



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Σύγχρονες Τεχνολογίες Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Κινδύνων»

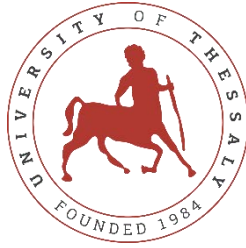
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αξιολόγηση δεδομένων ψηφιακού μοντέλου εδάφους στην πλημμυρική επικινδυνότητα. Περίπτωση μελέτης «Υδατόρρευμα "Λύρη" στη Δημοτική Ενότητα Σηπιάδος, Δήμου Νοτίου Πηλίου».

ΜΑΡΙΑ ΒΑΡΑΚΛΗ
ΑΜ: M061924003

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:
ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΦΑΡΣΙΡΩΤΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Π.Θ.

Βόλος, Σεπτέμβριος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY
INTERDEPARTMENTAL POSTGRADUATE STUDIES PROGRAMME
“Advanced Technologies for Environmental Risk Management”

POSTGRADUATE MASTER’S THESIS

Evaluation of digital terrain model data on flood risk. Case study «“Lyri” river in the Municipal Unit of Sipiada, Municipality of South Pelion».

MARIA VARAKLI
PN: M061924003

Supervisor:
EYAGGELIA FARSIROTOU, PROFESSOR, UTH

Volos, September 2025

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Σύγχρονες Τεχνολογίες Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Κινδύνων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αξιολόγηση δεδομένων ψηφιακού μοντέλου εδάφους στην πλημμυρική επικινδυνότητα. Περίπτωση μελέτης «Υδατόρρευμα "Λύρη" στη Δ.Ε. Σηπιάδος, Δήμου Νοτίου Πηλίου».

Evaluation of digital terrain model data on flood risk. Case study "Lyri" river in the Municipal Unit of Sipiada, Municipality of South Pelion».

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Σεπτεμβρίου 2025.

Επιβλέπουσα: ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΦΑΡΣΙΡΩΤΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Π.Θ.

ΚΩΤΣΟΠΟΥΛΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Θ.		ΑΛΑΜΑΝΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Θ.
--	--	---

Μέλος

Μέλος

Βόλος, Σεπτέμβριος 2025

MARIA ΒΑΡΑΚΛΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ Σ.ΤΕ.ΔΙ.ΠΕ.Κ.

Ηλεκτρονικός Μηχανικός Τ.Ε.

Copyright © Maria Varakli, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στο συγγραφέα.

Το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας εκφράζει τις απόψεις της συγγραφέα και ουδεμία ευθύνη για το περιεχόμενο φέρουν η επιβλέπουσα και η εξεταστική επιτροπή για αυτό.

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή.

Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης.

Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στη Διπλωματική μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Μεταπτυχιακού Τίτλου των Μεταπτυχιακών Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων.

Δηλώνω συνεπώς, ότι αυτή η Μ.Δ.Ε. προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

Ονοματεπώνυμο Συγγραφέα: Μαρία Βαρακλή

Υπογραφή:

Ημερομηνία: 20 Σεπτεμβρίου 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην επιβλέπουσα της εργασίας, κα Ευαγγελία Φαρσιρώτου, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη συνεχή υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Νικόλαο Ξαφούλη, Υποψήφιο Διδάκτορα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την άψογη συνεργασία μας και την άμεση ανταπόκριση του στην επίλυση κάθε απορίας που προέκυψε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Ιδιαίτερη μνεία θα ήθελα να αποδώσω στον Αναπληρωτή Διευθυντή της Διεύθυνσης Τεχνικών Έργων Περιφερειακής Ενότητας Μαγνησίας και Σποράδων κ. Κωνσταντίνο Χριστοδούλου, ο οποίος μας διέθεσε το σύνολο του υλικού της τοπογραφικής αποτύπωσης, διευκολύνοντας ουσιαστικά την υλοποίηση και την ολοκλήρωση της έρευνας.

Τέλος, εκφράζω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου και ειδικότερα στον σύζυγό μου για την αμέριστη συμπαράσταση, τη συνεχή βοήθεια, την κατανόηση και την ανεξάντλητη υπομονή που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ	V
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	VI
Περιεχόμενα	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	XI
ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	XIII
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	XIII
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	XIII
ABSTRACT	XV
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – Εισαγωγή – Σκοπός της εργασίας	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Ερευνητικό Πλαίσιο και Κίνητρο της Μελέτης	1
1.3 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας	2
1.4 Ερευνητικά Ερωτήματα	3
1.5 Δομή της Εργασίας	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – Ανασκόπηση	4
2.1 Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι και πλημμύρες	4
2.1.1 Ορισμοί και βασικές έννοιες	5
2.1.2 Μεσογειακό πλαίσιο και τάσεις	5
2.2 Θεσμικό πλαίσιο διαχείρισης πλημμυρικού κινδύνου (ΕΕ – Ελλάδα)	6
2.3 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους και πλημμυρικός κίνδυνος	6
2.4 Πηγές δεδομένων ανάγλυφου και συμβιβασμοί ακρίβειας – κόστους	8
2.5 Απλές υδροδιορθώσεις και προεπεξεργασία DEM	10
2.6 Λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν	10
2.6.1 Διαλειτουργικότητα ArcGIS Pro – HEC-RAS	11
2.7 Τοπικό πλαίσιο: τα γεγονότα Daniel και Elias	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Μεθοδολογία	15
3.1 Περιοχή μελέτης	15
3.1.1 Σχεδίαση Υδροκρίτη Λεκάνης Απορροής	17
3.1.2 Σχεδίαση Υδρογραφικού Δικτύου	18
3.1.3 Χαρακτηριστικά της Λεκάνης Απορροής	22
3.2 Επεξεργασία ψηφιακών μοντέλων εδάφους στο ArcGIS Pro	24
3.2.1 Άντληση δεδομένων	24
3.2.2 Δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους	26
3.2.3 Δημιουργία ίδιας ανάλυσης στα μοντέλα και αφαίρεση	29

3.3 Επεξεργασία ψηφιακών μοντέλων εδάφους στο HEC-RAS	30
3.3.1 Εισαγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους στο HEC-RAS	30
3.3.2 Δημιουργία γραμμών προφίλ	32
3.4 Προετοιμασία προσομοίωσης ροής στο HEC-RAS	34
3.4.1 Υπολογισμός της αιχμής απορροής	34
3.4.2 Δημιουργία γεωμετρίας και εισαγωγή της στο HEC-RAS	37
3.4.3 Δημιουργία αρχείου υδραυλικών δεδομένων	41
3.4.4 Σενάρια προσομοίωσης ροής	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – Αποτελέσματα – Ανάλυση αποτελεσμάτων	45
4.1 Σύγκριση μοντέλων εδάφους στο ArcGIS-Pro	45
4.1.1 Διαφορές DTM κτηματολογίου με Filled_DTM_Liri	48
4.1.2 Διαφορές DTM_5x5 με DTM_2x2	50
4.2 Σύγκριση μοντέλων εδάφους στο HEC-RAS	51
4.2.1 Διάγραμμα διατομής 04	51
4.2.2 Διάγραμμα διατομής 17	54
4.2.3 Διάγραμμα διατομής 28	55
4.2.4 Διάγραμμα διατομής 39	58
4.3 Σύγκριση προσομοίωσης ροής στα μοντέλα εδάφους	60
4.3.1 Terrain_UAV	60
4.3.2 Terrain_5x5	63
4.3.3 Terrain_2x2	65
4.3.4 Ταχύτητες ροής	68
4.3.5 Επιπτώσεις στην Αξιολόγηση του Πλημμυρικού Κινδύνου	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – Συμπεράσματα και Συστάσεις	73
5.1 Συμπεράσματα	73
5.2 Συστάσεις και Συζήτηση	74
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I – Ορθοφωτοχάρτες	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II – Διαγράμματα profile lines	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III – Διαγράμματα Cross Sections UAV	105

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Διαφορά μεταξύ DSM και DTM (Neonscience, 2025)	7
Εικόνα 2 Διαφορά μεταξύ TIN και Raster (Walsh, 2009)	8
Εικόνα 3 Απεικόνιση του φαινομένου Omega Block από τις 04 έως τις 09 Σεπτεμβρίου 2023 (Lekkas et al., 2024)	12
Εικόνα 4 Μέγιστη έκταση πλημμύρας στο Υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας (Lekkas et al., 2024)	13
Εικόνα 5 Γεωγραφική τοποθεσία Υδατορρεύματος «Λύρη» (Google Earth, 2025)	15
Εικόνα 6 Εκβολή Υδατορρεύματος «Λύρη» μετά την κακοκαιρία Daniel (Onlarissa.gr, 2025)	16
Εικόνα 7 Εκβολή Υδατορρεύματος «Λύρη» μετά τις εργασίες καθαρισμού (Προσωπικό αρχείο Μαρίας Βαρακλή, 2024)	17
Εικόνα 8 Μέρος Υδατορρεύματος «Λύρη» μετά τις εργασίες καθαρισμού (Προσωπικό αρχείο Μαρίας Βαρακλή, 2024)	17
Εικόνα 9 Εμβαδόν ΛΑΠ.....	18
Εικόνα 10 Αποτέλεσμα χρήσης εργαλείου Flow Direction	19
Εικόνα 11 Παραμετροποίηση του YD_Basin	20
Εικόνα 12 Αποτέλεσμα χρήσης εργαλείου Flow Accumulation με μεγάλο εύρος τιμών.....	20
Εικόνα 13 Μετατροπή των τιμών του raster σε 0 και 1	21
Εικόνα 14 Αποτέλεσμα χρήσης εργαλείου Flow Accumulation με τιμές 0 και 1	21
Εικόνα 15 Υδροκρίτης και Υδρογραφικό Δίκτυο ΛΑΠ	22
Εικόνα 16 Εισαγωγή του αρχείου AutoCAD της τοπογραφικής αποτύπωσης στο ArcGIS Pro	26
Εικόνα 17 Δημιουργία του raster Filled_DTM_Liri από το αρχείο τοπογραφικής αποτύπωσης.....	27
Εικόνα 18 Δημιουργία του raster DTM_5x5 από το DEM 5m του Κτηματολογίου	28
Εικόνα 19 Δημιουργία του raster DTM_2x2 από το DEM 2m του Κτηματολογίου	28
Εικόνα 20 Ανάλυση του raster Filled_DTM_Liri	29
Εικόνα 21 Αφαίρεση των raster με το εργαλείο Raster Calculator	29
Εικόνα 22 Δημιουργία Terrain από την τοπογραφική αποτύπωση σε ανάλυση 5m	30
Εικόνα 23 Δημιουργία Terrain από το DTM 2m του Κτηματολογίου σε ανάλυση 5m	31
Εικόνα 24 Δημιουργία Terrain από το DTM 5m του Κτηματολογίου	32
Εικόνα 25 Δημιουργία 40 γραμμών προφίλ.....	33
Εικόνα 26 Εισαγωγή της UAV_Geometry από το RAS Mapper στο HEC-RAS	38
Εικόνα 27 Εισαγωγή της 5x5_Geometry από το RAS Mapper στο HEC-RAS	39
Εικόνα 28 Εισαγωγή της 2x2_Geometry από το RAS Mapper στο HEC-RAS	40
Εικόνα 29 Δημιουργία αρχείου υδραυλικών δεδομένων	41
Εικόνα 30 Δημιουργία δεδομένων ροής για κάθε γεωμετρία.....	41
Εικόνα 31 Σενάριο προσομοίωσης ροής για τη Γεωμετρία UAV	42
Εικόνα 32 Σενάριο προσομοίωσης ροής για τη Γεωμετρία 5x5.....	43
Εικόνα 33 Σενάριο προσομοίωσης ροής για τη Γεωμετρία 2x2.....	43
Εικόνα 34 Επιλογή Μεταβλητών και Προφίλ που θα προβάλλονται στα διαγράμματα των Cross Sections.....	43
Εικόνα 35 Υψομετρικές διαφορές που προκύπτουν από την αφαίρεση του DEM UAV από το DEM 5m.....	45
Εικόνα 36 Υψομετρικές διαφορές που προκύπτουν από την αφαίρεση του DEM UAV από το DEM 2m.....	46
Εικόνα 37 Υψομετρικές διαφορές που προκύπτουν από την αφαίρεση του DEM 2m από το DEM 5m.....	47

Εικόνα 38	Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία UAV και T=50 έτη.....	60
Εικόνα 39	Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία UAV και T=100 έτη.....	61
Εικόνα 40	Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία UAV και T=1000 έτη....	62
Εικόνα 41	Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 5x5 και T=50 έτη	63
Εικόνα 42	Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 5x5 και T=100 έτη	64
Εικόνα 43	Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 5x5 και T=1000 έτη	65
Εικόνα 44	Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 2x2 και T=50 έτη	66
Εικόνα 45	Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 2x2 και T=100 έτη	67
Εικόνα 46	Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 2x2 και T=1000 έτη	68
Εικόνα 47	Ταχύτητα ροής για τη γεωμετρία UAV και T=1000 έτη	69
Εικόνα 48	Ταχύτητα ροής για τη γεωμετρία 5x5 και T=1000 έτη.....	70
Εικόνα 49	Ταχύτητα ροής για τη γεωμετρία 2x2 και T=1000 έτη.....	71

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1	Είδη ψηφιακών μοντέλων εδάφους.....	6
Πίνακας 2	Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά ΛΑΠ	23
Πίνακας 3	Τιμές συντελεστή απορροής σε σχέση με τα χαρακτηριστικά επιφάνειας εδάφους	37
Πίνακας 4	Σύγκριση υψομετρικών διαφορών μεταξύ DTM_5x5, DTM_2x2 και Filled_DTM_Liri.....	48

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1	Αύξηση επιπτώσεων φυσικών καταστροφών (UNDRR, 2025)	4
Σχήμα 2	Αριθμός καταγεγραμμένων περιστατικών ανά τύπο φυσικής καταστροφής κατά τη δεκαετία 2000 - 2019 (UNDRR, 2025).....	5
Σχήμα 3	Διατομή 208 της Γεωμετρίας UAV, με προβολή στοιχείων για T=50, 100 και 1000 έτη.....	44
Σχήμα 4	Διαγραμματική Απεικόνιση Διατομής CS_04 με έμφαση στις αποκλίσεις στις πλαγιές και την κοίτη	52
Σχήμα 5	Διαγραμματική Απεικόνιση Διατομής CS_17, με έμφαση στις μεγάλες αποκλίσεις στην αριστερή πλαγιά και την κοίτη	54
Σχήμα 6	Διαγραμματική Απεικόνιση Διατομής CS_28, με έμφαση στις αιχμηρές προεξοχές των πλαγιών και την αναστροφή του ανάγλυφου της κοίτης.....	56
Σχήμα 7	Διαγραμματική Απεικόνιση Διατομής CS_39 με έμφαση στις αποκλίσεις στην κοίτη	58

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΕΓΣΑ87: Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987

ΕΚΧΑ Α.Ε.: Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε.

ΛΑΠ: Λεκάνη Απορροής

ΥΔ: Υδατικό Διαμέρισμα

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ALOS: Advanced Land Observing Satellite/Προηγμένος Δορυφόρος Παρατήρησης Γης

DEM: Digital Elevation Model/Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

DoD: DEM of Difference/Διαφορά Ψηφιακών Μοντέλων Υψομέτρου

DSM: Digital Surface Model/Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας

DTM: Digital Terrain Model/Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

GIS: Geographic Information Systems/Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

GCPs: Ground Control Points/Σημεία Ελέγχου Εδάφους

GPS: Global Positioning System/Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης

HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center - River Analysis System/Κέντρο Υδρολογικής Μηχανικής - Σύστημα Ανάλυσης Ποταμού

LiDAR: Light Detection and Ranging/Ανίχνευση και Μέτρηση με Φως

NDSM: Normalized Digital Surface Model/Κανονικοποιημένο Μοντέλο Επιφάνειας

RTK: Real-Time Kinematic/Κινηματικό σε πραγματικό χρόνο

SI: Système International/Διεθνές Σύστημα Μονάδων

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission/Αποστολή Ραντάρ Τοπογραφίας με διαστημικό Λεωφορείο

UAS: Unmanned Aircraft System/Σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους

UAV: Unmanned Aerial Vehicle/Μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα (τύπου drone)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζει την αξιολόγηση διαφορετικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους (ΨΜΕ) και την επίδρασή τους στην εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου, με εφαρμογή στο υδατόρρευμα «Λύρη» της Δημοτικής Ενότητας Σηπιάδος, Δήμου Νοτίου Πηλίου. Οι πλημμύρες, ως ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς κινδύνους παγκοσμίως, παρουσιάζουν αυξανόμενη συχνότητα και ένταση λόγω της κλιματικής αλλαγής και της ανθρώπινης παρέμβασης. Η ιδιαίτερη γεωμορφολογία της Ελλάδας, με μικρές και απότομες λεκάνες απορροής και άμεση εκβολή στη θάλασσα, καθιστά απαραίτητη την ακριβή χαρτογράφηση και προσομοίωση για τη λήψη αξιόπιστων μέτρων πρόληψης και διαχείρισης.

Η μελέτη επικεντρώνεται στη συγκριτική αξιολόγηση τριών τύπων ΨΜΕ: του DEM ανάλυσης 5m και 2m από το Ελληνικό Κτηματολόγιο και του τοπογραφικού μοντέλου υψηλής ανάλυσης που δημιουργήθηκε μέσω μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicle – UAV, κοινή ονομασία drone), μετά από την κακοκαιρία Daniel που έπληξε την ευρύτερη περιοχή τον Σεπτέμβριο του 2023.

Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν στο λογισμικό ArcGIS Pro για τον καθορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, του υδρογραφικού δικτύου και την παραγωγή ομοιόμορφων μοντέλων. Στη συνέχεια, στο HEC-RAS πραγματοποιήθηκε αρχικά η σύγκριση των διατομών σε χαρακτηριστικά σημεία του υδατορρεύματος και ακολούθως η υδραυλική προσομοίωση σε διαφορετικά σενάρια πλημμυρικών παροχών, ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση των επιμέρους ΨΜΕ στην αποτύπωση της γεωμετρίας και των πλημμυρικών εκτάσεων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μοντέλα UAV αποδίδουν την πιο ρεαλιστική γεωμετρία της κοίτης και των παρόχθιων περιοχών, επιτρέποντας την ακριβέστερη αποτύπωση πλημμυρικών εκτάσεων και ταχυτήτων ροής. Το DEM 5m παρείχε μια πιο εξομαλυμένη αλλά λογική εικόνα, κατάλληλη για προκαταρκτικές εκτιμήσεις, ενώ το DEM 2m παρουσίασε σημαντικές παραμορφώσεις και αναξιοπιστία, κυρίως λόγω θορύβου και ελλιπούς υδροδιόρθωσης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανέδειξε ότι η ανάλυση από μόνη της δεν εγγυάται την ακρίβεια, καθώς κρίσιμη είναι η ποιότητα, η επικαιρότητα και η επεξεργασία των δεδομένων.

Η εργασία καταλήγει ότι για περιοχές με σύνθετη γεωμορφολογία όπως το Πήλιο, η χρήση UAV ή LiDAR δεδομένων είναι η πιο αξιόπιστη επιλογή, ιδιαίτερα μετά από ακραία φαινόμενα που μεταβάλλουν την τοπογραφία. Ωστόσο, σε επίπεδο κόστους

– οφέλους, τα εθνικά DEM του Κτηματολογίου αποτελούν μια χρήσιμη βάση για ευρύτερες αναλύσεις, εφόσον συνοδεύονται από κατάλληλη προεπεξεργασία. Τέλος, διατυπώνονται συστάσεις για την ενσωμάτωση σύγχρονων γεωχωρικών τεχνολογιών στη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου, με στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των τοπικών κοινωνιών απέναντι σε ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα.

Λέξεις-κλειδιά: πλημμυρικός κίνδυνος, ψηφιακά μοντέλα εδάφους, UAV, ArcGIS Pro, HEC-RAS

ABSTRACT

This master's thesis investigates the evaluation of different Digital Elevation Models (DEMs) and their impact on flood risk assessment, focusing on the "Lyri" river in the Municipal Unit of Sipiada, South Pelion Municipality. Floods, as one of the most severe natural hazards worldwide, are becoming more frequent and intense due to climate change and human interventions. The geomorphology of Greece, with small and steep catchments and direct outflows into the sea, makes accurate mapping and hydraulic simulation essential for reliable prevention and risk management strategies.

The study concentrates on the comparative assessment of three DEMs: the 5m and 2m resolution DEMs provided by the Hellenic Cadastre and a high-resolution UAV-based topographic survey. Data were processed in ArcGIS Pro to delineate catchment characteristics, the hydrographic network and standardized terrain models. Subsequently, in HEC-RAS, cross-section comparisons were first conducted at representative points of the river, followed by hydraulic simulations under different flood scenarios, in order to evaluate the influence of the DEMs on channel geometry and floodplain representation.

The results demonstrated that UAV-based models provide the most realistic representation of the channel and adjacent areas, allowing more accurate delineation of flood extents and flow velocities. The 5m DEM yielded a smoother yet acceptable representation, suitable for preliminary assessments, while the 2m DEM proved unreliable, showing significant distortions mainly due to noise and insufficient hydrological conditioning. The comparative analysis revealed that spatial resolution alone does not guarantee accuracy, as the quality, recency and preprocessing of data are equally critical factors.

The study concludes that for areas with complex geomorphology, such as Pelion, UAV or LiDAR data are the most reliable options, particularly after extreme events that alter topography. However, considering cost - effectiveness, national DEMs from the Hellenic Cadastre remain a valuable basis for large-scale studies, provided that proper preprocessing is applied. Finally, the thesis recommends integrating modern geospatial technologies into flood risk management, aiming to enhance the resilience of local communities against extreme hydrometeorological events.

Keywords: flood risk, digital elevation models, UAV, ArcGIS Pro, HEC-RAS

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – Εισαγωγή – Σκοπός της εργασίας

1.1 Εισαγωγή

Οι πλημμύρες αποτελούν έναν από τους σοβαρότερους φυσικούς κινδύνους παγκοσμίως, με συχνότητα και ένταση που αυξάνονται εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής και της ανθρώπινης δραστηριότητας (Μάρης, 2018). Στην Ελλάδα, η ιδιαίτερη γεωμορφολογία – με απότομα ανάγλυφα, μικρές και στενές λεκάνες απορροής και άμεση εκβολή στη θάλασσα – καθιστά την πρόβλεψη και διαχείριση πλημμυρικών κινδύνων ακόμη πιο σύνθετη. Το πλαίσιο αυτό αναδεικνύει την ανάγκη για ακριβή εργαλεία μοντελοποίησης και αξιόπιστη αξιολόγηση δεδομένων, ώστε να βελτιωθεί η πρόληψη και η προστασία των ευάλωτων περιοχών.

Τα τελευταία χρόνια, η χώρα έχει πληγεί από ακραία επεισόδια, όπως οι καταιγίδες Daniel και Elias (2023), που προκάλεσαν εκτεταμένες ζημιές και απώλειες. Τα γεγονότα αυτά κατέδειξαν με τον πιο emphaticό τρόπο τη σημασία της έγκαιρης και ακριβούς χαρτογράφησης πλημμυρικών ζωνών, ειδικά σε περιοχές με έντονη υδρολογική απόκριση, όπως το Πήλιο.

Η ακριβής εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη χρήση Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (Digital Elevation/Terrain Models – DEM/DTM). Τα μοντέλα αυτά αποτελούν βασικό υπόβαθρο για υδρολογικές και υδραυλικές προσομοιώσεις, επηρεάζοντας άμεσα την αποτύπωση της γεωμετρίας των ρεμάτων, τις διαδρομές ροής και τον προσδιορισμό των πλημμυρικών εκτάσεων. Συνεπώς, η ποιότητα και η ακρίβεια των DEM καθορίζουν την αξιοπιστία των χαρτών κινδύνου και, κατ' επέκταση, των μέτρων διαχείρισης.

1.2 Ερευνητικό Πλαίσιο και Κίνητρο της Μελέτης

Στη σύγχρονη πρακτική της υδρολογικής μοντελοποίησης, οι μελετητές και οι φορείς διαχείρισης αντιμετωπίζουν το ζήτημα της επιλογής μεταξύ διαφορετικών πηγών ψηφιακών δεδομένων εδάφους, οι οποίες διαφέρουν ως προς την ανάλυση, τη μεθοδολογία δημιουργίας, την ενημέρωση και το κόστος απόκτησης. Στην Ελλάδα, υπάρχουν διαθέσιμα DEM από διάφορες πηγές, όπως αυτά του Ελληνικού Κτηματολογίου με ανάλυση 2m και 5m, τα οποία παράγονται από αεροφωτογραφίες και LiDAR δεδομένα, καθώς και εξειδικευμένες τοπογραφικές μελέτες με χρήση UAV.

Η επιλογή του κατάλληλου ψηφιακού μοντέλου εδάφους παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις, καθώς δεν υπάρχει πάντα σαφής συσχέτιση μεταξύ της ανάλυσης ενός DEM και της ακρίβειάς του. Επιπλέον, η βιβλιογραφία δείχνει ότι σε ορισμένες περιπτώσεις μοντέλα υψηλότερης ανάλυσης μπορεί να περιλαμβάνουν περισσότερο θόρυβο ή σφάλματα από εκείνα χαμηλότερης ανάλυσης, ιδιαίτερα όταν δεν έχουν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία για την αφαίρεση βλάστησης και κτισμάτων.

Το κίνητρο της παρούσας μελέτης προέρχεται από την ανάγκη να διερευνηθεί πώς οι διαφορές μεταξύ των διαθέσιμων ψηφιακών μοντέλων εδάφους επηρεάζουν την ακρίβεια της υδραυλικής προσομοίωσης και την αξιολόγηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας σε ένα χαρακτηριστικό παράκτιο υδρολογικό σύστημα της Ελλάδας. Η επιλογή του υδατορρεύματος «Λύρη» στο Νότιο Πήλιο ως περίπτωση μελέτης παρέχει ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα με διαθέσιμα δεδομένα υψηλής ποιότητας από τοπογραφική αποτύπωση με χρήση UAV.

1.3 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η **συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης διαφορετικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους στην ακρίβεια της μοντελοποίησης πλημμυρικών φαινομένων**, με εστίαση στο υδατόρρευμα «Λύρη» της Δημοτικής Ενότητας Σηπιάδος του Δήμου Νοτίου Πηλίου.

Οι ειδικοί στόχοι της εργασίας περιλαμβάνουν:

1. **Συλλογή και επεξεργασία ψηφιακών μοντέλων εδάφους** από διαφορετικές πηγές (Ελληνικό Κτηματολόγιο 2m και 5m ανάλυση, τοπογραφική αποτύπωση με UAV) για την ίδια γεωγραφική περιοχή.
2. **Ποσοτική ανάλυση των διαφορών** μεταξύ των DEM μέσω στατιστικών μεθόδων και γεωχωρικής ανάλυσης στο περιβάλλον ArcGIS Pro.
3. **Υδραυλική μοντελοποίηση** του υδατορρεύματος «Λύρη» με χρήση του λογισμικού HEC-RAS και δημιουργία γραμμών προφίλ για κάθε ένα από τα διαθέσιμα DEM.
4. **Σύγκριση των αποτελεσμάτων** της υδραυλικής προσομοίωσης (στάθμες νερού, έκταση πλημμύρας, ταχύτητες ροής) για διαφορετικά σενάρια περιόδων επαναφοράς.
5. **Αξιολόγηση της αξιοπιστίας** κάθε DEM ως προς την ικανότητά του να παράγει ρεαλιστικά αποτελέσματα πλημμυρικής προσομοίωσης.

6. **Διατύπωση συστάσεων** για την επιλογή κατάλληλων ΨΜΕ σε μελέτες πλημμυρικής επικινδυνότητας παρόμοιων υδρολογικών συστημάτων.

1.4 Ερευνητικά Ερωτήματα

Η παρούσα έρευνα επιδιώκει να απαντήσει στα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

- Ποιες είναι οι κύριες διαφορές μεταξύ των διαθέσιμων ψηφιακών μοντέλων εδάφους στην περιοχή μελέτης και ποιοι παράγοντες τις προκαλούν;
- Πώς επηρεάζουν αυτές οι διαφορές την ακρίβεια της υδραυλικής προσομοίωσης και την εκτίμηση των πλημμυρικών ζωνών;
- Παρέχει όντως υψηλότερη ακρίβεια η χρήση DEM υψηλότερης ανάλυσης, ή υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα μοντέλα χαμηλότερης ανάλυσης είναι περισσότερο αξιόπιστα;
- Ποια κριτήρια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή ψηφιακού μοντέλου εδάφους για μελέτες πλημμυρικής επικινδυνότητας;

1.5 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται σε πέντε κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1 παρουσιάζει το γενικό πλαίσιο της έρευνας, το ερευνητικό πλαίσιο και κίνητρο, τους στόχους και τα ερευνητικά ερωτήματα.

Κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους, τις μεθόδους αξιολόγησής τους και την εφαρμογή τους στη μοντελοποίηση πλημμυρικών φαινομένων.

Κεφάλαιο 3 περιγράφει λεπτομερώς τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, την περιοχή μελέτης, τις πηγές δεδομένων, τα εργαλεία ανάλυσης και τις διαδικασίες επεξεργασίας στα λογισμικά ArcGIS Pro και HEC-RAS.

Κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων, συμπεριλαμβανομένων των συγκρίσεων μεταξύ των DEM και των επιπτώσεων στη μοντελοποίηση πλημμύρας, με λεπτομερή ανάλυση και ερμηνεία των ευρημάτων.

Κεφάλαιο 5 συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα της έρευνας, εξετάζει τους περιορισμούς της μελέτης και διατυπώνει συστάσεις για μελλοντικές εφαρμογές και έρευνες.

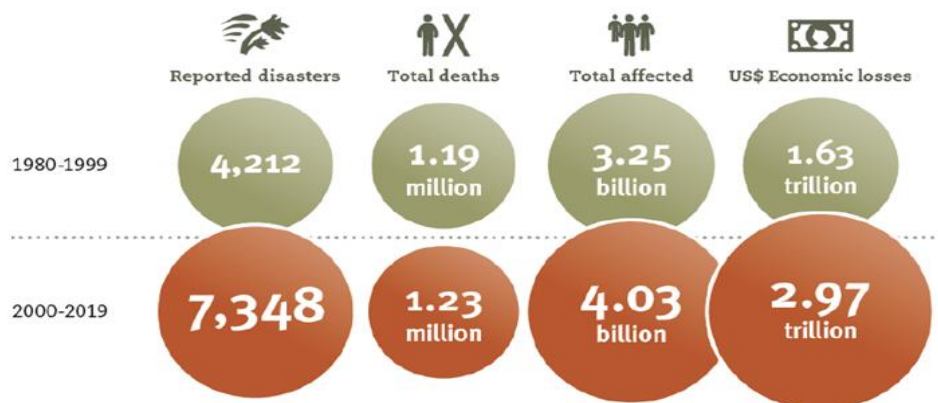
Η εργασία συμπληρώνεται με εκτενή βιβλιογραφία και παραρτήματα που περιλαμβάνουν διαγράμματα και χάρτες που προέκυψαν από την ανάλυση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – Ανασκόπηση

2.1 Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι και πλημμύρες

Τα τελευταία χρόνια γίνεται έντονη συζήτηση για το περιβάλλον και τους κινδύνους που το απειλούν. Ο όρος «περιβαλλοντικοί κίνδυνοι» έχει διττό περιεχόμενο (Μπάλιας, 2009). Από τη μια πλευρά, συνδέεται με κάποια φυσικά φαινόμενα, τα οποία όταν εκδηλωθούν με μεγάλη σφοδρότητα μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στο περιβάλλον, αλλά και να γίνουν απειλητικά για τον άνθρωπο (για παράδειγμα βροχοπτώσεις, πλημμύρες, παγετός, πυρκαγιά, κατολισθήσεις, σεισμοί, τυφώνες, τσουνάμι). Από την άλλη πλευρά, ο όρος σχετίζεται με τα εργαλεία και τις μεθόδους, που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση και διαχείριση πιθανών βλαβών.

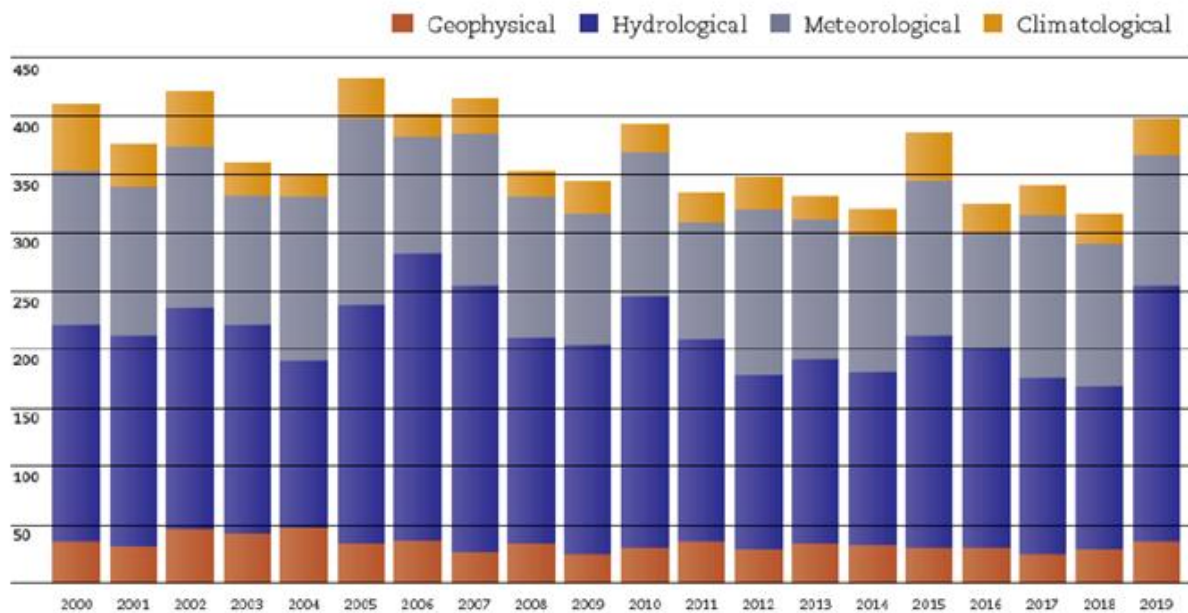
Το Κέντρο Έρευνας για την Επιδημιολογία των Καταστροφών (CRED) και ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας διατηρούν Βάση Δεδομένων Εκτάκτων Περιστατικών (Emergency Events Database). Αντλώντας δεδομένα από τη βάση αυτή, προκύπτει ότι υπάρχει πολύ μεγάλη αύξηση των καταγεγραμμένων φυσικών καταστροφών την τελευταία 20ετία (σχ. 1), ενώ αυξάνονται οι απώλειες ζωών και οι πληθυσμοί που επηρεάζονται, αλλά παράλληλα εκτοξεύονται και οι οικονομικές απώλειες.



Σχήμα 1 Αύξηση επιπτώσεων φυσικών καταστροφών (UNDRR, 2025)

Ειδικότερα, ένας από τους πιο σημαντικούς κινδύνους, είναι η πλημμύρα, που αποτελεί έναν από τους συχνότερους και πιο δαπανηρούς φυσικούς κινδύνους στην Ευρώπη και διεθνώς, με σημαντικές επιπτώσεις στις υποδομές, την οικονομία και την κοινωνική συνοχή. Σύμφωνα με τις καταστροφές που καταγράφηκαν κατά την εικοσαετία 2000 - 2019 από τη Βάση Δεδομένων Εκτάκτων Περιστατικών, οι πλημμύρες βρίσκονται στην πρώτη θέση με τα περισσότερα γεγονότα και τα

μετεωρολογικά φαινόμενα στη δεύτερη θέση. Ακολουθούν οι σεισμοί και τέλος οι πυρκαγιές (σχ. 2).



Σχήμα 2 Αριθμός καταγεγραμμένων περιστατικών ανά τύπο φυσικής καταστροφής κατά τη δεκαετία 2000 - 2019 (UNDRR, 2025)

2.1.1 Ορισμοί και βασικές έννοιες

- **Επικινδυνότητα:** η πιθανότητα εκδήλωσης ενός φαινομένου συγκεκριμένης έντασης σε δεδομένο χρόνο/χώρο.
- **Έκθεση:** οι άνθρωποι, οι δραστηριότητες και τα αγαθά που βρίσκονται στην περιοχή που ενδέχεται να πληγεί.
- **Τρωτότητα:** ο βαθμός στον οποίο τα εκτεθειμένα στοιχεία μπορεί να υποστούν βλάβη.
- **Κίνδυνος:** το αποτέλεσμα του συνδυασμού επικινδυνότητας, έκθεσης και τρωτότητας (UNDRR, 2015).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ποσοτικοποιείται πρωτίστως η επικινδυνότητα μέσω υδραυλικών προσομοιώσεων με διαφορετικά μοντέλα εδάφους, ενώ οι άλλες συνιστώσες τεκμηριώνονται εννοιολογικά.

2.1.2 Μεσογειακό πλαίσιο και τάσεις

Στη Μεσόγειο, οι έντονες βροχοπτώσεις παρουσιάζουν σαφή εποχικότητα και συνδέονται με συγκεκριμένα μοτίβα κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας. Πρόσφατες συνθετικές μελέτες αναδεικνύουν χωρικά ετερογενείς μεταβολές στη χρονικότητα και

το μέγεθος των πλημμυρών τις τελευταίες δεκαετίες, με ορισμένες ευρωπαϊκές περιοχές να βιώνουν «πλουσιότερες» περιόδους πλημμυρών σε σχέση με προηγούμενους αιώνες, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη για τοπικές, επικαιροποιημένες αναλύσεις (Blöschl et al., 2019).

2.2 Θεσμικό πλαίσιο διαχείρισης πλημμυρικού κινδύνου (ΕΕ – Ελλάδα)

Η Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και διαχείριση κινδύνων πλημμύρας καθιέρωσε έναν επαναλαμβανόμενο κύκλο έξι ετών που περιλαμβάνει: (α) Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνου Πλημμύρας, (β) Χάρτες Επικινδυνότητας και Κινδύνων και (γ) Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας σε επίπεδο υδρογραφικής λεκάνης, με συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών. Η Ελλάδα υλοποιεί τα στάδια αυτά με αρμόδιους φορείς και ειδικές πλατφόρμες διάχυσης, με στόχο την προστασία της ανθρώπινης ζωής, του περιβάλλοντος και της περιουσίας (UNDRR, 2015).

2.3 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους και πλημμυρικός κίνδυνος

Ως Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) ορίζεται μια διατεταγμένη αριθμητική αναπαράσταση της κατανομής υψομέτρων σε μια επιφάνεια γης (Li et al, 2005). Οι βασικοί τύποι ΨΜΕ συνοψίζονται στον πίνακα 1:

Πίνακας 1 Είδη ψηφιακών μοντέλων εδάφους

Τύπος	Περιγραφή	Χρήση/Πλεονέκτημα	Περιορισμοί
DEM (Digital Elevation Model)	Υψομετρικό μοντέλο της «γυμνής» γης	Κατάλληλο για χαρτογράφηση ροής και πλημμυρικών ζωνών	Συχνά συγχέεται με DTM
DTM (Digital Terrain Model)	DEM εμπλουτισμένο με στοιχεία μορφολογίας (π.χ. υδρογραφία, κορυφογραμμές)	Αποδίδει καλύτερα ασυνέχειες και κοίτες	Απαιτεί πρόσθετη επεξεργασία
DSM (Digital Surface Model)	Περιλαμβάνει βλάστηση και κτίσματα	Χρήσιμο για ορθοφωτοχάρτες	Όχι κατάλληλο για πλημμυρική μοντελοποίηση
nDSM (Normalized DSM)	DSM – DTM, δηλαδή τα υπέργεια αντικείμενα	Αναγνώριση δόμησης/βλάστησης	Δεν χρησιμοποιείται αυτόνομα

Η βασική διαφορά μεταξύ DSM και DTM έγκειται στο γεγονός ότι το DSM περιλαμβάνει όλα τα υπέργεια αντικείμενα (βλάστηση, κτίρια), ενώ το DTM αναπαριστά τη “γυμνή” γη και τη μορφολογία της (εικ. 1). Η διάκριση αυτή είναι

κρίσιμη για τις υδραυλικές προσομοιώσεις, καθώς η χρήση DSM μπορεί να οδηγήσει σε τεχνητούς φραγμούς στη ροή, ενώ το DTM αποδίδει πιο ρεαλιστικά τις κοίτες και τα πλημμυρικά πεδία.



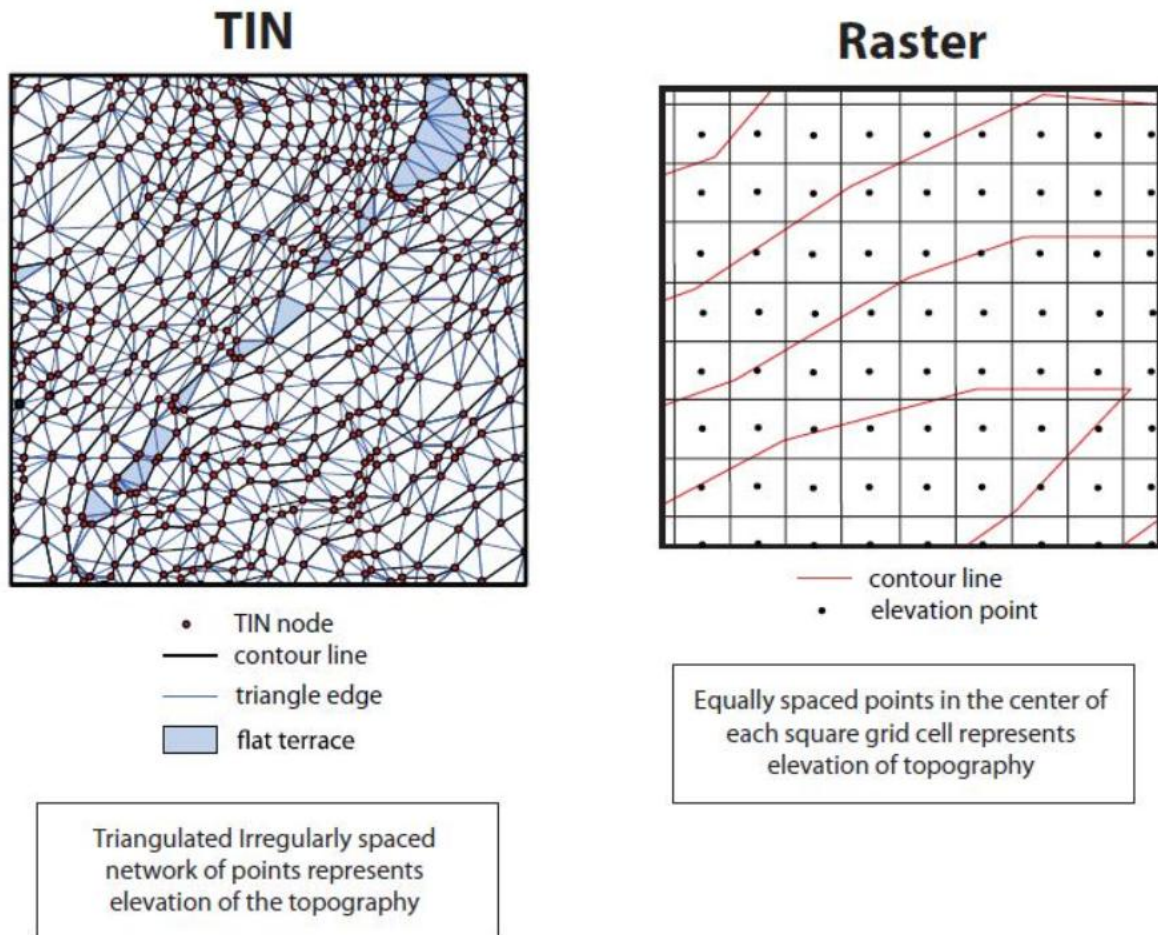
Εικόνα 1 Διαφορά μεταξύ DSM και DTM (Neonscience, 2025)

Η επιλογή μεταξύ DEM/DTM και η ποιότητα των υψομετρικών δεδομένων επηρεάζουν άμεσα τα υδραυλικά αποτελέσματα. Λανθασμένες ή υπεραπλουστευμένες γεωμετρίες (π.χ. «κλειστές» κοίτες λόγω γεφυρών/τοιχίων που δεν αποτυπώθηκαν σωστά) οδηγούν σε ψευδή φράγματα, υποεκτίμηση/υπερεκτίμηση σταθμών και αλλοίωση της πλημμυρικής έκτασης (Παρασχάκης, 1988; ASPRS, 2015).

Τα ΨΜΕ αποτελούν θεμελιώδες υπόβαθρο για τη μοντελοποίηση ροής και τον εντοπισμό πλημμυρικών ζωνών. Η ανάλυση και η ποιότητα τους επηρεάζουν άμεσα τη γεωμετρία της κοίτης και των πλημμυρικών πεδίων, τον υπολογισμό κλίσεων/καμπυλοτήτων, τις υδραυλικές αντιστάσεις και τις οδεύσεις ροής και συνεπώς τις εκτιμήσεις στάθμης, ταχύτητας και έκτασης κατάκλυσης στις προσομοιώσεις. Ακόμη και μικρά σφάλματα ύψους ή «τεχνητοί φραγμοί» (π.χ. από αταξινόμητα αντικείμενα στο DSM) μπορούν να οδηγήσουν σε μη ρεαλιστικές υπερχειλίσεις ή εγκλωβισμούς ροής (Hawker et al., 2018; Md Ali et al., 2015).

Τα μοντέλα υψομέτρων διαφέρουν ως προς τη δομή τους και συνήθως κατατάσσονται σε δύο βασικούς τύπους: (α) τα ακανόνιστα τριγωνικά δίκτυα (TIN), που υλοποιούνται σε διανυσματική μορφή και (β) τα πλεγματικά μοντέλα υψομέτρων (DEM), που βασίζονται σε κανονικό κάνναβο/ψηφιδωτό (raster) (εικ. 2). Η διαφοροποίηση αυτή έχει πρακτικές συνέπειες στη χρήση: τα πλεγματικά DEM

ευνοούνται όταν απαιτείται χειρισμός πολύ μεγάλων όγκων δεδομένων – όπως σε δορυφορικές αποτυπώσεις – λόγω χαμηλότερου κόστους και υψηλής αποδοτικότητας, ενώ τα TIN είναι προτιμητέα για ακριβή γεωμετρική αναπαράσταση τοπικών χαρακτηριστικών και λεπτομερειών του ανάγλυφου. (Κουτσόπουλος, 2005)



Εικόνα 2 Διαφορά μεταξύ TIN και Raster (Walsh, 2009)

2.4 Πηγές δεδομένων ανάγλυφου και συμβιβασμοί ακρίβειας – κόστους

Οι συνήθεις πηγές δεδομένων ανάγλυφου περιλαμβάνουν:

- Εθνικά ΨΜΕ (όπως του Κτηματολογίου με κάρναβο 2 – 5m) παρέχουν πανελλαδική κάλυψη και τυποποίηση ως κύρια πλεονεκτήματα. Ωστόσο, παρουσιάζουν περιορισμούς σε θέματα χρονικής υστέρησης και επικαιρότητας, καθώς και εξομάλυνση μικρομορφών κοίτης. Το κόστος απόκτησης είναι συνήθως μηδενικό ή χαμηλό, ενώ για τη βασική επεξεργασία παραμένει χαμηλό, προσφέροντας πολύ καλή σχέση κόστους - οφέλους για προκαταρκτικές αναλύσεις.

- Δορυφορικά ΨΜΕ (όπως Shuttle Radar Topography Mission/SRTM, Advanced Land Observing Satellite/ALOS) καλύπτουν ευρείες περιοχές αλλά έχουν μέτρια κατακόρυφη ακρίβεια για μικρές και απότομες λεκάνες. Προσφέρουν δωρεάν απόκτηση με χαμηλό έως μέτριο κόστος για υδροδιόρθωση και βελτιώσεις, αποτελώντας οικονομική επιλογή σε μεγάλες κλίμακες παρά το τεχνικό κόστος σε ζητήματα ακρίβειας.
- Η UAV και UAS (Unmanned Aircraft System/Σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους) φωτογραμμετρία παρέχει υψηλή ανάλυση και επικαιρότητα, είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για στενές κοιλάδες και μετά από ακραία επεισόδια. Απαιτεί προσεκτική γεωαναφορά με GCPs (Ground Control Points/Σημεία Ελέγχου Εδάφους) ή RTK και σωστή ταξινόμηση γυμνής γης (ASPRS, 2015). Το κόστος είναι μέτριο έως υψηλό για αποτύπωση και επεξεργασία, αλλά η στοχευμένη εφαρμογή σε συγκεκριμένα τμήματα μειώνει τον συνολικό προϋπολογισμό. Προσφέρει εξαιρετική αξία όταν απαιτείται επίκαιρη λεπτομέρεια.
- Το LiDAR (Light Detection and Ranging – Ανίχνευση και Μέτρηση με Φως), είτε εναέριο είτε επίγειο, παρέχει τη βέλτιστη κατακόρυφη ακρίβεια και δυνατότητα διαχωρισμού εδάφους από βλάστηση, αν και με υψηλότερο κόστος. Παρότι το κόστος απόκτησης και επεξεργασίας είναι υψηλό, προσφέρει τη μικρότερη αβεβαιότητα σε απαιτητικές μελέτες.

Η βέλτιστη επιλογή ψηφιακού υποβάθρου εξαρτάται από τον σκοπό της εφαρμογής. Για επιχειρησιακή αποτύπωση αμέσως μετά από ακραία συμβάντα (π.χ. Daniel – Elias, 2023), η χρήση UAV ή LiDAR είναι κρίσιμη, ώστε να καταγραφούν μετατοπίσεις κοίτης, αποθέσεις φερτών και βλάβες σε τεχνικά έργα που μεταβάλλουν την υδραυλική συμπεριφορά (Lekkas et al., 2024).

Παράλληλα, η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η ονομαστική ανάλυση των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους επηρεάζει καθοριστικά την ακρίβεια των υδραυλικών προσομοιώσεων. Όπως δείχνουν οι Xafoulis et al. (2023), ακόμη και δεδομένα υψηλής ανάλυσης δεν εγγυώνται κατ' ανάγκη καλύτερη ακρίβεια όταν δεν έχει προηγηθεί κατάλληλη αποθορυβοποίηση ή απομάκρυνση βλάστησης. Στη μελέτη τους για τη Θεσσαλία, τα δεδομένα UAV παρείχαν την πιο αξιόπιστη αποτύπωση, ενώ τα DEM 5m του Ελληνικού Κτηματολογίου αποτέλεσαν ρεαλιστική εναλλακτική σε συνθήκες περιορισμένων διαθέσιμων δεδομένων.

2.5 Απλές υδροδιορθώσεις και προεπεξεργασία DEM

Η υδρολογική «εξαναγκασμένη» συνέχεια της ροής (hydro-conditioning) με απλές μεθόδους μπορεί να βελτιώσει τη συνέπεια των διαδρομών ροής χωρίς να απαιτείται βαριά τεχνική ορολογία ή εξειδικευμένα εργαλεία. Τέτοιες διαδικασίες βοηθούν να αποφευχθούν τεχνητές λίμνες ή «σπασίματα» της ροής που δεν αντανakλούν την πραγματικότητα (Lindsay, 2016). Ενδεικτικά, τέτοια εργαλεία είναι:

- Fill sinks: άρση τεχνητών «λεκανών» που παγιτεύουν ροή (Esri, 2025).
- Flow Direction/Flow Accumulation: παραγωγή/έλεγχος υδρογραφικού δικτύου και οδεύσεων ροής (Esri, 2025).
- Stream burning/enforcement: εγχάραξη κοίτης και υποβιβασμός πυθμένα σε κρίσιμα σημεία (γέφυρες/οχετοί) για συνέχειες ροής (Lindsay, 2016; Hawker et al., 2018).
- Ενσωμάτωση breaklines: κοίτη, πρανή, τεχνητά όρια που «κατευθύνουν» την παρεμβολή σε TIN/rasters (ASPRS, 2015).
- Έλεγχοι συνέπειας: κλίση, σκιασμένο ανάγλυφο και διαφορικοί για εντοπισμό ασυνεπειών που επηρεάζουν κρίσιμα τις στάθμες (Μηλιαρέσης, 2006).

2.6 Λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν

Το ArcGIS Pro (Esri) είναι μια ολοκληρωμένη, επαγγελματική πλατφόρμα GIS για χαρτογράφηση, ανάλυση και διαχείριση γεωχωρικών δεδομένων σε 2D και 3D. Υποστηρίζει πλήρες φάσμα εργασιών, από εισαγωγή και γεωαναφορά δεδομένων raster και vector, μέχρι προχωρημένο geoprocessing (π.χ. buffer, overlay, υδρολογικές αναλύσεις), ανάλυση εδάφους (κλίσεις, ισοϋψείς, ορατότητα), μοντελοποίηση ροών εργασίας και παραγωγή χαρτογραφικών διατάξεων (layouts) για επικοινωνία αποτελεσμάτων. Ενσωματώνεται με διαδικτυακές υπηρεσίες (WMS/WFS/WMTS) και το ArcGIS Online/Portal για κοινή χρήση, ενώ επεκτείνεται με modules όπως Spatial Analyst και 3D Analyst. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη σωστή διαχείριση προβολικών συστημάτων, στη διάθεση μεταδεδομένων και στον έλεγχο ποιότητας δεδομένων, ώστε οι αναλύσεις να είναι τεκμηριωμένες και αναπαραγώγιμες.

Το HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers) είναι λογισμικό υδραυλικής προσομοίωσης ανοικτών ροών για 1D και 2D προσομοιώσεις μόνιμης ή/και ασταθούς ροής, με δυνατότητες μοντελοποίησης υδραυλικών κατασκευών (γέφυρες,

οχεοί, αναχώματα, θυροφράγματα), μεταφοράς φερτών και βασικής ποιότητας νερού. Μέσω του RAS Mapper δημιουργεί/αξιοποιεί υψομετρικές επιφάνειες (terrains) από DEM, ορίζει γεωμετρίες (κοίτη, όχθες, διατομές ή 2D mesh), παραμετροποιεί τραχύτητες (Manning n) και οριακές συνθήκες και παράγει χαρτογραφικά προϊόντα (π.χ. βάθος, ταχύτητα, έκταση κατάκλυσης) για αξιολόγηση κινδύνου πλημμύρας και εναλλακτικών τεχνικών λύσεων. Η αξιοπιστία του εξαρτάται από την ποιότητα της γεωμετρίας και των υδρολογικών δεδομένων, καθώς και από τη συστηματική βαθμονόμηση/έλεγχο ευαισθησίας.

2.6.1 Διαλειτουργικότητα ArcGIS Pro – HEC-RAS

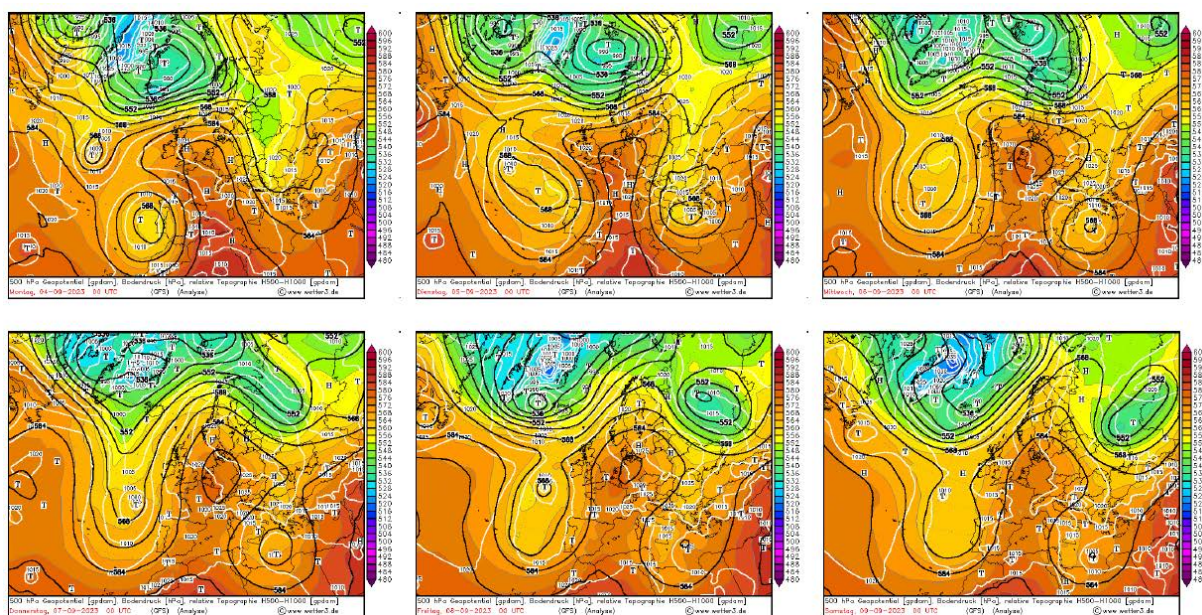
Το ArcGIS Pro προετοιμάζει τα χωρικά δεδομένα (DEM, υδρογραφία, όρια λεκανών, reprojection/clip) και τα μεταδίδει στο HEC-RAS για δημιουργία γεωμετρίας/terrain και εκτέλεση υδραυλικών προσομοιώσεων. Το HEC-RAS παράγει χάρτες κατάκλυσης, βάθους και ταχύτητας, οι οποίοι επανεισάγονται στο ArcGIS Pro για συνδυαστική ανάλυση με υποδομές/χρήσεις γης και τελική σύνθεση χαρτών. Κρίσιμες πρακτικές: ενιαίο προβολικό σύστημα σε όλα τα layers, τεκμηριωμένες πηγές/ημερομηνίες δεδομένων, έλεγχος τοπολογίας/υψομετρικών σφαλμάτων και αξιολόγηση αβεβαιότητας (ευαισθησία σε Manning και παροχές).

2.7 Τοπικό πλαίσιο: τα γεγονότα Daniel και Elias

Η κακοκαιρία Daniel με την επακόλουθη κακοκαιρία Elias ήταν ένα πολύ ακραίο καιρικό φαινόμενο που έπληξε την Ελλάδα και ιδιαίτερα τη Θεσσαλία, τον Σεπτέμβριο του 2023, οδηγώντας σε ανθρώπινες απώλειες και προκαλώντας εκτεταμένες καταστροφές.

Το ακραίο φαινόμενο Daniel διήρκεσε από τις 4 έως τις 12 Σεπτεμβρίου 2023, με το κύριο πλήγμα να σημειώνεται στις 5 Σεπτεμβρίου. Θεωρείται αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής, με την επικράτηση του φαινομένου «μπλοκ Ωμέγα» (Omega Block) να συμβάλλει στην ένταση και τη διάρκεια των βροχοπτώσεων, ενώ ξεπέρασε σε ένταση και όγκο νερού προηγούμενα φαινόμενα, όπως ο μεσογειακός κυκλώνας «Ιανός» του 2020, καθιστώντας τη μία από τις πιο καταστροφικές κακοκαιρίες που έχουν πλήξει την Ελλάδα (Lekkas et al., 2024). Το φαινόμενο Omega Block είναι ένα μετεωρολογικό μοτίβο που χαρακτηρίζεται από ένα σύστημα υψηλών πιέσεων ανάμεσα σε δύο συστήματα χαμηλών πιέσεων, σχηματίζοντας το σχήμα του

ελληνικού γράμματος Ωμέγα. Το συγκεκριμένο μοτίβο παρέμεινε επίμονα στην περιοχή για περισσότερο από μία εβδομάδα (εικ. 3).

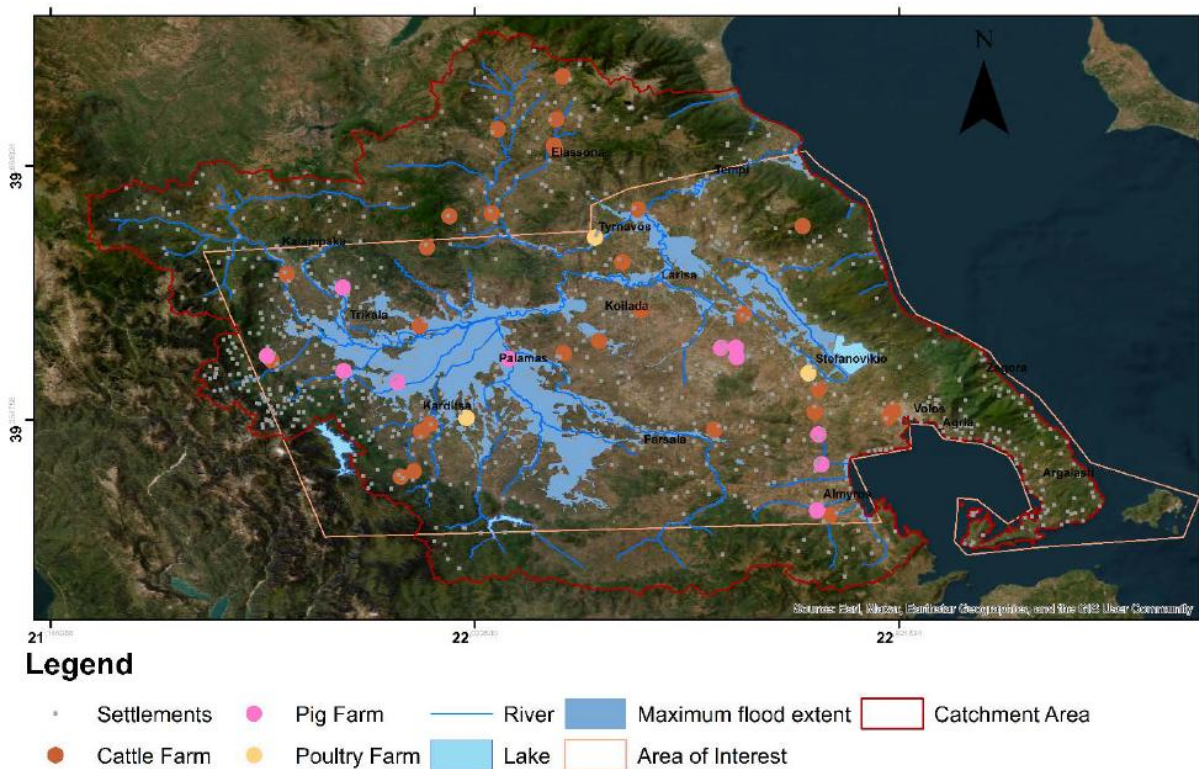


Εικόνα 3 Απεικόνιση του φαινομένου Omega Block από τις 04 έως τις 09 Σεπτεμβρίου 2023 (Lekkas et al., 2024)

Πριν ακόμα τελειώσει ο απολογισμός και η καταγραφή των βλαβών από το φαινόμενο Daniel, ένα δεύτερο ακραίο φαινόμενο διάρκειας πέντε ημερών (25 – 29 Σεπτεμβρίου 2023) χτύπησε τη Θεσσαλία μόλις δύο εβδομάδες μετά, η κακοκαιρία Elias, καθιστώντας ιστορική τη συνύπαρξη δυο τόσο ακραίων φαινομένων, ενώ η καταστροφή της Θεσσαλίας στα τέλη του Σεπτεμβρίου 2023 ήταν «βιβλική».

Στον χάρτη του Υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας, απεικονίζεται η μέγιστη έκταση πλημμύρας και η περιοχή που είχε επηρεαστεί (εικ. 4). Ο χάρτης αυτός είναι χρήσιμος για τον προσδιορισμό των περιοχών που υπέστησαν τη σοβαρότερη ζημιά, επισημαίνοντας τις επιπτώσεις στον αγροτικό τομέα, ιδίως στις περιοχές με σημαντική γεωργική και κτηνοτροφική δραστηριότητα στη Θεσσαλία.

Πολλές αγροτικές περιοχές στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της θεσσαλικής πεδιάδας παρέμειναν κάτω από τα νερά των πλημμυρών για αρκετές ημέρες. Το νερό συνέχισε τη φυσική του ροή προς τον ποταμό Πηνειό και κατέληξε εν μέρει στη Λίμνη Κάρλα, δημιουργώντας τη μεγαλύτερη λίμνη της χώρας και στην εκβολή του Πηνειού στη θάλασσα του Αιγαίου, δημιουργώντας νέο ανάγλυφο στο δέλτα του ποταμού.



Εικόνα 4 Μέγιστη έκταση πλημμύρας στο Υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας (Lekkas et al., 2024)

Σε περιοχές όπως το Πήλιο, οι μικρές λεκάνες με απότομα πρηνή παρουσιάζουν ταχεία υδρολογική απόκριση, ενώ η εγγύτητα στη θάλασσα, οι στενές κοιλάδες και η παρουσία φερτών υλικών αυξάνουν την πιθανότητα υποσκαφών, αστοχιών πρηνών και απόφραξης τεχνικών. Αυτές οι ιδιαιτερότητες χρειάζονται ρητή πρόβλεψη στη μοντελοποίηση και στον σχεδιασμό μέτρων (Blöschl et al., 2019). Στο οδικό δίκτυο παρατηρήθηκαν υποσκαφές και διαβρώσεις ερεισμάτων, αστοχίες πρηνών, παράσυρση επιχωμάτων, απόφραξη τεχνικών και τοπικές βλάβες σε γέφυρες. (Lekkas et al., 2024). Η άμεση απόκριση από τους αρμόδιους φορείς περιέλαβε προσωρινές αποκαταστάσεις (διανοίξεις, απομάκρυνση φερτών, επιχώσεις για επαναφορά βατότητας, τοπικές ενισχύσεις), ενώ σε δεύτερο χρόνο δρομολογήθηκαν μόνιμα έργα (ανακατασκευή τεχνικών, πτερυγότοιχοι, τοίχοι αντιστήριξης, σταθεροποιήσεις πρηνών κ.λπ.).

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, τα γεγονότα Daniel – Elias λειτουργούν ως πρακτικό παράδειγμα που αναδεικνύει:

- ✓ Τη σημασία της επικαιρότητας του DEM μετά από μεγάλες γεωμορφολογικές μεταβολές (πρόσχωση/διάβρωση, μετακινήσεις κοίτης, αλλαγές σε τεχνητά εμπόδια).
- ✓ Την αξία απλών υδροδιορθώσεων για ρεαλιστικές διαδρομές ροής.

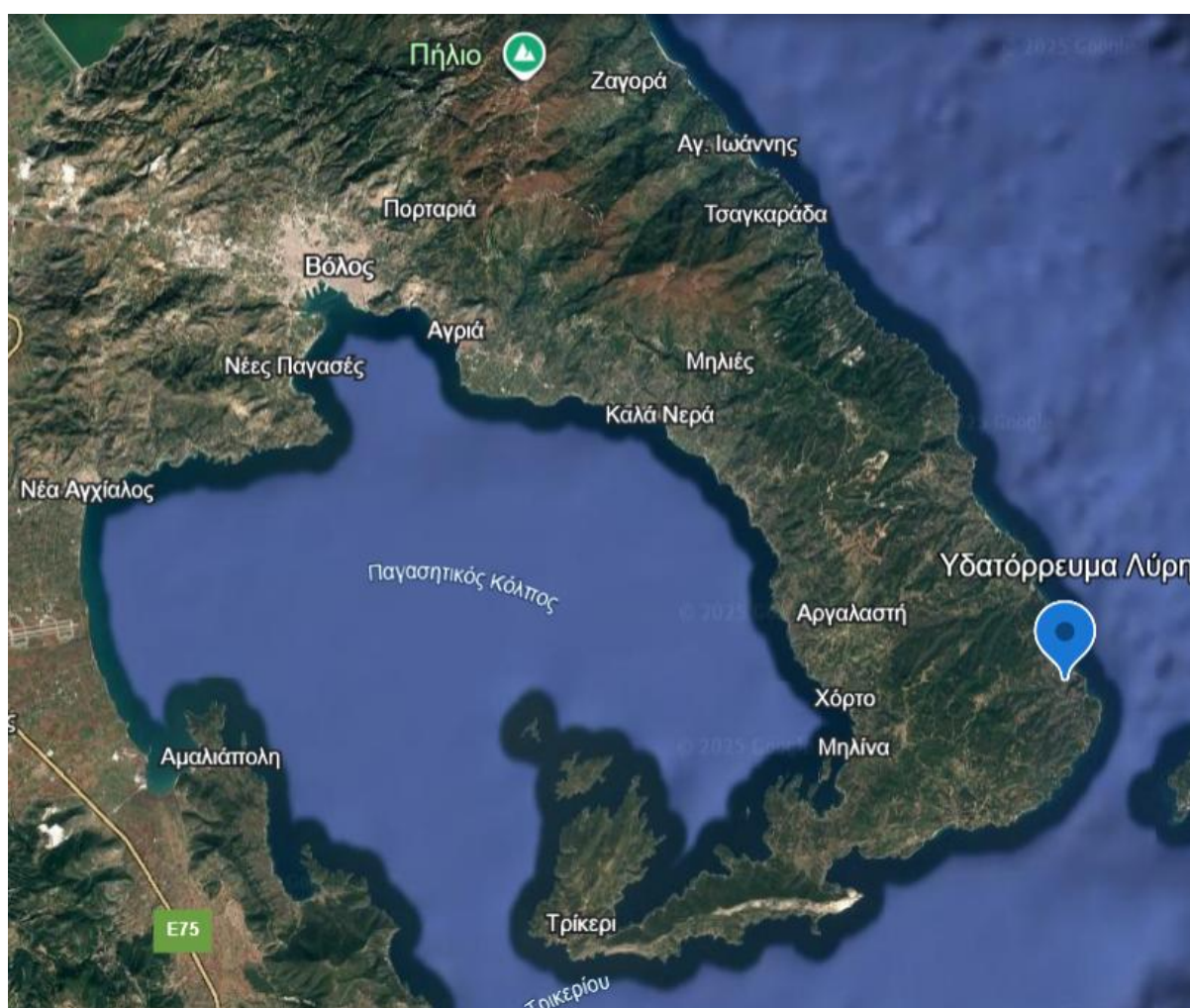
- ✓ Την ανάγκη προσαρμογής των παραμέτρων μοντελοποίησης στις τοπικές ιδιαιτερότητες μικρών, ορεινών και παράκτιων λεκανών (Hawker et al., 2018; Lindsay, 2016; USACE, 2023).

Τα παραπάνω οδηγούν στη μεθοδολογία του Κεφ. 3, όπου εφαρμόζονται συνεπείς διαδικασίες προεπεξεργασίας στο ArcGIS Pro και προσομοίωσης στο HEC-RAS και στο Κεφ. 4 όπου συγκρίνονται συστηματικά τα αποτελέσματα ανά πηγή DEM.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – Μεθοδολογία

3.1 Περιοχή μελέτης

Το φυσικό υδατόρρευμα «Λύρη», μήκους περίπου ενός χιλιομέτρου, βρίσκεται στην Περιφερειακή Ενότητα Μαγνησίας και Σποράδων, της Περιφέρειας Θεσσαλίας και συγκεκριμένα διέρχεται από τον ομώνυμο οικισμό Λύρη, ο οποίος ανήκει στον Δήμο Νοτίου Πηλίου. Το υδατόρρευμα εντοπίζεται στο πιο νοτιοανατολικό άκρο της Μαγνησίας, νοτιοανατολικά της Αργαλαστής, έδρας του Δήμου Νοτίου Πηλίου και εκβάλλει στο Αιγαίο Πέλαγος (εικ. 5).



Εικόνα 5 Γεωγραφική τοποθεσία Υδατορρέυματος «Λύρη» (Google Earth, 2025)

Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (ΥΔ 08), όπου εντοπίζεται η λεκάνη απορροής του εξεταζόμενου υδατικού συστήματος, εκτείνεται σε συνολική επιφάνεια 13.140 km² και βρίσκεται υπό τη διοικητική εποπτεία της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Θεσσαλίας-Στερεάς Ελλάδας, η οποία ασκεί τις αρμοδιότητές της μέσω της

Διεύθυνσης Υδάτων Θεσσαλίας. Η διάρθρωση του ΥΔ 08 περιλαμβάνει δύο βασικές υδρολογικές ενότητες: τη EL0816 (Κωδικός GR16) που αντιστοιχεί στη «Λεκάνη Πηνειού» και τη EL0817 (Κωδικός GR17) που αφορά στη «Λεκάνη Αλμυρού-Πηλίου» (ΥΠΕΝ, 2025).

Η λεκάνη απορροής (ΛΑΠ) Αλμυρού – Πηλίου, η οποία περιλαμβάνει τη λεκάνη απορροής του μελετώμενου υδατορρεύματος «Λύρη», χαρακτηρίζεται από την απουσία μεγάλων ποτάμιων συστημάτων. Το τοπικό υδρογραφικό δίκτυο συγκροτείται από μικρού μεγέθους υδατορρέυματα, που καταλήγουν στα παράκτια ύδατα του Παγασητικού Κόλπου και του Αιγαίου Πελάγους. Η ολική έκταση αυτής της υδρολογικής ενότητας φτάνει τα 2.079 km², ενώ το υδατόρρευμα «Λύρη» συγκαταλέγεται στα αντιπροσωπευτικά υδατορρέυματα που διασχίζουν τις παράκτιες περιοχές του νοτιοανατολικού τμήματος του όρους Πήλιο.

Οι οικισμοί στο Νότιο Πήλιο στην περιοχή της Λύρης, του Μουρτιά και της Βάτης μετά την κακοκαιρία έμειναν για περίπου δύο μήνες χωρίς νερό, αντιμετώπισαν συχνές διακοπές στην ηλεκτροδότηση και σοβαρό πρόβλημα με το δίκτυο τηλεπικοινωνιών ενώ είχε καταστραφεί ο αγροτικός δρόμος που οδηγεί από το Προμύρι στη Λύρη (εικ. 6).



Εικόνα 6 Εκβολή Υδατορρεύματος «Λύρη» μετά την κακοκαιρία Daniel (Onlarissa.gr, 2025)

Με την επέμβαση των αρμόδιων φορέων έγινε καθαρισμός του υδατορρεύματος (εικ. 7 και 8) και προσωρινή αποκατάσταση του δρόμου.



Εικόνα 7 Εκβολή Υδατορρεύματος «Λύρη» μετά τις εργασίες καθαρισμού (Προσωπικό αρχείο Μαρίας Βαρακλή, 2024)



Εικόνα 8 Μέρος Υδατορρεύματος «Λύρη» μετά τις εργασίες καθαρισμού (Προσωπικό αρχείο Μαρίας Βαρακλή, 2024)

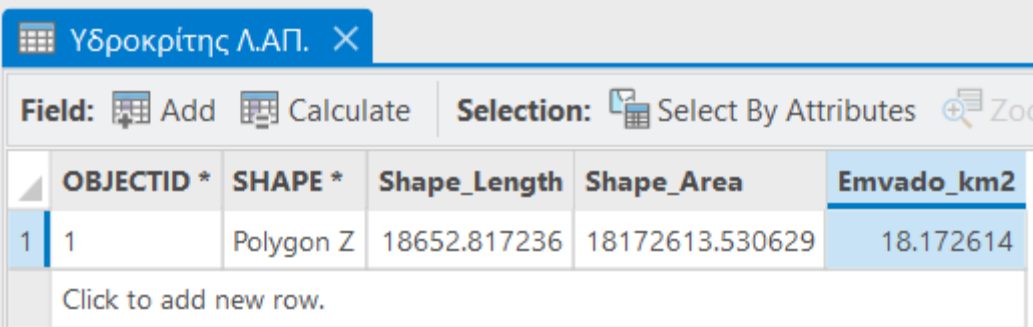
3.1.1 Σχεδίαση Υδροκρίτη Λεκάνης Απορροής

Για τη σχεδίαση του Υδροκρίτη της ΛΑΠ του υπό μελέτη υδατορρεύματος, χρησιμοποιείται το λογισμικό ArcGIS Pro. Στον ιστότοπο <http://geodata.gov.gr/>, από

όπου αντλήθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα, περιλαμβάνονται σε μορφή vector αρχείου τα 14 Υδατικά Διαμερίσματα (Περιοχές Λεκανών Απορροής Ποταμών) της χώρας, το υδρογραφικό δίκτυο της Ελλάδας, καθώς και οι λεκάνες απορροής. Από το shape file των λεκανών απορροής δημιουργείται ένα layer με την υπολεκάνη που ανήκει το υπό μελέτη υδατόρρευμα.

Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή του DEM του Ελληνικού Κτηματολογίου σε μορφή raster, ανάλυσης 5m, στο οποίο σχεδιάζονται ισοϋψείς καμπύλες ισοδιάστασης 50 m με το εργαλείο Contour, ενώ με τη χρήση του εργαλείου Extract By Mask δημιουργείται ένα νέο raster στα όρια της υπολεκάνης που ανήκει το υδατόρρευμα «Λύρη».

Μελετώντας το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και με τη βοήθεια των ισοϋψών καμπυλών, μπορεί να σχεδιαστεί ο υδροκρίτης, δημιουργώντας ένα νέο πολύγωνο μέσα στη Γεωβάση. Στον attribute table του υδροκρίτη, ο οποίος καθορίζει τη λεκάνη απορροής, μπορεί να προστεθεί πεδίο Emvado_km² και να υπολογιστεί το εμβαδόν της σε km², μέσω του calculate geometry (εικ. 9). Το συνολικό εμβαδόν είναι 18.17 km². Τέλος, με τη χρήση του εργαλείου Extract By Mask, δημιουργείται ένα νέο raster στα όρια της λεκάνης απορροής του υδατορρεύματος «Λύρη», με όνομα DEM_Basin, ενώ με τη χρήση του εργαλείου clip «κόβονται» οι ισοϋψείς καμπύλες στα όρια της λεκάνης απορροής.



	OBJECTID *	SHAPE *	Shape_Length	Shape_Area	Emvado_km2
1	1	Polygon Z	18652.817236	18172613.530629	18.172614

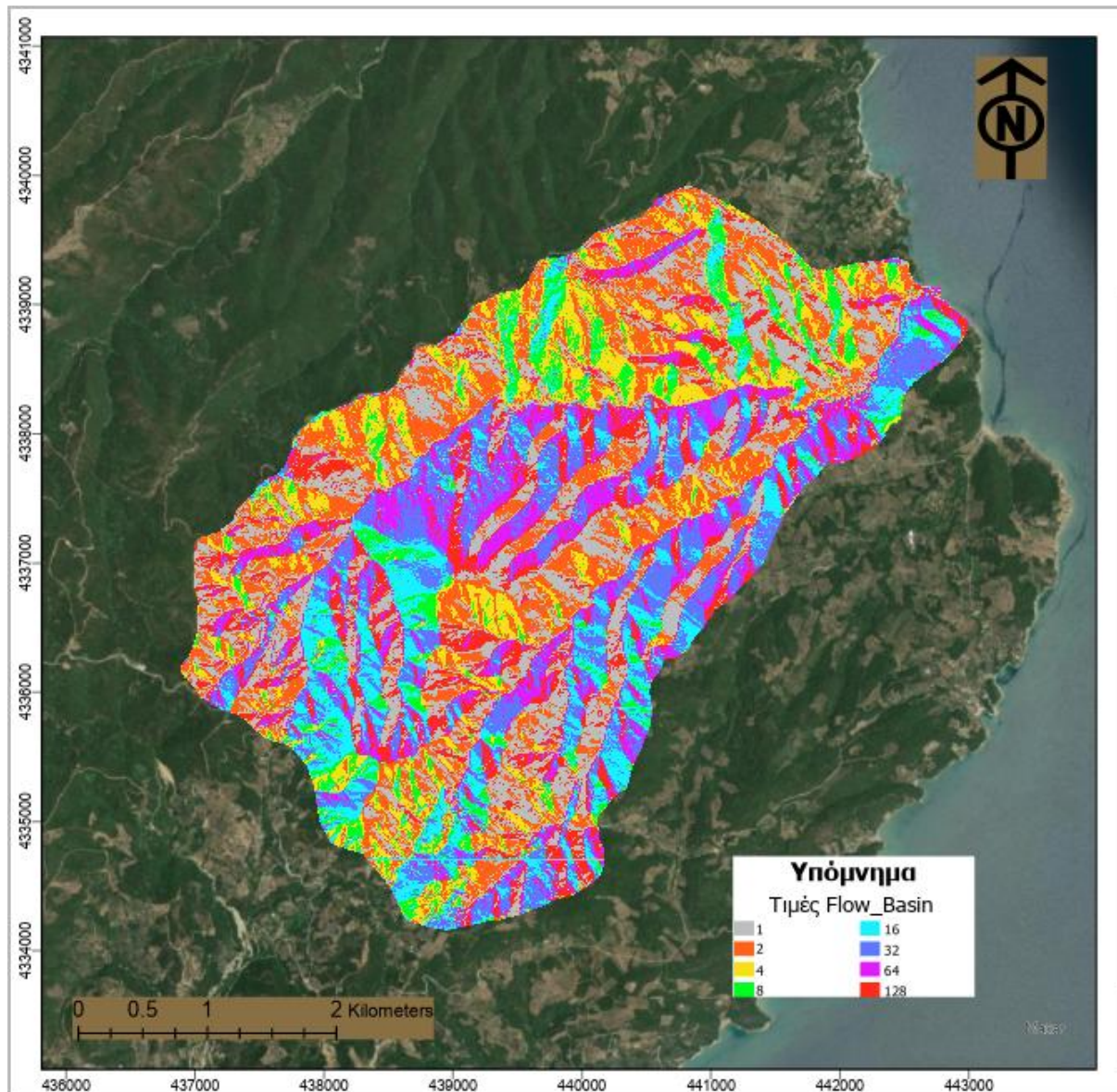
Εικόνα 9 Εμβαδόν ΛΑΠ

3.1.2 Σχεδίαση Υδρογραφικού Δικτύου

Για τον σχεδιασμό του υδρογραφικού δικτύου της ΛΑΠ θα υπολογιστούν η κατεύθυνση ροής (Flow Direction) και η συσσώρευση ροής (Flow Accumulation).

Το Flow Direction υπολογίζει την κατεύθυνση ροής του νερού σε κάθε κελί ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Κάθε κελί ανατίθεται σε μία από τις 8 κύριες κατευθύνσεις (π.χ. βόρεια, ανατολικά κ.λπ.), με βάση την κλίση προς το χαμηλότερο

γειτονικό κελί και χρησιμοποιείται για την ανάλυση υδρολογικών δικτύων και τον προσδιορισμό της πορείας του νερού στην επιφάνεια (ESRI, 2025). Εφαρμόζοντας το εργαλείο στο DEM_Basin προκύπτει το Flow_Basin (εικ. 10).



Εικόνα 10 Αποτέλεσμα χρήσης εργαλείου Flow Direction

Το Flow Accumulation υπολογίζει τον αριθμό των κελιών που «συρρέουν» σε κάθε κελί του DEM, με βάση το Flow Direction. Τα κελιά με υψηλή συσσώρευση ροής αντιστοιχούν σε περιοχές όπου το νερό συγκεντρώνεται, όπως ποτάμια ή κοιλάδες και χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό υδρογραφικών δικτύων και την ανάλυση πλημμυρικών περιοχών (ESRI, 2025). Εφαρμόζοντας το εργαλείο στο Flow_Basin προκύπτει το YD_Basin, στο οποίο μέσω του Symbology γίνεται η κατάλληλη παραμετροποίηση (εικ. 11), ώστε να είναι καλύτερο το εποπτικό αποτέλεσμα (εικ. 12).

Method

Classes

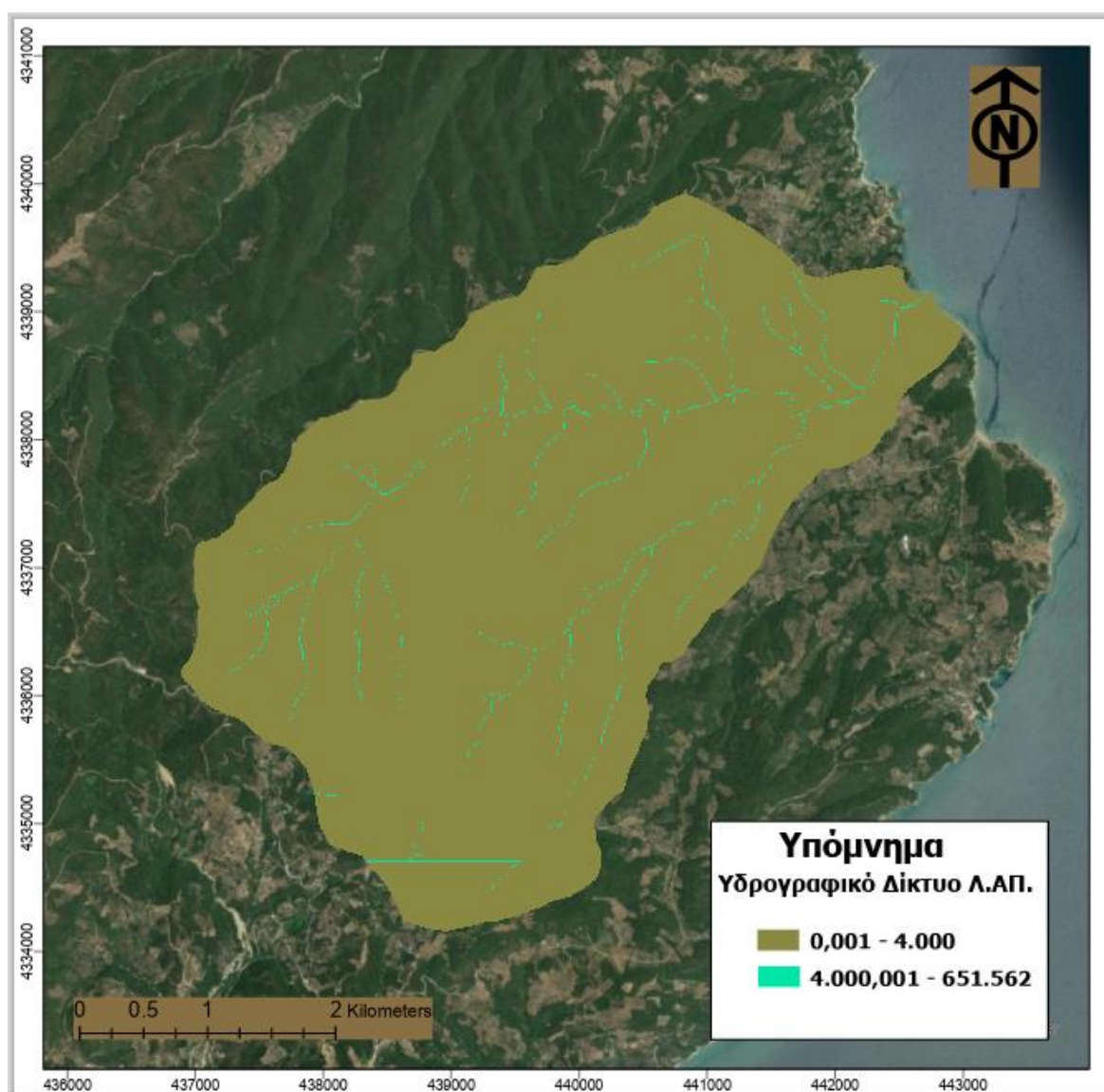
Color scheme 

Classes Mask Histogram

More

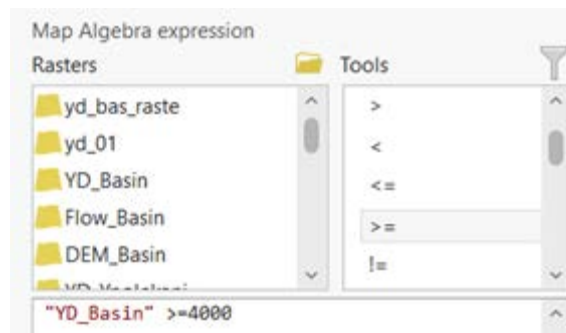
Color	Upper value	Label
	≤ 4000.0	0.001 - 4,000
	≤ 651562.0	4,000.001 - 651,562

Εικόνα 11 Παραμετροποίηση του YD_Basin

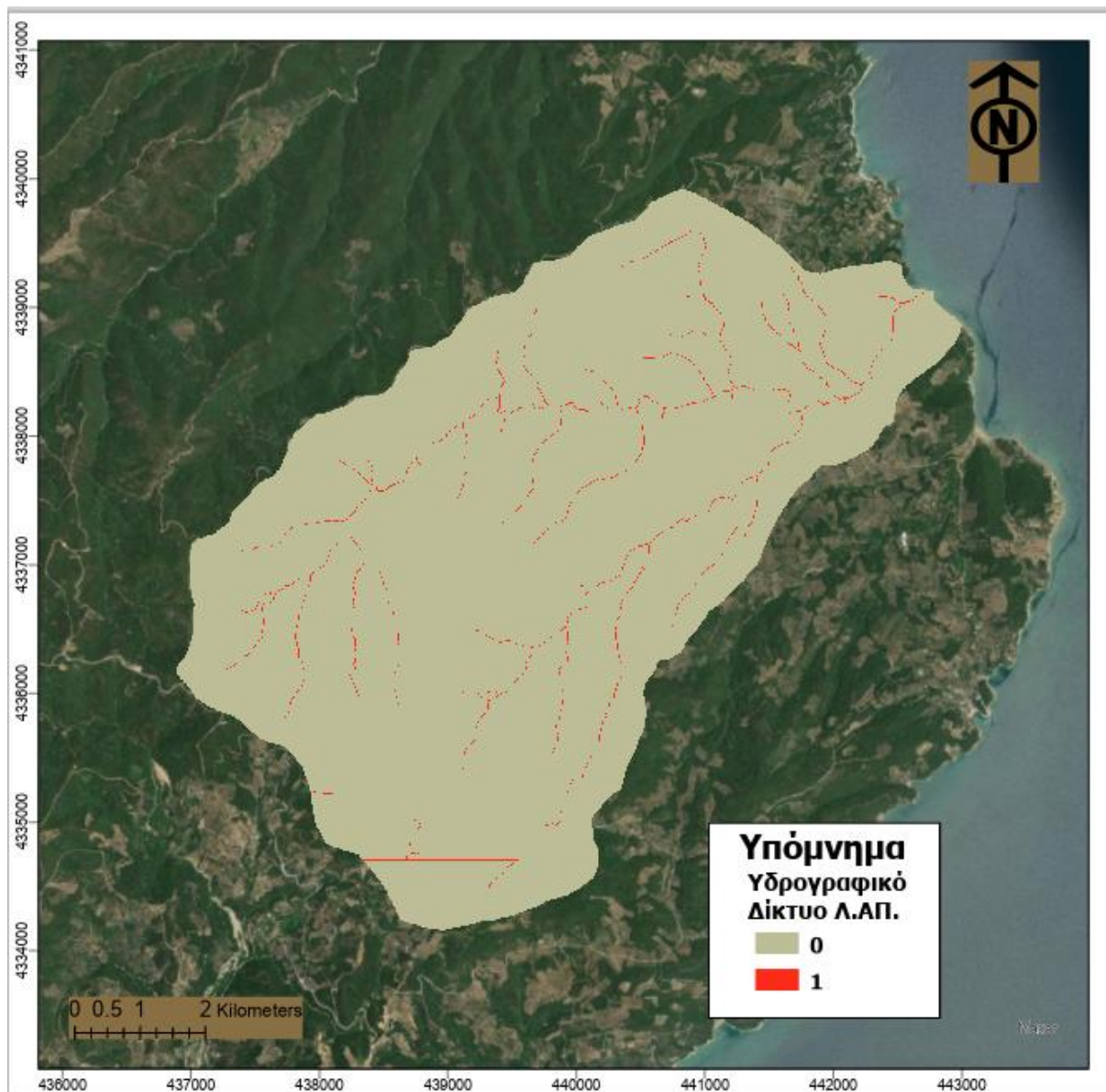


Εικόνα 12 Αποτέλεσμα χρήσης εργαλείου Flow Accumulation με μεγάλο εύρος τιμών

Για να είναι επεξεργάσιμα τα υδατορρέυματα του υδρογραφικού δικτύου, με τη χρήση του Raster Calculator (εικ. 13) δημιουργείται ένα νέο DEM από το YD_Basin, στο οποίο μετατρέπεται το εύρος τιμών σε διακριτές τιμές 0 και 1 (εικ. 14).

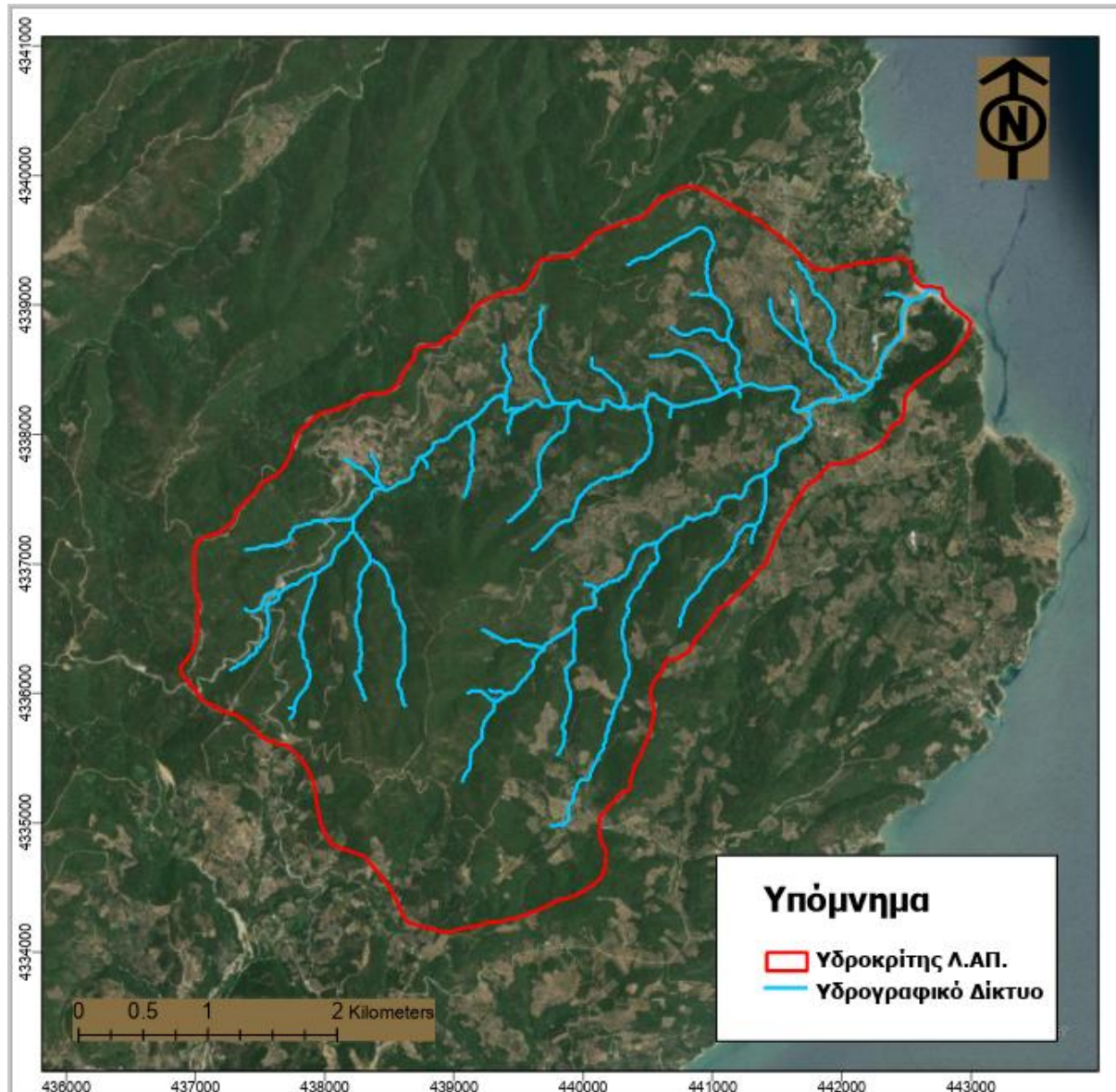


Εικόνα 13 Μετατροπή των τιμών του raster σε 0 και 1



Εικόνα 14 Αποτέλεσμα χρήσης εργαλείου Flow Accumulation με τιμές 0 και 1

Τέλος, με τη χρήση του εργαλείου Raster To Polyline γίνεται η δημιουργία του Υδρογραφικού Δικτύου, σε μορφή επεξεργάσιμη. Μετά τις απαραίτητες διορθώσεις και παραμετροποίηση προκύπτει το Υδρογραφικό Δίκτυο για τη Λεκάνη Απορροής του υδατορρέυματος «Λύρη» (εικ. 15).



Εικόνα 15 Υδροκρίτης και Υδρογραφικό Δίκτυο ΛΑΠ

3.1.3 Χαρακτηριστικά της Λεκάνης Απορροής

Η λεκάνη απορροής του υδατορρέυματος «Λύρη» εκτείνεται σε επιφάνεια 18,17 km² και εμφανίζει διακριτή μορφολογία με ορεινό χαρακτήρα. Το υδρογραφικό της δίκτυο οργανώνεται γύρω από το κύριο υδατόρρευμα μήκους 8,28 km, το οποίο διασχίζει τη λεκάνη καταλήγοντας στην παράκτια ζώνη. Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της Λεκάνης Απορροής, περιγράφονται συνοπτικά στον πίνακα 2.

Πίνακας 2 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά ΛΑΠ

ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΑΠ	
Εμβαδόν ΛΑΠ (km ²)	18,17
Υψόμετρο εξόδου ΛΑΠ (m)	0,00
Μέγιστο Υψόμετρο ΛΑΠ (m)	434,39
Μέσο Υψόμετρο ΛΑΠ (m)	213,64
Μήκος κύριου υδατορρεύματος (km)	8,28
Μέση εδαφική κλίση ΛΑΠ (%)	34,86

Η τοπογραφική διαμόρφωση της περιοχής εμφανίζει σημαντικές υψομετρικές διαφοροποιήσεις, με τα υψόμετρα να κυμαίνονται από 0 m στο σημείο εκβολής έως 434,39 m στην υψηλότερη κορυφή της λεκάνης. Το μέσο υψόμετρο υπολογίζεται σε 213,64 m, γεγονός που αντικατοπτρίζει το μεταβατικό χαρακτήρα από τις ορεινές περιοχές προς την παράκτια ζώνη. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτη είναι η μέση εδαφική κλίση που φτάνει το 34,86%, τιμή που ευνοεί γρήγορες απορροές και αυξημένες ταχύτητες ροής στα ρέματα, ειδικά κατά τη διάρκεια ισχυρών βροχοπτώσεων..

Το υδατόρρευμα καταλήγει άμεσα στο θαλάσσιο περιβάλλον της περιοχής, δημιουργώντας μια χαρακτηριστική παράκτια διεπαφή. Αυτή η γεωμορφολογική διάταξη ευνοεί τη δημιουργία προσχωματικών σχηματισμών και την αλληλεπίδραση με τις παράκτιες δυναμικές διεργασίες.

Με δεδομένα το μέγεθος της λεκάνης, τη σχετικώς μεγάλη κλίση και την άμεση παράκτια εκτόνωση, η υδρολογική απόκριση του συστήματος αναμένεται ταχεία. Αυτό συνεπάγεται αυξημένη ευαισθησία σε αιχμές παροχής και πιθανή μεταφορά φερτών προς τη ζώνη εκβολής, με επιδράσεις στις παράκτιες διεργασίες και στις υποδομές του οικιστικού μετώπου.

Αυτός ο συνδυασμός γεωμετρικών παραμέτρων καθιστά τη λεκάνη μια αντιπροσωπευτική περίπτωση των παράκτιων υδρολογικών συστημάτων του Πηλίου, με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που αξίζουν περαιτέρω μελέτης και παρακολούθησης.

3.2 Επεξεργασία ψηφιακών μοντέλων εδάφους στο ArcGIS Pro

3.2.1 Αντληση δεδομένων

Το **DEM 5m του Ελληνικού Κτηματολογίου** αναπτύχθηκε κατά τη διαδικασία παραγωγής ορθοεικόνων από έγχρωμες αεροφωτογραφίες, στο πλαίσιο του έργου "Large Scale Orthophotomaps" (LSO). Το εν λόγω έργο αποτελούσε βασικό τμήμα του ευρύτερου Μεγάλου Έργου με τίτλο "Υποδομή Δεδομένων και Τεχνολογίας Πληροφοριών για ένα σύγχρονο κτηματολόγιο", το οποίο υλοποιήθηκε από την πρώην ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε., προκάτοχο του σημερινού Φορέα ΝΠΔΔ "ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ". Η χρηματοδότηση του έργου πραγματοποιήθηκε με συγχρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος "Κοινωνία της Πληροφορίας" του Γ' Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης.

Το DEM 5m διαθέτει χωρική ανάλυση 5 μέτρων και αναφέρεται στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ'87 (EPSG:2100), καλύπτοντας το σύνολο του ελληνικού εδάφους. Η παραγωγή του βασίστηκε σε φωτογραμμετρική επεξεργασία έγχρωμων αεροφωτογραφιών υψηλής ανάλυσης, αποτελώντας ένα από τα κύρια παραδοτέα του έργου μαζί με τις ορθοεικόνες. Το DEM 5m αποτελεί σημαντικό εργαλείο για χωροταξικό και πολεοδομικό σχεδιασμό, περιβαλλοντικές μελέτες, υδρολογικές αναλύσεις, μελέτες φυσικών κινδύνων και διάφορες ερευνητικές εφαρμογές στις γεωεπιστήμες.

Το **DEM 2m του Ελληνικού Κτηματολογίου** δημιουργήθηκε στο πλαίσιο βελτιστοποίησης και επικαιροποίησης των υφιστάμενων προϊόντων του έργου LSO, μέσω της υλοποίησης του νέου έργου "Large Scale Orthophotomaps 25 cm (LSO25)". Το εν λόγω έργο αποτέλεσε συνέχεια του ευρύτερου προγράμματος "Υποδομή Δεδομένων και Τεχνολογίας Πληροφοριών για ένα σύγχρονο κτηματολόγιο" και επικεντρώθηκε σε τμηματικά έργα υψηλότερης ανάλυσης, στοχεύοντας κυρίως σε αστικές και ημιαστικές περιοχές. Η χρηματοδότηση του έργου πραγματοποιήθηκε με τη συγχρηματοδότηση του ΕΣΠΑ 2014-2020. Ο κεντρικός στόχος του LSO25 ήταν η παραγωγή ορθοφωτοχαρτών με μέγεθος εικονοστοιχείου 0,25 μέτρα και χωρική ανάλυση 2 μέτρων, καθώς και η δημιουργία του αντίστοιχου ψηφιακού μοντέλου εδάφους με ανάλυση 2 μέτρων, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία ορθοαναγωγής των εικόνων. Για τις ανάγκες του έργου πραγματοποιήθηκε λήψη νέων έγχρωμων αεροφωτογραφιών υψηλότερης

ανάλυσης κατά την περίοδο 2014-2016, εφαρμόζοντας προηγμένες τεχνικές βελτιωμένης ψηφιακής φωτογραμμετρίας. Επιπλέον, για συγκεκριμένες περιοχές που παρουσίαζαν ιδιαίτερες προκλήσεις, υιοθετήθηκε επιλεκτικά η τεχνολογία LiDAR, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια.

Το DEM 2m διαθέτει μέγεθος εικονοστοιχείου 2,00×2,00 μέτρα και αναφέρεται στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ'87 (EPSG:2100GreekGrid) σε κλίμακα 1:5.000. Όπως και το προγενέστερο DEM 5m του Ελληνικού Κτηματολογίου, το νέο ψηφιακό μοντέλο διατίθεται κυρίως σε μορφή GeoTIFF, διευκολύνοντας τη χρήση του σε ευρύ φάσμα γεωπληροφοριακών εφαρμογών και αναλύσεων. Η αυξημένη χωρική ανάλυση του DEM 2m το καθιστά ιδανικό εργαλείο για λεπτομερέστερες μελέτες σε αστικό περιβάλλον και εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερη ακρίβεια χωρικής πληροφορίας.

Τα ανωτέρω ψηφιακά μοντέλα εδάφους, διατίθενται αποκλειστικά σε δημόσιες υπηρεσίες κατόπιν υποβολής επίσημου έγγραφου αιτήματος από την επίσημη πηγή του Ελληνικού Κτηματολογίου, μέσω της Ηλεκτρονικής Υπηρεσίας Παροχής Δεδομένων (e-Ktimatologio) και της Διεύθυνσης Ψηφιακών Συστημάτων και Γεωπληροφορικής (ΔΨΣΓ). Για την πραγματοποίηση της παρούσας μελέτης, παραχωρήθηκαν από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

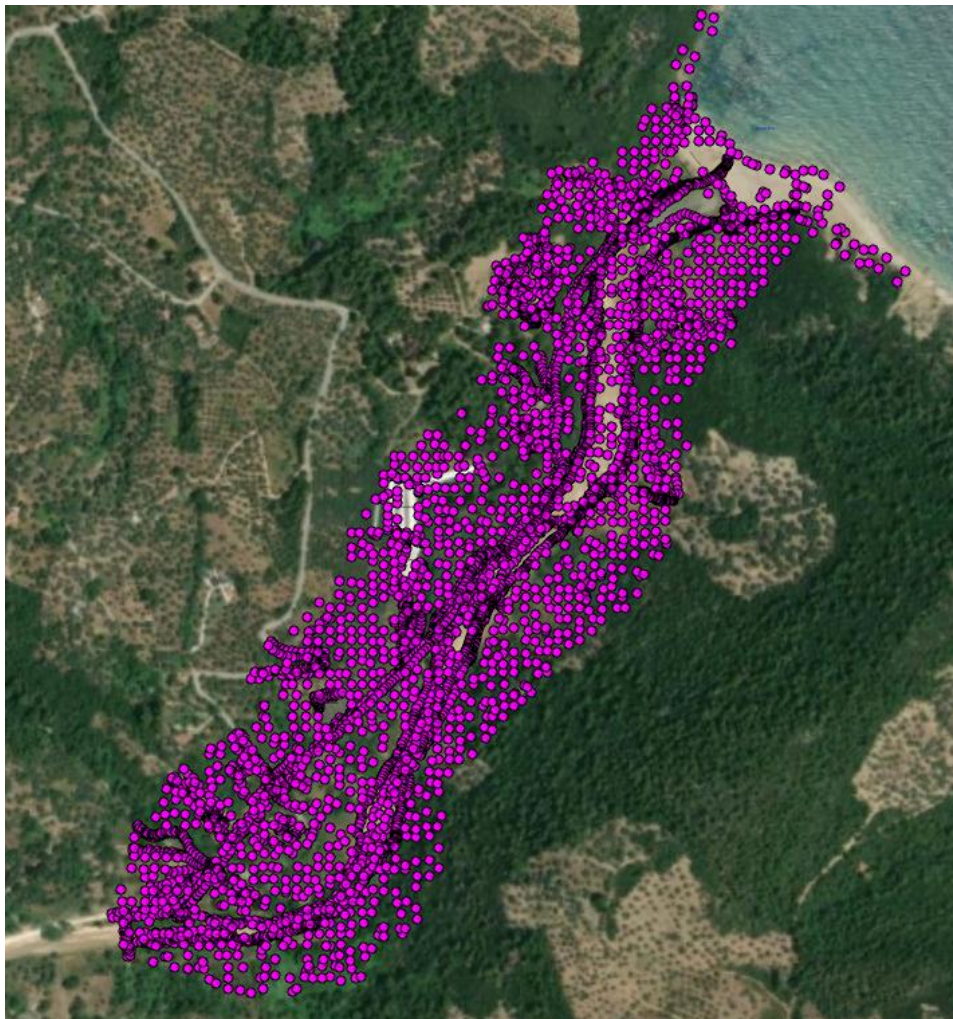
Επιπλέον, η **τοπογραφική αποτύπωση** του υδατορρεύματος «Λύρη» έγινε στα πλαίσια της παροχής Υπηρεσίας «ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΕΠΤΑ (7) ΡΕΜΑΤΩΝ ΔΗΜΟΥ ΝΟΤΙΟΥ ΠΗΛΙΟΥ» προς την Περιφέρεια Θεσσαλίας. Η εν λόγω υπηρεσία αφορά στην Τοπογραφική αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης επτά ρεμάτων του Νοτίου Πηλίου ύστερα από τις πρόσφατες καταστροφές, που υπέστησαν οι παρόχθιες περιοχές, λόγω της έντασης των φαινομένων Daniel και Elias. Αναλυτικότερα, για κάθε ρέμα αποτυπώθηκε η υφιστάμενη διαμόρφωση της κοίτης και μια παρόχθια ζώνη τουλάχιστον 30μ από κάθε όχθη των ρεμάτων, έτσι ώστε να υπάρχει λεπτομερής απεικόνιση του ανάγλυφου του εδάφους. Σε περιπτώσεις όπου ρέμα διέρχεται μέσα από οικισμό, αποτυπώθηκε οποιαδήποτε φυσικό ή τεχνητό στοιχείο εφάπτεται του ρέματος όπως κτίρια, προστατευτικά τοιχία, δρόμοι παράπλευροι κτλ. Ως αφετηρία μέτρησης του μήκους αποτύπωσης λήφθηκε η εκβολή στη θάλασσα (ο φυσικός αποδέκτης των υδατορρευμάτων). Επίσης, αποτυπώθηκαν οποιαδήποτε τεχνικά έργα παρεμβάλλονται στην κοίτη του ρέματος, όπως είναι οχετοί σωληνωτοί ή πλακοσκεπείς, τυχόν ιδιωτικά τεχνικά πρόσβασης εντός ιδιοκτησιών ή ιρλανδικές διαβάσεις εντός αυτών. Τα παραδοτέα αυτής της

παροχής υπηρεσίας, επειδή θα χρησιμοποιηθεί μελλοντικά σε εργολαβία Οριοθέτησης των άνω περιγραφόμενων ρεμάτων, είναι σύμφωνα με το άρθρο 2 του ΦΕΚ 428/Β/15-2-2017. Η τοπογραφική αποτύπωση πραγματοποιήθηκε με μη επανδρωμένο εναέριο όχημα και παραδόθηκε σε μορφή AutoCAD αρχείου (dwg). Παράλληλα, παραδόθηκαν και δύο ορθοφωτοχάρτες του υδατορρεύματος σε μορφή pdf αρχείου, οι οποίοι παρατίθενται στο Παράρτημα Ι.

Τα αρχεία αυτά παραχωρήθηκαν από τη Διεύθυνση Τεχνικών Έργων Π.Ε.Μ.Σ. για τον ερευνητικό σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

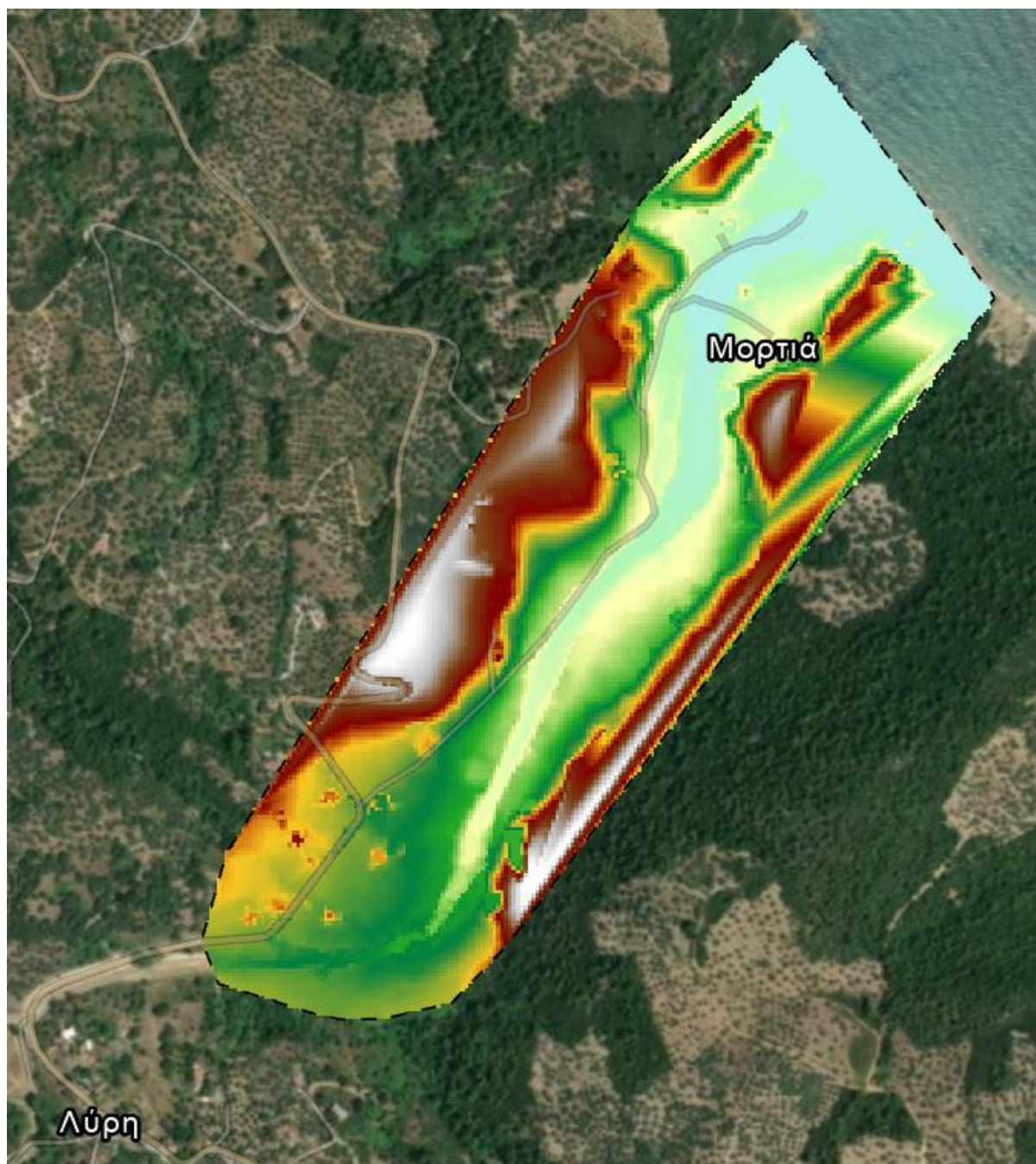
3.2.2 Δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους.

Εισάγοντας την τοπογραφική αποτύπωση του υδατορρεύματος «Λύρη» στο λογισμικό ArcGIS Pro (εικ. 16), πραγματοποιείται η μετατροπή της σε μορφή raster αρχείου με τα εργαλεία Create TIN → TIN Line → TIN Domain → TIN Node → TIN to Raster.

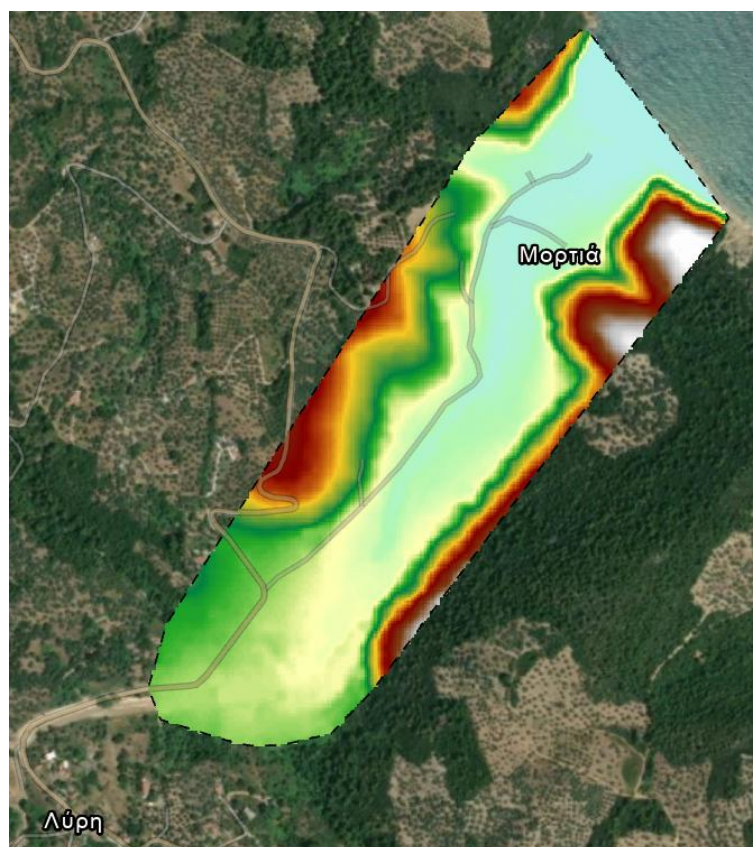


Εικόνα 16 Εισαγωγή του αρχείου AutoCAD της τοπογραφικής αποτύπωσης στο ArcGIS Pro

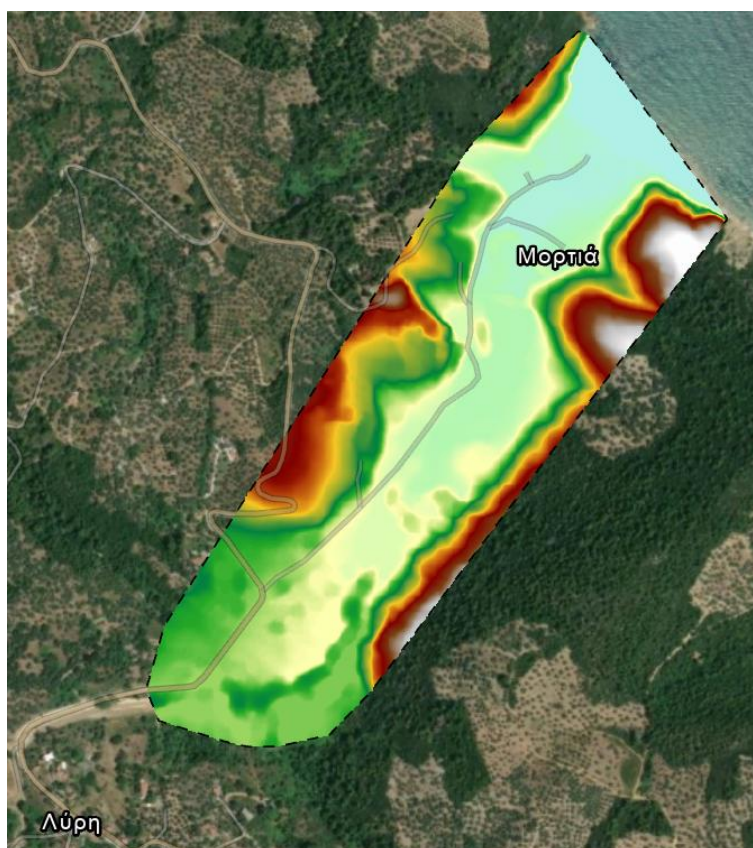
Με τη χρήση του εργαλείου Fill διορθώνονται τυχόν λάθη του νέου ράστερ και παράγεται το τελικό raster αρχείο Filled_DTM_Liri (εικ. 17). Επιπλέον, δημιουργείται το πολύγωνο mask_Liri ακριβώς στη γραμμή του TIN Domain.



Εικόνα 17 Δημιουργία του raster Filled_DTM_Liri από το αρχείο τοπογραφικής αποτύπωσης. Στη συνέχεια, γίνεται εισαγωγή του DEM του Ελληνικού Κτηματολογίου σε μορφή raster, ανάλυσης 5m και 2m και παράγονται τα raster αρχεία DTM_5x5 και DTM_2x2 αντίστοιχα, ακριβώς στη διάσταση του mask_Liri, με τη χρήση του εργαλείου Extract By Mask, ώστε να μπορούν να συγκριθούν (εικ. 18 και 19).



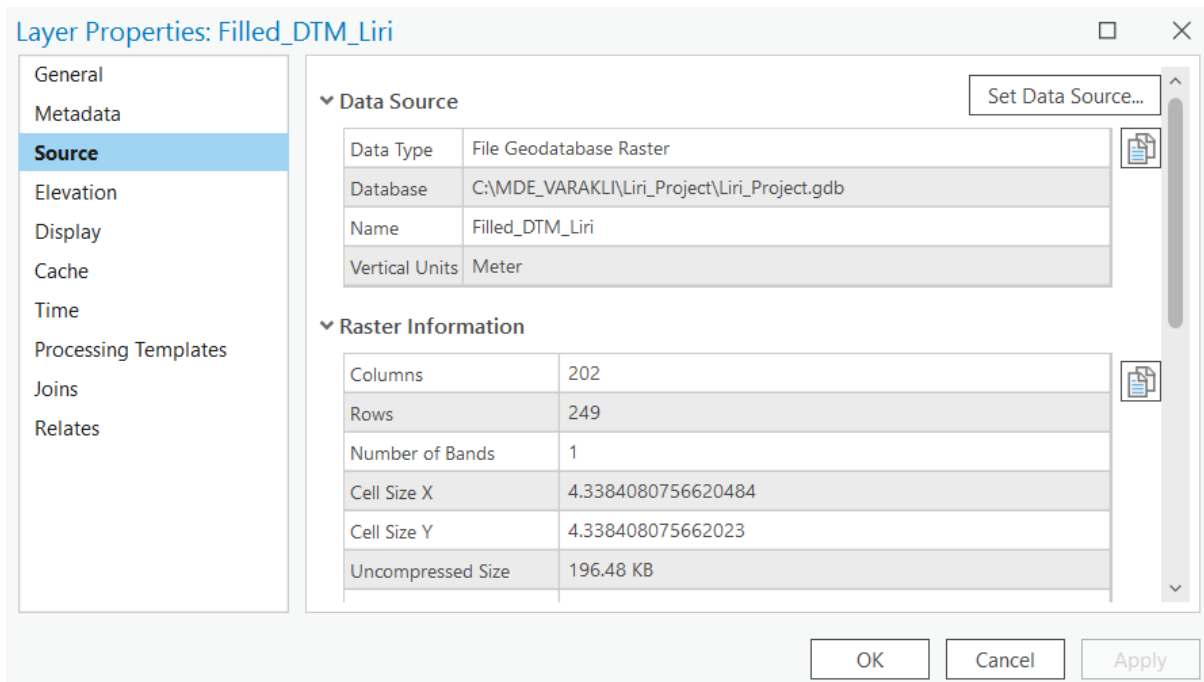
Εικόνα 18 Δημιουργία του raster DTM_5x5 από το DEM 5m του Κτηματολογίου



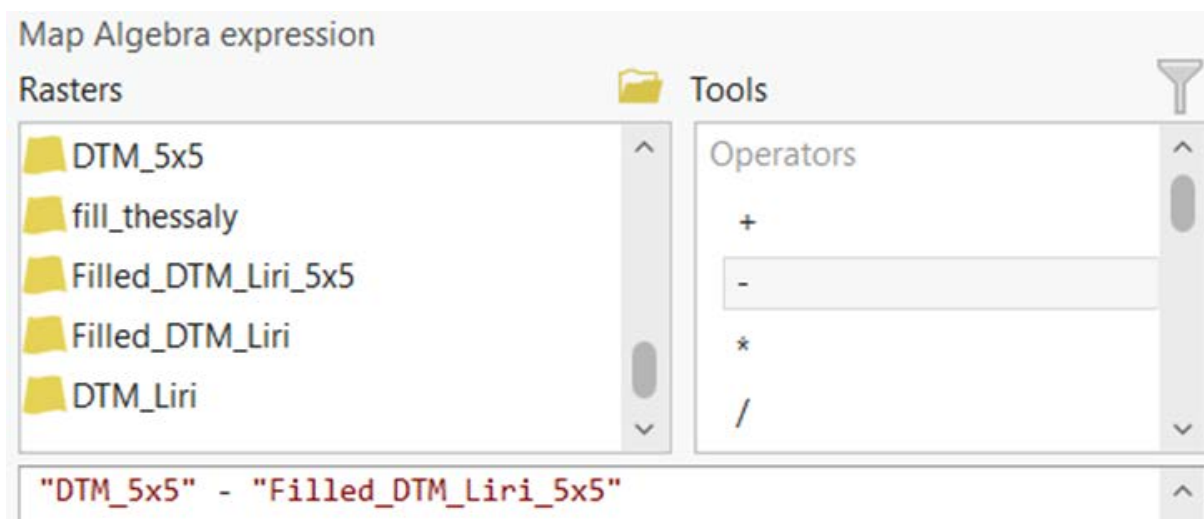
Εικόνα 19 Δημιουργία του raster DTM_2x2 από το DEM 2m του Κτηματολογίου

3.2.3 Δημιουργία ίδιας ανάλυσης στα μοντέλα και αφαίρεση

Η ανάλυση στην τοπογραφική αποτύπωση είναι περίπου 4,33m, όπως φαίνεται στο layer properties του Filled_DTM_Liri (εικ. 20). Για να είναι δυνατή η σύγκριση των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, πρέπει να γίνει πρώτα αναγωγή της ανάλυσης τους στις ίδιες τιμές. Με το εργαλείο Resample δημιουργούνται δύο νέα αρχεία για το Filled_DTM_Liri και DTM_2x2, τα οποία έχουν πλέον ανάλυση 5x5. Με το εργαλείο Raster Calculator μπορεί να γίνει αφαίρεση μεταξύ των ράστερ (εικ. 21), ενώ τα αποτελέσματα της αφαίρεσης και η ανάλυση τους παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.1.



Εικόνα 20 Ανάλυση του raster Filled_DTM_Liri

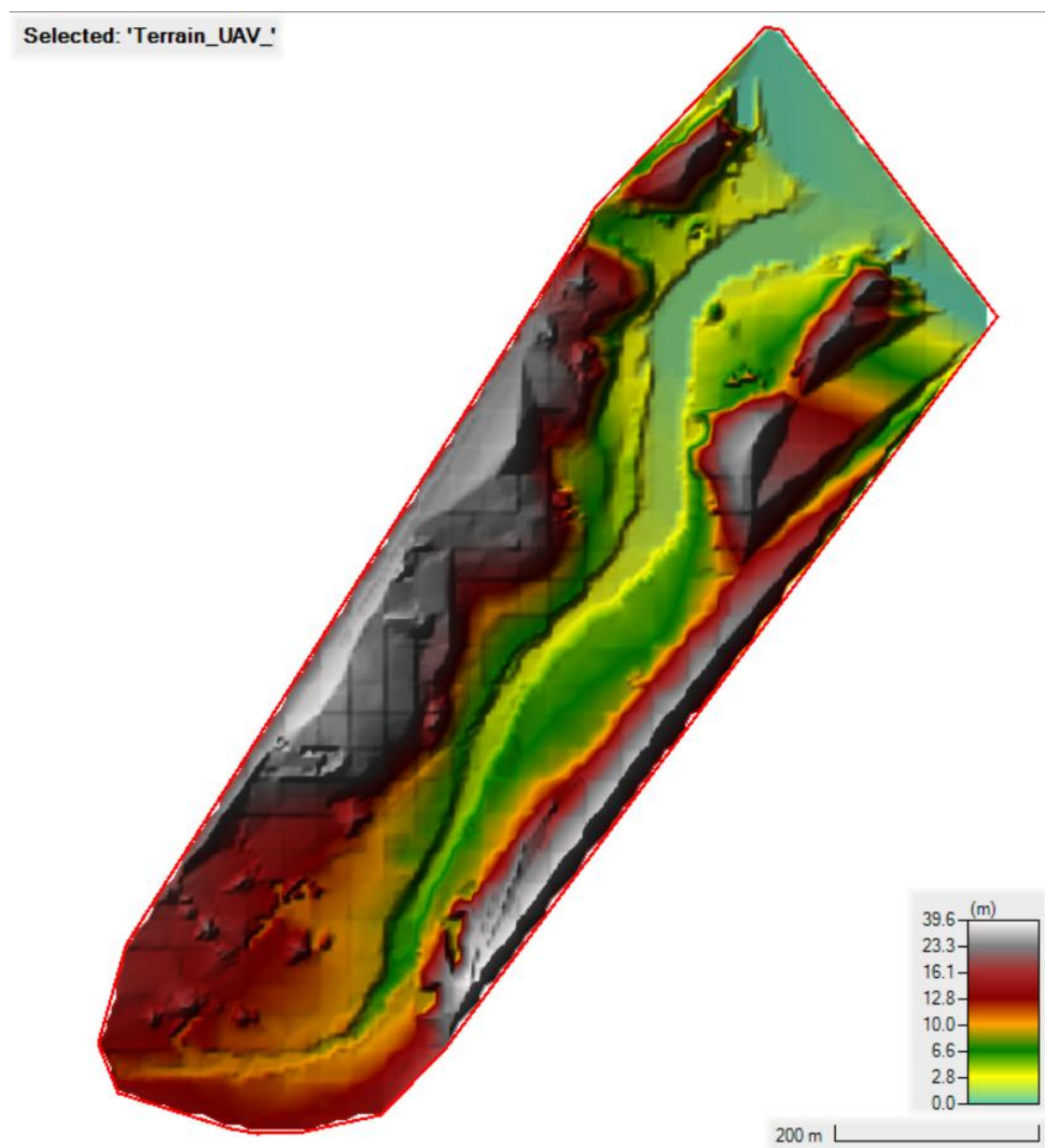


Εικόνα 21 Αφαίρεση των raster με το εργαλείο Raster Calculator

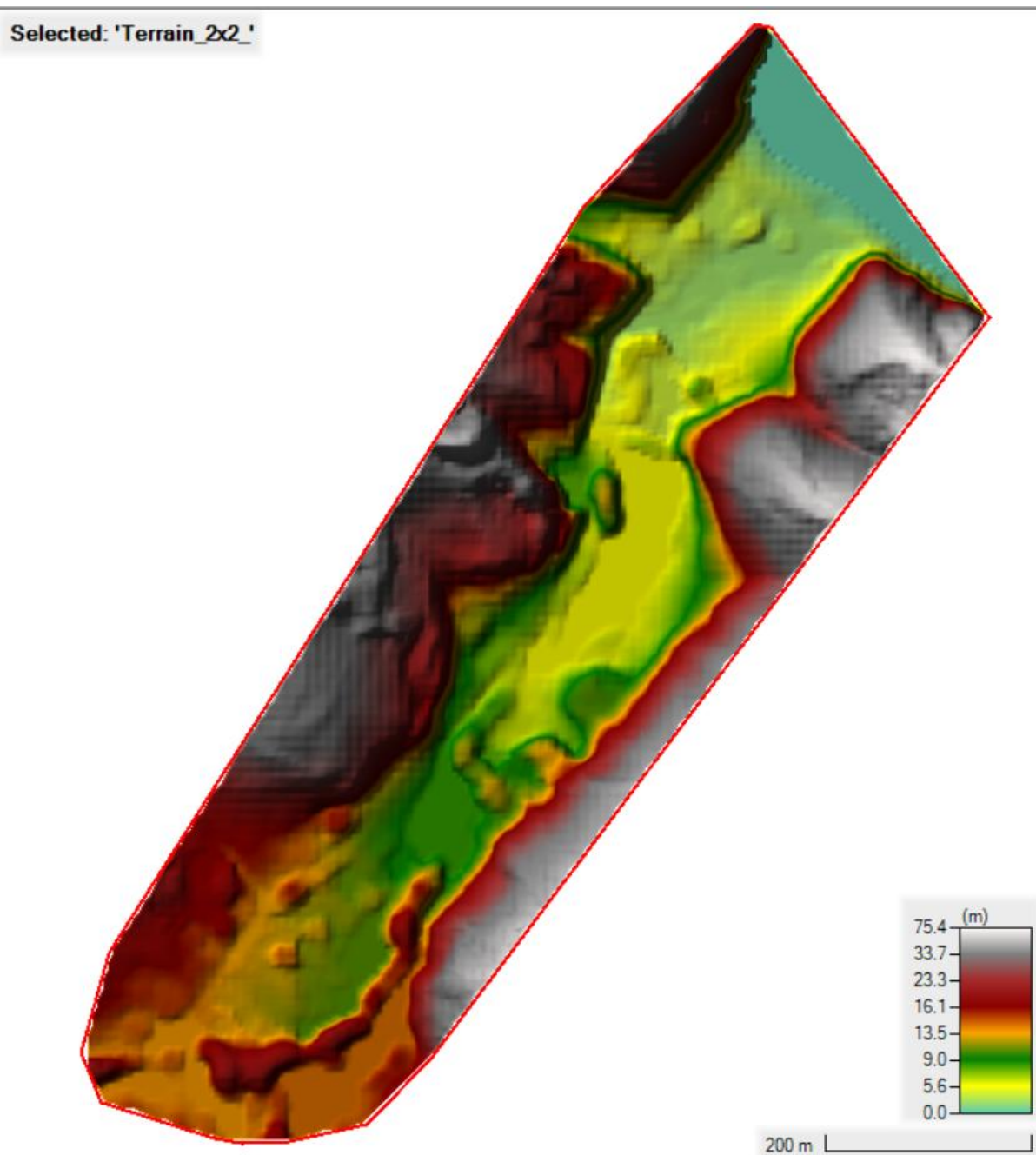
3.3 Επεξεργασία ψηφιακών μοντέλων εδάφους στο HEC-RAS

3.3.1 Εισαγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους στο HEC-RAS

Υπάρχει η δυνατότητα να εξαχθούν τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους από το ArcGIS Pro με τη χρήση του εργαλείου Data – Export Raster και να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία Terrains στο RAS Mapper του HEC-RAS. Για να μπορέσει να γίνει σύγκριση, εξάγονται τα raster με την ίδια ανάλυση 5m και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία νέων Terrain μέσω της επιλογής Create New Terrain του RAS Mapper (εικ. 22, 23 και 24).

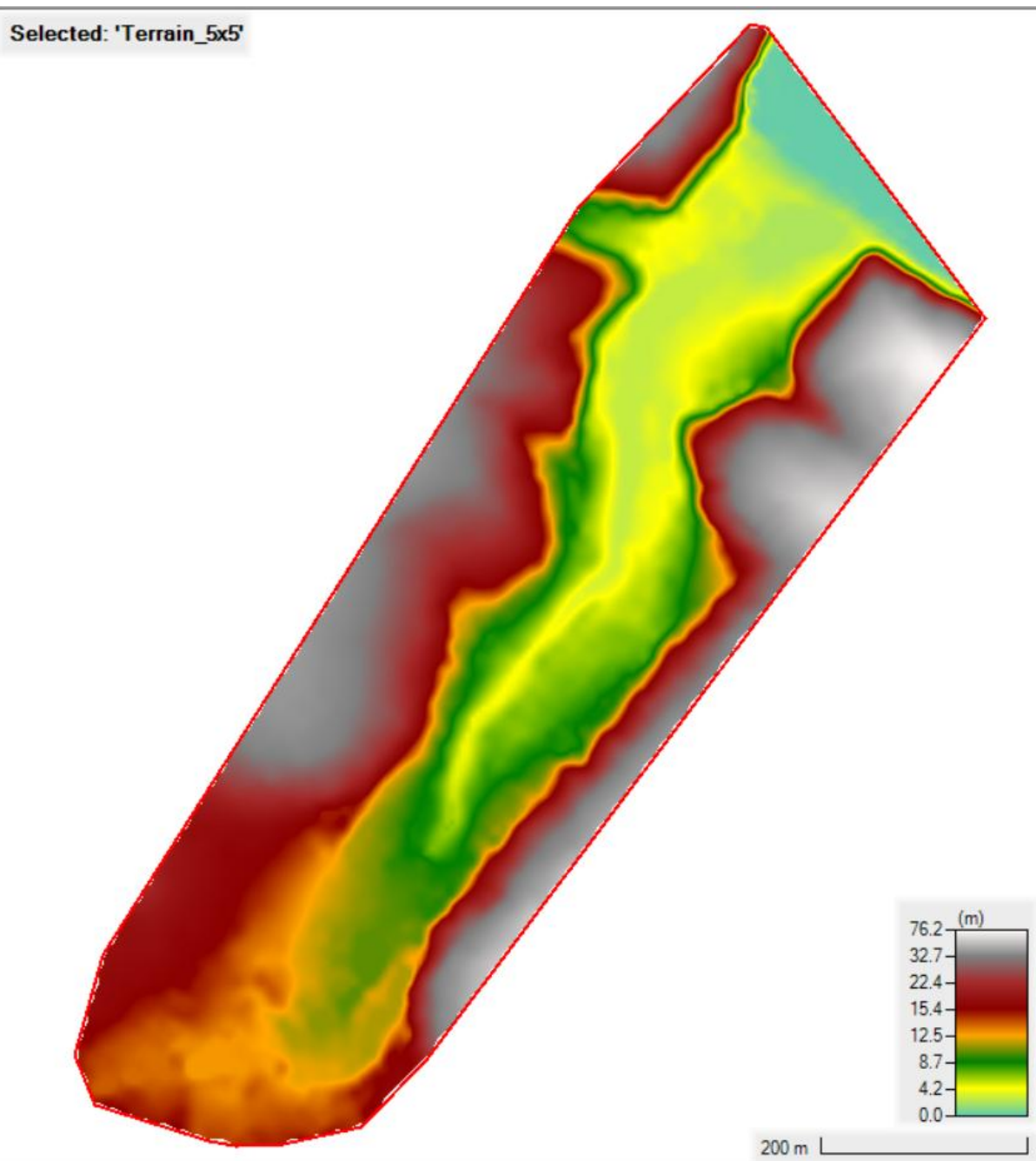


Εικόνα 22 Δημιουργία Terrain από την τοπογραφική αποτύπωση σε ανάλυση 5m



Εικόνα 23 Δημιουργία Terrain από το DTM 2m του Κτηματολογίου σε ανάλυση 5m

Στα Terrain_UAV και 2x2 παρατηρούνται “τετραγωνικά” μοτίβα (pixelation) που οφείλονται στο resampling του DEM από 4,33 m σε 5 m. Η αλλαγή μεγέθους και η παρεμβολή/ευθυγράμμιση του νέου καννάβου εξομαλύνουν και “τεμαχίζουν” τη μικροαναγλύφωση, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται τεχνητές βαθμίδες στο RAS Mapper. Το φαινόμενο είναι οπτικό/υπολογιστικό παρά γεωμορφολογικό και προκύπτει από την απώλεια λεπτομέρειας και την ανακατανομή των υψομετρικών τιμών στα μεγαλύτερα κελιά.

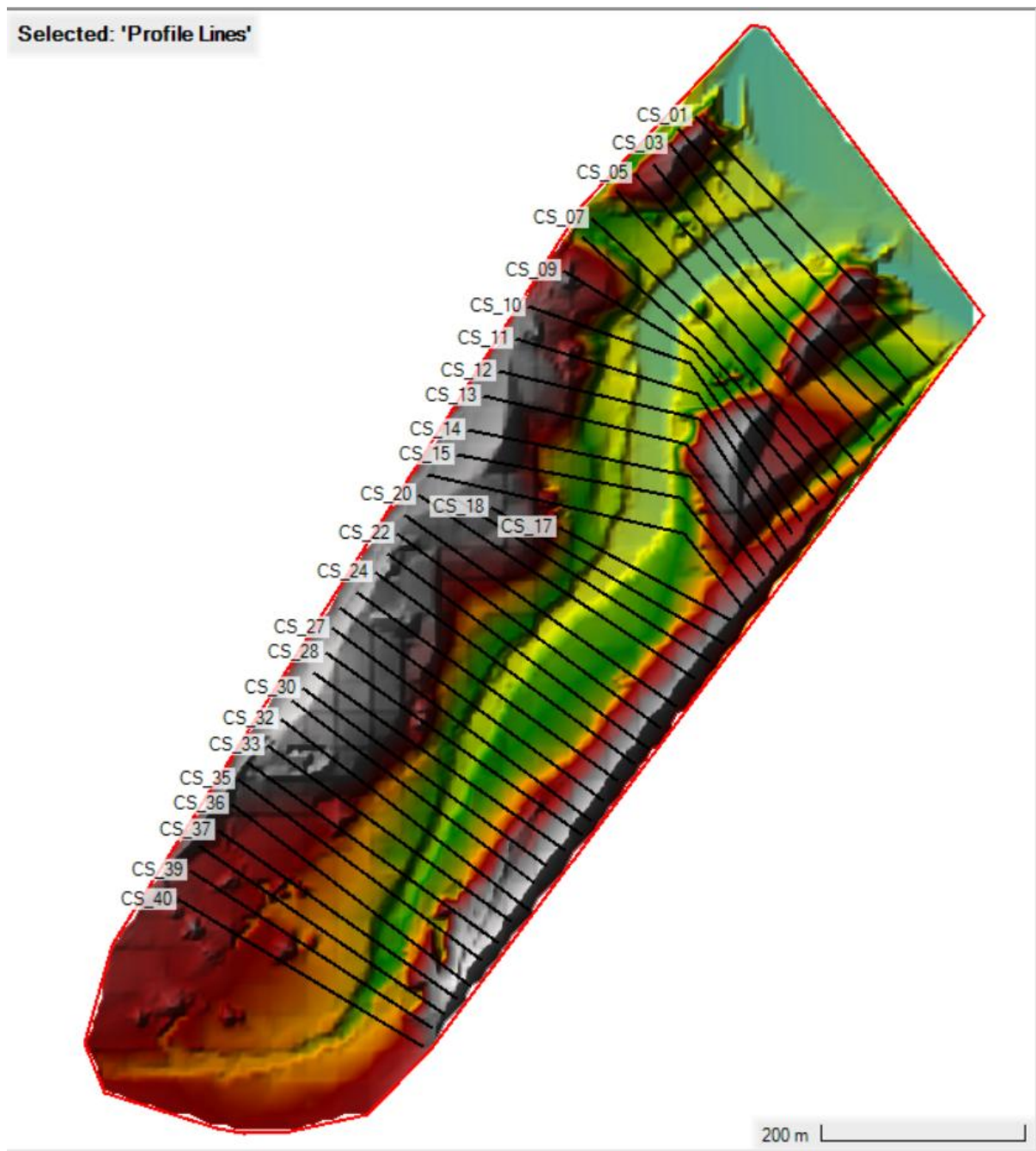


Εικόνα 24 Δημιουργία Terrain από το DTM 5m του Κτηματολογίου

3.3.2 Δημιουργία γραμμών προφίλ

Οι Γραμμές Προφίλ (profile lines) είναι οι γραμμές διατομής που τέμνουν εγκάρσια την κοίτη κατά μήκος της ροής, σε επιλεγμένες θέσεις του ποταμού. Με αυτές ορίζουμε γεωμετρικά τις διατομές για υδραυλική ανάλυση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, όπως στάθμη ή γραμμή ενέργειας, βάθη, ταχύτητες και παροχές, τόσο σε συνθήκες ηρεμίας όσο και πλημμύρας. Συνήθως τοποθετούνται κάθετα στον άξονα ροής, με επαρκή πυκνότητα ώστε να αποτυπώνουν τις μεταβολές της

μορφολογίας και της υδραυλικής συμπεριφοράς. Σχεδιάζονται σαράντα profile lines κάθετα στη ροή του ποταμού και δίνονται σε αυτές ονομασίες από CS_01 έως CS_40 (εικ. 25).



Εικόνα 25 Δημιουργία 40 γραμμών προφίλ

Στη συνέχεια, για καθεμία από τις γραμμές προφίλ παράγεται διαγραμματική απεικόνιση (profile plot) της μορφολογίας του εδάφους από τα τρία terrain datasets ταυτόχρονα, ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμα μεταξύ τους. Τα διαγράμματα που προκύπτουν και η ανάλυση τους παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.2.

3.4 Προετοιμασία προσομοίωσης ροής στο HEC-RAS

3.4.1 Υπολογισμός της αιχμής απορροής

Η αιχμή της απορροής αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή παροχής που εμφανίζεται στο υδατόρρευμα κατά τη διάρκεια πλημμυρικού επεισοδίου. Υπολογίζεται για περιόδους επαναφοράς 50, 100 και 1000 ετών, οι οποίες αποτελούν τις παροχές σχεδιασμού για την υδραυλική ανάλυση και επιτρέπουν την ορθή διαστασιολόγηση, λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματικές συνθήκες και τις νομοθετικές απαιτήσεις ασφάλειας. Η ποσοτικοποίηση αυτών των ακραίων παροχών είναι καίριας σημασίας για τον σχεδιασμό υδραυλικών έργων και την εκτίμηση πλημμυρικών φαινομένων. Για τον υπολογισμό της αιχμής απορροής, υπάρχουν διάφορες μεθοδολογικές προσεγγίσεις, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

Μέθοδος SCS-CN (Soil Conservation Service - Curve Number): Εμπειρική μέθοδος που αναπτύχθηκε από την Αμερικανική Υπηρεσία Διατήρησης Εδαφών, λαμβάνει υπόψη τις χρήσεις γης, τους τύπους εδαφών και τις υγρασιακές συνθήκες για τον υπολογισμό του απορροϊκού συντελεστή CN (Mockus, 1972; Chow et al., 1988) και

Ορθολογική Μέθοδος (Rational Method): Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για μικρές λεκάνες απορροής, που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία και θα παρουσιαστεί αναλυτικά παρακάτω.

3.4.1.1 Χρόνος συγκέντρωσης

Ο συνολικός χρόνος συρροής (ή χρόνος συγκέντρωσης) t_c είναι το διάστημα που απαιτείται ώστε το νερό που ξεκινά από το πιο απομακρυσμένο σημείο μιας λεκάνης ή υπολεκάνης απορροής να φτάσει στο σημείο εξόδου. Κατά την πορεία του μπορεί να κινηθεί ως αβαθής επιφανειακή ροή, μέσα σε φυσική κοίτη υδατορρέυματος ή σε τεχνητή διαμορφωμένη κοίτη/αγωγό. Για τον υπολογισμό του έχουν προταθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις (π.χ. Kerby, Kirpich, Giandotti), οι οποίες επιλέγονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης (Chow et al., 1988· Wanielista et al., 1997· Σακκάς, 1985).

Η εξίσωση Giandotti είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη εμπειρική σχέση για τον προσδιορισμό του t_c σε λεκάνες με ποικίλα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και αισθητές υψομετρικές μεταβολές. Σύμφωνα με αυτή ο χρόνος συγκέντρωσης από

λεκάνες μίας κύριας μισγάγγειας (κοίτης) της οποίας δεν προβλέπεται διευθέτηση είναι:

$$t_c = (4 \cdot \sqrt{E} + 1,5 \cdot L) / (0,8 \cdot \sqrt{H_m - H_o}) \quad (1)$$

όπου:

t_c : Χρόνος συγκέντρωσης (σε ώρες).

E : Εμβαδόν της υδρολογικής λεκάνης (σε km^2).

L : Μήκος της κύριας κοίτης του ποταμού (σε km).

H_m : Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης (σε m).

H_o : Το υψόμετρο εκβολής (σε m).

Μέσω του λογισμικού ArcGIS Pro, υπολογίστηκαν οι τιμές $E=18,17 \text{ km}^2$, $L=8,28 \text{ km}$, $H_m=213,64 \text{ m}$ και $H_o=0 \text{ m}$ και άρα $t_c=2,5 \text{ h}$.

3.4.1.2 Ένταση βροχής x (mm/h)

Οι όμβριες καμπύλες αποτελούν ένα βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση και αντιμετώπιση των πλημμυρικών κινδύνων. Πρόκειται για γραφικές ή μαθηματικές παραστάσεις που συνδέουν την ένταση της βροχόπτωσης (mm/h) με τη διάρκεια της (λεπτά ή ώρες) και την επαναληψιμότητα της (π.χ. κάθε 10, 50 ή 100 χρόνια), παρέχοντας κρίσιμα δεδομένα για τον σχεδιασμό υδραυλικών έργων, την πολεοδομία και την προστασία από πλημμύρες. Η ανάγκη για συστηματική καταγραφή και ενημέρωση των όμβριων καμπυλών ενισχύθηκε με την Οδηγία 2007/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, η οποία θέσπισε ένα ενιαίο πλαίσιο για την αξιολόγηση και διαχείριση των πλημμυρικών κινδύνων σε όλη την Ευρωπαϊκή Ένωση. Στο πλαίσιο εφαρμογής της Οδηγίας, η Ελλάδα, μέσω της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, προχώρησε στην ανάπτυξη και επικαιροποίηση των όμβριων καμπυλών για το σύνολο της επικράτειας.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αξιοποιήθηκαν οι επικαιροποιημένες ψηφιακές όμβριες καμπύλες, όπως αυτές παρέχονται σε ψηφιακή μορφή (shapefiles) από την επίσημη πλατφόρμα του ΥΠΕΝ (<https://floods.ypeka.gr/>), μαζί με τις σχετικές τεχνικές οδηγίες.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση των όμβριων καμπυλών, για ένταση βροχής x (mm/h), χρονική κλίμακα αναφοράς k (h) και περίοδο επαναφοράς T (έτη):

$$x = \lambda \cdot [(T/\beta)^{\xi} - 1] / (1 + k/\alpha)^{\eta} \quad (2)$$

με τις ενιαίες παραμέτρους $\alpha=0,18$ h και $\xi=0,18$ και τις γεωγραφικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους $\lambda^*=82,9$, $\beta^*=0,027$ και $\eta^*=0,63$, όπως αυτές υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού ArcGIS Pro, προκύπτει ότι:

- ✓ Για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη η ένταση της βροχής ισούται με $x=42,5$ mm/h.
- ✓ Για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη η ένταση της βροχής ισούται με $x=51,3$ mm/h.
- ✓ Για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη η ένταση της βροχής ισούται με $x=85,3$ mm/h.

3.4.1.3 Αιχμή της απορροής Q (m^3/s)

Ορθολογική Μέθοδος χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αιχμής απορροής μικρών υδρολογικών λεκανών. Βασίζεται στην υπόθεση ότι, όταν μια βροχή έχει χωρικά ομοιόμορφη κατανομή και σταθερή ένταση σε όλη τη διάρκεια της καταιγίδας, η μέγιστη παροχή στην έξοδο εμφανίζεται τη χρονική στιγμή που το νερό από ολόκληρη τη λεκάνη (δηλαδή από το πιο απομακρυσμένο σημείο) έχει φτάσει στο σημείο εξόδου — δηλαδή όταν η διάρκεια της κρίσιμης έντασης ισούται με τον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης. Τότε η αιχμή προσεγγίζεται από τη σχέση της Ορθολογικής Μεθόδου (Shaw, 1984, Παπαμιχαήλ, 2004).

Η ορθολογική μέθοδος εκφράζεται από τη σχέση:

$$Q=0,278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (3)$$

όπου:

Q (m^3/s) είναι η αιχμή της απορροής,

C είναι ο συντελεστής απορροής,

i (mm/h) είναι η ένταση της βροχόπτωσης για τον χρόνο συγκέντρωσης και

A (km^2) είναι η έκταση της υδρολογικής λεκάνης.

Η τιμή του συντελεστή απορροής υπολογίστηκε κατ' εκτίμηση $C=0,7$, με τη βοήθεια του πίνακα 3, που χρησιμοποιείται στη μέθοδο αυτή (Πηγή: ΟΜΟΕ ΑΣΥΕΟ).

Οι συντελεστές του εν λόγω πίνακα έχουν εφαρμογή σε υπολογισμούς για περιόδους επαναφοράς 5 έως 10 έτη. Η διόρθωση της εξίσωσης της ορθολογικής μεθόδου επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας τον υπολογιζόμενο συντελεστή (C) με το συντελεστή διόρθωσης $C_f=1,20$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη και $C_f=1,25$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ και $T=1000$ έτη.

Έτσι προκύπτουν οι τιμές $C(T50)=0,84$ και $C(T100)=C(T1000)=0,875$.

Πίνακας 3 Τιμές συντελεστή απορροής σε σχέση με τα χαρακτηριστικά επιφάνειας εδάφους

Χαρακτηριστικά επιφάνειας εδάφους		Τιμές συντελεστή απορροής			
		ακραίες	υψηλές	συνήθεις	χαμηλές
#	1	2	3	4	5
1	C _r Ανάγλυφο εδάφους	0,28 - 0,35 επικλινές, ανώμαλες επιφάνειες με μέσες κλίσεις >30%	0,20 - 0,28 λοφώδες, με μέσες κλίσεις 10 έως 30%	0,14 - 0,20 κυματώδες με μέσες κλίσεις 5 έως 10%	0,08 - 0,14 σχετικά επίπεδο, με μέσες κλίσεις 0 έως 5%
2	C _i Διηθητικότητα εδάφους	0,12 - 0,16 μη επηρεαζόμενο κάλυμμα εδάφους, είτε βραχώδες, είτε μανδύας λεπτόκκοκου εδάφους αμελητέας διηθητικότητας	0,08 - 0,12 βραδείας διηθητικότητας, άργυλοι ή αβαθή παχιά εδάφη χαμηλής διηθητικότητας, ατελώς ή πολύ μικρής αποστραγγιστικότητας	0,06 - 0,08 κανονικής διηθητικότητας, καλά αποστραγγιζόμενο μικρής ή μεσαίας μακροϋφής εδάφη, αμμώδη παχιά εδάφη, ιλύες και ιλυώδη εδάφη	0,04 - 0,06 υψηλής διηθητικότητας βαθιά άμμος, ή άλλο έδαφος, που απορροφά το νερό, πολύ ελαφριά καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη
3	C _v Φυτική κάλυψη εδάφους	0,12-0,16 βλάστηση που δεν επηρεάζει, γυμνό ή πολύ αραιά κάλυψη	0,08-0,12 πτωχή έως μέτρια, καθαρές καλλιέργειες, ή πτωχής φυσικής κάλυψης, λιγότερο από 20% της αποχετευόμενης επιφάνειας με καλή κάλυψη	0,06-0,08 μέτρια έως καλή, περίπου 50% της επιφάνειας είναι καλή φυτική γη ή δασώδες, λιγότερο από 50% επιφάνειας είναι καλλιέργειες	0,04-0,06 καλή έως άριστη, περίπου 90% της αποχετευόμενης επιφάνειας είναι καλή φυτική γη, δασώδες ή ισοδύναμης κάλυψης
4	C _s Αποθηκευτικότητα επιφάνειας εδάφους	0,10-0,12 αμελητέες ταπεινώσεις εδάφους και αβαθείς διάδρομοι αποστράγγισης επικλινείς και μικροί, καθόλου τέλματα ή βάλτοι	0,08-0,10 χαμηλή, καλά οριζόμενο σύστημα διαδρόμων αποστράγγισης, όχι λιμνάζοντα νερά ή τέλματα, βάλτοι	0,06-0,08 κανονική, σημαντικές επιφανειακές ταπεινώσεις, λιμνάζοντα νερά και τέλματα ή βάλτοι	0,04-0,06 υψηλή, αποθηκευτικότητα, σύστημα αποστράγγισης όχι καλά οριζόμενο, μεγάλος αριθμός πλημμυριζόμενων επιφανειών, ή τελμάτων, βάλτων

Επίσης, μέσω του λογισμικού ArcGIS Pro, υπολογίστηκε η τιμή $A=18,17 \text{ km}^2$.

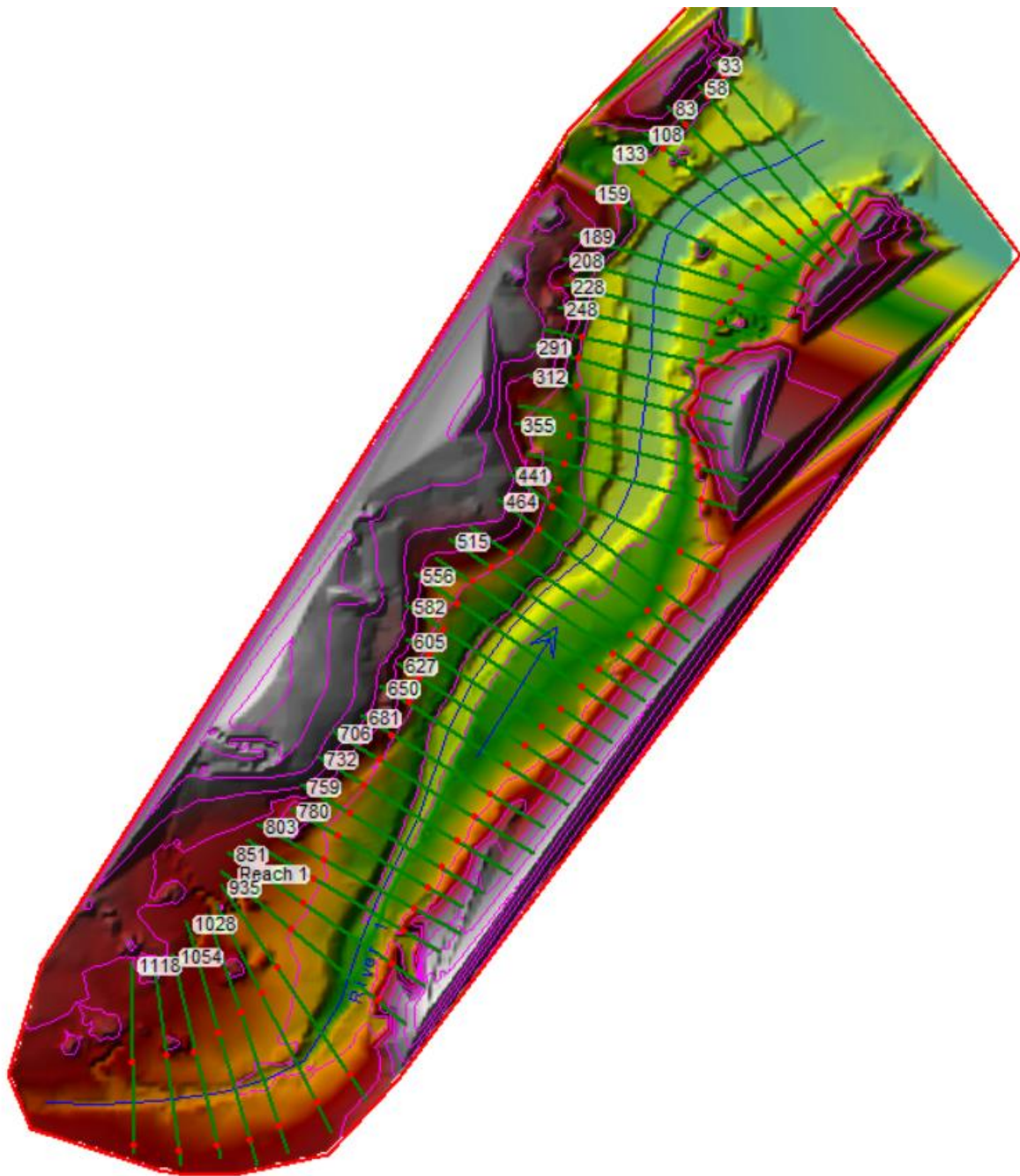
Τέλος, $i=x$, όπως υπολογίστηκε προηγουμένως, οπότε:

- ✓ Για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη η αιχμή απορροής ισούται με $Q=185 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ✓ Για $T=100$ έτη η αιχμή απορροής ισούται με $Q=227 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ✓ Για $T=1000$ έτη η αιχμή απορροής ισούται με $Q=377 \text{ m}^3/\text{s}$.

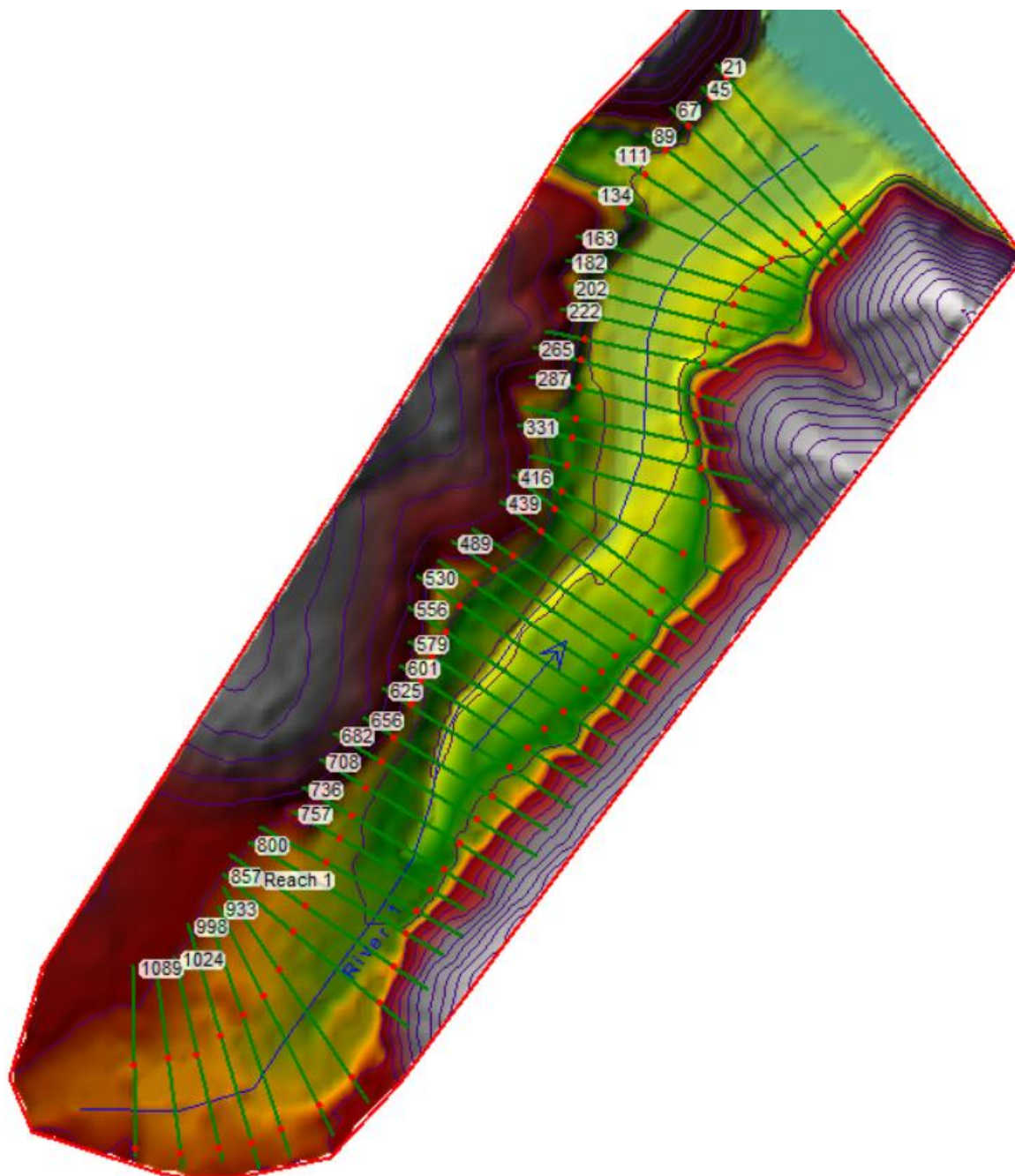
3.4.2 Δημιουργία γεωμετρίας και εισαγωγή της στο HEC-RAS

Από το ArcGIS Pro με τη χρήση του εργαλείου Data – Export Raster επιλέγονται τα μοντέλα με την αρχική τους ανάλυση (4,33m, 5m, 2m) και δημιουργούνται Terrains στο RAS Mapper του HEC-RAS. Δημιουργούνται τρεις γεωμετρίες: UAV_Geometry, 5x5_Geometry και 2x2_Geometry, η κάθε μία από τις οποίες συσχετίζεται με το αντίστοιχο Terrain και ψηφιοποιούνται 43 διατομές. Η διατομή (cross section) είναι

μια κατακόρυφη τομή που αντιπροσωπεύει το σχήμα του πυθμένα και των όχθων ενός υδατορρεύματος. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ροής, της στάθμης του νερού και της ταχύτητας σε διαφορετικά σημεία του ποταμού. Στη συνέχεια ψηφιοποιούνται το κύριο υδατόρρευμα και οι όχθες για κάθε γεωμετρία. Τέλος, οι γεωμετρίες εισάγονται στο HEC-RAS μέσω της καρτέλας File – Import Geometry Data – HEC-RAS Format και του φακέλου στην οποία έχουν αποθηκευτεί, επιλογή Διεθνούς Συστήματος μονάδων (SI, metric units), επιλογή του River 1 και Finished (εικ. 26, 27 και 28).

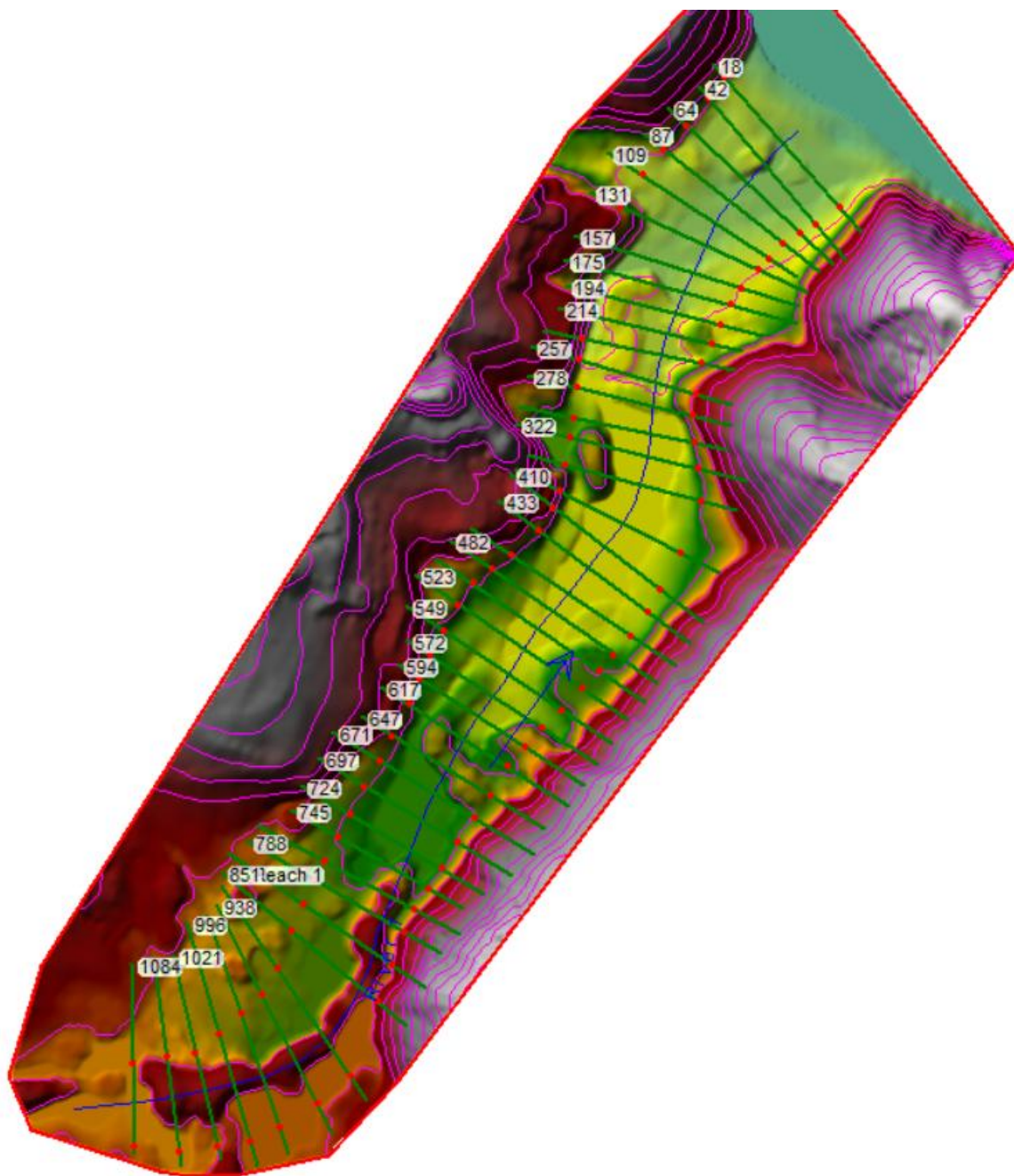


Εικόνα 26 Εισαγωγή της UAV_Geometry από το RAS Mapper στο HEC-RAS



Εικόνα 27 Εισαγωγή της 5x5_Geometry από το RAS Mapper στο HEC-RAS

Η Εικόνα 26 παρουσιάζει τη γεωμετρία UAV που εισήχθη στο HEC-RAS, προσφέροντας ρεαλιστική και υψηλής ακρίβειας αποτύπωση της κοίτης, καθώς προέρχεται από πρόσφατη αποτύπωση με drone. Η Εικόνα 27 δείχνει τη γεωμετρία 5x5, η οποία βασίζεται στο DEM 5m του Κτηματολογίου και αποδίδει μια πιο εξομαλυμένη αλλά αξιόπιστη εικόνα. Τέλος, η Εικόνα 28 παρουσιάζει τη γεωμετρία 2x2, η οποία προέρχεται από το DEM 2m του Κτηματολογίου και εμφανίζει μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο ανάγλυφο σε σχέση με το 5x5.



Εικόνα 28 Εισαγωγή της 2x2_Geometry από το RAS Mapper στο HEC-RAS

3.4.2.1 Συντελεστής Τραχύτητας του Manning

Ο συντελεστής τραχύτητας n του Manning, είναι μια παράμετρος που χρησιμοποιείται στον τύπο του Manning, για την εκτίμηση της ταχύτητας ροής σε ανοικτούς αγωγούς και αντιπροσωπεύει την αντίσταση στη ροή που προκαλείται από την τραχύτητα της επιφάνειας του αγωγού ή του καναλιού (Chow, 1959). Στην παρούσα εργασία ο συντελεστής ισούται με $n(\text{channel}) = 0,06$ και $n(\text{LOB}) = n(\text{ROB}) = 0,1$ και ορίζεται σε όλες τις διατομές.

3.4.3 Δημιουργία αρχείου υδραυλικών δεδομένων

Στο αρχικό μενού του προγράμματος, μέσω της καρτέλας Edit – Steady Flow Data ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο εισάγονται τα υδραυλικά δεδομένα, για συνθήκες μόνιμης ροής. Γίνεται επιλογή δημιουργίας τριών προφίλ και μέσω του Options – Edit Profile Names γίνεται αλλαγή του ονόματος τους. Για περίοδο επαναφοράς 50, 100 και 1000 έτη εισάγονται οι παροχές, όπως αυτές υπολογίστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, 185, 227 και 377 m³/s αντίστοιχα (εικ. 29).

Locations of Flow Data Changes			
River	Reach	River Sta.	
River 1	Reach 1	1118	

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates		
River	Reach	RS	T=50	T=100	T=1000
1 River 1	Reach 1	1118	185	227	377

Εικόνα 29 Δημιουργία αρχείου υδραυλικών δεδομένων

Δημιουργούνται τρία αρχεία δεδομένων ροής, ένα για κάθε γεωμετρία (εικ. 30).

Open Flow File

Selected File Title	Filename
Steady_Flow_Data_UAV	C:\MDE_VARAKLI\HECRAS\LIRI.f01
Steady_Flow_Data_UAV	C:\MDE_VARAKLI\HECRAS\LIRI.f01
Steady_Flow_Data_5x5	C:\MDE_VARAKLI\HECRAS\LIRI.f02
Steady_Flow_Data_2x2	C:\MDE_VARAKLI\HECRAS\LIRI.f03

Εικόνα 30 Δημιουργία δεδομένων ροής για κάθε γεωμετρία

3.4.3.1 Οριακές Συνθήκες

Ο αριθμός Froude Fr , εκφράζει το λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις βαρύτητας. Όταν $Fr < 1$ η ροή ονομάζεται υποκρίσιμη ή ποτάμια ροή, $Fr > 1$ η ροή ονομάζεται υπερκρίσιμη ή χειμαρρώδης ροή, $Fr = 1$ η ροή ονομάζεται κρίσιμη ροή.

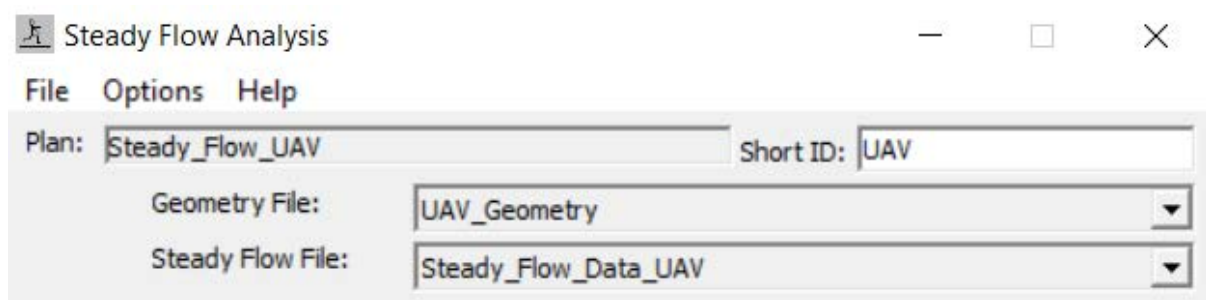
Στην παρούσα εργασία γίνεται επιλογή του Set Boundary for all profiles και στο Upstream και Downstream - Normal Depth. Γίνεται υπολογισμός της κλίσης στο Downstream με τον λόγο της υψομετρικής διαφοράς του πυθμένα της προτελευταίας διατομής από τον πυθμένα της τελευταίας διατομής προς τη μεταξύ τους απόσταση. Επειδή η κλίση είναι πολύ μικρή σε όλα τα μοντέλα επιλέγεται η τιμή $S=0,0001$. Γίνεται υπολογισμός της κλίσης στο Upstream, με τον λόγο της υψομετρικής διαφοράς του πυθμένα της πρώτης διατομής από τον πυθμένα της δεύτερης διατομής προς τη μεταξύ τους απόσταση. Στην 5x5_Geometry και 2x2_Geometry υπολογίζεται σε $S=0,0059$, ενώ στη UAV_Geometry επιλέγεται πάλι η τιμή $S=0,0001$.

3.4.3.2 Αξιοπιστία υδραυλικής προσομοίωσης

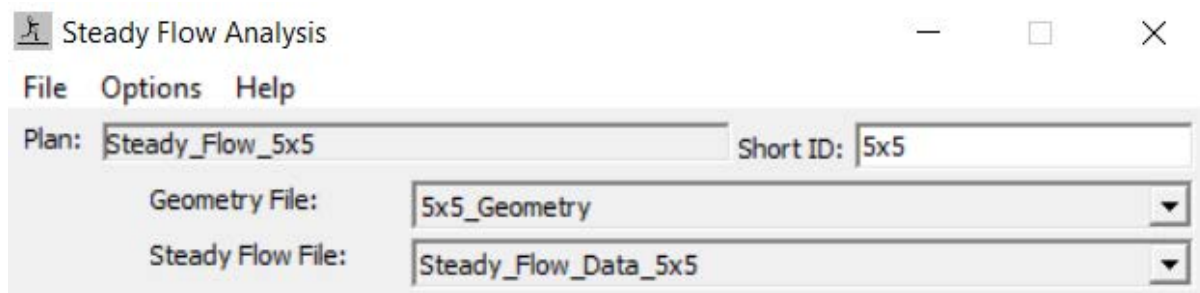
Το αποτέλεσμα της υδραυλικής προσομοίωσης δεν πρέπει να επηρεάζεται από τις οριακές συνθήκες, αλλά να είναι το ίδιο είτε γίνει επιλογή του Normal Depth είτε του Critical Depth, με εξαίρεση ίσως της πρώτης και τελευταίας διατομής. Μπορεί δηλαδή να γίνει έλεγχος της ευαισθησίας του μοντέλου με βάση τις οριακές συνθήκες.

3.4.4 Σενάρια προσομοίωσης ροής

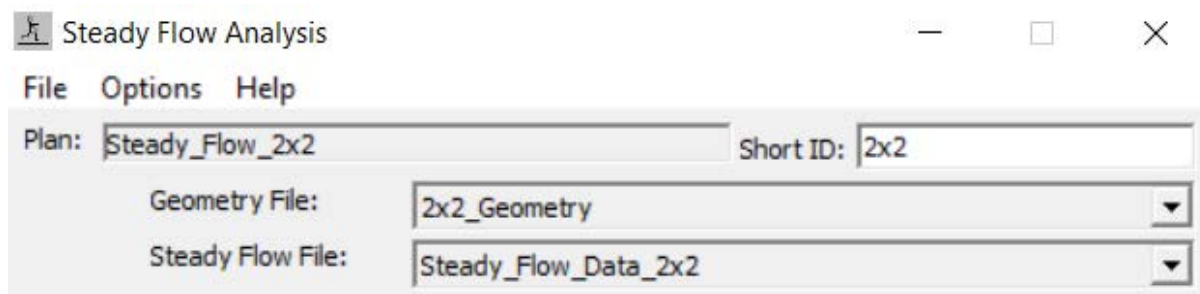
Στο αρχικό μενού του προγράμματος, μέσω της καρτέλας Run – Steady Flow Analysis, δημιουργούμε τρία σενάρια προσομοίωσης ροής (Plans) και συνδέουμε το κάθε ένα με την αντίστοιχη γεωμετρία και το αρχείο ροής Steady_Flow_Data (εικ. 31, 32 και 33).



Εικόνα 31 Σενάριο προσομοίωσης ροής για τη Γεωμετρία UAV

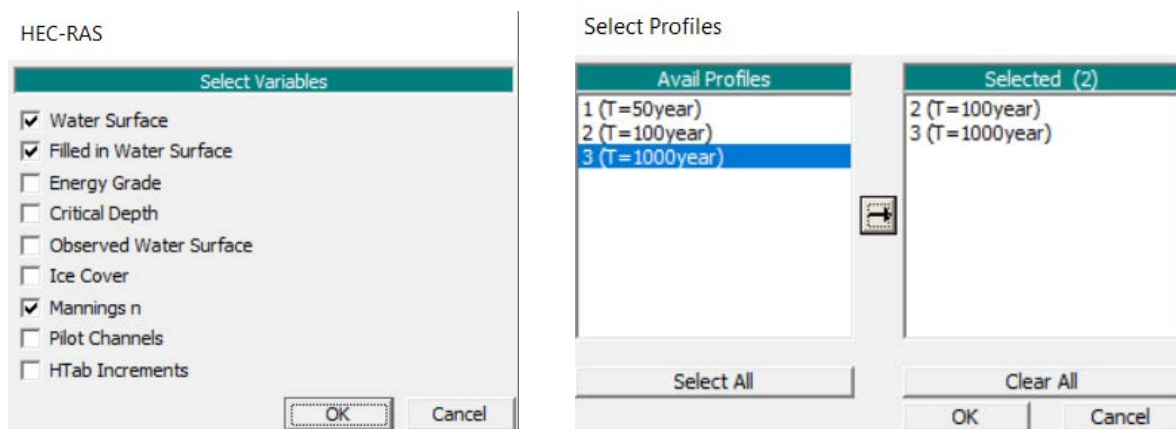


Εικόνα 32 Σενάριο προσομοίωσης ροής για τη Γεωμετρία 5x5



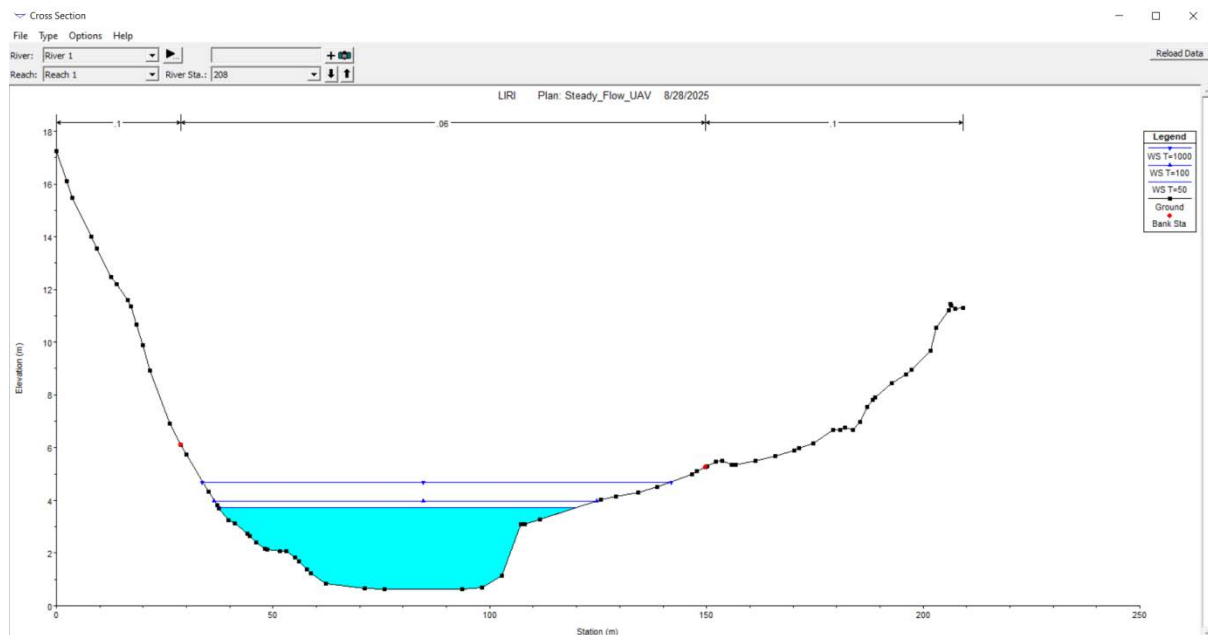
Εικόνα 33 Σενάριο προσομοίωσης ροής για τη Γεωμετρία 2x2

Στο αρχικό μενού του προγράμματος, μέσω της καρτέλας View – Cross Sections φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανά διατομή. Από την επιλογή Options – Variables μπορεί κανείς να επιλέξει τα στοιχεία που θέλει να προβάλλονται και από την επιλογή Options – Profiles τα προφίλ που θέλει να προβάλλονται, για παράδειγμα τα Profiles για περίοδο επαναφοράς 100 και 1000 έτη (εικ. 34).



Εικόνα 34 Επιλογή Μεταβλητών και Προφίλ που θα προβάλλονται στα διαγράμματα των Cross Sections

Ενδεικτικά, στο διάγραμμα της διατομής 208, κοντά στην εκβολή του υδατορρεύματος, απεικονίζονται οι στάθμες του νερού για περίοδο επαναφοράς $T=50$, 100 και 1000 έτη, η μορφολογία της διατομής (ground), οι όχθες (banks) και η επιφάνεια που είναι γεμισμένη με νερό (Filled in Water Surface) (σχ. 3). Το σύνολο των διατομών παρουσιάζεται στο Παράρτημα III.



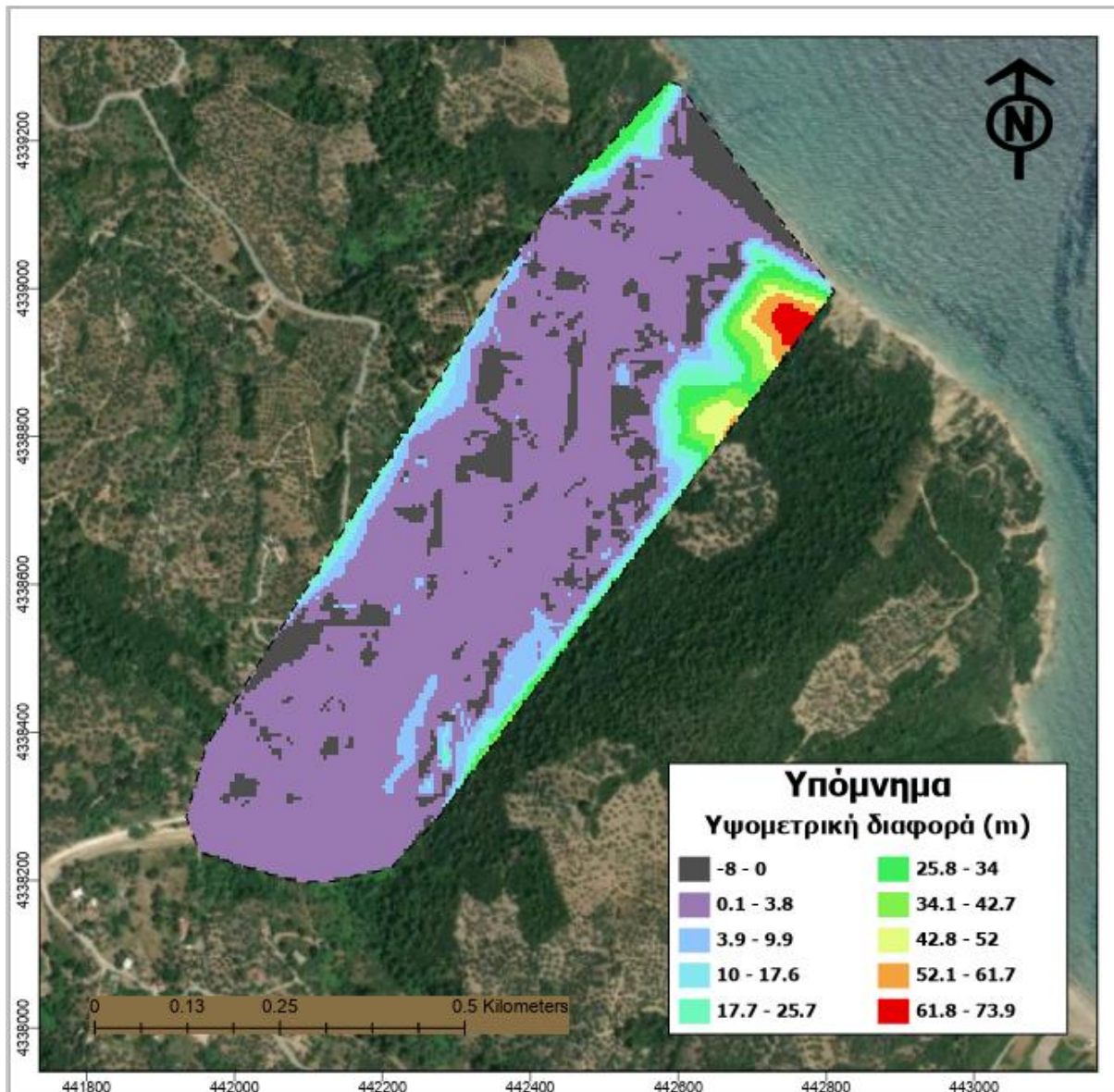
Σχήμα 3 Διατομή 208 της Γεωμετρίας UAV, με προβολή στοιχείων για $T=50$, 100 και 1000 έτη
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση της ροής, όπως αυτά προκύπτουν με τη χρήση του RAS Mapper και η ανάλυση τους παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – Αποτελέσματα – Ανάλυση αποτελεσμάτων

4.1 Σύγκριση μοντέλων εδάφους στο ArcGIS-Pro

Μετά την αφαίρεση μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων εδάφους (βλ. Κεφ. 3.2) υπολογίστηκαν τα στατιστικά στοιχεία των υψομετρικών διαφορών. Ως θετικές τιμές θεωρούνται οι υπερεκτιμήσεις, ενώ αρνητικές τιμές δηλώνουν υποεκτίμηση.

Με αφαίρεση του Filled_DTM_Liri από το DTM_5x5 προκύπτει ένα νέο raster dataset που αποτυπώνει τις υψομετρικές διαφορές μεταξύ των δύο DEM (εικ. 35).

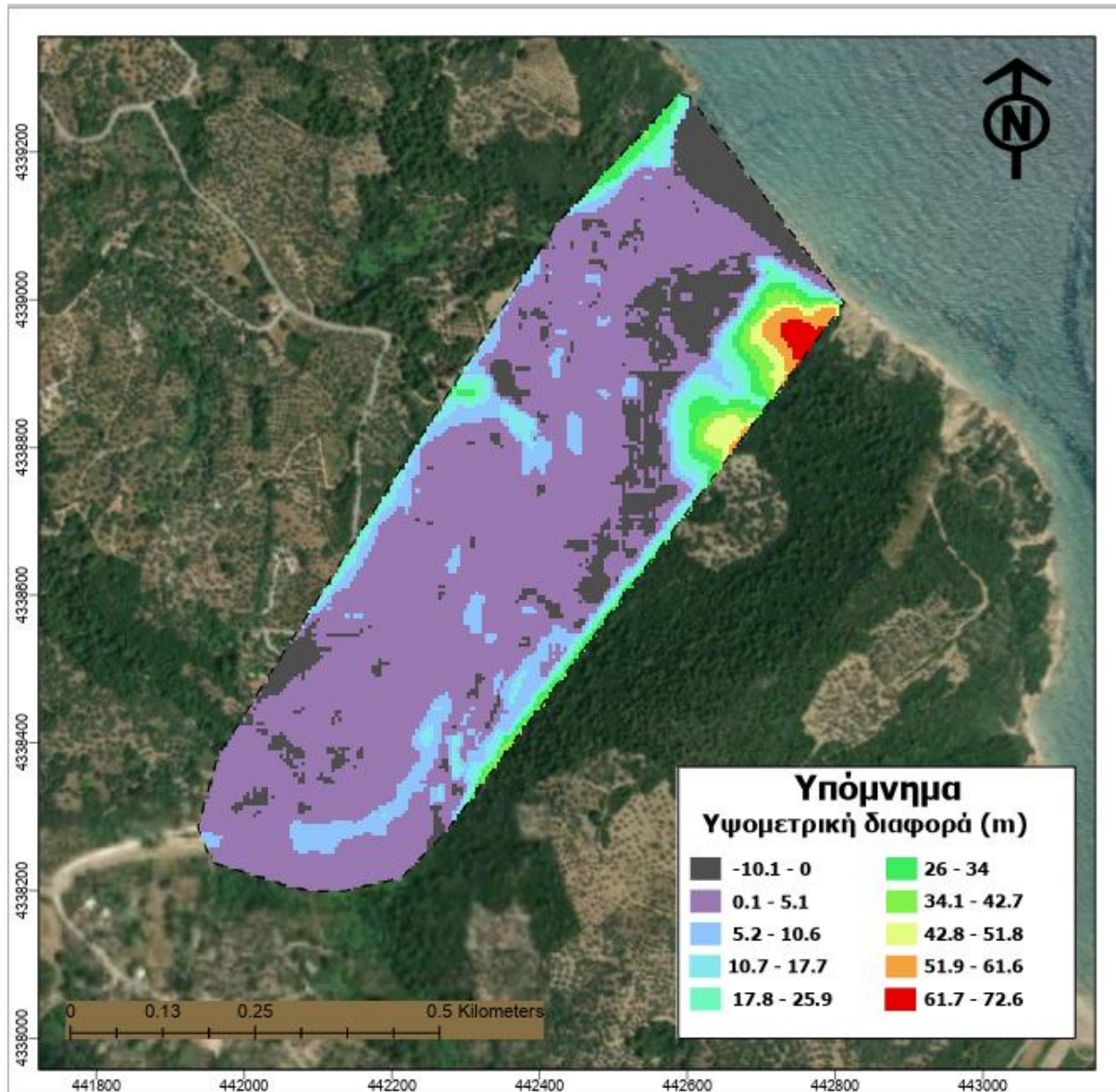


Εικόνα 35 Υψομετρικές διαφορές που προκύπτουν από την αφαίρεση του DEM UAV από το DEM 5m

- DTM_5x5 – Filled_DTM_Liri
 - Μέση απόκλιση: +4,88 m (υπερεκτίμηση).

- Μέγιστη θετική διαφορά: +74,0 m (απεικονίζεται με κίτρινο – πορτοκαλί – κόκκινο).
- Ελάχιστη διαφορά: -8,0 m (περιοχές με γκρι χρώμα).

Με αφαίρεση του Filled_DTM_Liri από το DTM_2x2 προκύπτει ένα νέο raster dataset που αποτυπώνει τις υψομετρικές διαφορές μεταξύ των δύο DEM (εικ. 36).

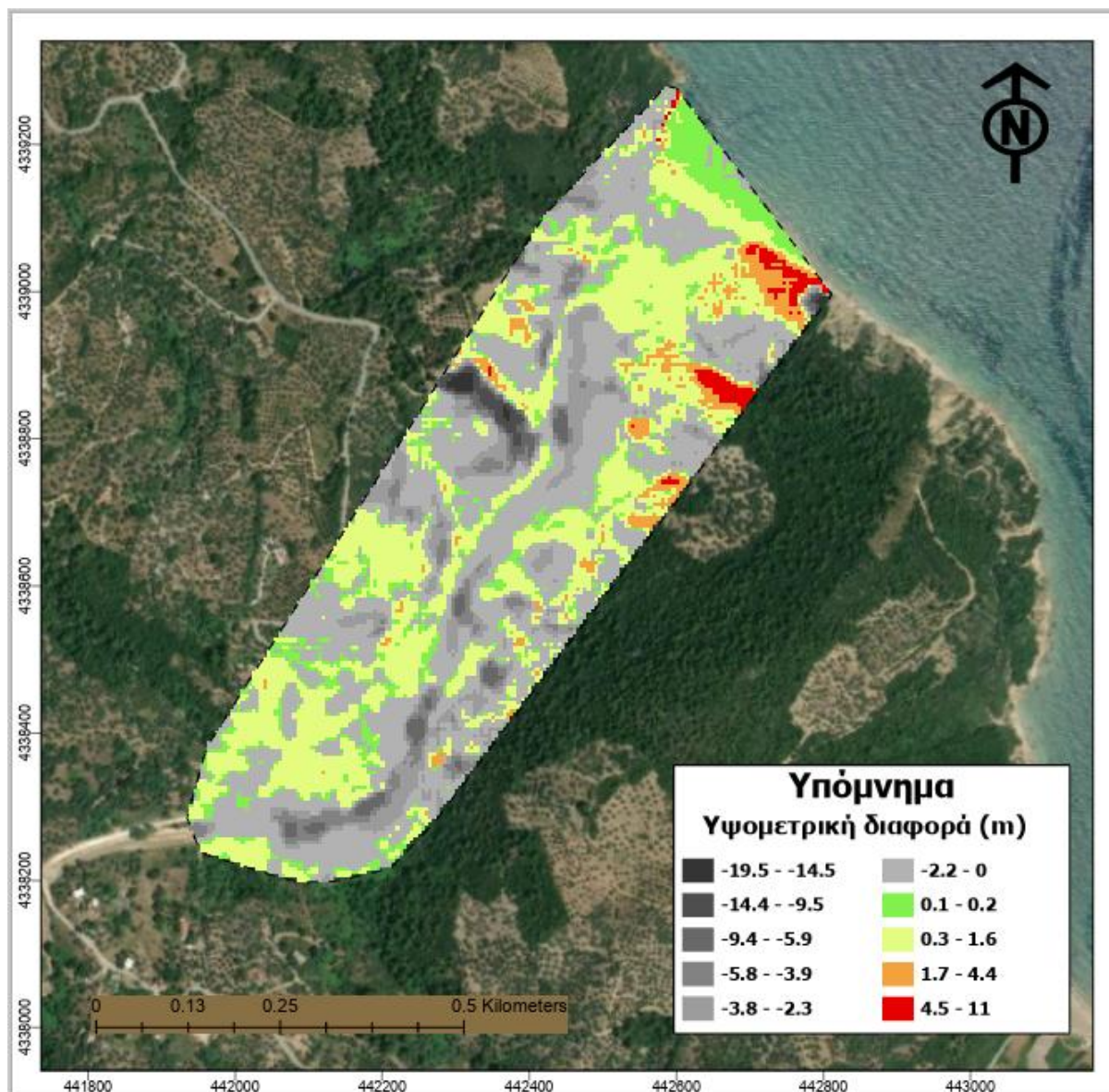


Εικόνα 36 Υψομετρικές διαφορές που προκύπτουν από την αφαίρεση του DEM UAV από το DEM 2m

➤ DTM_2x2 – Filled_DTM_Liri

- Μέση απόκλιση: +5,60 m (υπερεκτίμηση).
- Μέγιστη θετική διαφορά: +72,6 m (απεικονίζεται με κίτρινο – πορτοκαλί – κόκκινο).
- Ελάχιστη διαφορά: -10,1 m (γκρι χρώμα).

Με αφαίρεση του DTM_2x2 από το DTM_5x5 προκύπτει ένα νέο raster dataset που αποτυπώνει τις υψομετρικές διαφορές μεταξύ των δύο DEM (εικ. 37)



Εικόνα 37 Υψομετρικές διαφορές που προκύπτουν από την αφαίρεση του DEM 2m από το DEM 5m

➤ DTM_5x5 – DTM_2x2

- Μέση απόκλιση: -0,61 m (υποεκτίμηση, κατά μέσο όρο το DTM_5x5 είναι χαμηλότερο από το DTM_2x2).
- Μέγιστη θετική διαφορά: +11,0 m (απεικονίζεται με κίτρινο – πορτοκαλί – κόκκινο).
- Ελάχιστη διαφορά: -19,6 m (εκτεταμένες γκρι ζώνες, κυρίως στην κοίτη του υδατορρέυματος).

Στον Πίνακα 4 συνοψίζονται τα στατιστικά σφάλματος (μέση διαφορά, μέγιστη υπερεκτίμηση/υποεκτίμηση) και τα αντίστοιχα χρώματα χαρτών ανά σύγκριση.

Πίνακας 4 Σύγκριση υψομετρικών διαφορών μεταξύ DTM_5x5, DTM_2x2 και Filled_DTM_Liri

Σύγκριση	Μέση Διαφορά	Μέγιστη Υπερεκτίμηση	Μέγιστη Υποεκτίμηση	Χρώμα Χάρτη (Υπερεκτίμηση)	Χρώμα Χάρτη (Υποεκτίμηση)
DTM_5x5 – Filled_DTM_Liri	+4,88 m	+74,0 m	-8,0 m	Κίτρινο / Πορτοκαλί / Κόκκινο	Γκρι
DTM_2x2 – Filled_DTM_Liri	+5,60 m	+72,6 m	-10,1 m	Κίτρινο / Πορτοκαλί / Κόκκινο	Γκρι
DTM_5x5 – DTM_2x2	-0,61 m	+11,0 m	-19,6 m	Κίτρινο / Πορτοκαλί / Κόκκινο	Γκρι (κοίτη υδατορρεύματος)

4.1.1 Διαφορές DTM κτηματολογίου με Filled_DTM_Liri

➤ Υπερεκτίμηση Υψομέτρων (Θετικές Τιμές)

Η μέση υπερεκτίμηση ~5m και στις δύο περιπτώσεις δείχνει ότι τα DEM του Κτηματολογίου τείνουν να παρουσιάζουν το έδαφος ψηλότερο από ότι είναι στην πραγματικότητα (UAV). Αυτή η υπερεκτίμηση υψομέτρου, καθώς και οι μέγιστες τοπικές διαφορές (74m και 72,6m) πιθανότατα οφείλονται σε:

- ✓ Λάθη στο DEM του Κτηματολογίου (π.χ., λανθασμένη επεξεργασία LiDAR ή αεροφωτογραφιών σε απότομες πλαγιές). Επίσης, αν σε κάποιο μοντέλο δεν αφαιρέθηκαν πλήρως βλάστηση και κατασκευές, εμφανίζεται θετική μεροληψία (υπερεκτίμηση υψομέτρου).
- ✓ Διαφορετικές παραμετροποιήσεις ground classification σε LiDAR ή breaklines σε φωτογραμμετρία στα φίλτρα απομάκρυνσης βλάστησης/κτισμάτων αφήνουν «υπόλειμμα» ύψους (υπερεκτίμηση) ή υπεραφαιρούν (υποεκτίμηση). Αν το φίλτρο είναι "μαλακό", αφήνει κομμάτια από δέντρα/κτίρια και το DEM φαίνεται ψηλότερο. Αν είναι πολύ "σκληρό", αφαιρεί και κομμάτια εδάφους (π.χ. βράχια, λόφους) και το DEM φαίνεται χαμηλότερο.
- ✓ Οι διαφορετικές μέθοδοι κατά την παραγωγή ή μετατροπή ανάλυσης εισάγουν συστηματικές διαφορές, ειδικά στα όρια πρηνών. Όταν αλλάζουμε την ανάλυση (pixel size) ενός DEM, χρησιμοποιούμε διαφορετικούς αλγόριθμους παρεμβολής. Η bilinear/cubic "εξομαλύνει" τις τιμές δημιουργώντας μέσους όρους, ενώ η nearest neighbor διατηρεί απότομες αλλαγές. Στα όρια απότομων πρηνών, αυτές οι διαφορές γίνονται πιο εμφανείς και μπορούν να

δημιουργήσουν τεχνητές διαφορές μεταξύ δύο DEM που επεξεργάστηκαν με διαφορετικές μεθόδους παρεμβολής.

- ✓ Τα υψόμετρα δίνονται ως προς ένα κατακόρυφο σύστημα αναφοράς (datum) και γεωειδές/μοντέλο βαρύτητας. Αν δύο μοντέλα δεν χρησιμοποιούν ακριβώς το ίδιο κατακόρυφο datum ή το ίδιο γεωειδές, τότε όλα τα υψόμετρα του ενός θα είναι σχεδόν ομοιόμορφα μετατοπισμένα σε σχέση με του άλλου. Αυτό εμφανίζεται σαν μία σταθερή μέση μεροληψία.
- ✓ Η οριζόντια συνεγγραφή (coregistration) είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα όταν συγκρίνουμε δύο ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Το πρόβλημα προκύπτει επειδή τα δύο DEM που θέλουμε να συγκρίνουμε δεν είναι τέλεια ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους και ακόμη και μια πολύ μικρή οριζόντια μετατόπιση μόλις 1-2 μέτρων μπορεί να δημιουργήσει τεράστια προβλήματα. Όταν έχουμε απότομη μορφολογία, αυτή η μικρή οριζόντια αστοχία μεταφράζεται σε πολύ μεγάλες ψευδείς κατακόρυφες διαφορές έως και 10 – 20 μέτρα. Στην πραγματικότητα το ανάγλυφο δεν έχει αλλάξει καθόλου, απλώς τα DEM δεν είναι σωστά ευθυγραμμισμένα (Li, T. et al., 2023)
- ✓ Το Filled_DTM_Liri είναι υδρολογικά ορθολογικοποιημένο. Η αφαίρεση του από «ακατέργαστα» DEM αναδεικνύει τοπικές κοιλότητες και σφάλματα ευθυγράμμισης της κοίτης, επομένως εμφανίζονται μεγάλες θετικές τιμές στις όχθες/αναβαθμούς.
- ✓ Αλλαγές στο έδαφος μετά τη λήψη των δεδομένων (π.χ., αποθέσεις/διάβρωση στην κοίτη, κατασκευές και έργα, κατολισθήσεις, εκσκαφές). Τα DEM του κτηματολογίου είναι προγενέστερα του Daniel, ενώ πριν την τοπογραφική αποτύπωση έγινε καθαρισμός του υδατορρέυματος. Ως εκ τούτου εμφανίζονται πραγματικές τοπικές διαφορές, με πιο χαρακτηριστική τη διάβρωση στην εκβολή του υδατορρέυματος, όπου τα DTM_5x5 και 2x2 εμφανίζονται σαφώς ψηλότερα από το DTM_UAV.

➤ Υποεκτίμηση Υψομέτρων (Αρνητικές Τιμές)

Οι αρνητικές τιμές (-8m και -10,1m) μπορεί να οφείλονται σε:

- ✓ Λάθη στο UAV (π.χ., η φωτογραμμετρία δεν κατάφερε να αποτυπώσει σωστά βαθιές κοιλάδες).
- ✓ Εξομάλυνση στο DEM του Κτηματολογίου (π.χ., σε περιοχές με απότομες κλίσεις, το 2m ή 5m DEM μπορεί να "κόβει" κορυφές ή να γεμίζει κοιλάδες).

4.1.2 Διαφορές DTM_5x5 με DTM_2x2

➤ Μέση απόκλιση -0,61m

Το DTM_5x5 είναι ελαφρώς χαμηλότερο από το DTM_2x2, αλλά η διαφορά είναι μικρή.

- ✓ Αυτό μπορεί να οφείλεται στην εξομάλυνση που εισάγει η χαμηλότερη ανάλυση (5m). Το 5x5m, δηλαδή, «λειαίνει» το ανάγλυφο σε σχέση με το 2x2m, μειώνοντας κορυφές και αυξάνοντας κοιλότητες. Αυτό μπορεί να δώσει μικρότερες τιμές σε απότομες κοίτες (αρνητικές στο 5x5-2x2) και γενική υποεκτίμηση.

➤ Μέγιστες Τοπικές Αποκλίσεις (±19,6m)

Οι μεγάλες τοπικές διαφορές δείχνουν ότι τα δύο DEM δεν είναι πλήρως συμβατά.

- ✓ Πιθανές αιτίες μπορεί να είναι οι διαφορετικές πηγές δεδομένων (π.χ., το 2m από LiDAR και το 5m από αεροφωτογραφίες) καθώς και λάθη στη διαχείριση των δεδομένων (π.χ., διαφορετική μεθοδολογία interpolation).

➤ Το DTM_2x2 παρουσιάζει αυξημένες αποκλίσεις σε σχέση με το DTM_5x5

Το DTM_2x2, το οποίο είναι υψηλότερης ανάλυσης, θα έπρεπε να είναι πιο ακριβές. Παρόλα αυτά δείχνει να έχει μεγαλύτερη απόκλιση από την πραγματικότητα. Πιθανές αιτίες γι αυτό είναι:

- ✓ Θόρυβος υψηλής συχνότητας: Το DTM_2x2 καταγράφει περισσότερες λεπτομέρειες, αλλά δεν είναι όλες πραγματικές. Μπορεί, για παράδειγμα, να είναι μικρές ανωμαλίες όπως υπολείμματα βλάστησης, σκιές, τεχνητά χαρακτηριστικά που προκύπτουν από την επεξεργασία. Το DTM_5x5 "εξομαλύνει" αυτόν τον θόρυβο μέσω της χαμηλότερης ανάλυσης.
- ✓ Προβλήματα ground classification: Στα 2x2m, τα φίλτρα απομάκρυνσης βλάστησης/κτιρίων είναι πιο "ευαίσθητα". Μπορεί να αφήνουν περισσότερα υπολείμματα ή να αφαιρούν λανθασμένα κομμάτια εδάφους. Στα 5x5m, αυτά τα λάθη "μετριάζονται" από τη χωρική μέση τιμή.
- ✓ Ποιότητα πηγαίων δεδομένων: Αν τα αρχικά δεδομένα (LiDAR ή φωτογραμμετρία) δεν έχουν επαρκή πυκνότητα ή ακρίβεια για 2x2m, η παρεμβολή σε υψηλότερη ανάλυση δημιουργεί "τεχνητές λεπτομέρειες". Το 5x5m είναι πιο "συμβατό" με την πραγματική ανάλυση των δεδομένων.

4.2 Σύγκριση μοντέλων εδάφους στο HEC-RAS

Αξιοποιώντας το RAS Mapper (HEC-RAS) και τις γραμμές προφίλ που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 3.3, δημιουργήθηκαν συγκρίσιμα διαγράμματα διατομών κατά μήκος κοινών ιχνών, ώστε να αποτυπωθούν οι διαφοροποιήσεις της μορφολογίας μεταξύ των εξεταζόμενων DEM. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και ερμηνεύονται αντιπροσωπευτικά παραδείγματα, με βοηθητικό εργαλείο στη διεξαγωγή συμπερασμάτων τον ορθοφωτοχάρτη του υδατορρεύματος, ενώ όλα τα διαγράμματα περιλαμβάνονται στο Παράρτημα II για πλήρη τεκμηρίωση.

Σε όλα τα διαγράμματα χρησιμοποιήθηκε ίδιο χρώμα για κάθε terrain, ώστε να είναι ευκολότερη η ανάλυση και η σύγκριση τους.

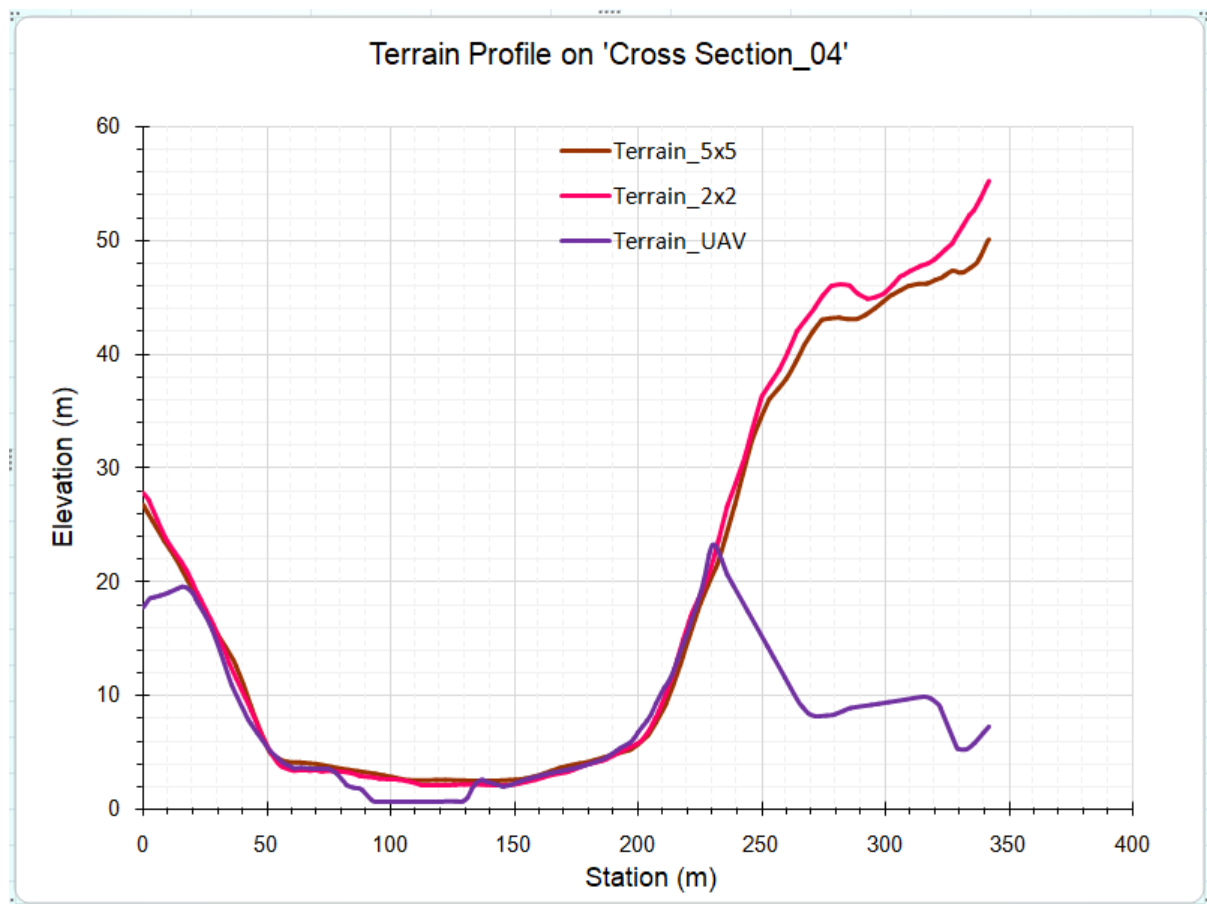
- **Terrain_UAV (μοβ γραμμή):** Αποτύπωση υψηλής ακρίβειας με μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV).
- **Terrain_5x5 (καφέ γραμμή):** Ψηφιακό μοντέλο εδάφους του Κτηματολογίου (ανάλυση 5×5m).
- **Terrain_2x2 (κόκκινη γραμμή):** Ψηφιακό μοντέλο εδάφους του Κτηματολογίου (ανάλυση 2×2m).

Στις διατομές 01 έως 13 παρατηρείται μεγάλη υψομετρική διαφορά μεταξύ των DEM του κτηματολογίου και της τοπογραφικής αποτύπωσης στη δεξιά πλευρά, όπου υπάρχει πλαγιά. Το ίδιο παρατηρείται και στις διατομές 18 έως 36, με λίγο μικρότερη υψομετρική διαφορά. Αντίστοιχο αποτέλεσμα παρατηρείται στις διατομές 01 έως 05, 14 έως 16, 20 και 24 έως 32, όπου υπάρχει πλαγιά στην αριστερή πλευρά.

Πέρα από τις παραπάνω αποκλίσεις, στις διατομές 01 έως 09 τα τρία DEM παρουσιάζουν παρόμοια μορφολογία εδάφους, με εξαίρεση 2 περίπου μέτρα περισσότερο βάθος στην κύρια κοίτη του υδατορρεύματος του DTM_UAV. Στις διατομές 10 έως 21 το DTM_2x2 δείχνει περίπου 4 περίπου μέτρα ψηλότερα την κοίτη, ενώ στις διατομές 25 έως 28 και 33 έως 40 παρουσιάζει μία αναστροφή στο ανάγλυφο της κοίτης.

4.2.1 Διάγραμμα διατομής 04

Η διατομή **CS_04** του υδατορρεύματος «Λύρη» βρίσκεται σε περιοχή με απότομες πλαγιές και στενή κοίτη, χαρακτηριστικά που καθιστούν την ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους κρίσιμη για την υδραυλική ανάλυση. Στο διάγραμμα της διατομής απεικονίζονται ταυτόχρονα και τα τρία μοντέλα (σχ. 4).



Σχήμα 4 Διαγραμματική Απεικόνιση Διατομής CS_04 με έμφαση στις αποκλίσεις στις πλαγιές και την κοίτη

➤ Κύριες Γεωμορφολογικές Αποκλίσεις

Υψομετρικές Διαφορές στις Πλαγιές:

Δεξιά Πλαγιά (Station ~300–350 m): Τα μοντέλα Terrain_5x5 και Terrain_2x2 υπερεκτιμούν το υψόμετρο κατά πολλά μέτρα σε σχέση με το Terrain_UAV, λόγω:

- Λανθασμένης παρεμβολής δεδομένων σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, όπου η φωτογραμμετρία ή το LiDAR δεν κατάφεραν να καταγράψουν με ακρίβεια τις μεταβολές.
- Υπολειμμάτων βλάστησης ή τεχνητών χαρακτηριστικών (π.χ., κτίρια, τοιχία) που δεν αφαιρέθηκαν πλήρως κατά την επεξεργασία των δεδομένων του Κτηματολογίου.
- Το Terrain_UAV αποτυπώνει πιο απότομη κλίση, σύμφωνη με την πραγματική γεωμετρία της πλαγιάς.

Αριστερή Πλαγιά (Station ~50–100 m): Επίσης υπερεκτίμηση (~10 m) στα Terrain_5x5 και Terrain_2x2.

- Το Terrain_2x2 να παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση λόγω του θορύβου υψηλής συχνότητας (π.χ., τεχνητές ανωμαλίες από την επεξεργασία).
- Το Terrain_UAV καταγράφει λεπτομερέστερη μορφολογία από τα άλλα δύο μοντέλα.

Διαφορές στη μορφολογία της κεντρικής κοίτης (Station ~150–250 m): Το Terrain_UAV παρουσιάζει βαθύτερη κοίτη κατά 1–2m σε σχέση με τα Terrain_5x5 και Terrain_2x2, λόγω:

- **Χρονικής απόκλισης:** Τα δεδομένα είναι προγενέστερα των ακραίων φαινομένων Daniel και Elias του 2023. Ακολούθησε καθαρισμός φερτών υλικών από την αρμόδια Υπηρεσία, αλλά και φυσικές διαβρωτικές διεργασίες, που έχουν εκθέσει το πραγματικό βάθος της κοίτης.

➤ Σύγκριση με Ορθοφωτοχάρτες και Επιβεβαίωση Ευρημάτων

Οι ορθοφωτοχάρτες επιβεβαιώνουν:

- Την απότομη κλίση των πλαγιών που καταγράφει το Terrain_UAV.
- Τη ακρίβεια της αποτύπωσης του ανάγλυφου της κοίτης στο Terrain_UAV.
- Τη διάβρωση και τον καθαρισμό φερτών υλικών μετά τα ακραία καιρικά φαινόμενα, που δικαιολογούν τη βαθύτερη κοίτη στο Terrain_UAV.

➤ Επίδραση στην Υδραυλική Συμπεριφορά

Η υπερεκτίμηση των πλαγιών στα Terrain_5x5 και Terrain_2x2 μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της παροχής σε συνθήκες πλημμύρας, καθώς η κοίτη φαίνεται στενότερη και ψηλότερη και λανθασμένο υπολογισμό των ταχυτήτων ροής και των βάθους νερού, με πιθανές επιπτώσεις στον σχεδιασμό προστατευτικών έργων.

Η υποεκτίμηση του βάθους της κοίτης στα Terrain_5x5 και Terrain_2x2 θα προκαλέσει σφάλματα στην προσομοίωση, όπως αδυναμία ακριβούς υπολογισμού της στάθμης πλημμύρας σε κρίσιμα σημεία και λανθασμένη εκτίμηση των ζωνών κινδύνου, με πιθανές επιπτώσεις στη χωροταξική πολιτική.

Το Terrain_UAV παρέχει την πιο ακριβή γεωμετρία και συνιστάται για αξιόπιστες υδραυλικές αναλύσεις.

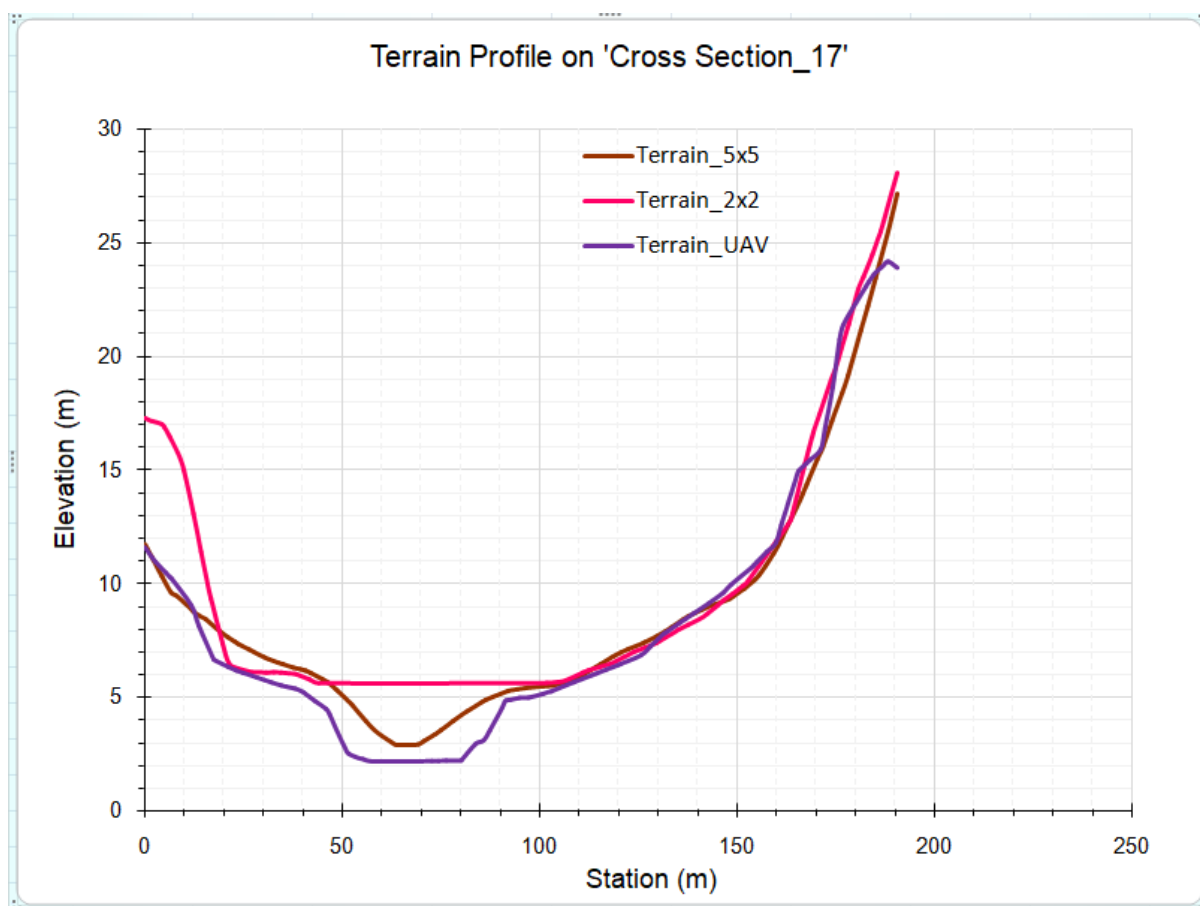
➤ Συμπεράσματα για την ακρίβεια των μοντέλων

- Το Terrain_UAV είναι το πιο ακριβές, καθώς αποτυπώνει λεπτομερώς την πραγματική γεωμετρία.

- Τα Terrain_5x5 και Terrain_2x2 είναι χρήσιμα για γενικές εκτιμήσεις, αλλά υποεκτιμούν το βάθος της κοίτης και υπερεκτιμούν τις πλαγιές.

4.2.2 Διάγραμμα διατομής 17

Η διατομή **CS_17** του υδατορρεύματος «Λύρη», αν και χαρακτηρίζεται από ήπιες πλαγιές, παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των τριών μοντέλων εδάφους, ιδιαίτερα στην κοίτη και την αριστερή πλαγιά (σχ. 5).



Σχήμα 5 Διαγραμματική Απεικόνιση Διατομής CS_17, με έμφαση στις μεγάλες αποκλίσεις στην αριστερή πλαγιά και την κοίτη

➤ Κύριες Γεωμορφολογικές Αποκλίσεις

Υψομετρικές Διαφορές στην αριστερή Πλαγιά (Station ~0–50 m): Το Terrain_2x2 παρουσιάζει σημαντική υπερεκτίμηση (μέχρι ~6 m) σε σχέση με το Terrain_UAV και το Terrain_5x5. Αιτίες:

- Λάθη παρεμβολής λόγω της υψηλής ανάλυσης (2×2m), η οποία καταγράφει τεχνητές ανωμαλίες (π.χ., βλάστηση, σκιές, ή λάθη ταξινόμησης εδάφους).
- Αδυναμία φιλτραρίσματος μικρών γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, τα οποία στο Terrain_5x5 εξομαλύνονται λόγω της χαμηλότερης ανάλυσης.

Το Terrain_5x5 ταυτίζεται σχεδόν πλήρως με το Terrain_UAV, υποδεικνύοντας ότι σε ήπιες πλαγιές, η χαμηλότερη ανάλυση (5×5m) είναι επαρκής για ακριβή αποτύπωση.

Διαφορές στη μορφολογία της κεντρικής κοίτης (Station ~50–200 m): Το Terrain_2x2 υπερεκτιμά το υψόμετρο της κοίτης μέχρι και 3,5m σε σχέση με το Terrain_UAV, όπως και πριν λόγω λαθών παρεμβολής και αποτυχίας αφαίρεσης βλάστησης/τεχνητών χαρακτηριστικών κατά την επεξεργασία των δεδομένων, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ως μέρος του εδάφους. Το Terrain_5x5 παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση (1–1,5m), όπως και πριν λόγω καθαρισμού φερτών υλικών και διάβρωσης.

➤ Σύγκριση με Ορθοφωτοχάρτες και Επιβεβαίωση Ευρημάτων

Οι ορθοφωτοχάρτες επιβεβαιώνουν:

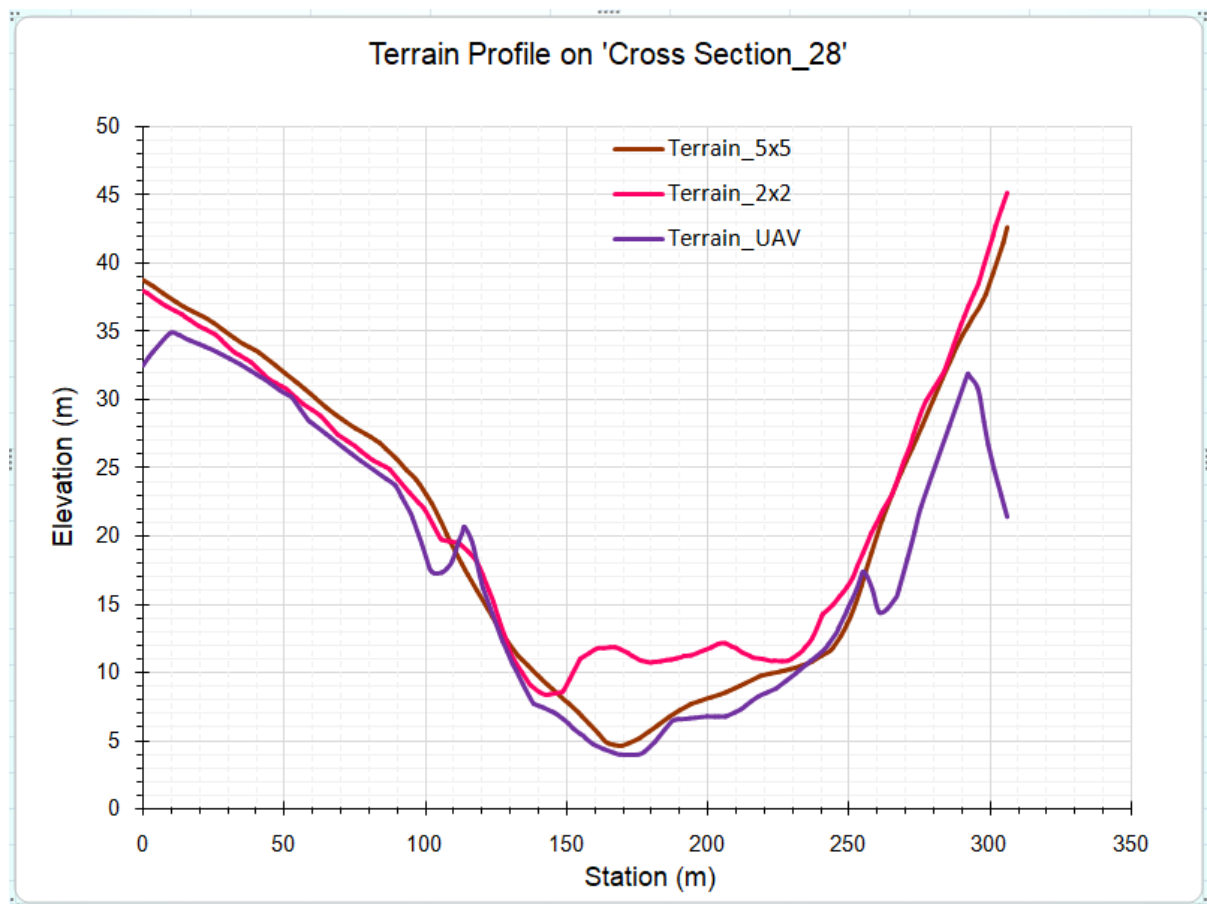
- Την ομαλή μορφολογία των πλαγιών, χωρίς απότομες μεταβολές, γεγονός που δικαιολογεί τη μικρή απόκλιση μεταξύ Terrain_UAV και Terrain_5x5.
- Την ύπαρξη βαθύτερης κοίτης στο Terrain_UAV, λόγω πρόσφατης διάβρωσης (μεταβολές μετά το 2023).
- Την απουσία τεχνητών αναβαθμών στην κοίτη, οι οποίοι θα μπορούσαν να δικαιολογήσουν τις αποκλίσεις του Terrain_2x2.

➤ Συμπεράσματα για την ακρίβεια των μοντέλων

- Το Terrain_UAV και εδώ είναι το πιο ακριβές, ιδιαίτερα για την κοίτη, όπου καταγράφει πρόσφατες γεωμορφολογικές μεταβολές.
- Το Terrain_5x5 είναι χρήσιμο για γενικές εκτιμήσεις, αλλά υποεκτίμα το βάθος της κοίτης.
- Το Terrain_2x2 δεν συνιστάται για υδραυλικές αναλύσεις γιατί εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις που μπορούν να παραπλανήσουν την ανάλυση και να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην υδραυλική προσομοίωση.

4.2.3 Διάγραμμα διατομής 28

Η διατομή **CS_28** του υδατορρέυματος «Λύρη» χαρακτηρίζεται από απότομες πλαγιές και στενή κοίτη, με σημαντικές αποκλίσεις κυρίως του μοντέλου Terrain_2x2 (σχ. 6).



Σχήμα 6 Διαγραμματική Απεικόνιση Διατομής CS_28, με έμφαση στις αιχμηρές προεξοχές των πλαγιών και την αναστροφή του ανάγλυφου της κοίτης

➤ Κύριες Γεωμορφολογικές Αποκλίσεις

Υψομετρικές Διαφορές στις Πλαγιές:

Δεξιά Πλαγιά (Station ~250–350 m): Υπερεκτίμηση στο Terrain_5x5 και 2x2 για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

Αριστερή Πλαγιά (Station ~0–100 m): Όλα τα Terrain ταυτίζονται σχεδόν πλήρως, με ελάχιστες αποκλίσεις (~1 m), καθώς η ήπια κλίση της αριστερής πλαγιάς τους επιτρέπει να αποτυπώσουν ικανοποιητικά τη γεωμετρία.

Σε αυτή τη διατομή όμως το Terrain_UAV παρουσιάζει **αιχμηρές προεξοχές** στις πλαγιές, οι οποίες απουσιάζουν από τα Terrain_5x5 και 2x2 και μπορεί να οφείλονται σε:

- Πραγματικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά: Οι αιχμηρές προεξοχές μπορεί να αντιστοιχούν σε φυσικές προεξοχές (π.χ., βραχώδεις σχηματισμοί, μικροί γκρεμοί) ή διαβρωμένα τμήματα πλαγιάς.

- Λάθη φωτογραμμετρικής επεξεργασίας: Μπορεί να δημιουργηθούν τεχνητές προεξοχές σε περιοχές με ανεπαρκή επικάλυψη εικόνων ή σκίες και αντανakλάσεις.
- Βλάστηση ή ανθρωπογενείς παρεμβάσεις: Οι αιχμηρές προεξοχές μπορεί να οφείλονται σε κλαδιά δέντρων ή μικρά τεχνητά χαρακτηριστικά (π.χ., τοιχία ή κατασκευές) που δεν αφαιρέθηκαν κατά την επεξεργασία.

Διαφορές στη μορφολογία της κεντρικής κοίτης (Station ~150–250 m): Ενώ υπάρχει συμφωνία Terrain_UAV με Terrain_5x5, το Terrain_2x2 παρουσιάζει **αναστροφή στο ανάγλυφο**, όπου η κοίτη φαίνεται ψηλότερη από ότι είναι στην πραγματικότητα.

Η «αναστροφή του ανάγλυφου» (relief inversion ή terrain reversal) είναι οπτική ψευδαίσθηση που εμφανίζεται κυρίως σε σκιασμένα μοντέλα ανάγλυφου και δορυφορικές εικόνες όταν το βασικό βάθος-σήμα είναι η σκίαση. Όταν η κατεύθυνση φωτισμού αντιβαίνει στο γνωστικό μας «προτέρημα φωτισμού από πάνω» (light-from-above prior), κοιλάδες εκλαμβάνονται ως ράχες και αντίστροφα. Η ένταση του φαινομένου επηρεάζεται από τον προσανατολισμό φωτισμού, την τραχύτητα του εδάφους και τα διαθέσιμα οπτικά στοιχεία (υφή, χρώμα, ετικέτες, κίνηση, στερεοσκοπία) (Çöltekin, A et al., 2019).

Η «αναστροφή του ανάγλυφου» που μερικές φορές βλέπουμε σε σκιασμένα DEM μπορεί να εξηγηθεί απλά ως συνδυασμός τριών παραγόντων: πρώτον, οι φωτογραμμετρικές μέθοδοι τείνουν να υπερεκτιμούν υψόμετρα σε πυθμένες κοιλάδων και σε απότομα πρανή, ειδικά όταν η υφή/φωτοχρωματική πληροφορία είναι φτωχή (νερό, σκιά, ομοιόμορφες επιφάνειες), με το σφάλμα να αυξάνει περίπου γραμμικά με την κλίση, δεύτερον, τα βήματα παρεμβολής και εξομάλυνσης που εφαρμόζονται για να «γεμίσουν» κενά ή να μειώσουν θόρυβο μπορούν άθελά τους να «γεφυρώσουν» την κοίτη και να αλλοιώσουν τη σωστή τοπογραφική μορφή και τρίτον, μικρές οριζόντιες μετατοπίσεις (μη συνταύτιση) μεταξύ πλακιδίων ή μεταξύ διαφορετικών πηγών υψομετρικών δεδομένων εισάγουν συστηματικές μεροληψίες που εκδηλώνονται ως τεχνητές ράχες/κοιλάδες (Polidori & El Hage, 2020; Nuth & Kääb, 2011).

➤ Σύγκριση με Ορθοφωτοχάρτες και Επιβεβαίωση Ευρημάτων

Οι ορθοφωτοχάρτες επιβεβαιώνουν:

- Την απότομη κλίση των πλαγιών που καταγράφει το Terrain_UAV.

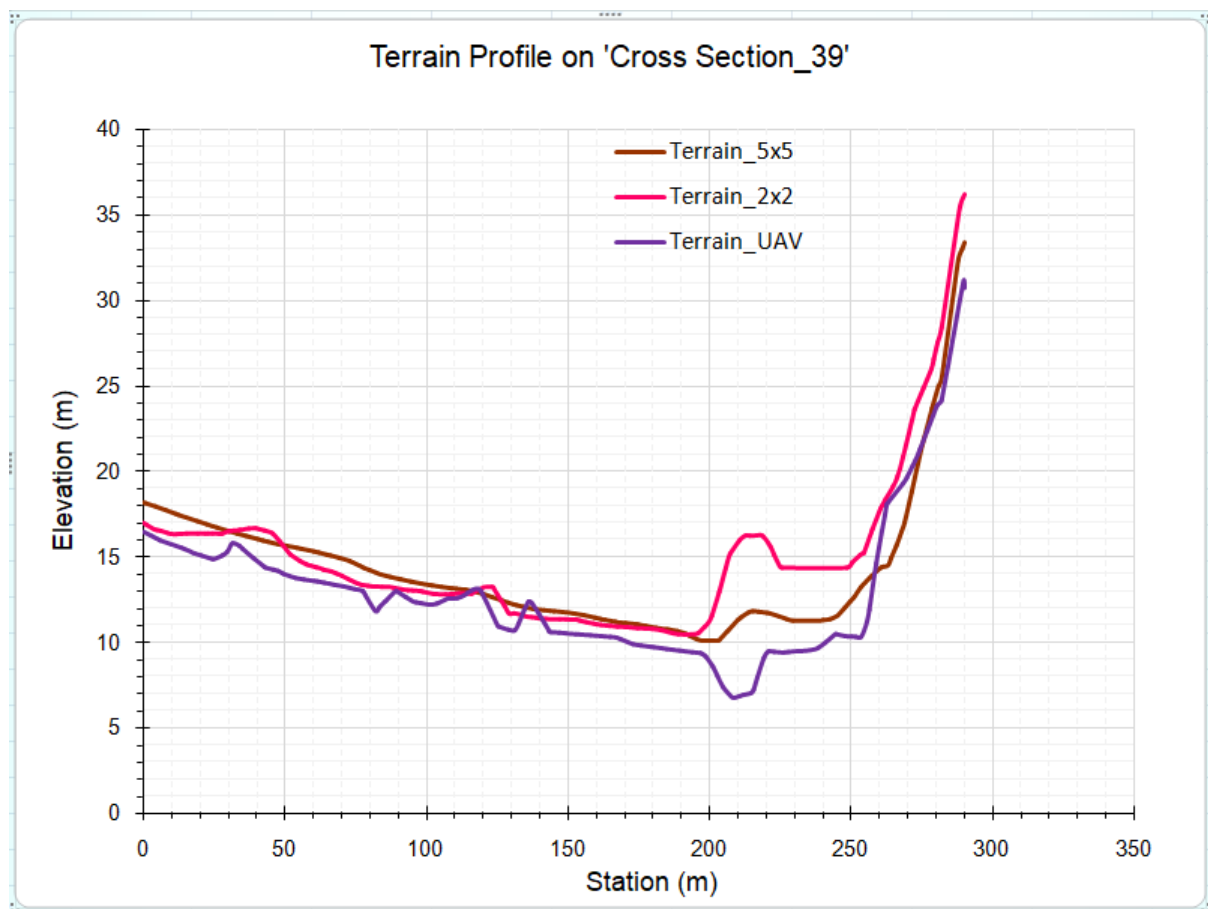
- Τη λανθασμένη απεικόνιση της κοίτης στο Terrain_2x2.
- Ότι οι αιχμηρές προεξοχές του UAV δεν οφείλονται σε πραγματικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Αντιθέτως, φαίνεται να υπάρχει πυκνή βλάστηση αλλά και τεχνητή κατασκευή, χωρίς αυτό βέβαια να αποκλείει και το ενδεχόμενο λάθους στην επεξεργασία.

➤ Συμπεράσματα για την ακρίβεια των μοντέλων

- Το Terrain_UAV είναι πάλι το πιο ακριβές, ενώ το Terrain_5x5 είναι χρήσιμο για γενικές εκτιμήσεις.
- Το Terrain_2x2 δεν συνιστάται για υδραυλικές αναλύσεις λόγω αναστροφής του ανάγλυφου και θορύβου.

4.2.4 Διάγραμμα διατομής 39

Η διατομή **CS_39** του υδατορρεύματος «Λύρη», αν και χαρακτηρίζεται από ήπιες κλίσεις, παρουσιάζει κρίσιμες αποκλίσεις μεταξύ των μοντέλων εδάφους, ιδιαίτερα στην κοίτη (σχ. 7).



Σχήμα 7 Διαγραμματική Απεικόνιση Διατομής CS_39 με έμφαση στις αποκλίσεις στην κοίτη

➤ **Κύριες Γεωμορφολογικές Αποκλίσεις**

Υψομετρικές Διαφορές στις Πλαγιές:

Δεξιά Πλαγιά (Station ~250–350 m) και **Αριστερή Πλαγιά** (Station ~0–100 m): Όλα τα μοντέλα παρουσιάζουν καλή σύγκλιση. Η ομαλή μορφολογία επιτρέπει την ακριβή αποτύπωση.

Εξαίρεση αποτελούν κάποιες αιχμηρές προεξοχές στην αποτύπωση του Terrain_UAV, όπως και πριν, λόγω ύπαρξης βλάστησης και κτηρίων ή/και λάθος στην επεξεργασία των δεδομένων.

Διαφορές στη μορφολογία της κεντρικής κοίτης (Station ~100–250 m): Το Terrain_2x2 παρουσιάζει πλήρη αναστροφή του ανάγλυφου της κοίτης σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα, δηλαδή όπου το Terrain_UAV και το Terrain_5x5 δείχνουν κοιλότητα (βάθος κοίτης), το Terrain_2x2 δείχνει προεξοχή (υψόμετρο), με τη μέγιστη απόκλιση να φτάνει τα +10 m (Station ~200–220 m).

Επίσης, το Terrain_5x5 υπερεκτιμά το υψόμετρο της κοίτης κατά μέχρι 4 m (Station ~180–210 m), επειδή γίνεται εξομάλυνση λόγω χαμηλής ανάλυσης.

Το Terrain_UAV παρουσιάζει βαθύτερη κοίτη, σύμφωνη με την πραγματική γεωμετρία, όπως επιβεβαιώνεται από τους ορθοφωτοχάρτες και τις πρόσφατες τοπογραφικές μετρήσεις.

➤ **Σύγκριση με Ορθοφωτοχάρτες και Επιβεβαίωση Ευρημάτων**

Οι ορθοφωτοχάρτες επιβεβαιώνουν:

- Την ομαλή μορφολογία των πλαγιών, χωρίς απότομες μεταβολές, γεγονός που δικαιολογεί τη μικρή απόκλιση μεταξύ Terrain_UAV και Terrain_5x5 και 2x2.
- Την ύπαρξη βαθύτερης κοίτης στο Terrain_UAV, λόγω μεταβολών μετά το 2023.
- Οι μεγάλες αποκλίσεις του Terrain_2x2, αλλά και οι μικρότερες του Terrain_5x5 δεν αντιστοιχούν σε πραγματικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.

➤ **Συμπεράσματα για την ακρίβεια των μοντέλων**

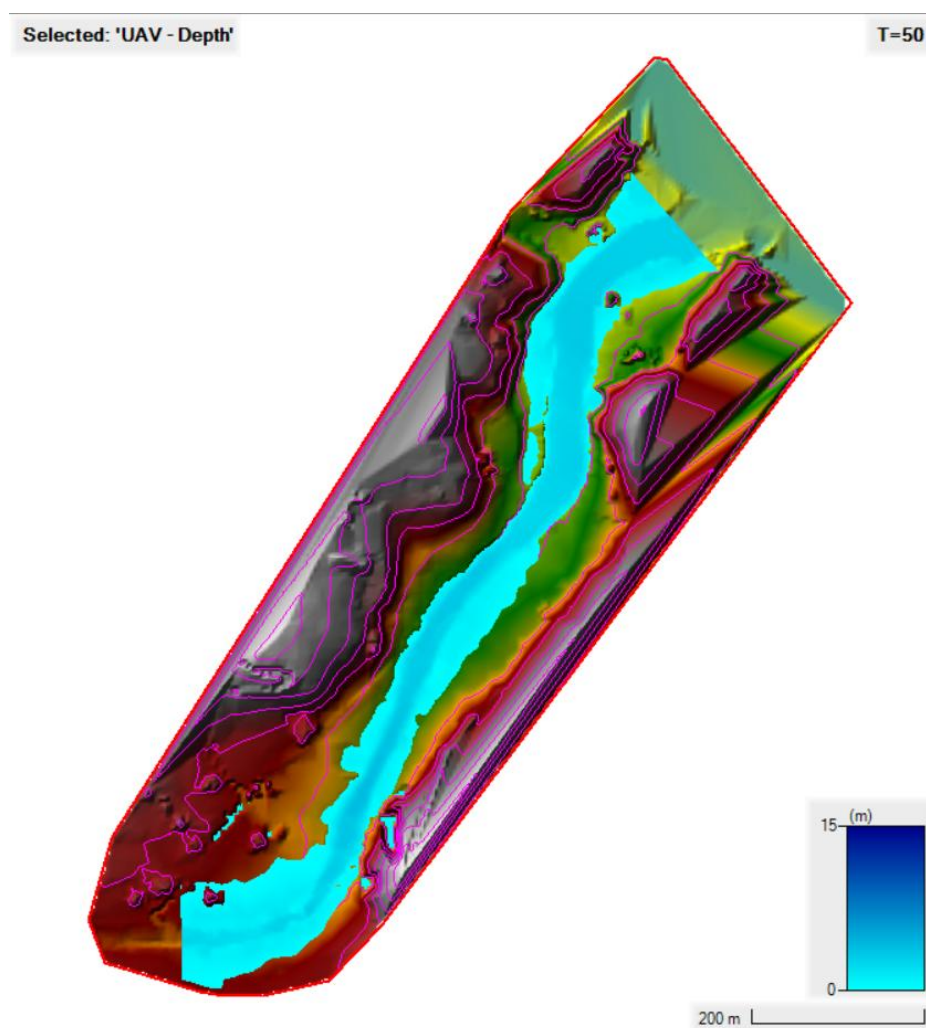
- Το Terrain_UAV είναι πάλι το πιο ακριβές, ενώ το Terrain_5x5 είναι χρήσιμο για γενικές εκτιμήσεις, αλλά με χειροκίνητη διόρθωση του βάθους της κοίτης (π.χ., με βάση δεδομένα UAV ή επιτόπιες μετρήσεις).
- Το Terrain_2x2 δεν συνιστάται για υδραυλικές αναλύσεις καθώς οι μεγάλες αποκλίσεις μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα.

4.3 Σύγκριση προσομοίωσης ροής στα μοντέλα εδάφους

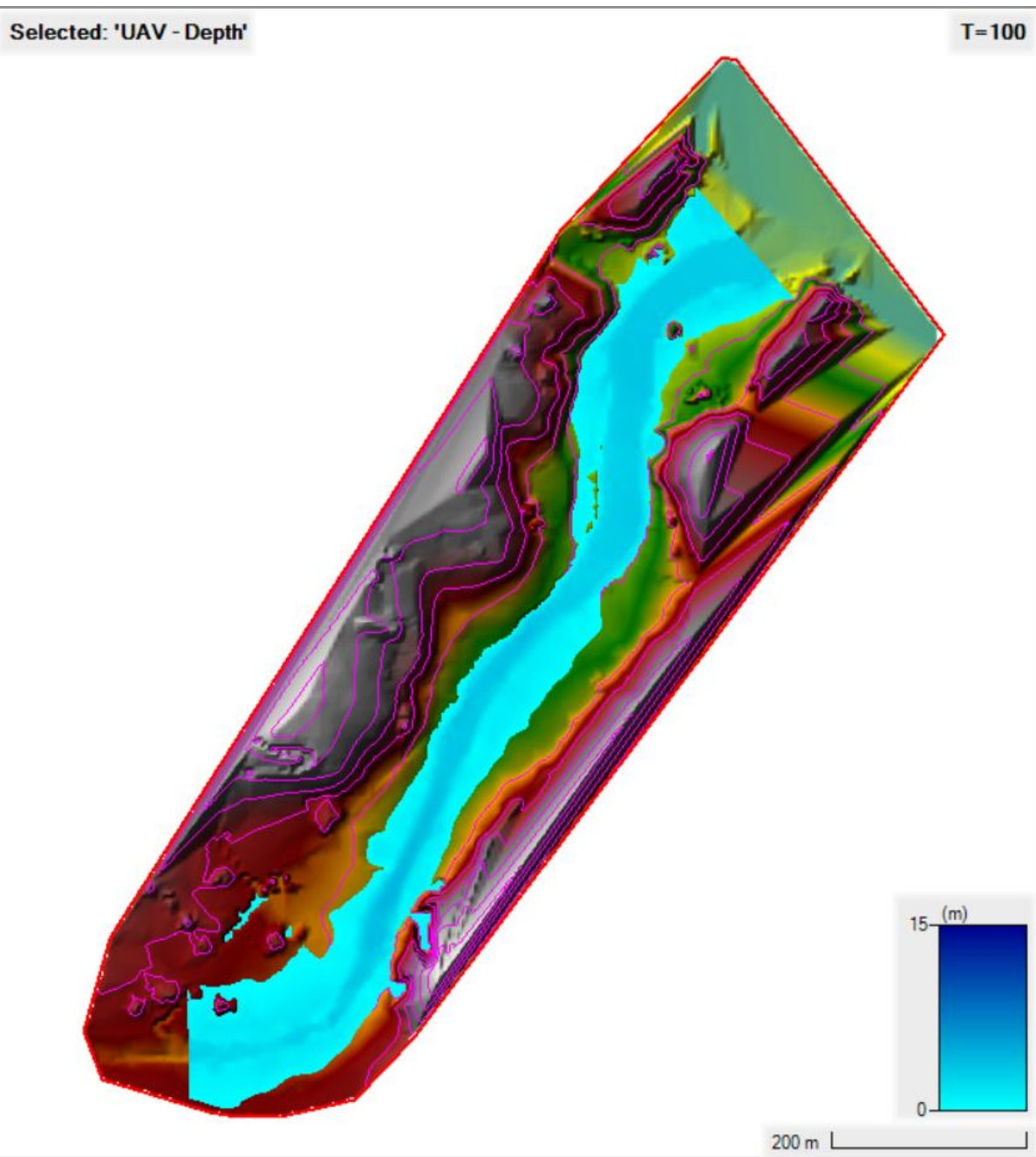
Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί την πρακτική εφαρμογή των αναλύσεων των Κεφ. 4.1 και 4.2, με βάση τα σενάρια που διαμορφώθηκαν στο Κεφ. 3.4. Τα τρία μοντέλα εδάφους (Terrain_UAV, Terrain_5x5, Terrain_2x2) υποβάλλονται σε υδραυλική προσομοίωση στο HEC-RAS για περιόδους επαναφοράς $T=50$, 100 και 1000 ετών, με στόχο τη σύγκριση διαφορών στις στάθμες νερού, στις πλημμυρικές ζώνες και στις ταχύτητες ροής, όπως αυτές αποτυπώνονται στο RAS Mapper.

4.3.1 Terrain_UAV

Οι χάρτες σταθμών νερού και πλημμυρικών ζωνών που παράγονται από αυτό το μοντέλο για $T=50$, $T=100$ και $T=1000$ έτη ταυτίζονται οπτικά με την πραγματική γεωμορφολογία του υδατορρεύματος (εικ. 38, 39 και 40), όπως αυτή φαίνεται και στους ορθοφωτοχάρτες.



Εικόνα 38 Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία UAV και $T=50$ έτη

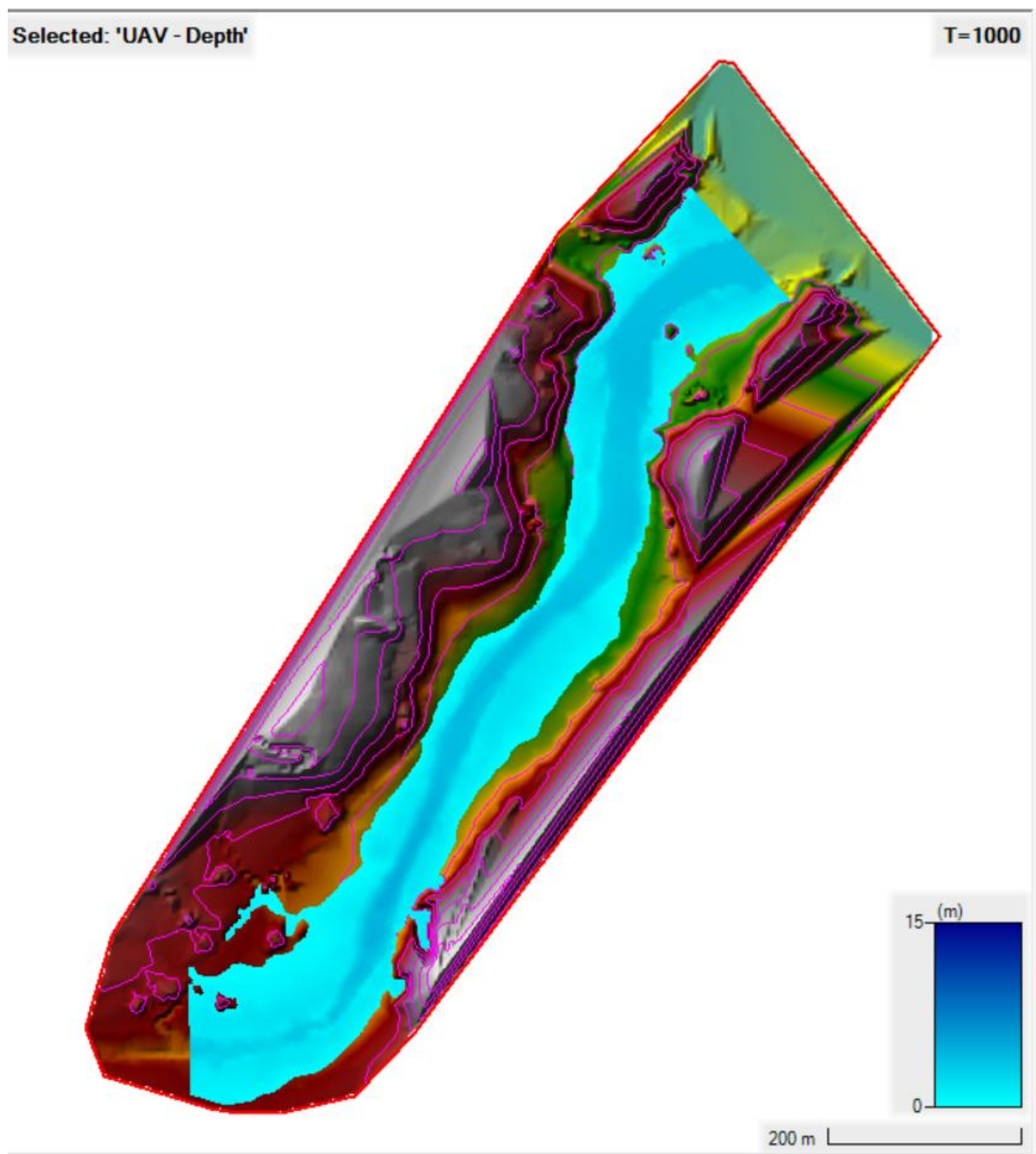


Εικόνα 39 Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία UAV και T=100 έτη

Η ροή του νερού ακολουθεί φυσικά τα χαρακτηριστικά του εδάφους, με ομαλή επέκταση στις πεδινές περιοχές και περιορισμό στις απότομες πλαγιές, χωρίς ξαφνικές αλλαγές ή αναστροφές.

Στις κρίσιμες διατομές (π.χ. CS_04, CS_17, CS_28, CS_39), το μοντέλο αυτό καταγράφει με ακρίβεια τις αλλαγές στο ανάγλυφο, όπως βαθιές κοίτες, απότομες πλαγιές και προεξοχές, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου.

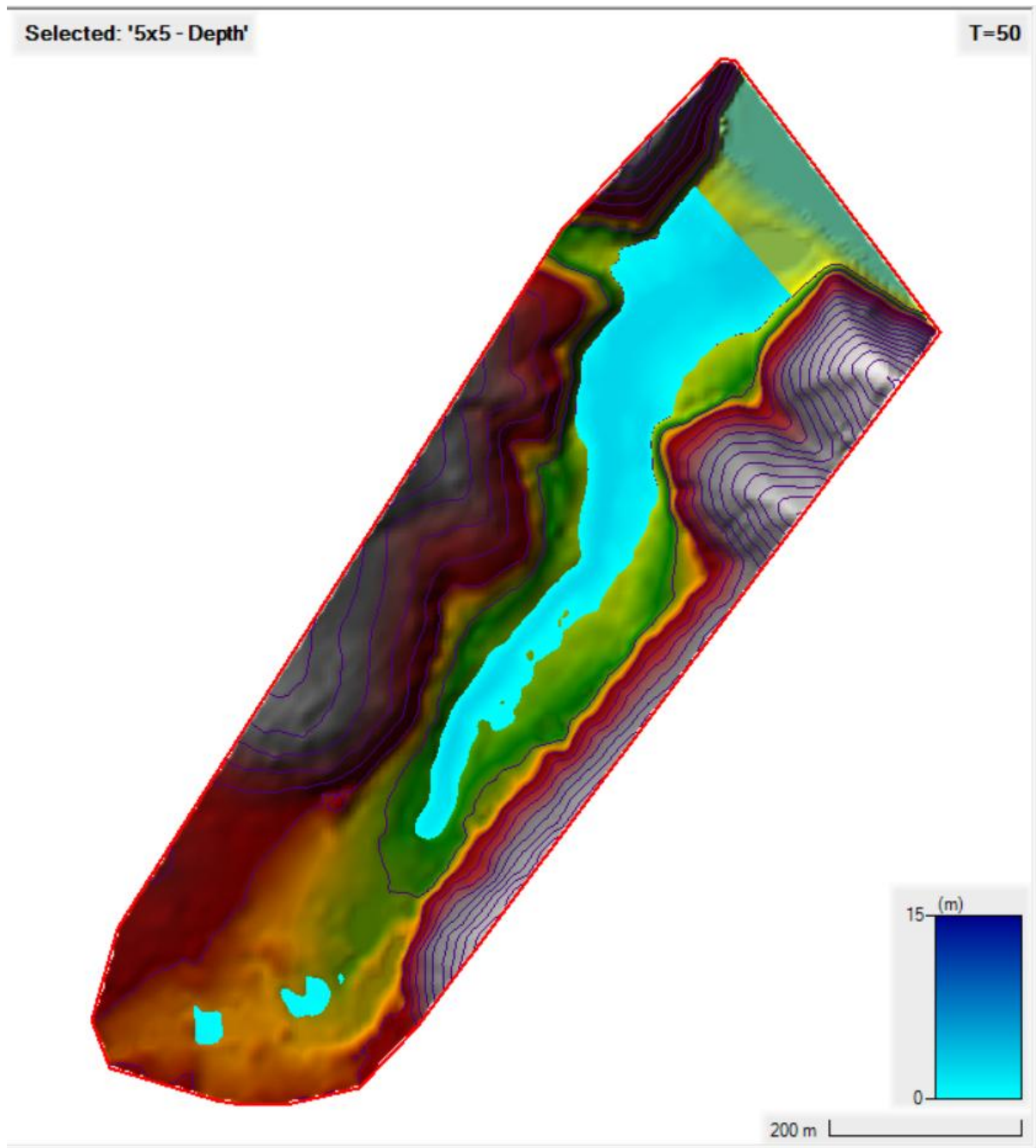
Οι στάθμες νερού και οι εκτάσεις των πλημμυρικών ζωνών είναι συνεχόμενες και λογικές, χωρίς κενά ή ασυνέπειες, ακόμη και για ακραία σενάρια (π.χ. $T=1000$ έτη). Το Terrain_UAV παρουσιάζει την πιο εκτεταμένη πλημμυρική ζώνη σε όλες τις περιόδους επαναφοράς ($T=50, 100, 1000$ έτη), ιδιαίτερα σε κρίσιμα σημεία όπως οι διατομές CS_17 και CS_39, όπου η κοίτη είναι ρηχή και οι πλαγιές ήπιες.



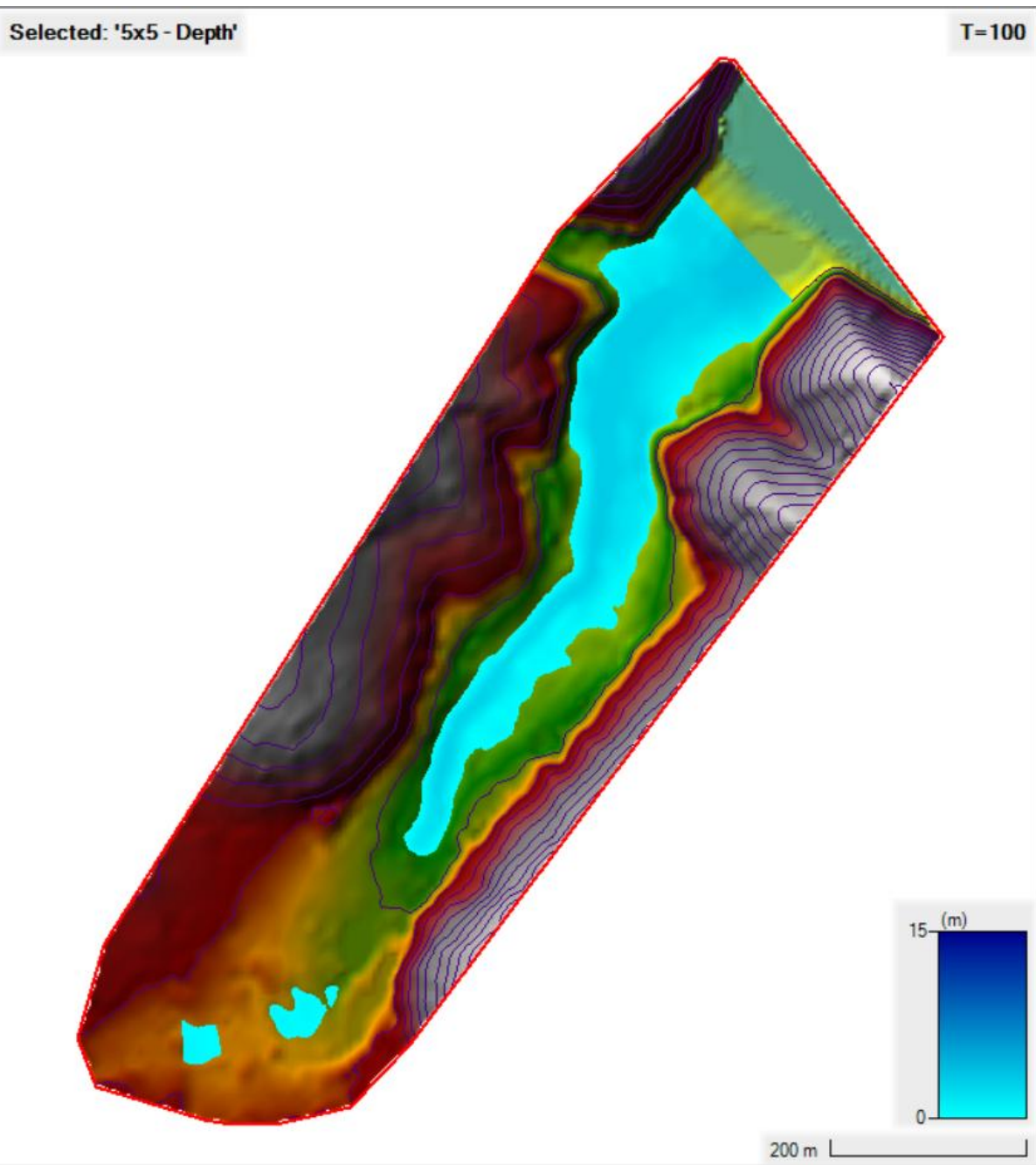
Εικόνα 40 Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία UAV και $T=1000$ έτη

4.3.2 Terrain_5x5

Στο Terrain_5x5 οι στάθμες νερού και οι πλημμυρικές ζώνες, που απεικονίζονται για $T=50$, $T=100$ και $T=1000$ έτη, είναι συστηματικά μικρότερες σε σχέση με το UAV, αλλά διατηρούν μια λογική μορφολογία, χωρίς ακραίες παραμορφώσεις (εικ. 41, 42 και 43).



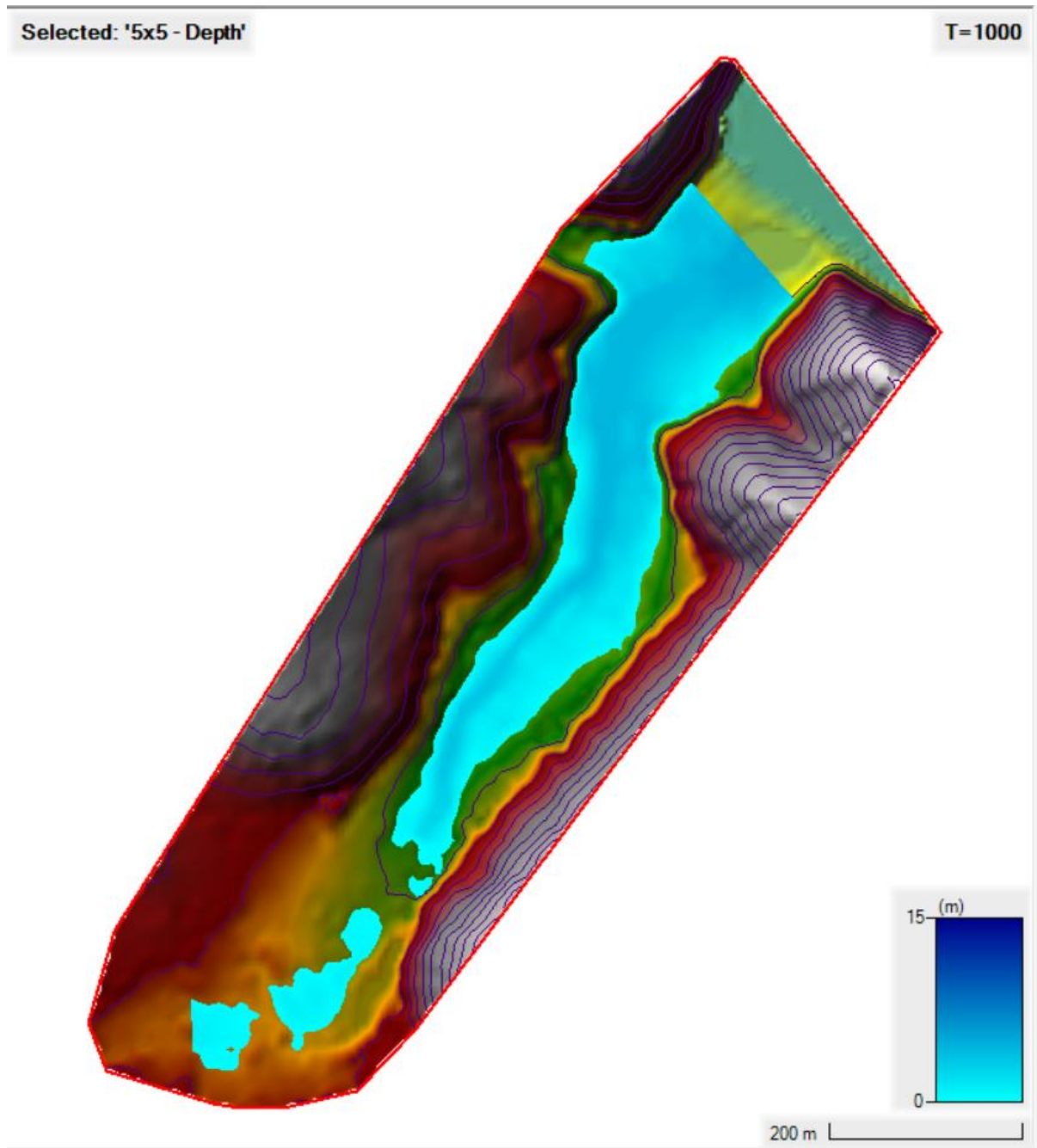
Εικόνα 41 Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 5x5 και $T=50$ έτη



Εικόνα 42 Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 5x5 και T=100 έτη

Η μείωση τους οφείλεται κυρίως στην υποεκτίμηση του βάθους της κοίτης και την εξομάλυνση των πλαγιών, που οδηγεί σε μικρότερο εμβαδόν ροής και, κατά συνέπεια, σε περιορισμένη επέκταση του νερού κατά τις πλημμύρες. Αυτή η εξομάλυνση των κοιτών και των πλαγιών οδηγεί σε λιγότερο απότομες μεταβολές στις στάθμες νερού και τις ταχύτητες ροής. Αυτό γίνεται εμφανές σε διατομές με απότομες κλίσεις, όπου το Terrain_UAV δείχνει μεγαλύτερη δυναμική. Σε ορισμένες περιπτώσεις, υποεκτιμάται η στάθμη του νερού και η έκταση της πλημμύρας, ειδικά σε σημεία με σύνθετο ανάγλυφο (π.χ. στενές κοίτες ή περιοχές με πολλαπλές

προεξοχές). Παρόλα αυτά, το Terrain_5x5 διατηρεί μια σχετική ομοιότητα με το UAV, ειδικά σε επίπεδες περιοχές και δεν παρουσιάζει αναστροφές ή ακραίες αποκλίσεις, γεγονός που το καθιστά χρήσιμο για γενικές εκτιμήσεις.

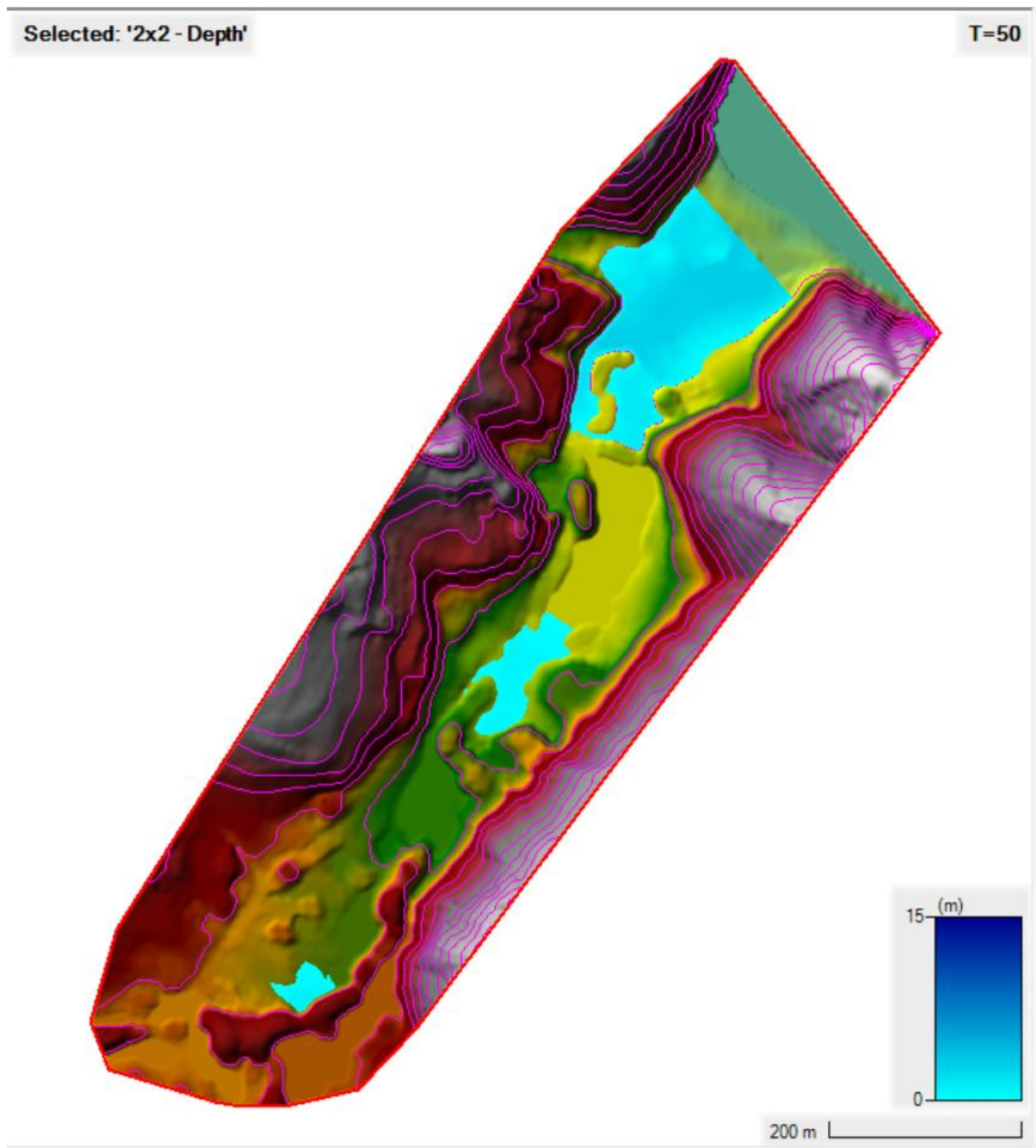


Εικόνα 43 Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 5x5 και T=1000 έτη

4.3.3 Terrain_2x2

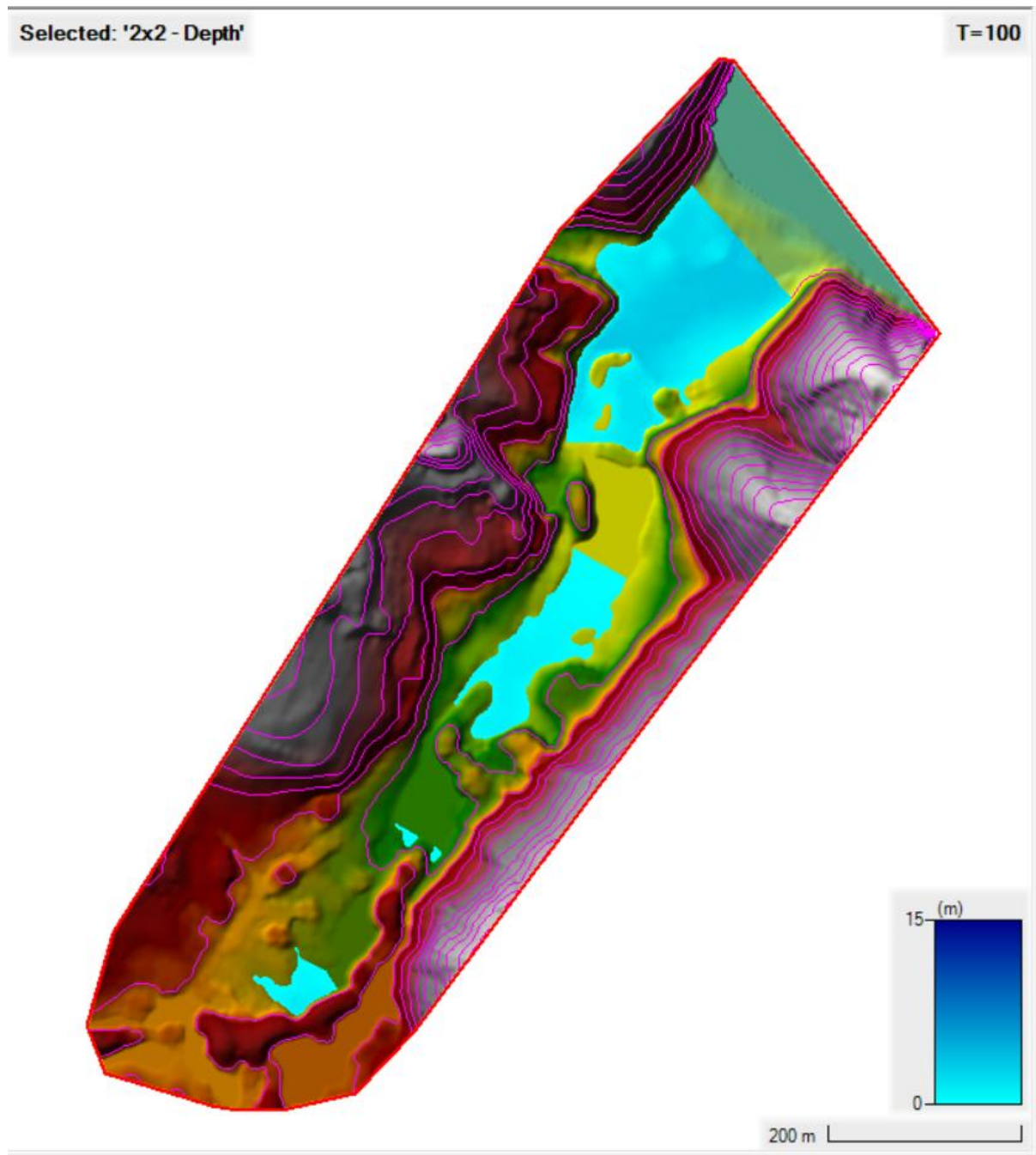
Οι χάρτες σταθμών νερού και πλημμυρικών ζωνών, όπως απεικονίζονται για T=50, T=100 και T=1000 έτη, εμφανίζουν σημαντικές παραμορφώσεις, με αναστροφές του

ανάγλυφου (π.χ. κοίτες που εμφανίζονται ως προεξοχές) και απουσία ροής σε σημεία όπου τα άλλα δύο μοντέλα δείχνουν πλημμύρα (εικ. 44, 45 και 46).

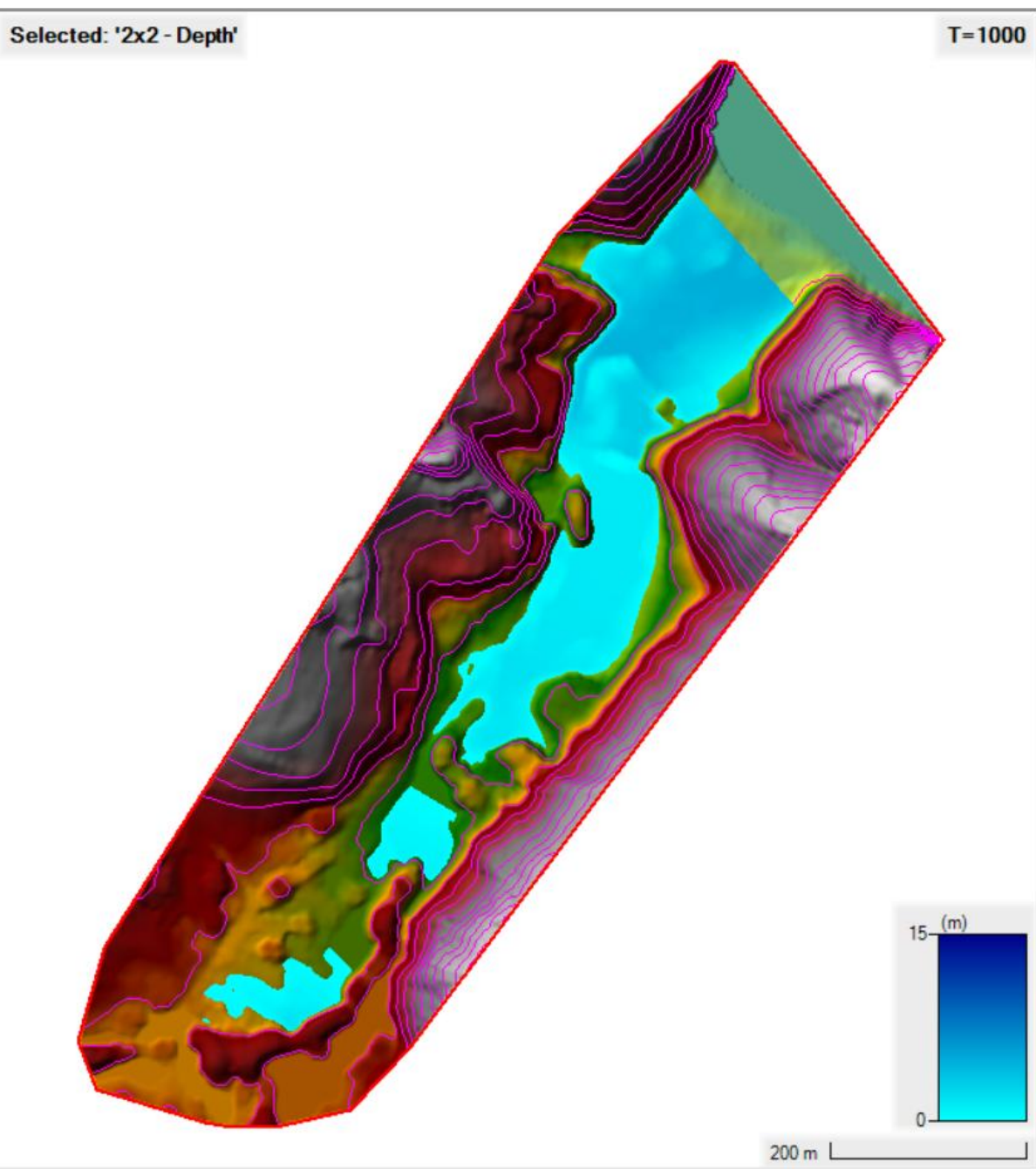


Εικόνα 44 Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 2x2 και T=50 έτη
Παρουσιάζεται η μικρότερη στάθμη νερού και έκταση πλημμυρικής ζώνης μεταξύ των τριών μοντέλων, με δραματική υποεκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου. Οι χάρτες δείχνουν ότι πολλές περιοχές που πλημμυρίζουν στο UAV και στο 5x5 παραμένουν ξηρές στο 2x2, ιδιαίτερα σε στενές κοίτες και απότομες πλαγιές. Σε κρίσιμες διατομές (π.χ. CS_39) το μοντέλο αποτυγχάνει να αναπαραστήσει τη ροή

του νερού. Η στάθμη του νερού και οι πλημμυρικές ζώνες είναι ασυνεχείς και μη ρεαλιστικές, με ξαφνικά κενά ή απότομες αλλαγές που δεν ταιριάζουν με την πραγματική γεωμορφολογία. Λόγω της αναστροφής του ανάγλυφου της κοίτης το μοντέλο δεν μπορεί να αναγνωρίσει την κοίτη ως περιοχή ροής, με αποτέλεσμα να υποεκτιμά δραματικά τη ροή του νερού και τις πλημμυρικές εκτάσεις, οδηγώντας σε εσφαλμένες εκτιμήσεις του πλημμυρικού κινδύνου.



Εικόνα 45 Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 2x2 και T=100 έτη



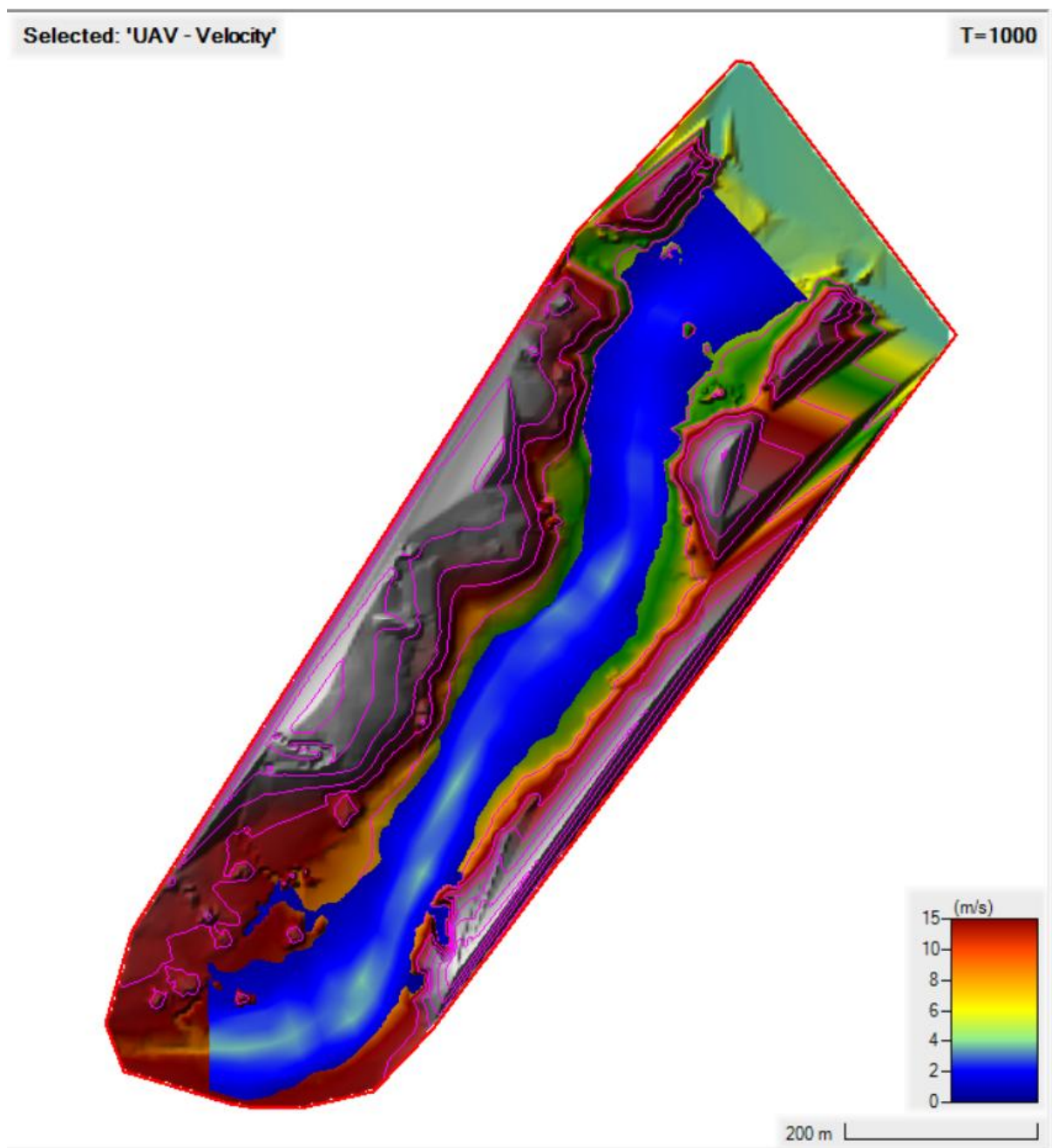
Εικόνα 46 Στάθμη νερού και πλημμυρικές ζώνες για τη γεωμετρία 2x2 και T=1000 έτη

4.3.4 Ταχύτητες ροής

Στα αποτελέσματα του RAS Mapper, γίνεται απεικόνιση όχι μόνο της στάθμης του νερού και των πλημμυρικών εκτάσεων, αλλά και των ταχυτήτων ροής, καθώς υποεκτίμηση της ταχύτητας ροής μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη εκτίμηση διάβρωσης και υποβάθμιση οικοσυστημάτων. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα για T=1000 έτη (εικόνες 47, 48 και 49) εμφανίζουν ακριβώς το ίδιο μοτίβο με εκείνο της στάθμης του νερού και των πλημμυρικών εκτάσεων:

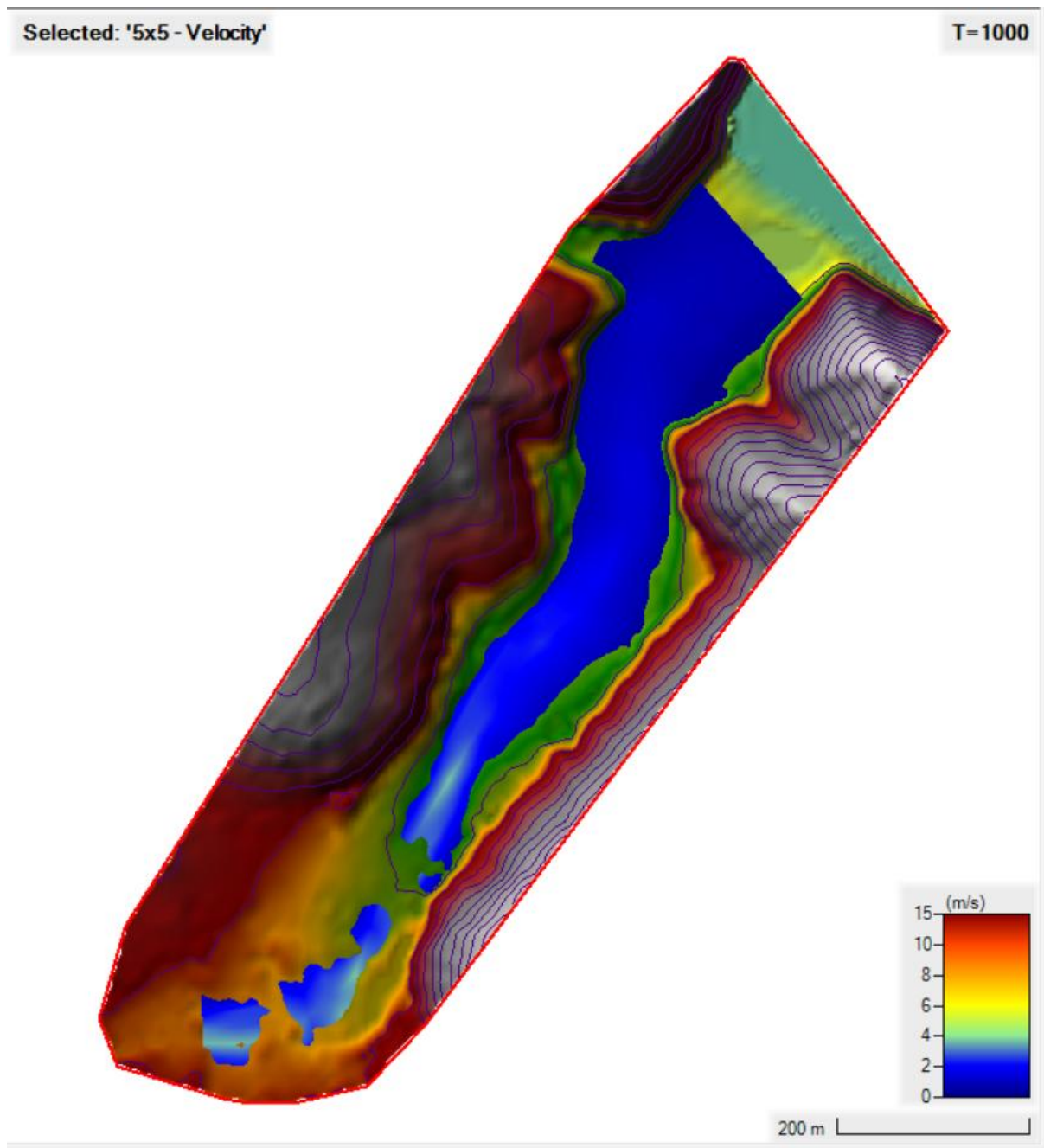
- ✓ Το Terrain_2x2 υποεκτιμά σημαντικά τις ταχύτητες ροής.
- ✓ Το Terrain_5x5 είναι πιο κοντά στο UAV, αλλά επίσης υποεκτιμά τις ταχύτητες ροής.

Αυτή η ομοιότητα υποδηλώνει ότι τα γεωμετρικά σφάλματα στα υποκείμενα μοντέλα επηρεάζουν με συνέπεια όλες τις παραμέτρους της προσομοίωσης, επιβεβαιώνοντας την ανάγκη για προσεκτικό έλεγχο και βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του μοντέλου προτού εξαχθούν τελικά συμπεράσματα.

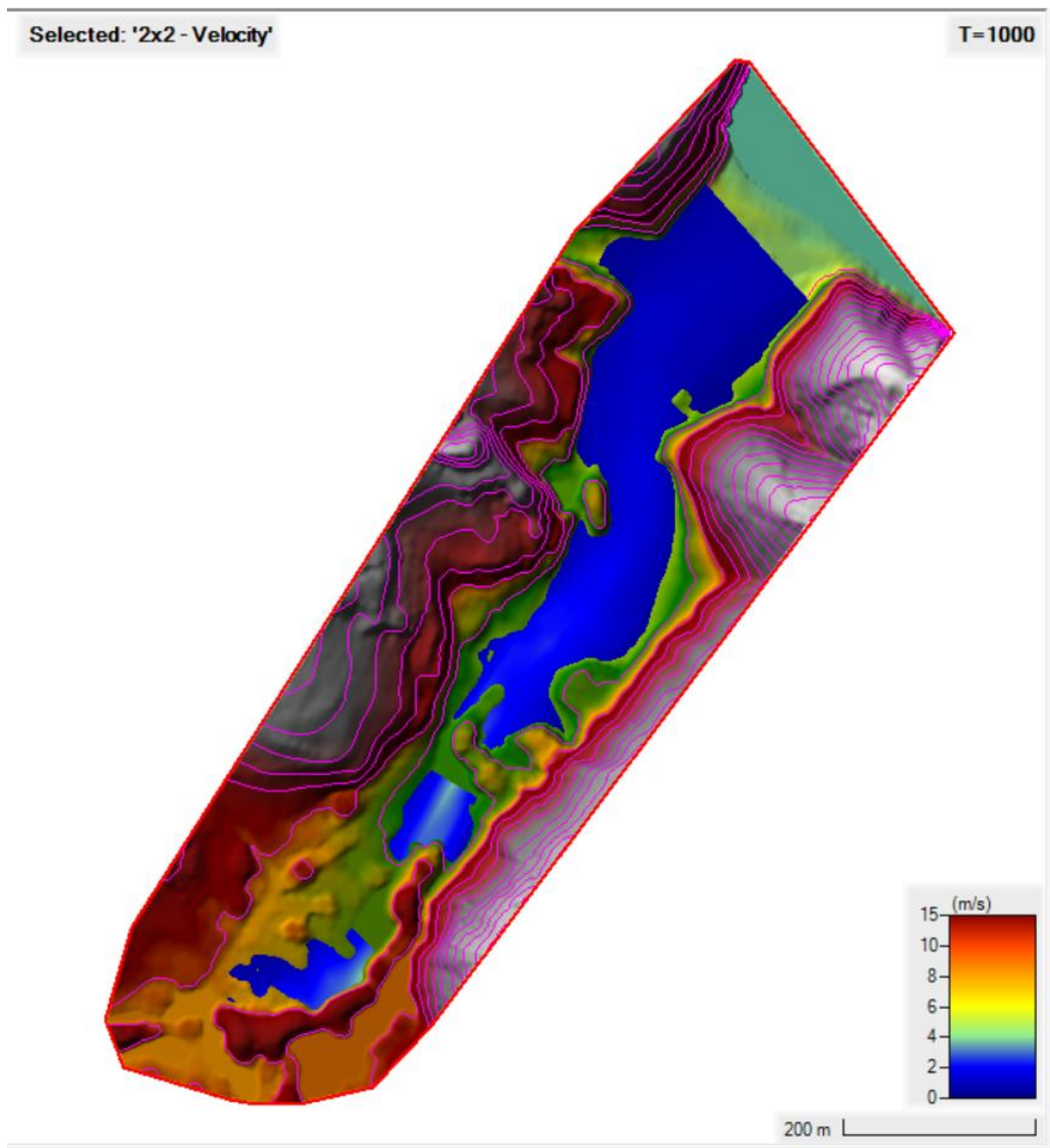


Εικόνα 47 Ταχύτητα ροής για τη γεωμετρία UAV και $T=1000$ έτη

Η Εικόνα 47 παρουσιάζει τις ταχύτητες ροής για το μοντέλο UAV, όπου φαίνονται καθαρά οι υψηλότερες τιμές εντός της κοίτης και οι χαμηλότερες στις πλημμυρικές εκτάσεις. Σε σύγκριση, η Εικόνα 48 (μοντέλο 5x5) εμφανίζει παρόμοιο χωρικό μοτίβο αλλά με μικρότερη ένταση στις μέγιστες τιμές, ενώ στην Εικόνα 49 (μοντέλο 2x2) η υποεκτίμηση των ταχυτήτων είναι ακόμη πιο έντονη, με αποτέλεσμα ένα πιο «εξομαλυμένο» πεδίο ροής. Η αντιπαραβολή των τριών εικόνων δείχνει ότι, αν και η χωρική κατανομή παραμένει όμοια, η απόδοση των μέγιστων τιμών διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο.



Εικόνα 48 Ταχύτητα ροής για τη γεωμετρία 5x5 και T=1000 έτη



Εικόνα 49 Ταχύτητα ροής για τη γεωμετρία 2x2 και T=1000 έτη

4.3.5 Επιπτώσεις στην Αξιολόγηση του Πλημμυρικού Κινδύνου

- ✓ Το μοντέλο **Terrain_UAV** παρέχει την πιο ρεαλιστική εικόνα του πλημμυρικού κινδύνου, καθώς αντανakλά με ακρίβεια την πραγματική γεωμετρία του υδατορρεύματος, καθώς η αποτύπωση πραγματοποιήθηκε μετά την έλευση της κακοκαιρίας Daniel. Οι εκτάσεις πλημμύρας που προκύπτουν είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με τα άλλα δύο μοντέλα, κάτι που σημαίνει ότι ο κίνδυνος δεν υποεκτιμάται όπως συμβαίνει στις άλλες περιπτώσεις. Επιπλέον, τα

αποτελέσματα συμφωνούν πλήρως με τους ορθοφωτοχάρτες και τις παρατηρήσεις επί του εδάφους, όπως για παράδειγμα η διάβρωση που καταγράφηκε μετά τα ακραία φαινόμενα Daniel και Elias.

- ✓ Το μοντέλο **Terrain_5x5** υποεκτιμά τον πλημμυρικό κίνδυνο, αλλά σε ένα λογικό και αποδεκτό βαθμό, με εκτάσεις πλημμύρας σχετικά μικρότερες από αυτές του UAV. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προκαταρκτικές μελέτες, αλλά απαιτεί διορθώσεις με βάση τα δεδομένα του UAV ή επιτόπιες μετρήσεις για ακριβέστερα αποτελέσματα. Οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες σε περιοχές με απότομες πλαγιές και στενές κοίτες, ενώ σε επίπεδες περιοχές τα αποτελέσματα προσεγγίζουν περισσότερο εκείνα του UAV.
- ✓ Το μοντέλο **Terrain_2x2** υποεκτιμά τον πλημμυρικό κίνδυνο σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό, με εκτάσεις πλημμύρας πολύ μικρότερες από αυτές του UAV. Οι χάρτες πλημμυρικών ζωνών που παράγονται δεν αντιστοιχούν στην πραγματικότητα, καθώς το μοντέλο αποτυγχάνει να αναπαραστήσει σωστά την κοίτη και τις πλαγιές του υδατορρεύματος. Για τον λόγο αυτό, δεν συνιστάται για υδραυλικές μελέτες, καθώς η χρήση του μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένους σχεδιασμούς αντιπλημμυρικών έργων και, κυρίως, σε σοβαρή υποεκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – Συμπεράσματα και Συστάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη αξιολόγησης διαφορετικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους στην πλημμυρική επικινδυνότητα του υδατορρέυματος «Λύρη», απαντώντας στα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν, αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές μεταξύ των μοντέλων, που έχουν άμεσες επιπτώσεις στην ακρίβεια των υδραυλικών προσομοιώσεων και την αξιολόγηση του πλημμυρικού κινδύνου.

✓ **Ακρίβεια και αξιοπιστία των ψηφιακών μοντέλων εδάφους**

Το ψηφιακό μοντέλο που προέκυψε από την τοπογραφική αποτύπωση με μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (Filled_DTM_Liri) αναδεικνύεται ως το πλέον ακριβές για την περιοχή μελέτης. Η υπεροχή του οφείλεται στην ικανότητά του να καταγράφει λεπτομερώς τη γεωμετρία της κοίτης και να αποτυπώνει πρόσφατες γεωμορφολογικές μεταβολές που έλαβαν χώρα μετά το πέρασμα της κακοκαιρίας Daniel και τις επακόλουθες εργασίες καθαρισμού του υδατορρέυματος.

Αντιθέτως, τα ψηφιακά μοντέλα του Ελληνικού Κτηματολογίου παρουσιάζουν συστηματικές αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Συγκεκριμένα, το DTM_5x5 εμφανίζει μέση υπερεκτίμηση υψομέτρου κατά 4,88 μέτρα, ενώ το DTM_2x2 κατά 5,60 μέτρα. Οι αποκλίσεις αυτές αποδίδονται κυρίως στην ανεπαρκή απομάκρυνση βλάστησης και κτισμάτων κατά την επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και στη χρονική απόσταση μεταξύ της λήψης των δεδομένων και των πραγματικών συνθηκών του εδάφους.

✓ **Επιπτώσεις στην υδραυλική προσομοίωση**

Οι γεωμετρικές αποκλίσεις των μοντέλων μεταφράζονται σε σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα των υδραυλικών προσομοιώσεων. Η ανάλυση των διατομών αποκαλύπτει ότι τα μοντέλα του Κτηματολογίου υποεκτιμούν το βάθος της κοίτης και υπερεκτιμούν τις πλαγιές, οδηγώντας σε λανθασμένους υπολογισμούς παροχών, ταχυτήτων ροής και βάθους νερού.

Ιδιαίτερα προβληματικό είναι το DTM_2x2, το οποίο σε ορισμένες διατομές παρουσιάζει ακόμη και αναστροφή του ανάγλυφου της κοίτης, καθιστώντας το ακατάλληλο για υδραυλικές αναλύσεις. Η χρήση του οδηγεί σε δραματική

υποεκτίμηση των πλημμυρικών εκτάσεων, δημιουργώντας σοβαρό κίνδυνο λανθασμένης αξιολόγησης του πλημμυρικού κινδύνου.

✓ **Επίδραση της ανάλυσης στην ποιότητα των μοντέλων**

Παραδόξως, το μοντέλο DTM_2x2, παρά την υψηλότερη χωρική του ανάλυση, εμφανίζει χειρότερη απόδοση από το DTM_5x5. Αυτό οφείλεται στον υψηλής συχνότητας θόρυβο που εισάγεται στα δεδομένα υψηλότερης ανάλυσης, καθώς και σε προβλήματα ground classification που δημιουργούν τεχνητές ανωμαλίες στο μοντέλο. Το DTM_5x5 επωφελείται από την εξομάλυνση που προσφέρει η χαμηλότερη ανάλυση, η οποία μετριάζει αυτά τα προβλήματα.

✓ **Συνέπειες για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου**

Τα ευρήματα της μελέτης υπογραμμίζουν την κρίσιμη σημασία της επιλογής κατάλληλων ψηφιακών μοντέλων εδάφους για τη μελέτη πλημμυρικού κινδύνου. Η χρήση ανακριβών μοντέλων μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη χαρτογράφηση πλημμυρικών ζωνών, ανεπαρκή σχεδιασμό αντιπλημμυρικών έργων και, κατ' επέκταση, σε αυξημένο κίνδυνο για τη δημόσια ασφάλεια και την περιβαλλοντική προστασία.

Η μελέτη αναδεικνύει επίσης την ανάγκη για τακτική επικαιροποίηση των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, ιδιαίτερα σε περιοχές που έχουν υποστεί σημαντικές γεωμορφολογικές αλλαγές λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων ή ανθρώπινων παρεμβάσεων. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης επιβεβαιώνουν την υπεροχή των εξειδικευμένων τοπογραφικών αποτυπώσεων έναντι των γενικού σκοπού ψηφιακών μοντέλων για εφαρμογές υδραυλικής μοντελοποίησης.

5.2 Συστάσεις και Συζήτηση

✓ **Πρακτικές Συστάσεις για τη Χρήση Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους**

Βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης, διατυπώνονται οι ακόλουθες συστάσεις για τη βέλτιστη αξιοποίηση ψηφιακών μοντέλων εδάφους σε υδραυλικές αναλύσεις:

Για κρίσιμες υδραυλικές μελέτες και σχεδιασμό αντιπλημμυρικών έργων, συνιστάται η χρήση εξειδικευμένων τοπογραφικών αποτυπώσεων υψηλής ακρίβειας (π.χ. UAV, επίγεια τοπογραφία). Η επένδυση σε τέτοιες αποτυπώσεις δικαιολογείται πλήρως από την υψηλή ακρίβεια που προσφέρουν και την αποφυγή κοστοβόρων σφαλμάτων σε έργα προστασίας από πλημμύρες.

Για προκαταρκτικές μελέτες και γενικές εκτιμήσεις, το DEM 5m του Κτηματολογίου αποτελεί αποδεκτή επιλογή, παρέχοντας ικανοποιητική ακρίβεια με χαμηλό κόστος απόκτησης. Αντιθέτως, το DEM 2m δεν συνιστάται λόγω του υψηλού θορύβου και των σημαντικών γεωμετρικών αποκλίσεων που παρουσιάζει.

Για περιοχές που έχουν υποστεί πρόσφατες γεωμορφολογικές αλλαγές λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων ή ανθρωπίνων παρεμβάσεων, η χρήση παλαιότερων DEM μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές υπο- ή υπερεκτιμήσεις του πλημμυρικού κινδύνου. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η επικαιροποίηση των δεδομένων είναι απαραίτητη.

✓ **Περιορισμοί της Μελέτης**

Η παρούσα έρευνα εστιάζει σε ένα συγκεκριμένο υδατόρρευμα με χαρακτηριστικά μικρού μεσογειακού υδατορρεύματος. Τα αποτελέσματα ενδεχομένως να διαφέρουν σε μεγαλύτερα υδατικά συστήματα ή σε περιοχές με διαφορετικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.

Επιπλέον, η σύγκριση περιορίστηκε στα διαθέσιμα μοντέλα εδάφους του Ελληνικού Κτηματολογίου και σε μία τοπογραφική αποτύπωση UAV. Η ενσωμάτωση περισσότερων πηγών δεδομένων (π.χ. LiDAR, δορυφορικά δεδομένα) θα μπορούσε να παράσχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της επίδοσης διαφορετικών τεχνολογιών.

✓ **Μελλοντικές Ερευνητικές Κατευθύνσεις**

Η έρευνα αυτή ανοίγει σημαντικές προοπτικές για περαιτέρω διερεύνηση. Προτείνεται η επέκταση της μεθοδολογίας σε περισσότερες περιοχές μελέτης με διαφορετικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, ώστε να εξαχθούν γενικότερα συμπεράσματα για την αξιοπιστία των DEM του κτηματολογίου σε εθνικό επίπεδο.

Η ανάπτυξη αυτοματοποιημένων εργαλείων αξιολόγησης της ποιότητας DEM θα μπορούσε να διευκολύνει τη γρήγορη εκτίμηση της καταλληλότητας ενός μοντέλου για συγκεκριμένες εφαρμογές. Επιπλέον, η διερεύνηση μεθόδων βελτίωσης της ακρίβειας των DEM χαμηλότερου κόστους μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης και συνδυασμού πολλαπλών πηγών δεδομένων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

✓ **Συζήτηση για το Ευρύτερο Πλαίσιο**

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης έχουν σημαντικές επιπτώσεις για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου σε εθνικό επίπεδο. Η αυξανόμενη συχνότητα ακραίων καιρικών φαινομένων στη Μεσόγειο καθιστά επιτακτική την ανάγκη για ακριβείς υδραυλικές προσομοιώσεις και αξιόπιστους χάρτες πλημμυρικού κινδύνου.

Η χρήση ακατάλληλων DEM μπορεί να έχει σοβαρές κοινωνικοοικονομικές συνέπειες, από λανθασμένο χωροταξικό σχεδιασμό έως μη επαρκή αντιπλημμυρικά έργα. Η επένδυση σε καλύτερα δεδομένα εδάφους αποτελεί επομένως όχι μόνο τεχνική ανάγκη, αλλά και κοινωνική ευθύνη.

Τέλος, η μελέτη αυτή υπογραμμίζει τη σημασία της διεπιστημονικής προσέγγισης στη διαχείριση περιβαλλοντικών κινδύνων, συνδυάζοντας τεχνολογίες αιχμής (UAV, GIS, υδραυλική μοντελοποίηση) με παραδοσιακές μεθόδους τοπογραφίας και υδρολογίας για την παραγωγή αξιόπιστων και πρακτικά εφαρμόσιμων αποτελεσμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Κουτσόπουλος, Κ. (2005). *Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Μάρης, Α. (2018), *Αστραπιαίες πλημμύρες και η επίδρασή τους στο περιβάλλον και τις ανθρώπινες κοινωνίες*. Αθήνα: Εκδόσεις Περιβάλλον.

Μηλιαρέσης, Γ. Χ. (2006). *Ειδικές εφαρμογές στο ArcGIS*. Αθήνα: Ίων.

Μπάλιας, Γ., 2009, *ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ: ΔΙΑΠΛΟΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ, ΔΙΚΑΙΟΥ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ*, εκδόσεις Αντ.Ν. Σάκκουλα, Αθήνα, σ. 1-24

Παπαμιχαήλ, Δ. Μ. (2004). *Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων*. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούδη. Θεσσαλονίκη.

Παρασχάκης Ι., Μ. Π. (1988). *Αυτοματοποιημένη Χαρτογραφία*. Θεσσαλονίκη

Πηγή ΟΜΟΕ – ΑΣΥΕΟ, ΝΑΜΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί & Μελετητές ΑΕ, ΟΜΟΕ - Τεύχος 8: *Αποχέτευση – Στράγγιση – Υδραυλικά Έργα Οδών*, Επικαιροποίηση Ιούλιος 2013 - Έκδοση 3

Σακκάς, Ι. Γ.(1985). *Τεχνική Υδρολογία*. Τεύχος 1. Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις Ν. Αϊβαζή – Σ. Ζουμπούλη, Ξάνθη.

Τσακίρης, Γ. (2007). *Υδρολογία*. Εκδόσεις Συμμετρία.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). (2015). *ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 81(3), A1–A26. <https://doi.org/10.14358/PERS.81.3.A1-26>

Blöschl, G., Kiss, A., Viglione, A., Barriendos, M., Böhm, O., Brázdil, R., ... Živković, N. (2019). Current European flood-rich period exceptional compared with the past 500 years. *Nature*, 573(7772), 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>

Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.

Chow, V.T., Maidment, D.R., & Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

- Çöltekin, A., Hartung, G., & Meyer, M. (2019). Deconstructing the relief inversion effect: Contributors of the problem and its solutions. *Abstracts of the International Cartographic Association*, 1, 48. <https://doi.org/10.5194/ica-abs-1-48-2019>
- European Commission. (2025). *Floods Directive* (2007/60/EC) – 3rd cycle (2022–2027). Ανακτήθηκε από https://environment.ec.europa.eu/topics/water/floods_en
- Google. (2025). Στιγμιότυπο χάρτη. Google Earth Web. Ανακτήθηκε 30 Αυγούστου 2025, από <https://earth.google.com>
- Hawker, L., Rougier, J., Neal, J., Bates, P., & Archer, L. (2018). The potential of global digital elevation models for flood inundation modelling. *Frontiers in Earth Science*, 6, 233. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00233>
- Lekkas, E.; Diakakis, M.; Mavroulis, S.; Filis, C.; Bantekas, Y.; Gogou, M.; Katsetsiadou, K.-N.; Mavrouli, M.; Giannopoulos, V.; Sarantopoulou, A.; et al. *The Early September 2023 Daniel Storm in Thessaly Region (Central Greece)*. Newsletter of Environmental, Disaster and Crises Management Strategies. 2024. Available online: https://edcm.edu.gr/images/docs/newsletters/Newsletter_30_2024_Daniel_Thessaly.pdf
- Li, T., Hu, Y., Liu, B., Jiang, L., Wang, H. and Shen, X. (2023). *Co-registration and residual correction of digital elevation models: a comparative study*, The Cryosphere, 17, 5299–5316, <https://doi.org/10.5194/tc-17-5299-2023>.
- Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). Digital terrain modeling: Principles and methodology. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203357132>
- Lindsay, J. B. (2016). Efficient hybrid breaching–filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models. *Hydrological Processes*, 30(6), 846–857. <https://doi.org/10.1002/hyp.10648>
- Md Ali, A., Solomatine, D., Di Baldassarre, G., & Werner, M. (2015). Assessing the impact of different sources of topographic data on 1D hydraulic modelling of floods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 631–643. <https://doi.org/10.5194/hess-19-631-2015>
- Mockus, V. (1972). *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology*. Soil Conservation Service, USDA.

Nuth, C., & Kääb, A. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, 5(1), 271–290. <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>

Polidori, L., & El Hage, M. (2020). Digital elevation model quality assessment methods: A critical review. *Remote Sensing*, 12(21), 3522. <https://doi.org/10.3390/rs12213522>

Shaw, E. M. (1984). *Hydrology in Practice*. Van Nostrand Reinhold (UK) Co. Ltd., U.K.

UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. Ανακτήθηκε από <https://www.preventionweb.net/sendai-framework/sendai-framework-for-disaster-risk-reduction>

USACE (U.S. Army Corps of Engineers), Hydrologic Engineering Center. (2023). *HEC-RAS river analysis system: Hydraulic reference manual* (Version 6.3). Davis, CA: USACE. Ανακτήθηκε από <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation>

Walsh, L. S. (2009). *Topographic signatures in the Himalaya: A geospatial survey of the interaction between tectonics and erosion in the Modi Khola valley, central Nepal* [Master's thesis, University of Maryland]

Wanielista, M., Kerten, R. and Eaglin, R.(1997). *Hydrology: Water Quantity and Quality Control*.J. Wiley & Sons, Inc., N.Y.

Xafoulis, N., Kontos, Y., Farsirotou, E., Kotsopoulos, S., Perifanos, K., Alamanis, N., Dedousis, D., & Katsifarakis, K. (2023). Evaluation of various resolution DEMs in flood risk assessment and practical rules for flood mapping in data-scarce geospatial areas: A case study in Thessaly, Greece. *Hydrology*, 10(4), 91. <https://doi.org/10.3390/hydrology10040091>

Ηλεκτρονικές Πηγές

Ιστότοπος Ηλεκτρονικού Τύπου <https://www.onlarissa.gr/> (Ανακτήθηκε στις 28/08/2025)

Ιστότοπος Ηλεκτρονικών Υπηρεσιών της e-Κτηματολόγιο
https://www.ktimanet.gr/CitizenWebApp/Home_Page.aspx (Ανακτήθηκε στις
28/08/2025)

Ιστότοπος της Ελληνικής Κυβέρνησης, σχεδιασμένος από το Ινστιτούτο
Πληροφοριακών Συστημάτων <http://geodata.gov.gr/> (Ανακτήθηκε στις 28/08/2025)

Ιστότοπος της εταιρείας Esri. *Flow Direction (Spatial Analyst)*. ArcGIS Pro Tool
Reference. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/flow-direction.htm> (Ανακτήθηκε στις 28/08/2025)

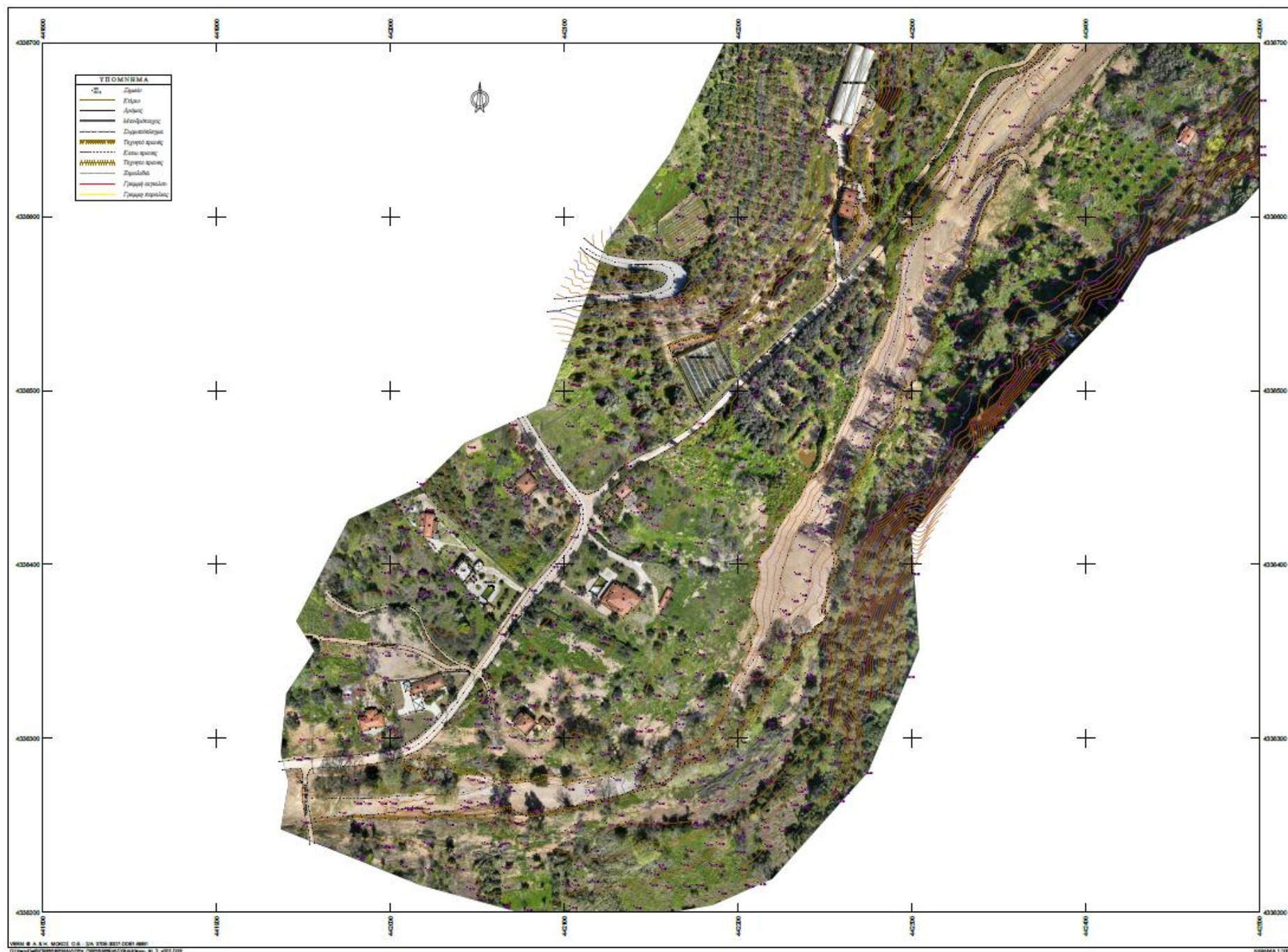
Ιστότοπος της εταιρείας Esri. *Flow Accumulation (Spatial Analyst)*. ArcGIS Pro Tool
Reference. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/flow-accumulation.htm> (Ανακτήθηκε στις 28/08/2025)

Ιστότοπος του Μηχανικού Σώματος Στρατού των Ηνωμένων Πολιτειών, Κέντρο
Υδρολογικής Μηχανικής <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
(Ανακτήθηκε στις 28/08/2025)

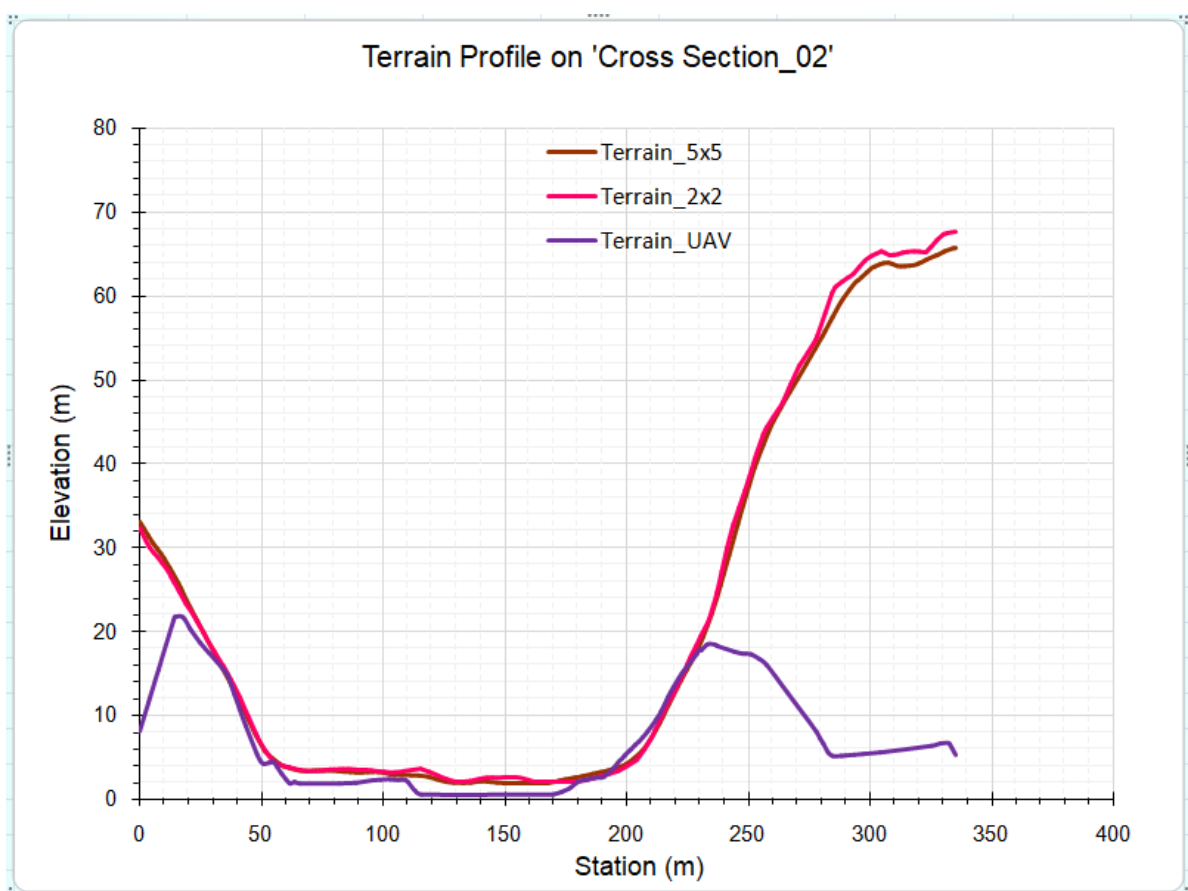
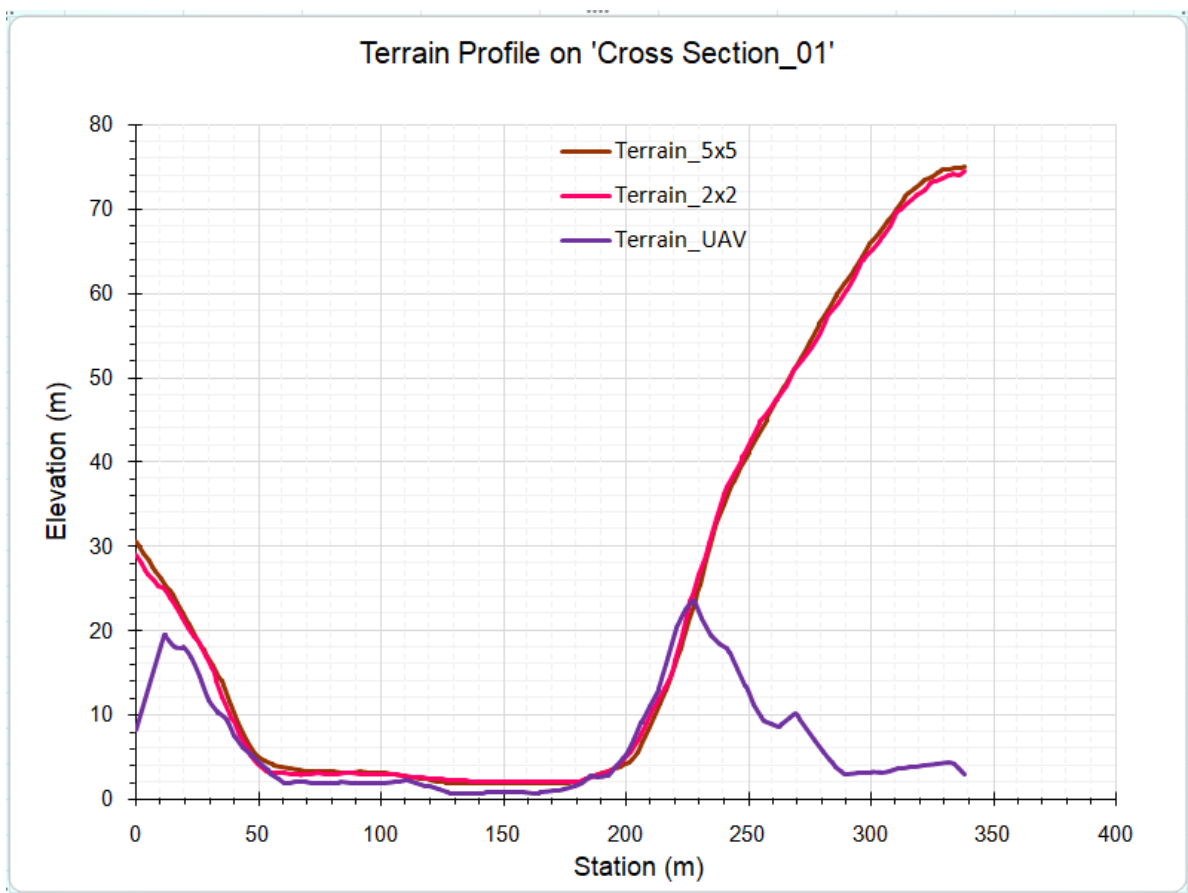
Ιστότοπος του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας Ελλάδας, Σχέδια
Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας <https://floods.ypeka.gr/> (Ανακτήθηκε στις
28/08/2025)

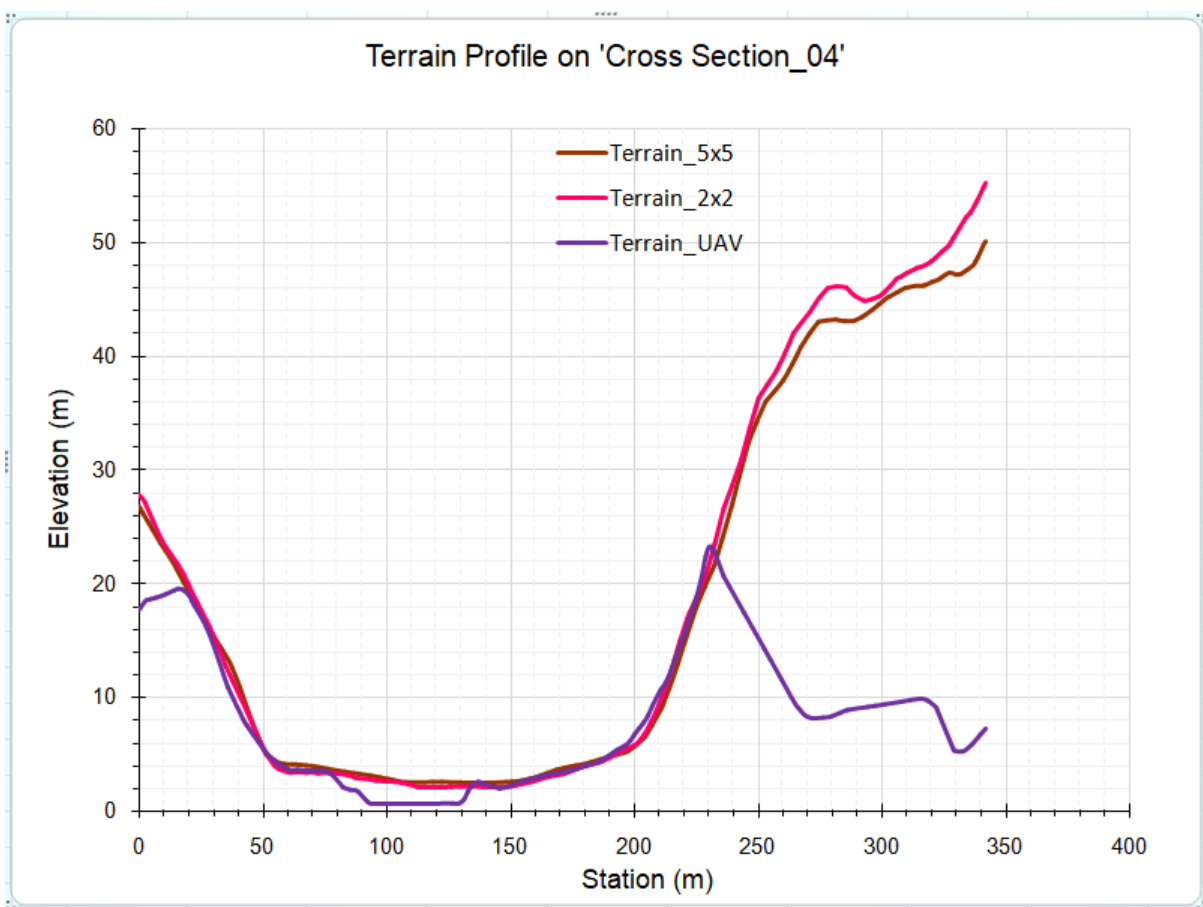
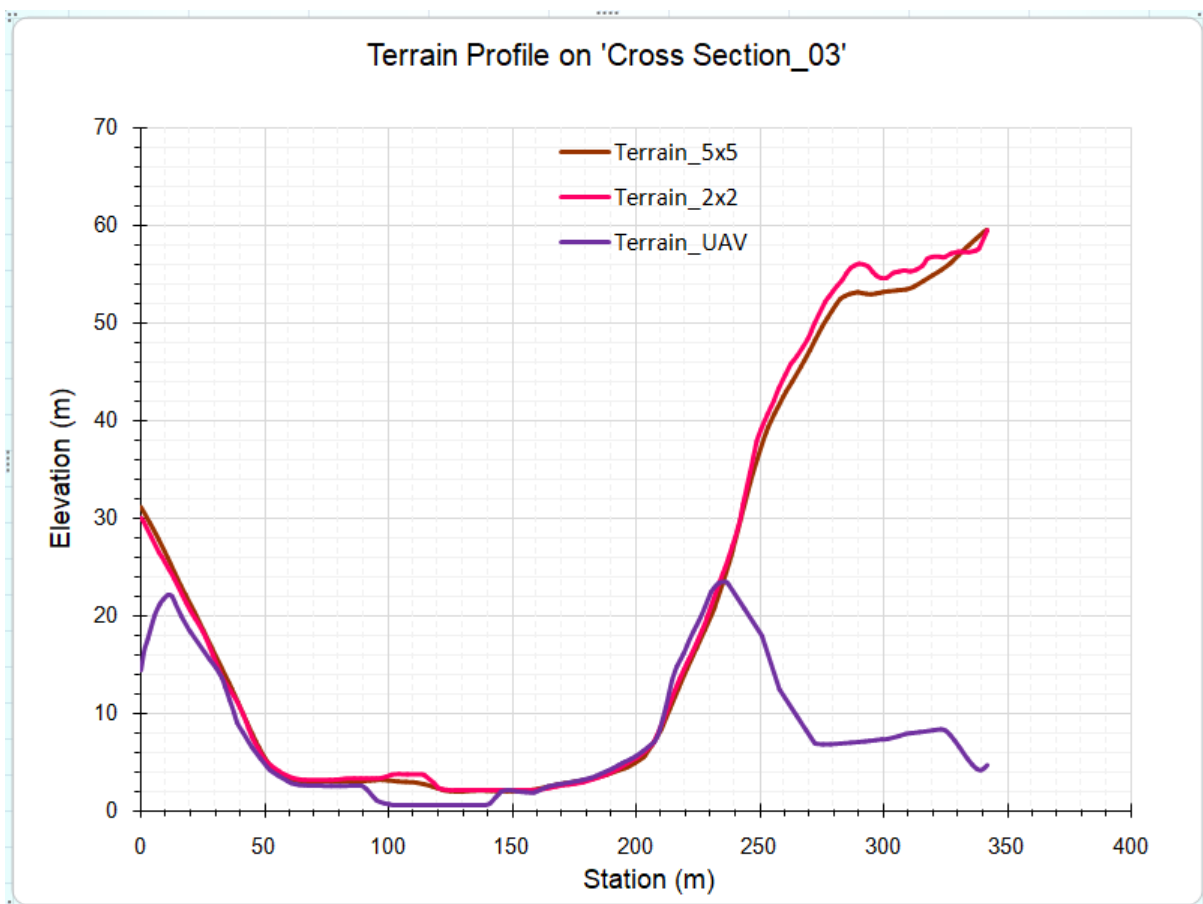
Ιστότοπος του U.S National Science Foundation's National Ecological Observatory
Network (NEON) <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/chm-dsm-dtm> (Ανακτήθηκε στις 28/08/2025)

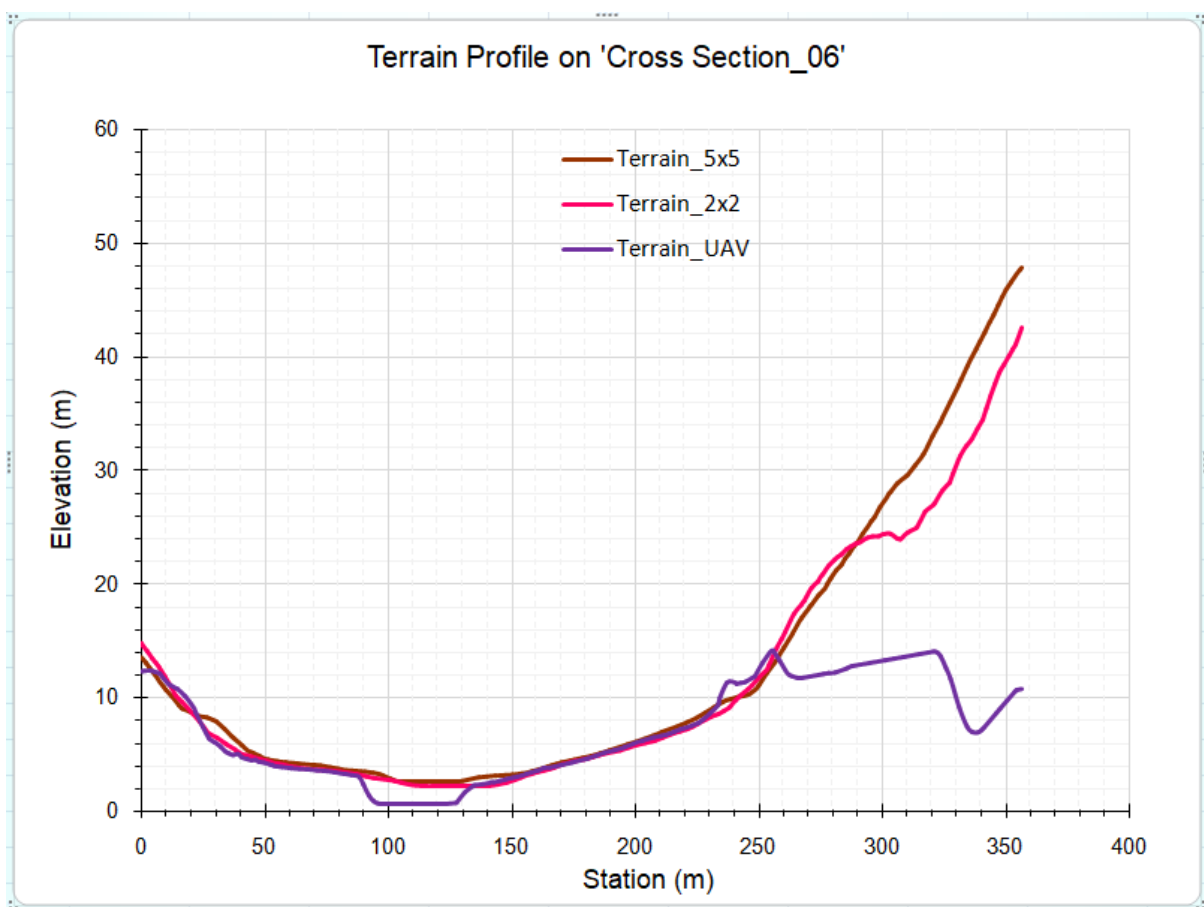
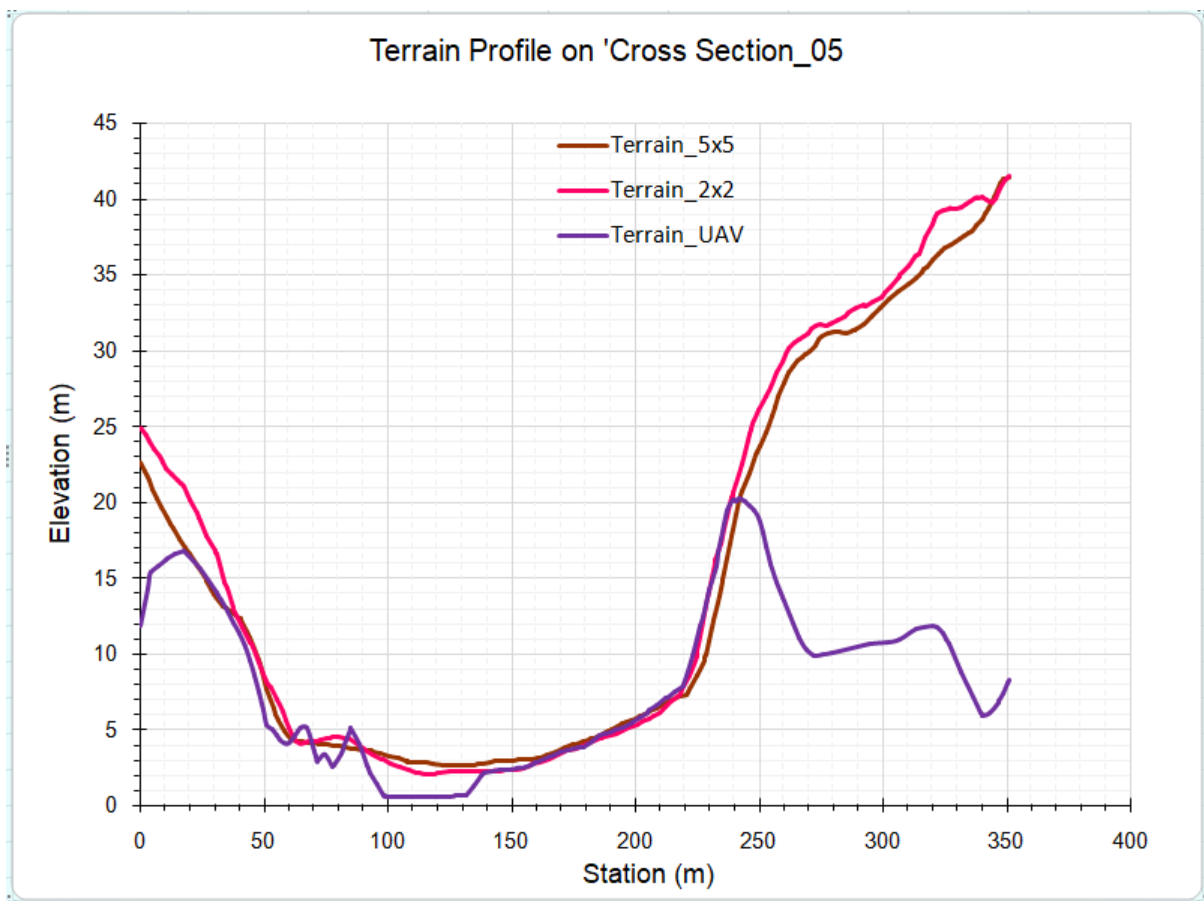
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι – Ορθοφωτοχάρτες

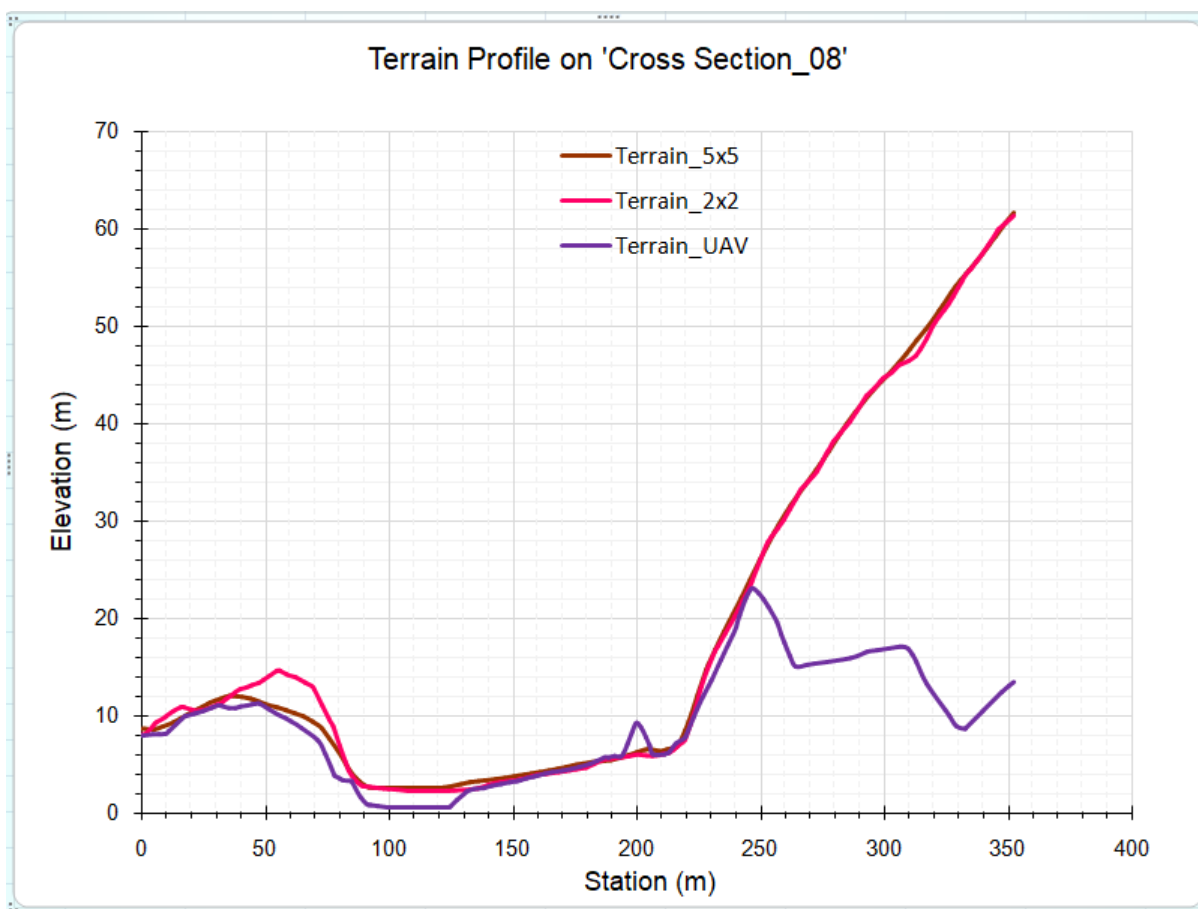
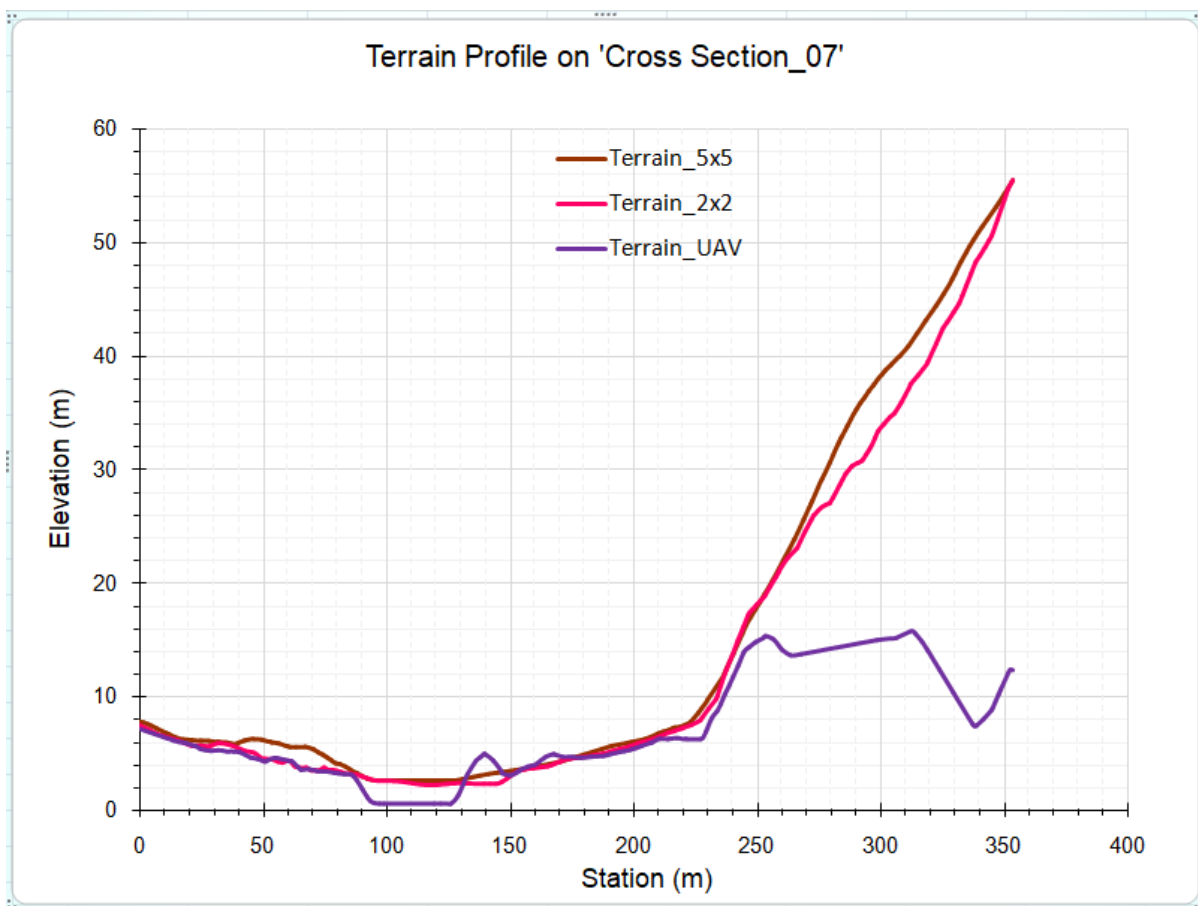


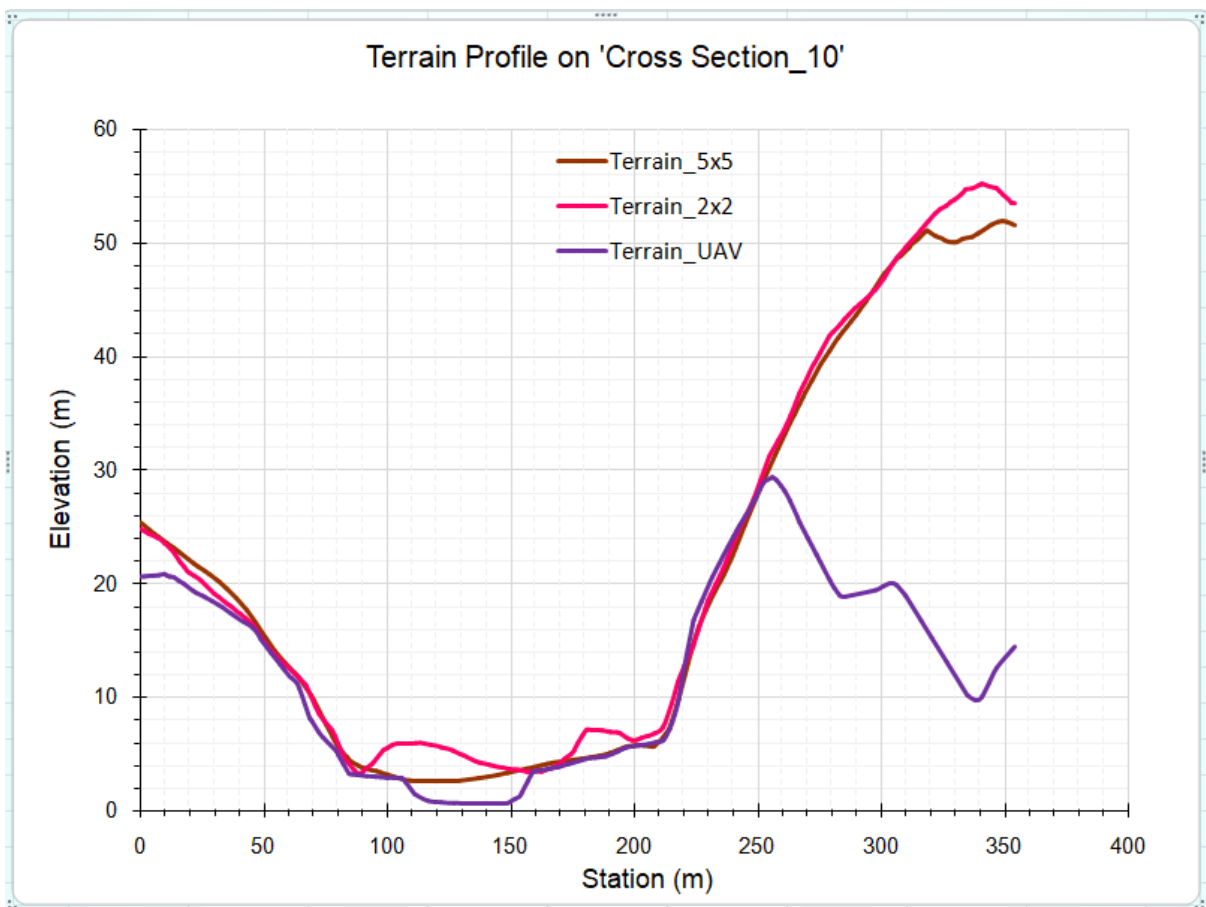
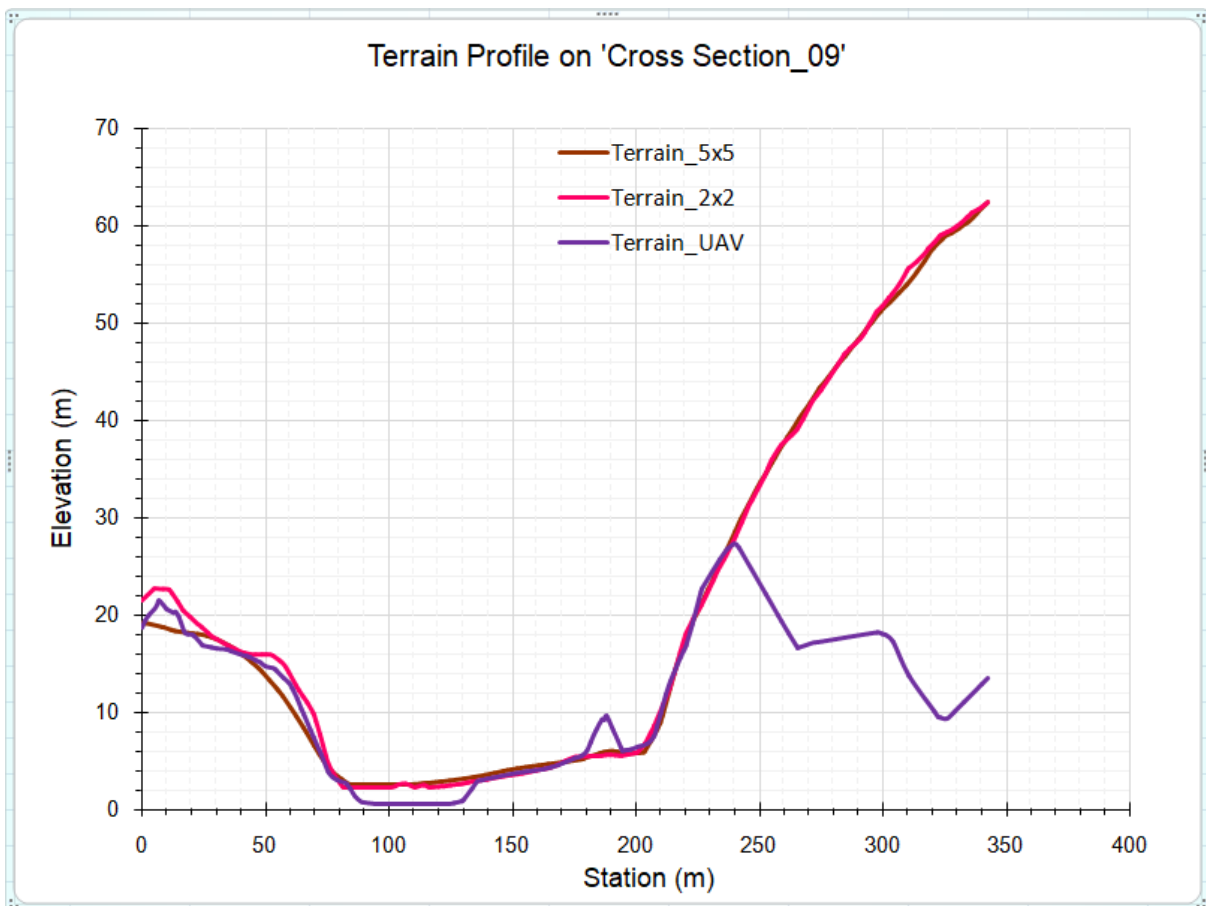
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II – Διαγράμματα profile lines

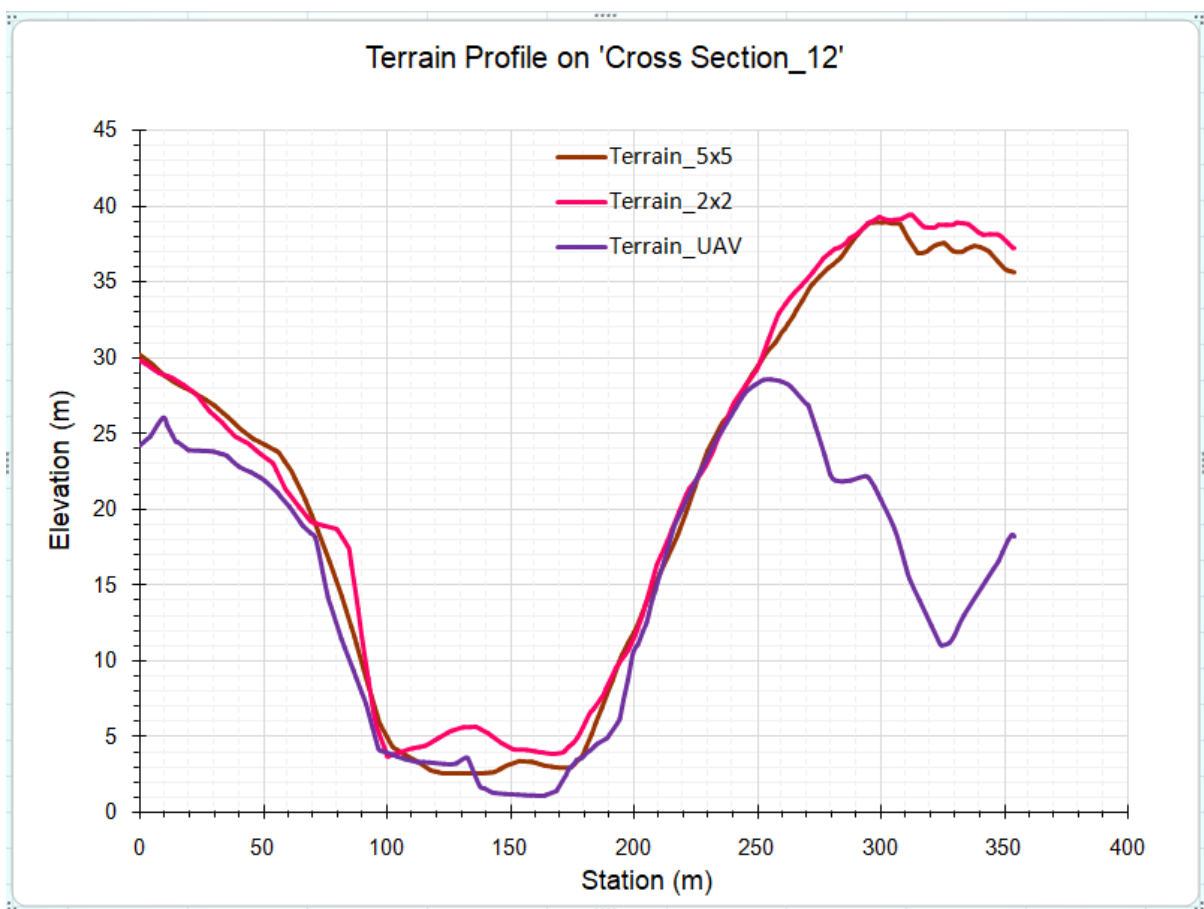
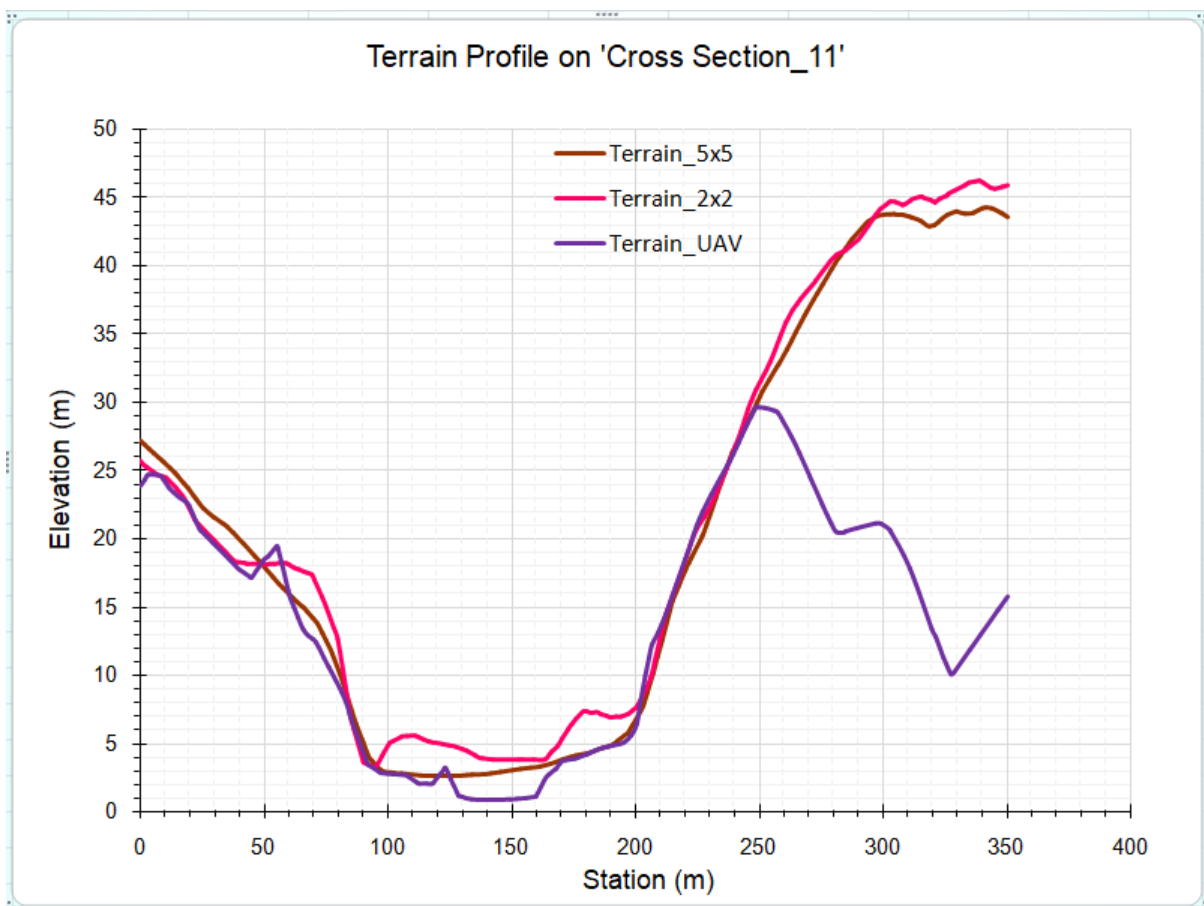


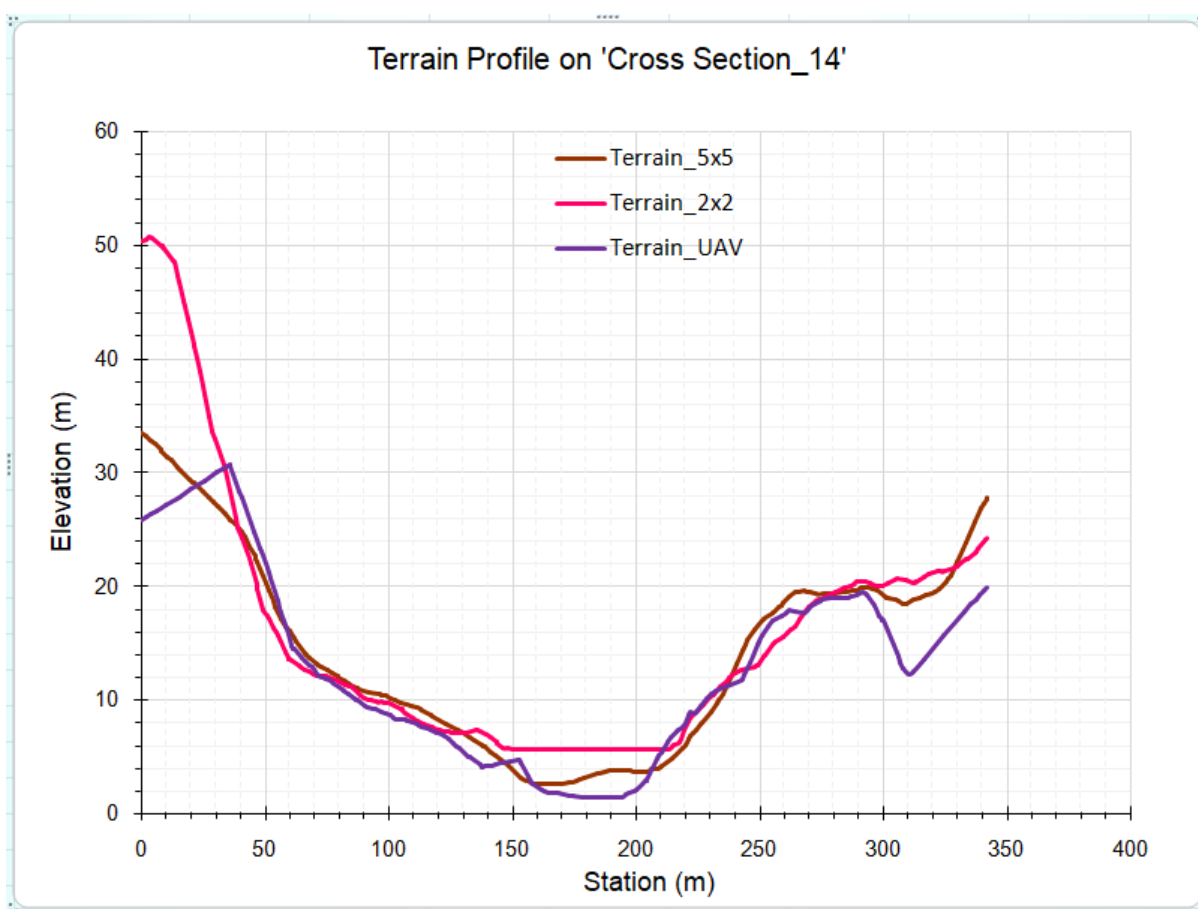
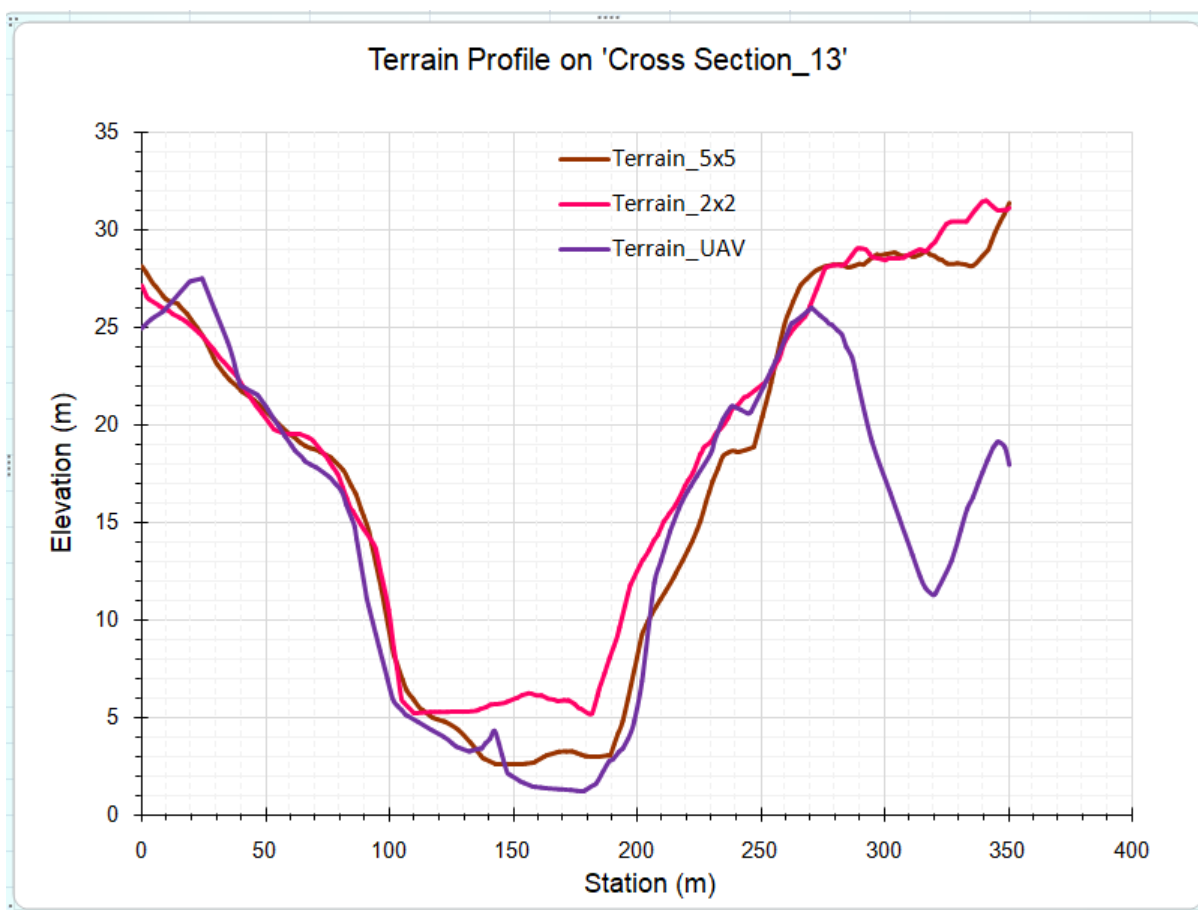


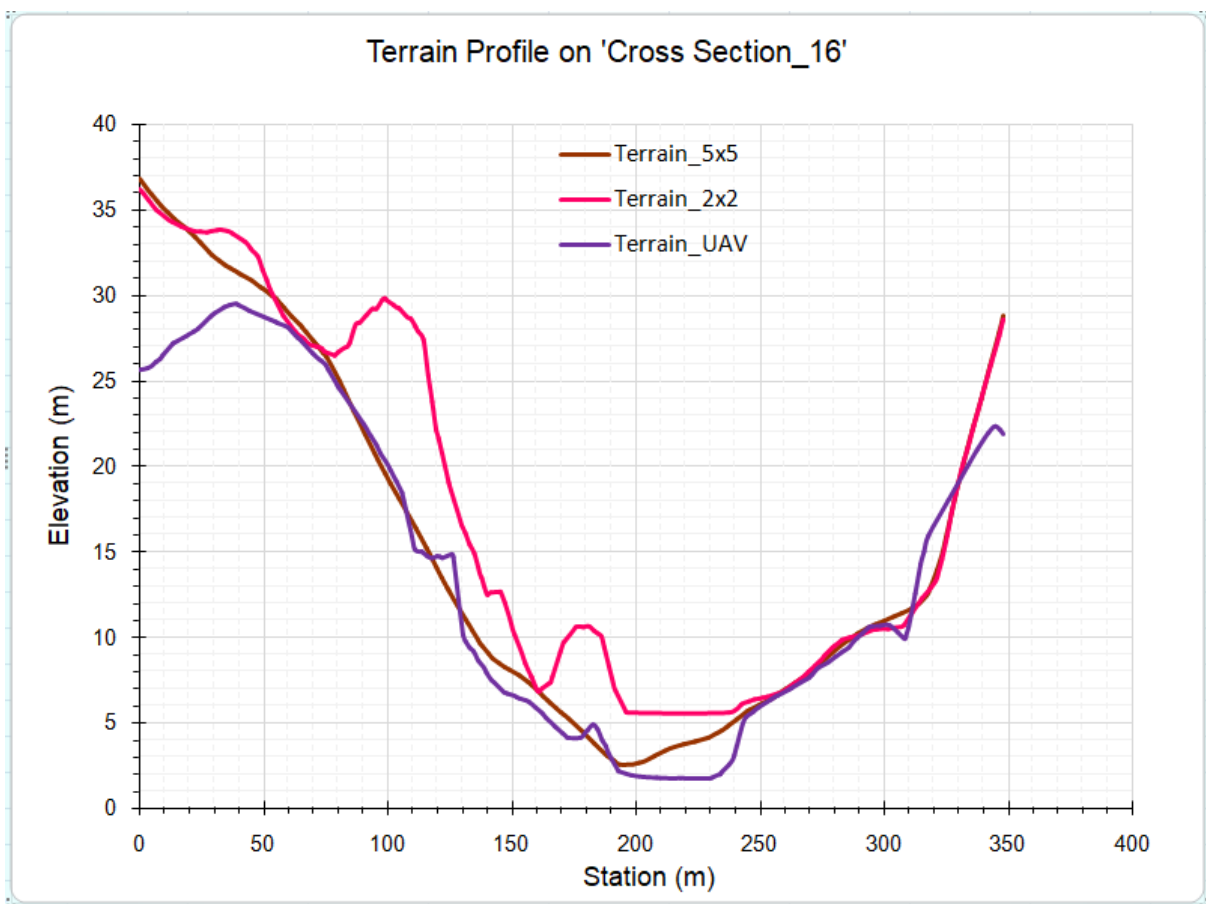
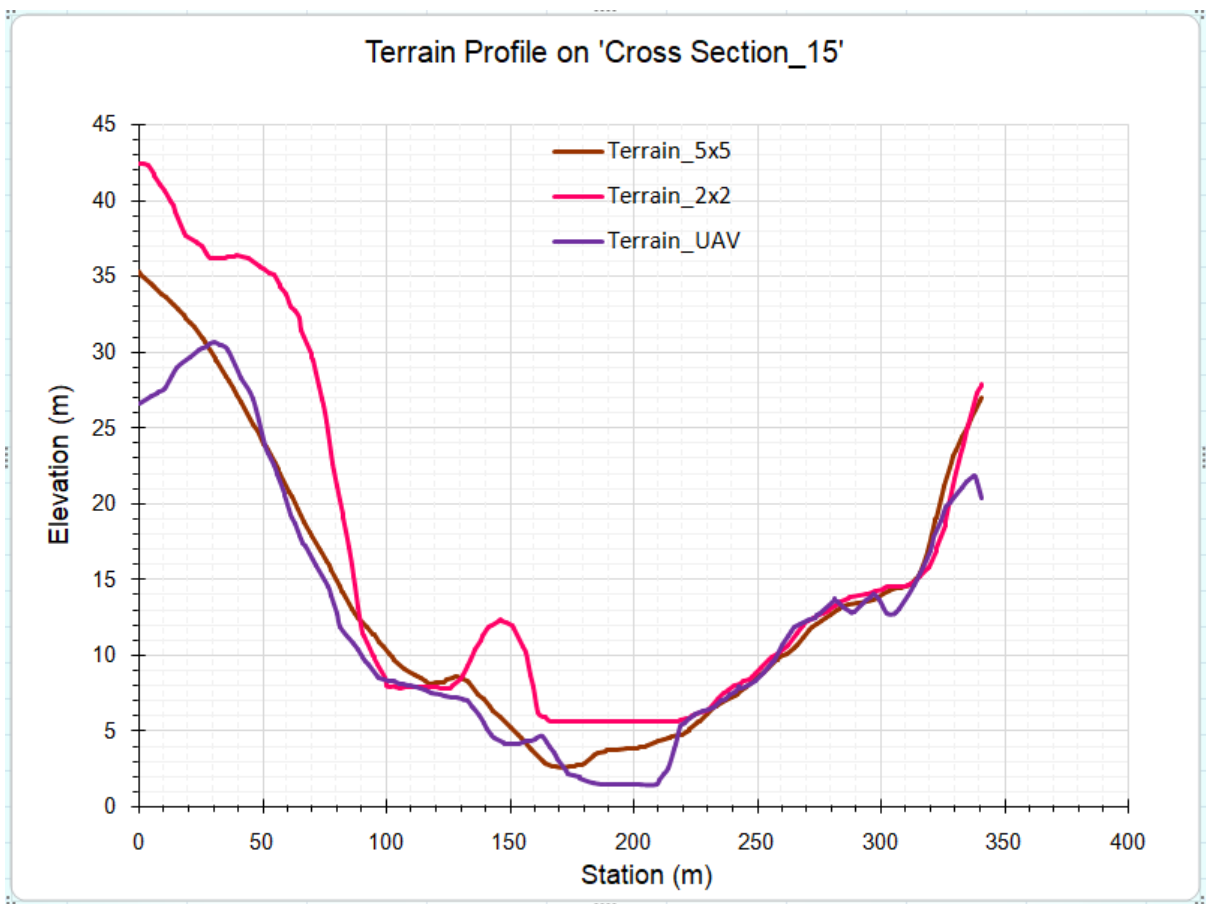


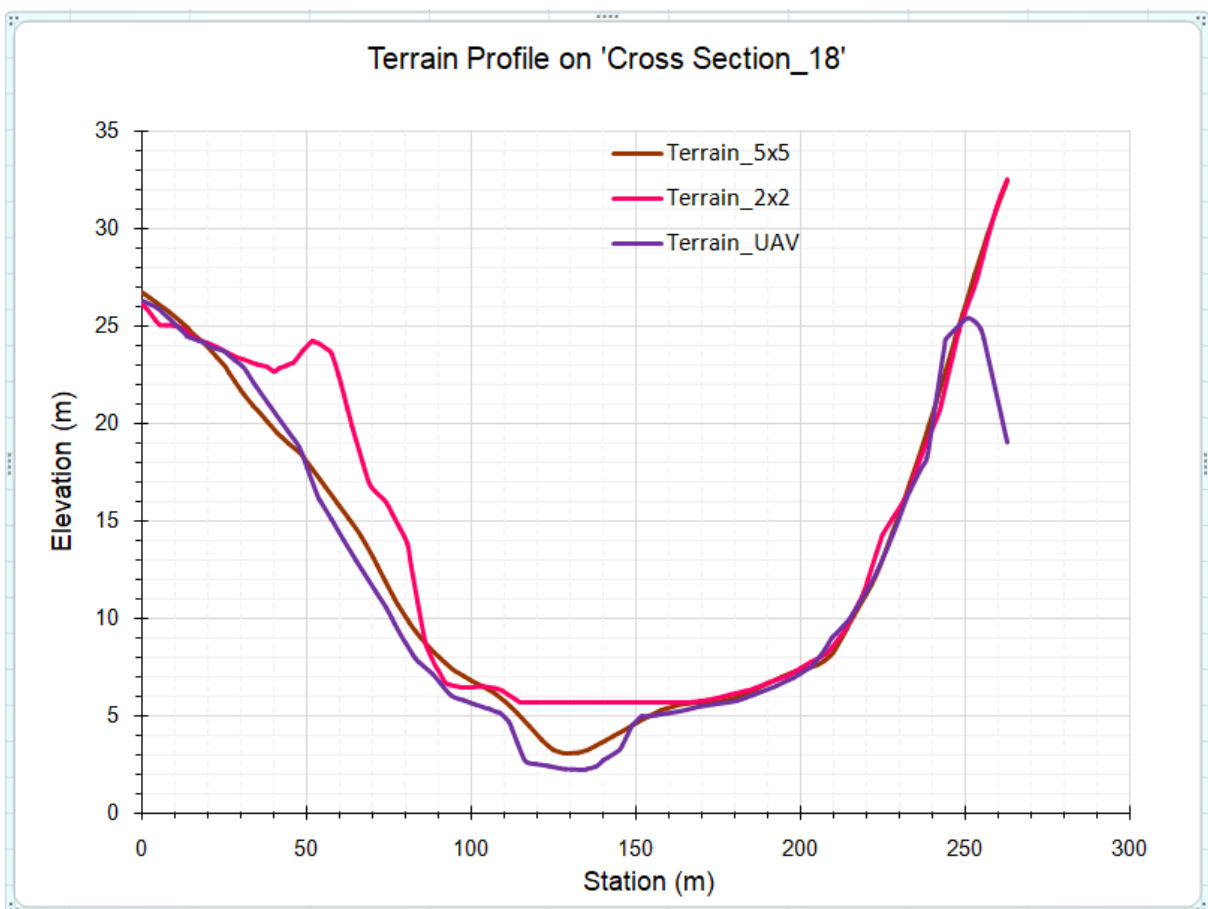
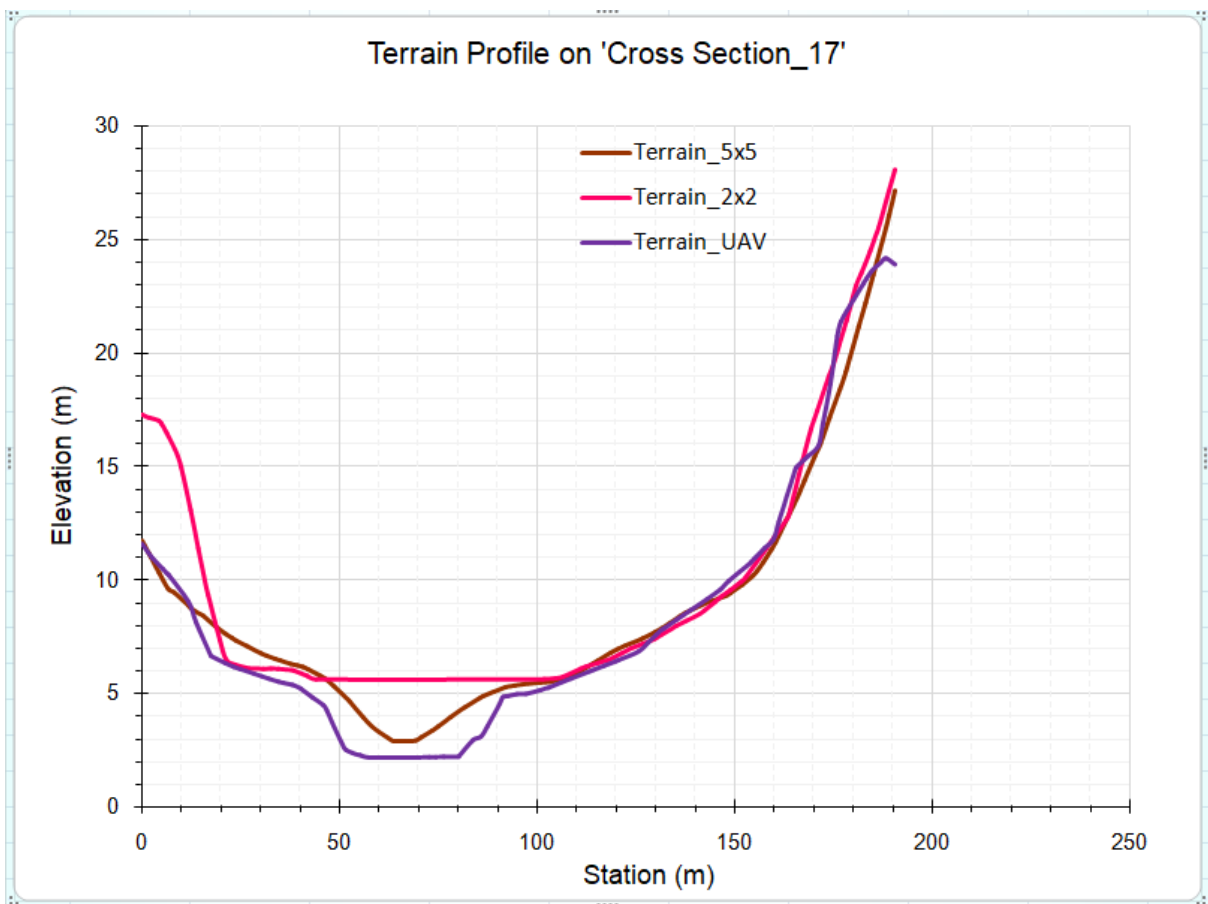


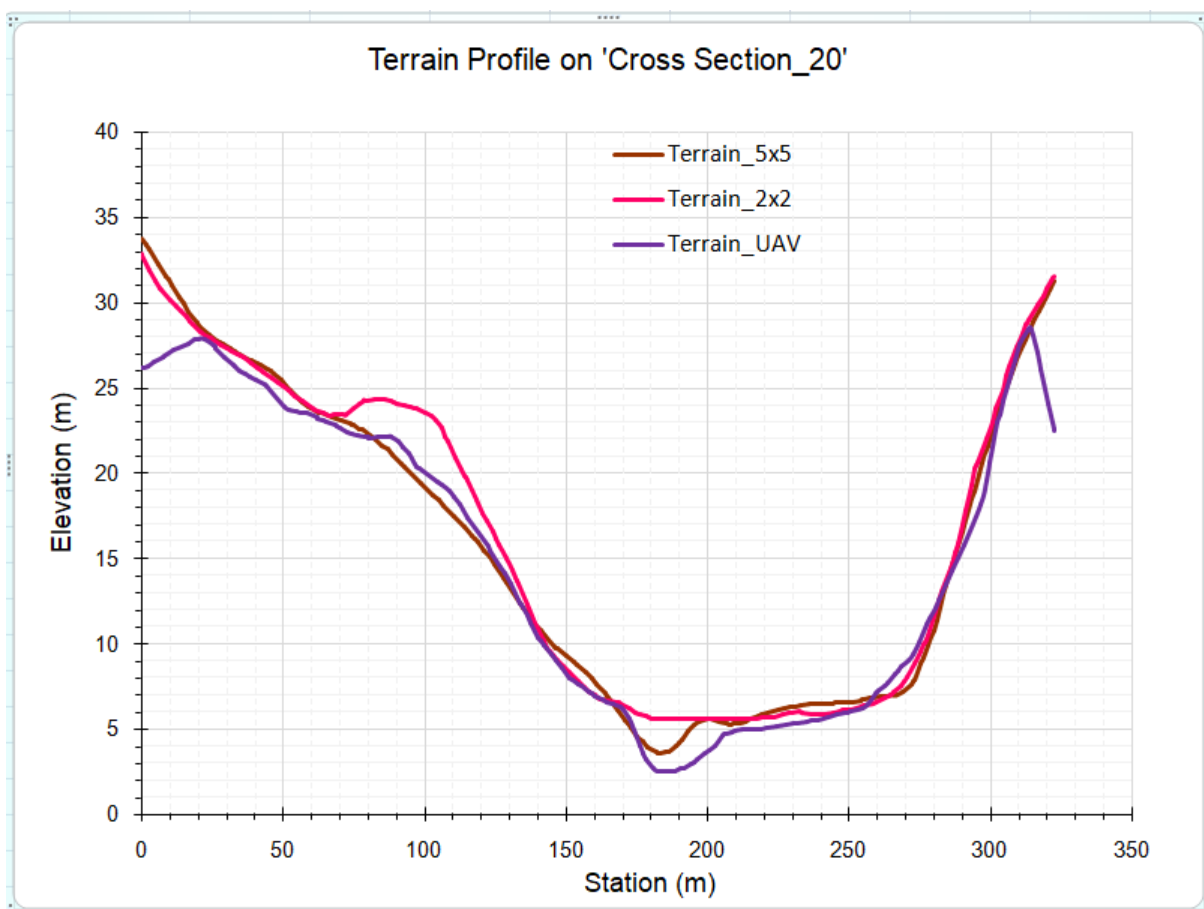
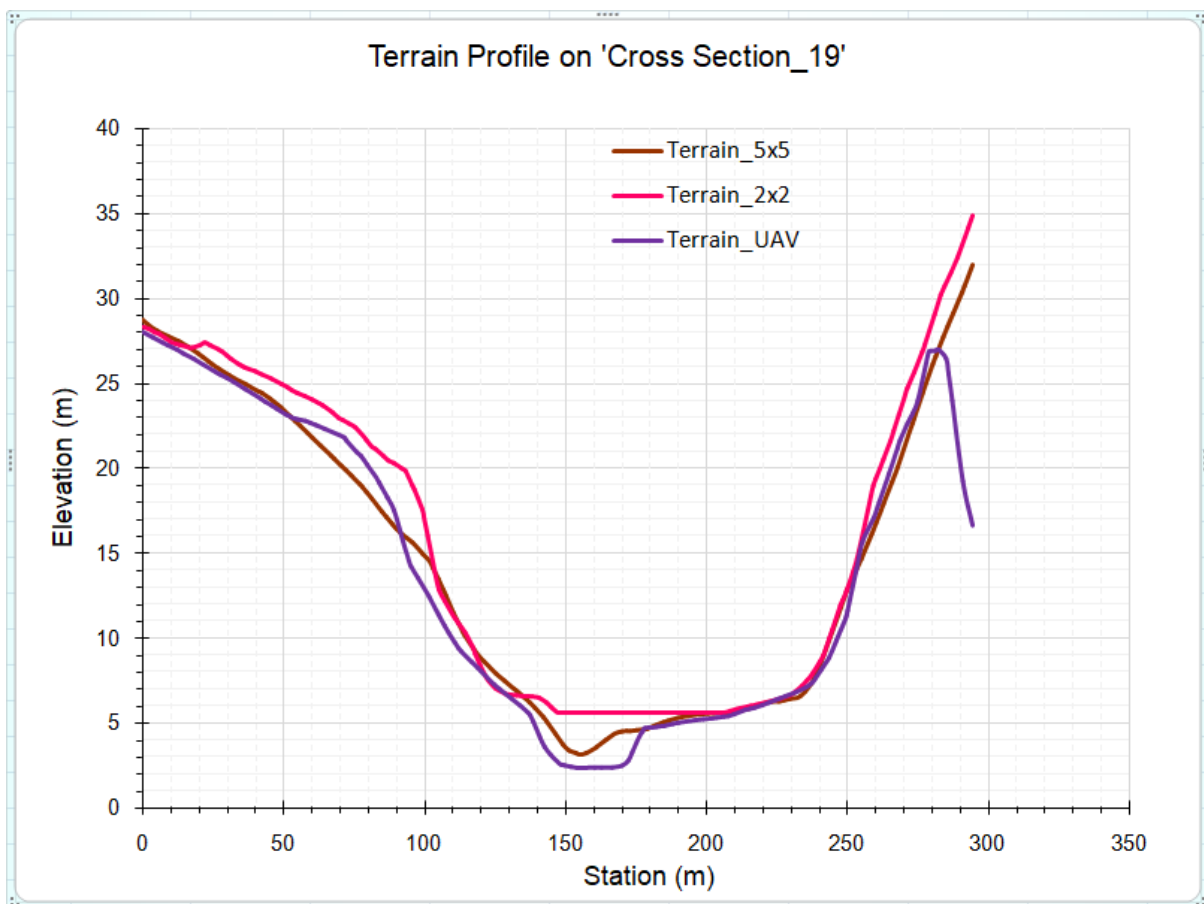


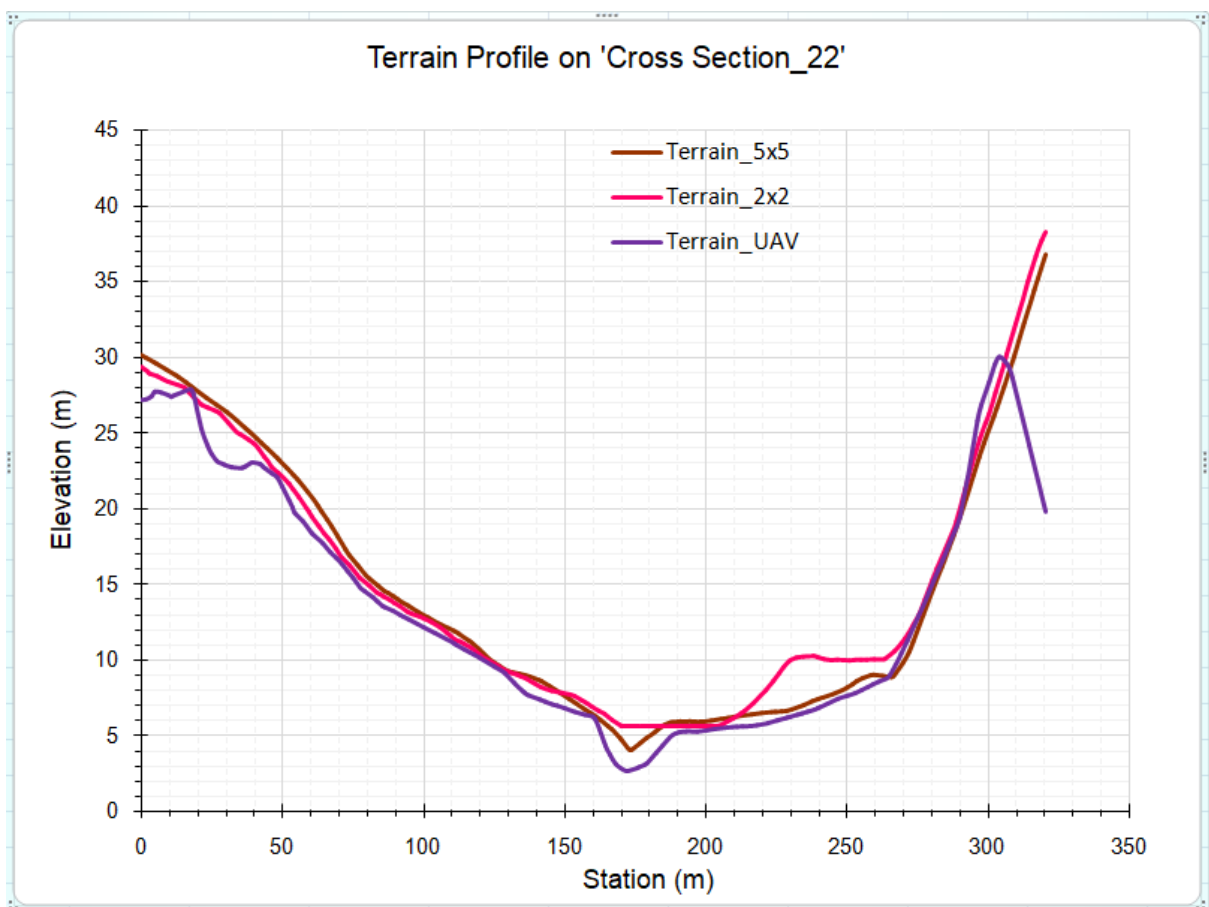
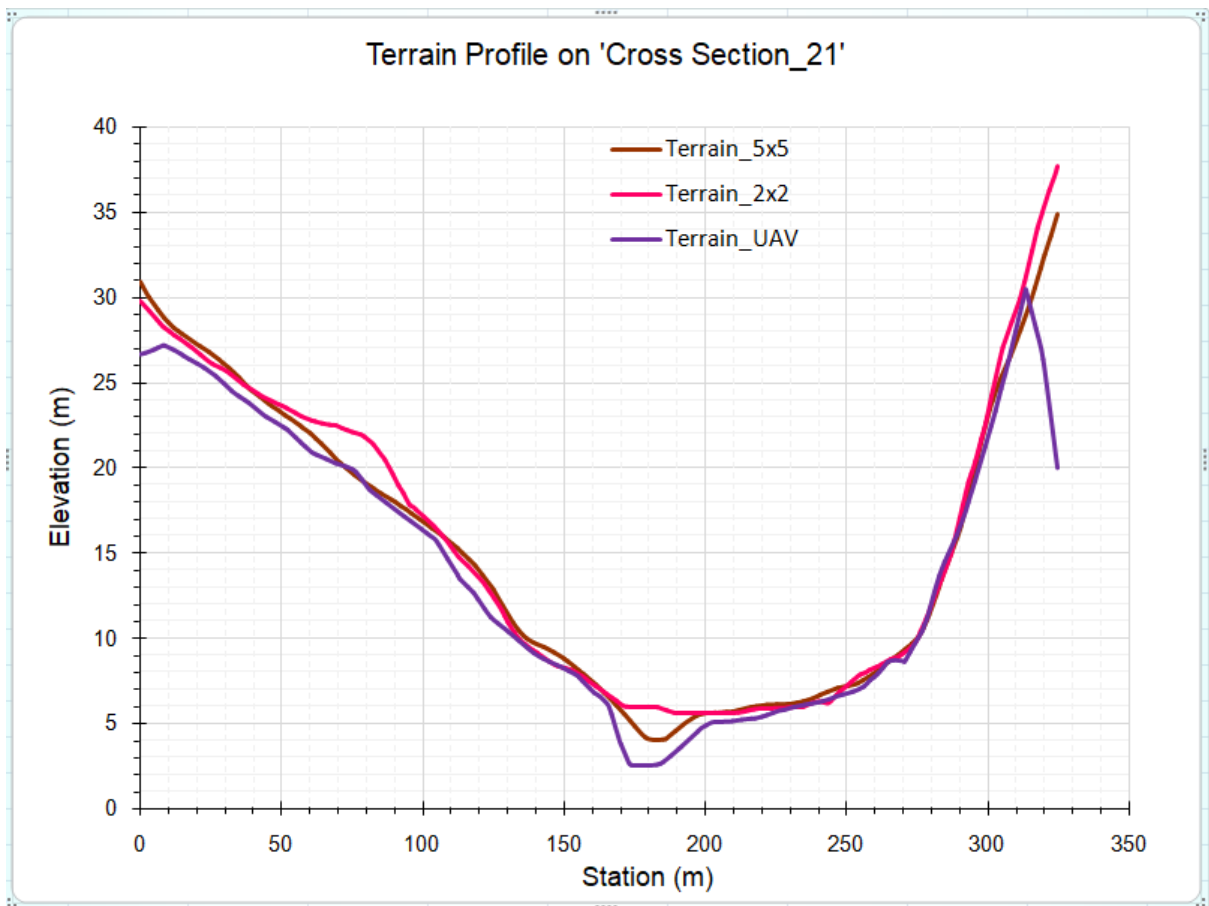


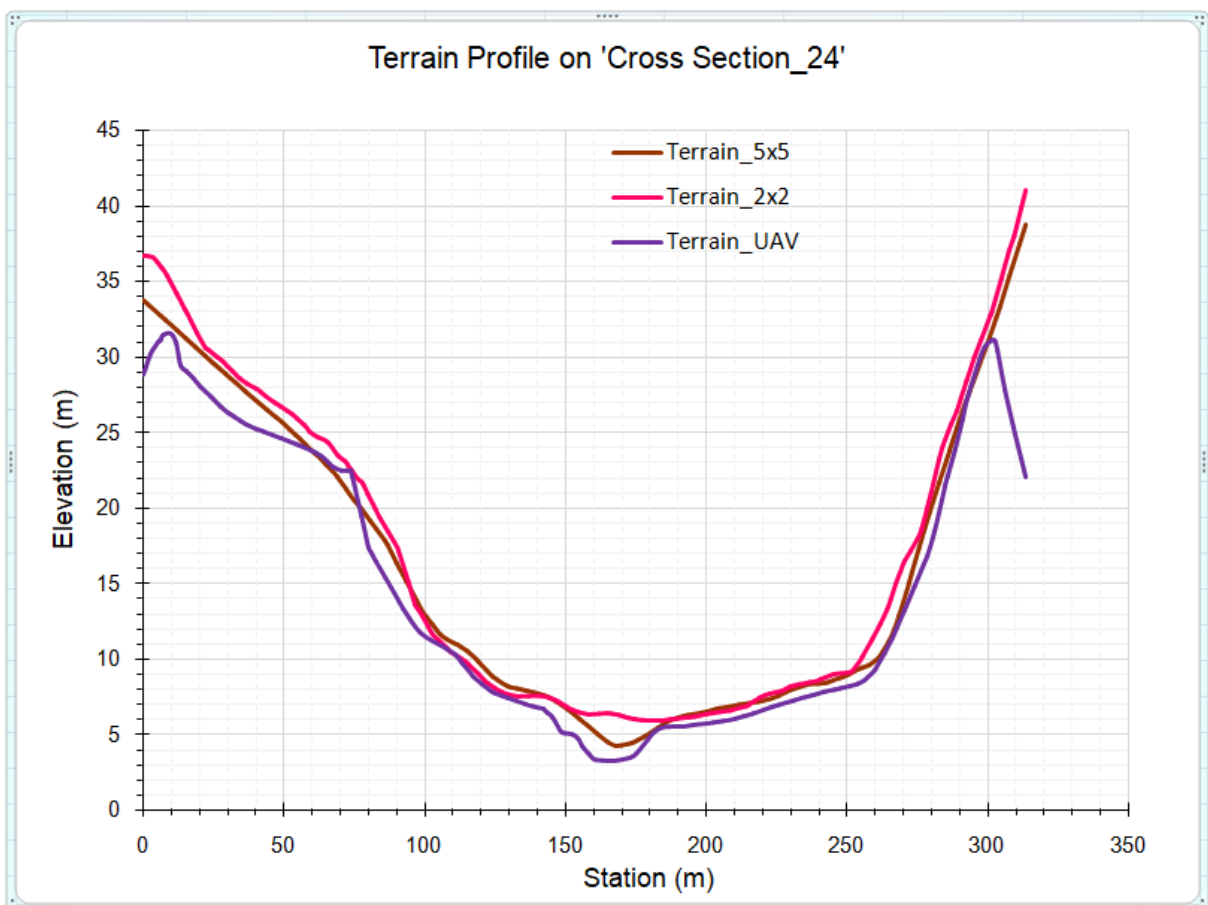
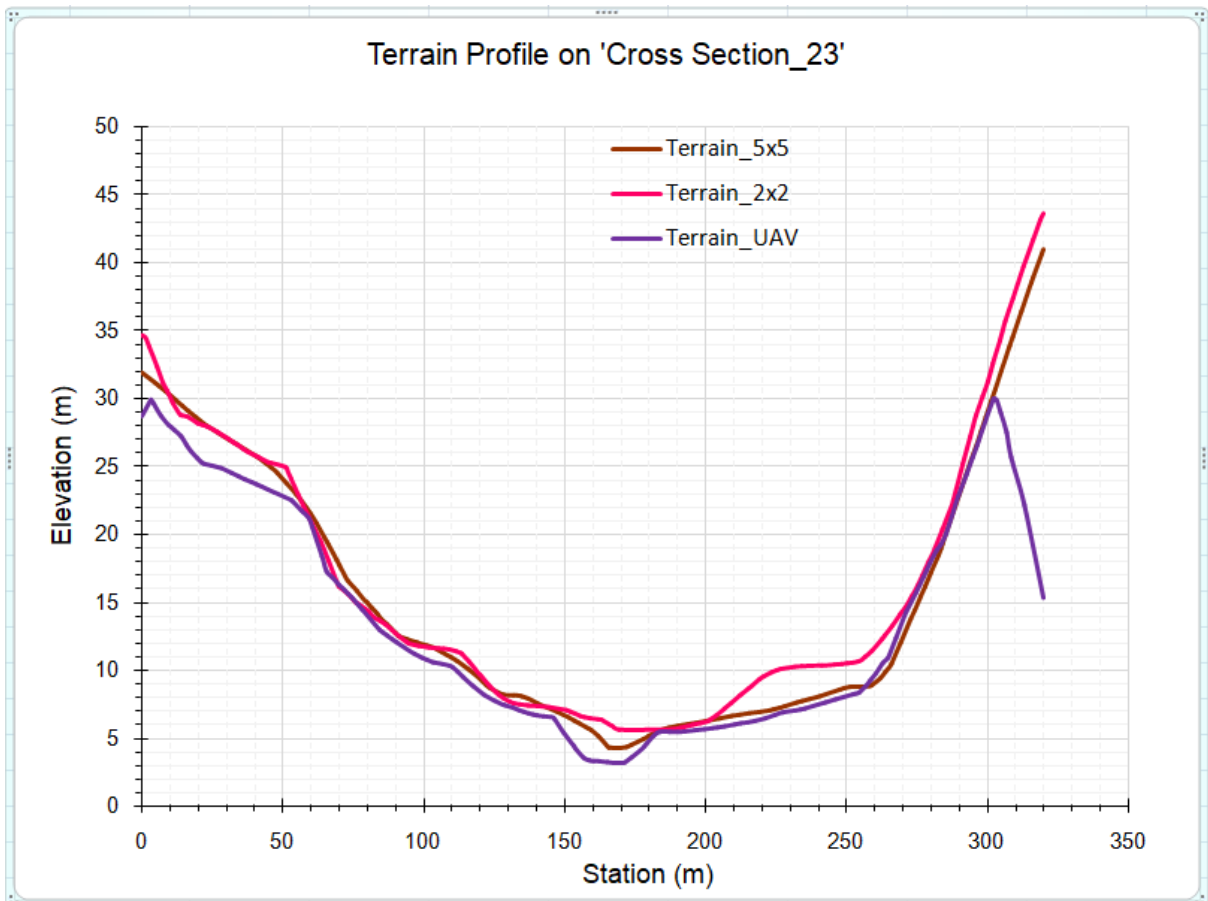


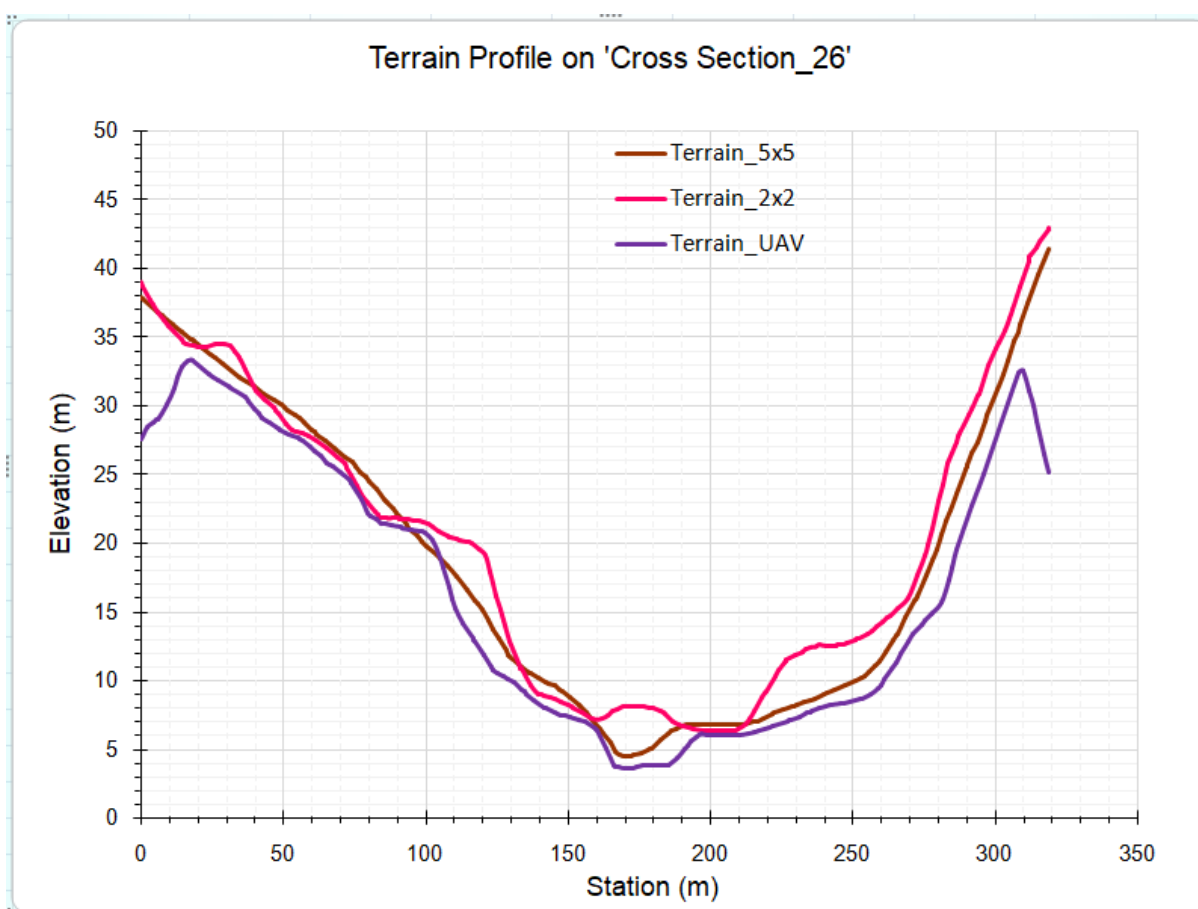
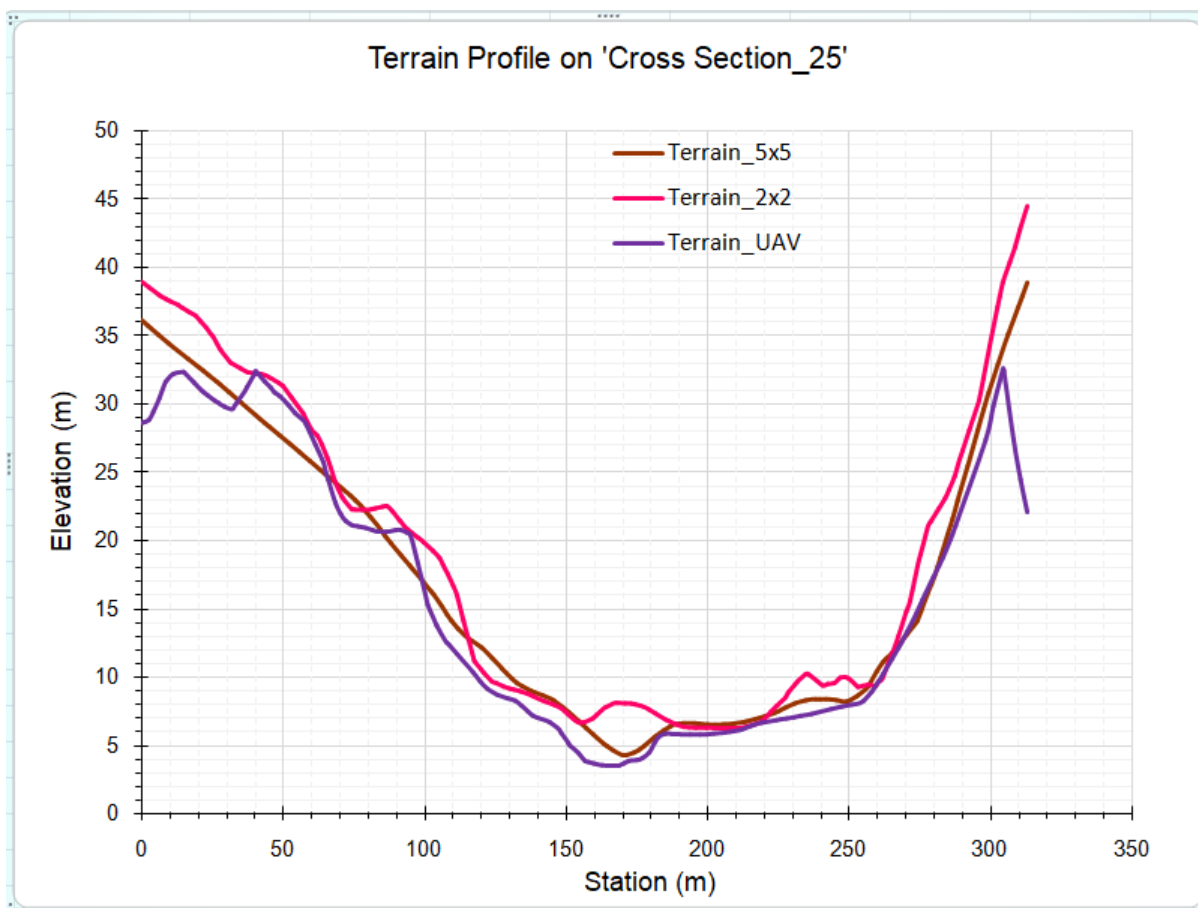


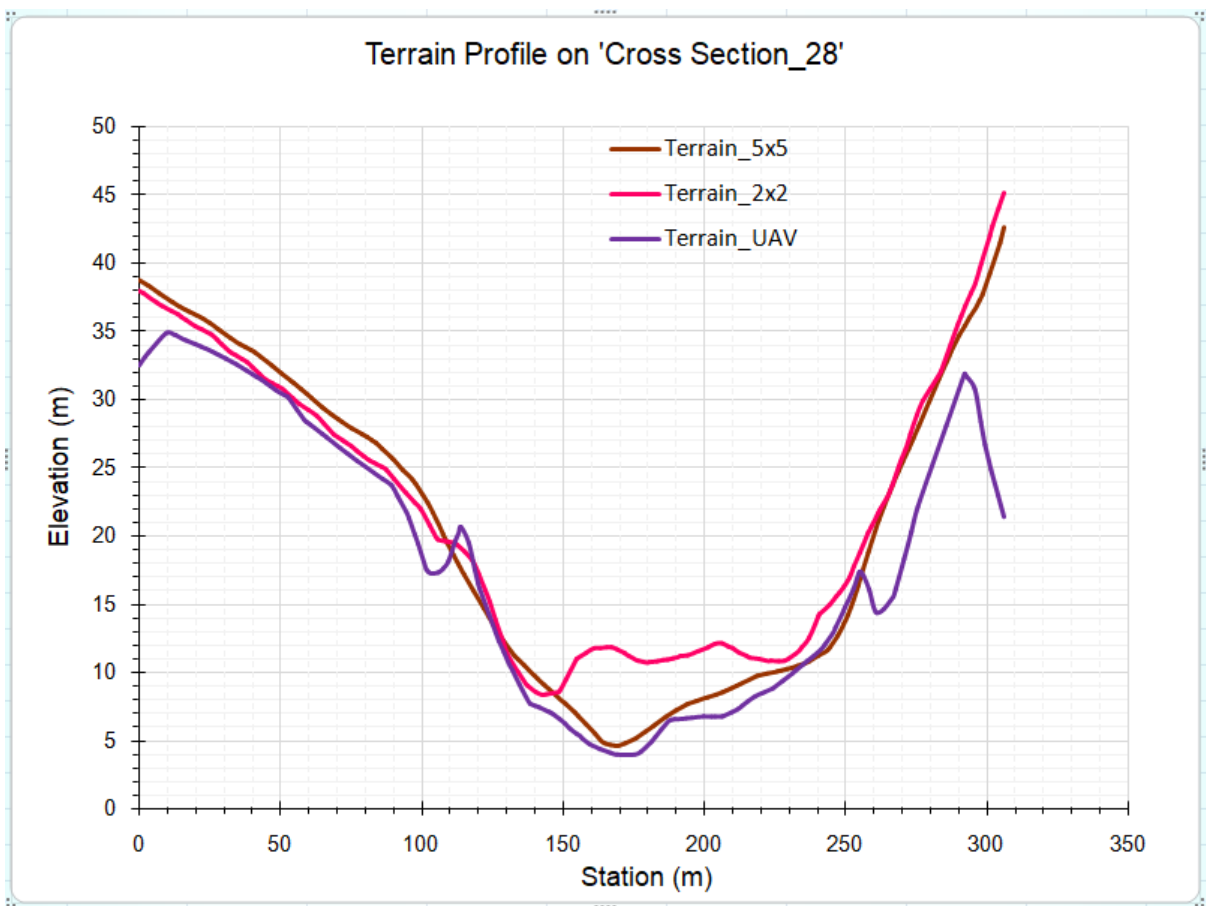
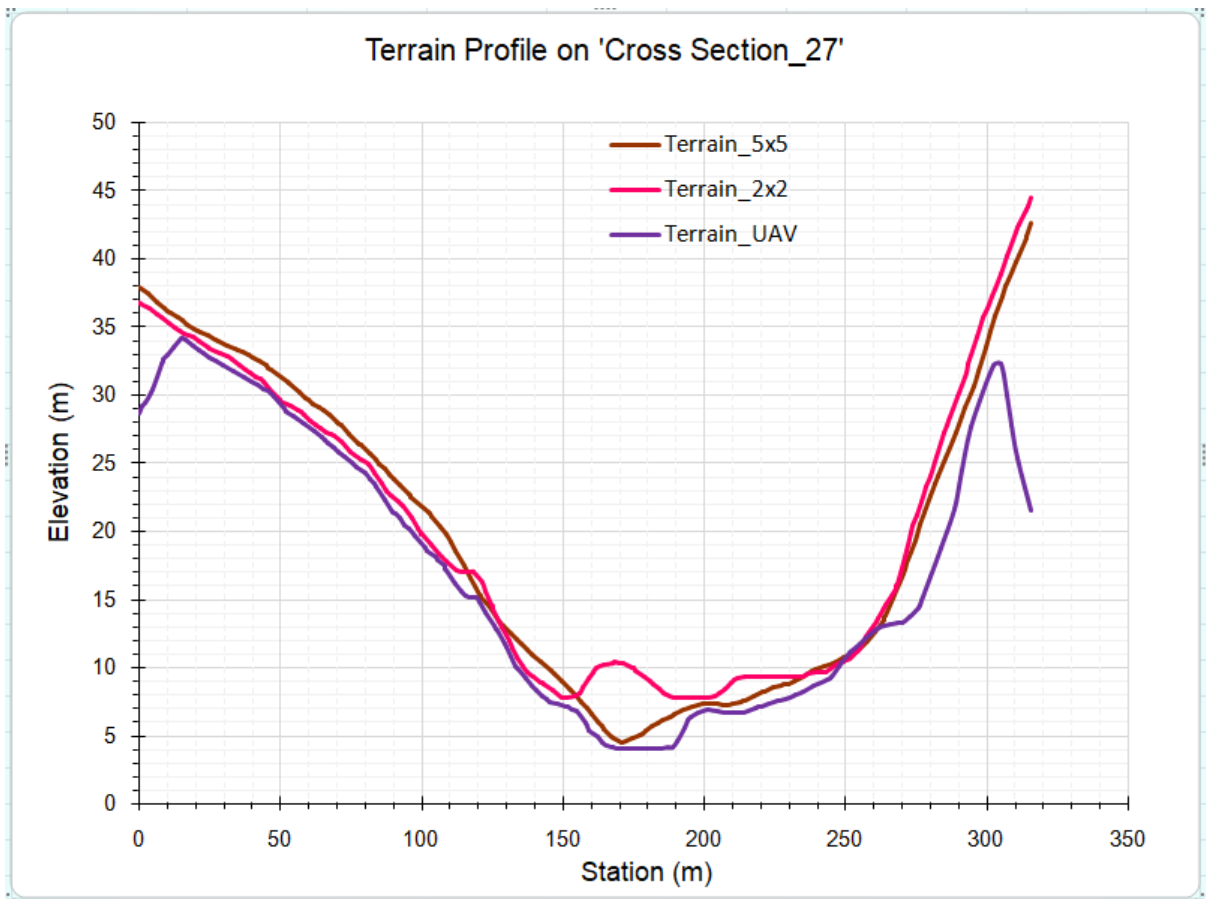


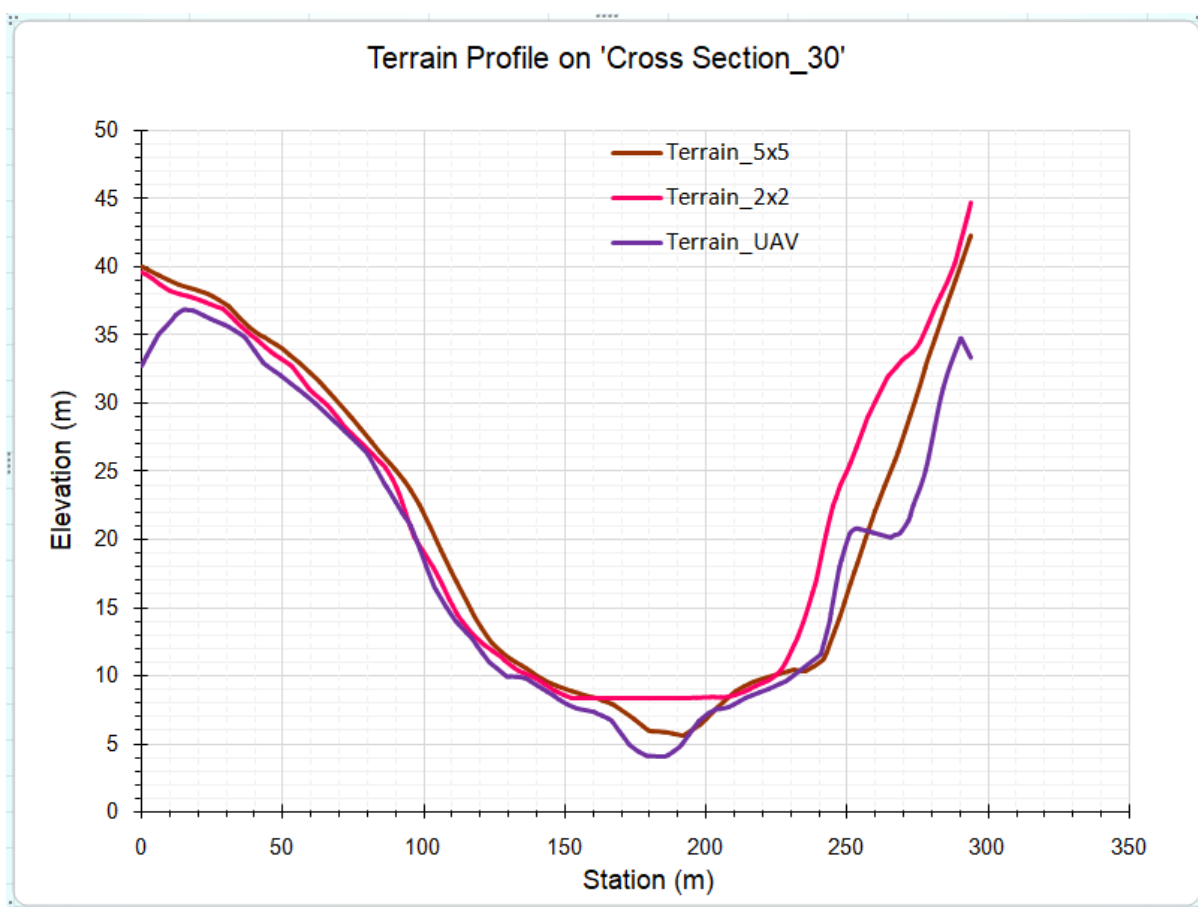
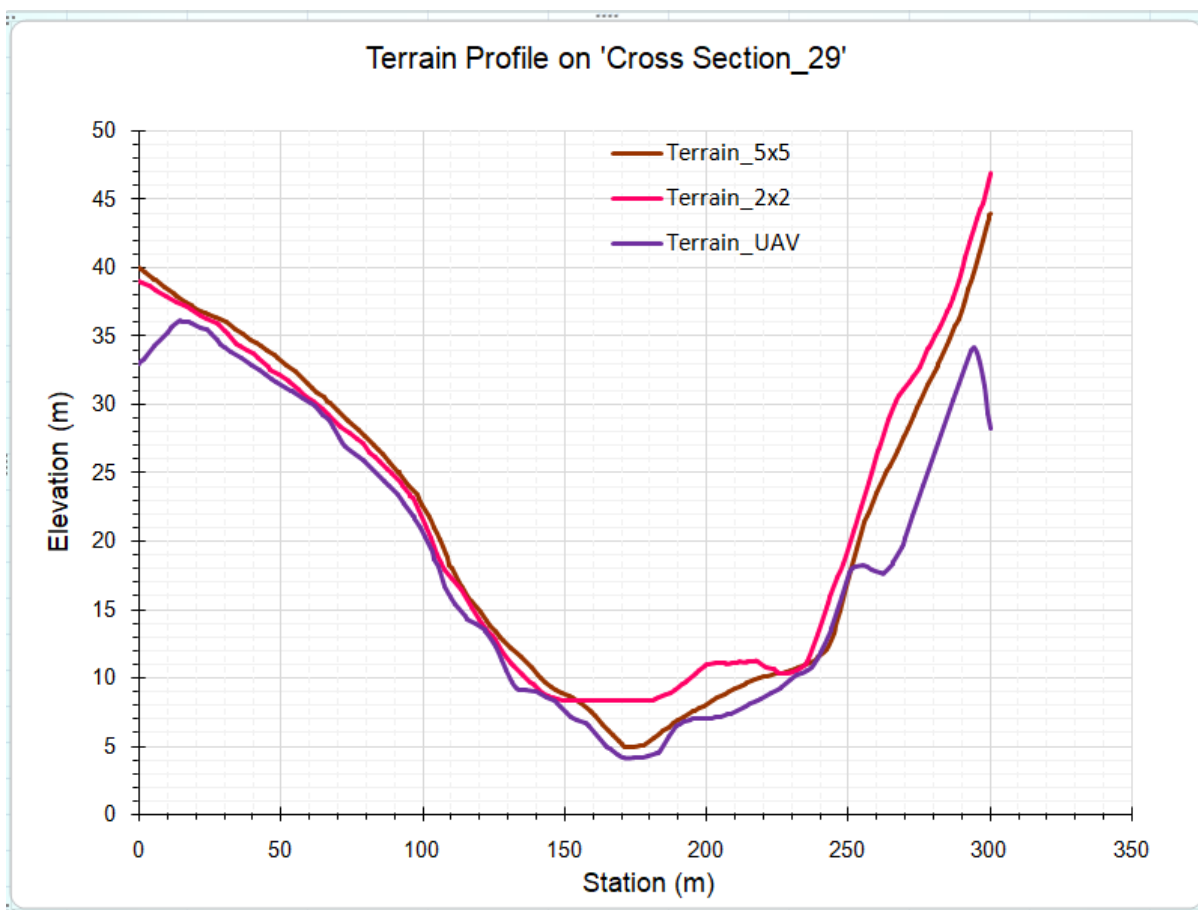


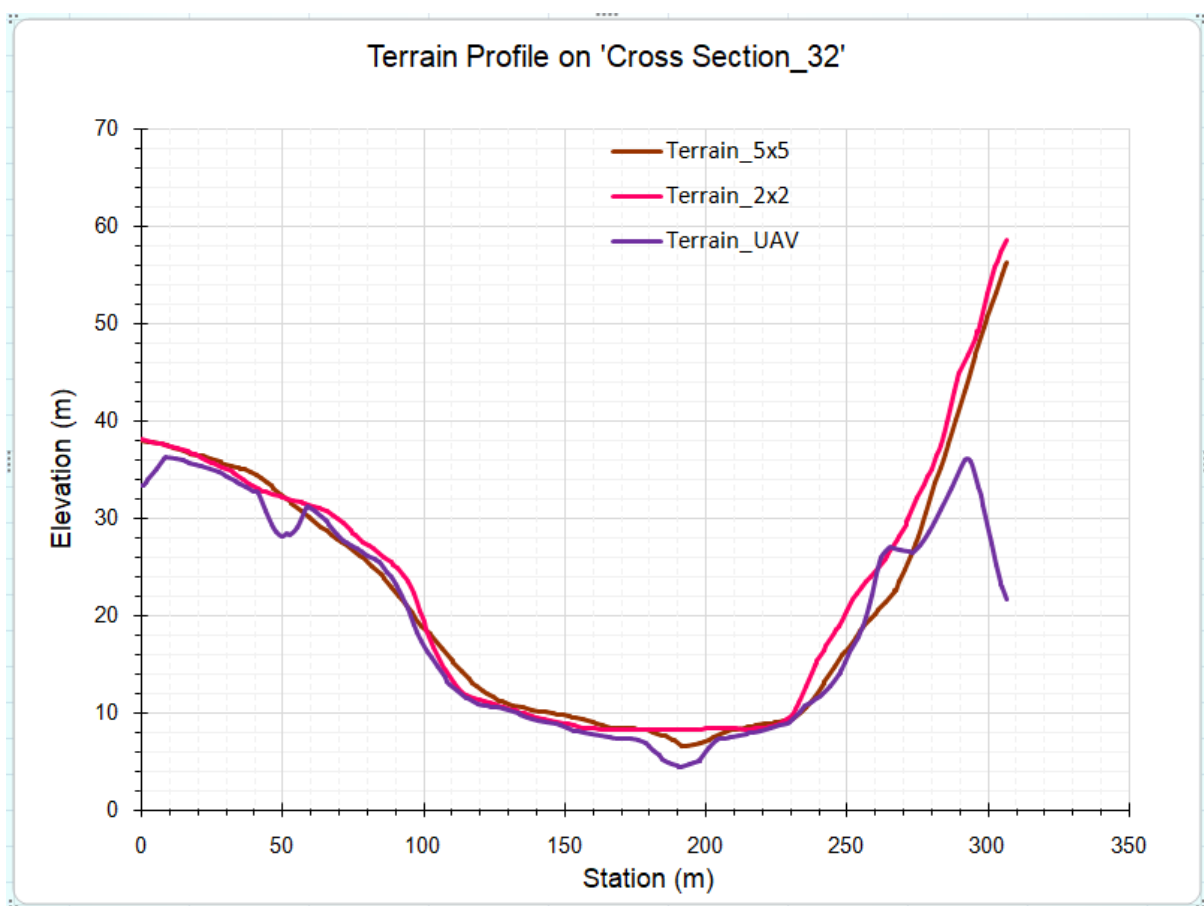
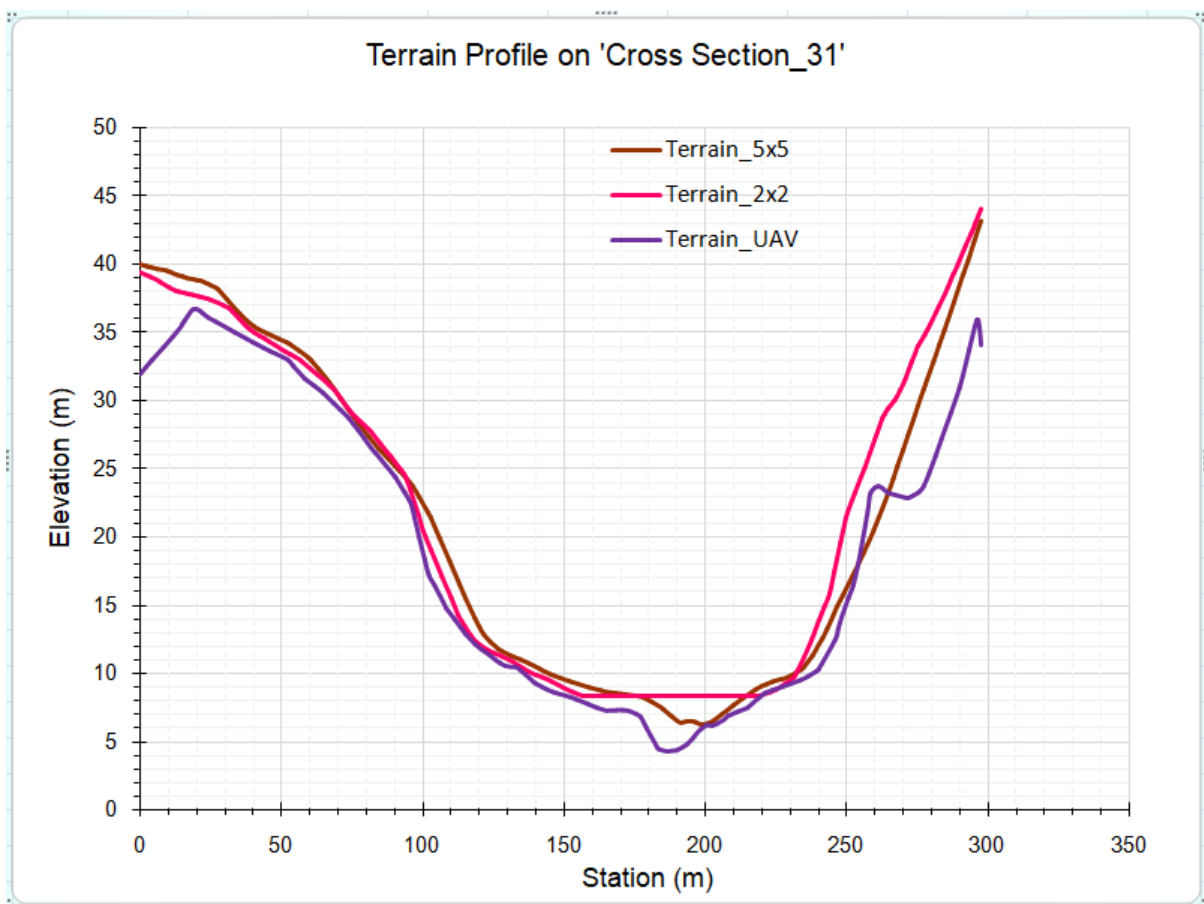


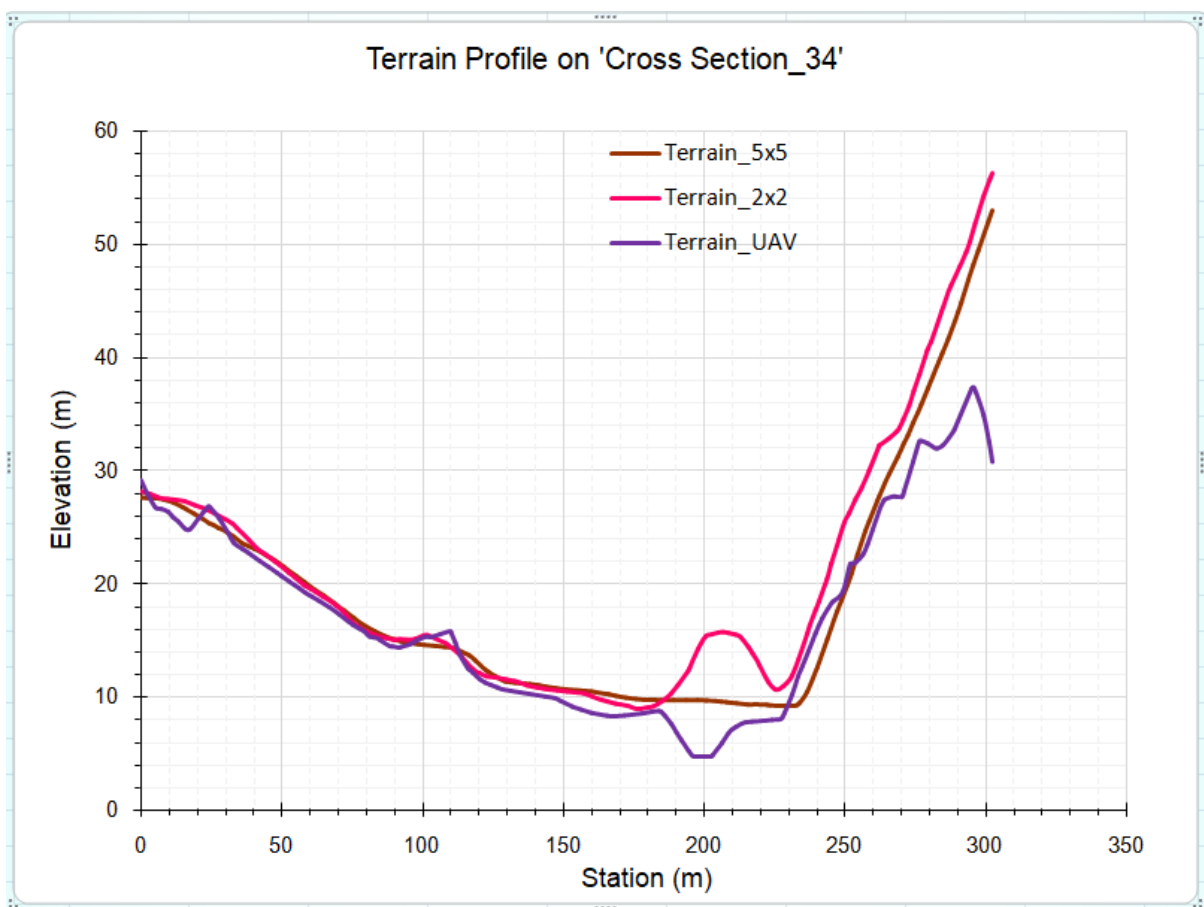
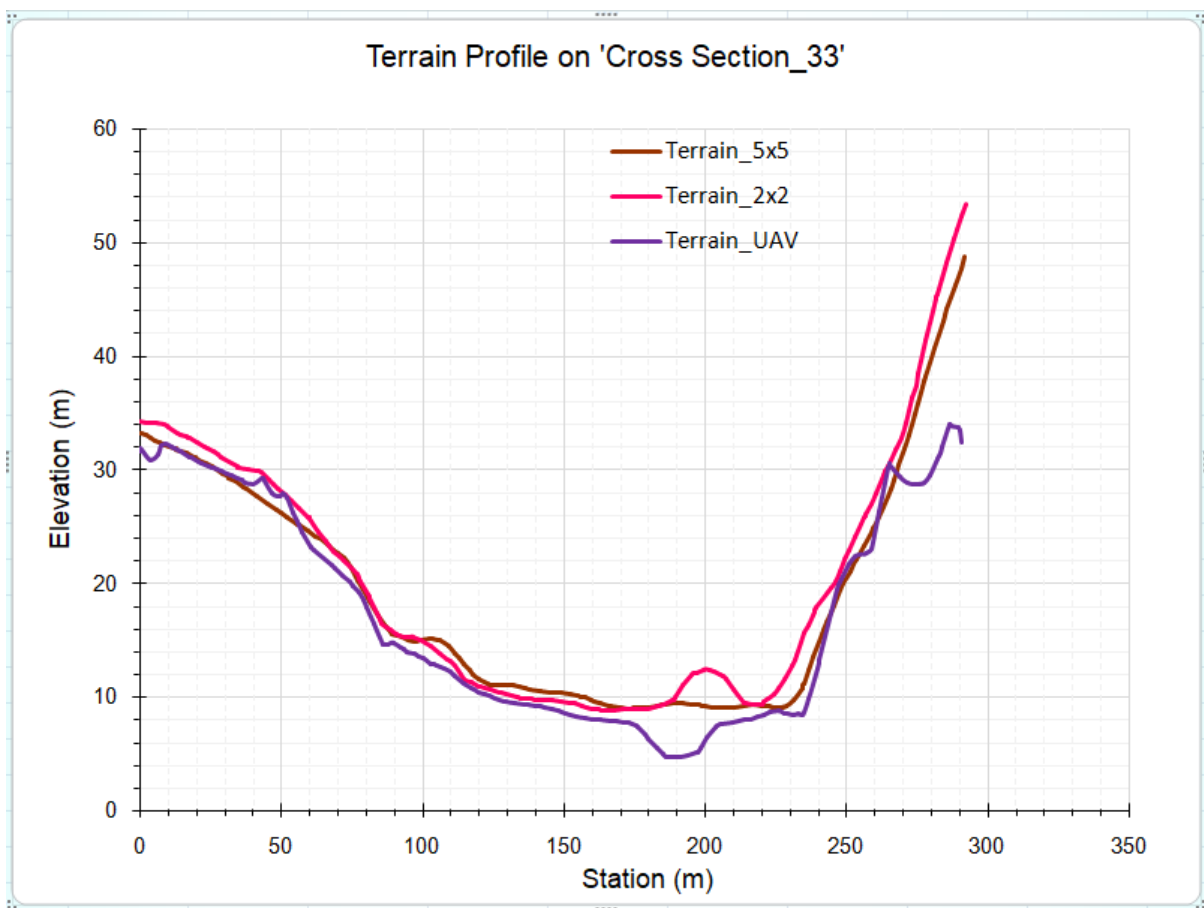


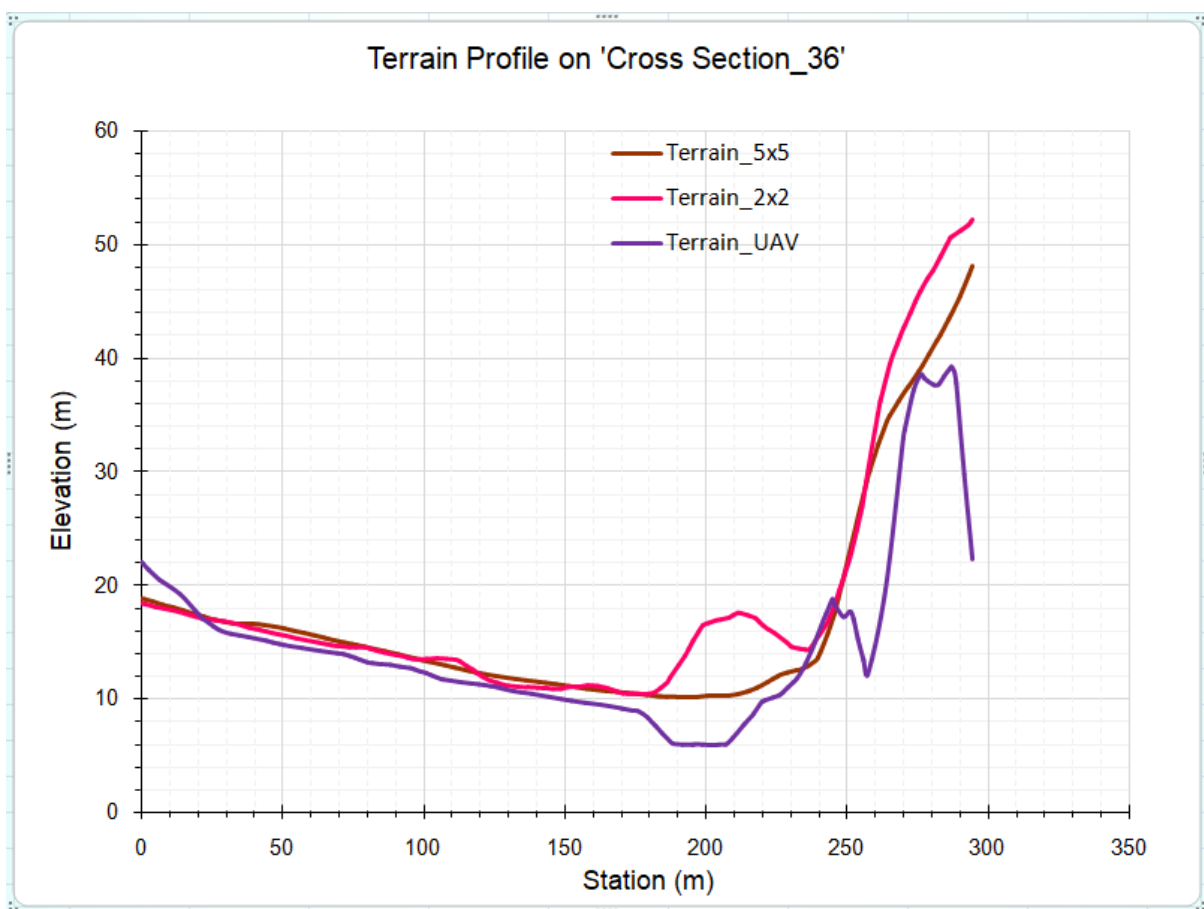
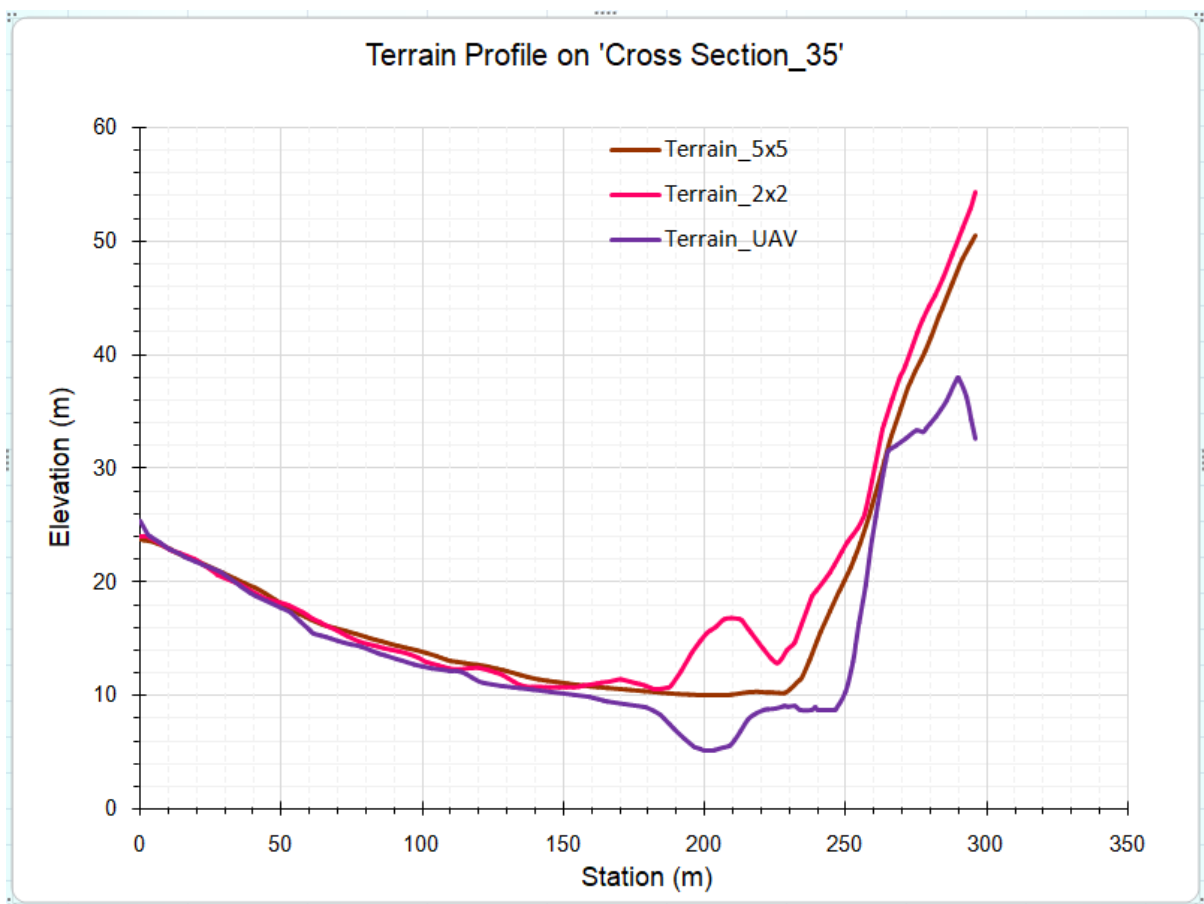


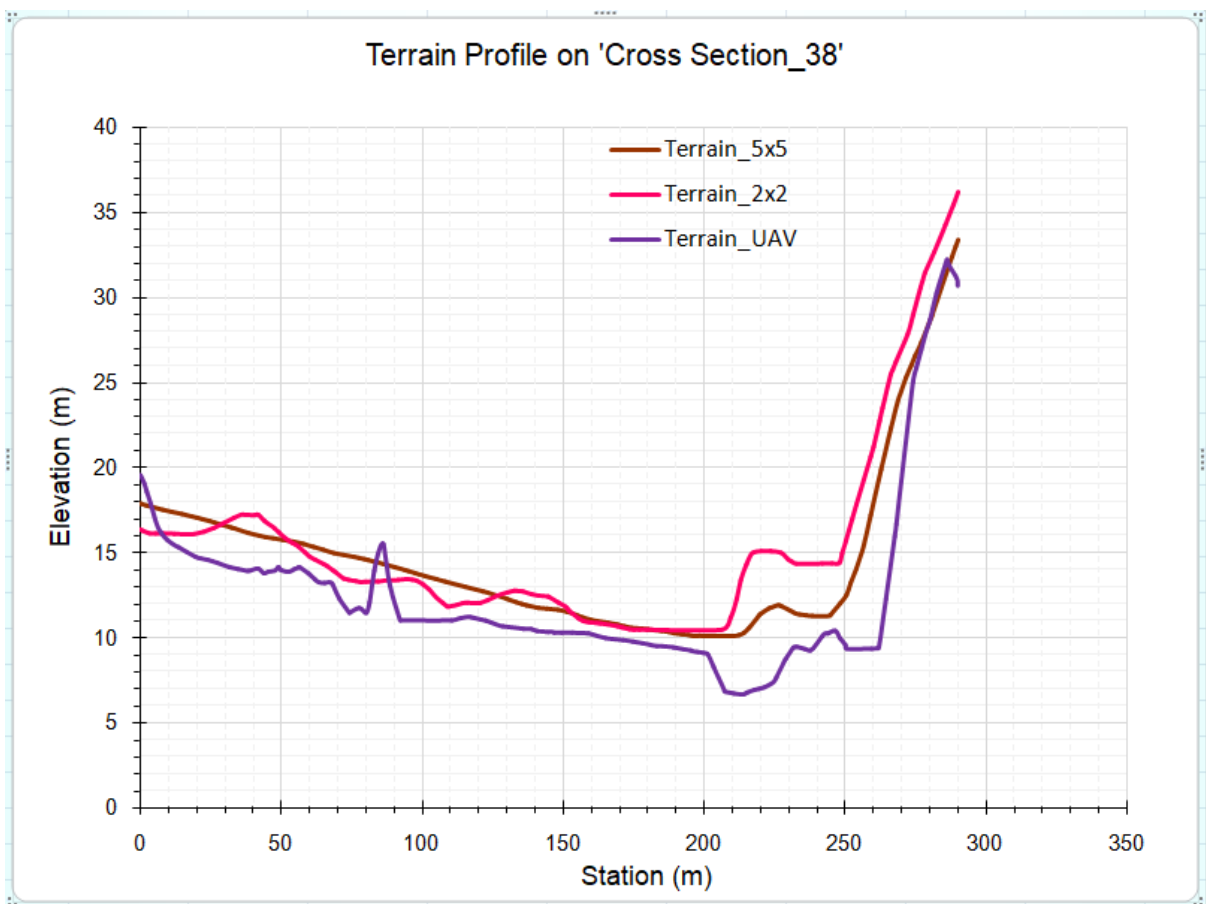
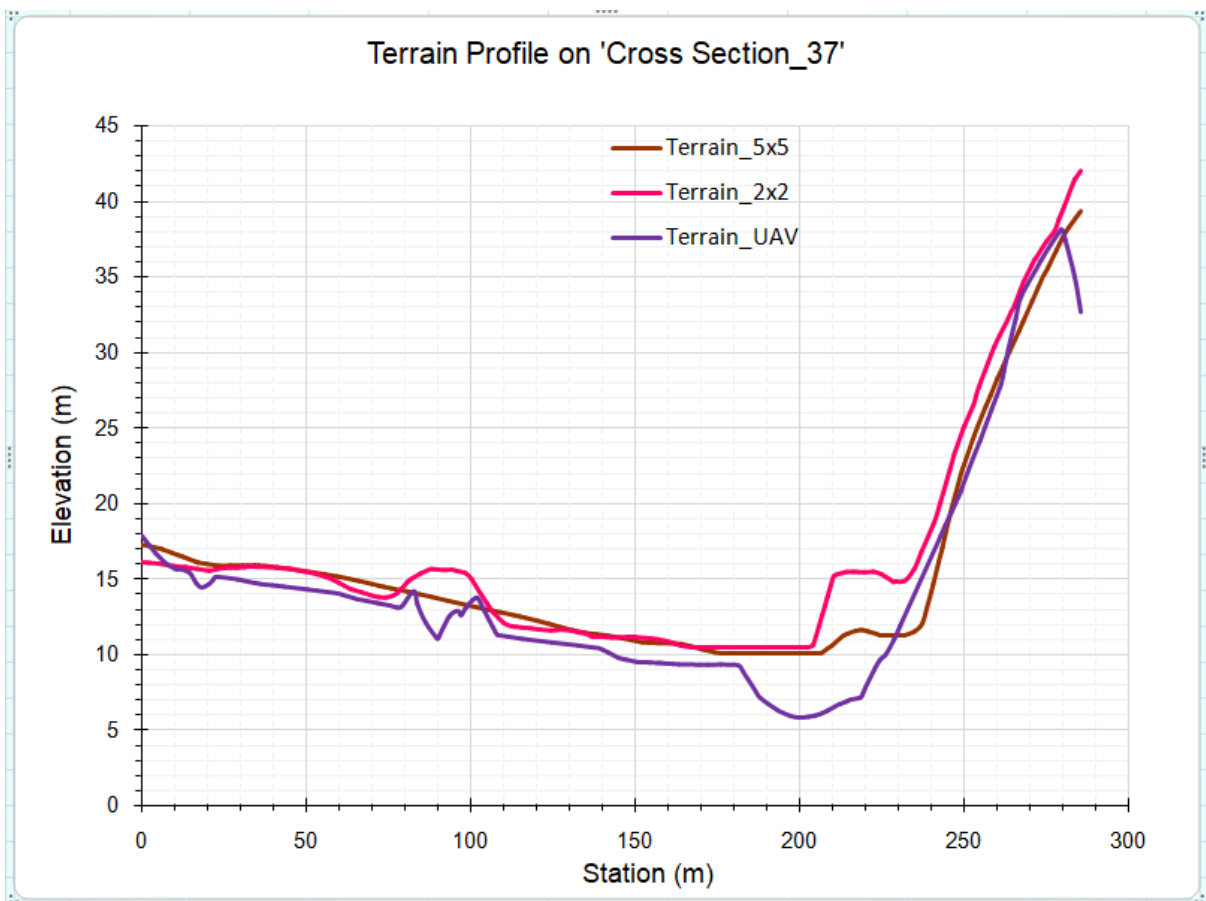


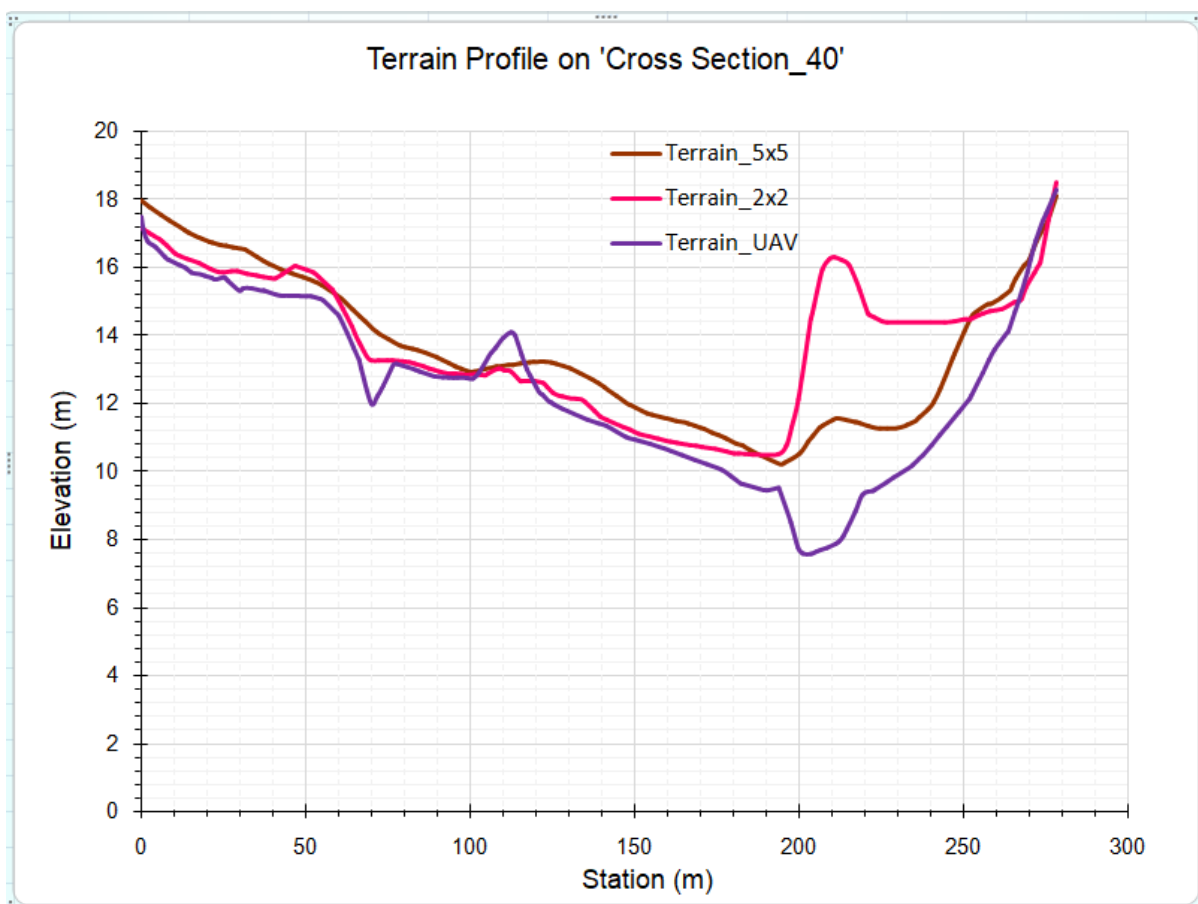
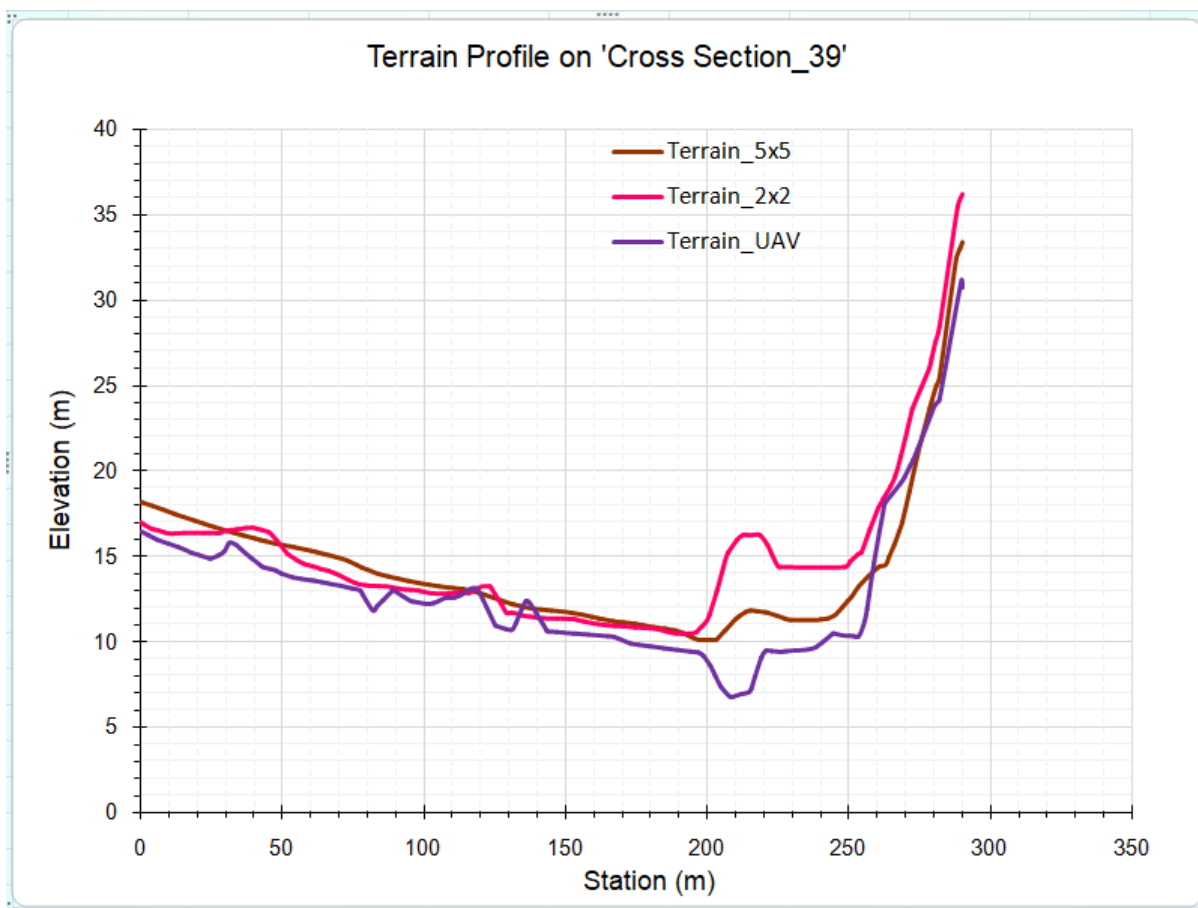












ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III – Διαγράμματα Cross Sections UAV

