



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΜΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**«ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΑΙΤΙΑ, ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ,  
ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΝΑΣ ΙΑΝΟΣ  
ΚΑΙ ΤΟΥ DANIEL (ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΤΟ 2020 ΚΑΙ ΤΟ 2023)»**

**«FLOOD PHENOMENA IN GREECE: CAUSES, CONSEQUENCES, RESILIENCE:  
STUDY OF THE FLOOD PHENOMENA CYCLONE IANOS AND FLOOD DANIEL (THESSALY  
REGION 2020 AND 2023)»**

**ΦΟΙΤΗΤΗΣ : ΝΑΣΗΣ ΑΓΓΕΛΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ : ΧΑΤΖΗΝΤΑΗ ΝΙΚΟΛΕΤΤΑ**

**ΠΕΙΡΑΙΑΣ, 2026**



## ΔΗΛΩΣΗ

«Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου».

«Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού της ΜΔΕ ανήκουν στον μεταπτυχιακό φοιτητή και στο επιβλέπων μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς τη συναίνεση άλλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του πρωτότυπου μέρους της ΜΔΕ ανήκουν στον μεταπτυχιακό φοιτητή και στην επιβλέπουσα από κοινού, δηλαδή δεν μπορεί ο ένας από τους δύο να κάνει χρήση αυτού χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον ένα εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο συν-συγγραφέων. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του/της μη συμμετέχοντα/ουσας στη συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο».

Ο Φοιτητής

Νάσης Αγγελής

Η Επιβλέπουσα

Χατζηνταή Νικολέττα

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει το φαινόμενο των πλημμυρών στην Ελλάδα, με έμφαση στις πρόσφατες ακραίες καταστροφές που προκλήθηκαν από τον μεσογειακό κυκλώνα «Ιανό» (2020) και την καταιγίδα «Daniel» (2023) στη Θεσσαλία. Αξιοποιώντας διεπιστημονική βιβλιογραφία, στατιστικά δεδομένα και εμπειρικές παρατηρήσεις, αναλύονται οι αιτίες, οι μηχανισμοί και οι επιπτώσεις των πλημμυρικών φαινομένων, καθώς και τα κενά της υφιστάμενης πολιτικής διαχείρισης. Η μελέτη αναδεικνύει την απουσία ολοκληρωμένου στρατηγικού σχεδιασμού, τον κατακερματισμό αρμοδιοτήτων, την ανεπαρκή συντήρηση υποδομών και τη χαμηλή κοινωνική ανθεκτικότητα ως κρίσιμους παράγοντες που επιτείνουν την τρωτότητα της χώρας. Παράλληλα, προτείνονται καινοτόμες λύσεις που περιλαμβάνουν την αξιοποίηση έξυπνων τεχνολογιών πρόγνωσης, την υιοθέτηση υβριδικών υποδομών που συνδυάζουν «γκρι» και «πράσινες» λύσεις, την ενσωμάτωση του κινδύνου στον πολεοδομικό σχεδιασμό, την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς και την ενίσχυση της κοινωνικής συμμετοχής. Τα συμπεράσματα της μελέτης δείχνουν ότι η Ελλάδα βρίσκεται σε κρίσιμο σταυροδρόμι, καθώς οι πλημμύρες, εντεινόμενες από την κλιματική αλλαγή, θα συνεχίσουν να απειλούν ανθρώπινες ζωές, υποδομές και οικονομικές δραστηριότητες. Η μετάβαση από την αποσπασματική και αντιδραστική διαχείριση σε μια ολιστική στρατηγική ανθεκτικότητας αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την προσαρμογή στις νέες προκλήσεις. Η έρευνα καταλήγει σε συγκεκριμένες προτάσεις πολιτικής που εστιάζουν στην τεχνολογική καινοτομία, τον χωρικό σχεδιασμό, την κοινωνική ενδυνάμωση και τη θεσμική αναβάθμιση, προσφέροντας έναν οδικό χάρτη για μια πιο βιώσιμη και ανθεκτική διαχείριση πλημμυρικών κινδύνων στην Ελλάδα.

**Λέξεις - κλειδιά:** Πλημμύρες, Ιανός, Daniel, Θεσσαλία, ανθεκτικότητα, διαχείριση κινδύνων, κλιματική αλλαγή, πολιτικές πρόληψης.

## ABSTRACT

This study examines flood phenomena in Greece, focusing on the recent extreme disasters caused by the Mediterranean cyclone “Ianos” (2020) and storm “Daniel” (2023) in Thessaly. Drawing on interdisciplinary literature, statistical data, and empirical observations, it analyzes the causes, mechanisms, and impacts of floods, as well as the gaps in current risk management policies. The findings highlight the lack of an integrated strategic plan, the fragmentation of responsibilities among institutions, the insufficient maintenance of infrastructures, and the low level of social resilience as critical factors that exacerbate vulnerability. At the same time, the study proposes innovative solutions, including the use of advanced monitoring and forecasting technologies, the implementation of hybrid infrastructures combining “grey” and “green” solutions, the integration of flood risk into urban and spatial planning, the protection of cultural heritage, and the empowerment of local communities. The results demonstrate that Greece is at a turning point, as floods, intensified by climate change, will continue to threaten human lives, infrastructures, and economic activities. Transitioning from a reactive and fragmented approach to a holistic resilience-oriented strategy is essential for effective adaptation to new challenges. The research concludes with concrete policy recommendations emphasizing technological innovation, spatial planning, social engagement, and institutional reform, thus providing a roadmap for more sustainable and resilient flood risk management in Greece.

**Keywords:** Floods, Ianos, Daniel, Thessaly, resilience, risk management, climate change, prevention policies.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς το Πανεπιστήμιο Πειραιώς και το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, στο πλαίσιο του οποίου εκπονήθηκε η παρούσα εργασία. Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στους καθηγητές μου, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την ακαδημαϊκή στήριξη και την έμπνευση που προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου την Κ. Χαντζηνταή Νικολέττα για όλη τη βοήθεια και τη στήριξη. Η συμβολή της ήταν καθοριστική όχι μόνο για την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης, αλλά και για τη διαμόρφωση ενός πλαισίου σκέψης και ερευνητικής μεθοδολογίας που θα με συνοδεύει και στο μέλλον. Θερμές ευχαριστίες απευθύνω επίσης σε όλους τους διδάσκοντες του Προγράμματος, οι οποίοι με τις γνώσεις και την εμπειρία τους συνέβαλαν ουσιαστικά στην εμβάθυνση της επιστημονικής μου κατάρτισης. Η ακαδημαϊκή αυτή πορεία υπήρξε για μένα μια γόνιμη εμπειρία μάθησης και εξέλιξης, που θα αποτελεί πάντα σημείο αναφοράς στη συνέχεια της επαγγελματικής μου δραστηριότητας.

## ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Θέλω να αφιερώσω την διπλωματική εργασία μου στην οικογένεια μου, Κωνσταντίνο και Στέλλα για την υποστήριξη τους , την κατανόηση και την συμπαράστασή τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου , αλλά και στους φίλους μου που ήταν δίπλα μου σε αυτό το ταξίδι γνώσεων.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Πανεπιστήμιο Πειραιώς, στο Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας, με αντικείμενο τα πλημμυρικά φαινόμενα στην Ελλάδα και ειδικότερα την ανάλυση δύο χαρακτηριστικών περιπτώσεων: του μεσογειακού κυκλώνα «Ιανός» το 2020 και της καταιγίδας «Daniel» το 2023 στη Θεσσαλία. Το θέμα της εργασίας, με τίτλο «Πλημμυρικά φαινόμενα στην Ελλάδα: αίτια, συνέπειες και ανθεκτικότητα – μελέτη των πλημμυρικών φαινομένων Ιανός και Daniel στη Θεσσαλία (2020,2023)», εστιάζει στην κατανόηση των αιτίων που οδηγούν σε ακραίες πλημμύρες, στις κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες που επιφέρουν, καθώς και στις πολιτικές και στρατηγικές που μπορούν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα απέναντι σε τέτοια γεγονότα. Η αξιολόγηση και η διαχείριση των κινδύνων από πλημμύρες αποτελούν κρίσιμης σημασίας ζητήματα για την προστασία των κοινωνιών και τη βιώσιμη ανάπτυξη, και η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει σε αυτόν τον επιστημονικό και κοινωνικό διάλογο.

## ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο βασικός σκοπός της μελέτης είναι να αναδείξει τη σημασία των πλημμυρικών φαινομένων στην Ελλάδα και να διερευνήσει τόσο τα αίτια και τις συνέπειές τους όσο και τις δυνατότητες ενίσχυσης της ανθεκτικότητας απέναντι σε αυτά. Μέσα από τη μελέτη των περιπτώσεων του «Ιανού» και του «Daniel», η εργασία επιδιώκει να εντοπίσει τα κενά στην υφιστάμενη πολιτική διαχείρισης κινδύνων, να αξιολογήσει τις πρακτικές που εφαρμόστηκαν και να προτείνει καινοτόμες λύσεις προσαρμογής και πρόληψης. Η μελέτη στοχεύει, παράλληλα, στη συμβολή στον επιστημονικό διάλογο για τη διαχείριση φυσικών καταστροφών στην εποχή της κλιματικής κρίσης, προσφέροντας θεωρητικές αναλύσεις αλλά και πρακτικές προτάσεις πολιτικής.

## ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η εργασία είναι θεωρητική και ερευνητική, βασισμένη σε ανάλυση βιβλιογραφίας, μελέτη περίπτωσης και σύνθεση προτάσεων πολιτικής. Αποτελείται από εννέα κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει το θέμα, παρουσιάζοντας το πλαίσιο, τη σημασία και τη μεθοδολογική προσέγγιση. Το δεύτερο κεφάλαιο εξετάζει την ιστορική εξέλιξη των πλημμυρικών φαινομένων στην Ελλάδα και διεθνώς. Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στις θεωρητικές προσεγγίσεις και στα μοντέλα διαχείρισης κινδύνων, ενώ το τέταρτο αναλύει τα χαρακτηριστικά και τις συνέπειες του κυκλώνα «Ιανός». Το πέμπτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην καταιγίδα «Daniel» και τις καταστροφές στη Θεσσαλία. Το έκτο κεφάλαιο συγκρίνει τις δύο περιπτώσεις και εξάγει συμπεράσματα για τις ομοιότητες και τις διαφορές τους. Στο έβδομο κεφάλαιο καταγράφονται οι πρακτικές διαχείρισης κινδύνων στην Ελλάδα και διεθνώς, ενώ το όγδοο κεφάλαιο αναλύει τη συνεισφορά της μελέτης, εντοπίζοντας τα κενά της υφιστάμενης πολιτικής, προτείνοντας καινοτόμες λύσεις και θέτοντας κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Τέλος, το ένατο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα και διατυπώνει ολοκληρωμένες προτάσεις πολιτικής. Η διάρθρωση αυτή επιτρέπει μια συνεκτική προσέγγιση του θέματος, από τη θεωρητική θεμελίωση έως την πρακτική εφαρμογή και τα συμπεράσματα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. Εισαγωγή</b> .....	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο και στόχοι της μελέτης .....	<b>1</b>
1.2 Οριοθέτηση (Χρονικά και Χωρικά) .....	<b>2</b>
1.3 Μεθοδολογική προσέγγιση.....	<b>3</b>
<b>2. Θεωρητικό Πλαίσιο</b> .....	<b>5</b>
2.1 Ορισμοί και βασικές έννοιες .....	<b>5</b>
2.2 Υδρομετεωρολογικοί παράγοντες και κλιματική αλλαγή .....	<b>6</b>
2.3 Ανθεκτικότητα και διαχείριση κινδύνου .....	<b>7</b>
<b>3. Μελέτη Περιστατικών: Κύκλωνες «Ιανός» (2020) και «Daniel» (2023) ...</b>	<b>9</b>
3.1 Περιγραφή και ποσοτικοποίηση φαινομένων .....	<b>9</b>
3.2 Χωρική κατανομή πλημμυρών στη Θεσσαλία .....	<b>11</b>
3.3 Συλλογή και ανάλυση δεδομένων πεδίου.....	<b>12</b>
3.4 Αιτίες για τις Πλημμύρες στους Κύκλωνες «Ιανός» (2020) και «Daniel» (2023).....	<b>14</b>
<b>4. Αιτίες Πλημμυρικών Φαινομένων</b> .....	<b>21</b>
4.1 Φυσικές παράμετροι (ένταση βροχόπτωσης, γεωμορφολογία).....	<b>21</b>
4.2 Ανθρωπογενείς παράγοντες.....	<b>23</b>

4.3	Συμβολή κλιματικής αλλαγής.....	24
<b>5.</b>	<b>Συνέπειες Πλημμυρών.....</b>	<b>25</b>
5.1	Οικονομικές υποδομές.....	25
5.2	Περιβαλλοντικές υποδομές.....	27
5.3	Κοινωνικές υποδομές.....	29
<b>6.</b>	<b>Αξιολόγηση Ανθεκτικότητας.....</b>	<b>30</b>
6.1	Δείκτες ευαλωτότητας και ανθεκτικότητας.....	30
6.2	Εφαρμογή σε τοπικό επίπεδο.....	34
6.3	Κριτήρια βέλτιστων πρακτικών.....	35
<b>7.</b>	<b>Στρατηγικές Διαχείρισης και Πρόληψης.....</b>	<b>37</b>
7.1	Τεχνικές λύσεις (υδροηλεκτρικά φράγματα, έργα αποστράγγισης).....	38
7.2	Φυσικές (green infrastructure, αναδασώσεις).....	39
7.3	Οργάνωση και σχέδια έκτακτης ανάγκης.....	40
<b>8.</b>	<b>Συνεισφορά της Μελέτης &amp; Προτάσεις.....</b>	<b>42</b>
8.1	Κενά στην υπάρχουσα πολιτική διαχείρισης.....	42
8.2	Καινοτόμες λύσεις για αύξηση ανθεκτικότητας.....	45
8.3	Κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.....	48
<b>9.</b>	<b>Συμπεράσματα και Προτάσεις.....</b>	<b>51</b>
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>55</b>

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 – Η πλημμύρα Ιανός (πηγή: <a href="https://www.iefimerida.gr/ellada/kakokairia-ianos-dramatik-nyhta-thessalia-sterea">https://www.iefimerida.gr/ellada/kakokairia-ianos-dramatik-nyhta-thessalia-sterea</a> ) .....	9
Εικόνα 2 – Η πλημμύρα Daniel (πηγή: <a href="https://www.cnn.gr/ellada/story/381744/kakokairia-daniel-erevna-gia-tis-plimmyres-sti-thessalia-dietakse-o-areios-pagos">https://www.cnn.gr/ellada/story/381744/kakokairia-daniel-erevna-gia-tis-plimmyres-sti-thessalia-dietakse-o-areios-pagos</a> ) .....	10
Εικόνα 3 – Κακοκαιρία Ιανός – Υλικές ζημιές (πηγή: <a href="https://hellasjournal.com/2022/06/o-mesogiakos-kiklonas-ianos-ke-i-sismi-tou-2021-allaxan-to-anaglifo-tis-thessalias/">https://hellasjournal.com/2022/06/o-mesogiakos-kiklonas-ianos-ke-i-sismi-tou-2021-allaxan-to-anaglifo-tis-thessalias/</a> ) .....	14
Εικόνα 4 - Κακοκαιρία Daniel - Υλικές ζημιές (πηγή: <a href="https://www.parapolitika.gr/ellada/article/1575200/xeperasan-tis-2000-oi-adeies-episkeuis-ktirion-meta-tis-plimmures-apo-tin-kakokairia-daniel/">https://www.parapolitika.gr/ellada/article/1575200/xeperasan-tis-2000-oi-adeies-episkeuis-ktirion-meta-tis-plimmures-apo-tin-kakokairia-daniel/</a> ).....	15
Εικόνα 5 - Διαχείριση κρίσεων στις πλημμύρες (πηγή: <a href="https://floodhazards.utah.gov/flood-mitigation/">https://floodhazards.utah.gov/flood-mitigation/</a> ).....	37

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 - Συνοπτική ποσοτικοποίηση των κυκλώνων «Ιανός» (2020) και «Daniel» (2023) στη Θεσσαλία .....	13
Πίνακας 2 - Κύριες κατηγορίες αιτίων για τις πλημμύρες των κυκλώνων «Ιανός» (2020) και «Daniel» (2023).....	17
Πίνακας 3 - Πολυπαραγοντικές αιτίες πλημμυρικού κινδύνου στη Θεσσαλία .....	22
Πίνακας 4 – Οικοδομικές Υποδομές.....	26
Πίνακας 5 – Περιβαλλοντικές Υποδομές.....	28
Πίνακας 6 – Δείκτες ευαλωτότητας και ανθεκτικότητας .....	32

## 1. Εισαγωγή

Οι πρόσφατες καταστροφικές πλημμύρες που προκάλεσαν οι μεσογειακοί κυκλώνες «Ιανός» (Σεπτέμβριος 2020) και «Daniel» (Σεπτέμβριος 2023) στην περιοχή της Θεσσαλίας επανέφεραν στο προσκήνιο το ζήτημα της αυξανόμενης συχνότητας και έντασης των υδρομετεωρολογικών κινδύνων στον ελλαδικό χώρο.

Ο «Daniel» κατέρριψε ρεκόρ ημερήσιας βροχόπτωσης με 754 mm στη Ζαγορά μέσα σε λιγότερο από 21 ώρες, «μια αδιανόητη ποσότητα νερού», όπως χαρτογραφήθηκε από τα δίκτυα παρακολούθησης<sup>1</sup>, ενώ ο «Ιανός» είχε ήδη δημιουργήσει προηγούμενο, πλημμυρίζοντας-μεταξύ άλλων-περισσότερα από 5.000 κτίρια στον Δήμο Καρδίτσας και προκαλώντας διακοπές ρεύματος και εκτεταμένες αγροτικές ζημιές.

Τα φαινόμενα αυτά επιδεικνύουν όχι απλώς ακραία υδρολογικά χαρακτηριστικά αλλά και μια πολυπαραγοντική διάσταση όπου η κλιματική αλλαγή, οι δομικές αδυναμίες των υποδομών, οι χρήσεις γης και η ανεπαρκής θεσμική ετοιμότητα συνδιαμορφώνουν το επίπεδο καταστροφής.

### 1.1 Αντικείμενο και στόχοι της μελέτης

Στόχος της παρούσας έρευνας είναι η σε βάθος διερεύνηση των αιτιών, των επιπτώσεων και των δυνατοτήτων ανθεκτικότητας έναντι των πλημμυρικών φαινομένων που συνδέονται με τους δύο προαναφερθέντες κυκλώνες στη Θεσσαλία. Ειδικότερα:

- Αναλυτική αποτύπωση των υδρομετεωρολογικών συνθηκών (ύψη βροχής, χωρική-χρονική κατανομή, ένταση απορροής) που συνέβαλαν στην εκδήλωση των πλημμυρών.
- Χαρτογράφηση των συνέπειων σε επίπεδο φυσικού, ανθρωπογενούς και κοινωνικοοικονομικού συστήματος από οικονομικές απώλειες σε υποδομές μέχρι περιβαλλοντικές αλλοιώσεις και κοινωνικές επιπτώσεις, όπως απώλειες ανθρώπινων ζωών και διάρρηξη κοινωνικής συνοχής.

---

<sup>1</sup> floodlist.com

- Αξιολόγηση της υφιστάμενης ανθεκτικότητας μέσω κατάλληλων δεικτών ευαλωτότητας-προσαρμοστικής ικανότητας και εντοπισμός κενών πολιτικής ή πρακτικής.
- Διατύπωση προτάσεων για ολοκληρωμένες στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου, με έμφαση σε πράσινες και υβριδικές λύσεις, καθώς και βελτιωμένα σχέδια έκτακτης ανάγκης.

Η παρούσα μελέτη προτείνει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει χαρτογράφηση και ανάλυση κινδύνου, ώστε να εντοπιστούν τα πιο ευάλωτα σημεία στη Θεσσαλία μετά τους κυκλώνες Ιανό (2020) και Daniel (2023). Θα εισαγάγει έναν δείκτη ανθεκτικότητας, που θα αξιολογεί την ικανότητα των τοπικών υποδομών να αμβλύνουν τις πλημμυρικές επιπτώσεις. Ως λύση, προωθεί τη χρήση πράσινων υποδομών (όπως φυσικές ζώνες εκτόνωσης πλημμυρών) σε συνδυασμό με τεχνικά έργα, ώστε να διορθωθούν τα υπάρχοντα σημεία συμφόρησης. Επιπλέον, προτείνει τη βελτίωση των σχεδίων έκτακτης ανάγκης μέσω ψηφιακών εργαλείων έγκαιρης προειδοποίησης και συμμετοχικών δράσεων της τοπικής κοινωνίας.

Η έρευνα θα προσπαθήσει να υποδείξει πώς η ορθολογική διαχείριση των χρήσεων γης, αποφεύγοντας την υπερ-συγκέντρωση δομημένων επιφανειών σε ευάλωτες ζώνες, μπορεί να μειώσει σημαντικά τον κίνδυνο. Προτείνει επίσης τη δημιουργία ενός μηχανισμού ανατροφοδότησης, ο οποίος θα αξιολογεί διαρκώς την αποτελεσματικότητα των μέτρων και θα προσαρμόζει τις πολιτικές αποφυγής. Επίσης, έμφαση δίνεται στην εκπαίδευση και την ευαισθητοποίηση των κατοίκων, ώστε να αποφεύγονται πρακτικές ενίσχυσης της ευαλωτότητας. Τέλος, η μελέτη καταλήγει στη σύσταση ενός εθνικού πλαισίου δράσεων για την αντιπλημμυρική ανθεκτικότητα, εστιάζοντας σε λύσεις που συνδυάζουν τεχνολογία, φύση και κοινωνική συμμετοχή.

## **1.2 Οριοθέτηση (Χρονικά και Χωρικά)**

Χρονικά, η μελέτη καλύπτει την περίοδο από τον Σεπτέμβριο 2020 έως τον Σεπτέμβριο 2023, εστιάζοντας στα δύο κύρια πλημμυρικά επεισόδια που συνδέονται άμεσα με τους κυκλώνες «Ιανός» και «Daniel». Η επιλογή αυτής της τριετίας εξασφαλίζει συγκρισιμότητα συνθηκών (μεσογειακά χαμηλά τέλους θέρους), ενώ παρέχει επαρκές διάστημα για την άντληση επίσημων δεδομένων ζημιών, μεταπλημμυρικών μελετών και θεσμικής ανταπόκρισης.

Χωρικά, το επίκεντρο είναι η Περιφέρεια Θεσσαλίας, με ιδιαίτερη έμφαση στις πεδιάδες των Πηνειού και Καρδίτσας, περιοχές που συνδυάζουν υψηλή υδρολογική ευπάθεια λόγω χαμηλού αναγλύφου και έντονης γεωργικής εκμετάλλευσης με σημαντικά αστικά κέντρα (Λάρισα, Καρδίτσα, Τρίκαλα, Βόλος). Η Θεσσαλία προσφέρει ένα αντιπροσωπευτικό «εργαστήριο» μεσογειακού ηπειρωτικού λεκανοπεδίου, στο οποίο συνυπάρχουν πλούσιος υδάτινος ισολογισμός, διαχρονικές παρεμβάσεις αποστράγγισης-άρδευσης και ποικίλες κατηγορίες υποδομών (οδικά & σιδηροδρομικά δίκτυα, τάφροι, φράγματα).

### 1.3 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η παρούσα μελέτη βασίζεται αποκλειστικά σε βιβλιογραφική ανασκόπηση, υιοθετώντας μια συστηματική και αναλυτική διαδικασία. Διατυπώνονται σαφή ερωτήματα σχετικά με (α) τα υδρομετεωρολογικά αίτια των πλημμυρών «Ιανού» & «Daniel», (β) τις συνέπειές τους στο φυσικό, κοινωνικό και οικονομικό περιβάλλον της Θεσσαλίας και (γ) τα επίπεδα ανθεκτικότητας/προσαρμοστικής ικανότητας που αναφέρουν προηγούμενες μελέτες. Σχηματίζεται πρωτόκολλο, που καθορίζει τις βάσεις δεδομένων, χρησιμοποιώντας λέξεις-κλειδιά και κριτήρια ένταξης-αποκλεισμού που χρησιμοποιείται ως διαδικασία επιλογής και στρατηγική σύνθεσης.

Η έρευνα εκτείνεται σε επιστημονικές βάσεις (Scopus, Web of Science, ScienceDirect), εξειδικευμένα ελληνικά αποθετήρια (Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών, ΕΚΤ «Κλειδί»), καθώς και γκρίζα βιβλιογραφία (εκθέσεις ΕΑΑ, ΥΠΕΝ, Περιφέρεια Θεσσαλίας, EFAS, Copernicus EMS). Το χρονικό εύρος περιορίζεται στην περίοδο 2000-2024, με έμφαση στις πρόσφατες δημοσιεύσεις μετά το 2020 η επιλογή αυτή επιτρέπει ενσωμάτωση των πιο σύγχρονων δεδομένων για τους δύο κυκλώνες, αλλά και συγκριτική θεώρηση παλαιότερων πλημμυρικών προτύπων.

Κάθε πηγή βαθμολογείται ως προς τα ακόλουθα: (α) επιστημονική εγκυρότητα (δείκτης απήχησης, peer-review), (β) μεθοδολογική αρτιότητα, (γ) γεωγραφική/θεματική συνάφεια. Τα επιλεγμένα άρθρα κωδικοποιούνται σε ειδικό λογιστικό φύλλο με μεταδεδομένα (τύπος φαινομένου, παράμετροι βροχόπτωσης, είδος συνεπειών, προτεινόμενα μέτρα ανθεκτικότητας), επιτρέποντας ποιοτική σύγκριση και, όπου ενδείκνυται, απλή ποσοτική στατιστική (π.χ. συχνότητα αναφοράς συγκεκριμένων πρακτικών).

Μέσω θεματικής ανάλυσης (thematic synthesis) ομαδοποιούνται τα αποτελέσματα σε τρεις μεγάλες ενότητες: Αίτια – Συνέπειες – Ανθεκτικότητα/Διαχείριση. Δίνεται προτεραιότητα

στη συγκριτική σκιαγράφιση ομοιοτήτων/διαφορών μεταξύ των δύο κυκλώνων, εντοπίζονται κενά έρευνας και ασυμφωνίες, ενώ επισημαίνονται καλές πρακτικές που τεκμηριώνονται επανειλημμένα στη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία.

Συνολικά, η μεθοδολογία επικεντρώνεται στη συγκριτική και κριτική αξιοποίηση υφιστάμενης γνώσης, αποφεύγοντας την πρωτογενή συλλογή δεδομένων ωστόσο, η αυστηρή, συστηματική διαδικασία επιλογής και αξιολόγησης πηγών διασφαλίζει ότι τα συμπεράσματα θεμελιώνονται σε στέρεο, τεκμηριωμένο επιστημονικό υπόβαθρο.

## 2. Θεωρητικό Πλαίσιο

Η ενότητα αυτή εδραιώνει τις εννοιολογικές και επιστημολογικές βάσεις της μελέτης, προσεγγίζοντας διαδοχικά (2.1) τους ορισμούς και τις βασικές έννοιες που περιβάλλουν τα πλημμυρικά φαινόμενα, (2.2) τους υδρομετεωρολογικούς παράγοντες με τη συνδρομή της κλιματικής αλλαγής και (2.3) τη σημερινή προβληματική της ανθεκτικότητας και της διαχείρισης κινδύνου. Η παρουσίαση ακολουθεί ενιαία αφήγηση ώστε να αναδειχθούν οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των τριών υποενοτήτων.

### 2.1 Ορισμοί και βασικές έννοιες

Ο όρος *πλημμύρα* δηλώνει τη βραχεία ή παρατεταμένη κατάκλυση μιας περιοχής από νερό, όταν η παροχή ύδατος υπερβαίνει τη φέρουσα ικανότητα της φυσικής ή τεχνητής κοίτης. Η ετυμολογική διαχρονία του φαινομένου, που εκτείνεται ήδη από την αρχαιότητα, σκιαγραφείται διεξοδικά από τον Angelakis et al. (2023), οι οποίοι ανιχνεύουν την εξέλιξη των πλημμυρών από το 7600 π.Χ. έως σήμερα, αναδεικνύοντας την ιστορική τους επιτελεσματικότητα στη διαμόρφωση τεχνικών και νομικών θεσμών Angelakis et al. (2023). Στη σύγχρονη γεωγραφία καταγράφονται αρκετοί επιμέρους τύποι—πλημμύρες ποταμών, παράκτιες, αστικές, υπερχείλισης φραγμάτων—με διακριτά υδρολογικά προφίλ. Οι *αιφνίδιες ή χειμαρρικές πλημμύρες* (flash floods) είναι ιδιαίτερα θανατηφόρες λόγω του περιορισμένου χρόνου προειδοποίησης η περίπτωση της Εύβοιας τον Αύγουστο 2020 αναλύεται από τους Karkani et al. (2021) με γεωμορφολογικά κριτήρια ευπάθειας, τεκμηριώνοντας πως ο επιταχυνόμενος ρυθμός αστικοποίησης και αποψίλωσης οξύνει τον κίνδυνο Karkani et al. (2021).

Στη φυσική καταστροφών χρησιμοποιείται επίσης ο όρος *άμεσες επιπτώσεις* για τις καταστροφές που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του υδρολογικού γεγονότος. Διαβαθμίσεις και μορφές τέτοιων επιπτώσεων κατέγραψαν οι Diakakis et al. (2016) για τη μεγάλη πλημμύρα της Αθήνας του 2014, προτείνοντας τυπολογία ζημιών σε υποδομές, οικιστικό και φυσικό περιβάλλον Diakakis et al. (2016). Στην κοινωνική γεωγραφία κυριάρχησε ο όρος *κοινωνική τρωτότητα* για να υποδηλώσει χαρακτηριστικά ομάδων πληθυσμού που αυξάνουν τη θνητότητα σε πλημμύρες, έννοια που διερεύνησε κριτικά ο Diakakis et al. (2016) αναδεικνύοντας μετατοπίσεις στον ποιοτικό χαρακτήρα των θανάτων στην Ελλάδα κατά τις τελευταίες δεκαετίες Diakakis et al. (2016).

Αξίζει να επισημανθεί ότι ο όρος *flooding* απαντά και σε λοιπές επιστήμες, φαινόμενο που, μολονότι μεταφορικό, φωτίζει πλευρές της φυσικής διαδικασίας υπερκορεσμού. Η εμφάνιση ανεπιθύμητων υδάτινων μεμβρανών στα κανάλια μεταφοράς καυσίμου των PEM κυψελών, που μελετούν οι Samanpour et al. (2022) και Kim et al. (2023), περιγράφεται ως *water flooding* επειδή παρεμποδίζει τη διάχυση και προκαλεί απώλεια απόδοσης Samanpour et al. (2022). Παρόμοια, οι Kong et al. (2022) απεικόνισαν μικροσκοπικά *flooded* μονοπάτια σε ηλεκτροκαταλυτικές «προβολές», ενώ οι Ruronen et al. (2022) δανείστηκαν ναυπηγικούς όρους πλημμύρισης («damaged ship flooding») για να βαθμονομήσουν υπολογιστικά μοντέλα βύθισης πλοίων. Η διεπιστημονική διάχυση του όρου ενισχύει τη σημασία της *μεταφοράς-μετασηματισμού ρευστού* ως κεντρικού μηχανισμού που, σε διαφορετικές κλίμακες, διαταράσσει την ισορροπία ενός κλειστού συστήματος ακριβώς η ίδια αρχή διέπει τη χωρική επέκταση μιας υπερχειλίσης σε λεκάνη κατάκλυσης.

## 2.2 Υδρομετεωρολογικοί παράγοντες και κλιματική αλλαγή

Το πλημμυρικό δυναμικό ενός τόπου καθορίζεται από την αλληλεπίδραση ατμοσφαιρικών διεργασιών, γεωμορφολογίας και χρηστικών μεταβολών στη λεκάνη απορροής. Οι δυναμικές *μεσογειακοί κυκλώνες* τύπου *medicane* —όπως ο «Ιανός» και ο «Daniel»— ενεργοποιούνται όταν θερμές θαλάσσιες επιφάνειες συναντούν ψυχρές ανώτερες ατμοσφαιρικές μάζες, παράγοντας ανεμοστρόβιλο, εξαιρετικά έντονες βροχοπτώσεις και τοπικές θύελλες. Η ακριβής ανασύνθεση τέτοιων επεισοδίων εξαρτάται από ολοκληρωμένες υποδομές παρακολούθησης· το ολοκληρωμένο σύστημα *nowcasting* που εφαρμόστηκε στη Μάνδρα Αττικής από τους Srygou et al. (2020) απέδειξε ότι ο συνδυασμός *mesoscale* μοντέλων, ραντάρ και δικτύων ομβρομετρικών σταθμών βελτιώνει τον χρόνο προειδοποίησης Srygou et al. (2020).

Ως προς τους γεωμορφολογικούς ελέγχους, η ανάλυση μορφομετρικών δεικτών από τους Karkani et al. (2021) επιβεβαιώνει ότι μικρές λεκάνες με απόκρημνες κλίσεις και στενούς πυθμένες παρουσιάζουν υψηλή δυναμική απορροής. Παράλληλα, η γεωστατιστική προσέγγιση των Garcia-Ayllon και Radke et al. (2021) σε μεσογειακή υδρολογική λεκάνη τεκμηρίωσε θετική χωρική συσχέτιση μεταξύ βαθμού ανθρωποποίησης και τρωτότητας, προσθέτοντας ποσοτικές ενδείξεις πως οι χρήσεις γης απορυθμίζουν τις φυσικές γραμμές επιφανειακής απορροής Garcia-Ayllon & Radke et al. (2021).

Η κλιματική αλλαγή επιτείνει τα παραπάνω. Τάσεις ανόδου της θερμοκρασίας της θάλασσας, αυξημένη ατμοσφαιρική υγρασία και μετατόπιση τροχιών βαρομετρικών

συστημάτων συντελούν σε συχνότερα και εντονότερα επεισόδια Angelakis et al. (2023). Στην περίπτωση της Ολυμπίας, οι Kalogeropoulos et al. (2023) συσχέτισαν τα νέα υετικά μοτίβα με αυξημένο κίνδυνο για πολιτιστική κληρονομιά, αναδεικνύοντας τον πολυτομεακό αντίκτυπο των υδρομετεωρολογικών ανωμαλιών Kalogeropoulos et al. (2023).

### 2.3 Ανθεκτικότητα και διαχείριση κινδύνου

Η έννοια της *ανθεκτικότητας* μετατοπίζει το επίκεντρο από την αμιγή πρόληψη στην ικανότητα ενός συστήματος να *απορροφήσει*, να *προσαρμοστεί* και να *ανακτήσει* λειτουργίες μετά από πλημμύρα. Ο Diakakis et al. (2016) καταδεικνύει ότι, παρά τη σχετική σταθερότητα του συνολικού αριθμού θυμάτων στην Ελλάδα, η μεταβολή των ποιοτικών γνωρισμάτων (ηλικία, φύλο, δραστηριότητα κατά τον χρόνο θανάτου) αντανακλά βαθμιαίες κοινωνικοοικονομικές και τεχνολογικές μετατοπίσεις, τονίζοντας την ανάγκη επικαιροποίησης δεικτών τρωτότητας Diakakis et al. (2016).

Η *πολιτιστική ανθεκτικότητα* προϋποθέτει εξειδικευμένη διαχείριση μνημειακών τόπων, όπως μαρτυρά η περίπτωση της Αρχαίας Ολυμπίας Kalogeropoulos et al. (2023). Τεχνικές μηχανικής, π.χ. αντυπλημμυρικές παρεμβάσεις χαμηλής όχλησης, πρέπει να συνδυάζονται με ψηφιακή καταγραφή και δυναμικά πρωτόκολλα εκκένωσης.

Σε επίπεδο υποδομών, τα σενάρια *ευφυούς έγκαιρης προειδοποίησης* κερδίζουν έδαφος. Μεθοδολογίες ανίχνευσης πλημμύρας σε «πραγματικό χρόνο», όπως τα μοντέλα βαθιάς μάθησης για πρόβλεψη *water flooding* σε PEM κυψέλες καυσίμου Kim et al. (2023) ή οι βέλτιστοι σχεδιασμοί καναλιών διαχείρισης νερού Samanpour et al. (2022), προσφέρουν παραδείγματα μεταφοράς τεχνογνωσίας προς τον υδρολογικό κλάδο: αλγόριθμοι εντοπισμού μοτίβων πίεσης-ροής μπορούν να προσαρμοστούν σε δίκτυα τηλεμετρίας ποταμών.

Η διαχείριση κινδύνου περιλαμβάνει, τέλος, τη *μοντελοποίηση ακραίων σεναρίων*. Η διεθνής ερευνητική δοκιμή του Ruronen et al. (2022), όπου συγκρίθηκαν 24 υπολογιστικά μοντέλα πλημμύρισης κατεστραμμένων πλοίων, υπογραμμίζει την αξία της πολυ-μοντελιακής επικύρωσης παρόμοια λογική προτείνεται για τα υδραυλικά μοντέλα ποταμών, ώστε να ποσοτικοποιείται η αβεβαιότητα και να προκύπτουν σχέδια έκτακτης ανάγκης πολλαπλών βαθμίδων.

Η αποτελεσματική *διακυβέρνηση πλημμυρικού κινδύνου* δεν περιορίζεται στην τεχνοκρατική σφαίρα. Η γεωστατιστική τεκμηρίωση της σχέσης «ανθρωποποίηση– τρωτότητα» από τους Garcia-Ayllon & Radke et al. (2021) αποδεικνύει ότι ο αναπτυξιακός σχεδιασμός οφείλει να ενσωματώνει την έννοια της προσαρμοστικής ικανότητας διαφορετικά, τα κέρδη υποδομής ακυρώνονται από την αυξανόμενη έκθεση. Η συνάρθρωση *κοινωνικών, περιβαλλοντικών και τεχνολογικών* συνιστωσών συγκροτεί, επομένως, τη βάση ενός ολιστικού πλαισίου ανθεκτικότητας, απόλυτα αναγκαίου για την ελληνική πραγματικότητα, όπου οι κυκλώνες τύπου *medicane* αναμένεται να αποτελούν ολοένα και συχνότερη συνθήκη.

### 3. Μελέτη Περιστατικών: Κύκλων «Ιανός» (2020) και «Daniel» (2023)

#### 3.1. Περιγραφή και ποσοτικοποίηση φαινομένων

Η πλημμυρική αλληλουχία των δύο μεσογειακών κυκλώνων εμφανίζει αξιοπρόσεκτες ομοιότητες αλλά και κρίσιμες διαφοροποιήσεις ως προς την ένταση, τη χρονική κλιμάκωση και τις συνέπειές τους. Ο «Ιανός» (16–19 Σεπτεμβρίου 2020) συνδύασε εξαιρετικά χαμηλή βαρομετρική πίεση με κυκλωνική διάταξη ανέμων, προκαλώντας μέγιστες 24ωρες βροχοπτώσεις 635 mm στην Καρδίτσα και ύψη κυματισμού άνω των 5 m στον δυτικό Παγασητικό Androulidakis et al. (2023). Ο «Daniel» (4–8 Σεπτεμβρίου 2023) υπερέβη κάθε προηγούμενο ρεκόρ με τιμές 754 mm μέσα σε 20 h στη Ζαγορά και συνδυασμένη θαλασσοταραχή στις εκβολές του Πηνειού, χαρακτηρίστηκε «υπερ-μεγιστικό» επεισόδιο Dimitriou et al. (2024). Η σύγκριση δορυφορικών καταγραφών (IMERG, GPM) και εδαφικών σταθμών έδειξε αποκλίσεις έως 35 % στα κορυφαία 6-ωρα ύψη, επιβεβαιώνοντας την ανάγκη τοπικής βαθμονόμησης αλγορίθμων Katsanos et al. (2024).



**Εικόνα 1 – Η πλημμύρα Ιανός (πηγή: <https://www.iefimerida.gr/ellada/kakokairia-ianos-dramatiki-nyhta-thessalia-steres>).**

Στον πληγμένο κάμπο της Θεσσαλίας, ο συνολικός πλημμυρικός όγκος νερού του «Daniel» υπολογίζεται σε 1,3 km<sup>3</sup> το 77 % παγιδεύτηκε στην ενδοχώρα λόγω ανεπαρκούς αποστράγγισης και καθίζησης εδαφών, φαινόμενο που αναπτύσσεται διαχρονικά στα ανατολικά τμήματα της λεκάνης Antoniadis etal. (2025). Οι ακραίες παροχές κατέστρεψαν 35 γεφυρικά ανοίγματα μετα-ανάλυση μηχανικών αποτυχιών καταδεικνύει ότι το 67 % των ζημιών σχετιζόταν με υδραυλική διόγκωση βάρθρων Medentzidis etal. (2025).



**Εικόνα 2 – Η πλημμύρα Daniel (πηγή: <https://www.cnn.gr/ellada/story/381744/kakokairia-daniel-erevna-gia-tis-plimmyres-sti-thessalia-dietakse-o-areios-pagos>).**

Οι διαδοχικές διακοπές ρεύματος και ύδρευσης παρήγαγαν μια αλληλουχία δευτερογενών κινδύνων η ραγδαία συγκέντρωση στάσιμων νερών πυροδότησε έξαρση λεπτοσπείρωσης και γαστρεντερίτιδας Manroulis etal. (2024), ενώ η παράλληλη κατάρρευση των τηλεπικοινωνιών μεγένθυσε τα προβλήματα συντονισμού Diakakis etal. (2025). Παρά τις διαφορετικές χωροχρονικές τροχιές, αμφότερα τα συστήματα προστίθενται σε έναν αυξανόμενο κατάλογο ιστορικών πλημμυρών της χώρας Angelakis etal. (2020) και ανατροφοδοτούν τη μακροχρόνια τάση εντονότερων συμβάντων που τεκμηρίωσαν οι Kotroni etal. (2025).

Σε σύγκριση με παλαιότερες θεσσαλικές πλημμύρες –όπως εκείνες του Πηνειού το 1953 ή του 1994 Bathrellos et al. (2018)– οι πρόσφατες μεσογειακές καταιγίδες παρουσιάζουν υψηλότερη ραγδαιότητα, γεγονός που υπερβαίνει τα «κλασικά» κατώφλια βροχόπτωσης για ενεργοποίηση πλημμυρών Diakakis et al. (2012) και διαφοροποιεί τη συμβολή της εποχικότητας, η οποία ιστορικά χαρακτηριζόταν από διπλό εαρινό-φθινοπωρινό μέγιστο Koutroulis et al. (2010). Οι σύγχρονες ατμοσφαιρικές κατατάξεις δείχνουν κυριαρχία του κυκλοφορικού τύπου «NA βαρομετρικό χαμηλό» στα πιο φονικά επεισόδια Tolika et al. (2023).

### 3.2. Χωρική κατανομή πλημμυρών στη Θεσσαλία

Η ιστορική εξέλιξη χρήσεων γης στον θεσσαλικό κάμπο επέδρασε αποφασιστικά στη χωρική διασπορά των ζημιών. Η πλημμύρα «Ιανός» εκδηλώθηκε κυρίως κατά μήκος των φυσικών απορροών του Καράμπαλη και των περιφερειακών τάφρων, με τα νερά να συγκεντρώνονται στον αστικό ιστό της Καρδίτσας, όπου η επέκταση αδιαπέρατων επιφανειών αυξήθηκε κατά 28 % από το 1990 Diakakis et al. (2014). Αντιθέτως, ο «Daniel» προκάλεσε εκτεταμένη λίμναση σε χαμηλές αναγλύφες εκτάσεις ανατολικά του Πηνειού, με βάθη > 2 m σε περιοχές υποκαθίστασης έως 5 cm yr<sup>-1</sup>, όπως αποκαλύπτουν οι χρονοσειρές InSAR Antoniadis et al. (2025).

Σε επίπεδο μικροκλίμακας, χωρική μοντελοποίηση φθίνουσας ικανότητας διήθησης κατέδειξε ότι ρέματα όπως το Ξηρολάκι στη Χαλκιδική, τα οποία διαθέτουν στενή κοίτη και έντονες κλίσεις, παράγουν συντελεστές κορυφιαίας παροχής άνω του 0,8 Tzanakas et al. (2016) παρόμοια γεωμορφολογικά μοτίβα συναντώνται στον υπολήκνιο κλάδο του Ενιπέα, γεγονός που εξηγεί τις αιφνίδιες διαρρήξεις αντιστοιχών αναχωμάτων. Χωρική ανάλυση 282 ιστορικών περιστατικών έδειξε ισχυρή συγκέντρωση πλημμυρών στον άξονα Τρίκαλα–Λάρισα Diakakis et al. (2012), ενώ στα παράκτια τμήματα η αλληλεπίδραση σειρών θυελλωδών κυμάτων και αύξησης της στάθμης της θάλασσας διπλασιάζει τον χώρο έκθεσης Androulidakis et al. (2023).

Τα δορυφορικά αντίγραφα βροχοπτώσεων GPM και IMERG επιτρέπουν λεπτομερή χωρική απεικόνιση της καταιγιδογενετικής εξάπλωσης ωστόσο, παρουσιάζουν συστηματική υποεκτίμηση πάνω από πεδινές περιοχές υψηλού κορεσμού, ιδίως στην ανατολική πεδιάδα της Λάρισας Katsanos et al. (2024). Η ένταξη διορθωτικών παραμέτρων από τοπικά ραντάρ μπορεί να μειώσει το σφάλμα Root-Mean-Square έως και 40 %, όπως απέδειξαν οι Varlas et al. (2018) στην Αττική. Με όλα αυτά φαίνεται ότι οι αστικές επεκτάσεις παραμένουν κρίσιμη μεταβλητή η πλημμύρα της Μάνδρας (2017) έδειξε ότι μεταβολή μόλις 12 % της κάλυψης

ασφάλτου μετέθεσε τους δρόμους εκκένωσης εκτός ζώνης ασφάλειας Soulios et al. (2018). Ανάλογες μετατοπίσεις διαπιστώθηκαν στον κάμπο Φαρσάλων μετά τα έργα αγροτικού δικτύου της δεκαετίας 1990 Bathrellos et al. (2018). Η πολυπλοκότητα αυτή επιβάλλει πολυκριτηριακή προσέγγιση που να συνυπολογίζει φυσιογραφικές παραμέτρους, ανθρωπογενείς μετασχηματισμούς και γεωδυναμικά φαινόμενα, όπως η παράκτια καθίζηση σε Μεσολόγγι-Αιτωλικό Antoniadis et al. (2023).

### 3.3. Συλλογή και ανάλυση δεδομένων πεδίου

Οι πρόσφατες πλημμύρες υπογράμμισαν την αξία των πολυεπίπεδων δικτύων παρακολούθησης. Το πρότυπο υδρομετεωρολογικό δίκτυο της ερευνητικής ομάδας του ΕΜΠ κατέγραψε 229 ψηφιακά υδρογραφήματα σε πραγματικό χρόνο, επιτυγχάνοντας ακρίβεια εκτίμησης κορυφιαίας παροχής  $\pm 7\%$  Dimitriou et al. (2024). Παράλληλα, πειραματική διάταξη ανίχνευσης της ηλεκτρικής συνιστώσας επιφανείας κατέγραψε πρόδρομη μεταβολή  $\sim 1,8 \text{ mV m}^{-1}$  δύο ώρες πριν από το πρώτο κύμα στον Πηνειό, προσφέροντας εναλλακτικό δείκτη έγκαιρης προειδοποίησης Skordas et al. (2025).

Στο μέτωπο της τηλεπισκόπησης, οι διαβαθμίσεις ημερήσιων υετικών πεδίων που προτείνουν οι Koliou et al. (2024) βελτιστοποίησαν τη χωρική αναλυτικότητα σε  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , εξέλιξη κρίσιμη για τις ταχείες αποφάσεις εκκένωσης. Η αξιολόγηση της απόδοσης 13 δορυφορικών προϊόντων από τους Katsanos et al. (2024) κατέδειξε ότι συνδυασμός αισθητήρων IR/MW με χωρική διασύνδεση ραντάρ περιορίζει το σφάλμα χρονισμού κορυφής σε  $< 30 \text{ min}$ .

Για τις επιπτώσεις σε υποδομές, μεταγενέστερες αποτυπώσεις UAV αποκάλυψαν βλάβες σε 44 γέφυρες, επιτρέποντας την ταξινόμηση μηχανισμών κατάρρευσης σε τρεις κατηγορίες: υποσκαφή θεμελίων, διάρρηξη ανωδομής, υδραυλική επαφή φορέα Medentzidis et al. (2024). Η ενσωμάτωση των δεδομένων αυτών σε γεωκαταλόγους επιτρέπει συστηματική ανάλυση αλυσιδωτών επιπτώσεων (cascade effects) – από τις μετακινήσεις κατοίκων έως τις διακοπές εφοδιασμού Diakakis et al. (2025).

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία αναδεικνύει επίσης την αναγκαιότητα χρήσης ιστορικών χρονοσειρών ή σύγκριση παλαιών κατωφλίων ενεργοποίησης πλημμύρας Diakakis et al. (2012) με τα νέα δεδομένα των μεσογειακών κυκλώνων τεκμηριώνει τη μετατόπιση σε υψηλότερες ραγδαιότητες, ενώ η στατιστική ανάγνωση 1 457 περιστατικών (1970-2010) φανερώνει σαφή τάση αύξησης των ανθρωπίνων απωλειών σε αστικές περιφέρειες (Diakakis et al. (2017).

Τέλος, η ολοκλήρωση γεωμορφολογικών προσεγγίσεων Tzanakas et al. (2016) με πολυετή υδροκλιματικά αρχεία Koutsoyiannis et al. (2012) και αστικά GIS—όπως το χρονικά εκθετικό μοντέλο εξέλιξης πλημμυρών της Αθήνας Diakakis et al. (2014)—προσφέρει ένα συνεκτικό πλαίσιο «βέλτιστων πρακτικών» για τον σχεδιασμό νέων υποδομών παρακολούθησης στη Θεσσαλία. Η συνεκτική σύμμιξη in-situ αισθητήρων, τηλεπισκόπησης και καινοτόμων πομποδεκτών (π.χ. δασμογράφων ηλεκτρικού πεδίου) συγκροτεί τη βάση για ένα ολιστικό, πολυπαραμετρικό σύστημα έγκαιρης ειδοποίησης, ικανό να ανταποκρίνεται στα όλο και συχνότερα ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα της περιοχής.

<b>Δείκτης</b>	<b>«Ιανός» (16–19 Σεπ 2020)</b>	<b>«Daniel» (4–8 Σεπ 2023)</b>	<b>Κύριες πηγές</b>
<b>Μέγιστο 24-ωρο ύψος βροχής</b>	635 mm (Καρδίτσα)	754 mm (Ζαγορά)	Kolios et al. (2024)
<b>Μέγιστη ωριαία ένταση</b>	118 mm h <sup>-1</sup>	142 mm h <sup>-1</sup>	Katsanos et al. (2024)
<b>Εκτιμώμενος πλημμυρικός όγκος</b>	≈ 0,9 km <sup>3</sup>	≈ 1,3 km <sup>3</sup>	Dimitriou et al. (2024)
<b>Κατεστραμμένες γέφυρες</b>	15	44	Medentzidis et al. (2024)
<b>Ανθρώπινες απώλειες</b>	4	17	Mavroulis et al. (2024), Diakakis et al. (2025)
<b>Κύρια δευτερογενή φαινόμενα</b>	κατολισθήσεις, βλάβες ΔΕΔΔΗΕ	εκτεταμένη λίμναση, επιδημίες λεπτοσπείρωσης	Mavroulis et al. (2024)

**Πίνακας 1 - Συνοπτική ποσοτικοποίηση των κυκλώνων «Ιανός» (2020) και «Daniel» (2023) στη Θεσσαλία.**

### 3.4. Αιτίες για τις Πλημμύρες στους Κύκλωνες «Ιανός» (2020) και «Daniel» (2023)

Η εκδήλωση των ακραίων πλημμυρικών επεισοδίων κατά τους κυκλώνες «Ιανός» και «Daniel» προέκυψε από την πολύπλοκη αλληλεπίδραση μετεωρολογικών, υδρογεωμορφολογικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Κατανοώντας διεξοδικά τις αιτίες αυτών των πλημμυρών, μπορούμε να διαμορφώσουμε στοχευμένα μέτρα πρόληψης και διαχείρισης.

Αρχικά, οι μετεωρολογικές προϋποθέσεις υπήρξαν αποφασιστικές. Ο «Ιανός», που έπληξε κυρίως τη δυτική Ελλάδα τον Σεπτέμβριο 2020, αναπτύχθηκε ως βαρομετρικό βαροκλωνικό σύστημα (Vb cyclone) στη Μεσόγειο, εισάγοντας θερμό και υγρό αέρα από τη βόρεια Αφρική. Η συστηματική μεταφορά υγρασίας υποστηρίχθηκε από σταθερό μπλοκάρισμα στη βορειοδυτική Ευρώπη, το οποίο κράτησε την κακοκαιρία πάνω από την περιοχή για διάστημα άνω των 48 ωρών.



**Εικόνα 3 – Κακοκαιρία Ιανός – Υλικές ζημιές (πηγή: <https://hellasjournal.com/2022/06/o-mesogiakos-kiklonas-ianos-ke-i-sismi-tou-2021-allaxan-to-anaglifto-tis-thessalias/>).**

Εντός αυτού του πλαισίου, διαδοχικά μέτωπα καταιγίδων οργανώθηκαν γύρω από το ελάχιστο βαρομετρικό κέντρο, προκαλώντας επίμονες και έντονες βροχοπτώσεις με ρυθμούς που σε ορισμένες θέσεις ξεπέρασαν τα 100 mm/24 h, παραγάγοντας παρατεταμένο κορεσμό του εδάφους.

Στον αντίποδα, ο «Daniel» του Σεπτεμβρίου 2023 χαρακτηρίστηκε ως έναν μεσογειακό κυκλώνα (medicane) με τροπικά χαρακτηριστικά η δομή του περιλάμβανε στροβιλισμό με «μάτι» και συστήματα ομφαλού, παρόμοια με τυφώνες, μεταφέροντας εξαιρετικά υψηλά φορτία υγρασίας. Σύμφωνα με δορυφορικές μετρήσεις GPM/IMERG, τα ημερήσια ύψη βροχής έφτασαν ή υπερέβησαν τα 200 mm, δηλαδή περίπου 150 % πάνω από τα ιστορικά σχεδιαστικά όρια των τοπικών υποδομών Koliou et al. (2024).



**Εικόνα 4 - Κακοκαιρία Daniel - Υλικές ζημιές (πηγή: <https://www.parapolitika.gr/ellada/article/1575200/xeperasan-tis-2000-oi-adeies-episkeuis-ktirion-meta-tis-plimmures-apo-tin-kakokairia-daniel/>).**

Η συνεχής τροφοδοσία του «Daniel» από θερμές θαλάσσιες μάζες στο Ιόνιο Πέλαγος διατήρησε την ένταση των καταιγίδων για πάνω από τρεις ημέρες, δημιουργώντας μια «φούσκα» εξάτμισης–συμπύκνωσης που ενίσχυσε τις καταιγιδοφόρες γραμμές ξημερώματα και βράδυ, ακριβώς τη στιγμή που οι τοπικές αναχωματώσεις και τα κανάλια απορροής ήταν ήδη κορεσμένα.

Σε επίπεδο υδρογεωμορφολογίας, οι ιδιαιτερότητες των λεκανών απορροής της Θεσσαλίας επιδείνωσαν τις επιπτώσεις. Οι πολύ απότομες κλίσεις και ο περιορισμένος χρόνος διαδρομής καθήλωσαν τα νερά σε στενούς «διαδρόμους» και χειμάρρους, επιταχύνοντας την αιχμή παροχής. Αναλυτικές προσομοιώσεις GIS στην κοίτη έχουν καταδείξει ότι σε περιοχές με αντίστοιχα γεωμετρικά χαρακτηριστικά οι ρυθμοί αιχμής μπορούν να τριπλασιαστούν σε σχέση με τις φυσιολογικές τιμές Tzanakas et al. (2016). Παράλληλα, η υψηλή προϋπάρχουσα υγρασία – ακριβώς πριν από την άφιξη και των δύο κυκλώνων – οφείλεται σε παρατεταμένες βροχοπτώσεις τους μήνες Ιούλιο–Αύγουστο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τον κορεσμό του ανώτερου στρώματος του εδάφους και σε συνδυασμό με την ένταση των βροχών είχε ως αποτέλεσμα να ελαχιστοποιηθεί η δυνατότητα διήθησης, οδηγώντας σε πολύ υψηλούς συντελεστές απορροής.

Σημαντικό ρόλο έπαιξαν οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και η χρήση γης. Στις παράκτιες και πεδινές ζώνες των περιοχών, η αδιάκριτη δόμηση, συχνά εντός των οριογραμμών των χειμάρρων, μείωσε την αποτελεσματική έκταση ζωνών πλημμυρικής αποφόρτισης. Η μελέτη για την περίπτωση της Μάνδρας το 2017 έχει ήδη αναδείξει πως η κατάργηση των ζωνών προστασίας κατά μήκος ρεμάτων και η κατασκευή αυθαίρετων κατασκευών πάνω σε κανάλια περιορίζει δραματικά την ελεύθερη ροή των νερών και επιταχύνει τον καταστροφικό παροξυσμό Soulios et al. (2018). Στην περίπτωση του «Daniel», η κατάσταση επιδεινώθηκε από τη φθορά μικρών αναχωμάτων και φραγμάτων, τα οποία είχαν ήδη υποστεί μικροβλάβες από προηγούμενες καταιγίδες.

Άλλος κρίσιμος παράγοντας ήταν η επάρκεια και αξιοπιστία των δικτύων παρακολούθησης και έγκαιρης προειδοποίησης. Η ανασκόπηση του ακραίου γεγονότος «Daniel» από τους Dimitriou et al. (2024) ανέδειξε ότι, παρά την ύπαρξη state-of-the-art αισθητήρων παροχής και στάθμης στο δίκτυο ποταμών της Θεσσαλίας, οι πληροφορίες δεν συλλέχθηκαν ή δεν διαβιβάστηκαν έγκαιρα στις τοπικές υπηρεσίες πολιτικής προστασίας. Ως αποτέλεσμα, κρίσιμες προειδοποιήσεις έχασαν το πραγματικό τους νόημα μεταξύ εθνικών

και δημοτικών φορέων, γεγονός που περιορίσε σημαντικά τον χρόνο αντίδρασης των κοινοτήτων.

Τέλος, η έννοια των «cascade effects»—αλυσιδωτές αστοχίες που πυροδοτούν νέες πλημμυρικές εξάρσεις—έπαιξε καταλυτικό ρόλο στον «Daniel». Όπως σημειώνουν οι Diakakis et al. (2025), η πρώτη υπερχείλιση μικρών φραγμάτων σε ανάντι τμήματα προκάλεσε ξαφνική αύξηση παροχής σε χαμηλότερες ζώνες, οδηγώντας σε δευτερογενείς καταστροφές σε δίκτυα αγωγών και υποδομών αποστράγγισης. Αυτή η αλληλουχία αστοχιών πολλαπλασίασε τον όγκο και την ταχύτητα του νερού, αυξάνοντας κατακόρυφα τις ζημιές σε γεωργικές εκτάσεις, οδικές αρτηρίες και οικισμούς.

Συμπερασματικά, οι πλημμύρες των κυκλώνων «Ιανός» και «Daniel» προήλθαν από συσσωρευμένες μετεωρολογικές συνθήκες εξαιρετικής έντασης, δυσμενών γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και κρίσιμων ελλείψεων στη διαχείριση του χώρου και των υποδομών. Η διεξοδική μελέτη αυτών των αιτίων, όπως υποστηρίζουν οι Kolios et al. (2024), Tsanakas et al. (2016), Soulios et al. (2018), Spyrou et al. (2020), Dimitriou et al. (2024) και Diakakis et al. (2025), είναι αναγκαία προϋπόθεση για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων στρατηγικών μείωσης κινδύνου, που θα συνδυάζουν τεχνικά έργα, φυσικές υποδομές και συστήματα nowcasting. Μόνο με αυτόν τον τρόπο, θα επιτευχθεί η έγκαιρη προειδοποίηση, θα ελεγχθούν οι ακραίες παροχές και θα αναβαθμιστεί η ανθεκτικότητα των τοπικών κοινοτήτων.

Κατηγορία Αιτίας	Περιγραφή	Παράδειγμα / Στοιχεία
<b>Μετεωρολογικοί παράγοντες</b>	Ακραίες, επίμονες βροχοπτώσεις λόγω βαρομετρικών διαμορφώσεων (Vb cyclone στον «Ιανό», medicane με «μάτι» στον «Daniel»)	«Ιανός»: > 100 mm/24 h για > 48 h σε Δυτ. Ελλάδα. «Daniel»: > 200 mm/ημέρα με διαδοχικά κύματα καταιγιδοφόρων γραμμών
<b>Υδρογεωμορφολογικοί παράγοντες</b>	Απότομες κλίσεις, στενοί χείμαρροι και κορεσμένα εδάφη που επιταχύνουν την αιχμή παροχής	Χιrolaki: αιχμές έως τριπλάσιες των φυσιολογικών κορεσμός εδάφους Ιούλιος–Αύγουστος προκαλεί ελάχιστη διήθηση

Κατηγορία Αιτίας	Περιγραφή	Παράδειγμα / Στοιχεία
<b>Ανθρωπογενείς παρεμβάσεις</b>	Αυθαίρετη δόμηση στις κοίτες, μείωση διαπερατότητας αστικών/αγροτικών εδαφών, φθαρμένα αντιπλημμυρικά έργα	Υποχώρηση ζωνών πλάτους παλαιών αναχωμάτων κατάργηση προστατευτικών ζωνών στην περίπτωση Μάνδρας (2017)
<b>Παρακολούθηση – Ειδοποίηση</b>	Ελλιπής ή καθυστερημένη μετάδοση μετρήσεων παροχής–στάθμης από state-of-the-art δίκτυα αισθητήρων	Θεσσαλία 2023: αισθητήρες κατέγραψαν άνοδο στάθμης, αλλά οι προειδοποιήσεις δεν διαβιβάστηκαν εγκαίρως
<b>Cascade effects</b>	Αλυσιδωτές αστοχίες: υπερχείλιση μικρών φραγμάτων προκαλεί δευτερογενείς πλημμυρικές αιχμές σε κατώτερα τμήματα	Σειρά διαδοχικών αστοχιών φραγμάτων στον «Daniel» οδήγησε σε πολλαπλασιασμό όγκου νερού και ταχύτητας παροχής
<b>Nowcasting &amp; early warning</b>	Ανάγκη έγκαιρης ανίχνευσης μείωσης διαύγειας και αύξησης παροχής μέσω real-time υδρομετεωρολογικών συστημάτων	Σύστημα Μάνδρας (2020): radar-based πτώση διαύγειας και πρόβλεψη flash floods βελτίωσε την ανταπόκριση κατά ~2–3 h

**Πίνακας 2 - Κύριες κατηγορίες αιτίων για τις πλημμύρες των κυκλώνων «Ιανός» (2020) και «Daniel» (2023).**

Ο παραπάνω πίνακας 2 υποδεικνύει έξι βασικές κατηγορίες παραγόντων που συνδυαστικά οδήγησαν στις ακραίες πλημμύρες των κυκλώνων «Ιανός» και «Daniel». Κάθε κατηγορία συμβάλλει με διαφορετικό τρόπο και σε διαφορετικό επίπεδο στο συνολικό αποτέλεσμα:

1. **Μετεωρολογικοί παράγοντες:** Οι ασυνήθιστα έντονες και επίμονες βροχοπτώσεις αποτέλεσαν την άμεση αφετηρία των πλημμυρών. Στον «Ιανό» είχαμε διαδοχικά μέτωπα καταιγίδων που κορεσμούσαν σταδιακά το έδαφος, ενώ στον «Daniel» η δομή

medicane με «μάτι» τροφοδοτούσε συνεχώς θερμές, υγρές αέριες μάζες, προκαλώντας ημερήσια ύψη βροχής > 200 mm. Αυτοί οι μετεωρολογικοί μηχανισμοί υπερέβησαν κατά πολύ τα ιστορικά σχεδιαστικά όρια των τοπικών υποδομών, καθιστώντας αναποτελεσματικά τα παραδοσιακά αντιπλημμυρικά έργα Kolios et al. (2024).

2. **Υδρογεωμορφολογικοί παράγοντες:** Οι γεωμορφολογικές ιδιαιτερότητες—απότομες κλίσεις, στενοί χειμάρροι, περιορισμένες ζώνες απορροής—επιτάχυναν τη μετατροπή της βροχής σε ακραίες παροχές. Μελέτες σε ανάλογες λεκάνες δείχνουν ότι η ακραία παροχή μπορεί να είναι έως και τριπλάσια των φυσιολογικών τιμών όταν το έδαφος είναι ήδη κορεσμένο Tsanakas et al. (2016).
3. **Ανθρωπογενείς παρεμβάσεις:** Η αυθαίρετη δόμηση κατά μήκος κοίτης χειμάρρων, η άναρχη χρήση γη που μειώνει τη διαπερατότητα και η κακή συντήρηση παλιών αναχωμάτων αύξησαν την ευπάθεια. Η κατάργηση των προστατευτικών ζωνών στην περίπτωση της Μάνδρας το 2017 είχε ήδη δείξει τις καταστροφικές συνέπειες όταν μειώνονται οι φυσικές λεκάνες πλημμυρικής αποφόρτισης Soulios et al. (2018). Στην περίπτωση του Κυκλώνα Ιανού, οι παρεμβάσεις αυτές συνέβαλαν στην σοβαρότητα των πλημμύρων στην Θεσσαλία: πολλαπλές κατασκευές εντός πλημμυρικών ζωνών και σε μη διαμορφωμένα ρέματα έγιναν οι μεγαλύτερες ζημιές. Παρόμοια, στον Daniel, οι συνδυασμένες επιπτώσεις ανθρώπινων παρεμβάσεων με τις ακραίες βροχοπτώσεις οδήγησαν σε ακόμα πιο εκτεταμένες πλημμύρες και ζημιές, φέρνοντας στο προσκήνιο την ανάγκη βελτίωσης της διαχείρισης γης, προστασίας των φυσικών λεκανών αποφόρτισης και ουσιαστικών αντιπλημμυρικών παρεμβάσεων στην Θεσσαλία.
4. **Παρακολούθηση – Ειδοποίηση:** Παρά την ύπαρξη σύγχρονων δικτύων αισθητήρων παροχής και στάθμης, οι πληροφορίες δεν ελήφθησαν ή δεν διαβιβάστηκαν εγκαίρως στις αρμόδιες αρχές. Στη Θεσσαλία, κρίσιμα σήματα συναγερμού έχασαν το πραγματικό τους νόημα μεταξύ εθνικών και δημοτικών φορέων, επιδεινώνοντας την καθυστέρηση αντίδρασης των κοινοτήτων Dimitriou et al. (2024).
5. **Cascade effects:** Οι «αλυσιδωτές» αστοχίες μικρών φραγμάτων, αναχωμάτων και τεχνικών έργων έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ένταση των πλημμύρων τόσο στον Ιανό όσο και στον Daniel. Κατά την διάρκεια των ακραίων βροχοπτώσεων, η διαδοχική υπερχειλίση ή κατάρρευση μικρών ταμιευτήρων και αναχωμάτων προκάλεσε την απότομη απελευθέρωση συσσωρευμένων υδάτων. Αυτό οδήγησε σε πολλαπλασιασμό

του όγκου και της ταχύτητας της ροής, δημιουργώντας πλημμυρικές αιχμές σε χαμηλότερα τμήματα των λεκανών απορροής. Στην Θεσσαλία, ιδιαίτερα στο Daniel, το φαινόμενο αυτό μετέτρεψε τοπικές πλημμύρες σε εκτεταμένη καταστροφή πεδιάδας, καθώς τα νερά που απελευθερώνονταν διαδοχικά κατέκλυζαν οικισμούς, αγροτικές εκτάσεις και υποδομές. Στον Ιανό, αν και πιο περιορισμένης κλίμακας, η ίδια δυναμική συνέβαλε στη ραγδαία αύξηση της πλημμυρικής παροχής, επιδεινώνοντας τις ζημιές. Diakakis et al. (2025).

6. **Nowcasting & early warning:** Τα συστήματα nowcasting—όπως το radar-based σύστημα το οποίο υπάρχει στην Μάνδρα μπορεί να βοηθήσει και στις περιπτώσεις Ιανού και του Daniel. Δηλαδή, μπορούν να υπολειτουργήσουν ως μηχανισμοί μετριάσμου του κινδύνου, όχι λόγω έλλειψης μετεωρολογικών δεδομένων, αλλά εξαιτίας της ανεπαρκούς μετατροπής της πρόγνωσης σε έγκαιρη και κατανοητή δράση. Παρότι υπήρχαν προειδοποιήσεις για ακραία φαινόμενα, η χωρική και χρονική εξειδίκευση των μηνυμάτων δεν ήταν πάντα επαρκής ώστε να ενεργοποιήσει έγκαιρα εκκενώσεις, προστασία υποδομών ή απομάκρυνση πολιτών από πλημμυρικές ζώνες. Spyrou et al. (2020).

Ο πίνακας 2 τονίζει ότι η αντιμετώπιση των ακραίων πλημμυρών απαιτεί ολιστική προσέγγιση: η μείωση κινδύνου δεν επιτυγχάνεται μόνο με τεχνοκρατικές παρεμβάσεις ή βελτίωση της μετεωρολογικής πρόγνωσης, αλλά και με συνεκτικό σχεδιασμό χωρικής χρήσης γης, συστήματα έγκαιρης ενημέρωσης και κατανομημένη στρατηγική συντήρησης υποδομών. Αυτό το διεπιστημονικό πλαίσιο θα καθοδηγήσει την ανάπτυξη στοχευμένων μέτρων και θα ενισχύσει την ανθεκτικότητα των τοπικών κοινοτήτων.

#### 4. Αιτίες Πλημμυρικών Φαινομένων

Οι πρόσφατες καταστροφικές πλημμύρες στη Θεσσαλία κατέδειξαν ότι η γένεση και η κλιμάκωση των υδατικών κινδύνων συνιστούν αποτέλεσμα σύνθετης αλληλεπίδρασης φυσικών διεργασιών, ανθρωπογενών μεταβολών και μακροκλιματικών τάσεων. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται διεξοδικά οι τρεις βασικοί άξονες αιτιότητας, με έμφαση στην τεκμηρίωση που παρέχει η σύγχρονη ελληνική και διεθνής βιβλιογραφία.

##### 4.1. Φυσικές παράμετροι (ένταση βροχόπτωσης, γεωμορφολογία)

Η βασικότερη φυσική παράμετρος που πυροδοτεί πλημμυρικά επεισόδια είναι η υετική ραγδιότητα. Η ανάλυση του κυκλώνα «Daniel» έδειξε τιμές ημερήσιου ύψους έως 754 mm στη Ζαγορά, με κορυφαία ωριαία ένταση που υπερέβη κατά 240 % τα τοπικά κατώφλια ενεργοποίησης πλημμύρας που είχαν προταθεί παλαιότερα για την Ελλάδα Diakakis et al. (2012). Παράλληλα, η διασταύρωση εδαφικών μετρήσεων και δορυφορικών προϊόντων GPM/IMERG κατέδειξε συστηματική υποεκτίμηση των κορυφών κατά 30–35 %, γεγονός που επισημαίνει την ανάγκη για τοπική βαθμονόμηση και πυκνότερα δίκτυα ανίχνευσης Katsanos et al. (2024).

Ωστόσο, η υπέρβαση της φέρουσας ικανότητας των κοιτών δεν εξαρτάται μόνο από το υετικό φορτίο. Η γεωμορφολογία ρηγμάτων και ο ποικιλόμορφος αναγλυφικός κατακερματισμός της Θεσσαλίας δημιουργούν λεκάνες μικρού χρόνου συγκέντρωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο παραπόταμος Ξηρολάκι, όπου ο συντελεστής κορυφαίας παροχής ( $C > 0,8$ ) συνδέθηκε άμεσα με τις δυσμενείς κλίσεις και τη στενή κοίτη Tzanakas et al. (2016). Σε μεγαλύτερη κλίμακα, η χωροχρονική ανάλυση 60 ετών πλημμυρικών καταγραφών στον Πηνειό επιβεβαίωσε ότι οι πεδινές, χαμηλής κλίσης εκτάσεις αποτελούν φυσική λεκάνη συλλογής και λειτουργούν ως εσωτερική λιμνοδεξαμενή κατά τα ακραία γεγονότα Bathrellos et al. (2018).

Στους παράκτιους τομείς, η επικάλυψη υετικών κορυφών με καταιγιστικούς κυματισμούς και ανύψωση στάθμης θάλασσας επιδεινώνει τη ροή παλινδρομισμού. Η μελέτη του «Ιανού» αποκάλυψε μέγιστες υποθαλάσσιες ταλαντώσεις άνω των 0,6 m στον Βόρειο Ευβοϊκό, οι οποίες εμπόδισαν την εκροή ποταμών και προκάλεσαν ανάστροφη ροή Androulidakis et al. (2023). Στην ίδια λογική, φαινόμενα καθίζησης εδαφών έως 5 cm  $yr^{-1}$  στην ανατολική Θεσσαλία διευρύνουν τις φυσικές λεκάνες κατάκλυσης, αυξάνοντας το βάθος λίμνασης Antoniadis et al. (2025).

Τέλος, η μακροχρόνια στατιστική επισκόπηση των σοβαρών καιρικών συμβάντων έδειξε σαφή μετατόπιση προς συχνότερες και εντονότερες υετογενείς διαταραχές μετά το 1990, εξέλιξη που συνδέεται με θετικές τάσεις θερμοκρασίας και αυξημένη υγρασιακή ροή από τη Μεσόγειο Kotroni etal. (2025). Η αλληλεξάρτηση ακραίας ραγδαιότητας και δυσμενών γεωμορφολογικών ιδιοτήτων, επομένως, συγκροτεί την πρώτη κρίσιμη συνιστώσα του πλημμυρικού κινδύνου.

Άξονας αιτιότητας	Παράγοντες-κλειδί	Ενδεικτικά ευρήματα για Θεσσαλία	Χαρακτηριστικές αναφορές
<b>Φυσικοί</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υετική ραγδαιότητα</li> <li>• Απότομες κλίσεις υπολεκανών</li> <li>• Παράκτια κυματική υπερύψωση</li> </ul>	Ραγδαιότητες > 240 % των ιστορικών ορίων στενές κοίτες ( $C > 0,8$ ) στον Επιπέα storm surge 0,6 m στον Παγασητικό	Diakakis etal. (2012), Tsanakas etal. (2016), Androulidakis etal. (2023)
<b>Ανθρωπογενείς</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αύξηση αδιαπέρατων επιφανειών</li> <li>• Γήρανση &amp; υποδιαστασιολόγηση γεφυρών</li> <li>• Εδαφική καθίζηση από υπεράντληση</li> </ul>	+28 % αστικοποίησης (1990–2020) 67 % γεφυρικών αστοχιών λόγω υποσκαφής· καθίζηση έως $5 \text{ cm yr}^{-1}$	Diakakis etal. (2014), Medentzidis etal. (2024), Antoniadis etal. (2025)
<b>Κλιματική μεταβολή</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Θέρμανση θαλάσσιας επιφάνειας</li> <li>• Αύξηση συχνότητας κυκλοφορικού τύπου «NA χαμηλό»</li> <li>• Άνοδος μέσης στάθμης θάλασσας</li> </ul>	+25 % εμφάνισης επικίνδυνων τύπων μετά 2000· άνοδος SLR $\approx 3 \text{ mm yr}^{-1}$ επιτείνει παλινδρομισμό ποταμών	Tolika etal. (2023), Kotroni etal. (2025), Angelakis etal. (2020)

**Πίνακας 3 - Πολυπαραγοντικές αιτίες πλημμυρικού κινδύνου στη Θεσσαλία.**

## 4.2. Ανθρωπογενείς παράγοντες

Παρότι οι φυσικοί μηχανισμοί εξηγούν το υδρολογικό δυναμικό, ο βαθμός καταστροφής καθορίζεται σε μεγάλο ποσοστό από τις ανθρώπινες παρεμβάσεις. Η ταχεία μετεξέλιξη των περιαστικών ζωνών της Καρδίτσας και της Λάρισας με αύξηση των αδιαπέρατων επιφανειών κατά 28 % μεταξύ 1990–2020 μετατόπισε τους χρόνους αποστράγγισης σε κλίμακες < 30 min, περιορίζοντας δραστικά την προειδοποίηση Diakakis et al. (2014). Η εμπειρία της Μάνδρας (2017) επιβεβαίωσε ότι ακόμη και μέτριες βροχοπτώσεις μπορεί να είναι φονικές όταν τα ρέματα έχουν επιχωθεί ή όταν το πλάτος τους έχει περιοριστεί σε < 7 m Soulios et al. (2018).

Η ευθραυστότητα των τεχνικών έργων φάνηκε ανάγλυφη στις καταρρεύσεις 44 γεφυρικών ανοιγμάτων μετά τον «Daniel». Ανασκόπηση των αστοχιών έδειξε ότι το 67 % οφειλόταν σε παθογένειες που συνδέονται με ανεπαρκή διατομή διόδευσης νερού και γήρανση υλικών Medentzidis et al. (2024). Η αλυσιδωτή παύση κυκλοφορίας στον οδικό άξονα ΠΑΘΕ προκάλεσε, πέραν των άμεσων οικονομικών ζημιών, διασπορά κινδύνου λόγω καθυστερημένης πρόσβασης υπηρεσιών διάσωσης Medentzidis et al. (2025).

Ορισμένες υποβόσκουσες διεργασίες, όπως η σταδιακή καθίζηση λόγω υπεράντλησης υδροφορέων, πολλαπλασιάζουν την τρωτότητα οι χρονοσειρές InSAR κατέδειξαν κάθοδο εδάφους > 15 cm σε τριακονταετία στην παραλιακή ζώνη Φαρσάλων–Βελεστίνου, γεγονός που αυξάνει τη συχνότητα υπερχειλίσεων αναχωμάτων Antoniadis et al. (2025). Στον ίδιο άξονα, η έλλειψη συντήρησης αρδευτικών τάφρων και η συσσώρευση φερτών υλών περιόρισαν κατά 40 % την υδραυλική χωρητικότητα, ενώ η αυθαίρετη αποκοπή φυσικών πλημμυρικών λεκανών από αναχωματικές παρεμβάσεις μετέφερε τον κίνδυνο στα κατάντη.

Η ανάλυση των «μετασταθμών αλυσιδωτών επιπτώσεων» που εκπόνησαν οι Diakakis et al. (2025) καταδεικνύει ότι η αποτυχία υποδομών ενέργειας και επικοινωνιών συνέβαλε σε εκθετική αύξηση των κοινωνικών και οικονομικών απωλειών. Οι διακοπές ρεύματος διέκοψαν τη λειτουργία αντλιοστασίων και δευτερογενώς καθυστέρησαν την απάντηση, ενώ η πτώση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας εμπόδισε τη γεωεντοπισμένη κοινοποίηση εντολών εκκένωσης. Με άλλα λόγια, ο ανθρωπογενής παράγοντας δεν περιορίζεται στην υλική μεταβολή του εδάφους επεκτείνεται στον τρόπο οργάνωσης και αλληλεξάρτησης κρίσιμων υποδομών.

### 4.3. Συμβολή κλιματικής αλλαγής

Το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής δρα ως πολλαπλασιαστής υετικών ακραίων. Η πρόσφατη μετατόπιση της εποχικότητας πλημμυρών προς νωρίτερο φθινοπωρινό μέγιστο, σε αντιδιαστολή με το παραδοσιακό δίπολο άνοιξης–φθινοπώρου, καταγράφεται στα μακροσκοπικά στατιστικά σειρών 1970–2020 Diakakis et al. (2017). Τα ίδια δεδομένα αναδεικνύουν αύξηση της έντασης κατά ~10 % ανά δεκαετία στα άνω δεκατημόρια κατανομής 24ωρης βροχής. Αντίστοιχα, οι Kotroni et al. (2025) τεκμηριώνουν με κλιματικές επαναanalύσεις ότι ο μηχανισμός «Saharan Air Layer intrusion», σε συνδυασμό με θερμές θαλάσσιες επιφάνειες στο Αιγαίο, αυξάνει τη δυνητική υγρασιακή μεταφορά (IVT) κατά 15–20 % σε ακραία επεισόδια τύπου medicane.

Σε ευρύτερο χρονικό ορίζοντα, η ιστοριογραφική ανασκόπηση των Angelakis et al. (2020) δείχνει ότι, παρά τη μακραίωνη παρουσία πλημμυρών στην Ελλάδα, οι μεταπολεμικές δεκαετίες σηματοδότησαν στροφή από ποτάμιες σε ενδοαστικές πλημμύρες, εξέλιξη που αποδίδεται στην ταχεία αστικοποίηση και στη μεταβολή βροχοκλιματικών μοτίβων. Συμπληρωματικά, οι Koutsoyiannis et al. (2012) ανέδειξαν αύξηση της αβεβαιότητας στη στατιστική προσαρμογή ακραίων τιμών, υποστηρίζοντας ότι οι υποθέσεις στάσιμων κατανομών δεν επαρκούν πλέον για τη διάσταση σχεδιασμού.

Οι πρόσφατες ατμοσφαιρικές κατατάξεις αποκαλύπτουν ότι ο κυκλοφορικός τύπος «NA βαρομετρικό χαμηλό στην ανώτερη τροπόσφαιρα» σχετίζεται με τα εντονότερα πλημμυρικά επεισόδια Tolika et al. (2023). Η στατιστική του συχνότητα εμφάνισης παρουσιάζει αύξηση κατά 25 % μετά το 2000, γεγονός που παραπέμπει σε μακροκλιματική αναδιοργάνωση. Η σύζευξη της συγκεκριμένης κυκλοφορίας με θερμό, υγρό περιβάλλον επιφάνειας θάλασσας ενισχύει τη σύγκλιση χαμηλών επιπέδων και προάγει τη γένεση μεσογειακών κυκλωνικών συστημάτων.

Σημαντικό είναι, τέλος, ότι η κλιματική μεταβολή δεν δρα μόνο επί της βροχόπτωσης. Η άνοδος της μέσης θαλάσσιας στάθμης κατά ~3 mm yr<sup>-1</sup> ενισχύει την υπερχειλίση των ποταμών παράκτιων πεδιάδων, ενώ η αύξηση της έντασης θυελλωδών κυματισμών αυξάνει τον κίνδυνο καταστροφής αναχωμάτων οι συνέπειες γίνονται φανερές στον υπήνεμο Βόλο και στις εκβολές του Πηνειού κατά τη διάρκεια του «Daniel» Androulidakis et al. (2023). Με άλλα λόγια, η κλιματική αλλαγή λειτουργεί ως παράγοντας *συναρμογής* των υπόλοιπων αιτιών, ενισχύοντας τόσο τη φάση γένεσης όσο και την έκταση των καταστροφών.

## 5. Συνέπειες Πλημμυρών

### 5.1. Οικονομικές υποδομές

Οι πλημμύρες που προκάλεσαν οι κύκλωνες «Ιανός» (Σεπτέμβριος 2020) και «Daniel» (Σεπτέμβριος 2023) προκάλεσαν εκτεταμένες βλάβες σε κρίσιμες οδικές και σιδηροδρομικές αρτηρίες της Θεσσαλίας, με άμεσες δαπάνες αποκατάστασης που υπερέβησαν τα 75 εκατ. € μόνο για γέφυρες και γεωργικά δίκτυα Medentzidis et al. (2024) , Tsenis et al. (2025). Η εντατική υδραυλική φόρτιση στα θεμέλια υπέσκαψε τις βάσεις πολλών κατασκευών, επιφέροντας αστοχίες σε στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα ηλικίας άνω των 30 ετών, για τα οποία οι σχεδιαστικές προδιαγραφές δεν προέβλεπαν ακραίες παροχές που καταγράφηκαν κατά το «Daniel» Ruronen et al. (2022).

Παράλληλα, η διακοπή λειτουργίας του δικτύου άρδευσης για 4–6 εβδομάδες είχε ως αποτέλεσμα μείωση της παραγωγής βαμβακιού κατά 18 % στις καλλιέργειες του κάμπου, ενώ οι καθυστερήσεις στη συγκομιδή καλαμποκιού οδήγησαν σε επιπλέον απώλειες ύψους 12 εκατ. € για τους παραγωγούς Kotroni et al. (2025). Οι επισκευαστικές επεμβάσεις χρειάστηκαν ειδικές μελέτες υδραυλικής μηχανικής και ανασχεδιασμό γεφυρών με διεπιστημονική προσέγγιση από το χώρο των water-flooding μοντέλων σε PEM κυψέλες καυσίμου, προκειμένου να βελτιωθεί η κατεύθυνση ροής και η αντοχή των υλικών σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις Kong et al. (2022) και Samanpour et al. (2022).

Σε μακροχρόνια βάση, η αύξηση της συχνότητας ακραίων γεγονότων αυξάνει την πίεση στον κρατικό προϋπολογισμό μέσω της ανάγκης προληπτικής συντήρησης, όπως επισημαίνουν οι Kotroni et al. (2025), αλλά και των ασφαλιστικών πακέτων που πλέον περιλαμβάνουν υψηλότερα ασφάλιστρα για έργα υποδομών υδάτινων δικτύων, όταν οι συμβάσεις δεν καλύπτουν ρητώς φθορές από κλιματική μεταβολή Koutsoyiannis et al. (2012). Οι επενδύσεις σε τεχνολογίες ψηφιακής παρακολούθησης φορτίων και ευφύων αισθητήρων προτείνονται ως μέτρα μείωσης του κόστους έκτακτων επισκευών κατά τουλάχιστον 20 % τα επόμενα πέντε έτη, βάσει υπολογισμών κόστους-οφέλους σε παρόμοιες μελέτες για το 2020–2023 Medentzidis et al. (2025).

<b>Παράμετρος</b>	<b>Περιγραφή Συνέπειας</b>	<b>Μέθοδος Διάγνωσης / Εκτίμησης</b>
<b>Ζημίες σε γεφυρικές κατασκευές</b>	Άμεσες δαπάνες αποκατάστασης υπερβαίνουν τα 75 εκ. € για γέφυρες και κύριες αρτηρίες μετά τον «Ιανό» και τον «Daniel»	Οικονομοτεχνικές μελέτες κόστους-οφέλους, καταγραφή επιθεωρήσεων, συγκριτική ανάλυση προδιαγραφών
<b>Εκτροπή και φθορά οδικών δικτύων</b>	Διακοπές κυκλοφορίας οδήγησαν σε απώλειες εφοδιαστικών αλυσίδων και πρόσθετο κόστος μεταφορών	GIS χαρτογράφηση κλειστών τμημάτων, ποσοτικοποίηση καθυστερήσεων
<b>Μειωμένη αγροτική παραγωγή</b>	Μείωση παραγωγής βαμβακιού κατά 18 % και απώλεια ~12 εκ. € από καθυστερημένη συγκομιδή καλαμποκιού	Στατιστική ανάλυση αποδόσεων σε σύγκριση με προηγούμενα έτη, έρευνα πεδίου
<b>Αύξηση κόστους συντήρησης</b>	Ασφάλιστρα έργων υδάτινων δικτύων αυξήθηκαν όταν οι συμβάσεις δεν κάλυπταν ζημίες από ακραία φαινόμενα	Ανασκόπηση ασφαλιστικών όρων, ανάλυση μεταβολών στα ασφάλιστρα

Παράμετρος	Περιγραφή Συνέπειας	Μέθοδος Διάγνωσης / Εκτίμησης
<b>Διεπιστημονικές λύσεις</b>	Εφαρμογή μοντέλων flooding από REM κυψέλες καυσίμου για βελτίωση σχεδιασμού υποδομών και μείωση μελλοντικών επισκευών	Προσομοιώσεις CFD, συγκριτική μελέτη κόστους-οφέλους μετά την υιοθέτηση καινοτομιών

**Πίνακας 4 – Οικονομικές Υποδομές.**

## 5.2 Περιβαλλοντικές υποδομές

Οι φυσικές υποδομές—όπως αναχωμάτια ποταμών, υγράτοποι, ζώνες πρόβλεψης πλημμύρας—υπέστησαν σοβαρές μεταβολές στη δομή και τη λειτουργία τους. Κατά το πέρασμα του «Daniel», οι δορυφορικές μετρήσεις GPM/IMERG κατέγραψαν βροχοπτώσεις άνω του 200 mm/ώρα, ξεπερνώντας κατά 160 % τις αντοχές των παραδοσιακών αναχωμάτων Koliou et al. (2024). Η συσσώρευση υλίου στα υδροτοπικά οικοσυστήματα αυξήθηκε κατά 45 %, μειώνοντας τη δυνατότητά τους να λειτουργούν ως φυσικά φίλτρα καθαρισμού υδάτων και προκαλώντας υδρόβια στρες σε τοπικά είδη Varlas et al. (2018).

Τηλεπισκοπικές αναλύσεις σε λεκάνες απορροής έδειξαν ότι σε περιοχές όπου είχαν γίνει αυθαίρετες παρεμβάσεις με αγνώστου ποιότητας υλικά, ο ρυθμός αιχμής πλημμυρικής παροχής εκτοξεύτηκε έως και στα 1 200 m<sup>3</sup>/s, τριπλάσιο των φυσιολογικών επιπέδων Tsanakas et al. (2016). Παράλληλα, η επεξεργασία radar-based δεδομένων μεθόδων nowcasting κατέδειξε μείωση διαύγειας κατά 60 % εντός τριών ωρών προ της κορύφωσης, δίνοντας πολύτιμο χρόνο για μηχανικές παρεμβάσεις σε μικρές λεκάνες Spyrou et al. (2020).

Η καταγραφή μεταβολών στην επιφανειακή ηλεκτρική αγωγιμότητα ως φυσικού προγνωστικού δείκτη ανίχνευσης εισροής υδάτων επιβεβαιώθηκε από μετρήσεις των Skordas et al. (2025), ενώ οι μακροχρόνιες στατιστικές σειρές δείχνουν τάση για αύξηση της πτώσης βροχής πάνω από τα 100 mm/ημέρα, δηλαδή κατά 30 % από το 1980 έως σήμερα Koutsogiannis et al. (2012), Tsanis et al. (2010). Ως αποτέλεσμα, προτείνεται η διεύρυνση των

ζωνών αποθήκευσης νερού και η αποκατάσταση υγροτόπων με φυσικές υδραυλικές λύσεις (green infrastructure), ώστε να αυξηθεί η αποθηκευτική ικανότητα και να μειωθεί το ιζηματογόνο φορτίο.

<b>Παράμετρος</b>	<b>Περιγραφή Συνέπειας</b>	<b>Μέθοδος Διάγνωσης / Εκτίμησης</b>
<b>Επίδραση σε αναχωμάτια ποταμών</b>	Υπερφόρτωση και ψαθυροποίηση πρανών – αντοχή οριοθετήσεων ξεπέρασε σχεδιαστικά όρια κατά 160 %	Δορυφορική χαρτογράφηση GPM/IMERG, GIS–γεωμορφολογική ανάλυση
<b>Αύξηση ιζηματογόνου φορτίου</b>	Αύξηση απόθεσης ιλύος κατά 45 % στους υγροτόπους, μείωση αυτοκαθαριστικής ικανότητας	Τηλεπισκόπηση (Multi-platform hydromet), δειγματοληψίες πεδίου
<b>Εκτοξευμένη πλημμυρική παροχή</b>	Ρυθμοί αιχμής έως 1 200 m <sup>3</sup> /s (τριπλάσιοι των φυσιολογικών), λόγω αυθαίρετων παρεμβάσεων	GIS ανάλυση λεκάνης απορροής, υδρολογική προσομοίωση
<b>Μείωση διαύγειας νερών</b>	Πτώση διαύγειας κατά 60 % πριν την κορύφωση, ως προειδοποιητικό σήμα επικείμενης εισροής	Radar-based nowcasting, μετρήσεις επιφανειακής ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Παράμετρος	Περιγραφή Συνέπειας	Μέθοδος Διάγνωσης / Εκτίμησης
<b>Προτάσεις green infrastructure</b>	Ανάπλαση υγροτόπων, πράσινες ζώνες και αναδασώσεις για αύξηση φυσικής αποθήκευσης και μείωση ιζηματογόνου φορτίου	Σχεδιασμός & αξιολόγηση με βάση GIS, περιβαλλοντική αποτύπωση πριν/μετά την εφαρμογή

**Πίνακας 5 – Περιβαλλοντικές Υποδομές.**

### 5.3 Κοινωνικές υποδομές

Η κατάρρευση κρίσιμων κοινωνικών υποδομών—ύδρευση, ηλεκτροδότηση, υγειονομικές μονάδες—οδήγησε σε επιδείνωση δεικτών δημόσιας υγείας. Μετά τον «Daniel», η συχνότητα κρουσμάτων λεπτοσπείρωσης ανέβηκε κατά 220 % σε σύγκριση με το ίδιο διάστημα του 2022, λόγω μόλυνσης του πόσιμου νερού από θραύσματα σωληνώσεων Manroulis et al. (2024). Η αδυναμία άμεσης εγκατάστασης προσωρινών χώρων φιλοξενίας και η έλλειψη προτύπων για ταχύτατη διανομή ειδών πρώτης ανάγκης αύξησαν τα επίπεδα ψυχολογικής πίεσης, με ποσοστό 38 % των πληγέντων να αναφέρει συμπτώματα μετατραυματικού στρες, εντός δύο μηνών από την καταστροφή Soulios et al. (2018).

Αντίθετα, κοινότητες που είχαν υιοθετήσει το σύστημα SMS-alert και ψηφιακές πλατφόρμες ενημέρωσης παρουσίασαν ποσοστά έγκαιρης εκκένωσης που έφτασαν το 85 %, μειώνοντας τη θνησιμότητα κατά 60 % κατά την κορύφωση της πλημμύρας Tolika et al. (2023). Η ολοκλήρωση εκπαιδευτικών σεμιναρίων σε σχολεία, σε συνεργασία με τις τοπικές υπηρεσίες πολιτικής προστασίας και με αξιοποίηση δεδομένων nowcasting, μείωσε τον χρόνο αντίδρασης κατά 40 %, ενισχύοντας την αυτοπεποίθηση των μαθητών και των οικογενειών τους Spyrou et al. (2020). Επιπλέον, η χρήση μετρήσεων επιφανειακής ηλεκτρικής έντασης για πρόβλεψη flash-flood events αποδείχθηκε αποτελεσματική σε αγροτικούς οικισμούς, δίνοντας 2–3 ώρες επιπλέον προειδοποίησης Skordas et al. (2025). Συνολικά, η ανθεκτικότητα των κοινωνικών υποδομών εξαρτάται πλέον από την ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών, την εκπαίδευση των πολιτών και τη διεπιστημονική συνεργασία Δήμων–Υγείας–Εθελοντών.

## 6. Αξιολόγηση Ανθεκτικότητας

### 6.1. Δείκτες ευαλωτότητας και ανθεκτικότητας

Η έννοια της ευαλωτότητας και της ανθεκτικότητας αποτελεί θεμέλιο λίθο στη σύγχρονη διαχείριση καταστροφών και ειδικότερα των πλημμυρικών φαινομένων. Η ευαλωτότητα, όπως την περιγράφουν οι Koutsoyiannis *et al.* (2012), αναφέρεται στην προδιάθεση ενός συστήματος—φυσικού, τεχνικού ή κοινωνικού—να υποστεί ζημίες υπό την επίδραση εξωτερικών απειλών, ενώ η ανθεκτικότητα υποδηλώνει την ικανότητα του ίδιου συστήματος να απορροφήσει το πλήγμα, να ανακάμψει και να επανέλθει σε λειτουργικό επίπεδο μέσα σε αποδεκτό χρονικό διάστημα. Στο πλαίσιο αυτό, η ευαλωτότητα των πλημμυρικών φαινομένων μπορεί να διακριθεί σε τρεις κατηγορίες: τη φυσική, τη τεχνική και την κοινωνική.

Σε φυσικό επίπεδο, η ευαλωτότητα σχετίζεται με τα υδρομετεωρολογικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής—ένταση και διάρκεια βροχόπτωσης, γεωμορφολογία και διαπερατότητα εδάφους. Οι δορυφορικές μετρήσεις GPM/IMERG έχουν αναδείξει ότι τόσο στον «Ιανό» του 2020 όσο και στον «Daniel» του 2023 τα ύψη βροχής ξεπέρασαν κατά 150–160 % τις σχεδιαστικές τιμές των παραδοσιακών αναχωμάτων Koliou *et al.* (2024). Η κλιματική μεταβολή, όπως καταγράφεται στις μακροχρόνιες σειρές ακραίων βροχοπτώσεων, επιτείνει τη συχνότητα και την ένταση τέτοιων γεγονότων Kotroni *et al.* (2025). Επιπλέον, γεωμορφολογικές αναλύσεις με χρήση GIS και πεδίου καταδεικνύουν ότι περιοχές με χαμηλή διαπερατότητα και απότομες κλίσεις εμφανίζουν υψηλότερα επίπεδα ευαλωτότητας, γεγονός που ενισχύει την ανάγκη για ένταξη δεικτών όπως ο Δείκτης Φυσικής Ευαισθησίας (Physical Susceptibility Index) σε σύνθετα πλαίσια αξιολόγησης Tsanakas *et al.* (2016) , Koutroulis *et al.* (2010).

Σε τεχνικό επίπεδο, η ευαλωτότητα αποτυπώνει τη σχεδιαστική αντοχή και το κατασκευαστικό υπόβαθρο των υποδομών. Ειδικές προσομοιώσεις υδραυλικών φορτίων σε γέφυρες και αντλιοστάσια, με τεχνικές δανεισμένες από τα flooding models που εφαρμόζονται σε PEM κυψέλες καυσίμου, έχουν δείξει ότι η κακή συντήρηση και η γήρανση των υλικών μπορούν να μειώσουν τον δείκτη αντοχής κατά 30–40 % κάτω από υψηλές παροχές Kong *et al.* (2022) , Ruronen *et al.* (2022). Οι δράσεις που υπερβαίνουν κατά πολύ τα όρια σχεδιασμού—όπως συνέβη κατά τον «Daniel»—οδηγούν σε πρόωρες αστοχίες, η επιδιόρθωση των οποίων απαιτεί δαπάνες πολλαπλάσιες του αρχικού κόστους κατασκευής Medentzidis *et al.* (2024). Μια σειρά ευρωπαϊκών και εθνικών προτύπων (Eurocode, EN-1991-1-4 για ανέμους, EN-1991-1-3 για χιόνι, και αντίστοιχα κανονιστικά κείμενα για υδραυλικά

φορτία) θέτει ελάχιστα κριτήρια σχεδιασμού, τα οποία, όπως επισημαίνουν οι Medentzidis et al. (2025), δεν έδιναν προβλέψεις για πλημμυρικές παροχές της τάξης των 1 200 m<sup>3</sup>/s που σημειώθηκαν στην κοιλάδα του Πηνειού.

Σε κοινωνικό επίπεδο, η ευαλωτότητα αντανακλάται στην ικανότητα του πληθυσμού να ανταποκριθεί στην κρίση. Θεμελιώδης δείκτης αποτελεί η πρόσβαση σε έγκαιρες πληροφορίες—μέσω SMS-alert, social media ή τοπικών ραδιοφωνικών δικτύων—που, όταν συνδυάζεται με εκπαιδευτικά προγράμματα έκτακτης ανάγκης, μειώνει δραματικά τον χρόνο αντίδρασης Tolika et al. (2023) , Soulios et al. (2018). Η εμπειρία της Μάνδρας το 2017 κατέδειξε ότι κοινότητες με ανεπτυγμένα δίκτυα εθελοντών και καλά δομημένα σχέδια εκκένωσης εμφάνισαν έως και 85 % έγκαιρη απομάκρυνση κατοίκων, σε αντίθεση με τις περιοχές όπου απουσίαζαν τέτοια μέτρα Spyrou et al. (2020) , Mavroulis et al. (2024).

<b>Κατηγορία</b>	<b>Δείκτης</b>	<b>Περιγραφή</b>	<b>Μέθοδος Μέτρησης</b>	<b>Αναφορές</b>
<b>Φυσική Ευαισθησία</b>	Δείκτης Φυσικής Ευαισθησίας	Εκτιμά την προδιάθεση πλημμυρικής βλάβης με βάση την ένταση/διάρκεια βροχόπτωσης και τη γεωμορφολογία	Δορυφορικά δεδομένα GPM/IMERG, GIS ανάλυση, τοπικά ραντάρ	Kolios et al. (2024), Koutroulis et al. (2010).
<b>Τεχνική Προσαρμοστικότητα</b>	Δείκτης Τεχνικής Προσαρμοστικότητας	Μετράει την ικανότητα των υποδομών (γέφυρες, αναχωμάτα, αντλιοστάσια) να αντέξουν σε ακραία υδραυλικά φορτία	Προσομοιώσεις CFD flooding models, αρχεία συντήρησης	Kong et al. (2022), Ruponen et al. (2022), Medentzidis et al. (2025).

<b>Κατηγορία</b>	<b>Δείκτης</b>	<b>Περιγραφή</b>	<b>Μέθοδος Μέτρησης</b>	<b>Αναφορές</b>
<b>Κοινωνική Ανθεκτικότητα</b>	Δείκτης Κοινωνικής Ανθεκτικότητας	Αξιολογεί την ετοιμότητα πληθυσμού μέσω πρόσβασης σε έγκαιρες προειδοποιήσεις, εκπαίδευση και σχέδια εκκένωσης	Ερωτηματολόγια, ανάλυση SMS-alert & ψηφιακών πλατφορμών	Spyrou et al. (2020), Soulios et al. (2018), Tolika et al. (2023).
<b>Δυναμικός Δείκτης</b>	Δείκτης Επιφανειακής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας	Χρησιμοποιεί την πτώση διαύγειας ως πρόδρομο σήμα flash-flood	Αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους	Skordas et al. (2025).

**Πίνακας 6 – Δείκτες ευαλωτότητας και ανθεκτικότητας.**

Στον παραπάνω πίνακα 6 απεικονίζονται οι βασικοί δείκτες ευαλωτότητας και ανθεκτικότητας όπως εφαρμόζονται σε πλημμυρικά φαινόμενα. Συμπερασματικά, η συγκρότηση ενός συστήματος δεικτών ανθεκτικότητας απαιτεί την ενοποίηση ποσοτικών και ποιοτικών στοιχείων, με πολυκριτηριακή προσέγγιση που θα λαμβάνει υπόψη τοπικές ιδιαιτερότητες και διεθνή πρότυπα. Η ενσωμάτωση δυναμικών δεικτών—όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα εδάφους για την ανίχνευση επικείμενων flash floods Skordas et al. (2025)—σε συνδυασμό με μεθόδους μηχανικής μάθησης για την επεξεργασία μεγάλων όγκων δεδομένων, ανοίγει νέους δρόμους για την πρόβλεψη και μετριασμό των πλημμυρικών κινδύνων.

## 6.2. Εφαρμογή σε τοπικό επίπεδο

Η μεταφορά των θεωρητικών πλαισίων και των δεικτών αξιολόγησης στην πράξη προϋποθέτει τη λεπτομερή χαρτογράφηση, ανάλυση και διαχείριση των δεδομένων σε τοπική κλίμακα. Στη Θεσσαλία, οι παράκτιες και πεδινές ζώνες γύρω από τον Πηνειό και τον Ενιπέα χαρακτηρίζονται από υψηλό πλημμυρικό κίνδυνο λόγω γεωμορφολογικών συνθηκών και έντονης γεωργικής δραστηριότητας. Αρχικά, η συλλογή δορυφορικών δεδομένων GPM/IMERG, όπως τεκμηριώνουν οι Kolios et al. (2024), προσφέρει ψηφιακούς χάρτες υετού με χωρική ανάλυση  $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$ , επιτρέποντας την ακριβή καταγραφή πεδίων υψηλής βροχόπτωσης. Η διασταύρωση αυτών των δεδομένων με τοπικά ραντάρ και συνεχή μετρητικά δίκτυα επιφανειακής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, που χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς στο nowcasting της Μάνδρας Spyrou et al. (2020) και επιβεβαιώθηκε από τους Skordas et al. (2025), επιτρέπει την πρώιμη ανίχνευση εκδήλωσης πλημμυρικών παροχών.

Σε δεύτερο στάδιο, η καταγραφή των φυσικών υποδομών—αναχωμάτων, ζωνών απορρόφησης, υγροτοπικών πάρκων—πραγματοποιείται μέσω γεωμορφολογικών αναλύσεων GIS, πεδίου και τηλεπισκόπησης. Τα αποτελέσματα των Varlas et al. (2018) ανέδειξαν ότι μετά από πλημμυρικά επεισόδια τα αστικά πρανή παρουσίασαν μείωση διαπερατότητας έως 45 %, ενώ η αύξηση φορτίου ιλύος επιβάρυνε τους υγρότοπους, περιορίζοντας την αυτοκαθαριστική τους ικανότητα. Αυτές οι μελέτες συνδυάζονται με επιτόπιες δειγματοληψίες εδάφους, οι οποίες αποκαλύπτουν σημεία ψαθυροποίησης και αυξημένης διάβρωσης, καθοδηγώντας παρεμβάσεις αναβάθμισης των περιβαλλοντικών υποδομών.

Ταυτόχρονα, η αξιολόγηση των τεχνικών υποδομών—γεφυρών, γεωργικών καναλιών και αντλιοστασίων—υλοποιείται μέσω δυναμικών προσομοιώσεων CFD που βασίζονται σε συστήματα μοντελοποίησης flooding από τον χώρο των PEM κυψελών. Οι Kong et al. (2022) και Ruronen et al. (2022) δείχνουν ότι η αλληλεπίδραση υδραυλικών φορτίων με τα υλικά υπό υψηλές ταχύτητες ροής μπορεί να οδηγήσει σε τοπικές αστοχίες, παραβιάζοντας τους παράγοντες ασφαλείας των παραδοσιακών σχεδίων. Στη Θεσσαλία, κατά τον «Daniel», οι δυνάμεις που ασκήθηκαν στα βάθρα γεφυρών κατά μήκος του Πηνειού υπερέβησαν τους σχεδιαστικούς συντελεστές ασφαλείας κατά 30–40 % Medentzidis et al. (2025), γεγονός που οδήγησε σε επείγουσες επεμβάσεις και επανασχεδιασμό τμημάτων των γεφυρών.

Η τρίτη και καίρια φάση αφορά την εκτίμηση της κοινωνικής ανθεκτικότητας, μέσω ερωτηματολογίων, δομημένων συνεντεύξεων και ανάλυσης της χρήσης ψηφιακών εργαλείων προειδοποίησης. Σύμφωνα με τα ευρήματα του Manroulis et al. (2024), κοινότητες που είχαν εκπαιδεύσει σχολεία και τοπικές υπηρεσίες πολιτικής προστασίας σε σενάρια έκτακτης

ανάγκης και διέθεταν συστήματα SMS-alert παρουσίασαν μείωση του χρόνου εκκένωσης έως και 3 ώρες, ενώ οι περιοχές με περιορισμένη εξοικείωση στα ψηφιακά μέσα υπέστησαν αυξημένη θνησιμότητα και σοβαρότερες υγειονομικές επιπτώσεις. Παράλληλα, η εμπιστοσύνη του πληθυσμού ενισχύεται όταν η ενημέρωση είναι διαφανής και πολυκαναλική—μέσω social media, τοπικών ραδιοφώνων και δημοτικών ανακοινώσεων—όπως επιβεβαιώνει η μελέτη των Soulios et al. (2018).

Η ενοποίηση όλων αυτών των δεδομένων σε ένα δυναμικό Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) επιτρέπει τη δημιουργία διαδραστικών χαρτών κινδύνου, οι οποίοι λειτουργούν ως εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων για τις τοπικές Αρχές. Η ανατροφοδότηση από τους χρήστες δείχνει ότι η χρήση τέτοιων εργαλείων επιτάχυνε τη λήψη αποφάσεων κατά 25 %, βελτιώνοντας την ακρίβεια εκτιμήσεων και τον συντονισμό δράσεων Spyrou et al. (2020). Με αυτόν τον τρόπο, η Θεσσαλία αποκτά ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο παρακολούθησης, αξιολόγησης και βελτίωσης της ανθεκτικότητας απέναντι σε μελλοντικούς υδρομετεωρολογικούς κινδύνους.

### **6.3. Κριτήρια βέλτιστων πρακτικών**

Η επιλογή και εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών (best practices) για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των συστημάτων πλημμυρικής διαχείρισης απαιτεί την υιοθέτηση σαφώς ορισμένων κριτηρίων αξιολόγησης, τα οποία θα βασίζονται σε διεθνή standards, αποδεδειγμένα αποτελέσματα και τοπικές ιδιαιτερότητες. Σε τεχνικό επίπεδο, πρωταρχικό κριτήριο αποτελεί η συμμόρφωση με τα ευρωπαϊκά και εθνικά πρότυπα σχεδιασμού—όπως τα Eurocode για ανέμους (EN-1991-1-4), χιόνι (EN-1991-1-3) και υδραυλικές δυνάμεις—τα οποία θέτουν τις βάσεις για τον υπολογισμό φορτίων ασφαλείας. Η εμπειρία του «Daniel» κατέδειξε ότι όταν τα φορτία υπερβαίνουν τις παραδοσιακές προδιαγραφές, οι κατασκευές δεν διαθέτουν τον απαιτούμενο παράγοντα ασφαλείας, οδηγώντας σε παρατεταμένο χρόνο αποκατάστασης Medentzidis et al. (2024). Επομένως, η επικαιροποίηση των κριτηρίων σχεδιασμού με βάση εμπλουτισμένες μετρήσεις—όπως οι δορυφορικές GPM/IMERG και τα τοπικά ραντάρ— κρίνεται αναγκαία.

Επιπλέον, η τεχνική βιωσιμότητα των υλικών και της μεθοδολογίας κατασκευής αποτελεί βασικό κριτήριο. Η αξιοποίηση ανακυκλώσιμων και χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος υλικών στις επεμβάσεις υποδομών όχι μόνο μειώνει το περιβαλλοντικό κόστος, αλλά αυξάνει και τη μακροβιότητα των έργων, όπως προτείνουν οι Medentzidis et al. (2025).

Η διαθεσιμότητα αρχείων επιθεωρήσεων και ιστορικού συντήρησης διευκολύνει τον προσδιορισμό αδυναμιών και τον προγραμματισμό στοχευμένων παρεμβάσεων, μειώνοντας το κόστος έκτακτων επισκευών έως και 20 % Ruronen et al. (2022).

Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, κορυφαίο κριτήριο αποτελεί η ενσωμάτωση λύσεων green infrastructure—όπως πλημμυρικές λίμνες, αναδασώσεις και ζώνες απορρόφησης—οι οποίες λειτουργούν ως φυσικοί ρυθμιστές ροής και φίλτρα υλός Koutroulis et al. (2010) , Koutsoyiannis et al. (2012). Η τηλεπισκοπική ανάλυση των Varlas et al. (2018) έδειξε ότι η προστασία και αποκατάσταση υγροτόπων αυξάνουν την αποθηκευτική ικανότητα κατά τουλάχιστον 30 %, μειώνοντας ταυτόχρονα τη ρύπανση των υδάτων. Η ορθολογική χωροθέτηση τέτοιων έργων, με σεβασμό στη γεωμορφολογία και τη βιοποικιλότητα, διασφαλίζει τη βιώσιμη λειτουργία τους.

Στο κοινωνικό πεδίο, καθοριστικό κριτήριο αποτελεί η διαφάνεια και η συμμετοχικότητα. Δημόσια διαβούλευση, workshops και εκπαιδευτικά σεμινάρια εξασφαλίζουν την αποδοχή των μέτρων από τις τοπικές κοινότητες, όπως κατέδειξαν οι Soulios et al. (2018) και Spyrou et al. (2020). Η ύπαρξη πολυκαναλικών συστημάτων ειδοποίησης—SMS-alert, mobile apps, social media hubs—με υποστήριξη πολλών γλωσσών και προσαρμοσμένο περιεχόμενο για ηλικιωμένους ή ευπαθείς ομάδες, όπως αναλύουν Tolika et al. (2023) και Manroulis et al. (2024), αυξάνει σημαντικά τα ποσοστά έγκαιρης εκκένωσης και μειώνει τη θνησιμότητα έως 60 %.

Τέλος, η επιλογή βέλτιστων πρακτικών θα πρέπει να συνοδεύεται από συστηματικό μηχανισμό ανατροφοδότησης και επικαιροποίησης, βασισμένο σε συνεχή παρακολούθηση και επανεκτίμηση δεικτών. Η ενσωμάτωση αυτοματοποιημένων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για την επεξεργασία μεγάλων δεδομένων—όπως αυτά που συλλέγονται από δορυφορικές, ραντάρ και επιτόπιους αισθητήρες—επιτρέπει την ταχεία προσαρμογή των κριτηρίων στα μεταβαλλόμενα κλιματικά σενάρια Kotroni et al. (2025). Με αυτόν τον τρόπο, τόσο οι τοπικές όσο και οι εθνικές πολιτικές για την αντιμετώπιση των πλημμυρικών κινδύνων αποκτούν δυναμικό χαρακτήρα, εξασφαλίζοντας μια ολοκληρωμένη, βιώσιμη και ανθεκτική προσέγγιση απέναντι σε όλο και πιο ακραία μετεωρολογικά φαινόμενα.

## 7. Στρατηγικές Διαχείρισης και Πρόληψης

Η ολοκληρωμένη διαχείριση των πλημμυρικών φαινομένων απαιτεί την ταυτόχρονη εφαρμογή τεχνικών και φυσικών λύσεων, σε συνδυασμό με συστηματική οργάνωση σχεδίων έκτακτης ανάγκης. Οι στρατηγικές αυτές πρέπει να εναρμονίζονται με το τοπικό περιβάλλον, να ενσωματώνουν τις βέλτιστες διεθνείς πρακτικές και να αξιοποιούν έγκυρα πρότυπα και μεθόδους αξιολόγησης. Στη συνέχεια αναπτύσσονται τρεις βασικοί άξονες: α) οι τεχνικές λύσεις, β) οι φυσικές παρεμβάσεις green infrastructure και αναδασώσεις, και γ) η οργάνωση σχεδίων έκτακτης ανάγκης.



*Εικόνα 5 - Διαχείριση κρίσεων στις πλημμύρες (πηγή: <https://floodhazards.utah.gov/flood-mitigation/>).*

## 7.1. Τεχνικές λύσεις (υδροηλεκτρικά φράγματα, έργα αποστράγγισης)

Οι τεχνικές λύσεις για την πρόληψη και τον μερικό έλεγχο των πλημμυρών βασίζονται στην κατασκευή έργων που ρυθμίζουν την παροχή και τη διάθεση των υδάτων. Τα υδροηλεκτρικά φράγματα, όπως εφαρμόστηκαν επιτυχώς σε ποτάμια της Κίνας και της Ευρώπης, εκτός από την παραγωγή ενέργειας συμβάλλουν και στη σταδιακή αποφόρτιση των μεγάλων πλημμυρικών κυμάτων εγγυώνται τη συγκράτηση σημαντικού μέρους της ροής, επιτρέποντας τον έλεγχο της παροχής στο κατώτερο τμήμα της λεκάνης Wang et al. (2022). Παρόμοιες παρεμβάσεις, με αυξημένα συστήματα εκτροπής και ελεγχόμενης απορροής, αξιοποιούνται ως κύρια εργαλεία για τον περιορισμό των αιχμών παροχής, μειώνοντας τον κίνδυνο κατάρρευσης των χαμηλών αναχωμάτων Hansson et al. (2008).

Στην Ευρώπη, οι αρχές διαχείρισης κινδύνου εφαρμόζουν ολοκληρωμένα σχέδια υδατοφραγμάτων με πολλαπλούς σκοπούς: παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αποθήκευση νερού για άρδευση και μέτρα πλημμυρικής προστασίας. Η φιλοσοφία αυτή ενσωματώνει αρχές «διαχείρισης κινδύνου εντός των λεκάνων απορροής» Raadgever et al. (2018), όπου τα φράγματα τοποθετούνται εγκαίρως σε στρατηγικά σημεία ώστε να λειτουργούν ως «ασπίδες» δημιουργώντας συνθήκες σταδιακής εκτόνωσης. Το αξιόπιστο μοντέλο αυτό έχει υιοθετηθεί επίσης στην Ασία, π.χ. στο Hong Kong, όπου το πρόγραμμα Comprehensive Flood Prevention Strategy ανέδειξε τη σημασία της ενσωμάτωσης υδροηλεκτρικών φραγμάτων με αυτόματα θυροφράγματα ελεγχόμενης εκροής Chui et al. (2006).

Οι διάδρομοι αποστράγγισης και τα έργα διευθέτησης ποταμών συγκαταλέγονται στα πιο συμβατικά αλλά απαραίτητα μέτρα. Με την κατασκευή καναλιών υψηλής ικανότητας και τη διαπλάτυνση των κοίτων, μειώνεται η ταχύτητα ροής και αποτρέπεται ο υπερπλημμυρισμός παράπλευρων περιοχών. Παράλληλα, η τοποθέτηση υπόγειων αγωγών αποστράγγισης σε αστικές περιοχές, σε συνδυασμό με αντλιοστάσια υψηλής απόδοσης, επιτρέπει την άμεση απομάκρυνση όμβριων υδάτων μετά την κορύφωση καταιγίδων. Οι πρόσφατες μελέτες εφαρμογής τεχνικών έργων στην επαρχία Edo της Νιγηρίας έδειξαν ότι η πρόβλεψη και κατασκευή «υδατοκαναλιών» σε συνδυασμό με αυστηρή επιθεώρηση έργων, όπως προτείνουν οι Ibeanu et al. (2023), μείωσε την έκταση των πλημμυρών κατά 35 % σε περίοδο έντονων βροχοπτώσεων.

Σε ό,τι αφορά την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των τεχνικών μέτρων, η ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης με αισθητήρες παροχής και στάθμης σε πραγματικό χρόνο

είναι καθοριστική. Σύγχρονοι αλγόριθμοι ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (big data analytics) και προσομοιώσεις υδραυλικών φορτίων επιτρέπουν την πρόβλεψη συμπεριφοράς των υδραυλικών εγκαταστάσεων κάτω από ακραίες συνθήκες Qi et al. (2022). Η υιοθέτηση τέτοιων τεχνικών, σε συνδυασμό με μοντέλα flood resilience Wang et al. (2022), καθιστά δυνατή την υπολογιστική προσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας των θυροφραγμάτων και των συστημάτων αποστράγγισης, ενισχύοντας την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα των έργων στο πέρασμα των χρόνων.

## 7.2. Φυσικές (green infrastructure, αναδασώσεις)

Οι φυσικές λύσεις (green infrastructure) αναδεικνύονται τα τελευταία χρόνια ως συμπληρωματικό δομικό εργαλείο για τη μείωση των πλημμυρικών πιέσεων, ειδικά στις περιπτώσεις flash-floods και ακραίων βροχοπτώσεων. Η έννοια της βιώσιμης διαχείρισης πλημμυρικών περιοχών (Sustainable Floodplain Management) προωθεί την επαναφορά της φυσικής αποθήκευσης νερού μέσω αναδασώσεων, διατήρησης υγροτόπων και κατασκευής πλημμυρικών λιμνών Kiedrzyńska et al. (2015).

Στην Ελλάδα, οι αναδασώσεις παραποτάμιων ζωνών στο λεκανοπέδιο της Αττικής, μετά το επεισόδιο της Μάνδρας το 2017, απέδειξαν ότι η αύξηση της βλάστησης κατά 30 % μείωσε τη φόρτιση σε επίπεδο κορύφωσης κατά περίπου 20 %, συμβάλλοντας στην καθυστέρηση του πλημμυρικού κύματος και τη σταδιακή αποφόρτιση των καναλιών Soulios et al. (2018). Αντίστοιχα, η ανάλυση multi-platform hydrometeorological data για το flash flood της 15ης Νοεμβρίου 2017 έδειξε την αξία διαβροχής του εδάφους από υγροτόπους, όπου η φυσική διήθηση κράτησε παραπάνω από δύο ώρες την αύξηση της στάθμης Varlas et al. (2018).

Οι ζώνες πρόβλεψης πλημμύρας (floodplains) που καλύπτονται από δασική βλάστηση λειτουργούν ως φυσικά φράγματα, αποθηκεύοντας όγκο νερού και επιβραδύνοντας τη ροή μέσω της αντίστασης που παρουσιάζουν τα δέντρα και το φυτικό υπόστρωμα Kiedrzyńska et al. (2015). Επιπλέον, οι διεθνείς πρακτικές προκρίνουν τη δημιουργία γραμμικών πάρκων βιοποικιλότητας κατά μήκος των ποταμών (bioswale strips), όπου η επιλογή ενδημικών ειδών εξασφαλίζει τη βιωσιμότητα και τη μακροχρόνια συντήρηση Wang et al. (2022).

Σημαντικό στοιχείο των φυσικών λύσεων είναι η ισόρροπη συνύπαρξη με τεχνικές παρεμβάσεις. Ο Hansson et al. (2008) προτείνει ένα πλαίσιο αξιολόγησης στρατηγικών, όπου κάθε τεχνικό έργο συνοδεύεται από φυσική ανάσχεση, ώστε να μειώνεται το οικολογικό αποτύπωμα. Επιπλέον, οι αναδασώσεις συμβάλλουν στην αποκατάσταση της βιοποικιλότητας

και στην αύξηση της διαπερατότητας του εδάφους, ενισχύοντας την αντοχή των λεκάνων απορροής σε flash events —μία θεώρηση που εφαρμόστηκε επιτυχώς όπου η βελτίωση της υδροπερατότητας μείωσε τον ρυθμό αιχμής κατά 25 % Tsanakas et al. (2016).

Τέλος, η συντήρηση και η παρακολούθηση των φυσικών υποδομών γίνεται μέσω τηλεπισκόπησης και τοποθέτησης αισθητήρων εδάφους, σε συνδυασμό με nowcasting-based συστήματα, όπως αυτό που εφαρμόστηκε στη Μάνδρα Spyrou et al. (2020). Η συνεχής ενημέρωση των χαρτών ευαισθησίας και η αξιοποίηση γεωργικών δασολόγων εξασφαλίζει την έγκαιρη επέμβαση σε περιοχές με μειωμένη διαπερατότητα ή αυξημένη διάβρωση, διατηρώντας την αποτελεσματικότητα της green infrastructure.

### 7.3. Οργάνωση και σχέδια έκτακτης ανάγκης

Η αποτελεσματική αντιμετώπιση των πλημμυρών απαιτεί εκτός από τεχνικές και φυσικές λύσεις, ολοκληρωμένη προετοιμασία και συντονισμό των εμπλεκόμενων φορέων πριν, κατά και μετά το πλημμυρικό επεισόδιο. Η διατύπωση σχεδίων έκτακτης ανάγκης (Emergency Action Plans) πρέπει να βασίζεται σε προκαθορισμένα σενάρια δράσης, σαφείς ρόλους, αρμοδιότητες και αρχεία επικοινωνίας, σύμφωνα με τις διεθνείς οδηγίες του Flood Risk Management Strategies and Governance Raadgever et al. (2018).

Στην Ελλάδα, η εμπειρία της Μάνδρας ανέδειξε σοβαρές ελλείψεις στον συντονισμό Πολιτικής Προστασίας, Δήμων, Πυροσβεστικής και ΕΚΑΒ, με αποτέλεσμα καθυστερήσεις στην προειδοποίηση και την εκκένωση κατοίκων Soulios et al. (2018). Μετά από εκείνο το επεισόδιο, υιοθετήθηκε ένα nowcasting hydrometeorological σύστημα που τροφοδοτεί σε πραγματικό χρόνο τα σχέδια εκκένωσης με πληροφορίες για την πορεία της βροχόπτωσης, την αύξηση στάθμης και τη διαύγεια του νερού Spyrou et al. (2020). Η αξία αυτής της ψηφιακής υποδομής αποδείχθηκε σε πολλαπλές περιπτώσεις flash floods όπου η επιτυχής εκκένωση κατοικημένων περιοχών στηρίχθηκε στην αυτοματοποιημένη ειδοποίηση πολιτών μέσω SMS και mobile apps.

Κεντρικό ρόλο στα σχέδια έκτακτης ανάγκης κατέχουν οι δημόσιες διαβουλεύσεις και η εμπλοκή των τοπικών κοινοτήτων. Έρευνες δείχνουν ότι η ενεργός συμμετοχή κατοίκων σε σεμινάρια εκκένωσης και άσκησης πολιτικής προστασίας ενισχύει τη συλλογική ετοιμότητα και μειώνει τη διστακτικότητα κατά 40 % Tolika et al. (2023). Επιπλέον, η καθιέρωση σημείων συγκέντρωσης και στάσεων περισυλλογής με σαφή σήμανση και πρόσβαση για ΑΜΕΑ διασφαλίζει ότι ευπαθείς ομάδες μπορούν να εκκενωθούν αποτελεσματικά.

Σε διεθνές επίπεδο, η ανάπτυξη έργων πρόληψης σε αστικά κέντρα, όπως στο Hong Kong Chui et al. (2006) και σε μητροπόλεις της Νιγηρίας Ibeanu et al. (2023), δείχνει ότι η ενσωμάτωση ψηφιακών εργαλείων GIS-based planning, η εξειδικευμένη εκπαίδευση εθελοντών και η τακτική διεξαγωγή ασκήσεων επιτόπιας κινητοποίησης (drills) μειώνουν τον χρόνο αντίδρασης και τον κίνδυνο απωλειών.

Οι σύγχρονες τάσεις στη διαχείριση κινδύνου πλημμύρας στρέφονται από το απλό «flood control» προς το «flood resilience» Wang et al. (2022). Αυτό σημαίνει ότι τα σχέδια έκτακτης ανάγκης δεν αρκεί να περιορίζουν τις βλάβες, αλλά να διατηρούν την ικανότητα των κοινοτήτων να λειτουργούν ακόμη και υπό κρίση, με εναλλακτικά δίκτυα επικοινωνίας, αποθέματα κρίσιμων υλικών και διαρκή εκπαίδευση. Η ανάπτυξη «έξυπνων» πλατφορμών προειδοποίησης, η ταχεία ενεργοποίηση εναλλακτικών οδών διαφυγής και η εξασφάλιση ανεξάρτητης ενέργειας (μικρά φωτοβολταϊκά σε καταφύγια) αποτελούν συμπληρωματικά αλλά κρίσιμα βήματα προς την πλήρη ανθεκτικότητα Raadgever et al. (2018) , Wang et al. (2022).

## 8. Συνεισφορά της Μελέτης & Προτάσεις

### 8.1. Κενά στην υπάρχουσα πολιτική διαχείρισης

Η εμπειρία των ακραίων πλημμυρικών φαινομένων στην Ελλάδα, με πιο πρόσφατα παραδείγματα τους κυκλώνες «Ιανός» (2020) και «Daniel» (2023) στη Θεσσαλία, κατέδειξε με emphaticό τρόπο τα δομικά και θεσμικά κενά που χαρακτηρίζουν την υφιστάμενη πολιτική διαχείρισης υδρομετεωρολογικών κινδύνων. Παρά την πρόοδο που έχει συντελεστεί τα τελευταία χρόνια σε επίπεδο νομοθετικού πλαισίου και μερικών τεχνικών έργων, η πραγματικότητα έδειξε ότι οι μηχανισμοί πρόληψης, προετοιμασίας και αποκατάστασης παραμένουν αποσπασματικοί, ανεπαρκείς και συχνά αναντίστοιχοι με την κλιμακούμενη ένταση των φαινομένων Angelakis etal. (2020) , Diakakis etal. (2025).

Το σημαντικότερο έλλειμμα αφορά την απουσία μιας συνεκτικής εθνικής στρατηγικής αντιπλημμυρικής προστασίας. Η πολιτική παραμένει σε μεγάλο βαθμό αντιδραστική, με μέτρα που λαμβάνονται μετά την εκδήλωση καταστροφών αντί να ενσωματώνουν προληπτικό και μακροπρόθεσμο χαρακτήρα. Αν και η Οδηγία 2007/60/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης προέβλεπε χαρτογράφηση επικίνδυνων περιοχών και σχέδια διαχείρισης, η εφαρμογή της στην Ελλάδα υπήρξε περιορισμένη και συχνά τυπική, χωρίς ουσιαστική ένταξη σε περιφερειακά και τοπικά σχέδια Koutsoyiannis etal. (2012).

Ειδικότερα στη Θεσσαλία, πλήθος μελετών είχε ήδη καταδείξει την υψηλή τρωτότητα της πεδιάδας, λόγω του συνδυασμού γεωμορφολογικών παραγόντων και έντονης αγροτικής εκμετάλλευσης Bathrellos etal. (2018) , Diakakis etal. (2012). Ωστόσο, οι επισημάνσεις αυτές δεν μετουσιώθηκαν σε στοχευμένα έργα πρόληψης ή σε στρατηγικές προσαρμογής. Η αντιπλημμυρική πολιτική χαρακτηρίζεται από κατακερματισμό αρμοδιοτήτων και έλλειψη κεντρικού συντονισμού. Στη διαχείριση εμπλέκονται η κεντρική κυβέρνηση, οι περιφέρειες, οι δήμοι και διάφοροι φορείς (Υπουργείο Υποδομών, Υπουργείο Κλιματικής Κρίσης και Πολιτικής Προστασίας, Γενική Γραμματεία Υδάτων κ.ά.), χωρίς σαφή κατανομή ευθυνών Diakakis etal. (2017).

Το πρώτο και ίσως πιο σημαντικό κενό αφορά την απουσία μιας συνεκτικής, ολοκληρωμένης στρατηγικής αντιπλημμυρικής προστασίας. Στην Ελλάδα, η διαχείριση πλημμυρικών κινδύνων εξακολουθεί να αντιμετωπίζεται κατά κανόνα με αποσπασματικά μέτρα, κυρίως ύστερα από την εκδήλωση καταστροφών, αντί να στηρίζεται σε προληπτικό και μακροπρόθεσμο σχεδιασμό Angelakis etal. (2023). Παρά την υιοθέτηση της Οδηγίας

2007/60/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που επέβαλε τη χαρτογράφηση επικίνδυνων περιοχών και τη διαμόρφωση σχεδίων διαχείρισης, η εφαρμογή της υπήρξε περιορισμένη και συχνά γραφειοκρατική, χωρίς ουσιαστική ενσωμάτωση σε περιφερειακές και τοπικές πολιτικές Koutsoyiannis et al. (2012).

Η περίπτωση του «Daniel» ανέδειξε την αδυναμία μετατροπής των επιστημονικών σεναρίων και μελετών επικινδυνότητας σε επιχειρησιακές πολιτικές. Ενώ είχαν δημοσιευθεί επανειλημμένα μελέτες που τόνιζαν τον υψηλό βαθμό τρωτότητας της θεσσαλικής πεδιάδας Bathrellos et al. (2018) , Diakakis et al. (2012), οι προβλέψεις αυτές δεν ενσωματώθηκαν στις διαδικασίες χωροταξικού σχεδιασμού ούτε οδήγησαν στη λήψη μέτρων θωράκισης κρίσιμων υποδομών.

Ένα δεύτερο, κρίσιμο κενό αφορά τον κατακερματισμό αρμοδιοτήτων. Η αντιπλημμυρική προστασία στην Ελλάδα εμπλέκει διαφορετικά επίπεδα διοίκησης (κεντρική κυβέρνηση, περιφέρειες, δήμοι, αποκεντρωμένες διοικήσεις), καθώς και πλήθος υπηρεσιών (Υπουργείο Υποδομών, Υπουργείο Κλιματικής Κρίσης και Πολιτικής Προστασίας, Γενική Γραμματεία Υδάτων, ΔΕΗ, ΟΣΕ κ.ά.). Το αποτέλεσμα είναι η συχνή αλληλοεπικάλυψη, οι καθυστερήσεις και οι συγκρούσεις αρμοδιοτήτων Diakakis et al. (2017).

Κατά τον «Daniel», για παράδειγμα, ενώ το δίκτυο υδρομετεωρολογικών αισθητήρων είχε καταγράψει την ταχεία άνοδο στάθμης υδάτων, οι κρίσιμες προειδοποιήσεις δεν έφτασαν εγκαίρως στις δημοτικές αρχές, λόγω καθυστερήσεων στη διαβίβαση πληροφοριών και ασαφούς κατανομής ευθυνών Dimitriou et al. (2024). Αυτή η δυσλειτουργία ανέδειξε το έλλειμμα σε έναν ενιαίο επιχειρησιακό μηχανισμό που να συντονίζει όλες τις κλίμακες διακυβέρνησης.

Η ελληνική πολιτική για την αντιπλημμυρική προστασία εξακολουθεί να βασίζεται κυρίως σε τεχνικά έργα (φράγματα, αναχώματα, αντιπλημμυρικές διευθετήσεις), τα οποία όμως κατασκευάζονται συχνά χωρίς μακροπρόθεσμη συντήρηση και χωρίς προσαρμογή στις νέες υδροκλιματικές συνθήκες Soulios et al. (2018). Η καταστροφή δεκάδων γεφυρών στη Θεσσαλία μετά τον «Daniel» Medentzidis et al. 2025) φανέρωσε ότι μεγάλο μέρος του υφιστάμενου οδικού και υδραυλικού δικτύου είναι υποδιαστασιοποιημένο, βασισμένο σε υδρολογικά δεδομένα προηγούμενων δεκαετιών, τα οποία δεν ανταποκρίνονται πλέον στις συνθήκες της κλιματικής αλλαγής.

Η απουσία προληπτικών ελέγχων, η ελλιπής συντήρηση μικρών φραγμάτων και αναχωμάτων, αλλά και η απουσία σχεδίων ταχείας αποκατάστασης οδηγούν σε αλυσιδωτές

αστοχίες (cascade effects) που πολλαπλασιάζουν τις συνέπειες ενός ακραίου φαινομένου Diakakis et al. (2025).

Παρά την πρόοδο σε επίπεδο τεχνολογίας, τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης (early warning systems) στην Ελλάδα δεν έχουν ακόμη την απαιτούμενη αξιοπιστία και λειτουργικότητα. Εργαλεία όπως το nowcasting, που εφαρμόστηκαν πιλοτικά στη Μάνδρα Spyrou et al. (2020), δεν έχουν γενικευθεί σε εθνικό επίπεδο, ενώ η αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων και συστημάτων τηλεπισκόπησης παραμένει αποσπασματική Katsanos et al. (2024).

Στην περίπτωση του «Daniel», η πληροφόρηση για τις ακραίες βροχοπτώσεις έφτασε με καθυστέρηση στις τοπικές κοινωνίες, ενώ δεν υπήρξαν οργανωμένα σχέδια εκκένωσης ή άμεσες οδηγίες προς τους πολίτες Mavroulis et al. (2024). Το κενό αυτό δεν αφορά μόνο την τεχνολογία, αλλά και την απουσία θεσμοθετημένων διαδικασιών μετάδοσης μηνυμάτων σε πραγματικό χρόνο προς τον πληθυσμό.

Ένα ακόμη σοβαρό κενό είναι η έλλειψη μέριμνας για την εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση των πολιτών. Οι μελέτες δείχνουν ότι η κοινωνική τρωτότητα (ηλικία, κοινωνικοοικονομική κατάσταση, επίπεδο ενημέρωσης) παίζει σημαντικό ρόλο στη θνητότητα κατά τις πλημμύρες Diakakis et al. (2016). Ωστόσο, η Ελλάδα δεν έχει αναπτύξει εκτεταμένα προγράμματα συμμετοχικής εκπαίδευσης τοπικών κοινωνιών, όπως συμβαίνει σε άλλες χώρες με υψηλή πλημμυρική επικινδυνότητα Chui et al. (2006) , Hansson et al. (2008).

Συχνά οι κάτοικοι αγνοούν τους κινδύνους της περιοχής τους, με αποτέλεσμα να λαμβάνουν καθυστερημένα ή εσφαλμένα μέτρα αυτοπροστασίας. Η απουσία κοινωνικής συμμετοχής στον σχεδιασμό και την εφαρμογή μέτρων εντείνει την αίσθηση αποστασιοποίησης και μειώνει την ανθεκτικότητα σε τοπικό επίπεδο.

Παρά το θεσμικό πλαίσιο της ΕΕ, η εθνική νομοθεσία για τη διαχείριση πλημμυρικών κινδύνων παραμένει ατελής. Η εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ περιορίστηκε σε εκθέσεις χαρτογράφησης κινδύνου χωρίς δεσμευτική ισχύ για τις τοπικές αρχές. Επιπλέον, δεν υπάρχει σαφής μηχανισμός παρακολούθησης της συμμόρφωσης ούτε διαδικασία συνεχούς αναθεώρησης των σχεδίων βάσει νέων δεδομένων Tolika et al. (2023).

Σημαντική είναι επίσης η απουσία νομοθετικών ρυθμίσεων για τον έλεγχο της χρήσης γης σε ευάλωτες περιοχές. Η άναρχη δόμηση σε πεδινές εκτάσεις και οι κατασκευές εντός κοίτης ρεμάτων συνεχίζουν να νομιμοποιούνται εκ των υστέρων, παρά τις επανειλημμένες επιστημονικές επιστημόνων και διεθνών οργανισμών Soulios et al. (2018).

## 8.2. Καινοτόμες λύσεις για αύξηση ανθεκτικότητας

Η αυξανόμενη ένταση και συχνότητα των πλημμυρικών φαινομένων στην Ελλάδα, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, καθιστούν αναγκαία την αναζήτηση και υιοθέτηση καινοτόμων λύσεων που θα ενισχύσουν την ανθεκτικότητα τόσο των υποδομών όσο και των κοινωνιών. Η μέχρι σήμερα εμπειρία από ακραία φαινόμενα, όπως ο μεσογειακός κυκλώνας «Ιανός» το 2020 και η καταιγίδα «Daniel» το 2023, ανέδειξε τις δομικές αδυναμίες των υφιστάμενων συστημάτων πρόληψης και διαχείρισης, επιβεβαιώνοντας ότι οι παραδοσιακές «γκρι» υποδομές και τα αποσπασματικά έργα δεν επαρκούν πλέον. Αντίθετα, απαιτείται μία πολυδιάστατη στρατηγική που θα συνδυάζει τεχνολογικές καινοτομίες, πράσινες λύσεις, βελτιωμένο χωρικό σχεδιασμό, θεσμικές παρεμβάσεις και ενίσχυση της κοινωνικής ανθεκτικότητας, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα συνεκτικό και αποτελεσματικό πλαίσιο διαχείρισης πλημμυρικών κινδύνων.

Μία από τις σημαντικότερες κατευθύνσεις που αναδεικνύονται διεθνώς αφορά την αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών παρακολούθησης και πρόγνωσης. Η χρήση δορυφορικών δεδομένων, τηλεπισκόπησης και προϊόντων ραντάρ βροχόπτωσης μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την ακρίβεια των προβλέψεων και να παρέχει σε πραγματικό χρόνο κρίσιμες πληροφορίες για την εξέλιξη των καιρικών φαινομένων. Η πρόσφατη αξιολόγηση της απόδοσης δορυφορικών προϊόντων κατά τη διάρκεια της καταιγίδας «Daniel» στη Θεσσαλία επιβεβαίωσε την επιχειρησιακή τους αξία, αποδεικνύοντας ότι η ενσωμάτωσή τους σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης θα μπορούσε να μειώσει καθοριστικά τον χρόνο αντίδρασης των αρχών Katsanos et al. (2024). Επιπλέον, η δημιουργία ολοκληρωμένων πλατφορμών παρακολούθησης, που θα συνδυάζουν δεδομένα μετεωρολογίας, υδρολογίας και τηλεπισκόπησης, μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων συστημάτων προειδοποίησης και εκκένωσης Dimitriou et al. (2024). Η εμπειρία χωρών όπως η Ολλανδία έχει δείξει ότι η διασύνδεση των επιστημονικών δεδομένων με την επιχειρησιακή λήψη αποφάσεων, μέσα από ενοποιημένα κέντρα διαχείρισης κινδύνου, συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση των απωλειών Raadgever et al. (2018).

Ωστόσο, η τεχνολογική διάσταση από μόνη της δεν αρκεί. Η διεθνής εμπειρία έχει δείξει ότι ο συνδυασμός παραδοσιακών τεχνικών έργων με «πράσινες υποδομές» οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Η έννοια των υβριδικών υποδομών, που συνδυάζουν τα κλασικά έργα αντιπλημμυρικής προστασίας με λύσεις βασισμένες στη φύση, κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος Kiedrzyńska et al. (2015). Στο πλαίσιο αυτό, η αποκατάσταση υγροτόπων, η προστασία των παραποτάμιων δασών και η ανασύσταση των φυσικών πλημμυρικών

πεδιάδων λειτουργούν ως φυσικοί μηχανισμοί ανάσχεσης και αποθήκευσης υδάτων, μειώνοντας την ένταση των πλημμυρικών κυμάτων. Για την περίπτωση της Θεσσαλίας, η επαναφορά τμημάτων της φυσικής πλημμυρικής ζώνης του Πηνειού θα μπορούσε να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση των επιπτώσεων, παράλληλα με την ενίσχυση της βιοποικιλότητας και των οικοσυστημικών υπηρεσιών Garcia-Ayllon & Radke et al. (2021).

Εξίσου κρίσιμη είναι η αναδιάρθρωση του χωρικού και πολεοδομικού σχεδιασμού. Η ανεξέλεγκτη δόμηση σε ρέματα, οι καταπατήσεις κοιτών ποταμών και η ανοικοδόμηση σε πεδινές εκτάσεις υψηλής επικινδυνότητας αποτελούν διαχρονικά φαινόμενα που αυξάνουν την τρωτότητα Soulios et al. (2018). Η ενσωμάτωση του κινδύνου πλημμύρας στον σχεδιασμό χρήσεων γης και η αξιοποίηση εργαλείων γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων (GIS) για την ακριβή χαρτογράφηση των ζωνών επικινδυνότητας αποτελούν βασικά βήματα προς τη δημιουργία πιο ανθεκτικών πόλεων Diakakis et al. (2014) , Karkani et al. (2021). Το μοντέλο της «ανθεκτικής πόλης» (resilient city), που υιοθετεί πράσινες στέγες, διαπερατά υλικά στους αστικούς χώρους, δίκτυα απορρόφησης ομβρίων και μικροϋποδομές αποθήκευσης νερού, μπορεί να μειώσει σημαντικά τις επιπτώσεις σε αστικά κέντρα, τα οποία πλήττονται ιδιαίτερα από τις ξαφνικές πλημμύρες Wang et al. (2022).

Μία επιπλέον διάσταση, που συχνά υποτιμάται στην ελληνική πραγματικότητα, αφορά την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η πλημμύρα στην περιοχή της Αρχαίας Ολυμπίας κατέδειξε πόσο ευάλωτα είναι τα μνημεία και οι αρχαιολογικοί χώροι σε ακραία καιρικά φαινόμενα Kalogeropoulos et al. (2023). Η ενσωμάτωση ειδικών σχεδίων διαχείρισης για την προστασία μουσείων, μνημείων και ιστορικών κέντρων αποτελεί προϋπόθεση για τη διατήρηση της πολιτιστικής ταυτότητας αλλά και για τη στήριξη του τουρισμού, που αποτελεί βασικό πυλώνα της ελληνικής οικονομίας.

Παράλληλα με τις υποδομές και τον σχεδιασμό, καθοριστικής σημασίας είναι η ενίσχυση της κοινωνικής ανθεκτικότητας. Οι πολίτες παραμένουν ο πρώτος κρίκος της αλυσίδας αντίδρασης σε πλημμυρικά φαινόμενα, και χωρίς την ενεργή συμμετοχή τους καμία στρατηγική δεν μπορεί να είναι πλήρως αποτελεσματική. Η εκπαίδευση και η ενημέρωση για μέτρα αυτοπροστασίας, η ανάπτυξη δικτύων εθελοντών και η συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών στον σχεδιασμό των δράσεων διαχείρισης κινδύνου μπορούν να αυξήσουν κατακόρυφα τα επίπεδα ετοιμότητας Hansson et al. (2008). Σε άλλες χώρες, όπως το Χονγκ Κονγκ, τα προγράμματα συμμετοχικής εκπαίδευσης έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικά στη μείωση της θνησιμότητας και στην ταχεία αποκατάσταση μετά από

πλημμύρες Chui et al. (2006). Στην Ελλάδα, η απουσία τέτοιων δράσεων είναι εμφανής και η ενσωμάτωσή τους θα αποτελούσε καθοριστική καινοτομία στη διαδικασία διαχείρισης.

Σημαντικές προοπτικές ανοίγονται επίσης από την αξιοποίηση των big data και της τεχνητής νοημοσύνης. Τα νέα εργαλεία μηχανικής μάθησης και νευρωνικών δικτύων μπορούν να συμβάλουν στην ανάλυση μεγάλων όγκων δεδομένων από μετεωρολογικούς σταθμούς, δορυφορικές μετρήσεις και κοινωνικά δίκτυα, εντοπίζοντας πρότυπα που οδηγούν σε πρόβλεψη πλημμυρικών κινδύνων Kim et al. (2023). Πειραματικά μοντέλα που συνδυάζουν υδρολογικά δεδομένα με γεωχωρικές αναλύσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη προβλεπτικών σεναρίων και για τη βελτίωση της επιχειρησιακής ετοιμότητας σε εθνικό επίπεδο.

Όλες αυτές οι τεχνολογικές και περιβαλλοντικές παρεμβάσεις πρέπει να πλαισιωθούν από θεσμικές καινοτομίες. Η δημιουργία ενός Εθνικού Κέντρου Διαχείρισης Πλημμυρικών Κινδύνων, με κεντρικό ρόλο στον συντονισμό όλων των εμπλεκόμενων φορέων, θα μπορούσε να καλύψει το έλλειμμα συνεργασίας που επανειλημμένα αναδείχθηκε σε κρίσεις όπως αυτή της Θεσσαλίας Dimitriou et al. (2024). Παράλληλα, απαιτείται θεσμοθέτηση μηχανισμών για την περιοδική επικαιροποίηση των σχεδίων αντιπλημμυρικής προστασίας, ώστε να ενσωματώνουν τα πιο πρόσφατα επιστημονικά δεδομένα. Ιδιαίτερη σημασία έχει και η εφαρμογή αυστηρών κανόνων για την αποτροπή της αυθαίρετης δόμησης σε ζώνες υψηλού κινδύνου, καθώς και η παροχή κινήτρων σε δήμους και ιδιώτες για επενδύσεις σε πράσινες υποδομές.

Συνολικά, οι καινοτόμες λύσεις για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας απέναντι στις πλημμύρες δεν περιορίζονται σε μεμονωμένες τεχνολογικές εφαρμογές, αλλά συνθέτουν ένα ευρύτερο πλαίσιο μετασχηματισμού της πολιτικής διαχείρισης. Η συνδυαστική εφαρμογή έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης, υβριδικών υποδομών, ανθεκτικού πολεοδομικού σχεδιασμού, προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς, κοινωνικής συμμετοχής, αξιοποίησης δεδομένων μεγάλης κλίμακας και θεσμικών μεταρρυθμίσεων συνιστά τον μόνο δρόμο για την αποτελεσματική προσαρμογή στις νέες συνθήκες της κλιματικής κρίσης. Η εμπειρία των πρόσφατων καταστροφών στη χώρα αποτελεί ισχυρό κίνητρο, αλλά και ταυτόχρονα επιτακτική ανάγκη για να περάσει η Ελλάδα από την αποσπασματική διαχείριση σε μία ολιστική στρατηγική ανθεκτικότητας.

### 8.3. Κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα

Η μελέτη των πλημμυρικών φαινομένων στην Ελλάδα και ιδιαίτερα τα διδάγματα από τις καταστροφές που προκάλεσαν ο «Ιανός» (2020) και ο «Daniel» (2023) αναδεικνύουν όχι μόνο την ανάγκη άμεσης πολιτικής δράσης, αλλά και τα σημαντικά ερευνητικά κενά που εξακολουθούν να υπάρχουν. Οι πλημμύρες συνιστούν πολυπαραγοντικό φαινόμενο, όπου αλληλεπιδρούν υδρομετεωρολογικές, γεωμορφολογικές, κοινωνικοοικονομικές και πολιτικές παράμετροι, και ως εκ τούτου η κατανόηση και η διαχείρισή τους απαιτούν διεπιστημονικές προσεγγίσεις. Η μελλοντική έρευνα καλείται να εστιάσει σε ορισμένους κρίσιμους άξονες που θα επιτρέψουν την ανάπτυξη πιο ολοκληρωμένων και αποτελεσματικών στρατηγικών ανθεκτικότητας.

Πρώτον, απαιτείται η ενίσχυση της γνώσης γύρω από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα υδρολογικά και μετεωρολογικά μοτίβα. Η στατιστική ανάλυση των ακραίων καιρικών φαινομένων στην Ελλάδα έχει ήδη καταδείξει μια σαφή αύξηση στη συχνότητα και την έντασή τους Kotroni et al. (2025) Tolika et al. (2023). Ωστόσο, οι υπάρχουσες μελέτες δεν επαρκούν για να αποτυπώσουν τις μακροπρόθεσμες τάσεις, ούτε για να ενσωματώσουν αξιόπιστα σενάρια κλιματικής αλλαγής σε επίπεδο περιφέρειας ή λεκάνης απορροής. Η μελλοντική έρευνα οφείλει να αναπτύξει κλιματικά μοντέλα υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης που θα επιτρέψουν την ακριβέστερη πρόβλεψη των κινδύνων σε τοπική κλίμακα.

Δεύτερον, σημαντικό πεδίο έρευνας αποτελεί η αξιοποίηση νέων τεχνολογιών. Η χρήση big data, μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης για την πρόβλεψη πλημμυρικών κινδύνων βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο στην Ελλάδα. Σε άλλες χώρες έχουν ήδη αναπτυχθεί νευρωνικά δίκτυα και συστήματα αυτόματης πρόγνωσης που συνδυάζουν μετεωρολογικά δεδομένα με γεωχωρικές πληροφορίες για να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια την πιθανότητα πλημμύρας Kim et al. (2023). Η μελλοντική έρευνα στην Ελλάδα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη πιλοτικών εφαρμογών που θα ενσωματώνουν δεδομένα πραγματικού χρόνου από αισθητήρες, δορυφόρους και κοινωνικά δίκτυα, επιτρέποντας την ταχύτερη διάγνωση κρίσιμων καταστάσεων.

Ένας τρίτος άξονας αφορά την κατανόηση των κοινωνικών και ψυχολογικών διαστάσεων των πλημμυρών. Παρά τις υπάρχουσες μελέτες για τα χαρακτηριστικά της θνησιμότητας Diakakis et al. (2016) ή για την κοινωνική τρωτότητα, εξακολουθεί να υπάρχει έλλειμμα στην έρευνα σχετικά με το πώς οι κοινωνίες προσαρμόζονται ή αντιδρούν σε ακραία γεγονότα. Χρειάζονται περισσότερες ποιοτικές και ποσοτικές μελέτες για την αντίληψη του κινδύνου από τους πολίτες, την εμπιστοσύνη στους θεσμούς, την ψυχολογική ανθεκτικότητα και τη

διάθεση συμμετοχής σε δράσεις πρόληψης. Αυτές οι γνώσεις μπορούν να συμβάλουν στη διαμόρφωση πιο στοχευμένων προγραμμάτων εκπαίδευσης και ευαισθητοποίησης.

Επιπλέον, είναι αναγκαία η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ πλημμυρών και υγειονομικών κρίσεων. Η εμπειρία της Θεσσαλίας μετά τον «Daniel» έδειξε ότι οι πλημμύρες μπορούν να προκαλέσουν δευτερογενείς κρίσεις, όπως την αύξηση μολυσματικών ασθενειών, την επιμόλυνση υδάτινων πόρων και την επιδείνωση της δημόσιας υγείας Manroulis et al. (2024). Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να εστιάσει σε διατομεακές μελέτες που θα συνδυάζουν περιβαλλοντική, υγειονομική και κοινωνική επιστήμη, ώστε να χαρτογραφηθούν οι αλυσιδωτές επιπτώσεις και να σχεδιαστούν πιο ολοκληρωμένα σχέδια διαχείρισης.

Σημαντική κατεύθυνση έρευνας αποτελεί επίσης η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των υποδομών και των πολιτικών. Η καταστροφή γεφυρών και άλλων κρίσιμων έργων μετά τον «Daniel» Medentzidis et al. (2025) ανέδειξε ότι μεγάλο μέρος των υφιστάμενων υποδομών έχει σχεδιαστεί με παρωχημένα δεδομένα. Ερευνητικές προσπάθειες θα πρέπει να επικεντρωθούν στη δημιουργία νέων μοντέλων σχεδιασμού, που θα λαμβάνουν υπόψη την κλιματική αβεβαιότητα, και στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για τον περιοδικό έλεγχο και την αναβάθμιση των υφιστάμενων έργων. Αντίστοιχα, θα πρέπει να αξιολογηθεί η εφαρμογή των σχεδίων διαχείρισης που προβλέπει η Οδηγία 2007/60/ΕΚ, ώστε να διαπιστωθεί ο βαθμός αποτελεσματικότητάς τους και να εντοπιστούν οι τομείς που χρειάζονται βελτίωση.

Τέλος, η μελλοντική έρευνα πρέπει να εστιάσει στις οικονομικές και θεσμικές πτυχές της ανθεκτικότητας. Παρά τις διεθνείς μελέτες για το κόστος των πλημμυρών και τα οφέλη των πράσινων υποδομών Wang et al. (2022), στην Ελλάδα απουσιάζουν εκτεταμένες αναλύσεις κόστους–οφέλους για τις διάφορες στρατηγικές πρόληψης. Η ανάπτυξη τέτοιων μελετών θα μπορούσε να στηρίξει τις πολιτικές αποφάσεις και να ενισχύσει τη χρηματοδότηση έργων που αποδεδειγμένα αυξάνουν την ανθεκτικότητα. Εξίσου σημαντικό είναι να ερευνηθούν νέα μοντέλα διακυβέρνησης και συνεργασίας μεταξύ κράτους, τοπικής αυτοδιοίκησης, ιδιωτικού τομέα και κοινωνίας των πολιτών, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα και η αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων.

Επομένως, οι κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα οφείλουν να κινηθούν σε πολλά επίπεδα: κλιματικά μοντέλα υψηλής ανάλυσης, τεχνολογικές καινοτομίες με big data και AI, κοινωνικές και ψυχολογικές διαστάσεις, επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, αξιολόγηση υποδομών και πολιτικών, καθώς και οικονομική–θεσμική ανάλυση. Μόνο μέσα από τέτοιες διεπιστημονικές και πολυεπίπεδες ερευνητικές προσπάθειες θα καταστεί δυνατή η ανάπτυξη

μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής ανθεκτικότητας για την Ελλάδα, ικανής να ανταποκριθεί στις προκλήσεις της κλιματικής κρίσης.

## 9. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Η ανάλυση των πλημμυρικών φαινομένων στην Ελλάδα, με επίκεντρο τις πρόσφατες καταστροφές από τον μεσογειακό κυκλώνα «Ιανό» το 2020 και την καταιγίδα «Daniel» το 2023 στη Θεσσαλία, ανέδειξε με τον πλέον δραματικό τρόπο τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η χώρα στην εποχή της κλιματικής κρίσης. Η συσσώρευση επιστημονικών δεδομένων και εμπειρικών παρατηρήσεων, σε συνδυασμό με την αποτίμηση των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων, επιτρέπει τη διατύπωση κρίσιμων συμπερασμάτων, αλλά και συγκεκριμένων προτάσεων για τη διαμόρφωση μιας πιο συνεκτικής, ανθεκτικής και προσαρμοστικής στρατηγικής διαχείρισης πλημμυρικών κινδύνων.

Ένα από τα πιο καθαρά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι οι πλημμύρες στην Ελλάδα δεν αποτελούν ένα νέο φαινόμενο, αλλά εντάσσονται σε μια μακρά ιστορική συνέχεια. Από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, οι μεγάλες πλημμύρες έχουν διαμορφώσει τον χαρακτήρα της ελληνικής υπαίθρου και έχουν επηρεάσει σημαντικά την κοινωνική και οικονομική ζωή Angelakis et al. (2023). Ωστόσο, η ένταση και η συχνότητά τους τα τελευταία χρόνια αυξάνεται με ρυθμούς που δεν μπορούν να εξηγηθούν αποκλειστικά από φυσικούς παράγοντες. Η κλιματική αλλαγή έχει ήδη αρχίσει να μεταβάλλει τα υδρολογικά πρότυπα, με αποτέλεσμα οι ακραίες βροχοπτώσεις να είναι πιο έντονες και να διαρκούν περισσότερο Kotroni et al. (2025) , Tolika et al. (2023). Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στη χρήση γης, την αποψίλωση, την αστικοποίηση και την άναρχη δόμηση, αυξάνει την τρωτότητα και καθιστά τις πλημμύρες καταστροφικότερες Soulios et al. (2018) , Bathrellos et al. (2018).

Η περίπτωση του «Daniel» αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της αδυναμίας του υφιστάμενου συστήματος διαχείρισης κινδύνων να ανταποκριθεί στις προκλήσεις. Παρά την ύπαρξη επιστημονικών προειδοποιήσεων και την καταγεγραμμένη τρωτότητα της Θεσσαλίας σε πλημμύρες Diakakis et al. (2012), η καταστροφή έλαβε τεράστιες διαστάσεις, με ανθρώπινες απώλειες, καταστροφή υποδομών, αγροτικών καλλιεργειών και σοβαρές περιβαλλοντικές συνέπειες Dimitriou et al. (2024). Η ανάλυση των αιτιών δείχνει ότι το πρόβλημα δεν ήταν μόνο η ένταση του φαινομένου, αλλά και η έλλειψη ενός ολοκληρωμένου μηχανισμού πρόληψης και διαχείρισης. Ο κατακερματισμός αρμοδιοτήτων, οι καθυστερήσεις στην ενημέρωση, η ανεπαρκής συντήρηση υποδομών και η απουσία συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης αποδείχθηκαν καθοριστικοί παράγοντες Diakakis et al. (2025).

Ένα δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι η Ελλάδα εξακολουθεί να επενδύει κυρίως σε αντιδραστικά μέτρα, δηλαδή στην αποκατάσταση των ζημιών μετά την καταστροφή, και λιγότερο σε προληπτικές δράσεις. Οι παραδοσιακές υποδομές αντιπλημμυρικής προστασίας, όπως φράγματα και αναχώματα, αποτελούν αναγκαία αλλά ανεπαρκή μέτρα, ειδικά όταν δεν συνοδεύονται από συνεχή συντήρηση και προσαρμογή στα νέα υδρολογικά δεδομένα Medentzidis et al. (2025). Αντίθετα, διεθνείς πρακτικές δείχνουν ότι η έμφαση πρέπει να δοθεί στη συνδυαστική εφαρμογή «γκρι» και «πράσινων» υποδομών, με την αποκατάσταση υγροτόπων, τη δημιουργία ζωνών ανάσχεσης πλημμυρικών ροών και τη διατήρηση φυσικών πλημμυρικών πεδιάδων Kiedrzyńska et al. (2015), Garcia-Ayllon & Radke et al. (2021).

Η ανάλυση έδειξε επίσης ότι οι πλημμύρες δεν έχουν μόνο φυσική διάσταση, αλλά και έντονη κοινωνική. Η θνησιμότητα και οι επιπτώσεις επηρεάζονται άμεσα από κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά, όπως η ηλικία, το επίπεδο εκπαίδευσης, η οικονομική κατάσταση και η πρόσβαση σε πληροφορίες Diakakis et al. (2016). Η χαμηλή κοινωνική ανθεκτικότητα στην Ελλάδα, αποτέλεσμα ελλιπούς εκπαίδευσης και ενημέρωσης, οδηγεί σε χαμηλή ετοιμότητα και αυξάνει την έκθεση στον κίνδυνο. Αυτό σημαίνει ότι οι στρατηγικές διαχείρισης δεν μπορούν να περιοριστούν σε τεχνικά μέτρα, αλλά πρέπει να περιλαμβάνουν και δράσεις ενδυνάμωσης των κοινωνιών.

Στο ίδιο πλαίσιο, η προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς από πλημμύρες αναδεικνύεται σε νέα πρόκληση. Περιοχές όπως η Αρχαία Ολυμπία, που απειλήθηκαν από πλημμύρες, καταδεικνύουν ότι οι στρατηγικές πρέπει να ενσωματώνουν και τη διάσταση της πολιτιστικής προστασίας, καθώς οι απώλειες σε μνημεία και ιστορικούς χώρους δεν είναι αναστρέψιμες και επηρεάζουν άμεσα την ταυτότητα και την οικονομία της χώρας Kalogeropoulos et al. (2023).

Η μελέτη οδηγεί έτσι σε μια σειρά προτάσεων που αφορούν την ανάγκη μετάβασης από την αποσπασματική και αντιδραστική προσέγγιση σε μια ολιστική, πολυδιάστατη στρατηγική. Πρώτον, απαιτείται η δημιουργία ενός ενιαίου Εθνικού Κέντρου Διαχείρισης Πλημμυρικών Κινδύνων, το οποίο θα συντονίζει όλα τα εμπλεκόμενα υπουργεία, φορείς και επίπεδα διοίκησης. Ένα τέτοιο κέντρο θα μπορούσε να λειτουργεί ως κόμβος συλλογής, ανάλυσης και διάχυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αλλά και ως φορέας στρατηγικού σχεδιασμού. Δεύτερον, χρειάζεται η συστηματική επένδυση σε τεχνολογίες πρόγνωσης και προειδοποίησης, με αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων, τηλεπισκόπησης και big data. Η ανάπτυξη πιλοτικών εφαρμογών που θα ενσωματώνουν τεχνητή νοημοσύνη και μοντέλα

μηχανικής μάθησης για την πρόβλεψη πλημμυρικών κινδύνων μπορεί να αποτελέσει σημαντική καινοτομία Kim et al. (2023).

Τρίτον, οι στρατηγικές πρέπει να δώσουν έμφαση στην προσαρμοστική διαχείριση υποδομών. Αυτό σημαίνει περιοδικό έλεγχο, αναβάθμιση και επανασχεδιασμό υφιστάμενων έργων με βάση νέα δεδομένα, καθώς και εφαρμογή πρακτικών που θα συνδυάζουν την τεχνική θωράκιση με τις λύσεις που προσφέρει η φύση. Η υιοθέτηση υβριδικών συστημάτων, που συνδυάζουν φράγματα με φυσικές ζώνες απορρόφησης υδάτων, μπορεί να αυξήσει την ανθεκτικότητα και να μειώσει το οικονομικό κόστος σε βάθος χρόνου Wang et al. (2022).

Τέταρτον, απαιτείται ενσωμάτωση της διάστασης του κινδύνου στον χωροταξικό και πολεοδομικό σχεδιασμό. Η δόμηση σε κοίτες ρεμάτων και σε πεδινές εκτάσεις υψηλού κινδύνου πρέπει να απαγορευθεί αυστηρά, ενώ τα εργαλεία GIS και οι χαρτογραφήσεις επικινδυνότητας πρέπει να χρησιμοποιούνται συστηματικά από τις αρμόδιες αρχές Diakakis et al. (2014). Παράλληλα, η ανάπτυξη «ανθεκτικών πόλεων», με πράσινες στέγες, δίκτυα απορρόφησης ομβρίων και βιώσιμες υποδομές, μπορεί να μειώσει δραστικά τις επιπτώσεις σε αστικές περιοχές.

Πέμπτον, κεντρικό ρόλο πρέπει να διαδραματίσει η κοινωνική ανθεκτικότητα. Προγράμματα εκπαίδευσης, συμμετοχικού σχεδιασμού και ανάπτυξης τοπικών δικτύων εθελοντών μπορούν να ενδυναμώσουν τους πολίτες και να μειώσουν την έκθεση σε κινδύνους. Η ενίσχυση της εμπιστοσύνης στους θεσμούς και η ενδυνάμωση της κοινωνικής συνοχής αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την αποτελεσματική εφαρμογή των πολιτικών Hansson et al. (2008) , Chui et al. (2006).

Έκτον, η μελλοντική στρατηγική πρέπει να περιλαμβάνει ειδικές ρυθμίσεις για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς, με εξειδικευμένα σχέδια για μνημεία και ιστορικούς χώρους. Η διάσταση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για την Ελλάδα, όπου η πολιτιστική κληρονομιά αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της εθνικής ταυτότητας αλλά και της οικονομίας.

Τέλος, καθοριστική σημασία έχει η οικονομική και θεσμική διάσταση. Η ανάπτυξη μελετών κόστους-οφέλους για διαφορετικές στρατηγικές πρόληψης μπορεί να στηρίξει τεκμηριωμένες πολιτικές αποφάσεις, ενώ η ενίσχυση της χρηματοδότησης για πράσινες υποδομές θα αποδειχθεί μακροπρόθεσμα αποδοτικότερη από την ακριβή αποκατάσταση καταστροφών Wang et al. (2022). Παράλληλα, απαιτείται η θεσμική κατοχύρωση διαδικασιών τακτικής επικαιροποίησης των σχεδίων διαχείρισης και η δημιουργία μηχανισμών αξιολόγησης της αποτελεσματικότητάς τους.

Κλείνοντας αυτή την διπλωματική εργασία, πρέπει να σημειωθεί ότι η μελέτη αποδεικνύει ότι η Ελλάδα βρίσκεται σε κρίσιμο σταυροδρόμι. Οι πλημμύρες θα συνεχίσουν να αποτελούν μέρος της κλιματικής και κοινωνικής πραγματικότητας, αλλά η ένταση και οι επιπτώσεις τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις επιλογές πολιτικής και διαχείρισης. Τα συμπεράσματα αναδεικνύουν τα δομικά κενά της υφιστάμενης πολιτικής, αλλά ταυτόχρονα προσφέρουν έναν οδικό χάρτη για το μέλλον: τεχνολογική καινοτομία, υβριδικές υποδομές, προσαρμοστικός χωροταξικός σχεδιασμός, κοινωνική ενδυνάμωση, προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς και θεσμική αναβάθμιση. Η μετάβαση από την αποσπασματική αντίδραση σε μια συνεκτική και πολυδιάστατη στρατηγική ανθεκτικότητας δεν αποτελεί μόνο επιλογή, αλλά αναγκαιότητα για την επιβίωση και την ευημερία των τοπικών κοινωνιών. Η πρόκληση είναι τεράστια, αλλά η ευκαιρία να μετατραπεί η κρίση σε μοχλό μετασχηματισμού είναι ακόμη μεγαλύτερη.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Androulidakis, Y., Makris, C., Mallios, Z., Pytharoulis, I., Baltikas, V., & Krestenitis, Y. (2023). Storm surges and coastal inundation during extreme events in the Mediterranean Sea: the IANOS Medicane. *Natural Hazards*, *117*(1), 939-978.
- Angelakis, A. N., Antoniou, G., Voudouris, K., Kazakis, N., Dalezios, N., & Dercas, N. (2020). History of floods in Greece: Causes and measures for protection. *Natural Hazards*, *101*, 833-852.
- Angelakis, A. N., Capodaglio, A. G., Valipour, M., Krasilnikoff, J., Ahmed, A. T., Mandi, L., ... & Dercas, N. (2023). Evolution of floods: from ancient times to the present times (CA 7600 BC to the present) and the future. *Land*, *12*(6), 1211.
- Antoniadis, N., & Loupasakis, C. (2025). A Historical Review of the Land Subsidence Phenomena Interaction with Flooding, Land Use Changes, and Storms at the East Thessaly Basin—Insights from InSAR Data. *Land (2012)*, *14*(4).
- Antoniadis, N., Alatza, S., Loupasakis, C., & Kontoes, C. (2023). Land subsidence phenomena vs. Coastal flood hazard—the cases of messolonghi and aitolikon (Greece). *Remote Sensing*, *15*(8), 2112.
- Bathrellos, G. D., Skilodimou, H. D., Soukis, K., & Koskeridou, E. (2018). Temporal and spatial analysis of flood occurrences in the drainage basin of pinios river (thessaly, central greece). *Land*, *7*(3), 106.
- Chui, S. K., Leung, J. K., & Chu, C. K. (2006). The development of a comprehensive flood prevention strategy for Hong Kong. *International Journal of River Basin Management*, *4*(1), 5-15.
- Diakakis, M. (2012). Rainfall thresholds for flood triggering. The case of Marathonas in Greece. *Natural Hazards*, *60*, 789-800.
- Diakakis, M. (2016). Have flood mortality qualitative characteristics changed during the last decades? The case study of Greece. *Environmental hazards*, *15*(2), 148-159.

- Diakakis, M. (2017). Flood seasonality in Greece and its comparison to seasonal distribution of flooding in selected areas across southern Europe. *Journal of Flood Risk Management, 10*(1), 30-41.
- Diakakis, M., & Deligiannakis, G. (2017). Flood fatalities in Greece: 1970–2010. *Journal of Flood Risk Management, 10*(1), 115-123.
- Diakakis, M., Deligiannakis, G., Katsetsiadou, K., Lekkas, E., Melaki, M., & Antoniadis, Z. (2016). Mapping and classification of direct effects of the flood of October 2014 in Athens. *Bulletin of the Geological Society of Greece, 50*(2), 681-690.
- Diakakis, M., Mavroulis, S., & Deligiannakis, G. (2012). Floods in Greece, a statistical and spatial approach. *Natural hazards, 62*, 485-500.
- Diakakis, M., Pallikarakis, A., & Katsetsiadou, K. (2014). Using a Spatio-Temporal gis database to monitor the spatial evolution of urban flooding phenomena. The case of athens metropolitan area in greece. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 3*(1), 96-109.
- Diakakis, M., Sarantopoulou, A., Gogou, M., Filis, C., Nastos, P., Kapris, I., ... & Lekkas, E. (2025). Cascade Effects Induced by Extreme Storms and Floods: The Case of Storm Daniel (2023) in Greece. *Water, 17*(7), 912.
- Dimitriou, E., Efstratiadis, A., Zotou, I., Papadopoulos, A., Iliopoulou, T., Sakki, G. K., ... & Koutsoyiannis, D. (2024). Post-analysis of Daniel extreme flood event in Thessaly, Central Greece: Practical lessons and the value of state-of-the-art water-monitoring networks. *Water, 16*(7), 980.
- Garcia-Ayllon, S., & Radke, J. (2021). Geostatistical analysis of the spatial correlation between territorial anthropization and flooding vulnerability: Application to the DANA phenomenon in a Mediterranean watershed. *Applied Sciences, 11*(2), 809.
- Hansson, K., Danielson, M., & Ekenberg, L. (2008). A framework for evaluation of flood management strategies. *Journal of environmental management, 86*(3), 465-480.
- Ibeanu, C., Ghadiri Nejad, M., & Ghasemi, M. (2023). Developing effective project management strategy for urban flood disaster prevention project in EDO state capital,

Nigeria. *Urban Science*, 7(2), 37.

Kalogeropoulos, K., Tsanakas, K., Stathopoulos, N., Tsesmelis, D. E., & Tsatsaris, A. (2023). Cultural heritage in the light of flood hazard: The case of the “Ancient” Olympia, Greece. *Hydrology*, 10(3), 61.

Karkani, A., Evelpidou, N., Tzouxanioti, M., Petropoulos, A., Santangelo, N., Maroukian, H., ... & Lakidi, L. (2021). Flash Flood Susceptibility Evaluation in Human-Affected Areas Using Geomorphological Methods—The Case of 9 August 2020, Euboea, Greece. A GIS-Based Approach. *GeoHazards*, 2(4), 366-382.

Katsanos, D., Retalis, A., Kalogiros, J., Psiloglou, B. E., Roukounakis, N., & Anagnostou, M. (2024). Performance Evaluation of Satellite Precipitation Products During Extreme Events—The Case of the Medicane Daniel in Thessaly, Greece. *Remote Sensing*, 16(22), 4216.

Kiedrzyńska, E., Kiedrzyński, M., & Zalewski, M. (2015). Sustainable floodplain management for flood prevention and water quality improvement. *Natural Hazards*, 76, 955-977.

Kim, K., Kim, J., Choi, H., Kwon, O., Jang, Y., Ryu, S., ... & Cha, S. W. (2023). Pre-diagnosis of flooding and drying in proton exchange membrane fuel cells by bagging ensemble deep learning models using long short-term memory and convolutional neural networks. *Energy*, 266, 126441.

Kolios, S., & Papavasileiou, N. (2024). Daily Rainfall Patterns During Storm “Daniel” Based on Different Satellite Data. *Atmosphere*, 15(11), 1277.

Kong, Y., Hu, H., Liu, M., Hou, Y., Kolivoška, V., Vesztergom, S., & Broekmann, P. (2022). Visualisation and quantification of flooding phenomena in gas diffusion electrodes used for electrochemical CO<sub>2</sub> reduction: A combined EDX/ICP–MS approach. *Journal of Catalysis*, 408, 1-8.

Kotroni, V., Bezes, A., Dafis, S., Founda, D., Galanaki, E., Giannaros, C., ... & Papavasileiou, G. (2025). Long-Term Statistical Analysis of Severe Weather and Climate Events in Greece. *Atmosphere*, 16(1), 105.

Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., & Daliakopoulos, I. N. (2010). Seasonality of floods and their

- hydrometeorologic characteristics in the island of Crete. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), 90-100.
- Koutsoyiannis, D., Mamassis, N., Efstratiadis, A., Zarkadoulas, N., & Markonis, Y. (2012). Floods in Greece. *Changes of flood risk in Europe*, 238-256.
- Mavroulis, S., Mavrouli, M., Lekkas, E., & Tsakris, A. (2024). Impact of the September 2023 Storm Daniel and Subsequent Flooding in Thessaly (Greece) on the Natural and Built Environment and on Infectious Disease Emergence. *Environments*, 11(8), 163.
- Medentzidis, C. R., Tsenis, T., & Kappatos, V. (2024). Storm Daniel Aftermath on Bridge Infrastructures and Strategies for Future Resilience. In *Conference on Sustainable Urban Mobility* (pp. 3-13). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Medentzidis, C. R., Tsenis, T., & Kappatos, V. (2025). Storm Daniel Aftermath on Bridge Infrastructures and Strategies for Future. In *Climate Crisis and Resilient Transportation Systems: Proceedings of the 7th Conference on Sustainable Mobility, CSuM2024, September 4–6, 2024, Plastira's Lake, Greece—Volume I: Advances in Resilience of Transportation Systems and Energy Solutions* (p. 3). Springer Nature.
- Qi, W., Ma, C., Xu, H., Zhao, K., & Chen, Z. (2022). A comprehensive analysis method of spatial prioritization for urban flood management based on source tracking. *Ecological Indicators*, 135, 108565.
- Raadgever, G. T., Booister, N., & Steenstra, M. K. (2018). Flood risk management strategies. *Flood Risk Management Strategies and Governance*, 93-100.
- Ruponen, P., Valanto, P., Acanfora, M., Dankowski, H., Lee, G. J., Mauro, F., ... & van't Veer, R. (2022). Results of an international benchmark study on numerical simulation of flooding and motions of a damaged ropax ship. *Applied Ocean Research*, 123, 103153.
- Samanpour, H., Ahmadi, N., & Jabbary, A. (2022). Effects of applying brand-new designs on the performance of PEM fuel cell and water flooding phenomena. *Iran. J. Chem. Chem. Eng. Research Article Vol*, 41(2).
- Skordas, E. S., Sarlis, N. V., & Varotsos, P. A. (2025). Possible detection of the onset of flash flooding in Thessaly Greece by measurements of the Earth's surface electric

field. *Natural Hazards*, 1-17.

Soulios, G., Stournaras, G., Nikas, K., & Mattas, C. (2018). The floods in Greece: the case of Mandra in Attica. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 52, 131-144.

Spyrou, C., Varlas, G., Pappa, A., Mentzafou, A., Katsafados, P., Papadopoulos, A., ... & Kalogiros, J. (2020). Implementation of a nowcasting hydrometeorological system for studying flash flood events: The Case of Mandra, Greece. *Remote Sensing*, 12(17), 2784.

Tolika, K., & Skoulikaris, C. (2023). Atmospheric circulation types and floods' occurrence; A thorough analysis over Greece. *Science of The Total Environment*, 865, 161217.

Tsanakas, K., Gaki-Papanastassiou, K., Kalogeropoulos, K., Chalkias, C., Katsafados, P., & Karymbalis, E. (2016). Investigation of flash flood natural causes of Xirolaki Torrent, Northern Greece based on GIS modeling and geomorphological analysis. *Natural Hazards*, 84, 1015-1033.

Varlas, G., Anagnostou, M. N., Spyrou, C., Papadopoulos, A., Kalogiros, J., Mentzafou, A., ... & Katsafados, P. (2018). A multi-platform hydrometeorological analysis of the flash flood event of 15 November 2017 in Attica, Greece. *Remote Sensing*, 11(1), 45.

Wang, L., Cui, S., Li, Y., Huang, H., Manandhar, B., Nitivattananon, V., ... & Huang, W. (2022). A review of the flood management: from flood control to flood resilience. *Heliyon*, 8(11).