

## ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ INTERREG V-A ΕΛΛΑΔΑ-ΚΥΠΡΟΣ 2014-2020

### BEACHTECH

**Παράκτια διάβρωση λόγω κλιματικής αλλαγής: εκτίμηση και τρόποι αποτελεσματικής αντιμετώπισης σε τουριστικές περιοχές του Βορείου Αιγαίου και της Κύπρου**

Κωδικός Πράξης: 5050552

|                          |   |
|--------------------------|---|
| <b>Πακέτο Εργασίας 4</b> | Εκτίμηση κινδύνου διάβρωσης στις πιλοτικές παραλίες Λέσβου, Χίου και Κύπρου       |
| <b>Παραδοτέο 4.3.3</b>   | Παρακολούθηση μορφολογικής εξέλιξης πιλοτικών παραλιών με μεθόδους τηλεπισκόπησης |

|   |  |
|---|--|
| <b>Κύριος Δικαιούχος Έργου</b>            | Πανεπιστήμιο Αιγαίου (ΤΩΘΒΕ-ΠΑ)  |
| <b>Επιστημονικός Υπεύθυνος Παραδοτέου</b> | Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου (ΤΕΠΑΚ)  |
| <b>Συμμετέχοντες Φορείς στο Παραδοτέο</b> | ΤΩΘΒΕ, ΠΤΑ ΒΑ, Δ. Πέγειας  |
| <b>Ομάδα Σύνταξης Παραδοτέου</b>          | Ε. Ευαγόρου, Α. Χατζηπαυλής, Χ. Μέττας, Ο. Ανδρεάδης, Γ. Τσεκούρας, Σ. Χατζησταμάτης   |
| <b>Ομάδα Υλοποίησης Παραδοτέου</b>        | Ο. Ανδρεάδης, Θ. Πανάγου, Α. Παπακωνσταντίνου, Ι. Πετσιμέρης, Α. Πούλος, Α. Ρήγος, Κ. Τοπουζέλης, Γ. Τσεκούρας, Β. Τρυγόνης, Θ. Χασιώτης, Α. Χατζηπαυλής, Σ. Χατζησταμάτης, Μ. Λοιζίδου, Μ. Ακουρδαλίτη, Ζ. Ανθής, Δ. Χατζημιτσής, Χ. Μέττας, Ε. Ευαγόρου, Χ. Παπουτσά, Ι. Κουντουρή, Δ. Μακρή, Α. Νισαντζή, Γ. Τσαϊρης, Α. Καρίνου, Χ. Σάββας |
| <b>Ημερομηνία</b>                         | Οκτώβριος 2023   |
| <b>Διαδικτυακή πρόσβαση</b>               | <a href="http://beachtech.eu">http://beachtech.eu</a>  |

Το παρόν κείμενο δημοσιεύτηκε με τη σύμφωνη γνώμη όλων των φορέων της σύμπραξης "BEACHTECH". Περιέχει υλικό τα δικαιώματα του οποίου ανήκουν στους δικαιούχους της πράξης "BEACHTECH" και το οποίο δεν μπορεί να αναπαραχθεί χωρίς άδεια από την σύμπραξη. Η έρευνα που οδήγησε στα αποτελέσματα του παρόντος κειμένου χρηματοδοτήθηκε από το Πρόγραμμα Συνεργασίας «Interreg V-A Ελλάδα-Κύπρος 2014-2020» (ΕΤΠΑ) και από Εθνικούς πόρους Ελλάδας και Κύπρου.

## Η Σύμπραξη του Έργου



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΑΙΓΑΙΟΥ

Πανεπιστήμιο Αιγαίου



ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟ  
ΤΑΜΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ  
ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ

Περιφερειακό Ταμείο  
Ανάπτυξης Βορείου Αιγαίου



Τεχνολογικό  
Πανεπιστήμιο  
Κύπρου

Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο  
Κύπρου



ΔΗΜΟΣ ΠΕΓΕΙΑΣ  
MUNICIPALITY OF PEGEIA

Δήμος Πέγειας Κύπρου

ΔΕΣΜΟΙ  
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>2 ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ ΠΑΡΑΛΙΑΚΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΑΠΟ ΟΠΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ</b> .....   | <b>6</b>  |
| 2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ (ΣΜΗΕΑ) .....                  | 6         |
| 2.2 ΟΠΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ .....              | 13        |
| <b>3 ΜΟΡΦΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΛΙΩΝ</b> .....                       | <b>20</b> |
| 3.1 ΠΑΡΑΛΙΑ CORAL BAY - ΚΥΠΡΟΣ.....                                     | 20        |
| 3.2 ΠΑΡΑΛΙΑ ΙΣΤΟΡΙΚΟ - ΛΕΣΒΟΣ.....                                      | 26        |
| 3.3 ΠΑΡΑΛΙΑ ΠΕΤΡΑΣ - ΛΕΣΒΟΣ.....  | 27        |
| 3.4 ΠΑΡΑΛΙΑ ΚΩΜΗΣ - ΧΙΟΣ .....  | 31        |
| <b>4 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΘΕΣΕΩΝ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΚΜΑΘΗΣΗ</b> .....        | <b>33</b> |
| 4.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ .....                          | 33        |
| 4.2 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΘΕΣΕΩΝ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ .....                                  | 36        |
| <b>5 ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΠΑΡΑΛΙΩΝ ΑΠΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ</b> ..... | <b>38</b> |
| <b>6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....   | <b>41</b> |
| <b>7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....   | <b>42</b> |



ΔΕΣΜΟΙ  
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

## Περίληψη

Στη συγκεκριμένη έρευνα αποτυπώνονται καινοτόμες μεθοδολογίες ανίχνευσης κρίσιμων παραμέτρων της παράκτιας μορφοδυναμικής όπως η θέση της ακτογραμμής και του του ανώτατου ορίου της κυματικής αναρρίχησης με υψηλή χωρο-χρονική διακριτικότητα. Παρατίθενται τα αποτελέσματα αποτυπώσεων της παραλιακής μορφολογίας των περιοχών μελέτης με χρήση οπτικών δεδομένων προερχόμενων από Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) και από οπτικό σύστημα παρακολούθησης παράκτιων διεργασιών. Παράλληλα, με χρήση δεδομένων του συστήματος παρακολούθησης καταγράφεται μια καινοτόμα προσπάθεια ανίχνευσης της θέσης της ακτογραμμής με χρήση τεχνικών τεχνητής εκμάθησης (machine learning) η οποία έδειξε πολύ καλά αποτελέσματα. Επιπλέον, πινακοποιούνται και συγκρίνονται αποτελέσματα δορυφορικών εικόνων της τελευταίας δεκαετίας, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο του παραδοτέου 3.3.1.



## 1 Εισαγωγή

Η παράκτια διάβρωση αποτελεί ένα σημαντικότερο σύγχρονο περιβαλλοντικό πρόβλημα, αφού το μεγαλύτερο τμήμα της παγκόσμιας ακτογραμμής βρίσκεται ήδη σε καθεστώς έντονης διάβρωσης, προκαλώντας σοβαρότατες κοινωνικό-οικονομικές συνέπειες. Ένα από τα βασικά εργαλεία στην παρακολούθηση και πρόβλεψη της παράκτιας διάβρωσης είναι η παρακολούθηση της μεταβολής της ακτογραμμής σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Τα κύρια εργαλεία που εφαρμόζονται στην αυτόματη ανίχνευση ακτογραμμών είναι μέσω πολυφασματικών εικόνων τηλεπισκόπησης ή κοινών ψηφιακών εικόνων (Ribas et al., 2020). Η ανίχνευση ακτογραμμών είναι ένα παράδειγμα εφαρμογής ανίχνευσης ακμών με βάση την εικόνα (Srinosa et al., 2021), μια καθιερωμένη περιοχή έρευνας στην τεχνητή όραση (computer vision). Στην έρευνα στη τεχνητή όραση, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι που εντοπίζουν ακμές που περιέχονται σε κοινές ψηφιακές εικόνες (RGB) καθημερινών αντικειμένων, αλλά υπάρχουν πρόσθετες προκλήσεις κατά την εφαρμογή της ίδιας εργασίας σε εικόνες για την ανίχνευση ακμών που χαρακτηρίζουν μια ακτογραμμή. Αντίστοιχα προκλήσεις εμφανίζονται και στην ανίχνευση ακμών σε πολυφασματικές εικόνες τηλεπισκόπησης καθώς αυτές περιέχουν περισσότερες φασματικές ζώνες, περισσότερο θόρυβο και μεγαλύτερη πυκνότητα ακμών σε σύγκριση με τις φυσικές εικόνες (McAllister et al., 2022).

Η μακροχρόνια εγκατάσταση συστημάτων οπτικής παρακολούθησης παράκτιων διεργασιών προσφέρουν δυνατότητα για τη μέτρηση διαφόρων παραμέτρων απευθείας στην πηγή τους. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν δυνατότητα για ακριβή και υψηλής χωρο-χρονικής ανάλυσης συλλογής σημαντικότερων παραλιακών δεδομένων (ακριβής αποτύπωση θέσης ακτογραμμής και γραμμής αιγιαλού) (Fischer et al., 2021), στα οποία βασίζεται τόσο η χωροθέτηση των παραλιακών δραστηριοτήτων, όσο και ο σχεδιασμός παράκτιων τεχνικών αντι-διαβρωτικών έργων. Τα δεδομένα αυτά παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανίχνευση ακτογραμμών και στην παρακολούθηση της διάβρωσης των ακτών. Οι επιτόπιες μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πληροφορίες αλήθειας εδάφους που χρησιμοποιούνται για την επικύρωση δεδομένων τηλεπισκόπησης και για την αξιολόγηση της ακρίβειας της εξαγόμενης ακτογραμμής. Τα δεδομένα αυτά παρέχουν επίσης πληροφορίες για τις τρέχουσες συνθήκες της παράκτιας περιοχής, συμπεριλαμβανομένης της θέσης της ακτογραμμής, της παρουσίας βλάστησης και άλλων φυσικών χαρακτηριστικών και του βάθους του νερού, τα οποία είναι απαραίτητα για την ανίχνευση αλλαγών στο παράκτιο περιβάλλον (Arabi et al., 2020).

Για τους παραπάνω λόγους, στο πλαίσιο του παρόντος έργου έχουν εγκατασταθεί τέτοιου είδους συστήματα, ενώ αναπτύχθηκε καινοτόμα αυτοματοποιημένη μεθοδολογία ανάλυσης μέσω μηχανικής μάθησης (και συγκεκριμένα νευρωνικών δικτύων) της παραλιακής οπτικής πληροφορίας.

Σε όλα τα παραπάνω είναι προφανής η συμβολή και ταυτόχρονα η συνέργεια της ανάλυσης της διαθέσιμης γεω-αναφερμένης τηλεσκοπικής πληροφορίας που είναι διαθέσιμη στις πιλοτικές παραλίες μελέτης με σκοπό την εκτίμηση και των μακροχρόνιων ιστορικών τάσεων διάβρωσης τους, αλλά και της εξέλιξης των ανθρωπογενών

δραστηριοτήτων. Το στάδιο αυτό υλοποιήθηκε για την τελευταία δεκαετία προκειμένου να εξυπηρετηθεί επιπλέον η δράση του Παραδοτέου 3.3.1, που αφορούσε την γεωχωρική βάση δεδομένων των παραλιών Λέσβου, Χίου και Κύπρου. Επιπλέον σημειώνεται ότι, η μεθοδολογία και ανάλυση των αποτυπώσεων με ΣμηΕΑ αναφέρθηκε και στο Παραδοτέο 4.1.2, επαναλαμβάνεται όμως μερικώς και στο συγκεκριμένο παραδοτέο, ώστε να υπάρχει συσχέτιση στις περιοχές ταυτόχρονης κάλυψης με το σύστημα οπτικής παρακολούθησης παράκτιων διεργασιών.




## **2 Αποτυπώσεις παραλιακής μορφολογίας από οπτικά δεδομένα**

### **2.1 Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ)**

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την αποτύπωση με φωτογραμμετρία είναι τα Συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (ΣμηΕΑ), γνωστά και ως Unmanned Aerial Vehicle (UAV) που έχουν καθιερωθεί στο χώρο της φωτογραμμετρίας. Στις μέρες μας, τα ΣμηΕΑ αποτελούν μια πολύτιμη πηγή δεδομένων για θέματα της χαρτογράφησης και της τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Τα ΣμηΕΑ μπορούν να πραγματοποιήσουν λήψεις με την ενσωματωμένη υψηλής ανάλυσης ψηφιακή κάμερα ή ακόμα μπορεί να εγκατασταθούν ερασιτεχνικές ή SLR ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές. Οι εναλλακτικές λύσεις χαμηλού κόστους του ΣμηΕΑ με την κλασική επανδρωμένη αεροφωτογράφιση έχει οδηγήσει στην εισαγωγή αρκετών νέων εφαρμογών σε τομείς μικρής και βραχείας εμβέλειας. Τα ΣμηΕΑ μπορούν να πετάξουν σε χειροκίνητες, ημιαυτόματες και αυτόνομες λειτουργίες και με ένα αυτοματοποιημένο τρόπο μπορούν να εξαχθούν αποτελέσματα όπως τρισδιάστατα μοντέλα, Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους και επιφάνειας (DTM/DSM) κλπ. Πλεονεκτήματα με την χρήση των UAVs είναι η ταχύτητα και η χαμηλού κόστους πτήσεις. Από την άλλη υπάρχουν και μειονεκτήματα στην χρήση των UAV's όπως είναι ο καιρός. Οι δυνατοί άνεμοι προκαλούν αστάθεια στο UAV και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων με τέτοιες πτήσεις να μην είναι ικανοποιητική.

Για την υλοποίηση του ερευνητικού έργου συλλέχθηκαν δεδομένα υψηλής ακρίβειας από ΣμηΕΑ εξοπλισμένα με κατάλληλους οπτικούς αισθητήρες RGB. Όλες οι πτήσεις προγραμματίστηκαν κατάλληλα και πραγματοποιήθηκαν αυτοματοποιημένα με τη χρήση του λογισμικού DJI GS PRO. Τα ΣμηΕΑ που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή των δεδομένων ήταν το DJI Phantom 4 και το DJI Phantom 4 RTK τα οποία διαθέτουν οπτικό αισθητήρα RGB, καθώς και το DJI Phantom 4 Multispectral το οποίο διαθέτει αισθητήρα RGB μαζί με αισθητήρα πολυφασματικής ανάλυσης. Τα βασικά χαρακτηριστικά των ΣμηΕΑ που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα παρατίθενται στον Πίνακα 1.

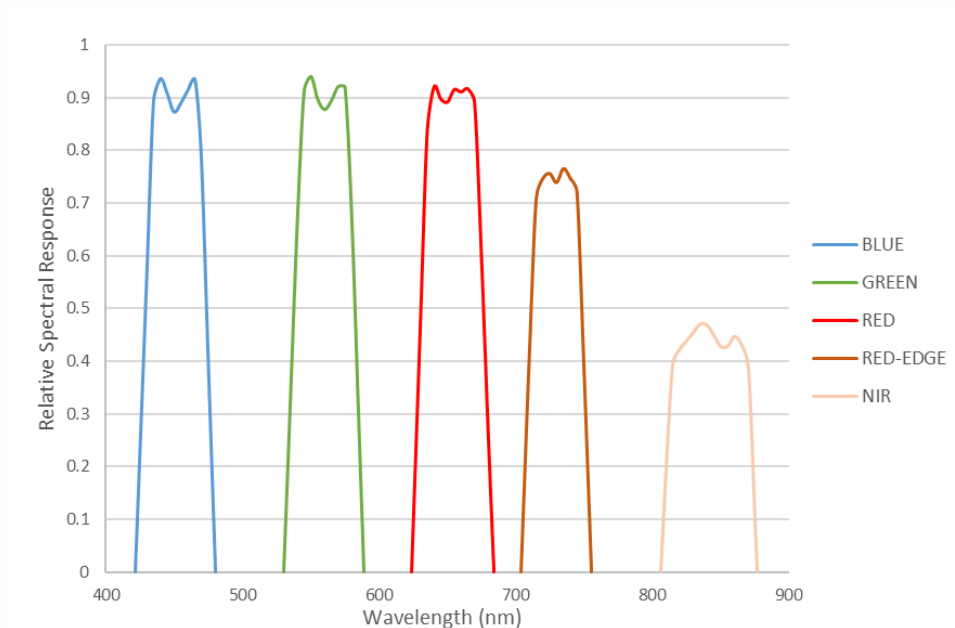
**Πίνακας 1:** Χαρακτηριστικά των ΣμηΕΑ που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της έρευνας.

|                             |   |  |   |
|-----------------------------|---|--|---|
|                             |  |  |  |
| <b>Όνομα μοντέλου ΣμηΕΑ</b> | <b>DJI Phantom 4</b>  | <b>Phantom 4 RTK</b>   | <b>DJI Phantom 4 Multispectral</b>  |
| <b>Αισθητήρας</b>           | RGB   | RGB  | RGB + 5 Μονοχρωμικούς Αισθητήρες  |
| <b>Ανάλυση κάμερας</b>      | 12 MP   | 20 MP  | 2.08 MP   |
| <b>Ανάλυση Σχήμας</b>       | 4000×3000   | 5472 × 3648  | 1600×1300   |
| <b>Εστιακό βάθος</b>        | 20mm  | 24 mm  | 5.74 mm   |
| <b>Μέγεθος αισθητήρα</b>    | 1/2.3"  | 1inch  | 1/2.9"  |

Το μη επανδρωμένο αεροσκάφος της DJI P4 Multispectral διαθέτει έξι ενσωματωμένους αισθητήρες (ένας RGB και πέντε πολυφασματικούς μονοχρωματικούς αισθητήρες). Κάθε αισθητήρας χρησιμοποιεί αποτελεσματικά εικονοστοιχεία 2.08 MP. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται είναι: Μπλε ( $450 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$ ), Πράσινο ( $560 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$ ), Κόκκινο ( $650 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$ ), Κόκκινο άκρο ( $730 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$ ) και Εγγύς υπέρυθρο ( $840 \text{ nm} \pm 26 \text{ nm}$ ). Το FOV των φακών που χρησιμοποιούνται είναι  $62.7^\circ$ . Ένας άλλος αισθητήρας που χρησιμοποιείται από το UAV είναι ο ενσωματωμένος αισθητήρας φασματικού ηλιακού φωτός που συλλαμβάνει την ηλιακή ακτινοβολία. Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται η Σχετική Φασματική Απόκριση (Relative Spectral Response - RSR) του DJI PM4 που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα.

Παράλληλα, συλλέχθηκαν δεδομένα επικύρωσης των τιμών ανακλαστικότητας χρησιμοποιώντας το φασματοραδιόμετρο SVC 1024 (Εικόνα 2α) το οποίο έχει φασματικό εύρος 350 - 2500 nm. Οι εμπρόσθιοι οπτικοί φακοί που χρησιμοποιήθηκαν είχαν οπτικό πεδίο  $4^\circ$  και όλα τα δεδομένα συλλέχθηκαν από ύψος 1.1 m, το οποίο μεταφράζεται σε κυκλική κάλυψη εδάφους με διάμετρο 0.08 m. Το όργανο χρησιμοποιεί τρεις ανιχνευτές που εκτείνονται στο ορατό, εγγύς υπέρυθρο και βραχύ κύμα υπέρυθρου με εύρος ζώνης:  $\leq 3.5 \text{ nm}$  για 350 - 1000 nm,  $\leq 3.8 \text{ nm}$  για 1000 - 1885 nm και  $\leq 2.5 \text{ nm}$  για 1885 - 2500 nm. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μεταξύ 10:00 π.μ. και 14:00 μ.μ. τοπική ώρα. Ένα βαθμονομημένο πάνελ φασμάτων (Spectralon Panel) -επιφάνεια Lambertian- χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση των μετρήσεων.





**Εικόνα 1:** Σχετική φασματική απόκριση (RSR) της DJI P4M.



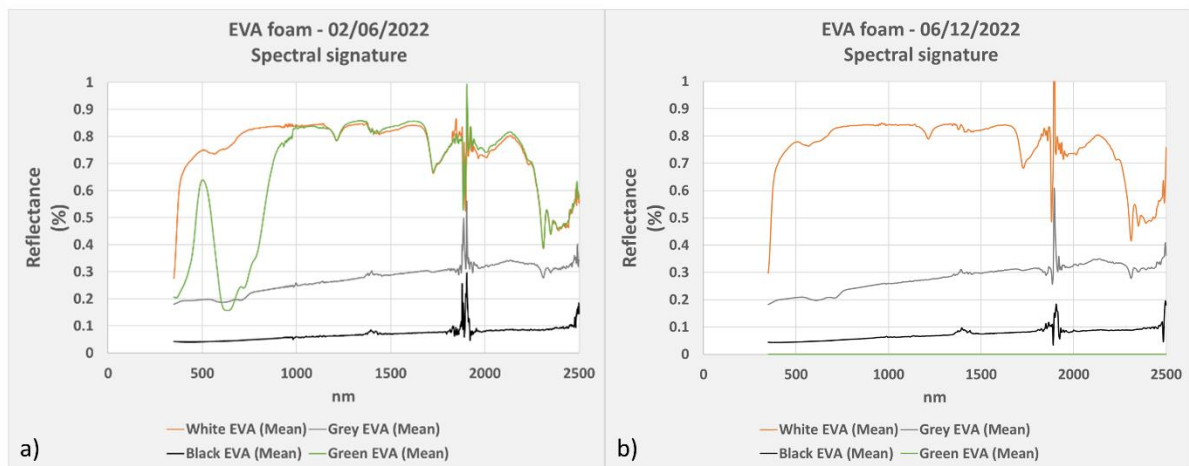
**Εικόνα 2:** (α) Το φασματοραδιόμετρο HR 1024 και πάνελ αφρού EVA που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση των δεδομένων του πολυφασματικού δέκτη. (β) Παράδειγμα εφαρμογής χρωματικής μάσκας στα πάνελ βαθμονόμησης.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο για τη βαθμονόμηση/επικύρωση των οπτικών δεδομένων από τα ΣμηΕΑ που έφεραν πολυφασματικό δέκτη (στην περίπτωση της παραλίας του Coral Bay) ήταν πάνελ από αφρό EVA ή αλλιώς συμπολυμερές αιθυλενίου-οξικού βινυλίου. Οι αφροί EVA έχουν λαμπερτιανή συμπεριφορά αλλά και υψηλή οριζόντια ομοιογένεια (Ponce-Alcántara et al. 2015). Οι διαστάσεις κάθε πάνελ αφρού EVA, που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη, ήταν 30 cm (μήκος) x 30 cm (πλάτος) x 1 cm (πάχος). Τα χρώματα των αφρών EVA που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το μαύρο, το γκρι, το λευκό (Εικόνα 2b) καθώς και το πράσινο το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην επικύρωση των αποτελεσμάτων ανακλαστικότητας κατά την βαθμονόμησης του ορθομωσαϊκού. Αυτά τα πάνελ είναι πολύ βολικά αφού είναι ελαφριά, εύκολα στην μεταφορά τους και καθαρίζονται εύκολα χρησιμοποιώντας πιεσμένο αέρα. Παρέχουν ένα καλό υλικό για



αναφορά ανάκλασης όταν πρόκειται για τη βαθμονόμηση εικόνων μη επανδρωμένων αεροσκαφών και ραδιομετρικών μετρήσεων ( Radró et al. 2018).

Οι μέσες τιμές ανακλαστικότητας όλων των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με λήψη εικόνων των EVA από ΣμηΕΑ στις 02/06/2022 και 06/12/2022 στην παραλία του Coral Bay παρατίθενται στην εικόνα 3. Αυτή ήταν η μόνη περίπτωση στην οποία πραγματοποιήθηκε πτήση και με πολυφασματικό αισθητήρα 5 χρωμάτων, πέρα από τον κλασικό RGB αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιοχές μελέτης.



**Εικόνα 3:** Φασματικές υπογραφές των πάνελς EVA όπως ανιχνεύτηκαν στις φωτογραφίες των ΣμηΕΑ που ελήφθησαν στις a) 02/06/2022 και b) 06/12/2022 από την παραλία Coral Bay.

Ακολούθησε ο υπολογισμός της ανάκλασης που παίρνει σε κάθε μήκος κύματος ( $C_k(\lambda)$ ) για κάθε κανάλι της πολυφασματικής εικόνας με την βοήθεια της RSR που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.

Η εξίσωση που χρησιμοποιείται συνήθως για τον υπολογισμό της αντιπροσωπευτικής τιμής ανάκλασης για τους αισθητήρες της κάμερας είναι:

$$r_{x,k} = \frac{\int_{425}^{875} R_x(\lambda) C_k(\lambda) d\lambda}{\int_{425}^{875} C_k(\lambda) d\lambda}$$

όπου  $r_{x,k}$  = μέση τιμή φασματικής τιμής του πίνακα βαθμονόμησης  $x$  και της ζώνης  $k$ .  $\lambda$  = μήκος κύματος ( $nm$ ).  $x$  = μεταβολή επιφάνειας για την περιοχή από 425 έως 875  $nm$  του πίνακα βαθμονόμησης/επικύρωσης  $x$  και  $C_k$  = σχετική φασματική ευαισθησία της ζώνης  $k$  για τον αισθητήρα DJI P4M στην περιοχή από 425 έως 875  $nm$ .

Τα μετρούμενα φάσματα ανάκλασης των πινάκων βαθμονόμησης και επικύρωσης μετατράπηκαν στις μέσες τιμές φασματικής ανάκλασης προσαρμοσμένες στη φασματική ευαισθησία των αισθητήρων και παρουσιάζονται.

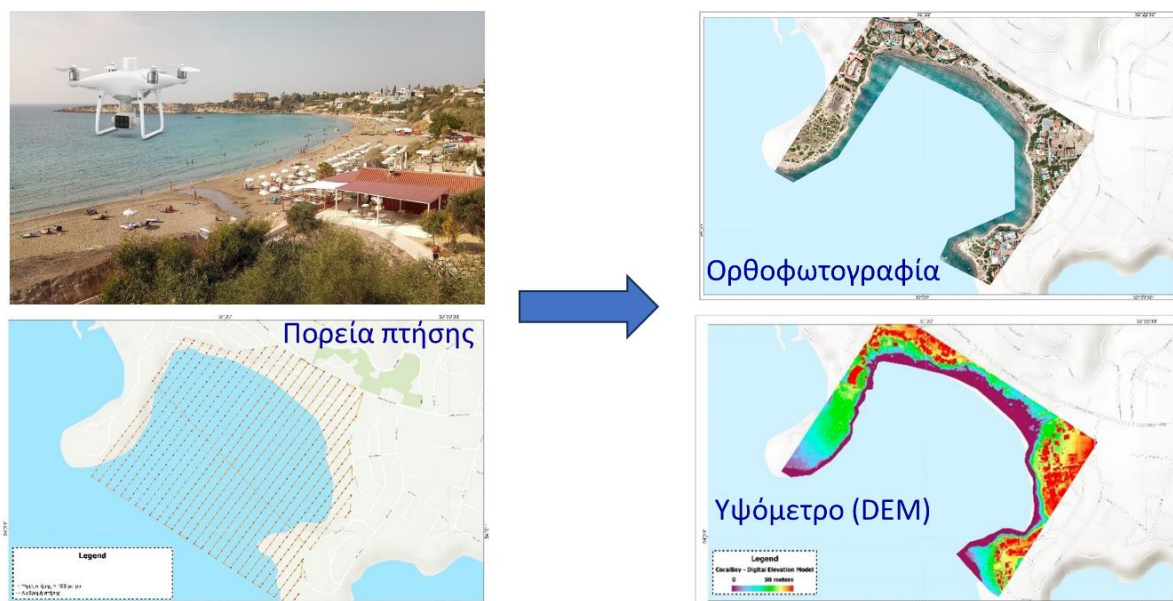
Για τις ανάγκες του έργου πραγματοποιήθηκαν 3 πτήσεις στην περιοχή της παραλίας Πέτρας Λέσβου, 2 πτήσεις στην παραλία της Κώμης Χίου (μια στο πλαίσιο του έργου και μια από παλιότερη καταγραφή), 1 στην παραλία του Ιστορικού και 2 στην παραλία του

Coral Bay. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι ημερομηνίες συλλογής των οπτικών δεδομένων (φωτογραφιών). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 8 πτήσεις κατά τις οποίες συνελέγησαν 2,387 αεροφωτογραφίες υψηλής ανάλυσης.

**Πίνακας 2:** Ημερομηνίες διεξαγωγής πτήσεων με ΣμηΕΑ για την αποτύπωση της παράκτιας τοπογραφίας.

| Αριθμός Πτήσης - Μοντέλο ΣμηΕΑ              | Ημερομηνία | Παραλία   | Αριθμός Φωτογραφιών |
|---|------------|-----------|---------------------|
| 1 - Phantom 4                               | 12/09/2022 | Πέτρα     | 151                 |
| 2 - Phantom 4 RTK                           | 20/02/2023 | Πέτρα     | 178                 |
| 3 - Phantom 4 RTK                           | 08/06/2023 | Πέτρα     | 168                 |
| 4 - Phantom 4                               | 07/06/2016 | Κώμη      | 478                 |
| 5 - Phantom 4 RTK                           | 17/10/2023 | Κώμη      | 470                 |
| 6 - Phantom 4 RTK                           | 12/10/2022 | Ιστορικό  | 208                 |
| 7 - Phantom 4 Multispectral & Phantom 4 RTK | 02/06/2022 | Coral Bay | 1,655 & 1,083       |
| 8 - Phantom 4 Multispectral & Phantom 4 RTK | 06/12/2022 | Coral Bay | 319 & 933           |

Τα οπτικά δεδομένα των ΣμηΕΑ επεξεργάστηκαν με το λογισμικό Agisoft Metashape. Στην περίπτωση των πτήσεων με RGB αισθητήρα τα τελικά αποτελέσματα ήταν ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) υψηλής χωρικής ανάλυσης, καθώς και μια ορθοφωτογραφία για κάθε πτήση (Εικόνα 4) ενώ στην πτήση με ΣμηΕΑ που έφεραν πολυφασματικό δέκτη (στην περίπτωση του Coral Bay), τα τελικά προϊόντα της ανάλυσης ήταν ένα DEM χαμηλότερης ανάλυσης και μια πολυφασματική εικόνα για κάθε πτήση.



**Εικόνα 4:** Τα διεργαστικά στάδια που ακολουθήθηκαν για την παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους υψηλής ακρίβειας (DEM). Παράδειγμα από δεδομένα της παραλίας του Coral Bay.

Για την επεξεργασία των εικόνων που λήφθηκαν από RGB αισθητήρα, ακολουθήθηκαν τα ακόλουθα βήματα:

- (1) Εισαγωγή των εικόνων στο λογισμικό Agisoft Metashape.
- (2) Ρυθμίσεις του Συστήματος Αναφοράς (ΣΑ).
- (3) Εισαγωγή των μετρήσεων πεδίου με GPS.
- (4) Δημιουργία Μασκών στο σετ εικόνων.
- (5) Εντολή ευθυγράμμισης (Alignment).
- (6) Βελτιστοποίηση ευθυγράμμισης (Optimize alignment).
- (7) Καθορισμός πλαισίου ανακατασκευής (Boundary box).
- (8) Δημιουργία πυκνού νέφους σημείων (Dense Cloud).
- (9) Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (Build DEM).
- (10) Δημιουργία Ορθό-φωτογραφίας της περιοχής μελέτης (Build Orthomosaic).

Για την επεξεργασία των εικόνων που λήφθηκαν από πολυφασματικό αισθητήρα, ακολουθήθηκαν τα ακόλουθα βήματα:

- (1) Εισαγωγή των εικόνων στο λογισμικό.
- (2) Ετοιμασία στόχων βαθμονόμησης ανακλαστικότητας (Panel Eva).
- (3) Εισαγωγή μετρήσεων ραδιομέτρου για το πάνελ βαθμονόμησης που μετρήθηκε.
- (4) Εισαγωγή των μετρήσεων πεδίου με GPS.
- (5) Δημιουργία Μασκών στο σετ εικόνων.
- (6) Εντολή ευθυγράμμισης (Alignment).
- (7) Βελτιστοποίηση ευθυγράμμισης (Optimize alignment).
- (8) Καθορισμός πλαισίου ανακατασκευής (Boundary box).
- (9) Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους - ΨΜΕ (Build DEM).
- (10) Δημιουργία Ορθό-φωτογραφίας της περιοχής μελέτης (Build Orthomosaic).
- (11) Μετασχηματισμός ψηφιδωτού.
- (12) Εξαγωγή ορθομωσαϊκού.

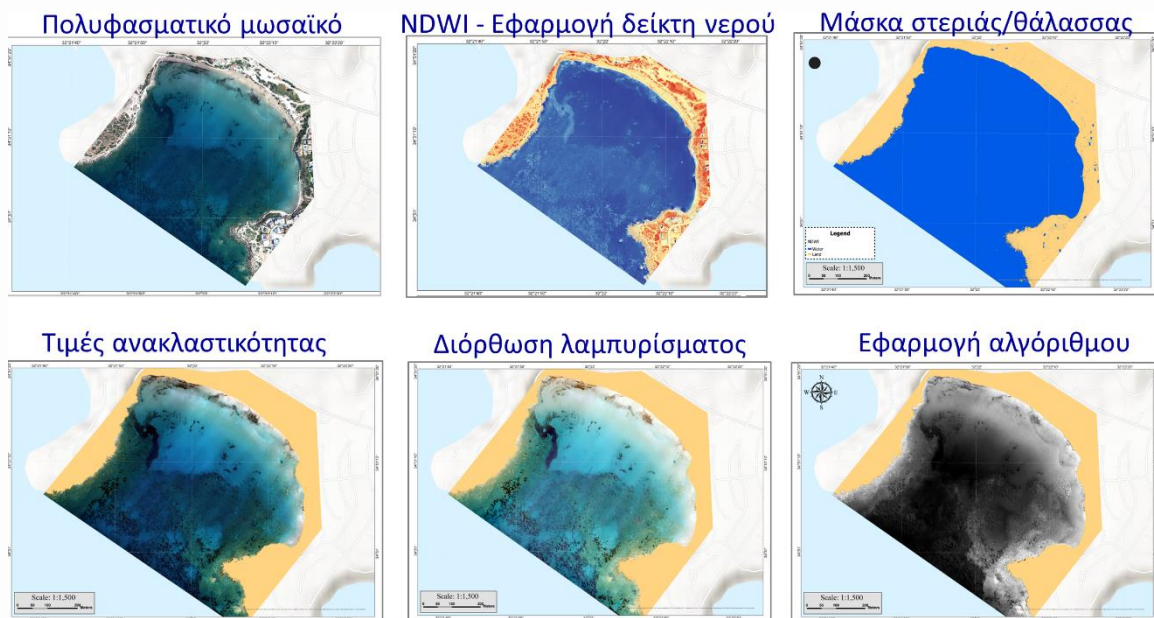
Καταγράφηκε με ακρίβεια η θέση της ακτογραμμής για κάθε πτήση που πραγματοποιήθηκε. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση περισσότερων από μίας πτήσεων στην ίδια παραλία (Πέτρα και Κώμη), πραγματοποιήθηκε σύγκριση της θέσης της ακτογραμμής μεταξύ των διαφορετικών ημερομηνιών, ενώ εκτιμήθηκαν τα εμβαδά διάβρωσης και απόθεσης. Κάτι τέτοιο κατέστη εφικτό με χρήση του εργαλείου Digital Shoreline Analysis System (DSAS) μέσω του οποίου εξήχθη ο δείκτης Net Shoreline Movement (NSM) από τον οποίο υπολογίζεται η μέγιστη και μέση απόσταση, των 2 συγκρινόμενων ακτογραμμών. Επιπρόσθετα, ο συγκεκριμένος δείκτης προσδίδει το ποσοστό των παραλιακών προφίλ (θέσεων κάθετα προς την παραλία) που εμφανίζουν διαφοροποιήσεις. Οι θετικές τιμές εκφράζουν το φαινόμενο της απόθεσης ενώ οι αρνητικές το φαινόμενο της διάβρωσης.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε πείραμα διερεύνησης του ενδεχόμενου εξαγωγής της παράκτιας βαθυμετρίας μέσα από τα δεδομένα των ΣμηΕΑ που λήφθηκαν στην παραλία

Coral Bay (Εικόνα 5). Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα σχεδόν ταυτόχρονα ορθομωσικά και ορθοφωτογραφίες (που παράχθηκαν από επεξεργασία των δεδομένων πτήσεων με RGB και πολυφασματικό αισθητήρα αντίστοιχα). Το πρώτο βήμα που υλοποιήθηκε για την Εκτίμηση Βαθυμετρίας (ΕΒ) είναι ο διαχωρισμός Στεριάς/Θάλασσας χρησιμοποιώντας τον Δείκτη Νερού Κανονικοποιημένης Διαφοράς(NDWI) με τον οποίο μπορούν να οριοθετηθούν τα χαρακτηριστικά νερού στις ψηφιακές εικόνες με τους παθητικούς δέκτες (McFeeters, 2007). Η ακόλουθη εξίσωση δείχνει τον δείκτη NDWI που χρησιμοποιήθηκε:

$$NDWI = \frac{B_{green} - B_{NIR}}{B_{green} + B_{NIR}}$$

όπου,  $B_{green}$  είναι η πράσινη ζώνη, ενώ η τιμή  $B_{NIR}$  αντιπροσωπεύει τις τιμές ζώνης της ακτινοβολίας στο εγγύς υπέρυθρο.



**Εικόνα 5:** Τα μεθοδολογικά βήματα που ακολουθήθηκαν για την εξαγωγή της παράκτιας βαθυμετρίας από τα δεδομένα ΣμηΕΑ στην παραλία του Coral Bay.

Με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS pro εφαρμόστηκε η πιο πάνω εξίσωση στις πολυφασματικές εικόνες. Στην συνέχεια εντοπίστηκε η τιμή διαχωρισμού του νερού/στεριάς (0.35) και με την βοήθεια του εργαλείου Raster Calculator και Simplify polygons δημιουργήθηκαν οι μάσκες στεριάς και θάλασσας. Χρησιμοποιώντας την μάσκα της θάλασσας και την πολυφασματική εικόνα (06/12/2022) απομονώθηκαν τα κελία της θάλασσας. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μετασχηματισμού λόγου του Stumpf et al., (2003). Η μέθοδος μετασχηματισμού λόγου έχει αρκετά πλεονεκτήματα για τη χρήση παθητικών εικόνων πολυφασματικών εικόνων για τη χαρτογράφηση βαθυμετρίας ρηχού νερού σε σχέση με άλλες μεθόδους. Ο αλγόριθμος μετατροπής αναλογίας που



προτάθηκε από τον Stumpf et al., (2003) μπορεί να εφαρμοστεί σε ζώνες με διαφορετική απορρόφηση στο νερό και να εφαρμοστούν κατάλληλα σε μήκη κύματος οποιουδήποτε αισθητήρα. Επειδή οι μπλε και πράσινες ζώνες έχουν χαμηλότερη απορρόφηση, ο λόγος των δυο ζωνών παραμένει ο ίδιος παρά τη διαφορετική σκίαση του πυθμένα σε σταθερό βάθος. Έτσι η μαθηματική εξίσωση του Stumpf έχει ως εξής:

$$Z = m_0 \frac{\ln(n * r_{rs}(li))}{\ln(n * r_{rs}(lj))} - m_1$$

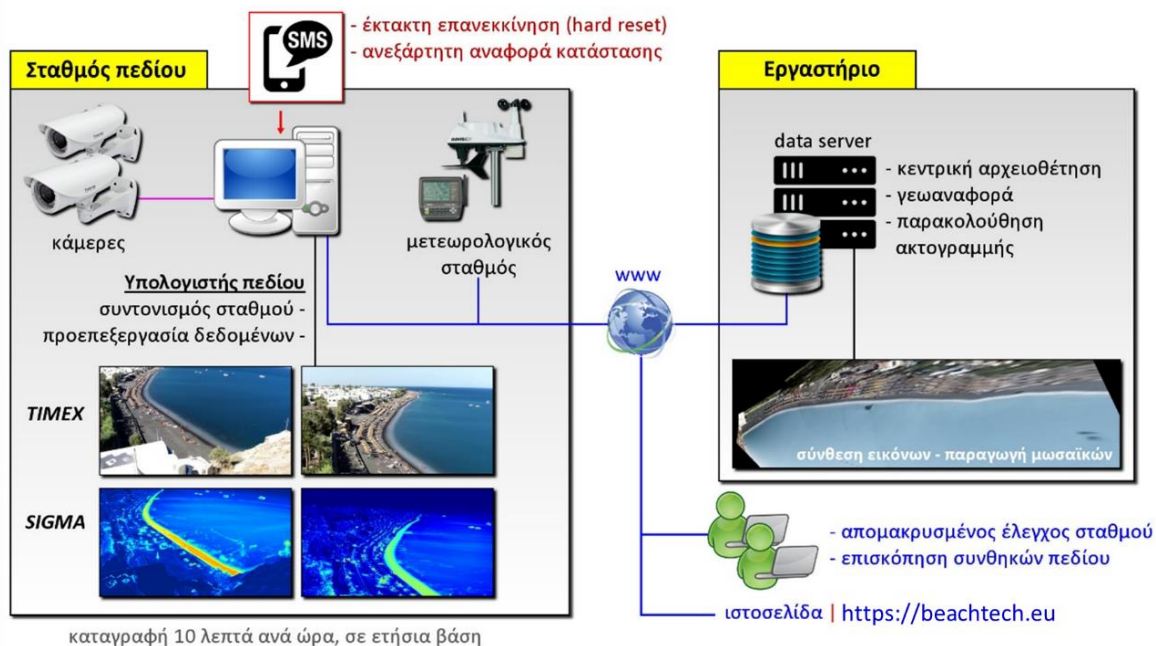
όπου Z είναι το βάθος, m\_0 και m\_1 είναι σταθερά για τον συντονισμό του μοντέλου με το πραγματικό βάθος, το n είναι μια σταθερά για να διασφαλιστεί ότι ο λόγος παραμένει θετικός κάτω από όλες τις τιμές και R(li) και R(lj) είναι οι ζώνες στο μπλε ορατό (li) και πράσινο (lj).

Χρησιμοποιώντας τα σημεία βαθμονόμησης και την ανωτέρω εξίσωση/αλγόριθμο, παράχθηκε ένας βαθυμετρικός χάρτης της περιοχής μελέτης. Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η αναλυτική βαθυμετρική αποτύπωση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου στην παραλία Coral Bay (βλ. Παραδοτέο 4.1.2).

## 2.2 Οπτικό Σύστημα Παραλούθησης Παράκτιων Διεργασιών

Το οπτικό σύστημα προσφέρει τη δυνατότητα οικονομικής και αυτόματης παρακολούθησης των παράκτιων διεργασιών σε βάθος χρόνου με μη επεμβατικό τρόπο, παρέχοντας υψίσυχνα δεδομένα, τα οποία ειδάλλως θα απαιτούσαν σημαντικούς πόρους σε προσωπικό, εξοπλισμό, και αριθμό αποστολών στο πεδίο για την επιτόπια συλλογή τους. Το οπτικό σύστημα αποτελείται από μία δικτυακή κάμερα, ένα μετεωρολογικό σταθμό, καθώς και από τον υπολογιστή πεδίου που είναι υπεύθυνος για τον κεντρικό έλεγχο των οργάνων και την αρχική προεπεξεργασία και συγχρονισμό των δεδομένων (Εικόνα 6).

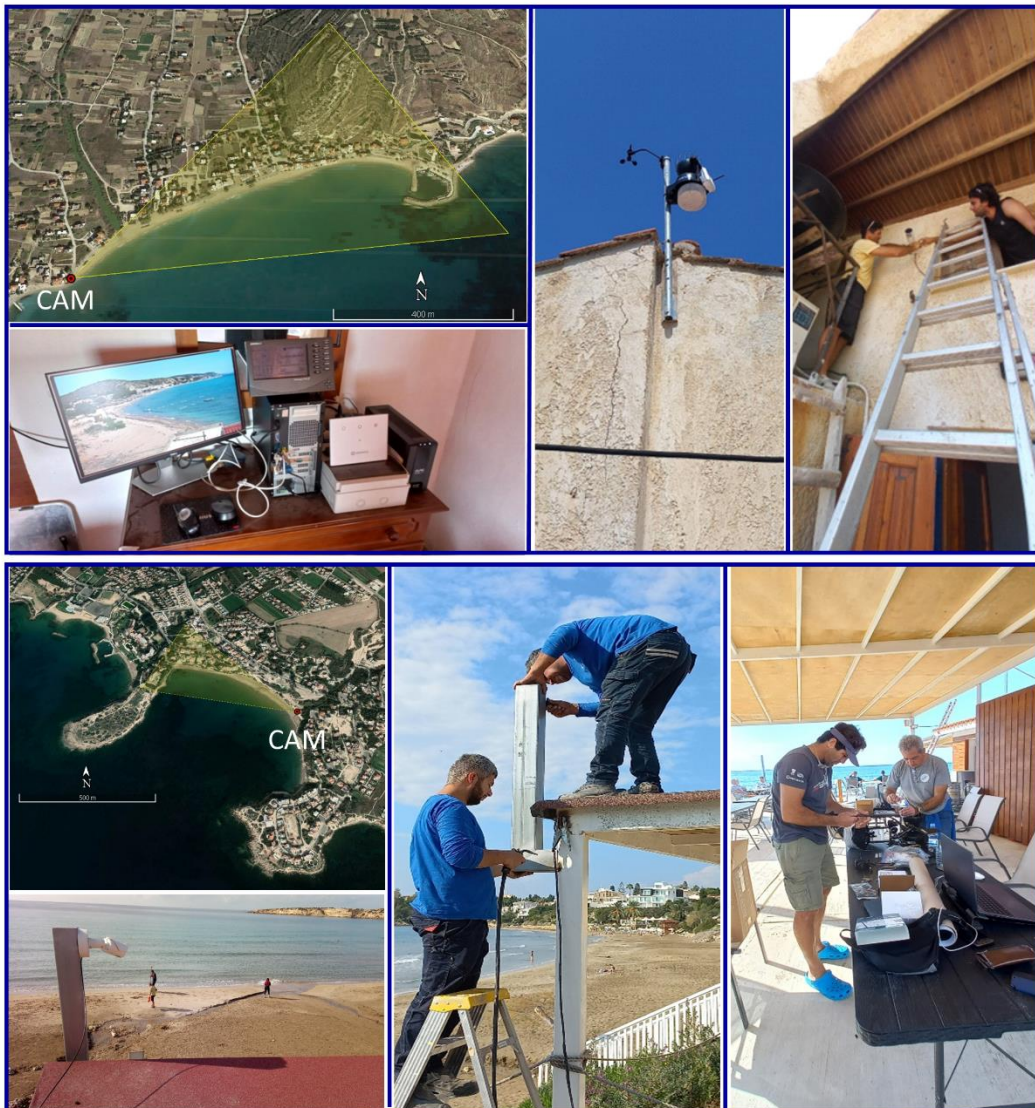
Το σύστημα είναι απολύτως αυτόνομο, ενώ παρέχει και τη δυνατότητα απομακρυσμένης διαχείρισης των παραμέτρων λειτουργίας του και επισκόπησης των περιβαλλοντικών συνθηκών σε πραγματικό χρόνο. Το οπτικό σύστημα είναι βαθμονομημένο (παραμόρφωση φακών, ύψος καμερών από το επίπεδο της θάλασσας, σημεία γεωαναφοράς), ώστε τα πρωτογενή βίντεο και τα προϊόντα αυτών να μπορούν να μετατραπούν σε γεωαναφερόμενα μωσαϊκά (για λεπτομέρειες βλ. Vousdoukas et al., 2011; Velegrakis et al., 2016; Chatzipavlis et al., 2019).



**Εικόνα 6:** Διάγραμμα ροής του οπτικού συστήματος παραλιακής παρακολούθησης. Το σύστημα αποτελείται από τον αυτόνομο σταθμό πεδίου, ενώ επικουρικές λειτουργίες υλοποιούνται στον κεντρικό διακομιστή (data server) του Εργαστηρίου Παράκτιας Μορφοδυναμικής – Διαχείρισης και Θαλάσσιας Γεωλογίας του Τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλασσίων Βιοεπιστημών.

Κεντρικές εργασίες διαχείρισης όπως η τελική αρχειοθέτηση των δεδομένων και η γεωαναφορά των προϊόντων εκτελούνται στον κεντρικό διακομιστή (data server) του Εργαστηρίου Παράκτιας Μορφοδυναμικής, Διαχείρισης και Θαλάσσιας Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Στα πλαίσια του προγράμματος, εγκαταστάθηκε στο Coral Bay και στην Κώμη ένα οπτικό σύστημα παρακολούθησης παράκτιων διεργασιών (coastal video monitoring system) και παράκτιων διεργασιών, με στόχο τη μακροχρόνια και συνεχή παρατήρηση της θέσης της ακτογραμμής και της ζώνης κυματικής θραύσης (Εικόνα 7). Στις υπόλοιπες δύο παραλίες της έρευνας υπήρξαν τεχνικές δυσχέρειες οι οποίες δεν επέτρεψαν την εγκατάστασή του. Πιο συγκεκριμένα, στην παραλία της Πέτρας υπήρξαν αντιδράσεις από τους μόνιμους κάτοικους και επαγγελματίες της περιοχής σχετικά με τη λειτουργία της κάμερας, και απροθυμία εγκατάστασης ακόμη και του μετεωρολογικού σταθμού, οι οποίες δεν μπόρεσαν να παρακαμφθούν. Στην περίπτωση της παραλίας του Ιστορικού δε μπόρεσε να βρεθεί κατάλληλη θέση εγκατάστασης λόγω της παρουσίας αλμυρικών πολύ κοντά στην ακτογραμμή που δεν επιτρέπουν την παρακολούθηση της ακτογραμμής. Η συγκεκριμένη θέση υποδείχθηκε από την Περιφέρεια Β. Αιγαίου, αφού πρόκειται για μία περιοχή στην οποία υπάρχει η επιθυμία κατασκευής τεχνητής παραλίας με συνοδά έργα ανάπλασης του παράκτιου χώρου. Βέβαια, στην παρούσα κατάσταση, ακόμη και εάν ήταν δυνατή η τοποθέτηση κάμερας, εκτιμάται ότι δεν θα απέδιδε χρήσιμες πληροφορίες λόγω της πολύ αδρομερούς σύστασης των ιζημάτων (αμμο-χαλικώδης παραλία με πολλά χαλίκια/κροκάλες ποικίλου μεγέθους), η οποία δε θα επέτρεπε σημαντικής έκτασης μορφολογικές μεταβολές. Όμως και στις 2 παραλίες, εγκαταστάθηκε

κυματογράφος (όργανο που συνοδεύει το οπτικό σύστημα παρακολούθησης), ώστε τουλάχιστον να υπάρχει εκτίμηση του κυματικού καθεστώτος των δύο αυτών περιοχών.



**Εικόνα 7:** Οι θέσεις εγκατάστασης και το οπτικό πεδίο παρακολούθησης του οπτικού συστήματος παρακολούθησης παράκτιων διεργασιών στις παραλίες της Κώμης (Πάνω) και του Coral Bay (Κάτω).

Το σύστημα είναι σχεδιασμένο για την παρακολούθηση των μορφοδυναμικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην παράκτια ζώνη, συνεπώς έχει βελτιστοποιηθεί για μακροχρόνια χρήση. Το σύστημα είναι σε θέση να λειτουργεί 365 ημέρες το χρόνο, και καταγράφει βίντεο για 10 λεπτά ανά ώρα (07:00 – 07:10, 08:00 – 08:10, 09:00 – 09:10,...). Τα επόμενα 50 λεπτά της ώρας αφιερώνονται στην προ-επεξεργασία των δεδομένων, και ο κύκλος συνεχίζεται για όλη τη διάρκεια της ημέρας, εξαιρώντας τις νυχτερινές ώρες. Η συχνότητα καταγραφής των βίντεο είναι 5 fps, και επομένως λαμβάνονται 3,000 εικόνες (οπτικά δεδομένα) για κάθε ώρα. Τα δεδομένα αυτά μετασχηματίζονται έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab σε μετα-δεδομένα συνθετικών εικόνων τύπου TIMEX (εικόνα μέσου όρου της φωτεινότητας των pixel) και IMMAX (εικόνα μέγιστου της φωτεινότητας των pixel) (βλ. Plant & Holman, 1997). Στο



σχήμα που ακολουθεί παρατίθενται οι εικόνες TIMEX και IMMAX που παράγονται από το σύστημα σε ωριαία βάση (Εικόνα 8).

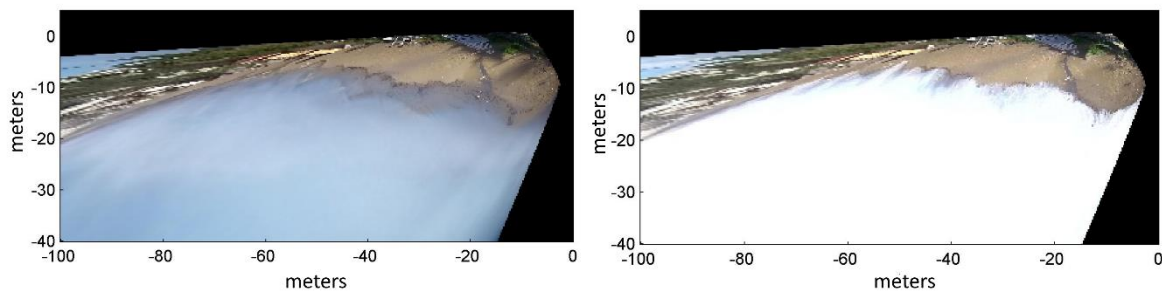


**Εικόνα 8:** Εικόνες TIMEX (αριστερά) και IMMAX (δεξιά) που παράχθηκαν από το οπτικό σύστημα, το οποίο εγκαταστάθηκε στην παραλία του Coral Bay (06/03/2023 08:00).

Οι συνθετικές εικόνες TIMEX και IMMAX εξάγονται περιοδικά από τον υπολογιστή πεδίου και μεταφέρονται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο στον κεντρικό data server του εργαστηρίου Παράκτιας Μορφοδυναμικής. Όπως φαίνεται στην εικόνα 8, οι TIMEX και IMMAX τονίζουν περιοχές υψηλής σημασίας για τη μορφοδυναμική μελέτη των παραλιών, όπως η ζώνη θραύσης και η ακτογραμμή. Για παράδειγμα, οι περιοδικές εναλλαγές του χρώματος των εικονοστοιχείων (μεταξύ άμμου και αφρού) στη ζώνη διαβροχής (swash zone) οδηγεί στη διακριτή αποτύπωση μίας γραμμής υψηλής διακύμανσης στις εικόνες IMMAX.

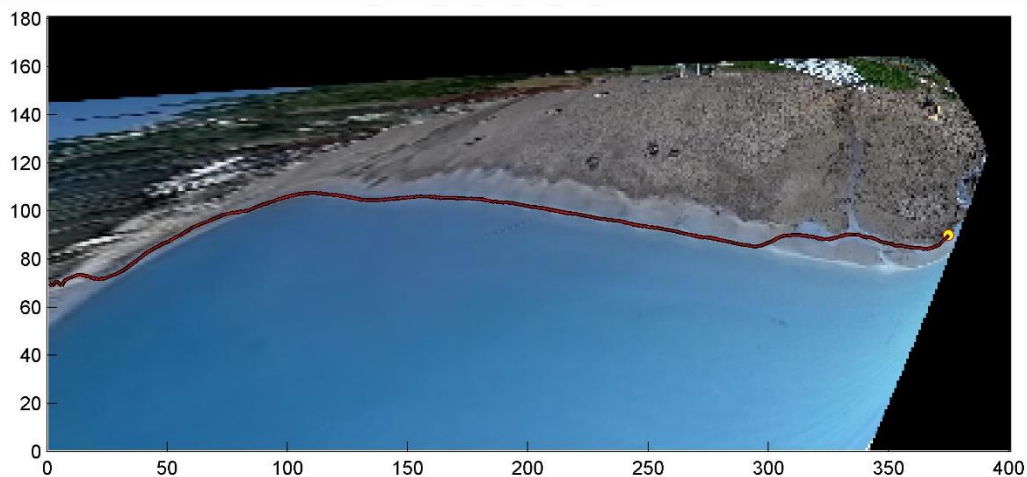
Επικουρικές εργασίες βαθμονόμησης περιλαμβάνουν τη διόρθωση της γεωμετρίας των οπτικών δεδομένων λόγω παραμόρφωσης του φακού (βλ. Heikkilä & Silvén, 1997), καθώς και τη λήψη σταθερών σημείων γεωαναφοράς με χρήση RTK-DGPS (Ground Control Points, GCPs). Τα GCPs αντιστοιχούν επιλεγμένα εικονοστοιχεία της εικόνας με σημεία γνωστού Γεωγραφικού Μήκους και Πλάτους, επιτρέποντας έτσι τη διόρθωση της καμπυλότητας του φακού, καθώς και τη γεωαναφορά των οπτικών δεδομένων σε πραγματικές συντεταγμένες, αλλά και περιστροφή των εικόνων θέτοντας ως σημείο (0,0) τη θέση της κάμερας (Vousdoukas et al., 2011). Οι λειτουργίες αυτές εκτελούνται στο σύνολο των δεδομένων όταν αυτά αποθηκευτούν στον κεντρικό data server.

Έπειτα από την παραπάνω επεξεργασία παράγονται γεωαναφερόμενα μωσικά TIMEX και IMMAX εικόνων (Εικόνα 9) που μπορούν κατόπιν να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση των μορφολογικών παραμέτρων ενδιαφέροντος. Η ακτογραμμή ανιχνεύεται από τις εικόνες TIMEX, ενώ το μέγιστο όριο της κυματικής αναρρίχησης ανιχνεύεται πάνω στις IMMAX εικόνες. Έτσι, σε βάθος χρόνου καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση της μορφοδυναμικής εξέλιξης της παραλίας με υψηλή χωρο-χρονική κάλυψη.



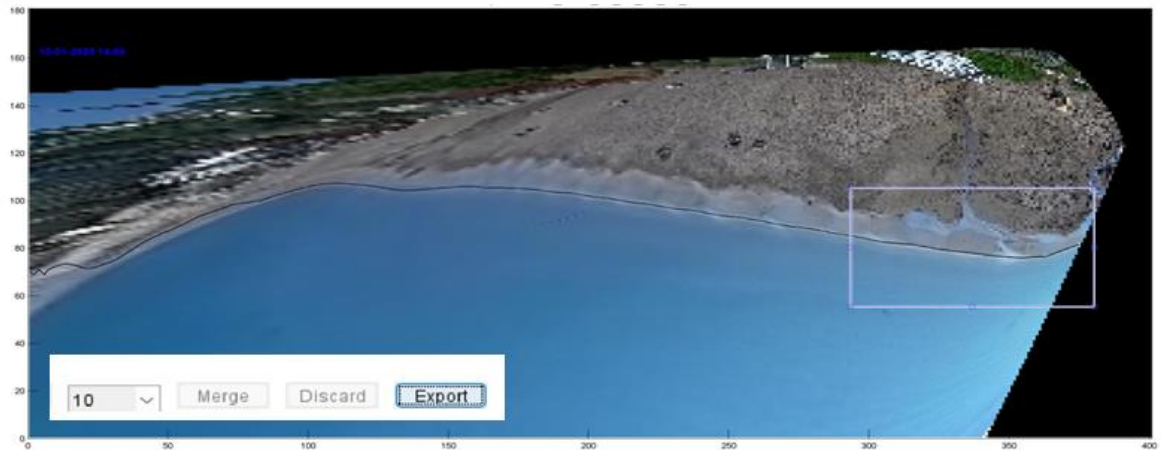
**Εικόνα 9:** Γεωαναφερμένα μωσαικά TIMEX (αριστερά) και IMMAX (δεξιά) εικόνων από την παραλία του Coral Bay (06/03/2023 08:00).

Η ανίχνευση της ακτογραμμής στις TIMEX εικόνες πραγματοποιείται σε 2 επιμέρους στάδια. Αρχικά τίθεται το σημείο εκκίνησης της ανίχνευσης και εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος kernel ο οποίος σαρώνει ταχύτατα την εικόνα και αγκυρώνεται στο μέσο της περιοχής ενδιαφέροντος σημαντικών χρωματικών διαφοροποιήσεων (όριο ξηράς – θάλασσας, δηλαδή στην ακτογραμμή). Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε προγραμματιστικό περιβάλλον matlab και η ακρίβεια των ανιχνεύσεων ελέγχεται κάθε φορά από εξειδικευμένο χρήστη (Εικόνα 10).



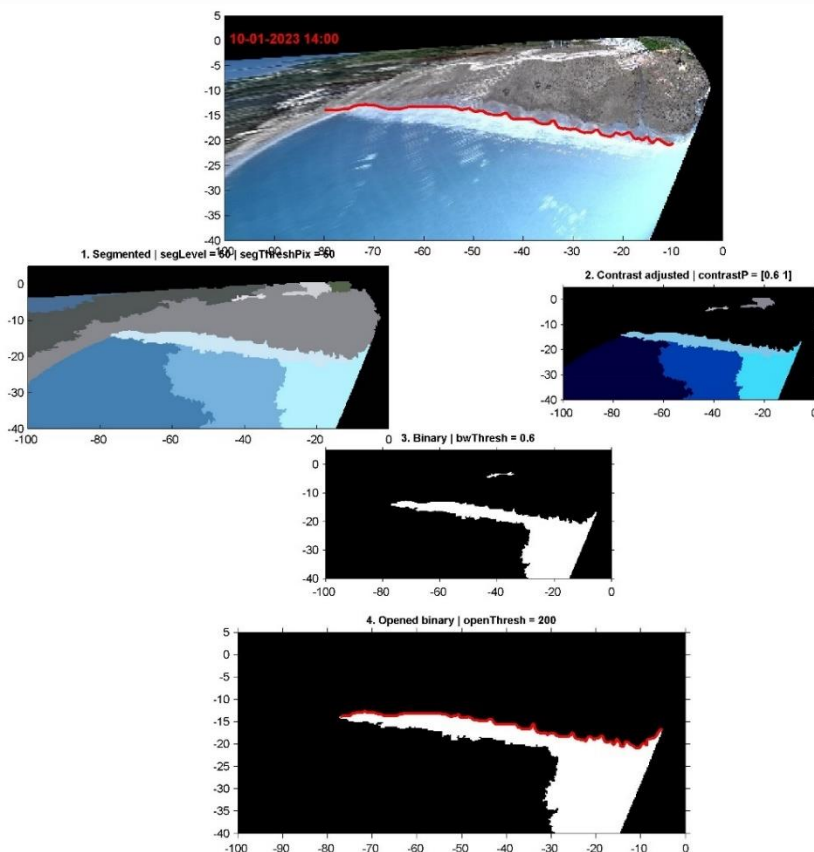
**Εικόνα 10.** Αυτόματη ανίχνευση ακτογραμμής σε TIMEX εικόνα από την παραλία του Coral Bay με εφαρμογή του αλγόριθμου kernel.

Στις περιπτώσεις όπου ο αλγόριθμος αποτυγχάνει να αναγνωρίσει και καταγράψει ακριβώς την ακτογραμμή σε ορισμένες θέσεις, ο χρήστης δύναται να προβεί σε χειροκίνητη διόρθωση του συγκεκριμένου τμήματος της εικόνας με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού που έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Παράκτιας Μορφοδυναμικής, Διαχείρισης και Θαλάσσιας Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Αιγαίου σε περιβάλλον matlab (Εικόνα 11).



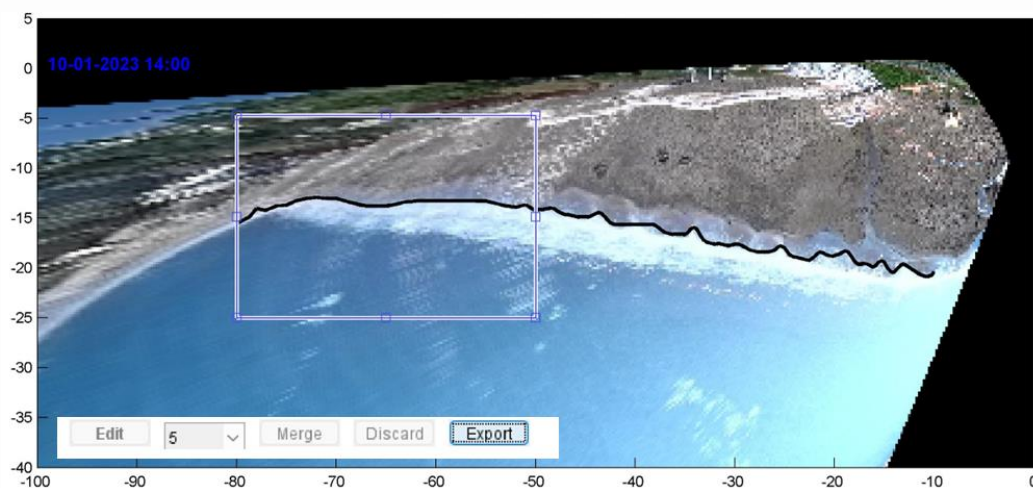
**Εικόνα 11.** Χειροκίνητη διόρθωση ακτογραμμής στην TIMEX εικόνα από την παραλία του Coral Bay με εφαρμογή εξειδικευμένου λογισμικού.

Η ανίχνευση του ανώτατου όριου της κυματικής αναρρίχησης στις IMMAX εικόνες πραγματοποιείται ομοίως σε 2 στάδια. Αρχικά πραγματοποιείται αυτόματη ανίχνευση με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού, όπου λαμβάνεται υπόψη τις χρωματικές διαφοροποιήσεις της εικόνας ώστε να αποτυπωθεί ξεκάθαρα το όριο στεριάς-θάλασσας (Εικόνα 12).



**Εικόνα 12.** Αυτόματη ανίχνευση του ανώτατου ορίου της κυματικής αναρρίχησης σε IMMAX εικόνα από το Coral Bay με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού.

Σε περιοχές όπου η αυτόματη ανίχνευση δεν κρίνεται ικανοποιητική από τον χρήστη, τότε δίνεται επίσης η δυνατότητα χειροκίνητων διορθώσεων με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού (Εικόνα 13).



**Εικόνα 13.** Χειροκίνητη διόρθωση του ανώτατου ορίου της κυματικής αναρρίχησης στην IMMAX εικόνα από την παραλία του Coral Bay με εφαρμογή εξειδικευμένου λογισμικού.

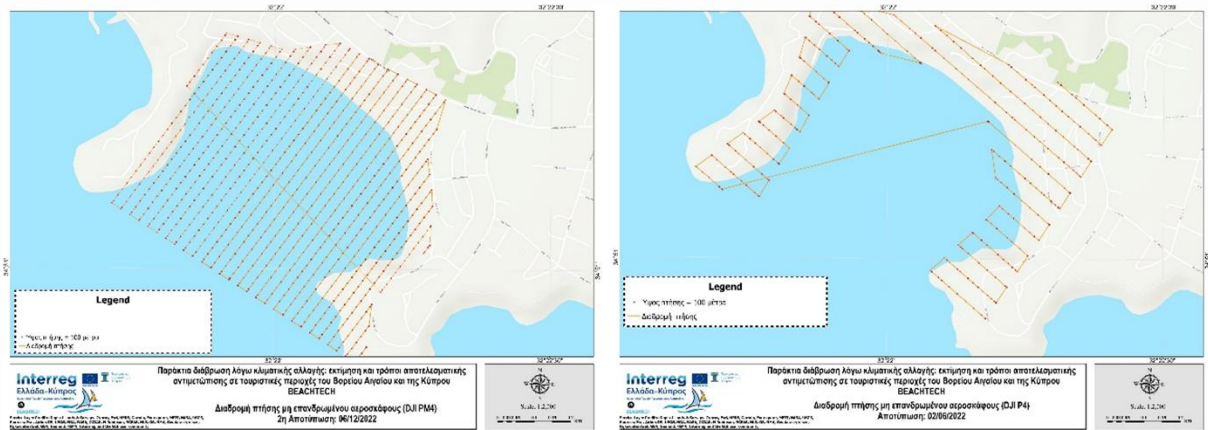
Τέλος, αφού ολοκληρωθούν οι ανιχνεύσεις των μορφολογικών χαρακτηριστικών είναι δυνατή η παρατήρηση των μορφοδυναμικών μεταβολών της παραλίας με σύνθεση των τελικών παραγόμενων εικόνων σε μορφή βίντεο. Έπειτα από ανίχνευση των μορφοδυναμικών τάσεων, επιλέγονται πολλαπλές θέσεις κατά μήκος της ακτογραμμής (τομές) ώστε να ποσοτικοποιηθούν με ακρίβεια οι παρατηρούμενες μεταβολές, θέτοντας μια γραμμή αναφοράς που συνήθως είναι η αρχική ακτογραμμή και θέση της κυματικής αναρρίχησης κατά μήκος της παραλίας στην αρχή των καταγραφών. Τα δεδομένα αυτά συγκρίνονται με τα ταυτόχρονα κυματικά και ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής για ανίχνευση τάσεων και συσχέτισή τους με την παράκτια υδροδυναμική, ενώ επίσης χρησιμοποιούνται για βαθμονόμηση έλεγχο των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις των μορφοδυναμικών μοντέλων. Επίσης, τα δεδομένα αυτά αξιοποιήθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος σε μια καινοτόμα ερευνητική προσπάθεια εναλλακτικής μοντελοποίησης της θέσης της ακτογραμμής με χρήση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης και πιο συγκεκριμένα στην ανάπτυξη και χρήση εξειδικευμένων τεχνητών νευρωνικών δικτύων (βλ. ενότητα 4).



### 3 Μορφοδυναμική μελετώμενων παραλιών

#### 3.1 Παραλία Coral Bay - Κύπρος

Τα σχέδια/πορείες των πτήσεων που πραγματοποιήθηκαν από τα ΣμηΕΑ στο Coral Bay στις 2 διαφορετικές ημερομηνίες καταγραφών (02/06/2022 και 06/12/2022) παρατίθενται στην εικόνα 14.

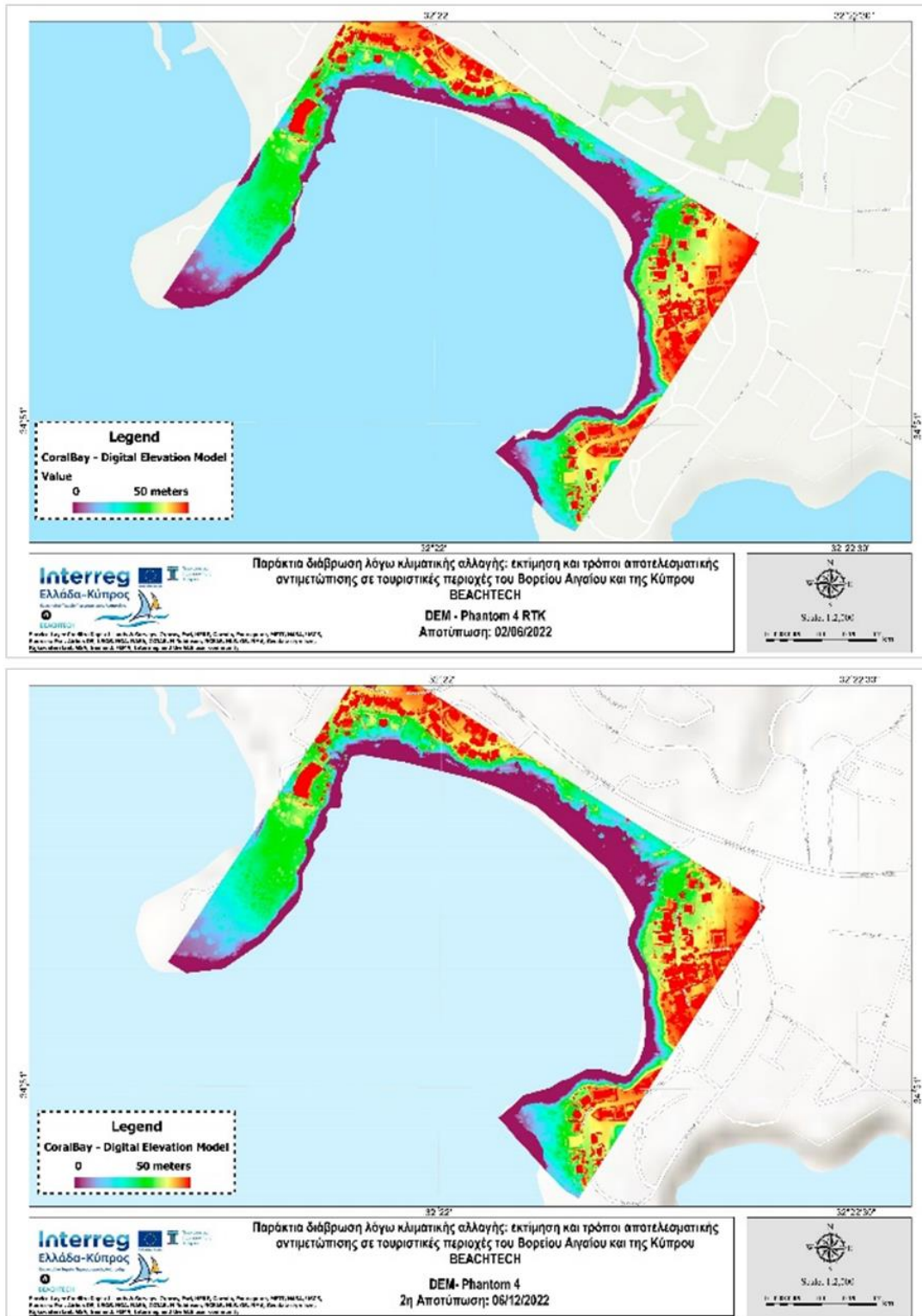


**Εικόνα 14:** Πορείες πτήσεων που σχεδιάστηκαν και ακολουθήθηκαν από τα ΣμηΕΑ στις 02/06/2022 (αριστερά) και 06/12/2022 (δεξιά) στην παραλία του Coral Bay.

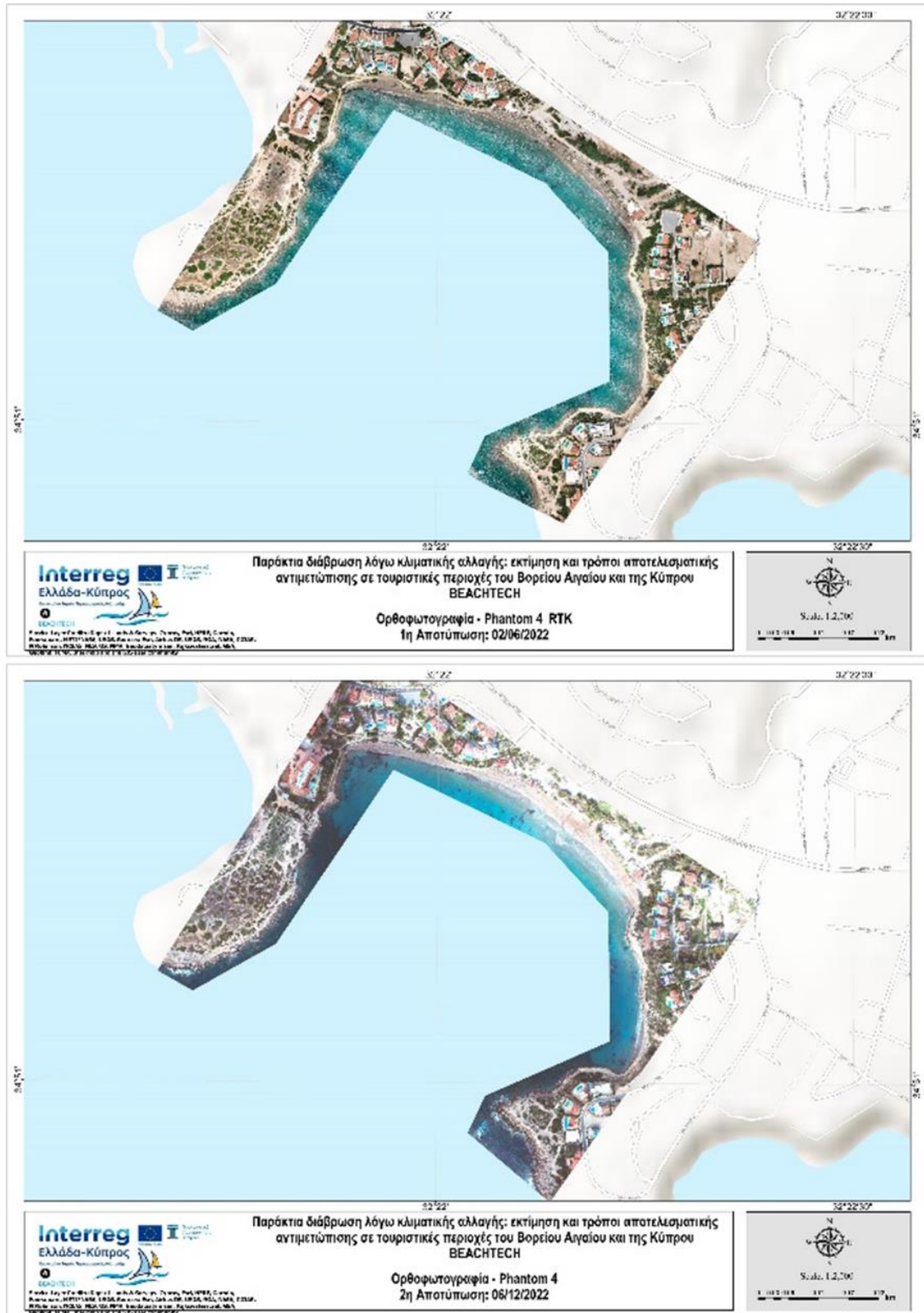
Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους υψηλής ακρίβειας που παράχθηκαν από επεξεργασία των οπτικών δεδομένων (εικόνων) από τα ΣμηΕΑ παρατίθενται στην εικόνα 15. Από τη σύγκριση των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των 2 διαφορετικών ημερομηνιών δε φάνηκε κάποια σημαντική διαφορά στην ευρύτερη υψομετρία της παραλίας. Όμως, καταγράφηκε σημαντική διαφορά στην περιοχή της ακτογραμμής η οποία οδηγεί στο συμπέρασμα πως μεταξύ του χρονικού διαστήματος λήψης των αεροφωτογραφιών από τα ΣμηΕΑ καταγράφηκαν προσχωτικές διεργασίες, ειδικότερα στο δυτικό τμήμα της παραλίας.

Οι ορθοφωτογραφίες που παράχθηκαν από τα οπτικά δεδομένα παρατίθενται στην εικόνα 16 που ακολουθεί. Ομοίως, είναι εμφανής η πρόσχωση που παρατηρείται στην περιοχή της ακτογραμμής συγκρίνοντας τις δύο εικόνες.

Έπειτα από κατάλληλη βαθμονόμηση από τις τιμές ανακλαστικότητας των EVA και των αποτελεσμάτων του ραδιόμετρου στις καταγραφές με ΣμηΕΑ που έφερε πολυφασματικό δέκτη 5 χρωμάτων, προέκυψε ως αποτέλεσμα η ακόλουθη ορθοφωτογραφία υψηλής ευκρίνειας (Εικόνα 17).

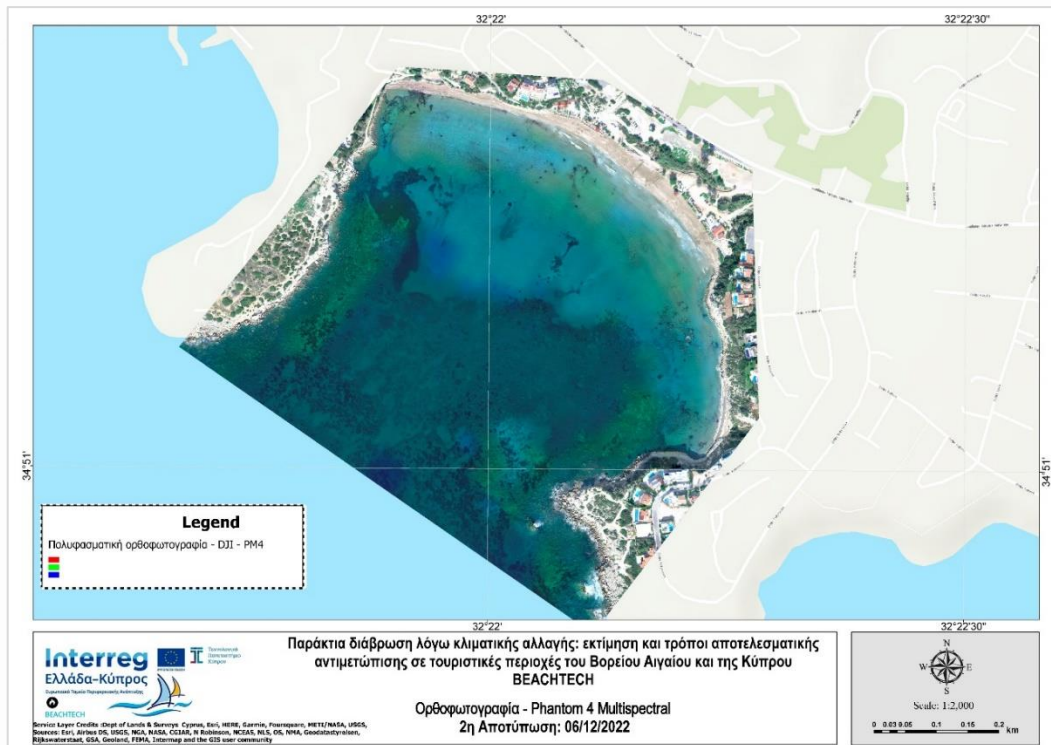


**Εικόνα 15:** Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) υψηλής ακρίβειας για την παραλία του Coral Bay από τα δεδομένα που ελήφθησαν στις 02/06/2022 (πάνω) και 06/12/2022 (κάτω).



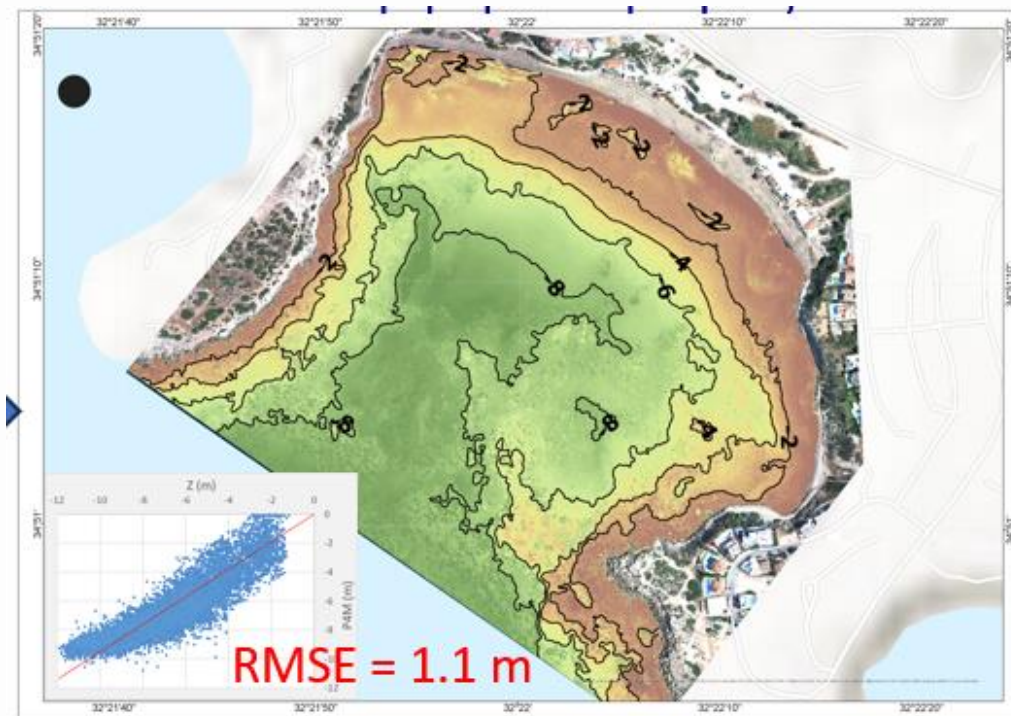
**Εικόνα 16:** Ορθοφωτογραφίες που παρήχθησαν από τα οπτικά δεδομένα για την παραλία του Coral Bay που ελήφθησαν στις 02/06/2022 (πάνω) και 06/12/2022 (κάτω).





**Εικόνα 17:** Ορθοφωτογραφία που προέκυψε από την ανάλυση των δεδομένων του πολυφασματικού δέκτη από την πτήση με ΣμηΕΑ που πραγματοποιήθηκε στις 06/12/2022.

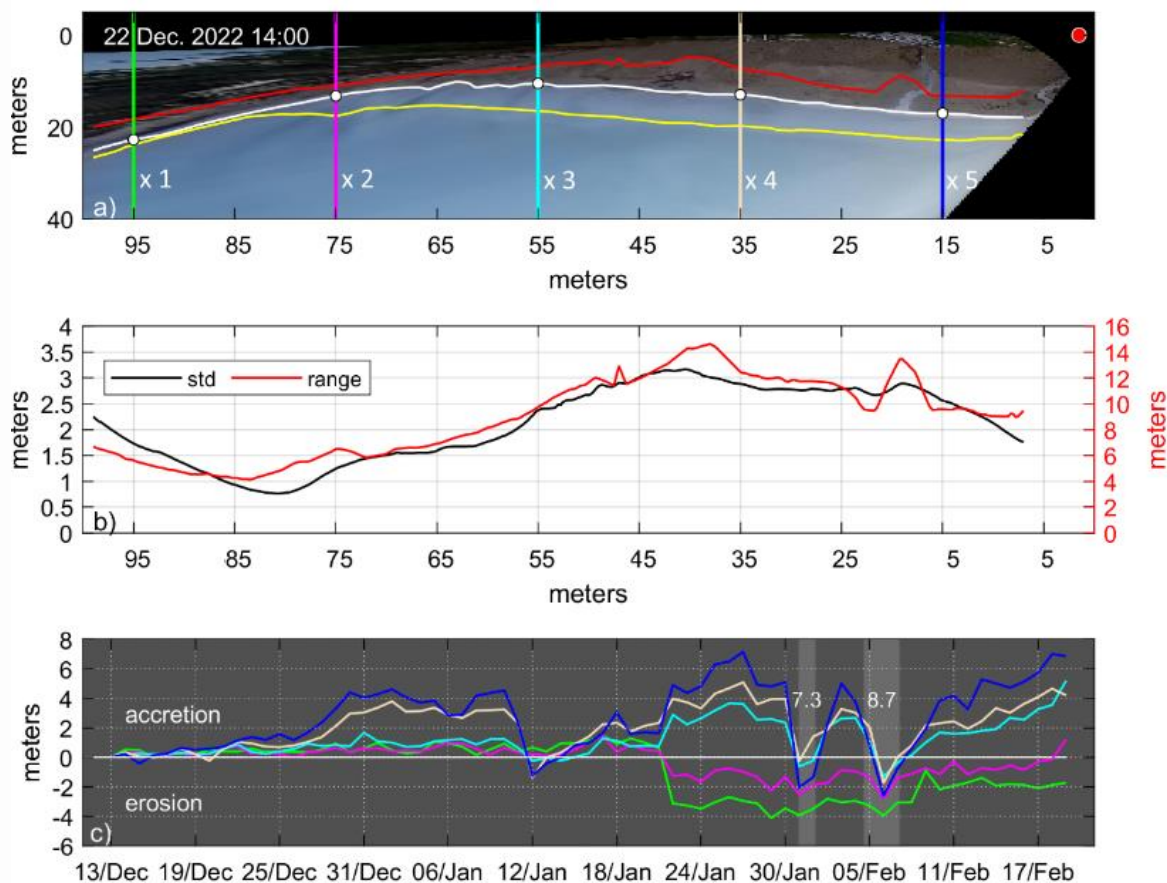
Τέλος, η παράκτια βαθυμετρία που εξήχθη από τις εικόνες των ΣμηΕΑ στις 06/12/2022 παρουσιάζεται στην εικόνα 18. Συγκρίνοντας με την αναλυτική παράκτια βυθομετρία που αποτυπώθηκε σε πολύ κοντινή ημερομηνία από βυθόμετρο ακριβείας (στις 03/12/2022 – βλ. ενότητα 3.3.1.4 του παραδοτέου 4.1.2), τα αποτελέσματα υπήρξαν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά μιας και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που προέκυψε είχε τιμή 1.1 m. Τιμή που είναι αρκετά ικανοποιητική, αν και προτείνεται η συγκεκριμένη ερευνητική προσπάθεια να βελτιωθεί στο μέλλον για μείωση του σφάλματος σε ακρίβεια δεκαδικών ψηφίων, ώστε να είναι δυνατή η χρήση τέτοιου τύπου δεδομένων ως εναλλακτικά δεδομένα εισόδου βαθυμετρίας των παράκτιων υδρο-μορφοδυναμικών μοντέλων προσομοίωσης.



**Εικόνα 18:** Απεικόνιση της παράκτιας βαθυμετρίας όπως προέκυψε με επεξεργασία των οπτικών δεδομένων που ελήφθησαν από πτήσεις με ΣμηΕΑ στην παραλία Coral Bay. Επίσης διακρίνεται το διάγραμμα σύγκρισης των βαθυμετρικών τιμών της παραγόμενης βαθυμετρίας με την αναλυτική βαθυμετρία της παραλίας και η τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος.

Από τα δεδομένα του οπτικού συστήματος επιλέχθηκε η ενεργητική χειμερινή περίοδος Δεκεμβρίου ως Φεβρουαρίου (διάστημα 70 ημερών) για ανάλυση με μεγάλη χωροχρονική διακριτικότητα της παράκτιας μορφοδυναμικής. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι θέσεις της ακτογραμμής και του ανώτατου ορίου της κυματικής αναρρίχησης παρουσίασαν σημαντική μεταβλητότητα. Σε κάθε τομέα της παραλίας οι καταγραφόμενες διαφορές μεταξύ ελάχιστων και μέγιστων θέσεων είχαν εύρη μεταξύ 4 - 14.5 m και 4.0 – 18 m αντίστοιχα (Εικόνες 19b και 20b). Περιοχές αυξημένης μεταβλητότητας συνδέονται κυρίως με περιοχές του κεντρικού και νοτιοανατολικού τομέα της παραλίας, ενώ στον δυτικό τομέα καταγράφηκαν τυπικές αποκλίσεις μικρότερες από 2.5 m και δείχνει αρκετά σταθεροποιημένος.

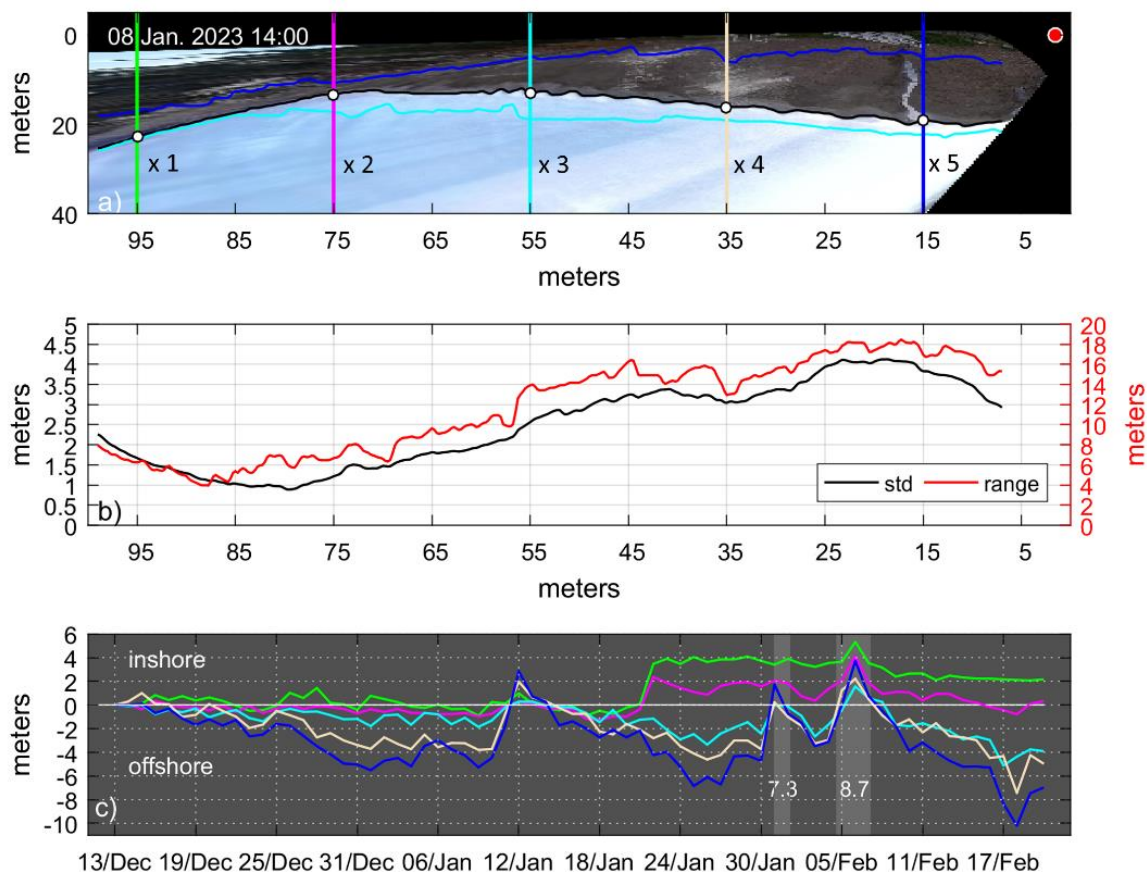
Η μορφοδυναμική της παραλίας γίνεται πιο ξεκάθαρη όταν εξετάζονται οι χρονικές μεταβολές στα 5 επιλεγμένες (ισαπέχουσες) και αντιπροσωπευτικές θέσεις κατά μήκος της παραλίας. Οι θέσεις x3, x4 και x5 που βρίσκονται στο κεντρικό και νοτιοανατολικό τμήμα της παραλίας του Coral Bay παρουσίασαν προσχωτική συμπεριφορά (της τάξης των 4-7 m – Εικόνα 19c) με τις αντίστοιχες θέσεις κυματικής αναρρίχησης να μετατοπίζονται προς τη θάλασσα (μετατόπιση κατά 4-10 m – Εικόνα 20c), συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες θέσεις στην αρχή των καταγραφών (13/12/2022 14:00). Αντίθετα, οι θέσεις x1 και x2 του νοτιοδυτικού τμήματος διαβρώθηκαν κατά 2-4 m με τις αντίστοιχες θέσεις της κυματικής αναρρίχησης να μετατοπίζονται προς τη χέρσο κατά περίπου 2 m.



**Εικόνα 19:** α) Ανιχνευόμενη ακτογραμμή στην επιλεγμένη TIMEX εικόνα από το Coral Bay που δείχνει επίσης τις 5 επιλεγμένες θέσεις (τομές) κατά μήκος της παραλίας και τη θέση εγκατάστασης του οπτικού συστήματος (κόκκινος κύκλος), καθώς και το εύρος μεταξύ ελάχιστων και μέγιστων ανιχνευόμενων θέσεων της ακτογραμμής. β) χωρική κατανομή της τυπικής απόκλισης (std) και του εύρους των καταγραφόμενων μεταβολών κατά μήκος της ακτογραμμής για τη διάρκεια παρακολούθησης. γ) χρονικές μεταβολές των 5 επιλεγμένων θέσεων/τομών κατά μήκος της ακτογραμμής (οι αλλαγές είναι σχετικές ως προς την θέση της ακτογραμμής που καταγράφηκε στις 13/12/2022 14:00. Οι γκρι περιοχές δείχνουν την ώρα, διάρκεια και μέση ανεμολογική ταχύτητα ενεργητικών ανεμολογικών συμβάντων που επηρέασαν την παραλία (άνεμοι από το Ν και ΝΔ τομέα με ταχύτητες  $> 7.0 \text{ ms}^{-1}$  και διάρκεια  $> 6 \text{ hours}$ ).

Από τα ανεμολογικά δεδομένα καταγράφηκαν 2 ανεμογενή επεισόδια (θύελλες) που έλαβαν χώρα το Φλεβάρη. Κατά τη διάρκεια αυτών των θυελλών, καταγράφηκε σημαντική απόκριση της ακτογραμμής στο νοτιο-ανατολικό τμήμα της παραλίας (διάβρωση της τάξης των 6 m στις παραλιακές θέσεις/προφίλ x5 και x4, ενώ στις θέσεις x1 και x2 οι μεταβολή ήταν ανεπαίσθητη (Εικόνα 19c). Αναλύοντας το πως μεταβλήθηκε το ανώτατο όριο της κυματικής αναρρίχησης ανιχνεύτηκαν παρόμοιες τάσεις (Εικόνα 20c). Αξίζει να σημειωθεί πως η μορφοδυναμική της παραλίας μεταβάλλεται έντονα σε συγκεκριμένες ημερομηνίες (στις 27/12, 09/01, 14/01, 20/01 και 09/02) κατά τις οποίες δεν καταγράφηκαν σημαντικές ανεμολογικές ταχύτητες. Όμως, όταν εξετάζονται τα δεδομένα των κυματογράφων φαίνεται πως κατά τις ημερομηνίες αυτές τα κυματικά ύψη ήταν αρκετά αυξημένα (βλ. και ενότητα 3.3.1.6 στο παραδοτέο 4.1.3).

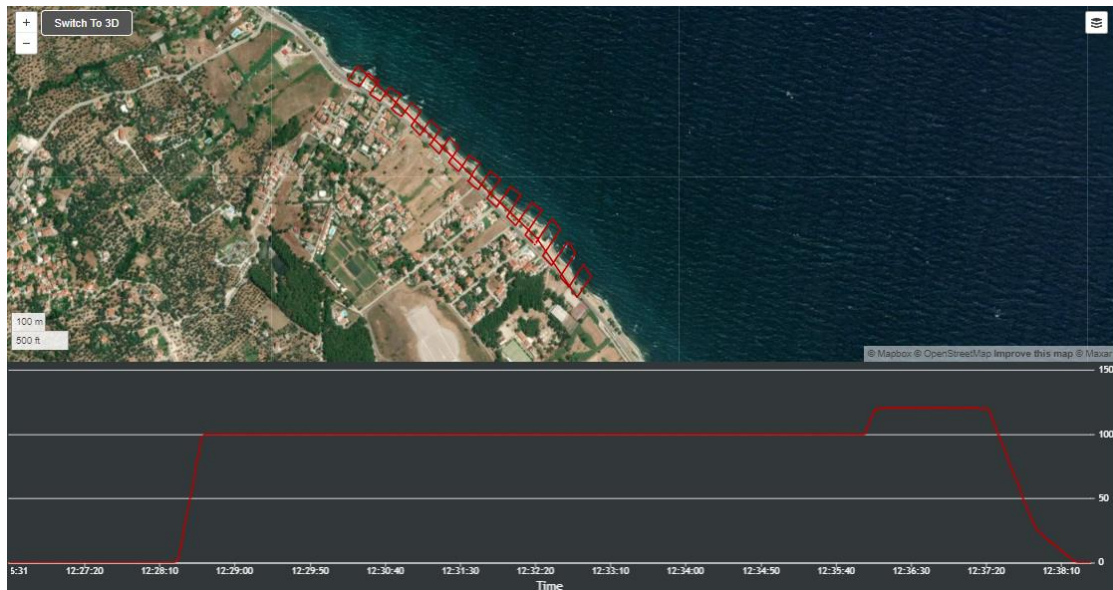




**Εικόνα 20:** a) Ανιχνευόμενη θέση του ανώτατου όριου κυματικής αναρρίχησης στην IMMAX εικόνα από το Coral Bay που δείχνει επίσης τις 5 επιλεγμένες θέσεις (τομές) κατά μήκος της παραλίας και τη θέση εγκατάστασης του οπτικού συστήματος (κόκκινος κύκλος), καθώς και το εύρος μεταξύ ελάχιστων και μέγιστων ανιχνευόμενων θέσεων της κυματικής αναρρίχησης. b) χωρική κατανομή της τυπικής απόκλισης (std) και του εύρους των καταγραφόμενων μεταβολών κατά μήκος της παραλίας για τη διάρκεια παρακολούθησης. c) χρονικές μεταβολές των 5 επιλεγμένων θέσεων/τομών κατά μήκος της ακτογραμμής (οι αλλαγές είναι σχετικές ως προς την θέση της ακτογραμμής που καταγράφηκε στις 13/12/2022 14:00. Οι γκρι περιοχές δείχνουν την ώρα, διάρκεια και μέση ανεμολογική ταχύτητα ενεργητικών ανεμολογικών συμβάντων που επηρέασαν την παραλία (άνεμοι από το N και ΝΔ τομέα με ταχύτητες  $> 7.0 \text{ ms}^{-1}$  και διάρκεια  $> 6 \text{ hours}$ ).

### 3.2 Παραλία Ιστορικό - Λέσβος

Η παραλία του Ιστορικού είναι «στενή» (πλάτη της τάξης των 2-5 m στο μεγαλύτερο τμήμα της), ενώ χαρακτηρίζεται από την παρουσία πληθώρας αλμυρικών δίπλα από τον παράκτιο δρόμο και κοντά στην ακτογραμμή, η οποία στην πλειονότητά της καλύπτεται από νεκρά φανερόγαμα Ποσειδωνίας. Χωροταξία τέτοιου τύπου δεν επιτρέπει την καταγραφή με ακρίβεια της παράκτιας τοπογραφίας (και ειδικότερα της ακτογραμμής) με οπτικά μέσα όπως τα ΣμηΕΑ, μιας και οι φωτογραφίες λαμβάνονται από κατάλληλο ύψος (άνω των 10 m). Κάτι το οποίο επιβεβαιώθηκε και από την δοκιμαστική πτήση που πραγματοποιήθηκε στις 12/10/2022 (Εικόνα 21).



**Εικόνα 21:** Η πτήση ΣμηΕΑ που σχεδιάστηκε και ακολουθήθηκε για την καταγραφή της τοπογραφίας της παραλίας του Ιστορικού στις 12/10/2022.

Η καταγραφή της ακτογραμμής της παραλίας πραγματοποιήθηκε έπειτα από χειροκίνητη ψηφιοποίηση του παραγόμενου ορθοφωτοχάρτη για τη συγκεκριμένη ημερομηνία (Εικόνα 22).

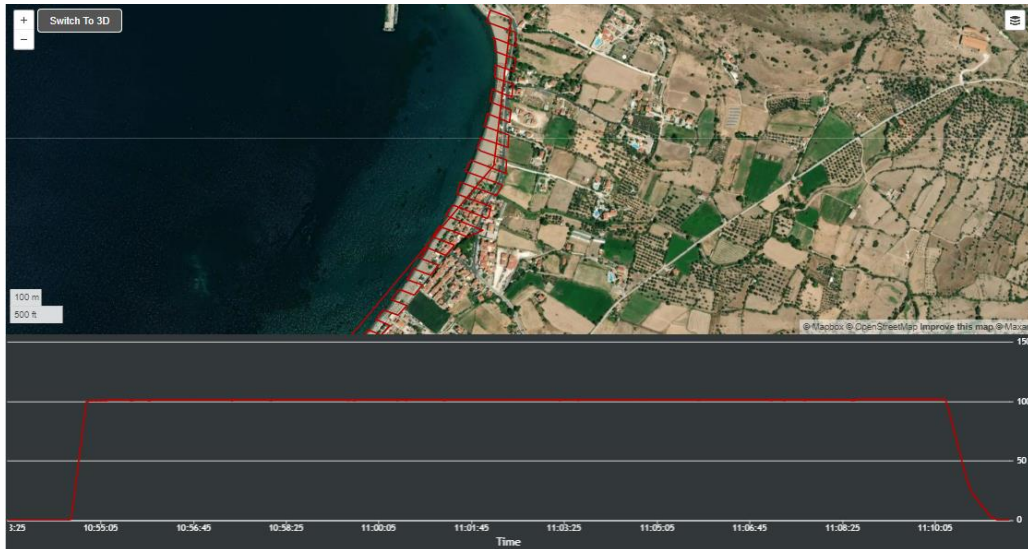


**Εικόνα 22:** Προσέγγιση της θέσης της ακτογραμμής της παραλίας του Ιστορικού έπειτα από χειροκίνητη ψηφιοποίηση στην παραγόμενη ορθοφωτογραφία από τα δεδομένα της πτήσης με ΣμηΕΑ που πραγματοποιήθηκε στις 12/10/2022.

Αν και το αποτέλεσμα δείχνει ορθολογικό, η ακτογραμμή προσεγγίστηκε με βάση την «εμπειρία» του χρήστη που προέβη στην ψηφιοποίηση και όχι με αντικειμενικά επιστημονικά κριτήρια καταγραφής. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε πως είναι άσκοπο να πραγματοποιηθούν περαιτέρω πτήσεις καταγραφής, μιας και κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε εσφαλμένες αποτυπώσεις/ψηφιοποιήσεις της ακτογραμμής.

### 3.3 Παραλία Πέτρας - Λέσβος

Ενδεικτικό σχέδιο πτήσης της παραλίας για την ημερομηνία 12/09/2022 παρουσιάζεται στην Εικόνα 23.



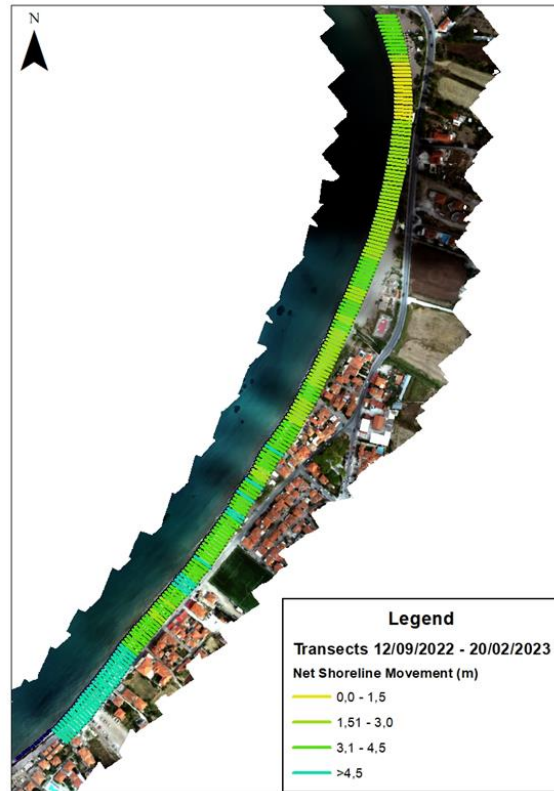
**Εικόνα 23:** Ενδεικτικό σχέδιο πτήσης ΣμηΕΑ όπως εκτελέστηκε στην παραλία της Πέτρας στις 12/09/2022.

Συγκρίνοντας τις διαφορετικές θέσεις της ακτογραμμής μεταξύ 12/09/2022 και 20/02/2023 φαίνεται πως η μέση απόσταση/διαφορά μεταξύ των ακτογραμμών είναι 3.5 m, ενώ η μέγιστη καταγραφόμενη διαφορά ήταν της τάξης των 7.0 m (Εικόνα 24). Θα πρέπει να σημειωθεί πως σε όλες τις μελετώμενες θέσεις της ακτογραμμής (213 ισαπέχουσα προφίλ) καταγράφηκε απόθεση.

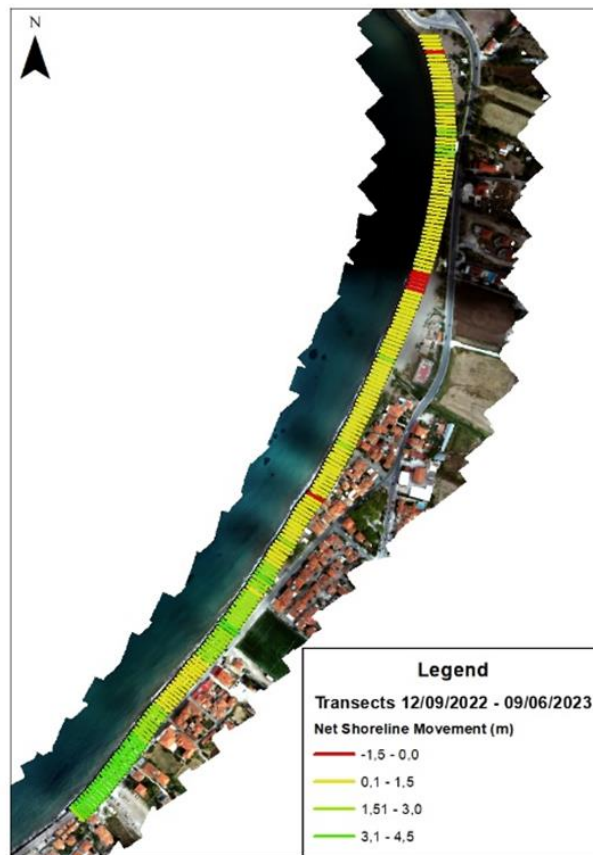
Αντίστοιχα, η σύγκριση των θέσεων της ακτογραμμής μεταξύ 12/09/2022 και 09/06/2023 έδειξε μέση απόσταση/διαφορά μεταξύ των ακτογραμμών είναι 1.3 m, ενώ η μέγιστη καταγραφόμενη διαφορά ήταν της τάξης των 3.9 m (Εικόνα 25). Στις περισσότερες θέσεις της παραλίας (208 από τις 213) καταγράφηκε απόθεση, ενώ σε 6 καταγράφηκε διάβρωση που κυμάνθηκε μεταξύ 0.5 - 1.0 m.

Εξετάζοντας τις θέσεις της ακτογραμμής μεταξύ 20/02/2023 και 09/06/2023, φαίνεται πως η μέση απόσταση μεταξύ των δύο ακτογραμμών είναι -2.2 m, ενώ η μέγιστη καταγραφόμενη διαφορά τους είναι - 4.3 m (Εικόνα 26). Στις περισσότερες θέσεις της παραλίας (201 από τις 213) καταγράφηκε διάβρωση, ενώ σε 12 καταγράφηκε μικρή απόθεση που κυμάνθηκε μεταξύ 0.2 – 0.5 m.



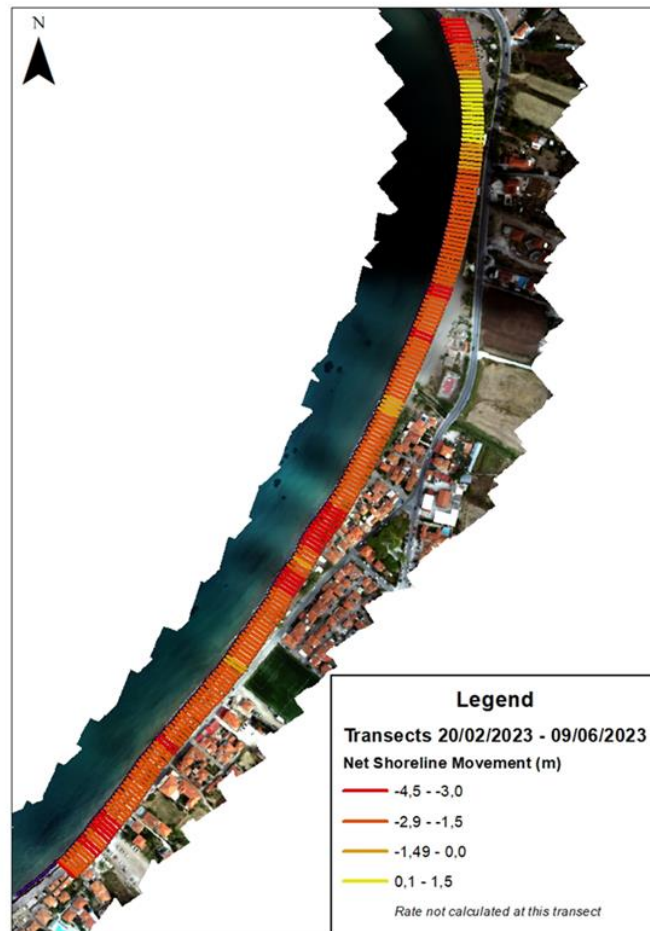


**Εικόνα 24:** Σύγκριση θέσεων ακτογραμμής (εγκάρσιων προφίλ) μεταξύ 12/09/2022 και 20/02/2023.



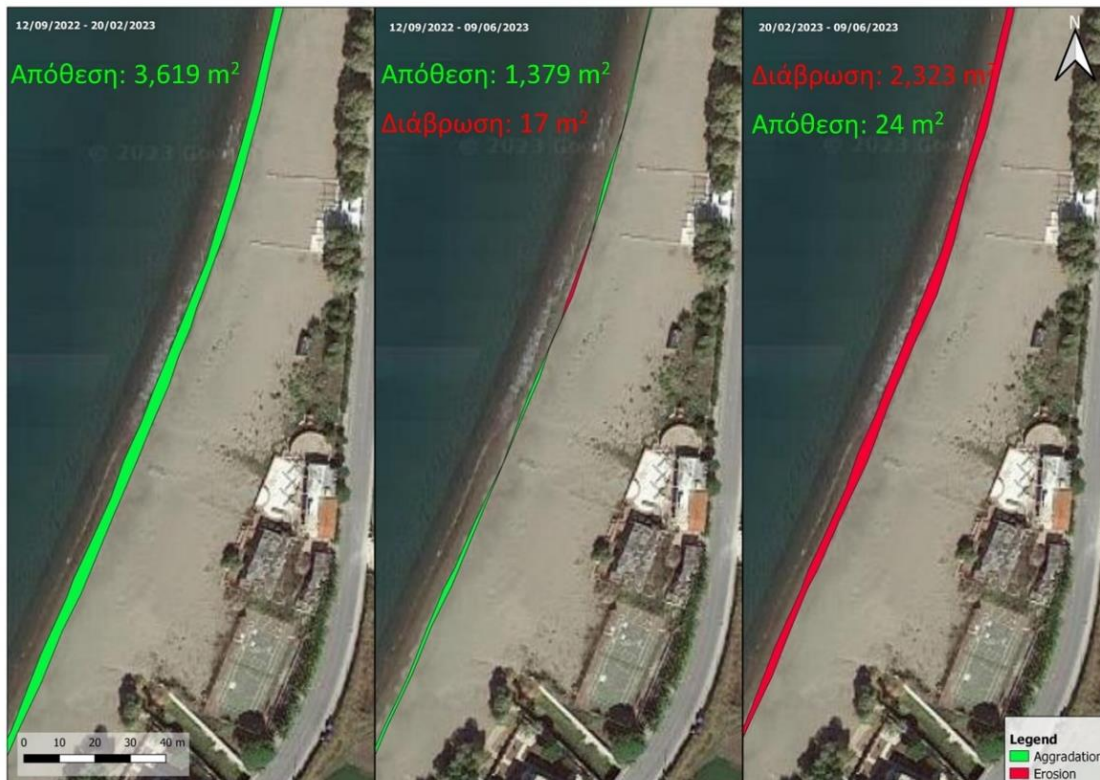
**Εικόνα 25:** Σύγκριση θέσεων ακτογραμμής (εγκάρσιων προφίλ) μεταξύ 12/09/2022 και 09/06/2023.





**Εικόνα 26:** Σύγκριση θέσεων ακτογραμμής (εγκάρσιων προφίλ) μεταξύ 20/02/2023 και 09/06/2023.

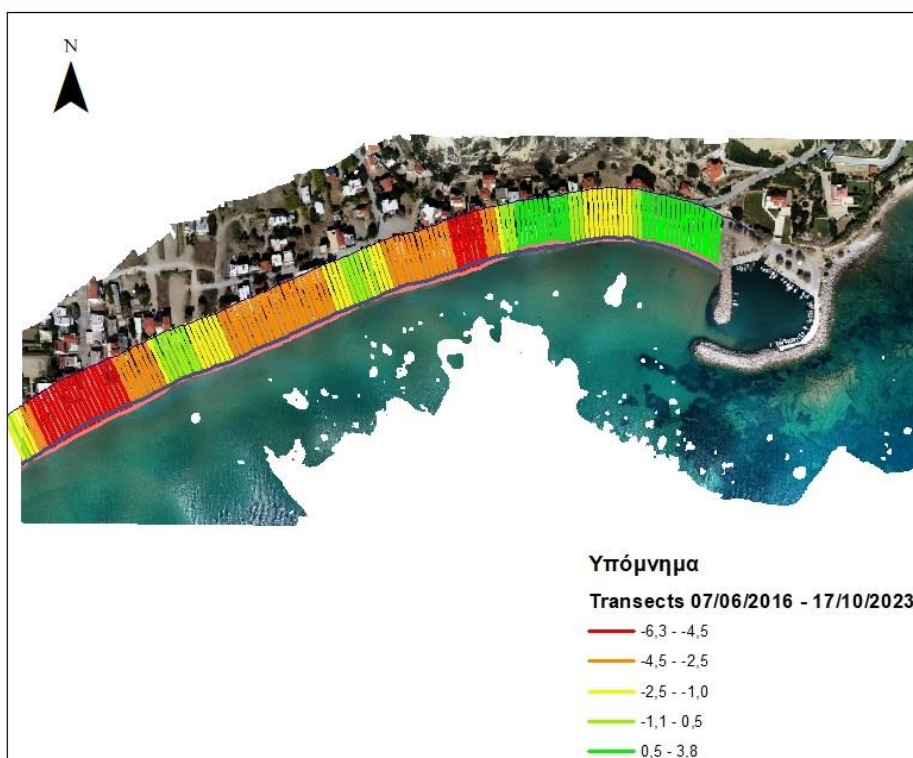
Από τα παραπάνω αποτελέσματα, καταλαβαίνει κανείς τη διαφοροποίηση της παράκτιας μορφολογίας, η οποία ελέγχεται από τις τοπικές υδροδυναμικές και ιζηματοδυναμικές συνθήκες και παρουσιάζει υψηλή χωρο-χρονική μεταβλητότητα. Κάτι το οποίο διαφαίνεται πληρέστερα όταν εξεταστεί η διαφοροποίηση στο εμβαδό της παραλίας μεταξύ των διαφορετικών ημερομηνιών (Εικόνα 27). Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ 12/09/2022 και 20/02/2023 η παραλία είχε προσχωτική συμπεριφορά, ενώ εκτιμήθηκε πως περίπου 3,620 m<sup>2</sup> είχαν εναποτεθεί στο παράκτιο μέτωπο. Παρόμοια συμπεριφορά πρόσχωσης καταγράφηκε μεταξύ των ημερομηνιών 12/09/2022 και 09/06/2023 όπου εναποτέθηκαν συνολικά περίπου 1,360 m<sup>2</sup> κατά μήκος της παραλίας, ενώ αντίθετα μεταξύ των ημερομηνιών 20/02/2023 και 09/06/2023, η παραλία έδειξε διαβρωτικές τάσεις με περίπου 2,300 m<sup>2</sup> παραλίας να έχουν χαθεί από το παράκτιο μέτωπο.



**Εικόνα 27:** Εκτιμώμενα εμβαδά διάβρωσης και απόθεσης μεταξύ των διαφορετικών ημερομηνιών καταγραφής της παραλιακής μορφολογίας με ΣμηΕΑ.

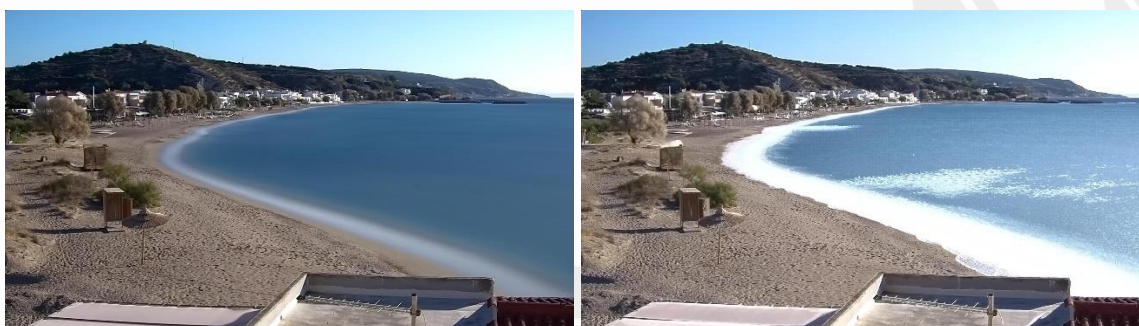
### 3.4 Παραλία Κώμης - Χίος

Στην περίπτωση της Κώμης στην Χίο η σύγκριση των ακτογραμμών έγινε με την χρήση δύο ορθοφωτοχαρτών. Ο πρώτος ορθοφωτοχάρτης παράχθηκε από δεδομένα που συλλέχθηκαν στις 07/06/2016 στα πλαίσια προηγούμενης πτήσης με ΣμηΕΑ από το τμήμα Ωκεανογραφίας και Θαλασσιών Βιο-επιστημών του Παν. Αιγαίου, ενώ ο δεύτερος από δεδομένα που συλλέχθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος στις 17/10/2023. Από την σύγκριση τους προέκυψε πως σε κάποια σημεία η ακτογραμμή εμφανίζει απόθεση, ενώ σε άλλα διάβρωση (Εικόνα 28). Από τα αποτελέσματα διαφαίνεται πως σε μια μακροπρόθεσμη περίοδο 7 χρόνων, η παραλία ως επί των πλείστων παρουσίασε πρόσχωση (μεταξύ 0.5 – 2 m) στο ανατολικό της τμήμα (πλησίον του αλιευτικού καταφυγίου), ενώ αντίθετα ανιχνεύτηκαν σημαντικές διαβρωτικές τάσεις (άνω των 4 m στην πλειονότητα των εξεταζόμενων θέσεων) στο κεντρικό και δυτικό της τμήμα. Το παραπάνω επιβεβαιώνει τις επικρατούσες διαβρωτικές τάσεις της παραλίας, ενώ αποτελεί ένδειξη εγκάρσιας στερεομεταφοράς από την χερσαία προς την υποθαλάσσια παραλία μιας και οι μικρές ανιχνευόμενες προσχωτικές τάσεις στο ανατολικό της τμήμα δε συμβαδίζουν με τα κατά πολύ μεγαλύτερα (και σε πολλαπλές θέσεις) ποσά διάβρωσης που ανιχνεύτηκαν στην υπόλοιπη παραλία ώστε η μορφοδυναμική να αιτιολογείται μέσω οριζόντιας προς την ακτή στερεομεταφοράς.



**Εικόνα 28:** Σύγκριση θέσεων ακτογραμμής (εγκάρσιων προφίλ) μεταξύ 07/06/2016 και 17/10/2023.

Το οπτικό σύστημα στην παραλία της Κώμης εγκαταστάθηκε τον Ιούνιο του 2023 και λαμβάνει συνεχόμενα ωριαία δεδομένα TIMEX και IMMAX εικόνων (Εικόνα 29) τα οποία αποθηκεύονται τοπικά στον υπολογιστή πεδίου, αλλά και στον data server του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Όμως, λόγω της ύπαρξης πληθώρας ομπρελών και έντονης δραστηριότητας κατά τη διάρκεια της τουριστικής περιόδου (ως και μέσα Σεπτεμβρίου), δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί εξαγωγή των θέσεων της ακτογραμμής και του ανώτατου ορίου της κυματικής αναρρίχησης προς το παρόν. Η ανάλυση αυτή και η εξαγωγή στα σχετικών δεδομένων θα πραγματοποιηθεί σε μεταγενέστερο στάδιο, σε συνεργασία του Πανεπιστημίου Αιγαίου με το ΠΤΑΒΑ.



**Εικόνα 29:** Εικόνες TIMEX (αριστερά) και IMMAX (δεξιά) που παράχθηκαν από το οπτικό σύστημα το οποίο εγκαταστάθηκε στην παραλία της Κώμης (18/10/2023 10:00).



## 4 Ανίχνευση θέσεων ακτογραμμής με μηχανική εκμάθηση

Πολλές μέθοδοι αυτόματης εξόρυξης της ακτογραμμής έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και περιλαμβάνουν κυρίως τη μέθοδο με βάση την κατάτμηση κατωφλίου (Rasuly et al., 2010), τη μέθοδο βάσει ανάλυσης δεικτών (Liu et al., 2017), τη μέθοδο με βάση το ενεργό μοντέλο περιγράμματος (Ke Cao et al., 2016), κ.τ.λ. Οι εφαρμογές μηχανικής μάθησης στην ανίχνευση παράκτιων αλλαγών έχουν επικεντρωθεί κυρίως στον α) προσδιορισμό της θέσης της ακτογραμμής, β) πρόβλεψη παράκτιας διάβρωσης και γ) προσδιορισμό των πιο σημαντικών μετεωρολογικών, υδρολογικών, γεωμορφολογικών ή ανθρωπογενών παραγόντων που οδηγούν στην παρατηρούμενη αλλαγή της ακτογραμμής (Goldstein et al., 2019).

Τα τελευταία χρόνια, οι μέθοδοι ανίχνευσης ακμών που βασίζονται σε συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα έχουν γίνει το state-of-the-art. Οι Xie και Tu (Xie & Tu, 2015) πρότειναν ένα ολιστικά ένθετο δίκτυο ανίχνευσης άκρων (Holistically-Nested Edge Detection-HED) που για πρώτη φορά, πραγματοποίησε ανίχνευση άκρων σε εικόνα χρησιμοποιώντας πλήρως συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα και το αποτέλεσμα ανίχνευσης που ελήφθη ήταν πολύ καλύτερο από προηγούμενες μεθόδους. Ωστόσο, το δίκτυο δεν αξιοποίησε πλήρως τις δυνατότητες του μεσαίου επιπέδου συνέλιξης, με αποτέλεσμα να χαθούν πολλές λεπτομέρειες. Οι Yu et al. (Yu et al., 2017) πρότειναν ένα βαθύ δίκτυο από άκρο σε άκρο για ανίχνευση σημασιολογικών ακμών με επίγνωση κατηγοριών (CASENet: Deep Category-Aware Semantic Edge Detection). Το δίκτυο όχι μόνο εκτέλεσε ανίχνευση μεμονωμένων άκρων, αλλά έκρινε και την κατηγορία ακμών, όμως η ακρίβεια ανίχνευσης δεν ήταν υψηλή και δεν μπορούσε να ανταποκριθεί στην εργασία εξαγωγής ακτογραμμής εικόνων τηλεπισκόπησης με υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας.

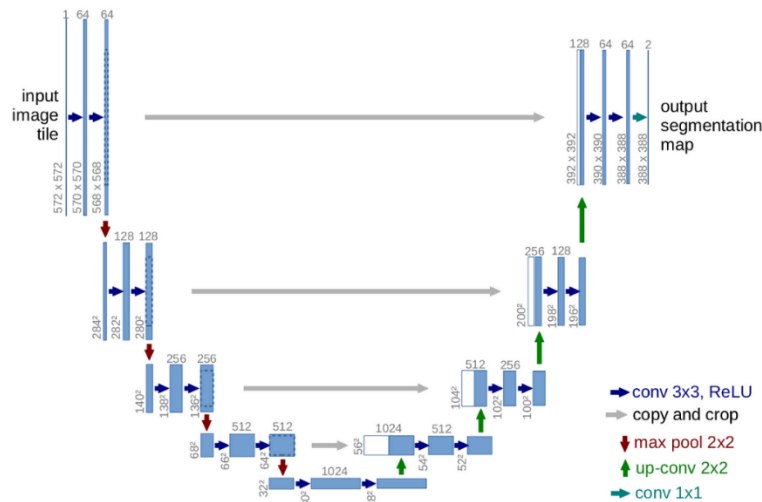
Οι Liu et al. (Liu et al., 2019) πρότειναν έναν ακριβή ανιχνευτή ακμών που χρησιμοποιεί πλουσιότερα συνελκτικά χαρακτηριστικά (Richer Convolutional Features). Είχε μια πιο λεπτομερή σύντηξη χαρακτηριστικών και η απόδοση είχε βελτιωθεί σημαντικά, όμως επειδή οι πληροφορίες άκρων και ο θόρυβος του παρασκηνίου των εικόνων τηλεπισκόπησης είναι πιο περίπλοκοι, ο αλγόριθμος δεν είναι ιδανικός όταν χρησιμοποιείται στην εργασία ανίχνευσης ακτογραμμών. Πολλοί ακόμη αλγόριθμοι ανίχνευσης ακτογραμμών που χρησιμοποιούν βαθιά μάθηση έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία (Bengoufa et al., 2021; Dang et al., 2022; Kumar et al., 2020). Λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα των δεδομένων εισόδου και το επιθυμητό αποτέλεσμα, οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες: εποπτευόμενη μάθηση, μάθηση χωρίς επίβλεψη, ημι-εποπτευόμενη μάθηση και ενισχυτική μάθηση (Tsiakos & Chalkias, 2023).

### 4.1 Ανάπτυξη Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια ανίχνευσης της ακτογραμμής, στο παρόν έργο αναπτύχθηκε μια μέθοδος ανίχνευσης ακτογραμμών που βασίζεται στο μοντέλο των

συνελικτικών νευρωνικών δικτύων (Convolutional neural networks-CNNs). Είναι ένα μοντέλο βαθιάς μάθησης εμπνευσμένο από τις αρχιτεκτονικές των βιολογικών νευρωνικών δικτύων. Το CNN είναι ένα μοντέλο νευρωνικού δικτύου πολλαπλών επιπέδων εμπρόσθιας τροφοδοσίας, όπου τα επίπεδα διασυνδέονται μεταξύ τους με ένα σύνολο βαρών και biases. Τα συνελικτικά επίπεδα χρησιμοποιούν, ως εισόδους, ενημερωμένες εκδόσεις κώδικα δειγμάτων εικόνας που καταγράφουν διαφορετικά χαρακτηριστικά σαρώνοντας ολόκληρη την εικόνα. Η αρχή βασίζεται στη δημιουργία χαρτών χαρακτηριστικών από κάθε επίπεδο χρησιμοποιώντας τις ενημερώσεις κώδικα εικόνας προκειμένου να τροφοδοτηθούν τα επόμενα επίπεδα (Venkatesan & Li, 2017).

Το δίκτυο U-Net (Ronneberger et al., 2015), το οποίο είναι ένα πλήρως συνελικτικό δίκτυο (Fully Convolutional Network-FCN), επιτυγχάνει εξαιρετική απόδοση κατάτμησης σε μικρά δείγματα δεδομένων. Το U-Net χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την κατάτμηση ιατρικών εικόνων, αλλά βρήκε εφαρμογή και σε γεωχωρικές εικόνες. Όπως φαίνεται στην εικόνα 30, το διακριτικό χαρακτηριστικό του U-Net είναι η πλήρως συμμετρική σύνθεση κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή. Η είσοδος των χαρτών χαρακτηριστικών σε κάθε στάδιο του κωδικοποιητή και του αποκωδικοποιητή υποβάλλονται σε δύο διαδοχικές διαδικασίες συνέλιξης 3×3, ενώ κάθε downsampling στον κωδικοποιητή αντιστοιχεί σε upsampling 2×2 στον αποκωδικοποιητή. Επιπλέον, το U-Net περικλύπτει τους χάρτες χαρακτηριστικών κάθε επιπέδου του κωδικοποιητή για τη διαδικασία αποκωδικοποίησης με τη λειτουργία “Crop and Copy” για να συμπληρώσει μέρος των πληροφοριών που χάνονται στη διαδικασία downsampling και upsampling.



Εικόνα 30: Η δομή του δικτύου U-Net.

Για την ανάπτυξη του προτεινόμενου νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκαν εικόνες που συλλεχθήκαν από τα εγκαταστημένα συστήματα οπτικής παραλιακής παρακολούθησης του παρόντος έργου. Οι μέθοδοι προεπεξεργασίας των εικόνων αυτών μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο είδη: τη μείωση θορύβου και τη διόρθωση εικόνας. Η ποιότητα μιας ανιχνευμένης ακτογραμμής εξαρτάται εν μέρει από την ποιότητα των μεθόδων

προεπεξεργασίας που εφαρμόζονται. Χρησιμοποιώντας μια μέθοδο προεπεξεργασίας που είναι καλύτερα προσαρμοσμένη στο σύνολο δεδομένων, είναι δυνατό να βελτιωθεί το αποτέλεσμα ανίχνευσης. Για την καλύτερη αναγνώριση της ακτογραμμής, είναι σημαντικό να μειωθεί ο θόρυβος, διατηρώντας παράλληλα τις πληροφορίες των άκρων. Για το λόγο αυτό, τα προσαρμοστικά φίλτρα, όπως το διάμεσο (median) φίλτρο (Wenbin Luo, 2006), χρησιμοποιούνται ευρέως.

Το νευρωνικό δίκτυο που προτείνεται σε αυτό το έργο βασίζεται στο U-Net λόγω της ομοιότητας στη φύση μεταξύ της κατάτμησης της επιφάνειας του νερού και της κατάτμησης της ιατρικής εικόνας. Το προτεινόμενο δίκτυο διατηρεί την αρχιτεκτονική κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή και χρησιμοποιεί ίσες ποσότητες downsampling και upsampling, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3. Για να διασφαλιστεί ότι το τελικό αποτέλεσμα κατάτμησης είναι συνεπές με την ανάλυση της εικόνας εισόδου και τους χάρτες χαρακτηριστικών των αντίστοιχων σταδίων του, ο κωδικοποιητής και ο αποκωδικοποιητής έχουν την ίδια χωρική ανάλυση και η λειτουργία συνέλιξης κάθε σταδίου συμπληρώνεται σύμφωνα με το μέγεθος του φίλτρου του στρώματος συνέλιξης. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί πλήρως η έξοδος των διαφόρων σταδίων του κωδικοποιητή για να αναπληρωθεί η απώλεια πληροφοριών που προκαλείται από τη δειγματοληψία και να χρησιμοποιηθούν εκτενώς οι πληροφορίες σε διάφορες κλίμακες για να ολοκληρωθεί καλύτερα το έργο της κατάτμησης χρησιμοποιώντας skip connections αντί της λειτουργίας Crop and Copy όπως στο αρχικό U-Net. Επίσης για να υπερκεραστεί το γεγονός της διαθεσιμότητας δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα προεκπαιδευμένο μοντέλο (το ResNet-34 προεκπαιδευμένο στο ImageNet) ως τμήμα κωδικοποιητή του U-Net. Ο Πίνακας 3 αποτυπώνει αναλυτικά την δομή του νευρωνικού δικτύου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του παρόντος έργου.

**Πίνακας 3:** Δομή του προτεινόμενου νευρωνικού δικτύου.

| Τμήμα         |                                    | Δομή  | Περιγραφή   |
|---------------|------------------------------------|---|---|
| Είσοδος       |                                    | Εικόνα RGB διαστάσεις [Height x Width x 3]                |   |
| Κωδικοποιητής | 1 <sup>ο</sup> Convolutional Block | <b>Convolutional Layer:</b> 32 filters, kernel size: 3x3  | Αυτό το επίπεδο μαθαίνει χαρακτηριστικά χαμηλού επιπέδου, όπως άκρες και χρώματα                  |
|               |                                    | <b>Activation Function:</b> ReLU (Rectified Linear Unit)  |   |
|               |                                    | <b>Max-Pooling Layer:</b> 2x2 pool size                   | Μειώνει τις χωρικές διαστάσεις διατηρώντας παράλληλα τις βασικές πληροφορίες                      |
|               | 2 <sup>ο</sup> Convolutional Block | <b>Convolutional Layer:</b> 64 filters, kernel size: 3x3  | Αυτό το επίπεδο καταγράφει πιο σύνθετα χαρακτηριστικά και μοτίβα στην εικόνα                      |
|               |                                    | <b>Activation Function:</b> ReLU                          |   |
|               |                                    | <b>Max-Pooling Layer:</b> 2x2 pool size                   |   |
|               | 3 <sup>ο</sup> Convolutional Block | <b>Convolutional Layer:</b> 128 filters, kernel size: 3x3 | Αρχίζει να αναγνωρίζει χαρακτηριστικά υψηλού επιπέδου, τα οποία θα μπορούσαν να είναι χρήσιμα για |

|                  |                                 |  |  |
|------------------|---------------------------------|--|--|
|                  |                                 |  | τη διαφοροποίηση μεταξύ χερσαίων και υδάτινων περιοχών.  |
|                  |                                 | <b>Activation Function:</b> ReLU                         |  |
|                  |                                 | <b>Max-Pooling Layer:</b> 2x2 pool size                  |  |
| Απόκωδικοποιητής | 1 <sup>ο</sup> Upsampling Block | <b>Convolutional Layer:</b> 64 filters, kernel size: 3x3 | Αυτή το τμήμα του δικτύου λαμβάνει δείγματα των feature maps και τους συνδυάζει με skip connections από τον κωδικοποιητή για να επαναφέρει τις χωρικές λεπτομέρειες. |
|                  |                                 | <b>Activation Function:</b> ReLU                         |  |
|                  | 2 <sup>ο</sup> Upsampling Block | <b>Convolutional Layer:</b> 32 filters, kernel size: 3x3 |  |
|                  |                                 | <b>Activation Function:</b> ReLU                         |  |
| Έξοδος           |                                 | <b>Convolutional Layer:</b> 1 filter, kernel size: 1x1   | Αυτό το επίπεδο συγκεντρώνει τις πληροφορίες από τον αποκωδικοποιητή για να δημιουργήσει μια ταξινόμηση κατά εικονοστοιχείο  |
|                  |                                 | <b>Activation Function:</b> Sigmoid                      | Εξάγει τιμές μεταξύ 0 και 1, αποφασίζοντας ουσιαστικά για κάθε εικονοστοιχείο εάν ανήκει στην ακτογραμμή (τιμή 1) ή όχι (τιμή 0).                                    |

## 4.2 Ανίχνευση θέσεων ακτογραμμής

Τα αποτελέσματα μπορούν να βελτιωθούν εκπαιδύοντας περαιτέρω το νευρωνικό δίκτυο με περισσότερα δεδομένα εικόνων που θα λαμβάνονται από τα συστήματα που έχουν εγκατασταθεί. Ήδη τα αποτελέσματα, χρησιμοποιώντας το προεκπαιδευμένο μοντέλο Resnet και εφαρμόζοντας μεταφορά μάθησης με τις εικόνες του έργου δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όπως αποτυπώνονται στον Πίνακα 4.

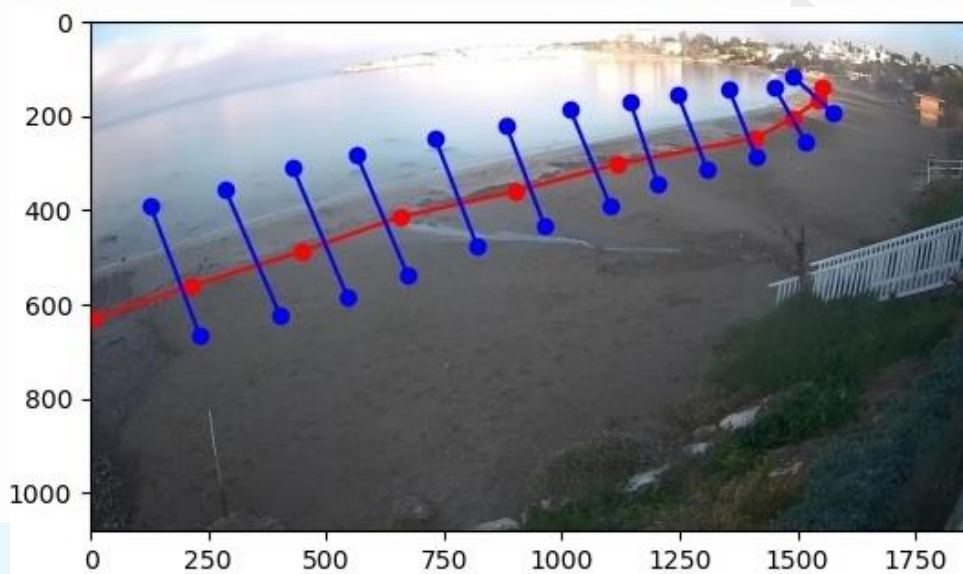
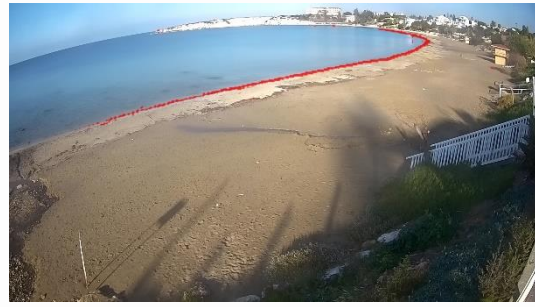
Μετά την ανίχνευση της ακτογραμμής ακολουθεί η ανάλυση της. Οι αρχικές εικόνες περιλαμβάνουν δεδομένα γεωαναφοράς και συνεπώς και η αναγνωρισμένη ακτογραμμή έχει πραγματικές συντεταγμένες. Για τη σύγκριση της προτεινόμενης μεθοδολογίας με άλλες μεθόδους που προτείνονται στη βιβλιογραφία χρησιμοποιήθηκε μεθοδολογία υπολογισμού της μέσης τετραγωνικής ρίζας εγκάρσιων τομών στην ακτογραμμή με βάση μια νοητή γραμμή που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά. Συγκεκριμένα λαμβάνονται τυχαίες κάθετες τομές (εγκάρσιες) πάνω στην νοητή γραμμή (Εικόνα 31) και για κάθε σημείο που η κάθετη τομή τέμνει την ακτογραμμή που έχει αναγνωριστεί (Εικόνα 32) υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα.



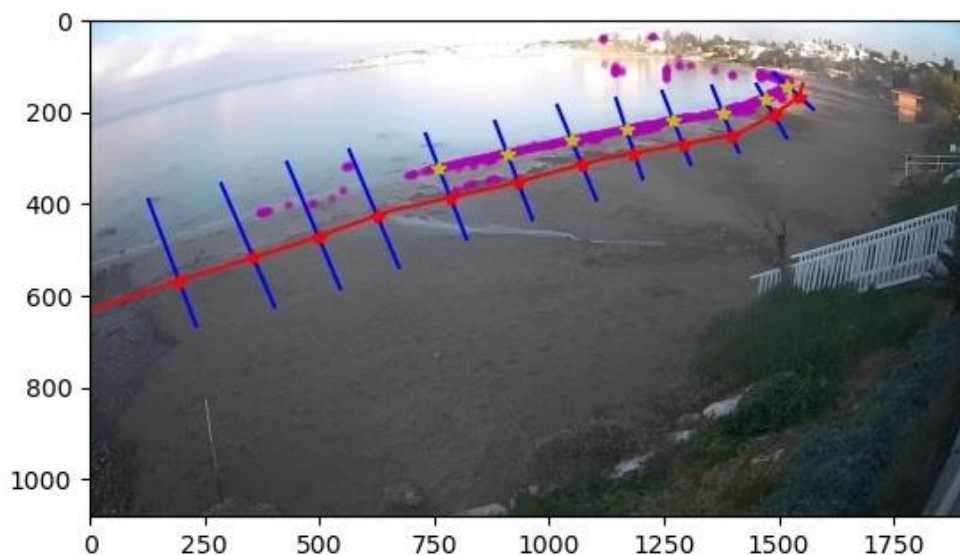
**Πίνακας 4:** Παραδείγματα αναγνώρισης ακτογραμμής (κόκκινη γραμμή) στην παραλία του Coral Bay.

Αρχική εικόνα

Αναγνωρισμένη ακτογραμμή



**Εικόνα 31:** Κάθετες τομές (μπλε χρώμα) σε νοητή γραμμή (κόκκινο χρώμα).



**Εικόνα 32:** Σημεία τομής με την αναγνωρισμένη ακτογραμμή (κίτρινα αστέρια).

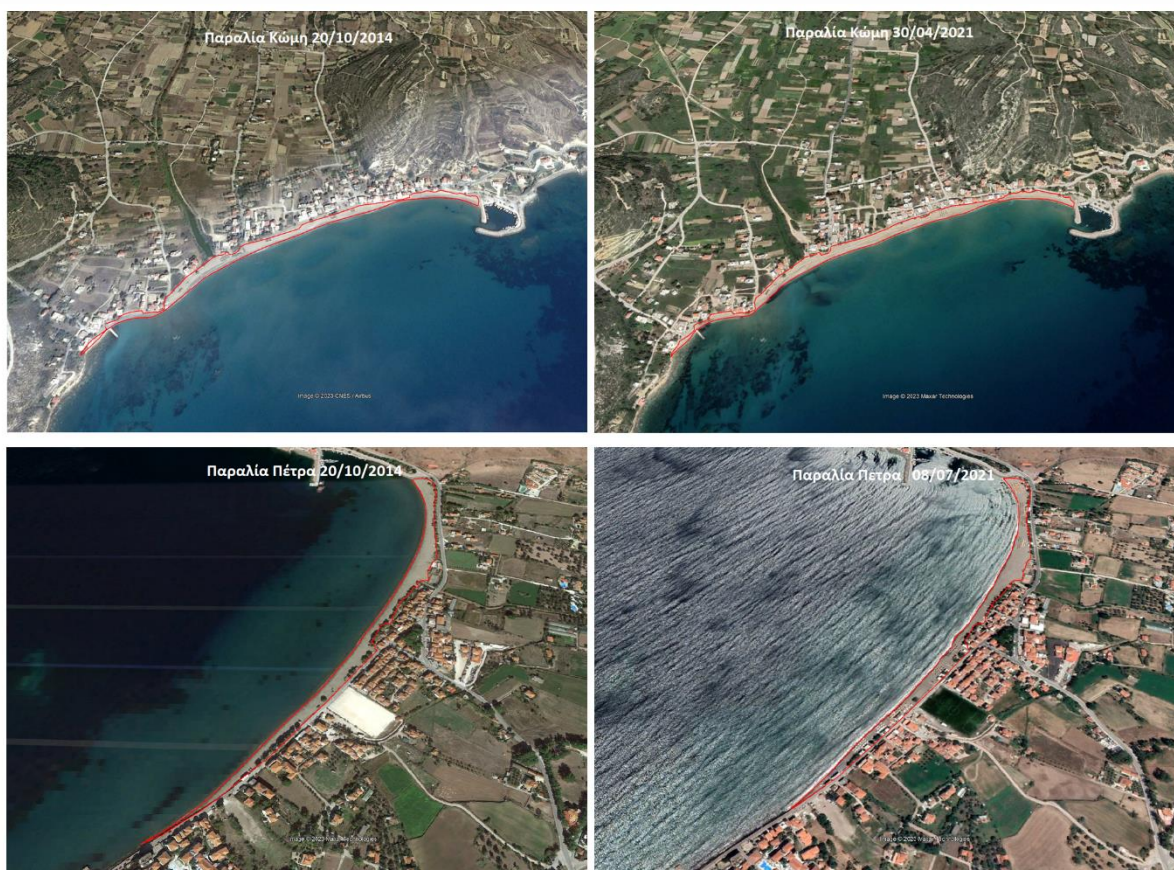
## 5 Αποτυπώσεις μορφολογίας παραλιών από δορυφορικά δεδομένα

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων παραλιών της έρευνας καταγράφηκαν από ψηφιοποίηση δορυφορικών εικόνων για διαφορετικές ημερομηνίες, με σκοπό την αποτύπωση της εξέλιξής τους. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφηκαν οι εξής κρίσιμες μορφολογικές παράμετροι της κάθε παραλίας: (1) Μέγιστο πλάτος, (2) Περίμετρος, (3) Μήκος και (4) Εμβαδόν. Οι καταγραφές/ψηφιοποιήσεις πραγματοποιήθηκαν για τουλάχιστον 4 διαφορετικές ημερομηνίες που καλύπτουν τουλάχιστον την τελευταία δεκαετία, με σκοπό να συγκριθεί η μεταβολή στα χαρακτηριστικά αυτά. Ορισμένα παραδείγματα καταγραφών στις πιλοτικές παραλίες διαφαίνονται στην εικόνα 33.

Η ψηφιοποίηση πραγματοποιήθηκε με χρήση των δορυφορικών εικόνων του προγράμματος Google Earth Pro, ενώ για την καταγραφή των μορφολογικών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία του προγράμματος (βλ. και Παραδοτέο 3.1.1).

Οι καταγραφές/ψηφιοποιήσεις μέσω δορυφορικών εικόνων για την παραλία του Coral Bay (ID 80 της βάσης δεδομένων των παραλιών της Κύπρου που παρουσιάζεται στο Παραδοτέο 3.3.1), πραγματοποιήθηκαν για 4 διαφορετικές ημερομηνίες μεταξύ της περιόδου 23/08/2010 – 10/08/2021 (Πίνακας 4). Συγκρίνοντας την εξέλιξη των μορφολογικών χαρακτηριστικών για την περίοδο αυτή, η Παραλία του Coral Bay φαίνεται να μη μεταβλήθηκε σημαντικά σε μήκος (διαφορά 4 m), αν και καταγράφηκε σημαντική μείωση σε παρελθοντικές περιόδους (κατά 23 m μεταξύ 24/10/2013 και 11/05/2016) και μέγιστο πλάτος (κατά 2 m). Όμως, καταγράφηκε σημαντική μείωση στο μέγιστο πλάτος κατά 10 m στην περίοδο αυτής της δεκαετίας, καθώς και σημαντική μείωση στην έκτασή της (κατά περίπου 6,400 m<sup>2</sup>).





**Εικόνα 33** Παραδείγματα ψηφιοποίησης μορφολογικών χαρακτηριστικών από τις παραλίες Κώμη (πάνω) και Πέτρα (κάτω).

**Πίνακας 4:** Μορφολογικά χαρακτηριστικά παραλίας Coral Bay για 4 διαφορετικές ημερομηνίες.

| ID - Παραλία   | Ημερομηνία | Μεγ. Πλάτος (m) | Περίμετρος (m) | Έκταση (m <sup>2</sup> ) | Μήκος (m) |
|----------------|------------|-----------------|----------------|--------------------------|-----------|
| 80 - Coral Bay | 23/08/2010 | 49.6            | 1,391          | 18,873                   | 645       |
| 80 - Coral Bay | 24/10/2013 | 39.2            | 1,369          | 13,618                   | 653       |
| 80 - Coral Bay | 11/05/2016 | 38.5            | 1,341          | 11705                    | 630       |
| 80 - Coral Bay | 10/08/2021 | 39.0            | 1,363          | 12,500                   | 641       |

Εξετάζοντας την εξέλιξη της παραλίας του Ιστορικού Μυτιλήνης (Λέσβος) από τις ψηφιοποιημένες δορυφορικές εικόνες (ID 43 της βάσης δεδομένων που παρουσιάζεται στο Παραδοτέο 3.3.1), ήταν εμφανής η παρουσία διαβρωτικών διεργασιών. Πιο συγκεκριμένα, για το χρονικό διάστημα μεταξύ της περιόδου 20/10/2014 - 17/06/2020 η παραλία μειώθηκε σε έκταση κατά 626 m, σε μήκος κατά 10 m, σε περίμετρο κατά 23 m και σε μέγιστο πλάτος κατά 2 m. Η μείωση αυτή καταγράφεται με σταθερό ρυθμό όπως διαφαίνεται από τη σύγκριση των διαφορετικών ημερομηνιών (Πίνακας 5). Ανά περίπου 2 έτη (10/2014 – 06/2016-06/2018-06/2010) η παραλία εμφανίζει ρυθμό μείωσης σε έκταση και μήκος κατά περίπου 200 m<sup>2</sup>.

**Πίνακας 5:** Μορφολογικά χαρακτηριστικά παραλίας Ιστορικού Μυτιλήνης για 4 διαφορετικές ημερομηνίες.

| ID - Παραλία  | Ημερομηνία | Μεγ. Πλάτος (m) | Περίμετρος (m) | Έκταση (m <sup>2</sup> ) | Μήκος (m) |
|---------------|------------|-----------------|----------------|--------------------------|-----------|
| 43 - Ιστορικό | 20/10/2014 | 16.7            | 1,938          | 6,049                    | 958       |
| 43 - Ιστορικό | 03/06/2016 | 12.9            | 1,917          | 5,879                    | 942       |
| 43 - Ιστορικό | 07/06/2018 | 11.7            | 1,913          | 5,691                    | 947       |
| 43 - Ιστορικό | 17/06/2020 | 14.7            | 1,915          | 5,423                    | 948       |

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της παραλίας της Πέτρας (ID 206 της βάσης δεδομένων που παρουσιάζεται στο Παραδοτέο 3.3.1), όπως προέκυψαν από τις ψηφιοποιήσεις στις δορυφορικές εικόνες παρατίθενται στον Πίνακα 6. Για το χρονικό διάστημα μεταξύ 20/10/2014 - 08/07/2021, η παραλία φαίνεται να μειώθηκε σε περίμετρο κατά 160 m, και σε έκταση κατά περίπου 1,250 m<sup>2</sup>. Αντίθετα, η παραλία εμφάνισε μικρή αύξηση σε μήκος (κατά 17 m) και μέγιστο πλάτος (κατά περίπου 1 m).

**Πίνακας 6:** Μορφολογικά χαρακτηριστικά παραλίας Πέτρας Λέσβου για 4 διαφορετικές ημερομηνίες.

| ID - Παραλία | Ημερομηνία | Μεγ. Πλάτος (m) | Περίμετρος (m) | Έκταση (m <sup>2</sup> ) | Μήκος (m) |
|--------------|------------|-----------------|----------------|--------------------------|-----------|
| 206 - Πέτρα  | 20/10/2014 | 49.0            | 2,317          | 28,179                   | 1,131     |
| 206 - Πέτρα  | 09/06/2016 | 49.4            | 2,335          | 26,553                   | 1,110     |
| 206 - Πέτρα  | 10/06/2018 | 45.5            | 2,335          | 25,132                   | 1,120     |
| 206 - Πέτρα  | 08/07/2021 | 49.9            | 2,157          | 26,934                   | 1,148     |

Οι καταγραφές/ψηφιοποιήσεις μέσω δορυφορικών εικόνων για την παραλία της Κώμης (ID 81 της βάσης δεδομένων που παρουσιάζεται στο Παραδοτέο 3.3.1), πραγματοποιήθηκαν για 4 διαφορετικές ημερομηνίες μεταξύ της περιόδου 2014 – 2021 (Πίνακας 7). Συγκρίνοντας την εξέλιξη των μορφολογικών χαρακτηριστικών για την περίοδο αυτή, η Παραλία της Κώμης φαίνεται να μειώθηκε σε μήκος (κατά περίπου 30 m) και μέγιστο πλάτος (κατά 2 m), όμως αυξήθηκε σε περίμετρο (κατά 20 m) και σε εμβαδόν (κατά περίπου 1,800 m).

**Πίνακας 7:** Μορφολογικά χαρακτηριστικά παραλίας Κώμης Χίου για 4 διαφορετικές ημερομηνίες.

| ID - Παραλία | Ημερομηνία | Μεγ. Πλάτος (m) | Περίμετρος (m) | Έκταση (m <sup>2</sup> ) | Μήκος (m) |
|--------------|------------|-----------------|----------------|--------------------------|-----------|
| 81 - Κομι    | 20/10/2014 | 40              | 2,333          | 22,682                   | 1,150.2   |
| 81 - Κομι    | 03/06/2016 | 37              | 2,334          | 21,711                   | 1,140.5   |
| 81 - Κομι    | 19/07/2020 | 38              | 2,351          | 23,117                   | 1,129.0   |
| 81 - Κομι    | 30/04/2021 | 38              | 2,353          | 24,475                   | 1,123.9   |



## 6 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια του Προγράμματος BEACHTECH έγιναν στις πιλοτικές παραλίες ολοκληρωμένες αποτυπώσεις της παράκτιας μορφοδυναμικής με υψηλή χωρο-χρονική ανάλυση, με χρήση ΣμηΕΑ και συστήματος παραλιακής παρακολούθησης. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε ανάπτυξη εξειδικευμένων τεχνικών τεχνητής εκμάθησης (machine learning) με τη χρήση νευρωνικών δικτύων που φάνηκε πως είναι σε θέση να προβούν σε επιτυχή αναγνώριση της ακτογραμμής στις TIMEX εικόνες.

Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα της μορφοδυναμικής ανάλυσης δείχνουν ότι (α) η μορφοδυναμική των πιλοτικών παραλιών χαρακτηρίζεται από σημαντική χωροχρονική μεταβλητότητα και πως η μελέτη και η διάγνωση τους απαιτεί μακρόχρονη και υψίσυχη παρακολούθηση. Συνεπώς, φαίνεται ότι στην περίπτωση που είναι αναγκαίες λεπτομερείς μορφοδυναμικές μελέτες (όπως π.χ. για το σχεδιασμό/κατασκευή παράκτιων έργων), απαιτούνται επιτόπιες εργασίες πεδίου με καλή χωροχρονική διακριτικότητα.

Η αποτύπωση της παράκτιας βαθυμετρίας με δεδομένα ΣμηΕΑ έδωσε ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ήταν της τάξης του 1.1 m, κι επομένως προς το παρόν κρίνεται πως τέτοιου τύπου δεδομένα δε μπορούν να αντικαταστήσουν τις κλασσικές μετρήσεις πεδίου με βυθόμετρο. Ειδικά στην περίπτωση χρήσης παράκτιων μορφοδυναμικών μοντέλων τα οποία βασίζονται σε αναλυτική καταγραφή της παράκτιας βαθυμετρίας. Όμως, με βελτίωση των αισθητήρων και των τεχνικών ανάλυσης εικόνας στο μέλλον αναμένεται πως αυτή η τεχνική θα βοηθήσει σημαντικά την παράκτια έρευνα μιας και χαρακτηρίζεται από ευχρηστία, μεγάλη χωρική κάλυψη και μικρό κόστος.

Τα αποτελέσματα ανίχνευσης της θέσης της ακτογραμμής με ανάπτυξη και χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων υπήρξαν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Υπάρχει η πεποίθηση πως η τροφοδότηση των δικτύων με περισσότερα δεδομένα, αλλά και η εξέλιξή τους στο μέλλον αναμένεται να μειώσει σημαντικά το σφάλμα της ανίχνευσης και να επιβεβαιωθεί η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους ως μια αξιόπιστη μέθοδος καταγραφής κρίσιμων παραλιακών χαρακτηριστικών.

Δορυφορικά δεδομένα της τελευταίας δεκαετίας μεταξύ της εαρινής-φθινοπωρινής περιόδου δείχνουν ότι οι πιλοτικές παραλίες στη Λέσβο και στη Χίο έχουν μια σχετική σταθερότητα στις μεταβολές της μορφολογίας τους. Αντίθετα, στην παραλία Coral Bay στην Κύπρο στην τελευταία περίπου δεκαετία το εύρος της συνολικά μειώθηκε περίπου 10 m, αναδεικνύοντας τα προβλήματα διάβρωσης που περιοδικά υφίσταται η παράκτια ζώνη.

## 7 Βιβλιογραφία

- Arabi, B., Salama, Mhd. S., Pitarch, J., & Verhoef, W. (2020). Integration of in-situ and multi-sensor satellite observations for long-term water quality monitoring in coastal areas. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111632. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111632>
- Bengoufa, S., Niculescu, S., Mihoubi, M. K., Belkessa, R., & Abbad, K. (2021). ROCKY SHORELINE EXTRACTION USING A DEEP LEARNING MODEL AND OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2021, 23–29. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-23-2021>
- Dang, K. B., Dang, V. B., Ngo, V. L., Vu, K. C., Nguyen, H., Nguyen, D. A., Nguyen, T. D. L., Pham, T. P. N., Giang, T. L., Nguyen, H. D., & Hieu Do, T. (2022). Application of deep learning models to detect coastlines and shorelines. *Journal of Environmental Management*, 320, 115732. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115732>
- Fischer, P., Dietrich, P., Achterberg, E. P., Anselm, N., Brix, H., Bussmann, I., Eickelmann, L., Flöser, G., Friedrich, M., Rust, H., Schütze, C., & Koedel, U. (2021). Effects of Measuring Devices and Sampling Strategies on the Interpretation of Monitoring Data for Long-Term Trend Analysis. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.770977>
- Goldstein, E. B., Coco, G., & Plant, N. G. (2019). A review of machine learning applications to coastal sediment transport and morphodynamics. *Earth-Science Reviews*, 194, 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.022>
- Heikkilä, J., Silvén, O. (1997). A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In: *IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*, San Juan, Puerto Rico. pp. 1106–1112.
- Ke Cao, Fan, J., Xinxin Wang, Xiang Wang, Jianhua Zhao, & Fengshou Zhang. (2016). Coastline automatic detection based on high resolution SAR images. *2016 4th International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA)*, 43–46. <https://doi.org/10.1109/EORSA.2016.7552763>
- Kumar, L., Afzal, M. S., & Afzal, M. M. (2020). Mapping shoreline change using machine learning: a case study from the eastern Indian coast. *Acta Geophysica*, 68(4), 1127–1143. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00454-9>
- Liu, Y., Cheng, M.-M., Hu, X., Bian, J.-W., Zhang, L., Bai, X., & Tang, J. (2019). Richer Convolutional Features for Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 41(8), 1939–1946. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2878849>
- Liu, Y., Wang, X., Ling, F., Xu, S., & Wang, C. (2017). Analysis of Coastline Extraction from Landsat-8 OLI Imagery. *Water*, 9(11), 816. <https://doi.org/10.3390/w9110816>
- McAllister, E., Payo, A., Novellino, A., Dolphin, T., & Medina-Lopez, E. (2022). Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. *Coastal Engineering*, 174, 104102. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104102>
- McFeeters, S. K. (2007). “The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features.” *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis Group, 17(7), 1425–1432.

- Padró, J., Carabassa, V., Balagué, J., Brotons, L., Alcañiz, J. M., and Pons, X. (2019). "Monitoring opencast mine restorations using Unmanned Aerial System (UAS) imagery." *Science of the Total Environment*, The Authors, 657, 1602–1614.
- Ponce-Alcántara, S., Arangú, A. V., and Plaza, G. S. (2015). "The Importance of Optical Characterization of PV Backsheets in Improving Solar Module Power." *Photovoltaics International*.
- Plant, N.G., Holman, R.A. (1997). Intertidal beach profile estimation using video images. *Marine Geology*, 140: 1–24.
- Rasuly, A., Naghdifar, R., & Rasoli, M. (2010). Monitoring of Caspian Sea Coastline Changes Using Object-Oriented Techniques. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 416–426. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.046>
- Ribas, F., Simarro, G., Arriaga, J., & Luque, P. (2020). Automatic Shoreline Detection from Video Images by Combining Information from Different Methods. *Remote Sensing*, 12(22), 3717. <https://doi.org/10.3390/rs12223717>
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation (pp. 234–241). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28)
- Spinosa, A., Ziemba, A., Saponieri, A., Damiani, L., & El Serafy, G. (2021). Remote Sensing-Based Automatic Detection of Shoreline Position: A Case Study in Apulia Region. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6), 575. <https://doi.org/10.3390/jmse9060575>
- Stumpf, R. P., Holderied, K., and Sinclair, M. (2003). "Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types." *Limnol. Oceanogr*, 48(2), 547–556.
- Tsiakos, C.-A. D., & Chalkias, C. (2023). Use of Machine Learning and Remote Sensing Techniques for Shoreline Monitoring: A Review of Recent Literature. *Applied Sciences*, 13(5), 3268. <https://doi.org/10.3390/app13053268>
- Velegrakis, A.F., Trygonis, V., Chatzipavlis, A.E., Karambas, Th., Vousdoukas, M.I., Ghionis, G., Monioudi I.N., Hasiotis, Th., Andreadis, O., Psarros, F. (2016). Shoreline variability of an urban beach fronted by a beachrock reef from video imagery. *Natural Hazards*, 83 (Suppl.1): 201–222.
- Venkatesan, R., & Li, B. (2017). *Convolutional Neural Networks in Visual Computing*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781315154282>
- Vousdoukas, M.I., Ferreira, P.M., Almeida, L., Dodet, G., Psaros, F., Taborda R., Silva, A.N., Ruano A.E., Ferreira, O. (2011). Performance of intertidal topography video monitoring of a meso-tidal reflective beach in South Portugal. *Ocean Dynamics*, 61: 1521–1540.
- Wenbin Luo. (2006). Efficient Removal of Impulse Noise from Digital Images. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 52(2), 523–527. <https://doi.org/10.1109/TCE.2006.1649674>
- Xie, S., & Tu, Z. (2015). Holistically-Nested Edge Detection. 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 1395–1403. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.164>
- Yu, Z., Feng, C., Liu, M.-Y., & Ramalingam, S. (2017). CASENet: Deep Category-Aware Semantic Edge Detection. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1761–1770. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.191>