



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ**

Διπλωματική Εργασία

ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΣΑΝΤ

**Επιβλέπων : Καθηγητής Αναστάσιος Ι. Στάμου
Συνεπίβλεψη: ΥΔ Γεώργιος Μητσόπουλος**

Αθήνα, Ιούλιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ**

Διπλωματική Εργασία

ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΣΑΝΤ

**Επιβλέπων : Καθηγητής Αναστάσιος Ι. Στάμου
Συνεπίβλεψη: ΥΔ Γεώργιος Μητσόπουλος**

Αθήνα, Ιούλιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ**

Διπλωματική Εργασία

ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΣΑΝΤ

**Επιβλέπων : Καθηγητής Αναστάσιος Ι. Στάμου
Συνεπίβλεψη: ΥΔ Γεώργιος Μητσόπουλος**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή
Αναστάσιος Στάμου, Καθηγητής ΕΜΠ
Ευάγγελος Μπαλτάς, Καθηγητής ΕΜΠ
Ευστρατιάδης Ανδρέας, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα, Καθηγητή και Διευθυντή του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, κ. Αναστάσιο Στάμου, χάρη στον οποίο μου δόθηκε η ευκαιρία να ασχοληθώ με το αντικείμενο της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής που πάντα επιθυμούσα.

Επίσης, ευχαριστώ όλα τα άτομα που με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Συγκεκριμένα ευχαριστώ τους υποψήφιους διδάκτορες του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής Γιώργο Μητσόπουλο, Ελπίδα Παναγιωτάτου, και τους διδάκτορες Μίλτο Γυμνόπουλο και Άρη Μπλούτσο, οι οποίοι μου προσέφεραν απλόχερα τις γνώσεις τους.

Ευχαριστώ το Μελετητικό Γραφείο Ε.Τ.ΜΕ. ΠΕΠΠΑΣ & ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Ε.Ε. για τη διάθεση όλων των απαραίτητων στοιχείων και σχεδίων των αντιπλημμυρικών έργων της Μάνδρας.

Τέλος, νιώθω ευγνώμων για τους ανθρώπους που έχω δίπλα μου, οικογένεια και φίλους, οι οποίοι με στήριξαν όλο αυτό το διάστημα περισσότερο από όσο θα μπορούσα να ζητήσω.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
1.1	Αντικείμενο και στόχος της εργασίας	2
1.2	Διάρθρωση της εργασίας	2
2	ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS 1D/2D	3
2.1	Εισαγωγή.....	3
2.2	Εξισώσεις υπολογισμού μονοδιάστατης (1D) ροής	3
2.2.1	Υπολογισμός της ελεύθερης επιφάνειας για 1D Μόνιμη Ροή.....	3
2.2.2	Υπολογισμός της ελεύθερης επιφάνειας για 1D Μη Μόνιμη Ροή	5
2.3	Προσομοίωση τεχνικού έργου με γέφυρες	6
2.3.1	Γενικά	6
2.3.2	Συντελεστές συστολής και διαστολής	6
2.3.3	Χαρακτηριστικές διατομές.....	7
2.3.4	Υπολογισμοί χαμηλής παροχής (Low flow computations).....	9
2.3.5	Υπολογισμοί υψηλής παροχής (High flow computations).....	12
2.4	Προσομοίωση τεχνικού έργου με οχετούς	13
2.4.1	Γενικά	13
2.4.2	Γενικές αρχές προσομοίωσης	14
2.4.3	Συντελεστές διαστολής και συστολής	14
2.4.4	Χαρακτηριστικές διατομές.....	14
2.4.5	Ορολογία οχετών	14
2.4.6	Καμπύλη απόδοσης (Performance curve ή HTab curve)	15
2.4.7	Τυπικές διατομές οχετών.....	16
2.4.8	Υδραυλικοί υπολογισμοί με το HEC-RAS	16
2.5	Προσομοίωση τεχνικού έργου με κάλυμμα (Lid)	24
2.5.1	Γενικά.....	24
2.5.2	Κάλυμμα σε συνθήκες μόνιμης ροής.....	24
2.5.3	Κάλυμμα σε συνθήκες μη μόνιμης ροής	25
3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ	29
3.1	Σενάρια υπολογισμών	29
3.1.1	Υπολογισμοί ομοιόμορφης ροής.....	29
3.1.2	Υπολογισμοί ροής σε γέφυρα	30
3.1.3	Υπολογισμοί ροής σε οχετό	31
3.1.4	Υπολογισμοί ροής με κάλυμμα	31
3.1.5	Χαρακτηριστικές διατομές.....	32
3.2	Υπολογισμοί ομοιόμορφης υποκρίσιμης ροής.....	33
3.3	Υπολογισμοί υποκρίσιμης ροής σε γέφυρα	35
3.4	Υπολογισμοί υποκρίσιμης ροής σε οχετό	37
3.5	Υπολογισμοί υποκρίσιμης ροής με κάλυμμα	39
3.6	Υπολογισμοί ομοιόμορφης υπερκρίσιμης ροής.....	41
3.6.1	Ομοιόμορφη υπερκρίσιμη ροή χωρίς γέφυρα	41
3.7	Υπολογισμοί υπερκρίσιμης ροής σε γέφυρα	43
3.8	Υπολογισμοί υπερκρίσιμης ροής σε οχετό	46
3.9	Υπολογισμοί υπερκρίσιμης ροής με κάλυμμα	48
3.10	Σύγκριση υπολογισμών	50
3.10.1	Υπολογισμοί υποκρίσιμης ροής για παροχή 90 m ³ /s	50
3.10.2	Υπολογισμοί υποκρίσιμης ροής για παροχή 120 m ³ /s	51

3.10.3	Υπολογισμοί υπερκρίσιμης ροής για παροχή 90 m ³ /s.....	52
3.10.4	Υπολογισμοί υπερκρίσιμης ροής για παροχή 175 m ³ /s.....	53
4	ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ.....	55
4.1	Γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.....	55
4.1.1	Ο χείμαρρος Σούρες.....	55
4.1.2	Ο χείμαρρος της Αγίας Αικατερίνης.....	56
4.1.3	Ο χείμαρρος Σαρανταπόταμος.....	56
4.2	Τεχνικά έργα στην περιοχή μελέτης.....	57
4.2.1	Τεχνικά έργα στον χείμαρρο Σούρες.....	57
4.2.2	Τεχνικά έργα στον χείμαρρο της Αγίας Αικατερίνης.....	62
4.3	Περιγραφή Υδροδυναμικού Μοντέλου 1D.....	65
4.3.1	Εισαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στο μοντέλο.....	65
4.4	Σενάρια Υπολογισμών στην περιοχή της μελέτης περίπτωσης.....	66
4.4.1	Σενάρια υπολογισμών.....	66
4.4.2	Σύγκριση υπολογισμών.....	69
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	71
5.1	Συμπεράσματα.....	71
5.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	71
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73
6.1	Διεθνής Βιβλιογραφία.....	73
6.2	Ελληνική βιβλιογραφία.....	74
6.3	Διαδικτυακοί ιστότοποι.....	74
Παράρτημα 1. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων υποκρίσιμης ροής αγωγού απλής γεωμετρίας.....		75
Παράρτημα 2. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων υπερκρίσιμης ροής αγωγού απλής γεωμετρίας.....		80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.3-1. Συντελεστές τοπικών απωλειών (Πηγή: HEC-RAS, 2015)	6
Πίνακας 2.4-1. Τυπικές διατομές οχετών.....	16
(Πηγή: HEC-RAS, 2015 & Hydraulic Design of Highway Culvert, 3 rd Edition,2012).....	16
Πίνακας 2.4-3. Τύποι ροής ελέγχου εισόδου ανάλογα με το αν η είσοδος είναι βυθισμένη ή όχι.....	17
Πίνακας 2.4-3. Τύποι ροής ελέγχου εξόδου ανάλογα με το αν η είσοδος είναι βυθισμένη ή όχι.....	18
Πίνακας 2.4-4. Εξισώσεις ροής εισόδου για μη βυθισμένη και βυθισμένη είσοδο.....	20
Πίνακας 3.1-1. Σενάρια υπολογισμών ομοιόμορφης ροής	29
Πίνακας 3.1-2. Σενάρια υπολογισμών ροής με γέφυρα	30
Πίνακας 3.1-3. Σενάρια υπολογισμών ροής σε οχετό.....	31
Πίνακας 3.1-4. Σενάρια υπολογισμών ροής με κάλυμμα	31
Πίνακας 3.1-5. Χαρακτηριστικές διατομές τεχνικών έργων	32
Πίνακας 3.2-1. Χαρακτηριστικά ομοιόμορφης υποκρίσιμης ροής.....	33
Πίνακας 3.3-1. Μορφή επιφάνειας νερού και ΓΕ σε υποκρίσιμη ροή (M) σε γέφυρα (B).....	35
Πίνακας 3.4-1. Μορφή επιφάνειας νερού και ΓΕ σε υποκρίσιμη ροή (M) σε οχετό (C) με απώλειες εισόδου και εξόδου	37
Πίνακας 3.5-1. Μορφή επιφάνειας νερού και ΓΕ σε υποκρίσιμη ροή (M) σε κάλυμμα (L)	39
Πίνακας 3.6-1. Χαρακτηριστικά ομοιόμορφης υπερκρίσιμης ροής	41
Πίνακας 3.7-1. Σύγκριση αποτελεσμάτων υπερκρίσιμης ροής (S) σε γέφυρα (B)	43
Πίνακας 3.8-1. Σύγκριση αποτελεσμάτων υπερκρίσιμης ροής (S) σε οχετό (C) με απώλειες εισόδου και εξόδου.....	46
Πίνακας 3.9-1. Σύγκριση αποτελεσμάτων υπερκρίσιμης ροής (S) με κάλυμμα (L).....	48
Πίνακας 4.2-1. Επιμέρους τμήματα του χ. Σούρες	57
Πίνακας 4.2-2. Στοιχεία τεχνικών έργων τμήματος 1	58
Πίνακας 4.2-3. Τυπικές διατομές της διευθέτησης του χ. Σούρες.....	59
(Πηγή: Περιφέρεια Αττικής, 2014).....	59
Πίνακας 4.2-4. Στοιχεία τεχνικών έργων της διευθέτησης του χ. Σούρες	60
Πίνακας 4.2-5. Στοιχεία τεχνικών έργων τμήματος 3	62
Πίνακας 4.2-5. Σύνοψη γεωμετρικών χαρακτηριστικών ροής του χ. Αγίας Αικατερινής.....	64
Πίνακας 4.4-1. Παροχές αιχμής των χ. Σούρες και Αγία Αικατερίνη για διάφορα πλημμυρικά επεισόδια.....	66
Πίνακας 4.4-2. Σενάρια υπολογισμών ροής στα τεχνικά έργα TE1, TE2 και TE Αττικής Οδού.....	68
Πίνακας 4.4-3. Προσομοίωση τεχνικού έργου TE2 με κάλυμμα (L) και γέφυρα (B)	69
Πίνακας 4.4-4. Προσομοίωση τεχνικού έργου T.E. Αττικής Οδού με κάλυμμα (L) και οχετό (C).....	70

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.2-1. Τυπική μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς K σε διατομές σύνθετης γεωμετρίας (Πηγή: HEC-RAS, 2016).....	4
Εικόνα 2.3-1: Τοποθεσίες διατομών σε μία γέφυρα (Πηγή: HEC-RAS, 2016).....	7
Εικόνα 2.4-2. Μη ενεργές περιοχές ροής εκατέρωθεν του ανοίγματος της γέφυρας.....	8
(Πηγή: HEC-RAS, 2016)	8
Εικόνα 2.5-1. Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών διατομών του οχετού.....	13
(Πηγή: HEC-RAS, 2016)	13
Εικόνα 2.4-2. Κάτοψη και τυπική διατομή οχετού (Πηγή: HEC-RAS, 2016).....	14
Εικόνα 2.4-3. Συνολική ενέργεια, βάθη ροής και απώλειες ενέργειας σε οχετό πλήρως γεμάτο (Πηγή: HEC-RAS, 2016)	15
Εικόνα 2.4-4. Διάγραμμα αποδοτικότητας για οχετό με υπερχειλίση καταστρώματος.....	19
Εικόνα 2.4-5. Αλγόριθμος υπολογισμού απωλειών με έλεγχο εισόδου ή εξόδου	21
Εικόνα 2.5-1. Διατομές με κάλυμμα ορθογωνικής και τοξωτής μορφής.....	24
Εικόνα 2.5-2. Η ελεύθερη επιφάνεια κάτω από το κάλυμμα, η πιεζομετρική γραμμή (μπλε) και η γραμμή ενέργειας (πράσινη διακεκομμένη).....	25
Εικόνα 2.5-3. Τετραγωνικός αγωγός με σχισμή Priessmann.....	27
Εικόνα 3.2-1. Ομοιόμορφη υποκρίσιμη ροή χωρίς τεχνικά έργα	33
Εικόνα 3.2-2. Ομοιόμορφη υποκρίσιμη ροή για παροχή $90 \text{ m}^3/\text{s}$ σε (α) μόνιμη και (β) μη μόνιμη ροή και για παροχή $120 \text{ m}^3/\text{s}$ σε (γ) μόνιμη και (δ) μη μόνιμη ροή.....	34
Εικόνα 3.3-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε γέφυρα για παροχή (α) $90 \text{ m}^3/\text{s}$ και (β) $120 \text{ m}^3/\text{s}$	
Εικόνα 3.4-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε οχετό για παροχή (α) $90 \text{ m}^3/\text{s}$ και (β) $120 \text{ m}^3/\text{s}$	38
Εικόνα 3.5-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε κάλυμμα για παροχή (α) $90 \text{ m}^3/\text{s}$ και (β) $120 \text{ m}^3/\text{s}$	40
Εικόνα 3.6-2. Μεταβολή της επιφάνειας ροής και της γραμμής ενέργειας για παροχή $90 \text{ m}^3/\text{s}$ σε (α) μόνιμη και (β) μη μόνιμη ροή και για παροχή $175 \text{ m}^3/\text{s}$ σε (γ) μόνιμη και (δ) μη μόνιμη ροή	42
Εικόνα 3.7-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε γέφυρα για παροχή (α) $90 \text{ m}^3/\text{s}$ και (β) $175 \text{ m}^3/\text{s}$ με επίλυση της εξίσωσης ενέργειας.....	44
Εικόνα 3.8-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε γέφυρα για παροχή (α) $90 \text{ m}^3/\text{s}$ (β) $175 \text{ m}^3/\text{s}$...	47
Εικόνα 3.9-3. Μεταβολή της επιφάνειας ροής με κάλυμμα για παροχή (α) $90 \text{ m}^3/\text{s}$ (β) $175 \text{ m}^3/\text{s}$.	49
Εικόνα 3.10-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής για παροχή $90 \text{ m}^3/\text{s}$ σε υποκρίσιμη ροή	50
Εικόνα 3.10-2. Μεταβολή της επιφάνειας ροής για παροχή $120 \text{ m}^3/\text{s}$ σε υποκρίσιμη ροή	51
Εικόνα 3.10-3. Μεταβολή της επιφάνειας ροής για παροχή $90 \text{ m}^3/\text{s}$ σε υπερκρίσιμη ροή	52
Εικόνα 3.10-4. Μεταβολή της επιφάνειας ροής για παροχή $175 \text{ m}^3/\text{s}$ σε υπερκρίσιμη ροή	53
Εικόνα 3.10-5. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε γέφυρα με μόνιμη ροή παροχής.....	54
Εικόνα 4.1-1. Χάρτης τοποθεσίας της περιοχής διερεύνησης με τις λεκάνες απορροής των χ. Σούρες και Αγία Αικατερίνη (Diakakis et al., 2019).....	55
Εικόνα 4.1-2. Άξονες τμημάτων χ. Σούρες διαφορετικών χαρακτηριστικών και αγωγών εκβολής σε αυτό (Υπόβαθρο: Κτηματολόγιο Α.Ε.).	56
Εικόνα 4.2-1. Άξονας της κοίτης του χ. Σούρες (Υπόβαθρο: Google Satellite).....	57

Εικόνα 4.2-2. Θέση τεχνικών έργων στο τμήμα 1 του χ. Σούρες.....	58
(Υπόβαθρο: Google Satellite).....	58
Εικόνα 4.2-3. Δίδυμος ορθογωνικός αγωγός με πτώσεις	59
Εικόνα 4.2-4. Θέση των τεχνικών της διευθέτησης χ. Σούρες.....	61
(Πηγή: Περιφέρεια Αττικής, 2014).....	61
Εικόνα 4.2-5. Θέση τεχνικών έργων στο τμήμα 3 του χ. Σούρες.....	61
(Υπόβαθρο: Google Satellite).....	61
Εικόνα 4.2-5. Κάτοψη έργων επί του χ. Αγίας Αικατερίνης (Υπόβαθρο: Google Earth)	63
Εικόνα 4.3-1. Γραμμές αξόνων των ρεμάτων Σούρες & Αγίας Αικατερίνης, διατομών και όχθων	65
Εικόνα 4.4-1. Η θέση και τα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων της μελέτης περίπτωσης που προσομοιώθηκαν με γέφυρα, κάλυμμα και οχετό	66
Εικόνα Π.1-1. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-EN-M-90, B-US-EN-M-90	75
Εικόνα Π.1-2. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-MO-M-90, B-US-MO-M-90	76
Εικόνα Π.1-3. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-EN-M-120, B-US-EN-M-120	77
Εικόνα Π.1-4. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων C-ST-M-90, C-US-M-90.....	78
Εικόνα Π.1-5. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων C-ST-M-120, C-US-M-120.....	79
Εικόνα Π.2-1. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-EN-S-90, B-US-EN-S-90	80
Εικόνα Π.2-2. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-MO-S-90, B-US-MO-S-90	81
Εικόνα Π.2-3. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-EN-S-175, B-US-EN-S-175	82
Εικόνα Π.2-4. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων C-ST-S-90, C-US-S-90.....	83
Εικόνα Π.2-5. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων C-ST-S-175, C-US-S-175.....	84

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

1. Ε.Ε.: Επώνυμη εταιρεία
2. Ε.Ο.: Εθνική Οδός
3. Ο.Σ.: Οπλισμένο Σκυρόδεμα
4. ρ.: ρέμα
5. Τ.Ε.: Τεχνικό Έργο
6. χ.: χείμαρρος
7. U.S.G.S: United Stage Geological Survey
8. F.HW.A.: Federal Highway Administration

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το υδροδυναμικό πρόγραμμα HEC-RAS, μας δίνει τη δυνατότητα να προσομοιώσουμε τα εγκάρσια στη ροή τεχνικά έργα με τρεις διαφορετικούς τρόπους, με γέφυρα (Bridge), με οχετό (Calvert) ή με κάλυμμα (Lid). Το λογισμικό HEC-RAS έχει αναπτυχθεί από την U.S. Army Corps of Engineers και χρησιμοποιείται παγκοσμίως.

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να οδηγήσει σε συμπεράσματα ως προς την επιλογή του κατάλληλου τρόπου προσομοίωσης των τεχνικών έργων σε πλημμυρικές ροές. Αυτό επιτεύχθηκε, μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από την προσομοίωση ενός τεχνικού έργου ίδιας γεωμετρίας, με τους τρεις ανωτέρω αναφερόμενους τρόπους.

Για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε να προσομοιωθεί ένας αγωγός απλής γεωμετρίας σε συνθήκες υποκρίσιμης και υπερκρίσιμης ροής. Ο αγωγός εξετάστηκε για διαφορετική παροχή έτσι ώστε η ροή είτε να είναι ομοιόμορφη είτε να τίθεται υπό πίεση κατά μήκος του τεχνικού έργου.

Από τους υπολογισμούς ελέγχου που διεξήχθησαν στον αγωγό απλής γεωμετρίας, προέκυψε πως η προσομοίωση με κάλυμμα (Lid) δίνει πιο ορθά αποτελέσματα.

Προκειμένου να ελέγξουμε αν το παραπάνω συμπέρασμα γενικεύεται και σε υδραυλικά μοντέλα σύνθετης γεωμετρίας διεξήχθη μελέτη περίπτωσης.

Ως μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε μονοδιάστατο μοντέλο HEC-RAS 1D το οποίο δημιουργήθηκε από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής ΕΜΠ. Το μοντέλο αποτελούνταν από το υδρογραφικό δίκτυο στη περιοχή της Μάνδρας στη Δυτική Αττική (οι χείμαρροι Σούρες και Αγ. Αικατερίνη καθώς ο υπόγειος αγωγός Κοροπούλη) και τα αντιπλημμυρικά έργα που χωροθετούνταν στην περιοχή πριν το καταστροφικό γεγονός της της πλημμύρας του Νοεμβρίου 2017, καθώς και αυτά που κατασκευάστηκαν μετά.

Από το σύνολο των τεχνικών έργων του μοντέλου μελέτης περίπτωσης, επιλέχθηκαν τρία, ένα μικρού, ένα μεσαίου και ένα μεγάλου μήκους με σκοπό να προσομοιωθούν με τους τρεις διαθέσιμους τρόπους του HEC-RAS, όπως αυτοί αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα πλημμυρογράφημα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο της μελέτης περίπτωσης, αφορούν σε πλημμυρικό επεισόδιο με περίοδο επαναφοράς $T=20$ έτη, $T=50$ έτη, $T=100$ έτη καθώς και στο πλημμυρογράφημα της πλημμύρας του Νοεμβρίου 2017, και χορηγήθηκαν από τον Καθηγητή Μπαλτά Ευάγγελο.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη περίπτωσης είναι ανάλογα με αυτά που προέκυψαν και από το μοντέλο του αγωγού απλής γεωμετρίας.

Λόγω της πολυπαραμετρικής φύσης του εν λόγω ερευνητικού αντικειμένου κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω διερεύνηση ικανού αριθμού σεναρίων.

Λέξεις – Κλειδιά : Μαθηματικό μοντέλο, HEC-RAS 1D, Μάνδρα, Υδροδυναμική Μοντελοποίηση, Γέφυρες, Οχετοί, Τεχνικά έργα, Αντιπλημμυρικά έργα

ABSTRACT

The HEC-RAS hydrodynamic program enables us to simulate technical works in three different ways, as a bridge, as a culvert or as a lid above the cross-sections of the model. HEC-RAS software is developed by U.S. Army Corps of Engineers and is used worldwide.

The aim of this thesis was to lead to conclusions regarding the selection of the appropriate way of simulating the flood protection works. This was achieved by comparing the results obtained from the simulation of an inline structure, of the same geometry, in the three ways mentioned above.

A rectangular channel was used for the simulation of subcritical and supercritical flow conditions. Different discharge values were chosen as inputs so the flows would be either entirely uniform or pressurized along the inline structure. Several computational scenarios, indicates that the simulation of the structure as a lid gives more accurate results.

In order to check whether the above conclusion is generalized to hydraulic models of complex geometry, a case study was conducted.

An one-dimensional model built by the Laboratory of Hydraulics, NTUA was chosen as a case study which included the hydrographic network in the area of Mandra in western Attica (the streams Soures and Agia Aikaterini as well as the underground pipeline Koropouli). The model also included the flood protection works that were located at the area before the catastrophic event of the flood of November 2017, as well as those that were constructed afterwards.

Three technical works of different length (small, medium, large) and location, were chosen from the case-study model and simulated as bridge, culvert and lid. For the simulation, flood events with different return periods ($T = 20$ years, $T = 50$ years, $T = 100$ years) were used, as well as the flood of November 2017. The results of the different modelling approaches were compared.

The conclusions conducted from the case study are similar to those of simple geometry channel model.

Due to the multiparametric nature of this research object, it is considered necessary to further investigate a sufficient number of scenarios.

Keywords: *Mathematical Model, HEC-RAS 1D, Mandra, Hydrodynamic Modelling, Technical works, Bridges, Culverts, Flood Protection Works*

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κάθε επέμβαση σε ένα υδατόρεμα με τη μορφή κάποιου τεχνικού έργου μεταβάλλει την δυναμική του. Ένας σημαντικός λόγος κατασκευής τεχνικών έργων σε υδατορέματα είναι η αντιπλημμυρική προστασία που μπορούν να προσφέρουν. Οι επεμβάσεις στο υδρογραφικό δίκτυο απαιτείται να γίνονται κατόπιν υδραυλικής και υδρολογικής μελέτης και τα τεχνικά έργα να κατασκευάζονται διατηρώντας την ισορροπία του υδάτινου οικοσυστήματος.

Καθώς τα υδάτινα οικοσυστήματα είναι διαρκώς μεταβαλλόμενα λόγω τόσο φυσικών όσο και ανθρωπογενών παραμέτρων, είναι αναγκαία η συνεχής παρακολούθησή τους καθώς και η δυνατότητα να επανασχεδιαστούν ώστε να προσαρμοστούν στις εκάστοτε συνθήκες.

Τα λογισμικά υδραυλικής προσομοίωσης, όπως το HEC-RAS, είναι ικανά να προσομοιώσουν οποιοδήποτε κανάλι (φυσικό, τεχνητό ή συνδυασμό αυτών) καθώς και τεχνικά έργα που υπάρχουν στη ροή δημιουργώντας υδραυλικά μοντέλα και με αυτόν τον τρόπο είναι ικανή η μελέτη της συμπεριφοράς τους σε οποιοδήποτε πλημμυρικό φαινόμενο.

Κρίνεται, λοιπόν, αναγκαία η κατανόηση του τρόπου προσομοίωσης των τεχνικών έργων από οποιοδήποτε λογισμικό, προκειμένου το υδραυλικό μοντέλο να είναι αξιόπιστο.

1.1 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μαθηματική προσομοίωση της υδραυλικής συμπεριφοράς των τεχνικών έργων σε πλημμυρικές ροές.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διεξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τις διαφορές των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης ενός τεχνικού έργου με τους τρεις διαφορετικούς τρόπους που διαθέτει το υδροδυναμικό λογισμικό HEC-RAS: με γέφυρα (Bridge), με οχετό (Culvert) και με κάλυμμα (Lid).

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 6 Κεφάλαια, τα οποία περιγράφονται σύντομα στη συνέχεια.

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται αναφορά στο αντικείμενο και τον στόχο της διπλωματικής εργασίας.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο HEC-RAS 1D, οι εξισώσεις υπολογισμού της μονοδιάστατης ροής και οι εξισώσεις υπολογισμού της ροής σε τεχνικά έργα.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της ροής σε αγωγό απλής γεωμετρίας με τεχνικό έργο που προσομοιώνεται με γέφυρα, με οχετό και με κάλυμμα, σε συνθήκες υποκρίσιμης και υπερκρίσιμης ροής. Στο κεφάλαιο παρατίθενται σύντομοι σχολιασμοί των αποτελεσμάτων.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 4** δίνονται οι απαραίτητες πληροφορίες για την περιοχή μελέτης περίπτωσης και τα τεχνικά έργα που υπάρχουν σε αυτή καθώς και για το μονοδιάστατο μοντέλο HEC-RAS της περιοχής αυτής.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της ροής για τους διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης (με γέφυρα, με οχετό και με κάλυμμα) τριών τεχνικών έργων που χωροθετούνται στην περιοχή μελέτης περίπτωσης. Στο κεφάλαιο παρατίθενται σύντομοι σχολιασμοί των αποτελεσμάτων.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS 1D/2D

2.1 Εισαγωγή

Το HEC-RAS πραγματοποιεί 1D ή 2D υδραυλικούς υπολογισμούς αλλά και συνδυασμό των δύο σε σύστημα ποταμών φυσικής ή και τεχνητής κοίτης. Τεχνικά έργα όπως γέφυρες και οχετοί λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς μέσω της δυνατότητας που δίνει το HEC-RAS να προσομοιωθούν.

2.2 Εξισώσεις υπολογισμού μονοδιάστατης (1D) ροής

2.2.1 Υπολογισμός της ελεύθερης επιφάνειας για 1D Μόνιμη Ροή

Το HEC-RAS ακολουθεί την Τυπική Μέθοδο Βήμα προς Βήμα (Standard step method) για τον υπολογισμό της επιφάνειας της ροής μεταξύ των διατομών. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εξίσωση ενέργειας, η οποία μεταξύ δυο διατομών εκφράζεται ως εξής:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_1 V_{1_1}^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_2 V_{1_2}^2}{2g} + h_e \quad (2.2-1)$$

Όπου:

- Z_1, Z_2 = τα υψόμετρα του πυθμένα στις δυο διατομές (m)
- Y_1, Y_2 = το βάθος του νερού στις δυο διατομές (m)
- V_1, V_2 = η μέση ταχύτητα στις δυο διατομές ($V=Q_{tot}/A_{tot}$) (m/s)
- α_1, α_2 = συντελεστές διόρθωσης των ταχυτήτων
- g = η επιτάχυνση της βαρύτητας (m^2/s) και
- h_e = οι απώλειες ενέργειας μεταξύ των δυο διατομών.

Συγκεκριμένα:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_{1_2}^2}{2g} - \frac{a_1 V_{1_1}^2}{2g} \right| \quad (2.2-2)$$

Όπου:

- L = το σταθμισμένο μήκος του καναλιού μεταξύ των διατομών (m)
- \bar{S}_f = η κλίση της γραμμής ενέργειας (m^{-1}) και
- C = ο συντελεστής απωλειών λόγω στένωσης η διαπλάτυνσης του καναλιού.

Το σταθμισμένο μήκος του καναλιού μεταξύ των διατομών υπολογίζεται βάση της εξής σχέσης:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (2.2-3)$$

Όπου:

- L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} = το μήκος του καναλιού μεταξύ δυο διατομών για ροή στην δεξιά όχθη, στο κέντρο και στην αριστερή όχθη του καναλιού αντίστοιχα (m) και
- $\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}$ = ο αριθμητικός μέσος των παροχών ανάμεσα σε δυο διατομές για την δεξιά όχθη, το κέντρο και την αριστερή όχθη του καναλιού αντίστοιχα (m^3/s).

Το HEC-RAS βασίζεται στην εξίσωση Manning:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} \bar{S}_f^{1/2} \quad (2.2-4)$$

Όπου:

- n = ο συντελεστής τραχύτητας Manning
- A = η επιφάνεια από την οποία διέρχεται παροχή Q (m^2)
- R = η υδραυλική ακτίνα (m) και
- \bar{S}_f = η κλίση της γραμμής ενέργειας (m^{-1}).

προκειμένου να υπολογίσει τον συντελεστή μεταφοράς K , ο οποίος ισούται με:

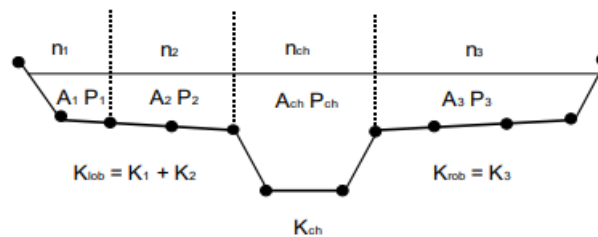
$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (2.2-5)$$

Όπου:

- n = ο συντελεστής τραχύτητας Manning
- A = η επιφάνεια από την οποία διέρχεται παροχή Q (m^2) και
- R = η υδραυλική ακτίνα (m).

Η τυπική μέθοδος υπολογισμού της κλίσης της γραμμής ενέργειας \bar{S}_f από το HEC-RAS είναι η επίλυση της εξίσωσης Manning (2.2-4).

Οι διατομές ενός καναλιού μπορεί να είναι σύνθετης γεωμετρίας. Στην περίπτωση αυτή το HEC-RAS υπολογίζει τον συντελεστή K επιμεριστικά χωρίζοντας την διατομή σε τμήματα σταθερού συντελεστή n . Έπειτα, το πρόγραμμα προσθέτει τους επιμέρους συντελεστές K για κάθε τμήμα της ροής (αριστερή όχθη K_{lob} , κυρίως κανάλι K_{ch} , δεξιά όχθη K_{rob}). Ο συντελεστής μεταφοράς που αντιπροσωπεύει όλο το κανάλι ισούται με το άθροισμα των παραπάνω τριών.



Εικόνα 2.2-1. Τυπική μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς K σε διατομές σύνθετης γεωμετρίας (Πηγή: HEC-RAS, 2016)

Η ροή στο κανάλι δεν επιμερίζεται πάντα. Το HEC-RAS εξετάζει το ακόλουθο κριτήριο:

Αν η κλίση του κυρίως καναλιού είναι πιο απότομη από 5:1 τότε η διατομή επιμερίζεται με βάση τους διαφορετικούς συντελεστές Manning n_i (Εξίσωση 6-17, Chow, 1959). Σε αντίθετη περίπτωση, το HEC-RAS υπολογίζει έναν ισοδύναμο συντελεστή n_c για όλο το κανάλι:

$$n_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3} \quad (2.2-6)$$

Όπου:

- n_c = ο ισοδύναμος συντελεστής τραχύτητας Manning
- P = η βρεχόμενη περίμετρος της διατομής καναλιού (m)
- P_i = η βρεχόμενη περίμετρος των επιμέρους τμημάτων της διατομής του καναλιού (m) και
- n_i = ο συντελεστής τραχύτητας Manning των επιμέρους τμημάτων της διατομής του καναλιού.

Στις διατομές του μονοδιάστατου υδραυλικού μοντέλου υπολογίζεται η μέση κινητική ενέργεια $a \frac{\bar{V}^2}{2g}$.

Ο συντελεστής διόρθωσης της ταχύτητας α υπολογίζεται βάση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$\alpha = \frac{[Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_N V_N^2]}{Q \bar{V}^2} \quad (2.2-7)$$

η οποία γράφεται επίσης και στην μορφή:

$$\alpha = \frac{(A_i)^2 \left[\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K_t^3} \quad (2.2-8)$$

Όπου:

- A_i = η συνολική επιφάνεια της διατομής
- A_{lob} , A_{ch} , A_{rob} = η επιφάνεια της αριστερής όχθης της διατομής, του κυρίως καναλιού και της δεξιά όχθης αντίστοιχα
- K_t = ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς της διατομής και
- K_{lob} , K_{ch} , K_{rob} = ο συντελεστής μεταφοράς της αριστερής όχθης της διατομής, του κυρίως καναλιού και της δεξιά όχθης αντίστοιχα.

2.2.2 Υπολογισμός της ελεύθερης επιφάνειας για 1D Μη Μόνιμη Ροή

Οι φυσικοί νόμοι που διέπουν τη ροή μέσα σε ένα ρέμα είναι η αρχή διατήρησης της μάζας και η αρχή διατήρησης της ορμής. Αυτές οι αρχές εκφράζονται μαθηματικά με τη μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων, συνέχειας και ποσότητας κίνησης.

Η αρχή διατήρησης μάζας για ένα όγκο ελέγχου δηλώνει ότι ο καθαρός ρυθμός ροής στον όγκο είναι ίσος με το ρυθμό μεταβολής της αποθήκευσης στον όγκο αυτόν. Η τελική μορφή της εξίσωσης συνέχειας (continuity equation) είναι:

$$\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial x} - qL = 0 \quad (2.2-9)$$

Όπου:

- A = η συνολική πλημμυρική επιφάνεια (m^2)
- Q = η συνολική ροή συναρτήσει απόστασης x και χρόνου t (m^3/s) και
- qL = η πλευρική εισροή ανά μονάδα μήκους (m^2/s).

Η αρχή διατήρησης ορμής για έναν όγκο ελέγχου εκφράζεται από το 2^ο νόμο του Newton και δηλώνει ότι ο καθαρός ρυθμός ορμής που εισέρχεται στον όγκο συν το άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν στον όγκο ισούνται με το ρυθμό συσσώρευσης της ορμής. Η τελική μορφή της εξίσωσης ποσότητας κίνησης (momentum equation) είναι:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + Sf \right) = 0 \quad (2.2-10)$$

Όπου:

- Q = η συνολική ροή συναρτήσει απόστασης x και χρόνου t (m^3/s)
- V = ο όγκος ελέγχου (m^3)
- g = η επιτάχυνση της βαρύτητας (m^2/s)
- A = η συνολική πλημμυρική επιφάνεια (m^2)
- $\partial z/\partial x$ = η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και
- Sf = ο ρυθμός απωλειών τριβής (USACE, 2016c).

2.3 Προσομοίωση τεχνικού έργου με γέφυρες

2.3.1 Γενικά

Για την προσομοίωση των τεχνικών έργων που χωροθετούνται στη περιοχή μελέτης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσθέσει γέφυρες, οχετούς ή καλύμματα (Bridge, Culvert, Lid), ώστε το μοντέλο HEC-RAS 1D/2D να υπολογίσει τις απώλειες ενέργειας που προκαλούνται από αυτά.

Η γεωμετρία μιας γέφυρας περιλαμβάνει το κατάστρωμά, τα ακρόβάθρα και τυχόν υποστυλώματα ή μεσόβαθρα που υπάρχουν. Οι απώλειες ενέργειας υπολογίζονται σε 3 θέσεις μιας γέφυρας:

- Στη θέση διαστολής της ροής - αμέσως κατάντη.
- στη γέφυρα και
- στη θέση στένωση της ροής λόγω του ανοίγματος της γέφυρας –αμέσως ανάντη.

2.3.2 Συντελεστές συστολής και διαστολής

Γενικά, οι απώλειες κατηγοριοποιούνται σε απώλειες συστολής και διαστολής (Contraction and Expansion Losses), οι οποίες περιγράφονται ως η απόλυτη τιμή της μεταβολής του ύψους της κινητικής ενέργειας μεταξύ παρακείμενων διατομών. Εάν το ύψος της κινητικής ενέργειας αυξάνεται προς την κατάντη κατεύθυνση, χρησιμοποιείται ο συντελεστής συστολής, ενώ όταν μειώνεται προς την κατάντη κατεύθυνση χρησιμοποιείται ο συντελεστής διαστολής.

Οι συνιστώμενες τιμές για τους συντελεστές διαστολής και συστολής στην περίπτωση υποκρίσιμης ροής δίνονται στον Πίνακα 2.3-1. Όπως υποδεικνύεται από τις τιμές του Πίνακα 2.3-1, η διαστολή της ροής προκαλεί μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας από τη συστολή της. Επίσης, οι απώλειες ενέργειας αυξάνονται όταν η συστολή και η διαστολή είναι απότομες. Για οχετούς με απότομες μεταπτώσεις ροής, οι συντελεστές απωλειών συστολής και διαστολής θα πρέπει να αυξηθούν για να ληφθούν υπόψη οι πρόσθετες απώλειες ενέργειας.

Πίνακας 2.3-1. Συντελεστές τοπικών απωλειών (Πηγή: HEC-RAS, 2015)

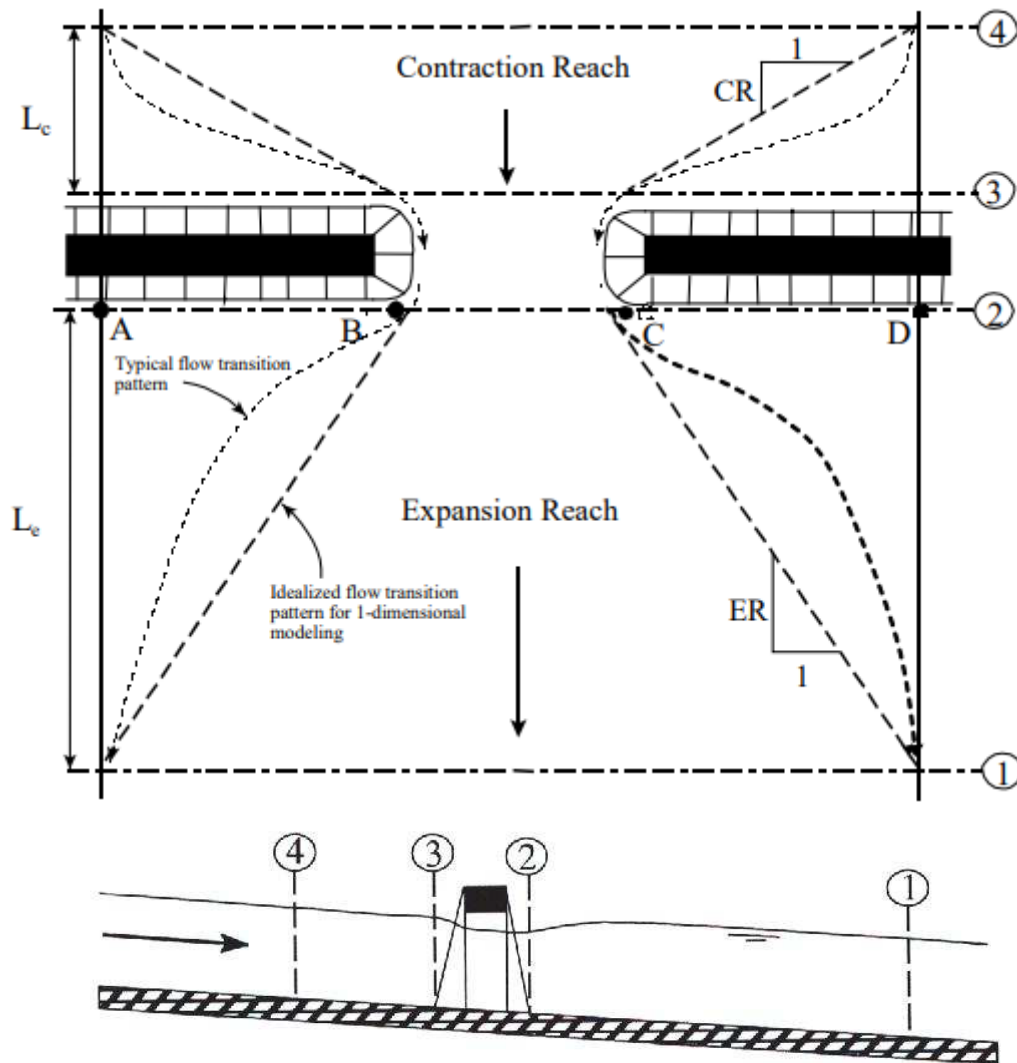
	Συστολή	Διαστολή
Μηδενικές τοπικές απώλειες	0	0
Σταδιακή μετάβαση	0.1	0.3
Τυπική διατομή γέφυρας	0.3	0.5
Απότομες μεταβάσεις	0.6	0.8

Η μέγιστη τιμή για τον συντελεστή συστολής και διαστολής είναι ένα (1.0).

Γενικά, οι συντελεστές συστολής και διαστολής πρέπει να είναι **χαμηλότεροι σε υπερκρίσιμη ροή**. Στην υπερκρίσιμη ροή τα ύψη κινητικής ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερα οπότε μικρές αλλαγές στο βάθος μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες αλλαγές στην ανάντη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας. Σε περιοχές όπου η ροή συστέλλεται και διαστέλλεται, ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει προσεκτικά τους συντελεστές συστολής και διαστολής. **Οι τυπικές τιμές για σταδιακές μεταβάσεις στην υπερκρίσιμη ροή θα είναι περίπου 0.01 για τον συντελεστή συστολής και 0.03 για τον συντελεστή διαστολής.** Καθώς οι φυσικές μεταβάσεις αρχίζουν να γίνονται πιο απότομες, μπορεί να χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες τιμές, όπως 0.05 για τον συντελεστή συστολής και 0.2 για τον συντελεστή διαστολής. Εάν δεν υπάρχει συστολή ή διαστολή, ο χρήστης μπορεί να μηδενίσει τους συντελεστές.

2.3.3 Χαρακτηριστικές διατομές

Τα βασικά σημεία διατομών (Cross sections) φαίνονται στην Εικόνα 2.3-1.



Εικόνα 2.3-1: Τοποθεσίες διατομών σε μία γέφυρα (Πηγή: HEC-RAS, 2016)

Συγκεκριμένα:

- **Διατομή 1**

Η διατομή 1 θα πρέπει να βρίσκεται σε θέση όπου ολόκληρη η επιφάνειά της συμβάλει στη μεταφορά του νερού, και δεν επηρεάζεται πλέον από τη στένωση που προκαλείται από τον οχετό. Τοποθετείται συνήθως σε απόσταση περίπου ίση με 4 φορές το μήκος των ακροβάθρων της γέφυρας, δηλ. 4 AB ή 4 CD.

- **Διατομή 2**

Η διατομή 2 βρίσκεται σε μικρή απόσταση κατάντη από την έξοδο του τεχνικού έργου. Αυτή η απόσταση πρέπει να αντιπροσωπεύει τη μικρή απόσταση που απαιτείται για την απότομη απομάκρυνση της ροής από το τεχνικό έργο. Η διατομή 2 αντιπροσωπεύει το φυσικό σχήμα του καναλιού ακριβώς κατάντη της γέφυρας.

Το HEC-RAS παρέχει την δυνατότητα καθορισμού “ineffective flow area”, μιας περιοχής της διατομής από την οποία το νερό δεν παροχετεύεται. Ο καθορισμός τέτοιων περιοχών χρησιμοποιείται για τον περιορισμό της πραγματικής επιφάνειας της ροής της διατομής 2, στην περιοχή κοντά στις άκρες των

οχετών. Με αυτόν τον τρόπο, παροχετεύεται η σωστή ποσότητα νερού ακριβώς κατάντη του οχετού. Επειδή η ροή θα αρχίσει να διαστέλλεται καθώς εξέρχεται από το τεχνικό έργο, το πλάτος «ενεργού» επιφάνειας στη διατομή 2 είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του ανοίγματος της γέφυρας. Το πλάτος της ενεργού περιοχής ροής θα εξαρτηθεί από το πόσο μακριά είναι η κατάντη διατομή 2 από την έξοδο του τεχνικού έργου. Σε γενικές γραμμές, μια λογική υπόθεση θα ήταν να υποθέσουμε έναν ρυθμό διαστολής 1.5:1 σε αυτή τη μικρή απόσταση. Με αυτή την υπόθεση, εάν η διατομή 2 απέχει 6 μέτρα από την έξοδο της γέφυρας, τότε η περιοχή ενεργού ροής στη διατομή 2 θα πρέπει να είναι 8 μέτρα μεγαλύτερη από το άνοιγμα του τεχνικού έργου (4 μέτρα σε κάθε πλευρά).

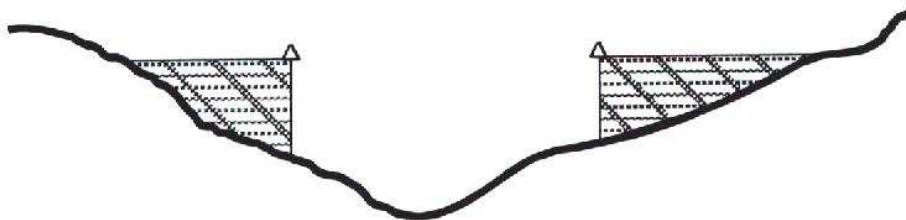
Οι διατομές 1 και 2 είναι τοποθετημένες έτσι ώστε να δημιουργείται μια περιοχή καναλιού κατάντη του τεχνικού έργου μέσα στο οποίο το πρόγραμμα HEC-RAS μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια τις απώλειες τριβής και τις απώλειες συστολής - διαστολής κατάντη του οχετού.

- **Διατομή 3**

Η διατομή 3 θα πρέπει να απέχει αρκετά από την είσοδο της γέφυρας, έτσι ώστε να ικανοποιείται η απόσταση που απαιτείται για την απότομη είσοδο της ροής στο τεχνικό έργο, αλλά και να πραγματοποιηθούν οι απώλειες εισόδου. Η επιλογή “ineffective flow area” μπορεί να χρησιμοποιείται και στη διατομή 3. Το πλάτος της ενεργού περιοχής ροής θα εξαρτηθεί από το πόσο μακριά έχει τοποθετηθεί η ανάντη διατομή του τεχνικού έργου. Σε γενικές γραμμές, μια λογική υπόθεση θα ήταν να θεωρήσουμε ρυθμό συστολής 1:1 μεταξύ της διατομής 3 και της εσωτερικής ανάντη διατομής του οχετού. Με αυτή την παραδοχή, εάν η διατομή 3 απέχει 5 μέτρα από την είσοδο του οχετού, τότε η περιοχή ενεργού ροής σε αυτή θα πρέπει να είναι 10 μέτρα (5 μέτρα σε κάθε πλευρά του οχετού).

- **Διατομή 4**

Η αρχική διατομή στο μοντέλο της γέφυρας βρίσκεται σε θέση όπου η ροή δεν έχει ακόμη αρχίσει να συστέλλεται. Τοποθετείται συνήθως σε απόσταση περίπου ίση με το μήκος των ακροβάθρων της γέφυρας, δηλ. AB ή CD. Αυτή η απόσταση καθορίζεται κανονικά υποθέτοντας ρυθμό συστολής 1:1. Θεωρείται συνήθως ότι το συνολικό πλάτος της διατομής συμμετέχει αποτελεσματικά στη μεταφορά της ροής και δεν απαιτείται καθορισμός “ineffective flow area”.



Εικόνα 2.4-2. Μη ενεργές περιοχές ροής εκατέρωθεν του ανοίγματος της γέφυρας
(Πηγή: HEC-RAS, 2016)

Επίσης, κατά τη διάρκεια των υπολογισμών το πρόγραμμα συνθέτει 2 ακόμα διατομές μέσα στη διατομή της γέφυρας με χαρακτηριστικά που συνδυάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γέφυρας και των διατομών 2 και 3.

2.3.4 Υπολογισμοί χαμηλής παροχής (Low flow computations)

Η ροή θεωρείται χαμηλής παροχής όταν περνά κάτω από τη γέφυρα με ελεύθερη επιφάνεια. Αρχικά το HEC-RAS επιλύει την εξίσωση ποσότητας κίνησης για να αναγνωρίσει την κλάση της ροής. Πιο αναλυτικά, αρχικά υπολογίζεται η ορμή για το κρίσιμο βάθος στην είσοδο και την έξοδο της γέφυρας. Η διατομή με την μεγαλύτερη ορμή είναι αυτή που ελέγχει την ροή. Η ορμή αυτή έπειτα συγκρίνεται με την ορμή κατάντη της γέφυρας (αν η ροή είναι υποκρίσιμη) ή ανάντη της γέφυρας (αν η ροή είναι υπερκρίσιμη).

Αν η ορμή κατάντη είναι μεγαλύτερη από αυτή στο κρίσιμο βάθος τότε η ροή είναι υποκρίσιμη παντού (Κλάση Α).

Αν η ορμή κατάντη είναι μεγαλύτερη από αυτή στο κρίσιμο βάθος τότε η ροή θα περάσει από το κρίσιμο βάθος και θα αναπτυχθεί υδραυλικό άλμα κατάντη (Κλάση Β).

Αν η ροή είναι υπερκρίσιμη καθ' όλο το μήκος της γέφυρας τότε η ροή θεωρείται Κλάση Γ.

Κλάση Α

Για τον υπολογισμό της επιφάνειας όταν η ροή είναι κλάσης Α, το HEC-RAS διαθέτει τέσσερις μεθόδους υπολογισμού:

2.3.4.1 Τυπική μέθοδος βήμα προς βήμα (Standard step method)

Η πρώτη από τις μεθόδους, είναι η μέθοδος διατήρησης της ενέργειας που αντιμετωπίζει την περίπτωση της γέφυρας με τον ίδιο τρόπο που αντιμετωπίζει τα φυσικά υδατορέματα, εκτός από το τμήμα κάτω από τη γέφυρα όπου η βρεχόμενη περιμέτρος αυξάνεται κατά την επαφή του νερού με το σώμα της γέφυρας. Όπως έχει αναφερθεί, το πρόγραμμα δημιουργεί αυτόματα δύο διατομές συνδυάζοντας τις διατομές 2 και 3 και τη γεωμετρία της γέφυρας. Αυτές οι δύο διατομές μπορούν να φανούν στην Εικόνα 2.4-2 ως BD (Bridge Down) και BU (Bridge Up). Η διαδικασία του υπολογισμού αρχίζει με την εφαρμογή της μεθόδου για το τμήμα από τη διατομή 2 έως τη διατομή BD. Στη συνέχεια ακολουθεί το τμήμα από τη διατομή BD έως τη BU. Ο τελευταίος υπολογισμός γίνεται στο τμήμα από τη διατομή BU έως τη διατομή 3 ανάντη της γέφυρας. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται ο καθορισμός του συντελεστή τραχύτητας Manning για τον υπολογισμό των απωλειών τριβής καθώς και οι συντελεστές στένωσης και διεύρυνσης για τον προσδιορισμό των απωλειών λόγω των αντίστοιχων καταστάσεων.

2.3.4.2 Εξίσωση ποσότητας κίνησης - Μέθοδος διατήρησης της ορμής

Η μέθοδος διατήρησης της ορμής στηρίζεται στην αρχή διατήρησης της ορμής μεταξύ των διατομών 2 και 3 (Εικόνα 2.3-1). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε τρία βήματα.

Βήμα 1. Εφαρμόζεται η αρχή διατήρησης της ορμής μεταξύ των διατομών 2 και BD. Η εξίσωση που εφαρμόζεται είναι η ακόλουθη:

$$A_{BD} \cdot \bar{Y}_{BD} + \frac{\beta_{BD} \cdot Q_{BD}^2}{g \cdot A_{BD}} = A_2 \cdot \bar{Y}_2 + \frac{\beta_2 \cdot Q_2^2}{g \cdot A_2} - A_{pBD} \cdot \bar{Y}_{pBD} + F_f - W_x \quad (2.3-1)$$

Όπου:

- A_2, A_{BD} : η ενεργή περιοχή της ροής στις διατομές 2 και BD αντίστοιχα (m^2)
- A_{pBD} : η περιοχή που καταλαμβάνουν τα μεσόβαθρα κατάντη (m^2)
- \bar{Y}_2, \bar{Y}_{BD} : η κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια του νερού στο κέντρο βάρους των τμημάτων ροής A2 και ABD αντίστοιχα (m)
- \bar{Y}_{pBD} : η κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια του νερού στο κέντρο βάρους της βρεχόμενης περιμέτρου των μεσόβαθρων στο κατάντη τμήμα της γέφυρας
- β_2, β_{BD} : οι συντελεστές βάρους της ταχύτητας για την εξίσωση της ορμής
- Q_2, Q_{BD} : οι παροχές στα αντίστοιχα τμήματα
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m^2/s)

- F_f : η εξωτερική δύναμη λόγω της τριβής, ανά μονάδα βάρους του νερού και
- $W_x = \left(\frac{Ad+Au}{2}\right) LSO$

η δύναμη λόγω του βάρους του νερού στην κατεύθυνση της ροής ανά μονάδα βάρους του νερού.

Βήμα 2. Εφαρμόζεται η αρχή διατήρησης της ορμής μεταξύ των διατομών BD και BU. Η εξίσωση που εφαρμόζεται στην περίπτωση αυτή κατά αντιστοιχία με αυτή του πρώτου βήματος είναι:

$$A_{BU} \cdot \overline{Y_{BU}} + \frac{\beta_{BU} \cdot Q_{BU}^2}{g \cdot A_{BU}} = A_{BD} \cdot \overline{Y_{BD}} + \frac{\beta_{BD} \cdot Q_{BD}^2}{g \cdot A_{BD}} + F_f - W_x \quad (2.3-2)$$

Βήμα 3. Στο τελευταίο βήμα εφαρμόζεται η διατήρηση της ορμής ανάμεσα στη διατομή BU και στη διατομή 3. Η εξίσωση για το βήμα αυτό γράφεται ως εξής:

$$A_3 \cdot \overline{Y_3} + \frac{\beta_3 \cdot Q_3^2}{g \cdot A_3} = A_{BU} \cdot \overline{Y_{BU}} + \frac{\beta_{BU} \cdot Q_{BU}^2}{g \cdot A_{BU}} + A_{p_{BU}} \cdot \overline{Y_{p_{BU}}} + \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \frac{A_{p_{BU}} \cdot Q_3^2}{g \cdot A_3^2} + F_f - W_x \quad (2.3-3)$$

Όπου:

C_D : ο συντελεστής αντίστασης της ροής, εξαρτώμενος από το σχήμα των μεσόβαθρων.

2.3.4.3 Εξίσωση Yarnell

Η εξίσωση Yarnell είναι μια εμπειρική εξίσωση που έχει προκύψει από 2600 εργαστηριακά πειράματα στα οποία οι ερευνητές άλλαζαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γέφυρας (σχήμα και πλάτος βάθρων, παροχή).

$$H_{3-2} = 2K(K + 10\omega - 0.6)(\alpha + 15\alpha^4) \left(\frac{V^2}{2g}\right) \quad (2.3-4)$$

Όπου:

- H_{3-2} = η πτώση της ελεύθερης επιφάνειας από την διατομή 3 στην διατομή 2
- K = ο συντελεστής σχήματος Yarnell (Yarnell, 1934)
- ω = το πηλίκο της κινητικής ενέργειας προς το βάθος ροής στην διατομή 2
- α = το πηλίκο της εμποδιζόμενης από τα βάθρα επιφάνειας της ροής προς την συνολική μη ανεμπόδιστη επιφάνεια στην διατομή 2 και
- V = η ταχύτητα στην διατομή 2.

2.3.4.4 Μέθοδος FHWA WSPRO

Η μέθοδος FHWA WSPRO αναπτύχθηκε από την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Οδοποιίας (Federal Highway Administration, FHWA) και το υπολογιστικό πρόγραμμα που ανέπτυξε, το οποίο λύνει την εξίσωση ενέργειας σταδιακά: από την διατομή 1 στην διατομή 2, έπειτα από την διατομή 2 στην BD, από την BD στην BU, από την BU στην διατομή 3 και τέλος από την διατομή 3 στην διατομή 4.

Η γενική εξίσωση ενέργειας από την διατομή 1 στην διατομή 4 περιγράφεται ως εξής:

$$h_4 + a_4 \frac{V_4^2}{2g} = h_1 + a_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_f + h_e \quad (2.3-5)$$

Όπου:

- h_1, h_4 = το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας στην διατομή 1 και 4 αντίστοιχα
- V_1, V_4 = η ταχύτητα στην διατομή 1 και 4 αντίστοιχα
- h_f = απώλειες ενέργειας λόγω τριβής
- h_e = τοπικές απώλειες ενέργειας λόγω αλλαγής γεωμετρίας

$$\bullet \quad h_{f1-2} = \frac{BQ^2}{K_2K_1} \quad (2.3-6)$$

και

$$\bullet \quad h_e = \frac{Q^2}{2gA_1^2} [2\beta_1 - \alpha_1 - 2\beta_2 \left(\frac{A_1}{A_2}\right) + \alpha \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2] \quad (2.3-7)$$

Όπου:

$$\bullet \quad \alpha_1 = \frac{\sum \left(\frac{K_i^3}{A_i^2}\right)}{K_T^3/A_T^2} \quad (2.3-8)$$

$$\bullet \quad \beta_1 = \frac{\sum \left(\frac{K_i^2}{A_i}\right)}{K_T^2/A_T} \quad (2.3-9)$$

$$\bullet \quad \alpha_2 = \frac{1}{C^2} \quad (2.3-10)$$

$$\bullet \quad \beta_2 = \frac{1}{C} \quad (2.3-11)$$

$$\bullet \quad h_{f(BU-DU)} = \frac{L_B Q^2}{K_{BU} K_{BD}} \quad (2.3-12)$$

και

$$\bullet \quad h_{f(3-4)} = \frac{L_{av} Q^2}{K_3 K_4} \quad (2.3-13)$$

Κλάση Β

Σε υποκρίσιμη αλλά και υπερκρίσιμη ροή η επιφάνεια στις διατομές 3 και 2 υπολογίζονται με την εξίσωση της ποσότητας κίνησης. Στην διατομή 3 το βάθος του νερού υπολογίζεται μεγαλύτερο από το κρίσιμο και στην διατομή 2 μικρότερο από το κρίσιμο.

Σε περίπτωση αδυναμίας του HEC-RAS να συγκλίνει σε λύση μέσω της εξίσωσης ποσότητας κίνησης, επιλέγει αυτόματα την εξίσωση ενέργειας.

Το HEC-RAS ακολουθεί υπολογισμούς από κατάντη προς ανάντη, ανάντη της γέφυρας και από ανάντη προς κατάντη, κατάντη της γέφυρας.

Κλάση Γ

Αν η ροή είναι κλάσης Γ (υπερκρίσιμη καθ' όλο το μήκος της γέφυρας) το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε εξίσωση ενέργειας είτε εξίσωση ποσότητας κίνησης για τον υπολογισμό της επιφάνειας.

2.3.5 Υπολογισμοί υψηλής παροχής (High flow computations)

Η ροή θεωρείται υψηλής παροχής όταν έρχεται σε επαφή με το άνω τμήμα του καταστρώματος της γέφυρας. Το HEC-RAS μπορεί να επιλύσει ροή υψηλής παροχής είτε με εξίσωση ενέργειας είτε υπολογίζοντας ξεχωριστά την ροή υπό πίεση και την ροή υπερχείλισης (αυτήν που περνά πάνω από το κατάστρωμα της γέφυρας).

2.3.5.1 Τυπική μέθοδος βήμα προς βήμα (Standard step method)

Ο πρώτος τρόπος υπολογισμού υψηλών παροχών είναι με την αρχή διατήρησης της ενέργειας (standard step method), με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόζεται και στις χαμηλές παροχές που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 2.3.4.1.

2.3.5.2 Ροή υπό πίεση

Η ροή υπό πίεση πραγματοποιείται όταν η ροή έρχεται σε επαφή με το κάτω μέρος του καταστρώματος της γέφυρας και δημιουργείται ανάσχεση της ροής.

Το παραπάνω φαινόμενο υπολογίζεται καταλλήλως από το HEC-RAS, βάση δυο περιπτώσεων:

- Βυθισμένη είσοδος, ελεύθερη ροή κάτω από την έξοδο της γέφυρας
- Βυθισμένη είσοδος και έξοδος της γέφυρας

Στην πρώτη περίπτωση η εξίσωση που εφαρμόζεται είναι η εξής:

$$Q = C_d A_{BU} \sqrt{2g} \left[Y_3 - \frac{Z}{2} + \frac{a_3 V_3^2}{2g} \right]^{1/2} \quad (\text{FHWA, 1978}) \quad (2.3-14)$$

Όπου:

- Q = η συνολική παροχή στο άνοιγμα της γέφυρας
- C_d = συντελεστής παροχής για ροή υπό πίεση
- A_{BU} = η καθαρή επιφάνεια του ανοίγματος της γέφυρας στην διατομή BU
- Y_3 = το υδραυλικό βάθος στην διατομή 3 και
- Z = η κατακόρυφη απόσταση από το κάτω μέρος (στο ψηλότερο σημείο) του καταστρώματος της γέφυρας ως το μέσο υψόμετρο του πυθμένα.

Στην δεύτερη περίπτωση η εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι η εξής:

$$Q = CA \sqrt{2gH} \quad (2.3-15)$$

Όπου:

- C = ο συντελεστής για ροή υπό πίεση στο άνοιγμα της γέφυρας με τιμές από 0.7 ως 0.9
- A = η καθαρή επιφάνεια του ανοίγματος της γέφυρας και
- H = η υψομετρική διαφορά από την γραμμή ενέργειας ανάντη της γέφυρας και την ελεύθερη επιφάνεια κατόντη της γέφυρας.

2.3.5.3 Ροή υπερχείλισης

Στην περίπτωση που η ροή περνά πάνω από την γέφυρα, τότε το HEC-RAS χρησιμοποιεί για τους υπολογισμούς της ροής την εξίσωση υπερχείλιση:

$$Q = CLH^{2/3} \quad (2.3-16)$$

Όπου:

- C = ο συντελεστής της παροχής για ροή πάνω από υπερχείλιση
- Q = η παροχή που περνά πάνω από την γέφυρα
- L = το ενεργό μήκος του υπερχείλιση και
- H = η υψομετρική διαφορά μεταξύ της γραμμής ενέργειας και της στέψης του καταστρώματος στα ανάντη της γέφυρας.

2.4 Προσομοίωση τεχνικού έργου με οχετούς

2.4.1 Γενικά

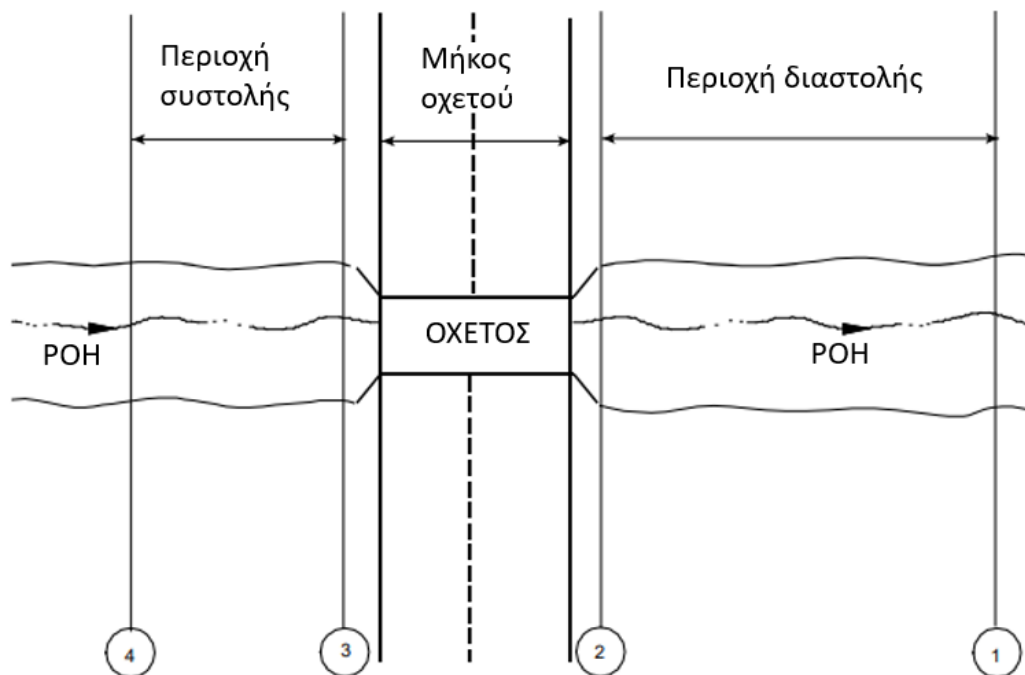
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος προσομοίωσης των οχετών στο HEC-RAS.

Το HEC-RAS υπολογίζει τις απώλειες ενέργειας, που προκαλούνται από κατασκευές όπως οχετοί, σε τρία μέρη:

- Το πρώτο μέρος αποτελείται από απώλειες που λαμβάνουν χώρα στο τμήμα αμέσως μετά την κατασκευή όπου η ροή διαστέλλεται.
- Το δεύτερο μέρος αποτελείται από απώλειες που λαμβάνουν χώρα καθώς η ροή οδεύει προς, μέσα και έξω από τον οχετό.
- Το τελευταίο τμήμα αποτελείται από απώλειες που λαμβάνουν χώρα στο τμήμα αμέσως ανάντη της κατασκευής όπου η ροή συστέλλεται προς το άνοιγμα του οχετού.

Το HEC-RAS έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει μεμονωμένους οχετούς, πολλαπλούς πανομοιότυπους οχετούς και πολλαπλούς μη πανομοιότυπους οχετούς.

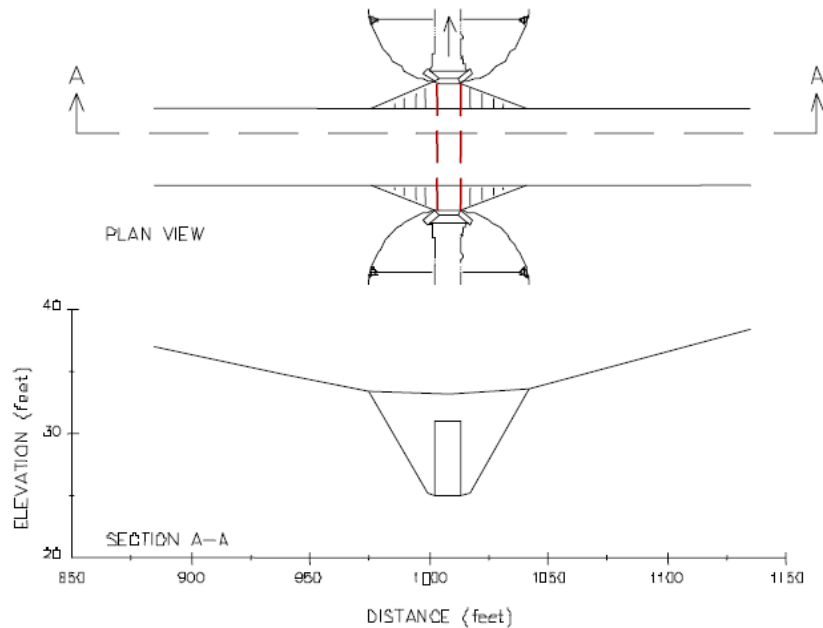
Παρακάτω αναλύεται πώς εκτελούνται οι υδραυλικοί υπολογισμοί μέσω του οχετού, ποια δεδομένα απαιτούνται και πώς επιλέγονται οι διάφοροι συντελεστές.



Εικόνα 2.5-1. Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών διατομών του οχετού
(Πηγή: HEC-RAS, 2016)

2.4.2 Γενικές αρχές προσομοίωσης

Οι οχετοί δύναται να αντιστοιχηθούν με τις γέφυρες. Οι τοίχοι και η οροφή του οχετού αντιστοιχούν στα ακρόβαθρα και στην κάτω παρειά του καταστρώματος μιας γέφυρας. Για τον λόγο αυτό, οι οχετοί προσομοιώνονται με παρόμοιο τρόπο με τις γέφυρες.



Εικόνα 2.4-2. Κάτοψη και τυπική διατομή οχετού (Πηγή: HEC-RAS, 2016)

Η διάταξη των διατομών, η χρήση των μη αποτελεσματικών περιοχών, η επιλογή των συντελεστών απωλειών και οι περισσότερες άλλες πτυχές της ανάλυσης της γέφυρας ισχύουν και για τους οχετούς.

2.4.3 Συντελεστές διαστολής και συστολής

Οι συντελεστές συστολής και διαστολής στους οχετούς καθορίζονται όπως στις γέφυρες, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.3.2.

2.4.4 Χαρακτηριστικές διατομές

Οι χαρακτηριστικές διατομές των οχετών τοποθετούνται καθ' ομοιότητα με αυτές των γεφυρών, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.3.3.

2.4.5 Ορολογία οχετών

Ως οχετός ορίζεται ένας κλειστός αγωγός που συνδέει δύο τμήματα ανοιχτών αγωγών. Οι οχετοί αποτελούνται από τρία τμήματα:

- την είσοδο,
- ένα βαρέλι, το οποίο είναι το τμήμα κλειστού αγωγού του οχετού, και
- την έξοδο, όπου το νερό ρέει έξω από τον οχετό.

Η συνολική παροχетеυτική ικανότητα ενός οχετού εξαρτάται από τα παραπάνω χαρακτηριστικά.

Για τη μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς του οχετού χρησιμοποιούνται τα παρακάτω μεγέθη:

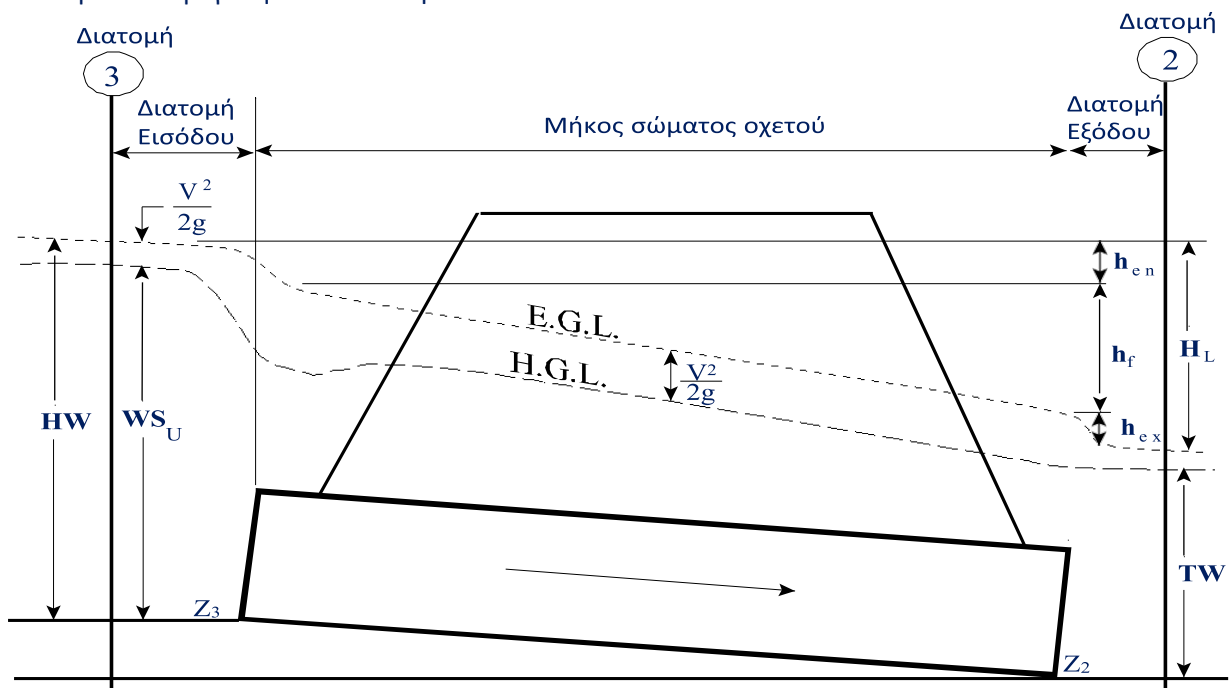
- Κατάντη στάθμη νερού (Tailwater, TW): Είναι το βάθος νερού στην έξοδο. Η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας στην έξοδο του αγωγού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κατάντη καναλιού για δεδομένη παροχή και υπολογίζεται με βάση τους παραδοσιακούς υπολογισμούς ροής με ελεύθερη επιφάνεια. Μια πρώτη προσέγγιση υπολογισμού για την κατάντη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας είναι να τεθεί το βάθος ροής ίσο με το ομοιόμορφο. Υψηλή στάθμη επιφάνειας νερού στα κατάντη μπορεί να προκληθεί από εμπόδιο στο κατάντη τμήμα του

καναλιού, όπως άλλη γέφυρα ή οχετός, συμβολή με άλλο κανάλι, ύπαρξη δεξαμενής ή φράγματος, κ.λπ. Σε τέτοιες περιπτώσεις, απαιτούνται υδραυλικοί υπολογισμοί από κατάντη προς ανάντη για τον ακριβή υπολογισμό της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας στην έξοδο του αγωγού.

- Ανάντη στάθμη νερού (Headwater, HW). Είναι το βάθος νερού μετρημένο από το υψόμετρο του πυθμένα στην είσοδο του οχετού έως τη γραμμή ενέργειας και αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για να περάσει δεδομένη παροχή διαμέσου του οχετού.
- Η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού ανάντη του οχετού (Water Surface Upstream, WSU), είναι το βάθος του νερού όπως μετράται από το υψόμετρο του πυθμένα της διατομής.

Η συνολική ενέργεια σε οποιαδήποτε θέση είναι ίση με το υψόμετρο του πυθμένα συν το βάθος νερού συν το ύψος της κινητικής ενέργειας σε αυτή τη θέση. Όλοι οι υπολογισμοί του οχετού εντός του HEC-RAS υπολογίζουν τη συνολική ενέργεια στην είσοδο του οχετού. Η ανάντη επιφάνεια νερού (WSU) λαμβάνεται στη συνέχεια τοποθετώντας αυτήν την ενέργεια στην ανάντη διατομή και υπολογίζοντας την επιφάνεια του νερού που αντιστοιχεί σε αυτήν την ενέργεια για τη δεδομένη παροχή.

Τα παραπάνω μεγέθη δίνονται στην Εικόνα 2.4-3.



Εικόνα 2.4-3. Συνολική ενέργεια, βάθη ροής και απώλειες ενέργειας σε οχετό πλήρως γεμάτο (Πηγή: HEC-RAS, 2016)

2.4.6 Καμπύλη απόδοσης (Performance curve ή HTab curve)

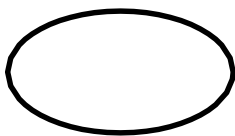

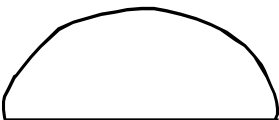

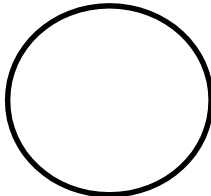

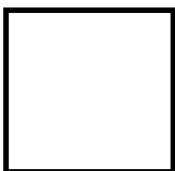

Η καμπύλη απόδοσης είναι μια γραφική παράσταση του βάθους ή της ανύψωσης του νερού συναρτήσει της παροχής. Η προκύπτουσα γραφική απεικόνιση της λειτουργίας του οχετού είναι χρήσιμη για την αξιολόγηση της παροχетеυτικής ικανότητας ενός οχετού για διάφορες τιμές της ενέργειας στην ανάντη διατομή. Κατά την ανάπτυξη μιας καμπύλης απόδοσης οχετών, πρέπει να σχεδιαστούν τόσο οι καμπύλες ροής εισόδου όσο και εξόδου. Αυτό είναι απαραίτητο επειδή είναι δύσκολο να προβλεφθεί εάν πρόκειται για ροή εισόδου ή εξόδου (Ενότητα 2.4.8). Επίσης, ανάλογα με το μέγεθος της παροχής είναι δυνατό να εναλλάσσονται συνθήκες ροής εισόδου ή εξόδου στον οχετό.

2.4.7 Τυπικές διατομές οχετών

Το HEC-RAS έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει δέκα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σχήματα οχετών. Οι τυπικές διατομές των οχετών δίνονται στον Πίνακα 2.4-1.

Πίνακας 2.4-1. Τυπικές διατομές οχετών.

(Πηγή: HEC-RAS, 2015 & Hydraulic Design of Highway Culvert, 3rd Edition, 2012)

Είδος οχετού	Σχήμα διατομής	Εικόνα
Ελλειψοειδής (Elliptical)		
Καμάρα (Arch)		
Κυκλικός (Cyclical)		
Ορθογωνικός (Box)		

2.4.8 Υδραυλικοί υπολογισμοί με το HEC-RAS

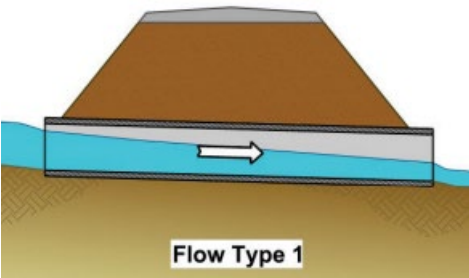
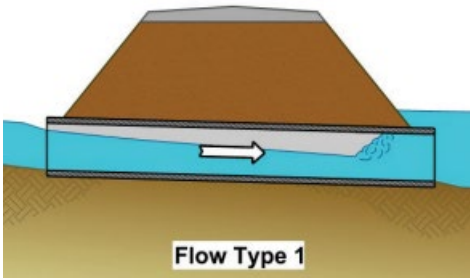
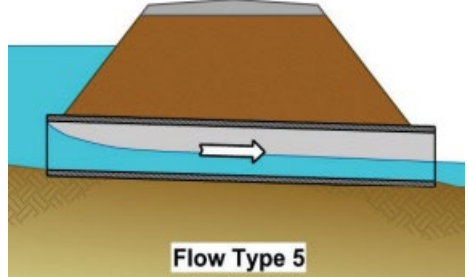
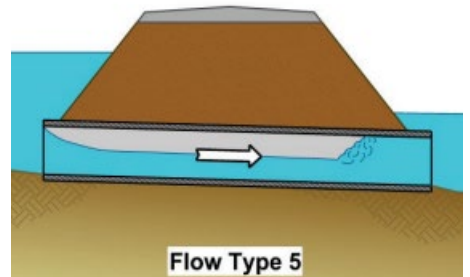
Η υδραυλική ανάλυση οχετών στο HEC-RAS χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

1. Ροή εισόδου (inlet control). Η ροή εισόδου πραγματοποιείται όταν το βαρέλι του οχετού είναι ικανό να μεταφέρει μεγαλύτερη παροχή από αυτή που δέχεται η είσοδος. Το τμήμα ελέγχου ενός οχετού που λειτουργεί υπό ροή εισόδου βρίσκεται ακριβώς στην είσοδο. Το κρίσιμο βάθος εμφανίζεται σε ή κοντά σε αυτήν την τοποθεσία και η ροή αμέσως κατάντη είναι υπερκρίσιμη. Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά κατάντη του τμήματος ροής εισόδου δεν επηρεάζουν τη χωρητικότητα του οχετού. Το ανάντη υψόμετρο της επιφάνειας του νερού και η γεωμετρία εισόδου αντιπροσωπεύουν τους κύριους ρυθμιστές ροής.
2. Ροή εξόδου (outlet control). Η ροή εξόδου λαμβάνει χώρα όταν η χωρητικότητα ροής του οχετού περιορίζεται από τις κατάντη συνθήκες (υψηλή κατάντη στάθμη επιφάνειας νερού) ή από την χωρητικότητα του οχετού. Για ροή εξόδου, η απαιτούμενη ενέργεια ανάντη υπολογίζεται εκτελώντας ένα ενεργειακό ισοζύγιο από το κατάντη τμήμα στο τμήμα ανάντη.

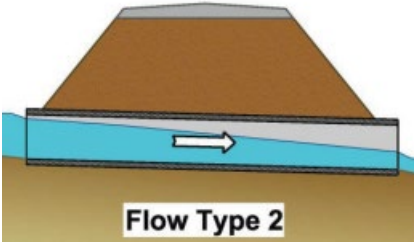
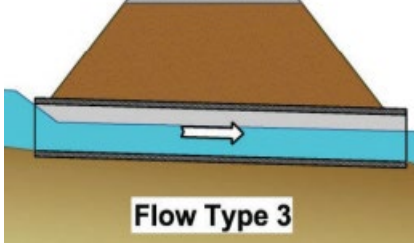
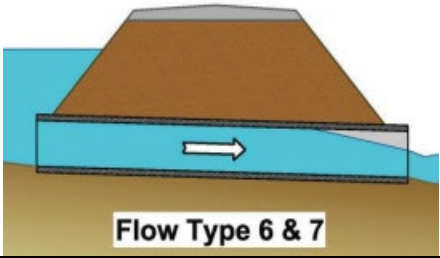
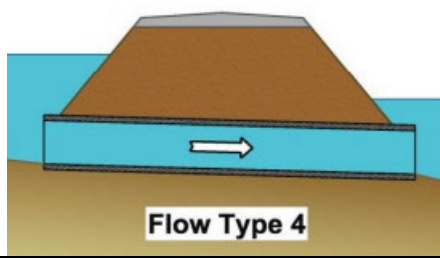
Η ροή σε οχετό κατηγοριοποιείται σε 7 τύπους σύμφωνα με την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Οδοποιίας (FHWA) και βάση της εξίσωσης ενέργειας έχουν αναπτυχθεί αντίστοιχοι τύποι επίλυσης για κάθε τύπο ροής (Bodhaine, 1978). Η επιβεβαίωση του τρόπου υπολογισμού των οχετών σε ένα μοντέλο HEC-RAS μπορεί να γίνει βάση αυτών των τύπων (Brunner, 2021).

Στους Πίνακες 2.4-2, 2.4-3 δίνονται οι τύποι ρών εισόδου και εξόδου ανάλογα με το αν η είσοδος είναι βυθισμένη ή όχι, ο αντίστοιχος τύπος υπολογισμού (Bodhaine, 1978) και η συνοπτική περιγραφή τους.

Πίνακας 2.4-3. Τύποι ροής ελέγχου εισόδου ανάλογα με το αν η είσοδος είναι βυθισμένη ή όχι

Μη βυθισμένη είσοδος	
<p>Η ροή περνάει από το κρίσιμο βάθος λίγο μετά την είσοδο στον οχετό και συνεχίζει υπερκρίσιμη. (Τύπος ροής 1)</p> $Q = C_D A_c \sqrt{2g \left(h_1 - z - h_c - h_{f12} + \alpha \frac{v_1^2}{2g} \right)}$	<p>Η υψηλή στάθμη νερού στην έξοδο του οχετού δεν εξασφαλίζει συνθήκες ροής εξόδου. Στην περίπτωση αυτή η ροή κατάντη της εισόδου είναι υπερκρίσιμη και εντός του οχετού συμβαίνει υδραυλικό άλμα. (Τύπος ροής 1)</p> $Q = C_D A_c \sqrt{2g \left(h_1 - z - h_c - h_{f12} + \alpha \frac{v_1^2}{2g} \right)}$
 <p style="text-align: center;">Flow Type 1</p>	 <p style="text-align: center;">Flow Type 1</p>
Βυθισμένη είσοδος	
<p>Η ροή περνάει από το κρίσιμο βάθος λίγο μετά την είσοδο στον οχετό και συνεχίζει υπερκρίσιμη. (Τύπος ροής 5)</p> $Q = C_D A_0 \sqrt{2g(h_1 - z)}$	<p>Παρά το ότι τόσο ανάντη όσο και κατάντη του οχετού η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας είναι υψηλή, δεν εξασφαλίζεται πλήρωση του αγωγού. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται υδραυλικό άλμα μέσα στον οχετό ενώ εάν δημιουργούνται φαινόμενα υποπίεσης είναι δυνατό να εναλλάσσεται ροή με ελεύθερη επιφάνεια και ροή υπό πίεση εντός του οχετού. (Τύπος ροής 5)</p> $Q = C_D A_0 \sqrt{2g(h_1 - z)}$
 <p style="text-align: center;">Flow Type 5</p>	 <p style="text-align: center;">Flow Type 5</p>

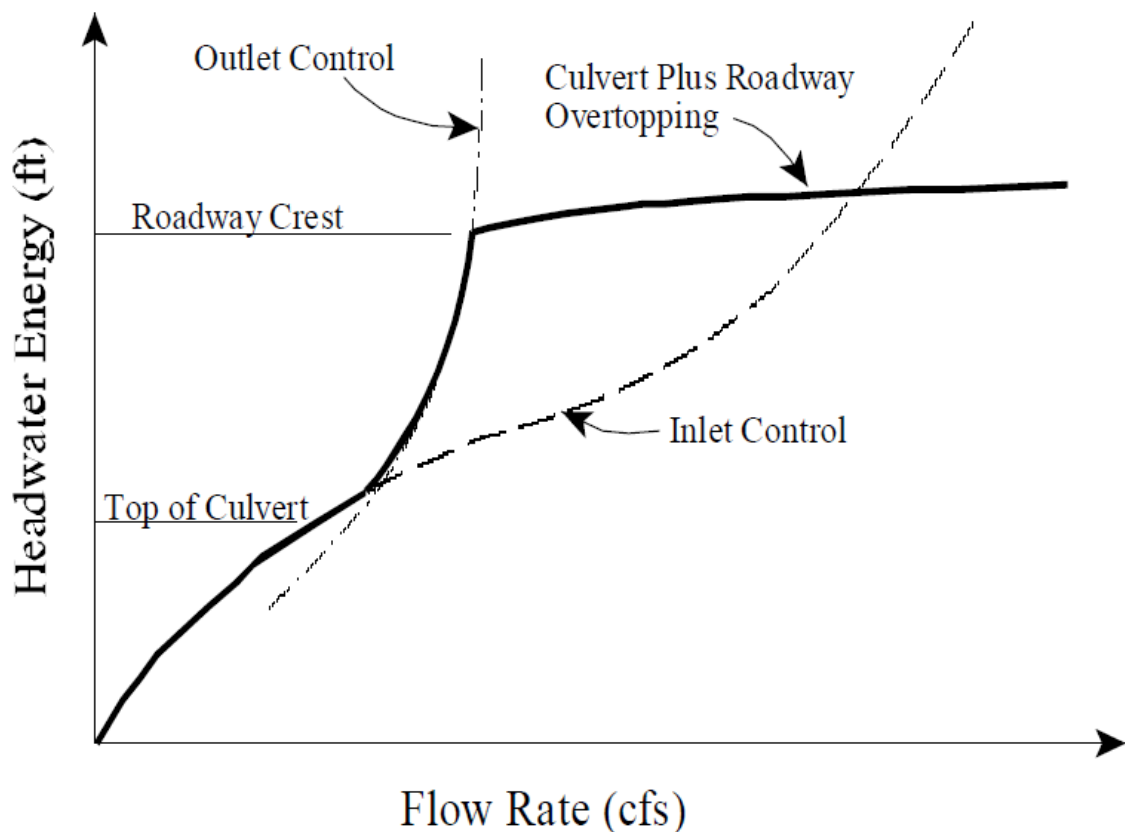
Πίνακας 2.4-3. Τύποι ροής ελέγχου εξόδου ανάλογα με το αν η είσοδος είναι βυθισμένη ή όχι

Μη βυθισμένη είσοδος	
<p>Η ροή περνά από το κρίσιμο βάθος στην έξοδο του οχετού. (Τύπος ροής 2)</p> $Q = C_D A_c \sqrt{2g * \left(h_1 - h_c - h_{f12} - h_{f23} + \alpha \frac{v_1^2}{2g} \right)}$	<p>Το βάθος αμέσως κατάντη του οχετού είναι μεγαλύτερο από το κρίσιμο. Σε περίπτωση που η επιφάνεια είναι ψηλότερα από την στέψη του οχετού στην έξοδο, η ροή στην έξοδο θα είναι πλήρης. (Τύπος ροής 3)</p> $Q = C_D A_3 \sqrt{2g \left(h_1 - d_3 - h_{f12} - h_{f23} + \alpha \frac{v_1^2}{2g} \right)}$
 <p>Flow Type 2</p>	 <p>Flow Type 3</p>
Βυθισμένη είσοδος	
<p>Η ροή είναι πλήρης καθ' όλο ή κατά το περισσότερο μήκος του οχετού ή ο οχετός δεν είναι γεμάτος με νερό και η ροή τότε είναι υποκρίσιμη. Η ροή περνά είτε από το κρίσιμο βάθος ακριβώς ανάντη της εξόδου είτε από το ομοιόμορφο. (Τύπος ροής 6 & 7)</p> $Q = C_D A_0 \sqrt{2g(h_1 - d_3 - h_{f23})}$	<p>Η ροή είναι υπό πίεση. (Τύπος ροής 4)</p> $Q = C_D A_0 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_4)}{1 + 29C_D^2 n^2 L / R^{4/3}}}$
 <p>Flow Type 6 & 7</p>	 <p>Flow Type 4</p>

2.4.8.1 Υδραυλικός έλεγχος Εισόδου

Η παροχή σε συνθήκες ροής εισόδου ορίζεται από τις τρεις περιοχές ροής: μη βυθισμένη, μεταβατική και βυθισμένη.

- Μη βυθισμένη. Η είσοδος του οχετού λειτουργεί ως υπερχειλιστής. Ο υπερχειλιστής είναι ένα μη βυθισμένο τμήμα ελέγχου ροής όπου μπορεί να προβλεφθεί η ανύψωση της επιφάνειας του νερού ανάντη για μια δεδομένη παροχή.
- Μεταβατική. Αυτή η ζώνη προσεγγίζεται σχεδιάζοντας τις εξισώσεις μη βυθισμένης και βυθισμένης ροής και συνδέοντάς τις με μια ευθεία εφαπτομένη και στις δύο καμπύλες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4-4.
- Βυθισμένη: η είσοδος του οχετού λειτουργεί ως ακροφύσιο. Ένα ακροφύσιο είναι ένα άνοιγμα, βυθισμένο στην ανάντη πλευρά που ρέει ελεύθερα στην κατάντη πλευρά, η οποία λειτουργεί ως διατομή ελέγχου.



Εικόνα 2.4-4. Διάγραμμα αποδοτικότητας για οχετό με υπερχειλίση καταστρώματος

Ο αλγόριθμος του HEC-RAS υπολογίζει την ανάντη ενέργεια που απαιτείται για να περάσει δεδομένη παροχή διαμέσου του οχετού για συνθήκες ροής εισόδου και για συνθήκες ροής εξόδου.

Γενικά, η υψηλότερη ανάντη ενέργεια «ελέγχει» και καθορίζει τον τύπο της ροής στον οχετό για δεδομένη παροχή και κατάντη στάθμη ελεύθερης επιφάνειας (ωστόσο, αυτό δεν ισχύει πάντα). Αυτό σημαίνει ότι το πρόγραμμα για δεδομένη στάθμη ελεύθερης επιφάνειας στα κατάντη θα υπολογίσει τη μέγιστη παροχή που μπορεί να περάσει μέσα από τον οχετό.

Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, εάν η λύση για ροή εισόδου βγει υψηλότερη από την λύση για ροή εξόδου, το πρόγραμμα θα εκτελέσει ορισμένους πρόσθετους υπολογισμούς για να αξιολογήσει εάν η παροχή ροής εισόδου μπορεί πράγματι να εισέλθει στον οχετό χωρίς να δημιουργηθεί υποπίεση.

Η ροή εισόδου θεωρεί ότι η ροή διέρχεται από κρίσιμο βάθος κοντά στην είσοδο του οχετού και μεταβαίνει σε υπερκρίσιμη ροή εντός του. Εάν η ροή παραμένει χαμηλότερη από το κρίσιμο βάθος εντός του αγωγού, τότε θεωρείται ροή βάση ελέγχου εισόδου. Εάν η ροή εισέρχεται στον οχετό μέσω υδραυλικού άλματος και καταλαμβάνει πλήρως τη διατομή, θεωρείται ότι αυτή η συνθήκη θα δημιουργήσει ροή υπό πίεση εντός του αγωγού και αυτός θα λειτουργήσει ως ακροφύσιο. Εάν συμβεί αυτό, τότε χρησιμοποιείται η λύση ροής εξόδου (υπό την υπόθεση της πληρωμένης με νερό διατομής) αντί της λύσης ροής εισόδου.

Για συνθήκες ροής εισόδου, η χωρητικότητα του οχετού περιορίζεται από τη χωρητικότητα του ανοίγματος του οχετού και όχι από συνθήκες στην έξοδο. Εκτεταμένες εργαστηριακές δοκιμές από το Εθνικό Γραφείο Προτύπων, το Γραφείο Δημόσιων Οδών και άλλους φορείς των Η.Π.Α. κατέληξαν σε μια σειρά εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν την ανάντη ενέργεια υπό διάφορες συνθήκες. Αυτές

οι εξισώσεις αποτελούν τη βάση των νομογραφημάτων ελέγχου εισόδου FHWA που εμφανίζονται στη δημοσίευση «Hydraulic Design of Highway Culverts» [FHWA, 1985]. Οι εξισώσεις ροής εισόδου FHWA χρησιμοποιούνται από το HEC-RAS για τον υπολογισμό της ενέργειας ανάντη. Οι εξισώσεις ροής εισόδου αναπτύχθηκαν για συνθήκες βυθισμένης και μη βυθισμένης εισόδου. Αυτές οι εξισώσεις δίνονται στον Πίνακα 2.4-4.

Πίνακας 2.4-4. Εξισώσεις ροής εισόδου για μη βυθισμένη και βυθισμένη είσοδο

Μη βυθισμένη είσοδος	Βυθισμένη είσοδος
$\frac{HW_i}{D} = \frac{H_c}{D} + K \left[\frac{Q}{A \cdot D^{5/2}} \right]^M - 0.5 \cdot S \quad (2.4-1)$	$\frac{HW_i}{D} = K \left[\frac{Q}{A \cdot D^{5/2}} \right]^M \quad (2.4-3)$
$\frac{HW_i}{D} = K \left[\frac{Q}{A \cdot D^{5/2}} \right]^M \quad (2.4-2)$	

Όπου:

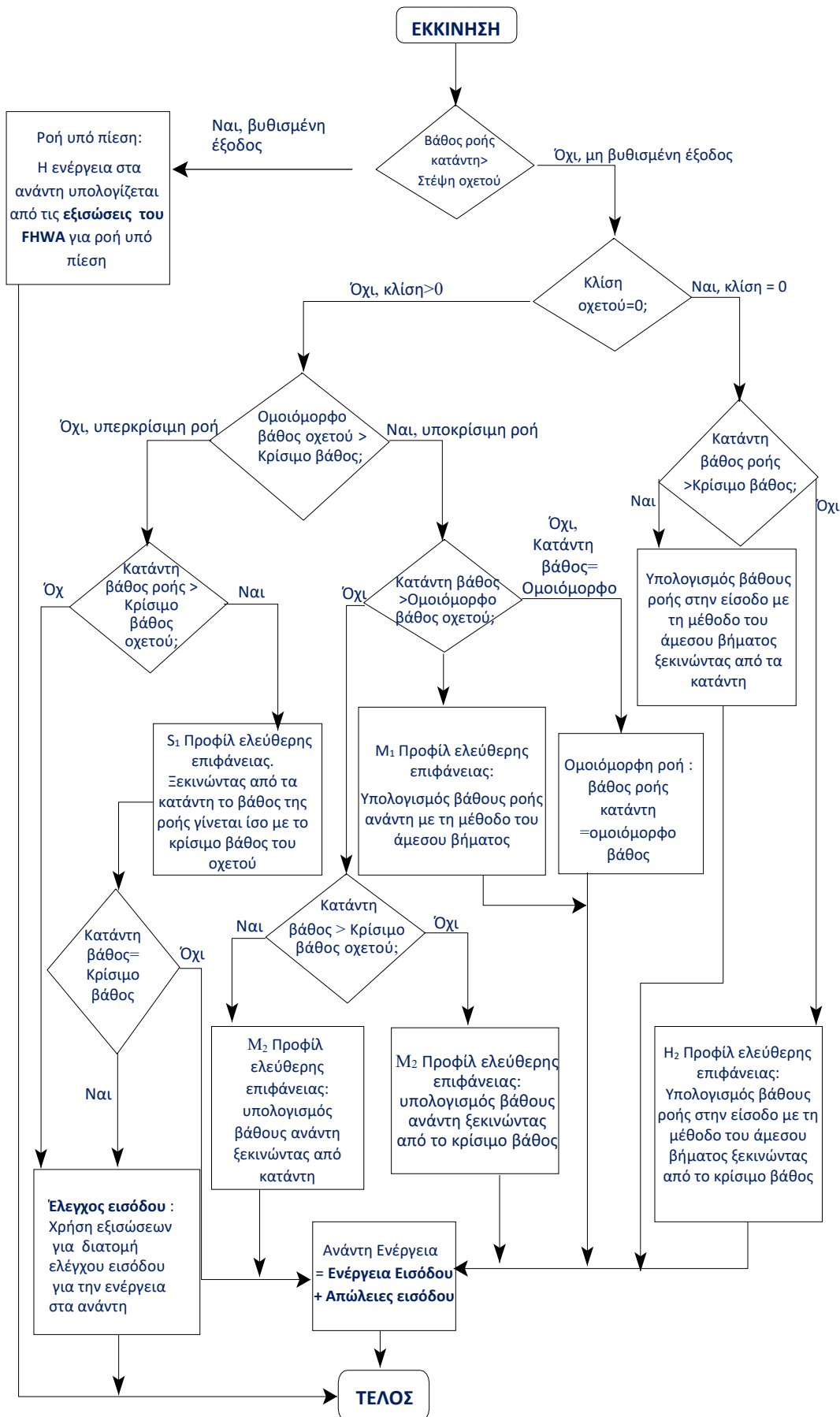
- HW_i= το ύψος ενέργειας στην είσοδο του οχετού (m)
- H_c= η ειδική ενέργεια στο κρίσιμο βάθος (dc + Vc²/2g)
- Q= η παροχή διαμέσου του οχετού (m³/s)
- A= το εμβαδόν ολόκληρης της διατομής του οχετού (m²)
- S= η κλίση πυθμένα του οχετού και
- K, M, c, Y= οι σταθερές της εξίσωσης που διαφέρουν ανάλογα με το σχήμα της διατομής του οχετού και τις συνθήκες εισόδου.

Τα νομογραφήματα στην αναφορά FHWA θεωρούνται ότι είναι ακριβή σε ποσοστό περίπου 10 τοις εκατό στον προσδιορισμό της απαιτούμενης ενέργειας εισόδου [FHWA, 1985]. Τα νομογραφήματα υπολογίστηκαν υποθέτοντας μια κλίση οχετού 0.02 πόδια ανά πόδι (2 τοις εκατό). Για διαφορετική κλίση οχετών τα νομογραφήματα είναι λιγότερο ακριβή επειδή η ενέργεια στην είσοδο αλλάζει ανάλογα με την κλίση. Ωστόσο, οι υπολογισμοί ροής σε οχετού στο HEC-RAS λαμβάνουν υπόψη την κλίση στον υπολογισμό της ενέργειας και είναι πιο ακριβείς από τα νομογραφήματα.

2.4.8.2 Υδραυλικός έλεγχος Εξόδου

Για τον έλεγχο της ροής εξόδου, η απαιτούμενη ανάντη ενέργεια για τη διέλευση της δεδομένης παροχής πρέπει να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη διάφορες συνθήκες εντός του οχετού και κατάντη του οχετού. Στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 2.4-5 απεικονίζεται η λογική των υπολογισμών ροής σε οχετό. Το HEC-RAS χρησιμοποιεί την εξίσωση του Bernoulli (2.2-1) για να υπολογίσει τη μεταβολή της ενέργειας κατά μήκος του οχετού υπό συνθήκες ροής εξόδου.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ



Εικόνα 2.4-5. Αλγόριθμος υπολογισμού απωλειών με έλεγχο εισόδου ή εξόδου

2.4.8.3 Ροή υπό πίεση σε οχετό

Για οχετούς υπό πίεση η συνολική απώλεια της ενέργειας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$H_L = h_{en} + h_f + h_{ex} \quad (2.4-4)$$

Όπου:

- h_{en} = οι τοπικές απώλειες στην είσοδο της ροής
- h_f = οι γραμμικές απώλειες ενέργειας λόγω τριβής που υπολογίζονται από την εξίσωση του Manning (2.2-4) και
- h_{ex} = οι τοπικές απώλειες στην έξοδο της ροής.

Συγκεκριμένα:

$$h_{en} = k_{en} * \frac{V_{en}^2}{2g} \quad (2.4-5)$$

Όπου:

- k_{en} = ο συντελεστής απωλειών εισόδου
- V_{en} = η ταχύτητα της ροής στην είσοδο και
- g = η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2).

$$h_{ex} = k_{ex} * \left(a_{ex} \frac{V_{ex}^2}{2g} - a_2 \frac{V_{e2}^2}{2g} \right) \quad (2.4-6)$$

Όπου:

- k_{ex} = ο συντελεστής απωλειών εξόδου
- V_{ex} = η ταχύτητα της ροής στην έξοδο
- V_2 = η ταχύτητα της ροής στην διατομή 2
- a_{ex}, a_2 = συντελεστές διόρθωσης των ταχυτήτων και
- g = η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2).

2.4.8.4 Μέθοδος Άμεσου Βήματος (Direct step method)

Για οχετούς που είναι σε μερική πληρότητα, το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας υπολογίζεται με τη μέθοδο άμεσου βήματος. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ αποτελεσματική, γιατί δεν απαιτούνται επαναλήψεις για τον προσδιορισμό του βάθους ροής για κάθε βήμα. Το προφίλ της επιφάνειας του νερού υπολογίζεται για μικρές αυξήσεις βάθους. Εάν το βάθος ροής ισούται με το ύψος του οχετού πριν το προφίλ φτάσει στο ανάντη άκρο του οχετού, η απώλεια τριβής μέσα στον οχετό υπολογίζεται υποθέτοντας ροή υπό πίεση.

Το πρώτο βήμα στη μέθοδο του άμεσου βήματος είναι ο υπολογισμός της τοπικής απώλειας εξόδου και η υπόθεση ενός βάθους ροής στα ανάντη. Εάν το βάθος του νερού κατάντη είναι κάτω από το κρίσιμο βάθος μέσα στον οχετό, τότε η οριακή συνθήκη μέσα στον οχετό θεωρείται το κρίσιμο βάθος. Εάν το βάθος του νερού κατάντη είναι μεγαλύτερο από το κρίσιμο βάθος στον οχετό, τότε χρησιμοποιείται η εξίσωση της ενέργειας (2.2-1) από την κατάντη διατομή προς το εσωτερικό του οχετού.

Μόλις υπολογιστεί το βάθος του νερού σε μία διατομή μέσα στον οχετό στα κατάντη, το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστούν μέσω της μεθόδου προς την αντίθετη κατεύθυνση τα βάθη της ροής έως ότου υπολογισθεί το βάθος της ροής στα ανάντη. Το τελευταίο βήμα είναι να προστεθούν οι τοπικές απώλειες εισόδου στην υπολογισμένη ενέργεια για να υπολογιστεί η συνολική ενέργεια στην διατομή 3. Η επιφάνεια του νερού έξω από τον οχετό λαμβάνεται στη συνέχεια υπολογίζοντας την επιφάνεια του νερού στην Διατομή 3 που αντιστοιχεί στην υπολογιζόμενη ενέργεια για την δεδομένη παροχή.

2.4.8.5 Ομοιόμορφο βάθος ροής σε οχετό

Το πρόγραμμα υπολογίζει το ομοιόμορφο βάθος χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική προσέγγιση για να καταλήξει σε μια τιμή, η οποία ικανοποιεί την εξίσωση του Manning (2.2-4). Εάν το ομοιόμορφο βάθος είναι μεγαλύτερο από το ύψος του οχετού, το πρόγραμμα ορίζει το ομοιόμορφο βάθος ίσο με το ύψος του οχετού.

2.4.8.6 Ροή υπερχειλίσης

Η πρώτη λύση γίνεται με την υπόθεση ότι όλη η ροή διέρχεται από το εσωτερικό του οχετού. Μόλις υπολογιστεί μια τελική ενέργεια ανάντη, το πρόγραμμα ελέγχει εάν το υψόμετρο ενέργειας είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο υψόμετρο για τη ροή του του υπερχειλιστή. Εάν η υπολογισμένη ενέργεια είναι μικρότερη από το ελάχιστο υψόμετρο υπερχειλίσης, τότε η λύση είναι τελική. Εάν η υπολογισμένη ενέργεια είναι μεγαλύτερη, το πρόγραμμα εκτελεί μια επαναληπτική διαδικασία για να προσδιορίσει την ποσότητα της ροής πάνω από τον υπερχειλιστή και μέσω των οχετών. Κατά τη διάρκεια αυτής της επαναληπτικής διαδικασίας, το πρόγραμμα υπολογίζει εκ νέου τις λύσεις οχετού βάση ελέγχου εισόδου και εξόδου για κάθε εκτίμηση της ροής του οχετού. Το πρόγραμμα θα συνεχίσει να επαναλαμβάνεται μέχρι να υπολογίσει ίδια ενέργεια ανάντη τόσο για τη ροή του υπερχειλιστή όσο και για τη ροή του οχετού.

2.4.8.7 Υπερκρίσιμη και μεικτή ροή σε οχετό

Η προσομοίωση του οχετού επιτρέπει συστήματα υπερκρίσιμης και μεικτής ροής μέσα στον οχετό. Κατά τους υπολογισμούς ελέγχου εξόδου, το πρόγραμμα θεωρεί ότι πρώτα μια υποκρίσιμη ροή διέρχεται μέσα στον οχετό, από τα κατάντη προς τα ανάντη. Εάν το εσωτερικό του οχετού έχει απότομη κλίση, το πρόγραμμα ενδέχεται να θεωρήσει πως το βάθος στο εσωτερικό του οχετού είναι ίσο με το κρίσιμο. Εάν συμβεί αυτό, οι υπολογισμοί γίνονται από ανάντη προς κατάντη, θεωρώντας ότι η ροή είναι υπερκρίσιμη και ξεκινώντας με την υπόθεση του κρίσιμου βάθους στην είσοδο του οχετού. Κατά τους υπολογισμούς, το πρόγραμμα ελέγχει συνεχώς την ειδική δύναμη της ροής και τη συγκρίνει με τη ειδική δύναμη στην περίπτωση υποκρίσιμης ροής.

Εάν η ειδική δύναμη της υποκρίσιμης ροής είναι μεγαλύτερη από την υπερκρίσιμη, το πρόγραμμα υποθέτει ότι θα συμβεί ένα υδραυλικό άλμα σε αυτή τη θέση. Διαφορετικά, υπολογίζεται ένα προφίλ υπερκρίσιμης ροής σε όλη τη διαδρομή μέσα και έξω από τον οχετό.

Κατά τους υπολογισμούς ελέγχου εισόδου, θεωρείται πως η επιφάνεια είναι κοντά από το κρίσιμο βάθος κοντά στην είσοδο του οχετού. Έπειτα η ροή είναι υπερκρίσιμη. Το πρώτο βήμα είναι να υπολογιστεί το σημείο «Vena Contracta», δηλαδή το στενότερο σημείο της ροής καθώς και το βάθος στο σημείο αυτό. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια εμπειρική εξίσωση για τους υπολογισμούς αυτούς. Έπειτα, πραγματοποιούνται υπολογισμοί από τα ανάντη προς τα κατάντη για να υπολογισθεί το βάθος ροής κατά μήκος του οχετού. Αν η κλίση είναι ήπια και το μήκος του οχετού αρκετά μεγάλο, πραγματοποιείται υδραυλικό άλμα. Αν το υδραυλικό άλμα προκαλεί αρκετά μεγάλο βάθος ροής ώστε να γεμίσει ο οχετός, θεωρείται έλεγχος εξόδου για τον υπολογισμό της ανάντη ενέργειας.

2.4.8.8 Ειδικές περιπτώσεις

- **Πολλαπλές τιμές συντελεστή Manning στο εσωτερικό οχετού**

Το HEC-RAS επιτρέπει την εισαγωγή δύο τιμών του συντελεστή Manning η στο εσωτερικό του οχετού, μία για το πάνω μέρος και τις πλευρές και μία δεύτερη για το κάτω μέρος του οχετού. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση οχετών που έχουν φυσικό πυθμένα ή οχετού που ο πυθμένας του είναι πιο τραχύς από την οροφή του ή εάν έχει τοποθετηθεί ιχθυόσκαλα.

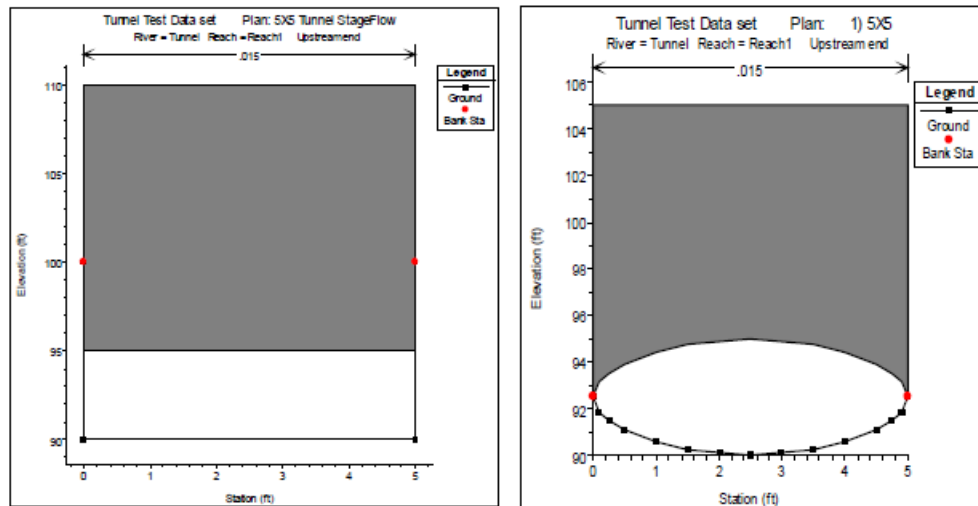
- **Μερικώς γεμισμένοι ή θαμμένοι οχετοί**

Το HEC-RAS επιτρέπει ένα τμήμα του οχετού να γεμίσει με κάποιο υλικό πέρα από νερό. Αυτή η επιλογή μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε από τα σχήματα οχετών.

2.5 Προσομοίωση τεχνικού έργου με κάλυμμα (Lid)

2.5.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση ενός τεχνικού έργου με την προσθήκη καλύμματος (Lid). Το HEC-RAS δίνει αυτήν την δυνατότητα για την προσομοίωση ροής υπό πίεση τόσο σε μονοδιάστατη μόνιμη αλλά και μη μόνιμη ροή. Ο χρήστης προσθέτει πρακτικά ένα κάλυμμα σε δυο διατομές (την αρχή του τεχνικού έργου και το πέρας του), ορίζοντας την γεωμετρία που αυτό θα έχει. Παράδειγμα τέτοιων διατομών φαίνεται στην Εικόνα 2.5-1.

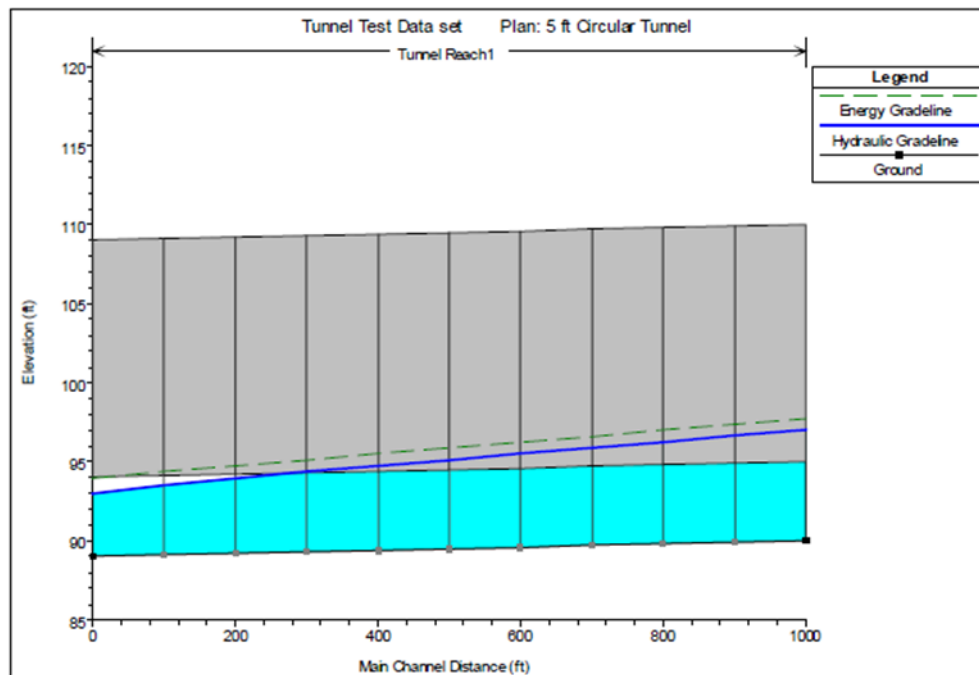


Εικόνα 2.5-1. Διατομές με κάλυμμα ορθογωνικής και τοξωτής μορφής

2.5.2 Κάλυμμα σε συνθήκες μόνιμης ροής

Το πρόγραμμα προκειμένου να υπολογίσει την ελεύθερη επιφάνεια λύνει την εξίσωση ενέργειας όπως ακριβώς γίνεται σε διατομές χωρίς κάλυμμα. Η μόνη διαφορά έγκειται στον υπολογισμό της επιφάνειας της ροής αλλά και της βρεχόμενης περιμέτρου, που περιορίζονται από το κάτω μέρος του καλύμματος.

Στην περίπτωση που το πρόγραμμα υπολογίσει ελεύθερη επιφάνεια που ξεπερνά το άνω μέρος του καλύμματος, στην εξίσωση ενέργειας χρησιμοποιείται η πιεζομετρική γραμμή αντί της ελεύθερης επιφάνειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5-2.



Εικόνα 2.5-2. Η ελεύθερη επιφάνεια κάτω από το κάλυμμα, η πιεζομετρική γραμμή (μπλε) και η γραμμή ενέργειας (πράσινη διακεκομμένη)

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στο υψόμετρο της Γραμμής Ενέργειας. Αν αυτό ξεπερνά το άνω μέρος του καλύμματος το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται τον χώρο πάνω από το άνοιγμα ως διαθέσιμο.

2.5.3 Κάλυμμα σε συνθήκες μη μόνιμης ροής

Σε συνθήκες μη μόνιμης ροής υπό πίεση το πρόγραμμα απαιτεί την χρήση της θεωρίας Priesmann Slot.

Οι κλειστοί αγωγοί μπορούν να λειτουργούν είτε υπό πίεση, είτε με ελεύθερη ροή, είτε με εναλλαγή αυτών κατά μήκος.

Εξισώσεις υδραυλικού πλήγματος

Η ροή υπό πίεση συνήθως αναλύεται με τη χρήση των εξισώσεων υδραυλικού πλήγματος (Streeter and Wylie, 1979):

Ποσότητας κίνησης

$$V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2.5-1)$$

Συνέχειας

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.5-2)$$

Όπου:

- V = η ταχύτητα του νερού
- h = το πιεζομετρικό ύψος
- ρ = η πυκνότητα του νερού
- g = η επιτάχυνση της βαρύτητας
- θ = η κλίση του πυθμένα
- f = ο συντελεστής τριβής Darcy-Weisbach
- D = η διάμετρος του αγωγού
- t = ο χρόνος και
- x = η απόσταση.

Οι παραπάνω εξισώσεις περιγράφουν την μεταφορά των κυμάτων υπό πίεση μέσα σε ένα ελαστικό μέσο. Ο ρυθμός μεταφοράς των κυμάτων περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dx}{dt} = V \mp a \quad (2.5-3)$$

Ο όρος της ταχύτητας του νερού μπορεί να αγνοηθεί επειδή είναι της τάξης των 1000 φορές μικρότερη από την ταχύτητα του κύματος.

Η ταχύτητα μετάδοσης του ηχητικού κύματος σε αγωγό υπό πίεση περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\alpha = \left(\frac{\gamma}{g} \left(\frac{1}{K} + \frac{D c_1}{E e} \right) \right)^{-0.5} \quad (2.5-4)$$

Όπου:

- γ = ειδικό βάρος του νερού
- K = μέτρο συμπίεσότητας
- D = η διάμετρος του αγωγού
- e = το πάχος του αγωγού
- $C_1=0.91$ = παράμετρος του αγωγού και
- E = μέτρο ελαστικότητας Young.

Όταν ο αγωγός είναι υπόγειος ή μέσα σε βράχο, το πάχος του είναι ασήμαντο και απαλείφεται από την εξίσωση με αποτέλεσμα να προκύψει η παρακάτω απλοποιημένη μορφή:

$$\alpha = \left(g \frac{K}{\gamma} \right)^{0.5} \quad (2.5-5)$$

Εξισώσεις Shallow water

Οι εξισώσεις Shallow water περιγράφουν ένα λεπτό στρώμα υγρού συγκεκριμένης πυκνότητας κάτω από το οποίο υπάρχει πυθμένας συγκεκριμένης γεωμετρίας και πάνω από το οποίο συνήθως υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια. Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του τύπου ροής είναι η πολύ μικρή κάθετη διάσταση σε σχέση με την οριζόντια.

Η μορφή αυτών των εξισώσεων μπορεί να γραφεί χρησιμοποιώντας την ταχύτητα και το βάθος ως ανεξάρτητες μεταβλητές:

Ορμής

$$V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + g(Sf - S_0) = 0 \quad (2.5-6)$$

Συνέχειας

$$T_w \frac{\partial h}{\partial t} + V T_w \frac{\partial V}{\partial x} + A \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.5-7)$$

Όπου:

- A = το εμβαδόν διατομής της ροής και
- T_w = το πλάτος της ροής.

Ο ρυθμός μεταφοράς των κυμάτων περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dx}{dt} = V \mp c \quad (2.5-8)$$

Όπου:

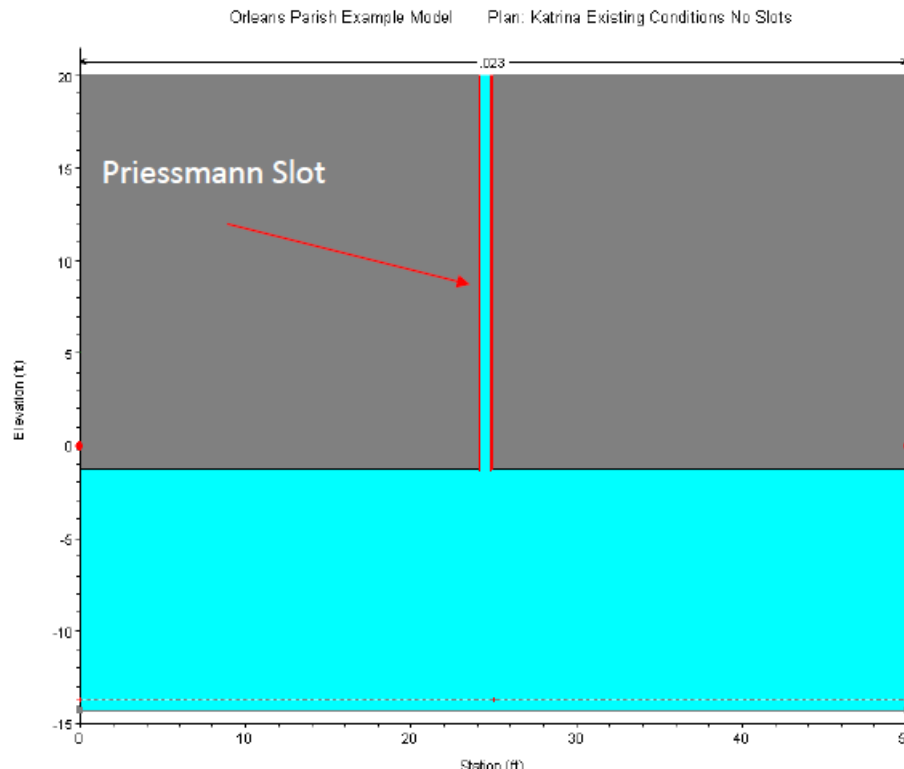
- c = η ταχύτητα μετάδοσης του μηχανικού κύματος

$$c = \sqrt{gD} \quad (2.5-9)$$

Όπου:

- g = η επιτάχυνση της βαρύτητας και
- D = το υδραυλικό βάθος.

Ο Priessmann (Cunge et al., 1980) παρατήρησε πως οι εξισώσεις 2.5-5 και 2.5-9 είναι ίδιες αν εξαιρέσουμε τις τιμές των ταχυτήτων μετάδοσης του κύματος, και συνεπώς αν θέσουμε την ταχύτητα μετάδοσης του μηχανικού κύματος c ίση με την ταχύτητα μετάδοσης του ακουστικού κύματος στις εξισώσεις Shallow water, μπορούμε να εκτιμήσουμε το κύμα της πίεσης, δηλαδή την μεταβολή της πίεσης στο μέσο, συνεπώς το βάθος του νερού. Για αυτό ο Priessmann πρότεινε την εισαγωγή μιας σχισμής (Priessmann slot) σταθερού πλάτους και άπειρου ύψους πάνω από τον αγωγό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5-3.



Εικόνα 2.5-3. Τετραγωνικός αγωγός με σχισμή Priessmann

Η ταχύτητα μετάδοσης του μηχανικού κύματος είναι ίση με την ταχύτητα μετάδοσης του ακουστικού κύματος όταν η επιφάνεια του νερού είναι μέσα στην σχισμή. Το πλάτος της σχισμής υπολογίζεται εξισώνοντας τις εξισώσεις 2.5-5 και 2.5-9.

Ο χρήστης πρέπει να ενεργοποιεί την μέθοδο Priessmann slot στις διατομές όπου τοποθετείται κάλυμμα (lid), έτσι ώστε να μπορεί το πρόγραμμα να προσομοιώσει σωστά τις εναλλαγές από ροή υπό πίεση σε ροή με ελεύθερη επιφάνεια.

3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

3.1 Σενάρια υπολογισμών

Σε ανοικτό ορθογωνικό αγωγό απλής γεωμετρίας πραγματοποιούνται διάφορα σενάρια υπολογισμών στο HEC-RAS ώστε να εξεταστούν οι διαφορές που παρουσιάζουν οι προσομοιώσεις ενός τεχνικού έργου με τους τρεις τρόπους που διαθέτει το HEC-RAS: με γέφυρα, οχετό και κάλυμμα. Ο αγωγός έχει μήκος $L=500$ m, σταθερό πλάτος $b=12$ m και ενιαίου βάθους κοίτης $d=7$ m. Τα τοιχώματα και ο πυθμένας του αγωγού αποτελούνται από το ίδιο υλικό και ο συντελεστής τραχύτητας Manning ισούται με $n=0.002$.

Προκειμένου να διασταυρωθούν τα αποτελέσματα κάθε σεναρίου, να γίνει κατανοητή η λογική επίλυσης κάθε περίπτωσης καθώς και να εντοπισθούν τυχόν αστάθειες στα μοντέλα, για κάθε σενάριο δημιουργήθηκε πίνακας με υδραυλικούς υπολογισμούς σε υπολογιστικό φύλλο Microsoft Excel. Η επίλυση κάθε σεναρίου πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τις εξισώσεις που ακολουθεί και το πρόγραμμα. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών υπολογισμών φαίνονται στο Παράρτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3.1.1 Υπολογισμοί ομοιόμορφης ροής

Στον Πίνακα 3.1-1 φαίνονται τα σενάρια υπολογισμών ομοιόμορφης ροής στον αγωγό.

Πίνακας 3.1-1. Σενάρια υπολογισμών ομοιόμορφης ροής

Σενάριο	Ροή Steady (ST) Unsteady (US)	Παροχή (m^3/s)	Είδος Ροής Mild (M) (Υποκρίσιμη) Supercritical (S) (Υπερκρίσιμη)
M-1	ST	90	M
M- 2	US	90	M
M- 3	ST	120	M
M- 4	US	120	M
S-1	ST	90	S
S-2	US	90	S
S-3	ST	175	S
S-4	US	175	S

3.1.2 Υπολογισμοί ροής σε γέφυρα

Στον Πίνακα 3.1-2 φαίνονται τα σενάρια υπολογισμών στον αγωγό με γέφυρα μήκους $L=26$ m. Η γέφυρα αποτελείται από κατάστρωμα χωρίς βάθρα και έχει άνοιγμα σταθερού πλάτους $b=12$ m και σταθερού ύψους $h=2.27$ m.

Πίνακας 3.1-2. Σενάρια υπολογισμών ροής σε γέφυρα

Σενάριο	Ροή Steady (ST) Unsteady (US)	Εξίσωση υπολογισμού απωλειών Ενέργειας (Energy-EN) Ποσότητας κίνησης (Momentum – MO)	Παροχή (m^3/s)	Είδος Ροής Mild (M) (Υποκρίσιμη) Supercritical (S) (Υπερκρίσιμη)
B-ST-EN-M-90	ST	EN	90	M
B-US-EN-M-90	US	EN	90	M
B-ST-MO-M-90	ST	MO	90	M
B-US-MO-M-90	US	MO	90	M
B-ST-EN-M-175	ST	EN	120	M
B-US-EN-M-175	US	EN	120	M
B-ST-MO-M-175	ST	MO	120	M
B-US-MO-M-175	US	MO	120	M
B-ST-EN-S-90	ST	EN	90	S
B-US-EN-S-90	US	EN	90	S
B-ST-MO-S-90	ST	MO	90	S
B-US-MO-S-90	US	MO	90	S
B-ST-EN-S-175	ST	EN	175	S
B-US-EN-S-175	US	EN	175	S
B-ST-MO-S-175	ST	MO	175	S
B-US-MO-S-175	US	MO	175	S

3.1.3 Υπολογισμοί ροής σε οχετό

Στον Πίνακα 3.1-3 φαίνονται τα σενάρια υπολογισμών στον αγωγό με οχετό μήκους $L=26$ m. Ο οχετός έχει άνοιγμα σταθερού πλάτους $b=12$ m και σταθερού ύψους $h=2.27$ m.

Πίνακας 3.1-3. Σενάρια υπολογισμών ροής σε οχετό

Σενάριο	Ροή Steady (ST) Unsteady (US)	Παροχή (m^3/s)	Είδος Ροής Mild (M) (Υποκρίσιμη) Supercritical (S) (Υπερκρίσιμη)
C-ST-M-90	ST	90	M
C-US-M-90	US	90	M
C-ST-M-120	ST	120	M
C-US-M-120	US	120	M
C-ST-S-90	ST	90	S
C-US-S-90	US	90	S
C-ST-S-175	ST	175	S
C-US-S-175	US	175	S

3.1.4 Υπολογισμοί ροής με κάλυμμα

Στον Πίνακα 3.1-3 φαίνονται τα σενάρια υπολογισμών στον αγωγό με κάλυμμα μήκους $L=26$ m. Κάτω από το κάλυμμα δημιουργείται άνοιγμα

Πίνακας 3.1-4. Σενάρια υπολογισμών ροής με κάλυμμα

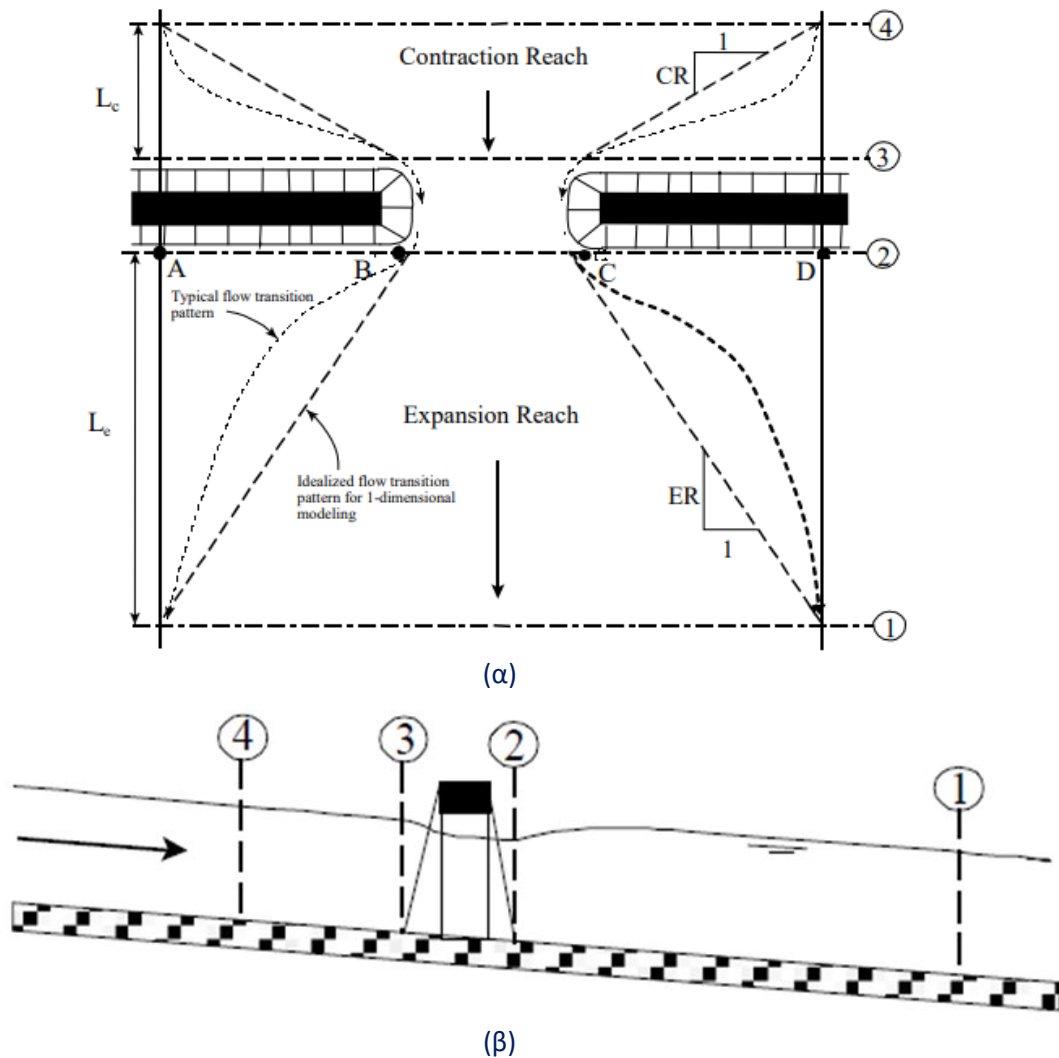
Σενάριο	Ροή Steady (ST) Unsteady (US)	Παροχή (m^3/s)	Είδος Ροής Mild (M) (Υποκρίσιμη) Supercritical (S) (Υπερκρίσιμη)
L-ST-M-90	ST	90	M
L-US-M-90	US	90	M
L-ST-M-120	ST	120	M
L-US-M-120	US	120	M
L-ST-S-90	ST	90	S
L-US-S-90	US	90	S
L-ST-S-175	ST	175	S
L-US-S-175	US	175	S

3.1.5 Χαρακτηριστικές διατομές

Στον Πίνακα 3.1-5 φαίνονται οι χιλιομετρικές θέσεις των χαρακτηριστικών διατομών και οι ονομασίες τους για κάθε τεχνικό έργο.

Πίνακας 3.1-5. Χαρακτηριστικές διατομές τεχνικών έργων

Ονομασία διατομής			Χιλιομετρική θέση (m)
Γέφυρα	Οχετός	Κάλυμμα	
Cross Section 1	Cross Section 1	Cross Section below	200.00
Cross Section 2	Cross Section 2	-	212.00
Bridge Down	Culvert Down	Lid Down	226.00
Bridge Up	Culvert Up	Lid Up	242.00
Cross Section 3	Cross Section 3	-	246.00
Cross Section 4	Cross Section 4	Cross Section above	250.00



Εικόνα 3.1-1. Χαρακτηριστικές διατομές ροής σε γέφυρα και οχετό σε (α) κάτοψη και (β) μηκοτομή

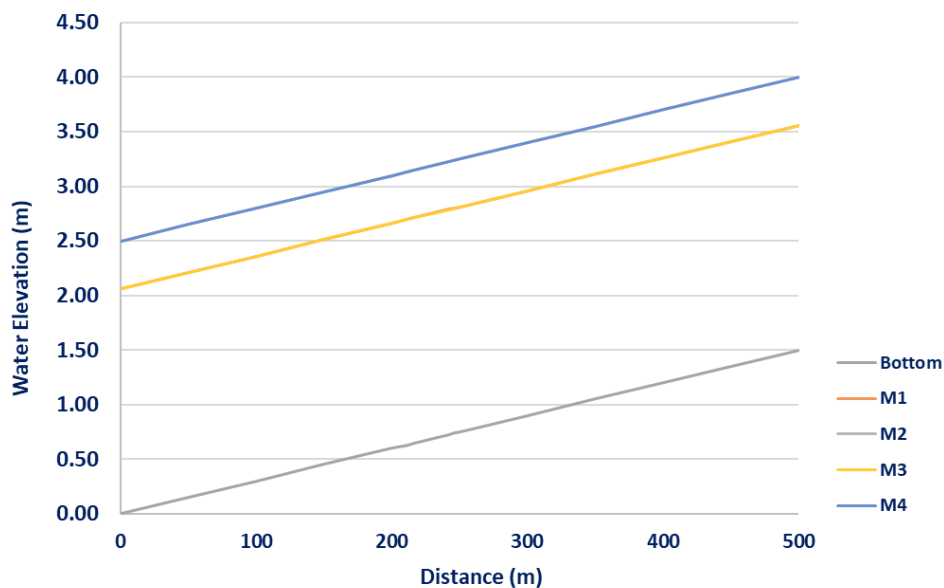
3.2 Υπολογισμοί ομοιόμορφης υποκρίσιμης ροής

Στον Πίνακα 3.2-1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά της ομοιόμορφης υποκρίσιμης ροής.

Πίνακας 3.2-1. Χαρακτηριστικά ομοιόμορφης υποκρίσιμης ροής

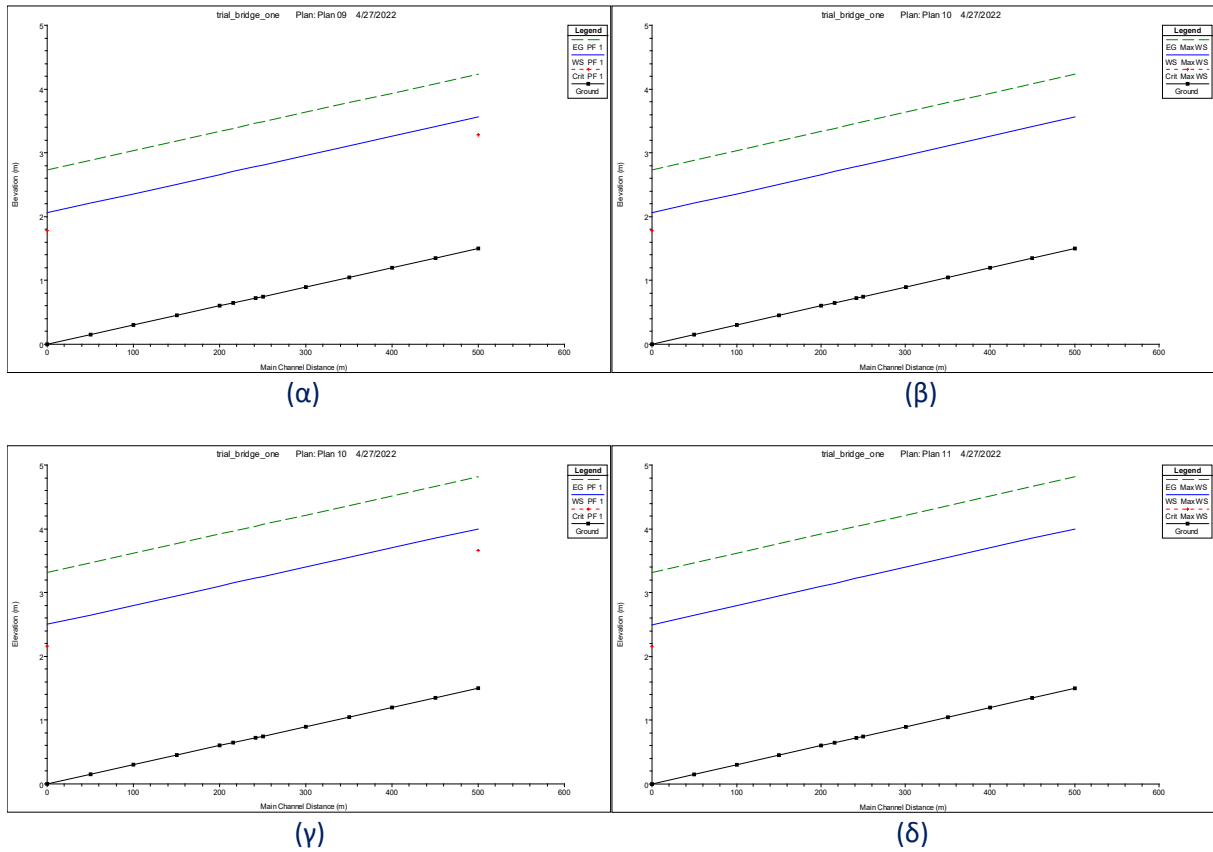
Παροχή	Q	m ³ /s	90.00	120.00
Μήκος αγωγού	L	m	500	500
Συντελεστής τραχύτητας	n	-	0.02	0.02
Κλίση πυθμένα	J	m/m	0.003	0.003
Πλάτος διατομής	b	m	12.00	12
Ομοιόμορφο βάθος	y _o	m	2.06	2.50
Εμβαδόν υγρής διατομής	A	m ²	24.72	30.00
Βρεχόμενη περίμετρος	P	m	16.12	17.00
Υδραυλική ακτίνα	R	m	1.53	1.76
Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας	T	m	12.00	12
Υδραυλικό βάθος	D	m	2.06	2.50
Αριθμός Froude	F	-	0.81	0.81

Αρχικά, πραγματοποιούνται υπολογισμοί στον αγωγό χωρίς γέφυρα, σχετό ή κάλυμμα για μόνιμη και μη μόνιμη ροή και για παροχή 90 m³/s και 120 m³/s και η ροή που υπολογίζεται είναι ομοιόμορφη.



Εικόνα 3.2-1. Ομοιόμορφη υποκρίσιμη ροή χωρίς τεχνικά έργα

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ

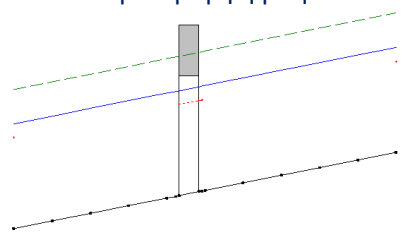
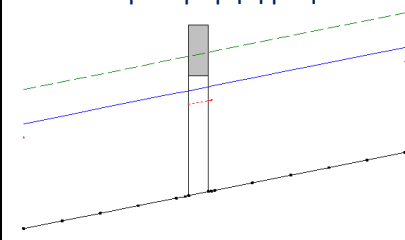
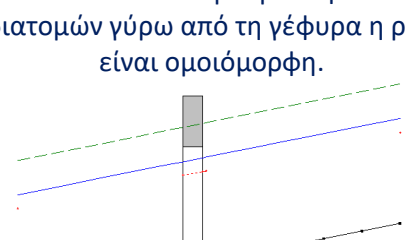
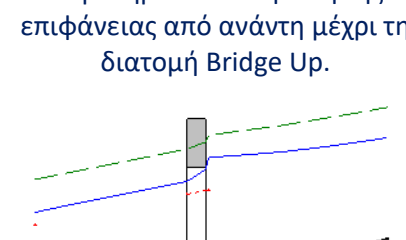
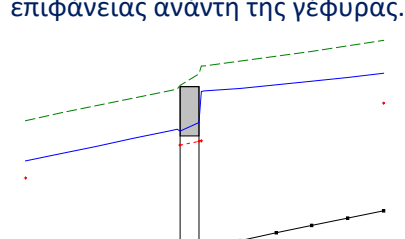
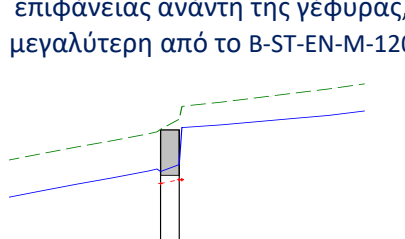


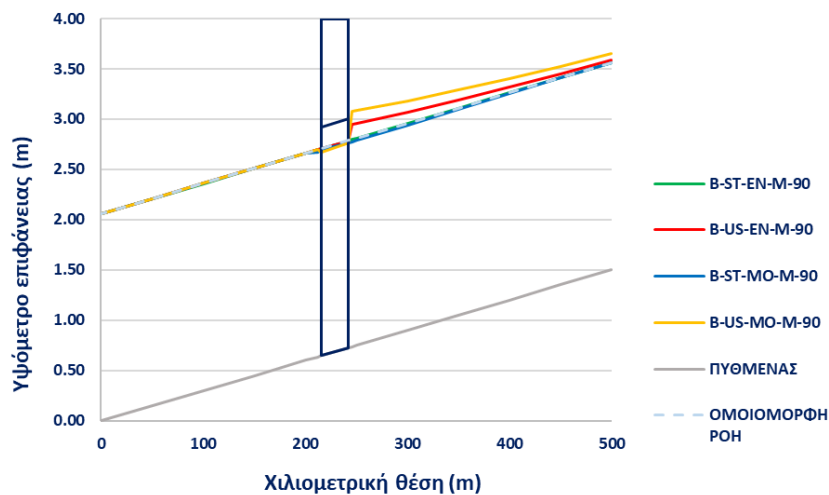
Εικόνα 3.2-2. Ομοιόμορφη υποκρίσιμη ροή για παροχή $90 \text{ m}^3/\text{s}$ σε (α) μόνιμη και (β) μη μόνιμη ροή και για παροχή $120 \text{ m}^3/\text{s}$ σε (γ) μόνιμη και (δ) μη μόνιμη ροή

3.3 Υπολογισμοί υποκρίσιμης ροής σε γέφυρα

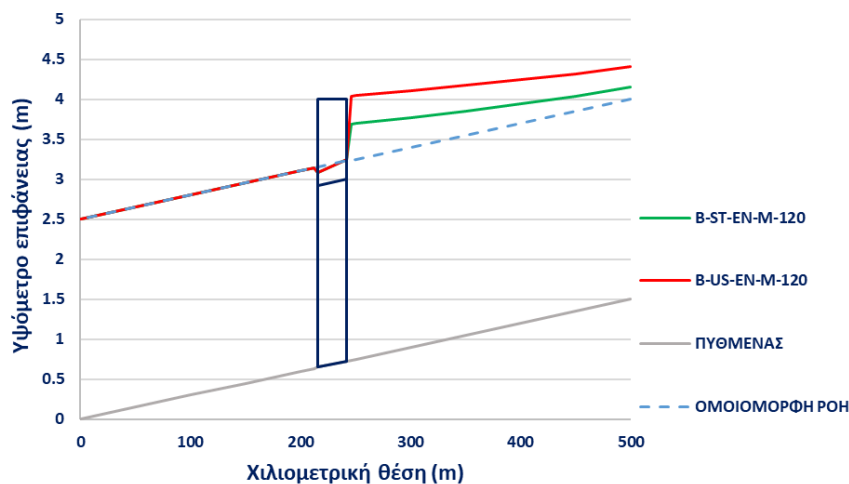
Για παροχή ίση με $90 \text{ m}^3/\text{s}$ η ροή είναι ομοιόμορφη και δεν επηρεάζεται από τη γέφυρα και για παροχή ίση με $120 \text{ m}^3/\text{s}$ η ροή γίνεται υπό πίεση. Η μορφή της επιφάνειας του νερού παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3-1.

Πίνακας 3.3-1. Μορφή επιφάνειας νερού και ΓΕ σε υποκρίσιμη ροή (M) σε γέφυρα (B)

Μόνιμη ροή		Μη μόνιμη ροή	
Εξ. ενέργειας	Εξ. Ποσότητας κίνησης	Εξ. ενέργειας	Εξ. Ποσότητας κίνησης
<p>B-ST-EN-M-90: Ομοιόμορφη ροή.</p> 	<p>B-ST-MO-M-90: Ομοιόμορφη ροή.</p> <p>Σημ. Στην εξ. Ποσότητας κίνησης περιλαμβάνεται το βάρος.</p> 	<p>B-UN-EN-M-90: Μετά από απομάκρυνση των διατομών γύρω από τη γέφυρα η ροή είναι ομοιόμορφη.</p> 	<p>B-UN-MO-M-90: Παρατηρείται ανύψωση της επιφάνειας από ανάντη μέχρι τη διατομή Bridge Up.</p> <p>Σημ. Στην εξ. Ποσότητας κίνησης περιλαμβάνεται το βάρος.</p> 
<p>B-ST-EN-M-120: Ροή υπό πίεση. Ανύψωση της επιφάνειας ανάντη της γέφυρας.</p> 	<p>B-ST-MO-M-120: Το μοντέλο δεν τη χρησιμοποιεί.</p>	<p>B-UN-EN-M-120: Ροή υπό πίεση. Ανύψωση της επιφάνειας ανάντη της γέφυρας, μεγαλύτερη από το B-ST-EN-M-120</p> 	<p>B-UN-MO-M-120: Το μοντέλο δεν τη χρησιμοποιεί.</p>



(α)



(β)

Εικόνα 3.3-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε γέφυρα για παροχή (α) $90 \text{ m}^3/\text{s}$ και (β) $120 \text{ m}^3/\text{s}$

Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $90 \text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Στα σενάρια B-ST-EN-M-90, B-ST-MO-M-90, B-UN-EN-M-90 η ροή είναι ομοιόμορφη και δεν επηρεάζεται από τη γέφυρα.
2. Στο σενάριο B-UN-EN-M-90 χρειάζεται να προσθέσουμε και να αφαιρέσουμε διατομές γύρω από τη γέφυρα ώστε να είναι η ροή ομοιόμορφη. Στην περίπτωση μας αφαιρέσαμε τις διατομές $X=212.00 \text{ m}$, $X=246.00 \text{ m}$, $X=250.00 \text{ m}$ και προσθέσαμε τη διατομή $X=275.00 \text{ m}$.
3. Στο σενάριο B-UN-MO-M-90 με την απομάκρυνση των διατομών δεν επιτεύχθηκε ομοιόμορφη ροή.

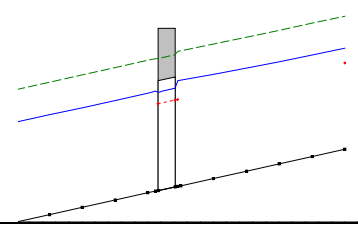
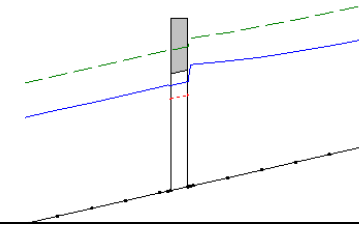
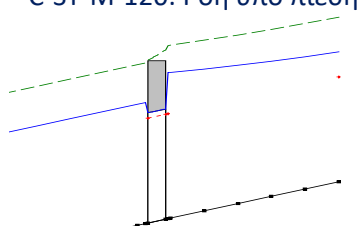
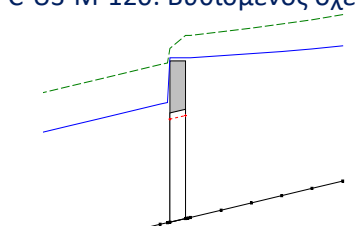
Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $120 \text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Σε όλα τα σενάρια η ροή τίθεται υπό πίεση. Κατάντη της γέφυρας η ροή είναι ομοιόμορφη.
2. Στο σενάριο B-UN-EN-M-120 τα βάθη ροής ανάντη της γέφυρας είναι μεγαλύτερα από αυτά του σεναρίου B-ST-EN-M-120.
3. Στα σενάρια B-ST-MO-M-120 και B-UN-MO-M-120 δεν μπορεί να γίνει επίλυση της ροής με την εξίσωση ποσότητας κίνησης, το πρόγραμμα αναφέρει πως «τα αποτελέσματα της εξίσωσης ποσότητας κίνησης δεν είναι αξιόπιστα αν η επιφάνεια είναι ψηλότερα από το κάτω μέρος του καταστρώματος» και συνεχίζει τους υπολογισμούς με την εξίσωση ενέργειας.

3.4 Υπολογισμοί υποκρίσιμης ροής σε οχετό

Για παροχή ίση με $90 \text{ m}^3/\text{s}$ η ροή είναι ομοιόμορφη και δεν επηρεάζεται από τον οχετό και για παροχή ίση με $120 \text{ m}^3/\text{s}$ η ροή γίνεται υπό πίεση. Η μορφή της επιφάνειας του νερού παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.4-1.

Πίνακας 3.4-1. Μορφή επιφάνειας νερού και ΓΕ σε υποκρίσιμη ροή (M) σε οχετό (C) με απώλειες εισόδου και εξόδου

Μόνιμη ροή	Μη μόνιμη ροή
<p>C-ST-M-90: Παρατηρείται ανύψωση της επιφάνειας από ανάντη μέχρι τη διατομή Culvert U_r.</p> 	<p>C-US-M-90: Παρατηρείται ανύψωση της επιφάνειας από ανάντη μέχρι τη διατομή Culvert U_r, μεγαλύτερη από C-ST-M-90.</p> 
<p>C-ST-M-120: Ροή υπό πίεση.</p> 	<p>C-US-M-120: Βυθισμένος οχετός.</p> 

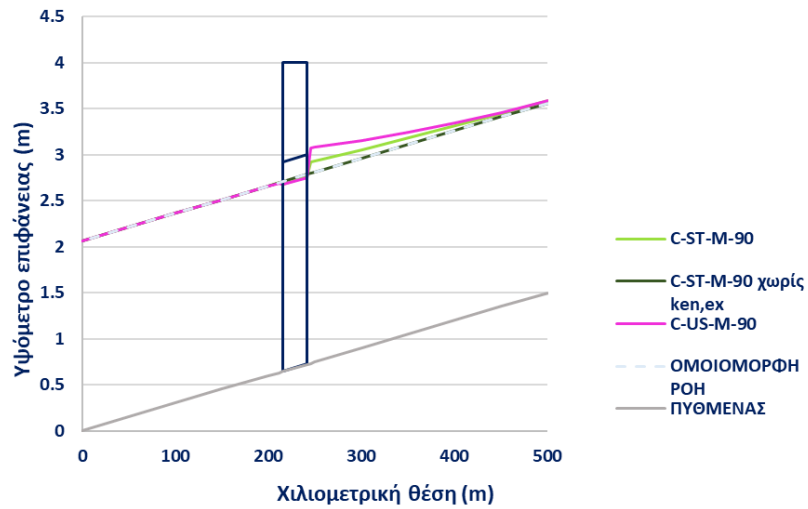
Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $90 \text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Στο σενάριο C-ST-M-90 η επιφάνεια ανυψώνεται ανάντη του οχετού εξαιτίας των απωλειών εισόδου και εξόδου. Οι συντελεστές απωλειών μειώνουν την παροχетеυτικότητα του αγωγού. Με μηδενισμό τους, η ροή πλησιάζει την ομοιόμορφη.
2. Στο σενάριο C-US-M-90 τα βάθη ανάντη του οχετού είναι μεγαλύτερα από αυτά του σεναρίου C-ST-M-90. Το μοντέλο παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στην μεταβολή του χρονικού βήματος.

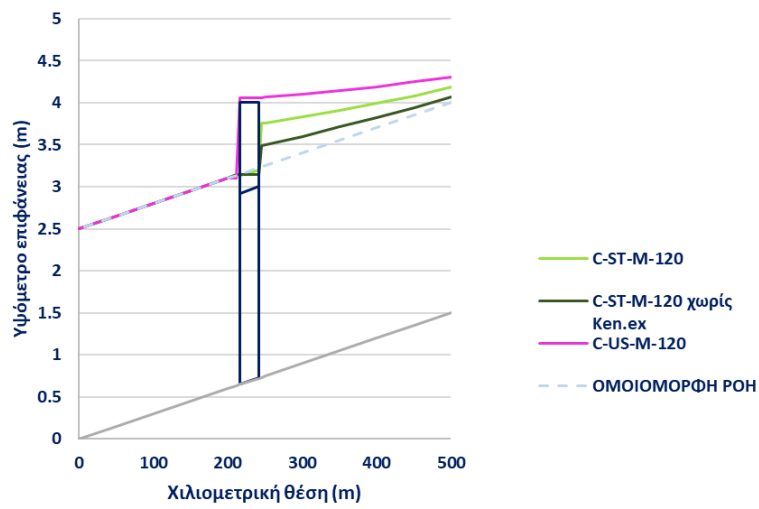
Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $120 \text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Στο σενάριο C-ST-M-120 ο οχετός είναι βυθισμένος. Ανυψώνοντας το «κατάστρωμα» του οχετού, δηλ. αυξάνοντας το υψόμετρο του καταστρώματος, μπορεί το σύνολο της παροχής να περάσει μέσα από τον οχετό και η ροή να γίνεται υπό πίεση.
2. Στο σενάριο C-US-M-120 ο οχετός είναι βυθισμένος. Τα βάθη ροής ανάντη του οχετού είναι μεγαλύτερα από αυτά του σεναρίου C-ST-M-120.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ



(α)



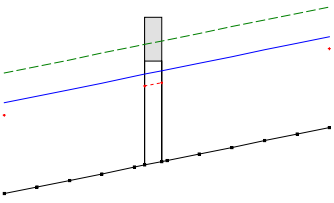
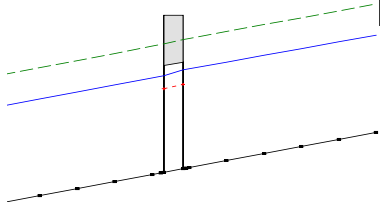
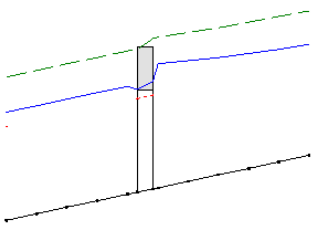
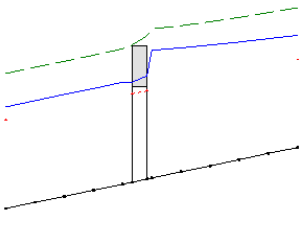
(β)

Εικόνα 3.4-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε σχετό για παροχή (α) 90 m³/s και (β) 120 m³/s

3.5 Υπολογισμοί υποκρίσιμης ροής με κάλυμμα

Για παροχή ίση με $90 \text{ m}^3/\text{s}$ η ροή είναι ομοιόμορφη και δεν επηρεάζεται από το κάλυμμα και για παροχή ίση με $120 \text{ m}^3/\text{s}$ η ροή γίνεται υπό πίεση. Η μορφή της επιφάνειας του νερού παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5-1.

Πίνακας 3.5-1. Μορφή επιφάνειας νερού και ΓΕ σε υποκρίσιμη ροή (M) σε κάλυμμα (L)

Μόνιμη ροή	Μη μόνιμη ροή
<p>L-ST-M-90: Ομοιόμορφη ροή.</p> 	<p>L-US-M-90: Ομοιόμορφη ροή.</p>  <p><i>Σημ. Επιλέχθηκε η επίλυση με θεώρηση αγωγού υπό πίεση (θεωρία Priessmann Slot)</i></p>
<p>L-ST-M-120: Παρατηρείται ανύψωση της επιφάνειας ανάντη ως την διατομή Lid Down. Ροή υπό πίεση.</p> 	<p>L-US-M-120: Παρατηρείται ανύψωση της επιφάνειας ανάντη ως την διατομή Lid Down, μικρότερη από ότι στο σενάριο L-ST-M-120. Ροή υπό πίεση.</p>  <p><i>Σημ. Επιλέχθηκε η επίλυση με θεώρηση αγωγού υπό πίεση (θεωρία Priessmann Slot)</i></p>

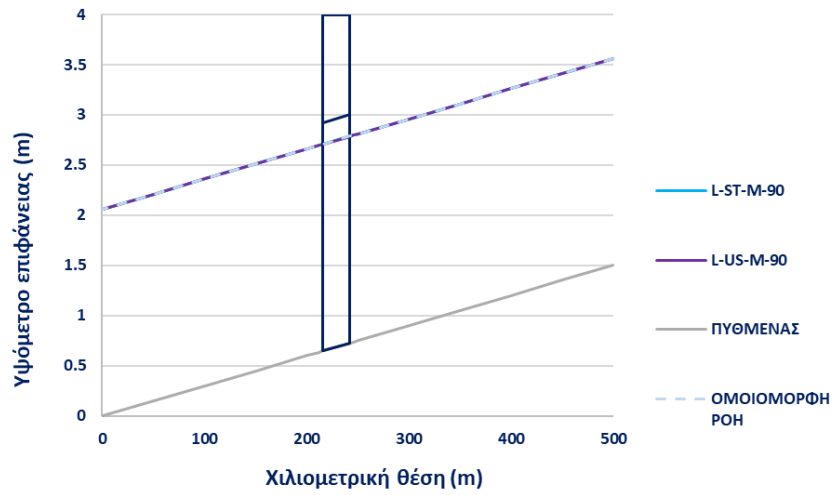
Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $90 \text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Στα σενάρια L-ST-M-90, L-US-M-90 η ροή είναι ομοιόμορφη.

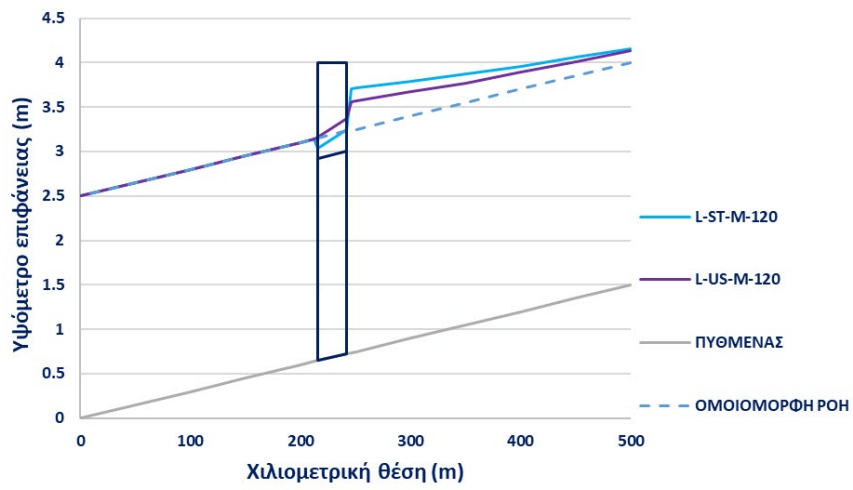
Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $120 \text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Στο σενάριο L-US-M-120 τα βάθη ροής ανάντη του καλύμματος είναι μεγαλύτερα από αυτά του σεναρίου L-ST-M-120.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ



(α)



(β)

Εικόνα 3.5-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε κάλυμμα για παροχή (α) $90 \text{ m}^3/\text{s}$ και (β) $120 \text{ m}^3/\text{s}$

3.6 Υπολογισμοί ομοιόμορφης υπερκρίσιμης ροής

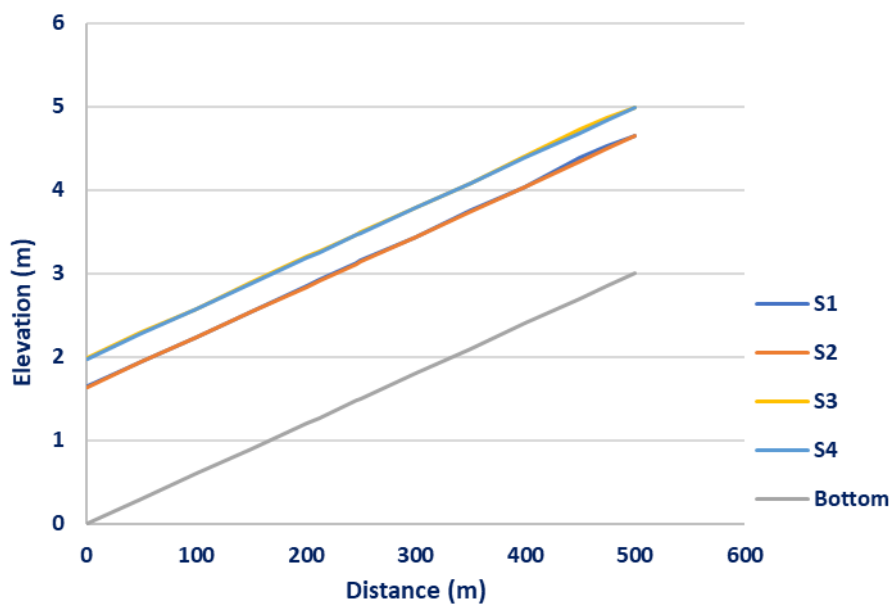
3.6.1 Ομοιόμορφη υπερκρίσιμη ροή χωρίς γέφυρα

Στον Πίνακα 3.6-1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά της ομοιόμορφης υπερκρίσιμης ροής.

Πίνακας 3.6-1. Χαρακτηριστικά ομοιόμορφης υπερκρίσιμης ροής

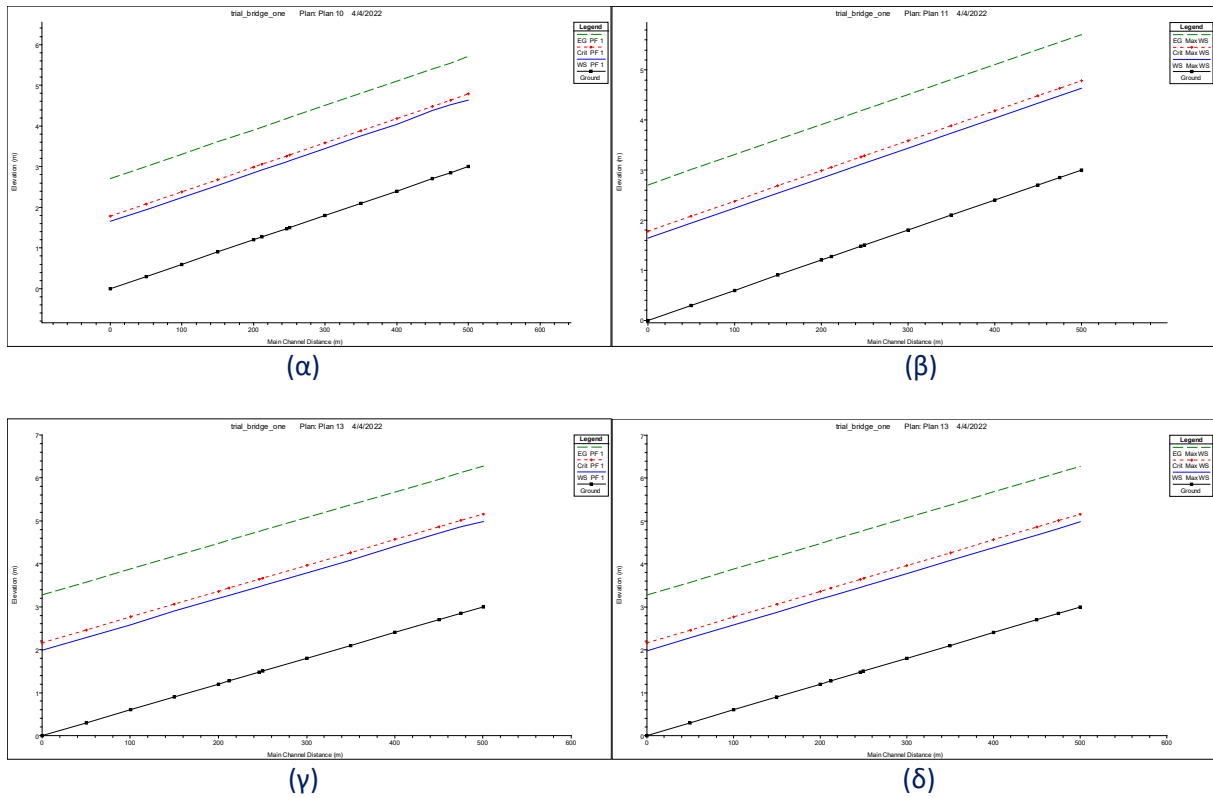
Παροχή	Q	m ³ /s	90.00	175.00
Μήκος αγωγού	L	m	500	500
Συντελεστής τραχύτητας	n	-	0.02	0.02
Κλίση πυθμένα	J	m/m	0.006	0.006
Πλάτος διατομής	b	m	12.00	12.00
Ομοιόμορφο βάθος	y ₀	m	1.64	2.55
Εμβαδόν υγρής διατομής	A	m ²	19.65	30.63
Βρεχόμενη περίμετρος	P	m	15.28	17.11
Υδραυλική ακτίνα	R	m	1.29	1.79
Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας	T	m	12.00	12.00
Υδραυλικό βάθος	D	m	1.64	2.55
Αριθμός Froude	F	-	1.14	1.14

Αρχικά, πραγματοποιούνται υπολογισμοί στον αγωγό χωρίς γέφυρα, σχετό ή κάλυμμα για μόνιμη και μη μόνιμη ροή και για παροχή 90 m³/s και 175 m³/s και η ροή που υπολογίζεται είναι ομοιόμορφη.



Εικόνα 3.6-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής για παροχή 90 m³/s και παροχή 175 m³/s

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ

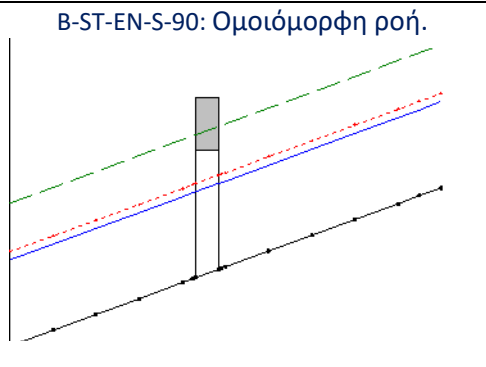
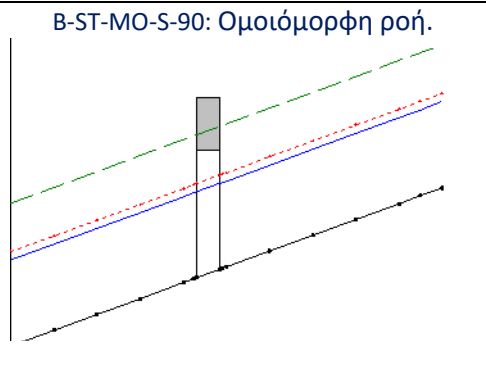
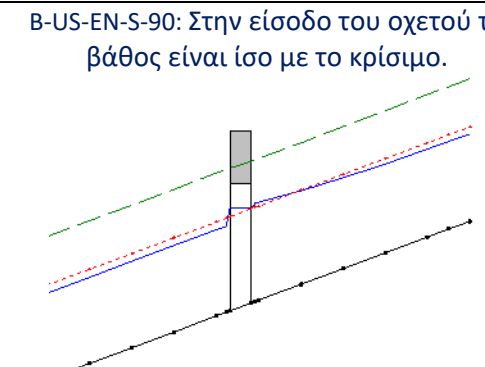
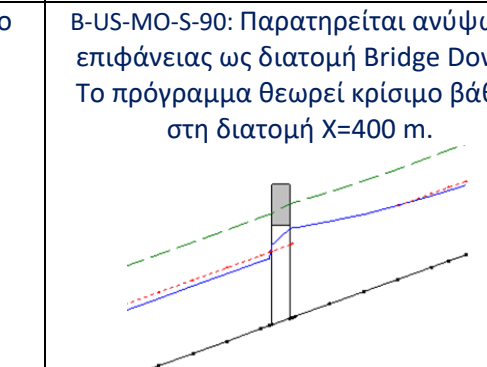
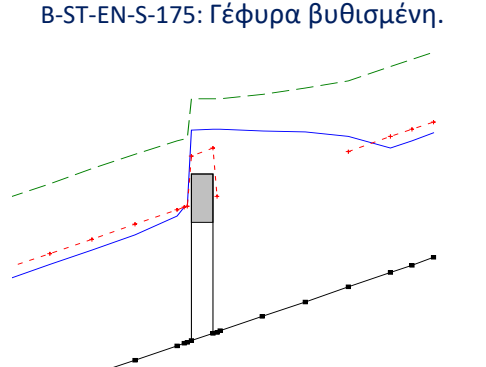
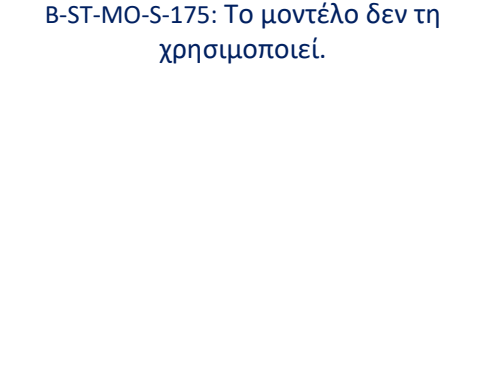
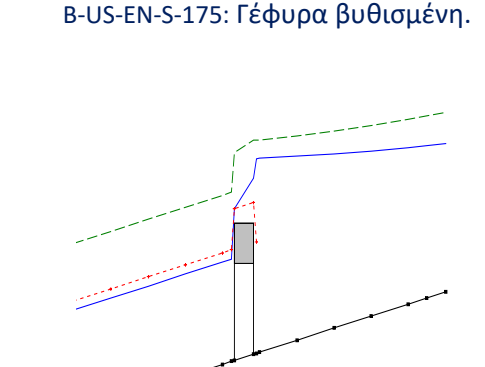
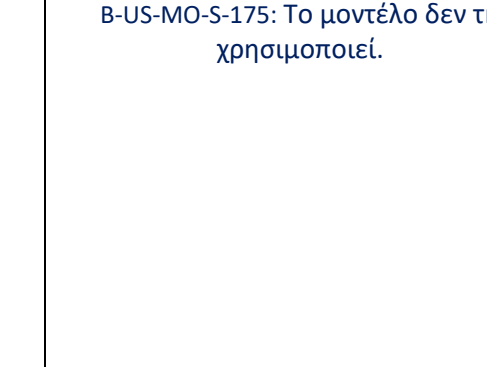


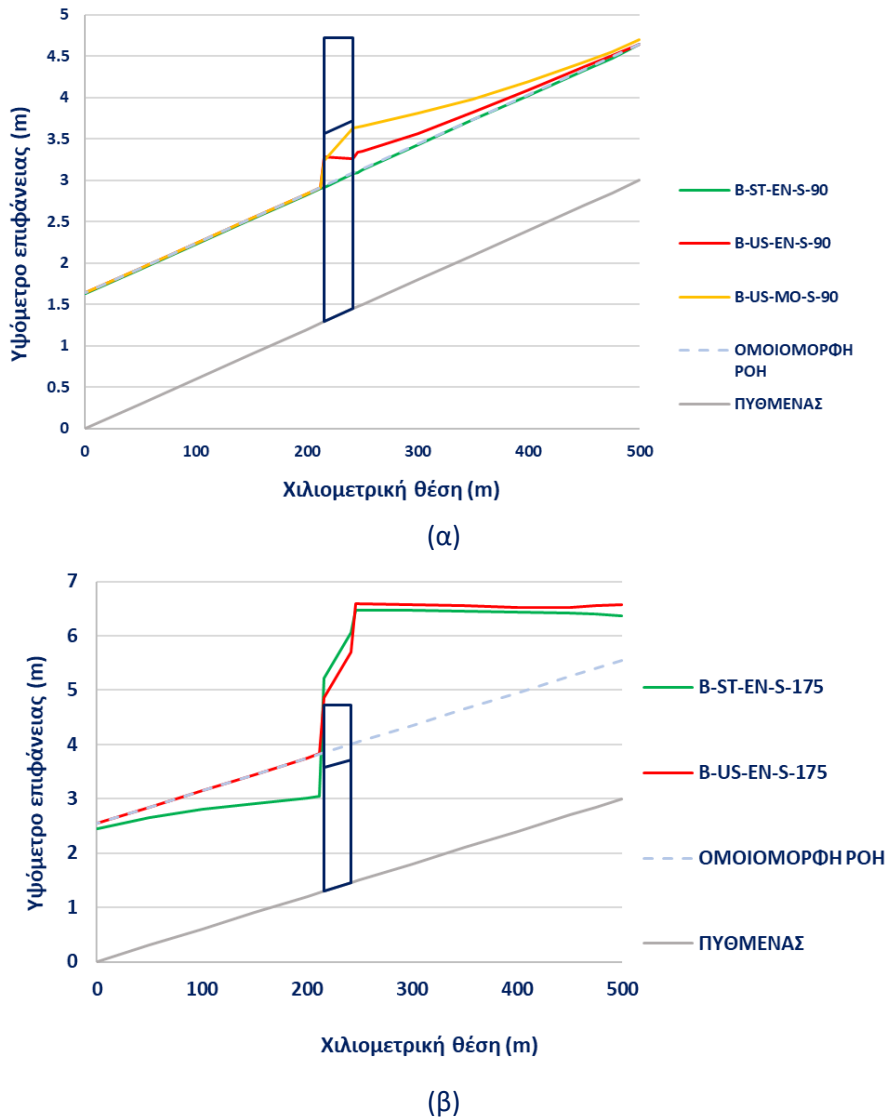
Εικόνα 3.6-2. Μεταβολή της επιφάνειας ροής και της γραμμής ενέργειας για παροχή $90 \text{ m}^3/\text{s}$ σε (α) μόνιμη και (β) μη μόνιμη ροή και για παροχή $175 \text{ m}^3/\text{s}$ σε (γ) μόνιμη και (δ) μη μόνιμη ροή

3.7 Υπολογισμοί υπερκρίσιμης ροής σε γέφυρα

Για παροχή ίση με $90 \text{ m}^3/\text{s}$ η ροή είναι ομοιόμορφη και δεν επηρεάζεται από τη γέφυρα και για παροχή ίση με $175 \text{ m}^3/\text{s}$ η ροή γίνεται υπό πίεση. Η μορφή της επιφάνειας του νερού παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7-1.

Πίνακας 3.7-1. Σύγκριση αποτελεσμάτων υπερκρίσιμης ροής (S) σε γέφυρα (B)

Μόνιμη ροή		Μη μόνιμη ροή	
Εξ. ενέργειας	Εξ. Ποσότητας κίνησης	Εξ. ενέργειας	Εξ. Ποσότητας κίνησης
<p>B-ST-EN-S-90: Ομοιόμορφη ροή.</p> 	<p>B-ST-MO-S-90: Ομοιόμορφη ροή.</p> 	<p>B-US-EN-S-90: Στην είσοδο του οχετού το βάθος είναι ίσο με το κρίσιμο.</p> 	<p>B-US-MO-S-90: Παρατηρείται ανύψωση επιφάνειας ως διατομή Bridge Down. Το πρόγραμμα θεωρεί κρίσιμο βάθος στη διατομή $X=400 \text{ m}$.</p> 
<p>B-ST-EN-S-175: Γέφυρα βυθισμένη.</p> 	<p>B-ST-MO-S-175: Το μοντέλο δεν τη χρησιμοποιεί.</p> 	<p>B-US-EN-S-175: Γέφυρα βυθισμένη.</p> 	<p>B-US-MO-S-175: Το μοντέλο δεν τη χρησιμοποιεί.</p> 



Εικόνα 3.7-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε γέφυρα για παροχή (α) $90 \text{ m}^3/\text{s}$ και (β) $175 \text{ m}^3/\text{s}$ με επίλυση της εξίσωσης ενέργειας

Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $90 \text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Στα σενάρια B-ST-EN-S-90 και B-ST-MO-S-90 η ροή είναι ομοιόμορφη και δεν επηρεάζεται από την γέφυρα.
2. Στο σενάριο B-US-EN-S-90 το πρόγραμμα αναφέρει «σφάλμα υπολογισμού της επιφάνειας λόγω μη σύγκλισης σε συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων» και συνεχίζει τους υπολογισμούς με θεώρηση κρίσιμου βάθους στην διατομή Bridge Up. Η ροή μεταβαίνει αρχικά σε υποκρίσιμη ανάντη της γέφυρας με καμπύλη επιφάνειας S1 και ύστερα προσεγγίζει το κρίσιμο βάθος με καμπύλη M2.
3. Στο σενάριο B-US-MO-S-90 το πρόγραμμα αναφέρει «σφάλμα υπολογισμού της επιφάνειας λόγω μη σύγκλισης σε συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων και συνεχίζει τους υπολογισμούς με θεώρηση κρίσιμου βάθους στην διατομή Bridge Down». Η ροή μεταβαίνει αρχικά σε υποκρίσιμη ανάντη της γέφυρας με καμπύλη επιφάνειας S1 και ύστερα προσεγγίζει το κρίσιμο βάθος με καμπύλη M2.

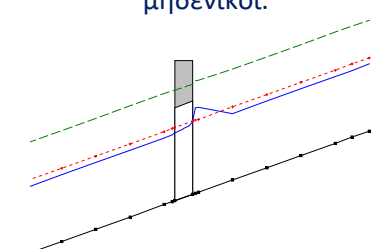
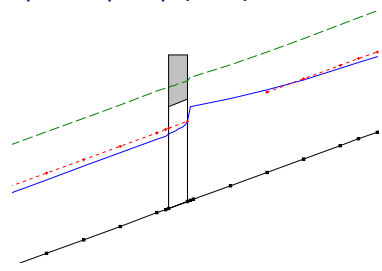
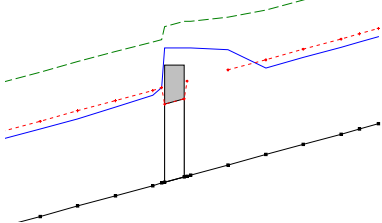
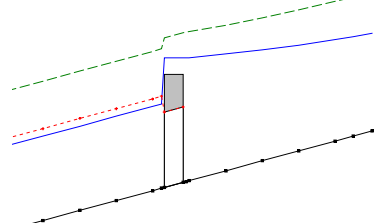
Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $175 \text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Στα σενάρια B-ST-EN-S-175 και B-US-EN-S-175 η γέφυρα είναι βυθισμένη και τα βάθη ροής ανάντη και κατόντη είναι παραπλήσια. Το πρόγραμμα εμφανίζει σφάλμα στο οποίο αναφέρεται αδυναμία σύγκλισης στον υπολογισμό του ομοιόμορφου βάθους κατόντη του οχετού.
2. Λόγω υπερκρίσιμης ροής για παροχή $Q=175\text{m}^3/\text{s}$ ιδανική μέθοδος επίλυσης είναι η μέθοδος του υπερχειλιστή (weir flow computations). Εφαρμόζοντας την στο σενάριο B-ST-EN-S-175 τα βάθη ροής ανάντη προκύπτουν μικρότερα. Η ροή κατόντη της γέφυρας είναι ομοιόμορφη.
3. Εφαρμόζοντας την μέθοδο του υπερχειλιστή στο σενάριο B-US-EN-S-175, τα αποτελέσματα παραμένουν ίδια.
4. Στα σενάρια B-ST-MO-S-175 και B-US-MO-S-175 δεν μπορεί να γίνει επίλυση της ροής με την εξίσωση ποσότητας κίνησης, το πρόγραμμα αναφέρει πως «τα αποτελέσματα της εξίσωσης ποσότητας κίνησης δεν είναι αξιόπιστα αν η επιφάνεια είναι ψηλότερα από το κάτω μέρος του καταστρώματος» και συνεχίζει τους υπολογισμούς με την εξίσωση ενέργειας.

3.8 Υπολογισμοί υπερκρίσιμης ροής σε οχετό

Για παροχή ίση με $90 \text{ m}^3/\text{s}$ η ροή είναι ομοιόμορφη και δεν επηρεάζεται από τον οχετό και για παροχή ίση με $175 \text{ m}^3/\text{s}$ η ροή γίνεται υπό πίεση. Η μορφή της επιφάνειας του νερού παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.8-1.

Πίνακας 3.8-1. Σύγκριση αποτελεσμάτων υπερκρίσιμης ροής (S) σε οχετό (C) με απώλειες εισόδου και εξόδου

Μόνιμη ροή	Μη μόνιμη ροή
<p>C-ST-M-90: Παρατηρείται υδραυλικό άλμα ανάντη του οχετού ως την διατομή Culvert Up όταν οι συντελεστές εισόδου-εξόδου είναι μη μηδενικοί.</p> 	<p>C-US-M-90: Παρατηρείται υδραυλικό άλμα ανάντη του οχετού ως την διατομή Culvert Up, μεγαλύτερου μήκους από το SP-O1.</p> 
<p>C-ST-M-175: Βυθισμένος οχετός.</p> 	<p>C-US-M-175: Βυθισμένος οχετός.</p> 

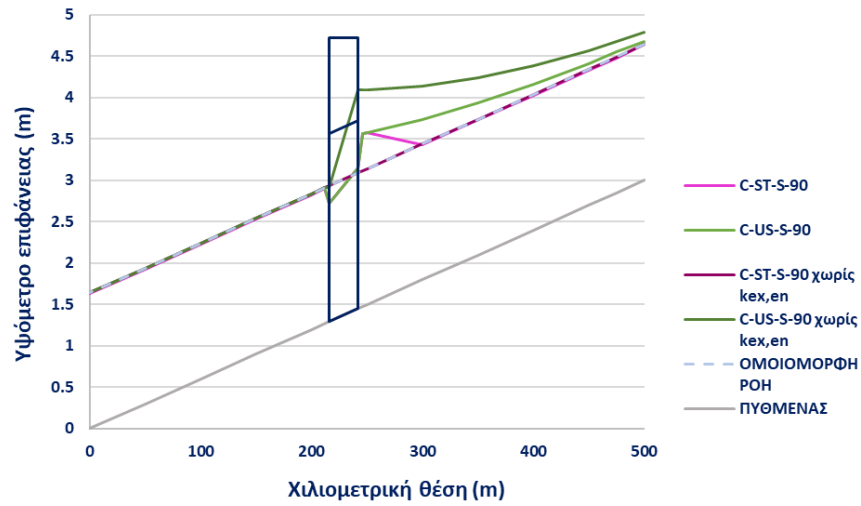
Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $90 \text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Όταν η επίλυση γίνεται με έλεγχο εισόδου ο οχετός αδυνατεί να παροχετεύσει $90 \text{ m}^3/\text{s}$.
2. Στο σενάριο C-ST-M-90 παρατηρείται υδραυλικό άλμα ανάντη του οχετού. Η ροή μεταβαίνει αρχικά σε υποκρίσιμη ανάντη του οχετού με καμπύλη επιφάνειας S1 και ύστερα προσεγγίζει το κρίσιμο βάθος με καμπύλη M2. Με μηδενισμό των συντελεστών απωλειών εισόδου και εξόδου η ροή είναι ομοιόμορφη. του οχετού με καμπύλη επιφάνειας S1 και ύστερα προσεγγίζει το κρίσιμο βάθος με καμπύλη M2. Ο μηδενισμός των συντελεστών απωλειών εισόδου και εξόδου προκαλεί αύξηση των βαθών ανάντη του οχετού.
3. Στο σενάριο C-US-M-90 τα βάθη ροής ανάντη του οχετού είναι μεγαλύτερα από αυτά του σεναρίου C-ST-M-90. Στην διατομή Culvert Up είναι ίσα.

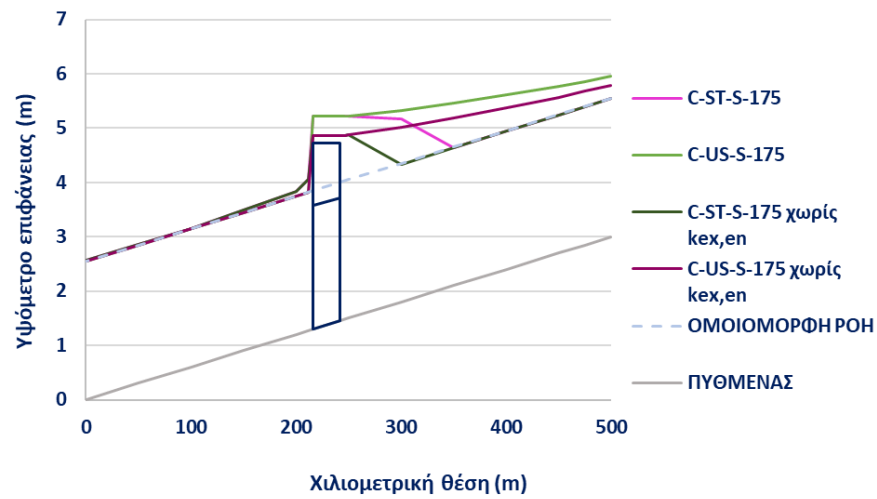
Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $175 \text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Η επίλυση γίνεται με έλεγχο εξόδου, όπως αναμένεται βάση θεωρίας.
2. Στα σενάρια C-ST-M-175 και C-US-M-175 το βάθος ανάντη του οχετού είναι μεγαλύτερο όταν οι συντελεστές απωλειών εισόδου και εξόδου είναι μη μηδενικοί. Με μηδενισμό τους τα βάθη ροής πάνω από τον οχετό μειώνονται.
3. Στο σενάριο C-US-M-175 τα βάθη ροής ανάντη του οχετού είναι μεγαλύτερα από αυτά του σεναρίου C-ST-M-175. Στην διατομή Culvert Up είναι ίσα.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ



(α)



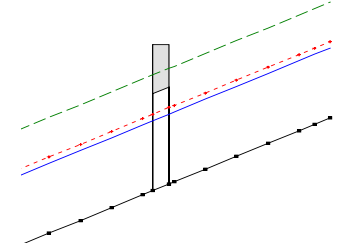
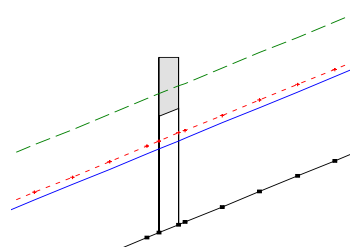
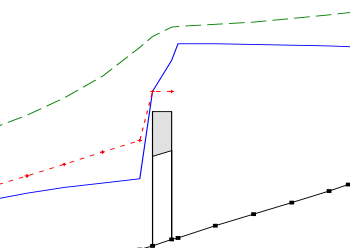
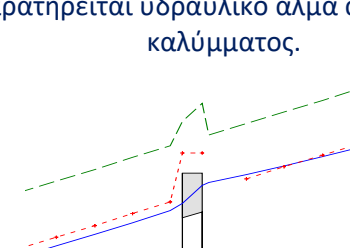
(β)

Εικόνα 3.8-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε γέφυρα για παροχή (α) 90 m³/s (β) 175 m³/s

3.9 Υπολογισμοί υπερκρίσιμης ροής με κάλυμμα

Για παροχή ίση με $90\text{m}^3/\text{s}$ το κάτω μέρος του καταστρώματος του οχετού είναι ψηλότερα από το ομοιόμορφο βάθος. Αναμένεται η ροή να περνά ελεύθερα κάτω από τον οχετό με βάθος ίσο με το ομοιόμορφο, όπως και συμβαίνει.

Πίνακας 3.9-1. Σύγκριση αποτελεσμάτων υπερκρίσιμης ροής (S) με κάλυμμα (L)

Μόνιμη ροή	Μη μόνιμη ροή
<p>L-ST-S-90: Η ροή δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη της γέφυρας και είναι ομοιόμορφη.</p> 	<p>L-US-S-90: Η ροή δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη της γέφυρας και είναι ομοιόμορφη.</p> 
<p>L-ST-S-175: Η επιφάνεια ταυτίζεται με αυτήν για γέφυρα ίδιας γεωμετρίας.</p> 	<p>L-US-S-175: Παρατηρείται ανύψωση της γραμμής ενέργειας πάνω από το κάλυμμα. Παρατηρείται υδραυλικό άλμα ανάντη του καλύμματος.</p> 

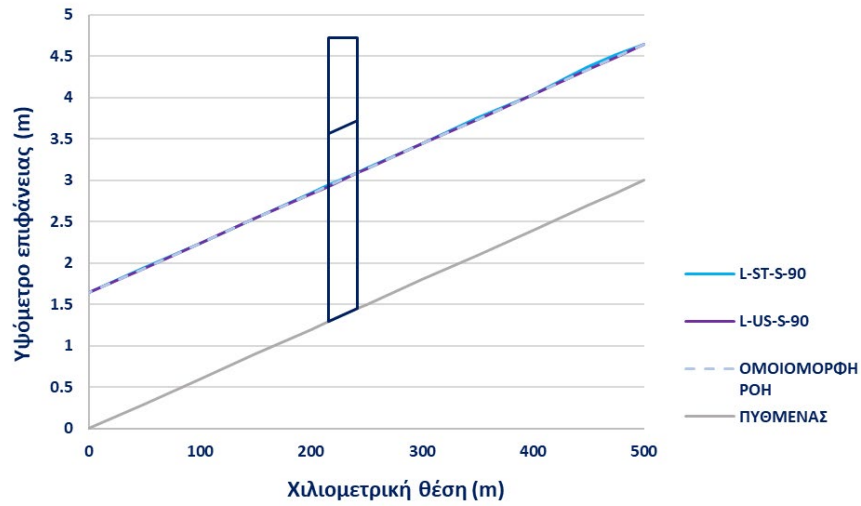
Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $90\text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Στα σενάρια L-ST-S-90, L-US-S-90 η ροή είναι ομοιόμορφη.

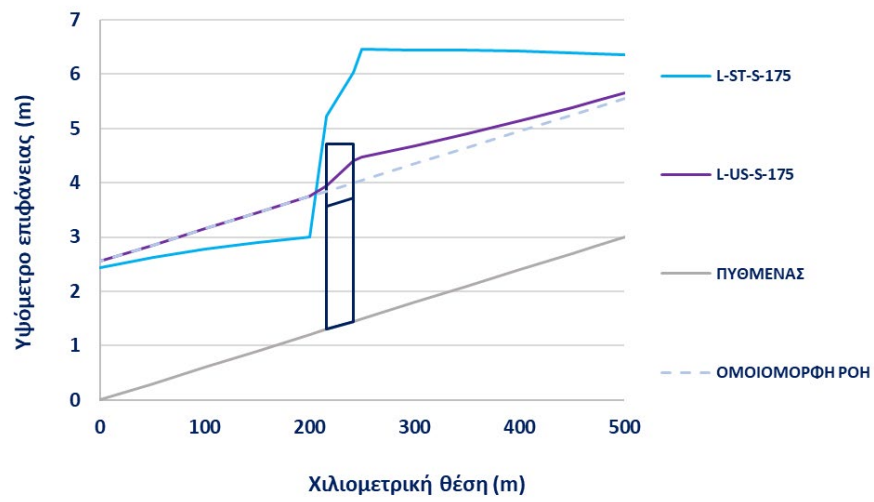
Από τους υπολογισμούς για παροχή ίση με $175\text{ m}^3/\text{s}$ διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Στο σενάριο L-ST-S-175 η γέφυρα είναι βυθισμένη. Το πρόγραμμα εμφανίζει σφάλμα στο οποίο αναφέρεται αδυναμία σύγκλισης στον υπολογισμό του ομοιόμορφου βάθους κατάντη του καλύμματος.
2. Στο σενάριο L-US-S-175 παρατηρείται ανύψωση της γραμμής ενέργειας πάνω από το κάλυμμα. Τα βάθη ροής είναι μεγαλύτερα από το ομοιόμορφο βάθος ανάντη του καλύμματος.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ



(α)



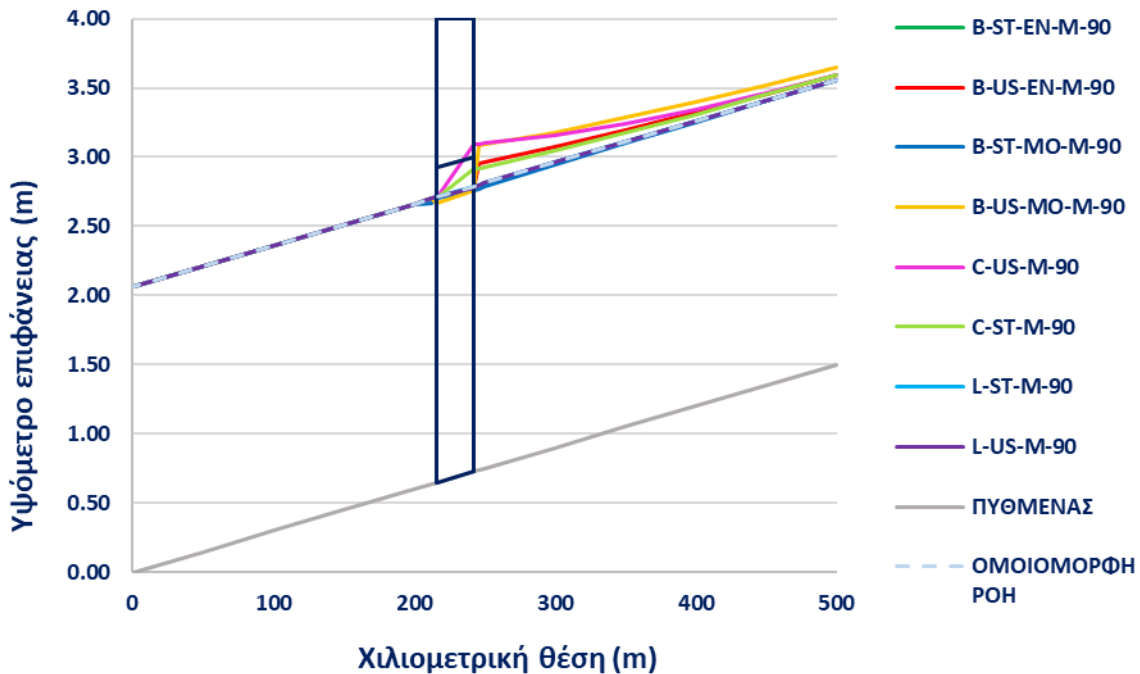
(β)

Εικόνα 3.9-3. Μεταβολή της επιφάνειας ροής με κάλυμμα για παροχή (α) $90 \text{ m}^3/\text{s}$ (β) $175 \text{ m}^3/\text{s}$

3.10 Σύγκριση υπολογισμών

3.10.1 Υπολογισμοί υποκρίσιμης ροής για παροχή 90 m³/s

Στην Εικόνα 3.10-1 παρουσιάζεται η επιφάνεια της υποκρίσιμης ροής για παροχή ίση με 90 m³/s και όλα τα σενάρια υπολογισμού.



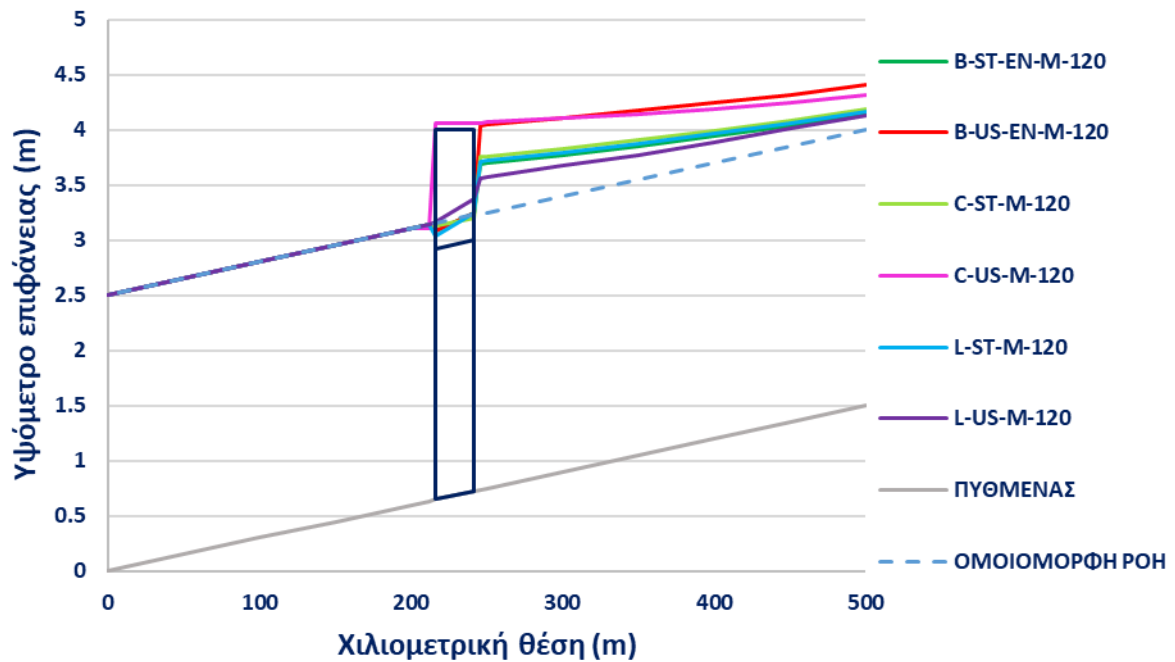
Εικόνα 3.10-1. Μεταβολή της επιφάνειας ροής για παροχή 90 m³/s σε υποκρίσιμη ροή

Διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Το κάλυμμα δεν επηρεάζει τη ροή που είναι ομοιόμορφη σε μόνιμες ή μη-μόνιμες συνθήκες.
2. Η γέφυρα δεν επηρεάζει τη ροή που είναι ομοιόμορφη σε μόνιμες ή μη-μόνιμες συνθήκες όταν επιλύεται η εξίσωση ενέργειας. Δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα οι τιμές των συντελεστών διαστολής και συστολής. Σε μη-μόνιμες συνθήκες παρατηρείται αύξηση των βαθών ροής ανάντη της γέφυρας.
3. Όταν στην προσομοίωση με γέφυρα συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση ποσότητας κίνησης ο όρος του όγκου του νερού σε συνθήκες μόνιμης ροής, η ροή είναι ομοιόμορφη. Όταν το υψόμετρο του πυθμένα είναι χαμηλότερο στην κατάντη διατομή από ότι στην ανάντη, η αγνόηση του όρου του βάρους προκαλεί αύξηση του ανάντη βάθους ροής προκειμένου να ισορροπήσει η εξίσωση της ορμής.
4. Τα βάθη ροής ανάντη του οχετού αυξάνονται λόγω των απωλειών ενέργειας στην είσοδο και την έξοδό του. Με μηδενισμό των συντελεστών απωλειών εισόδου και εξόδου, σε συνθήκες μόνιμης ροής η ροή πλησιάζει την ομοιόμορφη.
5. Σε μη-μόνιμες συνθήκες ροής τα βάθη ροής ανάντη της γέφυρας όταν επιλύεται η εξίσωση ποσότητας κίνησης είναι παρόμοια με αυτά ανάντη του οχετού.

3.10.2 Υπολογισμοί υποκρίσιμης ροής για παροχή 120 m³/s

Στην Εικόνα 3.10-2 παρουσιάζεται η επιφάνεια της υποκρίσιμης ροής για παροχή ίση με 120 m³/s και όλα τα σενάρια υπολογισμού.



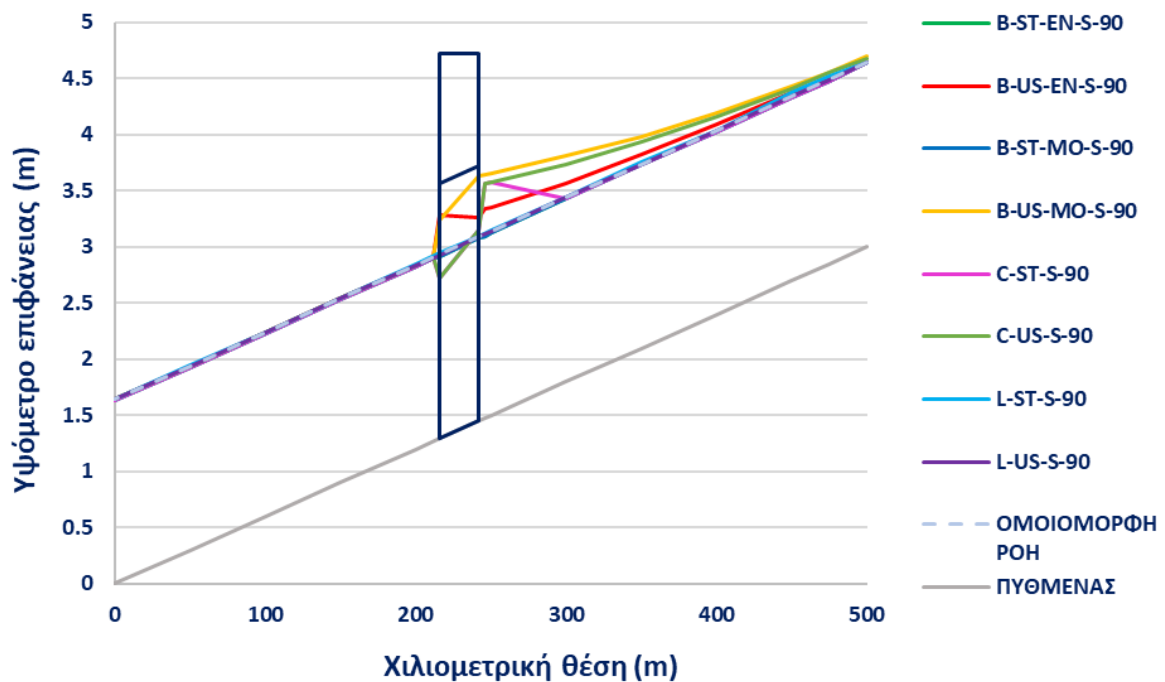
Εικόνα 3.10-2. Μεταβολή της επιφάνειας ροής για παροχή 120 m³/s σε υποκρίσιμη ροή

Διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Η γέφυρα (όταν επιλύεται η εξίσωση ενέργειας), ο οχετός (με απώλειες εισόδου και εξόδου) και το κάλυμμα έχουν ίδια βάθη ροής σε μόνιμες συνθήκες ροής.
2. Η γέφυρα και ο οχετός έχουν ίδια βάθη ροής ανάντη του τεχνικού έργου σε μη-μόνιμες συνθήκες ροής, με την διαφορά πως ο οχετός είναι βυθισμένος.
3. Τα βάθη ανάντη του οχετού και της γέφυρας είναι μεγαλύτερα σε συνθήκες μη-μόνιμης ροής από αυτά της μόνιμης ροής.
4. Σε μη-μόνιμες συνθήκες ροής τα βάθη ροής ανάντη του καλύμματος δεν διαφέρουν πολύ από τα βάθη σε συνθήκες μόνιμης ροής.
5. Τα βάθη ροής ανάντη του οχετού αυξάνονται λόγω των απωλειών ενέργειας στην είσοδο και την έξοδό του σε συνθήκες μόνιμης ροής. Με μηδενισμό των συντελεστών απωλειών εισόδου και εξόδου τα βάθη ροής ανάντη του οχετού μειώνονται. Σε συνθήκες μη-μόνιμης ροής ο μηδενισμός των συντελεστών απωλειών εισόδου και εξόδου προκαλεί αστάθεια στο πρόγραμμα.

3.10.3 Υπολογισμοί υπερκρίσιμης ροής για παροχή 90 m³/s

Στην Εικόνα 3.10-3 παρουσιάζεται η επιφάνεια της υπερκρίσιμης ροής για παροχή ίση με 90 m³/s και όλα τα σενάρια υπολογισμού.



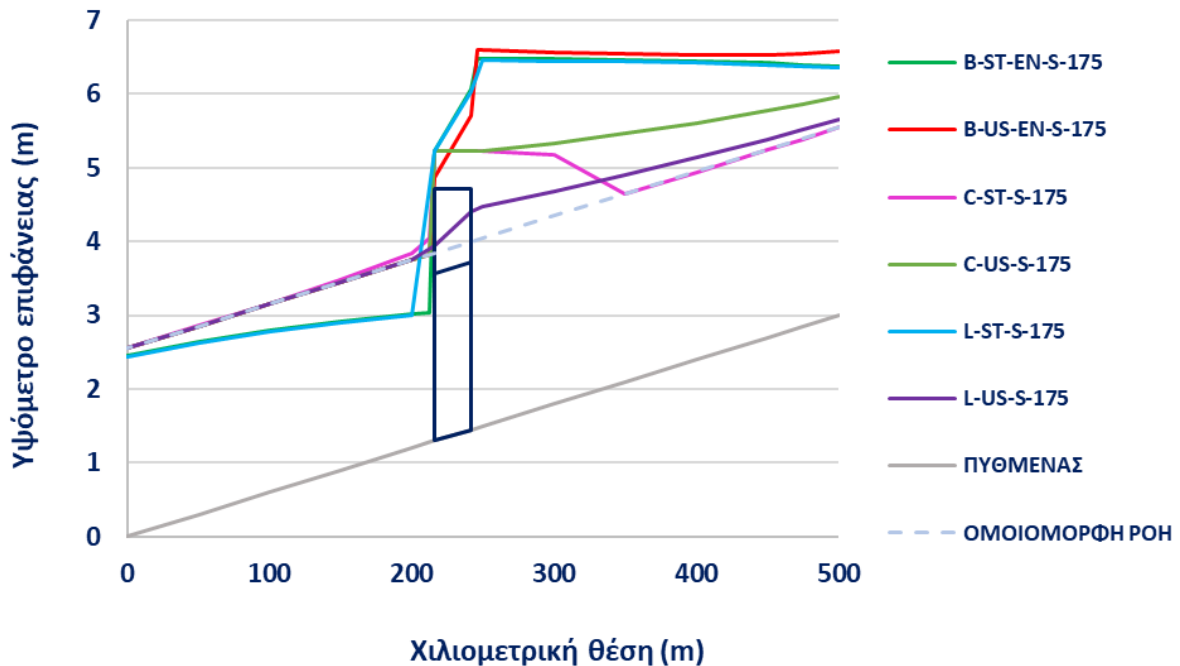
Εικόνα 3.10-3. Μεταβολή της επιφάνειας ροής για παροχή 90 m³/s σε υπερκρίσιμη ροή

Διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Η γέφυρα, ο οχετός (χωρίς απώλειες εισόδου και εξόδου) και το κάλυμμα έχουν ίδια βάθη ροής σε μόνιμες συνθήκες ροής.
2. Το κάλυμμα δεν επηρεάζει την ομοιόμορφη ροή σε μόνιμες και μη-μόνιμες συνθήκες.
3. Τα βάθη ροής ανάντη του οχετού σε συνθήκες μόνιμης ροής είναι μεγαλύτερα όταν οι συντελεστές απωλειών εισόδου και εξόδου είναι μη μηδενικοί.
4. Η γέφυρα όταν επιλύεται η εξίσωση ποσότητας κίνησης και ο οχετός παρουσιάζουν μεγαλύτερα βάθη ανάντη του τεχνικού έργου σε συνθήκες μη-μόνιμης ροής από αυτά της μόνιμης ροής.

3.10.4 Υπολογισμοί υπερκρίσιμης ροής για παροχή 175 m³/s

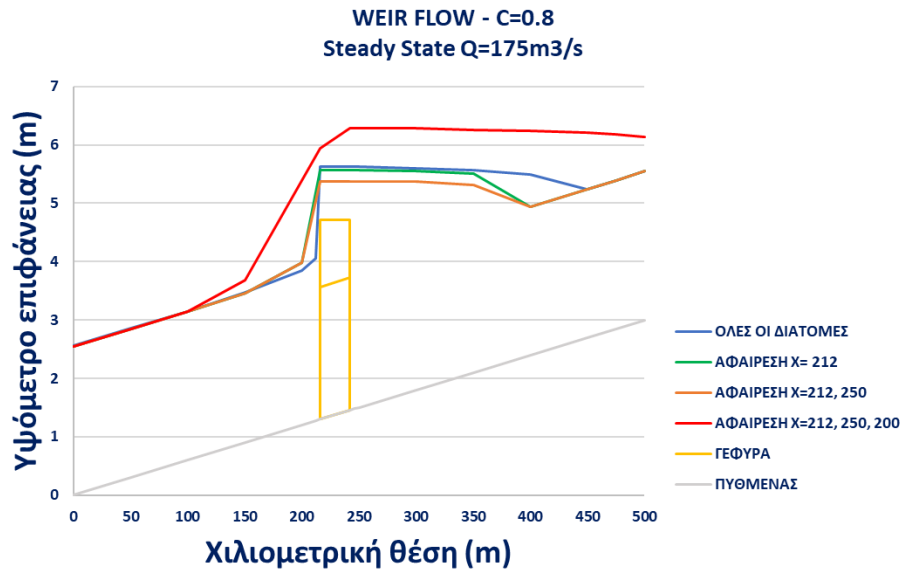
Στην Εικόνα 3.10-4 παρουσιάζεται η επιφάνεια της υπερκρίσιμης ροής για παροχή ίση με 175 m³/s και όλα τα σενάρια υπολογισμού.



Εικόνα 3.10-4. Μεταβολή της επιφάνειας ροής για παροχή 175 m³/s σε υπερκρίσιμη ροή

Διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. Η γέφυρα και το κάλυμμα έχουν σχεδόν ίδια βάθη ροής σε μόνιμες συνθήκες ροής.
2. Τα βάθη ροής ανάντη του οχετού είναι μεγαλύτερα όταν οι συντελεστές απωλειών εισόδου και εξόδου είναι μη μηδενικοί.
3. Τα βάθη ανάντη του οχετού είναι μεγαλύτερα σε συνθήκες μη-μόνιμης ροής από αυτά της μόνιμης ροής.
4. Τα βάθη ανάντη της γέφυρας είναι πολύ μεγαλύτερα σε σχέση με τα βάθη ανάντη του οχετού.
5. Το κάλυμμα σε συνθήκες μη μόνιμης ροής δεν είναι βυθισμένο. Τα βάθη ανάντη του καλύμματος είναι αρκετά μικρότερα από αυτά ανάντη της γέφυρας (0.98 m) και ανάντη του οχετού (0.5 m). Βάση της θεωρίας, επειδή η γραμμή ενέργειας είναι ψηλότερα από το άνω μέρος του καλύμματος το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται τον χώρο πάνω από το κάλυμμα ως διαθέσιμο.
6. Η λύση με τη μέθοδο του υπερχειλιστή διαφοροποιείται πάρα πολύ αλλάζοντας τον συντελεστή της παροχής του υπερχειλιστή.
7. Λόγω υπερκρίσιμης ροής για παροχή $Q=175 \text{ m}^3/\text{s}$ ιδανική μέθοδος επίλυσης στην περίπτωση της γέφυρας είναι η μέθοδος του υπερχειλιστή (weir flow computations). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10-5, αραιώνοντας τις διατομές κατάντη της γέφυρας, η επιφάνεια δεν πέφτει κατακόρυφα μετά την έξοδο της ροής από τη γέφυρα αλλά προσεγγίζει το ομοιόμορφο βάθος πιο ομαλά.



Εικόνα 3.10-5. Μεταβολή της επιφάνειας ροής σε γέφυρα με μόνιμη ροή παροχής

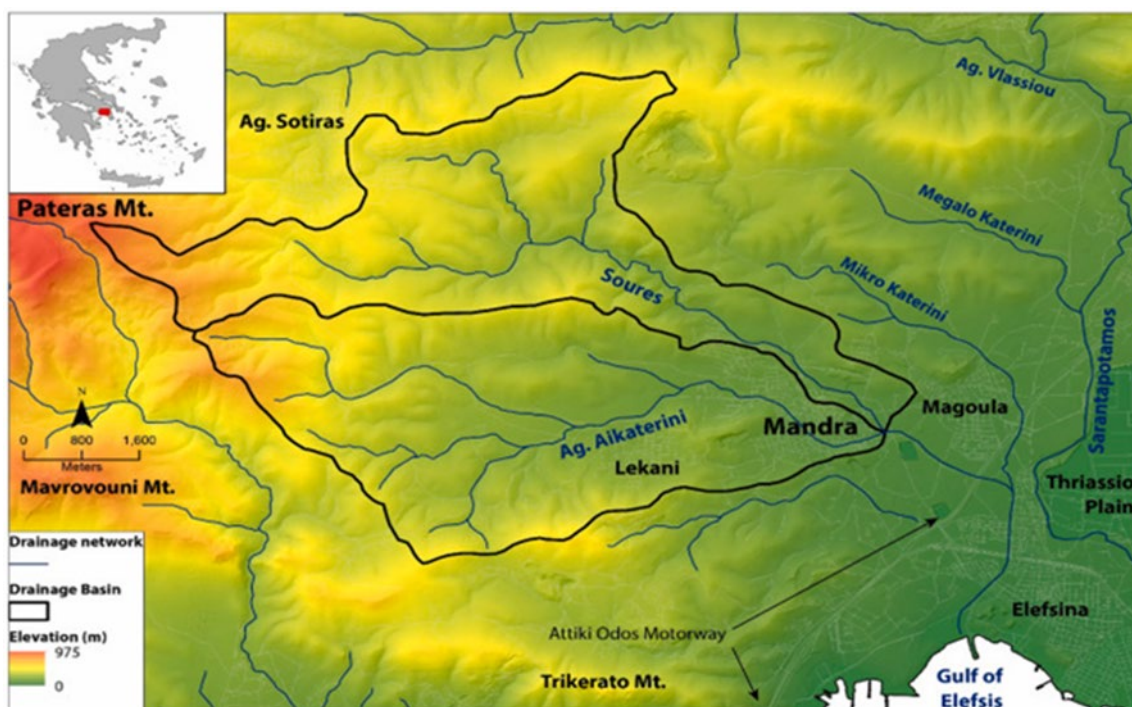
4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Προκειμένου τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση των τεχνικών έργων σε αγωγή απλής γεωμετρίας να εξετασθούν σε ένα πρόβλημα σύνθετης γεωμετρίας και πραγματικών συνθηκών ροής, κρίθηκε αναγκαία η διεξαγωγή μελέτης περίπτωσης.

Για την μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε μονοδιάστατο μοντέλο HEC-RAS 1D που είχε δημιουργηθεί από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής ΕΜΠ. Το μοντέλο αποτελούνταν από το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής της Μάνδρας στη Δυτική Αττική (τους χειμάρρους Σούρες και Αγ. Αικατερίνη και τον υπόγειο αγωγό Κοροπούλη) καθώς και τα υφιστάμενα αντιπλημμυρικά έργα που κατασκευάστηκαν στην περιοχή πριν και μετά το καταστροφικό γεγονός της πλημμύρας του Νοεμβρίου 2017.

4.1 Γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης

Η περιοχή της μελέτης περίπτωσης είναι η πόλη της Μάνδρας που βρίσκεται στη δυτική Αττική και η οποία αποτελεί έδρα του δήμου Μάνδρας – Ειδυλλίας. Η πόλη αυτή είναι κτισμένη στο Θριάσιο Πεδίο στους πρόποδες του όρους Πατέρα. Τα ρέματα που προκάλεσαν την πλημμύρα του 2017 είναι το ρέμα Σούρες και το ρέμα Αγία Αικατερίνη όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1-1, όπου στην έξοδο των λεκανών των ρεμάτων αυτών είναι χωροθετημένη η Μάνδρα.



Εικόνα 4.1-1. Χάρτης τοποθεσίας της περιοχής διερεύνησης με τις λεκάνες απορροής των χ. Σούρες και Αγία Αικατερίνη (Diakakis et al., 2019)

4.1.1 Ο χειμάρρος Σούρες

Ο χ. Σούρες ξεκινώντας από τα βόρεια φτάνει στον οικισμό της πόλης στο ανατολικό του όριο και αφού το διασχίσει ενώνεται με τον χ. της Αγίας Αικατερίνης στο νοτιοανατολικό του άκρο. Η ένωση αυτή βρίσκεται κοντά στην Ε.Ο. Ελευσίνας-Θηβών, την οποία και διασχίζουν κάθετα μέχρι να φτάσουν και να παροχετευθούν στον αγωγό, που έχει κατασκευαστεί από την Αττική Οδό. Η λεκάνη απορροής του χ. Σούρες προέρχεται από την συμβολή δύο άλλων χειμάρρων, τον χ. Σκυλόρεμα (από την περιοχή Κοκκιναριά) και τον χ. Αγίου Σωτήρα (από την περιοχή Πάχη Σωτήρος), η ένωση των οποίων γίνεται στην θέση Άγιος Χαράλαμπος (κοντά στην Ε.Ο. Ελευσίνας - Θηβών).

4.1.2 Ο χειμάρρος της Αγίας Αικατερίνης

Η είσοδος του χειμάρρου της Αγίας Αικατερίνης στην πόλη της Μάνδρας γίνεται από δυτικά, διασχίζει νότια την πόλη μέσω της οδού Κοροπούλη και τελικά φτάνει στο νοτιοανατολικό άκρο του οικισμού της Μάνδρας όπου και ενώνεται με το χ. Σούρες. Ο χ. αυτός προκύπτει από την συμβολή του χειμάρρου Κατσιμηδί και Οσίου Μελετίου, οι οποίοι συλλέγουν και διαρρέουν νερά της ευρύτερης λεκάνης απορροής. Η λεκάνη του χ. της Αγίας Αικατερίνης έχει ομαλό ανάγλυφο με συνολικό εμβαδόν 22.282 στρέμματα, έχοντας υψόμετρα που ξεκινούν από τα 63 μέτρα και φτάνουν μέχρι και τα 659 μέτρα, στο σημείο ένωσης με τον χ. Σούρες και στα δυτικά της πόλης στην κορυφή Κατακάλι, αντίστοιχα.

Για τον χ. Αγίας Αικατερίνης δεν προϋπήρχε κάποιο έργο για την διευθέτησή του. Ο χ. σταματά στην είσοδο της πόλης της Μάνδρας, όπου από εκεί και ύστερα είχε κατασκευαστεί ο υπόγειος αγωγός Κοροπούλη 2 x 1,80 m από οπλισμένο σκυρόδεμα. Σε αυτόν εισρέουν ύδατα από φρεάτια της οδού Ομήρου και άλλων δρόμων που συναντά η όδευσή του. Ο αγωγός εκβάλλει στο χ. Σούρες.

4.1.3 Ο χειμάρρος Σαρανταπόταμος

Ο χ. Σαρανταπόταμος προέρχεται από τη συμβολή δύο ρεμάτων, του ρ. Πέλκες και του ρεματος Αγίου Γεωργίου. Το ρ. Πέλκες πηγάζει από το όρος Κιθαιρώνας και διασχίζει την κοιλάδα της Οινόης και το ρ. Αγίου Γεωργίου πηγάζει από την ανατολική πλαγιά του όρους Πατέρα και διασχίζει την ομώνυμη κοιλάδα κοντά στην κοιλάδα της Οινόης. Μετά τη συμβολή ο χ. Σαρανταπόταμος διατρέχει το Θριάσιο πεδίο και εκβάλλει στον κόλπο της Ελευσίνας στην περιοχή της Χαλυβουργικής. Οι κυριότεροι χ. που συμβάλλουν σε αυτόν είναι ο Άγιος Βλάσιος, το Ξηρόρεμα και το Μεγάλο Κατερίνι (Μιχαηλίδη, 2013).



Εικόνα 4.1-2. Άξονες τμημάτων χ. Σούρες διαφορετικών χαρακτηριστικών και αγωγών εκβολής σε αυτό (Υπόβαθρο: Κτηματολόγιο Α.Ε.).

4.2 Τεχνικά έργα στην περιοχή μελέτης

4.2.1 Τεχνικά έργα στον χειμάρρο Σούρες

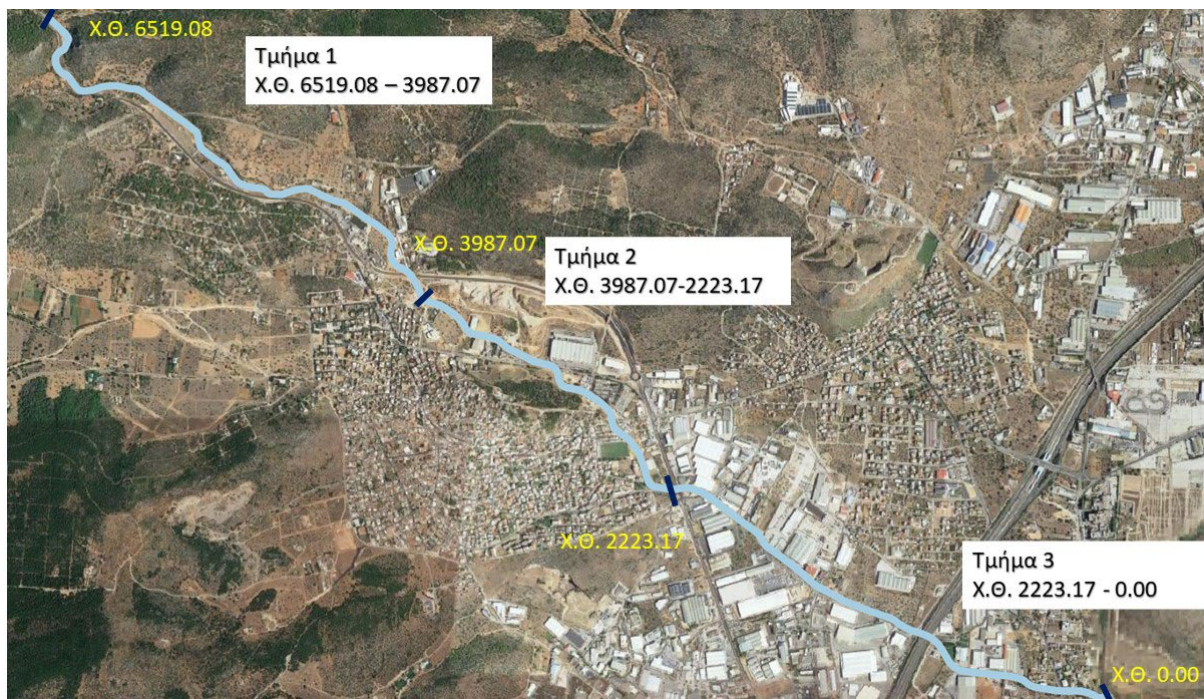
Τα τεχνικά έργα που υπήρχαν στον χειμάρρο Σούρες πριν το πλημμυρικό γεγονός του Νοεμβρίου 2017 ήταν:

1. Μικρή διευθέτηση του χειμάρρου ανάντη της συμβολής του με τον αγωγό Κοροπούλη με ύψος από 60 cm μέχρι 130 cm και πλάτος κατά μέσο όρο 2.5 m.
2. Δίδυμος ορθογωνικός αγωγός ύψους 3 m και πλάτους 4 m, ο οποίος ξεκινούσε από την εταιρεία DHL, περνούσε κάτω από την Αττική Οδό και έκβαλλε στον Σαρανταπόταμο.

Για τη λεπτομερέστερη ανάλυση του χ. Σούρες, τον χωρίζουμε σε 3 τμήματα.

Πίνακας 4.2-1. Επιμέρους τμήματα του χ. Σούρες

Τμήμα	Ανάτη Διατομή		Κατάντη Διατομή	
	Χ.Θ. (m) (HEC-RAS)	Ονομασία	Χ.Θ. (m) (HEC-RAS)	Ονομασία
1	6519	Περιοχή «Καντίνες» ανάτη της πόλης της Μάνδρας	3987	Αρχή νέων έργων αντιπλημμυρικής προστασίας
2	3950	Αρχή νέων έργων αντιπλημμυρικής προστασίας	2223	Έναρξη διευθετημένου τμήματος
3	2223	Έναρξη διευθετημένου τμήματος	0	Εκβολή χειμάρρου Σούρες στον Σαρανταπόταμο



Εικόνα 4.2-1. Άξονας της κοίτης του χ. Σούρες (Υπόβαθρο: Google Satellite)

4.2.1.1 Τμήμα 1 – Ανάντη της συμβολής του χ. Σούρες με τον χ. Αγία Αικατερίνη

Το πρώτο τμήμα του χ. Σούρες ξεκινά από τη Χ.Θ. 6519.08 m και ολοκληρώνεται στη Χ.Θ. 3987.07 m, όπου ξεκινούν τα αντιπλημμυρικά έργα στην πόλη της Μάνδρας. Σε αυτό το τμήμα χωροθετούνται τρία τεχνικά έργα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2-2.



Εικόνα 4.2-2. Θέση τεχνικών έργων στο τμήμα 1 του χ. Σούρες (Υπόβαθρο: Google Satellite)

Πίνακας 4.2-2. Στοιχεία τεχνικών έργων τμήματος 1

Κατάντη Χ.Θ. (m) (HECRAS)	Ανάντη Χ.Θ. (m) (HECRAS)	Περιγραφή
6+333.49	6+318.21	Πλάτος οχετού: 3.70 m Ύψος οχετού: 1.20 m Μήκος οχετού: 15.00 m Διατομή: Ορθογωνική
6+185.68	6+158.33	Πλάτος οχετού: 2.00 m Ύψος οχετού: 2.30 m Μήκος οχετού: 27.00 m Διατομή: Ορθογωνική
4+116.50	4+075.00	Πλάτος οχετού: 8.20 m Ύψος οχετού: 3.00 m Μήκος οχετού: 41.50 m Διατομή: Δίδυμη Ορθογωνική

4.2.1.2 Τμήμα 2 – Νέα αντιπλημμυρικά έργα

Το δεύτερο τμήμα του χ. Σούρες αποτελείται από τα αντιπλημμυρικά έργα που πραγματοποιήθηκαν μετά το πλημμυρικό γεγονός του Νοεμβρίου 2017. Ο άξονας της διευθέτησης του χειμάρρου Σούρες κατασκευάστηκε κυρίως εντός της υφιστάμενης κοίτης του χειμάρρου και έχει μήκος 1.78 km. Σε

ορισμένα σημεία παρατηρούνται μετατοπίσεις του άξονα, ώστε να προσαρμοστεί στις παραρεμάτιες εκτάσεις που έχουν διαμορφωθεί. Στην αρχική μελέτη, προβλέπονταν πέντε μικρές πτώσεις της στάθμης του πυθμένα της διευθέτησης, ύψους 0.50 m, οι οποίες όμως δεν κατασκευάστηκαν. Αντί αυτών κατασκευάστηκαν πέντε μικρές πτώσεις ανάντη της Χ.Θ. 1780 m, εντός δίδυμου ορθογωνικού αγωγού.



Εικόνα 4.2-3. Δίδυμος ορθογωνικός αγωγός με πτώσεις

Οι διατομές διευθέτησης είναι επενδεδυμένες με συρματοκιβώτια και διακρίνονται σε 3 τύπους με χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 4.2-3.

Πίνακας 4.2-3. Τυπικές διατομές της διευθέτησης του χ. Σούρες
(Πηγή: Περιφέρεια Αττικής, 2014)

Τύπος διατομής	1 Τραπεζοειδής	2 Τραπεζοειδής	3 Ορθογωνική
Σκαρίφημα διατομής			
Επενδεδυμένο τμήμα	Βάθος= 1.0 m Κλίση πρανών= 1:1 Συν. Manning = 0.025 Ταχύτητα max = 6.0 m/s	Πλάτος πυθμένα =6.00 m Ύψος επένδυσης =3.00–3.50 m Κλίση πρανών= 1:1 Ταχύτητα max = 8.0 m/s	Πλάτος πυθμένα = 8.00 m Ύψος επένδυσης = 3.00–3.50 m
Ανεπένδυτο τμήμα	Κλίση πρανών= 1:1.5	-	-

Στις θέσεις όπου ο χ. Σούρες διασταυρώνεται με το υφιστάμενο οδικό δίκτυο (Εθνική Οδός Ελευσίνας-Θηβών, τοπικές οδούς και την επαρχιακή οδό προς Μαγούλα) κατασκευάσθηκαν πέντε τεχνικά έργα-οχετοί από σκυρόδεμα στις θέσεις που φαίνονται στον Πίνακα 4.2-4. Η διατομή των οχετών είναι ορθογωνική και φαίνεται στην Εικόνα 4.2-3. Η διατομή αυτή είναι κλειστή δίδυμη ορθογωνική διατομή 2 x 4.00 m x 3.00 m, από οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37. Το μήκος των οχετών είναι ανάλογο με το πλάτος και τη γωνία της οδού που διασταυρώνουν. Σημειώνεται ότι αυτά τα τεχνικά έργα αντικαθιστούν τα προηγούμενα.

Πίνακας 4.2-4. Στοιχεία τεχνικών έργων της διευθέτησης του χ. Σούρες

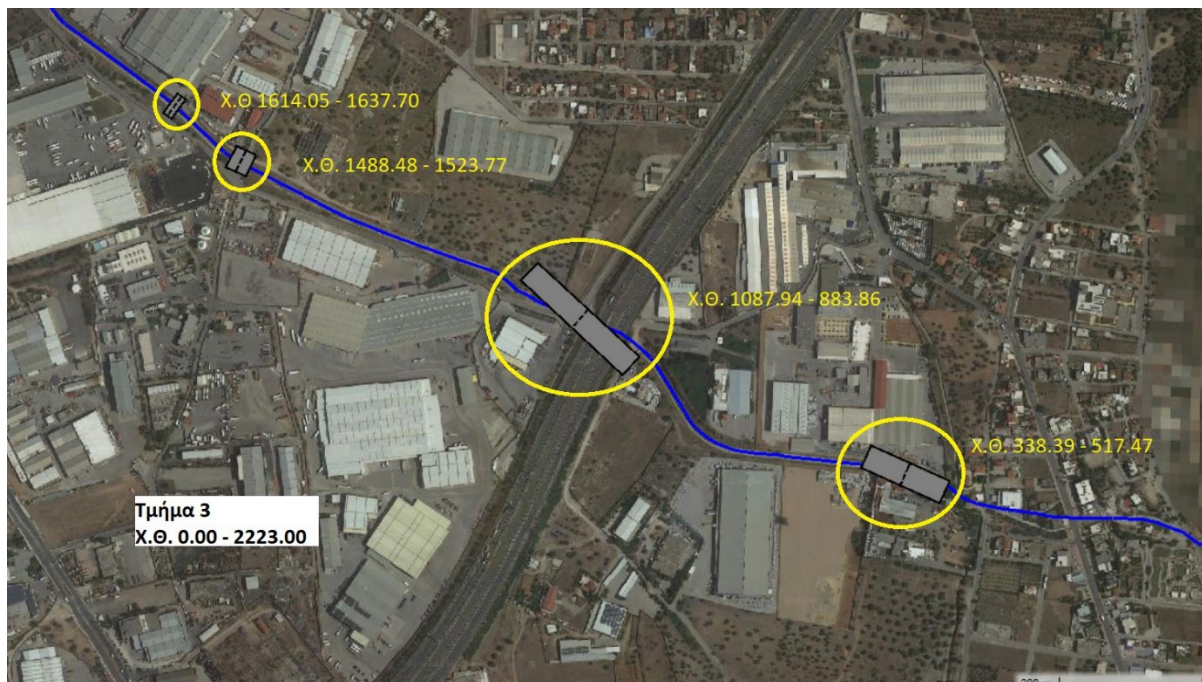
Σύντομη ονομασία τεχνικού έργου	Κατάντη Χ.Θ. (m) (HECRAS)	Ανάντη Χ.Θ. (m) (HECRAS)	Θέση	Περιγραφή
TE1	2+038.70	2+369.77	Διασταύρωση με Ε.Ο. Ελευσίνας – Θηβών	Πλάτος οχετού: 2x4.00 m Ύψος οχετού: 3.00 m Μήκος οχετού: 323.00 m Διατομή: Δίδυμη Ορθογωνική
TE2	2+828.20	2+835.81	Διασταύρωση με Οδό Λουκά	Πλάτος οχετού: 2x4.00 m Ύψος οχετού: 3.00 m Μήκος οχετού: 7.00 m Διατομή: Δίδυμη Ορθογωνική
TE3	2+922.50	2+928.51	Διασταύρωση με Οδό Δούκα που οδηγεί στο Κοιμητήριο	Πλάτος οχετού: 2x4.00 m Ύψος οχετού: 3.00 m Μήκος οχετού: 5.00 m Διατομή: Δίδυμη Ορθογωνική
TE4	2+984.15	2+989.01	Διασταύρωση με Οδό Ψηλορείτη	Πλάτος οχετού: 2x4.00 m Ύψος οχετού: 3.00 m Μήκος οχετού: 5.00 m Διατομή: Δίδυμη Ορθογωνική
TE5	3+201.51	3+267.59	Διασταύρωση με Ε.Ο. Ελευσίνας – Θηβών (κοντά στο βιομηχανικό κτίριο Logistics Βερόπουλος)	Πλάτος οχετού: 2x4.00 m Ύψος οχετού: 3.00 m Μήκος οχετού: 66.00 m Διατομή: Δίδυμη Ορθογωνική



Εικόνα 4.2-4. Θέση των τεχνικών της διευθέτησης χ. Σούρες
(Πηγή: Περιφέρεια Αττικής, 2014)

4.2.1.3 Τμήμα 3 – Διευθέτηση κατά την κατασκευή της Αττικής Οδού

Το τμήμα 3 του χειμάρρου Σούρες είχε διευθετηθεί κατά την κατασκευή των έργων της Αττικής Οδού με δίδυμο ανοικτό ορθογωνικό αγωγό διαστάσεων 4 x 3 m. Ξεκινά κατόπιν της δεύτερης συμβολής του με την Ε.Ο. Ελευσίνιας-Θηβών και καταλήγει στο ποταμό Σαρανταπόταμο περνώντας κάτω από την Αττική Οδό. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2-5, σε μερικές θέσεις ο αγωγός από ανοικτός μετατρέπεται σε κλειστό, όπως στην γέφυρα της Αττικής Οδού.



Εικόνα 4.2-5. Θέση τεχνικών έργων στο τμήμα 3 του χ. Σούρες
(Υπόβαθρο: Google Satellite)

Πίνακας 4.2-5. Στοιχεία τεχνικών έργων τμήματος 3

Σύντομη ονομασία τεχνικού έργου	Κατάντη Χ.Θ. (m) (HECRAS)	Ανάτη Χ.Θ. (m) (HECRAS)	Περιγραφή
-	1+614.05	1+637.70	Πλάτος οχετού: 2x4.00m Ύψος οχετού: 3.00m Μήκος οχετού: 14.00m Διατομή: Δίδυμη Ορθογωνική
-	1+488.48	1+523.77	Πλάτος οχετού: 2x4.00m Ύψος οχετού: 3.00m Μήκος οχετού: 30.00m Διατομή: Δίδυμη Ορθογωνική
Γέφυρα Αττικής Οδού	1+087.94	0+883.86	Πλάτος οχετού: 2x4.00m Ύψος οχετού: 3.00m Μήκος οχετού: 192.00m Διατομή: Δίδυμη Ορθογωνική
-	0+388.39	0+517.47	Πλάτος οχετού: 2x4.00m Ύψος οχετού: 3.00m Μήκος οχετού: 120.00m Διατομή: Δίδυμη Ορθογωνική

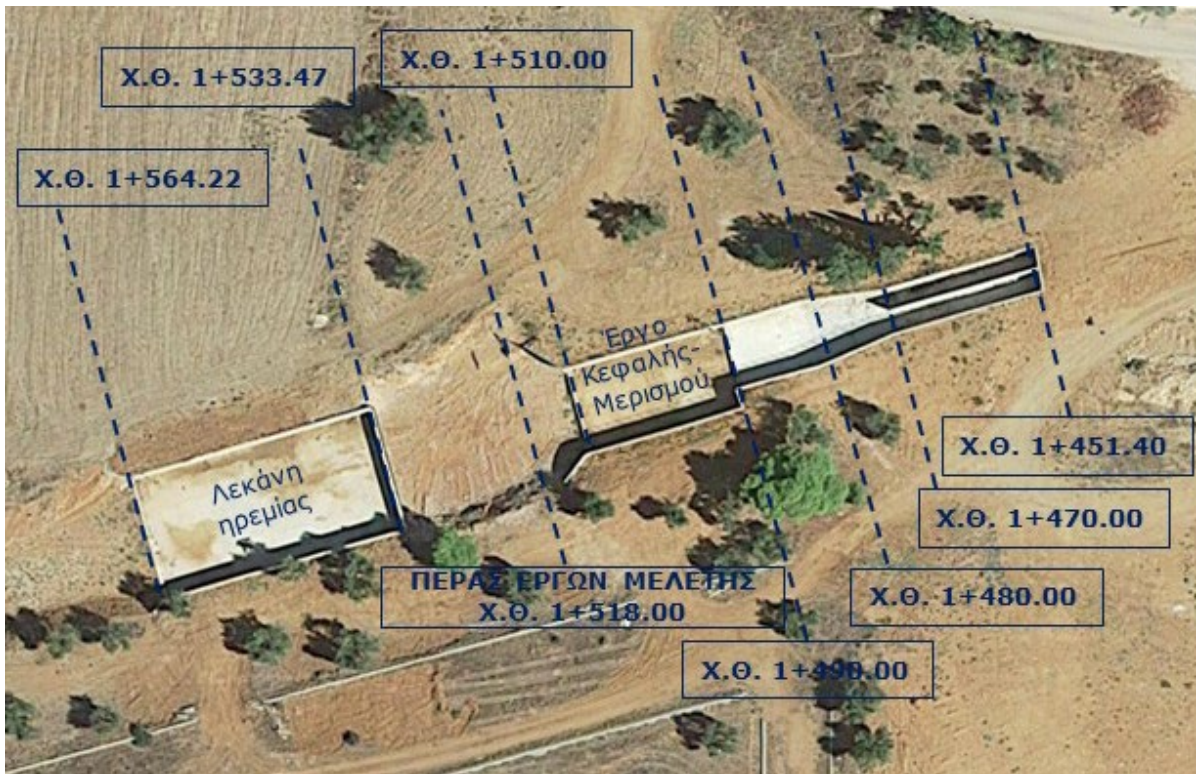
4.2.2 Τεχνικά έργα στον χείμαρρο της Αγίας Αικατερίνης

Σύμφωνα με τη μελέτη που εκπονήθηκε από την Τεχνική Εταιρεία «ΕΤΜΕ Πέππας και Συνεργάτες Ε.Ε.» στο χείμαρρο Αγίας Αικατερίνης προβλεπόταν κατασκευή «έργου κεφαλής-μερισμού» που θα διαχώριζε την πλημμυρική παροχή $Q=57 \text{ m}^3/\text{s}$, σε δύο παροχές της τάξεως των $Q_1=47 \text{ m}^3/\text{s}$ και $Q_2=10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Η παροχή Q_2 θα διοχετεύονταν μέσω τάφρου προς τον υφιστάμενο αγωγό Κοροπούλη (ο οποίος εκβάλλει στο χ. Σούρες πλησίον του κόμβου ΕΟ Ελευσίνας-Θηβών, Οδού Κοροπούλη) ωστόσο δεν κατασκευάστηκε τελικά. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.2-5, στο έργο κεφαλής μερισμού υπάρχει μεταλλική πλάκα που καλύπτει οπή στο δεξί κατά τη ροή τοιχίο επιτρέποντας τη μελλοντική κατασκευή αγωγού διόδευσης της παροχής Q_2 επί της φυσικής κοίτης του χ. Αγίας Αικατερίνης έως τον κλειστό υπόγειο αγωγό της οδού Κοροπούλη.

Για την πλημμυρική παροχή Q_1 επιλέχθηκε η χάραξη κλειστού, υπόγειου δίδυμου ορθογωνικού αγωγού οπλισμένου σκυροδέματος που ακολουθεί τις οδούς Κάλβου, Σ. Ρόκα και Ηπείρου έως την εκβολή του στην κοίτη του χ. Σούρες. Για την αποφυγή της ανάπτυξης ταχυτήτων μεγαλύτερων των 7.12 m/s προβλέφθηκαν τρία σημεία πτώσεως του πυθμένα ύψους 0.50 m . Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού όπως περιγράφονται στη μελέτη δίνονται στον Πίνακα 4.2-5.

Σύμφωνα με τα σχέδια που δόθηκαν από την εταιρεία κατασκευής και την επιτόπια αυτοψία της ομάδας του Εργαστηρίου Υδραυλικής ΕΜΠ, μεταξύ των Χ.Θ. $1+533.47 \text{ m}$ και $1+564.22 \text{ m}$ κατασκευάστηκε λεκάνη ηρεμίας οπλισμένου σκυροδέματος διαστάσεων $W \times L \times H = 15.00 \text{ m} \times 30.15 \text{ m} \times 3.00 \text{ m}$ η οποία δεν προβλεπόταν στη μελέτη. Η λεκάνη ηρεμίας στην έξοδό της (θέση Χ.Θ. $1+533.47 \text{ m}$) φέρει τοιχίο οπλισμένου σκυροδέματος ύψους 1.65 m που λειτουργεί ως υπερχειλιστής πλάτους 0.35 m ενώ για την αποτόνωση των τάσεων στο τοιχίο έχουν κατασκευαστεί επτά οπές διαμέτρου 160 mm στο ύψος του πυθμένα.



Εικόνα 4.2-5. Κάτοψη έργων επί του χ. Αγίας Αικατερίνης (Υπόβαθρο: Google Earth)

Πίνακας 4.2-5. Σύνοψη γεωμετρικών χαρακτηριστικών ροής του χ. Αγίας Αικατερίνης

Κατάντη Χ.Θ. (m) (HECRAS)	Ανάτη Χ.Θ. (m) (HECRAS)	Μήκος (m)	Διατομή /Τεχνικό έργο	
			Μελέτη	Όπως κατασκευάστηκε
0+000	0+037.60	37.60	Συμβολή με χ. Σούρες	Βλ. Μελέτη
0+037.60	0+230.80	193.20	Κλειστή Δίδυμη Ορθογωνική 2x2.50x2.50	Βλ. Μελέτη
0+230.80	1+316.00	85.20	Κλειστή Δίδυμη Ορθογωνική 2x2.50x2.80	Βλ. Μελέτη
1+316.00	1+451.40	135.40	Κλειστή Δίδυμη Ορθογωνική 2x2.50x2.50	Βλ. Μελέτη
1+451.40	1+470.00	18.60	Ανοικτή Δίδυμη Ορθογωνική 2x2.50x3.00	Βλ. Μελέτη
1+470.00	1+480.00	10.00	Συναρμογή	Βλ. Μελέτη
1+480.00	1+490.00	10.00	Ορθογωνική 8.00x3.00	Βλ. Μελέτη
1+490.00	1+510.00	20.00	Έργο Μερισμού Κεφαλής	Βλ. Μελέτη
1+510.00	1+518.00	8.00	Διαμόρφωση φυσικής κοίτης	Βλ. Μελέτη
1+518.00	1+533.47	15.47	Δεν προβλεπόταν στη μελέτη	Οριζοντιοποίηση φυσικού πυθμένα
1+533.47	1+564.22	30.75	Δεν προβλεπόταν στη μελέτη	Ορθογωνική λεκάνη ηρεμίας Ο.Σ. διαστάσεων 15.00 m x 30.15 m x 3.00 m με κατακόρυφο υπερχειλιστή ύψους 1.65 m στην έξοδο
1+564.22	1+621.88	57.66	Δεν προβλεπόταν στη μελέτη	Ανεπένδυτη φυσική κοίτη χ. Αγίας Αικατερίνης

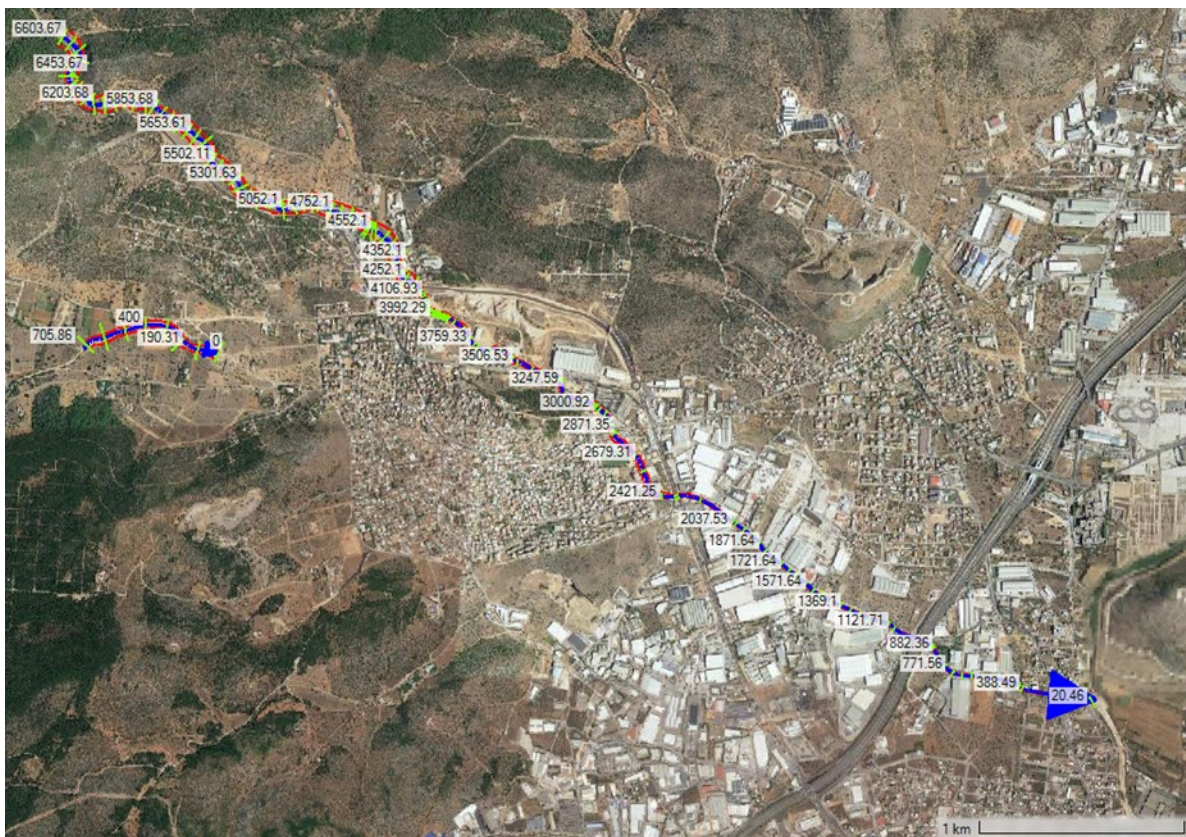
4.3 Περιγραφή Υδροδυναμικού Μοντέλου 1D

4.3.1 Εισαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στο μοντέλο

Αρχικά, έγινε εισαγωγή στο QGIS του χάρτη της περιοχής από το Google Earth και χάραξη (οπτικά) των γραμμών του άξονα του ρέματος (stream line) και των όχθων (banks). Έπειτα, χαράχθηκαν οι γραμμές των διατομών σε οριζοντογραφία.

Για την επεξεργασία των διατομών της Αγίας Αικατερίνης αλλά και για ένα τμήμα του χ. Σούρες ανάντη του διευθετημένου τμήματος, χρειάστηκε η διόρθωση τους στο Autocad μέσω χρήσης τοπογραφικού διαγράμματος που υπήρχε διαθέσιμο από τη σύνταξη της μελέτης της Τεχνικής Εταιρείας «ΕΤΜΕ Πέππας και Συνεργάτες Ε.Ε.».

Στη συνέχεια, οι παραπάνω γραμμές μετατράπηκαν σε shape files, προστέθηκαν στο RAS Mapper του μοντέλου και παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.3-1.



Εικόνα 4.3-1. Γραμμές αξόνων των ρεμάτων Σούρες & Αγίας Αικατερίνης, διατομών και όχθων

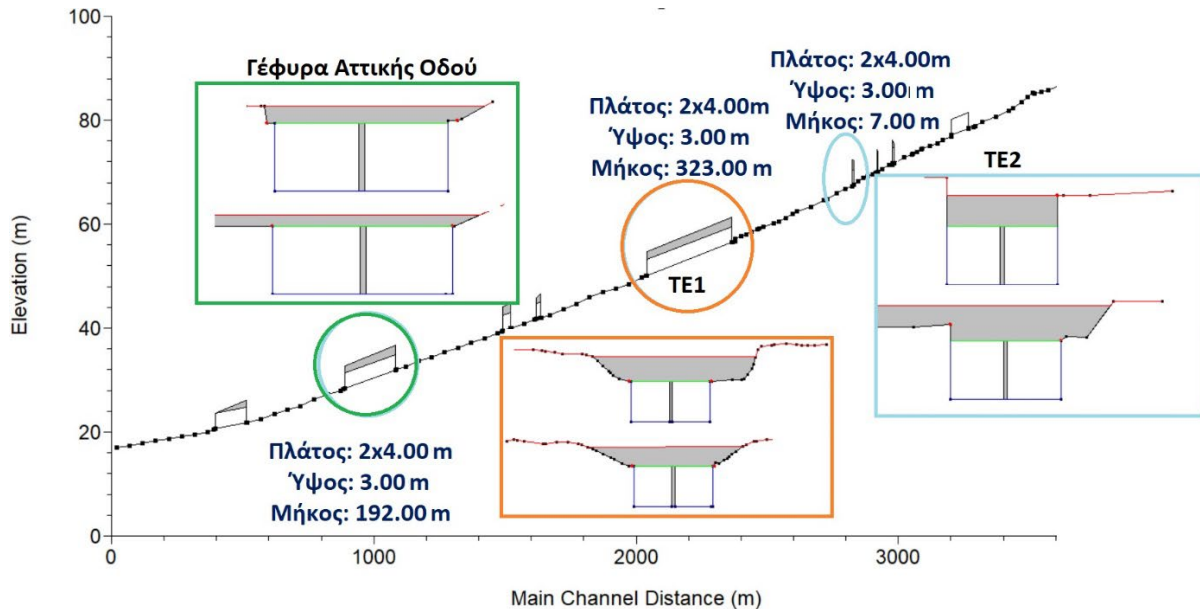
Ό συντελεστής τραχύτητας Manning n , θεωρήθηκε ίσος με $n=0.016$ στα επενδεδυμένα με σκυρόδεμα τμήματα, $n=0.03$ σε θαμνώδη τμήματα και $n=0.05$ σε ακόμη πιο θαμνώδη τμήματα των όχθων χειμάρρων.

Για την προσομοίωση των τεχνικών έργων της περιοχής μελέτης στο μονοδιάστατο μοντέλο ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα Κεφάλαια 2.3, 2.4 και 2.5. Στην αρχική μορφή του μοντέλου όπως είχε διαμορφωθεί από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής ΕΜΠ, τα τεχνικά έργα προσομοιώθηκαν με κάλυμμα (Lid), εκτός από τις τρεις γέφυρες που υπάρχουν στο τμήμα 1 του χ. Σούρες, οι οποίες προσομοιώθηκαν με γέφυρα (Bridge).

4.4 Σενάρια Υπολογισμών στην περιοχή μελέτης

4.4.1 Σενάρια υπολογισμών

Από το σύνολο των τεχνικών έργων του μοντέλου μελέτης περίπτωσης, επιλέχθηκαν τρία, ένα μικρού (TE2), ένα μεσαίου (TE Αττικής Οδού) και ένα μεγάλου μήκους (TE1) με σκοπό να προσομοιωθούν με τους τρεις διαθέσιμους τρόπους του HEC-RAS (γέφυρα, οχετό και κάλυμμα).



Εικόνα 4.4-1. Η θέση και τα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων της μελέτης περίπτωσης που προσομοιώθηκαν με γέφυρα, κάλυμμα και οχετό

Τα πλημμυρογράφημα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο της μελέτης περίπτωσης, αφορούν σε πλημμυρικό σενάριο με περίοδο επαναφοράς $T=20$ έτη, $T=50$ έτη, $T=100$ έτη καθώς και στο πλημμυρογράφημα της πλημμύρας του Νοεμβρίου 2017, και χορηγήθηκαν από τον Καθηγητή Μπαλτά Ευάγγελο. Οι παροχές αιχμής για τους χ. Σούρες και Αγία Αικατερίνη για κάθε πλημμυρικό σενάριο φαίνονται στον Πίνακα 4.4-1.

Πίνακας 4.4-1. Παροχές αιχμής των χ. Σούρες και Αγία Αικατερίνη για διάφορα πλημμυρικά επεισόδια

Πλημμυρικό σενάριο	Παροχή αιχμής χ. Σούρες (m^3/s)	Παροχή αιχμής χ. Αγίας Αικατερίνης (m^3/s)
$T=20$ χρόνια	38.13	61.57
$T=50$ χρόνια	46.99	75.88
$T=100$ χρόνια	54.41	87.85
Πλημμύρα 2017	172.47	150.51

Το υδραυλικό μοντέλο απεδείχθη αρκετά ευαίσθητο σε μεταβολές γεωμετρίας. Πιο συγκεκριμένα, οι υδραυλικοί υπολογισμοί δεν ολοκληρώνονταν στις εξής περιπτώσεις:

1. Αντικατάσταση του καλύμματος με οχετό στο TE2
2. Αντικατάσταση του καλύμματος με γέφυρα στο TE Αττικής Οδού και
3. Αντικατάσταση του καλύμματος με γέφυρα ή οχετό στο TE1. Συνεπώς, το τεχνικό έργο TE1 μπορεί να προσομοιωθεί μόνο με κάλυμμα.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ

Σε αυτές τις περιπτώσεις, έγιναν πολλές αλλαγές παραμέτρων που επηρεάζουν την ευστάθεια του προγράμματος όπως το χρονικό βήμα, οι τιμές των συντελεστών απωλειών (εισόδου, εξόδου, συστολής και διαστολής), οι αποστάσεις μεταξύ των διατομών των τεχνικών έργων, η τιμή του συντελεστή τραχύτητας Manning, η αλλαγή της εξίσωσης επίλυσης και άλλες.

Καμία από τις αλλαγές που έγιναν δεν ήταν αποτελεσματικές, καθώς η προσομοίωση εξακολουθούσε να μην ολοκληρώνεται.

Στον Πίνακα 4.4-2, φαίνονται τα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν, η παροχή που υπολογίσθηκε ανάπη από το τεχνικό έργο και η περίοδος επαναφοράς που αντιστοιχεί στο κάθε σενάριο. Αξίζει να σημειωθεί πως η ροή είναι υπερκρίσιμη.

Στην περίπτωση που το πρόγραμμα αδυνατούσε να ολοκληρώσει τους υπολογισμούς, η παροχή ανάπη εκφράζεται με « - ».

Πίνακας 4.4-2. Σενάρια υπολογισμών ροής στα τεχνικά έργα ΤΕ1, ΤΕ2 και ΤΕ Αττικής Οδού

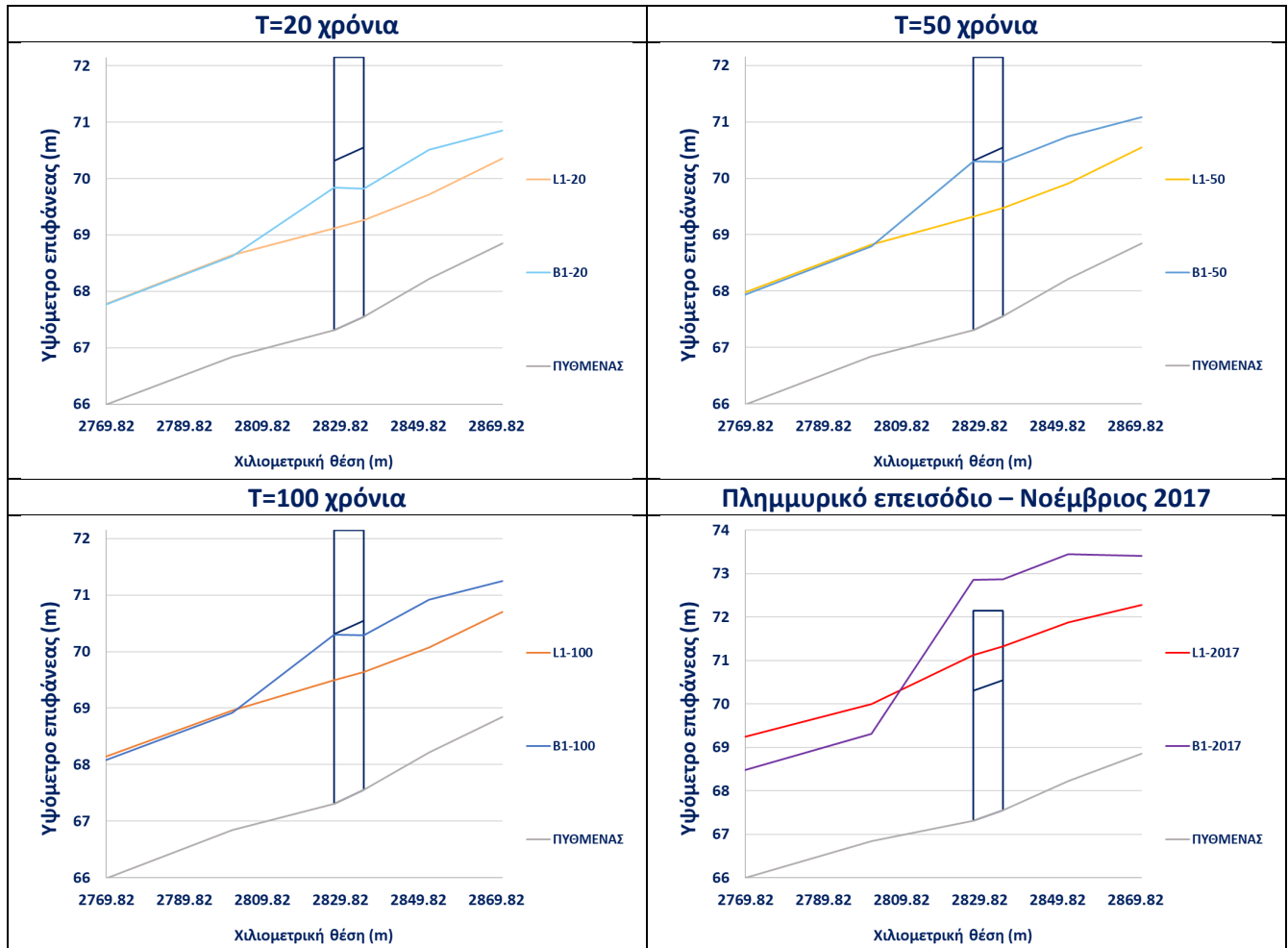
Σενάριο	Τεχνικό έργο (Γέφυρα (B), Οχετός (C), Κάλυμμα (L))	Σύντομη ονομασία τεχνικού έργου	Παροχή ανάπτυξη (m ³ /s)	Πλημμυρικό επεισόδιο
LA.O-20	L	ΤΕ Αττικής Οδού	88.27	T=20 χρόνια
LA.O-50	L	ΤΕ Αττικής Οδού	107.14	T=50 χρόνια
LA.O-100	L	ΤΕ Αττικής Οδού	123.56	T=100 χρόνια
LA.O-2017	L	ΤΕ Αττικής Οδού	214.47	Πλημμύρα 2017
BA.O-20	B	ΤΕ Αττικής Οδού	-	T=20 χρόνια
BA.O -50	B	ΤΕ Αττικής Οδού	-	T=50 χρόνια
BA.O -100	B	ΤΕ Αττικής Οδού	-	T=100 χρόνια
BA.O -2017	B	ΤΕ Αττικής Οδού	-	Πλημμύρα 2017
CA.O-20	C	ΤΕ Αττικής Οδού	82.05	T=20 χρόνια
CA.O -50	C	ΤΕ Αττικής Οδού	96.82	T=50 χρόνια
CA.O -100	C	ΤΕ Αττικής Οδού	108.39	T=100 χρόνια
CA.O -2017	C	ΤΕ Αττικής Οδού	126.07	Πλημμύρα 2017
L1-20	L	ΤΕ1	88.48	T=20 χρόνια
L1-50	L	ΤΕ1	107.26	T=50 χρόνια
L1-100	L	ΤΕ1	122.43	T=100 χρόνια
L1-2017	L	ΤΕ1	90.93	Πλημμύρα 2017
B1-20	B	ΤΕ1	-	T=20 χρόνια
B1-50	B	ΤΕ1	-	T=50 χρόνια
B1-100	B	ΤΕ1	-	T=100 χρόνια
B1-2017	B	ΤΕ1	-	Πλημμύρα 2017
C1-20	C	ΤΕ1	-	T=20 χρόνια
C1-50	C	ΤΕ1	-	T=50 χρόνια
C1-100	C	ΤΕ1	-	T=100 χρόνια
C1-2017	C	ΤΕ1	-	Πλημμύρα 2017
L2-20	L	ΤΕ2	87.26	T=20 χρόνια
L2-50	L	ΤΕ2	104.7	T=50 χρόνια
L2-100	L	ΤΕ2	118.75	T=100 χρόνια
L2-2017	L	ΤΕ2	222.63	Πλημμύρα 2017
B2-20	B	ΤΕ2	85.94	T=20 χρόνια
B2-50	B	ΤΕ2	101.56	T=50 χρόνια
B2-100	B	ΤΕ2	113.89	T=100 χρόνια
B2-2017	B	ΤΕ2	153.86	Πλημμύρα 2017
C2-20	C	ΤΕ2	-	T=20 χρόνια
C2-50	C	ΤΕ2	-	T=50 χρόνια
C2-100	C	ΤΕ2	-	T=100 χρόνια
C2-2017	C	ΤΕ2	-	Πλημμύρα 2017

4.4.2 Σύγκριση υπολογισμών

Ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα παραπάνω σενάρια.

Στον Πίνακα 4.4-3 παρουσιάζεται η επιφάνεια της ροής ανάντη και κατάντη του ΤΕ2.

Πίνακας 4.4-3. Προσομοίωση τεχνικού έργου ΤΕ2 με κάλυμμα (L) και γέφυρα (B)

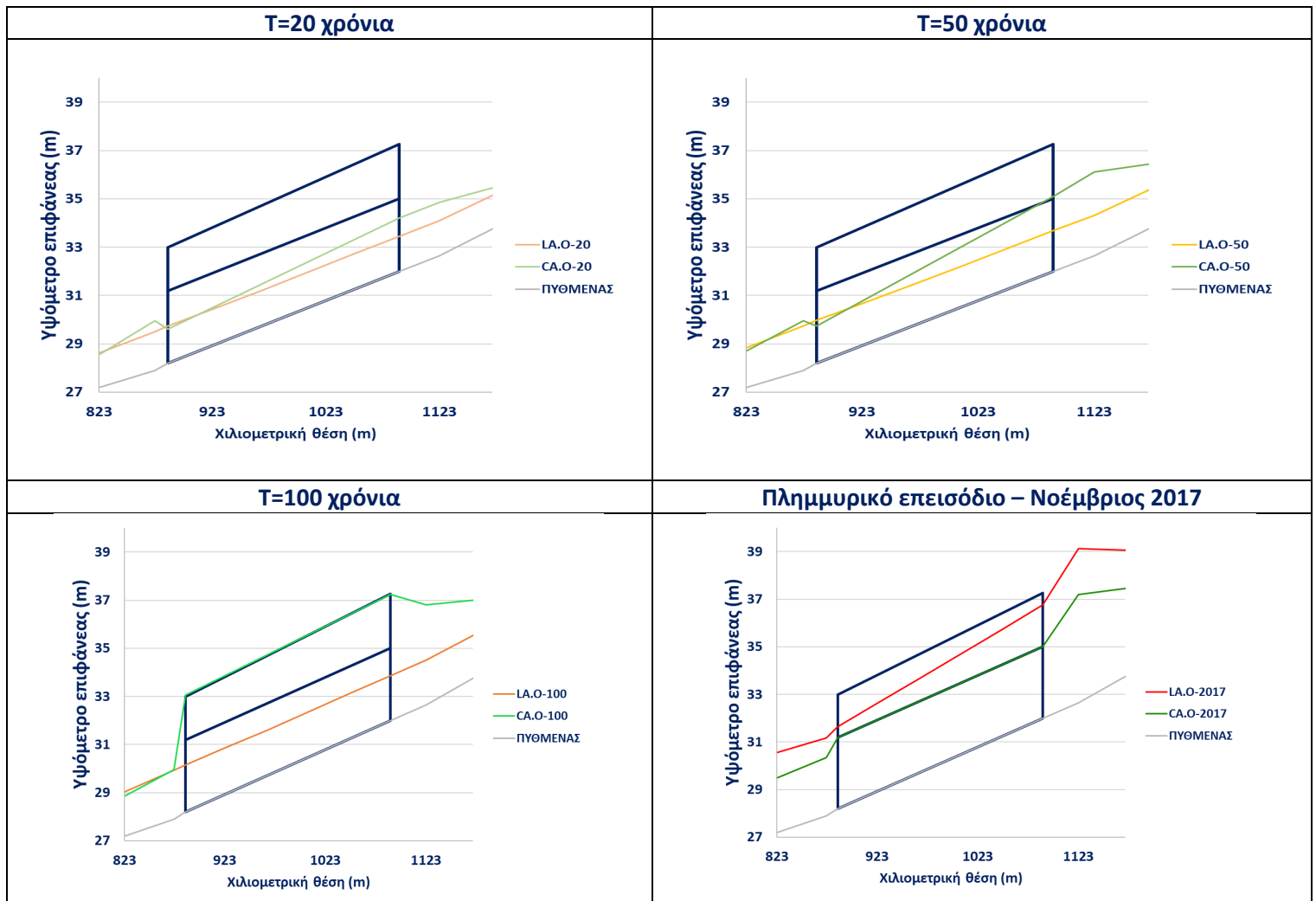


Συμπεραίνουμε τα εξής:

1. Η προσομοίωση του τεχνικού έργου με κάλυμμα δίνει χαμηλότερα βάθη ροής και πιο ομαλή ροή σε σχέση με την προσομοίωση με γέφυρα.
1. Για δεδομένη περίοδο επαναφοράς η παροχή που περνάει από το κάλυμμα δεν διαφέρει πολύ από αυτήν που περνάει από τη γέφυρα, εκτός από το σενάριο του πλημμυρικού επεισοδίου 2017, στο οποίο η παροχή που περνά από το κάλυμμα είναι 0.7 φορές μεγαλύτερη.
2. Στο σενάριο B1-2017 η ροή περνά πάνω από το κατάστρωμα της γέφυρας ενώ στο σενάριο L1-2017 το κάλυμμα τίθεται υπό πίεση.
3. Για μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς τα βάθη ροής είναι μεγαλύτερα.

Στον Πίνακα 4.4-4 παρουσιάζεται η επιφάνεια της ροής ανάντη και κατάντη του Τ.Ε. Αττικής Οδού.

Πίνακας 4.4-4. Προσομοίωση τεχνικού έργου Τ.Ε. Αττικής Οδού με κάλυμμα (L) και οχετό (C)



Συμπεραίνουμε τα εξής:

2. Η προσομοίωση του τεχνικού έργου με κάλυμμα δίνει χαμηλότερα βάθη ροής και πιο ομαλή ροή σε σχέση με την προσομοίωση με γέφυρα εκτός από το σενάριο του πλημμυρικού επεισοδίου 2017.
3. Στο σενάριο LA.O-2017 η ροή περνά πάνω από το κατάστρωμα της γέφυρας ενώ στο σενάριο CA.O-2017 το κάλυμμα τίθεται υπό πίεση.
4. Για μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς τα βάθη ροής είναι μεγαλύτερα.
5. Στην προσομοίωση με κάλυμμα η παροχή που υπολογίζεται ανάντη του τεχνικού έργου είναι μεγαλύτερη απ' ό τι στην προσομοίωση με οχετό.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 Συμπεράσματα

Από την διερεύνηση του τρόπου λειτουργίας των τεχνικών έργων καθώς και από την προσομοίωσή τους τόσο σε αγωγό απλής γεωμετρίας όσο και στο πολύπλοκο υδρολογικό σύστημα της Μάνδρας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Η προσομοίωση του τεχνικού έργου με κάλυμμα σε υποκρίσιμες ροές δεν παρουσιάζει διαφορές σε μόνιμη και μη μόνιμη ροή.
2. Οι προσομοιώσεις του τεχνικού έργου με γέφυρα και οχετό δίνουν παρόμοια αποτελέσματα σε συνθήκες ροής υπό πίεση ή ροής υπερχειλίσης τόσο σε υποκρίσιμες όσο και σε υπερκρίσιμες ροές. Σε υπερκρίσιμες ροές, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με επιλογή της εξίσωσης του υπερχειλιστή για την επίλυση της προσομοίωσης με γέφυρα.
3. Σε υπερκρίσιμες ροές για παροχή που θέτει υπό πίεση την γέφυρα, καλύτερη μέθοδος επίλυσης είναι η χρήση της εξίσωσης του υπερχειλιστή. Τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται πολύ για διαφορετικό συντελεστή υπερχειλίσης, συνεπώς η επιλογή του πρέπει να γίνεται προσεκτικά, βασιζόμενη στην θεωρία.
4. Όταν το υψόμετρο του πυθμένα είναι χαμηλότερο στην κατάντη διατομή από ότι στην ανάντη, η αγνόηση του όρου του βάρους στην εξίσωση ποσότητας κίνησης προκαλεί αύξηση του ανάντη βάθους ροής προκειμένου να ισορροπήσει η εξίσωση της ορμής. Κατά αντιστοίχιση, στην περίπτωση της αρνητικής κλίσης θα συνέβαινε ακριβώς το αντίθετο.
5. Όταν η γραμμή ενέργειας τέμνει το κατάστρωμα του οχετού, παρουσιάζεται αστάθεια στην επίλυση.
6. Η άνοδος της ελεύθερης επιφάνειας στις περιπτώσεις που δεν θα έπρεπε να συμβαίνει, οφείλεται σε αστάθεια του μοντέλου η οποία προκαλεί μικρές αλλαγές στην παροχή από διατομή σε διατομή και συνεπώς διαφορές στην ταχύτητα. Αυτό με τη σειρά του προκαλεί διαφορές στην κινητική και εν τέλει στην συνολική ενέργεια.
7. Παράμετροι όπως η απόσταση των διατομών, το υπολογιστικό χρονικό βήμα και οι συντελεστές απωλειών επηρεάζουν πολύ την ευστάθεια του μοντέλου.
8. Ακόμα και σε ένα σύνθετο μοντέλο, η προσομοίωση των τεχνικών έργων με κάλυμμα δεν επηρεάζει την ευστάθεια του και τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Παρατίθενται οι εξής προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

1. Εκτενέστερη προσομοίωση σύνθετων τεχνικών έργων (με αλλαγές στη γεωμετρία όπως στενώσεις, ακρόβαθρα, μεσόβαθρα).
2. Σύγκριση της προσομοίωσης τεχνικών έργων του λογισμικού HEC-RAS με άλλα υδροδυναμικά λογισμικά.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

6.1 Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Bodhaine, G.L. Measurement of peak discharge at culverts by indirect methods, U.S. Geological Survey, Techniques of Water Resources Investigations, 1968, book 3, chapter A3 60p.
2. Brunner, G. W. (2016). Combined 1D and 2D Modelling with HEC-RAS v. 5. US Army Corps of Engineers.
3. Chow, V.T. (1973). Open channel hydraulics. McGraw-Hill.
4. Mitsopoulos, G., Diakakis, M., Panagiotatou, E., Sant, V., Bloutsos, A., Lekkas, E., Baltas, E. and Stamou, A. I. (2022a). Do flood protection works always reduce risk? The case of the 2017 flash flood in Mandra, Attica, Greece. Water (submitted).
5. Mitsopoulos, G., Diakakis, M., Panagiotatou, E., Sant, V., Bloutsos, A., Lekkas, E., Baltas, E. and Stamou, A. I. (2022b). “How would an extreme flood have behaved if flood protection works were built?” the case of the disastrous flash flood of November 2017 in Mandra, Attica, Greece, Attica, Greece. Urban Water (submitted).
6. Papadonikolaki, G., Mitsopoulos, G., Mavrogeorgos, C., Bloutsos, A. and Stamou, A. 2020. Modelling the disastrous Flash Flood of November 2017 in Mandra (Attica, Greece). 6th IAHR Europe Congress, June 30th – July 2nd, 2020, Warsaw, Poland.
7. Sant, V., Mitsopoulos, G., Bloutsos, A., Stamou, A. (2021). Modelling Sediment Transport in the disastrous Flash Flood of November 2017 in Mandra (Attica, Greece). EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-10561. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-10561>, 2021.
8. Smolders, S. et al. (2016). Culverts modelling in TELEMAC-2D and TELEMAC-3D.
9. Stamou, A.I. (2018). The Disastrous Flash Flood of Mandra in Attica-Greece and now What? <https://juniperpublishers.com/cerj/pdf/CERJ.MS.ID.555677.pdf>.
10. Thomason Camille, P.E. (2019). Hydraulic Design Manual.
11. Tsokanis, K., Mitsopoulos, G., Bloutsos, A. and Stamou, A. (2021). Modelling the disastrous Flash Flood of November 2017 in Mandra (Attica, Greece). EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-15041. <https://doi.org/10.5194/EYE>, 2021.
12. U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2016a). HEC-RAS River Analysis System: User’s
13. Manual, Version 6.0, Hydrologic Engineering Center, CPD-68, Davis, CA.
14. U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2016b). HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User’s Manual, Version 6.0, Hydrologic Engineering Center, CPD-68A, Davis, CA.
15. U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2016c). HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 6.0, Hydrologic Engineering Center, CPD-69, Davis, CA.
16. U.S. Department of Transportation (2012). Hydraulic Design Of Highway Culverts, Version 3.

6.2 Ελληνική βιβλιογραφία

1. Μαρκόπουλος-Σαρίκας, Γ., Ζέρβα, Ι., Μαυρογεώργος Κ. και Στάμου Α. 2019. Προσομοίωση της ξαφνικής πλημμύρας στη Μάνδρα Αττικής το 2017 με το δισδιάστατο μοντέλο TELEMAC-2D. Πρακτικά 14ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Βόλος, Ελλάδα, 16-17 Μαΐου 2019.
2. Μαμάσης Ν. (2012). Πλημμύρες - Εκτίμηση πλημμυρικών αιχμών, Διδακτικές Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
3. Μιχαηλίδη, Ε.- Μ. (2013). Διερεύνηση προσομοίωσης πλημμύρας για το σχεδιασμό σε λεκάνες χημαιρικής διαίτας - Εφαρμογή στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου. ΙΤΙΑ. Retrieved October 1, 2021, from <https://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/1418/>.
4. Παπανικολάου, Π.Ν. (2017). Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
5. Στάμου, Α.Ι. (2016). Εφαρμοσμένη Υδραυλική, Ροή υπό πίεση και με ελεύθερη επιφάνεια.
6. Τσοκάνης, Κ. (2021). Εκτίμηση του πλημμυρικού κίνδυνου με υδροδυναμικούς υπολογισμούς μεγάλης ακρίβειας του μοντέλου HEC-RAS 1D/2D. Η περίπτωση της πλημμύρας στη Μάνδρα το Νοέμβριο του 2017.

6.3 Διαδικτυακοί ιστότοποι

Greece ArcGIS Shapefile Map Layers,
MapCruzin.com

<https://mapcruzin.com/free-greece-arcgis-maps-shapefiles.htm>

Google Maps

<https://www.google.com/maps>

HEC-RAS Contraction & Expansion Losses

<https://knowledge.civilgeo.com/knowledge-base/hec-ras-contraction-expansion-losses/>

Kleinschmidt group, The RAS solution forum

<https://www.kleinschmidtgroup.com/the-ras-solution-forum/>

Κάλυψη γης - Corine Land Cover 2018, ΥΠΕΝ

http://mapsportal.ypen.gr/layers/geonode:kalp_opdensity

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράρτημα 1. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων υποκρίσιμης ροής αγωγού απλής γεωμετρίας

Εικόνα Π.1-1. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-EN-M-90, B-US-EN-M-90

B-ST-EN-M-90								B-US-EN-M-90							
Χιλιομετρική θέση		250.00	246.00	242.00	216.00	212.00	200.00				242.00	216.00	212.00		
Διατομή		4	3	Bridge Up	Bridge Down	2	1			Bridge Up	Bridge Down	2			
Παροχή	m ³ /s	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00			m ³ /s	87.26	87.26	87.26	90.00	
Υψόμετρο πυθμένα	m	0.75	0.74	0.73	0.65	0.64	0.60			m	0.74	0.73	0.65	0.64	
Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας	m	2.81	2.80	2.79	2.71	2.70	2.66			m	2.96	2.83	2.76	2.70	
Υψος ενέργειας	m	3.49	3.48	3.47	3.39	3.38	3.34			m	3.51	3.47	3.39	3.37	
Βάθος ροής	m	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06			m	2.22	2.10	2.11	2.06	
Βάθος ροής HEC	m	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06			m	2.21	2.06	2.06	2.06	
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά								Γεωμετρικά χαρακτηριστικά							
Εμβαδόν υγρής διατομής	m ¹	24.77	24.75	24.73	24.75	24.72	24.72			m ¹	26.52	24.72	24.72	24.72	
Εμβαδόν υγρής διατομής HEC	m ²	24.72	24.72	24.72	24.72	24.71	24.71			m ²	26.57	24.65	24.70	24.71	
Πλάτος διατομής	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00			m	12	12.00	12.00	12.00	
Βρεχόμενη περίμετρος	m	16.13	16.13	16.12	16.13	16.12	16.12			m	16.43	16.20	16.22	16.12	
Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	16.12	16.12	16.12	16.12	16.12	16.12			m	16.43	16.11	16.12	16.12	
Χαρακτηριστικά της ροής								Χαρακτηριστικά της ροής							
Ταχύτητα	m/s	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64			m/s	3.28	3.54	3.53	3.64	
Ταχύτητα HEC	m/s	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64			m/s	3.28	3.54	3.53	3.64	
Αριθμός Froude	-	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81			-	0.71	0.79	0.79	0.81	
Συντελεστής α	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			-	1.00	1.00	1.00	1.00	
Υψος κινητικής ενέργειας	m	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68			m	0.55	0.64	0.64	0.68	
Πυκνότητα	kg/m ³	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00			kg/m ³	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	
Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s ²	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81			m/s ²	9.81	9.81	9.81	9.81	
Υπολογισμός απωλειών								Υπολογισμός απωλειών							
Συντελεστής διαστολής Ce	-	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.30			-	0.50	0.50	0.50	0.50	
Συντελεστής συστολής Cc	-	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.10			-	0.30	0.30	0.30	0.30	
Απώλειες λόγω Ce-Cc	m		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			m	0.03	0.00	0.01	0.00	
Κατάντη μήκος καναλιού	m	4.00	4.00	26.00	4.00	12.00	50.00			m	4.00	26.00	4.00	12.00	
Υδραυλική ακτίνα	m	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53			m	1.62	1.53	1.53	1.53	
Συντελεστής τραχύτητας Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020			-	0.020	0.020	0.020	0.020	
Κλίση Γραμμής Ενέργειας	m/m	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003			m/m	0.002	0.003	0.003	0.003	
Απώλειες τριβών	m	0.01	0.01	0.08	0.01	0.04	0.15			m	0.01	0.07	0.01	0.04	
Συνολικές απώλειες	m	0.01	0.01	0.08	0.01	0.04	0.15			m	0.04	0.07	0.02	0.04	

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΕΣ ΡΟΕΣ

Εικόνα Π.1-2. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-MO-M-90, B-US-MO-M-90

B-ST-MO-M-90								B-US-MO-M-90							
Χιλιομετρική θέση		246.00	242.00	216.00	212.00	200.00	150.00	Χιλιομετρική θέση		246.00	242.00	216.00	212.00	200.00	150.00
Διατομή		3 Bridge Up		Bridge Down		2	1	Διατομή		3 Bridge Up		Bridge Down		2	1
Παροχή	m ³ /s	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	Παροχή	m ³ /s	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Υψόμετρο πυθμένα	m	0.74	0.73	0.65	0.64	0.60	0.45	Υψόμετρο πυθμένα	m	0.74	0.73	0.65	0.64	0.60	0.45
Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας	m	2.77	2.76	2.67	2.70	2.66	2.51	Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας	m	3.08	2.76	2.67	2.70	2.66	2.51
Κρίσιμο βάθος	m		2.51	2.44				Κρίσιμο βάθος	m		2.51	2.44			
Υψος ενέργειας	m	3.46	3.45	3.37	3.38	3.34	3.19	Υψος ενέργειας	m	3.60	3.45	3.37	3.38	3.34	3.19
Βάθος ροής	m	2.03	2.03	2.02	2.06	2.06	2.06	Βάθος ροής	m	2.34	2.03	2.02	2.06	2.06	2.06
Βάθος ροής HEC	m	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	2.06	Βάθος ροής HEC	m	2.34	2.03	2.02	2.06	2.06	2.06
Κάθετη απόσταση	m	1.02	1.02	1.01	1.03	1.03	1.03	Κάθετη απόσταση	m	1.17	1.02	1.01	1.03	1.03	1.03
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά								Γεωμετρικά χαρακτηριστικά							
Εμβαδόν υγρής διατομής	m ²	24.36	24.36	24.24	24.72	24.77	24.72	Εμβαδόν υγρής διατομής	m ²	28.08	24.36	24.24	24.72	24.77	24.72
Εμβαδόν υγρής διατομής HEC	m ²	24.43	24.41	24.29	24.71	24.71	24.72	Εμβαδόν υγρής διατομής HEC	m ²	28.12	24.40	24.29	24.71	24.71	24.71
Εμβαδόν ακροβάθρων	m ²		0.00	0.00				Εμβαδόν ακροβάθρων	m ²		0.00	0.00			
Κάθετη απόσταση ακροβάθρων	m		0.00	0.00				Κάθετη απόσταση ακροβάθρων	m		0.00	0.00			
Πλάτος διατομής	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	Πλάτος διατομής	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Βρεχόμενη περίμετρος	m	16.06	16.06	16.04	16.12	16.13	16.12	Βρεχόμενη περίμετρος	m	16.68	16.06	16.04	16.12	16.13	16.12
Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	16.38	16.07	16.05	16.12	16.12	16.12	Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	16.69	16.07	16.05	16.12	16.12	16.12
Χαρακτηριστικά της ροής								Χαρακτηριστικά της ροής							
Ταχύτητα	m/s	3.68	3.69	3.71	3.64	3.64	3.64	Ταχύτητα	m/s	3.20	3.69	3.71	3.64	3.64	3.64
Ταχύτητα HEC	m/s	3.34	3.69	3.71	3.64	3.64	3.64	Ταχύτητα HEC	m/s	3.19	3.68	3.70	3.64	3.64	3.64
Αριθμός Froude	-	0.82	0.83	0.83	0.81	0.81	0.81	Αριθμός Froude	-	0.67	0.83	0.83	0.81	0.81	0.81
Συντελεστής α	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Συντελεστής α	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Συντελεστής β	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Συντελεστής β	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Συντελεστής μεταφοράς K	-	7878	7772	7728	7884	7884	7887	Συντελεστής μεταφοράς K	-	9182	7769	7728	7884	7884	7884
Υψος κινητικής ενέργειας	m	0.69	0.69	0.70	0.68	0.68	0.68	Υψος κινητικής ενέργειας	m	0.52	0.69	0.70	0.68	0.68	0.68
Πυκνότητα	kg/m ³	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	Πυκνότητα	kg/m ³	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s ²	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s ²	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
Υπολογισμός απωλειών								Υπολογισμός απωλειών							
Συντελεστής διαστολής Ce	-	0.50	0.50	0.50	0.50	0.30	0.30	Συντελεστής διαστολής Ce	-	0.50	0.50	0.50	0.50	0.30	0.30
Συντελεστής συστολής Cc	-	0.30	0.30	0.30	0.30	0.10	0.10	Συντελεστής συστολής Cc	-	0.30	0.30	0.30	0.30	0.10	0.10
Απώλειες λόγω Ce-Cc	m				0.00	0.00		Απώλειες λόγω Ce-Cc	m				0.00	0.00	
Κατάνη μήκος καναλιού	m	4.00	26.00	4.00	12.00	50.00	50.00	Κατάνη μήκος καναλιού	m	4.00	26.00	4.00	12.00	50.00	50.00
Υδραυλική ακτίνα	m	1.49	1.52	1.51	1.53	1.53	1.53	Υδραυλική ακτίνα	m	1.68	1.52	1.51	1.53	1.53	1.53
Συντελεστής τραχύτητας Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	Συντελεστής τραχύτητας Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Κλίση Γραμμής Ενέργειας	m/m	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	Κλίση Γραμμής Ενέργειας	m/m	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Απώλειες τριβών	m				0.04	0.15		Απώλειες τριβών	m				0.04	0.15	

Τάση	N/m ²	46.61	46.40	46.92	45.15	45.15	45.10	Τάση	N/m ²	33.78	46.45	46.92	45.15	45.15	45.15
Ισχύς καναλιού	N/m s	155.68	171.23	173.14	167.50	164.34	164.18	Ισχύς καναλιού	N/m s	107.76	170.93	173.61	164.34	164.34	164.34
Δύναμη πίεσης	m ³	24.80	24.78	24.53	25.45			Δύναμη πίεσης	m ³	32.90	24.77	24.53	25.45		
Όρος ορμής	m ³	33.80	33.83	33.99	33.42			Όρος ορμής	m ³	29.36	33.84	33.99	33.42		
Σύνολο		58.59	58.60	58.53	58.87			Σύνολο		62.26	58.61	58.53	58.87		
Δύναμη πίεσης	KN	243.25	243.05	240.67	249.66			Δύναμη πίεσης	KN	322.75	242.95	240.67	249.68		
Όρος ορμής	KN	331.56	331.83	333.47	327.80			Όρος ορμής	KN	288.05	331.97	333.47	327.80		
Βάρος νερού	KN	0.29	1.90	0.29				Βάρος νερού	KN	0.32	1.90	0.29			
Σύνολο	KN	574.81	574.89	574.14	577.47			Σύνολο	KN	610.80	574.92	574.14	577.48		
Δύναμη τριβής	KN	3.05	19.39	3.01				Δύναμη τριβής	KN	2.26	19.41	3.01			
		3-BU	BU-BD	BD-2						3-BU	BU-BD	BD-2			
Υπόλοιπο εξίσωσης	KN	-0.07	0.75	-3.33				Υπόλοιπο εξίσωσης	KN	35.88	0.78	-3.34			
Υπόλοιπο εξίσωσης-Ff+W	KN	-2.83	-16.74	-6.05				Υπόλοιπο εξίσωσης-Ff+W	KN	33.94	-16.73	-6.06			

Εικόνα Π.1-3. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-EN-M-120, B-US-EN-M-120

B-ST-EN-M-120								B-US-EN-M-120				
Χιλιμετρική θέση		250.00	246.00	242.00	216.00	212.00	200.00	Χιλιμετρική θέση		242.00	216.00	212.00
Διατομή		4	3	Bridge Up	Bridge Down	2	1	Διατομή		Bridge Up	Bridge Down	2
Παροχή	m ³ /s	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	Παροχή	m ³ /s	120.00	120.00	120.00
Υψόμετρο πυθμένα	m	0.75	0.74	0.73	0.65	0.64	0.60	Υψόμετρο πυθμένα	m	0.73	0.65	0.64
Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας	m	3.71	3.71	3.25	3.09	3.14	3.10	Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας	m	3.23	3.16	3.14
Κρίσιμο βάθος	m			2.51	2.44			Κρίσιμο βάθος	m	2.51	2.44	
Ύψος ενέργειας	m	4.30	4.29	4.23	4.01	3.96	3.92	Ύψος ενέργειας	m	4.22	4.00	3.95
Βάθος ροής	m	2.96	2.97	2.52	2.44	2.50	2.50	Βάθος ροής	m	2.50	2.51	2.50
Βάθος ροής HEC	m	3.16	3.16	2.55	2.45	2.50	2.50	Βάθος ροής HEC	m	2.55	2.46	2.50
Κάθετη απόσταση	m							Κάθετη απόσταση	m			
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά								Γεωμετρικά χαρακτηριστικά				
Εμβαδόν υγρής διατομής	m ¹	35.53	35.58	30.18	29.25	30.01	30.00	Εμβαδόν υγρής διατομής	m ¹	30.60	29.52	30.00
Εμβαδόν υγρής διατομής HEC	m ²	35.35	35.40	27.29	28.23	30.00	30.00	Εμβαδόν υγρής διατομής HEC	m ²	27.29	28.23	30.00
Εμβαδόν ακροβάθρων	m ³							Εμβαδόν ακροβάθρων	m ³			
Κάθετη απόσταση ακροβάθρων	m							Κάθετη απόσταση ακροβάθρων	m			
Πλάτος διατομής	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	Πλάτος διατομής	m	12.00	12.00	12.00
Βρεχόμενη περίμετρος	m	17.92	17.93	29.03	28.87	17.00	17.00	Βρεχόμενη περίμετρος	m	29.00	29.02	17.00
Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	17.89	17.90	28.55	28.70	17.00	17.00	Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	28.55	28.70	17.00
Χαρακτηριστικά της ροής								Χαρακτηριστικά της ροής				
Ταχύτητα	m/s	3.39	3.39	4.40	4.25	4.00	4.00	Ταχύτητα	m/s	4.40	4.07	4.00
Ταχύτητα HEC	m/s	3.39	3.39	4.40	4.25	4.00	4.00	Ταχύτητα HEC	m/s	4.40	4.25	4.00
Αριθμός Froude	-	0.63	0.63	0.93	0.88	0.81	0.81	Αριθμός Froude	-	0.88	0.83	0.81
Συντελεστής α	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Συντελεστής α	-	1.00	1.00	1.00
Συντελεστής β	-							Συντελεστής β	-			
Συντελεστής μεταφοράς K	-							Συντελεστής μεταφοράς K	-			
Ύψος κινητικής ενέργειας	m	0.59	0.59	0.99	0.92	0.82	0.82	Ύψος κινητικής ενέργειας	m	0.99	0.84	0.82
Calculation of Losses								Υπολογισμός απωλειών				
Συντελεστής διαστολής Ce	-	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	Συντελεστής διαστολής Ce	-	0.30	0.30	0.30
Συντελεστής συστολής Cc	-	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	Συντελεστής συστολής Cc	-	0.10	0.10	0.10
Απώλειες λόγω Ce-Cc	m		0.04	0.02	0.03	0.00	0.00	Απώλειες λόγω Ce-Cc	m	0.02	0.03	0.00
Κατάντη μήκος καναλιού	m	4.00	4.00	26.00	4.00	12.00	50.00	Κατάντη μήκος καναλιού	m	26.00	4.00	12.00
Υδραυλική ακτίνα	m	1.98	1.98	0.96	0.98	1.76	1.76	Υδραυλική ακτίνα	m	0.96	0.98	1.76
Συντελεστής τραχύτητας Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	Συντελεστής τραχύτητας Manning	-	0.020	0.020	0.020
Κλίση Γραμμής Ενέργειας	m/m	0.002	0.002	0.008	0.007	0.003	0.003	Κλίση Γραμμής Ενέργειας	m/m	0.01	0.01	0.00
Απώλειες τριβών	m	0.01	0.02	0.20	0.02	0.04	0.15	Απώλειες τριβών	m	0.19	0.02	0.04
Συνολικές απώλειες	m	0.01	0.06	0.22	0.05	0.04	0.15	Συνολικές απώλειες	m	0.21	0.05	0.04

Εικόνα Π.1-4. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων C-ST-M-90, C-US-M-90

C-ST-M-90								C-US-M-90							
Διατομή		4	3	Culvert Up	Culvert Down	2	1	Διατομή		4	3	Culvert Up	Culvert Down	2	1
Χαρακτηριστικό	Μονάδα							Χαρακτηριστικό	Μονάδα						
Θέση	m	250.0	246	242.0	216.0	212	200	Θέση	m	250.0	246	242.0	216.0	212	200
Παροχή Q	m ³ /s	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	Παροχή Q	m ³ /s	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Πυθμένας	m	0.75	0.74	0.726	0.648	0.64	0.60	Πυθμένας	m	0.75	0.740	0.726	0.648	0.64	0.60
Ελεύθερη επιφάνεια	m	2.94	2.93	2.85	2.70	2.70	2.66	Ελεύθερη επιφάνεια	m	3.02	3.02	2.85	2.71	2.70	2.66
Γραμμή ενέργειας	m	3.55	3.54	3.54	3.39	3.38	3.34	Γραμμή ενέργειας	m	3.54	3.53	3.53	3.39	3.38	3.34
Βάθος ροής	m	2.19	2.19	2.12	2.05	2.06	2.06	Βάθος ροής	m	2.27	2.28	2.12	2.06	2.06	2.06
Βάθος ροής HEC		2.18	2.18	2.17	2.05	2.06	2.06	Βάθος ροής HEC		2.35	2.35	2.36	2.05	2.06	2.06
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά								Γεωμετρικά χαρακτηριστικά							
Εμβαδόν HEC	m ²	26.16	26.19	25.20	24.00	24.71	24.71	Εμβαδόν HEC	m ²	28.16	28.25	25.20	25.20	24.71	24.70
Εμβαδόν	m ²	26.16	26.16	26.09	24.62	24.72	24.72	Εμβαδόν	m ²	27.28	27.36	25.48	24.71	24.73	24.78
Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	16.36	16.12	16.20	16.00	16.12	16.12	Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	16.70	16.71	16.20	16.20	16.12	16.12
Βρεχόμενη περίμετρος	m	16.36	16.36	16.35	16.10	16.12	16.12	Βρεχόμενη περίμετρος	m	16.55	16.56	16.25	16.12	16.12	16.13
Χαρακτηριστικά ροής								Χαρακτηριστικά ροής							
Ταχύτητα	m/s	3.44	3.44	3.57	3.75	3.64	3.64	Ταχύτητα	m/s	3.20	3.19	3.57	3.57	3.64	3.64
Ταχύτητα HEC	m/s	3.44	3.44	3.68	3.70	3.64	3.64	Ταχύτητα HEC	m/s	3.19	3.17	3.66	3.66	3.64	3.64
Αριθμός Froude	-	0.74	0.74	0.81	0.84	0.81	0.81	Αριθμός Froude	-	0.66	0.66	0.81	0.81	0.81	0.81
Άλφα	-	1	1	1	1	1	1	Άλφα	-	1	1	1	1	1	1
Ύψος κινητικής ενέργειας	m	0.60	0.60	0.69	0.70	0.68	0.68	Ύψος κινητικής ενέργειας	m	0.52	0.51	0.68	0.68	0.68	0.68
Υπολογισμός απωλειών								Υπολογισμός απωλειών							
Ce/ken	-	0.30		0.10	0.10	0.30	0.30	Ce/ken	-	0.30		0.10	0.10	0.30	0.30
Cc/kex	-	0.10		0.30	0.30	0.10	0.10	Cc/kex	-	0.10		0.30	0.30	0.10	0.10
		4->3	hen	hf	hex	2->1				4->3	hen	hf	hex	2->1	
Τοπικές-Γραμμικές απώλειες	m	0.00	0.07	0.07	0.01	0.00	0.00	Τοπικές-Γραμμικές απώλειες	m	0.00	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00
Μήκος L	m	4.00	34.00	26.00	4.00	12.00	50.00	Μήκος L	m	4.00	34.00	26.00	4.00	12.00	50.00
Υδραυλική ακτίνα R _h	m	1.60	1.62	1.56	1.50	1.53	1.53	Υδραυλική ακτίνα R _h	m	1.69	1.69	1.56	1.56	1.53	1.53
Συντελεστής Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	Συντελεστής Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Κλίση ενέργειας	m/m	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	Κλίση ενέργειας	m/m	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003
Απώλειες λόγω τριβής	m	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.15	Απώλειες λόγω τριβής	m	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.15
Συνολικές απώλειες	m	0.01	0.07	0.07	0.02	0.04	0.15	Συνολικές απώλειες	m	0.01	0.07	0.07	0.01	0.04	0.15

Εικόνα Π.1-5. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων C-ST-M-120, C-US-M-120

C-ST-M-120								C-US-M-120							
Διατομή	Μονάδα	4	3	Culvert Up	Culvert Down	2	1	Διατομή	Μονάδα	4	3	Culvert Up	Culvert Down	2	1
Χαρακτηριστικό	Μονάδα							Χαρακτηριστικό	Μονάδα						
Θέση	m	250.0	246	242.0	216.0	212	200	Θέση	m	250.0	246	242.0	216.0	212	200
Παροχή Q	m ³ /s	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	Παροχή Q	m ³ /s	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
Πυθμένας	m	0.75	0.74	0.726	0.648	0.64	0.60	Πυθμένας	m	0.75	0.74	0.726	0.648	0.64	0.60
Ελεύθερη επιφάνεια	m	3.72	3.72	3.35	3.01	3.14	3.10	Ελεύθερη επιφάνεια	m	3.72	3.72	3.35	3.01	3.14	3.10
Γραμμή ενέργειας	m	4.30	4.30	4.30	3.96	3.96	3.92	Γραμμή ενέργειας	m	4.30	4.30	4.30	3.96	3.96	3.92
Βάθος ροής	m	2.97	2.98	2.62	2.36	2.50	2.50	Βάθος ροής	m	2.97	2.98	2.62	2.36	2.50	2.50
Βάθος ροής κάτω από τον οχετό	m			2.27	2.27			Βάθος ροής κάτω από τον οχετό	m			2.27	2.27		
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά								Γεωμετρικά χαρακτηριστικά							
Εμβαδόν HEC	m ²	35.63	35.69	30.00	30.00	30.00	30.00	Εμβαδόν HEC	m ²	35.63	35.69	30.00	30.00	30.00	30.00
Εμβαδόν κάτω από τον οχετό	m ²			27.24	27.24			Εμβαδόν κάτω από τον οχετό	m ²			27.24	27.24		
Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	17.94	17.95	17.00	17.00	17.00	17.00	Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	17.94	17.95	17.00	17.00	17.00	17.00
Βρεχόμενη περίμετρος κάτω από τον οχετό	m			28.54	28.54			Βρεχόμενη περίμετρος κάτω από τον οχετό	m			28.54	28.54		
Χαρακτηριστικά ροής								Χαρακτηριστικά ροής							
Ταχύτητα	m/s	3.37	3.36	4.31	4.31	4.00	4.00	Ταχύτητα	m/s	3.37	3.36	4.31	4.31	4.00	4.00
Αριθμός Froude	-	0.62	0.62	0.87	0.87	0.81	0.81	Αριθμός Froude	-	0.62	0.62	0.87	0.87	0.81	0.81
Άλφα	-	1	1	1	1	1	1	Άλφα	-	1	1	1	1	1	1
Υψος κινητικής ενέργειας	m	0.58	0.58	0.95	0.95	0.82	0.82	Υψος κινητικής ενέργειας	m	0.58	0.58	0.95	0.95	0.82	0.82
Υπολογισμός απωλειών								Υπολογισμός απωλειών							
Ce/ken	-	0.30	0.30	0.10	0.10	0.30	0.30	Ce/ken	-	0.30	0.30	0.10	0.10	0.30	0.30
Cc/kex	-	0.10	0.10	0.30	0.30	0.10	0.10	Cc/kex	-	0.10	0.10	0.30	0.30	0.10	0.10
		4->3	hen	hf	hex	2->1				4->3	hen	hf	hex	2->1	
Τοπικές-Γραμμικές απώλειες	m	0.00	0.09	0.21	0.04	0.00	0.00	Τοπικές-Γραμμικές απώλειες	m	0.00	0.09	0.21	0.04	0.00	0.00
Μήκος L	m	4.00	4.00	26.00	4.00	12.00	50.00	Μήκος L	m	4.00	4.00	26.00	4.00	12.00	50.00
Υδραυλική ακτίνα R _h	m	1.99	1.99	0.95	0.95	1.76	1.76	Υδραυλική ακτίνα R _h	m	1.99	1.99	0.95	0.95	1.76	1.76
Συντελεστής Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	Συντελεστής Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Κλίση ενέργειας	m/m	0.002	0.002	0.008	0.008	0.003	0.003	Κλίση ενέργειας	m/m	0.002	0.002	0.008	0.008	0.003	0.003
Απώλειες λόγω τριβής	m	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.15	Απώλειες λόγω τριβής	m	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.15
Συνολικές απώλειες	m	0.01	0.09	0.21	0.04	0.04	0.15	Συνολικές απώλειες	m	0.01	0.09	0.21	0.04	0.04	0.15

Παράρτημα 2. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων υπερκρίσιμης ροής αγωγού απλής γεωμετρίας

Εικόνα Π.2-1. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-EN-S-90, B-US-EN-S-90

B-ST-EN-S-90								B-US-EN-S-90					
Χιλιομετρική θέση		250.00	246.00	242.00	216.00	212.00	200.00	Χιλιομετρική θέση		246.00	242.00	216.00	212.00
Διατομή		4	3	Bridge Up	Bridge Down	2	1	Διατομή		3	Bridge Up	Bridge Down	2
Παροχή	m ³ /s	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	Παροχή	m ³ /s	90.00	90.00	90.00	90.00
Υψόμετρο πυθμένα	m	1.50	1.48	1.45	1.30	1.27	1.20	Υψόμετρο πυθμένα	m	1.48	1.45	1.30	1.27
Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας	m	3.13	3.10	3.08	2.92	2.89	2.82	Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας	m	3.34	3.26	3.29	2.94
Ύψος ενέργειας	m	4.21	4.19	4.16	4.00	3.98	3.90	Ύψος ενέργειας	m	4.17	4.15	4.04	4.01
Βάθος ροής	m	1.63	1.62	1.63	1.62	1.62	1.62	Βάθος ροής	m	1.86	1.81	1.99	1.67
Βάθος ροής HEC	m	1.63	1.63	1.63	2.01	2.03	1.55	Βάθος ροής HEC	m	1.95	2.20	2.33	2.03
Κάθετη απόσταση	m							Κάθετη απόσταση	m				
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά								Γεωμετρικά χαρακτηριστικά					
Εμβαδόν υγρής διατομής	m ²	19.56	19.46	19.53	19.42	19.49	19.45	Εμβαδόν υγρής διατομής	m ²	22.32	21.72	23.86	20.07
Εμβαδόν υγρής διατομής HEC	m ²	19.52	19.52	19.52	19.52	19.52	19.52	Εμβαδόν υγρής διατομής HEC	m ²	22.33	21.50	23.41	19.64
Πλάτος διατομής	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	Πλάτος διατομής	m	12.00	12.00	12.00	12.00
Βρεχόμενη περίμετρος	m	15.26	15.24	15.26	15.24	15.25	15.24	Βρεχόμενη περίμετρος	m	15.72	15.62	15.98	15.35
Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	15.25	15.25	15.25	15.25	15.25	15.25	Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	15.72	15.38	15.90	15.27
Χαρακτηριστικά της ροής								Χαρακτηριστικά της ροής					
Ταχύτητα	m/s	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	Ταχύτητα	m/s	4.03	4.19	3.84	4.58
Ταχύτητα HEC	m/s							Ταχύτητα HEC	m/s				
Αριθμός Froude	-	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	Αριθμός Froude	-	0.94	1.00	0.88	1.14
Συντελεστής α	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Συντελεστής α	-	1.00	1.00	1.00	1.00
Ύψος κινητικής ενέργειας	m	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	Ύψος κινητικής ενέργειας	m	0.83	0.89	0.75	1.07
Πυκνότητα	kg/m ³	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	Πυκνότητα	kg/m ³	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s ²	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s ²	9.81	9.81	9.81	9.81
Υπολογισμός απωλειών								Υπολογισμός απωλειών					
Συντελεστής διαστολής Ce	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	Συντελεστής διαστολής Ce	-	0.05	0.05	0.05	0.05
Συντελεστής συστολής Cc	-	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	Συντελεστής συστολής Cc	-	0.03	0.03	0.03	0.03
Απώλειες λόγω Ce-Cc	m	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		Απώλειες λόγω Ce-Cc	m	0.00	0.01	0.01	
Κατάνη μήκος καναλιού	m	4.00	4.00	26.00	4.00	12.00	50.00	Κατάνη μήκος καναλιού	m	4.00	26.00	4.00	12
Υδραυλική ακτίνα	m	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	Υδραυλική ακτίνα	m	1.42	1.40	1.47	1.29
Συντελεστής τραχύτητας Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	Συντελεστής τραχύτητας Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020
Κλίση Γραμμής Ενέργειας	m/m	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	Κλίση Γραμμής Ενέργειας	m/m	0.004	0.004	0.004	0.006
Απώλειες τριβών	m	0.02	0.02	0.16	0.02	0.07		Απώλειες τριβών	m	0.02	0.10	0.02	
Συνολικές απώλειες	m	0.02	0.02	0.16	0.02	0.07		Συνολικές απώλειες	m	0.02	0.11	0.01	

Εικόνα Π.2-2. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-MO-S-90, B-US-MO-S-90

B-ST-MO-S-90								B-US-MO-S-90							
Χιλιμετρική θέση		246.00	242.00	216.00	212.00	208.00	200.00	Χιλιμετρική θέση		246.00	242.00	216.00	212.00	208.00	200.00
Διατομή		3	Bridge Up	Bridge Down	2	1		Διατομή		3	Bridge Up	Bridge Down	2	1	
Παροχή	m ³ /s	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	Παροχή	m ³ /s	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Υψόμετρο πυθμένα	m	1.50	1.48	1.45	1.30	1.27	1.20	Υψόμετρο πυθμένα	m	1.50	1.48	1.45	1.30	1.27	1.20
Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας	m	3.10	3.08	2.92	2.90	2.88	2.83	Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας	m	3.65	3.63	3.24	2.91	2.89	2.84
Κρίσιμο βάθος	m		2.51	2.44				Κρίσιμο βάθος	m		2.51	2.44			
Υψος ενέργειας	m	4.18	4.16	4.00	3.98	3.96	3.91	Υψος ενέργειας	m	4.26	4.24	4.00	3.98	3.96	3.91
Βάθος ροής	m	1.60	1.60	1.47	1.60	1.61	1.63	Βάθος ροής	m	2.15	2.15	1.79	1.61	1.62	1.64
Βάθος ροής HEC	m	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	Βάθος ροής HEC	m	2.17	2.17	1.94	2.91	1.64	1.64
Κάθετη απόσταση	m	0.80	0.80	0.74	0.80	0.80	0.82	Κάθετη απόσταση	m	1.08	1.08	0.90	0.81	0.81	0.82
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά								Γεωμετρικά χαρακτηριστικά							
Εμβαδόν υγρής διατομής	m ²	19.20	19.20	17.64	19.20	19.27	19.56	Εμβαδόν υγρής διατομής	m ²	25.80	25.80	21.48	19.34	19.41	19.68
Εμβαδόν υγρής διατομής HEC	m ²	19.52	19.52	19.52	19.52	19.52	19.52	Εμβαδόν υγρής διατομής HEC	m ²	26.07	26.10	23.30	19.64	19.64	19.64
Εμβαδόν ακροβάθρων	m ³		0.00	0.00				Εμβαδόν ακροβάθρων	m ³		0.00	0.00			
Κάθετη απόσταση ακροβάθρων	m		0.00	0.00				Κάθετη απόσταση ακροβάθρων	m		0.00	0.00			
Πλάτος διατομής	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	Πλάτος διατομής	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Βρεχόμενη περίμετρος	m	15.20	15.20	14.94	15.20	15.21	15.26	Βρεχόμενη περίμετρος	m	16.30	16.30	15.58	15.22	15.24	15.28
Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	15.25	15.25	15.25	15.25	15.25	15.25	Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	16.34	16.35	15.88	15.27	15.27	15.27
Χαρακτηριστικά της ροής								Χαρακτηριστικά της ροής							
Ταχύτητα	m/s	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	Ταχύτητα	m/s	3.45	3.45	3.86	4.58	4.58	4.58
Ταχύτητα HEC	m/s	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	Ταχύτητα HEC	m/s	3.45	3.45	3.86	4.58	4.58	4.58
Αριθμός Froude	-	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	Αριθμός Froude	-	0.75	0.75	0.89	1.14	1.14	1.14
Συντελεστής α	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Συντελεστής α	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Συντελεστής β	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Συντελεστής β	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Συντελεστής μεταφοράς K	-	6002	6002	6002	6002	6002	6002	Συντελεστής μεταφοράς K	-	8394	8407	7360	6044	6044	6044
Υψος κινητικής ενέργειας	m	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	Υψος κινητικής ενέργειας	m	0.61	0.61	0.76	1.07	1.07	1.07
Πυκνότητα	kg/m ³	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	Πυκνότητα	kg/m ³	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s ²	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s ²	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
Υπολογισμός απωλειών								Υπολογισμός απωλειών							
Συντελεστής διαστολής Ce	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	Συντελεστής διαστολής Ce	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03
Συντελεστής συστολής Cc	-	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	Συντελεστής συστολής Cc	-	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01
Απώλειες λόγω Ce-Cc	m				0.00	0.00		Απώλειες λόγω Ce-Cc	m				0.00	0.00	
Κατάντη μήκος καναλιού	m	4.00	26.00	4.00	4.00	8.00	50.00	Κατάντη μήκος καναλιού	m	4.00	26.00	4.00	4.00	8.00	50.00
Υδραυλική ακτίνα	m	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	Υδραυλική ακτίνα	m	1.60	1.60	1.47	1.29	1.29	1.29
Συντελεστής τραχύτητας Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	Συντελεστής τραχύτητας Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Κλίση Γραμμής Ενέργειας	m/m	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	Κλίση Γραμμής Ενέργειας	m/m	0.003	0.003	0.004	0.006	0.006	0.006
Απώλειες τριβών	m				0.02	0.05		Απώλειες τριβών	m				0.02	0.05	

Τάση	N/m ²	76.83	76.83	76.83	76.83	76.83	76.83
Ισχύς καναλιού	N/m s	354.18	354.18	354.18	354.18	354.18	354.18
Δύναμη πίεσης	m ³	15.62	15.62	14.35	15.62		
Όρος ορμής	m ³	42.30	42.30	42.30	42.30		
Σύνολο		57.92	57.92	56.65	57.91		
Δύναμη πίεσης	KN	153.19	153.19	140.75	153.19		
Όρος ορμής	KN	414.96	414.96	414.96	414.96		
Σύνολο	KN	568.15	568.15	555.71	568.15		
Δύναμη τριβής	KN	4.69	30.46	4.69			
		3-BU	BU-BD	BD-2			
Υπόλοιπο εξίσωσης	KN	0.00	12.45	-12.44			

Τάση	N/m ²	40.02	39.92	51.52	75.77	75.77	75.77
Ισχύς καναλιού	N/m s	138.08	137.74	177.75	292.47	347.03	347.03
Δύναμη πίεσης	m ³	28.03	28.06	20.85	15.83		
Όρος ορμής	m ³	31.67	31.64	35.44	42.04		
Σύνολο		59.70	59.69	56.29	57.87		
Δύναμη πίεσης	KN	274.93	275.24	204.57	155.27		
Όρος ορμής	KN	310.70	310.34	347.64	412.42		
Σύνολο	KN	585.63	585.59	552.21	567.69		
Δύναμη τριβής	KN	2.62	16.97	3.27			
		3-BU	BU-BD	BD-2			
Υπόλοιπο εξίσωσης	KN	0.04	33.38	-15.48			

Εικόνα Π.2-3. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων B-ST-EN-S-175, B-US-EN-S-175

B-ST-EN-S-175								B-US-EN-S-175							
Χιλιομετρική θέση		250.00	246.00	242.00	216.00	212.00	200.00	Χιλιομετρική θέση		246.00	242.00	216.00	212.00		
Διατομή		4	3	Bridge Up	Bridge Down	2	1	Διατομή		3	Bridge Up	Bridge Down	2		
Παροχή	m ³ /s	175.00	175.00	175.00	175.00	175.00	175.00	Παροχή	m ³ /s	175.00	175.00	175.00	175.00		
Υψόμετρο πυθμένα	m	1.50	1.48	1.45	1.30	1.27	1.20	Υψόμετρο πυθμένα	m	1.48	1.45	1.30	1.27		
Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας	m	6.48	6.47	6.04	5.19	3.00	2.84	Υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας	m	6.59	5.56	4.31	4.42		
Κρίσιμο βάθος	m			3.24	3.08			Κρίσιμο βάθος	m		3.24	3.08			
Ύψος ενέργειας	m	6.91	6.91	6.88	6.59	6.46	6.24	Ύψος ενέργειας	m	6.87	6.59	6.15	6.09		
Βάθος ροής	m	4.98	4.99	4.59	3.89	1.73	1.64	Βάθος ροής	m	5.11	4.11	3.01	3.15		
Βάθος ροής HEC	m	4.98	5.00	4.60	3.94	1.77	1.78	Βάθος ροής HEC	m	5.12	4.24	3.57	2.55		
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά								Γεωμετρικά χαρακτηριστικά							
Εμβαδόν υγρής διατομής	m ²	59.76	59.92	55.13	46.70	20.72	19.63	Εμβαδόν υγρής διατομής	m ²	61.32	49.32	36.10	37.83		
Εμβαδόν υγρής διατομής HEC	m ²	59.72	60.01	43.23	33.44	21.23	21.40	Εμβαδόν υγρής διατομής HEC	m ²	61.09	38.93	29.10	30.64		
Πλάτος διατομής	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	Πλάτος διατομής	m	12.00	12.00	12.00	12.00		
Βρεχόμενη περίμετρος	m	21.96	21.99	21.19	19.78	15.45	15.27	Βρεχόμενη περίμετρος	m	22.22	20.22	18.02	18.31		
Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	21.95	22.00	43.21	41.57	15.54	15.57	Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	22.18	42.49	40.85	17.11		
Χαρακτηριστικά της ροής								Χαρακτηριστικά της ροής							
Ταχύτητα	m/s	2.93	2.92	4.05	5.23	8.24	8.18	Ταχύτητα	m/s	2.86	4.50	6.01	5.71		
Αριθμός Froude	-	0.42	0.42	0.68	1.00	1.98	1.96	Αριθμός Froude	-	0.41	0.80	1.23	1.14		
Συντελεστής α	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Συντελεστής α	-	1.00	1.00	1.00	1.00		
Ύψος κινητικής ενέργειας	m	0.44	0.43	0.84	1.40	3.46	3.41	Ύψος κινητικής ενέργειας	m	0.42	1.03	1.84	1.66		
Υπολογισμός απωλειών								Υπολογισμός απωλειών							
Συντελεστής διαστολής C _e	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	Συντελεστής διαστολής C _e	-	0.05	0.05	0.05	0.05		
Συντελεστής συστολής C _c	-	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	Συντελεστής συστολής C _c	-	0.03	0.03	0.03	0.03		
Απώλειες λόγω C _e -C _c	m	0.00	0.01	0.02	0.06	0.00		Απώλειες λόγω C _e -C _c	m	0.00	0.02	0.01			
Κατάντη μήκος καναλιού	m	4.00	4.00	26.00	4.00	12.00	50.00	Κατάντη μήκος καναλιού	m	4.00	26.00	4.00	12		
Υδραυλική ακτίνα	m	2.72	2.73	1.00	0.80	1.37	1.37	Υδραυλική ακτίνα	m	2.75	0.92	0.71	1.79		
Συντελεστής τραχύτητας Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	Συντελεστής τραχύτητας Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020		
Κλίση Γραμμής Ενέργειας	m/m	0.001	0.001	0.007	0.015	0.018	0.018	Κλίση Γραμμής Ενέργειας	m/m	0.001	0.009	0.023	0.006		
Απώλειες τριβών	m	0.00	0.01	0.28	0.07	0.21		Απώλειες τριβών	m	0.02	0.41	0.06			
Συνολικές απώλειες	m	0.00	0.03	0.29	0.13	0.22		Συνολικές απώλειες	m	0.02	0.44	0.02			

Εικόνα Π.2-4. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων C-ST-S-90, C-US-S-90

C-ST-S-90								C-US-S-90							
Διατομή		4	3	Culvert Up	Culvert Down	2	1	Διατομή		4	3	Culvert Up	Culvert Down	2	1
Χαρακτηριστικό	Μονάδα							Χαρακτηριστικό	Μονάδα						
Θέση	m	250.0	246	242.0	216.0	212	200	Θέση	m	250.0	246	242.0	216.0	212	200
Παροχή Q	m ³ /s	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	Παροχή Q	m ³ /s	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Πυθμένας	m	1.50	1.48	1.45	1.30	1.27	1.20	Πυθμένας	m	1.50	1.48	1.45	1.30	1.27	1.20
Ελεύθερη επιφάνεια	m	3.45	3.45	3.15	2.72	2.88	2.80	Ελεύθερη επιφάνεια	m	3.45	3.45	3.15	2.72	2.90	2.81
Γραμμή ενέργειας	m	4.24	4.23	4.23	3.96	3.96	3.88	Γραμμή ενέργειας	m	4.24	4.23	4.23	3.97	3.97	3.88
Βάθος ροής		1.95	1.97	1.70	1.42	1.61	1.60	Βάθος ροής		1.95	1.97	1.70	1.43	1.63	1.61
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά								Γεωμετρικά χαρακτηριστικά							
Εμβαδόν HEC	m ²	24.92	25.12	19.52	19.52	19.52	19.52	Εμβαδόν HEC	m ²	24.98	25.12	19.64	19.64	19.64	19.64
Εμβαδόν	m ²	23.39	23.60	20.39	17.08	19.31	19.15	Εμβαδόν	m ³	23.39	23.60	20.39	17.11	19.51	19.35
Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	16.15	16.19	15.25	15.25	15.25	15.25	Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	16.16	16.19	15.27	15.27	15.27	15.27
Βρεχόμενη περίμετρος	m	15.90	15.93	15.40	14.85	15.22	15.19	Βρεχόμενη περίμετρος	m	15.90	15.93	15.40	14.85	15.22	15.19
Χαρακτηριστικά ροής								Χαρακτηριστικά ροής							
Ταχύτητα	m/s	3.94	3.92	4.60	4.94	4.61	4.61	Ταχύτητα	m/s	3.94	3.92	4.60	4.94	4.58	4.58
Αριθμός Froude	-	0.87	0.87	1.15	1.24	1.15	1.15	Αριθμός Froude	-	0.87	0.87	1.15	1.23	1.14	1.14
Άλφα	-	1	1	1	1	1	1	Άλφα	-	1	1	1	1	1	1
Ύψος κινητικής ενέργειας	m	0.79	0.78	1.08	1.24	1.08	1.08	Ύψος κινητικής ενέργειας	m	0.79	0.78	1.08	1.24	1.07	1.07
Υπολογισμός απωλειών								Υπολογισμός απωλειών							
Ce/ken	-	0.05	0.03	0.10	0.10	0.05	0.03	Ce/ken	-	0.05	0.03	0.10	0.10	0.05	0.03
Cc/kex	-	0.03	0.01	0.30	0.30	0.03	0.01	Cc/kex	-	0.03	0.01	0.30	0.30	0.03	0.01
			4->3	hen	hf	hex	2->1				4->3	hen	hf	hex	2->1
Τοπικές-Γραμμικές απώλειες	m	0.00	0.00	0.11	0.16	0.00	0.00	Τοπικές-Γραμμικές απώλειες	m	0.00	0.00	0.11	0.16	0.01	0.00
Μήκος L	m	4.00	34.00	26.00	4.00	12.00	50.00	Μήκος L	m	4.00	34.00	26.00	4.00	12.00	50.00
Υδραυλική ακτίνα R _h	m	1.54	1.55	1.28	1.28	1.28	1.28	Υδραυλική ακτίνα R _h	m	1.55	1.55	1.29	1.29	1.29	1.29
Συντελεστής Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	Συντελεστής Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Κλίση ενέργειας	m/m	0.003	0.003	0.006	0.007	0.006	0.006	Κλίση ενέργειας	m/m	0.003	0.003	0.006	0.007	0.006	0.006
Απώλειες λόγω τριβής	m	0.01	0.00	0.00	0.00	0.08	0.31	Απώλειες λόγω τριβής	m	0.01	0.00	0.00	0.00	0.08	0.30
Συνολικές απώλειες	m	0.01	0.00	0.11	0.16	0.08	0.31	Συνολικές απώλειες	m	0.01	0.00	0.11	0.16	0.08	0.30

Εικόνα Π.2-5. Υδραυλικοί υπολογισμοί σεναρίων C-ST-S-175, C-US-S-175

C-ST-S-175								C-US-S-175							
Διατομή		4	3	Culvert Up	Culvert Down	2	1	Διατομή		4	3	Culvert Up	Culvert Down	2	1
Χαρακτηριστικό	Μονάδα							Χαρακτηριστικό	Μονάδα						
Θέση	m	250.0	246	242.0	216.0	212	200	Θέση	m	250.0	246	242.0	216.0	212	200
Παροχή Q	m ³ /s	175.00	175.00	175.00	175.00	175.00	175.00	Παροχή Q	m ³ /s	175.00	175.00	175.00	175.00	175.00	175.00
Πυθμμένας	m	1.50	1.48	1.45	1.30	1.27	1.20	Πυθμμένας	m	1.50	1.48	1.45	1.30	1.27	1.20
Ελεύθερη επιφάνεια	m	5.22	5.21	4.44	3.91	4.05	3.84	Ελεύθερη επιφάνεια	m	5.23	5.22	4.43	3.91	3.81	3.74
Γραμμή ενέργειας	m	6.00	5.99	5.99	5.45	5.45	5.40	Γραμμή ενέργειας	m	6.01	6.00	6.00	5.47	5.47	5.40
Βάθος ροής	m	3.72	3.73	2.99	2.61	2.78	2.64	Βάθος ροής	m	3.73	3.74	2.98	2.61	2.54	2.54
Βάθος ροής κάτω από τον οχετό	m			2.27	2.27			Βάθος ροής κάτω από τον οχετό	m			2.27	2.27		
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά								Γεωμετρικά χαρακτηριστικά							
Εμβαδόν	m ²	44.61	44.96	44.96	44.96	33.36	31.62	Εμβαδόν HEC	m ²	44.71	44.89	44.89	44.89	30.64	30.64
Εμβαδόν κάτω από τον οχετό	m ²			27.24	27.24			Εμβαδόν κάτω από τον οχετό	m ²			27.24	27.24		
Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας	m	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	19.44	19.49	19.49	19.49	17.56	17.27	Βρεχόμενη περίμετρος HEC	m	19.45	19.48	19.48	19.48	17.11	17.11
Βρεχόμενη περίμετρος κάτω από τον οχετό	m			28.54	28.54			Βρεχόμενη περίμετρος κάτω από τον οχετό	m			28.54	28.54		
Χαρακτηριστικά ροής								Χαρακτηριστικά ροής							
Ταχύτητα	m/s	3.92	3.90	5.51	5.51	5.25	5.53	Ταχύτητα	m/s	3.94	3.92	5.55	5.55	5.71	5.71
Αριθμός Froude	-	0.65	0.64	0.91	0.91	1.00	1.09	Αριθμός Froude	-	0.65	0.65	0.92	0.92	1.14	1.14
Άλφα	-	1	1	1	1	1	1	Άλφα	-	1	1	1	1	1	1
Ύψος κινητικής ενέργειας	m	0.78	0.78	1.55	1.55	1.40	1.56	Ύψος κινητικής ενέργειας	m	0.79	0.78	1.57	1.57	1.66	1.66
Υπολογισμός απωλειών								Υπολογισμός απωλειών							
Ce/ken	-	0.05	0.03	0.10	0.10	0.05	0.03	Ce/ken	-	0.05	0.03	0.10	0.10	0.05	0.03
Cc/kek	-	0.03	0.01	0.30	0.30	0.03	0.01	Cc/kek	-	0.03	0.01	0.30	0.30	0.03	0.01
			4->3	hen	hf	hex	2->1				4->3	hen	hf	hex	2->1
Τοπικές-Γραμμικές απώλειες	m	0.00	0.00	0.15	0.34	0.04	0.00	Τοπικές-Γραμμικές απώλειες	m	0.00	0.00	0.16	0.34	0.03	0.00
Μήκος L	m	4.00	34.00	26.00	4.00	12.00	50.00	Μήκος L	m	4.00	34.00	26.00	4.00	12.00	50.00
Υδραυλική ακτίνα R _h	m	2.29	2.31	0.95	0.95	1.90	1.83	Υδραυλική ακτίνα R _h	m	2.30	2.30	0.95	0.95	1.79	1.79
Συντελεστής Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	Συντελεστής Manning	-	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Κλίση ενέργειας	m/m	0.002	0.002	0.013	0.013	0.005	0.005	Κλίση ενέργειας	m/m	0.002	0.002	0.013	0.013	0.006	0.006
Απώλειες λόγω τριβής	m	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.25	Απώλειες λόγω τριβής	m	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	0.30
Συνολικές απώλειες	m	0.01	0.00	0.15	0.34	0.10	0.26	Συνολικές απώλειες	m	0.01	0.00	0.16	0.34	0.10	0.30