

*ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ*

*ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ*

*ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ*

*ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΟΜΒΡΙΩΝ ΣΕ ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΤΗΝ  
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ*



*υπό*

*Δαλαμπύρα Ελένης*

*Κατσικανή Βασιλικής*

*Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους  
των απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού  
2019*

© 2019 Δαλαμπύρα Ελένη

© 2019 Κατσικανή Βασιλική

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Ηλιού Νικόλαος

(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Καλιαμπέτσος Γεώργιος

Επιστημονικός συνεργάτης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Κοπελιάς Παντελεήμων

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας μας, Καθηγητή κ. Ηλιού Νικόλαο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εργασίας μας. Οφείλουμε ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Καλιαμπέτσο Γεώργιο, επιστημονικό συνεργάτη στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την ανάθεση του θέματος και στην συνέχεια για την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μας παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας. Επιπλέον τον ευχαριστούμε θερμά για την προθυμία και για τις γνώσεις που αποκομίσαμε αυτό το χρονικό διάστημα. Επίσης, είμαστε ευγνώμονες στο τρίτο μέλος της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μας εργασίας, Δρ. Κοπελιά Παντελεήμονα που μας τίμησε με την συμμετοχή του στην Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή της διπλωματικής μας εργασίας. Τέλος ευχαριστούμε τις οικογένειές μας, τους συμφοιτητές και τους φίλους μας για την ηθική συμπαράσταση όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας.

*Δαλαμπύρα Ελένη – Κατσικανή Βασιλική*

# **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΟΜΒΡΙΩΝ ΣΕ ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ**

Δαλαμπύρα Ελένη  
Κατσικανή Βασιλική

**Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2014**

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Ηλιού Νικόλαος, Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η ύπαρξη του νερού, σε οποιαδήποτε μορφή, μειώνει την φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος και θέτει σε κίνδυνο την κυκλοφορία των διερχομένων οχημάτων. Το θέμα της απορροής των όμβριων των οδών είναι θέμα μείζονος σημασίας, καθώς η εμφάνιση υδάτων αποτελεί αιτία πρόκλησης του φαινομένου της υδρολίσθησης και της παγοπληξίας. Στις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων, με σκοπό την καλή απορροή του οδοστρώματος, προτείνεται η κατά μήκος κλίση της οδού να μην είναι μικρότερη από την πρόσθετη κλίση των οριογραμμών, η διαφορά  $s-\Delta s$  να είναι τουλάχιστον 0,5%. Σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό όμως, αποτελεί ο συνδυασμός οριζόντιας και κατακόρυφης χάραξης να είναι τέτοιος ώστε να αποφεύγονται μικρές τιμές της συνισταμένης κλίσης. Η επιλογή κατά μήκος κλίσεων, σύμφωνα με τον κανονισμό, μεταξύ των σημείων θλάσης της μηκοτομής, δεν διασφαλίζει πάντα την σωστή απορροή. Πρέπει η συνισταμένη κλίση να εξετάζεται και στις περιοχές των κατακόρυφων καμπύλων συναρμογής. Διαφορετικά στην επιφάνεια κυκλοφορίας είναι πιθανό να υπάρξουν κρίσιμες περιοχές όπου θα εμφανιστεί στρώμα νερού. Σκοπός στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η διερεύνηση και ο υπολογισμός του πάχους της υδατικής στρώσης στην επιφάνεια κυκλοφορίας που εμφανίζεται κατά την διάρκεια βροχοπτώσεως στις κρίσιμες περιοχές.



## Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή .....	1
1.1 Δομή Εργασίας .....	1
1.2 Σχετικές Έννοιες-Ορισμοί .....	2
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	5
2.1 Προσδιορισμός Κρίσιμων Περιοχών .....	5
2.1.1 Μεταβολή Επίκλισης – Ανύψωση Οδοστρώματος .....	5
2.2.2 Μαθηματική Περιγραφή .....	7
2.2 Πάχος Υδατικής Στρώσης.....	12
3. Διερεύνηση Τύπου Υπολογισμού .....	17
3.1 Υπολογισμός Πάχους Υδατικής Στρώσης .....	17
BY: Μέσο Βάθος Υφής .....	18
Lf: Μήκος Ροής .....	20
i: Ένταση Βροχόπτωσης .....	21
Sr: Συνισταμένη Κλίση .....	22
3.2 Παράμετροι για το Αποδεκτό Πάχος Υδατικής Στρώσης .....	23
Αποδεκτό Πάχος Υδατικής Στρώσης .....	25
3.3 Σύνοψη Αποτελεσμάτων.....	26
4. Διερεύνηση Επέκτασης του Τύπου Υπολογισμού.....	29
4.1 Σταθερή Κατά Μήκος Κλίση.....	29
Μέθοδος Υπολογισμού .....	30
4.1.1 Γραμμές Ροής Σταθερής κατά Μήκος Κλίσης $S_r=2\%$ .....	31
4.1.2 Γραμμές Ροής Σταθερής κατά Μήκος Κλίσης $S_r=3\%$ .....	33
4.2 Μεταβαλλόμενη Κατά Μήκος Κλίση.....	35
Μέθοδος Υπολογισμού .....	36
4.2.1 Περίπτωση Κοίλης Καμπύλης .....	37

Κοίλη Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ .....	37
Κοίλη Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,3m$ .....	38
Κοίλη Γραμμή Ροής: $L_f=100m$ , $H_o=2m$ .....	39
Κοίλη Γραμμή Ροής: $L_f=100m$ , $H_o=3m$ .....	40
4.2.2 Περίπτωση Κυρτής Καμπύλης .....	41
Κυρτή Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ .....	41
Κυρτή Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,3m$ .....	42
Κυρτή Γραμμή Ροής: $L_f=100m$ , $H_o=2m$ .....	43
Κυρτή Γραμμή Ροής: $L_f=100m$ , $H_o=3m$ .....	44
4.3 Πρόσθετες περιπτώσεις Μεταβαλλόμενης κατά Μήκος Κλίσης .....	45
Μέθοδος Υπολογισμού .....	46
Κοίλη Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ .....	47
Κυρτή Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ .....	48
4.4 Ταχύτητα Επιφανειακού Νερού.....	49
Υπολογισμός Ταχύτητας.....	51
Γραμμές Ροής Σταθερής κατά Μήκος Κλίσης.....	51
Γραμμές Ροής υπό την Μορφή Κοίλης Καμπύλης.....	53
Γραμμές Ροής υπό την Μορφή Κυρτής Καμπύλης .....	55
4.5 Σύνοψη Αποτελεσμάτων.....	57
5. Εφαρμογή του Τύπου σε Μοντέλα Δρόμων .....	65
Μέθοδος υπολογισμού συσσωρευμένου επιφανειακού νερού .....	66
Επιφανειακό ύψος νερού κατά την τροχιά κίνησης των οχημάτων .....	67
5.1 Εφαρμογή στο Μοντέλου Δρόμου 1 .....	67
Πάχος Υδατικής Στρώσης.....	69
Ταχύτητα Επιφανειακού Νερού.....	72
Τροχιές Διερχόμενων Οχημάτων .....	74



5.2 Εφαρμογή στο Μοντέλο Δρόμου 2.....	75
Πάχος Υδατικής Στρώσης.....	77
Ταχύτητα Επιφανειακού Νερού.....	79
Τροχιές Διερχόμενων Οχημάτων.....	80
5.3 Εφαρμογή στο Μοντέλο Δρόμου 3.....	81
Τροχιές Διερχόμενων Οχημάτων.....	83
5.4 Εφαρμογή στο Μοντέλο Δρόμου 4.....	85
Τροχιές Διερχόμενων Οχημάτων.....	86
6. Συμπεράσματα .....	89
7. Αναφορές .....	91
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	93
Μοντέλο Δρόμου 1 .....	94
Μοντέλο Δρόμου 2 .....	100
Μοντέλο Δρόμου 3 .....	106
Μοντέλο Δρόμου 4 .....	112



## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Μεταβολή επίκλισης.....	6
Σχήμα 2.2: Συναρμογή επικλίσεων, (RAL-L-1,1979). ....	6
Σχήμα 2.3: Χρωματική κλίμακα συνισταμένης κλίσης οδοστρώματος.....	10
Σχήμα 2.4: Προβληματική περιοχή κυκλικής δομής. ....	10
Σχήμα 2.5: Τμήμα μηκοτομής- διαγράμματος επικλίσεων και χρωματική απεικόνιση της συνισταμένης κλίσης στη συναρμογή εισόδου. ....	11
Σχήμα 2.6: Προβληματική περιοχή ελλειπτικής δομής. ....	12
Σχήμα 2.7: Παράδειγμα καμπυλών βάθους νερού. ....	15
Σχήμα 3.1: Σχηματισμός πάχους νερού στην επιφάνεια οδοστρώματος (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, ΤΕΥΧΟΣ 8,2002). ....	17
Σχήμα 3.2: Μακροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος. ....	18
Σχήμα 3.3: Συνισταμένη πορεία της ροής στο οδόστρωμα (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ,ΤΕΥΧΟΣ 8,2002). ....	21
Σχήμα 4.1: Διάστημα $\Delta l=1m$ για γραμμή ροής 10m με σταθερή κλίση. ....	30
Σχήμα 4.2: Μηκοτομή γραμμή ροής: $S_r=2\%$ , $L_f=10m$ . ....	32
Σχήμα 4.3: Μηκοτομή γραμμή ροής: $S_r=2\%$ , $L_f=100m$ . ....	32
Σχήμα 4.4: Μηκοτομή γραμμή ροής: $S_r=3\%$ , $L_f=10m$ . ....	34
Σχήμα 4.5: Μηκοτομή γραμμή ροής: $S_r=3\%$ , $L_f=100m$ . ....	34
Σχήμα 4.6: Διάστημα $\Delta l=2m$ για γραμμή ροής 10m με μεταβαλλόμενη κλίση. ....	36
Σχήμα 4.7: Μηκοτομή κοίλης γραμμής ροής ( $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ , $R=500m$ ). ....	37
Σχήμα 4.8: Μηκοτομή κοίλης γραμμής ροής ( $L_f=10m$ , $H_o=0,3m$ , $R=500m$ ). ....	38
Σχήμα 4.9: Μηκοτομή κοίλης γραμμής ροής ( $L_f=100m$ , $H_o=2m$ , $R=5000m$ ). ....	39
Σχήμα 4.10: Μηκοτομή κοίλης γραμμής ροής ( $L_f=100m$ , $H_o=3m$ , $R=2500m$ ). ....	41
Σχήμα 4.11: Μηκοτομή κυρτής γραμμής ροής ( $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ , $R=500m$ ). ....	42
Σχήμα 4.12: Μηκοτομή κυρτής γραμμής ροής ( $L_f=10m$ , $H_o=0,3m$ , $R=250m$ ). ....	43
Σχήμα 4.13: Μηκοτομή κυρτής γραμμής ροής ( $L_f=100m$ , $H_o=2m$ , $R=5000m$ ). ....	44
Σχήμα 4.14: Μηκοτομή κυρτής γραμμής ροής ( $L_f=100m$ , $H_o=3m$ , $R=2500m$ ). ....	45
Σχήμα 4.15: Μηκοτομή κοίλης γραμμής ροής ( $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ , $R=250m$ ). ....	47
Σχήμα 4.16: Μηκοτομή κυρτής γραμμής ροής ( $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ , $R=250m$ ). ....	48
Σχήμα 4.17: Μηκοτομή κοίλων γραμμών ροής. ....	59
Σχήμα 4.18: Μηκοτομή κυρτών γραμμών ροής.....	60
Σχήμα 4.19: Μηκοτομή γραμμών ροής.....	61
Σχήμα 5.1: Χρωματική κλίμακα συνισταμένης κλίσης οδοστρώματος.....	65

Σχήμα 5.2: Μοντέλο δρόμου 1. ....	68
Σχήμα 5.3: Κέντρο προβληματικής περιοχής μοντέλου δρόμου 1. ....	68
Σχήμα 5.4: Γραμμές ροής μοντέλου δρόμου 1. ....	69
Σχήμα 5.5: Τροχιές διερχόμενων οχημάτων. ....	74
Σχήμα 5.6: Μοντέλο δρόμου 2, αριστερή στροφή. ....	76
Σχήμα 5.7: Κέντρο προβληματικής περιοχής μοντέλου δρόμου 2. ....	76
Σχήμα 5.8: Γραμμές ροής μοντέλου δρόμου 2. ....	77
Σχήμα 5.9: Απεικόνιση διαδρομής διερχόμενων οχημάτων. ....	80
Σχήμα 5.10: Μοντέλο δρόμου 3. ....	82
Σχήμα 5.11: Κέντρο προβληματικής περιοχής για τον δρόμο 3. ....	82
Σχήμα 5.12: Γραμμές ροής επί του οδοστρώματος για το μοντέλο δρόμου 3. ....	83
Σχήμα 5.13: Τροχιές διερχόμενων οχημάτων. ....	84
Σχήμα 5.14: Απεικόνιση προβληματικής περιοχής για το μοντέλο δρόμου 4. ....	85
Σχήμα 5.15: Γραμμές ροής επί του οδοστρώματος για τον δρόμο 4. ....	86
Σχήμα 5.16: Διαδρομή οχήματος. ....	87
Σχήμα 8.1: Κέντρο προβληματικής περιοχής μοντέλου δρόμου 1. ....	94
Σχήμα 8.2: Γραμμές ροής μοντέλου δρόμου 1. ....	94
Σχήμα 8.3: Κέντρο προβληματικής περιοχής μοντέλου δρόμου 2. ....	100
Σχήμα 8.4: Γραμμές ροής μοντέλου δρόμου 2. ....	100
Σχήμα 8.5: Κέντρο προβληματικής περιοχής για τον δρόμο 3. ....	106
Σχήμα 8.6: Γραμμές ροής επί του οδοστρώματος για το μοντέλο δρόμου 3. ....	106
Σχήμα 8.7: Απεικόνιση προβληματικής περιοχής για το μοντέλο δρόμου 4. ....	112
Σχήμα 8.8: Γραμμές ροής δρόμου 4. ....	112

## Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 3.1: Πάχος υδατικής στρώσης συναρτήσει διάφορων τιμών του μέσου βάθους υφής .....	20
Γράφημα 3.2: Πάχος υδατικής στρώσης για διάφορα μήκη ροών. ....	21
Γράφημα 3.3: Πάχος νερού επί του οδοστρώματος για διαφορετικές τιμές έντασης βροχόπτωσης. ....	22
Γράφημα 3.4: Πάχος νερού επί του οδοστρώματος για διαφορετικές τιμές έντασης βροχόπτωσης. ....	22
Γράφημα 3.5: Πάχος υδατικής στρώσης για διαφορετικές τιμές σταθερής συνισταμένης κλίσης.....	23
Γράφημα 3.6: Αποδεκτό πάχος υδατικής στρώσης έναντι υδρολίσθησης.....	25
Γράφημα 4.1: Συνολικό βάθος νερού γραμμής ροής με μήκος $L_f=10m$ και σταθερή κλίση 2%. ....	32
Γράφημα 4.2: Συνολικό βάθος νερού γραμμής ροής με μήκος ροής 100m και σταθερή κλίση 2%.....	33
Γράφημα 4.3: Συνολικό βάθος νερού γραμμής ροής με μήκος ροής 10m και σταθερή κλίση 3%.....	34
Γράφημα 4.4: Συνολικό βάθος νερού γραμμής ροής με μήκος $L_f=100m$ και σταθερή κλίση 3%. ....	35
Γράφημα 4.5: Πάχος νερού διαστημάτων Κοίλη γραμμή ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ , $R=500m$ . ....	38
Γράφημα 4.6: Πάχος νερού διαστημάτων Κοίλη γραμμή ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,3m$ , $R=500m$ . ....	39
Γράφημα 4.7: Πάχος νερού διαστημάτων Κοίλη γραμμή ροής: $L_f=100m$ , $H_o=2m$ , $R=5000m$ . ....	40
Γράφημα 4.8: Πάχος νερού διαστημάτων Κοίλη γραμμή ροής: $L_f=100m$ , $H_o=3m$ , $R=2500m$ . ....	41
Γράφημα 4.9: Πάχος νερού διαστημάτων Κυρτή γραμμή ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ , $R=500m$ . ....	42
Γράφημα 4.10: Πάχος νερού διαστημάτων Κυρτή γραμμή ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,3m$ , $R=250m$ . ....	43
Γράφημα 4.11: Πάχος νερού διαστημάτων Κυρτή γραμμή ροής: $L_f=100m$ , $H_o=2m$ , $R=5000m$ . ....	44
Γράφημα 4.12: Πάχος νερού διαστημάτων Κυρτή γραμμή ροής: $L_f=100m$ , $H_o=3m$ , $R=2500m$ . ....	45
Γράφημα 4.13: Πάχος νερού διαστημάτων Κοίλη γραμμή ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ , $R=250m$ . ....	48
Γράφημα 4.14: Πάχος νερού διαστημάτων Κυρτής γραμμή ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ , $R=250m$ . ....	49
Γράφημα 4.15: Ταχύτητα νερού γραμμής ροής με σταθερή .....	52
Γράφημα 4.16: Ταχύτητα νερού γραμμής ροής με σταθερή .....	52
Γράφημα 4.17: Πορεία ταχύτητας νερού γραμμών ροής με σταθερή κλίση Διάστημα μελέτης $\Delta l=5m$ . ....	53
Γράφημα 4.18: Ταχύτητα νερού κοίλης γραμμής ροής $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ , $R=500m$ . ....	53
Γράφημα 4.19: Πορεία ταχύτητας νερού κοίλης γραμμής ροής ( $L_f=100m$ , $H_o=2m$ , $R=5000m$ ). ....	54
Γράφημα 4.20: Πορεία ταχύτητας νερού κοίλης γραμμής ροής ( $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$ , $R=250m$ ). ....	54
Γράφημα 4.21: Πορεία ταχύτητας νερού κυρτής γραμμής ροής.....	55
Γράφημα 4.22: Πορεία ταχύτητας νερού κυρτής γραμμής ροής.....	56
Γράφημα 4.23: Πορεία ταχύτητας νερού κυρτής γραμμής ροής.....	56
Γράφημα 4.24: Συνολικό βάθος νερού $L_f=10m$ και σταθερή κλίση $S_r=3\%$ . ....	57
Γράφημα 4.25: Συνολικό βάθος νερού $L_f=100m$ και σταθερή κλίση $S_r=2\%$ . ....	57
Γράφημα 4.26: Τελικό πάχος υδατικής στρώσης για γραμμές ροής με σταθερή κλίση.....	58

Γράφημα 4.27: Συνολικό βάθος νερού για καμπύλες γραμμές ροής. ....	58
Γράφημα 4.28: Συνολικό βάθος νερού για καμπύλες γραμμές ροής. ....	58
Γράφημα 4.29: Πάχος υδατικής στρώσης για κοίλες γραμμές ροής.....	59
Γράφημα 4.30: Πάχος υδατικής στρώσης για κυρτές γραμμές ροής. ....	60
Γράφημα 4.31: Συγκριτικό γράφημα πάχους υδατικής στρώσης γραμμών ροής. ....	61
Γράφημα 4.32: Ταχύτητα διαστημάτων κοίλης γραμμής ροής.....	62
Γράφημα 4.33: Ταχύτητα διαστημάτων κυρτής γραμμής ροής.....	62
Γράφημα 4.34: Πορεία ταχύτητας νερού γραμμών ροής με μεταβαλλόμενη κλίση. ....	63
Γράφημα 4.35: Πορεία ταχύτητας γραμμών ροής με μεταβαλλόμενη κλίση. ....	63
Γράφημα 5.1: Πάχος νερού για την 6 <sup>η</sup> και 8 <sup>η</sup> γραμμή ροής του μοντέλου δρόμου 1. ....	70
Γράφημα 5.2: Πάχος νερού για την 6 <sup>η</sup> και 8 <sup>η</sup> γραμμή ροής του μοντέλου δρόμου 1 .....	70
Γράφημα 5.3: Επιφανειακό πάχος νερού αντισυμμετρικών γραμμών ροής.. ....	70
Γράφημα 5.4: Πάχος νερού γραμμών ροής που απέχουν $l < 2,5m$ από το κέντρο του κύκλου. ....	71
Γράφημα 5.5: Συνισταμένη κλίση γραμμών ροής .....	71
Γράφημα 5.6: Πάχος νερού για την 17 <sup>η</sup> γραμμή ροής συναρτήσει της κλίσης.....	72
Γράφημα 5.7: Πάχος νερού για την 19 <sup>η</sup> γραμμή ροής συναρτήσει του μήκους. ....	72
Γράφημα 5.8: Πορεία ταχύτητας συναρτήσει της συνισταμένης κλίσης γραμμών ροής 6 <sup>ης</sup> και 8 <sup>ης</sup> .....	73
Γράφημα 5.9: Πορεία ταχύτητας συναρτήσει της συνισταμένης κλίσης γραμμών ροής 10 <sup>ης</sup> και 12 <sup>ης</sup> . .....	73
Γράφημα 5.10: Πορεία ταχύτητας συναρτήσει της συνισταμένης κλίσης 17 <sup>ης</sup> γραμμή ροής. ....	74
Γράφημα 5.11: Πορεία ταχύτητας συναρτήσει της συνισταμένης κλίσης 19 <sup>ης</sup> γραμμή ροής.....	74
Γράφημα 5.12: Πάχος υδατικής στρώσης κατά την τροχιά κίνησης των οχημάτων Μοντέλο δρόμου 1. .....	75
Γράφημα 5.13: Πάχος νερού για γραμμές μοντέλου δρόμου 2.....	78
Γράφημα 5.14: Συνισταμένη κλίση γραμμών ροής .....	78
Γράφημα 5.15: Πάχος νερού γραμμών ροής 6', 13' και 16'. ....	78
Γράφημα 5.16: Συνισταμένη κλίση γραμμών ροής 6', 13' και 16' .....	78
Γράφημα 5.17: Ταχύτητα επιφανειακού νερού για τις γραμμές ροής 12 και 15.....	79
Γράφημα 5.18: Ταχύτητα επιφανειακού νερού 22ης γραμμής ροής. ....	80
Γράφημα 5.19: Πάχος υδατικής στρώσης κατά την τροχιά κίνησης των οχημάτων .....	81
Γράφημα 5.20: Πάχος υδατικής στρώσης κατά την τροχιά κίνησης των οχημάτων Μοντέλο δρόμου 3. .....	84
Γράφημα 5.21: Πάχος υδατικής στρώσης κατά την τροχιά κίνησης των οχημάτων Μοντέλο δρόμου 4. .....	87

## **Κατάλογος Πινάκων**

<i>Πίνακας 3.1: Τιμές βάθους επιφανειακής υφής.....</i>	<i>19</i>
<i>Πίνακας 3.2: Σχέση χαρακτηριστικών παραμέτρων - βάθους νερού .....</i>	<i>24</i>
<i>Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά στοιχεία αγωγού ορθογωνικής διατομής. ....</i>	<i>50</i>
<i>Πίνακας 4.2: Συντελεστής Manning, n, για διάφορα υλικά .....</i>	<i>51</i>





# **1.Εισαγωγή**

---

Βασικός στόχος της διπλωματικής εργασίας αποτελεί, ο προσδιορισμός του πάχους της υδατικής στρώσης σε κρίσιμες περιοχές του οδοστρώματος, το οποίο είναι ικανό να προκαλέσει υδρολίσθηση. Ως κρίσιμες περιοχές, ορίζονται οι περιοχές του οδοστρώματος, όπου ο συνδυασμός εγκάρσιων και κατά μήκος κλίσεων δεν διασφαλίζει την σωστή απορροή. Συνήθως τότε σε μία από τις δύο οριογραμμές του οδοστρώματος εμφανίζεται κατά μήκος κλίση, αντίθετη από αυτή του άξονα περιστροφής της οδού. Επίσης εμφανίζονται μικρές τιμές στη συνισταμένη κλίση και δημιουργούνται περιοχές στην επιφάνεια της οδού, όπου η απορροή είναι δυσχερής. Ο προσδιορισμός των κρίσιμων περιοχών δεν αποτελεί το βασικό σκέλος της εργασίας είναι όμως χρήσιμο να κατανοηθεί ο τρόπος δημιουργίας.

Σε μοντέλα δρόμων που δημιουργήθηκαν, με την χρήση του προγράμματος Anadelta Tessera, υπολογίζεται το συνολικό ύψος νερού στα σημεία εμφάνισης ύδατος καθώς και η ταχύτητά του πάνω στο οδόστρωμα. Επιπλέον, προσδιορίζεται το πάχος νερού που είναι πιθανό να προκαλέσει υδρολίσθηση κατά την τροχιά κίνησης των διερχόμενων οχημάτων.

## **1.1 Δομή Εργασίας**

Στο **δεύτερο κεφάλαιο**, παρουσιάζεται το **θεωρητικό υπόβαθρο** που λήφθηκε υπόψη για την εκπόνηση της εργασίας, γίνεται η μαθηματική περιγραφή και προσδιορισμός των κρίσιμων περιοχών της οδού.

Στο **τρίτο κεφάλαιο**, γίνεται η **διερεύνηση του βασικού μαθηματικού τύπου** που επιλέχθηκε για την ανάπτυξη της έρευνας και προσδιορίζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν το αποδεκτό ύψος νερού έναντι υδρολίσθησης.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο**, γίνεται η **εφαρμογή του τύπου υπολογισμού** σε διαδρομές ροής με σταθερή κατά μήκος κλίση. Προσαρμόζεται ο τύπος, για περιπτώσεις διαδρομής με μεταβαλλόμενη κλίση, που αναπαρίστανται γραφικά με κοίλες ή κυρτές καμπύλες. Επιπλέον, υπολογίζεται η ταχύτητα του νερού κατά το μήκος της διαδρομής των ομβρίων.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο**, περιγράφεται η **εφαρμογή σε μοντέλα δρόμων** τα οποία κατασκευάστηκαν με την χρήση του λογισμικού Οδοποιίας Anadelta Tessera και των κρίσιμων περιοχών. Υπολογίζεται η υδατική στρώση, που εμφανίζεται στην επιφάνεια κυκλοφορίας στις

περιοχές αυτές. Επίσης, γίνεται ο σχολιασμός για το πάχος νερού έναντι υδρολίσθησης κατά την κίνηση των διερχόμενων οχημάτων.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται συνοπτικά **τα αποτελέσματα** και διατυπώνονται **τα συμπεράσματα** καθώς και **οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**.

Στο έβδομο κεφάλαιο υπάρχει **η βιβλιογραφία** που χρησιμοποιήθηκε, και στο τελευταίο κεφάλαιο το Παράρτημα **γραφημάτων** της εργασίας.

## **1.2 Σχετικές Έννοιες-Ορισμοί**

### **Υδρολίσθηση**

Φαινόμενο κατά το οποίο λόγω ύπαρξης ύδατος στο οδόστρωμα ο έλεγχος του οχήματος καθίσταται αδύνατος. Οι κινητήριοι τροχοί κινούνται πάνω σε επιφάνειες διαφορετικής αντίστασης που δεν υφίσταται καμία τριβή μεταξύ τους. Επομένως χάνεται η πρόσφυση με το οδόστρωμα και δεν μπορεί να επιτευχθεί επιβράδυνση ή αλλαγή κατεύθυνσης του οχήματος.

### **Γραμμές ροής**

Η γραμμή στην οποία εφάπτεται το διάνυσμα της ταχύτητας ενός σωματιδίου του ρευστού σε κάθε χρονική στιγμή και δείχνει την πορεία του πάνω στην επιφάνεια του εδάφους. Είναι πάντα κάθετη στις ισοϋψείς γραμμές και η φορά κίνησης του νερού είναι από τις περιοχές υψηλού υδραυλικού φορτίου προς τις περιοχές χαμηλού υδραυλικού φορτίου (από την υψηλή προς τη χαμηλή στάθμη).

### **Οριζοντιογραφία**

Η χάραξη της οδού σε οριζόντιο επίπεδο – οριζοντιογραφία – αποτελεί το πρώτο βήμα στη διαδικασία του γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών. Με τη χάραξη της πολυγωνικής της οδού στο τοπογραφικό διάγραμμα τοποθετείται, ουσιαστικά ο άξονας της υπό σχεδιασμό οδού στην οριζοντιογραφία. Η επόμενη ενέργεια είναι η μορφοποίηση της γεωμετρίας σύμφωνα με τους κανόνες ασφαλούς και άνετης χάραξης των οδών – ΟΜΟΕ.

### **Μηκοτομή**

Στο σχέδιο της μηκοτομής περιλαμβάνονται η τομή του άξονα της οδού με το φυσικό έδαφος καθώς και η τομή του άξονα της οδού με το κατάστρωμά της που ονομάζεται ερυθρά γραμμή και παριστάνει την υψομετρική θέση του άξονα της οδού. Επίσης στο σχέδιο αυτό παρατηρούνται

εύκολα οι ανωφέρειες και κατωφέρειες – θετική ή αρνητική κλίση του τμήματος της οδού στην κατά μήκος τομή – και σε ποια σημεία η οδός είναι ισόπεδη – το κατάστρωμά της δεν διαφέρει αισθητά από το φυσικό έδαφος.

Με τη χάραξη του άξονα της οδού σε οριζοντιογραφία ορίζεται η θέση του κατά  $X$  και  $Y$ . Επειδή όμως η οδός αναπτύσσεται στο χώρο είναι απαραίτητο να τοποθετήσουμε τον άξονα κατακόρυφα προσδιορίζοντας έτσι και την 3<sup>η</sup> διάσταση του που είναι η υψομετρική του θέση. Αυτό γίνεται με τη χάραξη της κατά μήκος τομής του άξονα της οδού ή αλλιώς της μηκοτομής. Στην αρχή και το τέλος της κατακόρυφης καμπύλης συναρμογής υπάρχει ο κατάλληλος συμβολισμός.

### **Διάγραμμα Επικλίσεων**

Αφορά την μεταβολή της εγκάρσιας κλίσης του οδοστρώματος, η οποία καλείται επίκλιση ( $q$ ). Είναι η κάθετη κλίση στον άξονα του δρόμου. Στο ευθύγραμμο τμήμα της η εγκάρσια τομή γίνεται αμφικλινής με κλίση εκατέρωθεν του άξονα της οδού 2,5%, για λόγους ευκολίας απορροής των όμβριων. Στις καμπύλες συναρμογής η επίκλιση μεταβάλλεται από την τιμή της ευθυγραμμίας στην τιμή του κυκλικού τόξου με περιστροφή γύρω από τον άξονα της οδού. Στο κυκλικό τόξο, όπου η εγκάρσια τομή είναι μονοκλινής, η επίκλιση λαμβάνει σταθερή τιμή που κυμαίνεται από 2,5% έως την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της εγκάρσιας κλίσης  $q_{max}$ , ανάλογα με την κατηγορία του δρόμου και την μορφολογία του εδάφους.

### **Κατά μήκος κλίση ( $s$ )**

Είναι η κλίση κατά μήκος του άξονα της οδού. Για παράδειγμα, το 2% σημαίνει, ότι από το σημείο που ξεκινάει η ανωφέρεια και στο τέλος οριζόντιας απόστασης 100m, ανεβαίνουμε κατακόρυφα 2m. Κατά αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται ένα ορθογώνιο τρίγωνο, του οποίου η υποτείνουσα είναι ο δρόμος.

### **Κατακόρυφες καμπύλες συναρμογής**

Κυρτή κατακόρυφη καμπύλη είναι η καμπύλη που εγγράφεται στις δύο πλευρές μιας γωνίας της ερυθράς (πολυγωνική γραμμή) η οποία στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω. Αντίθετα κατακόρυφη κοίλη καμπύλη είναι η καμπύλη που εγγράφεται στις δύο πλευρές μιας γωνίας της ερυθράς (πολυγωνική γραμμή) η οποία στρέφει τα κοίλα προς τα επάνω. Συνήθως οι κατακόρυφες καμπύλες που διατάσσονται στα κυρτώματα και τα κοιλώματα είναι τετραγωνικές παραβολές ως προσέγγιση κυκλικών τόξων, δεδομένου ότι για τις κατά κανόνα εφαρμοζόμενες μεγάλες ακτίνες

και την επιδιωκόμενη ακρίβεια το κυκλικό τόξο και η τετραγωνική παραβολή, πρακτικά, συμπίπτουν. Καθοριστικό γεωμετρικό μέγεθος της κατακόρυφης καμπύλης είναι η ακτίνα καμπυλότητας  $R$  στη θέση αλλαγής προσήμου της κατά μήκος κλίσης ( $S=0\%$ ).

### **Ερυθρά της οδού**

Η γραμμή εδάφους, η οποία αποτυπώνει το ανάγλυφο του εδάφους κατά μήκος του άξονα της οδού, είναι συνήθως μια έντονα τεθλασμένη γραμμή η οποία δεν μπορεί να αποτελέσει τον άξονα μιας επίπεδης, ομαλής επιφάνειας στην οποία θα κινηθούν τα οχήματα με ασφάλεια, ταχύτητα και άνεση. Έτσι λοιπόν η γραμμή αυτή υποκαθίσταται από την ερυθρά της οδού, η οποία είναι μια γραμμή με ομαλές και καμπύλες εναλλαγές κλίσεων (κατακόρυφες καμπύλες συναρμογής) και ορίζει υψομετρικά (κατακόρυφα) την θέση του άξονα της οδού.

### **Κλωθοειδής**

Η καμπύλη που χρησιμοποιείται κατά τη μετάβαση από ευθυγραμμία σε κυκλικό τόξο και αντίστροφα αλλά και για τη συναρμογή δύο ομόρροπων κυκλικών τόξων διαφορετικών ακτινών. Με τη χρήση της επιτυγχάνεται η μετάβαση από μία καμπυλότητα σε μία άλλη και πιο συγκεκριμένα η συνεχής γραμμική μεταβολή της φυγόκεντρης επιτάχυνσης. Εκεί γίνεται συνήθως η μεταβολή των επικλίσεων από τις τιμές της ευθυγραμμίας σε αυτές του κυκλικού τόξου και αντίστροφα.

## **2. Θεωρητικό Υπόβαθρο**

---

### **2.1 Προσδιορισμός Κρίσιμων Περιοχών**

Για την εξασφάλιση της απορροής των ομβρίων της οδού, οι Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) προτείνουν η διαφορά της κατά μήκος κλίσης και της πρόσθετης κλίσης των οριογραμμών να είναι τουλάχιστον 0,5%.

$$s - \Delta s \geq 0,5\% \quad (2.1)$$

Όπου,

$s$ : είναι η κατά μήκος κλίση της οδού (%),

$\Delta s$ : είναι η πρόσθετη κλίση των οριογραμμών (%).

Η επιλογή κατά μήκος κλίσεων, μεταξύ των σημείων θλάσης της μηκοτομής, που να υπακούουν στον παραπάνω κανόνα δεν διασφαλίζει πάντα την απορροή. Πρέπει η ίδια συνθήκη να ισχύει και στα τόξα συναρμογής της μηκοτομής έτσι ώστε σε καμία από τις δύο οριογραμμές του οδοστρώματος (και σε κανένα σημείο) να μην εμφανιστεί αντίθετη κλίση από την κατά μήκος κλίση του άξονα περιστροφής της οδού. Η κλίση αυτή, πρέπει να υπολογίζεται αναλυτικά για όλο το πλάτος του δρόμου και όχι σαν μια μόνο τιμή λοξής κλίσης ανά χιλιομετρική θέση στην άκρη του οδοστρώματος, συνδυασμός κατά μήκος κλίσης και επίκλισης (Καλιαμπέτσος, 2017).

#### **2.1.1 Μεταβολή Επίκλισης – Ανύψωση Οδοστρώματος**

Η **επίκλιση του οδοστρώματος στην ευθυγραμμία** πρέπει να είναι ικανοποιητική ώστε να αποφεύγεται η εμφάνιση νερού κατά τη διάρκεια της βροχής στο οδόστρωμα. Για όλες τις κατηγορίες οδών πρέπει η ελάχιστη ή τυπική τιμή της επίκλισης στην ευθυγραμμία να είναι:

$$q_{min}=2,5\%$$

Στις κυκλικές καμπύλες η επίκλιση, για λόγους δυναμικής της κίνησης έχει κατεύθυνση προς το εσωτερικό της καμπύλης (ΟΜΟΕ, Τεύχος 3, 2001).

Η μέγιστη τιμή της επίκλισης είναι:

για οδούς της ομάδας Α:

$q_{\max}=8\%$  (9%) σε πεδινά εδάφη

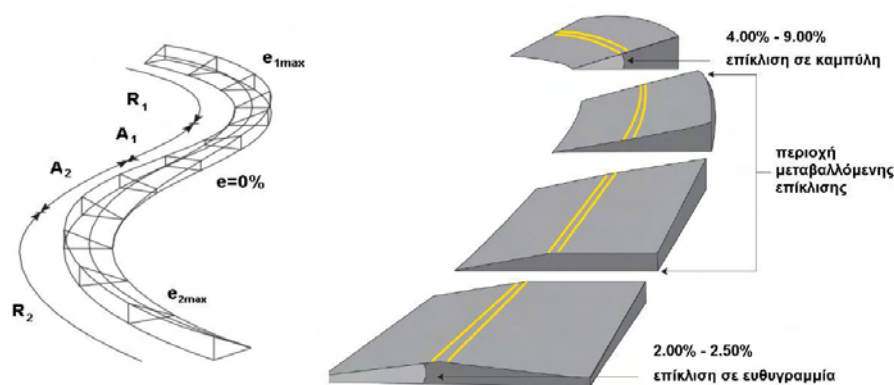
$q_{\max}=7\%$  σε λοφώδη και ορεινά εδάφη

για οδούς της ομάδας Β:

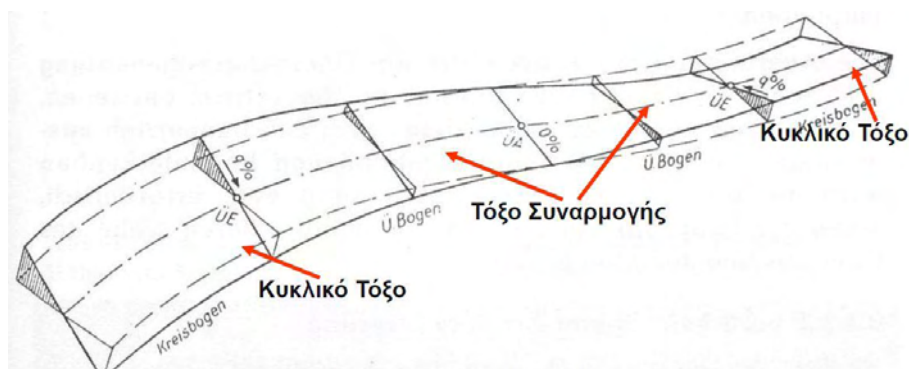
$q_{\max}=6\%$

Η ελάχιστη τιμή της υπερύψωσης στις κυκλικές καμπύλες λαμβάνεται ίδια με αυτή των ευθυγραμμίων, για λόγους απορροής, σε:  $q_{\min}=2,5\%$

Το μήκος της καμπύλης συναρμογής είναι συνήθως το μήκος στο οποίο λαμβάνει χώρα η μεταβολή της επίκλισης από την τιμή της ευθυγραμμίας σε αυτή της κυκλικής καμπύλης. Το μήκος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρό, για να εξασφαλίζεται η απορροή. Λαμβάνοντας υπόψη και τους περιορισμούς που επιβάλλονται από λόγους αισθητικής ή από την ίδια την περιστροφή.



Σχήμα 2.1: Μεταβολή επίκλισης.



Σχήμα 2.2: Συναρμογή επικλίσεων, (RAL-L-1,1979).

Η κατά μήκος κλίση της οριογραμμής σε σχέση με την κατά μήκος κλίση του άξονα λέγεται σχετική κλίση ή **πρόσθετη κλίση οριογραμμών** ( $\Delta s$ ). Αυτή δίνεται κάτω *Εξίσωση 2.2*:

$$\Delta s = \frac{e_e - e_b}{L_e} d \quad (2.2)$$

Όπου:

$\Delta s$ : σχετική ή πρόσθετη κλίση οριογραμμών.

$e_e$ : υπερύψωση ή επίκλιση στο τέλος του διαστήματος μεταβολής

$e_b$ : υπερύψωση ή επίκλιση στην αρχή του διαστήματος μεταβολής (έχει αρνητική τιμή όταν είναι αντίθετη της τιμής της  $e_e$ )

$L_e$ : μήκος μεταβολής των επικλίσεων

$d$ : απόσταση του άκρου των λωρίδων κυκλοφορίας (οριογραμμής) από τον άξονα του δρόμου

### **2.2.2 Μαθηματική Περιγραφή**

Ο συνδυασμός οριζόντιας και κατακόρυφης χάραξης, υπό προϋποθέσεις μπορεί να οδηγήσει σε όχι καλή απορροή των ομβρίων.

Η συνισταμένη κλίση σε οποιαδήποτε θέση του οδοστρώματος είναι πάντα μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση.

$$\rho(x, y) = \sqrt{(s_x + \Delta s_y)^2 + q_x^2} \quad (2.1)$$

Όπου:

$\rho(x, y)$ : συνισταμένη κλίση σε απόσταση  $x$  από το σημείο A, αρχή της οριζόντιας καμπύλης, και σε απόσταση  $y$  από τον άξονα του δρόμου

$s_x$ : κατά μήκος κλίση του άξονα σε απόσταση  $x$  από το σημείο A, αρχή της οριζόντιας καμπύλης

$$s_x = s_0 + n \frac{x}{R} \quad , \quad \forall x \geq 0 \quad (2.2)$$

Όπου:

$S_0$ : κατά μήκος κλίση του άξονα στην εφαπτομένη πριν την κατακόρυφη καμπύλη συναρμογής

$n$ : πρόσημο (+1) για κοίλη καμπύλης συναρμογής ή (-1) για κυρτή καμπύλη συναρμογής, (0) στην περίπτωση σταθερής κατά μήκος κλίσης

$x$ : απόσταση από την αρχή της κατακόρυφης καμπύλης συναρμογής, η οποία θεωρείται πάντα θετική

$R$ : ακτίνα καμπυλότητας της κατακόρυφης καμπύλης συναρμογής

$\Delta s_y$ : πρόσθετη κατά μήκος κλίση σε απόσταση  $y$  από τον άξονα του δρόμου

$$\Delta s_y = \frac{q+q_0}{L} y \quad (2.3)$$

Όπου:

$-q_0$ : επίκλιση στην ευθυγραμμία

$q$ : επίκλιση στο κυκλικό τόξο

$L$ : μήκος μεταβολής - περιστροφής του οδοστρώματος, που συνήθως ισούται με το μήκος κλωθοειδούς

$y$ : απόσταση από τον άξονα περιστροφής του οδοστρώματος

$q_x$ : η επίκλιση σε απόσταση  $x$ , επίσης από την αρχή της καμπύλης

$$q_x = -q_0 + \frac{q+q_0}{L} x \quad (2.4)$$

Όπου:

$x$ : απόσταση από τον την αρχή της καμπύλης

Το πρόβλημα της απορροής των ομβρίων εμφανίζεται σε σημεία-θέσεις στα οποία μηδενίζεται η συνισταμένη κλίση, όπως αυτή ορίζεται από τη σχέση (Εξ. 2.1), τα σημεία αυτά πρέπει να χαρακτηρίζονται από μηδενική επίκλιση και ταυτόχρονα από μηδενική σύνθετη κατά μήκος κλίση ( $s_x + \Delta s_y$ ), αυτό προκύπτει από την ίδια σχέση. Η θέση στην οποία μηδενίζεται η επίκλιση προσδιορίζεται από την τιμή του  $x$  στην οποία μηδενίζεται η  $q_x$ .

Χρησιμοποιώντας τη Εξίσωση 2.3 προκύπτει ότι αυτό συμβαίνει σε απόσταση  $x=X_c$  από την αρχή της καμπύλης:



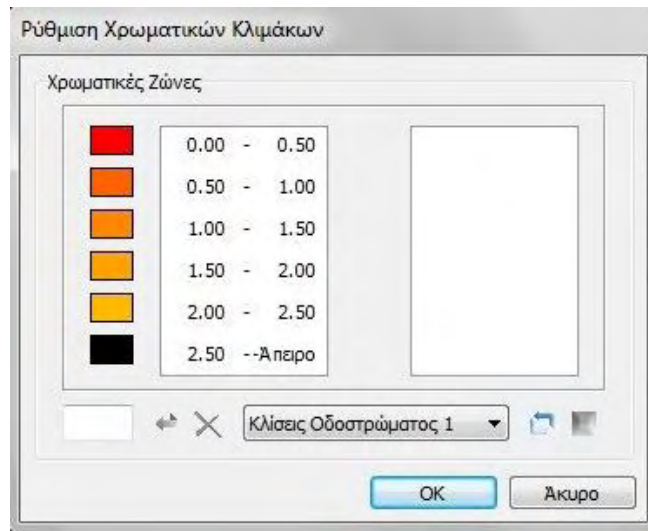
$$0 = -q_o + \frac{q+q_o}{L}x \leftrightarrow X_c = \frac{q_o}{q+q_o}L \quad (2.5)$$

Ο προσδιορισμός του σημείου μηδενισμού της συνισταμένης κλίσης, δηλαδή του σημείου ταυτόχρονου μηδενισμού της επίκλισης και της σύνθετης κατά μήκος κλίσης, δίνεται από τη σχέση:

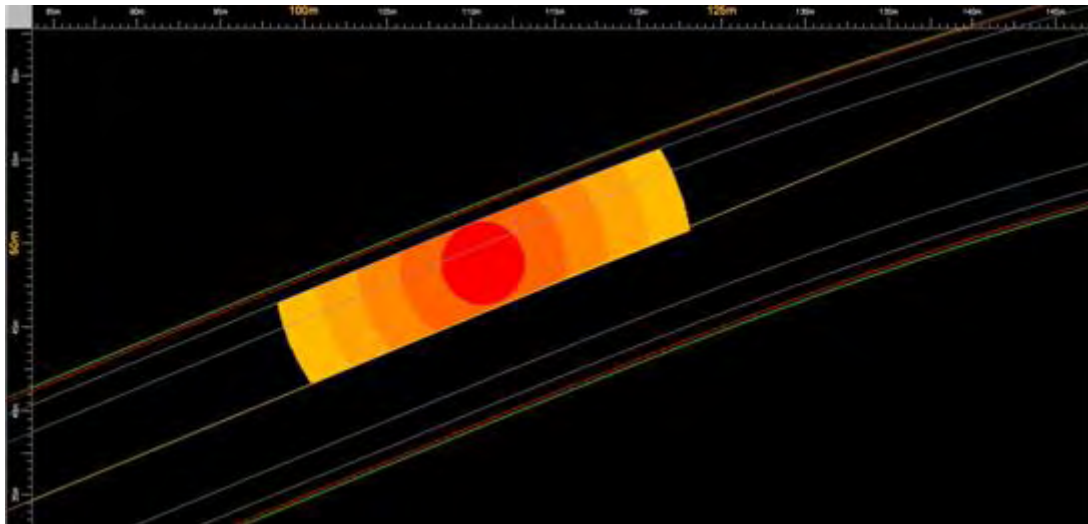
$$Y_c = \frac{L}{q+q_o} \left( s_0 - n \frac{x_o}{R} + \frac{q_o}{q+q_o} \frac{L}{R} \right) \quad (2.6)$$

Οι συντεταγμένες  $X_c, Y_c$  ορίζουν το σημείο μηδενισμού της συνισταμένης κλίσης, αν δεν υπάρχει σημείο με μηδενική συνισταμένη κλίση αυτό δεν σημαίνει ότι το πρόβλημα της απορροής έχει λυθεί. Το σημείο αυτό, αποτελεί το κέντρο μιας περιοχής την οποία αποκαλούμε ως κρίσιμη περιοχή, διότι εκεί η συνισταμένη κλίση είναι μικρότερη του 0,5% και η απορροή των υδάτων χαρακτηρίζεται ως κακή. Η μορφή της κρίσιμης αυτής περιοχής, διαφέρει αν έχουμε σταθερή κατά μήκος κλίση μηκοτομής στο μήκος της καμπύλης συναρμογής ή αν έχουμε μεταβαλλόμενη κατά μήκος κλίση.

Στην πρώτη περίπτωση, η μορφή της κρίσιμης περιοχής απεικονίζεται με κυκλική δομή. Στο *Σχήμα 2.4* απεικονίζεται η κυκλική αυτή δομή με τον κύκλο κόκκινου χρώματος. Για λόγους καλύτερης απεικόνισης, στο πρόγραμμα Anadelta Tessera, που είναι ένα λογισμικό κατασκευασμένο ειδικά για Οδοποιία. Σε αυτό συνυπάρχουν οι σχεδιαστικές δυνατότητες, με τις λειτουργίες διαχείρισης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και με τις λειτουργίες σχεδιασμού οδοποιίας. Έτσι γίνεται ευκολότερος ο εντοπισμός των προβληματικών αυτών περιοχών δημιουργούνται και άλλες ομόκεντρες κυκλικές δομές διαφορετικών χρωμάτων, όπου η κάθε μια ορίζει μια περιοχή η οποία χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών συνισταμένης κλίσης οδοστρώματος.



Σχήμα 2.3: Χρωματική κλίμακα συνισταμένης κλίσης οδοστρώματος.



Σχήμα 2.4: Προβληματική περιοχή κυκλικής δομής.

Για την απλοποίηση των σχέσεων, ορίζουμε την σταθερά  $C$ , η οποία εκφράζει τη μεταβολή της επίκλισης ανά μονάδα μήκους:

$$C = \frac{q + q_0}{L} \quad (2.7)$$

με βάση την οποία θα εκφραστούν και τα υπόλοιπα μεγέθη. Η απόσταση του σημείου μηδενισμού της συνισταμένης κλίσης από την αρχή της καμπύλης (μετρούμενη πάνω στον άξονα) και η οποία δίνεται από την Εξίσωση 2.5 γράφεται απλούστερα:

$$X_c = \frac{q_0}{C} \quad (2.8)$$

Η εγκάρσια απόσταση του ίδιου σημείου από τον άξονα του δρόμου, σύμφωνα με την *Εξίσωση 2.6*, για  $n=0$ , και την ενσωμάτωση της σταθεράς  $C$ , γράφεται:

$$Y_c = -\frac{s_0}{C} \quad (2.9)$$

και η ακτίνα των κυκλικών δομών (*Καλιαμπέτσος, 2017*) θα είναι:

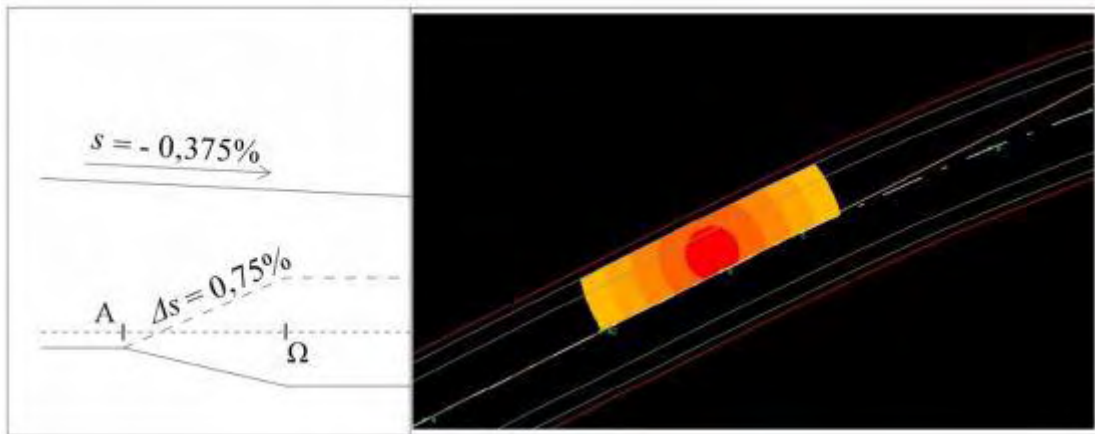
$$r_{ab} = \frac{\rho_0}{C} \quad (2.10)$$

Το μεγαλύτερο πρόβλημα απορροής, εμφανίζεται όταν η σταθερή κατά μήκος κλίση είναι  $s_0 = -0,375\%$ . Η μέγιστη τιμή του εμβαδού των κυκλικών δομών θα εμφανίζεται όταν το κέντρο των κυκλικών δομών, το σημείο μηδενισμού της συνισταμένης κλίσης, είναι στο μέσον του ρεύματος, δηλαδή για:

$$Y_c = \frac{a}{2} \quad (2.11)$$

Λύνοντας ως προς το  $s_0$ , την *Εξίσωση 2.9* προκύπτει η τιμή της σταθερής κλίσης η οποία αντιστοιχεί στη θέση αυτή:

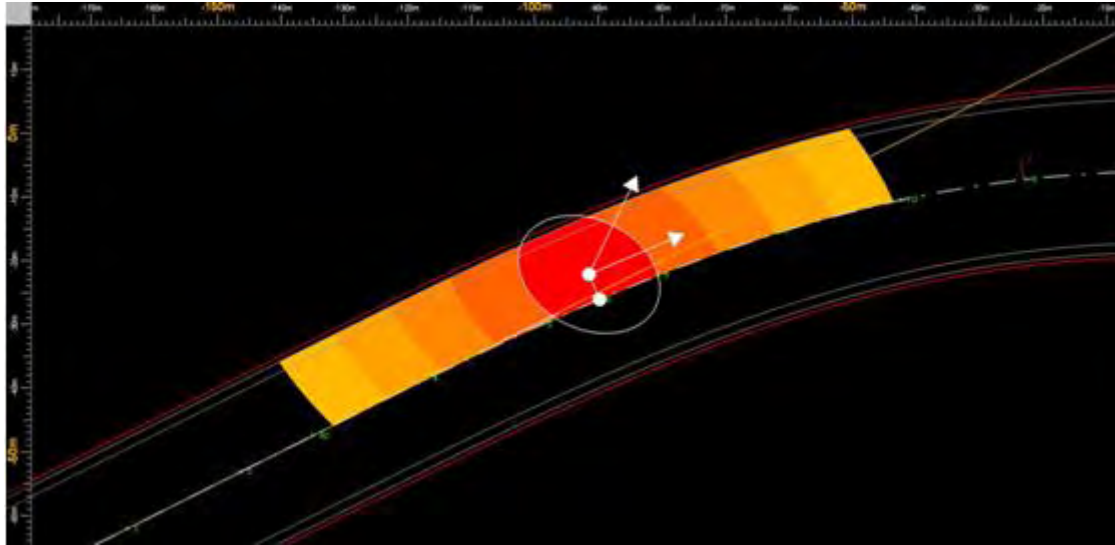
$$Y_c = -\frac{\Delta s}{2} \quad (2.12)$$



*Σχήμα 2.5: Τμήμα μηκοτομής- διαγράμματος επικλίσεων και χρωματική απεικόνιση της συνισταμένης κλίσης στη συναρμογή εισόδου.*

Στην δεύτερη περίπτωση, η μορφή της προβληματικής περιοχής απεικονίζεται με ελλειπτική δομή. Αυτό σημαίνει πως τα όρια της περιοχής, σε κάθε σημείο της οποίας η συνισταμένη κλίση

είναι μικρότερη του 0,5%, ορίζονται από την περίμετρο μιας έλλειψης. Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται αυτή η δομή με την έλλειψη κόκκινου χρώματος.



Σχήμα 2.6: Προβληματική περιοχή ελλειπτικής δομής.

Η εγκάρσια απόσταση του σημείου μηδενισμού από τον άξονα του δρόμου, σύμφωνα με την Εξίσωση (2.10) και την ενσωμάτωση της σταθεράς  $C$ , γράφεται:

$$Y_c = -\frac{1}{C} \left( s_0 - n \frac{x_0}{R} + n \frac{q_0}{RC} \right) \quad (2.13)$$

Το μήκος των ημιαξόνων των ελλείψεων (Καλιαμπέτσος, 2017) θα είναι:

$$a = \frac{\rho_0}{\sqrt{C^2 + \frac{1+\sqrt{1+4C^2R^2}}{2R^2}}}, \quad b = \frac{\rho_0}{\sqrt{C^2 + \frac{1-\sqrt{1+4C^2R^2}}{2R^2}}} \quad (2.14)$$

## 2.2 Πάχος Υδατικής Στρώσης

Αρκετές έρευνες έχουν διεξαχθεί για τον υπολογισμό του πάχους νερού υδρολίσθησης συναρτήσει της συνισταμένης κλίσης του οδοστρώματος. Το νερό της βροχής που πέφτει στην επιφάνεια κυκλοφορίας δημιουργεί γραμμές ροής με μήκος ροής  $L_f$  και συνισταμένη κλίση  $S_f$  (FHWA, 1979):

$$S_f = (S_x^2 + S_g^2)^2 = S_x \left( 1 + \left( \frac{S_g}{S_x} \right)^2 \right)^{0.5} \quad (2.15)$$

$$L_f = L_x \frac{S_f}{S_x} = L_x \left(1 + \left(\frac{S_g}{S_x}\right)^2\right)^{0.5} \quad (2.16)$$

Όπου:

$S_x$ : εγκάρσια κλίση (*ft/ft*)

$S_g$ : κατά μήκος κλίση (*ft/ft*)

$S_f$ : προκύπτουσα κλίση επιφάνειας (*ft/ft*)

$L_x$ : πλάτος οδοστρώματος

$L_f$ : μήκος ροής

Το βάθος νερού που συσσωρεύεται στο οδόστρωμα εξαρτάται από το μήκος ροής ( $L_f$ ), την ένταση βροχόπτωσης ( $I$ ), την συνισταμένη κλίση της γραμμής ροής ( $S_f$ ) και το βάθος υφής του οδοστρώματος, (μακροϋφή  $TXD$ ).

Η εμπειρική εξίσωση, βασισμένη σε πειραματικά δεδομένα για το βάθος νερού στην επιφάνεια οδοστρώματος ( $WD$ ) παρουσιάζεται στο *FHWA (1979)*:

$$WD = 0,00338(TXD^{0,11}L_f^{0,43}I^{0,59}S_f^{-0,42}) - TXD \quad (2.17)$$

Όπου:

$WD$ : το βάθος νερού πάνω από την ανώτατη επιφάνεια του

οδοστρώματος (δεν περιλαμβάνεται το βάθος της υφής) (*in*)

$TXD$ : βάθος της υφής οδοστρώματος (*in*)

$L_f$ : μήκος απορροής (*ft*)

$I$ : ένταση βροχόπτωσης (*in/h*)

$S_f$ : προκύπτουσα κλίση επιφάνειας (*ft/ft*)

Για μικρό μήκος ροής, για ασθενείς βροχοπτώσεις και για μεγάλες κλίσεις το πάχος νερού που προκύπτει από την *Εξίσωση 2.15* είναι μικρό έως και μηδενικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι

το βάθος του νερού ( $WD$ ) ορίζεται από τον ορίζοντα της επιφάνειας κυκλοφορίας. Αρνητικό βάθος δείχνει απλά ότι η επιφάνεια του στρώματος νερού είναι κάτω από την κορυφή του ανάγλυφου της επιφάνειας.

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις 2.15 και 2.16, η Εξίσωση 2.17 συναρτήσει του πλάτους οδοστρώματος, της εγκάρσιας και διαμήκης κλίσης, παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$WD = (WD_o + TXD)(1 + \left(\frac{S_g}{S_x}\right)^2)^{0.5} - TXD \quad (2.18)$$

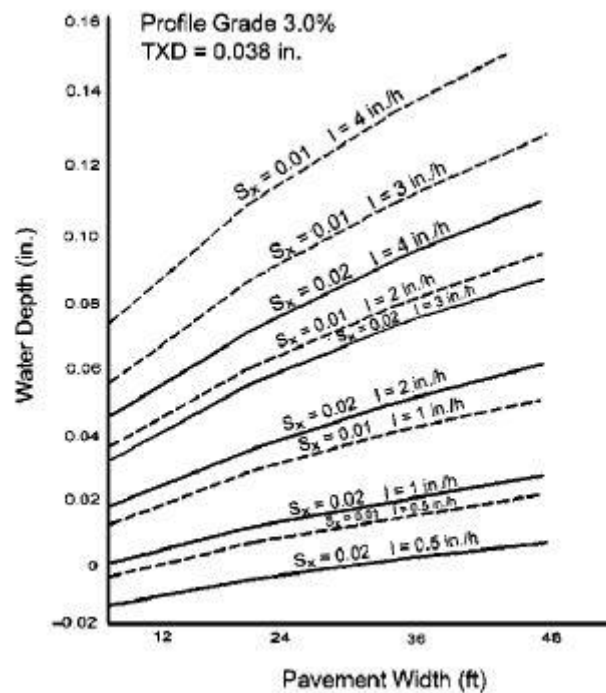
$$WD_o = 0,00338(TXD^{0,11}L_x^{0,43}I^{0,59}S_x^{-0,42}) - TXD \quad (2.19)$$

Η ποσότητα  $WD_o$  που ορίζεται από την Εξίσωση 2.19 αντιστοιχεί στο βάθος του νερού που θα συνέβαινε στην επιφάνεια του δρόμου για μηδενική διαμήκη κλίση ( $S_g=0$ ).

Οι υπολογισμοί με την Εξίσωση 2.18 για τυπικές τιμές των  $S_x$  και  $S_g$  δείχνουν ότι η διαμήκης κλίση δεν έχει σημαντική επίδραση στο βάθος του νερού, αν και έχει επίδραση στο μήκος διαδρομής ροής. Πιο συγκεκριμένα, το βάθος του νερού αυξάνεται κατά λιγότερο από 5%, όταν η τιμή της  $S_x$  αυξάνεται από 2,08% σε 2,60%. (αύξηση διαμήκης κλίσης από 0 έως 6%). (AASHTO, 1992).

Για διάφορους συνδυασμούς των παραπάνω παραμέτρων προκύπτει το Σχήμα 2.7.

Η προκύπτουσα κλίση επιφάνειας υπολογίζεται με την Εξίσωση 2.15, συναρτήσει της εγκάρσιας κλίσης  $S_x$  και της κατά μήκος κλίσης  $S_g$  του οδοστρώματος, το μήκος της ροής προκύπτει από την εφαρμογή της Εξίσωσης 2.16 συναρτήσει του πλάτους του οδοστρώματος



Σχήμα 2.7: Παράδειγμα καμπυλών βάθους νερού.

Ακόμη μια μαθηματική έκφραση της παραπάνω εξίσωσης για το πάχος νερού που αναπτύχθηκε από το Gallaway, όπου οι μεταβλητές εκφράζονται σε μονάδες S.I., σύμφωνα με τις οδηγίες *Highway Drainage Guidelines and Transportation* (2007), είναι:

$$WD = 0,01485 \left( TXD \cdot 0.11^{L_f^{0.43}} I^{0.59} S_f^{-0.42} \right) - TXD \quad (2.20)$$

Όπου:

**WD:** το βάθος νερού (*mm*)

**TXD:** βάθος της υφής οδοστρώματος (*mm*)

**$L_f$ :** μήκος απορροής (*m*)

**$I$ :** ένταση βροχόπτωσης (*mm/h*)

**$S_f$ :** προκύπτουσα κλίση επιφάνειας (*m/m*)





### 3. Διερεύνηση Τύπου Υπολογισμού

Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται η διερεύνηση του βασικού μαθηματικού τύπου που επιλέχθηκε για την ανάπτυξη της έρευνας. Αναλύονται οι μεταβλητές της εξίσωσης για τον υπολογισμό της υδατικής στρώσης επί του οδοστρώματος. Επιπλέον, υπολογίζεται, συναρτήσει των χαρακτηριστικών παραγόντων, το αποδεκτό πάχος έναντι υδρολίσθησης.

#### 3.1 Υπολογισμός Πάχους Υδατικής Στρώσης

Στις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων, Τεύχος 8, το πάχος υδατικής στρώσης, υπολογίζεται από την εμπειρική εξίσωση που αναπτύχθηκε από το GALLAWAY (*Highway Drainage Guidelines AASHTO 1999*):

$$BN = 0,01485(BY^{0,11}L_f^{0,43}i^{0,59}S_r^{-0,42}) - BY \quad (3.1)$$

Όπου:

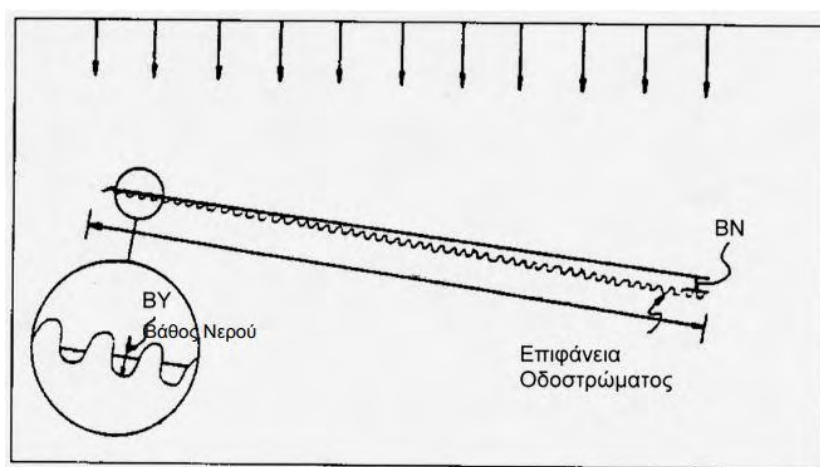
**BN**: το βάθος νερού πάνω από την ανώτατη επιφάνεια του οδοστρώματος (δεν περιλαμβάνεται το βάθος της υφής) (*mm*)

**BY**: το μέσο βάθος της υφής (*mm*)

**$L_f$** : μήκος ροής (*m*)

**$i$** : ένταση βροχόπτωσης (*mm/h*)

**$S_r$** : συνισταμένη κλίση γραμμής ροής (*m/m*)



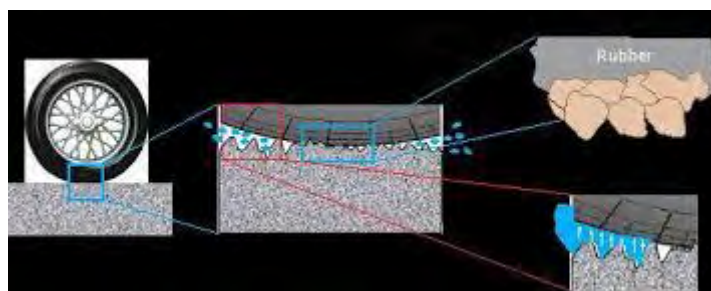
Σχήμα 3.1: Σχηματισμός πάχους νερού στην επιφάνεια οδοστρώματος (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, ΤΕΥΧΟΣ 8,2002).

Σύμφωνα με την *Εξίσωση 3.1*, το βάθος νερού ( $BN$ ) πάνω στην επιφάνεια του οδοστρώματος εξαρτάται από: το μήκος της διαδρομής ροής ( $L_f$ ), το βάθος υφής της οδοστρώματος ( $BY$ ), τη συνισταμένη κλίση ( $S_r$ ) και την ένταση βροχόπτωσης ( $i$ ).

Διεθνώς από πειραματικά δεδομένα έχει συμφωνηθεί ένα πεδίο τιμών του πάχους μεμβράνης νερού, που σαν αποτέλεσμα φέρουν την απώλεια της επαφής του ελαστικού με το οδόστρωμα. Αυτό το κατά προσέγγιση επικίνδυνο βάθος είναι της τάξης των  $1,5$  έως  $5mm$  (*OMOE- ΑΣΥΕΟ, ΤΕΥΧΟΣ 8, 2002*).

### **BY: Μέσο Βάθος Υφής**

Η επιφανειακή υφή είναι χαρακτηριστικό του οδοστρώματος το οποίο είναι απαραίτητο στην ομαλή λειτουργία της οδού και έχει άμεση σχέση με την αντιολισθηρότητα της επιφάνειας, δηλαδή τη μικροϋφή και τη μακροϋφή.



Σχήμα 3.2: Μακροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Συγκεκριμένα, η μικροϋφή και η μακροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι ιδιότητες που επηρεάζουν την πρόσφυση των ελαστικών επί του οδοστρώματος, η μικροϋφή εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας των αδρανών, ενώ η μακροϋφή προσδιορίζεται από το ανάγλυφο της επιφάνειας του οδοστρώματος. Η μακροϋφή, ή βάθος υφής, μετρείται με δύο διαφορετικούς τρόπους, την μέθοδο της κηλίδας άμμου και με ειδικά συστήματα λείζερ. Για να αποφεύγονται τυχόν αστοχίες και βλάβες στην επιφάνεια του οδοστρώματος θα πρέπει να πραγματοποιούνται μετρήσεις, που ορθό είναι να εκτελούνται κάθε χρόνο για τα τρία πρώτα (3) έτη και να γίνονται σε όλες τις λωρίδες του αυτοκινητόδρομου, ανά διαστήματα των  $100m$  το μέγιστο.

Τα όρια του δείκτη επιφανειακής υφής καθορίζονται από τον τύπο του ασφατικού σκυροδέματος. Το ασφατικό σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή αντιολισθητής

στρώσης, είναι ασφαλτόμιγμα παραγόμενο και διαστρωνόμενο "εν θερμώ", αυστηρά ελεγμένης σύνθεσης, από καθαρή ή τροποποιημένη με βελτιωτικά άσφαλτο και σκληρά αδρανή υλικά. Με τη μέθοδο αυτή, λόγω της υψηλής μηχανικής αντοχής του ασφαλτικού σκυροδέματος, εξασφαλίζεται αφενός μεν η ενίσχυση του οδοστρώματος και αφετέρου η επίτευξη εξαιρετικών επιφανειακών χαρακτηριστικών ομαλότητας, ομοιομορφίας, αντίστασης σε ολίσθηση και επιφανειακής υφής. Εφαρμόζεται σε νέες κατασκευές σε οδούς με σημαντική κυκλοφορία και για την ανακαίνιση-συντήρηση παλαιών οδοστρωμάτων.

Προσδιορίζονται λοιπόν δύο τύποι ασφαλτικού σκυροδέματος.

### **ΤΥΠΟΣ 1:**

Ασφαλτικό σκυρόδεμα πυκνής σύνθεσης, με ονομαστικό μέγεθος αδρανών 12,5mm, ή 9,5mm. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις, που ενδιαφέρει, πέρα από την εξασφάλιση της αντιστοιχισιρότητας, η ενίσχυση και η στεγανότητα του οδοστρώματος. Με αυτό τον τρόπο, δεν επιτυγχάνεται μεγάλο βάθος μακροϋφής.

### **ΤΥΠΟΣ 2:**

Ασφαλτικό σκυρόδεμα ανοικτής σύνθεσης, με ονομαστικό μέγεθος αδρανών 12,5mm, ή 9,5mm. Με τον τύπο αυτό, εξασφαλίζεται η μακροϋφή, με αποτέλεσμα την καλύτερη διατήρηση της αντίστασης σε ολίσθηση και σε υψηλές ταχύτητες. Λόγω αυξημένου ποσοστού κενών, η διάρκεια ζωής του ασφαλτοτάπητα είναι σχετικά μικρότερη, σε σύγκριση με τον Τύπο 1.

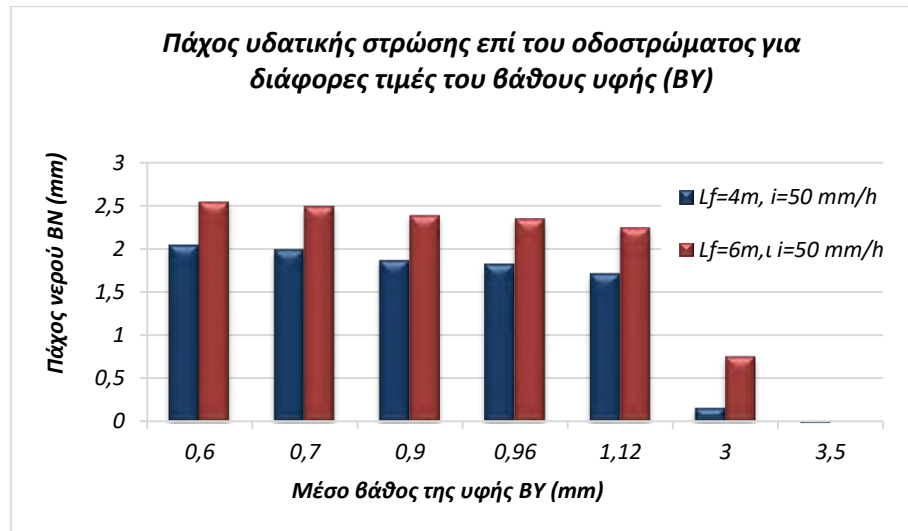
Οι κατώτερες τιμές της επιφανειακής υφής των παραπάνω τύπων ασφαλτομιγμάτων βάση, τον Πίνακα 3.1, κυμαίνονται από 0,6 mm, έως 12,5mm.

*Πίνακας 3.1: Τιμές βάθους επιφανειακής υφής*

Ονομαστικό μέγεθος	ΤΥΠΟΣ 1		ΤΥΠΟΣ 2	
Ελάχιστο βάθος επιφανειακής υφής	12,5mm	9,5mm	12,5mm	9,5mm
	0,7mm	0,6mm	1,0mm	0,9mm

Γενικά, τιμές της μακροϋφής τουλάχιστον 60% των παραπάνω θεωρούνται ικανοποιητικές για οδοστρώματα που έχουν κυκλοφορηθεί, μικρότερες τιμές αποτελούν ένδειξη για την λήψη βελτιωτικών μέτρων (Τεχνική Συγγραφή Υποχρεώσεων του Υ.Πε.Χω.Δ.Ε, ΑΡΘΡΟ ΣΤ4 ).

Οι τιμές του υμένα νερού, στην επιφάνεια κυκλοφορίας, που υπολογίστηκαν για διάφορες τιμές της επιφανειακής υψής παρουσιάζονται στο *Γράφημα 3.1*.

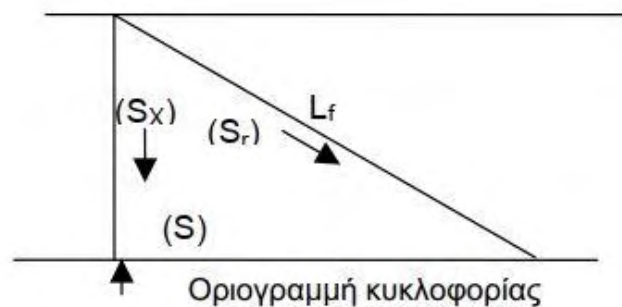


*Γράφημα 3.1: Πάχος υδατικής στρώσης συναρτήσει διάφορων τιμών του μέσου βάθους υψής*

Προκύπτει, πως για τις κατώτερες τιμές του *Πίνακα 3.1* το πάχος νερού επί του οδοστρώματος είναι της τάξεως των  $2,5\text{mm}$  έως  $1,8\text{mm}$ . Για τιμές, του βάθους υψής, μεγαλύτερες, το επιφανειακό στρώμα νερού κυμαίνεται σε μικρό ύψος. Υπάρχουν και περιπτώσεις, όπου το ύψος είναι μηδενικό καθώς το ανάγλυφο της επιφάνειας (βάθος υψής) επαρκεί για να μην δημιουργηθεί ροή όμβριων επί του οδοστρώματος.

### ***L<sub>f</sub>: Μήκος Ροής***

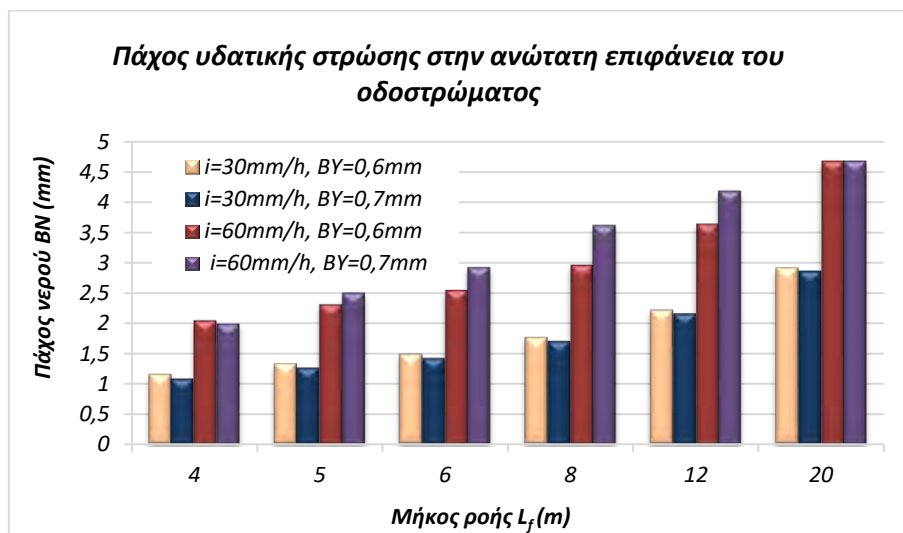
Ως μήκος ροής ορίζεται η πορεία της κίνησης του νερού πάνω στο οδόστρωμα. Η κατά μήκος κλίση της οδού  $S$ , καθώς και η εγκάρσια κλίση  $S_x$  καθορίζουν το μήκος διαδρομής της ροής. Για γραμμές ροής με σταθερή κατά μήκος κλίση, η πορεία παριστάνεται στο *Σχήμα 3.3*.



Σχήμα 3.3: Συνισταμένη πορεία της ροής στο οδόστρωμα (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, ΤΕΥΧΟΣ 8, 2002).

Για διάφορες τιμές των μεταβλητών του μαθηματικού τύπου, προκύπτει πως μεγαλύτερο μήκος ροής οδηγεί σε μεγαλύτερο ύψος νερού. Συγκεκριμένα, για ποσοστιαία αύξηση του μήκους κατά 5%, το ύψος αυξάνεται κατά 3,2%. Όταν το μήκος ροής είναι μεγάλο ( $L_f > 12m$ ), ακόμα και για ασθενείς βροχοπτώσεις της τάξεως των  $30mm/h$ , το πάχος της υδατικής στρώσης κυμαίνεται από  $2,5mm$  έως  $3mm$ , πάχος που θεωρείται κρίσιμο. (Γράφημα 3.2).

Σε όλες τις περιπτώσεις του γραφήματος, η συνισταμένη κλίση της γραμμής ορίστηκε ίση και σταθερή με  $S_r=0,5\%$ , ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη μεταβάλλονται.



Γράφημα 3.2: Πάχος υδατικής στρώσης για διάφορα μήκη ροών.

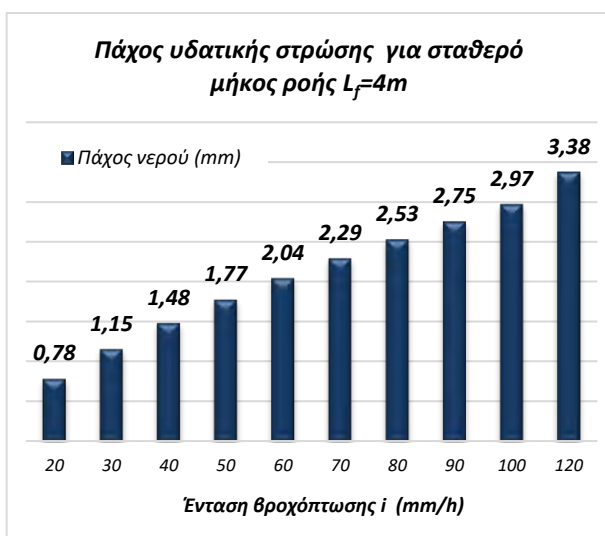
### **i: Ένταση Βροχόπτωσης**

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν το ύψος του επιφανειακού νερού, και κατά συνέπεια την υδρολίσθηση, είναι η βροχόπτωση ( $i$ ). Κατά την έναρξη της βροχής ο

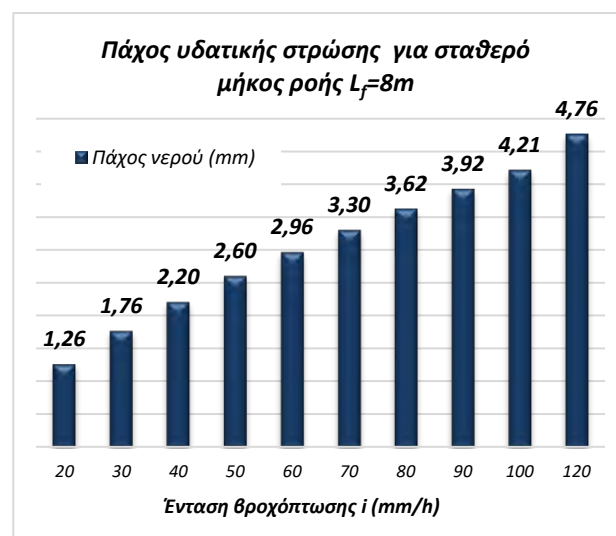
δρόμος γίνεται ολισθηρός και όταν ο συνδυασμός εγκάρσιων και κατά μήκος κλίσεων δεν διασφαλίζουν την σωστή απορροή, υπάρχει ο κίνδυνος της υδρολίσθησης.

Για μικρές εντάσεις βροχόπτωσης το ύψος είναι αμελητέο έως και μηδενικό. Ενώ, όπως είναι αναμενόμενο με την αύξηση της έντασης το ύψος νερού αυξάνεται.

Αναλυτικότερα, στα *Γραφήματα 3.3 και 3.4*, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το ίδιο μήκος ροής,  $L_f=4m$  και  $L_f=8m$ , και την ίδια σταθερή συνισταμένη κλίση,  $S_r=0,5\%$  έχοντας λάβει υπόψη περισσότερα δεδομένα για την ένταση βροχόπτωσης. Οι τιμές της έντασης κυμαίνονται από  $i=20mm/h$  έως  $i=120mm/h$ .



*Γράφημα 3.3: Πάχος νερού επί του οδοστρώματος για διαφορετικές τιμές έντασης βροχόπτωσης.*



*Γράφημα 3.4: Πάχος νερού επί του οδοστρώματος για διαφορετικές τιμές έντασης βροχόπτωσης.*

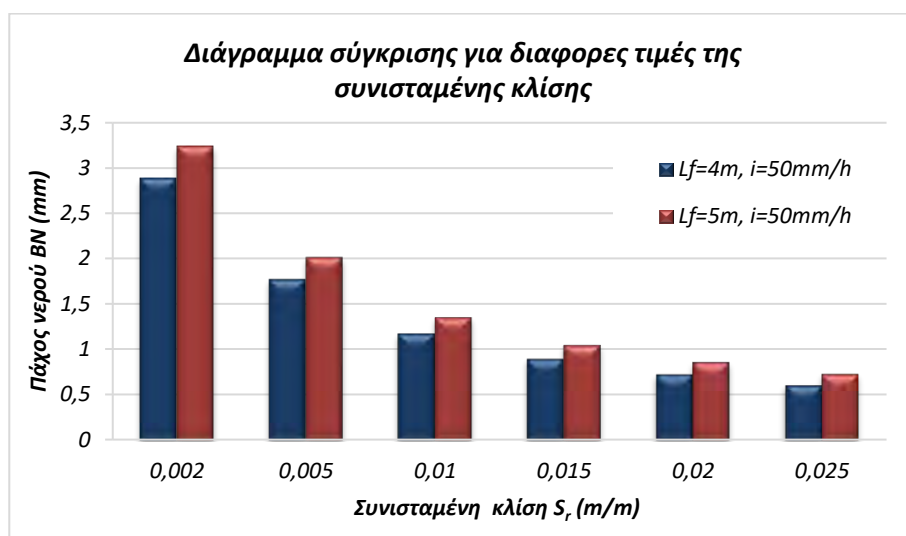
Ο έλεγχος για εντάσεις μεγαλύτερες από  $100mm/h$  έχει αμελητέα αξία από την άποψη της ασφάλειας του οδηγού. Κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων με  $i>100mm/h$  οι οδηγοί απομακρύνονται από τις λωρίδες κυκλοφορίας ενώ εκείνοι οι οδηγοί που παραμένουν, αναγκαστικά περιορίζονται σε πολύ χαμηλές ταχύτητες (ΟΜΟΕ- ΑΣΥΕΟ, ΤΕΥΧΟΣ 8, 2002).

### **Sr: Συνισταμένη Κλίση**

Τελευταία μεταβλητή, που καθορίζει το επιφανειακό ύψος, βάσει του μαθηματικού τύπου, είναι η συνισταμένη κλίση κατά μήκος της διαδρομής των υδάτων.

Το υπολογισμένο πάχος στρώματος για τιμές, της κλίσης μικρότερες από  $S_r \leq 1,5\%$ , είναι μεγαλύτερο, συγκριτικά, με το ύψος που εμφανίζεται όταν η κλίση είναι μεγαλύτερη (Γράφημα 3.5).

Με την μείωση κατά 5% της τιμής της συνισταμένης κλίσης της γραμμής ροής, το πάχος αυξάνεται περίπου κατά 8%.



Γράφημα 3.5: Πάχος υδατικής στρώσης για διαφορετικές τιμές σταθερής συνισταμένης κλίσης.

### 3.2 Παράμετροι για το Αποδεκτό Πάχος Υδατικής Στρώσης

Στην προηγούμενη ενότητα, παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι μεταβλητές της μαθηματικής εξίσωσης που καθορίζουν το πάχος νερού υδρολίσθησης επί του οδοστρώματος. Ανάλογα με το ανάγλυφο της επιφανείας του οδοστρώματος, την ένταση βροχόπτωσης και την συνισταμένη κλίση της γραμμής ροής, όταν το πάχος νερού που υπολογίζεται ξεπερνά την τιμή 1,5-5mm, θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα πρόληψης της υδρολίσθησης (ΟΜΟΕ- ΑΣΥΕΟ, ΤΕΥΧΟΣ 8, 2002).

Σημαντικοί παράγοντες για τη υλοποίηση ή μη των διορθωτικών μέτρων, που θα πρέπει να συνεκτιμώνται, είναι:

- το πλάτος ερεισμάτων,
- η θέση των στηθαίων,
- η κλίση πρανών όταν είναι μεγαλύτερη από  $\nu:\beta=1:3$ ,
- τα παρόδια ακλόνητα εμπόδια σε απόσταση μικρότερη των 9m από την οριογραμμή κυκλοφορίας της οδού,

- το μήκος ευθυγραμμίας της χάραξης.

Επιπροσθέτως, χαρακτηριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την υδρολίσθηση είναι:

- το βάθος πέλματος ελαστικών,
- η πίεση των ελαστικών
- και η ταχύτητα των οχημάτων

Μεταβάλλοντας τους παράγοντες, αυξάνεται το μέγιστο αποδεκτό ύψος όπου δεν αναμένεται υδρολίσθηση (Πίνακας 3.2).

*Πίνακας 3.2: Σχέση χαρακτηριστικών παραμέτρων - βάθους νερού*

	Παράμετρος		Βάθος νερού υδρολίσθησης
	Ιδιότητα	Μεταβολή μεγέθους	Μεταβολή μεγέθους
1	Αδρότητα οδοστρώματος	+1%	+1,6%
2	Βάθος πέλματος ελαστικού	+1%	+0,8%
3	Πίεση ελαστικών	+1%	+2,4%
4	Ταχύτητα <90km/h	-1%	+25,0%
5	Ταχύτητα >90km/h	+1%	-25,0%

Σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2 η αύξηση του βάθους του πέλματος των ελαστικών αυξάνει το μέγιστο αποδεκτό βάθος νερού κατά 0,8%, ενώ αν αυξηθεί κατά 1% η πίεση των ελαστικών το αποδεκτό μέγιστο βάθος, όπου δεν αναμένεται υδρολίσθηση, αυξάνεται κατά 2,4%.

Κατά τον έλεγχο της υδρολίσθησης, η ταχύτητα  $V=90\text{km/h}$  είναι εκείνη που λαμβάνεται πρακτικά υπόψη. Η μείωση της ταχύτητας κατά 1%, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του αποδεκτού πάχους νερού κατά 25%. Για μικρές ταχύτητες, η μεγάλη ένταση της βροχόπτωσης δεν επαρκεί για να δημιουργηθούν αίτια υδρολίσθησης. Για ταχύτητες μεγαλύτερες από 90km/h, η κατά 1% αύξηση της ταχύτητας μειώνει το μέγιστο βάθος, όπου δεν αναμένεται υδρολίσθηση, κατά 25%. Το τελευταίο σημαίνει πως η υδρολίσθηση μπορεί να συμβεί σε εξαιρετικά λεπτές μεμβράνες νερού σε συνδυασμό με πολύ ασθενείς βροχοπτώσεις της τάξης των 25mm/h και λιγότερο, για ταχύτητες μεγαλύτερες από 90km/h (ΟΜΟΕ- ΑΣΥΕΟ, ΤΕΥΧΟΣ 8, 2002).



### Αποδεκτό Πάχος Υδατικής Στρώσης

Το μέγιστο αποδεκτό πάχος μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας την μικρότερη τιμή από τις δύο εμπειρικές εξισώσεις, βασισμένες σε πειραματικές μελέτες που διεξάχθηκαν στο *Texas Transportation Institute (FHWA, 1979)*:

$$WD_s = (10.409 / (As - 3.507))^{16.67} \quad (3.2)$$

$$WD_s = (28,952 / (\frac{As}{TXD^{0.14}} + 7.817))^{16.67} \quad (3.3)$$

Όπου

*As*: υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.4

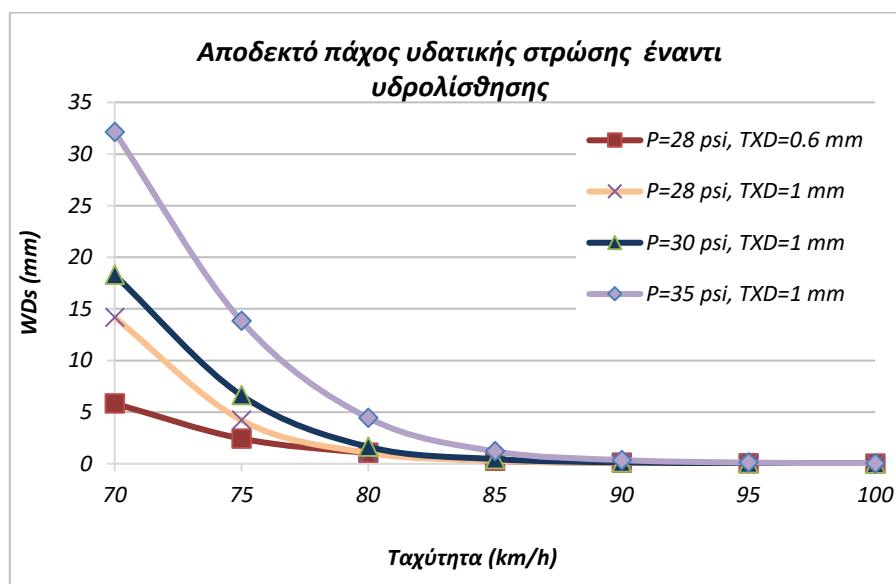
$$As = \frac{V}{10^{0.04} P^{0.3} (TD + 1)^{0.06}} \quad (3.4)$$

*V*: ταχύτητα οχήματος (*mph*)

*P*: πίεση ελαστικών (*psi*)

*TD*: βάθος πέλματος ελαστικού (*in*)

*TXD*: βάθος υφής οδοστρώματος (*in*)



Γράφημα 3.6: Αποδεκτό πάχος υδατικής στρώσης έναντι υδρολίσθησης.

Στο Γράφημα 3.6 φαίνονται οι διακυμάνσεις του αποδεκτού ύψους ως συνάρτηση της ταχύτητας του οχήματος. Παρατηρείται ότι το απαιτούμενο βάθος νερού έναντι υδρολίσθησης μειώνεται, μειώνοντας την πίεση των ελαστικών.

Επίσης, παρατηρείται πως για μικρές ταχύτητες ( $V < 80 \text{ km/h}$ ) το αποδεκτό ύψος είναι της τάξης των 5 έως 30mm, το βάθος υψής του οδοστρώματος και το βάθος πέλματος των ελαστικών αποστραγγίζουν το νερό. Το ελαστικό βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα και δεν υπάρχει κίνδυνος υδρολίσθησης.

Με την αύξηση της ταχύτητας (η ταχύτητα κυμαίνεται από 80-90km/h) το απαιτούμενο πάχος είναι της τάξεως των 2-5mm. Η επιφάνεια του πέλματος των ελαστικών που βρίσκεται σε επαφή με τον δρόμο είναι μειωμένη, αλλά σε συνθήκες μέσης κατάστασης επιφάνειας κυκλοφορίας και ελαστικών οχήματος, φαινόμενα υδρολίσθησης είναι σπάνιο να εμφανιστούν.

Για υψηλές ταχύτητες του οχήματος ( $V > 90 \text{ km/h}$ ) το ύψος νερού ( $WD_s$ ) δεν επηρεάζεται αισθητά από το βάθος της υψής ( $TXD$ ) και εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του οχήματος ( $V$ ). Το κρίσιμο βάθος για την υδρολίσθηση είναι πολύ μικρό. Οι κινητήριοι τροχοί κινούνται πάνω σε ένα στρώμα νερού και δεν υφίσταται καμία τριβή μεταξύ τους. Επομένως η πρόσφυση με το οδόστρωμα χάνεται και ο έλεγχος του οχήματος καθίσταται αδύνατος.

### **3.3 Σύνοψη Αποτελεσμάτων**

Το πάχος υδατικής στρώσης ( $BN$ ) σύμφωνα με την *Εξίσωση 3.1* εξαρτάται από: το μήκος της διαδρομής ροής ( $L_f$ ), το βάθος υψής της οδοστρώματος ( $BY$ ), τη συνισταμένη κλίση ( $S_r$ ) και την ένταση βροχόπτωσης ( $i$ ).

Προκύπτει, πως για τιμές, του βάθους υψής, από 0,95mm και μεγαλύτερες, το επιφανειακό στρώμα νερού κυμαίνεται σε μικρό ύψος έως μηδενικό. Αυτό σημαίνει ότι το ανάγλυφο της επιφάνειας επαρκεί για να αποστραγγίζει το νερό και η υδατική στρώση βρίσκεται κάτω από τον ορίζοντα του ανάγλυφου. Όταν το βάθος υψής παίρνει τις κατώτερες αποδεκτές τιμές το ύψος νερού αυξάνεται.

Παρατηρείται επίσης, πως το επιφανειακό νερό που υπολογίζεται είναι μεγαλύτερο όταν το μήκος ροής αυξάνεται. Για μεγάλες διαδρομές νερού,  $L_f > 20m$ , υπάρχουν περιπτώσεις που το πάχος ξεπερνά τα 2mm ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η ένταση βροχόπτωσης είναι της τάξης των 25mm/h.

Όμοια, η αύξηση της έντασης της βροχόπτωσης, έχει σαν συνέπεια την αύξηση του πάχους της υδατικής στρώσης. Για μικρές εντάσεις βροχόπτωσης το ύψος είναι αμελητέο έως και μηδενικό. Για εντάσεις μεγαλύτερες των 100mm/h, το επιφανειακό νερό που εμφανίζεται θεωρείται κρίσιμο και οι

οδηγοί θα πρέπει ή να απομακρύνονται από τις λωρίδες ή να περιορίζονται σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος υδρολίσθησης.

Εκτός από το πάχος νερού που εμφανίζεται στην επιφάνεια κυκλοφορίας παράγοντες που επηρεάζουν την υδρολίσθηση είναι: το βάθος πέλματος ελαστικών, η πίεση των ελαστικών και η ταχύτητα των οχημάτων.

Για υψηλές ταχύτητες του οχήματος ( $V > 90 \text{ km/h}$ ) το ύψος νερού ( $WD_s$ ) δεν επηρεάζεται αισθητά από το βάθος της υφής ( $TXD$ ), εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του οχήματος ( $V$ ). Το απαιτούμενο βάθος νερού έναντι υδρολίσθησης μειώνεται κατά 25% και σε μικρότερες τιμές από  $1 \text{ mm}$ . Παρατηρείται επίσης, ότι μειώνοντας την πίεση των ελαστικών το απαιτούμενο βάθος νερού έναντι υδρολίσθησης μειώνεται.



## ***4. Διερεύνηση Επέκτασης του Τύπου Υπολογισμού***

---

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε η διερεύνηση της *Εξίσωσης 3.1* και η ανάλυση στις επιμέρους μεταβλητές. Σκοπός του 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου, είναι η δυνατότητα επέκτασης εφαρμογής του μαθηματικού τύπου *BN* σε συγκεκριμένες περιπτώσεις διαδρομής κίνησης του νερού. Στην *Εξίσωση 3.1* η συνισταμένη κλίση της γραμμής ροής είναι σταθερή σε όλο το μήκος. Στους δρόμους, και συγκεκριμένα στην κρίσιμη περιοχή, οι γραμμές ροής έχουν μεταβαλλόμενη κλίση. Με σκοπό να υπολογιστεί το πάχος της υδατικής στρώσης στις συγκεκριμένες ροές ο τύπος προσαρμόστηκε ώστε να εφαρμόζεται τμηματικά. Κάθε τμήμα θεωρήθηκε ότι έχει σταθερή κατά μήκος κλίση και η επίδραση των προηγούμενων (υψηλότερων) τμημάτων ποσοτικοποιήθηκε με την εισαγωγή του ισοδύναμου μήκους.

Δημιουργήθηκαν διαδρομές ροής με διαφορετικά χαρακτηριστικά η κάθε μια, για να διαπιστωθεί η ορθότητα του τύπου στις περιπτώσεις με μεταβαλλόμενη κατά μήκος κλίση. Αυτές οι διαδρομές κατηγοριοποιήθηκαν με βάση την γεωμετρική τους μορφή σε: ευθεία, κοίλη και κυρτή. Ο τρόπος υπολογισμού του ύψους της υδατικής στρώσης αναλύεται σε κάθε υποενότητα καθώς και ο τρόπος υπολογισμού της ταχύτητας.

### ***4.1 Σταθερή Κατά Μήκος Κλίση***

Η κίνηση του ομβρίων γίνεται πάνω σε επιφάνεια κυκλοφορίας με μακροϋφή  $BY=0,6mm$ , επιλέχθηκε η κατώτερη τιμή του βάθους υφής και η ένταση βροχόπτωσης ορίστηκε σε ύψος  $60mm/h$ , για όλες τις διαδρομές. Διαφοροποιείται μόνο το μήκος της εκάστοτε γραμμής ροής.

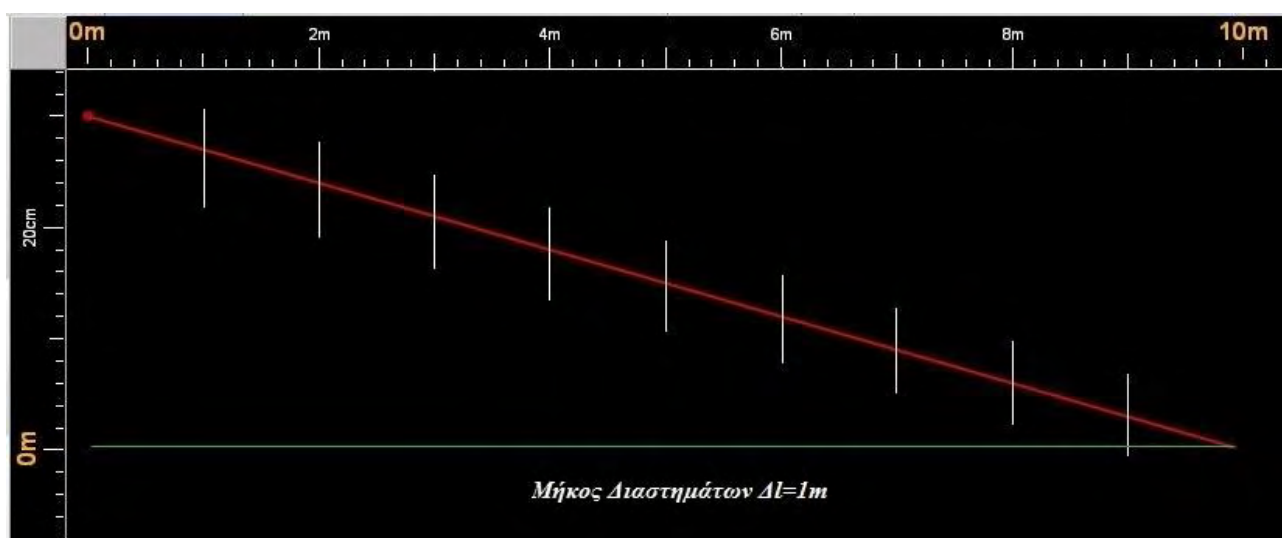
Οι γραμμές ροής σε αυτήν την κατηγορία είναι:

- Γραμμή ροής με σταθερή κατά μήκος κλίση 2% και μήκος ροής 10m
- Γραμμή ροής με σταθερή κατά μήκος κλίση 2% και μήκος ροής 100m
- Γραμμή ροής με σταθερή κατά μήκος κλίση 3% και μήκος ροής 10m
- Γραμμή ροής με σταθερή κατά μήκος κλίση 3% και μήκος ροής 100m

### Μέθοδος Υπολογισμού

Πρώτο βήμα, είναι να χωριστεί το μήκος ροής ( $L_f$ ) σε διαστήματα ( $\Delta l$ ) σταθερής κλίσης, ώστε να γίνει ο υπολογισμός του πάχους νερού ανά διαστήματα, και να υπολογιστεί στο τέλος της γραμμής το συνολικό πάχος επιφανειακού νερού που εμφανίζεται στο οδόστρωμα.

Το μήκος των διαστημάτων-βημάτων είναι  $5m$ ,  $2m$ ,  $1m$ ,  $0,5m$ ,  $0,2m$  και  $0,1m$  για γραμμές ροής με συνολικό μήκος  $10m$ . Αντίστοιχα, τα μήκη των διαστημάτων για διαδρομή ροής  $100m$  ορίστηκαν σε  $20m$ ,  $10m$ ,  $5m$ ,  $2m$ ,  $1m$ ,  $0,5m$ ,  $0,2m$ ,  $0,1m$ . Η επιλογή πολλών διαστημάτων-βημάτων έγινε με σκοπό την διερεύνηση της σύγκλισης του τρόπου υπολογισμού.



Σχήμα 4.1: Διάστημα  $\Delta l=1m$  για γραμμή ροής  $10m$  με σταθερή κλίση.

Με την χρήση της Εξίσωσης 4.1 υπολογίζεται η μέση κατά μήκος κλίση ( $S\%$ ) του κάθε διαστήματος.

$$S = \frac{\Delta H}{\Delta l} \quad (4.1)$$

Όπου

$S$ : μέση κατά μήκος κλίση διαστημάτων μελέτης ( $m/m$ )

$\Delta H$ : υψομετρική διάφορα μεταξύ των διαδοχικών σημείων

$$\Delta H = y_{n+1} - y_n$$

$\Delta l$ : μήκος (οριζόντια προβολή) διαστημάτων-βημάτων ( $m$ )

Προσαρμόζοντας, την *Εξίσωση 3.1* για τον υπολογισμό του πάχους νερού υδρολίσθησης, ανά διαστήματα, ορίζεται το αρχικό μήκος ροής ίσο με  $\Delta l$ .

$$\text{Αρχικό μήκος} = \Delta l$$

Υπολογίζεται το ύψος του επιφανειακού νερού του πρώτου διαστήματος,  $BN_1$ , εφαρμόζοντας την *Εξίσωση 4.3*. Έχοντας βρει το  $BN_1$  υπολογίζεται το ισοδύναμο μήκος ροής για το συγκεκριμένο βάθος νερού (*Εξ. 4.4*). Ως ισοδύναμο μήκος ροής ορίζεται η οριζόντια προβολή που αντιστοιχεί στο πάχος νερού των προηγούμενων διαστημάτων με την κατά μήκος κλίση του τρέχοντος διαστήματος. Στο παραπάνω ισοδύναμο μήκος προστίθεται το μήκος διαστήματος-βήματος  $\Delta l$  του τρέχοντος διαστήματος και υπολογίζεται το βάθος νερού στο τέλος αυτού (*Εξ. 4.5*). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλο το μήκος της διαδρομής βρίσκοντας το τελικό βάθος νερού που παραμένει στο οδόστρωμα στο τέλος της κάθε γραμμής ροής.

$$BN_1 = 0,01485(BY^{0,11}\Delta l^{0,43}i^{0,59}S_r^{-0,42}) \quad (4.3)$$

$$L_{fισοδ_i} = \left( \frac{BN_{i-1}}{0,01485(BY^{0,11}i^{0,59}S_r^{-0,42})} \right)^{\frac{1}{0,43}} \quad (4.4)$$

$$BN_i = 0,01485(BY^{0,11}(L_{fισοδ} + \Delta l)^{0,43}i^{0,59}S_r^{-0,42}) \quad (4.5)$$

Το βάθος υφής αφαιρείται από το τελικό βάθος νερού που υπολογίζεται στο τέλος της διαδρομής καθώς απαλείφεται από την διαδοχική πρόσθεση του βάθους νερού των προηγούμενων τμημάτων.

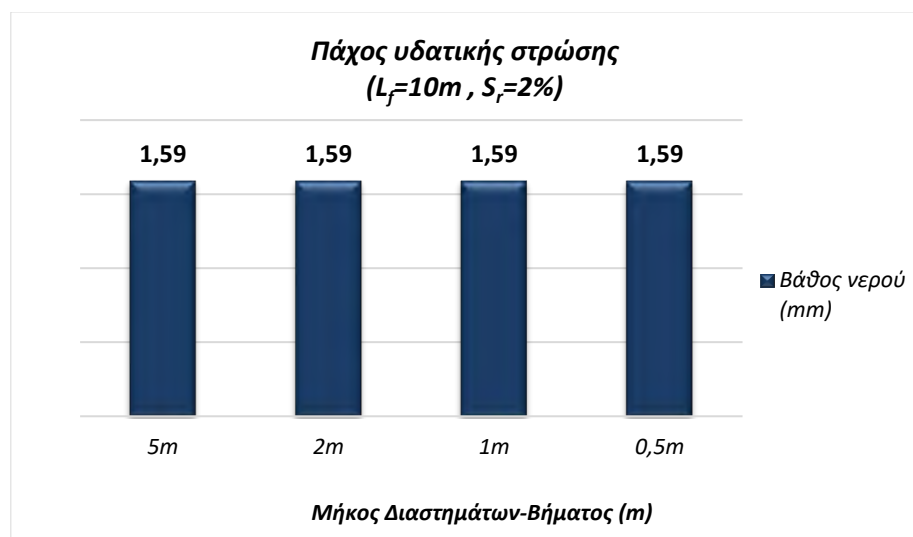
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε με βάση τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μαθηματικού τύπου (*Εξ. 3.1*).

#### **4.1.1 Γραμμές Ροής Σταθερής κατά Μήκος Κλίσης $S_r=2\%$**

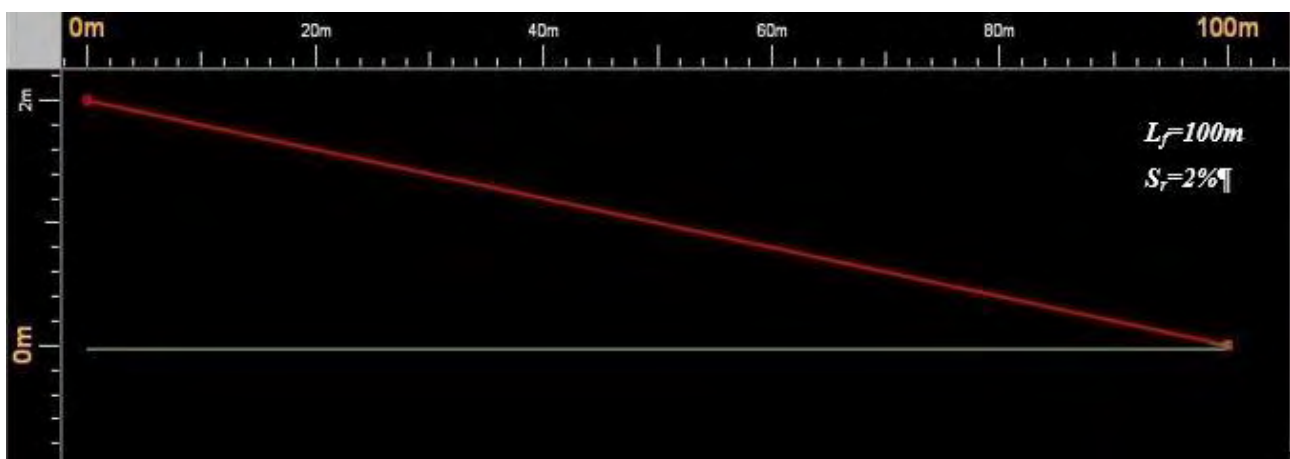
Με την εφαρμογή της μεθόδου που προαναφέρθηκε, τα αποτελέσματα για τις διαδρομές ροής με σταθερή κατά μήκος κλίση παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 4.2: Μηκοτομή γραμμή ροής:  $S_r = 2\%$ ,  $L_f = 10m$ .

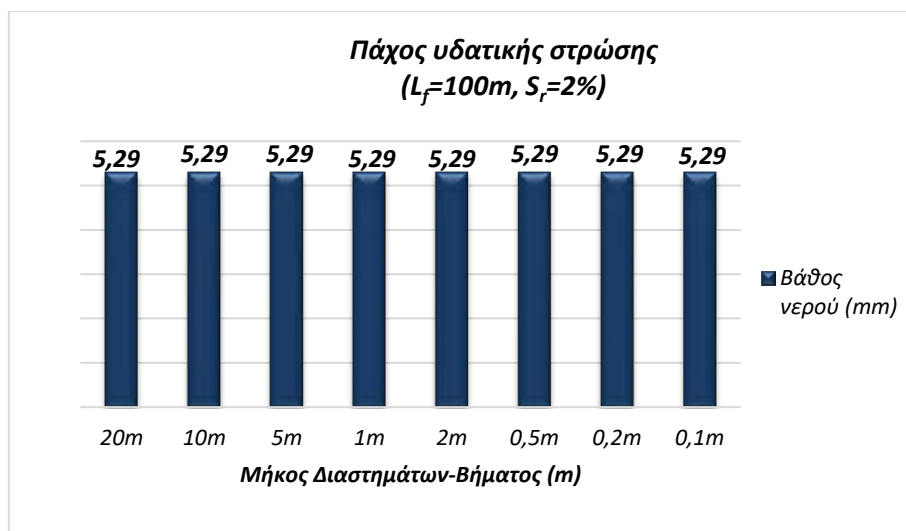


Γράφημα 4.1: Συνολικό βάθος νερού γραμμής ροής με μήκος  $L_f = 10m$  και σταθερή κλίση 2%.



Σχήμα 4.3: Μηκοτομή γραμμή ροής:  $S_r = 2\%$ ,  $L_f = 100m$ .





*Γράφημα 4.2: Συνολικό βάθος νερού γραμμής ροής με μήκος ροής 100m και σταθερή κλίση 2%.*

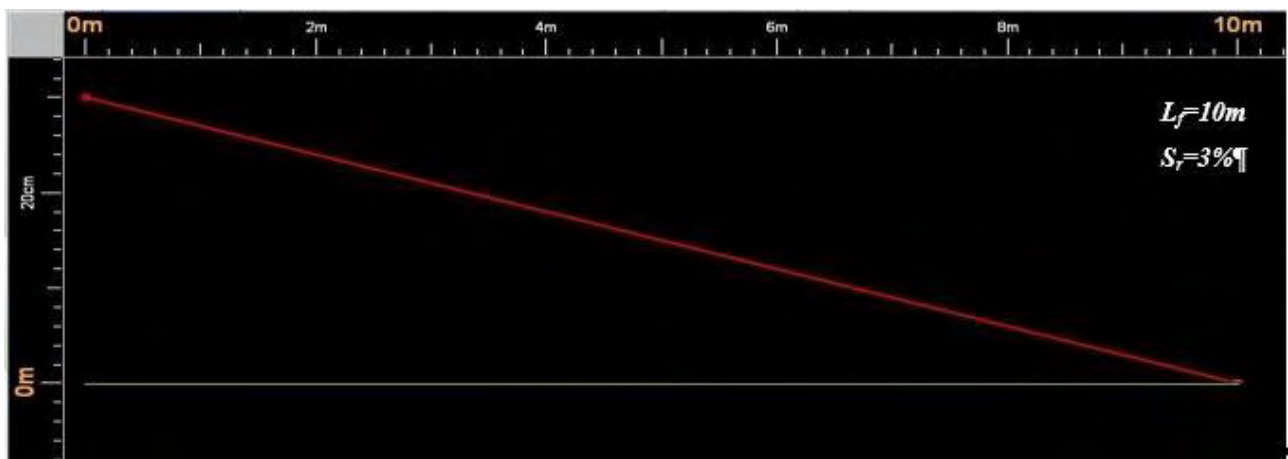
Παρατηρείται πως το βάθος νερού παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από το μήκος των διαστημάτων που έχουν επιλεγεί. Με βάση τα αποτελέσματα, επίσης, ταυτίζεται και με το βάθος νερού που υπολογίζεται από την εφαρμογή του βασικού τύπου υπολογισμού.

Στην περίπτωση όπου το μήκος ροής ισούται με  $L_f=10m$ , το συνολικό ύψος νερού ισούται με  $BN=1,588mm$  (Γράφημα 4.1). Με την εφαρμογή της Εξίσωσης 3.1 το πάχος νερού που υπολογίστηκε είναι  $BN=1,588mm$ .

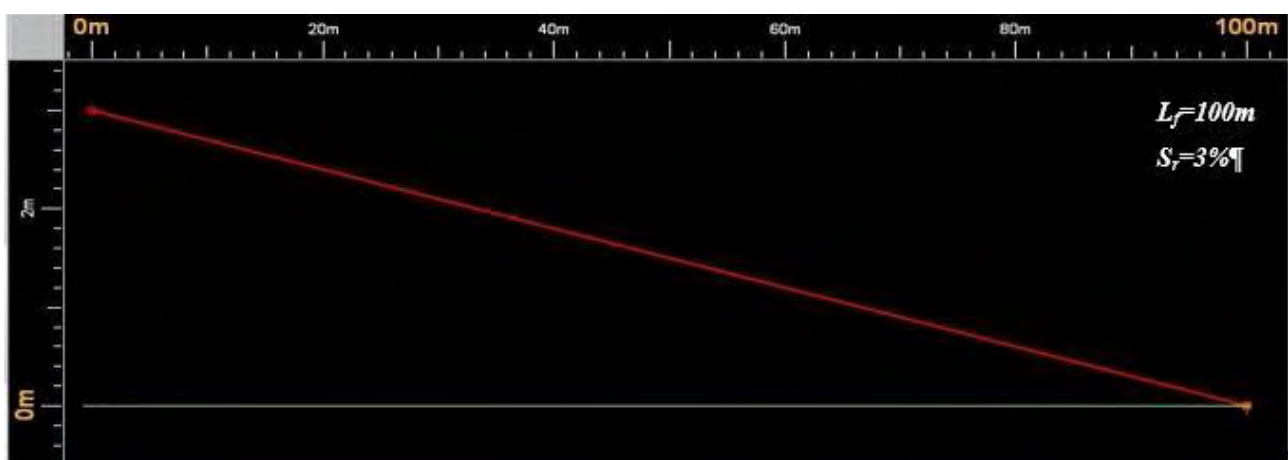
Για μεγαλύτερο μήκος ροής,  $L_f=100m$ , το ύψος αυξάνεται σε  $BN=5,288mm$ . Αντίστοιχα, με την εφαρμογή της Εξίσωσης 3.1, το πάχος νερού υπολογίστηκε ίσο με  $5,288mm$ . Το ύψος του επιφανειακού νερού σε αυτήν την περίπτωση αυξάνεται αρκετά και θεωρείται κρίσιμο, όμως στην πραγματικότητα το μήκος ροής ( $L_f=100m$ ) είναι αρκετά μεγάλο και δύσκολο να υπάρξει σε επιφάνεια κυκλοφορίας.

#### **4.1.2 Γραμμές Ροής Σταθερής κατά Μήκος Κλίσης $S_r=3\%$**

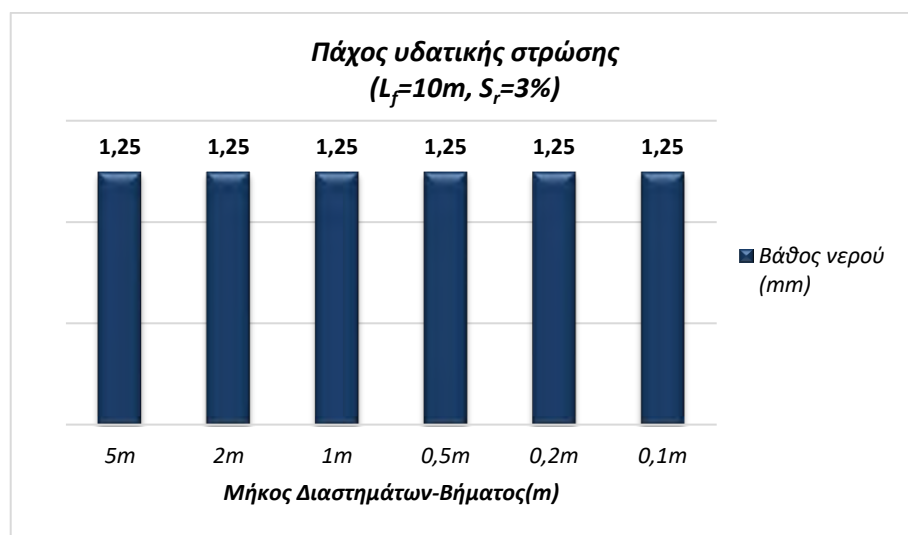
Για γραμμές ροής με κατά μήκος κλίση 3%, μήκος ροής  $L_f=10m$  και  $L_f=100m$ , αντίστοιχα, δεν υπάρχει διαφορά στο ύψος νερού που υπολογίζεται για κάθε διάστημα-βήμα.



Σχήμα 4.4: Μηκοτομή γραμμή ροής:  $S_r=3\%$ ,  $L_f=10m$ .



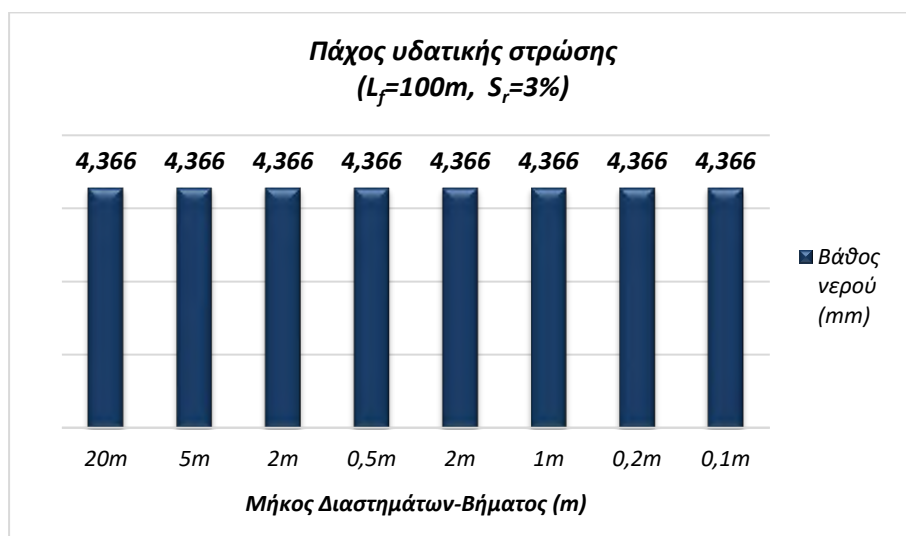
Σχήμα 4.5: Μηκοτομή γραμμή ροής:  $S_r=3\%$ ,  $L_f=100m$ .



Γράφημα 4.3: Συνολικό βάθος νερού γραμμής ροής με μήκος ροής 10m και σταθερή κλίση 3%.

Το πάχος υδατικής στρώσης επί του οδοστρώματος, για διαδρομή νερού  $10m$  ισούται με  $BN=1,25mm$ , ενώ στην περίπτωση όπου  $L_f=100m$ , η τιμή του πάχους νερού είναι ίση με  $BN=4,366mm$ . Και στις δυο περιπτώσεις γραμμών ροής τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της Εξίσωσης 3.1 ταυτίζονται.

Στην περίπτωση όπου η κατά μήκος κλίση είναι ίση και σταθερή με 3%, το πάχος νερού που υπολογίζεται είναι συγκριτικά μικρότερο με το πάχος νερού για σταθερή κατά μήκος κλίση 2%. Όπως αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, η μείωση της συνισταμένης κλίση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ύψους υδατικής στρώσης.



Γράφημα 4.4: Συνολικό βάθος νερού γραμμής ροής με μήκος  $L_f=100m$  και σταθερή κλίση 3%.

## 4.2 Μεταβαλλόμενη Κατά Μήκος Κλίση

Δημιουργήθηκε ένας αριθμός γραμμών ροής με μεταβαλλόμενη κλίση κατά μήκος της διαδρομής, υπό την μορφή κοίλης ή κυρτής καμπύλης. Το αρχικό υψόμετρο, καθώς και το συνολικό μήκος ροής διαφοροποιούνται για κάθε γραμμή. Ενώ, η ένταση βροχόπτωσης ορίστηκε σε ύψος  $60mm/h$  και το βάθος υψής ίσο με  $0,6mm$ , σε όλες τις περιπτώσεις.

Οι γραμμές ροής:

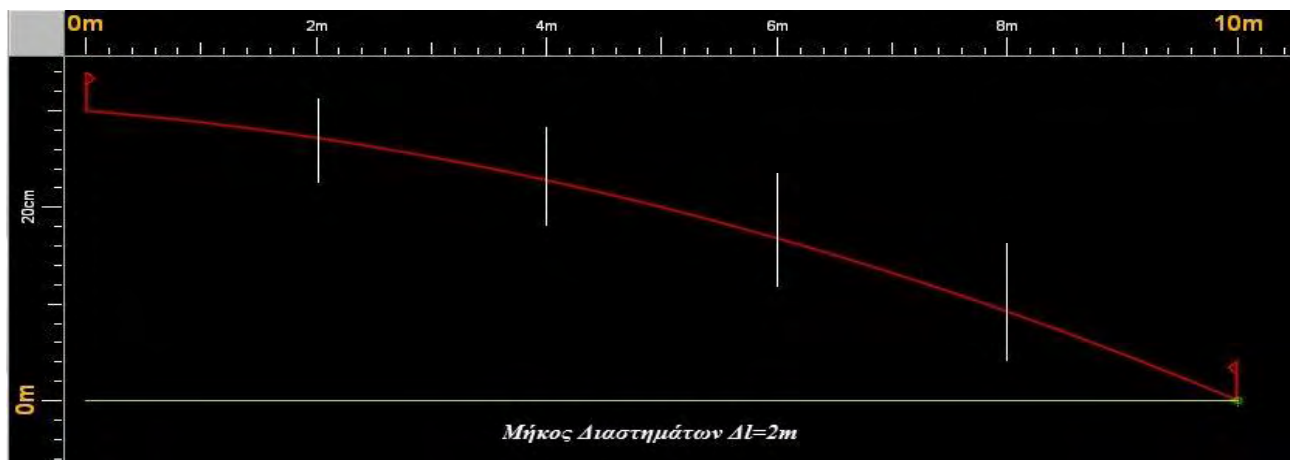
- Κοίλη γραμμή ροής με μήκος ροής  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $R=500m$
- Κοίλη γραμμή ροής με μήκος ροής  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $R=1000m$
- Κοίλη γραμμή ροής με μήκος ροής  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,3m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $R=500m$
- Κοίλη γραμμή ροής με μήκος ροής  $L_f=100m$ ,  $H_o=2m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $R=5000m$

- Κοίλη γραμμή ροής με μήκος ροής  $L_f=100m$ ,  $H_o=3m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $R=2500m$
- Κυρτή γραμμή ροής με μήκος ροής  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $R=500m$
- Κυρτή γραμμή ροής με μήκος ροής  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,3m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $R=250m$
- Κυρτή γραμμή ροής με μήκος ροής  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,3m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $R=500m$
- Κυρτή γραμμή ροής με μήκος ροής  $L_f=100m$ ,  $H_o=2m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $R=5000m$
- Κυρτή γραμμή ροής με μήκος ροής  $L_f=100m$ ,  $H_o=3m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $R=250m$

### Μέθοδος Υπολογισμού

Ο τρόπος υπολογισμού του ύψους επιφανειακού νερού διαφοροποιείται μόνο στα πρώτα βήματα. Γίνεται και εδώ ο διαχωρισμός του μήκους ροής ( $L_f$ ) σε διαστήματα-βήματα ( $\Delta l$ ) σταθερής κλίσης.

Το μήκος των διαστημάτων είναι  $5m$ ,  $2m$ ,  $1m$ ,  $0,5m$ ,  $0,2m$  και  $0,1m$ , για γραμμές ροής με μήκος  $10m$ . Αντίστοιχα, τα μήκη των διαστημάτων για μήκος  $100m$  ορίστηκαν σε  $20m$ ,  $10m$ ,  $5m$ ,  $2m$ ,  $1m$ ,  $0,5m$ ,  $0,2m$ ,  $0,1m$ .



Σχήμα 4.6: Διάστημα  $\Delta l=2m$  για γραμμή ροής  $10m$  με μεταβαλλόμενη κλίση.

Η εύρεση του υψόμετρου για κάθε σημείο, αρχής και τέλους του διαστήματος, γίνεται με την εφαρμογή της Εξίσωσης 4.6:

$$h = h_o + S_1 x \pm \frac{x^2}{2R} \quad (4.6)$$

Όπου:

$h$ : το υψόμετρο κάθε σημείου ( $m$ )

$h_o$ : το αρχικό υψόμετρο κάθε γραμμής (m)

$S_I$ : η συνισταμένη κλίση (m/m)

$x$ : η απόσταση κάθε σημείου από την αρχή της γραμμής (m)

$R$ : η ακτίνα καμπυλότητας (m)

Με την χρήση των Εξισώσεων 4.1 και 4.3 έως 4.5 και ακολουθώντας την ίδια μέθοδο επίλυσης υπολογίζεται το τελικό πάχος νερού στην επιφάνεια κυκλοφορίας.

#### 4.2.1 Περίπτωση Κοίλης Καμπύλης

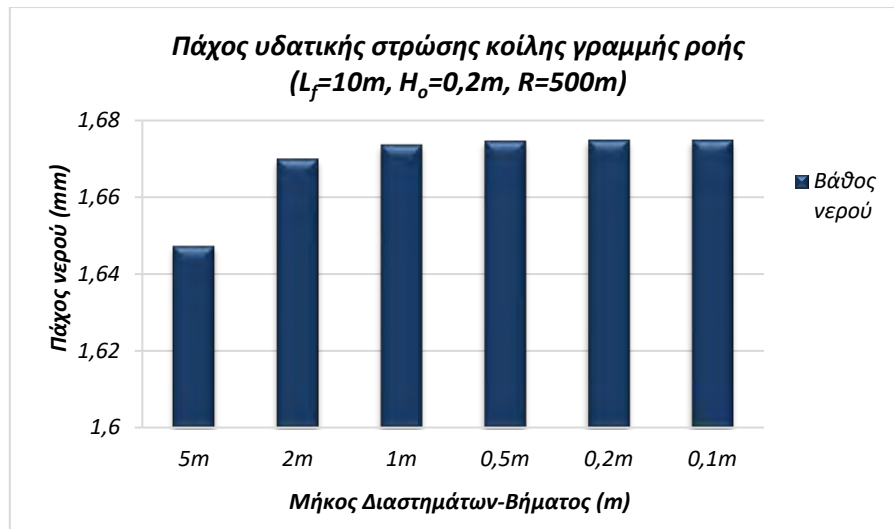
##### Κοίλη Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$

Η γραμμή ροής έχει συνολικό μήκος  $L_f=10m$ , αρχικό υψόμετρο  $H_o=0,2m$  και τελικό υψόμετρο  $H=0m$ , ενώ η ακτίνα καμπυλότητας είναι ίση με  $500m$ .



Σχήμα 4.7: Μηκοτομή κοίλης γραμμής ροής  
( $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=500m$ ).

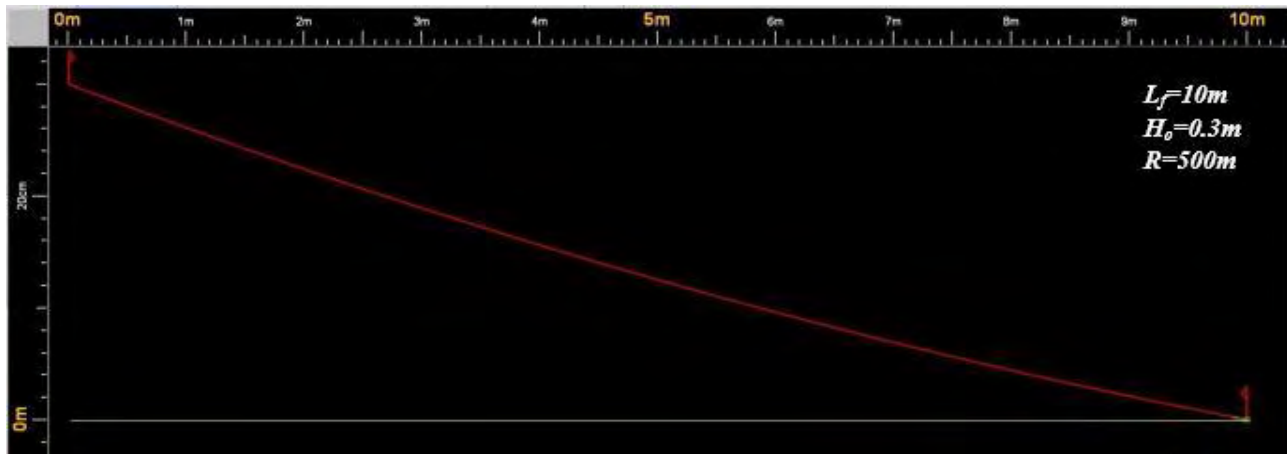
Στην πρώτη διερεύνηση, ακολουθώντας τον τρόπο επίλυσης που παρουσιάστηκε, για μήκος βήματος  $\Delta l=5m$ , το ύψος νερού που υπολογίστηκε είναι  $BN=1,647mm$ . Μειώνοντας το βήμα από  $5m$  σε  $2m$ , το ύψος νερού είναι ίσο με  $BN=1,669mm$ . Για  $\Delta l=1m$ , το τελικό πάχος υπολογίζεται:  $BN=1,673mm$ . Για τα διαστήματα ροής  $\Delta l=0,5m$ ,  $\Delta l=0,2m$  και  $\Delta l=0,1m$ , το αντίστοιχο ύψος ισούται με  $BN=1,674mm$ . Παρατηρήθηκε πως υπάρχουν μικρές διαφορές στα αποτελέσματα μεταξύ των διαστημάτων  $5m$  και  $2m$ , ενώ όταν τα τμήματα ροής είναι κάτω του  $1m$  τα αποτελέσματα ταυτίζονται (Γράφημα 4.5).



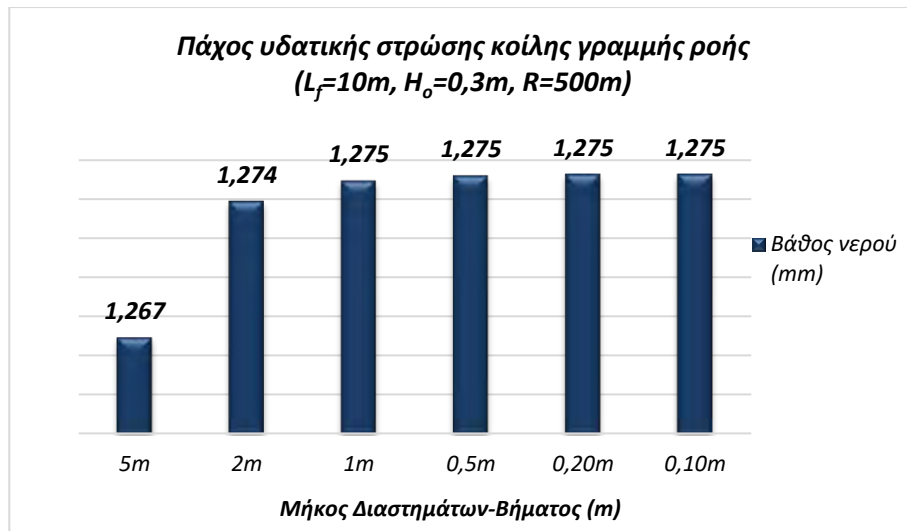
*Γράφημα 4.5: Πάχος νερού διαστημάτων  
Κοίλη γραμμή ροής:  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=500m$ .*

### **Κοίλη Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,3m$**

Σε αυτή την περίπτωση, η γραμμή ροής έχει συνολικό μήκος ροής  $L_f=10m$ , αρχικό υψόμετρο  $H_o=0,3m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $500m$ .



*Σχήμα 4.8: Μηκοτομή κοίλης γραμμής ροής  
( $L_f=10m$ ,  $H_o=0,3m$ ,  $R=500m$ ).*

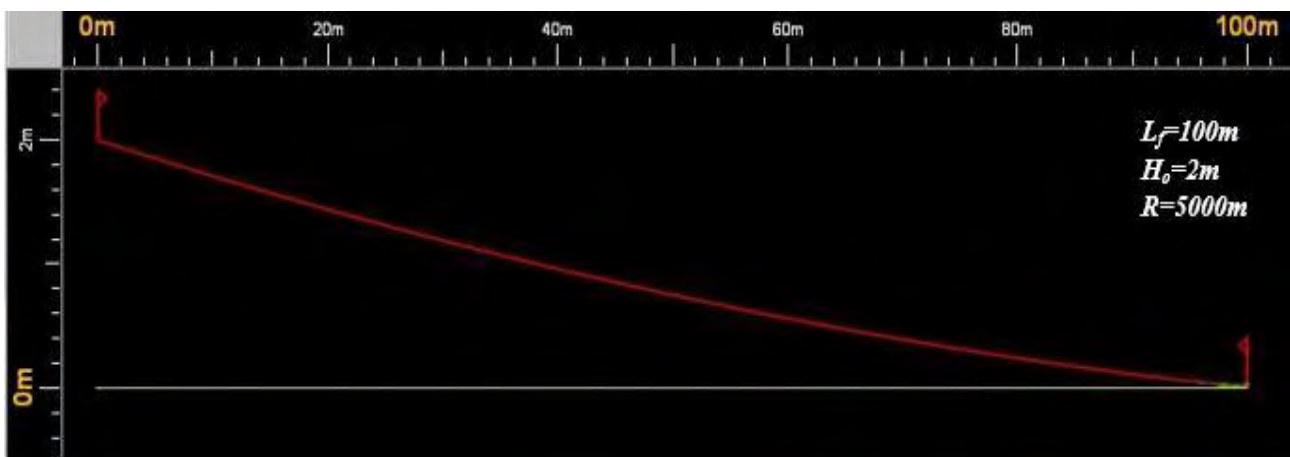


*Γράφημα 4.6: Πάχος νερού διαστημάτων  
Κοίλη γραμμή ροής:  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,3m$ ,  $R=500m$ .*

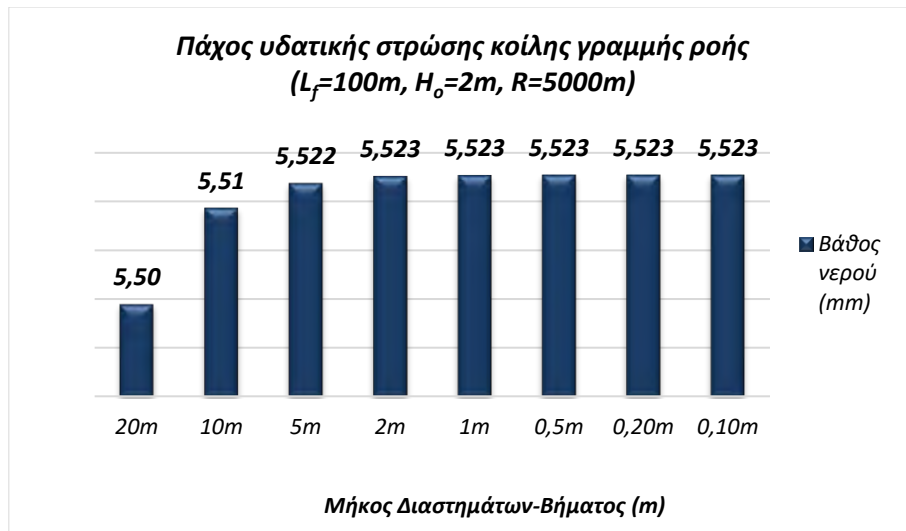
Όμοια με τη πρώτη περίπτωση, η διαφορά στο τελικό ύψος νερού εντοπίζεται όταν η πύκνωση διαστημάτων είναι  $5m$  ( $BN=1,266mm$ ). Καθώς μειώνεται το διάστημα τα αποτελέσματα συγκλίνουν με το επιφανειακό νερό να ισούται με  $BN=1,275mm$ .

#### **Κοίλη Γραμμή Ροής: $L_f=100m$ , $H_o=2m$**

Η γραμμή ροής έχει αρκετά μεγαλύτερο μήκος, συγκριτικά με τις γραμμές ροής που μελετήθηκαν στις προηγούμενες περιπτώσεις. Το μήκος είναι ίσο με  $100m$ ,  $H_o=2m$  και η ακτίνα καμπυλότητας είναι  $5000m$ .



*Σχήμα 4.9: Μηκοτομή κοίλης γραμμής ροής  
( $L_f=100m$ ,  $H_o=2m$ ,  $R=5000m$ ).*



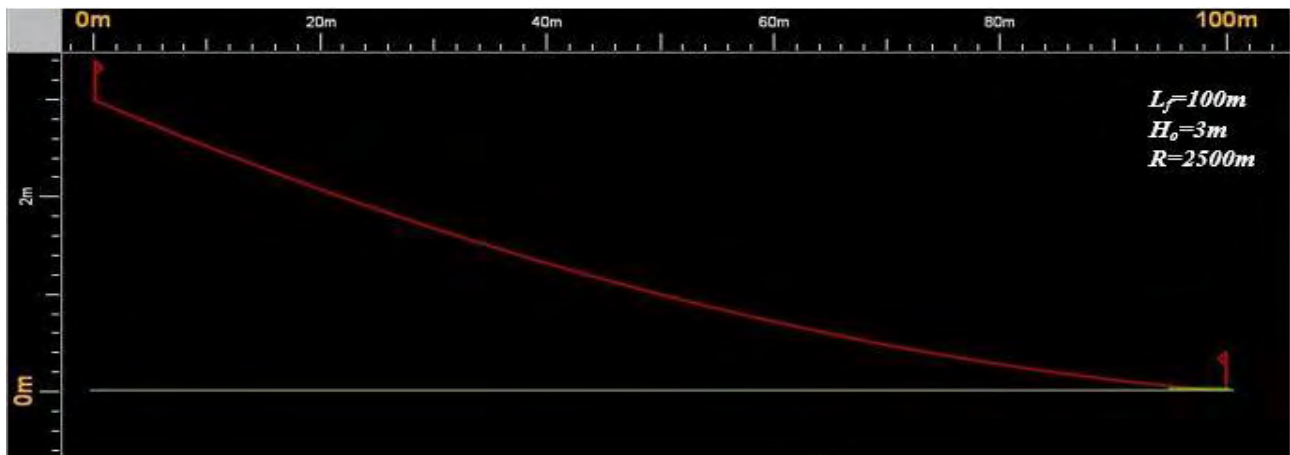
*Γράφημα 4.7: Πάχος νερού διαστημάτων  
Κοίλη γραμμή ροής:  $L_f=100m$ ,  $H_o=2m$ ,  $R=5000m$ .*

Παρατηρείται πως και σε αυτήν την περίπτωση οι αποκλίσεις είναι μικρές, και τα αποτελέσματα ταυτίζονται για βήμα μικρότερο των  $2m$  (Γράφημα 4.7). Συγκεκριμένα, για βήμα  $20m$  το επιφανειακό νερό υπολογίζεται  $BN=5,509mm$ , για διάστημα  $10m$  το  $BN$  ισούται με  $5,519mm$  και για διάστημα  $5m$  είναι  $BN=5,522mm$ , ενώ για διαστήματα  $\Delta l \leq 2m$  το  $BN$  που υπολογίζεται είναι ίσο με  $5,523mm$ .

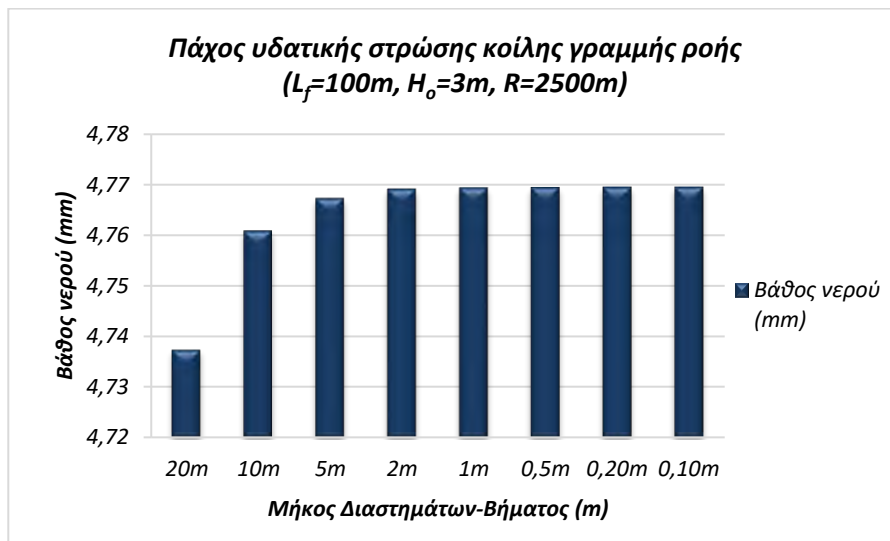
### **Κοίλη Γραμμή Ροής: $L_f=100m$ , $H_o=3m$**

Αντίστοιχα, για γραμμή ροής με συνολικό μήκος  $100m$ ,  $H_o=3m$  και  $R=2500m$ , το αρχικό ύψος νερού υπολογίζεται ίσο με  $4,737mm$ . Τα αποτελέσματα συγκλίνουν για διαστήματα ροής μικρότερων των  $5m$  με τελικό ύψος  $BN=4,769mm$ , όπως και στην περίπτωση της κοίλης με αρχικό υψόμετρο  $2m$ .





Σχήμα 4.10: Μηκοτομή κοίλης γραμμής ροής  
( $L_f=100m$ ,  $H_o=3m$ ,  $R=2500m$ ).

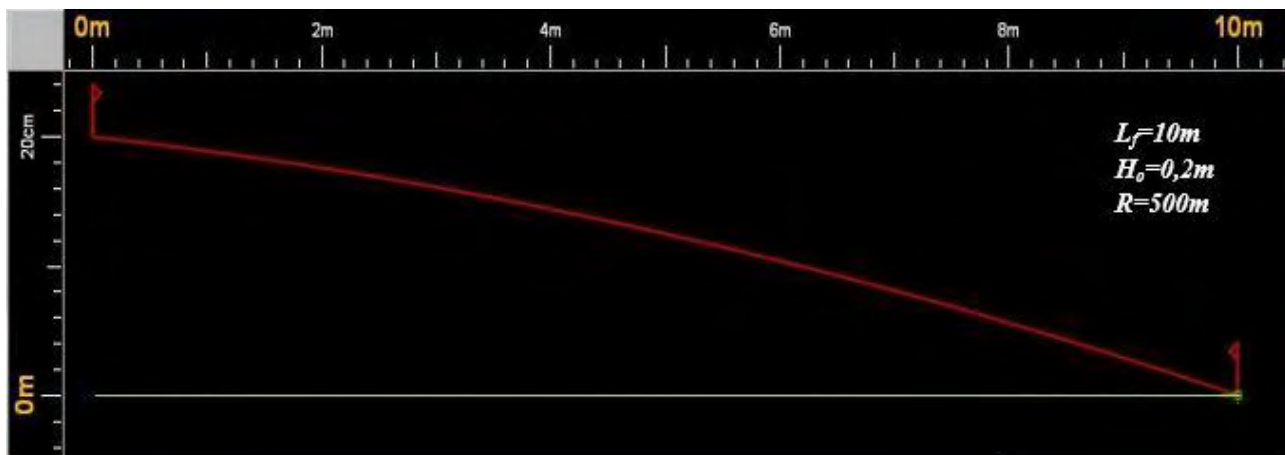


Γράφημα 4.8: Πάχος νερού διαστημάτων  
Κοίλη γραμμή ροής:  $L_f=100m$ ,  $H_o=3m$ ,  $R=2500m$ .

#### 4.2.2 Περίπτωση Κυρτής Καμπύλης

##### Κυρτή Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$

Το στρώμα της υδατικής στρώσης νερού που εμφανίζεται στο οδόστρωμα όταν το διάστημα είναι ίσο με  $\Delta l=5m$ , για κυρτή καμπύλη μήκους  $10m$ , ισούται με  $BN=1,647mm$ . Όπως στην αντίστοιχη περίπτωση της κοίλης γραμμής ροής, υπάρχει σύγκλιση αποτελεσμάτων όταν τα διαστήματα είναι μικρότερα του  $1m$ , το  $BN$  των διαστημάτων αυτών αντιστοιχεί σε  $1,674mm$ .



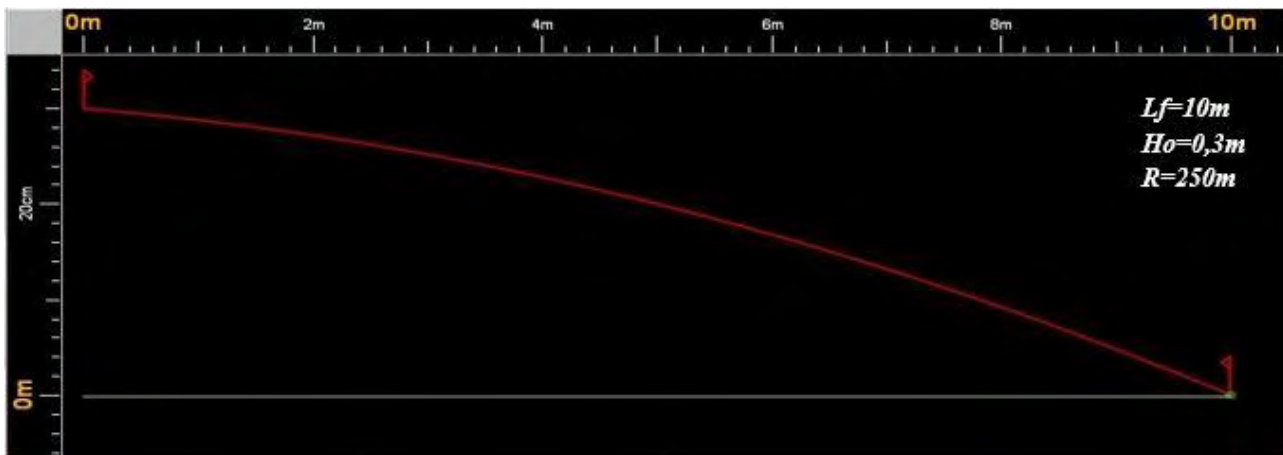
Σχήμα 4.11: Μηκοτομή κυρτής γραμμής ροής  
( $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=500m$ ).



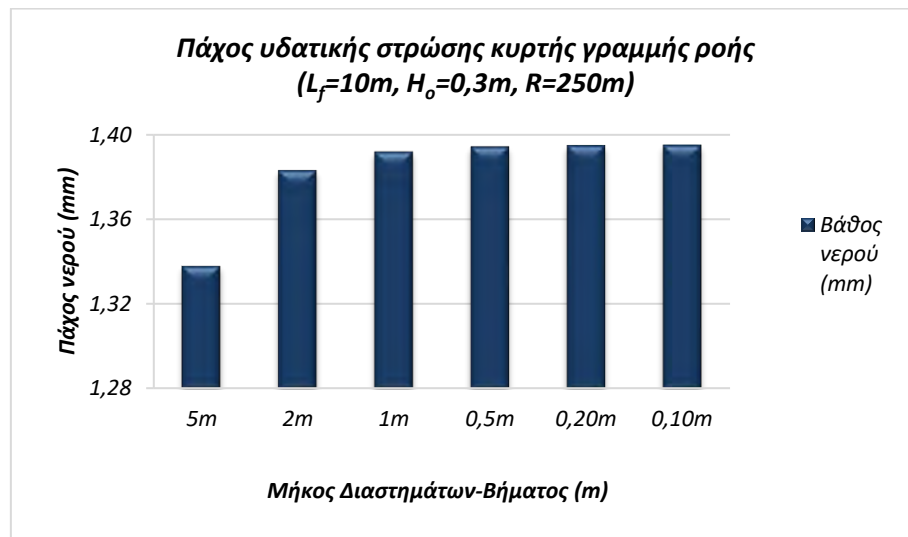
Γράφημα 4.9: Πάχος νερού διαστημάτων  
Κυρτή γραμμή ροής:  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=500m$ .

### Κυρτή Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,3m$

Επόμενη περίπτωση που μελετήθηκε είναι αυτή που κρατήθηκε σταθερό το μήκος της γραμμής ροής αλλάζοντας το αρχικό υψόμετρο σε  $H_o=0,3m$ . Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία εύρεσης αποτελέσματος και χρησιμοποιώντας τα ίδια μήκη διαστημάτων, η διαφορά εντοπίζεται στο τελικό βάθος νερού που εμφανίζεται στο οδόστρωμα. Για διάστημα-βήμα  $\Delta l=5m$ , το πάχος υπολογίζεται ίσο με  $BN=1,337mm$ , μικρότερο πάχος μεμβράνης νερού από την προηγούμενη διαδρομή ροής, αφού η κλίση σε αυτή την περίπτωση κατά μήκος της γραμμής είναι μεγαλύτερη. Η τιμή του τελικού βάθος νερού φτάνει στα  $1,394mm$ , όπου και πάλι τα αποτελέσματα συγκλίνουν για βήματα μικρότερα του  $1m$ .



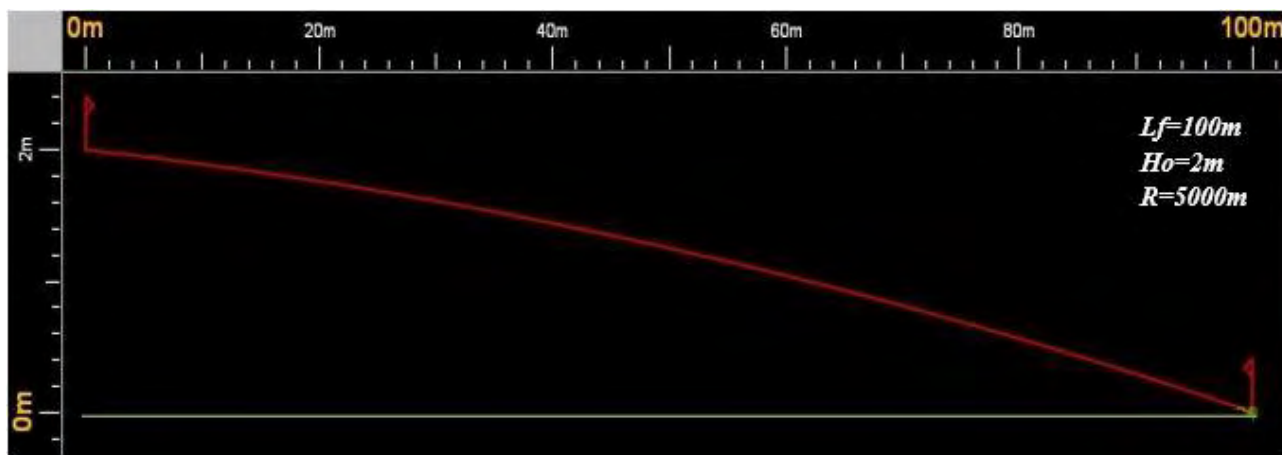
Σχήμα 4.12: Μηκοτομή κυρτής γραμμής ροής ( $L_f=10m$ ,  $H_o=0,3m$ ,  $R=250m$ ).



Γράφημα 4.10: Πάχος νερού διαστημάτων Κυρτή γραμμή ροής:  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,3m$ ,  $R=250m$ .

### **Κυρτή Γραμμή Ροής: $L_f=100m$ , $H_o=2m$**

Η γραμμή που σχεδιάστηκε σε αυτή την περίπτωση έχει μήκος  $L_f=100m$  και η αρχική τιμή του υψομέτρου είναι  $H_o=2m$ . Η ακτίνα καμπυλότητας είναι  $5000m$  και τα διαστήματα τροποποιούνται διότι έχουμε αρκετά μεγαλύτερο μήκος διαδρομής. Όμοια με την εξεταζόμενη περίπτωση της κοίλης γραμμής ροής με  $L_f=100m$ , υπάρχει σύγκλιση αποτελεσμάτων για  $\Delta l \leq 2m$ .



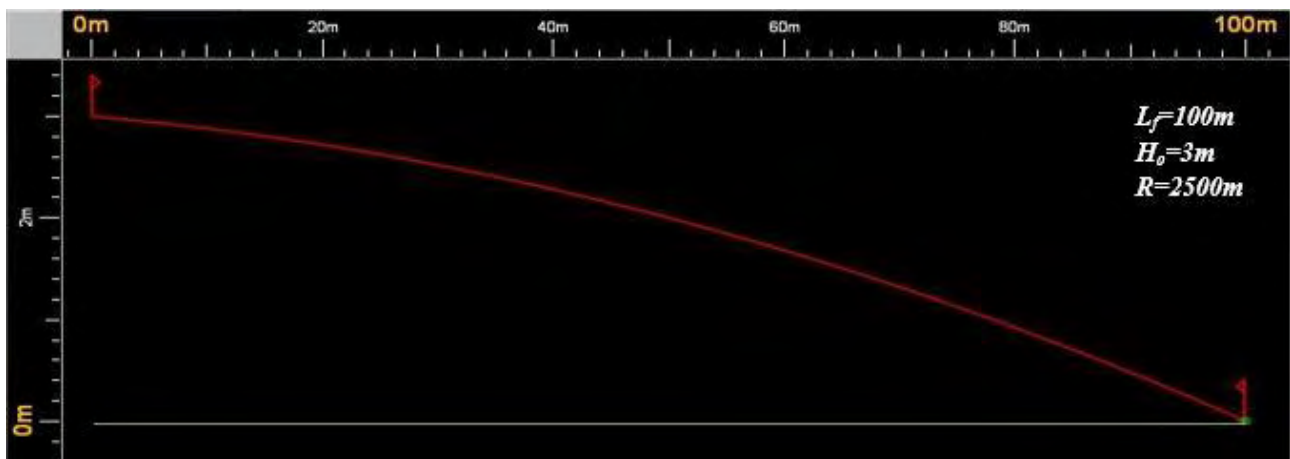
Σχήμα 4.13: Μηκοτομή κυρτής γραμμής ροής  
( $L_f=100m$ ,  $H_o=2m$ ,  $R=5000m$ ).



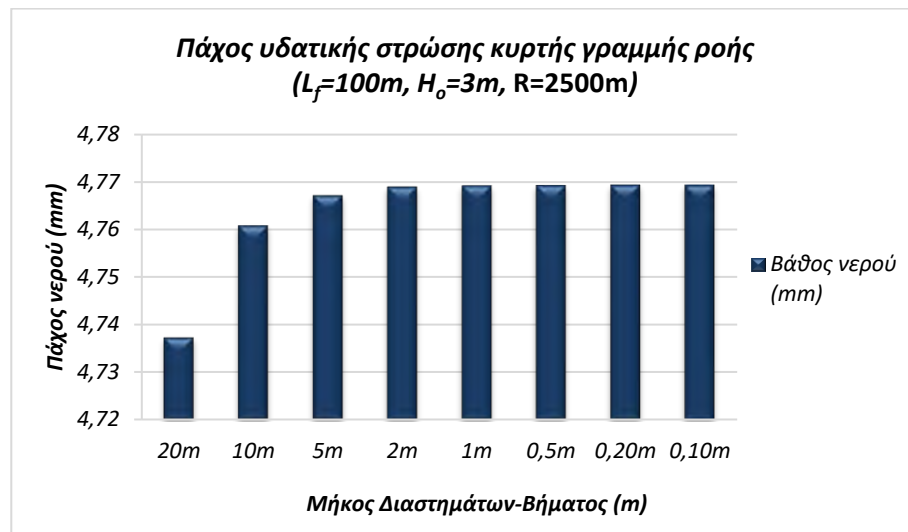
Γράφημα 4.11: Πάχος νερού διαστημάτων  
Κυρτή γραμμή ροής:  $L_f=100m$ ,  $H_o=2m$ ,  $R=5000m$ .

### Κυρτή Γραμμή Ροής: $L_f=100m$ , $H_o=3m$

Αντίστοιχα, με τα παραπάνω, τα αποτελέσματα, για το επιλεγμένο μήκος διαδρομής, συγκλίνουν για διαστήματα μικρότερα των  $2m$ . Το πάχος της υδατικής στρώσης ισούται με  $4,737mm$  για μήκος διαστήματος  $20m$  και με  $BN=4,769mm$  για διαστήματα των  $2m$  και έπειτα.



Σχήμα 4.14: Μηκοτομή κυρτής γραμμής ροής  
( $L_f=100m$ ,  $H_o=3m$ ,  $R=2500m$ ).



Γράφημα 4.12: Πάχος νερού διαστημάτων  
Κυρτή γραμμή ροής:  $L_f=100m$ ,  $H_o=3m$ ,  $R=2500m$ .

#### 4.3 Πρόσθετες περιπτώσεις Μεταβαλλόμενης κατά Μήκος Κλίσης

Στις προηγούμενες δύο ενότητες μελετήθηκαν διαδρομές ροής με σταθερή κατά μήκος κλίση (ευθείες γραμμές) και γραμμές ροής με μεταβαλλόμενη κλίση (κυρτή ή κοίλη καμπύλη). Στην ενότητα αυτή οι γραμμές ροής είναι συνδυασμός των δύο προηγούμενων.

Συγκεκριμένα, η συνισταμένη κλίση στην αρχή και στο τέλος της ροής είναι σταθερή. Έπειτα η κλίση μεταβάλλεται και η γραμμή ροής είναι υπό την μορφή κυρτής ή κοίλης καμπύλης.

### Μέθοδος Υπολογισμού

Για την εύρεση του ύψους επιφανειακού νερού ακολουθούνται τα ίδια βήματα μελέτης των προηγούμενων ενοτήτων. Διαφοροποιούνται μόνο οι εξισώσεις για την εύρεση του υψομέτρου κάθε σημείου.

Οι γραμμές ροής έχουν συνολικό μήκος  $L_f=10m$  και τα διαστήματα  $5m, 2m, 1m, 0,5m, 0,2m$  και  $0,1m$ .

Η εύρεση του υψομέτρου κάθε σημείου, αρχής και τέλους του διαστήματος, γίνεται με εφαρμογή των Εξισώσεων 4.8 έως 4.10.

$$T = R * \frac{|S_1 - S_2|}{2}, \quad \text{όπου } T < \frac{l}{2} \quad (4.7)$$

$$h = h_o + S_1 x, \quad (0 < x < \frac{l}{2} - T) \quad (4.8)$$

$$h = h_o + S_1 x \pm \frac{(x - \frac{l}{2} + T)^2}{2R}, \quad (\frac{l}{2} - T < x < \frac{l}{2} + T) \quad (4.9)$$

$$h = h_o + S_1 \frac{l}{2} + S_2 \frac{x - T}{2}, \quad x > \frac{l}{2} + T \quad (4.10)$$

όπου:

$T$ : εφαπτομένη παραβολής κατακόρυφης συναρμογής ( $m$ )

$R$ : η ακτίνα καμπυλότητας ( $m$ )

$x$ : η απόσταση κάθε σημείου από την αρχή της γραμμής ( $m$ )

$h$ : το υψόμετρο κάθε σημείου ( $m$ )

$h_o$ : το αρχικό υψόμετρο κάθε γραμμής ( $m$ )

$S_1$ : αρχική κατά μήκος κλίση ( $m/m$ )

$S_2$ : τελική κατά μήκος κλίση ( $m/m$ )

Ανάλογα με τα διαστήματα και τη θέση του σημείου γίνεται η χρήση της κάθε εξίσωσης. Για τα σημεία που βρίσκονται σε ευθύγραμμο τμήμα το υψόμετρο υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.8, ενώ για σημεία που βρίσκονται μέσα στην καμπύλη χρησιμοποιείται η Εξίσωση 4.9.

Με την χρήση των Εξισώσεων 4.11 έως 4.14 υπολογίζεται το τελικό πάχος νερού στην επιφάνεια κυκλοφορίας.

$$S = \frac{\Delta H}{\Delta l} \quad (4.11)$$

$$\text{Αρχικό μήκος} = \Delta l$$

$$BN_1 = 0,01485(BY^{0,11} \Delta l^{0,43} i^{0,59} S_r^{-0,42}) \quad (4.12)$$

$$L_{fισοδ_i} = \left( \frac{BN_{i-1}}{0,01485(BY^{0,11} i^{0,59} S_r^{-0,42})} \right)^{\frac{1}{0,43}} \quad (4.13)$$

$$BN_i = 0,01485(BY^{0,11} (L_{fισοδ} + \Delta l)^{0,43} i^{0,59} S_r^{-0,42}) \quad (4.14)$$

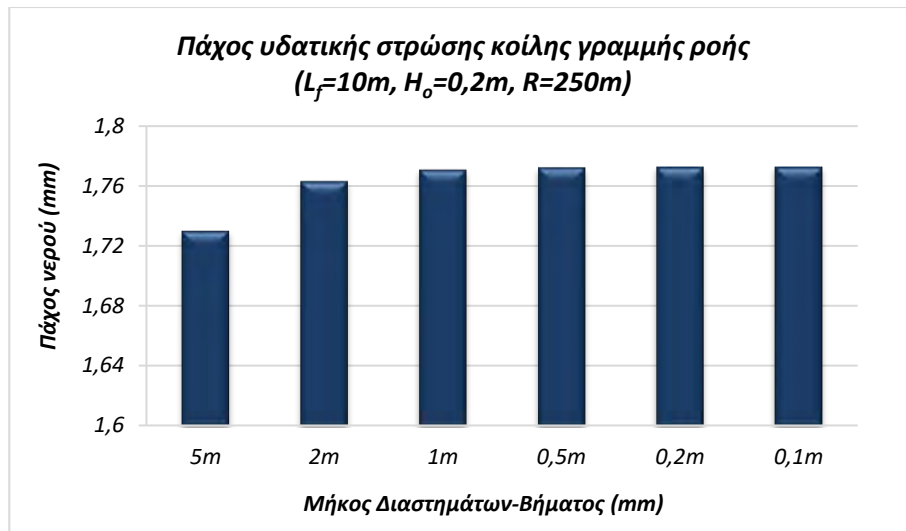
### **Κοίλη Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$**

Το συνολικό μήκος της γραμμής είναι  $10m$ . Η σταθερή κατά μήκος κλίση  $S_1$  του πρώτου τμήματος είναι ίση με  $3\%$ , το καμπύλο τμήμα της γραμμής έχει ακτίνα καμπυλότητας  $R=250m$  και τέλος η κλίση στο δεύτερο τμήμα ισούται με  $S_2=1\%$  (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.15: Μηκοτομή κοίλης γραμμής ροής  
( $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=250m$ ).

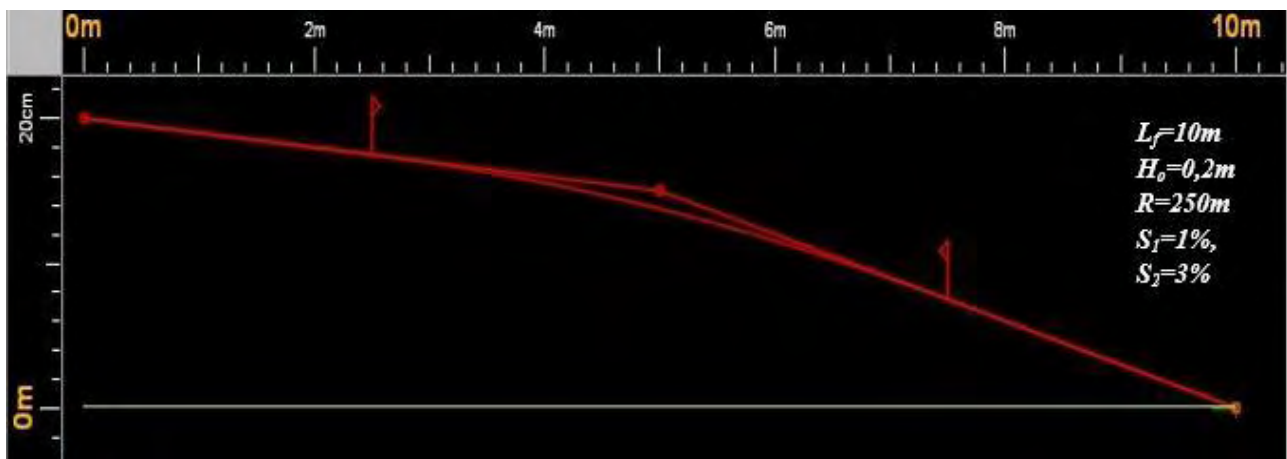
Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα για τα βάθος νερού. Όπως και στις προηγούμενες ενότητες, υπάρχει σύγκλιση αποτελεσμάτων για μήκη διαστημάτων μικρότερα των  $2m$ .



*Γράφημα 4.13: Πάχος νερού διαστημάτων  
Κοίλη γραμμή ροής:  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=250m$ .*

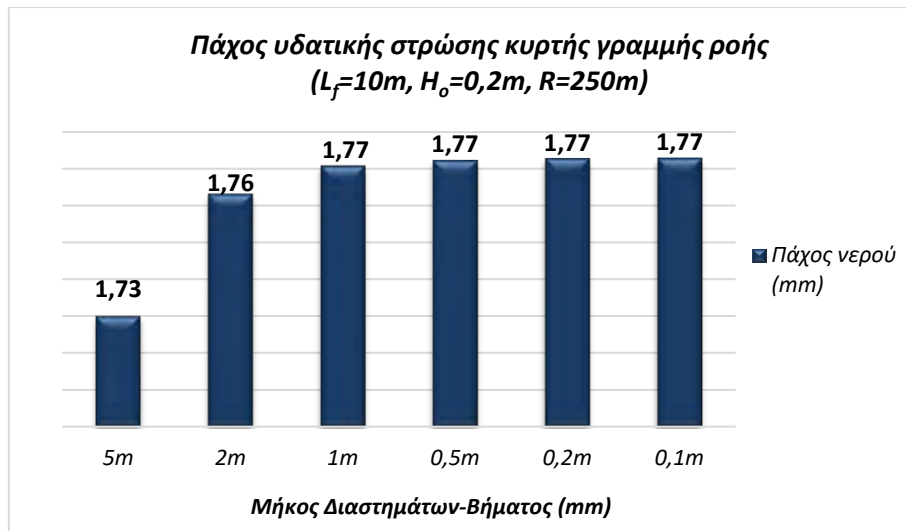
### **Κυρτή Γραμμή Ροής: $L_f=10m$ , $H_o=0,2m$**

Στην περίπτωση της κυρτής καμπύλης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι, το συνολικό μήκος  $10m$  και η ακτίνα καμπυλότητας  $R=250m$ . Τα τμήματα εκατέρωθεν της καμπύλης έχουν σταθερή κλίση  $S_1=1\%$  και  $S_2=3\%$  (Σχήμα 4.16).



*Σχήμα 4.16: Μηκοτομή κυρτής γραμμής ροής  
( $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=250m$ ).*





*Γράφημα 4.14: Πάχος νερού διαστημάτων  
Κυρτής γραμμή ροής:  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=250m$ .*

#### **4.4 Ταχύτητα Επιφανειακού Νερού**

Στη παρούσα ενότητα του κεφαλαίου αυτού, αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού της ταχύτητας του νερού, ως ταχύτητα ορίζεται η απόσταση της μετακίνησης στη μονάδα του χρόνου, ενός σωματιδίου νερού από το ένα σημείο στο άλλο.

Οι γραμμές ροής που κατασκευάστηκαν λειτουργούν όμοια με τους ανοιχτούς αγωγούς, ορθογωνικής διατομής. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός της ταχύτητας γίνεται με την εξίσωση του *Manning*:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (4.15)$$

Όπου,

$V$ : μέση ταχύτητα ροής

$$V = \frac{Q}{E} \quad (m/s)$$

$n$ : συντελεστής τραχύτητας του *Manning*

$R$ : υδραυλική ακτίνα

$$R = \frac{E}{P} \quad (m)$$

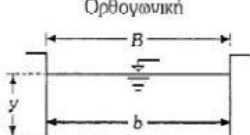
$S$ : κατά μήκος κλίση του αγωγού ( $m/m$ )

$Q$ : παροχή ( $m^3/s$ )

$E$ : εμβαδό υγρής διατομής ( $m^2$ )

$P$ : βρεχόμενη περίμετρος ( $m$ )

**Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά στοιχεία αγωγού ορθογωνικής διατομής.**

Διατομή	Επιφάνεια $A$	Βρεχ. περίμετρος $P$	Υδραυλική ακτίνα $R = A/P$	Πλάτος ελεύθερης επιφάνειας $B$	Υδραυλικό βάθος $y_d = A/B$
 <p>Ορθογωνική</p>	$by$	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	$b$	$y$

Επομένως, ως υδραυλικό βάθος ( $Y$ ) ορίζεται η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού και του χαμηλότερου σημείου της διατομής. Το εμβαδόν της επιφάνειας που περικλείεται από την ελεύθερη στάθμη του ρευστού και τα στερεά όρια της διατομής καλείται επιφάνεια ροής ή υγρή επιφάνεια  $A$ , ενώ το μήκος του βρεχόμενου στερεού περιγράμματος της διατομής, ονομάζεται βρεχόμενη περίμετρος.

Θεωρώντας την επιφάνεια του δρόμου λοιπόν σαν αγωγό ορθογωνικής διατομής στην οποία η ροή γίνεται σε ελεύθερη επιφάνεια και το βάθος ροής είναι  $y$ , τότε οι τύποι έχουν την παραπάνω μορφή (Πίνακας 4.1).

Στην περίπτωση των γραμμών ροής, όπου το πλάτος της ορθογωνικής διατομής είναι πολύ μεγαλύτερο από το βάθος ροής ( $b \gg y$ ), ο παρονομαστής της εξίσωσης που δίνει την υδραυλική ακτίνα μπορεί να απλοποιηθεί σε  $b+2y \approx b$ . Συνεπώς η υδραυλική ακτίνα θα είναι περίπου ίση με το βάθος ροής:

$$R \cong y \cong BN$$

Επιπλέον, ως κατά μήκος κλίση του αγωγού ( $S$ ), χρησιμοποιούμε την συνισταμένη κλίση της εκάστοτε γραμμής ροής.

Άρα, η Εξίσωση 4.15, στην περίπτωση γραμμών ροής παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$V = \frac{1}{n} BN^{2/3} S_r^{1/2} \quad (4.16)$$

Οι τιμές του συντελεστή  $n$  λαμβάνονται από πίνακες που έχουν δημοσιευθεί σε πληθώρα βιβλίων. Ο παρακάτω Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή  $n$  για μια σειρά υλικών από τα οποία αποτελείται ένας ανοιχτός αγωγός. Σημειώνεται ότι επειδή ο συντελεστής  $n$  δεν είναι αδιάστατος αριθμός, κατά τη χρήση του τύπου *Manning* η ταχύτητα πρέπει να εκφράζεται σε  $m/s$ .

<i>Πίνακας 4.2: Συντελεστής Manning, <math>n</math>, για διάφορα υλικά</i>	
<i>Μέταλλο λείο</i>	<i>0,011-0,015</i>
<i>Μέταλλο, αυλακωτό</i>	<i>0,023-0,025</i>
<i>Ξύλο, κατεργασμένο</i>	<i>0,010-0,015</i>
<i>Ξύλο, ακατέργαστο</i>	<i>0,011-0,015</i>
<i>Τσιμέντο λείο</i>	<i>0,010-0,013</i>
<i>Σκυρόδεμα</i>	<i>0,014-0,016</i>
<i>Τσιμεντοχάλικο</i>	<i>0,017 - 0,030</i>
<i>Γρασίδι</i>	<i>0 &gt; 0,020</i>

Ο συντελεστής  $n$  σύμφωνα με τον Πίνακα 4.2 ισούται με 0,015.

### **Υπολογισμός Ταχύτητας**

Για όλες τις γραμμές ροής της προηγούμενης ενότητας, έχοντας ως δεδομένο την κατά μήκος κλίση και το επιφανειακό πάχος νερού για κάθε διάστημα, προσδιορίστηκε η τιμή της ταχύτητας με βάση την Εξίσωση 4.16.

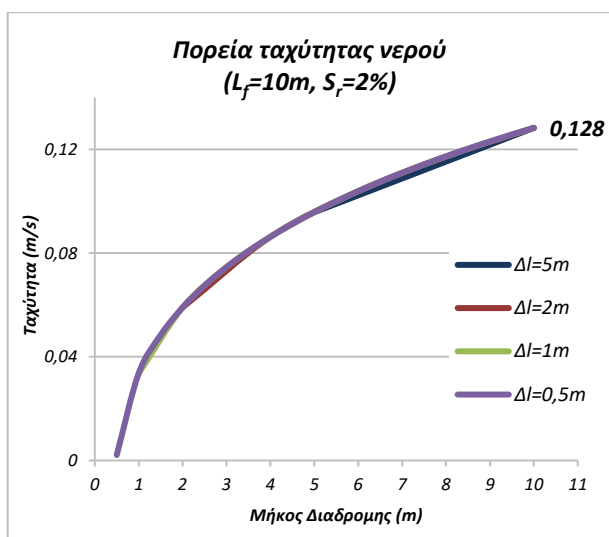
Η τιμή της ταχύτητας αντιστοιχεί σε κάθε διάστημα ισοδύναμου μήκους. Στα γραφήματα που ακολουθούν δίνεται η πορεία της ταχύτητας κατά το μήκος ροής.

### **Γραμμές Ροής Σταθερής κατά Μήκος Κλίσης**

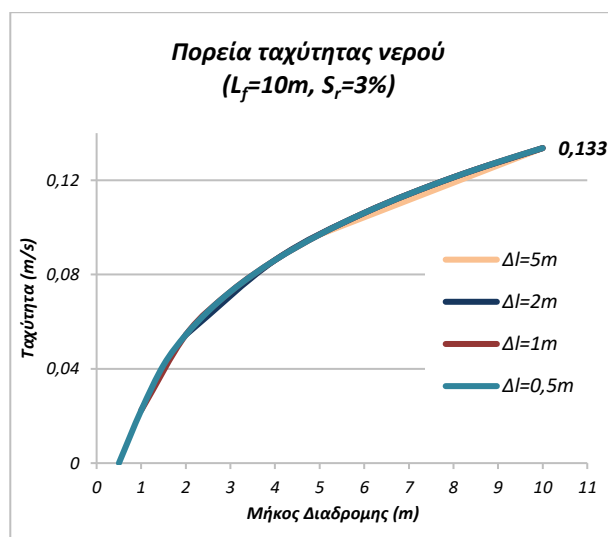
Στις περιπτώσεις όπου οι γραμμές ροής έχουν σταθερή κατά μήκος κλίση, η πορεία της ταχύτητας ανά διαστήματα είναι ίδια σε όλο το μήκος ροής του νερού.

Από το Γράφημα 4.15 και 4.16 παρατηρείται πως η συνολική ταχύτητα ροής αυξάνεται καθώς αυξάνεται η συνισταμένη κλίση. Στην περίπτωση όπου η κλίση παίρνει την τιμή  $S_r=2\%$  η ταχύτητα ισούται με  $0,128\text{m/s}$ . Αυξάνοντας την κλίση σε  $S_r=3\%$  αυξάνεται και η τελική ταχύτητα σε  $0,133\text{m/s}$ .

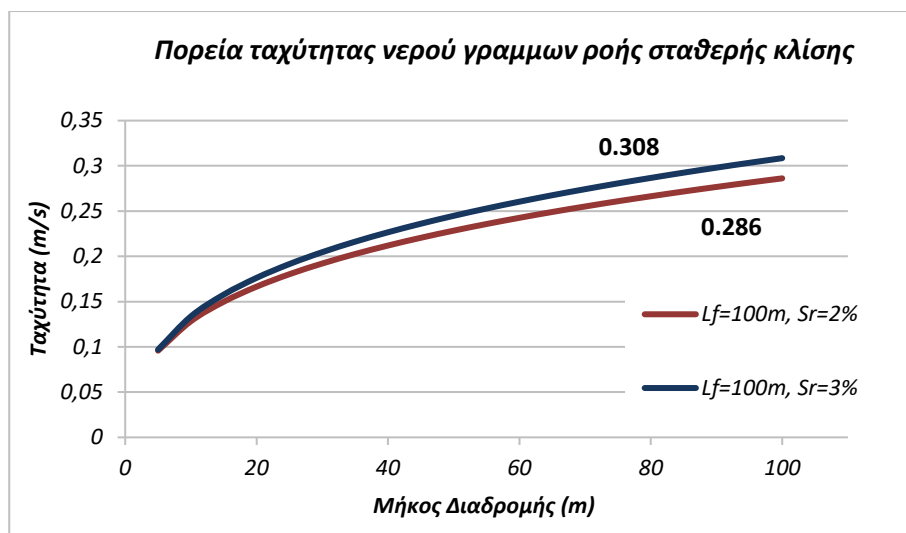
Επίσης, από το Γράφημα 4.17, παρατηρείται πως η τελική ταχύτητα που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερα μήκη ροής είναι μεγαλύτερη. Για μήκος ροής  $100\text{m}$  και συνισταμένη κλίση  $2\%$ , συγκριτικά με την περίπτωση των  $10\text{m}$ , η ταχύτητα αυξήθηκε σε  $0,286\text{m/s}$  καθώς το υπολογισμένο βάθος στην περίπτωση αυτή είναι μεγαλύτερο. Αύξηση στην τιμή της ταχύτητας παρατηρείται και στην περίπτωση όπου η συνισταμένη κλίση ισούται με  $3\%$  ( $V=0,308\text{ m/s}$ ).



Γράφημα 4.15: Ταχύτητα νερού γραμμής ροής με σταθερή κατά μήκος κλίση  $2\%$



Γράφημα 4.16: Ταχύτητα νερού γραμμής ροής με σταθερή κατά μήκος κλίση  $3\%$ .



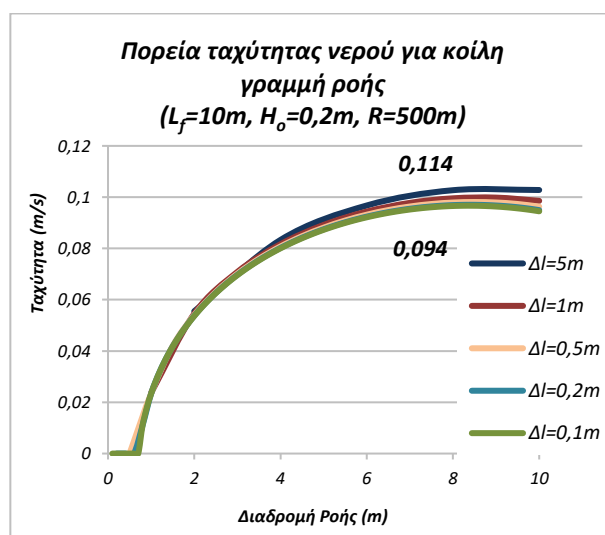
Γράφημα 4.17: Πορεία ταχύτητας νερού γραμμών ροής με σταθερή κλίση Διάστημα μελέτης  $\Delta l=5m$ .

### Γραμμές Ροής υπό την Μορφή Κοίλης Καμπύλης

Η πορεία της ταχύτητας για διαδρομές ροής υπό την μορφή κοίλης καμπύλης με μεταβαλλόμενη κλίση παρουσιάζεται στα παρακάτω γραφήματα.

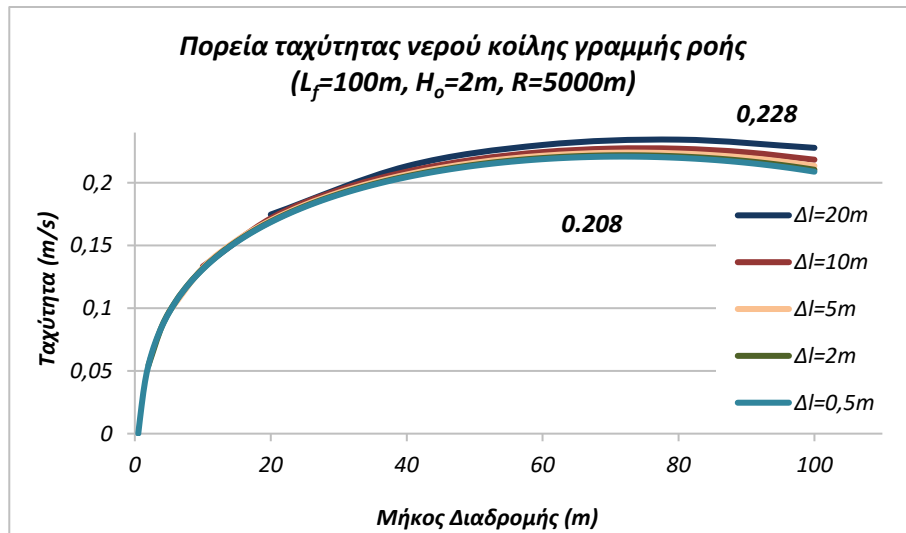
Παρατηρούνται μικρές διαφορές στην τιμή της ταχύτητας του τελευταίου διαστήματος ( $\Delta l$ ) που μελετάται ανά διαδρομή, όπως και στη πορεία κατά μήκος της διαδρομής σε όλες περιπτώσεις.

Όταν το μήκος ροής είναι ίσο με  $L_f=10m$  και αρχικό υψόμετρο  $H_o=0,2m$  η ταχύτητα βρέθηκε στα εξής διαστήματα των  $5m$ ,  $2m$ ,  $1m$ ,  $0,5m$ ,  $0,2m$ , και  $0,1m$ , όπως και στον υπολογισμό του ύψους νερού, η τιμή της κυμαίνεται από  $0,94m/s$  έως  $0,114m/s$ , εντοπίζοντας ελάχιστες διαφορές στα βήματα μικρότερα του  $1m$ . Επιπλέον, η πορεία ταυτίζεται, ανεξάρτητα από το μήκος βήματος, για τα πρώτα  $5m$  ροής (Γράφημα 4.18).

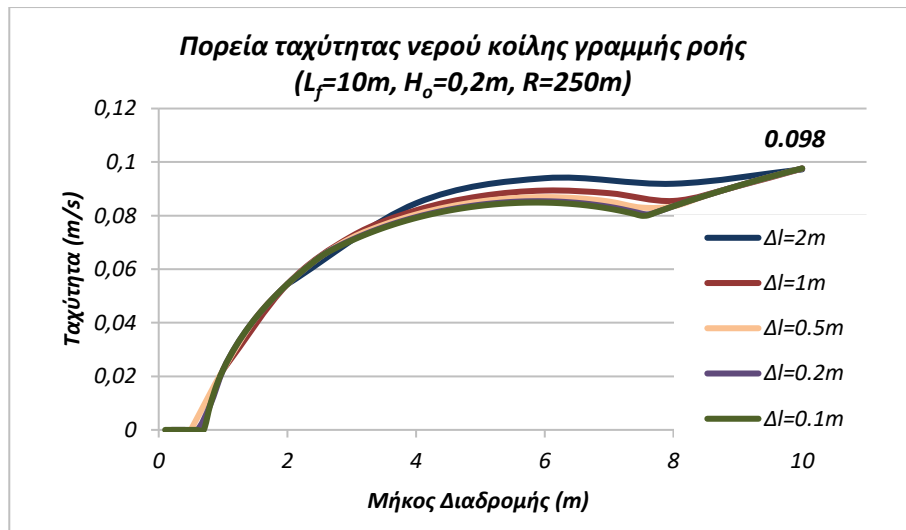


Γράφημα 4.18: Ταχύτητα νερού κοίλης γραμμής ροής  $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=500m$ .

Για μήκος  $L_f=100m$  και  $H_o=2m$ , η τιμή της ταχύτητας είναι συγκριτικά μεγαλύτερη. Τα διαστήματα είναι τα ίδια με αυτά της μελέτης για το συνολικό βάθος νερού:  $20m, 10m, 5m, 2m, 1m, 0,5m, 0,2m$ . Η τιμή της ταχύτητας για το βήμα  $20m$  είναι  $V=0,228m/s$ , για διάστημα  $10m$  ισούται με  $0,218m/s$  και για βήμα  $5m$  έχουμε  $V=0,213m/s$ , ενώ για διάστημα  $2m$  η τιμή παρουσιάζει ελάχιστη διαφορά,  $V=0,210m/s$ . Για διαστήματα μικρότερων του  $1m$  η ταχύτητα υπολογίστηκε ίση με  $0,209m/s$ , όπου και συγκλίνει.



Γράφημα 4.19: Πορεία ταχύτητας νερού κοίλης γραμμής ροής ( $L_f=100m$ ,  $H_o=2m$ ,  $R=5000m$ ).

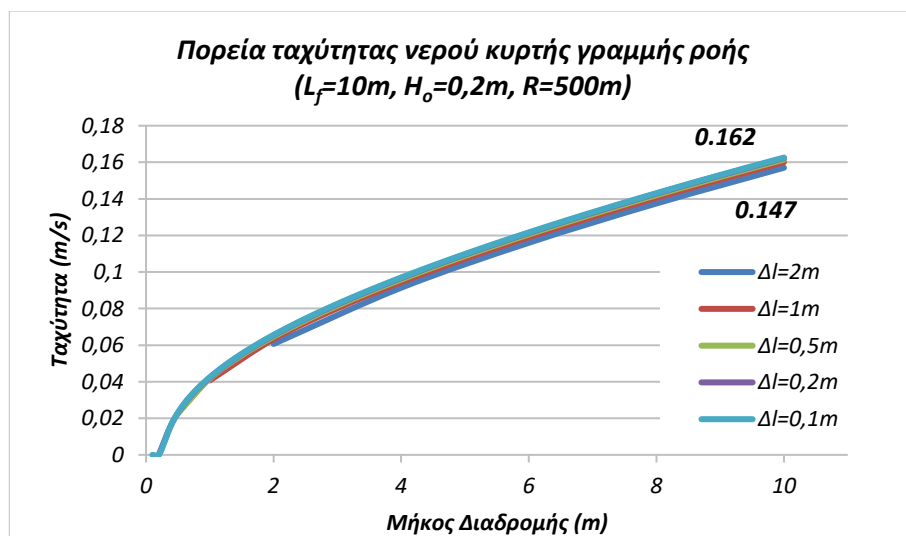


Γράφημα 4.20: Πορεία ταχύτητας νερού κοίλης γραμμής ροής ( $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=250m$ ).

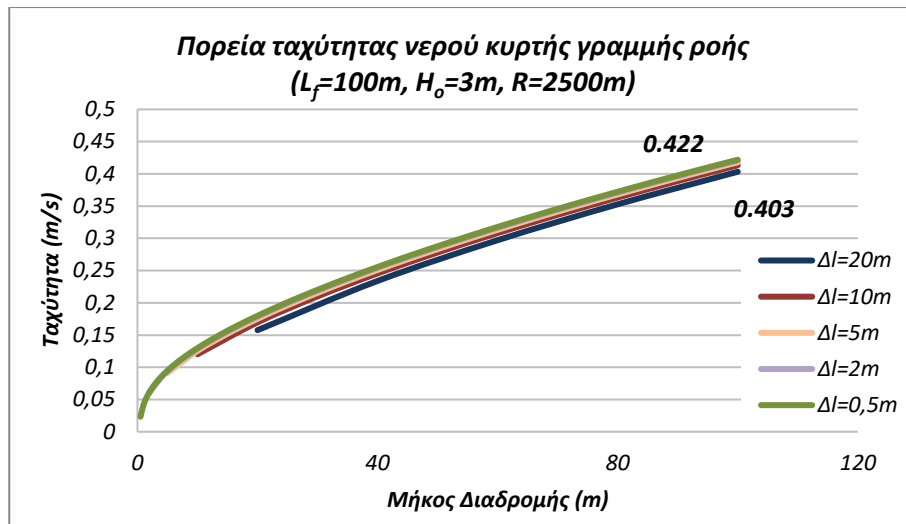
Η γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων για την γραμμή ροής που αποτελείται από εκατέρωθεν τμήματα με σταθερή κλίση, παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Η τιμή της ταχύτητας σταδιακά αυξάνεται και η πορεία ταυτίζεται στο τμήμα με σταθερή κατά μήκος κλίση. Μετά τα  $2,5m$ , στο καμπύλο τμήμα της ροής, η τιμή αρχίζει να μειώνεται και εμφανίζονται διαφορές μεταξύ της τιμής των διαστημάτων  $\Delta l$ . Από τα  $8m$ , και έπειτα, όπου η κλίση είναι και πάλι σταθερή, η τιμή αυξάνεται απότομα. Η ταχύτητα στο τέλος της διαδρομής έχει σε όλες τις περιπτώσεις την ίδια τιμή (Γράφημα 4.20).

### Γραμμές Ροής υπό την Μορφή Κυρτής Καμπύλης

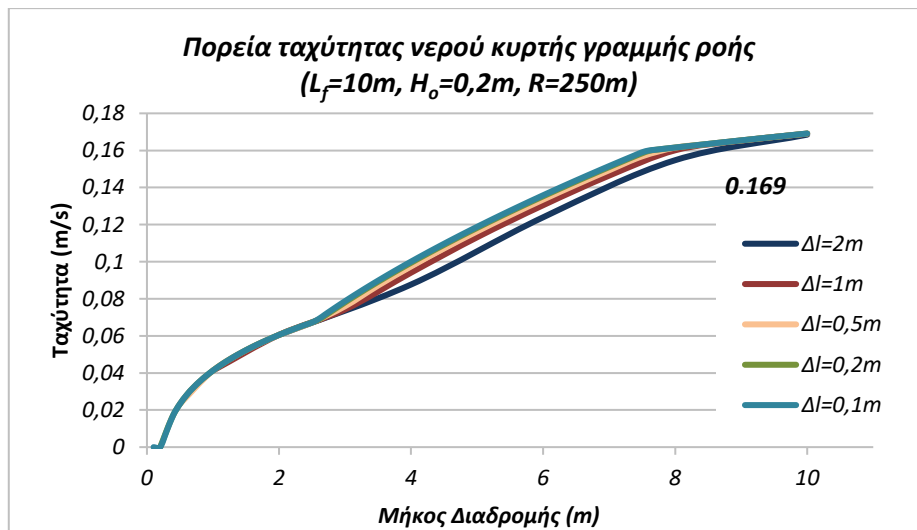
Η πορεία της ταχύτητας για κυρτή καμπύλη ροής συνεχώς αυξάνεται. Για μικρό μήκος ροής η ταχύτητα που υπολογίζεται έχει μικρές τιμές, ενώ για μεγαλύτερο μήκος,  $L_f=100m$ , η τιμή αυξάνεται, διότι το υπολογισμένο πάχος νερού είναι μεγαλύτερο στην δεύτερη περίπτωση. Διαπιστώθηκε, επίσης πως καθώς μειώνεται το μήκος βήματος, η ταχύτητα αυξάνεται. Σε κάθε περίπτωση όμως οι διαφορές που εντοπίζονται είναι ελάχιστες (Γράφημα 4.21-4.22).



Γράφημα 4.21: Πορεία ταχύτητας νερού κυρτής γραμμής ροής  
( $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=500m$ ).



**Γράφημα 4.22: Πορεία ταχύτητας νερού κυρτής γραμμής ροής  
( $L_f=100m$ ,  $H_o=3m$ ,  $R=2500m$ ).**



**Γράφημα 4.23: Πορεία ταχύτητας νερού κυρτής γραμμής ροής  
( $L_f=10m$ ,  $H_o=0,2m$ ,  $R=250m$ ).**

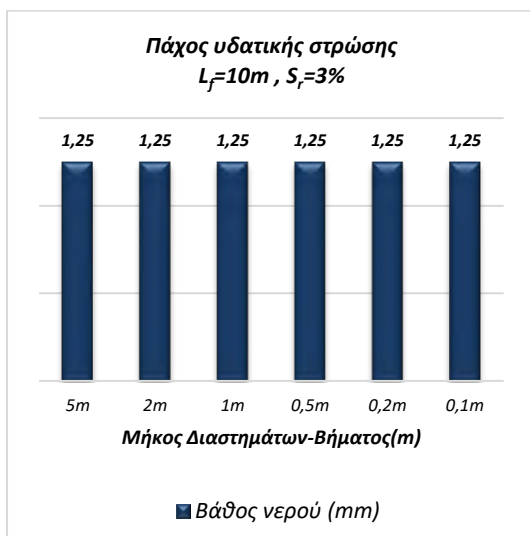
Η πορεία της ταχύτητας, στην περίπτωση της κυρτής καμπύλης που αποτελείται από ευθύγραμμα και καμπύλα τμήματα, εμφανίζει αύξουσα πορεία. Στο τμήμα ροής με σταθερή κλίση η πορεία ταυτίζεται. Στο τμήμα όπου η κλίση μεταβάλλεται, η πορεία εμφανίζει διαφορές μεταξύ των διαστημάτων. Στα τελευταία διαστήματα όπου η κλίση είναι πάλι σταθερή η πορεία ταυτίζεται. Για όλα τα βήματα υπολογισμού η τελική ταχύτητα ισούται με  $0,169m/s$ .



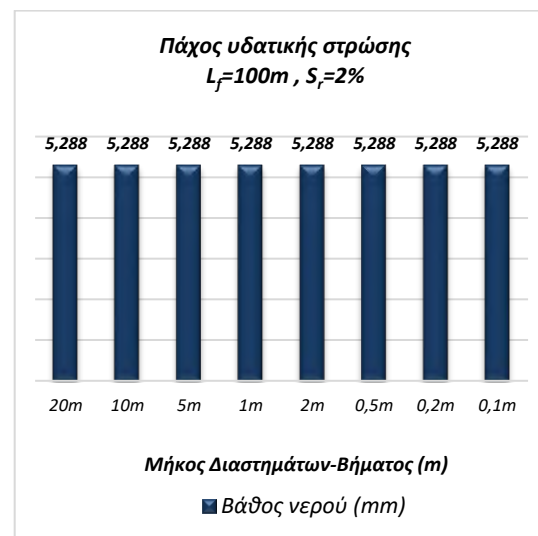
#### 4.5 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Συνοπτικά, στη ενότητα αυτή περιγράφονται τα αποτελέσματα για τον υπολογισμό του πάχους μεμβράνης νερού, σε συγκεκριμένες διαδρομές ροής που μελετήθηκαν στις παραπάνω υποενότητες και τα αποτελέσματα της ταχύτητας.

- Στην περίπτωση όπου η γραμμή ροής έχει σταθερή κατά μήκος κλίση, ανεξάρτητα από τα διαστήματα του ισοδύναμου μήκους που επιλέγονται κάθε φορά, τα αποτελέσματα ταυτίζονται και δεν υπάρχει διαφορά στο τελικό ύψος νερού που εμφανίζεται στο οδόστρωμα.

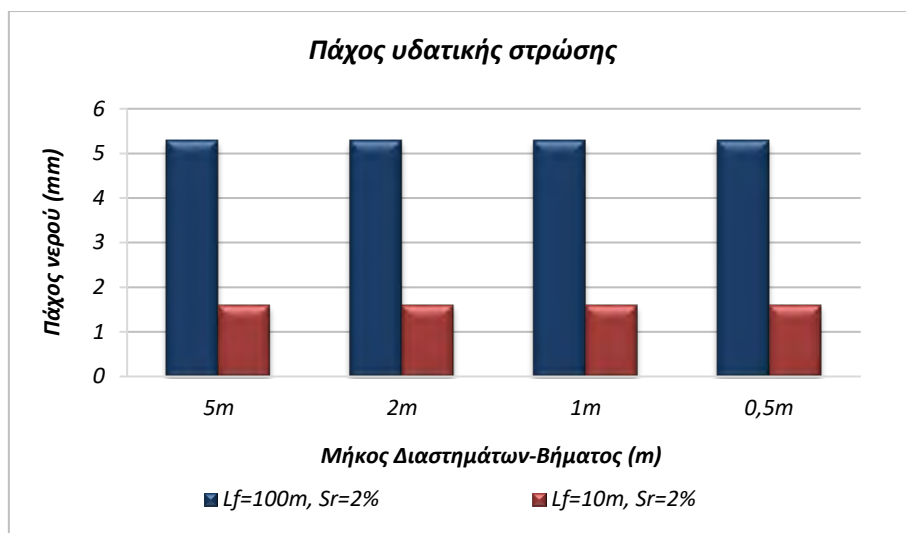


Γράφημα 4.24: Συνολικό βάθος νερού  
 $L_f=10m$  και σταθερή κλίση  $S_r=3\%$ .



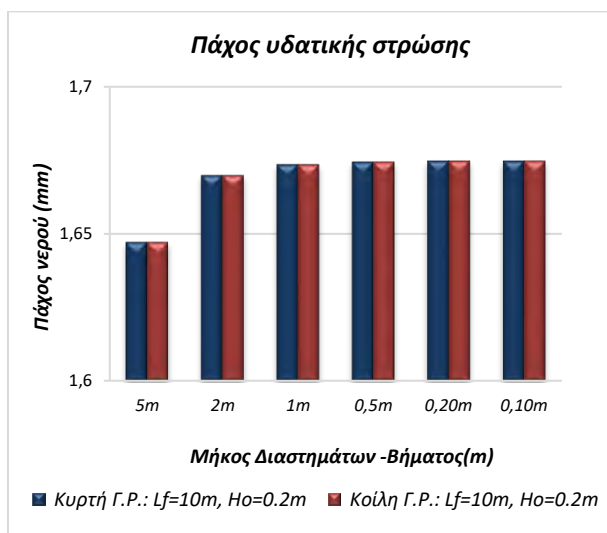
Γράφημα 4.25: Συνολικό βάθος νερού  
 $L_f=100m$  και σταθερή κλίση  $S_r=2\%$ .

- Όπως αναφέρθηκε και στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, όταν αυξάνεται το μήκος ροής, το συνολικό βάθος αυξάνεται. Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δύο γραμμές ροής με σταθερή κατά μήκος κλίση  $S_r=2\%$ , με ίδια χαρακτηριστικά ( $BY=0,6mm$ ,  $i=60mm/h$ ). Το μήκος της κάθε γραμμής ροής όμως διαφοροποιείται από  $10m$  σε  $100m$ . Παρατηρείται πως στην πρώτη περίπτωση το  $BN$  ισούται με  $1,58mm$ , ενώ στην δεύτερη περίπτωση το ύψος φτάνει στα  $5,288mm$ .

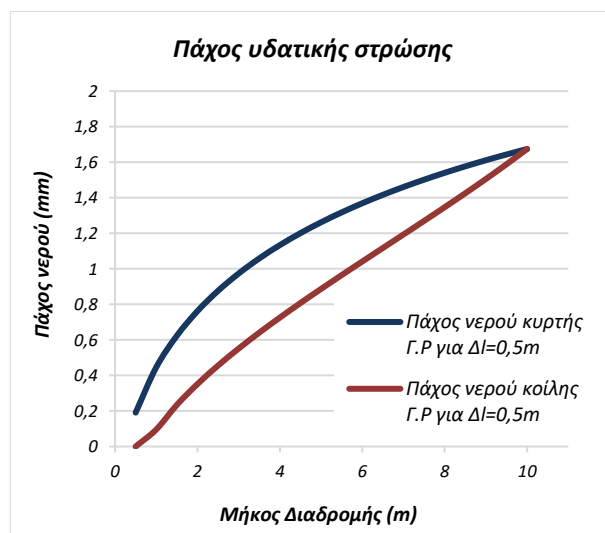


Γράφημα 4.26: Τελικό πάχος υδατικής στρώσης για γραμμές ροής με σταθερή κλίση.

- Στην περίπτωση όπου η γραμμή ροής είναι με την μορφή κοίλης ή κυρτής καμπύλης τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται ελάχιστα ανάλογα με τα διαστήματα. Όταν το μήκος ροής είναι αρκετά μεγάλο ( $L_f=100m$ ) τα αποτελέσματα συγκλίνουν για  $\Delta l \leq 5m$ , ενώ όταν το μήκος της ροής είναι μικρότερο ( $L_f=10m$ ) τα αποτελέσματα συγκλίνουν για  $\Delta l \leq 1m$ . Σε κάθε περίπτωση, όμως, οι διαφορές στο τελικό βάθος νερού είναι αρκετά μικρές.
- Επιπλέον, σημαντικό είναι να αναφερθεί πως δεν υπάρχει διαφορά στο τελικό ύψος νερού για γραμμή ροής με ίδια χαρακτηριστικά, είτε πρόκειται για κοίλη είτε για κυρτή καμπύλη. Συγκεκριμένα, για γραμμή ροής μήκους  $10m$ , αρχικό υψόμετρο  $H_0=0,2m$  και καμπυλότητα  $500m$ , για ένταση βροχόπτωσης,  $i=60 \text{ mm/h}$ , το  $BN$  είναι ίσο με  $1,68mm$  (Γράφημα 4.27).

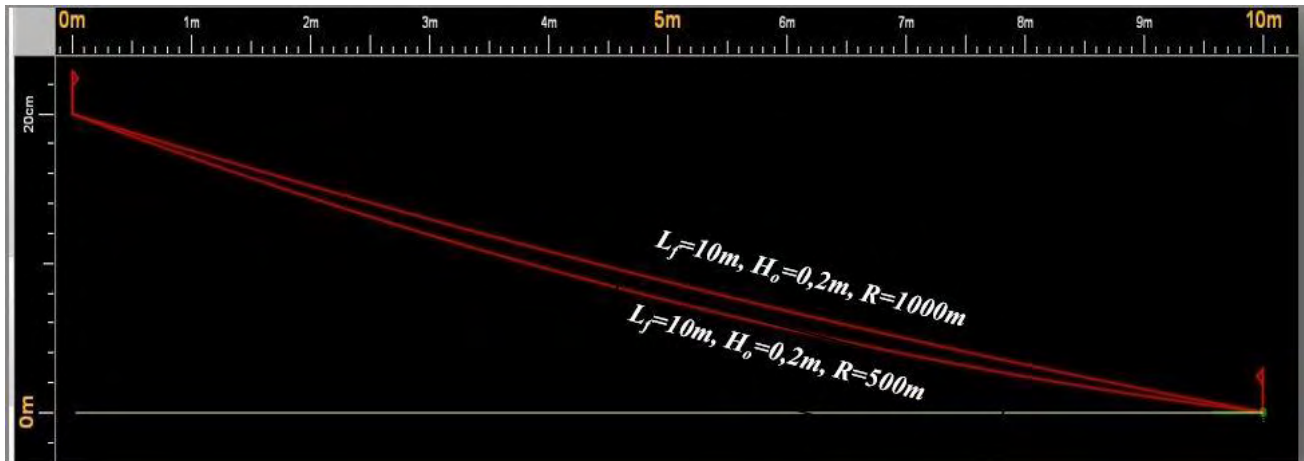


Γράφημα 4.27: Συνολικό βάθος νερού για καμπύλες γραμμές ροής.

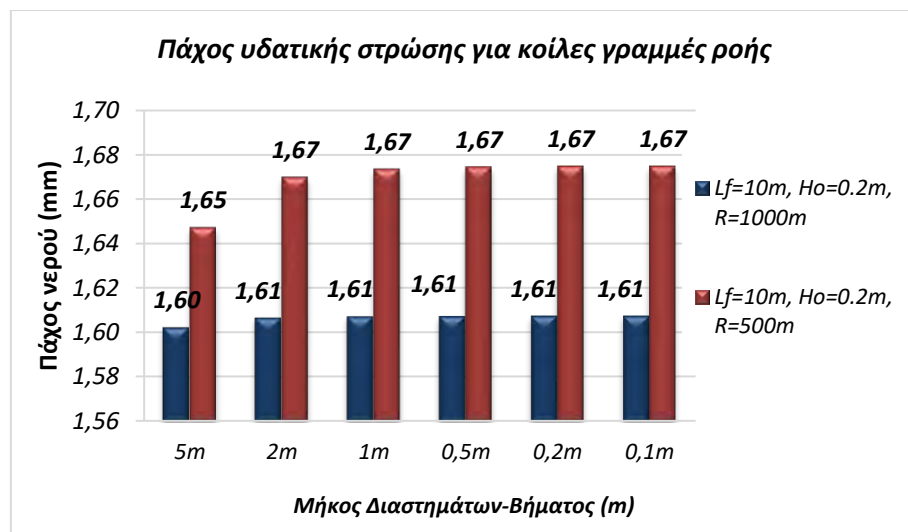


Γράφημα 4.28: Συνολικό βάθος νερού για καμπύλες γραμμές ροής.

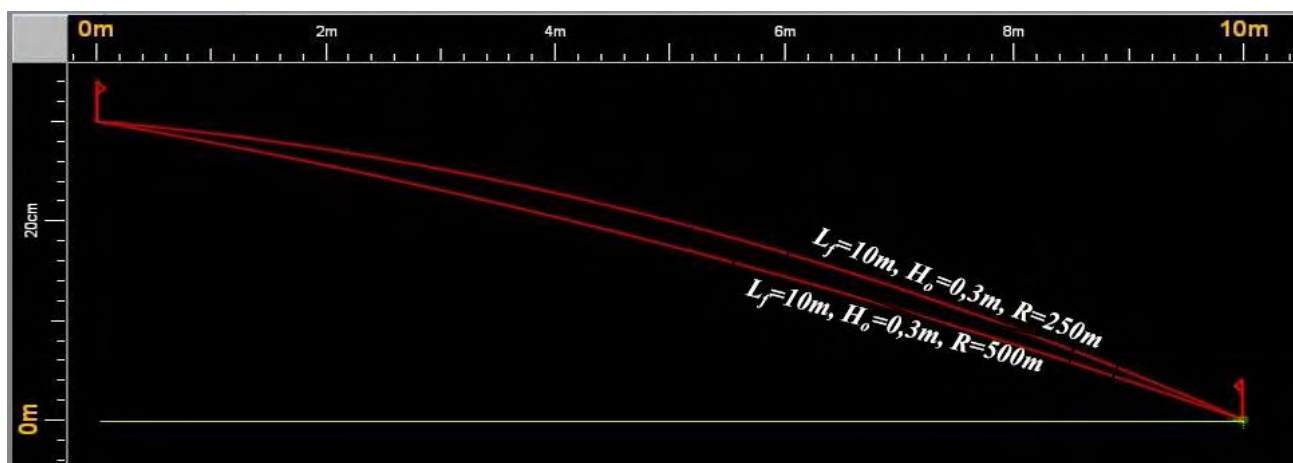
- Στην περίπτωση όμως, όπου η καμπυλότητα είναι διαφορετική το  $BN$  αλλάζει. Για κοίλη γραμμή ροής μήκους  $10m$ ,  $H_o=0,2m$  και ακτίνα καμπυλότητας  $500m$  το ύψος νερού πάνω στο οδόστρωμα φτάνει τα  $1,674mm$ , αντίστοιχα για κοίλη γραμμή ροής με ακτίνα καμπυλότητα  $1000m$  το  $BN$  είναι ίσο  $1,61mm$ , λόγω των κλίσεων.



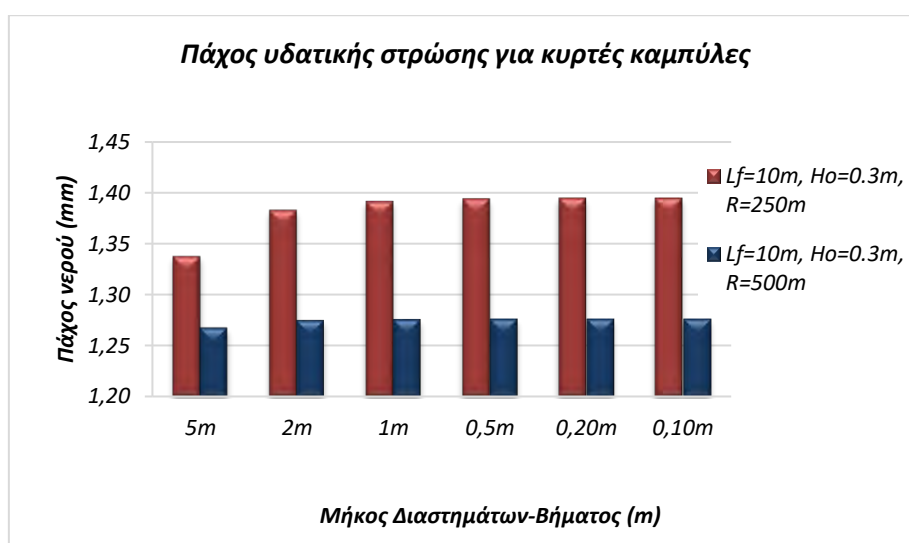
Σχήμα 4.17: Μηκοτομή κοίλων γραμμών ροής.



Γράφημα 4.29: Πάχος υδατικής στρώσης για κοίλες γραμμές ροής.



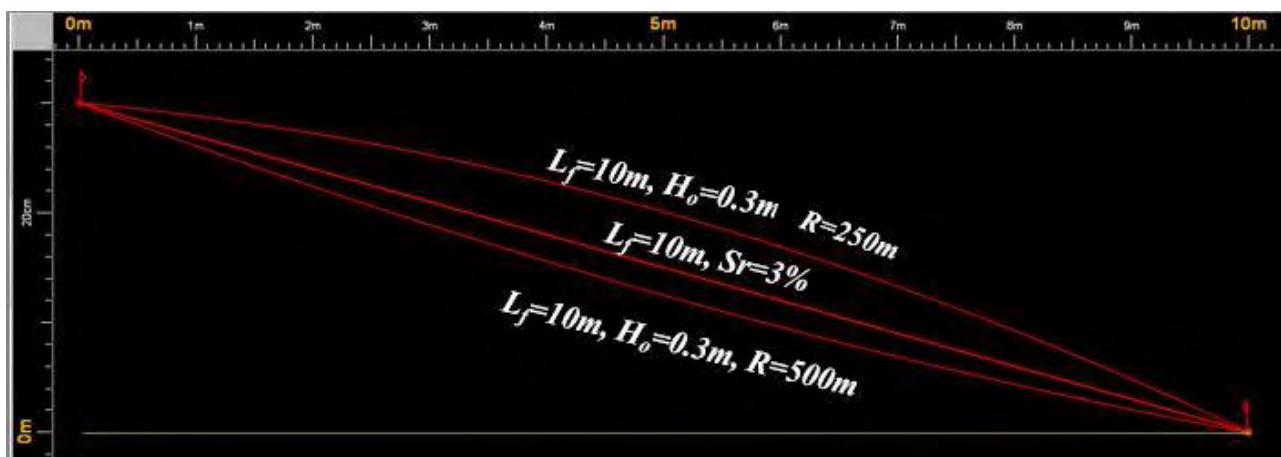
Σχήμα 4.18:Μηκοτομή κυρτών γραμμών ροής



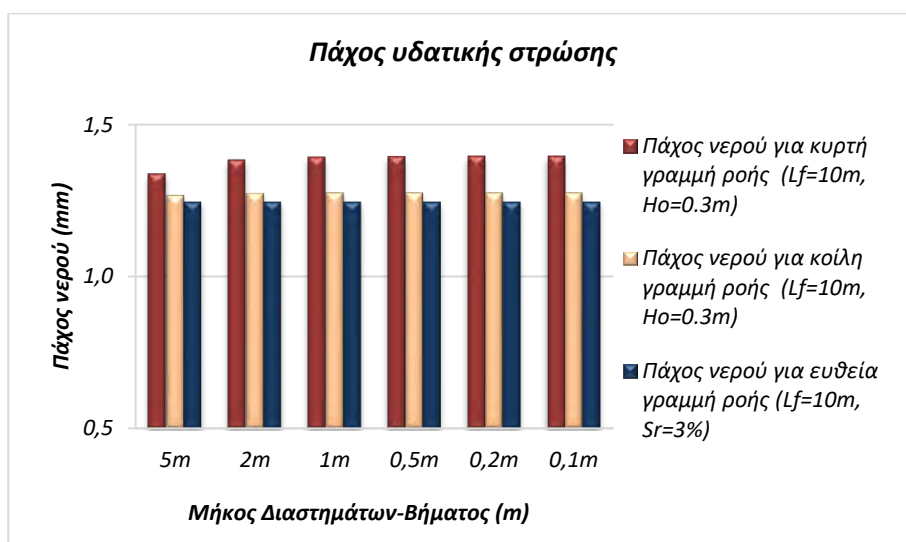
Γράφημα 4.30: Πάχος υδατικής στρώσης για κυρτές γραμμές ροής.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση της κυρτής καμπύλης μήκους  $10m$  και αρχικό υψόμετρο  $H_o=0,3m$ , στο υπολογισμένο βάθος νερού παρατηρείται αύξηση όταν η ακτίνα είναι  $R=250m$ .

- Επιπλέον, παρατηρείται πως στην περίπτωση όπου η ροή του νερού αντιπροσωπεύεται με ευθεία γραμμή και στην περίπτωση όπου η ροή αντιπροσωπεύεται με κοίλη ή κυρτή καμπύλη το πάχος διαφέρει. Η κίνηση του νερού γίνεται σε όλες τις περιπτώσεις πάνω σε οδόστρωμα με ίδια χαρακτηριστικά, το μήκος της ροής είναι ίδιο  $L_f=10m$  και το αρχικό υψόμετρο είναι το ίδιο.

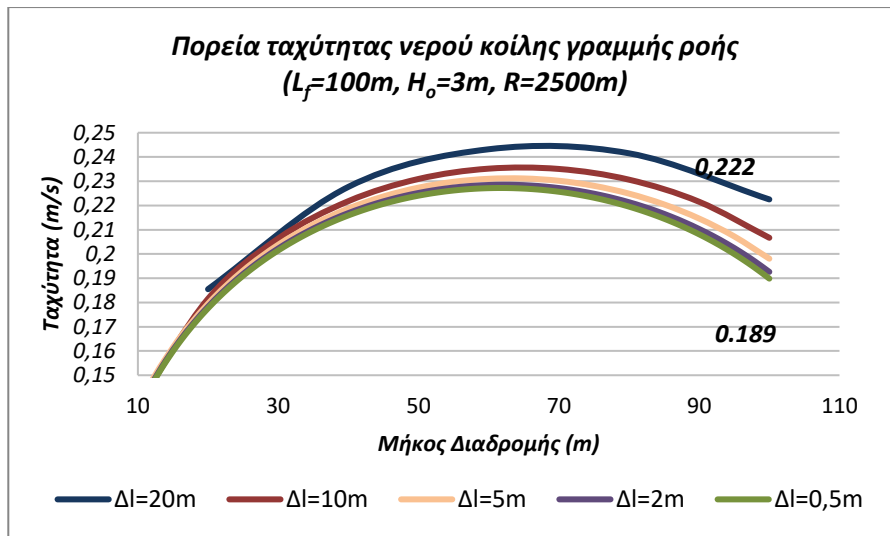


Σχήμα 4.19: Μηκοτομή γραμμών ροής.

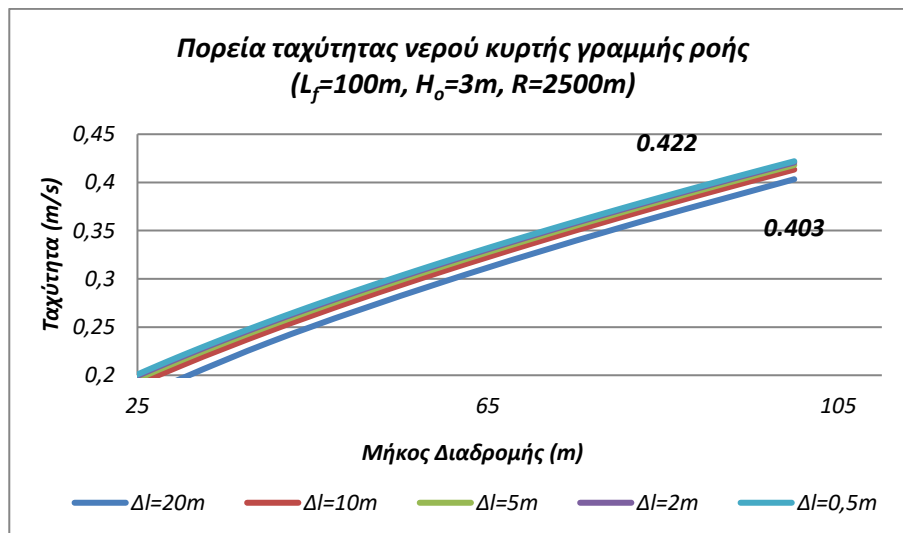


Γράφημα 4.31: Συγκριτικό γράφημα πάχους υδατικής στρώσης γραμμών ροής.

- Όπως αναφέρθηκε η ταχύτητα εξαρτάται από τη συνισταμένη κλίση και το πάχος του νερού που εμφανίζεται στο οδόστρωμα. Όταν η κλίση αυξάνεται, η τιμή της ταχύτητας μειώνεται. Αντίθετα, για μεγαλύτερα πάχη υδατικής στρώσης, υπολογίζεται μεγαλύτερη τιμή.
- Τα αποτελέσματα ανάλογα με την γεωμετρία της κάθε γραμμής διαφέρουν. Για γραμμές με σταθερή κλίση, η τιμή της ταχύτητας είναι ανεξάρτητη από την επιλογή των διαστημάτων  $\Delta l$  και η πορεία ταυτίζεται για όλα τα βήματα. Για κοίλες καμπύλες ροής διαπιστώθηκε πως με την μείωση των διαστημάτων, η τιμή μειώνεται (Γράφημα 4.32). Αντίθετα, στις κυρτές καμπύλες με την μείωση του μήκους βήματος, παρατηρήθηκε αύξηση της ταχύτητας διαστήματος (Γράφημα 4.33).

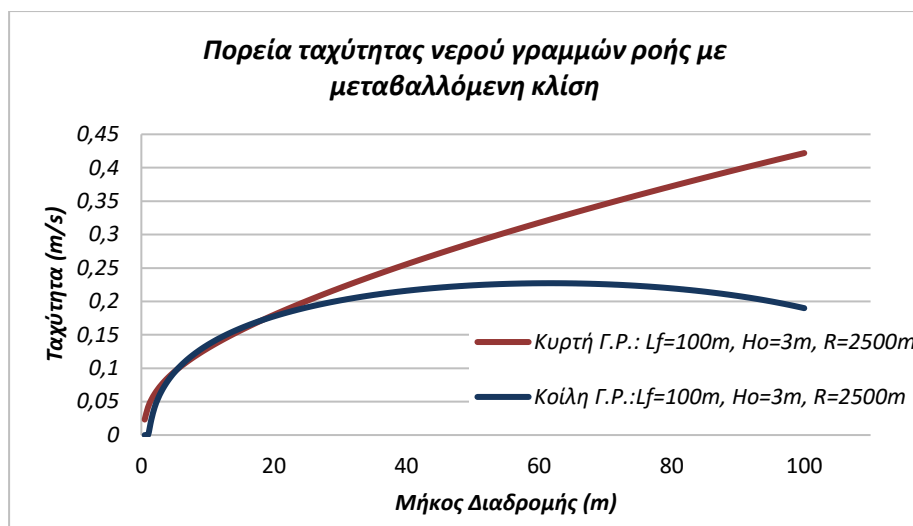


*Γράφημα 4.32: Ταχύτητα διαστημάτων κοίλης γραμμής ροής  
( $L_f=100m$ ,  $H_o=3m$ ,  $R=2500m$ ).*



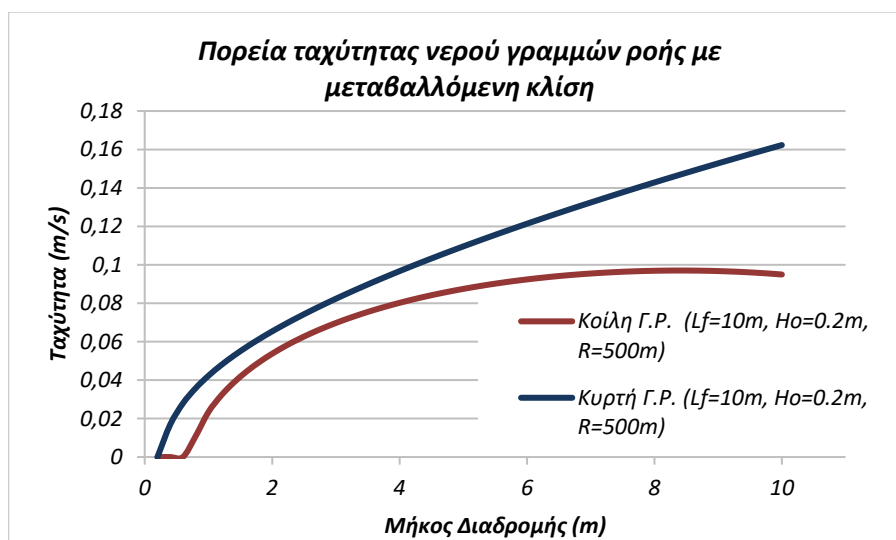
*Γράφημα 4.33: Ταχύτητα διαστημάτων κυρτής γραμμής ροής  
( $L_f=100m$ ,  $H_o=3m$ ,  $R=2500m$ ).*

- Η πορεία της ταχύτητας για κοίλες γραμμές ροής αρχικά αυξάνεται και έπειτα παρατηρείται μείωση. Στις κυρτές καμπύλες η ταχύτητα σταδιακά αυξάνεται (Γράφημα 4.34).



Γράφημα 4.34: Πορεία ταχύτητας νερού γραμμών ροής με μεταβαλλόμενη κλίση.

- Διαπιστώθηκε πως η ταχύτητα διαφέρει ανάλογα με την γεωμετρία της γραμμής. Συγκεκριμένα, για κοίλη γραμμή μήκους  $10m$ , αρχικό υψόμετρο  $H_o=0,2m$ ,  $R=500m$  και υπολογισμένο βάθος νερού  $BN=1,675mm$ , η τελική ταχύτητα διαστήματος ισούται με  $0,944m/s$ . Για κυρτή καμπύλη ροής, με ίδια χαρακτηριστικά, και ίδιο πάχος νερού ( $BN=1,675mm$ ) η τιμή της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη (Γράφημα 4.35).



Γράφημα 4.35: Πορεία ταχύτητας γραμμών ροής με μεταβαλλόμενη κλίση.

- Αξίζει να σημειωθεί πως για την γραμμή ροής που αποτελείται από καμπύλο τμήμα και εκατέρωθεν ευθύγραμμα τμήματα, η τιμή της ταχύτητας σταδιακά αυξάνεται και η πορεία ταυτίζεται στο τμήμα με σταθερή κατά μήκος κλίση. Στο καμπύλο τμήμα της ροής, η τιμή

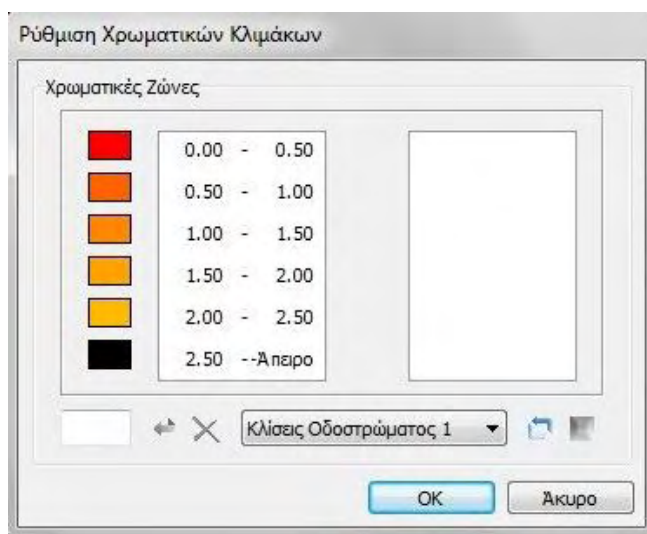
αρχίζει να μειώνεται και εμφανίζονται διαφορές μεταξύ της τιμής των διαστημάτων  $\Delta l$ . Όταν η κλίση είναι και πάλι σταθερή, η τιμή αυξάνεται απότομα και συνεχίζει να αυξάνεται γραμμικά μέχρι το τέλος της διαδρομής, καταλήγοντας στην ίδια τιμή για κάθε διάστημα. Στην αντίστοιχη περίπτωση που το καμπύλο τμήμα είναι κυρτό, η ταχύτητα ταυτίζεται στο τμήμα με σταθερή κλίση, και καταλήγει επίσης στην ίδια τιμή στο τέλος της διαδρομής για όλα τα διαστήματα. Η διαφορά εντοπίζεται στο καμπύλο τμήμα, η ταχύτητα στο τμήμα αυτό συνεχίζει να αυξάνεται χωρίς να υπάρξει κάποια μείωση.



## 5. Εφαρμογή του Τύπου σε Μοντέλα Δρόμων

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του τύπου σε μοντέλα δρόμων. Δημιουργήθηκαν διαφορετικά μοντέλα δρόμου, μέσω του προγράμματος Anadelta Tessera, που κρίθηκαν πως είναι αντιπροσωπευτικά στην απεικόνιση των κυριότερων συνδυασμών οριζοντιογραφίας και μηκοτομής που δημιουργούν περιοχές, όπου εμφανίζεται πρόβλημα στην απορροή των όμβριων υδάτων.

Για την πλήρη εξασφάλιση της απορροής των ομβρίων της οδού η διαφορά μεταξύ της κατά μήκος κλίσης και της πρόσθετης κλίσης των οριογραμμών πρέπει να είναι 0,2% (καλύτερα 0,5%) (ΟΜΟΕ-Χ, Τεύχος 3, 2001). Οι περιοχές εκείνες που η συνισταμένη κλίση είναι της τάξεως 0,5% έως και 1,00% εμφανίζουν λιγότερο έντονο πρόβλημα. Από 1% έως 2% σχεδόν το πρόβλημα δεν υπάρχει και όταν η σύνθετη κλίση είναι μεγαλύτερη από 2,5%, δηλαδή έχουμε ευθυγραμμία (αμφικλινής διατομή) ή κυκλικό τόξο (μονοκλινής διατομή) η απορροή εξασφαλίζεται. Η προβληματική, από πλευράς απορροής, περιοχή είναι συνήθως μέσα στην καμπύλη συναρμογής του δρόμου



Σχήμα 5.1: Χρωματική κλίμακα συνισταμένης κλίσης οδοστρώματος.

Τα μοντέλα δρόμων, που επιλέχθηκαν έχουν συνολικό μήκος περίπου 424m. Αποτελούνται είτε από μια συμμετρική (κλωθοειδή εισόδου ίδια με την κλωθοειδή εξόδου) δεξιά στροφή, είτε μια συμμετρική αριστερή στροφή, με ακτίνα κυκλικού τόξου 200m. Κοινό χαρακτηριστικό, επίσης, είναι το βάθος υψής οδοστρώματος  $BY=0,6mm$ , επιλέχθηκε η δυσμενέστερη περίπτωση. Για τον υπολογισμό του ύψους νερού σε όλες τις περιπτώσεις, η ένταση βροχόπτωσης ορίστηκε ίση με

60mm/h. Οι κατακρημνίσεις με ένταση της τάξεως 25mm/h θεωρούνται ασθενείς βροχοπτώσεις, ενώ σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, Τεύχος 8, ο έλεγχος για εντάσεις μεγαλύτερες από 100mm/h έχει αμελητέα αξία από την άποψη της ασφάλειας του οδηγού.

### **Μέθοδος υπολογισμού συσσωρευμένου επιφανειακού νερού**

Αφού δημιουργήθηκαν τα μοντέλα δρόμου που εμφανίζουν πρόβλημα στην απορροή των ομβρίων με διαφορετικά στοιχεία σε κάθε περίπτωση, επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία γραμμών ροής στις περιοχές αυτές.

Για κάθε γραμμή ροής, με την βοήθεια του προγράμματος, επιλέχθηκαν οι συντεταγμένες  $X, Y$ , που ορίζουν την θέση του κάθε σημείου της γραμμής πάνω στο δρόμο καθώς και η συνισταμένη κλίση. Στην περίπτωση των δρόμων ο υπολογισμός των εσωτερικών υψομέτρων δεν γίνεται με την εφαρμογή των εξισώσεων του 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου, αλλά με την χρήση του προγράμματος Anadelta Tessera.

Εξάγοντας τις συντεταγμένες κάθε σημείου της γραμμής ροής υπολογίζεται το διάστημα  $\Delta l$  με την Εξίσωση 5.1:

$$\Delta l = \sqrt{(X_n - X_{n+1})^2 + (Y_n - Y_{n+1})^2} \quad (5.1)$$

Όπου:

$\Delta l$ : η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σημείων της γραμμής ροής ( $m$ )

$X, Y$ : είναι συντεταγμένες κάθε σημείου

Ακολουθώντας την μέθοδο ισοδύναμου μήκους, που εφαρμόστηκε για τις περιπτώσεις που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4, ορίζεται το αρχικό μήκος ροής ίσο με το πρώτο διάστημα  $\Delta l_1$  και υπολογίζεται το αντίστοιχο ύψος του νερού ( $BN_1$ ).

$$\text{Αρχικό Μήκος Ροής}_1 = \Delta l_1$$

$$\text{Μήκος Ροής}_{n+1} = \text{Μήκος ροής}_n + \Delta l_{n+1} \quad (5.2)$$

Για τα επόμενα διαστήματα, γνωρίζοντας το ύψος νερού του προηγούμενου διαστήματος υπολογίζεται το ισοδύναμο μήκος ροής για το συγκεκριμένο βάθος και την συνισταμένη κλίση του τρέχοντος διαστήματος. Στο ισοδύναμο μήκος προστίθεται το μήκος διαστήματος-βήματος  $\Delta l$  και

υπολογίζεται το βάθος νερού στο τέλος αυτού. Με την εφαρμογή των παρακάτω εξισώσεων υπολογίζεται το τελικό πάχος της υδατικής στρώσης.

$$BN_1 = 0,01485(BY^{0,11}\Delta l^{0,43}i^{0,59}Sr^{-0,42}) \quad (5.3)$$

$$Lfισοδ = \left( \frac{BN}{0,01485(BY^{0,11}i^{0,59}Sr^{-0,42})} \right)^{\frac{1}{0,43}} \quad (5.4)$$

$$BNi = 0,01485(BY^{0,11}(Lfισοδ + \Delta l)^{0,43}i^{0,59}Sr^{-0,42}) \quad (5.5)$$

Η διαδικασία υπολογισμού του πάχους νερού περιγράφηκε πιο αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς είναι η διαδικασία υπολογισμού της ταχύτητας των διαστημάτων.

### **Επιφανειακό ύψος νερού κατά την τροχιά κίνησης των οχημάτων**

Αφού υπολογισθεί το ύψος νερού για κάθε γραμμή ροής του δρόμου, εξετάζεται και το πάχος νερού που συναντούν τα διερχόμενα οχήματα στην πορεία που διασχίζουν. Η τροχιά που ακολουθούν τα οχήματα ορίζεται παράλληλα στον άξονα του δρόμου και σε απόσταση ίση με  $2,55m$  για τον δεξιό τροχό του αυτοκινήτου και  $0,95m$  για τον αριστερό τροχό. Αντίστοιχα, η τροχιά κίνησης που διαγράφει το δίκυκλο ορίζεται στο μέσο της λωρίδας κυκλοφορίας και σε απόσταση  $1,75m$  από τον άξονα, για δρόμο με πλάτος  $3,5m$ .

Η χλιομέτρηση βαίνει αύξουσα ανάλογα με την φορά κυκλοφορίας των οχημάτων. Ορίζεται είτε με σημείο αναφοράς την Χ.Θ. της αρχής (ή του τέλους) της κλωθοειδούς ( $\Omega$ ), είτε την Χ.Θ της αρχής της οριζόντιας καμπύλης συναρμογής ( $A$ ) ανάλογα με την γεωμετρία κάθε οδού και την κατεύθυνση των οχημάτων.

### **5.1 Εφαρμογή στο Μοντέλου Δρόμου 1**

Το πρώτο μοντέλο αποτελεί μια συμμετρική δεξιά στροφή. Η ακτίνα κυκλικού τόξου ανέρχεται στην τιμή  $200m$ , μήκος κλωθοειδούς  $50m$ . Η πρόσθετη κλίση οριογραμμών είναι  $0,70\%$  και η κατά μήκος κλίση του οδοστρώματος είναι  $-0,55\%$ . Επομένως θα υπάρξει τμήμα που θα εμφανιστεί

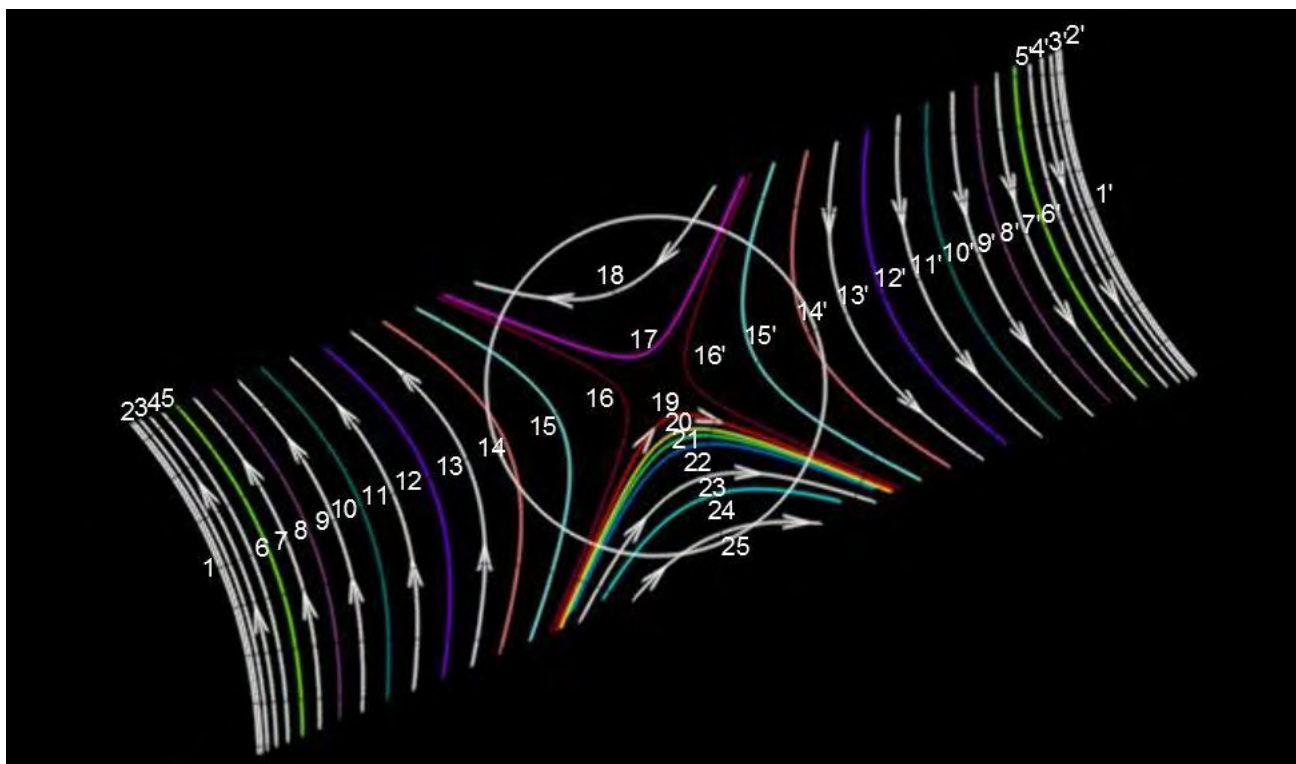
Figure 1 shows a schematic diagram of a curved, cylindrical structure. The structure is composed of a central red region and an outer yellow/orange region. The structure is surrounded by a black background with white lines. Labels include  $s = - 0,55\%$  with an arrow,  $A$ ,  $\Delta s = 0,70\%$ , and  $\Omega$ .

68

### Πάχος Υδατικής Στρώσης

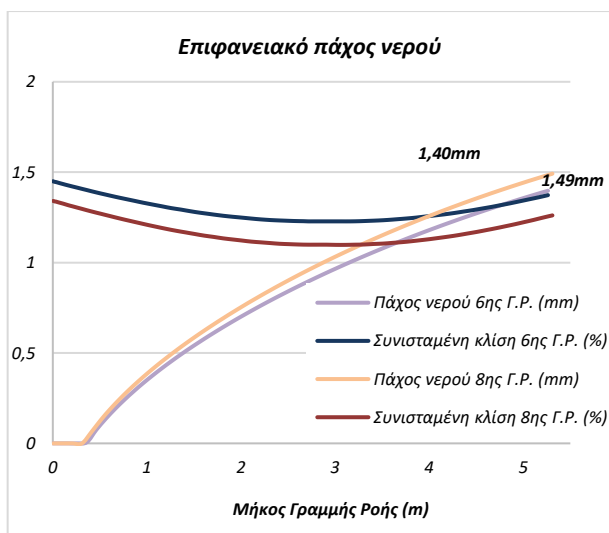
Το κέντρο της κρίσιμης περιοχής (σημείο μηδενισμού της κλίσης) εμφανίζεται στην αρχή της καμπύλης συναρμογής και σε απόσταση  $40m$  από την αρχή (ή το τέλος) της κλωθοειδούς. Έχει μήκος περίπου  $25m$ , ενώ έντονο πρόβλημα στην απορροή εμφανίζεται για  $5m$ , κόκκινος κύκλος (Σχήμα 5.3).

Σχεδιάστηκαν 40 γραμμές ροής, και η κίνηση γίνεται είτε με φορά προς τον άξονα είτε προς την εξωτερική λωρίδα του δρόμου (Σχήμα 5.4).

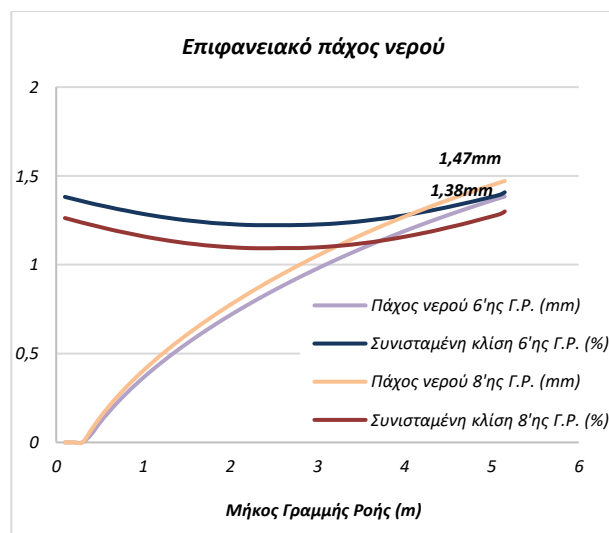


Σχήμα 5.4: Γραμμές ροής μοντέλου δρόμου 1.

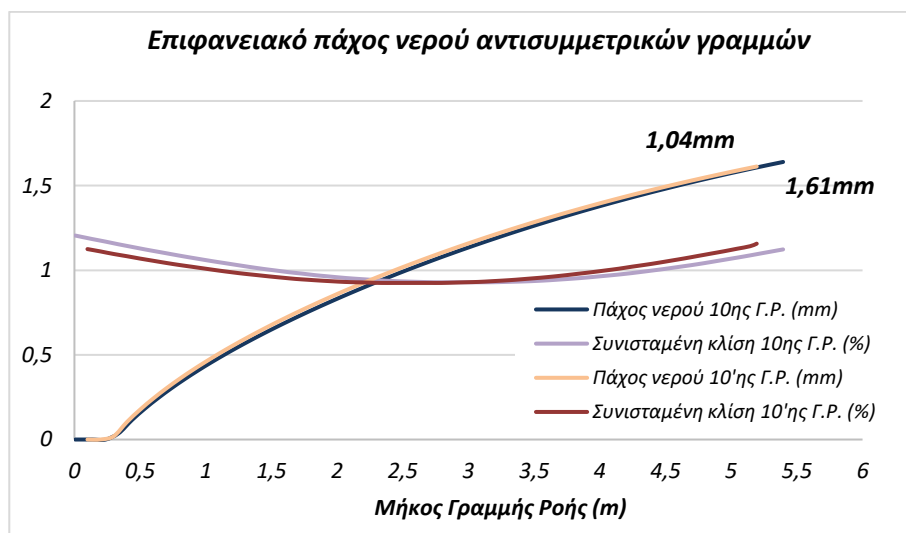
Οι γραμμές ροής από 1 έως 10 και 1' έως 10' απέχουν από το σημείο μηδενισμού την μεγαλύτερη απόσταση. Η απόσταση κυμαίνεται από  $4-7m$ . Το μήκος των γραμμών δεν ξεπερνάει τα  $5,30m$  και το μεγαλύτερο πάχος νερού που υπολογίζεται είναι  $1,6mm$ , που αντιστοιχεί στην 10<sup>η</sup> γραμμή ροής με μήκος  $L_{f10'}=5,19m$ .



Γράφημα 5.1: Πάχος νερού για την 6<sup>η</sup> και 8<sup>η</sup> γραμμή ροής του μοντέλου δρόμου 1.



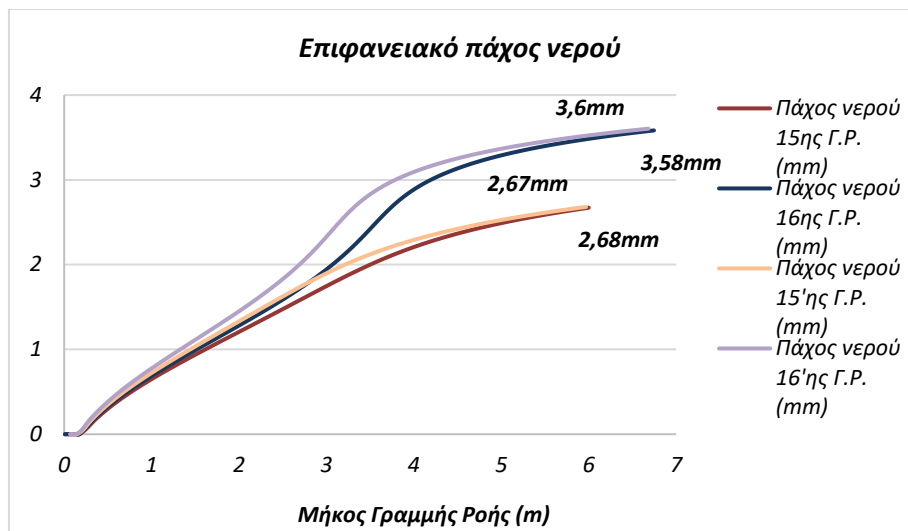
Γράφημα 5.2: Πάχος νερού για την 6<sup>η</sup> και 8<sup>η</sup> γραμμή ροής του μοντέλου δρόμου 1



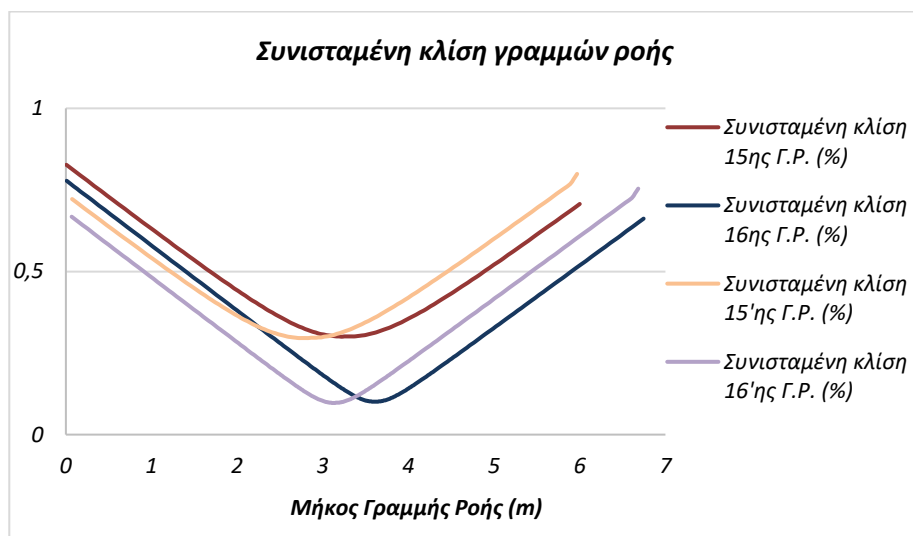
Γράφημα 5.3: Επιφανειακό πάχος νερού αντισυμμετρικών γραμμών ροής..

Καθώς πλησιάζουμε στον κύκλο το μήκος των γραμμών αυξάνεται και η κλίση μειώνεται, με αποτέλεσμα, να αυξάνεται το ύψος νερού στο τέλος κάθε γραμμής.

Μεγαλύτερο ύψος νερού υπολογίζεται για τις γραμμές ροής που απέχουν λιγότερο από 2,5m από το σημείο μηδενισμού της κλίσης. Η συνισταμένη κλίση είναι πολύ μικρή και το ύψος της υδατικής στρώσης επί του οδοστρώματος κυμαίνεται από 2,66mm έως 3,65mm.



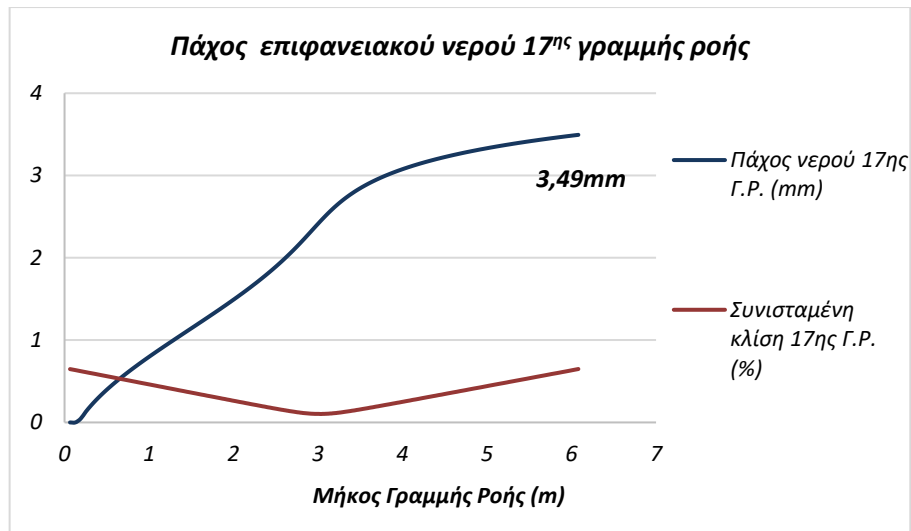
Γράφημα 5.4: Πάχος νερού γραμμών ροής που απέχουν  $L < 2,5m$  από το κέντρο του κύκλου.



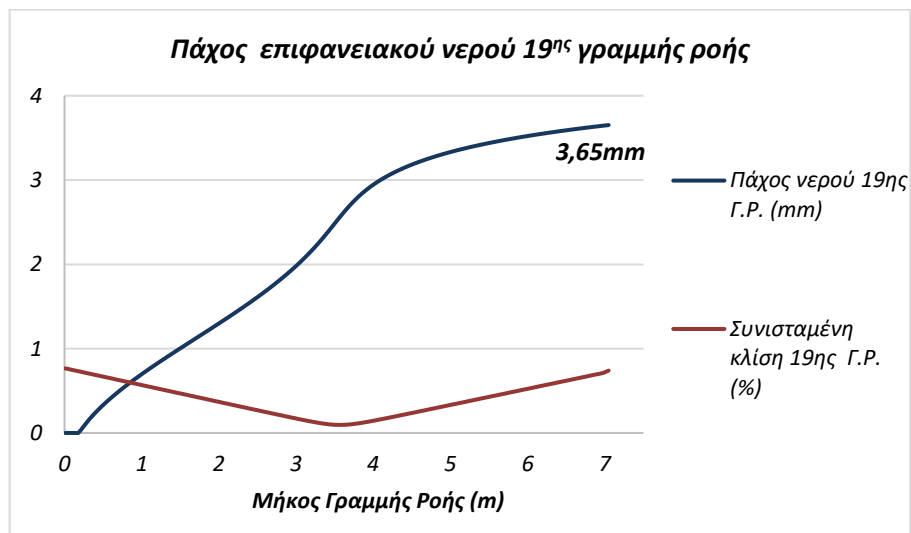
Γράφημα 5.5: Συνισταμένη κλίση γραμμών ροής

Το πάχος νερού που υπολογίζεται για τις γραμμές 16 και 16' παρουσιάζει μια απότομη αύξηση μετά τα 2,5m διαδρομής. Αυτό συμβαίνει διότι η τιμή της κλίσης στη θέση αυτή είναι πολύ μικρή ( $S < 0.2\%$ ), με τις μικρότερες τιμές να έχουν τα σημεία που βρίσκονται κοντά στα 3m ροής (Γράφημα 5.5).

Καλύτερα αντιληπτό γίνεται στα γραφήματα που ακολουθούν. Οι γραμμές ροής 17 και 19, έχουν τις μικρότερες κλίσεις και το μήκος για κάθε γραμμή είναι:  $L_{f17} = 6,08m$  και  $L_{f19} = 7,04m$ .



Γράφημα 5.6: Πάχος νερού για την 17η γραμμή ροής συναρτήσει της κλίσης.



Γράφημα 5.7: Πάχος νερού για την 19η γραμμή ροής συναρτήσει του μήκους.

Το πάχος νερού εμφανίζει μια απότομη αύξηση στις θέσεις όπου η κλίση παίρνει τιμές μικρότερες του 0,2% και το ύψος νερού στο τέλος της ροής ξεπερνά τα 3mm.

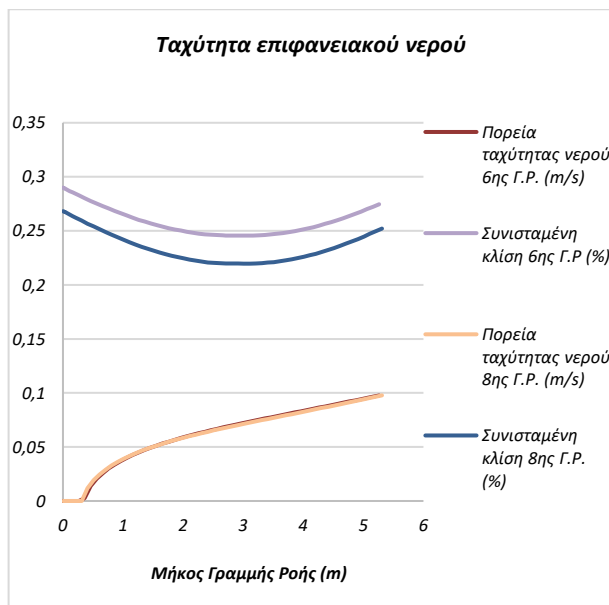
### Ταχύτητα Επιφανειακού Νερού

Για τις γραμμές ροής που μελετήθηκαν και βρίσκονται εκτός της κρίσιμης περιοχής οι πορείες των ταχυτήτων δεν διαφέρουν και πολλές φορές ταυτίζονται. Συγκεκριμένα, για τις πιο απομακρυσμένες γραμμές, που δεν εμφανίζουν έντονη καμπυλότητα, παρατηρήθηκε ομοιομορφία στην πορεία της ταχύτητας, με την μέγιστη ταχύτητα να είναι 0,114m/s (Γράφημα 5.8 και 5.9)

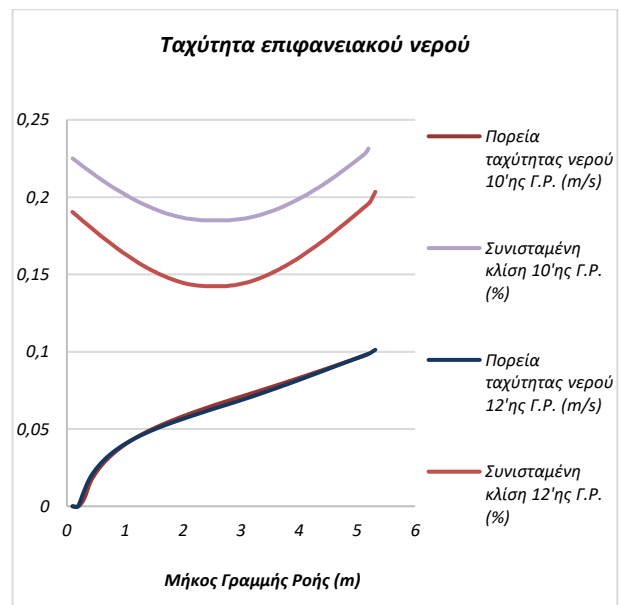


Έντονες αλλαγές και μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας έχουν οι γραμμές ροής που βρίσκονται εντός κρίσιμης περιοχής και απέχουν λιγότερο από  $2,5m$  από το κέντρο του κύκλου, λόγω χαμηλών κλίσεων και μεγάλων τιμών στο υπολογισμένο βάθος νερού κάθε γραμμής. Η πορεία, σε αυτές τις περιπτώσεις, αρχικά αυξάνεται, παρουσιάζοντας μια μικρή μείωση στη θέση όπου η κλίση παίρνει τιμές μικρότερες από  $0,2\%$ . Καθώς η κλίση αυξάνεται, η ταχύτητα αυξάνεται γραμμικά. Η μέγιστη ταχύτητα ισούται με  $0,136m/s$ , τιμή που αντιστοιχεί στην  $19^{η}$  γραμμή ροής με μήκος  $L_{f19}=7,04m$  και υπολογισμένο βάθος νερού  $BN=3,65mm$  (Γράφημα 5.9 και 5.10).

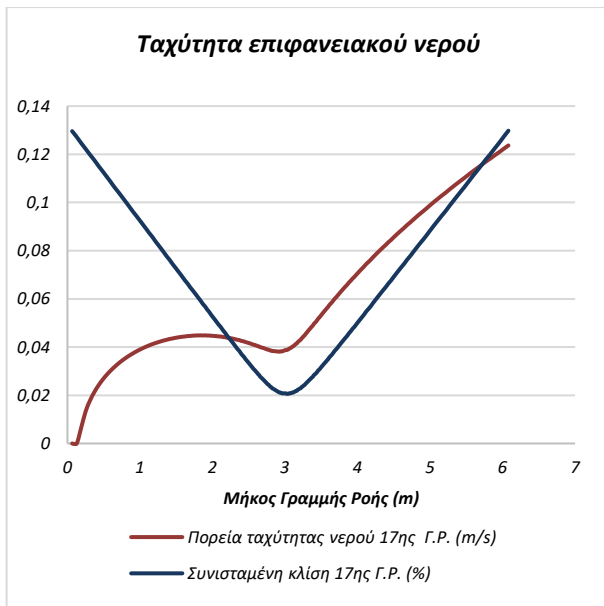
Στην περίπτωση αυτή, τα γραφήματα των ταχυτήτων νερού κάθε εξεταζόμενης γραμμής ροής είναι συναρτήσει της συνισταμένης κλίσης των επιμέρους διαστημάτων.



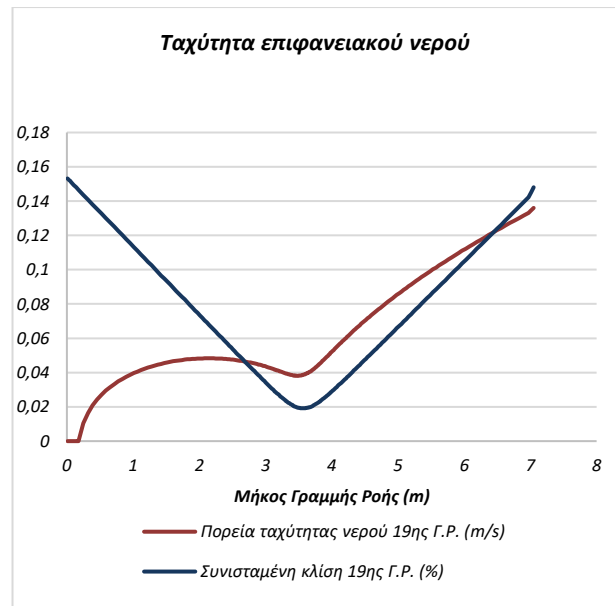
Γράφημα 5.8: Πορεία ταχύτητας συναρτήσει της συνισταμένης κλίσης γραμμών ροής 6<sup>ης</sup> και 8<sup>ης</sup>.



Γράφημα 5.9: Πορεία ταχύτητας συναρτήσει της συνισταμένης κλίσης γραμμών ροής 10<sup>ης</sup> και 12<sup>ης</sup>.



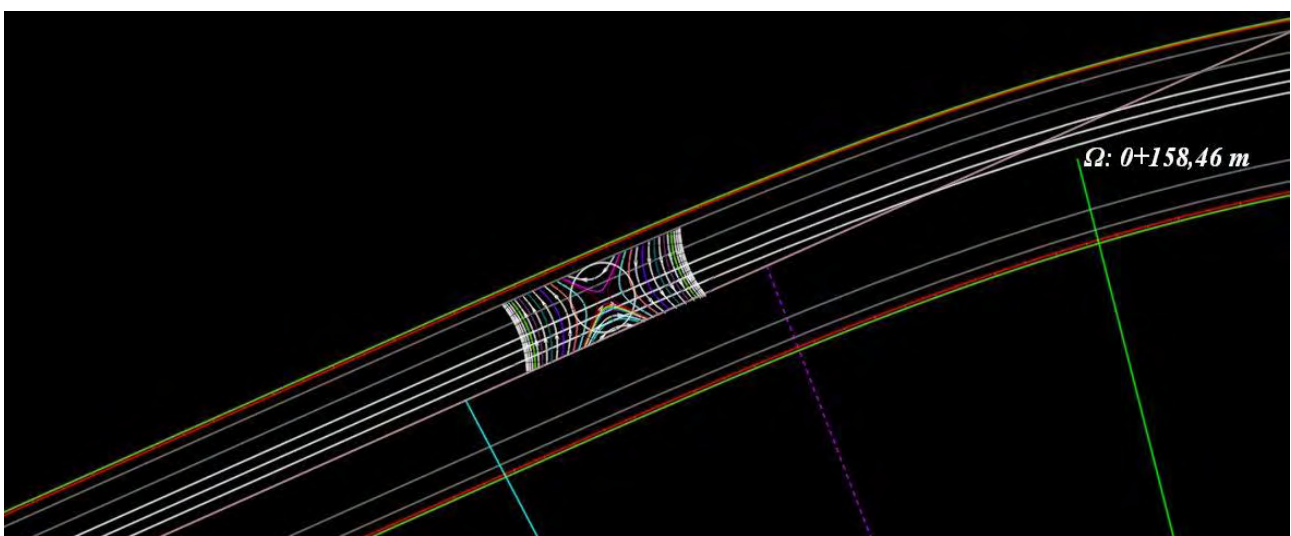
Γράφημα 5.10: Πορεία ταχύτητας συναρτήσει της συνισταμένης κλίσης 17<sup>ης</sup> γραμμής ροής.



Γράφημα 5.11: Πορεία ταχύτητας συναρτήσει της συνισταμένης κλίσης 19<sup>ης</sup> γραμμής ροής.

### Τροχιές Διερχόμενων Οχημάτων

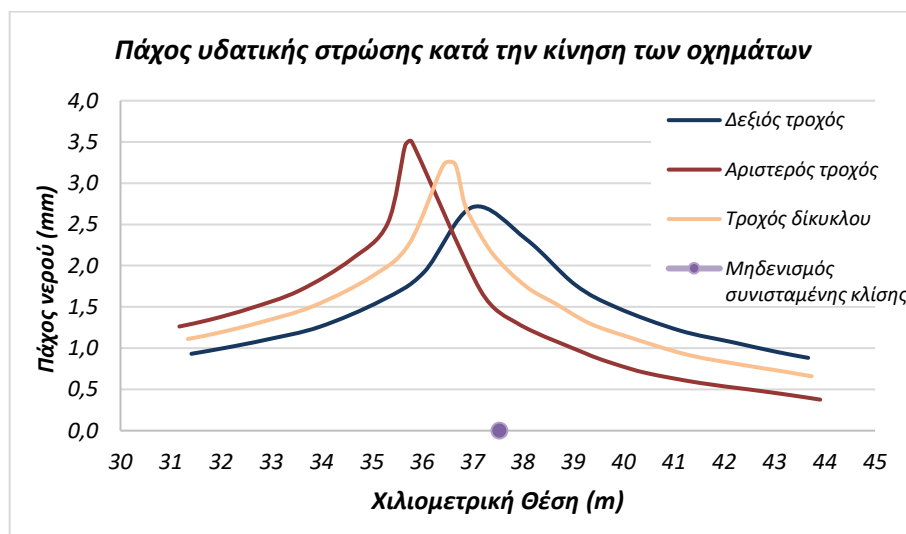
Τα διερχόμενα οχήματα κινούνται με φορά προς τα αριστερά. Ο δεξιός τροχός του αυτοκινήτου βρίσκεται παράλληλα και σε απόσταση 2,55m από τον άξονα του δρόμου, ενώ ο αριστερός τροχός σε απόσταση 0,95m. Η τροχιά που ακολουθεί η μηχανή είναι παράλληλη με τον άξονα του δρόμου σε απόσταση ίση με 1,75m. Η χιλιομέτρηση βαίνει αύξουσα ορίζοντας ως σημείο αναφοράς το τέλος της κλωθοειδούς, Ω, για το τμήμα του δρόμου που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5 (Ω:0+211,97m).



Σχήμα 5.5: Τροχιές διερχόμενων οχημάτων.

Τα οχήματα που κινούνται στο μοντέλο δρόμου 1, κατά την διάρκεια βροχοπτώσεως με ένταση  $60\text{mm/h}$ , συναντούν το μέγιστο ύψος νερού όταν βρίσκονται στην κρίσιμη περιοχή (κόκκινος κύκλος). Για  $5\text{m}$  πορείας, μέσα σε αυτήν την περιοχή, το νερό που συναντούν φτάνει σε ύψος  $3,50\text{mm}$  και  $3,46\text{mm}$ , ανάλογα με την θέση του τροχού. Όσο το αυτοκίνητο απομακρύνεται, η ποσότητα νερού που συναντάει μειώνεται και στο τελευταίο σημείο το πάχος είναι ίσο με  $0,93\text{mm}$ . Όσο αφορά την πορεία του δίκυκλου η μεγαλύτερη ποσότητα νερού που παρουσιάζεται στην πορεία του είναι  $3,20\text{mm}$ , σε σημεία που βρίσκονται εντός της κρίσιμης περιοχής. Όσο απομακρύνεται από το κέντρο, το πάχος νερού μειώνεται (Γράφημα 5.12).

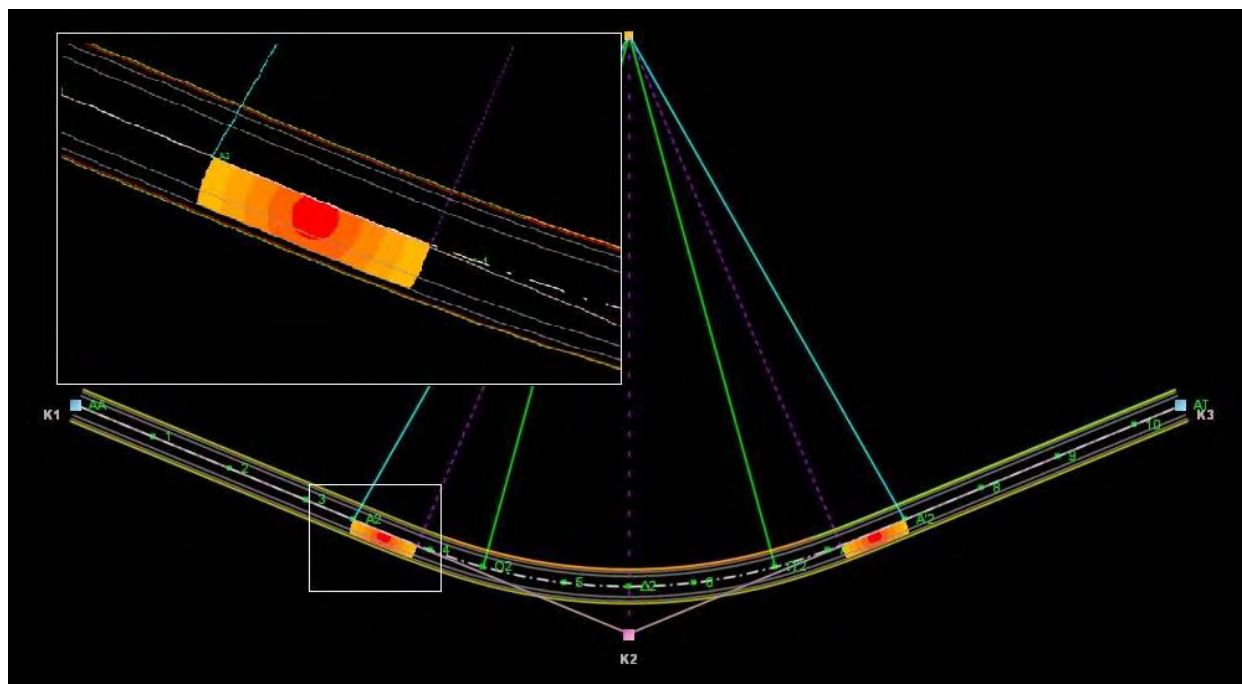
Από τις Εξισώσεις 3.2 και 3.3 το μέγιστο πάχος νερού που μπορεί να προκαλέσει υδρολίσθηση είναι  $WDs=2,43\text{mm}$  για ένα όχημα που κινείται με  $75\text{km/h}$  και τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου. Σε περίπτωση που η ταχύτητα του οχήματος αυξηθεί σε  $90\text{km/h}$  το μέγιστο πάχος μειώνεται, σε κάθε περίπτωση το ύψος νερού που υπολογίστηκε θεωρείται κρίσιμο για την δημιουργία ατυχήματος.



Γράφημα 5.12: Πάχος υδατικής στρώσης κατά την τροχιά κίνησης των οχημάτων Μοντέλο δρόμου 1.

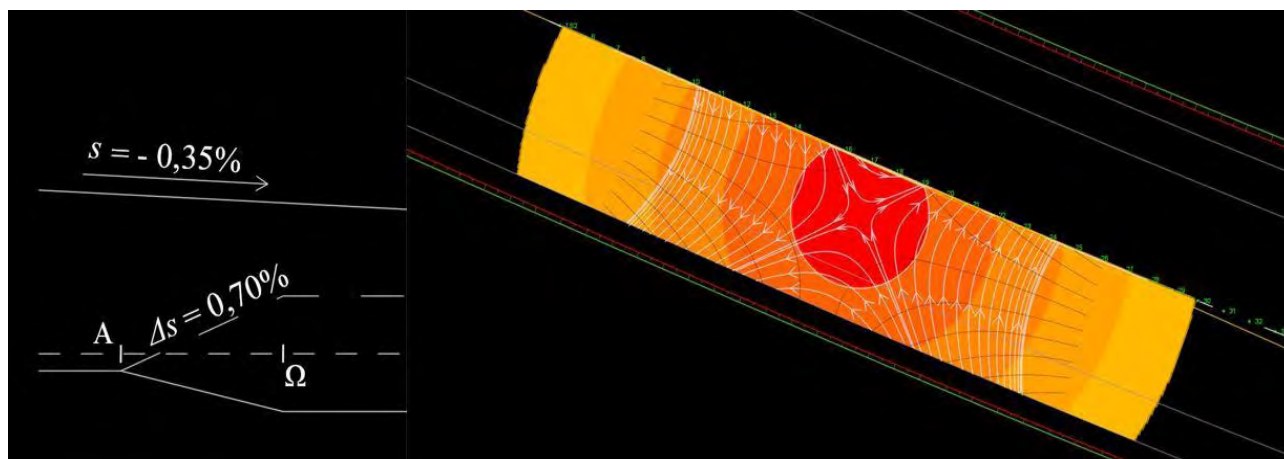
## 5.2 Εφαρμογή στο Μοντέλο Δρόμου 2

Στο μοντέλο δρόμου 2, στην οριζόντια χάραξη δεν έχουμε δεξιά στροφή, αλλά αριστερή. Η ακτίνα κυκλικού τόξου ισούται με  $200\text{m}$ , το μήκος κλωθοειδούς  $50\text{m}$ , σταθερά  $C=0,2\%$  και πρόσθετη κλίση οριογραμμών  $0,70\%$ .



Σχήμα 5.6: Μοντέλο δρόμου 2, αριστερή στροφή.

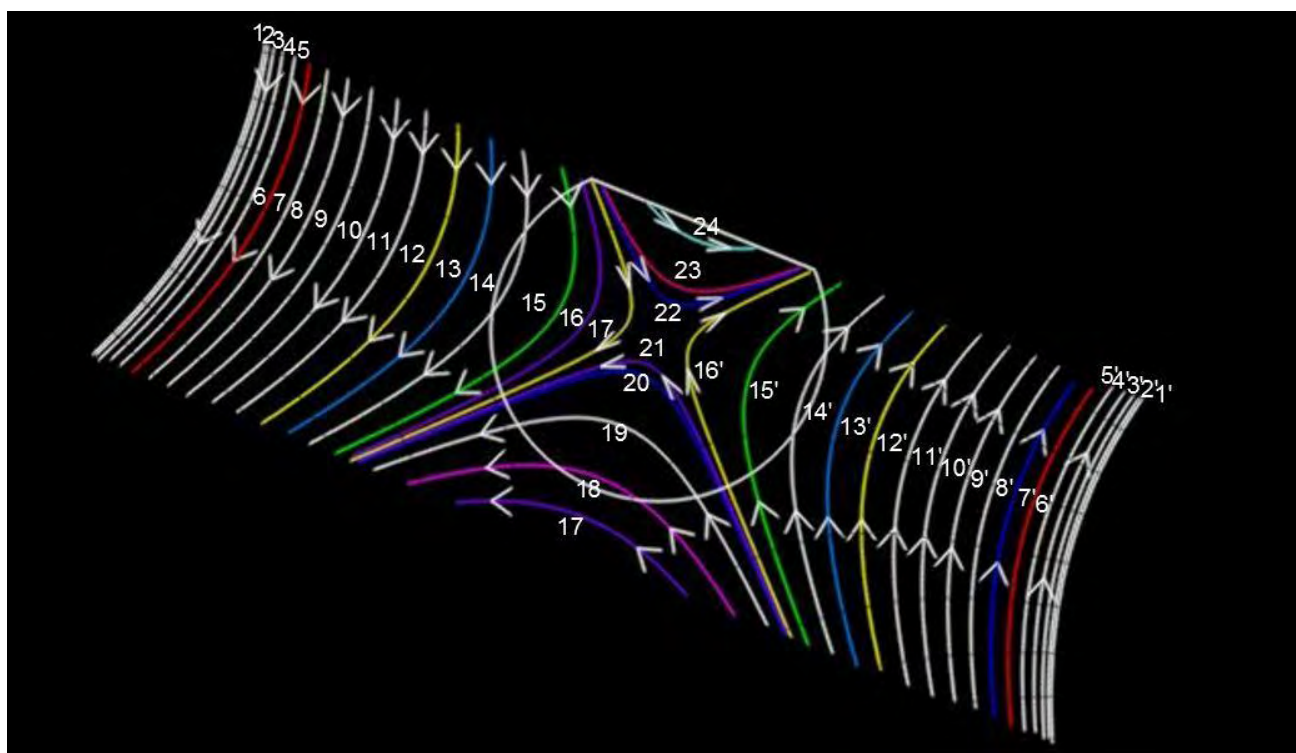
Το σημείο μηδενισμού της κλίσης βρίσκεται στο μέσο της εξωτερικής λωρίδας κυκλοφορίας. Χαρακτηρίζεται ως η δυσμενέστερη περίπτωση απορροής ομβρίων καθώς η κατά μήκος κλίση ισούται με το αντίθετο μισό της πρόσθετης κλίσης οριογραμμών. Η προβληματική περιοχή έχει την μέγιστη τιμή του εμβαδού των κυκλικών δομών (Καλιαμπέτσος, 2007).



Σχήμα 5.7: Κέντρο προβληματικής περιοχής μοντέλου δρόμου 2.

### Πάχος Υδατικής Στρώσης

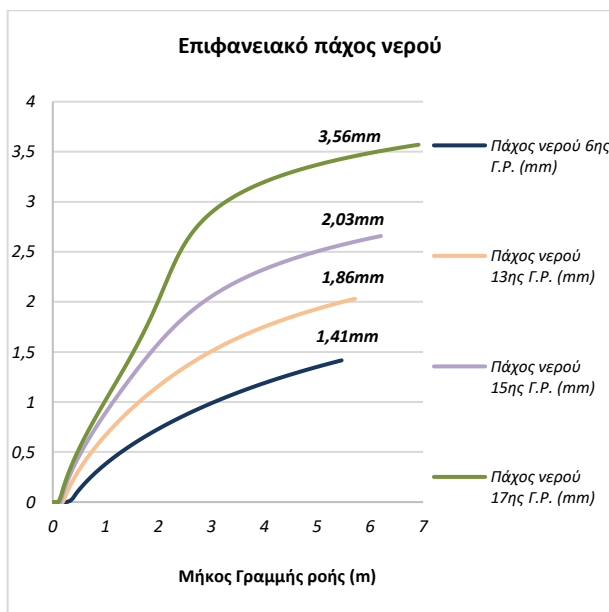
Στο μοντέλο δρόμου 2 η κρίσιμη περιοχή έχει μήκος περίπου 25m ενώ το κέντρο βρίσκεται στη Χ.Θ: 0+110,00m από την αρχή του δρόμου. Απαριθμούνται 42 γραμμές ροής, εκ των οποίων οι 17 βρίσκονται πριν την κρίσιμη περιοχή. Συμμετρικά και σε ίση απόσταση βρίσκονται άλλες 17 γραμμές ροής μετά την κρίσιμη περιοχή. Οι υπόλοιπες γραμμές ροής διέρχονται από το εσωτερικό του κύκλου είτε από την πλευρά του άξονα του δρόμου είτε από την εξωτερική πλευρά της λωρίδας (Σχήμα 5.8).



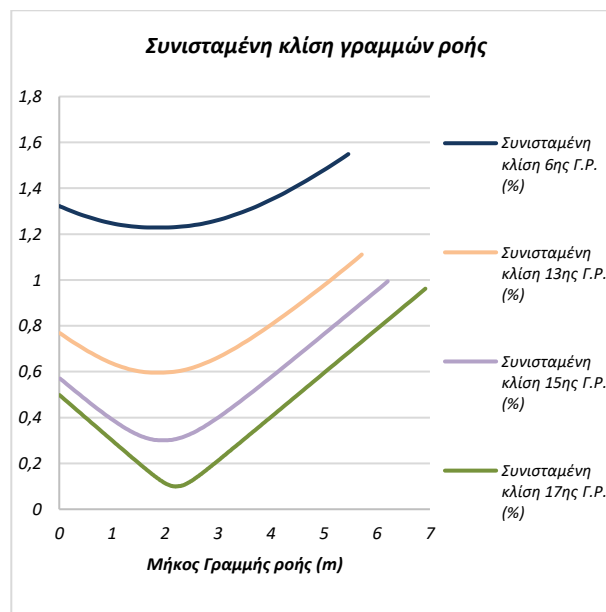
Σχήμα 5.8: Γραμμές ροής μοντέλου δρόμου 2

Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το ύψος των ομβρίων που εμφανίζονται στο οδόστρωμα.

Για τις γραμμές ροές όπου η κίνηση των ομβρίων γίνεται από τον άξονα προς την εξωτερική πλευρά της λωρίδας του δρόμου (γραμμές ροής 1 έως 17), τα αποτελέσματα ποιοτικά δεν διαφέρουν από την προηγούμενη ενότητα. Στις γραμμές ροής, που δεν εμφανίζουν έντονες μεταβολές στην κλίση, το πάχος νερού αυξάνεται ομοιόμορφα, γραμμές ροής 6, 13, 15 (Γράφημα 5.13). Αντίθετα στις γραμμές ροής που η τιμή της κλίσης είναι μικρότερη από 0,5% εμφανίζεται απότομη αύξηση του επιφανειακού νερού στη θέση εκείνη.



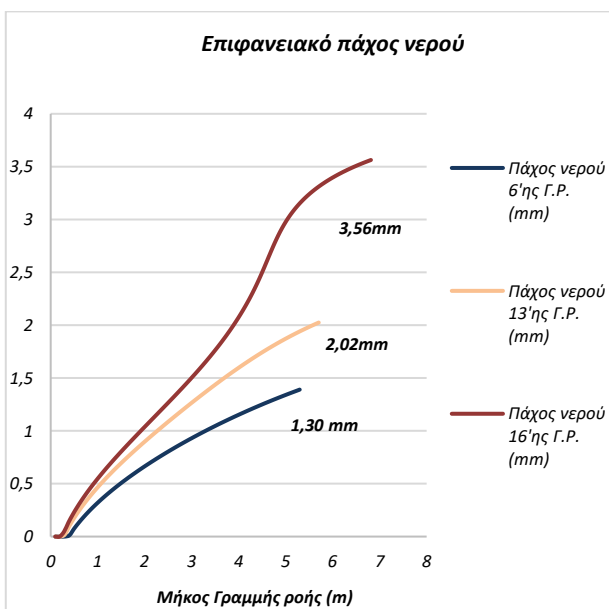
Γράφημα 5.13: Πάχος νερού για γραμμές μοντέλου δρόμου 2.



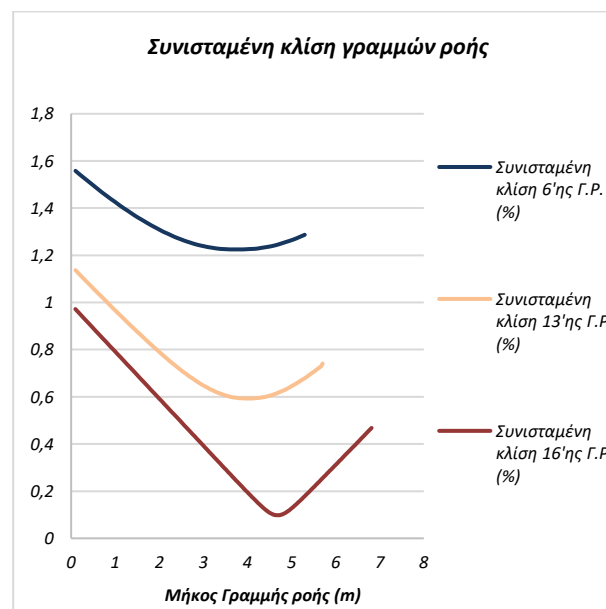
Γράφημα 5.14: Συνισταμένη κλίση γραμμών ροής

Οι αντίστοιχες γραμμές ροής που βρίσκονται μετά το σημείο μηδενισμού της συνισταμένης κλίσης παρουσιάζουν την ίδια ομοιομορφία στα αποτελέσματα, επίσης.

Η κίνηση του νερού γίνεται από την εξωτερική πλευρά και τα νερά συσσωρεύονται στον άξονα του δρόμου. Το μεγαλύτερο πάχος νερού,  $3,5mm$ , αντιστοιχεί στην γραμμή ροής 16' με  $L_{f16'} = 6,81mm$ .



Γράφημα 5.15: Πάχος νερού γραμμών ροής 6', 13' και 16'.

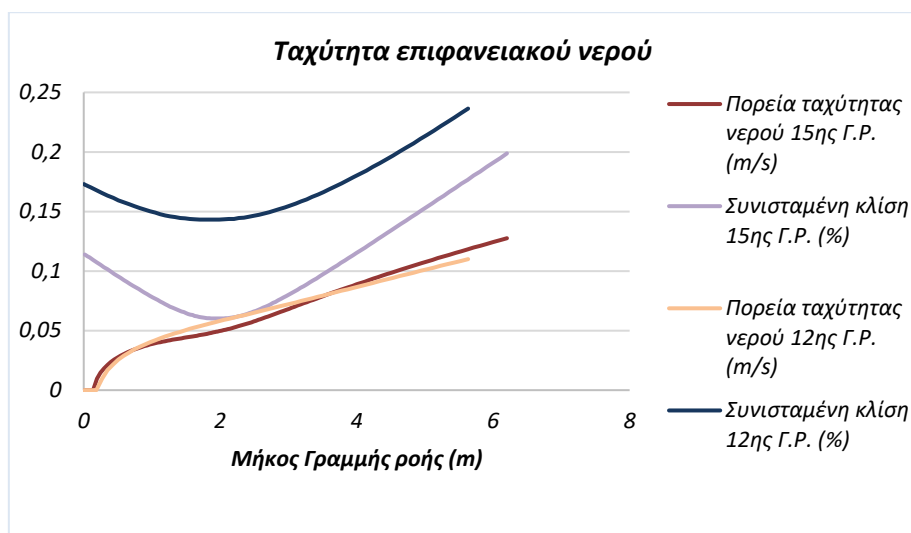


Γράφημα 5.16: Συνισταμένη κλίση γραμμών ροής 6', 13' και 16'

### Ταχύτητα Επιφανειακού Νερού

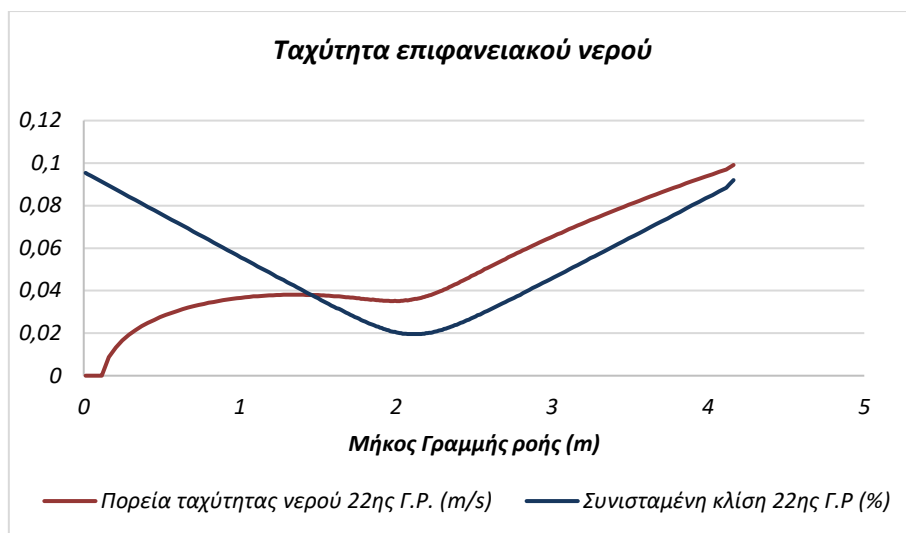
Η πορεία της ταχύτητας, όπως και το πάχος νερού, δεν διαφέρει ποιοτικά, συγκριτικά με το μοντέλου Δρόμου 1. Η ταχύτητα για γραμμές ροής με ήπιες κλίσεις δεν ξεπερνά τα  $0,1\text{ m/s}$  και δεν εμφανίζεται ανομοιομορφία στην πορεία. Καθώς η απόσταση των γραμμών από το κέντρο του κύκλου μειώνεται, υπάρχει αύξηση στην τελική ταχύτητα, που οφείλεται στις μικρότερες κλίσεις ( $S < 0,2\%$ ) και στο μεγαλύτερο πάχος νερού που αντιστοιχεί στην κάθε γραμμή.

Έντονες αλλαγές παρατηρούνται στην πορεία της ταχύτητας των γραμμών που απέχουν λιγότερο από  $2,5\text{ m}$  από το κέντρο της κρίσιμης περιοχής. Ποιοτικά η ταχύτητα αυξάνεται, παρουσιάζει μια μικρή μείωση στη θέση όπου η κατά μήκος κλίση παίρνει την μικρότερη τιμή και έπειτα αυξάνεται απότομα και γραμμικά μέχρι το τέλος της διαδρομής (Γράφημα 5.18).



Γράφημα 5.17: Ταχύτητα επιφανειακού νερού για τις γραμμές ροής 12 και 15.

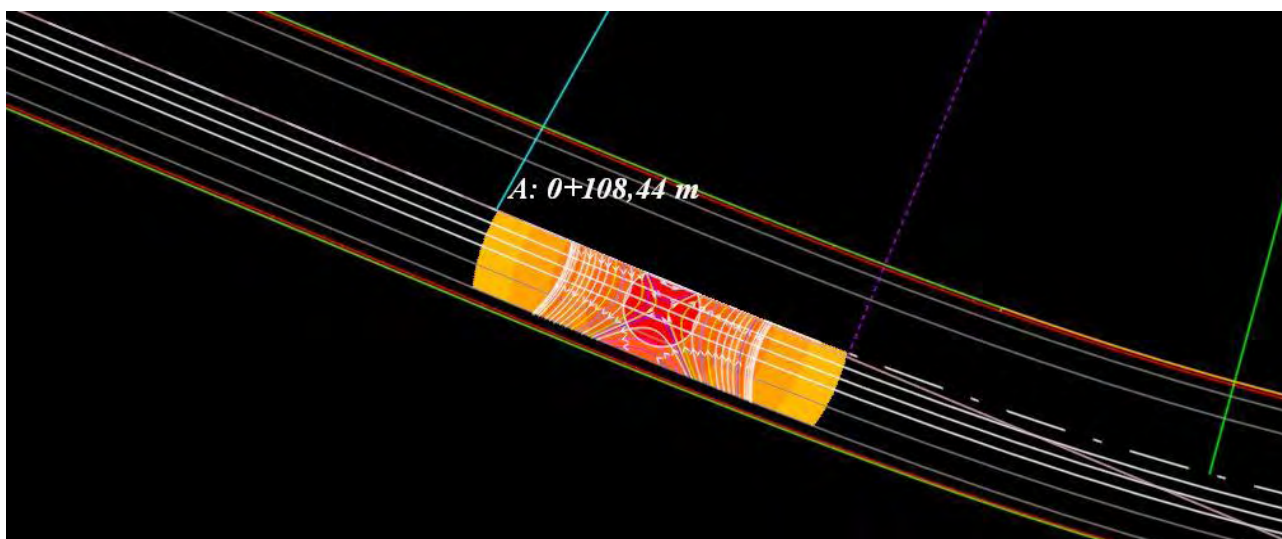




*Γράφημα 5.18: Ταχύτητα επιφανειακού νερού 22ης γραμμής ροής.*

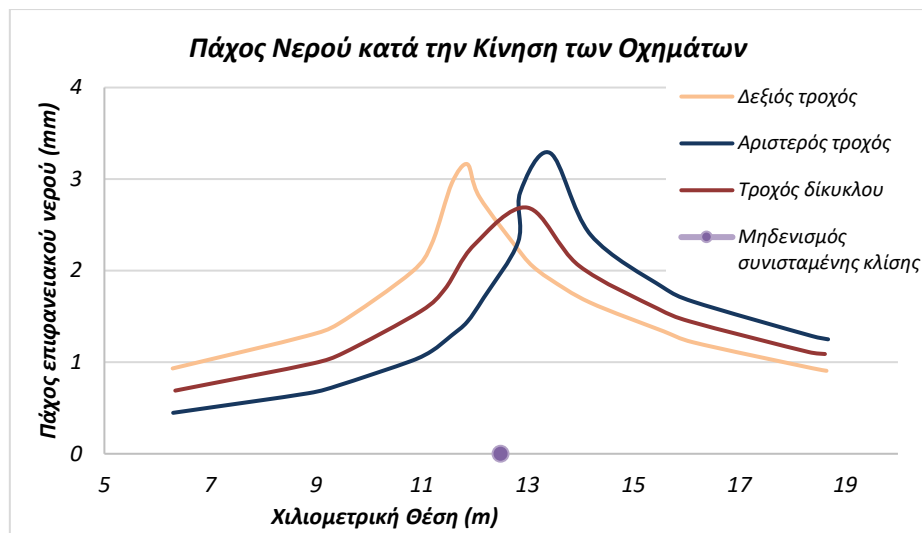
### Τροχιές Διερχόμενων Οχημάτων

Η χιλιομέτρηση στο μοντέλο δρόμου 2 γίνεται από την αρχή της οριζόντιας καμπύλης συναρμογής,  $A:0+108,433m$ , διότι η φορά κυκλοφορίας των οχημάτων είναι από τα δεξιά προς τα αριστερά.



*Σχήμα 5.9: Απεικόνιση διαδρομής διερχόμενων οχημάτων.*





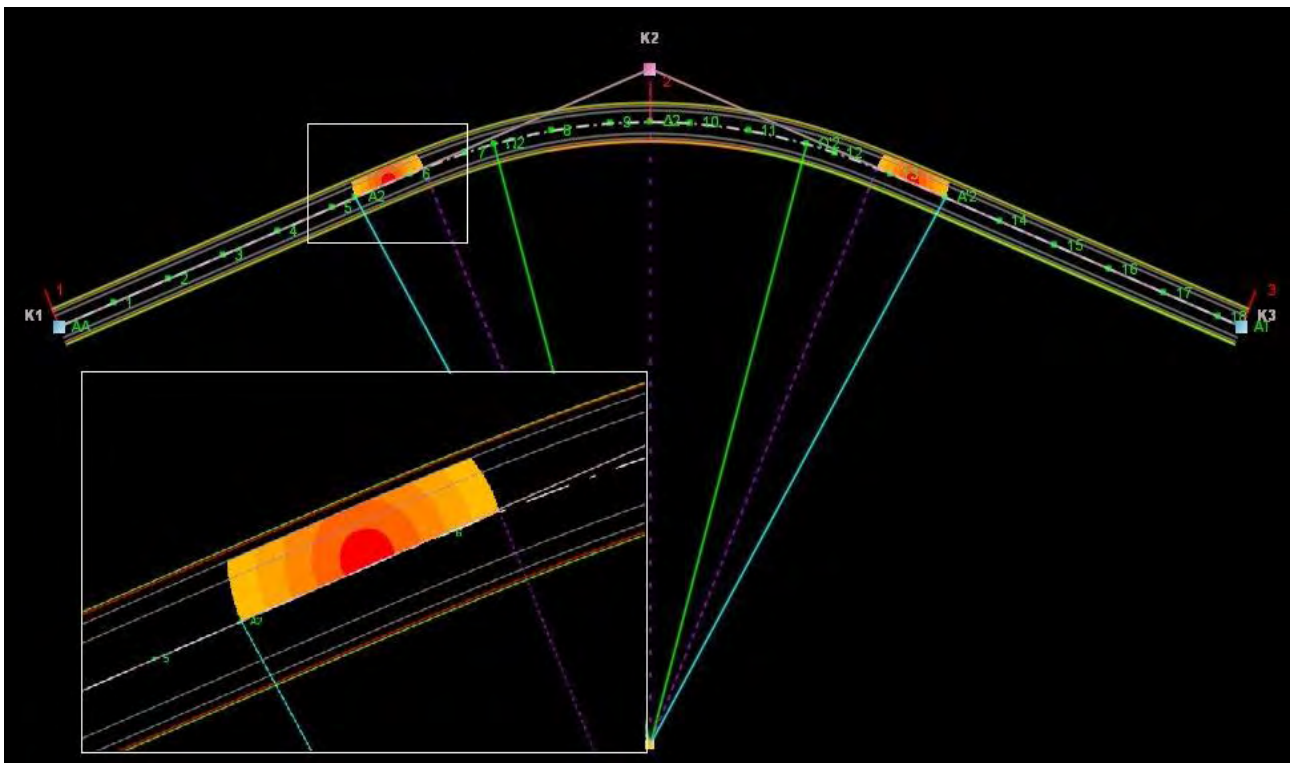
Γράφημα 5.19: Πάχος υδατικής στρώσης κατά την τροχιά κίνησης των οχημάτων  
Μοντέλο δρόμου 2.

Τα οχήματα διανύουν μια απόσταση  $10m$  όπου υπάρχει το περισσότερο νερό που εμφανίζεται στην επιφάνεια. Παρουσιάζεται μικρότερο ύψος, στην αρχή της προβληματικής περιοχής, για τον δεξιό τροχό από τον αριστερό, γιατί η φορά κίνησης των υδάτων γίνεται από την εξωτερική πλευρά προς τον άξονα του δρόμου στο τμήμα αυτό. Αντίθετα, καθώς απομακρύνεται από το σημείο μηδενισμού ο αριστερός τροχός συναντάει περισσότερο νερό αφού η φορά γίνεται αντίθετα. Το μέγιστο πάχος φτάνει στα  $3,5mm$  για περίπου  $5m$ , σε απόσταση  $35-40m$  από το  $A$ . Τα ύψη του επιφανειακού νερού που υπολογίστηκαν, χαρακτηρίζονται κρίσιμα και υπάρχει η πιθανότητα πρόκλησης του φαινομένου της υδρολίσθησης για οχήματα με ταχύτητα μεγαλύτερη των  $80km/h$ .

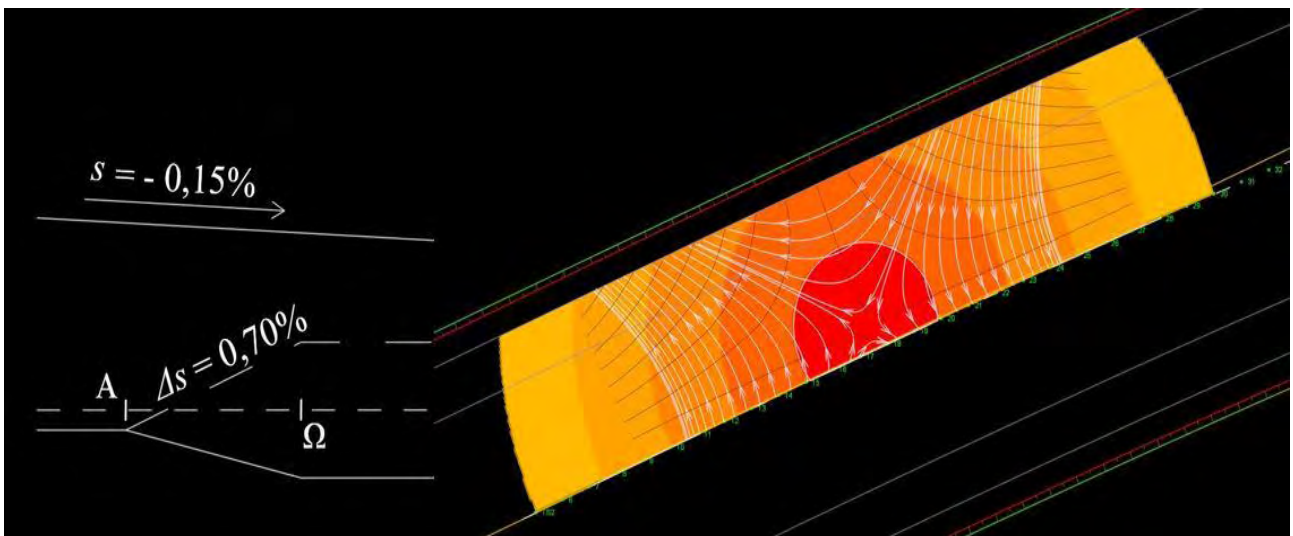
### 5.3 Εφαρμογή στο Μοντέλο Δρόμου 3

Πρόκειται για το μοντέλο δρόμου με τα εξής χαρακτηριστικά: αποτελείται από μια συμμετρική δεξιά στροφή με σταθερή αρνητική κατά μήκος κλίση ίση με  $0,15\%$ , ακτίνα κυκλικού τόξου  $200m$ , μήκος κλωθοειδούς  $50m$ , σταθερά  $C=0.16\%$  και πρόσθετη κλίση οριογραμμών  $0,70\%$ .

Σε αυτή την περίπτωση το κέντρο της προβληματικής περιοχής (σημείο μηδενισμού) βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά της εξωτερικής λωρίδας κυκλοφορίας.

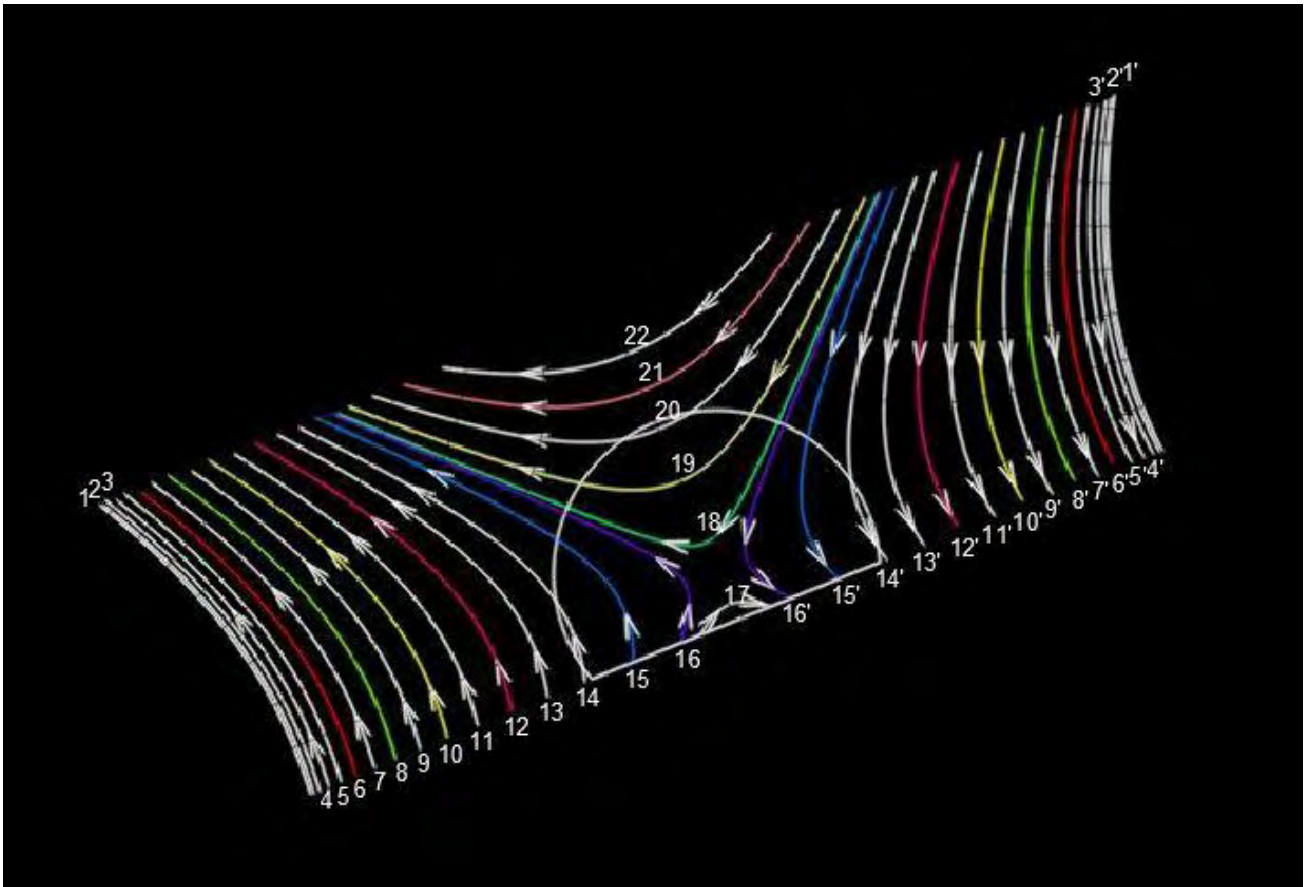


Σχήμα 5.10: Μοντέλο δρόμου 3.



Σχήμα 5.11: Κέντρο προβληματικής περιοχής για τον δρόμο 3.

Το πλήθος των γραμμών ροής που δημιουργήθηκαν στο συγκεκριμένο μοντέλο δρόμου είναι συνολικά 38 (Σχήμα 5.11).



*Σχήμα 5.12: Γραμμές ροής επί του οδοστρώματος για το μοντέλο δρόμου 3*

Τα αποτελέσματα για το ύψος επιφανειακού νερού δεν παρουσιάζουν ποιοτικά διαφορές με όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Για τον λόγο αυτό, κρίθηκε πώς τα γραφήματα για το επιφανειακό πάχος νερού καθώς και τα γραφήματα της ταχύτητας είναι προτιμότερο να παρουσιαστούν στο παράρτημα που ακολουθεί. Για τους δρόμους που ακολουθούν γίνεται ο σχολιασμός μόνο για το πάχος νερού που συναντάει το όχημα κατά την πορεία του.

### **Τροχιές Διερχόμενων Οχημάτων**

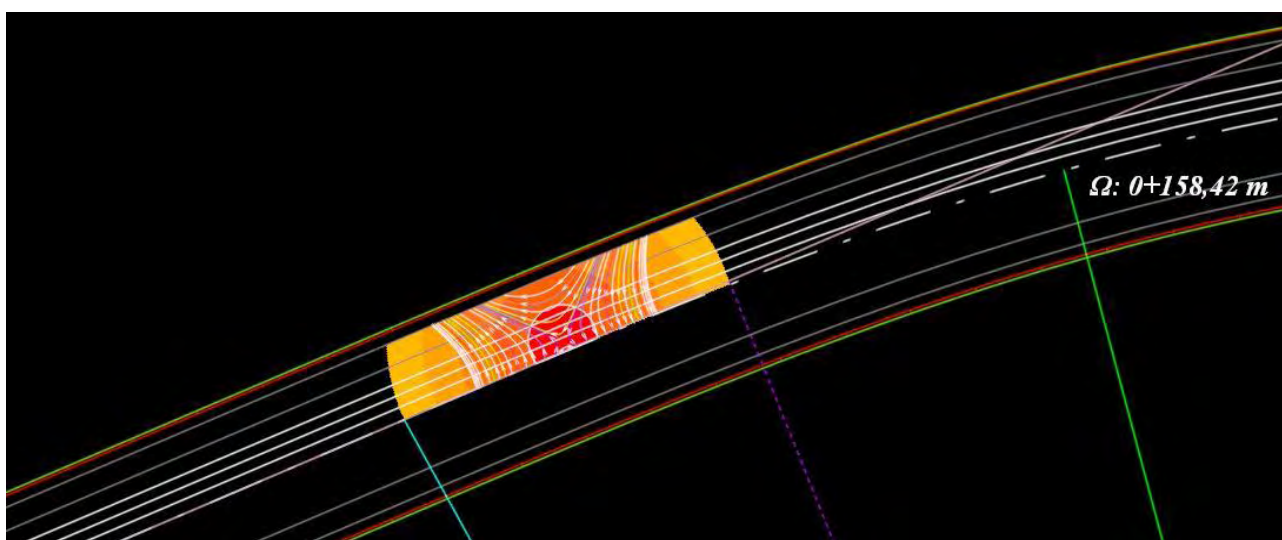
Στην περίπτωση δεξιάς στροφής, το σημείο αναφοράς της χιλιομέτρησης είναι το τέλος της κλωθοειδούς για το τμήμα του δρόμου που εξετάζεται. Το ύψος νερού που συναντάει το διερχόμενο όχημα στη θέση αυτή κυμαίνεται από  $0,28mm-0,98mm$  ανάλογα με την θέση τροχού.

Από το Σχήμα 5.12, όπου απεικονίζεται η πορεία των οχημάτων, διακρίνεται πως ο αριστερός τροχός, στη αρχή συναντάει μεγαλύτερα πάχη νερού καθώς βρίσκεται σε απόσταση  $0,95m$  από τον άξονα. Το νερό, σε εκείνη την περιοχή, κινείται με φορά από την εξωτερική λωρίδα προς τον άξονα,

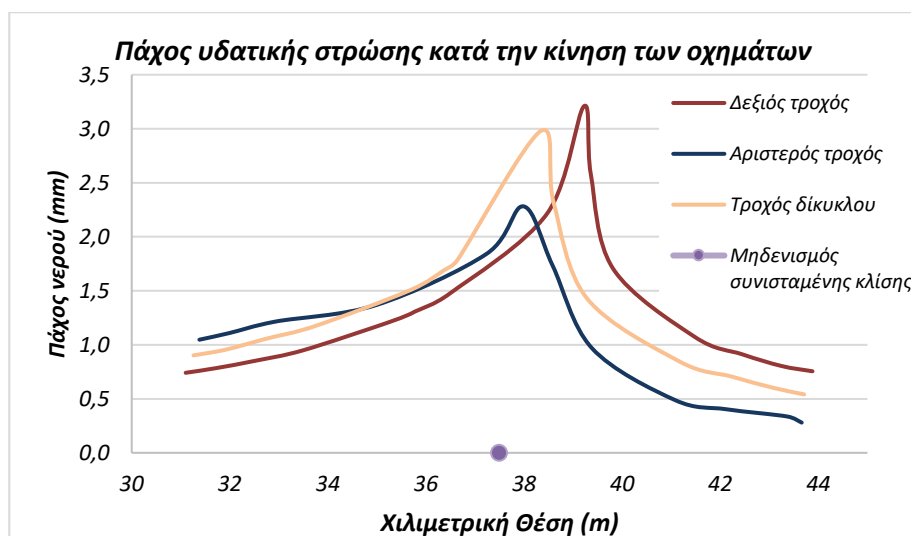
όπου το ύψος είναι μεγαλύτερο. Το μέγιστο πάχος που συναντάει είναι  $3,2\text{mm}$  σε απόσταση περίπου  $30\text{m}$  από το  $\Omega$ , όπου βρίσκεται κοντά στο κέντρο της προβληματικής περιοχής.

Ο δεξιός τροχός, αντίθετα στα πρώτα μέτρα βρίσκεται στην αρχή της ροής όπου το επιφανειακό νερό κυμαίνεται σε μικρό ύψος. Για τα επόμενα μέτρα της πορείας του το ύψος αυξάνεται καθώς πλησιάζει στο κύκλο.

Η τροχιά του δίκυκλου που βρίσκεται σε απόσταση  $1,75\text{m}$  από τον άξονα και ανάμεσα από τις τροχιές του αυτοκινήτου, συναντάει το μεγαλύτερο πάχος νερού σε απόσταση περίπου  $35\text{m}$  από το σημείο αναφοράς.



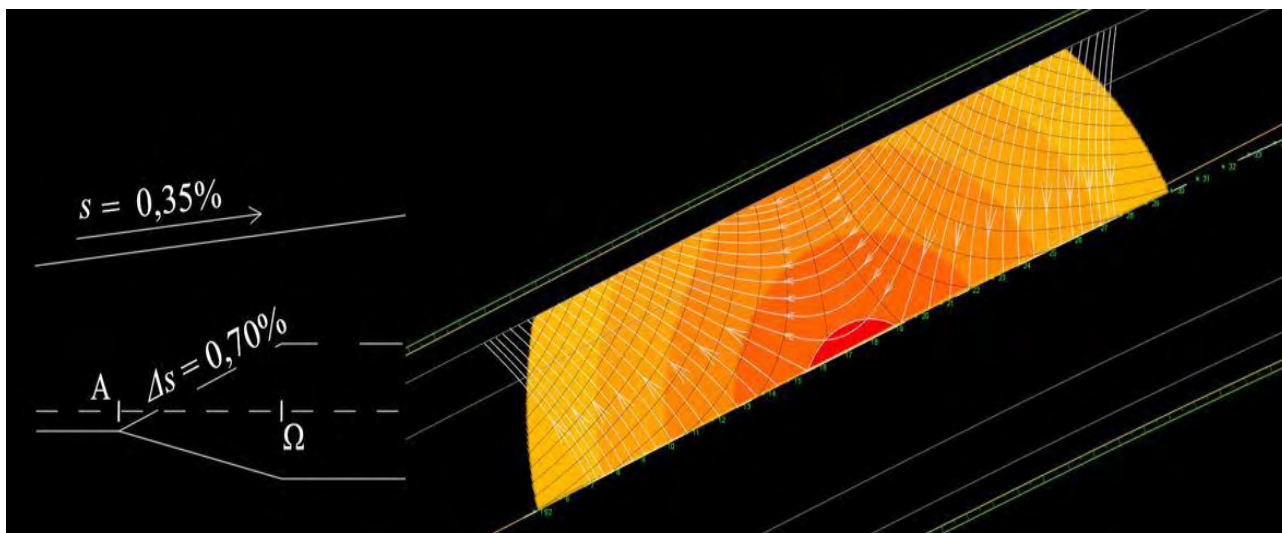
Σχήμα 5.13: Τροχιές διερχόμενων οχημάτων



Γράφημα 5.20: Πάχος υδατικής στρώσης κατά την τροχιά κίνησης των οχημάτων Μοντέλο δρόμου 3.

#### 5.4 Εφαρμογή στο Μοντέλο Δρόμου 4

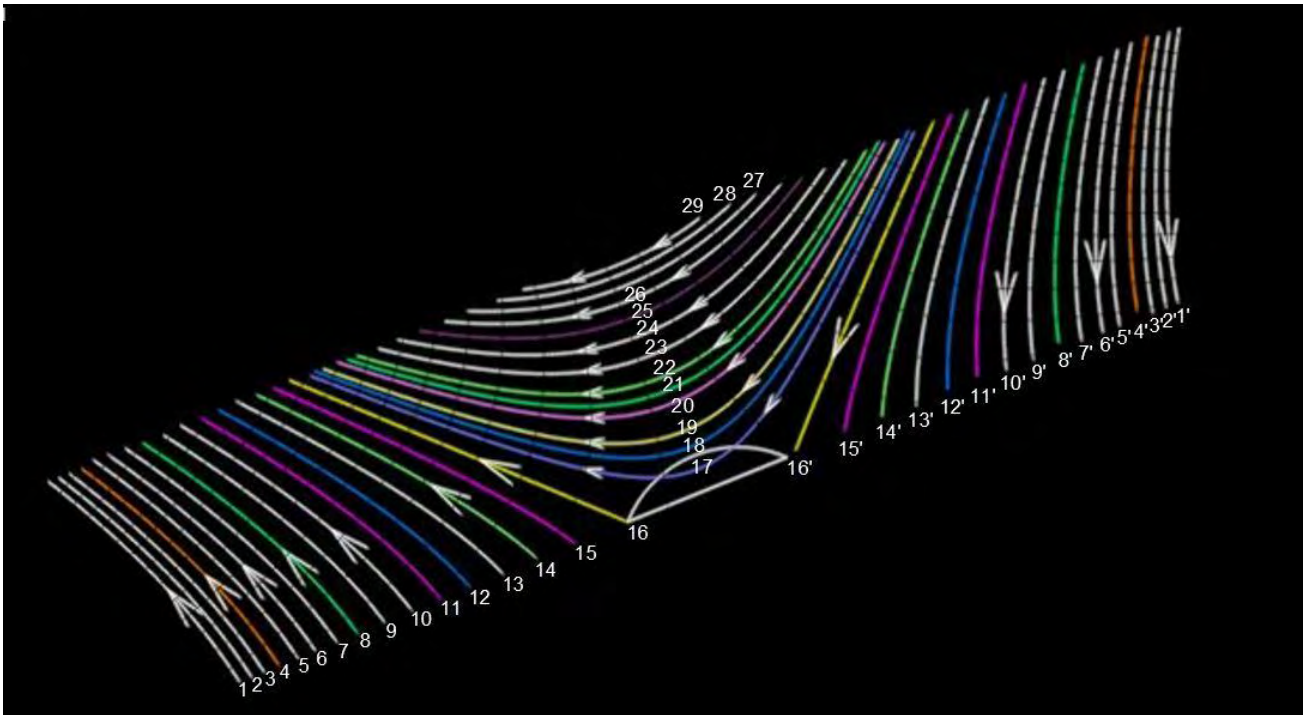
Ο δρόμος αποτελείται από μια συμμετρική δεξιά στροφή, η πρόσθετη κλίση οριογραμμών είναι 0,70% και η κατά μήκος κλίση του οδοστρώματος είναι 0,35%. Παρουσιάζεται το ίδιο μοντέλου δρόμου με το πρώτο με την διάφορα στο πρόσημο της κατά μήκος κλίσης. Η πρόσθετη κλίση οριογραμμών και η κατά μήκος κλίση είναι ομόσημα (ανωφέρεια). Σύμφωνα με τις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων πρέπει η διαφορά  $s-\Delta s > 0,5\%$ . Εδώ η διαφορά είναι 0,35 και θα έπρεπε σύμφωνα με αυτές να εμφανίζεται πρόβλημα στην απορροή. Αντιθέτως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14, όπου απεικονίζεται η προβληματική περιοχή, η έκταση της έχει σχεδόν μηδενιστεί, αφού μόνο ένα μικρό μέρος του κόκκινου κύκλου μπορούμε να διακρίνουμε. Αυτό σημαίνει ότι όταν η κλίση και η πρόσθετη κλίση οριογραμμών έχουν το ίδιο πρόσημο και είναι μεγαλύτερα από με 0,5% η απορροή εξασφαλίζεται.



Σχήμα 5.14: Απεικόνιση προβληματικής περιοχής για το μοντέλο δρόμου 4.

Σχεδιάστηκαν 45 γραμμές ροής, εκ των οποίων στις περισσότερες το υπολογισμένο πάχος νερού δεν ξεπερνά τα 2mm. Υπάρχουν γραμμές που αν και έχουν αποδεκτές τιμές από πλευράς απορροής, εξαιτίας του μεγάλου μήκους ροής ( $L_f \approx 15m$ ) το πάχος της υδατικής στρώσης αυξάνεται.





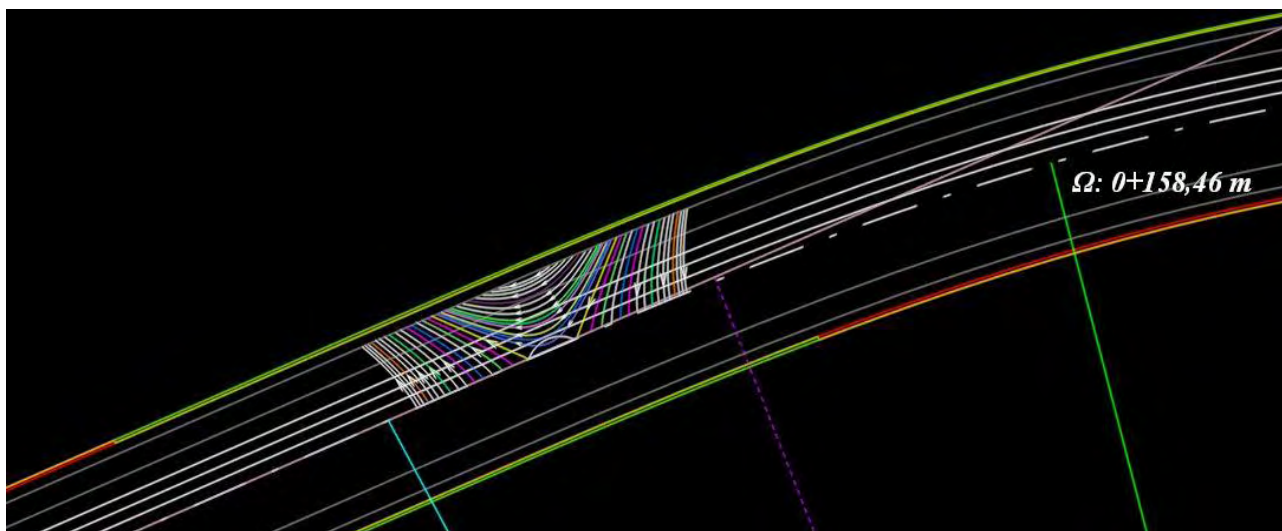
Σχήμα 5.15: Γραμμές ροής επί του οδοστρώματος για τον δρόμο 4.

### Τροχιές Διερχόμενων Οχημάτων

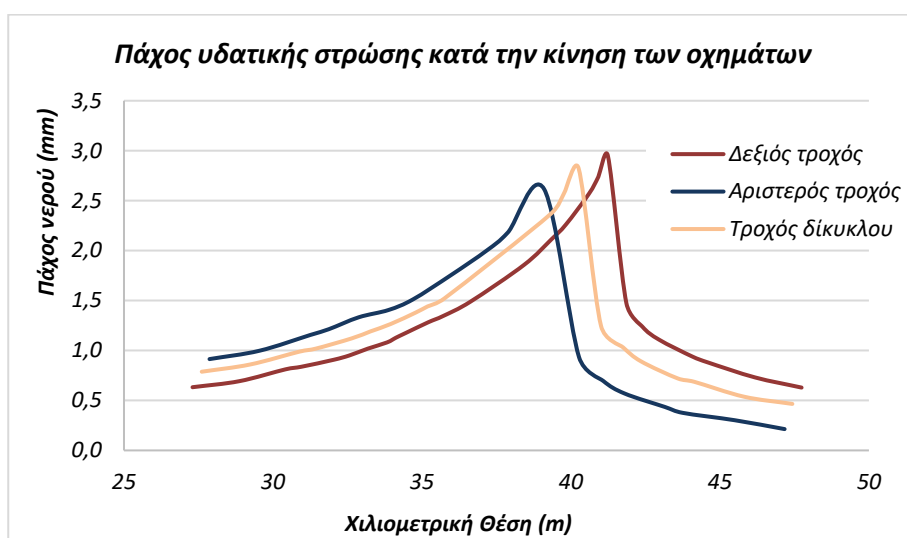
Στην περίπτωση του δρόμου 4, τα οχήματα συναντούν τα μικρότερα πάχη επιφανειακού νερού συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιπτώσεις δρόμων που μελετήθηκαν. Ο αριστερός τροχός του αυτοκινήτου συναντάει μεγαλύτερα πάχη σε απόσταση  $40m$  από το τέλος της κλωθοειδούς,  $\Omega$ , ( $BN_{max}=2.62mm$ ), ενώ ο δεξιός, σε απόσταση  $41m$  ( $BN_{max}=2,95mm$ ).

Κατά την τροχιά κίνησης του δίκυκλου τα μεγαλύτερα πάχη κυμαίνονται από  $2,38mm$ - $2,88mm$  για περίπου  $3m$  πορείας.

Για τον δυσμενέστερο συνδυασμό κατάστασης της επιφάνειας κυκλοφορίας και πίεσης ελαστικών, το υπολογισμένο βάθος θεωρείται υπό περιπτώσεις κρίσιμο σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.



Σχήμα 5.16: Διαδρομή οχήματος



Γράφημα 5.21: Πάχος υδατικής στρώσης κατά την τροχιά κίνησης των οχημάτων Μοντέλο δρόμου 4.





## 6. Συμπεράσματα

---

Η ύπαρξη του νερού επί του οδοστρώματος θέτει σε κίνδυνο την κυκλοφορία των διερχομένων οχημάτων, καθώς είναι ο κύριος παράγοντας που ευθύνεται για την εμφάνιση του φαινομένου της υδρολίσθησης. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο συνδυασμός εγκάρσιας και κατά μήκος κλίσης της οδού οδηγούν στην εμφάνιση νερού στην επιφάνεια κυκλοφορίας, στις καμπύλες περιοχές των οδών και συγκεκριμένα μέσα στις καμπύλες συναρμογής (κρίσιμη περιοχή).

Το μήκος της διαδρομής ροής ( $L_f$ ), το βάθος υφής του οδοστρώματος ( $BY$ ), η συνισταμένη κλίση ( $S_r$ ) και η ένταση της βροχόπτωσης ( $i$ ) είναι οι μεταβλητές που καθορίζουν το πάχος της υδατικής στρώσης επί της επιφάνειας. Η αύξηση του μήκους κατά 5%, έχει σαν αποτέλεσμα την ποσοστιαία μεταβολή του πάχους κατά 3,17%. Υπάρχουν περιπτώσεις που το ανάγλυφο της επιφάνειας επαρκεί για να μην δημιουργηθεί ροή όμβριων και η υδατική στρώση νερού είναι μικρότερη από το βάθος υφής του ανάγλυφου. Αυτό σημαίνει πως για μικρότερο βάθος υφής της επιφάνειας θα δημιουργηθεί ροή ομβρίων μικρού πάχους. Μεγαλύτερο πάχος εμφανίζεται όταν αυξηθεί η ένταση βροχόπτωσης. Για μικρές εντάσεις βροχόπτωσης το ύψος είναι αμελητέο έως και μηδενικό. Για εντάσεις μεγαλύτερες των  $100\text{mm/h}$ , το επιφανειακό νερό που εμφανίζεται θεωρείται κρίσιμο και οι οδηγοί θα πρέπει ή να απομακρύνονται από τις λωρίδες ή να περιορίζονται σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος υδρολίσθησης.

Ο βασικός μαθηματικός τύπος, υπολογίζει το πάχος νερού όταν η συνισταμένη κλίση της γραμμής ροής είναι σταθερή. Στους δρόμους, και συγκεκριμένα στην κρίσιμη περιοχή, όπου ο υπολογισμός του πάχους αποτελεί τον βασικό στόχο της εργασίας, οι γραμμές ροής έχουν μεταβαλλόμενη κλίση. Με σκοπό να υπολογιστεί το πάχος της υδατικής στρώσης στις συγκεκριμένες περιοχές ο τύπος προσαρμόστηκε ώστε να εφαρμόζεται τμηματικά. Κάθε τμήμα θεωρήθηκε ότι έχει σταθερή κατά μήκος κλίση και η επίδραση των προηγούμενων (υψηλότερων) τμημάτων ποσοτικοποιήθηκε με την εισαγωγή του ισοδύναμου μήκους.

Στις περιπτώσεις γραμμών, όπου η συνισταμένη κλίση είναι σταθερή, ο βασικός μαθηματικός τύπος και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε έδιναν τα ίδια αποτελέσματα, ανεξάρτητα από το μήκος βήματος. Αντίστοιχα για τις γραμμές ροής με μεταβαλλόμενη κλίση (κυρτή ή κοίλη καμπύλη), τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του τύπου συγκλίνουν όσο το μήκος των διαστημάτων μειώνεται. Όμοια στις περιπτώσεις γραμμών ροής που είναι συνδυασμός (μεταβαλλόμενη και σταθερή κλίση) το πάχος νερού που υπολογίζεται ανά διαστήματα συγκλίνει όσο το μήκος μειώνεται. Διαφορά δεν

εμφανίζεται στο τελικό ύψος νερού για γραμμή ροής με ίδια χαρακτηριστικά ( $L_f$ ,  $H_o$ ,  $R$ ), είτε πρόκειται για κοίλη είτε για κυρτή καμπύλη, όταν η μέση κλίση είναι ίδια.

Από τη εφαρμογή της μεθόδου του ισοδύναμου μήκους στις περιπτώσεις των δρόμων που δημιουργήθηκαν, το ύψος επιφανειακού νερού στο τέλος των γραμμών ροής που απέχουν περισσότερο από το σημείο μηδενισμού της συνισταμένης κλίσης κυμαίνεται σε μικρές τιμές, ανάλογα με το συνολικό μήκος της γραμμής και την συνισταμένη κλίση. Μεγαλύτερο ύψος νερού συσσωρεύεται στο τέλος των γραμμών που διέρχονται από τον κύκλο. Απέχουν λιγότερο από  $l < 2m$  και η κλίση που υπολογίζεται είναι πολλές φορές μικρότερη από 2%.

Κατά την πορεία κίνησης των οχημάτων, το ύψος του επιφανειακού νερού, το οποίο είναι ικανό να προκαλέσει υδρολίσθηση, κυμαίνεται από  $1,5mm$  έως  $5mm$ . Η τιμή του αποδεκτού ύψους έναντι υδρολίσθησης μεταβάλλεται ανάλογα με την επιφάνεια του οδοστρώματος και την κατάσταση των ελαστικών του οχήματος. Στις περιπτώσεις των οδών που μελετήθηκαν κατά την κίνηση των διερχόμενων οχημάτων, παρουσιάζεται μικρό ύψος, στην αρχή της κρίσιμης περιοχής. Καθώς η απόσταση από το κέντρο του κύκλου (σημείο μηδενισμού της κλίσης) μειώνεται το επιφανειακό ύψος αυξάνεται και υπάρχουν περιπτώσεις όπου το όχημα κινείται για  $5m$  σε στρώμα νερού μεγαλύτερο των  $3mm$ .

Στις περιπτώσεις των δρόμων που δημιουργήθηκαν, αλλά και των γραμμών ροής του 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου, η ταχύτητα του νερού, που εμφανίζεται στην επιφάνεια, συνεχώς αυξάνεται για όλες τις γραμμές. Ποιοτικά, για ήπιες κλίσεις ( $S > 1\%$ ) δεν εμφανίζεται ανομοιομορφία στην πορεία. Έντονες αλλαγές και μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας έχουν οι γραμμές ροής που βρίσκονται εντός κρίσιμης περιοχής και απέχουν λιγότερο από  $2,5m$  από το κέντρο του κύκλου, λόγω χαμηλών κλίσεων και μεγάλων τιμών στο υπολογισμένο βάθος νερού κάθε γραμμής. Η πορεία, σε αυτές τις περιπτώσεις, αρχικά αυξάνεται, παρουσιάζοντας μια μικρή μείωση στη θέση όπου η κλίση παίρνει τιμές μικρότερες από 0,2%. Καθώς η κλίση αυξάνεται, η ταχύτητα αυξάνεται γραμμικά.

Σαν συνέχεια της έρευνας προτείνεται η περίπτωση που στον άξονα του δρόμου υπήρχε κεντρική νησίδα χωρίς αποστραγγιστικά έργα και χώριζε τα 2 ρεύματα κυκλοφορίας. Λόγω της νησίδας το νερό που εμφανίζεται στην επιφάνεια θα καταλήξει να κινείται εφαπτόμενο σε αυτήν, όταν η κίνηση του γίνεται από την εξωτερική πλευρά του δρόμου προς τον άξονα. Ο υπολογισμός του πάχους προτείνεται να γίνει, στην περίπτωση ύπαρξης νησίδας, στην περιοχή που η ροή θα γίνεται από τον άξονα προς την εξωτερική πλευρά του δρόμου.

## 7. Αναφορές

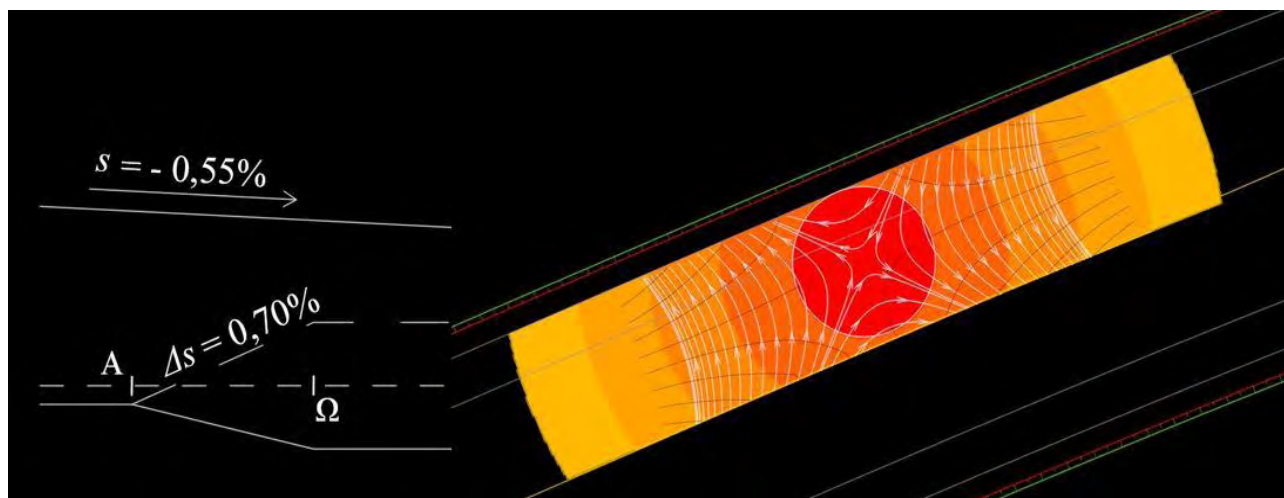
---

- [1] Καλιαμπέτσος, Γ.Δ., (2017), *Ανάπτυξη και βελτιστοποίηση αλγορίθμων για τον σχεδιασμό συγκοινωνιακών έργων*, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- [2] Σουμπάκας, Ε., (2016), *Διερεύνηση του προβλήματος της απορροής των ομβρίων σε κρίσιμες για την ασφάλεια περιοχές των οδικών χαράξεων*, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- [3] Αλιμονάκης Θ., (2018), *Διερεύνηση απορροής των ομβρίων σε κρίσιμες περιοχές του οδοστρώματος*, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- [4] Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας & Δημοσίων Έργων, (2001). *Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων ( OMOE ). Τεύχος 3: Χαράξεις ( OMOE - X )*.
- [5] B.M. Gallaway & D.L Ivey & G.Hayes & W.B. Ledbetter & R.M. Olson & D.L Woods & R.F Schiller, (1979), *Pavement and geometric design criteria for minimizing hydroplaning*.
- [6] OKTAY GOVEN & JOEL G. MELVILLE, (1999), *Pavement cross slope - A technical review*, Auburn University, Auburn.
- [7] AASHTO, *Highway Drainage Guidelines and transportation Officials*, 2007
- [8] D.B. Chaithoo & D. Allopi, (2012), *Re-evaluating superelevation in relation to drainage requirements and vehicle dynamics*, Durban University of Technology, South Africa.
- [9] Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας & Δημοσίων Έργων, (2002). *Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων ( OMOE ). Τεύχος 8: Αποχέτευση-Στράγγιση, Υδραυλικά, Έργα Οδών ( OMOE-ΑΣΥΕΟ )*.
- [10] Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών & Δικτύων,(2003), Εγκύκλιος 34 της 20/12/2013, *Δημοσίευση υπουργικής απόφασης «Προσθήκη-Συμπλήρωση Άρθρου στα Τιμολόγια Έργων Οδοποιίας*.
- [11] Κοσμέτου Π., (2014), *Ανάλυση και αξιολόγηση της υφής ασφαλτικών οδοστρωμάτων*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [12] Φίλικας Μ. & Ψαριώτης Α. & Τσάγγος Β., 2016, *Υπολογισμός και μελέτη ανοιχτών αγωγών Διαφόρων διατομών- υλικών*, Πτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα.

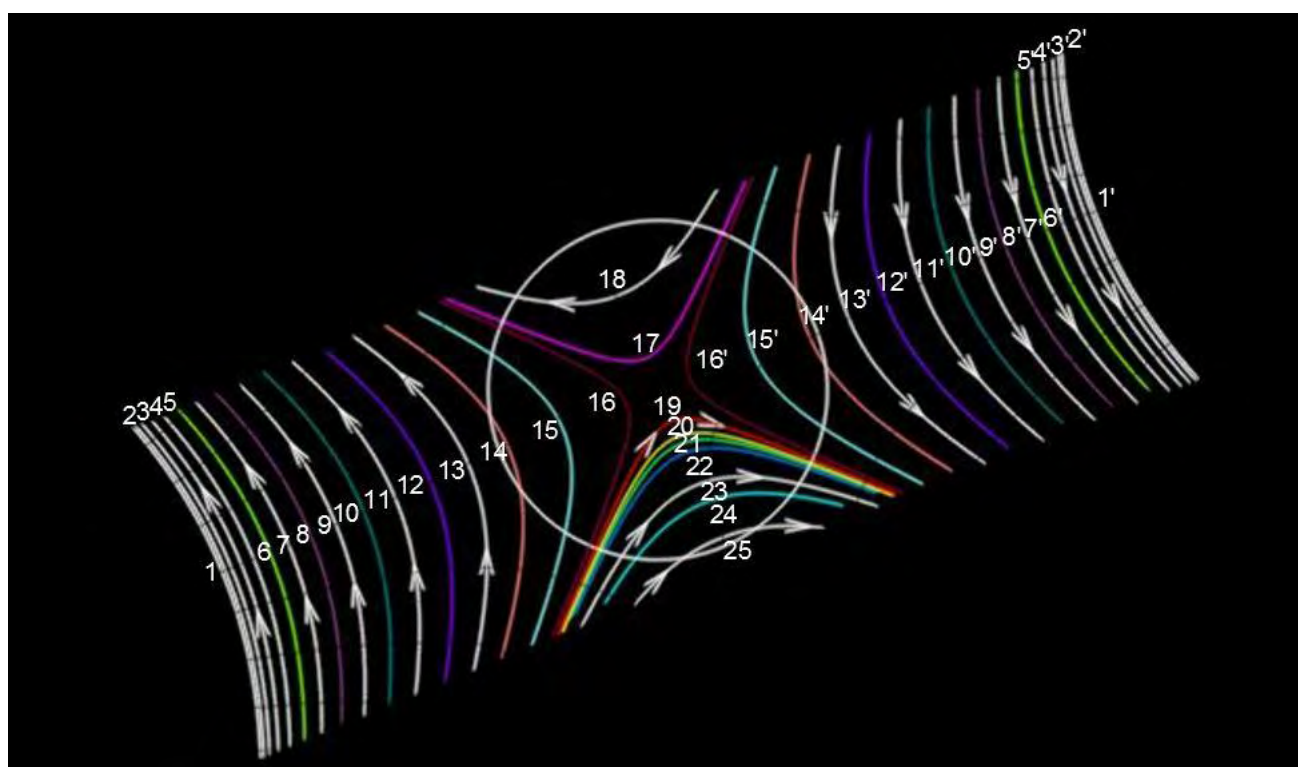


## ***ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α***

### Μοντέλο Δρόμου 1

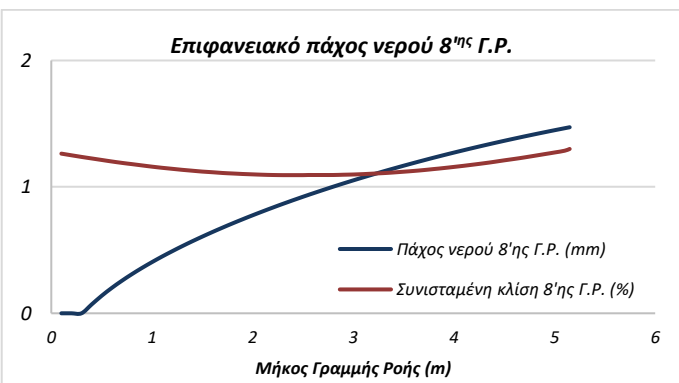
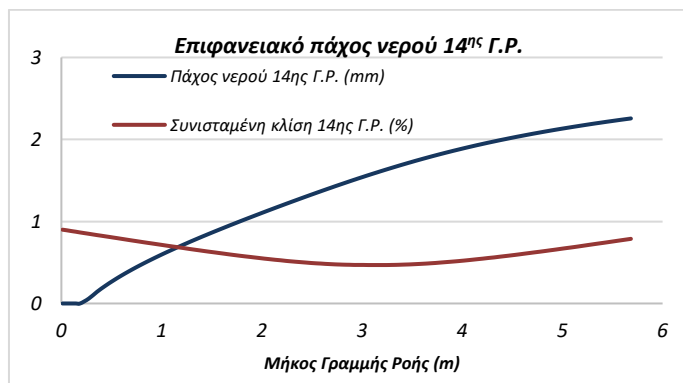
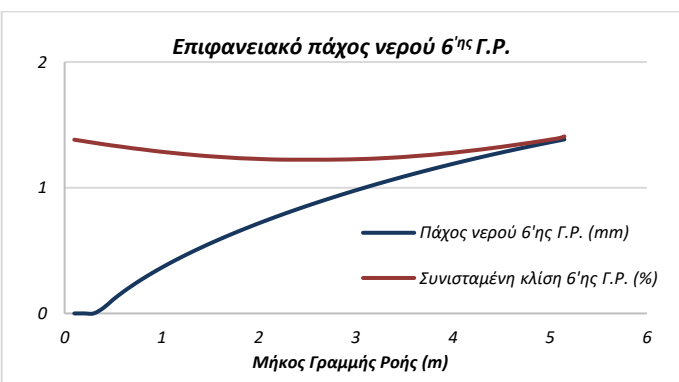
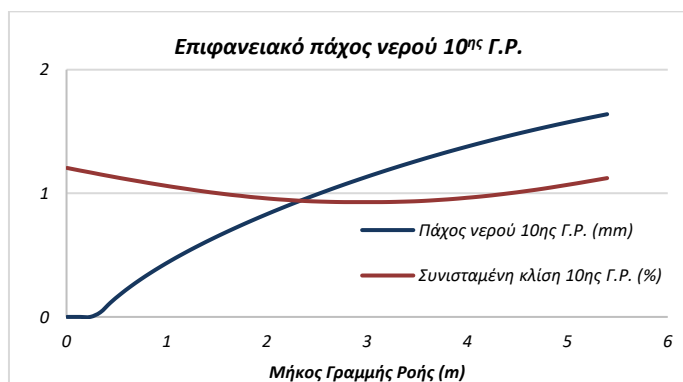
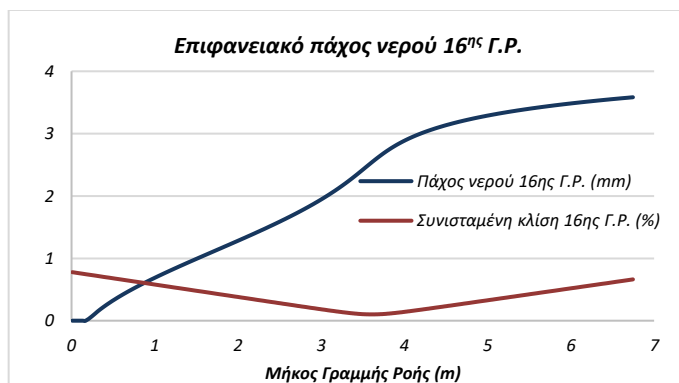
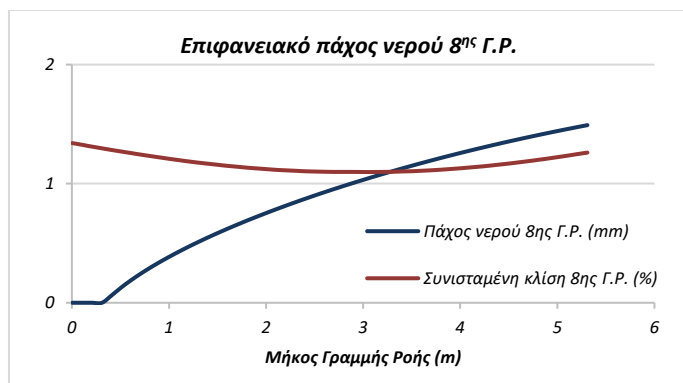
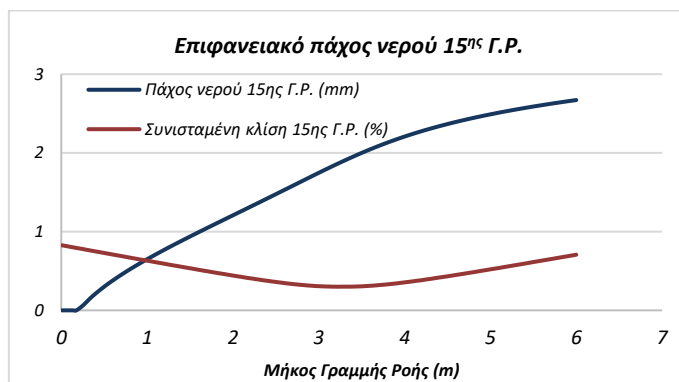
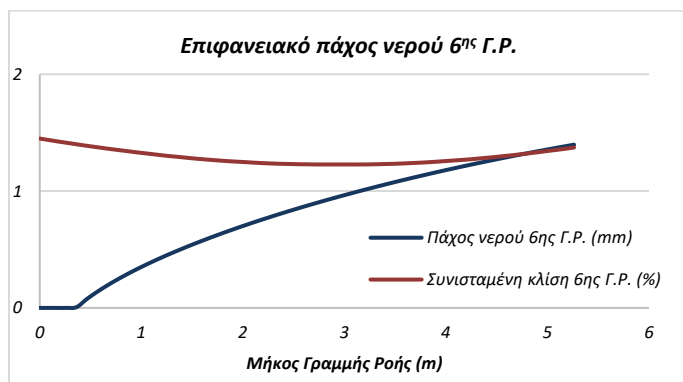


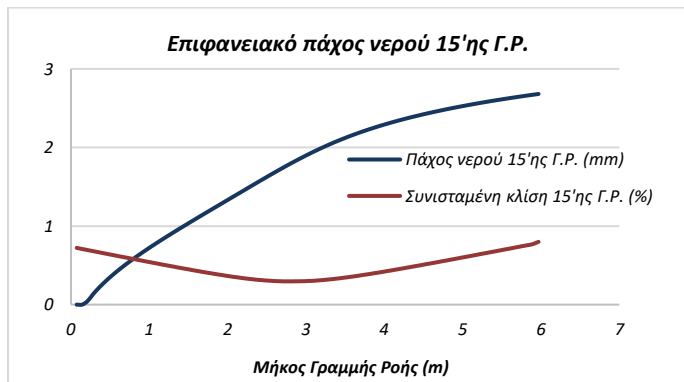
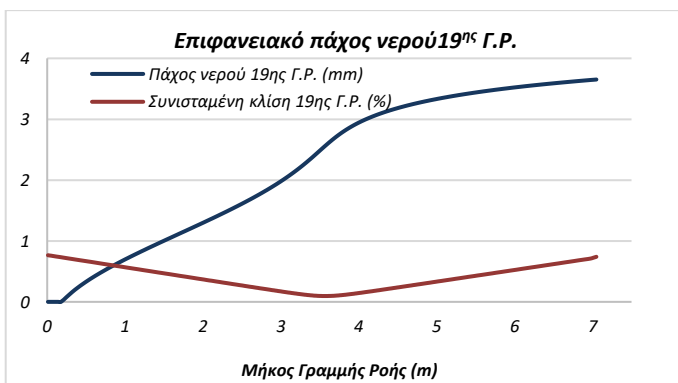
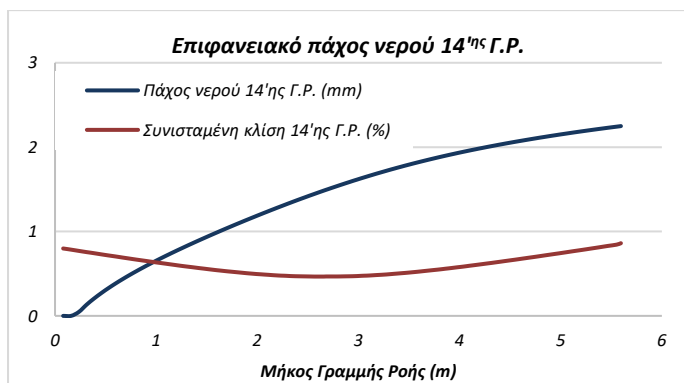
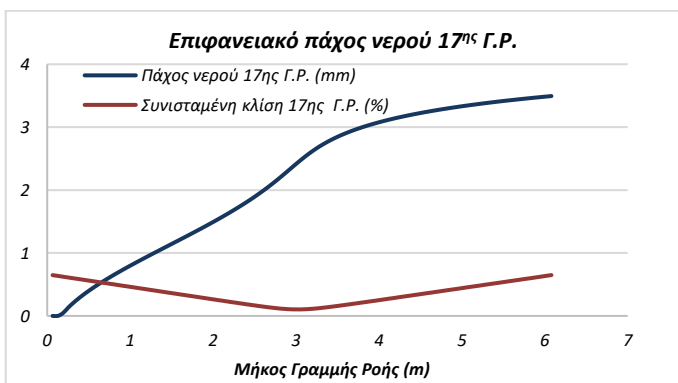
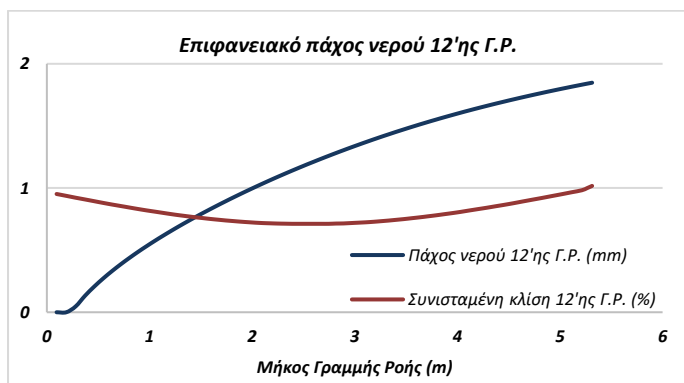
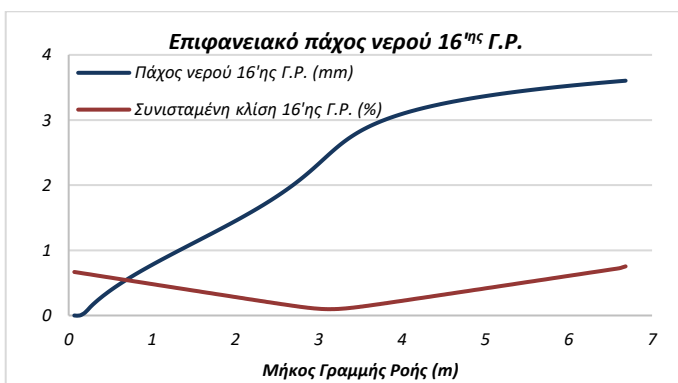
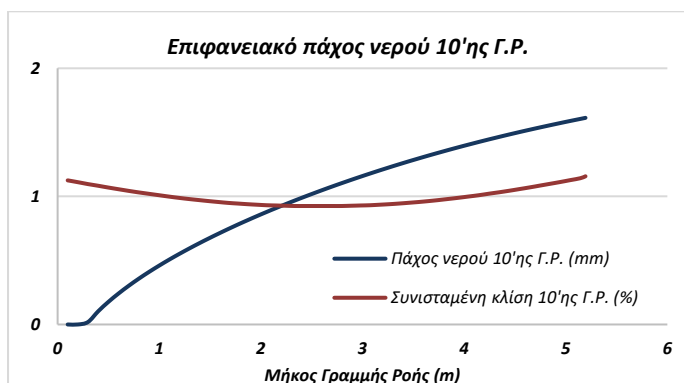
Σχήμα 8.1: Κέντρο προβληματικής περιοχής μοντέλου δρόμου 1.



Σχήμα 8.2: Γραμμές ροής μοντέλου δρόμου 1.

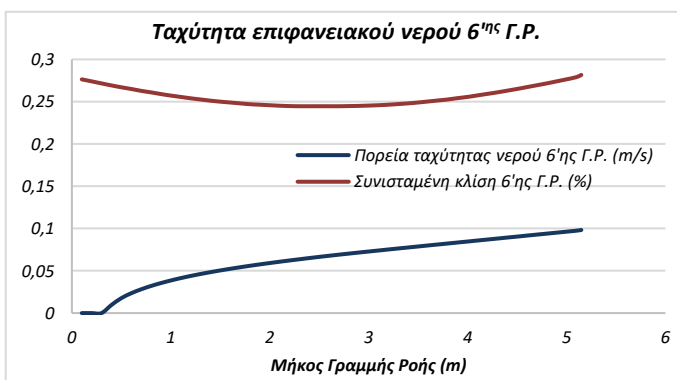
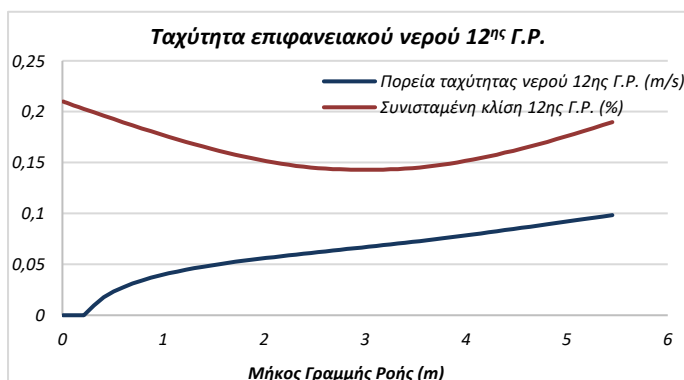
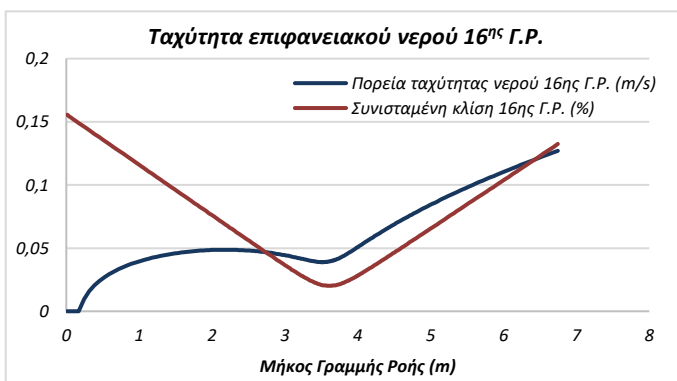
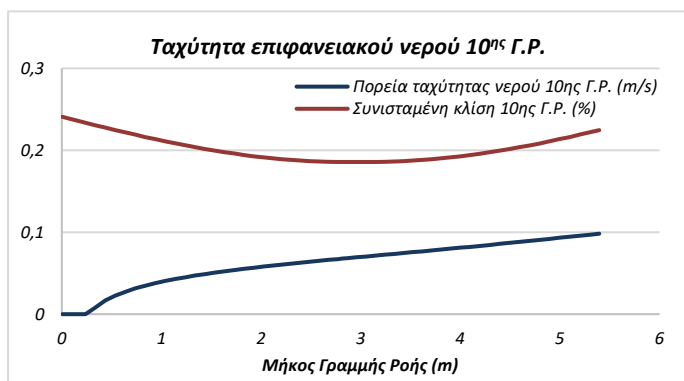
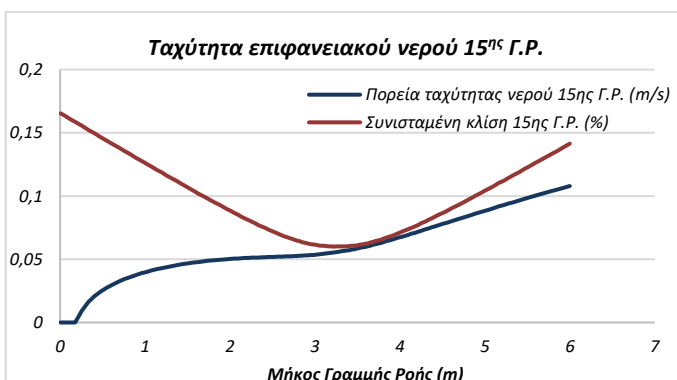
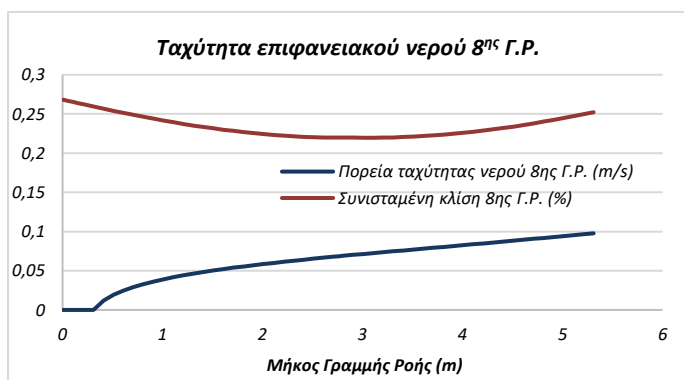
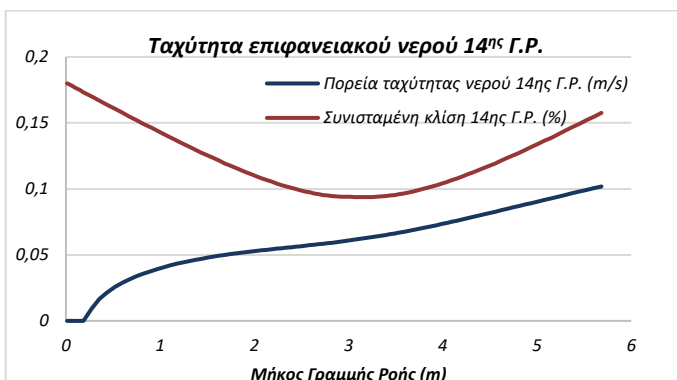
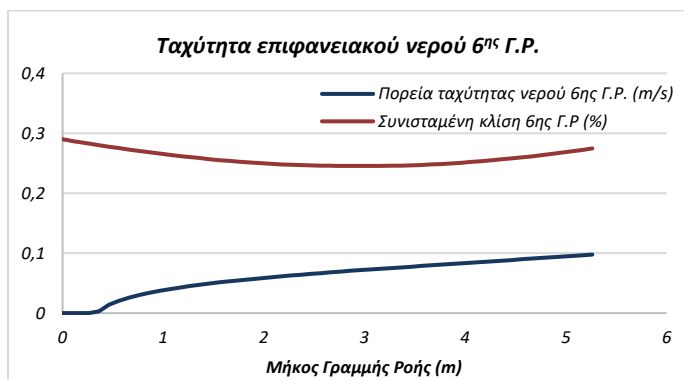
## Γραφήματα Υδατικής Στρώσης

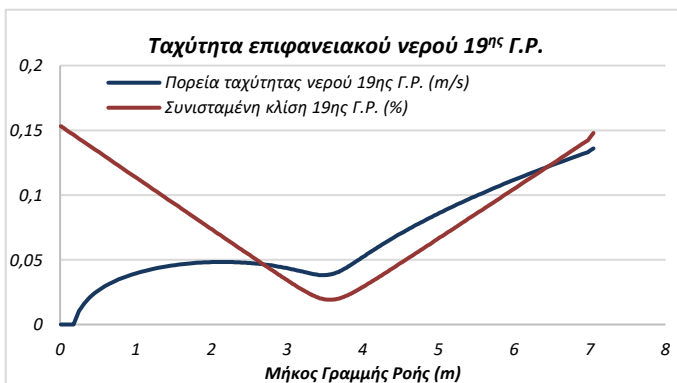
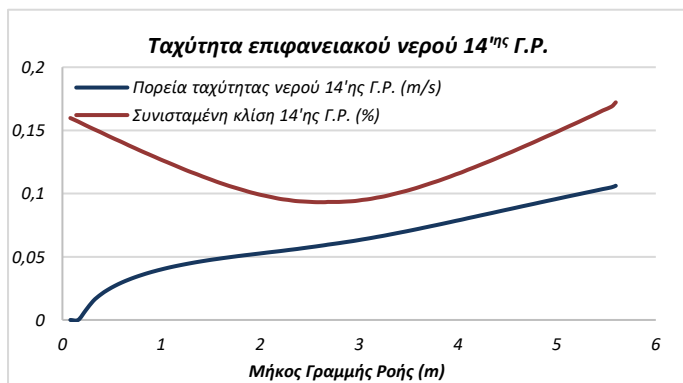
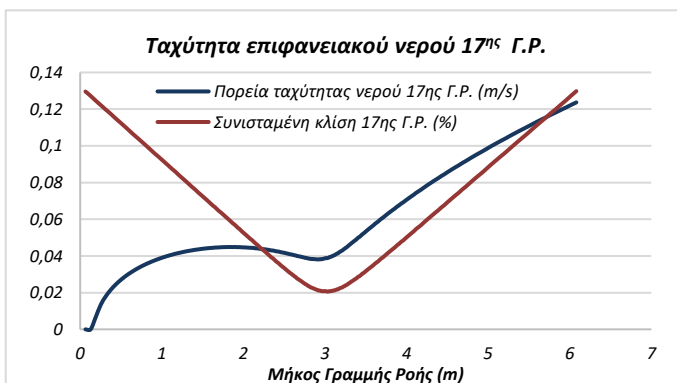
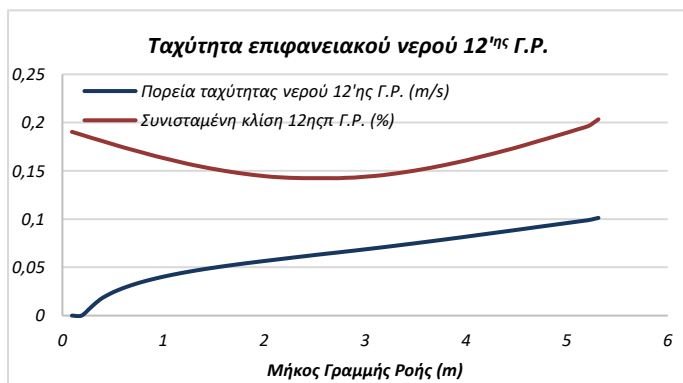
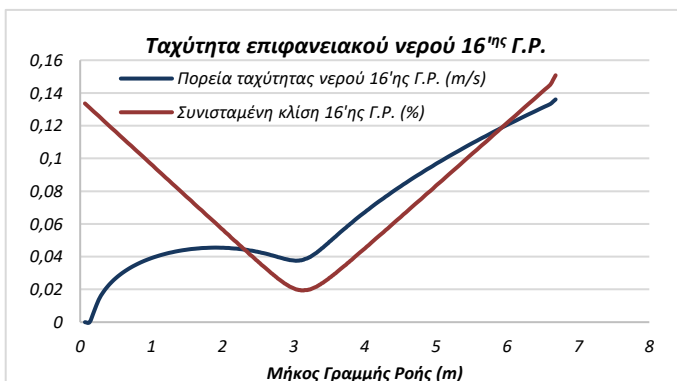
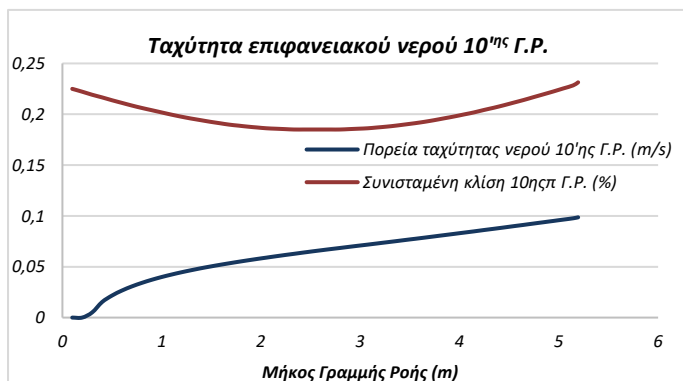
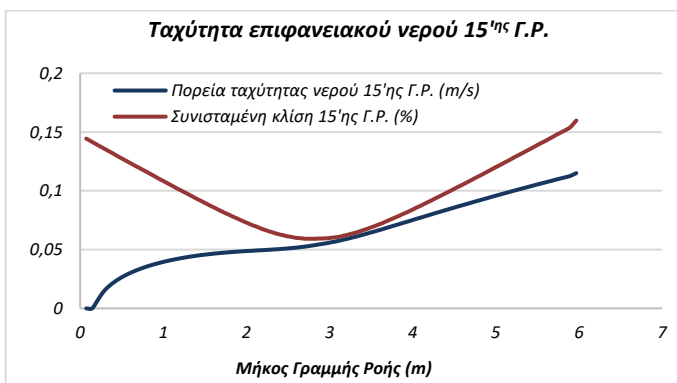
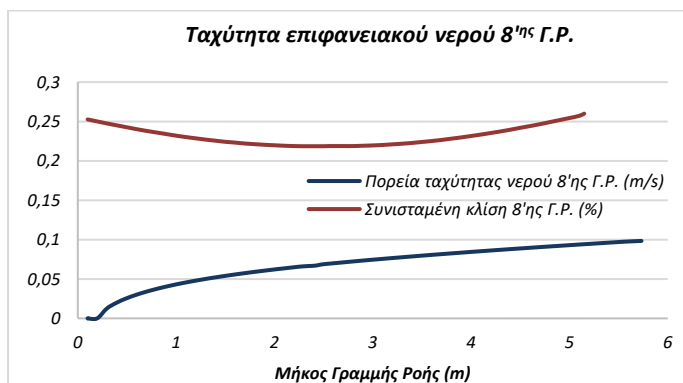






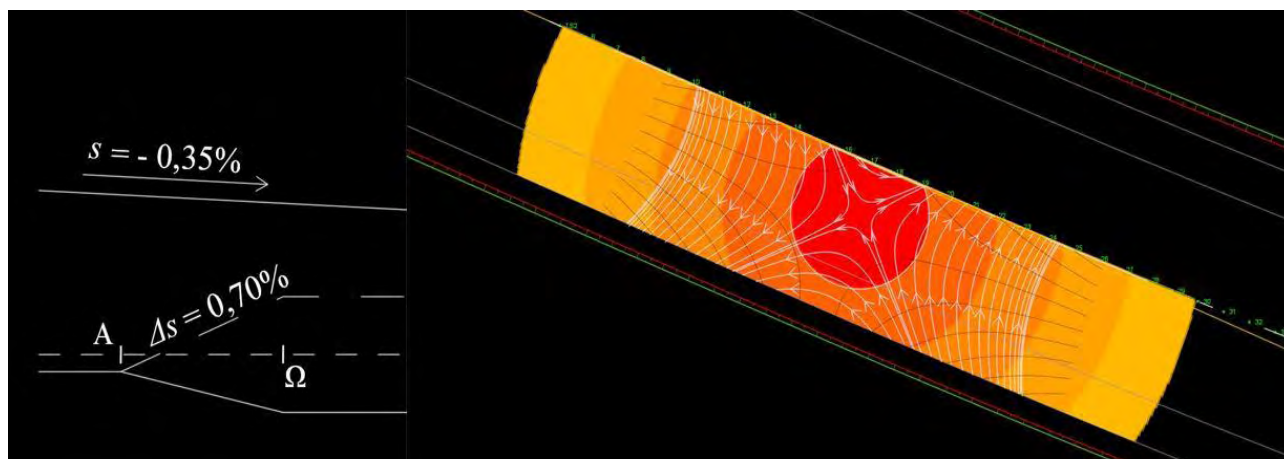
## Ταχύτητα Επιφανειακού Νερού



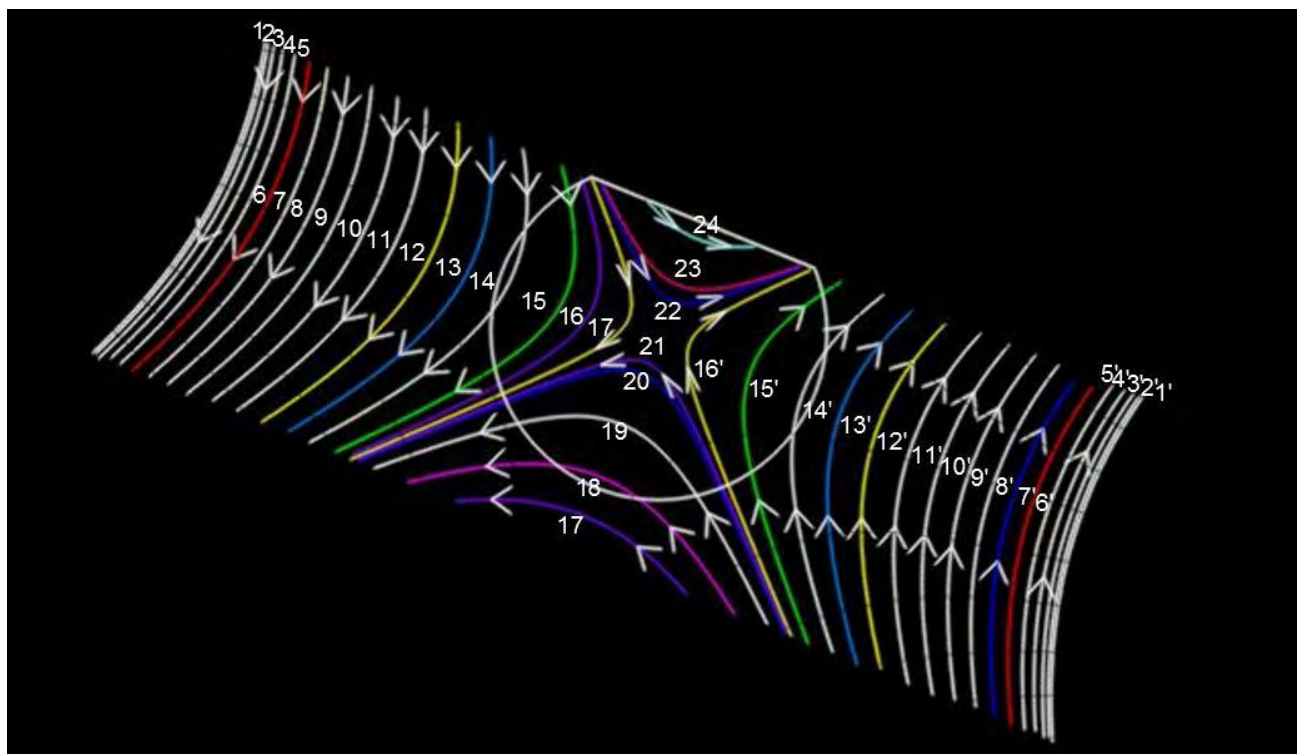




## Μοντέλο Δρόμου 2

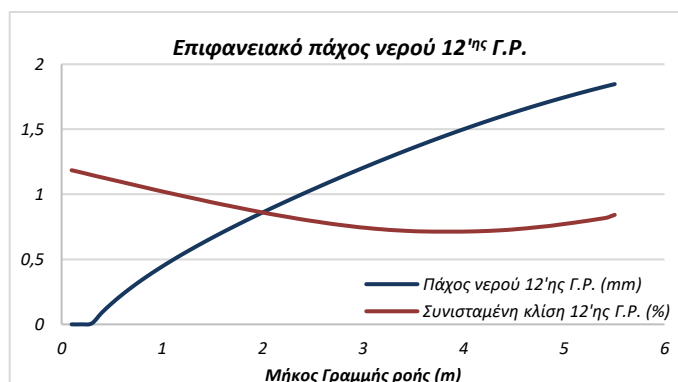
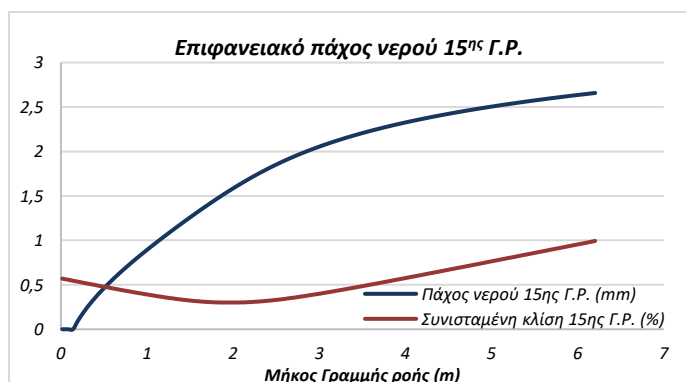
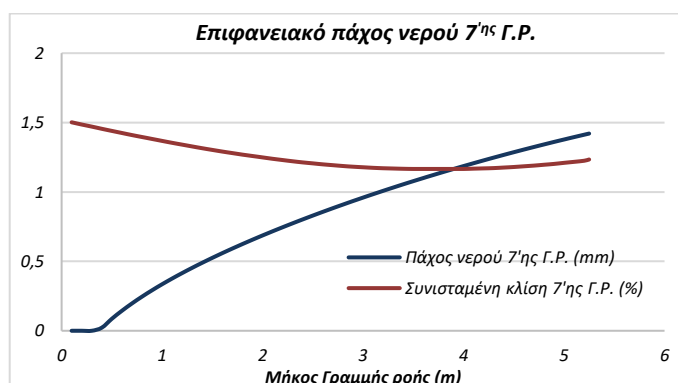
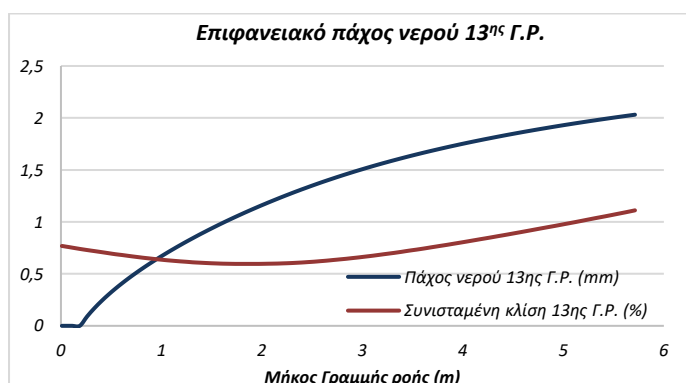
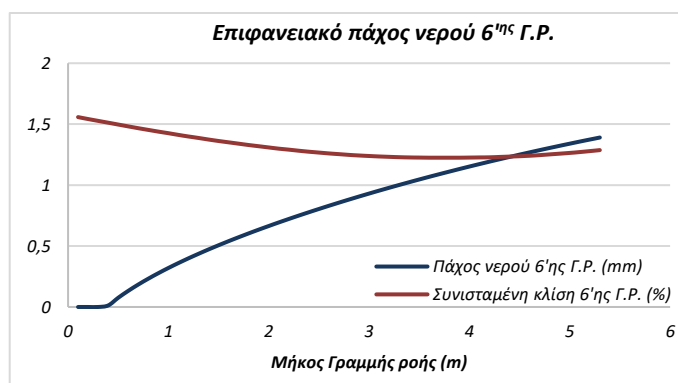
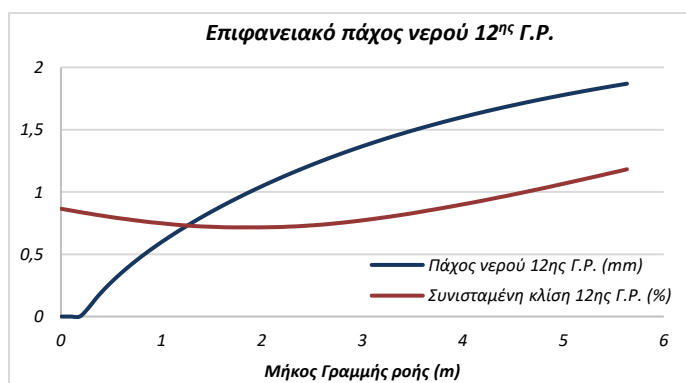
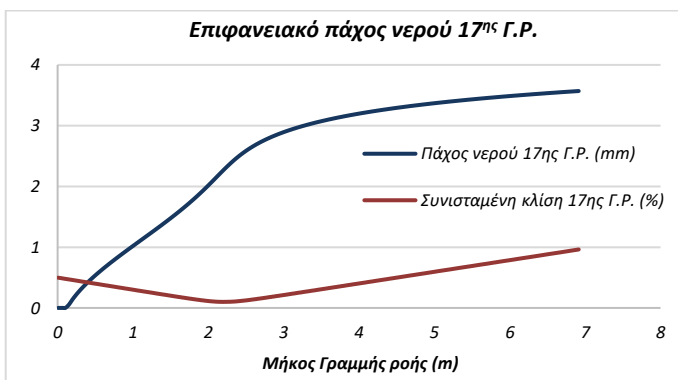
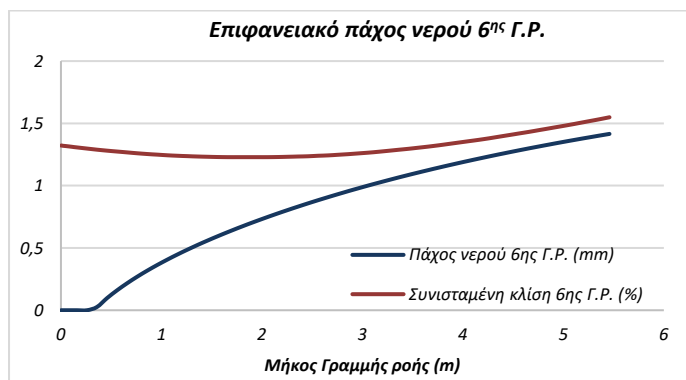


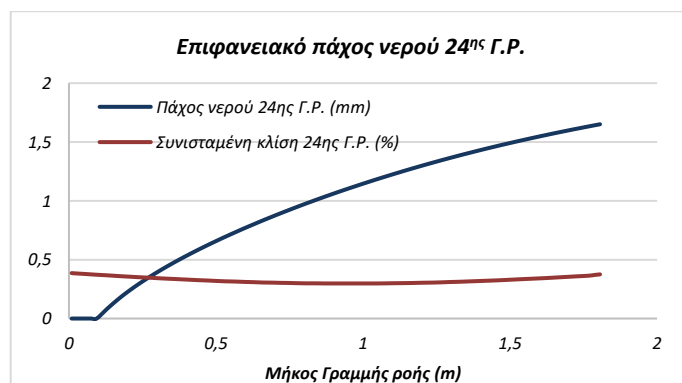
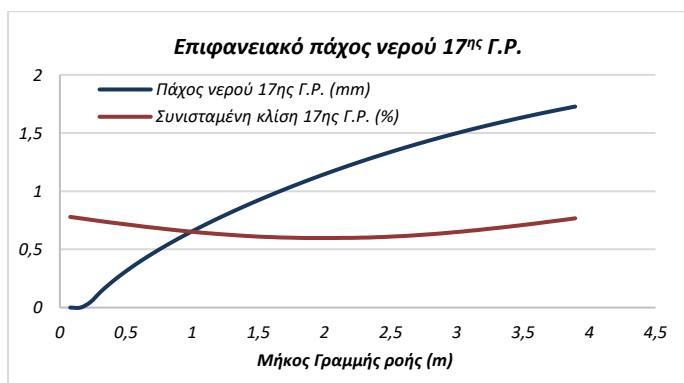
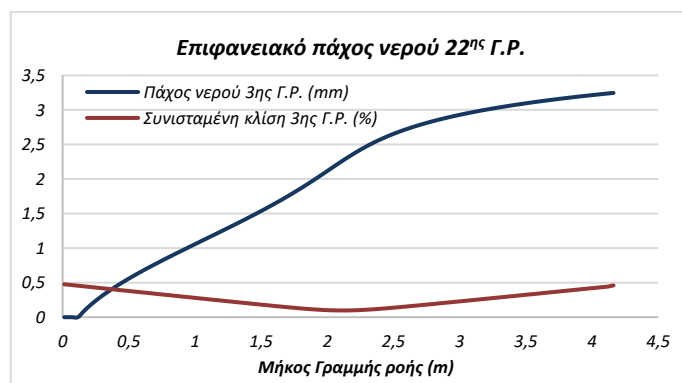
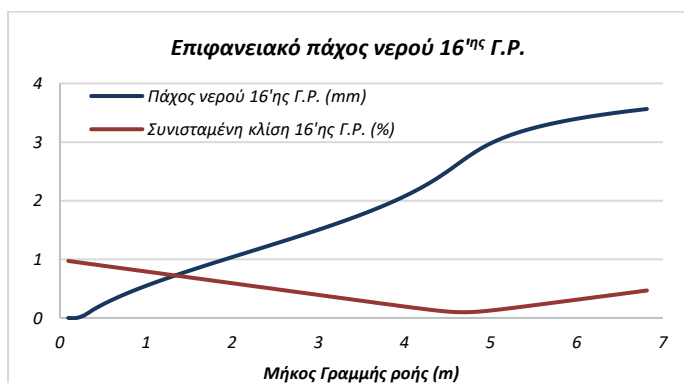
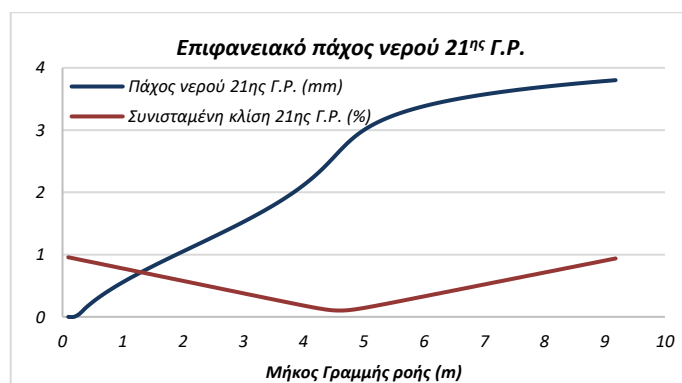
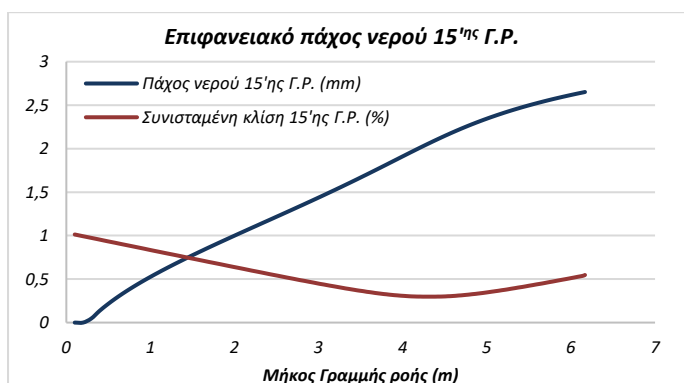
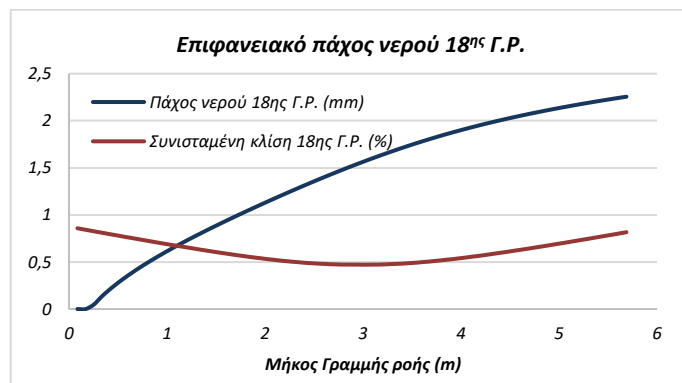
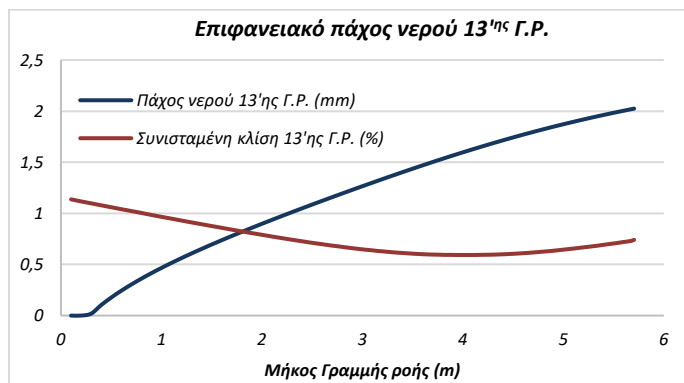
Σχήμα 8.3: Κέντρο προβληματικής περιοχής μοντέλου δρόμου 2.



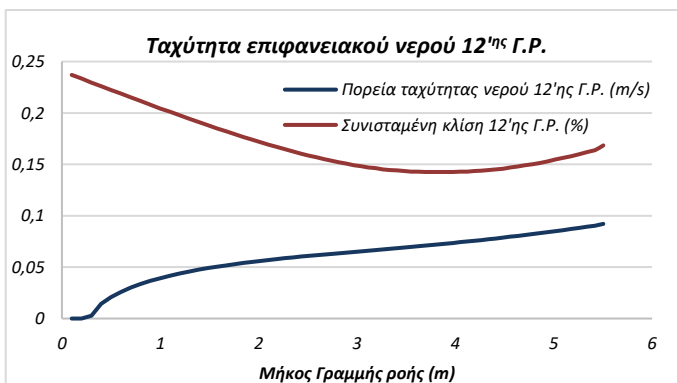
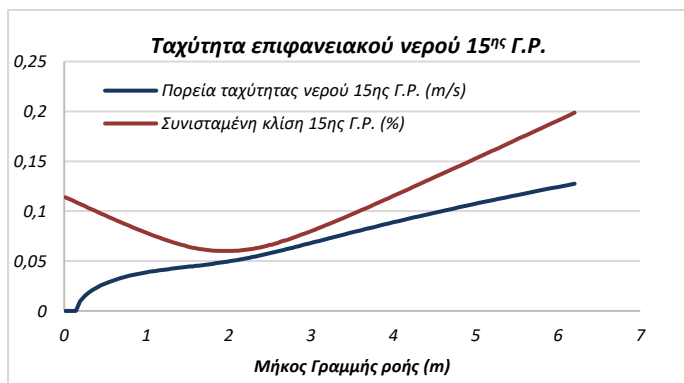
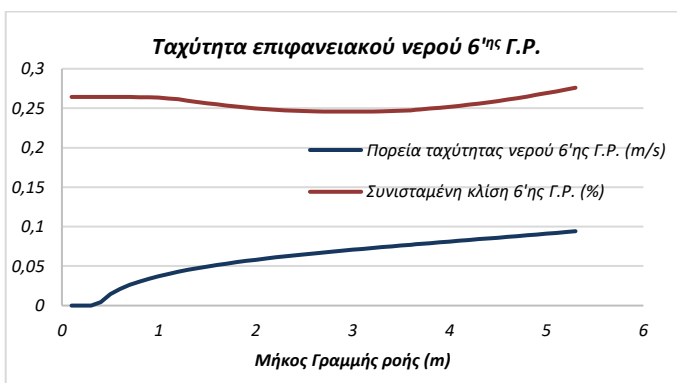
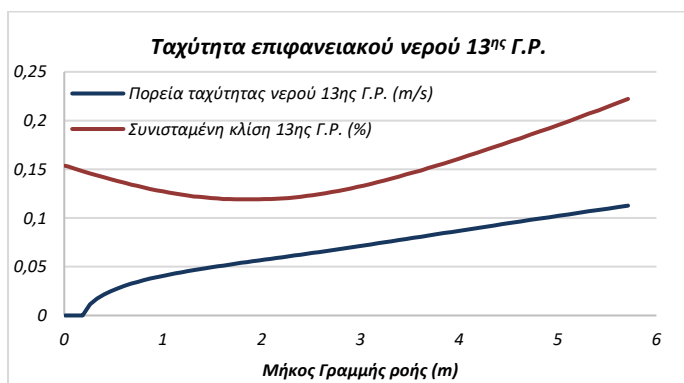
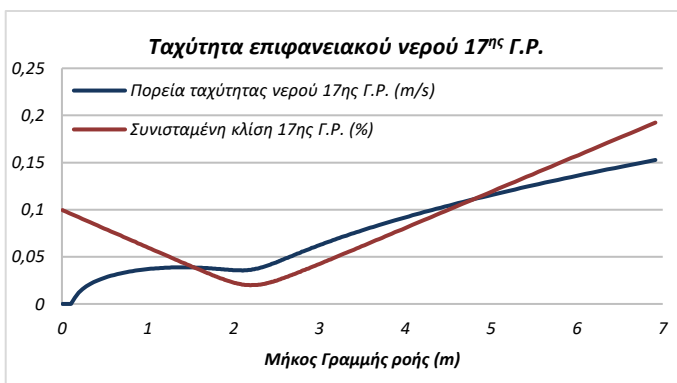
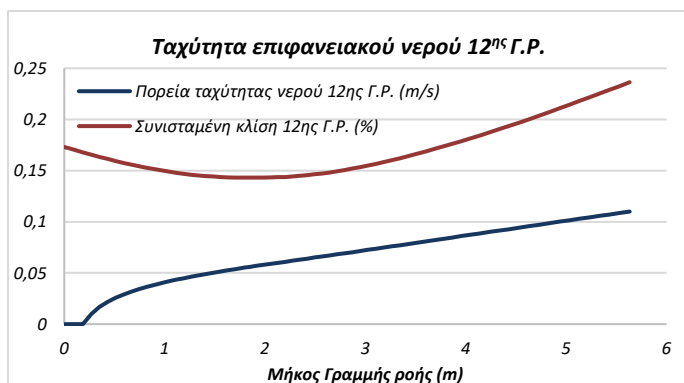
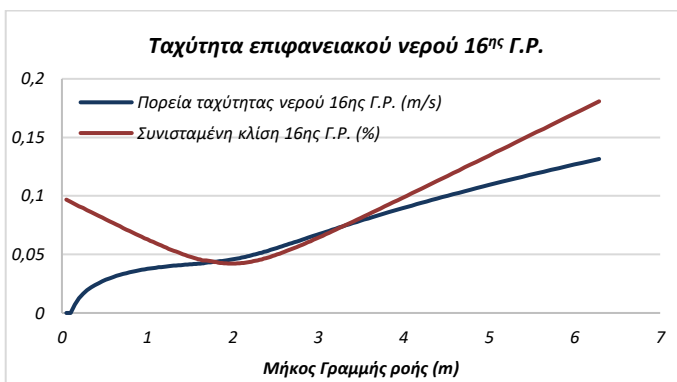
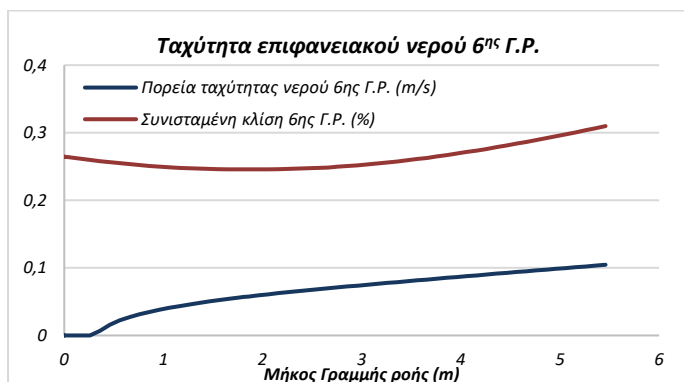
Σχήμα 8.4: Γραμμές ροής μοντέλου δρόμου 2.

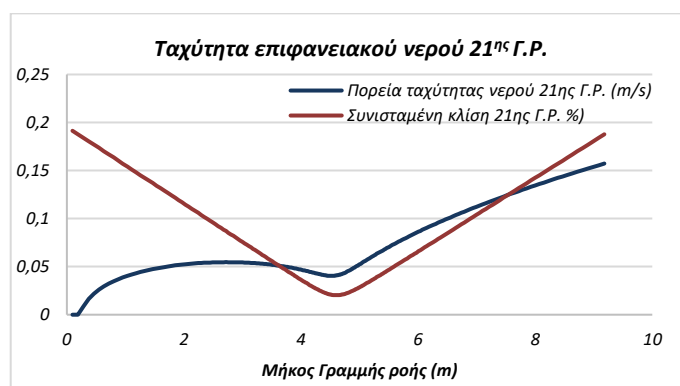
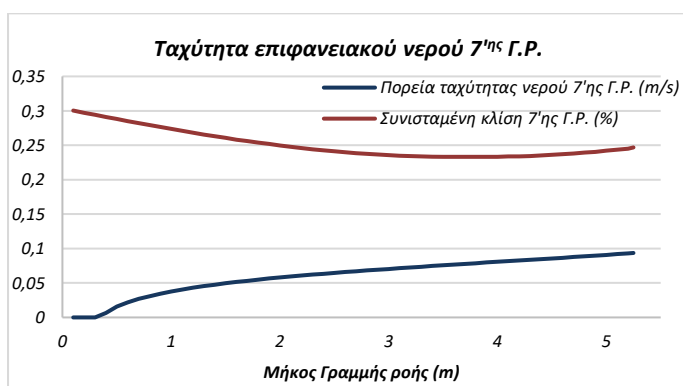
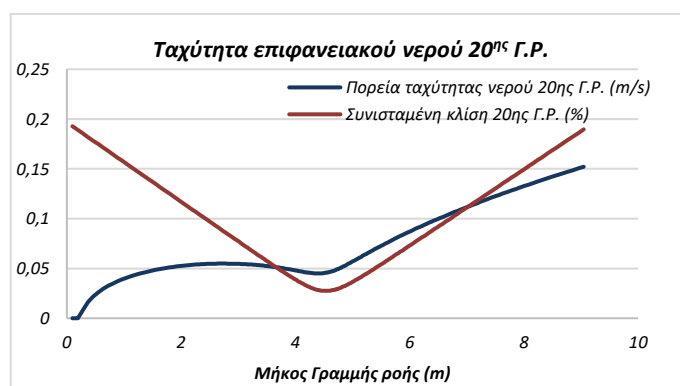
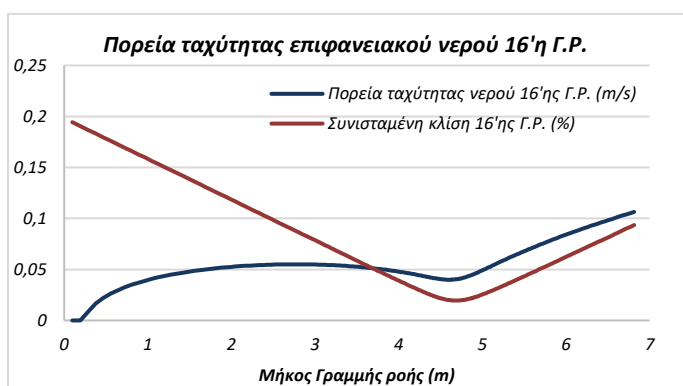
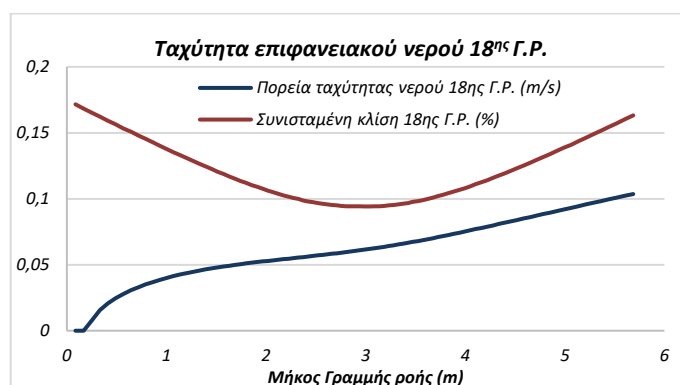
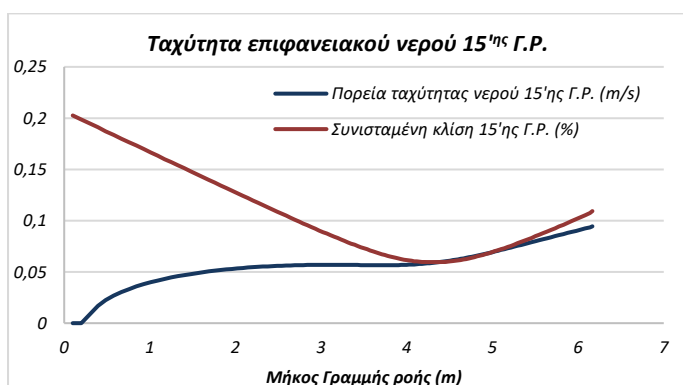
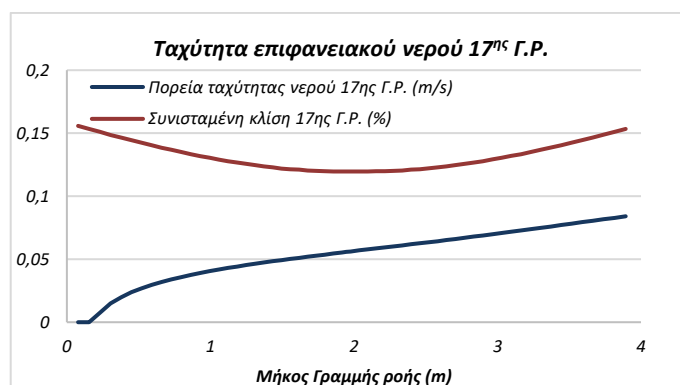
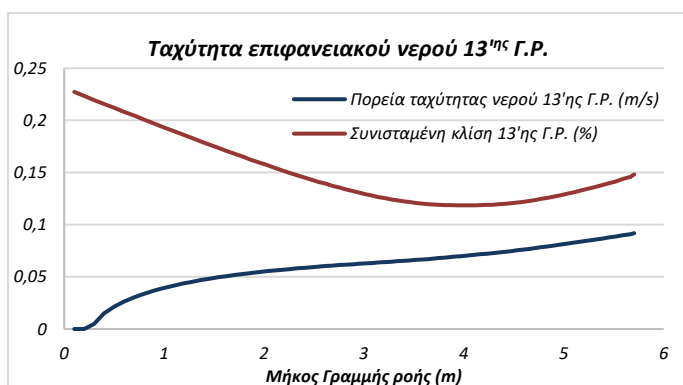
## Γραφήματα Υδατικής Στρώσης



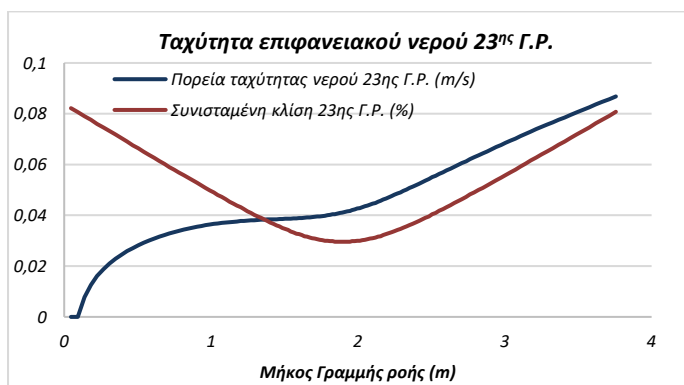
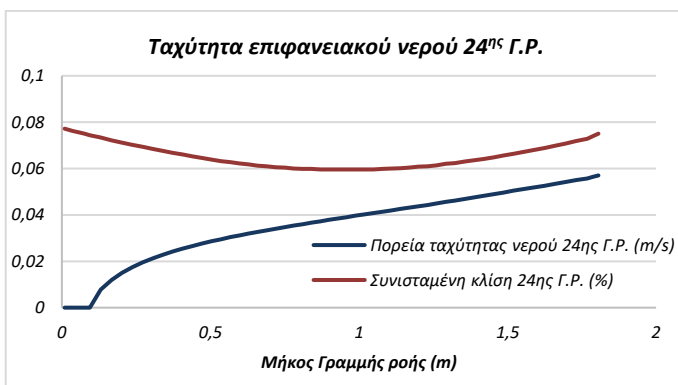
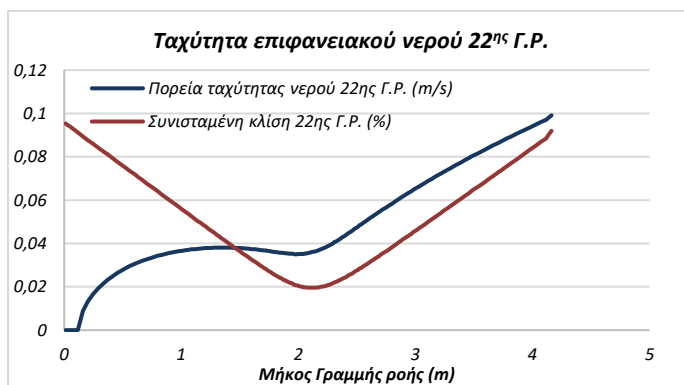


## Ταχύτητα Επιφανειακού Νερού

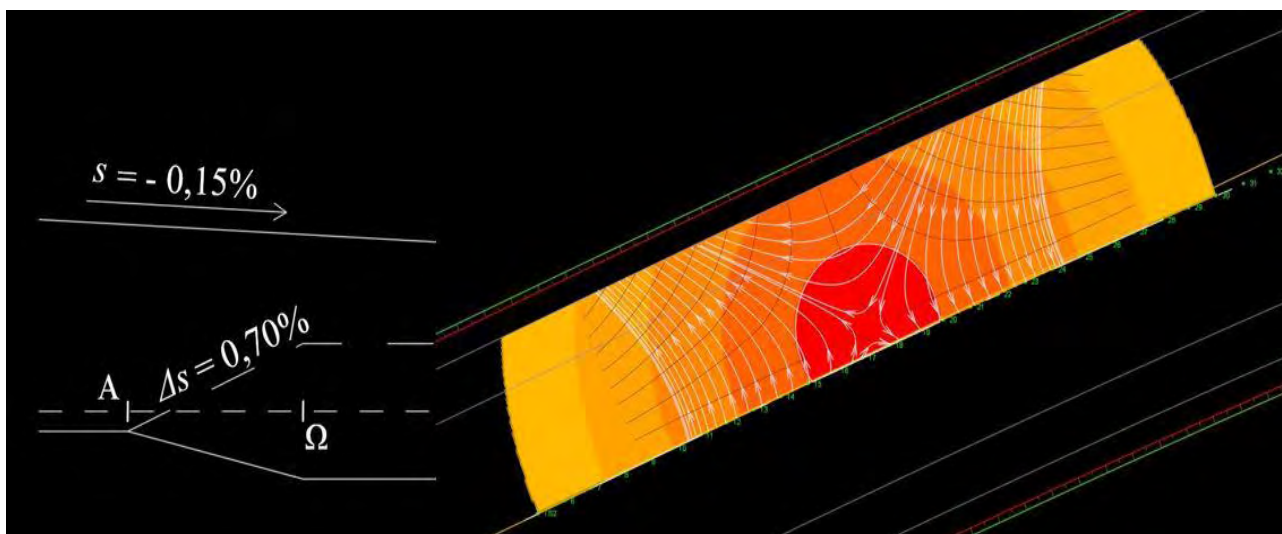




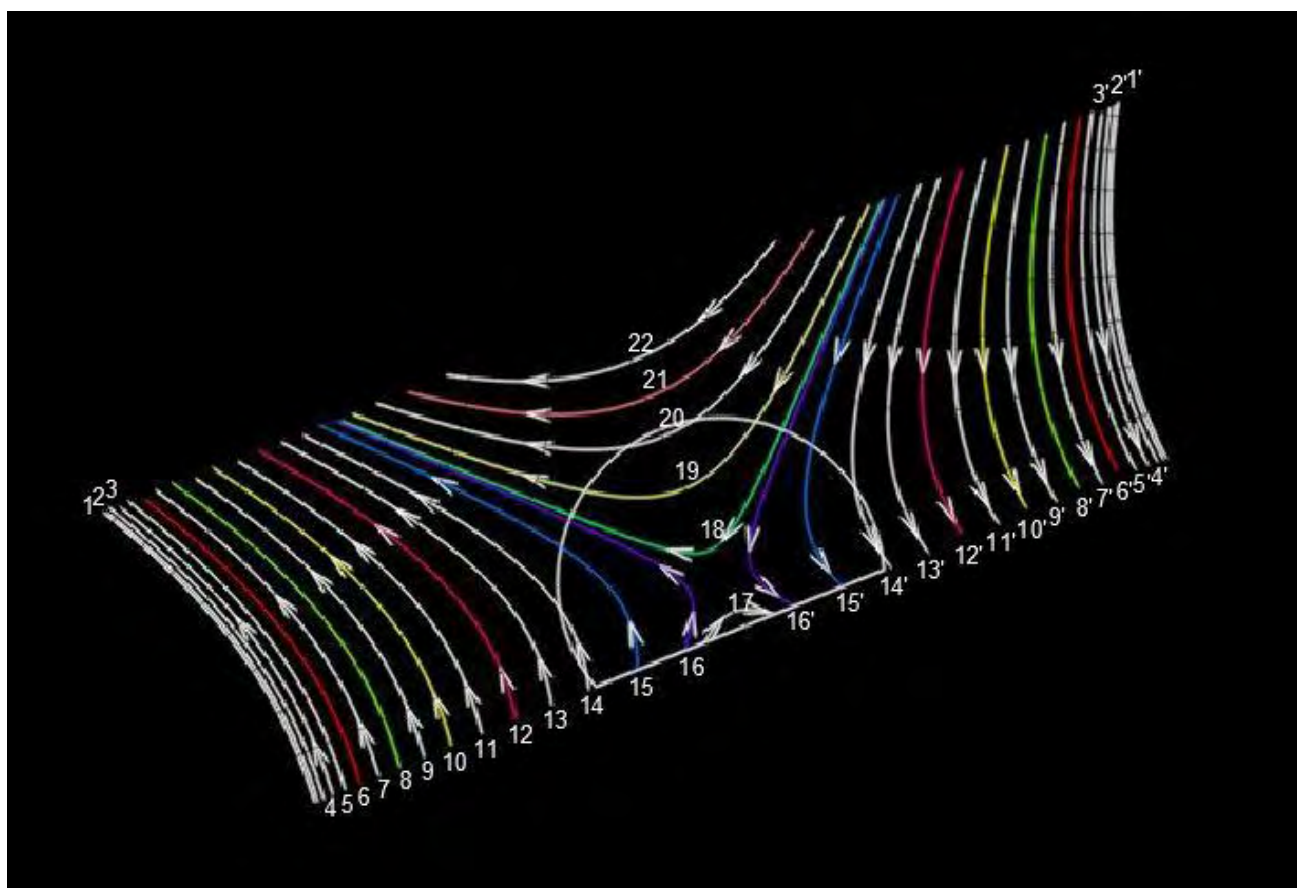




### Μοντέλο Δρόμου 3

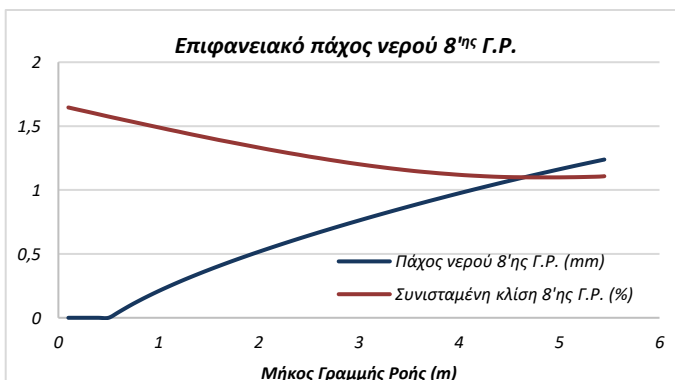
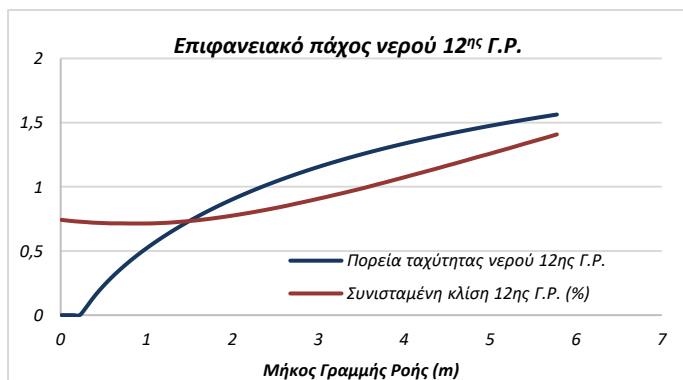
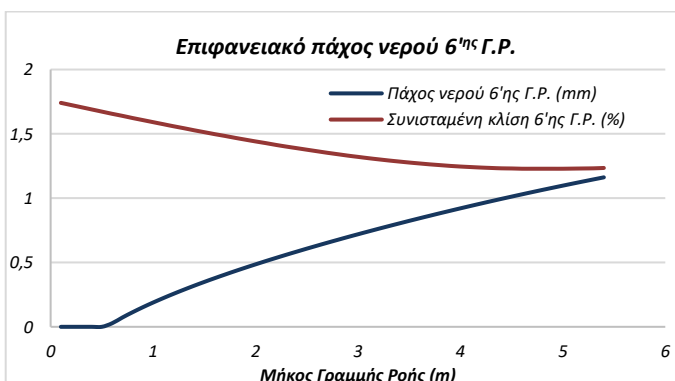
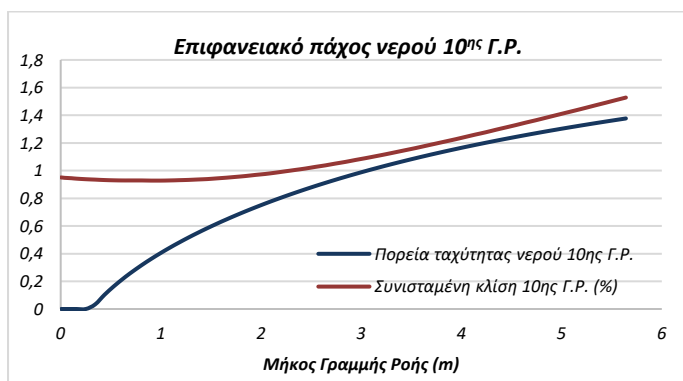
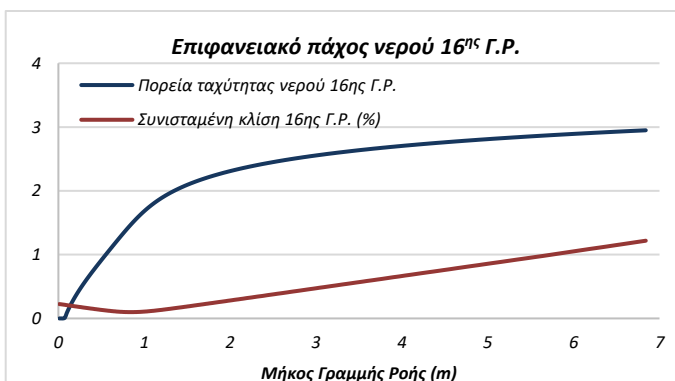
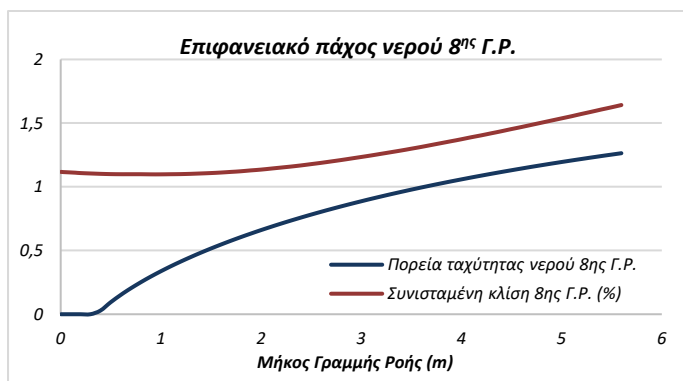
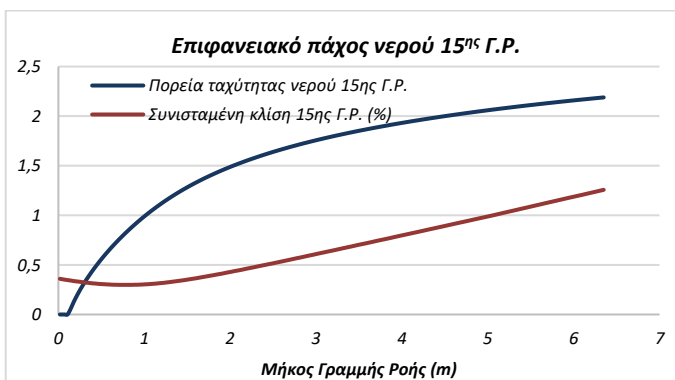
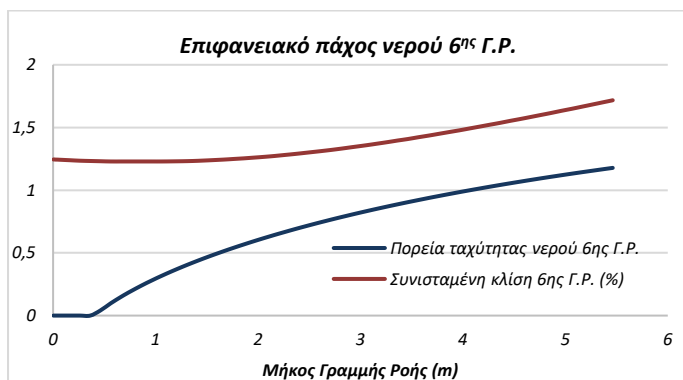


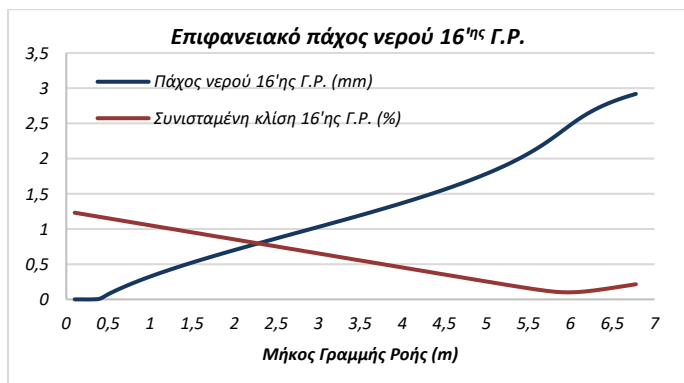
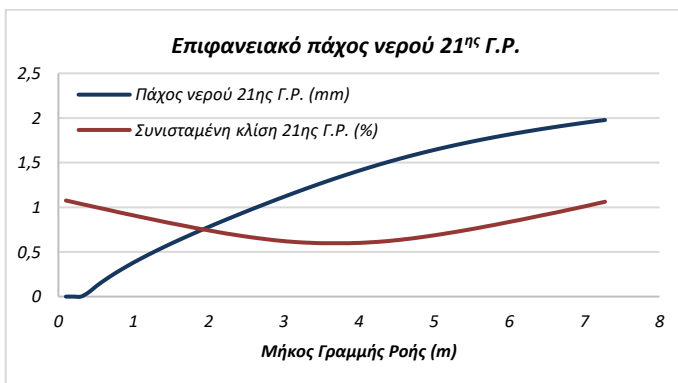
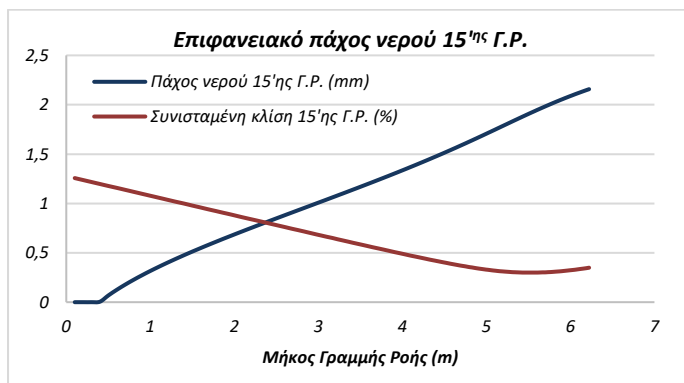
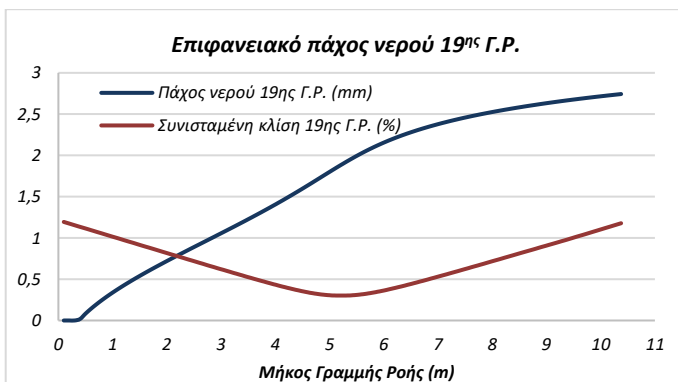
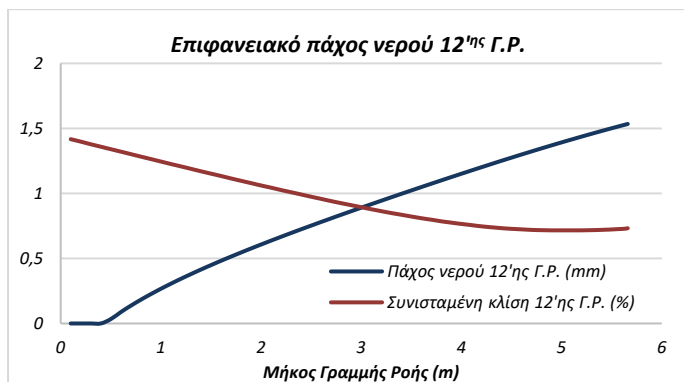
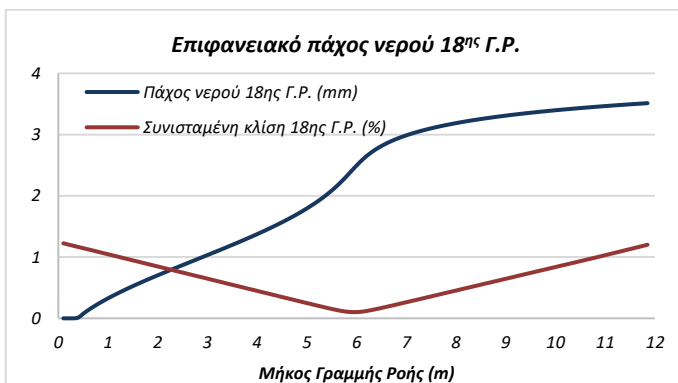
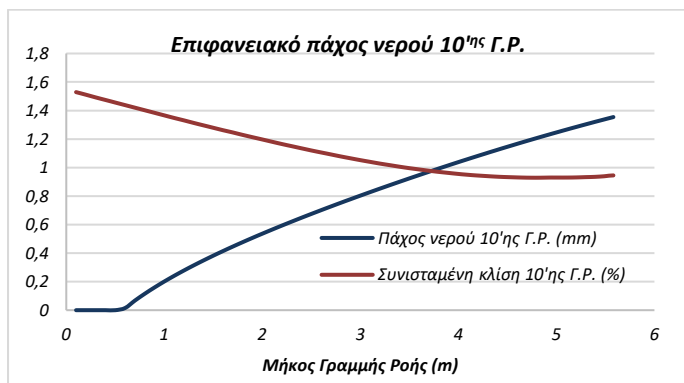
Σχήμα 8.5: Κέντρο προβληματικής περιοχής για τον δρόμο 3



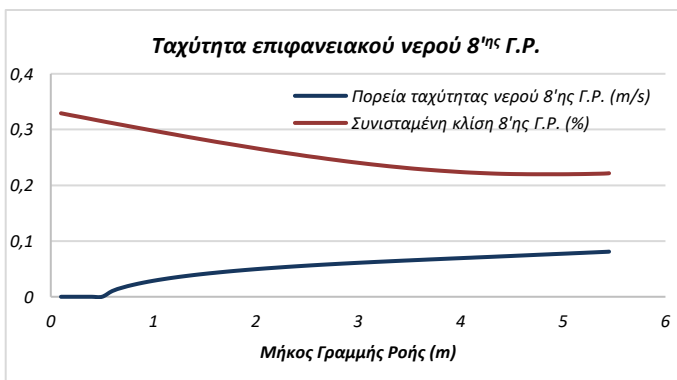
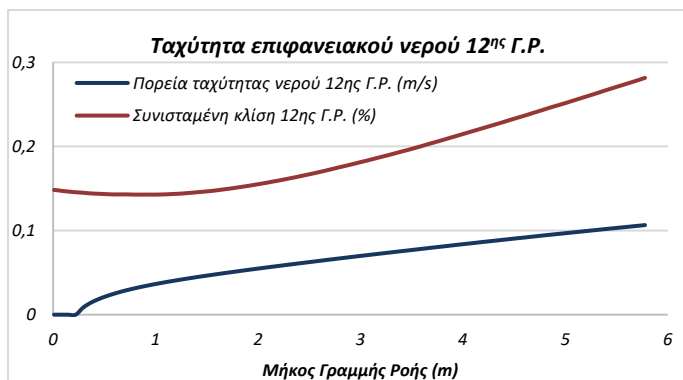
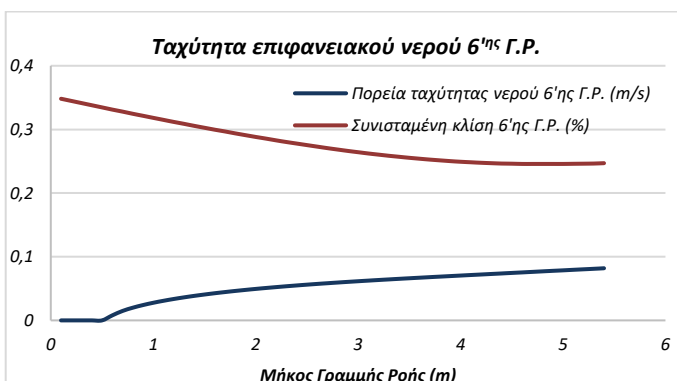
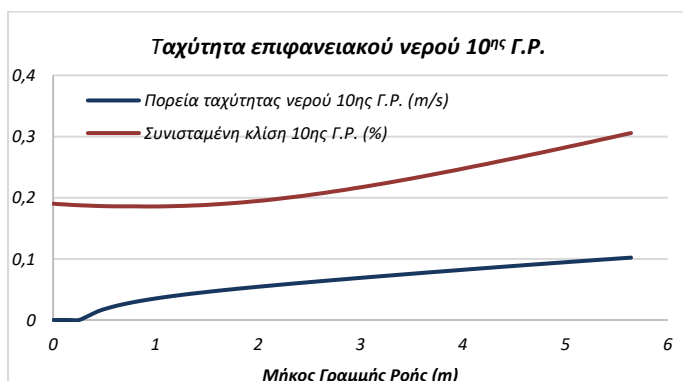
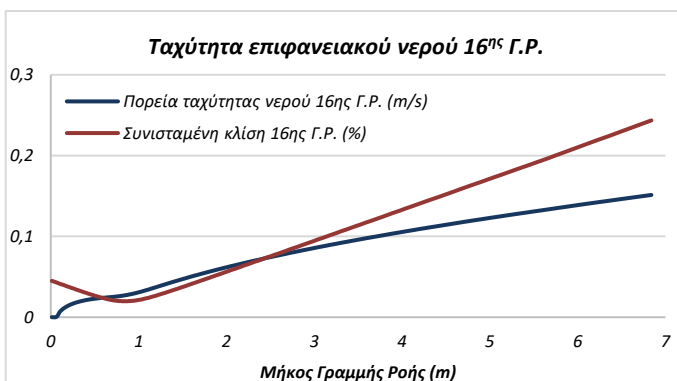
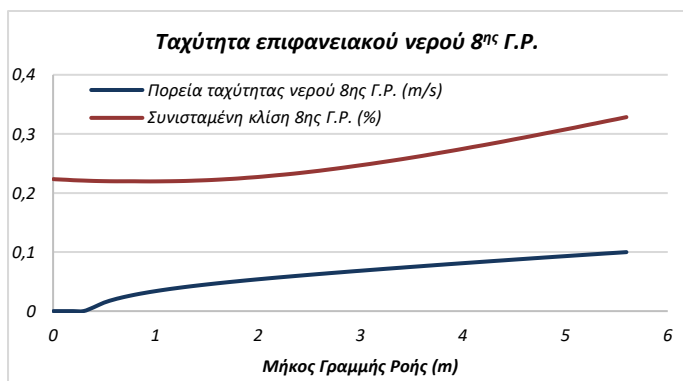
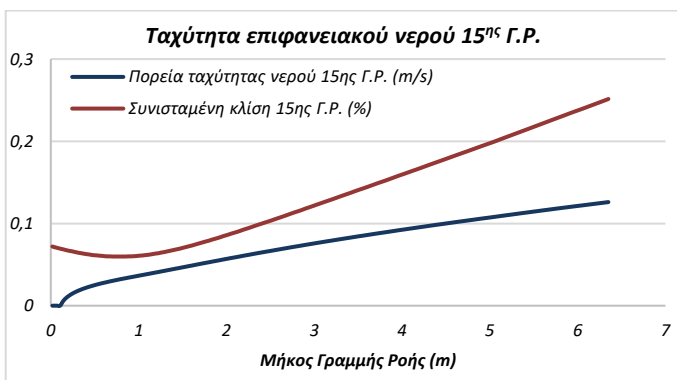
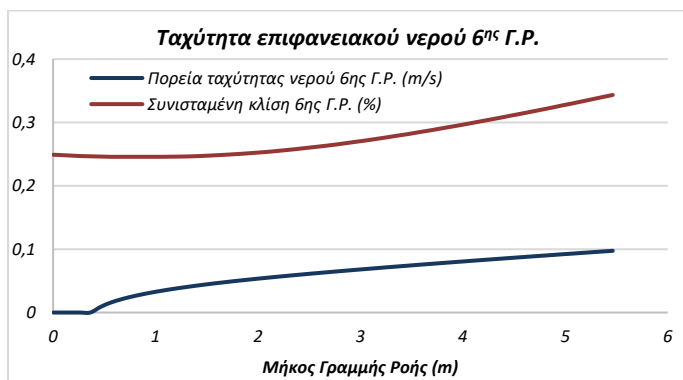
Σχήμα 8.6: Γραμμές ροής επί του οδοστρώματος για το μοντέλον δρόμου 3.

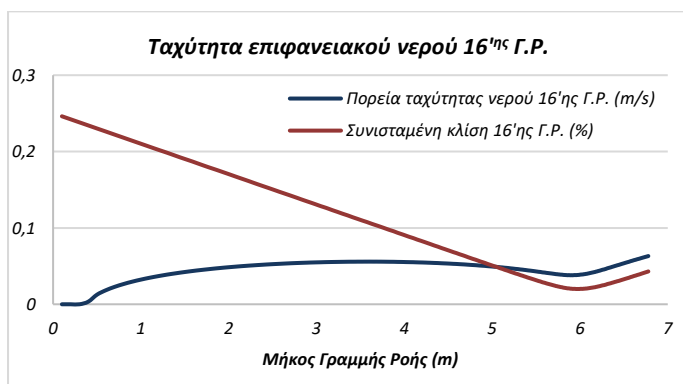
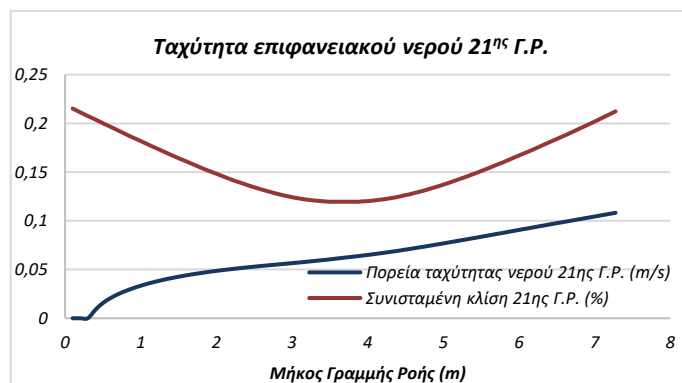
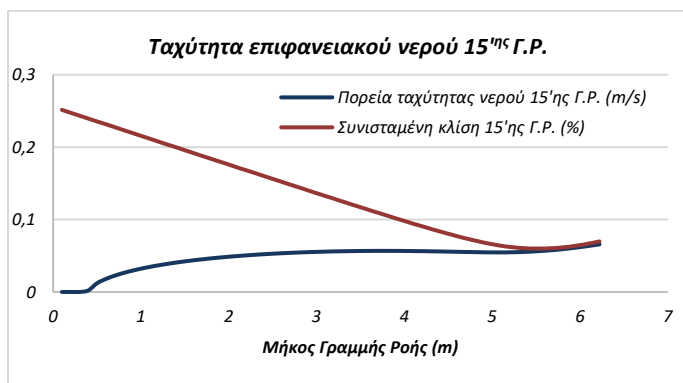
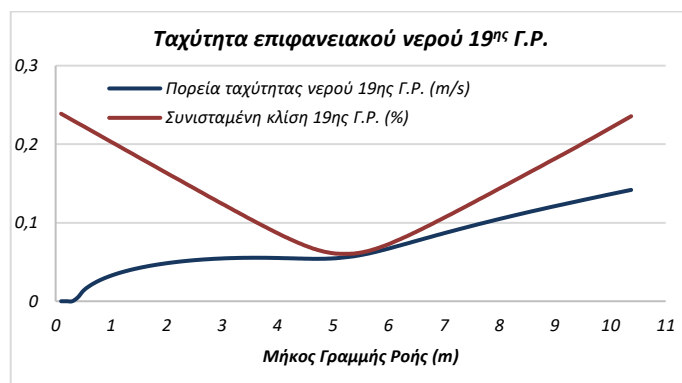
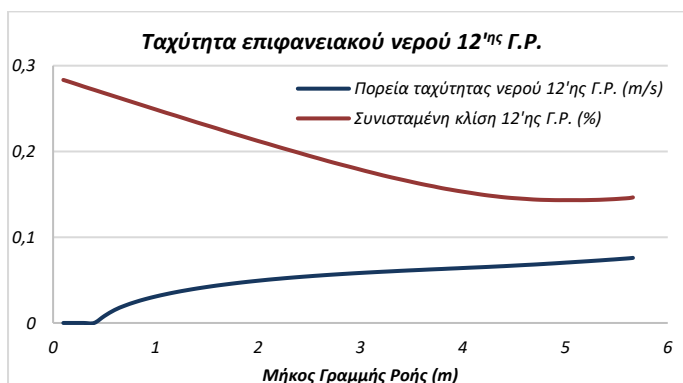
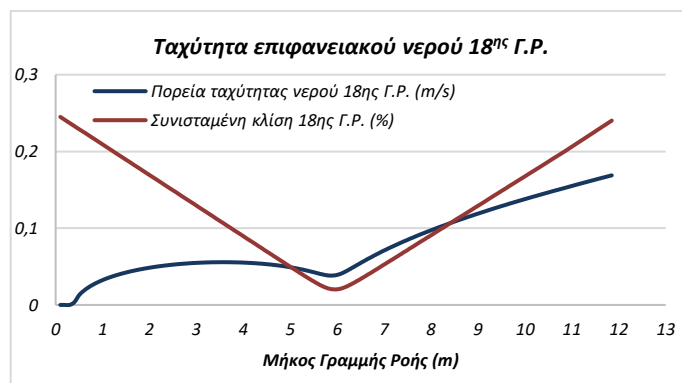
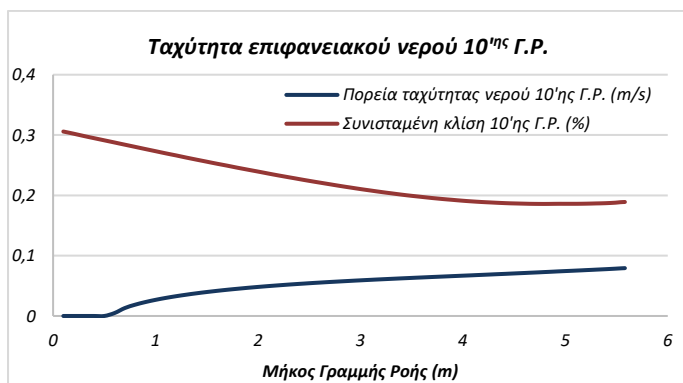
## Γραφήματα Υδατικής Στρώσης





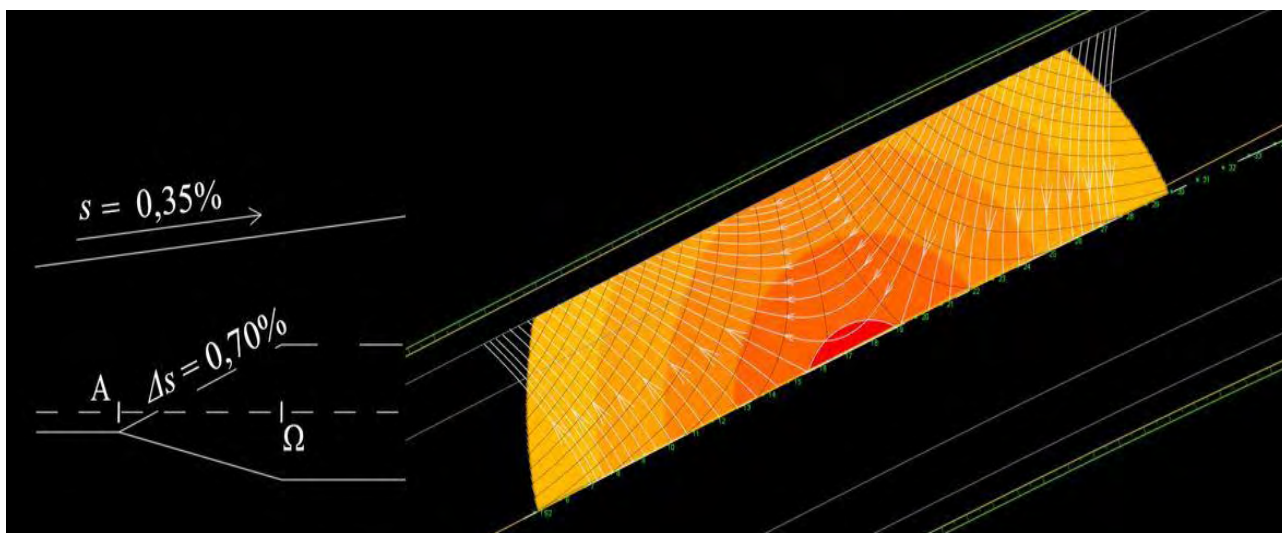
## Ταχύτητα Επιφανειακού Νερού



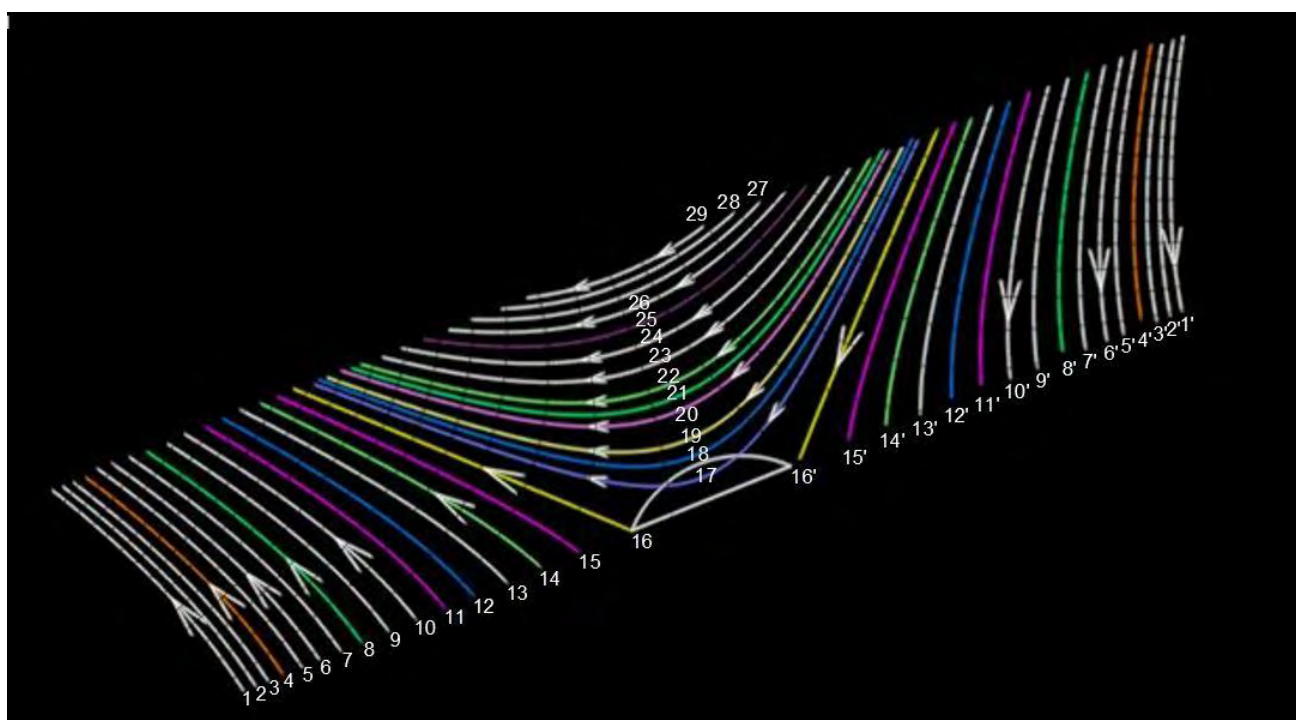




### Μοντέλο Δρόμου 4



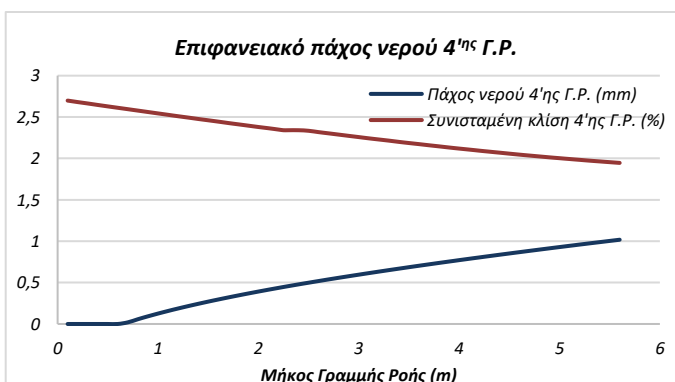
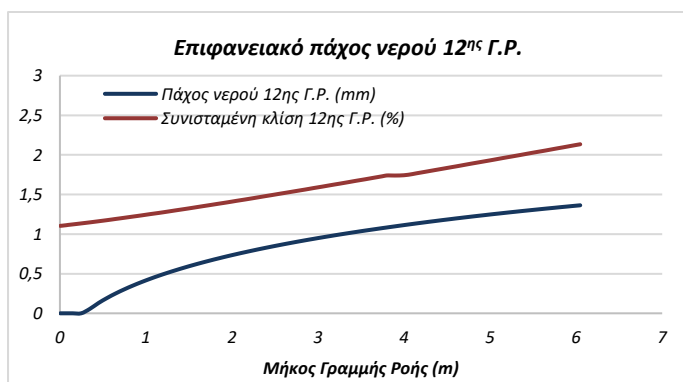
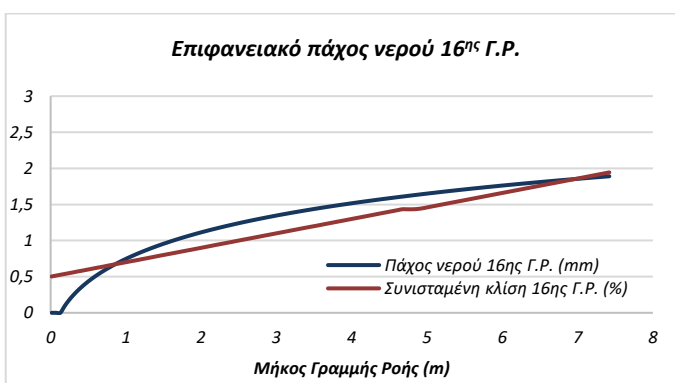
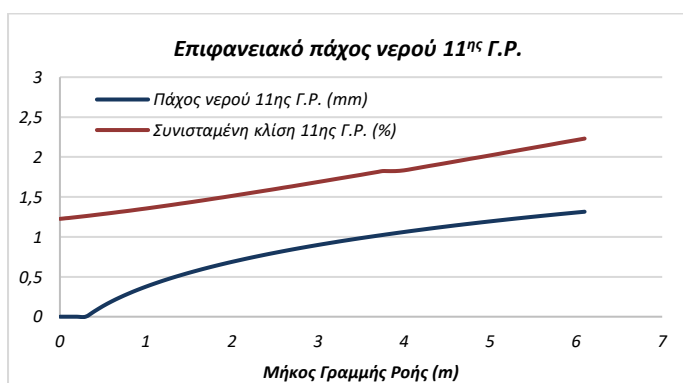
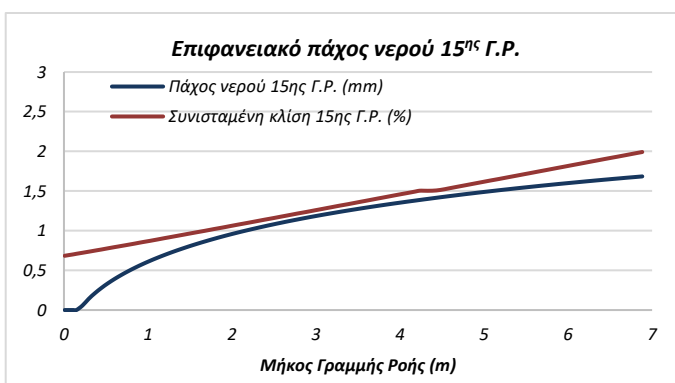
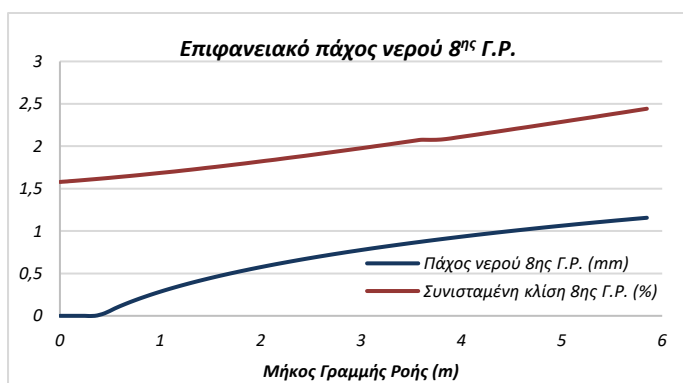
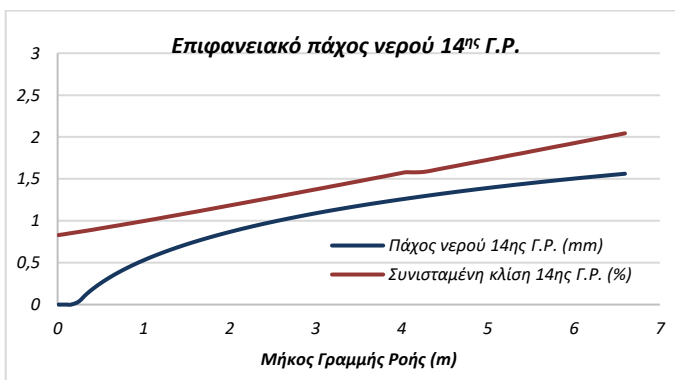
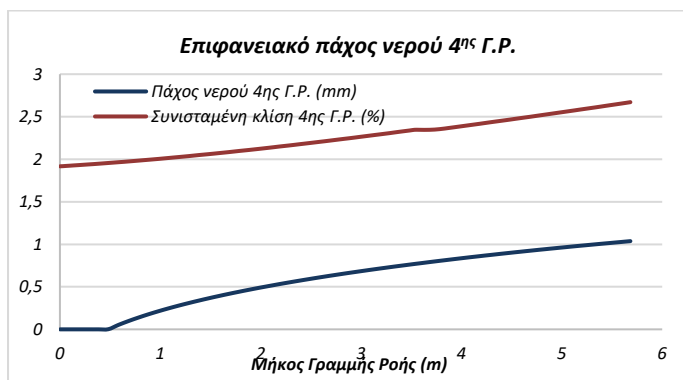
Σχήμα 8.7: Απεικόνιση προβληματικής περιοχής για το μοντέλο δρόμου 4.

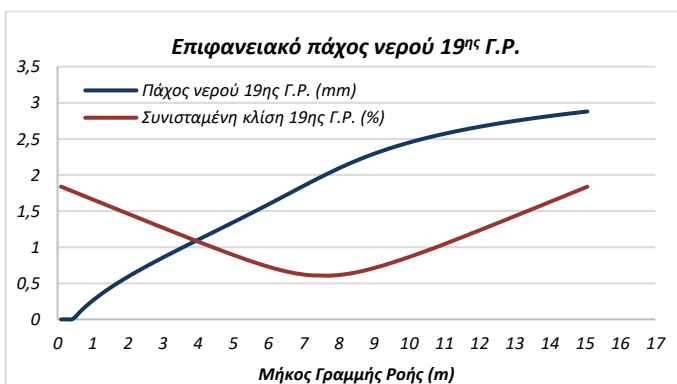
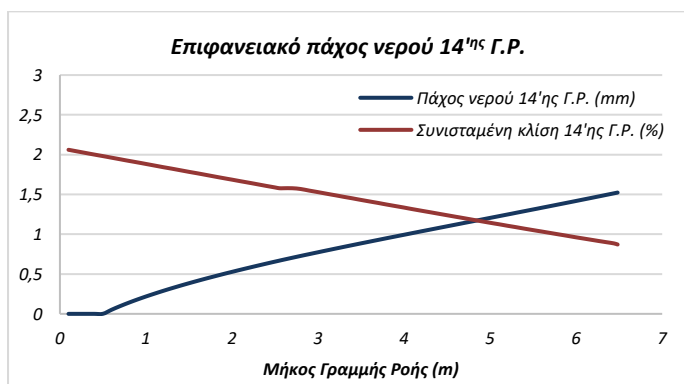
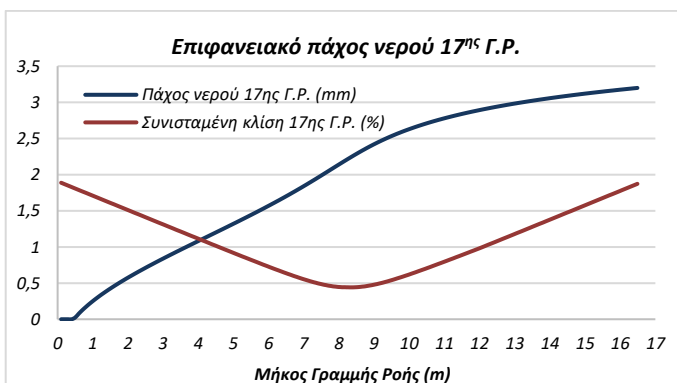
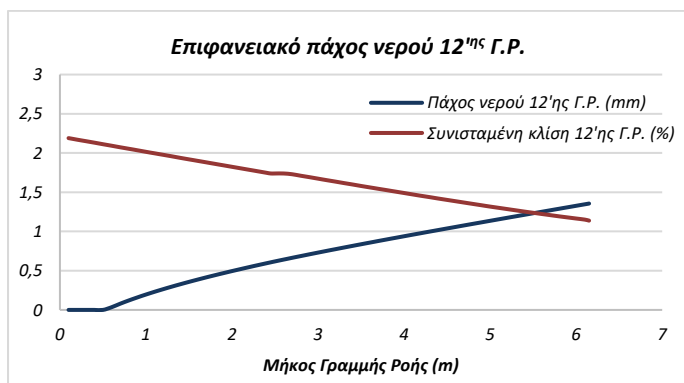
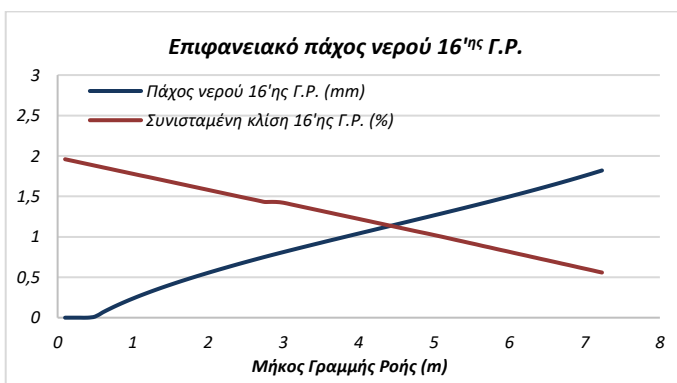
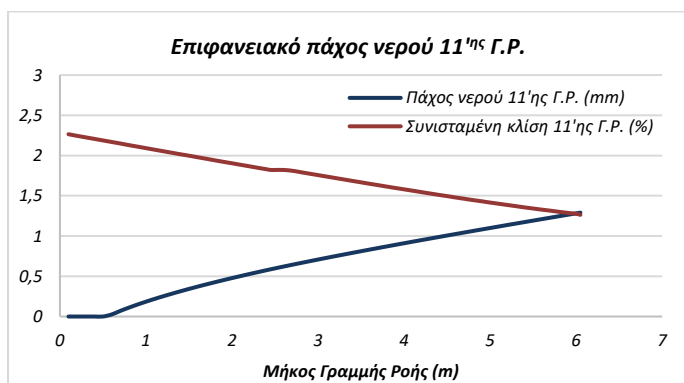
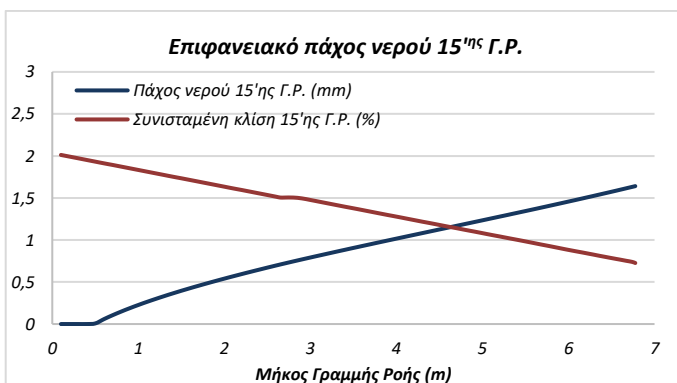
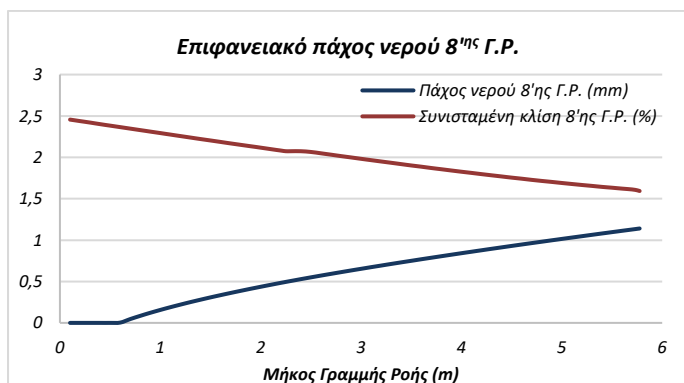


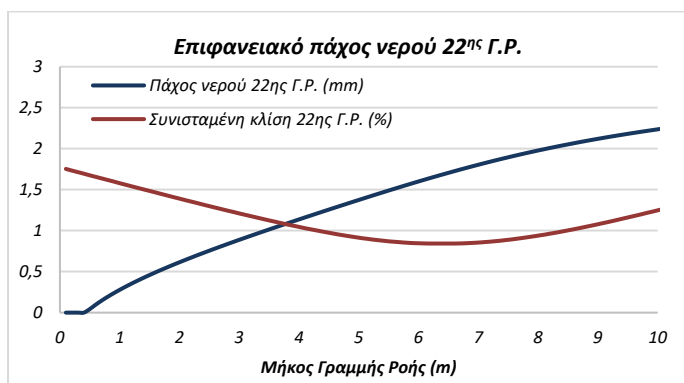
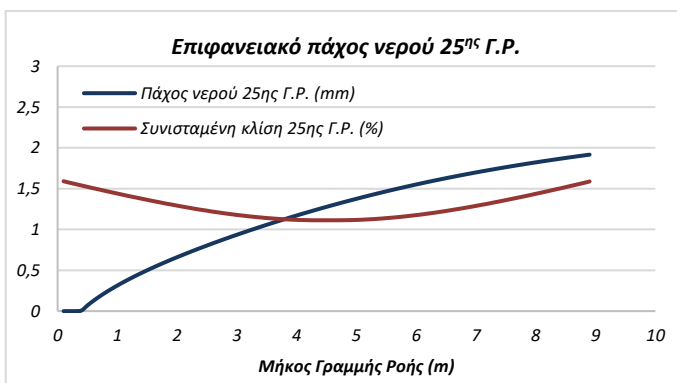
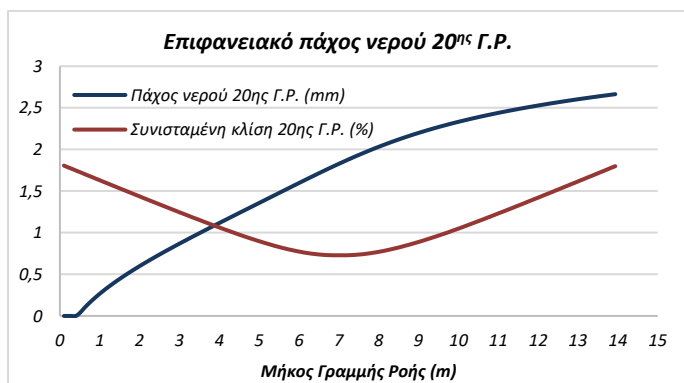
Σχήμα 8.8: Γραμμές ροής δρόμου 4.



## Γραφήματα Υδατικής Στρώσης







## Ταχύτητα Επιφανειακού Νερού

