

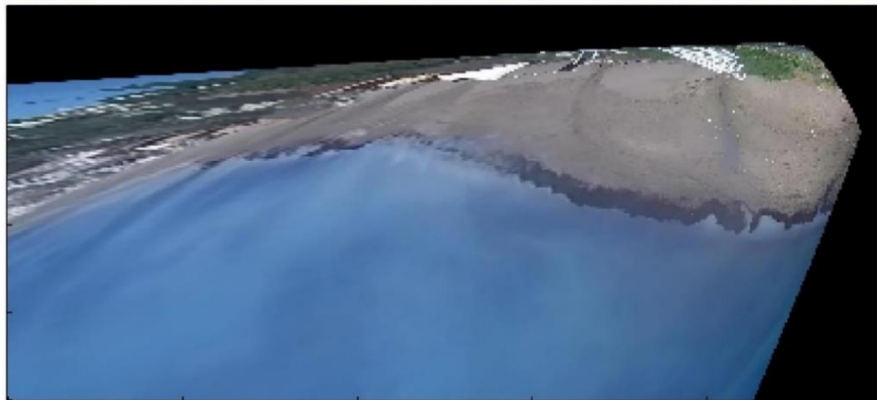


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΜΗΜΑ ΩΚΕΑΝΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΒΙΟΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Καταγραφή μεταβολών ακτογραμμής με χρήση υψίσυχνων οπτικών δεδομένων. Παραλία Κόλπος των Κοραλλιών, Κύπρος



Bykadorova Mariia

Επιβλέπων Καθηγητής: Βελεγράκης Αντώνης

Μέλη τριμελούς: Τζωράκη Ουρανία, Τουρλιώτη Πολίνα

7/7/2023, Μυτιλήνη

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	2
Abstract	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.1 Παραλιακή μορφοδυναμική	5
1.2 Παράκτια διάβρωση: Το πρόβλημα.....	10
1.3 Οπτικό Σύστημα Παρακολούθησης Παραλίας (ΟΣΠΠ)	15
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	20
2.1 Περιοχή μελέτης	20
2.2 Παραγωγή οπτικών δεδομένων	21
2.3 Υψίσυχνες καταγραφές θέσης ακτογραμμής.....	23
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	25
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	28
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	31

Περίληψη

Η παρακολούθηση και διαχείριση των παραλιών αποτελεί σημαντική πρόκληση λόγω της δυναμικής φύσης των παράκτιων περιοχών. Μια αποτελεσματική μέθοδος παρακολούθησης ακτογραμμής είναι απαραίτητη για την κατανόηση των μορφολογικών αλλαγών και των επιπτώσεών τους στο παράκτιο περιβάλλον.

Η μελέτη αξιοποίησε μια μεθοδολογία βασισμένη σε οπτικά δεδομένα για την παρακολούθηση και διαχείριση των παραλιών. Αυτή η μέθοδος αποδείχθηκε αποτελεσματική στην παροχή γρήγορων και ακριβών καταγραφών της ακτογραμμής, καθιστώντας την κατάλληλη για την παρακολούθηση της κυματικής αναρρίχησης και την καθορισμό της γραμμής του αιγιαλού.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ακτογραμμή της παραλίας Coral Bay παρουσίασε μεγάλη μεταβλητότητα, κυμαίνοντας από 2 έως 14,5 μέτρα. Συγκριτικά με άλλη μελέτη, οι αλλαγές της ακτογραμμής ήταν διαφορετικές και αυτό οφείλεται στην έλλειψη φυσικού ύφαλου και την περιορισμένη παράκτια κυκλοφορία στις rocket παραλίες.

Η μέθοδος των οπτικών δεδομένων αποδείχθηκε αξιόπιστη και αποτελεσματική, παρέχοντας υψηλή χωρο-χρονική κάλυψη και ακρίβεια. Επίσης, δεν επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς περιορισμούς όπως οι συνθήκες νεφοκάλυψης και οι άνεμοι. Ωστόσο, έχει περιορισμένο εύρος εντοπισμού σε σχέση με τους δορυφόρους και τα ΣμηΕΑ.

Πιθανά ερευνητικά βήματα για το μέλλον περιλαμβάνουν τη βαθμονόμηση των οπτικών δεδομένων με δορυφορικές εικόνες, προκειμένου να επεκταθεί η κάλυψη της παραλίας, καθώς και την τεχνική βελτίωση της ανάλυσης και του λογισμικού για πιο εύκολη χρήση από μη-έμπειρους χρήστες. Αυτές οι εξελίξεις αναμένεται να συμβάλουν στην περαιτέρω κατανόηση και διαχείριση των παραλιών με ιδιαίτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά.

Abstract

Monitoring and managing beaches pose significant challenges due to the dynamic nature of coastal areas. An effective shoreline monitoring method is essential for understanding morphological changes and their impacts on the coastal environment.

This study utilized a methodology based on optical data for the monitoring and management of beaches. This method proved to be effective in providing rapid and accurate shoreline recordings, making it suitable for monitoring wave run-up and determining the coastline's position.

The results revealed high variability in the Coral Bay beach shoreline, ranging from 2 to 14.5 meters. In comparison to other studies, the shoreline changes were different, mainly due to the absence of a natural offshore bar and limited littoral circulation in pocket beaches.

The optical data method demonstrated reliability and effectiveness, offering high spatial-temporal coverage and precision. Additionally, it is not influenced by environmental limitations such as cloud cover and winds. However, its detection range is limited compared to satellites and UAVs.

Potential future research directions include calibrating optical data with satellite imagery to expand the coverage of beach monitoring and improving the analysis and software for easier use by inexperienced users. These advancements are expected to contribute to a better understanding and management of beaches with unique morphological characteristics.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Μεσόγειος Θάλασσα φιλοξενεί πάνω από 400 εκατομμύρια κατοίκους κατανεμημένους σε 22 χώρες, από τους οποίους τα 143 εκατομμύρια ζουν στην παραλιακή ζώνη, ενώ περίπου άλλα 175 εκατομμύρια την επισκέπτονται κάθε χρόνο (EEA, 1999). Η ευημερία όλου αυτού του πληθυσμού εξαρτάται από την υγεία του περιβάλλοντος της Μεσογείου. Το περιβάλλον της Μεσογείου είναι ένα από τα πλουσιότερα και συγχρόνως τα πλέον ευάλωτα στον κόσμο, δεδομένου ότι τα θαλάσσια και παράκτια συστήματα είναι εκτεθειμένα σε επιβαρυντικούς παράγοντες. Ενδεικτικό της αυξανόμενης πληθυσμιακής πίεσης είναι το γεγονός ότι σύμφωνα με την βιβλιογραφία τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, το ποσοστό του αστικού πληθυσμού στις μεσογειακές χώρες αυξήθηκε κατά μέσο όρο κατά 44% έως 62% (World Bank, 2015).

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν και καθορίζουν τις παράκτιες περιοχές είναι:

- Η πυκνότητα του πληθυσμού που ζει και εργάζεται στην παράκτια ζώνη.
- Η σημαντική και εύθραυστη βιοποικιλότητα που απαντάται σε αυτές τις περιοχές εξαιτίας της αλληλοεπίδρασης του χερσαίου με το θαλάσσιο οικοσύστημα.
- Η γεωμορφολογική τους δομή.

- Οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα όπως οι μηχανισμοί φερτών υλών και
- Η πληθώρα δυνατοτήτων ανάπτυξης ανθρωπίνων δραστηριοτήτων όπως ο τουρισμός.

Σύμφωνα με τον Boak and Turner (2005) η παράκτια ζώνη αποτελεί την έκφραση της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ προσφοράς ιζήματος από τη λιθόσφαιρα και της διευθέτησής του από την υδρόσφαιρα (απομάκρυνση ή συσσώρευση) υπό την επίδραση των κυμάτων και των ρευμάτων με την πάροδο του χρόνου (βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα). Επίσης, η παράκτια ζώνη είναι ένα δυναμικό σύστημα που αντιμετωπίζει σημαντικές πιέσεις από ανθρώπινες και φυσικές παρεμβάσεις, οι οποίες λειτουργούν τόσο ανεξάρτητα όσο και αλληλοσυνδεόμενες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η τρωτότητα των παραλιών από την εκτεταμένη παράκτια διάβρωση και τις θαλάσσιες πλημμύρες, που συχνά επιδεινώνονται από ακατάλληλες ανθρωπίνες υποδομές και ανάπτυξη πολύ κοντά στην ακτογραμμή, καθώς και η άνοδος της μέσης θαλάσσιας στάθμης λόγω της κλιματικής αλλαγής (Monioudi et al., 2017; Φωτεΐνης, 2014; Αλεξανδράκης, 2011).

Η παράκτια ζώνη πάντα αποτελούσε για την ανθρωπότητα ένα από τα πολυτιμότερα, ταυτοχρόνως και ευάλωτα ενδιαίτηματα της γης, καθώς η ζωή και ο πλούτος πολλών χώρων της Μεσογείου, όπου μέσα σε αυτές είναι και η Κύπρος, εξαρτάται από τον παράκτιο χώρο. Οι παράκτιες ζώνες καταλαμβάνουν λιγότερο από το 15% της συνολικής επιφάνειας της γης, ωστόσο φιλοξενούν περισσότερο από το 60% του παγκόσμιου πληθυσμού. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία UNCED (1992) αν συνεχιστεί αυτή η τάση, μέχρι το 2025 μπορεί να κατοικεί έως και το 75% της ανθρωπότητας στις παράκτιες περιοχές. Όσον αφορά την Κύπρο, η παράκτια ζώνη της καταλαμβάνει περίπου 648 χιλιόμετρα και περίπου 80% του πληθυσμού της Κύπρου ζει στην παράκτια ζώνη του νησιού (Στατιστική Υπηρεσία προς Κύπρο, 2022).

Ταυτόχρονα, οι παραλίες είναι κρίσιμα παράκτια οικοσυστήματα, που παρέχουν προστασία από πλημμύρες προς φυσικούς οικοτόπους (λιμνοθάλασσες και υγροβιότοποι) και προς παράκτιες κοινότητες/υποδομές που βρίσκονται μπροστά προς. Επιπλέον, οι παραλίες είναι το επίκεντρο του τουριστικού μοντέλου 3S – Sun-Sea-Sand (Ηλιος-Θάλασσα-Άμμος), που είναι από τις πιο σημαντικούς τομείς της τουριστικής βιομηχανίας, η τρίτη μεγαλύτερη οικονομική δραστηριότητα παγκοσμίως (WTTC, 2022). Για τον λόγο αυτό, η μελέτη προς μορφοδυναμικής των παραλιών είναι ζωτικής σημασίας, καθώς μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις προς παράκτιες κοινότητες και

οικοσυστήματα, ειδικά αν λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι οι περισσότερες ακτογραμμές του κόσμου ήδη αντιμετωπίζουν διαβρωτικά φαινόμενα (Luijendijk et al., 2018), τα οποία προβλέπεται να επιδεινωθούν στο μέλλον (IPCC, 2023), απειλώντας υποδομές/ιδιοκτησίες και φυσικούς οικοτόπους.

Με την πάροδο του χρόνου οι τεχνολογίες εξελίσσονται και τα συστήματα πρόβλεψης παράκτιων κινδύνων σε πραγματικό χρόνο γίνονται όλο και πιο συνηθισμένα. Η διαθεσιμότητα τόσο των παγκοσμίων όσο και των τοπικών συστημάτων μοντελοποίησης καιρού και προς κατάσταση προς παράκτιας ζώνης έχει καταστήσει την ανάπτυξη συστημάτων προειδοποίησης προσιτή προς αρμόδιες αρχές και στην επιστημονική κοινότητα. Αυτά τα συστήματα συνήθως επικεντρώνονται στην αξιολόγηση των προβλημάτων που δημιουργούνται σε παράκτιες υποδομές σε πραγματικό χρόνο. Η αξιολόγηση και η πρόβλεψη διάφορων κινδύνων αποτελεί ολοένα και μεγαλύτερο πρόβλημα, ιδίως σε περιοχές όπου ο παράκτιος τουρισμός τύπου 3S αποτελεί βασικό μέρος προς οικονομίας.

1.1 Παραλιακή μορφοδυναμική

Η παραλιακή ζώνη είναι ένας ενεργός αποδέκτης της θαλάσσιας ενέργειας που σχετίζεται με την κυματική δράση και είναι εξαρτώμενος από την παράκτια κυκλοφορία. Ως αποτέλεσμα των υδροδυναμικών συνθήκων και σύμφωνα με την θέση των ως προς την ακτογραμμή κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες: οι παραλίες εφαπτόμενες στην ακτογραμμή (shoreline beaches) και οι παραλίες μη εφαπτόμενες στην ακτογραμμή (detached beaches) (Haslett, 2000). Πιο συγκεκριμένα :

Παραλίες εφαπτόμενες στην ακτογραμμή (shoreline beaches)

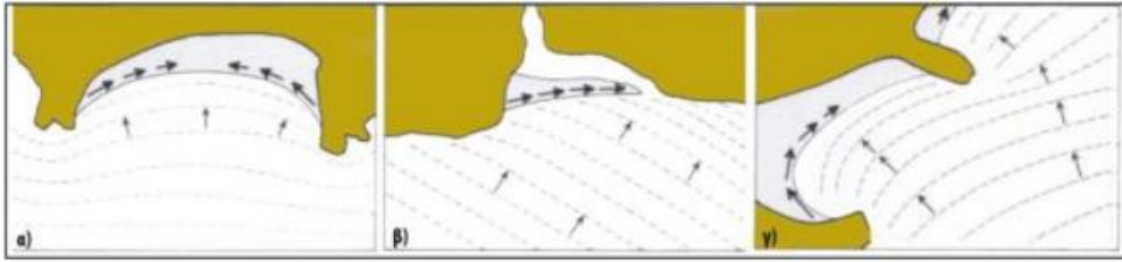
Σχηματίζονται συνήθως όπου υπάρχουν συγκεντρώσεις παράκτιων ιζημάτων κατά μήκος μια σταθερής ακτής. Οι εφαπτόμενες στην ακτογραμμή παραλίες διακρίνονται σε δύο γενικές κατηγορίες, στις i) ανοικτές παραλίες (open beaches) που δέχονται ή και ανταλλάσσουν ανεμπόδιστα ιζήματα τόσο πλευρικά όσο και με την ανοικτή

θάλασσα, και στις ii) εγκιβωτισμένες παραλίες (rocket beach) που είναι σχετικά απομονωμένες ως αναφορά την πλευρική τροφοδοσία τους σε ίζημα.

Οι παραλίες αυτού του τύπου τείνουν να προσανατολίζονται παράλληλα προς το μέτωπο του κύματος που φθάνει μετά από διάθλαση στα αβαθή της παραλιακής ζώνης, όπου μετά και την θραύση του δημιουργεί επιμήκη ρεύματα τα οποία μετακινούν τα ιζήματα μέχρι η γωνία μεταξύ της γραμμής κορυφής των κυμάτων και της ακτογραμμής να μηδενιστεί. Η διαδικασία αυτή τροποποιεί συνεχώς την ακτογραμμή μέχρι να γίνει παράλληλη με τα κύματα, και ως αποτέλεσμα σταματά κάθε μετακίνηση των ιζημάτων.

Ανάλογα με την γωνία προσβολής των κυμάτων με την ακτογραμμή διακρίνονται σε παραλίες με:

- Ευθυγράμμιση ζώνης διαβροχής (swash alignment). Τα κύματα προσπίπτουν κάθετα ή με πολύ μικρή γωνία σε μια εγκιβωτισμένη ακτή, όπου η παράκτια κυκλοφορία είναι περιορισμένη αν και όχι αδύνατη (Σχήμα 1α).
- Ευθυγράμμιση επιμήκους μεταφοράς (drift alignment). Σε αυτήν την περίπτωση τα κύματα προσπίπτουν υπό γωνία σε μια ανοικτή παραλία. Είναι μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας, όπου ο προσανατολισμός της παραλίας διαμορφώνεται από τη παράκτια κυκλοφορία με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα του σχήματός της (Σχήμα 1β).
- Σχηματισμός ζήτα (zeta-form). Είναι ένας συνδυασμός των προηγούμενων δύο μορφών και συναντιούνται όταν προεκβολές της χέρσου εμποδίζουν τοπικά την παράκτια κυκλοφορία. Και σαν αποτέλεσμα, το τμήμα της παραλίας που 'προστατεύεται' από μια τέτοια χερσαία παρεμβολή παίρνει το σχήμα της ευθυγράμμισης παφλασμού, ενώ το τμήμα που εκτίθεται στην παράκτια κυκλοφορία, πέραν του εμποδίου, αποκτά την μορφή της ευθυγράμμισης μεταφοράς (Σχήμα 1γ).

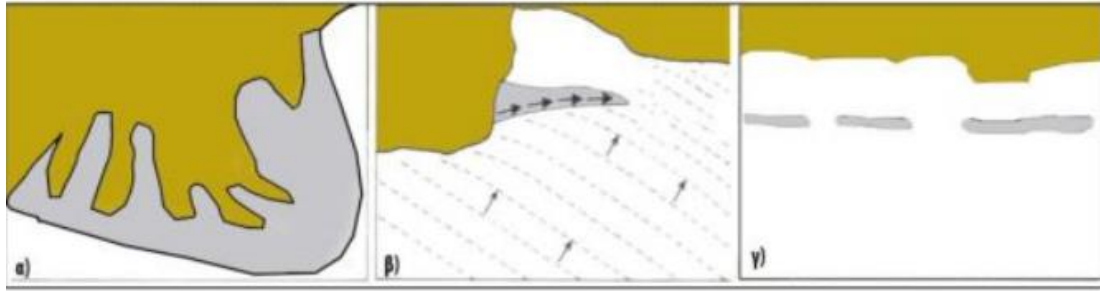


Σχήμα 1. Είδη παραλιών που εφάπτονται της ακτογραμμής: α) ευθυγράμμιση ζώνης διαβροχής (swash alignment), β) ευθυγράμμιση μεταφοράς (drift alignment), γ) σχηματισμός ζήτα (zeta-form) (από White et al., 1992)

Παραλίες μη εφάπτοντες της ακτογραμμής (detached beaches)

Οι κύριοι εκπρόσωποι της κατηγορίας αυτής είναι παράλιοι μορφολογικοί σχηματισμοί που συνδέονται με την ακτογραμμή αλλά αναπτύσσονται προχωρώντας προς την θάλασσα. Οι κατηγορίες είναι:

- Οι κυρτές προχώρες (cusped forelands). Ο σχηματισμός τους συνήθως σχετίζεται με την διάθλαση των κυμάτων σε κάποιο παρακείμενο ύψωμα του πυθμένα και με μια αμφίπλευρη τροφοδοσία σε ίζημα. Έχουν σχήμα του τριγώνου και έχοντας τη βάση του τριγώνου στην ακτογραμμή και την κορυφή να προελαύνει προς τη θάλασσα (Σχήμα 2α).
- Αμώδεις γλωσσοειδείς σχηματισμοί (spits). Ο σχηματισμός των spits συνδέεται με μια ακτογραμμή και με ένα παράκτιο ρεύμα που όταν η ακτογραμμή ξαφνικά κατευθυνθεί προς την ενδοχώρα (Σχήμα 2β).
- Τα νησιωτικά φράγματα (barrier islands). Είναι επιμήκης αποθέσεις με που κείνται παράλληλα στην ακτογραμμή και που χωρίζονται από αυτή με αβαθείς κόλπους και λιμνοθάλασσες. Συνήθως η δημιουργία τους σχετίζεται με τη συνδυασμένη δράση μικρής παλιρροϊκής ενέργειας και κυματικής δράσης (Σχήμα 2γ).



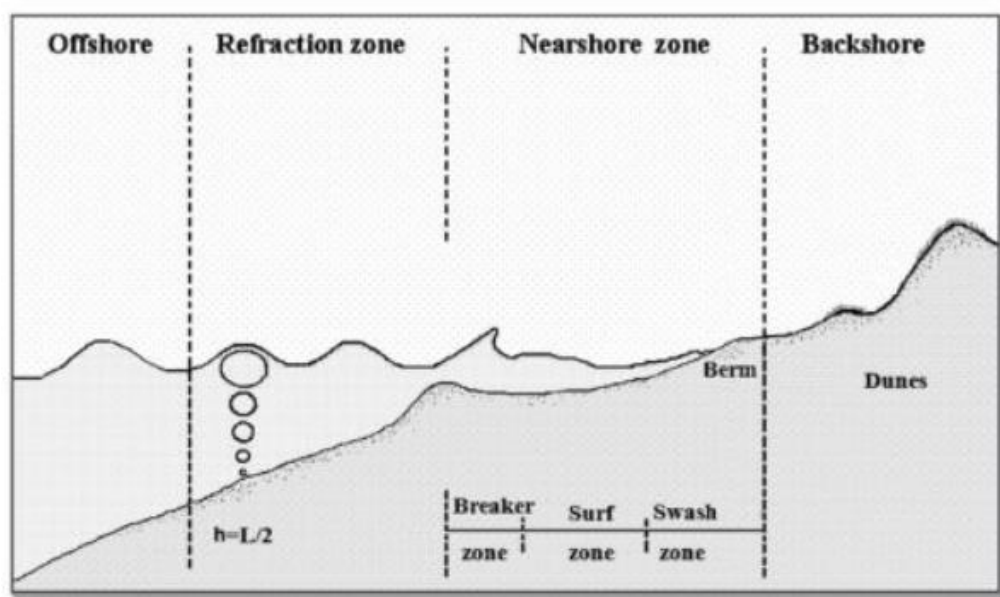
Σχήμα 2. Παραλίες μη επαπτόμενες της ακτογραμμής (*detached beaches*): α) οι κυρτές προχώρες (*cuspsate forelands*), β) αμμώδεις γλωσσοειδείς σχηματισμοί (*spits*), τα νησιώτικα φράγματα (*barrier islands*). (από White et al., 1992).

Κατά την διάδοση των κυματισμών προς την παραλία δημιουργούνται κυματικές ενεργειακές ζώνες παράλληλα στην ακτογραμμή οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετική υδρο- και ιζηματοδυναμική και, συνεπώς, μορφολογία και ιζηματολογία (Μουνιούδη, 2011). Αυτές είναι οι παράκτιες ενεργειακές (κυματικές) ζώνες:

- Η ζώνη της ανοικτής θάλασσας (*offshore zone*). Στη ζώνη αυτή η ανεμογενείς κυματισμοί μεταφέρουν μόνον ενέργεια και έχουν κυματοκορυφές (*wave crests*) ίσες και παράλληλες (Komar, 1998). Επηρεάζεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του ανέμου και συνεπώς τα ιζήματα είναι συνήθως λεπτόκοκκα, λόγω του ότι δεν υπάρχει κινητικότητα του ιζήματος και αλλαγή της της υποθαλάσσιας μορφολογίας (Αναγνώστου και Χρόνης, 2000).
- Η ζώνη διάθλασης (*refraction zone*). Στην ζώνη αυτή μπορεί συχνά να λαμβάνει χώρα μετακίνηση πυθμενικών ιζημάτων, αλλά σημαντικές μορφολογικές αλλαγές συμβαίνουν μόνο κατά την διάρκεια ακραίων κυματικών συμβάντων (Masselink and Hughes, 2003). Όσον αφορά τα πυθμενικά ιζήματα, συνήθως παρατηρούνται αυξημένα μέσα μεγέθη κόκκων και μέτριες διαβαθμίσεις (Inman, 1950).
- Η ζώνη θραύσης (*breaker zone*). Στο τμήμα αυτό της παραλιακής διατομής οι κυματισμοί καθίστανται ασταθείς και τελικά θραύονται. Στη ζώνη θραύσης που χαρακτηρίζεται από υψηλή ενέργεια και τυρβώδεις ροές λαμβάνουν χώρα σημαντικές ιζηματικές διεργασίες (Miller and Ziegler, 1958) που έχουν σαν αποτέλεσμα την επικράτηση αδρομερών ιζημάτων με φτωχή διαβάθμιση λόγω του μεγάλου φάσματος της διαχεόμενης ενέργειας.
- Η ζώνη απόσβεσης/κυματοαγωγής (*surf zone*). Στη ζώνη κυματοαγωγής οι μορφοποιημένοι από την θραύση κυματισμοί αποσβένονται περαιτέρω και ένα μέρος

της ενέργειας που μεταφέρουν τροφοδοτεί την ανάπτυξη των κυματογενών ρευμάτων. Τα ρεύματα αυτά είναι ικανά να διαβρώσουν και να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ιζημάτων (Dingler and Reiss, 2002).

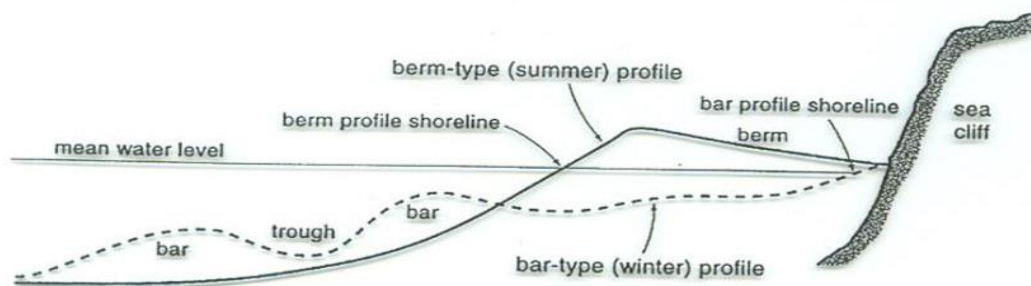
- Η ζώνη διαβροχής/αναρρίχησης (swash zone). Αποτελεί την ζώνη του χερσαίου τμήματος της παραλίας, το οποίο καλύπτεται και αποκαλύπτεται διαδοχικά από τους κυματισμούς και εκεί λαμβάνει χώρα η τελική απόσβεση της κυματικής ενέργειας. Η ζώνη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παραλιακή υδροδυναμική και μορφοδυναμική και χαρακτηρίζεται από έντονη στερεομεταφορά (Komar, 1998).



Σχήμα 3. Τυπικό προφίλ της παραλίας, που διαμορφώνεται από την κυματική ενέργεια και που δείχνει την παρουσία ενός ύψαλου αναβαθμού στη ζώνη θραύσης. (offshore: ανοικτή θάλασσα, refraction zone: ζώνη διάθλασης, nearshore zone: ζώνη κοντά στην ακτή, backshore: εσωτερική παραλία, breaker, surf and swash zone: ζώνη θραύσης, απόσβεσης και αναρρίχησης, berm: χερσαίος αναβαθμός, dunes: θίνες) (από Μονιούδη, 2011).

Οι μορφολογικές μεταβολές μιας ακτής που λαμβάνουν χώρα σε μεγάλη χρονική κλίμακα είναι της τάξεως μερικών ετών, σαν αθροιστικό αποτέλεσμα διαφόρων εποχικών κυματικών καταστάσεων (EUROSION, 2004). Ωστόσο, μορφολογικές μεταβολές που μπορούν να παρατηρηθούν σε επίπεδο έτους σχετίζονται κυρίως με την εποχικότητα που παρουσιάζει το ενεργειακό επίπεδο των ανεμογεννών κυματισμών και παράκτιων ρευμάτων, καθώς και τη δράση της παλίρροιας. Τέτοιες μεταβολές σε μια ακτή τεκμηριώθηκαν αρχικά από τους Shepard (1950) και Bascom (1953) στην

δυτική ακτή των Ηνωμένων Πολιτειών, όπου οι υψηλοί ενεργειακά (θυελλώδεις) κυματισμοί κατά την χειμερινή περίοδο δημιουργούν το χειμερινό προφίλ ακτής (winter profile) και οι χαμηλοί ενεργειακά κυματισμοί κατά την θερινή περίοδο σχηματίζουν το θερινό προφίλ ακτής (summer profile). Σύμφωνα με τον Komar (1998), κατά την χειμερινή περίοδο, όπου παρατηρούνται κύματα υψηλής ενέργειας, επικρατεί διάβρωση και καταστροφή του ιζηματογενούς υβώματος (berm), ιζηματική μεταφορά και απόθεση από το χερσαίο τμήμα προς το υποθαλάσσιο τμήμα της παραλίας και δημιουργία ιζηματογενών υφάλων (longshore bars) και κοιλάδων (longshore troughs). Αντίθετα, κατά την θερινή και χαμηλή ενεργειακά περίοδο παρατηρείται διάβρωση/καταστροφή των ιζηματογενών υφάλων και κοιλάδων του υποθαλάσσιου τμήματος, ιζηματική μεταφορά και απόθεση στο χερσαίο τμήμα και δημιουργία ιζηματογενών υβωμάτων λόγω των ηπιότερων κυματισμών (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Εποχικές αλλαγές στην μορφολογία της παράλιας (από Komar, 1998).

1.2 Παράκτια διάβρωση: Το πρόβλημα

Η παράκτια διάβρωση είναι η οπισθοχώρηση της ακτογραμμής και μετρείται με τον υπολογισμό του μέσου όρου οπισθοχώρησης κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, όπου η περίοδος αυτή είναι αρκετά μεγάλη για να αποβάλει τις επιδράσεις του καιρού, των καταιγίδων και της δυναμικής των ιζημάτων στην περιοχή (EUROSION, 2001). Καθορίζεται ως το αρνητικό ισοζύγιο μεταξύ της επίδρασης των διεργασιών απόθεσης-διάβρωσης και συνοδεύεται πάντα από απώλεια εδαφικής έκτασης (EUROSION,

2004). Μπορεί συνεπώς να θεωρηθεί ότι προκύπτει από την έλλειψη ισορροπίας μεταξύ της εισροής ενέργειας και της αντίστασης της παράκτιας λωρίδας στην μετακίνηση των ιζημάτων της (Anthony, 2005). Οι παραλίες δηλαδή διαβρώνονται αν η προμήθεια του ιζήματος που αποκτήθηκε, είναι μικρότερη από την ποσότητα του ιζήματος που χάθηκε.

Η διάβρωση προκύπτει από την συνδυασμένη δραστηριότητα φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων, δηλαδή σε επεμβάσεις στο περιβάλλον με διάφορους τρόπους και σε διάφορες χωροχρονικές κλίμακες (Βελεγράκης et al., 2005). Ο βαθμός διάβρωσης των ακτών δεν είναι παντού ο ίδιος αλλά εξαρτάται από φυσικούς παράγοντες, όπως:

- την τοπογραφία της ακτής (ακτή σε κόλπο ή στην ανοιχτή θάλασσα)
- τη γεωλογία της ακτής (αμμώδης ή βραχώδης, τεκτονικές κινήσεις ακτών)
- την μορφολογία της ακτής (ήπια ή απότομη κλίση)
- τις επικρατούσες κλιματικές και κυματικές συνθήκες (επιμήκη ρεύματα, άνεμοι, σύνηθες ύψος κυμάτων)
- το κοκκομετρικό μέγεθος
- την συχνότητα και ένταση των ακραίων καιρικών και κυματικών φαινομένων
- τα αποθέματα των ιζημάτων στην περιοχή (ακτή κοντά σε ποτάμι ή όχι)
- κλίση παράκτιου πυθμένα (η απότομη κλίση επιταχύνει την διάβρωση και την άνοδο της στάθμης της θάλασσας)
- τις τεκτονικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρο στην περιοχή (βύθιση/ανύψωση της ακτής)

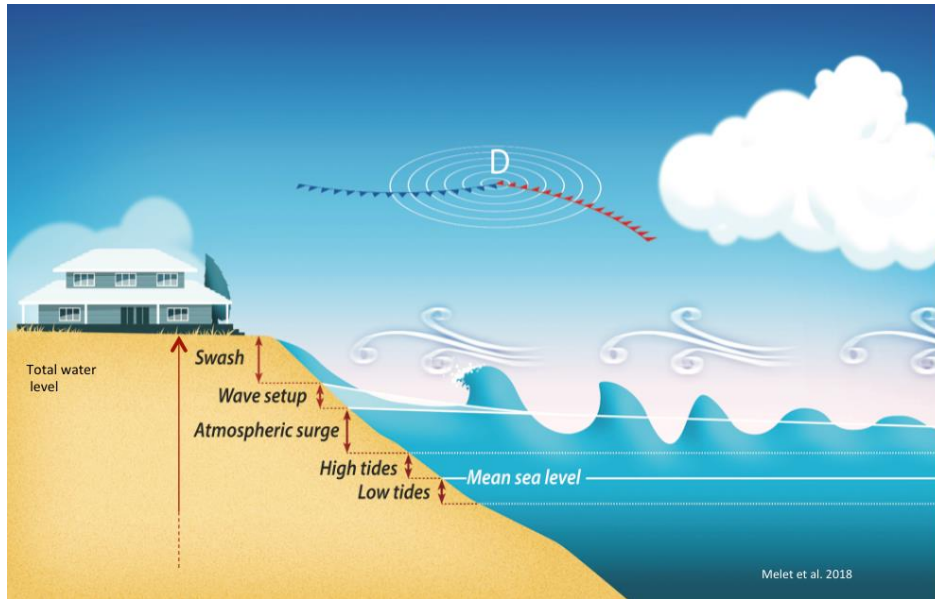
Οι φυσικοί παράγοντες που προκαλούν την διάβρωση είναι: τα ανεμογενή κύματα που προκαλούνται από την συνήθη άνεμο και τις θύελλες, τα παράκτια ρεύματα, η σχετική μεταβολή της στάθμης της θάλασσας λόγω ευστατισμού, τεκτονισμού ή συνδυασμός των δύο (Pranzini and Rossi, 1995), η λιθολογία της παράκτιας ζώνης, η κλίση της παράκτιας περιοχής, οι ποτάμιες εισροές και η μεταβολή τους που οφείλονται σε φυσικά αίτια (Berriolo Fierro and Gamboni, 2001). Στα παραπάνω αίτια μπορούν να προστεθούν άμεσα ή έμμεσα και η κλιματική αλλαγή (Medina and Lopez, 1997).

Οι ανθρωπογενείς παράγοντες περιλαμβάνουν: τις παράκτιες κατασκευές, την αλλαγή χρήσης της γης, την αποκοπή της τροφοδοσίας της παράκτιας ζώνης με ίζημα λόγω

της κατασκευής φραγμάτων (Poulos et al., 1996, Velegrakis et al., 2008), την αφαίρεση της βλάστησης από τα πεδία θινών και την εκβάθυνση του πυθμένα.

Επίσης, η παράκτια διάβρωση μπορεί να διακριθεί σε 2 κύριες κατηγορίες: 1) μακροπρόθεσμη (long-term) διάβρωση, δηλαδή μη αναστρέψιμη μακροχρόνια οπισθοχώρηση της ακτογραμμής, κυρίως λόγω ανόδου της μέσης (και σχετικής) θαλάσσιας στάθμης ή/και λόγω αρνητικών παράκτιων ιζηματικών ισοζυγίων (Nicholls et al., 2007), αιτίες δηλαδή που προκαλούν είτε τη μετανάστευση των ακτογραμμών προς την ξηρά (beach transgression) ή τον κατακλυσμό τους (beach drowning) 2) σε βραχυπρόθεσμη (short-term) διάβρωση, η οποία οφείλεται κυρίως σε ακραία θυελλώδη φαινόμενα (μετεωρολογικές παλίρροιες - storm surges και θυελλώδεις κυματισμούς), τα οποία μπορεί να μην έχουν σαν αναγκαίο αποτέλεσμα μόνιμες οπισθοχωρήσεις της ακτογραμμής αλλά μπορούν να προκαλέσουν μεγάλης κλίμακας καταστροφές (Μονιούδη, 2011).

Η μετεωρολογική παλίρροια είναι ένα συνδυαστικό φαινόμενο κατά το οποίο η θαλάσσια στάθμη ανυψώνεται παροδικά (για λίγες ώρες ή και ημέρες) όταν i) η ατμοσφαιρική πίεση στην περιοχή της παραλίας είναι χαμηλή (βαρομετρικό χαμηλό), ενώ ταυτόχρονα στην ανοιχτή θάλασσα είναι υψηλή (βαρομετρικό υψηλό), ενώ ταυτόχρονα ii) δρουν ισχυροί ανεμογενής κυματισμοί ως αποτέλεσμα μιας θύελλας (Σχήμα 5). Σε παλιρροιακά περιβάλλοντα, όταν το παραπάνω φαινόμενο πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της υψηλότερης παλιρροιακής στάθμης (high tide), η αύξηση στη θαλάσσια στάθμη είναι πολύ μεγάλη και μπορεί να έχει καταστρεπτικές πλημμυρικές και διαβρωτικές συνέπειες.

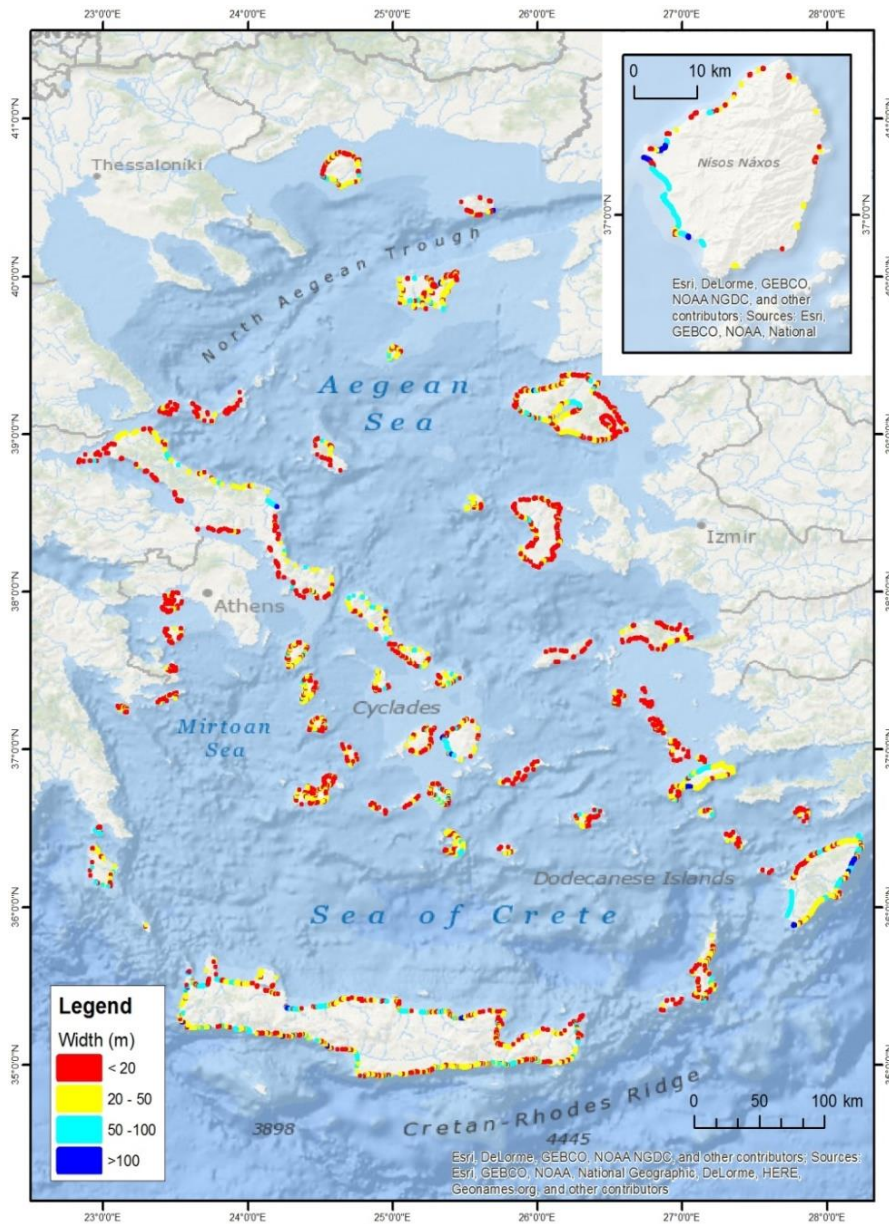


Σχήμα 5. Σχηματική απεικόνιση βραχυπρόθεσμης ανόδου της θαλάσσιας στάθμης κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου μετεωρολογικής παλίρροιας (από Melet et al., 2018).

Τις τελευταίες δεκαετίες το κλίμα της γης αλλάζει δραματικά κυρίως λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα που αυτές προκαλούν (IPCC, 2023). Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας είναι μια από τις επιδράσεις της μεταβολής του κλίματος σε θερμότερο, γεγονός που θα επιδράσει σημαντικά σε όλες τις παράκτιες περιοχές σε όλο τον κόσμο. Ενδεικτικά τον προηγούμενο αιώνα η ετήσια άνοδος της μέσης στάθμης θάλασσας (ΜΣΘ) ήταν $1.7 \pm 0,3$ mm (Church and White, 2006) και ο ρυθμός αυτός επιταχύνεται εξαιτίας της αύξησης της μέθης θερμοκρασίας της γης, που είναι αποτέλεσμα του φαινομένου του θερμοκηπίου (IPCC, 2023; Church and White, 2006). Η αύξηση της θαλάσσιας στάθμης οδηγεί στην μετακίνηση προς την ξηρά (Pethick, 2001), συγχρόνως επηρεάζοντας την υδροδυναμική (Simonato et al., 2004) και την ιζηματοδυναμική (Shennan et al., 2003), την κατανομή των παλιρροιακών υγροτόπων (Doyle et al., 2009) και την βιοποικιλότητα (Ellison, 2005).

Όσον αφορά την Ελλάδα και τα νησιά του Αιγαίου, σύμφωνα με Monioudi et al. (2017), εμφανίζονται ιδιαίτερα ευάλωτες από την άνοδο της μέσης στάθμης θάλασσας. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησής προβλέπουν σοβαρά φαινόμενα διάβρωσης και πλημμυρών ήδη από το 2040, ιδίως υπό τις συνδυασμένες επιπτώσεις της

προβλεπόμενης μέσης άνοδού στάθμης θάλασσας και της άνοδου στάθμης της θάλασσας που προκαλείται από θυέλλες.



Σχήμα 6. Προβλέψεις ελάχιστης παραλιακής διάβρωσης (σε μέτρα) υπό συνδυαστικό σενάριο ανόδου της Θαλάσσιας Στάθμης (μακροπρόθεσμα + βραχυπρόθεσμα) κατά 1.1 m για τα νησιά του Αιγαίου. Το νησί της Νάξου παρατίθεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια (από Μονιουδι et al., 2017).

Αναμένεται ότι μέχρι το 2100, η διάβρωση των παραλιών από το συνδυασμό της μέσης άνοδου στάθμης θάλασσας και των θυέλλων προβλέπεται να είναι πολύ σημαντική και να προκαλεί καταστροφικές επιπτώσεις τόσο στην παράκτιες υποδομές όσο και στον τουρισμό. Πιο συγκεκριμένα, σε συνδυαστικό σενάριο μακροπρόθεσμης άνοδου της

μέσης στάθμης της θάλασσας κατά 0.5 m και βραχυπρόθεσμης ανόδου λόγω θύελλας 0.6 m, προβλέπεται να οδηγήσει σε πλήρη διάβρωση μεταξύ 31% και 88 % όλων των νησιωτικών παραλιών του Αιγαίου (Σχήμα 6). Επιπλέον, μεταξύ 46 και 96 % των παράκτιων υποδομών των νησιών του Αιγαίου προβλέπεται να πλημμυρίσουν προσωρινά κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου συμβάντος. Όσον αφορά τον τουρισμό των νησιών του Αιγαίου, αυτός αναμένεται να επηρεαστεί αρνητικά από την προβλεπόμενη μείωση του πλάτους των παραλιών (και επομένως της φέρουσας ικανότητας), κάτι που αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη χρήση, την αξία και την ανθεκτικότητα των παραλιών για αναψυχή (Yang et al., 2012). Υπό τις συνθήκες αυξανόμενης διάβρωσης των παραλιών και των πλημμύρων, η μακροπρόθεσμη αξία αναψυχής παραλιών των νησιών του Αιγαίου, καθώς και η αξία των σχετικών περιουσιακών στοιχείων ενδέχεται να μειωθεί σημαντικά (Gopalakrishnan et al., 2011).

1.3 Οπτικό Σύστημα Παρακολούθησης Παραλίας (ΟΣΠΠ)

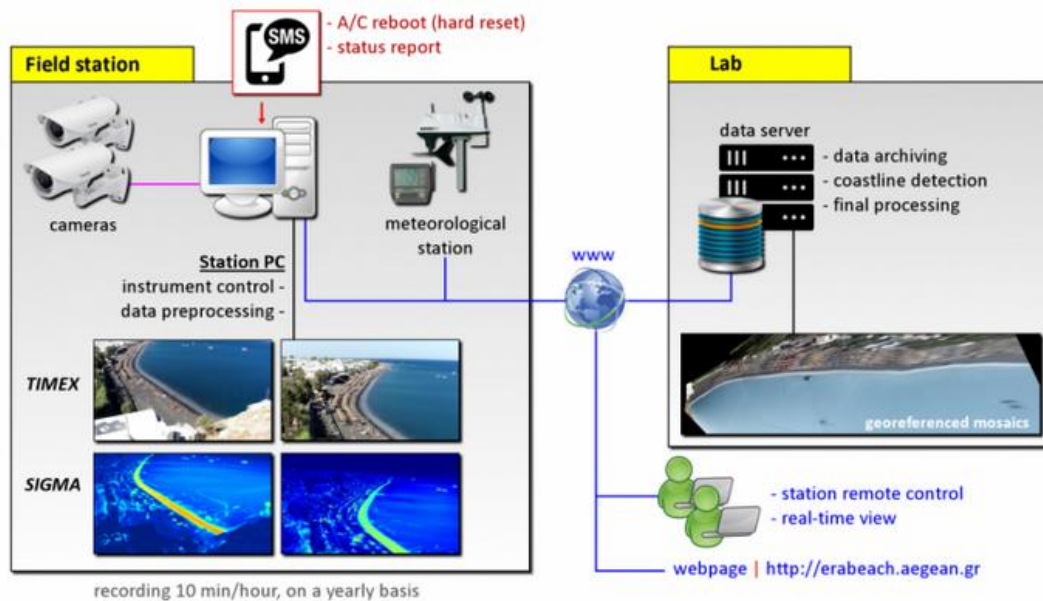
Η ιστορία πίσω από την απεικόνιση βίντεο στις μελέτες παράκτιων περιοχών ξεκινά από τη δεκαετία του 1930, όπου έγιναν οι πρώτες προσπάθειες για τη μελέτη παράκτιων διεργασιών με τη βοήθεια αεροφωτογραφιών. Το 1980 έχει γίνει άλλη μια προσπάθεια από το Εργαστήριο Εικόνας Ακτογραμμής (Coastal Imaging Lab - CIL) στην οπτική απομακρυσμένη ανίχνευση μέσω της μέτρησης της κυματικής αναρρίχησης με τη χρήση των χρόνο-χτυπημάτων (time-laps) για την ανίχνευση των ακραίων κυμάτων infragravity (Holman, 1981). Οι δύσκολες συνθήκες καιρού και κυμάτων του βορειοδυτικού Ειρηνικού των ΗΠΑ, η υλικοτεχνική υποδομή, το κόστος και τα οφέλη από τα δεδομένα οδήγησαν σύντομα το εργαστήριο να εφαρμόζει την μέθοδο οπτικής δειγματοληψίας στις παράκτιες ζώνη. Αυτό ενισχύθηκε σημαντικά από την πρόωμη ανακάλυψη ότι οι δεκάλεπτες εικόνες timex μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό βυθισμένων αμμοθινών και καναλιών, που ήταν μια εξαιρετικά απλούστευση μέθοδος σε σχέση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις τοπογράφησης (Lippmann and Holman, 1989). Η ισχύς της τεχνικής timex οδήγησε στην ανάπτυξη, το 1992, αυτοματοποιημένων μη επανδρωμένων σταθμών που ονομάζονται σταθμοί Argus, οι οποίοι είναι προγραμματισμένοι να συλλέγουν αυτές τις εικόνες ανά ώρα σε οποιαδήποτε περιοχή ερευνητικού ενδιαφέροντος. Το κύριο προϊόν του προγράμματος Argus, οι εικόνες TIMEX, βοήθησαν να συλλεχθούν

παραδείγματα εκπληκτικών παράκτιων μορφολογιών και διάφορων παράκτιων δυναμικών συμπεριφορών σε όλες σχεδόν τις παραλίες που έχουν ληφθεί δείγματα μέχρι σήμερα. Το λεγόμενο σύστημα Argus, το οποίο βελτιώνεται συνεχώς από το 1992, διαθέτει σήμερα πλήρως ψηφιακή τεχνολογία βίντεο, η οποία παρέχει υψηλή ποιότητα εικόνας σε συνδυασμό με λεπτομερή ανάλυση εικονοστοιχείων.

Τα οπτικά συστήματα παρακολούθησης παραλιών (Beach Optical Monitoring System - BOMS) χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τη μορφοδυναμική παρακολούθηση των παραλιών. Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν την χαμηλού κόστους απόκτηση μακροπρόθεσμων, μη παρεμβατικών παρατηρήσεων με υψηλή χωροχρονική ανάλυση (Plant and Holman, 1998; Pearre and Puleo, 2009). Μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την θέση της ακτογραμμής (Senechal et al., 2015), την ζώνη κυματικής θραύσης (Vousdoukas, 2014), την βαθυμετρία της ζώνης κυματογωγής (Catalan and Haller, 2008) και γενικά για την χρήση της παραλίας (Balouin et al., 2014).

Όλες αυτές οι παρατηρήσεις γίνονται μέσω της συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας *in situ* πρωτογενών δεδομένων βάσει ανεπτυγμένων αλγορίθμων λογισμικού. Το οπτικό σύστημα προσφέρει τη δυνατότητα οικονομικής και αυτόματης παρακολούθησης των παράκτιων διεργασιών, λόγω του ότι είναι αυτόνομο σύστημα και η διαχείριση των παραμέτρων της λειτουργίας του γίνεται χωρίς την ανάγκη παρουσίας φυσικής παρέμβασης.

Επιπλέον, ο σταθμός πεδίου μπορεί να παρέχει επισκόπηση των τοπικών περιβαλλοντικών συνθηκών σε πραγματικό χρόνο. Η δυνατότητα απομακρυσμένης διαχείρισης και παρακολούθησης του σταθμού πεδίου επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πλήρη έλεγχο και επίγνωση της κατάστασης του συστήματος και των περιβαλλοντικών συνθηκών στον τοπικό χώρο χωρίς να απαιτεί σημαντικούς πόρους σε προσωπικό, εξοπλισμό, και αριθμό αποστολών στο πεδίο για την επιτόπια συλλογή τους.

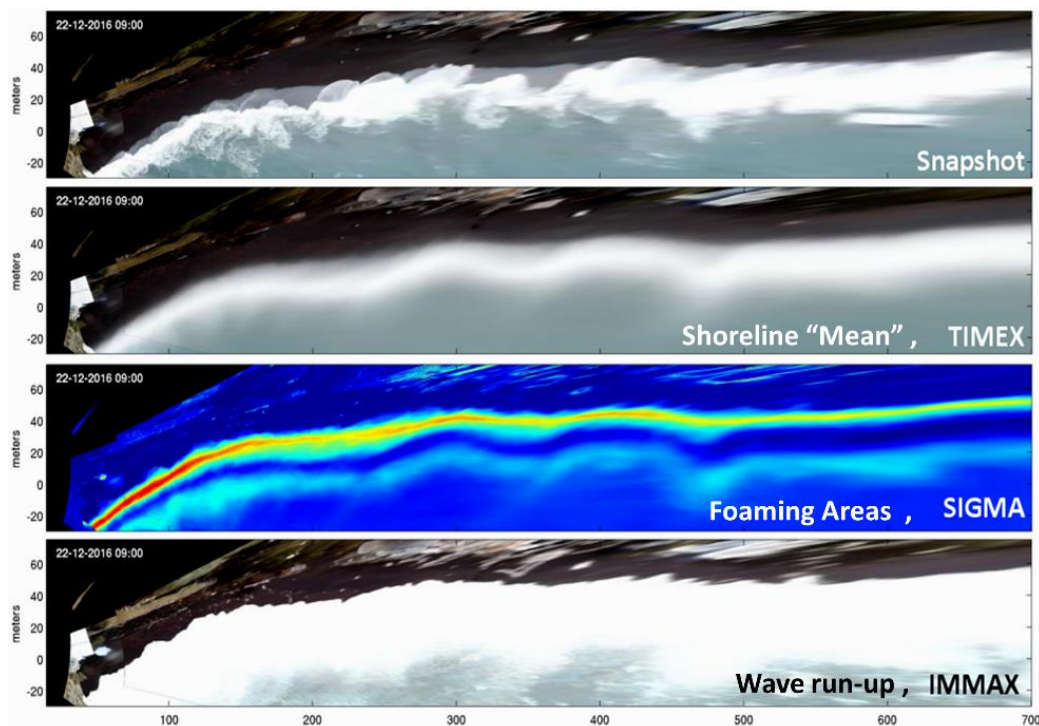


Σχήμα 7. Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας ενός ΟΣΠΠ (από σημειώσεις μαθήματος παράκτιας μορφοδυναμικής, 2023)

Το οπτικό σύστημα, που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Παράκτιας Μορφοδυναμικής, Διαχείρισης και Θαλάσσιας Γεωλογίας, είναι βαθμονομημένο (παραμόρφωση φακών, ύψος κάμερας από το επίπεδο της θάλασσας, σημεία γεωαναφοράς), έτσι ώστε τα πρωτογενή βίντεο και τα προϊόντα τους να μπορούν να μετατραπούν σε γεωαναφερμένες "μωσαϊκές" εικόνες. Αυτό γίνεται μέσω της συρραφής του οπτικού πεδίου της κάμερας σε μία ενοποιημένη εικόνα, ακολουθούμενη από τεχνικές επεξεργασίας εικόνας (Vousdoukas et al., 2011; Velegrakis et al., 2015, 2016). Οι 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 τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλάσσιων Βιοεπιστημών (Σχήμα 7).

Το αποτέλεσμα, το τελικό «προϊόν» των οπτικού συστήματος παρακολούθησης περιλαμβάνει εικόνες τύπου TIMEX, SIGMA και IMMAX οι οποίες εξάγονται για κάθε 10λεπτο καταγραφής. Οι TIMEX εικόνες εκφράζουν το μέσο όρο όλων των στιγμιότυπων του 10λέπτου (time-average), οι SIGMA αντιπροσωπεύουν τη διακύμανση (variance), ενώ οι IMMAX εικόνες εκφράζουν το ανώτατο ανιχνευμένο «υγρό» όριο προς τη χέρσο τις εικόνες TIMEX με μέση χρονική διάσταση και τις εικόνες διακύμανσης SIGMA (Holman and Stanley, 2007, Velegrakis et al., 2016).

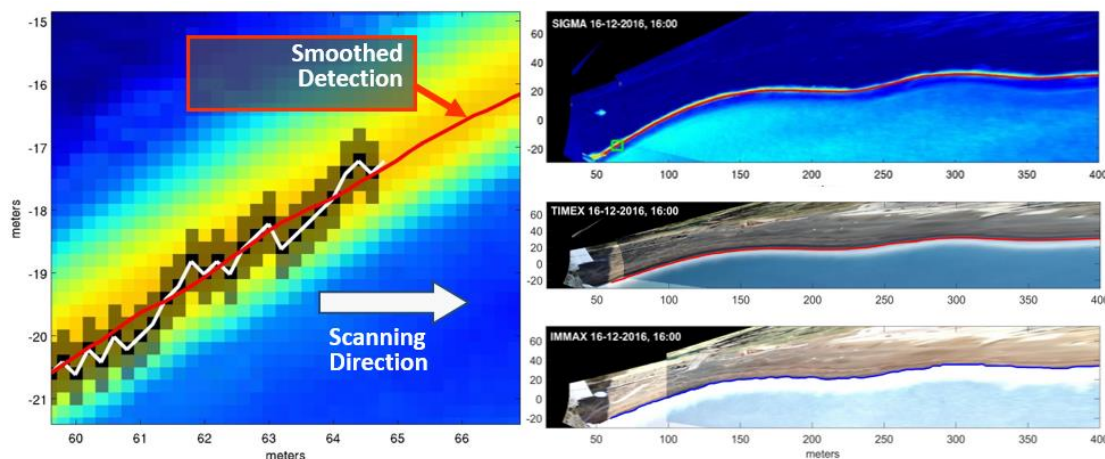
Στις χρονοσειρές εικόνων TIMEX και SIGMA, η δυναμική των σημαντικών χαρακτηριστικών της παραλίας μπορούν να αναγνωριστούν και να καταγραφούν όπως αυτές της διεπιφάνειας "υγρής"/"ξηρής" παραλίας, όπου το όριο διαφοράς είναι η γραμμή θραύσης των κυμάτων στην ακτή, ή το ανώτερο όριο της ζώνης κύματος. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες για την οριζόντια θέση της ακτογραμμής. Οι Plant και Holman (1997) βασίστηκαν στην εξαγωγή ακτογραμμής με βάση τις διακριτές παράλληλες μπάντες υψηλής φωτεινότητας που παράγονται από την αφρώδη ζώνη του κύματος (ακτογραμμής με μέγιστη φωτεινή ένταση - SLIMs). Οι Turner και Leyden (2000) χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο απόκλισης χρωματικών καναλιών (CCD) που χρησιμοποιεί διαδικασίες διάκρισης χρώματος εστιάζοντας στις εμφυτευμένες διαφορές που προκαλούνται από τη διαφορική ανάκλαση του φωτός ανάμεσα στην "υγρή" και "ξηρή" παραλία.



Σχήμα 8. Επιμέρους οπτικά προϊόντα του ΟΣΠΠ. Δεδομένα από Καμάρι, Σαντορίνη (από Chatzipavlis, 2022).

Θα πρέπει να αναφερθεί πως πέρα από την ανίχνευση της ακτογραμμής, οι TIMEX εικόνες προσφέρουν σημαντική οπτική πληροφορία για την γενικότερη υδροδυναμική της περιοχής. Περιοχές με συστηματικά υψηλή φωτεινότητα (π.χ. αφρός, θραύση κυμάτων) τονίζονται τόσο στις TIMEX όσο και στις IMMAX εικόνες, ενώ περιοχές

συστηματικής μεταβλητότητας τονίζονται στην εικόνα SIGMA (Σχήμα 9), όπου οι περιοδικές εναλλαγές του χρώματος των εικονοστοιχείων (μεταξύ άμμου και αφρού) στη ζώνη διαβροχής (swash zone) οδηγεί στη διακριτή αποτύπωση μίας γραμμής υψηλής διακύμανσης.



Σχήμα 9. Καταγραφή ακτογραμμής σε SIGMA και TIMEX εικόνες, καθώς και καταγραφή του ανώτατου ορίου κυματικής αναρρίχησης (wave run-up) σε IMMAX εικόνα. Δεδομένα από Καμάρι, Σαντορίνη (από Chatziravlis, 2022).

Η παρούσα εργασία περιγράφει συνοπτικά τις μορφολογικές αλλαγές που συντελούνται στις χτισμένες από χαλαρά ιζήματα παραλίες από την παράκτια κυματική δράση και τα θαλάσσια ρεύματα, ενώ εστιάζει στις ιδιαιτερότητες των υδροδυναμικών διεργασιών των παραλιών, που χαρακτηρίζονται ως εγκιβωτισμένες (rocket beach), που είναι σχετικά απομονωμένες ως αναφορά την πλευρική τροφοδοσία τους σε ίζημα. Τέλος, αξιοποιεί συγκεκριμένα οπτικά δεδομένα παρακολούθησης για την ανίχνευση του ανώτατου ορίου κυματικής αναρρίχησης στην αμμώδη, εγκιβωτισμένη παραλία Coral Bay (Κόλπος των Κοραλλιών).

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Περιοχή μελέτης

Η παραλία του Κόλπου των Κοραλλιών (Coral Bay) βρίσκεται στο ΝΔ τμήμα της Κύπρου, στην περιοχή Πέγειας, περίπου 11 χιλιόμετρα βόρεια της πόλης της Πάφου.



Σχήμα 10. Περιοχή μελέτης

Η γεωλογική δομή του Κόλπου των Κοραλλιών οφείλεται στην κλιματική και γεωλογική εξέλιξη της περιοχής. Στα βόρεια και στα νότια του Κόλπου των Κοραλλιών το παράκτιο ανάγλυφο χαρακτηρίζεται από βραχώδη ακρωτήρια και θαλάσσιες σπηλιές, κάνοντας τη συγκεκριμένη παραλία τη δημοφιλέστερη στην περιοχή. Πρόκειται για μια αμμώδη τυπική παραλία τσέπης (rocket beach) μικρών διαστάσεων (Μήκος - 610 m, Μέγιστο Πλάτος - 31 m) που χαρακτηρίζεται από φτωχή τροφοδοσία

σε ιζήματα, ενώ οριοθετείται από 2 ακρωτήρια μήκους ~500 m το κάθε ένα, προστατεύοντάς την από την κυματική δράση. Η παραλία είναι εκτεθειμένη στην κυματική φόρτιση προερχόμενη N από ΝΔ ανέμους (τομέας μεταξύ 180° - 250°).

Το Coral Bay χαρακτηρίζεται από υψηλή κοινωνικό-οικονομική αξία με αναπτυγμένη τουριστική υποδομή, που δέχεται πλήθος επισκεπτών κατά τη διάρκεια της τουριστικής περιόδου (Μάρτιος - Νοέμβριος για την Κύπρο).

Στην περιοχή πλησίον της παραλίας λειτουργούν 15 ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις και αρκετές επιχειρήσεις, ενώ τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται έντονη οικοδομική δραστηριότητα.

2.2 Παραγωγή οπτικών δεδομένων

Ο αυτόνομος σταθμός παρακολούθησης έχει εγκατασταθεί στο ανατολικό άκρο της παραλίας (σε οροφή παραλιακής επιχείρησης – Σχήμα 11) και αποτελείται από έναν υπολογιστή, έναν μετεωρολογικό σταθμό (τοποθετημένο σε υψόμετρο 7.5 μέτρων) και μια βιντεοκάμερα Vivotek IP8362 (τοποθετημένη σε υψόμετρο 6.5 μέτρων), ρυθμισμένη για την απόκτηση εικόνων της παραλίας (βίντεο 3gp, 1920 × 1080 pixels) με συχνότητα δειγματοληψίας 5 καρέ ανά δευτερόλεπτο σε λειτουργία συνεχούς λήψης (για βίντεο 10 λεπτών στην αρχή κάθε ώρας).

Μετά την εγκατάσταση ακολούθησε η ρύθμιση της εστίασης (focus) της κάμερας και η διόρθωση της εικόνας της εικόνας σύμφωνα με τη μεθοδολογία που έχει προταθεί από τον Bouguet (2015) και η οποία περιλαμβάνει τη χρήση προσχεδιασμένου γεωμετρικού κανάβου («σκακιέρα») και ειδικά σχεδιασμένο λογισμικό (toolbox) στη matlab. Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας πραγματοποιήθηκε η γεω-αναφορά του οπτικού πεδίου της κάμερας με τη βοήθεια διαφορικού GPS (RTK-DGPS), προκειμένου να επιτευχθεί η χωροθέτηση των εικόνων με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια.



Σχήμα 11. Η παραλιακή επιχείρηση, που στην οροφή της εγκαταστάθηκε η κάμερα Vivotek IP8362 (από Google Photo).

Πέραν της φυσικής εγκατάστασης του σταθμού στην περιοχή μελέτης, εκτελέστηκε μία σειρά επιμέρους εργασιών και συλλέχθηκαν επικουρικά δεδομένα για την βαθμονόμηση και γεωαναφορά του συστήματος. Οι σχετικές εργασίες βαθμονόμησης αφορούσαν κυρίως τη διόρθωση της γεωμετρίας των οπτικών δεδομένων λόγω παραμόρφωσης του φακού (Heikkilä & Silvén, 1997) καθώς και την αντιστοίχιση σταθερών σημείων γεωαναφοράς, γνωστού Γεωγραφικού Μήκους και Πλάτους (Ground Control Points, GCPs), με επιλεγμένα εικονοστοιχεία της εικόνας, επιτρέποντας έτσι τη γεωαναφορά των οπτικών δεδομένων (Vousdoukas et al., 2011).

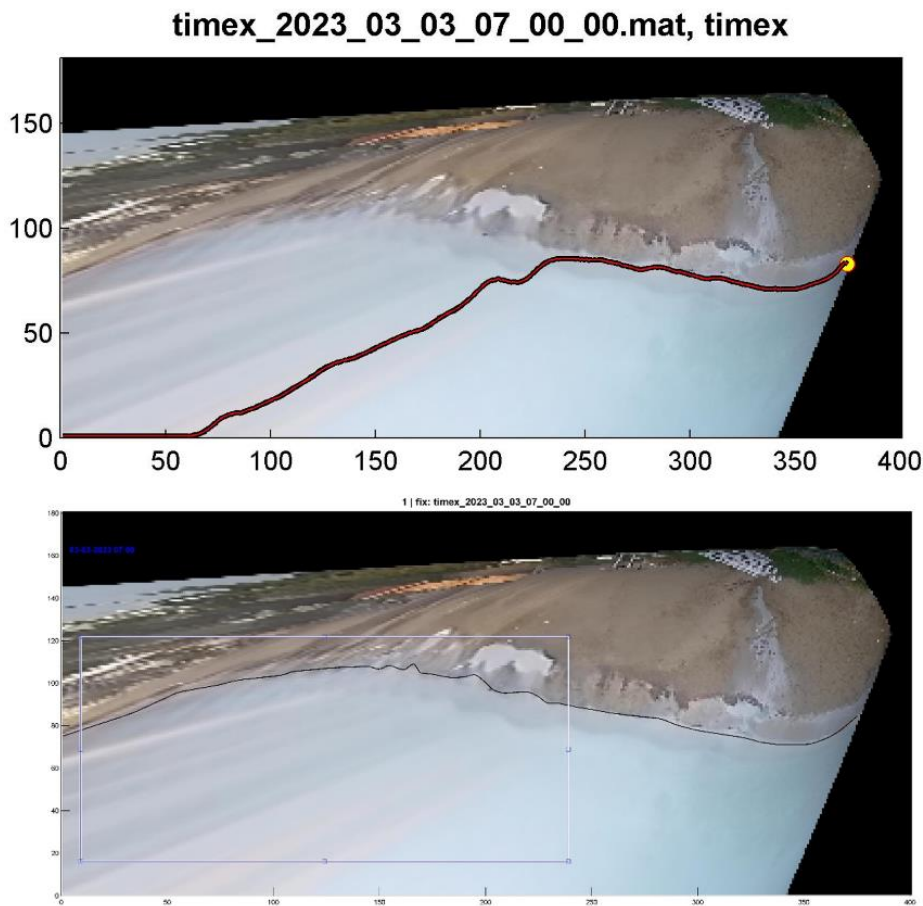
Ο σταθμός σχεδιάστηκε για την παρακολούθηση των μορφοδυναμικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην παράκτια ζώνη, συνεπώς έχει βελτιστοποιηθεί για μακροχρόνια χρήση. Το σύστημα είναι σε θέση να λειτουργεί καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και για όλη τη διάρκεια της ημέρας, εξαιρώντας τις νυχτερινές ώρες. Η κάμερα είναι συνδεδεμένη με έναν υπολογιστή του σταθμού πεδίου και η φωτογραφίες λαμβάνονται κάθε μια ώρα από τις 7 η ώρα το πρωί μέχρι τις 4 η ώρα το απόγευμα τους χειμερινούς μήνες και ως τις 8 το απόγευμα τη θερινή περίοδο. Μετά από αυτοματοποιημένη προεπεξεργασία στον υπολογιστή πεδίου, επιμέρους οπτικά προϊόντα του συστήματος - εικόνες μέσου όρου της φωτεινότητας των pixel - TIMEX (Velegrakis et al., 2016) και του μέγιστου της φωτεινότητας των pixel - IMMAX (Chatzipavlis et al., 2019) μεταφέρονται μέσω διαδικτύου στο Εργαστήριο Παράκτιας Μορφοδυναμικής – Διαχείρισης και Θαλάσσιας Γεωλογίας του Τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλάσσιων Βιοεπιστημών (ΤΩΘΒΕ) για γεω-αναφορά και ανίχνευση επιμέρους παραλιακών χαρακτηριστικών ενδιαφέροντος όπως η θέση της ακτογραμμής και το ανώτατο όριο της κυματικής αναρρίχησης (wave run-up).

2.3 Υψίσυχνες καταγραφές θέσης ακτογραμμής

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι ωριαίες εικόνες TIMEX (μέσος όρος της φωτεινότητας των pixel κάθε 10λεπτου ωριαίου βίντεο) για την ανίχνευση/εξαγωγή της θέσης της ακτογραμμής. Θα πρέπει να σημειωθεί, πως ως ακτογραμμή ορίστηκε η μέση γραμμή της φωτεινής ζώνης/λωρίδας της περιοχής που βρίσκεται στη ζώνη διαβροχής, και είναι εμφανής στην εκάστοτε TIMEX εικόνα (Σχήμα 12). Τα εικονοστοιχεία που αφορούν το χερσαίο και στεγνό τμήμα της παραλίας είναι συνήθως χαμηλής φωτεινότητας (σκούρες αποχρώσεις), ενώ τα εικονοστοιχεία που αντιπροσωπεύουν την περιοχή της ακτογραμμής είναι ιδιαίτερα υψηλής φωτεινότητας (λευκό χρώμα). Κατ' αυτόν τον τρόπο, λόγω της μεγάλης αντίθεσης στην φωτεινότητα γειτονικών εικονοστοιχείων ο χρήστης δύναται να ρυθμίζει τις παραμέτρους ανίχνευσης προκειμένου να επιτευχθεί ο κατά το δυνατόν ακριβέστερος διαχωρισμός.

Οι ανιχνεύσεις της θέσης της ακτογραμμής πραγματοποιήθηκε για κάθε ωριαία TIMEX εικόνα ξεχωριστά. Οι ανιχνεύσεις πραγματοποιήθηκαν σε 2 στάδια: i) αυτόματη ανίχνευση με χρήση ειδικού αλγόριθμου γραμμένου σε γλώσσα matlab; και ii) διόρθωση της αυτόματης ανίχνευσης του αλγόριθμου με ψηφιοποίηση, ομοίως με χρήση ειδικού αλγόριθμου γραμμένου στη matlab (Σχήμα 12). Οι παράμετροι ρύθμισης του αυτόματου «ανιχνευτή» που αφορούν την συγκεκριμένη τοποθεσία περιλαμβάνουν: i) την προτιμώμενη γενική κατεύθυνση κίνησης του αλγόριθμου (kernel) κατά μήκος της TIMEX εικόνας (από δεξιά προς τα αριστερά στην προκειμένη περίπτωση) και ii) το αρχικό σημείο «αγκύρωσης» των ανιχνεύσεων, το οποίο ορίζεται από τον χρήστη (στην αριστερότερη άκρη της εικόνας στην προκειμένη περίπτωση), που εκτείνεται σε όλο το στοιχείο ενδιαφέροντος.

Όσον αφορά την ακρίβεια της καταγραφής, αυτή τείνει να μειώνεται με την απόσταση από την κάμερα λόγω της μείωσης της ευκρίνειας των pixel της εικόνας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το οπτικό σύστημα παρακολούθησης εγκαταστάθηκε σε χαμηλό ύψος (7.5 m), κάτι που οδήγησε σε μικρό οπτικό πεδίο, με αποτέλεσμα η περιοχή ανίχνευσης της θέσης της ακτογραμμής να περιοριστεί σε ένα κομμάτι παραλίας μήκους 95 m. Σε αυτήν την περιοχή, η ανάλυση των ανιχνεύσεων εκτιμάται σε περίπου 0.25 m.



Σχήμα 12. Αυτόματη (πάνω) και χειροκίνητη (κάτω) ανίχνευση της θέσης της ακτογραμμής στην ίδια TIMEX εικόνα, σύμφωνα με το ειδικό λογισμικό/αλγόριθμους που έχουν αναπτυχθεί από το εργαστήριο Παράκτιας Μορφοδυναμικής, Διαχείρισης και Θαλάσσιας Γεωλογίας

Πραγματοποιήθηκε καταγραφή των θέσεων της ακτογραμμής σε 202 ωριαίες TIMEX εικόνες που αντιστοιχούν σε 25 ημέρες, καλύπτοντας μια μηνιαία περίοδο ενεργητικής υδροδυναμικής φόρτισης μεταξύ 03/03/2023 – 06/04/2023. Η ακτογραμμή και που καταγράφηκε κατά την αρχική ημερομηνία λειτουργίας του συστήματος (03/03/2023 στις 07:00) ορίστηκε ως γραμμή αναφοράς, προκειμένου να εκτιμηθεί η μεταβλητότητα της ακτογραμμής κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η χωρο-χρονική μεταβλητότητα για 5 ισαπέχουσες (ανά 20 m) και αντιπροσωπευτικές θέσεις της ακτογραμμής που καλύπτουν όλο το εύρος της περιοχής παρακολούθησης (Σχήμα 13). Σημειώνεται πως υπήρξαν ορισμένες χρονικές περιόδους από 03/03/2023 μέχρι 06/04/2023 και 29/03 έως

01/04 όπου η παραγωγή προϊόντων εικόνων TIMEX δεν ήταν εφικτή λόγω δυσλειτουργίας του συστήματος.

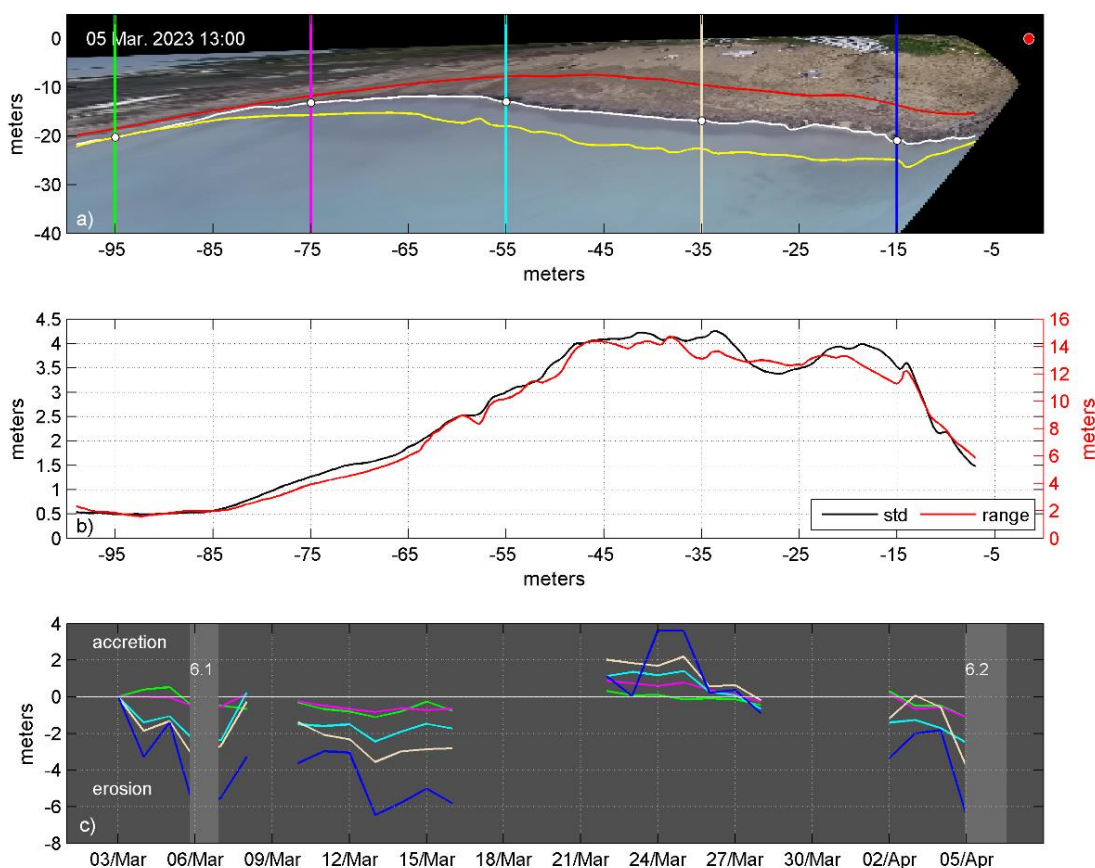
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης, οι θέσεις της ακτογραμμής παρουσίασαν εμφανή χωρο-χρονική μεταβλητότητα. Σε οποιοδήποτε τμήμα της παρακολουθούμενης παραλίας, οι διαφορές μεταξύ των ελάχιστων και μέγιστων σημείων της ακτογραμμής κυμαίνονταν μεταξύ 2 - 14.5 m (Σχήμα 13b). Οι περιοχές αυξημένης μεταβλητότητας της ακτογραμμής συνδέονται κυρίως με περιοχές του κεντρικού και νοτιοανατολικού τμήματος της παρακολουθούμενης παραλίας (σε περίπου μεταξύ 0 - 65 m από το σημείο τοποθέτησης του συστήματος), ενώ το νοτιοδυτικό τμήμα της παρακολουθούμενης παραλίας παρουσίασε τυπικές αποκλίσεις χαμηλότερες από 1.5 m και φαίνεται να είναι αρκετά σταθεροποιημένο (σε περίπου μεταξύ 65 - 98 m). Η μεταβλητότητα γίνεται εμφανής σε 80 – 85 m από το σημείο τοποθέτησης του συστήματος. Στις μεγαλύτερες τιμές φτάνουμε στο κεντρικό τμήμα της παρακολουθούμενης παραλίας, οι οποίες φτάνουν σχεδόν 4.5 m στο σημείο 30 – 40 m από το σημείο τοποθέτησης του συστήματος.

Η μορφολογική εξέλιξη γίνεται σαφέστερη όταν εξετάζουμε χρονική εξέλιξη της ακτογραμμής στις 5 επιλεγμένες/αντιπροσωπευτικές θέσεις της παραλίας. Οι χωρικές μεταβολές της τυπικής απόκλισης και του εύρους της ακτογραμμής φαίνεται στο σχήμα 13b, όπου η κόκκινη γραμμή δείχνει το εύρος της διαφοροποίησης (σε m) κατά μήκος της ακτογραμμής, ενώ η μαύρη γραμμή δείχνει την τυπική απόκλιση (ομοίως σε m). Τα παράκτια προφίλ κατά την διάρκεια της παρακολούθησης γενικά παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Το πρώτο χρονικό διάστημα 03/03-08/03, που για πρώτη φορά είχαμε έντονο ανεμολογικό φαινόμενο (άνεμοι από το Ν και ΝΔ τομείς με ταχύτητες > 6.1 ms⁻¹ και διάρκεια > 6 ώρες), μόνο το x1 προφίλ στην αρχή της περιόδου παρουσίαζε συμπεριφορά πρόσκωσης, ενώ τα υπόλοιπα είχαν τάσεις διάβρωσης, αν και το x2 προφίλ δεν παρουσίαζε πολύ έντονη συμπεριφορά διάβρωσης και ήταν σχετικά ουδέτερο (Σχήμα 13c).

Στο δεύτερο χρονικό διάστημα 10/03-16/03 και τα 5 παράκτια προφίλ έχουν την συμπεριφορά διάβρωσης και οι μεταβολές που γίνονται είναι πολύ παρόμοιες, εκτός

από το x2 προφίλ που είναι για αυτή την περίοδο σχετικά ουδέτερο και το x5 που παρουσιάζει μεγαλύτερες μεταβολές. Όμως, στο επόμενο χρονικό διάστημα 22/03-28/03 η συμπεριφορά των προφίλ αλλάζει και αρχίζουν και έχουν γενική τάση πρόσχωσης για σχεδόν όλο το χρονικό διάστημα, περίπου μέχρι 27/03, που εκείνη την ημέρα η συμπεριφορά πρόσχωσης αλλάζει προς την συμπεριφορά διάβρωσης.



Σχήμα 13. α) Γεωαναγνωρισμένη εικόνα TIMEX από την παραλία Coral Bay στην οποία φαίνονται οι θέσεις των 5 επιλεγμένων προφίλ, του σταθμού οπτικής παρακολούθησης - BOMS (κόκκινος κύκλος), της ακτογραμμής όπως ανιχνεύεται στην εμφανιζόμενη εικόνα TIMEX και της απόστασης μεταξύ του ελάχιστης και μέγιστης καταγεγραμμένης θέσης της ακτογραμμής β) χωρικές κατανομές της τυπικής απόκλισης (std) και του εύρους της θέσης της ακτογραμμής που ανιχνεύθηκε κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης γ) οι χρονικές μεταβολές της ακτογραμμής της παραλίας - πρόσχωση/διάβρωση στις 5 θέσεις που παρουσιάζονται στον εικόνα (α); οι σημαντικές μεταβολές σε σχέση με τη γραμμή αναφοράς που καταγράφηκε στην 03/03/2023 07:00- οι ανοιχτές γκριζες λωρίδες υποδηλώνουν το χρόνο, τη διάρκεια και την ταχύτητα των ενεργητικών ανεμολογικών φαινομένων (άνεμοι από το N και ΝΔ τομείς με ταχύτητες $>6.1 \text{ ms}^{-1}$ και διάρκεια > 6 ώρες).

Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί, ότι το προφίλ x1, όπως και το πρώτο χρονικό διάστημα, έχει γενικά ουδέτερη συμπεριφορά και βρίσκεται στο όριο πρόσχωσης-διάβρωσης, ενώ το x5 για ακόμη μια φορά έχει πολύ έντονες μεταβολές. Στο τελευταίο χρονικό διάστημα παρακολούθησης 02/04-05/04 τα προφίλ x1 και x2 στην αρχή παρουσιάζουν πολύ ελάχιστη τάση πρόσχωσης και μετά με τον ίδιο ακριβώς ρυθμό καθορίζουν την διάβρωση. Το προφίλ x4 αυτή την φορά παρουσιάζει μικρότερη συμπεριφορά διάβρωσης σε σχέση με x3 προφίλ και έχει μεγαλύτερες μεταβολές σε σχέση με τα προηγούμενα χρονικά διαστήματα. Το προφίλ x5 για ακόμα μια φορά παρουσιάζει πολύ έντονες μεταβολές και στο τέλος της παρακολούθησης φτάνει στο όριο 6 m διάβρωσης. Παρόμοιο φαινόμενο έχει παρατηρηθεί και την περίοδο 10/03-16/03 που η διάβρωση του προφίλ x5 έχει ξεπεράσει το όριο 6 m διάβρωσης και έχει φτάσει σε περίπου 6.5 m.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, τα εγκάρσια προφίλ x1 και x2, που βρίσκονται στο νοτιοδυτικό τμήμα, διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζουν ελάχιστες μεταβολές κατά την διάρκεια παρακολούθησης. Στην αρχή περιόδου παρακολούθησης το προφίλ x1 παρουσιάζει την συμπεριφορά πρόσχωσης αντίθετα με το προφίλ x2, που παρουσιάζει ελαφρώς συμπεριφορά διάβρωσης. Την πιο σημαντική και διακριτή συμπεριφορά διάβρωσης παρουσιάζει το προφίλ x5. Ενώ, όπως έχει σημειωθεί πριν, την περίοδο 22/03-28/03 και τα 5 προφίλ αντιπροσωπεύουν την συμπεριφορά πρόσχωσης.

Δύο γεγονότα ανέμου με ένταση μεγαλύτερη από 4 μποφόρ εντοπίστηκαν στις αρχές Μαρτίου και Απριλίου, μετά από ανάλυση των δεδομένων ανέμου που προέρχονται από τον μετεωρολογικό σταθμό. Όμως, δυστυχώς κατά τις περιόδους αυτές υπήρχε δυσλειτουργία του συστήματος και δεν καταγράφηκαν μορφοδυναμικά δεδομένα. Γενικά, οι θέσεις της ακτογραμμής στην υπό παρακολούθηση περιοχή της παραλίας Coral Bay διαπιστώθηκε ότι είχαν διαφορετική συμπεριφορά σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος της ακτής, κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης. Σε γενικές γραμμές, η μεταβλητότητα της ακτογραμμής εντοπίστηκε να είναι μεγαλύτερη στην ανατολική από ό,τι στο δυτικό τμήμα της παρακολουθούμενης παραλίας. Οι διαφορές αυτές θα μπορούσαν να αποδοθούν σε αλλαγές στις παράκτιες κλίσεις, οι οποίες αποτελούν κρίσιμο παράγοντα ελέγχου της κύματος.

Η μετατόπιση της ακτογραμμής πραγματοποιήθηκε σε συγκεκριμένες ημερομηνίες, για τις οποίες δεν καταγράφηκε από τον μετεωρολογικό σταθμό σημαντική ανεμογενής

δραστηριότητα, ικανή να δημιουργήσει επαρκή κυματική δράση. Αυτές οι μορφολογικές αλλαγές θα μπορούσαν ενδεχομένως να αποδοθούν στη δράση κυματισμών που δημιουργήθηκαν αλλού (swell), λαμβανομένου επίσης υπόψη του μεγάλου ενεργού μήκους ανάπτυξης των κυματισμών (Feff) της παραλίας Coral Bay (η πλησιέστερη απέναντι ακτή βρίσκεται στην Αίγυπτο, 550 km μακριά).

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε θεωρείται ικανή να παρέχει ένα αποτελεσματικό και ισχυρό εργαλείο παρακολούθησης και διαχείρισης των παραλιών, αφού έχει την ικανότητα να παρέχει γρήγορη και υψηλής συχνότητας καταγραφές των θέσεων της ακτογραμμής. Επιπρόσθετα, η πρωτογενής πληροφορία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της μέγιστης κυματικής αναρρίχησης (wave run up) (Chatzipavlis et al., 2019), καθιστώντας την εξαιρετικά σημαντική, καθώς μπορεί να καθορίσει με ακρίβεια τη γραμμή του αιγιαλού, που είναι μια πολύ κρίσιμη παράμετρος για τον παράκτιο σχεδιασμό.

Τα αποτελέσματά της μελέτης υποδηλώνουν μια εξαιρετικά μεταβλητή ακτογραμμή του παραλιακού μετώπου που κυμαίνονταν μεταξύ 2 έως 14.5 m. Αντιθέτως, η μελέτη του Velegrakis et al. (2015), που υλοποιήθηκε στην παραλία Αμμουδάρα, μια παραλία τύπου perched beach η οποία προστατεύεται από τους έντονους κυματισμούς λόγω του φυσικού υφάλου που βρίσκεται στην κοντινή απόσταση από την παραλία, η μετατόπιση βρέθηκε να είναι μεταξύ 3,1 και 8 m. Συγκριτικά με την μελέτη Velegrakis et al. (2015), η διαφορά μετατόπισης της ακτογραμμής της παραλίας Coral Bay ήταν διαφορετική και αυτό κυρίως οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει κάποιος φυσικός ύφαλος και στο γεγονός ότι στις παραλίες τύπου rocket beach η παράκτια κυκλοφορία είναι περιορισμένη και δεν υπάρχει επαρκεί τροφοδότηση σε ίζημα. Γενικά, η συγκεκριμένη μελέτη έχει αποδείξει ότι οι θέσεις της ακτογραμμής στην παρακολουθούμενη περιοχή της παραλίας Coral Bay παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος της ακτής και κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης. Σε γενικές γραμμές, η μεταβλητότητα της ακτογραμμής εντοπίστηκε να είναι μεγαλύτερη στην ανατολική από ό,τι στο δυτικό τμήμα της παρακολουθούμενης παραλίας. Οι

διαφορές αυτές θα μπορούσαν να αποδοθούν σε αλλαγές στις παράκτιες κλίσεις, οι οποίες αποτελούν κρίσιμο παράγοντα ελέγχου του κύματος. Επίσης, αυτές οι μορφολογικές αλλαγές θα μπορούσαν ενδεχομένως να αποδοθούν στη δράση κυματισμών που δημιουργήθηκαν αλλού (swell), όπως έχει αναφερθεί στα αποτελέσματα.

Ομοίως, ο Chatzipavlis et al. (2019) έχουν αναλύσει με την χρήση των οπτικών δεδομένων τις παραλίες Καμάρι στην Σαντορίνη και Καλό Λιβάδη στην Μύκονο. Η μελέτη έχει δείξει ότι οι μεταβολές της κυματικής αναρρίχησης και στις δυο παραλίες οφείλονται κυρίως στους κυματισμούς.

Η μέθοδος ανίχνευσης της ακτογραμμής μέσω των οπτικών δεδομένων του BOMS παρήγαγε ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα που χαρακτηρίζονται από υψηλή χωρο-χρονική κάλυψη και μεγάλη ακρίβεια ανάλυσης. Φαίνεται, πως η μακροχρόνια εγκατάσταση και συντήρηση τέτοιου τύπου συστημάτων, συνοδευόμενες από ανάλυση των TIMEX εικόνων από έμπειρους χρήστες, είναι σε θέση να καταδείξει με ασφάλεια τη γραμμή αιγιαλού μιας παραλίας, κάτι που αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των υπάρχοντων μεθόδων ταυτοποίησης, όπως για παράδειγμα οι δορυφορικές εικόνες και η χρήση ΣμηΕΑ. Σε αντίθεση με τους δορυφόρους και τα ΣμηΕΑ που επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως οι συνθήκες νεφοκάλυψης και οι δυνατοί άνεμοι αντίστοιχα, η μέθοδος ανίχνευσης της ακτογραμμής μέσω των οπτικών δεδομένων του BOMS δεν έχει τέτοιου είδους περιορισμούς. Παράλληλα η ακρίβεια των καταγραφών μέσω των οπτικών δεδομένων του BOMS δίνει τη δυνατότητα περαιτέρω διερεύνησης και κατανόησης των φυσικών διεργασιών και βελτίωσης των υπάρχοντων παραμετροποιημένων μαθηματικών σχέσεων, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για παραλίες με ιδιαίτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά όπως οι παραλίες τύπου rocket beach. Σημαντικό είναι να αναφερθεί, ότι η μέθοδος ανίχνευσης της ακτογραμμής μέσω των οπτικών δεδομένων του BOMS μπορεί να καταγράψει πληροφορίες μόνο για περιοχή μικρού εύρους λόγω της οπτικής ανάλυσης του φακού των καμερών, ενώ οι δορυφόροι και τα ΣμηΕΑ μπορούν να συλλέξουν πληροφορίες για πολύ μεγαλύτερου εύρους περιοχές.

Επόμενα ερευνητικά βήματα στις μέρες μας, είναι η βαθμονόμηση (έλεγχος και σύγκριση) ανίχνευσης θέσεων ακτογραμμής από δορυφορικές εικόνες, σε σχέση με ακτογραμμές που έχουν βγει με ακρίβεια από οπτικά συστήματα παρακολούθησης, ώστε να πραγματοποιείται με ασφάλεια η εξαγωγή της ακτογραμμής σε μεγαλύτερη

χωρική κλίμακα. Περαιτέρω τεχνική βελτίωση της ανάλυσης των καμερών, συνοδευόμενη από εξέλιξη του λογισμικού, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται και από μη-έμπειρους χρήστες μέσα από περιβάλλον φιλικότερο (user friendly) και αυτοματοποιημένο ως προς τον χρήστη, αναμένεται να συνεισφέρει σημαντικά τόσο στην επέκταση του μήκους κάλυψης παραλίας, όσο και στην πιο άνετη και εύκολη χρήση από φορείς παράκτιας διαχείρισης.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anthony E.J. (2005). Beach erosion, In M. L. Schwartz (ed.), *Encyclopedia of Coastal Science*, Springer, Dordrecht, p. 140-145.
- Balouin Y., Rey-Valette H., Picand P.A. (2014). Automatic assessment and analysis of beach attendance using video images at the Lido of Sete beach, France. *Ocean Coastal Management*, 102:114–122.
- Bascom W. (1953). CHARACTERISTICS OF NATURAL BEACHES. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(4):10.
- Berriolo G., Fierro G., Gamboni S. (2001). The evolution of the coast between Cape Farina and Cape Gamath (Northern Tunisia). *Proc. of the Fifth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 01*, MEDCOAST Secretariat, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 3:1497-1502.
- Boak E. and Turner I. (2005). Shoreline Defenition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(4):688-703.
- Bouguet J.Y. (2015). Camera Calibration Toolbox for Matlab. URL: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
- Catalan P.A. and Haller M.C. (2008). Remote sensing of breaking wave phase speeds with application to nonlinear depth inversions. *Coastal Engineering*, 55(1):93–111.
- Chatzipavlis A.E., Trygonis V., Eleftheriou A., Andreadis O., Monioudi I., Velegrakis A.F. (2019). Automated 2-D wave run-up detection from coastal video imagery. Examples from the islands of Santorini and Mykonos. 1st International Scientific Conference on Design and Management of Port, Coastal and Offshore Works Athens, Greece, 8-11 May 2019.
- Chatzipavlis, A. (2022). High resolution beach morphodynamics: A comparison between perched and open beaches. PhD Thesis, Department of Marine Sciences, Univeristy of the Aegean, 132 pp.
- Church J.A. and White N.J. (2006). A 20th century acceleration in global sea-level rise. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 23, L01602.
- Dingler J.R. and Reiss T.E. (2002). Changes to Monterey Bay beaches from the end of the 1982-83 El Nino through the 1997-98 El Nino. *Marine Geology* 181(1-3): 249-263.
- Doyle T.W., Krauss K.W., Conner W.H., From A.S. (2009). Predicting the retreat and migration of tidal forests along the northern Gulf of Mexico under sea-level rise. *Forest Ecology and Management*, 259(4): 770-777.
- EEA Annual Report 1999 - European Environment Agency.

Ellison J. (2005). Holocene palynology and sea-level change in two estuaries in Southern Irian Jaya. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 220: 291-309.

EUROSION (2001). “Coastal erosion – Evaluation of the need for action” Directorate General Environment, European Commission.

EUROSION (2004). Living with coastal erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability. In: Coastal Erosion – Evaluation of the need for action, Directorate General Environment, European Commission.

Gopalakrishnan S., Smith M.D., Slott J.M., Brad Murray A. (2011). The value of disappearing beaches: A hedonic pricing model with endogenous beach width. *Journal of Environmental Economics and Management*, 61: 297–310.

Haslett S.K. (2000). *Coastal Systems*. Routledge, London.

Heikkila J. and Silven O. (1997). A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 17-19, San Juan, Puerto Rico. pp. 1106–1112.

Holman R.A. (1981). Infragravity energy in the surf zone, *Journal of Geophysical Research*, 86(C7): 6442-6450.

Holman R.A. and Stanley J. (2007). The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Engineering*, 54(6–7):477–491.

IPCC (2023). Sixth Assessment Report (AR6) “Climate Change 2023”, Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC), 86 pp.

Komar P. D. (1998). *Beach processes and sedimentation*. New Jersey: Prentice Hall.

Lippmann T.C., Holman R.A. (1989). Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation. *Journal of Geophysical Research*, 94 (C1): 995-1011.

Luijendijk A., Hagenaars G., Ranasinghe R., Baart F., Donchuts G. and Aarninkhof S. (2018). The State of the World’s Beaches, *Scientific Reports*, 8 (6641): 11.

Masselink G. and Hughes M.G. (2003). *Introduction to coastal processes and geomorphology*, Oxford University Press, London, pp. 345.

Medina J.M. and Lopez J.S. (1997). Strong erosion scenario due to disequilibrium of solid transport rate: the case of Torrox Beach (Malaga). *Proc. of the Third International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 97*, MEDCOAST Secretariat, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2:1234-1239.

Melet A., Meyssignac B., Almar R. (2018). Under-estimated wave contribution to coastal sea-level rise. *Nature Climate Change*, 8:234–239.

Miller R.L. and Ziegler J.M. (1958). A model relating dynamics and sediment pattern in equilibrium in the region of shoaling waves, breaker zone and foreshore, *Geology* 66(7): 419-441.

Monioudi I., Velegarakis A., Chatzipavlis A., Rigos A., Karambas T., Vousdoukas M., Hasiotis T., Koukourouvli N., Peduzzi P., Manoutsoglou E., Poulos S., Collins M. (2017). Assessment of island beach erosion due to sea level rise: The case of the Aegean archipelago (Eastern Mediterranean). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17: 449-466.

Nicholls R.J., Hanson S., Herweijer C., Patmore N., Hallegatte S., Corfee-Morlot J., Cha[^]teau J., Muir-Wood R. (2007). Ranking port cities with high exposure and vulnerability to climate extremes—exposure estimates. OECD environmental working paper no. 1, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris

Pearre N.S. and Puleo J.A. (2009). Quantifying seasonal shoreline variability at Rehoboth beach, Delaware, using automated imaging techniques. *Journal of Coastal Research*, 25(4):900–914.

Pethick J. (2001). Coastal management and sea-level rise. *Catena*, 42: 307-322.

Plant N.C. and Holman R.A. (1998) Extracting morphologic information from field data. *Coastal Engineering*, 98:2773–2784.

Poulos S.E., Collins M.B. and Evans G (1996). Water-sediment fluxes of Greek rivers, southeastern alpine Europe: annual yields, seasonal variability, delta formation and human impact. *Zietschrift fur Geomorphologie*, 40:243-261.

Pranzini E. and Rossi L. (1995). Physical model test in the framework of beach nourishment performance evaluation. Proc. of the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 95, MEDCOAST Secretariat, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2:1145-1159.

Senechal N., Coco G., Castelle B., Marieu V. (2015). Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- to macrotidal open sandy beach (Biscarrosse, France). *Geomorphology*, 228:448–461.

Shennan I., Coulthard T., Flather R., Horton B., Macklin M., Rees J., Wright M. (2003). Integration of shelf evolution and river basin models to simulate Holocene sediment dynamics of the Humber Estuary during periods of sea-level change and variations in catchment sediment supply. *The Science of The Total Environment*, 314-316: 737-754.

Shepard F.P. (1937). Revised classification of marine shorelines. *Journal of Geology*, 45:602-624.

Shepard F.P. (1973). *Submarine Geology*, Harper & Row, New York, NY.

Simonato C.G., Dragani W., Meccia V., Nunez M. (2004). A numerical study of the barotropic circulation of the Rio de Plata estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth's rotation and low frequency wind variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61: 261-273.

Turner I.L. and Leyden V.M. (2000). System description and analysis of shoreline change: August 1999–February 2000. Report 1. Northern Gold coast coastal imaging system, Water Research Laboratory Technical Report, University of New South Wales, Sydney Australia, 12: 78

Velegrakis A.F., Vousdoukas M., Andreadis O.P., Adamakis G. and Meligonitis R. (2008). Impacts of dams on their downstream beaches: A case study from Eresos coastal basin, Island of Lesbos, Greece. *Marine Georesources and Geotechnology*, 24: 350-371.

Velegrakis A.F., Trygonis V., Vousdoukas M.I., Ghionis G., Hatzipavlis A.E, Andreadis O., Psarros F., Hasiotis Th. (2015). Automated 2-d shoreline detection from coastal video imagery: an example from the island of Crete. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 9535*, 3rd International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of Environment.

Velegrakis A.F., Trygonis V, Chatzipavlis A.E., Karambas T., Vousdoukas M.I., Ghionis G., Monioudi I.N., Hasiotis T., Andreadis O. and Psarros F. (2016). Shoreline variability of an urban beach fronted by a beachrock reef from video imagery. *Natural Hazards*, 83(1): 201-222.

Vousdoukas M.I., Ferreira P.M., Almeida L.P., Dodet G., Andriolo U., 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(10):1521–1540.

Vousdoukas M.I. (2014). Observations of wave run-up and groundwater seepage line motions on a reflectiveto-intermediate, meso-tidal beach. *Marine Geology*, 350:52–70.

White I.D., Mottershead D.N., Harrison S.J. (1992). *Environmental systems: an introductory text*. Chapman and Hall, 1992. London.

World Bank (2015). *Health, Nutrition, and Population*. Washington, DC: The World Bank.

WTTC (2022), *Travel & Tourism Economic Impact Global Trends 2022*, World Travel & Tourism Council (WTTC), United Kingdom.

UNCED, 1992. Agenda 21, 17:44.

Yang B., Madden M., Kim J., Jordan T. R. (2012). Geospatial analysis of barrier island beach availability to tourists, *Tourism Management*, 33, 840–854.

Φωτείνης, Σ. (2014). Η διάβρωση των ακτογραμμών της Ελλάδας. Αξιολόγηση – τρόποι αντιμετώπισης. Διδακτορική διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή μηχανικών περιβάλλοντος. URL: <http://hdl.handle.net/10442/hedi/34691>.

Αλεξανδράκης, Γ. (2011). Υπολογισμός του δείκτη τρωτότητας των παραλιακών ζωνών της Ελλάδος με βάση ωκεανογραφικά και γεωλογικά στοιχεία. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Ωκεανογραφίας & Διαχείρισης Θαλάσσιου Περιβάλλοντος. URL: <http://hdl.handle.net/10442/hedi/34778>.

«Απογραφή Πληθυσμού και Κατοικιών 2021, Προκαταρκτικά Αποτελέσματα - 1η Οκτωβρίου 2021 Πληθυσμός 918.100». www.cystat.gov.cy. Στατιστική Υπηρεσία της Κυπριακής Δημοκρατίας. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο στις 6 Αυγούστου 2022. Ανακτήθηκε στις 6 Αυγούστου 2022.

Αναγνώστου Χ. και Χρόνης Γ. (2000). Εισαγωγή στην παράκτια γεωλογία και στη γεωμορφολογία ακτών. Αθήνα: ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.

Βελεγράκης, Α. Φ., (2005). Σημειώσεις Παράκτιας Γεωλογίας. Τμήμα Επιστημών Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, σελ. 102.

Μονιούδη Ι. (2011). Ολοκληρωμένη εκτίμηση της διάβρωσης των ακτών λόγω της ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σχολή Περιβάλλοντος, Τμήμα Επιστημών της θάλασσας.

Χατζηπαυλής Α. (2023). Σημειώσεις μαθήματος Παράκτιας Μορφοδυναμικής και Μηχανικής, Τμήμα Επιστημών Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.