

ΑΝΤΙΚΤΥΠΟΣ ΣΤΗΝ ΚΟΙΝΩΝΙΑ

Το έργο MARICC θα ωφελήσει την Εθνική Διοίκηση, τις τοπικές αρχές και άλλους ενδιαφερόμενους φορείς, καθώς και το ευρύτερο κοινό, μέσω της αξιολόγησης του κινδύνου παραλιακής διάβρωσης/πλημμύρας κάτω από την Κλιματική μεταβλητότητα και Αλλαγή (ΚΜ&Α) σε νησιωτική κλίμακα. Με τον τρόπο αυτό ενημερώνει τις πολιτικές και τα μέτρα αντιμετώπισης, ενισχύοντας τις προοπτικές βιώσιμης ανάπτυξης των παράκτιων νησιωτικών κοινοτήτων. Οι εκτιμήσεις παραλιακής διάβρωσης που παρέχει το MARICC είναι ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση των ακτών, κάτι που έχει αναγνωριστεί στις διεθνείς και Εθνικές πολιτικές (π.χ. το Πλαίσιο Σεντάι, η Ευρωπαϊκή και Εθνική Στρατηγική Προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή) και προβλέπεται από την νομοθεσία (π.χ. Οδηγίες 2000/60/ΕΚ, 2007/60/ΕΚ και 2014/52/ΕΕ).

IMPACT ON SOCIETY

The MARICC project will benefit the National Administration, local authorities, and other stakeholders, including the broader public, by assessing the risk of coastal erosion/ flooding due to CV&C at an island scale. This assessment will inform policies and response strategies, thereby enhancing the prospects for sustainable development in coastal island communities. The beach erosion assessments provided by MARICC are essential for effective coastal management, a need recognized in the international and national policies (e.g., the Sendai Framework, the EU and Greek Climate Change Adaptation Strategies) and prescribed in legislation, such as the EU Directives 2000/60/EEC, 2007/60/EC and 2014/52/EU.

Φορέας Υποδοχής:
Host Institution:



Πανεπιστήμιο Αιγαίου
University of the Aegean

Συνεργαζόμενοι Φορείς:
Collaborating Institutions:



Ίδρυμα Λοχαγού Φανουράκη
Captain Fanourakis Foundation



Γεωθήρα Μ.Α.Ε.,
GEOTHIRA M.A.E.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
UNIVERSITY OF THE AEGEAN

Μεθοδολογικό πλαίσιο για την εκτίμηση και παρακολούθηση του κινδύνου διάβρωσης των τουριστικών νησιωτικών παραλιών κάτω από Κλιματική Αλλαγή

Methodological framework for the Assessment and monitoring of the erosion Risk of touristic Island beaches under Climate Change

Επιστημονική Υπεύθυνη:
Δρ. Ισαβέλα Μονιούδη

Principal Investigator:
Dr. Isavela Monioudi

Σήμερα οι παραλίες αποτελούν τον πρωταρχικό φυσικό και οικονομικό πόρο της παράκτιας ζώνης ενώ ταυτόχρονα αντιμετωπίζουν σοβαρότατα προβλήματα διάβρωσης. Η επιταχυνόμενη άνοδος της θαλάσσιας στάθμης (ΑΘΣ), σε συνδυασμό με πιθανές αλλαγές στην ένταση/συχνότητα των φαινομένων καταιγίδας λόγω της Κλιματικής Μεταβλητότητας και Αλλαγής (ΚΜ&Α), αναπόφευκτα θα επιδεινώσει τη διάβρωση των παραλιών, με σοβαρές επιπτώσεις στα φυσικά και ανθρώπινα παράκτια συστήματα. Η κατάσταση είναι ιδιαίτερα ανησυχητική για τις νησιωτικές περιοχές, οι οποίες γενικά χαρακτηρίζονται από παραλίες 'τσέπης' με περιορισμένες ιζηματοπαροχές, ενώ την ίδια στιγμή αποτελούν το επίκεντρο του ελληνικού τουρισμού.

Η παράκτια διάβρωση διακρίνεται σε:

- ❖ Μακροχρόνια διάβρωση, δηλ. μόνιμη υποχώρηση της ακτογραμμής, λόγω ανόδου της σχετικής μέσης θαλάσσιας στάθμης-RSLR ή/και αρνητικών ισοζυγίων ιζήματος
- ❖ Επεισοδική υποχώρηση λόγω γεγονότων καταιγίδας (ακραία θαλάσσια στάθμη-ESL), τα οποία δεν οδηγούν απαραίτητα σε μόνιμη διάβρωση, ενδέχεται όμως να προκαλέσουν μεγάλης κλίμακας καταστροφές.

Σημαντικές κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις

- ❖ Αύξηση του κινδύνου πλημμύρας παράκτιων οικισμών και υποδομών
- ❖ Μείωση παραλιακού πλάτους που συνεπάγεται μετατόπιση της ζώνης αιγιαλού προς τα ενδότερα και μείωση της φέρουσας ικανότητας (δηλ. του αριθμού των επισκεπτών που μπορεί να φιλοξενήσει η παραλία)
- ❖ Μείωση της ποιότητας και ελκυστικότητας της παραλίας ως περιβάλλον αναψυχής
- ❖ Επακόλουθες συνέπειες στον τουρισμό και στην οικονομία.



Σχήμα 1. Παραδείγματα επεισοδικής διάβρωσης. - **Fig. 1.** Examples of episodic erosion from USA

Ερευνητικό αντικείμενο και στόχοι - Research objectives

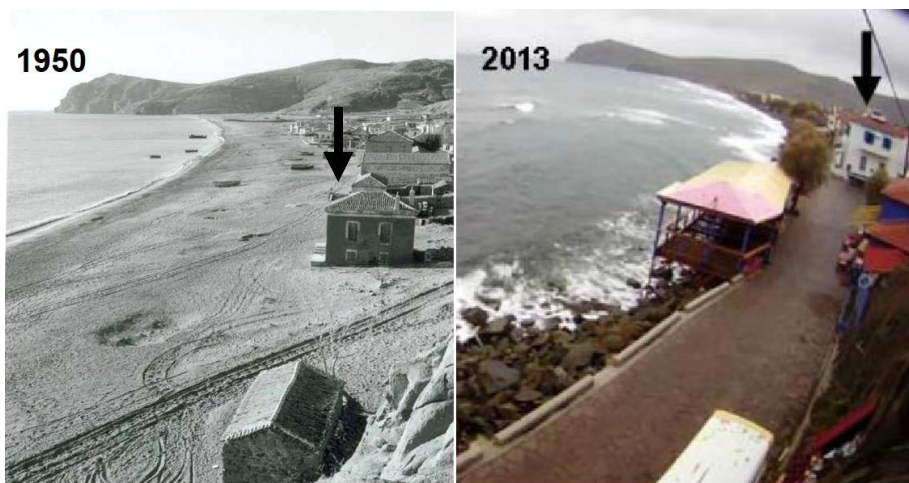
Beaches are the primary natural and economic resource of the coastal zone and are already facing significant erosion. Accelerated relative sea level rise (RSLR), combined with possible increases in the intensity/frequency of storm events due to Climate Variability and Change (CV&C), will inevitably exacerbate beach erosion, with severe impacts on the natural and human coastal systems. The situation is particularly alarming for the island regions, which are generally characterized by ‘pocket’ beaches with limited sediment supply and at the same time are the main focus of the Greek tourist industry.

Beach erosion can be differentiated into:

- ❖ **Long-term erosion**, i.e., irreversible shoreline retreat due to relative mean sea level rise (RSLR) and/or negative sedimentary budgets
- ❖ **Short-term retreat** caused by storm events (Extreme Sea Level-ESL), which although might not result in permanent erosion, it could be, nevertheless, devastating

Significant socio-economic impacts

- ❖ Increase of flooding risk in coastal settlements and infrastructure
- ❖ Beach width reduction, resulting in the foreshore shifting inland and decreases in carrying capacity (i.e., the number of visitors a beach can accommodate)
- ❖ Decrease in the quality and attractiveness of the beach as a recreational environment
- ❖ Consequent impacts on tourism and the economy.



Σχήμα 2. Μακροχρόνια διάβρωση παραλίας Ερεσού. - Fig. 2. Long-term erosion of Eresos, Lesvos.

Ερευνητικό αντικείμενο και στόχοι - Research objectives

Είναι λοιπόν απαραίτητο να εκτιμηθεί η μελλοντική διάβρωση/πλημμύρα σε μεγάλες χωρικές κλίμακες, προκειμένου να προσδιοριστούν οι κρίσιμες και ευάλωτες περιοχές, ώστε να σχεδιαστούν αποτελεσματικές πολιτικές προσαρμογής και να γίνει αποδοτική κατανομή πόρων. Για το σκοπό αυτό, το έργο έχει αναπτύξει/εφαρμόσει πολύτιμα και καινοτόμα εργαλεία, όπως ένα Αυτόνομο Οπτικό Σύστημα Παρακολούθησης των Παραλιών, αλγόριθμους ικανούς να αποτυπώσουν μεταβολές κρίσιμων χαρακτηριστικών, όπως η ακτογραμμή και το ανώτερο όριο της κυματικής αναρρίχησης και Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) ικανά να προσομοιάσουν την παραλιακή μορφοδυναμική.

Οι στόχοι του έργου MARICC είναι:

1 Δημιουργία ολοκληρωμένης βάσης δεδομένων των παραλιών

2 Εκτίμηση της παραλιακής διάβρωσης σε κλίμακα νησιού κάτω από ΚΜ&Α

3 Ιεράρχηση Ευπάθειας των παραλιών στη διάβρωση

- Παρουσίαση παραλιών υψηλής σημασίας για την εφαρμογή μέτρων προσαρμογής
- Επιλογή πιλοτικών παραλιών

4 Μακρόχρονη, υψηλής συχνότητας παρακολούθηση της παραλιακής μορφοδυναμικής και υδροδυναμικής των πιλοτικών παραλιών

5 Κοινωνικο-οικονομική ανάλυση πιλοτικών παραλιών

The objectives of the project MARICC are:

1 Construction of an integrated beach database

2 Assessment, at an island scale, of beach erosion under CV&C

3 Prioritization of beach vulnerability to erosion

- Showing beaches of highest importance in the list for adaptation measures
- Selection of pilot beaches

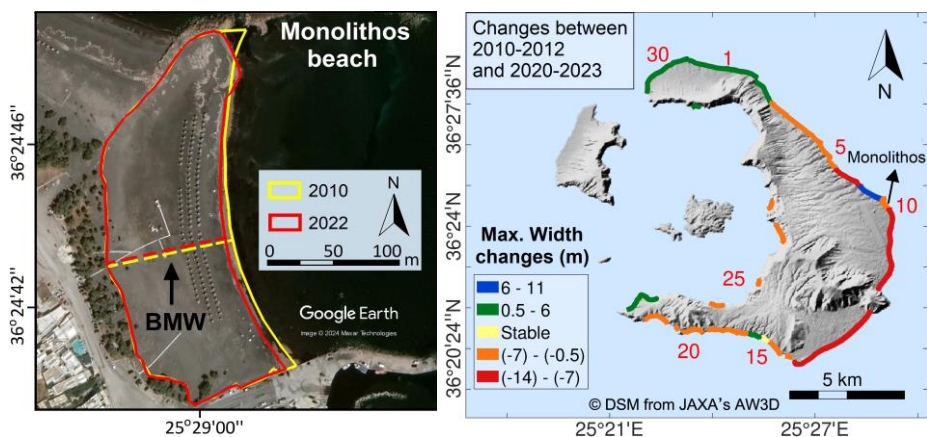
4 Long-term, high-frequency monitoring of coastal morphodynamics and hydrodynamics of pilot beaches

5 Socio-economic analysis of pilot beaches

Based on the above, it is necessary to assess future beach retreat/erosion and flood risk at large spatial scales in order to identify critical and vulnerable areas for the design of effective adaptation policies and the efficient allocation of human and financial resources. For this purpose, the project has developed/applied valuable and innovative tools, such as an Autonomous Optical Beach Monitoring System, algorithms capable of capturing changes in critical features, such as the coastline and the upper limit of the wave run-up and Artificial Neural Networks (ANNs), which seem to be capable of simulating coastal morphodynamics.

Βάση δεδομένων παραλιών - Beach inventory

Στο πλαίσιο του έργου MARICC δημιουργήθηκε μία ολοκληρωμένη βάση δεδομένων των παραλιών της Σαντορίνης και Κω. Περιλαμβάνει πληροφορία για τα γεω-χωρικά περιβαλλοντικά, κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά και τις ανθρώπινες παρεμβάσεις. Τα αρχικά δεδομένα προέρχονται από την ψηφιοποίηση δορυφορικών εικόνων, ευρέως διαθέσιμων από την εφαρμογή Google Earth Pro. Επίσης μελετήθηκαν οι ιστορικές τάσεις διάβρωσης/πρόσχωσης, μέσω σύγκρισης ιστορικών εικόνων. Η βάση είναι οργανωμένη σε GIS και προσβάσιμη στο <https://maricc.gr/> και περιέχει πληροφορία για 30 παραλίες στη Σαντορίνη και για 78 στην Κω (Σχήμα 3a). Στατιστική ανάλυση της βάσης έδειξε ότι: (α) οι παραλίες έχουν μικρό μέγεθος, με το 88% να έχουν μέγιστα πλάτη < 50 m, γεγονός που τις κάνει εξαιρετικά ευάλωτες στην ΑΘΣ· (β) οι ιστορικές μεταβολές έδειξαν σημαντικές τάσεις διάβρωσης (Σχήμα 3b). Η βάση αυτή αποτελεί πολύτιμο εργαλείο παράκτιας διαχείρισης.

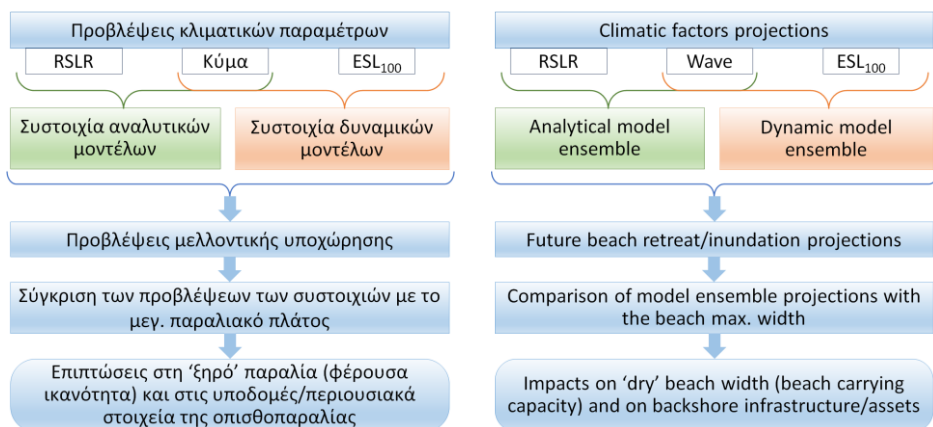


Σχήμα 3. (α) Ψηφιοποίηση παραλιακών ορίων (μέγιστο παραλιακό πλάτος - BMW) για 2 διαφορετικές ημερομηνίες (β) Ιστορική μεταβολή του BMW μεταξύ 2 περιόδων (Σαντορίνη).
Fig. 3. (a) Beach delimitation for 2 dates; (b) historical changes in Beach Max. Width-BMW.

Within the framework of the project MARICC, a GIS-based inventory (database) of the beaches of Santorini and Kos was constructed. It contains information for the geo-spatial, environmental, socio-economic characteristics and the human intervention features. The information is based on the digitization of satellite/aerial photographs widely available in the Google Earth Pro application. 30 beaches of Santorini and 78 of Kos have been digitized (Fig. 3a) and stored in the database (<https://maricc.gr/>). Historical trends of erosion/accretion were also studied through historical imagery. Statistical analysis showed that: (i) the beaches are limited in size (*pocket beaches*) with 88 % showing max. widths < 50 m; (ii) historical changes have shown significant erosion trends (Fig. 3b). This database comprises a valuable coastal management tool.

Εκτίμηση κινδύνου παραλιακής διάβρωσης Beach erosion risk assessment

Αναπτύχθηκε μία προσέγγιση που παρέχει μια γρήγορη εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης σε μεγάλη χωρική. Συνίσταται από 2 συστοιχίες μοντέλων (i) μία αποτελούμενη από τα αναλυτικά μοντέλα Bruun, Dean και Edelman, η οποία προβλέπει τη μόνιμη μακροχρόνια υποχώρηση λόγω RSLR και (ii) μία αποτελούμενη από τα δυναμικά μοντέλα Leont'yeν, SBEACH, Xbeach και Boussinesq, η οποία προβλέπει την υποχώρηση κάτω από επεισοδιακή ESL (Monioudi et al., 2017; 2023). Επειδή τα μοντέλα εφαρμόστηκαν σε μεγάλη χωρική κλίμακα, χρησιμοποιήθηκαν γραμμικές διατομές ως αρχική βαθυμετρία, θεωρώντας ένα λογικό εύρος κλίσεων και μεγεθών ιζήματος, βάσει ποιοτικών πληροφοριών από τη βάση δεδομένων. Οι ελάχιστες, μέγιστες και διάμεσες τιμές των προβλέψεων των συστοιχιών συγκρίθηκαν με τα μέγ. πλάτη των παραλιών, ώστε να εκτιμηθούν: (i) το ποσοστό μείωσης/κατάκλυσης της "ξηρής" παραλίας και, κατ' επέκταση, η επίπτωση στην φέρουσα ικανότητα της και (ii) οι επιπτώσεις σε υποδομές ή/και περιουσιακά στοιχεία που βρίσκονται στην οπισθοπαραλία.

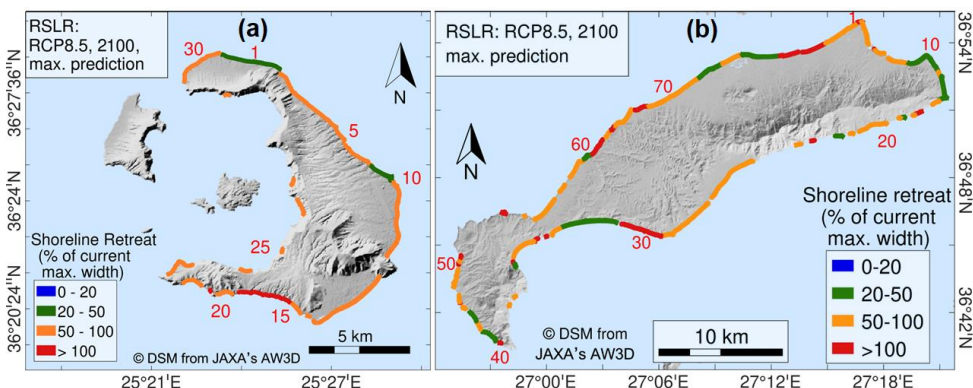


Two model ensembles were created: (a) an analytical ensemble consisting of the models Bruun, Dean and Edelman, which was used to assess beach retreat due to long-term RSLR and (b) a numerical (dynamic) model ensemble comprising the models SBEACH, Leont'yeν, Xbeach and Boussinesq which was used to assess beach retreat under episodic ESL (Monioudi et al., 2017; 2023). Since the models were applied at an island scale, the use of in-situ measurements was not feasible. Therefore, linear profiles were used as initial bathymetry, considering a plausible range of slopes and median sediment sizes, based on qualitative information gathered on the beach database. The minimum, maximum, and median values of the model ensemble predictions were compared with the max. beach widths to estimate: (i) the percentage of the "dry" beach reduction/inundation, and consequently, the impact on the beach carrying capacity, and (ii) the effects on the backshore infrastructure/assets.

Εκτίμηση κινδύνου παραλιακής διάβρωσης Beach erosion risk assessment

Προβλέψεις μακροχρόνιας διάβρωσης

Το 2050 κάτω από μακροχρόνια RSLR προβλέπεται ότι έως και το 60% των παραλιών στη Σαντορίνη και το 70% στην Κω θα υποχωρήσουν μόνιμα κατά τουλάχιστον το 20% του μεγ. πλάτους τους (μέγιστες προβλέψεις για απαισιόδοξο σενάριο RCP8.5). Το 2100 οι επιπτώσεις θα είναι πιο σοβαρές, ειδικά σύμφωνα με το RCP8.5, καθώς το 40% - 90% των παραλιών στη Σαντορίνη και το 36% - 82% στην Κω θα υποχωρήσουν τουλάχιστον κατά το ήμισυ του πλάτους τους, ενώ το 7% - 17% στη Σαντορίνη και το 3% - 28% στην Κω θα διαβρωθούν πλήρως. Επειδή όλες οι παραλίες στη Σαντορίνη και το 95% των παραλιών της Κω οριοθετούνται από παράκτιους κρημνούς ή/και παράκτιες υποδομές, δεν διαθέτουν επαρκή χώρο για να υποχωρήσουν προς την ξηρά. Ως εκ τούτου, οι παραπάνω εκτιμήσεις θα οδηγήσουν σε συρρίκνωση των παραλιών και μόνιμη διάβρωση.



Σχήμα 4. Προβλέψεις παραλιακής υποχώρησης σε σχέση (%) με το μεγ. παραλιακό πλάτος, κάτω από RSLR για τη (α) Σαντορίνη και (β) για Κω.

Fig. 4. Projections of beach retreat in relation (%) to the beach max. width, under RSLR for (a) Santorini and (b) Kos.

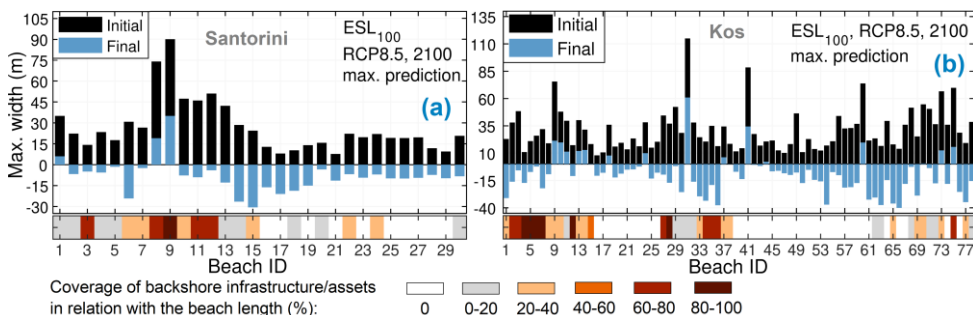
Projections of long-term beach retreat

In 2050, under long-term RSLR, it is predicted that up to 60% of beaches in Santorini and 70% in Kos will permanently retreat by at least 20% of their max. width (max. prediction, pessimistic scenario RCP8.5). In 2100 the impacts will be more severe, especially based on RCP8.5, since 40% - 90% of the beaches in Santorini and 36% - 82% in Kos will retreat by at least half of their max. width, while 7% - 17% in Santorini and 3% - 28% in Kos will be completely eroded. Because all beaches in Santorini and 95% of Kos beaches are backed by coastal cliffs and/or coastal infrastructure, they do not have the accommodation space to retreat landwards. Therefore, the above estimates will lead to beach squeeze and permanent erosion.

Εκτίμηση κινδύνου παραλιακής διάβρωσης Beach erosion risk assessment

Προβλέψεις επεισοδιακής διάβρωσης

Κάτω από ESL, οι προβλέψεις δείχνουν ότι οι επιπτώσεις στα 2 νησιά θα είναι καταστροφικές. Το 2050, προβλέπεται ότι έως και το 47% των παραλιών στη Σαντορίνη και το 42% στην Κω θα κατακλυστούν πλήρως, έστω και προσωρινά, από ένα γεγονός ESL που εμφανίζεται μία φορά ανά 100 χρόνια, ενώ ζημιές σε υποδομές/περιουσιακά στοιχεία θα παρατηρηθούν στο 13% των παραλιών της Σαντορίνης και στο 19% της Κω, σύμφωνα με τις μέγιστες προβλέψεις για το σενάριο RCP8.5. Το 2100 (για το RCP8.5) οι επιπτώσεις αναμένεται να είναι ακόμη πιο σοβαρές, καθώς το 43% - 90% των παραλιών στη Σαντορίνη και το 44% - 81% στην Κω θα κατακλυστούν πλήρως, τουλάχιστον προσωρινά. Επιπλέον, το 23% - 57% των παραλιών στη Σαντορίνη και το 17% - 37% στην Κω θα υποστούν ζημιές σε κτίρια και υποδομές της οπισθοπαραλίας (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Απεικονίζονται η παραλιακή κατάκλυση κάτω από ESL_{100} για (α) Σαντορίνη και (β) για Κω. Συγκεκριμένα απεικονίζονται (i) με μαύρο χρώμα το αρχικό μέγ. πλάτος των παραλιών, με γαλάζιο (ii) το τελικό πλάτος εξαιτίας της παραλιακής κατάκλυσης (iii) η κάλυψη (%) των υποδομών πίσω από την κάθε παραλία. Οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν υποχώρηση > το μεγ. πλάτος.

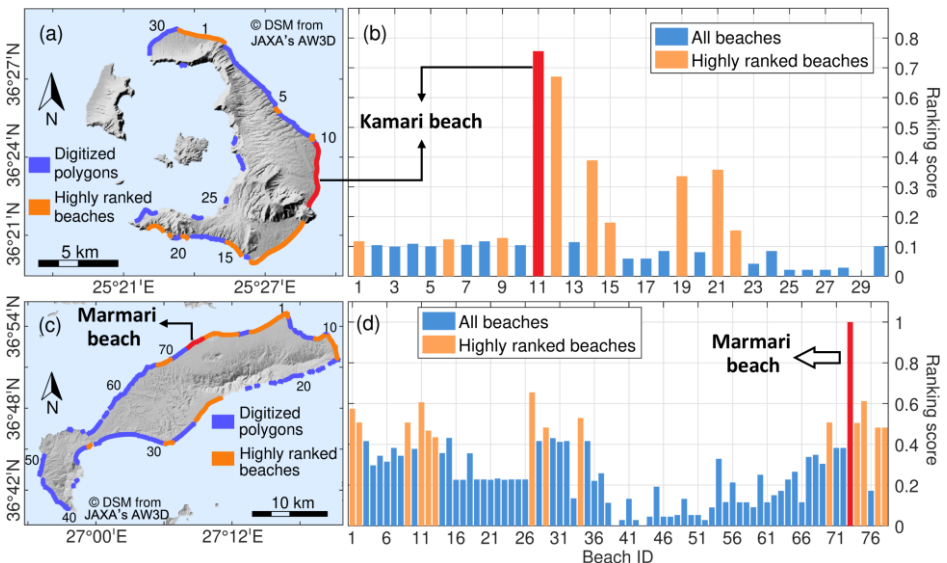
Fig. 5. Projected beach retreat/inundation for (a) Santorini and (b) Kos, under ESL_{100} is shown together with the recorded coverage of frontline backshore assets (as a percentage of the beach length); the current (initial) BMWs (black bars) are compared with those resulting from the beach retreats (blue bars); negative values indicate beach retreat more than the current BMW.

Projections of episodic beach retreat

Under ESL, the results show that the impacts on the 2 islands will be devastating. In 2050, it is projected that up to 47% of the beaches in Santorini and 42% in Kos will be fully inundated, even temporarily, by an ESL event with a 1 in 100 years return period, while damages to infrastructure and assets will be observed on 13% of Santorini beaches and 19% of Kos, according to the max. projections for the RCP8.5 scenario. In 2100 (under RCP8.5) the impacts are expected to be even worse, since 43% - 90% of the beaches in Santorini and 44% - 81% in Kos will be fully inundated, at least temporarily. In addition, 23% - 57% of the beaches in Santorini and 17% - 37% in Kos will suffer damages to backshore buildings and infrastructure (Fig. 5).

Ιεράρχηση των παραλιών με βάση την τρωτότητα τους στη διάβρωση Prioritization of beach vulnerability to sea level rise

Αναπτύχθηκε ιεραρχικό πλαίσιο που κατατάσσει τις παραλίες με βάση την κρισιμότητα τους για λήψη προστατευτικών μέτρων, χρησιμοποιώντας πολυκριτηριακές μεθόδους (AHP, TOPSIS, PROMETHEE II) και συνδυάζοντας κριτήρια που υποδεικνύουν την κοινωνικο-οικονομική και περιβαλλοντική τους αξία, καθώς και την τρωτότητα τους στην προβλεπόμενη διάβρωση. Κατά σειρά οι παραλίες Καμάρι, Περίσσα και Βλυχάδα στη Σαντορίνη και οι παραλίες Μαρμάρι, Φάρος και Καρδάμαινα στην Κω, παρουσίασαν σταθερά τις υψηλότερες βαθμολογίες (Σχήμα 6), υποδηλώνοντας ότι είναι οι πιο ευάλωτες στη διάβρωση και, θα πρέπει να βρίσκονται υψηλότερα στη λίστα για μέτρα προσαρμογής.



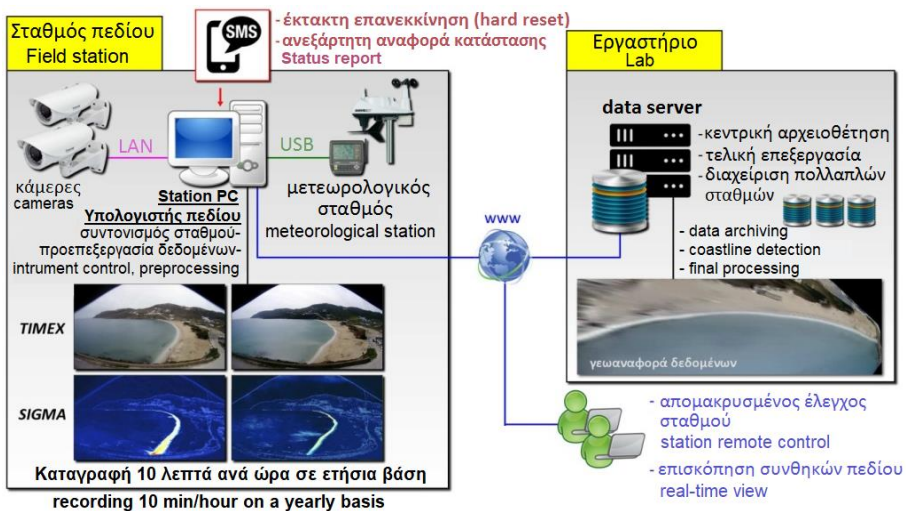
Σχήμα 6. Τα πολύγωνα των παραλιών της (α) Σαντορίνης και (c) Κω. Βαθμολογίες κατάταξης των παραλιών της (b) Σαντορίνης και (d) Κω, όπου εκείνες με την υψηλότερη κατάταξη εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα.

Fig. 6. Beach polygons for (a) Santorini and (c) Kos. Ranking scores of the beaches of (a) Santorini and (c) Kos. The beaches with the highest ranking are shown in red.

A prioritization framework has been developed that aims to make the best decision for the selection of the most critical beaches requiring protection, using multicriteria methods (AHP, TOPSIS, PROMETHEE II) and combining criteria that indicate the socio-economic and environmental value of the beaches as well as their vulnerability to CV&C. In order, the beaches of Kamari, Perissa and Vlychada in Santorini and the beaches of Marmari, Faros and Kardamena in Kos consistently showed the highest scores (Fig. 6), suggesting that they are the most vulnerable to erosion and should be higher on the list for adaptation measures.

Αυτόνομο Οπτικό Σύστημα Παρακολούθησης των παραλιών Autonomous Optical System of beach monitoring

Μια από τις καινοτομίες του έργου MARICC ήταν η ανάπτυξη ενός πρωτοποριακού οπτικού συστήματος υψίσυχνης παρακολούθησης των παραλιών. Το σύστημα αποτελείται από βιντεοκάμερες, κατάλληλα τοποθετημένες, βαθμονομημένες και γεω-αναφερμένες, και συνδεδεμένες με υπολογιστή (σταθμός πεδίου) με μόνιμη σύνδεση στο διαδίκτυο. Το σύστημα είναι αυτόνομο και σχεδιασμένο έτσι ώστε να μεταφέρει/αρχειοθετεί τα οπτικά δεδομένα σε βάση δεδομένων (Σχήμα 7). Μέσω της αυτοματοποιημένης αποθήκευσης/επεξεργασίας των δεδομένων δίνεται η δυνατότητα μακρόχρονης παρακολούθησης των παραλιών με μεγάλη χωρο-χρονική διακριτικότητα. Συνεπώς, απαντά στη μεγάλη πρόκληση της υψίσυχνης παρακολούθησης της μορφοδυναμικής εξέλιξης των παραλιών, που αποτελούν από τα πλέον δυναμικά, κρίσιμα και ευαίσθητα στην κλιματική αλλαγή, οικοσυστήματα της παράκτιας ζώνης. Το σύστημα εγκαταστάθηκε στις πιλοτικές παραλίες Καμάρι και Μαρμάρι.

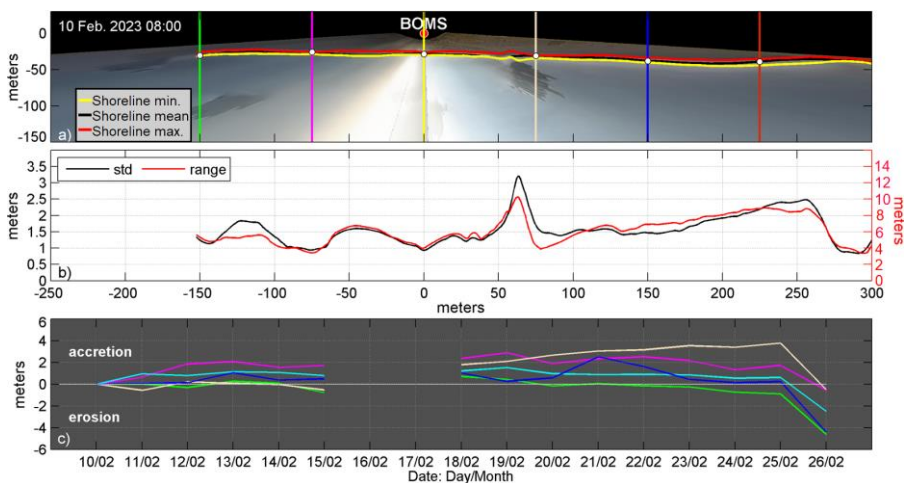


Σχήμα 7. Διάγραμμα ροής του οπτικού συστήματος παρακολούθησης παραλιών.
Fig. 7. Flow chart of the beach monitoring optical system.

An important innovation of the project MARICC is the development of a low cost, automated, high frequency beach monitoring system. The system consists of integrated video cameras suitably located, calibrated and geo-referenced that record time series of shoreline positions, wave breaking zones and run-ups. Following automated pre-processing at the field station PC, the imagery is transferred via an internet link to the lab for archiving, final processing and storage (Fig. 7). The system can answer the *Data Resolution Challenge* with regard to the long-term, high frequency monitoring of the beaches, which form the most dynamic, critical and sensitive to climatic change coastal ecosystem. The system was installed at the pilot beaches of Kamari and Marmari.

Αυτόνομο Οπτικό Σύστημα Παρακολούθησης των παραλιών Autonomous Optical System of beach monitoring

Τα κύρια προϊόντα του συστήματος είναι οι εικόνες TIMEX (Σχήματα 7, 8), που εκφράζουν το μέσο όρο και οι IMMAX, που αντιπροσωπεύουν το μέγιστο της φωτεινότητας των 10λεπτων καταγραφών. Οι TIMEX και IMMAX εικόνες προσδιορίζουν περιοχές υψηλής σημασίας για τη μορφοδυναμική μελέτη των παραλιών, όπως τη ζώνη θραύσης, τη θέση της ακτογραμμής και της ανώτατης κυματικής αναρρίχησης, η οποία σε βάθος χρόνου προσδίδει τον αιγιαλό. Μια ακόμα καινοτομία ήταν η ανάπτυξη γρήγορων, αυτοματοποιημένων αλγορίθμων για την ανίχνευση/εξαγωγή της ακτογραμμής (Chatzipavlis et al., 2023). Εφαρμογή της μεθοδολογίας έδειξε σημαντική χωρο-χρονική μεταβλητότητα της ακτογραμμής (Σχήμα 8) και του ανώτατου ορίου της κυματικής αναρρίχησης.



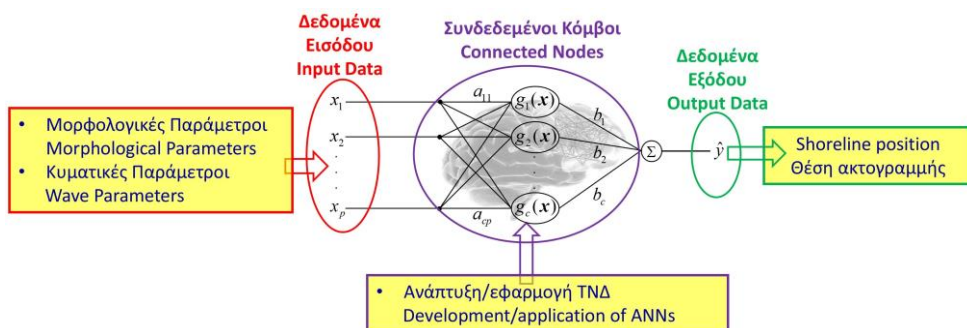
Σχήμα 8. Εκτίμηση μεταβολής ακτογραμμής σε εικόνες TIMEX (Καμάρι): (α) Ελάχιστη (min), μέγιστη (max), μέση (mean) θέση ακτογραμμής (β) Εύρος (max-min) και απόκλιση. (γ) Χρονικές μεταβολές 6 διατομών σε σχέση με τη θέση της ακτογραμμής στην αρχή των καταγραφών.

Fig. 8. Shoreline changes in TIMEX images extracted from the BOMS installed in Kamari beach: (a) min, max and mean positions (b) range (max-min) and standard deviation. (c) Temporal changes in beach gain/erosion at 6 cross-shore transects with regard to the initial recording date.

Main coastal video monitoring products include the time-averaged coastal imagery-TIMEX and IMMAX images (Figs 7, 8). In TIMEX and IMMAX image time series, the dynamics of significant beach features (e.g. the wet/dry beach interface, the wave breaking zone and the upper limit of the swash zone) are recorded with the use of specialized algorithms and image processing techniques. For the detection of shoreline and wave run-up position, an automated procedure was developed which is fast, processing large numbers of TIMEX/IMMAX mosaics in negligible time. Application of the method has shown significant spatio-temporal variability with regard to the relevant shoreline or wave run-up positions at the initial recording date (Fig. 8).

Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα Artificial Neural Networks

Αναπτύχθηκαν/δοκιμάστηκαν τεχνικές πρόβλεψης της θέσης της ακτογραμμής με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ΤΝΔ) (Σχήμα 9), στη βάση προηγούμενων προσπαθειών (π.χ. Tsekouras et al., 2017; Chatzipavlis et al., 2019). Οι τεχνικές αυτές εφαρμόστηκαν σε γεω-αναφερόμενα μετα-δεδομένα του οπτικού συστήματος (TIMEX και IMMAX εικόνες), που εγκαταστάθηκε στις 2 παραλίες. Δοκιμάστηκαν διαφορετικού τύπου τεχνικές νευρωνικών δικτύων (π.χ. Radial Basis Function Neural Network (RBFNN) - Competitive Learning Network (TSK-CLN)). Έπειτα από την κατάλληλη εκπαίδευση και σύγκριση των προβλέψεων των διαφορετικών νευρωνικών δικτύων, φάνηκε πως τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMSEs) είχαν πολύ καλές αποδόσεις (μικρότερα των 3 m κατά περίπτωση) και φαίνεται να είναι εξαιρετικά ελπιδοφόρες.



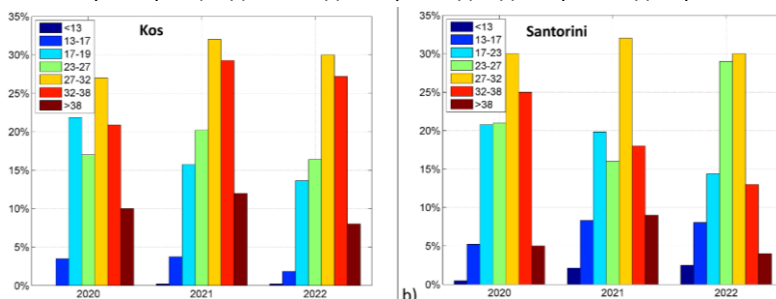
Σχήμα 9. Απεικόνιση της δομής ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιήθηκε για την πρόγνωση της θέσης της ακτογραμμής, στη βάση λίγων δεδομένων εισόδου-εξόδου.

Fig. 9. Schematic approach showing the structure of an artificial neural network used for the prediction of shoreline position on the basis of a few input-output parameters.

Techniques based on the development/testing of different Artificial Neural Networks (ANNs) (Figure 9), capable of projecting shoreline position were used (e.g. Tsekouras et al., 2017; Chatzipavlis et al., 2019). These techniques were used on the geo-referenced metadata of the optical system (TIMEX and IMMAX timeseries) deployed on both pilot beaches. Several Artificial Neural Networks were used (e.g., Radial Basis Function Neural Network (RBFNN) - Competitive Learning Network (TSK-CLN)). After the necessary training process and comparison of the results against the real recorded shoreline positions, it was found that the Root Mean Square Errors (RMSEs) were low (even smaller than 3 m in specific cases), showing a good performance overall.

Κοινωνικο-οικονομική Ανάλυση Socio-economic Analysis

Επιτόπιες έρευνες στις πιλοτικές παραλίες υπολόγισαν την οικονομική αξία τους από τα έσοδα των επιχειρήσεων σε ακτίνα 1 km, την εκμίσθωση αιγιαλού-παραλίας και εκτιμήσεις της προθυμίας πληρωμής (WTP) των άμεσα ενδιαφερόμενων για την προστασία της παραλίας. Η ετήσια συνολική αξία για την παραλία Καμάρι εκτιμήθηκε ως 100,675,669 € και για το Μαρμάρι ως 91,326,140 €. Αλλαγές στις μετεωρολογικές συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία) αναμένεται να μεταβάλουν τις προτιμήσεις των επισκεπτών και να τροποποιήσουν τις επιλογές τους για έναν προορισμό διακοπών. Ένας εξειδικευμένος βιοκλιματικός δείκτης (Climate Index for Tourism – CIT, [De Freitas et al., 2008](#)) βαθμονομήθηκε για τα 2 νησιά προκειμένου να αξιολογηθεί η παρελθούσα, παρούσα και μελλοντική ελκυστικότητα των παραθαλάσσιων προορισμών των νησιών. Κλιματικές προβλέψεις δείχνουν ότι αν και ο δείκτης θερμικής αίσθησης PET ([Σχήμα 10](#)) και ο δείκτης CIT θα μεταβληθούν στο μέλλον, η ελκυστικότητα και στα 2 νησιά θα αυξηθεί γενικά λόγω κυρίως της πιθανής διεύρυνσης της τουριστικής περιόδου.



Σχήμα 10. Κατανομή εύρους θερμοκρασιών του δείκτη θερμικής αίσθησης PET που υπολογίστηκε για τη περίοδο Απριλίου-Οκτωβρίου για τα έτη 2020-2022 και για τα 2 νησιά.

Fig. 10. Distribution of the temperature range of the thermal sensation index PET in both islands covering the touristic period (April-October) of 2020-2022.

The value of the pilot beaches was estimated from the revenues of the companies within a radius of 1 km, from the revenues from the lease of the seashore and from the estimation of the willingness to pay (WTP) of those directly interested in the protection of the beach. The annual total value for Kamari beach was estimated at € 109,092,705 and for Marmari at € 91,164,005. Changes in the meteorological conditions (i.e., temperature, wind, humidity, cloudiness and precipitation) are expected to alter the preferences of beach visitors and modify their choices for a holiday destination. A specialized bio-climatic index (the Climate Index for Tourism – CIT, [De Freitas et al., 2008](#)) was calibrated for the 2 islands in order to evaluate the past, present and future attractiveness of the island beach destinations. Both the thermal sensation PET index ([Fig. 10](#)) and the CIT are expected to not be significantly altered in the future. A slight increase of the CIT is projected for specific months during the touristic season for both islands, which is expected to enhance the overall attractiveness of Kos and Santorini.

Ο συντονισμός του έργου MARICC πραγματοποιήθηκε από την ερευνητική ομάδα “Παράκτιας Μορφοδυναμικής-Διαχείρισης & Θαλάσσιας Γεωλογίας” του Τμήματος Ωκεανογραφίας και Θαλασσίων Βιοεπιστημών (Πανεπιστήμιο Αιγαίου). Η ερευνητική δραστηριότητα της ομάδας εστιάζεται στη μελέτη της δυναμικής και διαχείρισης της παράκτιας ζώνης και των φυσικών πόρων της. Διαθέτει σύγχρονο εξοπλισμό όπως ρευματογράφους ADVs, ADCPs και ECM, OBSs, RTK-DGPS, επίγειο σαρωτή, υδρογραφικό βυθόμετρο, ηχοβολιστές πλευρικής σάρωσης και ακουστικό τομογράφο πυθμένα, ροόμετρα, σταθμηγράφους, ολοκληρωμένα συστήματα καμερών καθώς και σύγχρονες υπολογιστικές υποδομές (Σχήμα 11). Η ομάδα έχει αναπτύξει/βελτιώσει 1-D, 2-D και quasi-3-D μοντέλα προσομοίωσης της παράκτιας μορφοδυναμικής και της ποτάμιας υδρολογίας και γεωχημείας. Έχει αναπτύξει νέες μεθόδους υψίσυχνης οπτικής παρακολούθησης της ακτογραμμής και λογισμικά για (i) την ανάλυση υδροδυναμικών/ιζηματοδυναμικών παρατηρήσεων, (ii) την επεξεργασία εικόνας και (iii) την εκτίμηση της παραλιακής οπισθοχώρησης λόγω ανόδου της θαλάσσιας στάθμης χρησιμοποιώντας συστοιχίες μοντέλων.



Σχήμα 11. Εργασίες πεδίου και Εξοπλισμός - Fig. 11. Field work and equipment.

The MARICC project was coordinated by the Research Group of “Coastal Morphodynamics-Management & Marine Geology” of the Department of Marine Sciences, University of the Aegean. The research interests of the group focuses on the study of the dynamics and management of the coastal zone and of its natural resources. The research group owns/operates state-of-the-art field equipment such as ADVs, ADCPs, ECMs, OBSs an RTK-DGPS, a terrestrial laser scanner, hydrographic echosounders and side scan sonars, a sub-bottom profiler (boomer), water level sensors, open stream flowmeters, integrated video camera systems and advanced computational facilities (Fig. 11). The group has developed/modified 1-D, 2-D and quasi 3-D models for the simulation of coastal hydrodynamics/morphodynamatics and river hydrology and geochemistry. It has also developed new methods for high frequency beach monitoring and software toolboxes for (i) the analysis of high frequency hydrodynamic observations, (ii) image processing, and (iii) the estimation of beach retreat under sea level rise.

Δημοσιεύσεις του έργου - Publications of the project

Kontopyrakis, K.E., Velegrakis, A.F., Monioudi I.N. & Čulibrk A. (2024) Prioritizing environmental policies in Greek coastal municipalities. *Anthropocene Coasts* 7, 1. <https://doi.org/10.1007/s44218-023-00035-5>

Monioudi I.N. and Velegrakis A.F. (2022) Beach Carrying Capacity at Touristic 3S Destinations: Its Significance, Projected Decreases and Adaptation Options under Climate Change. *Journal of Tourism & Hospitality*, 11:500. <https://doi.org/10.35248/2167-0269.22.11.500>.

Monioudi I.N., Chatzipavlis A.E., Nikolaou A., Velegrakis A.F., Hasiotis T. (2023) Exploring beach visitors' willingness to pay for protecting island beaches from erosion: The case of Marmari beach in Kos, Greece. In proceedings of 'CEST2023: 18th International Conference on Environmental Science and Technology', 30 August to 2 September 2023, Athens, Greece.

Chatzipavlis A., Monioudi I.N., Velegrakis A.F., Chalazas T., Chatzistratis D. (2023) Application of a Bioclimatic Index for Evaluating the Attractiveness of Two Highly Touristic Beaches in Santorini and Kos. In proceedings of 'CEST2023: 18th International Conference on Environmental Science and Technology', 30 August to 2 September 2023, Athens, Greece.

Monioudi I.N., Velegrakis A.F., Vousdoukas M.I., Chatzistratis D., Chalazas Th. (2022) Coastal hazards under Climate Variability and Change – The case of Santorini and Crete (Aegean sea). In proc. of Marine and Inland Waters Research Symposium, Porto Heli, Argolida, Greece, Sept. 16-20.

Chatzipavlis A., Trygonis, V., Velegrakis A.F. (2022) High Frequency Shoreline and Wave Run-Up Detections through Optical Video Imagery. Example from Kamari Beach, Santorini. In proc. of Marine and Inland Waters Research Symposium, Porto Heli, Argolida, Greece, Sept. 16-20.

Monioudi I.N., Markozanes F., Velegrakis A.F., Chatzipavlis A.E., Čulibrk A., Kontopyrakis K.E. (2021) Prioritization of beach vulnerability to sea level rise: The case of Santorini, Greece. In proceedings of the HydroMediT 2021 - 4th International Conference on Applied Ichthyology, Oceanography & Aquatic Environment, Mytilene (virtual), Greece, November 4-6, 264-268.

Βιβλιογραφικές αναφορές - References

Chatzipavlis A., Tsekouras G.E., Trygonis V., Velegrakis A.F., Tsimikas J., Rigos A., Hasiotis Th. and Salmas C., 2019. Modeling beach realignment using a neuro-fuzzy network optimized by a novel backtracking search algorithm. *Neural Computing and Applications*, 17 pp. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3809-9>

De Freitas, C.R., Scott, D., McBoyle, G. (2008) A second generation climate index for tourism (CIT): specification and verification. *International Journal of Biometeorology* 52, 399-407. <https://doi.org/10.1007/s00484-007-0134-3>

Monioudi I.N., Velegrakis A.F., Chatzistratis D., Vousdoukas M.I., Savva C., Wang D., Bove G., Mentaschi L., Paprotny D., Morales-Nápoles O., Chatzipavlis A.E., Hasiotis T., Manoutsoglou E. (2023) Climate change - induced hazards on touristic island beaches: Cyprus, Eastern Mediterranean. *Frontiers in Marine Science* 10: 1188896.

Monioudi I.N., Velegrakis A.F., Chatzipavlis A., et al., (2017) Assessment of island beach erosion due to sea level rise: The case of the Aegean Archipelago (Eastern Mediterranean). *Natural Hazards and Earth System Science* 17, 449–466. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-449-2017>

Tsekouras GE, Trygonis V, Maniatopoulos A, Rigos A, Chatzipavlis A, Tsimikas J, Mitianoudis N, Velegrakis AF (2017) A Hermite neural network incorporating artificial bee colony optimization to model shoreline realignment at a reef-fronted beach. *Neurocomputing* <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.07.070>