

Διερεύνηση πιθανών θέσεων για την κατασκευή μικρών φραγμάτων για βελτίωση της εξοικονόμησης νερού με τη χρήση υδραυλικών μοντέλων στη Μεσσηνία

Α. Καββαδίας^α, Δ. Λακαφώσης^β

^α Γεωπόνος, MSc. Υπ. Διδάκτορας, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

^β Πολιτικός μηχανικός Παν. Πατρών, MSc. Υδροεξυγιαντική ΑΕ

Μικροφράγματα: Ήπια λύση για εξοικονόμηση νερού και ανθεκτικότητα στην κλιματική κρίση

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερες περιοχές της Μεσογείου, με κυρίαρχες ξηρικές καλλιέργειες όπως οι ελαιώνες, αντιμετωπίζουν σοβαρές προκλήσεις λόγω της κλιματικής αλλαγής: παρατεταμένες περίοδοι ξηρασίας, αισθητή μείωση των βροχοπτώσεων και απουσία βιώσιμων και ήπιων υδραυλικών υποδομών. Οι αγρότες δυσκολεύονται να εξασφαλίσουν νερό για τις καλλιέργειες τους, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες. Ταυτόχρονα, η αυξανόμενη συχνότητα και σφοδρότητα των δασικών πυρκαγιών το καλοκαίρι, καθιστά αναγκαία την ύπαρξη τοπικών αποθεμάτων νερού για σκοπούς πυρόσβεσης. Σε αυτό το πλαίσιο, προκύπτει η ανάγκη διερεύνησης κατάλληλων θέσεων για την κατασκευή μικρής κλίμακας φραγμάτων συγκράτησης νερού εντός κοίτης υδατορεμάτων (small inline dams), ώστε να εξυπηρετούν τόσο την άρδευση όσο και την πολιτική προστασία, με χαμηλό κόστος και ελάχιστη περιβαλλοντική όχληση.

Εφαρμογή υδραυλικής προσομοίωσης με το εργαλείο HEC-RAS για εντοπισμό κατάλληλων θέσεων φραγμάτων

Η κατασκευή μικροφραγμάτων σε επιλεγμένα σημεία ρεμάτων αποτελεί μια ήπια, χαμηλού κόστους και περιβαλλοντικά φιλική παρέμβαση, που μπορεί να εφαρμοστεί γρήγορα και χωρίς εκτεταμένη τεχνική επιβάρυνση. Τα φράγματα αυτά μπορούν να κατασκευαστούν σε σημεία όπου το ρέμα στενεύει και βαθιάίνει, επιτρέποντας τη δημιουργία μικρών ταμιευτήρων χωρίς σοβαρή αλλοίωση του τοπίου ή των οικοσυστημάτων. Παράλληλα, προσφέρουν άμεση αποθηκευτική δυνατότητα για χρήση σε άρδευση ή πυρόσβεση σε περιόδους αυξημένης ανάγκης.

Πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική διερεύνηση για τον εντοπισμό των βέλτιστων θέσεων κατασκευής μικροφραγμάτων σε φυσικά ρέματα, με την αξιοποίηση υδραυλικού μοντέλου προσομοίωσης της ροής του νερού, με στόχο την κατανόηση της συμπεριφοράς του στις φυσικές ρεματιές με βάση:

- Την παρουσία στενώσεων και βαθιών διατομών στα ρέματα, ώστε να απαιτείται μικρότερη ποσότητα υλικών για την κατασκευή.
- Τη δυνατότητα ταχείας πλήρωσης από τις υφιστάμενες βροχοπτώσεις.
- Την εγγύτητα από τις περιοχές ενδιαφέροντος

Περιοχή Διερεύνησης: Χώρα Μεσσηνίας

Η περιοχή ενδιαφέροντος αφορά στην ευρύτερη περιοχή της Χώρας Μεσσηνίας, στον Δήμο Πύλου-Νέστορος, η οποία είναι μια αγροτική περιοχή στη νοτιοδυτική Πελοπόννησο, γνωστή για την εκτεταμένη καλλιέργεια ελαιώνων. Η περιοχή προτάθηκε από την τοπική Ομάδα Παραγωγών Ελαιολάδου 'ΝΗΛΕΑΣ' η οποία ιδρύθηκε το 2002 από 54 ιδρυτικά μέλη με τη φιλοδοξία να εφαρμόσει για πρώτη φορά στην Ελλάδα σύστημα Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Παραγωγής στην καλλιέργεια της

ελιάς. Με αίσθημα περιβαλλοντικής και κοινωνικής ευθύνης πρωτοστατεί με την εφαρμογή προτύπων περιβαλλοντικής διαχείρισης και ποιότητας, τη διαχείριση ευρωπαϊκών προγραμμάτων, καθώς και με πρωτοβουλίες για τη δημιουργία υποδομών υποστήριξης της άρδευσης, της δασοπυρόσβεσης, και την εφαρμογή νέων τεχνολογιών με στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των τοπικών ελαιοκομικών κοινοτήτων.

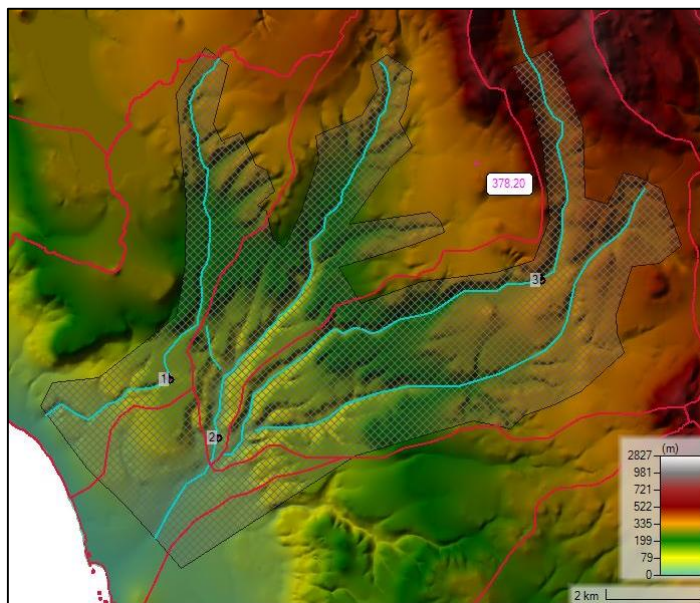


Εικόνα 1. Ελαιώνες στην περιοχή της Χώρας, Μεσσηνία.

Οι εκτάσεις των ελαιόδεντρων γύρω από τη Χώρα προσεγγίζουν τα 35.000 στρέμματα, ενώ σχεδόν όλος ο πληθυσμός των 3.500 κατοίκων της περιοχής, απασχολείται μερικώς ή πλήρως με την καλλιέργειά τους. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο, με υψομετρικές διακυμάνσεις που εναλλάσσονται από την επιφάνεια της θάλασσας έως τα 1000 μέτρα, και το μέσο ετήσιο ύψος της βροχόπτωσης κυμαίνεται από 600 έως 800 mm, παρουσιάζοντας φθίνουσα τάση τα τελευταία χρόνια λόγω της κλιματικής κρίσης. Χαρακτηριστικό είναι ότι το 2024 καταγράφηκε ύψος βροχής μόλις 485 mm (Μ. Σ. Πύλου, ΕΑΑ). Η λειψυδρία και η έλλειψη βασικών υδραυλικών υποδομών καθιστά την περιοχή ευάλωτη σε ξηρασίες και πυρκαγιές. Συνεπώς, η περιοχή πληροί τα βασικά χαρακτηριστικά που απαιτούν άμεσες λύσεις διαχείρισης των τοπικών υδατικών πόρων και καθιστούν σκόπιμη τη διερεύνηση πιθανών θέσεων κατασκευής ήπιων υποδομών συγκράτησης νερού.

Μεθοδολογία και εργαλεία εντοπισμού βέλτιστων θέσεων κατασκευής μικροφραγμάτων για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας σε μεσογειακά οικοσυστήματα

Ως πεδίο διερεύνησης και εφαρμογής σεναρίων υδραυλικής προσομοίωσης επιλέχθηκαν τρεις λεκάνες απορροής που διατρέχουν την ευρύτερη περιοχή, με συνολική έκταση περίπου **117 km²**. Οι λεκάνες αυτές περιλαμβάνουν αρκετά φυσικά ρέματα όπως ο Σελάς (5 km), το Αλαφινόρεμα (10,3 Km) και η Καμπίροβα (18,9 km) τα οποία στο πλαίσιο της μελέτης της 2^{ης} Αναθεώρησης των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής θεωρήθηκαν αρκετά σημαντικά ώστε να συγκροτούν ποτάμια υδατικά συστήματα, καθώς και άλλα μικρότερα ρέματα που είναι σε φυσική κατάσταση, με απότομες κλίσεις και εμφανείς στενώσεις, χαρακτηριστικά που προσφέρονται για στοχευμένη συγκέντρωση νερού.



Εικόνα 2. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της Περιοχής Μελέτης όπου διακρίνονται τα ρέματα (με γαλάζιο) και τα όρια των τριών λεκανών απορροής (με κόκκινο)

Στις τρεις λεκάνες απορροής εφαρμόστηκε επίλυση διδιάστατου υδραυλικού μοντέλου ροής μέσω του λογισμικού **HEC-RAS**. Η μεθοδολογία περιελάμβανε την εισαγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) χωρικής ανάλυσης 25m/apixel της έκτασης των τριών λεκανών απορροής ενδιαφέροντος, για την απόδοση της γεωμορφολογίας επί της οποίας θα προσομοιωθεί η συμπεριφορά της ροής του νερού. Επί του DEM ορίστηκε υπολογιστικό χωρίο και δημιουργήθηκε δισδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα (computational mesh) αποτελούμενο από 178.112 κελιά, με χωρική ανάλυση 10 m εντός της κοίτης των ρεμάτων και 20 m στις λοιπές εκτάσεις. Για τη βελτίωση της υδραυλικής ακρίβειας του μοντέλου στις κρίσιμες ζώνες ροής, εφαρμόστηκε υψηλότερης ανάλυσης πλέγμα εντός της κοίτης, όπου παρατηρούνται αυξημένες ταχύτητες και βάθη, τα οποία επηρεάζουν καθοριστικά την ακρίβεια της προσομοίωσης.

Σε επόμενο βήμα, ορίστηκαν ενδεικτικές ετήσιες παροχές στα ρέματα, οι οποίες προσεγγίζουν τον διαθέσιμο όγκο επιφανειακού νερού ανά έτος, λαμβάνοντας υπόψη το ύψος της ετήσιας βροχόπτωσης των τελευταίων ετών και την έκταση κάθε λεκάνης, μετά την αφαίρεση των εκτιμώμενων απωλειών λόγω εξάτμισης και διήθησης, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση.

$$\text{Παροχή αιχμής (m}^3\text{/έτος)} = (\text{Υψος βροχής (m/έτος)} * \text{Έκταση (m}^2\text{)}) * (1 - C_{\text{Εξάτμισης}} - C_{\text{Διήθησης}})$$

Στα μεσογειακά δασικά οικοσυστήματα, οι συντελεστές εξάτμισης και διήθησης που επηρεάζουν τον όγκο διαθέσιμου επιφανειακού νερού κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα λόγω των κλιματικών και γεωμορφολογικών συνθηκών. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, οι παραδοχές ορίστηκαν με βάση το χειρότερο σενάριο, δηλαδή **84%** για την εξάτμιση¹ και **40%** για τη διήθηση² της ετήσιας

¹ Η εξάτμιση από τα μεσογειακά δάση, κυρίως λόγω της διαπνοής και της εξάτμισης από το έδαφος, μπορεί να φτάσει έως και το 84% της ετήσιας βροχόπτωσης, ανάλογα με το είδος της βλάστησης και τις κλιματικές συνθήκες.

² Η διήθηση εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, την κλίση και την κάλυψη της βλάστησης. Σε μεσογειακά δασικά οικοσυστήματα, ένα ενδεικτικό ποσοστό διήθησης μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 10% και 30% της ετήσιας βροχόπτωσης.

βροχόπτωσης, σύμφωνα με τιμές που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία. Η επιλογή αυτή ενισχύει τον ρεαλισμό της υδραυλικής προσομοίωσης, καθώς επιτρέπει την προσέγγιση της διαθέσιμης παροχής στα ρέματα υπό συνθήκες αυξημένων απωλειών, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές των μεσογειακών ξηροθερμικών τοπίων.

Κατά την ανάλυση των σεναρίων ροής, καταγράφηκε η χωρική κατανομή του βάθους και της ταχύτητας του νερού σε όλα τα ρέματα της περιοχής μελέτης. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, εντοπίστηκαν **6** σημεία με στένωση της κοίτης, στα οποία παρατηρήθηκαν υψηλές τιμές βάθους και ταχύτητας ροής. Σε αυτά τα σημεία τοποθετήθηκαν ενδεικτικά **6** εικονικά μικροφράγματα ύψους **3 m** εντός του μοντέλου, και η προσομοίωση εκτελέστηκε εκ νέου, με στόχο την αξιολόγηση της ικανότητας συγκράτησης νερού στα συγκεκριμένα φραγμένα τμήματα της ροής.

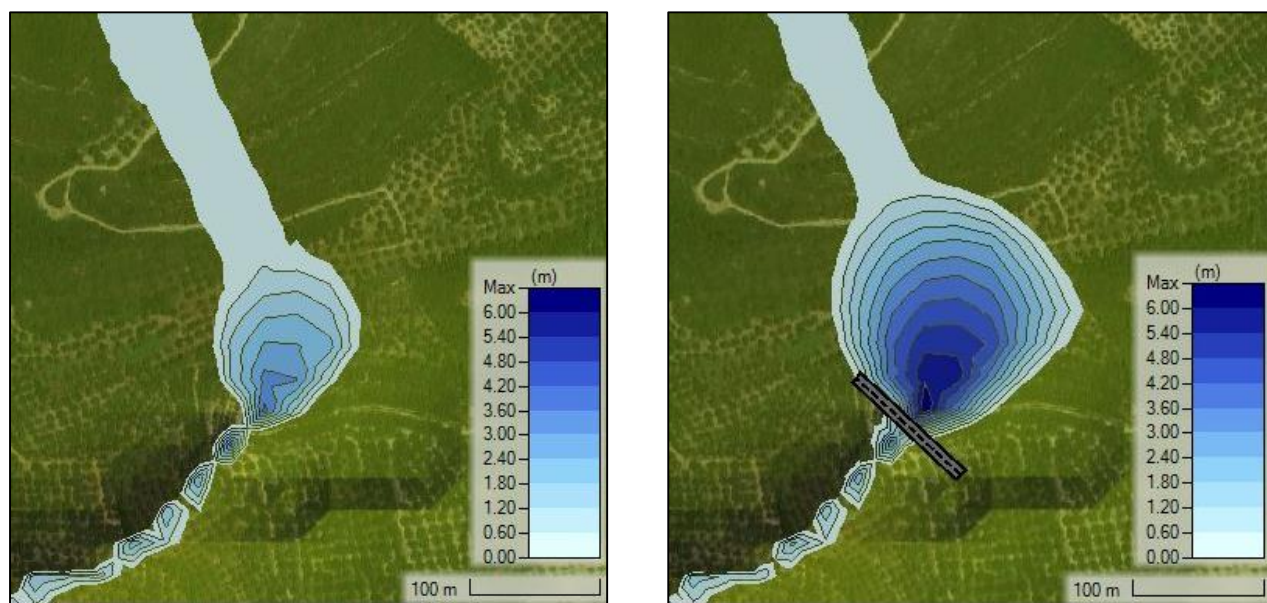
Αποτελέσματα

Από την υδραυλική ανάλυση εντοπίστηκαν συνολικά **6** υποψήφιες θέσεις για την κατασκευή μικρών φραγμάτων σε σημεία των ρεμάτων με ευνοϊκά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Τα **3** από τα προτεινόμενα φράγματα δεν παρουσίασαν ικανή συγκέντρωση υδάτων κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων και απορρίφθηκαν ως ακατάλληλα για περαιτέρω διερεύνηση. Οι υπόλοιπες **3** θέσεις παρουσίασαν θετικότερα υδραυλικά χαρακτηριστικά, με συγκεντρώσεις υδάτων που απέδιδαν σημαντικά βάθη νερού έως **6 m**, ικανοποιητική ικανότητα ταμίευσης (περίπου **50.000 - 70.000 m³**), και ομαλή γεωμορφολογία, η οποία διευκολύνει την κατασκευή μικρής κλίμακας υδατοδεξαμενών, χωρίς μεγάλη τεχνική παρέμβαση. Τα βασικά υδραυλικά χαρακτηριστικά των τριών αυτών θέσεων συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

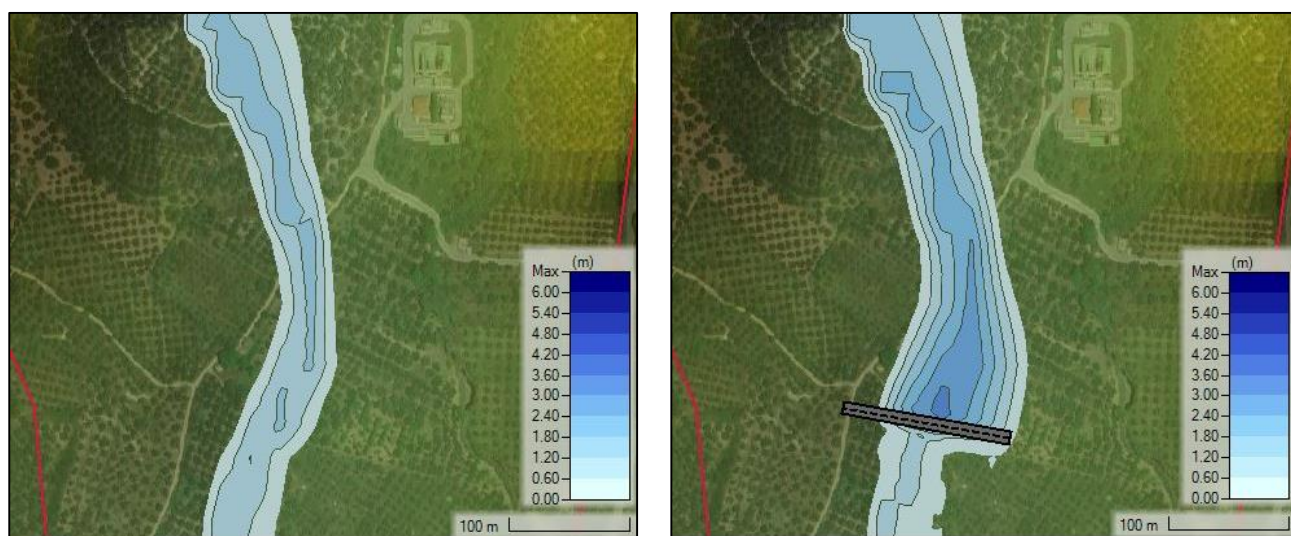
Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά ταμίευσης νερού των 3 πιθανών φραγμάτων

Φράγμα	Μέγιστο Βάθος Νερού (m)	Μέγιστη Επιφάνεια Νερού (m²)	Μέγιστος Όγκος Νερού (m³)	Μήκος Στέψης (m)
1	6,4	26.530	68.810	70
2	3,3	34.620	51.650	116
3	3,6	30.920	60.680	68

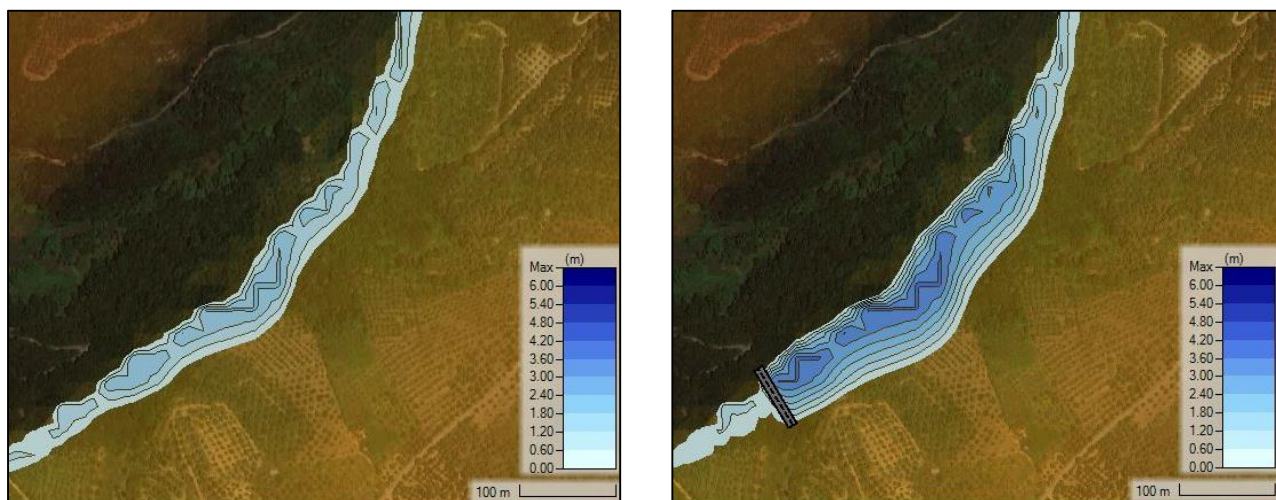
Με μια πρώτη (μη τεκμηριωμένη ακόμη) επισκόπηση από τον μελετητή, οι θέσεις αυτές φαίνεται να βρίσκονται σε σχετική εγγύτητα με καλλιεργούμενες εκτάσεις, ενώ διαθέτουν και ικανοποιητική προσβασιμότητα, γεγονός που καθιστά πιθανή τη διπλή αξιοποίηση τους τόσο για άρδευση όσο και για πυρόσβεση σε περιπτώσεις εκτάκτων αναγκών. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζεται η υδραυλική απόκριση του ρέματος στα τρία σημεία, για τις περιπτώσεις χωρίς και με την εισαγωγή φράγματος στο υπολογιστικό μοντέλο.



Σχήμα 1. Απεικόνιση της υδραυλικής συμπεριφοράς στο σημείο 1, χωρίς (αριστερά) και με την εισαγωγή (δεξιά) μικρού εικονικού φράγματος. Παρατηρείται αύξηση του βάθους ροής και συγκέντρωση ύδατος ανάντη του φράγματος.



Σχήμα 2. Απεικόνιση της υδραυλικής συμπεριφοράς στο σημείο 2, χωρίς (αριστερά) και με την εισαγωγή (δεξιά) μικρού εικονικού φράγματος. Παρατηρείται αύξηση του βάθους ροής και συγκέντρωση ύδατος ανάντη του φράγματος.



Σχήμα 3. Απεικόνιση της υδραυλικής συμπεριφοράς στο σημείο 3, χωρίς (αριστερά) και με την εισαγωγή (δεξιά) μικρού εικονικού φράγματος. Παρατηρείται αύξηση του βάθους ροής και συγκέντρωση ύδατος ανάντη του φράγματος.

Συμπεράσματα

Η εφαρμογή υδραυλικής προσομοίωσης 2D μέσω του HEC-RAS επέτρεψε την ταχεία αποτίμηση της συμπεριφοράς του νερού σε φυσικά ρέματα της περιοχής της Χώρας Μεσσηνίας, προσεγγίζοντας τα ρεαλιστικά επίπεδα των τοπικών ετήσιων διαθέσιμων υδατικών πόρων. Η ανάλυση ανέδειξε κρίσιμα σημεία με αυξημένο βάθος και ταχύτητα ροής, τα οποία προσφέρονται για τη δημιουργία μικρών φραγμάτων χαμηλής όχλησης. Τα ενδεικτικά σενάρια κατασκευής έδειξαν ότι σε τουλάχιστον 3 θέσεις είναι δυνατή η αποθήκευση σημαντικής συνολικής ποσότητας νερού, περίπου **180.000 m³**, με χαμηλό τεχνικό κόστος και χωρίς ιδιαίτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Οι τεχνικές απαιτήσεις της παρούσας μεθοδολογίας ήταν σχετικά περιορισμένες, καθιστώντας την προσέγγιση ελαφριά σε υπολογιστικό φορτίο και εύκολα επαναλήψιμη. Η προσομοίωση απαιτεί μικρό χρόνο εκτέλεσης, βασίζεται σε ευρέως διαθέσιμα γεωχωρικά δεδομένα (όπως DEM) και αξιοποιεί το λογισμικό HEC-RAS, το οποίο είναι δωρεάν και ανοιχτού κώδικα. Ωστόσο, η ορθή παραμετροποίηση του μοντέλου και η αξιόπιστη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, προϋποθέτουν την εξοικείωση του χρήστη με βασικές αρχές υδραυλικής και υδρολογικής μοντελοποίησης. Η προσέγγιση αυτή αναδεικνύει τη χρησιμότητα των εργαλείων υδραυλικής προσομοίωσης ως μέσου ταχείας αξιολόγησης και ανάπτυξης προκαταρκτικού σχεδιασμού για τη χωρική βελτιστοποίηση μικρών υδροτεχνικών έργων σε τοπικό επίπεδο, ειδικά σε περιοχές όπου συνυπάρχουν υψηλή γεωργική εξάρτηση από τη βροχόπτωση και αυξανόμενοι κλιματικοί κίνδυνοι, όπως οι πυρκαγιές και οι ξηρασίες.

Επόμενα βήματα και δυνατότητες επεκτασιμότητας

Η αρχική προσομοίωση απέδειξε τη δυναμική της μεθόδου για την υποστήριξη τοπικών αποφάσεων σχετικά με την κατασκευή μικρών φραγμάτων. Σε επόμενο στάδιο, προβλέπεται η εκπόνηση αναλυτικότερης και πολυκριτηριακής μελέτης, η οποία θα ενσωματώνει επιπλέον δεδομένα και παραμέτρους με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων:

- **Υδρολογικά δεδομένα** χρήση ιστορικών χρονοσειρών βροχοπτώσεων, ώστε να προσεγγιστούν ρεαλιστικότερα οι παροχές σχεδιασμού και να επιλεγούν σενάρια αντιπροσωπευτικά της περιοχής μελέτης.
- **Γεωχωρικά δεδομένα χρήσεων γης** για την ενσωμάτωση πηγών όπως το CORINE Land Cover για την αποτύπωση της τραχύτητας εδάφους (Manning, *n*), με σκοπό την ορθότερη προσομοίωση της επιφανειακής απορροής.
- **Γεωλογική ανάλυση του πεδίου μελέτης** για τον υπολογισμό απωλειών μέσω διήθησης, όσο και για την αξιολόγηση της ικανότητας φυσικής συγκράτησης νερού στις επιλεγμένες θέσεις κατασκευής, χωρίς ανάγκη επένδυσης ή μεγάλης τεχνικής παρέμβασης.
- **Ανάλυση κόστους-οφέλους (Cost-Benefit Analysis)** της κατασκευής των προτεινόμενων μικροφραγμάτων για την τεκμηρίωση σκοπιμότητας (π.χ. κόστος ανά κ.μ. νερού που αποθηκεύεται), για την ιεράρχηση προτεινόμενων φραγμάτων και την προσέλκυση χρηματοδότησης.
- **Συνυπολογισμός της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία της περιοχής** μέσω ένταξης σεναρίων μειωμένων βροχοπτώσεων και αυξημένων απωλειών εξάτμισης στα υδρολογικά δεδομένα εισόδου, με στόχο τη διερεύνηση της μεταβολής της ετήσιας υδρολογικής ισορροπίας και της διαθεσιμότητας επιφανειακών απορροών.
- **Υψομετρική αξιολόγηση** ώστε τα φράγματα να βρίσκονται ει δυνατόν σε υψηλότερη θέση από τις καλλιέργειες που θα εξυπηρετούν.
- **Εγγύτητα από αγροτεμάχια** για υπολογισμό κόστους κατασκευής αρδευτικών δικτύων.
- **Προσβασιμότητα** των σημείων για πυροσβεστικά οχήματα και εγγύτητα με δασικές εκτάσεις υψηλής επικινδυνότητας.

Τέλος, η ανάπτυξη μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας επιλογής κατάλληλων θέσεων μικροφραγμάτων, βασισμένης σε υδραυλικά μοντέλα, ανάλυση γεωχωρικών και υδρολογικών δεδομένων και μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για τον ταχύ και αντικειμενικό εντοπισμό κατάλληλων σημείων παρέμβασης. Μια τέτοια προσέγγιση θα ενίσχυε σημαντικά την επεκτασιμότητα της παρούσας πρακτικής και θα διευκόλυνε την εφαρμογή της σε άλλες περιοχές της Μεσογείου που αντιμετωπίζουν παρόμοια προβλήματα λειψυδρίας, έλλειψης υποδομών και αυξημένου κινδύνου φυσικών καταστροφών.

Βιβλιογραφία

- Llorens, Pilar & Domingo, Francisco. (2007). Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*. 10.1016/j.jhydrol.2006.10.032.
- Rahman, M.A., Pawijit, Y., Xu, C. *et al.* A comparative analysis of urban forests for storm-water management. *Sci Rep* 13, 1451 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28629-6>

- HEC-RAS User's Manual. (Version 6.4.1). U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Available at: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%20User's%20Manual-v6.4.1.pdf>
- FAO. (2015). *Coping with water scarcity in agriculture: a global framework for action in a changing climate*. Rome: FAO.
- Molle, F., & Cadier, C. (2010). *Small reservoirs in sub-Saharan Africa: challenges and opportunities*. *Water International*, 35(3), 343–355.
- Horritt, M.S., & Bates, P.D. (2002). *Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation*. *Journal of Hydrology*, 268(1-4), 87–99.
- European Environment Agency (EEA). (2020). *Water and climate change — EEA Report No 12/2020*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Ackerman CT, Brunner GW (2006) *Dam failure analysis using HEC-RAS and HEC-GEORAS*. Third federal interagency hydrologic modeling conference, Reno, Nevada, USA
- Υδροεξυγιαντική Ε.Ε., 2016. *Υδρολογική Μελέτη Πλημμυρών, Μελέτες συμπληρωματικών έργων ταμιευτήρα Μπραμιανού, αντιπλημμυρικών έργων Γρα Λυγιάς και φράγματος Μύρτου Ν. Λασιθίου Κρήτης*.