



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΡΕΜΑΤΟΣ
ΠΡΟΦΗΤΗ ΔΑΝΙΗΛ



Νίκος Ιωαννίδης

Επιβλέπων: Α. Ι. Στάμου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1 Γενικά	5
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	5
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	7
2.1 Γενικά	7
2.1.1 Το παντοροϊκό σύστημα της Αθήνας.....	8
2.1.2 Το ρέμα του Προφήτη Δανιήλ	9
2.1.3 Υφιστάμενη κατάσταση.....	10
2.2 Γεωμετρία ρέματος	14
2.2.1 Το AutoCAD Civil 3D	14
2.2.2 Χάραξη οριζοντιογραφίας ρέματος	15
2.2.3 Διαμόρφωση τελικής γεωμετρίας.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS	23
3.1. Γενικά	23
3.2. Το μοντέλο HEC-RAS.....	23
3.2.1 Εισαγωγή	23
3.2.2 Μόνιμη ροή	23
3.2.3 Ροή σε σύνθετες διατομές	24
3.2.4. Υπολογισμός της μέσης κινητικής ενέργειας	26
3.2.6. Εκτίμηση του συντελεστή συστολής διαστολής.....	27
3.2.7. Βήματα υπολογισμού.....	28
3.2.8. Υπολογισμός του κρίσιμου βάθους	28
3.2.9. Η εξίσωση ορμής	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ TELEMAC	31
4.1 Γενικά	31
4.2 Εξισώσεις του μοντέλου	32
4.3 Μοντέλα τύρβης.....	33
4.4 Το περιβάλλον BlueKenue	33
4.4 Παράμετροι μοντέλου	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	38
5.1 Επίλυση με HEC-RAS	38
5.1.1 Δημιουργία αρχείου γεωμετρίας	38
5.1.2 Εφαρμογή του μοντέλου	38
5.2 Επίλυση με Telemac.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Σύγκριση και σχολιασμός αποτελεσμάτων HEC- RAS TELEMAC	58
6.1. Σύγκριση	58
6.2 Συμπεράσματα	64
6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	71
Βιβλιογραφία.....	72

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η υδροδυναμική προσομοίωση του ρέματος του Προφήτη Δανιήλ το οποίο βρίσκεται στην περιοχή του Βοτανικού στην Αθήνα για διάφορα σενάρια παροχών.

Ρέμα είναι κάθε φυσική διαμόρφωση του εδάφους που λειτουργεί ως αποδέκτης και αγωγός των νερών της βροχής, του χιονιού (μετά την τήξη) και των φυσικών πηγών και εξυπηρετεί την απορροή τους προς άλλους αποδέκτες μεγαλύτερης χωρητικότητας, φυσικούς ή τεχνητούς. Ιδιαίτερα η Αττική ήταν μια περιοχή που στις αρχές του 20ου αιώνα είχε χιλιάδες ρέματα εκ των οποίων πολλά από αυτά με την ραγδαία αστικοποίηση μπαζώθηκαν με αποτέλεσμα αρκετές φορές να προκαλούν καταστροφές σε περίπτωση πλημμυρών. Κατά συνέπεια η ανάλυση των ρεμάτων είναι αναγκαία.

Η ανάλυση έχει γίνει με την χρήση των υδραυλικών μοντέλων HEC-RAS και TELEMAC. Το μοντέλο HEC-RAS είναι ένα μονοδιάστατο μοντέλο που χρησιμοποιεί μονοδιάστατη ανάλυση και τις εξισώσεις ορμής και ενέργειας ενώ το μοντέλο του TELEMAC χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων επιλύοντας τις εξισώσεις ρηχού κύματος Saint Venant στις 2 διαστάσεις. Στη συνέχεια της εργασίας τα αποτελέσματα των 2 μοντέλων συγκρίθηκαν μεταξύ τους, έτσι ώστε να αντληθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις διαφορετικές μεθοδολογίες που ακολουθούν αυτά τα 2 μοντέλα. Αρχικά αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα τεχνικών μελετών ώστε να αντληθούν στοιχεία για την γεωμετρία της περιοχής που εξετάζουμε. Κατόπιν το ρέμα προσομοιώθηκε τρισδιάστατα με την βοήθεια του προγράμματος Civil 3D προκειμένου στη συνέχεια η τρισδιάστατη αυτή επιφάνεια να εξαχθεί για να χρησιμοποιηθεί από τα προγράμματα HEC-RAS και TELEMAC.

Ύστερα αφού πραγματοποιήθηκαν αρκετά σενάρια για διάφορες τιμές παροχών και μοντέλων τύρβης υπολογίστηκε η στάθμη ελεύθερης επιφάνειας για κάθε ένα από αυτά τα 2 μοντέλα και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα μεταξύ τους. Όσον αφορά τα συμπεράσματα επιβεβαιώθηκε ότι τα 2 μοντέλα, παρόλο που χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθοδολογίες είναι αρκετά κοντά στα μεταξύ τους αποτελέσματα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, ιδιαίτερες ευχαριστίες αποδίδονται στον Καθηγητή ΕΜΠ Αναστάσιο Στάμου, ο οποίος είχε την επίβλεψη της εργασίας, για τον χρόνο που αφιέρωσε, τις πολύτιμες συμβουλές και την διαρκή καθοδήγησή του.

Θερμά ευχαριστώ, επίσης, την Υποψήφια Διδάκτορα Γεωργία Παπαδονικολάκη για την προθυμία της να βοηθήσει σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυπτε σχετικά με την υλοποίηση της εργασίας.

Το μεγαλύτερο, όμως, ευχαριστώ, το οφείλω στους δικούς μου ανθρώπους, που δε σταμάτησαν ποτέ να πιστεύουν σε μένα και να με στηρίζουν σε κάθε εγχείρημά μου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Οι υδάτινες οδοί ως στοιχεία του φυσικού περιβάλλοντος έχουν υποστεί διαχρονικά τις συνέπειες της υπερεκμετάλλευσης των φυσικών πόρων και της ραγδαίας αστικοποίησης σε παγκόσμιο επίπεδο. Ιδιαίτερα η Αττική έχει βιώσει με δραματικό ρυθμό αυτές τις μεταβολές.

Τομή στην αστικοποίηση της Αθήνας αποτελεί η ανταλλαγή πληθυσμών, ως αποτέλεσμα της Μικρασιατικής Καταστροφής του 1922. Η Αθήνα μεταξύ 1920-1928 διπλασίασε σχεδόν τον πληθυσμό της. Η αστική επέκταση ήταν επιβεβλημένη και ο πλέον ανέξοδος και ανεμπόδιστος τρόπος για να επιτευχθεί ήταν η κατάληψη φθηνής γης, η οποία συνήθως περιλάμβανε και παραρρημάτιες περιοχές. Λόγω των πειστικών προβλημάτων για την οικοδόμηση προσφυγικών κατοικιών και συνοικιών άνθισε η αυθαίρετη δόμηση, ενώ η προστασία της φύσης υποτιμήθηκε παντελώς (Βάιου κ.ά., 1998).

Τέλος, μετά από μια περίοδο ύφεσης της οικοδομικής δραστηριότητας, λόγω των πολέμων (Β' Παγκοσμίου και Εμφυλίου), η αστικοποίηση ξαναβρίσκει τους προπολεμικούς ρυθμούς της, με την ένταξη στο αστικό τοπίο των πρώτων πολυκατοικιών που έρχονται να αντικαταστήσουν τις παλιές μονοκατοικίες και διπλοκατοικίες (Βάιου κ.ά., 1998). Παρόλα αυτά, σύμφωνα με μελέτη του ΕΜΠ, τα ανοιχτά ρέματα το 1945 είχαν μήκος 1.280 km και σήμερα μόλις 434 km, μειώθηκαν, δηλαδή, σε ποσοστό 66,4%. Όπως, δε, προκύπτει από μελέτη του ΙΓΜΕ, πριν από μερικά χρόνια, το 80% των νερών της βροχής το απορροφούσε το έδαφος και μόλις το 20% έπεφτε στην θάλασσα, ενώ σήμερα το ποσοστό αυτό έχει αλλάξει δραματικά (Λάππας, 2013). Συνέπειες όλων αυτών είναι αρκετές φορές σε περιπτώσεις έντονων βροχοπτώσεων, τα ρέματα να υπερχειλίζουν προκαλώντας αρκετές φορές έντονες καταστροφές ακόμη και θύματα, όπως στην περίπτωση της Μάνδρας.

Πάνω σε αυτό το πλαίσιο η ανάλυση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των ρεμάτων για διάφορα σενάρια παροχών καθίσταται απαραίτητη για την ασφάλεια της εξεταζόμενης περιοχής. Τα υδραυλικά μοντέλα και οι μαθηματικές προσομοιώσεις αποτελούν αξιόπιστα εργαλεία για την ανάλυση τέτοιων σεναρίων. Ιδιαίτερα όταν γίνεται χρήση πολλών μοντέλων με διαφορετικές μεθοδολογίες μεταξύ τους μπορούμε να έχουμε μια αρκετά εμπειριστατωμένη εικόνα για την απόκριση του ρέματος σε σενάρια παροχών τα οποία προκαλούνται από βροχοπτώσεις και να είμαστε έτοιμοι για την αντιμετώπιση των καταστροφικών συνεπειών τους με διάφορου είδους έργα όπως αντιπλημμυρικά, τάφροι κλπ.

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του ρέματος Προφήτη Δανιήλ με 2 διαφορετικά υδραυλικά μοντέλα, το HEC-RAS ένα μονοδιάστατο μοντέλο ευρέων εφαρμογών που επιλύει την εξίσωση ενέργειας το οποίο έχει αναπτυχθεί από τον αμερικανικό στρατό και το TELEMAC, το οποίο λύνει τις εξισώσεις ρηχού κύματος Saint Venant στις 2 διαστάσεις και έχει αναπτυχθεί από την Γαλλική εταιρεία ηλεκτρισμού.

Αξιοποιήθηκαν τεχνικές μελέτες, οι οποίες είχαν γίνει για την διευθέτηση του ρέματος από εργολαβικές εταιρείες, για την καλύτερη καταγραφή της γεωγραφίας του

ρέματος και αποτύπωσης του στο πρόγραμμα Civil 3D. Τέλος συγκρίθηκαν τα 2 αυτά μοντέλα μεταξύ τους και τα αποτελέσματα που έδωσαν ώστε να εξάγουμε συμπεράσματα για τις μεθόδους που χρησιμοποιούν.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

- **Κεφάλαιο 2:** Παρουσίαση της περιοχής μελέτης
- **Κεφάλαιο 3:** Παρουσίαση του μοντέλου HEC-RAS
- **Κεφάλαιο 4:** Παρουσίαση του μοντέλου Telemac
- **Κεφάλαιο 5:** Παρουσίαση των αποτελεσμάτων των 2 μοντέλων
- **Κεφάλαιο 6:** Σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων των 2 μοντέλων καθώς και άντληση συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Γενικά

Στην Ελλάδα γενικά υπήρξε καθυστέρηση στην κατασκευή σύγχρονων συστημάτων αποχέτευσης. Η Αθήνα διαθέτει στο κέντρο της ένα από τα παλιότερα ελληνικά συστήματα παντοροϊκών δικτύων αποχέτευσης.

Το παντοροϊκό σύστημα της Αθήνας είναι ένα σύνολο αγωγών και εγκαταστάσεων για την κοινή απορροή των ομβρίων και ακαθάρτων υδάτων κυρίως των κεντρικών περιοχών της πόλης. Η όλη περιοχή του παντοροϊκού δικτύου της Αθήνας έχει έκταση περίπου 850 εκτάρια και εκτείνεται χονδρικά από την Άγια Βαρβάρα (Πατήσια) μέχρι την περιοχή Πλάκας-Ζάππειου και από τις υπώρειες του Γκύζη μέχρι τον σταθμό Αττικής και περιοχή Κολωνού.

Για πρώτη φορά στη νεότερη ιστορία της Αθήνας, γύρω στο 1840, έγινε προσπάθεια για συστηματική κατασκευή συστήματος συλλογής και μεταφοράς ακαθάρτων και ομβρίων υδάτων. Το 1860 κατασκευάστηκε από την πρώτη γαλλική Αποστολή Δημοσίων Έργων ο παντοροϊκός αγωγός της Σταδίου, ο οποίος και επεκτάθηκε το 1870.

Στη δεκαετία 1880-1890 καλύφθηκε το ανοιχτό ρέμα του Κυκλοβόρου με λιθόκτιστο αγωγό μεγάλης διαμέτρου (περίπου 3 μ.). Μέχρι το 1893 το κατασκευασμένο δίκτυο αποχέτευσης είχε συνολικό μήκος περίπου 11,5 χλμ., ενώ ο βαθμός ανάπτυξης της πόλης ήταν τέτοιος που απαιτούσε αποχετευτικό δίκτυο μήκους 90 χλμ. Οι αποχετευτικές ανάγκες δηλαδή της πόλης ήταν περίπου οκταπλάσιες. Στα επόμενα χρόνια, εξαιτίας και του ισχυρού προσφυγικού ρεύματος που προκάλεσε η Μικρασιατική καταστροφή το 1922, η ανάγκη κατασκευής έργων αποχέτευσης έγινε ακόμη πιο επιτακτική. Το 1925, ο Δήμος Αθηναίων μελέτησε και κατασκεύασε το “Νέο Μεγάλο Αγωγό”, ενώ την ίδια περίοδο κατασκευάστηκε ένα μεγάλο τεχνικό έργο, η συμβολή των δύο “Μεγάλων Αγωγών” στις οδούς Μάρνη και Παιωνίου.

Το 1930 ολοκληρώθηκε η κατασκευή αγωγού ακαθάρτων του ρέματος Προφήτη Δανιήλ με αποδέκτη το Φαληρικό Δέλτα. Ήταν ένας αγωγός ωσειδής με χερσαίο μήκος περίπου 6,5 χλμ. και υποθαλάσσιο περίπου 700 μ.

Το 1931 συστάθηκε η «Ανώνυμος Εταιρία Κατασκευής Υπονόμων Αθηνών και Περιχώρων», στην οποία το ελληνικό κράτος ανέθεσε την οριστική μελέτη του δικτύου των Αθηνών και Περιχώρων για ακάθαρτα και όμβρια ύδατα με βάση την προμελέτη του Ιταλού καθηγητή υδραυλικής Φαντόλι.

Παράλληλα, ο Δήμος Αθηναίων απαγόρευσε την κατασκευή απορροφητικών βόθρων σε όσους δρόμους είχε κατασκευαστεί δίκτυο και αφαίρεσε από τους ιδιώτες το δικαίωμα της κατασκευής και εκμετάλλευσης αγωγών ακαθάρτων και ομβρίων στην πόλη. Μέσα στην πενταετία 1934 - 1939 υλοποιήθηκε ένα μεγάλο πρόγραμμα κατασκευής αποχετευτικών έργων που περιλάμβανε την κάλυψη 17 σημαντικών ρεμάτων, την κατασκευή των μεγάλων αγωγών στις οδούς Ρηγίλλης και Βασιλίσσης Σοφίας και την κατασκευή αντιπλημμυρικής τάφρου στο Λόφο Φιλοπάππου.

Ταυτόχρονα με βάση την προμελέτη του καθηγητή Φαντόλι, κατασκευάστηκαν τρία βασικά έργα υποδομής στην Αθήνα, παρά την έναρξη του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, που αφορούσαν:

- Την κατασκευή του Κεντρικού Αποχετευτικού Αγωγού (ΚΑΑ)
- Την κατασκευή του μεγάλου και βασικού συλλεκτήρα , μετά από οριστική μελέτη που συντάχθηκε για τον Ιλισό.
- Τη διεύθυνση τμημάτων του Κηφισού.

Από το 1950 και μετά η Αθήνα αναπτύχθηκε πολεοδομικά με ραγδαίους ρυθμούς. Έτσι, η επιτακτική ανάγκη για μεγάλα έργα αποχέτευσης οδήγησε στη σύσταση του Οργανισμού Αποχέτευσης Πρωτεύουσας (ΟΑΠ). Ο ΟΑΠ έθεσε τα θεμέλια για την υποδομή του αποχετευτικού συστήματος της πόλης των Αθηνών, αλλά και για τον μακροχρόνιο σχεδιασμό των μελλοντικών αναγκών της Πρωτεύουσας σε δίκτυα ακαθάρτων και αντιπλημμυρικής προστασίας. Το 1950 άρχισε η σύνταξη προμελέτης για την αποχέτευση της περιοχής της Πρωτεύουσας σε έκταση 200.000 στρεμμάτων, που οριστικοποιήθηκε και υποβλήθηκε στις κρατικές αρχές το 1963. Η προμελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε ως βάση ανάπτυξης των δικτύων στις δεκαετίες του 1960 και του 1970, αφού υπέστη συνεχείς τροποποιήσεις από το 1963 ως το 1977. Συνολικά, στο διάστημα λειτουργίας του ΟΑΠ, μεταξύ των ετών 1950 έως 1980, κατασκευάστηκαν έργα ακαθάρτων μήκους 1.700 χλμ. και ομβρίων μήκους 300 χλμ., μεταξύ των οποίων ο Παραλιακός Συλλεκτήρας της ακτής Σαρωνικού και ο Παρακηφισιος Συλλεκτήρας.

Οι αρμοδιότητες του ΟΑΠ (Οργανισμός Αποχέτευσης Πρωτεύουσας) μεταβιβάστηκαν το 1980 στον ενιαίο φορέα διαχείρισης της ύδρευσης και αποχέτευσης της Αθήνας, την ΕΥΔΑΠ. Στον τομέα της αποχέτευσης ο νέος αυτός φορέας ανέλαβε την απορροή των λυμάτων και των βιομηχανικών αποβλήτων. Επίσης ανέλαβε τον έλεγχο της διαδικασίας καθαρισμού των λυμάτων και την τελική διάθεσή τους στη θάλασσα. Από τις υποχρεώσεις του τέως ΟΑΠ, η ΕΥΔΑΠ δεν ανέλαβε την κατασκευή των δευτερευόντων αγωγών ακαθάρτων και τη σύνδεση των ακινήτων με τα δίκτυα, που εκχωρήθηκαν στους ΟΤΑ.

Από την αρχή της λειτουργίας της ΕΥΔΑΠ, το αποχετευτικό δίκτυο των Αθηνών επεκτάθηκε και πύκνωσε με την κατασκευή πολλών χιλιομέτρων αγωγών, για να φτάσει σήμερα το συνολικό μήκος του δικτύου αποχέτευσης να αγγίζει τα 8.000 χλμ.

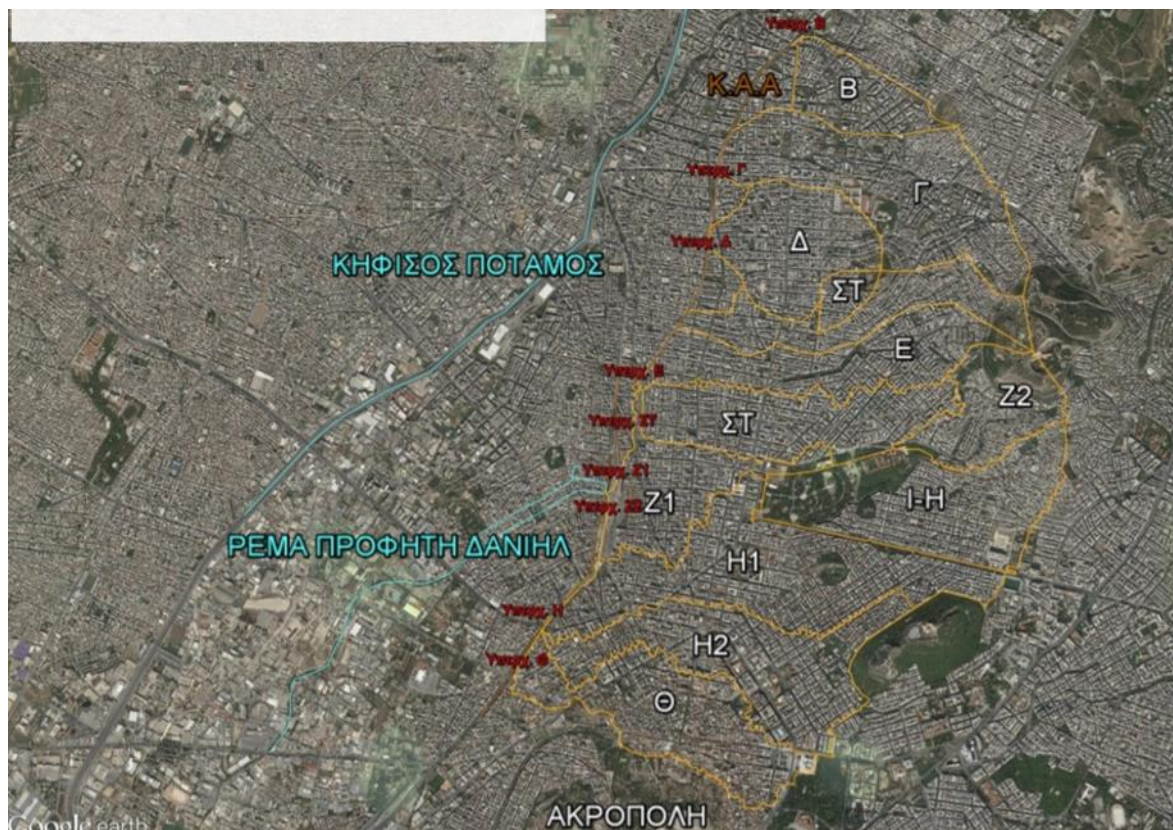
2.1.1 Το παντοροϊκό σύστημα της Αθήνας

Η λεκάνη απορροής του κεντρικού Παντοροϊκού συστήματος της Αθήνας, χωρίζεται στις εξής υπολεκάνες ή Ζώνες, οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.1-1, τις Β, Γ, Δ, Ε, ΣΤ, Ζ1, Ζ2, Η1, Η2 και Θ. Η έκταση της λεκάνης απορροής ομβρίων της περιοχής αυτής είναι 1310 εκτάρια ενώ των ακαθάρτων υδάτων ανέρχεται σε 1250 εκτάρια περίπου.

Κύριος αποδέκτης του όλου συστήματος είναι ο αγωγός Κ.Α.Α.(κεντρικός αγωγός αποχέτευσης των ακαθάρτων), στον οποίο εντάχθηκαν εννέα υπερχειλιστές. Στα φρεάτια των υπερχειλιστών γίνεται ο διαχωρισμός απορροής των ακαθάρτων, που συνεχίζουν στον Κ.Α.Α., καθώς και των ομβρίων που παραλαμβάνονται μέσω υπερχείλισης και διοχετεύονται στους αντίστοιχους αγωγούς υπερχείλισης Β, Γ, Δ, Ε, ΣΤ, Ζ1 και Ζ2.

Σε περίπτωση που η απορροή ομβρίων ,όταν βρέχει, που μεταφέρεται από τους παντοροϊκούς συλλεκτήρες , μαζί με τα λύματα της κάθε ζώνης, δεν ξεπερνά ένα κρίσιμο όριο, το σύνολο της μικτής αυτής παροχής παροχετεύεται από τον ΚΑΑ, ο οποίος λειτουργεί σαν παντοροϊκός συλλεκτήρας και μέσω αυτού οδηγούνται στο Κέντρο

Επεξεργασίας Λυμάτων στην Ψυτάλλεια. Όταν η μικτή παροχή ανά τμήμα του ΚΑΑ ξεπεράσει το ανωτέρω όριο αρχίζουν να λειτουργούν οι υπερχειλιστές επί του ΚΑΑ και μέσω των κατασκευασμένων αγωγών υπερχείλισης μεταφέρεται μέρος της παροχής αυτής στον Κηφισό (Ζώνες Β έως και ΣΤ) και τον Προφήτη Δανιήλ (Ζώνες Ζ1 και Ζ2) ο οποίος με τη σειρά του εκβάλλει στον Κηφισό.



Εικόνα 0-1: Οι Ζώνες του Παντορροϊκού Συστήματος Αθηνών (Κούρτης, Ι.Μ., Γ. Κοψιάυτης, Β. Μπέλος & Β. Α.Τσιχριντζής, Βαθμονόμηση και επαλήθευση του λογισμικού SWMM σε μια λεκάνη του παντορροϊκού συστήματος αποχέτευσης της Αθήνας, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, 2017).

Σημειώνεται ότι ο υπερχειλιστής Θ δε λειτουργεί καθόλου, γιατί δεν έχει κατασκευαστεί ο αγωγός υπερχείλισης, ενώ ο υπερχειλιστής Η δεν κατασκευάστηκε ποτέ (ΜΕΤΕΡ, 2011).

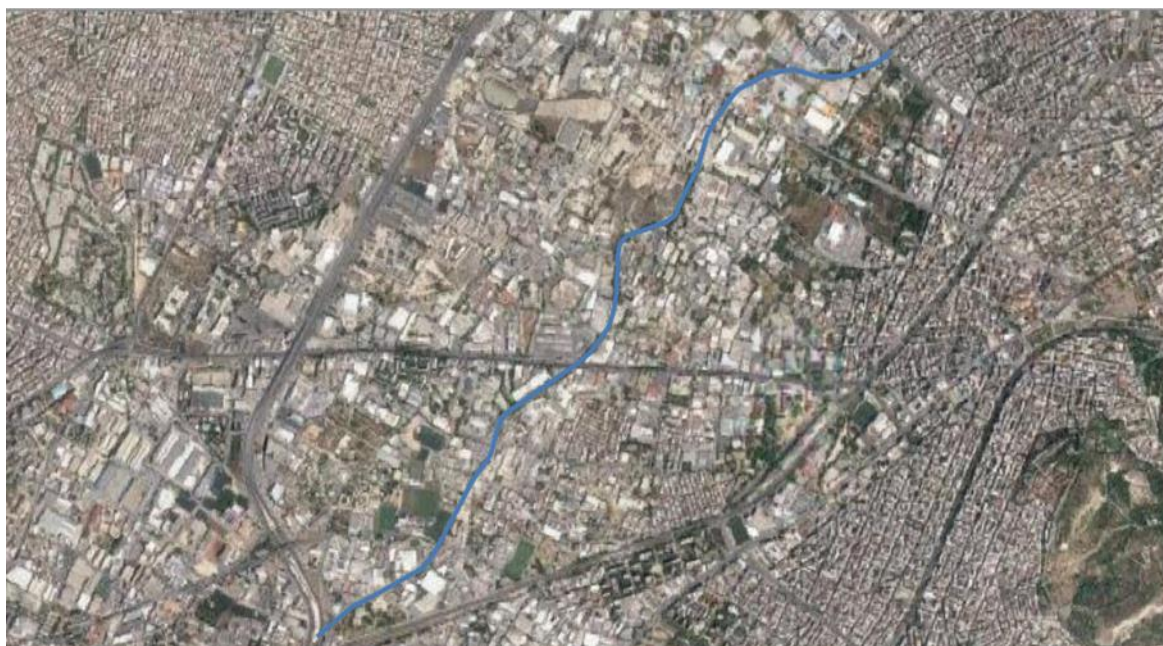
2.1.2 Το ρέμα του Προφήτη Δανιήλ

Η περιοχή του Προφήτη Δανιήλ βρίσκεται 3 χιλιόμετρα από την Ομόνοια, δυτικά του κέντρου της Αθήνας. Οροθετείται από μεγάλους οδικούς άξονες όπως την Λεωφόρο Αθηνών από βορρά, την Λεωφόρο Κωνσταντινουπόλεως στα ανατολικά και την Ιερά Οδό στα νότια, ενώ από την δυτική πλευρά, όριο αποτελεί το Γεωπονικό Πανεπιστήμιο. Μια μεταβατική ζώνη ο Προφήτης Δανιήλ, βρίσκεται ανάμεσα σε περιοχές με διαφορετικές χρήσεις γης(αστική συνοικία στο Μεταξουργείο, χώροι διασκέδασης στο Γκάζι, πράσινο και εκπαίδευση σε Βοτανικό Κήπο και Γεωπονικό Πανεπιστήμιο αντίστοιχα) περιλαμβάνοντας στοιχεία από όλες.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2-1, το ρέμα διασχίζει μια πορεία στον κεντρικό ιστό της Αθήνας μέχρι τις συνοικίες του Πειραιά. Αρχίζει από τη Λεωφόρο Αθηνών και εκβάλλει στον Κηφισό, στο ύψος της διασταύρωσης με τη Σιδηροδρομική Γραμμή του

Ο.Σ.Ε., κατάντη της οδού Μακρυγιάννη-Ταύρου. Το συνολικό μήκος του ρέματος είναι 3850m.

Ο προφήτης Δανιήλ διασχίζει τον Ελαιώνα, εκβάλλει στον Κηφισό και σε αυτόν καταλήγουν και οι παροχές από τις υπερχειλίσσεις του παντοροϊκού συστήματος ανάντη της Λεωφόρο Αθηνών (υφιστάμενες υπερχειλίσσεις Z1 και Z2) και μικρές παροχές από τον Κυκλοβόρο στη διασταύρωση της Λ. Αθηνών (Η). Ο Προφήτης Δανιήλ δεν έχει διευθετηθεί και η σημερινή του εκβολή στον Κηφισό είναι προβληματική δημιουργώντας με τις συχνές υπερχειλίσσεις του προβλήματα στις κατάντη περιοχές του Μοσχάτου. Για τη βελτίωση της λειτουργίας της εκβολής του έχει μελετηθεί να έχει κοινή εκβολή στον Κηφισό με τον Κυκλοβόρο επί της Κωνσταντινουπόλεως, αμέσως κατάντη των σιδηροδρομικών γραμμών.



Εικόνα 0-2.1: Ο άξονας του ρέματος Προφήτη Δανιήλ και οι οδικές αρτηρίες με τις οποίες διασταυρώνεται (Google Earth)

2.1.3 Υφιστάμενη κατάσταση

Το συνολικό μήκος του ρέματος Προφήτη Δανιήλ είναι 3850 m. Στα πρώτα 1100 m του ανάντη τμήματός του (από τη Λεωφόρο Αθηνών έως και την συμβολή με την Αγίου Πολυκάρπου) η διατομή του ρέματος είναι κλειστή ορθογωνικού τύπου επενδυμένη με σκυρόδεμα, με διαστάσεις 6.3 m x 3.7 m με μέση κλίση 0.80%, μέσω της οποίας είναι δυνατόν να επιτευχθεί παροχετευτικότητα της τάξης των 140 m³/s (ΜΕΤΕΡ, 2011).

Στο τμήμα του ρέματος κατάντη της οδού Αγίου Πολυκάρπου και έως την εκβολή του στον Κηφισό ποταμό η διατομή του ρέματος είναι ανοιχτή και τραπεζοειδής, με κλίση πρανών που κυμαίνεται από 1 : 5 έως 1 : 10 (Ο:Κ) και με πλάτος που κυμαίνεται από 4.60 m έως 6.70 m. Είναι επενδυμένη με σκυρόδεμα έως την οδό Λεγάκη και λιθεπένδυτη στο κατάντη τμήμα (βλ. Εικόνα 2.2-2), από την συμβολή με την οδό Λεγάκη έως την εκβολή στον Κηφισό ποταμό (ΜΕΤΕΡ, 2011).



Εικόνα 0-3: Φωτογραφία της λιθεπένδυτης τραπεζοειδούς διατομής του ρέματος Προφήτη Δανιήλ, στο ύψος της οδού Λεγάκη (κατάντη του έργου E1) (Κατερίνα Βαγενά, 2019)

Παράλληλα και στην αριστερή κατά τη ροή πλευρά του ρέματος οδεύει ο Παραπροφήτιος Αγωγός, ο οποίος ακολουθεί την πορεία του ρέματος (βλ. Παρ. 2.1.1) από το ανάντη άκρο του έως και την οδό Λεγάκη, στην περιοχή του Ρέντη. Ο αγωγός αυτός παλαιότερα αποτελούσε τμήμα του Κ.Α.Α., ενώ σήμερα αποχετεύει τα λύματα της ανατολικής περιοχής του ρέματος.

Στο ρέμα Προφήτη Δανιήλ είναι κατασκευασμένα δύο έργα εκτροπής, τύπου κόφτρας, που καλούνται E1 και E2. Το έργο εκτροπής E1 βρίσκεται στη διασταύρωση του ρέματος με την οδό Λεγάκη ($X.Θ=3162.5$ m), όπου το ρέμα διασταυρώνεται με τον Κ.Α.Α., εκτρέποντας την παροχή ξηράς περιόδου του ρέματος προς τον Κ.Α.Α (βλ. Εικόνα 2.2-3). Το έργο εκτροπής E2 βρίσκεται στο ανάντη άκρο του ρέματος Προφήτη Δανιήλ στο ύψος της Λ. Αθηνών ($X=0.0$ m) και εκτρέπει απορροές ακαθάρτων, ξηράς περιόδου, προς τον Παραπροφήτιο αγωγό ακαθάρτων προκειμένου να μην καταλήγουν λύματα στο ρέμα.



Εικόνα 0-4: Φωτογραφία του έργου εκτροπής E1 εντός της κοίτης του ρέματος Προφήτη Δανιήλ, στο ύψος της οδού Λεγάκη (Κατερίνα Βαγενά, 2019)



Εικόνα 0-5: Φωτογραφία της κοίτης του ρέματος (Κατερίνα Βαγενά, 2019)



Εικόνα 0-6: Φωτογραφία ρέματος Προφήτη Δανιήλ κατά την διάρκεια βροχής λιγο πριν την εκβολή στον Κηφισσό (Κατερίνα Βαγενά, 2019)

Η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής του ρέματος Προφήτη Δανιήλ ανέρχεται σε 19.1 km² και διακρίνεται στις εξής υπολεκάνες (ΜΕΤΕΡ, 2011):

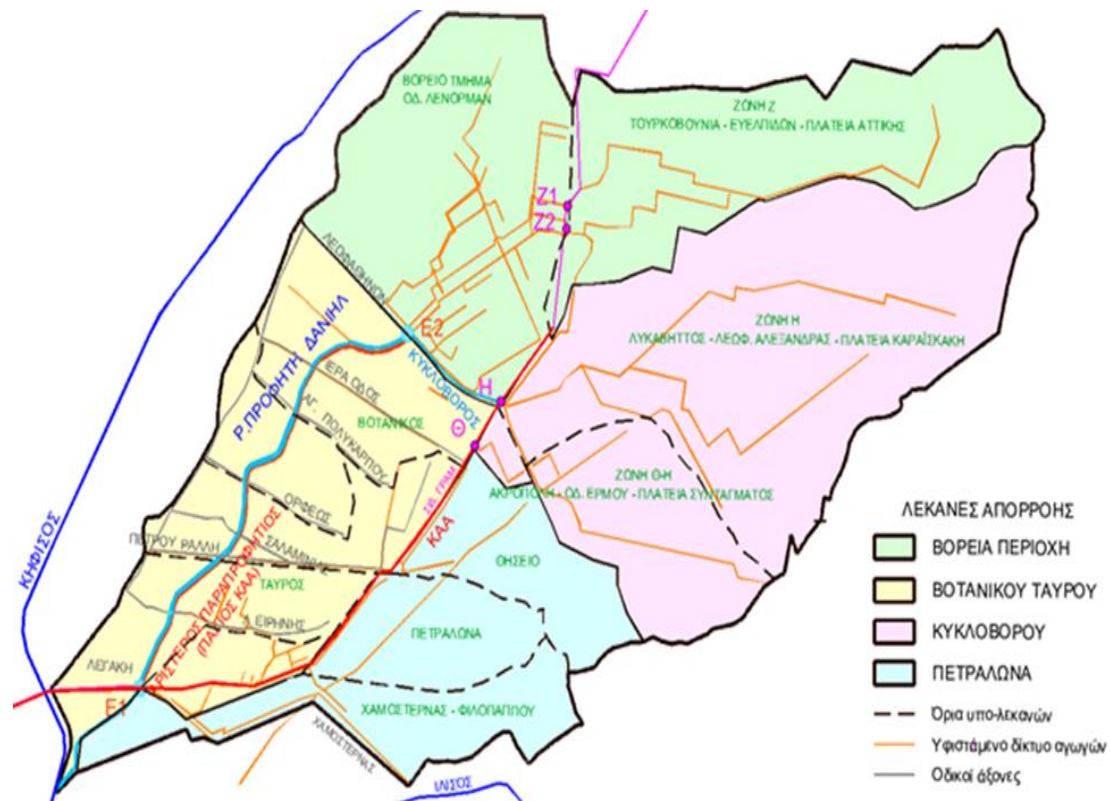
1. Λεκάνη “Βοτανικού-Ταύρου”
2. Λεκάνη “Βόρεια περιοχή”
3. Λεκάνη “Κυκλοβόρου”
4. Λεκάνη “Πετράλωνα”

Τα χαρακτηριστικά των λεκανών αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2-1. Από την Εικόνα 2.2-4 φαίνεται η λεκάνη απορροής Βοτανικού-Ταύρου περιλαμβάνει το ρέμα Προφήτη Δανιήλ, ενώ οι απορροές των υπόλοιπων λεκανών αποχετεύονται στο ρέμα μέσω αγωγών.

Πίνακας 2.2-1: Στοιχεία λεκάνης και υπολεκανών απορροής του ρέματος Προφήτη Δανιήλ

Όνομασία λεκάνης	Έκταση (km ²)	Περιοχή που αποστραγγίζεται	Σημείο(α) εκβολής στο ρέμα
Βοτανικού-Ταύρου	4.4	Βοτανικός, Ταύρος	Κατά μήκος του ρέματος Οδοί Λεγάκη (Χ.Θ=3163.0 m), Πέτρου Ράλλη (Χ.Θ=2137.0m), Σαλαμινίας (Χ.Θ=1985.0m), Ιερά Οδός (Χ.Θ=715.0 m)
Βόρεια περιοχή	5.7	Οδός Λένορμαν, Ευέλπιδων, Πλατεία Αττικής, Τουρκοβούνια	Λ. Αθηνών (Χ.Θ=0.0 m)
Κυκλοβόρου	6.1	Λόφος Λυκαβητού, Λεωφόρος Αλεξάνδρας, Ακρόπολη, οδός	Λ. Αθηνών (Χ=0.0 m)

		Ερμού	
Πετράλωνα	2.9	Πετράλωνα, Φιλοπάππου, Χαμοστέρνας	Θησείο, οδός Οδοί Λεγάκη (Χ.Θ=3163.0 m), Πέτρου Ράλλη (Χ.Θ=2137.0 m)
Συνολική Λεκάνη	19.1		



Εικόνα 0-7: Το ρέμα Προφήτη Δανιήλ και οι υπολεκάνες απορροής του (Κατερίνα Βαγενά, 2019)

2.2 Γεωμετρία ρέματος

2.2.1 Το AutoCAD Civil 3D

Το AutoCAD Civil 3D είναι ένα λογισμικό με το οποίο μπορούν να πραγματοποιηθούν μελέτες οδοποιίας, τοπογραφίας, υδρολογίας, υδραυλικών έργων καθώς και σύνθετων χωματουργικών διαμορφώσεων, με ταχύτητα και ακρίβεια σε ένα δυναμικό και παραμετρικό περιβάλλον. Όσον αφορά τις υδραυλικές εφαρμογές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη και σχεδίαση ακάθαρτων και ομβρίων παράλληλα με το υπόλοιπο σύστημα επιφάνειας και χάραξης. Όλοι οι αγωγοί που σχεδιάζονται είναι πλήρως συνυφασμένοι με τα υπόλοιπα δεδομένα του μοντέλου που έχουν δημιουργηθεί στο AutoCAD Civil 3D. Για παράδειγμα το δίκτυο ομβρίων είναι άμεσα συνδεδεμένο με την χάραξη του άξονα ενός δρόμου.

Μπορεί αυτόματα να εμφανιστούν οι αγωγοί στην μηκοτομή και στις διατομές ενός δρόμου. Οποιαδήποτε αλλαγή στο δίκτυο των αγωγών έχει σαν αποτέλεσμα την αυτόματη και δυναμική ενημέρωση των σχεδίων της μηκοτομής και των διατομών του δρόμου.

Στην παρούσα εργασία το συγκεκριμένο λογισμικό αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση του ρέματος μέσω μιας επιφάνειας (surface) ,του κεντρικό άξονα μέσω της οριζοντιογραφίας (alignment) και μερικών διατομών (cross sections) και στην συνέχεια στην εξαγωγή της τελικής γεωμετρίας του σε ένα αρχείο γεωμετρίας για χρήση του από το HEC-RAS και από το TELEMAC.

2.2.2 Χάραξη οριζοντιογραφίας ρέματος

Για την χάραξη της οριζοντιογραφίας του ρέματος ελήφθησαν στοιχεία από τη μελέτη του Βασιλόπουλου.Πιο συγκεκριμένα εξήχθησαν οι τοπικές συντεταγμένες σε (X,Y) των 60 χαρακτηριστικών διατομών του ρέματος στο Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς της Ελλάδας στο ΕΓΣΑ '87.Έπειτα αφού ορίσαμε το σύστημα συντεταγμένων με το οποίο θα δουλέψουμε στο Civil 3D ως το ΕΓΣΑ'87(GGRS 87) τοποθετήσαμε ως σημεία(POINTS) με τις συντεταγμένες τους στο (X,Y) επίπεδο την θέση του μέσου κάθε διατομής στο σχέδιο.Στην συνέχεια ενώνοντας τα σημεία με μια polyline σχεδιάζουμε την οριζοντιογραφία του κύριου άξονα του ρέματος.

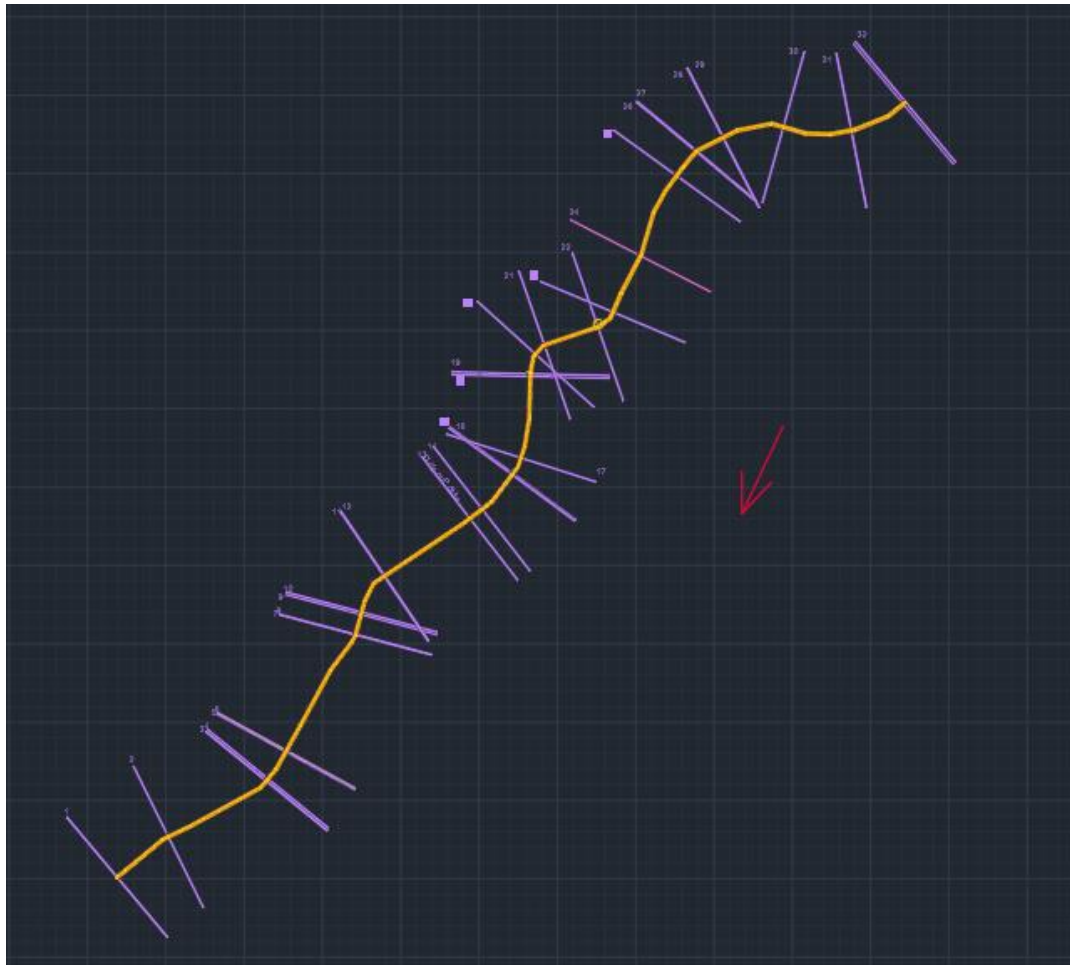
Από την ίδια μελέτη εξάγουμε και τα δεδομένα για τις Χιλιομετρικές Θέσεις(X.Θ) μεταξύ των διατομών, τις κλίσεις(%) καθώς και την γεωμετρία τους αν είναι ορθογωνικές ή τραπεζοειδείς την κλίση των πρανών και το ύψος τους. Τα στοιχεία αυτά συνοψίζονται στους Πίνακες 2.2.2.1 και 2.2.2.2 για ορθογωνικές και τραπεζοειδής διατομές.

Πίνακας Error! No text of specified style in document..2-1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παροχετευτικότητα διατήρησης ελεύθερου πειρωρίου 50 cm/εξάντλησης ελεύθερου περιθωρίου του ανάντη τμήματος του ρέματος Προφήτη Δανιήλ (Από Λ. Αθηνών έως οδό Αγίου Πολυκάρπου), στην υφιστάμενη κατάσταση

Χ.Θ (m)		Αριθμός Διατομής	Μήκος (m)	Κλίση (%)	Ορθογωνική διατομή b(m)xh(m)	Παροχετευτικότητα (m ³ /s)
από	έως					
0.0	198.0	Δ01 / Δ02	198.0	0.61	6.83x3.45	102/165
198.0	419.0	Δ03	221.0	0.85	6.83x3.45	120/195
419.0	620.0	Δ04	201.0	0.40	6.30x3.70	82/131
620.0	621.0	Δ05	1.0	Πτώση 0.40 m		
621.0	715.0	Δ06	94.0	0.80	2x3.20x3.70	118/190
715.0	718.0	Δ07	3.0	Πτώση 0.76 m ΙΕΡΑ ΟΔΟΣ		
718.0	816.5	Δ08	98.5	0.80	6.30x3.70	114/186
816.5	1100.0	Δ09	283.5	0.80	6.00x3.15	86/ 140

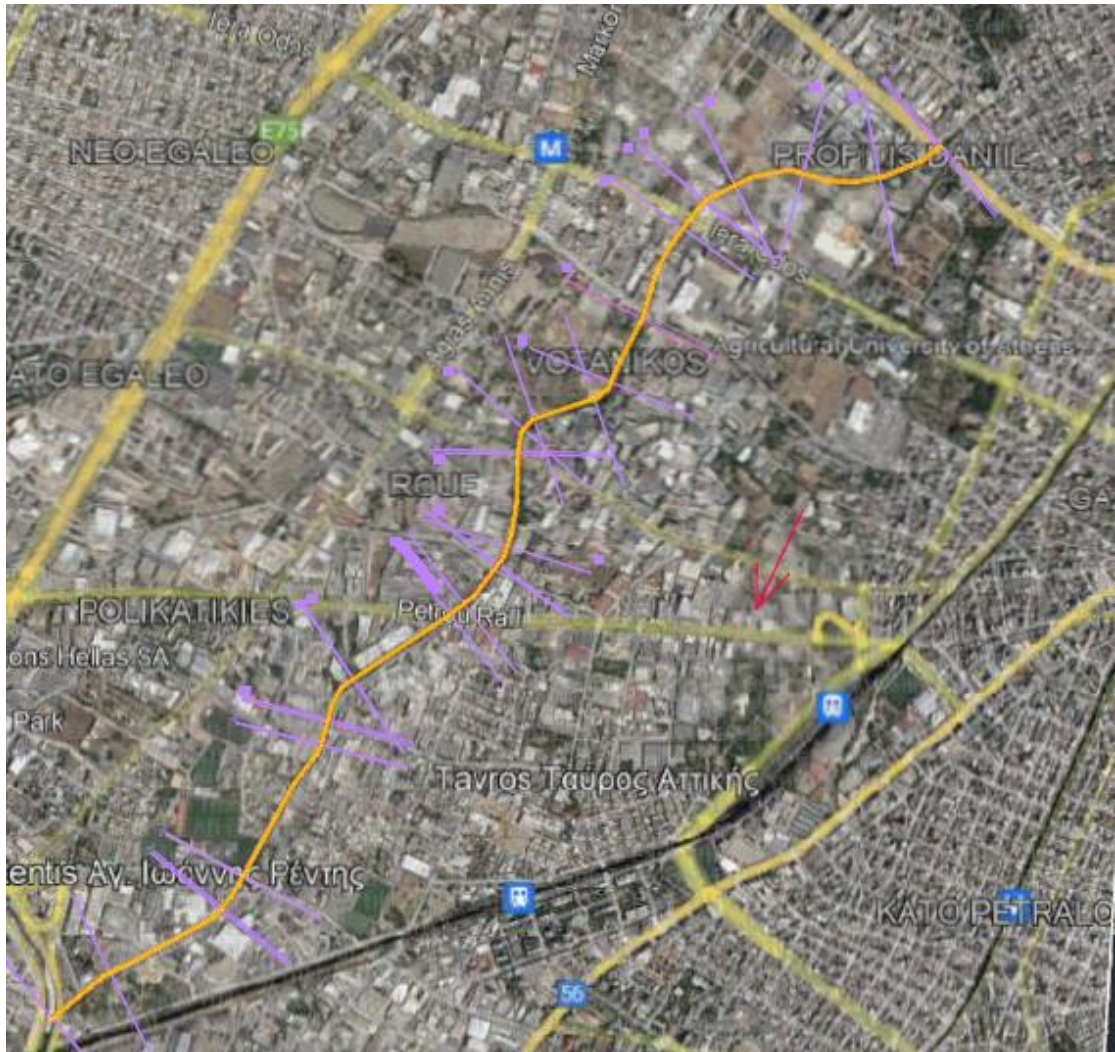
Πίνακας Error! No text of specified style in document..2-2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και παροχετευτικότητα διατήρησης ελεύθερου πειρωρίου 50 cm/εξάντλησης ελεύθερου περιθωρίου του ανάντη τμήματος του ρέματος Προφήτη Δανιήλ (Από Λ. Αθηνών έως οδό Αγίου Πολυκάρπου), στην υφιστάμενη κατάσταση

Χ.Θ (m)		Αριθμός Διατομής	Μήκος (m)	Κλίση (%)	Τραπεζοειδής διατομή b(m)χh(m) i(m:m)	Παροχτευτικότητα (m ³ /s)
από	έως					
1100.0	1300.0	Δ10	200.0	0.87	6.70x3.60 1:10	183/225
1300.0	1370.0	Δ11	70.0	0.6	Τμήμα ακανόνιστης διατομής	
1370.0	1550.0	Δ12	180.0	1.0	5.60x3.60 1:6	165/205
1550.0	1591.0	Δ13	41.0	0.42	5.10x3.60 1:7	91/114
1591.0	1657.0	Δ14	66.0	0.15	5.60x3.60 1:6	64/78
1657.0	1665.5	Δ15	8.5	ΓΕΦΥΡΑ b=5.4m ΟΔΟΣ ΟΡΦΕΩΣ		
1665.5	1928.5	Δ16	263.0	0.28	5.60x3.80 1:8	92/112
1928.5	1984.5	Δ17	56.0	1.12	4.30x3.80 1:5	144/177
1984.5	1989.9	Δ18	5.4	ΓΕΦΥΡΑ b=4.4m ΟΔΟΣ ΣΑΛΑΜΙΝΙΑΣ		
1989.9	2136.9	Δ19	147.0	0.23	5.40x3.80 1:6	83/101
2136.9	2185.9	Δ20	49.0	ΓΕΦΥΡΑ b=5.5m ΟΔΟΣ ΠΕΤΡΟΥ ΡΑΛΛΗ		
2185.9	2513.9	Δ21	328.0	0.41	5.40x3.80 1:6	110/135
2513.9	2516.3	Δ22	2.4	ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑ b=5.4 m		
2516.3	2656.3	Δ23	140.0	0.44	5.40x3.80 1:6	114/140
2656.3	2664.3	Δ24	8.0	ΓΕΦΥΡΑ b=5.4m Λ. ΕΙΡΗΝΗΣ		
2664.3	2730.3	Δ25	66.0	0.77	5.40x3.80 1:6	152/186
2730.3	2731.5	Δ26	1.2	ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑ b=5.4 m		
2731.5	3162.5	Δ27	431.0	0.41	5.50x3.5 1:6	98/120
3162.5	3167.0	Δ28	4.5	ΓΕΦΥΡΑ b=5.6m ΚΑΙ ΠΤΩΣΗ 0.60 m ΟΔΟΣ ΛΕΓΑΚΗ		
3167.0	3271.0	Δ29	104.0	0.47	5.50x3.80 1:6	107/132
3271.0	3279.3	Δ30	8.3	ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑ b=5.6 m		
3279.3	3641.3	Δ31	362.0	0.41	5.50x3.80 1:5	103/127
3641.3	3850.0	Δ32	208.7	0.11	5.50x3.80-4.40 1:5	53/65



Εικόνα 2.2-1: Ο κύριος άξονας του ρέματος σχεδιασμένος στο Civil3D. Με το κόκκινο βελάκι η κατεύθυνση της ροής. Ενώ οι μωβ γραμμές αναπαριστούν τις διατομές στις αντίστοιχες χιλιομετρικές θέσεις.

Στην συνέχεια με την εφαρμογή Google Earth Pro και το CAD Earth εντοπίζουμε το ρέμα αφού το γεωαναφέρουμε μέσα στο γεωγραφικό περιβάλλον της Αθήνας.



Εικόνα 2.2.2:-Ο κύριος άξονας του ρέματος σχεδιασμένος στο Civil3D μέσα στο περιβάλλον της Google Earth (Google Earth)

2.2.3 Διαμόρφωση τελικής γεωμετρίας

Για την υδραυλική επίλυση στο HEC-RAS πρέπει να διαμορφώσουμε κατάλληλα την γεωμετρία στο Civil 3D ώστε να γίνει η εξαγωγή στο HEC-RAS σε μισο μορφή κατάλληλη για χρήση. Τα βήματα για την διαμόρφωση είναι τα εξής :

1. Η αναπαράσταση της οριζοντιογραφίας του ρέματος θα γίνει μέσω μιας alignment. Η alignment είναι ένας συνδυασμός από ευθυγραμμίες και καμπύλες που μας επιτρέπει να χειριζόμαστε την οριζοντιογραφία του ρέματος ως ένα αντικείμενο(object) αλλά και να επεξεργαζόμαστε τις διατομές(cross sections) στην Χ.Θ που μας ενδιαφέρουν.
2. Η δημιουργία διατομών κατα μήκος της alignment στις Χ.Θ που έχω δεδομένα γίνεται μέσω sample lines. Τοποθετώ επίσης βοηθητικές διατομές στα σημεία που η alignment αλλάζει γωνία κατεύθυνσης για ευκολία στον υπολογισμό των υψομέτρων και στην δημιουργία επιφάνειας(surface) αργότερα.

3. Υπολογίζω την στάθμη του πυθμένα και των πρανών. Από τα δεδομένα της τεχνικής μελέτης έχω ότι στο σημείο εκβολής του ρέματος η στάθμη του πυθμένα είναι στα +7.59. Από τους πίνακες 2.2.1 και 2.2.2 έχω δεδομένα για την κλίση του πυθμένα μεταξύ των χαρακτηριστικών διατομών του ρέματος καθώς και για την κλίση των πρανών αλλά και για το πλάτος του πυθμένα της διατομής. Με τα δεδομένα αυτά υπολογίζω την στάθμη του πυθμένα και των πρανών σε κάθε διατομή του ρέματος. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στους πίνακες Πίνακες 2.3.3-1 και 2.3.3-2

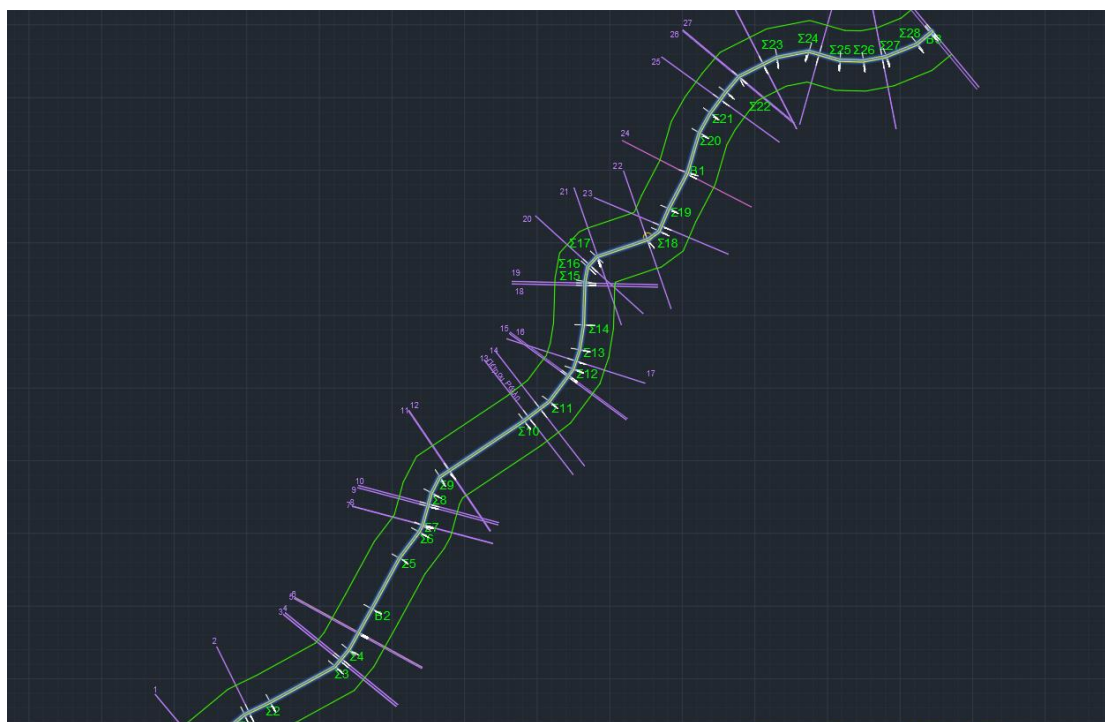
Πίνακας 2.3.3-1: Χαρακτηριστικά μεγέθη διατομών στο ορθογωνικό τμήμα του αγωγού (Βασιλόπουλος, 2011)

Χ.Θ (m)		Αριθμός Διατομή S	Μήκος (m)	Κλίση πυθμένα (%)	Ορθογωνική διατομή b(m)xh(m)	Πλάτος πυθμένα (m)	Στάθμη πυθμένα (m)	Κλίση πρανών (%)	Στάθμη πρανών (m)
από	έως								
0.0	198.0	Δ01 / Δ02	198.0	0.61	6.83x3.45	6.83	29.77/28.56	0	33.22/29.01
198.0	419.0	Δ03	221.0	0.85	6.83x3.45	6.83	26.68	0	30.13
419.0	620.0	Δ04	201.0	0.40	6.30x3.70	6.30	25.88	0	29.58
620.0	621.0	Δ05	1.0	40	6.40x3.70	6.40	25.48	0	29.18
621.0	715.0	Δ06	94.0	0.80	6.40x3.70	6.40	24.73	0	28.43
715.0	718.0	Δ07	3.0	25.33	6.30x3.70	6.30	23.97	0	27.67
718.0	816.5	Δ08	98.5	0.80	6.30x3.70	6.30	23.18	0	26.88
816.5	1100.0	Δ09	283.5	0.80	6.00x3.15	6.00	20.91	0	24.06

Πίνακας 2.3.3-2: Χαρακτηριστικά μεγέθη διατομών στο τραπεζοειδές τμήμα του αγωγού (Βασιλόπουλος, 2011)

Χ.Θ (m)		Αριθμός Διατομής	Μήκος (m)	Κλίση πυθμένα (%)	Τραπεζοειδής διατομή b(m)χh(m)	Πλάτος πυθμένα (m)	Στάθμη πυθμένα (m)	Κλίση πρανών (%)	Στάθμη πρανών (m)
από	έως								
1100.0	1300.0	Δ10	200.0	0.87	6.70x3.60 1:10	6.70	19.17	0.133	22.77
1300.0	1370.0	Δ11	70.0	0.6	6.15x3.60 1:7	6.15	18.75	0.167	22.35
1370.0	1550.0	Δ12	180.0	1	5.60x3.60 1:6	5.6	16.95	0.143	20.55
1550.0	1591.0	Δ13	41.0	0.42	5.10x3.60 1:7	5.1	16.77	0.167	20.37
1591.0	1657.0	Δ14	66.0	0.15	5.60x3.60 1:6	5.6	16.67	0.125	20.27
1657.0	1665.5	Δ15	8.5	0.28	5.40x3.60 1:6	5.4	16.65	0.125	20.25
1665.5	1928.5	Δ16	263.0	0.28	5.60x3.80 1:8	5.6	15.91	0.200	19.71
1928.5	1984.5	Δ17	56.0	1.12	4.30x3.80 1:5	4.3	15.29	0.200	19.09
1984.5	1989.9	Δ18	5.4	0.23	4.30x3.80 1:5	4.4	15.28	0.167	19.08
1989.9	2136.9	Δ19	147.0	0.23	5.40x3.80 1:6	5.4	14.94	0.167	18.74
2136.9	2185.9	Δ20	49.0	0.41	5.50x3.80 1:6	5.5	14.73	0.167	18.53
2185.9	2513.9	Δ21	328.0	0.41	5.40x3.80 1:6	5.4	13.39	0.167	17.19
2513.9	2516.3	Δ22	2.4	0.44	5.40x3.80 1:6	5.4	13.38	0.167	17.18
2516.3	2656.3	Δ23	140.0	0.44	5.40x3.80 1:6	5.4	12.77	0.167	16.56
2656.3	2664.3	Δ24	8.0	0.77	5.40x3.80 1:6	5.4	12.71	0.167	16.5
2664.3	2730.3	Δ25	66.0	0.77	5.40x3.80 1:6	5.4	12.20	0.167	15.99
2730.3	2731.5	Δ26	1.2	0.41	5.40x3.80 1:6	5.4	12.19	0.167	15.98
2731.5	3162.5	Δ27	431.0	0.41	5.50x3.5 1:6	5.5	10.42	0.167	13.92
3162.5	3167.0	Δ28	4.5	13.33	5.60x3.80 1:6	5.6	9.82	0.167	13.62
3167.0	3271.0	Δ29	104.0	0.47	5.50x3.80 1:6	5.5	9.33	0.200	13.13
3271.0	3279.3	Δ30	8.3	0.41	5.50x3.80 1:5	5.6	9.30	0.200	13.1
3279.3	3641.3	Δ31	362.0	0.41	5.50x3.80 1:5	5.5	7.81	0.200	11.61
3641.3	3850.0	Δ32	208.7	0.11	5.50x3.80 1:5	5.5	7.59	0.200	11.39

4. Με τα δεδομένα που έχω για το πλάτος και την στάθμη του πυθμένα καθώς και για την κλίση και την στάθμη των πρανών μπορώ σχεδιάσω την τελική γεωμετρία προς χρήση. Για να αναπαρισταθούν τα υψόμετρα σε κάθε διατομή του ρέματος θα χρησιμοποιηθούν feature lines. Οι feature lines είναι μια επιλογή ευθειών του Civil 3D που μας επιτρέπει να προσθέσουμε υψόμετρα (elevations) στα σημεία που μας ενδιαφέρει. Μέσω παρεμβολής τα υπόλοιπα σημεία της ευθείας αποκτούν και αυτά υψόμετρα. Ετσι οι feature lines μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή επιφάνειας (surface) αργότερα. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζονται στο Civil 3D ο πόδας και το φρύδι του πρανού του ρέματος στα σημεία με τραπεζοειδής διατομή. Λόγω του ότι στο Civil 3D 2 γραμμές feature line δεν μπορούν να ταυτίζονται και στο ορθογωνικό τμήμα του αγωγού ο πόδας και το φρύδι το ρέματος ταυτίζονται στο οριζόντιο επίπεδο δεχόμεστε μια ελάχιστη κλίση πρανών ως παραδοχή θεωρώντας ότι δεν θα επηρεάσει σημαντικά το αποτέλεσμα.
5. Τέλος για την εξαγωγή της γεωμετρίας για υδραυλική επίλυση στο HEC-RAS θα χρειαστεί η δημιουργία μιας επιφάνειας (surface). Ορίζουμε ως βοηθητικές γραμμές (surface breaklines) τις feature lines του αριστερού και δεξιού φρυδιού του ρέματος. Έπειτα ως σύνορο (boundary) της επιφάνειας χρησιμοποιούμε τις 2 ακραίες διατομές (Δ01, Δ02) και τις 2 feature lines του αριστερού και δεξιού φρυδιού για την καλύτερη οριοθέτηση της περιοχής μελέτης του ρέματος. Έπειτα με την εντολή offset σχεδιάζουμε 2 παράλληλες feature lines με τα 2 φρύδια του πρανού του ρέματος με τα ίδια υψόμετρα για να απεικονίσουμε το έδαφος γύρω από το ρέμα. Τις διατομές που σχεδιάσαμε τις παρεμβάλλουμε με την επιφάνεια ώστε να αποκτήσουν την τελική τους μορφή με τα πλάτη του πυθμένα και το ύψος και την κλίση των πρανών. Τέλος κατασκευάζουμε την επιφάνεια από τις breaklines και το σύνορο που έχουμε ορίσει προηγουμένως.



Εικόνα 3.2.3-1: Η τελική γεωμετρία του ρέματος. Με το λευκό χρώμα η επιφάνεια του ρέματος στο Civil 3D (Βασιλόπουλος, 2011)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS

3.1. Γενικά

Η μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των ρεμάτων ώστε να μελετηθεί η υδραυλική απόκριση τους για διάφορα σενάρια παροχών, απαιτεί έναν συνδυασμό υποβάθρων από τα γνωστικά πεδία της Μηχανικής των Ρευστών καθώς και χειρισμό κατάλληλων υδραυλικών μοντέλων. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η λειτουργία του υδραυλικού μοντέλου HEC-RAS καθώς και οι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιεί και οι θεωρητικές αρχές πάνω στις οποίες βασίζεται.

3.2. Το μοντέλο HEC-RAS

3.2.1 Εισαγωγή

Το μοντέλο HEC-RAS είναι ένα πολυχρηστικό εργαλείο για τη μονοδιάστατη ανάλυση και προσομοίωση φυσικών υδατορευμάτων. Πρόκειται για ένα σύνολο μοντέλων με 4 συνιστώσες ανάλυσης :

- Υπολογισμός του προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε συνθήκες μόνιμης ροής
- Υπολογισμοί σε συνθήκες μη μόνιμης ροής
- Υπολογισμοί απόθεσης φερτών υλών
- Υπολογισμοί σχετικά με την ποιότητα του νερού

Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο έχει τη δυνατότητα υπολογισμού της στάθμης του νερού για βαθμιαίως μεταβαλλόμενη ροή σε δίκτυο τεχνητών αγωγών, σε σύστημα υδατορευμάτων με τεχνικά έργα ή φυσικές κοίτες σε συνθήκες υποκρίσιμης ή υπερκρίσιμης ροής. Επίσης, δύναται να υπολογίσει υδραυλικά άλματα, υδραυλικές συνθήκες σε γέφυρες, οχετούς, υπερχειλιστές (με ή χωρίς θυροφράγματα), στενώσεις καθώς και τη διάβρωση της κοίτης στις γέφυρες.

3.2.2 Μόνιμη ροή

Με το HEC-RAS υπολογίσαμε το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας για μόνιμη ροή και πραγματοποιήσαμε υπολογισμούς ροής μονοδιάστατης ανάλυσης. Η μονοδιάστατη ανάλυση που χρησιμοποιεί το HEC-RAS ενδείκνυται για ροή σε ευθύγραμμους σωλήνες σταθερής διατομής ή σε ευθύγραμμους αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια και σταθερή διατομή καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις η κατά μήκος συνιστώσα της ταχύτητας u είναι πολύ σημαντικότερη των άλλων 2 συνιστωσών v και w .

Μπορεί να διαχειριστεί έναν και μοναδικό ποταμό ή ένα δίκτυο από ποταμίσκους που διακλαδώνονται. Επίσης η προσομοίωση μπορεί να γίνει υπό συνθήκες υποκρίσιμης υπερκρίσιμης ή ακόμα και σε συνδυασμό των 2 ροών (mixed flow). Οι απώλειες ενέργειας στην μόνιμη ροή υπολογίζονται από την τριβή του πυθμένα (εξίσωση του Manning) και από τις απώλειες λόγω συστολής και διαστολής. Η εξίσωση απώλειας ενέργειας που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι η εξής :

$$z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (3.1)$$

Z_1, Z_2 : το υψόμετρο πυθμένα στις διατομές 1 και 2
 Y_1, Y_2 : τα βάθη ροής στις διατομές 1 και 2
 a_1, a_2 : συντελεστές διόρθωσης
 g : η επιτάχυνση της βαρύτητας
 h_e : απώλειες ενέργειας

Οι απώλειες ενέργειας μεταξύ 2 διατομών υπολογίζονται από την σχέση :

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3.2)$$

\bar{S}_f : αντιπροσωπευτική κλίση απωλειών ενέργειας μεταξύ των διατομών 1 και 2
 L : σταθμισμένο μήκος μεταξύ των 2 διατομών
 C : συντελεστής συστολής ή διαστολής

Όπου το μήκος L υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (3.3)$$

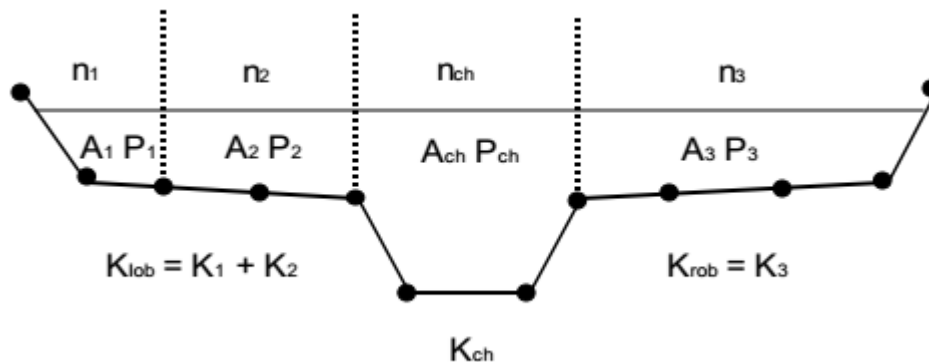
L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} : το μήκος μεταξύ των 2 διατομών της αριστερής πλημμυρικής κοίτης της κύριας κοίτης και της δεξιάς πλημμυρικής κοίτης.

$\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$: ο αριθμητικός μέσος όρος των παροχών μεταξύ των 2 διατομών

3.2.3 Ροή σε σύνθετες διατομές

Ροή σε σύνθετες διατομές εμφανίζεται εν γένει κατά τη διάρκεια πλημμύρων σε φυσικούς ποταμούς όπου η κυρίως κοίτη δεν επαρκεί για τη διερχόμενη παροχή, με αποτέλεσμα να έχουμε υπερχειλίση στις εκατέρωθεν πλημμυρικές κοίτες. Σε αυτές τις διατομές λόγω του διαφορετικού βάθους και της διαφορετικής ταχύτητας οι ταχύτητες ροής στα επιμέρους τμήματα της διατομής είναι συνήθως διαφορετικές. Αυτό έχει σαν συνέπεια να αναπτύσσονται σημαντικές δυνάμεις εσωτερικής τριβής μεταξύ των τμημάτων και συμβαίνει μεταφορά ποσότητας κίνησης που επιβραδύνει το ταχύτερα κινούμενο ρέμα ενώ επιβραδύνει βραδύτερα κινούμενο.

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το HEC-RAS είναι να διαιρεί τη ροή σε επιμέρους τμήματα στα οποία η ταχύτητα είναι ομοιόμορφα κατανομημένη.



Εικόνα 3.2-1: Σύνθετη διατομή
 (Brunner, 2021)

Η παροχή υπολογίζεται για κάθε επιμέρους κομμάτι βάσει των εξισώσεων:

$$Q = K S_f^{1/2} \quad (3.4)$$

$$K = \frac{1.486}{n} A R^{2/3} \quad (3.5)$$

K: παροχή κάθε επιμέρους τμήματος
n: συντελεστής Manning για κάθε επιμέρους τμήμα
A: εμβαδό για κάθε επιμέρους τμήμα
R: υδραυλική ακτίνα για κάθε επιμέρους τμήμα
S_f: κλίση γραμμής ενέργειας

Το HEC-RAS αθροίζει τις παροχές κάθε επιμέρους τμήματος για να υπολογίσει τελικά 2 παροχές μια της αριστερής και μια της δεξιάς πλημμυρικής κοίτης. Η παροχή της κύριας κοίτης υπολογίζεται κανονικά ως ένα μοναδικό τμήμα. Έπειτα αθροίζονται οι 3 τιμές αυτές μεταξύ τους ώστε να υπολογισθεί η συνολική παροχή της διατομής.

Κατά αναλογία με τις παροχές ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής σε σύνθετες διατομές είναι η διαφορά στη μέση ανα τμήμα ταχύτητα λόγω της διαφοράς ανα τμήμα υδραυλικής ακτίνας και της διαφορετικής τραχύτητας. Για παράδειγμα στις πλημμυρικές κοίτες ενός ποταμού η τραχύτητα είναι συνήθως κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτήν της κύριας κοίτης λόγω της ύπαρξης σε αυτές θάμνων δέντρων κλπ.

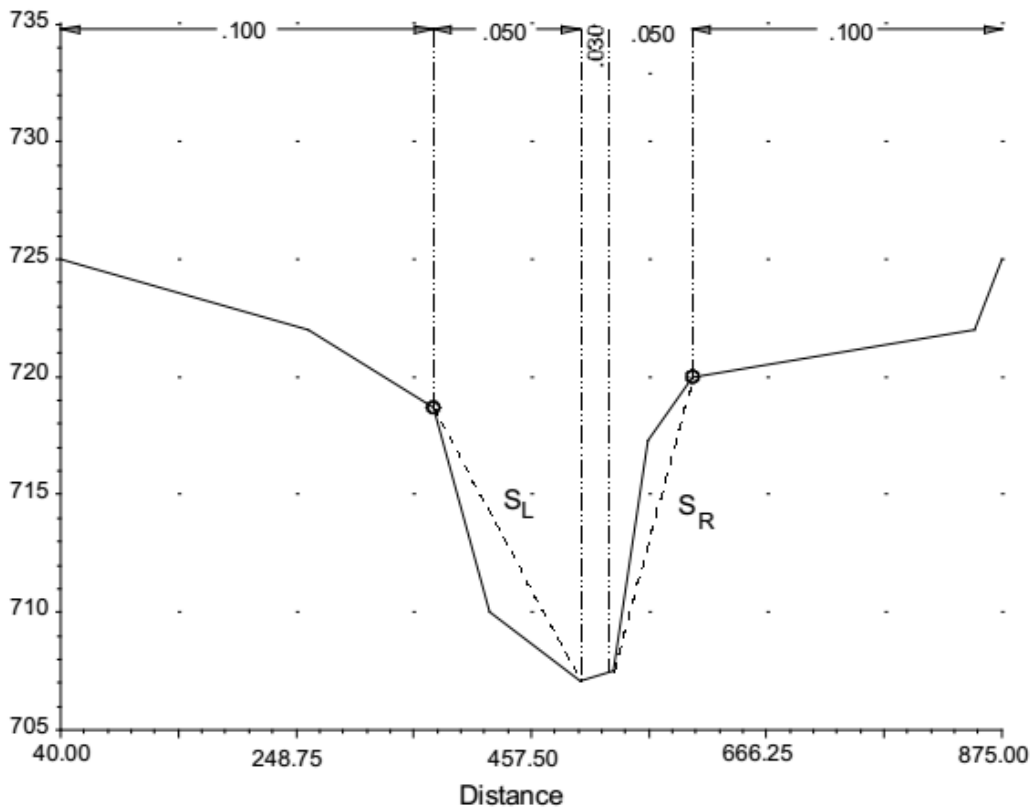
Το HEC-RAS για την σύνθετη διατομή αφού την χωρίσει σε επιμέρους τμήματα όπου το καθένα έχει μια επιμέρους τραχύτητα και επιμέρους βρεχόμενη περίμετρο υπολογίζει μια ισοδύναμη τραχύτητα βάσει της εξίσωσης :

$$n_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3} \quad (3.6)$$

n_i: συντελεστής τραχύτητας του επιμέρους τμήματος της διατομής
P_i: βρεχόμενη περίμετρος του κάθε επιμέρους τμήματος
P: βρεχόμενη περίμετρος της συνολικής διατομής

Ύστερα εξετάζεται από το HEC-RAS για το αν αυτή η τιμή της ισοδύναμης τραχύτητας μπορεί να εφαρμοστεί ή θα συνεχίσει τους υπολογισμούς με τι επιμέρους τραχύτητες του κάθε τμήματος.

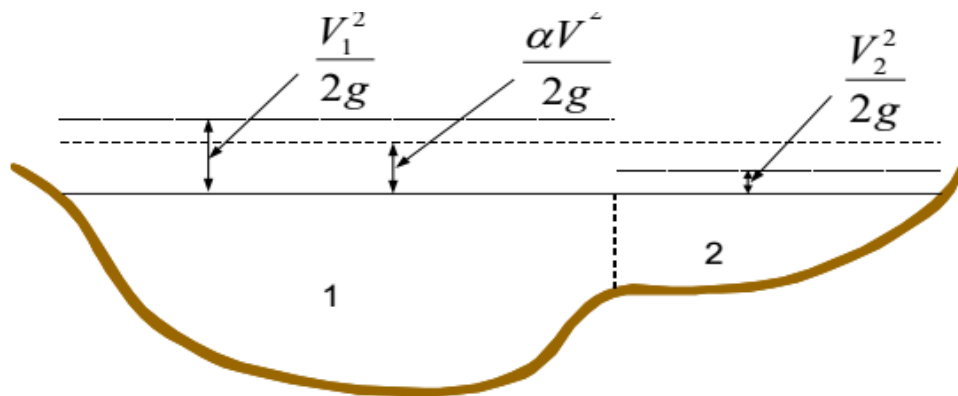
Αν η κλίση του πρηνούς της κύριας κοίτης είναι μεγαλύτερη 0.2 και στην κύρια κοίτη βρίσκονται τμήματα με διαφορετικούς συντελεστές τραχύτητας τότε χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς η ισοδύναμη τραχύτητα. Η κλίση αυτή ορίζεται ως η διαφορά του υψομέτρου 2 γειτονικών σημείων με διαφορετικό συντελεστή τραχύτητας προς την οριζόντια απόσταση τους όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1-2.



Εικόνα 3.2-2: Παράδειγμα υπολογισμού κλίσης στο HEC-RAS (Brunner,2021)

3.2.4. Υπολογισμός της μέσης κινητικής ενέργειας

Το HEC-RAS υπολογίζει μια τιμή της κινητικής ενέργειας για κάθε διατομή. Έτσι για ένα δεδομένο ύψος ελεύθερης επιφάνειας δίνεται η μέση κινητική ενέργεια της συνολικής διατομής υπολογίζοντας μια σταθμισμένη ενέργεια με βάση την παροχή από τα 3 επιμέρους μέρη της συνολικής διατομής: την αριστερή πλημμυρική κοίτη, τη κύρια κοίτη και την δεξιά πλημμυρική κοίτη. Στην εικόνα 2.1-3 φαίνεται πως υπολογίζεται η μέση κινητική ενέργεια σε μια διατομή με δεξιά πλημμυρική κοίτη



V_1 = mean velocity for subarea 1

V_2 = mean velocity for subarea 2

Εικόνα 3.2-3: Υπολογισμός μέσης κινητική ενέργειας σε διατομή (Brunner,2021)

Για τον υπολογισμό της μέσης κινητικής ενέργειας είναι απαραίτητη η εκτίμηση του συντελεστή διόρθωσης α . Εξισώνοντας την μέση κινητική ενέργεια με το άθροισμα της ενέργειας στην κύρια κοίτη και στην πλημμυρική κοίτη :

$$\alpha \frac{\bar{v}^2}{2g} = \frac{2g \left[Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g} \right]}{Q_1 + Q_2} \quad (3.7)$$

Συνεχίζοντας με τις πράξεις καταλήγουμε σε μια τιμή για τον συντελεστή α :

$$\alpha = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q_2) \bar{v}^2} \quad (3.8)$$

Ο γενικός τύπος υπολογισμού του α για περισσότερες κοίτες είναι ο :

$$\alpha = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_N V_N^2}{Q \bar{v}^2} \quad (3.9)$$

3.2.5. Εκτίμηση του συντελεστή τριβής

Οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβής εκτιμώνται από το HEC-RAS ως το γινόμενο της κλίσης των απωλειών ενέργειας λόγω τριβής \bar{S}_f και του μήκους μεταξύ 2 διατομών L όπως αυτό ορίζεται από την εξίσωση 2.1-3. Η κλίση της γραμμής ενέργειας σε κάθε διατομή υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad (3.10)$$

Το HEC-RAS υπολογίζει την κλίση της γραμμής ενέργειας βάσει των τύπων:

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (3.11)$$

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad (3.12)$$

$$\bar{S}_f = \sqrt{S_{f1} \times S_{f2}} \quad (3.13)$$

Το HEC-RAS για τον υπολογισμό της κλίσης ενέργειας χρησιμοποιεί ως προεπιλογή την εξίσωση 2.1-11 εκτός και αν μια διαφορετική εξίσωση επιλεγεί από τον χρήστη ανά τύπο ροής προφίλ ελεύθερης επιφάνειας.

3.2.6. Εκτίμηση του συντελεστή συστολής διαστολής

Οι απώλειες ενέργειας λόγω συστολής και διαστολής υπολογίζονται από το HEC-RAS βάσει της εξίσωσης :

$$h_{cc} = C \left| \frac{a_1 V_1^2}{2g} - \frac{a_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (3.14)$$

Το πρόγραμμα θεωρεί ότι υπάρχει συστολή όταν η ταχύτητα ροής στα κατάντη είναι μεγαλύτερη από αυτήν στα ανάντη και αντίστροφα. Μερικές τιμές του συντελεστή C για υποκρίσιμη ροή δίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.2-6 Τιμές του συντελεστή C για διάφορες καταστάσεις (Brunner,2021)

	Contraction	Expansion
No transition loss computed	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Typical Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

3.2.7. Βήματα υπολογισμού

Για να υπολογιστεί το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας σε μια τυχαία διατομή θα ακολουθηθεί η παρακάτω επαναληπτική διαδικασία με τα εξής βήματα :

1. Υποτίθεται ένα ύψος ελεύθερης επιφάνειας στον πιο ανάντη σταθμό αν έχει επιλεγεί καθεστώς υποκρίσιμης ροής, αλλιώς στον πιο κατάντη σταθμό αν το πρόγραμμα θα εκτελεστεί με υπερκρίσιμη ροή.
2. Βάσει αυτού του υποτιθέμενου ύψους προσδιορίζεται η ανάλογη συνολική παροχή και το ύψος ταχύτητας.
3. Με τιμές από το βήμα 2 υπολογίζεται η μέση κλίση της γραμμής ενέργειας \bar{S}_f και υπολογίζονται οι απώλειες ενέργειας h_e βάσει της εξίσωσης 2.2-2.
4. Με τις τιμές από τα βήματα 2 και 3 λύνω την εξίσωση 2.2.1 και βρίσκω ένα νέο ύψος ελεύθερης επιφάνειας.
5. Συγκρίνω αυτό το νέο ύψος ελεύθερης επιφάνειας με αυτό που είχα βρει στο βήμα 1.

3.2.8. Υπολογισμός του κρίσιμου βάθους

Το κρίσιμο βάθος για μια διατομή μπορεί να υπολογιστεί αν μια από τις παρακάτω συνθήκες ικανοποιούνται:

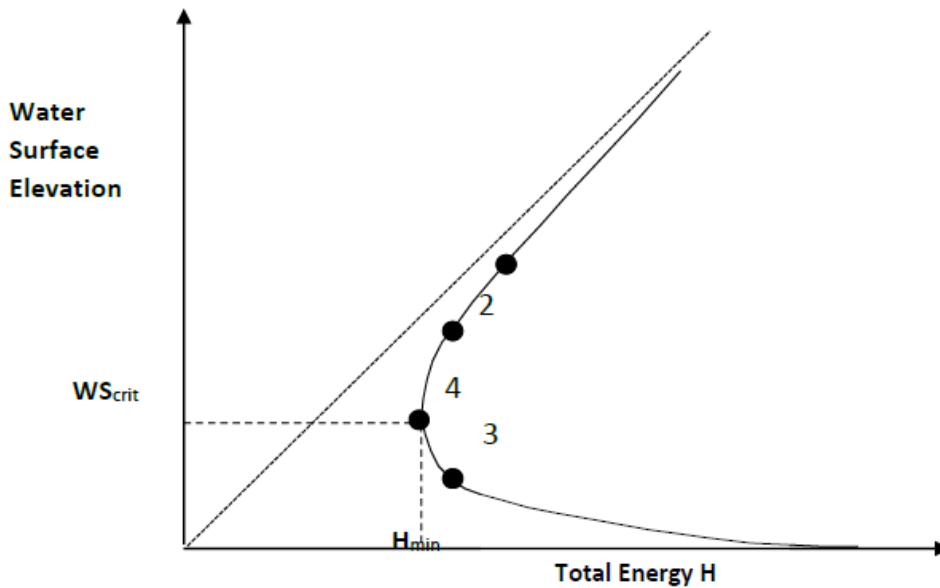
1. Έχουμε μια κατάσταση υπερκρίσιμης ροής.
2. Έχει ζητηθεί από τον χρήστη ο υπολογισμός του κρίσιμου βάθους.
3. Είναι μια διατομή εξωτερικό όριο και το κρίσιμο βάθος πρέπει να υπολογιστεί ώστε να επιβεβαιώσουμε την υπόθεση που έχουμε κάνει για την κατάσταση της ροής (υποκρίσιμη ή υπερκρίσιμη) στην περιοχή.
4. Ο έλεγχος του αριθμού Froude για ένα προφίλ υποκρίσιμης ροής δείχνει ότι το κρίσιμο βάθος χρειάζεται να καθοριστεί ώστε να επιβεβαιωθεί ότι η κατάσταση της ροής σχετίζεται με το αυξημένο ύψος.
5. Το μοντέλο δεν μπορεί να ισορροπήσει την εξίσωση ενέργειας πριν φτάσει στον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων.

Το συνολικό ύψος ενέργειας σε μια διατομή καθορίζεται από την εξίσωση :

$$H = WS + \frac{aV^2}{2g} \quad (3.15)$$

H=συνολικό ύψος ενέργειας
 WS=ύψος ελεύθερης επιφάνειας
 $\frac{aV^2}{2g}$ =ύψος κινητικής ενέργειας

Το κρίσιμο βάθος ροής είναι εκείνο το βάθος για το οποίο η ειδική ενέργεια ελαχιστοποιείται για δεδομένη παροχή. Το κρίσιμο ύψος καθορίζεται από μια επαναληπτική διαδικασία όπου υποθέτουμε το βάθος ροής μέχρι να ελαχιστοποιηθεί το ύψος ενέργειας.



Εικόνα 3.2-5: Υπολογισμός κρίσιμου βάθους σε μια διατομή (Brunner,2021)

3.2.9. Η εξίσωση ορμής

Όταν το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας ξεπεράσει το κρίσιμο βάθος τότε η εξίσωση ενέργειας δεν θεωρείται πια εφαρμόσιμη. Η εξίσωση ενέργειας εφαρμόζεται μόνο όταν έχω βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή ενώ η μετάβαση από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη ροή θεωρείται ταχέως μεταβαλλόμενη ροή. Τέτοιου είδους μετάβαση συμβαίνει σε περιοχή απότομης αλλαγής κλίσης πυθμένα, π.χ σε ροή κάτω από γέφυρες καθώς και σε ροή κοντά σε υπερχειλιστές και θυροφράγματα.

Στο HEC-RAS η εξίσωση ορμής χρησιμοποιείται όταν έχω υδραυλικό άλμα, διακλαδώσεις αγωγών και σε ροή κοντά σε βάθρο γέφυρας.

$$\frac{Q_2 \beta_2^2}{gA_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) LS_o - \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) LS_f = \frac{Q_1^2 \beta_1}{gA_1} + A_1 \bar{Y}_1 \quad (3.17)$$

$Q_{1,2}$: παροχές στις διατομές (1) και (2)

$\beta_{1,2}$: συντελεστές συνόρθωσης στις διατομές (1) και (2)

L : απόσταση μεταξύ των 2 διατομών

S_f : κλίση γραμμής ενέργειας

$A_{1,2}$: βρεχόμενη περίμετρος των διατομών (1) και (2)

\bar{Y}_1, \bar{Y}_2 : βάθη ροής μετρημένα από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι το κεντροειδές της περιοχής μεταξύ των διατομών (1) και (2).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ TELEMATAC

4.1 Γενικά

Το σύστημα TELEMATAC – MASCARET αποτελεί μία πλατφόρμα λογισμικών ελεύθερης πρόσβασης και ανοιχτού κώδικα, που βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της ροής σε ελεύθερη επιφάνεια. Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε από το εργαστήριο *Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE)* της διεύθυνσης έρευνας & ανάπτυξης (*Direction des Recherches et Développements, R&D*) της Γαλλικής Εταιρείας Ηλεκτρισμού (*Electricité de France, EDF*) και αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα υδραυλικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην Γαλλία από ερευνητικά κέντρα και οργανώσεις στον χώρο της περιβαλλοντικής υδραυλικής. Το σύστημα TELEMATAC-MASCARET χρησιμοποιεί διάφορα λογισμικά όπως για την επίλυση διάφορων προβλημάτων όπως τα :

- SISYPHE είναι το μοντέλο στερεομεταφοράς και εξέλιξης του πυθμένα.
- NESTOR που αξιοποιεί τα δεδομένα από βυθοκορίσεις σε ποταμούς
- ARTEMIS, που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της διάδοσης ανεμογενών κυμάτων σε ακτές ή λιμένες, σε ένα γεωγραφικό πεδίο με λίγα τετραγωνικά χιλιόμετρα.
- TELEMATAC – 2D, είναι το υδροδυναμικό μοντέλο 2D που χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις που χαρακτηρίζονται από μικρό σε σχέση με την επιφάνεια βάθος (ρηχά κύματα)
- TELEMATAC – 3D χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις που αφορούν σχετικά μικρής έκτασης περιοχής μελέτης στις οποίες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα μέσα καθ' ύψος μεγέθη.

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το υπομοντέλο Telemac-2D. Το λογισμικό χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα θαλάσσιας ή ποτάμιας υδραυλικής, όπου εμφανίζονται ροές με ελεύθερη επιφάνεια. Η βασική λειτουργία του είναι η αριθμητική επίλυση των μέσων ως προς το βάθος εξισώσεων της δισδιάστατης ροής ή αλλιώς των εξισώσεων ρηχών κυμάτων (depth-averaged free surface flow equations ή shallow water equations) όπως αυτές διατυπώθηκαν για πρώτη φορά από τον Barré de Saint-Venant το 1871. Τα κυριότερα αποτελέσματα του μοντέλου σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος είναι το βάθος ροής και οι συνιστώσες της ταχύτητας στις δύο διαστάσεις της ροής.

Το Telemac – 2D μπορεί να προσομοιώσει πλήθος διεργασιών και να λάβει υπόψη του τα παρακάτω φαινόμενα:

- Τριβή πυθμένα
- Τύρβη
- Την επίδραση της δύναμης Coriolis
- Την επίδραση μετεωρολογικών φαινομένων, όπως ατμοσφαιρική πίεση και άνεμος.
- Εισαγωγή υπερχειλιστών, αναχωμάτων, οχετών και άλλων τεχνικών στο υπολογιστικό πεδίο
- Περιοχές που παραμένουν στεγνές κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης (flood-plains ή tidal flats)
- Μεταφορά και διάχυση ιχνηθετών, υπό την επίδραση ρευμάτων

- Υπολογισμός της ποιοτικής κατάστασης του υδάτινου σώματος (σύζευξη με μοντέλα ποιότητας υδάτων, π.χ. DELWAQ)
- Στις εφαρμογές θαλάσσιας υδραυλικής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό προβλητών και κυματοθραυστών

4.2 Εξισώσεις του μοντέλου

Ο κώδικας του TELEMAC-2D επιλύει το ακόλουθο σύστημα διαφορικών εξισώσεων

1. Εξίσωση Συνέχειας

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(h) + h \cdot \text{div}(\vec{u}) = S_h \quad (4.1)$$

2. Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά τη διεύθυνση x

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(u) = -g \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \cdot \text{div}(h\nu_t \vec{\nabla}(u)) \quad (4.2)$$

3. Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά τη διεύθυνση y

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(v) = -g \cdot \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \cdot \text{div}(h\nu_t \vec{\nabla}(v)) \quad (4.3)$$

4. Ισοζύγιο μάζας του ιχνηθέτη

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(T) = S_T + \frac{1}{h} \cdot \text{div}(h\nu_T \vec{\nabla}(T)) \quad (4.4)$$

Όπου:

h (m) : το βάθος ροής

u, v (m/s) : οι συνιστώσες της ταχύτητας

T (g/l or °C) : παθητικός ιχνηθέτης

t (s) : ο χρόνος

x, y (m) : οριζόντιες συντεταγμένες

g (m/s²) : η επιτάχυνση της βαρύτητας

ν_t (m²/s) : η τυρβώδης συνεκτικότητα

ν_T (m²/s) : ο συντελεστής διάχυσης του ρύπου

Z (m) : το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας

S_h (m/s) : ο όρος πηγής της εξίσωσης συνέχειας

S_x, S_y (m/s²) : όροι πηγής των εξισώσεων ποσότητας κίνησης

S_T (g/l/s) ο όρος πηγή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας του ρύπου

Οι άγνωστες μεταβλητές στις παραπάνω εξισώσεις είναι το βάθος νερού h , η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας u , η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας v και ο παθητικός ιχνηθέτης T . Οι εξισώσεις δίνονται σε καρτεσιανό σύστημα, αλλά μπορούν να δοθούν και σε πολικές συντεταγμένες. Οι όροι S_x, S_y (m/s²) είναι όροι πηγής που αντιπροσωπεύουν τον αέρα, την τριβή του πυθμένα, την δύναμη Coriolis ή την πηγή της ορμής μέσα στο πεδίο.

Η τυρβώδης συνεκτικότητα είτε δίνεται από τον χρήστη είτε καθορίζεται από ένα μοντέλο το οποίο προσομοιώνει την μεταφορά των όρων k (τυρβώδης κινητική ενέργεια) και E (τυρβώδης διάχυση).

Στην περίπτωση που οι μη υδροστατικές δυνάμεις δεν μπορούν να αμεληθούν, μπορεί να γίνει προσθήκη κάποιων επιπλέον όρων στις εξισώσεις Saint Venant, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Serre, Boussinesq, Korteweg, De Vries). Για τη θεώρηση Boussinesq, προστίθενται οι παρακάτω όροι στο δεξί μέλος των εξισώσεων Saint Venant (εξισώσεις Boussinesq):

$$-\frac{H_0^2}{6} \text{grad} \left[\text{div} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \right] + \frac{H_0}{2} \text{grad} \left[\text{div} \left(H_0 \frac{\partial u}{\partial t} \right) \right] \quad (4.5)$$

4.3 Μοντέλα τύρβης

Η γένεση της τύρβης προκαλείται από αστάθεια της ροής οφειλόμενη είτε στις συνθήκες ροής είτε σε τυχαία διατάραξη και εμφανίζεται κατά κανόνα σε περιοχές σημαντικών δυνάμεων συνεκτικότητας, όπως είναι οι περιοχές σημαντικών κλίσεων της ταχύτητας. Η τυρβώδης ροή πραγματοποιείται όταν οι δυνάμεις αδράνειας είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις συνεκτικότητας. Τα μοντέλα τύρβης είναι μαθηματικά μοντέλα τα οποία βοηθούν στην πρόβλεψη των αποτελεσμάτων της τυρβώδους ροής.

Ένα διαδεδομένο μοντέλο προσομοίωσης τύρβης είναι το k-ε. Το μοντέλο K-ε προτάθηκε από τους Launder και Spalding. Είναι ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους παραπάνω επιστήμονες και μπορεί να καλύπτει ένα ευρύ φάσμα τυρβώδων ροών δίνοντας πολύ καλά αποτελέσματα για ένα μεγάλο φάσμα ρευστομηχανικών προβλημάτων. Βασίζεται στις εξισώσεις μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια (K) και για τον ρυθμό εκφυλισμού της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ε) (dissipation rate). Για τα δύο αυτά μεγέθη το Telemac-2D λύνει τις παρακάτω εξισώσεις μεταφοράς:

Για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \nabla k = \frac{1}{h} \text{div} \left(h \frac{v_t}{1.0} \nabla k \right) + P - \varepsilon + G \quad (4.6)$$

Για την απόσβεση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ε:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \nabla \varepsilon = \frac{1}{h} \text{div} \left(h \frac{v_t}{1.3} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} + (1.44P - 1.92\varepsilon) - 1.44 \frac{\varepsilon}{k} G \quad (4.7)$$

Όπου P είναι ο όρος παραγωγής ενέργειας λόγω τύρβης και G είναι ο όρος για τις βαρυτικές δυνάμεις. Τα δύο μεγέθη k-ε σχετίζονται με την τυρβώδη συνεκτικότητα με την σχέση:

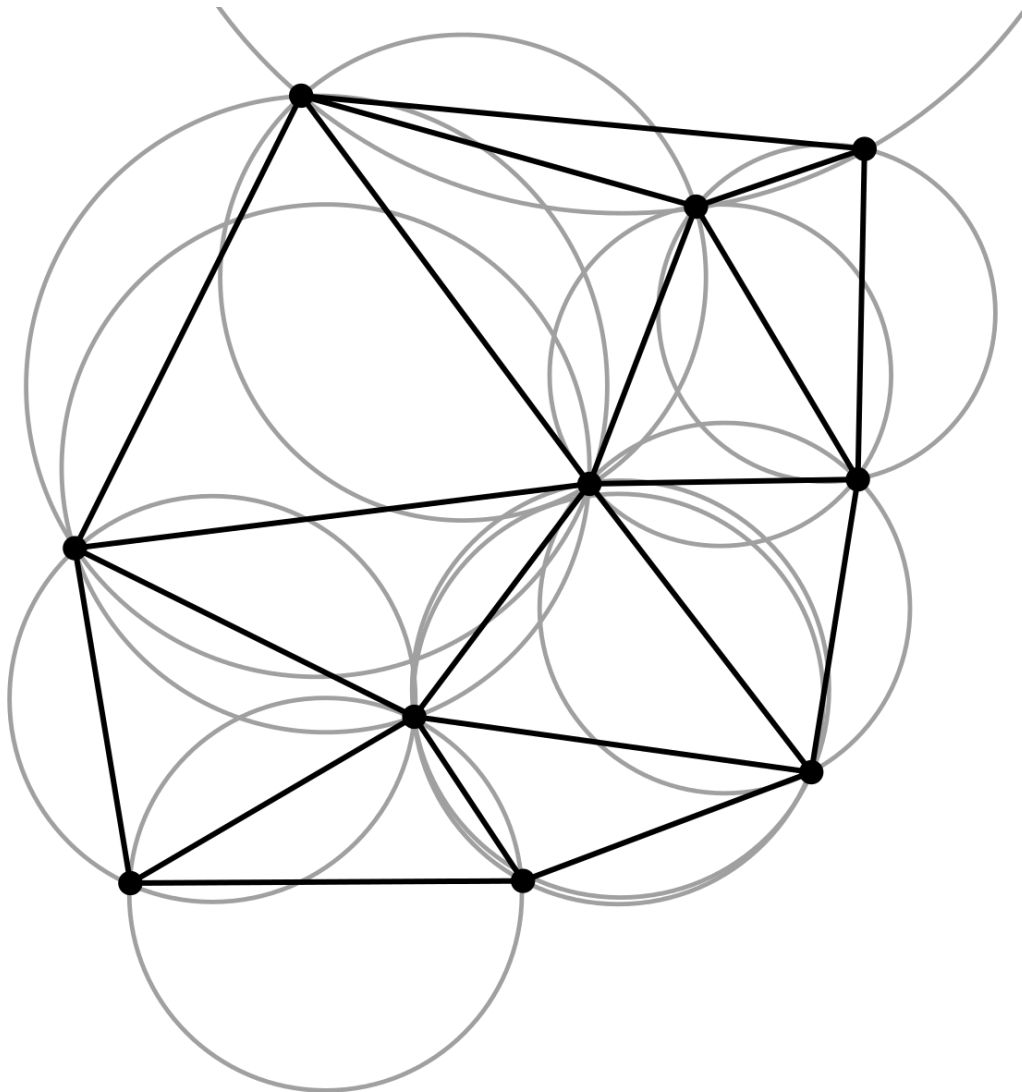
$$v_t = 0.09 \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.8)$$

Ένα άλλο μοντέλο προσομοίωσης της τύρβης είναι με δεδομένη σταθερή τυρβώδη συνεκτικότητα (constant viscosity) την οποία την επιλέγει ο χρήστης. Στην περίπτωση αυτή η τυρβώδης συνεκτικότητα (v_t) είναι σταθερή σε όλο το πεδίο. Μπορεί να ορισθεί η τιμή της ολικής συνεκτικότητας ($v_{ολ}$), η οποία αποτελεί το άθροισμα της κινηματικής συνεκτικότητας (ν) και της τυρβώδους συνεκτικότητας (ν_t). Αυτό το μοντέλο προσομοίωσης έχει επιλεγεί για την παρούσα εργασία

4.4 Το περιβάλλον BlueKenue

Το TELEMAC για την υδραυλική επίλυση χρησιμοποιεί ένα υπολογιστικό πλέγμα(mesh) το οποίο πρώτα θα πρέπει να κατασκευάσουμε. Η δόμηση του υπολογιστικού πλέγματος θα γίνει με την βοήθεια του περιβάλλοντος BlueKenue. Το BlueKenue είναι ένα εργαλείο επεξεργασίας και ανάλυσης γεωχωρικών δεδομένων και προβολής υδραυλικών μοντέλων. Είναι βασισμένο πάνω στην τεχνολογία EnSim, η οποία δημιουργήθηκε από το Καναδικό Κέντρο Υδραυλικής(CHC), ώστε να ανταποκρίνεται στις αυξημένες ανάγκες για προβλέψεις πάνω σε περιβαλλοντικά θέματα.

Στα μαθηματικά και την υπολογιστική γεωμετρία, ένας τριγωνισμός Delaunay για ένα δεδομένο σύνολο P διακριτών σημείων σε μια γενική θέση είναι ένας τριγωνικός γεωμετρικός τόπος(DT) έτσι ώστε κανένα σημείο στο P να μην βρίσκεται εντός του κύκλου οποιουδήποτε τριγώνου στο DT. Ο τριγωνισμός Delaunay έχει πολλές εφαρμογές στην προσέγγιση και κατασκευή φυσικών επιφανειών σε υπολογιστικό περιβάλλον με την χρήση πλεγμάτων(meshes).

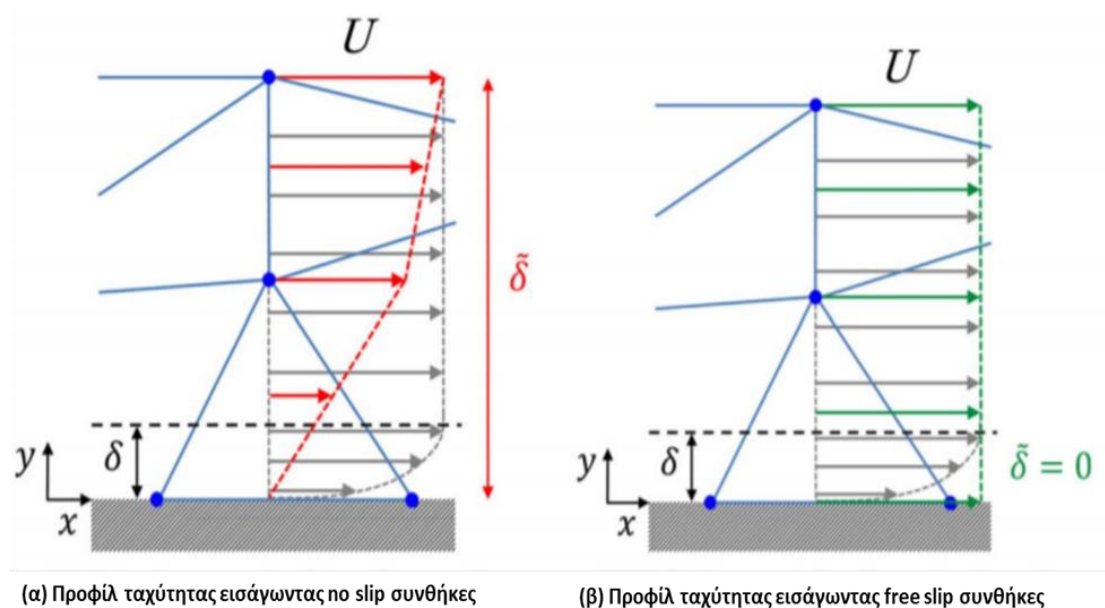


Εικόνα 4.4.1 : Ένα πλέγμα τριγωνισμού Delaunay (Delaunay, 1934)

4.5 Παράμετροι μοντέλου

Οι οριακές συνθήκες στα όρια του ρέματος στην ανάντη και στην κατάντη διατομή καθορίζονται στο TELEMAC-2D σε ένα αρχείο τύπου .cas. Στην κατάντη διατομή εξόδου εκεί που εκβάλλει το ρέμα θα θεωρήσουμε δεδομένο βάθος ίσο με 1.59. Ενώ στην ανάντη διατομή εισόδου θεωρούμε δεδομένη παροχή ανάλογα με το σενάριο που εκτελείται.

Επιπλέον πρέπει να διαμορφώσουμε τα πλευρικά όρια του υπολογιστικού πεδίου, όπου εισήχθη οριακή συνθήκη τοίχου (solid boundary wall), λαμβάνοντας υπόψη την τριβή. Σημειώνεται ότι το μοντέλο TELEMAC-2D από προεπιλογή σε οριακή συνθήκη τοίχου δεν χρησιμοποιεί αυστηρά συνθήκη μη ολίσθησης (no-slip condition) στους οριακούς κόμβους του υπολογιστικού πλέγματος (δηλαδή μηδενισμό της ταχύτητας στο στερεό όριο), αλλά μια ελαστική συνθήκη η οποία αποδίδει ταχύτητα στα όρια αυτά (βλ. Εικόνα 5-9). Κοντά στο στερεό όριο έχουμε τη δημιουργία του οριακού στρώματος μέσα στο οποίο η ταχύτητα αυξάνεται λογαριθμικά. Με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, στο μοντέλο TELEMAC-2D, η λογαριθμική αύξηση γίνεται με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής μεταξύ των κόμβων. Στην Ρευστομηχανική οι συνθήκες free slip και no slip αναλογούν στην φυσική και κινηματική συνθήκη των ρευστών κοντά στα στερεά όρια. Στα πραγματικά ρευστά και η εφαπτομενική συνιστώσα και η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού σωματιδίου κοντά στο στερεό όριο είναι μηδέν ενώ στα ιδεατά που η συνεκτικότητα είναι μηδέν ($\mu=0$) η εφαπτομενική συνιστώσα σε ακίνητο στερεό όριο δεν είναι μηδενική. Στο μοντέλο που δημιουργήσαμε επιλέξαμε συνθήκες μη ολίσθησης (no slip condition).



Εικόνα 4.5-1: Προφίλ ταχύτητας με χρήση (α) no slip conditions και (β) free slip conditions (Πηγή: Cerquaglia, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2016)

Στη συνέχεια, επιλέγουμε το χρονικό βήμα, όπου επιλέχθηκε ίσο με 2 sec. Η εκτίμηση του χρονικού βήματος έγινε με βάση τη συνθήκη CFL (Courant-Friedrich-Levy), κατά την οποία θα πρέπει να ισχύει:

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} + \frac{v\Delta t}{\Delta y} \leq C_{max} \quad (4.5-1)$$

όπου:

u, v (m/s): οι συνιστώσες της ταχύτητας
 $\Delta x, \Delta y$ (m): οι διαστάσεις του πλέγματος
 Δt (s): το χρονικό βήμα
 C (-): ο αριθμός Courant.

Η τιμή του C_{max} τέθηκε ίση με 1. Η συνθήκη CFL είναι μια απαραίτητη συνθήκη ώστε να εξασφαλίζεται η αριθμητική σύγκλιση όταν επιλύονται μερικές διαφορικές εξισώσεις όπως οι Navier Stokes σε 2 διαστάσεις που επιλύει το Telemac 2D. Ύστερα από δοκιμές – επαναλήψεις, επιλέχθηκε το κατάλληλο χρονικό βήμα έτσι ώστε να τηρείται η παραπάνω εξίσωση και να περιοριστούν κατά το δυνατόν οι αριθμητικές αστάθειες. Η προσομοίωση καθορίστηκε να διαρκεί έως ότου επέλθουν μόνιμες συνθήκες στη ροή.

Τέλος, ορίστηκαν οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Σε όλο το υπολογιστικό πεδίο θεωρήθηκε ότι υπάρχει ένα βάθος ροής ίσο με 1.5 m στην έναρξη της προσομοίωσης ($t=0$). Η επιλογή ενός αρχικού βάθους ροής είναι απαραίτητη στην περίπτωση μας, αφού έχουμε ορίσει στην είσοδο δεδομένη παροχή (οριακή συνθήκη εισροής). Το Telemac 2D χρειάζεται να έχει ως αρχικά δεδομένα στην είσοδο όχι μόνο την παροχή αλλά και το βάθος ροής, ώστε να δύναται να υπολογίσει την ταχύτητα. Αξίζει να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για μόνιμες συνθήκες δεν επηρεάζονται από τις αρχικές συνθήκες.

Για την προσομοίωση της τριβής στον πυθμένα επιλέχθηκε η εξίσωση του Manning, καθώς αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη εξίσωση σε ανοικτούς αγωγούς και έχει την ακόλουθη μορφή (Κωτσόπουλος, 2014):

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (4.5-2)$$

Όπου, V : η μέση ταχύτητα ροής (m/s), n : ο συντελεστής τραχύτητας του Manning, R : η υδραυλική ακτίνα (m) και S : η κατά μήκος κλίση του αγωγού (m/m). Όπως φαίνεται από την εξίσωση Manning 5.4-2, η ταχύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον συντελεστή τραχύτητας.

Η αρχική επιλογή του συντελεστή τραχύτητας Manning έγινε βάση της μελέτης του Βασιλόπουλου (2011), όπου στο ανάντη κλειστό τμήμα του ρέματος από τη Λεωφόρο Αθηνών έως την οδό Λεγάκη ($X=0.0 - 3162..5$ m) όπου έχω διατομή από σκυρόδεμα ο συντελεστής Manning είναι ίσος με 0.016, ενώ στο κατάντη τμήμα του ρέματος από την οδό Λεγάκη και έως την υφιστάμενη εκβολή (Κηφισός) ο συντελεστής Manning αναφέρεται ίσος με 0.018 ($X=3271.0 - 3850.0$ m) καθώς στο τμήμα εκείνο του αγωγού έχω λιθεπένδυτη διατομή. Όπως και στο HEC-RAS θα πραγματοποιηθούν και 6 σενάρια παροχής.

Ως μοντέλο τύρβης επιλέχθηκε το Constant Viscosity model. Στο μοντέλο αυτό θεωρούμε σταθερή τυρβώδη συνεκτικότητα. Κατά την κίνηση του ρευστού δημιουργούνται στροβιλισμοί λόγω τύρβης με αποτέλεσμα την μεταφορά ενέργειας και την δημιουργία διατμητικών τάσεων. Σύμφωνα με την εξίσωση Boussinesq (4.4.3) εισάγεται ο όρος της τυρβώδους συνεκτικότητας (eddy viscosity) για τον υπολογισμό των διατμητικών τάσεων

$$-\overline{u'_i u'_j} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4.5.3)$$

όπου :

S_{ij} =ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης
 v_t =τυρβώδης συνεκτικότητα
 δ_{ij} =δέλτα του Kronecker
 k =τυρβώδης κινητική ενέργεια

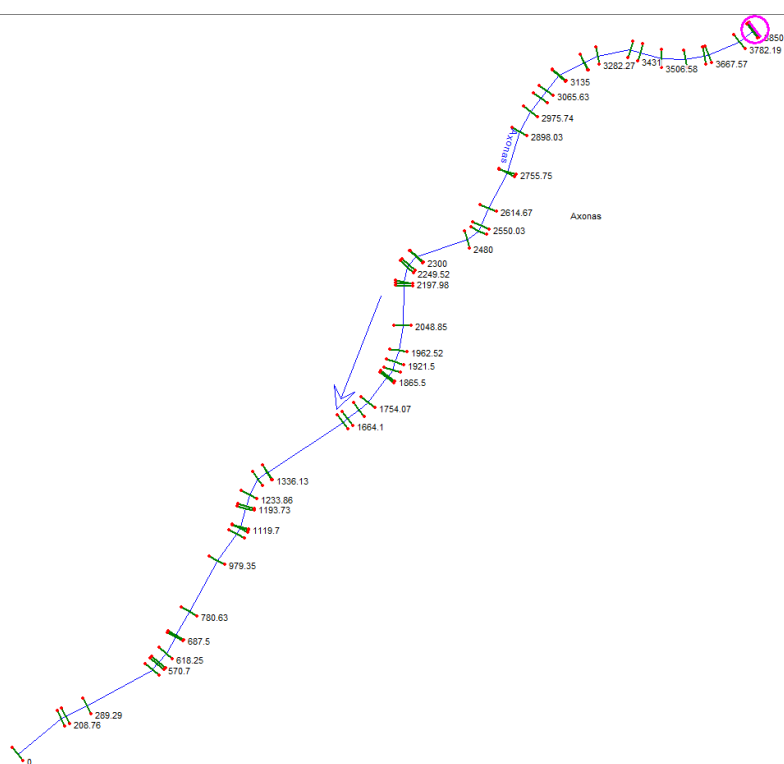
Θεωρούμε συνολική συνεκτικότητα δηλαδή το άθροισμα της τυρβώδους και της μοριακής ίση με 10^{-6} για την υδραυλική επίλυση του ρέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

5.1 Επίλυση με HEC-RAS

5.1.1 Δημιουργία αρχείου γεωμετρίας

Στο Civil 3D μέσω της εντολής export to HEC-RAS εξάγουμε την επιφάνεια, τις διατομές και τον κύριο άξονα του ρέματος που είχαμε δημιουργήσει στα προηγούμενα βήματα. Το HEC-RAS επιτρέπει την εισαγωγή δεδομένων γεωμετρίας σε μορφή GIS και έχει ειδικό περιβάλλον επεξεργασίας αυτών των δεδομένων, τον geometry editor. Εισάγουμε λοιπόν το αρχείο της γεωμετρίας του ρέματος που δημιουργήσαμε στο Civil 3D σε μορφή GIS (GIS Format). Έπειτα το Civil 3D έχει αντίστροφη ρύθμιση από το HEC-RAS εισάγουμε τις διατομές αντίστροφα. Η τελική εικόνα της γεωμετρίας του ρέματος στο περιβάλλον του Civil 3D δίνεται στην Εικόνα 5.3.1-1.



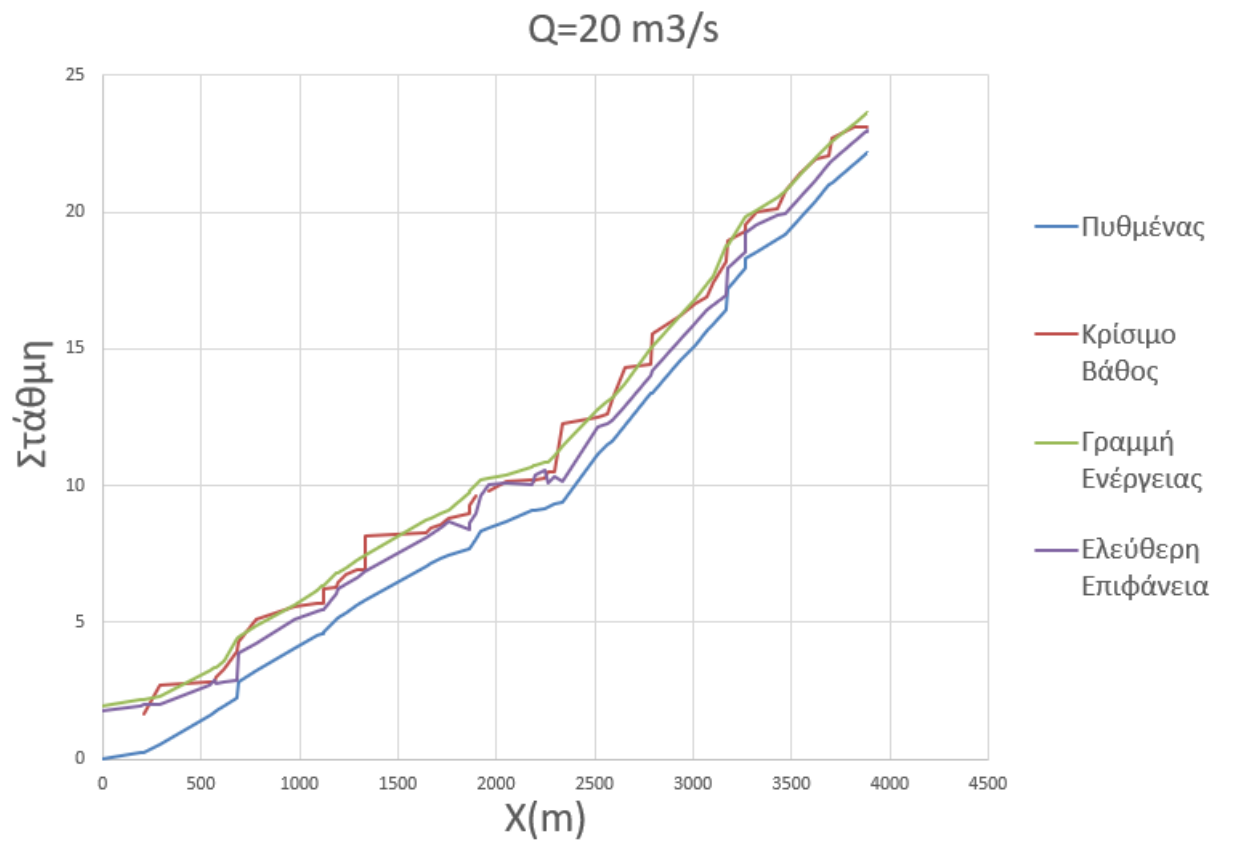
Εικόνα 5.1.1-1: Η γεωμετρία του ρέματος στο περιβάλλον του HEC-RAS

5.1.2 Εφαρμογή του μοντέλου

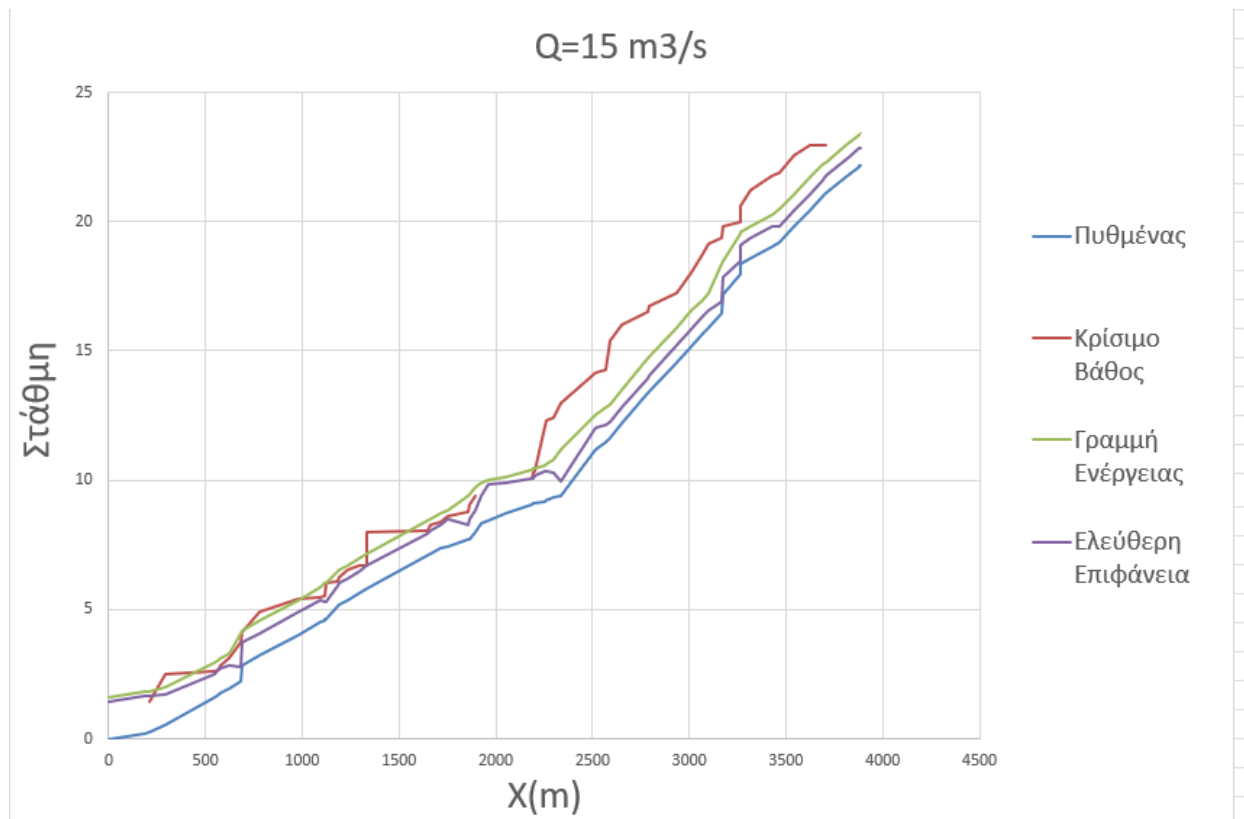
Για την υδραυλική επίλυση του ρέματος θα επιλέξουμε μόνιμη ροή στο HEC-RAS (steady state flow). Η επίλυση θα γίνει για τραχύτητα πυθμένα $n=0.016$ στο ανάντη τμήμα του ρέματος μέχρι την όδο Λεγάκη και για $n=0.018$ από την οδό Λεγάκη μέχρι το σημείο εκβολής καθώς εκεί η διατομή είναι λιθεπένδυτη και για 6 διαφορετικά σενάρια παροχής 20, 15, 10, 5, 2 και 1 m^3/s .

Ως συνοριακές συνθήκες επιλέγω ομοιόμορφο βάθος με κλίση πυθμένα 0.0061 ανάντι του ρέματος και ομοιόμορφο βάθος με κλίση πυθμένα 0.0011 κατάντη του σημείου εκβολής του ρέματος. Επιλέγω ως κατάντη υψόμετρο για το σημείο εκβολής

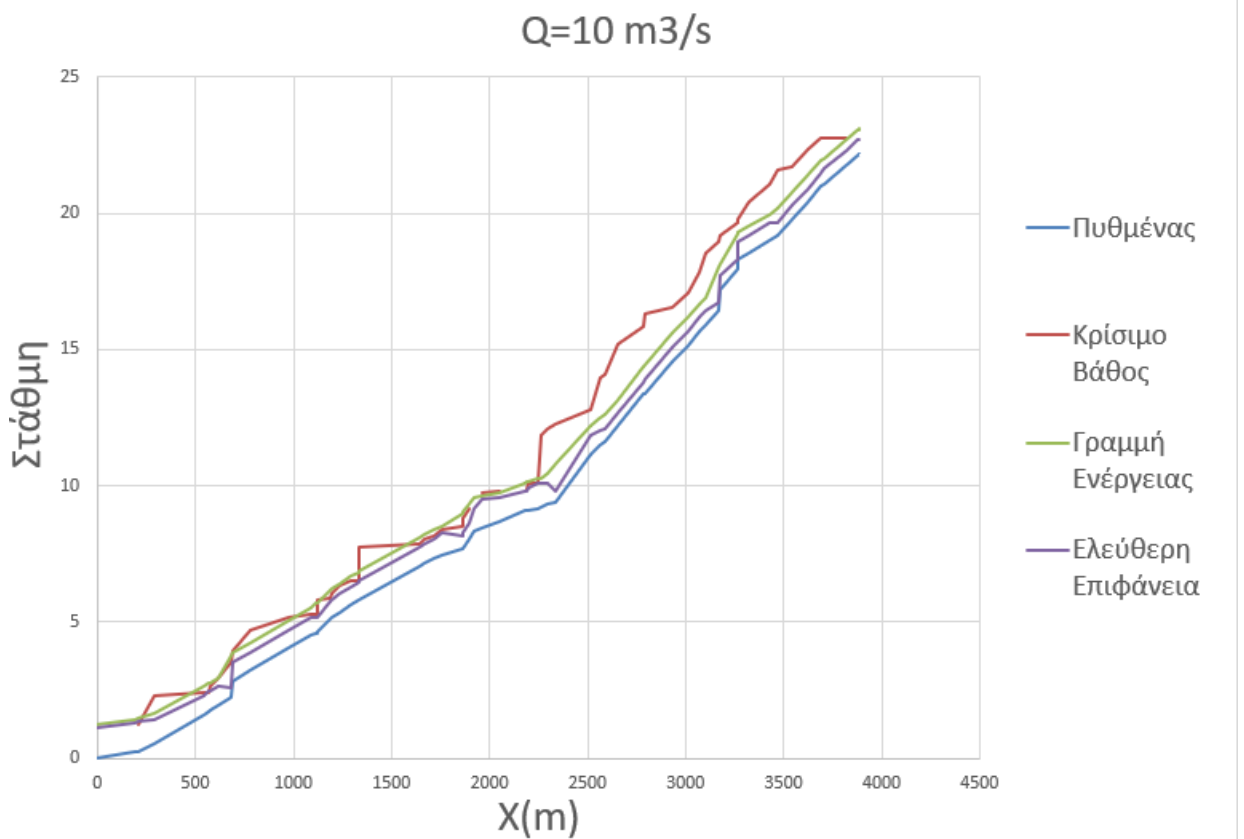
το +0.00 από την στάθμη της θάλασσας. Τα αποτελέσματα για τα 2 σενάρια φαίνονται στις παρακάτω εικόνες για το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας.



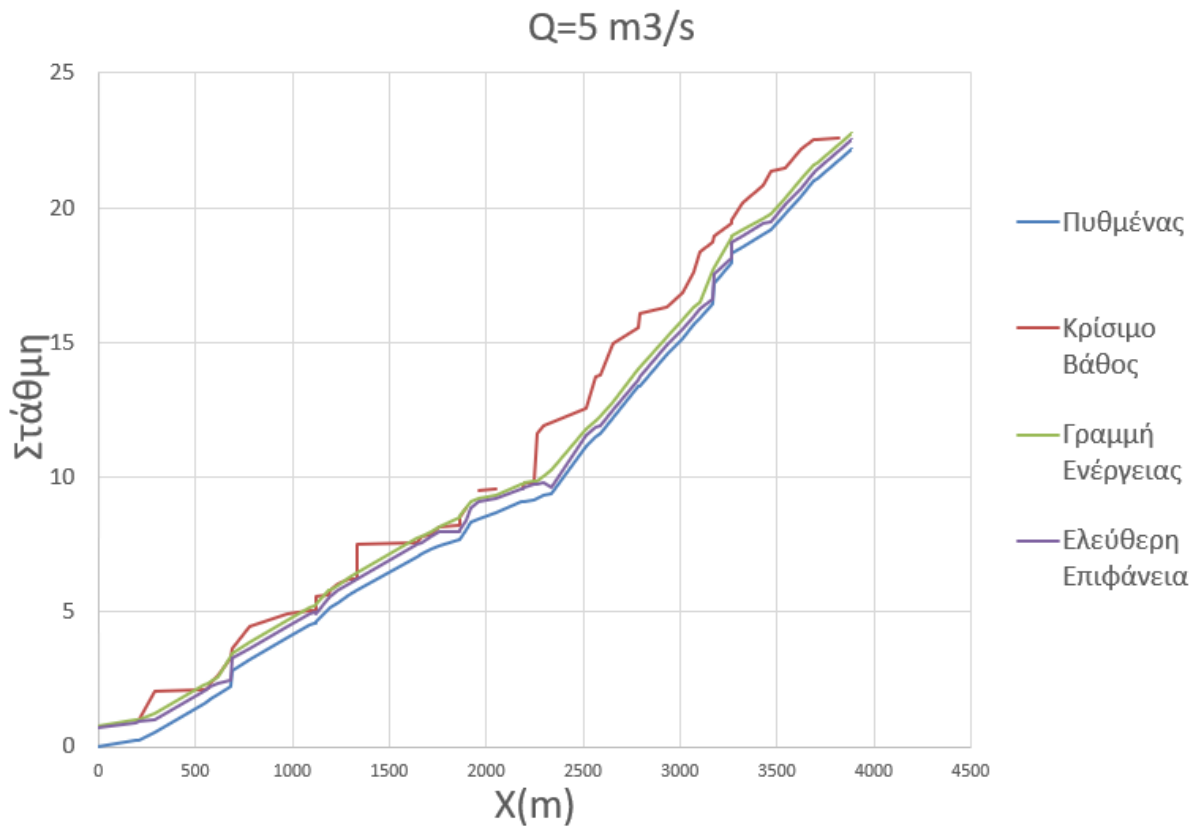
Εικόνα 5.1.2-1: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$



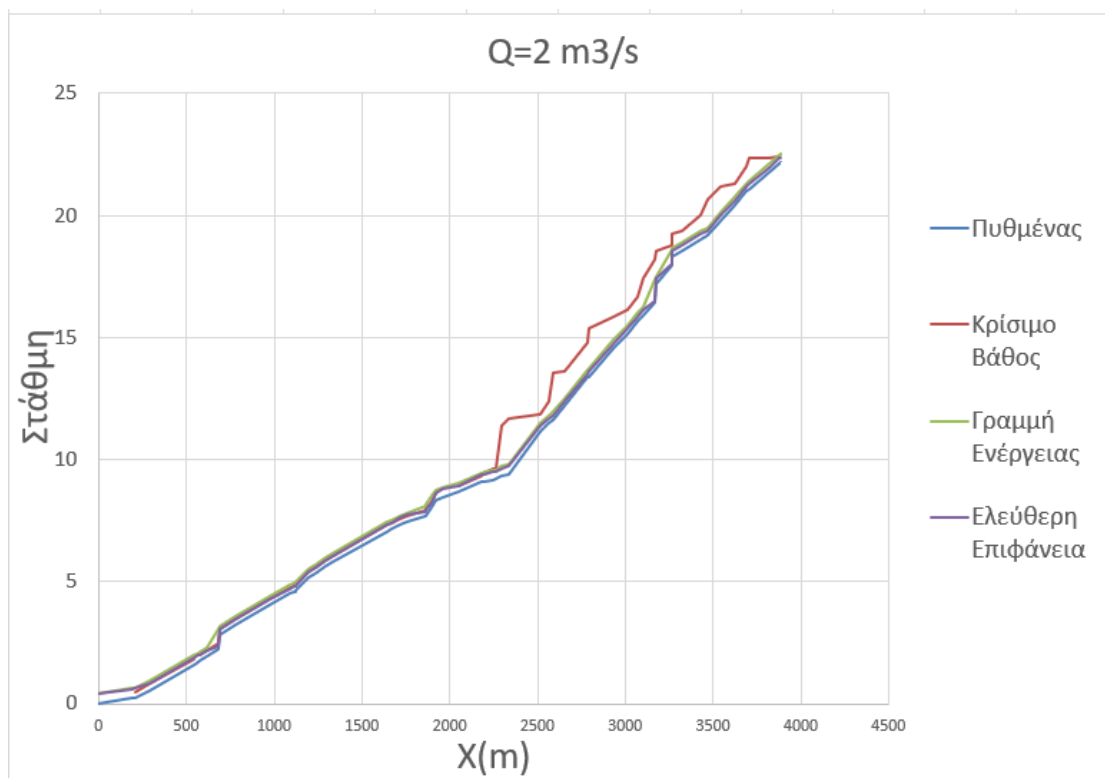
Εικόνα 5.1.2-2: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$



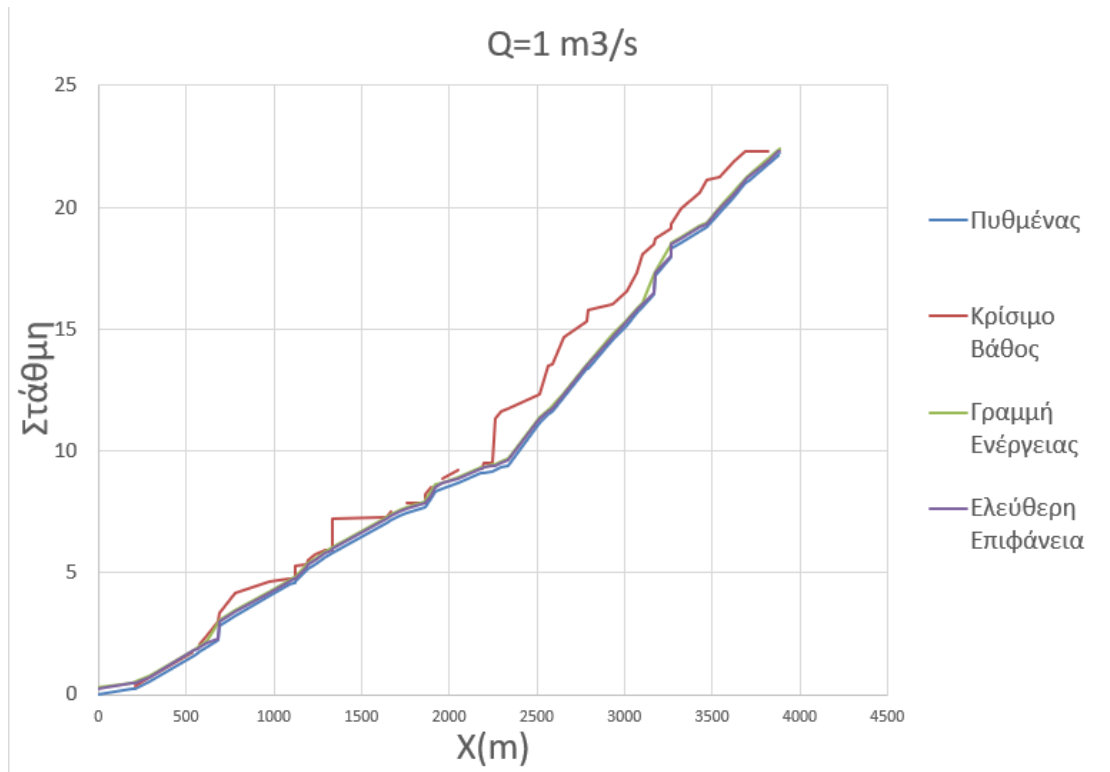
Εικόνα 5.1.2-3: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$



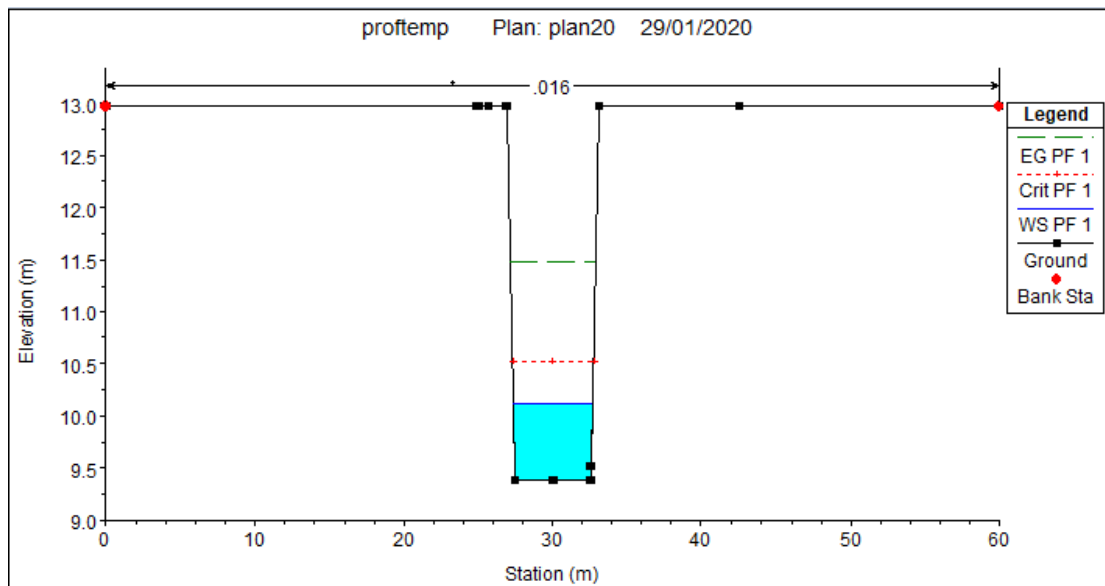
Εικόνα 5.1.2-4: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για $Q=5 \text{ m}^3/\text{s}$



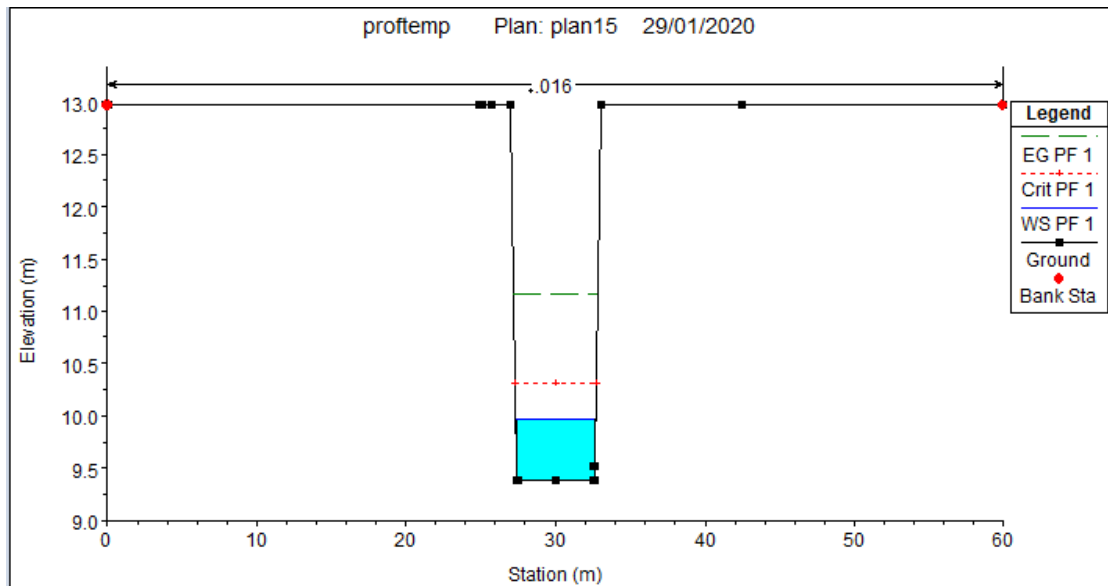
Εικόνα 5.1.2-5: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για $Q=2 \text{ m}^3/\text{s}$



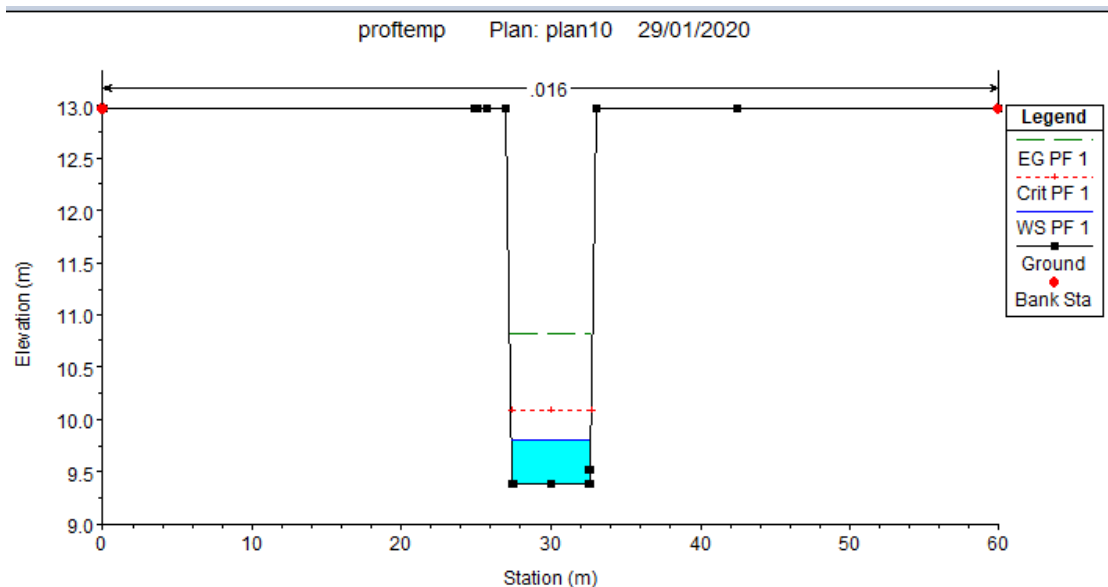
Εικόνα 5.1.2-6: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για $Q=1 \text{ m}^3/\text{s}$



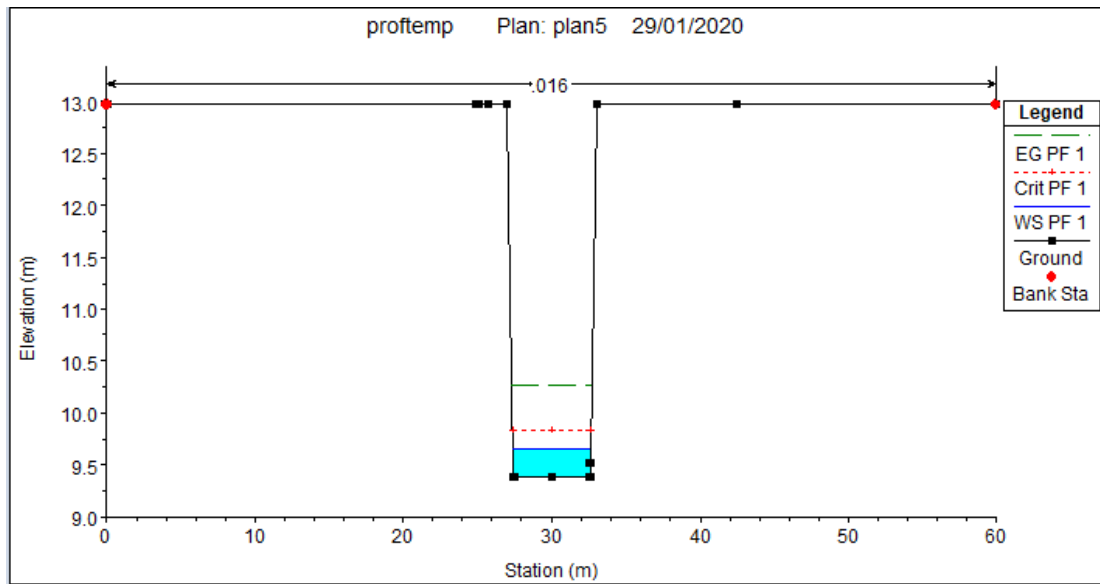
Εικόνα 5.1.2-7: Προφίλ χαρακτηριστικής διατομής $\Delta 12$ για $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$



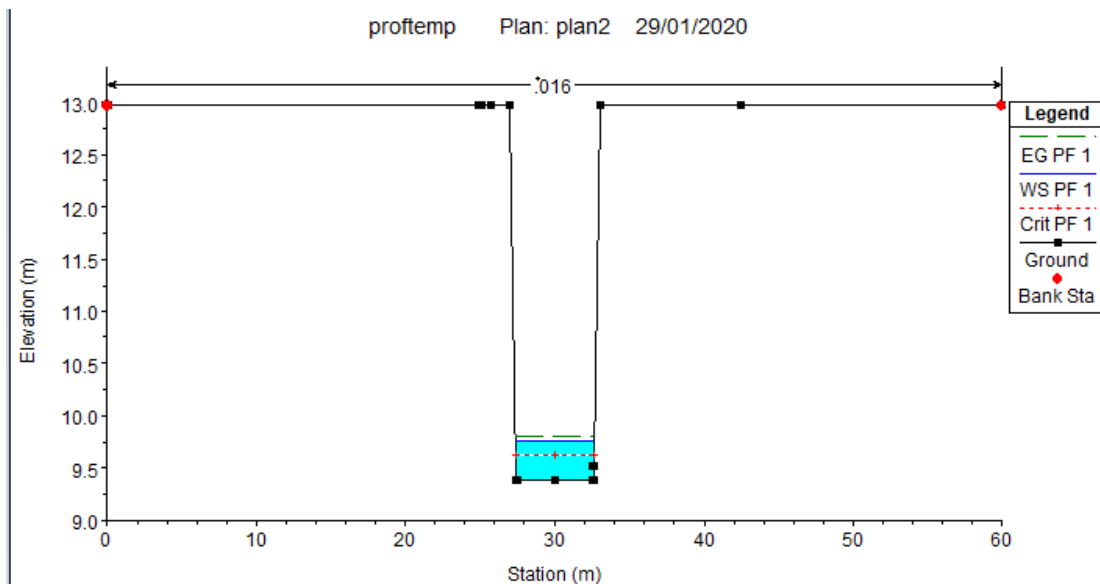
Εικόνα 5.1.2-8: Προφίλ χαρακτηριστικής διατομής Δ12 για $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$



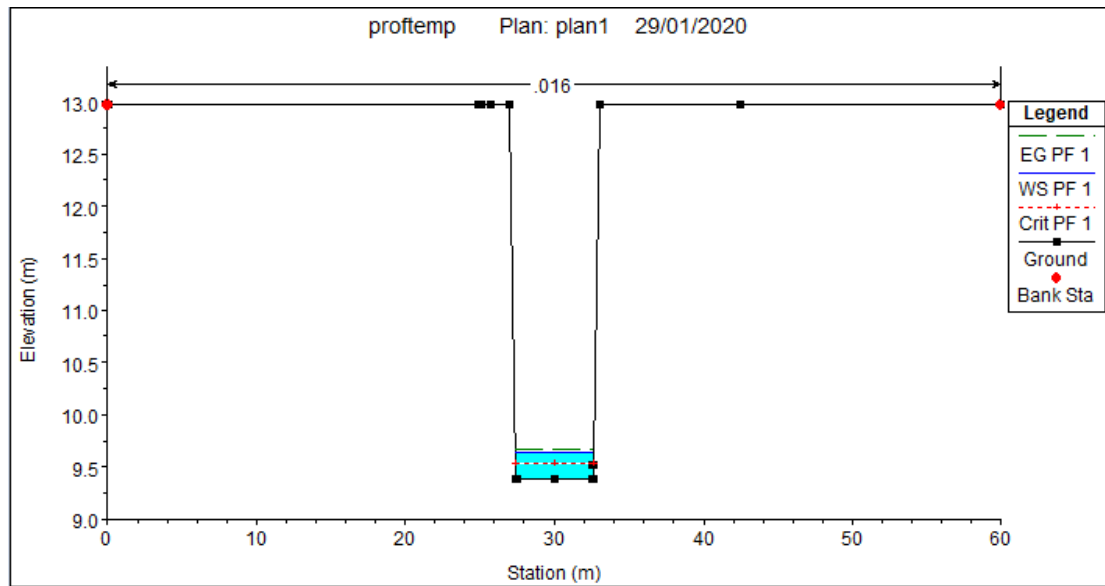
Εικόνα 5.1.2-9: Προφίλ χαρακτηριστικής διατομής Δ12 για $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$



Εικόνα 5.1.2-10: Προφίλ χαρακτηριστικής διατομής Δ12 για $Q=5 \text{ m}^3/\text{s}$



Εικόνα 5.1.2-11: Προφίλ χαρακτηριστικής διατομής Δ12 για $Q=2 \text{ m}^3/\text{s}$



Εικόνα 5.1.2-12: Προφίλ χαρακτηριστικής διατομής Δ12 για $Q=1 \text{ m}^3/\text{s}$

Παρατηρώντας το προφίλ των διατομών για κάθε σενάριο παροχής βλέπουμε ότι το ρέμα δεν υπερχειλίζει σε κανένα σημείο. Οπότε η παραδοχή μας να θεωρήσουμε ανοιχτό το ανάντι τμήμα του ρέματος στο HEC-RAS, το οποίο μετά από παρέμβαση στεγανοποιήθηκε ώστε να μετατραπεί σε κλειστό ορθογωνικό αγωγό, είναι ασφαλής.

Πίνακας 5.1.2-1: Αριθμός Froude για τα σενάρια παροχής σε κάθε διατομή. Με κίτρινο χρώμα εκεί που έχω υπερκρίσιμη ροή με πράσινο η υποκρίσιμη και με χρώμα έχω κρίσιμη ροή

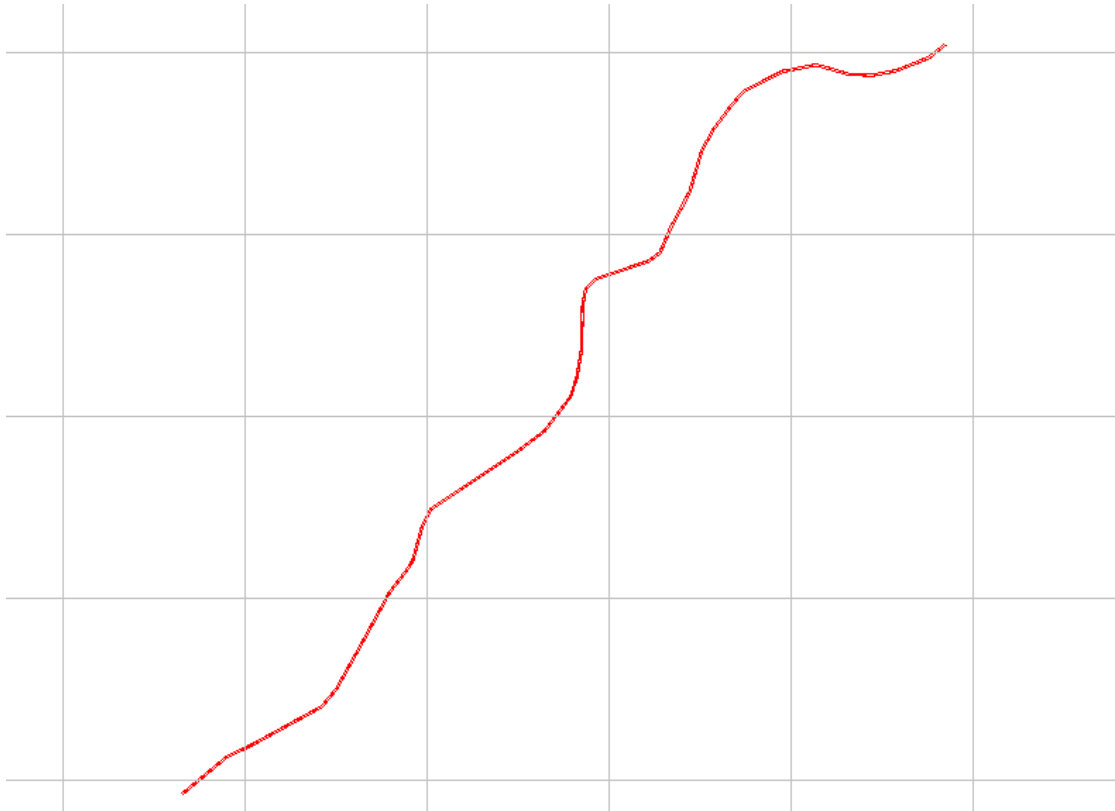
ΔΟ	20	15	10	5	2	1
1	1.27	1.27	1.26	1.22	1.15	1.09
2	1.32	1.34	1.33	1.26	1.19	1.08
3	1.44	1.44	1.43	1.41	1.39	1.43
4	1.02	1.09	1.04	1.04	1	0.87
5	1.87	1.98	2.16	2.58	3.39	4.06
6	1.43	1.37	1.28	1.12	1	1.01
7	2.45	2.59	2.85	3.47	4.81	6.27
8	1.36	1.34	1.36	1.37	1.4	1.49
9	1.71	1.67	1.64	1.59	1.53	1.27
10	1.49	1.48	1.48	1.45	1.44	1.27
11	1.15	1.15	1.14	1.14	1.07	1
12	1.96	2.01	2.06	2.07	2.05	2.08
13	0.71	0.72	0.71	0.68	2.07	0.6
14	0.79	0.85	0.9	0.86	0.73	0.68
15	0.8	0.85	0.91	0.87	0.71	0.66
16	1.01	1	1	1	1	1
17	1.59	1.61	1.65	1.61	1.4	1.23
18	1.89	1.9	1.92	1.81	1.53	0.74

19	1	1	1.01	1	0.95	0.86
20	1.1	1.08	1.08	0.97	0.97	0.94
21	1.04	1.06	1.03	1.05	0.99	0.93
22	1.04	1.06	1.03	1.05	1	0.94
23	1.06	1.04	1.04	1.08	1.67	1
24	1.17	1.18	1.18	1.27	1.31	1.17
25	1.44	1.46	1.47	1.42	1.27	1.25
26	1.46	1.46	1.46	1.42	1.29	1.29
27	1.02	1.03	1.05	1	1	0.86
28	2.07	2.22	2.46	2.95	3.91	5.09
29	1.03	1.03	1.11	0.94	0.89	0.83
30	1.03	1.02	1.13	0.94	0.9	0.88
31	0.5	0.5	0.5	0.49	0.46	0.43
32	0.49	0.49	0.49	0.49	0.46	0.44

Στον Πίνακα 5.1.2-1 παρουσιάζεται σε ποια τμήματα του ρέματος έχουμε υπερκρίσιμη και σε ποια υποκρίσιμη ανάλογα με τον αριθμό Froude. Παρατηρούμε ότι για όλα τα σενάρια παροχών η ροή είναι υπερκρίσιμη στο μεγαλύτερο μέρος του ρέματος. Πιο συγκεκριμένα για τα σενάρια παροχής 20, 15, 10, 5 m³/s από τις διατομές 1 μέχρι 13 και τις ΧΘ 0 μέχρι 1591 m έχω υπερκρίσιμη ροή ενώ κοντά στην διατομή έχω το 1ο υδραυλικό άλμα αποτέλεσμα αναμενόμενο καθώς από την διατομή 12 ως στην διατομή 13 έχω απότομη στένωση του πυθμένα από 3.6 m πλάτος στα 3.1 m. Έπειτα για όλα τα σενάρια παροχής από την διατομή 13 έως 16 και την ΧΘ 1591 έως 1921.5 έχω υποκρίσιμη ροή. Η ροή ξαναγίνεται υπερκρίσιμη στις διατομές 16 έως 18 και στις ΧΘ 1928.5 έως 1989.9 ενώ μετά την διατομή 18 έχω το 2ο υδραυλικό άλμα για όλα τα σενάρια παροχής. Έπειτα μέχρι την διατομή 30 και την Χ.Θ 2191.5 έχω υπερκρίσιμη ροή. Τέλος στο κατάντη τμήμα του ρέματος έχω την μεγαλύτερη διαφοροποίηση ανάλογα την τιμή παροχής καθώς στις διατομές 31-32 και τις ΧΘ 3641.24-3850 για τα 3 σενάρια παροχής 20, 15, 10 m³/s έχω υποκρίσιμη ροή ενώ για τα σενάρια παροχής 1, 2, 5 m³/s η υποκρίσιμη ροή ξεκινά πιο πριν από την διατομή 28 και την ΧΘ 3167 m δηλαδή 500 m πιο πριν. Γενικά στο ρέμα μεγαλύτερες τιμές παροχής δίνουν μεγαλύτερους αριθμούς Froude και κατα συνέπεια μεγαλύτερο μέρος του ρέματος σε υπερκρίσιμη ροή.

5.2 Επίλυση με Telemac

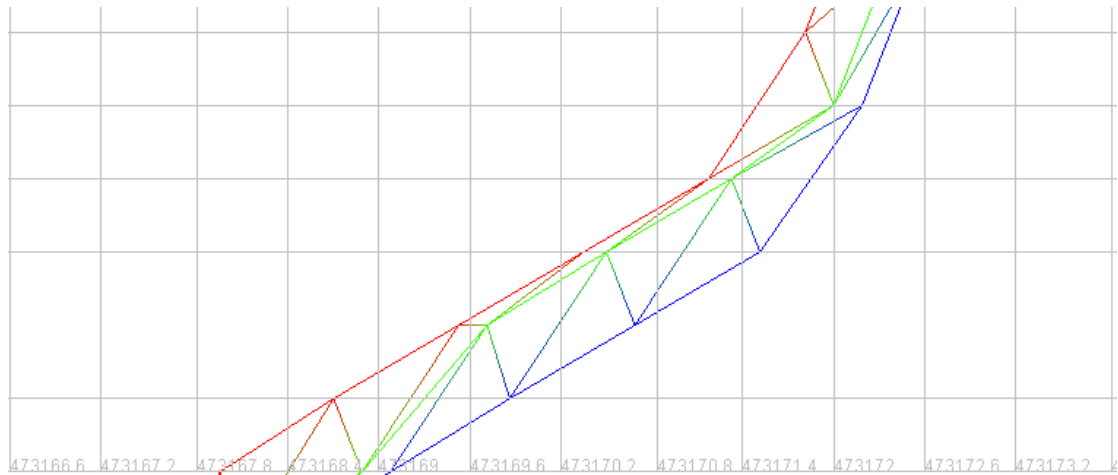
Από την τελική γεωμετρία που διαμορφώσαμε σε προηγούμενα βήματα στο Civil 3D έχουμε πληροφορίες για το αριστερό και δεξί πόδι και φρύδι του πρσανούς. Τα στοιχεία των συντεταγμένων στο οριζόντιο (X, Y) επίπεδο αυτών των 4 γραμμών τα εξαγάγουμε σε μορφή CSV σε διαφορετικά αρχεία Notepad. Σε άλλα 4 μαζί με τις συντεταγμένες (X, Y) εξάγεται και το υψόμετρο τους. Τα αρχεία αυτά είναι είτε σε μορφή .i2s (συντεταγμένες X και Y) είτε σε μορφή i3.s (συντεταγμένες X, Y και υψόμετρο Z) ώστε να χρησιμοποιηθούν ως αρχεία εισόδου γεωμετρίας για την κατασκευή πλέγματος στο BlueKenue.



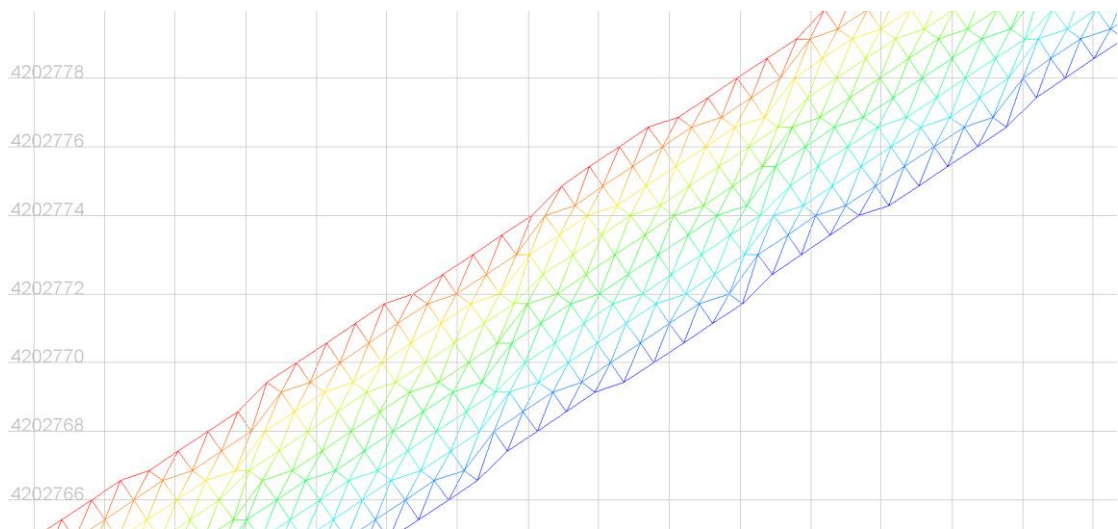
Εικόνα 5.2-1: Οριζοντιογραφία του ρέματος στο οριζόντιο επίπεδο στο περιβάλλον του BlueKenue

Για αρχή θα κατασκευάσουμε 3 διαφορετικά πλέγματα(mesh) από τα οποία το καθένα θα αντιπροσωπεύει το αριστερό πρηνές το δεξιό πρηνές και τον πυθμένα του ρέματος.Οπότε δημιουργούμε 3 νέα πλέγματα μέσω του αντικειμένου T3 Channel Mesher του BlueKenue.Για τα πλέγματα των 2 πρηνών η αριστερή και δεξιά όχθη τους θα αποτελείται από το φρύδι και το πόδι του αντίστοιχου πρηνούς.Λόγω του πολύ μικρού πλάτους του πρηνούς στο πλέγμα που θα φτιάξω επιλέγω 3 κόμβους(Cross Channel Node Count) ανα 1 μέτρο(Along Channel Interval) ανάμεσα στην αριστερή και δεξιά όχθη του πρηνούς.

Την ίδια διαδικασία ακολουθούμε και για το πλέγμα του πυθμένα επιλέγοντας 10 κόμβους ανα 1 μέτρο και τον αριστερό και δεξιό πόδα του πρηνούς του ρέματος ως αριστερή και δεξιά όχθη του πυθμένα.

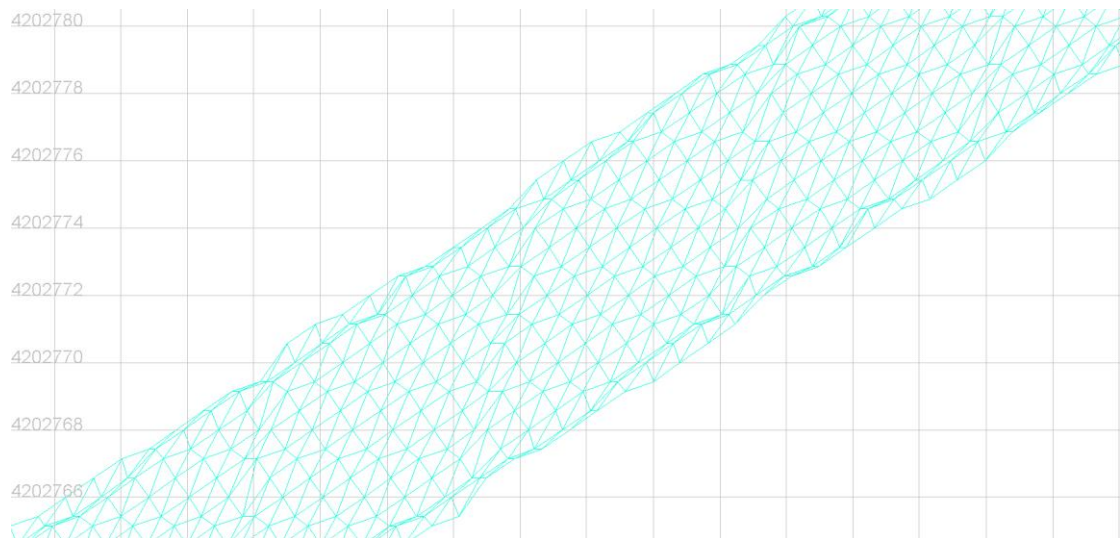


Εικόνα 5.2-2: Λεπτομέρεια πλέγματος αριστερού πρηνούς



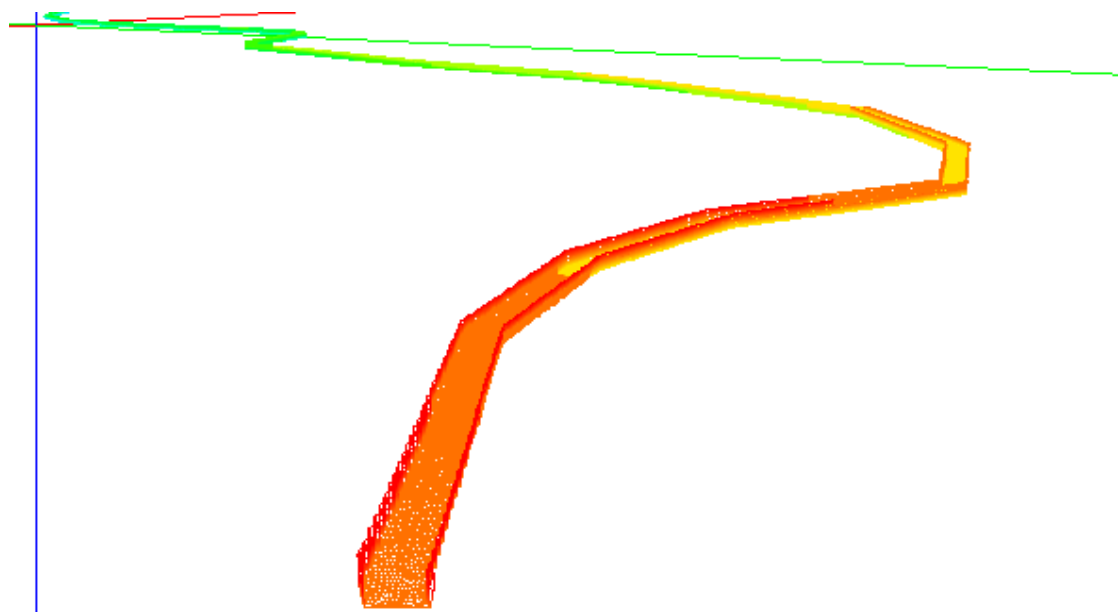
Εικόνα 5.2-3: Λεπτομέρεια πλέγματος πυθμένα

Τα προηγούμενα 3 πλέγματα εισάγονται ως υποπλέγματα(submeshes) στην επιλογή T3 Mesh Generator του BlueKenue, ενώ ως περίγραμμα του πλέγματος(Outline) επιλέγεται το αριστερό και το δεξιό φρύδι του πρηνούς του ρέματος. Με αυτόν τρόπο δημιουργούμε ένα ενιαίο πλέγμα πάνω στο οποίο θα γίνουν οι υδροδυναμικοί υπολογισμοί του Telemac.

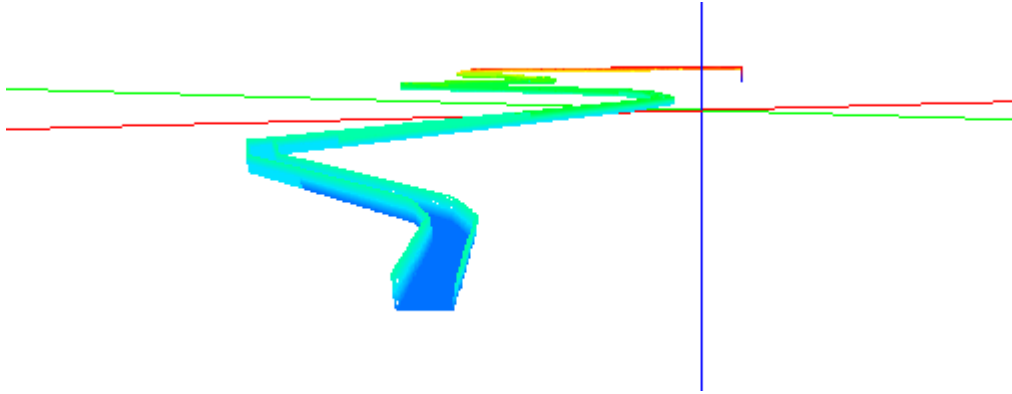


Εικόνα 5.2-4: Λεπτομέρεια συνολικού πλέγματος

Έπειτα με την βοήθεια της επιλογής του 2D Interpolator του BlueKenue παρεμβάλλουμε τα δεδομένα βαθυμετρίας και τις στάθμες που έχουμε εξάγει από το αρχείο Civil 3D με το τελικό πλέγμα που έχουμε δημιουργήσει. Έτσι έχουμε την απεικόνιση του πλέγματος στο τρισδιάστατο επίπεδο.



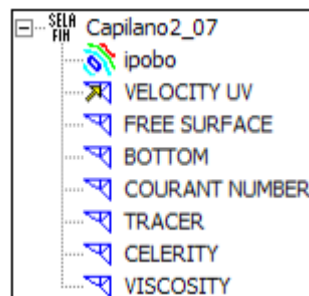
Εικόνα 5.2-5: Απεικόνιση του ρέματος στο 3D επίπεδο στα ανάντη



Εικόνα 5.2-6: Απεικόνιση του ρέματος στο 3D επίπεδο στα κατάντη

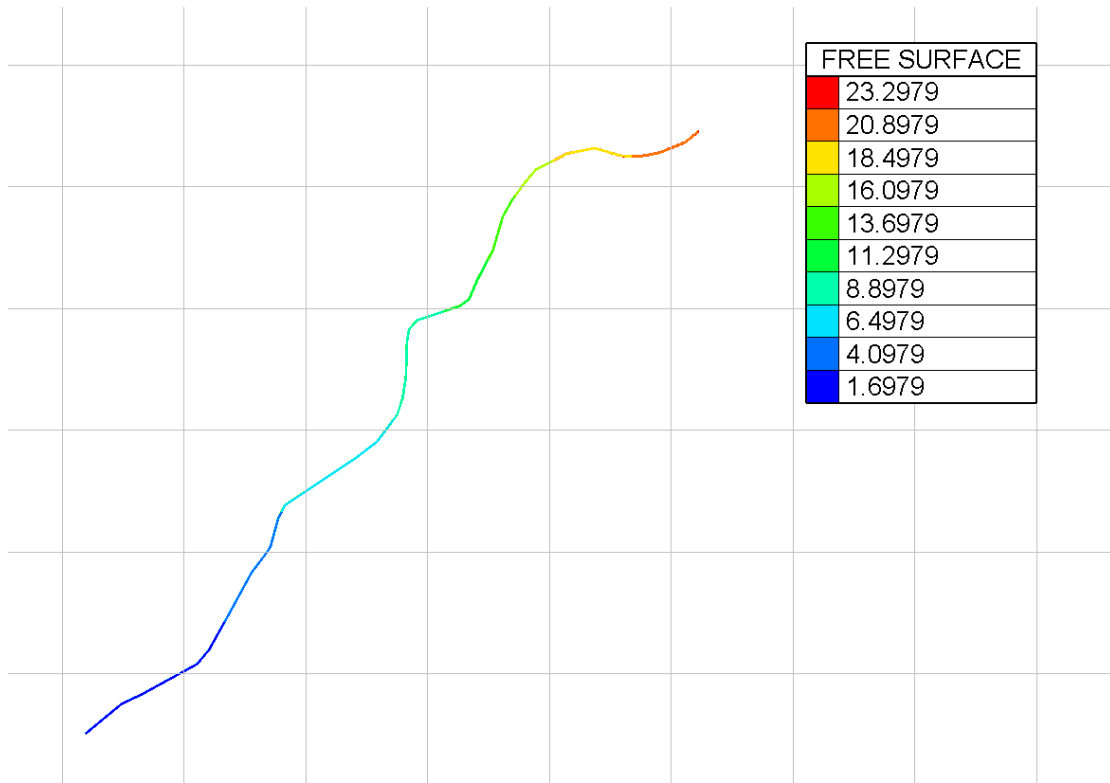
Έπειτα πρέπει να προσδιορίσουμε τις συνοριακές συνθήκες που επικρατούν στις ακραίες διατομές του ρέματος στο πλέγμα που κατασκευάσαμε. Στην ακραία ανάντη διατομή (Δ01) επιλέγουμε δεδομένη σταθερή παροχή (open boundary with prescribed Q) και στην ακραία κατάντη διατομή επιλέγουμε δεδομένο σταθερό βάθος (open boundary with prescribed Q).

Τέλος δημιουργούμε το αρχείο το οποίο θα χρησιμεύσει ως το αρχείο εισόδου για την υδροδυναμική επίλυση στο Telemac. Το αρχείο είναι τύπου SELAFIN και τα αρχεία αυτά χρησιμεύουν ως αρχεία εισόδου αλλά και εξόδου δηλαδή προβολής αποτελεσμάτων για το TELEMAC. Το BlueKenue αντιμετωπίζει το αρχείο SELAFIN ως αποθήκη η οποία περιέχει ως αντικείμενα διάφορες μεταβλητές για την υδροδυναμική επίλυση του ρέματος στο TELEMAC όπως η τραχύτητα πυθμένα η ταχύτητα ο αριθμός Courant. Έτσι στο πλέγμα που έχουμε δημιουργήσει μπορούμε να προσθέσουμε διάφορες πληροφορίες για το ρέμα. Ένα αρχείο SELAFIN στο περιβάλλον του BlueKenue φαίνεται στην Εικόνα 4.1-7.

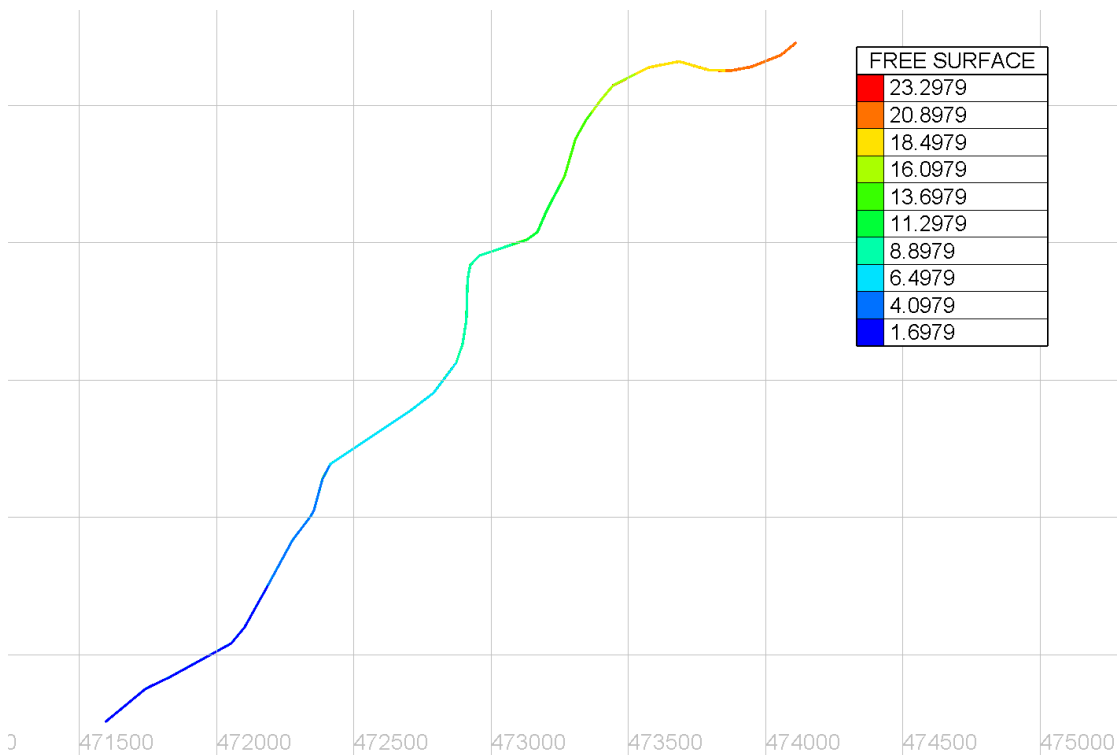


Εικόνα 5.2-7: Το αρχείο SELAFIN στο περιβάλλον του BlueKenue

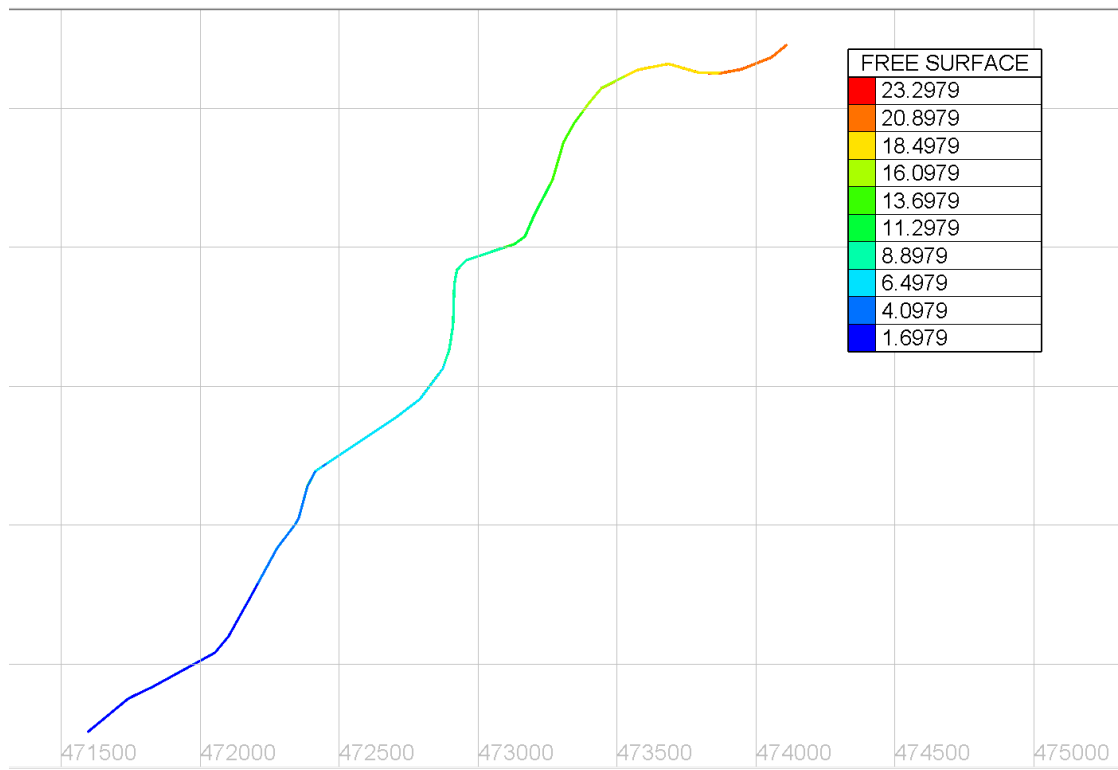
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου Telemac για το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας και για το βάθος ροής σε τρισδιάστατο επίπεδο για την κάθε τιμή παροχής:



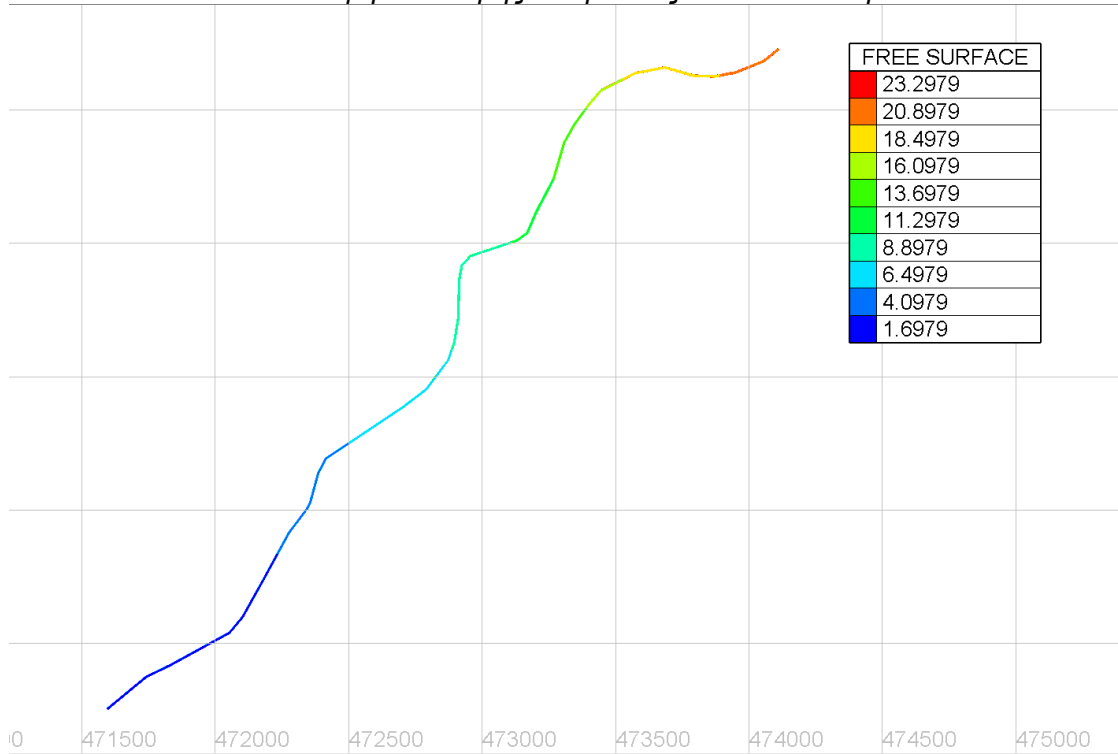
Εικόνα 5.2-8: Στάθμη Ελεύθερης Επιφάνειας στο *Telemac* για $Q=20m^3/s$



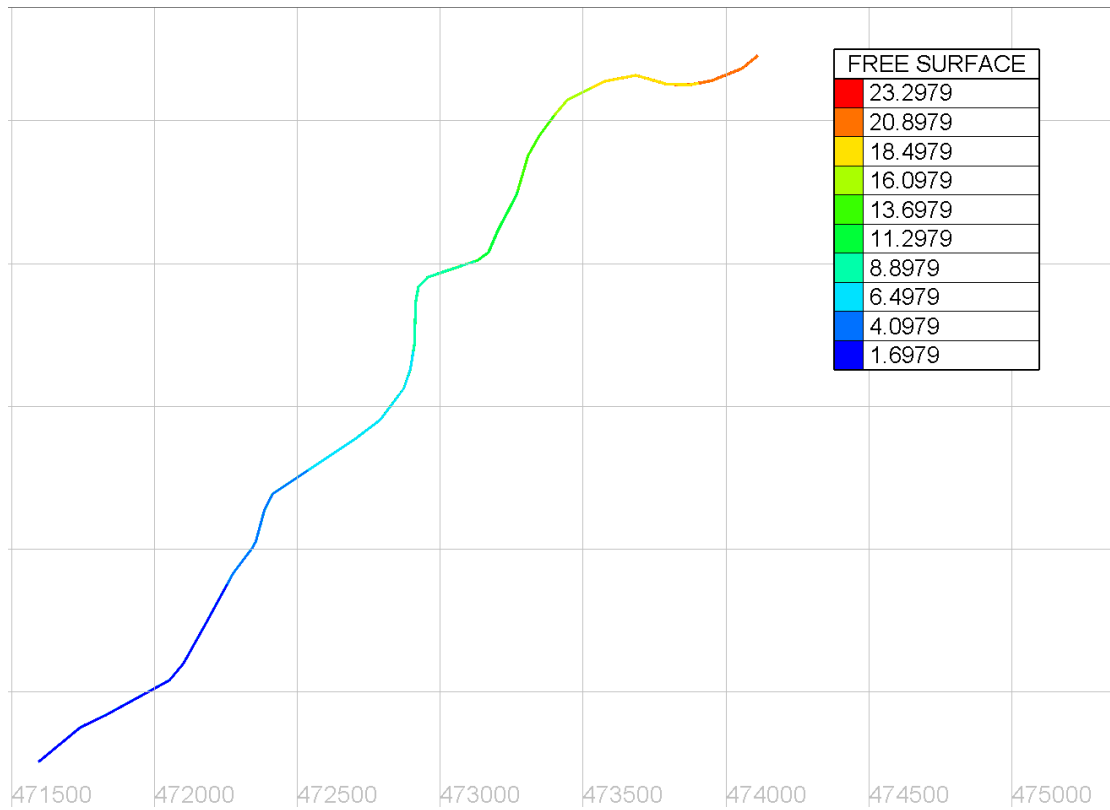
Εικόνα 5.2-9: Στάθμη Ελεύθερης Επιφάνειας στο *Telemac* για $Q=15m^3/s$



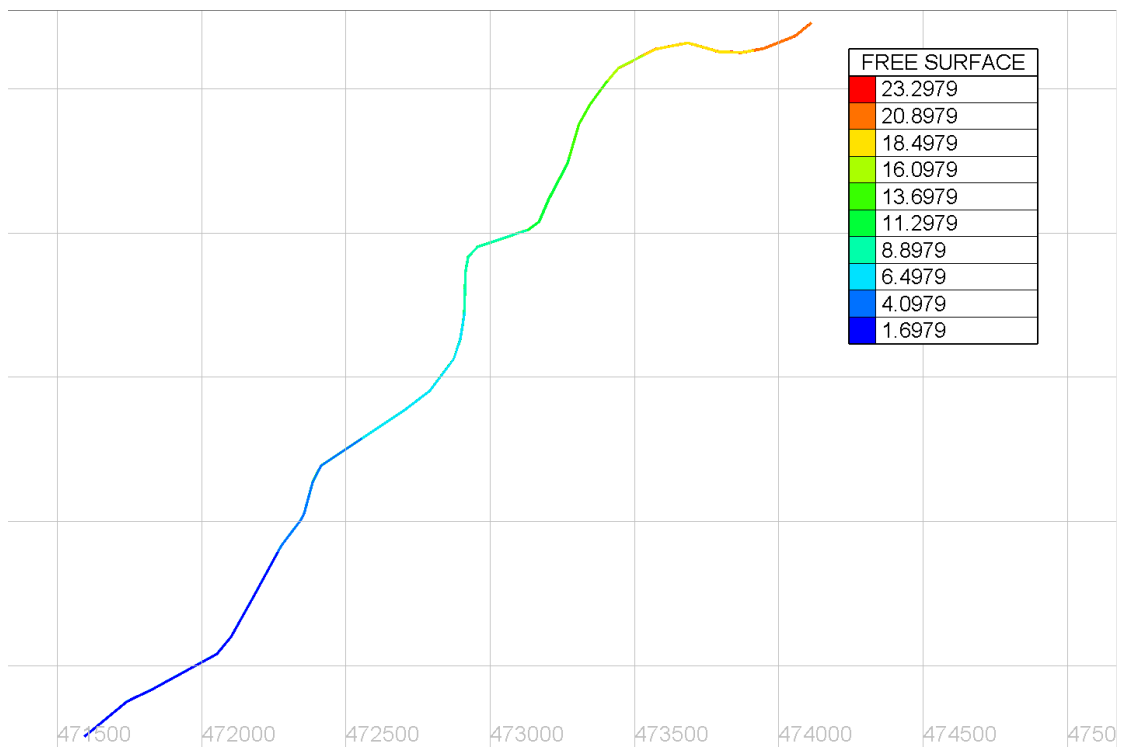
Εικόνα 5.2-10: Στάθμη Ελεύθερης Επιφάνειας στο *Telemac* για $Q=10\text{m}^3/\text{s}$



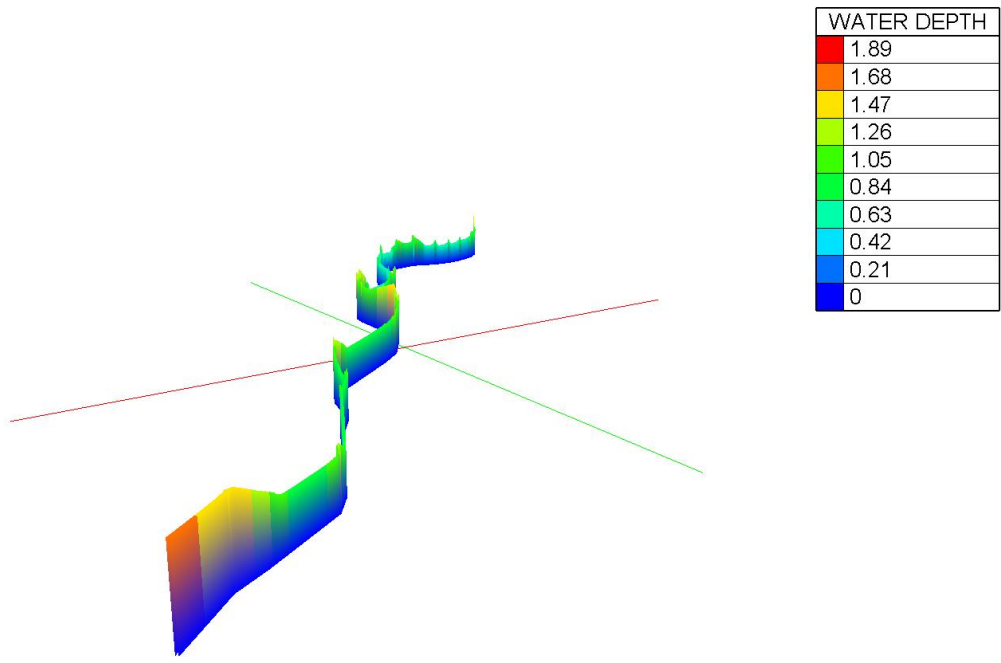
Εικόνα 5.2-11: Στάθμη Ελεύθερης Επιφάνειας στο *Telemac* για $Q=5\text{m}^3/\text{s}$



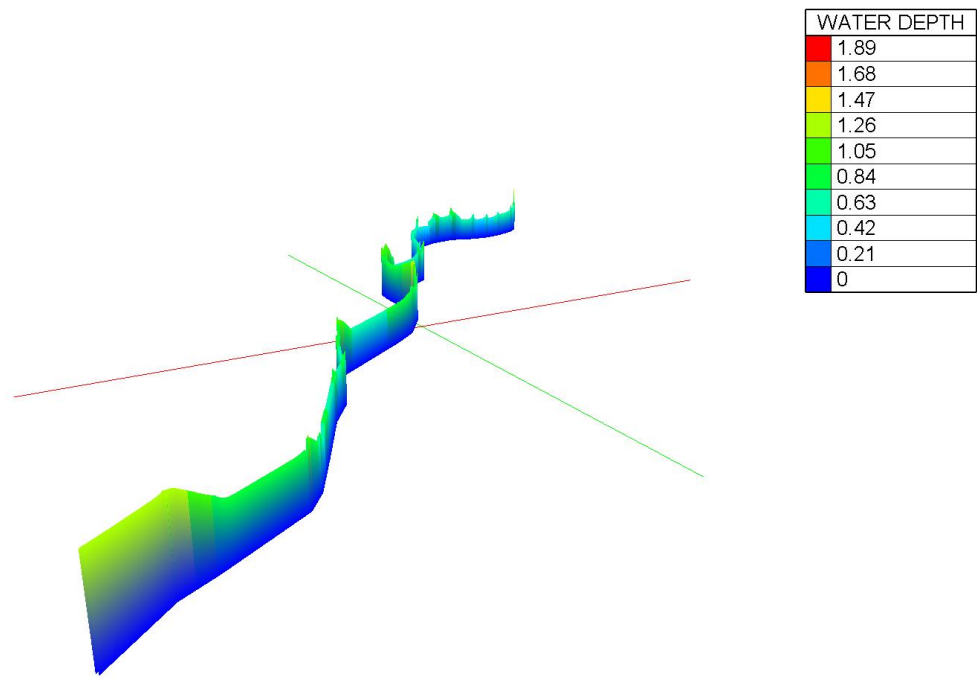
Εικόνα 5.4.4-3:Στάθμη Ελεύθερης Επιφάνειας στο Telemac για $Q=2m^3/s$



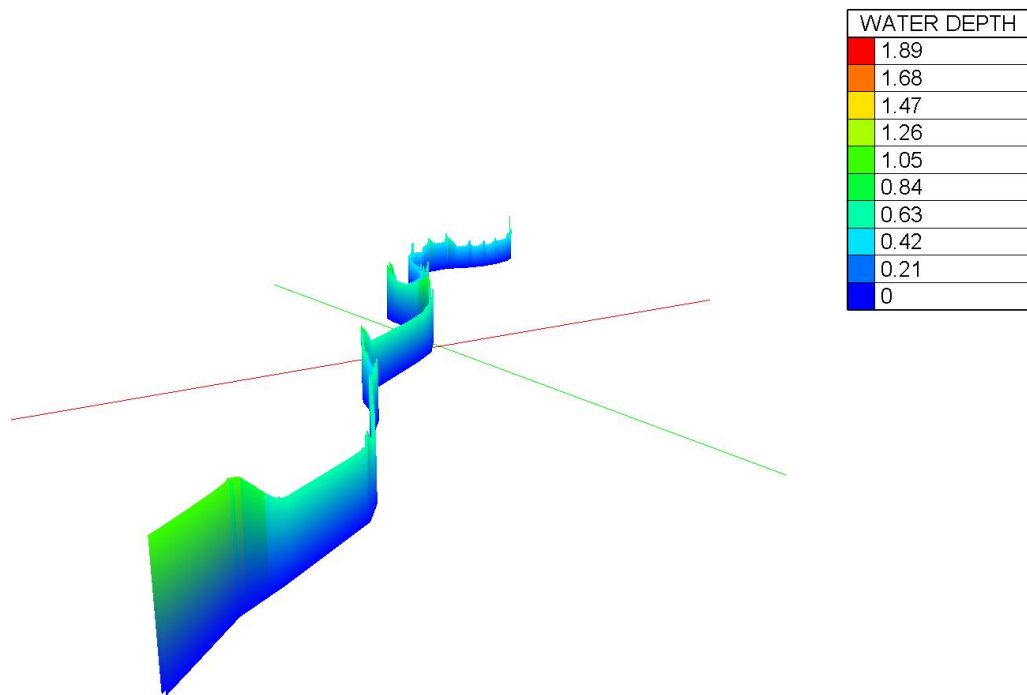
Εικόνα 5.4.4-3:Στάθμη Ελεύθερης Επιφάνειας στο Telemac για $Q=1m^3/s$



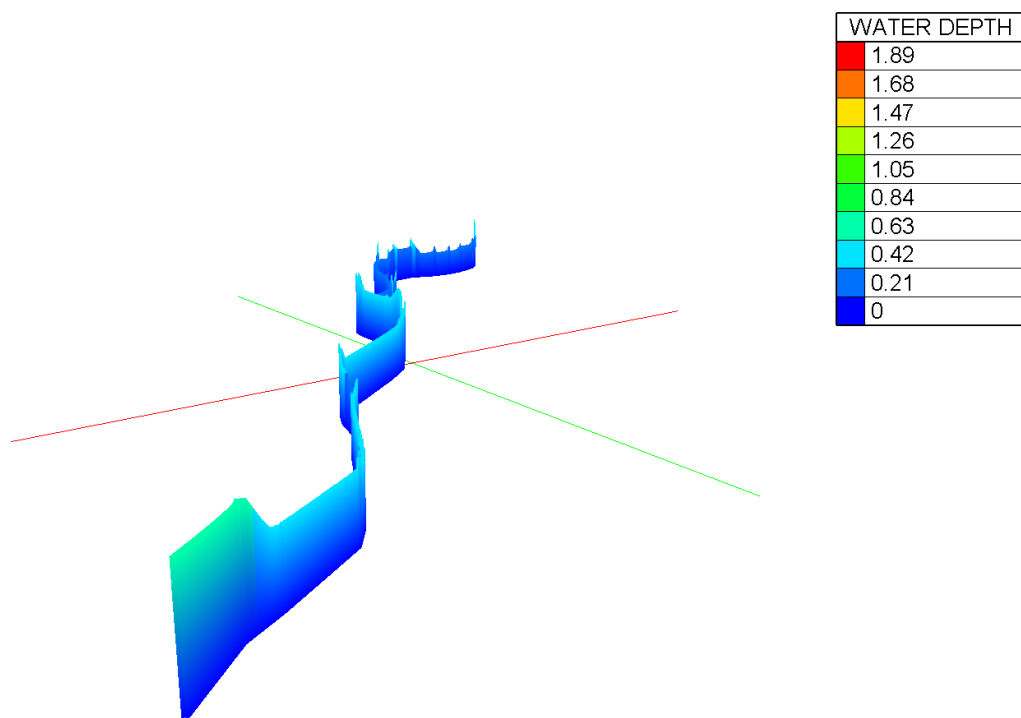
Εικόνα 5.4.4-4:Βάθος ροής στο 3D επίπεδο για $Q=20m^3/s$



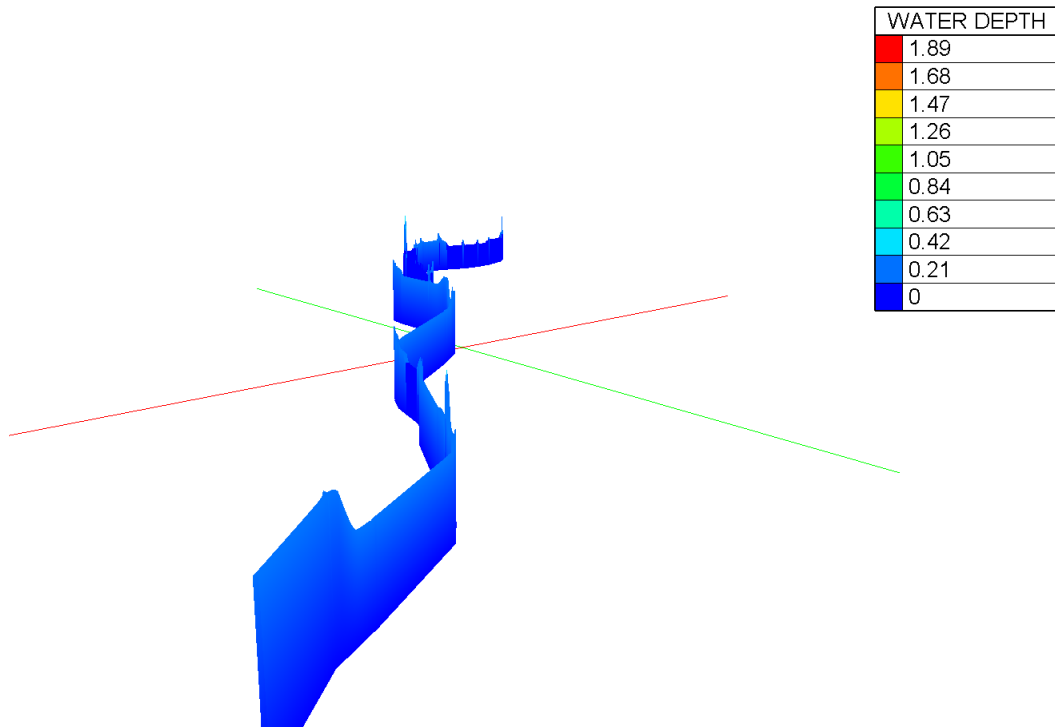
Εικόνα 5.4.4-5:Βάθος ροής στο 3D επίπεδο για $Q=15m^3/s$



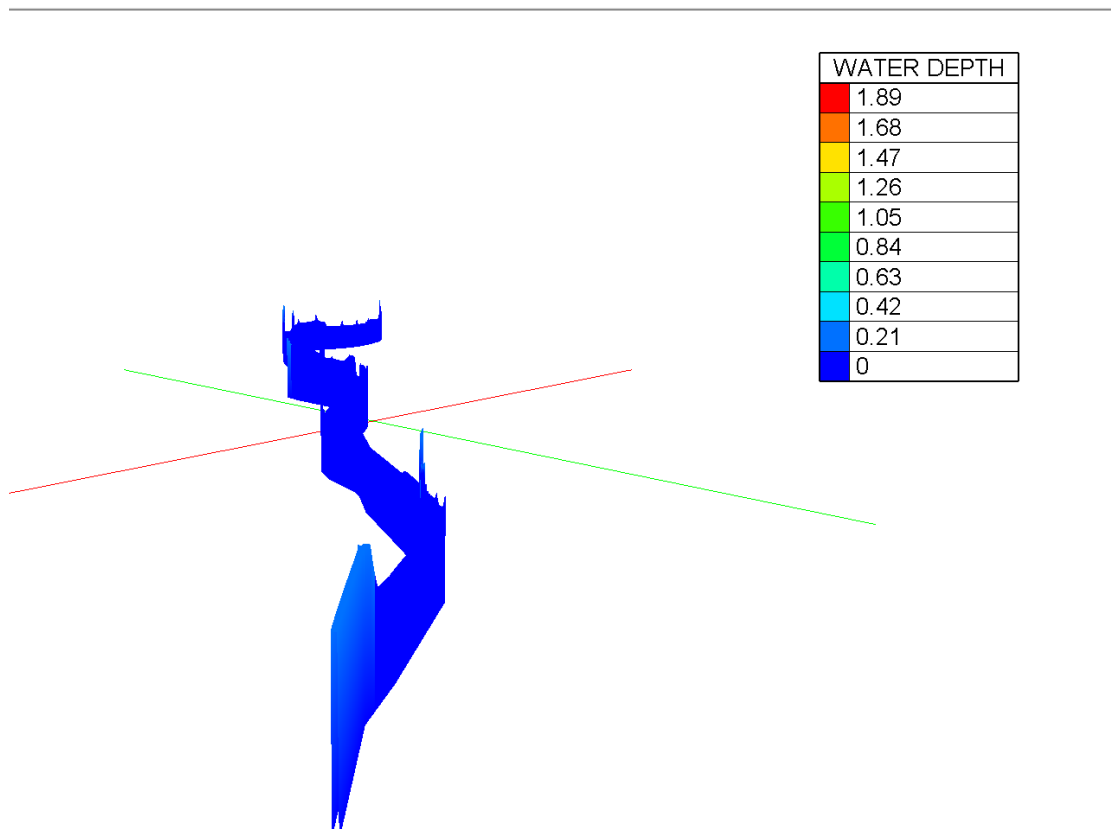
Εικόνα 5.4.4-6:Βάθος ροής στο 3D επίπεδο για $Q=10m^3/s$



Εικόνα 5.4.4-7:Βάθος ροής στο 3D επίπεδο για $Q=5m^3/s$



Εικόνα 5.4.4-8:Βάθος ροής στο 3D επίπεδο για $Q=2m^3/s$



Εικόνα 5.4.4-9:Βάθος ροής στο 3D επίπεδο για $Q=1m^3/s$

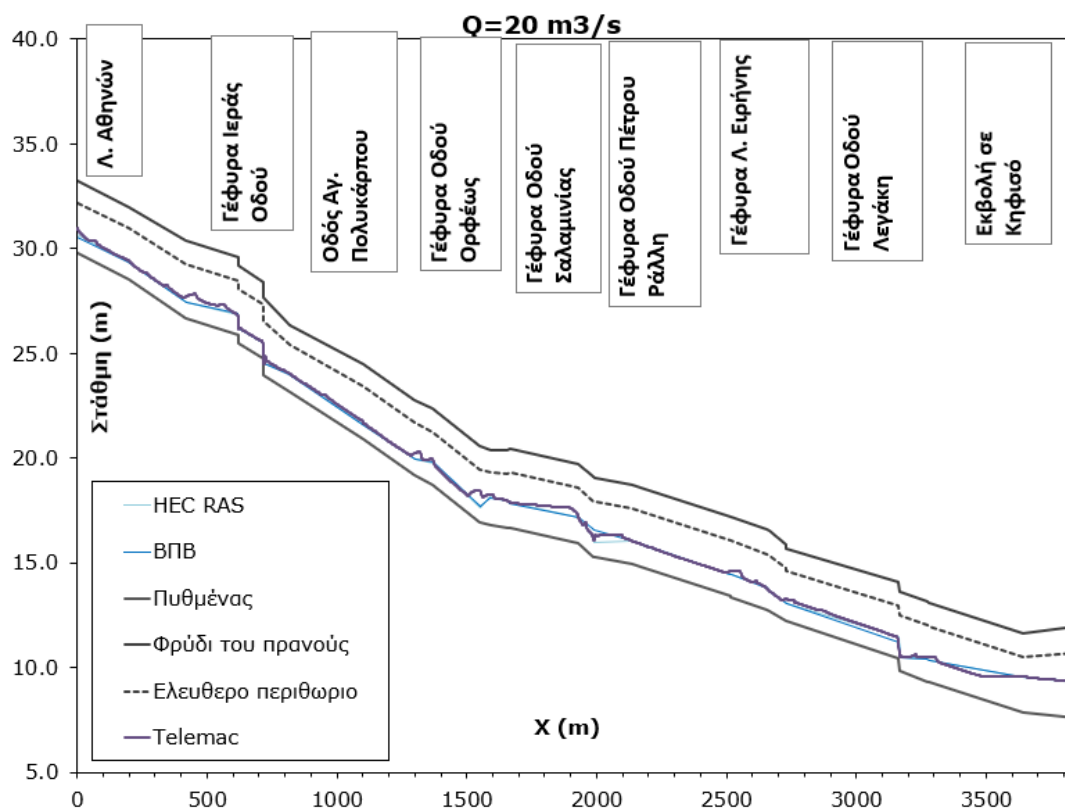
Παρατηρούμε ότι όπως και στο HEC-RAS το ρέμα δεν υπερχειλίζει σε κανένα σημείο του οπότε η υπόθεση μας να θεωρήσουμε ως ανοιχτό το κλειστό κομμάτι του αγωγού επιβεβαιώνεται και εδώ.

Στο τελευταίο κομμάτι του αγωγού παρατηρούμε μια απότομη αύξηση του βάθους ροής που αντιστοιχεί στην οδό Πέτρου Ράλλη που πραγματοποιείται υδραινικό άλμα αποτέλεσμα που συμφωνεί με τα αποτελέσματα του HEC-RAS παραπάνω.

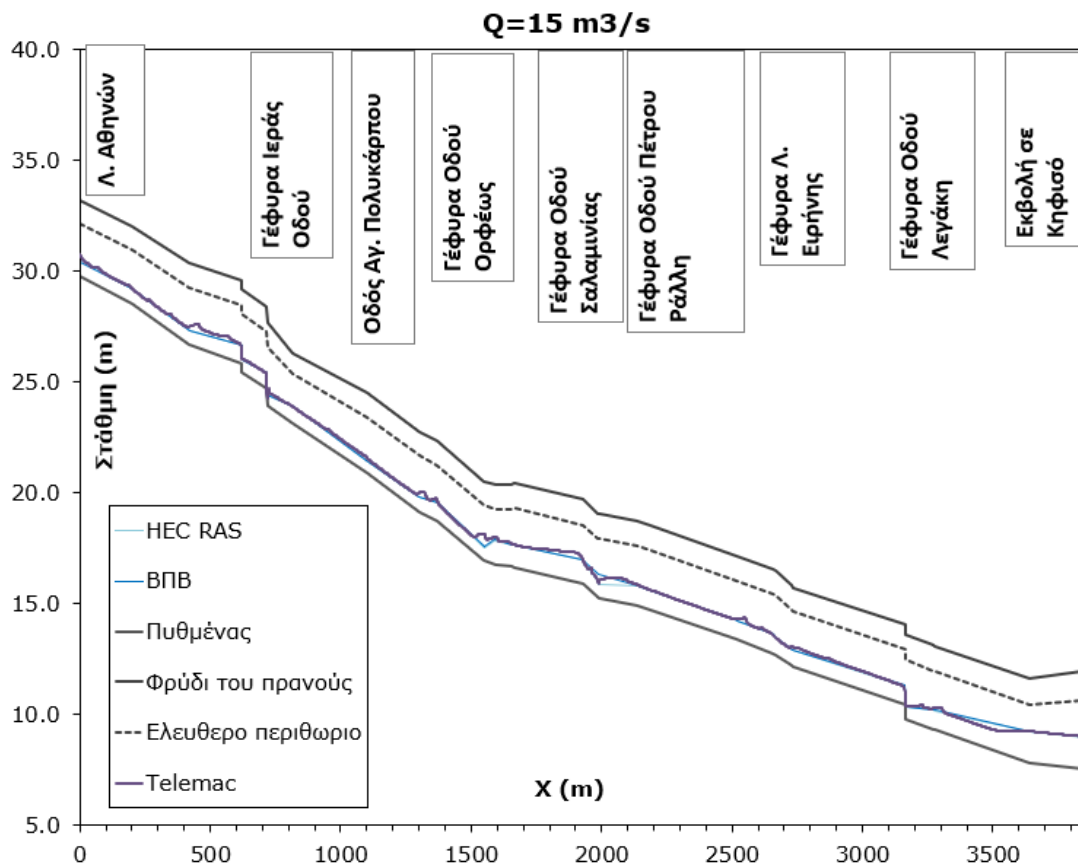
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Σύγκριση και σχολιασμός αποτελεσμάτων HEC-RAS TELEMAC

6.1. Σύγκριση

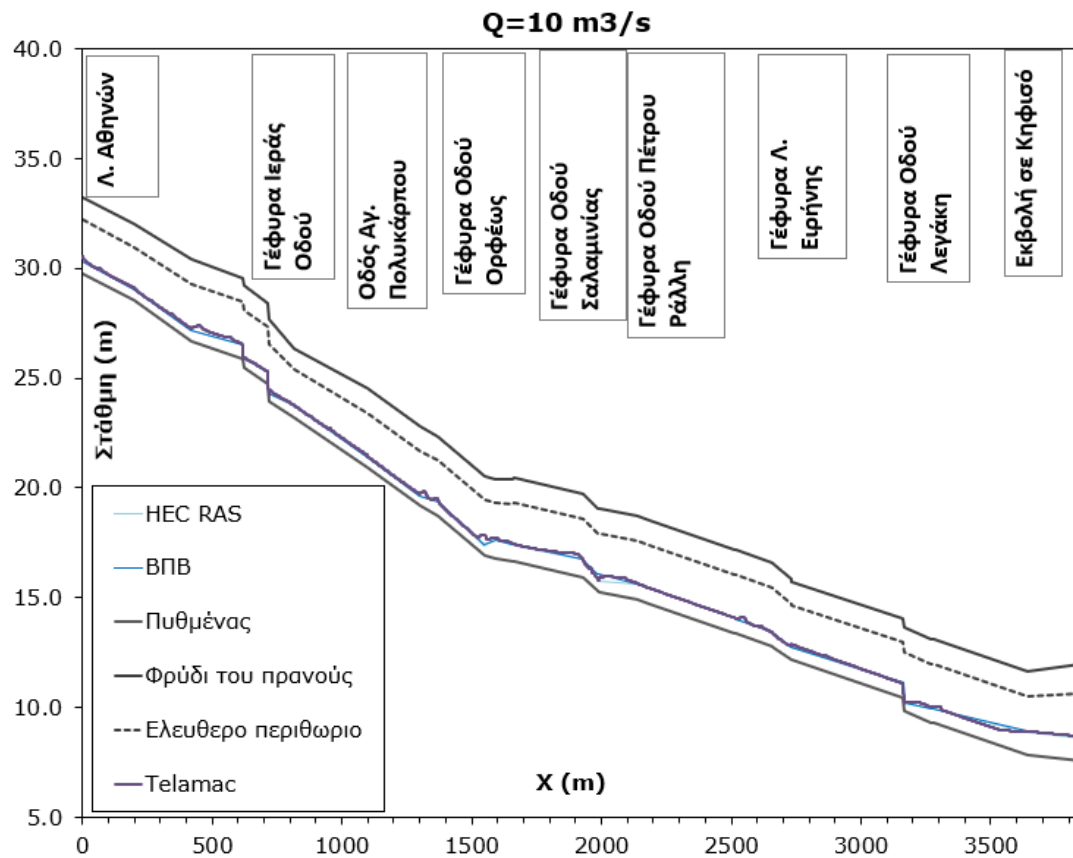
Στην ενότητα αυτή θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που δίνουν τα μοντέλα HEC-RAS και Telemac για τα διάφορα σενάρια παροχής. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Θεωρούμαι εδώ +7.59 ως στάθμη πυθμένα η οποία εκτιμάται από την τεχνική μελέτη.



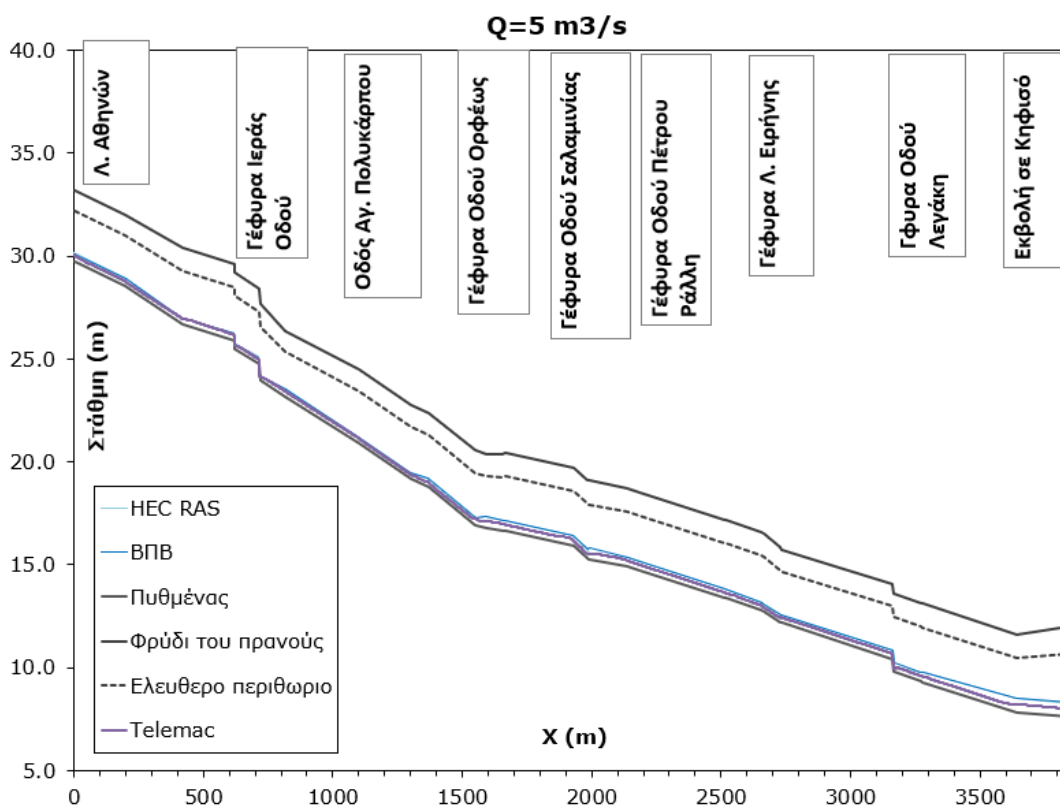
Εικόνα 6.1-1: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για HEC-RAS και TELEMAC για $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$



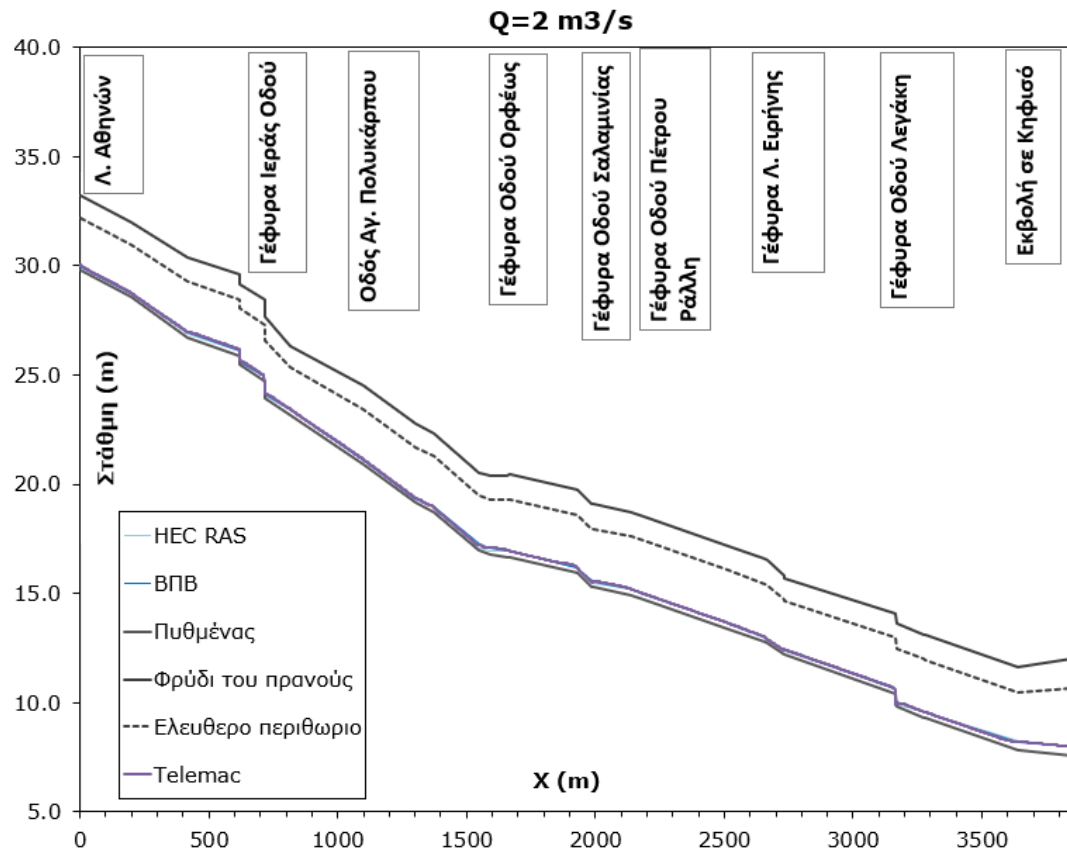
Εικόνα 6.1-2: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για HEC-RAS και TELEMAC για $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$



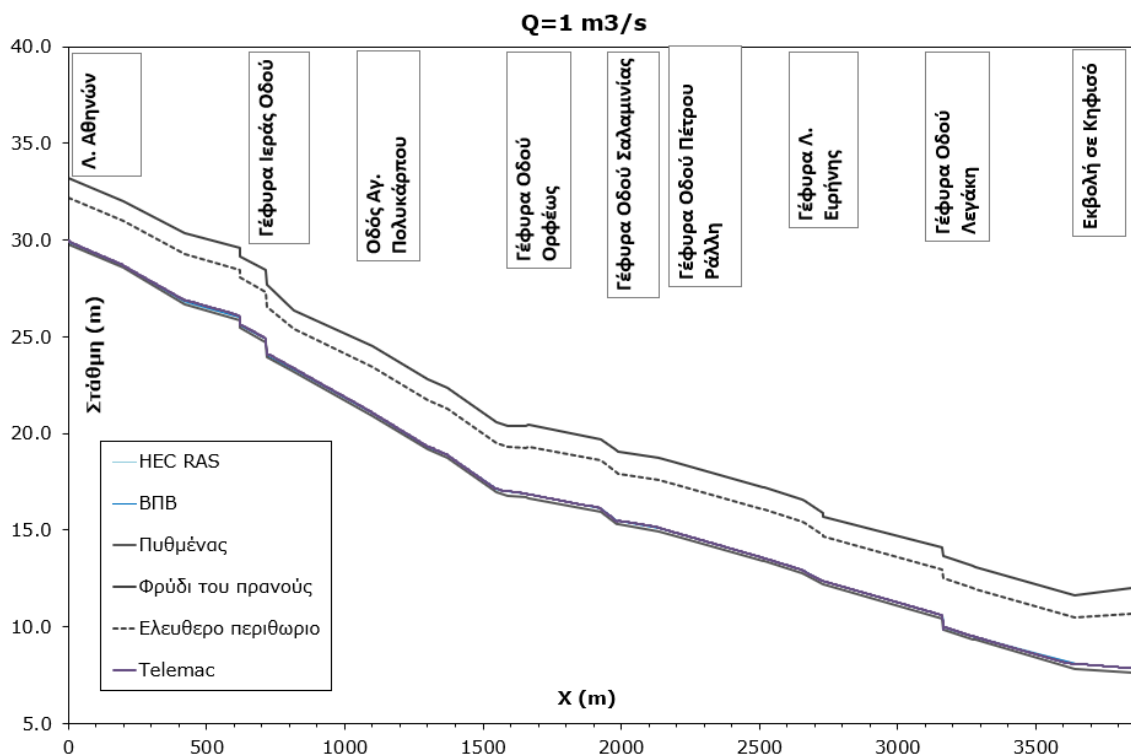
Εικόνα 6.1-3: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για HEC-RAS και TELEMAC για $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$



Εικόνα 6.1-4: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για HEC-RAS και TELEMAC για $Q=5$ m^3/s



Εικόνα 6.1-5: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για HEC-RAS και TELEMAC για $Q=2$ m^3/s



Εικόνα 6.1-6: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας για HEC-RAS και TELEMAC για $Q=1 \text{ m}^3/\text{s}$

Σε όλα τα σενάρια παροχής παρατηρούμε ότι τα προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας που έχουν υπολογίσει τα 2 μοντέλα ταυτίζονται στην πλειοψηφία του ρέματος. Αυτό αν αναλογιστούμε τις εξισώσεις και τις θεωρητικές παραδοχές με τις οποίες λειτουργούν τα 2 μοντέλα είναι ένα αποτέλεσμα που το περιμέναμε.

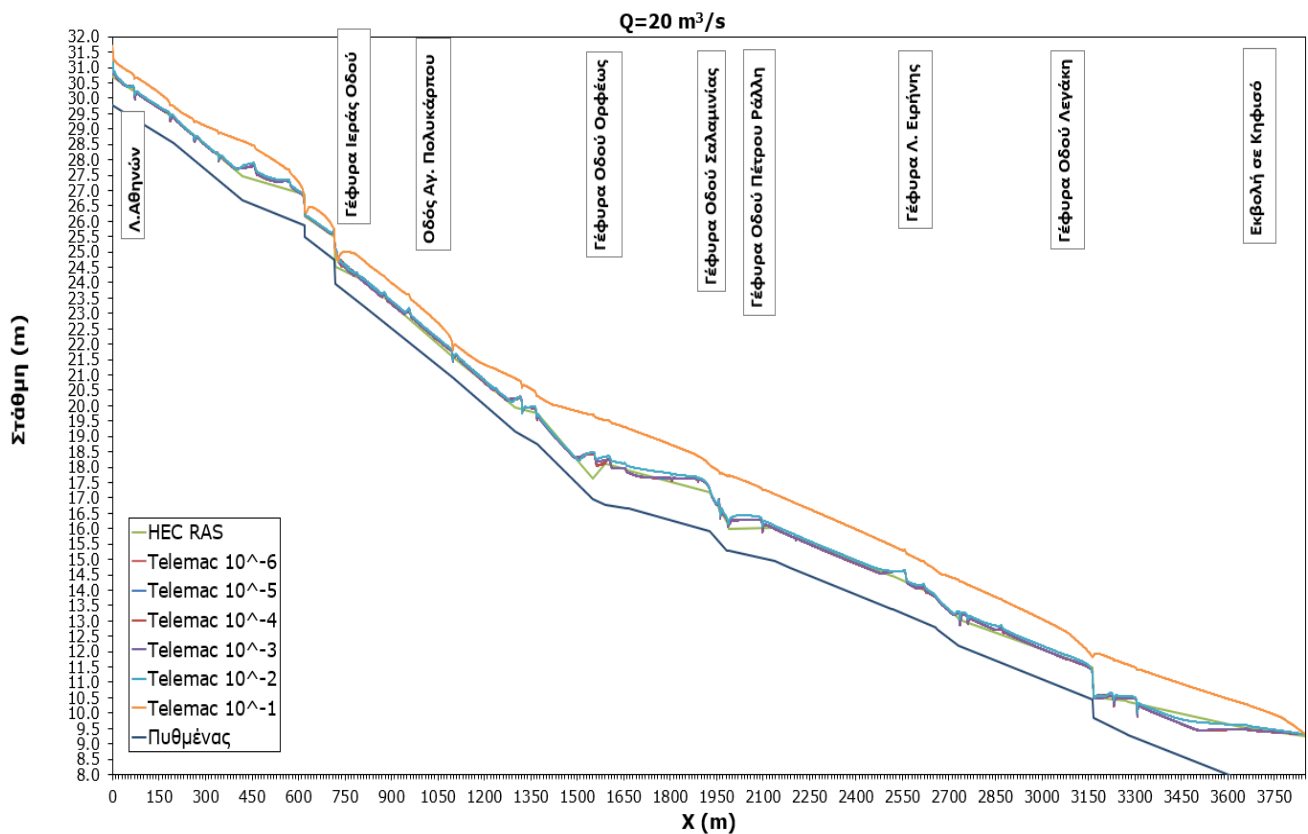
Στα πραγματικά ρευστά λόγω του ακανόνιστου σχήματος των διατομών μεταξύ των οποίων γίνεται η ροή αλλά και λόγω περιβαλλοντικών εξωτερικών δράσεων όπως π.χ η δράση του ανέμου προκαλείται τύρβη. Η τυρβώδης ροή λόγω του χαοτικού χαρακτήρα της προσεγγίζεται πάντα στατιστικά και εμπειρικά και όχι ντετερμινιστικά βάσει κάποιου νόμου. Λόγω της δράσης των δυνάμεων της μοριακής συνεκτικότητας στις επιφάνειες που δημιουργούνται από τους στροβίλους της τύρβης έχουμε αυξημένες απώλειες ενέργειας σε θερμότητα. Το πρόβλημα αυτό των απωλειών ενέργειας λόγω τύρβης λόγω του χαοτικού χαρακτήρα του φαινομένου μπορεί να προσεγγιστεί μόνο εμπειρικά. Το HEC-RAS όπως δείξαμε και στο κεφάλαιο 2.2 προσεγγίζει τις απώλειες αυτές ως ένα ποσοστό της διαφοράς της κινητικής ενέργειας μεταξύ 2 διατομών μέσω ενός συντελεστή C ανάλογα αν έχω συστολή ή διαστολή της διατομής :

$$h_{cc} = C \left| \frac{a_1 V_1^2}{2g} - \frac{a_2 V_2^2}{2g} \right|.$$

Το Telemac αντίθετα μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικά μοντέλα τύρβης καθώς επιλύει στο οριζόντιο επίπεδο (x,y) με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το παρακάτω σύστημα διαφορικών εξισώσεων το οποίο αναφέρεται στην εξίσωση συνέχειας στην εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά x στην εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά y και στην εξίσωση του ισοζυγίου μάζας του ιχνηθέτη όπως περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 4 με τις εξισώσεις (4.1-4.7)

Στην παρούσα εργασία έχουμε επιλέξει μοντέλο σταθερούς τυρβώδης συνεκτικότητας (constant viscosity) σε όλο το πεδίο ίση με 10^{-6} η οποία αντιστοιχεί στην μοριακή συνεκτικότητα του νερού. Χαμηλές τιμές τυρβώδους συνεκτικότητας υποδηλώνουν χαμηλότερες απώλειες ενέργειας καθώς θα έχουμε διάχυση στην ροή μόνο μικρών στροβιλισμών σε αντίθεση με μια μεγαλύτερη τιμή που υποδηλώνει μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας λόγω τύρβης. Επιλέγοντας μια τιμή τυρβώδους συνεκτικότητας ίση με την μοριακή συνεκτικότητα του νερού το μοντέλο σταθερής τυρβώδους συνεκτικότητας που χρησιμοποιήσαμε προσομοιάζει με την μέθοδο Standard Step Method που χρησιμοποιεί το HEC-RAS δίνοντας παρόμοια αποτελέσματα.

Προς επίρρωση αυτής της εκτίμησης θα πραγματοποιήσουμε αλλά 5 σενάρια στο μοντέλο Telemac, αυτή την φορά για διαφορετικές τιμές τυρβώδους συνεκτικότητας $10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}$.

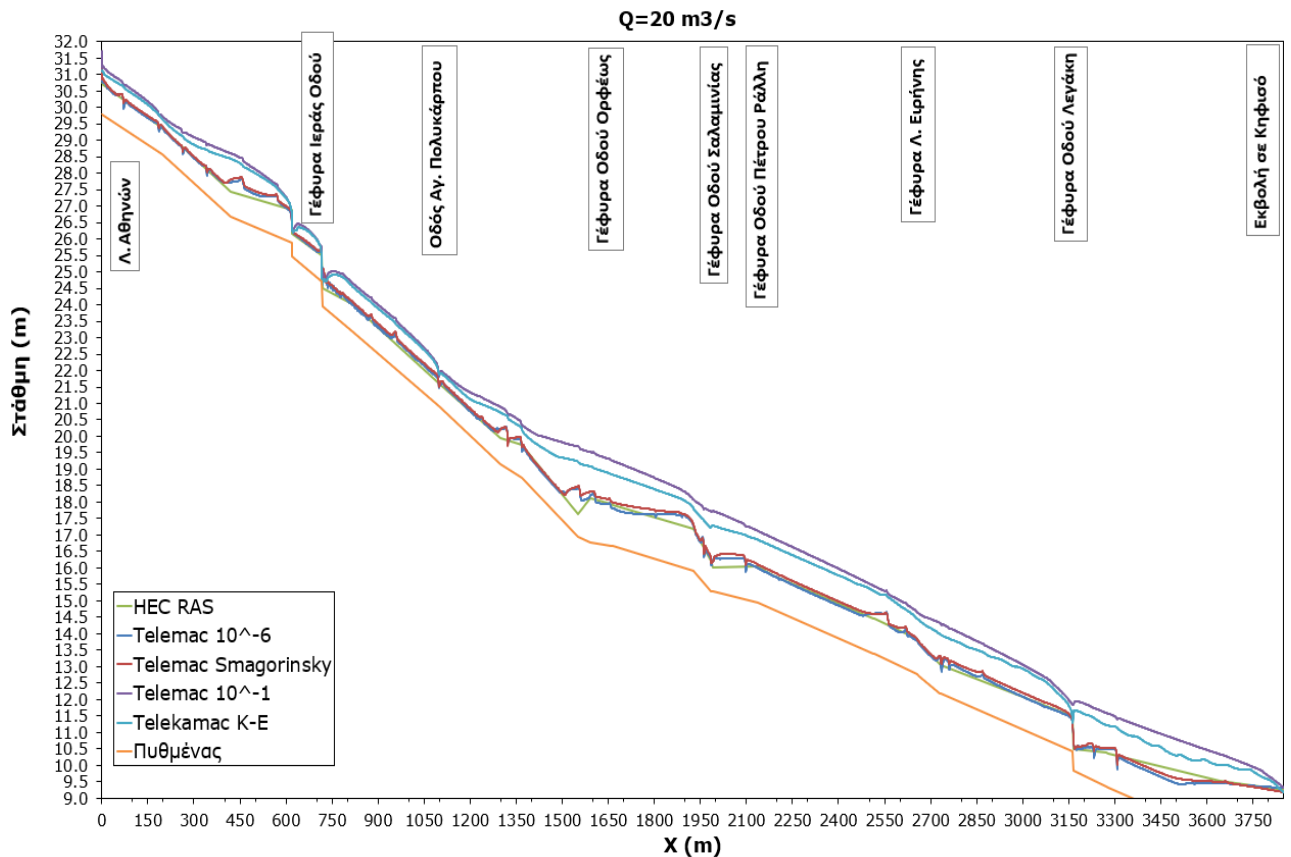


Εικόνα 6.1-7: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας στο TELEMAC για $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ και τιμές τυρβώδους συνεκτικότητας $10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}$ και στο HEC-RAS

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την εκτίμηση μας. Την μεγαλύτερη απόκλιση από το μοντέλο του HEC-RAS την έχουμε για τυρβώδη συνεκτικότητα 10^{-1} η οποία δίνει μεγαλύτερη στάθμη ελεύθερης επιφάνειας σε όλο το ρέμα. Την άμεσα μεγαλύτερη απόκλιση την δίνει η συνεκτικότητα 10^{-2} και η 10^{-3} ενώ για τις υπόλοιπες τιμές τα προφίλ ελεύθερης επιφάνειας έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις με σκοπό να μην διακρίνονται στο παραπάνω διάγραμμα.

Για περαιτέρω επιβεβαίωση της υπόθεσης θα πραγματοποιήσω άλλα 2 σενάρια με 2 διαφορετικά μοντέλα τύρβης που επιτρέπει το Telemac. Το ένα είναι το μοντέλο k-ε το οποίο βασίζεται στις εξισώσεις μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια (K) και για τον ρυθμό εκφυλισμού της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ε) (dissipation rate). Για τα δύο αυτά μεγέθη το Telemac λύνει τις παρακάτω εξισώσεις μεταφοράς όπως περιγράψαμε και πιο πάνω στις εξισώσεις 4.5 4.6 και 4.7

Ένα άλλο μοντέλο τύρβης που μπορεί να πραγματοποιήσει το Telemac είναι του Smagorinsky (Smagorinsky, 1963). Το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό του k-ε χωρίς να λαμβάνει υπόψιν όμως τους όρους διασποράς. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

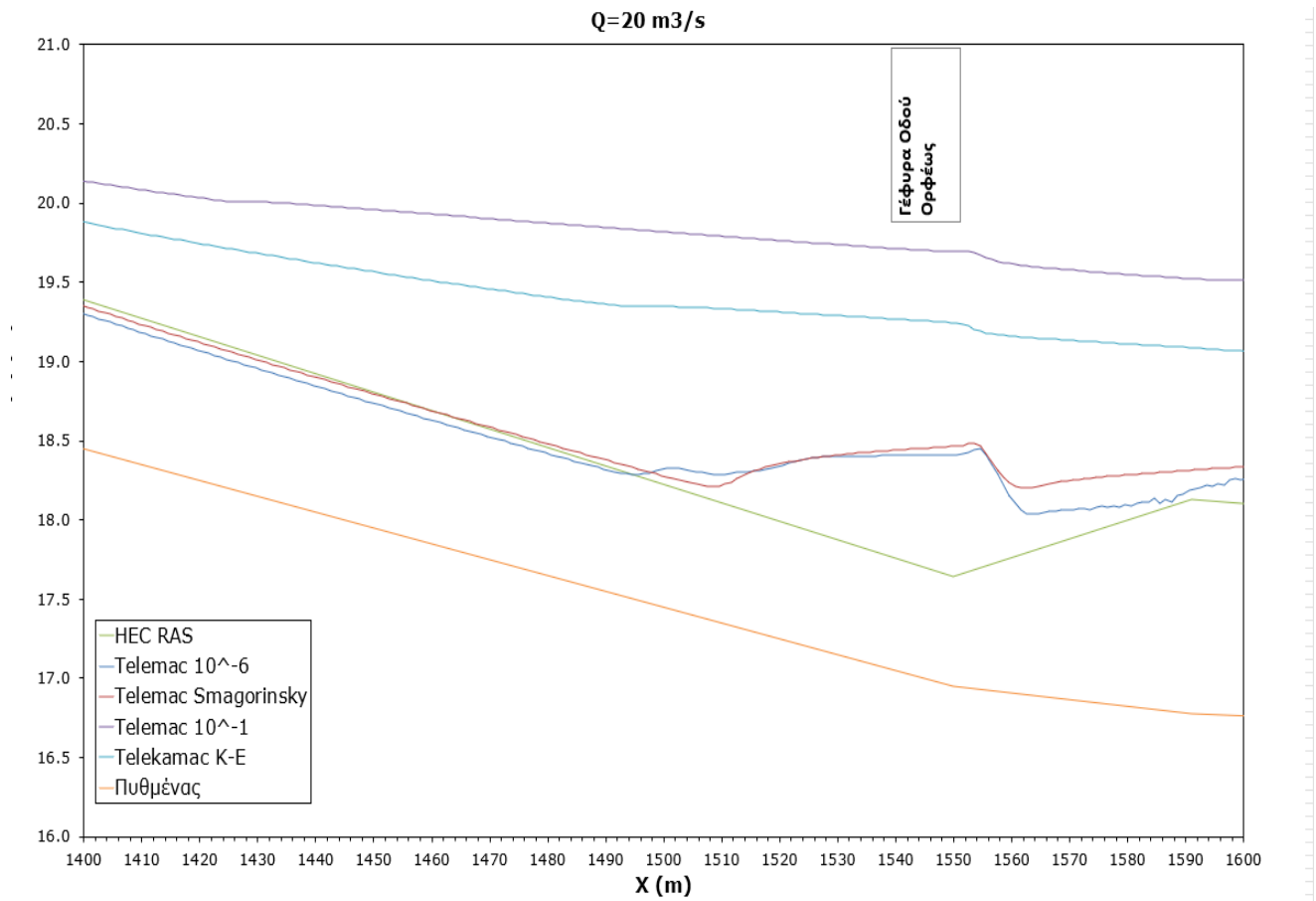


Εικόνα 6.1-7: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας στο TELEMAC για $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ για μοντέλα τύρβης Constant Viscosity, k-ε, Smagorinsky και στο HEC-RAS

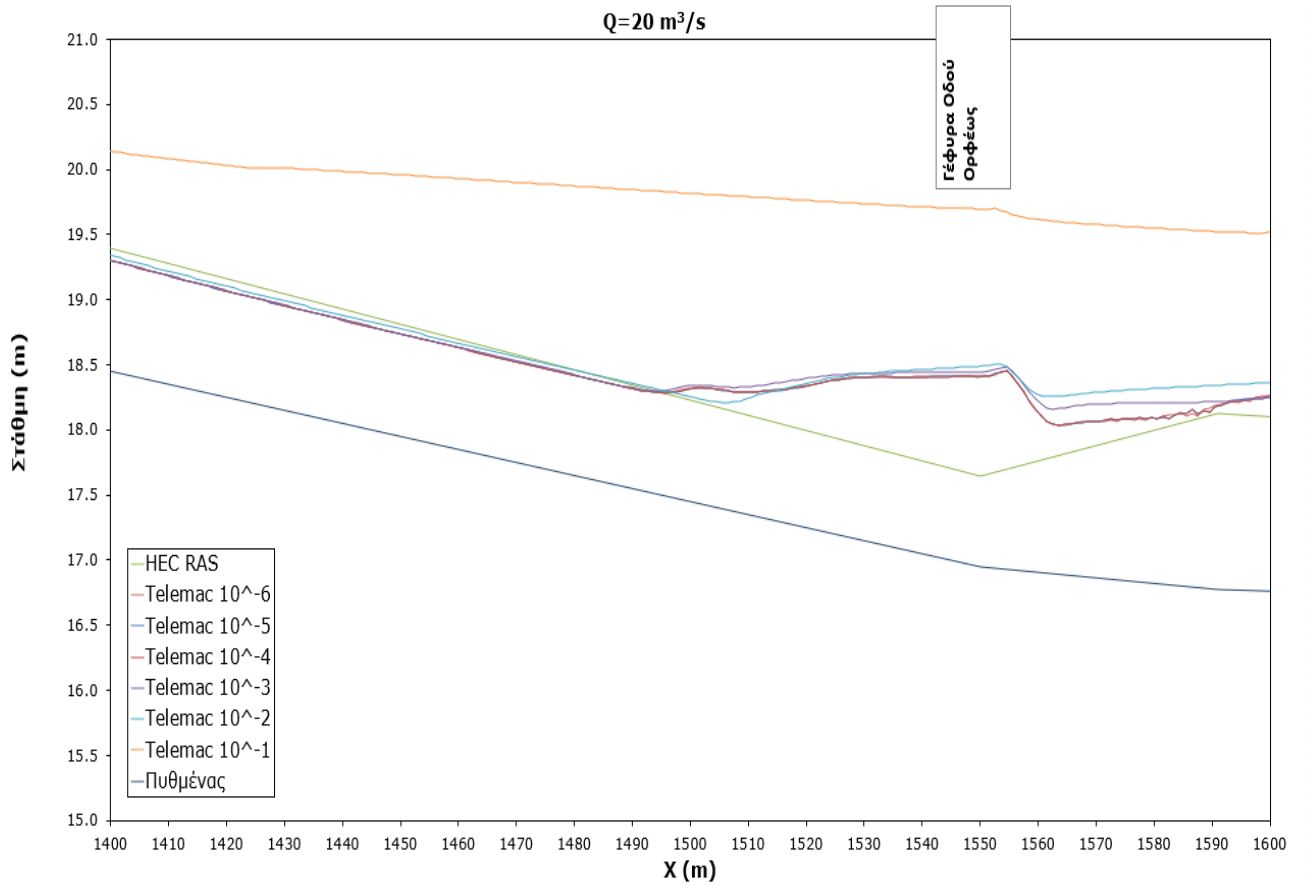
Όπως αναμενόταν μεγαλύτερη απόκλιση από το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας που έχει υπολογίσει το HEC-RAS παρουσιάζει πάλι το μοντέλο τύρβης του Telemac Constant Viscosity με τιμή τυρβώδους συνεκτικότητας ίσης με 10^{-1} . Ακολουθεί το μοντέλο k-ε ενώ το μοντέλο τύρβης Smagorinsky και Constant Viscosity με τυρβώδη συνεκτικότητα προσεγγίζουν καλύτερα τα αποτελέσματα του HEC-RAS.

6.2 Συμπεράσματα

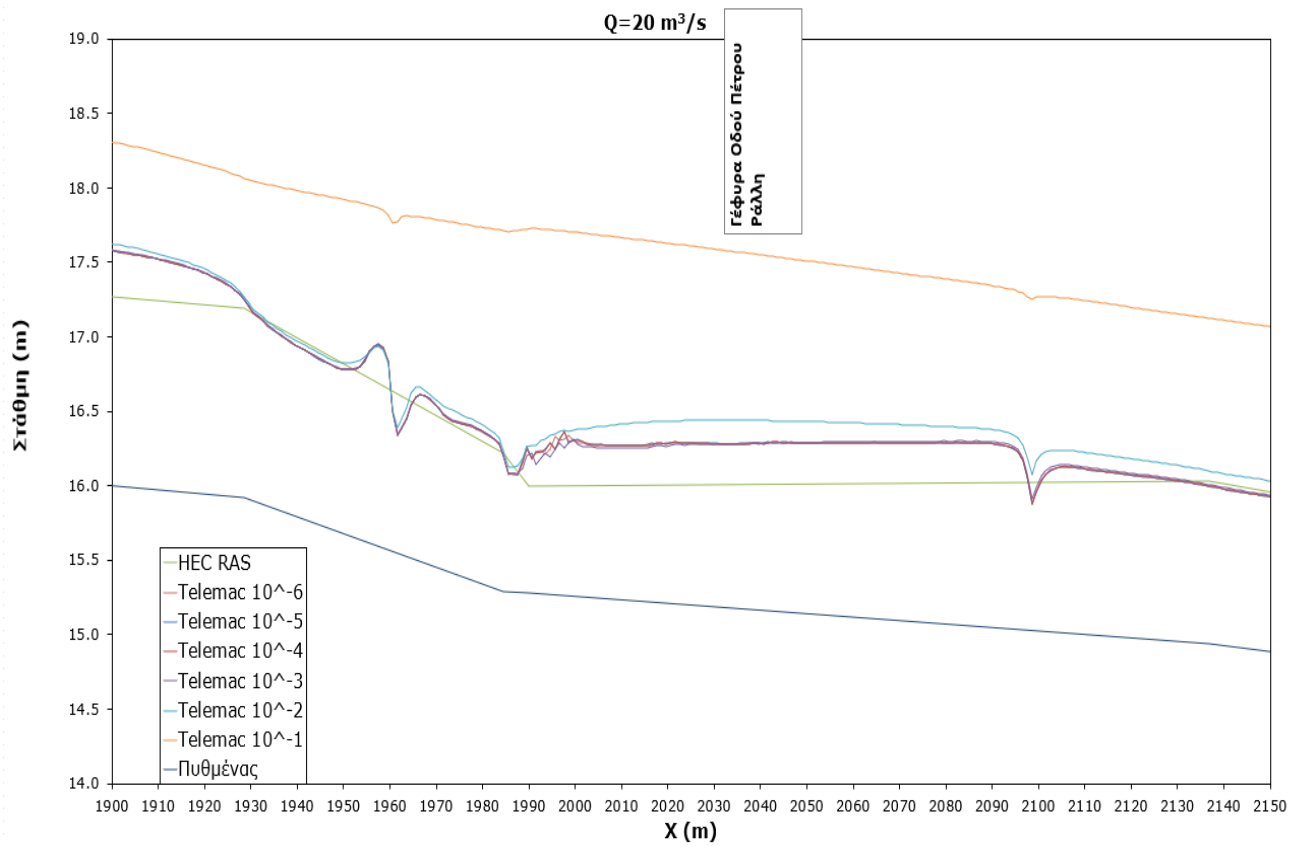
Παρόλο που το Telemac με το μοντέλο τύρβης Constant Viscosity με τυρβώδη συνεκτικότητα ίση με 10^{-6} που επιλέξαμε προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά με ελάχιστη απόκλιση το προφίλ Ελεύθερης Επιφάνειας που υπολογίζει το HEC-RAS με μια πιο προσεκτική ανάγνωση των διαγραμμάτων παρατηρούμε ότι υπάρχουν σημεία στο ρέμα όπου παρουσιάζονται μεγαλύτερες αποκλίσεις κυρίως στις περιοχές όπου εμφανίζεται υδραυλικό άλμα. Δύο από αυτά είναι ανάντη της γέφυρας της Οδού Ορφέως στις διατομές Δ12-Δ13 στις Χ.Θ 1550-1591 και στην γέφυρα της Οδού Πέτρου Ράλλη στις διατομές Δ18-Δ19 στις Χ.Θ 19898.9-2136.9 η λεπτομέρεια του οποίου φαίνεται στις επόμενες εικόνες :



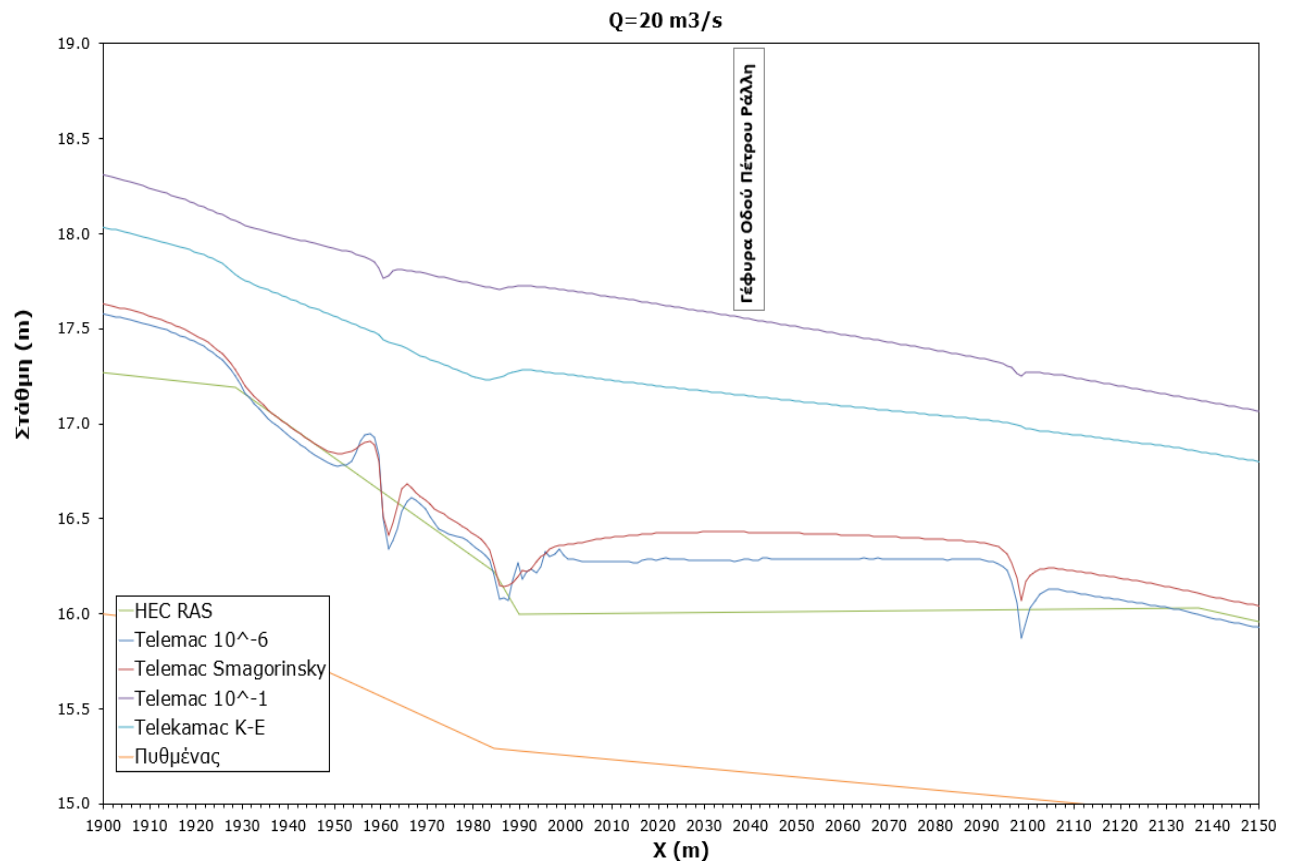
Εικόνα 6.2-1: Λεπτομέρεια ελεύθερης επιφάνειας στην Οδό Ορφέως στο TELEMAC για $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ για μοντέλα τύρβης *Constant Viscosity*, *k-ε*, *Smagorinsky* και στο HEC-RAS



Εικόνα 6.2-2: Λεπτομέρεια ελεύθερης επιφάνειας στην Οδό Ορφάεως στο TELEMAC για $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ με τιμές τυρβώδους συνεκτικότητας $10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}$ και στο HEC-RAS



Εικόνα 6.2-3: Λεπτομέρεια ελεύθερης επιφάνειας στην Οδό Πέτρου Ράλλη στο TELEMAC για $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ με τιμές τυρβώδους συνεκτικότητας $10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}$ και στο HEC-RAS



Εικόνα 6.2-4: Λεπτομέρεια ελεύθερης επιφάνειας στην Οδό Πέτρου Ράλλη στο TELEMAC για $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ για μοντέλα τύρβης Constant Viscosity, $k-\epsilon$, Smagorinsky και στο HEC-RAS

Και στις 2 περιοχές με υδραυλικό άλμα το μοντέλο του Telemac που επιλέξαμε παρουσιάζει μια μικρή απόκλιση σχετικά με το προφίλ της Ελεύθερης Επιφάνειας που υπολογίζει το HEC-RAS. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί ενδεχομένως με πύκνωση διατομών κοντά στην περιοχή του υδραυλικού άλματος στο αρχείο γεωμετρίας του HEC-RAS καθώς τα προφίλ του Telemac φαίνεται να προσεγγίζουν καλύτερα την περιοχή του υδραυλικού άλματος. Το μοντέλο Constant Viscosity με σταθερή τυρβώδη συνεκτικότητα 10^{-6} που επιλέξαμε επίσης συγκλίνει περισσότερο με τα αποτελέσματα του HEC-RAS. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τυρβώδους συνεκτικότητας τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόκλιση του προφίλ της Ελεύθερης Επιφάνειας από αυτό του HEC-RAS. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεγαλύτερες τιμές τυρβώδους συνεκτικότητας δίνουν μεγαλύτερες σταθμές στο προφίλ της Ελεύθερης Επιφάνειας. Από τα υπόλοιπα μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιεί το Telemac το μοντέλο του Smagorinsky φαίνεται να προσεγγίζει τα αποτελέσματα του HEC-RAS και του μοντέλου Constant Viscosity. Το μοντέλο τύρβης αυτό χρησιμοποιείται στο Telemac κυρίως για την προσομοίωση παλιρροικών ροών. Η ικανοποιητική προσομοίωση της ροής στο ρέμα δείχνει ότι σαν μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ροές σε ανοιχτούς αγωγούς. Μεγάλη απόκλιση δείχνει το μοντέλο $k-\epsilon$ το οποίο προσεγγίζει περισσότερο το μοντέλο Constant Viscosity με σχετικά μεγάλη τιμή τυρβώδους συνεκτικότητας 10^{-1} . Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

Περισσότερη διερεύνηση θέλει σχετικά με το ποιες περιπτώσεις θα ήταν καλό να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ροών με ανοιχτούς αγωγούς

Στον παρακάτω πίνακα είναι υπολογισμένη η απόκλιση της στάθμης σε ποσοστό επί % της ελεύθερης επιφάνειας που υπολογίζει το HEC-RAS με την στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας που υπολογίζει το Telemac για κάθε τιμή της παροχής σε κάθε διατομή του ρέματος.

Πίνακας 6.2.1: Ποσοστό απόκλισης επί τις % της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας μεταξύ των 2 μοντέλων

Χ.Θ	Q= 20m ³ /s	Q= 15m ³ /s	Q=10m ³ /s	Q=5 m ³ /s	Q=2 m ³ /s	Q=1 m ³ /s
0.00	-0.71	-0.57	-0.39	-0.18	-0.06	-0.02
5.99	-1.40	-1.14	-0.83	-0.49	-0.28	-0.21
10.00	-1.18	-0.98	-0.67	-0.38	-0.20	-0.11
67.81	-0.82	-0.55	-0.35	-0.17	-0.06	-0.08
182.43	-0.25	-0.22	-0.20	-0.17	-0.16	-0.09
198.05	-0.13	-0.15	-0.11	-0.07	-0.04	0.02
262.91	-0.44	-0.36	-0.24	-0.17	-0.12	-0.11
343.42	-0.58	-0.43	-0.27	-0.12	-0.03	-0.01
419.00	-0.63	-0.37	-0.11	-0.10	-0.09	-0.11
455.26	-0.92	-0.82	-0.69	-0.57	-0.49	-0.05
567.73	-0.68	-0.54	-0.46	-0.26	-0.14	-0.10
620.00	1.87	1.60	1.56	1.27	1.09	1.01
621.00	0.04	0.04	0.02	-0.01	-0.03	-0.05
715.00	0.78	1.13	1.07	0.97	0.91	0.77
718.00	-0.23	0.27	-0.53	-0.28	-0.13	-0.12
784.37	0.07	0.12	0.14	0.13	0.13	0.11
816.50	0.20	0.13	0.03	-0.02	-0.04	-0.05
874.26	-0.10	-0.11	-0.09	-0.06	-0.04	0.00
951.97	-0.46	-0.39	-0.34	-0.20	-0.11	-0.15
1094.25	-0.28	-0.26	-0.21	-0.14	-0.09	-0.01
1100.00	-0.37	-0.30	-0.22	-0.12	-0.06	0.03
1235.33	0.05	0.05	0.03	0.06	0.08	-0.01
1299.97	-1.94	-1.73	-1.56	-1.55	-1.54	-1.47
1318.95	-2.66	-2.17	-1.58	-0.83	-0.38	-0.20
1370.00	-0.65	-0.52	-0.37	-0.16	-0.03	0.01
1550.00	-4.46	-3.69	-2.81	-1.62	-0.90	-0.54
1554.02	-3.65	-2.97	-2.25	-1.26	-0.66	-0.35
1591.00	-0.71	-0.63	-0.53	-0.96	-1.22	-0.09
1600.48	-0.31	-0.30	-0.28	-0.19	-0.13	-0.08

1652.02	-0.5	-0.42	-0.40	-0.19	-0.06	-0.03
1656.93	0.05	-0.13	-0.33	-0.10	0.03	0.03
1665.50	0.10	-0.07	-0.27	-0.05	0.08	0.07
1801.15	0.17	0.13	0.06	-0.17	-0.31	-0.18
1887.48	0.27	0.26	0.21	0.15	0.11	0.08
1928.50	-0.14	-0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
1956.88	-2.58	-1.91	-1.27	-0.74	-0.43	-0.33
1984.50	-0.24	-0.19	-0.16	-0.03	0.04	0.04
1989.90	-0.29	-0.22	-0.32	-0.42	-0.47	0.02
2095.93	-0.06	-0.08	-0.12	-0.09	-0.08	-0.03
2136.90	-0.05	-0.11	-0.13	-0.12	-0.11	-0.03
2185.90	-0.29	-0.16	-0.15	-0.09	-0.05	-0.06
2205.94	-0.35	-0.25	-0.20	-0.09	-0.03	-0.03
2513.87	-0.73	-0.39	-0.05	-0.05	-0.04	0.01
2516.30	-0.82	-0.47	-0.08	-0.05	-0.03	-0.05
2553.93	-3.37	-2.78	-2.18	-1.21	-0.62	-0.34
2616.14	-1.17	-1.00	-0.87	-0.69	-0.57	-0.55
2656.27	0.34	0.39	0.30	0.15	0.1	0.06
2664.30	0.13	0.12	0.11	0.02	-0.07	0.06
2730.30	-1.81	-1.54	-1.12	-0.56	-0.22	-0.21
2731.50	-1.94	-1.60	-1.22	-0.66	-0.33	-0.30
2734.70	-1.71	-1.35	-0.96	-0.51	-0.23	-0.20
2757.90	-0.60	-0.52	-0.43	-0.47	-0.50	-0.66
2870.65	-0.47	-0.42	-0.27	-0.15	-0.08	0.01
3069.37	0.11	0.03	-0.03	-0.51	-0.80	-0.01
3162.50	2.75	2.44	2.10	1.73	1.51	1.50
3167.00	0.06	-0.10	-0.16	-0.23	-0.28	-0.14
3231.75	0.30	-0.04	-0.70	-0.27	-0.02	-0.02
3271.03	-1.14	-0.74	-0.82	-0.35	-0.07	-0.06
3279.30	-1.53	-1.23	-1.31	-0.56	-0.10	-0.17
3305.11	-2.36	-2.34	-2.01	-0.87	-0.19	-0.03
3560.71	0.14	0.14	0.12	-0.17	-0.34	-0.30
3641.24	-0.25	-0.20	-0.21	-0.13	-0.08	-0.06
3658.89	-0.90	-0.88	-0.69	-0.48	-0.35	-0.08
3850.00	-0.69	-0.62	-0.61	-0.40	-0.28	-0.17

Συμπαιρένουμε από τις τιμές του πίνακα ότι η αριθμητική απόκλιση στις τιμές των 2 μοντέλων είναι ελάχιστη καθ'όλη την έκταση του ρέματος με μέγιστη απόκλιση στο 4.5% στην περιοχή του υδραυλικού άλματος. Αυτό που είναι εμφανές από τα δεδομένα του πίνακα είναι επίσης ότι το ποσοστό της απόκλισης αυξάνει με μεγαλύτερες τιμές παροχής αν και ελάχιστα. Παραδείγματος χάρη ενώ η μέγιστη απόκλιση των 2 μοντέλων για την μέγιστη παροχή 20m³/s που υπολογίσαμε είναι 4.5% για την ελάχιστη παροχή 1m³/s η απόκλιση μεταξύ των 2 μοντέλων σχεδόν εκμηδενίζεται στο 0.54%. Αυτό το μοτίβο ισχύει για όλη την έκταση του ρέματος αν και στις υπόλοιπες διατομές η διαφορά είναι αρκετά μικρή.

Οπότε για αρκετά μεγαλύτερες τιμές παροχής εκτιμούμε ότι η απόκλιση θα είναι μεγαλύτερη οπότε θα χρειαστεί μεγαλύτερη προσοχή όπως και πύκνωση διατομών για μεγαλύτερη ακρίβεια.

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα μελέτη το TELEMAC για το μοντέλο τύρβης Constant Viscosity με μικρές τιμές τυρβώδους συνεκτικότητας της τάξης του 10⁻⁶ και το HEC-RAS παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημα αποτελέσματα εκτός από την περιοχή που πραγματοποιείται υδραυλικό άλμα. Περαιτέρω διερεύνηση χρειάζεται αν αυτό είναι διαφορά εν γένει των 2 μοντέλων ή αν μπορεί να λυθεί με περισσότερη πύκνωση διατομών στο HEC-RAS στις περιοχές εκείνες ώστε να έχω μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό. Επίσης το μοντέλο k-ε προσεγγίζει όπως φαίνεται μοντέλα σταθερής τυρβώδους συνεκτικότητας με μεγαλύτερη τιμή της τάξης 10⁻¹. Παρότι το μοντέλο k-ε είναι αρκετά διαδεδομένο σε εφαρμογές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics) στην περίπτωση μας δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μια μελλοντική περιοχή μελέτης είναι κάτω από ποιες προϋποθέσεις μπορεί να εφαρμοστεί σε ροές ανοιχτών αγωγών αυτό το μοντέλο.

Βιβλιογραφία

i) Ελληνική

1. Δάρας Α. (2004). Το παντοροϊκό σύστημα της Αθήνας, ΗΜΕΡΙΔΑ «Αντιπλημμυρική προστασία Αττικής».
2. ΕΤΜΕ – Ι. ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝ/ΤΕΣ Ε.Ε. (1987). Οριστική Μελέτη βελτίωσης των υφισταμένων υπερχειλιστών του κεντρικού παντοροϊκού συστήματος και των έργων εκτροπής παροχής ξηράς περιόδου των φυσικών ρεμάτων στον ΚΑΑ (κόφτρες). Εισαγωγική Έκθεση. Φορέας: ΕΥΔΑΠ.
3. ΕΝΒΕCO Α.Ε. (2011). «Άτλας του Ελαιώνα Αττικής». Αθήνα: Αναθέτουσα Αρχή: Αναπτυξιακή Εταιρεία Δήμου Αθηναίων (ΑΕΔΑ Α.Ε.).
4. ΕΥΔΑΠ Α.Ε (2017). Ετήσιος Απολογισμός και Ετήσιο Δελτίο 2017.
5. Ευστρατιάδης Α. & Κουτσογιάννης Δ. (2018). Εισαγωγή στις αποχετεύσεις.
6. Ζαφειράκου Α. (2014) Υδρεύσεις – Αποχετεύσεις – Αδρεύσεις. Ιστορική Αναδρομή σε αποχετευτικά δίκτυα.
7. Θεοδοσόπουλος Δ. (2018). Μια κριτική ανάγνωση της Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων του ρέματος του Προφήτη Δανιήλ, Γεωμυθική.
8. Κούρτης Ι.Μ., Κοψιαύτης Γ., Μπέλλος Β., Τσιχριντζής Β.Α. (2017). Βαθμονόμηση και Επαλήθευση του Λογισμικού SWMM σε μια Λεκάνη του Παντοροϊκού Συστήματος Αποχέτευσης της Αθήνας, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών.
9. Κουτσογιάννης Δ. (2011). Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης, Έκδοση 4η.
10. Κωτσόπουλος Σ. (2014), Σημειώσεις Υδραυλική ΙΙ, Μάθημα Δ΄ Εξαμήνου. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Θεσσαλίας.
11. Μαυρομιχάλης Ν. (2008). Εκτροπή Κυκλοβόρου / Ιλισού (μερική / Προφ. Δανιήλ στον Κηφισό.
12. ΜΕΤΕΡ-ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΥΠΟΔΟΜΗ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., "ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΙΩΝΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝ/ΤΕΣ, ΚΑΜΠΗ Ε.Τ.Ε., ISP (Scholz Beratende Ingenieure) AG, ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ ΓΙΑΝΝΑΤΟΣ, ΜΑΚ.Τ.Ε. Ε.Π.Ε. (2011). Μελέτη της οδού Μαρκόνι- Αγ. Άννας από την Λ. Αθηνών μέχρι τη διασταύρωσή της με την Οδό Μακρυγιάννη- Ταύρου (συμπεριλαμβανομένου του τμήματος της οδού Μακρυγιάννη Ταύρου από την οδό Αγ. Άννας μέχρι τον Α/Κ με Λ. Κηφισού και εξαιρουμένου του μελετηθέντος τμήματος από την Ιερά οδό μέχρι την οδό Ορφέως), της μελέτης του οδικού & υδραυλικού έργου της οδού και του ρέματος Προφ. Δανιήλ από την Ιερά Οδό μέχρι τον Π. Κηφισό και της διαπλάτυνσης της οδού Ορφέως μέχρι την οδό Αγ. Άννας. Φορέας: Υπ.ΥΠΟ.ΜΕ.ΔΙ./Γ.Γ.Δ.Ε./Δ.Μ.Ε.Ο.
13. Μπελάη Βασιλική (2009). Υδραυλική Προσομοίωση Υδατορεύματος στο Δ.Δ. Τριλόφου του Δήμου Μικρας και Προκαταρκτική Περιβαλλοντική Εκτίμηση Έργων Αντιπλημμυρικής Προστασίας του. Μεταπτυχιακή Εργασία. Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

14. Νουτσόπουλος Γ., Χριστοδούλου Γ., Παπαθανασιάδης Τ. (2010). Υδραυλική ανοικτών αγωγών.
15. Πολύδερα Α. (2018). Προσδιορισμός της Οικολογικής Παροχής σε ποταμούς με Ολοκληρωμένα Μοντέλα Υδροδυναμικής Συμπεριφοράς – Ενδιαιτήματος. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
16. Στάμου Α. (2016). Εφαρμοσμένη Υδραυλική – Ροή υπό πίεση και με ελεύθερη επιφάνεια, Έκδοση 3η.
17. Σταυριανάκης Ε. (2003). Εταιρεία υδρεύσεως και αποχετεύσεως πρωτεύουσής. Οργανωτική Δομή. Οικονομικά αποτελέσματα. Πτυχιακή εργασία. Σχολή Διοίκησης και Οικονομίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Καλαμάτας, 2003.
18. Βάιου Κ. (1998). Τα ρέματα στην Αθήνα του 21ου αιώνα
19. Λάππας Δ.(2013).Τα ρέματα των Αθηνών χθες και σήμερα
20. Βαγενά Κ.(2019). Μαθηματική προσομοίωση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του ρεύματος του Προφήτη Δανιήλ.

ii) Ξενόγλωσση

1. Alberto Pérez-Ortiz, John Pescatore, Ian Bryden (2015). A Systematic Approach to Undertake Tidal Energy Resource Assessment with Telemac-2D.
2. Chow, V.T. (1959) Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York.
3. Horritt M. S. and Bates P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation, Journal of Hydrology, 268:87–99.
4. Jonathan Desombre (2013), TELEMAC-2D User Manual, version v6p2.
5. M. Gharbi, A. Soualmia, D. Dartus, L. Masbernat (2016). Comparison of 1D and 2D Hydraulic Models for Floods Simulation on the Medjerda River in Tunisia, J. Mater. Environ. Sci. 7 (8) (2016) 3017-3026.
6. Marco Lucio Cerquaglia, Geoffrey Deliege, Romain Boman, Vincent Terrapon and Jean – Philippe Ponthot (2016). Free slip Boundary conditions for simulating free-surface incompressible flows through the particle finite element method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 110:921-946.
7. N.T.M. Linh, D.Q. Tri, T.H. Thai and N.Cao Don (2018). Application of a two-dimensional model for flooding and floodplain simulation: Case study in Tra Khuc-Song Ve river in Vietnam, Lowland Technology International 2018; 20 (3): 367-378.
8. Philippe Maron (2012), Tutorial Manual for the Mesher in BlueKenue.
9. P. Rameshwaran, K. Shiono, X. Sun, J.H. Chandler, R. H. J. Sellin (2014), Hydrodynamic Behaviour of a two – stage channel with horizontal and inclined floodplains: A Numerical Investigation.
10. Tung T. Vu , Phuoc K. T. Nguyen, Lloyd H. C. Chua and Adrian W. K. Law (2015). Two-Dimensional Hydrodynamic Modelling of Flood Inundation for a Part of the Mekong River with TELEMAC-2D, British Journal of Environment & Climate Change.

11. Van Thinh Nguyen, Carlos Serrano Moreno, Siwan Lyu (2014). Numerical Simulation of Sediment Transport and Bedmorphology around Gangjeong Weir on Nakdong River.
12. Smagorinsky, J. (1963) General Circulation Experiments with the Primitive Equation I the Basic Experiment. Monthly Weather Review, 91, 99-164

iii) Διαδικτυακοί Τόποι

1. www.eydap.gr
2. www.opentelemac.org
3. www.nrc-cnrc.gc.ca

Παράρτημα

Πίνακας 1: Τα αποτελέσματα της υδραυλικής επίλυσης στο HEC-RAS για $Q=20\text{m}^3/\text{s}$. Δεδομένα για βάθος, στάθμη πυθμένα (Min Ch El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας (W.S El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας για κρίσιμη ροή (Crit W.S), στάθμη γραμμής ενέργειας (E.G El), κλίση γραμμής ενέργειας (E.G Slope), ταχύτητα ροής (Vel Chn), εμβαδόν βρεχόμενης επιφάνειας (Flow Area), πλάτος βρεχόμενης επιφάνειας (Top Width) και αριθμός Froude (Froude).

ΔO	X'	X	Q Total	Y	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	m	m	(m ³ /s)	m	(m)	(m)	(m)		(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	-
1	3850.00	0.00	20	0.94	22.20	23.14	23.30	23.90	0.01	3.85	5.19	5.52	1.27
	3844.01	5.99	20	0.66	22.16	22.82	23.12	23.82	0.01	4.43	4.52	6.83	1.74
	3840.00	10.00	20	0.67	22.14	22.81	23.09	23.78	0.01	4.37	4.57	6.83	1.71
	3782.19	67.81	20	0.80	21.76	22.56	22.70	23.22	0.01	3.58	5.58	6.99	1.28
	3667.57	182.43	20	0.83	21.06	21.89	22.03	22.56	0.01	3.62	5.53	6.71	1.27
2	3651.95	198.05	20	0.80	20.99	21.79	21.95	22.48	0.01	3.68	5.44	6.83	1.32
	3587.09	262.91	20	0.72	20.43	21.15	21.38	21.98	0.01	4.03	4.96	6.91	1.52
	3506.58	343.42	20	0.73	19.79	20.52	20.74	21.32	0.01	3.95	5.06	6.94	1.48
3	3431.00	419.00	20	0.77	19.18	19.95	20.16	20.75	0.01	3.96	5.05	6.57	1.44
	3394.74	455.26	20	0.97	19.01	19.98	19.99	20.48	0.00	3.15	6.36	6.70	1.03
	3282.27	567.73	20	0.97	18.56	19.53	19.55	20.05	0.00	3.22	6.22	6.43	1.04
4	3230.00	620.00	20	0.99	18.34	19.33	19.35	19.85	0.00	3.18	6.29	6.36	1.02
5	3229.00	621.00	20	0.68	17.95	18.63	18.97	19.78	0.01	4.75	4.21	6.40	1.87
6	3135.00	715.00	20	0.78	17.19	17.97	18.18	18.77	0.01	3.96	5.05	6.47	1.43
7	3132.00	718.00	20	0.55	16.44	16.99	17.44	18.66	0.02	5.71	3.50	6.30	2.45
	3065.63	784.37	20	0.76	15.90	16.66	16.91	17.55	0.01	4.19	4.78	6.30	1.54
8	3033.50	816.50	20	0.85	15.65	16.50	16.69	17.28	0.01	3.92	5.10	6.01	1.36
	2975.74	874.26	20	0.81	15.15	15.96	16.19	16.83	0.01	4.13	4.84	6.00	1.47
	2898.03	951.97	20	0.81	14.53	15.34	15.57	16.20	0.01	4.12	4.86	6.00	1.46
	2755.75	1094.25	20	0.80	13.39	14.19	14.42	15.06	0.01	4.13	4.84	6.09	1.48
9	2750.00	1100.00	20	0.68	13.36	14.04	14.32	15.01	0.01	4.37	4.58	6.83	1.71
	2614.67	1235.33	20	0.74	12.18	12.92	13.14	13.74	0.01	4.02	4.98	6.85	1.51
10	2550.03	1299.97	20	0.78	11.61	12.39	12.62	13.24	0.01	4.07	4.91	6.42	1.49
	2531.05	1318.95	20	0.72	11.46	12.18	12.43	13.05	0.01	4.14	4.83	6.91	1.58
11	2480.00	1370.00	20	0.99	11.17	12.16	12.25	12.79	0.00	3.51	5.70	5.94	1.15
12	2300.00	1550.00	20	0.69	9.38	10.07	10.45	11.37	0.01	5.05	3.96	5.83	1.96
	2295.98	1554.02	20	0.73	9.36	10.09	10.45	11.31	0.01	4.89	4.09	5.75	1.85
13	2259.00	1591.00	20	1.35	9.20	10.55	10.28	10.88	0.00	2.53	7.90	6.06	0.71
	2249.52	1600.48	20	1.41	9.18	10.59		10.84	0.00	2.23	8.95	6.63	0.61
	2197.98	1652.02	20	1.26	9.11	10.37		10.75	0.00	2.70	7.41	6.05	0.78
14	2193.07	1656.93	20	1.26	9.10	10.36		10.74	0.00	2.74	7.31	6.02	0.79
15	2184.50	1665.50	20	1.25	9.08	10.33		10.72	0.00	2.76	7.24	5.93	0.80
	2048.85	1801.15	20	1.48	8.69	10.17		10.45	0.00	2.32	8.61	6.01	0.62
	1962.52	1887.48	20	1.66	8.45	10.11		10.33	0.00	2.06	9.73	6.07	0.52
16	1921.50	1928.50	20	1.27	8.34	9.61	9.61	10.22	0.00	3.46	5.78	4.77	1.01
	1893.12	1956.88	20	0.95	7.99	8.94	9.24	10.01	0.01	4.58	4.37	4.78	1.53
17	1865.50	1984.50	20	0.93	7.71	8.64	8.97	9.77	0.01	4.71	4.25	4.72	1.59
18	1860.10	1989.90	20	0.72	7.70	8.42	8.80	9.69	0.01	4.99	4.01	5.65	1.89
	1754.07	2095.93	20	1.27	7.45	8.72	8.53	9.10	0.00	2.75	7.27	5.94	0.80
19	1713.10	2136.90	20	1.09	7.36	8.45	8.45	8.98	0.00	3.24	6.18	5.84	1.00
20	1664.10	2185.90	20	1.02	7.16	8.18	8.25	8.79	0.00	3.45	5.80	5.82	1.10
	1644.06	2205.94	20	1.04	7.07	8.11	8.17	8.72	0.00	3.46	5.79	5.76	1.10
21	1336.13	2513.87	20	1.08	5.81	6.89	6.91	7.45	0.00	3.32	6.02	5.77	1.04
22	1333.70	2516.30	20	1.08	5.80	6.88	6.90	7.44	0.00	3.32	6.02	5.77	1.04
	1296.07	2553.93	20	0.90	5.62	6.52	6.68	7.23	0.01	3.73	5.36	6.11	1.27
	1233.86	2616.14	20	1.02	5.35	6.37	6.44	6.99	0.00	3.48	5.74	5.81	1.12
23	1193.73	2656.27	20	1.06	5.18	6.24	6.28	6.82	0.00	3.37	5.94	5.76	1.06
24	1185.70	2664.30	20	0.99	5.12	6.11	6.22	6.78	0.00	3.61	5.54	5.74	1.17
25	1119.70	2730.30	20	0.87	4.61	5.48	5.71	6.35	0.01	4.14	4.83	5.71	1.44
26	1118.50	2731.50	20	0.86	4.60	5.46	5.69	6.34	0.01	4.17	4.80	5.79	1.46
	1115.30	2734.70	20	0.84	4.60	5.44	5.68	6.32	0.01	4.14	4.83	5.86	1.46
	1092.10	2757.90	20	1.04	4.49	5.53	5.58	6.11	0.00	3.38	5.92	5.89	1.08
	979.35	2870.65	20	1.04	4.04	5.08	5.12	5.66	0.00	3.38	5.91	5.88	1.08
	780.63	3069.37	20	1.05	3.22	4.27	4.31	4.84	0.00	3.36	5.95	5.84	1.06

27	687.50	3162.50	20	1.07	2.83	3.90	3.91	4.44	0.00	3.26	6.13	5.92	1.02
28	683.00	3167.00	20	0.67	2.24	2.91	3.31	4.31	0.02	5.25	3.81	5.81	2.07
	618.25	3231.75	20	1.06	1.94	3.00	3.02	3.55	0.00	3.31	6.05	5.91	1.04
29	578.97	3271.03	20	1.05	1.75	2.80	2.82	3.35	0.00	3.28	6.09	5.93	1.03
30	570.70	3279.30	20	1.06	1.71	2.77	2.79	3.31	0.00	3.26	6.13	6.00	1.03
	544.89	3305.11	20	1.06	1.60	2.66	2.66	3.18	0.00	3.20	6.26	6.15	1.01
	289.29	3560.71	20	1.43	0.56	1.99	1.65	2.29	0.00	2.41	8.30	6.08	0.66
31	208.76	3641.24	20	1.71	0.23	1.94		2.14	0.00	2.00	9.99	6.18	0.50
	191.11	3658.89	20	1.65	0.21	1.86		2.11	0.00	2.24	8.95	5.76	0.57
32	0.00	3850.00	20	1.66	0.00	1.66	1.03	1.85	0.00	1.96	10.23	6.32	0.49

Πίνακας 2: Τα αποτελέσματα της υδραυλικής επίλυσης στο HEC-RAS για $Q=15\text{m}^3/\text{s}$. Δεδομένα για βάθος, στάθμη πυθμένα (Min Ch El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας (W.S El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας για κρίσιμη ροή (Crit W.S), στάθμη γραμμής ενέργειας (E.G El), κλίση γραμμής ενέργειας (E.G Slope), ταχύτητα ροής (Vel Chnl), εμβαδόν βρεχόμενης επιφάνειας (Flow Area), πλάτος βρεχόμενης επιφάνειας (Top Width) και αριθμός Froude (Froude).

ΔO	X'	X	Q Total	Y	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	m	m	(m3/s)	m	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
1	3850.00	0.00	15	0.78	22.20	22.98	23.11	23.60	0.01	3.50	4.29	5.52	1.27
	3844.01	5.99	15	0.55	22.16	22.71	22.95	23.54	0.01	4.04	3.71	6.83	1.75
	3840.00	10.00	15	0.55	22.14	22.69	22.92	23.49	0.01	3.94	3.80	6.83	1.69
	3782.19	67.81	15	0.69	21.76	22.45	22.54	22.95	0.01	3.16	4.75	6.99	1.22
	3667.57	182.43	15	0.68	21.06	21.74	21.86	22.30	0.01	3.29	4.55	6.71	1.28
2	3651.95	198.05	15	0.65	20.99	21.64	21.78	22.22	0.01	3.38	4.44	6.83	1.34
	3587.09	262.91	15	0.59	20.43	21.02	21.21	21.71	0.01	3.68	4.08	6.91	1.53
	3506.58	343.42	15	0.61	19.79	20.40	20.57	21.05	0.01	3.57	4.20	6.94	1.47
3	3431.00	419.00	15	0.64	19.18	19.82	19.99	20.47	0.01	3.59	4.18	6.57	1.44
	3394.74	455.26	15	0.79	19.01	19.80	19.83	20.23	0.00	2.89	5.19	6.69	1.05
	3282.27	567.73	15	0.81	18.56	19.37	19.38	19.79	0.00	2.89	5.19	6.43	1.03
4	3230.00	620.00	15	0.78	18.34	19.12	19.17	19.59	0.00	3.03	4.96	6.35	1.09
5	3229.00	621.00	15	0.55	17.95	18.50	18.80	19.52	0.01	4.48	3.34	6.40	1.98
6	3135.00	715.00	15	0.67	17.19	17.86	18.01	18.48	0.01	3.50	4.29	6.47	1.37
7	3132.00	718.00	15	0.44	16.44	16.88	17.27	18.36	0.03	5.39	2.78	6.30	2.59
	3065.63	784.37	15	0.65	15.90	16.55	16.73	17.24	0.01	3.69	4.07	6.30	1.46
8	3033.50	816.50	15	0.70	15.65	16.35	16.50	16.99	0.01	3.54	4.24	6.00	1.34
	2975.74	874.26	15	0.67	15.15	15.82	16.01	16.54	0.01	3.76	3.99	6.00	1.47
	2898.03	951.97	15	0.67	14.53	15.20	15.39	15.91	0.01	3.72	4.03	6.00	1.45
	2755.75	1094.25	15	0.66	13.39	14.05	14.24	14.77	0.01	3.74	4.01	6.09	1.47
9	2750.00	1100.00	15	0.57	13.36	13.93	14.16	14.72	0.01	3.93	3.82	6.81	1.67
	2614.67	1235.33	15	0.62	12.18	12.80	12.98	13.46	0.01	3.62	4.15	6.82	1.48
10	2550.03	1299.97	15	0.65	11.61	12.26	12.44	12.95	0.01	3.69	4.06	6.38	1.48
	2531.05	1318.95	15	0.60	11.46	12.06	12.26	12.77	0.01	3.74	4.01	6.88	1.56
11	2480.00	1370.00	15	0.82	11.17	11.99	12.07	12.51	0.00	3.20	4.68	5.88	1.15
12	2300.00	1550.00	15	0.56	9.38	9.94	10.27	11.06	0.02	4.68	3.20	5.79	2.01
	2295.98	1554.02	15	0.60	9.36	9.96	10.26	10.99	0.01	4.51	3.33	5.71	1.88
13	2259.00	1591.00	15	1.11	9.20	10.31	10.09	10.59	0.00	2.33	6.44	5.98	0.72
	2249.52	1600.48	15	1.16	9.18	10.34		10.55	0.00	2.05	7.31	6.54	0.62
	2197.98	1652.02	15	1.01	9.11	10.12		10.45	0.00	2.56	5.85	5.97	0.83
14	2193.07	1656.93	15	1.00	9.10	10.10		10.44	0.00	2.61	5.75	5.93	0.85
15	2184.50	1665.50	15	0.99	9.08	10.07		10.42	0.00	2.63	5.69	5.86	0.85
	2048.85	1801.15	15	1.19	8.69	9.88		10.12	0.00	2.18	6.88	5.93	0.65
	1962.52	1887.48	15	1.37	8.45	9.82		10.00	0.00	1.88	7.97	5.99	0.52
16	1921.50	1928.50	15	1.05	8.34	9.39	9.39	9.90	0.00	3.16	4.75	4.69	1.00
	1893.12	1956.88	15	0.77	7.99	8.76	9.03	9.68	0.01	4.24	3.54	4.72	1.56
17	1865.50	1984.50	15	0.76	7.71	8.47	8.75	9.43	0.01	4.35	3.45	4.66	1.61
18	1860.10	1989.90	15	0.60	7.70	8.30	8.61	9.36	0.01	4.56	3.29	5.60	1.90
	1754.07	2095.93	15	1.06	7.45	8.51	8.34	8.82	0.00	2.49	6.02	5.87	0.79
19	1713.10	2136.90	15	0.90	7.36	8.26	8.26	8.70	0.00	2.95	5.08	5.78	1.00
20	1664.10	2185.90	15	0.86	7.16	8.02	8.06	8.51	0.00	3.10	4.84	5.77	1.08
	1644.06	2205.94	15	0.87	7.07	7.94	7.98	8.43	0.00	3.11	4.82	5.70	1.08
21	1336.13	2513.87	15	0.88	5.81	6.69	6.72	7.17	0.00	3.07	4.89	5.70	1.06
22	1333.70	2516.30	15	0.88	5.80	6.68	6.71	7.16	0.00	3.07	4.89	5.70	1.06
	1296.07	2553.93	15	0.75	5.62	6.37	6.50	6.96	0.01	3.39	4.43	6.06	1.27
	1233.86	2616.14	15	0.84	5.35	6.19	6.25	6.71	0.00	3.19	4.71	5.75	1.12
23	1193.73	2656.27	15	0.89	5.18	6.07	6.09	6.54	0.00	3.04	4.94	5.70	1.04
24	1185.70	2664.30	15	0.82	5.12	5.94	6.03	6.50	0.01	3.30	4.54	5.68	1.18
25	1119.70	2730.30	15	0.71	4.61	5.32	5.52	6.06	0.01	3.81	3.94	5.65	1.46
26	1118.50	2731.50	15	0.71	4.60	5.31	5.51	6.04	0.01	3.80	3.95	5.74	1.46
	1115.30	2734.70	15	0.70	4.60	5.30	5.49	6.02	0.01	3.77	3.98	5.81	1.45
	1092.10	2757.90	15	0.86	4.49	5.35	5.39	5.83	0.00	3.08	4.88	5.83	1.07
	979.35	2870.65	15	0.86	4.04	4.90	4.94	5.38	0.00	3.08	4.87	5.82	1.08
	780.63	3069.37	15	0.87	3.22	4.09	4.12	4.57	0.00	3.05	4.91	5.78	1.06

27	687.50	3162.50	15	0.88	2.83	3.71	3.72	4.17	0.00	2.98	5.03	5.86	1.03
28	683.00	3167.00	15	0.52	2.24	2.76	3.13	4.04	0.02	5.01	2.99	5.77	2.22
	618.25	3231.75	15	0.86	1.94	2.80	2.84	3.28	0.01	3.07	4.88	5.84	1.07
29	578.97	3271.03	15	0.88	1.75	2.63	2.64	3.08	0.00	2.98	5.04	5.88	1.03
30	570.70	3279.30	15	0.88	1.71	2.59	2.60	3.04	0.00	2.96	5.06	5.93	1.02
	544.89	3305.11	15	0.85	1.60	2.45	2.47	2.91	0.01	3.00	4.99	6.06	1.06
	289.29	3560.71	15	1.14	0.56	1.70	1.46	1.97	0.00	2.29	6.54	5.96	0.70
31	208.76	3641.24	15	1.42	0.23	1.65		1.82	0.00	1.83	8.18	6.07	0.50
	191.11	3658.89	15	1.36	0.21	1.57		1.79	0.00	2.05	7.31	5.64	0.58
32	0.00	3850.00	15	1.37	0.00	1.37	0.85	1.53	0.00	1.79	8.38	6.26	0.49

Πίνακας 3: Τα αποτελέσματα της υδραυλικής επίλυσης στο HEC-RAS για $Q=10\text{m}^3/\text{s}$. Δεδομένα για βάθος, στάθμη πυθμένα (Min Ch El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας (W.S El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας για κρίσιμη ροή (Crit W.S), στάθμη γραμμής ενέργειας (E.G El), κλίση γραμμής ενέργειας (E.G Slope), ταχύτητα ροής (Vel Chnl), εμβαδόν βρεχόμενης επιφάνειας (Flow Area), πλάτος βρεχόμενης επιφάνειας (Top Width) και αριθμός Froude (Froude).

ΔO	X'	X	Q Total	Y	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	m	m	(m3/s)	m	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
1	3850.00	0.00	10	0.60	22.20	22.80	22.89	23.27	0.01	3.04	3.29	5.52	1.26
	3844.01	5.99	10	0.43	22.16	22.59	22.76	23.19	0.01	3.45	2.90	6.83	1.69
	3840.00	10.00	10	0.44	22.14	22.58	22.74	23.15	0.01	3.34	2.99	6.83	1.61
	3782.19	67.81	10	0.54	21.76	22.30	22.36	22.67	0.01	2.69	3.72	6.99	1.18
	3667.57	182.43	10	0.52	21.06	21.58	21.67	22.01	0.01	2.89	3.46	6.71	1.28
2	3651.95	198.05	10	0.50	20.99	21.49	21.59	21.93	0.01	2.95	3.40	6.83	1.33
	3587.09	262.91	10	0.46	20.43	20.89	21.03	21.40	0.01	3.19	3.14	6.91	1.51
	3506.58	343.42	10	0.48	19.79	20.27	20.39	20.74	0.01	3.04	3.29	6.94	1.41
3	3431.00	419.00	10	0.49	19.18	19.67	19.80	20.17	0.01	3.12	3.20	6.57	1.43
	3394.74	455.26	10	0.59	19.01	19.60	19.64	19.95	0.00	2.60	3.85	6.69	1.09
	3282.27	567.73	10	0.61	18.56	19.17	19.19	19.50	0.00	2.57	3.90	6.43	1.05
4	3230.00	620.00	10	0.62	18.34	18.96	18.97	19.29	0.00	2.55	3.93	6.35	1.04
5	3229.00	621.00	10	0.40	17.95	18.35	18.60	19.23	0.02	4.14	2.41	6.40	2.16
6	3135.00	715.00	10	0.53	17.19	17.72	17.82	18.16	0.01	2.92	3.43	6.47	1.28
7	3132.00	718.00	10	0.31	16.44	16.75	17.07	18.04	0.03	5.01	1.99	6.30	2.85
	3065.63	784.37	10	0.52	15.90	16.42	16.54	16.90	0.01	3.08	3.25	6.30	1.37
8	3033.50	816.50	10	0.53	15.65	16.18	16.30	16.68	0.01	3.12	3.21	6.00	1.36
	2975.74	874.26	10	0.52	15.15	15.67	15.81	16.21	0.01	3.26	3.07	6.00	1.46
	2898.03	951.97	10	0.51	14.53	15.04	15.19	15.58	0.01	3.24	3.09	6.00	1.44
	2755.75	1094.25	10	0.51	13.39	13.90	14.04	14.44	0.01	3.23	3.10	6.09	1.44
9	2750.00	1100.00	10	0.44	13.36	13.80	13.97	14.39	0.01	3.39	2.95	6.79	1.64
	2614.67	1235.33	10	0.48	12.18	12.66	12.79	13.15	0.01	3.10	3.23	6.80	1.44
10	2550.03	1299.97	10	0.49	11.61	12.10	12.25	12.64	0.01	3.23	3.09	6.34	1.48
	2531.05	1318.95	10	0.47	11.46	11.93	12.07	12.45	0.01	3.20	3.12	6.84	1.51
11	2480.00	1370.00	10	0.63	11.17	11.80	11.86	12.20	0.00	2.81	3.56	5.82	1.14
12	2300.00	1550.00	10	0.42	9.38	9.80	10.06	10.68	0.02	4.17	2.40	5.74	2.06
	2295.98	1554.02	10	0.45	9.36	9.81	10.05	10.62	0.01	3.97	2.52	5.66	1.90
13	2259.00	1591.00	10	0.85	9.20	10.05	9.88	10.26	0.00	2.03	4.92	5.89	0.71
	2249.52	1600.48	10	0.89	9.18	10.07		10.24	0.00	1.79	5.57	6.44	0.62
	2197.98	1652.02	10	0.75	9.11	9.86		10.13	0.00	2.32	4.31	5.88	0.86
14	2193.07	1656.93	10	0.73	9.10	9.83		10.12	0.00	2.38	4.20	5.84	0.90
15	2184.50	1665.50	10	0.72	9.08	9.80	9.76	10.10	0.00	2.41	4.15	5.79	0.91
	2048.85	1801.15	10	0.87	8.69	9.56		9.76	0.00	2.01	4.98	5.85	0.69
	1962.52	1887.48	10	1.04	8.45	9.49		9.63	0.00	1.66	6.02	5.90	0.53
16	1921.50	1928.50	10	0.81	8.34	9.15	9.15	9.54	0.00	2.78	3.60	4.60	1.00
	1893.12	1956.88	10	0.58	7.99	8.57	8.78	9.31	0.01	3.83	2.61	4.64	1.63
17	1865.50	1984.50	10	0.57	7.71	8.28	8.51	9.05	0.01	3.87	2.58	4.60	1.65
18	1860.10	1989.90	10	0.45	7.70	8.15	8.39	8.98	0.01	4.02	2.49	5.55	1.92
	1754.07	2095.93	10	0.82	7.45	8.27	8.14	8.51	0.00	2.14	4.67	5.79	0.76
19	1713.10	2136.90	10	0.69	7.36	8.05	8.05	8.39	0.00	2.59	3.86	5.72	1.01
20	1664.10	2185.90	10	0.66	7.16	7.82	7.85	8.19	0.00	2.71	3.68	5.71	1.08
	1644.06	2205.94	10	0.67	7.07	7.74	7.77	8.11	0.00	2.72	3.67	5.63	1.08
21	1336.13	2513.87	10	0.68	5.81	6.49	6.50	6.85	0.00	2.65	3.78	5.63	1.03
22	1333.70	2516.30	10	0.68	5.80	6.48	6.49	6.84	0.00	2.65	3.78	5.63	1.03
	1296.07	2553.93	10	0.57	5.62	6.19	6.29	6.65	0.01	2.99	3.34	5.99	1.28
	1233.86	2616.14	10	0.63	5.35	5.98	6.04	6.39	0.01	2.85	3.51	5.68	1.16
23	1193.73	2656.27	10	0.68	5.18	5.86	5.88	6.22	0.00	2.65	3.77	5.63	1.04
24	1185.70	2664.30	10	0.63	5.12	5.75	5.82	6.17	0.01	2.90	3.45	5.61	1.18
25	1119.70	2730.30	10	0.54	4.61	5.15	5.31	5.73	0.01	3.36	2.98	5.59	1.47
26	1118.50	2731.50	10	0.54	4.60	5.14	5.29	5.71	0.01	3.32	3.01	5.68	1.46
	1115.30	2734.70	10	0.54	4.60	5.14	5.28	5.68	0.01	3.23	3.09	5.76	1.41
	1092.10	2757.90	10	0.66	4.49	5.15	5.18	5.52	0.00	2.69	3.72	5.76	1.07
	979.35	2870.65	10	0.67	4.04	4.71	4.73	5.07	0.00	2.66	3.76	5.76	1.05
	780.63	3069.37	10	0.67	3.22	3.89	3.91	4.25	0.00	2.67	3.75	5.72	1.05

27	687.50	3162.50	10	0.67	2.83	3.50	3.52	3.86	0.01	2.65	3.77	5.80	1.05
28	683.00	3167.00	10	0.37	2.24	2.61	2.92	3.74	0.03	4.70	2.13	5.72	2.46
	618.25	3231.75	10	0.61	1.94	2.55	2.62	2.98	0.01	2.90	3.45	5.76	1.19
29	578.97	3271.03	10	0.64	1.75	2.39	2.43	2.77	0.01	2.74	3.64	5.80	1.11
30	570.70	3279.30	10	0.63	1.71	2.34	2.39	2.74	0.01	2.78	3.59	5.83	1.13
	544.89	3305.11	10	0.64	1.60	2.24	2.27	2.60	0.01	2.66	3.75	5.98	1.07
	289.29	3560.71	10	0.82	0.56	1.38	1.25	1.62	0.00	2.15	4.65	5.83	0.77
31	208.76	3641.24	10	1.09	0.23	1.32		1.45	0.00	1.60	6.23	5.94	0.50
	191.11	3658.89	10	1.05	0.21	1.26		1.42	0.00	1.80	5.55	5.51	0.57
32	0.00	3850.00	10	1.04	0.00	1.04	0.65	1.17	0.00	1.57	6.37	6.20	0.49

Πίνακας 4: Τα αποτελέσματα της υδραυλικής επίλυσης στο HEC-RAS για $Q=5m^3/s$. Δεδομένα για βάθος, στάθμη πυθμένα (Min Ch El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας (W.S El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας για κρίσιμη ροή (Crit W.S), στάθμη γραμμής ενέργειας (E.G El), κλίση γραμμής ενέργειας (E.G Slope), ταχύτητα ροής (Vel Chn), εμβαδόν βρεχόμενης επιφάνειας (Flow Area), πλάτος βρεχόμενης επιφάνειας (Top Width) και αριθμός Froude (Froude).

ΔO	X'	X	Q Total	Y	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	m	m	(m3/s)	m	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
1	3850.00	0.00	5	0.38	22.20	22.58	22.63	22.87	0.01	2.36	2.12	5.52	1.22
	3844.01	5.99	5	0.27	22.16	22.43	22.54	22.80	0.01	2.69	1.86	6.83	1.65
	3840.00	10.00	5	0.29	22.14	22.43	22.52	22.76	0.01	2.55	1.96	6.83	1.52
	3782.19	67.81	5	0.36	21.76	22.12	22.14	22.33	0.00	2.01	2.49	6.99	1.08
	3667.57	182.43	5	0.33	21.06	21.39	21.45	21.66	0.01	2.33	2.15	6.71	1.31
2	3651.95	198.05	5	0.33	20.99	21.32	21.37	21.57	0.01	2.25	2.22	6.83	1.26
	3587.09	262.91	5	0.29	20.43	20.72	20.81	21.04	0.01	2.52	1.98	6.91	1.51
	3506.58	343.42	5	0.32	19.79	20.11	20.17	20.38	0.01	2.29	2.18	6.94	1.31
3	3431.00	419.00	5	0.31	19.18	19.49	19.57	19.80	0.01	2.46	2.03	6.57	1.41
	3394.74	455.26	5	0.35	19.01	19.36	19.41	19.62	0.01	2.27	2.20	6.69	1.27
	3282.27	567.73	5	0.39	18.56	18.95	18.95	19.15	0.00	1.98	2.53	6.43	1.01
4	3230.00	620.00	5	0.39	18.34	18.73	18.74	18.94	0.00	2.03	2.47	6.35	1.04
5	3229.00	621.00	5	0.23	17.95	18.18	18.37	18.88	0.03	3.70	1.35	6.40	2.58
6	3135.00	715.00	5	0.37	17.19	17.56	17.59	17.79	0.01	2.11	2.37	6.47	1.12
7	3132.00	718.00	5	0.17	16.44	16.61	16.84	17.66	0.06	4.54	1.10	6.30	3.47
	3065.63	784.37	5	0.36	15.90	16.26	16.30	16.51	0.01	2.25	2.22	6.30	1.21
8	3033.50	816.50	5	0.33	15.65	15.98	16.06	16.30	0.01	2.49	2.01	6.00	1.37
	2975.74	874.26	5	0.33	15.15	15.48	15.57	15.81	0.01	2.55	1.96	6.00	1.43
	2898.03	951.97	5	0.34	14.53	14.87	14.94	15.18	0.01	2.48	2.02	6.00	1.36
	2755.75	1094.25	5	0.33	13.39	13.72	13.81	14.04	0.01	2.51	1.99	6.09	1.40
9	2750.00	1100.00	5	0.29	13.36	13.65	13.75	14.00	0.01	2.64	1.90	6.75	1.59
	2614.67	1235.33	5	0.32	12.18	12.50	12.56	12.78	0.01	2.36	2.12	6.76	1.35
10	2550.03	1299.97	5	0.32	11.61	11.93	12.01	12.26	0.01	2.54	1.97	6.29	1.45
	2531.05	1318.95	5	0.32	11.46	11.78	11.85	12.07	0.01	2.39	2.09	6.79	1.38
11	2480.00	1370.00	5	0.40	11.17	11.57	11.61	11.82	0.01	2.23	2.25	5.74	1.14
12	2300.00	1550.00	5	0.26	9.38	9.64	9.81	10.21	0.02	3.33	1.50	5.69	2.07
	2295.98	1554.02	5	0.29	9.36	9.65	9.80	10.14	0.01	3.08	1.62	5.61	1.83
13	2259.00	1591.00	5	0.55	9.20	9.75	9.63	9.88	0.00	1.58	3.17	5.79	0.68
	2249.52	1600.48	5	0.58	9.18	9.76		9.86	0.00	1.40	3.56	6.33	0.60
	2197.98	1652.02	5	0.49	9.11	9.60		9.76	0.00	1.79	2.80	5.79	0.82
14	2193.07	1656.93	5	0.48	9.10	9.58		9.75	0.00	1.84	2.71	5.76	0.86
15	2184.50	1665.50	5	0.47	9.08	9.55		9.73	0.00	1.86	2.69	5.72	0.87
	2048.85	1801.15	5	0.50	8.69	9.19		9.35	0.00	1.77	2.82	5.75	0.81
	1962.52	1887.48	5	0.65	8.45	9.10		9.19	0.00	1.35	3.70	5.80	0.54
16	1921.50	1928.50	5	0.51	8.34	8.85	8.85	9.10	0.00	2.23	2.25	4.49	1.00
	1893.12	1956.88	5	0.35	7.99	8.34	8.49	8.86	0.01	3.20	1.56	4.55	1.74
17	1865.50	1984.50	5	0.37	7.71	8.08	8.21	8.55	0.01	3.04	1.65	4.53	1.61
18	1860.10	1989.90	5	0.29	7.70	7.99	8.14	8.48	0.01	3.08	1.62	5.50	1.81
	1754.07	2095.93	5	0.53	7.45	7.98	7.88	8.13	0.00	1.67	3.00	5.69	0.73
19	1713.10	2136.90	5	0.43	7.36	7.79	7.79	8.01	0.00	2.06	2.43	5.64	1.00
20	1664.10	2185.90	5	0.44	7.16	7.60	7.59	7.81	0.00	2.01	2.48	5.64	0.97
	1644.06	2205.94	5	0.44	7.07	7.51	7.51	7.73	0.00	2.07	2.42	5.56	1.00
21	1336.13	2513.87	5	0.43	5.81	6.24	6.25	6.47	0.00	2.13	2.34	5.55	1.05
22	1333.70	2516.30	5	0.43	5.80	6.23	6.24	6.46	0.00	2.13	2.34	5.55	1.05
	1296.07	2553.93	5	0.38	5.62	6.00	6.05	6.26	0.01	2.26	2.22	5.92	1.18
	1233.86	2616.14	5	0.39	5.35	5.74	5.79	6.01	0.01	2.29	2.18	5.60	1.17
23	1193.73	2656.27	5	0.42	5.18	5.60	5.62	5.84	0.00	2.17	2.30	5.54	1.08
24	1185.70	2664.30	5	0.38	5.12	5.50	5.56	5.80	0.01	2.42	2.06	5.53	1.27
25	1119.70	2730.30	5	0.35	4.61	4.96	5.05	5.31	0.01	2.62	1.91	5.52	1.42
26	1118.50	2731.50	5	0.35	4.60	4.95	5.04	5.30	0.01	2.60	1.92	5.62	1.42
	1115.30	2734.70	5	0.35	4.60	4.95	5.03	5.27	0.01	2.52	1.99	5.69	1.36
	1092.10	2757.90	5	0.40	4.49	4.89	4.93	5.14	0.01	2.23	2.25	5.67	1.13
	979.35	2870.65	5	0.39	4.04	4.43	4.48	4.70	0.01	2.28	2.19	5.66	1.17
	780.63	3069.37	5	0.45	3.22	3.67	3.66	3.87	0.00	2.00	2.50	5.65	0.96

27	687.50	3162.50	5	0.44	2.83	3.27	3.27	3.48	0.01	2.05	2.44	5.73	1.00
28	683.00	3167.00	5	0.21	2.24	2.45	2.67	3.36	0.05	4.23	1.18	5.67	2.95
	618.25	3231.75	5	0.43	1.94	2.37	2.37	2.59	0.01	2.05	2.44	5.70	1.00
29	578.97	3271.03	5	0.45	1.75	2.20	2.18	2.39	0.00	1.96	2.56	5.74	0.94
30	570.70	3279.30	5	0.45	1.71	2.16	2.15	2.36	0.00	1.96	2.56	5.77	0.94
	544.89	3305.11	5	0.47	1.60	2.07	2.02	2.24	0.00	1.83	2.73	5.90	0.86
	289.29	3560.71	5	0.44	0.56	1.00	1.00	1.21	0.00	2.01	2.49	5.68	0.97
31	208.76	3641.24	5	0.70	0.23	0.93		1.01	0.00	1.26	3.96	5.78	0.49
	191.11	3658.89	5	0.68	0.21	0.89		0.99	0.00	1.41	3.54	5.36	0.56
32	0.00	3850.00	5	0.67	0.00	0.67	0.41	0.74	0.00	1.24	4.04	6.13	0.49

Πίνακας 5: Τα αποτελέσματα της υδραυλικής επίλυσης στο HEC-RAS για $Q=2\text{m}^3/\text{s}$. Δεδομένα για βάθος, στάθμη πυθμένα (Min Ch El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας (W.S El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας για κρίσιμη ροή (Crit W.S), στάθμη γραμμής ενέργειας (E.G El), κλίση γραμμής ενέργειας (E.G Slope), ταχύτητα ροής (Vel Ch), εμβαδόν βρεχόμενης επιφάνειας (Flow Area), πλάτος βρεχόμενης επιφάνειας (Top Width) και αριθμός Froude (Froude).

ΔO	X'	X	Q Total	Y	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	m	m	(m3/s)	m	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
1	3850.00	0.00	2	0.22	22.20	22.42	22.44	22.56	0.01	1.67	1.19	5.52	1.15
	3844.01	5.99	2	0.16	22.16	22.32	22.37	22.50	0.01	1.89	1.06	6.83	1.53
	3840.00	10.00	2	0.17	22.14	22.31	22.34	22.46	0.01	1.71	1.17	6.83	1.32
	3782.19	67.81	2	0.21	21.76	21.97	21.97	22.07	0.00	1.42	1.41	6.99	1.01
	3667.57	182.43	2	0.18	21.06	21.24	21.27	21.39	0.01	1.66	1.20	6.71	1.25
2	3651.95	198.05	2	0.18	20.99	21.17	21.20	21.31	0.01	1.60	1.25	6.83	1.19
	3587.09	262.91	2	0.16	20.43	20.59	20.64	20.76	0.01	1.79	1.12	6.91	1.42
	3506.58	343.42	2	0.19	19.79	19.98	20.00	20.10	0.01	1.58	1.26	6.94	1.19
3	3431.00	419.00	2	0.17	19.18	19.35	19.39	19.51	0.01	1.79	1.12	6.57	1.39
	3394.74	455.26	2	0.14	19.01	19.15	19.24	19.45	0.03	2.42	0.83	6.69	2.20
	3282.27	567.73	2	0.22	18.56	18.78	18.77	18.88	0.00	1.40	1.43	6.43	0.95
4	3230.00	620.00	2	0.22	18.34	18.56	18.56	18.67	0.00	1.45	1.38	6.35	1.00
5	3229.00	621.00	2	0.12	17.95	18.07	18.19	18.62	0.06	3.28	0.61	6.40	3.39
6	3135.00	715.00	2	0.22	17.19	17.41	17.41	17.51	0.00	1.45	1.38	6.47	1.00
7	3132.00	718.00	2	0.07	16.44	16.51	16.65	17.39	0.14	4.16	0.48	6.30	4.81
	3065.63	784.37	2	0.22	15.90	16.12	16.12	16.23	0.01	1.50	1.34	6.30	1.04
8	3033.50	816.50	2	0.18	15.65	15.83	15.87	16.00	0.01	1.86	1.08	6.00	1.40
	2975.74	874.26	2	0.20	15.15	15.35	15.38	15.50	0.01	1.74	1.15	6.00	1.27
	2898.03	951.97	2	0.19	14.53	14.72	14.75	14.88	0.01	1.77	1.13	6.00	1.31
	2755.75	1094.25	2	0.19	13.39	13.58	13.62	13.74	0.01	1.75	1.14	6.09	1.29
9	2750.00	1100.00	2	0.16	13.36	13.52	13.57	13.70	0.01	1.90	1.05	6.73	1.53
	2614.67	1235.33	2	0.19	12.18	12.37	12.39	12.50	0.01	1.62	1.23	6.74	1.21
10	2550.03	1299.97	2	0.17	11.61	11.78	11.83	11.96	0.01	1.87	1.07	6.25	1.44
	2531.05	1318.95	2	0.19	11.46	11.65	11.68	11.78	0.01	1.61	1.24	6.75	1.20
11	2480.00	1370.00	2	0.23	11.17	11.40	11.41	11.53	0.01	1.58	1.26	5.68	1.07
12	2300.00	1550.00	2	0.14	9.38	9.52	9.61	9.83	0.02	2.45	0.82	5.65	2.05
	2295.98	1554.02	2	0.17	9.36	9.53	9.60	9.76	0.01	2.10	0.95	5.57	1.63
13	2259.00	1591.00	2	0.14	9.20	9.34	9.43	9.65	0.02	2.46	0.81	5.65	2.07
	2249.52	1600.48	2	0.33	9.18	9.51	9.41	9.56	0.00	1.00	2.01	6.23	0.56
	2197.98	1652.02	2	0.29	9.11	9.40		9.47	0.00	1.19	1.68	5.73	0.70
14	2193.07	1656.93	2	0.29	9.10	9.39		9.47	0.00	1.22	1.64	5.70	0.73
15	2184.50	1665.50	2	0.29	9.08	9.37	9.31	9.44	0.00	1.21	1.66	5.68	0.71
	2048.85	1801.15	2	0.24	8.69	8.93	8.93	9.04	0.00	1.45	1.38	5.69	0.94
	1962.52	1887.48	2	0.35	8.45	8.80		8.85	0.00	1.02	1.96	5.72	0.56
16	1921.50	1928.50	2	0.27	8.34	8.61	8.61	8.75	0.00	1.65	1.21	4.40	1.00
	1893.12	1956.88	2	0.18	7.99	8.17	8.26	8.49	0.02	2.52	0.79	4.49	1.91
17	1865.50	1984.50	2	0.22	7.71	7.93	7.98	8.14	0.01	2.04	0.98	4.48	1.40
18	1860.10	1989.90	2	0.18	7.70	7.88	7.94	8.09	0.01	2.03	0.98	5.46	1.53
	1754.07	2095.93	2	0.30	7.45	7.75	7.69	7.82	0.00	1.18	1.70	5.61	0.69
19	1713.10	2136.90	2	0.24	7.36	7.60	7.60	7.71	0.00	1.47	1.36	5.58	0.95
20	1664.10	2185.90	2	0.24	7.16	7.40	7.40	7.51	0.00	1.49	1.35	5.58	0.97
	1644.06	2205.94	2	0.25	7.07	7.32	7.31	7.43	0.00	1.47	1.36	5.49	0.94
21	1336.13	2513.87	2	0.24	5.81	6.05	6.05	6.17	0.00	1.52	1.32	5.48	0.99
22	1333.70	2516.30	2	0.24	5.80	6.04	6.04	6.16	0.00	1.53	1.31	5.48	1.00
	1296.07	2553.93	2	0.22	5.62	5.84	5.85	5.97	0.01	1.59	1.26	5.86	1.09
	1233.86	2616.14	2	0.19	5.35	5.54	5.59	5.72	0.01	1.89	1.06	5.53	1.38
23	1193.73	2656.27	2	0.17	5.18	5.35	5.42	5.59	0.01	2.15	0.93	5.46	1.67
24	1185.70	2664.30	2	0.20	5.12	5.32	5.36	5.49	0.01	1.83	1.09	5.47	1.31
25	1119.70	2730.30	2	0.21	4.61	4.82	4.85	4.98	0.01	1.80	1.11	5.47	1.27
26	1118.50	2731.50	2	0.21	4.60	4.81	4.84	4.97	0.01	1.80	1.11	5.57	1.29
	1115.30	2734.70	2	0.21	4.60	4.81	4.83	4.96	0.01	1.72	1.16	5.64	1.21
	1092.10	2757.90	2	0.20	4.49	4.69	4.73	4.86	0.01	1.81	1.11	5.60	1.30
	979.35	2870.65	2	0.24	4.04	4.28	4.28	4.39	0.00	1.52	1.32	5.61	1.00
	780.63	3069.37	2	0.16	3.22	3.38	3.46	3.63	0.01	2.20	0.91	5.55	1.74

27	687.50	3162.50	2	0.24	2.83	3.07	3.07	3.19	0.01	1.51	1.32	5.67	1.00
28	683.00	3167.00	2	0.09	2.24	2.33	2.47	3.06	0.11	3.77	0.53	5.63	3.91
	618.25	3231.75	2	0.25	1.94	2.19	2.18	2.29	0.00	1.45	1.38	5.63	0.94
29	578.97	3271.03	2	0.25	1.75	2.00		2.10	0.00	1.39	1.43	5.68	0.89
30	570.70	3279.30	2	0.26	1.71	1.97	1.95	2.07	0.00	1.41	1.42	5.69	0.90
	544.89	3305.11	2	0.28	1.60	1.88	1.83	1.96	0.00	1.25	1.61	5.82	0.76
	289.29	3560.71	2	0.24	0.56	0.80	0.80	0.91	0.01	1.52	1.32	5.60	1.00
31	208.76	3641.24	2	0.40	0.23	0.63	0.47	0.67	0.00	0.90	2.22	5.66	0.46
	191.11	3658.89	2	0.38	0.21	0.59		0.65	0.00	1.01	1.99	5.24	0.52
32	0.00	3850.00	2	0.37	0.00	0.37	0.22	0.41	0.00	0.89	2.26	6.08	0.46

Πίνακας 6: Τα αποτελέσματα της υδραυλικής επίλυσης στο HEC-RAS για $Q=1\text{m}^3/\text{s}$. Δεδομένα για βάθος, στάθμη πυθμένα (Min Ch El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας (W.S El), στάθμη ελεύθερης επιφάνειας για κρίσιμη ροή (Crit W.S), στάθμη γραμμής ενέργειας (E.G El), κλίση γραμμής ενέργειας (E.G Slope), ταχύτητα ροής (Vel Chn), εμβαδόν βρεχόμενης επιφάνειας (Flow Area), πλάτος βρεχόμενης επιφάνειας (Top Width) και αριθμός Froude (Froude).

ΔO	X'	X	Q Total	Y	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	m	m	(m ³ /s)	m	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
1	3850.00	0.00	1	0.14	22.20	22.34	22.35	22.42	0.01	1.28	0.78	5.52	1.09
	3844.01	5.99	1	0.10	22.16	22.26	22.29	22.37	0.01	1.43	0.70	6.83	1.43
	3840.00	10.00	1	0.12	22.14	22.26	22.27	22.33	0.01	1.25	0.80	6.83	1.16
	3782.19	67.81	1	0.13	21.76	21.89	21.89	21.96	0.01	1.13	0.89	6.99	1.01
	3667.57	182.43	1	0.13	21.06	21.19	21.20	21.26	0.01	1.23	0.81	6.71	1.13
2	3651.95	198.05	1	0.13	20.99	21.12	21.12	21.19	0.01	1.18	0.84	6.83	1.08
	3587.09	262.91	1	0.10	20.43	20.53	20.56	20.64	0.01	1.43	0.70	6.91	1.43
	3506.58	343.42	1	0.13	19.79	19.92	19.92	19.99	0.01	1.17	0.86	6.94	1.06
3	3431.00	419.00	1	0.10	19.18	19.28	19.33	19.39	0.01	1.45	0.69	6.57	1.43
	3394.74	455.26	1	0.16	19.01	19.17	19.16	19.23	0.00	1.02	0.98	6.69	0.85
	3282.27	567.73	1	0.14	18.56	18.70	18.69	18.76	0.00	1.12	0.89	6.42	0.96
4	3230.00	620.00	1	0.15	18.34	18.49	18.49	18.55	0.00	1.05	0.95	6.35	0.87
5	3229.00	621.00	1	0.07	17.95	18.02	18.12	18.51	0.11	3.08	0.32	5.50	4.06
6	3135.00	715.00	1	0.14	17.19	17.33	17.33	17.40	0.01	1.15	0.87	6.47	1.01
7	3132.00	718.00	1	0.04	16.44	16.48	16.57	17.27	0.29	3.94	0.25	6.30	6.27
	3065.63	784.37	1	0.15	15.90	16.05	16.05	16.11	0.00	1.11	0.90	6.30	0.94
8	3033.50	816.50	1	0.11	15.65	15.76	15.79	15.88	0.01	1.54	0.65	6.00	1.49
	2975.74	874.26	1	0.14	15.15	15.29	15.30	15.37	0.01	1.24	0.81	6.00	1.08
	2898.03	951.97	1	0.11	14.53	14.64	14.67	14.75	0.01	1.47	0.68	6.00	1.39
	2755.75	1094.25	1	0.14	13.39	13.53	13.54	13.61	0.01	1.25	0.80	6.09	1.10
9	2750.00	1100.00	1	0.12	13.36	13.48	13.49	13.57	0.01	1.33	0.75	6.72	1.27
	2614.67	1235.33	1	0.11	12.18	12.29	12.31	12.38	0.01	1.33	0.75	6.72	1.26
10	2550.03	1299.97	1	0.12	11.61	11.73	11.75	11.82	0.01	1.37	0.73	6.23	1.27
	2531.05	1318.95	1	0.13	11.46	11.59	11.60	11.67	0.01	1.21	0.83	6.74	1.10
11	2480.00	1370.00	1	0.15	11.17	11.32	11.34	11.40	0.01	1.20	0.83	5.65	1.00
12	2300.00	1550.00	1	0.09	9.38	9.47	9.52	9.66	0.03	1.96	0.51	5.63	2.08
	2295.98	1554.02	1	0.12	9.36	9.48	9.53	9.60	0.01	1.54	0.65	5.55	1.44
13	2259.00	1591.00	1	0.21	9.20	9.41	9.35	9.44	0.00	0.85	1.17	5.67	0.60
	2249.52	1600.48	1	0.22	9.18	9.40		9.43	0.00	0.76	1.31	6.19	0.53
	2197.98	1652.02	1	0.19	9.11	9.30		9.34	0.00	0.91	1.10	5.70	0.66
14	2193.07	1656.93	1	0.19	9.10	9.29		9.33	0.00	0.93	1.07	5.66	0.68
15	2184.50	1665.50	1	0.19	9.08	9.27		9.31	0.00	0.91	1.10	5.65	0.66
	2048.85	1801.15	1	0.16	8.69	8.85	8.84	8.91	0.00	1.15	0.87	5.66	0.93
	1962.52	1887.48	1	0.22	8.45	8.67		8.70	0.00	0.81	1.23	5.69	0.56
16	1921.50	1928.50	1	0.17	8.34	8.51	8.51	8.60	0.00	1.31	0.76	4.37	1.00
	1893.12	1956.88	1	0.11	7.99	8.10	8.16	8.31	0.02	2.03	0.49	4.46	1.96
17	1865.50	1984.50	1	0.15	7.71	7.86	7.88	7.97	0.01	1.50	0.67	4.45	1.23
18	1860.10	1989.90	1	0.18	7.70	7.88	7.85	7.93	0.00	1.00	1.00	5.46	0.74
	1754.07	2095.93	1	0.20	7.45	7.65		7.69	0.00	0.91	1.10	5.57	0.65
19	1713.10	2136.90	1	0.16	7.36	7.52		7.58	0.00	1.09	0.92	5.55	0.86
20	1664.10	2185.90	1	0.15	7.16	7.31	7.31	7.38	0.00	1.16	0.86	5.55	0.94
	1644.06	2205.94	1	0.16	7.07	7.23	7.22	7.30	0.00	1.13	0.88	5.46	0.90
21	1336.13	2513.87	1	0.16	5.81	5.97	5.96	6.03	0.00	1.16	0.86	5.45	0.93
22	1333.70	2516.30	1	0.15	5.80	5.95	5.95	6.02	0.00	1.17	0.85	5.45	0.94
	1296.07	2553.93	1	0.15	5.62	5.77	5.77	5.84	0.01	1.19	0.84	5.84	1.00
	1233.86	2616.14	1	0.10	5.35	5.45	5.50	5.61	0.02	1.77	0.57	5.50	1.76
23	1193.73	2656.27	1	0.15	5.18	5.33	5.33	5.41	0.01	1.21	0.82	5.45	1.00
24	1185.70	2664.30	1	0.14	5.12	5.26	5.27	5.35	0.01	1.35	0.74	5.45	1.17
25	1119.70	2730.30	1	0.13	4.61	4.74	4.76	4.84	0.01	1.41	0.71	5.45	1.25
26	1118.50	2731.50	1	0.13	4.60	4.73	4.76	4.84	0.01	1.44	0.70	5.54	1.29
	1115.30	2734.70	1	0.13	4.60	4.73	4.74	4.82	0.01	1.34	0.75	5.62	1.17
	1092.10	2757.90	1	0.09	4.49	4.58	4.64	4.77	0.02	1.93	0.52	5.56	2.02
	979.35	2870.65	1	0.16	4.04	4.20	4.19	4.26	0.00	1.15	0.87	5.58	0.93
	780.63	3069.37	1	0.16	3.22	3.38	3.37	3.44	0.00	1.11	0.90	5.55	0.88

27	687.50	3162.50	1	0.17	2.83	3.00	3.00	3.06	0.00	1.09	0.92	5.65	0.86
28	683.00	3167.00	1	0.05	2.24	2.29	2.39	2.94	0.23	3.57	0.28	5.62	5.09
	618.25	3231.75	1	0.16	1.94	2.10	2.09	2.16	0.01	1.13	0.89	5.60	0.91
29	578.97	3271.03	1	0.16	1.75	1.91		1.97	0.00	1.07	0.94	5.65	0.83
30	570.70	3279.30	1	0.16	1.71	1.87	1.86	1.94	0.00	1.10	0.91	5.66	0.88
	544.89	3305.11	1	0.19	1.60	1.79	1.75	1.83	0.00	0.93	1.07	5.79	0.69
	289.29	3560.71	1	0.15	0.56	0.71	0.71	0.78	0.01	1.21	0.83	5.56	1.00
31	208.76	3641.24	1	0.26	0.23	0.49	0.38	0.52	0.00	0.69	1.46	5.61	0.43
	191.11	3658.89	1	0.26	0.21	0.47		0.49	0.00	0.76	1.31	5.18	0.48
32	0.00	3850.00	1	0.24	0.00	0.24	0.14	0.27	0.00	0.68	1.47	6.06	0.44