



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWMM ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΤΤΙΚΟΥ  
ΑΛΣΟΥΣ ΥΠΟ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

**ΑΝΔΡΕΑΣ ΤΣΙΧΡΙΝΤΖΗΣ**

**Επιβλέπων: Ευάγγελος Μπαλτάς, Καθηγητής ΕΜΠ**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ  
ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»**

**Αθήνα, Ιούλιος 2023**



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας κλείνει για εμένα ο μεταπτυχιακός κύκλος σπουδών. Πρόκειται για μια πολύ συγκινητική στιγμή, καθώς αφιερώνοντας πολύ χρόνο στην παρούσα έρευνα και με τη βοήθεια σημαντικών για έμένα ανθρώπων, κατάφερα να επιτύχω και αυτόν το στόχο μου. Προσεγγίζοντας, λοιπόν, στο τέλος του διπλώματος μου, πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Μπαλτά για την τιμή που μου έκανε να με αναλάβει υπό την καθοδήγησή του, την όλη υποστήριξη και την βοήθεια του κατά την περίοδο της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών σπουδών μου. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής μου, κ. Συμεών Μαλαμή και κ. Πανταζή Γεωργίου, για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην εργασία μου. Με τα σχόλια και τις παρεμβάσεις τους με βοήθησαν να εμβαθύνω στο αντικείμενο της αστικής διαχείρισης των υδατικών πόρων. Αξιοσημείωτη και αναντικατάστατη ήταν, επίσης, η συνεισφορά του Δρ. Ιωάννη Κούρτη, μεταδιδάκτορα του Ε.Μ.Π., ο οποίος ήταν συνεχώς παρών για να λύσει κάθε απορία μου και να με βοηθήσει να ξεπεράσω κάθε εμπόδιο που αντιμετώπισα κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, από την επιλογή της περιοχής μελέτης και την εύρεση όλων των απαιτούμενων στοιχείων εισόδου, έως τη βαθμονόμηση και τελική εφαρμογή του μοντέλου SWMM. Επιπλέον, ξεχωριστή μνεία αρμόζει στους γονείς μου, Βασίλη και Αλέκα, τον αδερφό μου Κώστα, καθώς και στους συνεργάτες και φίλους μου, οι οποίοι καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας με στήριξαν και μου συμπαραστάθηκαν απεριόριστα. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «*Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*» για τις γνώσεις που μου προσέφεραν, καθώς και το διοικητικό προσωπικό της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	xv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	xxxι
ABSTRACT .....	xxxiii
EXTENDED ABSTRACT .....	xxxv
Introduction .....	xxxv
Study area.....	xxxv
Methodological Framework – Model SWMM.....	xxxviii
Results .....	xli
Summary and conclusions.....	li
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Στόχοι της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2. Σημασία αποχετευτικού συστήματος και συστήματος ομβρίων .....	1
1.3. Το αποχετευτικό σύστημα κατά την αρχαιότητα.....	2
1.4. Το αποχετευτικό σύστημα στην Αθήνα .....	3
1.4.1. Αρχαιότητα – 1840.....	3
1.4.2. Περίοδος 1840 – 1930.....	3
1.4.3. Περίοδος 1930 - 1950.....	4
1.4.4. Περίοδος 1950 – 1980.....	4
1.4.5. Περίοδος 1980 – σήμερα.....	5
1.5. Μελέτες με χρήση του λογισμικού SWMM.....	5
1.6. Παρουσίαση κεφαλαίων .....	6
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	9
2.1. Γενική περιγραφή .....	9
2.2. Σχεδιασμός λεκανών απορροής.....	10
2.3. Χρήσεις γης.....	11
2.4. Κλίσεις εδάφους.....	17
2.5. Γεωλογική περιγραφή.....	18
2.6. Περιγραφή επεισοδίων υετού Οκτώβρη 1994 και Ιουλίου 1995 .....	19
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ - MONTELO SWMM .....	21
3.1. Εκτίμηση παροχής σχεδιασμού ακαθάρτων.....	21

3.2.	Βροχόπτωση σχεδιασμού - όμβριες καμπύλες .....	23
3.2.1.	Ισχύουσες όμβριες καμπύλες - Αθήνα.....	24
3.2.2.	Μελλοντικές όμβριες καμπύλες - κλιματική αλλαγή .....	25
3.3.	Δημιουργία νετογραφημάτων σχεδιασμού - μέθοδος των εναλλασσόμενων blocks	26
3.4.	Λογισμικό SWMM.....	27
3.4.1.	Γενικά.....	27
3.4.2.	Δυνατότητες του λογισμικού SWMM και τυπικές εφαρμογές.....	29
3.4.3.	Εννοιολογική αντίληψη του μοντέλου .....	31
3.4.4.	Οπτικά αντικείμενα προσομοίωσης λογισμικού (Visual objects) .....	32
3.4.5.	Μη οπτικά αντικείμενα προσομοίωσης λογισμικού (Non-visual objects) .....	37
3.4.6.	Διαδικασία μοντελοποίησης.....	39
3.4.7.	Διαδικασία μοντελοποίησης.....	41
3.4.8.	Μέθοδος υπολογισμού απωλειών βροχής - μέθοδος SCS.....	42
3.4.9.	Διόδευση δυναμικού κύματος .....	49
3.5.	Βαθμονόμηση μοντέλου.....	50
3.6.	Διαστασιολόγηση υπόγειας δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης του νερού στην έξοδο του συστήματος - μέθοδος Puls .....	52
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	56
4.1.	Βαθμονόμηση.....	56
4.2.	Σενάριο 1: Προσομοίωση με χρήση όμβριων καμπυλών περιοχής Αθηνών.....	64
4.3.	Σενάριο 2: Προσομοίωση με χρήση όμβριων καμπυλών περιοχής Αθηνών συμπεριλαμβανομένου και του επεισοδίου του 1994.....	73
4.4.	Σενάριο 3: Προσομοίωση με χρήση όμβριων καμπυλών περιοχής Αθηνών – Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας 2017 .....	83
4.5.	Σενάριο 4: Προσομοίωση με χρήση μελλοντικών όμβριων καμπυλών βάσει σεναρίων κλιματικής αλλαγής- μέση πρόβλεψη .....	92
4.6.	Σενάριο 5: Προσομοίωση με χρήση μελλοντικών όμβριων καμπυλών βάσει σεναρίων κλιματικής αλλαγής- πιο συντηρητική πρόβλεψη.....	102
4.7.	Σενάριο 6: Προσομοίωση με χρήση μελλοντικών όμβριων καμπυλών βάσει σεναρίων κλιματικής αλλαγής- ευνοϊκότερη πρόβλεψη .....	112
4.8.	Σενάριο 7: Προσομοίωση για μεγαλύτερα επεισόδια βροχής- αύξηση βροχής κατά 7%	121
4.9.	Σενάριο 8: Προσομοίωση για μεγαλύτερα επεισόδια βροχής - αύξηση βροχής κατά 10%	124
4.10.	Σενάριο 9: Προσομοίωση για μεγαλύτερα επεισόδια βροχής- αύξηση βροχής κατά 15%.....	127
4.11.	Σενάριο 10: Προσομοίωση για μεγαλύτερα επεισόδια βροχής- αύξηση βροχής κατά 20%	130

4.12.	Σενάριο 11: Προσομοίωση για μεγαλύτερα επεισόδια βροχής- αύξηση βροχής κατά 25%.....	132
4.13.	Σενάριο 12: Προσομοίωση για αλλαγή χρήσης γης τμήματος του Αττικού Άλσους σε αστική ζώνη.....	135
4.14.	Κόμβοι που πλημμυρίζουν .....	138
4.15.	Διαστασιολόγηση δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης (ΔΠΚ). .....	138
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	140
5.1.	Συμπεράσματα.....	140
5.2.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	142
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	144
	Ελληνική.....	144
	Αγγλική.....	146
	Ιστότοποι .....	149
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....	150
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....	152
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ .....	174





## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Table 1: Land Uses

Table 2: Results of statistical calibration tests of the model

Table 3: Number of nodes that flood in each scenario

Table 4: Results of sizing for the water detention basin

Πίνακας 2.1: Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης

Πίνακας 3.1: Τιμές Curve Number (CN) για αστικές χρήσεις γης (Πηγή: USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Πίνακας 3.2: Κατάταξη και χαρακτηριστικά εδαφών (Πηγή: USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Πίνακας 3.3: Τιμές Curve Number (CN) για γεωργικές λεκάνες (Πηγή: USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Πίνακας 3.4: Ρύθμιση τιμής Curve Number (CN) ανάλογα με την προϋπάρχουσα υγρασία του εδάφους (Πηγή: USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων βαθμονόμησης μοντέλου

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης με το λογισμικό SWMM στο βαθμονομημένο μοντέλο

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών- Σενάριο 1

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών- Σενάριο 1

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών- Σενάριο 2

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών- Σενάριο 2

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών- Σενάριο 3

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών- Σενάριο 3

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών- Σενάριο 4

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών- Σενάριο 4

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας 4.15: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αύξηση βροχής 7%- Σενάριο 7

Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αύξηση βροχής 10%- Σενάριο 8

Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αύξηση βροχής 15%- Σενάριο 9

Πίνακας 4.18: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αύξηση βροχής 20%- Σενάριο 10

Πίνακας 4.19: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αύξηση βροχής 25%- Σενάριο 11

Πίνακας 4.20: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αλλαγή χρήσης γης του Αττικού Άλσους- Σενάριο 12

Πίνακας 4.21: Κόμβοι που πλημμυρίζουν σε κάθε σενάριο

Πίνακας 4.22: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης ΔΑ

Πίνακας Π.Α.1: Χρήσιμα μεγέθη για τον υπολογισμό της παροχής ακαθάρτων

Πίνακας Π.Α.2: Υπολογισμός παροχής ακαθάρτων σε κάθε αστική λεκάνη απορροής (ΛΑ)

Πίνακας Π.Β.1: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 1

Πίνακας Π.Β.2: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 1  
Πίνακας Π.Β.3: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 1  
Πίνακας Π.Β.4: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 1  
Πίνακας Π.Β.5: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 1  
Πίνακας Π.Β.6: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 1  
Πίνακας Π.Β.7: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 2  
Πίνακας Π.Β.8: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 2  
Πίνακας Π.Β.9: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 2  
Πίνακας Π.Β.10: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 2  
Πίνακας Π.Β.11: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 2  
Πίνακας Π.Β.12: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 2  
Πίνακας Π.Β.13: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 3  
Πίνακας Π.Β.14: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 3  
Πίνακας Π.Β.15: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 3  
Πίνακας Π.Β.16: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 3  
Πίνακας Π.Β.17: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 3  
Πίνακας Π.Β.18: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 3  
Πίνακας Π.Β.19: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 4  
Πίνακας Π.Β.20: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 4  
Πίνακας Π.Β.21: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 4  
Πίνακας Π.Β.22: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 4  
Πίνακας Π.Β.23: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 4  
Πίνακας Π.Β.24: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 4  
Πίνακας Π.Β.25: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Β.26: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Β.27: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Β.28: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Β.29: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Β.30: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Β.31: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας Π.Β.32: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας Π.Β.33: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας Π.Β.34: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας Π.Β.35: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας Π.Β.36: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας Π.Γ.1: Βαθμονόμηση αγωγού 1313- Υπολογισμός συντελεστή NSE

Πίνακας Π.Γ.2: Βαθμονόμηση αγωγού 1640- Υπολογισμός συντελεστή NSE

Πίνακας Π.Γ.3: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 1

Πίνακας Π.Γ.4: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 2

Πίνακας Π.Γ.5: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 3

Πίνακας Π.Γ.6: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 4

Πίνακας Π.Γ.7: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Γ.8: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 6

Πίνακας Π.Γ.9: Απορροές για αυξημένη βροχόπτωση κατά 7%, 10%, 15%, 20% και 25% καθώς και για αλλαγή χρήσης γης του Αττικού Άλσους σε αστική περιοχή στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάρια 7, 8, 9, 10, 11 και 12



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Figure 1: Visualization of the combined sewer system of Athens (Source: Κούρτης κ.α. 2017)

Figure 2: Combined sewer network of study area

Figure 3: a) Land uses of study area b) Slopes of study area

Figure 4: Digital elevation model (DEM) of study area

Figure 5: Hydrograph of conduit 1313

Figure 6: Hydrograph of conduit 1640

Figure 7: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 1

Figure 8: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 2

Figure 9: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 3

Figure 10: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown - Scenario 1

Figure 11: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown - Scenario 3

Figure 12: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown - Scenario 2

Figure 13: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 4

Figure 14: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 5

Figure 15: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 6

Figure 16: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown - Scenario 4

Figure 17: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown – Scenario 5

Figure 18: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown - Scenario 6

Figure 19: Hydrograph of sewer network outlet – Scenario 11

Figure 20: Hydrograph of sewer network outlet – Scenario 12

Figure 21: Hydrograph of correlation of inflow and outflow in the water detention basin

Εικόνα 1.1: Αλληλεπίδραση πολιτών και περιβάλλοντος (Πηγή: Butler et al. 2018)

Εικόνα 2.1: Χάρτης αποχετευτικού δικτύου Αθηνών (Πηγή:

<https://www.eydap.gr/TheCompany/DrainageAndSewerage/SewageNetwork/>)

Εικόνα 2.2: Υπόμνημα χάρτη αποχετευτικού δικτύου Αθηνών

(Πηγή: <https://www.eydap.gr/TheCompany/DrainageAndSewerage/SewageNetwork/>)

Εικόνα 2.3: Απεικόνιση παντοροϊκού δικτύου Αθηνών (Πηγή: Κούρτης κ.α. 2017)

Εικόνα 2.4: Περιοχή Μελέτης, τμήμα της υπολεκάνης Z2 (Πηγή: ArcMap 10.5.1.)

Εικόνα 2.5: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης



Εικόνα 2.6: Αστικές λεκάνες απορροής στην περιοχή μελέτης

Εικόνα 2.7: Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης

Εικόνα 2.8: Κλίσεις εδάφους στην περιοχή μελέτης

Εικόνα 3.1: Τυπικό αποχετευτικό δίκτυο αστικής περιοχής (Πηγή: Rossman and Simon 2022)

Εικόνα 3.2: Οπτικά αντικείμενα μοντελοποίησης του συστήματος αποχέτευσης (Πηγή: Rossman and Simon 2022)

Εικόνα 3.3: Διαθέσιμες διατομές αγωγών λογισμικού SWMM (Πηγή: Rossman and Simon 2022)

Εικόνα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση των τριών βασικών παραμέτρων ενός μοναδιαίου υδρογραφήματος (Πηγή: Rossman and Simon 2022)

Εικόνα 3.5: Παράδειγμα εγκάρσιας διατομής σε φυσικό κανάλι (Πηγή: Rossman and Simon 2022)

Εικόνα 3.6: Κατηγορίες εδαφών λόγω της υφής (Πηγή: USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Εικόνα 3.7: Σύστημα δεξαμενής συγκράτησης εν σειρά (Πηγή: Τσιχριντζής 1999)

Εικόνα 4.1: Υδρογράφημα αγωγού 1313

Εικόνα 4.2: Συσχέτιση παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων μοντέλου για τον αγωγό 1313

Εικόνα 4.3: Συσχέτιση παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων μοντέλου για τον αγωγό 1640

Εικόνα 4.4: Υδρογράφημα αγωγού 1640

Εικόνα 4.5: Υετογράφημα παρατηρήσεων 1/1/2005

Εικόνα 4.6: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος (αγωγός 1621) στο βαθμονομημένο μοντέλο

Εικόνα 4.7: Η απορροή στους αγωγούς του βαθμονομημένου μοντέλου κατά την αιχμή

Εικόνα 4.8: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές).

Εικόνα 4.9: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών - Σενάριο 1

Εικόνα 4.10: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 1

Εικόνα 4.11: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=2$  έτη - Σενάριο 1

Εικόνα 4.12: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=5$  έτη - Σενάριο 1

Εικόνα 4.13: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=10$  έτη - Σενάριο 1

Εικόνα 4.14: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=25$  έτη - Σενάριο 1

Εικόνα 4.15: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=50$  έτη - Σενάριο 1

Εικόνα 4.16: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=100$  έτη - Σενάριο 1

Εικόνα 4.17: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.

Εικόνα 4.18: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.

Εικόνα 4.19: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.

Εικόνα 4.20: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.

Εικόνα 4.21: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος) Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.

Εικόνα 4.22: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.

Εικόνα 4.23: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών - Σενάριο 2

Εικόνα 4.24: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 2

Εικόνα 4.25: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 2$  έτη - Σενάριο 2

Εικόνα 4.26: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 5$  έτη - Σενάριο 2

Εικόνα 4.27: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 10$  έτη - Σενάριο 2

Εικόνα 4.28: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 25$  έτη - Σενάριο 2

Εικόνα 4.29: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 50$  έτη - Σενάριο 2

Εικόνα 4.30: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 100$  έτη - Σενάριο 2

Εικόνα 4.31: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.

Εικόνα 4.32: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμη (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.

Εικόνα 4.33: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμη (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.

Εικόνα 4.34: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμη (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.

Εικόνα 4.35: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμη (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.

Εικόνα 4.36: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμη (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.

Εικόνα 4.37: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών - Σενάριο 3

Εικόνα 4.38: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 3

Εικόνα 4.39: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 2$  έτη - Σενάριο 3

Εικόνα 4.40: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 5$  έτη - Σενάριο 3

Εικόνα 4.41: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=10$  έτη - Σενάριο 3

Εικόνα 4.42: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=25$  έτη - Σενάριο 3

Εικόνα 4.43: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=50$  έτη - Σενάριο 3

Εικόνα 4.44: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=100$  έτη- Σενάριο 3

Εικόνα 4.45: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.

Εικόνα 4.46: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.

Εικόνα 4.47: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.

Εικόνα 4.48: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.

Εικόνα 4.49: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.

Εικόνα 4.50: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.

Εικόνα 4.51: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών - Σενάριο 4

Εικόνα 4.52: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 4

Εικόνα 4.53: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 2$  έτη - Σενάριο 4

Εικόνα 4.54: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 5$  έτη - Σενάριο 4

Εικόνα 4.55: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 10$  έτη - Σενάριο 4

Εικόνα 4.56: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 25$  έτη - Σενάριο 4

Εικόνα 4.57: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 50$  έτη - Σενάριο 4

Εικόνα 4.58: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 100$  έτη - Σενάριο 4

Εικόνα 4.59: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.

Εικόνα 4.60: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.

Εικόνα 4.61: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.

Εικόνα 4.62: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.

Εικόνα 4.63: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.

Εικόνα 4.64: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.

Εικόνα 4.65: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 5

Εικόνα 4.66: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών- Σενάριο 5

Εικόνα 4.67: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 2$  έτη - Σενάριο 5

Εικόνα 4.68: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 5$  έτη - Σενάριο 5

Εικόνα 4.69: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 10$  έτη - Σενάριο 5

Εικόνα 4.70: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 25$  έτη - Σενάριο 5

Εικόνα 4.71: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 50$  έτη - Σενάριο 5

Εικόνα 4.72: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 100$  έτη - Σενάριο 5

Εικόνα 4.73: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.

Εικόνα 4.74: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.

Εικόνα 4.75: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.

Εικόνα 4.76: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.

Εικόνα 4.77: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.

Εικόνα 4.78: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.

Εικόνα 4.79: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών - Σενάριο 6

Εικόνα 4.80: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών- Σενάριο 6

Εικόνα 4.81: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 2$  έτη - Σενάριο 6

Εικόνα 4.82: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T= 5$  έτη - Σενάριο 6



Εικόνα 4.83: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=10$  έτη - Σενάριο 6

Εικόνα 4.84: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=25$  έτη - Σενάριο 6

Εικόνα 4.85: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=50$  έτη - Σενάριο 6

Εικόνα 4.86: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=100$  έτη - Σενάριο 6

Εικόνα 4.87: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.

Εικόνα 4.88: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.

Εικόνα 4.89: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.

Εικόνα 4.90: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.

Εικόνα 4.91: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.

Εικόνα 4.92: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.

Εικόνα 4.93: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αύξηση βροχής 7% και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 7

Εικόνα 4.94: Η απορροή για αύξηση βροχόπτωσης 7% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή - Σενάριο 7.

Εικόνα 4.95: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αύξηση βροχόπτωσης 7% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 7.

Εικόνα 4.96: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αύξηση βροχής 10% και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 8

Εικόνα 4.97: Η απορροή για αύξηση βροχόπτωσης 10% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή.- Σενάριο 8

Εικόνα 4.98: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αύξηση βροχόπτωσης 10% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 8.

Εικόνα 4.99: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αύξηση βροχής 15% και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 9

Εικόνα 4.100: Η απορροή για αύξηση βροχόπτωσης 15% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή.- Σενάριο 9

Εικόνα 4.101: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αύξηση βροχόπτωσης 15% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το

άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 9

Εικόνα 4.102: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αύξηση βροχής 20% και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 10

Εικόνα 4.103: Η απορροή για αύξηση βροχόπτωσης 20% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή.- Σενάριο 10

Εικόνα 4.104: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αύξηση βροχόπτωσης 20% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 10

Εικόνα 4.105: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αύξηση βροχής 25% και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 11

Εικόνα 4.106: Η απορροή για αύξηση βροχόπτωσης 25% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή.- Σενάριο 11

Εικόνα 4.107: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αύξηση βροχόπτωσης 25% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 11

Εικόνα 4.108: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αλλαγή χρήσης γης τμήματος του Αττικού Άλσους σε αστική ζώνη και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 12

Εικόνα 4.109: Η απορροή για αλλαγή χρήσης γης τμήματος του Αττικού Άλσους σε αστική ζώνη στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή.- Σενάριο 12

Εικόνα 4.110: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αλλαγή χρήσης γης τμήματος του Αττικού Άλσους σε αστική ζώνη στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή

(μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) -  
Σενάριο 11

Εικόνα 4.111: Υδρογράφημα συσχέτισης της εισροής και της εκροής στην ΔΚ

Εικόνα Π.Β.1: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 1

Εικόνα Π.Β.2: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 1

Εικόνα Π.Β.3: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 1

Εικόνα Π.Β.4: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 1

Εικόνα Π.Β.5: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 1

Εικόνα Π.Β.6: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 2

Εικόνα Π.Β.7: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 2

Εικόνα Π.Β.8: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 2

Εικόνα Π.Β.9: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 2

Εικόνα Π.Β.10: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 2

Εικόνα Π.Β.11: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 3

Εικόνα Π.Β.12: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 3

Εικόνα Π.Β.13: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 3

Εικόνα Π.Β.14: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 3

Εικόνα Π.Β.15: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 3

Εικόνα Π.Β.16: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 4

Εικόνα Π.Β.17: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 4

Εικόνα Π.Β.18: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 4

Εικόνα Π.Β.19: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 4

Εικόνα Π.Β.20: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 4

Εικόνα Π.Β.21: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 5

Εικόνα Π.Β.22: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 5

Εικόνα Π.Β.23: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 5  
Εικόνα Π.Β.24: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 5  
Εικόνα Π.Β.25: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 5  
Εικόνα Π.Β.26: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 6  
Εικόνα Π.Β.27: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 6  
Εικόνα Π.Β.28: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 6  
Εικόνα Π.Β.29: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 6  
Εικόνα Π.Β.30: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 6



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στη υδρολογική και υδραυλική αναπαράσταση και προσομοίωση υπολεκάνης του παντοροϊκού αποχετευτικού δικτύου της Αθήνας με τη χρήση του μοντέλου SWMM της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (USEPA). Συγκεκριμένα, μελετάται τμήμα της ζώνης Z2 του παντοροϊκού αποχετευτικού δικτύου των Αθηνών, δηλαδή η αστική λεκάνη ανάμεσα στο Αττικό Άλσος και το Πεδίον του Άρεως (περιοχή Κυψέλης). Αρχικά, η λεκάνη διαχωρίστηκε σε υπολεκάνες με την βοήθεια του λογισμικού AutoCAD, ενώ μέσω του λογισμικού ArcGIS απεικονίστηκαν οι χρήσεις γης, οι κλίσεις εδάφους και η γεωλογία της περιοχής. Έπειτα, παρουσιάζεται η μεθοδολογία εκτίμησης της παροχής των ακαθάρτων και σχεδιασμού των υετογραφημάτων εισόδου στο μοντέλο. Η αρχική προσομοίωση με το λογισμικό SWMM βασίστηκε σε μια ιστορική χρονοσειρά βροχόπτωσης της 1/1/2005 και ακολούθησε η βαθμονόμηση του μοντέλου βάσει πραγματικών μετρήσεων απορροής που ήταν διαθέσιμες σε δύο αγωγούς (1313 και 1640) του δικτύου. Στην συνέχεια, εξετάστηκε η απόκριση του βαθμονομημένου μοντέλου σε σενάρια χρήσης διαφορετικών εξισώσεων ομβρίων καμπυλών που περιγράφουν την περιοχή της Αθήνας, καθώς και μελλοντικών ομβρίων καμπυλών της περιοχής που βαζίζονται σε προβέψεις κλιματικής αλλαγής για το έτος 2100. Οι βροχοπτώσεις που εξετάστηκαν είχαν περιόδους επαναφοράς, 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών. Επιπλέον, εξετάστηκαν σενάρια παρουσίας στην περιοχή εντονότερων επεισοδίων βροχής, καθώς και ένα υποθετικό σενάριο αλλαγής χρήσης γης τμήματος του Αττικού Άλσους σε αστική ζώνη. Σε αυτή την περίπτωση, οι αλλαγές στο μέγεθος της απορροής κρίθηκαν στατιστικά μη σημαντικές σε επίπεδο εμπιστοσύνης 5%, βάσει του ελέγχου Student t-test. Έπειτα, εξετάστηκε για όλα τα παραπάνω σενάρια η επάρκεια των αγωγών του συστήματος, καθώς και το ενδεχόμενο υπερχειλίσις των φρεατίων και παρουσίας φαινομένων δυαδικής ροής στο σύστημα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το αποχετευτικό δίκτυο ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην διαχείριση της απορροής της βροχής στις περισσότερες περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Εντούτοις, στο πιο ακραίο σενάριο κλιματικής αλλαγής φαίνεται ότι η χωρητικότητα του αποχετευτικού συστήματος περιορίζεται σε βροχοπτώσεις περιόδου επαναφοράς έως 5 ετών. Τέλος, εξετάστηκε η κατασκευή μιας δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης στην έξοδο του συστήματος με σκοπό την μείωση της αιχμής του υδρογραφήματος πριν την εκροή στον Κηφισό ποταμό.





## ABSTRACT

This postgraduate thesis focuses on the hydrological and hydraulic representation and simulation of a sub-catchment area of the combined sewer system of Athens using the Storm Water Management Model (SWMM) developed by the United States Environmental Protection Agency (USEPA). Specifically, it examines part of Zone Z2 of the combined sewer system of Athens, which refers to the urban catchment area between Attiko Alsos and Pedion tou Areos (Kypseli area). Initially, the catchment area was divided into sub-catchments using the AutoCAD software, while ArcGIS was used to depict land uses, soil slopes, and geology of the area. Subsequently, the methodology for estimating the inflow rates of wastewater and designing the input hydrographs into the model is presented. The initial simulation with the SWMM software was based on a historical rainfall time series from January 1, 2005, and the model calibration was performed based on actual flow measurements available from two conduits (1313 and 1640) of the network. Then, the response of the calibrated model was examined under scenarios considering various intensity-duration-frequency (IDF) curves that describe the Athens area, as well as future IDF curves for the area considering climate change projections for year 2100. The rainfall events analyzed included return periods of 2, 5, 10, 25, 50, and 100 years. Additionally, scenarios with the presence of intense rainfall events in the area were examined, as well as a hypothetical scenario of land use change of a portion of Attiko Alsos from park to urban development. In this case, the changes in the flow magnitude were statistically non-significant at a 5% confidence level, based on the Student t-test. Furthermore, the adequacy of the system's conduits, the potential for overflow in catch basins, and the occurrence of surcharge in the system were assessed for all the aforementioned scenarios. The results indicate that the sewer network adequately manages rainfall runoff in most tested cases. Nevertheless, for the most extreme climate change scenario tested, the capacity of the system reduces to a return period of 5 years. Finally, the construction of a detention basin at the system's outlet is examined with the aim of reducing the hydrograph peak before its entrance to Kifisos river.



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

This postgraduate thesis focuses on the hydrological and hydraulic representation and simulation of a sub-catchment area of the combined sewer system of Athens using the Storm Water Management Model (SWMM) developed by the United States Environmental Protection Agency (USEPA). Specifically, the model configuration follows manual calibration based on actual measurements for the size of the catchments, and the calibration results are evaluated using statistical coefficients. Additionally, the thesis examines various scenarios of climate change, increased rainfall, and land use change to capture their impact on the runoff of the urban watershed. Finally, the possibility of constructing a temporary water retention tank at the system's outlet is examined.

### Study area

The study area constitutes a section of the watershed of the sewer system of Athens. Athens is partially served by a combined sewer network. This system drains a watershed of 1,310 ha and collects wastewater from an area of 1,250 ha. This network primarily serves the areas between Plaka - Zappeio and Gyzi - Kolonos.

In more detail, the rainwater ends into Kifisos River, which does not have a permanent flow, and the stream of Prophet Daniel, which is a tributary of Kifisos. The wastewater is directed to the Central Sewerage Conduit (C.S.C.), where 7 out of the planned 9 overflow structures have been constructed. Out of these, 5 discharge into Kifisos River and 2 into its tributary Prophet Daniel. The watershed consists of 10 sub-watersheds, namely B, C, D, E, Z1, Z2, H1, H2, and  $\Theta$  (Fig. 1). In this thesis, the study area is sub-watershed Z2, which covers an area of 0.66 km<sup>2</sup> and consists of 38 egg-shaped sewers and 6 circular sewers (223, 224, 225, 226, 227, and 228). Additionally, there are 45 manholes located between the conduits and one outlet (Fig. 2).



Figure 1: Visualization of the combined sewer system of Athens (Source: Κούρτης κ.α. 2017)

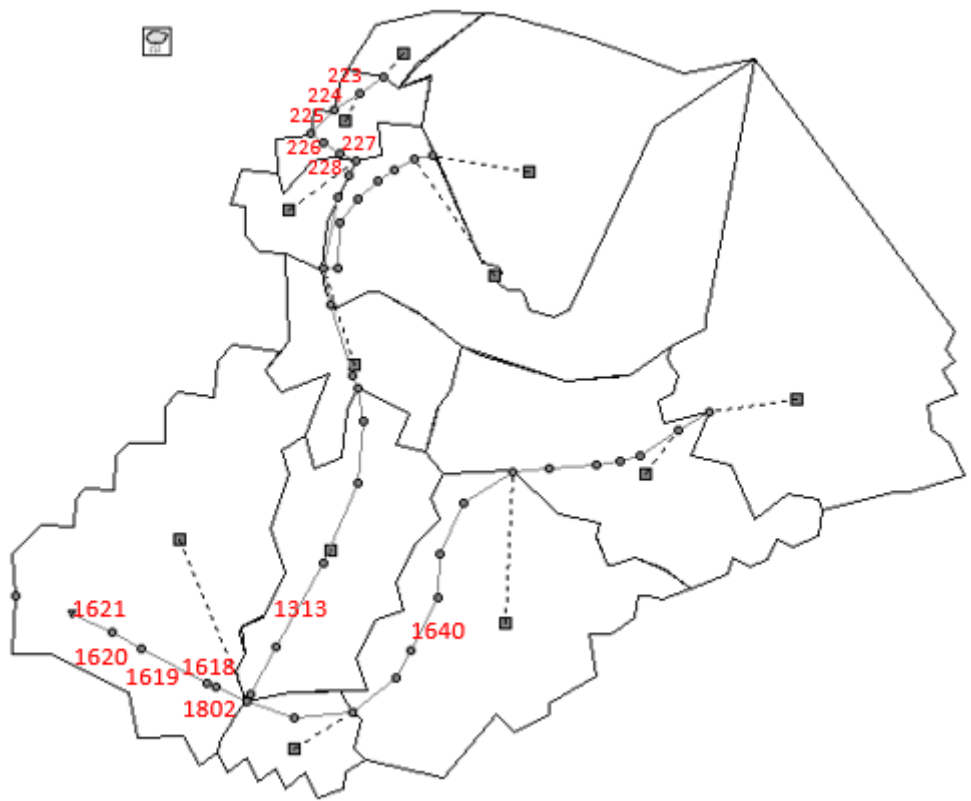


Figure 2: Combined sewer network of study area

In order to simulate a comprehensive sewer network, it is important to understand the hydrological behavior of the urban watershed under study. This is achieved by collecting land use data, as the runoff coefficient is calculated based on this information. The runoff coefficient determines the proportion of rainfall at each point of the watershed that will become runoff, considering land use, slope and the geological characteristics of the area. Land use data was collected from Corine Land Cover 2018 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>), and based on this, the study area is characterized by an intense urban nature. Specifically, besides the road network, most of the watershed consists of continuous urban fabric, as shown in Table 1. The presence of green areas is also significant, mainly in the parts of the watershed located in Pedion tou Areos and Attiko Alsos. Additionally, smaller areas of discontinuous dense urban fabric, industrial units, and recreational facilities are present. The above information is summarized in the map in Fig. 3a, which displays the land use of the area as derived using ArcGIS software. The slopes of the study area are presented in Fig. 3b and the digital elevation model in Fig. 4.

Table 1: Land Uses

<b>Code CLC 2018</b>	<b>Corine Land Cover 2018</b>	<b>Area, %</b>
11100	Continuous urban fabric	21.54
12100	Industrial, commercial, public, military and private units	1.13
11210	Discontinuous dense urban fabric	1.69
14100	Green urban areas	16.33
14200	Sports and leisure facilities	0.42
12220	Other roads and associated land	58.89

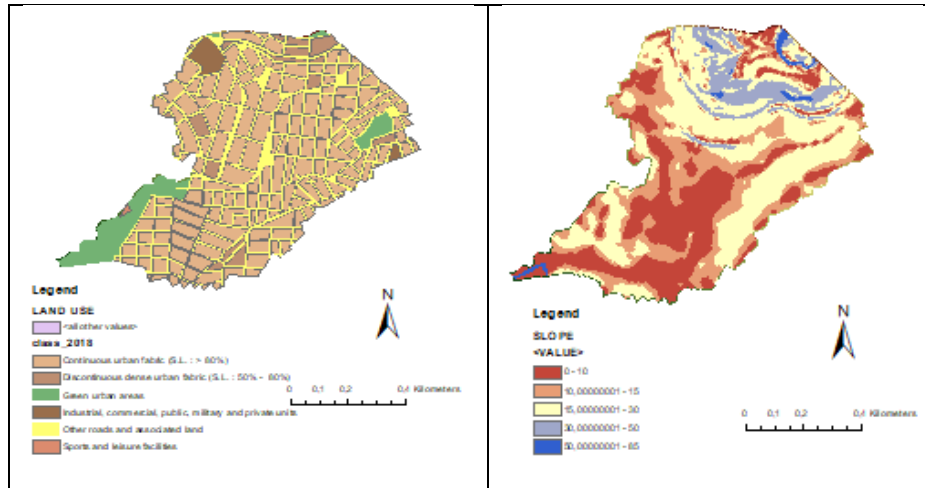


Figure 3: a) Land uses of study area b) Slopes of study area

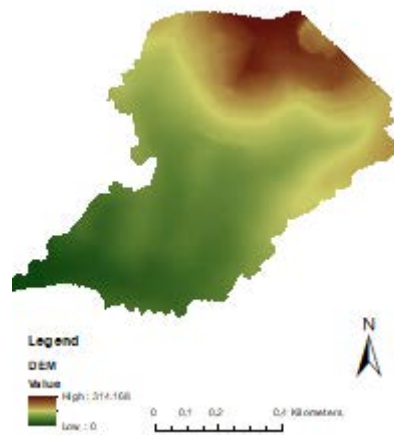


Figure 4: Digital elevation model (DEM) of study area

### Methodological Framework – Model SWMM

In order to complete the simulation using the SWMM software, appropriate configuration of input data in the model and processing of output data were necessary. More specifically, a series of established methodologies and equations were used to calculate the runoff from the wastewater, determine the runoff coefficient (CN) of the study area, generate hyetographs, calibrate the model, and size a temporary water retention tank.

The Storm Water Management Model (SWMM) is a product of the United States Environmental Protection Agency (USEPA). The purpose of the model is the simulation of hydrological and hydraulic processes using rainfall-runoff relationships and water quality controls. SWMM represents the watershed as a collection of

hydrological and hydraulic elements (sub-watersheds, conduits, manholes). Moreover, SWMM can use the dual drainage system to study flood phenomena. For the purpose of this thesis, the dynamic wave method is used as routing method. The Soil Conservation Service (SCS) method is used to calculate rainfall losses.

The calibration of the model was the more critical step of this study. Specifically, the calibration was based on actual measurements of runoff at two points, conduits 1313 and 1640, following a rainfall event of 1/1/2005. Main calibration parameters were the Curve Number (CN) and the percentage of imperviousness (%Impervious) of the soil. Other parameters with modifications were the Manning coefficient for both impervious and pervious parts of the urban watershed and of the conduits of the sewer network, as well as the slope and the width of each urban sub-watershed. The evaluation of the calibration results of the model includes the following metrics:

- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)
- Slope of the regression line ( $\gamma$ ) and correlation coefficient ( $R^2$ ) in a scatter plot
- Root Mean Square Error (RMSE)
- Number of Flow Observations (NOF)
- Percent BIAS (PBIAS)

Following the calibration of the model, several alternative scenarios were examined using the calibrated model. The first category of scenarios (Scenarios 1 – 3) analyzed the model's response using different intensity-duration-frequency (IDF) curves, designed for the region of Athens (Eqs. 1 – 3). Specifically, scenario 1 used the IDF curve (Eq. 1) of Mimikou et al. (2000). In scenario 2, the IDF curve of Eq. (2) (Mimikou et al. 2000) was used. The difference between these two scenarios was that Eq. (2) takes also into consideration a very intense historical rain event of October 1994. The third scenario used the IDF curve (Eq. 3) of the Flood Risk Management Plan for Attica River Basin District (EL06 - 2017). In each of the three scenarios, the study examined return periods of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years.

$$i = 15.39 T^{0.276} t^{-0.725} \quad (1)$$

$$i = 15.56 T^{0.286} t^{-0.715} \quad (2)$$

$$i = 162.95(T^{0.185} - 0.698) \left(1 + \frac{d}{0.124}\right)^{-0.622} \quad (3)$$

Furthermore, in Scenarios 4 – 6, future rainfall curves for the year 2100, based on climate change projections (Kourtis et al. 2022) were used. In all the cases, the return periods examined were again 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years. The rainfall in these scenarios was calculated by Eqs. (4) – (6). Eq. (4) describes a mean forecast for the year 2100, while Eqs. (5) and (6) present the upper and lower limits of this projection at 5% confidence level:

$$i=25.76 T^{0.4}(d + 0,348)^{-0.797} \quad \text{Mean} \quad (4)$$

$$i=34.06 T^{0.443}(d + 0,129)^{-0.698} \quad \text{Upper} \quad (5)$$

$$i=19.67 T^{0.361}(d + 0,647)^{-0.909} \quad \text{Lower} \quad (6)$$

Scenarios 7 - 11 examined intense rainfall events in the study area based on the historical rainfall event of 1/1/2005. Specifically, the study in these scenarios referred to an increase of 7%, 10%, 15%, 20% and 25% of the rainfall depth. Scenario 12 is a hypothetical scenario of land use change in a part of Attiko Alsos region, from park to continuous urban fabric. In these cases (Scenarios 7 – 12) the significance of changes in the flow magnitude were statistically tested by Student t-test at a 5% confidence level.

Finally, the construction of a detention basin at the system's outlet is examined with the aim of reducing the hydrograph peak before its entrance to Kifisos river (conduit 1621). In order to calculate the runoff that enters the basin, we first used Eq. (1) to calculate the rainfall. For the purpose of this study, a rainfall with return period of ten years was used, because of its use in the design of sewer systems. The duration of the rainfall was one hour.



## Results

The results of simulating the Athens urban watershed, specifically the Z2 sub-basin, using the SWMM software are presented. The calibration of the model was based on actual flow measurements in conduits 1313 and 1640. As for the conduit 1313 the results of the calibration were very good as it is shown in Fig. 5 and Table 2. In conduit 1640, the results of the calibration were also good, but not as good as in the previous case, as we can see in Fig. 6 and Table 2. The main difference between observed and computed hydrographs appears, in this case, between hours 3:50 and 5:30, where the model results underestimated the observations.

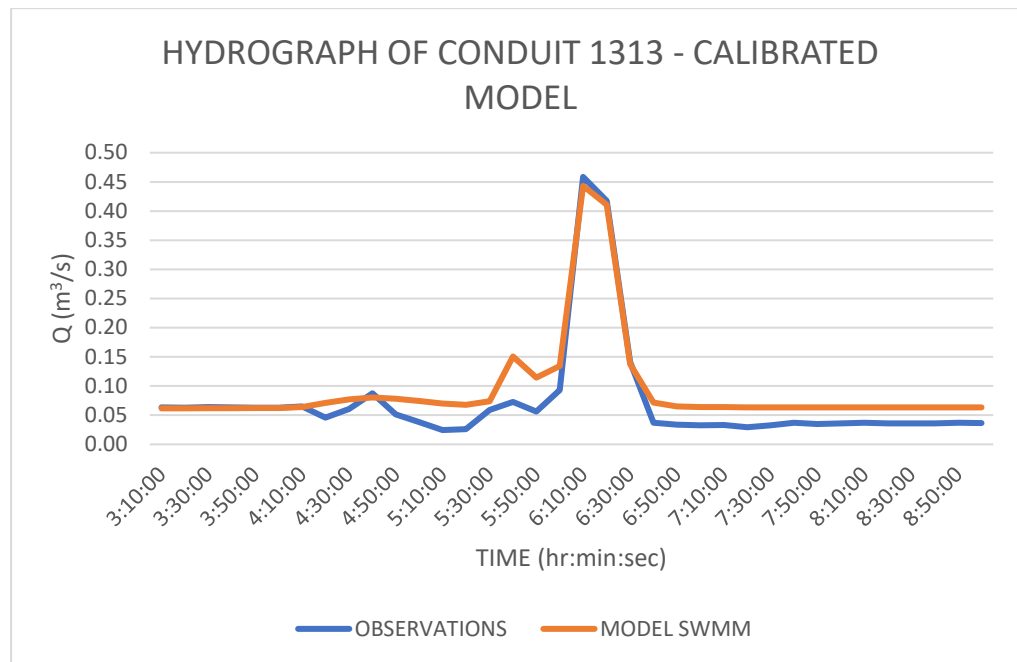


Figure 5: Hydrograph of conduit 1313

Table 2: Results of statistical calibration tests of the model

Parameter	Best Values	Conduit 1313	Conduit 1640
<i>NSE</i>	0.75-1	0.897	0.545
<i>R</i> <sup>2</sup>	~1	0.948	0.855
$\gamma$	~1	1.05	0.77
<i>NOF</i>	0-1	0.407	0.479
<i>PBIAS</i>	±25%	-30%	19%

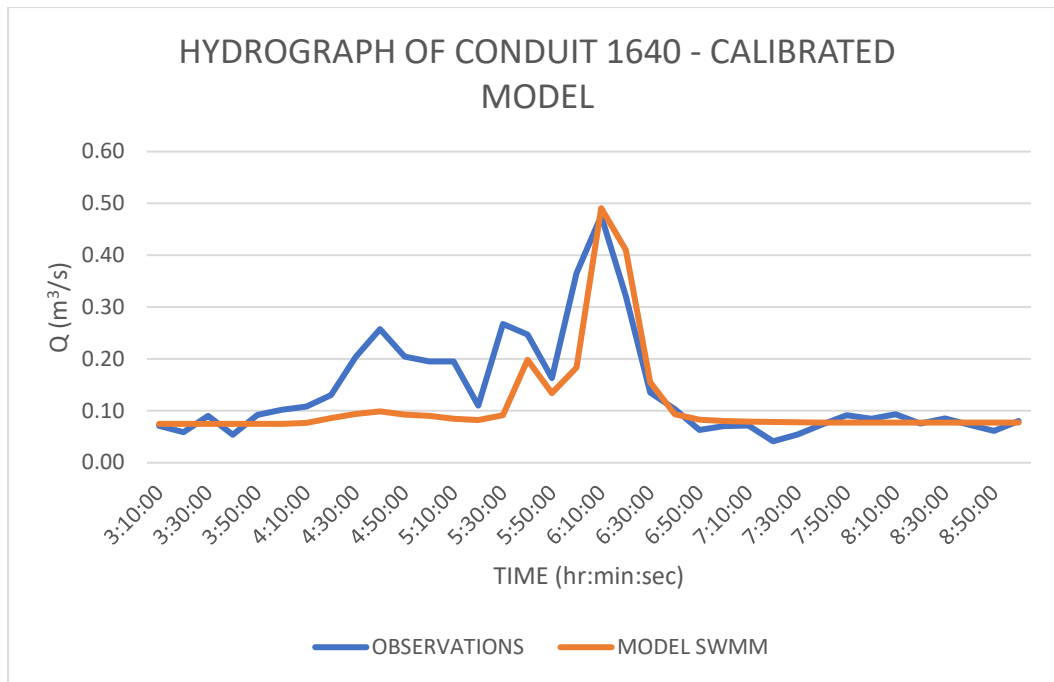


Figure 6: Hydrograph of conduit 1640

In the first category of scenarios, IDF curves (Eq. 1 – 3) for the Athens area were used to generate hyetographs. As we can see from the hydrographs of Figs. 7 to 9, the system responded well in the management of runoff for rainfalls with return periods of less than 50 years. Especially, for return period of 10 years, which is the one used for sizing a sewer system, we can see in the profile of Figs. 10 to 12 a free surface flow in the last 5 conduits of the sewer system.

In the second category of scenarios, future IDF curves (Eq. 4 - 6) for the area of Athens showed more extreme results. In Scenario 4 of mean projection, we can see that for rainfalls with return periods of more than 50 years, the peak of the hydrograph (Fig. 13) is cut off. This is due to not adequate capacity of the system (conduit 1621) and overflow on the street, and the existence of phenomena of dual flow. Furthermore, in scenario 5 of the upper limit of the projection, the peak of the hydrograph (Fig. 14) is also cut off for rainfalls with return periods of more than 10 years, which also indicates overflow in the streets of the system and phenomena of dual flow. Scenario 6 presented the lowest values of runoff of any of the 6 scenarios (Fig. 15). For return period of 10 years, we can see that in Scenarios 4 to 6 there was a free surface flow in the last 5 conduits of the sewer system (Fig. 16 to Fig. 18), but, especially in Scenario 5, the ratio of the uniform depth to the diameter of the conduit ( $y/D$ ) is larger than 80% (Fig. 17),

which is a design guideline for sewer systems. Finally, for each scenario and return period, the possibility of flooding in the network's manholes was examined (Table 3). The results show that Scenario 5 presents the most critical values of runoff in the system.

Furthermore, the model's response to the possibility of higher rainfall depths was examined. Specifically, the change in runoff in each of the five different scenarios, ranging from a 7% to 25% increase in initial rainfall data, was considered as non-significant, following the Student t-test at a 5% confidence level, even for the most extreme case of Scenario 11 (Fig. 19). The last scenario (Scenario 12), which was examined in this thesis, involved the hypothetical urbanization in the upstream area of the Z2 sub-basin, particularly in the Attiko Alsos region and showed again non-significant changes in runoff at a confidence level of 5% (Fig. 20).

Finally, the results of the sizing of a water detention basin in the Pedion tou Areos area, where the Z2 sub-basin ends, are presented in Table 4. As we can see from the hydrograph of Fig. 21, the suggested dimensions of this basin are able to reduce the peak of the hydrograph from 5.93 m<sup>3</sup>/s to 5.11 m<sup>3</sup>/s.

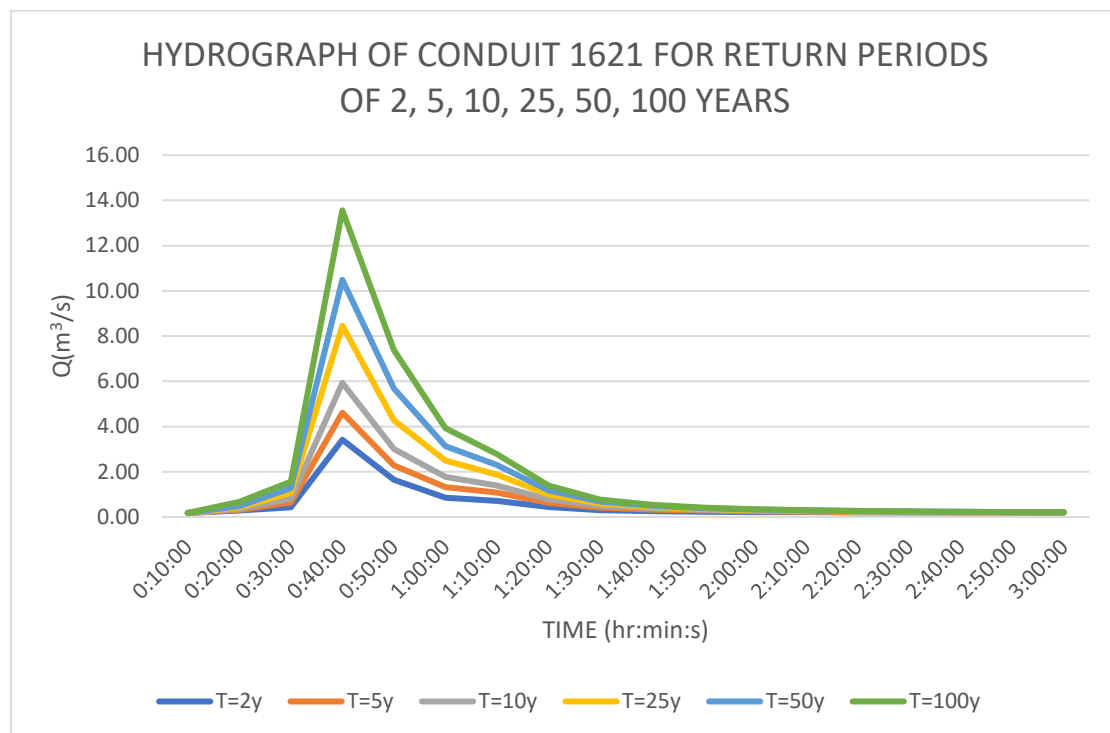


Figure 7: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 1

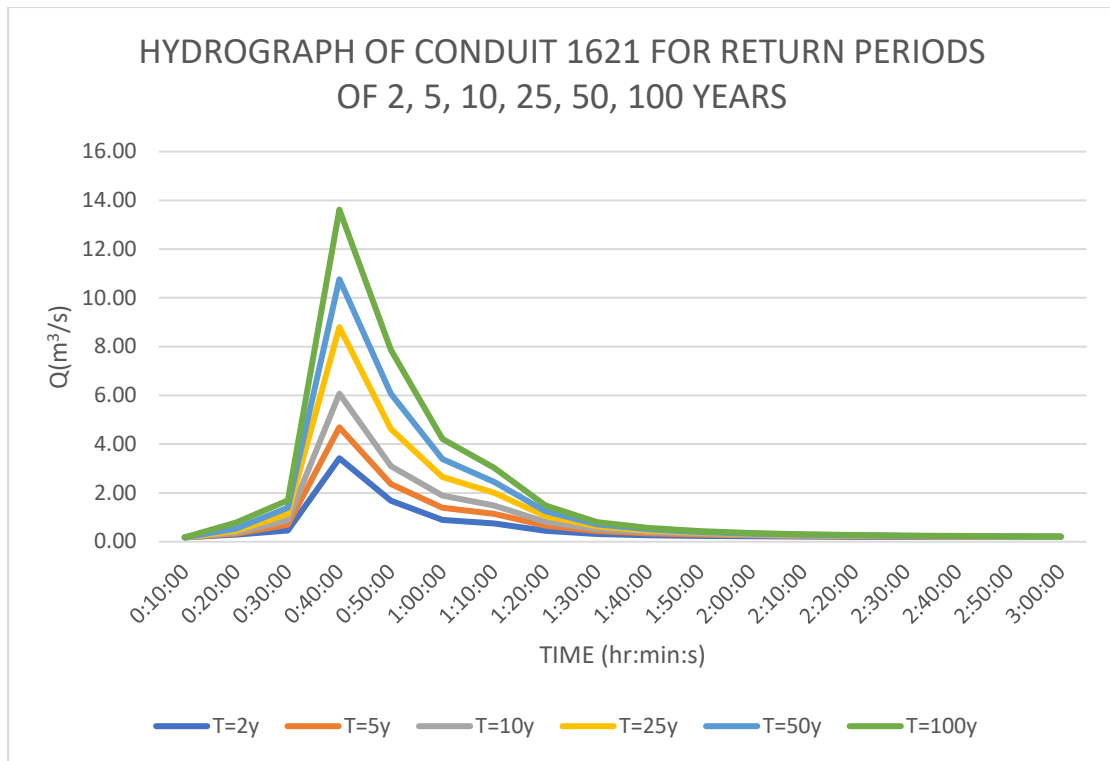


Figure 8: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 2

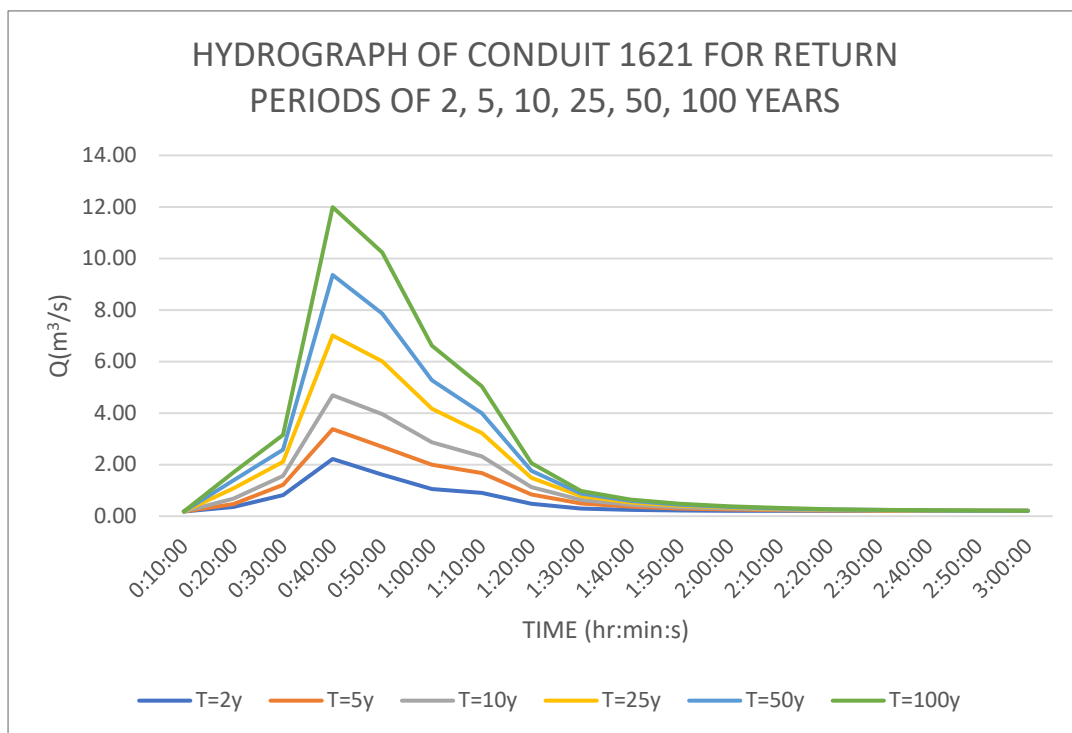


Figure 9: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 3

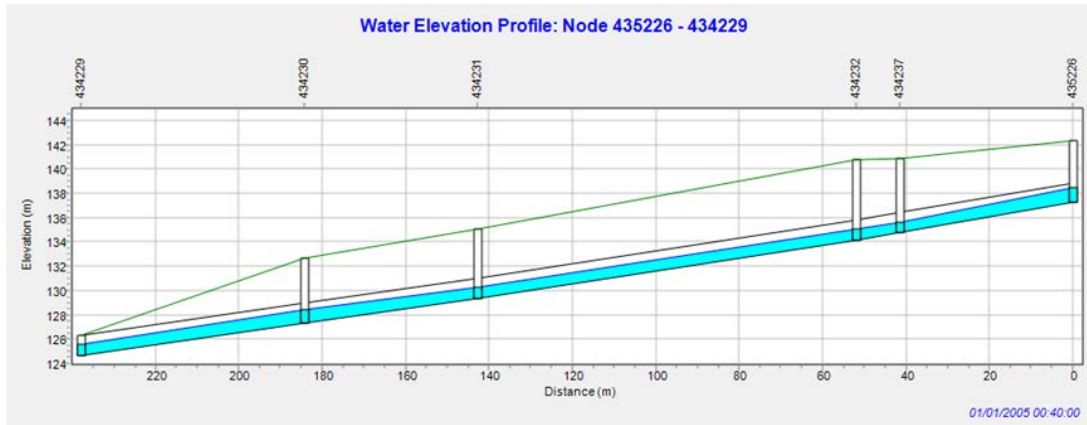


Figure 10: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown - Scenario 1

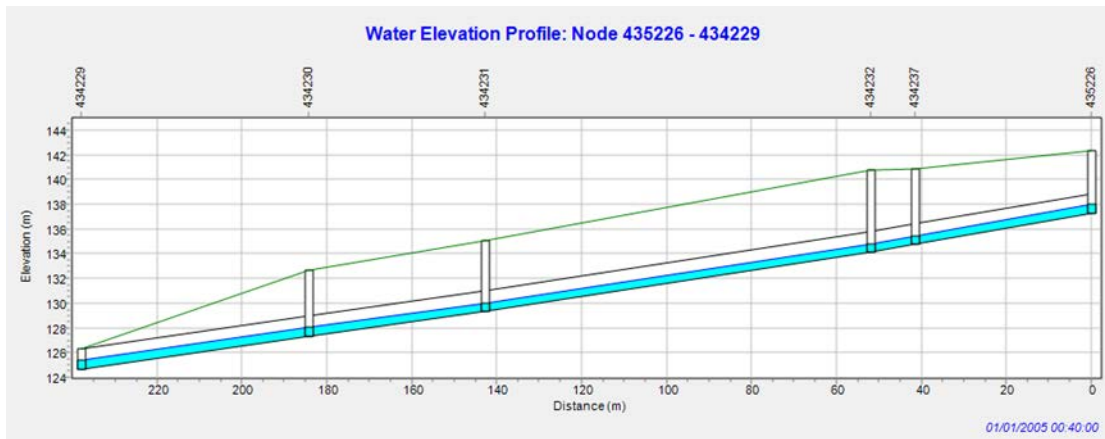


Figure 11: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown - Scenario 3

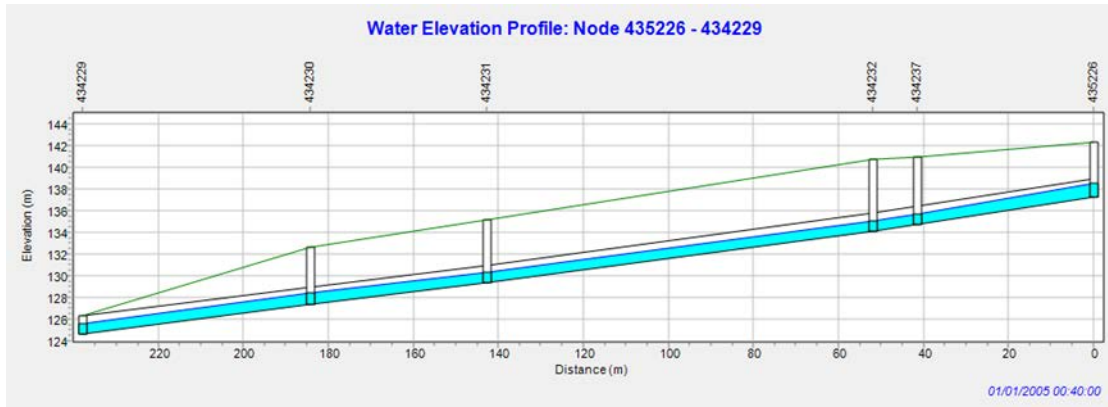


Figure 12: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown - Scenario 2

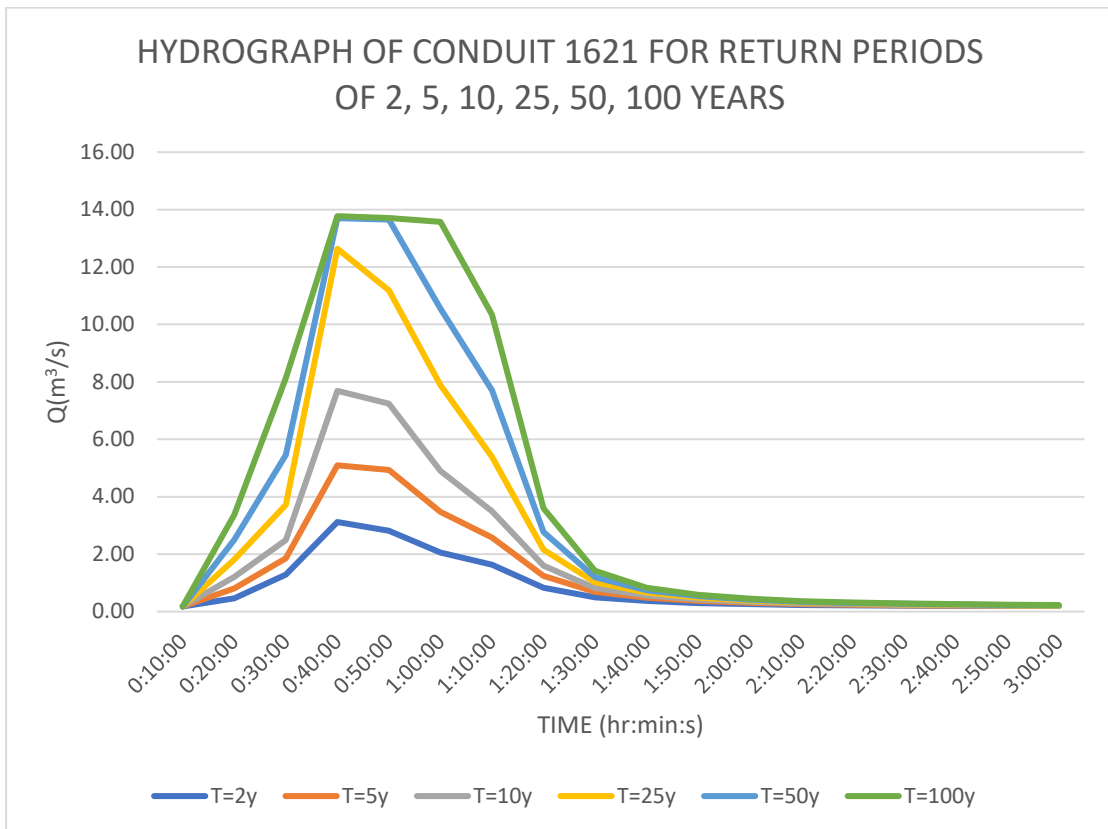


Figure 13: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 4

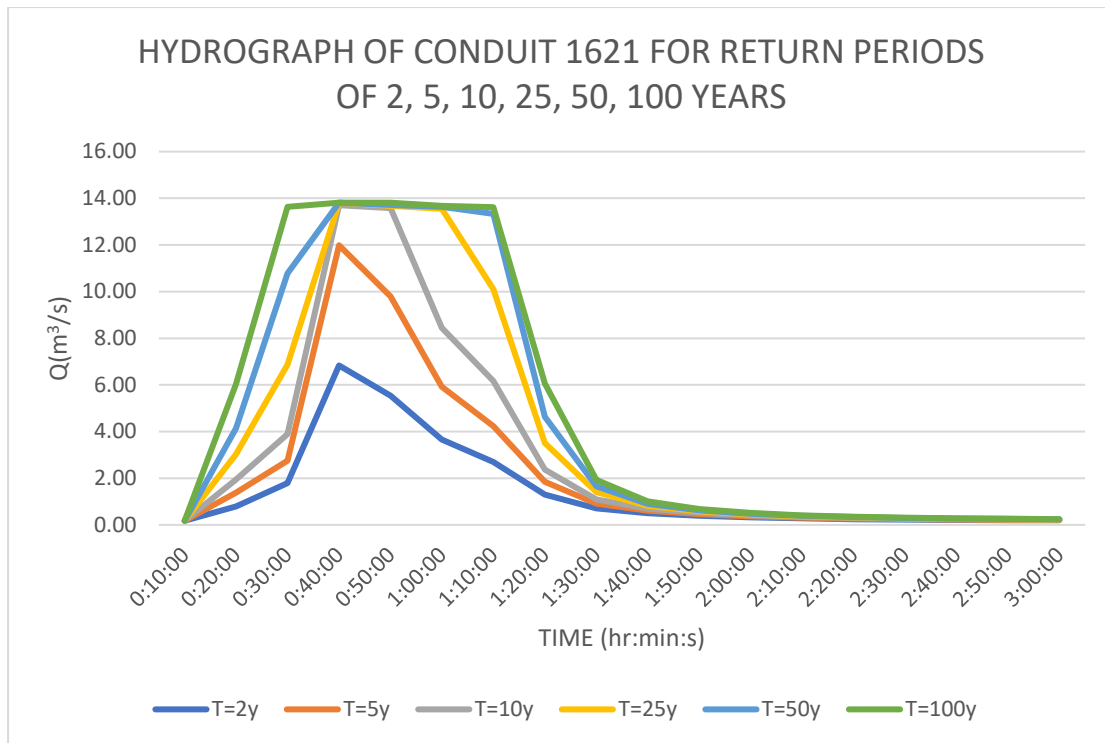


Figure 14: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 5

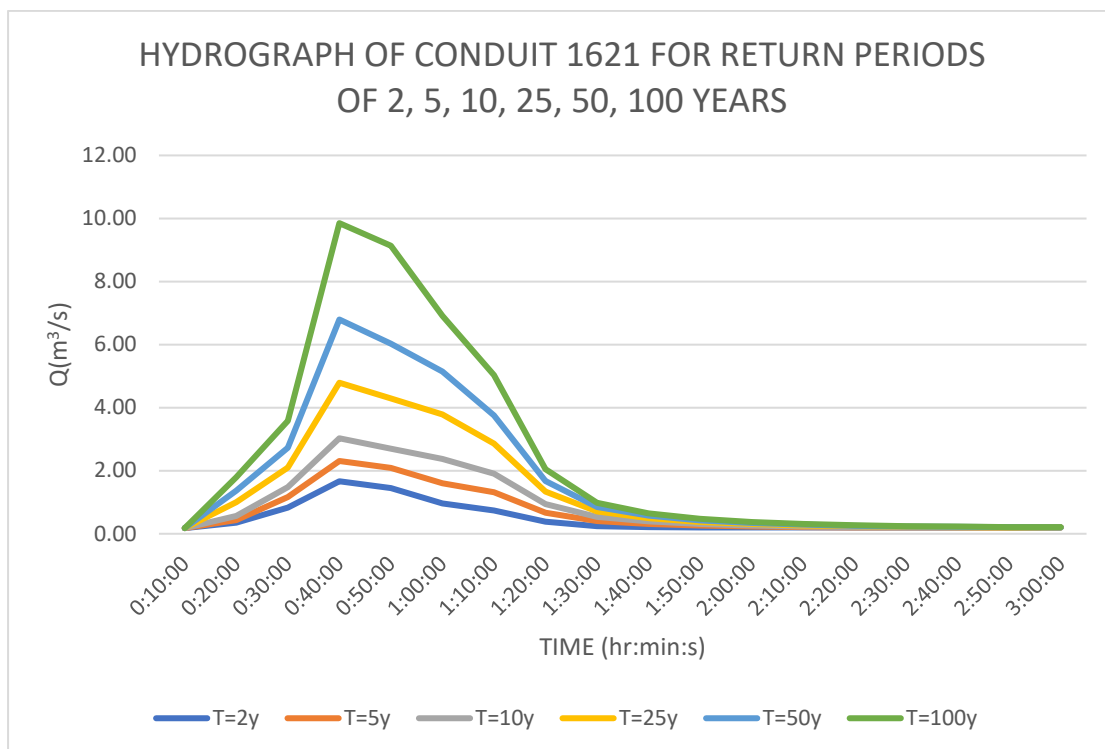


Figure 15: Hydrograph of sewer network outlet for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Scenario 6

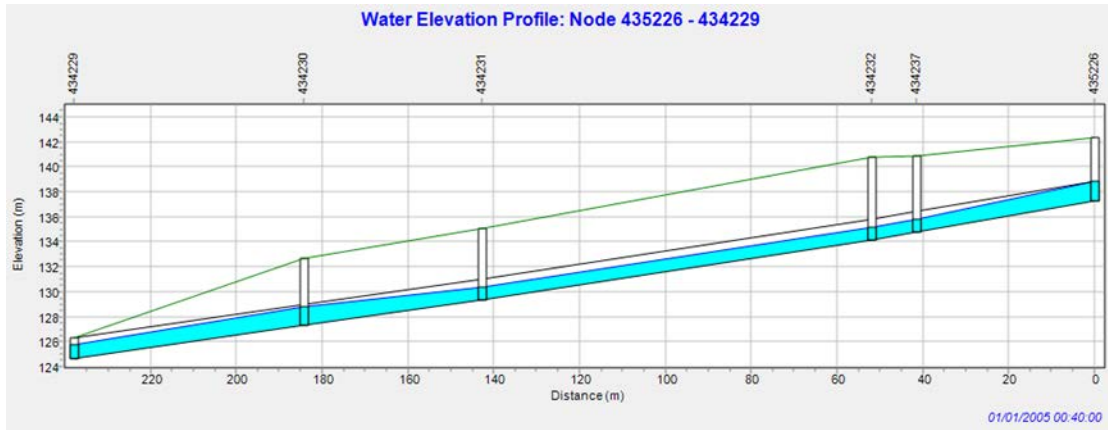


Figure 16: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown - Scenario 4

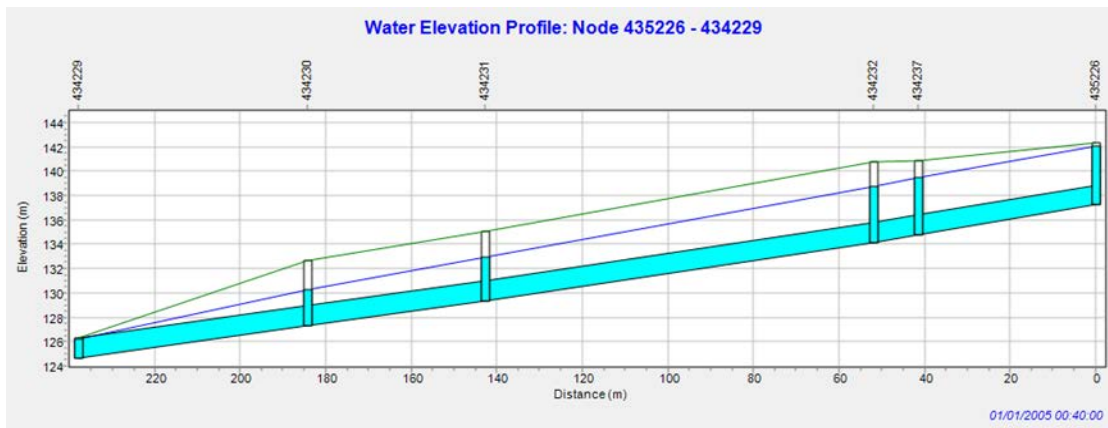


Figure 17: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown – Scenario 5



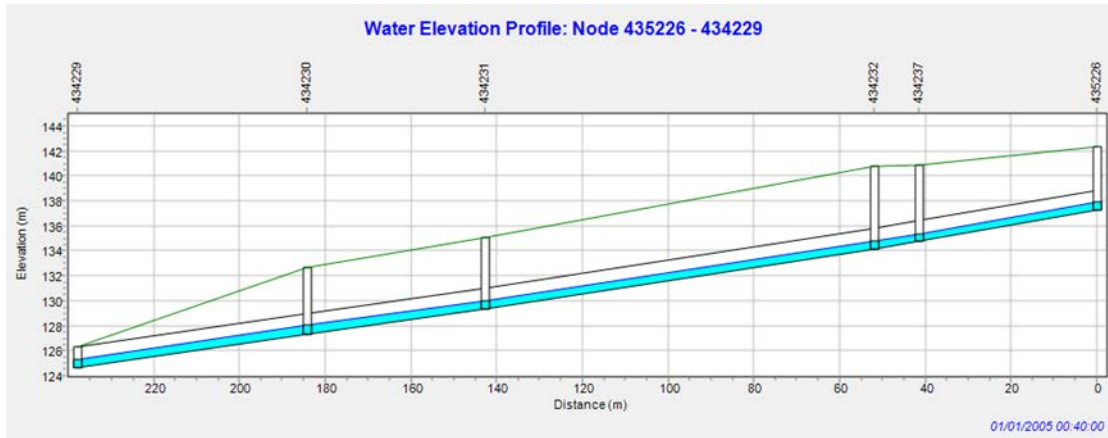


Figure 18: Profile of conduits 1802, 1618, 1619, 1620, and 1621 with return periods of 10 years at the time 00:40 (peak of the hydrograph). The conduits (black), water depth (blue), upper part of the pipelines (black), piezometric line (purple), soil surface (green), and wells (vertical lines) are shown - Scenario 6

Table 3: Number of nodes that flood in each scenario

SCENARIO	T= 2y	T= 5y	T= 10y	T= 25y	T= 50y	T= 100y
1	0	0	0	0	1	9
2	0	0	0	0	3	9
3	0	0	0	0	0	5
4	0	0	0	6	15	22
5	0	5	13	23	28	28
6	0	0	0	0	0	0

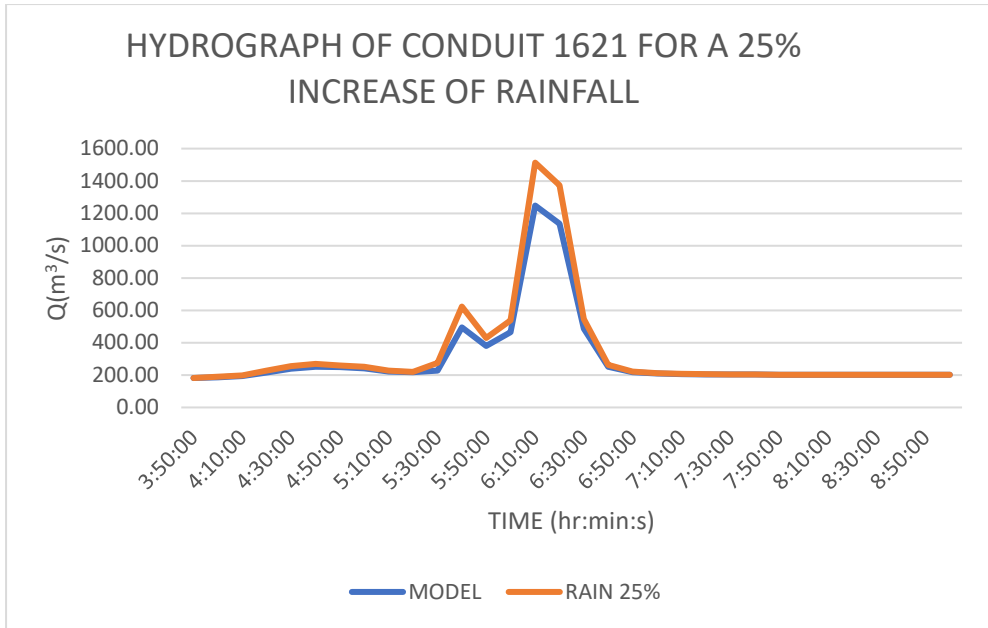


Figure 19: Hydrograph of sewer network outlet – Scenario 11

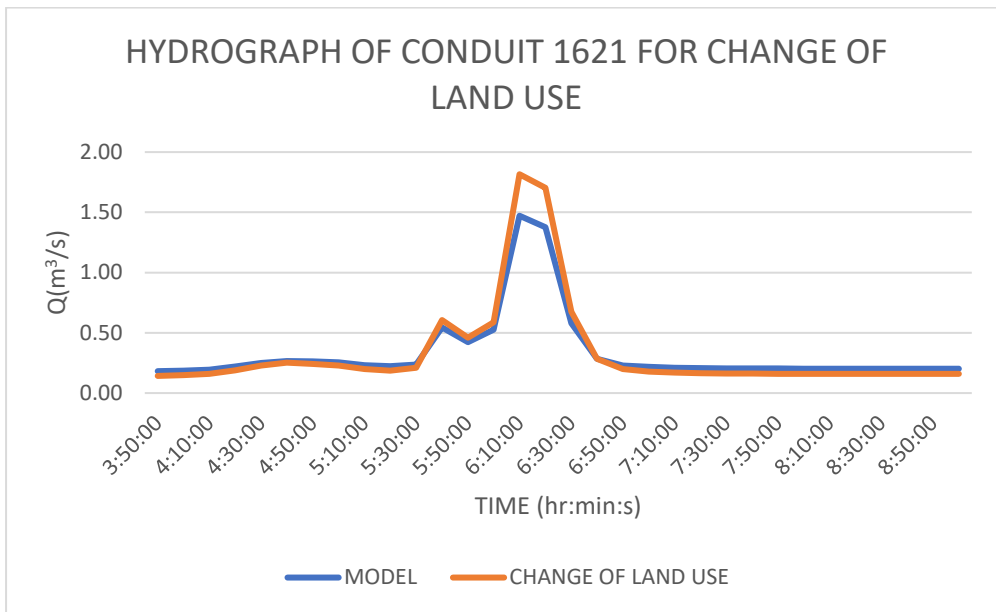


Figure 20: Hydrograph of sewer network outlet – Scenario 12

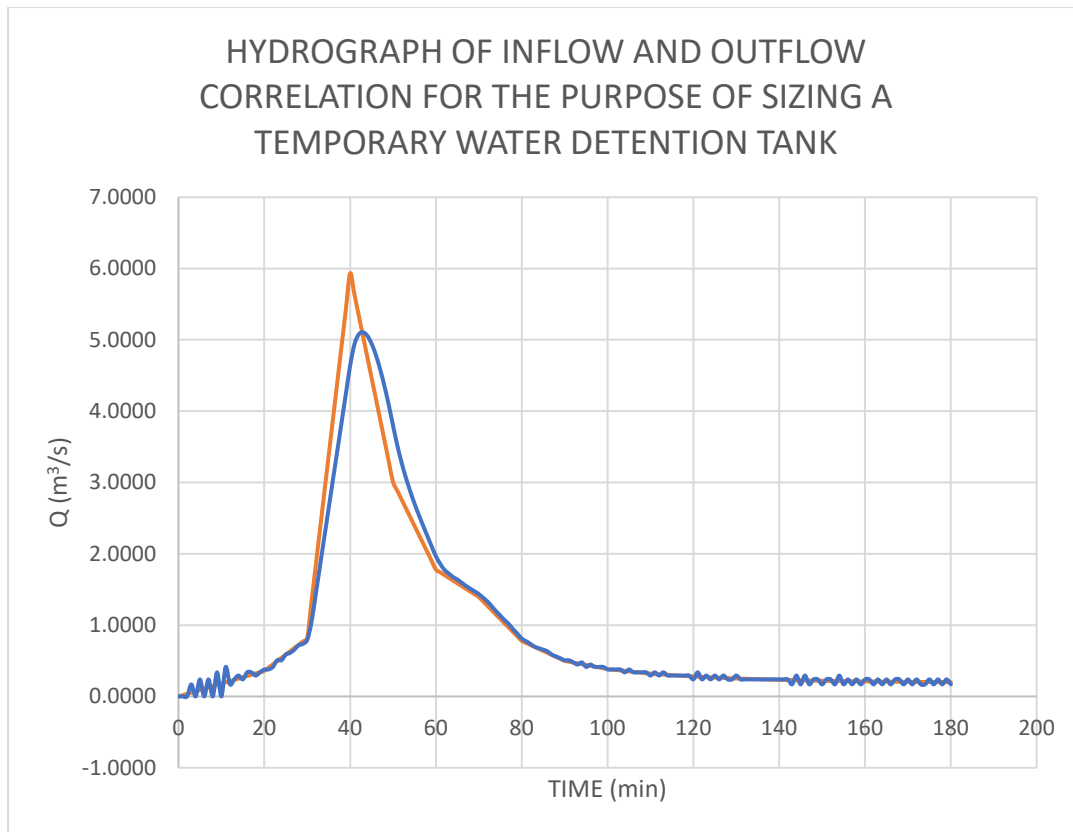


Figure 21: Hydrograph of correlation of inflow and outflow in the water detention basin

Table 4: Results of sizing for the water detention basin

Size	Value
Width W (m)	40
Length L (m)	15
Diameter of the end-whole D (m)	0.9

### Summary and conclusions

Through this postgraduate thesis, the combined sewer system of Zone Z2 of Athens was modeled and analyzed using the EPA SWMM software. Moreover, the model was calibrated based on actual measurements of runoff at two points: conduits 1313 and 1640. Finally, using the calibrated model, different scenarios were examined.

The most important conclusions from the research were the following:

- SWMM is a user-friendly software, which can model a variety of hydrologic and hydraulic elements in an urban watershed. The software is able to simulate the watershed in the level of sub-watersheds by executing hydraulic calculations and quality tests of water at very high speed, providing important information about the conduits and manholes of a sewer system.
- SWMM is, also, able to communicate with ArcGIS via the expansion of InfoSWMM.
- The calibration of the model was successful in conduit 1640 and very successful in conduit 1313.
- The most sensitive parameter of the calibration was the percentage of imperviousness (% Impervious) of the soil.
- The conduits of the sewer system are able to manage the flow of the historical rainfall episode of 1/1/2005.
- For a return period of 10 years there are no overflows and phenomena of dual flow in the system, except for Scenario 5, which is the most critical one.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην εφαρμογή του μοντέλου SWMM σε τμήμα της αστικής λεκάνης απορροής Ζ2 του παντοροϊκού αποχετευτικού δικτύου των Αθηνών. Ειδικότερα, την διαμόρφωση του μοντέλου ακολουθεί η χειροκίνητη βαθμονόμησή του βάσει πραγματικών μετρήσεων για το μέγεθος των απορροών και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης αξιολογούνται βάσει στατιστικών συντελεστών. Επιπλέον, η εργασία εξετάζει διάφορα σενάρια κλιματικής αλλαγής, αύξησης βροχόπτωσης και αλλαγής χρήσης γης προκειμένου να αποτυπωθεί η επίδραση αυτών στις απορροές της αστικής λεκάνης. Τέλος, εξετάζεται το ενδεχόμενο κατασκευής μιας δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης του νερού στην έξοδο του συστήματος.

### 1.2. Σημασία αποχετευτικού συστήματος και συστήματος ομβρίων

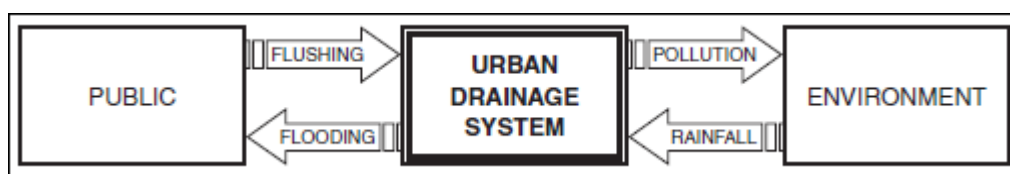
Παλαιότερα στην περισσότερες πόλεις υπήρχε κοινό δίκτυο ακαθάρτων και ομβρίων υδάτων, αποκαλούμενο ως παντοροϊκό δίκτυο, κάτι το οποίο δεν συνηθίζεται σήμερα. Παρόλα αυτά, σε πολλές πόλεις της Ευρώπης και αλλού στον κόσμο, ακόμα παρατηρείται η ύπαρξη και λειτουργία παντοροϊκών δικτύων ή τμημάτων παντοροϊκών δικτύων (Κούρτης 2016). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Αθήνα συμπεριλαμβανομένης και της περιοχής μελέτης της παρούσας εργασίας.

Η σημασία των έργων αποχέτευσης για το επίπεδο ζωής στις αστικές περιοχές είναι αδιαμφισβήτητη. Στις περιοχές όπου δεν συναντάται αποχετευτικό σύστημα, τίθεται σε κίνδυνο η δημόσια υγεία τόσο βραχυπρόθεσμα, όσο και μακροπρόθεσμα. Επιπλέον, χαρακτηριστικά έντονα είναι τα φαινόμενα ρύπανσης του εδάφους. Μάλιστα, αυτό συνεπάγεται την μεταφορά ρύπων στους επιφανειακούς και υπόγειους υδροφορείς και την ρύπανση του υπογείου νερού (Κουτσογιάννης 2011).

Ταυτόχρονα, κρίσιμη είναι η ύπαρξη στις αστικές περιοχές ενός ορθώς διαστασιολογημένου δικτύου ομβρίων προκειμένου να αποφεύγονται υπερχειλίσσεις των αγωγών. Αυτές μπορεί να έχουν καταστροφικές επιπτώσεις στον αστικό κύκλο σε κοινωνικοοικονομικό επίπεδο. Συγκεκριμένα, οι Κουτσογιάννης (2011) και Κούρτης (2016) αναφέρουν ότι μια κακή διαστασιολόγηση του δικτύου ομβρίων δύναται να

επιφέρει προβλήματα στο οδικό δίκτυο της περιοχής, πλημμυρικά φαινόμενα, καθώς και απώλειες ανθρωπίνων ζωών (Bellos et al. 2020, Theodosopoulou et al. 2022).

Έτσι, τα όμβρια και τα λύματα μιας περιοχής συλλέγονται από τα αστικά αποχετευτικά συστήματα, με σκοπό την εξυπηρέτηση των πολιτών, καθώς και την διασφάλιση της προστασίας του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας, κάτι που απεικονίζεται από τους Butler et al. (2018) στην Εικ. 1.1.



Εικόνα 1.1: Αλληλεπίδραση πολιτών και περιβάλλοντος (Πηγή: Butler et al. 2018)

### 1.3. Το αποχετευτικό σύστημα κατά την αρχαιότητα

Στην Ελλάδα παρατηρείται από τα αρχαία ακόμη χρόνια η ύπαρξη συστημάτων αποχέτευσης. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα αυτών των συστημάτων (Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης Ελασσόνας <https://deyael.gr/>):

Σημαντικότερο παράδειγμα αποτελεί αυτό του ανακτόρου της Κνωσού κατά την περίοδο του Μινωικού πολιτισμού (1950-1500 π.Χ.). Κατά τις αρχαιολογικές μελέτες βρέθηκαν τόσο χώροι υγιεινής, όσο και δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων και ακαθάρτων. Αναλυτικότερα, η έξοδος του δικτύου βρισκόταν στο χείμαρρο Καίρατο, ανατολικά της Κνωσού. Το δίκτυο αποτελούταν από ανοιχτούς αγωγούς ορθογωνικής διατομής, κατασκευασμένους από πηλό. Μάλιστα, το δίκτυο συλλογής ομβρίων του ανακτόρου λειτουργεί ακόμα και σήμερα. Ένα ακόμα παράδειγμα της ύπαρξης αποχετευτικού συστήματος κατά την περίοδο του Μινωικού πολιτισμού αναφέρει ο Ιταλός συγγραφέας Angelo Mosso, σχετικά με την περιοχή της Αγίας Τριάδος (<http://www.minoancrete.com/agtriada.htm>). Ο Mosso επισκέφθηκε την περιοχή στις αρχές του 20ου αιώνα. Κατά τη διάρκεια μιας έντονης βροχόπτωσης παρατήρησε την άρτια λειτουργία του συστήματος αναφέροντας ότι «... αμφιβάλλω αν υπάρχει άλλη περίπτωση αποχετευτικού συστήματος ομβρίων που να λειτουργεί 4000 χρόνια μετά την κατασκευή του». Τέλος, ο Μαρκαντωνάτος (1986) αναφέρει ότι στην Ακρόπολη της

Αθήνας βρέθηκαν τμήματα αγωγών κατασκευασμένα από ψημένο πηλό. Παράλληλα, στην αρχαία Ρώμη υπήρχαν τόσο δημόσια αποχωρητήρια και αγωγοί αποχέτευσης που απομάκρυναν τα λύματα, όσο και αγωγοί ομβρίων, όπως η *cloaca maxima* (μεγάλος υπόνομος) που εξυπηρετούσε τη Ρωμαϊκή αγορά. Μάλιστα, αυτό το σύστημα λειτουργεί ακόμα και σήμερα.

#### 1.4. Το αποχετευτικό σύστημα στην Αθήνα

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας διαχωρισμός σε περιόδους του αποχετευτικού δικτύου της Αθήνας, όπως αυτός αναφέρεται από την ΕΥΔΑΠ (2020).

##### 1.4.1. Αρχαιότητα – 1840

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (Παράγραφος 1.3), στον Ελλαδικό χώρο η ύπαρξη δικτύων αποχέτευσης χρονολογείται ακόμα από τον Μινωικό πολιτισμό. Στην περιοχή των Αθηνών, κατά την αρχαιότητα δεν υπήρχε οργανωμένο δίκτυο αποχέτευσης με αποτέλεσμα προβλήματα στην δημόσια υγεία. Ειδικότερα, η ύπαρξη ανοιχτού δικτύου ακαθάρτων οδηγούσε στην εμφάνιση σοβαρών επιδημιών και ασθενειών, όπως η χολέρα και η πανώλη. Σταδιακά, ανά τους αιώνες, το σύστημα αναβαθμίστηκε και τα λύματα διοχετεύονταν σε απορροφητικούς βόθρους. Αν οι βόθροι αυτοί φτάνανε σε πλήρωση με αποτέλεσμα την μείωση της διηθητικής τους ικανότητας, τότε ανοίγονταν νέοι. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη λύση δεν επέφερε σημαντική βελτίωση αναφορικά με τα προβλήματα που παρουσιάζονταν στον τομέα της υγείας.

##### 1.4.2. Περίοδος 1840 – 1930

Η πρώτη απόπειρα δημιουργίας ενός συστήματος συλλογής και μεταφοράς ακαθάρτων και ομβρίων χρονολογείται περί το 1840, ενώ τα επόμενα χρόνια έγιναν σημαντικά βήματα προς την βελτίωση της υπάρχουσας κατάστασης. Συγκεκριμένα, το 1860, κατασκευάζεται ο παντοροϊκός αγωγός της Σταδίου, ο οποίος και επεκτείνεται σταδιακά έως και το 1970. Παράλληλα την δεκαετία του 1920, ολοκληρώνεται και η κάλυψη του ανοιχτού ρέματος του Κυκλοβόρου από λιθόκτιστο αγωγού διαμέτρου περίπου 3 m. Μέχρι και τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα, η πόλη έχει αποχετευτικό σύστημα 11.5 km, παρόλα αυτά λόγω της ταχείας ανάπτυξης, απαιτείται σύστημα μήκους 90

km, κάτι που εντείνεται τα επόμενα χρόνια ακόμα, λόγω των προσφυγικών ρευμάτων, που ήταν επακόλουθα της Μικρασιατικής Καταστροφής το 1922. Τέλος, το 1925 κατασκευάζεται δεύτερος μεγάλος αγωγός, αποκαλούμενος ως ο «*Νέος Μεγάλος Αγωγός*», καθώς και η συμβολή των δύο αγωγών, στις οδούς Μάρνης και Παιωνίου.

#### 1.4.3. Περίοδος 1930 - 1950

Επόμενη χρονική περίοδος του αποχετευτικού δικτύου των Αθηνών κατά την ΕΥΔΑΠ (2020) είναι μεταξύ των ετών 1930 και 1950. Το 1930 ολοκληρώνεται στο ρέμα του Προφήτη Δανιήλ, κατασκευή αγωγού ακαθάρτων ωσειδούς διατομής και μήκους 6.5 km, ο οποίος απορρέει στο Φαληρικό Δέλτα. Το έτος 1931 αποτελεί καθοριστική χρονιά για το αποχετευτικό δίκτυο της Αθήνας, διότι συστάθηκε η «*Ανώνυμος Εταιρία Κατασκευής Υπονόμων Αθηνών και Περιχώρων*» από το ελληνικό κράτος. Αρμοδιότητα της εταιρείας ήταν η ολοκλήρωση της μελέτης του δικτύου ακαθάρτων και ομβρίων της Αττικής. Σημαντική πρόοδος παρατηρείται κατά την περίοδο 1934 έως και 1939, οπότε και κατασκευάζονται οι μεγάλοι αγωγοί στην οδό Ρηγίλλης και στην λεωφόρο Βασιλίσσης Σοφίας, η τάφος στο Λόφο Φιλοπάππου, καθώς και καλύπτονται ποικίλα ρέματα της περιοχής. Η περίοδος ολοκληρώνεται με την κατασκευή του Κεντρικού Αποχετευτικού Αγωγού (ΚΑΑ).

#### 1.4.4. Περίοδος 1950 – 1980

Κατά την περίοδο 1950 με 1980, η αδιάκοπη ανάπτυξη της Αθήνας, οδήγησε στη σύσταση του Οργανισμού Αποχέτευσης Πρωτεύουσας (ΟΑΠ). Ο ΟΑΠ αποτέλεσε καταλύτη στην μελέτη και υλοποίηση του αποχετευτικού συστήματος της Αθήνας, ενώ έκανε και προβλέψεις των μελλοντικών αναγκών που θα παρουσιάζονταν στην Πρωτεύουσα. Ως αποτέλεσμα, κατασκευάστηκαν κατά αυτή την περίοδο αυτή αγωγοί ακαθάρτων μήκους μεγαλύτερου από 1,700 km. και ομβρίων μήκους περίπου 300 km., Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ο Κεντρικός Παραλιακός Συλλεκτήρας της ακτής Σαρωνικού και ο Παρακηφίσιος Συλλεκτήρας.



#### 1.4.5. Περίοδος 1980 – σήμερα

Τέλος, από το 1980, συστάθηκε ενιαίος φορέας για την διαχείριση την ύδρευσης και της αποχέτευσης στην περιοχή των Αθηνών. Έτσι, έπαψε η λειτουργία του ΟΑΠ και οι αρμοδιότητες του μεταβιβάστηκαν στην ΕΥΔΑΠ, η οποία από τότε είναι ο κύριος υπεύθυνος φορέας για την συλλογή των λυμάτων και των βιομηχανικών αποβλήτων, τον έλεγχο της έκπλυσης των λυμάτων και την διάθεσή τους στη θάλασσα. Σήμερα το συνολικό μήκος του δικτύου αποχέτευσης σήμερα είναι μεγαλύτερο από 8000 km (ΕΥΔΑΠ 2020).

#### 1.5. Μελέτες με χρήση του λογισμικού SWMM

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική αναφορά σε μελέτες, οι οποίες εκπονήθηκαν με χρήση του λογισμικού SWMM. Οι Tsihrintzis and Hamid (1998) χρησιμοποίησαν το λογισμικό SWMM προκειμένου να κάνουν μια πρόβλεψη της ποιότητας της απορροής σε μικρές αστικές λεκάνες στην Νότια Φλόριντα. Οι Barco et al. (2008) χρησιμοποίησαν το λογισμικό SWMM με σκοπό την προσομοίωση μια μεγάλης αστικής λεκάνης στην Νότια Καλιφόρνια μετά από βαθμονόμηση του μοντέλου. Επιπλέον, οι Rabori et al. (2017) πραγματοποίησαν μια ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου σε μια ημίξηρη περιοχή στο Βόρειο Ιράν, προκειμένου να υπολογίσουν την απορροή. Σημαντικό είναι το έργο του Κούρτη, ο οποίος αρχικά χρησιμοποίησε το λογισμικό SWMM κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής διπλωματικής του εργασίας (Κούρτης 2016), με σκοπό την προσομοίωση της Ζώνης Δ του παντοροϊκού δικτύου της Αττικής, προτείνοντας μέτρα αντιμετώπισης πλημμυρικών φαινομένων. Έπειτα, κατά το έτος 2017, χρησιμοποίησε, αρχικά, το λογισμικό SWMM (Κούρτης κ.α. 2017) με στόχο την βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου σε μια λεκάνη του παντοροϊκού συστήματος αποχέτευσης της Αθήνας, στην Κυψέλη. Στην ίδια περιοχή χρησιμοποίησε το μοντέλο (Kourtis et al. 2017) προκειμένου να εξετάσει δύο διαφορετικές αστικές λεκάνες. Τέλος, οι Kourtis et al. (2017b) χρησιμοποίησαν εκ νέου το λογισμικό αυτό στην περιοχή με σκοπό την προσομοίωση ενός παντοροϊκού δικτύου και την αξιολόγηση μέτρων για την μείωση της παροχής ακαθάρτων.

Παράλληλα, το μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί στην περιοχή της Αθήνας σε επίπεδο διπλωματικών εργασιών. Ο Λαζάρου (2019) εκτέλεσε ανάλυση ευαισθησίας των

παραμέτρων του μοντέλου SWMM, με εφαρμογή στη Β ζώνη του παντοροϊκού δικτύου των Αθηνών. Ο Μπούκας (2019) χρησιμοποίησε το λογισμικό για προσομοίωση σε αστική υπολεκάνη του παντοροϊκού δικτύου, προτείνοντας εναλλακτικούς τύπους συστημάτων ήπιας ανάπτυξης (LID). Η Τζίμα (2019) εκτέλεσε υδρολογική προσομοίωση στην αστική λεκάνη της ζώνης Δ, μέσω του SWMM, ενώ υπολόγισε και την επίδραση της διακριτοποίησης της αστικής λεκάνης απορροής. Η Μουρατίδου (2020) παρουσίασε τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην αστική ζώνη Δ με χρήση του λογισμικού SWMM. Η Ελευθερίου (2020) προσομοίωσε με το SWMM αστική υπολεκάνη και εκτέλεσε ανάλυση ευαισθησίας με χρήση της μεθόδου Morris. Η Παπούλια (2022) εκτέλεσε έναν έλεγχο αποτελεσματικότητας των εναλλακτικών τύπων συστημάτων ήπιας ανάπτυξης (LID) στην ζώνη Β του παντοροϊκού δικτύου της Αθήνας, με χρήση του λογισμικού SWMM.

#### 1.6. Παρουσίαση κεφαλαίων

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στην εργασία με αναφορές στο αποχετευτικό δίκτυο της Αθήνας και στους στόχους της μελέτης. Παράλληλα, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση σε προηγούμενες εργασίες που χρησιμοποίησαν το λογισμικό SWMM.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται περιγραφή της περιοχής μελέτης. Ειδικότερα, παρουσιάζεται η μέθοδος διακριτοποίησης της περιοχής σε αστικές λεκάνες και υπολεκάνες, οι χρήσεις γης που παρατηρούνται, καθώς και οι κλίσεις εδάφους και η γεωλογία της περιοχής. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα ιστορικά επεισόδια βροχής του Οκτώβρη του 1994 και του Ιουλίου του 1995 στην περιοχή της Αττικής.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μεθοδολογικό υπόβαθρο της εργασίας. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στις μεθοδολογίες για τον υπολογισμό δεδομένων εισόδου στο SWMM όπως η παροχή ακαθάρτων, ο σχεδιασμός των υετογραφημάτων. Παράλληλα, γίνεται παρουσίαση του SWMM καθώς και του θεωρητικού του υπόβαθρου. Τέλος, αναφέρονται οι στατιστικοί έλεγχοι βαθμονόμησης του μοντέλου και η μεθοδολογία διαστασιολόγησης μίας δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης νερού στην έξοδο του συστήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης, η αξιολόγηση της βαθμονόμησης του μοντέλου, καθώς και διάφορα εναλλακτικά σενάρια που εξετάστηκαν στο βαθμονομημένο μοντέλο. Αυτά αφορούσαν την κλιματική αλλαγή,

την αύξηση της βροχόπτωσης στην περιοχή και την αστικοποίηση τμήματος της περιοχής. Τέλος, επιλέγεται η κατασκευή μιας υπόγειας δεξαμενής κατακράτησης του νερού στην έξοδο του συστήματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της έρευνας. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην πρόταση δημιουργίας μιας δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης του νερού στην περιοχή και σε προτάσεις μελλοντικής έρευνας.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται οι πίνακες που χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό τον υπολογισμό της παροχής ακαθάρτων σε κάθε αστική υπολεκάνη της περιοχής μελέτης.

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται οι πίνακες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου των εναλλασσόμενων blocks, καθώς και τα υετογραφήματα που προέκυψαν.

Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται η ιστορική χρονοσειρά απορροών για τους αγωγούς 1313 και 1640, καθώς και οι πίνακες της βαθμονόμησης του μοντέλου. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναφορικά με το μέγεθος της απορροής για τα αδιάφορα σενάρια που εξετάστηκαν.



## 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

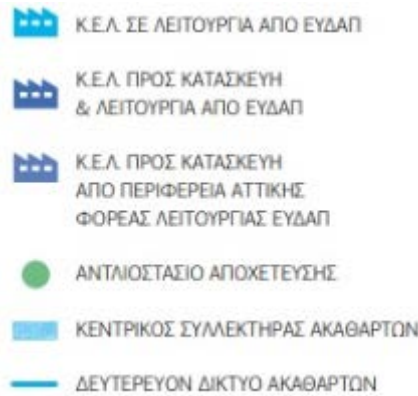
### 2.1. Γενική περιγραφή

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας αποτελεί ένα τμήμα της λεκάνης απορροής του αποχετευτικού συστήματος της Αθήνας (Εικ. 2.1 και Εικ. 2.2). Η Αθήνα εν μέρει εξυπηρετείται από ένα παντοροϊκό δίκτυο, το οποίο ουσιαστικά ορίζεται ως ένα σύστημα κοινής απορροής ομβρίων έκτασης 1.310 ha και ακαθάρτων υδάτων έκτασης 1250 ha. Το δίκτυο αυτό εξυπηρετεί κατά κύριο λόγο τις περιοχές μεταξύ Πλάκας-Ζάππειου και Γκύζη-Κολωνού.



Εικόνα 2.1: Χάρτης αποχετευτικού δικτύου Αθηνών

(Πηγή: <https://www.eydap.gr/TheCompany/DrainageAndSewerage/SewageNetwork/>)



Εικόνα 2.2: Υπόμνημα χάρτη αποχετευτικού δικτύου Αθηνών

(Πηγή: <https://www.eydap.gr/TheCompany/DrainageAndSewerage/SewageNetwork/>)

Αναλυτικότερα, τα όμβρια ύδατα καταλήγουν στον ποταμό Κηφισό, ο οποίος δεν παρουσιάζει μόνιμη ροή, και στο ρέμα του προφήτη Δανιήλ που αποτελεί ουσιαστικά παραπόταμο του Κηφισού. Αντίστοιχα, τα ακάθαρτα δίκτυα οδηγούνται στον Κεντρικό Αποχετευτικό Αγωγό (Κ.Α.Α.), στον οποίο έχουν κατασκευαστεί 7 από τους προβλεπόμενους 9 υπερχειλιστές. Από αυτούς οι 5 καταλήγουν στον Κηφισό και οι 2 στον προαναφερθέντα παραπόταμό του. Τέλος, η λεκάνη απορροής της Αθήνας απαρτίζεται από τις 10 υπολεκάνες απορροής: Β, Γ, Δ, Ε, Ζ1, Ζ2, Η1, Η2, και Θ (Εικ. 2.3). Στην παρούσα εργασία, η περιοχή μελέτης είναι η υπολεκάνη Ζ2, η οποία έχει έκταση 0.66 km<sup>2</sup> και αποτελείται από 38 αποχετευτικούς αγωγούς ωοειδούς διατομής και 6 αγωγούς κυκλικής διατομής (223, 224, 225, 226, 227 και 228) στα ανάντη της περιοχής μελέτης και στις υπολεκάνες S395100 και S395101, Επιπλέον, συναντώνται 45 φρεάτια μεταξύ των αγωγών και μία έξοδος. (Εικ. 2.4).

## 2.2. Σχεδιασμός λεκανών απορροής

Ο σχεδιασμός λεκανών απορροής αποτελείται από μία διαδικασία υπολογισμών, όπου βασικό δεδομένο εισόδου της αποτελεί το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Ψ.Μ.Ε). Πρώτο στάδιο της διαδικασίας αποτελεί η χάραξη του υδροκρίτη της υπό εξέτασης λεκάνης απορροής, η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με την τοπογραφία. Ως υδροκρίτης ορίζεται νοητή γραμμή που συνδέει τα ψηλότερα σημεία των υψωμάτων μίας επιφάνειας και διαχωρίζει τη ροή των όμβριων υδάτων. Η χάραξη του υδροκρίτη βασίζεται, ουσιαστικά, στις ισοϋψείς καμπύλες, που προκύπτουν από το εκάστοτε Ψ.Μ.Ε. (Εικ. 2.5) βάσει των υψομέτρων των φρεατίων.

Στην περίπτωση λεκανών σε αστικές περιοχές, ο σχεδιασμός γίνεται πιο απαιτητικός, καθώς εκτός από τη τοπογραφία, σημαντική κρίνεται και η επιρροή της ρυμοτομίας της περιοχής. Αναλυτικότερα, πρώτα λαμβάνει χώρα η διχοτόμηση των γωνιών των οικοδομικών τετραγώνων. Έπειτα, υπολογίζονται οι κλίσεις γης της λεκάνης, βάσει του Ψ.Μ.Ε. και με γνωστές τις θέσεις των φρεατίων του αποχετευτικού δικτύου, χαράσσεται ο υδροκρίτης της αστικής περιοχής. Στην Εικ. 2.6 παρουσιάζονται οι λεκάνες απορροής των οικοδομικών τετραγώνων όπως αυτά προκύπτουν μέσω της χρήσης των λογισμικών ArcMap και AutoCAD.



Εικόνα 2.3: Απεικόνιση παντοροϊκού δικτύου Αθηνών (Πηγή: Κούρτης κ.α. 2017)

### 2.3. Χρήσεις γης

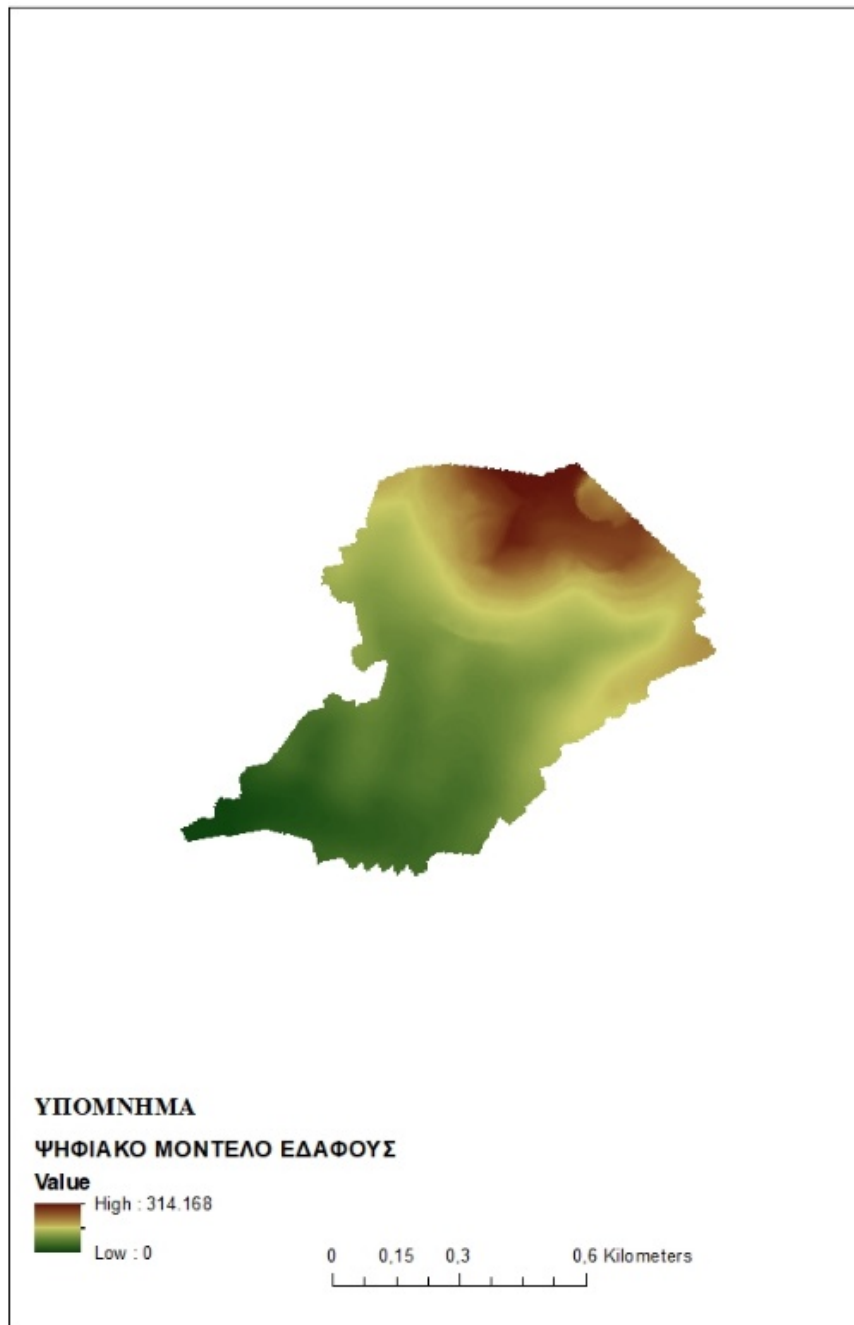
Σημαντικό μέρος στη προσομοίωση ενός παντοροϊκού αποχετευτικού δικτύου αποτελεί η κατανόηση της υδρολογικής συμπεριφοράς της υπό μελέτη αστικής λεκάνης απορροής. Αυτό γίνεται με τη συλλογή δεδομένων χρήσεων γης, καθώς βάσει αυτών υπολογίζεται ο συντελεστής απορροής. Ως συντελεστής απορροής ορίζεται ο συντελεστής, όπου βάσει των χρήσεων γης και της γεωλογίας της περιοχής, καθορίζει πόσο μέρος της βροχής σε κάθε σημείο της λεκάνης θα γίνει απορροή. Τα δεδομένα χρήσεων γης συλλέχθηκαν από το Corine Land Cover 2018 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>) και βάσει αυτών,

η υπό μελέτη περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονο αστικό χαρακτήρα. Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης αποτελείται, πέραν του οδικού δικτύου, από ένα συνεχή αστικό ιστό όπως φαίνεται στον Πιν. 2.1. Σημαντική είναι επίσης και η παρουσία περιοχών πρασίνου, κυρίως στο τμήμα της λεκάνης που βρίσκεται στο Πεδίον του Άρεως και το Αττικό Άλσος. Τέλος, συναντώνται μικρότερες εκτάσεις ασυνεχούς πυκνού αστικού ιστού, βιομηχανικών μονάδων και ψυχαγωγικών εγκαταστάσεων. Τα παραπάνω συνοψίζονται στον χάρτη της Εικ. 2.7 όπου και φαίνονται οι χρήσεις γης της περιοχής όπως αυτές προέκυψαν με χρήση του λογισμικού ArcGIS.

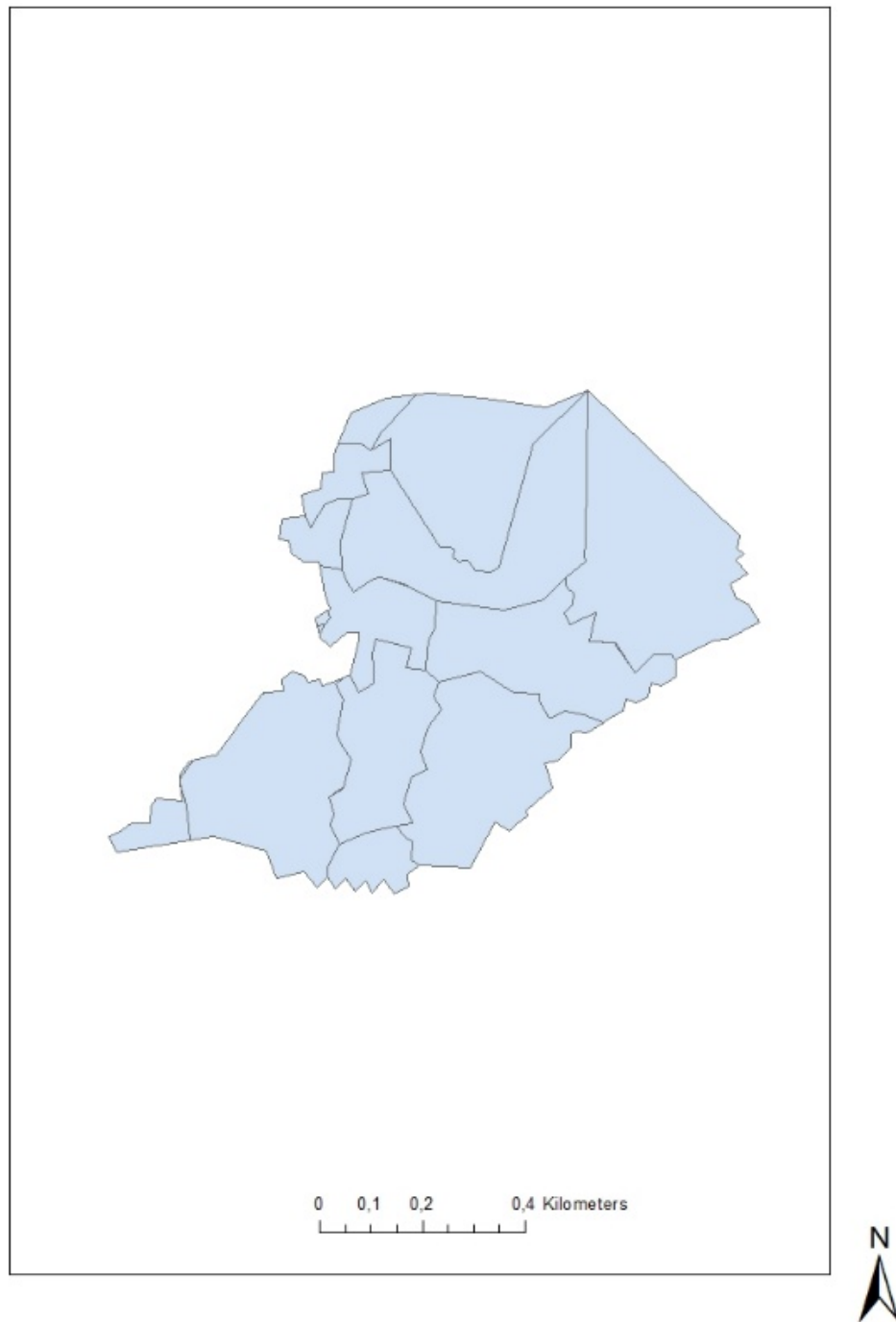


Εικόνα 2.4: Περιοχή Μελέτης, τμήμα της υπολεκάνης Z2 (Πηγή: ArcMap 10.5.1.)





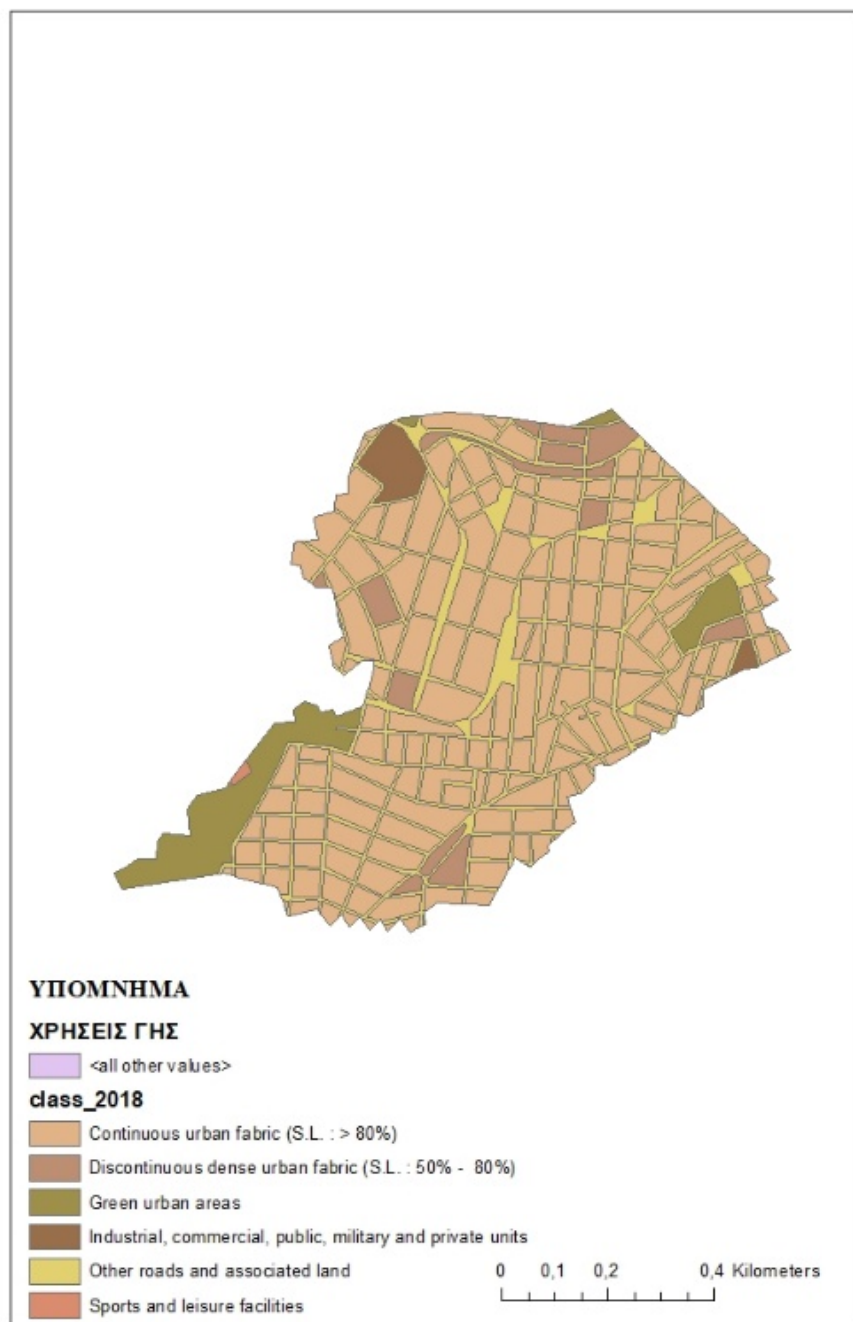
Εικόνα 2.5: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης



Εικόνα 2.6: Αστικές λεκάνες απορροής στην περιοχή μελέτης

Πίνακας 2.1: Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης

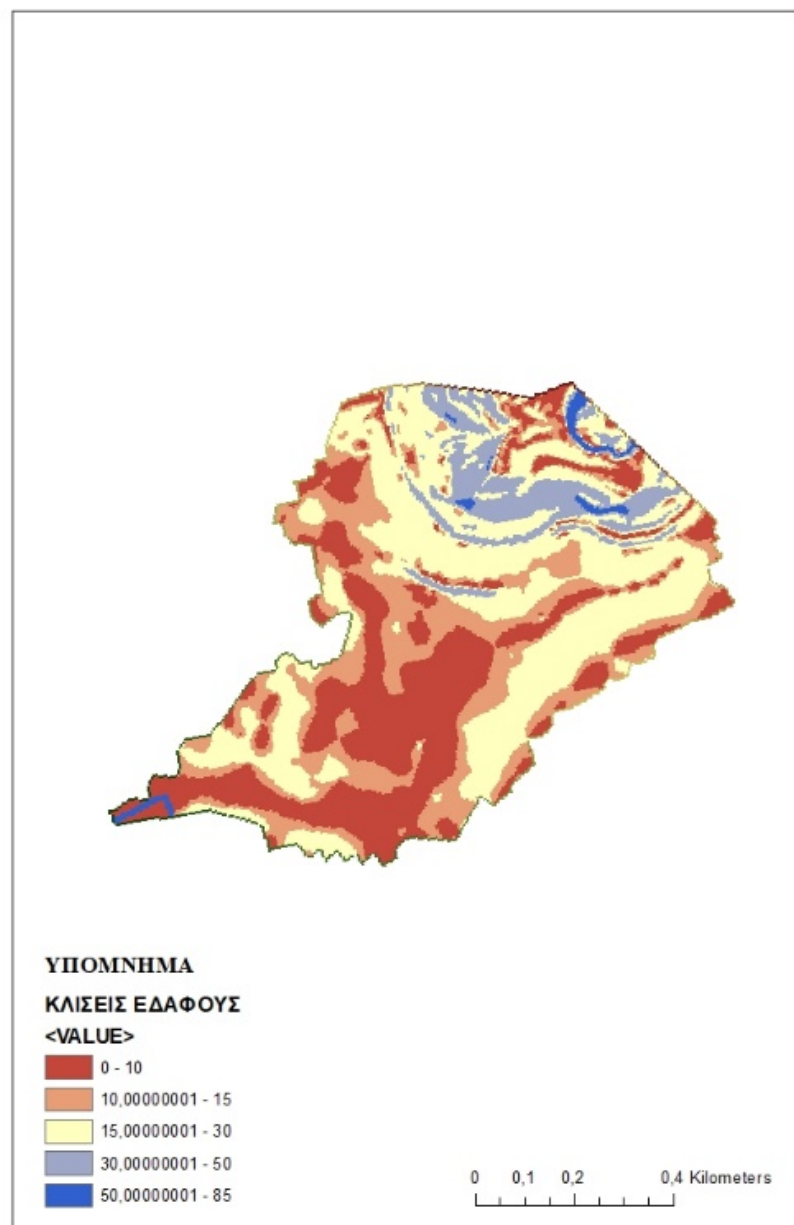
<b>Κωδικός CLC 2018</b>	<b>Χρήση γης Corine Land Cover 2018</b>	<b>Χρήση γης</b>	<b>Έκταση %</b>
11100	Continuous urban fabric	Συνεχής αστικός ιστός	21.54
12100	Industrial, commercial, public, military and private units	Βιομηχανικές, εμπορικές, δημόσιες, στρατιωτικές και ιδιωτικές μονάδες	1.13
11210	Discontinuous dense urban fabric	Ασυνεχής πυκνός αστικός ιστός	1.69
14100	Green urban areas	Πράσινες αστικές περιοχές	16.33
14200	Sports and leisure facilities	Αθλητικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις	0.42
12220	Other roads and associated land	Άλλοι δρόμοι και συναφή γη	58.89



Εικόνα 2.7: Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης

## 2.4. Κλίσεις εδάφους

Για την αρτιότερη προσομοίωση της περιοχής μελέτης, είναι αναγκαίος ο υπολογισμός των κλίσεων του εδάφους. Ο κάρταβος των κλίσεων που παρουσιάζεται στην Εικ.2.8, προέκυψε με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS βάσει του ΨΜΕ. Συγκεκριμένα, η κλίση επιλέχθηκε να υπολογιστεί σε μορφή ποσοστού και, πιο σωστά, ποσοστιαίας αύξησης ή αλλιώς ποσοστιαίας κλίσης.



Εικόνα 2.8: Κλίσεις εδάφους στην περιοχή μελέτης

## 2.5. Γεωλογική περιγραφή

Συμπληρωματικά με τις χρήσεις γης και τις κλίσεις εδάφους, αναγκαία είναι γεωλογική ανάλυση της περιοχής που προέκυψε με τη χρήση των γεωλογικών χαρτών της Νομαρχίας Αθηνών (Πογιατζή κ.α. 2013). Ο χάρτης επιβεβαιώνει πως η πλειοψηφία του εδάφους της υπό μελέτη περιοχής αποτελείται από αδιαπέρατο έδαφος, γεγονός που συμφωνεί με τον έντονο αστικό χαρακτήρα της περιοχής. Αναλυτικότερα, από τους 15 γεωλογικούς σχηματισμούς που διαθέτει το λεκανοπέδιο Αττικής (Πογιατζή κ.α. 2013), στην υπό μελέτη περιοχή παρουσιάζονται οι εξής:

1. Αθηναϊκοί σχιστόλιθοι (φλύσχης) - Σχιστόλιθοι ( $K_{9sch}$ ): σερικιτικοί, γλωριτικοί, εναλλασσόμενοι με αργιλικούς σχιστόλιθους, φακούς ψαμμιτών και ψαμμούχων κρυσταλλικών ή μικροκλαστικών ασβεστόλιθων ( $K_{9k_2}$ ), οι οποίοι σχηματίζουν τις κορυφές των λόφων από τον Αρδηττό και ανατολικά. Κατά θέσεις, οι Αθηναϊκοί σχιστόλιθοι διασχίζονται από φλέβες χαλαζία και από εξαλλοιωμένα εκρηξιγενή πετρώματα. Στις νοτιοανατολικές παρυφές του όρους Αιγάλεω, δεν είναι μεταμορφωμένοι (φλύσχης) και εμφανίζονται σαν τεφροί, κυανότεφροι βιοαρενίτες, ψαμμούχες μάργες με φυλλώδη υφή και μικροκοκκώδεις ψαμμίτες στα ανώτερα μέλη. Μέσα στους σχηματισμούς αυτούς, παρατηρούνται θραύσματα κερατόλιθων, ασβεστόλιθων, οφιολίθων, κόκκων χαλαζία κ.ά.
2. Ασβεστόλιθοι Τουρκοβουνίων ( $K_{gk}$ ) ανοικτότεφροι έως σκοτεινότεφροι, παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι, κατά θέσεις μεσοστρωματώδεις, ανακρυσταλλωμένοι, καρστικοί και έντονα διαρρηγμένοι. Πρόκειται για τους ασβεστόλιθους που κατέχουν τις κορυφές των λόφων της πόλης των Αθηνών. Υπέγκεινται του Μαργαϊκού ορίζοντα ( $K_{gmk,sch}$ ) ή βρίσκονται εγκυβωτισμένοι μέσα στους σχηματισμούς του ορίζοντα αυτού, συνήθως με τη μεσολάβηση κροκαλολατυποπαγών στρωμάτων, μικρού πάχους. Οι εν λόγω ασβεστόλιθοι κατά πάσα πιθανότητα έχουν τοποθετηθεί στα ανώτερα μέλη του Μαργαϊκού ορίζοντα με μορφή μεγάλων ολισβολίδων. Στα Τουρκοβούνια, στη βάση των ασβεστόλιθων αυτών, βρέθηκε το απολίθωμα *Vaccinites* (Hip.) cf. *atheniensis* K TENAS του κατώτερου Καμπανίου (ίσως και του Ανώτερου Σαντωνίου). Επίσης, στους ασβεστόλιθους αυτούς σε πολλές θέσεις

απαντώνται τομές και θραύσματα ρουδιστών, που δίνουν σ' αυτούς, με βεβαιότητα, ανωκρητιδική ηλικία.

3. Σχιστόλιθοι Αθηνών ( $K_{gsch}$ ): φλυσχοειδή ιζήματα που αποτελούνται από τεφρούς, γαλανότεφρους ή υποπράσινους αργιλικούς, ψαμμιτικούς σχιστόλιθους, ασβεστιτικούς ψαμμίτες και γραουβάκες, με ενστρώσεις ασβεστόλιθων και σχιστωδών μαργών ( $K_{gm,k}$ ) και με μικρά σώματα εκρηξιγενών πετρωμάτων, κυρίως σπιλιτών. Προς τα ανατολικά, μεταπίπτουν σε σερικιτιωμένους ψαμμίτες και ψαμμούχους κρυσταλλικούς ή ημικρυσταλλικούς ασβεστόλιθους με λεπτές διαστρώσεις πυριτόλιθων που αντιστοιχούν σε ιζήματα φλύσχη.

## 2.6. Περιγραφή επεισοδίων υετού Οκτώβρη 1994 και Ιουλίου 1995

Ένα ακόμη σημαντικό δεδομένο εισόδου στη διαδικασία μοντελοποίησης αποτελεί η επιλογή και επεξεργασία των επεισοδίων βροχόπτωσης. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε, μεταξύ άλλων ομβρίων καμπυλών, η όμβρια καμπύλη της Mimikou et al. (2000), η οποία περιγράφει δύο ιστορικά επεισόδια υετού, τα οποία προκάλεσαν σοβαρές καταστροφές και συνέπειες στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνα, αλλά και ειδικότερα στην υπολεκάνη Z2 του αποχετευτικού συστήματος.

Αναφορικά με το πρώτο επεισόδιο, ο λόγος γίνεται για τον γεγονός της 21<sup>ης</sup> και 22<sup>ας</sup> Οκτωβρίου του 1994. Το συγκεκριμένο επεισόδιο καταιγίδας χαρακτηρίστηκε ως ένα από τα πιο ακραία των τελευταίων 30 – 40 ετών, καθώς παρουσίασε μεγαλύτερη από την αναμενόμενη περίοδο επαναφοράς και προκάλεσε αρκετούς θανάτους και καταστροφές. Το συγκεκριμένο συμβάν έπληξε σχεδόν ολόκληρη την Ελλάδα, με εξαίρεση τη Θράκη και την Ανατολική Μακεδονία. Σε ορισμένες περιοχές της Αθήνας, η μέγιστη ωριαία ένταση της βροχής ανήλθε στα 42.7 mm, ενώ αντίστοιχα η μέγιστη 10 λεπτη ένταση στα 26.0 mm (<https://www.news247.gr/kairos/21-oktovrioy-1994-i-foniki-plimmyra-toy-podonifti-stin-attiki.9395967.html>). Συνέπεια των ως άνω ήταν οι εκτεταμένες πλημμύρες, υπερχειλίσσεις ρεμάτων της Αθήνας και ζημιές σε δρόμους, κατοικίες και εμπορικούς χώρους, προκαλώντας την απώλεια 11 ανθρώπινων ζωών, καθώς και σοβαρές ζημιές σε αγροτικές περιοχές, μεταφορές, τηλεπικοινωνίες και παροχές ενέργειας. Κοιτώντας την πλημμύρα από μία πιο οικονομικοκοινωνική πλευρά, άξιο αναφοράς κρίνεται επίσης πως οι ζημιές στη βιομηχανική και εμπορική

ιδιοκτησία ανήλθαν περίπου στα 13 εκατ. ευρώ, ενώ για την κατοικίες περίπου στο 1 εκατ. ευρώ (Mimikou et al. 2000).

Το δεύτερο επεισόδιο υετού έλαβε χώρα στη 1<sup>η</sup> Ιουλίου του 1995 και αφορά σε μία ξαφνική καλοκαιρινή καταιγίδα συναγωγικού τύπου που παρουσίασε έντονη χωρική μεταβλητότητα από το κέντρο προς τα βορειοανατολικά της Αθήνας. Λόγω της μικρής διάρκειας και μεγάλης έντασης, αυτή προκάλεσε ξαφνική πλημμύρα στην αστική περιοχή, όπως δυστυχώς και συγκέντρωση φερτών (σκουπιδιών και φερτών υλικών) στα δίκτυα αποχέτευσης (Mimikou et al. 2000).



### 3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ - MONTELO SWMM

Προκειμένου να ολοκληρωθεί η προσομοίωση με το λογισμικό SWMM, απαραίτητη ήταν η κατάλληλη διαμόρφωση των δεδομένων εισόδου στο μοντέλο, αλλά και η επεξεργασία των δεδομένων εξόδου. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν μια σειρά από γνωστές μεθοδολογίες και εξισώσεις με σκοπό τον υπολογισμό της απορροής ακαθάρτων, τον υπολογισμό του συντελεστή απορροής (CN) της περιοχής μελέτης, την παραγωγή υετογραφημάτων, την βαθμονόμηση του μοντέλου καθώς και την διαστασιολόγηση μιας δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης του νερού. Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο και στις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας καθώς και περιγραφή του μοντέλου SWMM.

#### 3.1. Εκτίμηση παροχής σχεδιασμού ακαθάρτων

Βασικό δεδομένο εισόδου για το μοντέλο αποτελεί η παροχή σχεδιασμού του δικτύου ακαθάρτων. Προκειμένου να υπολογιστεί χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται από τους Τσακίρης (2010) και Κούρτης (2016). Απαραίτητο δεδομένο για τους υπολογισμούς ήταν η εύρεση του πληθυσμού της περιοχής έτσι ώστε να υπολογιστεί η συνολική παραγωγή ακαθάρτων. Τα δεδομένα-χάρτες πυκνότητας πληθυσμού αντλήθηκαν από το πρόγραμμα Καλλικράτης του Ο.Κ.Χ.Ε (Οργανισμός Κτηματολογίου και Χαρτογραφίσεων Ελλάδος- <https://geodata.gov.gr/dataset/oria-demon-kallikrates>). Έτσι, προέκυψε ότι η πυκνότητα πληθυσμού της περιοχής μελέτης ήταν 19,815.01 κάτοικοι/km<sup>2</sup>. Συνεπώς, στην έκταση των περίπου 0.66 km<sup>2</sup> της υπό μελέτη περιοχής ο πληθυσμός (P<sub>v</sub>) ήταν ίσος με 13,039 κατοίκους. Να σημειωθεί ότι για την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα, ο υπολογισμός της παροχής ακαθάρτων και, επομένως, του πληθυσμού (P<sub>v</sub>) έγινε ξεχωριστά για κάθε υπολεκάνη της λεκάνης Z2 του αποχετευτικού συστήματος.

Επιπλέον, για τον τελικό υπολογισμό της παροχής έπρεπε να γίνουν κάποιες παραδοχές. Αρχικά, βάσει του Τσακίρη (2010), θεωρείται πως στον σχεδιασμό ενός δικτύου ακαθάρτων το 60-80% του νερού οικιακής χρήσης απορρέει στο αποχετευτικό δίκτυο. Αυτό διαφοροποιείται σε περίπτωση βιομηχανικών ή γεωργικών χρήσεων γης στην περιοχή. Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε έναν αστικό ιστό, όπου δεν εμφανίζονται γεωργικές χρήσεις και οι βιομηχανικές είναι αμελητέες. Λαμβάνοντας

υπόψιν τα παραπάνω επιλέχθηκε να αποχετεύονται το 80% των ακαθάρτων από οικιακή χρήση. Επιπλέον, έπρεπε να προσδιοριστεί η μέση ανοιγμένη κατανάλωση ανά κάτοικο ( $q$ ). Βάσει του Τσακίρη (2010), αυτή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 200-300 L/d/κάτοικο για χώρες της Μεσογείου. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε η τιμή 250 L/d/κάτοικο.

Έτσι, με δεδομένα τα παραπάνω και την μεθοδολογία που παρουσιάζεται από τους Τσακίρη (2010) και Κούρτης (2016), ακολουθήθηκε η εξής πορεία υπολογισμών. Αρχικά, υπολογίστηκε η συνολική μέση ημερήσια κατανάλωση για τον πληθυσμό σχεδιασμού ( $Q_d$ ) σε L/s βάσει του πληθυσμού ( $P_v$ ) και της μέση ανοιγμένης κατανάλωσης ανά κάτοικο ( $q$ ), όπως φαίνεται στην Εξ. 3.1:

$$Q_d = P_v q \quad (3.1)$$

Επόμενο βήμα ήταν ο υπολογισμός της συνολικής μέγιστης ωριαίας κατανάλωσης ( $Q_{h,max}$ ) σε L/s από την Εξ. 3.2. Για αυτό τον σκοπό πρέπει να συνυπολογιστούν και οι συντελεστές ζήτησης  $F_1$ ,  $F_2$  και  $F_{ol}$  (Εξ. 3.3):

$$Q_{h,max} = F_1 F_2 Q_d \quad (3.2)$$

$$F_{ol} = F_1 F_2 \quad (3.3)$$

Οι πολλαπλασιαστές ζήτησης εξαρτώνται από το μέγεθος του πληθυσμού και η διακύμανση των τιμών του  $F_{ol}$  είναι μεταξύ 3 και 9. Για την Ελλάδα προτείνεται από τον Τσακίρη (2010) η τιμή  $F_{ol} = 6$ .

Στην συνέχεια, υπολογίστηκε η συνολική μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων ( $Q_{Ah,max}$ ) σε L/s βάσει της παραδοχής ότι το  $\mu=80\%$  της μέγιστης ωριαίας κατανάλωσης ( $Q_{h,max}$ ) απορρέει στο αποχετευτικό δίκτυο (Εξ. 3.4):

$$Q_{Ah,max} = \mu Q_{h,max} \quad (3.4)$$

Τελευταίο βήμα ήταν ο υπολογισμός της μέγιστης ωριαίας παροχής ακαθάρτων ( $Q_{Ah,max}$ ) σε L/s (Εξ. 3.5) πολλαπλασιασμένης με τον αυξητικό συντελεστή  $P$  (Εξ. 3.6), ο οποίος εξαρτάται από τη μέγιστη ημερήσια παροχή ακαθάρτων ( $Q_{Ad}$ ). Για τον συντελεστή  $P$  ισχύει ο περιορισμός ότι  $P \leq 3$ :

$$Q_{Ah,max} = P Q_{Ad,max} \quad (3.5)$$

$$P = 1.5 + \frac{2.5}{\sqrt{Q_{Ad}}} \quad (3.6)$$

### 3.2. Βροχόπτωση σχεδιασμού - όμβριες καμπύλες

Οι όμβριες καμπύλες ή καμπύλες (Intensity Duration Frequency curves – IDF) είναι απαραίτητες για τον υδρολογικό σχεδιασμό μεγάλου αριθμού υδραυλικών έργων. Τέτοια έργα μπορεί να είναι ο σχεδιασμός μιας λεκάνης κατακράτησης υδάτων, ενός υπερχειλιστή ή εν προκειμένω ενός αποχετευτικού δικτύου ομβρίων. Βάσει αυτών, ο μελετητής δύναται να υπολογίσει για κάθε διάρκεια βροχής ( $d$ ) και περίοδο επαναφοράς ( $T$ ) την ένταση ( $i$ ) και συνεπώς το ύψος βροχής ( $h$ ) ή αντίστοιχα, για δύο εκ των  $d$ ,  $T$ ,  $i$  να υπολογίσει το τρίτο μέγεθος.

Προκειμένου να περιγράψουν οι όμβριες καμπύλες, οι επιστήμονες έχουν χρησιμοποιήσει διάφορες εκφράσεις. Βάσει της Mimikou et al. (2000), οι καμπύλες IDF συσχετίζουν την ένταση ( $i$  σε mm/h), τη διάρκεια ( $d$  σε h) και τη συχνότητα (συνήθως σε όρους περιόδου επαναφοράς, εκφρασμένη σε έτη) των βροχοπτώσεων. Αντίστοιχα, ο Τσακίρης (2010) αναφέρει ότι ως όμβριες καμπύλες ορίζονται οι καμπύλες έντασης – διάρκειας – περιόδου επαναφοράς που εκφράζουν την σχέση της ετήσιας μέγιστης έντασης βροχόπτωσης  $i$ , της διάρκειας  $d$  της ραγδαίας βροχόπτωσης και της περιόδου επαναφοράς  $T$ . Όπως αναφέρουν οι Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999) για την δημιουργία μιας καμπύλης IDF απαιτούνται ιστορικές χρονοσειρές μεγίστων εντάσεων βροχόπτωσης για διάφορες διάρκειες βροχής, που ξεκινούν από 5 min και καταλήγουν στη μέγιστη διάρκεια βροχής που αφορά στη διαστασιολόγηση και τον υδραυλικό έλεγχο τεχνικών έργων (2 έως 4 ημέρες). Προκειμένου να γίνει η

καταμέτρηση των απαραίτητων, για την δημιουργία των καμπυλών, βροχοπτώσεων χρησιμοποιούνται βροχογράφοι και βροχόμετρα.

### 3.2.1. Ισχύουσες όμβριες καμπύλες - Αθήνα

Η Μιμίκου (2006) αναφέρει ότι η γενική παραμετρική έκφραση των όμβριων καμπυλών μπορεί να αποτυπωθεί ως εξής (Εξ. 3.7) :

$$i = k T^a d^{-m} \quad (3.7)$$

όπου  $i$ : ένταση βροχής (mm/h),  $T$ : περίοδος επαναφοράς (yr),  $d$ : διάρκεια της βροχόπτωσης (h) και  $k$ ,  $a$  και  $m$ : σταθερές που προκύπτουν από στατιστική ανάλυση ιστορικών γεγονότων βροχόπτωσης στην εκάστοτε περιοχή.

Η περιοχή της Αθήνας μπορεί να περιγραφεί σύμφωνα με τους Mimikou et al. (2000), από την παρακάτω όμβρια καμπύλη (Εξ. 3.8), η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική για τον υπολογισμό βροχόπτωσης:

$$i = 15.39 T^{0.276} t^{-0.725} \quad (3.8)$$

όπου  $i$ : ένταση βροχής (mm/h),  $T$  η περίοδος επαναφοράς (yr) και  $d$  η διάρκεια της βροχόπτωσης (h).

Αν ληφθεί υπόψιν και το ακραίο επεισόδιο της περιόδου του Οκτώβρη του 1994, το οποίο περιεγράφηκε αναλυτικότερα στο υποκεφάλαιο 2.1, τότε η παραπάνω εξίσωση διαμορφώνεται σύμφωνα με τους Mimikou et al. (2000) από την Εξ. 3.9:

$$i = 15.56 T^{0.286} t^{-0.715} \quad (3.9)$$

όπου  $i$ : ένταση βροχής (mm/h),  $T$  η περίοδος επαναφοράς (yr) και  $d$  η διάρκεια της βροχόπτωσης (h).

Μία ακόμα όμβρια καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε κατά τους υπολογισμούς, η οποία διαφέρει εν μέρει σε μορφή από την τυπική όμβρια καμπύλη της Εξ. 3.7, είναι αυτή που προκύπτει από το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του 2017 για τον Νομό Αττικής (EL06-2017). Αυτή περιγράφεται από την Εξ. 3.10:

$$i = 162.95(T^{0.185} - 0.698) \left(1 + \frac{d}{0.124}\right)^{-0.622} \quad (3.10)$$

### 3.2.2. Μελλοντικές όμβριες καμπύλες - κλιματική αλλαγή

Παράλληλα, προκειμένου να γίνει πρόβλεψη της επιρροής της κλιματικής αλλαγής στον υπολογισμό της απορροής που προκύπτει από την βροχόπτωση, οι Kourtis et al. (2022) χρησιμοποίησαν την κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών (Γ.Α.Τ. ή διεθνώς General Extreme Value – GEV distribution). Η κατανομή Γ.Α.Τ. προτάθηκε από τον Jenkinson (1955) και αποτελεί μια σύνθεση των κατανομών ακραίων τιμών (Extreme Value distributions) τύπου I, II, και III. Πιο συγκεκριμένα, συνδέει την κατανομή ακραίων τιμών τύπου I (Gumbel), τύπου II (Fréchet) και τύπου III (Weibull) και βάσει των Koutsoyiannis et al. (1998) έχει την εξής έκφραση (Εξ .3.11):

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \kappa \left( \frac{x}{\lambda} - \psi \right) \right]^{-1/\kappa} \right\} \quad (3.11)$$

όπου  $F(x)$  είναι η συνάρτηση κατανομής της μεταβλητής  $x$ , η οποία αφορά στην ένταση της βροχής  $i$  και  $\kappa > 0$ ,  $\lambda > 0$  και  $\psi$  οι παράμετροι σχήματος, κλίμακας και θέσης, αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι μαθηματικά είναι εφικτό η παράμετρος σχήματος να είναι μικρότερη του μηδενός ( $\kappa < 0$ ), αλλά αυτό συνεπάγεται άνω φραγμένη τιμή της έντασης βροχής, κάτι που δεν είναι δυνατόν φυσικά. Έτσι, σύμφωνα με τους Kourtis et al. (2022) και με χρήση της κατανομής Γ.Α.Τ. προέκυψαν τρεις μελλοντικές εξισώσεις ομβρίων καμπυλών για το έτος 2100 για την περιοχή της Αθήνας. Η πρώτη περίπτωση (Εξ. 3.12) αφορά σε μία πρόβλεψη της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στο μέγεθος

της απορροής με μέσες τιμές έντασης. Η δεύτερη περίπτωση (Εξ. 3.13) αναφέρεται στην ακραία (μεγαλύτερη πιθανή) τιμή της έντασης και πρόκειται για την πιο συντηρητική πρόβλεψη. Τέλος, η Εξ. 3.14 αναφέρεται στην λιγότερο συντηρητική πρόβλεψη.

$$i=25.76 T^{0.4}(d + 0,348)^{-0.797} \quad (3.12)$$

$$i=34.06 T^{0.443}(d + 0,129)^{-0.698} \quad (3.13)$$

$$i=19.67 T^{0.361}(d + 0,647)^{-0.909} \quad (3.14)$$

### 3.3. Δημιουργία υετογραφημάτων σχεδιασμού - μέθοδος των εναλλασσόμενων blocks

Χρησιμοποιώντας την Εξ. 3.7 και για δεδομένες τιμές των σταθερών  $k$ ,  $a$ ,  $m$ , καθώς και της περιόδου επαναφοράς  $T$  (y) και διάρκειας βροχόπτωσης  $d$  (h), προκύπτει η ένταση της βροχόπτωσης  $i$  (mm/h). Αν αυτή η ένταση πολλαπλασιαστεί με την διάρκεια της βροχόπτωσης, τότε προκύπτει το ύψος βροχής για ένα συγκεκριμένο επεισόδιο ραγδαίας βροχόπτωσης.

Ως υετογράφημα ορίζεται η χρονική κατανομή αυτού του ύψους βροχής που πέφτει σε μια λεκάνη. Ο Κουτσογιάννης (1999) αναφέρει πώς όταν ένα υετογράφημα προκύπτει από εξισώσεις ομβρίων καμπυλών υπερτερεί σε σχέση με τις τυποποιημένες βροχές σχεδιασμού. Αυτό συμβαίνει διότι οι όμβριες καμπύλες είναι εμπειρικές εξισώσεις οι οποίες βασίζονται αποκλειστικά σε ιστορικά δεδομένα βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης. Έτσι, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια στις προβλέψεις. Προκειμένου, λοιπόν, να επιτευχθεί η κατανομή των υψών βροχής στην παρούσα εργασία, με σκοπό την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό SWMM, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των εναλλασσόμενων υψών βροχής (Alternation Block Method; Chow et al. 1988), η οποία περιγράφεται από την Εξ. 3.15:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1-m} \quad (3.15)$$

όπου  $h_1$  είναι το ύψος βροχής διάρκειας  $d_1$ ,  $h_2$  είναι το ύψος βροχής διάρκειας  $d_2$  και  $m$  είναι σταθερά που υπολογίζεται από τη σχέση έντασης-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς.

Η υπολογιστική διαδικασία ξεκινάει με τον υπολογισμό των υψών βροχής σε κάθε χρονικό βήμα της βροχόπτωσης και έπειτα των διαφορών τους. Στην συνέχεια, γίνεται η κατανομή των υψών βάσει του ακόλουθου κανόνα: «*Το μεγαλύτερο ύψος βροχής τοποθετείται στο κεντρικό χρονικό διάστημα, το αμέσως μικρότερο στο αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα από δεξιά και το αμέσως επόμενο στο χρονικό διάστημα από αριστερά. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται μέχρι να συμπληρωθούν όλα τα χρονικά διαστήματα με τιμές υψών βροχόπτωσης*» (Μιμίκου και Μπαλτάς 2018).

Το ΥΠΕΧΩΔΕ (2002) αναφέρει στο τεύχος «*Αποχέτευση - Στράγγιση. Υδραυλικά Έργα Οδών*» σχετικά με την επιλογή του χρονικού βήματος, ότι αυτό δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20% του χρόνου συγκέντρωσης κυρίως στο τμήμα της ισχυρής βροχόπτωσης για το οποίο είναι αναγκαία η λεπτομερής καταγραφή των εντάσεων βροχής. Γενικά, το χρονικό βήμα δεν θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλο προκειμένου να γίνεται ορθότερη εκτίμηση της παροχής αιχμής.

### 3.4. Λογισμικό SWMM

#### 3.4.1. Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το λογισμικό Storm Water Management Model ή αλλιώς SWMM. Πρόκειται για ένα προϊόν της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency-USEPA: <https://www.epa.gov/>). Το μοντέλο αναπτύχθηκε το 1971 από τους Metcalf and Eddy (1971) με σκοπό την προσομοίωση της απορροής των ομβρίων, σε ποσοτικό και ποιοτικό επίπεδο. Έκτοτε η δομή του μοντέλου έχει τροποποιηθεί ως προς τις υπολογιστικές μεθόδους που χρησιμοποιεί. Σύμφωνα με τους Rossman and Simon (2022), η πρώτη ευρέως διαδεδομένη έκδοση του λογισμικού SWMM χρονολογείται το 1975 στο Πανεπιστήμιο της Φλόριντα (University of Florida), ενώ η πρώτη έκδοση

του λογισμικού για ηλεκτρονικούς υπολογιστές γίνεται από την USEPA το 1983. Το πρόγραμμα, όπως αναφέρουν ο Rossman (2009) και οι Rossman and Simon (2022) έλαβε την σημερινή του μορφή το 2010 από την Water Supply and Water Resources Division της USEPA σε συνεργασία με την συμβουλευτική εταιρεία CDM-Smith (<https://www.cdmsmith.com/>).

Το λογισμικό SWMM αποτελεί ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης βροχής απορροής, το οποίο περιγράφει τον αστικό υδρολογικό κύκλο, σύμφωνα με την Εικ. 3.1. Ειδικότερα, το μοντέλο αναπαριστά την λεκάνη απορροής ως ένα σύνολο από υδραυλικά στοιχεία, δηλαδή από υπολεκάνες, αγωγούς και φρεάτια, τα οποία έχουν διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες (μέγεθος, κλίση, συντελεστή τραχύτητας κ.α.). Έτσι, παρέχει στο μελετητή ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για την προσομοίωση υδρολογικών και υδραυλικών διαδικασιών, καθώς και ελέγχων ποιότητας τόσο για ένα μεμονωμένο γεγονός όσο και για συνεχή γεγονότα. Κύριο μέγεθος που εξετάζει είναι αυτό της απορροής σε κάθε υπολεκάνη της περιοχής μελέτης, την οποία και αντιλαμβάνεται ως το σύνολο της εκάστοτε κατακρήμνισης (Rossman and Simon 2022). Παράλληλα, σε κάθε υπολεκάνη υπολογίζει το βάθος ροής, την ταχύτητα ροής και την ποιότητα νερού στο αποχετευτικό σύστημα κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης. Στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση SWMM 5.2.





Εικόνα 3.1: Τυπικό αποχετευτικό δίκτυο αστικής περιοχής (Πηγή: Rossman and Simon 2022)

#### 3.4.2. Δυνατότητες του λογισμικού SWMM και τυπικές εφαρμογές

Το μοντέλο SWMM, εκτελεί μια πληθώρα από υδρολογικές διεργασίες, οι οποίες προκαλούν επιφανειακή απορροή. Οι κυριότερες από αυτές είναι, μεταξύ άλλων (Rossman and Simon 2022):

- Βροχόπτωση μεταβλητή με τον χρόνο.
- Εξάτμιση στάσιμου επιφανειακού νερού.
- Συσσώρευση και τήξη χιονιού.
- Αρχική συγκράτηση κοιλοτήτων.
- Διήθηση σε ακόρεστα στρώματα του εδάφους.
- Κατείδυση επιφανειακού νερού στον υπόγειο υδροφόρο.
- Ενδιάμεση ροή μεταξύ υπογείου νερού και συστήματος επιφανειακού νερού.
- Μη γραμμική διόδευση επιφανειακής διάχυτης ροής.
- Διήθηση βρόχινου νερού στο σύστημα αγωγών ακαθάρτων.
- Συγκράτηση βροχής και απορροής με διάφορους τύπους συστημάτων ήπιας ανάπτυξης (LID).

Η χωρική μεταβλητότητα σε όλες αυτές τις διαδικασίες επιτυγχάνεται με τον διαχωρισμό της αστικής λεκάνης απορροής σε ομογενείς υπολεκάνες. Η κάθε υπολεκάνη αποτελείται από ένα ποσοστό διαπερατής και ένα αδιαπέρατης επιφάνειας, ενώ η επιφανειακή απορροή μπορεί να διoδευτεί ανάμεσα στις υπολεκάνες ή στα σημεία εισόδου ενός αποχετευτικού συστήματος (Rossman and Simon 2022):

Το SWMM παρουσιάζει, επιπλέον, και δυνατότητες υδραυλικής προσομοίωσης για την διόδευση της απορροής και των εξωτερικών εισροών δια μέσου ενός αποχετευτικού

συστήματος αγωγών και δεξαμενών κατακράτησης, επεξεργασίας και εκτροπής. Αναλυτικότερα αυτές περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων (Rossman and Simon 2022):

- Το χειρισμό δικτύων απεριόριστου μεγέθους
- Τη χρήση μια μεγάλης ποικιλίας κλειστών και ανοιχτών αγωγών καθώς και φυσικών καναλιών
- Τη μοντελοποίηση ειδικών στοιχείων όπως δεξαμενές κατακράτησης και επεξεργασίας, αντλίες, εκχειλιστές, οπές και διαχωριστές ροής
- Τη δυνατότητα εφαρμογής εξωτερικών εισροών και ποιότητας λόγω επιφανειακής απορροής, ταχείας ενδιάμεσης ροής, διήθησης από κατακρημνίσματα και άλλες εισροές, ροής ακάθαρτων σε ξηρό καιρό και εισροών ορισμένων από τον χρήστη.
- Τη χρήση είτε των εξισώσεων κινηματικού κύματος, είτε των εξισώσεων δυναμικού κύματος για την διόδευση της απορροής
- Τη μοντελοποίηση πολύπλοκων φαινομένων όπως έλεγχος της στάθμης στα κατάντη, υπερφόρτιση, ανάστροφη ροή και λίμναση.
- Την εφαρμογή κανόνων δυναμικού ελέγχου από το χρήστη για την προσομοίωση της λειτουργίας των αντλιών, των οπών και των διαφραγμάτων.

Τέλος, το λογισμικό SWMM, έχει τη δυνατότητα της εκτίμησης των ρυπαντικών φορτίων για τον έλεγχο ποιότητας των υδάτων. Οι διαδικασίες που δύναται να προσομοιώσει συνοψίζονται παρακάτω (Rossman and Simon 2022):

- Συσσώρευση ρύπων σε διάφορες χρήσεις γης για ξηρό καιρό
- Απόπλυση ρύπων από συγκεκριμένες χρήσεις γης κατά τη διάρκεια επεισοδίων βροχής
- Μείωση της συσσώρευσης ρύπων σε συνθήκες ξηρού καιρού λόγω του «σκουπίσματος» των δρόμων
- Μείωση του φορτίου απόπλυσης δια μέσου των μέτρων βέλτιστης διαχείρισης (BMPs)
- Είσοδος παροχών ακαθάρτων ξηρού καιρού και εξωτερικών εισροών οριζόμενων από τον χρήστη σε κάθε σημείο του αποχετευτικού συστήματος
- Διόδευση ρύπων μέσω του αποχετευτικού συστήματος

- Μείωση των συγκεντρώσεων των ρυπαντικών φορτίων μέσω επεξεργασίας σε δεξαμενές κατακράτησης ή με φυσικές διεργασίες σε αγωγούς και κανάλια

Το SWMM, όπως αναφέρθηκε εκτενώς στο Υποκεφάλαιο 1.5 έχει συχνή εφαρμογή σε μελέτες διαχείρισης βρόχινου νερού και ακαθάρτων. Οι Rossman and Simon (2022) περιγράφουν στο manual του μοντέλου μερικές τυπικές του εφαρμογές:

- Τον σχεδιασμό και διαστασιολόγηση του συστήματος αποχέτευσης για τον έλεγχο των πλημμυρών.
- Την διαστασιολόγηση των δεξαμενών κατακράτησης της απορροής και των υδραυλικών τμημάτων τους για έλεγχο πλημμύρας και διαχείριση της ποιότητας της απορροής.
- Την χαρτογράφηση της πλημμυρικής έκτασης σε φυσικά συστήματα καναλιών
- Τον σχεδιασμό μέτρων ελέγχου για την ελαχιστοποίηση των υπερχειλίσεων από παντοροϊκά δίκτυα.
- Την αξιολόγηση της επίπτωσης της διήθησης βροχής σε υγειονομικούς υπονόμους.
- Την εκτίμηση φορτίων μη σημειακών πηγών ρύπανσης για μελέτες καταμερισμού φορτίων ρύπων.
- Την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων βέλτιστης διαχείρισης στη μείωση των φορτίων ρύπων κατά την διάρκεια υγρού καιρού.

### 3.4.3. Εννοιολογική αντίληψη του μοντέλου

Το SWMM ερμηνεύει ένα αποχετευτικό σύστημα ως μια σειρά από ροές νερού και άλλων υλικών μεταξύ των διαφόρων περιβαλλοντικών συστημάτων. Τα συστήματα αυτά κατά τους Rossman and Simon (2022) είναι τα εξής:

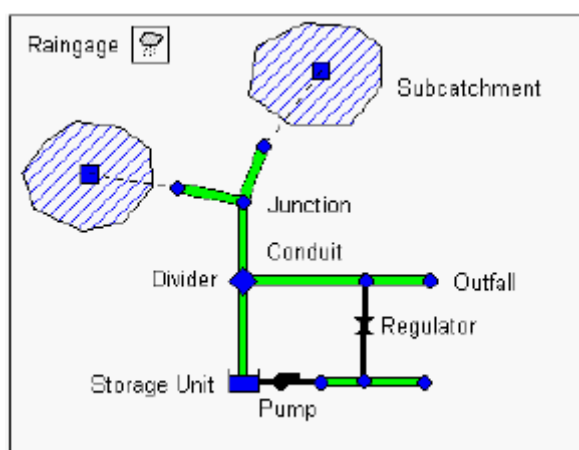
- Το τμήμα της ατμόσφαιρας (Atmosphere compartment): στο τμήμα αυτό παράγεται το κατακρήμνισμα που συντελεί στην εναπόθεση των ρύπων στην επιφάνεια της γης. Το SWMM χρησιμοποιεί βροχογράφους ώστε να αναπαρίσταται η βροχόπτωση ως δεδομένο εισόδου στο σύστημα.
- Το τμήμα της επιφάνειας της γης (Land Surface compartment): το τμήμα αυτό αναπαρίσταται από μία ή περισσότερες λεκάνες απορροής και δέχεται τα

κατακρημνίσματα από το τμήμα της ατμόσφαιρας είτε με την μορφή βροχής, είτε με τη μορφή χιονιού. Επιπλέον, αποστέλλει την εκροή στο τμήμα του υπόγειου υδροφορέα με τη μορφή διήθησης, ενώ παράλληλα αποστέλλει την επιφανειακή απορροή και τα ρυπαντικά φορτία στο τμήμα μεταφοράς.

- Το τμήμα των υπόγειων υδάτων (Groundwater compartment): αυτό δέχεται τη διήθηση από το τμήμα της επιφάνειας της γης και ένα μέρος το μεταφέρει ως εισροή στο τμήμα της μεταφοράς.
- Το τμήμα της μεταφοράς (Transport compartment): αυτό περιλαμβάνει το δίκτυο μεταφοράς, αγωγούς, κανάλια, αντλίες, ρυθμιστές, δεξαμενές συγκράτησης και επεξεργασίας. Στόχος είναι να διαβιβάζει το νερό σε σημεία εκβολής ή σε μέρη επεξεργασίας. Σε αυτό εισέρχονται οι ροές λόγω επιφανειακής απορροής, υπόγειας απορροής αλλά και λόγω πρόσθετων εισροών οριζόμενων από τον χρήστη.

#### 3.4.4. Οπτικά αντικείμενα προσομοίωσης λογισμικού (Visual objects)

Ως οπτικά ορίζονται τα αντικείμενα τα οποία αναπαρίστανται στο περιβάλλον του λογισμικού SWMM με σκοπό την προσομοίωση του αποχετευτικού συστήματος. Στην Εικ. 3.2 παρουσιάζονται μερικά από αυτά και, ειδικότερα, οι βροχογράφοι (rain gages), υπολεκάνες (subcatchments), κόμβοι (junction nodes), κόμβοι εκβολής (outfall nodes), αγωγοί (conduits), δεξαμενές κατακράτησης και επεξεργασίας (storage units), αντλίες (pumps) και ρυθμιστές ροής (regulators). Αυτά παρουσιάζονται παρακάτω σύμφωνα με τους Rossman and Simon (2022).



Εικόνα 3.2: Οπτικά αντικείμενα μοντελοποίησης του συστήματος αποχέτευσης (Πηγή: Rossman and Simon 2022)

Οι βροχογράφοι (rain gages) αποδίδουν δεδομένα σχετικά με την βροχόπτωση στις υπολεκάνες της περιοχής μελέτης. Η εισαγωγή των δεδομένων δύναται να έχει την μορφή ημερήσιων χρονοσειρών βροχόπτωσης είτε να εισαχθεί ως ένα εξωτερικό αρχείο. Απαραίτητα δεδομένα εισαγωγής στους βροχογράφους είναι ο τύπος βροχόπτωσης (ένταση, ύψος ή όγκος) και το χρονικό της βήμα.

Οι υπολεκάνες (subcatchments) είναι ουσιαστικά υδρολογικές μονάδες που περιγράφουν την εκάστοτε περιοχή μελέτης. Βάσει της τοπογραφίας τους και των δεδομένων του αποχετευτικού συστήματος, η επιφανειακή απορροή οδηγείται στην έξοδο της κάθε υπολεκάνης. Μεγάλη είναι η σημασία του σωστού διαχωρισμού της υπό μελέτης περιοχής σε άρτια οριοθετημένες υπολεκάνες, καθώς και της εύρεσης του σημείου εξόδου τους για την ορθότητα των υπολογισμών. Στο περιβάλλον SWMM, τα σημεία εκβολής αποτελούν συνήθως κόμβους του αποχετευτικού συστήματος.

Οι υπολεκάνες αποτελούνται από διαπερατά και αδιαπέρατα τμήματα. Η επιφανειακή απορροή μπορεί να διεισδύσει στην άνω ακόρεστη εδαφική ζώνη της διαπερατής περιοχής, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει αντίστοιχα με την αδιαπέρατη. Προκειμένου να περιγραφεί αυτό το φαινόμενο, το SWMM επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει την μέθοδο διήθησης μεταξύ τριών εμπειρικών εξισώσεων:

- Το μοντέλο Horton
- Το μοντέλο Green-Ampt
- Τη μέθοδο της Soil Conservation Service (SCS)

Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η μέθοδος της SCS η οποία και θα αναλυθεί παρακάτω (§3.4.8).

Απαραίτητα δεδομένα για την ορθότερη προσομοίωση μιας αστικής λεκάνης στο λογισμικό SWMM είναι:

- Ο βροχογράφος
- Το σημείο εξόδου της λεκάνης
- Η συνολική έκταση της περιοχής

- Το ποσοστό της αδιαπέρατης περιοχής
- Η μέση κλίση της περιοχής
- Το χαρακτηριστικό πλάτος της επίγειας ροής
- Ο συντελεστής τραχύτητας Manning ( $n$ ) της επίγειας ροής τόσο για τις διαπερατές όσο και για τις αδιαπέρατες περιοχές
- Η επιφανειακή συγκράτηση στις διαπερατές και στις αδιαπέρατες περιοχές
- Το ποσοστό της αδιαπέρατης περιοχής με μηδενική επιφανειακή αποθήκευση

Η φυσική σημασία των κόμβων (junction nodes) είναι αυτή των φρεατίων ενός αποχετευτικού συστήματος που συνδέουν τους αγωγούς ή τα κανάλια μεταξύ τους. Χρησιμεύουν και για την εισαγωγή εξωτερικών εισροών στο σύστημα. Απαραίτητα δεδομένα εισόδου στους κόμβους για την προσομοίωση στο λογισμικό SWMM είναι:

- Το υψόμετρο πυθμένα του αγωγού
- Το ύψος μέχρι την επιφάνεια του εδάφους.

Συμπληρωματικά και για μεγαλύτερη ακρίβεια των υπολογισμών μπορούν να εισαχθούν τα εξής δεδομένα:

- Η έκταση της λιμνάζουσας επιφάνειας σε περίπτωση πλημμύρας
- Δεδομένα εξωτερικών εισροών στον κόμβο.

Οι κόμβοι εκβολής (Outfall Nodes) αποτελούν τους τερματικούς κόμβους ενός αποχετευτικού συστήματος, οι οποίοι με χρήση της μεθόδου διόδευσης του Δυναμικού Κύματος (Dynamic Wave flow routing) οριοθετούν την λεκάνη απορροής στα κατάντη του συστήματος. Σύμφωνα με τους Rossman and Simon (2022), για την προσομοίωση των κόμβων απαιτείται η εισαγωγή των εξής δεδομένων:

- Το υψόμετρο πυθμένα.
- Οι οριακές συνθήκες που αφορούν το κρίσιμο και ομοιόμορφο βάθος ροής, καθώς και την ανώτατη στάθμη νερού στον κόμβο.
- Η παρουσία θυροφράγματος για την αποφυγή φαινομένων ανάστροφης ροής.

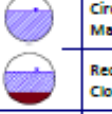
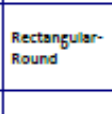
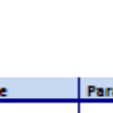

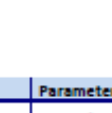
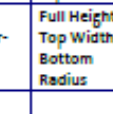
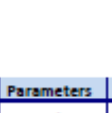
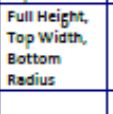

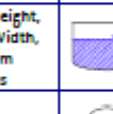

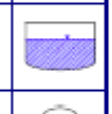
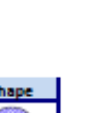












Οι αγωγοί (conduits) είναι είτε κλειστοί αγωγοί είτε κανάλια τα οποία συνδέουν τους κόμβους, με σκοπό την μεταφορά της απορροής από τον ένα στον άλλο. Οι διατομές των αγωγών που χρησιμοποιεί το λογισμικό ποικίλουν και παρουσιάζονται αναλυτικά

στην Εικ. 3.3. Στις περισσότερες μελέτες χρησιμοποιούνται αγωγοί κυκλικής (circular), ελλειπτικής (ellipse) ή τοξωτής (arch) διατομής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι αγωγοί ήταν είτε ωοειδούς (eggshape) διατομής είτε κυκλικής (circular) διατομής.

Το SWMM χρησιμοποιεί την εξίσωση του Manning (Εξ. 3.16) για τον υπολογισμό της απορροής.

$$Q = \frac{1}{n}AR^{2/3}S^{1/2} \quad (3.16)$$

όπου  $Q$  η απορροή σε  $m^3/s$ ,  $A$  το εμβαδόν σε  $m^2$  της επιλεχθείσας διατομής από την Εικ. 3.3,  $R$  η υδραυλική ακτίνα σε  $m$  και  $S$  η κλίση, η οποία λαμβάνει είτε την τιμή της κλίσης του πυθμένα ( $S_0$ ) είτε της κλίσης της γραμμής ενέργειας ( $S_f$ ) ανάλογα με τη μέθοδο διάδευσης η οποία χρησιμοποιείται.

Name	Parameters	Shape	Name	Parameters	Shape
Circular	Full Height		Circular Force Main	Full Height, Roughness	
Filled Circular	Full Height, Filled Depth		Rectangular - Closed	Full Height, Width	
Rectangular - Open	Full Height, Width		Trapezoidal	Full Height, Base Width, Side Slopes	
Triangular	Full Height, Top Width		Horizontal Ellipse	Full Height, Max. Width	
Vertical Ellipse	Full Height, Max. Width		Arch	Full Height, Max. Width	
Parabolic	Full Height, Top Width		Power	Full Height, Top Width, Exponent	
Rectangular-Triangular	Full Height, Top Width, Triangle Height		Rectangular-Round	Full Height, Top Width, Bottom Radius	
Modified Baskethandle	Full Height, Bottom Width, Top Radius		Egg	Full Height	
Horseshoe	Full Height		Gothic	Full Height	
Catenary	Full Height		Semi-Elliptical	Full Height	
Baskethandle	Full Height		Semi-Circular	Full Height	
Irregular Channel	Transect Coordinates		Custom Closed Shape	Full Height, Shape Curve Coordinates	
Street or Roadway	See Section 3.3.6				

Εικόνα 3.3: Διαθέσιμες διατομές αγωγών λογισμικού SWMM (Πηγή: Rossman and Simon 2022)

Αναφορικά με τον υπολογισμό των απωλειών τριβής σε κυκλικούς αγωγούς υπό πίεση, το SWMM χρησιμοποιεί είτε την εξίσωση του Hazen-Williams (Εξ. 3.17) είτε την εξίσωση του Darcy-Weisbach (Εξ. 3.18).

Στο διεθνές σύστημα μονάδων η εξίσωση Hazen-Williams είναι:

$$Q = 1.318CAR^{0.63}S^{0.54} \quad (3.17)$$

Αντίστοιχα, η εξίσωση Darcy-Weisbach είναι:

$$Q = \sqrt{\frac{8g}{f}}AR^{0.5}S^{0.5} \quad (3.18)$$

όπου  $Q$  η απορροή σε  $m^3/s$ ,  $A$  το εμβαδόν σε  $m^2$  της διατομής ροής από την Εικ. 3.3,  $R$  η υδραυλική ακτίνα σε  $m$ ,  $S$  η κλίση. Για την (Εξ. 17),  $C$  είναι ο συντελεστής Hazen-Williams, ο οποίος εξαρτάται από την τραχύτητα του αγωγού και δεν λαμβάνει υπόψιν το είδος της ροής. Για την (Εξ. 3.18) με  $g$  συμβολίζεται η επιτάχυνση της βαρύτητας σε  $m/s^2$  και με  $f$  ο συντελεστής τριβής, ο οποίος εξαρτάται από το υλικό του αγωγού και από το είδος της ροής (στρωτή, τυρβώδης).

Τα βασικά αρχικά δεδομένα που απαιτεί το SWMM για την προσομοίωση των αγωγών είναι τα εξής (Rossman και Simon 2022):

- Τα ονόματα των κόμβων εισόδου και εξόδου
- Τα μετατοπισμένα ύψη ή τις μετατοπισμένες στάθμες εισόδου και εξόδου πάνω από τα αντίστοιχα υψόμετρα πυθμένα των φρεατίων
- Το μήκος του αγωγού
- Ο συντελεστής τραχύτητας του Manning ( $n$ )
- Η γεωμετρία της διατομής



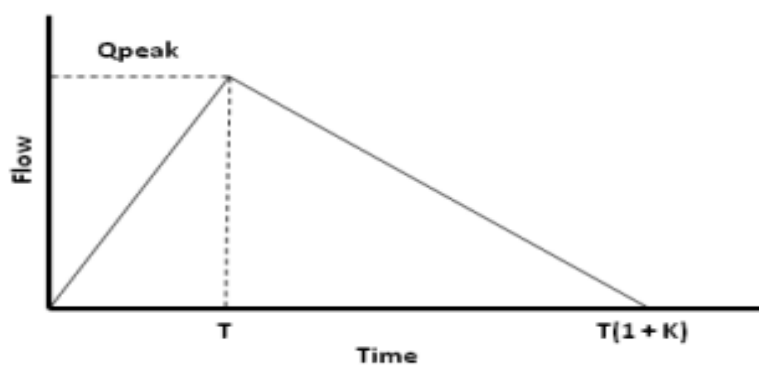
### 3.4.5. Μη οπτικά αντικείμενα προσομοίωσης λογισμικού (Non-visual objects)

Ως μη οπτικά ορίζονται τα αντικείμενα τα οποία δεν αναπαρίστανται στο χάρτη του περιβάλλοντος του λογισμικού. Το SWMM τα χρησιμοποιεί προκειμένου να δώσει στον χρήστη περισσότερες πληροφορίες αναφορικά με την υπό μελέτη περιοχή. Τα μη οπτικά αντικείμενα μπορεί να αφορούν βάσει των Rossman και Simon (2022) κλιματολογικά δεδομένα (climatology), όπως θερμοκρασία, εξάτμιση, ταχύτητα ανέμου, τήξη χιονιού κ.α.. Επιπλέον, αναφέρονται σε μοναδιαία υδρογραφήματα (unit hydrographs), υδροφορείς (aquifers), εγκάρσιες τομές (transects), εξωτερικές εισροές (external inflows), εντολές ελέγχου (control rules), ρύπους (pollutants), χρήσεις γης (land uses), χρονοσειρές (timeseries) και συστήματα ήπιας ανάπτυξης LID (Low Impact Development). Παρακάτω αναφέρονται μερικά, επιπλέον, στοιχεία για αυτά.

Κατά τον Sherman (1932), ως μοναδιαίο υδρογράφημα (MY-Unit Hydrograph) ορίζεται το υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους ίσου με την μονάδα (1 cm) ομοιόμορφα κατανεμημένης σε όλη την έκταση της λεκάνης με ομοιόμορφη ένταση καθ' όλη τη διάρκεια.. Σύμφωνα με τους Rossman and Simon (2022), κάθε MY θεωρείται ως διαφορετικό αντικείμενο στο λογισμικό, με μοναδικό όνομα και ξεχωριστό βροχογράφο, ο οποίος του παρέχει δεδομένα βροχοπτώσεων.

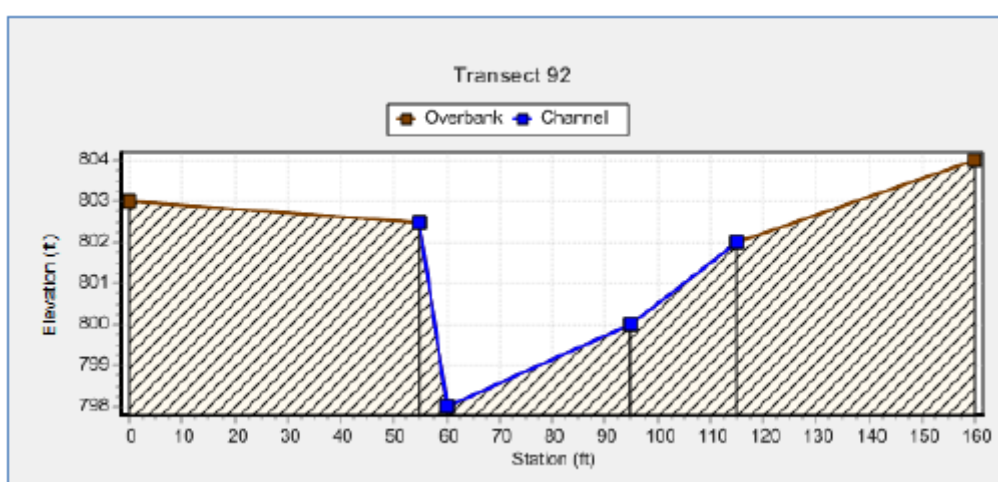
Όπως φαίνεται από την Εικ. 3.4, το MY αποτελείται από τρεις συνιστώσες:

- $R$ : τον όγκο της απορροής που εισέρχεται στο αποχετευτικό σύστημα.
- $T$ : τον χρόνο που περνά από την αρχή της απορροής έως την αιχμή του MY (κλάδος ανόδου).
- $KT$ : τον χρόνο που περνά από την αιχμή του MY έως την λήξη της απορροής.



Εικόνα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση των τριών βασικών παραμέτρων ενός μοναδιαίου υδρογραφήματος (Πηγή: Rossman and Simon 2022)

Οι εγκάρσιες τομές (transects) αφορούν στη γεωμετρία του πυθμένα. Ειδικότερα, περιγράφουν τη μεταβολή του υψομέτρου του πυθμένα σε σχέση με την οριζόντια απόσταση σε ένα φυσικό κανάλι ή σε μια διατομή αγωγού ακανόνιστου σχήματος. Ένα παράδειγμα εγκάρσιας τομής για αγωγό ελεύθερης επιφάνειας φαίνεται στην Εικ. 3.5.



Εικόνα 3.5: Παράδειγμα εγκάρσιας διατομής σε φυσικό κανάλι (Πηγή: Rossman and Simon 2022)

Κάθε εγκάρσια διατομή έχει το δικό της ξεχωριστό όνομα, το οποίο είναι χαρακτηριστικό του σχήματος των αγωγών. Το λογισμικό δύναται να προσομοιάσει διατομές ακανόνιστου σχήματος και να υπολογίσει τα υδραυλικά τους μεγέθη (υδραυλική ακτίνα, πλάτος ελεύθερης επιφάνειας, εμβαδό κ.α.) μέσω του Transect Editor. Επιπλέον, το SWMM μπορεί να αντιληφθεί διαφορετικό συντελεστή Manning στην δεξιά και την αριστερή παρειά της διατομής, καθώς και στο κύριο κανάλι. Έτσι, γίνεται αρτιότερη εκτίμηση της μεταφοράς της απορροής μέσα στο κανάλι, κάτω από συνθήκες υψηλής ροής.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι εξωτερικές εισροές (external inflows) που εισέρχονται στους κόμβους του αποχετευτικού συστήματος. Αυτές δύνανται να έχουν τις παρακάτω μορφές, όπως αναφέρουν οι Rossman και Simon (2022):

- Άμεση Εισροή
- Εισροή σε ξηρό καιρό
- Εισροή λόγω βροχόπτωσης

Όσον αφορά τις χρονοσειρές, αυτές περιγράφουν την χρονική εξέλιξη ορισμένων ιδιοτήτων των αντικειμένων. Η χρήση τους είναι συχνή για αναπαράσταση των εξής τύπων δεδομένων (Rossman and Simon 2022)

- Δεδομένα θερμοκρασίας
- Δεδομένα εξάτμισης
- Βροχομετρικά δεδομένα
- Δεδομένα στάθμης στους κόμβους εκβολής
- Υδρογραφήματα εξωτερικών εισροών σε κόμβους του αποχετευτικού συστήματος
- Γραφήματα αναπαράστασης της ρύπανσης από εξωτερικές εισροές σε κόμβους του αποχετευτικού συστήματος

#### 3.4.6. Διαδικασία μοντελοποίησης

Η διαδικασία της μοντελοποίησης ξεκινάει με την ψηφιοποίηση των υπολεκανών απορροής. Η άρτια αναπαράσταση των υπολεκανών αποτελεί κρίσιμο στάδιο για την εξασφάλιση ορθών αποτελεσμάτων και επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης των λογισμικών AutoCAD και ArcGIS. Οι παράμετροι, που χρήζουν υπολογισμού και ψηφιοποίησης στο περιβάλλον ArcMap είναι οι ακόλουθες εννέα:

- Το εμβαδό της εκάστοτε υπολεκάνης απορροής.
- Το μήκος της επίγειας ροής
- Το πλάτος της επίγειας ροής που προκύπτει από το λόγο του εμβαδού της υπολεκάνης με το χερσαίο μήκος της επίγειας ροής.
- Οι κλίσεις της περιοχής, οι οποίες προκύπτουν συνδυαστικά από τα υψόμετρα στέψης των φρεατίων και τις κλίσεις των υπολεκανών, με τη χρήση των λογισμικών InfoSWMM και ArcGIS αντίστοιχα.

- Το ποσοστό αδιαπέρατου τμήματος της εκάστοτε υπολεκάνης, το οποίο για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης υπολογίζεται με τη χρήση του λογισμικού Google Earth και για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης διαθέτει τιμές μεταξύ 70 και 90%.
- Ο συντελεστής Manning, ο οποίος για το αδιαπέρατο τμήμα της εκάστοτε υπολεκάνης θεωρείται ίσος με 0.011, ενώ στο διαπερατό ίσος με 0.100.
- Η επιφανειακή συγκράτηση, η οποία για το αδιαπέρατο τμήμα θεωρείται ίση με 2 mm λόγω της σχετικά μη καλής κατάστασης του οδικού δικτύου της περιοχής, έναντι της προτεινόμενης τιμής 1.6 mm από την Αμερικάνικη Ένωση Πολιτικών Μηχανικών (American Society of Civil Engineers-ASCE-<https://www.asce.org/>). Αντίστοιχα, για το διαπερατό τμήμα κάθε υπολεκάνης, που ουσιαστικά προκύπτει ως συμπληρωματικό του αδιαπέρατου, η επιφανειακή συγκράτηση επιλέγεται ίση με 5.5 mm.
- Το ποσοστό της αδιαπέρατης περιοχής χωρίς επιφανειακή συγκράτηση, το οποίο λαμβάνεται ίσο με 100%, θεωρώντας αμελητέες τις οποιεσδήποτε απώλειες ή κατακρατήσεις.
- Το μοντέλο διήθησης, βάσει του οποίου υπολογίζεται ο αριθμός καμπύλης CN (Curve Number). Στην παρούσα μελέτη, επιλέχτηκε η μέθοδος SCS (Soil Conservation Service) που λαμβάνει υπόψη της τη γεωλογία της περιοχής μελέτης, τις χρήσεις γης και την υδρολογική κατάσταση του εδάφους. Το έδαφος της λεκάνης Z2 θεωρείται υδρολογικής κατηγορίας B.

Έπειτα, εισάγονται τα φρεάτια του δικτύου, σε αντιστοιχία με της πινακίδες της Ε.Υ.Δ.Α.Π. (Εταιρεία Υδρεύσεως και Αποχετεύσεως Πρωτεύουσας), όπου απαιτούμενες παράμετροι τους αποτελούν οι ακόλουθες:

- Το υψόμετρο του πυθμένα κάθε φρεατίου
- Το μέγιστο βάθος, όπου προκύπτει από τη διαφορά υψομέτρων πυθμένα και στέψης του εκάστοτε φρεατίου.

Αντίστοιχα, εισάγονται οι αγωγοί του υπό μελέτη μέρους του παντοροϊκού δικτύου, με απαιτούμενα στοιχεία τα εξής:

- Το φρεάτιο εισόδου

- Το φρεάτιο εξόδου
- Το είδος του κάθε αγωγού, όπου κατά πλειοψηφία είναι ωσειδής (λόγω της παλαιότητας του δικτύου) ή κυκλικός.
- Το μέγιστο βάθος για τους ωσειδείς αγωγούς και η διάμετρος για του κυκλικούς.
- Το μήκος του αγωγού
- Ο συντελεστής Manning, όπου για τους ωσειδείς λαμβάνεται ίσος με 0.014 και για τους κυκλικούς ίσος με 0.013.

#### 3.4.7. Δυαδικό σύστημα αποχέτευσης

Για τις ανάγκες προσομοίωσης των πλημμυρικών φαινομένων, σε σχέση φυσικά με το υπό μελέτη παντοροϊκό δίκτυο, χρησιμοποιείται το δυαδικό σύστημα αποχέτευσης, το οποίο προκύπτει συνδυαστικά από το υπόγειο αποχετευτικό δίκτυο και το σύστημα των επιφανειακών αγωγών. Για να γίνει κατανοητό το δυαδικό σύστημα αποχέτευσης, υπάρχουν κάποιες έννοιες, που χρήζουν ανάλυσης. Αρχικά, υπογραμμίζεται ότι το υπόγειο μέρος του δικτύου είναι σχεδιασμένο για να διοδεύει πλημμύρες με αιχμή και όγκο που αναλογεί σε περίοδο επαναφοράς 5 ετών. Συνεπώς, οποιοδήποτε επεισόδιο υετού προκαλεί πλημμυρικά επεισόδια μεγαλύτερης περιόδου επαναφοράς, οι αγωγοί του παντοροϊκού δικτύου πληρούνται και τα φρεάτια υπερχειλίζουν στο επιφανειακό μέρος του δικτύου.

Στο δυαδικό σύστημα, το υπόγειο μέρος αποτελείται από τους υπόγειου αγωγούς, ενώ σε περίπτωση πλημμύρας ο πλημμυρικός όγκος διοδεύεται από του επιφανειακούς αγωγούς (κανάλια), όπου ως τέτοιοι ορίζονται οι δρόμοι στους οποίους πλημμυρίζουν τα φρεάτια. Ουσιαστικά, το σύστημα διοδεύει το πλημμυρικό νερό μέσω υπόγειων και επιφανειακών αγωγών, οι οποίοι διαφοροποιούνται αποκλειστικά από το υψόμετρο και τη διατομή τους. Το συγκεκριμένο σύστημα προσομοίωσης της λειτουργίας ενός αποχετευτικού συστήματος πλεονεκτεί έναντι άλλων, καθώς δύναται να προσομοιώσει επεισόδια υετού αρκετά μεγάλης περιόδου επαναφοράς.

Η εισαγωγή των επιφανειακών αγωγών στο μοντέλο λαμβάνει χώρα με τη χρήση του λογισμικού SWMM, θεωρώντας πως το μήκος τους ισούται με το μήκος των αντίστοιχων υπόγειων αγωγών και ο συντελεστής Manning ( $n$ ) ίσος με 0.011. Συγκεκριμένα, η εισαγωγή γίνεται με τη χρήση των εργαλείων μετατόπισης εισόδου κι

εξόδου, όπου επιτρέπουν την παράλληλη μετατόπιση προς το έδαφος σε ίση απόσταση με τη διαφορά υψομέτρου του πυθμένα των υπόγειων αγωγών από το υψόμετρο στέψης. Επιπρόσθετα, η διατομή των επιφανειακών αγωγών προκύπτει συνδυαστικά από το λογισμικό Google Earth και του ArcGIS, στο οποίο εισάγονται οι ψηφιακοί ορθοφωτοχάρτες του Κτηματολογίου Α.Ε. Βάσει αυτών, μετρούνται λεπτομερώς το πλάτος κάθε δρόμου και πεζοδρομίου, τα οποία ψηφιοποιούνται σε μορφή αρχείου Excel.

Τέλος, εισάγονται οι οριζοντιογραφίες και οι υψομετρικές θέσεις κατά μήκος των οδών στο ArcGIS (με τη χρήση του εργαλείου Transect Editor).

Τέλος, η προσομοίωση του αποχετευτικού δικτύου απαιτεί τον καθορισμό των ακόλουθων παραμέτρων:

1. Μέθοδος Διόδευσης: Δυναμικού κύματος
2. Μέθοδος Διήθησης: Μέθοδος της SCS
3. Χρονικό Βήμα Αναφοράς Αποτελεσμάτων: 1 s
4. Χρονικό Βήμα Ξηρού Καιρού: 1 h
5. Χρονικό Βήμα Υγρού Καιρού: 1 s
6. Χρονικό Βήμα Μεταφοράς Απορροής (Routing): 1 s
7. Διατήρηση Αρχικών Όρων: Διατήρηση
8. Ορισμός Υπερκρίσιμης Ροής: βάσει της κλίσης του αριθμού Froude
9. Απώλειες Ενέργειας: Darcy-Weisbach.

#### 3.4.8. Μέθοδος υπολογισμού απωλειών βροχής - μέθοδος SCS

Προκειμένου να υπολογιστούν οι απώλειες νερού στους αγωγούς του συστήματος από το λογισμικό SWMM χρησιμοποιείται η μέθοδος της SCS. Όπως αναφέρει ο Τσιχριντζής (1999) η επιφανειακή απορροή, βάσει της SCS, υπολογίζεται για τέσσερις κύριες κατηγορίες εδαφών και με κριτήριο τις ιδιότητές τους να αποστραγγίζονται (υδρολογική κατάταξη). Οι κατηγορίες αυτές είναι οι A, B, C και D.

- Κατηγορία A: Πρόκειται για εδάφη με μικρή δυνατότητα παραγωγής επιφανειακής απορροής. Επομένως, η διηθητική ικανότητα είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα σημαντικό ποσοστό του νερού να καταλήγει στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Πρόκειται για αμμώδη εδάφη εμπλουτισμένα με αρκετό χαλίκι.
- Κατηγορία B: Σε αυτή την περίπτωση η επιφανειακή απορροή παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την κατηγορία A, ενώ η διήθηση παραμένει σε ανώτερα επίπεδα από τις μέσες τιμές. Παραδείγματα εδαφών υδρολογικής κατηγορίας B είναι τα αμμώδη, τα οποία ως προς την σύστασή τους είναι πιο λεπτόκοκκα από ό,τι στην κατηγορία A. Τα εδάφη αυτά συναντώνται και στην υπό εξέταση περιοχή μελέτης.
- Κατηγορία C: Η επιφανειακή απορροή στα εδάφη της κατηγορίας C παρουσιάζει ικανοποιητικές τιμές και επομένως, η διηθητική ικανότητα τους είναι χαμηλότερη της μέσης. Η σύστασή τους αποτελείται κυρίως από άργιλο.
- Κατηγορία D: Η επιφανειακή απορροή παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές και τα εδάφη θεωρούνται πρακτικά αδιαπέρατα.

Πέραν των κύριων κατηγοριών A, B, C, και D τα εδάφη μπορούν να διαχωριστούν και βάσει της υψής τους. Ειδικότερα, στην Εικ. 3.6 και στον Πιν. 3.1 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των εδαφών σε 11 κατηγορίες, καθώς και η αντιστοίχιση της κάθε κατηγορίας με την υδρολογική κατηγορία εδαφών.

Σύμφωνα με τη μέθοδο της SCS, η επιφανειακή απορροή υπολογίζεται βάσει της Εξ. 3.19, όπου με  $Q$  συμβολίζεται η επιφανειακή απορροή, με  $P$  η ημερήσια βροχόπτωση, με  $I$  οι αρχική απώλεια και με  $S$  η ικανότητα κατακράτησης του εδάφους. Τα παραπάνω μεγέθη είναι εκφρασμένα σε mm.

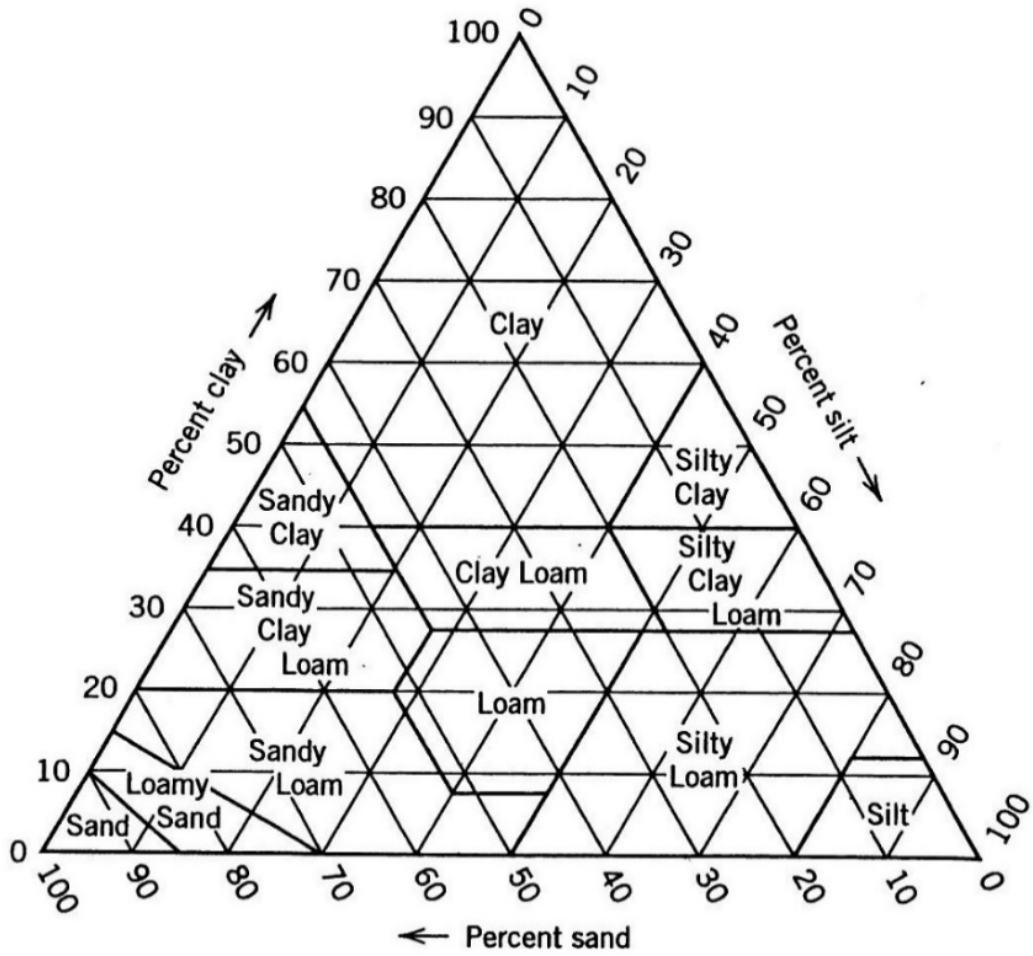
$$Q = \frac{(P-I)^2}{(P-I+S)} \quad (3.19)$$

Η ικανότητα κατακράτησης του εδάφους  $S$  (mm) υπολογίζεται συναρτήσει του αριθμού καμπύλης (Curve Number-CN), βάσει εμπειρικής εξίσωσης (Εξ. 3.20). Ο αριθμός καμπύλης CN είναι μια εμπειρική παράμετρος που λαμβάνει υπόψη τον τύπο εδάφους, την χρήση γης καθώς και την επιφανειακή υγρασία. Οι τιμές του κυμαίνονται από 0-100, με την μηδενική τιμή να αφορά σε μια θεωρητική λεκάνη απορροής με άπειρες απώλειες, ενώ η τιμή 100 αφορά σε ένα πρακτικά αδιαπέρατο έδαφος. Οι τιμές του CN που χρησιμοποιούνται από την SCS παρουσιάζονται στους Πίν. 3.2 έως 3.4. Τέλος, οι αρχικές απώλειες είναι ανάλογες της ικανότητας κατακράτησης του εδάφους, όπως φαίνεται από την Εξ. 3.21, με τη συνήθη τιμή του  $\lambda$  να είναι το 0.2.

$$S = \frac{25000}{CN} - 254 \quad (3.20)$$

$$I = \lambda S \quad (3.21)$$





Εικόνα 3.6: Κατηγορίες εδαφών λόγω της υφής (Πηγή: USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Πίνακας 3.1: Τιμές Curve Number (CN) για αστικές χρήσεις γης (Πηγή: USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Κατηγορία υφής	Ελάχιστος ρυθμός διήθησης (mm/hr)	Υδρολογική κατηγορία κατά SCS
Άμμος (Sand)	210.0	A
Τυρφώδης άμμος (Loamy sand)	61.2	A
Αμμώδης τύρφη (Sandy loam)	25.9	B
Τύρφη (Loam)	13.2	B
Λεπτή αμμώδης τύρφη (Silty loam)	6.8	C
Αμμώδης αργιλώδης τύρφη (Sandy clay loam)	4.3	C
Αργιλώδης τύρφη (Clay loam)	2.3	D
Λεπτή αμμώδης αργιλώδης τύρφη (Silty clay loam)	1.5	D
Αμμώδης άργιλος (Sandy clay)	1.3	D
Λεπτή αμμώδης άργιλος (Silty clay)	1.0	D
Άργιλος (Clay)	0.5	D

Προκειμένου να εφαρμοσθεί η μέθοδος στο περιβάλλον του λογισμικού SWMM, ο χρήστης είναι απαραίτητο να προσδιορίσει τις εξής παραμέτρους:

- Τον αριθμό καμπύλης CN
- Τον χρόνο ξήρανσης που απαιτείται για ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος να επανέλθει σε ξηρή κατάσταση

Πίνακας 3.2: Κατάταξη και χαρακτηριστικά εδαφών (Πηγή: USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Περιγραφή		% Αδιαπερατότητας	Υδρολογικές Κατηγορίες Εδαφών			
Τύπος Κάλυψης	Υδρολογική Κατάσταση		A	B	C	D
Ανοικτοί χώροι (κήποι, πάρκα, γρασίδι, κοιμητήρια, γήπεδα γκολφ, κλπ)	Άσχημη κατάσταση (κάλυψη με γρασίδι <50%)		68	79	86	89
	Μέση κατάσταση (κάλυψη με γρασίδι 50-75%)		49	69	79	84
	Καλή κατάσταση (κάλυψη με γρασίδι >50%)		39	61	74	80
Αδιαπέρατες επιφάνειες	Στρωμένοι ανοικτοί χώροι στάθμευσης, στέγες, ταρράτσες, κλπ		98	98	98	98
Δρόμοι και αρτηρίες	Στρωμένοι, με κράσπεδα και υπονόμους ομβρίων		98	98	98	98
	Στρωμένοι, με ανοικτά στραγγιστικά χαντάκια στις άκρες		83	89	92	93
	Χαλικόστρωτοι		76	85	89	91
	Χωματόδρομοι		72	82	87	89
Αστικές περιοχές	Εμπορικές ζώνες	85	89	92	94	95
	Βιομηχανικές ζώνες	72	81	88	91	93
Αστικές περιοχές με κατοικίες μιάς οικογένειας σε οικόπεδα (βάσει μεγέθους οικοπέδου)	0.05 ha = 0.5 στρέμμα	65	77	85	90	92
	0.1 ha = 1.0 στρέμμα	38	61	75	83	87
	0.13 ha = 1.3 στρέμματα	30	57	72	81	86
	0.2 ha = 2 στρέμματα	25	54	70	80	85
	0.4 ha = 4 στρέμματα	20	51	68	79	84
	0.8 ha = 8 στρέμματα	12	46	65	77	82
Νέες περιοχές κατοικιών υπό κατασκευή	Διαπερατές επιφάνειες χωρίς γρασίδι		77	86	91	94
Κενά οικόπεδα	από τον Πίνακα 2.27					

*Σημειώσεις:* (1) Οι τιμές του πίνακα ισχύουν για κατηγορία υγρασίας εδάφους από προηγούμενες βροχές (AMC) II και  $\lambda=0.2$ . (2) Για τις περιοχές όπου φαίνεται το ποσοστό αδιαπερατότητας, οι τιμές CN είναι γεωμετρικοί μέσοι όροι σύμφωνοι με το ποσοστό αδιαπερατότητας που φαίνεται. Για το αδιαπέρατο μέρος χρησιμοποιήθηκε  $CN=98$  και για το διαπερατό μέρος οι τιμές που αντιστοιχούν σε ανοικτό χώρο με γρασίδι σε καλή κατάσταση για την αντίστοιχη κατηγορία εδάφους. Κατά συνέπεια διορθώσεις των τιμών είναι δυνατές όταν το ποσοστό αδιαπερατότητας είναι γνωστό.

Πίνακας 3.3: Τιμές Curve Number (CN) για γεωργικές λεκάνες (Πηγή: USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

Χρήση Γης	Επιφάνεια ή γεωργική πρακτική	Υδρολογική Κατάσταση	Υδρολογικές Κατηγορίες Εδαφών			
			A	B	C	D
Γεωργική γη που έχει μείνει ακαλλιέργητη			77	86	91	94
Διάφορες καλλιέργειες	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοψείς)	Άσχημη	72	81	88	91
		Καλή	67	78	85	89
	Ακολουθώντας τις ισοψείς	Άσχημη	70	79	84	88
		Καλή	65	75	82	86
	Ακολουθώντας τις ισοψείς με ταρράτσωμα	Άσχημη	66	74	80	82
		Καλή	62	71	78	81
Μικρόκοκκες καλλιέργειες	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοψείς)	Άσχημη	65	76	84	88
		Καλή	63	75	83	87
	Ακολουθώντας τις ισοψείς	Άσχημη	63	74	82	85
		Καλή	61	73	81	84
	Ακολουθώντας τις ισοψείς με ταρράτσωμα	Άσχημη	61	72	79	82
		Καλή	59	70	78	81
Λαχανικά ή εναλασόμενες καλλιέργειες	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοψείς)	Άσχημη	66	77	85	89
		Καλή	58	72	81	85
	Ακολουθώντας τις ισοψείς	Άσχημη	64	75	83	85
		Καλή	55	69	78	83
	Ακολουθώντας τις ισοψείς με ταρράτσωμα	Άσχημη	63	73	80	83
		Καλή	51	67	76	80
Βοσκότοπος, κτηνοτροφική περιοχή	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοψείς)	Άσχημη	68	79	86	89
		Μέση	49	69	79	84
		Καλή	39	61	74	80
	Ακολουθώντας τις ισοψείς	Άσχημη	47	67	81	88
		Μέση	25	59	75	83
		Καλή	6	35	70	79
Λιβάδια		Καλή	30	58	71	78
Δασικές εκτάσεις		Άσχημη	45	66	77	83
		Μέση	36	60	73	79
		Καλή	25	55	70	77
Φάρμες			59	74	82	86
Δρόμοι	Χωματόδρομοι		72	82	87	89
	Με σκληρή επιφάνεια		74	84	90	92

Πίνακας 3.4: Ρύθμιση τιμής Curve Number (CN) ανάλογα με την προϋπάρχουσα υγρασία του εδάφους (Πηγή: USDA-NRCS 1986, Τσιχριντζής 1999)

<b>Κατάσταση Προϋπάρχουσας Υγρασίας (Antecedent Moisture Condition, AMC)</b>		
<b>AMC II (Κανονική)</b>	<b>AMC I (Ξηρή)</b>	<b>AMC III (Υγρή)</b>
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50

**Σημείωση:**

*AMC I:* Σχετικά ξηρά εδάφη, βροχή τις προηγούμενες 5 ημέρες <12.5 mm.

*AMC II:* Κανονική κατάσταση, βροχή τις προηγούμενες 5 ημέρες μεταξύ 12.5 και 38 mm.

*AMC III:* Σχετικά υγρά εδάφη, βροχή τις προηγούμενες 5 ημέρες >38 mm.

### 3.4.9. Διόδευση δυναμικού κύματος

Η διόδευση δυναμικού κύματος βασίζεται στην επίλυση των μονοδιάστατων εξισώσεων ροής Saint-Venant. Ειδικότερα, στους αγωγούς χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις συνέχειας και ορμής, ενώ στους κόμβους εφαρμόζεται η εξίσωση συνέχειας όγκου (Rossman and Simon 2022). Με την συγκεκριμένη μέθοδο δύναται να αναπαρασταθεί η πλημμύρα των ανάντη και κατάντη φρεατίων ενός υπό πίεση αγωγού, όταν το ύψος του νερού στην διατομή του αγωγού υπερβεί το ομοιόμορφο βάθος. Η διόδευση δυναμικού κύματος συνυπολογίζει τις εξής παραμέτρους κατά τους υπολογισμούς:

- Αποθήκευση στα φυσικά κανάλια (channel storage)
- Τα φαινόμενα ανάστροφής ροής (flow reversal)
- Τα φαινόμενα της επίδρασης εκ των κατάντη (backwater effect)
- Τις απώλειες εισόδου και εξόδου από το σύστημα (entrance/exit losses)
- Την ροή υπό πίεση (pressurized flow)

### 3.5. Βαθμονόμηση μοντέλου

Κρισιμότερο στάδιο της μελέτης ήταν η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Κατά τον Τσακίρη (2006), ως βαθμονόμηση ορίζεται η διαδικασία της εκτίμησης των παραμέτρων ενός μοντέλου με βάση μετρήσεις των υδρολογικών μεγεθών εισόδου και εξόδου. Πιο συγκεκριμένα, οι Tsihrintzis and Hamid (1998) και Barco et al. (2008) αναφέρουν ότι κατά την χειροκίνητη βαθμονόμηση του λογισμικού SWMM, η επιλογή των παραμέτρων για τη βαθμονόμηση εξαρτάται από τους στόχους της μελέτης και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες παράμετροι. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η μεταβολή των εξής παραμέτρων (Bellos et al. 2017, Kourtis et al. 2017):

- του συντελεστή Manning, τόσο στο αδιαπέρατο, όσο και στο διαπερατό τμήμα της αστικής λεκάνης, καθώς και στους αγωγούς του υπόγειου αποχετευτικού δικτύου
- της κλίσης της κάθε αστικής λεκάνης
- του πλάτους της κάθε αστικής λεκάνης
- του αριθμού καμπύλης CN
- του συντελεστή αδιαπερατότητας (%Imperv) της κάθε υπολεκάνης
- της μεταβολής του χρόνου διόδου της πλημμύρας (Routing time).

Στην παρούσα διπλωματική, η βαθμονόμηση έγινε χειροκίνητα με κριτήριο το μέγεθος των απορροών, συγκρίνοντας τις προβλέψεις του μοντέλου με καταγεγραμμένα υδρογραφήματα σε δύο αγωγούς (τους 1313 και 1640). Στόχος ήταν η καλύτερη δυνατή σύγκλιση των μετρημένων και των προσομοιωμένων τιμών του μοντέλου, όσον αφορά στην αιχμή, στον όγκο της απορροής, στο χρόνο της αιχμής, καθώς και στους κλάδους ανόδου και καθόδου και για τις δύο περιπτώσεις. Προκειμένου να αξιολογηθεί η

βαθμονόμηση, χρησιμοποιήθηκαν οι στατιστικοί δείκτες που περιγράφονται από τις Εξ. 3.22 έως Εξ. 3.26.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (M_i - O_i)^2}{\sum_{t=1}^T (O_i - O_0)^2} \quad (3.22)$$

Στην Εξ. 3.22 φαίνεται ο στατιστικός συντελεστής Nash-Sutcliffe Efficiency (*NSE*), ο οποίος προτάθηκε από τους Nash και Sutcliffe (1970), με σκοπό την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των υδρολογικών μοντέλων. Ο *NSE* μπορεί να κυμαίνεται από  $-\infty$  έως 1 (Rabori et al. 2017). Ως βέλτιστη τιμή του *NSE* θεωρείται η τιμή 1, ενώ πολύ καλά θεωρούνται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και για τιμές μεγαλύτερες του 0.75. Ικανοποιητικά θεωρούνται και τα αποτελέσματα ανάμεσα στα όρια 0.36 και 0.75 (Boskidis et al. 2012).

$$O_i = \gamma \cdot M_i \quad (3.23)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}} \quad (3.24)$$

$$NOF = \frac{RMSE}{O_0} \quad (3.25)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (3.26)$$

όπου:

$O_i$ : Μετρημένες τιμές απορροής ( $m^3/s$ )

$M_i$ : Υπολογισμένες τιμές απορροής ( $m^3/s$ )

$O_o$ : Μέση μετρημένη απορροή ( $m^3/s$ )

$\gamma$ : Κλίση της ευθείας παλινδρόμησης

$N$ : Αριθμός παρατηρήσεων

Στην Εξ 3.23 παρουσιάζεται η γραμμική κλίση  $\gamma$  της ευθείας γραμμής παλινδρόμησης μεταξύ μετρημένων κι υπολογισμένων τιμών του μοντέλου. Η βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ των παρατηρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου δίνει τιμή κλίσης  $\gamma$  ίση με 1. Για τιμές μεγαλύτερες του 1 το μοντέλο υποεκτιμά τις πραγματικές μετρήσεις, ενώ για μικρότερες του 1 υπερεκτιμά τις παρατηρήσεις. Από την ευθεία παλινδρόμησης προκύπτει και ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$ , με τον οποίο υπολογίζεται η διασπορά των σημείων γύρω από αυτήν. Καλές τιμές θεωρούνται αυτές κοντά στην μονάδα.

Στην Εξ. 3.24 παρουσιάζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ( $RMSE$ ), το οποίο χρησιμοποιείται κατά τον υπολογισμό της κανονικοποιημένης συνάρτησης στόχου ( $NOF$ , Εξ. 3.25), η οποία αποτελεί άλλο στατιστικό έλεγχο αξιοπιστίας των εκτιμήσεων υδρολογικών μοντέλων. Οι Kornecki et al. (1999) προτείνουν ως ιδανική τιμή της συνάρτησης  $NOF$  το 0, με τιμές έως και την μονάδα να θεωρούνται αποδεκτές.

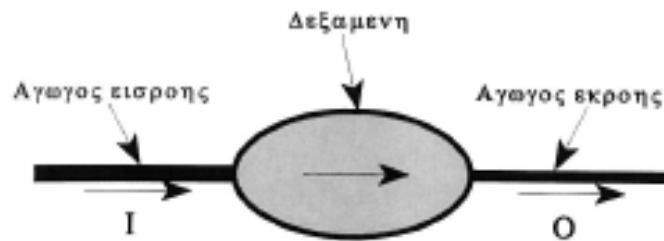
Τέλος, στην Εξ. 3.26 παρουσιάζεται το ποσοστό  $BIAS$  ( $PBIAS$ ) με το οποίο αξιολογείται το κατά πόσο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι μικρότερα ή μεγαλύτερα από τις διαθέσιμες παρατηρήσεις. Απόλυτη ισορροπία επιτυγχάνεται όταν το  $PBIAS$  παίρνει την τιμή 0, με τις θετικές τιμές να υποδεικνύουν ότι το μοντέλο υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές και με τις αρνητικές ότι τις υπερεκτιμά. Οι Moriasi et al. (2007) αναφέρουν ως βέλτιστες τιμές για το  $PBIAS$  τα όρια  $\pm 10\%$  για το μέγεθος των απορροών, ενώ αποδεκτές είναι και οι τιμές στα όρια  $\pm 25\%$ .

### 3.6. Διαστασιολόγηση υπόγειας δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης του νερού στην έξοδο του συστήματος - μέθοδος Puls

Σημαντικό κεφάλαιο της εργασίας ήταν η διαστασιολόγηση μιας δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης του νερού (ΔΠΚ) στην έξοδο του συστήματος, στο Πεδίο του Άρεως. Ειδικότερα, προκειμένου να υπολογισθεί ο όγκος της δεξαμενής, χρησιμοποιήθηκε η θεωρία της υδρολογικής διόδευσης μέσω υδροταμιευτήρα, γνωστή



και ως μέθοδος Puls (Τσιχριντζής 1999). Κατά τη Puls, αναφέρεται ότι αν το υδρογράφημα εισόδου στη δεξαμενή και η γεωμετρία της δεξαμενής είναι γνωστά, τότε ο μελετητής δύναται να υπολογίσει το υδρογράφημα στην έξοδο της δεξαμενής (Εικ. 3.7) μέσω των παρακάτω εξισώσεων (Εξ. 3.27 και Εξ. 3.28), όπου  $O$  είναι η παροχή εκροής και  $S_{αποθ}$  ο όγκος αποθήκευσης της δεξαμενής, εκφρασμένοι ως συναρτήσεις  $f_1$ ,  $f_2$  της στάθμης του νερού ( $H$ ) μέσα στην ΔΠΚ.



Σχημα 2.30. Δεξαμενη συγκρατησης εν σειρα

Εικόνα 3.7: Σύστημα δεξαμενής συγκράτησης εν σειρά (Πηγή: Τσιχριντζής 1999)

$$O = f_1(H) \quad (3.27)$$

$$S = f_2(H) \quad (3.28)$$

Για τον υπολογισμό, ισχύει το ισοζύγιο της μάζας (Εξ. 3.29), όπου  $I_{μέσο}(t)$  και  $O_{μέσο}(t)$  οι μέσες παροχές εισροής και εκροής (Εξ. 3.30 και Εξ. 3.31) προς και από τη ΔΠΚ, αντίστοιχα, για ένα χρονικό διάστημα  $\Delta t$  και για μεταβολή της αποθήκευσης νερού στη δεξαμενή στο χρονικό αυτό διάστημα  $\Delta S_{αποθ}(t)$  (Εξ. 3.32):

$$I_{μέσο}(t)\Delta t - O_{μέσο}(t)\Delta t = \Delta S(t) \quad (3.29)$$

$$I_{μέσο}(t) = \left( \frac{I(t) + I(t - \Delta t)}{2} \right) \quad (3.30)$$

$$O_{\mu\acute{\epsilon}\sigma\omicron}(t) = \left( \frac{O(t)+O(t-\Delta t)}{2} \right) \quad (3.31)$$

$$\Delta S(t) = S(t) - S(t - \Delta t) \quad (3.32)$$

Ορίζοντας τη συνάρτηση  $\Gamma(t)$  σύμφωνα με την Εξ. 3.33, η Εξ. 3.29 παίρνει την μορφή της Εξ. 3.34 και η εκροή  $O(t)$  από τη δεξαμενή μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση  $f_3$  της  $\Gamma(t)$  βάσει της Εξ. 3.35. Οι Εξ. 3.34 και Εξ. 3.35 αποτελούν σύστημα 2 εξισώσεων, με αγνώστους τις τιμές  $\Gamma(t)$  και  $O(t)$  και μπορούν να επιλυθούν με ευκολία σε λογιστικό φύλλο Excel, προκειμένου να σχεδιαστεί η γεωμετρία της ΔΠΚ και να υπολογιστεί η το υδρογράφημα της εκροής.

$$\Gamma(t) = \frac{S(t)}{\Delta t} + \frac{O(t)}{2} \quad (3.33)$$

$$\Gamma(t) = \Gamma(t - \Delta t) + I_{\mu\acute{\epsilon}\sigma\omicron}(t) - O(t - \Delta t) \quad (3.34)$$

$$O(t) = f[\Gamma(t)] \quad (3.35)$$



## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του παντοροϊκού δικτύου των Αθηνών και συγκεκριμένα της υπολεκάνης Z2 με χρήση του λογισμικού SWMM. Οι υπολογισμοί ξεκίνησαν με την βαθμονόμηση του μοντέλου βάσει πραγματικών μετρήσεων απορροής στους αγωγούς 1313 και 1640 του συστήματος και έπειτα με το βαθμονομημένο μοντέλο εξετάστηκαν εναλλακτικά σενάρια. Στην πρώτη κατηγορία σεναρίων χρησιμοποιήθηκαν οι όμβριες καμπύλες (Εξ. 3.8 - Εξ. 3.10) για την περιοχή της Αθήνας, όπως αυτές παρουσιάζονται από τους Mimikou et al. (2000) και το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του 2017 (EL06-2017), με σκοπό την παραγωγή υετογραφημάτων. Στην δεύτερη κατηγορία σεναρίων παρουσιάζονται μελλοντικές όμβριες καμπύλες της περιοχής (Εξ. 3.12- Εξ. 3.14), οι οποίες έχουν παραχθεί λαμβάνοντας υπόψη διάφορα κλιματικά μοντέλα και σενάρια κλιματικής αλλαγής. Οι εξισώσεις (Εξ. 3.12- Εξ. 3.14) σε αυτή την περίπτωση αναπτύχθηκαν από τους Kourtis et al. (2022). Η μελέτη σε όλα τα παραπάνω σενάρια έγινε για περιόδους επαναφοράς ( $T$ ) 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών. Έπειτα, εξετάστηκε η απόκριση του μοντέλου στο ενδεχόμενο παρουσίας βροχοπτώσεων με μεγαλύτερο ύψος βροχής. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν 5 διαφορετικά σενάρια για αύξηση των αρχικών δεδομένων βροχής από 7% έως και 25%. Το τελευταίο σενάριο, το οποίο εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, αφορούσε το ενδεχόμενο υποθετικής αστικοποίησης στα ανάντη της υπολεκάνης Z2 και συγκεκριμένα στην περιοχή του Αττικού άλσους. Σε όλα τα σενάρια η σύγκριση γίνεται με την υπάρχουσα κατάσταση αναφορικά με το μέγεθος των απορροών στον αγωγό εξόδου 1621 του μοντέλου. Παράλληλα, για κάθε σενάριο εξετάζεται το ενδεχόμενο πλημμύρας στα φρεάτια του δικτύου. Τέλος, εξετάστηκε και το ενδεχόμενο κατασκευής μιας δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης του νερού στο Πεδίον του Άρεως όπου και καταλήγει η υπολεκάνη Z2 με σκοπό την μείωση των αιχμών των απορροών.

### 4.1. Βαθμονόμηση

Η διαδικασία βαθμονόμησης έλαβε χώρα με την μέθοδο trial and error, δηλαδή έγιναν συνεχείς επαναλήψεις και δοκιμές και έτσι προέκυψαν τα αποτελέσματα τα οποία περιγράφουν την παρούσα κατάσταση αναφορικά με τις απορροές στους αγωγούς της περιοχής μελέτης. Προκειμένου να ολοκληρωθεί η βαθμονόμηση του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά μετρημένα υδρογραφήματα, τα οποία ήταν διαθέσιμα

σε δύο αγωγούς του παντοροϊκού συστήματος της λεκάνης Ζ2. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν τα υδρογραφήματα των αγωγών 1313 και 1640, με σκοπό τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα πραγματικά δεδομένα να παρουσιάζουν όσο το δυνατόν καλύτερη συσχέτιση ως προς τον όγκο απορροής, την αιχμή του υδρογραφήματος, καθώς και τους κλάδους ανόδου και καθόδου. Οι παράμετροι του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν στην βαθμονόμηση ήταν το πλάτος των υπολεκανών, ο συντελεστής Manning των αγωγών, το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας, ο συντελεστής Manning σε περατή και αδιαπέρατη επιφάνεια και η επιφανειακή αποθήκευση σε περατά και αδιαπέρατα εδάφη (Bellos et al. 2017, Kourtis et al. 2017). Για να πιστοποιηθούν τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκαν οι στατιστικοί συντελεστές Nash-Sutcliffe (*NSE*), η κλίση  $\gamma$  της γραμμής παλινδρόμησης, ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$ , η Κανονικοποιημένη Συνάρτηση Στόχου (*NOF*) και το ποσοστό *BIAS*, όπως αυτά περιγράφονται από τις Εξ. 3.22 έως και Εξ. 3.26 και βάσει των βέλτιστων τιμών που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.

Έτσι, έπειτα από μια χειροκίνητη διαδικασία διαδοχικών τροποποιήσεων εντός των επιτρεπόμενων ορίων για κάθε παράμετρο, προέκυψαν τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων, τα οποία συνοψίζονται στον Πιν. 4.1. Στον αγωγό 1313 είναι εμφανής η καλή σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των μετρημένων παροχών, κάτι που φαίνεται από το γεγονός ότι τηρούνται ικανοποιητικά τα όρια των ελέγχων. Παράλληλα, η ανταπόκριση του μοντέλου στην πραγματική κατάσταση αναφορικά με τις απορροές φαίνεται και από την σύγκριση των παρατηρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου στα υδρογραφήματα της Εικ. 4.1, ενώ είναι εμφανές ότι οι αιχμές συμπίπτουν χρονικά με αυτές των μετρήσεων. Τέλος, η καλή πρόβλεψη του μοντέλου φαίνεται και στο διάγραμμα διασποράς μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών (Εικ. 4.2), από όπου προκύπτει συντελεστής συσχέτισης ( $R^2$ ) των δεδομένων κοντά στο 95%.

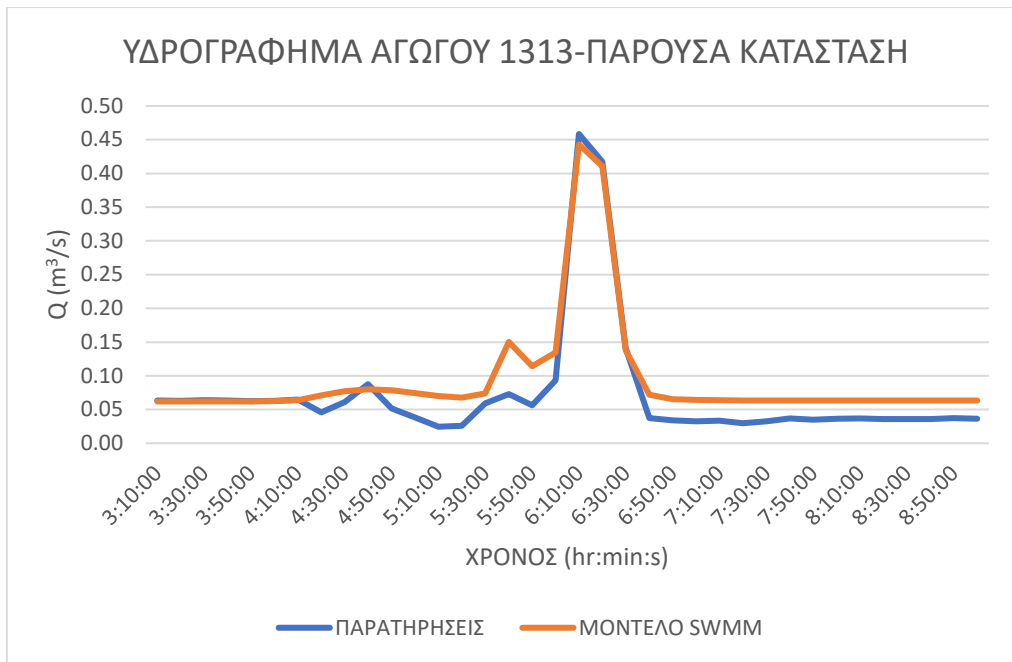
Στον αγωγό 1640 παρατηρείται ότι η βαθμονόμηση δεν ήταν εξίσου αποτελεσματική, ενώ πιθανό να υπήρχαν σφάλματα στις μετρήσεις. Όπως διακρίνουμε στον Πιν. 4.2 καθώς και στο διάγραμμα διασποράς της Εικ. 4.3, οι επιτρεπόμενες τιμές των στατιστικών ελέγχων δεν παρουσίαζαν ικανοποιητικά αποτελέσματα αναφορικά με την σύγκριση των προβλέψεων του μοντέλου και των διαθέσιμων μετρήσεων απορροής. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι τόσο ο συντελεστής *NSE*, όσο και η κλίση της γραμμής παλινδρόμησης και ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  παρουσίαζαν μια μικρή

απόκλιση σε σχέση με τις επιθυμητές τιμές. Εν αντιθέσει, η κανονικοποιημένη συνάρτηση στόχου (NOF) και το ποσοστό BIAS λαμβάνουν τιμές εντός των επιθυμητών ορίων. Επομένως, επιλέχθηκε ως βασικότερο κριτήριο βαθμονόμησης, οι μετρήσεις του μοντέλου να προσεγγίζουν την αιχμή του υδρογραφήματος παρατηρήσεων, όπως φαίνεται στην Εικ. 4.4. Από το υδρογράφημα του αγωγού (Εικ. 4.4) παρατηρήθηκε διαφορά μεταξύ των παρατηρήσεων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στην δεύτερη ώρα, όπου και το μοντέλο υποεκτιμά τις πραγματικές μετρήσεις απορροής. Σε αυτό το χρονικό διάστημα η διαφορά των υδρογραφημάτων κυμαίνεται μεταξύ 0.1 και 0.15 m<sup>3</sup>/s.

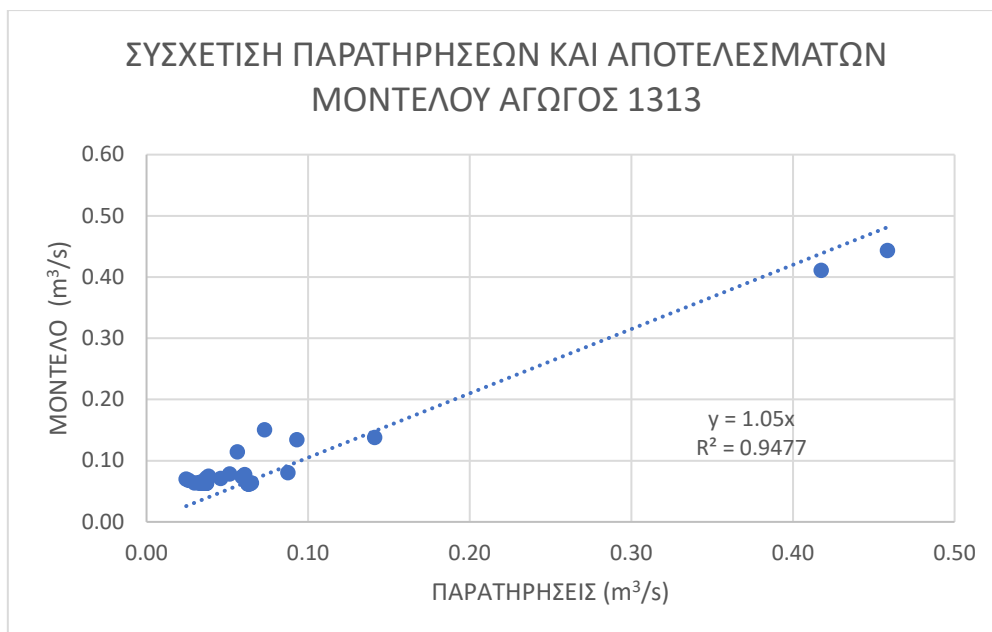
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων βαθμονόμησης μοντέλου

<b>Παράμετρος (Εξ. 3.22- Εξ. 3.26)</b>	<b>Βέλτιστες τιμές</b>	<b>Αγωγός 1313</b>	<b>Αγωγός 1640</b>
<i>NSE</i>	0.75-1	0.897	0.545
<i>R</i> <sup>2</sup>	~1	0.948	0.855
<i>γ</i>	~1	1.05	0.77
<i>NOF</i>	0-1	0.407	0.479
<i>PBIAS</i>	+/- 25%	-30%	19%

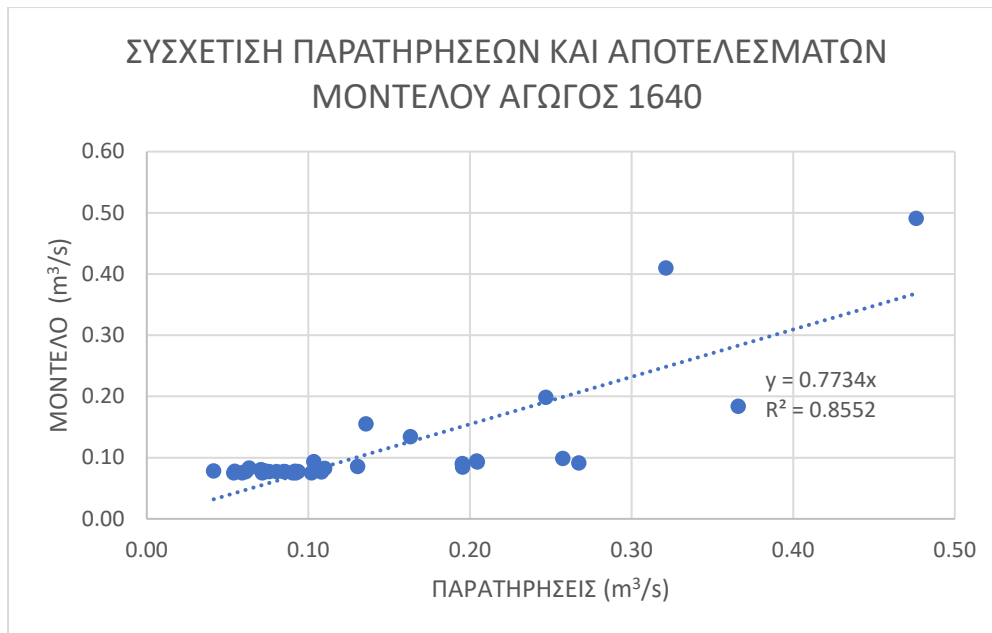
Προκειμένου να ολοκληρωθεί η βαθμονόμηση και, έπειτα η τελική προσομοίωση με το μοντέλο, χρησιμοποιήθηκε το επεισόδιο βροχής της 1/1/2005, το οποίο περιγράφεται από το υετογράφημα της Εικ. 4.5. Έτσι, με το βαθμονομημένο, πλέον, μοντέλο προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα κατά την προσομοίωση και συνοψίζονται στον Πίν. 4.2. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η βροχόπτωση ανέρχεται σε 11.6 mm σε διάστημα 2.5 ωρών, μεταξύ ώρας 3:50 και 6:20, με τα δεδομένα να διατίθενται σε 10λεπτο βήμα. Το διάστημα 5:50 έως 06:00 χαρακτηρίζεται ως το 10λεπτο με την πιο έντονη βροχόπτωση, κατά το οποίο το ύψος βροχής ανέρχεται σε 3.82 mm. Η αιχμή του υδρογραφήματος του αγωγού εξόδου του συστήματος (Εικ. 4.6), έπεται χρονικά του διαστήματος 05:50 έως και 06:00, όπως είναι αναμενόμενο και παρατηρείται κατά την χρονική στιγμή 6:10, με τιμή 1.25 m<sup>3</sup>/s.



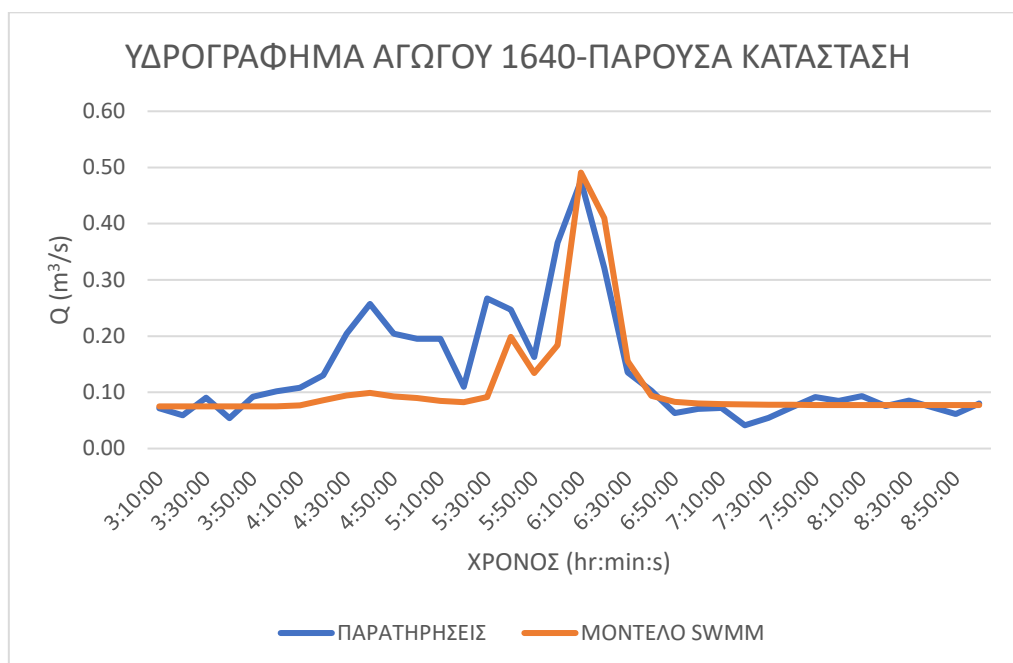
Εικόνα 4.1: Υδρογράφημα αγωγού 1313



Εικόνα 4.2: Συσχέτιση παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων μοντέλου για τον αγωγό 1313



Εικόνα 4.3: Συσχέτιση παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων μοντέλου για τον αγωγό 1640

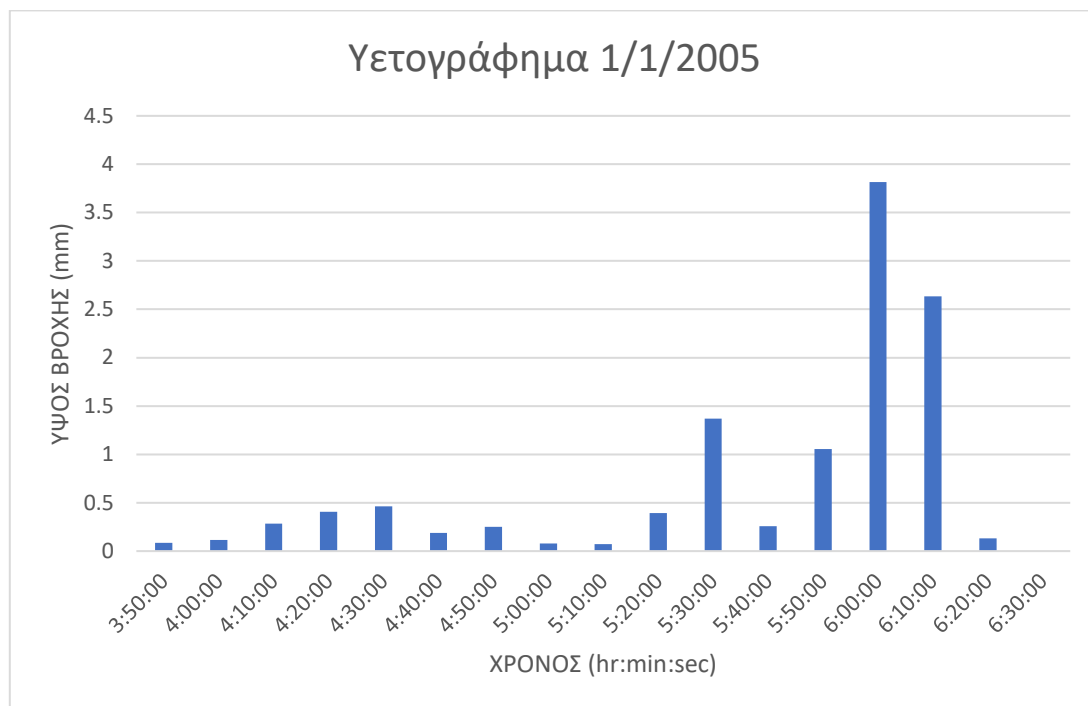


Εικόνα 4.4: Υδρογράφημα αγωγού 1640

Γενικά, οι αιχμές του υδρογραφήματος ακολουθούν χρονικά τις αιχμές του νετογραφήματος και για μικρότερα ύψη βροχής. Οι απώλειες βροχής παρουσιάζουν τιμές μικρότερες του 10% της βροχόπτωσης, κάτι που είναι αναμενόμενο εφόσον



πρόκειται για αστική περιοχή. Αναφορικά με την παροχή ακαθάρτων του παντοροϊκού συστήματος, αυτή έχει μέση τιμή κατά την εξεταζόμενη περίπτωση  $0.23 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Εικόνα 4.5: Υετογράφημα παρατηρήσεων 1/1/2005

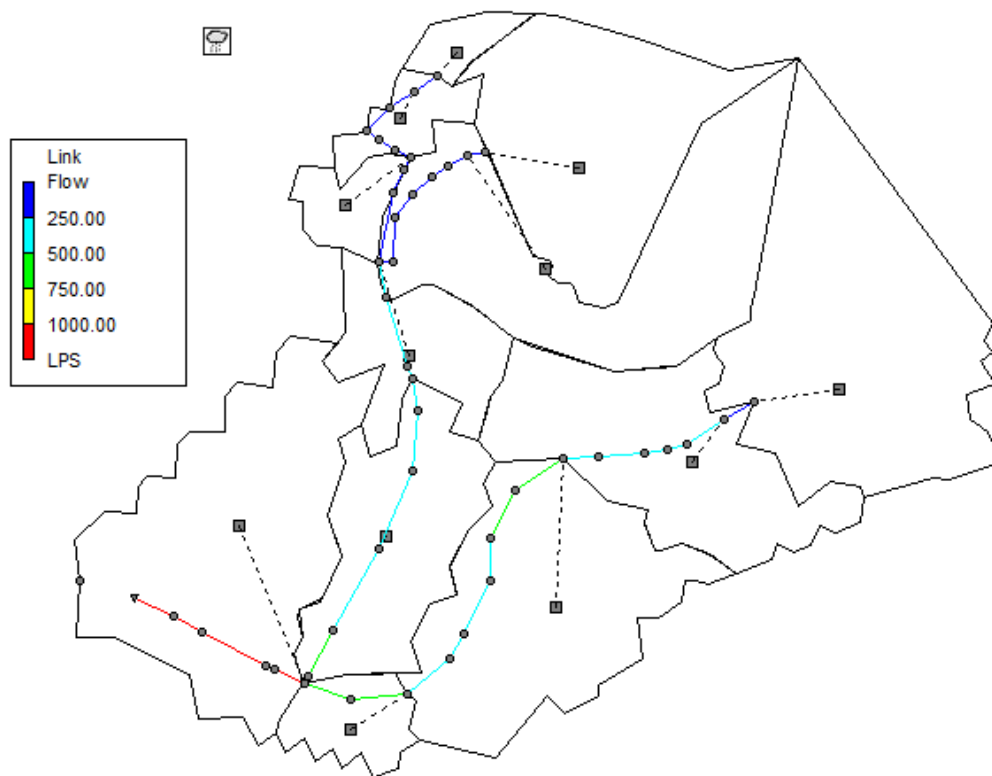
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης με το λογισμικό SWMM στο βαθμονομημένο μοντέλο

Αποτελέσματα	Βαθμονομημένο μοντέλο
Βροχόπτωση (mm)	11.600
Απώλειες βροχής (mm)	0.830
Παροχή αιχμής στην έξοδο ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	1.248
Μέση απορροή ακαθάρτων ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	0.230



Εικόνα 4.6: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος (αγωγός 1621) στο βαθμονομημένο μοντέλο

Έπειτα, στην Εικ. 4.7 παρουσιάζεται το μέγεθος της απορροής, κατά την αιχμή της την χρονική στιγμή 06:10, για όλους τους αγωγούς του υπό μελέτη δικτύου ξεχωριστά. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν τιμές μικρότερες από  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ , ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί οι οποίοι έχουν τιμές μεγαλύτερες από  $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$ . Παρατηρείται, σημαντική αύξηση της απορροής από τον αγωγό 1802, όπου και συμβάλλουν οι δύο κλάδοι του συστήματος, έως και την έξοδο της λεκάνης στον αγωγό 1621. Παράλληλα στην Εικ. 4.8, διακρίνεται κατά την στιγμή 06:10 το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621, οι οποίοι αποτελούν το τμήμα του δικτύου από το σημείο συμβολής των δύο κλάδων του συστήματος μέχρι την έξοδο του δικτύου. Η ροή σε αυτούς τους αγωγούς γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια, δηλαδή δεν παρατηρείται πλήρωση του αγωγού σε κανένα σημείο.



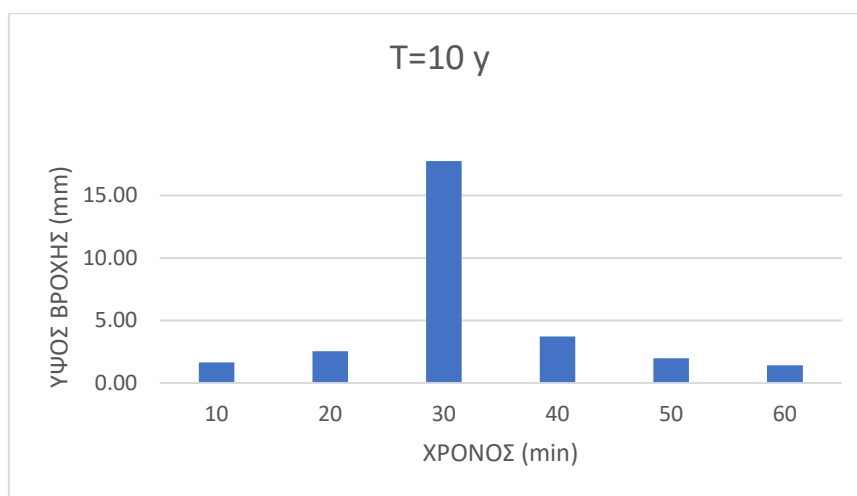
Εικόνα 4.7: Η απορροή στους αγωγούς του βαθμονομημένου μοντέλου κατά την αιχμή



Εικόνα 4.8: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές).

#### 4.2. Σενάριο 1: Προσομοίωση με χρήση όμβριων καμυλών περιοχής Αθηνών

Αφού ολοκληρώθηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου, εξετάστηκαν στο βαθμονομημένο μοντέλο διάφορα εναλλακτικά σενάρια. Αρχικά, αυτά αφορούσαν σε χρήση διαφορετικών εξισώσεων ομβρίων καμυλών, για τον υπολογισμό της έντασης βροχής, οι οποίες περιγράφουν την περιοχή της Αθήνας. Στο πρώτο σενάριο, η ένταση της βροχής προκύπτει από την Εξ. 3.8, η οποία αποτελεί την αναλυτική έκφραση των ομβρίων καμυλών της Αθήνας σύμφωνα με τους Mimikou et al. (2000). Η Εικ. 4.9 παρουσιάζει το υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών και διάρκεια βροχής 1 ώρα, όπως αυτό προέκυψε με την χρήση της μεθόδου των εναλλασσόμενων blocks (§ 3.3). Τα υπόλοιπα υετογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις και για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 25, 50 και 100 ετών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.



Εικόνα 4.9: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών - Σενάριο 1

Η κατανομή της βροχής που προέκυψε για κάθε περίοδο επαναφοράς, χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο εισόδου στο βαθμονομημένο μοντέλο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών παρουσιάζονται στους Πιν. 4.3 και Πιν. 4.4. Το ύψος βροχής κυμαίνεται μεταξύ των 18.62 mm και 54.86 mm, για διάρκεια βροχής 1 h, παρουσιάζοντας, όπως αναμένεται, μεγαλύτερες τιμές για μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς. Η εφαρμογή

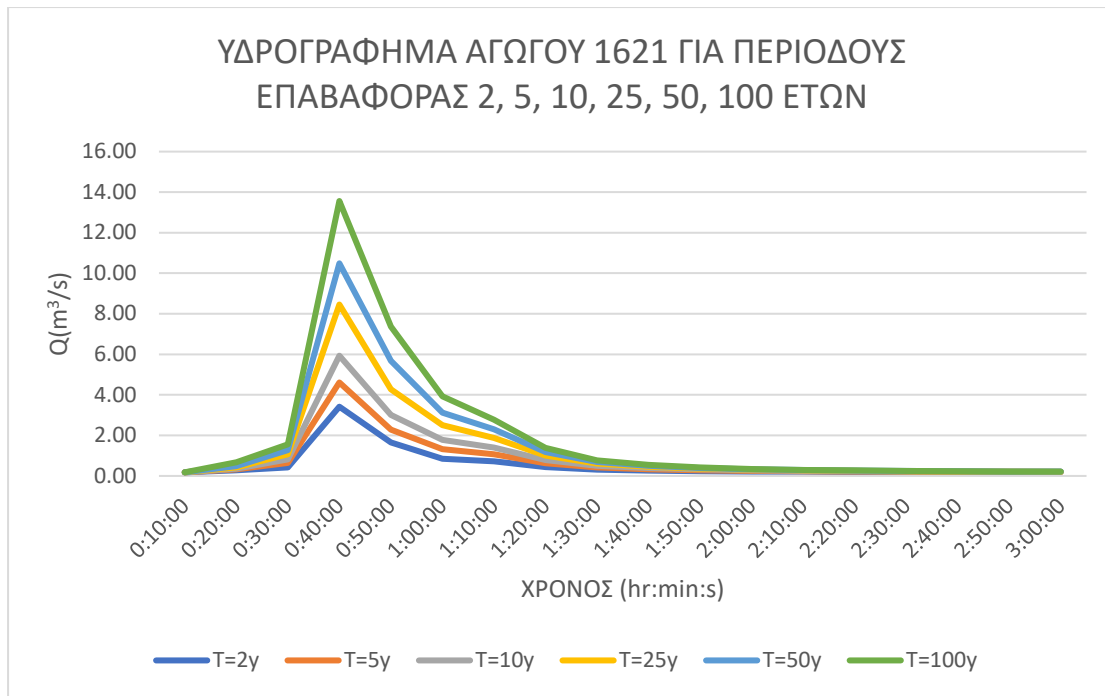
της μεθόδου των εναλλασσόμενων Blocks (§ 3.3) έδειξε ότι το ισχυρότερο 10λεπτο βροχόπτωσης σε βροχή διάρκειας 1 h είναι αυτό μεταξύ των χρονικών στιγμών 00:20 και 00:30, ενώ όπως παρατηρείται η αιχμή του υδρογραφήματος της Εικ. 4.10 παρουσιάζεται για όλες τις περιόδους επαναφοράς την στιγμή 00:40. Οι αιχμές του υδρογραφήματος έρχονται σε κάθε περίπτωση 10 λεπτά μετά το ισχυρότερο 10λεπτο βροχόπτωσης. Αναφορικά με τις απώλειες βροχής αυτές παρουσιάζουν και πάλι τιμές μικρότερες του ή περίπου 10% της κατακρήμνισης. Τέλος, η μέση απορροή ακαθάρτων παραμένει σταθερή και ίση με 0.23 m<sup>3</sup>/s.

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών - Σενάριο 1

<b>Αποτελέσματα</b>	<b>T = 2y</b>	<b>T = 5y</b>	<b>T = 10y</b>
Βροχόπτωση (mm)	18.620	23.990	29.050
Απώλειες βροχής (mm)	1.360	2.460	2.490
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	3.416	4.611	5.931
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 1

<b>Αποτελέσματα</b>	<b>T = 25y</b>	<b>T = 50y</b>	<b>T = 100y</b>
Βροχόπτωση (mm)	37.420	45.300	54.860
Απώλειες βροχής (mm)	3.380	4.180	4.940
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	8.456	10.489	13.563
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230

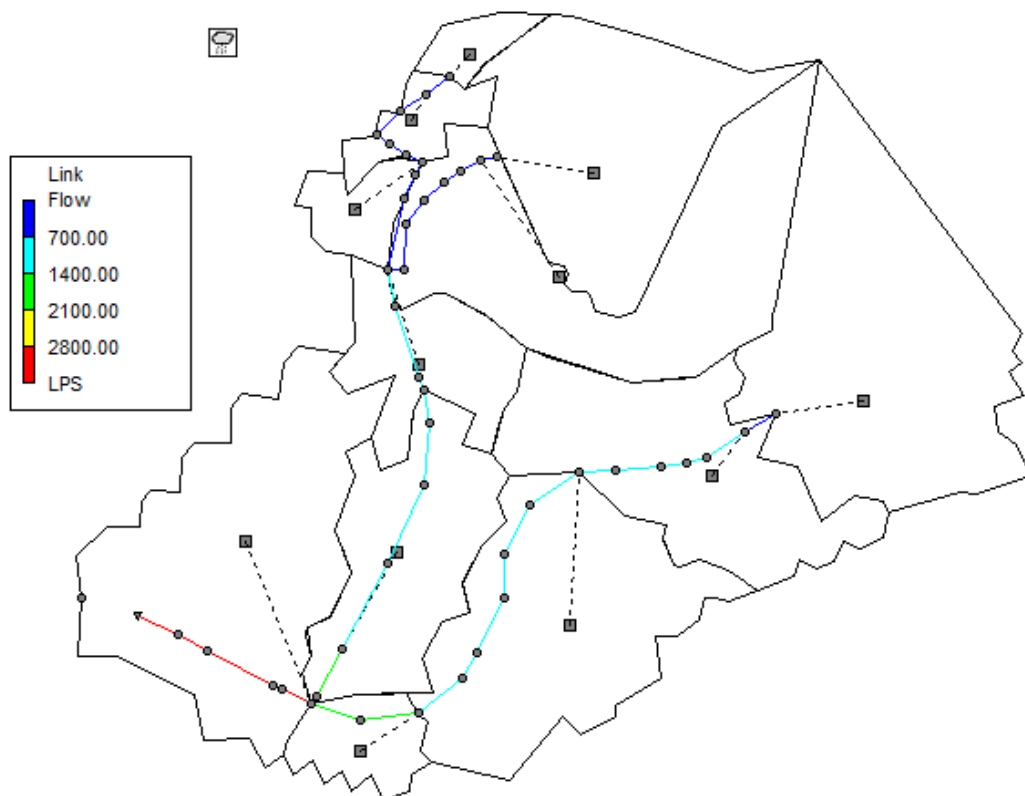


Εικόνα 4.10: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 1

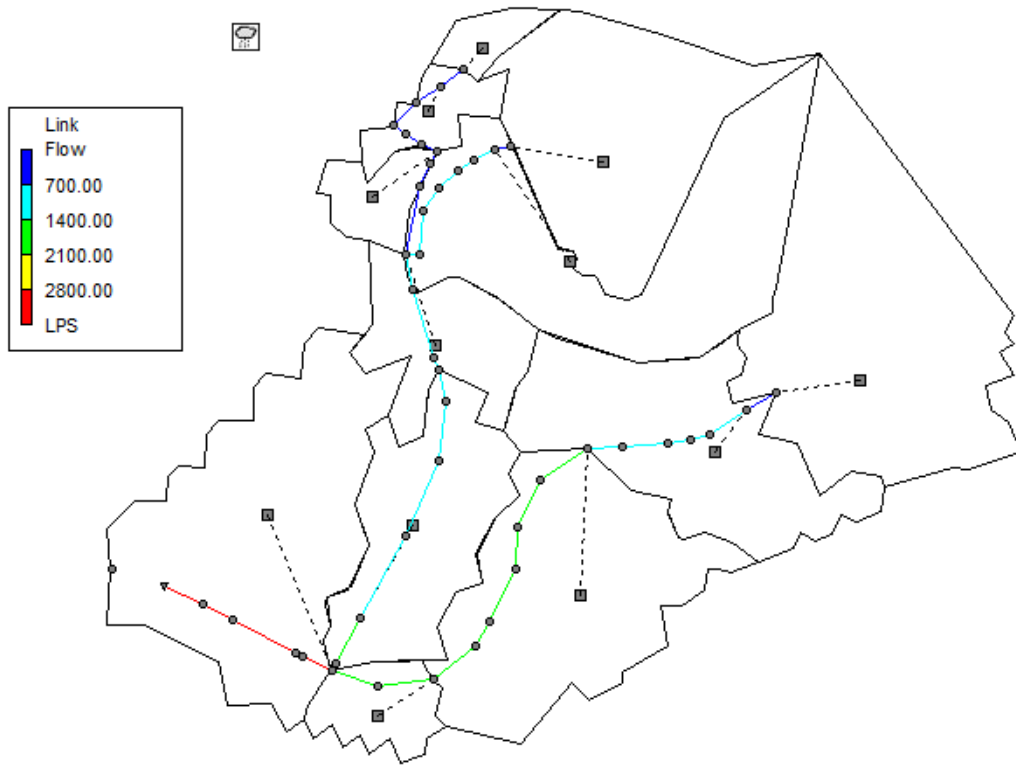
Στην συνέχεια, στις Εικ. 4.11 έως και 4.16 παρουσιάζεται το μέγεθος της απορροής, κατά την αιχμή της την χρονική στιγμή 00:40, για όλους τους αγωγούς του υπό μελέτη δικτύου ξεχωριστά και για κάθε περίοδο επαναφοράς. Όπως είναι αναμενόμενο οι βροχές με μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς παρουσιάζουν και μεγαλύτερες τιμές απορροών. Η αιχμή της απορροής κυμαίνεται από 3.42 m<sup>3</sup>/s για περίοδο επαναφοράς 2 ετών έως 13.56 m<sup>3</sup>/s για περίοδο επαναφοράς 100 ετών κατά την χρονική στιγμή 00:40. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν μεγαλύτερες τιμές απορροής. Από την συμβολή στον αγωγό 1802 έως και την έξοδο της λεκάνης στον αγωγό 1621, η απορροή παρουσιάζει σε όλες τις περιπτώσεις τις υψηλότερες τιμές της. Παράλληλα στις Εικ. 4.17 έως και Εικ. 4.22, διακρίνεται κατά την στιγμή 00:40 το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621, από το οποίο και προκύπτουν τα εξής:

- Για βροχές με περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών (Εικ. 4.17 - Εικ. 4.19) η ροή και στους πέντε καταληκτικούς αγωγούς του συστήματος γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια.

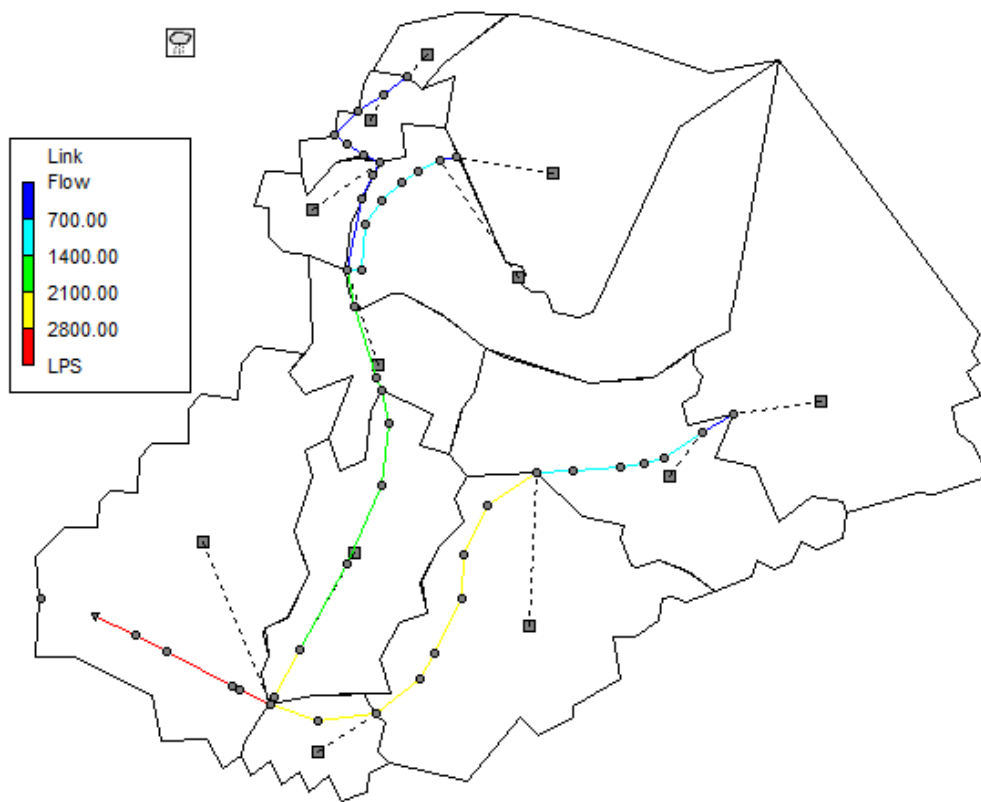
- Για βροχές με περιόδους επαναφοράς 25 και 50 ετών (Εικ. 4.20 και Εικ. 4.21), ένα τμήμα των αγωγών 1802, 1620 και 1621 παρουσιάζει ροή υπό πίεση, ενώ το υπόλοιπο τμήμα παρουσιάζει ροή με ελεύθερη επιφάνεια. Στους αγωγούς 1618 και 1619 η ροή γίνεται αποκλειστικά με ελεύθερη επιφάνεια. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια 435226 και 434230, όμως η πιεζομετρική γραμμή δεν ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου και έτσι δεν παρατηρούνται υπερχειλίσεις των φρεατίων.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 ετών (Εικ. 4.22), η ροή και στους πέντε αγωγούς της διατομής είναι υπό πίεση. Η πιεζομετρική γραμμή παρ' όλα αυτά παραμένει κάτω από την επιφάνεια του δρόμου. Επομένως, δεν παρατηρούνται υπερχειλίσεις των φρεατίων και φαινόμενα δυαδικής ροής.



Εικόνα 4.11: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=2$  έτη - Σενάριο 1

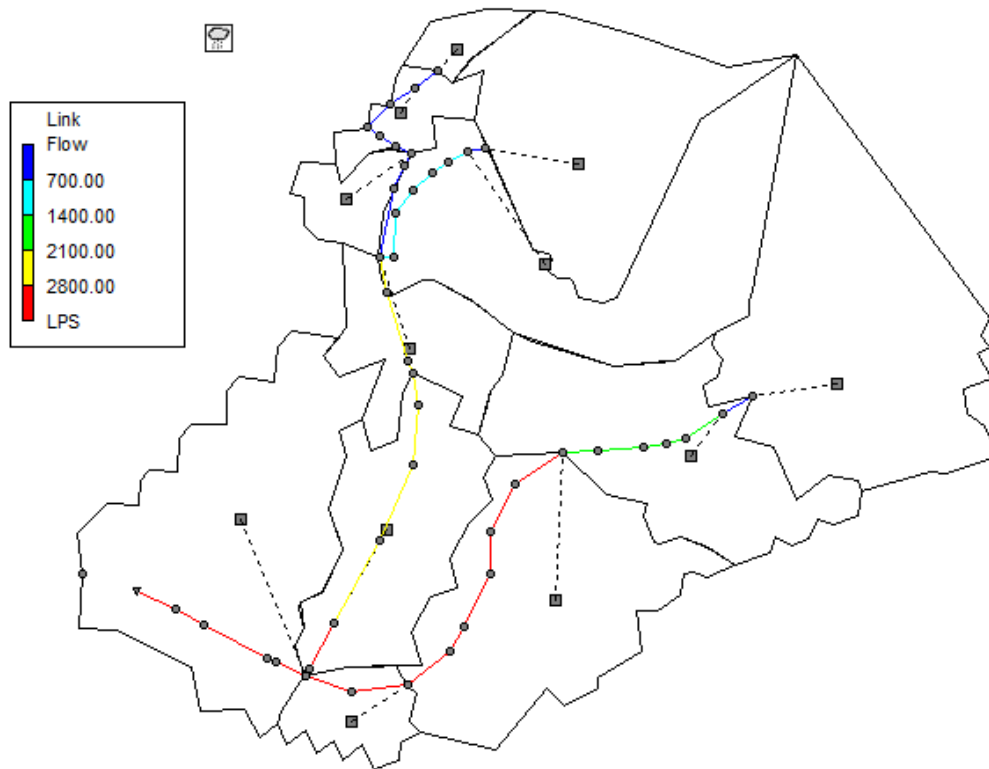


Εικόνα 4.12: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 5 έτη - Σενάριο 1

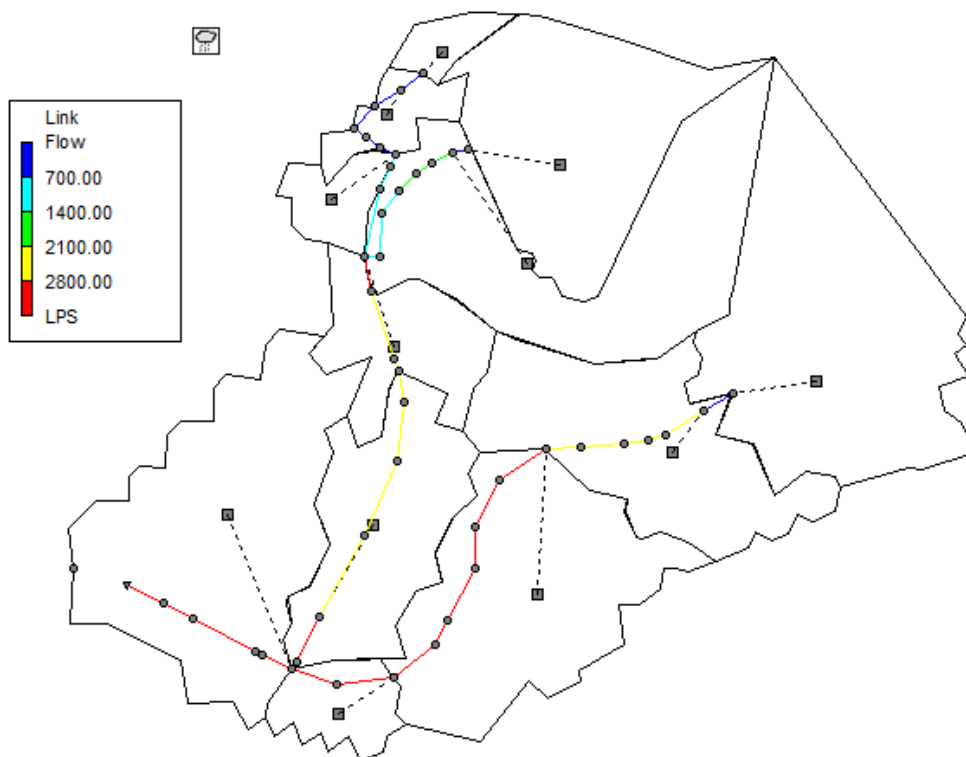


Εικόνα 4.13: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 10 έτη - Σενάριο 1

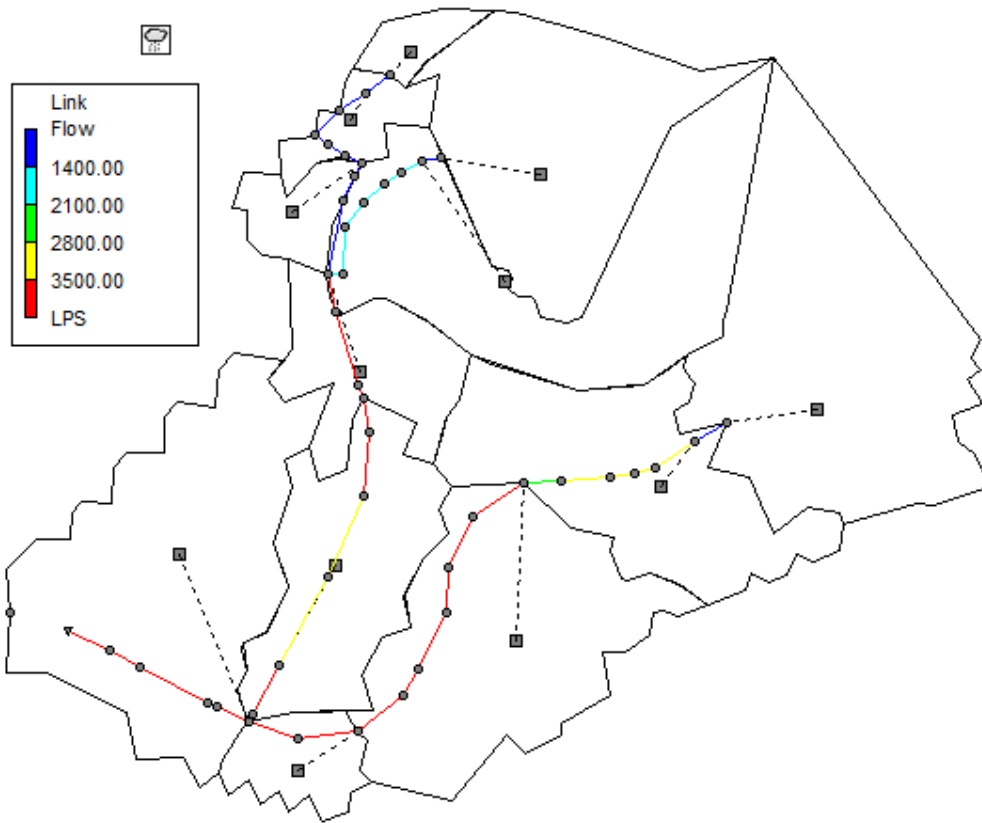




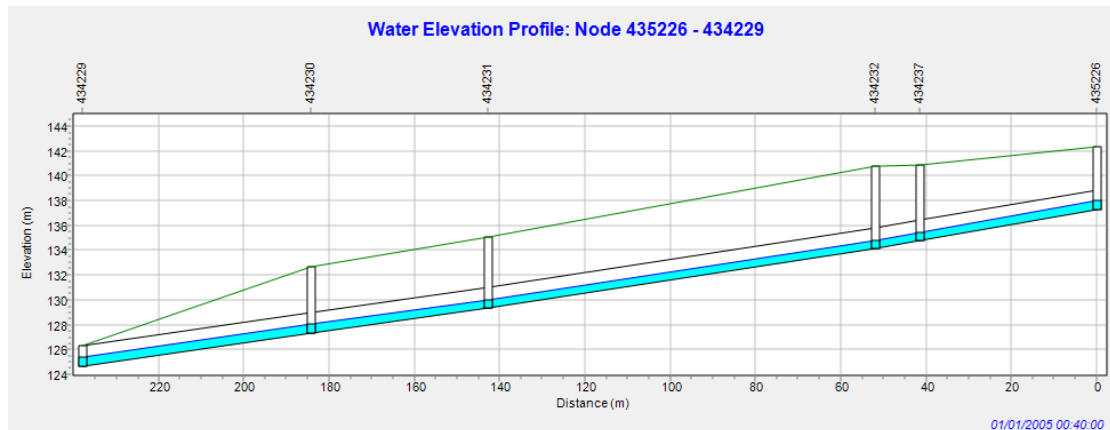
Εικόνα 4.14: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=25$  έτη - Σενάριο 1



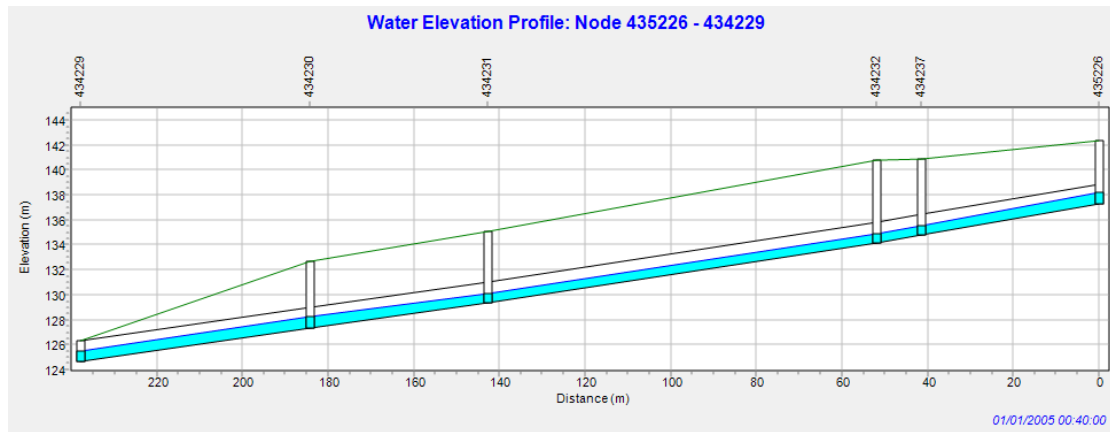
Εικόνα 4.15: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=50$  έτη - Σενάριο 1



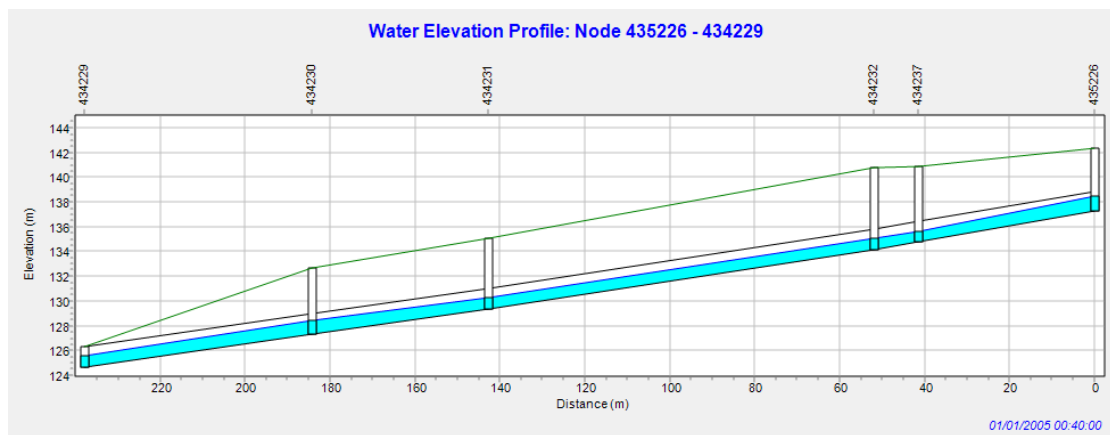
Εικόνα 4.16: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=100$  έτη - Σενάριο 1



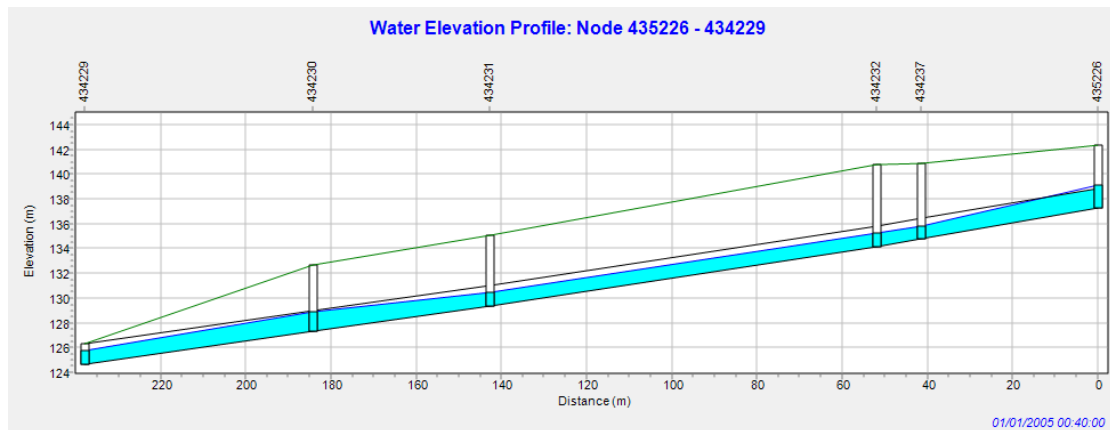
Εικόνα 4.17: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.



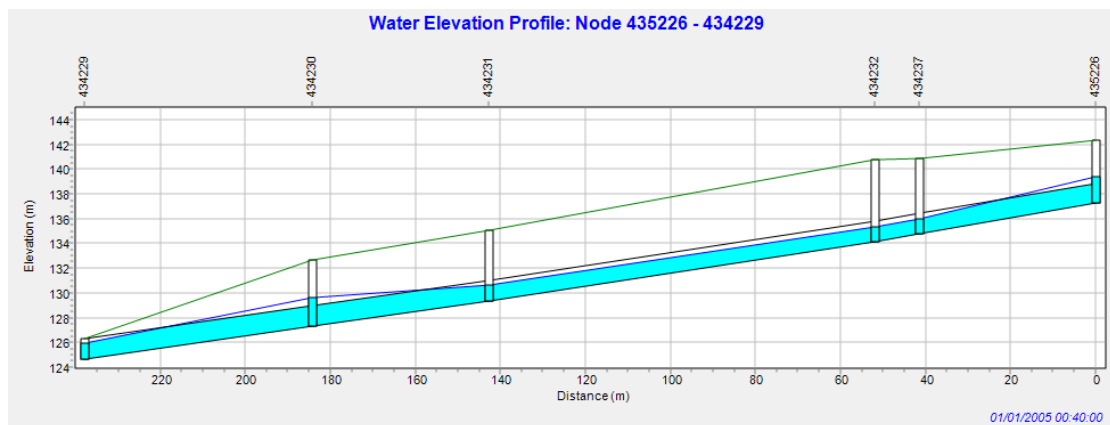
Εικόνα 4.18: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.



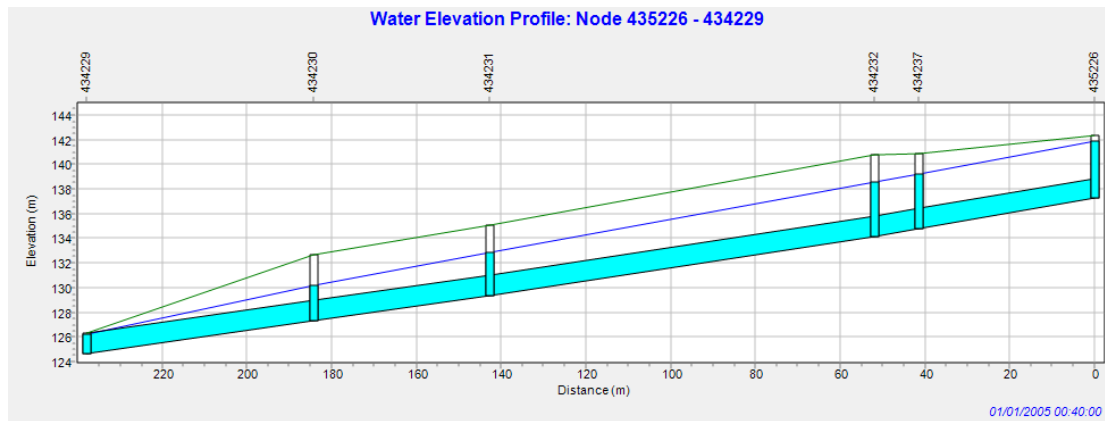
Εικόνα 4.19: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμη (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.



Εικόνα 4.20: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.



Εικόνα 4.21: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος) Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.



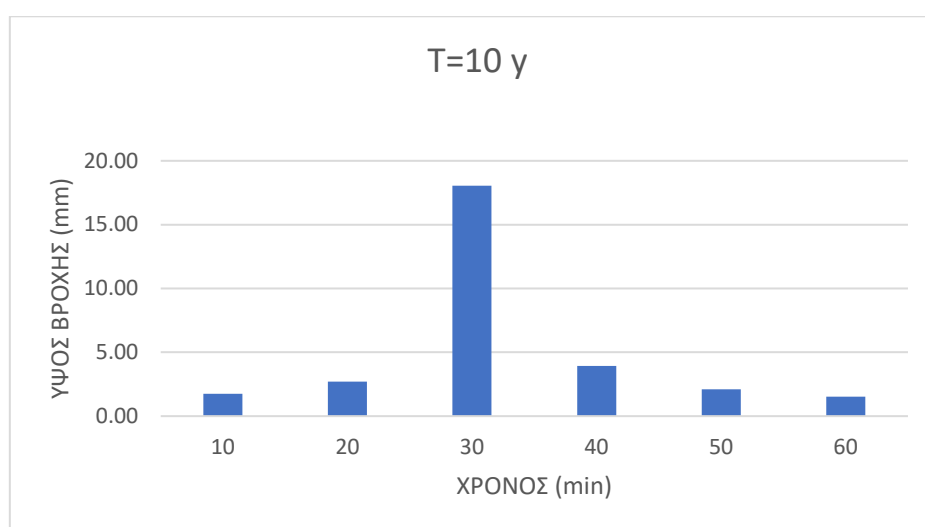
Εικόνα 4.22: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 1.

#### 4.3. Σενάριο 2: Προσομοίωση με χρήση όμβριων καμπυλών περιοχής Αθηνών συμπεριλαμβανομένου και του επεισοδίου του 1994

Η δεύτερη εξίσωση (Εξ. 3.9) αφορά πάλι την περιοχή της Αθήνας με την διαφοροποίηση ότι λαμβάνει υπόψιν και το επεισόδιο βροχόπτωσης του Οκτώβρη του 1994, το οποίο έχει αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 2.5. Αντίστοιχα, στην Εικ. 4.23 παρουσιάζεται το νετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχής 1 ώρας, ενώ για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 25, 50 και 100 χρόνων, τα νετογραφήματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Η κατανομή της βροχής που παρουσιάζεται στην Εικ. 4.23 και οι αντίστοιχες κατανομές για τις υπόλοιπες περιόδους επαναφοράς (Παράρτημα Β) αποτέλεσαν αρχικό δεδομένο της μοντελοποίησης και στο Σενάριο 2. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών παρουσιάζονται στους Πιν. 4.5 και Πιν. 4.6. Στην Εικ. 4.24 διακρίνεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του παντοροϊκού δικτύου και συγκεκριμένα στο αγωγό 1621. Το ύψος της βροχόπτωσης σε αυτό το σενάριο είναι 18.97 mm για περίοδο επαναφοράς 2 ετών, ενώ ανέρχεται σε 58.07 mm για περίοδο επαναφοράς 100 ετών. Για τις υπόλοιπες περιόδους που εξετάστηκαν τα ύψη βροχής κυμαίνονται μεταξύ αυτών των δύο ορίων, ενώ παρατηρείται ότι το ύψος βροχής είναι μεγαλύτερο για το

αντίστοιχο T, σε σχέση με τα αποτελέσματα του Σεναρίου 1. Οι απώλειες βροχής δεν υπερβαίνουν το 10% της κατακρήμνισης. Στην συνέχεια, ως 10λεπτο ισχυρότερης βροχόπτωσης χαρακτηρίζεται αυτό μεταξύ 00:20 και 00:30, ενώ η αιχμή του υδρογραφήματος (Εικ. 4.24) ακολουθεί την χρονική στιγμή 00:40 σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Τέλος, η μέση απορροή ακαθάρτων είναι σταθερή και ίση με 0.23 m<sup>3</sup>/s.



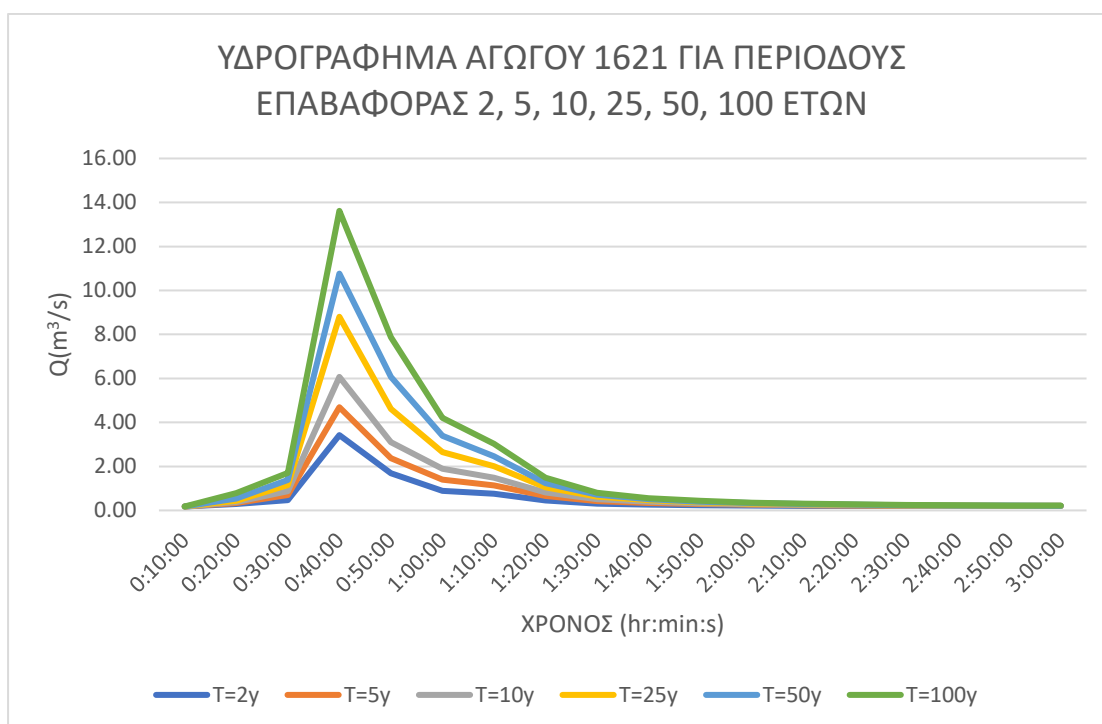
Εικόνα 4.23: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών - Σενάριο 2

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών - Σενάριο 2

Αποτελέσματα	T=2y	T=5y	T=10y
Βροχόπτωση (mm)	18,970	24.660	30.060
Απώλειες βροχής (mm)	1.520	2.730	2.890
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	3.423	4.691	6.070
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 2

Αποτελέσματα	T=25y	T=50y	T=100y
Βροχόπτωση (mm)	39.070	47.640	58.070
Απώλειες βροχής (mm)	3.180	3.810	4.650
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	8.803	10.765	13.618
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230



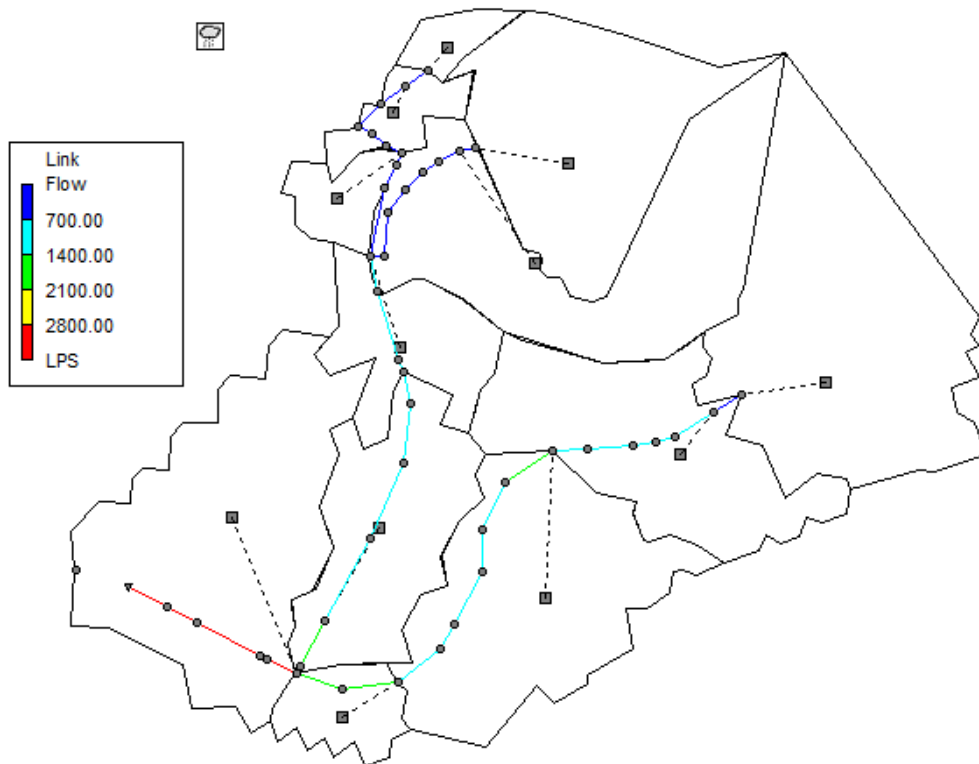
Εικόνα 4.24: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 2

Στην συνέχεια, στις Εικ. 4.25 έως και 4.30 παρουσιάζεται το μέγεθος της απορροής, κατά την αιχμή της την χρονική στιγμή 00:40, για όλους τους αγωγούς του υπό μελέτη δικτύου ξεχωριστά και για κάθε περίοδο επαναφοράς. Όσο αυξάνεται η περίοδος επαναφοράς, αυξάνεται και το ύψος βροχής και, επομένως, η απορροή στους αγωγούς του συστήματος. Η αιχμή της απορροής κυμαίνεται από 3.43 m<sup>3</sup>/s για περίοδο

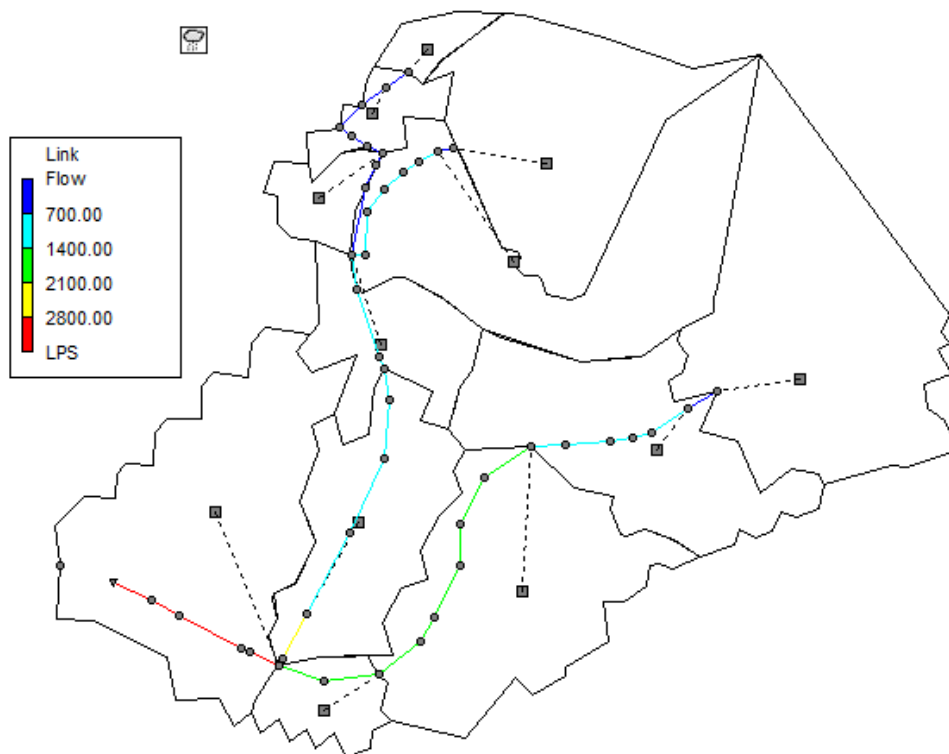
επαναφοράς 2 ετών, έως 13.62 m<sup>3</sup>/s για περίοδο επαναφοράς 100 ετών κατά την χρονική στιγμή 00:40, τιμές αρκετά κοντινές με αυτές του Σεναρίου 1. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν κρισιμότερες τιμές απορροής. Από τον αγωγό 1802 έως και την έξοδο της λεκάνης στον αγωγό 1621, η απορροή αυξάνεται εφόσον στον αγωγό 1802 γίνεται η συμβολή των δύο κλάδων του συστήματος. Στην συνέχεια, στις Εικ. 4.31 έως και Εικ. 4.36, διακρίνεται κατά την στιγμή 00:40 το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621, από το οποίο και προκύπτουν τα εξής:

- Για βροχές με περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών (Εικ. 4.31 - Εικ. 4.33) η ροή και στους πέντε καταληκτικούς αγωγούς του συστήματος γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 25 ετών (Εικ. 4.34), ένα τμήμα των αγωγών 1802, 1620 και 1621 παρουσιάζει ροή υπό πίεση, ενώ το υπόλοιπο τμήμα παρουσιάζει ροή με ελεύθερη επιφάνεια. Στους αγωγούς 1618 και 1619 η ροή γίνεται αποκλειστικά με ελεύθερη επιφάνεια. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στο φρεάτιο 435226, όμως η πιεζομετρική γραμμή δεν ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου και έτσι δεν παρατηρείται υπερχειλίσεις του φρεατίου.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 ετών (Εικ. 4.35), το μεγαλύτερο τμήμα των αγωγών 1802, 1620 και 1621 παρουσιάζει ροή υπό πίεση, ενώ το υπόλοιπο τμήμα παρουσιάζει ροή με ελεύθερη επιφάνεια. Στους αγωγούς 1618 και 1619 η ροή γίνεται αποκλειστικά με ελεύθερη επιφάνεια. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια 435226 και 434230, όμως η πιεζομετρική γραμμή δεν ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου και έτσι δεν παρατηρούνται υπερχειλίσεις των φρεατίων.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 ετών (Εικ. 4.22), η ροή σε όλη την διατομή γίνεται υπό πίεση. Η πιεζομετρική γραμμή παρ' όλα αυτά παραμένει κάτω από την επιφάνεια του δρόμου. Επομένως, δεν παρατηρούνται, ούτε σε αυτή την περίπτωση, υπερχειλίσεις των φρεατίων και φαινόμενα δυαδικής ροής.

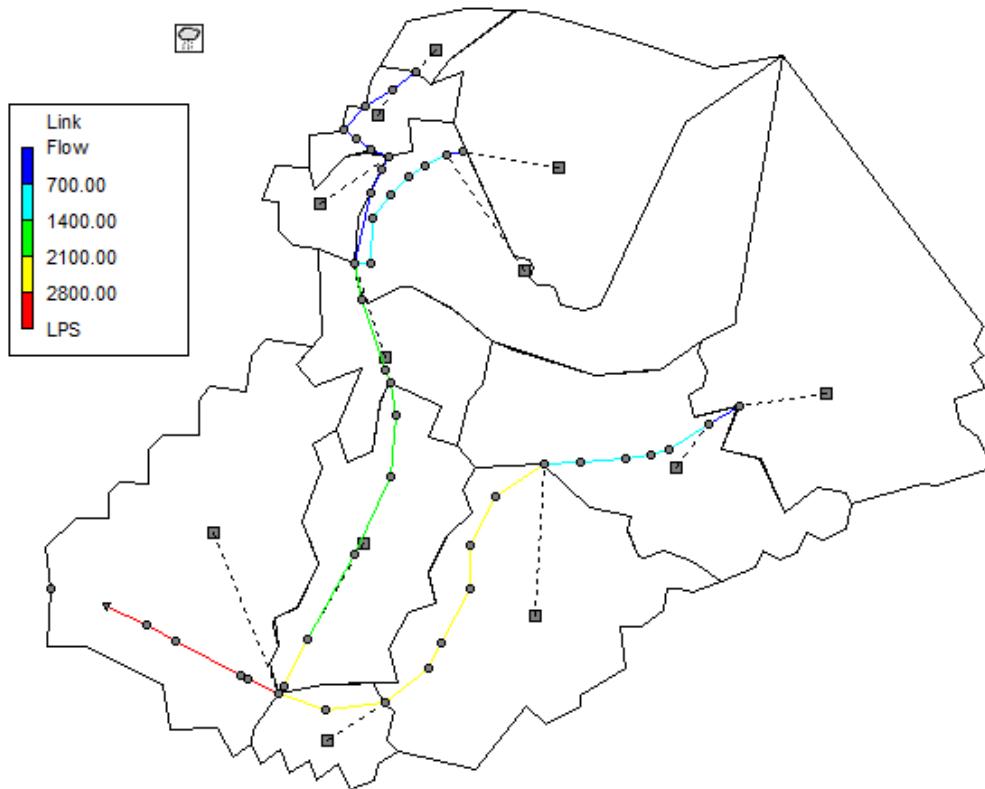




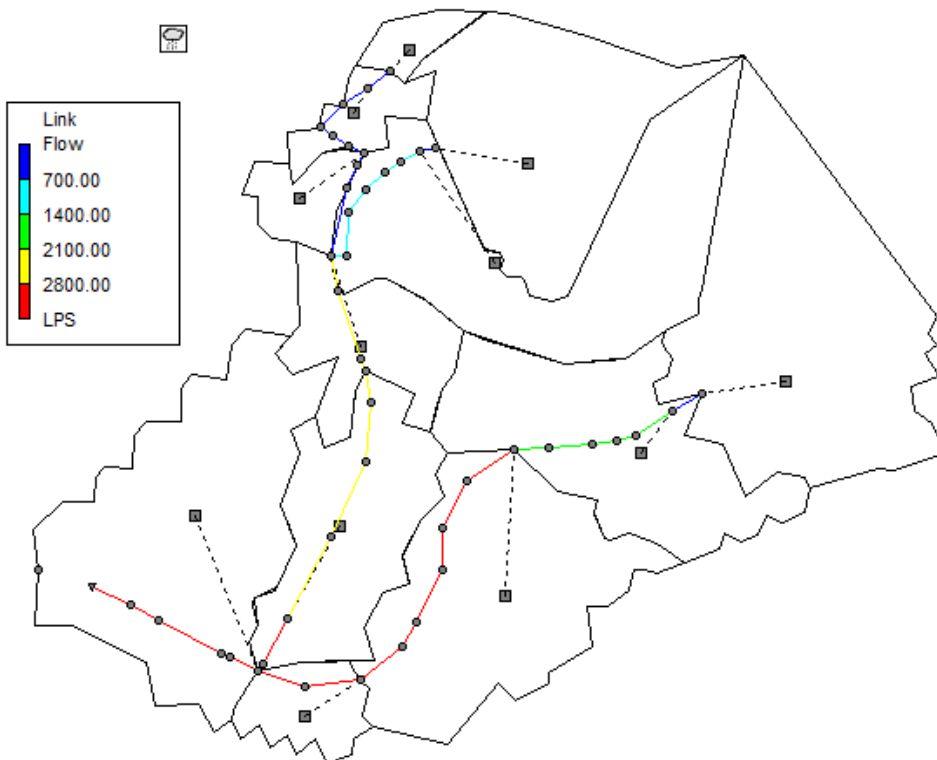
Εικόνα 4.25: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=2$  έτη - Σενάριο 2



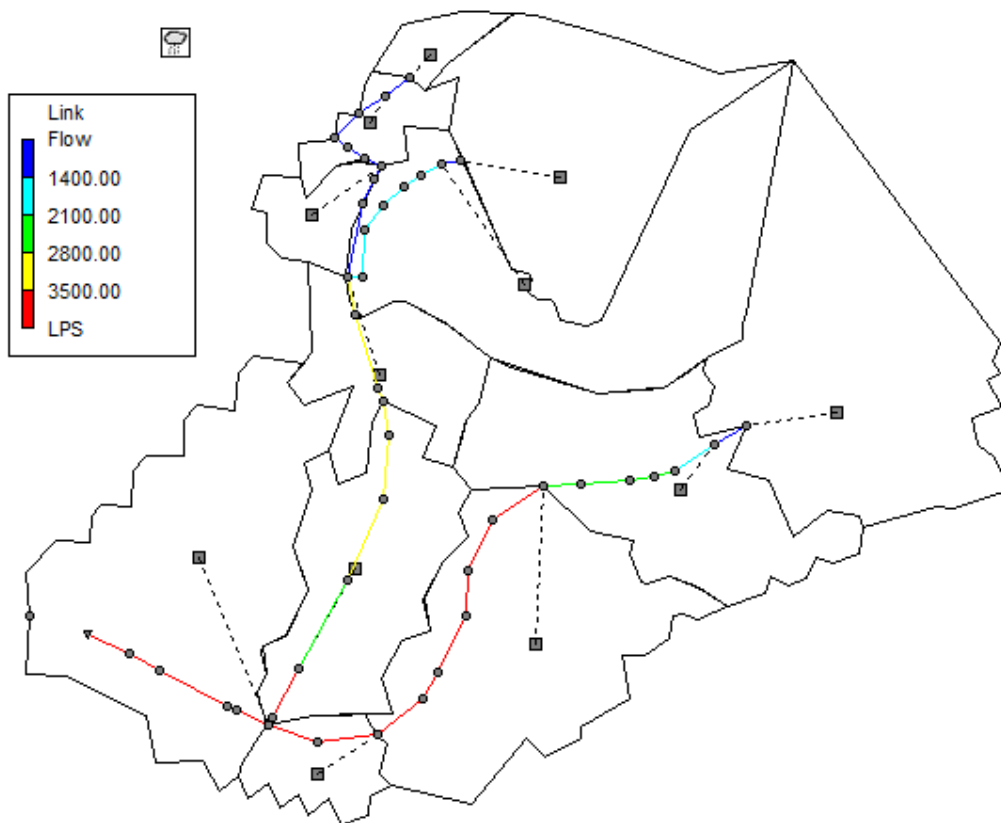
Εικόνα 4.26: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=5$  έτη - Σενάριο 2



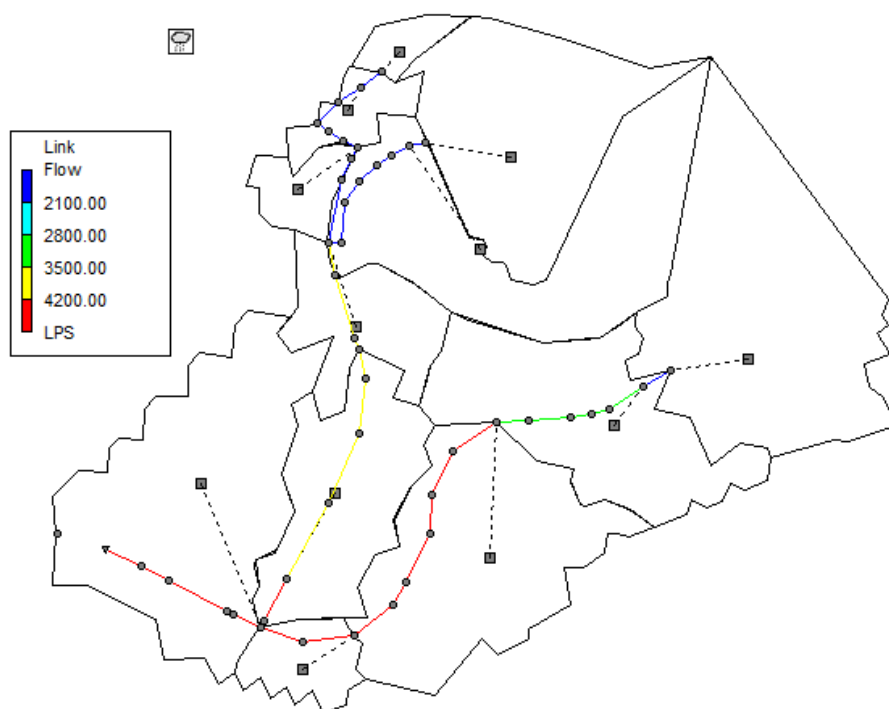
Εικόνα 4.27: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 10 έτη - Σενάριο 2



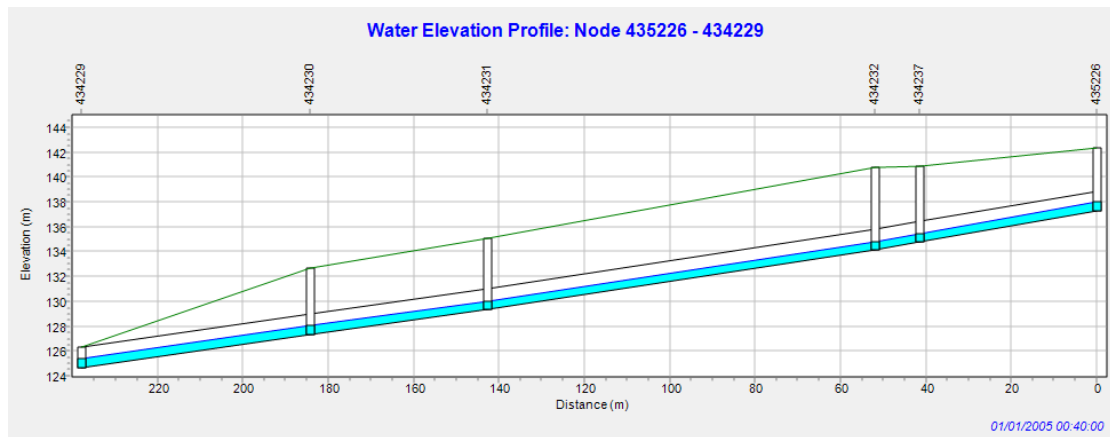
Εικόνα 4.28: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 25 έτη - Σενάριο 2



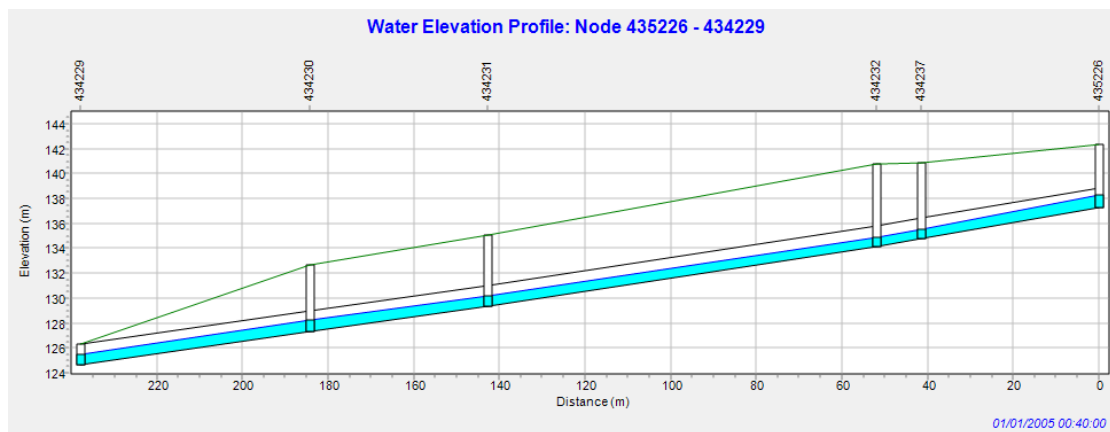
Εικόνα 4.29: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 50 έτη - Σενάριο 2



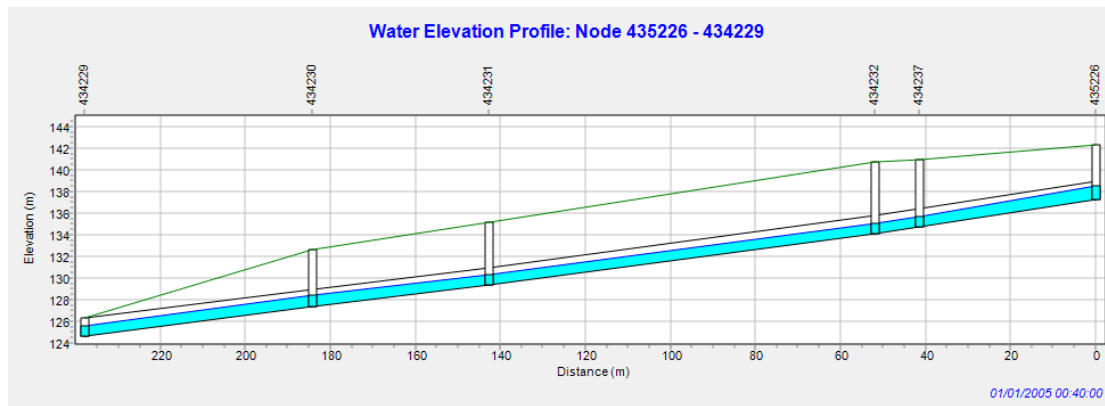
Εικόνα 4.30: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 100 έτη - Σενάριο 2



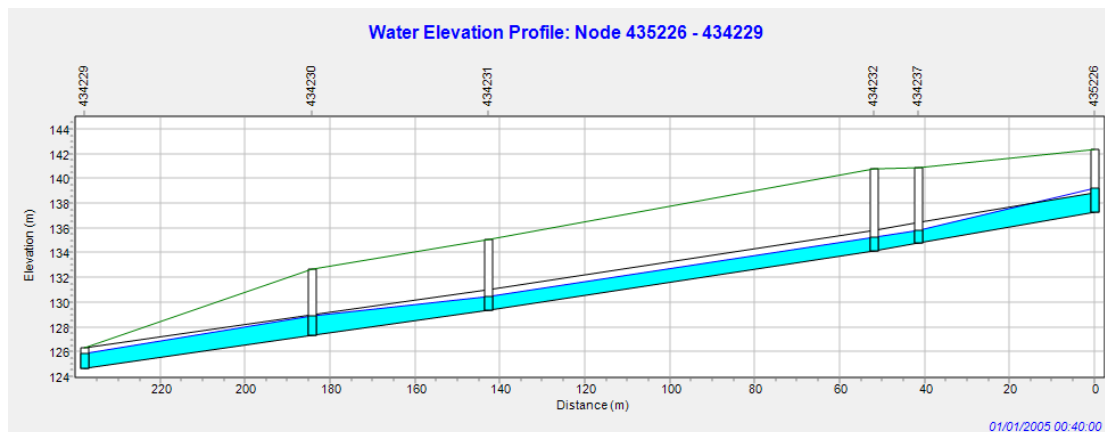
Εικόνα 4.31: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.



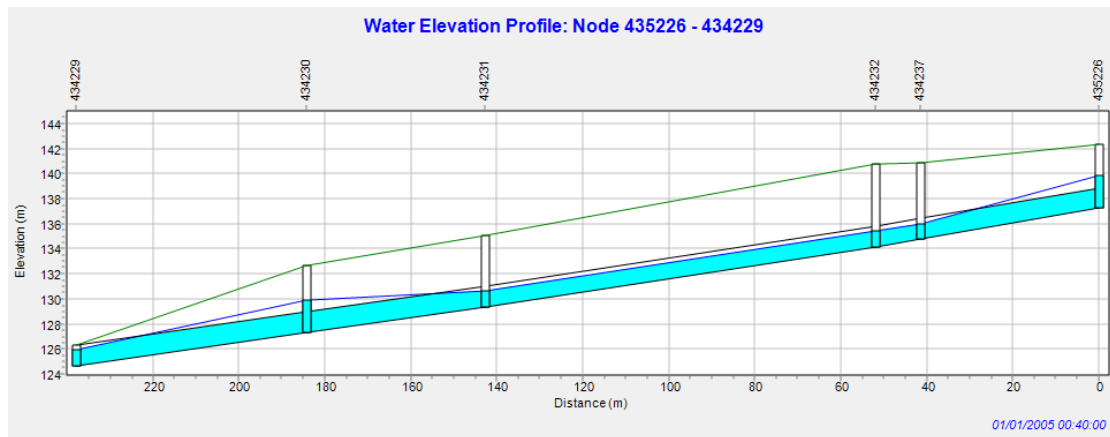
Εικόνα 4.32: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.



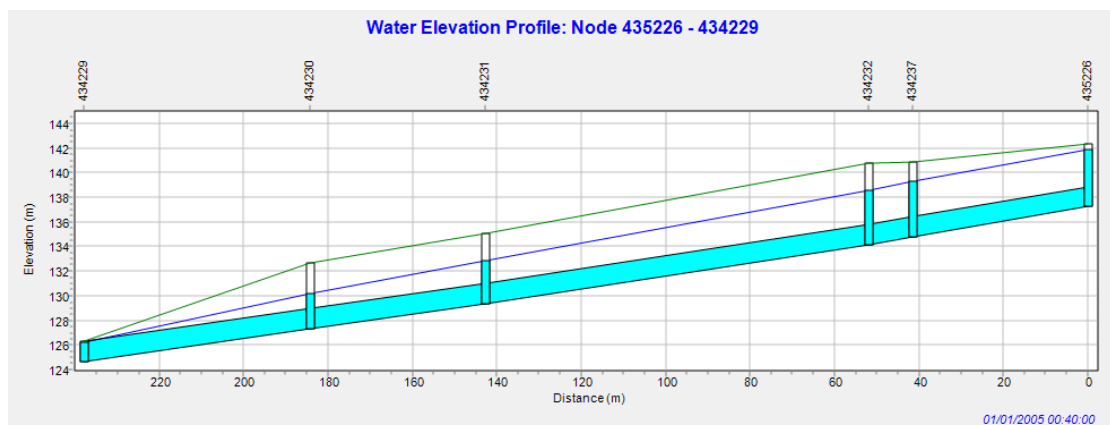
Εικόνα 4.33: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.



Εικόνα 4.34: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.



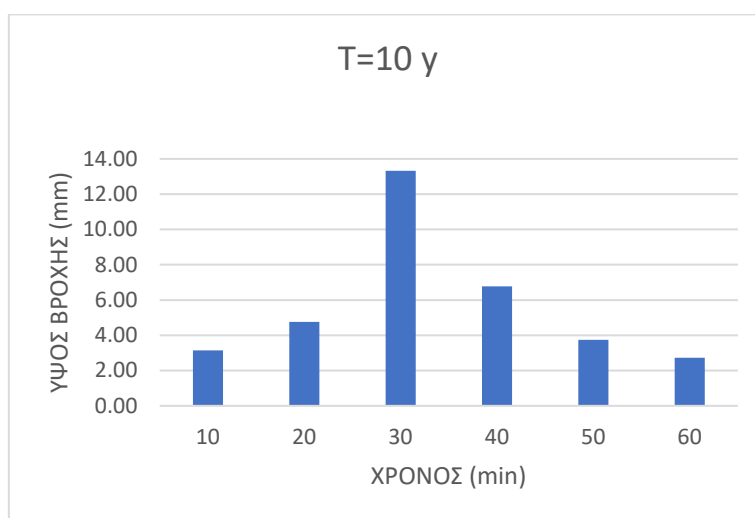
Εικόνα 4.35: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.



Εικόνα 4.36: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 2.

#### 4.4. Σενάριο 3: Προσομοίωση με χρήση όμβριων καμπυλών περιοχής Αθηνών – Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας 2017

Η τελευταία εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε και η οποία περιγράφει τις όμβριες καμπύλες στην περιοχή της Αθήνας είναι η Εξ. 3.10. Αυτή προκύπτει από το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του 2017 για τον Νομό Αττικής (EL06-2017). Στην Εικ. 4.37 διακρίνεται το υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας βροχής 1 ώρα. Τα υετογραφήματα για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 25, 50 και 100 χρόνια παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.



Εικόνα 4.37: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών - Σενάριο 3

Η κατανομή της βροχής της Εικ. 4.37 και οι αντίστοιχες κατανομές για τις υπόλοιπες περιόδους επαναφοράς αποτελέσαν δεδομένα εισαγωγής για τις προσομοιώσεις του Σεναρίου 3. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών παρουσιάζονται στους Πιν. 4.7 και Πιν. 4.8. Στην Εικ. 4.38 διακρίνεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του παντοροϊκού δικτύου και συγκεκριμένα στο αγωγό 1621. Το ύψος της βροχόπτωσης σε αυτό το σενάριο είναι 18.15 mm για περίοδο επαναφοράς 2 ετών, ενώ ανέρχεται σε 68.09 mm για περίοδο επαναφοράς 100 ετών. Οι απώλειες δεν υπερβαίνουν το 10% της βροχόπτωσης. Επιπλέον και σε αυτή την περίπτωση η ισχυρότερη βροχόπτωση παρουσιάζεται μεταξύ 00:20 και 00:30, ενώ η αιχμή του υδρογραφήματος (Εικ. 4.24) ακολουθεί την χρονική στιγμή 00:40 σε όλες τις περιπτώσεις. Τέλος, η μέση απορροή ακαθάρτων ανέρχεται σε 0.23 m<sup>3</sup>/s.

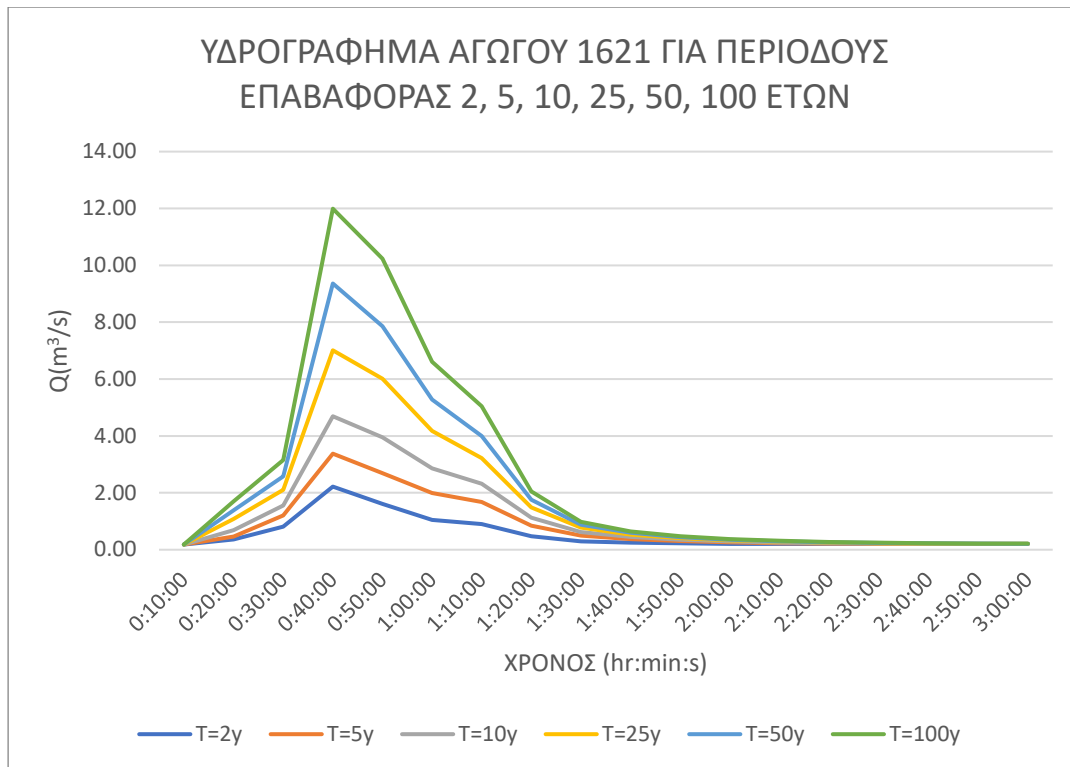
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών  
- Σενάριο 3

<b>Αποτελέσματα</b>	<b>T=2y</b>	<b>T=5y</b>	<b>T=10y</b>
Βροχόπτωση (mm)	18.150	26.830	34.470
Απώλειες βροχής (mm)	1.450	2.150	2.760
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	2.219	3.377	4.693
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 3

<b>Αποτελέσματα</b>	<b>T=25y</b>	<b>T=50y</b>	<b>T=100y</b>
Βροχόπτωση (mm)	46.150	56.420	68.090
Απώλειες βροχής (mm)	3.690	3.950	4.770
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	7.012	9.361	11.993
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230

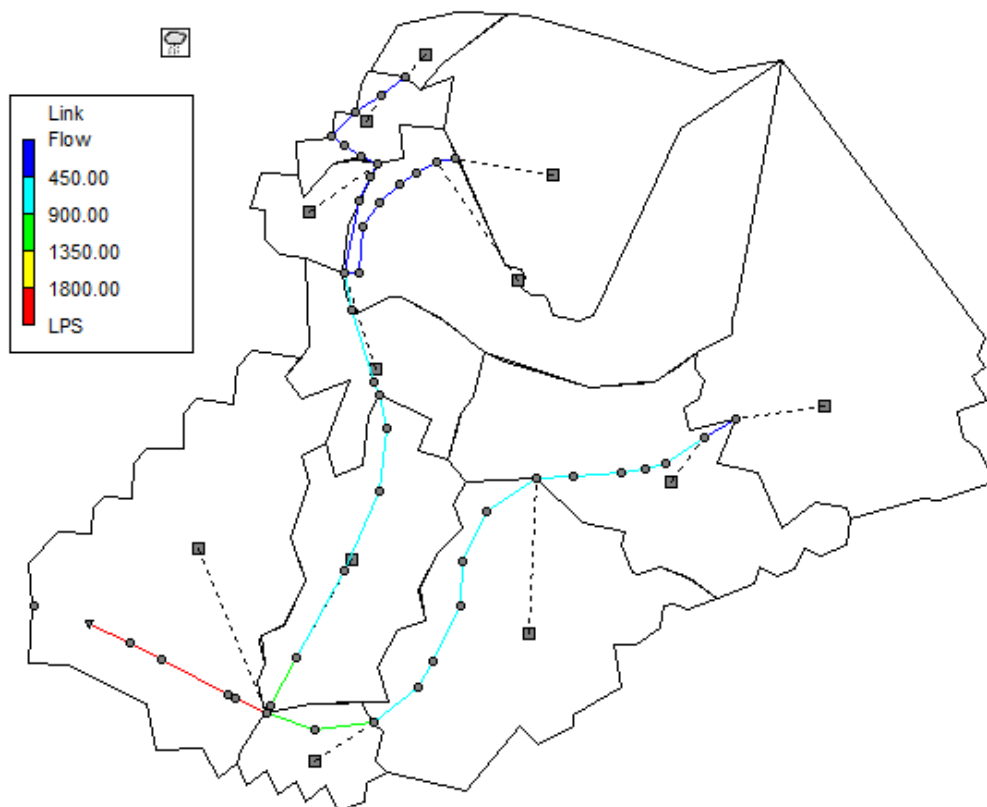




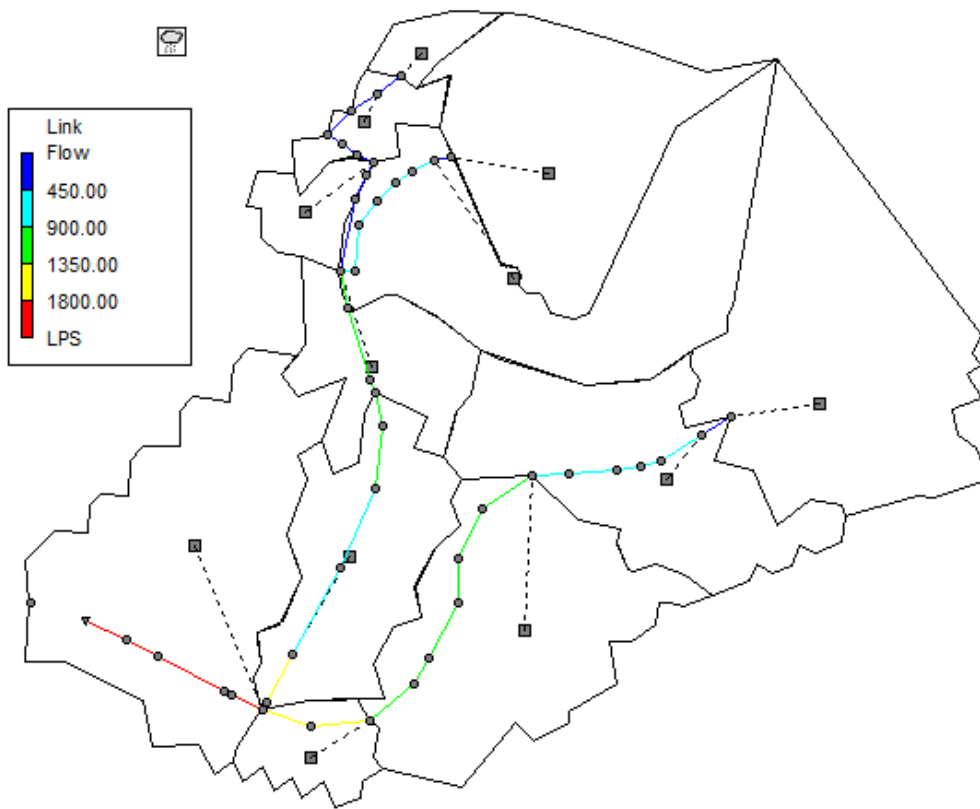
Εικόνα 4.38: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 3

Στην συνέχεια, στις Εικ. 4.39 έως και 4.44 παρουσιάζεται το μέγεθος της απορροής, κατά την αιχμή της την χρονική στιγμή 00:40, για όλους τους αγωγούς του υπό μελέτη δικτύου ξεχωριστά και για κάθε περίοδο επαναφοράς. Μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς συνεπάγονται και εντονότερες βροχοπτώσεις και, επομένως, μεγαλύτερες απορροές στο σύστημα. Η αιχμή της απορροής κυμαίνεται από 2.20 m<sup>3</sup>/s για περίοδο επαναφοράς 2 ετών, έως 12.00 m<sup>3</sup>/s για περίοδο επαναφοράς 100 ετών κατά την χρονική στιγμή 00:40, τιμές που είναι σχετικά μικρότερες από τα προηγούμενα σενάρια, παρά τα μεγαλύτερα ύψη βροχής. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν κρισιμότερες τιμές απορροής. Από τον αγωγό 1802 έως και την έξοδο της λεκάνης στον αγωγό 1621, η απορροή αυξάνεται εφόσον στον αγωγό 1802 γίνεται η συμβολή των δύο ανάντη κλάδων του δικτύου. Στην συνέχεια, στις Εικ. 4.45 έως και Εικ. 4.50, διακρίνεται κατά την στιγμή 00:40 το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621, από το οποίο και συμπεραίνεται ότι:

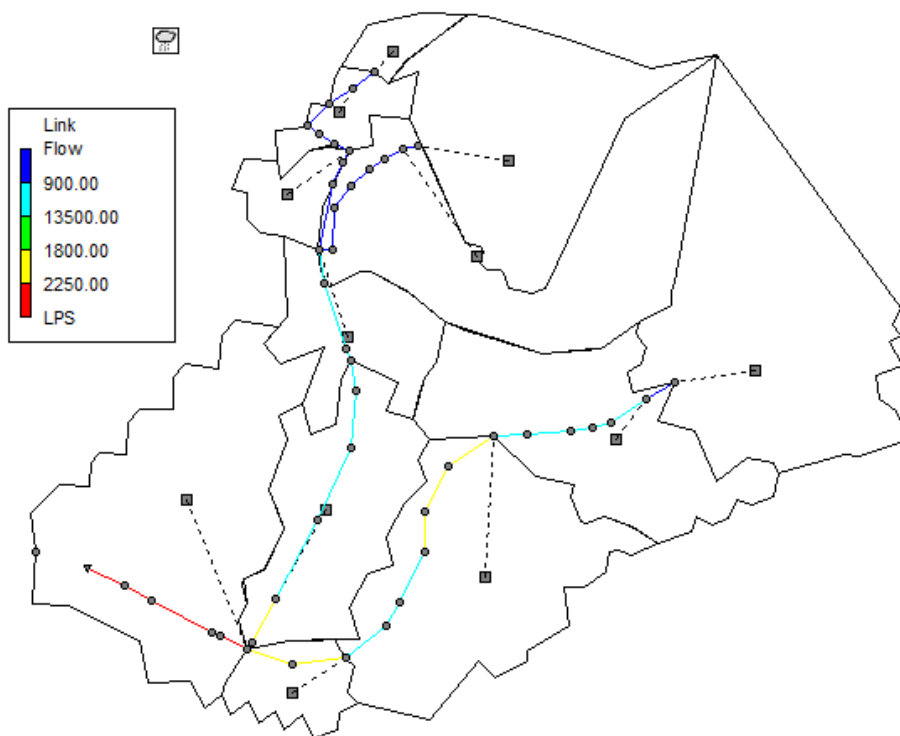
- Για βροχές με περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10 και 25 ετών (Εικ. 4.45 - Εικ. 4.48) η ροή και στους πέντε καταληκτικούς αγωγούς του συστήματος γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 ετών (Εικ. 4.49), ένα τμήμα των αγωγών 1802, 1620 και 1621 παρουσιάζει ροή υπό πίεση, ενώ το υπόλοιπο τμήμα παρουσιάζει ροή με ελεύθερη επιφάνεια. Στους αγωγούς 1618 και 1619 η ροή γίνεται αποκλειστικά με ελεύθερη επιφάνεια. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια 435226 και 434230, όμως η πιεζομετρική γραμμή δεν ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου και έτσι δεν παρατηρείται υπερχειλίσσεις του φρεατίου.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 ετών (Εικ. 4.50), στους αγωγούς 1802, 1620 και 1621 παρουσιάζεται σχεδόν αποκλειστικά ροή υπό πίεση. Στους αγωγούς 1618 και 1619 η ροή γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια 435226 και 434230, όμως η πιεζομετρική γραμμή δεν ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου και έτσι δεν παρατηρούνται υπερχειλίσσεις των φρεατίων.



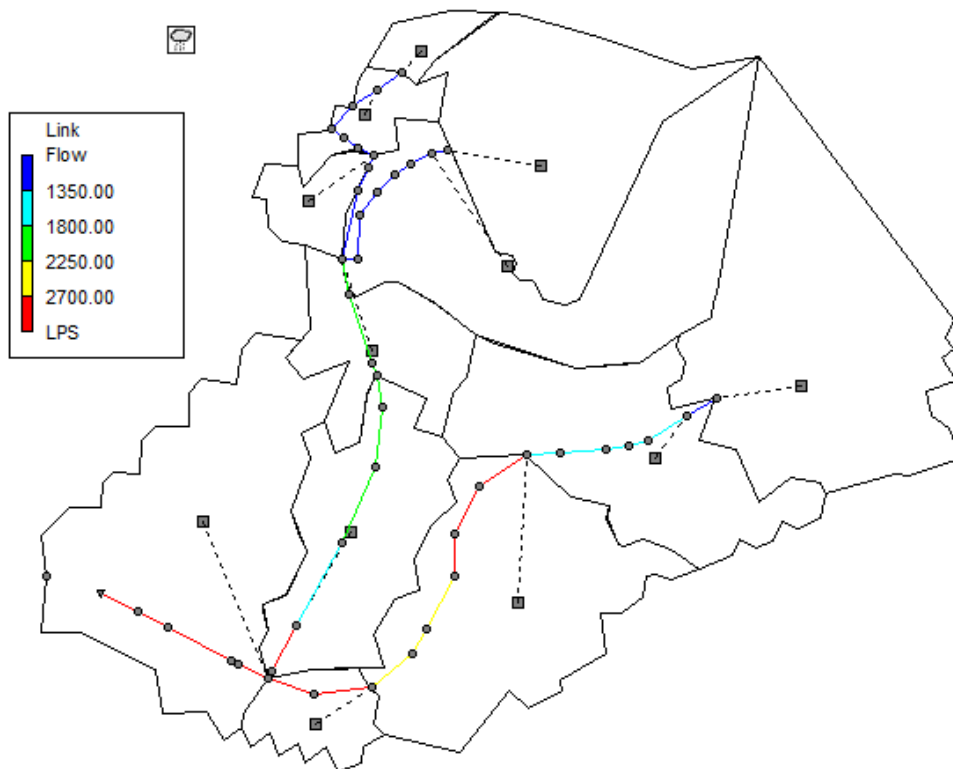
Εικόνα 4.39: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=2$  έτη - Σενάριο 3



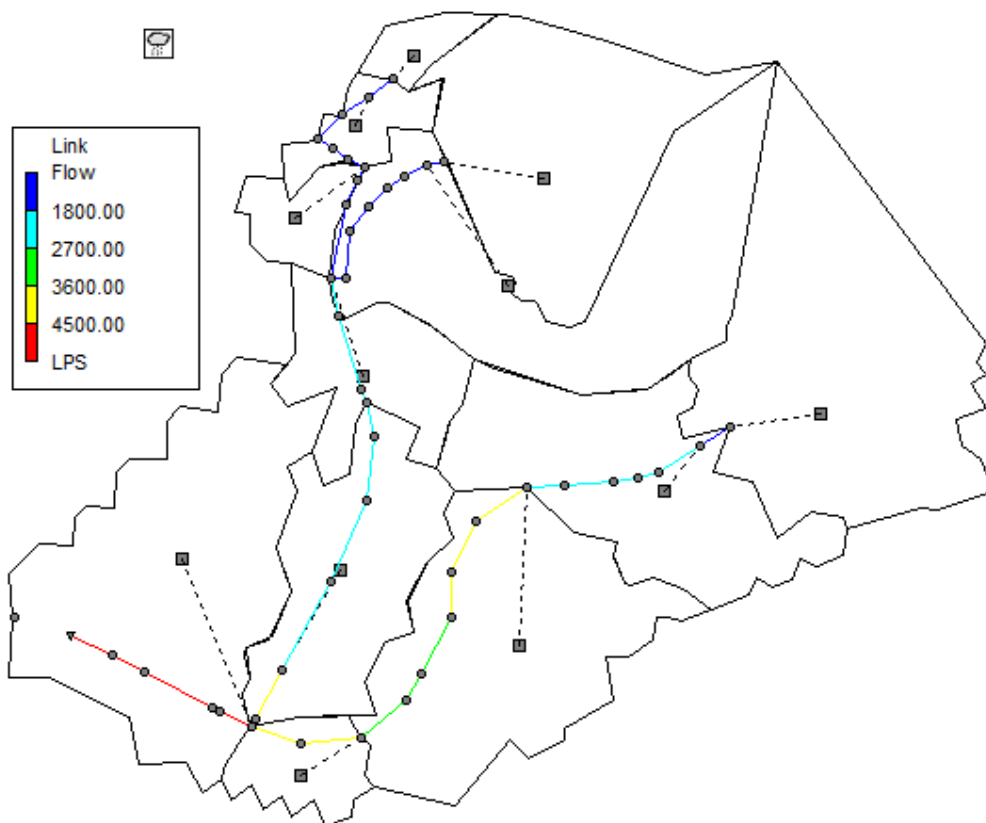
Εικόνα 4.40: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 5 έτη - Σενάριο 3



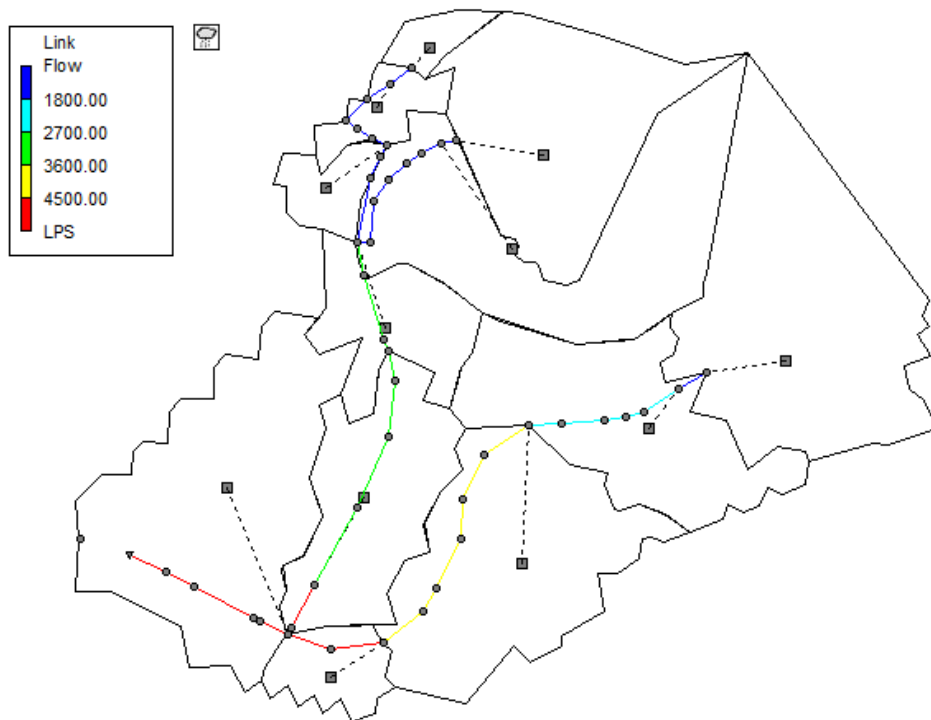
Εικόνα 4.41: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 10 έτη - Σενάριο 3



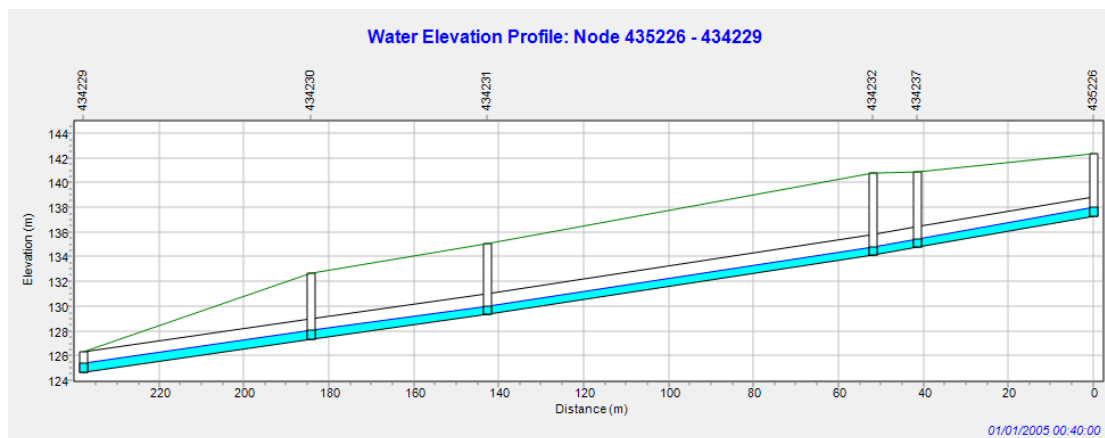
Εικόνα 4.42: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=25$  έτη - Σενάριο 3



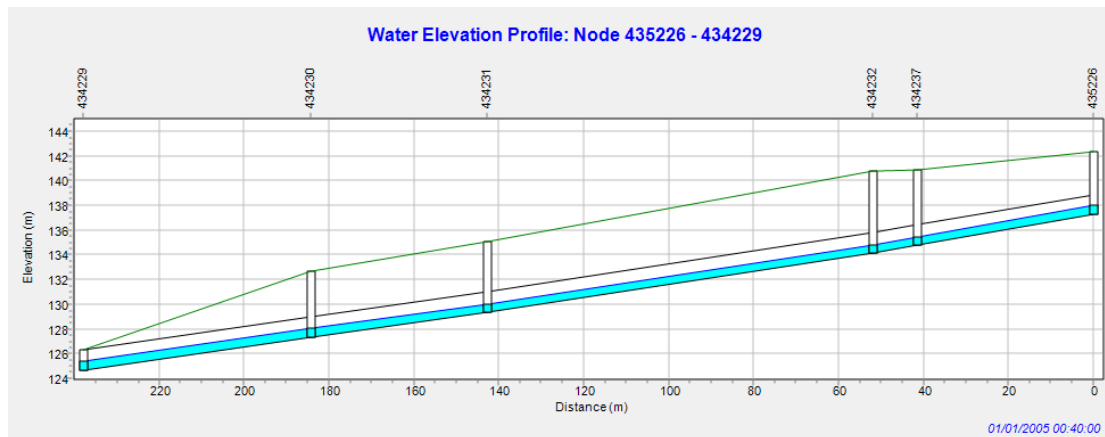
Εικόνα 4.43: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=50$  έτη- Σενάριο 3



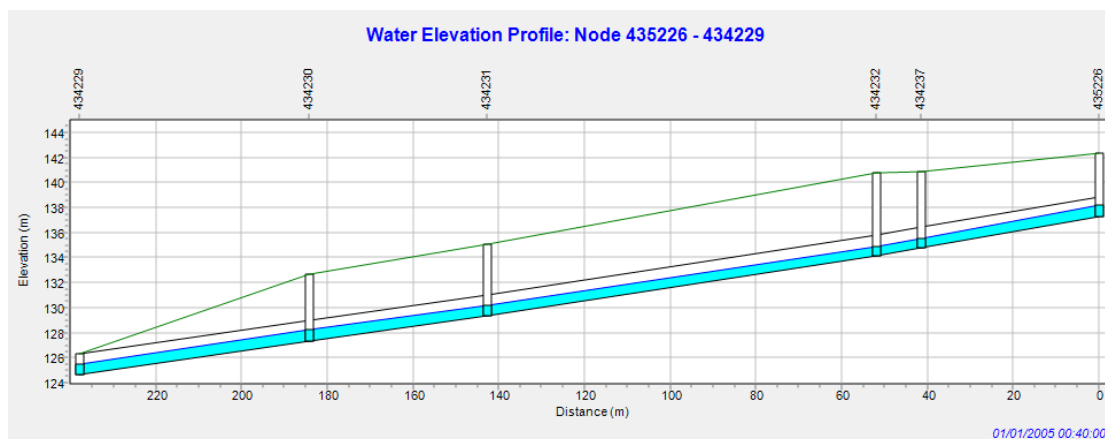
Εικόνα 4.44: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=100$  έτη - Σενάριο 3



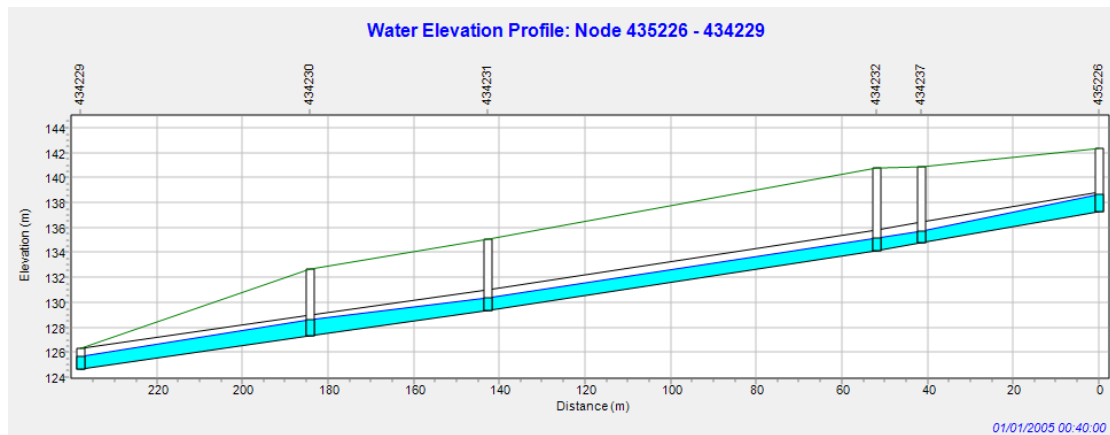
Εικόνα 4.45: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.



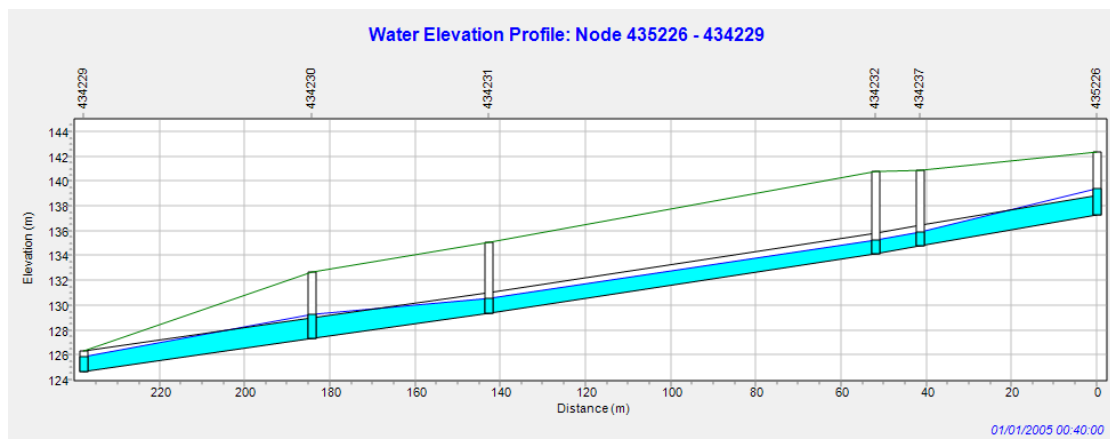
Εικόνα 4.46: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.



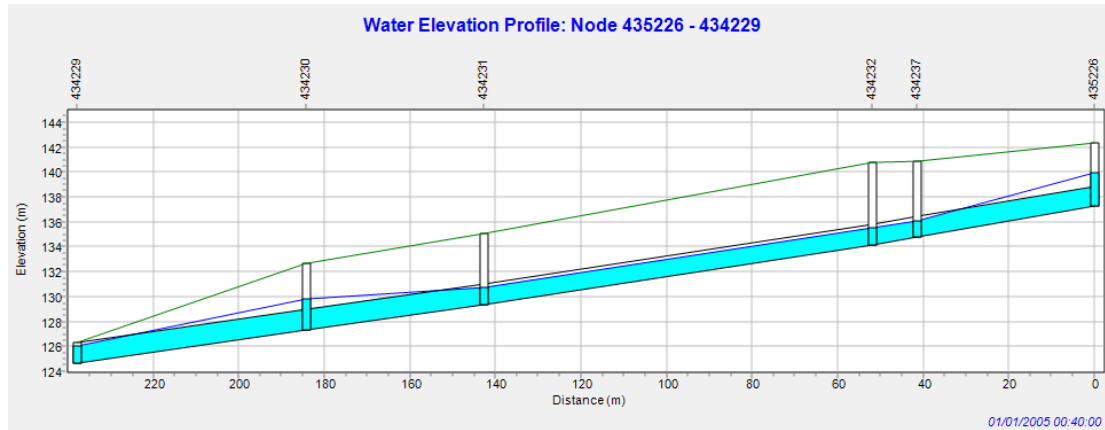
Εικόνα 4.47: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.



Εικόνα 4.48: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.



Εικόνα 4.49: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.

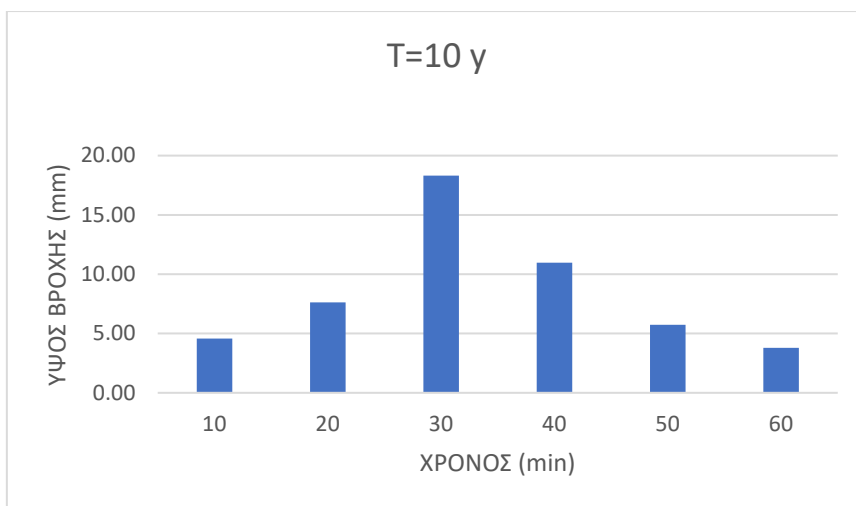


Εικόνα 4.50: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 3.

#### 4.5. Σενάριο 4: Προσομοίωση με χρήση μελλοντικών όμβριων καμπυλών βάσει σεναρίων κλιματικής αλλαγής- μέση πρόβλεψη

Στην δεύτερη ομάδα σεναρίων οι όμβριες καμπύλες περιγράφονται από τις Εξ. 3.12 έως και Εξ. 3.14 οι οποίες έχουν προκύψει με την κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών (Γ.Α.Τ.) από τους Kourtis et al. (2022). Αναλυτικότερα, πρόκειται για εξισώσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψιν τον αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής στην απορροή που προκαλείται από την βροχόπτωση μέσα στο αστικό δίκτυο αποχέτευσης της Αθήνας για το έτος 2100. Στη παρούσα ομάδα σεναρίων χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές εξισώσεις ομβρίων καμπυλών, η διαφοροποίηση των οποίων έγκειται στην αβεβαιότητα των μελλοντικών προβλέψεων. Στο Σενάριο 4 χρησιμοποιήθηκε η Εξ. 3.12, η οποία δίνει μια μέση (mean) πρόβλεψη σχετικά με την επιρροή της κλιματικής αλλαγής στην ένταση της βροχής. Στην Εικ. 4.51 παρουσιάζεται το υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών. Τα υετογραφήματα για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 25, 50 και 100 χρόνων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.





Εικόνα 4.51: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών - Σενάριο 4

Το παραπάνω υετογράφημα (Εικ. 4.51) αποτέλεσε αρχικό δεδομένο για την προσομοίωση με το μοντέλο SWMM. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών παρουσιάζονται στους Πιν. 4.9 και Πιν. 4.10, ενώ στην Εικ. 4.52 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του παντοροϊκού δικτύου και συγκεκριμένα στο αγωγό 1621. Το ύψος της βροχόπτωσης σε αυτό το σενάριο είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με τα προηγούμενα και ανέρχεται σε 26.79 mm για περίοδο επαναφοράς 2 ετών, ενώ προσεγγίζει την τιμή των 128.10 mm για περίοδο επαναφοράς 100 ετών. Οι απώλειες βροχής δεν υπερβαίνουν, ούτε σε αυτή την περίπτωση, το 10% της βροχόπτωσης. Επιπλέον, η ισχυρότερη βροχόπτωση παρουσιάζεται μεταξύ 00:20 και 00:30, ενώ η αιχμή του υδρογραφήματος (Εικ. 4.52) ακολουθεί, κατά την χρονική στιγμή 00:40 σε όλες τις περιπτώσεις. Για περιόδους επαναφοράς 50 και 100 ετών, η αιχμή των υδρογραφημάτων φαίνεται να φτάνει ένα plateau («κόβεται») που διαρκεί 10 min (για T=50 έτη) με 20 min (για T=100 έτη). Αυτό συμβαίνει λόγω υπερχειλίσης από τα φρεάτια στους δύο ανάντη κλάδους του δικτύου όπου μέρος της απορροής ρέει επιφανειακά στο δρόμο (δυναδική ροή). Τέλος, η μέση απορροή ακαθάρτων ανέρχεται και πάλι σε 0.23 m<sup>3</sup>/s.

Στην συνέχεια, στις Εικ. 4.53 έως και 4.58 παρουσιάζεται το μέγεθος της απορροής, κατά την αιχμή της την χρονική στιγμή 00:40, για όλες τις περιόδους επαναφοράς στους αγωγούς του συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος επαναφοράς, τόσο μεγαλύτερη η ένταση της βροχής και, επομένως, τόσο μεγαλύτερη η απορροή που

προκαλείται από αυτήν. Η αιχμή της απορροής κυμαίνεται από 3.12 m<sup>3</sup>/s για περίοδο επαναφοράς 2 ετών, έως 13.77 m<sup>3</sup>/s για περίοδο επαναφοράς 100 ετών κατά την χρονική στιγμή 00:40, τιμές που είναι σχετικά κρισιμότερες από τα προηγούμενα σενάρια. Βάσει των σεναρίων που εξετάστηκαν παραπάνω (Σενάρια 1-2) και του παρόντος σεναρίου μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο αγωγός εξόδου 1621 οδηγείται σε πλήρωση για απορροή που κυμαίνεται μεταξύ των 13.50 m<sup>3</sup>/s και 14.00 m<sup>3</sup>/s. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται, και σε αυτή την περίπτωση, οι αγωγοί που έχουν κρισιμότερες τιμές απορροής. Από τον αγωγό 1802 έως και την έξοδο της λεκάνης στον αγωγό 1621, η απορροή παρουσιάζει αυξημένες τιμές σε σχέση με τους υπόλοιπους αγωγούς, εφόσον στον αγωγό 1802 γίνεται η συμβολή των δύο κλάδων του συστήματος. Έπειτα, στις Εικ. 4.59 έως και Εικ. 4.64, διακρίνεται κατά την στιγμή 00:40 το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621, από το οποίο και συμπεραίνεται ότι:

- Για βροχές με περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών (Εικ. 4.59 - Εικ. 4.61) η ροή και στους πέντε καταληκτικούς αγωγούς του συστήματος γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 25 ετών (Εικ. 4.62), το νερό στους αγωγούς 1802, 1619, 1620 και 1621 ρέει υπό πίεση. Στον αγωγό 1618 η ροή γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια 435226, 434230 και 434231, όμως η πιεζομετρική γραμμή δεν ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου και έτσι δεν παρατηρούνται υπερχειλίσεις των φρεατίων.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 50 ετών (Εικ. 4.63), η ροή στους καταληκτικούς αγωγούς γίνεται αποκλειστικά υπό πίεση. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια, χωρίς όμως, η πιεζομετρική γραμμή να ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου, ακόμα και στο αρχικό φρεάτιο 435226 και έτσι δεν παρατηρούνται υπερχειλίσεις των φρεατίων σε αυτό το τμήμα του δικτύου.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 ετών (Εικ. 4.64), η ροή στους καταληκτικούς αγωγούς γίνεται και πάλι υπό πίεση. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια, χωρίς όμως, η πιεζομετρική γραμμή να ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου σε κανένα φρεάτιο πέραν από το

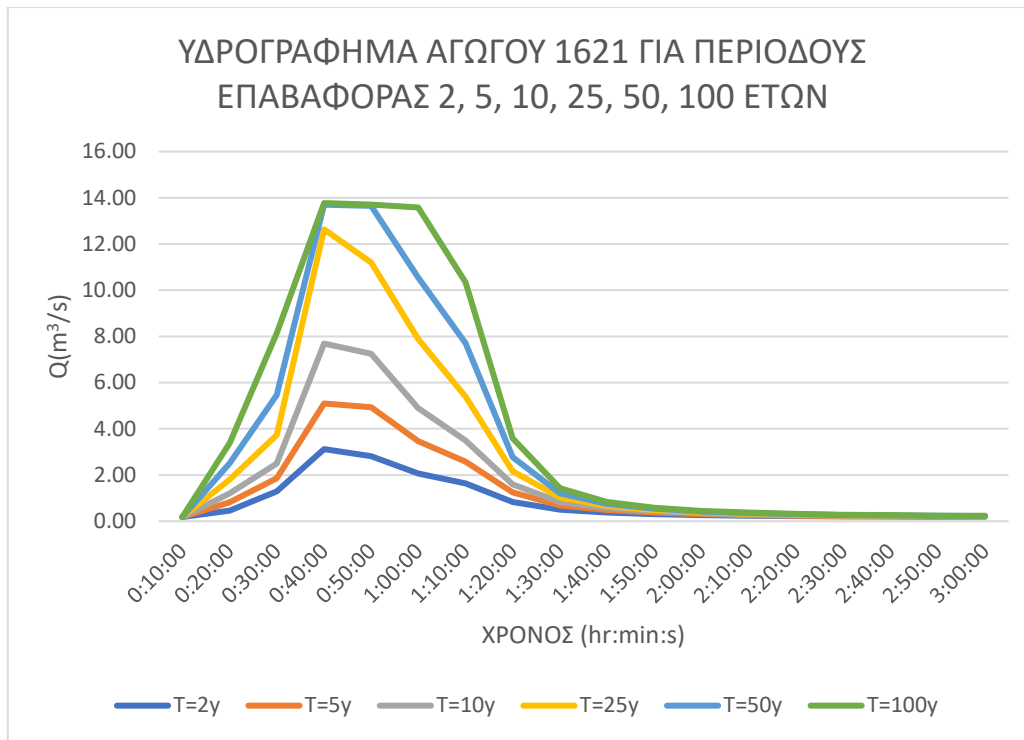
αρχικό 435226 και έτσι παρατηρείται υπερχείλιση του φρεατίου και φαινόμενα δυαδικής ροής.

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών  
- Σενάριο 4

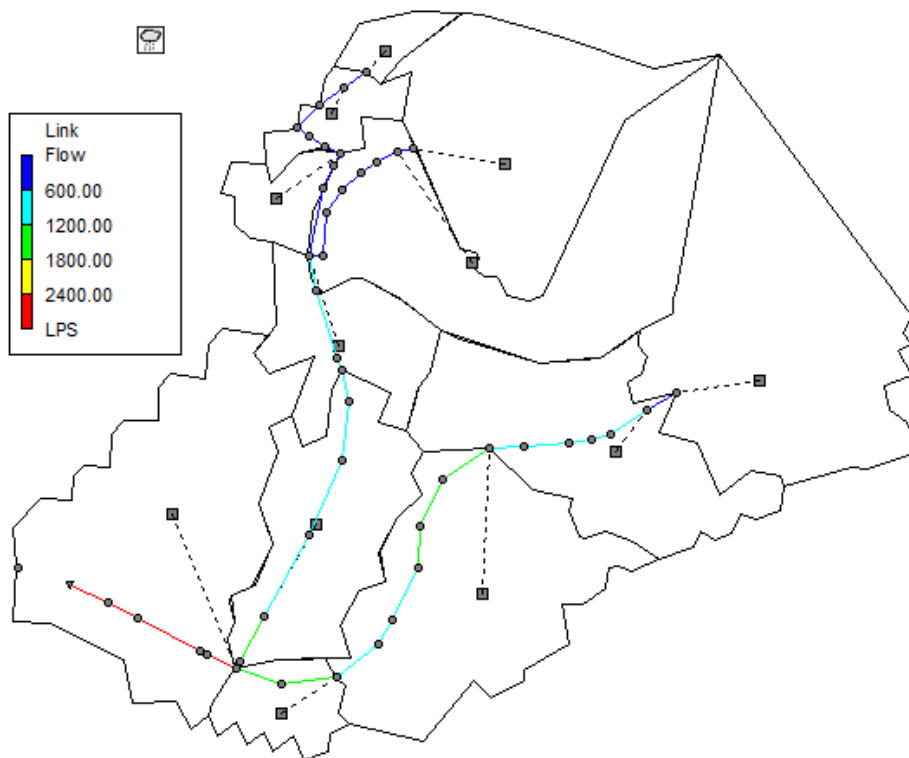
<b>Αποτελέσματα</b>	<b>T=2y</b>	<b>T=5y</b>	<b>T=10y</b>
Βροχόπτωση (mm)	26.790	38.660	51.000
Απώλειες βροχής (mm)	2.140	3.090	3.570
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	3.119	5.094	7.689
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 4

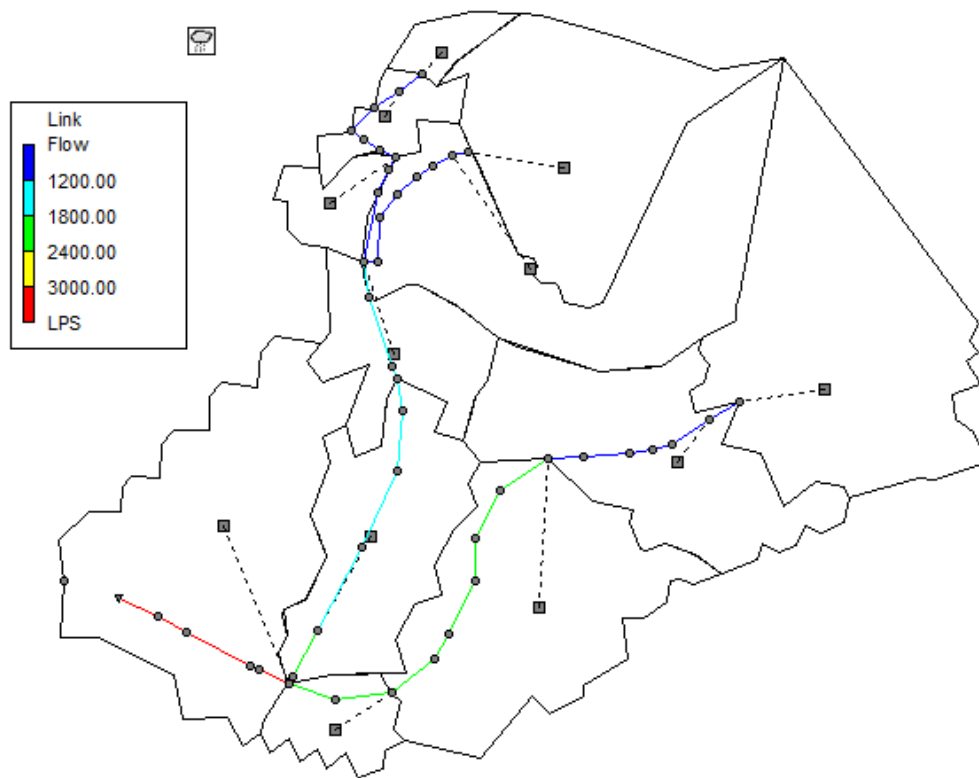
<b>Αποτελέσματα</b>	<b>T=25y</b>	<b>T=50y</b>	<b>T=100y</b>
Βροχόπτωση (mm)	73.580	97.090	128.100
Απώλειες βροχής (mm)	5.150	6.340	9.460
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	12.636	13.700	13.771
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230



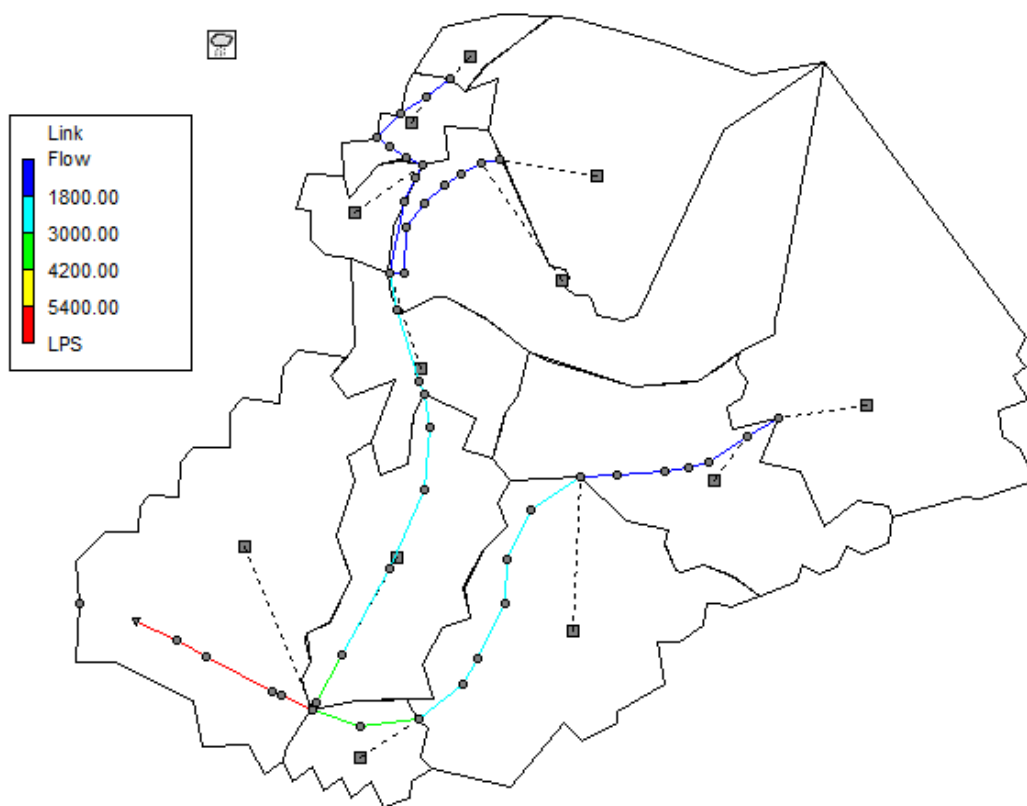
Εικόνα 4.52: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 4



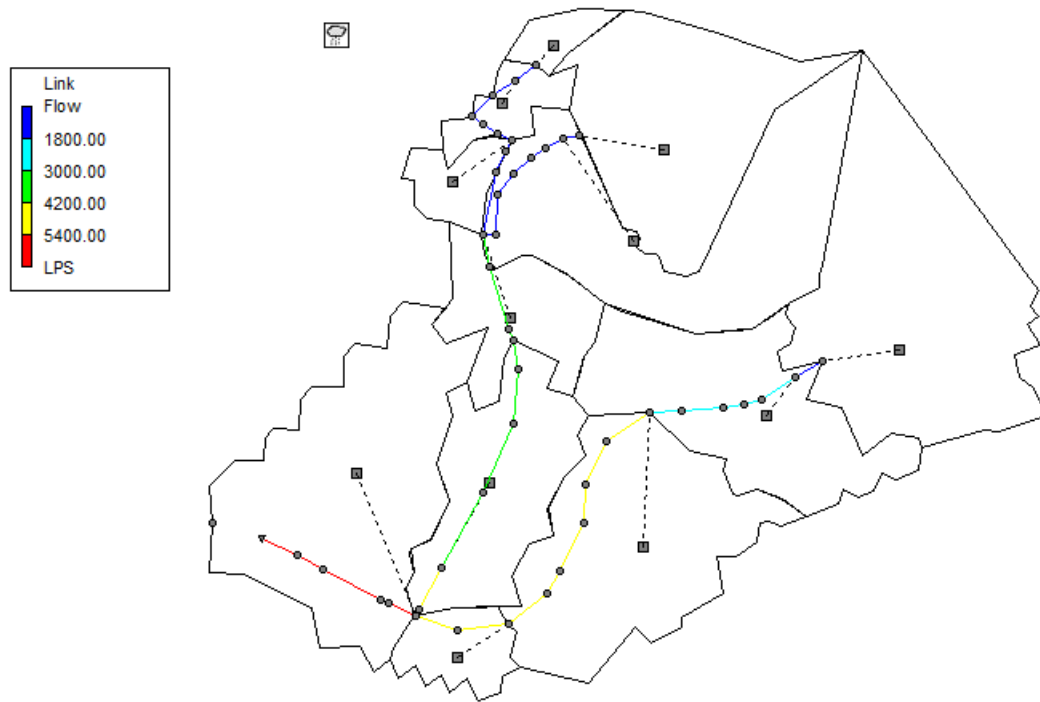
Εικόνα 4.53: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 2 έτη - Σενάριο 4



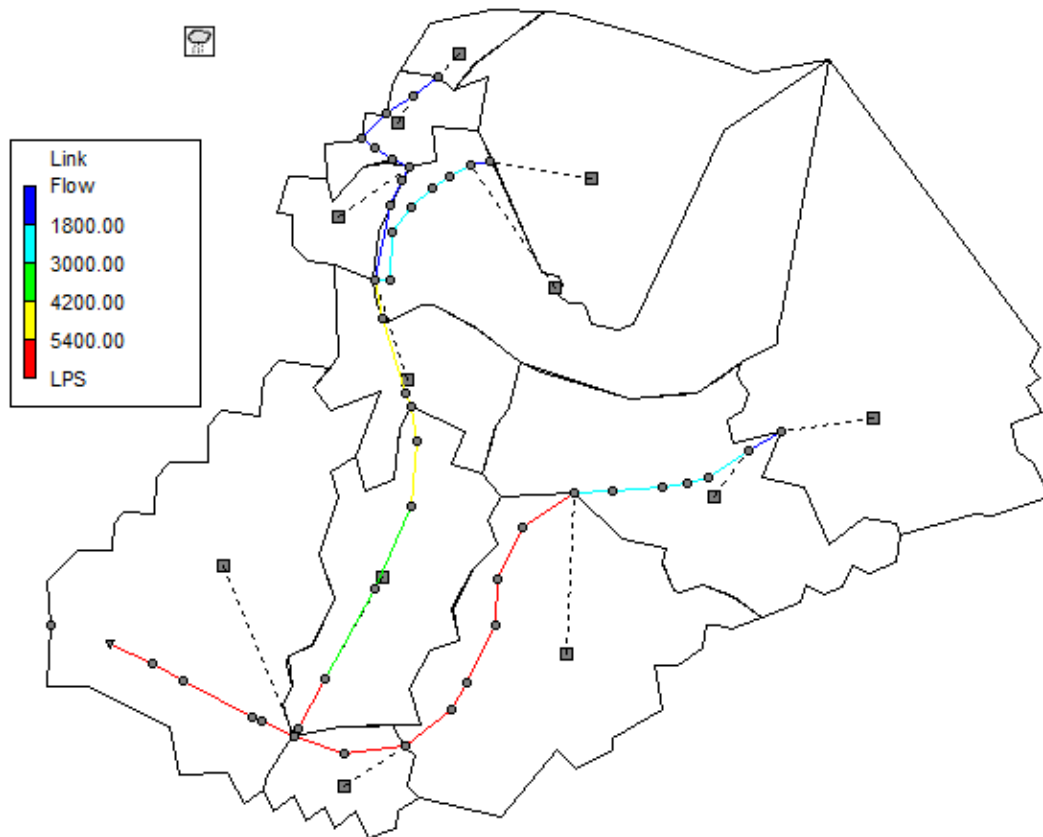
Εικόνα 4.54: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=5$  έτη - Σενάριο 4



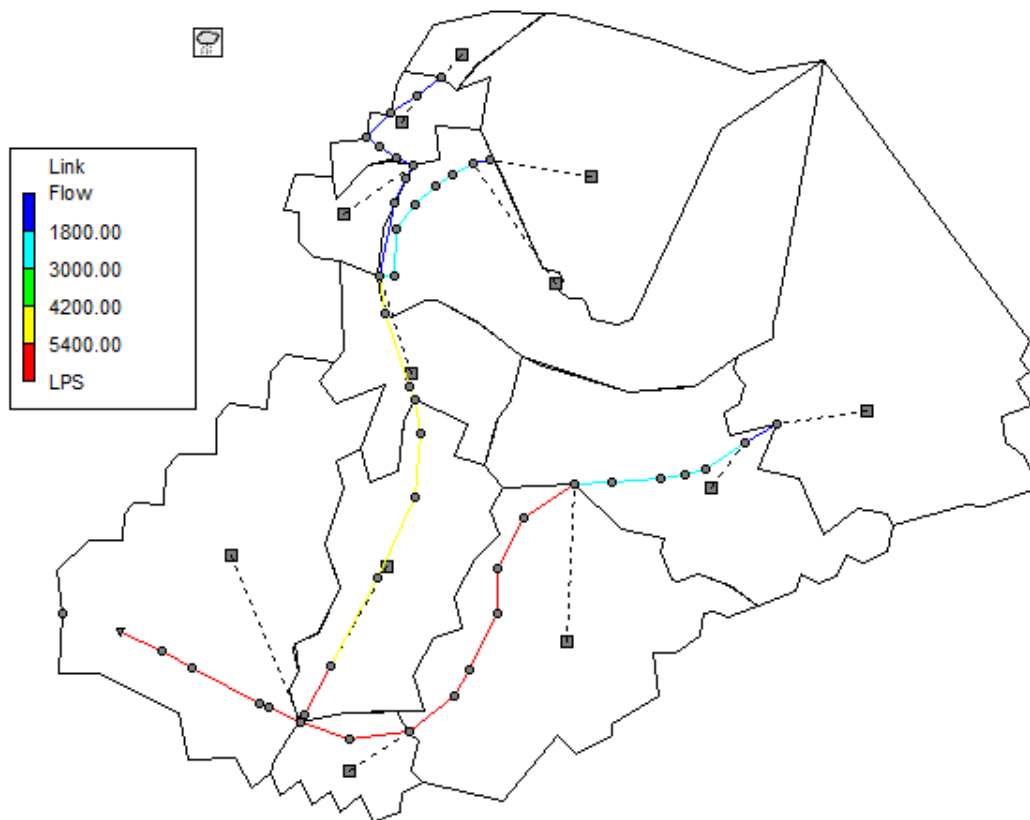
Εικόνα 4.55: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=10$  έτη - Σενάριο 4



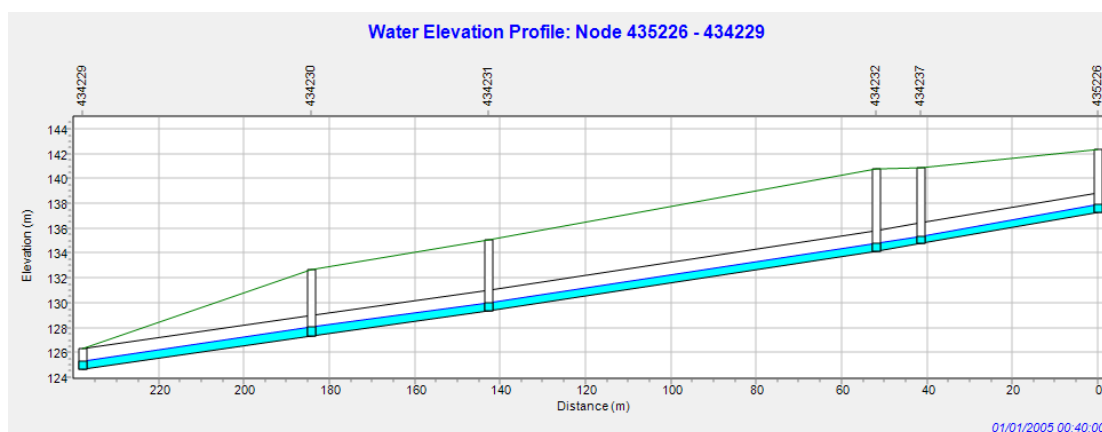
Εικόνα 4.56: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=25$  έτη - Σενάριο 4



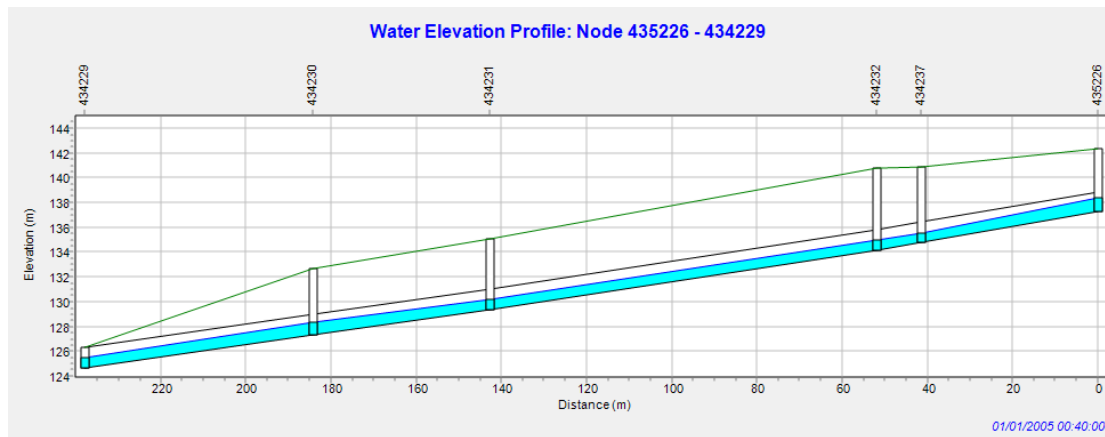
Εικόνα 4.57: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=50$  έτη - Σενάριο 4



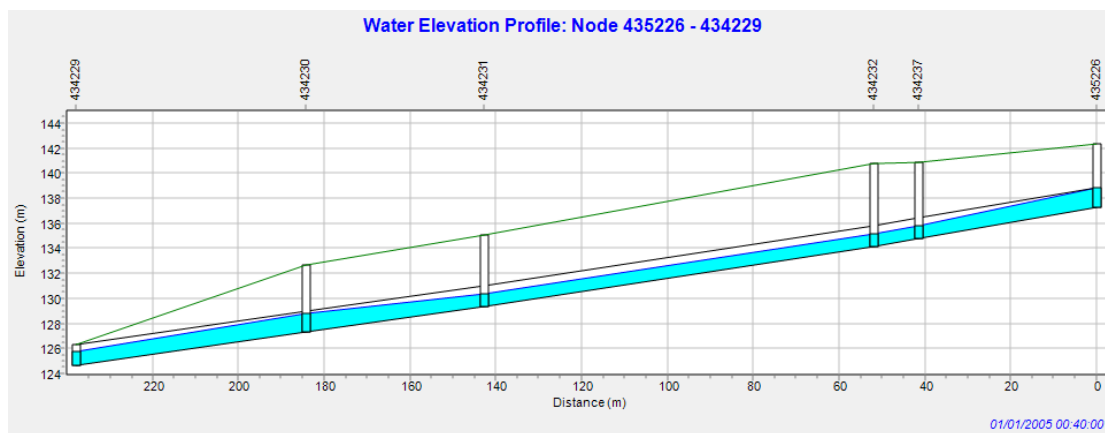
Εικόνα 4.58: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=100$  έτη - Σενάριο 4



Εικόνα 4.59: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.

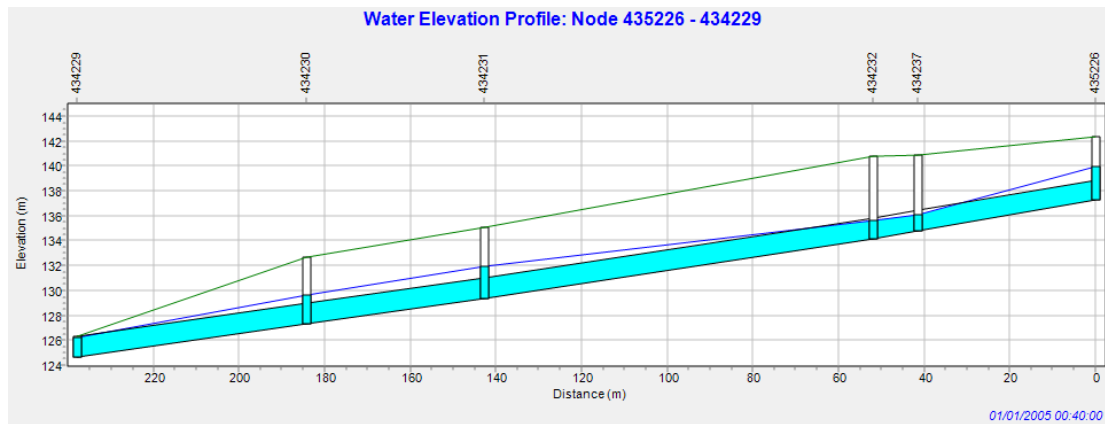


Εικόνα 4.60: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.

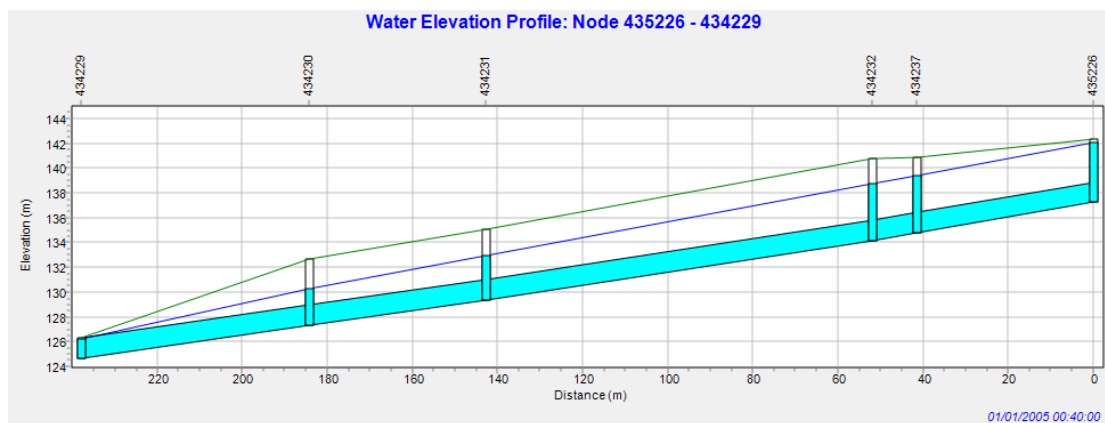


Εικόνα 4.61: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.

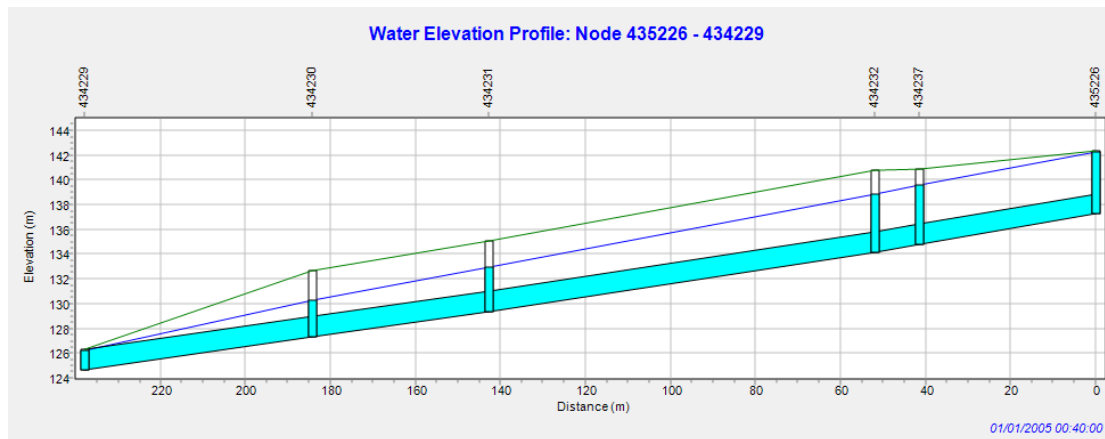




Εικόνα 4.62: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.



Εικόνα 4.63: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.

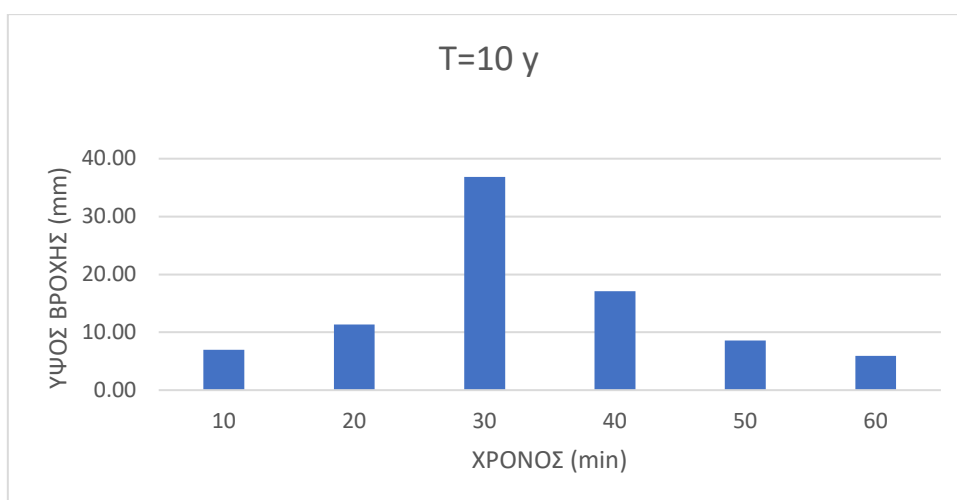


Εικόνα 4.64: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 4.

#### 4.6. Σενάριο 5: Προσομοίωση με χρήση μελλοντικών όμβριων καμπυλών βάσει σεναρίων κλιματικής αλλαγής- πιο συντηρητική πρόβλεψη

Στο Σενάριο 5 χρησιμοποιήθηκε η Εξ. 3.13, η οποία δίνει την πιο συντηρητική/δυσμενή (upper) πρόβλεψη σχετικά με την επιρροή της κλιματικής αλλαγής στην ένταση της βροχής για το έτος 2100. Στην Εικ. 4.65 παρουσιάζεται το υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών. Τα υετογραφήματα για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 25, 50 και 100 χρόνια παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Η παραπάνω κατανομή βροχής (Εικ. 4.65) αποτέλεσε και το αρχικό δεδομένο βροχόπτωσης για την προσομοίωση με το μοντέλο SWMM κατά το Σενάριο 5. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών παρουσιάζονται στους Πιν. 4.11 και Πιν. 4.12, ενώ στην Εικ. 4.66 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του παντοροϊκού δικτύου και συγκεκριμένα στο αγωγό 1621. Το ύψος της βροχόπτωσης σε αυτό το σενάριο είναι ακόμα μεγαλύτερο σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση (Σενάριο 4), κάτι που είναι αναμενόμενο, εφόσον στο παρόν σενάριο εξετάζεται το πιο συντηρητικό/δυσμενές σενάριο.



Εικόνα 4.65: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 5

Έτσι, παρατηρούμε ότι για περίοδο επαναφοράς 2 ετών το ύψος βροχής είναι 42.54 mm, ενώ για αντίστοιχο ύψος βροχής στο Σενάριο 4, θα είχαμε περίοδο επαναφοράς μεγαλύτερη των 5 ετών. Για περίοδο επαναφοράς 100 ετών, προσεγγίζει την τιμή των 240.69 mm, σχεδόν διπλάσια της μέσης πρόβλεψης (Σενάριο 4). Οι απώλειες βροχής, ναί μεν παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές αλλά δεν υπερβαίνουν το 10% της βροχόπτωσης. Επιπλέον, η ισχυρότερη βροχόπτωση παρουσιάζεται μεταξύ 00:20 και 00:30, ενώ η αιχμή του υδρογραφήματος (Εικ. 4.66) ακολουθεί, κατά την χρονική στιγμή 00:40 σε όλες τις περιπτώσεις. Και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται το plateau στην αιχμή των υδρογραφημάτων (για  $T=25$  έως 100 έτη) που υποδεικνύει υπερχειλίση των αγωγών και επιφανειακή ροή στους δύο ανάντη κλάδους του δικτύου. Τέλος, η μέση απορροή ακαθάρτων είναι  $0.23 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Το μέγεθος της απορροής φαίνεται αναλυτικότερα στις Εικ. 4.67 έως και 4.72, όπου και παρουσιάζεται η κατανομή της απορροής σε όλους τους αγωγούς της λεκάνης για τις διάφορες περιόδους επαναφοράς. Μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς συνεπάγονται και μεγαλύτερα ύψη βροχής, οπότε και αυξημένες τιμές απορροής. Για περίοδο επαναφοράς 2 ετών, η αιχμή της απορροής ισούται με  $6.83 \text{ m}^3/\text{s}$ , τιμή υπερδιπλάσια της μέσης πρόβλεψης. Για περίοδο επαναφοράς 100 ετών, η μέγιστη απορροή ισούται με  $13.81 \text{ m}^3/\text{s}$  κατά την χρονική στιγμή 00:40, τιμή στην οποία οι αγωγοί έχουν οδηγηθεί σε πλήρωση. Αυτό είναι ευδιάκριτο και στο υδρογράφημα της Εικ. 4.66, όπου

παρατηρείται σταθεροποίηση της απορροής εντός του αγωγού στην αιχμή. Με κόκκινο χρώμα στις Εικ. 4.67 έως Εικ. 4.72 παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν κρισιμότερες τιμές απορροής. Από τον αγωγό 1802 έως και την έξοδο της λεκάνης στον αγωγό 1621, η απορροή παρουσιάζει αυξημένες τιμές σε σχέση με τους υπόλοιπους αγωγούς, εφόσον στον αγωγό 1802 γίνεται η συμβολή των δύο κλάδων του δικτύου. Έπειτα, στις Εικ. 4.73 έως και Εικ. 4.78, διακρίνεται κατά την στιγμή 00:40 το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621, από το οποίο και συμπεραίνεται ότι:

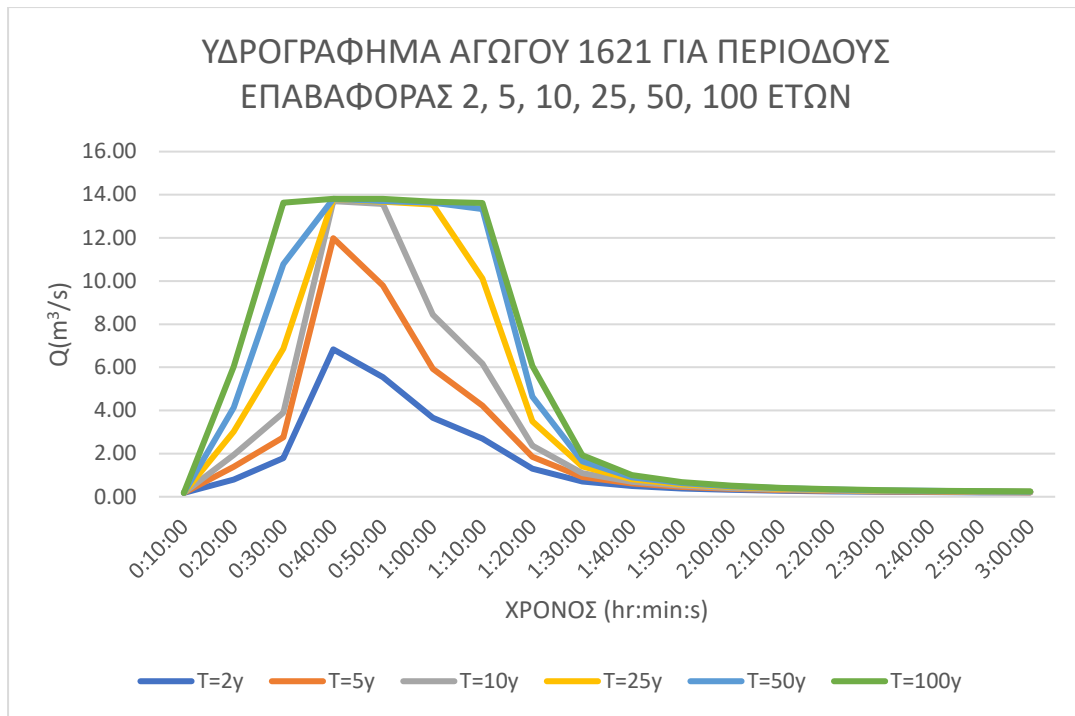
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 2 ετών (Εικ. 4.73) η ροή και στους πέντε καταληκτικούς αγωγούς του συστήματος γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 5 ετών (Εικ. 4.74), το νερό στους αγωγούς 1802, 1620 και 1621 ρέει υπό πίεση. Στους αγωγούς 1618 και 1619 η ροή γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια 435226 και 434230, όμως η πιεζομετρική γραμμή δεν ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου και έτσι δεν παρατηρούνται υπερχειλίσεις των φρεατίων.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 10 ετών (Εικ. 4.75), το νερό στους αγωγούς καταληκτικούς αγωγούς του συστήματος ρέει υπό πίεση. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια, όμως η πιεζομετρική γραμμή δεν ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου, ακόμα και στον αρχικό αγωγό, και έτσι δεν παρατηρούνται υπερχειλίσεις των φρεατίων.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 25 ετών (Εικ. 4.76), η ροή στους καταληκτικούς αγωγούς γίνεται και πάλι υπό πίεση. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια, χωρίς όμως, η πιεζομετρική γραμμή να ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου σε κανένα φρεάτιο πέραν από το αρχικό 435226 και έτσι παρατηρείται υπερχειλίση του συγκεκριμένου φρεατίου και φαινόμενα δυαδικής ροής.
- Για βροχές με περιόδους επαναφοράς 50 και 100 ετών (Εικ. 4.77), το νερό στους αγωγούς ρέει υπό πίεση. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια, χωρίς όμως, η πιεζομετρική γραμμή να ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου σε κανένα φρεάτιο πέραν από το αρχικό 435226. Έτσι, παρατηρείται υπερχειλίση του συγκεκριμένου φρεατίου και το νερό ρέει στον δρόμο.

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών- Σενάριο 5

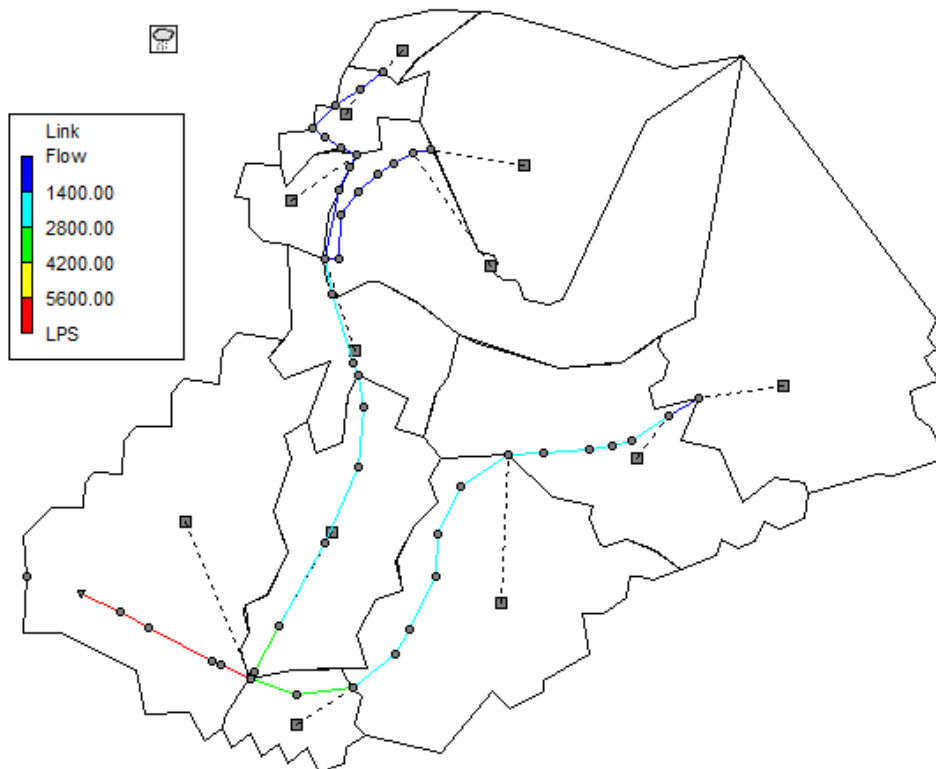
<b>Αποτελέσματα</b>	<b>T=2y</b>	<b>T=5y</b>	<b>T=10y</b>
Βροχόπτωση (mm)	42.540	63.850	86.790
Απώλειες βροχής (mm)	2.970	4.470	6.080
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	6.833	11.986	13.703
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών- Σενάριο 5

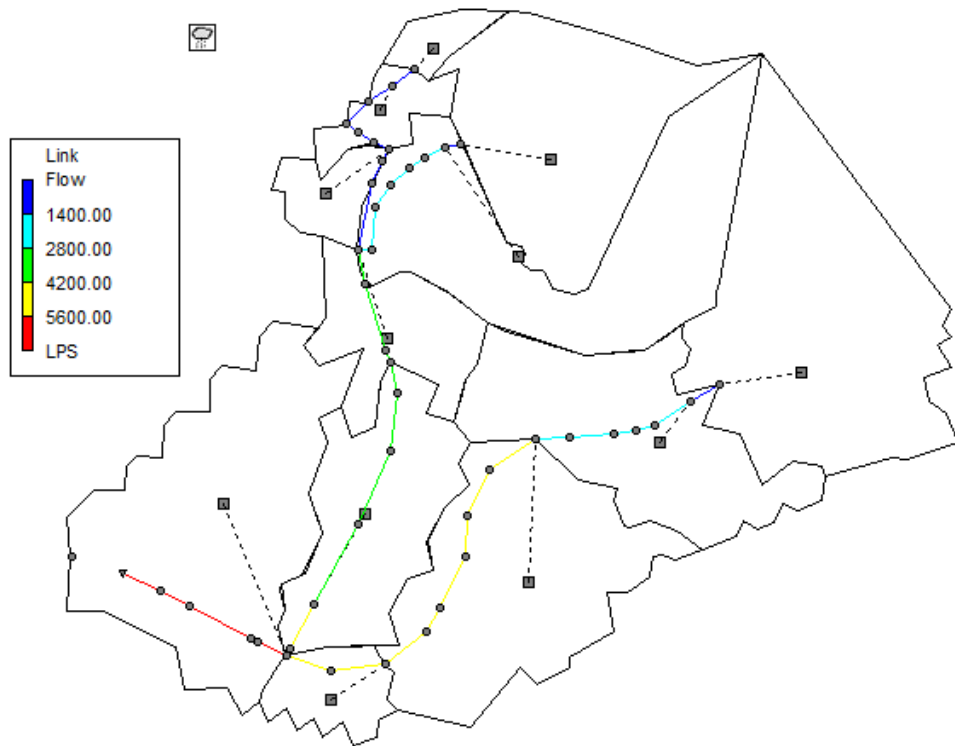
<b>Αποτελέσματα</b>	<b>T=25y</b>	<b>T=50y</b>	<b>T=100y</b>
Βροχόπτωση (mm)	130.250	177.060	240.690
Απώλειες βροχής (mm)	8.760	11.270	15.650
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	13.806	13.809	13.809
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230



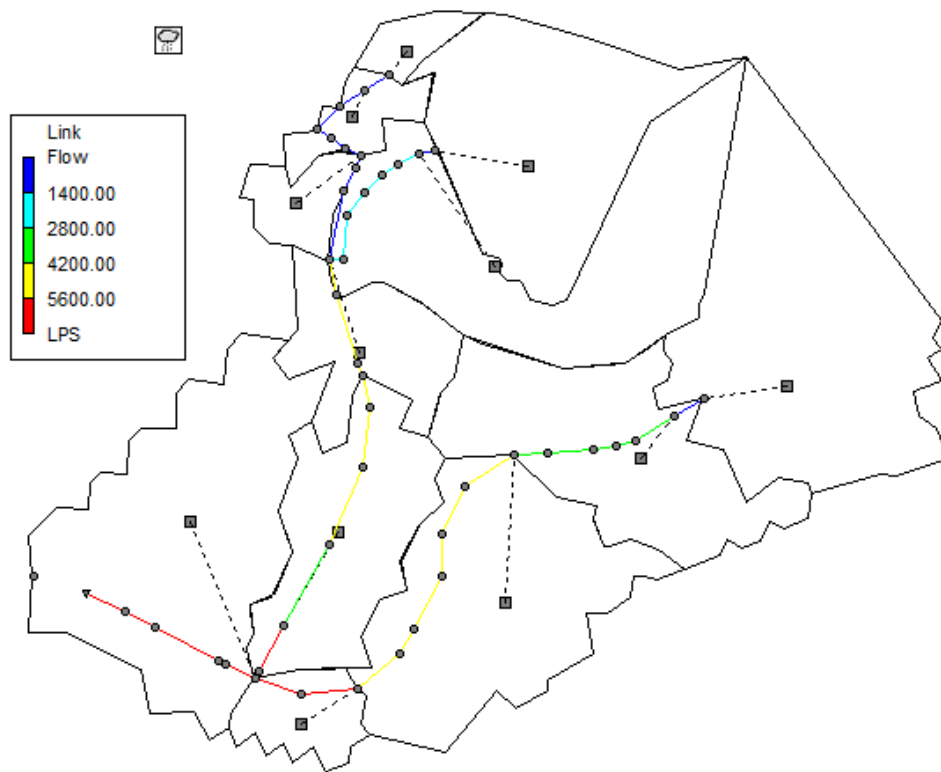
Εικόνα 4.66: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών - Σενάριο 5



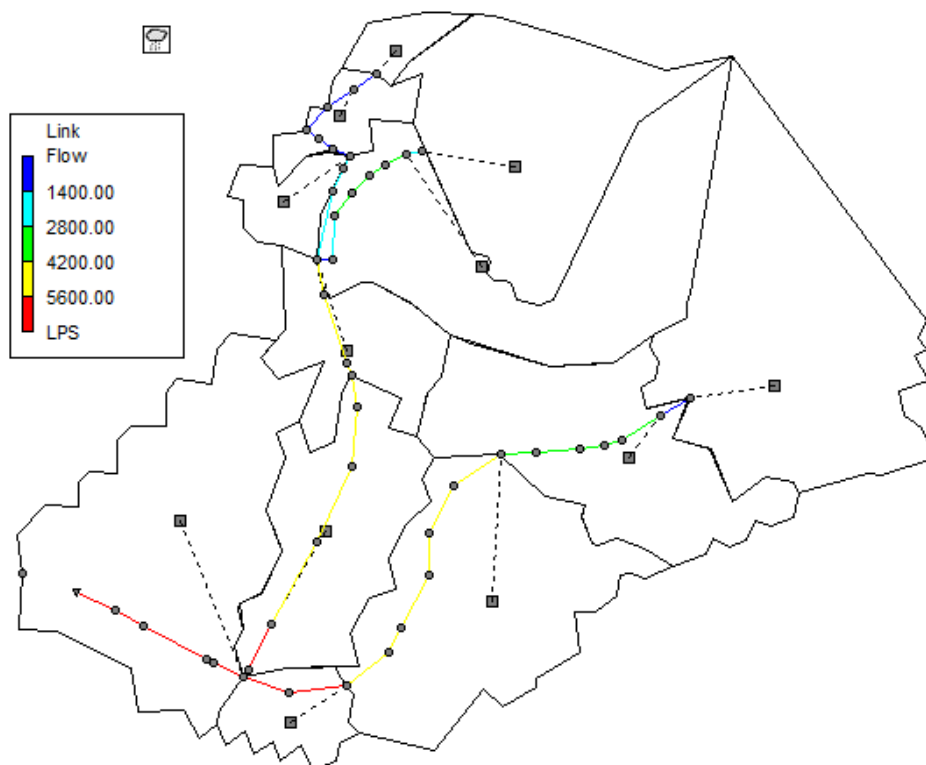
Εικόνα 4.67: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 2 έτη - Σενάριο 5



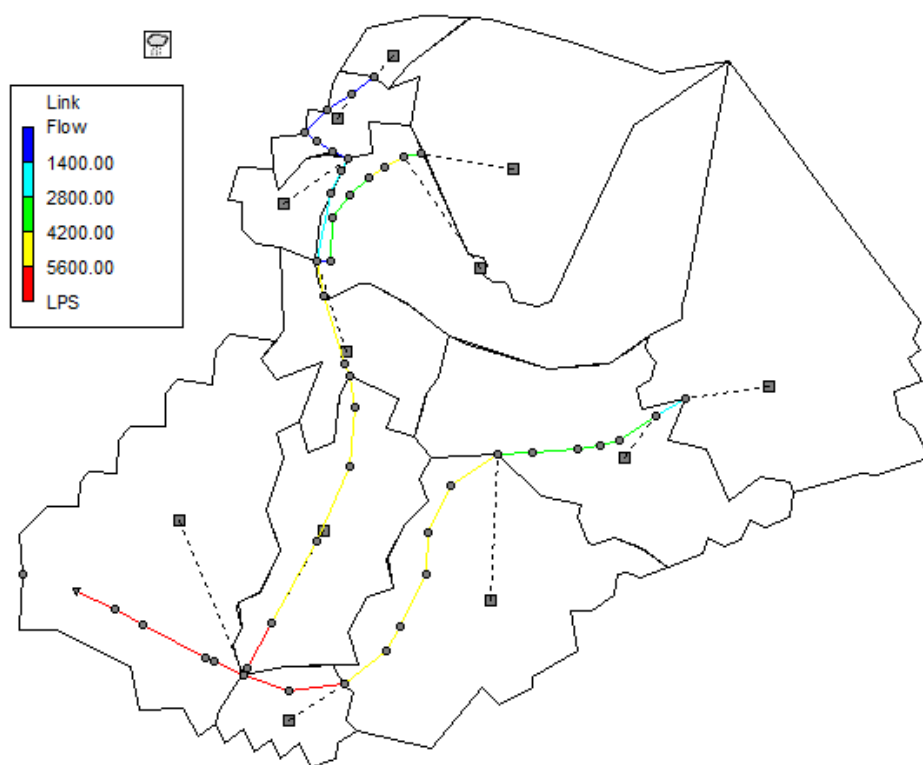
Εικόνα 4.68: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 5 έτη - Σενάριο 5



Εικόνα 4.69: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 10 έτη - Σενάριο 5

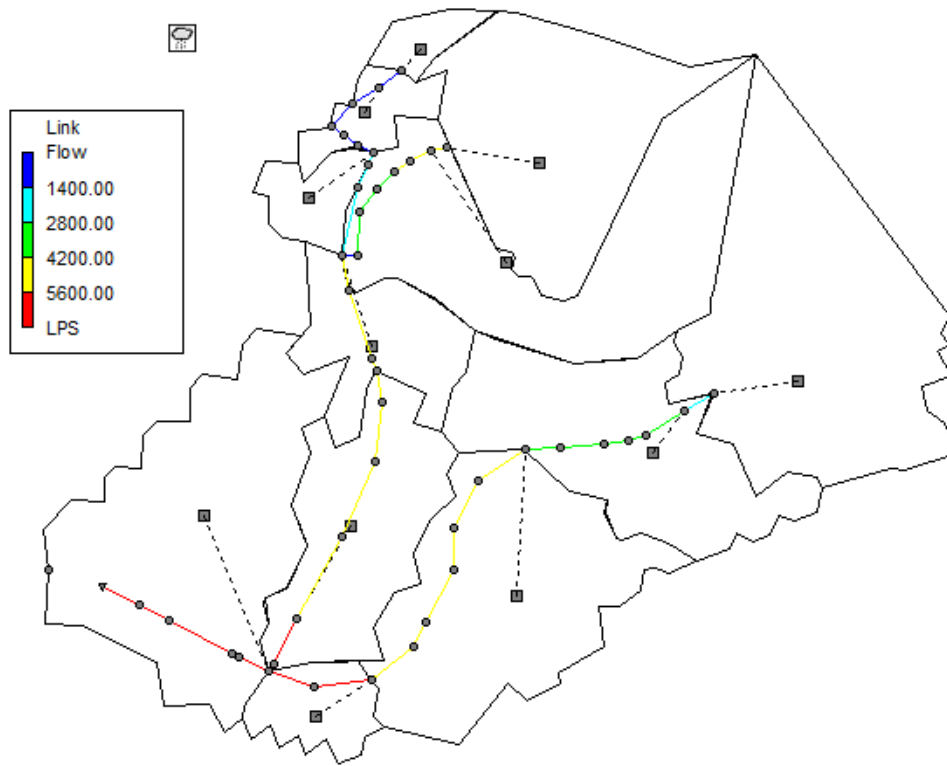


Εικόνα 4.70: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 25 έτη - Σενάριο 5

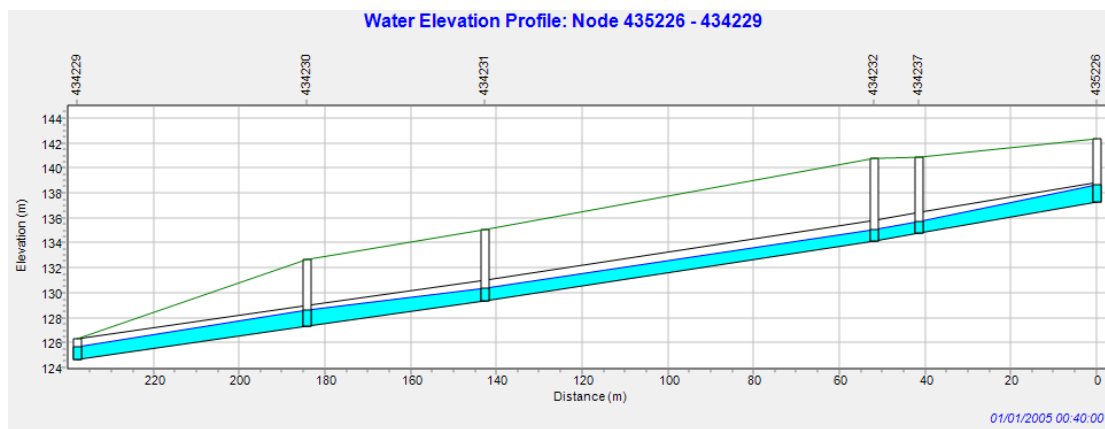


Εικόνα 4.71: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 50 έτη - Σενάριο 5

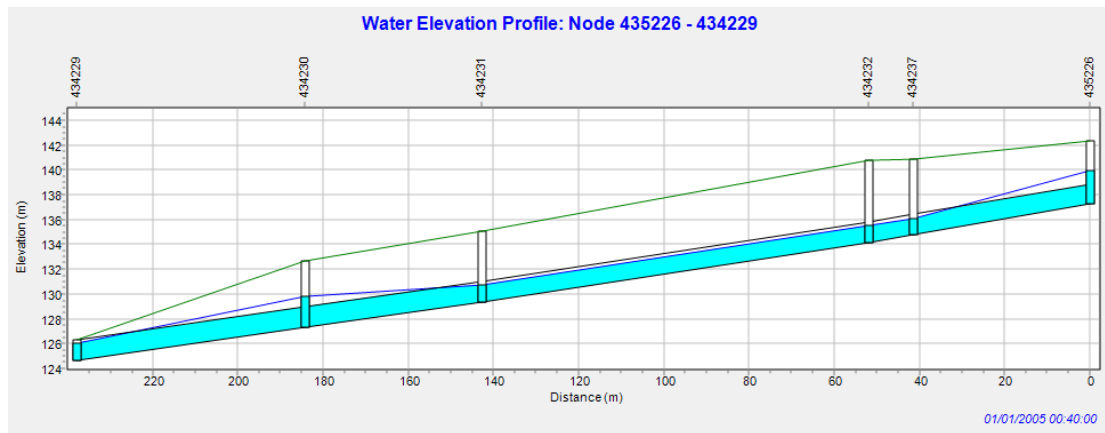




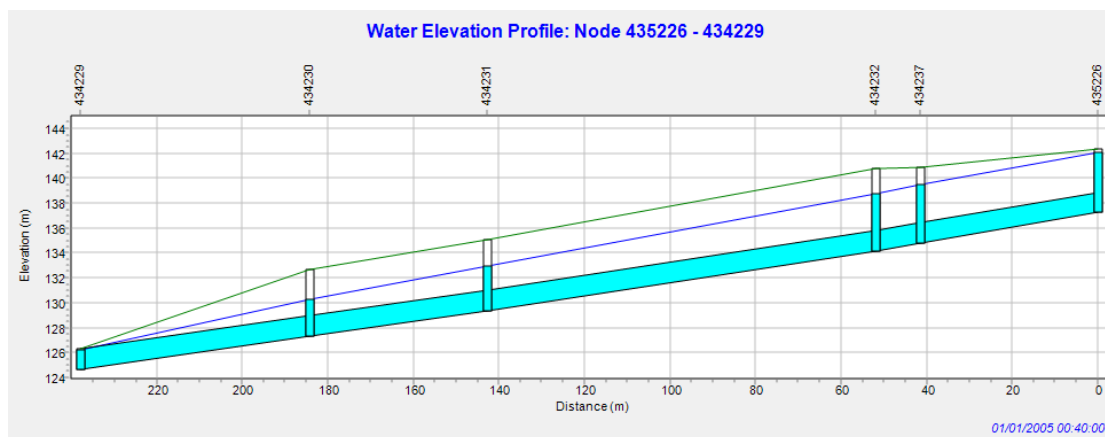
Εικόνα 4.72: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=100$  έτη - Σενάριο 5



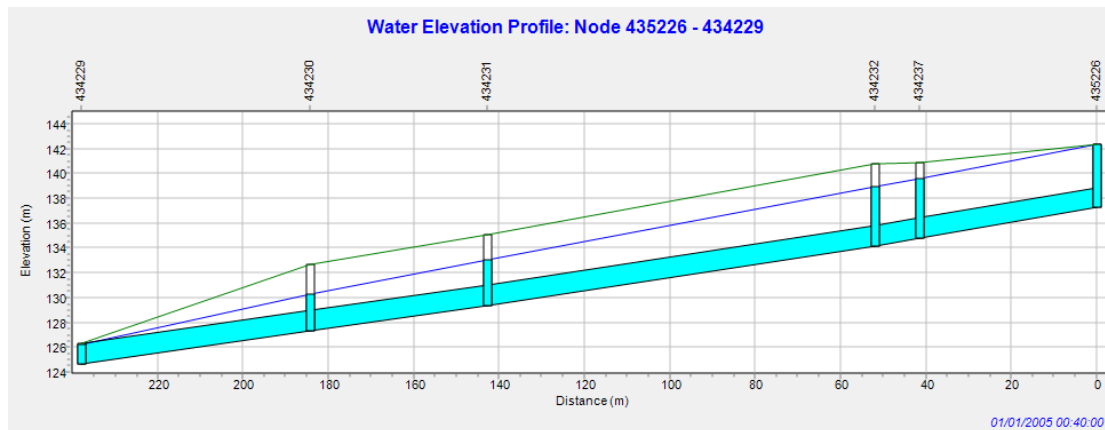
Εικόνα 4.73: Προφίλ αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621 για  $T=2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.



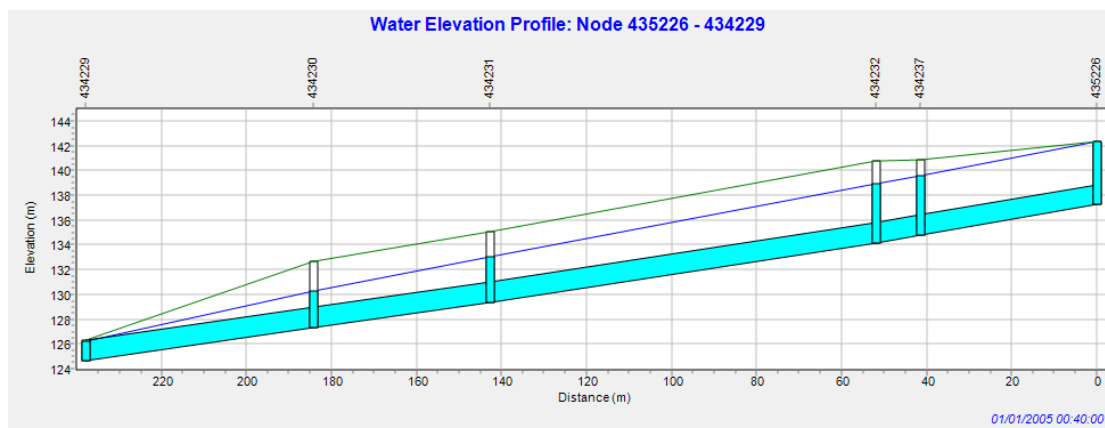
Εικόνα 4.74: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.



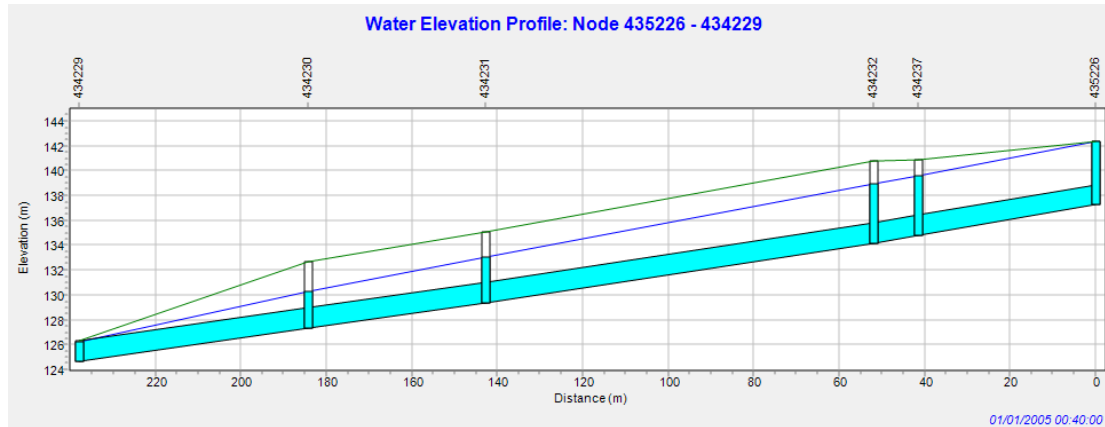
Εικόνα 4.75: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.



Εικόνα 4.76: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.



Εικόνα 4.77: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.

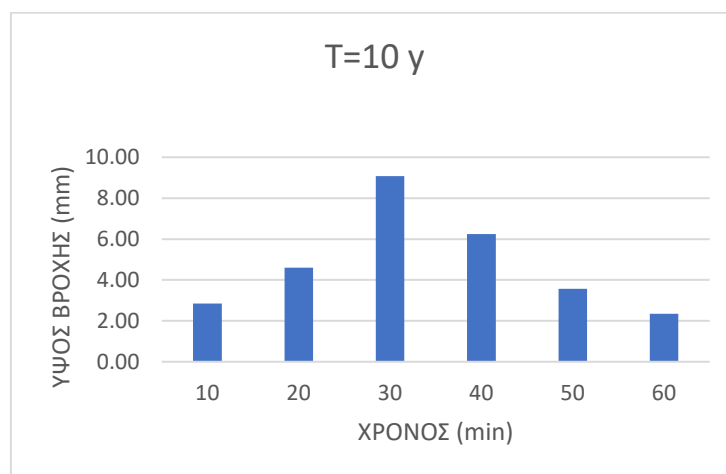


Εικόνα 4.78: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 5.

#### 4.7. Σενάριο 6: Προσομοίωση με χρήση μελλοντικών όμβριων

καμπυλών βάσει σεναρίων κλιματικής αλλαγής- ευνοϊκότερη πρόβλεψη

Στο τελευταίο σενάριο (Σενάριο 6) που έγινε χρήση ομβρίων καμπυλών για την παραγωγή δεδομένων βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκε η (Εξ. 3.14), η οποία δίνει την λιγότερο συντηρητική (lower) πρόβλεψη σχετικά με την επιρροή της κλιματικής αλλαγής στην ένταση της βροχής για το έτος 2100. Στην Εικ. 4.79 παρουσιάζεται το υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών. Τα υετογραφήματα για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 25, 50 και 100 χρόνια παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.



Εικόνα 4.79: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 10 ετών - Σενάριο 6

Η παραπάνω κατανομή βροχής (Εικ. 4.79) αποτέλεσε και την κατανομή βροχόπτωσης που επιλέχθηκε κατά το Σενάριο 6. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών παρουσιάζονται στους Πιν. 4.13 και Πιν. 4.14, ενώ στην Εικ. 4.80 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του παντοροϊκού δικτύου και συγκεκριμένα στο αγωγό 1621. Το ύψος της βροχόπτωσης σε αυτό το σενάριο είναι μικρότερο σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις που αφορούσαν την μέση και την πιο συντηρητική πρόβλεψη (Σενάρια 4 και 5). Συγκεκριμένα, για περίοδο επαναφοράς 2 ετών το ύψος βροχής είναι 16.06 mm, τιμή που είναι και η χαμηλότερη που έχει παρατηρηθεί και στα 6 πρώτα σενάρια. Για περίοδο επαναφοράς 100 ετών, η βροχόπτωση διάρκειας 1 h έχει ύψος 65.90 mm, τιμή που στο Σενάριο 5 αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς λίγο μεγαλύτερη των 5 ετών. Οι απώλειες βροχής, και σε αυτή την περίπτωση, δεν υπερβαίνουν το 10% της απορροής. Επιπλέον, η ισχυρότερη βροχόπτωση παρουσιάζεται μεταξύ 00:20 και 00:30, ενώ η αιχμή του υδρογραφήματος (Εικ. 4.80) ακολουθεί κατά την χρονική στιγμή 00:40 σε όλες τις περιπτώσεις. Τέλος, η μέση απορροή ακαθάρτων ανέρχεται σε 0.23 m<sup>3</sup>/s.

Το μέγεθος της απορροής φαίνεται αναλυτικότερα στις Εικ. 4.81 έως και 4.86, όπου και παρουσιάζεται η κατανομή της απορροής σε όλους τους αγωγούς της λεκάνης για τις διάφορες περιόδους επαναφοράς. Όσο μεγαλύτερη είναι μια περίοδος επαναφοράς για μία βροχόπτωση, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η απορροή που θα προκληθεί από αυτήν. Για περίοδο επαναφοράς 2 ετών η αιχμή της απορροής συναντάται στα 1.67 m<sup>3</sup>/s, τιμή σημαντικά χαμηλότερη της μέσης πρόβλεψης. Για περίοδο επαναφοράς 100 ετών η μέγιστη απορροή ισούται με 9.85 m<sup>3</sup>/s κατά την χρονική στιγμή 00:40, τιμή για την οποία δεν πληρούνται οι αγωγοί. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν κρισιμότερες τιμές απορροής. Από τον αγωγό 1802 έως και την έξοδο της λεκάνης στον αγωγό 1621, η απορροή παρουσιάζει αυξημένες τιμές σε σχέση με τους υπόλοιπους αγωγούς, εφόσον στον αγωγό 1802 γίνεται η συμβολή των δύο κλάδων του συστήματος. Έπειτα, στις Εικ. 4.87 έως και Εικ. 4.92, παρουσιάζεται κατά την στιγμή 00:40 το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621, από το οποίο και συμπεραίνεται ότι:

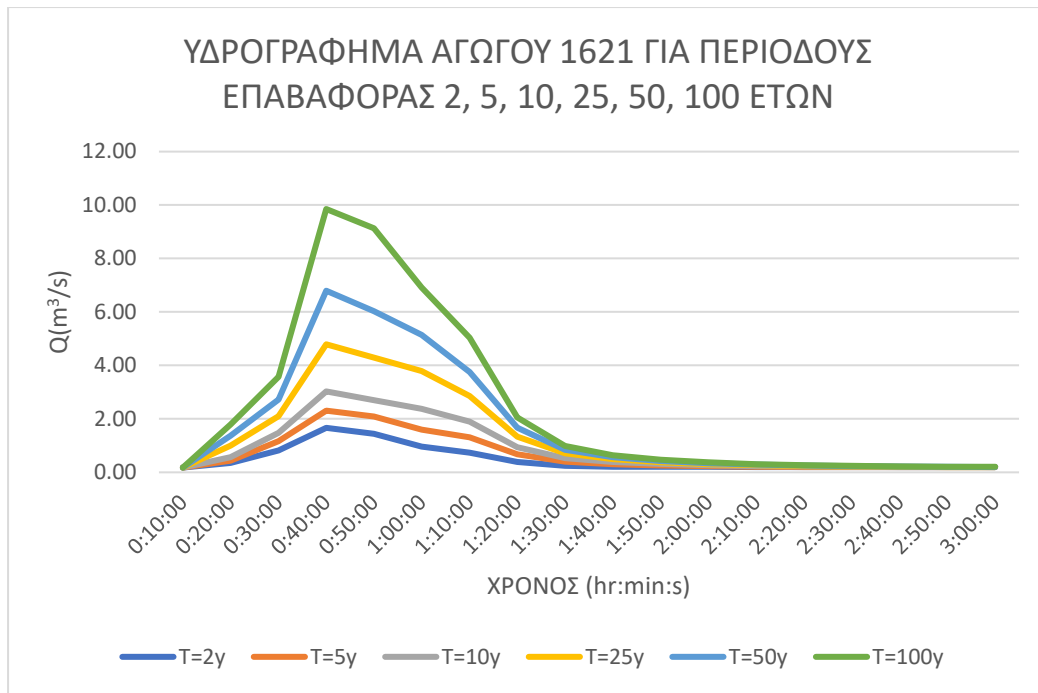
- Για βροχές με περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10 και 25 και 50 ετών (Εικ. 4.87 – Εικ. 4.91) η ροή και στους πέντε καταληκτικούς αγωγούς του συστήματος γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια.
- Για βροχή με περίοδο επαναφοράς 100 ετών (Εικ. 4.92), το νερό στους αγωγούς 1802, 1620 και 1621 ρέει, σχεδόν αποκλειστικά υπό πίεση. Στους αγωγούς 1618 και 1619 η ροή γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια. Παράλληλα, παρατηρείται η άνοδος της στάθμης του νερού στα φρεάτια 435226 και 434230 όμως η πιεζομετρική γραμμή δεν ξεπερνά την επιφάνεια του δρόμου και έτσι δεν παρατηρούνται υπερχειλίσεις του φρεατίου.

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 2, 5 και 10 ετών- Σενάριο 6

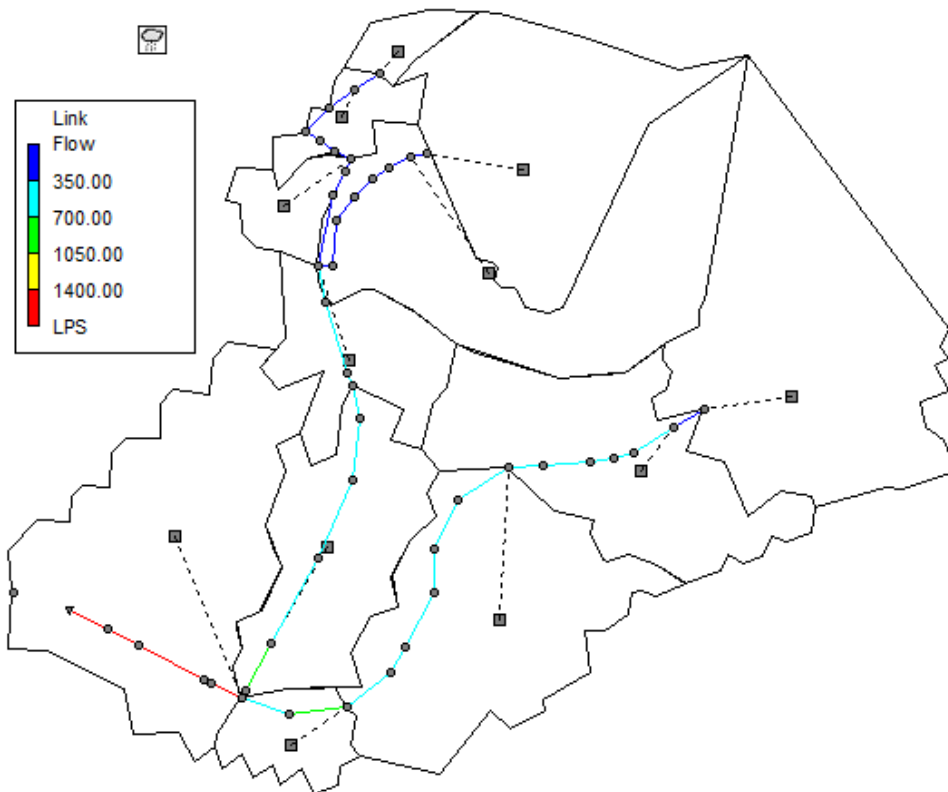
<b>Αποτελέσματα</b>	<b>T=2y</b>	<b>T=5y</b>	<b>T=10y</b>
Βροχόπτωση (mm)	16.060	22.350	28.700
Απώλειες βροχής (mm)	1.280	1.760	2.000
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	1.665	2.308	3.028
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230

Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα προσομοίωσης για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 ετών- Σενάριο 6

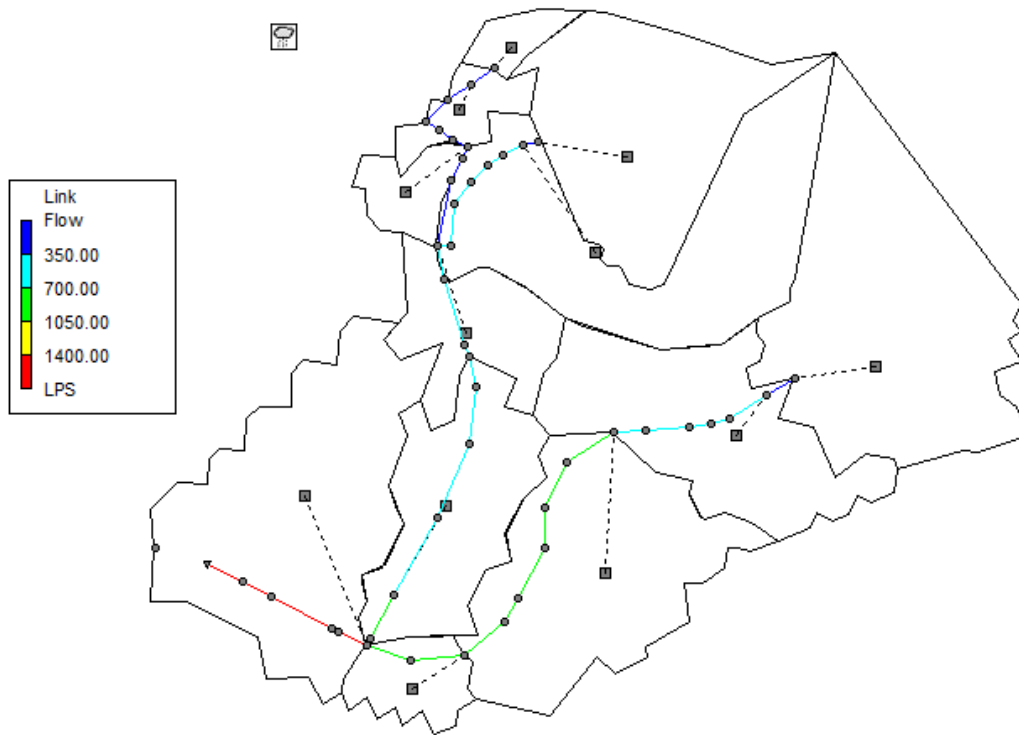
<b>Αποτελέσματα</b>	<b>T=25y</b>	<b>T=50y</b>	<b>T=100y</b>
Βροχόπτωση (mm)	39.950	51.310	65.900
Απώλειες βροχής (mm)	2.790	3.540	4.610
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	4.791	6.795	9.852
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230	0.230	0.230



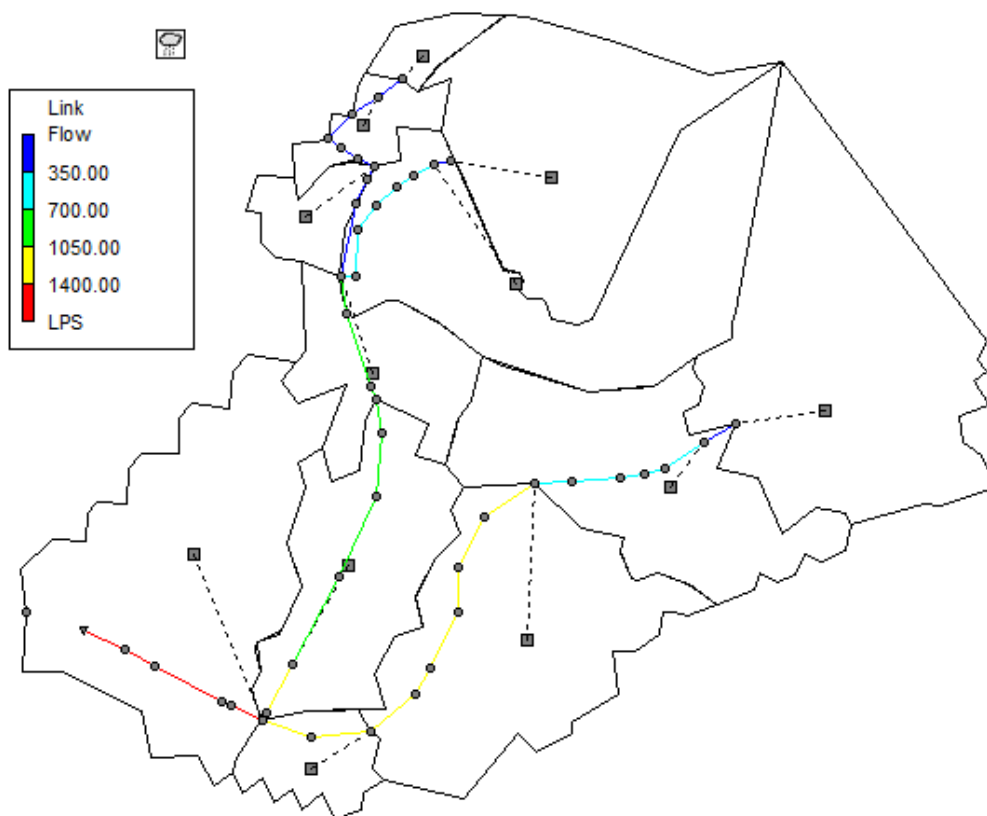
Εικόνα 4.80: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών- Σενάριο 6



Εικόνα 4.81: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 2 έτη - Σενάριο 6

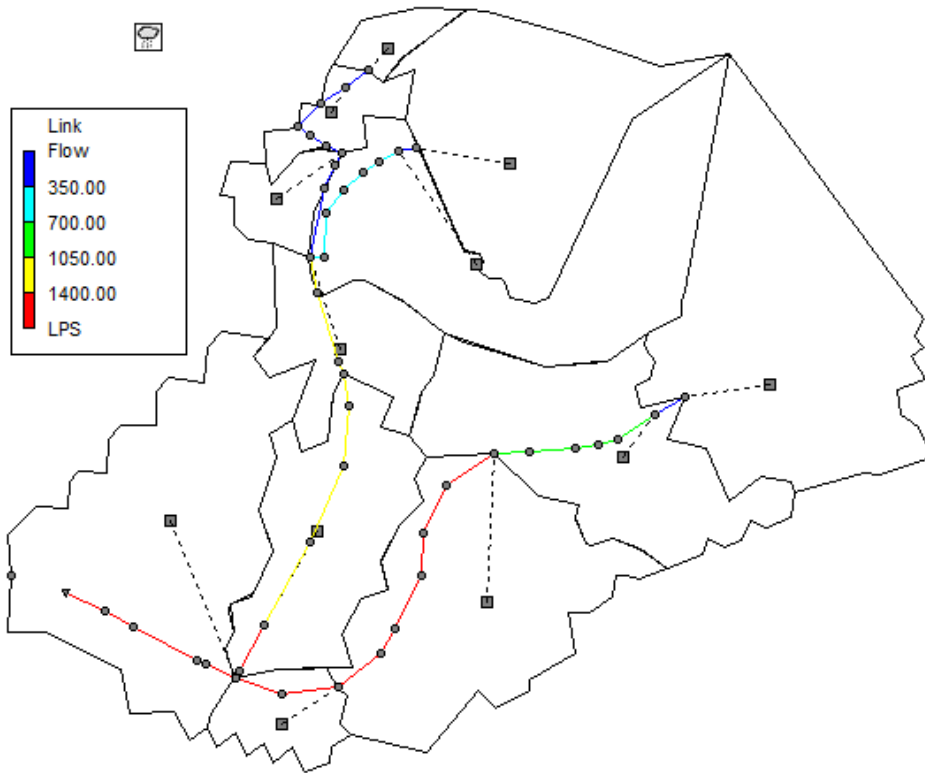


Εικόνα 4.82: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 5 έτη - Σενάριο 6

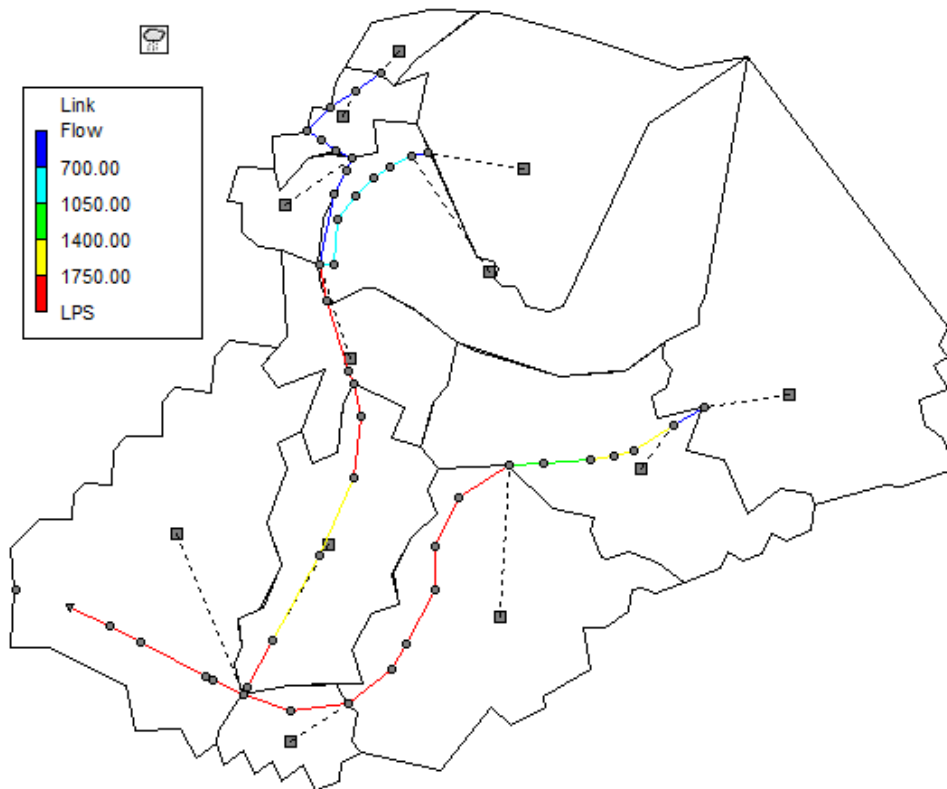


Εικόνα 4.83: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για T= 10 έτη - Σενάριο 6

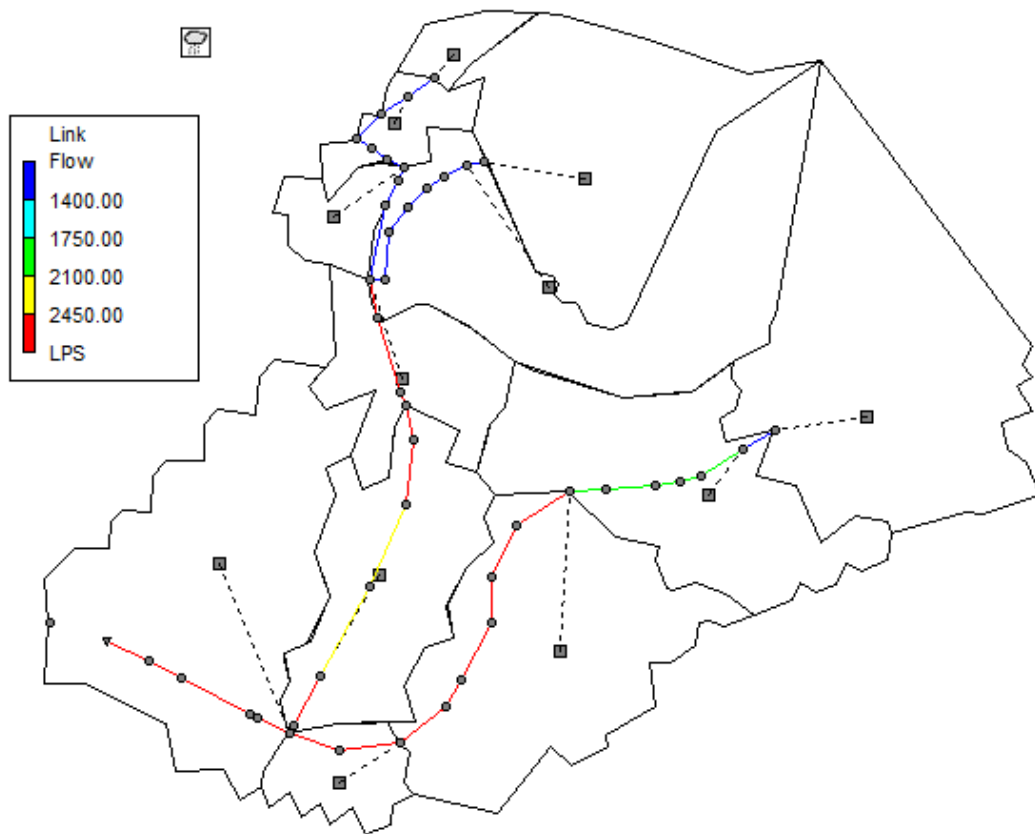




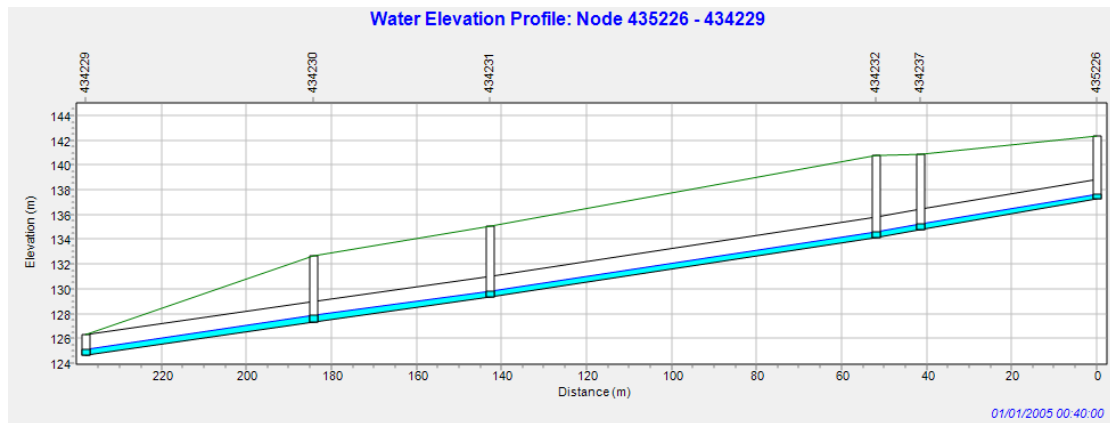
Εικόνα 4.84: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=25$  έτη - Σενάριο 6



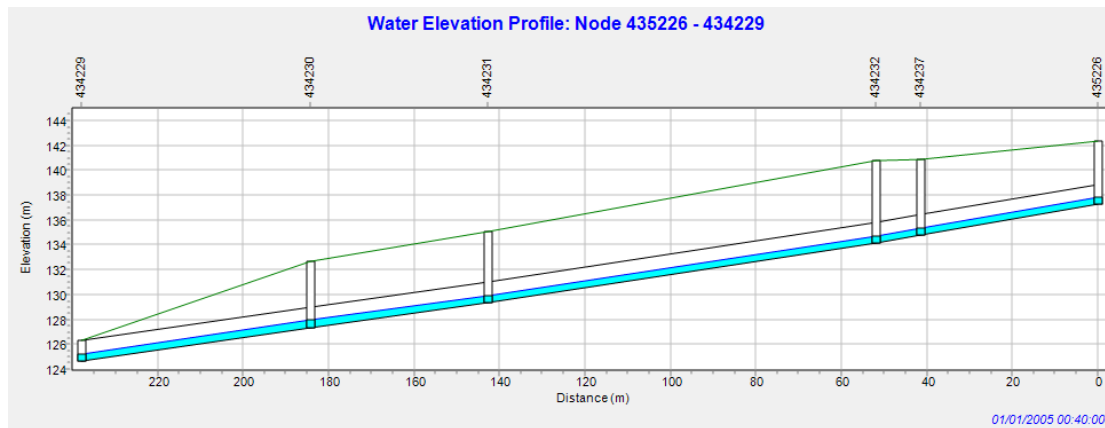
Εικόνα 4.85: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=50$  έτη - Σενάριο 6



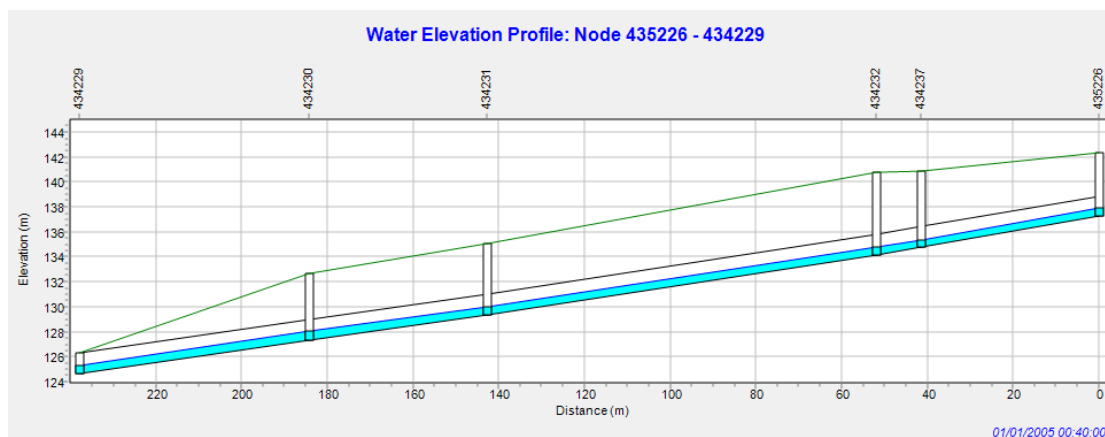
Εικόνα 4.86: Η απορροή στους αγωγούς κατά την αιχμή για  $T=100$  έτη - Σενάριο 6



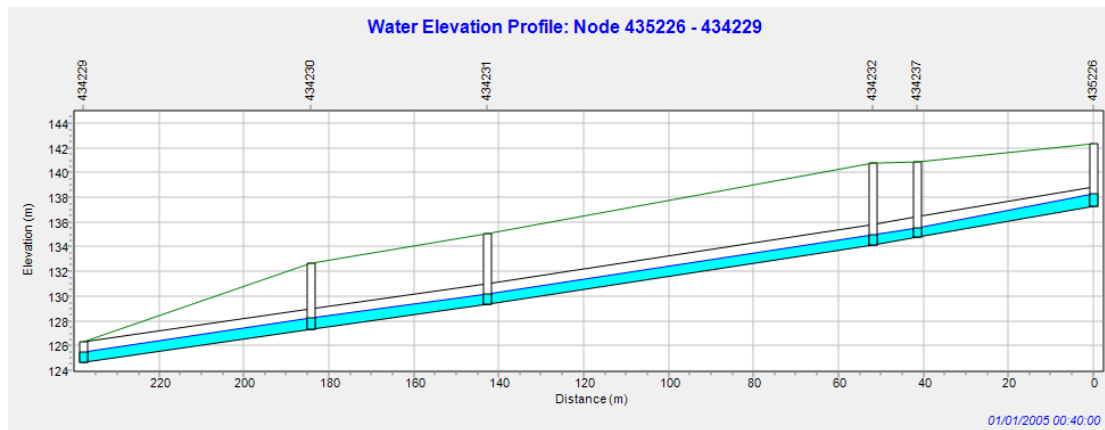
Εικόνα 4.87: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T=2$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.



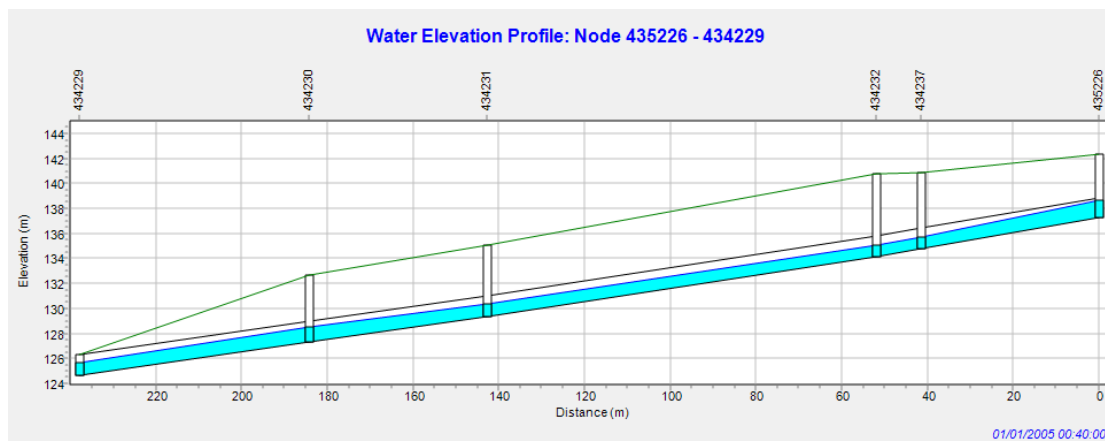
Εικόνα 4.88: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 5$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.



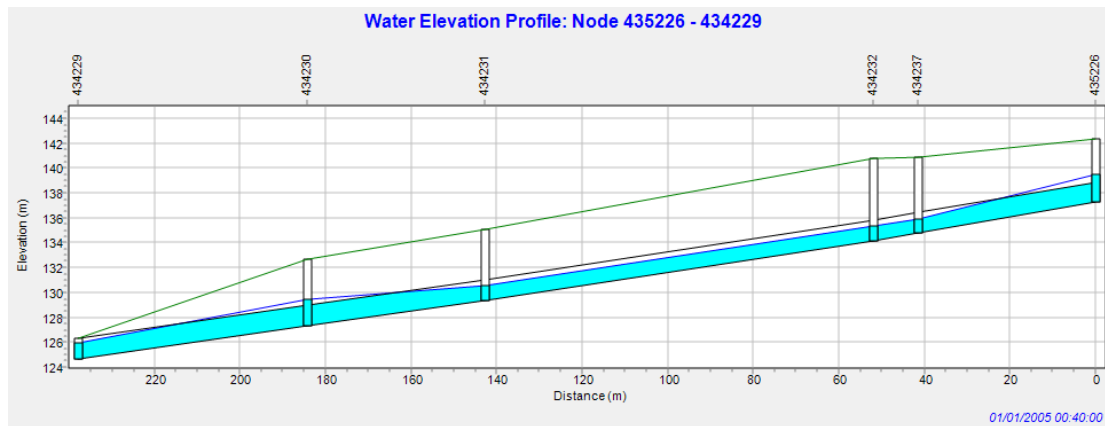
Εικόνα 4.89: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 10$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.



Εικόνα 4.90: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 25$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.



Εικόνα 4.91: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 50$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.



Εικόνα 4.92: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για  $T= 100$  έτη κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 6.

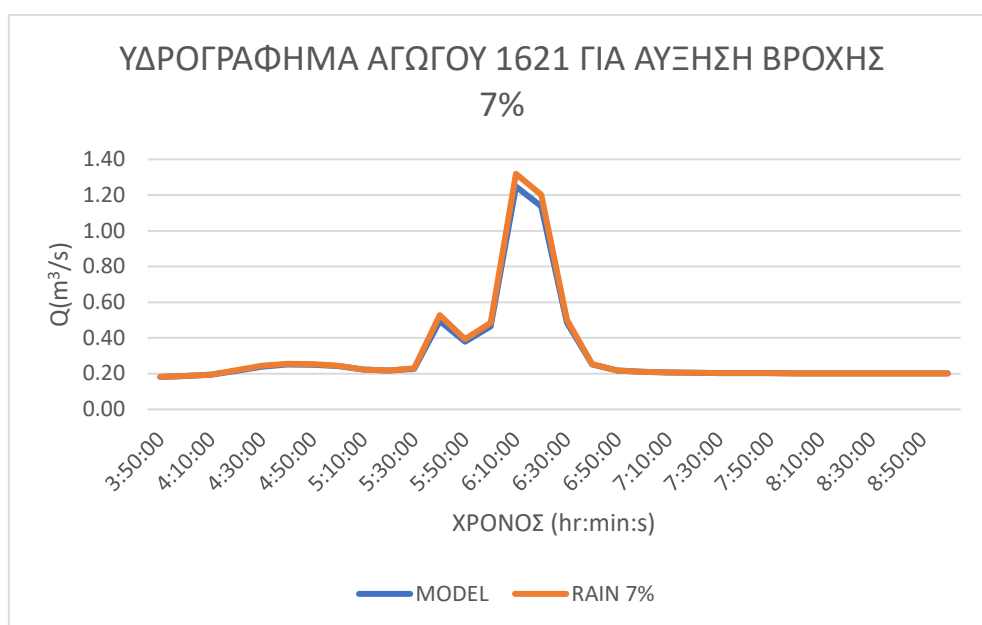
#### 4.8. Σενάριο 7: Προσομοίωση για μεγαλύτερα επεισόδια βροχής- αύξηση βροχής κατά 7%

Η παρούσα ομάδα σεναρίων αφορούσε στο ενδεχόμενο ύπαρξης μεγαλύτερων επεισοδίων βροχής από αυτό της 1/1/2005, το οποίο αποτέλεσε και δεδομένο εισόδου στην αρχική προσομοίωση και βαθμονόμηση του μοντέλου. Προς αυτό τον σκοπό, λοιπόν, εξετάστηκε το ενδεχόμενο γραμμικής αύξησης των δεδομένων βροχής. Συγκεκριμένα, στο Σενάριο 7 μελετήθηκε το ενδεχόμενο ύπαρξης ενός επεισοδίου βροχής κατά 7% μεγαλύτερο της αρχικής βροχής, δηλαδή για συνολικό ύψος βροχής ίσο με 12.41 mm. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πιν. 4.15, ενώ το υδρογράφημα εξόδου του αγωγού για αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται στην Εικ. 4.93. Οι απώλειες βροχής και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζουν χαμηλές τιμές, ίσες περίπου με το 8% της κατακρήμνισης, ενώ αναφορικά με τα ακάθαρτα η μέση τιμή παραμένει σταθερή. Παράλληλα, από το υδρογράφημα της Εικ. 4.93 συμπεραίνουμε ότι οι αιχμές του βαθμονομημένου μοντέλου και του παρόντος σεναρίου βρίσκονται αρκετά κοντά, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των Πιν. 4.2 και Πιν. 4.15. Ο έλεγχος Student t-test που έγινε με την βοήθεια του λογισμικού Excel στο τέλος της προσομοίωσης και ανάμεσα στις απορροές του βαθμονομημένου μοντέλου και του παρόντος σεναρίου έδειξε μη σημαντικές στατιστικά αλλαγές για το μέγεθος των

απορροών. Συγκεκριμένα, η τιμή p-value ισούται με 45.21%, τιμή πολύ μεγαλύτερη του ορίου εμπιστοσύνης 5% που χρησιμοποιήθηκε κατά την μελέτη.

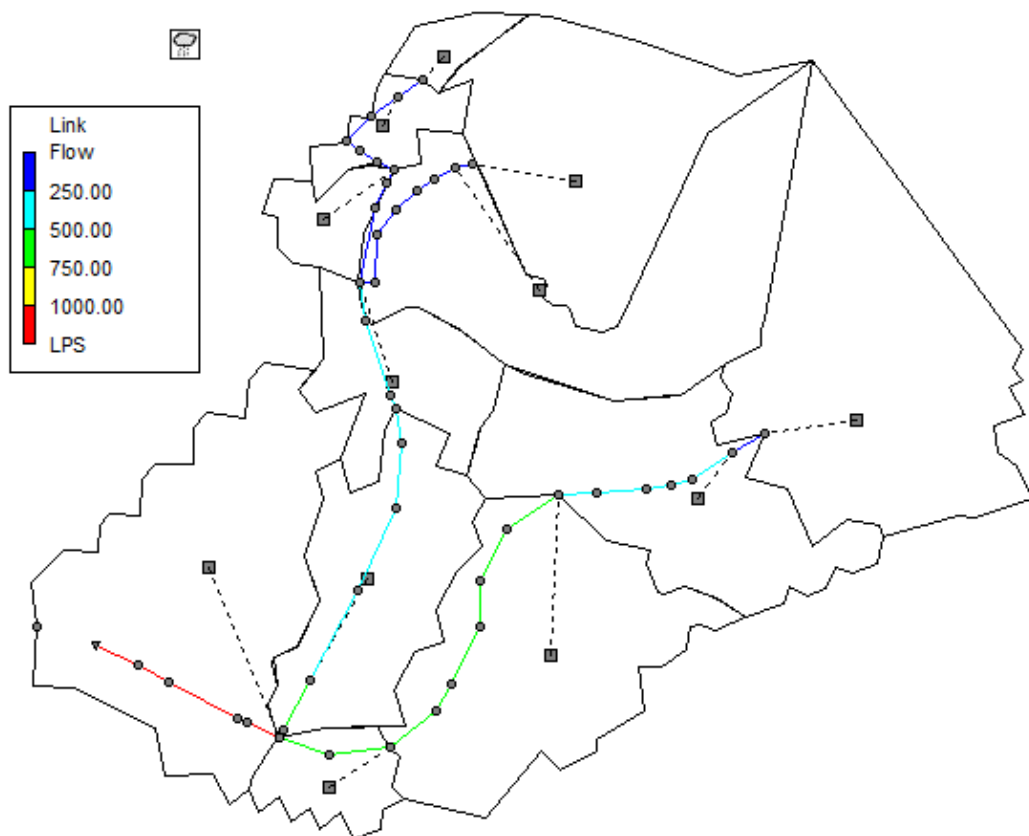
Πίνακας 4.15: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αύξηση βροχής 7% - Σενάριο 7

Αποτελέσματα	Βροχή 7%
Βροχόπτωση (mm)	12.410
Απώλειες βροχής (mm)	0.990
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	1.248
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230
p-Value (%)	45.21

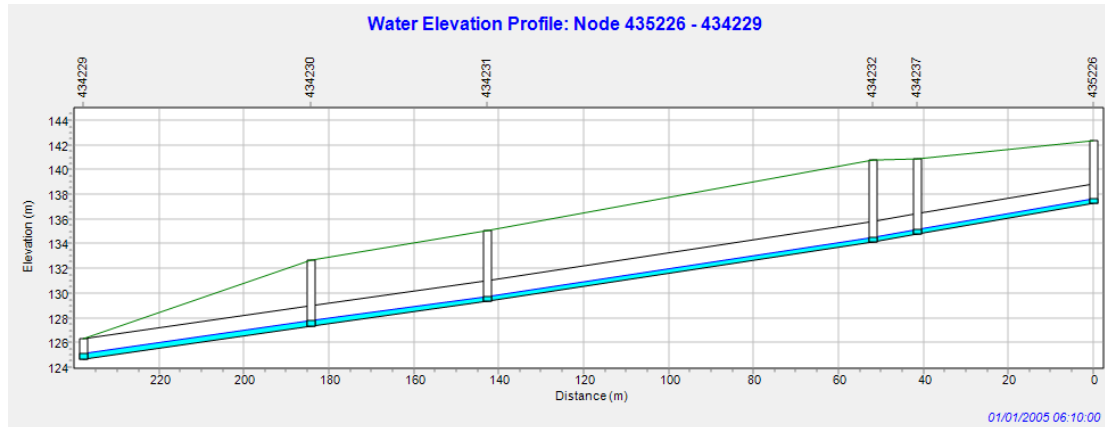


Εικόνα 4.93: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αύξηση βροχής 7% και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 7

Έπειτα, στην Εικ. 4.94 παρουσιάζεται το μέγεθος της απορροής, κατά την αιχμή της την χρονική στιγμή 06:10, για όλους τους αγωγούς του υπό μελέτη δικτύου ξεχωριστά. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν τιμές μικρότερες από 0.25 m<sup>3</sup>/s, ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί οι οποίοι έχουν τιμές μεγαλύτερες από 1.00 m<sup>3</sup>/s. Σημαντική είναι η αύξηση της απορροής από τον αγωγό 1802, όπου και συμβάλλουν οι δύο κλάδοι του συστήματος, έως και την έξοδο της λεκάνης στον αγωγό 1621. Παράλληλα στην Εικ. 4.95, διακρίνεται κατά την στιγμή 06:10 το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621. Η απορροή σε αυτούς τους αγωγούς παρουσιάζει τις κρισιμότερες τιμές κατά το παρόν σενάριο, όμως δεν οδηγούνται σε πλήρωση.



Εικόνα 4.94: Η απορροή για αύξηση βροχόπτωσης 7% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή - Σενάριο 7.



Εικόνα 4.95: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αύξηση βροχόπτωσης 7% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 7.

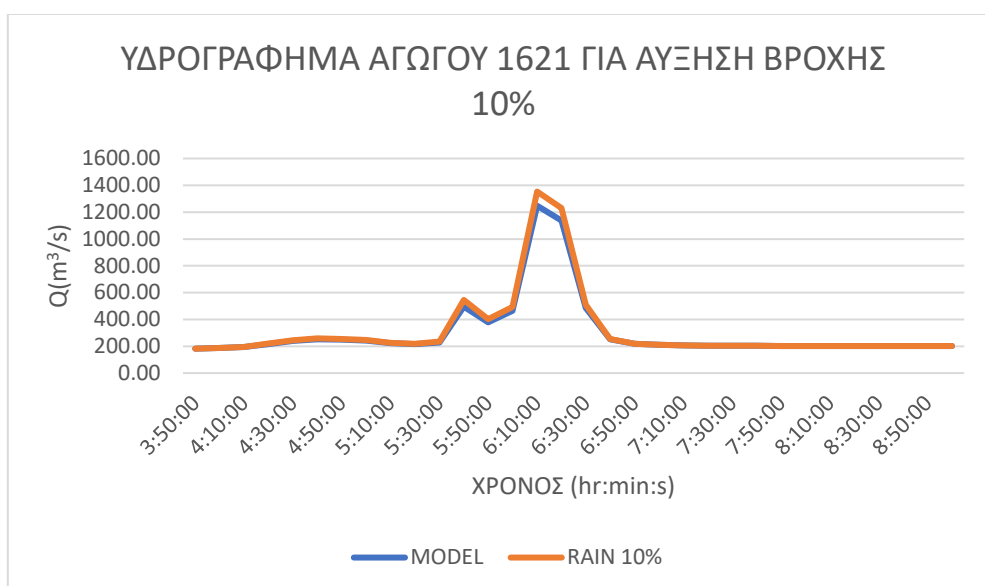
#### 4.9. Σενάριο 8: Προσομοίωση για μεγαλύτερα επεισόδια βροχής - αύξηση βροχής κατά 10%

Στο Σενάριο 8 έγινε αύξηση της βροχής κατά 10% , δηλαδή για ύψος βροχής 12.76 mm για κάθε τιμή της ιστορικής χρονοσειράς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται, αντίστοιχα, στον Πιν. 4.16, ενώ το υδρογράφημα εξόδου του αγωγού για αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται στην Εικ. 4.96. Οι απώλειες βροχής και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζουν τιμές χαμηλότερες από το 10% της κατακρήμνισης, ενώ αναφορικά με τα ακάθαρτα η μέση τιμή της παροχής παραμένει σταθερή. Παράλληλα, από το υδρογράφημα της Εικ. 4.96 συμπεραίνουμε ότι οι αιχμές του βαθμονομημένου μοντέλου και του παρόντος σεναρίου βρίσκονται αρκετά κοντά, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των Πιν. 4.2 και Πιν. 4.16. Και σε αυτή την περίπτωση, ο έλεγχος Student t-test ανάμεσα στις απορροές του βαθμονομημένου μοντέλου και του παρόντος σεναρίου, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 5%, έδειξε μη σημαντικές στατιστικά αλλαγές για το μέγεθος των απορροών. Συγκεκριμένα, η τιμή p-value ισούται με 43.02% και κρίνεται πολύ μεγαλύτερη του 5%.



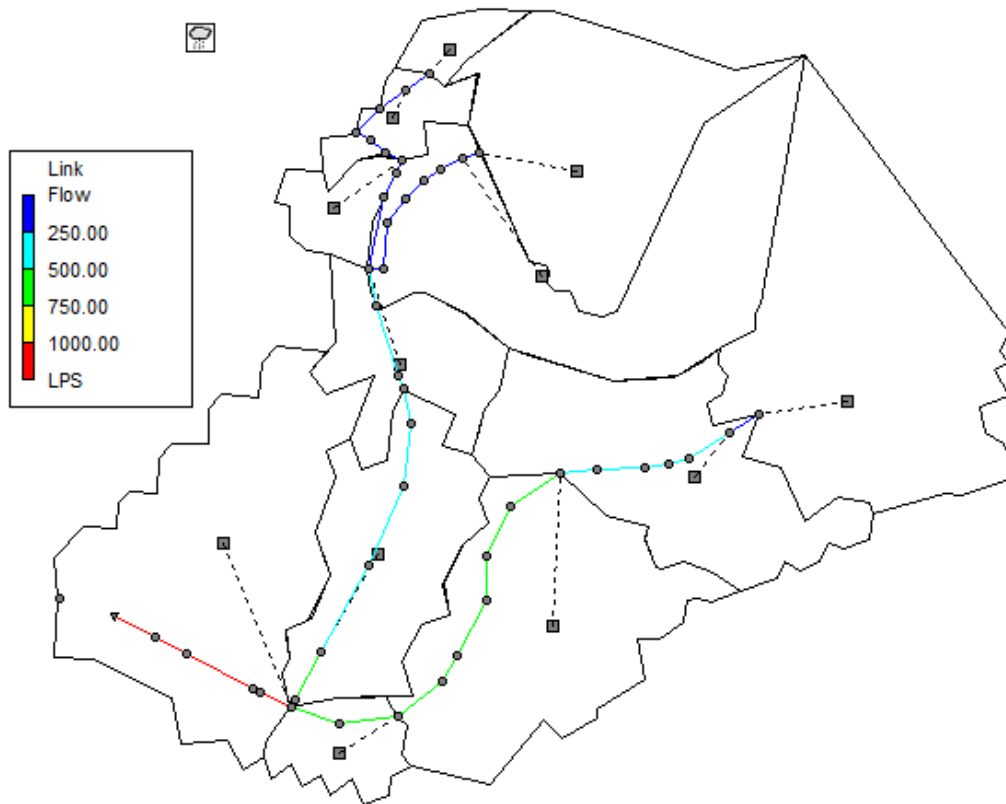
Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αύξηση βροχής 10% - Σενάριο 8

Αποτελέσματα	Βροχή 10%
Βροχόπτωση (mm)	12.760
Απώλειες βροχής (mm)	1.010
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	1.319
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230
P-Value (%)	43.02

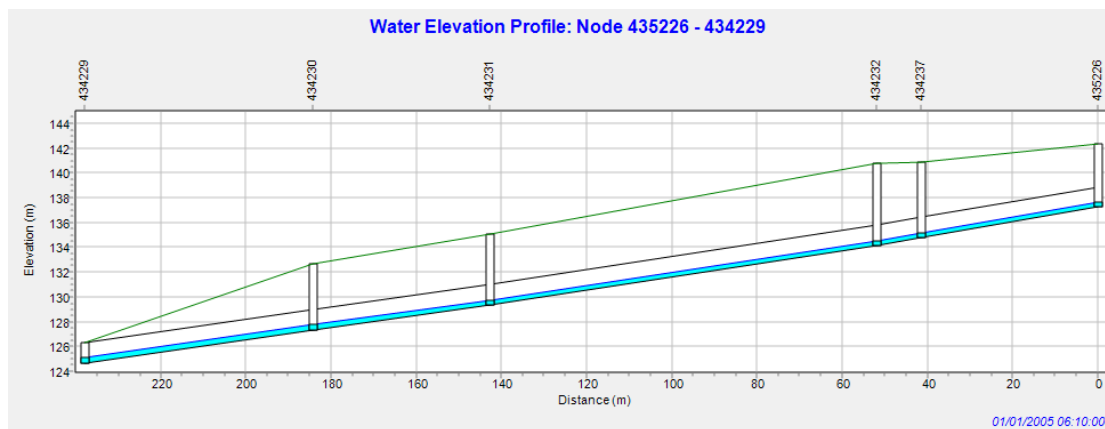


Εικόνα 4.96: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αύξηση βροχής 10% και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 8

Έπειτα, στην Εικ. 4.97 παρουσιάζεται το μέγεθος της απορροής, κατά την αιχμή της την χρονική στιγμή 06:10. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν τιμές μικρότερες από 0.25 m<sup>3</sup>/s, ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί οι οποίοι έχουν τιμές μεγαλύτερες από 1.00 m<sup>3</sup>/s. Σημαντική είναι η αύξηση της απορροής από τον αγωγό 1802 έως και την έξοδο της λεκάνης στον αγωγό 1621.



Εικόνα 4.97: Η απορροή για αύξηση βροχόπτωσης 10% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή.- Σενάριο 8



Εικόνα 4.98: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αύξηση βροχόπτωσης 10% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 8.

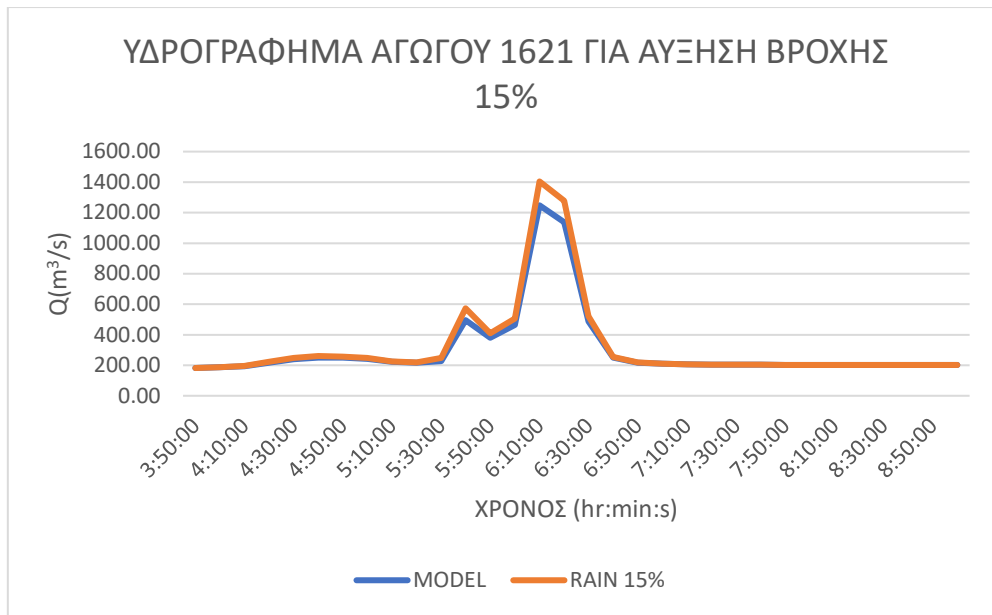
Παράλληλα στην Εικ. 4.98, διακρίνεται κατά την στιγμή 06:10 το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621. Η απορροή σε αυτούς τους αγωγούς παρουσιάζει τις κρισιμότερες τιμές κατά το παρόν σενάριο, όμως δεν οδηγούνται σε πλήρωση.

#### 4.10. Σενάριο 9: Προσομοίωση για μεγαλύτερα επεισόδια βροχής- αύξηση βροχής κατά 15%

Στο παρόν σενάριο μελετήθηκε το ενδεχόμενο μιας πιο ακραίας βροχόπτωσης, με αύξηση της αρχικής βροχής κατά 15%, δηλαδή για βροχόπτωση 13.34 mm. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται, αντίστοιχα, στον Πιν. 4.17, όπου και οι απώλειες βροχής ισούνται περίπου με το 8% της κατακρήμνισης. Η παροχή ακαθάρτων παραμένει και πάλι σταθερή. Το υδρογράφημα εξόδου του αγωγού για αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται στην Εικ. 4.99, όπου και γίνεται σύγκριση με το υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου με την παροχή αιχμής να αυξάνεται από 1.25 m<sup>3</sup>/s σε 1.40 m<sup>3</sup>/s. Ο έλεγχος Student t-test ανάμεσα στις απορροές του αρχικού μοντέλου και του παρόντος σεναρίου έδειξε εκ νέου μη σημαντικές στατιστικά αλλαγές για το μέγεθος των απορροών και για επίπεδο εμπιστοσύνης 5%. Συγκεκριμένα, η τιμή p-value ισούται με 39.80% (>> 5%).

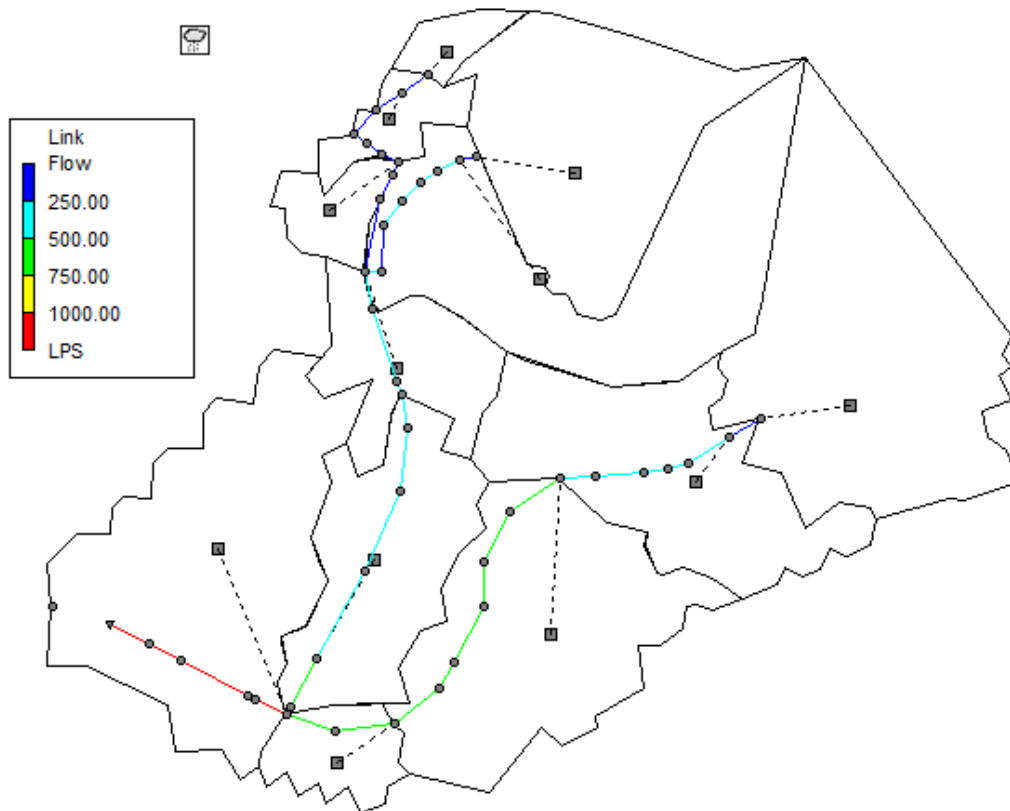
Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αύξηση βροχής 15% - Σενάριο 9

<b>Αποτελέσματα</b>	<b>Βροχή 15%</b>
Βροχόπτωση (mm)	13.340
Απώλειες βροχής (mm)	1.040
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	1.404
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230
P-Value (%)	39.80

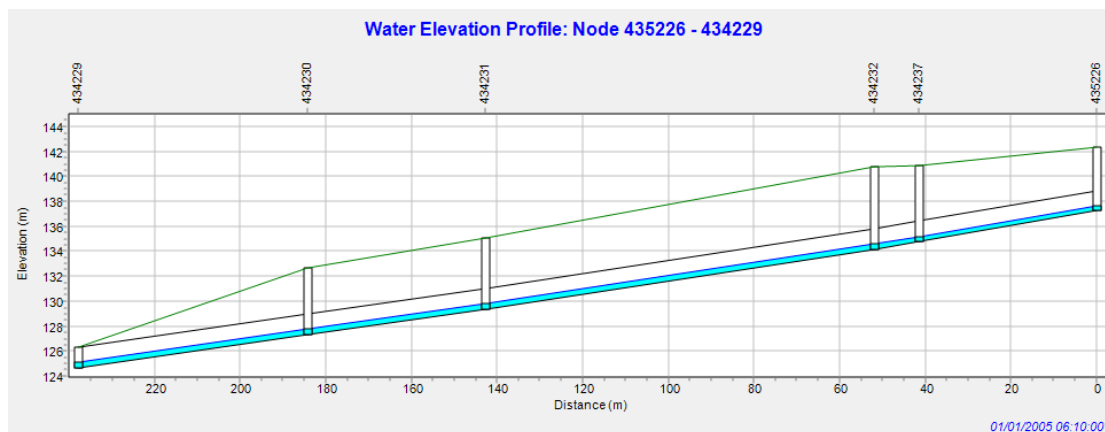


Εικόνα 4.99: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αύξηση βροχής 15% και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 9

Τέλος, στην Εικ. 4.100 παρουσιάζεται το μέγεθος της απορροής, κατά την αιχμή της την χρονική στιγμή 06:10 σε όλους τους αγωγούς του συστήματος. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν τιμές μικρότερες από  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ , ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί οι οποίοι έχουν τιμές μεγαλύτερες από  $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$ . Σημαντική είναι η αύξηση της απορροής από τον αγωγό 1802 έως και την έξοδο της λεκάνης στον αγωγό 1621. Έπειτα, στην Εικ. 4.101, παρουσιάζεται κατά την στιγμή 06:10 το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621. Η απορροή σε αυτούς τους αγωγούς παρουσιάζει τις κρίσιμότερες τιμές κατά το παρόν σενάριο, όμως δεν οδηγούνται σε πλήρωση.



Εικόνα 4.100: Η απορροή για αύξηση βροχόπτωσης 15% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή.- Σενάριο 9



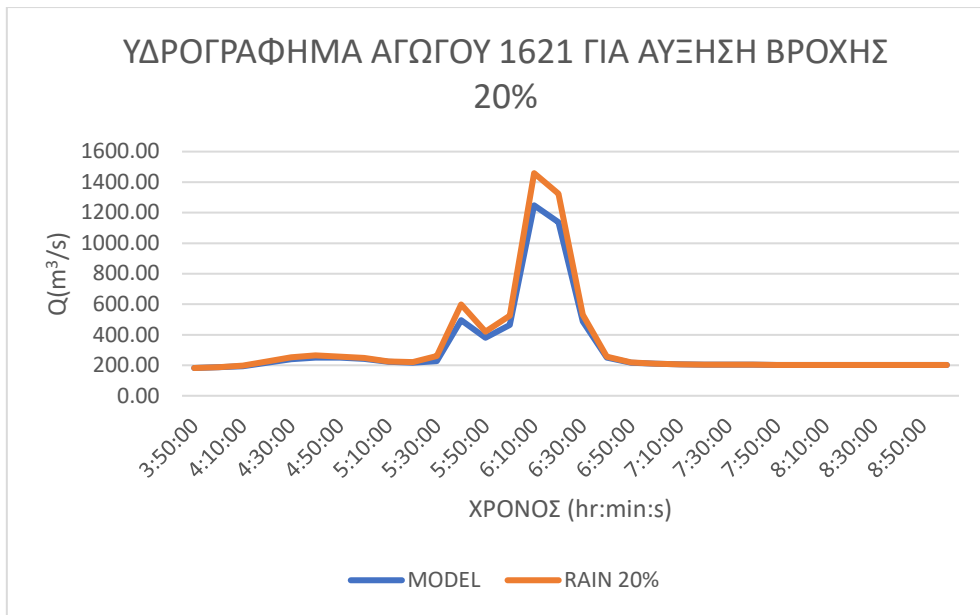
Εικόνα 4.101: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αύξηση βροχόπτωσης 15% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 9

#### 4.11. Σενάριο 10: Προσομοίωση για μεγαλύτερα επεισόδια βροχής- αύξηση βροχής κατά 20%

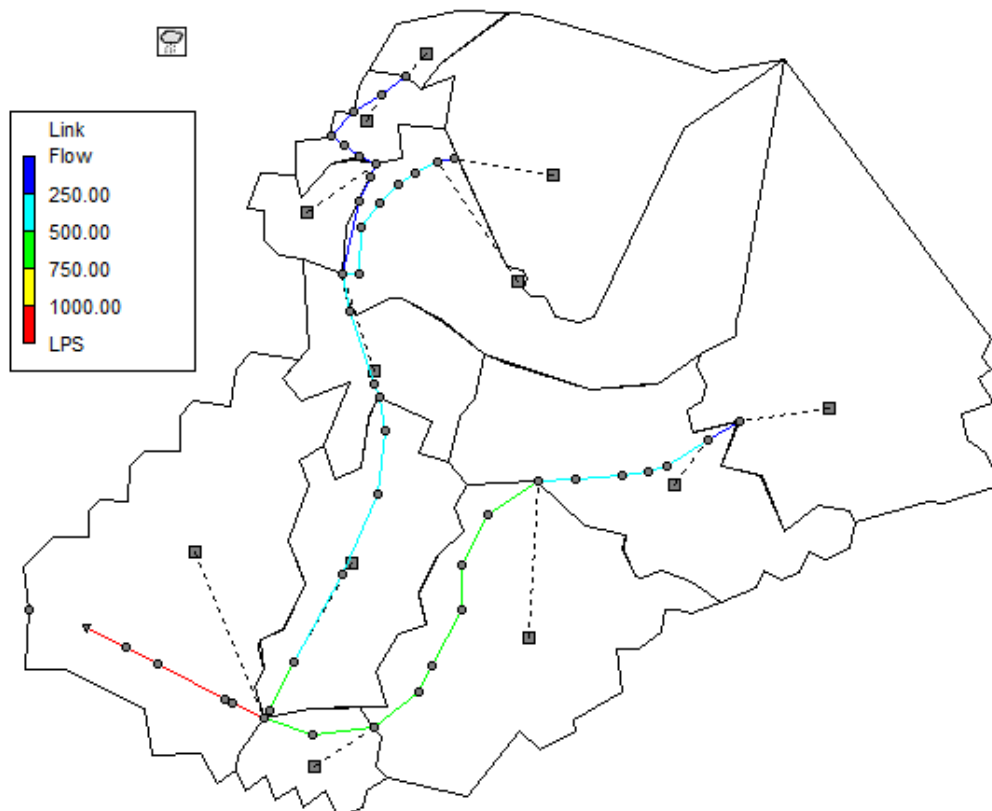
Αντίστοιχα με τα σενάρια 7, 8 και 9 έγινε προσομοίωση, όμως, μεγαλύτερου επεισοδίου βροχόπτωσης, βασισμένου στην διαθέσιμη ιστορική χρονοσειρά βροχόπτωσης της 1/1/2005. Στο παρόν σενάριο αυξήθηκε η βροχή κατά 20%, με αποτέλεσμα το ύψος της να φτάσει τα 13.92 mm. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πιν. 4.18. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι οι απώλειες βροχής ανέρχονται σε περίπου 1 mm, τιμή μικρότερη του 10% της βροχόπτωσης, ενώ η μέση τιμή της απορροής ακαθάρτων δεν μεταβάλλεται (Πιν. 4.2). Το υδρογράφημα εξόδου του αγωγού για αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται στην Εικ. 4.102., όπου και γίνεται η σύγκριση με το υδρογράφημα του αρχικού μοντέλου. Σε αυτή την περίπτωση η αιχμή αυξάνεται από 1.25 m<sup>3</sup>/s σε 1.46 m<sup>3</sup>/s. Τέλος, και αυτό το σενάριο κρίνεται στατιστικά μη σημαντικό, για επίπεδο εμπιστοσύνης 5%, εφόσον η τιμή p-value του Student t-test ανέρχεται σε 36.72% (>>5%).

Πίνακας 4.18: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αύξηση βροχής 20%- Σενάριο 10

<b>Αποτελέσματα</b>	<b>Βροχή 20%</b>
Βροχόπτωση (mm)	13.920
Απώλειες βροχής (mm)	1.070
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	1.459
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230
P-Value (%)	36.72

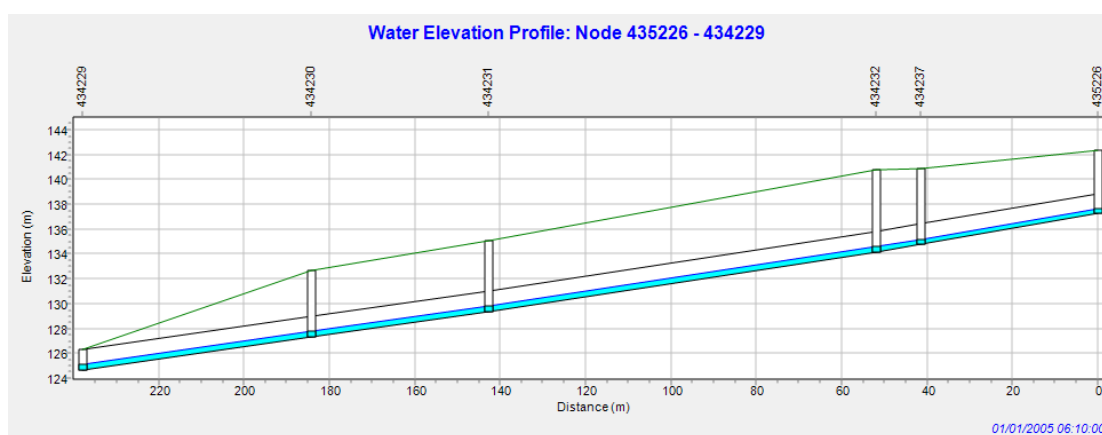


Εικόνα 4.102: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αύξηση βροχής 20% και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 10



Εικόνα 4.103: Η απορροή για αύξηση βροχόπτωσης 20% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή - Σενάριο 10.

Τέλος, στην Εικ. 4.103 παρουσιάζεται η κατανομή της παροχής αιχμής στους αγωγούς της λεκάνης. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν τιμές μικρότερες από  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ , ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί οι οποίοι έχουν τιμές μεγαλύτερες από  $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$ . Σημαντική είναι η αύξηση της απορροής από τον αγωγό 1802 έως και την έξοδο της λεκάνης στον αγωγό 1621. Έπειτα, στην Εικ. 4.104, παρουσιάζεται κατά την στιγμή 06:10 το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621. Η απορροή σε αυτούς τους αγωγούς παρουσιάζει τις κρισιμότερες τιμές κατά το παρόν σενάριο, όμως δεν οδηγούνται σε πλήρωση.



Εικόνα 4.104: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αύξηση βροχόπτωσης 20% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 10

#### 4.12. Σενάριο 11: Προσομοίωση για μεγαλύτερα επεισόδια βροχής-αύξηση βροχής κατά 25%

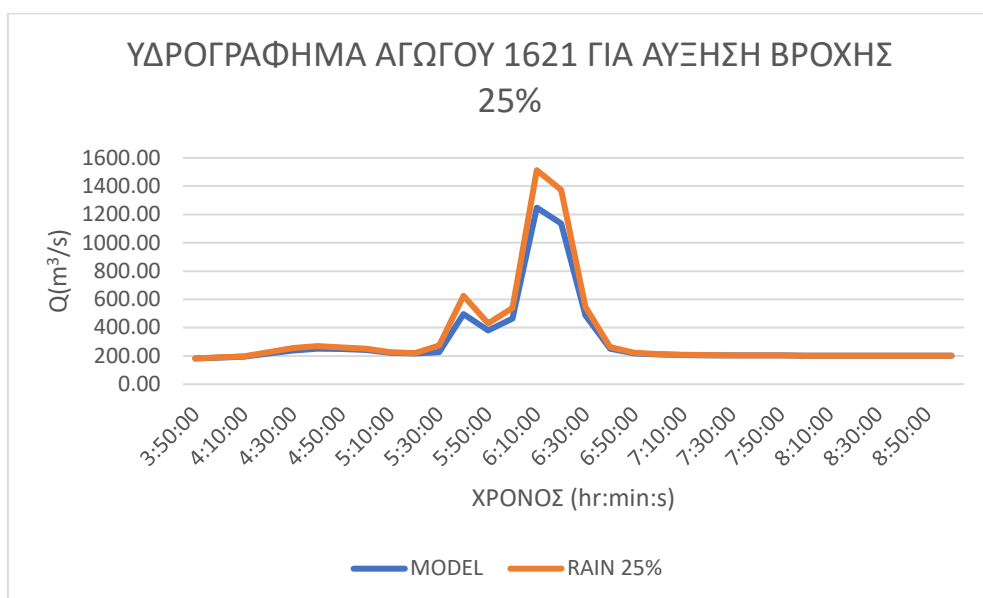
Η τελευταία προσομοίωση ενός μεγαλύτερου επεισοδίου βροχόπτωσης αποτελούσε και την δυσμενέστερη περίπτωση με αύξηση της βροχής κατά 25% της αρχικής της τιμής. Το ύψος βροχής σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται στα  $14.50 \text{ mm}$  και οι απώλειες βροχής σε ένα ποσοστό λίγο μικρότερο του 8% της κατακρήμνισης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πιν. 4.19, από όπου παρατηρείται ότι η απορροή ακαθάρτων έχει τιμή ίση με την αρχική προσομοίωση του βαθμονομημένου μοντέλου. Το



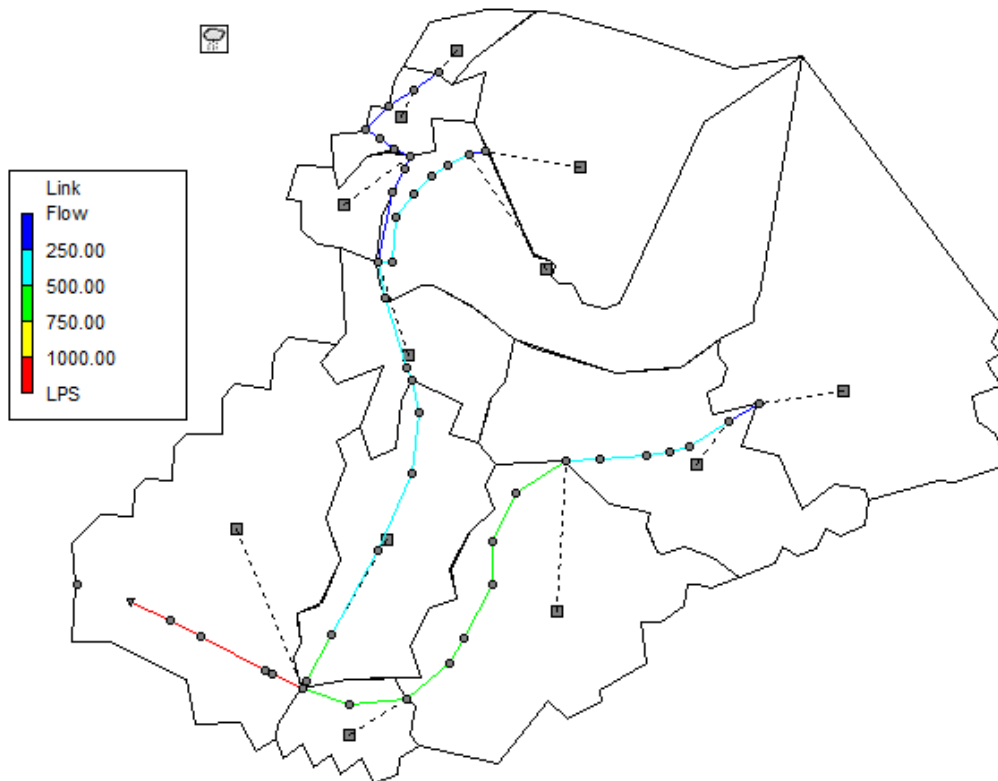
υδρογράφημα εξόδου του αγωγού για αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται στην Εικ. 4.105, από όπου και φαίνεται ότι η παροχή αιχμής ανέρχεται από 1.25 m<sup>3</sup>/s (βαθμονομημένο μοντέλο) σε 1.51 m<sup>3</sup>/s. Τέλος, ο έλεγχος Student t-test έδωσε τιμή p-value ίση με 33.60%, η οποία αντίστοιχα με τις προηγούμενες περιπτώσεις δεν κρίνεται σημαντική για επίπεδο εμπιστοσύνης 5%.

Πίνακας 4.19: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αύξηση βροχής 25% - Σενάριο 11

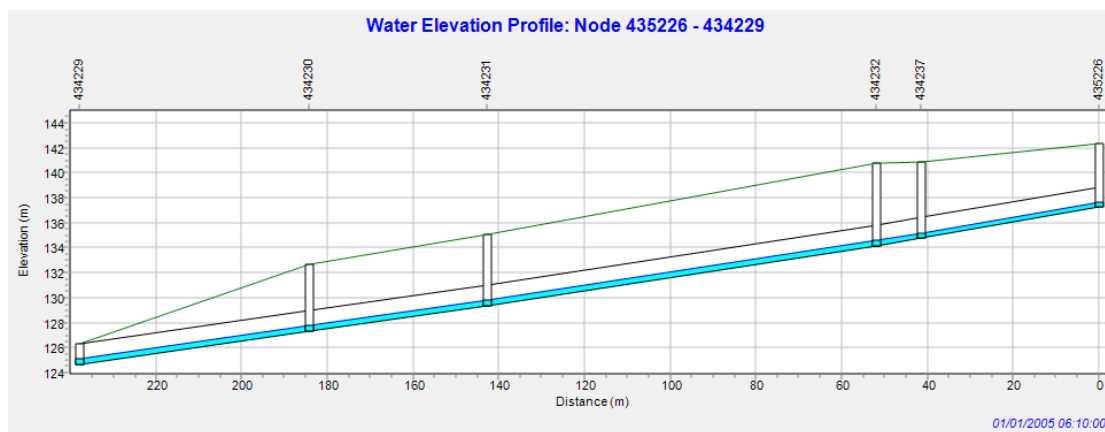
Αποτελέσματα	Βροχή 25%
Βροχόπτωση (mm)	14.500
Απώλειες βροχής (mm)	1.120
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	1.513
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.230
P-Value (%)	33.60



Εικόνα 4.105: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αύξηση βροχής 25% και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 11



Εικόνα 4.106: Η απορροή για αύξηση βροχόπτωσης 25% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή.- Σενάριο 11



Εικόνα 4.107: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αύξηση βροχόπτωσης 25% στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 11

Τέλος, στην Εικ. 4.106 παρουσιάζεται η κατανομή της απορροής στους αγωγούς της λεκάνης κατά την χρονική στιγμή 06:10 (αιχμή υδρογραφήματος). Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν τιμές μικρότερες από  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ , ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί οι οποίοι έχουν τιμές μεγαλύτερες από  $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$ . Έπειτα, στην Εικ. 4.104, παρουσιάζεται κατά την ίδια στιγμή το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621. Η απορροή σε αυτούς τους αγωγούς παρουσιάζει τις κρισιμότερες τιμές κατά το παρόν σενάριο, όμως όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις οι αγωγοί δεν οδηγούνται σε πλήρωση.

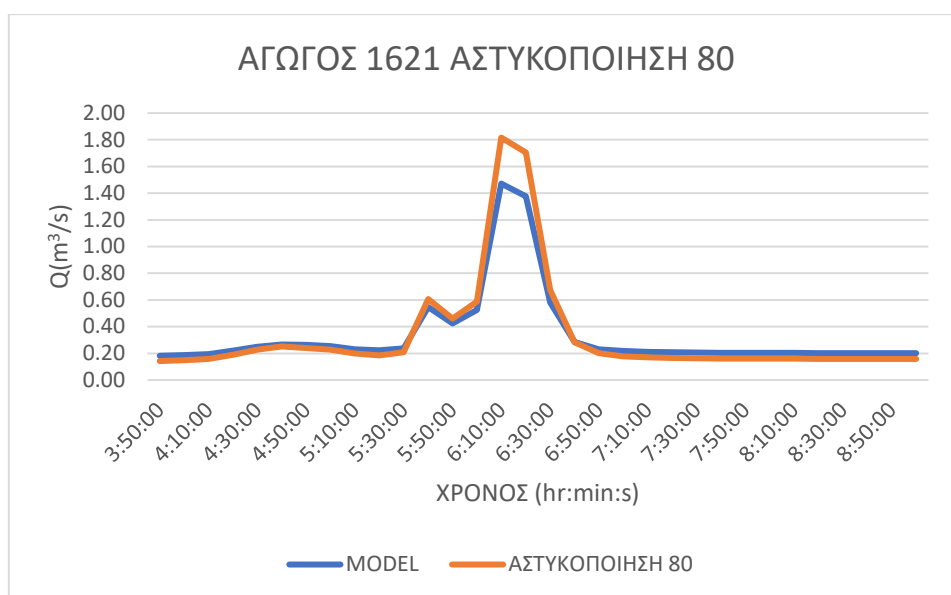
#### 4.13. Σενάριο 12: Προσομοίωση για αλλαγή χρήσης γης τμήματος του Αττικού Άλσους σε αστική ζώνη

Τελευταίο σενάριο ήταν το ενδεχόμενο αλλαγής χρήσης γης σε ένα τμήμα του Αττικού Άλσους και συγκεκριμένα στις υπολεκάνες S395132, S395133 και S416155. Ειδικότερα, εξετάστηκε το ενδεχόμενο αστικοποίησης, μέσω αλλαγής του αριθμού καμπύλης CN (νέα τιμή ίση με 94) αυτού του τμήματος του πάρκου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πιν. 4.20. Το ύψος βροχής παραμένει ίδιο με αυτό του βαθμονομημένου μοντέλου, εφόσον δεν αλλάζουν τα δεδομένα βροχής, αλλά οι απώλειες βροχής μειώνονται από  $0.83 \text{ mm}$  σε  $0.54 \text{ mm}$ . Η μέση τιμή της απορροής ακαθάρτων παραμένει σταθερή. Το υδρογράφημα εξόδου του αγωγού για αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται στην Εικ. 4.108, όπου και παρατηρείται αύξηση της αιχμής της απορροής στον αγωγό 1621, από  $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$  σε  $1.82 \text{ m}^3/\text{s}$ . Η σημαντικότητα των αλλαγών που προκλήθηκαν στο μέγεθος των απορροών αξιολογείται με την χρήση του Student t-test σε επίπεδο εμπιστοσύνης 5%, από όπου προκύπτει η τιμή p-value ίση με 49.83 ( $\gg 5$ ). Οι αλλαγές, λοιπόν, δεν κρίνονται στατιστικά σημαντικές.

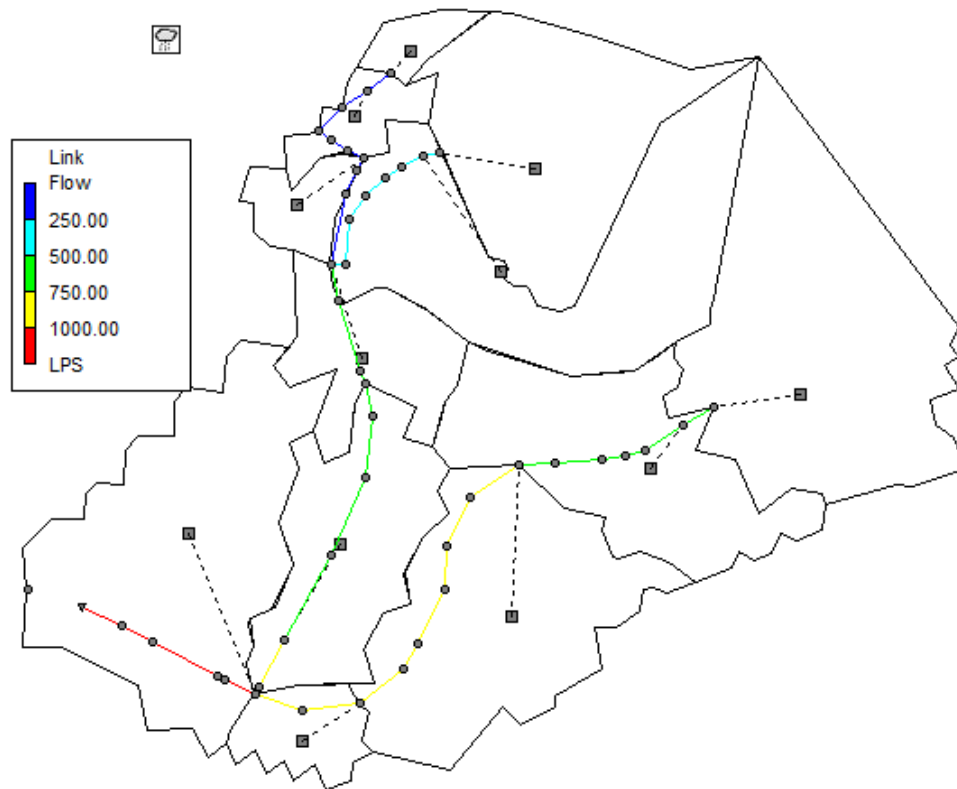
Τέλος, στην Εικ. 4.109 παρουσιάζεται η κατανομή της απορροής στους αγωγούς της λεκάνης κατά το παρόν σενάριο και για την χρονική στιγμή 06:10 (αιχμή υδρογραφήματος). Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί που έχουν τιμές μικρότερες από  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ , ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αγωγοί οι οποίοι έχουν τιμές μεγαλύτερες από  $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$ . Έπειτα, στην Εικ. 4.110, παρουσιάζεται κατά την ίδια στιγμή το προφίλ των αγωγών 1802, 1618, 1619, 1620 και 1621. Και σε αυτή την περίπτωση οι αγωγοί δεν οδηγούνται σε πλήρωση

Πίνακας 4.20: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αλλαγή χρήσης γης του Αττικού Άλσους- Σενάριο 12

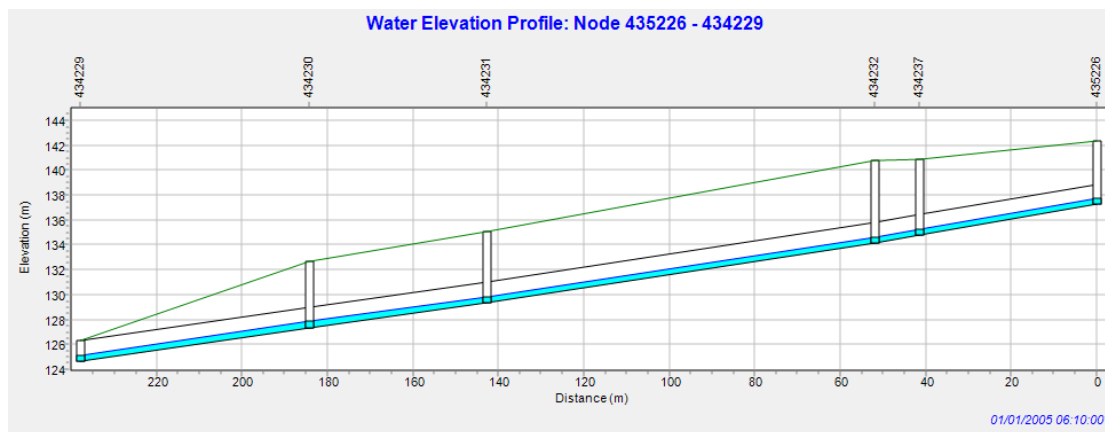
Αποτελέσματα	Αστικοποίηση
Βροχόπτωση (mm)	11.600
Απώλειες βροχής (mm)	0.540
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m <sup>3</sup> /s)	1.816
Μέση απορροή ακαθάρτων (m <sup>3</sup> /s)	0.216
P-Value (%)	49.83



Εικόνα 4.108: Υδρογράφημα εξόδου του συστήματος για αλλαγή χρήσης γης τμήματος του Αττικού Άλσους σε αστική ζώνη και σύγκριση με υδρογράφημα του βαθμονομημένου μοντέλου - Σενάριο 12



Εικόνα 4.109: Η απορροή για αλλαγή χρήσης γης τμήματος του Αττικού Άλσους σε αστική ζώνη στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την αιχμή.- Σενάριο 12



Εικόνα 4.110: Προφίλ αγωγών 1802, 1618 1619, 1620 και 1621 για αλλαγή χρήσης γης τμήματος του Αττικού Άλσους σε αστική ζώνη στο βαθμονομημένο μοντέλο κατά την χρονική στιγμή 00:40 (αιχμή υδρογραφήματος). Φαίνονται οι αγωγοί (μαύρο), το βάθος του νερού (μπλε), το άνω μέρος των αγωγών (μαύρο), η πιεζομετρική γραμμή (μωβ) η επιφάνεια του εδάφους (πράσινο) και τα φρεάτια (κατακόρυφες γραμμές) - Σενάριο 11

#### 4.14. Κόμβοι που πλημμυρίζουν

Τέλος, εξετάστηκε για την παρούσα κατάσταση, καθώς και για κάθε ένα από τα σενάρια, το αν τα φρεάτια πλημμυρίζουν κατά την προσομοίωση του δικτύου. Παρατηρήθηκε ότι τόσο στο βαθμονομημένο μοντέλο, όσο και στα σενάρια που αφορούσαν την αύξηση της υπάρχουσας βροχής (Σενάριο 7 έως και Σενάριο 11) και την αλλαγή χρήσης γης του Αττικού άλσους (Σενάριο 12), οι κόμβοι του δικτύου δεν πλημμυρίζουν. Αναφορικά με τα σενάρια κατά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές εξισώσεις ομβρίων καμπυλών (Σενάριο 1 έως και Σενάριο 6), ο αριθμός των φρεατίων που πλημμυρίζουν παρουσιάζεται στον Πιν. 4.21. Παρατηρείται ότι στα Σενάρια 1 έως και 3, όπου και χρησιμοποιούνται οι παρούσες εξισώσεις των ομβρίων καμπυλών της Αττικής, οι κόμβοι πλημμυρίζουν μόνο για ακραίες περιπτώσεις βροχής με περιόδους επαναφοράς μεγαλύτερες από 50 χρόνια. Τα Σενάρια 4 έως και 6 περιγράφουν τις μελλοντικές όμβριες καμπύλες. Στο πιο συντηρητικό σενάριο (Σενάριο 5), παρατηρούμε ότι τα φρεάτια πλημμυρίζουν ακόμα και για πιο συνήθη επεισόδια βροχής περιόδων επαναφοράς μεγαλύτερων των 5 ετών. Όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος επαναφοράς της βροχόπτωσης, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο αριθμός των κόμβων/φρεατίων του δικτύου που πλημμυρίζουν.

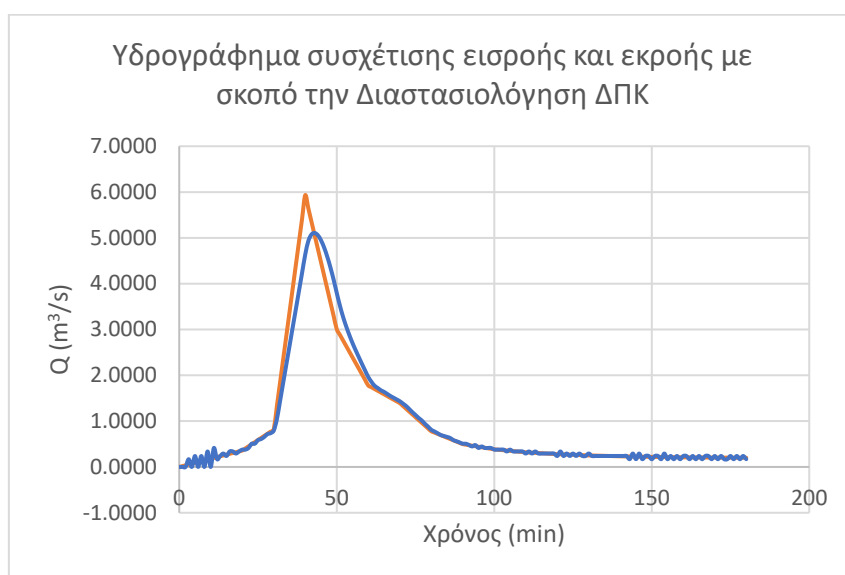
Πίνακας 4.21: Κόμβοι που πλημμυρίζουν σε κάθε σενάριο

ΣΕΝΑΡΙΟ	T= 2y	T= 5y	T= 10y	T= 25y	T= 50y	T= 100y
1	0	0	0	0	1	9
2	0	0	0	0	3	9
3	0	0	0	0	0	5
4	0	0	0	6	15	22
5	0	5	13	23	28	28
6	0	0	0	0	0	0

#### 4.15. Διαστασιολόγηση δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης (ΔΠΚ).

Στην έξοδο του συστήματος προτείνεται η κατασκευή μιας υπόγειας ορθογωνικής (WxL) δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης του νερού (ΔΠΚ), με σκοπό την μείωση

της αιχμής της απορροής στην έξοδο του συστήματος, στον ποταμό Κηφισό, όταν αυτό απαιτείται. Για την διαστασιολόγηση της δεξαμενής χρησιμοποιείται η μέθοδος Puls, η οποία και περιγράφεται αναλυτικά στο Υποκεφάλαιο 3.6. Ως βροχή σχεδιασμού επιλέγεται η βροχόπτωση που περιγράφεται από τις όμβριες καμπύλες της Εξ. 3.8. και για περίοδο επαναφοράς 10 ετών. Στην Εικ. 4.111 με πορτοκαλί χρώμα διαφαίνεται το υδρογράφημα εισόδου στην ΔΠΚ, ενώ με μπλε το υδρογράφημα εξόδου. Παρατηρείται η μείωση της αιχμής από  $5.93 \text{ m}^3/\text{s}$  σε  $5.11 \text{ m}^3/\text{s}$ . Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό επιλέχθηκε μια δεξαμενή κάτοψης  $40 \times 15 \text{ m}$ , με οπή στην έξοδο  $0.9 \text{ m}$  (Πιν. 4.22).



Εικόνα 4.111: Υδρογράφημα συσχέτισης της εισροής και της εκροής στην ΔΚ

Πίνακας 4.22: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης ΔΠΚ

Μέγεθος	Τιμή
Πλάτος W (m)	40
Μήκος L (m)	15
Οπή διαμέτρου D (m)	0.9

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

### 5.1. Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία αφορούσε στην προσομοίωση τμήματος της ζώνης Ζ2 του παντοροϊκού δικτύου των Αθηνών, με χρήση του λογισμικού SWMM της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (USEPA). Πρόκειται για ένα μοντέλο προσομοίωσης βροχής απορροής ιδιαίτερα φιλικό και κατανοητό προς τον μελετητή, το οποίο αναπαριστά ποικίλα υδραυλικά στοιχεία μιας αστικής λεκάνης απορροής (ΛΑ), μέσω της προσομοίωσης υδρολογικών και υδραυλικών διαδικασιών. Συγκεκριμένα δύναται να προσομοιώσει μία ΛΑ σε επίπεδο υπολεκανών, καθώς και να παράγει δεδομένα (απορροής, διήθησης, στάθμης κ.α.) για τους αγωγούς και τα φρεάτια που συναντώνται σε αυτή. Επιπλέον, το μοντέλο παρέχει την δυνατότητα ποιοτικών ελέγχων σε επίπεδο ΛΑ, τόσο για μεμονωμένα, όσο και για συνεχή γεγονότα. Σημαντική, επίσης, κρίνεται η δυνατότητα επικοινωνίας του μοντέλου με το λογισμικό ArcGIS, μέσω της επέκτασης InfoSWMM. Τέλος, χαρακτηριστική ήταν η υψηλή ταχύτητα εκτέλεσης των υπολογισμών.

Συμπληρωματικά και στα πλαίσια των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκαν κι άλλα λογισμικά. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS του Ινστιτούτου Ερευνών Περιβαλλοντικών Συστημάτων (Environmental Systems Research Institute-ESRI), ένα λογισμικό με πολλαπλές δυνατότητες αναπαράστασης λεκανών απορροής. Με την βοήθεια του συγκεκριμένου λογισμικού παρήχθησαν με ευκολία οι κανάβι των κλίσεων της περιοχής, των χρήσεων γης, καθώς και ο εδαφολογικός της χάρτης. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό AutoCAD της Autodesk με σκοπό την διακριτοποίηση της ΛΑ σε υπολεκάνες και το λογισμικό Excel της Microsoft ώστε να απλουστευτούν οι υπολογισμοί και η χάραξη του υδροκρίτη. Με το Excel έγινε επίσης η εφαρμογή της μεθόδου Puls για τη διαστασιολόγηση της δεξαμενής κατακράτησης.

Κρισιμότερο στάδιο κρίνεται αυτό της βαθμονόμησης του μοντέλου, εφόσον ένα άρτια βαθμονομημένο μοντέλο, εξασφαλίζει στον μελετητή μικρότερη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα του. Η βαθμονόμηση στην παρούσα εργασία βασίστηκε σε μετρήσεις απορροής σε δύο αγωγούς (του 1313 και του 1640) του συστήματος για ένα γεγονός βροχόπτωσης, εφόσον μόνο σε αυτούς υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα. Έπειτα από συνεχείς προσομοιώσεις και τροποποίηση των παραμέτρων του συστήματος, τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης κρίθηκαν πολύ καλά για τον αγωγό 1313 και καλά για τον αγωγό 1640, βάσει των συντελεστών αξιολόγησης (Εξ. 3.22 - Εξ. 3.26) όπως



παρουσιάζονται στον Πιν. 4.1. Πιο ευαίσθητη παράμετρος κατά τις δοκιμές ήταν ο συντελεστής αδιαπερατότητας του εδάφους (%Impervious).

Στο βαθμονομημένο, πλέον, μοντέλο η προσομοίωση της βροχής της 1/1/2005 έδειξε ότι οι αγωγοί του παντοροϊκού συστήματος επαρκούν ώστε να μεταφέρουν την απορροή που προκαλείται. Έτσι, δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα υπερχείλισης των φρεατίων και δυαδικής ροής.

Προκειμένου λοιπόν, να ελεγχθεί η επάρκεια των αγωγών του μοντέλου, μελετήθηκαν διάφορα εναλλακτικά σενάρια. Αυτά αφορούσαν, αρχικά (Σενάρια 1, 2, και 3) την χρήση εναλλακτικών εξισώσεων περιγραφής των ομβρίων καμπυλών της Αθήνας. Όπως παρουσιάζεται και στον Πιν. 4.21 τα φρεάτια πλημμυρίζουν στα συγκεκριμένα σενάρια μόνο για βροχές με περιόδους επαναφοράς μεγαλύτερες των 50 ετών, ενώ για μικρότερες το αποχετευτικό δίκτυο είναι ικανό να διοδεύσει όλη την ποσότητα νερού που απορρέει.

Έπειτα, στα Σενάρια 4, 5 και 6 παρουσιάζονται μελλοντικές όμβριες καμπύλες που περιγράφουν την περιοχή της Αθήνας για το έτος 2100, συνυπολογίζοντας παραμέτρους κλιματικής αλλαγής. Παρατηρούμε ότι κατά την συντηρητικότερη περίπτωση (Σενάριο 5), παρατηρείται υπερχείλιση των φρεατίων για περιόδους επαναφοράς μεγαλύτερες των 5 ετών. Σε αυτή την περίπτωση, η όμβρια καμπύλη καταλήγει στα μεγαλύτερα ύψη βροχής και, επομένως, στην δυσμενέστερη περίπτωση απορροής, όπου εμφανίζονται φαινόμενα δυαδικής ροής (υπερχείλιση αγωγών στο δρόμο), ιδίως στις πιο μεγάλες περιόδους επαναφοράς. Εν αντιθέσει στο Σενάριο 6 όπου περιγράφεται η ευνοϊκότερη κατάσταση δεν παρατηρούνται φαινόμενα υπερχείλισης ακόμα και σε πολύ ακραία γεγονότα βροχής.

Στα Σενάρια 7-11 που αφορούσαν μεγαλύτερα επεισόδια βροχής και αντίστοιχα στο Σενάριο 12 της αστικοποίησης του Αττικού Άλσους, η αλλαγή στο μέγεθος των απορροών κρίθηκε μη σημαντική από τον έλεγχο Student t-test για επίπεδο εμπιστοσύνης 5%. Αλλαγή υπήρξε στις αιχμές των υδρογραφημάτων, οι οποίες και αυξήθηκαν αναλογικά σε όλες τις περιπτώσεις. Παράλληλα, δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα υπερχείλισης, των φρεατίων του συστήματος ή δυαδικής ροής.

Συμπερασματικά, το δίκτυο ανταποκρίθηκε επιτυχώς στην διαχείριση της απορροής που προκλήθηκε από βροχοπτώσεις περιόδου επαναφοράς μικρότερης των 10 ετών,

στις περισσότερες περιπτώσεις. Επίσης, εξετάστηκε η κατασκευή μιας δεξαμενής προσωρινής κατακράτησης του νερού, στην έξοδο της ΛΑ, για την μείωση της αιχμής της απορροής που καταλήγει στον Κηφισό ποταμό.

## 5.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί η σημασία της εξέλιξης της μοντελοποίησης για την μείωση της αβεβαιότητας στις υδρολογικές και υδραυλικές προσομοιώσεις. Η μείωση αυτής της αβεβαιότητας και η ανάπτυξη ακόμα πιο αξιόπιστων μοντέλων θα πρέπει να αποτελέσει βασικό στόχο του αυριανού μελετητή. Βασικό στάδιο προς αυτόν τον σκοπό είναι η εξασφάλιση της διαθεσιμότητας των απαραίτητων δεδομένων προσομοίωσης και βαθμονόμησης των μοντέλων. Ειδικότερα, χρήσιμη θα ήταν η ύπαρξη περισσότερων ιστορικών χρονοσειρών βροχόπτωσης και απορροής, ώστε να γίνει σύγκριση με την ήδη υπάρχουσα, καθώς και η ύπαρξη δεδομένων απορροής σε περισσότερους αγωγούς ώστε να επιτευχθεί αρτιότερη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Αναφορικά με την μελέτη του παντοροϊκού δικτύου των Αθηνών, αυτή θα μπορούσε να επεκταθεί και σε άλλες ζώνες πέραν της Ζ2. Σημαντική θα ήταν επίσης και μια μελέτη ποιότητάς των απορροών του δικτύου, με χρήση κατάλληλων δεικτών.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική

- Ελευθερίου Χ (2019). *Καθολική ανάλυση ευαισθησίας του SWMM με τη μέθοδο Morris*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα.
- Εταιρεία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Πρωτεύουσας (ΕΥΔΑΠ) (2020). *Λειτουργία Δικτύου Αττικής*, Επίσκεψη στον διαδικτυακό ιστότοπο, τελευταία πρόσβαση στις 07/09/2020.
- Κούρτης Ι (2016). *Προσομοίωση παντορροϊκού δικτύου με το λογισμικό και πρόταση μέτρων αντιμετώπισης πλημμυρικών φαινομένων*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Αθήνα
- Κούρτης Ι, Κοψιάτης Γ, Μπέλος Β, Τσιχριντζής Β (2017) *Βαθμονόμηση και επαλήθευση του λογισμικού SWMM σε μια λεκάνη του παντορροϊκού συστήματος αποχέτευσης της Αθήνας*, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών
- Κουτσογιάννης Δ, Ξανθόπουλος Θ, (1999). *Τεχνική Υδρολογία*, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης Δ (2011). *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης*, Έκδοση 4, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Λαζάρου ΣΘ (2019). *Ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου SWMM και εφαρμογή στο παντορροϊκό δίκτυο της Αθήνας*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα.
- Λουκάς Α (2012). *Υδρολογική Προσομοίωση και Πρόγνωση*, Διαφάνειες του μαθήματος 'Τεχνική Υδρολογία', Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών

Πόρων, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μαρκαντωνάτος Γ (1986) *Επεξεργασία και διάθεση υγρών αποβλήτων: αστικά λύματα βιομηχανικά απόβλητα ζωικά απορρίμματα.*

Μιμίκου Μ (2006). *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.* 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

Μιμίκου Μ, Μπαλτάς Ε (2018). *Τεχνική Υδρολογία.* 6<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

Μπούκας Ε (2019). *Έλεγχος αποτελεσματικότητας εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης ομβρίων υδάτων σε αστικές λεκάνες με τη χρήση του λογισμικού SWMM.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα

Μουρατίδου Δ (2020) *Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε αστική λεκάνη με τη χρήση του λογισμικού SWMM.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα

Παπούλια Α (2022) *Έλεγχος αποτελεσματικότητας αειφόρων πρακτικών μετριασμού του πλημμυρικού κίνδυνου (LID) στο παντοροϊκό δίκτυο της Αθήνας, Ζώνη Β', με τη χρήση του λογισμικού SWMM.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα

Πογιατζή Ε, Σπανού Ν, Κοντογιάννη Β, Παπαδόπουλος Κ, Κωνσταντοπούλου Γ, Στεφούλη Μ, ΙΓΜΕΜ (2013). *Περιγραφή Γεωκινδύνων για την Αθήνα, Seventh Framework Programme Cooperation: Space Call 3, FP7-SPACE-2010-1, Version 1, Αύγουστος.*

Τζίμα Μ (2022) *Υδρολογική Προσομοίωση Αστικής Λεκάνης με το Λογισμικό SWMM και Εκτίμηση της Επίδρασης της Διακριτοποίησης της Λεκάνης.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών

Γεωπληροφορικής, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα

Τσακίρης Γ (2006) *Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση. Τόμος II: Εγγειοβελτιωτικά Έργα*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα

Τσακίρης Γ (2010). *Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση Τόμος I: Αστικά Υδραυλικά Έργα*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Τσακίρης Γ (2013). *Υδατικοί Πόροι: Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων*. (2013). Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Τσιχριντζής Β (1999). *Οικολογική Μηχανική και Τεχνολογία Τόμος I: Διαχείριση Απορροής, Ρύπων και Φερτών*. Εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.

ΥΠΕΧΩΔΕ (2002). Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ). Τεύχος 8: Αποχέτευση- Στράγγιση. Υδραυλικά Έργα Οδών (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ). Αθήνα.

#### Αγγλική

Barco J, Wong K, Stenstrom MK (2008). *Automatic calibration of the U.S. EPA SWMM model for a large urban catchment*, ASCE 0733-9429, 134:4 (466).

Bellos V, Papageorgaki I, Kourtis I, Vangelis H, Kalogiros I, Tsakiris G. (2020) Reconstruction of a flash flood event using a 2D hydrodynamic model under spatial and temporal variability of storm. *Natural Hazards* 101: 711–726. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03891-3>

Boskidis I, Gikas G, Sylaios G, Tsihrintzis V (2012) Hydrologic and water quality modeling of lower Nestos River basin. *Water Resources Management* 26:3023–3051. DOI: 10.1007/s11269-012-0064-7

Bellos V, Kourtis I, Moreno-Rodenas A, (2017). Quantifying roughness coefficient uncertainty in urban flooding simulations through a simplified methodology, *Water*, 9, 944.

- Bellos V, Kourtis I, Tsihrintzis V, (2017). A simplified methodology for flood simulation in urban catchments Municipal sludge dewatering using Sludge Treatment Wetlands View project QUICS-Quantifying Uncertainty in Integrated Catchment Studies View Project A simplified methodology for flood simulation in urban catchments. *European Water* 57. <https://www.researchgate.net/publication/321493033>
- Butler D, Digman CJ, Makropoulos C, Davies JW (2018). *Urban drainage*, 4<sup>th</sup> Edition.
- Chow VT, Maidment DR, Mays LW (1988). *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Flood Risk Management Plan for Attica River Basin District (EL06) (2017) IDF Curves (In Greek). [https://floods.ypeka.gr/egyFloods/gr06/report/I\\_1\\_P02\\_EL06.pdf](https://floods.ypeka.gr/egyFloods/gr06/report/I_1_P02_EL06.pdf). Accessed 10 Dec 2021
- Jenkinson AF (1955) The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) of meteorological elements. *QJR Meteorol Soc* 81:158–171
- Kornecki TS, Sabbagh GJ, Storm DE (1999) Evaluation of runoff, erosion and phosphorus modeling system–Simple. *Journal of the American Water Resources Association* 35(4):807–820. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb04176.x.
- Kourtis I, (2017). Calibration and validation of SWMM model in two urban catchments in Athens, Greece, 15th International Conference on Environmental Science and Technology.
- Kourtis I, Tsihrintzis V, Baltas E, (2017b). Modelling of a combined sewer system and evaluation of mitigation measures using SWMM. *European Water* 57, 123–128.
- Kourtis I, Tsihrintzis V, Baltas E (2018). Simulation of Low Impact Development (LID) Practices and Comparison with Conventional Drainage Solutions. 640. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110640>
- Kourtis I, Tsihrintzis V, Baltas E (2020). A robust approach for comparing conventional and sustainable flood mitigation measures in urban basins. *Journal of Environmental Management*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110822>

- Kourtis I, Nalbantis I, Tsakiris G, Psiloglou G, Tsihrintzis V (2022) Updating IDF Curves Under Climate Change: Impact on Rainfall-Induced Runoff in Urban Basins
- Koutsoyiannis D, Kozonis D, Manetas A (1998) A mathematical framework for Metcalf & Eddy, Inc., University of Florida, Water Resources Engineers, Inc. *Storm Water Management Model*, Volume I – Final Report, 11024DOC07/71, Water Quality Office, Environmental Protection Agency, Washington, DC, July 1971.
- Mimikou M, Baltas E, Varanou E, (2000). A Study of Extreme Storm Events in the Athens Greater Area.
- Rabori M, Ghazavi R, Reveshty A (2017). *Sensitivity analysis of SWMM model parameters for urban runoff estimation in semi – arid area*, Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, 10(5): 284-294.
- Rossman L (2009). *Storm Water Management Model Applications Manual*.
- Rossman L, Simon M (2022). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*, EPA/600/R-05/040, U.S Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- Sherman K (1932) *Streamflow from Rainfall by Unit-Graph Method*. Eng. News Record, 108, 501-505.
- Theodosopoulou Z, Kourtis IM, Bellos V, Apostolopoulos K, Potsiou C, Tsihrintzis VA. (2022). A fast data-driven tool for flood risk assessment in urban areas. *Hydrology* 9(8): 9080147. <https://doi.org/10.3390/hydrology9080147>.
- Tsihrintzis V, Hamid R (1998). Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM. *Hydrological Processes* 12(2):311–329. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199802\)12:2<311:AID-HYP579>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199802)12:2<311:AID-HYP579>3.0.CO;2-R)
- US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS) (1986) *Urban Hydrology for Small Watersheds*, TR-55



## Ιστότοποι

<https://www.eydap.gr/TheCompany/DrainageAndSewerage/SewageNetwork/>

<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>

<https://www.news247.gr/kairos/21-oktovrioy-1994-i-foniki-plimmyra-toy-podonifti-stin-attiki.9395967.html>

<https://geodata.gov.gr/dataset/oria-demon-kallikrates>

<https://www.epa.gov/>

<https://deyael.gr/>

<http://www.minoancrete.com/agtriada.htm>

<https://www.asce.org/>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Π.Α.1: Χρήσιμα μεγέθη για τον υπολογισμό της παροχής ακαθάρτων

Πληθυσμός Σχεδιασμού		πυκνότητα (κάτοικοι/m <sup>2</sup> )	area (m <sup>2</sup> )	P <sub>v</sub>
		P <sub>v</sub>	19815.01	0.658048
Μέση ανηγμένη ημερήσια κατανάλωση ανά κάτοικο	q	250	L/d	
Συνολική μέση ημερήσια κατανάλωση για τον πληθυσμό σχεδιασμού	Q <sub>d</sub>	37.73	L/s	
Πολλαπλασιαστής Ζήτησης 1	F <sub>1</sub>	1		
Πολλαπλασιαστής Ζήτησης 2	F <sub>2</sub>	2		
Πολλαπλασιαστής Ζήτησης ΟΛΙΚΟΣ	F <sub>ολ</sub>	6		
Συνολική μέγιστη ωριαία κατανάλωση	Q <sub>h,max</sub>	226.38	L/s	
Ποσοστό μετατροπής σε ακάθαρτα	μ	80%		
Συνολική Μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων	Q <sub>Ah,max</sub>	181.10	L/s	
Συντελεστής P	P	1.96		
Μέγιστη Ημερήσια Παροχή Ακαθάρτων	Q <sub>Ad,max</sub>	30.18	L/s	
Μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων	Q <sub>Ah,max</sub>	59.01	L/s	

Πίνακας Π.Α.2: Υπολογισμός παροχής ακαθάρτων σε κάθε αστική λεκάνη απορροής (ΛΑ)

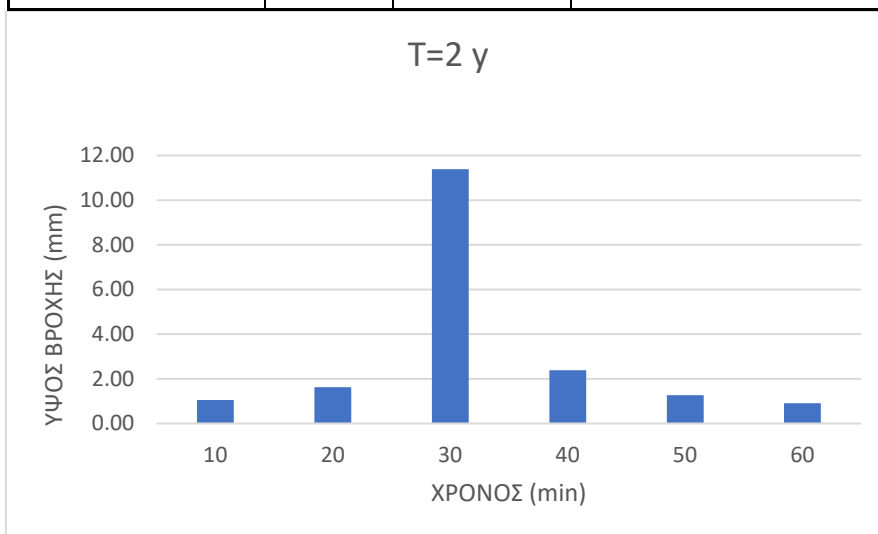
ΟΝΟΜΑ ΛΑ	ΚΟΜΒΟΣ ΠΟΥ ΑΠΟΧΕΤΕΥΕΤΑΙ	ΕΚΤΑΣΗ (ha)	ΕΚΤΑΣΗ (km <sup>2</sup> )	P <sub>v</sub>	Q <sub>d</sub>	Q <sub>h,max</sub>	Q <sub>Ah,max</sub>	Q <sub>Ad,max</sub>	P	Q <sub>Ah,max</sub>
S395100	395100	0.74	0.007	146	0.42	2.54	2.03	0.34	3.00	<b>1.016</b>
S395101	395101	1.23	0.012	244	0.71	4.24	3.39	0.57	3.00	<b>1.695</b>
S395133	395133	7.52	0.075	1490	4.31	25.87	20.70	3.45	2.85	<b>9.817</b>
S395132	395132	8.98	0.090	1780	5.15	30.90	24.72	4.12	2.73	<b>11.256</b>
S416155	416155	11.40	0.114	2260	6.54	39.23	31.38	5.23	2.59	<b>13.563</b>
S416156	416156	6.94	0.069	1375	3.98	23.87	19.10	3.18	2.90	<b>9.234</b>
S415282	415282	8.31	0.083	1646	4.76	28.57	22.86	3.81	2.78	<b>10.594</b>
S395126	395126	1.20	0.012	237	0.69	4.12	3.30	0.55	3.00	<b>1.649</b>
S395123	395123	3.08	0.031	610	1.76	10.59	8.47	1.41	3.00	<b>4.235</b>



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακας Π.Β.1: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 1

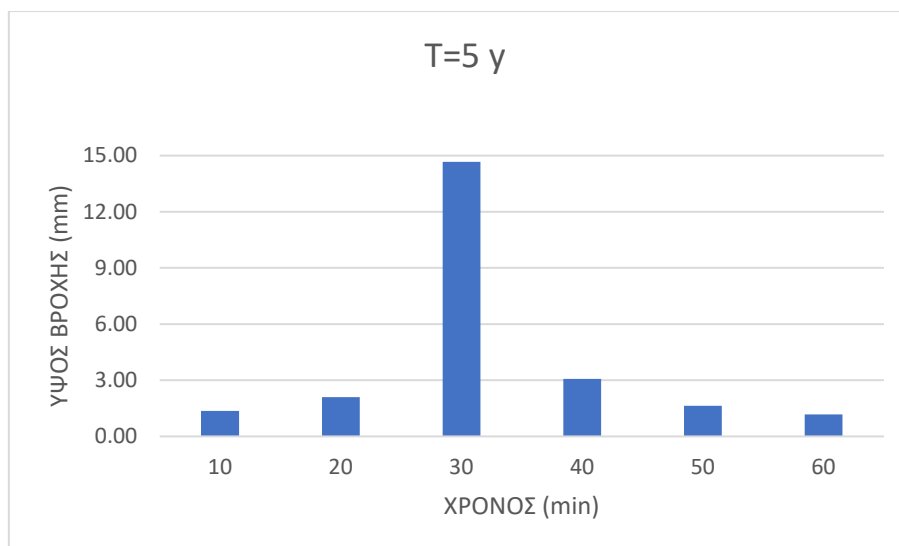
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		2		
10	0.17	11.38	11.38	1.05
20	0.33	13.78	2.39	1.62
30	0.50	15.40	1.62	11.38
40	0.67	16.67	1.27	2.39
50	0.83	17.72	1.05	1.27
60	1.00	18.63	0.91	0.91
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.1: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 1

Πίνακας Π.Β.2: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 1

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		5		
10	0.17	14.66	14.66	1.36
20	0.33	17.74	3.08	2.09
30	0.50	19.83	2.09	14.66
40	0.67	21.46	1.63	3.08
50	0.83	22.82	1.36	1.63
60	1.00	24.00	1.17	1.17
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



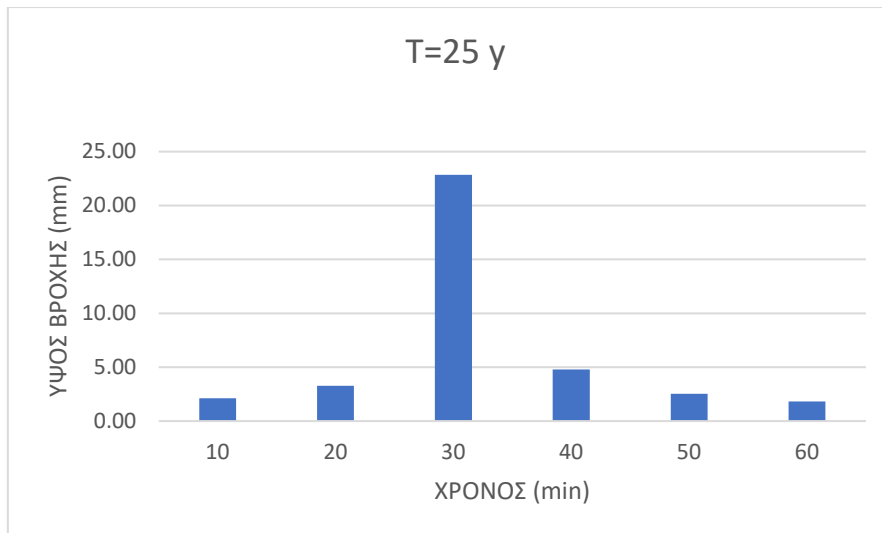
Εικόνα Π.Β.2: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 1

Πίνακας Π.Β.3: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 1

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		10		
10	0.17	17.75	17.75	1.64
20	0.33	21.48	3.73	2.53
30	0.50	24.01	2.53	17.75
40	0.67	25.99	1.98	3.73
50	0.83	27.64	1.64	1.98
60	1.00	29.06	1.42	1.42
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00

Πίνακας Π.Β.4: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 1

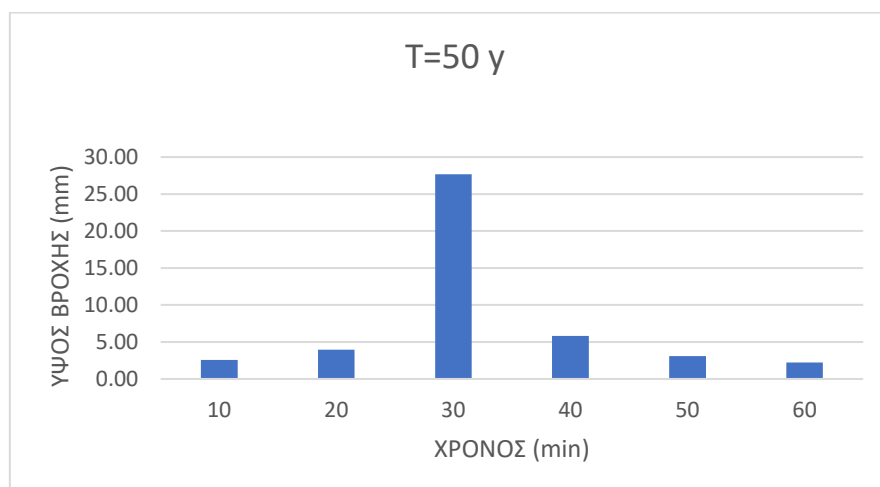
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		25		
10	0.17	22.86	22.86	2.12
20	0.33	27.66	4.80	3.26
30	0.50	30.92	3.26	22.86
40	0.67	33.47	2.55	4.80
50	0.83	35.59	2.12	2.55
60	1.00	37.42	1.83	1.83
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.3: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 1

Πίνακας Π.Β.5: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 1

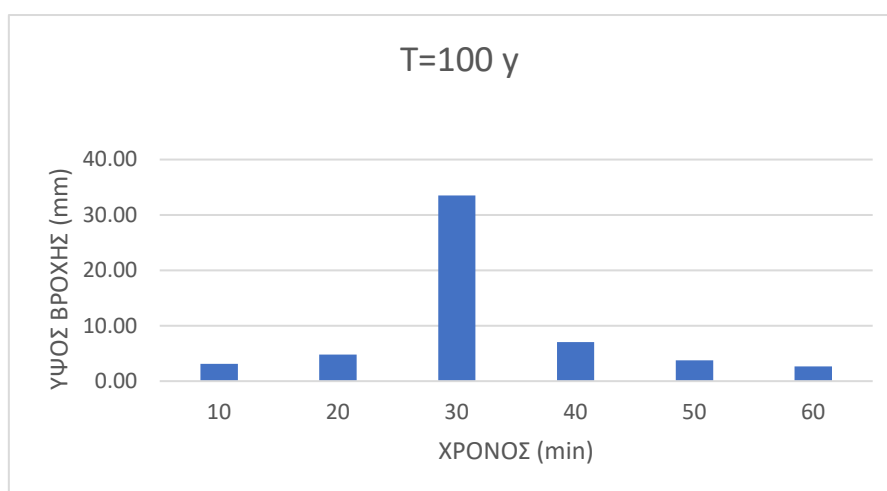
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		50		
10	0.17	27.68	27.68	2.56
20	0.33	33.49	5.81	3.95
30	0.50	37.44	3.95	27.68
40	0.67	40.53	3.08	5.81
50	0.83	43.09	2.56	3.08
60	1.00	45.31	2.22	2.22
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.4: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 1

Πίνακας Π.Β.6: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 1

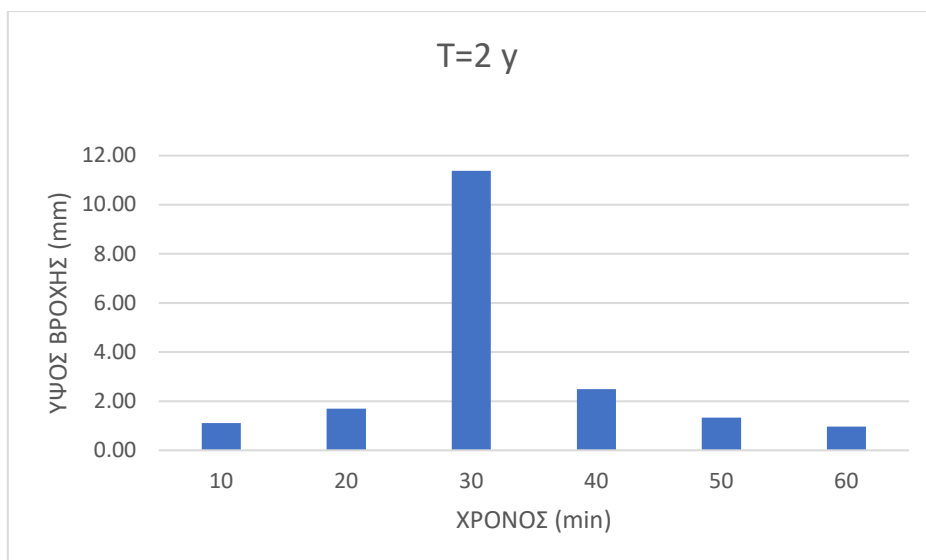
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		100		
10	0.17	33.52	33.52	3.11
20	0.33	40.55	7.04	4.78
30	0.50	45.34	4.78	33.52
40	0.67	49.07	3.73	7.04
50	0.83	52.18	3.11	3.73
60	1.00	54.86	2.68	2.68
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.5: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 1

Πίνακας Π.Β.7: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 2

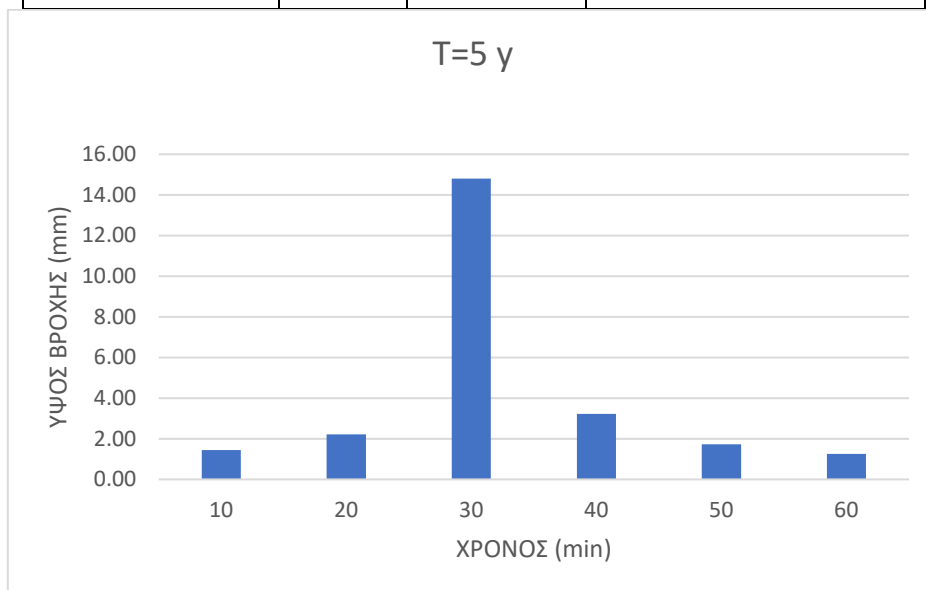
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		2		
10	0.17	11.38	11.38	1.11
20	0.33	13.87	2.49	1.70
30	0.50	15.57	1.70	11.38
40	0.67	16.90	1.33	2.49
50	0.83	18.01	1.11	1.33
60	1.00	18.97	0.96	0.96
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.6: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 2

Πίνακας Π.Β.8: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 2

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		5		
10	0.17	14.80	14.80	1.44
20	0.33	18.03	3.23	2.21
30	0.50	20.24	2.21	14.80
40	0.67	21.96	1.73	3.23
50	0.83	23.41	1.44	1.73
60	1.00	24.66	1.25	1.25
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.7: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 2

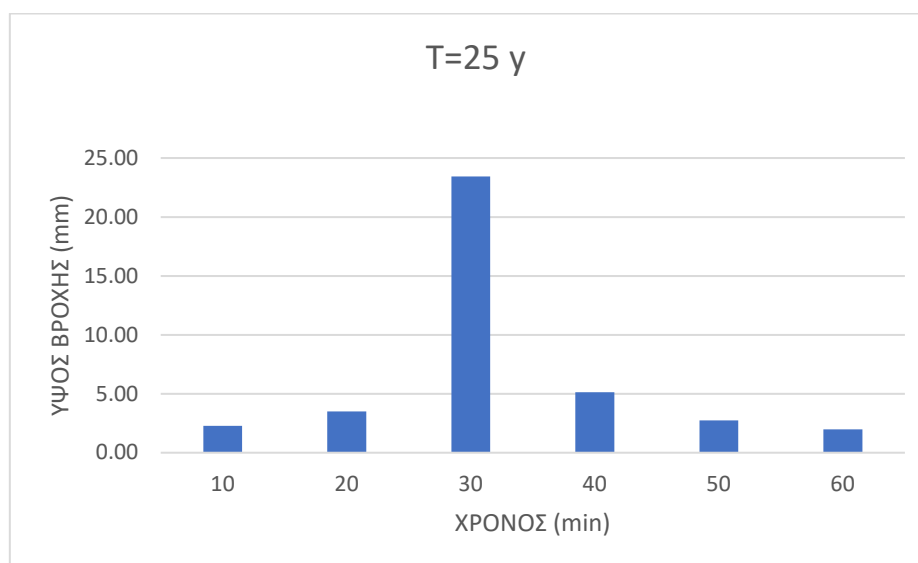


Πίνακας Π.Β.9: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 2

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		10		
10	0.17	18.04	18.04	1.76
20	0.33	21.98	3.94	2.69
30	0.50	24.67	2.69	18.04
40	0.67	26.78	2.11	3.94
50	0.83	28.54	1.76	2.11
60	1.00	30.06	1.52	1.52
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00

Πίνακας Π.Β.10: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 2

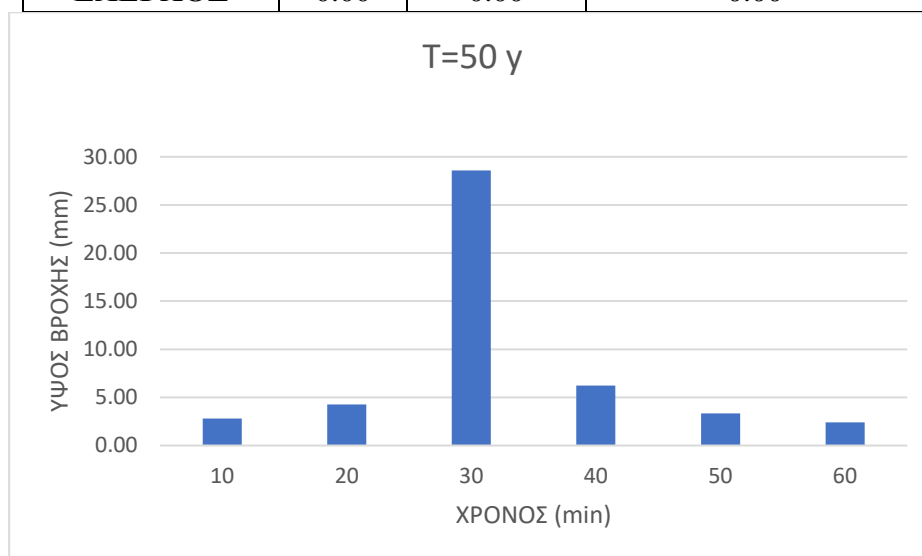
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		25		
10	0.17	23.44	23.44	2.29
20	0.33	28.57	5.12	3.50
30	0.50	32.06	3.50	23.44
40	0.67	34.80	2.74	5.12
50	0.83	37.09	2.29	2.74
60	1.00	39.07	1.98	1.98
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.8: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 2

Πίνακας Π.Β.11: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 2

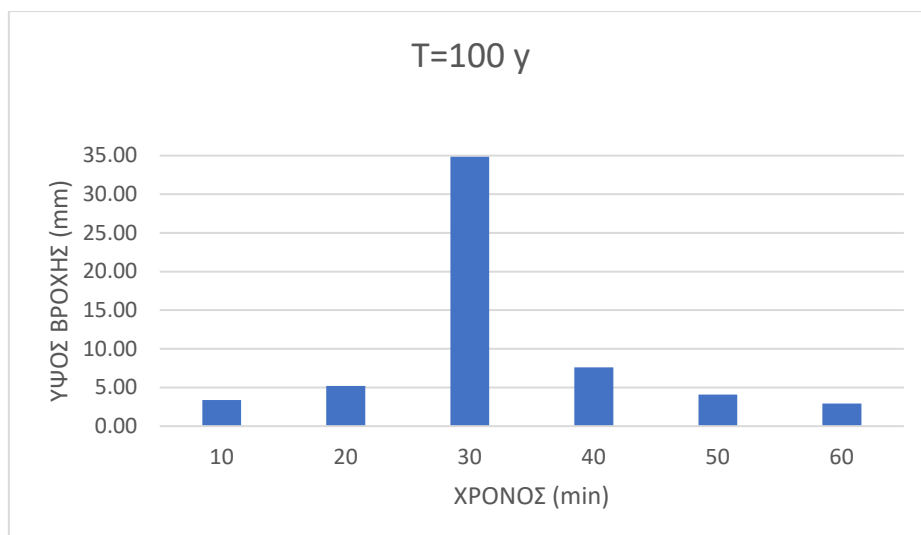
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		50		
10	0.17	28.59	28.59	2.79
20	0.33	34.83	6.24	4.27
30	0.50	39.10	4.27	28.59
40	0.67	42.44	3.34	6.24
50	0.83	45.22	2.79	3.34
60	1.00	47.63	2.41	2.41
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.9: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 2

Πίνακας Π.Β.12: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 2

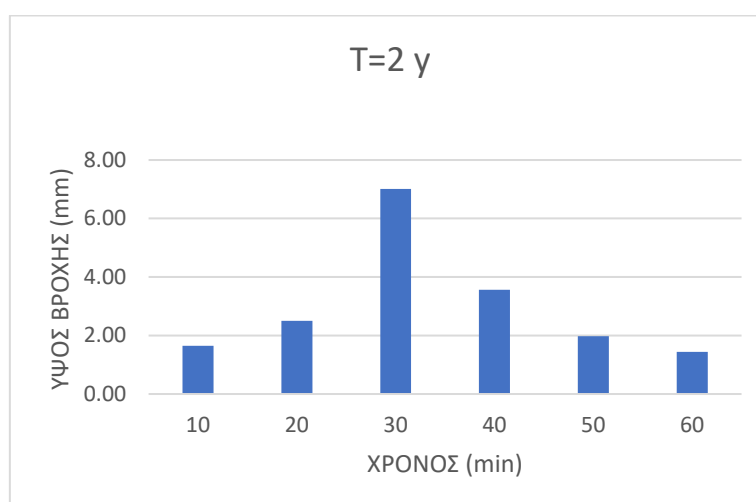
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		100		
10	0.17	34.85	34.85	3.40
20	0.33	42.46	7.61	5.20
30	0.50	47.67	5.20	34.85
40	0.67	51.74	4.07	7.61
50	0.83	55.14	3.40	4.07
60	1.00	58.08	2.94	2.94
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.10: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 2

Πίνακας Π.Β.13: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 3

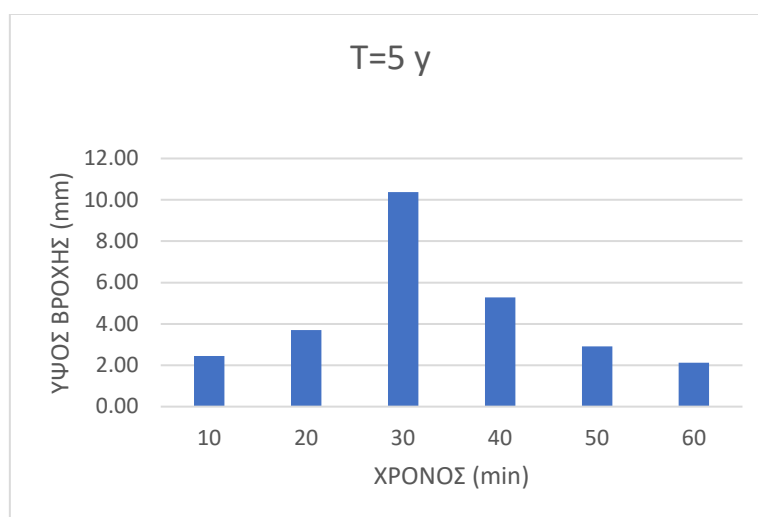
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		2		
10	0.17	7.02	7.02	1.65
20	0.33	10.58	3.57	2.50
30	0.50	13.09	2.50	7.02
40	0.67	15.06	1.97	3.57
50	0.83	16.71	1.65	1.97
60	1.00	18.15	1.44	1.44
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.11: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 3

Πίνακας Π.Β.14: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 3

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		5		
10	0.17	10.37	10.37	2.44
20	0.33	15.65	5.28	3.70
30	0.50	19.35	3.70	10.37
40	0.67	22.27	2.92	5.28
50	0.83	24.71	2.44	2.92
60	1.00	26.84	2.12	2.12
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



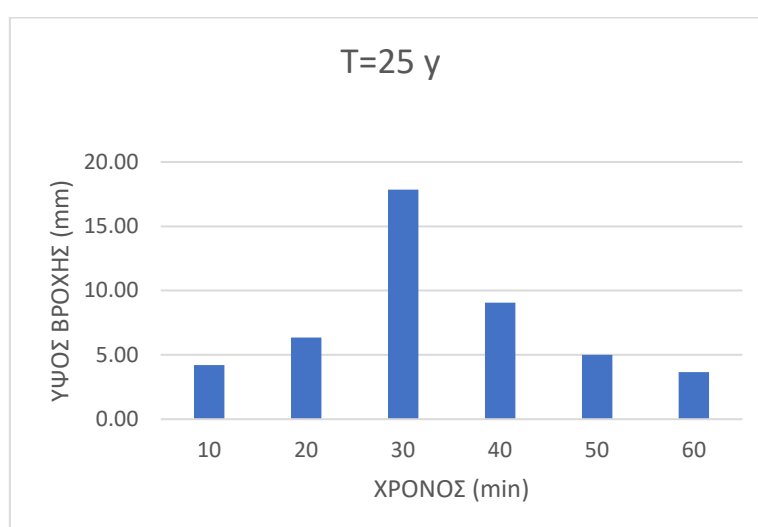
Εικόνα Π.Β.12: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 3

Πίνακας Π.Β.15: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 3

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		10		
10	0.17	13.32	13.32	3.14
20	0.33	20.09	6.78	4.75
30	0.50	24.84	4.75	13.32
40	0.67	28.59	3.75	6.78
50	0.83	31.73	3.14	3.75
60	1.00	34.46	2.73	2.73
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00

Πίνακας Π.Β.16: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 3

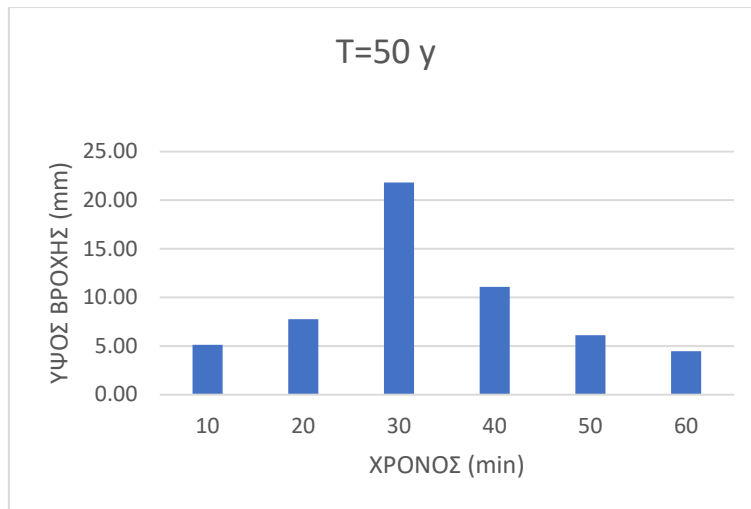
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		25		
10	0.17	17.84	17.84	4.20
20	0.33	26.92	9.08	6.36
30	0.50	33.28	6.36	17.84
40	0.67	38.30	5.02	9.08
50	0.83	42.50	4.20	5.02
60	1.00	46.16	3.65	3.65
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.13: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 3

Πίνακας Π.Β.17: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 3

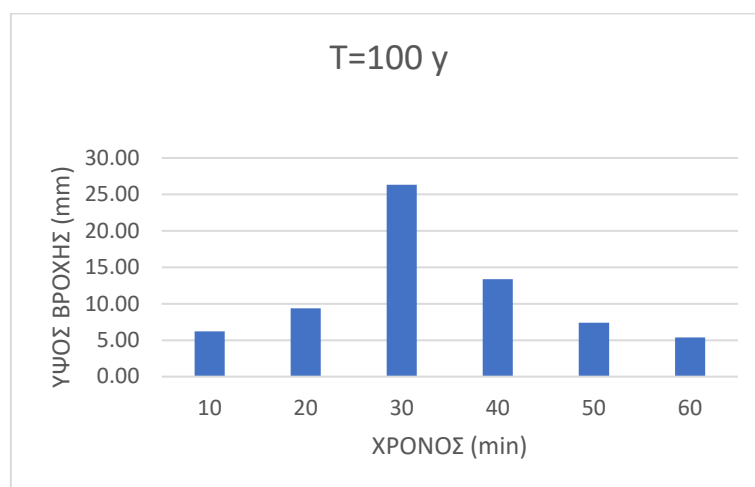
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		50		
10	0.17	21.81	21.81	5.14
20	0.33	32.90	11.09	7.78
30	0.50	40.68	7.78	21.81
40	0.67	46.81	6.13	11.09
50	0.83	51.95	5.14	6.13
60	1.00	56.42	4.47	4.47
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.14: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 3

Πίνακας Π.Β.18: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 3

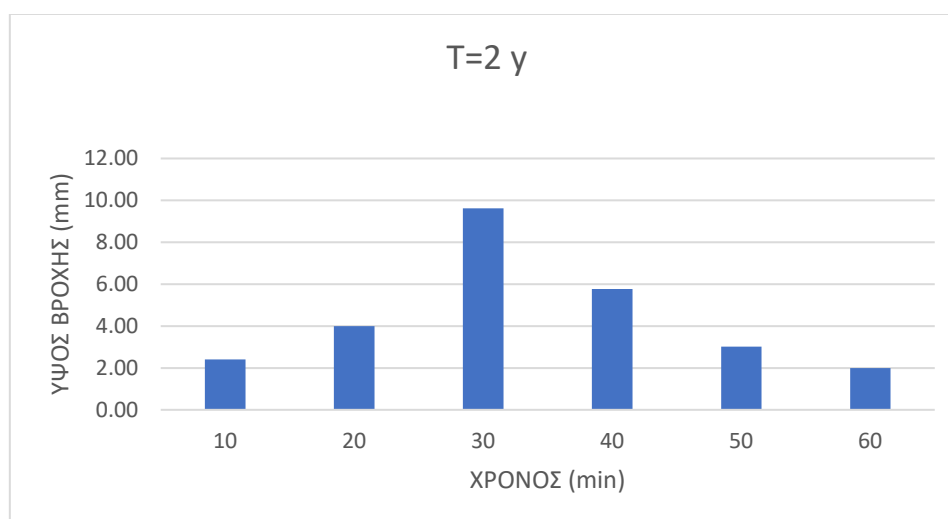
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		100		
10	0.17	26.32	26.32	6.20
20	0.33	39.71	13.39	9.39
30	0.50	49.09	9.39	26.32
40	0.67	56.49	7.40	13.39
50	0.83	62.70	6.20	7.40
60	1.00	68.09	5.39	5.39
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.15: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 3

Πίνακας Π.Β.19: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 4

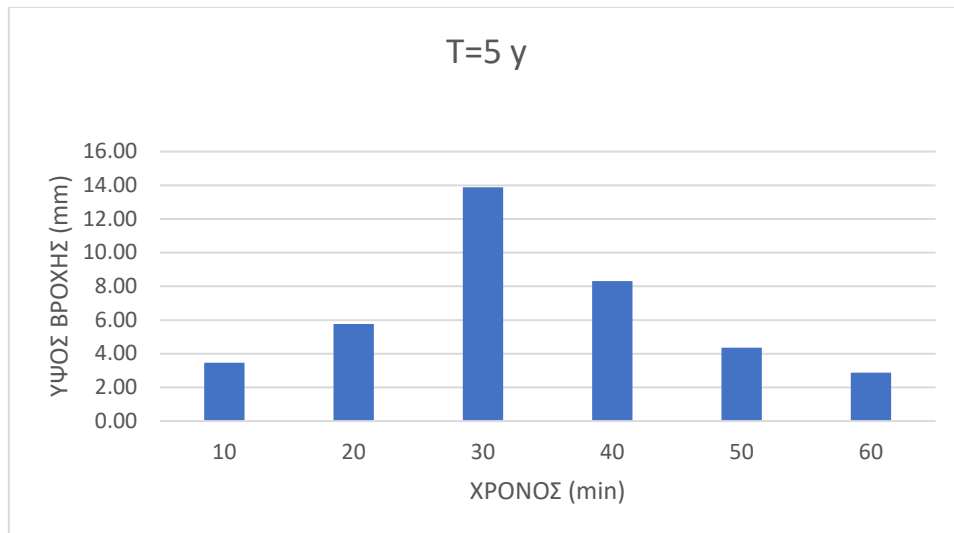
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		2		
10	0.17	9.62	9.62	2.40
20	0.33	15.38	5.76	4.00
30	0.50	19.38	4.00	9.62
40	0.67	22.40	3.02	5.76
50	0.83	24.80	2.40	3.02
60	1.00	26.79	1.99	1.99
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.16: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 4

Πίνακας Π.Β.20: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 4

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		5		
10	0.17	13.88	13.88	3.47
20	0.33	22.19	8.32	5.77
30	0.50	27.96	5.77	13.88
40	0.67	32.31	4.35	8.32
50	0.83	35.78	3.47	4.35
60	1.00	38.65	2.87	2.87
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.17: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 4

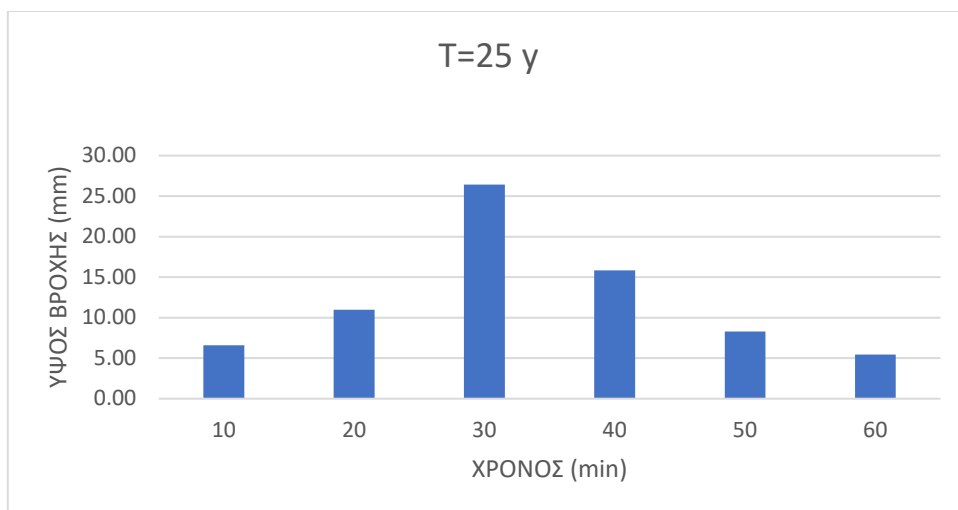
Πίνακας Π.Β.21: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 4

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		10		
10	0.17	18.31	18.31	4.58
20	0.33	29.28	10.97	7.61
30	0.50	36.90	7.61	18.31
40	0.67	42.64	5.74	10.97
50	0.83	47.22	4.58	5.74
60	1.00	51.00	3.79	3.79
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00

Πίνακας Π.Β.22: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 4

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		25		
10	0.17	26.42	26.42	6.60
20	0.33	42.25	15.83	10.98
30	0.50	53.23	10.98	26.42
40	0.67	61.52	8.29	15.83
50	0.83	68.12	6.60	8.29
60	1.00	73.58	5.46	5.46
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00

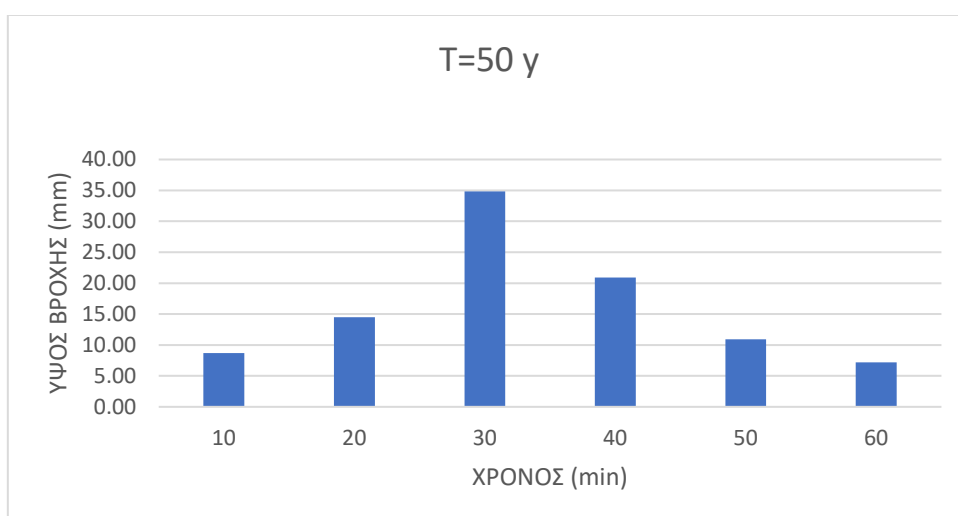




Εικόνα Π.Β.18: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 4

Πίνακας Π.Β.23: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 4

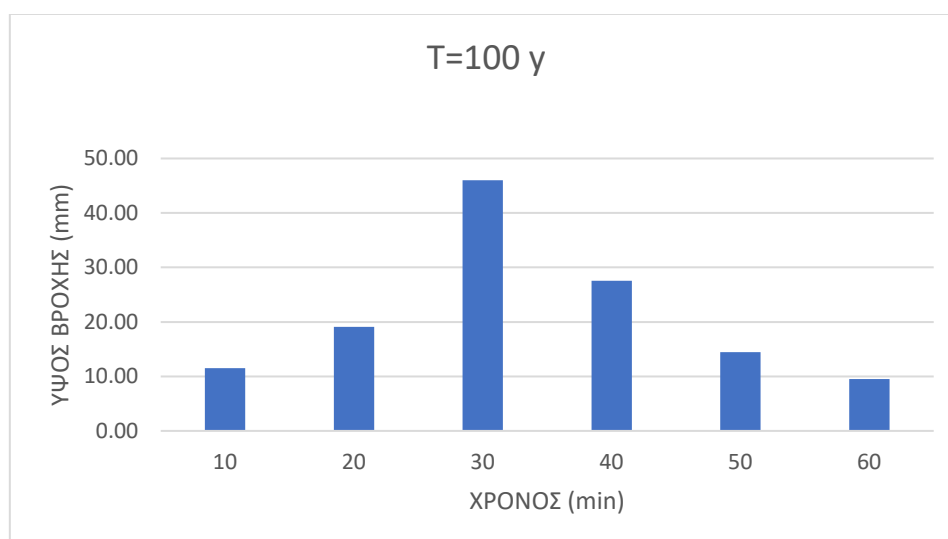
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		50		
10	0.17	34.86	34.86	8.71
20	0.33	55.75	20.89	14.49
30	0.50	70.24	14.49	34.86
40	0.67	81.17	10.93	20.89
50	0.83	89.88	8.71	10.93
60	1.00	97.09	7.21	7.21
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.19: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 4

Πίνακας Π.Β.24: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 4

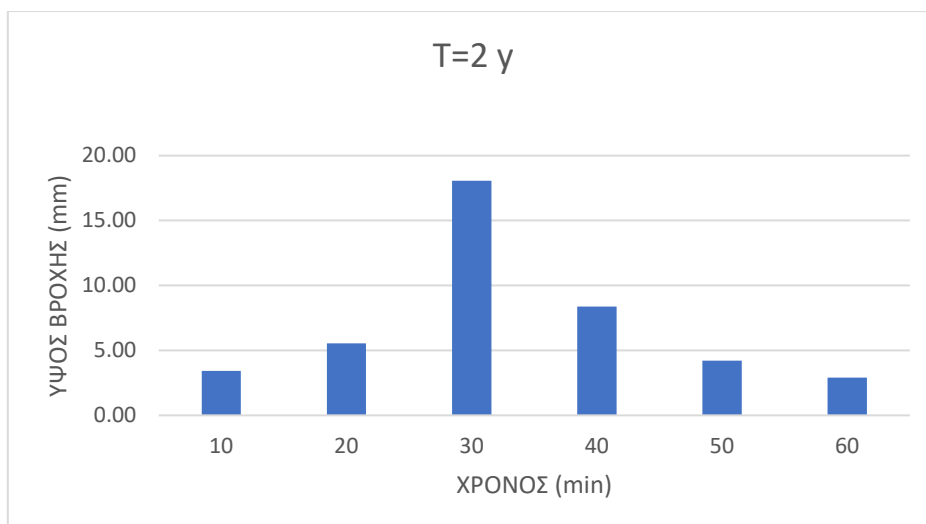
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		100		
10	0.17	45.99	45.99	11.49
20	0.33	73.56	27.56	19.12
30	0.50	92.68	19.12	45.99
40	0.67	107.11	14.43	27.56
50	0.83	118.60	11.49	14.43
60	1.00	128.11	9.51	9.51
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.20: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 4

Πίνακας Π.Β.25: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 5

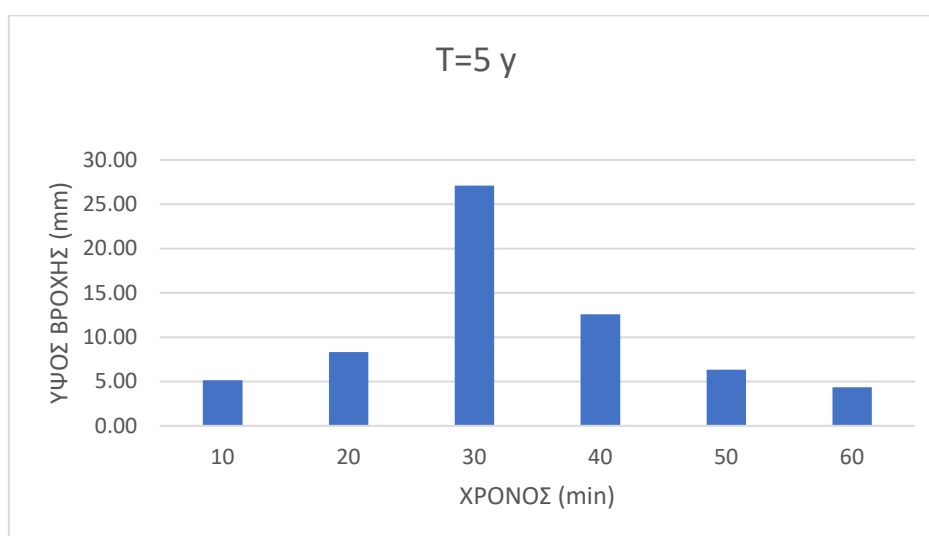
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		2		
10	0.17	18.06	18.06	3.43
20	0.33	26.44	8.38	5.55
30	0.50	32.00	5.55	18.06
40	0.67	36.21	4.21	8.38
50	0.83	39.63	3.43	4.21
60	1.00	42.54	2.91	2.91
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.21: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Β.26: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 5

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		5		
10	0.17	27.11	27.11	5.14
20	0.33	39.69	12.58	8.33
30	0.50	48.02	8.33	27.11
40	0.67	54.34	6.32	12.58
50	0.83	59.48	5.14	6.32
60	1.00	63.84	4.37	4.37
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



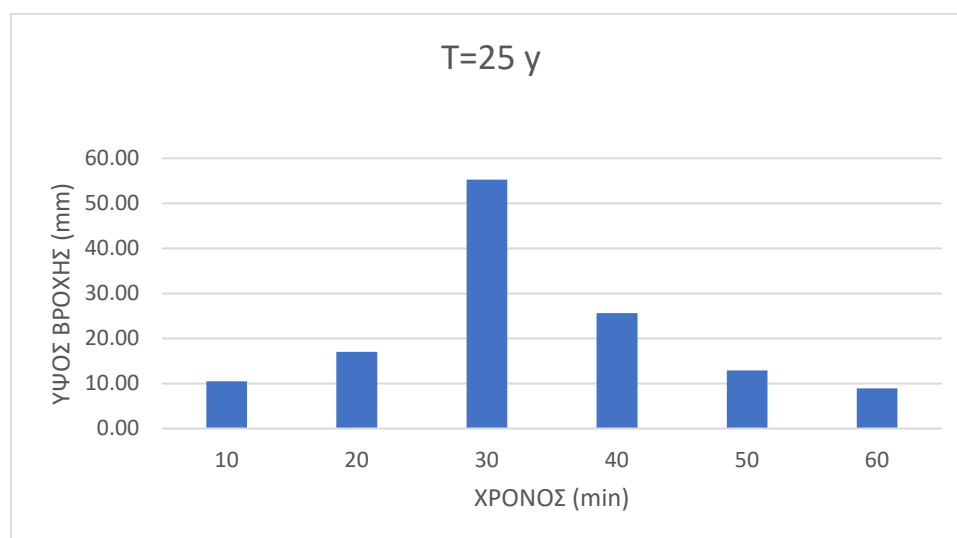
Εικόνα Π.Β.22: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Β.27: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 5

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		10		
10	0.17	36.85	36.85	6.99
20	0.33	53.95	17.10	11.33
30	0.50	65.28	11.33	36.85
40	0.67	73.87	8.59	17.10
50	0.83	80.85	6.99	8.59
60	1.00	86.79	5.93	5.93
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00

Πίνακας Π.Β.28: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 5

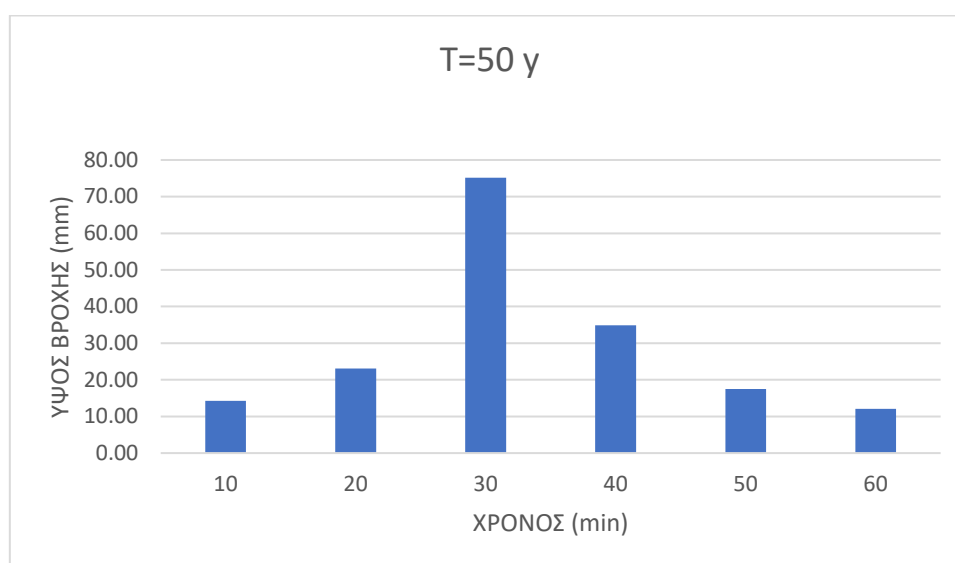
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		25		
10	0.17	55.30	55.30	10.49
20	0.33	80.96	25.66	17.00
30	0.50	97.96	17.00	55.30
40	0.67	110.85	12.89	25.66
50	0.83	121.34	10.49	12.89
60	1.00	130.24	8.91	8.91
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.23: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Β.29: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 5

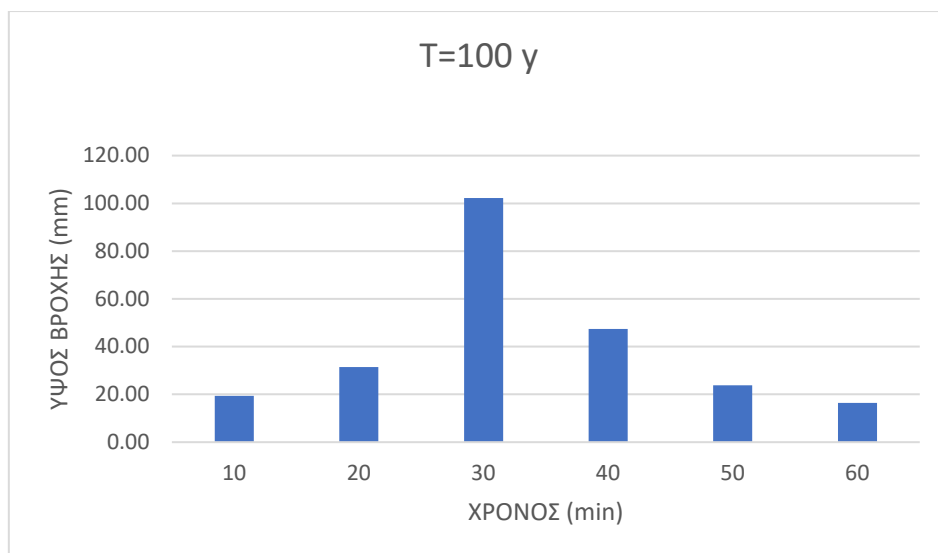
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		50		
10	0.17	75.18	75.18	14.26
20	0.33	110.06	34.88	23.11
30	0.50	133.17	23.11	75.18
40	0.67	150.69	17.52	34.88
50	0.83	164.95	14.26	17.52
60	1.00	177.05	12.11	12.11
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.24: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Β.30: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 5

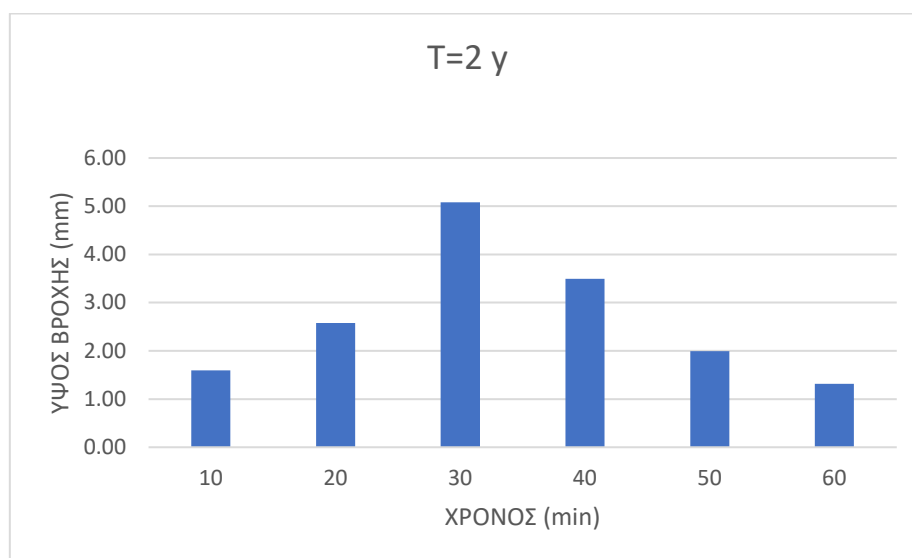
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		100		
10	0.17	102.21	102.21	19.38
20	0.33	149.62	47.41	31.41
30	0.50	181.03	31.41	102.21
40	0.67	204.85	23.82	47.41
50	0.83	224.23	19.38	23.82
60	1.00	240.69	16.46	16.46
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.25: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 5

Πίνακας Π.Β.31: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 6

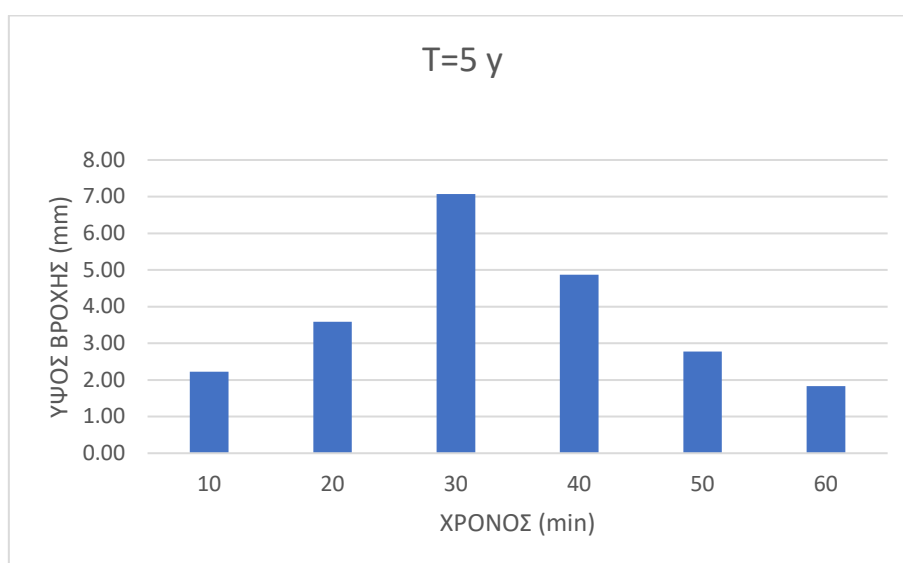
	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		2		
10	0.17	5.08	5.08	1.60
20	0.33	8.57	3.50	2.58
30	0.50	11.15	2.58	5.08
40	0.67	13.14	1.99	3.50
50	0.83	14.74	1.60	1.99
60	1.00	16.05	1.31	1.31
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.26: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 2 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας Π.Β.32: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 6

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		5		
10	0.17	7.07	7.07	2.22
20	0.33	11.94	4.87	3.59
30	0.50	15.52	3.59	7.07
40	0.67	18.30	2.77	4.87
50	0.83	20.52	2.22	2.77
60	1.00	22.34	1.83	1.83
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



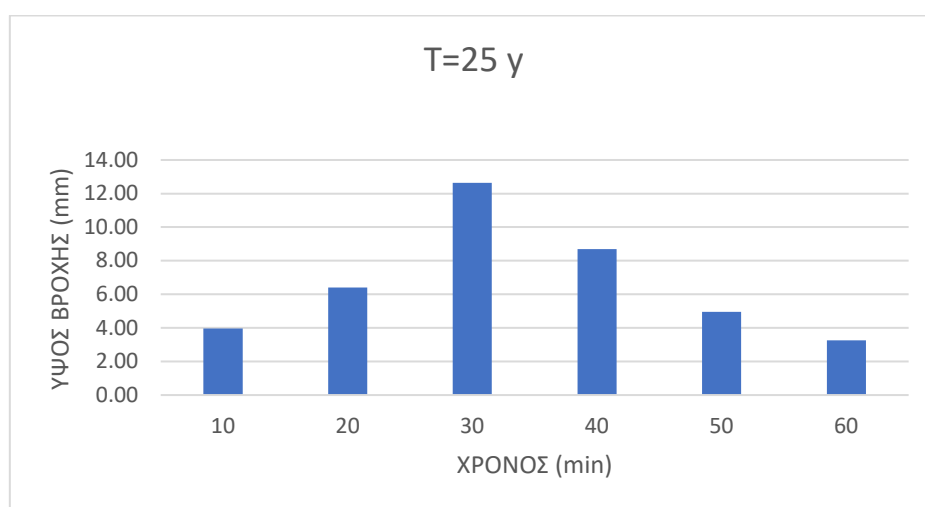
Εικόνα Π.Β.27: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 5 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας Π.Β.33: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 10 ετών- Σενάριο 6

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		10		
10	0.17	9.08	9.08	2.85
20	0.33	15.33	6.25	4.61
30	0.50	19.94	4.61	9.08
40	0.67	23.50	3.56	6.25
50	0.83	26.35	2.85	3.56
60	1.00	28.70	2.35	2.35
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00

Πίνακας Π.Β.34: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 6

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		25		
10	0.17	12.64	12.64	3.97
20	0.33	21.34	8.70	6.41
30	0.50	27.75	6.41	12.64
40	0.67	32.71	4.96	8.70
50	0.83	36.68	3.97	4.96
60	1.00	39.95	3.27	3.27
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00

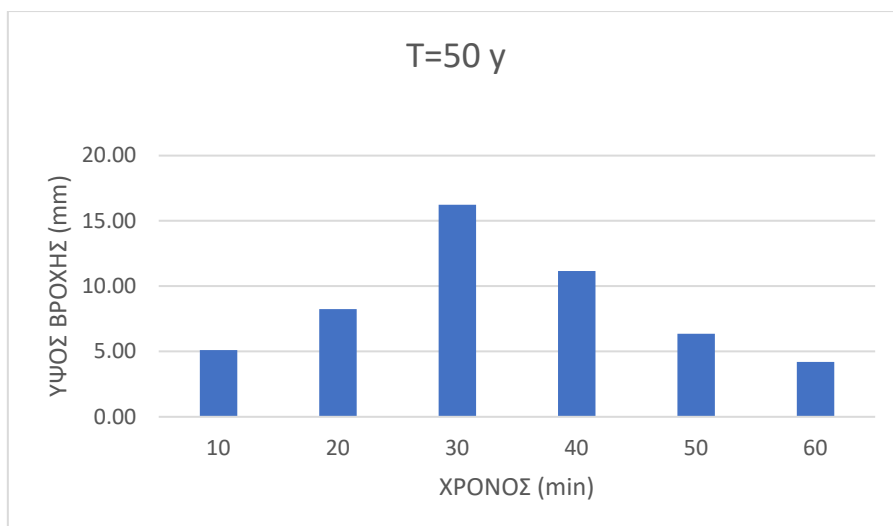


Εικόνα Π.Β.28: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 25 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας Π.Β.35: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 6

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		50		
10	0.17	16.23	16.23	5.10
20	0.33	27.41	11.17	8.24
30	0.50	35.64	8.24	16.23
40	0.67	42.01	6.37	11.17
50	0.83	47.11	5.10	6.37
60	1.00	51.30	4.20	4.20
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00

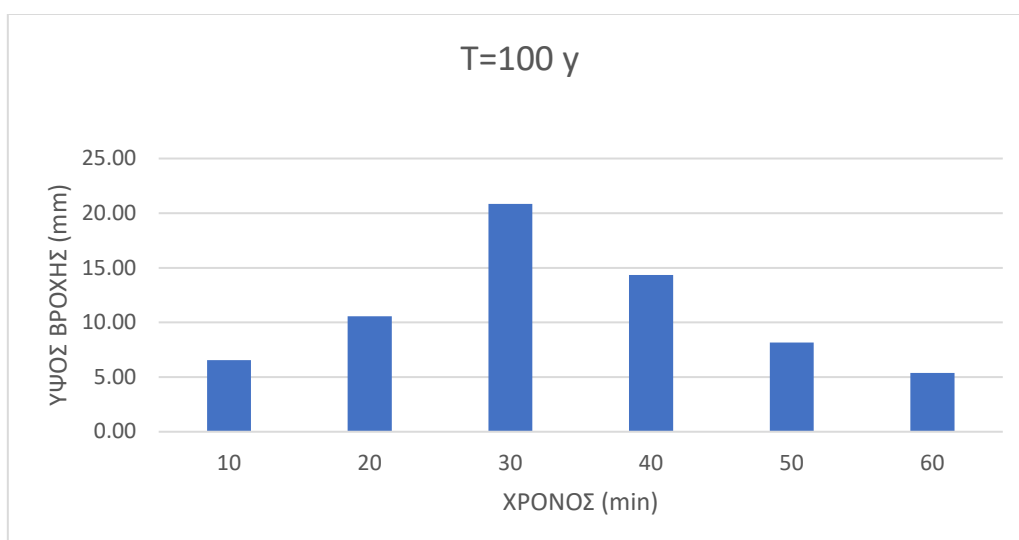




Εικόνα Π.Β.29: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 50 ετών- Σενάριο 6

Πίνακας Π.Β.36: Κατανομή βροχής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 6

	<b>d</b>	<b>T=</b>	<b>ΔΙΑΦΟΡΑ</b>	<b>ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ BLOCK</b>
		100		
10	0.17	20.85	20.85	6.55
20	0.33	35.20	14.35	10.58
30	0.50	45.78	10.58	20.85
40	0.67	53.95	8.18	14.35
50	0.83	60.50	6.55	8.18
60	1.00	65.89	5.39	5.39
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ</b>		0.00	0.00	0.00



Εικόνα Π.Β.30: Υετογράφημα για περίοδο επαναφοράς 100 ετών- Σενάριο 6

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Πίνακας Π.Γ.1: Βαθμονόμηση αγωγού 1313- Υπολογισμός συντελεστή NSE

ΑΓΩΓΟΣ 1313	Observed		Model	NSE	0.897
	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(L/s)	Q(L/s)	(O-M) <sup>2</sup>	(O-Omean) <sup>2</sup>
3:10:00	0.06	63.19	62.04	1.32	83.04
3:20:00	0.06	62.73	62.04	0.47	91.68
3:30:00	0.06	63.94	62.03	3.65	69.95
3:40:00	0.06	63.41	62.03	1.92	79.00
3:50:00	0.06	62.68	62.05	0.39	92.65
4:00:00	0.06	62.99	62.41	0.33	86.78
4:10:00	0.06	64.99	63.72	1.61	53.50
4:20:00	0.05	45.94	71.06	630.82	694.81
4:30:00	0.06	60.85	77.08	263.53	131.25
4:40:00	0.09	87.54	80.17	54.37	232.28
4:50:00	0.05	51.36	78.35	728.51	438.64
5:00:00	0.04	38.30	74.50	1310.75	1156.50
5:10:00	0.02	24.54	69.81	2049.03	2280.95
5:20:00	0.03	26.06	67.88	1748.98	2138.49
5:30:00	0.06	59.16	73.84	215.60	172.83
5:40:00	0.07	72.96	150.43	6002.06	0.43
5:50:00	0.06	56.11	114.28	3383.37	262.11
6:00:00	0.09	93.13	134.44	1706.17	433.94
6:10:00	0.46	458.54	443.15	236.84	149178.75
6:20:00	0.42	417.45	410.93	42.51	119126.48
6:30:00	0.14	141.17	137.74	11.78	4742.99
6:40:00	0.04	37.07	71.74	1202.02	1241.37
6:50:00	0.03	33.89	65.15	977.07	1475.41
7:00:00	0.03	32.62	64.16	994.47	1574.36
7:10:00	0.03	33.49	63.73	914.28	1506.22
7:20:00	0.03	29.67	63.51	1145.39	1817.88
7:30:00	0.03	32.60	63.40	948.65	1576.34
7:40:00	0.04	37.01	63.32	692.15	1245.51
7:50:00	0.03	34.85	63.27	807.42	1402.36
8:00:00	0.04	36.11	63.24	736.13	1310.06
8:10:00	0.04	37.00	63.21	686.70	1245.95
8:20:00	0.04	36.03	63.20	738.36	1315.93
8:30:00	0.04	35.83	63.18	747.76	1329.93
8:40:00	0.04	36.03	63.17	736.34	1315.41
8:50:00	0.04	37.14	63.16	677.14	1236.57
9:00:00	0.04	36.51	63.16	710.34	1281.30

Πίνακας Π.Γ.2: Βαθμονόμηση αγωγού 1640- Υπολογισμός συντελεστή NSE

<b>ΑΓΩΓΟΣ 1640</b>	<b>Observed</b>		<b>Model</b>	<b>NSE</b>	0.545
<b>TIME</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(L/s)</b>	<b>Q(L/s)</b>	<b>(O-M)<sup>2</sup></b>	<b>(O-Omean)<sup>2</sup></b>
3:10:00	0.07	71.43	75	12.76	4458.95
3:20:00	0.06	58.97	75	257.06	6278.38
3:30:00	0.09	90.34	75	235.29	2290.98
3:40:00	0.05	53.83	75	448.21	7119.01
3:50:00	0.09	92.14	75	293.74	2121.93
4:00:00	0.10	101.85	75.02	719.85	1321.56
4:10:00	0.11	108.02	76.9	968.65	910.84
4:20:00	0.13	130.55	85.79	2003.34	58.59
4:30:00	0.20	204.21	94.26	12088.82	4356.78
4:40:00	0.26	257.49	98.92	25142.88	14228.15
4:50:00	0.20	204.60	92.8	12499.64	4408.77
5:00:00	0.20	195.24	90.1	11055.10	3253.56
5:10:00	0.20	195.52	84.57	12309.18	3284.84
5:20:00	0.11	110.03	82.61	751.62	793.98
5:30:00	0.27	267.27	91.61	30856.73	16658.44
5:40:00	0.25	246.96	198.71	2328.41	11828.81
5:50:00	0.16	163.07	134.34	825.24	618.21
6:00:00	0.37	365.97	183.76	33201.23	51878.62
6:10:00	0.48	476.11	490.97	220.71	114183.57
6:20:00	0.32	321.28	409.95	7862.15	33517.55
6:30:00	0.14	135.69	155.38	387.54	6.30
6:40:00	0.10	103.24	93.66	91.73	1222.58
6:50:00	0.06	63.40	83.14	389.59	5595.23
7:00:00	0.07	70.73	80.26	90.85	4552.87
7:10:00	0.07	72.07	79	48.08	4374.16
7:20:00	0.04	41.35	78.35	1368.99	9380.51
7:30:00	0.05	54.30	77.93	558.43	7039.93
7:40:00	0.07	73.53	77.7	17.42	4183.15
7:50:00	0.09	91.61	77.56	197.33	2171.16
8:00:00	0.08	84.65	77.42	52.28	2867.91
8:10:00	0.09	93.54	77.31	263.46	1994.69
8:20:00	0.08	75.75	77.25	2.24	3899.85
8:30:00	0.09	85.51	77.22	68.70	2776.75
8:40:00	0.07	73.37	77.2	14.68	4203.58
8:50:00	0.06	61.33	77.14	249.99	5909.68
9:00:00	0.08	80.38	77.16	10.38	3343.38

Πίνακας Π.Γ.3: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 1

<b>ΑΓΩΓΟΣ 1621</b>	<b>T=2y</b>	<b>T=5y</b>	<b>T=10y</b>	<b>T=25y</b>	<b>T=50y</b>	<b>T=100y</b>
<b>TIME</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>
0:10:00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
0:20:00	0.28	0.32	0.36	0.42	0.48	0.67
0:30:00	0.43	0.64	0.82	1.07	1.28	1.56
0:40:00	3.42	4.61	5.93	8.46	10.49	13.56
0:50:00	1.65	2.28	3.01	4.28	5.68	7.37
1:00:00	0.85	1.32	1.78	2.50	3.13	3.92
1:10:00	0.72	1.08	1.39	1.88	2.29	2.77
1:20:00	0.44	0.62	0.78	1.00	1.18	1.39
1:30:00	0.31	0.42	0.50	0.61	0.69	0.77
1:40:00	0.26	0.33	0.38	0.45	0.50	0.55
1:50:00	0.24	0.29	0.32	0.36	0.39	0.42
2:00:00	0.22	0.26	0.28	0.31	0.33	0.35
2:10:00	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29	0.30
2:20:00	0.20	0.22	0.23	0.25	0.26	0.27
2:30:00	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
2:40:00	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23	0.23
2:50:00	0.20	0.20	0.20	0.21	0.22	0.22
3:00:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.21

Πίνακας Π.Γ.4: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 2

<b>ΑΓΩΓΟΣ 1621</b>	<b>T=2y</b>	<b>T=5y</b>	<b>T=10y</b>	<b>T=25y</b>	<b>T=50y</b>	<b>T=100y</b>
<b>TIME</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>
0:10:00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
0:20:00	0.29	0.33	0.37	0.44	0.54	0.78
0:30:00	0.46	0.69	0.88	1.14	1.39	1.70
0:40:00	3.42	4.69	6.07	8.80	10.77	13.62
0:50:00	1.69	2.37	3.10	4.62	6.07	7.87
1:00:00	0.89	1.40	1.89	2.65	3.40	4.21
1:10:00	0.75	1.14	1.48	2.00	2.46	3.03
1:20:00	0.45	0.65	0.82	1.05	1.24	1.48
1:30:00	0.31	0.43	0.52	0.63	0.71	0.80
1:40:00	0.27	0.34	0.39	0.46	0.51	0.56
1:50:00	0.24	0.29	0.32	0.37	0.40	0.43
2:00:00	0.22	0.26	0.28	0.31	0.33	0.35
2:10:00	0.21	0.24	0.25	0.28	0.29	0.31
2:20:00	0.20	0.22	0.23	0.25	0.26	0.27
2:30:00	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
2:40:00	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23	0.23
2:50:00	0.20	0.20	0.20	0.21	0.22	0.22
3:00:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.21

Πίνακας Π.Γ.5: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 3

ΑΓΩΓΟΣ 1621	T=2y	T=5y	T=10y	T=25y	T=50y	T=100y
TIME	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(m <sup>3</sup> /s)
0:10:00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
0:20:00	0.35	0.44	0.57	1.00	1.37	1.79
0:30:00	0.83	1.16	1.48	2.10	2.72	3.58
0:40:00	1.66	2.31	3.03	4.79	6.80	9.85
0:50:00	1.45	2.09	2.70	4.29	6.03	9.13
1:00:00	0.97	1.60	2.38	3.78	5.14	6.91
1:10:00	0.74	1.32	1.90	2.86	3.76	5.03
1:20:00	0.39	0.67	0.94	1.34	1.67	2.05
1:30:00	0.24	0.40	0.54	0.71	0.85	0.98
1:40:00	0.21	0.31	0.39	0.50	0.57	0.64
1:50:00	0.21	0.26	0.31	0.38	0.43	0.47
2:00:00	0.20	0.23	0.26	0.31	0.34	0.37
2:10:00	0.20	0.21	0.23	0.26	0.29	0.31
2:20:00	0.20	0.20	0.22	0.24	0.25	0.27
2:30:00	0.20	0.20	0.20	0.22	0.23	0.24
2:40:00	0.20	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23
2:50:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.21
3:00:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21

Πίνακας Π.Γ.6: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 4

<b>ΑΓΩΓΟΣ 1621</b>	<b>T=2y</b>	<b>T=5y</b>	<b>T=10y</b>	<b>T=25y</b>	<b>T=50y</b>	<b>T=100y</b>
<b>TIME</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>
0:10:00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
0:20:00	0.46	0.81	1.21	1.81	2.51	3.38
0:30:00	1.28	1.86	2.49	3.72	5.46	8.14
0:40:00	3.12	5.09	7.69	12.64	13.70	13.77
0:50:00	2.81	4.94	7.24	11.19	13.65	13.70
1:00:00	2.06	3.47	4.90	7.88	10.55	13.58
1:10:00	1.63	2.58	3.49	5.39	7.71	10.34
1:20:00	0.83	1.24	1.59	2.16	2.77	3.59
1:30:00	0.49	0.68	0.82	1.02	1.20	1.42
1:40:00	0.37	0.48	0.56	0.67	0.75	0.83
1:50:00	0.30	0.37	0.42	0.49	0.54	0.58
2:00:00	0.26	0.31	0.34	0.38	0.42	0.45
2:10:00	0.23	0.26	0.29	0.32	0.34	0.37
2:20:00	0.21	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32
2:30:00	0.20	0.22	0.23	0.25	0.27	0.28
2:40:00	0.20	0.21	0.22	0.23	0.25	0.26
2:50:00	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24
3:00:00	0.20	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23

Πίνακας Π.Γ.7: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 5

<b>ΑΓΩΓΟΣ 1621</b>	<b>T=2y</b>	<b>T=5y</b>	<b>T=10y</b>	<b>T=25y</b>	<b>T=50y</b>	<b>T=100y</b>
<b>TIME</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>
0:10:00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
0:20:00	0.80	1.38	1.95	3.02	4.13	6.03
0:30:00	1.79	2.75	3.89	6.86	10.78	13.64
0:40:00	6.83	11.99	13.70	13.81	13.81	13.81
0:50:00	5.54	9.79	13.58	13.67	13.71	13.81
1:00:00	3.66	5.93	8.44	13.55	13.64	13.67
1:10:00	2.70	4.23	6.17	10.11	13.34	13.61
1:20:00	1.30	1.84	2.37	3.50	4.64	6.07
1:30:00	0.71	0.92	1.09	1.40	1.65	1.93
1:40:00	0.50	0.62	0.70	0.82	0.90	1.01
1:50:00	0.39	0.46	0.51	0.58	0.63	0.68
2:00:00	0.32	0.37	0.40	0.45	0.48	0.51
2:10:00	0.28	0.31	0.34	0.37	0.39	0.41
2:20:00	0.25	0.27	0.29	0.32	0.33	0.35
2:30:00	0.23	0.25	0.26	0.28	0.30	0.31
2:40:00	0.21	0.23	0.24	0.26	0.27	0.28
2:50:00	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26
3:00:00	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25



Πίνακας Π.Γ.8: Απορροές για περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 ετών στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάριο 6

<b>ΑΓΩΓΟΣ 1621</b>	<b>T=2y</b>	<b>T=5y</b>	<b>T=10y</b>	<b>T=25y</b>	<b>T=50y</b>	<b>T=100y</b>
<b>TIME</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q(m<sup>3</sup>/s)</b>
0:10:00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
0:20:00	0.35	0.44	0.57	1.00	1.37	1.79
0:30:00	0.83	1.16	1.48	2.10	2.72	3.58
0:40:00	1.66	2.31	3.03	4.79	6.80	9.85
0:50:00	1.45	2.09	3.09	4.89	7.03	10.13
1:00:00	0.97	1.60	2.38	3.78	5.14	6.91
1:10:00	0.74	1.32	1.90	2.86	3.76	5.03
1:20:00	0.39	0.67	0.94	1.34	1.67	2.05
1:30:00	0.24	0.40	0.54	0.71	0.85	0.98
1:40:00	0.21	0.31	0.39	0.50	0.57	0.64
1:50:00	0.21	0.26	0.31	0.38	0.43	0.47
2:00:00	0.20	0.23	0.26	0.31	0.34	0.37
2:10:00	0.20	0.21	0.23	0.26	0.29	0.31
2:20:00	0.20	0.20	0.22	0.24	0.25	0.27
2:30:00	0.20	0.20	0.20	0.22	0.23	0.24
2:40:00	0.20	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23
2:50:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.21
3:00:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21

Πίνακας Π.Γ.9: Απορροές για αυξημένη βροχόπτωση κατά 7%, 10%, 15%, 20% και 25% καθώς και για αλλαγή χρήσης γης του Αττικού Άλσους σε αστική περιοχή στην έξοδο του συστήματος (αγωγός 1621)- Σενάρια 7, 8, 9, 10, 11 και 12

TIME	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	ΒΡΟΧΗ 7%	ΒΡΟΧΗ 10%	ΒΡΟΧΗ 15%	ΒΡΟΧΗ 20%	ΒΡΟΧΗ 25%	ΑΣΤΥΚΟΠΟΙΗΣΗ
3:50:00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.14
4:00:00	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.15
4:10:00	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16
4:20:00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.19
4:30:00	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.23
4:40:00	0.25	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.25
4:50:00	0.25	0.25	0.25	0.26	0.26	0.26	0.24
5:00:00	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.23
5:10:00	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23	0.23	0.20
5:20:00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.19
5:30:00	0.23	0.23	0.23	0.25	0.26	0.27	0.21
5:40:00	0.49	0.53	0.55	0.57	0.60	0.62	0.61
5:50:00	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.46
6:00:00	0.46	0.48	0.49	0.51	0.52	0.54	0.59
6:10:00	1.25	1.32	1.35	1.40	1.46	1.51	1.82
6:20:00	1.14	1.20	1.23	1.28	1.32	1.37	1.70
6:30:00	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.55	0.67
6:40:00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.26	0.26	0.28
6:50:00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.20
7:00:00	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.18
7:10:00	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.17
7:20:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.17
7:30:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16
7:40:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16
7:50:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16
8:00:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16
8:10:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16
8:20:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16
8:30:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16
8:40:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16
8:50:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16
9:00:00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.16