

Εκτίμηση της Έκθεσης Αστικών Περιοχών του Μαϊάμι (ΗΠΑ) σε Φαινόμενα Παράκτιων Πλημμυρών**ΜΑΚΡΗΣ Χ.^{1,*}, ΜΑΛΛΙΟΣ Ζ.², ΑΝΔΡΟΥΛΙΔΑΚΗΣ Α.³ και ΚΟΥΡΑΦΑΛΟΥ Β.⁴**¹Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100, Ξάνθη²Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124, Θεσσαλονίκη³Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 81100, Μυτιλήνη⁴Rosenstiel Σχολή Επιστημών Θάλασσας, Ατμοσφαιράς και Γης, Πανεπιστήμιο του Μαϊάμι, 33149-1031, Μαϊάμι, ΗΠΑ*Υπεύθυνος για την αλληλογραφία συγγραφέας / E-mail: cmakris@civil.duth.gr**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Οι διακυμάνσεις της Ανύψωσης Στάθμης Θάλασσας (ΑΣΘ) αποτελεί κρίσιμο δείκτη της Κλιματικής Αλλαγής, επηρεάζοντας ιδιαίτερα τις παράκτιες περιοχές χαμηλού υψομέτρου (Williams & Gutierrez, 2009). Η Νότια Φλόριντα είναι μια από τις πιο εκτεθειμένες και ευάλωτες περιοχές του κόσμου σε παράκτιες πλημμύρες καθώς επηρεάζεται από επεισόδια ΑΣΘ λόγω της επίδρασης τροπικών καταιγίδων και κυκλώνων του Ατλαντικού. Ειδικά το Μαϊάμι, με έναν πυκνό αστικό ιστό και υποδομές στην παράκτια ζώνη, υπόκειται σε έντονο κίνδυνο θαλάσσιων πλημμυρών που οδηγούν σε ανθρώπινες απώλειες και εκτεταμένες καταστροφές περιουσιών και κτιρίων, με σημαντικές κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις (Palm & Bolsen, 2020).

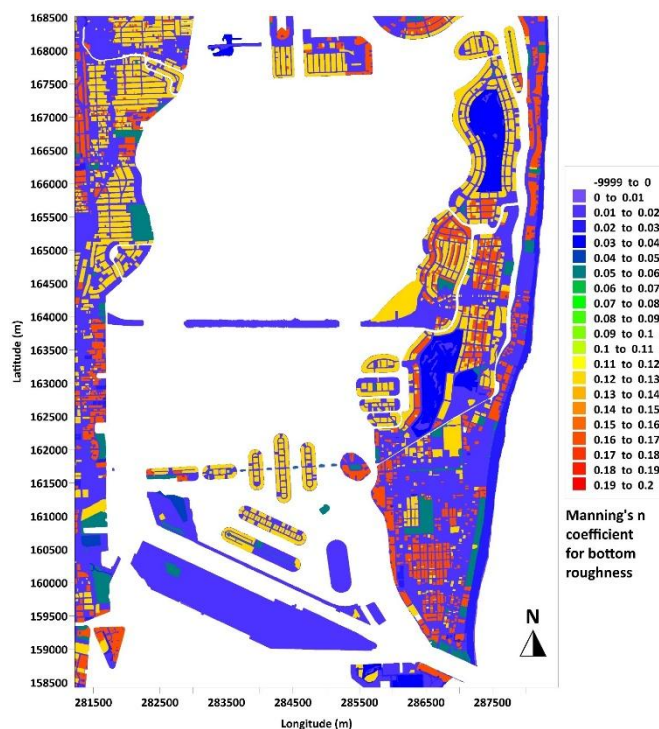
ΣΚΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Αυτή η μελέτη διερευνά νέους τρόπους εκτίμησης της έκθεσης περιουσιακών στοιχείων (σε επίπεδο ακινήτων και οικοπέδων) στο φαινόμενο της παράκτιας κατάκλυσης με βάση πολύ λεπτομερείς χάρτες κινδύνου πλημμύρας (Makris et al., 2024). Αυτοί παράγονται από μια πρόσφατη έκδοση του μοντέλου CoastFLOOD (Makris et al., 2023), το οποίο είναι ειδικά διαμορφωμένο για προσομοιώσεις παράκτιων πλημμυρών σε πεδία πολύ υψηλής ανάλυσης (πλέγμα $dx=1-2m$). Αυτές τροφοδοτούνται με ακραία σενάρια ΑΣΘ κατά μήκος των ακτών για ένα χρονικό πλαίσιο 30 ετών (1994-2023). Ο πρωταρχικός στόχος της εργασίας είναι η ανάλυση της διαχρονικής μεταβλητότητας των επιπτώσεων των παράκτιων πλημμυρών σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές στο Μαϊάμι (ΗΠΑ). Ταυτόχρονα αξιολογείται η έκθεση σε φαινόμενα πλημμύρας από θαλασσινό νερό σε επίπεδο κτιρίων και εγκαταστάσεων υποδομών κατά μήκος της ακτής του Κόλπου του Biscayne και της παραλίας του Μαϊάμι. Η μελέτη διερευνά επίσης τις μακροπρόθεσμες τάσεις εξέλιξης και τις αντίστοιχες ακραίες τιμές ΑΣΘ, χρησιμοποιώντας ιστορικές καταγραφές θαλάσσιας στάθμης από παλιρροιογράφους.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ**Περιοχή Μελέτης - Δεδομένα Στάθμης Θάλασσας**

Η περιοχή μελέτης (Εικ.1) επιλέχθηκε με βάση την ποικιλομορφία των χρήσεων γης και της εδαφοκάλυψης (LULC) λαμβάνοντας επίσης υπόψη αρκετούς κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες (π.χ. πυκνότητα πληθυσμού, τιμές αγοράς ακινήτων κ.λπ.). Τα όρια της περιοχής μελέτης και του πεδίου προσομοίωσης ορίστηκαν με βάση την υπολογιστική δυνατότητα για μοντελοποίηση πλημμύρας (~ $15 \cdot 10^3$ κελιά πλέγματος). Περιλαμβάνει τις βόρειες ακτές του Κόλπου Biscayne και την παραλία του

Μαϊάμι, που εμπεριέχουν τόσο φυσικά προστατευμένες περιοχές όσο και εξαιρετικά εκτεθειμένες αστικές ζώνες. Τα δεδομένα ΑΣΘ προέρχονται από ωριαίες μετρήσεις παλιρροίας της NOAA στο σταθμό του Virginia Key και καλύπτουν την περίοδο 1994–2023. Η υψηλότερη τιμή ΑΣΘ ($=1,172m$ με περίοδο επαναφοράς >244 ετών) καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του τυφώνα Ίρμα, ενός τροπικού κυκλώνα Κατηγορίας 5 στις αρχές Σεπτεμβρίου του 2017.



Σχήμα 1. Χοροχρωματικός χάρτης συντελεστή Manning n της τραχύτητας εδάφους στην περιοχή του Μαϊάμι με βάση δεδομένα LULC που αφορούν στο Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας (DSM) της NOAA για το υψόμετρο εδάφους, μετρημένο από το North American Vertical Datum 1988.

Αριθμητικό μοντέλο – Ανάλυση ακραίων τιμών

Το CoastFLOOD είναι ένα 2-D μοντέλο προσομοίωσης διόδευσης πλημμύρας, βασισμένο σε πεδία raster πολύ υψηλής ανάλυσης χρησιμοποιώντας εξισώσεις ισορροπίας μάζας (Makris et al., 2023). Ενσωματώνει την τριβή εδάφους κατά Manning και βαθμονομείται με δεδομένα της NOAA (Makris et al., 2024). Το μοντέλο εφαρμόζεται για την αξιολόγηση της έκθεσης σε αστικές πλημμύρες κάτω από διάφορα σενάρια ΑΣΘ. Η ανάλυσή μας προσδιορίζει τιμές επαναφοράς 2-, 5-, 10-, ..., 100-, ..., 1.000-, ... έως και 10.000-ετών για την ΑΣΘ, με βάση την προσαρμογή της κατανομής GEV σε μπλοκ ετήσιων μεγίστων, χρησιμοποιώντας το πακέτο *extRemes* του λογισμικού R-studio. Κατώφλια και

μακροπρόθεσμες τάσεις εκτιμώνται επίσης με στατιστικά μοντέλα όπως η Εμπειρική Αποσύνθεση Τρόπων και το τεστ ομογένειας Pettit.

Έκθεση σε επίπεδο ιδιοκτησίας σε παράκτιες πλημμύρες

Οι επιπτώσεις του κινδύνου παράκτιας πλημμύρας εκτιμήθηκε με βάση ένα δείκτη ποσοστού κάλυψης πλημμύρας (FCP%, Androulidakis et al., 2023). Οι συνιστώσες για την εκτίμηση της έκθεσης ιδιοκτησιών/οικοπέδων σε παράκτιες πλημμύρες περιλαμβάνουν αναλύσεις πολύ υψηλής ανάλυσης σε επίπεδο κτιρίων (Iliadis et al., 2023). Οι μετρικές περιλαμβάνουν πιθανότητες πλημμύρας ανά ιδιοκτησία και αριθμό πλημμυρισμένων κελιών, διάφορα στατιστικά μεγέθη και ποσοστιαία για παραμέτρους κινδύνου όπως πλημμυρισμένα εμβαδά, μέγιστα ύψη και ταχύτητες πλημμυρικού κύματος, απόσταση κτιρίων από τα όρια πλημμυρισμένων περιοχών κ.λπ. Ένα σύστημα ταξινόμησης σε κλίμακα Likert 5 επιπέδων για την κατάταξη ακινήτων διαμορφώνει τελικά έναν σωρευτικό δείκτη έκθεσης για κάθε στοιχείο υπό διακινδύνευση.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Επικύρωση Μοντέλου - Εκτίμηση Παράκτιας Πλημμύρας

Η απόδοση του μοντέλου αξιολογήθηκε συγκρίνοντάς το με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις κατάκλυσης λόγω ΑΣΘ της NOAA. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν αρκετά υψηλή συσχέτιση (>80%) μεταξύ των προσομοιώσεων με το CoastFLOOD και των εκτιμήσεων της NOAA. Οι όποιες διαφοροποιήσεις κρίνονται εύλογες αφού το μοντέλο CoastFLOOD λαμβάνει υπόψη πιο πολύπλοκες δυναμικές διεργασίες της πλημμυρικής ροής π.χ. λόγω τριβής πυθμένα κ.λπ. Οι προσομοιώσεις υποδεικνύουν ότι περιοχές με υψόμετρο εδάφους έως και 2 m πάνω από τη Μέση Στάθμη Θάλασσας είναι ιδιαίτερα εκτεθειμένες σε παράκτιες πλημμύρες, επιβεβαιώνοντας τις αντίστοιχες αναφορές της FEMA (2018).

Ανάλυση έκθεσης σε επίπεδο ιδιοκτησιών - οικοπέδων

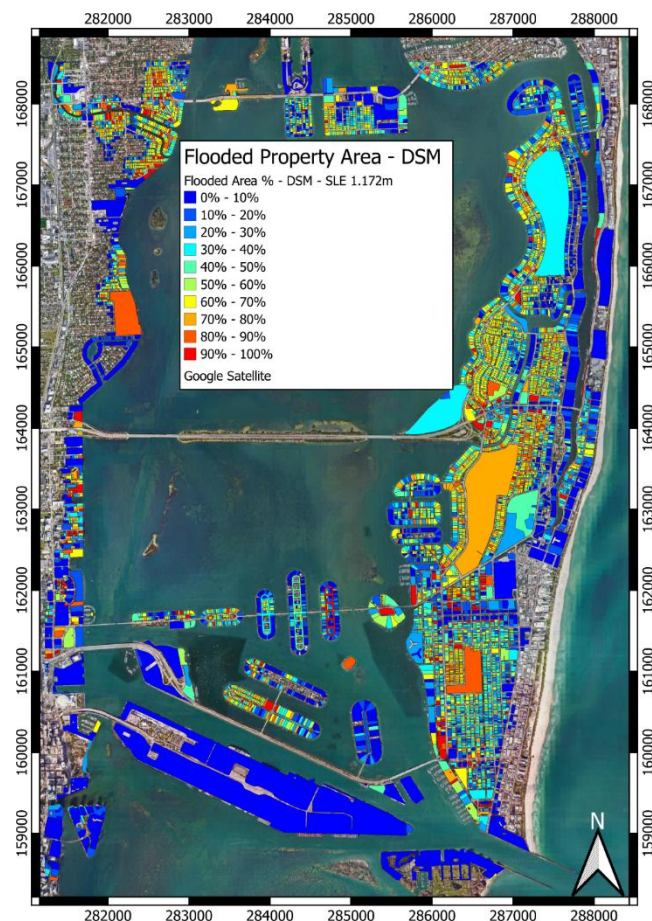
Τα βασικά ευρήματα εκτίμησης της έκθεσης σε παράκτιες πλημμύρες σε επίπεδο ιδιοκτησίας (Εικ. 2) είναι τα εξής:

- Οι κατοικημένες περιοχές χαμηλού υψομέτρου παρουσιάζουν υψηλή έκθεση σε πλημμύρα, ιδιαίτερα στη νοτιοδυτική παραλία του Μαϊάμι και τις μεσαίες νησίδες.
- Τα ακίνητα κοντά στις δυτικές ακτές του Indian Creek και του Biscayne Bay είναι πολύ εκτεθειμένα σε πλημμύρες.
- Παράκτιες υποδομές, όπως το λιμάνι και οι αυτοκινητόδρομοι, συσσωρεύουν πλημμυρικά ύδατα πιθανότατα λόγω ύπαρξης αδιαπέραστων επιφανειών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αυτή η έρευνα παρουσιάζει αριθμητικές προσομοιώσεις πολύ υψηλής ανάλυσης για την εκτίμηση παράκτιων πλημμυρών στην πόλη του Μαϊάμι. Γίνεται προσπάθεια λεπτομερούς εκτίμησης των επιπτώσεων με βάση χάρτες GIS ενσωματώνοντας μακροπρόθεσμες επιπτώσεις παρατηρήσεις από παλιρροιογράφους με ανάλυση ακραίων τιμών για την ΑΣΘ. Έτσι παρέχονται λεπτομερείς αναλύσεις για την έκθεση οικοπέδων/ιδιοκτησιών/κτιρίων σε κίνδυνο πλημμύρας. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν την ανάγκη για ενισχυμένο πολεοδομικό σχεδιασμό και στρατηγικές προσαρμογής για

τον μετριασμό των πιθανών μελλοντικών παράκτιων κινδύνων από θυελλογενείς παλίρροιες και τυφώνες.



Σχήμα 2. Χοροπληθικός χάρτης πλημμυρισμένων ιδιοκτησιών που απεικονίζει ποσοστά πλημμυρισμένων περιοχών σε κάθε διακριτό οικόπεδο της περιοχής μελέτης, από προσομοιώσεις για τον τυφώνα Irma (ΑΣΘ=1,172m).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Androulidakis Y. et al. (2023). Sea level variability and coastal inundation over the northeastern Mediterranean Sea. *Coast Eng J*, vol. 65(4), pp. 514-545.
- FEMA (2018). Mitigation assessment team report: Hurricane Irma in Florida. FEMA P-2023.
- Iliadis C. et al. (2023). Urban Flood Modelling under Extreme Rainfall Conditions for Building-Level Flood Exposure Analysis. *Hydrology*, vol. 10(8), p. 172.
- Makris C. et al. (2023). CoastFLOOD: A High-Resolution Model for the Simulation of Coastal Inundation Due to Storm Surges. *Hydrology*, vol. 10(5), p. 103.
- Makris C.V. et al. (2024). On Modeling the Coastal Floods and Assessing the Impacts on Inundated Urban Areas of Miami (FL, USA). 34th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), pp. 2872-2879.
- Palm R. and Bolsen T. (2020). Climate change and sea level rise in South Florida, Vol. 34, Springer.
- Williams S.J. and Gutierrez B.T. (2009). Sea-level rise and coastal change: Causes and implications for the future of coasts and low-lying regions. *Shore & Beach*, vol. 77(4), p. 13.