταξύ 80 Hz και 1 Hz, που αναφέρονται σε μήκος 7 km στην περίπτωση των δεδομένων 1 Hz και σε μήκος έως και 100 m στην περίπτωση των 80 Hz κατά μήκος της τροχιάς.

Ο υπολογισμός των παραμέτρων απόσταση (Range), ύψος κύματος (Wave Height), ταχύτητα ανέμου (Wind Speed) γίνεται με την χρήση της διαδικασίας που ονομάζεται Επαναπροσδιορισμός Κυματομορφής (Waveform Retracking). Η διαδικασία συνίσταται στην εφαρμογή του θεωρητικού μοντέλου Brown (Vignudelli et al., 2019) στις κυματομορφές που λαμβάνονται, υπολογίζοντας τις γεωφυσικές παραμέτρους, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένους συντελεστές (estimators) κατά την διάρκεια εφαρμογής του μοντέλου. Η απόσταση (Range) που υπολογίζεται από την διαδικασία ‘Retracking’ υφίσταται περαιτέρω διορθώσεις από τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας. Στην

Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένας μέσος όρος κυματομορφών για διάφορα δείγματα σημάτων.



Εικόνα 2.2 Μέσος Όρος Κυματομορφών για  $n = 1$ ,  $n = 25$  και  $n = 1000$  δείγματα σημάτων επιστροφής radar.

## 2.2 Αλτιμετρία SAR με παρατηρήσεις Doppler

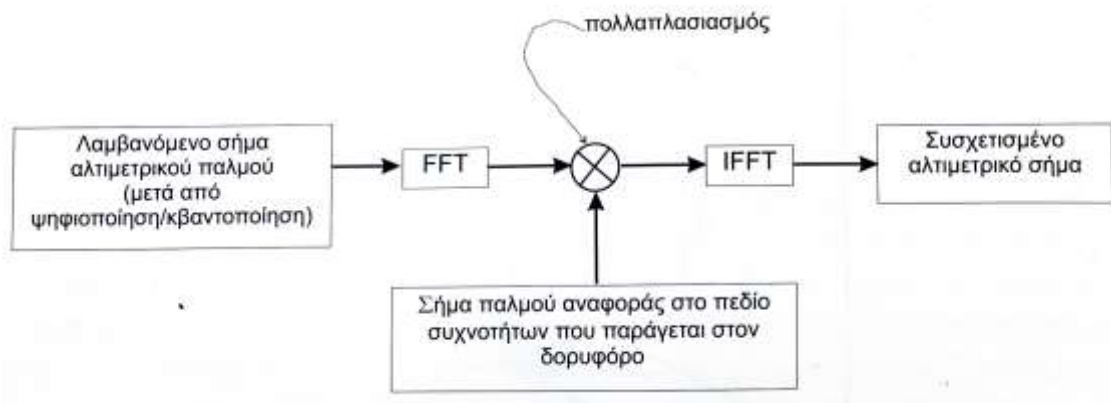
Η αρχή λειτουργίας SAR με παρατηρήσεις Doppler (Synthetic Aperture Radar ή Delay - Doppler αλτιμέτρα) είναι ίδια όπως και στην συμβατική Αλτιμετρία. Διαφέρει στον τρόπο εκπομπής των παλμών, στην συνοχή των σημάτων, στην ακριβή χρονομέτρηση και στην επεξεργασία των αλτιμετρικών σημάτων (Μερτίκας, 2016).

Η τεχνική αυτή βασίζεται στην παρατήρηση όλου του ιστορικού των σημάτων επιστροφής κατά μήκος της τροχιάς σε όλο το εύρος του οπτικού πεδίου της δέσμης της ακτινοβολίας. Συνεισφέρει στον αντίστοιχο προσδιορισμό υψομέτρων σε διάφορες θέσεις εντός του οπτικού πεδίου της δέσμης και δεν περιορίζεται μόνο σε ένα υψόμετρο εντός του οπτικού πεδίου της δέσμης.

Παρέχει τη δυνατότητα να προσδιορίζονται υψόμετρα θάλασσας κατά μήκος της τροχιάς (along track) με υψηλή χωρική ανάλυση και ακρίβεια, όχι μόνο στην ανοιχτή θάλασσα

αλλά και κοντά στις ακτογραμμές, στα ηπειρωτικά ύδατα (ποτάμια, λίμνες) και επίσης συμβάλλει στην αποτύπωση της τοπογραφίας της ξηράς και των παγετώνων.

Στην Αλτιμετρία SAR παράγεται επίσης παλμός του οποίου η συχνότητα μεταβάλλεται γραμμικά κατά την διάρκεια της εκπομπής. Ο δορυφόρος λαμβάνει το εκπεμπόμενο σήμα και το μετασχηματίζει στο πεδίο των συχνοτήτων. Ο τοπικός ταλαντωτής/χρονόμετρο στον δορυφόρο δημιουργεί ακριβές αντίγραφο του εκπεμπόμενου σήματος και το μετασχηματίζει και αυτό στο πεδίο των συχνοτήτων και τα δύο σήματα, αναφοράς και λαμβανόμενο, πολλαπλασιάζονται. Τέλος, προσδιορίζεται το τελικό σήμα στο πεδίο του χρόνου, αφού εφαρμοστεί αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (Μερτίκας, 2016). Το FFT αντιστοιχεί στον ευθύ σχηματισμό Fourier και το IFFT στον αντίστροφο (Εικόνα 2.3). Μετά τον πολλαπλασιασμό των δύο αυτών παλμών προκύπτει η αμφίδρομη διαδρομή (απόσταση) του σήματος από τον δορυφόρο στην θάλασσα (επιφάνεια της Γης).



**Εικόνα 2.3** Διαδικασία συμπίεσης παλμού στην αλτιμετρία SAR (Μερτίκας, 2016).

Η κύρια διαφορά στην Αλτιμετρία SAR είναι ότι προϋποθέτει κατ' αρχάς διαφορετικό τρόπο εκπομπής του δορυφορικού σήματος σε σχέση με την συμβατική Αλτιμετρία. Στην Αλτιμετρία SAR η εκπομπή γίνεται με την μορφή ριπής διαδοχικών παλμών με πολύ ταχείς ρυθμούς, αλλά η επεξεργασία των σημάτων επιστροφής είναι πολύπλοκη και περιλαμβάνει ανάλυση του φαινομένου Doppler των σημάτων επιστροφής.

Παρόλο που η Αλτιμετρία SAR επιβαρύνεται με επιπρόσθετη και πολύπλοκη επεξεργασία σήματος, εντούτοις καταλήγει σε αυξημένη διακριτική ικανότητα εδάφους (ανάλυση περίπου 250 - 300 m κατά μήκος της τροχιάς), σε σχέση με εκείνη της συμβατικής Αλτιμετρίας (3 - 5 km) αλλά και μεγαλύτερη επιφανειακή κάλυψη με χρήσιμα δεδομένα.

Η τεχνική της Αλτιμετρίας SAR απαιτεί επακριβή γνώση της συνοχής (συμφωνίας) των σημάτων των παλμών. Συνοχή σήματος σημαίνει ότι το χρονόμετρο στο δορυφόρο τηρεί χρόνο υψηλής ακρίβειας ώστε να επιτρέπει παρατήρηση οποιασδήποτε μεταβολής στη φάση και τη συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος με ακρίβεια. Δηλαδή οι παλμοί πρέπει καθ' όλη την διάρκεια της εκπομπής της ριπής να διατηρούν σταθερή διαφορά φάσης και σταθερή συχνότητα. Επίσης, η συχνότητα επανάληψης κάθε ριπής παλμών θα πρέπει να είναι και αυτή σταθερή και αμετάβλητη. Μόνο με αυτές τις προϋποθέσεις της αυστηρής συνοχής των παλμών είναι εφικτή η επεξεργασία των σημάτων SAR.

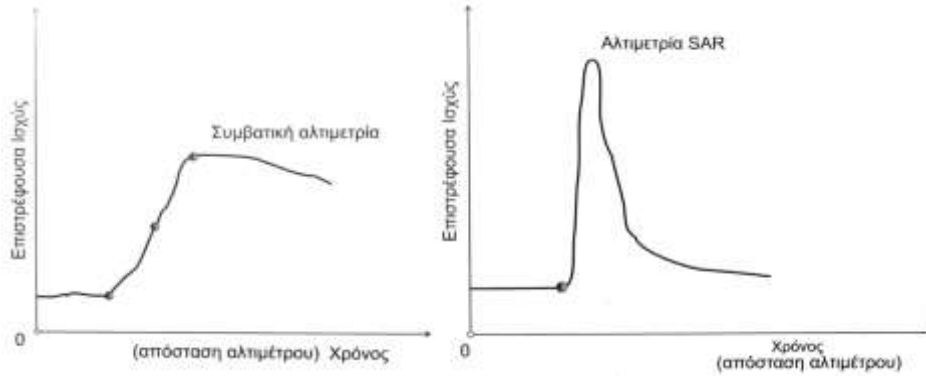
Μετά την ανάκλαση των εκπεμπόμενων παλμών στην επιφάνεια της Γης, σήματα επιστροφής συγκεκριμένου στόχου καταγράφονται από διαφορετικές θέσεις στην τροχιά καθώς ο δορυφόρος μετακινείται. Τέλος αποθηκεύονται στη μνήμη του δορυφόρου για περαιτέρω επεξεργασία εν πτήση.

Στα δεδομένα των σημάτων επιστροφής εφαρμόζεται αρχικά ευθύς μετασχηματισμός Fourier (*cf* *Εικόνα 2.3*) στις διαφορετικές θέσεις παρατήρησης κατά μήκος της τροχιάς. Ο μετασχηματισμός αυτός των σημάτων επιστροφής από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων γίνεται εν πτήση από ένα σύνολο παράλληλων αλγορίθμων με ταχείς μετασχηματισμούς Fourier FFT (Fast Fourier Transforms).

Τα σήματα που προκύπτουν για κάθε επίγειο στόχο, αφού διορθωθούν ταξινομούνται ανάλογα με τις τιμές της συχνότητας Doppler που διαθέτουν. Επίσης, προσδιορίζονται οι αντίστοιχες γεωγραφικές θέσεις των παρατηρούμενων στόχων στην επιφάνεια της Γης και οι αλτιμετρικές μετρήσεις για τον ίδιο στόχο από διαφορετικές θέσεις στην τροχιά προστίθενται η μία μετά την άλλη. Έτσι προκύπτουν πολλές αλτιμετρικές παρατηρήσεις (multi looks) για τον ίδιο στόχο από διαφορετικές θέσεις στην τροχιά.

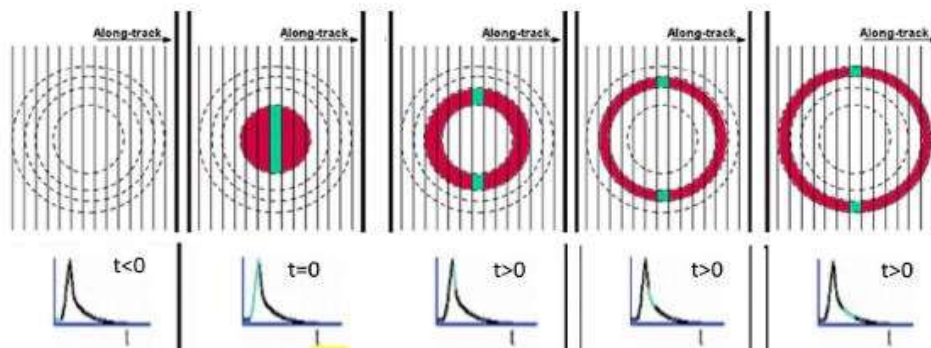
Συνέπεια αυτής της επεξεργασίας είναι τα σήματα επιστροφής των πολλαπλών παρατηρήσεων για τον ίδιο στόχο από διαφορετικές θέσεις στην τροχιά να παρουσιάζουν την μορφή συναρτήσεων σημειακής διέγερσης (Impulse Response Function), εν αντιθέσει με τα συμβατικά αλτίμετρα που το σήμα επιστροφής μοιάζει με σκαλωτή συνάρτηση (*Εικόνα 2.4*).





**Εικόνα 2.4** Τα σήματα επιστροφής στην συμβατική αλτιμετρία και την αλτιμετρία SAR (Μερτίκας, 2016)

Η Εικόνα 2.5 αναπαριστά την εξέλιξη σε σχέση με το χρόνο του αποτυπώματος στην επιφάνεια της Γης, της συμβατικής και της SAR Αλτιμετρίας. Αρχικά την χρονική στιγμή που προσπίπτει ο παλμός στην επιφάνεια της Γης ( $t=0$ ) το αποτύπωμα του παλμού της SAR Αλτιμετρίας δεν είναι κυκλικό όπως αυτό του παλμού της συμβατικής Αλτιμετρίας αλλά ορθογώνιο. Την χρονική αυτή στιγμή η εγκάρσια ανάλυση στην τροχιά (across track resolution) είναι ίδια και στις δύο μεθόδους όμως για  $t>0$  το αποτύπωμα του παλμού της SAR Αλτιμετρίας μικραίνει σε μέγεθος την ίδια στιγμή που η περιοχή του αποτυπώματος του παλμού της συμβατικής Αλτιμετρίας παραμένει σταθερή (κυκλική). Επειδή το αποτύπωμα του SAR αλτιμέτρου δεν παραμένει σταθερό με το πέρασμα του χρόνου παρατηρείται και αυτή η μειούμενη «ουρά» στο διάγραμμα της κυματομορφής (cf Εικόνα 2.4).



**Εικόνα 2.5** Εξέλιξη της γεωμετρίας του αποτυπώματος του σήματος στην περίπτωση της συμβατικής Αλτιμετρίας (κόκκινο χρώμα) και της Αλτιμετρίας SAR (πράσινο χρώμα) (Rosmorduc et al., 2011)

## 2.3 Η Δορυφορική Αλτιμετρία στις Παράκτιες Ζώνες και στα Ηπειρωτικά Ύδατα

Ο αρχικός σκοπός και στόχος της Δορυφορικής Αλτιμετρίας ήταν και είναι η μέτρηση της στάθμης της θάλασσας στους ωκεανούς. Η πρόοδος της τεχνολογίας που επέφερε την εξέλιξη των αλτιμέτρων και των διαδικασιών επεξεργασίας του σήματος, έδωσε την δυνατότητα για την ανάπτυξη εφαρμογών της Δορυφορικής Αλτιμετρίας στις παράκτιες ζώνες και στα ηπειρωτικά ύδατα (ποτάμια, λίμνες). Οι δυνατότητες της Δορυφορικής Αλτιμετρίας στις περιοχές αυτές βρίσκονται ακόμη και σήμερα υπό διερεύνηση και ανάπτυξη καθώς υπάρχει η δυναμική να αποτελέσουν ένα σημαντικό παράγοντα στον τομέα της Υδρολογίας.

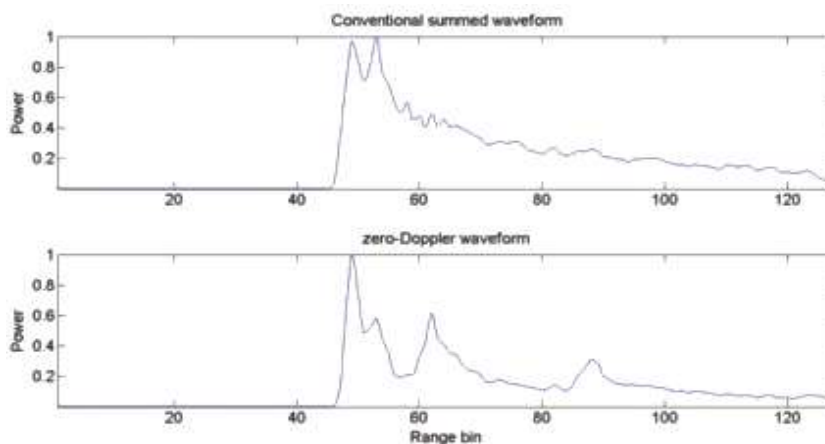
Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου 2, το σήμα από το ραντάρ του δορυφόρου που ανακλάται στην επιφάνεια της θάλασσας, σε περιοχές κοντά στις ακτές, στις οποίες υπάρχει στεριά, δεν μπορεί να περιγραφεί και να αναλυθεί πλήρως από το μοντέλο Brown που χαρακτηρίζει και περιγράφει τις κυματομορφές (waveforms) στην ανοιχτή θάλασσα (Vignudelli et al., 2019). Το αλτίμετρο διατηρεί το επιστρεφόμενο σήμα σε ένα συγκεκριμένο εύρος ανάλυσης με διαδικασίες (pretracker) που γίνονται στο δορυφόρο. Το όργανο αυτό του δορυφόρου ρυθμίζει συνεχώς τις καθυστερήσεις των επιστρεφόμενων σημάτων με σκοπό να διατηρήσει τα όρια των τιμών των κυματομορφών (σε σύγκριση με τα επιστρεφόμενα σήματα από τις περιοχές ανοιχτής θάλασσας) σε μια ονομαστική τιμή παρακολούθησης μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα.

Η παρουσία στεριάς ή παράκτιων κατασκευών μπορεί να αλλοιώσει την μορφή και τις τιμές των κυματομορφών. Η μόλυνση του επιστρεφόμενου σήματος από μη υδρολογικούς παράγοντες που το διασκορπίζουν (scatterers) είναι συχνή σε παράκτιες περιοχές και στα ηπειρωτικά ύδατα με αποτέλεσμα την μείωση της ακρίβειας στον υπολογισμό της απόστασης (Range) του δορυφόρου από την επιφάνεια της Γης (*ibid*, 2019).

Τα κλασικά μοντέλα επαναπροσδιορισμού κυματομορφών των δορυφορικών αλτιμέτρων υποθέτουν την ύπαρξη ομογενούς εύρους σήματος επιστροφής και σταθερό  $\sigma_0$  (sigma 0 ή backscatter coefficient). Πλησιάζοντας όμως στην ακτογραμμή είναι σύνηθες να παρατηρούνται επιδράσεις στο φάσμα του σήματος, στην μεταβλητή του ανέμου και την

μορφή της επιφάνειας ανάκλασης του σήματος. Όλες αυτές οι επιδράσεις συνεισφέρουν στην μεταβολή του βαθμού διασκόρπισης του επιστρεφόμενου σήματος (backscatter). Σε περίπτωση που η μεταβολή αυτή δεν ληφθεί υπόψη θα οδηγήσει σε επιπλέον σφάλματα στον υπολογισμό της απόστασης του δορυφόρου από την επιφάνεια της θάλασσας, σφάλματα τα οποία οι αλγόριθμοι επαναπροσδιορισμού των κυματομορφών πρέπει να μετριάσουν. Στα συνήθη προϊόντα Αλτιμετρίας τα δεδομένα στις παράκτιες ζώνες επισημαίνονται (flagged) ως λανθασμένα, δεν λαμβάνονται υπόψη και δεν χρησιμοποιούνται. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι επαναπροσδιορισμού (retrackers) για την βελτίωση των μετρήσεων της Δορυφορικής Αλτιμετρίας κοντά στην ακτογραμμή (*Gommengiger et al., 2011*). Επίσης η Δορυφορική Αλτιμετρία με την χρήση της τεχνολογίας SAR έχει βελτιώσει την ποιότητα των δεδομένων στις παράκτιες ζώνες (*Dinardo et al., 2018*). Πολλές μελέτες έχουν δείξει επίσης την βελτίωση των δεδομένων και για τα ηπειρωτικά ύδατα από συμβατικά και SAR αλτίμετρα (*Villadsen et al., 2016*), (*Moore et al., 2018*).

Οι διορθώσεις και οι βοηθητικές πληροφορίες δεν είναι οι βέλτιστες ακόμη για τις παράκτιες ζώνες και τα ηπειρωτικά ύδατα και είναι αναγκαία η επανεξέτασή τους για την αύξηση της ακρίβειας των παρεχόμενων δεδομένων. Σε πολλές περιπτώσεις ο συνδυασμός της πολύπλοκης μορφολογίας των παράκτιων ζωνών και των ευμετάβλητων καιρικών συνθηκών που επικρατούν κοντά στις ακτές μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα περιοχές με μικρό κυματισμό να εμφανίζουν υψηλές τιμές (bright targets) στο επιστρεφόμενο σήμα (*Vignudelli et al., 2019*).



**Εικόνα 2.6** Παράδειγμα επίδρασης της στεριάς στην κυματομορφή

(*Vignudelli et al., 2019*).

Η Εικόνα 2.6 δείχνει δύο κυματομορφές από το αλτίμετρο RA-2 του δορυφόρου ENVISAT. Στο παράδειγμα αυτό το σήμα του δορυφόρου είναι σχεδόν κατακόρυφο στην ακτογραμμή. Η κυματομορφή του πρώτου διαγράμματος δημιουργήθηκε από τον μέσο όρο  $N = 1984$  σημάτων παρουσιάζοντας απόκλιση από το μοντέλο Brown. Η κυματομορφή αυτή παρουσιάζει δύο κορυφές εξαιτίας της “μόλυνσης” του σήματος επιστροφής από την παρουσία στεριάς.

Μια βελτίωση παρουσιάζεται από τον συνεκτικό μέσο όρο και την επεξεργασία των σημάτων χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις Doppler, όπως συμβαίνει και στην Αλτιμετρία SAR. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται zero - Doppler επειδή χρησιμοποιεί μόνο μία zero - delay, αγνοώντας έτσι τον διασκορπισμό του επιστρεφόμενου σήματος (backscatter) από το ναδίρ της τροχιάς του δορυφόρου. Με τον τρόπο αυτό παράγεται μια βελτιωμένη κυματομορφή, ελαχιστοποιώντας την επίδραση της στεριάς στο επιστρεφόμενο σήμα.

Ο δορυφόρος CryoSat 2 φέρει το πρώτο ραντάρ που χρησιμοποιεί την τεχνολογία SAR (*ibid*, 2019). Χρησιμοποιώντας αλτίμετρο SAR, στη λειτουργία του οποίου αναφέρθηκε η προηγούμενη παράγραφος, το αποτύπωμα του σήματος του δορυφόρου στην επιφάνεια της Γης χωρίζεται σε εγκάρσιες ζώνες κατά μήκος της τροχιάς με αποτέλεσμα το επιστρεφόμενο σήμα να είναι περισσότερο ισχυρό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη χωρική ανάλυση κατά μήκος της τροχιάς (περίπου 300 m) δίνοντας έτσι την δυνατότητα μελέτης μικρότερης κλίμακας χαρακτηριστικών της επιφάνειας της Γης σε σχέση με την συμβατική Αλτιμετρία. Η αποστολή Sentinel 3 χρησιμοποιεί επίσης την τεχνολογία αυτή καθώς διαθέτει αλτίμετρο SAR (SRAL).

Βελτιώσεις στην ποιότητα του επιστρεφόμενου σήματος μπορούν να επιτευχθούν με την χρήση της συχνότητας Ka. Η αποστολή SARAL χρησιμοποιεί το αλτίμετρο Altika, το πρώτο αλτίμετρο που λειτουργεί σε αυτή την συχνότητα. Η χρήση της Ka - band προσφέρει καλύτερη χωρική ανάλυση λόγω του μικρού αποτυπώματος του σήματος στην επιφάνεια της Γης. Η επίδραση όμως της υγρασίας της ατμόσφαιρας και των καιρικών φαινομένων στο σήμα είναι σημαντική καθώς η Ka - band επηρεάζεται περισσότερο από αυτούς τους παράγοντες σε σχέση με την Ku - band.

## 2.4 Αποστολές Δορυφορικής Αλτιμετρίας SAR

Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά στις δύο βασικές αποστολές Αλτιμετρίας που χρησιμοποιούν SAR αλτίμετρο. Πρόκειται για τους δορυφόρους CryoSat 2 και Sentinel 3. Δεδομένα από τις αποστολές αυτές χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα εργασία, τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

### 2.4.1 Η Αποστολή CryoSat 2

Ο CryoSat 2 (*Εικόνα 2.7*) είναι δορυφόρος της European Space Agency (ESA) με αποστολή την παρατήρηση του πάχους των πάγων και του ύψους των παγετώνων στους πόλους. Η αποστολή εκτοξεύθηκε στις 8 Απριλίου 2010 και έχει τροχιά που ολοκληρώνεται κάθε 369 ημέρες. Για την εκπλήρωση των απαιτήσεων της αποστολής του ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος ένα ραντάρ SAR interferometric που ονομάστηκε SIRAL (*Dinardo, 2020*) το οποίο λειτουργεί στην συχνότητα Ku. Το ραντάρ SIRAL διαθέτει τρεις λειτουργίες SAR, SARin (SAR interferometric) και LRM (Low Rate Mode) που είναι η ορολογία που χρησιμοποιείται στον δορυφόρο CryoSat 2 για την λειτουργία της συμβατικής Αλτιμετρίας.

Το γεγονός ότι ο δορυφόρος έχει μία μόνο συχνότητα λειτουργίας σημαίνει ότι δεν μπορεί να υπολογίσει αυτόνομα από τις μετρήσεις του την καθυστέρηση του παλμού του ραντάρ εξαιτίας της επίδρασης της ιονόσφαιρας. Η τροχιά του έχει κλίση  $92^\circ$  με σκοπό την καλύτερη λειτουργία του δορυφόρου στις πολικές περιοχές και δεν είναι σύγχρονη με τον ήλιο με αποτέλεσμα ο δορυφόρος να αντιμετωπίζει διαφορετικές συνθήκες φωτεινότητας και θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της πτήσης του.

Για τον ακριβή υπολογισμό της τροχιάς του ο δορυφόρος CryoSat 2 διαθέτει σύστημα DORIS (Doppler Orbit και Radio Positioning Integration by Satellite) και laser retro-reflectoarray (LRR). Ο δορυφόρος όμως δεν είναι εξοπλισμένος με μικροκυματικό ραδιόμετρο και έτσι δεν μπορεί να προσδιορίσει την καθυστέρηση του παλμού του ραντάρ που οφείλεται στο υγρό μέρος της τροπόσφαιρας.

Ο δορυφόρος CryoSat 2 ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες αποστολές Αλτιμετρίας καθώς δεν εκτελεί καμία επεξεργασία στις λαμβανόμενες κυματομορφές επί του σκάφους αλλά τις

μεταφορτώνει στους σταθμούς του εδάφους, αφού ολοκληρώσει την ψηφιοποίησή τους. Στο έδαφος οι κυματομορφές που στέλνονται από τον δορυφόρο γεωαναφέρονται, διορθώνονται χρονικά και γίνεται εφαρμογή των κατάλληλων διορθώσεων που θα αναφερθούν στο κεφάλαιο 3 με σκοπό την παραγωγή δεδομένων επιπέδου 1 (Level 1 ή L1). Λόγω του τεχνικού σχεδιασμού του δορυφόρου CryoSat 2 δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη SAR και LRM λειτουργία του (*ibid*, 2020).



**Εικόνα 2.7** Δορυφόρος CryoSat 2 (ESA)

#### **2.4.2 Η Αποστολή Sentinel 3**

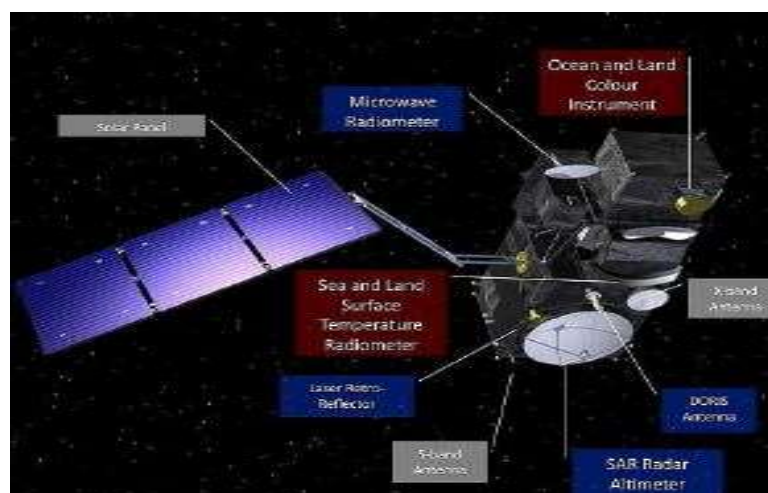
Η αποστολή Sentinel 3 αναπτύχθηκε από την ESA και λειτουργεί από την EUMETSAT στο πλαίσιο του προγράμματος Copernicus της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Ο πρώτος δορυφόρος της αποστολής (*Εικόνα 2.8*) εκτοξεύθηκε στις 16 Φεβρουαρίου του 2016 και κατέστη επιχειρησιακός τον Ιούλιο του ίδιου έτους. Ο δορυφόρος Sentinel 3A διαθέτει μια σειρά αισθητήρων για την απόκτηση δορυφορικών εικόνων (OLCI και SLSTR) και τον προσδιορισμό της τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας (SRAL). Το SRAL είναι ένα ραντάρ αλτίμετρο που λειτουργεί στην συχνότητα Ku και στην συχνότητα C. Έχει την δυνατότητα να λειτουργήσει σαν SAR αλτίμετρο και σαν LRM αλτίμετρο (*ibid*, 2020).

Το αλτίμετρο SRAL αποτελεί ουσιαστικά συνέχεια του αλτιμέτρου SIRAL του δορυφόρου CryoSat 2 αφού τα δύο αυτά αλτίμετρα διαθέτουν παρόμοιο σχεδιασμό. Στόχος του αλτιμέτρου SRAL είναι η παροχή μετρήσεων της τοπογραφίας των ωκεανών,

των πάγων της θάλασσας, των παγετώνων, των λιμνών και των ποταμών με μεγάλη ακρίβεια σε όλη την ονομαστική διάρκεια ζωής του που είναι επτά έτη. Θα παρέχει επίσης μετρήσεις του ύψους των κυμάτων της θάλασσας και του ανέμου.

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η παροχή μετρήσεων της τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας αλλά και των ηπειρωτικών υδάτων, ο δορυφόρος Sentinel 3A διαθέτει μικροκυματικό ραδιόμετρο με το οποίο προσδιορίζεται η επίδραση του υγρού μέρους της τροπόσφαιρας στον παλμό. Επίσης διαθέτει την λειτουργία παρακολούθησης OLTC (Open Loop Tracking Command) που επιτρέπει τον έλεγχο και την διατήρηση της παρακολούθησης της τροχιάς του δορυφόρου πάνω από πολύπλοκες τοπογραφικά επιφάνειες όπως είναι οι παράκτιες ζώνες (*ibid*, 2020). Επιπρόσθετα ο δορυφόρος διαθέτει σύστημα DORIS (Doppler Orbit και Radio Positioning Integration by Satellite), δέκτη GNSS και laser retro-reflectoarray (LRR) για τον ακριβή υπολογισμό της τροχιάς του διαστημικού σκάφους.

Η τροχιά του δορυφόρου Sentinel 3A είναι σύγχρονη με τον ήλιο, το υψόμετρο πτήσης του δορυφόρου είναι 814 χλμ με κλίση 98.6° και ολοκληρώνεται κάθε 27 ημέρες. Η τροχιά του Sentinel 3 δεν έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ από καμία αποστολή έως τώρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη σφάλματος κατά τον προσδιορισμό των ανωμαλιών της στάθμης της θάλασσας (Sea Level Anomaly ή SLA) στα πρώτα στάδια λειτουργίας της αποστολής. Δεδομένου ότι η κλίση της τροχιάς δεν είναι η ίδια με αυτή του CryoSat 2 η κάλυψη στις πολικές περιοχές από τον Sentinel 3A θα είναι μικρότερη (*ibid*, 2020). Τον Απρίλιο του 2018 η αποστολή συμπληρώθηκε και από το δεύτερο μέλος της, τον δορυφόρο Sentinel 3B ο οποίος διπλασίασε την κάλυψη που προσφέρει η αποστολή Sentinel 3.



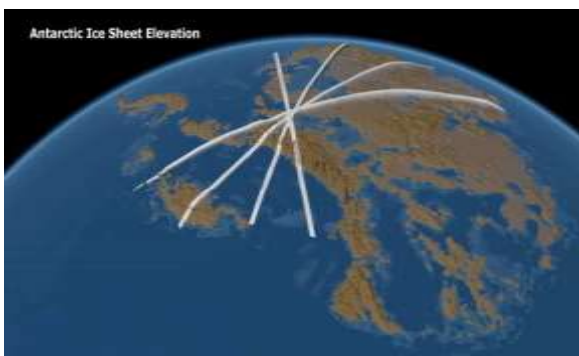
**Εικόνα 2.8** Δορυφόρος Sentinel 3A (ESA)

## 2.5 Μελλοντικές αποστολές Δορυφορικής Αλτιμετρίας

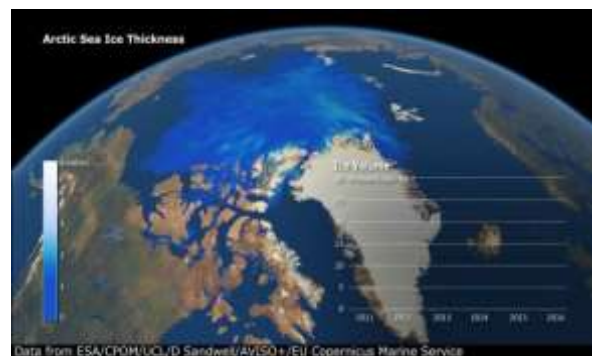
Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των μελλοντικών αποστολών της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Περιγράφονται οι καινοτομίες με τις οποίες οι νέες αποστολές θα τροφοδοτήσουν την επιστημονική κοινότητα με βελτιωμένης ακρίβειας δεδομένα για περιοχές που έως σήμερα δεν είχαν την πλήρη κάλυψη των δορυφόρων Αλτιμετρίας.

### 2.5.1 CRISTAL (Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter)

Η αποστολή CRISTAL της ESA αναμένεται να ξεκινήσει το 2025. Ο δορυφόρος θα φέρει ένα αλτίμετρο ραντάρ πολλαπλών συχνοτήτων και ένα μικροκυματικό ραδιόμετρο για τη μέτρηση και την παρακολούθηση του πάχους του πάγου και του βάθους του χιονιού. Επίσης θα μετρά και θα παρακολουθεί τις αλλαγές στο ύψος των φύλλων πάγου της θάλασσας και των παγετώνων σε όλο τον κόσμο. Οι μετρήσεις θα υποστηρίξουν τις θαλάσσιες επιχειρήσεις στους πόλους και μακροπρόθεσμα, θα βοηθήσουν στον προγραμματισμό των δραστηριοτήτων στις πολικές περιοχές. Δεδομένου ότι η διαχρονική μεταβλητότητα των θαλάσσιων πάγων είναι ευαίσθητη στην αλλαγή του κλίματος, η αποστολή θα συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των κλιματικών διεργασιών.



Εικόνα 2.9 Ύψος χιονιού στην Ανταρκτική (ESA)



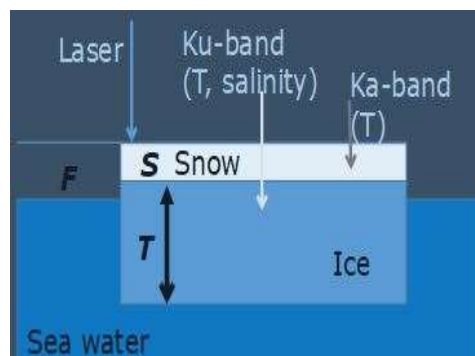
Εικόνα 2.10 Πάχος πάγου στην Αρκτική (ESA)

Οι πρωταρχικοί στόχοι της νέας αυτής αποστολής θα είναι, όπως αναφέρθηκε η παρακολούθηση και η μέτρηση των μεταβολών του πάχους των πάγων (cf Εικόνα 2.10)



και του ύψους του χιονιού, στην Αρκτική και στον Νότιο Ωκεανό και η παρακολούθηση και η μέτρηση των μεταβολών της επιφάνειας των παγετώνων και των παγόβουνων της Ανταρκτικής και της Γροιλανδίας. Οι δευτερεύοντες στόχοι της αποστολής CRISTAL, θα είναι να συμβάλλει στην παρατήρηση τοπογραφίας των ωκεανών μέχρι τις πολικές θάλασσες, να υποστηρίξει εφαρμογές που αφορούν παράκτια, εσωτερικά ύδατα, το χιόνι και το παγωμένο νερό.

Το αλτιμέτρο του CRISTAL θα διεξάγει μετρήσεις στην Ku και στην Ka band και έτσι θα έχει την δυνατότητα μέτρησης του ύψους του χιονιού και του πάχους του πάγου (Εικόνα 2.11).



**Εικόνα 2.11** Λειτουργία αλτιμέτρου CRISTAL (ESA)

### 2.5.2 Sentinel 6/Jason CS

Το πρόγραμμα Jason-CS συνιστά τη συμβολή της EUMETSAT στην αποστολή Copernicus Sentinel 6, η οποία θα αναπτυχθεί και θα υλοποιηθεί με συνεργασία της ΕΕ, της ESA, της EUMETSAT, της NASA και της NOAA. Από το 2020 έως το 2030, η αποστολή Sentinel 6 θα επεκτείνει με μοναδικό τρόπο το σύνολο των μετρήσεων της στάθμης της θάλασσας που έχουν συσσωρευτεί από το 1992 από την αποστολή TOPEX / Poseidon, Jason-1, Jason-2 και Jason-3. Ένας πρωταρχικός στόχος της αποστολής είναι να συνεχιστεί αυτή η μακρά παγκόσμια χρονολογική σειρά μετρήσεων της στάθμης της θάλασσας με ένα σφάλμα μικρότερο από 1 χιλ./έτος. Η αποστολή Sentinel 6 θα αποτελέσει επίσης ένα βασικό σύστημα παρατήρησης για την επιχειρησιακή ωκεανογραφία και τις εποχιακές προβλέψεις στην Ευρώπη και σε άλλες περιοχές. Θα παρέχει μετρήσεις του ύψους της θάλασσας (Sea Surface Height - SSH), του σημαντικού ύψους κύματος (Significant Wave Height - SWH) και της ταχύτητας του ανέμου (Wind

Speed) χωρίς υποβάθμιση της ακρίβειας σε σύγκριση με την αποστολή Jason-2, η οποία τερματίστηκε στα τέλη του 2019. Ως εκ τούτου, όπως και οι προκάτοχοί της, η αποστολή αυτή θα παράσχει βασικές υπηρεσίες δεδομένων στους χρήστες για παρακολούθηση της στάθμης της θάλασσας, την επιχειρησιακή ωκεανογραφία και την θαλάσσια μετεωρολογία. Αυτές οι υπηρεσίες θα ευθυγραμμιστούν με αυτές των αποστολών Sentinel-3, οι οποίες θα λειτουργήσουν την ίδια εποχή.



**Εικόνα 2.12** Ο δορυφόρος Sentinel 6 της ESA (ESA)

Εκτός από την υπηρεσία αλτιμετρικών δεδομένων, η αποστολή Sentinel 6 θα περιλαμβάνει επίσης ένα όργανο GNSS-RO (GNSS Radio Occultation) ως δευτερεύουσα λειτουργία, εκμεταλλευόμενο την τροχιά του Sentinel 6 που δεν είναι ηλιοσύγχρονη. Οι μετρήσεις GNSS-RO θα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την ατμοσφαιρική πίεση, τη θερμοκρασία και τους υδρατμούς, καθώς και πληροφορίες για την ιονόσφαιρα. Η υπηρεσία αυτή θα καλύπτει κυρίως τις ανάγκες των χρηστών για μετεωρολογικά δεδομένα και δεδομένα για το κλίμα.

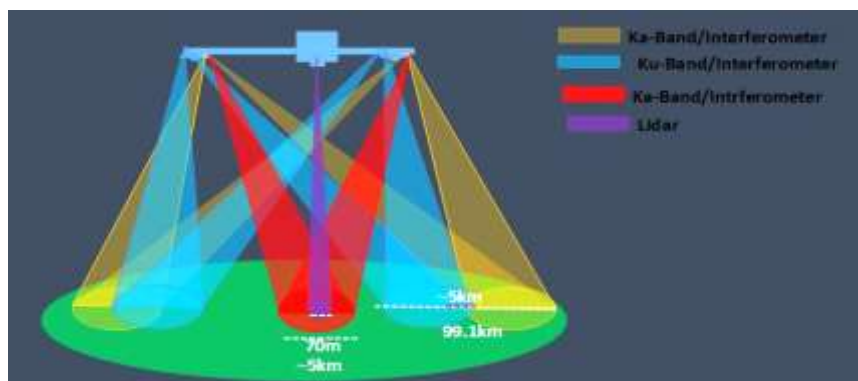
Ο δορυφόρος θα διαθέτει αλτίμετρο Poseidon 4 για την μέτρηση της απόστασης (Range) του δορυφόρου από την επιφάνεια της θάλασσας, καθορίζοντας το σημαντικό ύψος κύματος (Significant Wave Height- SWH) και την ταχύτητα του ανέμου (Wind Speed). Επίσης το αλτίμετρο θα λειτουργεί σε δύο διαφορετικές συχνότητες, στην Ka και στην C, παρέχοντας και την διόρθωση για την επίδραση της ιονόσφαιρας στον υπολογισμό της απόστασης (Range). Θα διαθέτει επίσης το ραδιόμετρο μικροκυμάτων AMR - C (Advanced Microwave Radiometer-C) της JPL με το οποίο θα παρέχεται η διόρθωση για την επίδραση της τροπόσφαιρας στο σήμα του δορυφόρου. Ο δορυφόρος θα διαθέτει επίσης όργανα για να παρέχει με μεγάλη ακρίβεια μετρήσεις για την εύρεση της τροχιακής θέσης (GNSS-POD, DORIS, LRA) καθώς και το όργανο GNSS - RO για τον

ακριβή υπολογισμό των επιδράσεων της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας, όπως αναφέρεται παραπάνω.

Η αποστολή Sentinel 6 αποτελείται από δύο πανομοιότυπους δορυφόρους (Jason-CS A και Jason-CS B) με ονομαστική διάρκεια ζωής 5.5 έτη και προγραμματισμένη επικάλυψη τουλάχιστον 6 μήνες. Οι δορυφόροι θα ξεκινήσουν διαδοχικά στην τροχιά του Jason για να αναλάβουν την συνέχεια την παροχή δεδομένων όταν η αποστολή Jason-3 φτάσει στο τέλος της προγραμματισμένης διάρκειας ζωής της. Η τροχιά των δορυφόρων θα έχει διάρκεια περίπου 9 ημέρες και 22 ώρες. Επί του παρόντος, οι εκτοξεύσεις του Jason-CS A και B σχεδιάζονται για το 2020 και το 2026, αντίστοιχα.

### 2.5.3 QUANLAN

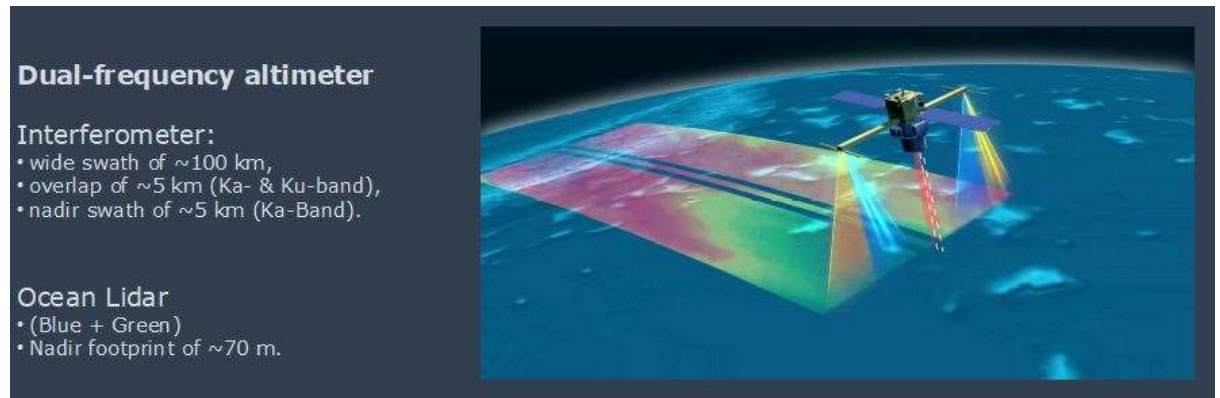
Η Κίνα τα επόμενα χρόνια θα εκτοξεύσει τον δορυφόρο QUANLAN (Εικόνα 2.13). Ο δορυφόρος θα διεξάγει μετρήσεις στην Ka και Ku συχνότητα, όμως θα διαθέτει συμβολόμετρα (Ka interferometer, Ku interferometer), δηλαδή θα είναι σαν δύο δορυφόροι σε έναν. Θα υπάρχει ένας δορυφόρος στο αριστερό τμήμα του σκάφους, ένας στο δεξί και ένας στο κέντρο.



Εικόνα 2.13 Ο δορυφόρος QUANLAN.

Η αποστολή θα έχει δύο φάσεις. Στην αρχική φάση της αποστολής ο δορυφόρος θα κινείται σε τροχιά χαμηλού ύψους περίπου 400 χιλιομέτρων και θα πραγματοποιεί μετρήσεις με το όργανο Laser (Lidar) που θα χρησιμοποιεί την μπλέ ακτίνα ενώ θα διαθέτει και δυνατότητα χρήσης της πράσινης ακτίνας σε περίπτωση δυσλειτουργίας του οργάνου (Εικόνα 2.14). Μετά από περίπου ένα χρόνο η αποστολή θα περάσει στην

δεύτερη φάση στην οποία θα κινείται σε τροχιά ύψους 1000 χιλιομέτρων και δορυφόρος θα είναι πλήρως επιχειρησιακός.



**Εικόνα 2.14** Παράμετροι Αλτιμέτρων και οργάνου Laser του δορυφόρου Quianlan

#### **2.5.4 COMPIRA (Coastal and Ocean Measurement Mission with Precise and Innovative Radar Altimeter)**

Η Ιαπωνική Υπηρεσία Αεροδιαστημικής Έρευνας (Japan Aerospace Exploration Agency - JAXA) οργανώνει μια νέα αποστολή Αλτιμετρίας που ονομάζεται COMPIRA (Uematsu et al., 2011). Οι κύριοι στόχοι της αποστολής COMPIRA είναι τρεις:

α) η παρακολούθηση των ρευμάτων των ωκεανών για διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες συμπεριλαμβανομένης της ναυσιπλοΐας και της εκτίμησης των θέσεων αλιείας

β) η μελέτη των φαινομένων του υποθαλάσσιου ωκεανού, της ανόδου της στάθμης της θάλασσας και η βελτίωση του μοντέλου των προβλέψεων των τσουνάμι

γ) η λήψη δεδομένων σχετικά με το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας στην παράκτια περιοχή.

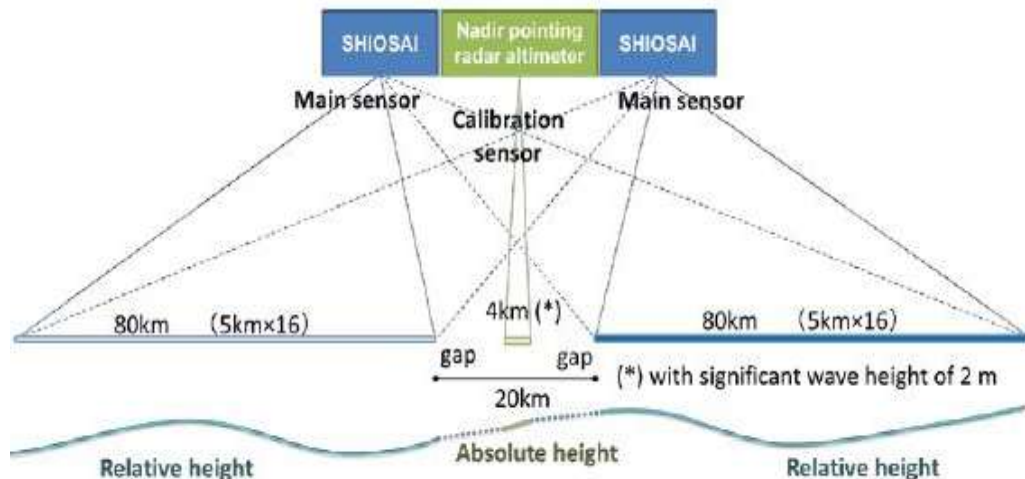
Η αποστολή COMPIRA θα φέρει ένα αλτίμετρο ευρείας δέσμης με δύο κεραίες SAR, που ονομάζεται SHIOSAI (SAR Height Imaging Oceanic Sensor with Advanced Interferometry), με πλάτος δέσμης 80 χιλιόμετρα αριστερά και δεξιά. Ο δορυφόρος θα διαθέτει POD (Precise Orbit Determination) ώστε να πληροί τις προϋποθέσεις ακριβείας για τον υπολογισμό της στάθμης της θάλασσας (7,5 cm, με χωρική ανάλυση 5 km) (Εικόνα 2.15). Για τον λόγο αυτό ο δορυφόρος θα είναι εξοπλισμένος με όργανο LRA (Laser Retroreflector Array) για να βαθμονομεί τις αποκλίσεις στις μετρήσεις του GPS

για τον προσδιορισμό της τροχιάς και να αποκτήσει συνδυασμένες ακριβείς τροχιές από τις μετρήσεις SLR / GPS με τη συνεργασία των σταθμών ILRS. Επίσης, για την ικανοποίηση των απαιτήσεων της αποστολής κρίθηκε απαραίτητη η ικανοποίηση του λογισμικού POD. Για τον λόγο αυτό η JAXA ανέπτυξε ένα νέο λογισμικό για τον υπολογισμό της τροχιάς και του χρόνου GNSS που ονομάζεται "Madoka", του οποίου η απόδοση αξιολογήθηκε πρόσφατα (*ibid*, 2011).

Το σύστημα αισθητήρων της αποστολής COMPIRA αποτελείται από τρία μέρη:

- α) αλτίμετρο ευρείας δέσμης (SHIOSAI),
- β) αλτίμετρο ραντάρ που θα διεξάγει μετρήσεις στο Ναδίρ του δορυφόρου
- γ) και ραδιόμετρο μικροκυμάτων.

Η χωρική ανάλυση του SHIOSAI θα είναι 5 km. Αυτό θα επιτρέψει την παρακολούθηση παράκτιων θαλάσσιων περιοχών. Η τροχιά της αποστολής θα είναι μη ηλιοσύγχρονη με υψόμετρο 937,49 km, κλίση 51,2° και περίοδο επανάληψης 10 ημερών. Αυτό θα επιτρέψει τον υπολογισμό της επίδρασης της παλίρροιας στην στάθμη της θάλασσας που προσδιορίζει ο δορυφόρος. Η εκτόξευση του δορυφόρου COMPIRA σχεδιάζεται για το 2020.



**Εικόνα 2.15** Παράμετροι Αποστολής COMPIRA (*Uematsu et al.,2011*)

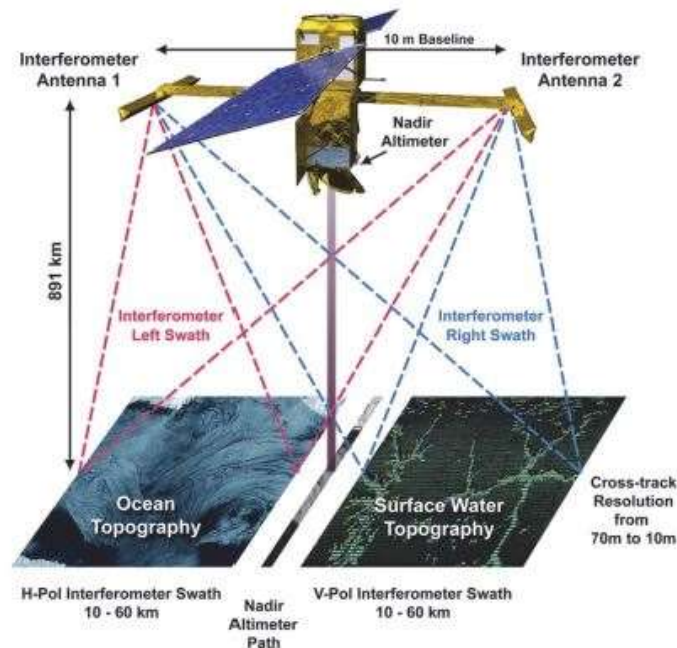
### 2.5.5 SWOT (Surface Water and Ocean Topography)

Η αποστολή SWOT αποτελεί συνεργασία δύο επιστημονικών κοινοτήτων που εστιάζουν τις προσπάθειες τους στην καλύτερη κατανόηση των φαινομένων και της συμπεριφοράς των ωκεανών σε παγκόσμια κλίμακα και των επιφανειακών υδάτων της στεριάς. Ωκεανογράφοι και Υδρογράφοι από τις ΗΠΑ, την Γαλλία και συνεργάτες από οργανισμούς της Αγγλίας και του Καναδά έχουν ενώσει τις προσπάθειές τους για να αναπτύξουν μια δορυφορική αποστολή, με σκοπό να πραγματοποιηθεί η πρώτη παγκόσμια παρατήρηση και έρευνα των επιφανειακών υδάτων της Γης, να παρατηρηθούν οι λεπτομέρειες της τοπογραφίας της επιφάνειας των ωκεανών και να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο τα συστήματα των υδάτων μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου.

Η εξέλιξη στην επεξεργασία των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας, παρέχει αξιόπιστα δεδομένα σε απόσταση 5 - 10 km από την ακτή χωρίς να καλύπτει τις παράκτιες περιοχές και τις περιοχές που εκβάλλουν ποταμοί. Με την νέα αποστολή SWOT θα παρέχονται δεδομένα για το ύψος της στάθμης της θάλασσας σε πλάτος 120 km με ένα κενό 20 km στο ναδίρ της τροχιάς. Ένα επιπλέον συμβατικό αλτίμετρο θα παρέχει δεδομένα για την κάλυψη του κενού (Εικόνα 2.16). Χρησιμοποιώντας επεξεργασία με συμβολομετρία θα είναι διαθέσιμα 1 επί 1 km gridded δεδομένα από τις περιφερειακές θάλασσες έως τις παράκτιες περιοχές και τις περιοχές πλησίον των εκβολών των ποταμών. Επιπλέον θα είναι διαθέσιμα υψηλής ανάλυσης δεδομένα ποταμών και επιφανειακών υδάτων εντός των ηπειρωτικών περιοχών καθώς και για παράκτιες περιοχές σε απόσταση 3 km από την ακτή. Τα δεδομένα υψηλής ανάλυσης θα έχουν υψηλότερο θόρυβο, όμως με κατάλληλη επεξεργασία για την μείωση του θορύβου θα είναι δυνατή η διερεύνηση της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας σε τοπικές συντεταγμένες.

Η αποστολή SWOT θα χρησιμοποιεί την τεχνολογία SAR για να βελτιώσει την ανάλυση του σήματος κατά μήκος της τροχιάς (along track resolution), όπως εξηγείται στην παράγραφο 2.2. Η επεξεργασία με συμβολομετρία βελτιώνει την εγκάρσια ανάλυση στην τροχιά (cross track resolution). Το όργανο SAR-KaRIn του SWOT παρέχει μια βασική ανάλυση μέτρησης 2,5 m κατά μήκος της τροχιάς. Πάνω από τις επίγειες επιφάνειες νερού, εκτελείται μια προεπεξεργασία των δεδομένων επί του σκάφους, τα οποία

μεταφορτώνονται σε ανάλυση 5,5 m κατά μήκος της τροχιάς με την μέγιστη εγκάρσια ανάλυση. Η πλήρη επεξεργασία των δεδομένων διεξάγεται στη συνέχεια στο έδαφος.

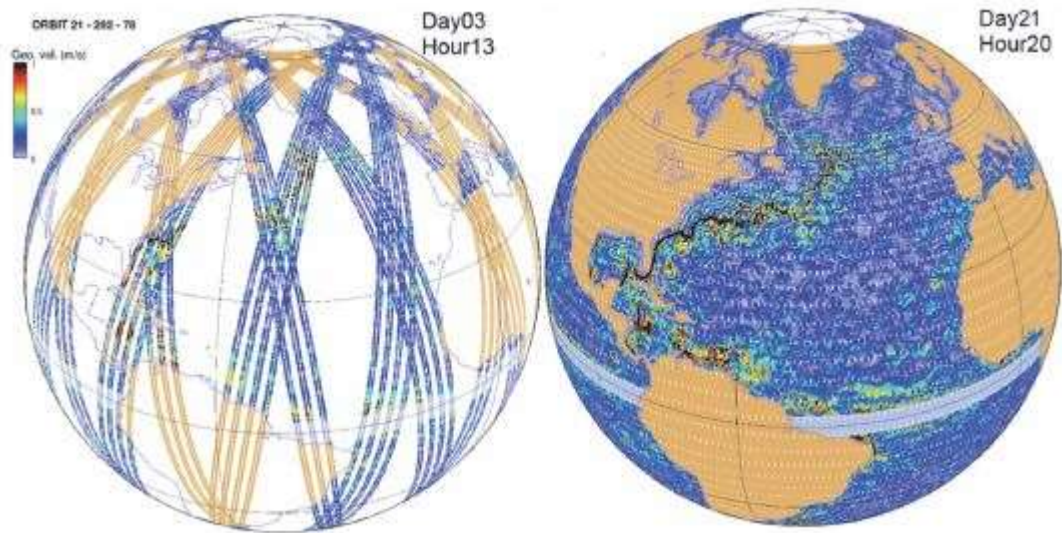


**Εικόνα 2.16** Τεχνική της λειτουργίας SWOT με τη χρήση του οργάνου KaRIn με συμβολομετρία SAR στις δύο λωρίδες αριστερά και δεξιά και ένα αλτίμετρο Jason στο ναδίρ του δορυφόρου. (ESA)

Ο πρωταρχικός στόχος της αποστολής SWOT είναι η διερεύνηση της κίνησης του ωκεανού σε μέση και υπομέση κλίμακα που προσδιορίζεται από την τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας σε χωρικές αναλύσεις έως 15 km. Οι τρέχουσες αποστολές Αλτιμετρίας μπορούν μόνο να διεξάγουν μετρήσεις σε ανάλυση μεγαλύτερη από 200 km (Morrow *et al.* 2018).

Οι δύο επιστημονικές κοινότητες όμως που θα χρησιμοποιήσουν τις παρατηρήσεις και τα δεδομένα του προγράμματος SWOT ως επί το πλείστον, έχουν διαφορετικούς στόχους. Οι υδρολόγοι χρειάζονται παγκόσμια κάλυψη για την μελέτη και την παρατήρηση των μικρότερων λιμνών και ποταμών, συμπεριλαμβανομένου του Ισημερινού, σε μηνιαία κλίμακα. Οι ωκεανογράφοι χρειάζονται δεδομένα και παρατηρήσεις για τις μικρές ωκεάνιες κλίμακες ωστόσο, η πλήρη χωρική και χρονική κάλυψη δεν είναι δυνατή με ένα δορυφόρο. Η τελική τροχιά επελέγη έτσι ώστε να καλύψει τις περισσότερες περιοχές των επιφανειακών υδάτων και των ωκεανών μέχρι 78° B και N (κλίση 77,6°) σε υψόμετρο 890,6 km σε μια επαναλαμβανόμενη τροχιά 21

ημερών, επιτρέποντας σχεδόν πλήρη κάλυψη της επιφάνειας μετά από ένα πλήρη κύκλο. Ο δορυφόρος SWOT έχει μια μη ηλιοσύγχρονη τροχιά όπου η κλίση και η διάρκεια της επιλέχθηκαν ειδικά για τον υπολογισμό των κυριότερων επιδράσεων της παλίρροιας που είναι ιδιαίτερα σημαντικές στις παράκτιες περιοχές, τις περιοχές με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος και για την πρόοδο στη παρατήρηση των εσωτερικών παλιρροιών (Εικόνα 2.17).



**Εικόνα 2.17** Η κάλυψη της τροχιάς SWOT έως 78° Β και Ν μετά από 3 ημέρες αριστερά και οι πλήρεις 21 ημέρες πλήρους κύκλου δεξιά. Το χρώμα δείχνει τα εξελισσόμενα ρεύματα κατά μήκος της τροχιάς για κάθε ίχνος της στην επιφάνεια της γης. (ESA)

Η δυναμική των ωκεανών στις παράκτιες περιοχές είναι πολύ σημαντική για πολλές κοινωνικές εφαρμογές. Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στις παράκτιες περιοχές έχουν μικρότερη χρονική και χωρική κλίμακα από αυτά του ανοιχτού ωκεανού και για τον λόγο αυτό απαιτούν υψηλότερης ανάλυσης παρακολούθηση. Ο δορυφόρος SWOT θα παρέχει υψηλής ανάλυσης παρατηρήσεις σε παγκόσμια κλίμακα για την παρακολούθηση φαινομένων (παράκτια ρεύματα, καταγίδες κλπ) σε παράκτιες περιοχές, μέχρι την ακτή, με ανάλυση από 250 m έως 2 km. Παρόλο που η αποστολή δεν είναι σχεδιασμένη να παρακολουθεί τις γρήγορες χρονικές μεταβολές των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην παράκτια ζώνη, η κάλυψη του εύρους του σήματος στην επιφάνεια της θάλασσας, θα επιτρέψει τον χαρακτηρισμό της χωρικής δομής των φαινομένων όταν αυτά συμβαίνουν εντός του εύρους του σήματος.



Αν και η σειρά δορυφορικών αλτιμέτρων Jason έχει βελτιώσει σημαντικά τις παρατηρήσεις μας για τις βαροτροπικές παλίρροιες στον ανοιχτό ωκεανό, η μικρή χωρική κλίμακα των παράκτιων παλιρροιών και τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζουν δυσκολίες στην παρατήρηση και παρακολούθηση, καθώς υπολείπεται η πληροφορία ανάμεσα στις τροχιές του Jason. Η 2D κάλυψη του δορυφόρου SWOT με την ανάλυση των 250 m μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μετρητής παλίρροιας (παλιρροιογράφος), για χρονική περίοδο τριών ετών. Αυτό θα επιτρέψει την άνευ προηγουμένου κάλυψη των παράκτιων παλιρροιών και των βαροτροπικών παλιρροιών των ανοιχτών ωκεανών, που εκτείνονται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη των 78° Β και Ν. Σημειώνεται ότι οι ακριβείς ιστορικές παρατηρήσεις για την παλίρροια των δορυφόρων Jason φτάνουν μόνο σε 66° Β και Ν και οι σύγχρονες τροχιές των αλτιμέτρων υψηλότερου γεωγραφικού πλάτους (ERS, Envisat, Cryosat, Saral) δεν μπορούν να υπολογίσουν με ακρίβεια τις επιδράσεις της παλίρροιας στις μετρήσεις, ειδικά ο δορυφόρος Sentinel 2.

Επομένως οι παρατηρήσεις της αποστολής SWOT δεν θα είναι σημαντικές μόνο διότι θα διαχωρίζουν τις επιπτώσεις της βαροτροπικής και της εσωτερικής παλίρροιας από τις παρατηρήσεις για την κίνηση των ωκεανών. Θα είναι σημαντικές επίσης για παράκτιες και ανοιχτού ωκεανού εφαρμογές και θα συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση της σχέσης και της εξέλιξης των φαινομένων από την παράκτια ζώνη στον ανοιχτό ωκεανό. Οι πρωτοφανείς μετρήσεις του ύψους της στάθμης της θάλασσας από τον δορυφόρο SWOT θα αποκαλύψουν την πολυπλοκότητα των φαινομένων των παράκτιων περιοχών, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες στους επιστήμονες και τους χρήστες των δεδομένων για την κατανόηση της υδροδυναμικής μεταβλητότητας στις παράκτιες ζώνες.

Μετά την εκτόξευση το 2021, ο SWOT θα βρίσκεται για έξι μήνες στη λεγόμενη "τροχιά βαθμονόμησης", όπου ο δορυφόρος θα περνάει καθημερινά πάνω από το ίδιο σημείο για την βαθμονόμηση των παραμέτρων του. Στους πρώτους τρεις μήνες της περιόδου αυτής των έξι μηνών θα γίνει η προσαρμογή και βαθμονόμηση των παραμέτρων των οργάνων του δορυφόρου και το δεύτερο τρίμηνο οι μετρήσεις και οι παρατηρήσεις του δορυφόρου θα διατίθενται αποκλειστικά για επιστημονικούς σκοπούς. Στη συνέχεια, ο δορυφόρος SWOT θα κινείται στην κανονική τροχιά επανάληψης 21 ημερών για τρία χρόνια, από το 2021 έως το 2024.

## **3 Τα Δεδομένα για τον Προσδιορισμό της Στάθμης της Θάλασσας**

Από τα βασικότερα στοιχεία για τον προσδιορισμό της στάθμης της θάλασσας αποτελούν τα διαθέσιμα αλτιμετρικά δεδομένα και οι επιτόπου (in situ) παρατηρήσεις από παλιρροιογράφους, που πρόκειται να αξιοποιηθούν. Ανάλογα με τη φύση, το χαρακτήρα και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, επιλέγονται κάθε φορά τα κατάλληλα προ-επεξεργασμένα δεδομένα, καθώς υπάρχουν αρκετά διαφορετικά είδη και επίπεδα αναγωγών και διορθώσεων στις οποίες υπόκεινται οι πρωτογενείς παρατηρήσεις, ειδικά για τα δεδομένα της Αλτιμετρίας, πριν διατεθούν στους χρήστες. Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι βασικές διεργασίες και τα επίπεδα επεξεργασίας των αλτιμετρικών δεδομένων. Γίνεται περιγραφή του είδους και της φύσης των διορθώσεων καθώς και τα μεγέθη στα οποία εφαρμόζονται οι διορθώσεις αυτές, ώστε να εξαιρεθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια προσδιορισμού του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας. Αναφέρονται επίσης τεχνικές και όργανα με τα οποία λαμβάνονται επιτόπου (in situ) μετρήσεις του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας, η χρησιμότητα τους στον προσδιορισμό του υψομέτρου της επιφάνειας της θάλασσας και της επαλήθευσης των δεδομένων της Αλτιμετρίας.

### **3.1 Επίπεδα Επεξεργασίας και Είδη Αλτιμετρικών Δεδομένων**

Τα διαθέσιμα αλτιμετρικά δεδομένα διέρχονται από μια διεξοδική διαδικασία προ-επεξεργασίας που διαχωρίζεται σε πέντε βήματα (Βήμα 0 – 4). Μετά τη διεκπεραίωση κάθε βήματος, τα δεδομένα αναβαθμίζονται σε πιο εξειδικευμένα προϊόντα αντίστοιχου Επιπέδου (ή Level) 0 έως 4 (Δεληκαράογλου κ.α., 2015).

Συγκεκριμένα, το Βήμα 0, περιλαμβάνει τη λήψη από το δορυφόρο δεδομένων τηλεμετρίας (Επίπεδο 0) σε δυαδική κωδικοποιημένη μορφή. Στο Βήμα 1, πραγματοποιείται ο αρχικός ποιοτικός έλεγχος. Στην συνέχεια και αφού ελεγχθούν τα τηλεμετρικά δεδομένα προωθούνται στα κέντρα επεξεργασίας δεδομένων των αρμόδιων φορέων για την χρονολόγηση, την χωροθέτηση και την έκφρασή τους στις κατάλληλες

μονάδες μέτρησης (Επίπεδο 1). Τα δεδομένα αυτά διορθώνονται ως προς τα σφάλματα του οργάνου, τα σφάλματα που προκύπτουν κατά τη διάδοση του σήματος στην ατμόσφαιρα και τις διαταραχές στις οποίες υπόκειται το σήμα κατά την ανάκλασή του από την προσπίπτουσα επιφάνεια (Βήμα 2). Ειδικότερα, στο στάδιο αυτό επιτελείται ο ακριβής προσδιορισμός της τροχιάς του δορυφόρου, που επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των σύγχρονων συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού και των ακριβέστερων τροχιακών μοντέλων και ταυτόχρονα τα δεδομένα υπόκεινται σε μια εκτεταμένη σειρά από γεωφυσικές αναγωγές και διορθώσεις, όπως:

α) Λόγω του γεωειδούς και των παλιρροιών (ωκεάνια παλίρροια, παλίρροια του στερεού φλοιού της Γης και παλίρροια των πόλων), των οποίων η διόρθωση πραγματοποιείται με τη χρήση σχετικών μοντέλων υψηλής ακρίβειας.

β) Για σφάλματα λόγω της ιονόσφαιρας που διορθώνονται με τη χρήση δύο διαφορετικών συχνοτήτων, ενώ τα σφάλματα λόγω του υγρού και του ξηρού μέρους της τροπόσφαιρας διορθώνονται με τη χρήση μετρήσεων από το μικροκυματικό ραδιόμετρο που είναι εξοπλισμένοι οι δορυφόροι.

γ) Τα σφάλματα λόγω των μεταβολών της επιφάνειας της θάλασσας, π.χ. λόγω της αντίστροφης επίδρασης της ατμοσφαιρικής πίεσης και του ηλεκτρομαγνητικού συστηματικού σφάλματος του παλμού λόγω της κατάστασης της θάλασσας.

δ) Τα ενδογενή σφάλματα κατά τη λειτουργία του αλτιμετρικού ραντάρ.

Με τον τρόπο αυτό παράγονται τα δεδομένα Επιπέδου 2 που είναι συνήθως γνωστά και ως γεωφυσικά δεδομένα. Στη συνέχεια, κατά το Βήμα 3, τα γεωφυσικά δεδομένα επικυρώνονται ακολουθώντας αυστηρούς κανόνες διασφάλισης ποιότητας και μετατρέπονται πλέον σε επικυρωμένα δεδομένα (Επίπεδου 3) μετρήσεων από διακριτά σημεία κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου και αντίστοιχα επί της θαλάσσιας επιφάνειας κατά μήκος του επίγειου ίχνους της τροχιάς (Along-track δεδομένα). Τέλος, κατά το Βήμα 4, πραγματοποιείται δια-δορυφορική βαθμονόμηση μεταξύ αποστολών, δηλαδή τα δεδομένα από διαφορετικούς δορυφόρους συνδυάζονται μετά από εκτενείς ελέγχους συμβατότητας. Στο στάδιο αυτό, μετατρέπονται σε Gridded δεδομένα, δηλαδή προϊόντα που ανάγουν τις αλτιμετρικές πληροφορίες από τα επίγεια ίχνη των πολλαπλών δορυφόρων στα σημεία καννάβων και ανήκουν πλέον στο Επίπεδο 4 (*ibid.*,2015).

Τα διαθέσιμα στους χρήστες αλτιμετρικά προϊόντα, εκτός από τη διάκριση τους σε Along-track και Gridded δεδομένα, κατηγοριοποιούνται επίσης με βάση τον τοπικό και χρονικό τους χαρακτήρα, καθώς και με βάση τους δορυφόρους συγκεκριμένων

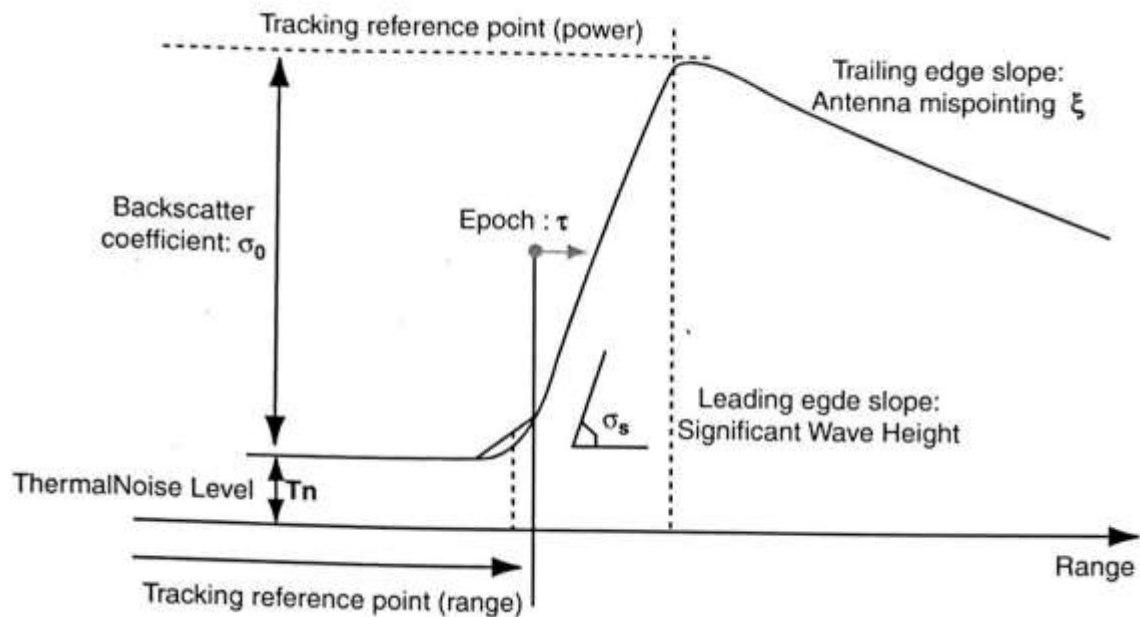
αποστολών που συνεισφέρουν δεδομένα για τη δημιουργία τους. Συγκεκριμένα, με βάση το χρόνο που απαιτείται για τη διάθεσή τους στους χρήστες μετά τη λήψη των παρατηρήσεων, διακρίνονται σε Real-Time ή RT (διαθέσιμα μετά από 3 έως 5 ώρες), σε Near Real Time ή NRT (μετά από 2 έως 3 ημέρες) και σε Delayed Time ή DT (μετά από περίπου 30 ημέρες). Επιπλέον διακρίνονται σε δεδομένα μιας και μόνο αποστολής (Mono-mission) και σε συνδυασμού δύο ή περισσότερων αποστολών (Multi-mission). Επίσης, με βάση τη διάρκεια τους διακρίνονται σε ημερήσια (daily), εβδομαδιαία (weekly), μηνιαία (monthly), εποχιακά (seasonal) και σε μέσες τιμές ορισμένων ετών (several years mean), ενώ με βάση τη χωρική τους κάλυψη σε παγκόσμια (global) και περιφερειακά (regional) δεδομένα.

### **3.2 Διεργασίες για την Παραγωγή Προϊόντων Επιπέδου 2 (L2) στην Αλτιμετρία SAR**

Γενικά μπορεί να ειπωθεί, σύμφωνα και με την προηγούμενη παράγραφο, ότι η επεξεργασία των αλτιμετρικών δεδομένων Επιπέδου 2 (Level 2 ή L2) συνίσταται σε όλες εκείνες τις διεργασίες που πραγματοποιούνται για τον προσδιορισμό των γεωφυσικών ποσοτήτων από μια κυματομορφή (waveform) που επιστρέφεται στο δορυφόρο έχοντας ανακλαστεί από μια συγκεκριμένη επιφάνεια της Γης. Ουσιαστικά στο επίπεδο αυτό επεξεργασίας πραγματοποιείται η μέτρηση αυτών των γεωφυσικών ποσοτήτων. Οι διεργασίες αυτές είναι διαφορετικές στην συμβατική Αλτιμετρία σε σχέση με την Αλτιμετρία SAR.

Οι γεωφυσικές παράμετροι που προσδιορίζονται από την επεξεργασία του Επιπέδου 2 (Εικόνα 3.1) είναι το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος  $P_u$  που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του συντελεστή  $\sigma_0$  (sigma 0 ή backscatter coefficient) και της ταχύτητας του ανέμου πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας ( $U_{10}$ ), η παράμετρος  $\tau$  που χρησιμοποιείται για την βελτίωση της μέτρησης της απόστασης από τον δορυφόρο και για την μέτρηση της κλίσης του διαγράμματος της κυματομορφής από την οποία υπολογίζεται το σημαντικό ύψος κύματος (Significant Wave Height). Τέλος προσδιορίζεται η παράμετρος  $\xi^2$  που είναι το τετράγωνο της απόκλισης της κατακορύφου και αντιπροσωπεύει την ανομοιογένεια της δέσμης από την σκέδαση μετά την ανάκλασή της στην επιφάνεια της θάλασσας και την εξασθένησή της από τις επιδράσεις της

ατμόσφαιρας (Peng et al., 2020). Η ακρίβεια προσδιορισμού της παραμέτρου  $\xi^2$  είναι σημαντική καθώς επηρεάζει γενικότερα την ποιότητα των υπολογισμών του αλτιμέτρου (Peng et al., 2018b).



Εικόνα 3.1 Γεωφυσικές Παράμετροι (Vignudelli et al, 2011)

### 3.2.1 Επαναπροσδιορισμός κυματομορφής (Waveform Retracking)

Η διαδικασία προσδιορισμού των γεωφυσικών παραμέτρων από την επιστρεφόμενη στο ραντάρ του δορυφόρου κυματομορφή, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.1, ονομάζεται επαναπροσδιορισμός κυματομορφής (waveform retracking ή retracking). Διακρίνονται τρεις κατηγορίες αλγορίθμων επαναπροσδιορισμού κυματομορφής (Dinardo, 2020):

- α) Εμπειρικός επαναπροσδιορισμός
- β) Επαναπροσδιορισμός κυματομορφής με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά της
- γ) Στατιστικός επαναπροσδιορισμός

Στον Εμπειρικό επαναπροσδιορισμό η μέτρηση των γεωφυσικών ποσοτήτων βασίζεται σε ευρετικές μεθόδους που αναπτύχθηκαν εμπειρικά ή σε αποτελέσματα δοκιμών. Οι εμπειρικοί αλγόριθμοι επαναπροσδιορισμού διακρίνονται για την ευκολία εκτέλεσής τους και την ταχύτητα στους υπολογισμούς, όμως απαιτούν αρκετές ενέργειες

βελτιστοποίησης των παραμέτρων που υπολογίζονται. Οι εμπειρικοί αλγόριθμοι συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που τα φυσικά χαρακτηριστικά τους τις καθιστούν πολύπλοκες για να αντιμετωπιστούν με διαφορετική προσέγγιση. Πεδίο εφαρμογής των μεθόδων του εμπειρικού επαναπροσδιορισμού είναι τα ηπειρωτικά ύδατα και ο θαλάσσιος πάγος.

Στον επαναπροσδιορισμό της κυματομορφής που βασίζεται στα φυσικά χαρακτηριστικά της, οι γεωφυσικές ποσότητες προσδιορίζονται συγκρίνοντας την ληφθείσα στο ραντάρ του δορυφόρου κυματομορφή με ένα μοντέλο κυματομορφής το οποίο προσεγγίζει με τον βέλτιστο τρόπο το σχήμα της λαμβανόμενης κυματομορφής και βασίζεται στα φυσικά χαρακτηριστικά της αλληλεπίδρασης μεταξύ του μεταδιδόμενου παλμού και της επιφάνειας σκέδασης. Το μοντέλο κυματομορφής προσομοιώνει με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο όλα τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και την επεξεργασία που έχει υποστεί η ληφθείσα κυματομορφή στον δορυφόρο και στο έδαφος.

Ως εκ τούτου ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία ενός αλγορίθμου επαναπροσδιορισμού (retracker) αυτού του είδους είναι το μοντέλο της κυματομορφής (waveform) που αντιπροσωπεύει την μορφή και τα χαρακτηριστικά που αναμένεται να έχει η κυματομορφή που διασκορπίζεται από την επιφάνεια της Γης. Με την εν λόγω διαδικασία κατέστη δυνατή η βελτίωση της ακρίβειας στον υπολογισμό της απόστασης (range) από τον δορυφόρο στην επιφάνεια της Γης σε σχέση με την αρχική ακρίβεια υπολογισμού. Υπάρχουν δύο κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης των φυσικών χαρακτηριστικών της επιστρεφόμενης κυματομορφής. Το αναλυτικό μοντέλο και το αριθμητικό μοντέλο (*ibid*, 2020).

Το αριθμητικό μοντέλο επαναπροσδιορισμού της κυματομορφής υπολογίζεται με αριθμητική επίλυση των μαθηματικών σχέσεων που διέπουν το σχήμα της λαμβανόμενης κυματομορφής. Στο αναλυτικό μοντέλο οι αντίστοιχες μαθηματικές σχέσεις επιλύονται αναλυτικά, έτσι το μοντέλο αυτό μπορεί να εκφραστεί με την μορφή κλειστής εξίσωσης.

Τα αριθμητικά μοντέλα προσομοιώνουν το σχήμα και τα φυσικά χαρακτηριστικά της λαμβανόμενης κυματομορφής με μεγαλύτερη ακρίβεια καθώς περιλαμβάνουν στην επίλυσή τους τις επιπτώσεις φυσικών φαινομένων και χαρακτηριστικών καθώς και τις επιπτώσεις στην κυματομορφή από την λειτουργία των οργάνων του δορυφόρου. Στα αναλυτικά μοντέλα πρέπει να γίνουν υποθέσεις και προσεγγίσεις ώστε να δημιουργηθεί μια λύση κλειστής μορφής του μοντέλου. Οι αλγόριθμοι επαναπροσδιορισμού της κυματομορφής (waveform retracker) που βασίζονται στο αναλυτικό μοντέλο, το οποίο

εκφράζεται από μία απλή εξίσωση, είναι πιο ευέλικτοι με ταχύτητα στους υπολογισμούς και εύκολοι στην αναπαραγωγή και χρήση. Έχοντας μια αναλυτική διαμόρφωση ενός μοντέλου κυματομορφής, ο χρήστης είναι σε θέση να κατανοήσει και να προβλέψει την συμπεριφορά του μοντέλου κατά την αλλαγή των μεταβλητών εισόδου.

Σε κάθε περίπτωση, η χρησιμοποίηση ενός αναλυτικού ή αριθμητικού μοντέλου και η εφαρμογή του στην συμβατική ή στην Αλτιμετρία SAR έχει πάντα ως αφετηρία την τριπλή συνέλιξη μεταξύ της απόκρισης της επίπεδης επιφάνειας (Flat Surface Impulse Response -  $P_{FS}$ ), της απόκρισης του συστήματος στόχευσης (System Point Target Response -  $P_{PTR}$ ) και της συνάρτησης της πυκνότητας του ύψους της θάλασσας (Sea Surface Elevation Probability density function -  $PDF_{sz}$ ) (Dinardo, 2020, Brown, 1977):

$$Pr = P_{FS} * P_{FS} * P_{PTR} \quad 3.1$$

Η απόκριση του συστήματος στόχευσης (System Point Target Response -  $P_{PTR}$ ) περιλαμβάνει όλα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του αισθητήρα του ραντάρ. Μπορεί να θεωρηθεί και η συνάρτηση μεταφοράς σήματος του αισθητήρα. Η απόκριση της επίπεδης επιφάνειας (Flat Surface Impulse Response -  $P_{FS}$ ) είναι η ιδανική απόκριση του παλμού από μία επίπεδη επιφάνεια ενώ περιλαμβάνεται και η στατιστική κατανομή των υψομέτρων της επιφάνειας της θάλασσας στην συνάρτηση της πυκνότητας του ύψους της θάλασσας (Sea Surface Elevation Probability density function -  $PDF_{sz}$ ).

Ο αλγόριθμος επαναπροσδιορισμού κυματομορφής (waveform retracker) από τον οποίο παρήχθησαν τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (μια παραλλαγή του αλγορίθμου) χρησιμοποιεί το αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης της κυματομορφής. Ο αλγόριθμος ονομάζεται SAMOSA (SAR Altimetry Mode Studies and Applications) δημιουργήθηκε από την ESA (European Space Agency) αρχικά για την επεξεργασία δεδομένων στον ανοιχτό ωκεανό και έχει καταστεί ως ο κατεξοχήν αλγόριθμος επαναπροσδιορισμού κυματομορφής της Αλτιμετρίας SAR στους ωκεανούς. Χρησιμοποιώντας όμως ένα αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης της κυματομορφής έχει την ευελιξία να προσαρμόζεται σε οποιαδήποτε επιφάνεια σκέδασης.

Τέλος ο Στατιστικός επαναπροσδιορισμός αναζητά την λύση στο πρόβλημα του επαναπροσδιορισμού της κυματομορφής προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσει (ή να μεγιστοποιήσει) στατιστικά τις ιδιότητες ενός διαδοχικού συνόλου κυματομορφών

(Dinardo, 2020). Στον Στατιστικό επαναπροσδιορισμό όπως και στον Εμπειρικό δεν γίνεται χρήση μοντέλου προσομοίωσης των χαρακτηριστικών της κυματομορφής.

Μόλις καθοριστεί ποια κατηγορία αλγορίθμου από τις τρεις που αναφέρθηκαν θα χρησιμοποιηθεί, το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των αγνώστων ή των γεωφυσικών παραμέτρων που θα πρέπει να προσδιοριστούν. Σε εφαρμογές του αλγορίθμου πάνω από ωκεανούς και στις παράκτιες περιοχές οι γεωφυσικές παράμετροι που χρήζουν προσδιορισμού είναι όπως αναφέρθηκε:

- α) το σημαντικό ύψος κύματος σε μέτρα (Significant Wave Height ή SWH)
- β) το υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας σε μέτρα (Sea Surface Height ή SSH)
- γ) η ταχύτητα του ανέμου σε κόμβους (Marine Wind Speed – U10).

Το υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) είναι το ύψος της θάλασσας όπως προσδιορίζεται από το αλτίμετρο με αφετηρία το ελλειψοειδές αναφοράς που χρησιμοποιείται. Το σημαντικό ύψος κύματος (SWH) είναι το μέσο ύψος από το ένα τρίτο των υψηλότερων κυμάτων και λαμβάνεται συνήθως ως το τετραπλάσιο της τυπικής απόκλισης του υψομέτρου της θάλασσας. Η παράμετρος ταχύτητα του ανέμου (U10) αναφέρεται στην ταχύτητα του ανέμου σε ύψος δέκα μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας (*ibid*, 2020).

Ένας αλγόριθμος επαναπροσδιορισμού (waveform retracker) που βασίζεται στα φυσικά χαρακτηριστικά της κυματομορφής περιέχει επιπλέον στα αποτελέσματά του:

- α) την παράμετρο  $\tau$  (epoch) ή χρονική καθυστέρηση (Dinardo, 2020, Vignudelli et al., 2011)
- β) το σημαντικό ύψος κύματος (SWH) στην περίπτωση της Αλτιμετρίας SAR
- γ) την παράμετρο  $P_u$  ως επαναπροσδιορισμένη ισχύς της κυματομορφής (retracked waveform power)

Μετά το πέρας του επαναπροσδιορισμού της κυματομορφής το ύψος της θάλασσας από το ελλειψοειδές προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση (Dinardo, 2020):

$$SSH = h - (R_{obs} + R_{cor})$$

$$R = Tracker\_Delay * c/2 + \tau * c/2 \quad 3.2$$



Όπου :

$R_{obs}$ : Είναι η επαναπροσδιορισμένη (retracked) απόσταση (range) του αλτιμέτρου από την επιφάνεια της Γης

$h$ : Είναι το ύψος του κέντρου μάζας του δορυφόρου από το ελλειψοειδές αναφοράς που χρησιμοποιείται

$c$ : Είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό

Tracker\_Delay: Είναι η αμφίδρομη χρονική καθυστέρηση από την στιγμή εκπομπής του παλμού μέχρι την επιστροφή του αφού ανακλαστεί διορθωμένη από όλες τις επιδράσεις των οργάνων του αλτιμέτρου

$R_{cor}$ : Περιλαμβάνει τις γεωφυσικές διορθώσεις, όπως θα δούμε αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

### **3.2.2 Διορθώσεις απόστασης (range) και Γεωφυσικές διορθώσεις του ύψους της θάλασσας**

Η λειτουργία της Δορυφορικής Αλτιμετρίας συνίσταται στην εκπομπή από τον δορυφόρο μιας σύντομης δέσμης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, με γνωστή ισχύ, προς την επιφάνεια της θάλασσας, η οποία αλληλεπιδρά με την επιφάνεια και μέρος αυτής επιστρέφει στο αλτίμετρο με ταυτόχρονη ακριβή μέτρηση του χρόνου από και προς το δορυφόρο. Ο προσδιορισμός του ύψους της θάλασσας (SSH) από την μέτρηση της απόστασης (range) όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο περιέχει έναν αριθμό από γεωφυσικές διορθώσεις. Η απόσταση διορθώνεται από τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας στον παλμό του ραντάρ, από τις επιδράσεις της κατάστασης της επιφάνειας της θάλασσας (sea state bias) και άλλους γεωφυσικούς παράγοντες. Ένα τμήμα των διορθώσεων αυτών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή όταν πρόκειται να διορθωθεί η απόσταση (range) σε παράκτιες περιοχές.

Διακρίνονται επομένως δύο κατηγορίες διορθώσεων. Διορθώσεις στην απόσταση που έχουν να κάνουν με την ταχύτητα του παλμού του ραντάρ και την επιφάνεια σκέδασης και γεωφυσικές διορθώσεις στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας που το προσαρμόζουν, διορθώνοντας τις επιδράσεις της παλίρροιας και της ατμοσφαιρικής

πίεσης, με σκοπό να απομονώσουν τους παράγοντες της τοπογραφίας της θάλασσας από τις μεταβολές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας (Vignudelli et al, 2011).

Αν η ατμόσφαιρα ήταν κενό και η κατανομή του κυματισμού της θάλασσας ήταν γνωστή, τότε η απόσταση μεταξύ του αλτιμέτρου και της επιφάνειας της θάλασσας θα μπορούσε να προσδιοριστεί εύκολα από την αμφίδρομη μέτρηση του χρόνου και την τραχύτητα του εκπεμπόμενου παλμού του ραντάρ. Η παρουσία όμως αερίων, υγρασίας και ελεύθερων ηλεκτρονίων στην ατμόσφαιρα μειώνει την ταχύτητα του παλμού προκαλώντας μια αύξηση στην μέτρηση της απόστασης (range) και το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας εμφανίζεται (SSH) μειωμένο σε σχέση με το πραγματικό.

Οι διορθώσεις που εφαρμόζονται στην απόσταση που προσδιορίζεται από το αλτίμετρο, για να αφαιρέσουν τις επιδράσεις της ατμόσφαιρας στον εκπεμπόμενο παλμό από το ραντάρ χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες (Dinardo, 2020, Vignudelli et al., 2011):

α) Η διόρθωση λόγω του ξηρού παράγοντα της τροπόσφαιρας (Dry Tropospheric Correction) εξουδετερώνει τις επιδράσεις στον παλμό από ξηρά αέρια της ατμόσφαιρας όπως το Οξυγόνο και το Άζωτο

β) Η διόρθωση λόγω του υγρού παράγοντα της τροπόσφαιρας (Wet Tropospheric Correction) εξουδετερώνει τις επιδράσεις από την υγρασία της ατμόσφαιρας στον παλμό

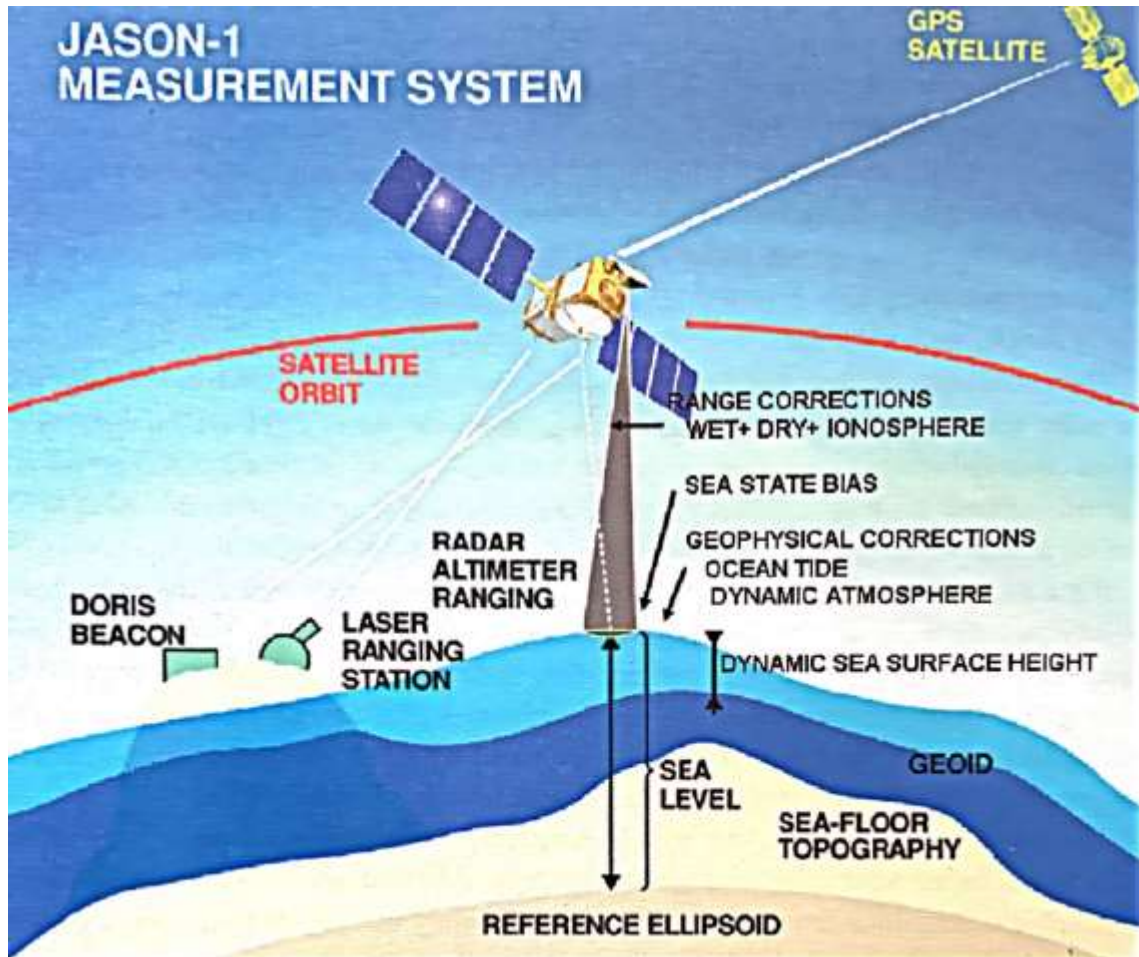
γ) Η διόρθωση λόγω ιονόσφαιρας (Ionospheric Correction) εξουδετερώνει τις επιδράσεις των ελεύθερων ηλεκτρονίων που βρίσκονται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Ο κυματισμός και η σκέδαση του παλμού του ραντάρ στην επιφάνεια της θάλασσας δεν ακολουθούν την κατανομή του Gauss. Οι κοιλίες των κυμάτων είναι αυτές που ανακλούν το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πίσω στον δορυφόρο σε σχέση με τις κορυφές και έτσι το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) υποεκτιμάται. Αυτή η απόκλιση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας σχετίζεται με την κατάσταση της θάλασσας τοπικά. Η διόρθωση για την απόκλιση λόγω της κατάστασης της επιφάνειας της θάλασσας (Sea State Bias Correction) προσπαθεί να εκμηδενίσει τις διαφορές της επιφάνειας σκέδασης του παλμού και της μέσης στάθμης της θάλασσας ώστε να υπολογιστεί με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) στην περιοχή εκείνη που αντιστοιχεί στο ίχνος (footprint) του παλμού στην επιφάνεια της θάλασσας.

Η σχέση επομένως της διορθωμένης απόστασης (range) με την απόσταση που προκύπτει από τις μετρήσεις του αλτιμέτρου (Εικόνα 3.2) είναι (Vignudelli et al., 2011):

$$R_{\text{corrected}} = R_{\text{obs}} - \Delta R_{\text{dry}} - \Delta R_{\text{wet}} - \Delta R_{\text{iono}} - \Delta R_{\text{ssb}} \quad 3.3$$

Όπου  $R_{\text{obs}}$  είναι η απόσταση (range) που υπολογίζεται από τον χρόνο της διαδρομής του παλμού που μετράται από έναν ταλαντωτή (ultra stable oscillator - USO) που βρίσκεται στον δορυφόρο και την ταχύτητα του φωτός στο κενό.



**Εικόνα 3.2** Σχηματική αναπαράσταση της βασικής λειτουργίας της Δορυφορικής Αλτιμετρίας και των διορθώσεων που εφαρμόζονται στις παρατηρήσεις του υψομέτρου της επιφάνειας της θάλασσας. (Vignudelli et al, 2011)

Οι τιμές των μεταβλητών των διορθώσεων αλλά και των μετρήσεων θα πρέπει να έχουν σύστημα αναφοράς το ελλειψοειδές. Η κοινή γεωαναφορά των μετρήσεων είναι σημαντική ειδικά στην περίπτωση που οι μετρήσεις της στάθμης της θάλασσας από το αλτίμετρο συγκρίνονται με μετρήσεις της στάθμης της θάλασσας με επί τόπου (in situ)

παρατηρήσεις από παλιρροιογράφους ή σηματοδούρες (buoys) των οποίων οι μετρήσεις έχουν γεωαναφερθεί χρησιμοποιώντας δέκτες GPS.

Υπάρχει και ένα σύνολο διορθώσεων, όπως αναφέρθηκε, οι οποίες εξουδετερώνουν τις επιδράσεις της παλίρροιας και της ατμοσφαιρικής πίεσης, με σκοπό να απομονώσουν τους παράγοντες της τοπογραφίας της θάλασσας από τις μεταβολές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας. Οι διορθώσεις αυτές είναι (Vignudelli et al., 2011, Dinardo, 2020):

α) Διόρθωση του γεωειδούς ( $h_{\text{geoid}}$ ). Η διόρθωση του γεωειδούς προκύπτει από το γεγονός ότι σε απουσία όλων των άλλων δυνάμεων εκτός από την βαρύτητα και τις φυγόκεντρες δυνάμεις, η επιφάνεια της θάλασσας θα συνέπιπτε με την ισοδυναμική επιφάνεια που ονομάζεται γεωειδές. Αυτή η διόρθωση λειτουργεί σαν αλλαγή του συστήματος αναφοράς στις παρατηρήσεις. Το υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας προσδιορίζεται επομένως σε σχέση με το γεωειδές και όχι με το μοντέλο του ελλειψοειδούς. Αφαιρώντας από τις μετρήσεις αυτή την μόνιμη επίδραση του γεωειδούς και χρησιμοποιώντας ως επιφάνεια αναφοράς πλέον το γεωειδές τα υψόμετρα της επιφάνειας της θάλασσας προσδιορίζονται στην κλίμακα του μέτρου. Τα γεωστατικά ρεύματα των ωκεανών προσδιορίζονται από την ποσότητα αυτή.

β) Διόρθωση της παλίρροιας ( $h_{\text{tides}}$ ). Η παλίρροια είναι ο κυρίαρχος παράγοντας στις διακυμάνσεις των υψών της επιφάνειας της θάλασσας. Η επίδραση της παλίρροιας στους ωκεανούς έχει το πλεονέκτημα της εύκολης παραγωγής μοντέλων για την παρακολούθησή της χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό των δυνάμεων που ασκούνται από την Σελήνη και τον Ήλιο και Υδροδυναμικών μοντέλων. Στις παράκτιες περιοχές ωστόσο η κατάσταση είναι περισσότερο περίπλοκη.

γ) Η δυναμική διόρθωση της ατμόσφαιρας (Dynamic Atmospheric Correction – DAC ή  $h_{\text{atm}}$ ). Η δυναμική διόρθωση της ατμόσφαιρας διορθώνει τις τιμές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας από τις επιδράσεις της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η ατμόσφαιρα ασκεί δυνάμεις στην επιφάνεια της θάλασσας προκαλώντας μείωση της στάθμης όταν η πίεση είναι υψηλή και αντίστροφα.

Το πραγματικό ύψος της επιφάνειας της θάλασσας ( $h$ ) επομένως είναι το άθροισμα αυτών των γεωφυσικών ποσοτήτων και του δυναμικού ύψους της επιφάνειας της θάλασσας ( $h_D$ ):

$$h = h_D + h_{\text{geoid}} + h_{\text{tides}} + h_{\text{atm}}$$

ή

$$h_D = h - h_{\text{geoid}} - h_{\text{tides}} - h_{\text{atm}} \quad 3.4$$

που σημαίνει ότι αυτές οι γεωφυσικές διορθώσεις πρέπει να αφαιρεθούν από τις μετρήσεις του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας. Σημειώνεται ότι αυτές είναι διορθώσεις στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας αλλά συμπεριφέρονται ως διορθώσεις στην μετρημένη από τον δορυφόρο απόσταση (range) (Vignudelli et al., 2011).

Στην συνέχεια θα πρέπει να συνδυαστούν οι διορθώσεις στην απόσταση και οι γεωφυσικές διορθώσεις του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας σε ένα ενιαίο σύνολο διορθώσεων. Για την αποφυγή σύγχυσης για το ποιες διορθώσεις πρέπει να εφαρμοστούν στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας και ποιες διορθώσεις πρέπει να εφαρμοστούν στην απόσταση, οι Διαστημικές Υπηρεσίες αποφάσισαν ότι όλες οι διορθώσεις θα πρέπει να αφαιρούνται από την παρατηρούμενη τιμή του ύψους του δορυφόρου. Οι διορθώσεις της απόστασης και οι διορθώσεις λόγω της κατάστασης της επιφάνειας της θάλασσας (Sea State Bias Corrections) έχουν σαν αποτέλεσμα να υποεκτιμάται η πραγματική απόσταση του δορυφόρου από την επιφάνεια της θάλασσας και έτσι να αυξάνεται το ύψος της. Επομένως συνήθως, εφαρμόζονται ως αρνητική διόρθωση ύψους που αφαιρείται από το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας.

Συνδυάζοντας τα παραπάνω, τις διορθώσεις της απόστασης, του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας και την σχέση 3.1, το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) είναι (*ibid*, 2011):

$$\text{SSH} = h - R_{\text{obs}} - \Delta h_{\text{dry}} - \Delta h_{\text{wet}} - \Delta h_{\text{iono}} - \Delta h_{\text{ssb}} - h_{\text{tides}} - h_{\text{atm}} - h_{\text{geoid}} \quad 3.5$$

Στην σχέση 3.5 οι διορθώσεις στην απόσταση αφαιρούνται από την παρατηρούμενη τιμή του ύψους του δορυφόρου από το κέντρο μάζας της Γης και έτσι ουσιαστικά ισχύει:  $\Delta R_{\text{dry}} = - \Delta h_{\text{dry}}$  κοκ. Οι διορθώσεις στην απόσταση δηλαδή μετατρέπονται σε διορθώσεις στο ύψος όπως αναφέρθηκε.

Ένας από τους σημαντικούς παράγοντες για την επιτυχία της δορυφορικής αλτιμετρίας και της συνεχούς βελτίωσης της ποιότητας των παρατηρήσεων του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας, οφείλεται στην συνεχή βελτίωση στον προσδιορισμό της τροχιάς του δορυφόρου και στην βελτίωση των διορθώσεων που εφαρμόζονται στις παρατηρήσεις από την επιστημονική κοινότητα.

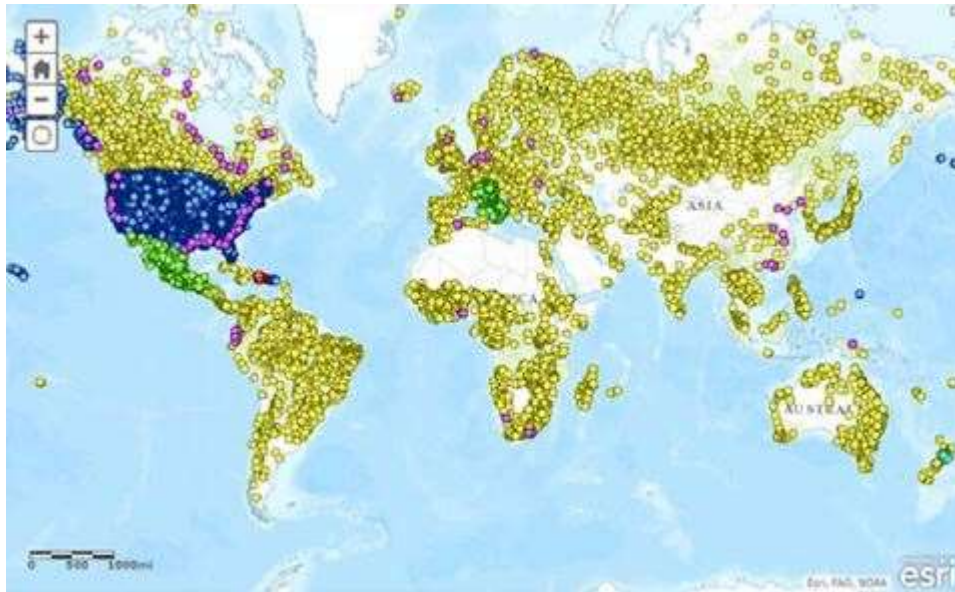
### 3.3 Επιτόπου (in situ) Δεδομένα

Για την επιτόπου παρατήρηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας είναι διαθέσιμο ένα εύρος από τεχνικές και όργανα, τα οποία έχουν τα ανάλογα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσο αφορά την δειγματοληψία, το κόστος αλλά και την διάρκεια λειτουργίας τους. Για τις επιτόπου παρατηρήσεις χρησιμοποιούνται παλιρροιογράφοι, σημαντήρες GPS και άλλες τεχνικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται επίσης για την βαθμονόμηση των δορυφόρων και την επαλήθευση των μετρήσεών τους. Στην παράγραφο αυτή αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των παλιρροιογράφων και των πλωτών σημαντήρων GPS.

#### 3.3.1 Παλιρροιογράφοι (Tide Gauges)

Οι παλιρροιογράφοι είναι τοποθετημένοι σε προβλήτες λιμανιών και μετρούν συνεχώς το ύψος της στάθμης της θάλασσας σε σχέση με ένα επίπεδο αναφοράς, διαφορετικό για κάθε παλιρροιογράφο. Το προστατευμένο περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται οι παλιρροιογράφοι σε διάφορα σημεία των ακτογραμμών και των νησιών της γης έχει ως αποτέλεσμα οι μετρήσεις τους, να μην είναι αντιπροσωπευτικές των συνθηκών που επικρατούν στις παράκτιες περιοχές. Η κατανομή των παλιρροιογράφων επίσης είναι ιδιαίτερα αραιή σε μερικές περιοχές (Αφρική) ενώ μερικές χώρες παρέχουν δεδομένα σε ένα μικρό ποσοστό των παλιρροιογράφων λόγω εμπορικών περιορισμών ή για λόγους ασφαλείας (Vignudelli et al., 2019).

Η Εικόνα 3.3 δείχνει την κατανομή των παλιρροιογράφων που καταγράφουν το ύψος της στάθμης της θάλασσας αλλά και αυτό των ηπειρωτικών υδάτων. Υπάρχουν χιλιάδες παλιρροιογράφοι οι περισσότεροι από τους οποίους βρίσκονται στις ΗΠΑ. Παρ' όλα αυτά όμως πολλοί από αυτούς έχουν μόνο ιστορικά δεδομένα, κάποιιοι διαθέτουν σχετικά πρόσφατα και ορισμένοι διαθέτουν μόνο πρόσφατα δεδομένα για το ύψος της στάθμης της θάλασσας. Οι παλιρροιογράφοι έφτασαν στον μέγιστο αριθμό τους το 1979 και στην συνέχεια μειώθηκαν αισθητά. Μερικές από τις αιτίες για την μείωση του αριθμού των παλιρροιογράφων είναι η ελλιπής χρηματοδότηση, η αδυναμία συλλογής των δεδομένων ή οι απαγορεύσεις στην πρόσβαση των δεδομένων για πολιτικούς λόγους (ibid, 2019).



**Εικόνα 3.3** Χάρτης με την κατανομή των παλιρροιογράφων (Vignudelli et al, 2019)

Υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες παλιρροιογράφων (Bonfond et al, 2011). Αυτοί που μετράνε την στάθμη του νερού πάνω από έναν βυθισμένο αισθητήρα πίεσης, και αυτοί οι παλιρροιογράφοι που μετράνε την στάθμη του νερού κάτω από έναν αισθητήρα που χρησιμοποιεί ακουστικά κύματα ή τεχνολογία laser για να υπολογίσει το βάθος. Οι παλιρροιογράφοι επειδή ουσιαστικά στερεώνονται σε ένα επίπεδο συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα θα πρέπει να ελέγχεται τακτικά η κατακόρυφη μετακίνησή τους. Επιπλέον το επίπεδο αναφοράς του παλιρροιογράφου θα πρέπει να συνδεθεί στο ελλειψοειδές αναφοράς που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της τροχιάς του δορυφόρου. Έλεγχος θα πρέπει να γίνεται επίσης για την πρόληψη οποιασδήποτε δυσλειτουργίας του αισθητήρα του παλιρροιογράφου καθώς και εκτενέστερος έλεγχος κάθετων μετακινήσεων του εδάφους στην περιοχή που είναι τοποθετημένος ο παλιρροιογράφος.

### 3.3.2 Σημαντήρες GPS

Μία εναλλακτική μέθοδος για την επιτόπου παρατήρηση του ύψους της στάθμης της θάλασσας, η οποία χρησιμοποιείται και για την βαθμονόμηση των δορυφόρων και την επαλήθευση των μετρήσεων τους είναι η χρήση πλωτών σημαντήρων GPS (Εικόνα 3.4). Πρόκειται για πλατφόρμες που επιπλέουν στην επιφάνεια της θάλασσας και είναι

εξοπλισμένες με δέκτες GPS. Οι σημαντήρες GPS έχουν την δυνατότητα μέτρησης του ύψους της στάθμης της θάλασσας ως προς το ελλειψοειδές αναφοράς σε εποχιακή βάση, με τον σημαντήρα είτε να βρίσκεται σε σταθερή θέση είτε να μπορεί να επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας χωρίς περιορισμό. Τοποθετώντας έναν πλωτό σημαντήρα σε σημείο που βρίσκεται επί της τροχιάς μπορεί να προσδιοριστεί το σφάλμα του δορυφόρου στον προσδιορισμό του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας. Μελέτες ήδη από το 1994 έδειξαν ότι τα δεδομένα από πλωτούς σημαντήρες είχαν ακρίβεια της τάξης του ενός εκατοστού με δεδομένα από παλιρροιογράφους όταν γινόταν σύγκριση με τα δεδομένα της δορυφορικής αλτιμετρίας (*ibid*, 2011).



**Εικόνα 3.4** Πλωτός Σημαντήρας GPS (*Chuntao et al.*, 2014)

Η χρήση των πλωτών σημαντήρων GPS προσφέρει το πλεονέκτημα της φορητότητας και της ευελιξίας στην επιλογή των θέσεων ανάπτυξης. Η συνδυαστική χρήση μετρήσεων από πλωτούς σημαντήρες και παλιρροιογράφους προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα ιδιαίτερα για την βαθμονόμηση των αλτιμετρικών δορυφόρων και την επαλήθευση των μετρήσεών τους αλλά και για την επαλήθευση των επιτόπου μετρήσεων μεταξύ των πλωτών σημαντήρων και των παλιρροιογράφων (*Bonnefond et al*, 2011).



## 4 Μεθοδολογία και Δεδομένα

Στο κεφάλαιο 3 αναφέρθηκαν τα τέσσερα επίπεδα (L0 έως L4) επεξεργασίας των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Οι διαστημικές υπηρεσίες δημιουργούν μια σειρά από προϊόντα Αλτιμετρίας, η διαθεσιμότητα των οποίων εξαρτάται κυρίως από τον χρόνο που απαιτείται για την παραγωγή τους. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1 υπάρχουν προϊόντα που είναι διαθέσιμα στους χρήστες μερικές ώρες από την απόκτησή τους, προϊόντα διαθέσιμα μετά από μερικές ημέρες και προϊόντα διαθέσιμα στους χρήστες μετά από μερικές εβδομάδες (Δεληκαράογλου κ.α., 2015).

Το κύριο προϊόν από το δεύτερο επίπεδο επεξεργασίας των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας είναι το προϊόν GDR (Geophysical Data Record) (Vignudelli *et al.*, 2019). Το προϊόν αυτό παράγεται συνήθως με συχνότητα 1 Hz (δηλαδή τιμές ανά 7 χιλιόμετρα) και όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2 περιέχει όλες εκείνες τις παραμέτρους για τον υπολογισμό του υψομέτρου της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) και των ανωμαλιών της (SLA). Υπάρχουν διαθέσιμα σύνολα δεδομένων συχνότητας 20 Hz (τιμές ανά 350 μέτρα) και 80Hz (τιμές ανά 85 μέτρα) όπως θα αναφερθεί στην συνέχεια. Το κύριο προϊόν του σταδίου επεξεργασίας επιπέδου 1 είναι το SGDR (Sensor Geophysical Data Record) (*ibid*, 2019) που χρησιμοποιείται από χρήστες που επιθυμούν να εκτελέσουν οι ίδιοι τον επαναπροσδιορισμό της κυματομορφής και να προσδιορίσουν τις γεωφυσικές παραμέτρους για τον υπολογισμό του SSH και του SLA.

Στην συνέχεια θα γίνει αναφορά στα διαθέσιμα προϊόντα και δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας που έχουν δημιουργηθεί για να παρέχουν αποτελέσματα με ακρίβεια στις παράκτιες ζώνες. Θα παρουσιαστούν τα βασικά χαρακτηριστικά και η μέθοδος με την οποία λειτουργεί ο αλγόριθμος επαναπροσδιορισμού της κυματομορφής (waveform retracker) SAMOSA + που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η πλατφόρμα G-POD (<http://gpod.eo.esa.int/>) από την οποία έγινε η επεξεργασία των δεδομένων αλτιμετρίας καθώς και η μεθοδολογία και τα δεδομένα των επιτόπου παρατηρήσεων από παλιρροιογράφους.

## 4.1 Δορυφορικά Προϊόντα για την Παράκτια Αλτιμετρία

Κάθε δορυφορική αποστολή έχει διαφορετικό τρόπο διάθεσης και μορφής των επεξεργασμένων δεδομένων. Πολλά προϊόντα διανέμονται μέσω διαδικτύου (FTP) όμως καθίστανται σχεδόν αμέσως ξεπερασμένα λόγω της συνεχούς βελτίωσης των διορθώσεων και της επεξεργασίας. Η AVISO (<https://www.aviso.altimetry.fr/>) της CNES και η PO.DAAC (<https://podaac.jpl.nasa.gov/>) της NASA είναι οι επίσημοι φορείς επεξεργασίας και διανομής επικαιροποιημένων προϊόντων δορυφορικής Αλτιμετρίας σε μορφότυπο NetCDF (Vignudelli et al., 2019). Οι δύο αυτές υπηρεσίες προσφέρουν δωρεάν πρόσβαση σε NRT (Near Real Time) προϊόντα για βασικούς (L4), προχωρημένους (L2, L3) και εξειδικευμένους χρήστες (L1).

Οι παραπάνω υπηρεσίες έχουν σχεδιαστεί για την παροχή δεδομένων στον ανοιχτό ωκεανό. Επίσης ορισμένοι χρήστες ίσως να μην είναι εξοικειωμένοι με τις διαδικασίες προσδιορισμού των αποτελεσμάτων που επιθυμούν καθώς και με τις απαιτούμενες διορθώσεις ανάλογα με την εφαρμογή. Η χρήση εξάλλου της δορυφορικής Αλτιμετρίας στις παράκτιες ζώνες και στα ηπειρωτικά ύδατα απαιτεί εξειδικευμένη επεξεργασία, η οποία λαμβάνει υπόψη τα προβλήματα και τις ιδιαιτερότητες αυτών των περιοχών.

Το πρόγραμμα PISTACH (Prototype Innovant de Système de Traitement pour l'Altimétrie Côtière et l'Hydrologie) δημιούργησε ένα προϊόν που περιέχει τις πιθανές διορθώσεις και τα δεδομένα για πληθώρα εφαρμογών παρέχοντας τιμές μεταβλητών από διαφορετικούς τρόπους επαναπροσδιορισμού (retracking). Ένα ακόμη πρόγραμμα που αναπτύχθηκε ώστε να παρέχει σύνολα δεδομένων ειδικά για τις παράκτιες ζώνες παρόμοιο με το PISTACH είναι το COASTALT. Το COASTALT έχει παρόμοια προσέγγιση δημιουργώντας ένα προϊόν με μια σειρά από διαφορετικές εκδοχές και τρόπους επαναπροσδιορισμού (retracking) και διορθώσεων. Το αρχικό προϊόν περιείχε μόνο παγκόσμιας κλίμακας διορθώσεις. Η ανάπτυξη από τους χρήστες περιφερειακής κλίμακας διορθώσεων παρείχε πιο ακριβή αποτελέσματα, προσαρμοσμένα στις εκάστοτε περιοχές εφαρμογής (Dufau et al., 2011).

Μία δεκαετία προόδου κατέστησε δυνατή την ανάπτυξη και την αύξηση της διαθεσιμότητας προϊόντων δορυφορικής αλτιμετρίας για την παρακολούθηση των παράκτιων και ηπειρωτικών υδάτων. Σε σύγκριση με τα τυπικά προϊόντα, περιλαμβάνουν υψηλότερη ανάλυση κατά μήκος της τροχιάς, βελτιωμένους αλγορίθμους επαναπροσδιορισμού (retrackers), νέες βελτιωμένες διορθώσεις και βελτιωμένη

προεπεξεργασία και επεξεργασία των δεδομένων. Στον πίνακα 4.1 (Cipollini et al., 2017) παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά των νέων αυτών προϊόντων για την παράκτια ζώνη.

Προϊόν	Εταιρία Παραγωγής	Αλτίμετρο	Επίπεδο Προϊόντος	Συχνότητα Προϊόντος	Κάλυψη	Πρόσβαση από	Παρατηρήσεις
<b>PISTACH</b>	CLS CNES	Jason 2	L2	20 Hz	Παγκόσμια	AVISO +	Παράκτιες εφαρμογές. Αναπτύχθηκε έως το 2016 και σταμάτησε λόγω δημιουργίας του PEACHI.
<b>PEACHI</b>	CLS CNES	Saral Jason 2	L2	40 Hz	Παγκόσμια	AVISO + ODES	Πειραματικά δεδομένα από το αλτίμετρο SARAL AltiKa και από το 2017 του Jason 2.
<b>XTRACK</b>	LEGOS - CTOH	Topex Geosat Jason 1-2 Saral	L2, L3	1 Hz, 20 Hz	23 περιοχές που καλύπτουν όλες τις παράκτιες ζώνες	CTOH AVISO + ODES	Εξειδικευμένη επεξεργασία δεδομένων χρησιμοποιώντας τις πιο πρόσφατες διαθέσιμες διορθώσεις.
<b>ALES</b>	NOC	Jason 1-2 Envisat Jason 3 (Σύντομα)	L2	20 Hz	Παγκόσμια <50 χλμ από την ακτή	PODAAC	Προϊόν από τον αλγόριθμο επαναπροσδιορισμού ALES. Περιέχει και SGDR προϊόντα.
<b>SARvatore</b>	ESA-ESRIN	CryoSat 2, Sentinel 3	L2	20 Hz, 80Hz	Παγκόσμια	ESA G-POD	Κατ' απαίτηση επεξεργασία όπου ο χρήστης μπορεί να διαμορφώσει ορισμένες παραμέτρους επεξεργασίας ώστε να πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις.

<b>COP</b>	ESA	CryoSat 2	L2	80 Hz	Παγκόσμια	ESA	Προϊόν με δεδομένα από τον CryoSat 2 LRM και PLRM λειτουργία αλλά χωρίς επεξεργασία για παράκτιες ζώνες.
<b>COSTA</b>	DGFI - TUM	ERS 1 – 2 Jason 1 – 2	L3	1 Hz, 20 Hz	Μεσόγειος και Βόρεια Θάλασσα	PANGAEA	Μετρήσεις της στάθμης της θάλασσας για παράκτιες ζώνες βασισμένες στον βελτιωμένο αλγόριθμο επαναπροσδιορισμού ALES.

**Πίνακας 4.1** Προϊόντα για την Παράκτια Αλτιμετρία (Coastal Altimetry). Επικαιροποιήσεις των στοιχείων του πίνακα στην ιστοσελίδα: [www.coastalt.eu](http://www.coastalt.eu) (Cipollini et al., 2017)

Η CTOH (<http://ctoh.legos.obs-mip.fr/data>) ένας γαλλικός οργανισμός με πεδίο εξειδίκευσης την μελέτη της δορυφορικής Αλτιμετρίας, διατηρεί ομοιογενείς βάσεις αλτιμετρικών δεδομένων (L2, L3) για την μακροπρόθεσμη παρακολούθηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας. Το ALES αποτελείται από δεδομένα Αλτιμετρίας που έχουν επαναπροσδιοριστεί από τον ομώνυμο αλγόριθμο επαναπροσδιορισμού ALES (Vignudelli et al., 2019). Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα με ανάλυση 350 μέτρων (συχνότητα 20 Hz) κατά μήκος της τροχιάς για τις δορυφορικές αποστολές Envisat, Jason-1, Jason-2 και AltiKa στην παράκτια ζώνη εντός 50 χιλιομέτρων από την ακτή. Το COSTA είναι ένα ειδικά επεξεργασμένο σύνολο δεδομένων που αποτελείται από χρονοσειρές ανωμαλιών της στάθμης της θάλασσας (Sea Level Anomaly ή SLA) συγκεκριμένα για την Μεσόγειο Θάλασσα.

Το X-TRACK έχει αναπτυχθεί από την CTOH (<http://ctoh.legos.obs-mip.fr/data>) για διαφορετικές αποστολές δορυφορικής Αλτιμετρίας και περιοχές. Είναι ένα προϊόν με ανάλυση κατά μήκος της τροχιάς 7 χιλιομέτρων (συχνότητα 1 Hz), με τη μορφή χρονοσειρών SLA και επεκτείνεται έως την παράκτια ζώνη με βελτιωμένες μεθόδους επεξεργασίας (Birol et al., 2017). Η υπηρεσία της G-POD <https://gpod.eo.esa.int/> που ονομάστηκε SARvatore (SAR Versatile To Altimetric Toolkit for Ocean Research & Exploitation) επιτρέπει την on-line επεξεργασία, κατ' απαίτηση και με δυνατότητα επιλογών διαφορετικής διαμόρφωσης, τόσο στα δεδομένα CryoSat-2 όσο και στα

δεδομένα Sentinel-3 σε λειτουργία SAR. Χρησιμοποιεί ένα ειδικό αλγόριθμο επαναπροσδιορισμού (retracker) για την παράκτια ζώνη και ένα σύνολο δεδομένων με ανάλυση κατά μήκος της τροχιάς 350 μέτρα (συχνότητα 20 Hz) ή 87 μέτρα (συχνότητα 80 Hz) (Dinardo et al., 2016). Στην επόμενη παράγραφο θα γίνει λεπτομερής αναφορά στην υπηρεσία SARvatore της G-POD (<https://gpod.eo.esa.int/>).

## 4.2 Η Υπηρεσία SARvatore της Διαδικτυακής Πύλης G-POD

Ένας από τους στόχους της πλατφόρμας G-POD (<https://gpod.eo.esa.int/>) είναι η παροχή στους χρήστες υπηρεσιών επεξεργασίας δεδομένων Αλτιμετρίας χωρίς να χρειάζεται οι ίδιοι να χειρίζονται ογκώδη δεδομένα. Η G-POD (<https://gpod.eo.esa.int/>) σχεδιάστηκε για να παρέχει στους επιστημονικούς και βιομηχανικούς χρήστες μια κοινή πλατφόρμα επεξεργασίας δεδομένων που προωθεί την ανάπτυξη, τον έλεγχο και την λειτουργία νέων εφαρμογών παρατήρησης της Γης.

Στην πλατφόρμα είναι αποθηκευμένα περισσότερα από 300 TB δεδομένων (*ibid*, 2016). Τα δεδομένα που διατίθενται, προέρχονται είτε από αποστολές της ESA είτε όχι. Η διαδικτυακή πύλη G-POD (<https://gpod.eo.esa.int/>) είναι ευέλικτη και ασφαλής. Ο χρήστης μπορεί εύκολα να διαχειριστεί όλες τις ενέργειες που εκτελεί. Από την δημιουργία μιας νέας εργασίας έως τη δημοσίευση των αποτελεσμάτων, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής των δεδομένων, η πλατφόρμα G-POD χαρακτηρίζεται από τον φιλικό ως προς τον χρήστη σχεδιασμό και την εύκολη προσβασιμότητα.

Η υπηρεσία SARvatore της G-POD (<https://gpod.eo.esa.int/>) διαθέτει δεδομένα από την αποστολή CryoSat 2 και την αποστολή Sentinel 3. Πρόσφατα με την προσθήκη του μοντέλου SAMOSA+ έγινε δυνατή η επεξεργασία δεδομένων σε παράκτιες ζώνες και ηπειρωτικά ύδατα (*ibid*, 2016). Η επεξεργασία των δεδομένων για την παρούσα εργασία έγινε με την χρήση της υπηρεσίας αυτής και του μοντέλου SAMOSA+.

Η υπηρεσία είναι ανοιχτή και δωρεάν μέσω διαδικτύου. Για την πρόσβαση, απαιτούνται διαπιστευτήρια από την EO-SSO (Earth Observation Single Sign-On) και στη συνέχεια, η αποστολή ενός e-mail στην ομάδα του G-POD ([eogpod@esa.int](mailto:eogpod@esa.int)) ζητώντας την ενεργοποίηση της υπηρεσίας για τον λογαριασμό EO-SSO του χρήστη. Μετά την εγγραφή στο EO-SSO, οι χρήστες έχουν ελεύθερη πρόσβαση στην ηλεκτρονική

υπηρεσία στη διεύθυνση: <https://gpod.eo.esa.int/services>. Η υπηρεσία παρατίθεται στο θέμα Marine.

Ο σχεδιασμός στην Εικόνα 4.1 είναι από την υπηρεσία SARvatore για τα δεδομένα της αποστολής Sentinel 3. Η πρώτη ενέργεια του χρήστη είναι η επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος και του χρόνου ενδιαφέροντος δηλαδή της ημερομηνίας ή του χρονικού διαστήματος των δεδομένων. Όσον αφορά στην επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος, αυτή μπορεί να γίνει με την σχεδίαση ενός ορθογωνίου στον παγκόσμιο χάρτη, χρησιμοποιώντας το ανάλογο εργαλείο σχεδίασης στη γραμμή εργαλείων. Για την επιλογή της περιοχής με μεγαλύτερη ακρίβεια, ο χρήστης μπορεί να πληκτρολογήσει απευθείας τις συντεταγμένες της περιοχής ενδιαφέροντος στα αντίστοιχα πεδία. Όσο αφορά στον χρόνο ενδιαφέροντος, ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις ημερομηνίες έναρξης και λήξης στα αντίστοιχα πεδία του ημερολογίου. Η γραμμή εργαλείων ενσωματώνει επίσης όλα τα απαραίτητα πλήκτρα για την περιήγηση στο χάρτη.

Μόλις ολοκληρωθεί η επιλογή της ημερομηνίας και της γεωγραφικής περιοχής, επιλέγοντας το πλήκτρο "QUERY", η υπηρεσία παραθέτει τα περάσματα του δορυφόρου σύμφωνα με τις χρονικές και χωρικές επιλογές του χρήστη. Τα τμήματα των περασμάτων που διασχίζουν την περιοχή ενδιαφέροντος, εμφανίζονται στον παγκόσμιο χάρτη. Η καρτέλα των αποτελεσμάτων της αναζήτησης παραθέτει έως και 100 περάσματα ανά σελίδα και ενημερώνει τους χρήστες για τον συνολικό αριθμό των αποτελεσμάτων. Ο χρήστης μπορεί να αποφασίσει ποια περάσματα του δορυφόρου θα επιλέξει.



**Εικόνα 4.1** Υπηρεσία SARvatore για την αποστολή Sentinel 3 (G-POD).

Το τελευταίο βήμα, πριν από την υποβολή της εργασίας, είναι ο ορισμός των επιλογών επεξεργασίας. Η καρτέλα με τις διαθέσιμες επιλογές και τις δυνατότητες επεξεργασίας

(Εικόνα 4.2) είναι ευέλικτη και ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει τον αλγόριθμο επεξεργασίας με παραμέτρους, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η επιλογή των παραμέτρων γίνεται μέσω μιας σειράς αναπτυσσόμενων μενού και οι επιλογές κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το επίπεδο επεξεργασίας των δεδομένων (L1 και L2).

**L1B Processor:**

- **Data Posting Rate:** Flag to set the data posting rate: 20 Hz (coarse posting rate) or 80 Hz (fine posting rate)
- **Hamming Weighting Window** Flag to set the application of the Hamming Weighting Window on the burst data (section 4.4 in REF1)
- **Exact Beam-Forming** Flag to set the application of exact or approximated Doppler Beam Steering (section 4.4 in REF1)
- **FFT Zero-Padding** Flag to operate the Zero-Padding prior to the range-FFT (section 4.8 in REF1), Zero-Padding is indicated for coastal zone analysis
- **Radar Receiving Window Size** Flag to select the size of the radar receiving window: 128 range bins (standard) or 128 x N range bins (extended N times). Extended window with N=2 is indicated for coastal zone and sea ice analysis. N>2 may be indicated only for inland water over very steep topographic regions.
- **Antenna Pattern Compensation** Flag to activate the antenna pattern compensation on the Stack Data
- **Dump SAR Stack Data in output** Flag to dump the SAR Stack Data in the output package. Be aware that SAR Stack Data are bulky data products (around 1 GB for single pass); do not process them massively but limit yourself at around 10/20 passes at the time

**L2 Processor:**

- **Restrict the re-tracking on specific surfaces** Flag to limit the processing on open sea or on water (open sea, coastal zone and inland water) or to process the full pass
- **PTR width alpha parameter** Use a LUT (Look-Up Table) or a constant for PTR (Point Target Response) alpha parameter
- **SIAMOSA Model Generation**

**Εικόνα 4.2** Πεδία επιλογής των παραμέτρων της επεξεργασίας των δεδομένων στην υπηρεσία SARvatore για την αποστολή Sentinel 3 (G-POD).

Αρχικά είναι δυνατή η επιλογή της διαμόρφωσης της επεξεργασίας των δεδομένων και η συμπλήρωση των παραμέτρων στην καρτέλα των επιλογών αυτόματα ανάλογα με την εφαρμογή (ανοιχτό ωκεανό, παράκτια ζώνη κλπ). Στην κατηγορία επεξεργασίας L2 ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ άλλων, τον αλγόριθμο επαναπροσδιορισμού (retracker), το μοντέλο της παλίρροιας και το μοντέλο της μέσης στάθμης της επιφάνειας της θάλασσας που θα εφαρμοστεί στα δεδομένα. Στην κατηγορία επεξεργασίας L1 γίνεται η επιλογή της συχνότητας (20Hz ή 80Hz) των δεδομένων που θα επιλεγούν για την εργασία.

Μόλις ο χρήστης επιλέξει τις παραμέτρους της επεξεργασίας των δεδομένων, προκειμένου να υποβάλει την εργασία στο GPOD Computing Elements, επιλέγει "PROCESS IT". Μετά την υποβολή μιας εργασίας, ο χρήστης κατευθύνεται στη σελίδα του ιστορικού των αιτημάτων εργασίας, όπου μπορεί να παρακολουθηί σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση της εκτέλεσης.

Ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιήσει αλλαγές στις παραμέτρους επεξεργασίας των δεδομένων και να υποβάλλει εκ νέου την εργασία. Όταν η επεξεργασία των δεδομένων ολοκληρωθεί, παρέχεται στον χρήστη αναφορά των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν με τυχόν σφάλματα που προέκυψαν, καθώς και ένας σύνδεσμος για το κατέβασμα των δεδομένων σε τοπικό μέσο αποθήκευσης του χρήστη. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων από την υπηρεσία SARvatore περιλαμβάνουν το ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου σε μορφότυπο KML, το ηχόγραμμα του ραντάρ σε εικόνα PNG και τα επιπέδου 2 (L2) επεξεργασμένα δεδομένα σε μορφότυπο NetCDF.

### 4.3 Αλγόριθμος Επαναπροσδιορισμού κυματομορφής SAMOSA+

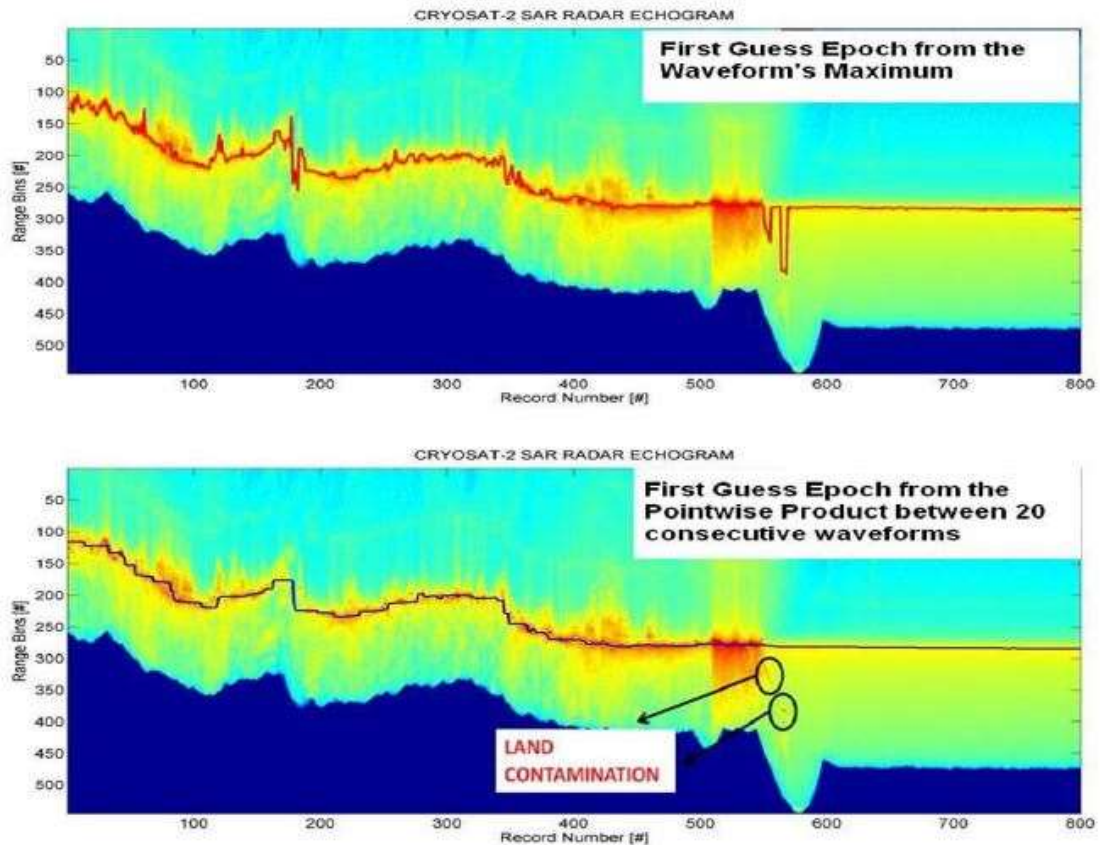
Ο αλγόριθμος επαναπροσδιορισμού κυματομορφής (waveform retracker) που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων από την υπηρεσία SARvatore της G-POD είναι ο SAMOSA+. Ο αλγόριθμος SAMOSA+ αποτελεί εξέλιξη του αλγορίθμου SAMOSA που αποτελεί τον βασικό αλγόριθμο για τον επαναπροσδιορισμό κυματομορφής στην Αλτιμετρία SAR. Η εξέλιξη αφορά στην δυνατότητα παροχής δεδομένων με μεγαλύτερη ακρίβεια στις παράκτιες ζώνες και τα ηπειρωτικά ύδατα (Dinardo, 2020). Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν τα βασικά χαρακτηριστικά του αλγορίθμου επαναπροσδιορισμού κυματομορφής (waveform retracker) SAMOSA+.

Ουσιαστικά ο SAMOSA+ αποτελεί μια γενίκευση του αλγορίθμου SAMOSA με την οποία γίνεται εφικτή η χρήση του σε κάθε επιφάνεια είτε είναι ανοιχτή θάλασσα, είτε παράκτια ζώνη, πάγος, ηπειρωτικά ύδατα κοκ. Το μοντέλο που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος SAMOSA+ για τον επαναπροσδιορισμό της κυματομορφής σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση του έχει δύο σημαντικές προσθήκες. Η πρώτη προσθήκη αφορά την επιλογή της παραμέτρου  $\tau$  (epoch) που χρησιμοποιείται για την βελτίωση της μέτρησης της απόστασης (range) από τον δορυφόρο και για την μέτρηση της κλίσης του διαγράμματος της κυματομορφής όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.

Η παράμετρος  $\tau$  (epoch) (cf *Εικόνα 3.1*) δεν επιλέγεται πλέον από την θέση την κορυφής του διαγράμματος μίας κυματομορφής, όπως συμβαίνει στην Αλτιμετρία στην ανοιχτή θάλασσα, αλλά από τον συνδυασμό είκοσι συνεχόμενων κυματομορφών αφού διορθωθεί η μετατόπιση τους ώστε να είναι δυνατός ο συνδυασμός τους. Η λογική με την οποία επιλέχθηκε η διαδικασία αυτή για την παράμετρο  $\tau$  (epoch) είναι η μείωση του



σφάλματος (Εικόνα 4.3) στον υπολογισμό της απόστασης (range) στα δεδομένα στην παράκτια ζώνη (*ibid*, 2020).



**Εικόνα 4.3** Ηχόγραμμα κυματομορφής από τον δορυφόρο CryoSat 2. Στο πάνω διάγραμμα η παράμετρος  $\tau$  (epoch) προσδιορίζεται από μία κυματομορφή και στο κάτω από είκοσι συνεχόμενες (*Dinardo*, 2020).

Στην Αλτιμετρία SAR στην ανοιχτή θάλασσα η αρχική επιλογή της παραμέτρου  $\tau$  (epoch) από την τιμή της κορυφής μίας κυματομορφής αρκεί. Η υπόθεση, δηλαδή ότι η επαναπροσδιορισμένη τιμή της παραμέτρου  $\tau$  (epoch) δεν απέχει από την τιμή της κορυφής μίας κυματομορφής, ισχύει στην περίπτωση της ανοιχτής θάλασσας. Στην περίπτωση της παράκτιας ζώνης όπου οι κυματομορφές επηρεάζονται από την ύπαρξη στεριάς η υπόθεση που χρησιμοποιείται στην ανοιχτή θάλασσα παύει να ισχύει γιατί η κυματομορφή μπορεί να έχει μέγιστες τιμές και από την στεριά παραπλεύρως και όχι μόνο από το ναδίρ του δορυφόρου. Το διάγραμμα της κυματομορφής δηλαδή μπορεί να έχει περισσότερες της μίας κορυφές (*cf* Εικόνα 2.6) και το σημείο υπολογισμού της παραμέτρου  $\tau$  (epoch) να μην μπορεί να προσδιοριστεί με την απαιτούμενη ακρίβεια.

Χρησιμοποιώντας τον συνδυασμό είκοσι συνεχόμενων κυματομορφών μπορεί να επιλεγεί μια τιμή για την παράμετρο  $\tau$  (epoch) μεγαλύτερης ακρίβειας και απαλλαγμένη από την επίδραση της στεριάς.

Στο κάτω μέρος της εικόνας 4.3 η τιμή της απόστασης (range) δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη της στεριάς σε αντίθεση με το πάνω διάγραμμα που υπάρχει η απότομη μείωση της τιμής της απόστασης (range) εξαιτίας της επιλογής της αρχικής τιμής της παραμέτρου  $\tau$  (epoch) από μία κυματομορφή. Η επιλογή της διαδικασίας του συνδυασμού είκοσι κυματομορφών παρουσιάζει μια πιο αξιόπιστη προσέγγιση του προσδιορισμού της παραμέτρου στην παράκτια ζώνη (*ibid*, 2020).

Η δεύτερη προσθήκη στον αλγόριθμο επαναπροσδιορισμού SAMOSA+ αφορά την μεταχείριση των κυματομορφών που εμπεριέχουν την επίδραση της στεριάς. Στην περίπτωση όπου οι κυματομορφές δεν είναι επηρεασμένες από στεριά χρησιμοποιείται το ίδιο μοντέλο με τον αλγόριθμο SAMOSA με ορισμένες διαφοροποιήσεις. Στην περίπτωση ύπαρξης στεριάς οι κυματομορφές επαναπροσδιορίζονται με μια διαδικασία δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο προσδιορίζεται το σημαντικό ύψος κύματος (Significant Wave Height ή SWH) σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 ενώ στο δεύτερο στάδιο του επαναπροσδιορισμού της κυματομορφής το SWH τίθεται ίσο με το μηδέν και η τρίτη παράμετρος στην διαδικασία επαναπροσδιορισμού γίνεται η μέση τετραγωνική κλίση (*Kurz et al.*, 2014). Το αποτέλεσμα του δεύτερου σταδίου είναι ο υπολογισμός της απόστασης (range) και του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος (Pu) (*Dinardo*, 2020).

#### **4.4 Δεδομένα Sentinel 3A και CryoSat 2**

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα των αποστολών Sentinel 3A και CryoSat 2 σε διάφορες παράκτιες περιοχές και νησιά της Ελλάδας τα χαρακτηριστικά των οποίων θα αναφερθούν αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Τα αλτιμετρικά δεδομένα αφορούν το έτος 2018 και χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της στάθμης της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) και των ανωμαλιών της στάθμης της θάλασσας (Sea Level Anomaly ή SLA) για την διαπίστωση του βαθμού της σύνδεσης των μετρήσεων της Αλτιμετρίας και των παλιρροιογράφων σε κάθε περιοχή.

Η επεξεργασία των αλτιμετρικών δεδομένων έγινε στην διαδικτυακή πύλη G-POD (<http://gpod.eo.esa.int/>) με την χρήση της υπηρεσίας SARvatore, τα χαρακτηριστικά της οποίας αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.2. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η συχνότητα των δεδομένων να είναι 20 Hz δηλαδή κάθε μέτρηση απέχει 350 μέτρα από την προηγούμενη κατά μήκος της τροχιάς. Οι περιοχές μελέτης είναι παράκτιες και νησιωτικές επομένως επιλέχθηκε ο αλγόριθμος επαναπροσδιορισμού της κυματομορφής (waveform retracker) SAMOSA+.

Η επιλογή των δεδομένων και η επεξεργασία τους στην υπηρεσία SARvatore πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για κάθε περιοχή με χρόνο αναμονής περίπου τις τέσσερις με πέντε ώρες. Τα δεδομένα με το πέρας της επεξεργασίας αποθηκεύτηκαν τοπικά σε μορφότυπο NetCDF. Σε κάθε πακέτο των αλτιμετρικών δεδομένων περιέχονται δεδομένα επεξεργασίας επιπέδου 2 (Level 2 ή L2), οι τροχιές του δορυφόρου σε μορφότυπο KMZ καθώς και οι εικόνες με το ηχόγραμμα του ραντάρ για κάθε τροχιά όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.2.

Η επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών για τον προσδιορισμό του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας για κάθε περιοχή έγινε με την χρήση απλών εντολών της προγραμματιστικής γλώσσας Python. Η επεξεργασία των αλτιμετρικών δεδομένων και η εφαρμογή των απαιτούμενων διορθώσεων για την χρησιμοποίησή τους στην παράκτια ζώνη έγινε με την χρήση της υπηρεσίας SARvatore στην διαδικτυακή πλατφόρμα G-POD. Η επεξεργασία που απαιτήθηκε τοπικά, αφορά στην επιλογή και τον συνδυασμό των μεταβλητών ώστε κάθε φορά να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Σε κάθε περιοχή και για κάθε τροχιά των δορυφόρων που επιλέχθηκε, δημιουργήθηκαν πίνακες του ύψους της στάθμης της θάλασσας (SSH) και των ανωμαλιών της στάθμης της θάλασσας (SLA) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή όπου:

$$SLA = SSH - MSS \quad 4.1$$

Οι μεταβλητές στην σχέση 4.1 είναι σε μέτρα. Η παράμετρος MSS είναι η Μέση Επιφάνεια της Θάλασσας (Mean Sea Surface ή MSS). Το μοντέλο MSS που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των μετρήσεων SLA είναι το DTU 18 (*Andersen et al., 2018*) και η επιλογή του έγινε πριν την επεξεργασία των δεδομένων στην υπηρεσία SARvatore.

#### 4.4.1 Επιλογή της τροχιάς αλτιμετρικού δορυφόρου

Οι μετρήσεις του αλτιμέτρου ή αλλιώς τα περάσματα του δορυφόρου, δεν ταυτίζονται με τα σημεία που βρίσκονται τοποθετημένοι οι παλιρροιογράφοι ούτε οι παρατηρήσεις του δορυφόρου συμφωνούν χρονικά με αυτές του παλιρροιογράφου. Ο δορυφόρος έχει συγκεκριμένη συχνότητα περάσματος από κάθε σημείο, που ποικίλει από μερικές μέρες έως μήνες, ενώ ο παλιρροιογράφος λαμβάνει μετρήσεις συνεχώς. Χρειάζεται επομένως μια διαδικασία ώστε να μπορούν να συνδυαστούν οι μετρήσεις της δορυφορικής Αλτιμετρίας με αυτές του παλιρροιογράφου (*Cipollini et al., 2017*).

Είναι προφανές ότι οι τροχιές του αλτιμετρικού δορυφόρου που βρίσκονται πολύ μακριά από την θέση του παλιρροιογράφου δεν θα είναι κατάλληλες για τον συνδυασμό των μετρήσεων. Μια συνήθη διαδικασία για την επιλογή των κατάλληλων τροχιών σε σχέση με την απόσταση από την θέση του παλιρροιογράφου είναι να επιβληθεί μια ακτίνα κύκλου με κέντρο τον παλιρροιογράφο και να ελεγχθούν οι τιμές του αλτιμέτρου μέσα στην περιοχή αυτή (*ibid, 2017*). Ελέγχεται η ρίζα της τετραγωνικής διαφοράς των μέσων τιμών αλτιμέτρου και παλιρροιογράφου (RMSD) όπου:

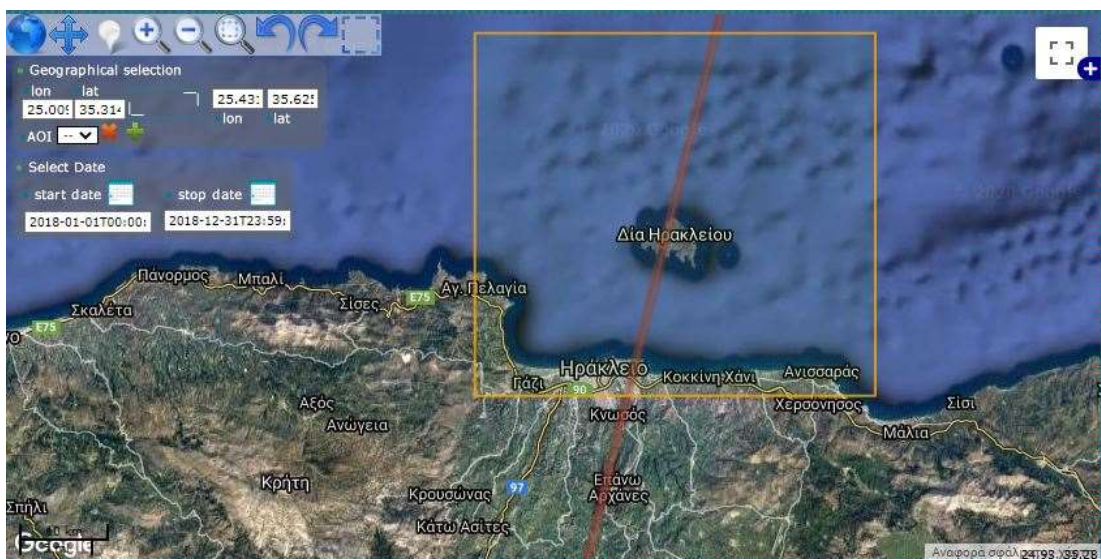
$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - w_i)^2} \quad 4.2$$

Όπου τα  $v_i$  και  $w_i$  είναι οι μέσες τιμές των μετρήσεων (SLA ή SSH) από τον δορυφόρο και τον παλιρροιογράφο αντίστοιχα.

Η τροχιά στην οποία η ποσότητα RMSD είναι μικρότερη επιλέγεται για τον συνδυασμό των μετρήσεων με τον παλιρροιογράφο. Για κάθε τροχιά του δορυφόρου επιλέγεται μια τιμή η οποία είναι η διάμεσος του συνόλου των τιμών που εμπεριέχονται στην επιλεγθείσα κάθε φορά ακτίνα. Η αντίστοιχη τιμή για τον παλιρροιογράφο επιλέγεται με γραμμική παρεμβολή, λαμβάνοντας υπόψη την ημερομηνία και ώρα λήψης της μέτρησης του αλτιμέτρου. Θα πρέπει οι μετρήσεις να είναι την ίδια ημέρα και οι χρονικές στιγμές λήψης τους να μην έχουν διαφορά μεγαλύτερη της μισής ώρας. Το πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι η επιλεγθείσα απόσταση (ακτίνα) αντιπροσωπεύει την βέλτιστη ακτίνα για κάθε παλιρροιογράφο ξεχωριστά και έτσι διαφορετικοί παλιρροιογράφοι έχουν διαφορετική ακτίνα επιλογής για τα δεδομένα του αλτιμέτρου (*ibid, 2017*).

Στην παρούσα εργασία δεν απαιτήθηκε η εφαρμογή της διαδικασίας που περιγράφηκε καθώς σε κάθε τοποθεσία παλιρροιογράφου τα περάσματα του δορυφόρου Sentinel 3A ήταν συγκεκριμένα και σε απόσταση μικρότερη των διακοσίων χιλιομέτρων. Επίσης το χρονικό διάστημα που εξετάστηκε ήταν μόνο για το έτος 2018, για μία αποστολή δορυφορικής Αλτιμετρίας κάθε φορά και μόνο για την παράκτια ζώνη (μικρότερη απόσταση από 10 χιλιόμετρα από την ακτή). Σε κάθε τοποθεσία παλιρροιογράφου επιλέχθηκε το πιο κοντινό πέρασμα του δορυφόρου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο, έγινε και επεξεργασία δεδομένων από τροχιά που απείχε μεγαλύτερη απόσταση από την τοποθεσία του παλιρροιογράφου για την σύγκριση των αποτελεσμάτων της εγγύτερης και της απομακρυσμένης τροχιάς με τις μετρήσεις του παλιρροιογράφου.

Η επιλογή της τροχιάς της οποίας οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν, έγινε στην υπηρεσία SARvatore με τον σχεδιασμό ενός πολυγώνου (Εικόνα 4.4) γύρω από την τοποθεσία του παλιρροιογράφου. Η υπηρεσία εμφάνισε τις τροχιές που βρίσκονταν μέσα στο πολύγωνο αυτό και έτσι έγινε η επιλογή της εγγύτερης τροχιάς στην τοποθεσία του παλιρροιογράφου. Στην περίπτωση όπου στο πολύγωνο υπήρχαν περάσματα του δορυφόρου με διαφορετική κατεύθυνση επιλέχθηκαν και τα δύο και εξετάστηκαν ξεχωριστά το καθένα.



**Εικόνα 4.4** Αναζήτηση και επιλογή τροχιάς με την χρήση πολυγώνου στην Υπηρεσία SARvatore for Sentinel 3 (G-POD)

## 4.5 Δεδομένα Παλιρροιογράφων

Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά στα δεδομένα των παλιρροιογράφων που χρησιμοποιήθηκαν, στον τρόπο απόκτησής τους και στις διαδικασίες επεξεργασίας τους. Τα επιτόπου (in situ) δεδομένα πριν από τον συνδυασμό ή την σύγκρισή τους με τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας θα πρέπει να υποστούν μια διαδικασία προεπεξεργασίας. Η διαδικασία αυτή στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε από τον πάροχο των δεδομένων, την Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού (<https://www.hnhs.gr/>). Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τις μετρήσεις των παλιρροιογράφων και θα αναφερθεί στην συνέχεια, είναι η κατακόρυφη μετατόπιση του εδάφους (Vertical Land Motion ή VLM) με αποτέλεσμα οι παλιρροιογράφοι να παρατηρούν ένα σχετικό ως προς την βάση που είναι τοποθετημένοι ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH). Επιτόπου δεδομένα παλιρροιογράφων χρησιμοποιήθηκαν επίσης από την διαδικτυακή βάση δεδομένων PSMSL (<https://www.psmsl.org/>).

### 4.5.1 Προεπεξεργασία δεδομένων Παλιρροιογράφου.

Η υψηλή ποιότητα δεδομένων από παλιρροιογράφους απαιτείται από πολλές εφαρμογές. Υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των δεδομένων από τους οποίους προκύπτουν τρία βασικά ζητήματα στα δεδομένα (*Heliani et al, 2013*):

- α) Στιγμαίειες ακραίες τιμές
- β) Αλλαγές στην μέση τιμή των δεδομένων
- γ) Κενά στις χρονοσειρές των δεδομένων των παλιρροιογράφων

Η διαδικασία προεπεξεργασίας που ακολουθείται για την εξάλειψη των παραπάνω σφαλμάτων στα δεδομένα αποτελείται από τρία στάδια (*ibid, 2013*). Στο πρώτο στάδιο ελέγχεται η ύπαρξη και το ποσοστό των κενών στα δεδομένα με βάση την διαθεσιμότητα των δεδομένων κάθε λεπτό. Το επόμενο στάδιο της προεπεξεργασίας είναι να γίνει έλεγχος της πιθανότητας ύπαρξης αποκλίσεων από την τιμή αναφοράς η οποία συνήθως οφείλεται σε βλάβη στο σύστημα τροφοδοσίας του οργάνου ή στην ύπαρξη μεγάλου κενού στα δεδομένα. Τα δεδομένα διαχωρίζονται σε ομάδες με βάση την θέση των κενών

(δηλαδή δημιουργούνται σύνολα δεδομένων που βρίσκονται μεταξύ κενών). Η ομάδα με τις περισσότερες μετρήσεις καθορίζεται ως ομάδα αναφοράς. Αν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην μέση τιμή των δεδομένων μεταξύ των ομάδων σημαίνει πως υπάρχει αλλαγή στο πεδίο αναφοράς τους. Στην περίπτωση αυτή οι αλλαγές στην τιμή αναφοράς διορθώνονται προσθέτοντας την μέση τιμή των αποκλίσεων από την ομάδα αναφοράς σε κάθε μέτρηση των υπόλοιπων ομάδων δεδομένων (*ibid*, 2013). Στο τελευταίο στάδιο της προεπεξεργασίας ανιχνεύονται και εξαλείφονται οι ακραίες τιμές στις μετρήσεις.

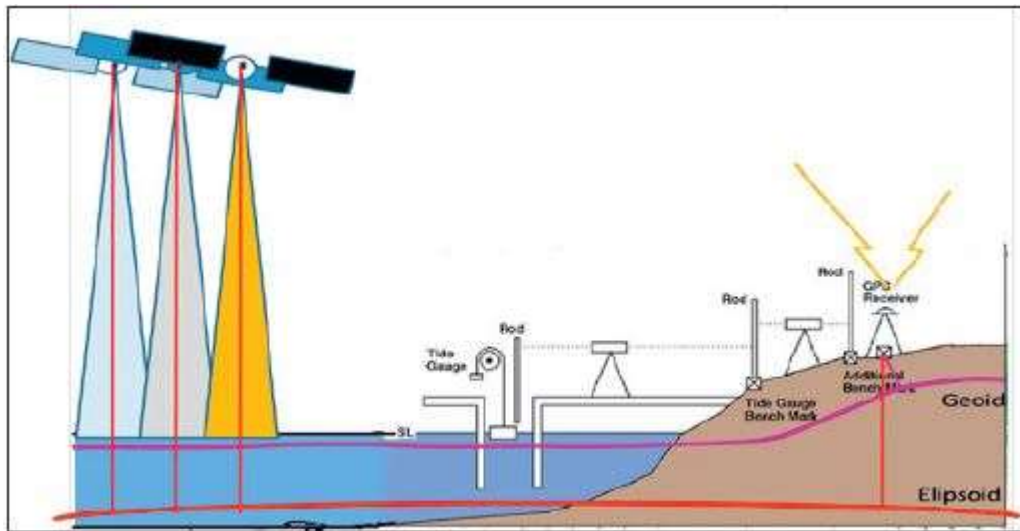
Η διαδικασία προεπεξεργασίας είναι κυρίως απαραίτητη σε σύνολα δεδομένων που αποτελούνται από μετρήσεις παλιρροιογράφων ανά λεπτό. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αποτελούνταν από ημερήσιες μετρήσεις των παλιρροιογράφων για το έτος 2018. Η εξάλειψη των ακραίων τιμών, των αποκλίσεων από την τιμή αναφοράς και των κενών στα δεδομένα έγινε από τον πάροχο των δεδομένων.

#### **4.5.2 Κατακόρυφη μετατόπιση του εδάφους (Vertical Land Motion)**

Οι μετρήσεις της δορυφορικής Αλτιμετρίας για το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) έχουν σαν σύστημα αναφοράς το ελλειψοειδές. Αυτό σημαίνει ότι η Αλτιμετρία παρέχει δεδομένα SSH τα οποία δεν επηρεάζονται από την κατακόρυφη κίνηση του εδάφους στην περιοχή που αναφέρονται. Από την άλλη, τα δεδομένα από τον παλιρροιογράφο αποτελούνται από μετρήσεις SSH σε τοπικό σύστημα αναφοράς που σχετίζεται με το έδαφος στο οποίο είναι τοποθετημένος ο παλιρροιογράφος. Για τον λόγο αυτό οι μετρήσεις του παλιρροιογράφου επηρεάζονται από τις κάθετες μετατοπίσεις του εδάφους που λαμβάνουν χώρα τοπικά, αλλά και ευρύτερα, στο σημείο τοποθέτησης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται κατακόρυφη μετατόπιση του εδάφους (Vertical Land Motion ή VLM) με αποτέλεσμα όπως αναφέρθηκε, οι παλιρροιογράφοι να καταγράφουν ένα σχετικό ως προς την βάση που είναι τοποθετημένοι ύψος της επιφάνειας της θάλασσας.

Η κατακόρυφη μετατόπιση του εδάφους μπορεί να προσδιοριστεί με την χρήση μετρήσεων GNSS, όμως ελάχιστοι παλιρροιογράφοι είναι εξοπλισμένοι με δέκτες GNSS όπως στην Εικόνα 4.5. Υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν πολλαπλοί γειτονικοί δέκτες GNSS για τον προσδιορισμό της VLM. Στην περίπτωση αυτή η αβεβαιότητα στον

προσδιορισμό της κατακόρυφης μετατόπισης είναι  $4 \times 10^{-3}$  χιλ./έτος για κάθε χιλιόμετρο απόστασης του δέκτη GNSS από τον παλιρροιογράφο (Kleinherenbrink et al., 2017).



**Εικόνα 4.5** Συνδυασμός μετρήσεων δορυφορικής Αλτιμετρίας και παλιρροιογράφων για τον υπολογισμό της VLM με την χρήση δεκτών GNSS (Heliani et al, 2013)

Ένας δεύτερος τρόπος προσδιορισμού της κατακόρυφης μετατόπισης του εδάφους (VLM), ξεπερνώντας τους περιορισμούς ενός αραιού δικτύου GNSS, χρησιμοποιεί δεδομένα που προκύπτουν από τις διαφορές μετρήσεων δορυφορικής Αλτιμετρίας και παλιρροιογράφων (ALT – TG) (ibid, 2017). Με γνωστή την κατακόρυφη μετατόπιση (VLM) του εδάφους μπορούμε να μετατρέψουμε τις μετρήσεις του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) από τοπικές σε γεωκεντρικές με σύστημα αναφοράς το ελλειψοειδές.

#### 4.5.3 Επεξεργασία μετρήσεων παλιρροιογράφων

Η Υδρογραφική Υπηρεσία παρείχε δωρεάν, ημερήσια δεδομένα παλιρροιογράφων του 2018 για το Κατάκολο, το Ηράκλειο Κρήτης, την Σύρο και την Αλεξανδρούπολη οι οποίες επιλέχθηκαν λόγω της θέσης τους σε παράκτια ζώνη. Τα δεδομένα αυτά δεν απαιτήθηκε να υποστούν προεπεξεργασία παρόλα αυτά πραγματοποιήθηκε έλεγχος για την ύπαρξη κενών και ακραίων τιμών. Διαπιστώθηκαν σε ορισμένες περιοχές ελάχιστα κενά τα οποία όμως δεν ήταν ικανά να επηρεάσουν το σύνολο των μετρήσεων.



Στους παλιρροιογράφους οι μετρήσεις των οποίων χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, δεν υπάρχει εγκατεστημένος δέκτης GNSS και το δίκτυο GNSS στις γειτονικές περιοχές είναι αραιό και σε μεγάλη απόσταση. Η κατακόρυφη μετατόπιση του εδάφους (VLM) επομένως δεν προσδιορίστηκε για τις τοποθεσίες των παλιρροιογράφων. Η αλλαγή από τοπικό σε γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς της μέτρησης του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας από τον παλιρροιογράφο ( $SSH_{TG}$ ) έγινε με την χρήση τιμών του ύψους του Γεωειδούς στις θέσεις των παλιρροιογράφων:

$$SSH_{TG} = SLA_{TG} + H_{GEOID} \quad 4.3$$

Όπου  $H_{GEOID}$  είναι το υψόμετρο του Γεωειδούς στην θέση του παλιρροιογράφου και  $SLA_{TG}$  είναι η μέτρηση του ύψους της στάθμης της θάλασσας από τον παλιρροιογράφο από την οποία έχει αφαιρεθεί η επίδραση της παλίρροιας. Η παλίρροια προσδιορίστηκε από τον μέσο όρο όλων των διαθέσιμων διαχρονικών μετρήσεων κάθε παλιρροιογράφου στην διαδικτυακή βάση δεδομένων PSMSL (<https://www.psmsl.org/>).

Με τον τρόπο αυτό προσδιορίστηκε το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας ( $SSH$ ) στις θέσεις των παλιρροιογράφων για να συνδυαστεί με τις μετρήσεις  $SSH$  από την δορυφορική Αλτιμετρία. Ως μοντέλο Γεωειδούς χρησιμοποιήθηκε το EGM 2008 και οι τιμές του στις θέσεις των παλιρροιογράφων προσδιορίστηκαν από διαδικτυακή υπηρεσία της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (<http://web.gys.gr/GeoSearch/geoid/hmgs-geoid-index.html>).

Για τον προσδιορισμό του ύψους της στάθμης της θάλασσας από τον παλιρροιογράφο χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από τις οποίες είχε αφαιρεθεί η επίδραση της παλίρροιας. Με τον τρόπο αυτό υπολογίστηκαν οι τιμές των ανωμαλιών της στάθμης της θάλασσας (Tide Gauge Sea Level Anomaly ή  $SLA_{TG}$ ) από τις μετρήσεις του παλιρροιογράφου. Η παράμετρος αυτή ονομάστηκε Sea Level Anomaly του παλιρροιογράφου ( $SLA_{TG}$ ) και συνδυάστηκε με την αντίστοιχη μεταβλητή  $SLA$  των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Η σύγκριση των δύο αυτών παραμέτρων ( $SLA_{TG}$  και  $SLA$  αλτιμέτρου) δίνει την δυνατότητα παρακολούθησης της συμπεριφοράς των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας κοντά στις ακτές όπως θα διαπιστωθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

## 5 Αποτελέσματα στις Περιοχές Μελέτης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας και των παλιρροιογράφων για το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας μετά την επεξεργασία τους. Επιλέχθηκαν τέσσερις περιοχές μελέτης με βάση την θέση των παλιρροιογράφων σε αυτές. Οι περιοχές μελέτης είναι το Κατάκολο που βρίσκεται στην Πελοπόννησο, η Αλεξανδρούπολη στον Έβρο, η Σύρος στο κεντρικό Αιγαίο και το Ηράκλειο Κρήτης. Οι περιοχές που μελετήθηκαν είναι παράκτιες. Τα περάσματα του δορυφόρου ήταν σε απόσταση κάτω των 100 χιλιομέτρων ενώ στην Αλεξανδρούπολη και το Ηράκλειο εξετάστηκαν και περάσματα που ήταν περισσότερο απομακρυσμένα από την θέση του παλιρροιογράφου, με σκοπό να παρατηρηθούν οι διαφορές στις μετρήσεις.

Για κάθε περιοχή μελέτης έχουν δημιουργηθεί διαγράμματα των ανωμαλιών της στάθμης της θάλασσας (Sea Level Anomaly ή SLA) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για να διαπιστωθεί η απόσταση μέχρι την οποία οι τιμές SLA του δορυφόρου συνάδουν με αυτές του παλιρροιογράφου. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.4 χρησιμοποιήθηκαν αλτιμετρικά δεδομένα από το έτος 2018. Επίσης όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4.2, ο δορυφόρος Sentinel 3A περνάει από μια περιοχή κάθε 27 ημέρες. Επομένως κάθε περιοχή μελέτης ο δορυφόρος την επισκέφτηκε 12 ή 13 φορές το 2018. Είναι προφανές ότι κάθε ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου στην περιοχή μελέτης δεν ταυτίζεται στην επιφάνεια της γης ακριβώς με το προηγούμενο αλλά υπάρχουν διαφοροποιήσεις μερικών μέτρων που είναι πολύ μικρές σε σχέση με το κατά μήκος μέγεθος του περάσματος. Για τον υπολογισμό της απόστασης κάθε μέτρησης από την ακτή χρησιμοποιήθηκε το μέσο ίχνος των τροχιών από το σύνολο των περασμάτων σε κάθε περιοχή.

Δημιουργήθηκαν επίσης διαγράμματα με τις μηνιαίες μετρήσεις SLA για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά της στάθμης της θάλασσας όπως καταγράφηκε από τα δύο αυτά σύνολα δεδομένων. Τέλος δημιουργήθηκαν χάρτες με το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) για κάθε περιοχή από τον συνδυασμό των μετρήσεων της δορυφορικής Αλτιμετρίας και των παλιρροιογράφων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανά περιοχή και στο τέλος τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα.

## 5.1 Αποτελέσματα για την Αλεξανδρούπολη

Η Αλεξανδρούπολη βρίσκεται στην Θράκη και είναι πρωτεύουσα της περιφερειακής ενότητας Έβρου. Στο λιμάνι της πόλης έχει τοποθετηθεί παλιρροιογράφος τα δεδομένα του οποίου επεξεργάστηκαν στην παρούσα εργασία. Στην περιοχή, σε απόσταση κάτω των πενήντα χιλιομέτρων από τον παλιρροιογράφο υπάρχουν δεδομένα από δύο περάσματα του δορυφόρου Sentinel 3A. Για τον προσδιορισμό του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα από τον δορυφόρο CryoSat 2. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα δεδομένα για κάθε αποστολή ξεχωριστά.



**Εικόνα 5.1** Χάρτης κλίμακας 1:150,000 με τις τροχιές του δορυφόρου Sentinel 3A στην Αλεξανδρούπολη.

Στον χάρτη της εικόνας 5.1 απεικονίζονται οι δύο τροχιές του Sentinel 3A στην περιοχή. Πρόκειται για την τροχιά με αριθμό 241 και την τροχιά με αριθμό 335. Ο πίνακας 5.1 περιέχει ορισμένα στοιχεία για τις δύο κατηγορίες δεδομένων όπως συσχέτιση, διασπορά των διαφορών των δύο συνόλων δεδομένων, διασπορά ξεχωριστά για κάθε σύνολο δεδομένων και την μέση τιμή τους. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν ξεχωριστά για κάθε τροχιά.

Αλεξανδρούπολη	Orbit 241		Orbit 335	
	Altimetry	Tide Gauge	Altimetry	Tide Gauge
Correlation (m)	0.92		0.538	
Std of Differences (m)	0.037		0.029	
Standart Deviation (m)	0.086	0.065	0.068	0.12
Mean SLA 20 Hz (m)	0.029	-0.024	-0.011	0.018

**Πίνακας 5.1** Στατιστικά στοιχεία δεδομένων ανά τροχιά για τον δορυφόρο Sentinel 3A και τον παλιρροιογράφο για την Αλεξανδρούπολη.

Ο πίνακας 5.2 περιέχει τα αντίστοιχα στοιχεία από τα δεδομένα του δορυφόρου CryoSat 2 και του παλιρροιογράφου επίσης για τους μήνες του 2018, τα αποτελέσματα των οποίων θα παρουσιαστούν γραφικά σε επόμενη παράγραφο.

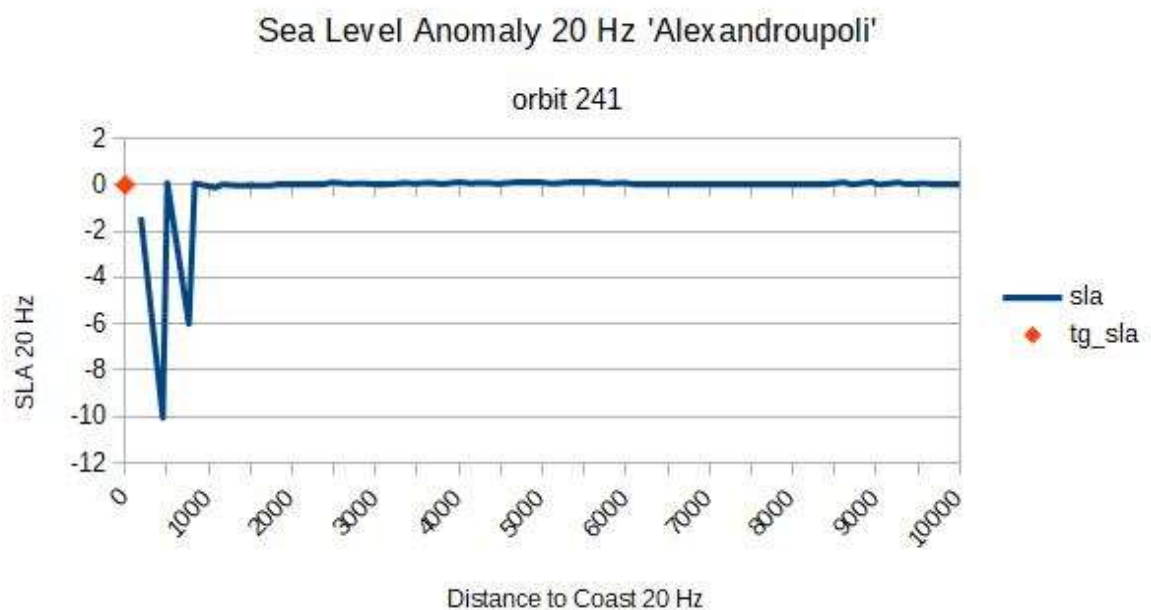
Αλεξανδρούπολη	CryoSat 2	
	Altimetry	Tide Gauge
Correlation (m)	0.479	
Std of Differences (m)	0.089	
Standart Deviation (m)	0.1	0.033
Mean SLA 20 Hz (m)	0.003	0.024

**Πίνακας 5.2** Στατιστικά στοιχεία από τα δεδομένα του δορυφόρου CryoSat 2 και τον παλιρροιογράφο για την Αλεξανδρούπολη.

### 5.1.1 Αποτελέσματα SLA Sentinel 3A

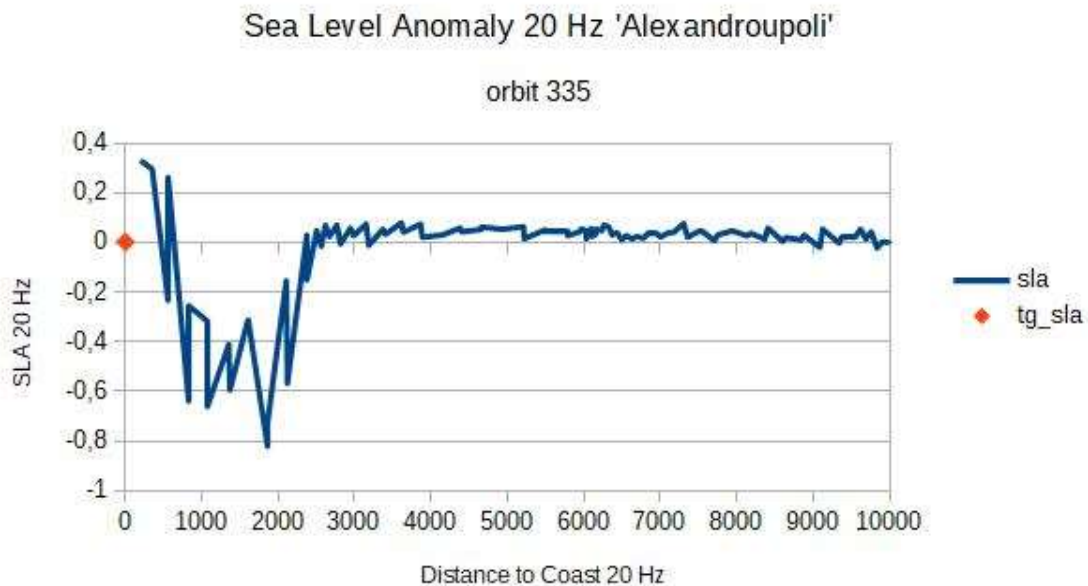
Η μεταβλητή SLA (Sea Level Anomaly) προσδιορίστηκε από τα αλτιμετρικά δεδομένα αρχικά σε συνάρτηση με την απόσταση από την ακτή και στην συνέχεια μηνιαία για κάθε

σύνολο δεδομένων. Στην εικόνα 5.2 παρατηρείται η μεταβλητή SLA σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 241 (cf Εικόνα 5.1). Οι μετρήσεις είναι συχνότητας 20 Hz δηλαδή υπάρχει μία τιμή ανά 350 μέτρα κατά μήκος της τροχιάς. Για την τροχιά 241 παρατηρείται μία πολύ καλή συσχέτιση των μετρήσεων του δορυφόρου σε σχέση με τις μετρήσεις του παλιρροιογράφου ακόμα και σε απόσταση περίπου χιλίων μέτρων από την ακτή. Σε απόσταση μικρότερη των χιλίων μέτρων παρατηρείται απότομη μεταβολή των τιμών SLA του δορυφόρου και επομένως η διαδικασία επαναπροσδιορισμού της κυματομορφής δεν δίνει αποδεκτά αποτελέσματα.



**Εικόνα 5.2** Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 241 του δορυφόρου Sentinel 3A για την Αλεξανδρούπολη.

Στην εικόνα 5.3, στην οποία φαίνονται οι μετρήσεις SLA σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 335 (cf Εικόνα 5.1) του δορυφόρου Sentinel 3A, παρατηρείται μια συσχέτιση των μετρήσεων του αλιτιμέτρου διαφορετική από την τροχιά 241 και με μικρότερη τιμή όπως διαπιστώνεται από τον πίνακα 5.1. Παρ' όλα αυτά μεγάλες μεταβολές στις τιμές SLA των μετρήσεων του αλιτιμέτρου παρατηρούνται σε απόσταση μικρότερη των 2,5 χιλιομέτρων περίπου από την ακτή.



**Εικόνα 5.3** Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 335 του δορυφόρου Sentinel 3A για την Αλεξανδρούπολη.

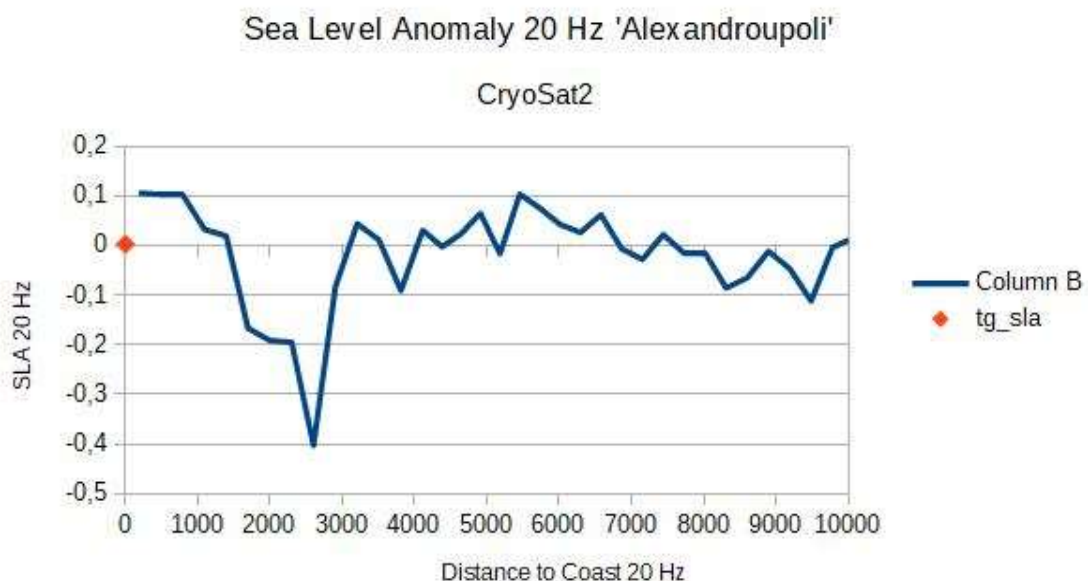
Όπως διαπιστώνεται από την εικόνα 5.1 τα περάσματα του δορυφόρου (τροχιά 241 και 335) και επομένως οι μετρήσεις της δορυφορικής Αλτιμετρίας, δεν απέχουν μεγάλη απόσταση από την θέση του παλιρροιογράφου ή η απόσταση κάθε τροχιάς και του παλιρροιογράφου δεν διαφέρει σημαντικά. Το πέρασμα του δορυφόρου στην τροχιά 241 με το πέρασμα του δορυφόρου στην τροχιά 335 πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικές ημερομηνίες με διαφορετική κατάσταση της επιφάνειας της θάλασσας (Sea State Bias ή SSB). Επομένως αυτή η διαφορετική μορφή των διαγραμμάτων μπορεί να οφείλεται είτε στις διαφορετικές χρονικές στιγμές μέτρησης της μεταβλητής SLA για την τροχιά 241 και 335 είτε στην επίδραση του Δέλτα του ποταμού Έβρου στην παράκτια περιοχή της τροχιάς 335.

### 5.1.2 Αποτελέσματα SLA CryoSat 2

Για τα δεδομένα του δορυφόρου CryoSat 2 χρησιμοποιήθηκε η υπηρεσία SARinatore της πλατφόρμας G-POD ([https://gpod.eo.esa.int/services/CRYOSAT\\_SARIN/](https://gpod.eo.esa.int/services/CRYOSAT_SARIN/)). Η υπηρεσία αυτή δημιουργήθηκε από την ESA (<http://www.esa.int/>) για την επεξεργασία δεδομένων επιπέδου 1 (L1) με την διαδικασία SARin (SAR Interferometric) (Garcia et

al., 2014) και την δημιουργία δεδομένων επιπέδου 2 (L2) χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο επαναπροσδιορισμού SAMOSA. Η υπηρεσία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές στον ανοιχτό ωκεανό, σε παράκτιες ζώνες αλλά και σε εσωτερικά ύδατα (λίμνες, ποτάμια). Τα προϊόντα της υπηρεσίας αυτής και οι διαδικασίες επεξεργασίας είναι όμοιες με την υπηρεσία SARvatore που περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.

Στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης που χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα CryoSat 2, εξετάστηκε όπως και στην περίπτωση του δορυφόρου Sentinel 3A η μεταβλητή SLA σε σχέση με την απόσταση από την ακτή. Στην συνέχεια προσδιορίστηκαν οι μηνιαίες τιμές SLA της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου για το έτος 2018 καθώς και οι τιμές για το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH).



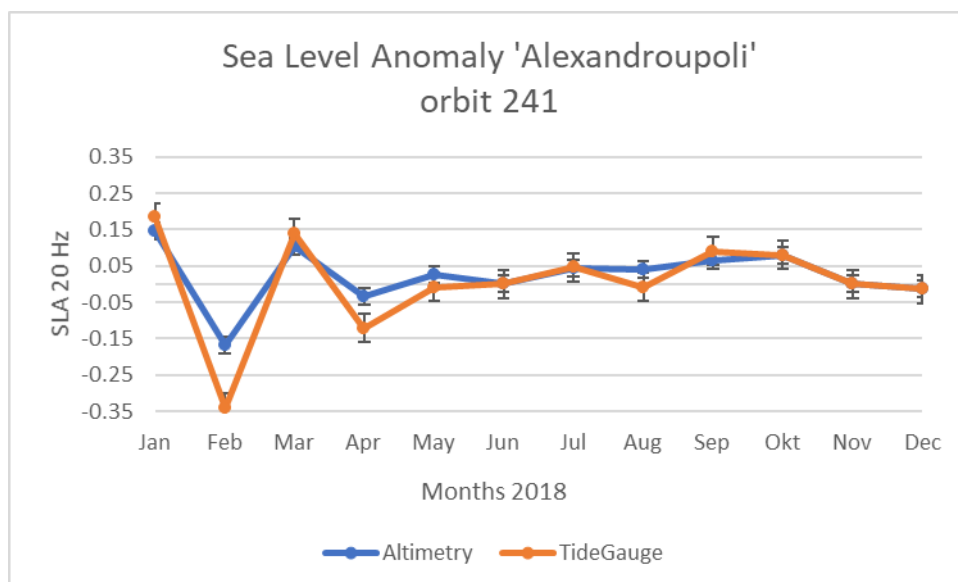
**Εικόνα 5.4** Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή από τα δεδομένα του δορυφόρου CryoSat 2 για την Αλεξανδρούπολη.

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.4 δεν παρατηρείται μία καλή (*cf Πίνακας 5.2*) συσχέτιση των μετρήσεων του αλτιμέτρου σε σχέση με την τιμή του παλιρροιογράφου για την μεταβλητή SLA. Η διαφορετική εικόνα των μετρήσεων του αλτιμέτρου σε σχέση με τον παλιρροιογράφο που παρατηρείται στα διαγράμματα SLA της εικόνας 5.4, της εικόνας, 5.3 και της εικόνας 5.2 δικαιολογείται και από την διαφορετική τιμή της συσχέτισης των δεδομένων στους πίνακες 5.1 και 5.2. Στην περίπτωση του CryoSat 2, όπως και σε αυτή του Sentinel 3A οι μετρήσεις SLA δεν έχουν διορθωθεί από τις επιδράσεις της

κατάστασης της θάλασσας δηλαδή από την μεταβλητή (Sea State Bias ή SSB). Παρ' όλα αυτά παρατηρείται μια σχετικά αξιόπιστη συμπεριφορά των μετρήσεων του αλτιμέτρου και στην περίπτωση του CryoSat 2 μέχρι την απόσταση των 3 χιλιομέτρων από την ακτή.

### 5.1.3 Μηνιαία αποτελέσματα SLA Sentinel 3A και παλιρροιογράφου

Στα διαγράμματα της παραγράφου θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των δεδομένων για τις μετρήσεις SLA σε μηνιαία βάση. Η διαφορά με τα διαγράμματα των μετρήσεων SLA σε σχέση με την απόσταση είναι ότι εδώ, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις SLA του παλιρροιογράφου για την ίδια ημερομηνία που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Επομένως οι μετρήσεις κάθε μήνα της μεταβλητής SLA της δορυφορικής Αλτιμετρίας και οι μετρήσεις SLA κάθε μήνα του παλιρροιογράφου έχουν πραγματοποιηθεί την ίδια ημέρα.

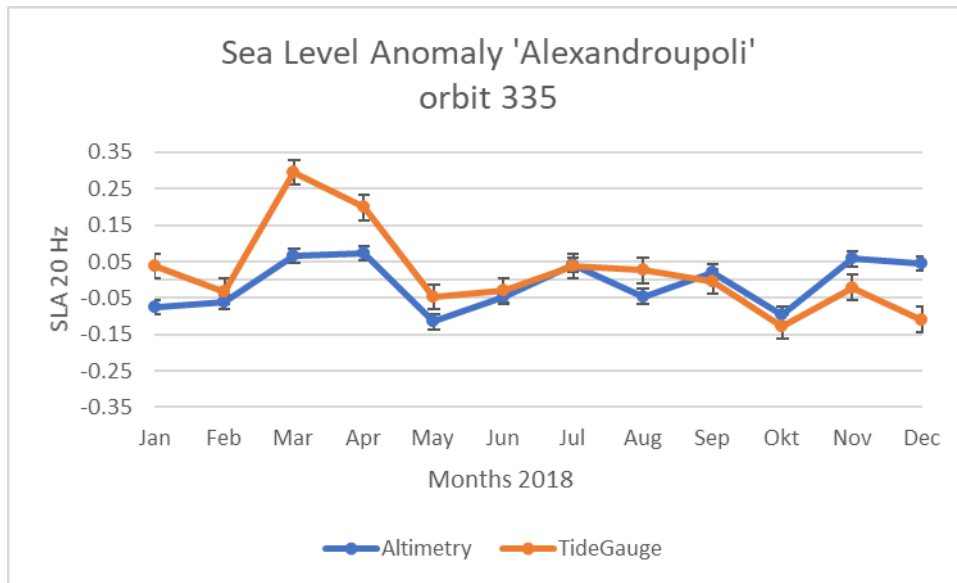


**Εικόνα 5.5** Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα της τροχιάς 241 του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για την Αλεξανδρούπολη.

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.5 παρατηρούνται οι ίδιες μεταβολές της μεταβλητής SLA στις καταγραφές της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου κάθε μήνα για την τροχιά 241 του δορυφόρου Sentinel 3A. Το πόσο μειώθηκε ή αυξήθηκε το ύψος της στάθμης της θάλασσας στην περιοχή καταγράφεται ικανοποιητικά από τα δύο σύνολα



δεδομένων με τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας να δείχνουν ότι επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό από τις μεταβολές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας.



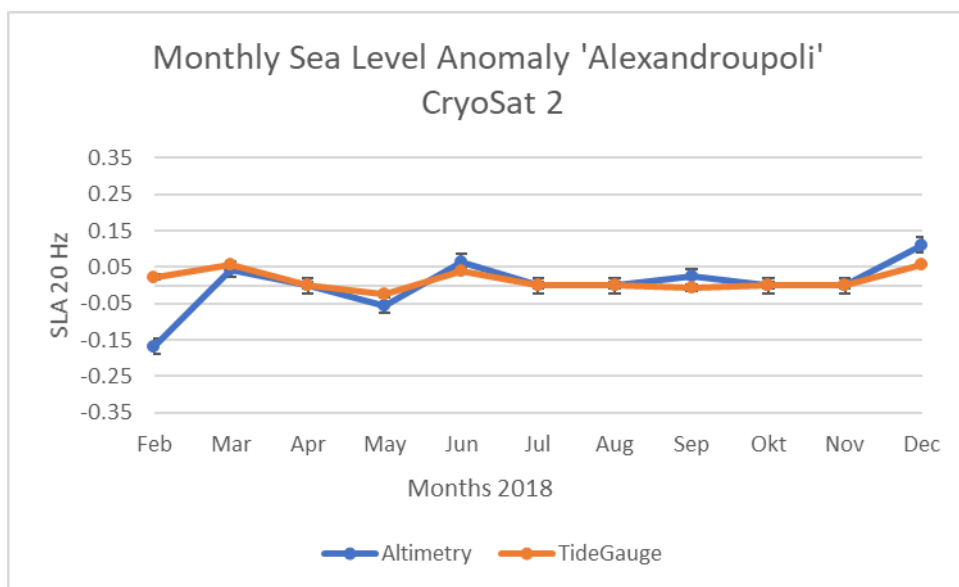
**Εικόνα 5.6** Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα της τροχιάς 335 του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για την Αλεξανδρούπολη.

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.6 παρατηρείται μια μεγαλύτερη απόκλιση των καταγραφών της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου στους μήνες Μάρτιο (0.2 μέτρα) και Απρίλιο (0.1 μέτρα) του 2018. Η άνοδος στην στάθμη της θάλασσας κατά τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο που καταγράφεται και από τα δύο σύνολα δεδομένων, επηρέασε περισσότερο τις τιμές του παλιρροιογράφου οι οποίες αυξήθηκαν περισσότερο σε αυτό το χρονικό διάστημα. Οι τιμές της δορυφορικής Αλτιμετρίας παρουσιάζουν μικρότερο εύρος σφάλματος σε σχέση με τις τιμές του παλιρροιογράφου. Οι μετρήσεις τους υπόλοιπους μήνες του έτους παρουσιάζουν μια παρόμοια συμπεριφορά με μικρές αποκλίσεις στις τιμές.

Διαφοροποιήσεις εξάλλου υπήρχαν και στα διαγράμματα SLA σε σχέση με την απόσταση από την ακτή (cf Εικόνα 5.3 και 5.2) οι οποίες όπως και στα διαγράμματα των μηνιαίων τιμών οφείλονται σε μεγάλο βαθμό από τις διαφορετικές ημερομηνίες των μετρήσεων της τροχιάς 241 και 335. Οι αλλαγές αυτές στις τιμές διαπιστώνονται και στον πίνακα 5.1 που παρατηρείται διαφορετική μέση τιμή SLA για τον παλιρροιογράφο στις δύο τροχιές.

#### 5.1.4 Μηνιαία αποτελέσματα SLA CryoSat 2 και παλιρροιογράφου

Στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.1.2 χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα του δορυφόρου CryoSat 2 για τον προσδιορισμό των SLA και SSH. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι καταγραφές ανά μήνα, όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, για τα δεδομένα όμως του δορυφόρου CryoSat 2 και του παλιρροιογράφου.



**Εικόνα 5.7** Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα του δορυφόρου CryoSat 2 και του παλιρροιογράφου για την Αλεξανδρούπολη.

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.7 παρατηρείται μια μικρή απόκλιση στις τιμές των μετρήσεων της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου κάθε μήνα. Στην περίπτωση του δορυφόρου CryoSat 2 οι μετρήσεις του επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό από τις μεταβολές της στάθμης της θάλασσας που καταγράφονται και από τα δύο σύνολα δεδομένων. Το εύρος σφάλματος των τιμών SLA του CryoSat 2 είναι επίσης μικρότερο σε σχέση με τις τιμές του δορυφόρου Sentinel 3A. Επισημαίνεται ότι οι μετρήσεις του δορυφόρου CryoSat 2 και αντίστοιχα του παλιρροιογράφου έχουν πραγματοποιηθεί σε διαφορετικές ημερομηνίες σε σχέση με τις μετρήσεις του δορυφόρου Sentinel 3A στις τροχιές με αριθμό 335 και 241 (cf Εικόνα 5.6 και 5.5).

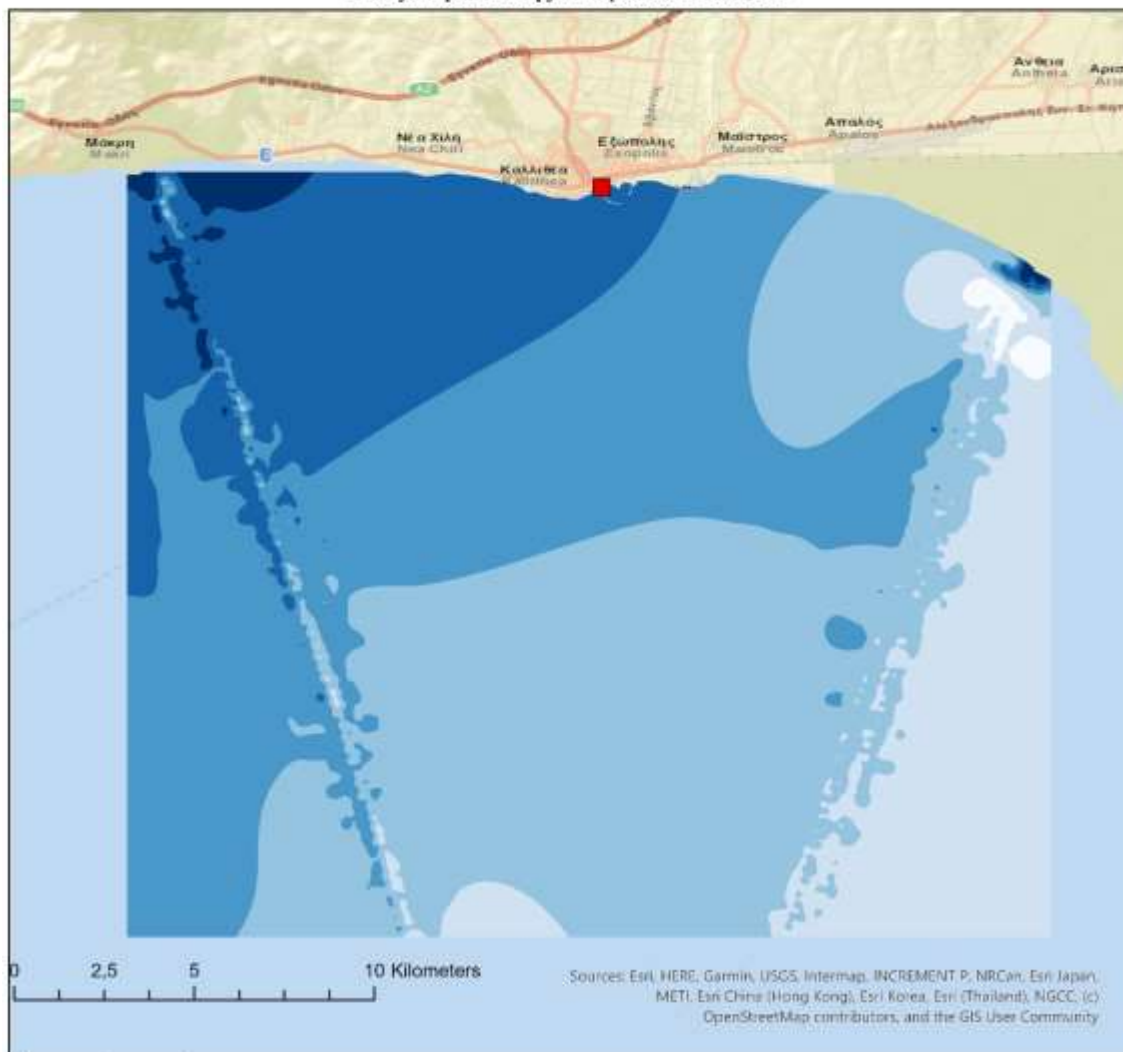
### **5.1.5 Αποτελέσματα ύψους επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) Sentinel 3A και CryoSat 2**

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας δημιουργήθηκαν χάρτες SSH. Χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των μεταβλητών SSH της δορυφορικής Αλτιμετρίας ενώ για τον παλιρροιογράφο ο προσδιορισμός του SSH πραγματοποιήθηκε με την διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.5.3. Οι τιμές SSH απεικονίζονται σε χάρτες οι οποίοι, δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον GIS και τα όρια της επιφάνειας SSH επιλέχθηκαν από το πρόγραμμα σύμφωνα με τις θέσεις των τροχιών του εκάστοτε δορυφόρου διατηρώντας την μέγιστη δυνατή ακρίβεια.

Ο χάρτης 5.1 δείχνει τις διακυμάνσεις του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) από δεδομένα του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου. Στον χάρτη 5.2 και σε μεγαλύτερη έκταση παρατηρείται το SSH από δεδομένα του δορυφόρου CryoSat 2 και του παλιρροιογράφου και τέλος ο χάρτης 5.3 δημιουργήθηκε από τον συνδυασμό των δεδομένων των δυο δορυφορικών αποστολών Αλτιμετρίας Sentinel 3A και CryoSat 2.

Οι διαφορές στις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές κάθε χάρτη από τις δύο διαφορετικές αποστολές δορυφορικής Αλτιμετρίας παρατηρείται ότι είναι περίπου 1 έως 2 εκατοστά στον προσδιορισμό του SSH. Στον χάρτη όπου έγινε ο συνδυασμός των δεδομένων SSH των δύο δορυφόρων παρατηρείται μια καλύτερη κατανομή των τιμών, που είναι αναμενόμενο αφού αυξήθηκε ο αριθμός των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της επιφάνειας SSH. Οι παρακάτω χάρτες αν συνδυαστούν με την πληροφορία των διαγραμμάτων των εικόνων 5.2, 5.3 και 5.4 μπορούν να εκτιμήσουν το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας έως την απόσταση των 3 χιλιομέτρων από την ακτή.

Χάρτης Ύψους Επιφάνειας της Θάλασσας (SSH) από  
 Δεδομένα Sentinel 3A για την περιοχή της  
 Αλεξανδρούπολης Κλίμακα: 1:150,000



Alexandroupoli

■ Παλιρροιογράφος

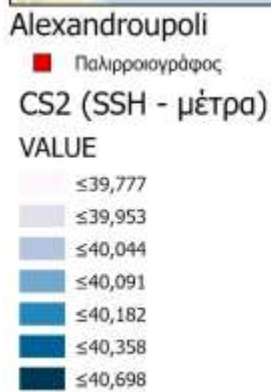
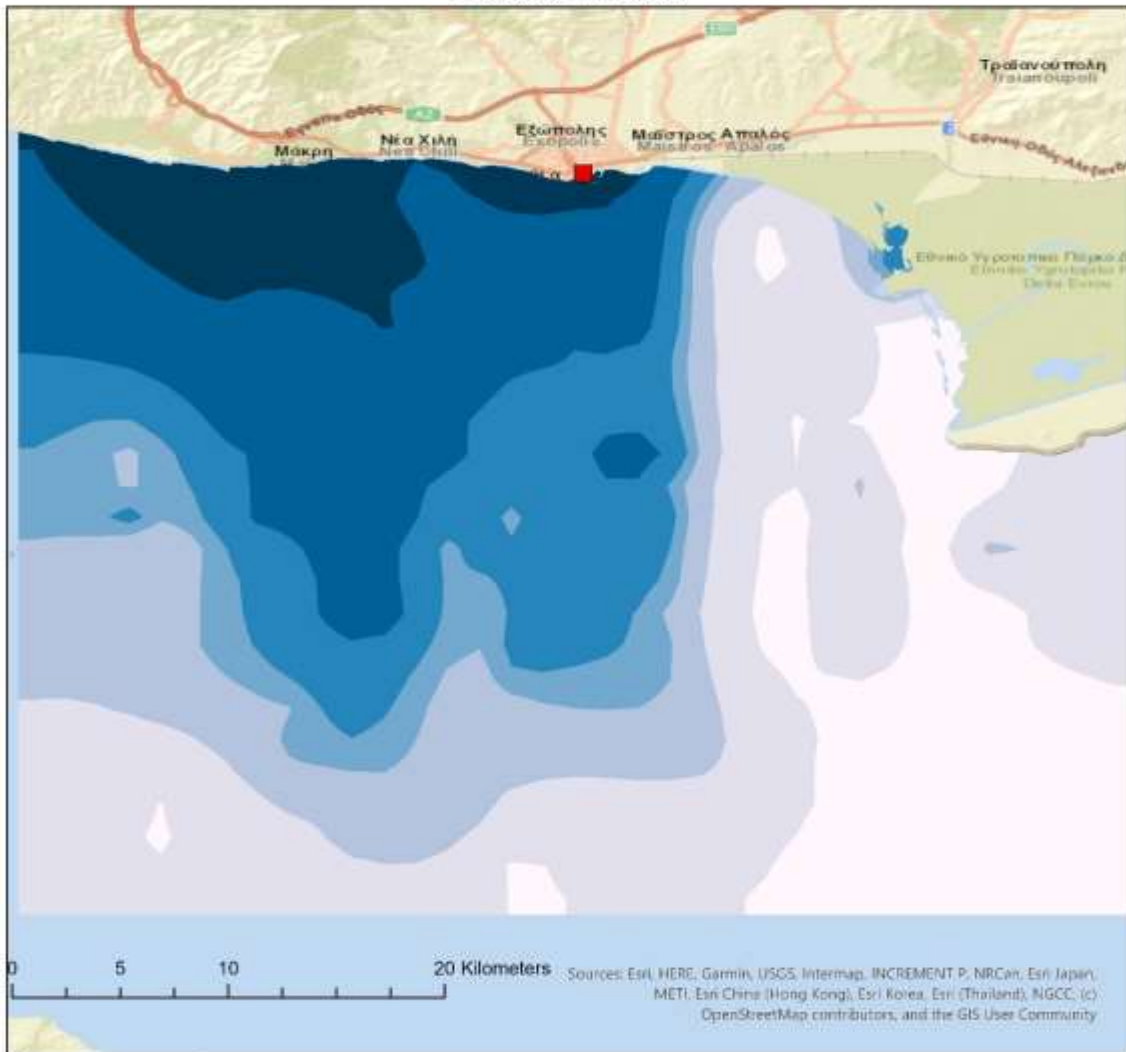
Sentinel 3A (SSH - μέτρα)

Value

- ≤ 39,605
- ≤ 39,943
- ≤ 40,147
- ≤ 40,271
- ≤ 40,475
- ≤ 40,813

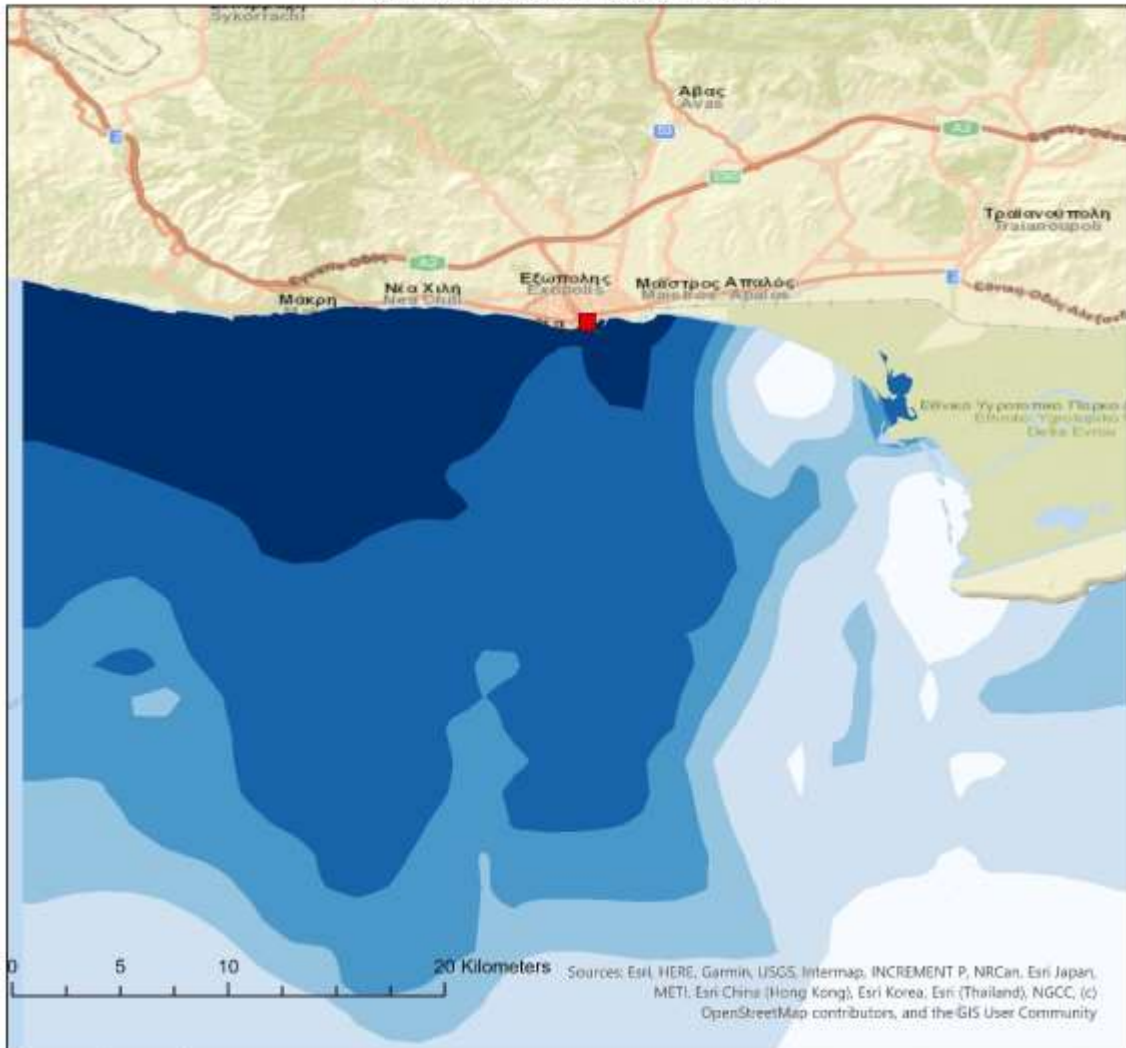
Χάρτης 5.1 SSH Sentinel 3A και παλιρροιογράφου για την Αλεξανδρούπολη

Χάρτης Ύψους Επιφάνειας της Θάλασσας (SSH) από  
 Δεδομένα CryoSat 2 για την περιοχή της Αλεξανδρούπολης  
 Κλίμακα: 1:250,000



Χάρτης 5.2 SSH CryoSat 2 και παλιρροιογράφου για την Αλεξανδρούπολη

Χάρτης Ύψους Επιφάνειας της Θάλασσας (SSH) από  
 Δεδομένα Sentinel 3A και CryoSat 2 για την περιοχή της  
 Αλεξανδρούπολης Κλίμακα: 1:250,000



Alexandroupoli

■ Παλιρροιογράφος

S3 και Cs2 (SSH - μέτρα)

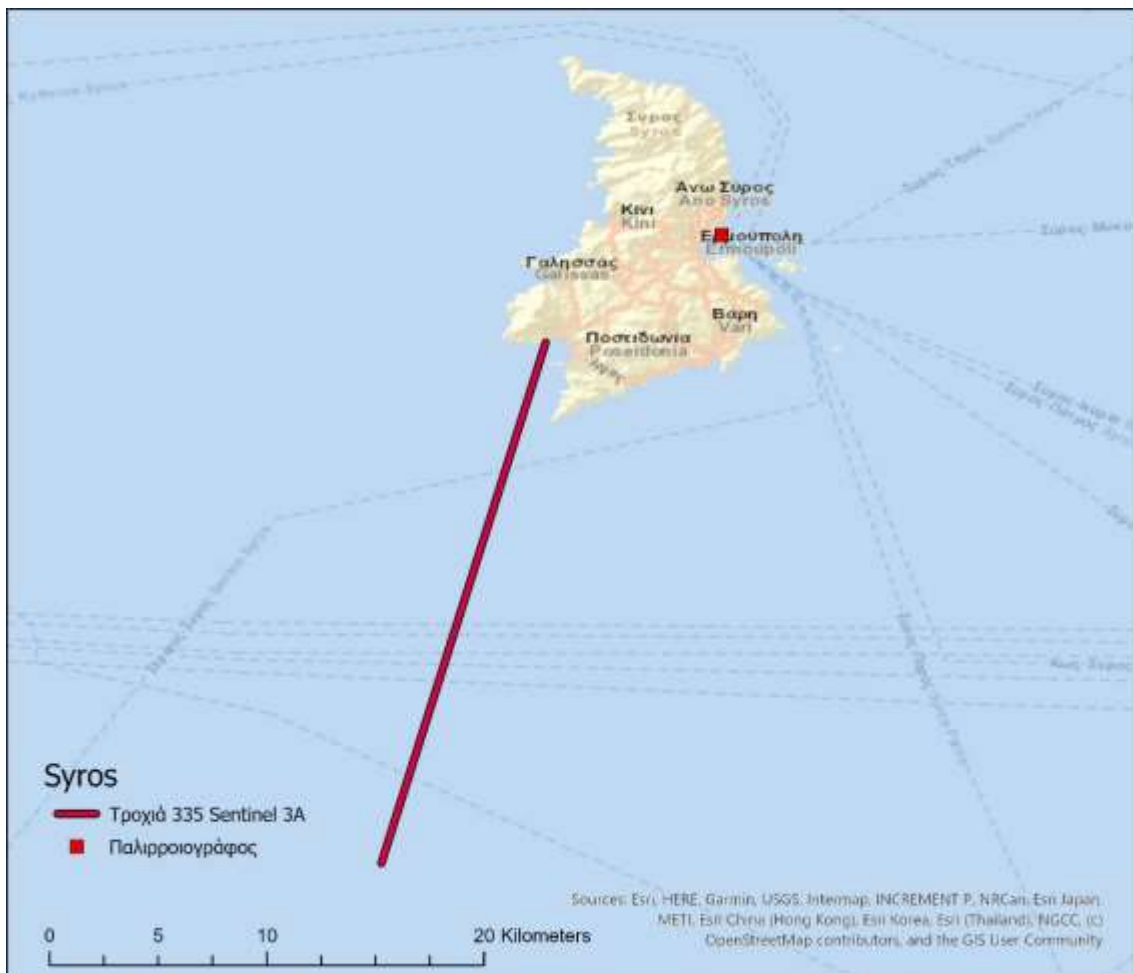
VALUE

- ≤39,72
- ≤39,907
- ≤39,991
- ≤40,076
- ≤40,262
- ≤40,674

Χάρτης 5.3 SSH Sentinel 3A - CryoSat 2 και παλιρροιογράφου για την Αλεξανδρούπολη

## 5.2 Αποτελέσματα για την Σύρο

Η Σύρος είναι ένα νησί που βρίσκεται στο κεντρικό Αιγαίο πέλαγος. Η Ερμούπολη είναι ο μεγαλύτερος οικισμός του νησιού και πρωτεύουσα της Περιφέρειας του Νοτίου Αιγαίου. Στο λιμάνι της Ερμούπολης είναι εγκατεστημένος ο παλιρροιογράφος τα δεδομένα του οποίου χρησιμοποιήθηκαν. Περιμετρικά της Σύρου βρίσκονται και άλλα νησιά των Κυκλάδων επομένως έχει ενδιαφέρον να παρατηρηθούν τα αποτελέσματα της δορυφορικής Αλτιμετρίας σε πυκνά νησιωτικά συμπλέγματα όπως οι Κυκλάδες.



**Εικόνα 5.8** Χάρτης κλίμακας 1: 250.000 με την τροχιά 335 του δορυφόρου Sentinel 3A στην Σύρο.

Στην εικόνα 5.8 απεικονίζεται το τμήμα της τροχιάς του δορυφόρου Sentinel 3A τα δεδομένα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των SLA και SSH για την Σύρο. Στην περιοχή υπάρχουν περάσματα του δορυφόρου με διαφορετική κατεύθυνση,

σε μικρότερη απόσταση από την θέση του παλιρροιογράφου που όμως δεν συναντούν τις ακτές της νήσου. Ο πίνακας 5.3 περιέχει ορισμένα στοιχεία για τις δύο κατηγορίες δεδομένων όπως συσχέτιση, διασπορά των διαφορών των δύο συνόλων δεδομένων, διασπορά ξεχωριστά για κάθε σύνολο δεδομένων και την μέση τιμή τους. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα με την μορφή διαγραμμάτων σε σχέση με την απόσταση από την ακτή, οι μηνιαίες τιμές του παλιρροιογράφου και της δορυφορικής Αλτιμετρίας για την μεταβλητή SLA και ο χάρτης με την κατανομή των τιμών SSH στην περιοχή.

Σύρος	Orbit 335	
	Altimetry	Tide Gauge
Correlation (m)	0.503	
Std of Differences (m)	0.023	
Standart Deviation (m)	0.07	0.09
Mean SLA 20 Hz (m)	0.036	0.048

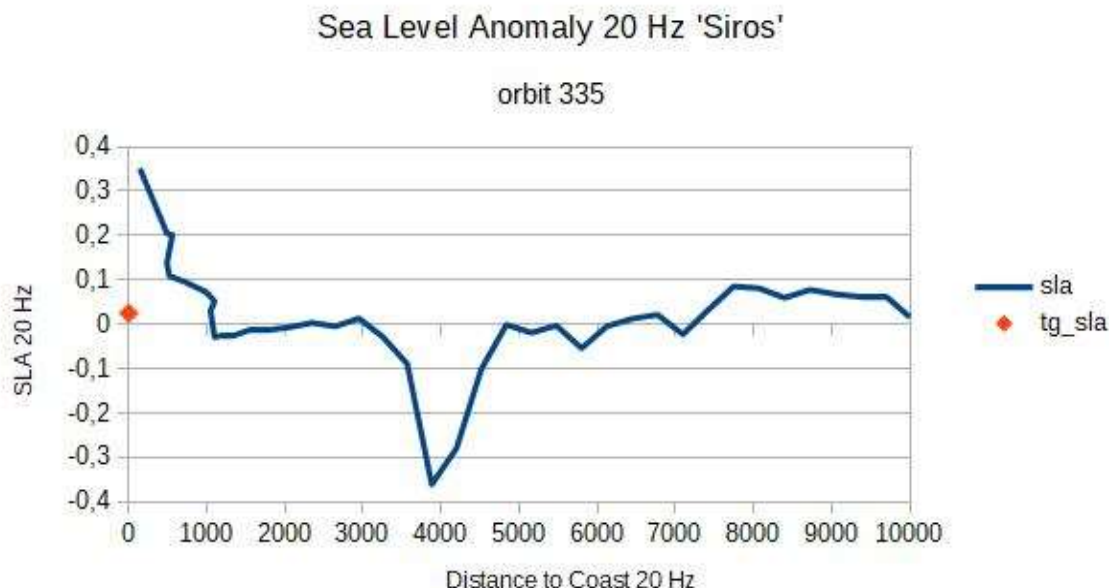
**Πίνακας 5.3** Στατιστικά στοιχεία δεδομένων για τον δορυφόρο Sentinel 3A και τον παλιρροιογράφο για την Σύρο.

### 5.2.1 Αποτελέσματα SLA Sentinel 3A

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.9 παρατηρείται ότι οι μετρήσεις SLA του αλτιμέτρου μετά την επεξεργασία τους και τον επαναπροσδιορισμό των κυματομορφών παρουσιάζουν αποκλίσεις μικρότερες από  $\pm 1$  εκατοστό από την τιμή του παλιρροιογράφου μέχρι την απόσταση των 4 χιλιομέτρων από την ακτή. Στα 4 χιλιόμετρα παρατηρείται μία πτώση στην τιμή του SLA του δορυφόρου. Στην συνέχεια μέχρι την απόσταση του ενός περίπου χιλιομέτρου οι τιμές επανέρχονται και συνεχίζουν να έχουν μια καλή συσχέτιση με τις τιμές SLA του παλιρροιογράφου.

Οι μετρήσεις της δορυφορικής Αλτιμετρίας έχουν ληφθεί στο νότιο παράκτιο τμήμα της νήσου ενώ ο παλιρροιογράφος, όπως γίνεται αντιληπτό από την εικόνα 5.8, είναι τοποθετημένος στο προστατευμένο από τις καιρικές συνθήκες λιμάνι της Ερμούπολης στο ανατολικό παράκτιο τμήμα της νήσου. Παρ' όλη την απόσταση και την διαφορετική θέση λήψης των μετρήσεων παρατηρείται μία καλή συσχέτιση των μετρήσεων SLA για τα δύο σύνολα δεδομένων.



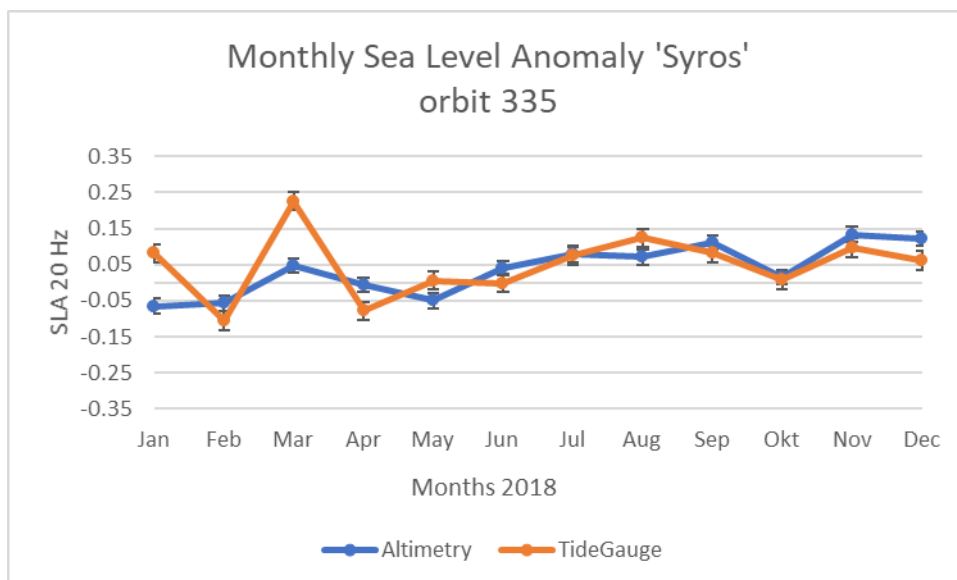


**Εικόνα 5.9** Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 335 του δορυφόρου Sentinel 3A για την Σύρο.

### 5.2.2 Μηνιαία αποτελέσματα SLA Sentinel 3A και παλιρροιογράφου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι μετρήσεις SLA ανά μήνα των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου. Στο διάγραμμα της εικόνας 5.10 παρατηρείται μια ικανοποιητική καταγραφή του μεγέθους της μείωσης ή της αύξησης της μεταβλητής SLA από τα δύο σύνολα δεδομένων. Σε όλη την διάρκεια του έτους 2018 παρατηρείται μια καλή συσχέτιση των μετρήσεων και μόνο τον μήνα Μάρτιο παρουσιάζεται μία μεγαλύτερη αύξηση της τιμής SLA του παλιρροιογράφου σε σχέση με αυτή της δορυφορικής Αλτιμετρίας.

Με εξαίρεση τον Μάρτιο του 2018 δεν παρατηρείται κάποιο από τα δύο σύνολα δεδομένων να επηρεάζεται με διαφορετικό τρόπο και σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό από τις μεταβολές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας. Το παραπάνω γίνεται αντιληπτό και από τις μέσες τιμές της μεταβλητής SLA του πίνακα 5.3 για τα δύο σύνολα δεδομένων ( M.O SLA = 0.036 m για την δορυφορική Αλτιμετρία και 0.048 m για τον παλιρροιογράφο).



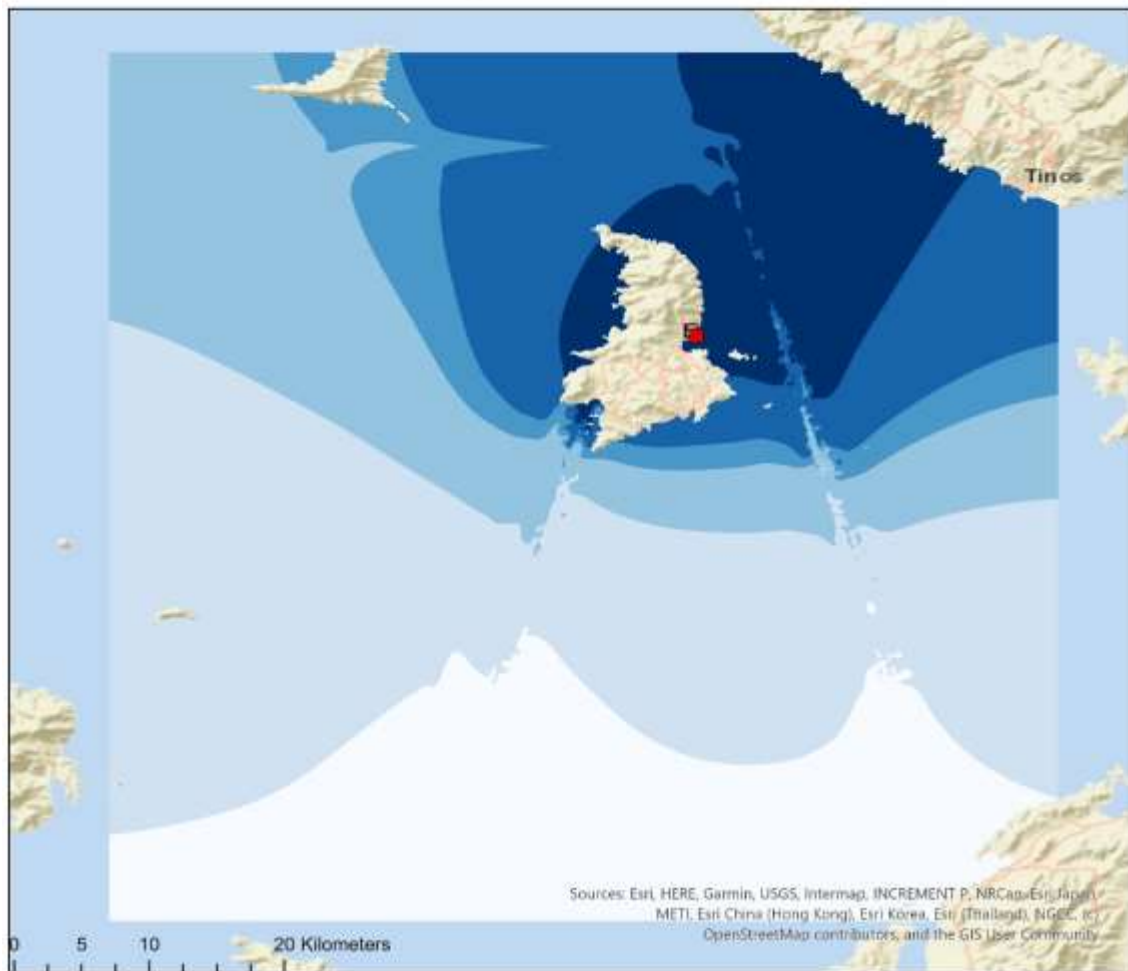
**Εικόνα 5.10** Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα της τροχιάς 335 του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για την Σύρο.

### 5.2.3 Αποτελέσματα ύψους επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) Sentinel 3A

Για την κατανομή των υψών της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) στην περιοχή της Σύρου χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον και τα δεδομένα τροχιάς με αριθμό 127 του δορυφόρου Sentinel 3A. Η τροχιά αυτή διέρχεται σε μικρή απόσταση από την θέση του παλιρροιογράφου αλλά δεν συναντά σε κανένα σημείο της ακτή της νήσου και για τον λόγο αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε στον προσδιορισμό της μεταβλητής SLA σε σχέση με την απόσταση από την ακτή και στις τιμές SLA ανά μήνα.

Με την χρήση των δεδομένων της επιπλέον τροχιάς και της τροχιάς με αριθμό 335 της εικόνας 5.8 βελτιώθηκε η κατανομή των SSH αφού χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα σημεία με τιμές SSH για τον προσδιορισμό της επιφάνειας. Ο χάρτης 5.4 δείχνει την κατανομή των υψών της επιφάνειας της θάλασσας που προσδιορίστηκαν από δεδομένα του παλιρροιογράφου και του δορυφόρου Sentinel 3A περίξ της νήσου Σύρου. Στο χάρτη οι υψηλότερες τιμές SSH παρατηρούνται μεταξύ της νήσου Σύρου και της Τήνου.

**Χάρτης Ύψους Επιφάνειας της Θάλασσας (SSH) από  
Δεδομένα Sentinel 3A για την περιοχή της Σύρου  
Κλίμακα 1: 400,000**



**Χάρτης 5.4** SSH Sentinel 3A και παλιρροιογράφου για την Σύρο.

### 5.3 Αποτελέσματα για το Ηράκλειο Κρήτης

Το Ηράκλειο είναι η μεγαλύτερη πόλη της Κρήτης και έδρα της Περιφέρειας Κρήτης. Στο λιμάνι του Ηρακλείου είναι τοποθετημένος ο παλιρροιογράφος τα δεδομένα του οποίου χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) και των ανωμαλιών της επιφάνειας της θάλασσας (SLA). Στο λιμάνι του Ηρακλείου είναι τοποθετημένοι δύο παλιρροιογράφοι. Ο ένας διαθέτει δεδομένα από την περίοδο 1951 – 2011 και ο δεύτερος από 2009 – 2018 σύμφωνα με την διαδικτυακή βάση δεδομένων PSMSL (<https://www.psmsl.org/data/obtaining/map.html>).



Εικόνα 5.11 Χάρτης κλίμακας 1:300,000 με τις τροχιές του δορυφόρου Sentinel 3A στο Ηράκλειο.

Σε συνδυασμό με τα δεδομένα του παλιρροιογράφου χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα δορυφορικής Αλτιμετρίας για τον προσδιορισμό των SSH και SLA. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από δύο περάσματα του δορυφόρου Sentinel 3A. Στον

χάρτη της εικόνας 5.11 φαίνονται οι δύο τροχιές του δορυφόρου, οι μετρήσεις των οποίων επεξεργάστηκαν, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους ξεχωριστά για κάθε τροχιά. Στον πίνακα 5.4 περιέχονται ορισμένα στατιστικά στοιχεία των επεξεργασμένων δεδομένων για τις τροχιές του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου στην περιοχή του Ηρακλείου.

Ηράκλειο	Orbit 127		Orbit 007	
	Altimetry	Tide Gauge	Altimetry	Tide Gauge
<b>Correlation (m)</b>	0.543		0.392	
<b>Std of Differences (m)</b>	0.123		0.065	
<b>Standart Deviation (m)</b>	0.083	0.057	0.059	0.063
<b>Mean SLA 20 Hz (m)</b>	-0.071	0.012	-0.065	0.025

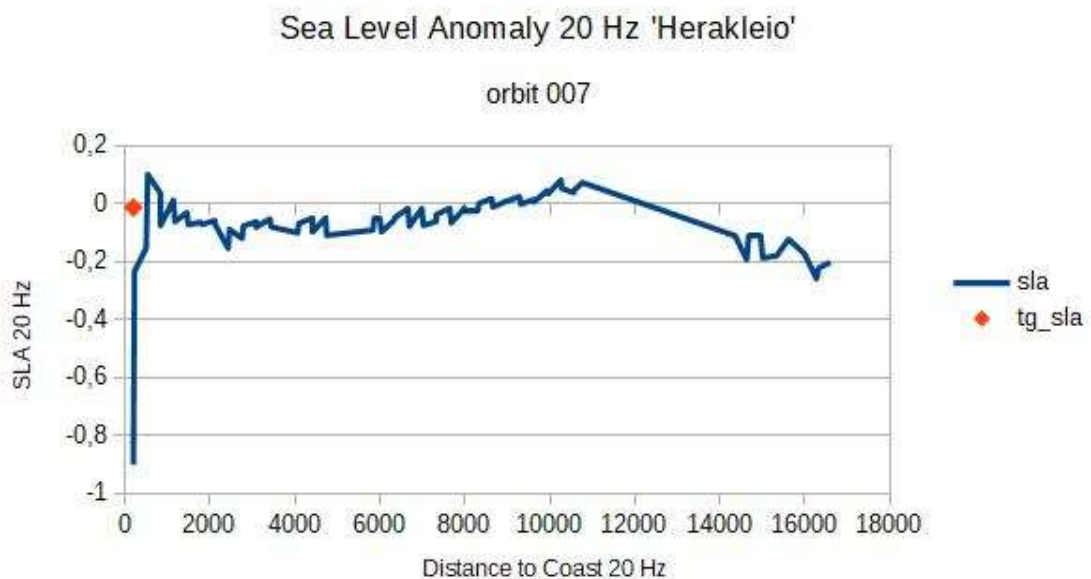
**Πίνακας 5.4** Στατιστικά στοιχεία δεδομένων ανά τροχιά για τον δορυφόρο Sentinel 3A και τον παλιρροιογράφο για το Ηράκλειο.

Στην περιοχή του Ηρακλείου όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα δύο διαφορετικών τροχιών του δορυφόρου Sentinel 3A. Οι δυο αυτές τροχιές παρουσιάζουν ενδιαφέρον για διαφορετικούς λόγους η κάθε μία. Στον χάρτη της εικόνας 5.11 παρατηρείται η ύπαρξη της νησίδας Δία βόρεια του λιμανιού του Ηρακλείου. Η τροχιά με αριθμό 007 του δορυφόρου διασχίζει την νησίδα αυτή. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί το κατά πόσο μπόρεσαν οι μετρήσεις του δορυφόρου να επανέλθουν σε πραγματικές τιμές και να διορθωθούν από την επίδραση της στεριάς σε αυτές.

Αντίστοιχα η τροχιά με αριθμό 127 παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί απέχει από την θέση του παλιρροιογράφου περίπου 40 χιλιόμετρα. Η απόσταση δεν είναι μεγάλη για την σύγκριση των δεδομένων με τον παλιρροιογράφο, συνδυάζοντας όμως τις μετρήσεις της τροχιάς 127 με την τροχιά 007 που βρίσκεται πολύ κοντά στην θέση του παλιρροιογράφου μπορεί να γίνει μια εκτίμηση για την επίδραση της απόστασης. Υπογραμμίζεται ότι και στην περίπτωση του Ηρακλείου, όπως στην Αλεξανδρούπολη, οι παρατηρήσεις των δύο τροχιών προέρχονται από δεδομένα διαφορετικής ημερομηνίας και ώρας επομένως μεγάλο ρόλο στα αποτελέσματα έχει η επίδραση της διαφορετικής κατάστασης της επιφάνειας της θάλασσας. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τις διαφορετικές μέσες τιμές της μεταβλητής SLA του παλιρροιογράφου στον πίνακα 5.4 για κάθε τροχιά.

### 5.3.1 Αποτελέσματα SLA Sentinel 3A

Στα διαγράμματα των εικόνων 5.12 και 5.13 της παραγράφου παρουσιάζονται οι τιμές της μεταβλητής SLA σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για τις δύο τροχιές στην περιοχή του Ηρακλείου. Η εικόνα 5.12 περιέχει το διάγραμμα SLA για την τροχιά του δορυφόρου Sentinel 3A με αριθμό 007 τα δεδομένα της οποίας επηρεάζονται από την νησίδα Δία. Η εικόνα 5.13 περιέχει το αντίστοιχο διάγραμμα για την τροχιά με αριθμό 127.



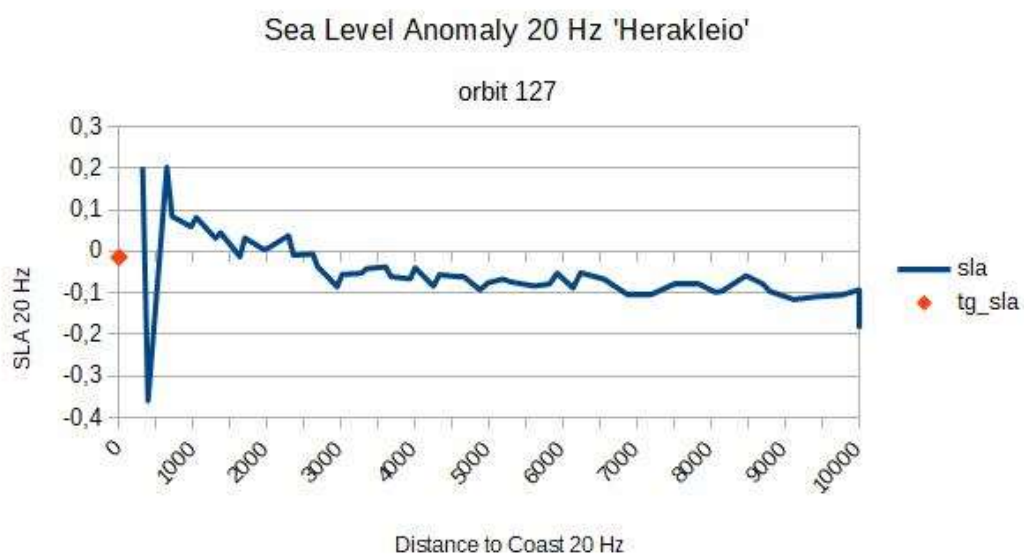
**Εικόνα 5.12** Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 007 του δορυφόρου Sentinel 3A για το Ηράκλειο.

Το διάγραμμα της εικόνας 5.12 παρουσιάζει ορισμένες διαφοροποιήσεις από τα προηγούμενα διαγράμματα. Αρχικά παρατηρείται ότι η καταγραφή των τιμών της μεταβλητής SLA ξεκινά από την απόσταση των 17 περίπου χιλιομέτρων από τις ακτές του Ηρακλείου. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση της νησίδας Δία στις μετρήσεις του δορυφόρου. Όπως γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα η νησίδα επηρέασε τις τιμές μεταξύ του 14<sup>ου</sup> και 11<sup>ου</sup> περίπου χιλιομέτρου από την ακτή. Οι τιμές αυτές δεν συμπεριλήφθηκαν στο σύνολο των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Παρατηρείται μία άνοδος των τιμών στην επαναφορά του δορυφόρου πάνω από την

θαλάσσια επιφάνεια μετά το πέρασμά του πάνω από την νησίδα. Οι τιμές επανέρχονται στα προηγούμενα επίπεδα (προ νησίδας) μετά από 4 περίπου χιλιόμετρα και σε απόσταση 6 περίπου χιλιόμετρα από τις ακτές του Ηρακλείου.

Η ύπαρξη στεριάς σε απόσταση 12 περίπου χιλιομέτρων από την ακτή προκάλεσε μια άνοδο των τιμών SLA και ο δορυφόρος χρειάστηκε να διανύσει μία απόσταση περίπου τεσσάρων χιλιομέτρων (μερικά δευτερόλεπτα πτήσης του δορυφόρου) ώστε να επανέλθουν οι τιμές στα προηγούμενα επίπεδα. Επομένως όταν επιλέγεται ένα πέρασμα δορυφόρου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η κατεύθυνσή του δηλαδή αν ο δορυφόρος κινείται από θάλασσα σε στεριά ή από στεριά σε θάλασσα. Στην περίπτωση που ο δορυφόρος κινείται από στεριά σε θάλασσα, η επίδραση της στεριάς στον παλμό για να εξαλειφθεί, χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα κίνησης του δορυφόρου πάνω από θαλάσσια επιφάνεια.

Οι τιμές SLA της δορυφορικής Αλτιμετρίας για την τροχιά 007 του δορυφόρου έχουν την χαμηλότερη τιμή συσχέτισης με τις τιμές SLA του παλιρροιογράφου από όλες τις περιοχές που εξετάστηκαν. Φαίνεται ότι η ύπαρξη της νησίδας είχε καθοριστικό αποτέλεσμα στο σύνολο των μετρήσεων του δορυφόρου για τα δεδομένα του τμήματος της τροχιάς τα οποία χρησιμοποιήθηκαν.



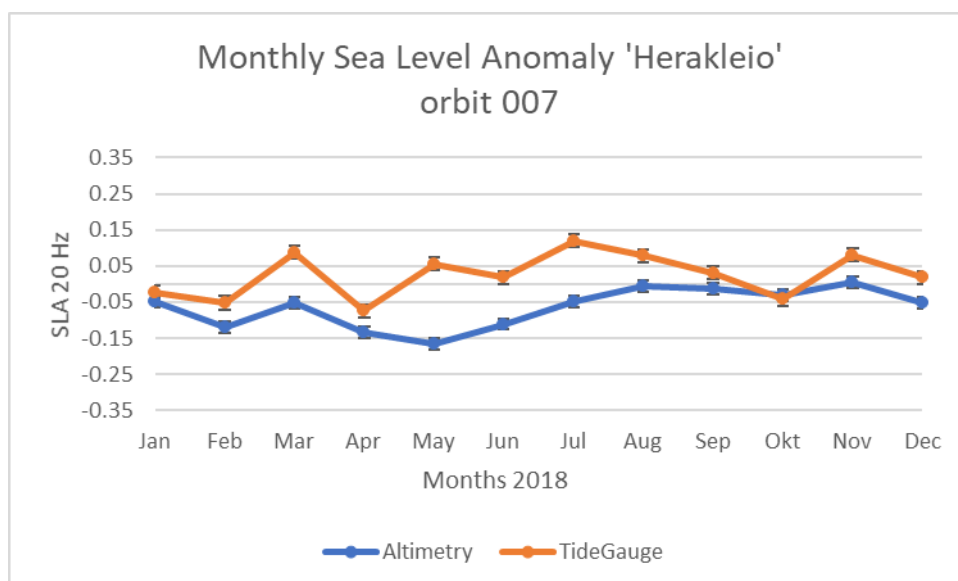
**Εικόνα 5.13** Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή για την τροχιά 127 του δορυφόρου Sentinel 3A για το Ηράκλειο.

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.13 παρατηρείται μία καλή συσχέτιση των μετρήσεων της δορυφορικής Αλτιμετρίας με τις μετρήσεις του παλιρροιογράφου σε σχέση με την

απόσταση από την ακτή. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται και από τα στοιχεία του πίνακα 5.4. Παρατηρείται ότι παρόλο που η τροχιά με αριθμό 127 απέχει μεγαλύτερη απόσταση από τον παλιρροιογράφο (cf *Εικόνα 5.11*) οι μετρήσεις δείχνουν να έχουν καλύτερη συσχέτιση με την τροχιά με αριθμό 007 (cf *Πίνακας 5.4*) οι μετρήσεις της οποίας επηρεάζονται όμως από την θέση της νησίδας Δία. Μέχρι την απόσταση των δύο περίπου χιλιομέτρων οι τιμές SLA της τροχιάς 127 του δορυφόρου Sentinel 3A δείχνουν να συσχετίζονται με τις τιμές SLA του παλιρροιογράφου.

### 5.3.2 Μηνιαία αποτελέσματα SLA Sentinel 3A και παλιρροιογράφου

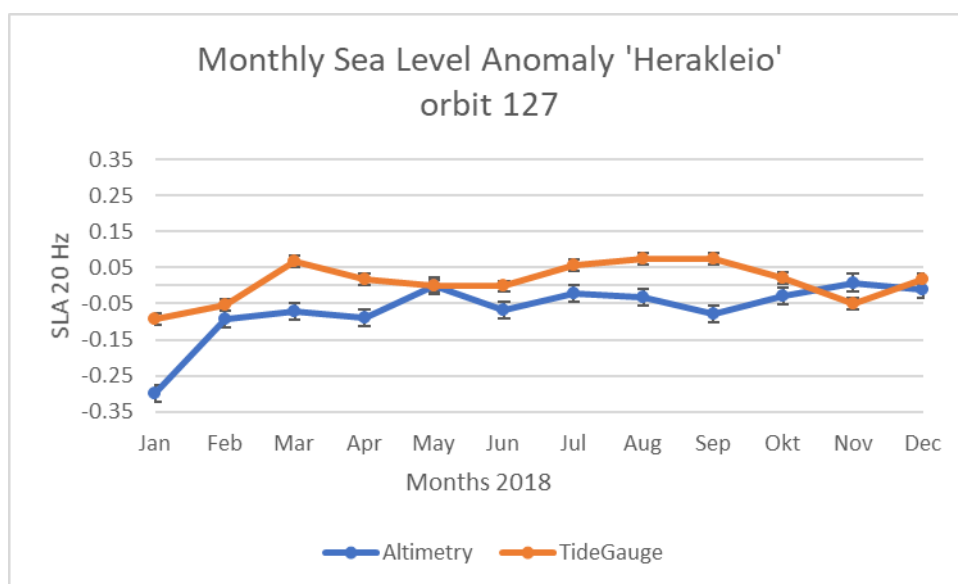
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι μετρήσεις SLA του παλιρροιογράφου και της δορυφορικής Αλτιμετρίας ανά μήνα για τις δύο τροχιές της περιοχής του Ηρακλείου που εξετάστηκαν. Στο διάγραμμα της εικόνας 5.14 φαίνονται οι τιμές SLA για την τροχιά με αριθμό 007 του δορυφόρου και οι αντίστοιχες μετρήσεις του παλιρροιογράφου και στο διάγραμμα της εικόνας 5.15 περιέχονται οι τιμές SLA για την τροχιά 127 του δορυφόρου οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές ημερομηνίες από τις μετρήσεις του διαγράμματος της εικόνας 5.14.



**Εικόνα 5.14** Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα της τροχιάς 007 του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για το Ηράκλειο.



Στο διάγραμμα της εικόνας 5.14 οι τιμές SLA της δορυφορικής Αλτιμετρίας της τροχιάς 007 και του παλιρροιογράφου έχουν μία απόκλιση περίπου ενός εκατοστού. Είναι η μεγαλύτερη απόκλιση σε μηνιαίες μετρήσεις από κάθε άλλη περιοχή μελέτης. Παρ' όλα αυτά φαίνεται ότι τα δύο σύνολα μετρήσεων καταγράφουν με τον ίδιο τρόπο τις μεταβολές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας και δεν φαίνεται κανένα από τα δύο να επηρεάζεται δυσανάλογα από την αύξηση ή την μείωση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας. Επίσης παρατηρείται ότι το μέγεθος του σφάλματος στις τιμές SLA και των δύο συνόλων δεδομένων είναι μικρότερο σε σχέση με άλλες περιοχές.

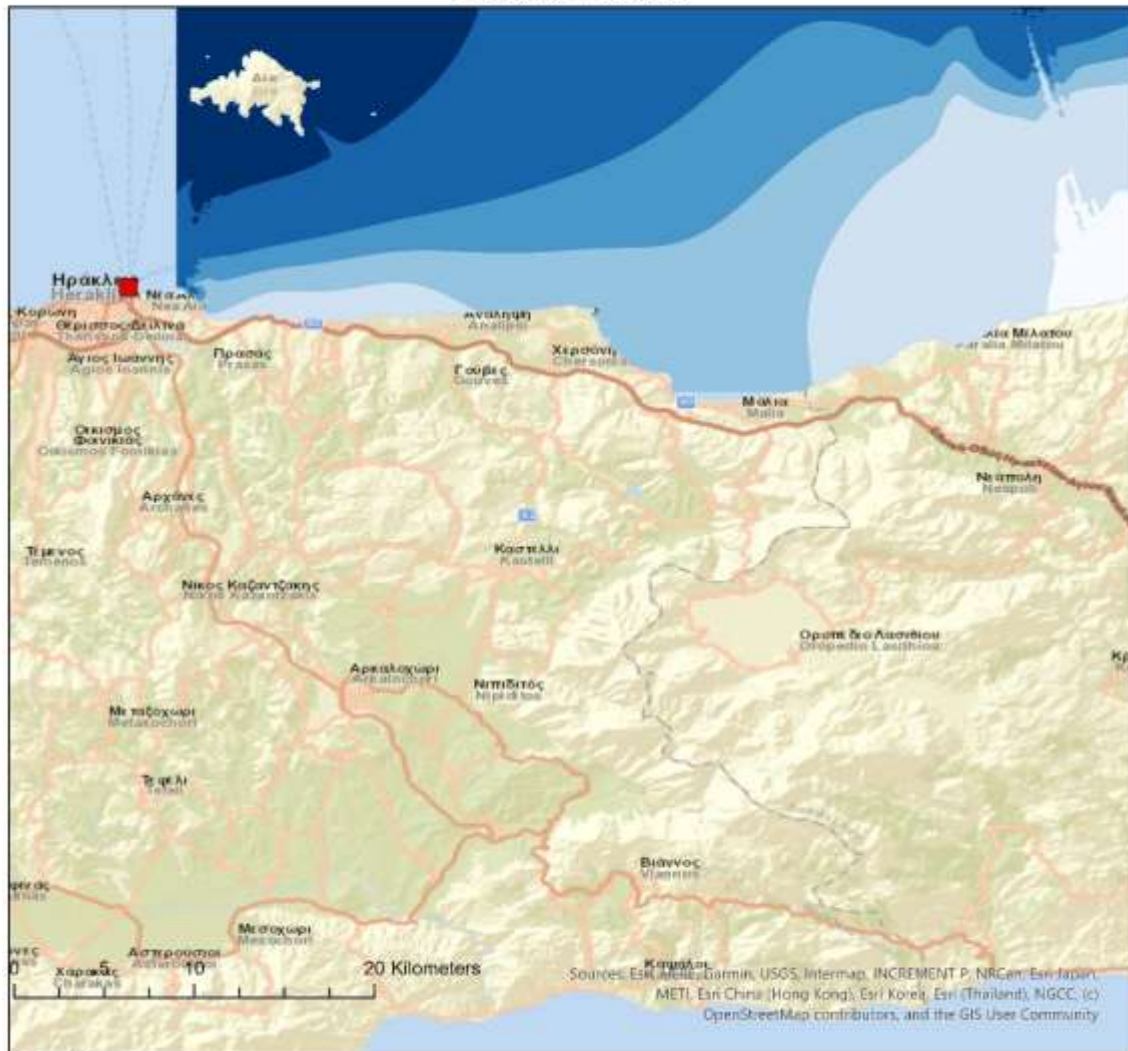


**Εικόνα 5.15** Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) από τα δεδομένα της τροχιάς 127 του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για το Ηράκλειο.

Στις μετρήσεις SLA ανά μήνα της τροχιάς 127 και του παλιρροιογράφου παρατηρείται μία μικρότερη απόκλιση. Οι μεταβολές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας φαίνεται να καταγράφονται ικανοποιητικά. Το σύνολο των μετρήσεων της δορυφορικής Αλτιμετρίας φαίνεται να επηρεάζεται με διαφορετικό τρόπο από αυτό του παλιρροιογράφου μόνο τον Μάιο και τον Νοέμβριο του 2018. Την άνοιξη του 2018 οι τιμές SLA του παλιρροιογράφου παρουσιάζουν μία πτωτική τάση ενώ οι τιμές SLA των αντίστοιχων ημερών της δορυφορικής Αλτιμετρίας παρουσιάζουν μία άνοδο. Παρουσιάζεται μία αντίθετη συμπεριφορά των δύο συνόλων δεδομένων με κοινή τιμή το μήνα Μάιο. Το ίδιο φαινόμενο της αντίστροφης καταγραφής των μεταβολών του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας παρουσιάζεται και το φθινόπωρο του ίδιου έτους.

### 5.3.3 Αποτελέσματα ύψους επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) Sentinel 3A

Χάρτης Ύψους Επιφάνειας της Θάλασσας (SSH) από Δεδομένα Sentinel 3A για την περιοχή του Ηρακλείου  
Κλίμακα: 1:300,000



Herakleio

■ Παλιρροιογράφος

Sentinel 3A (SSH - μέτρα)

VALUE

- ≤ 23,7
- ≤ 24,28
- ≤ 24,402
- ≤ 24,524
- ≤ 24,869
- ≤ 25,848

Χάρτης 5.5 SSH Sentinel 3A και παλιρροιογράφου για το Ηράκλειο.

Για την δημιουργία του χάρτη με τις τιμές SSH της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου για την περιοχή του Ηρακλείου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του δορυφόρου για την τροχιά με αριθμό 007 και 127 καθώς και οι τιμές SSH που προήλθαν από τις μετρήσεις του παλιρροιογράφου. Στον χάρτη φαίνεται η άνοδος στις τιμές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας που προκαλεί η νησίδα Δία αφού οι μεγαλύτερες τιμές του SSH παρατηρούνται σε αυτή την περιοχή. Ο χάρτης σε συνδυασμό με τα διαγράμματα SLA σε σχέση με την απόσταση από την ακτή, μπορεί να παρουσιάσει μία καλή εκτίμηση για το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας τουλάχιστον σε απόσταση δύο χιλιομέτρων από τις ακτές της Κρήτης.

#### 5.4 Αποτελέσματα για το Κατάκολο

Το Κατάκολο είναι ένας παραλιακός οικισμός της Περιφερειακής Ενότητας Ηλείας και λιμάνι του Δήμου Πύργου. Στο λιμάνι του Κατάκολου είναι εγκατεστημένος ο παλιρροιογράφος τα δεδομένα του οποίου χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) και των ανωμαλιών της επιφάνειας της θάλασσας (SLA) στην περιοχή. Στον χάρτη της εικόνας 5.16 απεικονίζεται η τροχιά του δορυφόρου Sentinel 3A και η θέση του παλιρροιογράφου στο λιμάνι του Κατάκολου.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν αλτιμετρικά δεδομένα της τροχιάς με αριθμό 107 του δορυφόρου Sentinel 3A. Η θέση του παλιρροιογράφου απέχει περίπου 20 χιλιόμετρα από το πέρασμα του δορυφόρου. Ο πίνακας 5.5 περιέχει ορισμένα στατιστικά στοιχεία για τα δεδομένα όμοια με τις υπόλοιπες περιοχές μελέτης που αναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο.

Κατάκολο	Orbit 107	
	Altimetry	Tide Gauge
Correlation (m)	0.554	
Std of Differences (m)	0.051	
Standart Deviation (m)	0.052	0.056
Mean SLA 20 Hz (m)	-0.011	-0.001

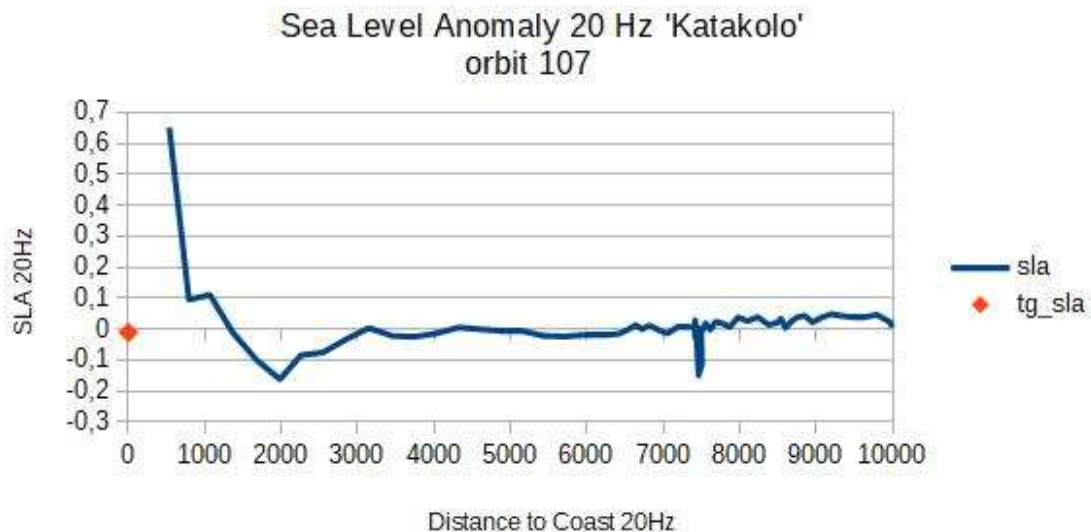
**Πίνακας 5.5** Στατιστικά στοιχεία δεδομένων για τον δορυφόρο Sentinel 3A και τον παλιρροιογράφο για το Κατάκολο.



**Εικόνα 5.16** Χάρτης κλίμακας 1: 300.000 με την τροχιά 107 του δορυφόρου Sentinel 3A στο Κατάκολο.

#### 5.4.1 Αποτελέσματα SLA Sentinel 3A

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.17 παρουσιάζονται οι τιμές της μεταβλητής SLA της δορυφορικής Αλτιμετρίας σε σχέση με την απόσταση από την ακτή και την τιμή SLA από τα δεδομένα του παλιρροιογράφου. Οι τιμές SLA του δορυφόρου παρουσιάζουν μία καλή συσχέτιση με τις μετρήσεις του παλιρροιογράφου. Μέχρι την απόσταση των τριών χιλιομέτρων από την ακτή οι διαφορές στις τιμές του δορυφόρου και του παλιρροιογράφου είναι της τάξης του χιλιοστού. Μετά την απόσταση των τριών χιλιομέτρων οι διακυμάνσεις της τιμής SLA του δορυφόρου δεν επιτρέπουν την ορθή εκτίμηση των ανωμαλιών της στάθμης της θάλασσας και ως εκ τούτου ούτε την ορθή εκτίμηση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας στην ζώνη από την ακτή έως και τρία χιλιόμετρα μακριά.



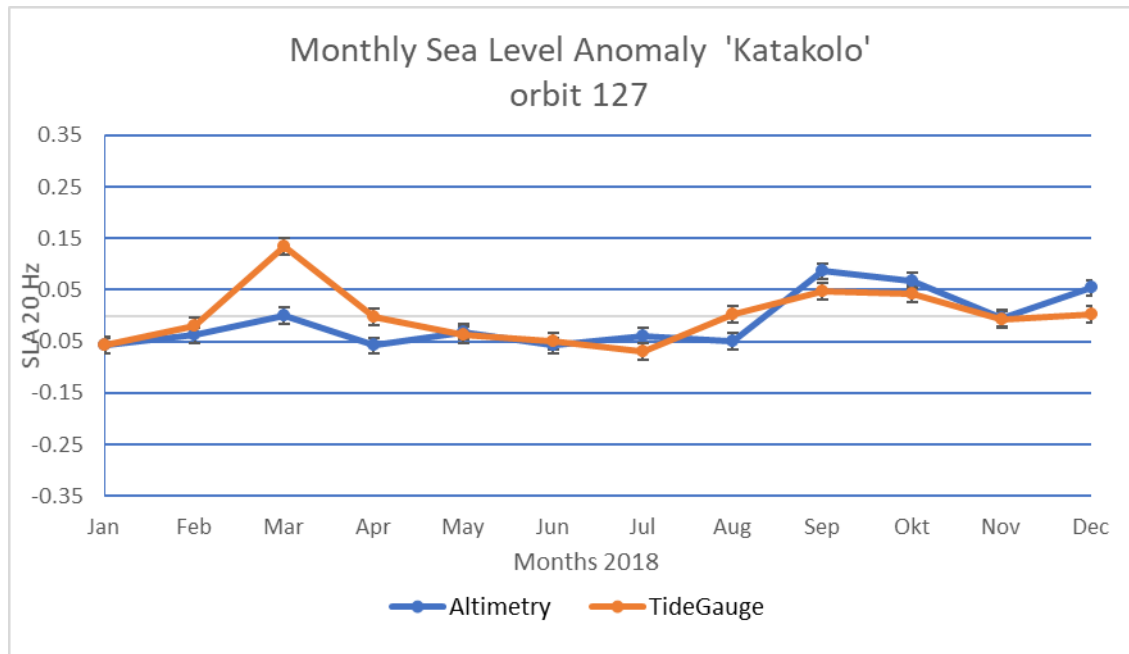
**Εικόνα 5.17** Διάγραμμα SLA (σε μέτρα) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή από τα δεδομένα του δορυφόρου Sentinel 3A για το Κατάκολο.

Σε απόσταση μεταξύ 7 και 8 χιλιομέτρων παρατηρείται μία απότομη πτώση της τιμής SLA του δορυφόρου. Η αιτία της πτώσης δεν μπορεί να εξακριβωθεί με την χρήση αλτιμετρικών δεδομένων ενός μόνο έτους. Για την εξάλειψη της πιθανότητας η πτώση αυτή να οφείλεται σε τυχαίο σφάλμα ή την δράση κάποιου παράγοντα που επέδρασε στιγμιαία, αναγκαία είναι η χρησιμοποίηση δεδομένων περισσότερων ετών για να διαπιστωθεί η ύπαρξη ή όχι της πτώσης αυτής στην τιμή. Η πτώση αυτή δεν θεωρήθηκε ότι επηρεάζει το σύνολο των τιμών SLA της δορυφορικής Αλτιμετρίας σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην ληφθούν υπόψη οι τιμές SLA σε μικρότερες αποστάσεις από την ακτή.

#### **5.4.2 Μηνιαία αποτελέσματα SLA Sentinel 3A και παλιρροιογράφου**

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.18 απεικονίζονται οι τιμές SLA του παλιρροιογράφου και αυτές της δορυφορικής Αλτιμετρίας για την περιοχή του Κατάκολου. Από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι οι μεταβολές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας καταγράφονται ικανοποιητικά από τα δύο σύνολα δεδομένων. Οι μεταβολές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο τις τιμές της μεταβλητής SLA του παλιρροιογράφου και του δορυφόρου εκτός από τον μήνα Μάρτιο που η τιμή του

παλιρροιογράφου παρουσιάζει μεγαλύτερη αύξηση από την τιμή SLA της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Όπως θα διαπιστωθεί στην συνέχεια, ο Μάρτιος ήταν ο μήνας που καταγράφηκαν οι υψηλότερες τιμές SLA για το έτος 2018 συνολικά σε κάθε περιοχή μελέτης.

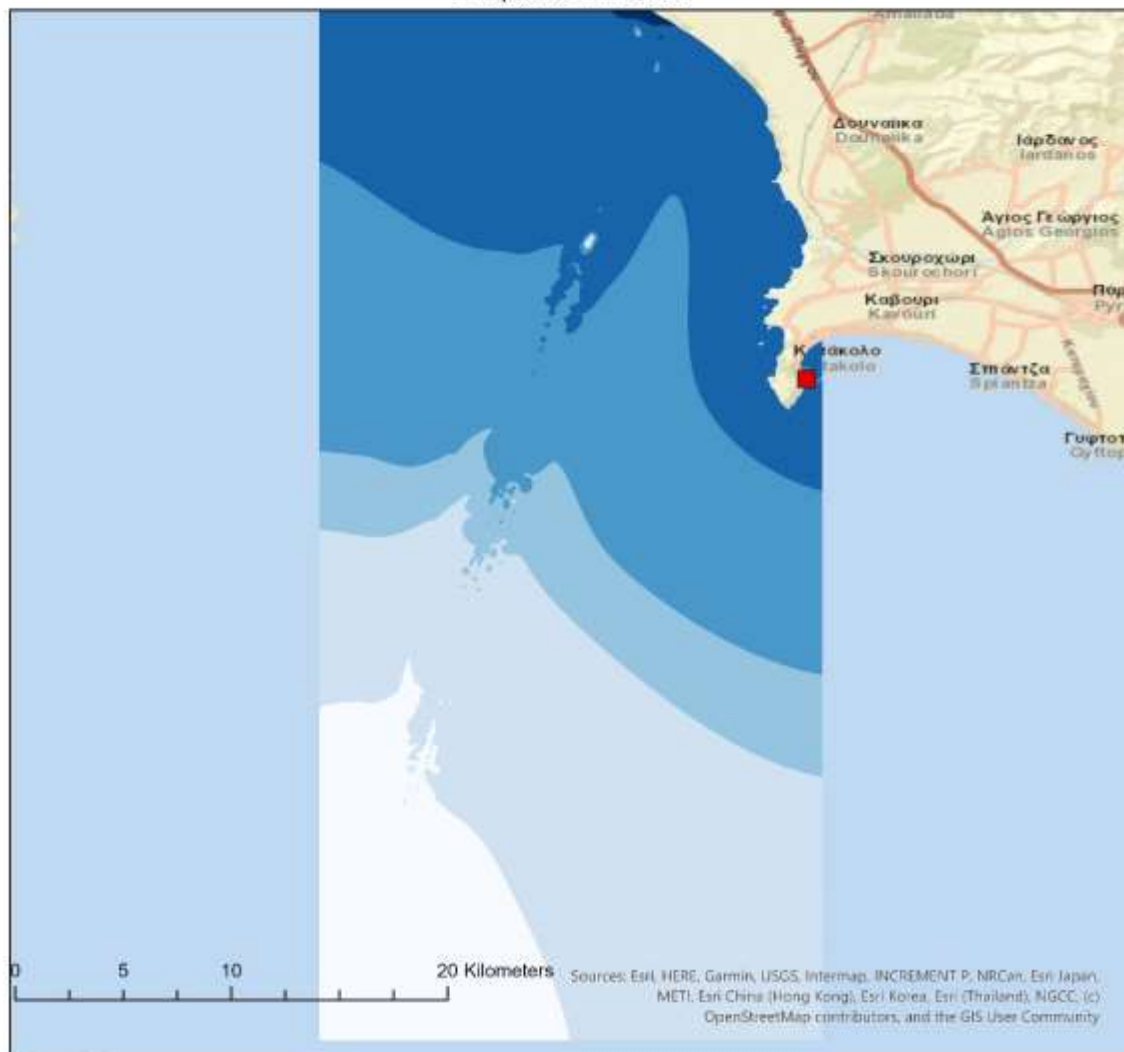


**Εικόνα 5.18** Διάγραμμα μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) του δορυφόρου Sentinel 3A και του παλιρροιογράφου για το Κατάκολο.

### 5.4.3 Αποτελέσματα ύψους επιφάνειας της θάλασσας (Sea Surface Height ή SSH) Sentinel 3A

Στον χάρτη 5.6 της επόμενης σελίδας απεικονίζεται η επιφάνεια με την κατανομή των τιμών των υψών της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) στην περιοχή του Κατάκολου. Ο χάρτης με τις τιμές SSH σε συνδυασμό με την πληροφορία από το διάγραμμα της εικόνας 5.17 που απεικονίζει τις τιμές SLA του δορυφόρου σε σχέση με την απόσταση από την ακτή, προσδιορίζει το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας ικανοποιητικά μέχρι την απόσταση των τριών τουλάχιστον χιλιομέτρων από την ακτή.

**Χάρτης Ύψους Επιφάνειας της Θάλασσας (SSH) από  
Δεδομένα Sentinel 3A για την περιοχή του Κατάκολου  
Κλίμακα: 1:250,000**



**Κατάκολο**

■ Παλιρροιογράφος

**Sentinel 3A (SSH - μέτρα)**

**VALUE**

- ≤22,618
- ≤22,933
- ≤23,052
- ≤23,367
- ≤24,12
- ≤26,399

**Χάρτης 5.6** SSH Sentinel 3A και παλιρροιογράφου για το Κατάκολο.

## 5.5 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν ορισμένα συγκεντρωτικά αποτελέσματα και μετρήσεις από τα δεδομένα όλων των περιοχών μελέτης. Οι τέσσερις περιοχές που επιλέχθηκαν έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά τα οποία επιδρούν στις μεταβολές του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας. Το κοινό τους χαρακτηριστικό είναι ότι ανήκουν στην παράκτια ζώνη.



**Εικόνα 5.19** Χάρτης με την τιμή της συσχέτισης σε σχέση με την θέση του διάμεσου των μετρήσεων του δορυφόρου και του παλιρροιογράφου Κλίμακα: 1: 4,000,000



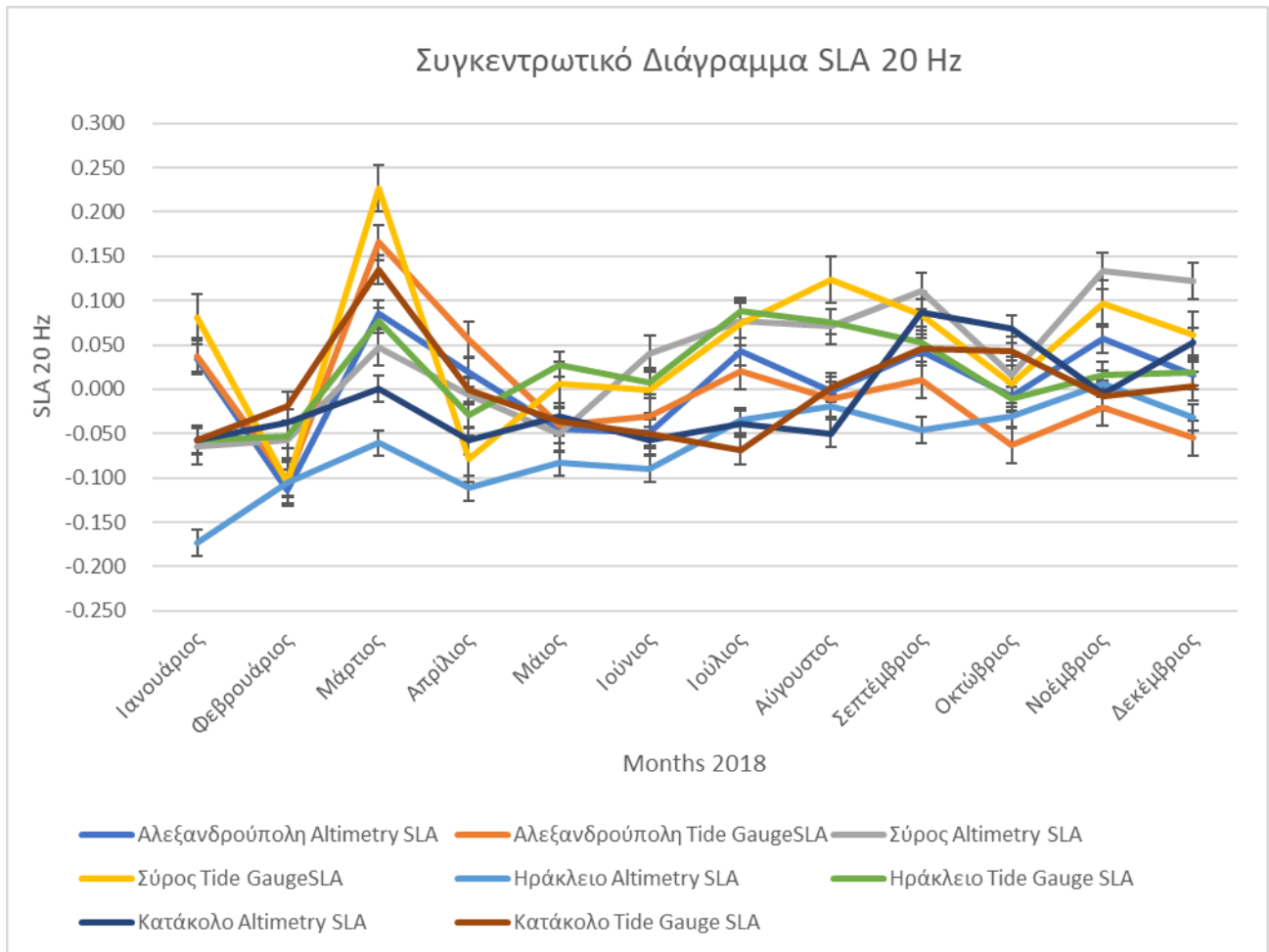
Στον χάρτη της εικόνας 5.19 απεικονίζονται οι θέσεις των τεσσάρων παλιρροιογράφων στην Αλεξανδρούπολη, την Σύρο, το Ηράκλειο και το Κατάκολο. Απεικονίζεται επίσης η θέση του διαμέσου του συνόλου των μετρήσεων κάθε τροχιάς του δορυφόρου Sentinel 3A και του CryoSat 2 στην Αλεξανδρούπολη. Η θέση του διαμέσου των μετρήσεων έχει χρωματιστεί ανάλογα με την τιμή της συσχέτισης των μετρήσεων SLA του παλιρροιογράφου και της δορυφορικής Αλτιμετρίας.

Γίνεται αντιληπτό ότι στα περάσματα του δορυφόρου που επιλέχθηκαν για να προσδιοριστεί το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας, η απόσταση των μετρήσεων του δορυφόρου από την θέση του παλιρροιογράφου δεν επηρέασε την μεταξύ τους συσχέτιση. Στην περιοχή του Ηρακλείου, το πιο απομακρυσμένο από την θέση του παλιρροιογράφου πέρασμα του δορυφόρου παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή συσχέτισης. Στην περίπτωση αυτή η επίδραση της νησίδας Δία στις μετρήσεις του δορυφόρου ήταν μεγαλύτερη από την απόσταση. Στην Αλεξανδρούπολη επίσης που τα περάσματα του δορυφόρου Sentinel 3A είχαν σχεδόν την ίδια απόσταση από τον παλιρροιογράφο, η τροχιά δυτικά είχε την μεγαλύτερη τιμή συσχέτισης. Η τροχιά του δορυφόρου Sentinel 3A με αριθμό 241 στην Αλεξανδρούπολη είχε την μεγαλύτερη τιμή συσχέτισης (0.92) από κάθε τροχιά σε όλες τις περιοχές μελέτης.

Στον πίνακα 5.6 περιέχονται οι μέσες τιμές της μεταβλητής SLA του παλιρροιογράφου και του δορυφόρου για κάθε μήνα του έτους 2018. Στο διάγραμμα της εικόνας 5.20 απεικονίζεται η διακύμανση της μεταβλητής SLA, όπως καταγράφεται από τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου. Από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι η μεγαλύτερη άνοδος στην τιμή SLA και ως εκ τούτου και στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας καταγράφηκε τον Μάρτιο του 2018. Την μεγαλύτερη άνοδο τον μήνα αυτό την κατέγραψαν οι παλιρροιογράφοι σε όλες τις περιοχές μελέτης. Στους υπόλοιπους μήνες του έτους παρατηρείται μία σχετικά ομοιόμορφη καταγραφή των μεταβολών της μεταβλητής SLA από όλους τους παλιρροιογράφους και από την δορυφορική Αλτιμετρία σε κάθε περιοχή. Διαφορετική συμπεριφορά παρατηρείται στο Κατάκολο μεταξύ Αυγούστου - Σεπτεμβρίου που η τιμή SLA παρουσιάζει άνοδο, η οποία καταγράφεται και από τον παλιρροιογράφο και από τον δορυφόρο, την ώρα που οι τιμές SLA σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές παρουσιάζουν μείωση. Την περίοδο Μαΐου – Ιουλίου οι τιμές SLA στο Κατάκολο παρουσιάζουν μείωση ενώ στις υπόλοιπες περιοχές μελέτης παρουσιάζεται αύξηση.

Μήνες	Αλεξανδρούπολη		Σύρος		Ηράκλειο		Κατάκολο	
	Altimetry SLA	Tide GaugeSLA	Altimetry SLA	Tide GaugeSLA	Altimetry SLA	Tide Gauge SLA	Altimetry SLA	Tide Gauge SLA
Ιανουάριος	0.035	0.037	-0.065	0.082	-0.174	-0.058	-0.057	-0.058
Φεβρουάριος	-0.114	-0.102	-0.058	-0.105	-0.105	-0.053	-0.038	-0.020
Μάρτιος	0.085	0.166	0.047	0.227	-0.061	0.078	0.000	0.135
Απρίλιος	0.019	0.056	-0.007	-0.078	-0.112	-0.029	-0.058	-0.001
Μάιος	-0.045	-0.041	-0.050	0.006	-0.083	0.028	-0.031	-0.037
Ιούνιος	-0.048	-0.030	0.041	-0.001	-0.090	0.008	-0.058	-0.051
Ιούλιος	0.042	0.020	0.078	0.075	-0.035	0.088	-0.039	-0.069
Αύγουστος	-0.002	-0.011	0.071	0.124	-0.019	0.076	-0.050	0.003
Σεπτέμβριος	0.043	0.011	0.111	0.084	-0.046	0.052	0.086	0.047
Οκτώβριος	-0.008	-0.063	0.016	0.007	-0.030	-0.011	0.068	0.044
Νοέμβριος	0.057	-0.021	0.134	0.097	0.006	0.016	-0.005	-0.007
Δεκέμβριος	0.016	-0.055	0.122	0.062	-0.032	0.018	0.054	0.004

Πίνακας 5.6 Συγκεντρωτικά μηνιαία αποτελέσματα μέσω των τιμών SLA (μέτρα) της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου για κάθε περιοχή μελέτης.



**Εικόνα 5.20** Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέσω μηνιαίων τιμών SLA (σε μέτρα) της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου για κάθε περιοχή μελέτης.

## **6 Συμπεράσματα και Προτάσεις**

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα συμπεράσματα από την επεξεργασία των αλτιμετρικών δεδομένων και των δεδομένων των παλιρροιογράφων για τις τέσσερις περιοχές μελέτης (Αλεξανδρούπολη, Σύρος, Ηράκλειο και Κατάκολο). Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5 οι περιοχές επιλέχθηκαν λόγω των παράκτιων χαρακτηριστικών τους. Κάθε περιοχή είχε ιδιαίτερα χαρακτηριστικά με διαφορετική κάθε φορά επίδραση στα αποτελέσματα. Εξετάστηκε η δυνατότητα χρησιμοποίησης δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας σε παράκτιες περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τέλος δίνονται οι προτάσεις για την μελλοντική εξέλιξη και ποιοτική αναβάθμιση της εργασίας και των αποτελεσμάτων της.

### **6.1 Συμπεράσματα**

Στην παράγραφο αυτή αναφέρονται τα συμπεράσματα της εργασίας που αφορούν στα δεδομένα και στην μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας και των παλιρροιογράφων και στα αποτελέσματα της εργασίας.

#### **6.1.1 Συμπεράσματα για τα δεδομένα**

Η ποιότητα αλλά και η ποσότητα των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας στην παράκτια ζώνη, ειδικά μετά την έναρξη της αποστολής Sentinel 3 με τα πλεονεκτήματα της λειτουργίας SAR, έχει βελτιωθεί σημαντικά. Μπορεί να θεωρηθεί ότι πλέον τα δεδομένα είναι αξιόπιστα για τον συνδυασμό τους με τα δεδομένα των παλιρροιογράφων αλλά και με τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας στον ανοιχτό ωκεανό, με σκοπό τον καλύτερο προσδιορισμό της ανόδου της στάθμης της θάλασσας σε παγκόσμιο επίπεδο.

Για τον προσδιορισμό του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) στις περιοχές μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της αποστολής Sentinel 3A και CryoSat 2 για το έτος 2018. Η επιλογή των δεδομένων και η παραμετροποίηση της διαδικασίας για την κατάλληλη επεξεργασία τους ώστε να είναι κατάλληλα για χρήση σε παράκτιες περιοχές πραγματοποιήθηκε στην πλατφόρμα SARvatore της διαδικτυακής πύλης G-POD. Η επιλογή και η επεξεργασία των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για κάθε περιοχή. Ο χρόνος για την επεξεργασία των δεδομένων στην πλατφόρμα SARvatore δεν ξεπερνούσε τις τέσσερις με πέντε ώρες. Στην συνέχεια τα δεδομένα σε μορφότυπο NetCDF μεταφορτώθηκαν σε τοπικό μέσο αποθήκευσης για την περαιτέρω επεξεργασία τους και την εξαγωγή των τιμών του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) και των ανωμαλιών της επιφάνειας της θάλασσας (SLA) με συχνότητα μέτρησης 20 Hz για κάθε περιοχή και τροχιά.

Τα δεδομένα των παλιρροιογράφων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ημερήσια για το έτος 2018 όπως και τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Δηλαδή οι τιμές των παλιρροιογράφων αποτελούνταν από τον μέσο όρο των μετρήσεων για κάθε ημέρα. Στα διαγράμματα των τιμών SLA ανά μήνα, οι τιμές από τον δορυφόρο και τους παλιρροιογράφους προέρχονται από μετρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί την ίδια ημέρα. Αυτό όμως δεν εξασφαλίζει ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ίδιες ή έστω παρόμοιες συνθήκες της επιφάνειας της θάλασσας. Επίσης δεν απαιτήθηκε κάποιου είδους προεπεξεργασία στα δεδομένα των παλιρροιογράφων αν και πραγματοποιήθηκε έλεγχος για κενά στα δεδομένα καθώς και για την ύπαρξη ακραίων τιμών στις μετρήσεις.

### **6.1.2 Συμπεράσματα για την επεξεργασία**

Η χρήση του αλγορίθμου επαναπροσδιορισμού της κυματομορφής (waveform retracker) SAMOSA+ και γενικότερα της υπηρεσίας SARvatore της G-POD είχε σημαντική συνεισφορά στην επεξεργασία των δεδομένων της δορυφορικής Αλτιμετρίας σε παράκτιο περιβάλλον. Ουσιαστικά τα δεδομένα διορθώθηκαν από τις επιδράσεις των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της παράκτιας ζώνης ικανοποιητικά, όπως φάνηκε από την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η ευκολία της επιλογής δεδομένων και της χρήσης της υπηρεσίας SARvatore αλλά και της πλατφόρμας G-POD καθιστά τα επεξεργασμένα και ειδικά για την παράκτια ζώνη δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας προσιτά και

προσβάσιμα από κάθε χρήστη ανεξάρτητα από το επίπεδο εξοικείωσης με την επεξεργασία δεδομένων τέτοιου όγκου και μορφότυπου.

Από τα δεδομένα των παλιρροιογράφων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία εξαλείφθηκε η επίδραση της παλίρροιας ώστε να γίνει ο προσδιορισμός των ανωμαλιών της στάθμης της θάλασσας (SLA) όπως καταγράφηκαν από τον παλιρροιογράφο. Στην παρούσα εργασία η επίδραση της παλίρροιας προσδιορίστηκε για κάθε παλιρροιογράφο ξεχωριστά από τον μέσο όρο των μετρήσεων κάθε παλιρροιογράφου που είχε καταχωρηθεί στην διαδικτυακή βάση δεδομένων PSMSL.

Παρότι η διαδικασία της εφαρμογής των απαραίτητων διορθώσεων στα δεδομένα που προέρχονται από την δορυφορική Αλτιμετρία πραγματοποιείται μέσω της διαδικτυακής πλατφόρμας G-POD απαιτείται από τον χρήστη η κατοχή βασικών προγραμματιστικών γνώσεων (πχ Python) ή η γνώση προγραμμάτων επεξεργασίας αρχείων των δορυφόρων Αλτιμετρίας μορφότυπου NetCDF (BRAT, Panoply κ.α.) για την επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών από τα δεδομένα και την χρησιμοποίησή τους στην διαδικασία της επεξεργασίας.

### **6.1.3 Συμπεράσματα για τα αποτελέσματα**

Τα αποτελέσματα σε κάθε περιοχή μελέτης παρουσιάστηκαν ξεχωριστά για κάθε πέρασμα του δορυφόρου που επιλέχθηκε να εξεταστεί. Δημιουργήθηκαν σε κάθε περιοχή δύο είδη διαγραμμάτων. Δημιουργήθηκαν διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν την διακύμανση της τιμής του μεγέθους των ανωμαλιών της επιφάνειας της θάλασσας (SLA) σε σχέση με την απόσταση από την ακτή, ώστε να διαπιστωθεί η απόσταση μέχρι την οποία οι τιμές SLA του δορυφόρου συνάδουν με αυτές του παλιρροιογράφου. Το δεύτερο είδος διαγραμμάτων παρουσιάζει τις μηνιαίες μετρήσεις SLA για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά της στάθμης της θάλασσας όπως καταγράφηκε από τα δύο αυτά σύνολα δεδομένων κατά την διάρκεια του έτους 2018.

Από τα διαγράμματα των τιμών των μετρήσεων SLA σε σχέση με την απόσταση παρατηρήθηκε ότι οι μετρήσεις SLA της δορυφορικής Αλτιμετρίας είχαν μια καλή συσχέτιση με τις μετρήσεις των παλιρροιογράφων μέχρι και αποστάσεις μικρότερες των τεσσάρων χιλιομέτρων από την ακτή. Συγκεκριμένα για τις τιμές SLA του δορυφόρου Sentinel 3A της τροχιάς με αριθμό 241 στην Αλεξανδρούπολη παρουσιάζεται μια αρκετά

καλή συσχέτιση μεταξύ του δορυφόρου και του παλιρροιογράφου. Η τιμή της συσχέτισης είναι 0.92 και οι τιμές SLA του δορυφόρου μέχρι την απόσταση των δύο περίπου χιλιομέτρων από την ακτή συνάδουν με τις τιμές SLA του παλιρροιογράφου. Αυτή είναι η μέγιστη τιμή συσχέτισης που επιτεύχθηκε μεταξύ των δύο συνόλων δεδομένων και ήταν και το πέρασμα του δορυφόρου στο οποίο επιτεύχθηκε η καλύτερη τιμή (απόσταση 2 χιλιομέτρων) όσο αφορά την εγγύτητα στην ακτή σε σχέση με την παράμετρο SLA. Στην περιοχή του Ηρακλείου με την παρουσία της νησίδας Δία, στην Αλεξανδρούπολη με τις παρακείμενες εκβολές του ποταμού Έβρου, στην Σύρο με την παρουσία παρακείμενων νήσων τα δεδομένα από το δορυφόρο έδειξαν να σχετίζονται με τα δεδομένα του παλιρροιογράφου χωρίς μεγάλες αποκλίσεις.

Στο δεύτερο είδος διαγραμμάτων απεικονίζεται η μηνιαία διακύμανση της μεταβλητής SLA, όπως καταγράφεται από τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας και του παλιρροιογράφου. Τόσο στα διαγράμματα για κάθε τροχιά ξεχωριστά όσο και στο διάγραμμα που παρουσιάζει συνολικά για κάθε περιοχή την μηνιαία διακύμανση SLA, διαπιστώνεται ότι η μεγαλύτερη άνοδος στην τιμή SLA και ως εκ τούτου και στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) καταγράφηκε τον Μάρτιο του 2018. Η μέγιστη τιμή SLA τον Μάρτιο κυμαίνεται μεταξύ 0.15 και 0.23 μέτρα και καταγράφεται σε κάθε περιοχή τόσο από τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας όσο και από τα δεδομένα των παλιρροιογράφων.

Από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων παρατηρήθηκε επίσης ότι η απόσταση του περάσματος του δορυφόρου από την θέση του παλιρροιογράφου δεν επηρέασε την συσχέτιση των μετρήσεων. Οι αποστάσεις ήταν μικρότερες των 100 χιλιομέτρων όμως φαίνεται πως σημαντικό ρόλο στην συσχέτιση έχει και η τοπογραφία της περιοχής μελέτης και η μορφή της ακτογραμμής της.

Από τα δεδομένα δημιουργήθηκαν ακόμη, χάρτες με την κατανομή των υψομέτρων της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) σε κάθε περιοχή μελέτης. Χρησιμοποιήθηκε το υψόμετρο του γεωειδούς στην θέση του παλιρροιογράφου για την μετατροπή των τιμών SLA σε τιμή SSH με το ίδιο σύστημα αναφοράς του δορυφόρου. Ως μοντέλο Γεωειδούς χρησιμοποιήθηκε το EGM 2008. Ο συνδυασμός των διαγραμμάτων της τιμής SLA σε σχέση με την απόσταση από την ακτή και των χαρτών SSH δίνει την δυνατότητα προσδιορισμού του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) σε κάθε περιοχή μελέτης σε απόσταση έως τέσσερα χιλιομέτρων από την ακτή τουλάχιστον.

## 6.2 Προτάσεις

Οι μεταβολές της επιφάνειας της θάλασσας εξαιτίας παραγόντων που δεν εμφανίζουν συστηματικότητα ώστε να διορθωθούν από τις υπάρχουσες διορθώσεις έχουν ως αποτέλεσμα τις μεταβολές στα διαγράμματα SLA που αφορούν ίδιες περιοχές αλλά διαφορετική τροχιά. Το φαινόμενο αυτό γίνεται αντιληπτό ιδιαίτερα στην Αλεξανδρούπολη στα δεδομένα του δορυφόρου Sentinel 3A. Επομένως προτείνεται η χρήση ωριαίων μετρήσεων των παλιρροιογράφων με σκοπό την χρησιμοποίηση εκείνων των μετρήσεων μόνο που έχουν πραγματοποιηθεί την ίδια ημέρα και με έως μισή ώρα χρονική διαφορά από τις μετρήσεις της δορυφορικής Αλτιμετρίας. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφεται σε μεγάλο βαθμό η επίδραση της παραμέτρου SSB στα αποτελέσματα και οι τιμές στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας (SSH) είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Τα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας επεξεργάστηκαν, διορθώθηκαν και είχαν όλες τις προϋποθέσεις για την εφαρμογή τους στην παράκτια ζώνη. Τα δεδομένα των παλιρροιογράφων παρότι διορθώθηκαν από την επίδραση της παλίρροιας και άλλους παράγοντες έχουν περεταίρω περιθώρια διορθώσεων. Στα δεδομένα της δορυφορικής Αλτιμετρίας έχει εφαρμοστεί διόρθωση για τις επιδράσεις της ατμοσφαιρικής πίεσης (DAC). Η διόρθωση αυτή, καθώς και η διόρθωση της παλίρροιας, προτείνεται να εφαρμοστούν και στα δεδομένα των παλιρροιογράφων με την χρήση μοντέλων Dynamic Atmospheric Corrections (DAC) και μοντέλων για την εξάλειψη της επίδρασης της παλίρροιας για την περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας των μετρήσεών τους.

Ένας παράγοντας που επιδρά στις μετρήσεις των παλιρροιογράφων είναι οι κάθετες μετατοπίσεις του εδάφους (Vertical Land Motion ή VLM). Στην παρούσα εργασία η κατακόρυφη μετατόπιση του εδάφους δεν λήφθηκε υπόψη αφού οι παλιρροιογράφοι δεν ήταν συνδεδεμένοι με δέκτες GNSS ώστε να υπολογίζεται η ποσότητα VLM στην τοποθεσία εγκατάστασης του κάθε παλιρροιογράφου. Ο υπολογισμός της κατακόρυφης μετατόπισης του εδάφους αποτελεί σημαντική παράμετρο στην ποιότητα των τιμών που λαμβάνονται από τους παλιρροιογράφους και προτείνεται η εξέταση της πιθανότητας πραγματοποίησης των απαραίτητων ενεργειών με σκοπό την δυνατότητα μέτρησης της από τους παλιρροιογράφους της Ελλάδας.

Με τον εμπλουτισμό των δεδομένων της Αλτιμετρίας SAR με περισσότερα δεδομένα από τον δορυφόρο Sentinel 3B αλλά και της επερχόμενης αποστολής SWOT ο



προσδιορισμός του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας σε παράκτιες ζώνες στα ηπειρωτικά ύδατα θα πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Επομένως είναι αναγκαίος ο συνδυασμός των δεδομένων διαφορετικών αποστολών Αλτιμετρίας που θα εκμεταλλεύεται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε αποστολής για τον προσδιορισμό του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας αλλά και άλλων παραμέτρων στις παράκτιες ζώνες.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

Δ. Δεληκαράογλου, Χ. Χατζηκυριάκου: Αξιοποίηση δεδομένων Δορυφορικής Αλτιμετρίας για τυπικές χαρτογραφικές εφαρμογές στον τομέα της θαλάσσιας Γεωδαισίας και Ωκεανογραφίας 2015

Μερτίκας : Εισαγωγή στην Γεωδαισία, τον Δορυφορικό Εντοπισμό και την Αλτιμετρία 2016.

### **Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία**

Ablain M., J. F. Legeais, P. Prandi, M. Marcos, L. Fenoglio-Marc, H. B. Dieng, J. Benveniste, A. Cazenave: Satellite Altimetry-Based Sea Level at Global and Regional Scales 2017

Andersen Ole B., Stine K. Rose P. Knudsen, L. Stenseng: The DTU18 MSS Mean Sea Surface improvement from SAR altimetry, 2018

Birol F., N. Fuller, F. Lyard, M. Cancet, F. Nino, C. Delebecque, S. Fleury, F. Toublanc, A. Melet, M. Saraceno, F. Leger: Coastal applications from nadir altimetry: Example of the X-TRACK regional products 2017. Article in Advances in Space Research · November 2016

Bonnefond P., B.J. Haines, C. Watson: In situ Absolute Calibration and Validation - A link from Coastal to Open-Ocean Altimetry 2011, In book: Coastal Altimetry

Brown G: The Average Impulse of a Rough Surface and its Applications, 1977

Cazenave A., H. Palanisamy, M. Ablain: Contemporary sea level changes from satellite altimetry: What have we learned? What are the new challenges? 2018

Cipollini P., F. M. Calafat, S. Jevrejeva, A. Melet, P. Prandi: *Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges 2017*

Chuntao Chen, Wanlin Zhai, Longhao Yan, Qian Zhang, Xiaoxu Zhang, Jianhua Zhu, Shuangyan He less: *Assessment of the GPS buoy accuracy for altimeter sea surface height calibration 2014, DOI:10.1109/IGARSS.2014.6947133*

Dinardo S., M. Restano, A. Ambrózio, J. Benveniste: *SAR Altimetry Processing on demand service for CryoSat 2 and Sentinel 3 at ESA G-POD 2016*

Dinardo S., B. Lucas, J. Benveniste: *Sentinel 3 STM SAR Ocean Retracking Algorithm and SAMOSA Model, 2018*

Dinardo S.: *Techniques and Applications for Satellite SAR Altimetry over water, land and ice, 2020.*

Dufau C., C. Martin-Puig, L. Moreno: *User Requirements in the Coastal Ocean for Satellite Altimetry 2011, DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0\_3, In book: Coastal Altimetry*

Garcia E., D. Sandwell, W. Smith: *Retracking CryoSat-2, Envisat and Jason-1 radar altimetry waveforms for improved gravity field recovery 2014*

Gommenginger C., P.Thibaut, L.Fenoglio-Marc, G. Quartly, X. Deng, J. Gomez-Enri, P. Challenor, and Y. Gao: *Retracking Altimeter Waveforms Near the Coasts. A review of Retracking Methods and Some Applications to Coastal Waveforms 2011, In book: Coastal Altimetry*

Heliani L., N.Widjajanti, I.Endrayanto, Danardono, H.Panuntun: Preprocessing of coastal satellite altimetry, tide gauges and GNSS data: *Towards the possibility of detected vertical deformation of South Java island, 2013*

Kleinherenbrink M., R.Riva, T. Frederiske: *A comparison of methods to estimate vertical land motion trends from GNSS and altimetry at tide gauge stations 2017*

Kurtz N. T., N. Galin, and M. Studinger: *An improved CryoSat-2 sea ice freeboard and thickness retrieval algorithm through the use of waveform fitting 2014*

Magionni V., Christian Massari: *Extreme Hydroclimatic Events and Multivariate Hazards in a Changing Environment, A Remote Sensing Approach, 2019*

Morrow R., D. Blumstein, and G. Dibarboure.: *Fine Scale Altimetry and the Future SWOT Mission 2018.*

Peng F., X. Deng: *A New Retracking Technique for Brown Peaky Altimetric Waveforms, 2018. In Marine Geodesy*

Peng F., X. Deng: *Validation of Sentinel-3A SAR mode sea level anomalies around the Australian coastal region, 2020*

M. Raynal, M. Denneulin, B. Picard, G. Dibarboure, N. Picot: *Revisiting the small-scale variability in coastal areas thanks to altimetry constellation 2020*

Uematsu A., K. Akiyama, N. Ito, and the JAXA COMPIRA team: *Japanese Altimetry Mission, COMPIRA*

Vignudelli S., A. Scozzari, R. Abileah, J. Gomez, J. Benvniste, P. Chipollini: *Water surface elevation in coastal and inland waters using satellite radar altimetry 2019*

Vignudelli S., A. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benvniste: *Coastal Altimetry. Berlin Heidelberg. Springer – Verlag, 2011*

## **Ιστοσελίδες**

<https://swot.jpl.nasa.gov/mission.htm>

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/jason-cs>

<http://wiki.services.eoportal.org/tiki-index.php?page=GPOD+SENTINEL-3+SARvatore+Software+Prototype+User+Manual&highlight=SAMOSASAMOSA%20%2B>

<https://www.psmsl.org/data>

<http://web.gys.gr/GeoSearch/geoid/hmgs-geoid-index.html>

<http://odes.altimetry.cnes.fr>

<https://gpod.eo.esa.int/services>

<http://www.coastalt.eu>