



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWMM
ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΠΑΝΤΟΡΡΟΪΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ**

Λαζάρου Σ. Θεοχάρης

Επιβλέπων καθηγητής: Βασίλειος Τσιχριντζής, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2019



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING
LABORATORY OF RECLAMATION WORKS AND WATER
RESOURCES MANAGEMENT

DIPLOMA THESIS

**PARAMETERS SENSITIVITY ANALYSIS OF SWMM MODEL AND
PRACTISE ON THE COMBINED SEWERAGE SYSTEM OF ATHENS CITY**

Lazarou S. Theocharis

Supervisor: V.A Tsihrintzis, Professor N.T.U.A

Athens, March 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWMM
ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΠΑΝΤΟΡΡΟΪΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Θεοχάρη Λαζάρου

Επιβλέπων: Τσιχριντζής Βασίλειος, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από τη τριμελή εξεταστική επιτροπή:

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Βασίλειος Τσιχριντζής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ιωάννης Ναλμπάντης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Χαρίλαος Βαγγέλης
Ε.ΔΙ.Π Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε ορισμένους ανθρώπους που συνέβαλαν σημαντικά στην εκπόνηση και επομένως ολοκλήρωση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Βασίλειο Τσιχριντζή, καθηγητή Ε.Μ.Π, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας καθώς και για την ευθύνη που δέχθηκε να είναι ο επιβλέπων της εργασίας. Επίσης, καθοριστική ήταν η συμβολή του καθώς μου παρείχε συμβουλές και με καθοδήγησε μέσα από δυσκολίες που συνάντησα κατά τη διαδικασία της εκπόνησης προκειμένου να φτάσω στο ζητούμενο και επιθυμητό αποτέλεσμα.

Ακόμα, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π Ιωάννη Κούρτη. Χωρίς την βοήθεια του θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση του έργου καθώς μου παρείχε οδηγίες, συμβουλές και απόψεις για το έργο που μου είχε ανατεθεί να ολοκληρώσω. Επίσης, είχε την υπομονή να απαντάει σε κάθε απορία μου και να διαθέτει σημαντικό χρόνο από την καθημερινότητα του για την διπλωματική μου εργασία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την ΕΥΔΑΠ και συγκεκριμένα τη διεύθυνση πληροφορικής και τεχνολογίας καθώς και ειδικά την τεχνολόγο πολιτικό μηχανικό Κ. Λυγγρή Κωνσταντίνα για την παράδοση των στοιχείων του αποχετευτικού δικτύου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την Ινώ Παπαγεωργάκη, υποψήφια διδάκτορα Ε.Μ.Π για τις πολύτιμες συμβουλές της στη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών καθώς και όλα τα μέλη του εργαστηρίου Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων για τις γνώσεις που μου παρείχαν αυτά τα χρόνια φοίτησης μου στο Ε.Μ.Π.

Λαζάρου Θεοχάρης

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Τυπική διατομή δρόμου και αγωγού παντορροϊκού δικτύου.....	8
Εικόνα 1.2: Τυπική διατομή δρόμου και αγωγών χωριστικού δικτύου αποχέτευσης.....	9
Εικόνα 2.1: Τυπικό υετόγραμμα κατασκευασμένο με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ.....	17
Εικόνα 2.2: Διάγραμμα ενδεικτικής κατανομής του νερού της βροχής.....	18
Εικόνα 3.1: Τυπικό αποχετευτικό σύστημα αστικής περιοχής με τα συστατικά του στοιχεία.....	30
Εικόνα 3.2: Οπτικά αντικείμενα λογισμικού SWMM.....	33
Εικόνα 3.3: Τυπική γεωμετρία αγωγού.....	37
Εικόνα 3.4: Τυπική διατομή ενός φυσικού υδατορεύματος.....	38
Εικόνα 3.5: Αναπαράσταση λεκάνης απορροής σύμφωνα με το λογισμικό SWMM.....	39
Εικόνα 3.6: Εννοιολογικό μοντέλο υπολογισμού επιφανειακής απορροής.....	40
Εικόνα 3.7: Διαίρεση λεκάνης απορροής.....	41
Εικόνα 4.1α: Δορυφορική απεικόνιση Β' ζώνης παντορροϊκού δικτύου Αθηνών.....	58
Εικόνα 4.1β: Δορυφορική απεικόνιση παντορροϊκού δικτύου Αθηνών (ζώνες).....	58
Εικόνα 4.2: Διοικητική διαίρεση Β' ζώνης παντορροϊκού δικτύου Αθηνών.....	59
Εικόνα 4.3: Αποχετευτικό δίκτυο Β' ζώνης παντορροϊκού δικτύου Αθηνών (GIS).....	61
Εικόνα 4.4: Υδροκριτικές γραμμές οικοδομικών τετραγώνων.....	62
Εικόνα 4.5: Χάρτης Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους περιοχής μελέτης.....	63
Εικόνα 4.6: Σχηματισμένες αστικές λεκάνες απορροής Β' ζώνης παντορροϊκού δικτύου Αθηνών.....	64
Εικόνα 4.7: Χάρτης χρήσεων γης Β' ζώνης παντορροϊκού δικτύου Αθηνών.....	65
Εικόνα 4.8: Χάρτης κλίσεων γης περιοχής μελέτης.....	66

Εικόνα 4.9: Γεωλογία Β΄ ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.....	67
Εικόνα 4.10: Μοντελοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο στο λογισμικό SWMM.....	68
Εικόνα 4.11: Ονομασία και σχετική θέση φρεατίων Β΄ ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.....	74
Εικόνα 5.1: Σημείο εξόδου δικτύου-πρόσθετος αγωγός.....	77
Εικόνα 5.2: Τροποποιημένο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους Β΄ ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.....	78
Εικόνα 5.3: Παράδειγμα raster αρχείου flow direction (Λεκάνη 16).....	78
Εικόνα 5.4: Παράδειγμα raster αρχείου flow accumulation (Λεκάνη 16).....	79
Εικόνα 5.5: Παράδειγμα raster αρχείου flow length (Λεκάνη 16).....	79
Εικόνα 5.6: Χάρτης κλίσεων λεκανών απορροής Β΄ ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.....	81
Εικόνα 5.7: Χάρτης αδιαπερατότητας λεκανών απορροής Β΄ ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.....	81
Εικόνα 5.8: Μέγιστα μήκη επίγειας ροής (m) ανά λεκάνη απορροής.....	82
Εικόνα 5.9: Γενικές επιλογές προσομοίωσης.....	83
Εικόνα 5.10: Επιλογές προσομοίωσης δυναμικού κύματος.....	84
Εικόνα 5.11: Υετόγραμμα σχεδιασμού για t=2 h και T=2 έτη.....	86
Εικόνα 5.12: Υετόγραμμα σχεδιασμού για t=2 h και T=5 έτη.....	87
Εικόνα 5.13: Υετόγραμμα σχεδιασμού για t=2 h και T=10 έτη.....	88
Εικόνα 5.14: Υετόγραμμα σχεδιασμού για t=2 h και T=25 έτη.....	89
Εικόνα 5.15: Υετόγραμμα σχεδιασμού για t=2 h και T=50 έτη.....	90
Εικόνα 6.1: Υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου για βροχόπτωση T=10 έτη και t=12 h.....	94

Εικόνα 6.2: Προφίλ αγωγού Β-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ τη χρονική στιγμή της αιχμής.....	95
Εικόνα 6.3: Προφίλ αγωγού ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ τη χρονική στιγμή της αιχμής.....	95
Εικόνα 6.4: Πλημμυρισμένα φρεάτια του δικτύου τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.....	96
Εικόνα 6.5: Προφίλ αγωγών που συνδέουν τα φρεάτια Β-42α και ΚΑΑ-85ΕΚΧ τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.....	97
Εικόνα 6.6: Προφίλ αγωγών που συνδέουν τα φρεάτια ΚΑΑ-89α και ΚΑΑ-85ΕΚΧ τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής της πλημμύρας.....	98
Εικόνα 6.7: Βάθος νερού στους αγωγούς, βάθος νερού στους κόμβους και απορροή λεκανών απορροής τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.....	99
Εικόνα 6.8: Απορροή λεκάνης 1 και πλημμυρογράφημα φρεατίου Β-42.....	100
Εικόνα 6.9: Διήθηση ανά λεκάνη απορροής και ταχύτητα νερού στους αγωγούς του δικτύου τη χρονική στιγμή της αιχμής.....	100
Εικόνα 6.10: Υετόγραμμα σχεδιασμού $t=12$ h, $T=10$ έτη και υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου (φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ).....	102
Εικόνα 7.1: Γενική μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησίας.....	104
Εικόνα 7.2: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς την αδιαπερατότητα.....	113
Εικόνα 7.3: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (Β-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς την αδιαπερατότητα.....	113
Εικόνα 7.4: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας απορροής ως προς την αδιαπερατότητα	114
Εικόνα 7.5: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς την αδιαπερατότητα.....	114
Εικόνα 7.6: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς την αδιαπερατότητα.....	115

Εικόνα 7.7: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς το πλάτος.....	117
Εικόνα 7.8: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (Β-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς το πλάτος.....	117
Εικόνα 7.9: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας απορροής ως προς το πλάτος.....	118
Εικόνα 7.10: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς το πλάτος.....	118
Εικόνα 7.11 : Υδρογραφήματα απορροής λεκάνης 16 για πλάτος με μεταβολές $\pm 40\%$	119
Εικόνα 7.12: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς τον συντελεστή η των αγωγών.....	121
Εικόνα 7.13: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (Β-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς τον συντελεστή η των αγωγών.....	121
Εικόνα 7.14: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς τον συντελεστή η των αγωγών.....	122
Εικόνα 7.15: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς τον συντελεστή η των αγωγών.....	122
Εικόνα 7.16: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς τον αριθμό καμπύλης CN.....	124
Εικόνα 7.17: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (Β-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς τον αριθμό καμπύλης CN.....	124
Εικόνα 7.18: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας απορροής ως προς τον αριθμό καμπύλης CN.....	125
Εικόνα 7.19: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς τον αριθμό καμπύλης CN.....	125
Εικόνα 7.20: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς τον αριθμό καμπύλης CN.....	126

Εικόνα 7.21: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς τον συντελεστή N-Perv.....	128
Εικόνα 7.22: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (B-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς τον συντελεστή N-Perv.....	128
Εικόνα 7.23: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας απορροής ως προς τον συντελεστή N-Perv.....	129
Εικόνα 7.24: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς τον συντελεστή N-Perv.....	129
Εικόνα 7.25: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς τον συντελεστή N-Perv.....	130
Εικόνα 7.26: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς τον συντελεστή N-Imperv.....	132
Εικόνα 7.27: Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (B-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς τον συντελεστή N-Imperv.....	132
Εικόνα 7.28: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας απορροής ως προς τον συντελεστή N-Imperv.....	133
Εικόνα 7.29: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς τον συντελεστή N-Imperv.....	133
Εικόνα 7.30: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς τον συντελεστή N-Imperv.....	134
Εικόνα 7.31: Ποσοστιαία μεταβολή παροχής αιχμής αγωγού (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου.....	135
Εικόνα 7.32: Ποσοστιαία μεταβολή παροχής αιχμής στον αγωγό (B-34α/ΚΑΑ-86ΕΚΧ) ως προς την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου.....	136
Εικόνα 7.33: Ποσοστιαία μεταβολή συνολικής ποσότητας απορροής ως προς την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου.....	137

Εικόνα 7.34: Ποσοστιαία μεταβολή συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου.....	138
Εικόνα 7.35: Ποσοστιαία μεταβολή συνολικής ποσότητας εισροής στον κόμβο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου.....	139
Εικόνα Α.1: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=2$ έτη, $t=1$ h.....	152
Εικόνα Α.2: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=2$ έτη, $t=6$ h.....	153
Εικόνα Α.3: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=2$ έτη, $t=12$ h.....	154
Εικόνα Α.4: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=2$ έτη, $t=24$ h.....	155
Εικόνα Α.5: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=5$ έτη, $t=1$ h.....	156
Εικόνα Α.6: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=5$ έτη, $t=6$ h.....	157
Εικόνα Α.7: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=5$ έτη, $t=12$ h.....	158
Εικόνα Α.8: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=5$ έτη, $t=24$ h.....	159
Εικόνα Α.9: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=10$ έτη, $t=1$ h.....	160
Εικόνα Α.10: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=10$ έτη, $t=6$ h.....	161
Εικόνα Α.11: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=10$ έτη, $t=12$ h.....	162
Εικόνα Α.12: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=10$ έτη, $t=24$ h.....	163
Εικόνα Α.13: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=25$ έτη, $t=1$ h.....	164
Εικόνα Α.14: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=25$ έτη, $t=6$ h.....	165
Εικόνα Α.15: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=25$ έτη, $t=12$ h.....	166
Εικόνα Α.16: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=25$ έτη, $t=24$ h.....	167
Εικόνα Α.17: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=50$ έτη, $t=1$ h.....	168
Εικόνα Α.18: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=50$ έτη, $t=6$ h.....	169
Εικόνα Α.19: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=50$ έτη, $t=12$ h.....	170

Εικόνα Α.20: Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=50$ έτη, $t=24$ h.....	171
Εικόνα Γ.1: Πινακίδα στοιχείων αποχευτικού δικτύου.....	176
Εικόνα Δ.1: Υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου για $t=12$ h και $T=2$ έτη.	179
Εικόνα Δ.2: Προφίλ αγωγού που συνδέει τα φρεάτια Β-42α και ΚΑΑ-85ΕΚΧ τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.....	179
Εικόνα Δ.3: Προφίλ αγωγού που συνδέει τα φρεάτια ΚΑΑ-86 και ΚΑΑ-85ΕΚΧ τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.....	180
Εικόνα Δ.4: Πλημμυρισμένα φρεάτια δικτύου τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο του δικτύου.....	180
Εικόνα Δ.5: Επιφανειακή απορροή ανά λεκάνη απορροής και βάθος νερού στους κόμβους του δικτύου τη χρονική στιγμή της αιχμής.....	181
Εικόνα Δ.6: Πλημμυρισμένα φρεάτια τη χρονική στιγμή 6:01:00 για βροχόπτωση σχεδιασμού $t=12$ h και $T=10$ έτη.....	182
Εικόνα Δ.7: Υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου για $t=12$ h και $T=5$ έτη.	183
Εικόνα Δ.8: Παντοροϊκός συλλεκτήρας (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.....	183
Εικόνα Δ.9: Παροχή απορροής ανά αγωγό τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο του δικτύου.....	184
Εικόνα Δ.10: Υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περιόδου επαναφοράς $T=25$ έτη.....	185
Εικόνα Δ.11: Παντοροϊκός συλλεκτήρας Β-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.....	186
Εικόνα Δ.12: Παντοροϊκός συλλεκτήρας ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.....	186
Εικόνα Δ.13: Διάγραμμα βάθος νερού-χρόνου στην έξοδο του δικτύου για βροχόπτωση σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T=25$ έτη και διάρκεια $t=12$ h.....	187

Εικόνα Δ.14: Υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου (ΚΑΑ-85ΕΚΧ) για $t=12$ h και $T=50$ έτη.....	188
Εικόνα Δ.15: Πλήρωση αγωγών τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής.....	189
Εικόνα Δ.16: Υδρογραφήματα απορροής στην έξοδο του δικτύου για $t=12$ h και για διάφορα T	190
Εικόνα Δ.17: Υδρογραφήματα απορροής για $t=1$ h και για διάφορα T	191
Εικόνα Δ.18: Υδρογραφήματα απορροής για $t=2$ h και για διάφορα T	192
Εικόνα Δ.19: Υδρογραφήματα απορροής για $t=6$ h και για διάφορα T	193
Εικόνα Δ.20: Υδρογραφήματα απορροής για $t=24$ h και για διάφορα T	194

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Παράδειγμα όμβριας καμπύλης για την περιοχή της Αθήνας.....	15
Πίνακας 2.2: Τιμές συντελεστή διόρθωσης περιόδου επαναφοράς.....	19
Πίνακας 2.3: Τιμές του συντελεστή απορροής για διάφορους τύπους χρήσης γης.....	20
Πίνακας 2.4: Τιμές του συντελεστή απορροής για διάφορους τύπους επιφάνειας.....	21
Πίνακας 2.5: Τιμές του συντελεστή απορροής σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές (Π.Δ 696/74).....	21
Πίνακας 2.6: Τιμές του χρόνου αβαθούς ή διάχυτης ροής σύμφωνα με ελληνικές και αμερικανικές προδιαγραφές.....	22
Πίνακας 2.7: Τυπικοί αριθμοί καμπύλης CN κατά Soil Conservation Service για συνθήκες υγρασίας τύπου II.....	25
Πίνακας 2.8: Πολλαπλασιαστές ζήτησης.....	27
Πίνακας 3.1: Πίνακας κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας K_s για διάφορες κατηγορίες εδάφους.....	49
Πίνακας 3.2: Ενδεικτικές μελέτες με χρήση του λογισμικού SWMM.....	56
Πίνακας 4.1: Στοιχεία φρεατιών Β' ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.....	69
Πίνακας 4.2: Στοιχεία αγωγών Β' ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.....	71
Πίνακας 4.3: Στοιχεία αστικών λεκανών απορροής Β' ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.....	73
Πίνακας 5.1: Διοικητική διαίρεση έκτασης λεκανών απορροής 1 και 16.....	91
Πίνακας 5.2: Στοιχεία ΕΛΣΤΑΤ σύμφωνα με την απογραφή του έτους 2011.....	91
Πίνακας 5.3: Μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων ανά λεκάνη απορροής.....	92
Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης βροχόπτωσης σχεδιασμού $T=10$ έτη $t=12$ h.....	94
Πίνακας 7.1: Στοιχεία ανάλυσης ευαισθησίας λογισμικού SWMM.....	108

Πίνακας 7.2: Αρχικές τιμές και αποδεκτά όρια παραμέτρων εισόδου λογισμικού SWMM στην παρούσα διπλωματική εργασία.....	110
Πίνακας 7.3: Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα μεταβολής της % αδιαπερατότητας.....	112
Πίνακας 7.4: Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα μεταβολής του πλάτους	115
Πίνακας 7.5: Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα μεταβολής του συντελεστή τραχύτητας των αγωγών.....	120
Πίνακας 7.6: Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα μεταβολής του αριθμού καμπύλης CN.....	123
Πίνακας 7.7: Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα μεταβολής του συντελεστή Manning για ροή σε διαπερατές επιφάνειες.....	127
Πίνακας 7.8: Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα μεταβολής του συντελεστή Manning για ροή σε αδιαπέρατες επιφάνειες.....	131
Πίνακας Β.1: Υπολογισμοί παροχής ακαθάρτων.....	174
Πίνακας Δ.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περιόδου επαναφοράς $T=2$ έτη.....	178
Πίνακας Δ.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περιόδου επαναφοράς $T=5$ έτη.....	182
Πίνακας Δ.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περιόδου επαναφοράς $T=25$ έτη.....	185
Πίνακας Δ.4 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περιόδου επαναφοράς $T=50$ έτη.....	188
Πίνακας Ε.1: Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές της αδιαπερατότητας των λεκανών απορροής.....	196
Πίνακας Ε.2: Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές του πλάτους των λεκανών απορροής.....	197

Πίνακας Ε.3: Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές του συντελεστή κατά Manning των αγωγών.....	198
Πίνακας Ε.4: Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές του αριθμού καμπύλης CN.....	199
Πίνακας Ε.5: Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές του συντελεστή N-Imperv.....	200
Πίνακας Ε.6: Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές του συντελεστή N-Periv.....	201

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xvii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	xxi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1 Σημασία των έργων αποχέτευσης.....	5
1.2 Σύντομο ιστορικό.....	6
1.3 Παντοροϊκά και χωριστικά αποχετευτικά δίκτυα.....	7
1.4 Σημαντικοί ορισμοί.....	9
1.5 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Εκτίμηση πλημμύρας.....	14
2.2.1 Βροχόπτωση σχεδιασμού.....	14
2.2.1.1 Όμβριες καμπύλες.....	14
2.2.1.2 Δημιουργία υετογραμμάτων σχεδιασμού.....	15
2.2.2 Απώλειες βροχόπτωσης.....	17
2.2.3 Η ορθολογική μέθοδος.....	18
2.2.4 Μέθοδος SCS.....	23
2.3 Εκτίμηση παροχής απορροών ξηρού καιρού.....	26
2.3.1 Γενικά.....	26
2.3.2 Εκτίμηση παροχής αποχέτευσης ακαθάρτων.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SWMM.....	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Δυνατότητες μοντέλου & Τυπικές εφαρμογές.....	30
3.3 Εννοιολογικό μοντέλο λογισμικού SWMM.....	32

3.4 Αντικείμενα λογισμικού SWMM.....	33
3.4.1 Οπτικά αντικείμενα.....	33
3.4.1.1 Εισαγωγή.....	33
3.4.1.2 Βροχογράφοι.....	33
3.4.1.3 Υπολεκάνες απορροής.....	34
3.4.1.4 Κόμβοι.....	35
3.4.1.5 Κόμβοι εκροής.....	35
3.4.1.6 Αγωγοί.....	36
3.4.2 Μη οπτικά αντικείμενα.....	37
3.4.2.1 Εισαγωγή.....	37
3.4.2.2 Διατομές.....	37
3.4.2.3 Χρονοσειρές.....	38
3.5 Υπολογιστικές μέθοδοι.....	39
3.5.1 Εισαγωγή.....	39
3.5.2 Επιφανειακή απορροή.....	39
3.5.3 Διήθηση.....	42
3.5.4 Διόδευση απορροής.....	42
3.5.4.1 Εισαγωγή.....	42
3.5.4.2 Διόδευση με μόνιμη ροή.....	43
3.5.4.3 Μέθοδος κινηματικού κύματος.....	43
3.5.4.4 Μέθοδος δυναμικού κύματος.....	43
3.5.5 Επιφανειακή λίμναση.....	44
3.6 Επιλογές προσομοίωσης.....	44
3.6.1 Γενικές επιλογές.....	44
3.6.1.1 Φυσικές διεργασίες/διαδικασίες.....	44
3.6.1.2 Μοντέλο διήθησης.....	44
3.6.1.3 Μέθοδος διόδευσης.....	45
3.6.1.4 Λίμναση.....	45
3.6.1.5 Αναφορά δεδομένων εισαγωγής.....	45

3.6.1.6 Ελάχιστη κλίση αγωγών.....	45
3.6.1.7 Αναφορά των διαδικασιών ελέγχου.....	45
3.6.2 Επιλογές ημερομηνίας και ώρας έναρξης και λήξης προσομοίωσης.....	45
3.6.2.1 Έναρξη προσομοίωσης.....	45
3.6.2.2 Έναρξη καταγραφής αποτελεσμάτων.....	45
3.6.2.3 Λήξη της προσομοίωσης.....	46
3.6.3 Επιλογές χρονικών βημάτων.....	46
3.6.3.1 Χρονικό βήμα καταγραφής αποτελεσμάτων.....	46
3.6.3.2 Χρονικό βήμα υγρής περιόδου.....	46
3.6.3.3 Χρονικό βήμα ξηρής περιόδου.....	46
3.6.3.4 Χρονικό βήμα διόδευσης της απορροής.....	46
3.6.4 Επιλογές μεθόδου διόδευσης δυναμικού κύματος.....	47
3.6.4.1 Εισαγωγή.....	47
3.6.4.2 Αδρανειακοί όροι.....	47
3.6.4.3 Καθορισμός υπερκρίσιμης ροής.....	47
3.6.4.4 Εξίσωση υπολογισμού απωλειών τριβής.....	47
3.7 Διήθηση-Μέθοδος αριθμού καμπύλης CN.....	48
3.8 Βιβλιογραφική ανασκόπηση-Προηγούμενες μελέτες με το λογισμικό SWMM.....	49
3.8.1 Εισαγωγή.....	49
3.8.2 Διπλωματικές εργασίες.....	49
3.8.3 Μεταπτυχιακές διπλωματικές εργασίες.....	51
3.8.4 Επιστημονικά άρθρα.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	57
4.1 Εισαγωγή.....	57
4.2 Χαρτογραφική αναπαράσταση της περιοχής μελέτης και μοντελοποίηση του αποχετευτικού δικτύου.....	59
4.3 Ψηφιοποίηση και αναπαράσταση του αποχετευτικού δικτύου.....	61
4.4 Σχηματισμός αστικών λεκανών απορροής.....	62
4.5 Χρήσεις γης.....	64
4.6 Κλίσεις εδάφους.....	65

4.7 Στοιχεία γεωλογίας περιοχής μελέτης.....	67
4.8 Μοντελοποίηση αποχετευτικού δικτύου στο λογισμικό Infoswmm.....	67
4.9 Μοντελοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο στο SWMM.....	68
4.10 Στοιχεία απλού αποχετευτικού δικτύου.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	75
5.1 Εισαγωγή δεδομένων αποχετευτικού δικτύου στο λογισμικό SWMM.....	75
5.1.1 Εισαγωγή παραμέτρων φρεατίων.....	75
5.1.2 Εισαγωγή παραμέτρων αγωγών.....	76
5.1.3 Εισαγωγή παραμέτρων αστικών λεκανών απορροής.....	77
5.2 Εισαγωγή παραμέτρων προσομοίωσης.....	82
5.2.1 Γενικές επιλογές.....	82
5.2.2 Επιλογές ημερομηνίας και ώρας.....	83
5.2.3 Επιλογές χρονικών βημάτων.....	83
5.2.4 Επιλογές δυναμικού κύματος.....	84
5.3 Κατάρτιση υετογραμμμάτων σχεδιασμού.....	84
5.4 Παροχή αποχέτευσης ακαθάρτων.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΝΤΟΡΡΟΪΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	93
6.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης παντορροϊκού δικτύου για βροχόπτωση σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς T=10 έτη και διάρκειας t=12 h.....	93
6.1.1 Γενικά.....	93
6.1.2 Αποτελέσματα.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SWMM.....	103
7.1 Εισαγωγή.....	103
7.2 Βασική μεθοδολογία.....	105
7.3 Αποτελέσματα προηγούμενων μελετών ανάλυσης ευαισθησίας του λογισμικού SWMM.....	106
7.4 Μεθοδολογικό πλαίσιο ανάλυσης ευαισθησίας στην παρούσα εργασία.....	108
7.4.1 Γενικά.....	108
7.4.2 Μεταβολές παραμέτρων εισόδου.....	109
7.4.3 Δείκτες αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας.....	110

7.5 Αποτελέσματα παραμέτρων.....	111
7.5.1 % Αδιαπερατότητα.....	111
7.5.2 Πλάτος.....	115
7.5.3 Συντελεστής τραχύτητας αγωγών κατά Manning.....	120
7.5.4 Αριθμός καμπύλης (Curve Number).....	123
7.5.5 Συντελεστής Manning για ροή σε διαπερατές επιφάνειες (N-Perv).....	126
7.5.6 Συντελεστής Manning για ροή σε αδιαπέρατες επιφάνειες (N-Imperv).....	130
7.6 Γενικά αποτελέσματα-σύγκριση παραμέτρων.....	134
7.6.1 Παροχή αιχμής στον αγωγό (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ).....	135
7.6.2 Παροχή αιχμής στον αγωγό (Β-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ).....	136
7.6.3 Συνολική ποσότητα απορροής.....	137
7.6.4 Συνολική πλημμυρική ποσότητα του δικτύου.....	138
7.6.5 Συνολική ποσότητα εισροής στον κόμβο ΚΑΑ-85ΕΚΧ του δικτύου.....	139
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ.....	141
8.1 Συμπεράσματα-ανακεφαλαίωση.....	141
8.1.1 Προσομοιώσεις.....	142
8.1.2 Ανάλυση ευαισθησίας.....	142
8.2 Αξιολόγηση λογισμικού SWMM 5.1.....	143
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	145
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΥΕΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	151
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΠΑΡΟΧΗ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ ΑΚΑΘΑΡΤΩΝ.....	173
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΠΙΝΑΚΙΔΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟΧΕΤΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ...	175
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΝΤΟΡΡΟΪΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	177
Δ.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης παντορροϊκού δικτύου για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας t=12 h.....	178
Δ.1.1 T=2 έτη.....	178
Δ.1.2 T=5 έτη.....	181
Δ.1.3 T=25 έτη.....	184
Δ.1.4 T=50 έτη.....	187

Δ.2 Σύγκριση υδρογραφημάτων.....	190
Δ.2.1 Υδρογραφήματα απορροής για t=12 h.....	190
Δ.2.2 Υδρογραφήματα απορροής για t=1 h.....	191
Δ.2.3 Υδρογραφήματα απορροής για t=2 h.....	192
Δ.2.4 Υδρογραφήματα απορροής για t=6 h.....	193
Δ.2.5 Υδρογραφήματα απορροής για t=24 h.....	194
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε – ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΙΜΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ.....	195

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση της Β΄ ζώνης του παντοροϊκού δικτύου Αθηνών με χρήση του μοντέλου SWMM καθώς και η ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM στις παραμέτρους εισόδου του.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους γίνεται η εκτίμηση της απορροής των ομβρίων αλλά και των ακαθάρτων υδάτων ενώ παράλληλα γίνεται εκτενής παρουσίαση του λογισμικού SWMM περιγράφοντας τις δυνατότητες του, τα μέρη του μοντέλου, τις υπολογιστικές διαδικασίες που ακολουθεί προκειμένου να μετατρέψει την βροχόπτωση σε απορροή και την μεταφορά της μέσω του αποχετευτικού δικτύου καθώς και τις μεθοδολογίες εκτίμησης των παραμέτρων εισαγωγής στο μοντέλο.

Στην συνέχεια γίνεται επεξεργασία, απεικόνιση και τελικά μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης και του αποχετευτικού δικτύου της Β΄ ζώνης του παντοροϊκού δικτύου Αθηνών. Επίσης περιγράφονται οι διαδικασίες υπολογισμού των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν ενώ επίσης γίνεται υπολογισμός της παροχής των ακαθάρτων ανά λεκάνη απορροής. Τέλος κατασκευάζονται τα υετογράμματα σχεδιασμού μέσω της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ.

Ακολουθεί η προσομοίωση του αποχετευτικού δικτύου με βροχοπτώσεις σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περιόδους επαναφοράς $T=2, 5, 10, 25, 50$ έτη. Επίσης υπολογίζονται τα υδρογραφήματα απορροής στην έξοδο του δικτύου για διάρκειες βροχόπτωσης $t=1$ h, 2 h, 6 h, 24 h και περιόδους επαναφοράς $T=2, 5, 10, 25, 50$ έτη. Ως μέθοδος διάδευσης χρησιμοποιήθηκε αυτή του δυναμικού κύματος με σκοπό την μέγιστη ακρίβεια των αποτελεσμάτων αφού προσεγγίζει με τον καλύτερο τρόπο την μη μόνιμη ανομοιόμορφη ροή του νερού στο αποχετευτικό δίκτυο.

Ακολούθως εκτελείται η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου SWMM με σκοπό τον καθορισμό των σημαντικότερων παραμέτρων του μοντέλου που επηρεάζουν στον μεγαλύτερο βαθμό τις υπολογιστικές διαδικασίες. Οι παράμετροι εισόδου που εξετάζονται είναι το ποσοστό αδιαπερατότητας των λεκανών απορροής, το πλάτος των λεκανών απορροής, ο αριθμός καμπύλης CN, ο συντελεστής τραχύτητας των αγωγών κατά Manning και οι συντελεστές Manning για επιφανειακή ροή σε

διαπερατά και αδιαπέρατα εδάφη ενώ ως βροχόπτωση σχεδιασμού χρησιμοποιείται αυτή με περίοδο επαναφοράς $T=10$ έτη και διάρκεια $t=12$ h. Για την ανάλυση ευαισθησίας έγινε μελέτη της επιρροής των μεταβολών των παραμέτρων στους παρακάτω δείκτες:

- Παροχή αιχμής στους αγωγούς που καταλήγουν στον υπερχειλιστή
- Συνολική ποσότητα απορροής από τις λεκάνες
- Συνολική ποσότητα εισροής στον υπερχειλιστή
- Συνολική επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα του δικτύου

Στα αποτελέσματα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο οι μεταβολές της κάθε παραμέτρου επηρεάζουν τους δείκτες προς εξέταση ενώ στο τέλος γίνεται σύγκριση της επιρροής των παραμέτρων ανά εξεταζόμενο δείκτη με σκοπό την εξαγωγή των κυριότερων παραμέτρων προς εκτίμηση.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the simulation of the combined sewerage system of the City of Athens (Zone B) with the use of SWMM, as well as the performance of a sensitivity analysis of various SWMM input parameters.

First of all, background information used for the estimation of surface runoff and wastewater flow is presented. Then, a description of the capabilities, objects and computational methods used in SWMM for the transformation of rainfall into surface runoff and the routing of runoff through the conveyance system are discussed. SWMM input parameter value selection is a crucial procedure which is also discussed in the present work.

The next step is the process of editing, presenting and modelling the study area and its sewer system that collects and conveys stormwater runoff and wastewater flows to the outlet point. The computations of wastewater flow for each subcatchment are represented and design hyetographs are derived using the alternating block method.

After this step, the simulation of the combined sewerage system takes place. The design storms used in the simulation have a rainfall duration of 12 h and return periods of 2, 5, 10, 25 and 50 years. Furthermore, outflow hydrographs at the outlet point of the system are computed for design storms of durations of 1, 2, 6 and, 24 hours and return periods of 2, 5, 10, 25 and 50 years.

Subsequently, the parameter sensitivity analysis of SWMM is performed in order to find which parameters are most sensitive and have a crucial influence on the computational procedures of the model. These parameters would have to be selected with the greatest accuracy because the model results depend on the precision of these. The design storm used in sensitivity analysis had a duration of 12 h and a return period of 10 years. A one at a time method was carried out in order to provide the most sensitive parameters of the model. The parameters tested included the: % imperviousness of the subcatchments, the characteristic width of the subcatchments, the curve number, the roughness coefficient of channels, and the roughness coefficient of Manning for overland flow. The most sensitive parameters were determined based on the results for the following indices:

- Peak flow at the terminal conduits
- Subcatchments Runoff Volume
- Total Inflow Volume at the outfall point
- Total surface Flooding Loss

The results section discusses the way that each variable affects the results of SWMM model, and then, also presents a comparison of the impact of the input parameters on each index.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σημασία των έργων αποχέτευσης

Η σημασία των έργων αποχέτευσης για τον άνθρωπο είναι σχεδόν αυτόνομη. Συνδέεται άμεσα με τη δημόσια υγεία, το επίπεδο ζωής των πολιτών αλλά και την καθημερινή ευημερία του. Σε περιοχές χωρίς δίκτυα αποχέτευσης λυμάτων παρατηρείται πολύ συχνά το φαινόμενο της ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων, των επιφανειακών υδάτων-συστημάτων, καθώς και του εδάφους λόγω της συνεχούς εναπόθεσης των λυμάτων σε αυτά. Επίσης συχνό είναι και το φαινόμενο της εμφάνισης οσμών οι οποίες προέρχονται από τη σηπτική δραστηριότητα των λυμάτων και συγκεκριμένα των συστατικών τους.

Επίσης σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν έργα αποχέτευσης όμβριων υδάτων σε κάθε γεγονός βροχόπτωσης, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές που διαθέτουν περιορισμένο αριθμό φυσικών υδατορευμάτων παρατηρείται το φαινόμενο πλημμυρών. Τα αποτελέσματα των πλημμυρών με πρόσφατα παραδείγματα σε όλη την Ελλάδα μπορεί να έχουν σημαντικά οικονομικά κόστη για το κράτος και τους πολίτες αλλά το σημαντικότερο είναι ότι μπορεί να προκαλέσουν την απώλεια ανθρώπινων ζωών.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω τα έργα αποχέτευσης αποτελούν σημαντικότερα και άκρως απαραίτητα έργα υποδομής για τη λειτουργία και την προστασία της δημόσιας υγείας σε μία αστική περιοχή.

1.2 Σύντομο ιστορικό

Η τέχνη της απομάκρυνσης των λυμάτων από τους οικισμούς ήταν γνωστή σε πολλούς αρχαίους πολιτισμούς (Κουτσογιάννης 2011). Ενδεικτικά στον ινδικό πολιτισμό (5000 π.Χ) ανασκαφές έδειξαν την ύπαρξη πλινθόκτιστων υπόνομων με σκοπό την απομάκρυνση των λυμάτων από τις κατοικίες. Στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στο Μινωικό ανάκτορο της Κνωσού (1950-1500π.Χ) ανακαλύφθηκαν δίκτυα αποχέτευσης ακαθάρτων, ομβρίων υδάτων αλλά και φρεάτια επίσκεψης για τη συντήρηση του δικτύου. Στη νεότερη ιστορία της Αθήνας η εξέλιξη των αποχετευτικών έργων μπορεί να χωριστεί σε πέντε χρονικές φάσεις (ΕΥΔΑΠ 2019).

- ✓ **Αρχαιότητα-1840** Κατά την περίοδο αυτή η Αθήνα δεν διέθετε οργανωμένο σύστημα αποχέτευσης με αποτέλεσμα τα ανοιχτά συστήματα αποχέτευσης να δημιουργούν σοβαρά προβλήματα στη δημόσια υγεία μέσω της εξάπλωσης επιδημιών και ασθενειών. Στη συνέχεια υπήρξε η διάνοιξη βόθρων κατά την οποία όταν ο βόθρος γέμιζε τα λύματα αφήνονταν μέσω δοχείων σε φυσικά ρέματα και χειμάρρους.
- ✓ **1840-1930** Για πρώτη φορά στη νεότερη ιστορία της Αθήνας, γύρω στο 1840, έγινε προσπάθεια για συστηματική κατασκευή συστήματος συλλογής και μεταφοράς ακαθάρτων και ομβρίων υδάτων. Το 1860 κατασκευάστηκε από την πρώτη γαλλική Αποστολή Δημοσίων Έργων ο παντοροϊκός αγωγός της Σταδίου, ο οποίος και επεκτάθηκε το 1870. Μετά τη Μικρασιατική καταστροφή το 1922 λόγω της αύξησης του πληθυσμού έγινε επιτακτική η ανάγκη για την κατασκευή έργων αποχέτευσης ενώ το 1925 ο δήμος Αθηναίων κατασκεύασε τον 'Νέο Μεγάλο Αγωγό'.
- ✓ **1930-1950** Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από έντονες εξελίξεις στην κατασκευή αποχετευτικών έργων στην Ελλάδα. Αρχικά το 1930 ολοκληρώθηκε η κατασκευή ωοειδούς αγωγού ακαθάρτων μήκους 6.5 χιλιομέτρων με αποδέκτη το Φαληρικό Δέλτα. Το 1931 συστάθηκε η «Ανώνυμος Εταιρία Κατασκευής Υπνόμων Αθηνών και Περιχώρων» στόχος της οποίας ήταν η οριστική μελέτη για την κατασκευή και τον σχεδιασμό του δικτύου αποχέτευσης ομβρίων αλλά και ακαθάρτων της Αθήνας. Τέλος κατασκευάστηκαν τα ακόλουθα μεγάλα αποχετευτικά έργα:
 - Η κατασκευή του Κεντρικού Αποχετευτικού Αγωγού (ΚΑΑ)

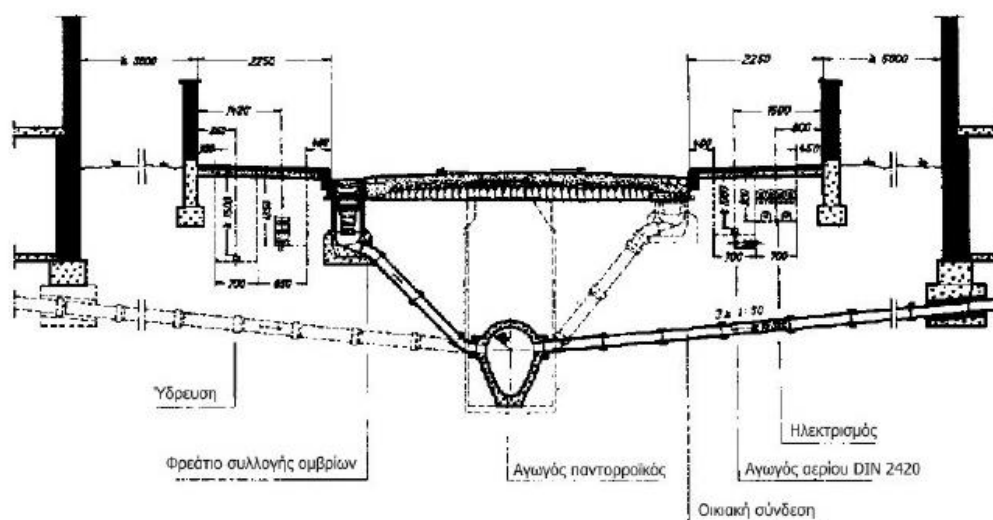
- Η κατασκευή του μεγάλου και βασικού συλλεκτήρα, μετά από οριστική μελέτη που συντάχθηκε για τον Ιλισό.
 - Η διευθέτηση τμημάτων του Κηφισού
- ✓ **1950-1980** Την περίοδο αυτή η Αθήνα αναπτύχθηκε πολεοδομικά με έντονους ρυθμούς. Η μεγάλη ανάγκη για αποχετευτικά έργα οδήγησε στην δημιουργία του «Οργανισμού Αποχέτευσης Πρωτεύουσας» (ΟΑΠ). Ο ΟΑΠ έθεσε τα θεμέλια για την υποδομή του αποχετευτικού συστήματος της πόλης των Αθηνών, αλλά και για τον μακροχρόνιο σχεδιασμό των μελλοντικών αναγκών της πρωτεύουσας σε δίκτυα ακαθάρτων και αντιπλημμυρικής προστασίας. Το 1950 ξεκίνησε η προμελέτη για την αποχέτευση της Αθήνας σε έκταση 200000 στρεμμάτων η οποία δόθηκε στις κρατικές αρχές το 1963 και αποτέλεσε την βάση για τα έργα αποχέτευσης της περιόδου αυτής. Στην συνέχεια η προμελέτη αυτή δέχθηκε πολλές διορθώσεις και αλλαγές.
- ✓ **1980-σήμερα** Το 1980 ο ΟΑΠ παραδίδει τις αρμοδιότητες του στον φορέα διαχείρισης ύδρευσης και αποχέτευσης πρωτεύουσας της Αθήνας, την σημερινή ΕΥΔΑΠ. Η ΕΥΔΑΠ πύκνωσε το υπάρχον δίκτυο κατασκευάζοντας πολλά χιλιόμετρα νέων αγωγών ενώ το πρώτο μέλημα της ήταν η διαχείριση και ο σχεδιασμός της αποχέτευσης των λυμάτων και των βιομηχανικών αποβλήτων που προέρχονται από βιομηχανίες. Τέλος, φρόντισε για την επεξεργασία των λυμάτων πριν της διάθεση τους στην θάλασσα μέσω της κατασκευής κέντρων επεξεργασίας λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων.

1.3 Παντοροϊκά και χωριστικά αποχετευτικά δίκτυα

Τα αποχετευτικά δίκτυα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες οι οποίες είναι τα παντοροϊκά αποχετευτικά δίκτυα και τα χωριστικά αποχετευτικά δίκτυα. Τα πρώτα αποχετευτικά δίκτυα που κατασκευάστηκαν και βρίσκονται σε Ευρωπαϊκές αλλά και Αμερικανικές πόλεις είναι παντοροϊκά (Κουτσογιάννης 1999) ενώ η σημερινή άποψη είναι ότι τα δίκτυα πρέπει να είναι χωριστικά (Τσακίρης 2010).

Παντοροϊκά αποχετευτικά δίκτυα είναι αυτά που αποχετεύουν μαζί τα όμβρια και τα ακάθαρτα ύδατα. Είναι κατασκευασμένα με διατομές που είναι επαρκείς για τα ακάθαρτα ενώ μπορούν να μεταφέρουν και μέρος των όμβριων υδάτων. Σε περιόδους ξηρού καιρού οι αγωγοί του παντοροϊκού δικτύου μεταφέρουν μόνο τα ακάθαρτα και μέσω κεντρικών αγωγών τα μεταφέρουν στο σημείο επεξεργασίας τους. Σε

περιόδους όπου έχουμε γεγονότα βροχόπτωσης και όταν η συνολική παροχή είναι μέχρι κάποιο όριο τότε τα ακάθαρτα και τα όμβρια ύδατα παροχετεύονται μαζί μέχρι την εγκατάσταση επεξεργασίας των ακαθάρτων. Σε αντίθετη περίπτωση και όταν η αθροιστική παροχή ακαθάρτων και ομβρίων υδάτων είναι πάνω από το όριο που θέσαμε προηγουμένως τότε μέρος της παροχής συνεχίζει στον κεντρικό αγωγό με κατεύθυνση το κέντρο επεξεργασίας, ενώ το υπόλοιπο υπερχειλίζει μέσω των αγωγών υπερχειλίσεως και κατευθύνεται προς τους επιφανειακούς υδροφορείς χωρίς καμία επεξεργασία. Η εκροή αυτή ομβρίων και μη επεξεργασμένων ακαθάρτων υδάτων αποτελεί και το σημαντικότερο μειονέκτημα των παντοροϊκών δικτύων ενώ πρόβλημα επίσης μπορούν να προκαλέσουν και τα όμβρια ύδατα που καταλήγουν στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Στην Εικόνα 1.1 που παρουσιάζεται παρακάτω φαίνεται μία τυπική διατομή δρόμου και αγωγού ενός παντοροϊκού δικτύου.

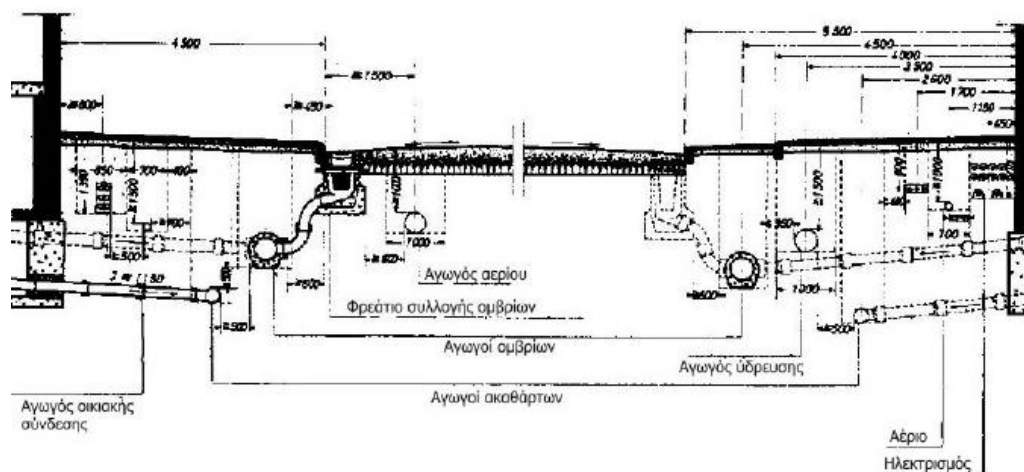


Εικόνα 1.1 Τυπική διατομή δρόμου και αγωγού παντοροϊκού δικτύου αποχέτευσης.

Πηγή: Ιωσηφίδης (2010)

Σε αντίθεση με τα παντοροϊκά δίκτυα, τα χωριστικά αποχέτουν σε διαφορετικούς αγωγούς τα ακάθαρτα και τα όμβρια ύδατα. Επομένως σε κάθε δρόμο υπάρχουν δύο αγωγοί μεταφοράς υδάτων, των ομβρίων αλλά και των ακαθάρτων. Το χωριστικό δίκτυο επιτρέπει την ανεξαρτησία των δύο δικτύων. Έτσι το δίκτυο των ακαθάρτων σχεδιάζεται συγκεντρωτικά, δηλαδή τα ύδατα συλλέγονται σε έναν κεντρικό αγωγό ο

οποίος στην συνέχεια τα μεταφέρει στην εγκατάσταση επεξεργασίας ενώ το δίκτυο των ομβίων αποκεντρωτικά, μεταφέροντας έτσι τα όμβρια σε διαφορετικά σημεία του υδάτινου αποδέκτη. Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζεται μία τυπική διατομή δρόμου και αγωγών ομβρίων και ακαθάρτων υδάτων.



Εικόνα 1.2 Τυπική διατομή δρόμου και αγωγών χωριστικού δικτύου αποχέτευσης.

Πηγή: Ιωσηφίδης (2010)

1.4 Σημαντικοί ορισμοί

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα ορισούμε μερικές σημαντικές έννοιες απαραίτητες για την κατανόηση της παρούσας εργασίας που σχετίζονται κυρίως με τα έργα αποχέτευσης. Οι ορισμοί αυτοί θα βοηθήσουν έναν αρχάριο μηχανικό αλλά και κάποιον μη σχετικό με το επάγγελμα του υδραυλικού μηχανικού στην βαθύτερη κατανόηση των κειμένων της εργασίας αυτής.

- ✓ Αρχικά με τον όρο αστικές αποχετεύσεις εννοούμε τα τεχνικά έργα υποδομής που έχουν ως σκοπό την συγκέντρωση, μεταφορά και επεξεργασία των υδάτων είτε αυτά είναι ακάθαρτα είτε είναι όμβρια.
- ✓ Ακάθαρτα ύδατα η λύματα αποκαλούνται τα ύδατα τα οποία προέρχονται από οικίες, βιοτεχνίες και βιομηχανίες και αποτελούνται από ύδατα και διάφορες στερεές ουσίες.
- ✓ Όμβρια ύδατα ονομάζονται εκείνα που προέρχονται από γεγονότα βροχόπτωσης και απορρέουν επιφανειακά.

- ✓ Διήθηση ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία το νερό μέσω του εδάφους μετακινείται προς τα χαμηλότερα επιφανειακά στρώματα.
- ✓ Το αποχετευτικό δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο αγωγών μεταφοράς των υδάτων, φρεατίων και άλλων κατασκευών όπως είναι τα φρεάτια υπερχειλίσης, οι αγωγοί υπερχειλίσης, οι αντλίες κ.λπ.
- ✓ Τα δίκτυα αποχέτευσης όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο χωρίζονται σε χωριστικά και παντοροϊκά.
- ✓ Οι αγωγοί ενός χωριστικού δικτύου αποχέτευσης χωρίζονται επίσης σε αγωγούς ακαθάρτων και σε αγωγούς ομβρίων ανάλογα με το είδος του νερού που μεταφέρουν.
- ✓ Αποδέκτης ή σημείο εκβολής των υδάτων είναι συνήθως ένα υδάτινο σώμα όπως είναι η θάλασσα, τα ποτάμια και οι λίμνες. Η διάθεση των όμβριων υδάτων μπορεί να γίνει χωρίς κάποια επεξεργασία ενώ η διάθεση των λυμάτων προϋποθέτει την επεξεργασία τους σε κέντρα επεξεργασίας λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων. Ο αποδέκτης σε περίπτωση χωριστικού δικτύου μπορεί να είναι διαφορετικός για τα ακάθαρτα και τα όμβρια ύδατα.

1.5 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνεται η εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας ενώ πέρα από αυτό αναφέρονται και οι βασικές υδρολογικές μέθοδοι ιδιαίτερα κρίσιμες για την κατανόηση των βασικών υδρολογικών-υδραυλικών διεργασιών από τον αναγνώστη. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά το λογισμικό SWMM ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο εκτελούνται οι κατάλληλες και απαραίτητες διαδικασίες παρουσίασης, επεξεργασίας και μοντελοποίησης της περιοχής μελέτης και του αποχετευτικού δικτύου της. Στο πέμπτο κεφάλαιο ακολουθεί η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του αποχετευτικού δικτύου, η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων προσομοίωσης καθώς και η διαδικασία εκτίμησης ορισμένων παραμέτρων. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του παντοροϊκού δικτύου για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περιόδου επαναφοράς $T=10$ έτη. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο εκτελείται η ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM και παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα και τα

συμπεράσματα της ανάλυσης. Στα παραρτήματα βρίσκονται συμπληρωματικά δεδομένα εκπόνησης της εργασίας. Στο Παράρτημα Α βρίσκονται τα υετογράμματα σχεδιασμού που υπολογίστηκαν ενώ στο Παράρτημα Β παρουσιάζεται η πινακίδα των στοιχείων του αποχετευτικού δικτύου όπως παραδόθηκαν από την ΕΥΔΑΠ. Στο Παράρτημα Γ παρατίθενται αναλυτικά σε πίνακες το σύνολο των υπολογισμών της παροχής αποχέτευσης ακαθάρτων ανά λεκάνη απορροής ενώ στο Παράρτημα Δ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του παντοροϊκού δικτύου για τις υπόλοιπες βροχοπτώσεις σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T=10$ έτη καθώς και τα υδρογραφήματα στην έξοδο του δικτύου για το σύνολο των υπολογισμένων υετογραμμάτων σχεδιασμού. Τέλος, στο Παράρτημα Ε βρίσκονται οι τιμές των δεικτών που εκτιμήθηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM ανά παράμετρο και ανά ποσοστό μεταβολής.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Εισαγωγή

Οι απορροές αποτελούν σε γενικές γραμμές το τμήμα του υδρολογικού κύκλου το οποίο επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις δραστηριότητες και τα διάφορα τεχνικά έργα του ανθρώπου (Τσακίρης 2013). Αποτελούν τη βασική υδρολογική παράμετρο σε μια σειρά από έργα που γίνονται για τον έλεγχο και την προστασία των υδατικών πόρων ενώ επίσης ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών έργων στηρίζονται στα μεγέθη της απορροής. Επίσης έχουν ιδιαίτερα μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό των αποχετευτικών συστημάτων των αστικών λεκανών απορροής, αφού αυτά είναι υπεύθυνα για την ασφαλή μεταφορά της απορροής εκτός των οικισμών. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο περιέχει μία σύντομη παρουσίαση ορισμένων θεωρητικών γνώσεων και αρχών όπως είναι η μετατροπή της κατακρήμνισης σε απορροή, οι διάφορες απώλειες βροχής, οι μέθοδοι εκτίμησης της πλημμυρικής απορροής καθώς και της εκτίμησης της παροχής πλημμύρας. Οι παραπάνω υδρολογικές εργασίες σε συνδυασμό με την μέθοδο εκτίμησης της παροχής αποχέτευσης ακαθάρτων είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την προσομοίωση ενός παντορροϊκού αστικού δικτύου αποχέτευσης και την κατανόηση της λειτουργίας των φυσικών αλλά και των αστικών λεκανών απορροής. Εδώ να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη μελέτη έγινε χρήση ορισμένων μόνο μεθόδων και θεωρητικών αρχών που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό, ωστόσο η παρουσίαση όλων θεωρήθηκε επιτακτική ανάγκη για την πλήρη κατανόηση των υδρολογικών διεργασιών από τον αναγνώστη.

2.2 Εκτίμηση πλημμύρας

2.2.1 Βροχόπτωση σχεδιασμού

2.2.1.1 Όμβριες Καμπύλες

Απαραίτητο στοιχείο στην μελέτη και εκτίμηση των παροχών των όμβριων υδάτων είναι η χωροχρονική εξέλιξη των βροχοπτώσεων καθώς και η παρακολούθηση της κατανομής τους. Το μαθηματικό μοντέλο της στατιστικής Υδρολογίας που μελετά όλα τα παραπάνω ονομάζεται όμβρια καμπύλη ή αλλιώς στην διεθνή ορολογία (intensity-duration-frequency curve ή idf curve). Όμβριες καμπύλες ονομάζονται οι καμπύλες έντασης-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς και εκφράζουν τη σχέση της ετήσιας μέγιστης έντασης βροχόπτωσης i , της διάρκειας t της ραγδαίας βροχόπτωσης και της περιόδου επαναφοράς T (Τσακίρης 2010). Πρόκειται για μία αναλυτική σχέση της μορφής (Τσακίρης 2010):

$$i = i(t, T) \quad (2.1)$$

Επίσης, στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες σχέσεις για συγκεκριμένη τιμή της περιόδου επαναφοράς T όπως (Τσακίρης 2010):

$$i = \frac{a}{t+b} \quad (2.2)$$

$$i = \frac{a}{(t+b)^n} \quad (2.3)$$

Όπου: a , b , n παράμετροι. Επίσης, έχουν προταθεί σχέσεις που αποτυπώνουν ταυτόχρονα την επίδραση της διάρκειας και της περιόδου επαναφοράς της βροχόπτωσης όπως είναι οι παρακάτω (Τσακίρης 2010):

$$i = \frac{c T^m}{t+b} \quad (2.4)$$

$$i = \frac{c T^m}{t^n} \quad (2.5)$$

Όπου: b , c , m , n παράμετροι. Τέλος, για την εξαγωγή όμβριων καμπυλών με χρήση μετρήσεων βροχόπτωσης, ο αναγνώστης παραπέμπεται σε εγχειρίδια Τεχνικής

Υδρολογίας όπως είναι αυτό του Τσακίρη (1995 β). Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί δίνεται ένα παράδειγμα όμβριας καμπύλης για την περιοχή της Αθήνας.

Πίνακας 2.1 Παράδειγμα όμβριας καμπύλης για την περιοχή της Αθήνας.

Πηγή: Mimikou et al. (2000)

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΟΜΒΡΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ
ΑΘΗΝΑ	$i = 15.39T^{0.276}t^{-0.725}$

2.2.1.2 Δημιουργία υετογραμμμάτων σχεδιασμού

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο του κεφαλαίου αυτού οι όμβριες καμπύλες και η ορθή εκτίμηση αυτών είναι κομβικής σημασίας για την ορθολογική εκτίμηση των παροχών των ομβρίων. Από τις καμπύλες αυτές και για δεδομένη περίοδο επαναφοράς (years) και διάρκεια βροχόπτωσης (h) προκύπτει η κρίσιμη ένταση της βροχόπτωσης i (mm/h). Η ένταση αυτή πολλαπλασιασμένη με τη χρονική διάρκεια της βροχόπτωσης όπως είναι φανερό θα έχει ως αποτέλεσμα το συνολικό ύψος βροχόπτωσης για ένα δεδομένο φαινόμενο βροχόπτωσης. Γενικά, υετόγραμμα ή υετογράφημα σχεδιασμού ονομάζεται το διάγραμμα χρονικής κατανομής του συνολικού ύψους βροχόπτωσης. Το διάγραμμα αυτό παρουσιάζει ουσιαστικά το ύψος της βροχόπτωσης σε κάθε χρονικό βήμα κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης. Για την κατάρτιση και τον σχεδιασμό των υετογραμμμάτων σχεδιασμού υπάρχουν διάφοροι τρόποι οι οποίοι κάνουν κατανομή του συνολικού ύψους βροχόπτωσης στα διάφορα χρονικά βήματα. Μερικές από τις μεθόδους αυτές είναι οι εξής:

- i. Μέθοδος της S.C.S
- ii. Μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ
- iii. Μέθοδος του δυσμενέστερου συνδυασμού

❖ Μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ

Η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ (alternating block method) είμαι μία από τις πιο γνωστές και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους κατάρτισης των υετογραμμμάτων σχεδιασμού. Η διαδικασία που ακολουθεί η μέθοδος αυτή είναι η εξής:

Αρχικά από την όμβρια καμπύλη για δεδομένη περίοδο επαναφοράς T και χρονική διάρκεια βροχόπτωσης t προκύπτει το συνολικό ύψος βροχόπτωσης ως γινόμενο της κρίσιμης έντασης βροχόπτωσης και της χρονικής διάρκειας όπως αναφέραμε παραπάνω. Επομένως για δύο χρονικές στιγμές θα ισχύει:

$$h_1 = i \times t_1 \quad (2.6)$$

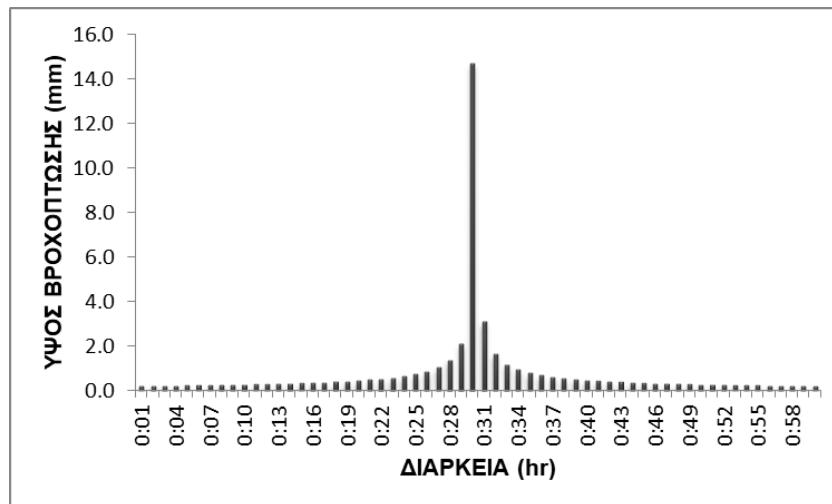
$$h_2 = i \times t_2 \quad (2.7)$$

όπου h είναι το ύψος βροχόπτωσης και i η κρίσιμη ένταση της βροχόπτωσης.

Στη συνέχεια και σύμφωνα με την σχέση:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1-m} \quad (2.8)$$

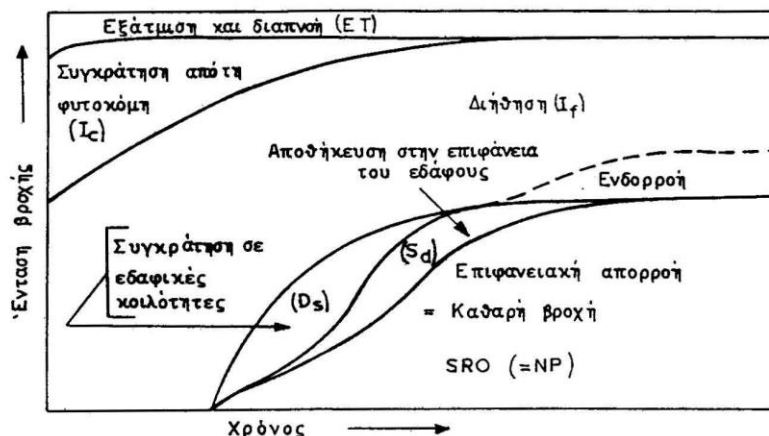
όπου: m σταθερά που υπολογίζεται από την όμβρια καμπύλη, υπολογίζονται τα ύψη βροχής κάθε διάρκειας μέσα στην συνολική διάρκεια της βροχόπτωσης. Τα ύψη αυτά ωστόσο είναι αθροιστικά επομένως υπολογίζοντας τις επιμέρους διαφορές τους προκύπτουν τα ύψη βροχόπτωσης κάθε επιμέρους διάρκειας. Στη συνέχεια η κατανομή των υψών γίνεται ως εξής: Το μεγαλύτερο ύψος βροχόπτωσης τοποθετείται στο κεντρικό χρονικό διάστημα, το αμέσως μικρότερο ύψος στο αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα από δεξιά και στην συνέχεια το αμέσως μικρότερο στο χρονικό διάστημα από αριστερά. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται μέχρι να συμπληρωθούν όλα τα χρονικά διαστήματα με τιμές υψών βροχόπτωσης. Η μέθοδος αυτή δίνει αποδεδειγμένα μεγαλύτερες τιμές αιχμής της πλημμυρικής απορροής σε σχέση με τις τυποποιημένες καταιγίδες σχεδιασμού και λειτουργεί επομένως θετικά ως προς την ασφάλεια (Zarris et al. 1998). Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα τυπικό υετογράφημα το οποίο έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ.



Εικόνα 2.1 Τυπικό υετόγραμμα κατασκευασμένο με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ.

2.2.2 Απώλειες βροχόπτωσης

Στην συγκεκριμένη παράγραφο θα αναλυθούν σύντομα οι απώλειες βροχόπτωσης η αλλιώς οι υδρολογικές απώλειες (Hydrologic losses). Οι απώλειες αυτές έχουν καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό της απορροής που αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου ως το τμήμα του υδρολογικού κύκλου που επηρεάζει και αλληλοεπιδρά με τους ανθρώπους. Μετά την πτώση της βροχής και πριν τη δημιουργία της απορροής εκτελούνται ορισμένες διεργασίες που ονομάζονται απώλειες βροχής (Τσακίρης 2013). Αρχικά και πριν η βροχή φτάσει στο έδαφος ένα μέρος αυτής συγκρατείται από τη βλάστηση και από άλλα εμπόδια και ονομάζεται **Συγκράτηση**. Εκτός από τη συγκράτηση, το νερό αφού φτάσει στις επιφανειακές κοιλότητες υπόκειται σε **Διήθηση** στα κατώτερα εδαφικά στρώματα με το φαινόμενο αυτό να αποτελεί επίσης απώλεια. Μετά τις υδρολογικές απώλειες της συγκράτησης και της διήθησης ένα μέρος της βροχής συγκρατείται σε επιφανειακές κοιλότητες οι οποίες δεν του επιτρέπουν την επιφανειακή απορροή του με το φαινόμενο αυτό να ονομάζεται **Συγκράτηση σε επιφανειακές κοιλότητες**. Στη συνέχεια ακολουθεί το φαινόμενο της **Επιφανειακής Αποθήκευσης** όπου παρατηρείται η εξάτμιση και η διήθηση του νερού που ήταν αρχικά αποθηκευμένο στις επιφανειακές κοιλότητες. Στην Εικόνα 2.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των φαινομένων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο αυτή.



Εικόνα 2.2 Λιάγραμμα ενδεικτικής κατανομής του νερού της βροχής.

Πηγή: Τσακίρης (2013)

Η ποσότητα του νερού που απομένει μετά τις παραπάνω υδρολογικές απώλειες απορρέει είτε επιφανειακά είτε υπεδάφια. Το τμήμα της βροχής που απορρέει επιφανειακά ονομάζεται **Καθαρή Βροχή** (Τσακίρης 2013) ενώ το άθροισμα της επιφανειακής απορροής και της ταχείας υπεδάφιας ροής ονομάζεται άμεση απορροή. Το μέρος της βροχόπτωσης που το προκαλεί καλείται **Απορροϊκή Βροχή** ή **Περίσσευμα Βροχής**. Για τον υπολογισμό των απωλειών της βροχής υπάρχουν διαθέσιμοι ορισμένοι δείκτες και μέθοδοι όπως:

- I. Δείκτης Φ
- II. Δείκτης W
- III. Συντελεστής Απορροής C
- IV. Μέθοδος της SCS (SCS 1972)

Οι δείκτες Φ , W και ο συντελεστής απορροής C για την εφαρμογή τους χρειάζονται ιδανικά μετρήσεις βροχόπτωσης και απορροής, ενώ αντίθετα η μέθοδος της Soil Conservation Service (1972) μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να υπάρχουν μετρήσεις για τις διάφορες υδρολογικές απώλειες. Από τους παραπάνω δείκτες θα αναλυθεί σύντομα ο συντελεστής απορροής C ο οποίος χρησιμοποιείται κατά την Ορθολογική Μέθοδο καθώς και η μέθοδος της SCS στις επόμενες παραγράφους.

2.2.3 Η Ορθολογική Μέθοδος

Πριν την ανάπτυξη αναλυτικών μεθόδων χωροχρονικής εξέλιξης της πλημμύρας γινόταν χρήση απλών εμπειρικών εξισώσεων για την εκτίμηση των κρίσιμων

χαρακτηριστικών της πλημμύρας όπως είναι η αιχμή και ο χρόνος στον οποίο συμβαίνει (Τσακίρης 2013). Η συμβατική ορθολογική μέθοδος (Kuishling 1889) είναι μία μέθοδος υδρολογικού σχεδιασμού που επιτρέπει την εκτίμηση μόνο της παροχής αιχμής ενός υποθετικού πλημμυρικού γεγονότος σχεδιασμού συγκεκριμένης περιόδου επαναφοράς (Τσακίρης 2010) ενώ η μέθοδος έχει ευρεία χρήση ακόμα και σήμερα λόγω της ευκολίας στην χρήση της (Τσακίρης 2013). Προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος για την εκτίμηση παροχών σχεδιασμού γίνονται οι εξής υποθέσεις (Κουτσογιάννης 1999):

- i. Η περίοδος επαναφοράς της παροχής είναι ίση με την περίοδο επαναφοράς της βροχόπτωσης
- ii. Η διάρκεια της βροχής θεωρείται ίση με τον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής
- iii. Η βροχόπτωση σχεδιασμού έχει χρονικά σταθερή ένταση (Τσακίρης 2010).

Η ορθολογική μέθοδος βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση (Τσιχριντζής 1999):

$$Q_p = \frac{1}{360} C_f C_i A \quad (2.9)$$

Όπου: Q_p η παροχή αιχμής του υδρογραφήματος m^3/s , $1/360$ ο συντελεστής διόρθωσης μονάδων μέτρησης, C_f ο συντελεστής διόρθωσης περιόδου επαναφοράς, i η σταθερή ένταση της βροχόπτωσης (mm/h), C ο συντελεστής απορροής και A η έκταση της λεκάνης απορροής (ha).

Ο συντελεστής διόρθωσης περιόδου επαναφοράς δίνεται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Τιμές συντελεστή διόρθωσης περιόδου επαναφοράς.

Πηγή: Τσιχριντζής (1999)

Περίοδος επαναφοράς-Έτη	C_f
2-10	1.00
25	1.10
50	1.20
100	1.25

Ο συντελεστής απορροής εξαρτάται από την ένταση της βροχόπτωσης, από τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, τις χρήσεις γης, την εδαφοκάλυψη και

τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας στην λεκάνη απορροής (Akan 1993). Συνηθέστερα, ο συντελεστής απορροής λαμβάνεται από πίνακες με βάση τις χρήσεις γης και την εδαφοκάλυψη (Τσακίρης 2010, Τσιχριντζής 1999). Τιμές του συντελεστή απορροής έχουν προταθεί από την Αμερικάνικη Ομοσπονδία Ελέγχου Ρύπανσης του Νερού (WPCF) και από την Αμερικάνικη Ένωση Πολιτικών Μηχανικών (ASCE). Οι αντίστοιχες τιμές παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.3 και 2.4, ενώ στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή απορροής σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές.

Πίνακας 2.3 Τιμές του συντελεστή απορροής για διάφορους τύπου χρήσεις γης.
Πηγή: WPCF and ASCE (1976)

Συντελεστής απορροής	Συντελεστής απορροής
Εμπορική	
Κέντρο	0,70 – 0,95
Περιφέρεια	0,50 – 0,70
Οικιστική, αστική	
Μονοκατοικίες	0,30 – 0,50
Πολυκατοικίες σε πανταχόθεν ελεύθερο σύστημα	0,40 – 0,60
Πολυκατοικίες σε συνεχές σύστημα	0,60 – 0,75
Οικιστική, υποαστική	0,25 – 0,40
Βιομηχανική	
Ελαφρά	0,50 – 0,80
Βαριά	0,60 – 0,90
Μη ανεπτυγμένη	0,10 – 0,30
Πάρκα, νεκροταφεία	0,10 – 0,25
Γήπεδα	0,20 – 0,35

Πίνακας 2.4 Τιμές του συντελεστή απορροής για διάφορους τύπους επιφάνειας.

Πηγή: WPCF and ASCE (1976)

Τύπος επιφάνειας	Συντελεστής απορροής
Πεζοδρόμια, δρόμοι	
Σκυρόδεμα / Ασφαλτοσκυρόδεμα	0,70 – 0,95
Πλίνθοι	0,70 – 0,85
Στέγες	0,75 – 0,95
Αγροί, αμμώδη εδάφη	
Ήπια κλίση, 2%	0,05 – 0,10
Μέση κλίση, 2% έως 7%	0,10 – 0,15
Απότομη κλίση, 7%	0,15 – 0,20
Αγροί, βαριά εδάφη	
Ήπια κλίση, 2%	0,13 – 0,17
Μέση κλίση, 2% έως 7%	0,18 – 0,20
Απότομη κλίση, 7%	0,25 – 0,35

Πίνακας 2.5 Τιμές του συντελεστή απορροής σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές (Π.Δ 696/74).

Περιοχή	Ορεινή	Λοφώδης	Πεδινή
Συντελεστής απορροής	0,60	0,50	0,30

Σαν διάρκεια σχεδιασμού σε αυτή τη μέθοδο λαμβάνεται ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής. Ο χρόνος αυτός ισούται με το άθροισμα του χρόνου αβαθούς η διάχυτης ροής (T_o), του χρόνου μετακίνησης του νερού στους δρόμους (T_s) και του χρόνου μετακίνησης της ροής σε κανάλια η αγωγούς (T_L) όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση (Τσιχριντζής 1999):

$$T_c = T_o + T_s + T_l \quad (2.10)$$

Ο χρόνος αβαθούς η διάχυτης ροής υπολογίζεται σύμφωνα με εμπειρικές εξισώσεις μερικές από τις οποίες είναι (Τσιχριντζής 1999):

- Εξίσωση Kerby
- Εξίσωση Izzard
- Εξίσωση Brasby-Williams

- Εξίσωση της Aviation Agency των Η.Π.Α
- Εξίσωση του Manning κινηματικού κύματος

Ο χρόνος ροής στους αγωγούς ή στον δρόμο βρίσκεται σύμφωνα με συνδυασμό των εξισώσεων του Manning οι οποίες είναι (Τσιχριντζής 1999):

$$Q_p = \frac{1}{n} A_L R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad \text{ή} \quad V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

και της εξίσωσης $T_{s,L} = \frac{L}{V}$ (2.12) ώστε να προκύψει τελικά η εξίσωση $T_{s,L} = \frac{L}{\frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}$

(2.13) όπου:

- Q_p =παροχή αιχμής (m^3/s)
- V =μέση ταχύτητα ροής στον αγωγό ή δρόμο (m/s)
- L =μήκος αγωγού η δρόμου (m)
- S =κλίση αγωγού η δρόμου (m/m)
- A_L =επιφάνεια ροής στον αγωγό η δρόμο (m^2)
- R =υδραυλική ακτίνα (m)
- n =συντελεστής Manning για αγωγούς ή κανάλια (μπορεί να βρεθεί μέσα από αντίστοιχους πίνακες)

Οι ελληνικές τεχνικές προδιαγραφές, σε μελέτες αποχέτευσης ομβρίων υδάτων δέχονται μια σταθερή τιμή ίση με 10 min για τον χρόνο αβαθούς ή διάχυτης ροής. Αντίθετα οι αμερικανικές προδιαγραφές δέχονται διαφορετικές τιμές ανάλογα με τις αστικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Οι παραπάνω τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.6

Πίνακας 2.6 Τιμές του χρόνου αβαθούς ή διάχυτης ροής σύμφωνα με ελληνικές και αμερικανικές προδιαγραφές. Πηγή: Τσακίρης (2010)

Περιγραφή περιοχής	Χρόνος εισόδου [min]
Ελληνικές προδιαγραφές (ΠΔ 696/74) για κάθε περιοχή	10
Συστάσεις αμερικανικών ενώσεων WPCF&ASCE	
Πυκνοδομημένες περιοχές με άμεσες ιδιωτικές συνδέσεις στους αγωγούς	5
Αναπτυγμένες περιοχές με ήπιες κλίσεις	10 – 15

2.2.4 Μέθοδος SCS

Η υπηρεσία Soil Conservation Service των Η.Π.Α παρουσίασε μια μέθοδο υπολογισμού του περισσεύματος της βροχόπτωσης από μια δεδομένη βροχή με την βοήθεια τριών μεταβλητών: του ύψους βροχής, της αρχικής κατάστασης υγρασίας του εδάφους και του υδρολογικού συμπλόκου εδάφους-καλύμματος (SCS 1972). Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του περισσεύματος της βροχής ή το φαινόμενο μετατροπής της βροχής σε άμεση απορροή (Τσακίρης 2013, Τσιχριντζής 1999), ενώ η σχέση μπορεί να εφαρμοστεί και για το τελικό ύψος βροχής της καταιγίδας αλλά και για ενδιάμεσες τιμές του, και έτσι προκύπτει η χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Η μέθοδος κάνει την υπόθεση ότι οι αρχικές απώλειες της εξάτμισης και της συγκράτησης αποτελούν το 20% των συνολικών απωλειών (S) δηλαδή της διαφοράς ύψους βροχόπτωσης (h_r) και του ύψους περισσεύματος βροχής (h_R) και έτσι προκύπτει η σχέση (Τσακίρης 2013):

$$h_R = \frac{(h_r - 0.2S)^2}{(h_r + 0.8S)} \quad (2.14)$$

για $h_r > 0.2S$ ενώ για $h_r < 0.2S$ τότε $h_R=0$. Ενώ οι συνολικές απώλειες (S) εκφράζονται με την βοήθεια του αριθμού καμπύλης CN από την σχέση:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ (mm)} \quad (2.15)$$

Αρχικά και πριν την παρουσίαση του τρόπου εκτίμησης του αριθμού καμπύλης CN θα παρουσιαστούν οι μεταβλητές της αρχικής κατάστασης υγρασίας του εδάφους και οι κατηγορίες των εδαφών από υδρολογική άποψη σύμφωνα με τους Τσακίρη (2013) και Τσιχριντζή (1999).

Αρχική κατάσταση υγρασίας

Η αρχική κατάσταση υγρασίας υπολογίζεται σύμφωνα με το συνολικό ύψος βροχής των προηγούμενων 5 ημερών και έτσι διακρίνονται τρεις κατηγορίες.

Τύπος I: Συνολικό ύψος βροχόπτωσης μικρότερο των 13 mm τις 5 προηγούμενες ημέρες.

Τύπος II: Συνολικό ύψος βροχόπτωσης τις προηγούμενες 5 ημέρες ανάμεσα σε 13 και 38 mm.

Τύπος III: Αντιστοιχεί σε περίπτωση που το ύψος βροχόπτωσης τις 5 προηγούμενες ημέρες είναι μεγαλύτερο των 38 mm.

Κατηγορίες εδαφών από υδρολογική άποψη

Κατηγορία A: Εδάφη με υψηλή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Αφορά συνήθως αμμώδη ή χαλικώδη εδάφη. Έχουν την μικρότερη δυνατότητα παραγωγής επιφανειακής απορροής και την υψηλότερη δυνατότητα διήθησης.

Κατηγορία B: Εδάφη με μέτρια βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Έχουν ιδιαίτερα μικρή δυνατότητα παραγωγής επιφανειακής απορροής και άνω της μέσης δυνατότητα διήθησης.

Κατηγορία C: Εδάφη με μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Έχουν ικανοποιητικά υψηλή δυνατότητα παραγωγής επιφανειακής απορροής και κάτω της μέσης δυνατότητα διήθησης.

Κατηγορία D: Εδάφη με πολύ μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Αποτελούν ουσιαστικά τα εδάφη, με την υψηλότερη δυνατότητα παραγωγής επιφανειακής απορροής ενώ είναι σχεδόν αδιαπέρατα.

Αριθμός καμπύλης CN

Για συνθήκες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του αριθμού καμπύλης για κάθε ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης. Οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7 ενώ για τις άλλες δύο συνθήκες υγρασίας γίνεται αναγωγή του CN με βάση τις παρακάτω σχέσεις (Rossman 2015):

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}} \quad (2.16)$$

$$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 - 0.13CN_{II}} \quad (2.17)$$

Πίνακας 2.7 Τυπικοί αριθμοί καμπύλης CN κατά Soil Conservation Service για συνθήκες υγρασίας τύπου II. Πηγή: Τσακίρης (2013), Wanielista (1978)

Χρήσεις γης		Υδρολογικός τύπος εδάφους			
		A	B	C	D
Καλλιεργούμενες εκτάσεις		62-72	71-81	78-88	81-91
Λιβάδια, βοσκότοποι		30-68	58-79	71-86	78-89
Δάση		25-45	55-66	70-77	77-83
Ανοιχτοί χώροι, πάρκα, κοιμητήρια κ.τ.λ.					
Με κάλυψη πράσινου πάνω από 75% της έκτασης		39	61	74	80
Με κάλυψη πράσινου λιγότερο από 75% της έκτασης		49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές		89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές		81	88	91	93
Οικιστικές περιοχές					
Μέσο μέγεθος οικοπέδου (στρέμματα)	Αδιαπέρατη επιφάνεια				
<0,5	65%	77	85	90	92
<1,0	38%	61	75	83	87
<1,5	30%	57	72	81	86
<2,0	25%	54	70	80	85
<4,0	20%	51	68	79	84
Οδοί					
με οδόστρωμα και αγωγούς ομβρίων		98	98	98	98
χαλικόστρωτοι		76	85	89	91
χωματόδρομοι		72	82	87	89

2.3 Εκτίμηση παροχής απορροών ξηρού καιρού

2.3.1 Γενικά

Το δίκτυο αποχέτευσης αστικών λυμάτων ή ακαθάρτων ενός οικισμού ορίζεται ουσιαστικά ως το δίκτυο συλλογής, μεταφοράς, επεξεργασίας και διάθεσης στον τελικό αποδέκτη των υγρών αποβλήτων από οικίες, εμπορικές και βιοτεχνικές μονάδες μιας αστικής περιοχής (Τσακίρης 2010). Το δίκτυο αποχέτευσης ενός οικισμού όπως αναφέρει ο Τσακίρης (2010) πρέπει να είναι ικανό να απομακρύνει τη μέγιστη παροχή ακαθάρτων κάθε στιγμή κατά την διάρκεια της ημέρας με τη μέγιστη κατανάλωση νερού. Με βάση την παραδοχή ότι περίπου το 60-80% της κατανάλωσης νερού καταλήγει στο αποχετευτικό δίκτυο αλλά και με βάση την παραπάνω παραδοχή ότι το δίκτυο πρέπει να είναι ικανό να μεταφέρει την μέγιστη στιγμιαία παροχή που προσεγγίζεται από την μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων ακολουθείται η διαδικασία εκτίμησης της παροχής των ακαθάρτων (Τσακίρης 2010). Για την εκτίμηση αυτή, χρειάζεται ο υπολογισμός ορισμένων παραμέτρων όπως είναι ο πληθυσμός της εκάστοτε περιοχής μελέτης, η κατανάλωση νερού καθώς και το ποσοστό της κατανάλωσης αυτής που καταλήγει τελικώς στην αποχέτευση.

2.3.2 Εκτίμηση παροχής αποχέτευσης ακαθάρτων

Η διαδικασία που ακολουθείται στην εκτίμηση της παροχής των ακαθάρτων είναι η ακόλουθη (Τσακίρης 2010):

- i. Προσδιορίζεται η μέση ανηγμένη ημερήσια κατανάλωση ανά κάτοικο (q) με τις τιμές αυτές να κυμαίνονται για τις μεσογειακές χώρες ανάμεσα σε 200-300 L/ημέρα*κάτοικο.
- ii. Υπολογίζεται η συνολική μέση ημερήσια κατανάλωση για τον πληθυσμό της περιοχής μελέτης (P_v).

$$Q_d = P_v q \quad (2.18)$$

- iii. Υπολογίζεται η συνολική μέγιστη ωριαία κατανάλωση

$$Q_h^{max} = F_1 F_2 Q_d \quad (2.19)$$

όπου ο πολλαπλασιαστής $F_{ολ} = F_1 F_2$ από 3 μέχρι 9, ενώ η συνήθης τιμή για τις Ελληνικές πρακτικές επιλέγεται να είναι $F_1 F_2 = 4 \div 6$.

Πολλαπλασιαστές ζήτησης (Peaking factors)

Σύμφωνα με την WSAΑ (2002) οι πολλαπλασιαστές ζήτησης εξαρτώνται απο το μέγεθος του πληθυσμού.

Πίνακας 2.8 Πολλαπλασιαστές ζήτησης.

Πηγή: Τσακίρης (2010)

Πολλαπλασιαστής F_1	Πληθυσμός
$F_1 = 1.50$	$P_v > 10000$
$F_1 = 2$	$P_v < 2000$

Πολλαπλασιαστής F_2	Πληθυσμός
$F_2 = 2$	$P_v > 10000$
$F_2 = 5$	$P_v < 2000$

Ο πολλαπλασιαστής F_1 χρησιμοποιείται στην μετατροπή της μέσης ημερήσιας παροχής σε μέγιστη ημερήσια παροχή ενώ ο συντελεστής F_2 στην μετατροπή της μέγιστης ημερήσιας παροχής σε μέγιστη ωριαία παροχή.

- iv. Υπολογίζεται η συνολική μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων ως ποσοστό της μέγιστης ωριαίας κατανάλωσης με συντελεστή μ από 60 έως 80%. [Η ΕΥΔΑΠ (1985) πρότεινε ποσοστό 85%]

$$QA_h^{max} = \mu Q_h^{max} \quad (2.20)$$

Σύμφωνα με τον Τσακίρη (2010) για τις Ελληνικές προδιαγραφές η μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων υπολογίζεται από τη μέγιστη ημερήσια παροχή ακαθάρτων πολλαπλασιασμένη με έναν συντελεστή P ο οποίος είναι συνάρτηση της μέγιστης ημερήσιας παροχής ακαθάρτων. Δηλαδή ισχύει:

i. $QA_h^{max} = PQA_d^{max} \quad (2.21)$

$$\text{ii. } P = 1.5 + \frac{2.5}{\sqrt{Q_d^{max}}} \leq 3 \quad (2.22)$$

Εδώ να τονίσουμε ότι όλα τα μεγέθη παροχών που παρουσιάστηκαν παραπάνω εκφράζονται σε L / s.

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SWMM

3.1 Εισαγωγή

Το λογισμικό SWMM ή ολογράφως Storm Water Management Model δημιουργήθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (Environmental Protection Agency U.S) το 1971. Από το 1971 μέχρι και σήμερα το λογισμικό έχει δεχθεί πολλές αναβαθμίσεις (Metcalf and Eddy 1971) , (Huber and Dickinson 1992) ενώ παραμένει ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό για το σχεδιασμό, την ανάλυση και τη διαχείριση της επιφανειακής απορροής, παντοροϊκών δικτύων, δικτύων ακαθάρτων αλλά και άλλων αποχετευτικών δικτύων αστικών και μη αστικών περιοχών. Το λογισμικό SWMM είναι ένα δυναμικό λογισμικό βροχόπτωσης-απορροής σχεδιασμένο για μεμονωμένα γεγονότα βροχόπτωσης ή για συνεχή προσομοίωση της ποιότητας και της ποσότητας της απορροής από αστικές κυρίως περιοχές. Το τμήμα της απορροής στηρίζεται σε ένα σύνολο λεκανών απορροής οι οποίες δέχονται βροχόπτωση και παράγουν απορροή και ρυπαντικά φορτία. Στη συνέχεια, το τμήμα μεταφοράς του λογισμικού, μεταφέρει την απορροή αυτή μέσω ενός συστήματος αγωγών, καναλιών, δεξαμενών κατακράτησης/επεξεργασίας, ρυθμιστών ροής και αντλιών. Το λογισμικό SWMM είναι ικανό να εκτιμήσει την ποιότητα και την ποσότητα της απορροής που παράγει η κάθε λεκάνη απορροής, αλλά και την ταχύτητα, το βάθος ροής και την ποιότητα του νερού μέσα σε κάθε αγωγό ή κανάλι κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Παρακάτω, στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό αποχετευτικό σύστημα αστικής περιοχής με τα συστατικά του στοιχεία.



Εικόνα 3.1 Τυπικό αποχετευτικό σύστημα αστικής περιοχής με τα συστατικά του στοιχεία. Πηγή: Rossman (2015)

3.2 Δυνατότητες μοντέλου & τυπικές εφαρμογές

Το SWMM συνυπολογίζει μεγάλο αριθμό υδρολογικών διεργασιών για την παραγωγή της απορροής. Μερικές από τις υδρολογικές δυνατότητες του μοντέλου παρουσιάζονται παρακάτω.

- Χρονικά ανομοιόμορφη βροχόπτωση
- Εξάτμιση του επιφανειακού νερού
- Συγκέντρωση και τήξη του χιονιού
- Διήθηση του νερού σε κατώτερα εδαφικά στρώματα
- Εισροή του υπόγειου νερού στο αποχετευτικό σύστημα
- Εισαγωγή του διηθημένου νερού σε κατώτερα υδάτινα στρώματα-αποδέκτες
- Συγκράτηση νερού σε επιφανειακές κολότητες-επιφανειακή κατακράτηση
- Βασική απορροή
- Κατασκευές Low Impact Development (LID) για την συγκράτηση της απορροής

Σύμφωνα με τον Rossman (2015) η χωρική μεταβλητότητα όλων των παραπάνω στοιχείων μπορεί να επιτευχθεί χωρίζοντας την αρχική λεκάνη απορροής σε

μικρότερες ομοιογενείς υπολεκάνες απορροής από τις οποίες κάθε μία θα περιέχει και ένα ποσοστό διαπερατής και μη διαπερατής επιφάνειας.

Πέρα από τις υδρολογικές δυνατότητες του μοντέλου, το SWMM παρέχει στον χρήστη ένα σύνολο υδραυλικών δυνατοτήτων για τη διόδευση της απορροής και των εισροών μέσα από το αποχετευτικό σύστημα. Οι δυνατότητες αυτές, υδραυλικής προσομοίωσης του μοντέλου παρουσιάζονται παρακάτω.

- Δεν υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος του δικτύου.
- Χρήση μεγάλης ποικιλίας διατομών κλειστών αγωγών αλλά και ανοιχτών όπως είναι τα κανάλια.
- Μοντελοποίηση ειδικών στοιχείων του αποχετευτικού δικτύου όπως είναι οι αντλίες, οι υπερχειλιστές, τα στόμια και οι δεξαμενές κατακράτησης και επεξεργασίας.
- Δυνατότητα εισαγωγής εξωτερικών εισροών και των ποιοτικών τους στοιχείων από επιφανειακή απορροή, εισροή των υπόγειων ροών στο αποχετευτικό σύστημα και εισροές ακαθάρτων στο δίκτυο.
- Καθορισμός της μεθόδου κινηματικού κύματος ή δυναμικού κύματος για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων του Saint Venant για τη διόδευση της απορροής μέσω του δικτύου.
- Μοντελοποίηση πολλών καταστάσεων ροής όπως είναι η ανάστροφη ροή, η υπερχειλίση και η ροή υπό πίεση.
- Εισαγωγή από τον χρήστη δυναμικών κανόνων ελέγχου λειτουργίας των αντλιών, των στομίων κ.λπ.

Επιπλέον, για την μοντελοποίηση παραγωγής της απορροής και της μεταφοράς της, το SWMM έχει την δυνατότητα υπολογισμού ρυπαντικών φορτίων που σχετίζονται με την απορροή αυτή. Ο χρήστης καθορίζει τα συστατικά στοιχεία που περιέχονται στην απορροή και μπορεί να γίνει μοντελοποίηση των παρακάτω διαδικασιών:

- Συγκέντρωση ρύπων σε συνθήκες ξηρού καιρού για διάφορες χρήσεις γης.
- Απόπλυση ρύπων από διάφορες χρήσεις γης κατά τη διάρκεια γεγονότων βροχόπτωσης.

- Μείωση της απόπλυσης μέσω των συστημάτων βέλτιστων συνθηκών διαχείρισης.
- Διόδευση των επιλεγμένων από τον χρήστη συστατικών της απορροής μέσω του αποχετευτικού συστήματος.
- Μείωση της συγκέντρωσης ρυπαντικών συστατικών στοιχείων μέσω επεξεργασίας στις δεξαμενές κατακράτησης/διαχείρισης ή μέσω φυσικών διαδικασιών στους αγωγούς και στα κανάλια του συστήματος.

Το λογισμικό SWMM όπως αναφέραμε και παραπάνω χρησιμοποιείται παγκοσμίως σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Ενδεικτικές εφαρμογές του λογισμικού είναι:

- Σχεδιασμός και διαστασιολόγηση αποχετευτικών δικτύων.
- Διαστασιολόγηση των δεξαμενών κατακράτησης της απορροής για την προστασία από πλημμυρικά φαινόμενα και τη διαχείριση της ποιότητας του νερού.
- Χαρτογράφηση της πλημμυρικής κατάστασης σε αγωγούς και σε κανάλια.
- Σχεδιασμός ελέγχων για τη μείωση των υπερχειλίσεων σε παντοροϊκά δίκτυα.
- Εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των βέλτιστων συνθηκών διαχείρισης στην μείωση των ρύπων σε περιόδους βροχόπτωσης.

3.3 Εννοιολογικό μοντέλο λογισμικού SWMM

Το λογισμικό SWMM αντιλαμβάνεται το αποχετευτικό σύστημα ως ένα σύνολο τμημάτων του περιβάλλοντος μέσα από τα οποία γίνεται η μετακίνηση του νερού. Τα τμήματα του περιβάλλοντος μαζί με τα διάφορα αντικείμενα του λογισμικού που περιλαμβάνουν είναι τα ακόλουθα:

- Το τμήμα της ατμόσφαιρας το οποίο παράγει βροχόπτωση και την στέλνει στο τμήμα της επιφάνειας του εδάφους. Το λογισμικό SWMM αναπαριστά το τμήμα αυτό με το αντικείμενο Rain Gage.
- Το τμήμα του εδάφους που δέχεται την βροχόπτωση από το τμήμα της ατμόσφαιρας. Μέσω της διήθησης ένα μέρος του νερού οδεύει προς το τμήμα των υπόγειων νερών ενώ το άλλο τμήμα μέσω της επιφανειακής απορροής καταλήγει στο αποχετευτικό σύστημα που ανήκει στο τμήμα της μεταφοράς.

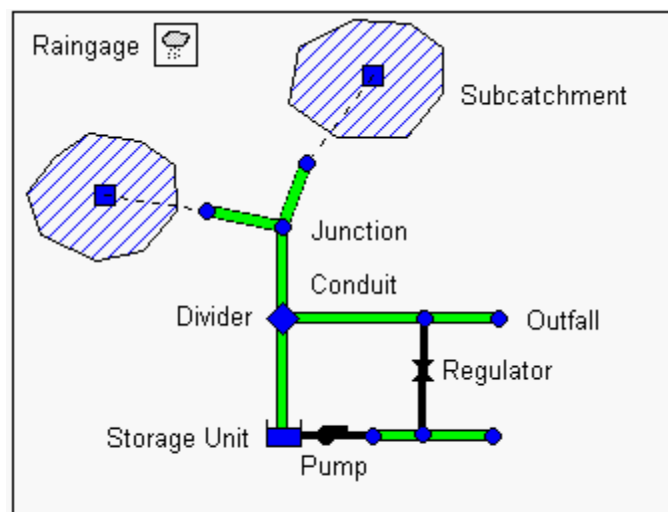
- Το τμήμα των υπόγειων νερών όπως αναφέραμε δέχεται μέσω της διήθησης νερό από το τμήμα του εδάφους. Ένα μέρος της διήθησης αυτής καταλήγει ως εισροή στο τμήμα της μεταφοράς ενώ στο λογισμικό SWMM απεικονίζεται μέσω των αντικειμένων του υπόγειου υδροφορέα (aquifer).
- Το τμήμα της μεταφοράς το οποίο δέχεται την επιφανειακή απορροή από το τμήμα εδάφους και την εισροή υπόγειων νερών από το τμήμα των υπόγειων νερών. Το τμήμα της μεταφοράς αποτελείται από αντικείμενα κόμβων και αγωγών συνδέσεων.

3.4 Αντικείμενα λογισμικού SWMM

3.4.1 Οπτικά αντικείμενα

3.4.1.1 Εισαγωγή

Οπτικά αντικείμενα είναι αυτά τα οποία μπορούν να εμφανιστούν στον χάρτη του περιβάλλοντος εργασίας του λογισμικού και αναπαριστούν το αποχετευτικό δίκτυο. Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζονται τα οπτικά αντικείμενα του λογισμικού SWMM.



Εικόνα 3.2 Οπτικά αντικείμενα λογισμικού SWMM.

Πηγή: Rossman (2015)

3.4.1.2 Βροχογράφοι

Οι βροχογράφοι παρέχουν δεδομένα βροχόπτωσης σε μία ή περισσότερες υπολεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης. Οι βασικές παράμετροι εισαγωγής για τους βροχογράφους είναι:

- Πηγή δεδομένων βροχόπτωσης
- Χρονικό βήμα βροχόπτωσης
- Ονομασία βροχομετρικής πηγής
- Τύπος δεδομένων βροχόπτωσης (ένταση-όγκος-ισοδύναμο ύψος βροχόπτωσης)

3.4.1.3 Υπολεκάνες απορροής

Οι υπολεκάνες απορροής αποτελούν υδρολογικές μονάδες η τοπογραφία των οποίων σε συνεργασία με το αποχετευτικό σύστημα κατευθύνουν την απορροή σε ένα μόνο σημείο εκροής για κάθε λεκάνη. Ο χρήστης του λογισμικού είναι υπεύθυνος για την επιλογή του σωστού αριθμού υπολεκανών, τον ορθό καθορισμό αυτών, καθώς και τον καθορισμό του σημείου εκβολής κάθε υπολεκάνης απορροής. Η επιφάνεια κάθε υπολεκάνης μπορεί να χωριστεί σε διαπερατή και μη διαπερατή έκταση ενώ η επιφανειακή απορροή μπορεί να διηθηθεί μόνο στη διαπερατή περιοχή και όχι στην αδιαπέρατη. Τέλος, η αδιαπέρατη περιοχή χωρίζεται σε δύο υποπεριοχές η μία απο τις οποίες έχει την δυνατότητα επιφανειακής κατακράτησης νερού ενώ η άλλη όχι. Η διήθηση του νερού στα ανώτερα εδαφικά στρώματα μπορεί να χαρακτηριστεί σύμφωνα με 5 διαφορετικά μοντέλα διήθησης τα οποία παρέχονται στον χρήστη. Τα μοντέλα διήθησης είναι:

- Horton
- Τροποποιημένη μέθοδος Horton
- Green-Ampt
- Τροποποιημένη μέθοδος Green-Ampt
- Μέθοδος του αριθμού καμπύλης CN

Οι άλλες βασικές παράμετροι εισαγωγής για τον καθορισμό των υπολεκανών απορροής είναι:

- Βροχογράφος
- Σημείο εκροής λεκάνης
- Ποσοστό αδιαπερατότητας
- Κλίση λεκάνης
- Πλάτος επίγειας ροής

- Συντελεστής κατά Manning για επίγεια ροή σε αδιαπέρατα και διαπερατά εδάφη
- Ποσοστό αδιαπέρατης περιοχής χωρίς τη δυνατότητα επιφανειακής συγκράτησης
- Καθορισμένες χρήσεις γης
- Έκταση λεκάνης
- Επιφανειακή αποθήκευση διαπερατής και αδιαπέρατης περιοχής

3.4.1.4 Κόμβοι

Οι κόμβοι αποτελούν τα σημεία του αποχετευτικού συστήματος στα οποία συνδέονται όλοι οι αγωγοί-κανάλια του δικτύου. Αναπαριστούν ουσιαστικά τις διασταυρώσεις των φυσικών υδατορευμάτων, τις συνδέσεις των αγωγών ή τα φρεάτια του αποχετευτικού δικτύου ενώ εξωτερικές εισροές εισχωρούν στο δίκτυο μέσω των κόμβων. Περίσσειμα νερού σε έναν κόμβο μπορεί να προκαλέσει την υπό πίεση λειτουργία ενός αγωγού με αποτέλεσμα ο αγωγός να υπερχειλίσει. Στην περίπτωση αυτή το περίσσειμα νερού μπορεί είτε να χαθεί από το σύστημα είτε να αποθηκευτεί πάνω από τον κόμβο και να αποχετευτεί αργότερα. Βασικές παράμετροι εισαγωγής για τον καθορισμό ενός κόμβου είναι:

- Υψόμετρο πυθμένα κόμβου
- Δεδομένα εξωτερικών εισροών
- Έκταση λιμνάζουσας επιφάνειας σε περίπτωση πλημμύρας
- Ύψος από τον πυθμένα του κόμβου μέχρι την επιφάνεια του εδάφους

3.4.1.5 Κόμβοι εκροής

Οι κόμβοι εκροής είναι τερματικοί κόμβοι του αποχετευτικού συστήματος στα κατάντη στην περίπτωση διόδευσης δυναμικού κύματος. Οι βασικές παράμετροι εισαγωγής είναι:

- Υψόμετρο πυθμένα
- Τύπος οριακών συνθηκών που προσδιορίζουν την ανώτατη στάθμη
- Παρουσία θυροφράγματος για την εμπόδιση της ροής εκ των κατάντη (ανάστροφης ροής)

3.4.1.6 Αγωγοί

Οι αγωγοί είναι σωλήνες ή κανάλια που μεταφέρουν την απορροή από έναν κόμβο σε έναν άλλο ενώ η επιλογή του σχήματος της διατομής μπορεί να γίνει μέσα από έναν μεγάλο αριθμό διατομών που παρέχει το λογισμικό στον χρήστη. Οι περισσότεροι ανοιχτοί αγωγοί μπορούν να αναπαρασταθούν από ορθγωνικές-τραπεζοειδείς διατομές ενώ υπάρχει η επιλογή του καθορισμού της διακύμανσης του βάθους κατά μήκος της διατομής από τον χρήστη.

Το SWMM χρησιμοποιεί την εξίσωση του Manning για την σχέση ανάμεσα στην παροχή, κλίση, υδραυλική ακτίνα και εμβαδόν της διατομής και η εξίσωση στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I) είναι:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (3.1)$$

Όπου n ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning, ενώ η κλίση S είναι είτε η κλίση του πυθμένα του αγωγού είτε η κλίση τριβών S_f ανάλογα με την μέθοδο διόδευσης που επιλέγεται από τον χρήστη (Rossman 2015). Για αγωγούς κυκλικής διατομής οι οποίοι λειτουργούν υπό πίεση οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται αντί της εξίσωσης Manning είναι οι Hazen-Williams και Darcy-Weisbach. Η σχέση Hazen-Williams στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I) είναι (Τερζίδης 1997):

$$Q = 0.279CD^{2.63}S^{0.54} \quad (3.2)$$

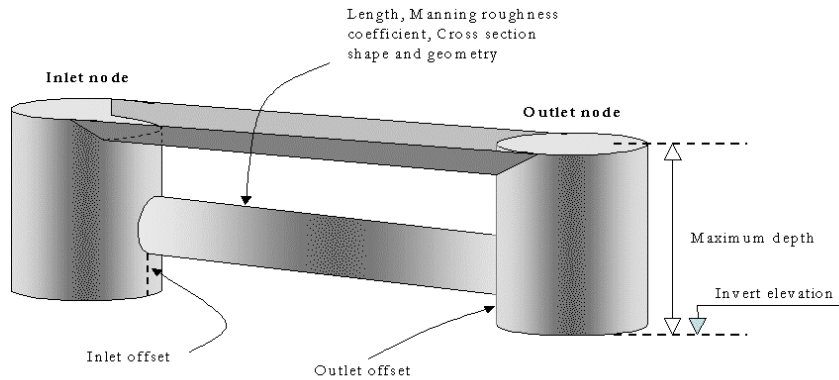
Όπου C είναι ο συντελεστής κατά Hazen-Williams, D η διάμετρος του αγωγού σε m και S η κλίση του πιεζομετρικού φορτίου. Η εξίσωση των Darcy-Weisbach είναι:

$$Q = \sqrt{\frac{8g}{f}} AR^{0.5} S^{0.5} \quad (3.3)$$

Όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας και f ο συντελεστής τριβών Darcy-Weisbach. Οι βασικές παράμετροι εισαγωγής στο μοντέλο για τους αγωγούς είναι:

- Ονόματα κόμβων εισόδου/εξόδου
- Μήκος αγωγού
- Σχήμα-γεωμετρία διατομής αγωγού
- Συντελεστής τραχύτητας κατά Manning

- Ύψος πυθμένα αγωγού από τον πυθμένα των κόμβων εισόδου/εξόδου (inlet & outlet offsets). Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται ενδεικτικά η γεωμετρία της παραμέτρου.



Εικόνα 3.3 Τυπική γεωμετρία αγωγού.

Πηγή: Gironas et al. (2009)

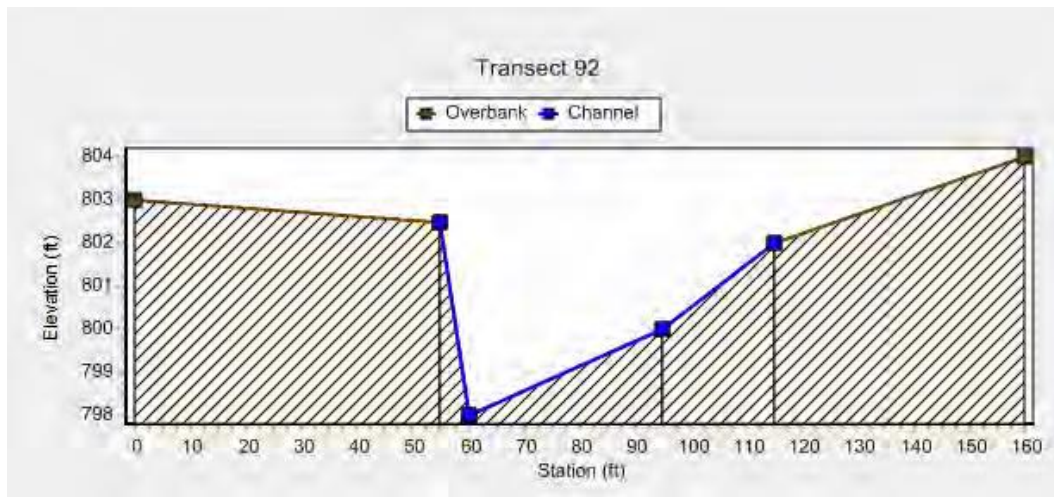
3.4.2 Μη οπτικά αντικείμενα

3.4.2.1 Εισαγωγή

Εκτός των οπτικών αντικειμένων το λογισμικό SWMM χρησιμοποιεί ένα σύνολο μη οπτικών δεδομένων αντικειμένων για την περιγραφή επιπρόσθετων χαρακτηριστικών και διαδικασιών σε μία περιοχή μελέτης. Τα δεδομένα αυτά ενδεικτικά μπορεί να είναι: κλιματολογικά, δεδομένα χιονόπτωσης, υπόγειοι υδροφορείς, μοναδιαία υδρογραφήματα, διατομές, εντολές ελέγχου, ρύποι, χρήσεις γης καθώς και χρονοσειρές.

3.4.2.2 Διατομές

Οι διατομές είναι γεωμετρικά δεδομένα που περιγράφουν πως μεταβάλλεται το υψόμετρο του πυθμένα με την οριζόντια απόσταση στη διατομή ενός φυσικού υδατορεύματος ή ενός αγωγού ακανόνιστου σχήματος.



Εικόνα 3.4 Τυπική διατομή ενός φυσικού υδατορεύματος.

Πηγή: Rossman (2015)

Κάθε διατομή θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ένα μοναδικό όνομα. Στη συνέχεια, το όνομα αυτό εισάγεται στη παράμετρο της διατομής ενός αγωγού προκειμένου να περιγραφεί η γεωμετρία της διατομής του συγκεκριμένου αγωγού.

3.4.2.3 Χρονοσειρές

Τα αντικείμενα χρονοσειρών χρησιμοποιούνται προκειμένου να περιγράψουν τον τρόπο με τον οποίο ορισμένα χαρακτηριστικά αντικειμένων μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του χρόνου. Οι χρονοσειρές χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν:

- Δεδομένα θερμοκρασίας
- Δεδομένα εξάτμισης
- Δεδομένα βροχόπτωσης
- Δεδομένα στάθμης νερού στις εκροές του δικτύου
- Υδρογραφήματα εξωτερικών εισροών στους κόμβους του αποχετευτικού δικτύου
- Γραφήματα ρύπων εξωτερικών εισροών στους κόμβους του αποχετευτικού δικτύου
- Ρυθμίσεις ελέγχου για αντλίες, ρυθμιστές ροής

3.5 Υπολογιστικές μέθοδοι

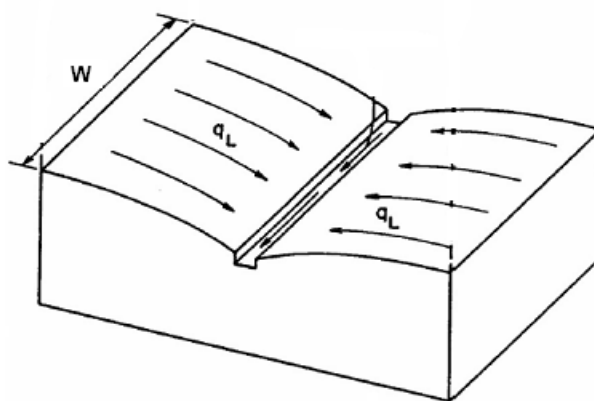
3.5.1 Εισαγωγή

Το SWMM είναι ένα φυσικά δομημένο, διακριτού χρόνου λογισμικό προσομοίωσης. Κάνει χρήση των αρχών διατήρησης της μάζας, της ενέργειας και της ορμής όπου αυτό είναι απαραίτητο. Το υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζει συνοπτικά τις μεθόδους που χρησιμοποιεί το SWMM για τη μοντελοποίηση της ποιότητας και της ποσότητας της απορροής μέσα από τις παρακάτω φυσικές διαδικασίες:

- Επιφανειακή απορροή
- Υπόγεια νερά
- Διόδευση απορροής
- Διόδευση της ποιότητας των υδάτων
- Διήθηση
- Τήξη χιονιού
- Επιφανειακή λίμναση

3.5.2 Επιφανειακή απορροή

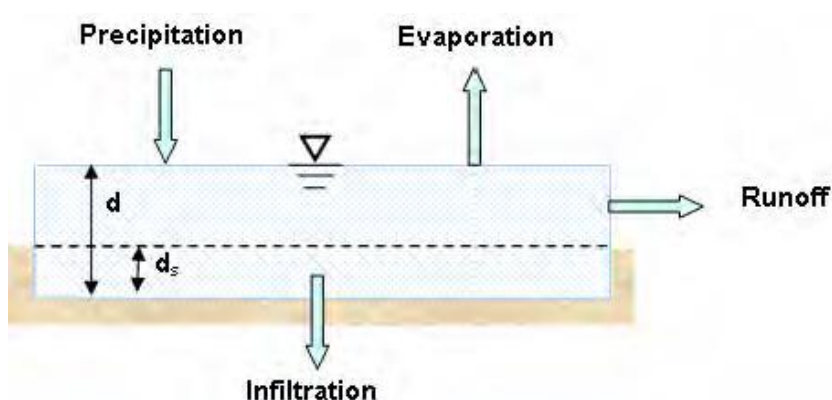
Το λογισμικό SWMM αντιλαμβάνεται την λεκάνη απορροής ως μία ορθογώνια επιφάνεια ομοιόμορφης κλίσης S και πλάτους W η οποία στραγγίζεται σε ένα μοναδικό κανάλι.



Εικόνα 3.5 Αναπαράσταση λεκάνης απορροής σύμφωνα με το λογισμικό SWMM.

Πηγή: Rossman (2016)

Το εννοιολογικό μοντέλο υπολογισμού της επιφανειακής απορροής παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.6 που ακολουθεί. Κάθε λεκάνη απορροής θεωρείται ως μία μη γραμμική δεξαμενή με εισροές την απορροή από τις ανάντη λεκάνες και την κατακρήμνιση, ενώ οι εκροές της δεξαμενής είναι η εξάτμιση, η διήθηση και η επιφανειακή απορροή. Η χωρητικότητα της αποθηκευτικής δεξαμενής ισούται με τη μέγιστη επιφανειακή αποθήκευση που προκύπτει από την επιφανειακή λίμναση, τη ύγρανση του εδάφους, τη συγκράτηση από τη βλάστηση, καθώς και την αποθήκευση σε επίπεδες ταράτσες. Η επιφανειακή απορροή προκύπτει μόλις το βάθος του νερού στη δεξαμενή ξεπεράσει τη δυνατότητα μέγιστης επιφανειακής αποθήκευσης.



Εικόνα 3.6 Εννοιολογικό μοντέλο υπολογισμού επιφανειακής απορροής.

Πηγή: Rossman (2015)

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας, η μεταβολή του ανηγμένου βάθους νερού d σε κάθε χρονικό βήμα θα είναι απλώς η διαφορά ανάμεσα στις εισροές και τις εκροές της λεκάνης απορροής. Η σχέση που δηλώνει τα παραπάνω είναι:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (3.4)$$

Όπου: i ο ρυθμός βροχόπτωσης (m/s), e ο ρυθμός εξάτμισης (m/s), f ο ρυθμός διήθησης (m/sec) και q ο ρυθμός της απορροής (m/s).

Στη συνέχεια και σύμφωνα με την υπόθεση πως η ροή είναι ομοιόμορφη και η διατομή ορθογωνική πλάτους W , ύψους $d-d_s$ και ομοιόμορφης κλίσης S μπορούμε σύμφωνα με την εξίσωση του Manning να προσδιορίσουμε την παροχή της επιφανειακής απορροής. Η εξίσωση του Manning είναι:

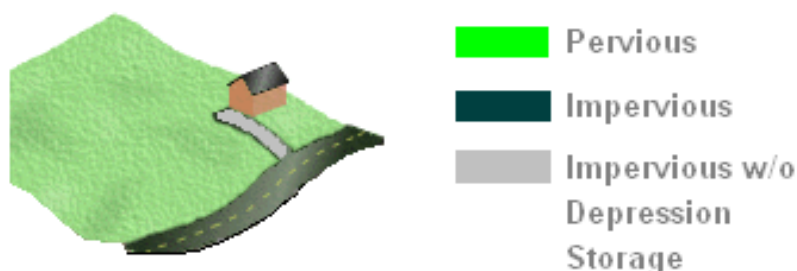
$$Q = \frac{1}{n} S^{1/2} R^{2/3} A \quad (3.5)$$

Όπου: n ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning, S η κλίση της λεκάνης, A η επιφάνεια ροής στον αγωγό και R η υδραυλική ακτίνα. Ενώ σύμφωνα με τις Εικόνες 3.5 και 3.6 η επιφάνεια ροής θα είναι ορθογωνικού σχήματος με πλάτος ροής W και ύψος ίσο με $d - d_s$, καθώς το πλάτος επίγειας ροής W είναι πάντα αρκετά μεγαλύτερο από το βάθος d ισχύουν οι σχέσεις: $A = W(d - d_s)$ & $R = d - d_s$. Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις η εξίσωση του Manning που προκύπτει είναι:

$$Q = \frac{1}{n} WS^{1/2}(d - d_s)^{5/3} \quad (3.6)$$

Διαίρεση λεκάνης απορροής

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό για την εκτίμηση της επιφανειακής απορροής αφορούν λεκάνες με ομοιόμορφα χαρακτηριστικά. Οι αστικές λεκάνες απορροής ωστόσο χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο χρήσεων γης που χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές είναι διαπερατές εκτάσεις και αδιαπέρατες εκτάσεις. Οι διαπερατές εκτάσεις αφορούν τα δάση, το γρασίδι και τα χωράφια στα οποία το νερό μπορεί να διηθηθεί στο έδαφος ενώ οι αδιαπέρατες εκτάσεις περιλαμβάνουν τους δρόμους, τα κτίρια και τους υπαίθριους χώρους στάθμευσης αυτοκινήτων. Επίσης, στα αδιαπέρατα εδάφη η επιφανειακή απορροή δεν ξεκινάει αμέσως μετά την βροχόπτωση καθώς πρώτα πρέπει να εξαντληθεί ο χώρος της επιφανειακής αποθήκευσης όπου υπάρχει. Το λογισμικό SWMM δίνει τη δυνατότητα διακριτικοποίησης των εκτάσεων αυτών αρχικά με την παράμετρο *Imperviousness* που δηλώνει το ποσοστό αδιαπέρατης έκτασης καθώς και την παράμετρο *%Zero-Imperv* που αντιπροσωπεύει το ποσοστό της αδιαπέρατης περιοχής που έχει μηδενική επιφανειακή αποθήκευση. Στην Εικόνα 3.7 που ακολουθεί παρουσιάζεται η διακριτικοποίηση της λεκάνης απορροής σύμφωνα με το λογισμικό SWMM.



Εικόνα 3.7 Διαίρεση λεκάνης απορροής.

Πηγή: Rossman (2016)

3.5.3 Διήθηση

Διήθηση είναι η διαδικασία διείσδυσης του νερού στα ακόρεστα εδαφικά στρώματα στις διαπερατές επιφάνειες της λεκάνης απορροής. Το SWMM προσφέρει 4 συνολικά επιλογές για τη μοντελοποίηση της διήθησης οι οποίες είναι:

- Μέθοδος Horton
- Τροποποιημένη μέθοδος Horton
- Μέθοδος Green-Ampt
- Τροποποιημένη μέθοδος Green-Ampt
- Μέθοδος αριθμού καμπύλης CN

Από τις παραπάνω μεθόδους θα αναλυθεί μόνο η μέθοδος αριθμού καμπύλης CN που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη εργασία.

Μέθοδος αριθμού καμπύλης CN

Η προσέγγιση μοντελοποίησης της διήθησης προέρχεται από την μέθοδο της SCS Curve Number (1972) για τον υπολογισμό της απορροής που έχει αναπτυχθεί πλήρως στο κεφάλαιο του θεωρητικού υποβάθρου της παρούσας εργασίας. Η μέθοδος θεωρεί ότι η συνολική διηθητική ικανότητα ενός εδάφους μπορεί να προσδιοριστεί από τους πινακοποιημένους αριθμούς καμπύλης που πρότεινε η SCS (1972) ή ο Wanielista (1978) για τον συγκεκριμένο τύπο εδάφους. Κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχόπτωσης η χωρητικότητα αυτή μειώνεται ως συνάρτηση του ισοδύναμου ύψους βροχόπτωσης και της χωρητικότητας που έχει απομείνει ενώ οι παράμετροι εισαγωγής για τη μέθοδο αυτή είναι ο αριθμός καμπύλης CN καθώς και ο χρόνος που χρειάζεται για την πλήρη ξήρανση του ακόρεστου εδάφους.

3.5.4 Διόδευση απορροής

3.5.4.1 Εισαγωγή

Η διόδευση της απορροής δια μέσω ενός αγωγού γίνεται στο λογισμικό SWMM σύμφωνα με τις αρχές διατήρησης της μάζας και της ορμής για μη μόνιμη ανομοιόμορφη ροή (διαφορικές εξισώσεις Saint Venant). Το SWMM δίνει την δυνατότητα επιλογής τριών μεθόδων διόδευσης ανάλογα με την πολυπλοκότητα των διαφορικών εξισώσεων που θέλει να χρησιμοποιήσει ο χρήστης.

3.5.4.2 Διόδευση με μόνιμη ροή

Η υπόθεση της μόνιμης ομοιόμορφης ροή αποτελεί την απλούστερη μορφή διόδευσης. Σε κάθε υπολογιστικό βήμα γίνεται απλή μετάφραση του υδρογραφήματος εισροής σε έναν αγωγό προκειμένου να παραχθεί το υδρογράφημα εξόδου στον αγωγό αυτό χωρίς να παρουσιάζει καθυστέρηση στην εμφάνιση της αιχμής και χωρίς να υπάρχει αλλαγή στο σχήμα του υδρογραφήματος. Αυτός ο τύπος διόδευσης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό φαινομένων όπως είναι η χωρητικότητα ενός αγωγού, η ανάστροφη ροή, οι απώλειες εισόδου/εξόδου καθώς και η ροή υπό πίεση. Χρησιμοποιείται μόνο για δενδροειδή δίκτυα μεταφοράς νερού όπου ο κάθε κόμβος έχει μόνον έναν αγωγό στον οποίο εκρέει.

3.5.4.3 Μέθοδος κινηματικού κύματος

Αυτή η μέθοδος διόδευσης επιλύει την εξίσωση συνέχειας κάνοντας χρήση μίας απλοποιημένης μορφής της αρχής διατήρησης της ορμής ενώ θεωρεί ότι η κλίση της επιφάνειας του νερού ισούται με την κλίση του πυθμένα του αγωγού που βρίσκεται υπό μελέτη. Η μέγιστη παροχή που μπορεί να διοδευτεί μέσω του αγωγού είναι η μέγιστη κανονική παροχή ενώ κάθε ποσοστό παροχής που ξεπερνάει το όριο της μέγιστης παροχευτικότητας μπορεί να χάνεται από το σύστημα ή να αποθηκεύεται ως επιφανειακή λίμναση στο πάνω μέρος του κόμβου εισόδου και να παροχετεύεται στον κόμβο αργότερα. Η μέθοδος αυτή δεν έχει τη δυνατότητα υπολογισμού των απωλειών εισόδου/εξόδου, φαινομένων ανάστροφης ροής, φαινομένων λειτουργίας αγωγών υπό πίεση καθώς και φαινομένων επίδρασης εκ των κατάντη ενώ είναι μη ενδεδειγμένη η χρήση της για την προσομοίωση και επίλυση δικτύων δενδροειδούς τύπου.

3.5.4.4 Μέθοδος δυναμικού κύματος

Η μέθοδος διόδευσης δυναμικού κύματος επιλύει το σύνολο των εξισώσεων Saint Venant για την διόδευση της ροής και για τον λόγο αυτό θεωρείται ότι παράγει τα θεωρητικά ακριβέστερα αποτελέσματα. Οι εξισώσεις αυτές περιέχουν τις αρχές διατήρησης της μάζας και της ορμής για τους αγωγούς καθώς και την εξίσωση διατήρησης του όγκου για τους κόμβους του δικτύου. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο διόδευσης μπορούν να αναπαρασταθούν φαινόμενα ανάστροφης ροής, ροής υπό πίεση σε αγωγούς και φαινόμενα επίδρασης εκ των κατάντη. Πλημμυρικά φαινόμενα

κατά τη χρήση της μεθόδου προκύπτουν όταν το βάθος του νερού σε έναν κόμβο ξεπεράσει το ύψος του κόμβου με τον επιπλέον όγκο νερού είτε να χάνεται από το δίκτυο είτε να λιμνάζει επιφανειακά πάνω από τον κόμβο και να αποχετεύεται αργότερα στον ίδιο κόμβο.

3.5.5 Επιφανειακή λίμναση

Κατά τη διόδευση της απορροής, όταν ο όγκος του νερού σε έναν κόμβο έχει ξεπεράσει την ικανότητα του δικτύου για τη μεταφορά του προς τα κατάντη, το περίσσειμα του όγκου υπερχειλίζει και χάνεται από το σύστημα. Στο λογισμικό υπάρχει δυνατότητα της επιφανειακής λίμνασης του νερού πάνω από τον κόμβο και αποχέτευση του αργότερα στον κόμβο αυτό. Κατά τη μέθοδο της μόνιμης ροής και τη μέθοδο του κινηματικού κύματος το νερό που λιμνάζει θεωρείται απλά ως μία ποσότητα περισσέυματος νερού ενώ κατά τη μέθοδο του δυναμικού κύματος που λαμβάνεται υπόψη το βάθος νερού που παραμένει στον κόμβο το νερό που λιμνάζει θεωρείται ότι καταλαμβάνει μία συγκεκριμένη έκταση πάνω από τον κόμβο. Το μέγεθος της έκτασης που καταλαμβάνει το λιμνάζον νερό αποτελεί παράμετρο εισαγωγής για έναν κόμβο κατά τη διόδευση με τη μέθοδο του δυναμικού κύματος.

3.6 Επιλογές προσομοίωσης

3.6.1 Γενικές επιλογές

Η σελίδα γενικών επιλογών διαθέτει τις παρακάτω γενικές επιλογές για την προσομοίωση ενός δικτύου.

3.6.1.1 Φυσικές διεργασίες/διαδικασίες

Οι επιλογές που υπάρχουν είναι οι εξής: βροχόπτωση/απορροή, διόδευση απορροής, τήξη χιονιού, υπόγεια νερά και ποιότητα υδάτων ενώ στη συγκεκριμένη εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί οι φυσικές διεργασίες της διόδευσης και της βροχόπτωσης/απορροής.

3.6.1.2 Μοντέλο διήθησης

Η επιλογή του μοντέλου διήθησης όπως έχουμε αναφέρει μπορεί να γίνει ανάμεσα στα μοντέλα: Horton, τροποποιημένο Horton, Green-Ampt, τροποποιημένο Green-Ampt και η μέθοδος του αριθμού καμπύλης CN.

3.6.1.3 Μέθοδος διόδευσης

Οι επιλογές είναι: μόνιμη ροή, μέθοδος κινηματικού κύματος και μέθοδος δυναμικού κύματος.

3.6.1.4 Λίμναση

Η επιλογή αυτή δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να επιλέξει εάν το περίσσειμα νερού που προκύπτει σε έναν κόμβο θα χάνεται από το σύστημα ή θα λιμνάζει στην επιφάνεια του πάνω μέρους του κόμβου και θα παροχετεύεται στον κόμβο αργότερα όταν αυτό είναι εφικτό.

3.6.1.5 Αναφορά δεδομένων εισαγωγής

Επιλογή από τον χρήστη της εμφάνισης ή μη των δεδομένων εισαγωγής στο μοντέλο κατά την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.

3.6.1.6 Ελάχιστη κλίση αγωγών

Η ελάχιστη τιμή καθορισμένη από τον χρήστη για την κλίση των αγωγών. Σε περίπτωση που η επιλογή μείνει κενή ή πάρει μηδενική τιμή τότε δεν υπάρχει ελάχιστη τιμή για την κλίση των αγωγών.

3.6.1.7 Αναφορά των διαδικασιών ελέγχου

Επιλογή από τον χρήστη εάν επιθυμεί την εμφάνιση των διαφόρων διαδικασιών ελέγχου που έγιναν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στην εξαγωγή και εμφάνιση των τελικών αποτελεσμάτων.

3.6.2 Επιλογές ημερομηνίας και ώρας έναρξης και λήξης προσομοίωσης

3.6.2.1 Έναρξη προσομοίωσης

Ημερομηνία και ώρα έναρξης της προσομοίωσης.

3.6.2.2 Έναρξη καταγραφής αποτελεσμάτων

Ημερομηνία και ώρα έναρξης καταγραφής αποτελεσμάτων από το λογισμικό.

3.6.2.3 Λήξη της προσομοίωσης

Ημερομηνία και ώρα λήξης της προσομοίωσης.

*Οι υπόλοιπες επιλογές ημερομηνίας και ώρας δεν θα χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη εργασία.

3.6.3 Επιλογές χρονικών βημάτων

3.6.3.1 Χρονικό βήμα καταγραφής αποτελεσμάτων

Αποτελεί το χρονικό βήμα καταγραφής των υπολογισμένων αποτελεσμάτων από το λογισμικό.

3.6.3.2 Χρονικό βήμα υγρής περιόδου

Αποτελεί το χρονικό βήμα που θα γίνεται ο υπολογισμός της απορροής από κάθε λεκάνη απορροής σε περιόδους βροχόπτωσης ή σε περιόδους κατά τις οποίες υπάρχει επιφανειακή λίμναση υδάτων.

3.6.3.3 Χρονικό βήμα ξηρής περιόδου

Αποτελεί το χρονικό βήμα υπολογισμού της απορροής που προέρχεται από τις λεκάνες απορροής σε περιόδους ξηρού καιρού. Το χρονικό αυτό βήμα είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο χρονικό βήμα της υγρής περιόδου.

3.6.3.4 Χρονικό βήμα διόδευσης της απορροής

Αποτελεί το χρονικό βήμα που γίνεται η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων του Saint Venant για τη διόδευση της απορροής. Παίρνει τιμές μικρότερες του δευτερολέπτου, ενώ για μέθοδο διόδευσης δυναμικού κύματος οι τιμές αυτές πρέπει να είναι μικρότερες από αυτές στις άλλες μεθόδους διόδευσης λόγω της πολυπλοκότητας των υπολογισμών. Ιδιαίτερη σημασία στην επιλογή του κατάλληλου χρονικού βήματος διόδευσης της απορροής αποτελεί το κριτήριο Courant-Friedrichs-Lewy (CFL condition).

Κριτήριο Courant–Friedrichs-Lewy: Το κριτήριο CFL αναφέρει συνοπτικά για την κατάλληλη επιλογή του χρονικού βήματος διόδευσης της απορροής ότι πρέπει να είναι μικρότερο από το χρόνο που χρειάζεται το νερό για τη διόδευση του από την αρχή έως το τέλος του μικρότερου σε μήκος αγωγού.

3.6.4 Επιλογές μεθόδου διόδευσης δυναμικού κύματος

3.6.4.1 Εισαγωγή

Οι επιλογές δυναμικού κύματος περιέχουν αρκετές παραμέτρους που ελέγχουν τον τρόπο με τον οποίο γίνονται οι υπολογιστικές διαδικασίες κατά τη διόδευση της απορροής. Οι επιλογές αυτές δεν επηρεάζουν με κανένα τρόπο τις άλλες μεθόδους διόδευσης.

3.6.4.2 Αδρανεϊακοί όροι

Υποδεικνύουν τον χειρισμό των αδρανεϊακών όρων των διαφορικών εξισώσεων Saint-Venant. Οι επιλογές είναι:

- Keep-Διατήρηση των αδρανεϊακών όρων σε όλες τις συνθήκες.
- Dampen-Μείωση των αδρανεϊακών όρων όσο η ροή τείνει να γίνει κρίσιμη ενώ τους αγνοεί πλήρως όταν η ροή είναι υπερκρίσιμη.
- Ignore-Αγνοεί πλήρως τους αδρανεϊακούς όρους των διαφορικών εξισώσεων Saint-Venant δημιουργώντας έτσι το λεγόμενο διάχυτο κύμα.

3.6.4.3 Καθορισμός υπερκρίσιμης ροής

Επιλογή της βάσης που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της υπερκρίσιμης ροής. Οι επιλογές είναι:

- Κλίση επιφάνειας νερού
- Αριθμός Froude
- Κλίση επιφάνειας νερού και αριθμός Froude

Η τρίτη επιλογή είναι αυτή που προτείνεται από το λογισμικό SWMM (Rossman 2015) και χρησιμοποιείται στα πλαίσια της εργασίας.

3.6.4.4 Εξίσωση υπολογισμού απωλειών τριβής

Επιλέγει ποια εξίσωση θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των απωλειών τριβής στη περίπτωση της ροής υπό πίεση. Οι επιλογές όπως έχουμε αναφέρει είναι:

- Εξίσωση Darcy-Weisbach
- Εξίσωση Hazen-Williams

3.7 Διήθηση-Μέθοδος αριθμού καμπύλης CN

Η μέθοδος αριθμού καμπύλης είναι καινούρια στο λογισμικό SWMM. Βασίζεται στην ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο της SCS (1972) για την εκτίμηση του περισσεύματος βροχόπτωσης, χρήση της οποίας γίνεται σε μεγάλο πλήθος εγχειρίδιων υδρολογίας. Η μέθοδος προστέθηκε στο λογισμικό SWMM λόγω της οικειότητας που υπάρχει από μεγάλη μερίδα μηχανικών και ερευνητών καθώς και στη διαθεσιμότητα πινακοποιημένων αριθμών καμπύλης για ένα σύνολο χρήσεων γης και κατηγοριών εδάφους. Η μέθοδος διήθησης του αριθμού καμπύλης δέχεται ως παραμέτρους τα εξής:

- Αριθμός καμπύλης
- Χρόνος ξήρανσης πλήρως κορεσμένου εδάφους

Οι υπολογιστικές διαδικασίες της μεθόδου καθώς και η διαδικασία επιλογής του αριθμού καμπύλης CN με την χρήση πινάκων έχουν αναλυθεί πλήρως στο κεφάλαιο 3 της εργασίας με όνομα “ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ” και συγκεκριμένα στο υποκεφάλαιο “Μέθοδος SCS”. Στο σημείο αυτό θα αναλύσουμε τον προσδιορισμό της δεύτερης παραμέτρου της μεθόδου δηλαδή του χρόνου ξήρανσης. Ο χρόνος ξήρανσης σε ημέρες υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_{dry} = \frac{3.125}{\sqrt{K_s}} \quad (3.7)$$

όπου η παράμετρος K_s προσδιορίζεται στον Πίνακα 3.1 (Rossman 2016).

Πίνακας 3.1 Πίνακας κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας K_s για διάφορες κατηγορίες εδάφους. Πηγή: Rossman (2016)

Κατηγορία εδάφους	Saturated Hydraulic Conductivity, K_s (in/h)
Sand	4.74
Loamy sand	1.18
Sandy loam	0.43
Loam	0.13
Silt loam	0.26
Sandy clay loam	0.06
Clay loam	0.04
Silty clay loam	0.04
Sandy clay	0.02
Silty clay	0.02
Clay	0.01

3.8 Βιβλιογραφική ανασκόπηση-Προηγούμενες μελέτες με το λογισμικό SWMM

3.8.1 Εισαγωγή

Το λογισμικό SWMM έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος διπλωματικών εργασιών, μεταπτυχιακών διπλωματικών εργασιών, πραγματικών μελετών αλλά και σε ένα μεγάλο αριθμό θεωρητικών μελετών που στη συνέχεια δημοσιεύθηκαν σε επιστημονικά περιοδικά.

3.8.2 Διπλωματικές Εργασίες

Το λογισμικό SWMM έχει ευρεία χρήση σε διπλωματικές εργασίες προπτυχιακών φοιτητών που ασχολούνται με τα υδραυλικά έργα. Μερικές από τις εργασίες αυτές είναι: Λάζου (2012), Γιοβάνη (2013), Τσεκούρα (2010).

Η **Λάζου (2012)** με τη χρήση του SWMM εκτίμησε την περίπτωση του πλημμυρικού κινδύνου στην αστική λεκάνη απορροής του Χαλανδρίου προσομοιώνοντας το αποχετευτικό σύστημα με το δυαδικό σύστημα αποχέτευσης δηλαδή εκτός από τους υπόγειους αγωγούς θεώρησε και επιφανειακούς αγωγούς με διατομή αυτή του δρόμου. Η μεθοδολογία αυτή ακολουθήθηκε προκειμένου σε μεγάλα γεγονότα βροχόπτωσης στα οποία το υπόγειο αποχετευτικό σύστημα υπερφορτίζεται και τελικώς πλημμυρίζει να γίνεται υδραυλική διόδευση της απορροής μέσω των επιφανειακών αγωγών. Για την κατάρτιση των υετογραμμάτων σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε η ενιαία εξίσωση όμβριων καμπυλών που προέκυψε από τον νοτιοανατολικό σταθμό του Ε.Μ.Π. που βρίσκεται στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, ενώ για να υπάρχει και προσομοίωση υπό πραγματικές συνθήκες βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκαν και πραγματικά δεδομένα βροχόπτωσης που συλλέχθηκαν κατά την περίοδο 1994-2009. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί η στατιστική ανάλυση των παροχών αιχμής που προέκυψαν από τις παραπάνω δύο μεθοδολογίες κατάρτισης υετογραμμάτων. Η στατιστική ανάλυση έγινε μέσω του προγράμματος 'Hydrognomon' και οι κατανομές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι Gumbel I, Long-Pearson III καθώς και η GEVI.

Η **Γιοβάνη (2013)** έκανε ανάλυση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στην αστική λεκάνη απορροής της Ραφήνας. Τα γεγονότα βροχόπτωσης προέκυψαν μέσω της ενιαίας εξίσωσης όμβριων καμπυλών του νοτιοανατολικού σταθμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου ενώ εκτός από το δυαδικό αποχετευτικό σύστημα έγινε προσομοίωση και στο απλό αποχετευτικό σύστημα με την ύπαρξη μόνο των υπόγειων αποχετευτικών αγωγών. Ενδεικτικά τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν ήταν, πως για περίοδο επαναφοράς $T=25$, $T=50$ έτη δεν εμφανίζονται γεγονότα πλημμύρας ενώ αντίθετα για $T=10000$ έτη που είναι και ακραία περίπτωση βροχής το σύνολο των υπόγειων αγωγών έχει πλημμυρίσει ενώ ένα μεγάλο ποσοστό των επιφανειακών αγωγών βρίσκεται στο μέγιστο όριο πλήρωσης τους.

Η **Τσεκούρα (2010)** εκτίμησε με τη χρήση του λογισμικού SWMM την πιθανότητα πλημμύρας στην αστική λεκάνη του Ψυχικού-Φιλοθέης. Η βροχόπτωση σχεδιασμού προέκυψε από την ενιαία εξίσωση όμβριων καμπυλών του μετεωρολογικού σταθμού που βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του Ε.Μ.Π ενώ το δίκτυο προσομοιώθηκε ως απλό αποχετευτικό σύστημα, δυαδικό αποχετευτικό σύστημα καθώς και ως λεκάνη απορροής χωρίς αποχετευτικό σύστημα πριν την αστικοποίηση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσομοίωση της λεκάνης χωρίς αποχετευτικό σύστημα καθώς δίνει

τη δυνατότητα εκτίμησης της ποσοστιαίας αύξησης της απορροής που προέκυψε λόγω της αστικοποίησης. Ενδεικτικά αναφέρει πως η ποσοστιαία αύξηση της παροχής αιχμής του υδρογραφήματος κυμαίνεται από 55% έως και 88% ανάλογα με την περίοδο επαναφοράς και τη διάρκεια της βροχόπτωσης σχεδιασμού.

3.8.3 Μεταπτυχιακές Διπλωματικές Εργασίες

Ο **Κούρτης (2016)** πραγματοποίησε προσομοίωση του παντοροϊκού δικτύου Αθηνών με την χρήση του λογισμικού SWMM. Συγκεκριμένα, ως περιοχή μελέτης λήφθηκε η Δ' ζώνη του παντοροϊκού δικτύου. Εφόσον το δίκτυο ήταν παντοροϊκό ήταν απαραίτητος ο υπολογισμός της παροχής απορροών ξηρού καιρού ή αλλιώς των ακαθάρτων. Τα γεγονότα βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν για περιόδους επαναφοράς $T=2$, $T=5$, $T=10$, $T=20$, $T=25$, $T=50$, $T=100$ έτη ενώ οι διάρκειες βροχόπτωσης $t=1$, $t=2$, $t=3$, $t=6$, $t=12$, $t=24$ ώρες. Το δίκτυο προσομοιώθηκε μέσω του λογισμικού SWMM αλλά και με βάση την Ορθολογική Μέθοδο. Όπως αναφέρει, τα αποτελέσματα από την Ορθολογική Μέθοδο λαμβάνοντας υπόψη και τις Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές έδειξαν ότι ορισμένοι αγωγοί του δικτύου είναι υπερδιαστασιοποιημένοι ενώ άλλοι είναι υποδιαστασιοποιημένοι (Κούρτης 2016). Επίσης συγκρίνοντας τις δύο προσομοιώσεις έγινε φανερό πως η Ορθολογική Μέθοδος γενικά υπερεκτιμά την παροχή αιχμής της πλημμύρας (Κούρτης 2016). Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι το δίκτυο είναι ικανό να παροχετεύσει μόνο το γεγονότα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς $T=5$ έτη ενώ για μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς εμφανίζονται πλημμυρικά φαινόμενα στους υπόγειους αγωγούς αλλά και στους επιφανειακούς αγωγούς σε ορισμένες περιπτώσεις (Κούρτης 2016). Τέλος προτείνονται ορισμένα μέτρα αντιμετώπισης των πλημμυρικών φαινομένων όπως είναι η αύξηση της διαμέτρου ορισμένων αγωγών, η διαστασιολόγηση δεξαμενής κατακράτησης στη έξοδο του δικτύου αλλά και η κατασκευή δεξαμενών κατά μήκος του υπόγειου αποχετευτικού δικτύου.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εργασία του **Tikkanen (2013)** στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών στο Aalto University-School of Engineering με τίτλο 'Degree Programme in Transport and Environmental Engineering'. Στην εργασία αυτή η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην νότια Φινλανδία και εκτείνεται σε έκταση 40 km^2 ενώ η πόλη ονομάζεται Lahti. Μεγάλη λεπτομέρεια δίνεται στην προσομοίωση και αναπαράσταση του αποχετευτικού δικτύου ομβρίων σε μία έκταση

2,64 km². Η εργασία εστιάζεται κυρίως στην ορθή επιστημονική προσέγγιση για τον διαχωρισμό των λεκανών απορροής σε αστικές υπολεκάνες απορροής που πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού ArcGIS και με την βοήθεια του DEM. Επίσης γίνεται εκτενής ανάλυση στην εισαγωγή των σωστών παραμέτρων που αναπαριστούν μία λεκάνη απορροής και στον υπολογισμό των παραμέτρων αυτών. Ενδεικτικά υπολογίζονται παράμετροι όπως:

- a) Κλίση λεκανών απορροής
- b) Αδιαπερατότητα
- c) Πλάτος επίγειας ροής και άλλα

Ενώ τα δεδομένα τα οποία είχε στην διαθεσή του ήταν:

- a) Ορθοφωτογραφίες
- b) DEM
- c) Τοπογραφικά διαγράμματα περιοχής μελέτης
- d) Imperviousness layer σε μορφή shp. Το imperviousness layer είναι ένα θεματικό επίπεδο στο οποίο κάθε ψηφίδα περιέχει και ένα ποσοστό μη διαπερατής έκτασης από αυτή που καταλαμβάνει
- e) Μοντελοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο από την τοπική εταιρεία αποθεμάτων νερού
- f) Μετεωρολογικά δεδομένα από τον μετεωρολογικό σταθμό Finnish Meteorological Institute

Ο **Παπαθανασίου (2009)** στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας μελέτησε το σύστημα αποχέτευσης όμβριων υδάτων στην περιοχή του Δήμου Συκεών Θεσσαλονίκης. Τα υετογράμματα σχεδιασμού προέκυψαν μέσω της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ ενώ τα γεγονότα βροχής αντιστοιχούσαν σε περιόδους επαναφοράς T=2, T=5, T=10 έτη ενώ οι διάρκειες βροχόπτωσης t=6, t=12, t=24 ώρες. Ιδιαίτερη προσοχή χρήζει η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε βάση του απορροϊκού συντελεστή CN της SCS, του συντελεστή απορροής C, του συντελεστή κατά Manning n και της κλίσης των λεκανών απορροής. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι το λογισμικό είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις παραπάνω μεταβλητές. Επίσης στη συγκεκριμένη εργασία ξεχωρίζει και η προσομοίωση μέσω του λογισμικού SWMM της ποιότητας των αστικών απορροών. Όσον αφορά τις

προσομοιώσεις του αποχετευτικού συστήματος έδειξαν ότι δεν θα υπάρξει γεγονός πλημμύρας κάτω από τις συνθήκες σχεδιασμού.

3.8.4 Επιστημονικά άρθρα

Στην βιβλιογραφία υπάρχει μεγάλο πλήθος μελετών που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό SWMM και μελετήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Οι **Tsihrintzis and Hamid (1997)** δημοσίευσαν μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση για την χρήση του SWMM στην εκτίμηση της ποσότητας και της ποιότητας της αστικής απορροής ενώ ανέφεραν ότι αποτελεί το μεγαλύτερο πρόβλημα στην ρύπανση των υδατικών πόρων (Tsihrintzis and Hamid 1997 a, b). Περιοχή μελέτης ήταν τέσσερις πόλεις στη νότια Φλόριντα των ΗΠΑ με κάθε περιοχή να έχει διαφορετική επικρατέστερη χρήση γης. Η βαθμονόμηση του λογισμικού SWMM έγινε κάνοντας χρήση μετρημένων στο πεδίο παραμέτρων (από την Αμερικανική Γεωλογική Υπηρεσία) ή προερχόμενων από βιβλιογραφικούς πίνακες. Αναφέρουν πως η καλύτερη προσέγγιση της βαθμονόμησης είναι το σημείο των υδρογραφημάτων (μετρημένων - υπολογισμένων) στο οποίο το μέσο τετραγωνικό σφάλμα σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή γίνεται το ελάχιστο, ενώ η βαθμονόμηση έγινε για πλήθος βροχοπτώσεων. Σκοπός της εργασίας ήταν η εκτίμηση της ικανότητας του λογισμικού SWMM σε μικρές αστικές λεκάνες απορροής διαφόρων χρήσεων γης καθώς και η ορθή εκτίμηση των παραμέτρων εισόδου στο λογισμικό από τους ερευνητές.

Οι **Aryal et al. (2016)** έκαναν χρήση του λογισμικού SWMM για την εκτίμηση των μεταβολών στην ποσότητα της απορροής που θα προέκυπταν από την αύξηση των αδιαπέρατων εδαφών. Συγκεκριμένα η περιοχή μελέτης ήταν στο νοτιοανατολικό Queensland της Αυστραλίας ενώ δημιουργήθηκαν δύο σενάρια αύξησης της συνολικής αδιαπέρατης επιφάνειας. Το πρώτο αφορούσε αύξηση σε όλες τις λεκάνες απορροής κατά 5-55% ενώ το δεύτερο αύξηση 60-70% σύμφωνα με την διαδικασία των Ashbolt et al. (2012). Επίσης αναφέρεται η διαφορετική ανταπόκριση της κάθε λεκάνης στην αύξηση της αδιαπερατής έκτασης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης όπως η κλίση κ.λπ (Aryal et al. 2016). Τέλος, στη μελέτη αυτή σχολιάζεται η χρήση ενός LID (Low Impact Development) για τη μείωση της απορροής. Το

αποτέλεσμα που προκύπτει είναι πως είναι δυνατή η μείωση της απορροής έως και 60% ωστόσο δεν είναι εφικτή η προσέγγιση των προ-αστικοποίησης μεγεθών.

Οι **Bisht et al. (2016)** με τη βοήθεια του SWMM σχεδίασαν ένα νέο αποχετευτικό σύστημα για την περιοχή του Indian Institute of Technology, Kharagpur, Ινδία. Χρησιμοποίησαν πραγματικά βροχομετρικά δεδομένα που συλλέχθηκαν την περίοδο 1956-2012 ενώ το δίκτυο σχεδιάστηκε για να μεταφέρει βροχόπτωση περιόδου επαναφοράς $T=10$ έτη. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η στατιστική ανάλυση που έγινε στα βροχομετρικά δεδομένα πριν την χρήση τους.

Εκτίμηση της πλημμυρικής πιθανότητας σε αστικά αποχετευτικά δίκτυα πραγματοποίησαν οι **Zhu et al. (2016)**. Η ανάγκη αυτή όπως αναφέρουν πηγάζει από την μη γραμμική σχέση που έχουν οι δείκτες πλημμύρας και η πλημμυρική πιθανότητα (Zhu et al. 2016). Περιοχή μελέτης ήταν ένα τμήμα της πόλης Guangzhou της Κίνας ενώ έγινε χρήση 7 (επτά) συνολικά δεικτών και 20 (είκοσι) γεγονότων βροχής-απορροής. Τα στάδια της μελέτης ήταν τα εξής: i) προσομοίωση του αποχετευτικού δικτύου με το λογισμικό SWMM ii) εισαγωγή των βαρών των δεικτών ανάλογα με την σημασία τους iii) χωρική κατανομή των χαρακτηριστικών πλημμύρας με διάφορες στατιστικές μεθόδους. Το αποτέλεσμα της μελέτης ήταν η κατάρτιση χαρτών που παρουσιάζουν την χωρική κατανομή των πλημμυρικών πιθανοτήτων ανά φρεάτιο και επομένως ανά περιοχή.

Επιπλέον, διατίθεται μεγάλο πλήθος μελετών στις οποίες έγινε ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του λογισμικού SWMM. Οι **Rabori et al. (2017)** έδειξαν ότι οι πιο ευαίσθητες μεταβλητές του λογισμικού που επηρεάζουν την αιχμή της απορροής είναι το βάθος της επιφανειακής κατακράτησης, ο συντελεστής Manning για ροή σε αδιαπέρατη επιφάνεια, το πλάτος της επίγειας ροής, το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας, η κλίση της λεκάνης απορροής, ο συντελεστής Manning των αγωγών καθώς και το ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας χωρίς επιφανειακή αποθήκευση. Αντίθετα αναφέρουν πως ο αριθμός καμπύλης CN, ο συντελεστής Manning για ροή σε διαπερατή επιφάνεια καθώς και το βάθος επιφανειακής αποθήκευσης των διαπερατών επιφανειών προκαλούν μικρές μεταβολές στην αιχμή του υδρογραφήματος της απορροής. Η περιοχή μελέτης την οποία εφαρμόστηκε η ανάλυση ευαισθησίας είναι η λεκάνη απορροής της πόλης Zanjan του Ιράν ενώ η αρχική λεκάνη απορροής χωρίστηκε σε 16 υπολεκάνες απορροής προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια αποτελεσμάτων της ανάλυσης ευαισθησίας καθώς και του αποτελέσματος από το λογισμικό SWMM (Rabori et al. 2017).

Οι **Akdogan and Guven (2016)** έκαναν χρήση της μεθόδου One-at a-time για την εξαγωγή των πιο σημαντικών παραμέτρων ευαισθησίας του λογισμικού SWMM. Ως περιοχή μελέτης ήταν η λεκάνη απορροή Alibeykoy, ενώ οι μεταβλητές που μελετήθηκαν ήταν η βροχόπτωση, η αδιαπερατότητα, η έκταση της λεκάνης απορροής, η κλίση, ο συντελεστής Manning για τους αγωγούς, το μήκος των αγωγών καθώς και το βάθος των φρεατίων. Στα αποτελέσματα της μεθόδου παρουσιάστηκε η σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές και τα αποτελέσματα (θετικά συσχετιζόμενη-αρνητικά συσχετιζόμενη) καθώς και η κατάταξη των μεταβλητών ως προς την ευαισθησία τους με τη μεταβλητή της βροχόπτωσης να είναι η πιο ευαίσθητη (Akdogan and Guven 2016).

Τέλος, ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM εκτέλεσε ο **Zaghloul (1983)**. Τονίζει πως η χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού για την προσομοίωση του φαινομένου χρειάζεται τη βαθμονόμηση των διαφόρων παραμέτρων του προκειμένου τα αποτελέσματα του να είναι ορθά. Συμπέρασμα της εργασίας αυτής ήταν πως το ποσοστό αδιαπερατότητας της περιοχής μελέτης καθώς και το πλάτος της επίγειας ροής είναι οι σημαντικότερες υδρολογικές παράμετροι ενώ όσον αφορά το τμήμα μεταφοράς της απορροής αναφέρει πως το μήκος των αγωγών παίζει τον σημαντικότερο ρόλο.

Επιπλέον, βιβλιογραφικές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω ενώ παρατίθεται και μία μικρή ανάλυση για την κάθε μελέτη (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2 Ενδεικτικές μελέτες με χρήση του λογισμικού SWMM.

Βιβλιογραφική πηγή	Ανάλυση
Jacobson (2011)	Ανάλυση της αύξησης της αδιαπερατότητας λόγω αστικοποίησης καθώς και των επιπτώσεων στην παροχή αιχμής της απορροής. Επίσης αναφέρεται το πρόβλημα της βαθμονόμησης και δίνονται μεθοδολογίες βαθμονόμησης για διάφορα μοντέλα.
Hsu et al. (2000)	Προσομοίωση αστικής λεκάνης απορροής με το SWMM.
Wijesekera et al. (2012)	Προσομοίωση αστικής λεκάνης με το λογισμικό SWMM καθώς και ανάλυση ευαισθησίας ορισμένων παραμέτρων.
Salvadore et al. (2015)	Προσομοίωση αστικής λεκάνης απορροής με το λογισμικό SWMM.
James Nakamura and Nick Villagra (2009)	Προσομοίωση λεκάνης απορροής με το λογισμικό SWMM για τον υπολογισμό της ποσότητας και της ποιότητας της απορροής.
Li et al. (2014)	Ανάλυση ευαισθησίας λογισμικού SWMM με χρήση δύο μεθόδων Global Analysis. Οι δείκτες που μελετώνται είναι η συνολική ποσότητα απορροής, η αιχμή του υδρογραφήματος στην έξοδο καθώς και ο χρόνος της αιχμής.
Sharifan et al. (2010)	Ανάλυση αβεβαιότητας και ευαισθησίας υπολογισμού του βάθους νερού στα φρεάτια δικτύου και της αιχμής της απορροής από τις λεκάνες απορροής μέσω του λογισμικού SWMM.
Tavousi et al. (2015)	Ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM με τα αποτελέσματα να δείχνουν πως το μοντέλο είναι πολύ ευαίσθητο στις παραμέτρους της κλίσης, του πλάτους της λεκάνης απορροής και του συντελεστή κατά Manning για ροή σε αδιαπέρατη επιφάνεια.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Η περιοχή μελέτης μας βρίσκεται στο κεντρικό μέρος της Αθήνας και συγκεκριμένα στο βόρειο κεντρικό τμήμα αυτής. Ανήκει σχεδόν εξολοκλήρου στον Δήμο Αθηναίων και ένα μικρό τμήμα αυτής στον Δήμο Γαλατσίου. Περικλείεται νότια από την περιοχή των Άνω Πατησίων, δυτικά από τους Αγίους Αναργύρους, ανατολικά από το Γαλάτσι ενώ βόρεια από την περιοχή της Λαμπρινής. Εκτείνεται σε μία έκταση 50.63 ha ή 0.50 km². Συγκεκριμένα το παντοροϊκό αποχετευτικό δίκτυο της Αθήνας είναι χωρισμένο σε 10 αποχετευτικές ζώνες με τις ονομασίες Β, Γ, Δ, Ε, ΣΤ, Ζ1, Ζ2, Η1, Η2 και Θ (Δάρας 2004). Το παντοροϊκό δίκτυο της Αθήνας έχει συνολική έκταση που ανέρχεται σε 1310 ha. Σκοπός του δικτύου αυτού είναι η κοινή αποχέτευση ακαθάρτων αλλά και των ομβρίων υδάτων μέσω των παντοροϊκών συλλεκτήρων. Κορμός του συστήματος αυτού είναι ο Κεντρικός Αποχετευτικός Αγωγός (Κ.Α.Α) ο οποίος μεταφέρει τα λύματα στο κέντρο επεξεργασίας που βρίσκεται στο νησί της Ψυτάλλειας στο νότιο τμήμα της Αθήνας. Στον Κ.Α.Α και στην έξοδο των λεκανών λειτουργούν εννέα υπερχειλιστές. Σε περίοδο βροχής και όταν τα όμβρια ύδατα μαζί με τα ακάθαρτα δεν ξεπερνούν κάποιο όριο τότε συνεχίζουν να απορρέουν μέσω του Κ.Α.Α ενώ σε περίπτωση που το όριο αυτό ξεπεραστεί η πλεονάζουσα παροχή παροχετεύεται μέσω των αγωγών υπερχείλισης στους υδάτινους αποδέκτες του Κηφισού Ποταμού και του ρέματος του προφήτη Δανιήλ. Εδώ να σημειωθεί ότι ο Κ.Α.Α κατασκευάστηκε ώστε να μεταφέρει με ασφάλεια τα ακάθαρτα ύδατα υπό συνθήκες ξηρού καιρού αφού οι διατομές του είναι πολύ μεγαλύτερες από τις απαιτούμενες για την παροχέτευση μόνο των λυμάτων.

Στην παρακάτω δορυφορική Εικόνα 4.1 διακρίνεται η περιοχή μελέτης μας που αποτελεί την Β' ζώνη του παντοροϊκού δικτύου της Αθήνας ενώ στη συνέχεια και συγκεκριμένα στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται η διοικητική διαίρεση της περιοχής.

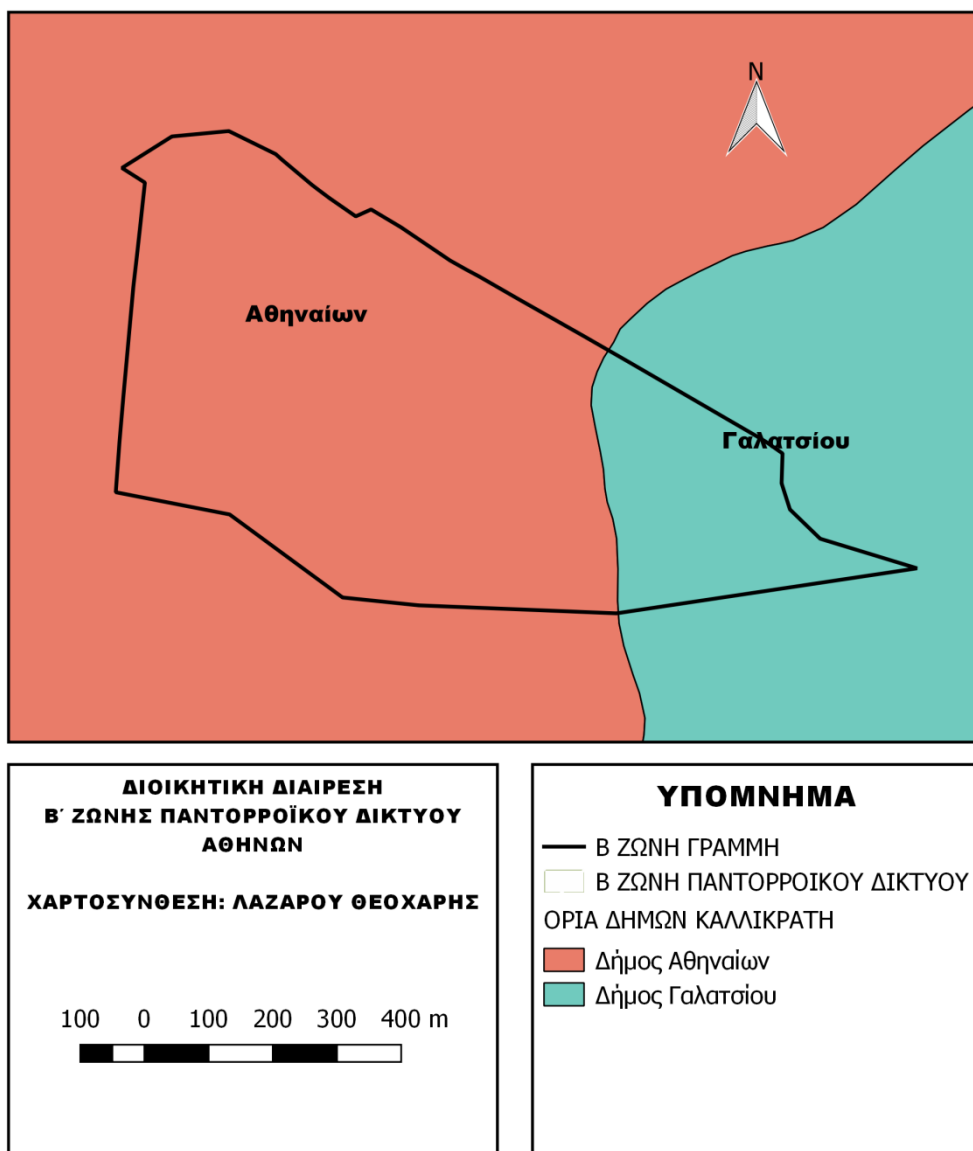


(α)



(β)

Εικόνα 4.1 (α) Δορυφορική απεικόνιση Β' ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών. (β) Δορυφορική απεικόνιση παντοροϊκού δικτύου Αθηνών (ζώνες). Πηγή:Google Earth



Εικόνα 4.2 Διοικητική διαίρεση Β' ζώνης παντορροϊκού δικτύου Αθηνών.

4.2 Χαρτογραφική αναπαράσταση της περιοχής μελέτης και μοντελοποίηση του αποχετευτικού δικτύου

Η χαρτογραφική αναπαράσταση της περιοχής μελέτης και η μοντελοποίηση του αποχετευτικού της δικτύου περιλαμβάνουν τα ακόλουθα βήματα:

- Αρχικά έγινε παραλαβή από την ΕΥΔΑΠ και συγκεκριμένα από τη Διεύθυνση Πληροφορικής και Τεχνολογίας/Υπηρεσία Εφαρμογών Γεωγραφικών Πληροφοριών πινακίδων κλίμακας 1/2000 στις οποίες παρουσιάζονταν οι

θέσεις των φρεατίων και των αγωγών του παντορροϊκού δικτύου καθώς και τα ονόματά τους.

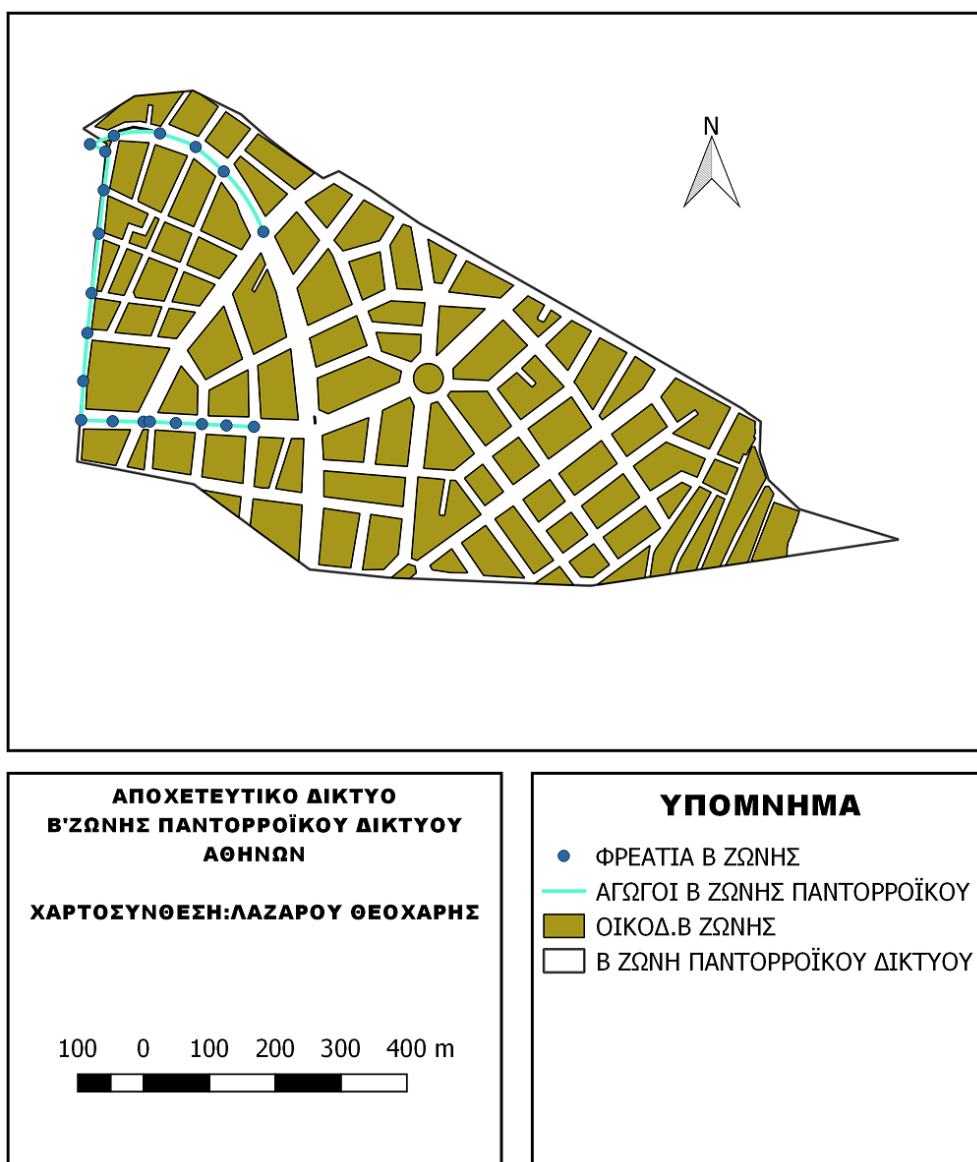
- Στην συνέχεια λάβαμε από την ίδια Διεύθυνση της ΕΥΔΑΠ ψηφιοποιημένα τα στοιχεία του αποχετευτικού δικτύου στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87. Τα στοιχεία που λάβαμε καθώς και οι πληροφορίες γι' αυτά ήταν τα εξής:
 - Αγωγοί (φρεάτιο αρχής, φρεάτιο τέλους, μήκος αγωγού, όνομα αγωγού, κλίση αγωγού, υλικό, σχήμα διατομής, υψόμετρο εκκίνησης, υψόμετρο τέλους, πλάτος αγωγού, ύψος αγωγού, είδος αγωγού)
 - Φρεάτια (υψόμετρο πυθμένα, υψόμετρο στέψης, όνομα φρεατίου, είδος φρεατίου)
 - Δρόμοι με την ονομασία τους
 - Οικοδομικά τετράγωνα
- Στην συνέχεια έγινε η παραλαβή του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους της περιοχής μελέτης από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.
- Χάραξη υδροκριτικών γραμμών οικοδομικών τετραγώνων.
- Χάραξη και ψηφιακή αναπαράσταση των αστικών λεκανών απορροής.
- Εισαγωγή του ψηφιοποιημένου αποχετευτικού δικτύου στο λογισμικό Infoswmm.
- Εισαγωγή του μοντελοποιημένου αποχετευτικού δικτύου στο λογισμικό SWMM για την προσομοίωση του.

Οι παραπάνω εργασίες ψηφιοποίησης, αναπαράστασης και μοντελοποίησης της Β' ζώνης του παντορροϊκού δικτύου Αθηνών παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω στις παραγράφους που ακολουθούν. Εδώ είναι χρήσιμο να αναφέρουμε πως οι χαρτογραφικές εργασίες επεξεργασίας και αναπαράστασης της περιοχής μελέτης μας καθώς και των διαφόρων χρήσιμων στοιχείων για την αναπαράσταση του αποχετευτικού δικτύου έγιναν μέσω των λογισμικών:

- QGIS
- ArcGIS (ESRI)
- Infoswmm (Innovyze)
- Autocad (Autodesk)

4.3 Ψηφιοποίηση και αναπαράσταση του αποχετευτικού δικτύου

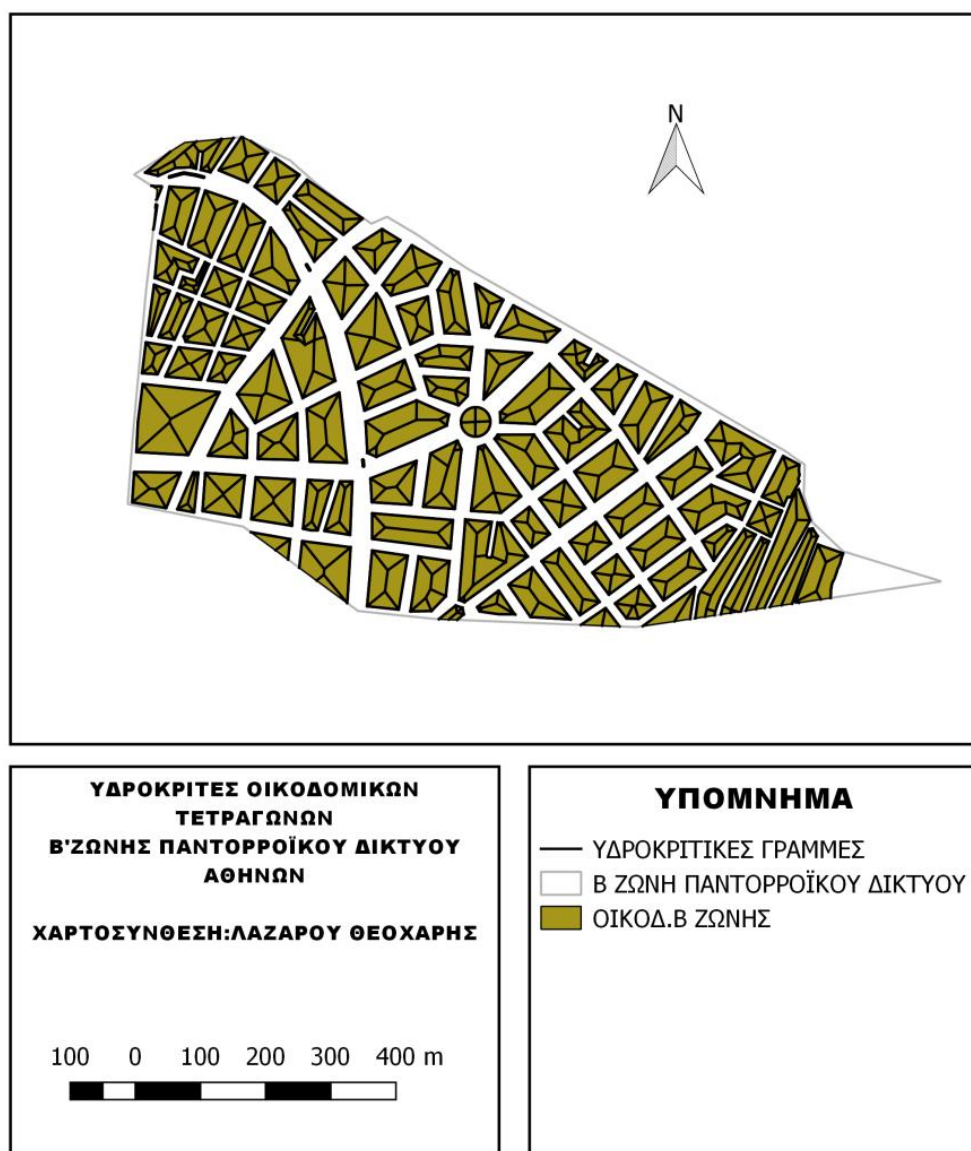
Τα στοιχεία τα οποία ψηφιοποιήθηκαν ήταν αρχικά η Β' ζώνη του παντορροϊκού δικτύου Αθηνών, τα οικοδομικά τετράγωνα της Β' ζώνης του παντορροϊκού δικτύου Αθηνών, οι αγωγοί του αποχετευτικού δικτύου καθώς και τα φρεάτια του αποχετευτικού δικτύου. Όλα τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.3



Εικόνα 4.3 Αποχετευτικό δίκτυο Β' ζώνης παντορροϊκού δικτύου Αθηνών (GIS).

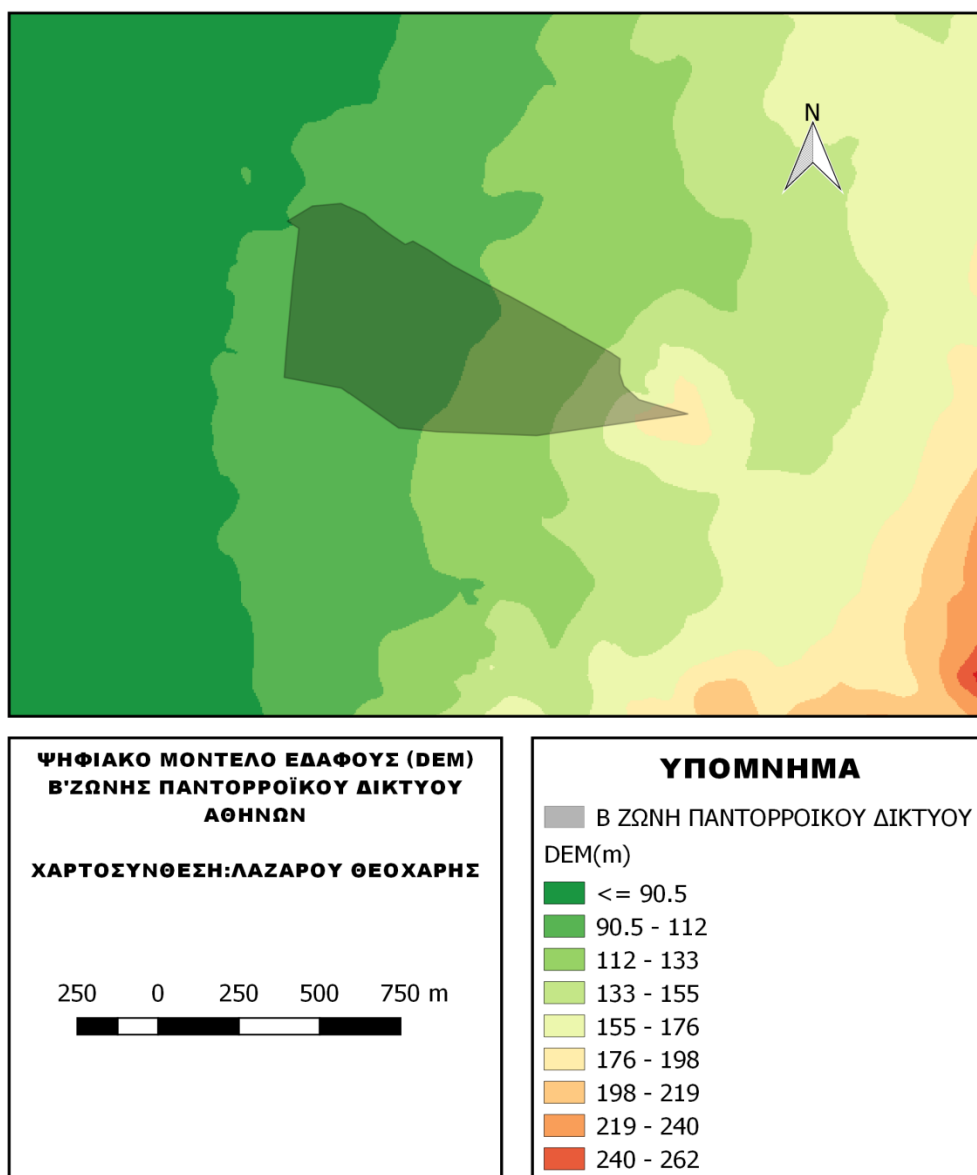
4.4 Σχηματισμός αστικών λεκανών απορροής

Για τη δημιουργία και τον σχηματισμό των αστικών λεκανών απορροής είναι αρχικά απαραίτητος ο σχηματισμός των υδροκριτικών γραμμών των οικοδομικών τετραγώνων. Οι υδροκριτικές αυτές γραμμές είναι οι διχοτόμοι των γωνιών των οικοδομικών τετραγώνων σε μία αστική περιοχή εφόσον ισχύει ότι τα όμβρια ύδατα που προέρχονται από κάθε εσωτερικό ενός οικοδομικού τετραγώνου αποχετεύονται προς την πλησιέστερη στο σημείο οδό (Κουτσογιάννης 1999). Παρακάτω στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζονται χαραγμένες οι υδροκριτικές γραμμές των οικοδομικών τετραγώνων της Β' ζώνης του παντοροϊκού δικτύου Αθηνών οι οποίες έγιναν με την βοήθεια των λογισμικών QGIS και Autocad.



Εικόνα 4.4 Υδροκριτικές γραμμές οικοδομικών τετραγώνων.

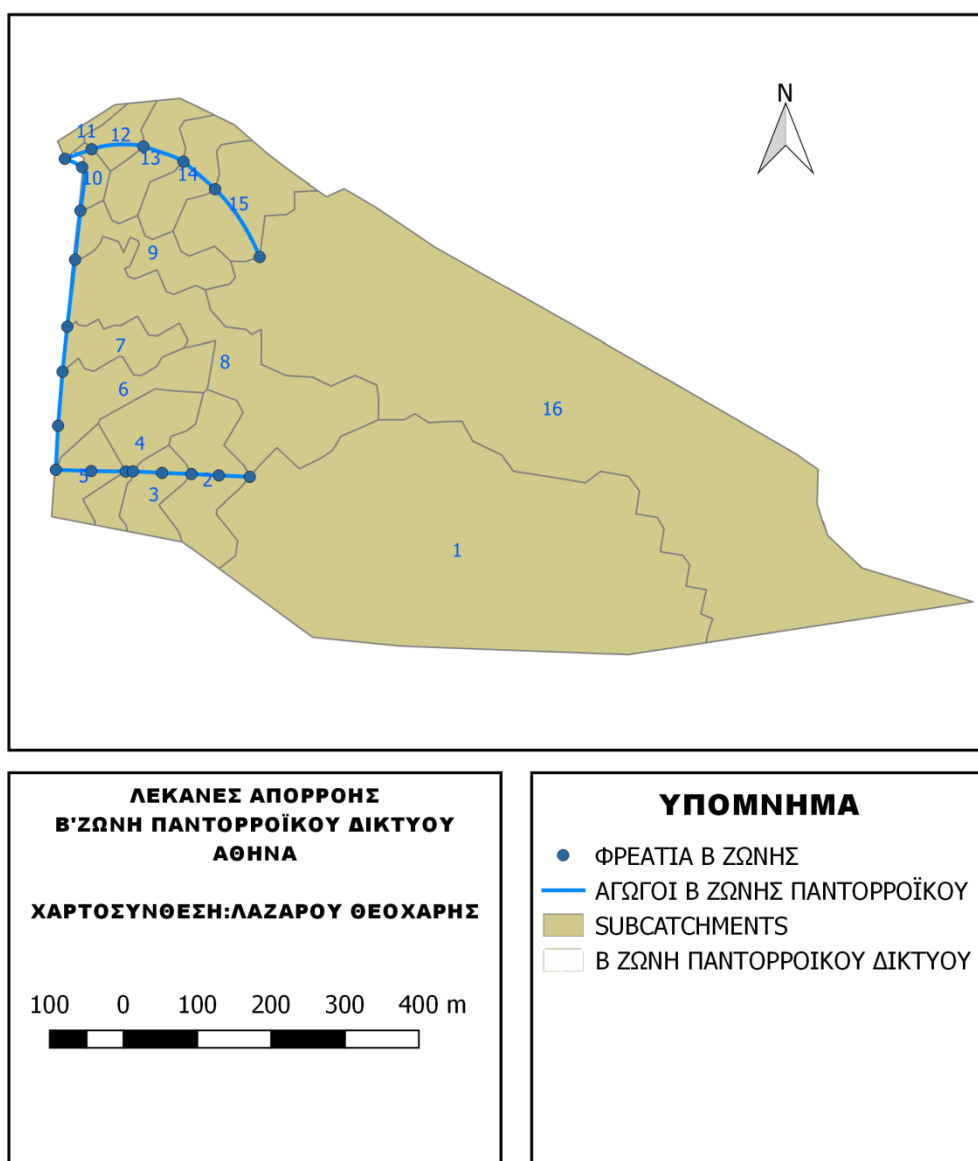
Στη συνέχεια της διαδικασίας για τον σχηματισμό των αστικών λέκανων απορροής έγινε η μελέτη του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) της περιοχής. Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους παραχωρήθηκε από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε και παρουσιάζει μέγιστο υψόμετρο 190 m ενώ ελάχιστο υψόμετρο 90 m από την Μέση Στάθμη της θάλασσας. Στην εικόνα 4.5 παρουσιάζεται το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της Β΄ ζώνης του παντορροϊκού δικτύου Αθηνών ανάλυσης 5 m×5 m.



Εικόνα 4.5 Χάρτης Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους περιοχής μελέτης.

Τέλος, έγινε η ενοποίηση των αστικών λεκανών απορροής σύμφωνα με τις χαραγμένες υδροκριτικές γραμμές και μελετώντας παράλληλα το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μελέτης. Η ενοποίηση έγινε σύμφωνα με το φρεάτιο που

αποχετεύεται το κάθε τμήμα των οικοδομικών τετραγώνων και τα αποτελέσματα εμφανίζονται παρακάτω στην Εικόνα 4.6.

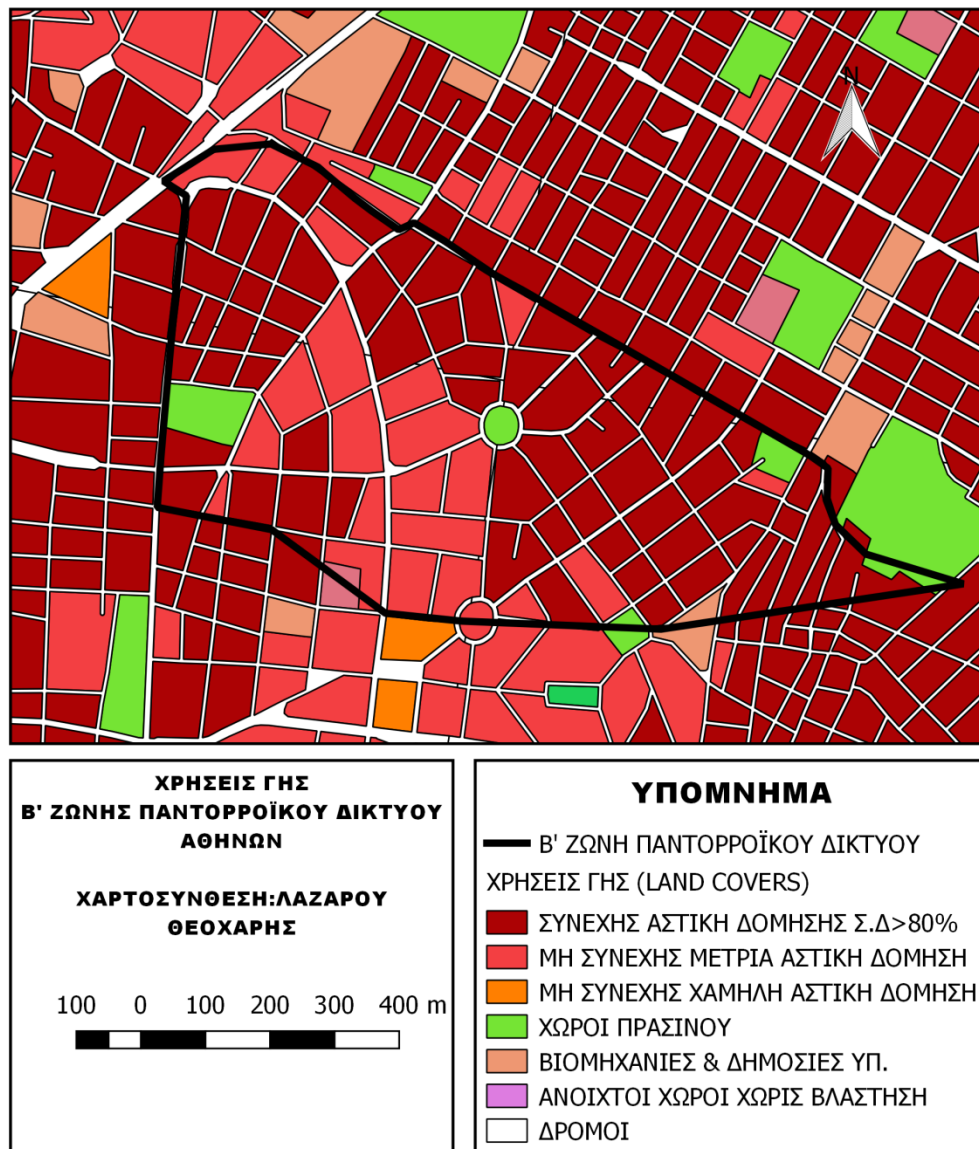


Εικόνα 4.6 Σχηματισμένες αστικές λεκάνες απορροής Β' ζώνης παντορροϊκού δικτύου Αθηνών.

4.5 Χρήσεις γης

Οι χρήσεις γης αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα για την υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής. Στην περιοχή μελέτης μας η κύρια χρήση γης είναι η συνεχής αστική δόμηση με συντελεστή δόμησης >80% ενώ υπάρχουν και λίγες εκτάσεις με μη συνεχή και μέτρια αστική δόμηση με συντελεστή δόμησης 50-80%.

Τέλος υπάρχουν ελάχιστοι χώροι πρασίνου. Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στην Εικόνα 4.7 όπου αποτελεί τον χάρτη χρήσεων γης της περιοχής μελέτης.



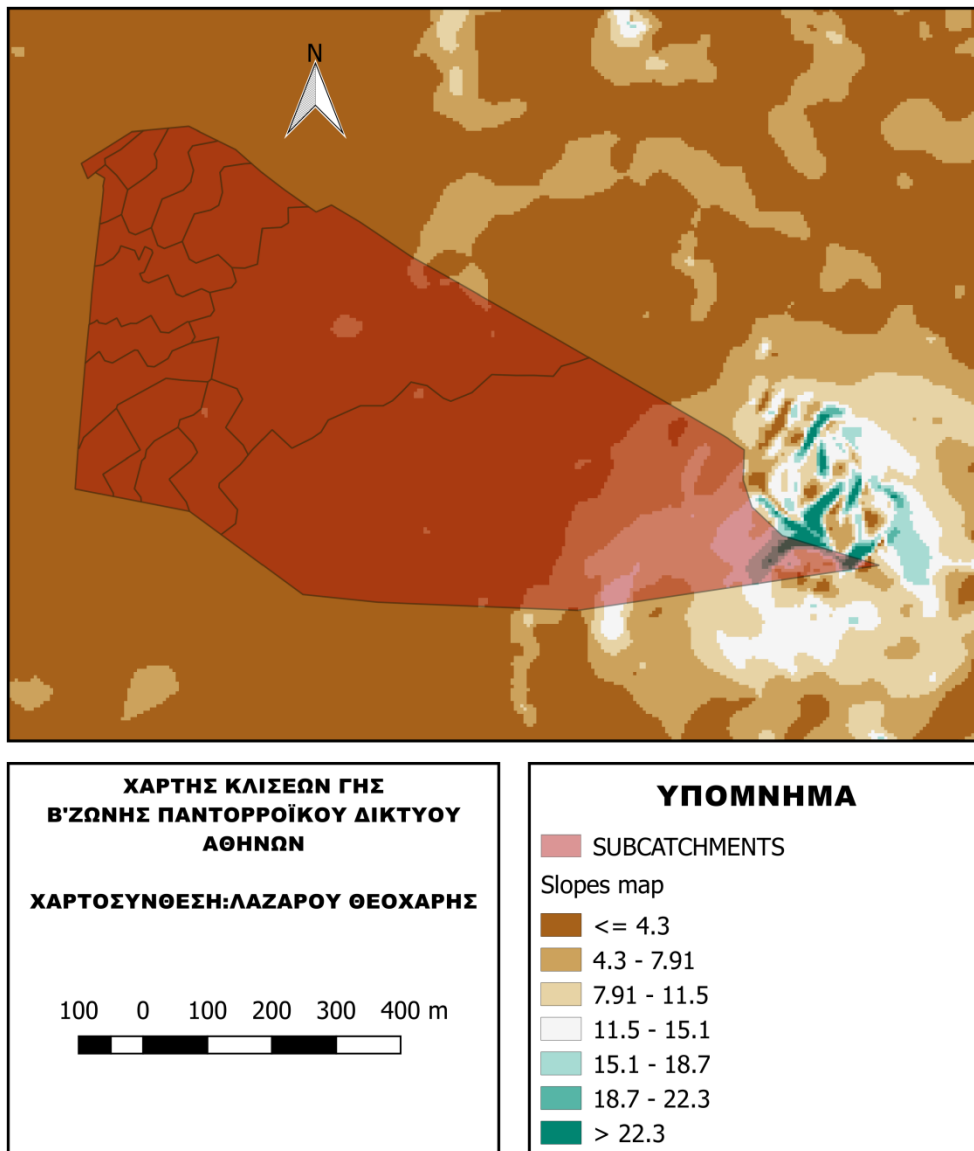
Εικόνα 4.7 Χάρτης χρήσεων γης Β' ζώνης παντορροϊκού δικτύου Αθηνών.

Πηγή: Corine Land Cover

4.6 Κλίσεις εδάφους

Τέλος ένα ιδιαίτερο στοιχείο που επηρεάζει την υδρολογική συμπεριφορά μιας λεκάνης απορροής (αστικής ή φυσικής) είναι οι κλίσεις γης. Στην περιοχή μελέτης μας η μέγιστη κλίση εμφανίζεται στο ανατολικό μέρος με τιμή περίπου 25% ενώ η μικρότερη κλίση είναι της τάξης του 2%. Ο χάρτης κλίσεων γης προέκυψε με την χρήση του λογισμικού QGIS από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής και

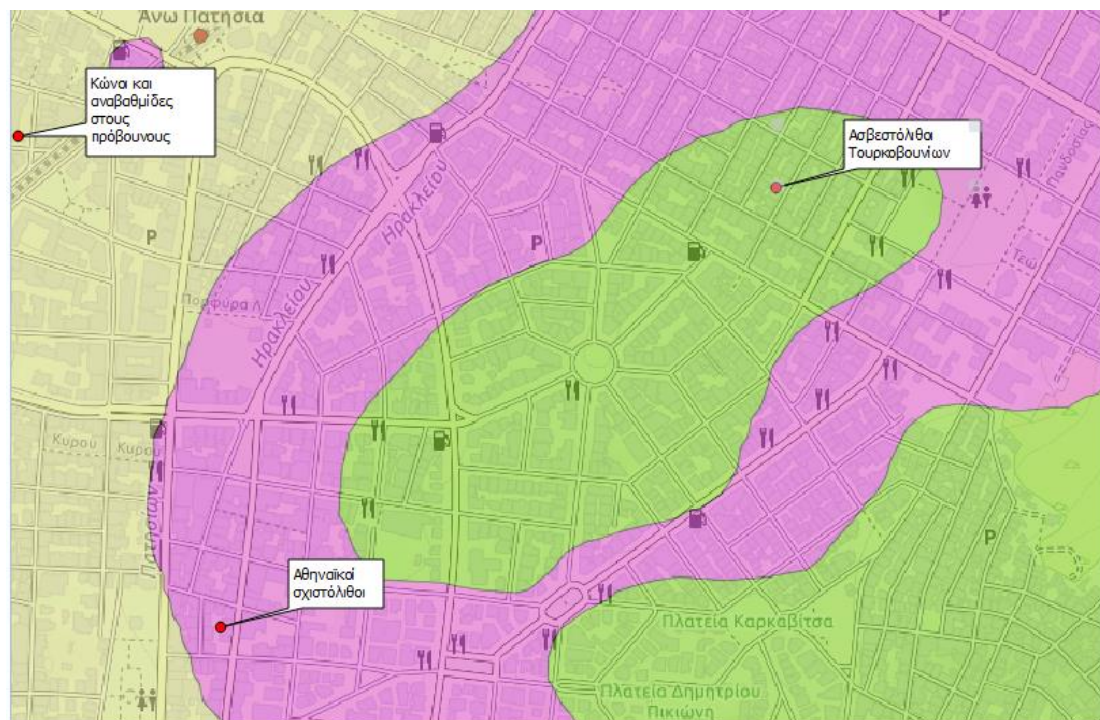
παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.8. Στη συγκεκριμένη εργασία, εκτός από τον χάρτη κλίσεων γης υπολογίστηκαν και η μέση κλίση γης για κάθε αστική υπολεκάνη απορροής ξεχωριστά μέσω του λογισμικού ArcGIS, χωρίζοντας το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής ανά αστική υπολεκάνη απορροής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12 ενώ ήταν φυσιολογικά και αναμενόμενα καθώς οι κλίσεις γης κυμαίνονται μέσα στα όρια του 2-15% που ισχύει για αστικές λεκάνες απορροής για την εύκολη αποχέτευση των όμβριων υδάτων.



Εικόνα 4.8 Χάρτης κλίσεων γης περιοχής μελέτης.

4.7 Στοιχεία γεωλογίας περιοχής μελέτης

Στην Εικόνα 4.9 παρουσιάζεται η γεωλογία της περιοχής μελέτης σύμφωνα με το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.



Εικόνα 4.9 Γεωλογία Β' ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.

Πηγή: Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών

Κώνιοι κορημάτων: Συνίσταται από παλαιότερα κορήματα, ριπίδια χειμάρρων, προσχεσιγενή υλικά που αποτελούνται από λατύπες, χαλίκια, κροκάλες, άμμο και αργίλους με ενστρώσεις σε ορισμένα σημεία από αργιλομαργαϊκό αμμούχο υλικό.

Σχιστόλιθοι Αθηνών: Πρόκειται για ένα σύστημα διαφορετικών πετρωμάτων όπως είναι οι πηλίτες, οι αργιλικόι σχιστόλιθοι, οι μάργες και οι ψαμμίτες.

Ασβεστόλιθοι Τουρκοβουνίων: Πρόκειται για λευκότεφρους ασβεστόλιθους έντονα διαρρηγμένους οι οποίοι παρουσιάζουν σημαντικά ποσά υδατοπερατότητας.

4.8 Μοντελοποίηση αποχετευτικού δικτύου στο λογισμικό Infoswmm

Το λογισμικό Infoswmm δημιουργήθηκε από την εταιρεία Inponyze με σκοπό να παρέχει την δυνατότητα σε υδρολόγους μηχανικούς και σε χρήστες των γεωγραφικών

συστημάτων πληροφοριών να δουλεύουν ταυτόχρονα σε μία ενιαία πλατφόρμα. Είναι λογισμικό ενσωματωμένο στο λογισμικό ArcGIS της ESRI και παρέχει πολλές δυνατότητες υδρολογικών διεργασιών όπως είναι η εύρεση των μηκών ροής, η χάραξη των αστικών λεκανών απορροής και άλλα. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η student version του προγράμματος με περιορισμένες δυνατότητες σε σχέση με την ολοκληρωμένη πλατφόρμα. Μέσω του λογισμικού Infoswmm μοντελοποιήσαμε το αρχικό αποχετευτικό σύστημα που ήταν απλώς πολύγωνα, σημεία και γραμμές ώστε να αναγνωρίζονται από το λογισμικό οι λεκάνες απορροής, τα φρεάτια και οι αγωγοί ως μέλη αποχετευτικού συστήματος. Το Infoswmm έχει τη δυνατότητα εξαγωγής ενός περιβάλλοντος εργασίας απευθείας στο λογισμικό SWMM.

4.9 Μοντελοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο στο SWMM

Με την εξαγωγή του project από το Infoswmm στο λογισμικό SWMM έχουμε μοντελοποιημένο το αποχετευτικό δίκτυο της Β' ζώνης του παντοροϊκού δικτύου Αθηνών. Παρακάτω στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζεται το μοντελοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο όπως αυτό εμφανίζεται στο περιβάλλον εργασίας του λογισμικού SWMM.



Εικόνα 4.10 Μοντελοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο όπως περιγράφεται στο λογισμικό SWMM.

4.10 Στοιχεία απλού αποχετευτικού δικτύου

Στην συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται σε πίνακες όλα τα στοιχεία των φρεατίων, των αγωγών αλλά και των σχηματισμένων αστικών λεκανών απορροής της Β΄ ζώνης του παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.

Πίνακας 4.1 Στοιχεία φρεατίων Β΄ ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.

*όπως περιγράφεται η θέση των φρεατίων στην Εικόνα 4.11.

ΦΡΕΑΤΙΑ						
Ονομασία φρεατίου	Τύπος Διατομής	Τύπος φρεατίου	Υλικό	Υψόμετρο στέψης(m)	Υψόμετρο πυθμένα(m)	Μέγιστο βάθος (m)
B-42	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	104.529	100.76	3.769
B-42α	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	103.459	98.58	4.879
B-41	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	101.589	97.209	4.38
B-41α	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	100.25	96.12	4.13
B-40	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	99.3	94.43	4.87
B-40α	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	99.129	94.98	4.149
B-39	Κυκλικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	97.779	94.26	3.519
B-38	Ειδικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	96.76	92.51	4.25
B-37α	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	96.379	91.93	4.449
B-37	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	95.779	91.11	4.669

Πίνακας 4.1 (συνέχεια)

B-36	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	95.019	90.489	4.53
B-35	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	93.91	89.54	4.37
B-34	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	93.059	88.61	4.449
B-34α	Ειδικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	91.279	87.93	3.349
ΚΑΑ-85-Εκχ.	Ειδικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	91.5	86.65	4.85
ΚΑΑ-86	Ειδικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	92.529	88.779	3.75
ΚΑΑ-87	Κυκλικό	Παντοροϊκό	Οπλ. σκυρόδ.	94.099	91.349	2.75
ΚΑΑ-88	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	95.8	91.699	4.101
ΚΑΑ-89	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	96.91	92.76	4.15
ΚΑΑ-89α	Ορθογωνικό	Ακαθάρτων	Οπλ. σκυρόδ.	99.379	95.43	3.949

Πίνακας 4.2 Στοιχεία αγωγών Β' ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.

*όπως περιγράφεται η θέση των φρεατίων στην Εικόνα 4.11.

ΑΓΩΓΟΙ									
Οδός	Φρεάτιο αρχής	Φρεάτιο τέλους	Τύπος Διατομής	Μήκος Αγωγού(m)	Πλάτος(m)	Ύψος(m)	offset(m) εισόδου	offset(m) εξόδου	Συντελεστής Manning
Λασκαράτου	B-42	B-42α	Ωοειδής	42.369	0.6	0.899	0	1.439	0.015
Λασκαράτου	B-42α	B-41	Ωοειδής	37.86	0.6	0.899	0	0.011	0.015
Λασκαράτου	B-41	B-41α	Ωοειδής	40.099	0.6	0.899	0	0.38	0.015
Λασκαράτου	B-41α	B-40	Ωοειδής	40.599	0.6	0.899	0	1.209	0.015
Λασκαράτου	B-40	B-40α	Ωοειδής	8.729	0.6	0.899	0.779	0	0.015
Λασκαράτου	B-40α	B-39	Ωοειδής	45.819	0.699	1.049	0	0	0.015
Λασκαράτου	B-39	B-38	Ωοειδής	47.409	0.699	1.049	0	0.949	0.015
28^{ης} Οκτωβρίου	B-38	B-37α	Ωοειδής	56.049	0.699	1.049	0	0	0.015
28^{ης} Οκτωβρίου	B-37α	B-37	Ωοειδής	70.199	0.699	1.049	0	0	0.015
28^{ης} Οκτωβρίου	B-37	B-36	Ωοειδής	58.2	0.699	1.049	0	0	0.015
28^{ης} Οκτωβρίου	B-36	B-35	Ωοειδής	91	0.699	1.049	0	0	0.015

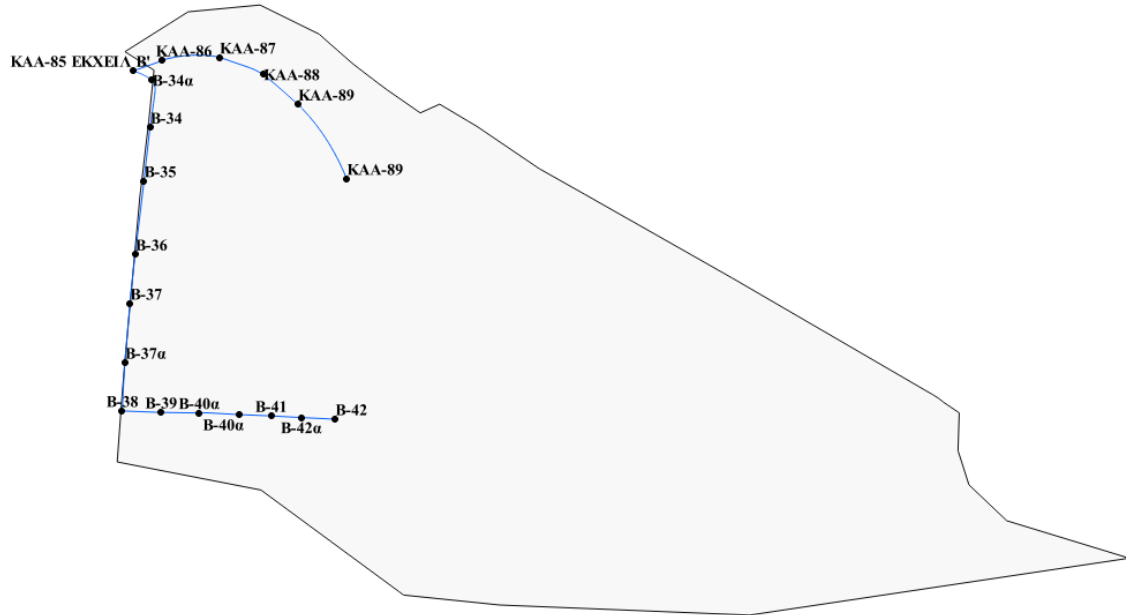
Πίνακας 4.2 (συνέχεια)

28^{ης} Οκτωβρίου	B-35	B-34	Ωοειδής	66.5	0.699	1.049	0	0.129	0.015
28^{ης} Οκτωβρίου	B-34	B-34α	Ωοειδής	59.4	0.8	1.2	0	0	0.015
28^{ης} Οκτωβρίου	B-34α	ΚΑΑ-85- εκχ.	Ωοειδής	25.549	0.8	1.2	0	1.11	0.015
Αγίας Λαύρας	ΚΑΑ- 86	ΚΑΑ-85- εκχ.	Ωοειδής	38.599	1	1.5	0	1.11	0.015
Αγίας Λαύρας	ΚΑΑ- 87	ΚΑΑ-86	Ωοειδής	132	1	1.5	0	0	0.015
Αγίας Λαύρας	ΚΑΑ- 88	ΚΑΑ-87	Ωοειδής	58.104	1	1.5	0	0	0.015
Αγίας Λαύρας	ΚΑΑ- 89	ΚΑΑ-88	Ωοειδής	55.849	1	1.5	0	0	0.015
Αγίας Λαύρας	ΚΑΑ- 89α	ΚΑΑ-89	Ωοειδής	112.8	1	1.5	0	0	0.015

Πίνακας 4.3 Στοιχεία αστικών λεκανών απορροής Β΄ ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών. *όπως περιγράφεται η θέση των λεκανών απορροής στην Εικόνα 4.6.

Ονομασία λεκάνης	Έκταση(ha)	Πλάτος(m)	Κλίση(%)
1	15.2	200	4.12
2	1.56	177	3.86
3	0.73	121	3.37
4	1.19	135	2.69
5	0.74	82	2.38
6	1.35	89	2.59
7	0.82	51	2.67
8	4.07	84	3.24
9	1.11	51	2.35
10	0.25	67	3.19
11	0.16	72	2.78
12	0.47	52	2.72
13	0.97	116	2.64
14	1	166	2.14
15	1.67	147	2.33
16	19.5	189	4.43

Τέλος, στην Εικόνα 4.11 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι σχετικές θέσεις των φρεατίων του παντοροϊκού δικτύου και τα ονόματα των φρεατίων όπως αυτά παραδόθηκαν από την ΕΥΔΑΠ για την καλύτερη κατανόηση της γεωμετρίας του δικτύου από τον αναγνώστη.



Εικόνα 4.11 Ονομασία και σχετική θέση φρεατίων Β' ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή δεδομένων αποχετευτικού δικτύου στο λογισμικό SWMM

Μετά το τέλος των χαρτογραφικών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον GIS και τη χρήση του λογισμικού Infoswmm για τη μοντελοποίηση του αποχετευτικού δικτύου και την εισαγωγή του στο λογισμικό SWMM ακολουθεί η διαδικασία εισαγωγής των παραμέτρων στο λογισμικό. Οι παράμετροι που εισήχθησαν στο λογισμικό αφορούσαν τα φρεάτια του δικτύου, τους αγωγούς του δικτύου καθώς και τις σχηματισμένες λεκάνες απορροής.

5.1.1 Εισαγωγή παραμέτρων φρεατίων

Η εισαγωγή των παραμέτρων των φρεατίων του αποχετευτικού δικτύου έγινε σύμφωνα με τα δεδομένα τα οποία παραχωρήθηκαν από την ΕΥΔΑΠ για την εκπόνηση της μελέτης. Για κάθε φρεάτιο τα απαραίτητα στοιχεία εισαγωγής είναι:

- **Invert Elevation:** Υψόμετρο πυθμένα φρεατίου
- **Max Depth/Μέγιστο βάθος νερού στον κόμβο:** Το μέγιστο βάθος νερού στον κόμβο προκύπτει ως η διαφορά των υψομέτρων του πυθμένα του φρεατίου και του υψομέτρου του εδάφους.
- **Inflows:** Τυχόν εισροές στον κόμβο

5.1.2 Εισαγωγή παραμέτρων αγωγών

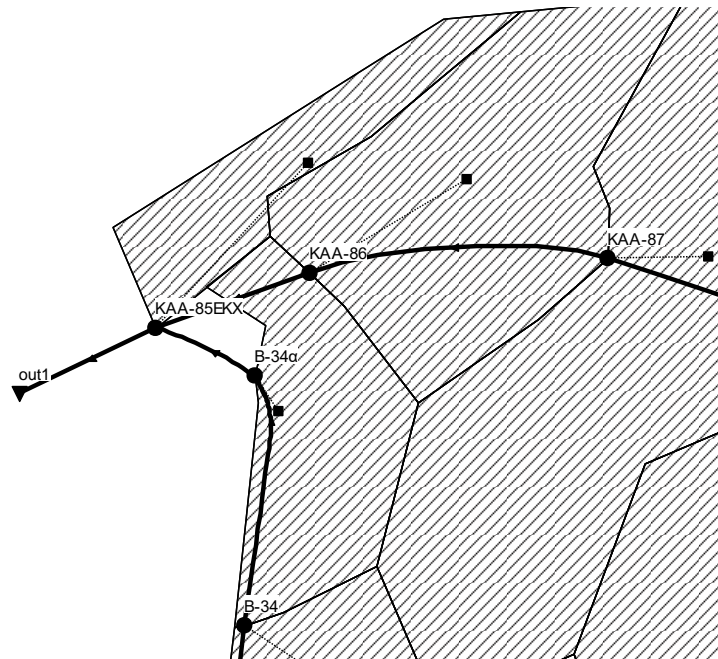
Η εισαγωγή των στοιχείων των αγωγών όπως και των φρεατίων έγινε σύμφωνα με τα δεδομένα που παραδόθηκαν από την ΕΥΔΑΠ. Τα απαραίτητα στοιχεία για τον χαρακτηρισμό ενός αγωγού στο λογισμικό SWMM είναι:

- **Φρεάτιο εισόδου**
- **Φρεάτιο εξόδου**
- **Μήκος αγωγού**
- **Σχήμα διατομής αγωγού:** Όλοι οι αγωγοί του δικτύου της Β΄ ζώνης είναι ωοειδείς.
- **Συντελεστής Manning:** Για τους ωοειδείς αγωγούς του μοντέλου επιλέχθηκε συντελεστής τραχύτητας κατά Manning ίσος με 0.015, τιμή η οποία προέκυψε σύμφωνα με βιβλιογραφικούς πίνακες όπως του Rossman (2017).
- **Inlet/outlet offset:** Είναι η διαφορά υψομέτρου που έχουν ο πυθμένας του φρεατίου με τον πυθμένα του αγωγού στην αρχή και στο τέλος του αγωγού αντίστοιχα.
- **Μέγιστο βάθος αγωγού**

Πρόσθετος αγωγός: Το λογισμικό SWMM είναι κατασκευασμένο ώστε στην έξοδο του συστήματος-δικτύου να συνδέεται μόνο ένας αγωγός (Rossman 2015). Στην περίπτωση μας, δηλαδή την Β΄ ζώνη παντοροϊκού δικτύου Αθηνών, στην έξοδο του δικτύου (φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ) συνδέονται δύο αγωγοί (Εικόνα 5.1). Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη ενός φανταστικού-πρόσθετου αγωγού ο οποίος υπάρχει στην πραγματικότητα ωστόσο δεν ήταν γνωστά τα γεωμετρικά του στοιχεία. Έτσι, η έξοδος του δικτύου στο λογισμικό SWMM θα είναι η Out1 όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 5.1. Τα στοιχεία του πρόσθετου αγωγού επιλέχθηκαν με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσέγγιση του πραγματικού αγωγού, δηλαδή του Κ.Α.Α.

- Μήκος αγωγού: 50 m
- Συντελεστής τραχύτητας κατά Manning αγωγού: 0.017
- Σχήμα διατομής αγωγού: Κυκλικός

- Κλίση αγωγού: 0.033



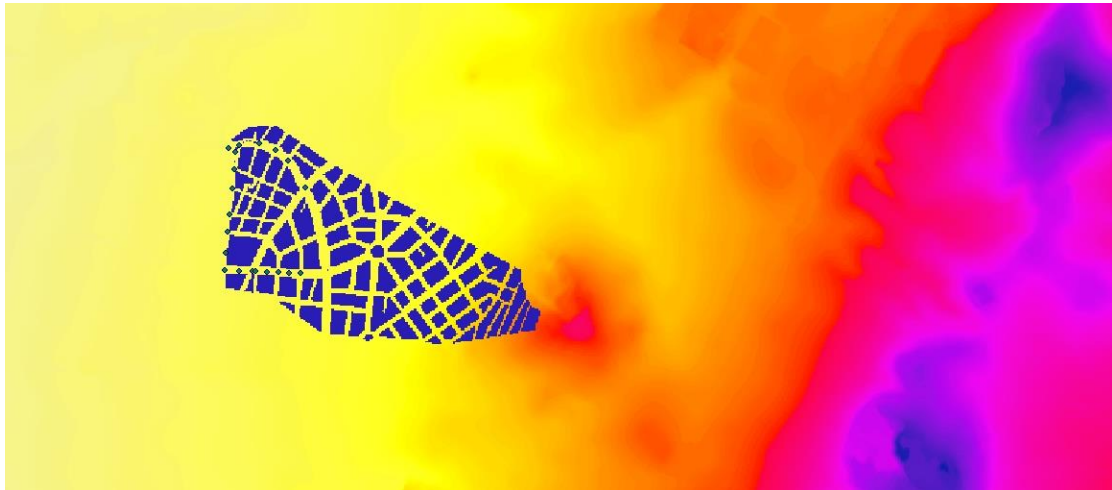
Εικόνα 5.1 Σημείο εξόδου δικτύου-πρόσθετος αγωγός.

5.1.3 Εισαγωγή παραμέτρων αστικών λεκανών απορροής

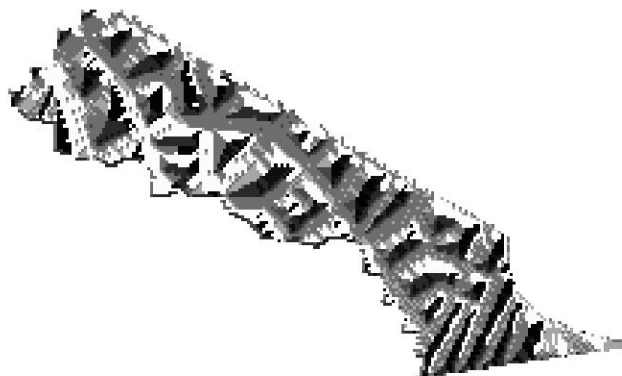
Οι βασικές παράμετροι εισαγωγής για τις υπολεκάνες απορροής είναι:

- **Βροχογράφος**
- **Σημείο εκροής λεκάνης απορροής**
- **Εμβαδόν λεκάνης απορροής:** Η έκταση των λεκανών απορροής υπολογίστηκε μέσω του λογισμικού QGIS σε εκτάρια.
- **Πλάτος λεκάνης απορροής:** Για την εύρεση του πλάτους λεκάνης απορροής υπολογίστηκαν αρχικά τα μέγιστα επίγεια μήκη ροής για κάθε υπολεκάνη μέσω του λογισμικού ArcGIS. Στην συνέχεια υπολογίστηκε το πλάτος επίγειας ροής σύμφωνα με την σχέση $W = \frac{A}{L}$ όπου A το εμβαδόν της λεκάνης και L το μέγιστο μήκος επίγειας ροής. Το λογισμικό SWMM αναφέρει πως το L στη σχέση υπολογισμού του πλάτους αποτελεί το μέγιστο μήκος επίγειας ροής δηλαδή το μήκος ροής από το πλέον απομακρυσμένο

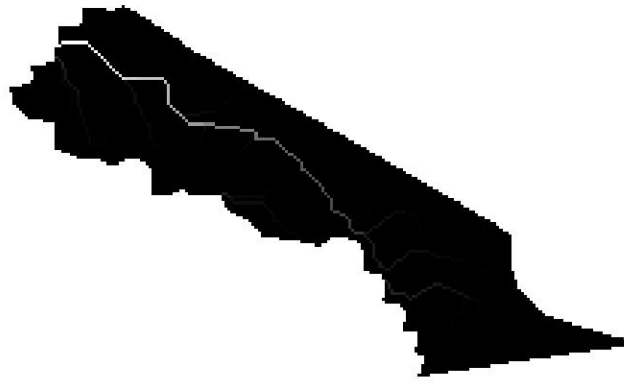
σημείο της λεκάνης μέχρι η ροή να εισχωρήσει στο αποχετευτικό σύστημα. Για τον υπολογισμό του μήκους ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Αρχικά τροποποιήθηκε το αρχικό Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους στις περιοχές των οικοδομικών τετραγώνων με σκοπό την εμπόδιση της ροής (Εικόνα 5.2). Στη συνέχεια για κάθε λεκάνη απορροής υπολογίστηκαν τα raster αρχεία flow direction και flow accumulation (Εικόνες 5.3, 5.4) που δείχνουν την συγκέντρωση του νερού καθώς και τις κατευθύνσεις της ροής. Τέλος, υπολογίστηκαν τα raster αρχεία flow length (Εικόνα 5.5) που δείχνουν για κάθε κελί το μήκος ροής από τα ανάντη. Οι παραπάνω εργασίες πραγματοποιήθηκαν μέσω του εργαλείου Spatial Analysis \Rightarrow Hydrology tools που είναι διαθέσιμο στο περιβάλλον εργασίας του λογισμικού ArcGIS.



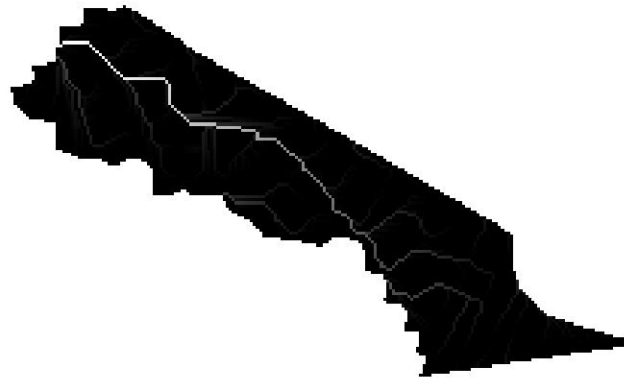
Εικόνα 5.2 Τροποποιημένο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους Β' ζώνης παντοροϊκού δικτύου.



Εικόνα 5.3 Παράδειγμα raster αρχείου flow direction (Λεκάνη 16).



Εικόνα 5.4 Παράδειγμα raster αρχείου flow accumulation.(Τα λευκά pixel δείχνουν την μέγιστη συγκέντρωση νερού-Λεκάνη 16).



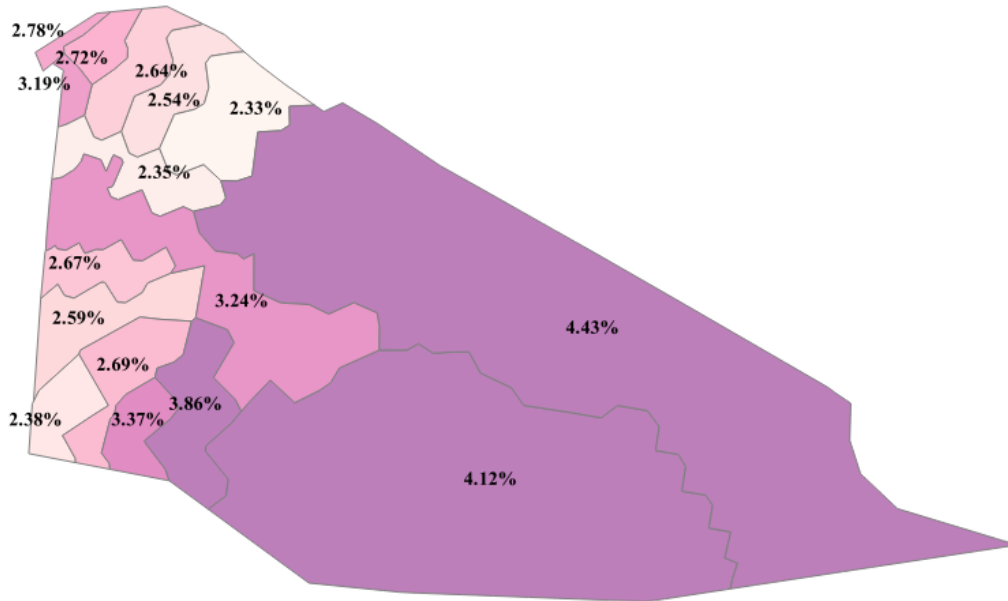
Εικόνα 5.5 Παράδειγμα raster αρχείου flow length.(Τα λευκά κελιά παρουσιάζουν το μεγαλύτερο μήκος ροής από τα ανάντη-Λεκάνη 16).

- **Κλίση:** Η κλίση της κάθε λεκάνης απορροής υπολογίστηκε μέσω του λογισμικού ArcGIS. Οι Rossman (2015) και Jironas et al. (2009) αναφέρουν πως η κλίση στις αστικές περιοχές ισούται με την κλίση των οικοδομικών τετραγώνων εφόσον έχουμε ομοιογενείς περιοχές. Στο λογισμικό SWMM η κλίση της λεκάνης απορροής αντιπροσωπεύει τη μέση κλίση της επίγειας ροής μέχρι τη στιγμή εισόδου στο αποχετευτικό σύστημα (Rossman 2015) ενώ σε λεκάνες με απλή γεωμετρία η κλίση αυτή υπολογίζεται ως ο λόγος της υψομετρικής διαφοράς ανάμεσα στο σημείο εκκίνησης και κατάληξης αντίστοιχα της επίγειας ροής με το μήκος της ροής. Σε αστικές περιοχές, η κλίση κυμαίνεται μεταξύ 2-15% για εύκολη απορροή των ομβρίων υδάτων.

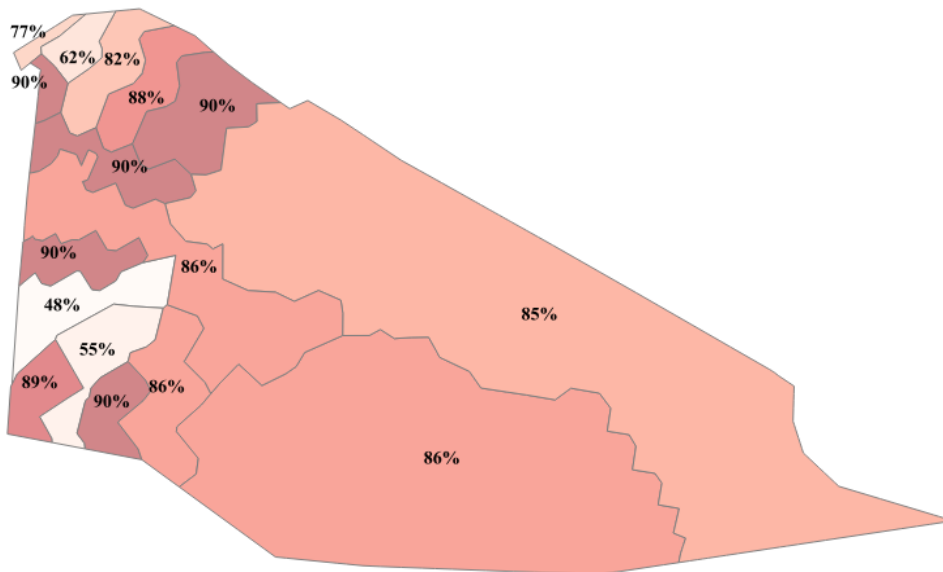
Στην περιοχή μελέτης, η μέγιστη κλίση είναι 4.43% ενώ η ελάχιστη που υπολογίστηκε ήταν 2.14%.

- **Διαπερατότητα:** Η διαπερατότητα της κάθε λεκάνης απορροής υπολογίστηκε με χρήση των λογισμικών QGIS και Google Earth. Οι τιμές που εκτιμήθηκαν κυμαίνονται μεταξύ 48 έως 90%.
- **Συντελεστής manning:** Ο συντελεστής Manning για επίγεια ροή σε διαπερατή επιφάνεια επιλέχθηκε να είναι ίσος με $N\text{-Perv}=0.24$ ενώ για επίγεια ροή σε αδιαπέρατη επιφάνεια είναι $N\text{-Imperv}=0.015$. Οι τιμές αυτές προτείνονται από τον Rossman (2016).
- **Επιφανειακή αποθήκευση:** Η επιφανειακή αποθήκευση σε διαπερατά εδάφη είναι $D\text{store-Perv}=6.5\text{mm}$ ενώ σε αδιαπέρατα εδάφη είναι $D\text{store-Imper}=2.5\text{mm}$ (Rossman 2016).
- **Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας χωρίς επιφανειακή αποθήκευση:** Η αδιαπέρατη επιφάνεια χωρίς επιφανειακή αποθήκευση αποτελεί το 25% της έκτασης που καταλαμβάνει η αδιαπέρατη επιφάνεια.
- **Μέθοδος Διήθησης:** Η μέθοδος διήθησης που επιλέχθηκε για όλες τις υπολεκάνες απορροής είναι αυτή του αριθμού καμπύλης CN. Σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναλύθηκε στην Παράγραφο 2.2.4 και με χρήση του γεωλογικού χάρτη της περιοχής μελέτης καθώς και του χάρτη χρήσεων γης, λαμβάνεται αρχική κατάσταση υγρασίας τύπου I και κατηγορία εδάφους C. Τελικά επιλέγεται αριθμός καμπύλης $CN=95$ (Τσιχριντζής 1999, Τσακίρης 2013).

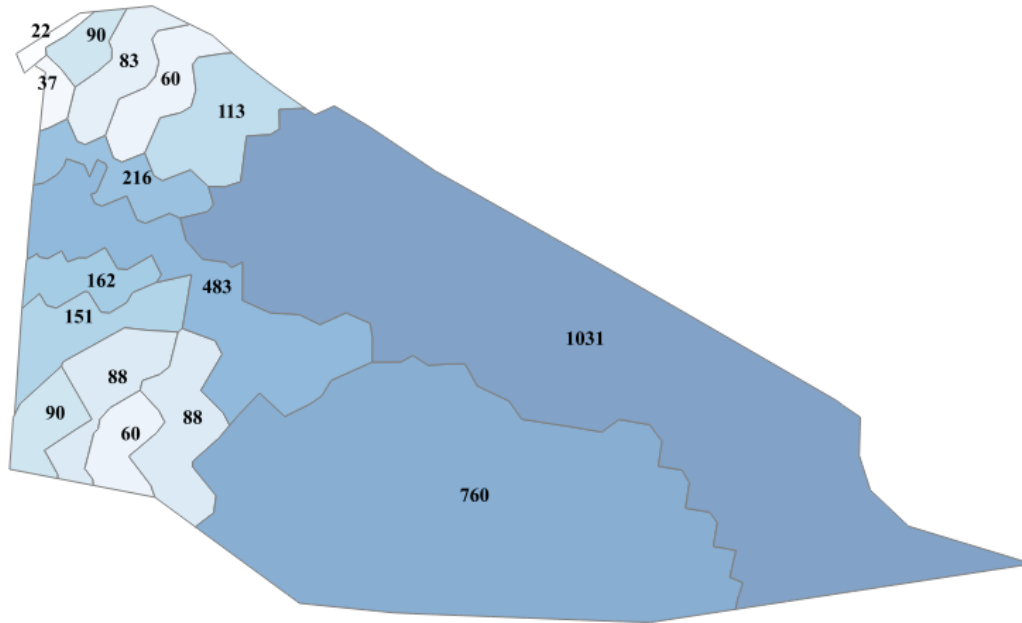
Στις Εικόνες 5.6 και 5.7 που ακολουθούν παρουσιάζονται σε χάρτες οι κλίσεις και τα ποσοστά αδιαπερατότητας της περιοχής μελέτης μας για κάθε υπολεκάνη απορροής ενώ στην Εικόνα 5.8 παρουσιάζονται τα μέγιστα μήκη επίγεια ροής που υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού ArcGIS.



Εικόνα 5.6 Χάρτης κλίσεων λεκανών απορροής Β΄ ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών. *όπως περιγράφεται η ονομασία των λεκανών απορροής στην Εικόνα 4.6.



Εικόνα 5.7 Χάρτης αδιαπερατότητας λεκανών απορροής Β΄ ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών. *όπως περιγράφεται η ονομασία των λεκανών απορροής στην Εικόνα 4.6.



Εικόνα 5.8 Μέγιστα μήκη επίγειας ροής (m) ανά λεκάνη απορροής.
 *όπως περιγράφεται η ονομασία των λεκανών απορροής στην Εικόνα 4.6.

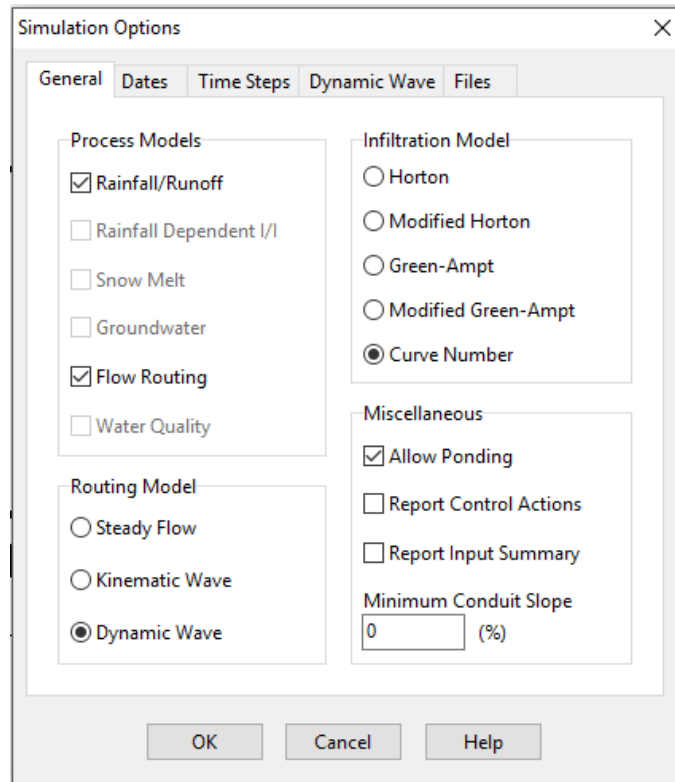
5.2 Εισαγωγή παραμέτρων προσομοίωσης

Οι επιλογές των διαφόρων παραμέτρων προσομοίωσης στο λογισμικό SWMM όπως έχουμε αναφέρει χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής:

- Γενικές επιλογές
- Επιλογές ημερομηνίας και ώρας
- Επιλογές χρονικού βήματος
- Επιλογές δυναμικού κύματος

5.2.1 Γενικές επιλογές

- **Φυσικές διεργασίες:** Επιλέγουμε τις διαδικασίες της βροχόπτωσης/απορροής και της διόδευσης.
- **Μοντέλο διήθησης:** Όπως έχουμε αναφέρει το μοντέλο διήθησης που επιλέξαμε είναι η μέθοδος CN (Curve Number).
- **Μέθοδος διόδευσης:** Επιλέγουμε την μέθοδο δυναμικού κύματος (Dynamic Wave).



Εικόνα 5.9 Γενικές επιλογές προσομοίωσης.

5.2.2 Επιλογές ημερομηνίας και ώρας

Σε αυτό το παράθυρο των επιλογών προσομοίωσης εισάγουμε την ημερομηνία αλλά και την ώρα της εκκίνησης και της λήξης της προσομοίωσης.

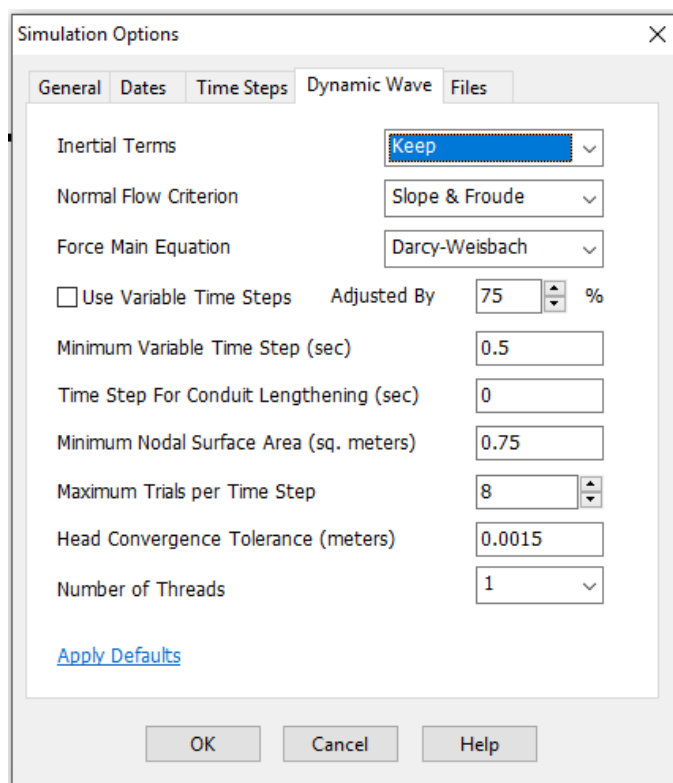
5.2.3 Επιλογές χρονικών βημάτων

- **Χρονικό βήμα καταγραφής:** Είναι το χρονικό βήμα καταγραφής των αποτελεσμάτων και επιλέγεται η τιμή 1 min.
- **Χρονικό βήμα ξηρού καιρού:** Αποτελεί το χρονικό βήμα υπολογισμού της απορροής σε περιόδους ξηρού καιρού και επιλέγεται η τιμή 1 h.
- **Χρονικό βήμα υγρού καιρού:** Αποτελεί το χρονικό βήμα του υπολογισμού της απορροής από τις λεκάνες απορροής σε περιόδους υγρού καιρού και επιλέγεται η τιμή 1 sec.
- **Χρονικό βήμα μεταφοράς της απορροής:** Αποτελεί το χρονικό βήμα επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων Saint Venant κατά τη διάρκεια της διόδου και παίρνει τιμές μικρότερες του δευτερολέπτου. Επιλέγεται η τιμή 0.1 sec.

5.2.4 Επιλογές δυναμικού κύματος

Αρχικοί όροι: Διατήρηση

Ορισμός υπερκρίσιμης ροής: Αριθμός Froude και κλίση



Εικόνα 5.10 Επιλογές προσομοίωσης δυναμικού κύματος.

5.3 Κατάρτιση νετογραμμάτων σχεδιασμού

Η όμβρια καμπύλη όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι μία σχέση διάρκειας βροχόπτωσης, περιόδου επαναφοράς βροχόπτωσης και σταθερής έντασης της βροχόπτωσης. Στην παρούσα μελέτη για την προσομοίωση της Β΄ ζώνης του παντοροϊκού δικτύου Αθηνών χρησιμοποιήθηκε η όμβρια καμπύλη των Mimikou et al. (2000). Η αναλυτική σχέση της όμβρια καμπύλης είναι:

$$i = 15.39T^{0.276}t^{-0.725} \quad (5.1)$$

Όπου: i η σταθερή ένταση βροχόπτωσης (mm/h), T η περίοδος επαναφοράς (years) και t η χρονική διάρκεια της βροχόπτωσης (h).

Οι βροχοπτώσεις σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν ήταν για περιόδους επαναφοράς $T=2, 5, 10, 25, 50$ έτη και διάρκειας βροχόπτωσης $t=1, 2, 6, 12, 24$ ώρες αντίστοιχα

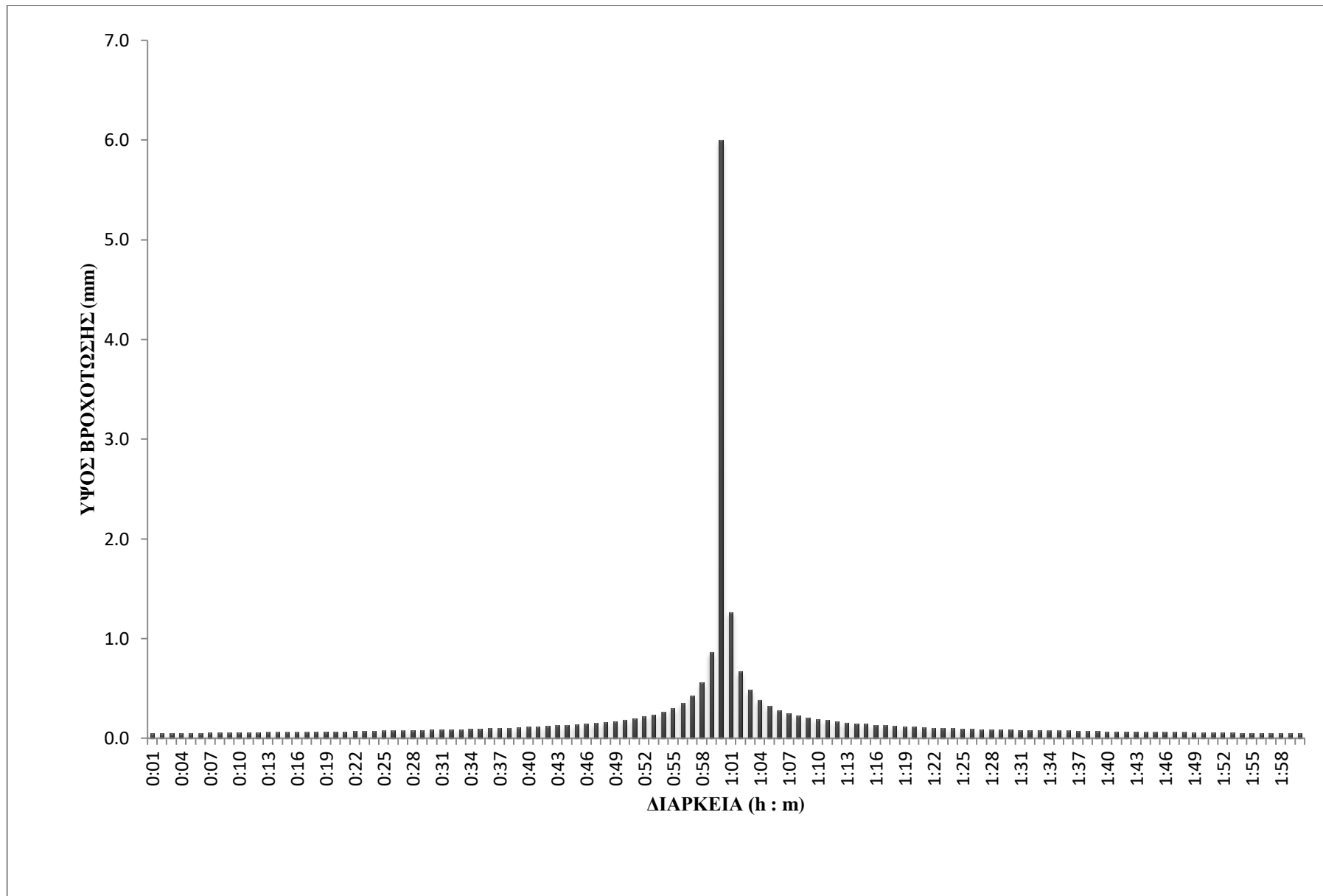
καταρτίζοντας έτσι συνολικά 25 υετογράμματα σχεδιασμού. Η κατανομή του συνολικού ύψους βροχόπτωσης στα επιμέρους χρονικά βήματα έγινε με τη μέθοδο εναλλασσόμενων μπλοκ ενώ το χρονικό βήμα που επιλέχθηκε είναι 1 λεπτό (1 min).

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω η γενική διαδικασία είναι η εξής:

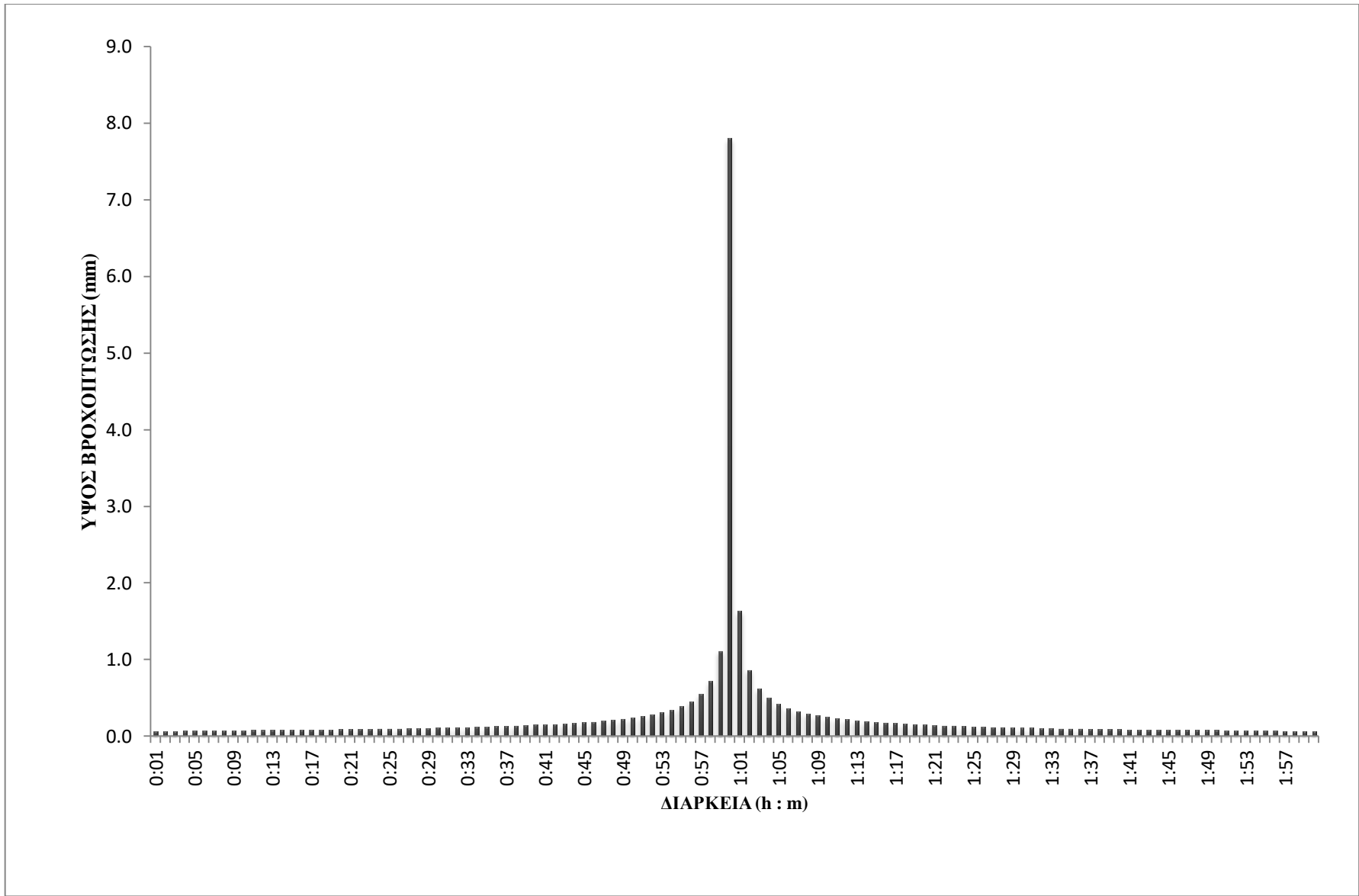
Αρχικά υπολογίζονται τα συνολικά ύψη βροχόπτωσης για κάθε διάρκεια βροχόπτωσης και για κάθε περίοδο επαναφοράς σύμφωνα με την όμβρια καμπύλη. Στη συνέχεια και σύμφωνα με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ βρίσκονται τα επιμέρους αθροιστικά ύψη βροχόπτωσης σε κάθε χρονικό βήμα του ενός λεπτού. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η εξής:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1-0.725} \quad (5.2)$$

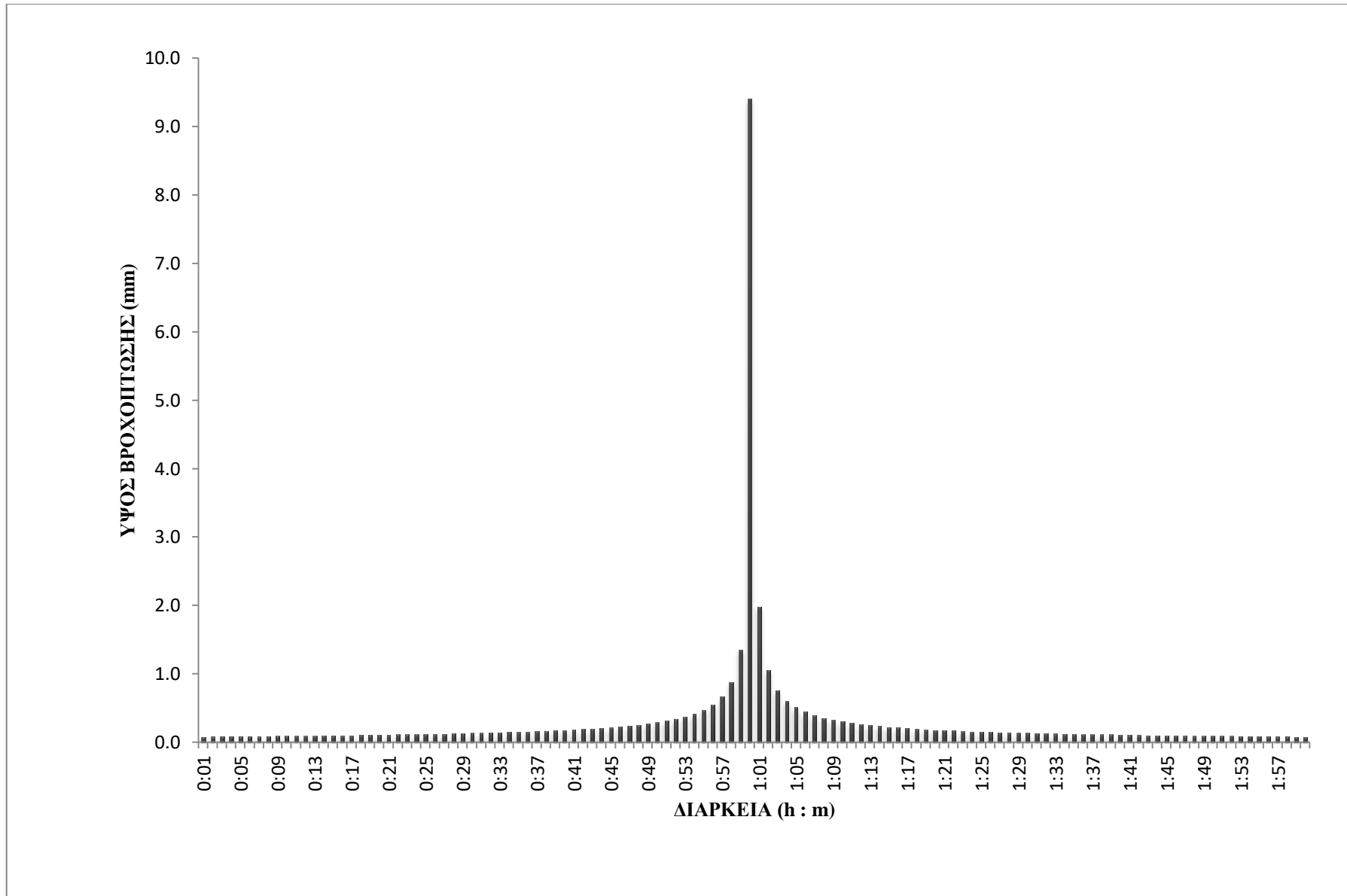
Στην συνέχεια και αφού έχουν υπολογιστεί τα αθροιστικά ύψη βροχόπτωσης υπολογίζονται οι διαφορές τους οι οποίες αποτελούν και το ύψος βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στο κάθε χρονικό βήμα. Τέλος, η κατανομή που γίνεται στα ύψη βροχόπτωσης είναι η εξής: το μεγαλύτερο ύψος βροχόπτωσης τοποθετείται στο κεντρικό χρονικό βήμα, το αμέσως μικρότερο στη δεξιά πλευρά του κεντρικού χρονικού βήματος και το τρίτο μεγαλύτερο κατά σειρά στο χρονικό βήμα που βρίσκεται αριστερά του κεντρικού. Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία υπολογίζονται συνολικά 25 υετογραφήματα σχεδιασμού (5 για κάθε περίοδο επαναφοράς). Στις επόμενες Εικόνες 5.11 έως 5.15 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα υετογράμματα σχεδιασμού για χρονική διάρκεια βροχόπτωσης $t=2$ ώρες και περιόδους επαναφοράς $T=2, 5, 10, 25, 50$ έτη ενώ τα υπόλοιπα υετογράμματα σχεδιασμού παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.



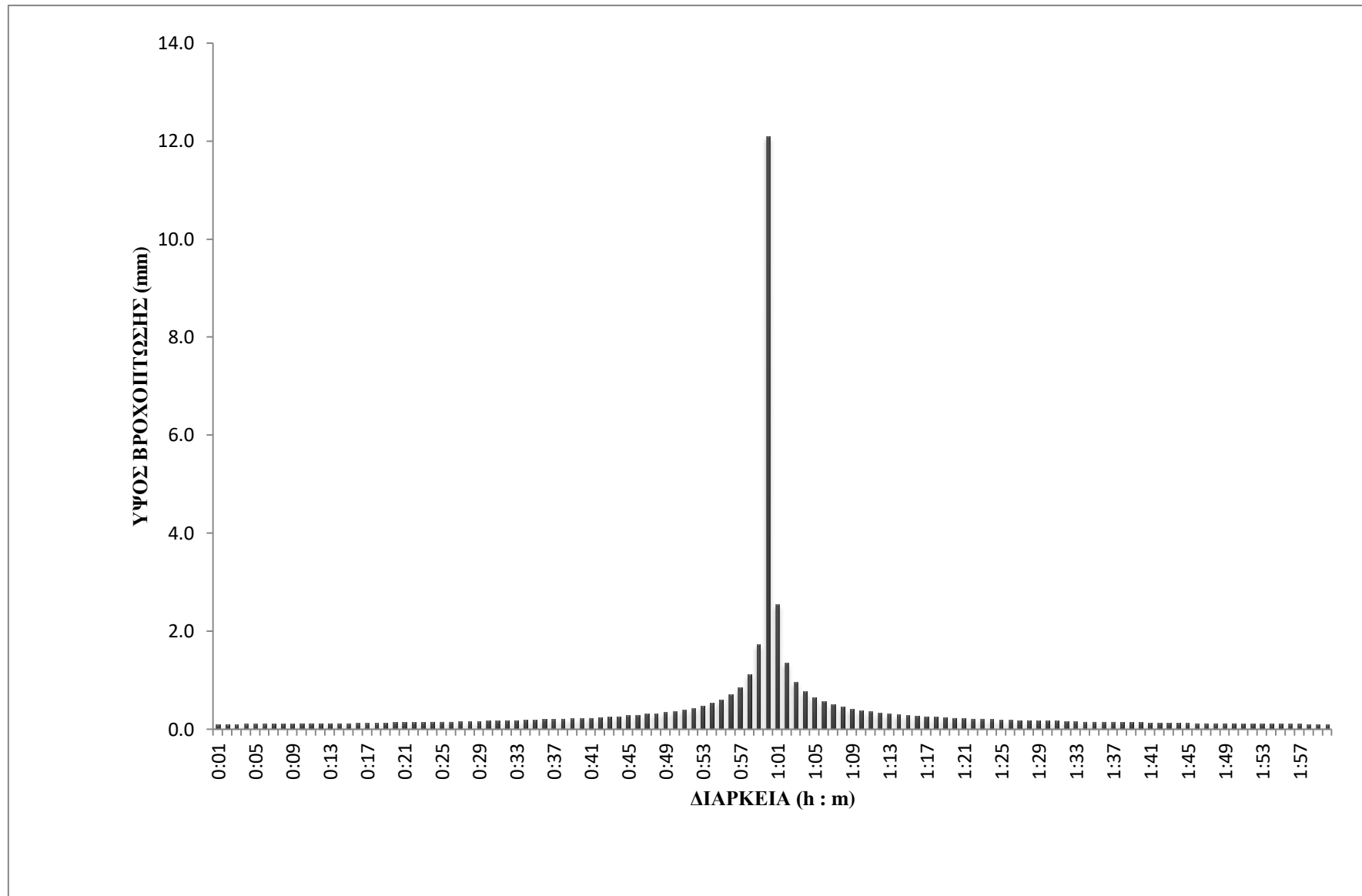
Εικόνα 5.11 Υετόγραμμα σχεδιασμού για $t=2$ h και $T=2$ έτη.



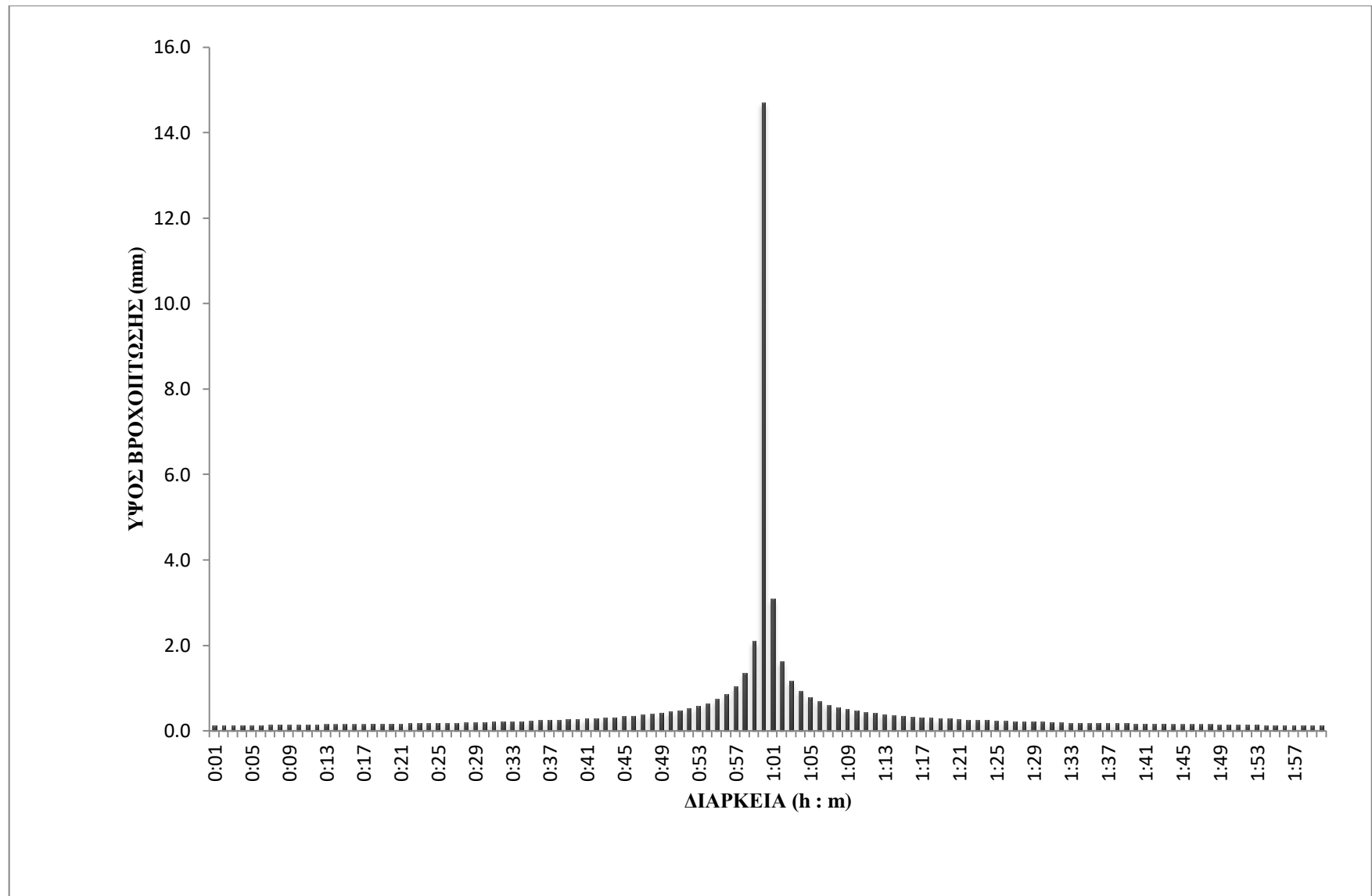
Εικόνα 5.12 Υετόγραμμα σχεδιασμού για $t=2$ h και $T=5$ έτη.



Εικόνα 5.13 Υετόγραμμα σχεδιασμού για t=2 h και T=10 έτη.



Εικόνα 5.14 Υετόγραμμα σχεδιασμού για $t=2$ h και $T=25$ έτη.



Εικόνα 5.15 Υετόγραμμα σχεδιασμού για $t=2$ h και $T=50$ έτη.

5.4 Παροχή αποχέτευσης ακαθάρτων

Στην παράγραφο 2.3 της εργασίας, αναλύθηκε λεπτομερώς η μεθοδολογία εκτίμησης της παροχής των ακαθάρτων. Αρχικά, για την εκτίμηση της παροχής χρειάζεται ο προσδιορισμός του πληθυσμού κάθε λεκάνης απορροής, ο οποίος πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των στοιχείων της ΕΛΣΤΑΤ από την απογραφή πληθυσμού το έτος 2011. Στην Εικόνα 4.2 του Κεφαλαίου 4 παρουσιάζεται η διοικητική διαίρεση της Β' ζώνης παντοροϊκού δικτύου Αθηνών. Όλες οι λεκάνες απορροής πλην των 1 και 16 ανήκουν εξολοκλήρου στον Δήμο Αθηναίων ενώ για τις λεκάνες 1 και 16 ισχύει η διοικητική διαίρεση που παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 5.1 Διοικητική διαίρεση έκτασης λεκανών απορροής 1 και 16.

	Έκταση km ²	Έκταση km ² Δήμος Αθηναίων	Έκταση km ² Δήμος Γαλατσίου
1	0.152	0.135	0.017
16	0.195	0.115	0.08

Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ από την απογραφή του 2011 προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 Στοιχεία ΕΛΣΤΑΤ σύμφωνα με την απογραφή του 2011.

Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ (2012)

	Πληθυσμός ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο
Δήμος Αθηναίων	17042,55
Δήμος Γαλατσίου	14740,44

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και έχοντας υπολογίσει την έκταση κάθε λεκάνης έγινε ο προσδιορισμός του πληθυσμού για κάθε λεκάνη απορροής και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι παροχές αποχέτευσης ακαθάρτων. Αναλυτική παρουσίαση των υπολογισμών σε όλη τη διαδικασία της μεθόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα Β.1 του Παραρτήματος Β. Τέλος, η παροχή των ακαθάρτων εισήχθη στο μοντέλο στους κόμβους του δικτύου μέσω της επιλογής Inflows \Rightarrow Dry Weather. Η μέγιστη ωριαία

παροχή ακαθάρτων για κάθε λεκάνη απορροής που εισάχθηκε στο μοντέλο παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.3 που ακολουθεί.

Πίνακας 5.3 Μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων ανά λεκάνη απορροής.

Λεκάνη απορροής	Μέγιστη ωριαία παροχή (m³/s)
1	0.0195
2	0.0039
3	0.0023
4	0.0032
5	0.0024
6	0.0035
7	0.0025
8	0.0078
9	0.0031
10	0.0012
11	0.0009
12	0.0018
13	0.0028
14	0.0029
15	0.0041
16	0.0259

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΝΤΟΡΡΟΪΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

6.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης παντορροϊκού δικτύου για βροχόπτωση σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T=10$ έτη και διάρκειας $t=12$ h

6.1.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του παντορροϊκού δικτύου Αθηνών και συγκεκριμένα της Β' ζώνης του δικτύου για βροχόπτωση σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς $T=10$ έτη και διάρκεια $t=12$ ώρες. Η συγκεκριμένη βροχόπτωση θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM ενώ τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του δικτύου για τις υπόλοιπες βροχοπτώσεις σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ.

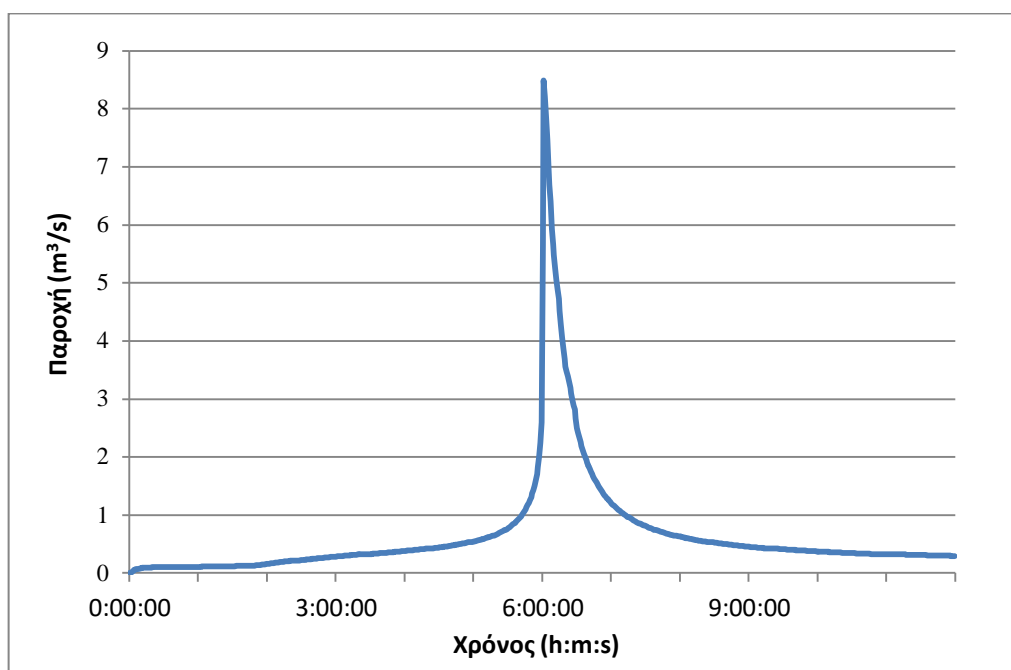
6.1.2 Αποτελέσματα

Τα γενικά αποτελέσματα της προσομοίωσης του παντορροϊκού δικτύου της Αθήνας για βροχόπτωση σχεδιασμού $T=10$ έτη και $t=12$ h παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1 που ακολουθεί. Το δίκτυο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, δεν είναι επαρκές για την

αποχέτευση της απορροής με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται πλημμυρικά φαινόμενα. Στην Εικόνα 6.1 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου ΚΑΑ-85ΕΚΧ.

Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης βροχόπτωσης σχεδιασμού T=10 έτη, t=12 h.

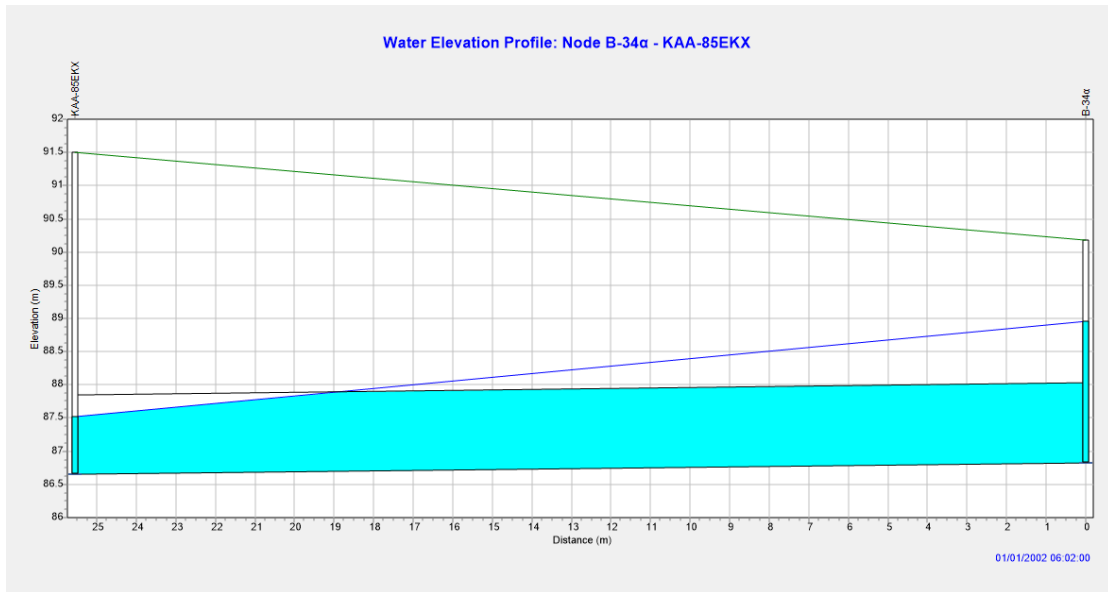
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ t=12 h, T=10 έτη	
Βροχόπτωση (mm)	57.4
Διήθηση (mm)	1.6
Επιφανειακή απορροή (mm)	51.6
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m ³ /s)	8.49
Χρόνος αιχμής (h:m:s)	6:02:00



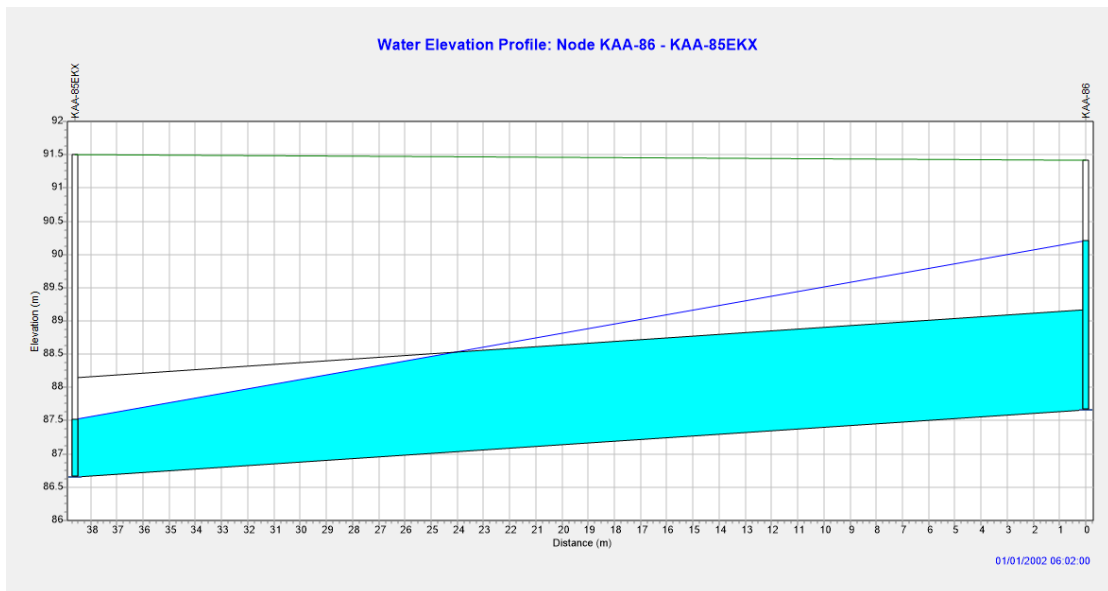
Εικόνα 6.1 Υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου για βροχόπτωση T=10 έτη και t=12 h.

Στην συνέχεια και συγκεκριμένα στις εικόνες 6.2 και 6.3 που ακολουθούν παρουσιάζεται το προφίλ των αγωγών (B-34/ΚΑΑ-85ΕΚΧ, ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) που καταλήγουν στην έξοδο του δικτύου κατά τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής. Οι αγωγοί, όπως φαίνεται και στις εικόνες, δεν έχουν πληρωθεί ($y/D < 1$) ωστόσο το ανάντη μέρος τους λειτουργεί υπό πίεση αφού η στάθμη του νερού έχει ξεπεράσει τη στέψη του αγωγού στα συγκεκριμένα φρεάτια. Επομένως, τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής τα φρεάτια B-34α και ΚΑΑ-86 είναι υπερφορτισμένα

ενώ το ίδιο συμβαίνει και με το ανάντη μέρος των αγωγών. Εδώ αξίζει να υπενθυμίσουμε πως σύμφωνα με το λογισμικό SWMM (Rossman 2017) ένα φρεάτιο θεωρείται υπερφορτισμένο όταν η στάθμη του νερού έχει ξεπεράσει το ύψος της στέψης του υψηλότερα συνδεδεμένου αγωγού στο συγκεκριμένο φρεάτιο ενώ ένας αγωγός θεωρείται υπερφορτισμένος όταν το ύψος του νερού σε ένα φρεάτιο υπερβεί το ύψος της στέψης του αγωγού στο συγκεκριμένο φρεάτιο.

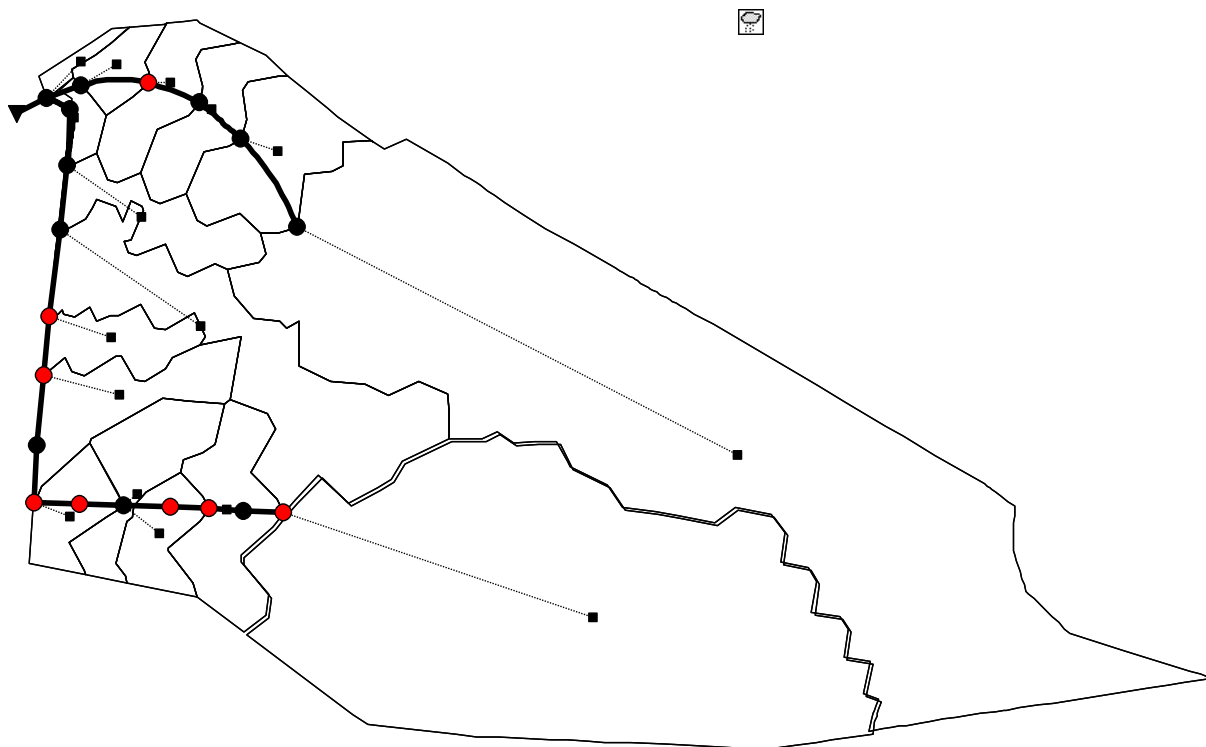


Εικόνα 6.2 Προφίλ αγωγού B-34a/KAA-85EKX τη χρονική στιγμή της αιχμής.



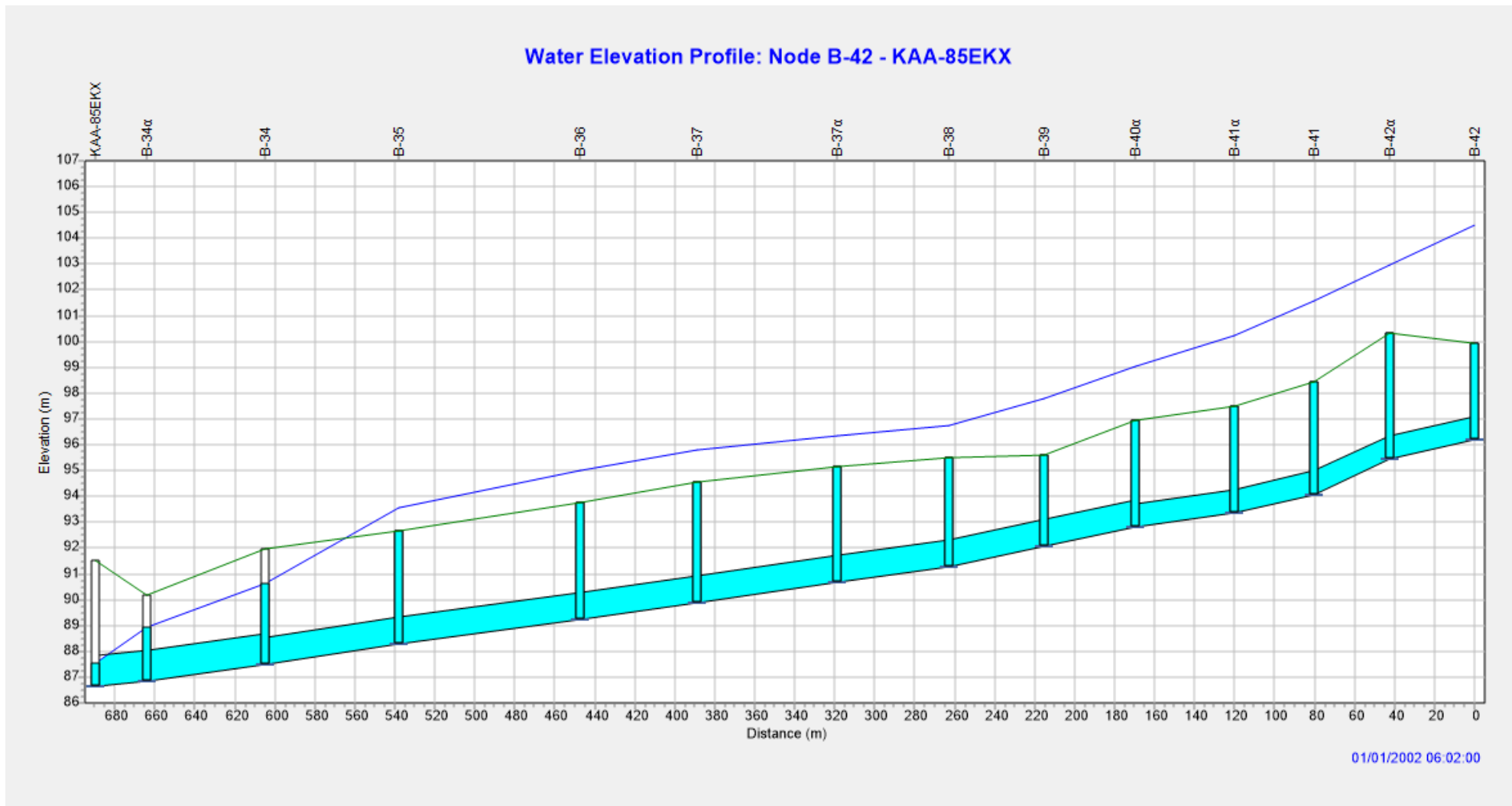
Εικόνα 6.3 Προφίλ αγωγού KAA-86/KAA-85EKX τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το δίκτυο δεν είναι ικανό να αποχετεύσει το σύνολο της απορροής με αποτέλεσμα να παρατηρούνται πλημμυρικά φαινόμενα. Τα φρεάτια τα οποία πλημμυρίζουν είναι τα εξής: B-42, B-41, B-41α, B-40α, B-39, B-38, B-37, B-36, ΚΑΑ-88 και ΚΑΑ-87. Στην Εικόνα 6.4 παρουσιάζονται τα πλημμυρισμένα φρεάτια του δικτύου τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του λογισμικού το φρεάτιο που παραμένει πλημμυρισμένο για την μεγαλύτερη χρονική διάρκεια είναι το φρεάτιο B-38.

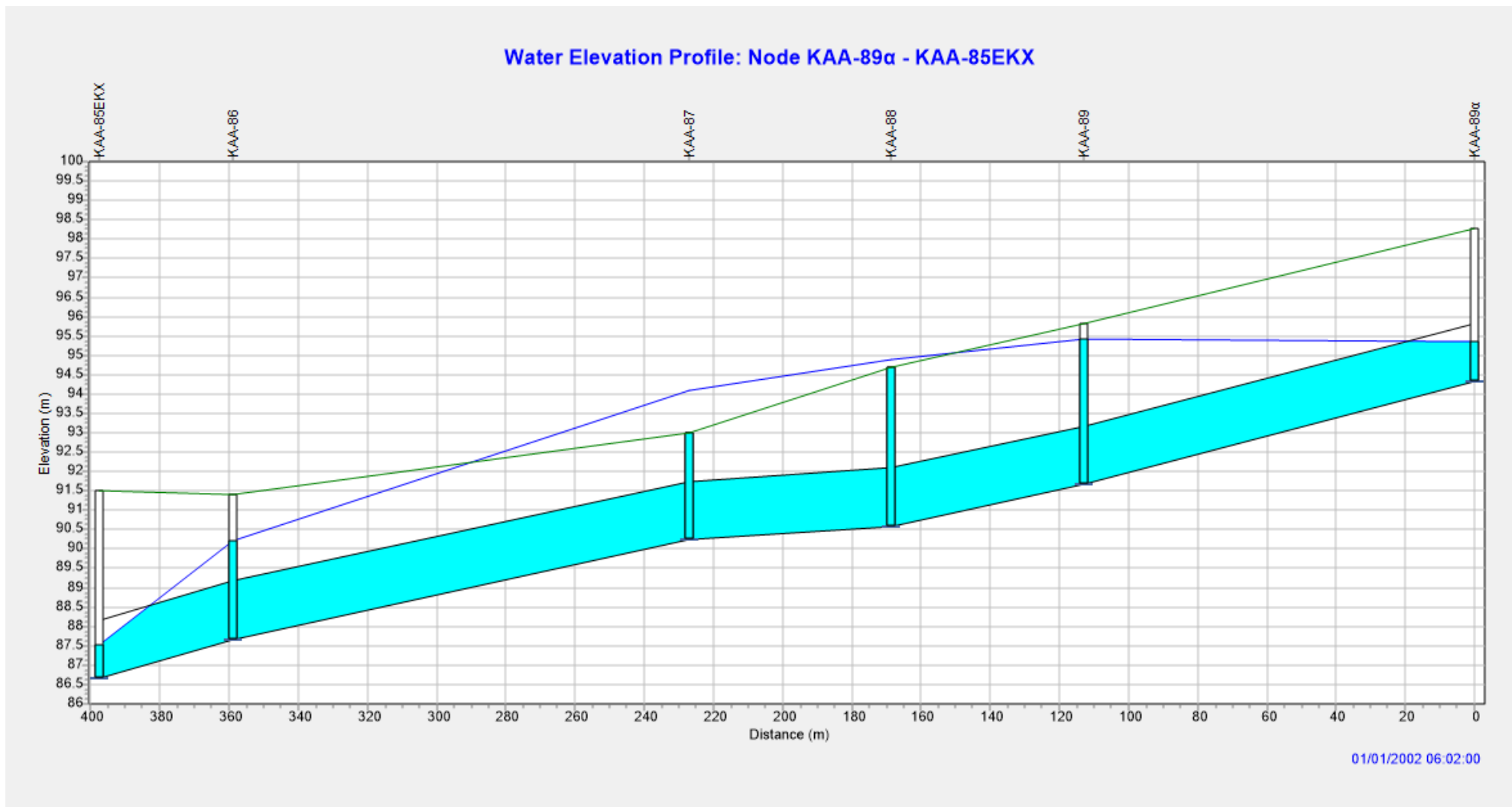


Εικόνα 6.4 Πλημμυρισμένα φρεάτια του δικτύου τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής. *όπως περιγράφεται η ονομασία των φρεατίων στην Εικόνα 4.11.

Στις Εικόνες 6.5 και 6.6 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα προφίλ των αγωγών του πάνω και κάτω μέρους του δικτύου. Όπως είναι φανερό, οι αγωγοί του κάτω μέρους (Εικόνα 6.5) δεν είναι ικανοί να αποχετεύσουν το σύνολο της απορροής με αποτέλεσμα οι περισσότεροι να έχουν πληρωθεί ($y/D=1$) ενώ όλοι λειτουργούν υπό πίεση. Παρόμοια κατάσταση επικρατεί και στους αγωγούς που συνδέουν τα φρεάτια ΚΑΑ-89α και ΚΑΑ-85ΕΚΧ με αποτέλεσμα τα φρεάτια ΚΑΑ-87 και ΚΑΑ-88 να πλημμυρίζουν (Εικόνα 6.6).

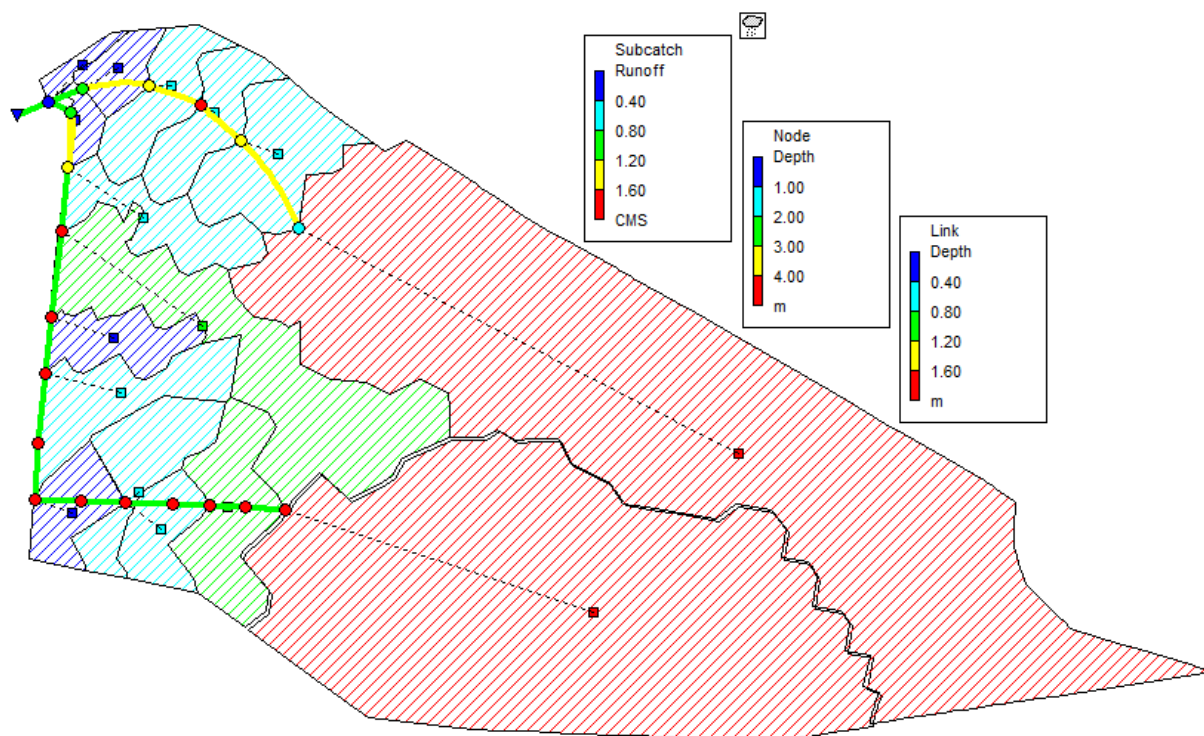


Εικόνα 6.5 Προφίλ αγωγών που συνδέουν τα φρεάτια B-42 και KAA-85EKX τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.



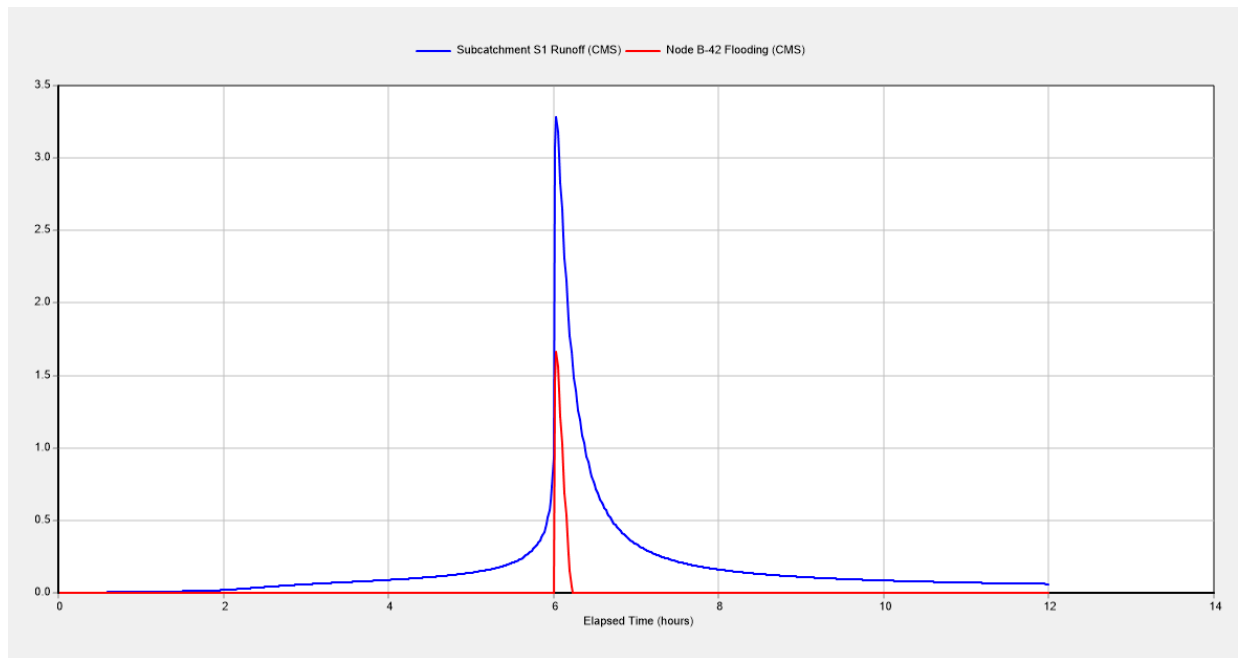
Εικόνα 6.6 Προφίλ αγωγών που συνδέουν τα φρεάτια KAA-89α και KAA-85EKX τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής της πλημμύρας.

Στην Εικόνα 6.7 που ακολουθεί παρουσιάζεται το βάθος νερού στους αγωγούς του δικτύου, το βάθος νερού στα φρεάτια του δικτύου καθώς και η απορροή από τις υπολεκάνες απορροής τη χρονική στιγμή 6:02:00 στην οποία εμφανίζεται η αιχμή του υδρογραφήματος στην έξοδο του δικτύου.



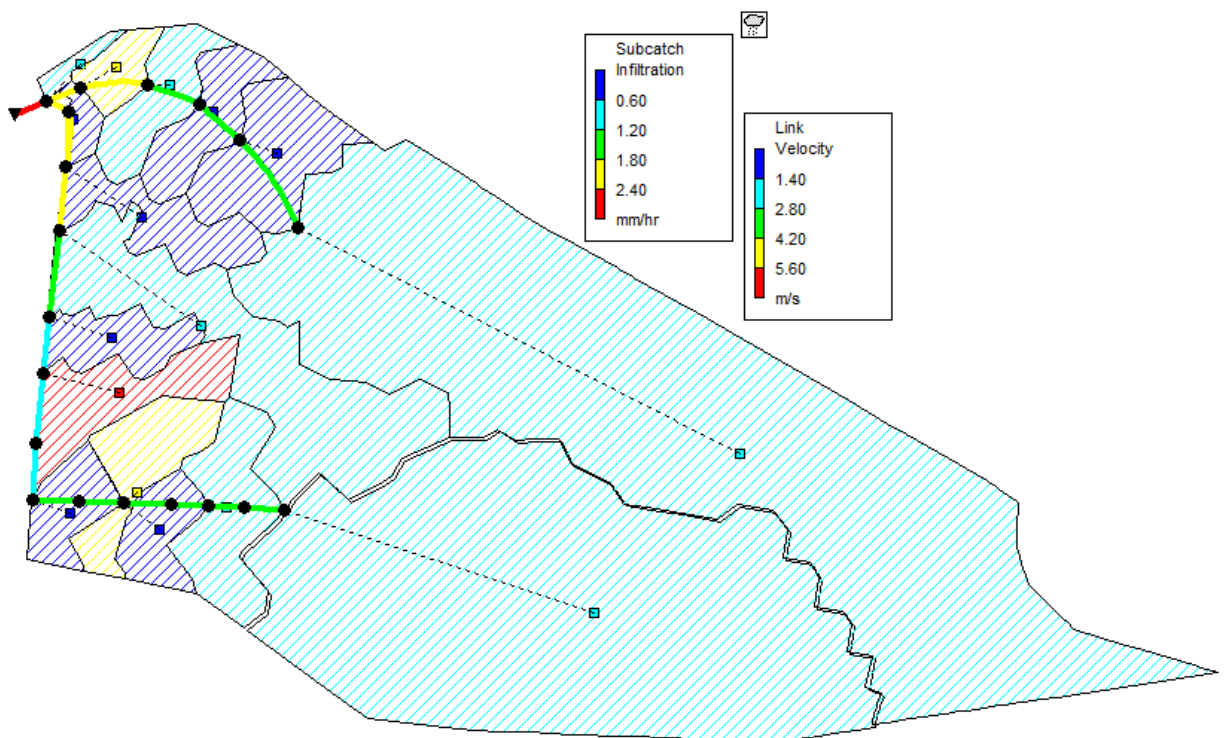
Εικόνα 6.7 Βάθος νερού στους αγωγούς, βάθος νερού στα φρεάτια και απορροή λεκανών απορροής τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.7, η λεκάνη απορροής 1 η οποία αποχετεύεται στο φρεάτιο B-42 έχει απορροή μεγαλύτερη από $3.20 \text{ m}^3/\text{s}$. Το φρεάτιο B-42 κατά τη συγκεκριμένη προσομοίωση παρουσίασε τον μέγιστο ρυθμό πλημμύρας από όλα τα άλλα φρεάτια του δικτύου. Η επιφανειακή απορροή από την λεκάνη 1 καθώς και το πλημμυρογράφημα του φρεατίου B-42 παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.8 που ακολουθεί.



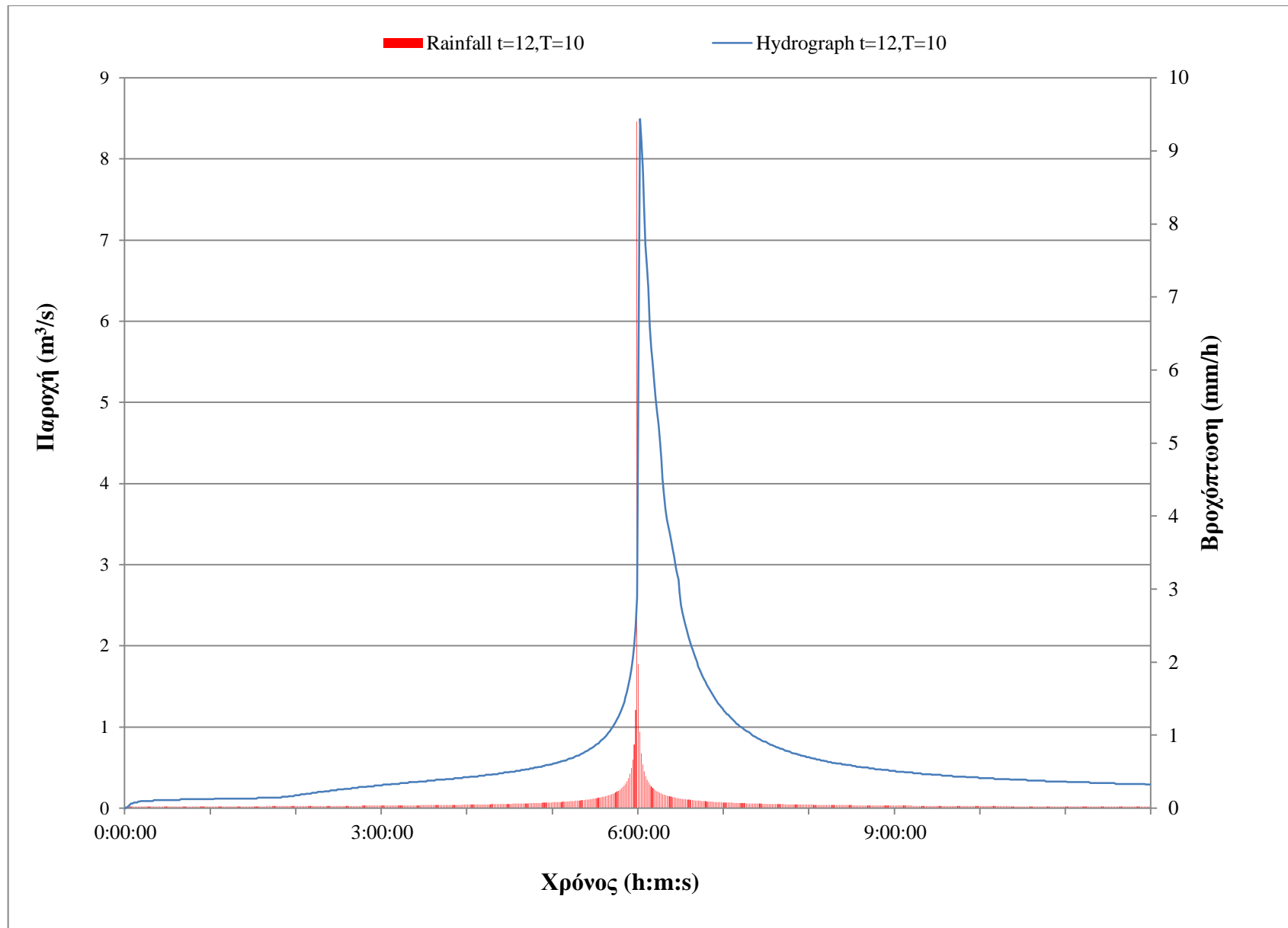
Εικόνα 6.8 Απορροή λεκάνης 1 και πλημμυρογράφημα φρεατίου B-42.

Τέλος, στην Εικόνα 6.9 παρουσιάζεται η διήθηση ανά λεκάνη απορροής και η ταχύτητα της ροής στους αγωγούς του δικτύου κατά την εμφάνιση της αιχμής στην έξοδο του δικτύου.



Εικόνα 6.9 Διήθηση ανά λεκάνη απορροής και ταχύτητα νερού στους αγωγούς του δικτύου τη χρονική στιγμή της αιχμής.

Τα αποτελέσματα της Εικόνας 6.9 είναι τα αναμενόμενα, καθώς οι λεκάνες οι οποίες έχουν μικρότερα ποσοστά αδιαπέρατης επιφάνειας απορροφούν νερό με μεγαλύτερο ρυθμό-ένταση από τις υπόλοιπες λεκάνες. Έτσι, η λεκάνη 6, η οποία έχει το μικρότερο ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας στην περιοχή μελέτης, έχει τον μέγιστο ρυθμό διήθησης. Στην Εικόνα 6.10 παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα η βροχόπτωση σχεδιασμού για διάρκεια βροχόπτωσης $t=12$ h και περιόδου επαναφοράς $T=10$ έτη με το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου.



Εικόνα 6.10 Υετόγραμμα σχεδιασμού t=12 h, T=10 έτη και υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου (φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ).

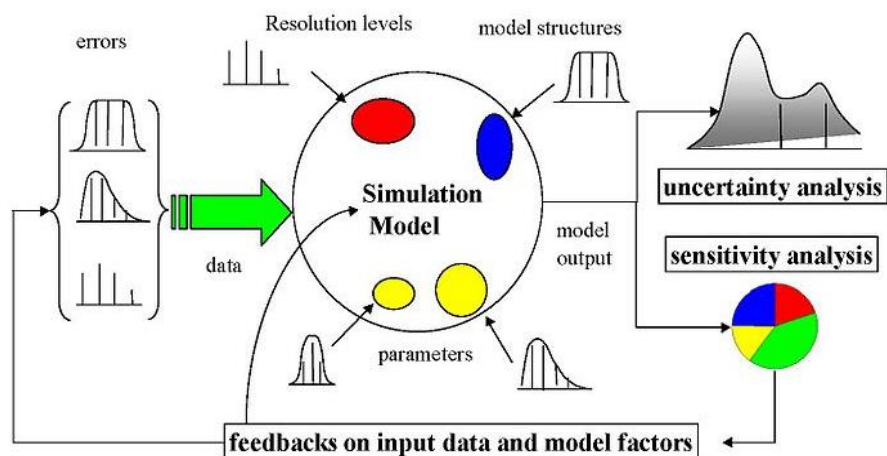
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SWMM

7.1 Εισαγωγή

Ανάλυση ευαισθησίας είναι η διαδικασία κατά την οποία η αβεβαιότητα στο τελικό αποτέλεσμα ενός μοντέλου μπορεί να επιμεριστεί στις διάφορες πηγές αβεβαιότητας των δεδομένων εισόδου σε αυτό (Saltelli 2002, 2008). Σύμφωνα με τον Παπαθανασίου (2009), αυτή η ανάλυση αποτελεί αναπόσπαστο και βασικό τμήμα της προσομοίωσης αφού με βάση την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει και η τελική απόδοση του μοντέλου ενώ παράλληλα η επαλήθευση ενός μοντέλου πραγματοποιείται και ολοκληρώνεται με την ανάλυση ευαισθησίας όλων των παραμέτρων του μοντέλου αυτού. Επιπλέον, το αποτέλεσμα ενός μοντέλου (Output) εξαρτάται από τα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο ως παράμετροι (Input) τονίζουν οι Tavousi et al. (2015).

Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, τα υδρολογικά μονέλα βροχόπτωσης-απορροής χρησιμοποιούν ένα μεγάλο εύρος μαθηματικών πράξεων για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων. Έτσι, ένα μοντέλο δέχεται μεταβλητές εισόδου που καθορίζονται από τον χρήστη και μέσω μαθηματικών πράξεων παράγουν τις μεταβλητές εξόδου που αποτελούν και τα αποτελέσματα (Μπαριάμης 2013). Για τον παραπάνω λόγο της ύπαρξης μεγάλου πλήθους αριθμητικών πράξεων, η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί σημαντικό κομμάτι της ανάπτυξης και διασφάλισης της ποιότητας των μοντέλων με αποτέλεσμα υπηρεσίες όπως είναι η ΕΡΑ των Η.Π.Α να οργανώνουν τμήματα τα οποία είναι αφοσιωμένα στην ανάλυση της ευαισθησίας των

λογισμικών τους (Μπαριάμης 2013). Στην Εικόνα 7.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας.



Εικόνα 7.1 Γενική μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησίας.

Πηγή: Saltelli (1999)

Ο Pannell (1997) αναφέρει πως η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να έχει τους παρακάτω στόχους:

- I. Δοκιμές ευρωστίας των αποτελεσμάτων του μοντέλου.
- II. Μελέτη σχέσης μεταβλητών εισόδου-εξόδου σε ένα μοντέλο.
- III. Μείωση της αβεβαιότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων μέσω του προσδιορισμού των μεταβλητών αυτών που προκαλούν σημαντική αβεβαιότητα.
- IV. Εύρεση σφαλμάτων στην εφαρμογή ενός μοντέλου.
- V. Αφαίρεση από το μοντέλο των παραμέτρων εκείνων που δεν έχουν καμία επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα.
- VI. Εύρεση της περιοχής στο πεδίο ορισμού των παραγόντων εισόδου, για την οποία το αποτέλεσμα πληροί κάποιο συγκεκριμένο κριτήριο (Monte Carlo).

Εκτός από τους παραπάνω στόχους οι οποίοι ισχύουν σε όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης ευαισθησίας, στις περιπτώσεις υδρολογικών μοντέλων ισχύουν ορισμένοι επιπλέον στόχοι. Σύμφωνα με τον Jacobson (2011), η ανάλυση ευαισθησίας δείχνει τον τρόπο με τον οποίο οι παράμετροι οι οποίες είναι προς βαθμονόμηση σε ένα λογισμικό επηρεάζουν την συμπεριφορά του μοντέλου γενικότερα. Επίσης, τα δεδομένα εισαγωγής σε ένα υδρολογικό μοντέλο μπορεί να επηρεάζονται από πολλές πηγές αβεβαιότητας όπως είναι τα σφάλματα μετρήσεων ή αβεβαιότητες που

προκύπτουν από μη επαρκή δεδομένα (Crosetto et al. 2000). Τέλος, οι Xiaomeng et al. (2015) αναφέρουν πως η ανάλυση ευαισθησίας παίζει καθοριστικό ρόλο στη βαθμονόμηση, οπτικοποίηση και ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας του υδρολογικού μοντέλου. Η επιλογή της μεθόδου ανάλυσης ευαισθησίας τυπικά καθορίζεται από έναν αριθμό περιορισμών που καθορίζονται από το πρόβλημα. Μερικοί από τους πιο συχνούς περιορισμούς είναι (Μπαριάμης 2013):

- a. Υπολογιστικό κόστος καθότι σχεδόν πάντα η ανάλυση ευαισθησίας εκτελείται με πολλαπλές επαναλήψεις του μοντέλου.
- b. Μη γραμμικά προβλήματα να προσεγγίζονται με γραμμικό τρόπο.
- c. Συσχετιζόμενα δεδομένα εισόδου, όπου συχνά θεωρούμε την ανεξαρτησία μεταξύ των μεταβλητών εισόδου, ενώ αυτό μπορεί στην πραγματικότητα να μην συμβαίνει.
- d. Αλληλεπιδράσεις του μοντέλου.

7.2 Βασική μεθοδολογία

Ανάλογα με τους παραπάνω βασικούς περιορισμούς που αναφέραμε υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος μεθόδων ανάλυσης ευαισθησίας. Οι μέθοδοι αυτοί διακρίνονται από το είδος του μέτρου ευαισθησίας στο οποίο βασίζονται και ακολουθούν συνήθως την παρακάτω διάρθρωση:

- Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας σε κάθε μεταβλητή εισόδου (O'Hagan et al. 2006).
- Προσδιορισμός της μεταβλητής εξόδου που πρόκειται να αναλυθεί.
- Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο, υπολογίζοντας τα μέτρα ευαισθησίας σύμφωνα με το ενδιαφέρον της ανάλυσης.
- Λειτουργία του μοντέλου αρκετές φορές χρησιμοποιώντας κάποια πειράματα σχεδιασμού που υπαγορεύονται από τη μέθοδο της επιλογής και την αβεβαιότητα των δεδομένων εισόδου (Sacks et al. 1989).

Μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας “Once at a time”

Η μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας “Once at a time” αποτελεί μία από τις απλούστερες μεθόδους ανάλυσης ευαισθησίας. Η γενική εφαρμογή της μεθόδου μελετά την

επίδραση που θα έχει στο τελικό αποτέλεσμα η μεταβολή μίας μόνο παραμέτρου εισόδου. Στη συνέχεια της διαδικασίας, η παράμετρος επανέρχεται στην αρχική της τιμή και εφαρμόζεται μεταβολή σε άλλη παράμετρο για την ανίχνευση της επίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα (Campbell et al. 2008). Η μέθοδος περιορίζεται στο γεγονός πως είναι αδύνατη η μεταβολή δύο η περισσότερων παραμέτρων με αποτέλεσμα να μη δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη ανίχνευσης και μελέτης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των δεδομένων εισόδου (Czitrom 1999). Η μέθοδος “Once at a time” είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη για πρακτικούς λόγους ενώ σε περίπτωση αποτυχίας της προσομοίωσης μέσω της μεθόδου, ο χρήστης αυτομάτως γνωρίζει την παράμετρο στην οποία οφείλεται το αποτέλεσμα αυτό (Saltelli and Annoni 2010). Η μέθοδος “Once at a time” ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων που είναι βιβλιογραφικά γνωστές ως local (Haan 2002).

7.3 Αποτελέσματα προηγούμενων μελετών ανάλυσης ευαισθησίας του λογισμικού SWMM

Όπως αναφέρθηκε στην βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.8, υπάρχει μεγάλος αριθμός μελετών με στόχο την ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν εν συντομία τα αποτελέσματα που προέκυψαν από ένα σύνολο αναλύσεων που μελετήθηκαν για την εκπόνησης της παρούσας ανάλυσης ευαισθησίας.

Οι **Li et al. (2014)** απέδειξαν πως η έκταση της λεκάνης απορροής καθώς και ο συντελεστής Manning για ροή σε διαπερατές και αδιαπερατές επιφάνειες είναι θετικά συσχετιζόμενα με την συνολική ποσότητα απορροής του δικτύου ενώ αντίθετα ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning για τους αγωγούς, το πλάτος της λεκάνης απορροής καθώς και η κλίση της λεκάνης είναι αρνητικά συσχετιζόμενα με την συνολική ποσότητα της απορροής καθώς και με την αιχμή του υδρογραφήματος στην έξοδο του δικτύου.

Επίσης, οι **Li et al. (2016)** σε μελέτη της ευαισθησίας του λογισμικού SWMM αναφέρουν πως ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning των αγωγών καθώς και το βάθος επιφανειακής αποθήκευσης των αδιαπερατών επιφανειών αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα του λογισμικού SWMM.

Οι **Barco et al. (2008)** κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το ποσοστό αδιαπερατότητας της περιοχής μελέτης καθώς και η επιφανειακή αποθήκευση των αδιαπέρατων εκτάσεων αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την αιχμή του υδρογραφήματος και την συνολική ποσότητα της απορροής.

Οι **Beling et al. (2011)** αναφέρουν πως το ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας, το πλάτος των λεκάνων απορροής καθώς και ο συντελεστής Manning για τους αγωγούς αποτέλεσαν τους σημαντικότερους και πιο ευαίσθητους παράγοντες στην βαθμονόμηση του μοντέλου.

Οι **Rabori et al. (2017)** αναφέρουν πως το βάθος επιφανειακής αποθήκευσης των αδιαπέρατων εκτάσεων, ο συντελεστής κατά Manning για ροή σε αδιαπέρατες εκτάσεις, το πλάτος της επίγειας ροής, το ποσοστό αδιαπερατότητας, η κλίση, ο συντελεστής Manning των αγωγών και το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας χωρίς επιφανειακή κατακράτηση αποτελούν τις πιο σημαντικές παραμέτρους του μοντέλου ενώ αντίθετα, ο αριθμός καμπύλης CN, το βάθος επιφανειακής κατακράτησης για διαπερατές επιφάνειες και ο συντελεστής κατά Manning για ροή σε διαπερατές εκτάσεις αποτελούν τους λιγότερο σημαντικούς παράγοντες επηρεασμού της συνολικής ποσότητας απορροής καθώς και της αιχμής του υδρογραφήματος της απορροής.

Επίσης, οι **Akdogan and Guven (2016)** συμπεραίνουν από μελέτη τους πως το ποσοστό αδιαπερατότητας της περιοχής μελέτης, η κλίση καθώς και η έκταση της λεκάνης απορροής είναι θετικά συσχετιζόμενες μεταβλητές εισόδου με την ποσότητα της απορροής ενώ επίσης αναφέρουν πως η κλίση επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την αιχμή της πλημμύρας από ότι την ποσότητα της απορροής. Τέλος, αναφέρουν πως το μήκος των αγωγών και ο συντελεστής κατά Manning για τους αγωγούς έχουν αντίστροφη σχέση με την συνολική ποσότητα εισροής, δηλαδή, αύξηση στις τιμές των μεταβλητών αυτών θα επιφέρει μείωση στην τιμή της συνολικής ποσότητας εισροής στο δίκτυο. Όσον αφορά την ανάλυση ευαισθησίας, κατατάσσουν την βροχόπτωση ως την πιο ευαίσθητη παράμετρο του λογισμικού ενώ ακολουθεί η έκταση της λεκάνης απορροής.

Τέλος, οι **Ahmadian et al. (2013)**, σε μελέτη ευαισθησίας του μοντέλου SWMM αναφέρουν πως ο συντελεστής Manning για ροή σε αδιαπέρατες επιφάνειες, το πλάτος, η κλίση καθώς και το ποσοστό της αδιαπέρατης περιοχής αποτελούν τις πιο ευαίσθητες παραμέτρους στην μεταβολή της αιχμής του υδρογραφήματος. Αντίστοιχα οι **Tavousi et al. (2015)** αποδεικνύουν μέσα από μελέτη τους πως ο

συντελεστής Manning για ροή σε αδιαπέρατη επιφάνεια, η κλίση και το πλάτος της λεκάνης απορροής αποτελούν τους πιο ευαίσθητους παράγοντες του μοντέλου SWMM, ενώ αντίθετα το ποσοστό της αδιαπέρατης περιοχής και η επιφανειακή αποθήκευση διαπερατών και μη διαπερατών εκτάσεων αποτελούν τις λιγότερο ευαίσθητες μεταβλητές του μοντέλου.

Εκτός από τις παραπάνω μελέτες ανάλυσης ευαισθησίας των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν συνοπτικά, το λογισμικό SWMM παραθέτει ενδεικτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αύξηση των υδρολογικών παραμέτρων εισόδου του μοντέλου. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1, ο οποίος είναι διαθέσιμος στο Reference Manual-Hydrology (Rossman 2016) του λογισμικού που διατίθεται μαζί με το λογισμικό.

Πίνακας 7.1 Στοιχεία ανάλυσης ευαισθησίας λογισμικού SWMM

Πηγή: Rossman (2016)

Παράμετρος	Επιρροή στο υδρογράφημα	Επιρροή αύξησης μεταβλητής στην ποσότητα της απορροής	Επιρροή αύξησης μεταβλητής στην αιχμή της απορροής
Έκταση	Σημαντική	Αύξηση	Αύξηση
Αδιαπερατότητα	Σημαντική	Αύξηση	Αύξηση
Πλάτος	Επηρεάζει το σχήμα	Μείωση	Αύξηση
Κλίση	Επηρεάζει το σχήμα	Μείωση	Αύξηση
Συντελεστής τραχύτητας Manning	Επηρεάζει το σχήμα	Αύξηση	Μείωση
Επιφανειακή αποθήκευση	Μέτρια	Μείωση	Μείωση

7.4 Μεθοδολογικό πλαίσιο ανάλυσης ευαισθησίας στην παρούσα εργασία

7.4.1 Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM έγινε για τις παρακάτω μεταβλητές εισόδου του λογισμικού:

- Συντελεστής Manning για ροή σε αδιαπέρατα εδάφη (N-Imperv)

- Συντελεστής Manning για ροή σε διαπερατά εδάφη (N-Perv)
- Συντελεστής τραχύτητας αγωγών κατά Manning (n)
- Πλάτος λεκανών απορροής (Width)
- Αριθμός καμπύλης (CN)
- Ποσοστό αδιαπερατότητας (%Imperviousness)

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η “Once at a time” ενώ ως βροχόπτωση σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε αυτή με περίοδο επαναφοράς $T=10$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t=12$ ώρες.

7.4.2 Μεταβολές παραμέτρων εισόδου

Σύμφωνα με τους Dubus et al. (2003) οι ποσοστιαίες μεταβολές για τις παραμέτρους βρίσκονται σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$Input\ Variation\ (\%) = \frac{I-I_{BC}}{I_{BC}} 100 \quad (7.1)$$

$$Output\ Variation\ (\%) = \frac{O-O_{BC}}{O_{BC}} 100 \quad (7.2)$$

όπου: I η τελική τιμή της παραμέτρου εισόδου, I_{BC} η αρχική τιμή της παραμέτρου εισόδου, O η τελική τιμή της μεταβλητής εξόδου και O_{BC} η αρχική τιμή της παραμέτρου εξόδου του μοντέλου.

Οι μεταβολές που εφαρμόστηκαν στις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου SWMM επιλέχθηκαν με τρόπο τέτοιο ώστε οι τελικές τιμές των παραμέτρων μετά την επιβολή της μεταβολής να βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια που ορίζονται από βιβλιογραφικές πηγές για την κάθε μεταβλητή (Tsihrintzis and Hamid 1998, Tavousi et al. 2015, Rabori et al. 2017, ASCE 1982).

Ακόμα, σχετικά με το μέγεθος των μεταβολών που εφαρμόστηκαν στις μεταβλητές εισόδου του λογισμικού προτείνονται και χρησιμοποιούνται από την διαθέσιμη βιβλιογραφία ένα πλήθος πιθανών μεταβολών ανάλογα με την μεταβλητή που βρίσκεται υπό διερεύνηση. Συνοπτικά, οι Rabori et al. (2017) και Tavousi et al. (2015) εφαρμόζουν αντίστοιχα μεταβολές $\pm 15\%$ και $\pm 30\%$. Επίσης, οι Akdogan and Guven (2016) επιλέγουν να μεταβάλλουν τις παραμέτρους εισόδου κατά $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$, $\pm 40\%$ και $\pm 50\%$ ενώ οι Cunderlik and Simonovic (2004) για την ανάλυση

ευαισθησίας του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS εφάρμοσαν μεταβολές κατά $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$.

Στην εργασία αυτή οι παράμετροι εισόδου του λογισμικού SWMM υπέστησαν τις εξής μεταβολές για την ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού: $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$, $\pm 40\%$.

Επίσης, οι αρχικές τιμές των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου επιλέχθηκαν ώστε μετά την εφαρμογή των μεταβολών οι τιμές που προκύπτουν να κυμαίνονται μέσα στα αποδεκτά όρια για την κάθε παράμετρο. Οι αρχικές τιμές που επιλέχθηκαν, τα αποδεκτά όρια για την κάθε μεταβλητή καθώς και οι βιβλιογραφική πηγή από την οποία αντλήθηκαν τα συγκεκριμένα στοιχεία παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2 που παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 7.2 Αρχικές τιμές και αποδεκτά όρια παραμέτρων εισόδου λογισμικού SWMM στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Παράμετρος	Αρχικές τιμές	Επιτρεπτό εύρος	Αναφορά-Πηγή
%Αδιαπερατότητα	70	0-100	-
Πλάτος	υπολογισμένα	0-(...)	-
Συντελεστής τραχύτητας αγωγών	0.016	0.011-0.026	ASCE (1982)
N-Impervious	0.015	0.011-0.024	Rossman (2015)
N-Pervious	0.24	0.05-0.80	Rossman (2015)
Αριθμός καμπύλης (CN)	70	39-98	Τσιχριντζής (1999), Wanielista (1978), SCS (1972)

7.4.3 Δείκτες αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας

Η επιλογή των δεικτών πάνω στους οποίους εξετάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του λογισμικού SWMM είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την ανάλυση ευαισθησίας κάθε μοντέλου. Στις βιβλιογραφικές πηγές ανάλυσης ευαισθησίας υδρολογικών μοντέλων όπως το SWMM επικρατέστεροι δείκτες είναι η παροχή αιχμής στην έξοδο του δικτύου καθώς και η συνολική ποσότητα απορροής που παράγεται από τις λεκάνες απορροής (Li et al. 2014, Akdogan and Guven 2016). Στην μελέτη αυτή για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και τη συσχέτιση αυτών με τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου επιλέχθηκε ένα πλήθος

δεικτών για την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου. Συγκεκριμένα θα μελετηθούν τα εξής αποτελέσματα των προσομοιώσεων:

Για τις **υδρολογικές παραμέτρους** εισόδου του μοντέλου:

- Παροχή αιχμής στον αγωγό (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ)
- Παροχή αιχμής στον αγωγό (Β-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ)
- Συνολική ποσότητα απορροής από τις λεκάνες απορροής (Total Runoff Volume)
- Συνολική ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ (Total Inflow Volume)
- Συνολική ποσότητα πλημμύρας στο δίκτυο (Total Flooding Loss)

Ενώ για τις **υδραυλικές παραμέτρους** του μοντέλου οι δείκτες θα είναι οι εξής:

- Παροχή αιχμής στον αγωγό (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ)
- Παροχή αιχμής στον αγωγό (Β-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ)
- Συνολική ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ (Total Inflow Volume)
- Συνολική ποσότητα πλημμύρας στο δίκτυο (Total Flooding Loss)

Οι συγκεκριμένοι αγωγοί επιλέχθηκαν καθώς αποτελούν τους τερματικούς αγωγούς του δικτύου, δηλαδή είναι οι αγωγοί που καταλήγουν στην έξοδο του δικτύου (όπως περιγράφεται η θέση των φρεατίων και των αγωγών στην Εικόνα 4.11).

7.5 Αποτελέσματα παραμέτρων

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που είχαν οι μεταβολές στη κάθε παράμετρο στους δείκτες που μελετήθηκαν στην παρούσα ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων ενώ αναλυτικά οι τιμές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις παρατίθενται στο Παράρτημα Ε.

7.5.1 % Αδιαπερατότητα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται σε διαγράμματα τα αποτελέσματα που προέκυψαν στους δείκτες προς μελέτη από τις διάφορες μεταβολές που εφαρμόστηκαν στο ποσοστό αδιαπερατότητας των λεκανών απορροής. Συγκεκριμένα

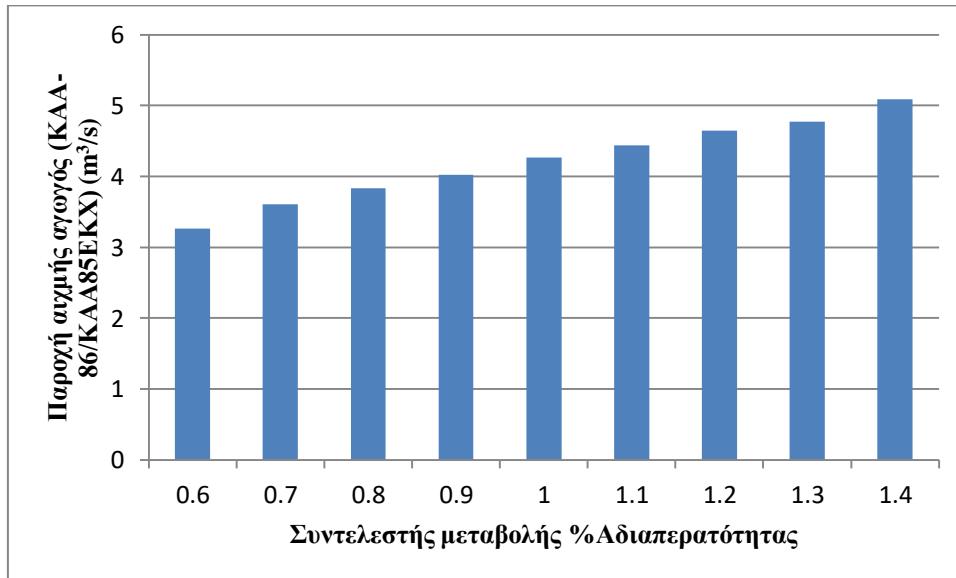
στον Πίνακα 7.3 φαίνονται οι ποσοστιαίες μεταβολές των δεικτών ως αποτέλεσμα της ποσοστιαίας μεταβολής της παραμέτρου της % αδιαπερατότητας.

Πίνακας 7.3 Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα μεταβολής της %αδιαπερατότητας

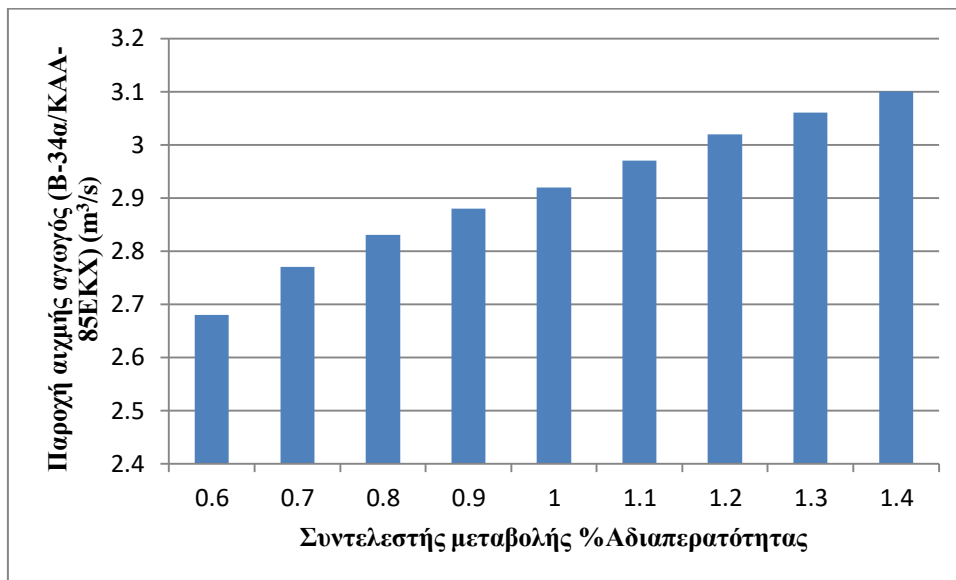
	Μεταβολή %Αδιαπερατότητας								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής %Αδιαπερατότητας								
	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ-86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	-23.65	-15.46	-10.30	-5.85	0.00	3.98	8.90	11.71	19.20
Peak στον αγωγό εξόδου (B-34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	-8.22	-5.14	-3.08	-1.37	0.00	1.71	3.42	4.79	6.16
Ποσότητα επιφανειακής απορροής	-32.03	-23.85	-15.77	-7.89	0.00	7.60	15.11	22.42	29.54
Ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ	-25.42	-18.64	-12.29	-5.93	0.00	5.93	11.86	17.37	22.88
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα	-63.80	-49.71	-34.27	-17.66	0.00	18.44	37.84	57.63	77.51

Συνοπτικά παρατηρούμε ότι η παράμετρος της αδιαπερατότητας έχει θετική σχέση με τους δείκτες που μελετάμε δηλαδή η αύξηση του ποσοστού της αδιαπερατότητας θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των δεικτών. Η μεγαλύτερη μεταβολή συναντάται στην συνολική ποσότητα πλημμύρας όπου για αύξηση της αδιαπερατότητας κατά 40% παρατηρείται αύξηση στο ποσό της πλημμύρας κατά 77.51%. Επίσης ιδιαίτερα σημαντικές κρίνονται και οι μεταβολές στην παροχή αιχμής των αγωγών, στη συνολική ποσότητα απορροής καθώς και στη συνολική ποσότητα εισροής στον κόμβο ΚΑΑ-85ΕΚΧ όπου κυμαίνονται από 6 έως και 32%. Στα σχήματα που παρουσιάζονται παρακάτω διακρίνονται οι τιμές των δεικτών ως προς την παράμετρο της αδιαπερατότητας. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με του Rossman (2016) που αναφέρει πως η αύξηση της αδιαπερατότητας έχει ως συνέπεια της αύξηση της ποσότητας απορροής καθώς και της αιχμής του υδρογραφήματος. Αυτό, όπως

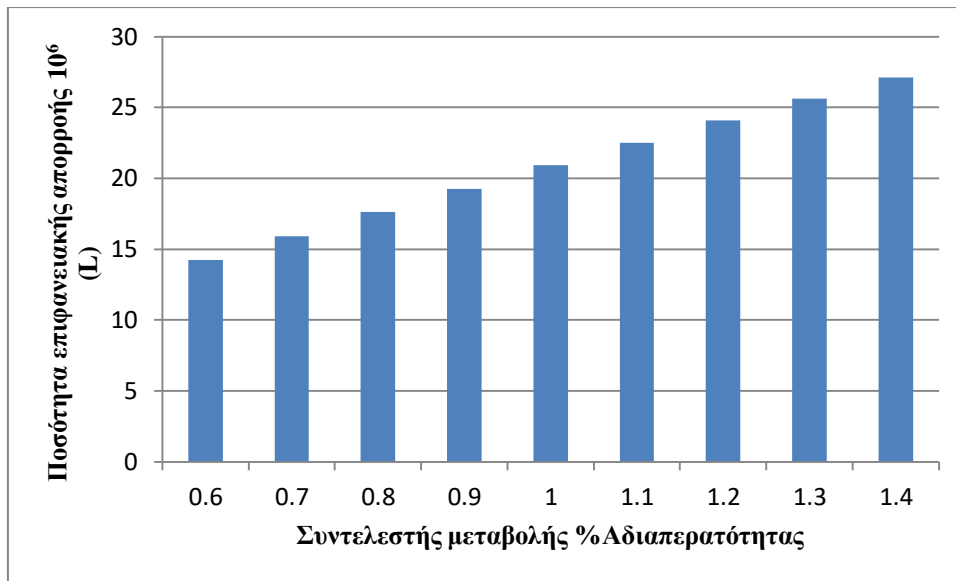
αναφέρει συμβαίνει καθώς η αύξηση του ποσοστού της αδιαπερατότητας έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της διήθησης στα κατώτερα εδαφικά στρώματα με αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής επιφανειακής απορροής.



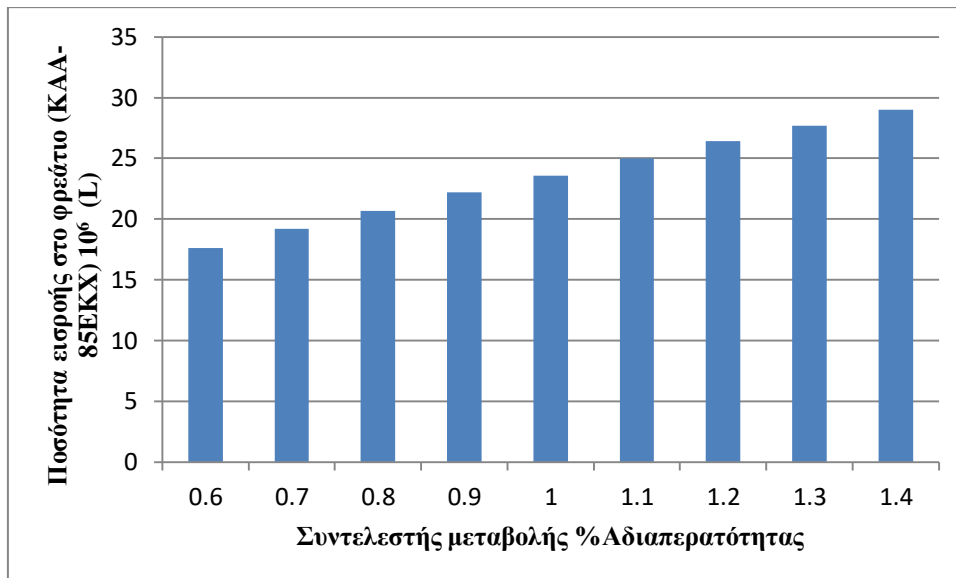
Εικόνα 7.2 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς την αδιαπερατότητα.



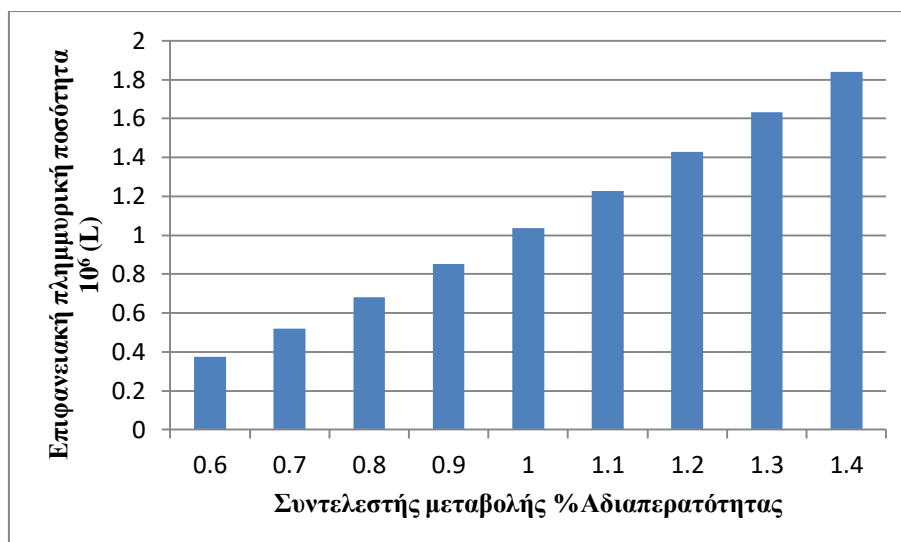
Εικόνα 7.3 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (B-34a/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς την αδιαπερατότητα.



Εικόνα 7.4 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας απορροής ως προς την αδιαπερατότητα.



Εικόνα 7.5 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς την αδιαπερατότητα.



Εικόνα 7.6 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς την αδιαπερατότητα.

7.5.2 Πλάτος

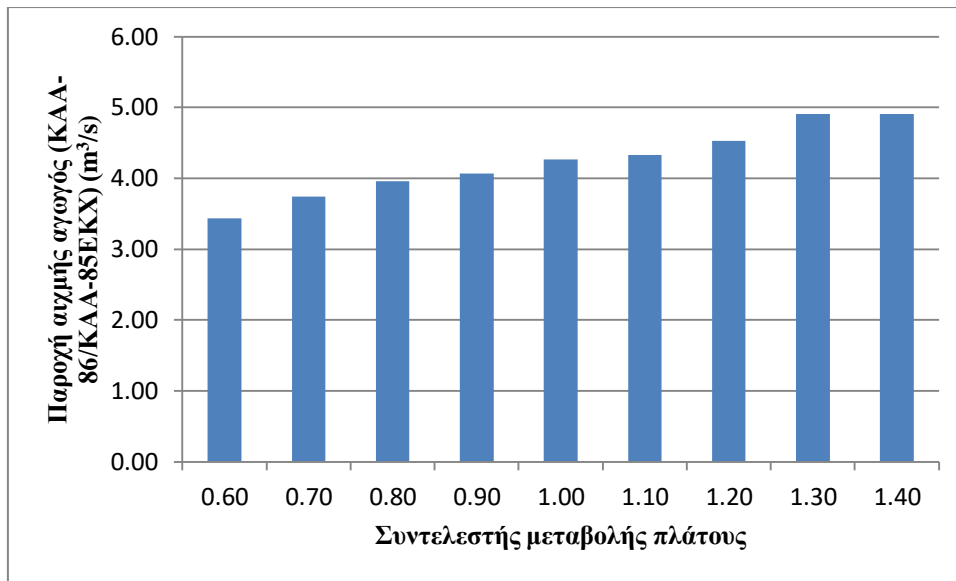
Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές των δεικτών ως αποτέλεσμα της μεταβολής του πλάτους των λεκανών απορροής.

Πίνακας 7.4 Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα μεταβολής του πλάτους.

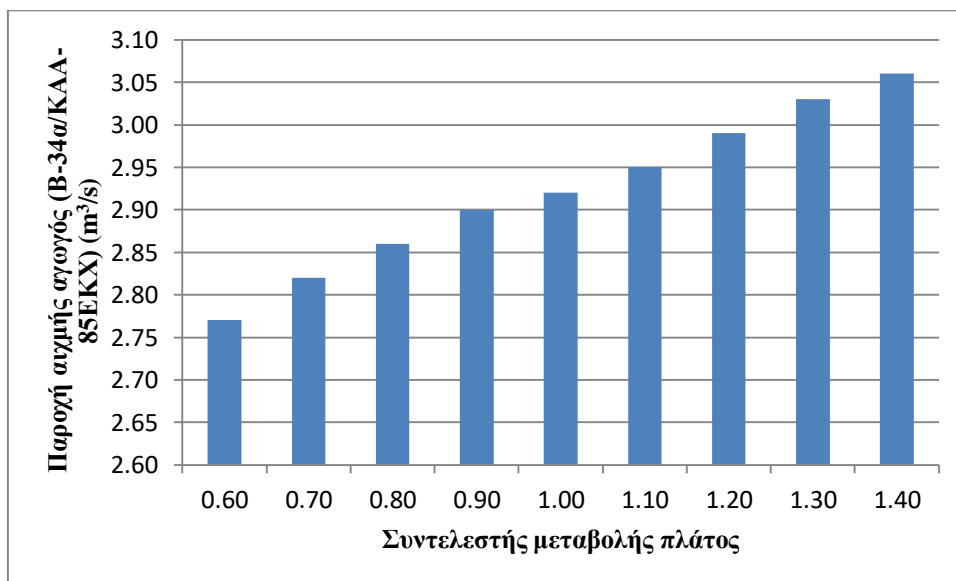
	Μεταβολή πλάτους								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής πλάτους								
	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ-86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	-19.44	-12.41	-7.26	-4.68	0.00	1.41	6.09	14.99	14.99
Peak στον αγωγό εξόδου (Β-34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	-5.14	-3.42	-2.05	-0.68	0.00	1.03	2.40	3.77	4.79
Ποσότητα επιφανειακής απορροής	-1.67	-1.15	-0.67	-0.33	0.00	0.24	0.43	0.62	0.76
Ποσότητα εισροής στο φρέατο ΚΑΑ-85ΕΚΧ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα	-28.47	-19.69	-12.16	-5.69	0.00	5.02	9.46	13.51	17.28

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 7.4 η παράμετρος του πλάτους των λεκανών απορροής είναι ανάλογη της παροχής αιχμής των αγωγών, της συνολικής ποσότητας παραγόμενης απορροής καθώς και της συνολικής ποσότητας πλημμύρας. Ιδιαίτερα ευαίσθητο το μοντέλο φαίνεται να είναι στον υπολογισμό της συνολικής ποσότητας πλημμύρας αφού για μείωση του αρχικού πλάτους κατά 40% παρατηρείται μείωση της πλημμυρικής ποσότητας κατά 28.47% ενώ σημαντική είναι και η μεταβολή της παροχής αιχμής στον αγωγό ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ όπου για μείωση του πλάτους κατά 40% επιφέρεται μείωση κατά 19.44%. Τέλος, μηδενική επίδραση παρατηρείται στην συνολική ποσότητα εισροής στην έξοδο του συστήματος (ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ενώ μικρή είναι η επιρροή στην συνολική ποσότητα απορροής που παράγεται από τις λεκάνες απορροής. Ενδεικτικά αύξηση του πλάτους κατά 40% έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απορροής κατά 0.76%. Σε γενικές γραμμές το πλάτος δεν επηρεάζει σημαντικά την ποσότητα της απορροής ωστόσο όπως αναφέρει και ο Rossman (2016) μείωση του πλάτους έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου διήθησης του νερού στις διαπερατές επιφάνειες με αποτέλεσμα την μείωση της απορροής κάτι το οποίο είναι φανερό και στα αποτελέσματα.

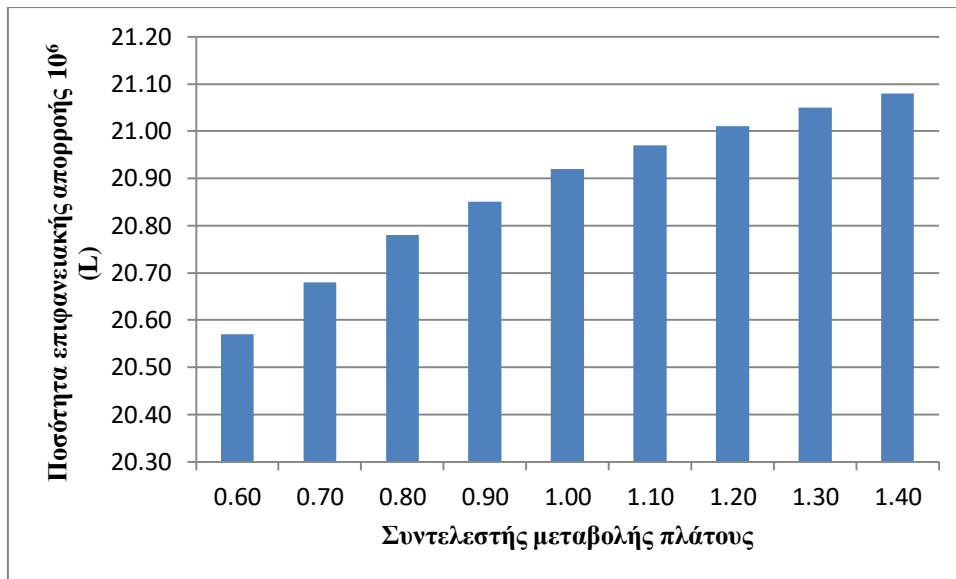
Στα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω φαίνεται η μεταβολή της τιμής των δεικτών ως αποτέλεσμα της μεταβολής του μέσου πλάτους των λεκανών. Οι μεταβολές των δεικτών που προκαλούνται από μεταβολή του πλάτους είναι παρόμοιες με τις προβλεπόμενες από τον Rossman (2016) ο οποίος αναφέρει πως η αύξηση του πλάτους έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλότερης παροχής αιχμής χρονικά νωρίτερα.



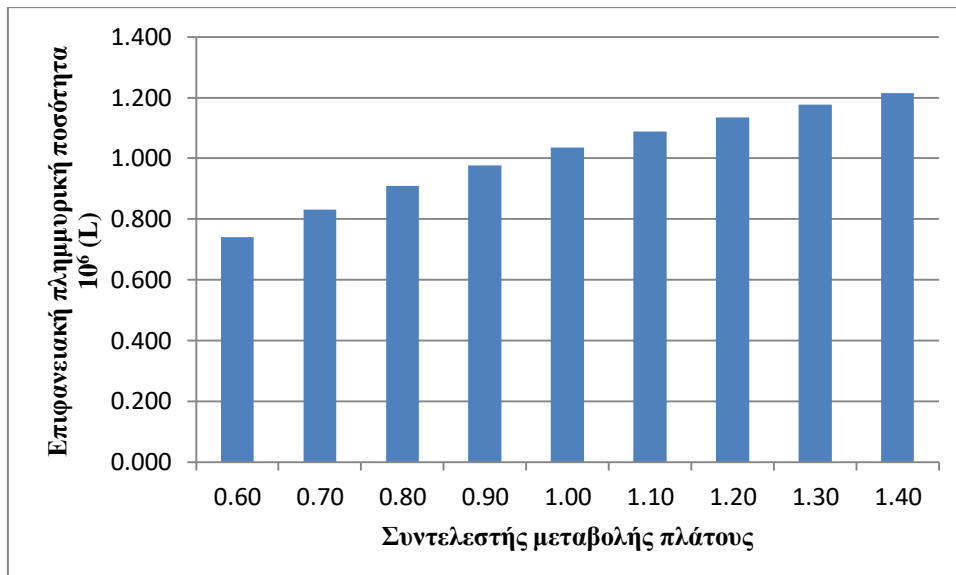
Εικόνα 7.7 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (KAA-86/KAA-85EKX) ως προς το πλάτος.



Εικόνα 7.8 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (B-34a/KAA-85EKX) ως προς το πλάτος.

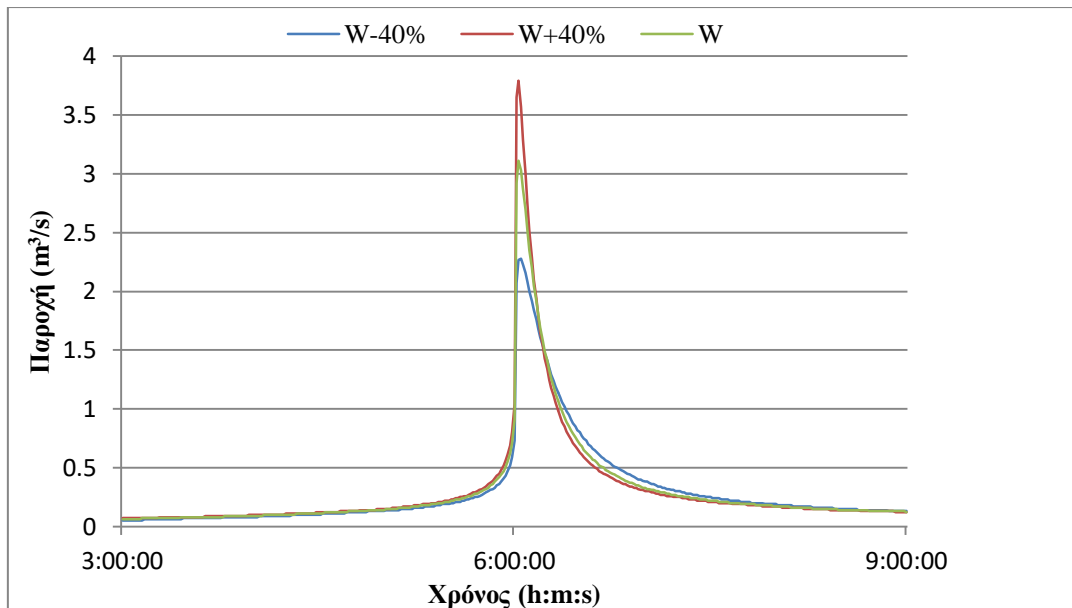


Εικόνα 7.9 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας απορροής ως προς το πλάτος.



Εικόνα 7.10 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς το πλάτος.

Επίσης για την παράμετρο του πλάτους των λεκανών απορροής θα γίνει εξέταση του σχήματος του υδρογραφήματος εκτός από την μελέτη της παροχής αιχμής. Προκειμένου να επιτευχθεί η μελέτη αυτή θα συγκριθούν τα υδρογραφήματα απορροής της λεκάνης 16 για αύξηση και μείωση αντίστοιχα του πλάτους της λεκάνης κατά $\pm 40\%$. Τα υδρογραφήματα επιφανειακής απορροής παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.11.



Εικόνα 7.11 Υδρογραφήματα απορροής λεκάνης 16 για πλάτος με μεταβολές $\pm 40\%$.

*όπως περιγράφεται η θέση των λεκανών απορροής στην Εικόνα 4.6.

Παρατηρούμε αρχικά πως, όπως αναφέρει και ο Rossman (2016), το πλάτος επηρεάζει το σχήμα του υδρογραφήματος απορροής. Η αύξηση του πλάτους έχει ως αποτέλεσμα η απορροή να ελευθερώνεται γρηγορότερα από την υποτιθέμενη μη γραμμική δεξαμενή με αποτέλεσμα το υδρογράφημα να αυξάνεται γρηγορότερα που σημαίνει πως επιτυγχάνεται σε μικρότερο χρόνο από την έναρξη της βροχόπτωσης η αιχμή του υδρογραφήματος. Αντίθετα η μείωση του πλάτους επιφέρει ως αποτέλεσμα περισσότερο νερό να αποθηκεύεται στην δεξαμενή που δεν αφήνεται ελεύθερο. Για τον ίδιο λόγο, γρηγορότερη και πιο έντονη είναι και η υποχώρηση-ύφεση του υδρογραφήματος απορροής για αυξημένο πλάτος λεκάνης απορροής σε σχέση με τον κλάδο καθόδου της λεκάνης με μειωμένο χαρακτηριστικό πλάτος (Rossman 2016).

Ο χρόνος αιχμής των υδρογραφημάτων απορροής της λεκάνης 16 αλλάζει ελάχιστα καθώς για πλάτος λεκάνης μειωμένο κατά 40% η αιχμή απορροής εμφανίζεται την χρονική στιγμή 6:03:00 ενώ για πλάτος αυξημένο κατά 40% την χρονική στιγμή 6:02:00. Τα αποτελέσματα είναι φυσιολογικά αφού αυξημένο πλάτος προκαλεί όπως αναφέραμε παραπάνω γρηγορότερη-ραγδαία άνοδο του υδρογραφήματος άρα και αιχμή παροχής σε συντομότερο χρόνο.

7.5.3 Συντελεστής τραχύτητας αγωγών κατά Manning (n)

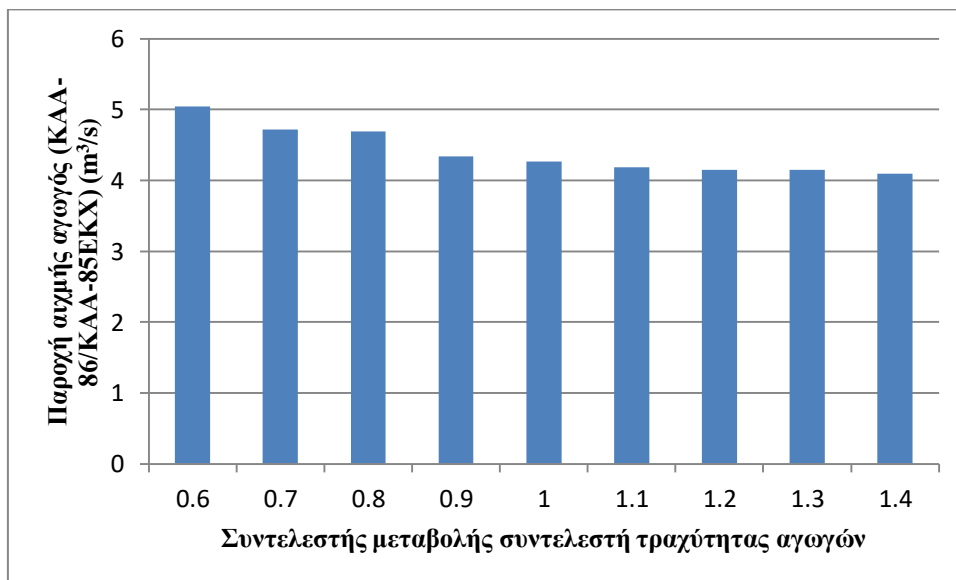
Στον Πίνακα 7.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές των διαφόρων δεικτών που προέκυψαν από την μεταβολή της τιμής του συντελεστή τραχύτητας των αγωγών.

Πίνακας 7.5 Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα μεταβολής του συντελεστή τραχύτητας των αγωγών.

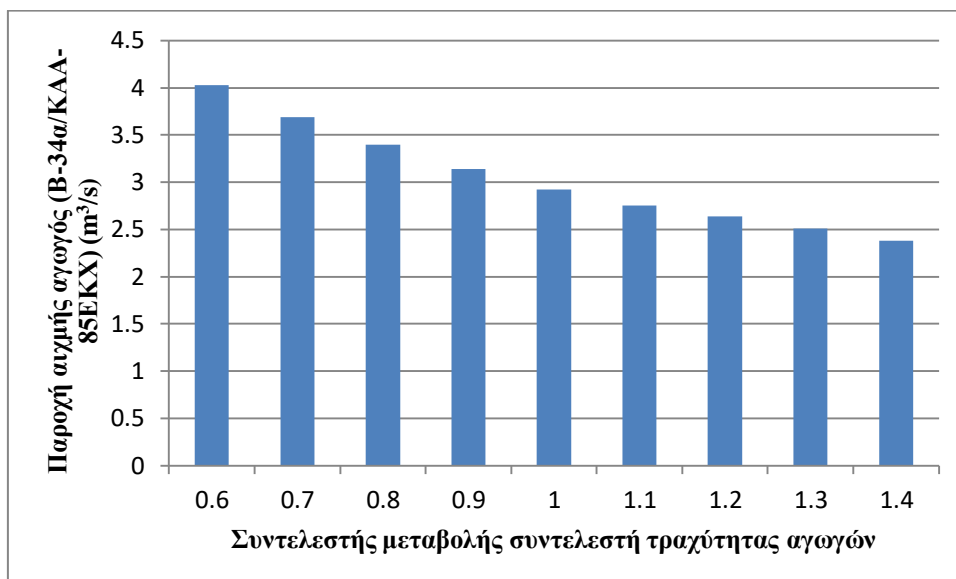
	Μεταβολή συντελεστή τραχύτητας αγωγών (n)								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής συντελεστή τραχύτητας αγωγών (n)								
	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ-86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	18.03	10.54	9.84	1.64	0.00	-1.87	-2.81	-2.81	-3.98
Peak στον αγωγό εξόδου (B-34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	38.01	26.37	16.44	7.53	0.00	-5.82	-9.59	14.04	-18.49
Ποσότητα εισροής στο φρέατο ΚΑΑ-85ΕΚΧ	2.54	2.12	1.27	0.85	0.00	-0.42	-0.85	-1.27	-2.12
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα	-55.50	-40.83	25.97	12.07	0.00	11.58	22.68	33.69	45.37

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.5 συμπεραίνουμε πως ο συντελεστής τραχύτητας είναι ανάλογος της συνολικής ποσότητας πλημμύρας. Αυτό συμβαίνει καθώς όπως αποδεικνύει ο Παπαθανασίου (2009) σε ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου SWMM, η αύξηση του συντελεστή τραχύτητας των αγωγών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βάθους ροής στους αγωγούς του δικτύου. Για μείωση του συντελεστή κατά 40% παρατηρείται μείωση της πλημμύρας κατά 55% που αποτελεί ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό. Επίσης, σημαντική είναι η επίδραση την παροχή αιχμής των αγωγών που παρατηρούνται μεταβολές ακόμα και 38% για μεταβολή του συντελεστή κατά 40% ενώ είναι αρνητική η σχέση ανάμεσα στον συντελεστή n και στην παροχή αιχμής των αγωγών. Σύμφωνα με τους Akdogan and Guven (2016) οι αγωγοί με μικρή τραχύτητα ασκούν μικρή αντίσταση στο νερό με αποτέλεσμα οι πλημμυρικές αιχμές να είναι υψηλότερες. Τέλος, μικρή φαίνεται πως είναι η επίδραση στην συνολική ποσότητα

εισροής καθώς δεν παρατηρούνται μεταβολές μεγαλύτερες από 3%. Στα διαγράμματα που βρίσκονται παρακάτω φαίνονται οι μεταβολές των τιμών των δεικτών ως προς την τιμή του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning των αγωγών.



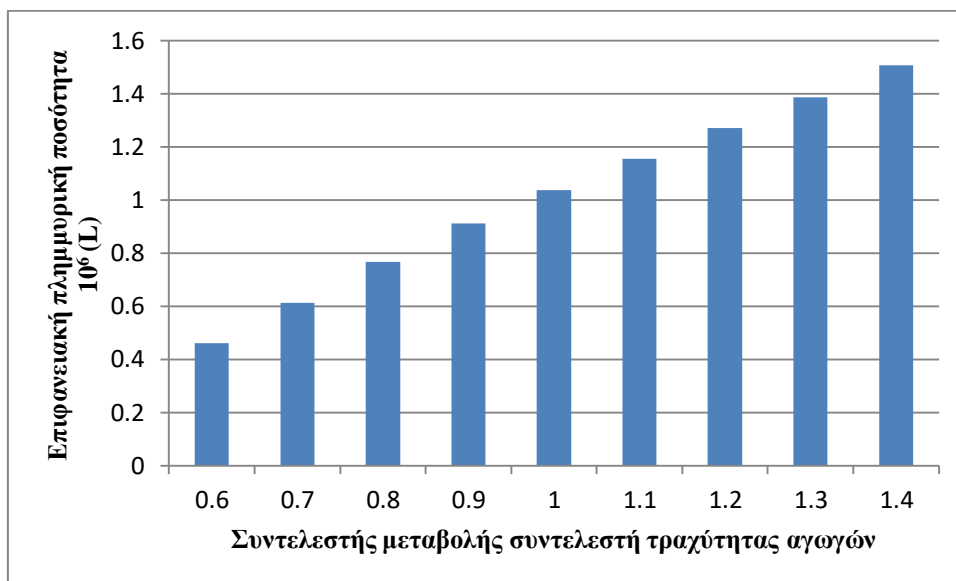
Εικόνα 7.12 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (KAA-86/KAA-85EKX) ως προς τον συντελεστή n των αγωγών.



Εικόνα 7.13 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (B-34a/KAA-85EKX) ως προς τον συντελεστή n των αγωγών.



Εικόνα 7.14 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς τον συντελεστή η των αγωγών.



Εικόνα 7.15 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς τον συντελεστή η των αγωγών.

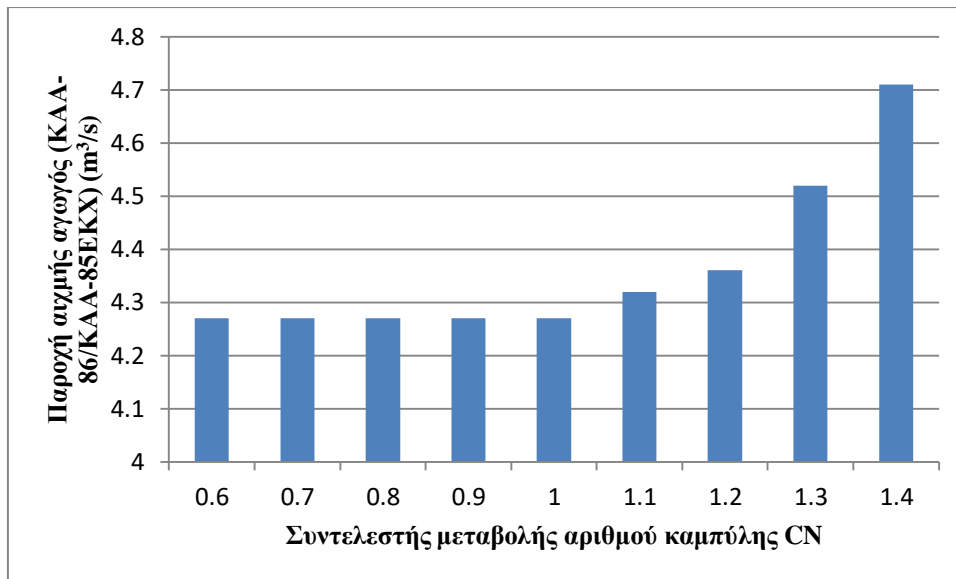
7.5.4 Αριθμός καμπύλης (Curve Number)

Στον Πίνακα 7.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM στην παράμετρο του αριθμού καμπύλης.

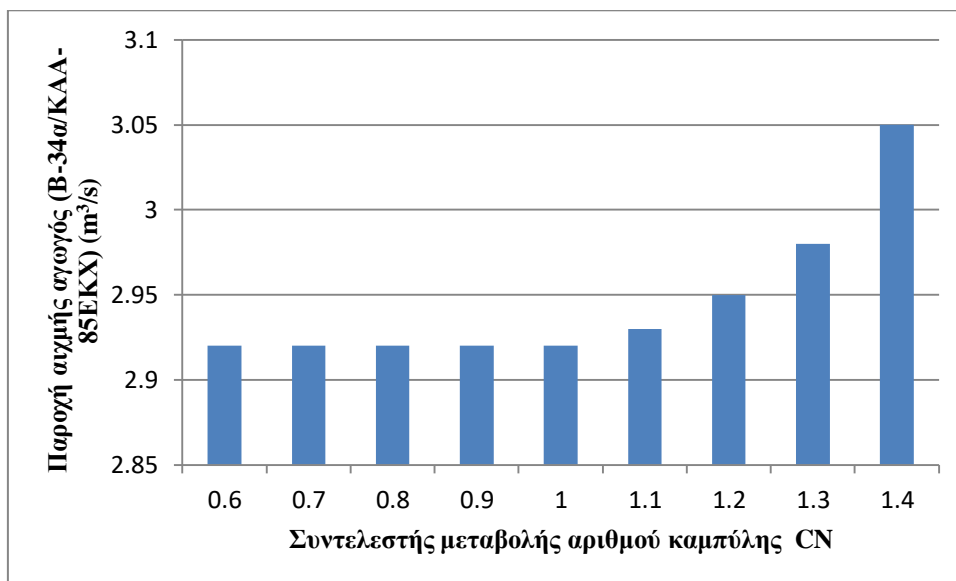
Πίνακας 7.6 Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα μεταβολής του αριθμού καμπύλης (CN).

	Μεταβολή αριθμού καμπύλης (CN)								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής αριθμού καμπύλης (CN)								
	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ-86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.17	2.11	5.85	10.30
Peak στον αγωγό εξόδου (Β-34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	1.03	2.05	4.45
Ποσότητα επιφανειακής απορροής	-7.17	-6.12	-4.59	-2.63	0.00	3.25	7.74	13.91	22.99
Ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ	-5.93	-5.08	-3.81	-2.12	0.00	2.97	6.36	11.44	18.22
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα	-2.22	-2.22	-2.22	-1.83	0.00	3.76	11.10	25.19	48.26

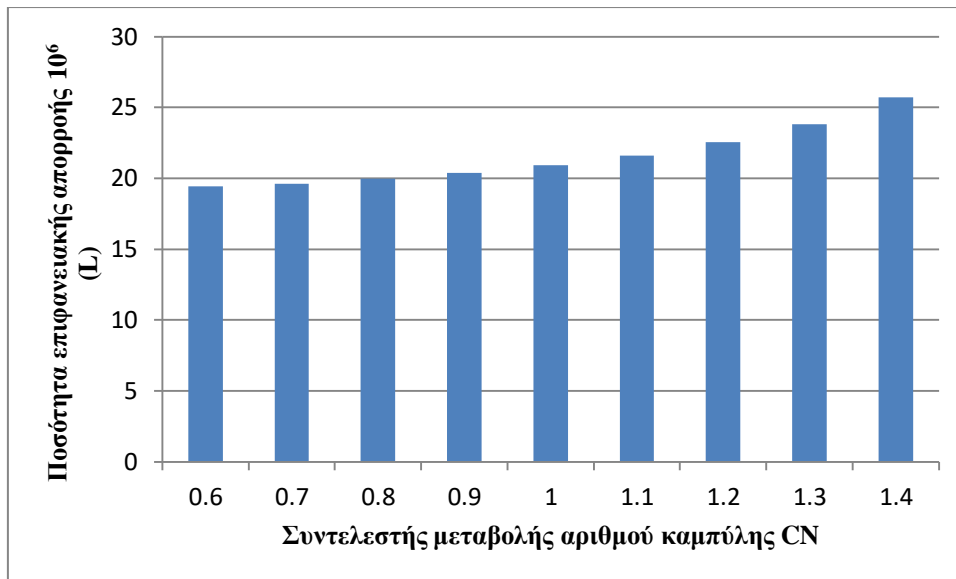
Ιδιαίτερα σημαντική είναι η επίδραση του αριθμού καμπύλης στην συνολική ποσότητα απορροής καθώς για αύξηση του CN κατά 40% παρατηρείται αύξηση την απορροής κατά 22.99%. Επίσης, μεγάλη μεταβολή συμβαίνει στην συνολική πλημμυρική ποσότητα όπου αυξάνεται κατά 48.26% για αύξηση του συντελεστή CN κατά 40%. Αντίθετα, μικρή επίδραση φαίνεται πως υπάρχει στον υπολογισμό της παροχής αιχμής των αγωγών καθώς σε αρκετές περιπτώσεις μεταβολών του αριθμού καμπύλης οι παροχές αιχμής εμφανίζουν μηδενική μεταβολή. Τέλος, η παράμετρος του αριθμού καμπύλης φαίνεται πως έχει θετική σχέση με το σύνολο των χρησιμοποιούμενων δεικτών. Στα παρακάτω διαγράμματα διακρίνονται οι τιμές των δεικτών ως προς τον αριθμό καμπύλης CN που επιλέχθηκε για τις λεκάνες απορροής.



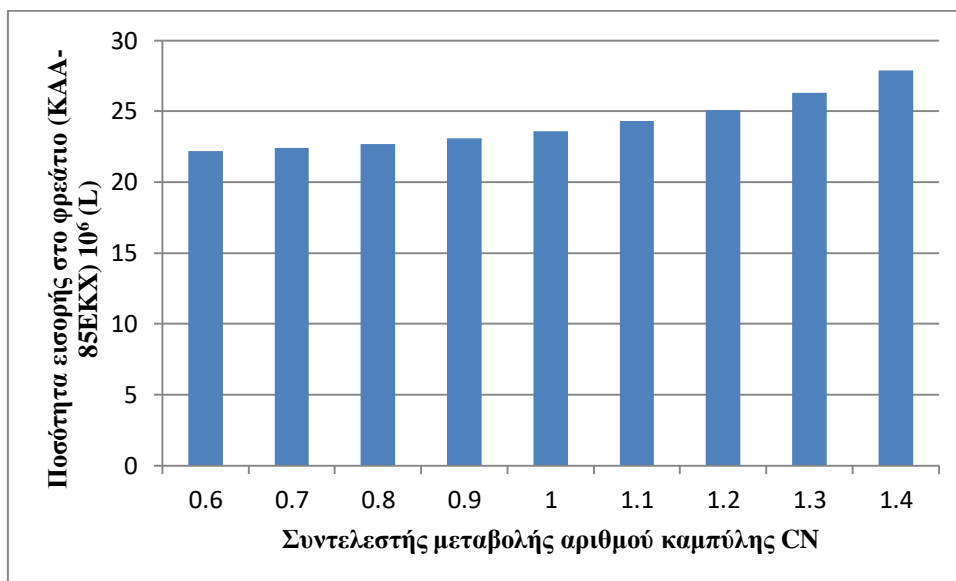
Εικόνα 7.16 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (KAA-86/KAA-85EKX) ως προς τον αριθμό καμπύλης CN.



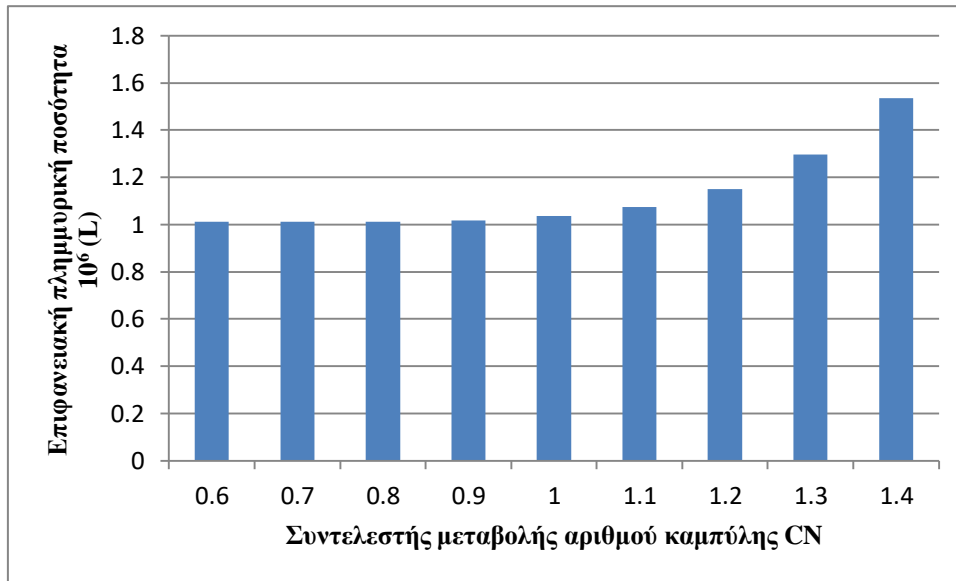
Εικόνα 7.17 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (B-34a/KAA-85EKX) ως προς τον αριθμό καμπύλης CN.



Εικόνα 7.18 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας απορροής ως προς τον αριθμό καμπύλης CN.



Εικόνα 7.19 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς τον αριθμό καμπύλης CN.



Εικόνα 7.20 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς τον αριθμό καμπύλης CN.

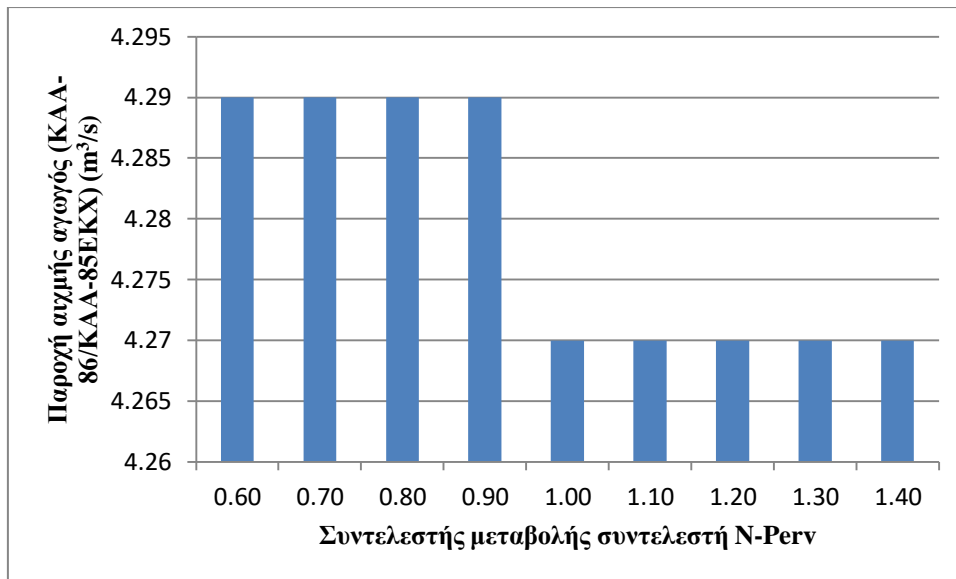
7.5.5 Συντελεστής Manning για ροή σε διαπερατές επιφάνειες (N-Perv)

Στον Πίνακα 7.7 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές των δεικτών που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου στον συντελεστή κατά Manning για ροή σε διαπερατά εδάφη (N-Perv).

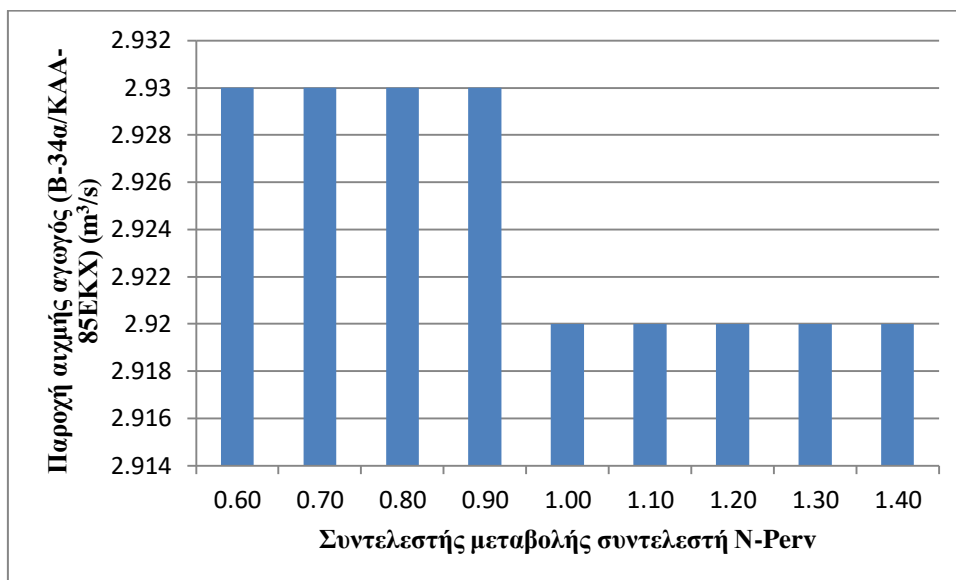
Πίνακας 7.7 Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα μεταβολής του συντελεστή Manning για ροή σε διαπερατές επιφάνειες.

	Μεταβολή συντελεστή N-Perv								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής συντελεστή N-Perv								
	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ-86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	0.47	0.47	0.47	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peak στον αγωγό εξόδου (Β-34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	0.34	0.34	0.34	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ποσότητα επιφανειακής απορροής	0.72	0.43	0.29	0.14	0.00	-0.19	-0.38	-0.53	-0.67
Ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ	0.85	0.42	0.42	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.42
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα	1.16	0.77	0.39	0.19	0.00	-0.19	-0.39	-0.48	-0.58

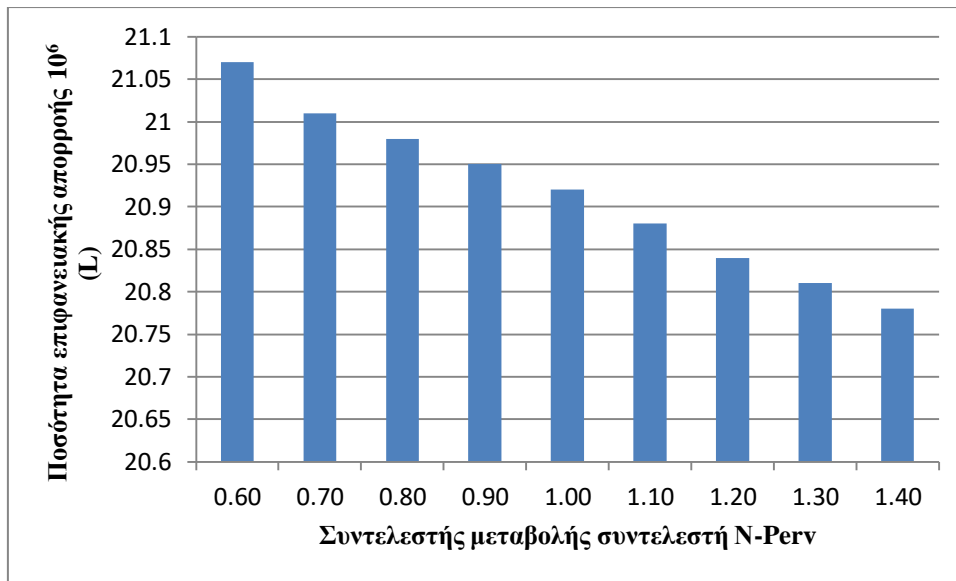
Βάση του Πίνακα 7.7 συμπεραίνουμε πως ο συντελεστής κατά Manning για ροή σε διαπερατές επιφάνειες δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου τους υπολογισμούς του μοντέλου SWMM. Οι ποσοστιαίες μεταβολές των δεικτών κυμαίνονται κάτω από 1% σχεδόν στο σύνολο τους για μεταβολές του συντελεστή κατά Manning έως και 40%. Επομένως, η εκτίμηση του συντελεστή N-Perv δεν χρήζει ιδιαίτερα μεγάλης ακρίβειας και προσοχής καθώς δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του υδρολογικού μοντέλου. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατηρούνται οι τιμές των δεικτών ως προς τον συντελεστή N-Perv.



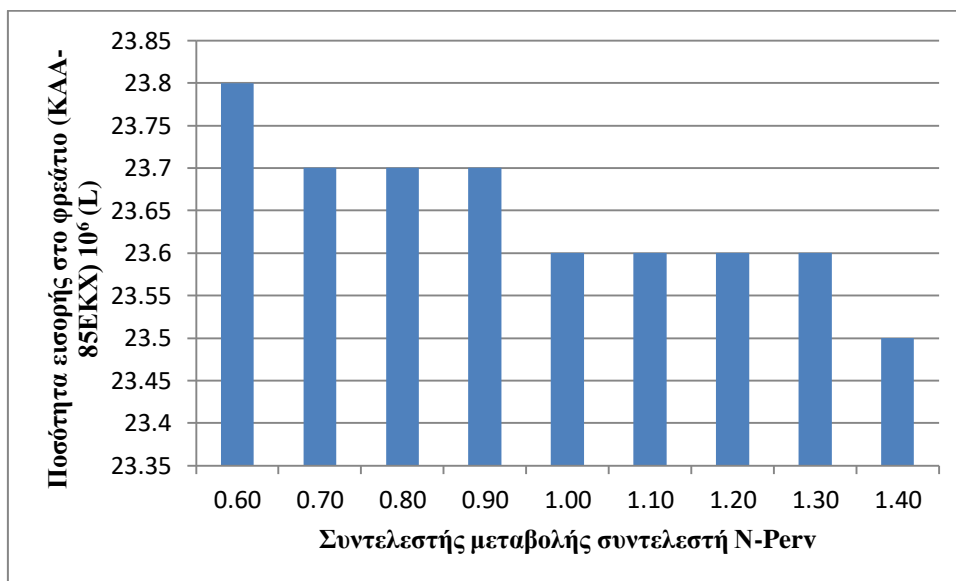
Εικόνα 7.21 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (KAA-86/KAA-85EKX) ως προς τον συντελεστή N-Perv.



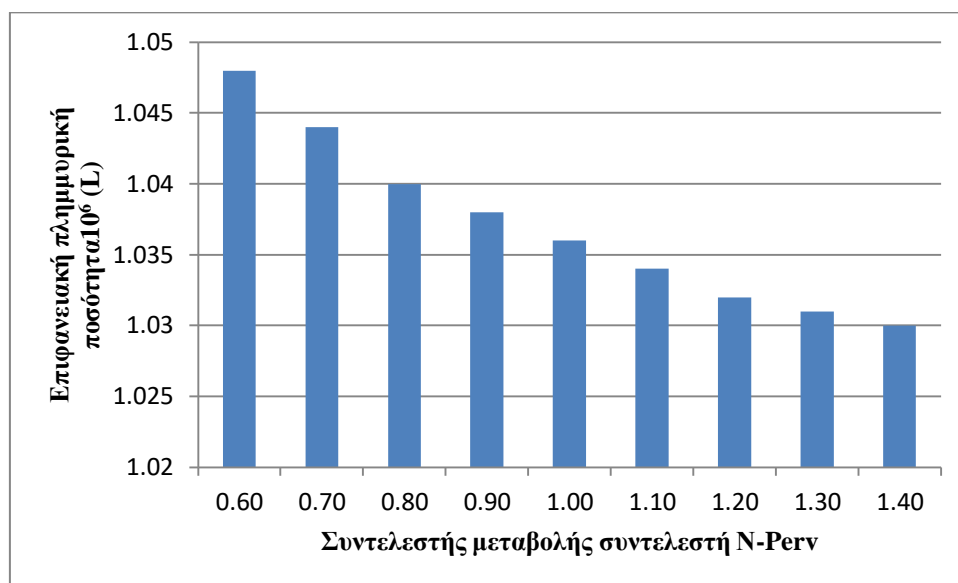
Εικόνα 7.22 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (B-34a/KAA-85EKX) ως προς τον συντελεστή N-Perv.



Εικόνα 7.23 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας απορροής ως προς τον συντελεστή N-Perv.



Εικόνα 7.24 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς τον συντελεστή N-Perv.



Εικόνα 7.25 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς τον συντελεστή N-Perv.

7.5.6 Συντελεστής Manning για ροή σε αδιαπέρατες επιφάνειες

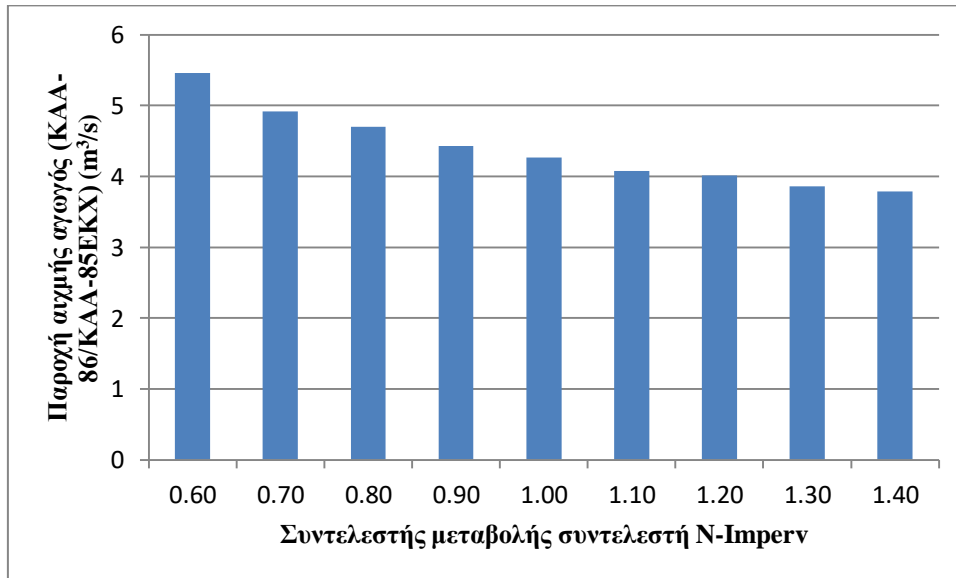
Στον Πίνακα 7.8 παρατίθενται οι ποσοστιαίες μεταβολές των δεικτών του μοντέλου ως αποτέλεσμα της μεταβολής του συντελεστή κατά Manning για ροή σε αδιαπέρατες επιφάνειες.

Πίνακας 7.8 Ποσοστιαίες μεταβολές δεικτών ως αποτέλεσμα της μεταβολής του συντελεστή κατά Manning για ροή σε αδιαπέρατες επιφάνειες.

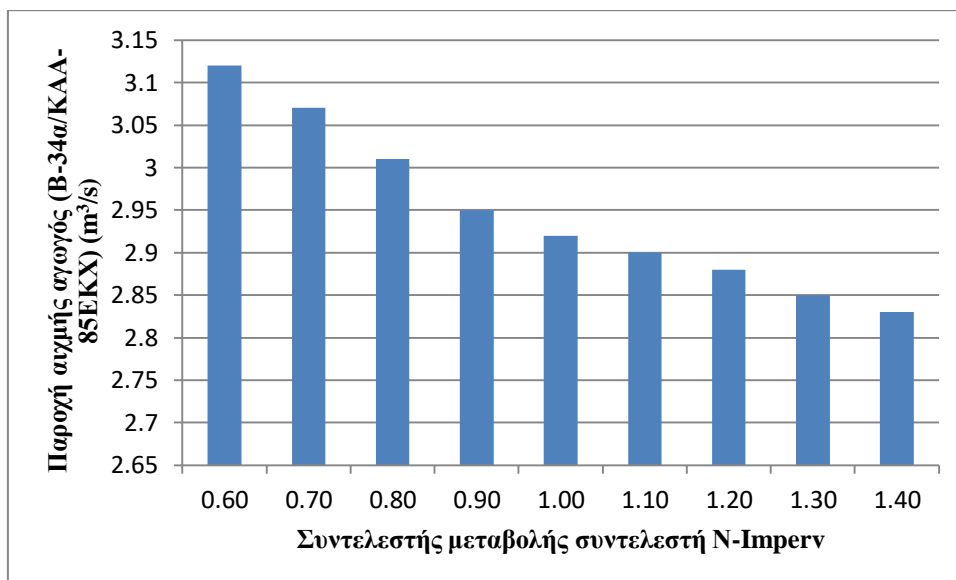
	Μεταβολή συντελεστή N-Imperv								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής συντελεστή N-Imperv								
	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ-86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	27.87	15.22	10.07	3.75	0.00	-4.45	-6.09	-9.60	-11.24
Peak στον αγωγό εξόδου (B-34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ)	6.85	5.14	3.08	1.03	0.00	-0.68	-1.37	-2.40	-3.08
Ποσότητα επιφανειακής απορροής	0.62	0.38	0.29	0.14	0.00	-0.19	-0.38	-0.48	-0.53
Ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ	-0.42	-0.42	0.00	0.00	0.00	0.42	0.42	0.42	0.42
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα	25.87	17.57	11.10	5.31	0.00	-4.92	-9.56	-13.90	-17.95

Σε αντίθεση με τον συντελεστή N-Periv, ο συντελεστής για ροή σε αδιαπέρατα εδάφη έχει σημαντικές επιδράσεις στα αποτελέσματα του μοντέλου. Για μείωση του συντελεστή N-Imperv κατά 40% παρατηρείται αύξηση στην παροχή αιχμής του αγωγού που συνδέει τα φρεάτια ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ κατά 28% ενώ προκαλεί αύξηση της πλημμυρικής ποσότητας νερού κατά 26%. Η μείωση της παροχής αιχμής ως αποτέλεσμα αύξησης του συντελεστή αναφέρεται και από τον Rossman (2016). Αντίθετα, η συνολική ποσότητα απορροής καθώς και η ποσότητα εισροής στον κόμβο ΚΑΑ-85ΕΚΧ δεν επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από τον συντελεστή N-Imperv καθώς οι μεταβολές είναι μικρότερες από 1%. Τέλος, η σχέση ανάμεσα στον συντελεστή κατά Manning για ροή σε αδιαπέρατες επιφάνειες και στην παροχή αιχμής των αγωγών, στην συνολική ποσότητα απορροής και στην πλημμυρική

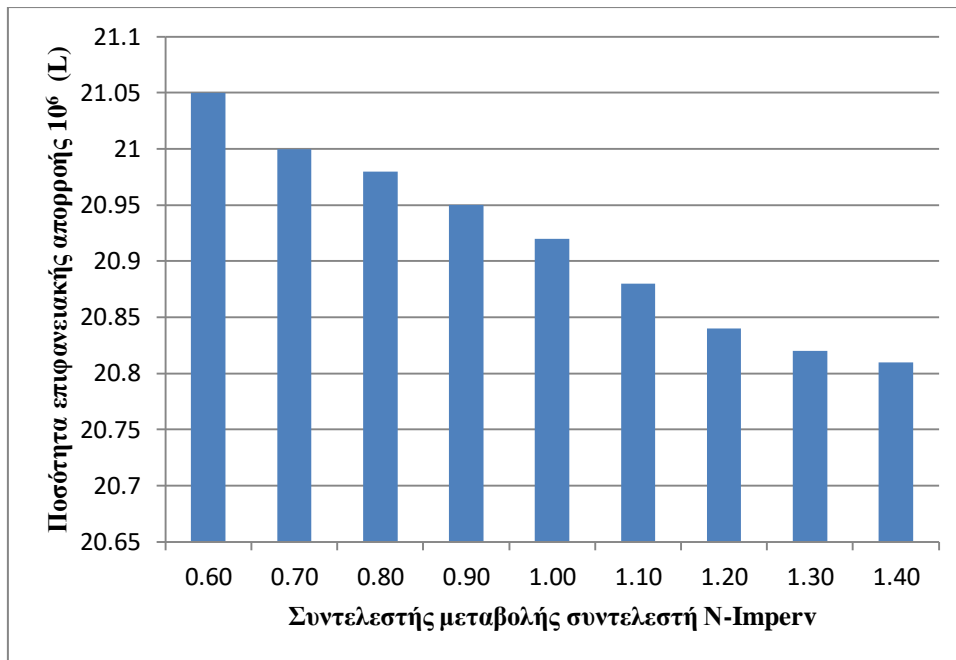
ποσότητα είναι αρνητική στο οποίο συμφωνούν και τα συμπεράσματα του Zaghoul (1983). Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα τιμών των δεικτών ως προς τον συντελεστή N-Imperv.



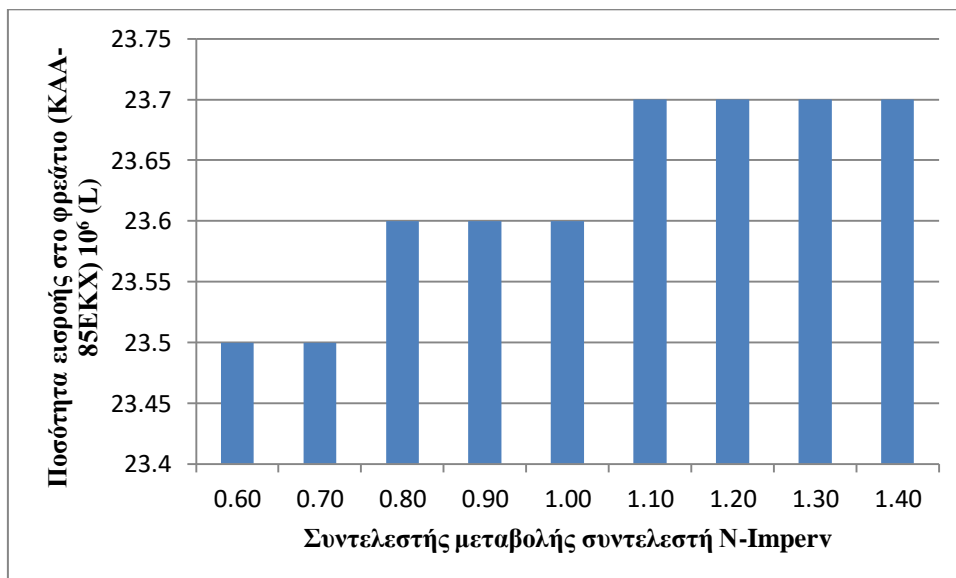
Εικόνα 7.26 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (KAA-86/KAA-85EKX) ως προς τον συντελεστή N-Imperv.



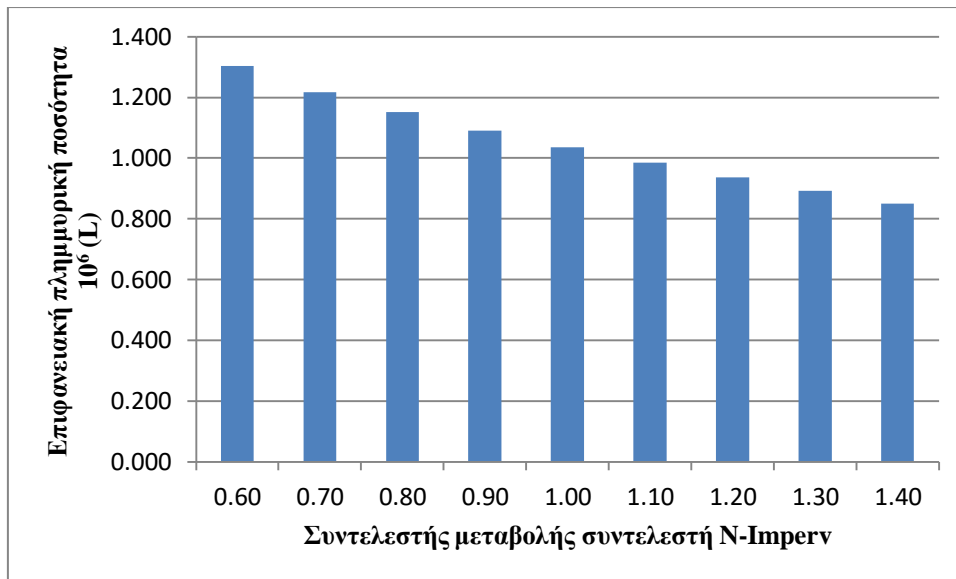
Εικόνα 7.27 Διάγραμμα παροχής αιχμής στον αγωγό (B-34a/KAA-85EKX) ως προς τον συντελεστή N-Imperv.



Εικόνα 7.28 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας απορροής ως προς τον συντελεστή N-Imperv.



Εικόνα 7.29 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας εισροής στο φρέατο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς τον συντελεστή N-Imperv.

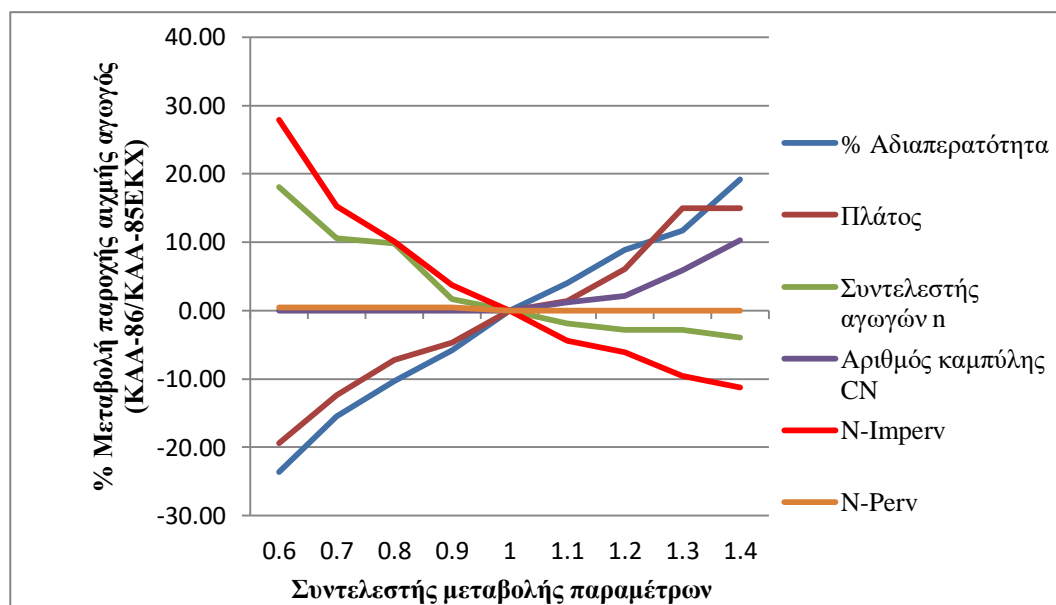


Εικόνα 7.30 Διάγραμμα συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς τον συντελεστή N-Imperv.

7.6 Γενικά αποτελέσματα-σύγκριση παραμέτρων

Στο υποκεφάλαιο αυτό συγκρίνεται η ευαισθησία των αποτελεσμάτων του μοντέλου ως προς τις διάφορες παραμέτρους εισόδου οι οποίες μελετήθηκαν στην παρούσα ανάλυση ευαισθησίας. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η εκλογή των κυριότερων παραμέτρων του λογισμικού SWMM οι οποίες αποτελούν και τις παραμέτρους που πρέπει να εκτιμηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια κατά τη μοντελοποίηση του δικτύου καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις παροχών προκειμένου να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση του μοντέλου. Επιπλέον, γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων καθώς και σύγκριση αυτών με διαθέσιμα αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας. Η σύγκριση της επιρροής των παραμέτρων εισόδου γίνεται μέσω των διαγραμμάτων που παρουσιάζονται παρακάτω.

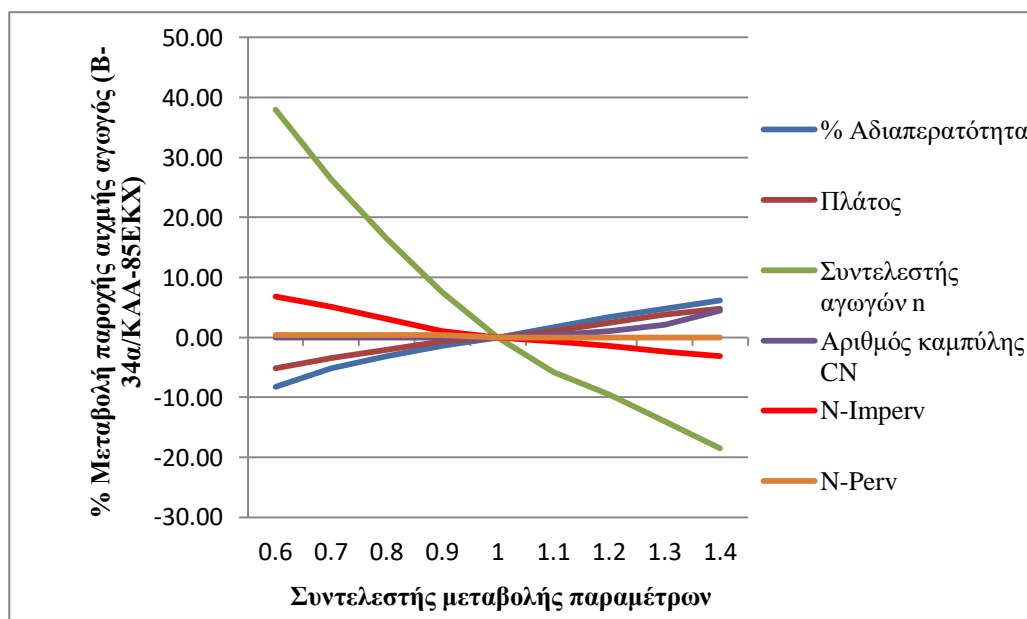
7.6.1 Παροχή αιχμής στον αγωγό (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ)



Εικόνα 7.31 Ποσοστιαία μεταβολή παροχής αιχμής αγωγού (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου.

Σύμφωνα με την Εικόνα 7.31 αναγνωρίζει κανείς πως η παράμετρος της αδιαπερατότητας, ο συντελεστής κατά Manning για ροή σε αδιαπέρατα εδάφη, καθώς και το πλάτος των λεκανών απορροής αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες υπολογισμού της παροχής αιχμής στον αγωγό. Αντίθετα, μικρή επιρροή έχουν οι παράμετροι του αριθμού καμπύλης CN, ο συντελεστής κατά Manning για ροή σε διαπερατά εδάφη καθώς και ο συντελεστής τραχύτητας των αγωγών. Η παράμετρος που προκαλεί την μεγαλύτερη μείωση της παροχής αιχμής είναι η αδιαπερατότητα ενώ η μεγαλύτερη αύξηση προκαλείται από μεταβολή του συντελεστή N-Imperv. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά που προέκυψαν από τις μελέτες ανάλυσης ευαισθησίας των Ahmadian et al. (2013), Beling et al. (2011) ενώ συμφωνούν εν μέρει με τους Tavousi et al. (2015) που αναφέρουν τον συντελεστή N-Imperv και το πλάτος ως τις σημαντικότερες παραμέτρους προς υπολογισμό ενώ η αδιαπερατότητα θεωρείται λιγότερο σημαντική παράμετρος. Τέλος, συσχέτιση υπάρχει και με τον Rossman (2016) που αναφέρει πως η αδιαπερατότητα έχει ιδιαίτερα σημαντική επιρροή στο υδρογράφημα που υπολογίζεται από το μοντέλο.

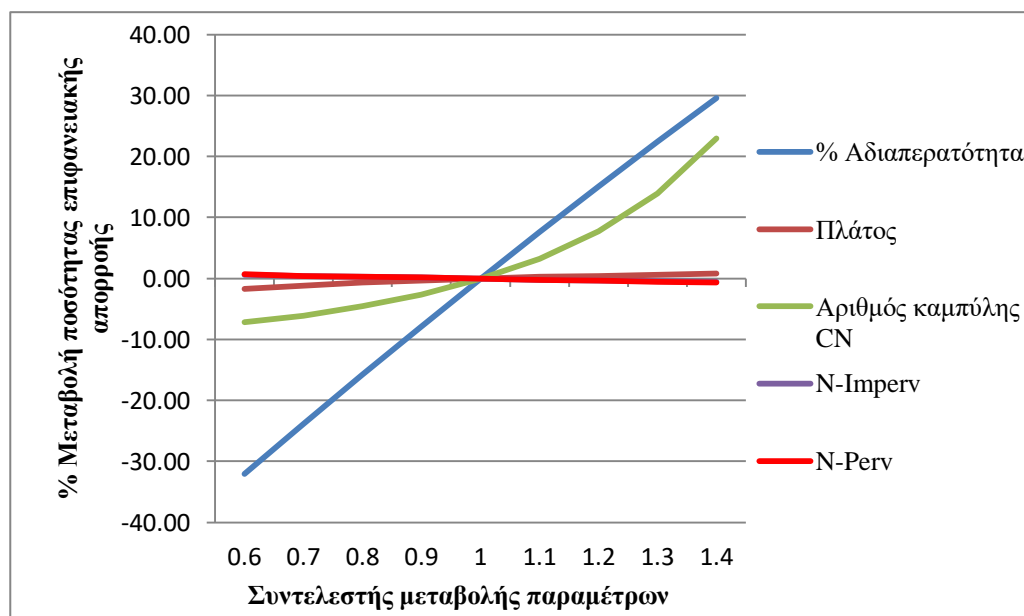
7.6.2 Παροχή αιχμής στον αγωγό (B-34a/ΚΑΑ-85ΕΚΧ)



Εικόνα 7.32 Ποσοστιαία μεταβολή παροχής αιχμής στον αγωγό (B-34a/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) ως προς την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου.

Η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου όπως έχει αναφερθεί πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την βροχόπτωση σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T=10$ έτη και διάρκειας $t=12$ h. Κατά την προσομοίωση αυτή όπως δείξαμε στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 6, ο αγωγός B-34a/ΚΑΑ-85ΕΚΧ δεν ήταν επαρκής για την αποχέτευση της απορροής με αποτέλεσμα να πλημμυρίζει. Για τον παραπάνω λόγο, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα καμία παράμετρος δεν άσκησε σημαντική επιρροή στην αύξηση ή μείωση της παροχής αιχμής εκτός από τον συντελεστή τραχύτητας των αγωγών ο οποίος αποτελεί την σημαντικότερη παράμετρο στον υπολογισμό της παροχής αιχμής στον αγωγό. Παρόμοια αποτελέσματα έδειξαν στην έρευνα τους οι Rabori et al. (2017) και οι Li et al. (2014) ενώ οι Akdogan and Guven (2016) ισχυρίζονται πως ο συντελεστής τραχύτητας των αγωγών είναι η 4^η πιο ευαίσθητη παράμετρος στον υπολογισμό της παροχής αιχμής του δικτύου.

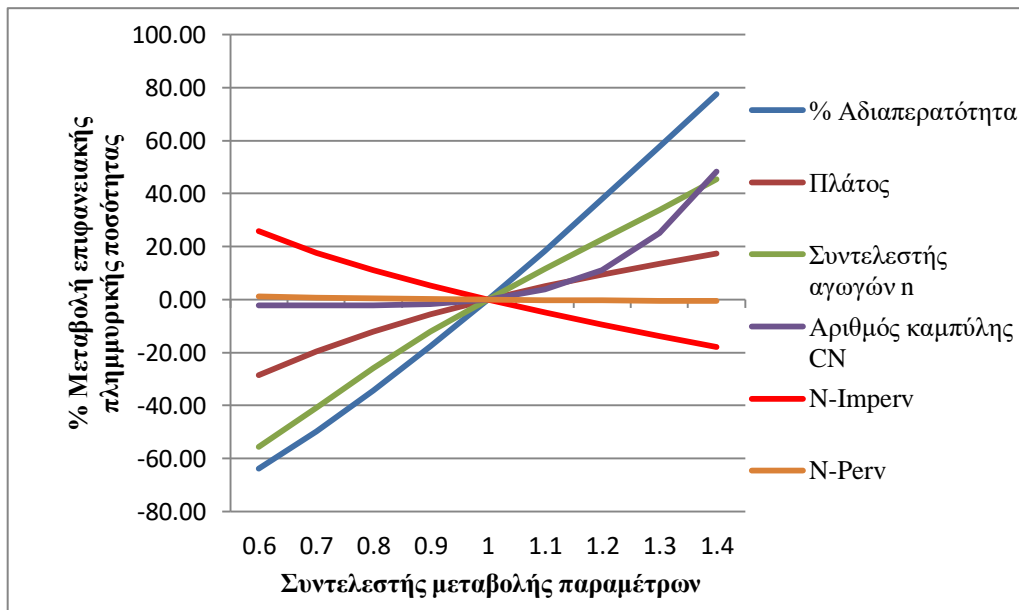
7.6.3 Συνολική ποσότητα απορροής



Εικόνα 7.33 Ποσοστιαία μεταβολή συνολικής ποσότητας απορροής ως προς την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.33 φαίνεται πως η παράμετρος που επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την εκτίμηση της ποσότητας απορροής από το μοντέλο SWMM είναι το ποσοστό αδιαπερατότητας της περιοχής ενώ ακολουθεί η παράμετρος του αριθμού καμπύλης. Τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα καθώς οι δύο αυτές παράμετροι συνδέονται άμεσα με την παραγωγή της απορροής από τις λεκάνες της περιοχής μελέτης. Αντίθετα οι υπόλοιπες μεταβλητές εισόδου έχουν ιδιαίτερα μικρή συμμετοχή στον υπολογισμό της ποσότητας της απορροής. Τα αποτελέσματα αρχικά συμφωνούν με τον Rossman (2016) ο οποίος αναφέρει πως η παράμετρος της αδιαπερατότητας έχει μεγάλη συμμετοχή στον υπολογισμό της απορροής καθώς και ότι το πλάτος της λεκάνης επηρεάζει κυρίως το σχήμα του υδρογραφήματος και την αιχμή του και όχι την ποσότητα παραγόμενης απορροής (Rossman 2016). Επίσης αντιστοιχία υπάρχει με τα συμπεράσματα των Rabori et al. (2017) που ισχυρίζονται πως το ποσοστό αδιαπερατής επιφάνειας είναι αυτό που επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τον υπολογισμό της ποσότητας απορροής καθώς και με αυτά από τους Barco et al. (2008) οι οποίοι απέδειξαν πως η αδιαπερατότητα καθώς και η επιφανειακή αποθήκευση στα μη διαπερατά εδάφη αποτελούν τις κυριότερες παραμέτρους για την εκτίμηση της συνολικής ποσότητας απορροής των λεκανών.

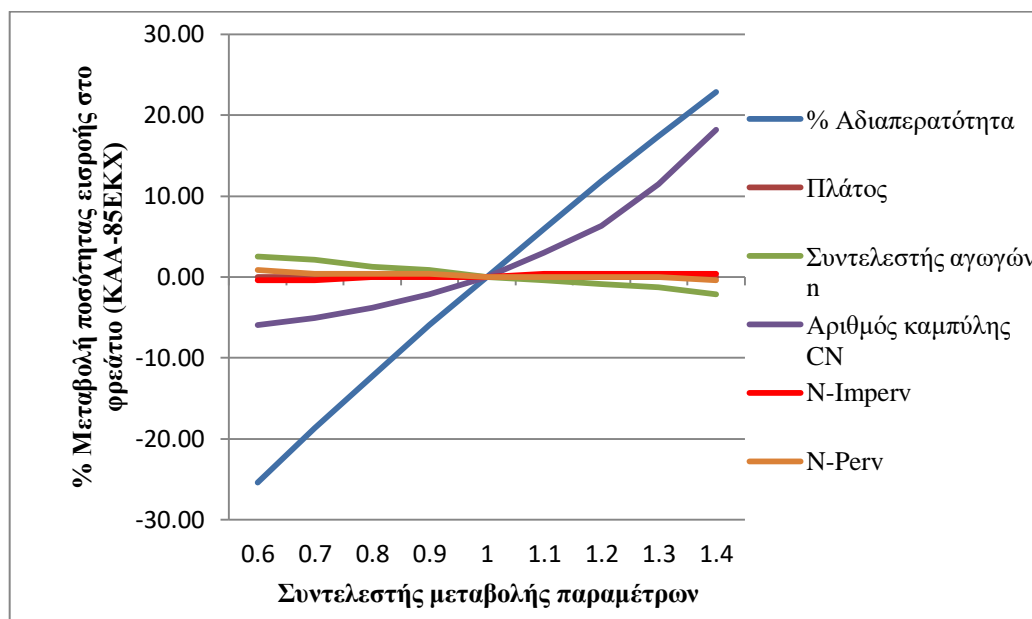
7.6.4 Συνολική πλημμυρική ποσότητα του δικτύου



Εικόνα 7.34 Ποσοστιαία μεταβολή συνολικής ποσότητας πλημμύρας ως προς την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.34 η αδιαπερατότητα της περιοχής μελέτης αποτελεί την σημαντικότερη παράμετρο που επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την πλημμυρική ποσότητα του δικτύου. Σημαντική επίσης είναι η επίδραση του συντελεστή τραχύτητας των αγωγών κατά Manning καθώς και του αριθμού καμπύλης CN. Μικρότερης σημασίας κρίνεται ο υπολογισμός του πλάτους των λεκανών απορροής καθώς και των συντελεστών Manning για ροή σε διαπερατά και αδιαπέρατα εδάφη. Επιπλέον παρατηρούμε πως η πλημμυρική ποσότητα συνδέεται άμεσα με την συνολική ποσότητα απορροής καθώς οι παράμετροι που αποτελούν τις σημαντικότερες προς εκτίμηση είναι κοινές για τους δύο δείκτες που βρίσκονται προς μελέτη.

7.6.5 Συνολική ποσότητα εισροής στον κόμβο ΚΑΑ-85ΕΚΧ του δικτύου



Εικόνα 7.35 Ποσοστιαία μεταβολή συνολικής ποσότητας εισροής στον κόμβο ΚΑΑ-85ΕΚΧ ως προς την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου.

Στην περίπτωση υπολογισμού της συνολικής ποσότητας εισροής στην έξοδο του δικτύου όπως και στον υπολογισμό της ποσότητας της απορροής καθώς και στην εκτίμηση της πλημμυρικής ποσότητας του δικτύου τον σημαντικότερο ρόλο παίζει η παράμετρος της αδιαπερατότητας με τον αριθμό καμπύλης να ακολουθεί στην κατάταξη της ευαισθησίας. Τα αποτελέσματα είναι φυσιολογικά και αναμενόμενα καθώς η ποσότητα εισροής στον κόμβο είναι η ποσότητα της απορροής που παράγεται από τις λεκάνες αφαιρώντας την ποσότητα που χάνεται από το σύστημα λόγω πλημμυρικών φαινομένων. Ο συντελεστής τραχύτητας των αγωγών, το πλάτος και οι συντελεστές Manning για επιφανειακή ροή επηρεάζουν ελάχιστα το σύστημα σε αυτή τη περίπτωση.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

8.1 Συμπεράσματα-ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία, απεικόνιση και μοντελοποίηση της Β΄ ζώνης του παντορροϊκού δικτύου Αθηνών καθώς και του αποχετευτικού της δικτύου που είναι υπεύθυνο για την ασφαλή μεταφορά των ομβρίων και ακαθάρτων υδάτων της περιοχής στον πλησιέστερο αποδέκτη. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις λειτουργίας του αποχετευτικού συστήματος καθώς και η ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM. Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραπάνω εργασίες εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας είναι τα εξής:

- QGIS
- ArcGIS (ESRI)
- Autocad (Autodesk)
- Excel (Microsoft)
- Word (Microsoft)
- Infoswmm (Innovyze)
- SWMM (EPA)

8.1.1 Προσομοιώσεις

Το αποχετευτικό δίκτυο προσομοιώθηκε με βροχοπτώσεις σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περιόδους επαναφοράς $T=2, 5, 10, 25, 50$ έτη κατασκευασμένες με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ. Επίσης υπολογίστηκαν τα υδρογραφήματα εισροής στην έξοδο του αποχετευτικού δικτύου (ΚΑΑ-85ΕΚΧ) για διάρκειες βροχόπτωσης $t=1, 2, 6, 24$ h και με περιόδους επαναφοράς $T=2, 5, 10, 25, 50$ έτη. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως ακόμα και για την μικρότερη περίοδο επαναφοράς δηλαδή $T=2$ έτη το δίκτυο δεν είναι επαρκές για την παροχέτευση του συνόλου της απορροής με αποτέλεσμα να προκαλούνται πλημμυρικά φαινόμενα σε ένα σύνολο φρεατιών. Τα προβλήματα διακρίνονται στο κάτω μέρος του δικτύου που καταλήγει στον υπερχειλιστή δηλαδή στους αγωγούς που συνδέουν τα φρεάτια Β-42α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ ενώ το πάνω μέρος του δικτύου δεν πλημμυρίζει. Αντίθετα, το πάνω μέρος του δικτύου, δηλαδή οι αγωγοί που συνδέουν τα φρεάτια ΚΑΑ-89α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ, παρουσιάζει πλημμυρικά φαινόμενα για βροχοπτώσεις σχεδιασμού με περιόδους επαναφοράς μεγαλύτερες των 10 ετών.

8.1.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ευαισθησίας του λογισμικού SWMM. Οι παράμετροι εισόδου του λογισμικού που επιλέχθηκαν να μελετηθούν ήταν οι εξής:

- ❖ Ποσοστό αδιαπερατότητας
- ❖ Πλάτος
- ❖ Αριθμός καμπύλης CN
- ❖ Συντελεστής τραχύτητας αγωγών κατά Manning
- ❖ Συντελεστές Manning για επιφανειακή ροή (N-Imperv/N-Perv)

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε με σκοπό την ανάδειξη των σημαντικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν τις υπολογιστικές διαδικασίες και επομένως τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το λογισμικό SWMM κατά την προσομοίωση δικτύων.

Στην πραγματικότητα, η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της επαλήθευσης ενός μοντέλου. Οι τιμές που προκύπτουν για τις διάφορες παραμέτρους από τη βαθμονόμηση του μοντέλου στη συνέχεια υπόκεινται σε ανάλυση ευαισθησίας

για την εξαγωγή των κυριότερων παραμέτρων επηρεασμού των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Στην περίπτωση του δικτύου μας, δηλαδή της Β' ζώνης του παντοροϊκού δικτύου Αθηνών δεν υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις απορροών σε διάφορα χαρακτηριστικά σημεία του δικτύου επομένως ήταν αδύνατη η βαθμονόμηση καθώς και η επαλήθευση του μοντέλου, διαδικασίες οι οποίες θα έδιναν έγκυρες τιμές για τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου έδειξαν αρχικά πως το λογισμικό είναι ευαίσθητο σε διαφορετικές παραμέτρους ανάλογα με τον δείκτη που βρίσκεται προς διερεύνηση. Στην περίπτωση παρακολούθησης της αιχμής της παροχής δείξαμε πως η αδιαπερατότητα καθώς και ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους. Ακολουθεί η παράμετρος του πλάτους που επηρεάζει σημαντικά και το σχήμα του υδρογραφήματος της απορροής καθώς και ο συντελεστής κατά Manning για ροή σε αδιαπέρατες επιφάνειες. Στην περίπτωση μελέτης της συνολικής ποσότητας απορροής ή της ποσότητας πλημμύρας του δικτύου ή της συνολικής ποσότητας εισροής στην έξοδο του δικτύου φαίνεται πως η αδιαπερατότητα αποτελεί την κρίσιμότερη προς εκτίμηση παράμετρο ενώ σημαντική θεωρείται και παράμετρος του αριθμού καμπύλης. Μικρότερη επίδραση από το σύνολο των παραμέτρων που μελετήθηκαν έχει ο συντελεστής N-Perin ο οποίος δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του δικτύου σε καμία περίπτωση και δεν έχει συμμετοχή στις υπολογιστικές διαδικασίες. Τέλος, είναι χρήσιμο να αναφερθεί πως τα αποτελέσματα σε γενικές γραμμές είναι παρόμοια με αυτά που προέκυψαν από διάφορες μελέτες στην διεθνή βιβλιογραφία που μελετήθηκαν για την πραγματοποίηση της παρούσας ανάλυσης ευαισθησίας.

Εδώ είναι κρίσιμο να τονίσουμε πως τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας είναι προσαρμοσμένα στην εκάστοτε περιοχή μελέτης στην οποία εφαρμόζεται.

8.2 Αξιολόγηση λογισμικού SWMM 5.1

Το λογισμικό SWMM 5.1 αποτελεί ένα ιδιαίτερα εύχρηστο λογισμικό το οποίο μπορεί να μελετηθεί, κατανοηθεί και τελικά να χρησιμοποιηθεί από έναν μηχανικό χωρίς ιδιαίτερα μεγάλη εμπειρία στην μελέτη υδραυλικών έργων και αποχετευτικών δικτύων λόγω της απλής πλατφόρμας εργασίας καθώς και των πολλών εγχειριδίων χρήσης τα οποία διατίθενται μαζί με το λογισμικό από την EPA. Τα εγχειρίδια αυτά

εξηγούν με έναν ιδιαίτερα απλό και κατανοητό τρόπο την λειτουργία του λογισμικού, τα σημεία που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά τη χρήση του μοντέλου ενώ παράλληλα εξηγούν πλήρως τις υδρολογικές και υδραυλικές έννοιες που θα συναντήσει ο χρήστης κατά τη λειτουργία του λογισμικού. Ωστόσο, οι δυσκολίες που μπορεί να αντιμετωπίσει ο χρήστης είναι πολλές και πηγάζουν κυρίως από την μη βαθμονόμηση του μοντέλου όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις απορροών σε διάφορα σημεία του δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλές από τις μεταβλητές εισόδου του μοντέλου όπως είναι το πλάτος της λεκάνης απορροής να υπολογίζονται από τον χρήστη με μεθόδους που προσθέτουν αβεβαιότητα και σφάλματα στο τελικό αποτέλεσμα. Επίσης ιδιαίτερο προβληματισμό για πιθανή μελλοντική έρευνα είναι η ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώσει λεκάνες απορροής που στην πραγματικότητα έχουν ακανόνιστα σχήματα και αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό από την ιδανική ορθογωνική επιφάνεια που χρησιμοποιεί το υπολογιστικό σύστημα του μοντέλου. Το ίδιο ισχύει και για τις λεκάνες απορροής με επιφάνεια πολύ μεγαλύτερη των τυπικών αστικών λεκανών απορροής όπως ήταν οι λεκάνες 1 και 16 στην περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας.

Όπως δείξαμε και στα πλαίσια της εργασίας, το λογισμικό SWMM παρέχει στο χρήστη ένα μεγάλο εύρος αποτελεσμάτων που αφορούν υδρολογικά καθώς και υδραυλικά μεγέθη. Τα αποτελέσματα αυτά, παρουσιάζονται είτε μέσω πινάκων που περιέχουν τις αναλυτικές τιμές των μεγεθών είτε μέσω διαγραμμάτων διαφόρων τύπων που είναι διαθέσιμα. Τα αποτελέσματα τέλος, μπορούν να μετακινηθούν σε λογιστικά φύλλα με σκοπό να πραγματοποιηθεί εκεί η επεξεργασία τους. Τα παραπάνω καθιστούν το μοντέλο SWMM 5.1 ένα σημαντικό εργαλείο στα χέρια των μηχανικών που μελετούν την συμπεριφορά και τον σχεδιασμό των δικτύων ομβρίων υδάτων καθώς και των παντοροϊκών δικτύων αποχέτευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γιοβάνη Μ. Ε. (2013). *Εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στην αστική λεκάνη της Ραφήνας*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα.

Δάρας Α. (2004). *Το παντοροϊκό σύστημα της Αθήνας*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Επαγγελματικής Ανάπτυξης, Γραφείο Παραγωγής Έργων, Αθήνα.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ (2012). *ΔΕΛΤΙΟ ΤΥΠΟΥ: Ανακοίνωση των Αποτελεσμάτων Απογραφής Πληθυσμού – Κατοικιών 2011 για το Μόνιμο Πληθυσμό της Χώρας*.

ΕΥΔΑΠ (2019), *Ιστορική αναδρομή αποχέτευσης*, Επίσκεψη στον διαδικτυακό ιστότοπο, τελευταία πρόσβαση στις 02/01/2019.

Ζαφειράκου Α. (2015). *Υδρεύσεις – Αποχετεύσεις- Αρδεύσεις*, Διδακτικές Σημειώσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Θεσσαλονίκη.

Κούρτης Ι. Μ. (2016). *Προσομοίωση παντοροϊκού δικτύου με το λογισμικό SWMM και πρόταση μέτρων αντιμετώπισης πλημμυρικών φαινομένων*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.

Κουτσογιάννης Δ. (2011). *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης*, Έκδοση 4, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Λάζου Π. (2012). *Εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε αστικές λεκάνες απορροής: Η περίπτωση των λεκανών Νέου Ψυχικού – Χαλανδρίου*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα.

Λουκάς Α. *Υδρολογική Προσομοίωση και Πρόγνωση*, Διδακτικές Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Μιμίκου Μ. Α. (2006). *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

Μπαριάμης Γ. Ε. (2013). *Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και εφαρμογή σε λεκάνη του ρέματος Ραφήνας*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.

Π.Δ 696/74 (1974). *Περί αμοιβών μηχανικών δια σύνταξιν μελετών, επίβλεψιν, παραλαβήν κ.λπ. Συγκοινωνιακών, Υδραυλικών και Κτιριακών Έργων, ως και Τοπογραφικών, Κτηματογραφικών και Χαρτογραφικών Εργασιών και των σχετικών τεχνικών προδιαγραφών μελετών.*

Παπαθανασίου Κ. (2009). *Προσομοίωση δικτύου ομβρίων με το λογισμικό SWMM5 – Εφαρμογή στο Δήμο Συκεών Ν. Θεσσαλονίκης*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα: Γεωπληροφορική, Κατεύθυνση: Υδατικοί Πόροι.

Ραπτάκη Ε. (2017). *Ολοκληρωμένη προσομοίωση πλημμύρας στην αστική λεκάνη απορροής Αφαίας-Σκαρμαγκά, Δήμος Χαϊδαρίου*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα.

Τερζίδης Γ. Α. (1997). *ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Τσακίρης Γ. (2013). *ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ: Ι. Τεχνική Υδρολογία και Εισαγωγή στη διαχείριση υδατικών πόρων*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

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

Τσεκούρα Χ. (2010). *Εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε αστικές λεκάνες απορροής: Η περίπτωση των λεκανών Ψυχικού-Φιλοθέης*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα.

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

Ξενογλώσση Βιβλιογραφία

Akdogan Z., Guven B. (2016). *Assessing the sensitivity of SWMM to variations in hydrological and hydraulic parameters: A case study for the city of Istanbul*, Global NEST Journal, Volume 18.

Aryal S., Ashbolt S., Mcintosh B. S., Petrone K. P., Moheepala S., Chowdhury R. K., Gardener T., Gardiner R. (2016). *Assessing and Mitigating the Hydrologic Impacts of Urbanisation in Semi – Urban Catchments Using the Storm Water Management Model*, Water Resources Manage, Volume 30, pp.5437-5454.

Bisht D. S., Chatterjee C., Upadhyay P. (2016). *Modelling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study*, Natural Hazards, DOI: 10.1007/S11069-016-2455-1.

Gironas J., Roesner A. L., Davis J. (2009). *Storm Water Management Model Applications Manual*, EPA/600/R-09/000, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

Giudice G. D., Padulano R. (2016). *Sensitivity Analysis and Calibration of a Rainfall – Runoff Model with the Combined Use of EPA – SWMM and Genetic Algorithm*, Acta Geophysica, Volume 64, pp. 1755-1778.

Houston E. B. (2006). *The Use of Stormwater Modelling for Design and Performance Evaluation of Best Management Practices at the Watershed Scale*, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Civil and Environmental Engineering, Blacksburg.

Hsu M. H., Chen S. H., Chang T. J. (2000). *Inundation simulation for urban drainage Basin with the Storm Sewer System*, Journal of Hydrology, 234(1-2), pp. 21-37.

Jacobson C. R. (2011). *Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review*, Journal of Environmental Management, 92(2011), pp. 1438-1448.

Li C., Wang W., Xiong j. Chen P. (2014). *Sensitivity Analysis of Urban Drainage Modeling Using Mutual Information*, Entropy, Volume 16, pp. 5738-5752.

Mimikou M., Baltas E., Varanou E. (2000). *A study of Extreme Storm Events in the Athens Greater Area*, The extreme of the extremes symposium, Floods: Case studies.

Rabori A. M., Ghazavi R., Reveshty M. A. (2017). *Sensitivity analysis of SWMM model parameters for urban runoff estimation in semi – arid area*, Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, Volume 10, No. 5, pp. 284-294.

Rossman L. (2017). *Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics*, EPA/600/R-17/111, U.S Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

Rossman L. (2015). *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology*, EPA/600/R-15/162, U.S Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

Rossman L. (2010). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*, EPA/600/R-05/040, U.S Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

Salvadore E., Bronders J., Batelaan O. (2015). *Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions*, Journal of Hydrology, 529(2015), pp. 62-81.

Tavousi M., Honarbakhsh H., Yazd H. G. H. (2015). *Analysis of the Sensitivity of the Variables Affecting Urban Flood through Two Rational and SWMM Methods by SSA*, Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, Volume 4, pp. 362-370.

Tikkanen H. (2013). *Hydrological modeling of a large urban catchment using a stormwater management model (SWMM)*, Master Thesis, Aalto University, Transport and Environmental Engineering.

Tsihrintzis V. A., Hamid R. (1998). *Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM*, Hydrological Processes, Volume 12, pp. 311-329.

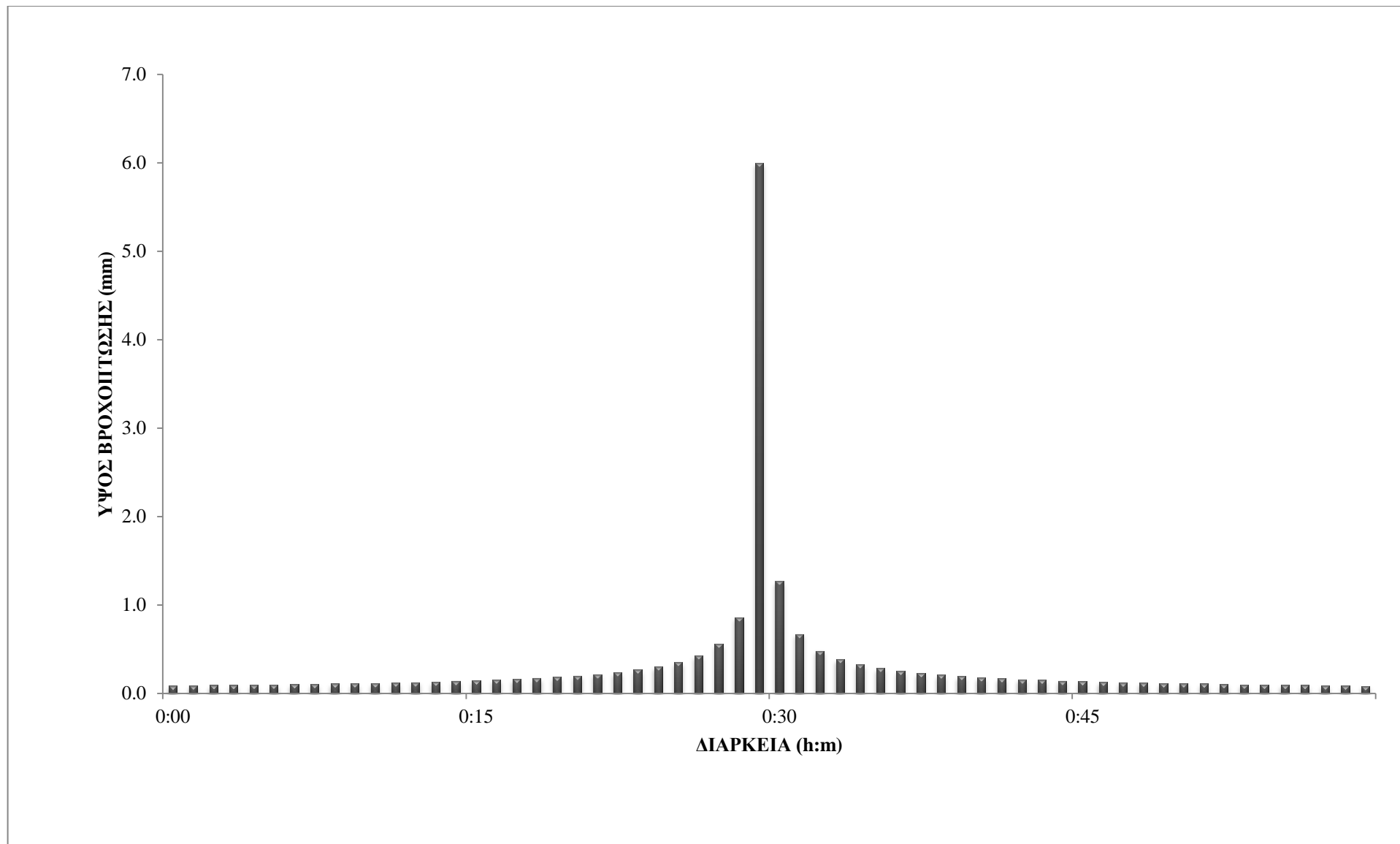
Tsihrintzis V. A., Hamid R. (1997). *Modeling and management of urban Stormwater runoff quality: A review*, Water Resources Management, Volume 11, pp.137-164.

Wanniarachchi S. S., Wijsekera N. T. S. (2012). *Using SWMM as a Tool for Floodplain Management in Ungauged Urban Watershed*, Engineer, Volume XXXXV, No. 01, pp. 1-8.

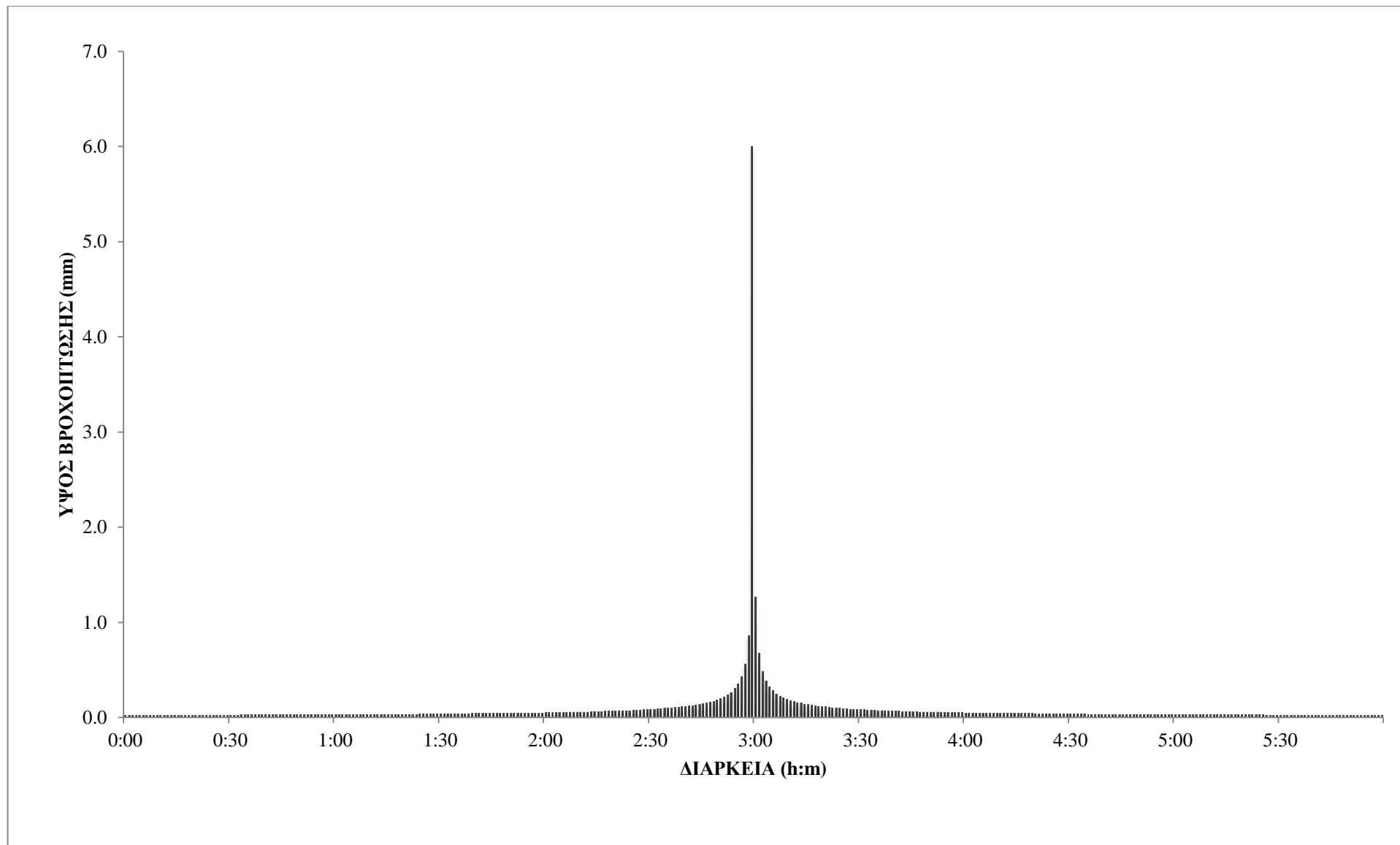
Zaghloul N. A. (1983). *Sensitivity Analysis of the SWMM Runoff – Transport Parameters and the effects of catchment discretisation*, Adv. Water Resources, Volume 6, December.

Zhang S., Guo Y. (2014). *SWMM Simulation of the Storm Water Volume Control Performance of Permeable Pavement Systems*, Journal of Hydrologic Engineering.

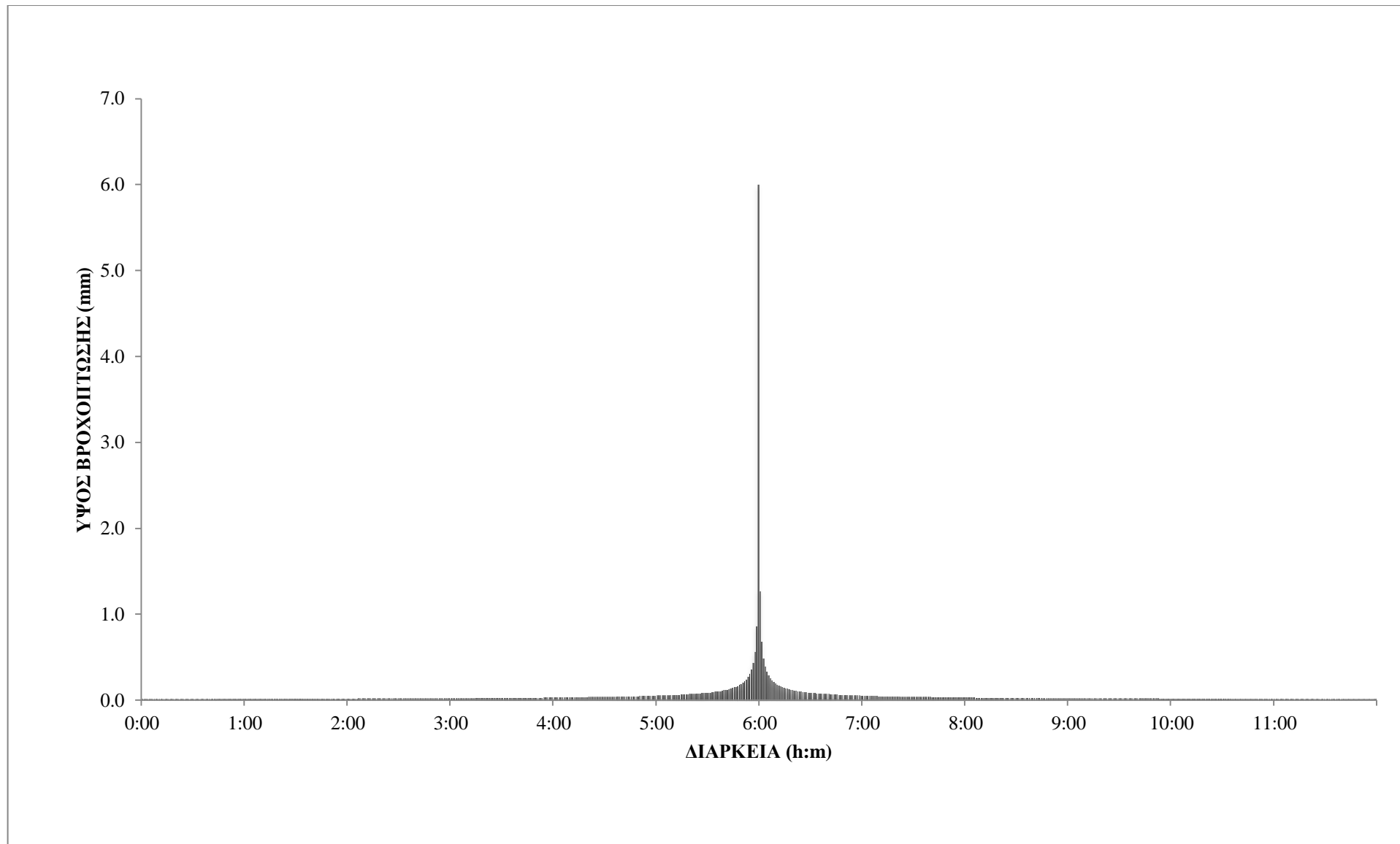
ΥΕΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ



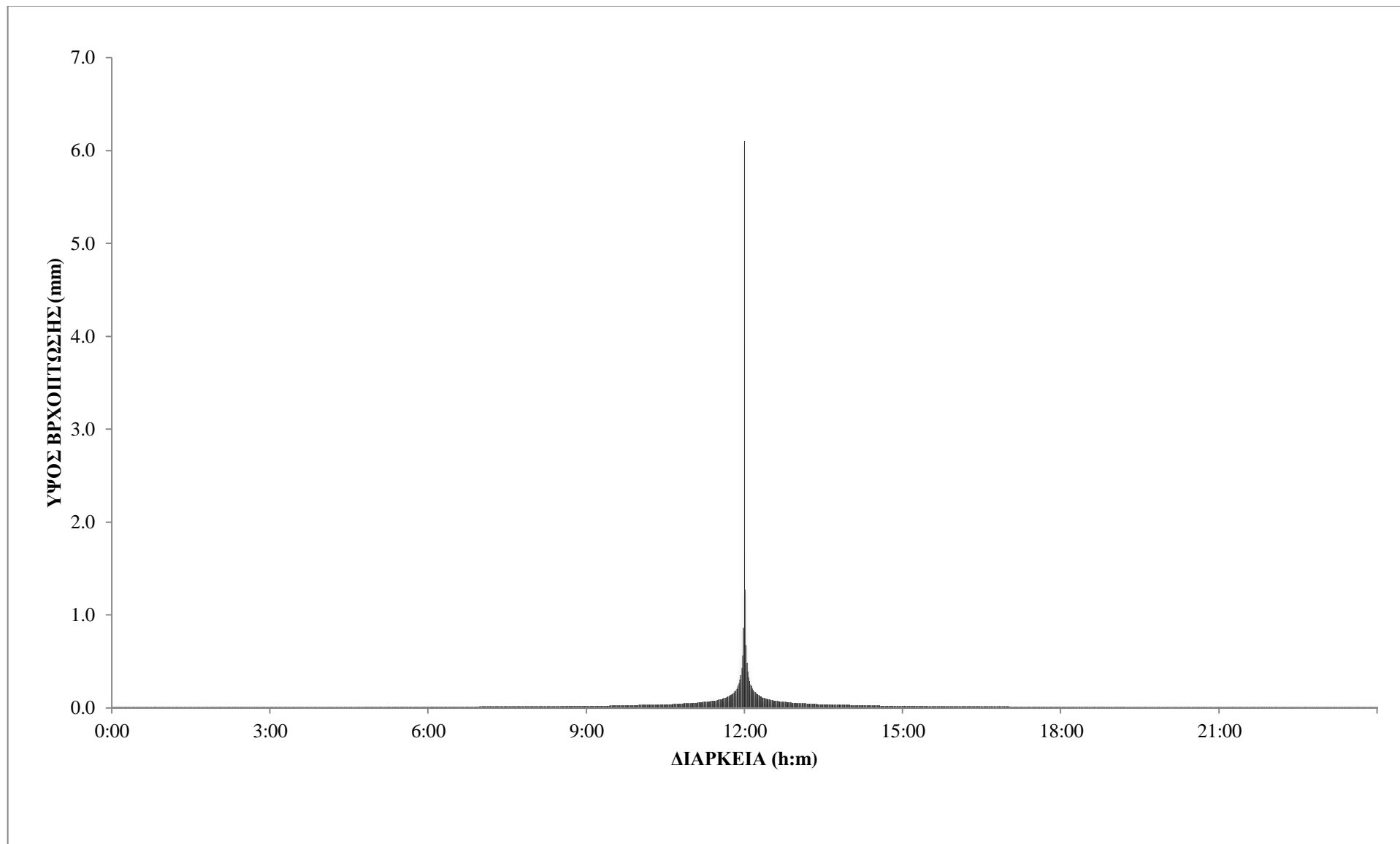
Εικόνα Α.1 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=2 έτη, t=1 h.



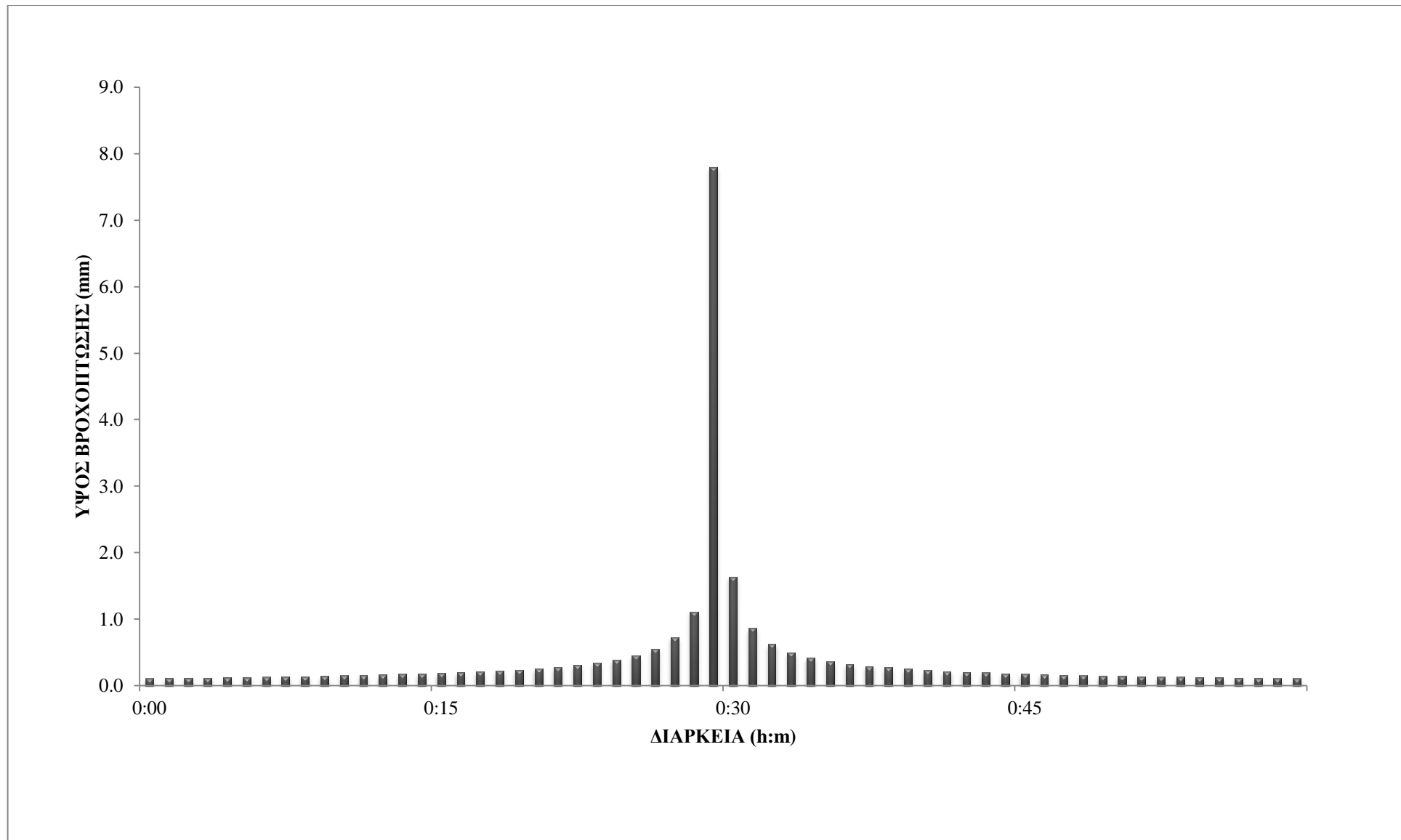
Εικόνα Α.2 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=2 έτη, t=6 h.



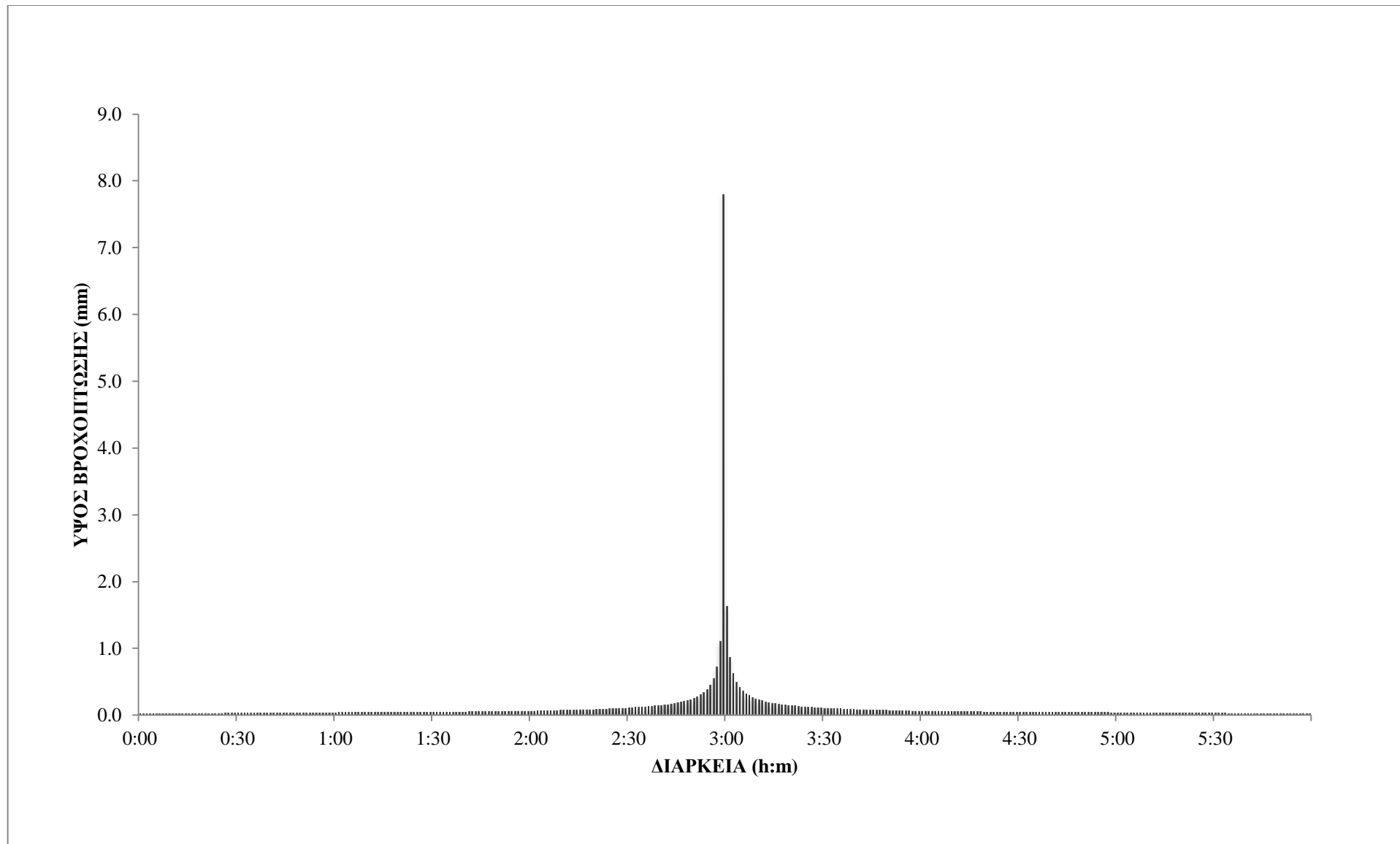
Εικόνα Α.3 Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=2$ έτη, $t=12$ h.



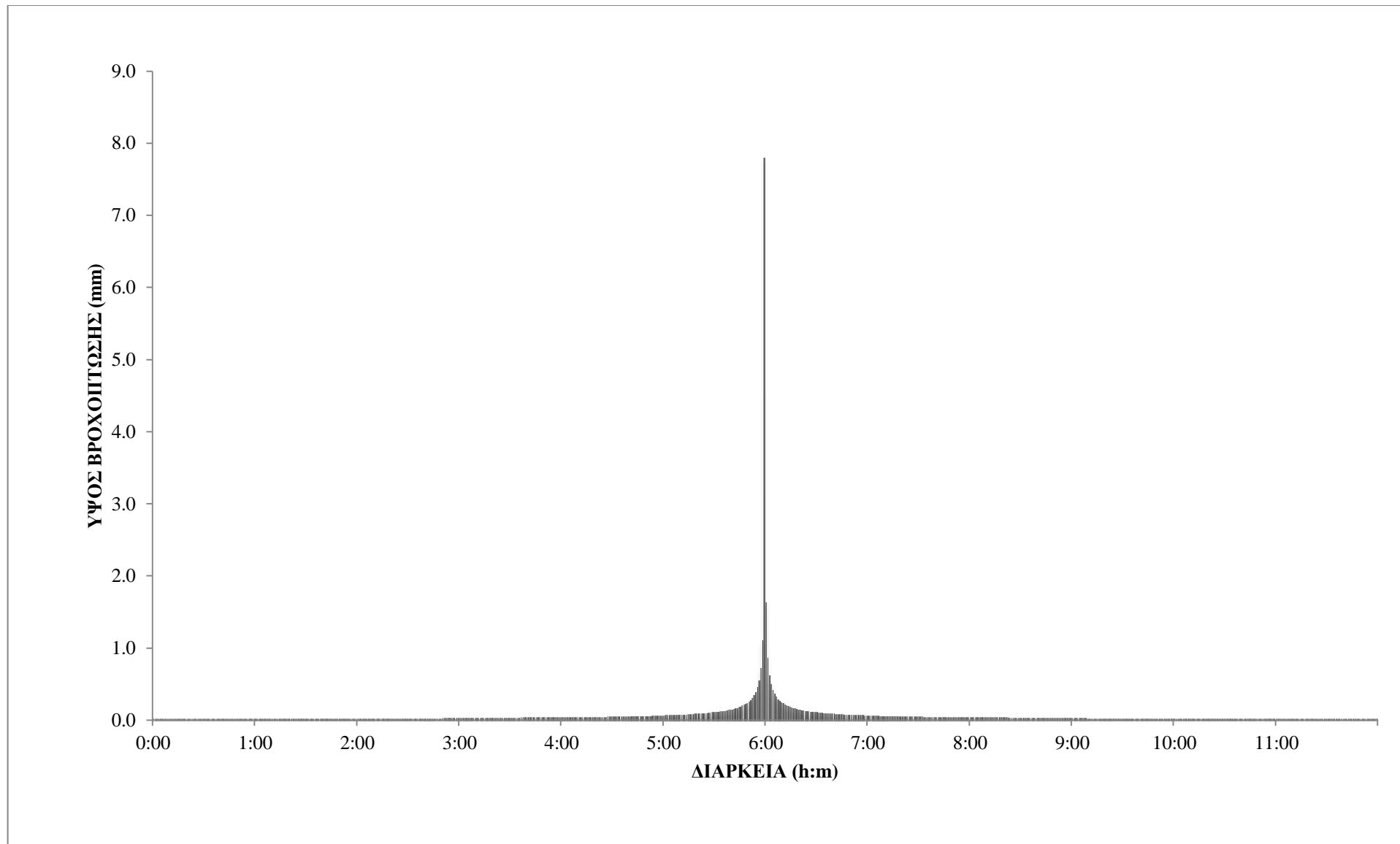
Εικόνα Α.4 Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=2$ έτη, $t=24$ h.



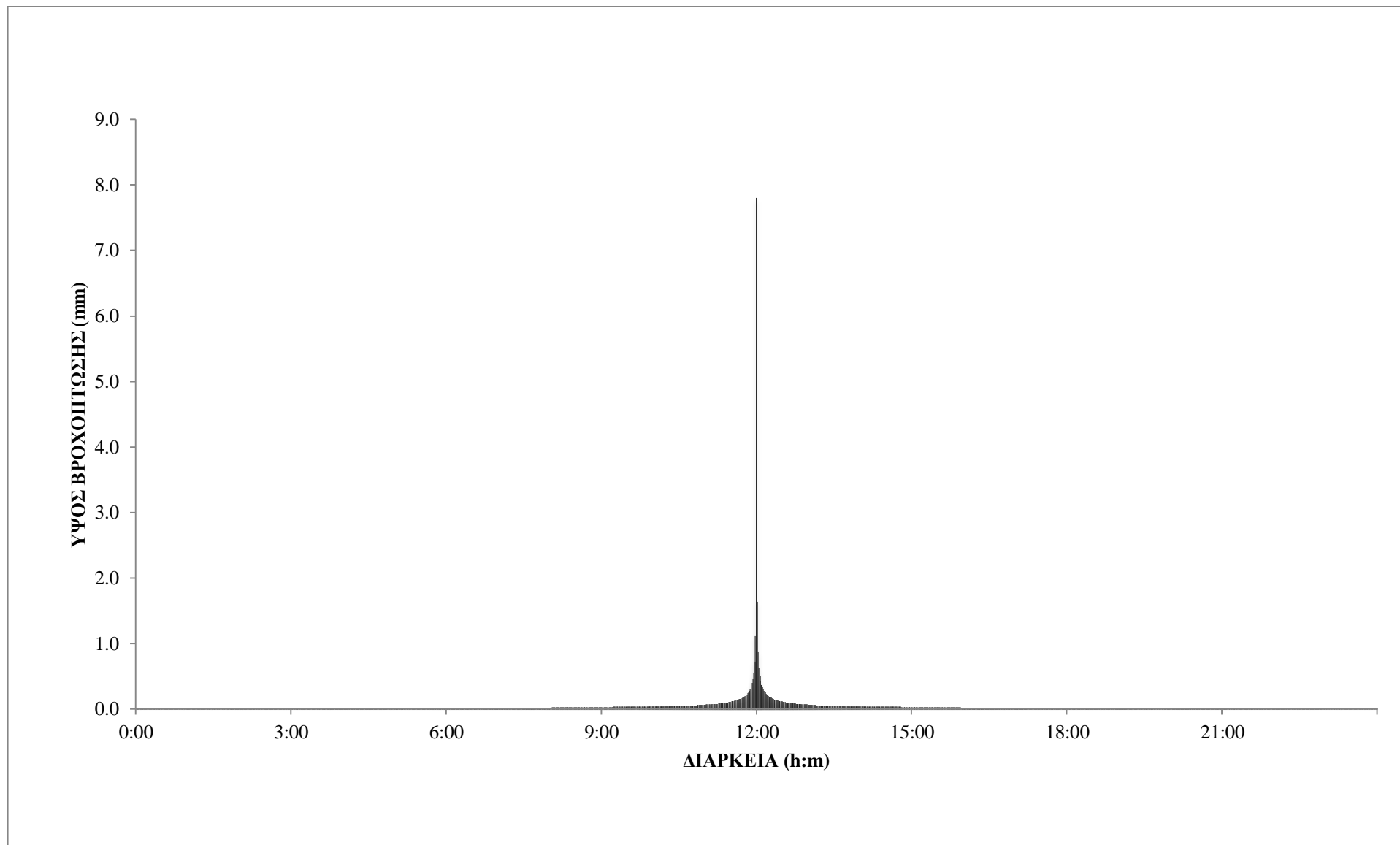
Εικόνα Α.5 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=5 έτη, t=1 h.



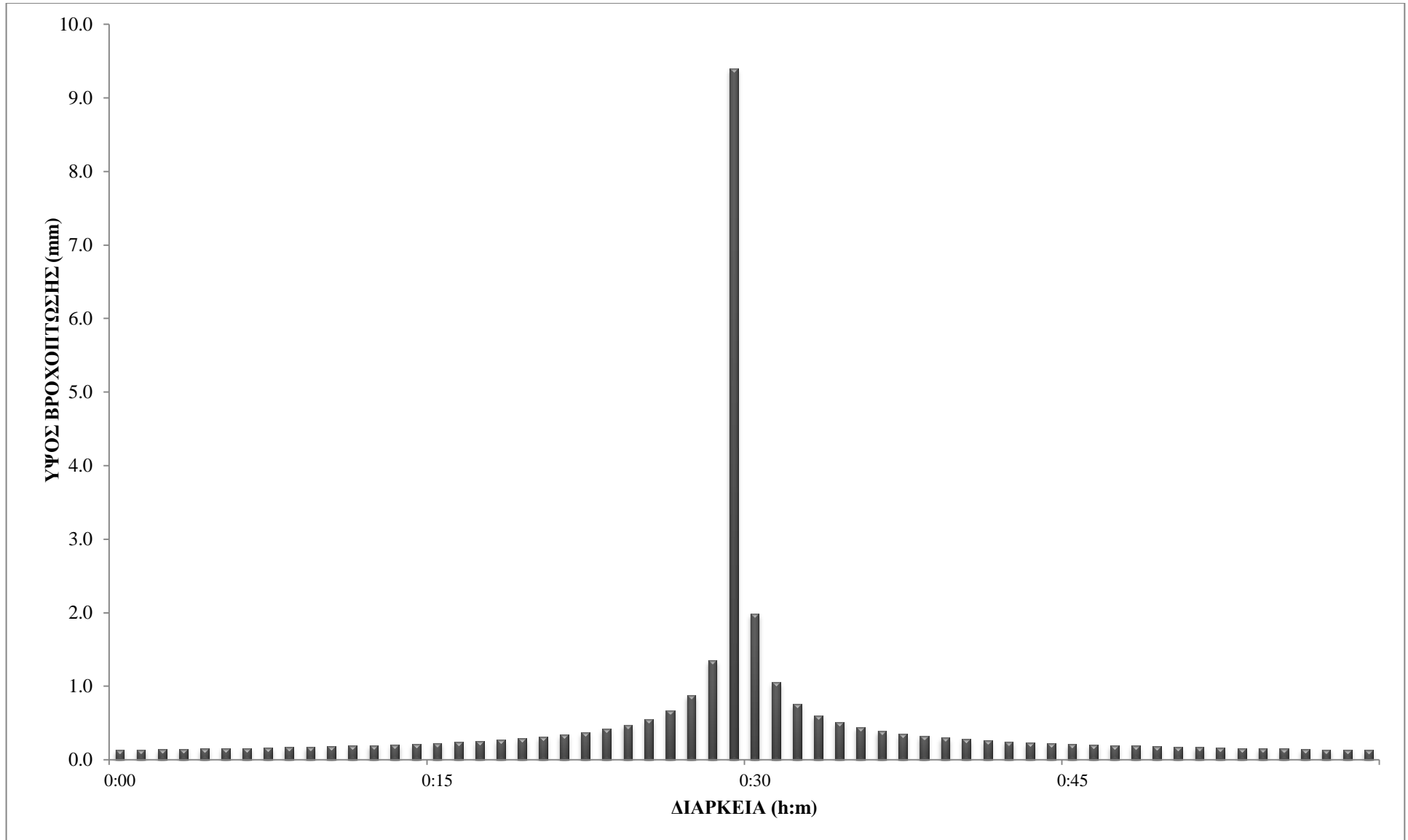
Εικόνα Α.6 Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=5$ έτη, $t=6$ h.



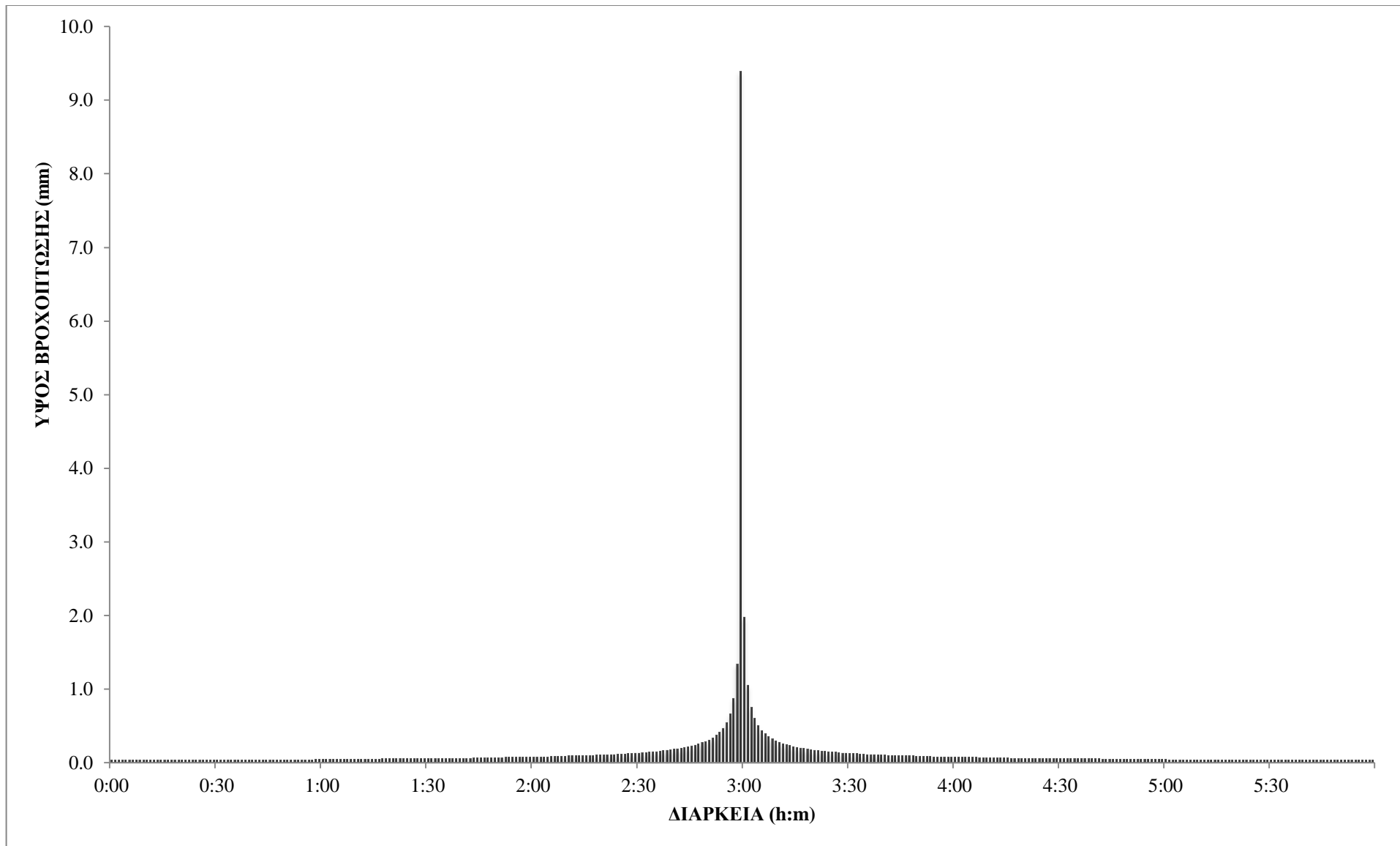
Εικόνα Α.7 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=5 έτη, t=12 h.



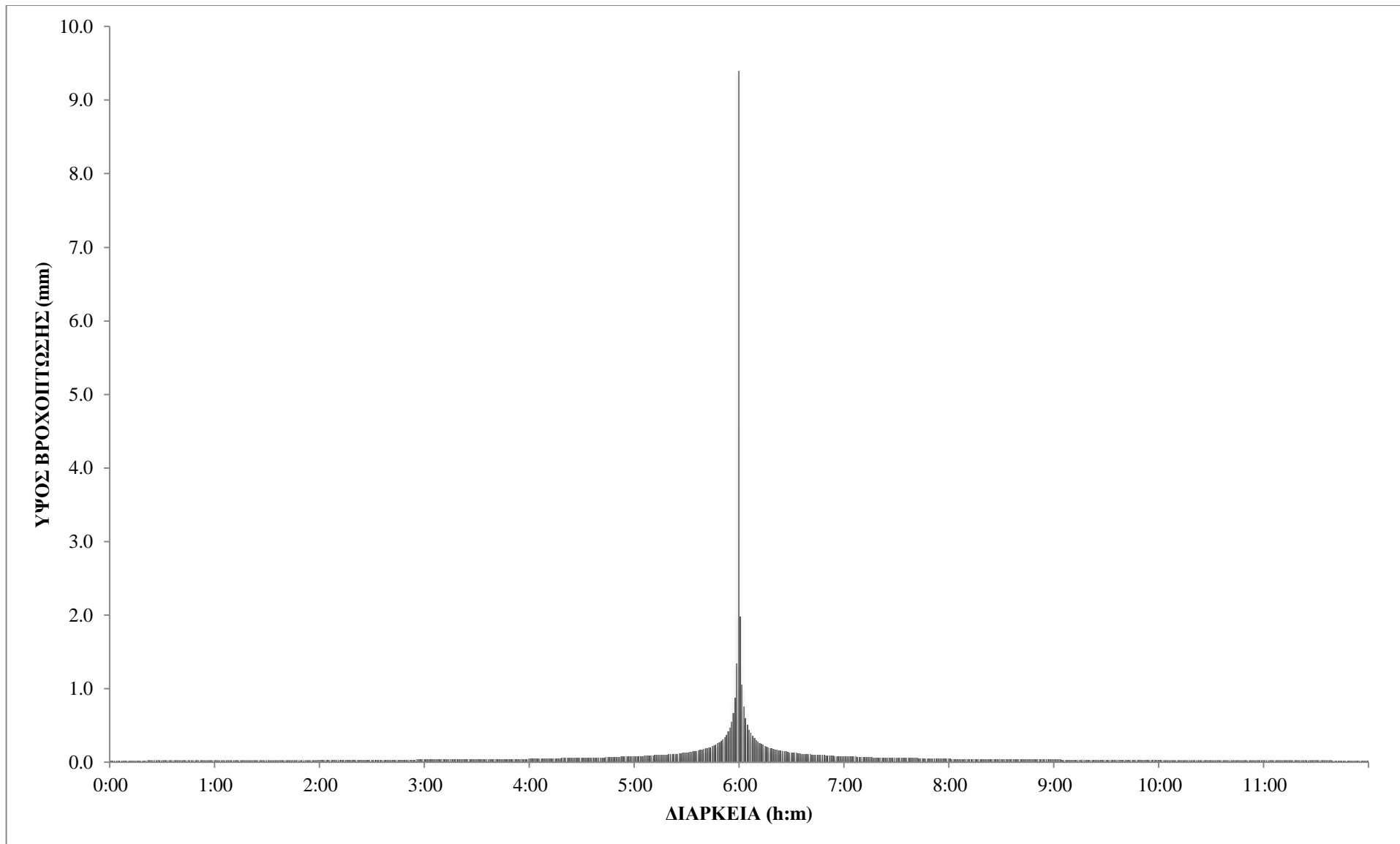
Εικόνα Α.8 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=5 έτη, t=24 h.



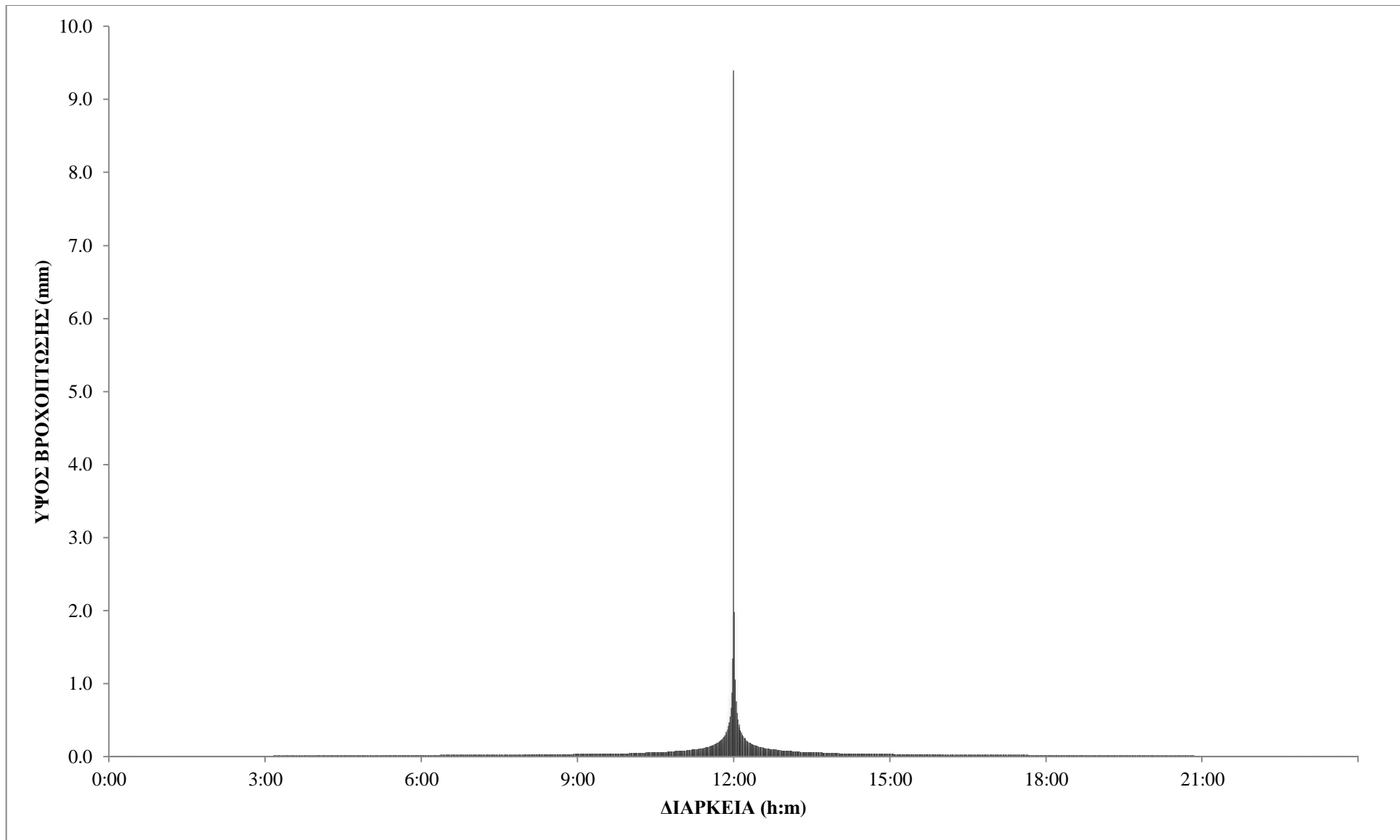
Εικόνα Α.9 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=10 έτη, t=1 h.



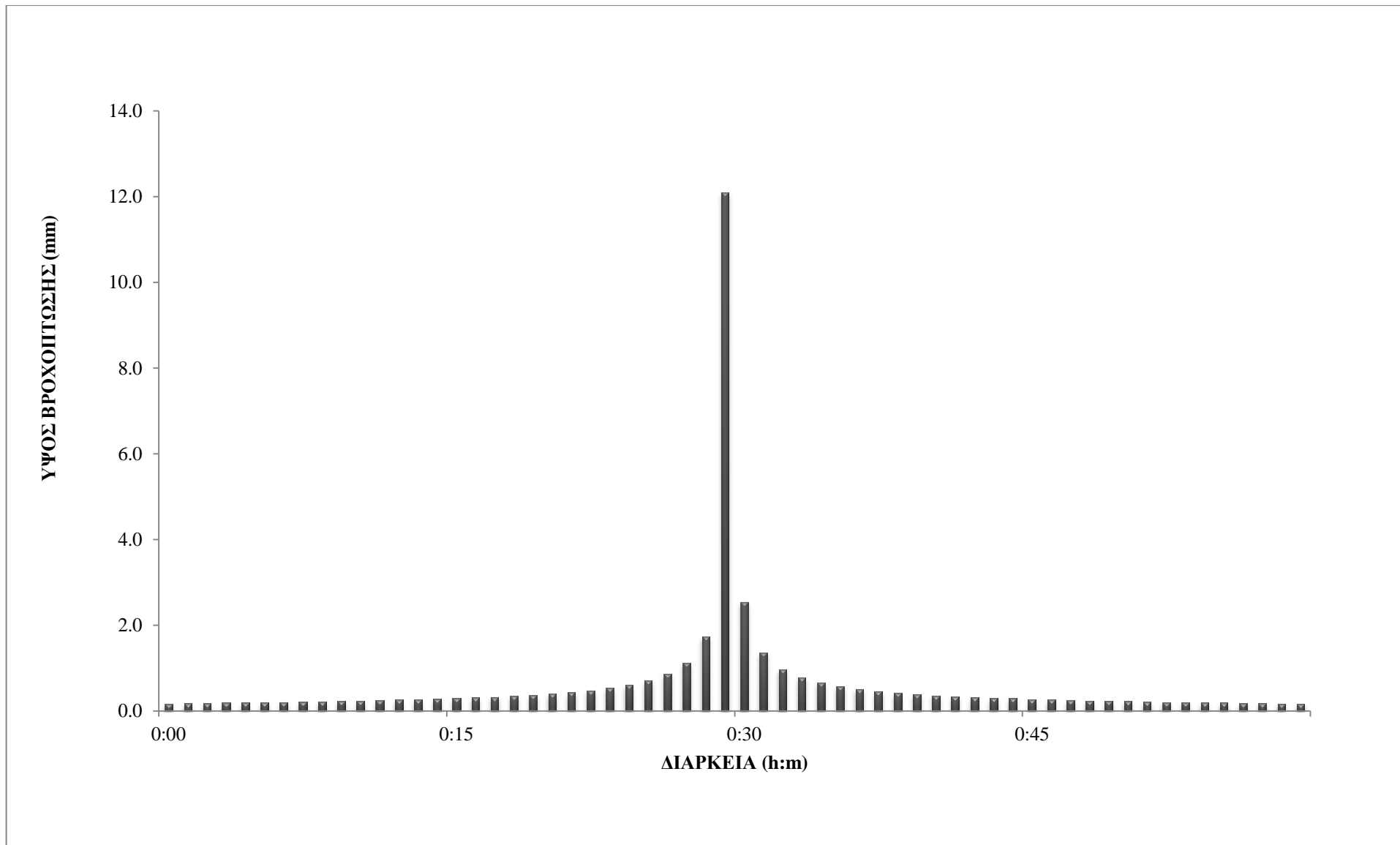
Εικόνα Α.10 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=10 έτη, t=6 h.



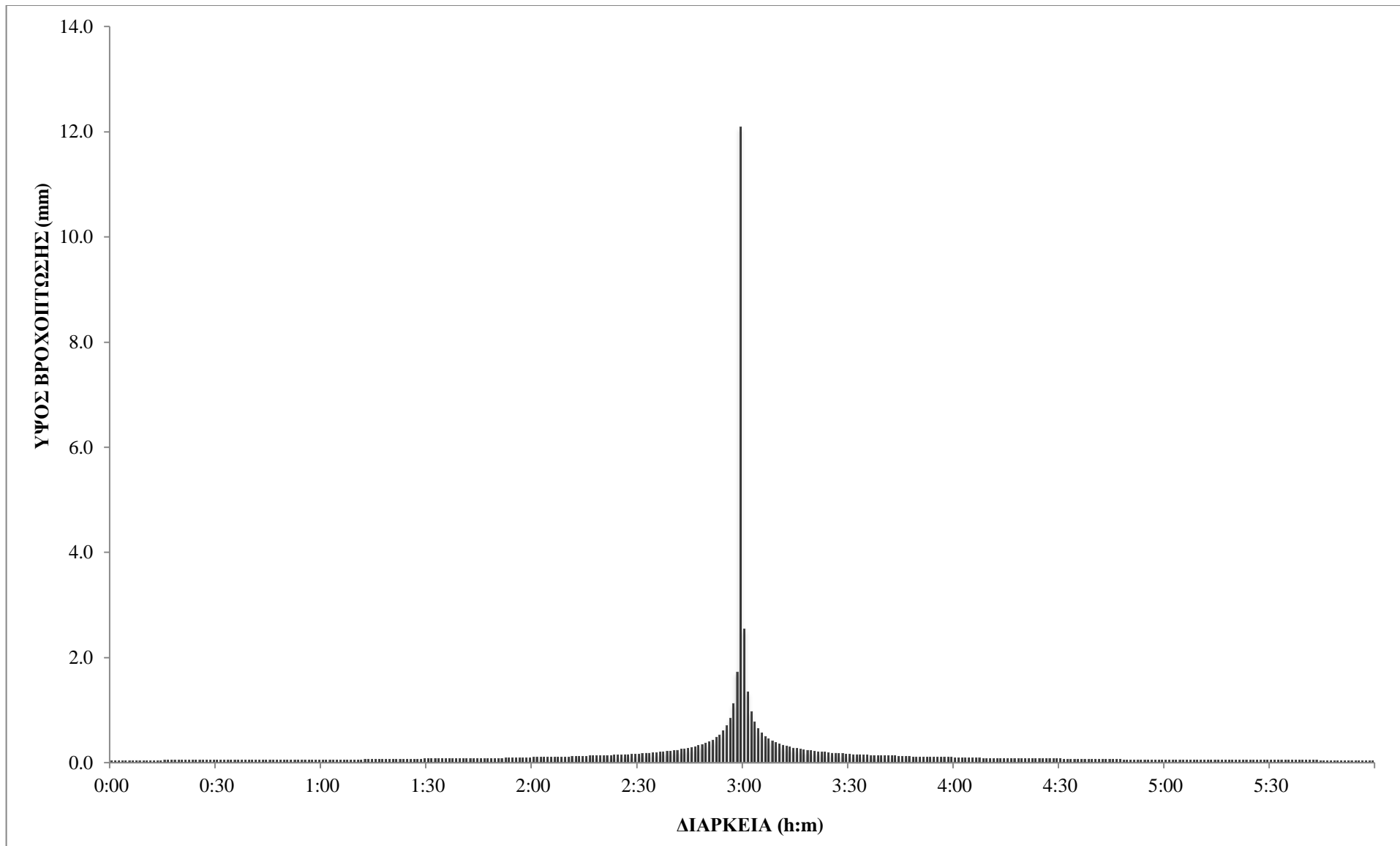
Εικόνα Α.11 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=10 έτη, t=12 h.



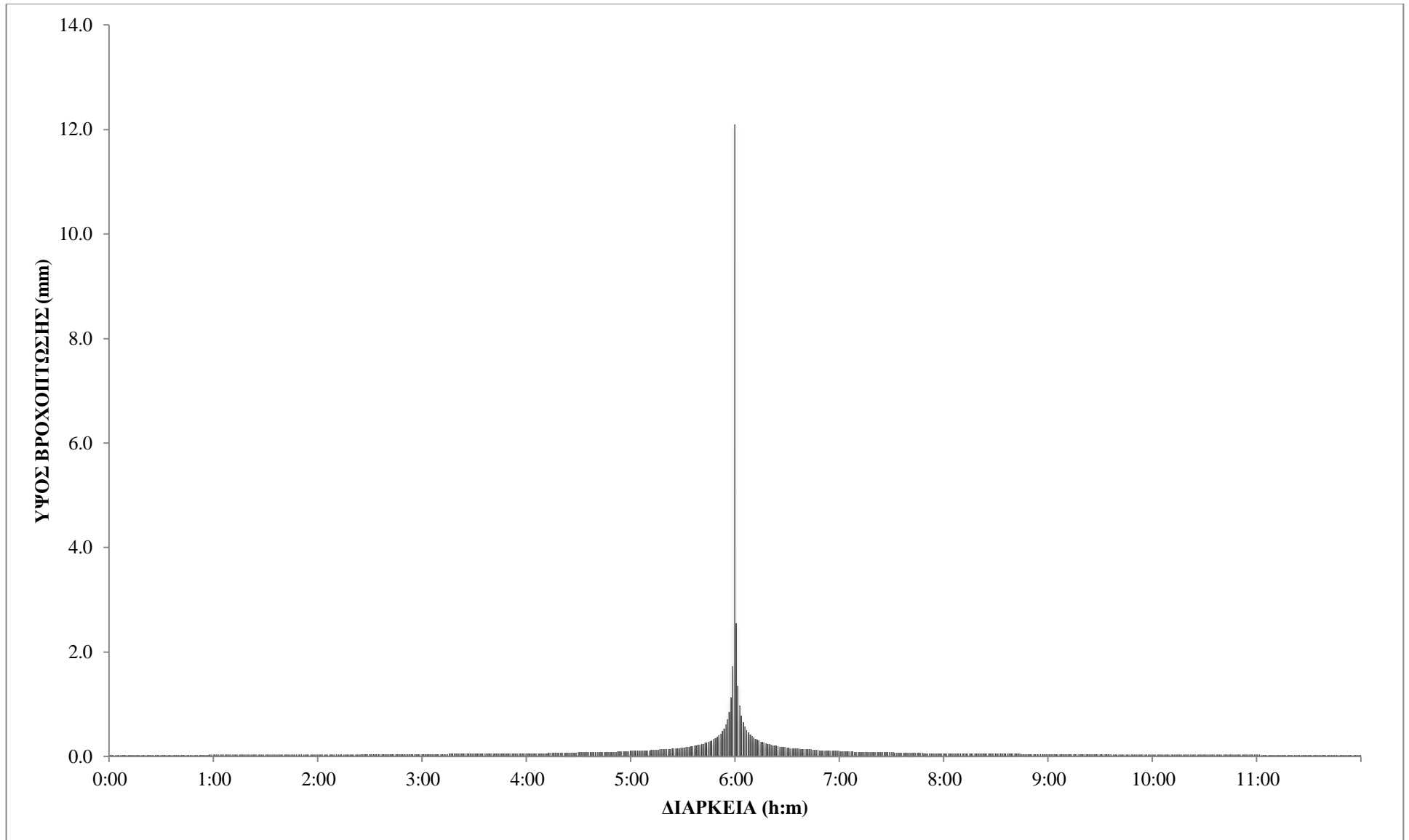
Εικόνα Α.12 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=10 έτη, t=24 h.



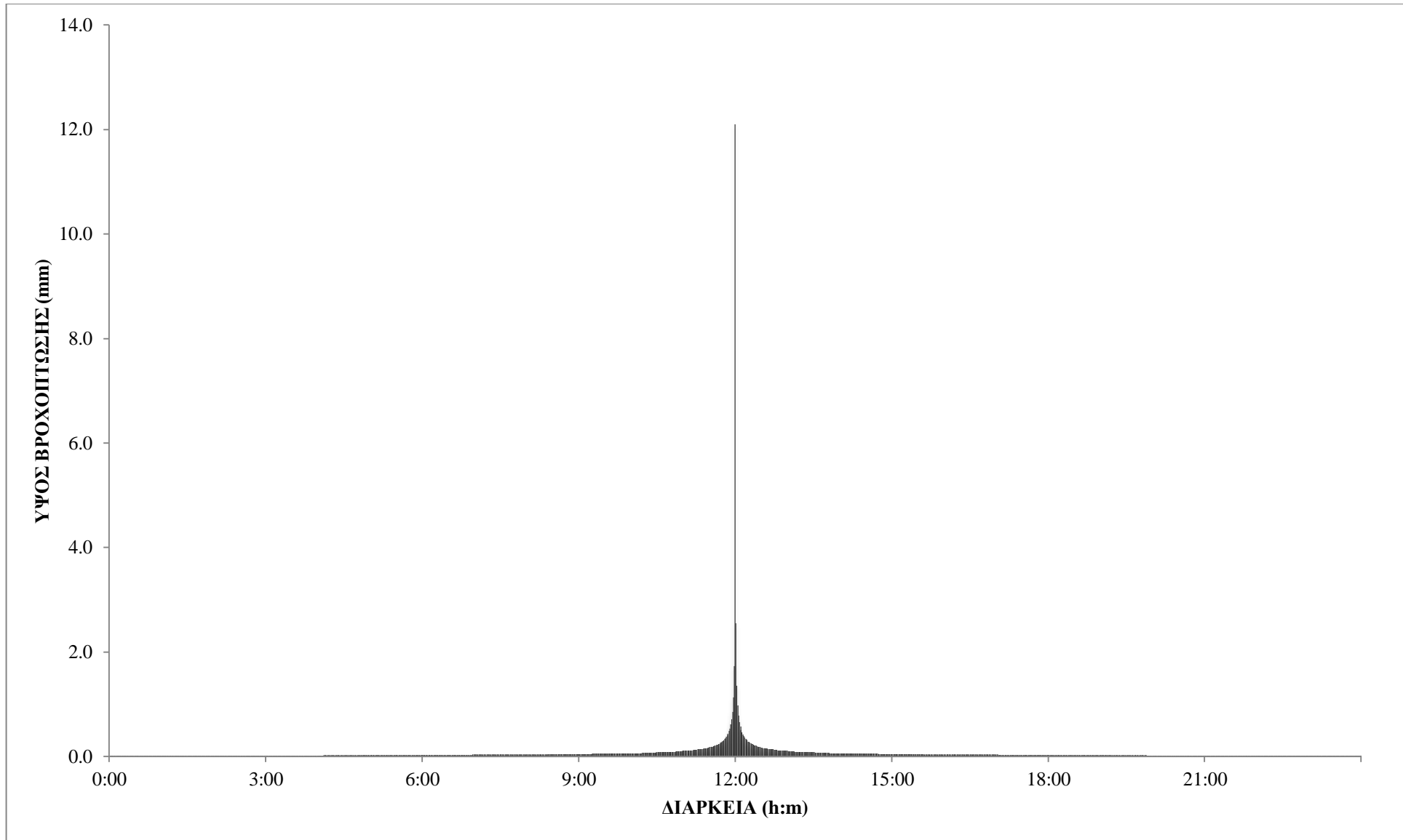
Εικόνα Α.13 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=25 έτη, t=1 h.



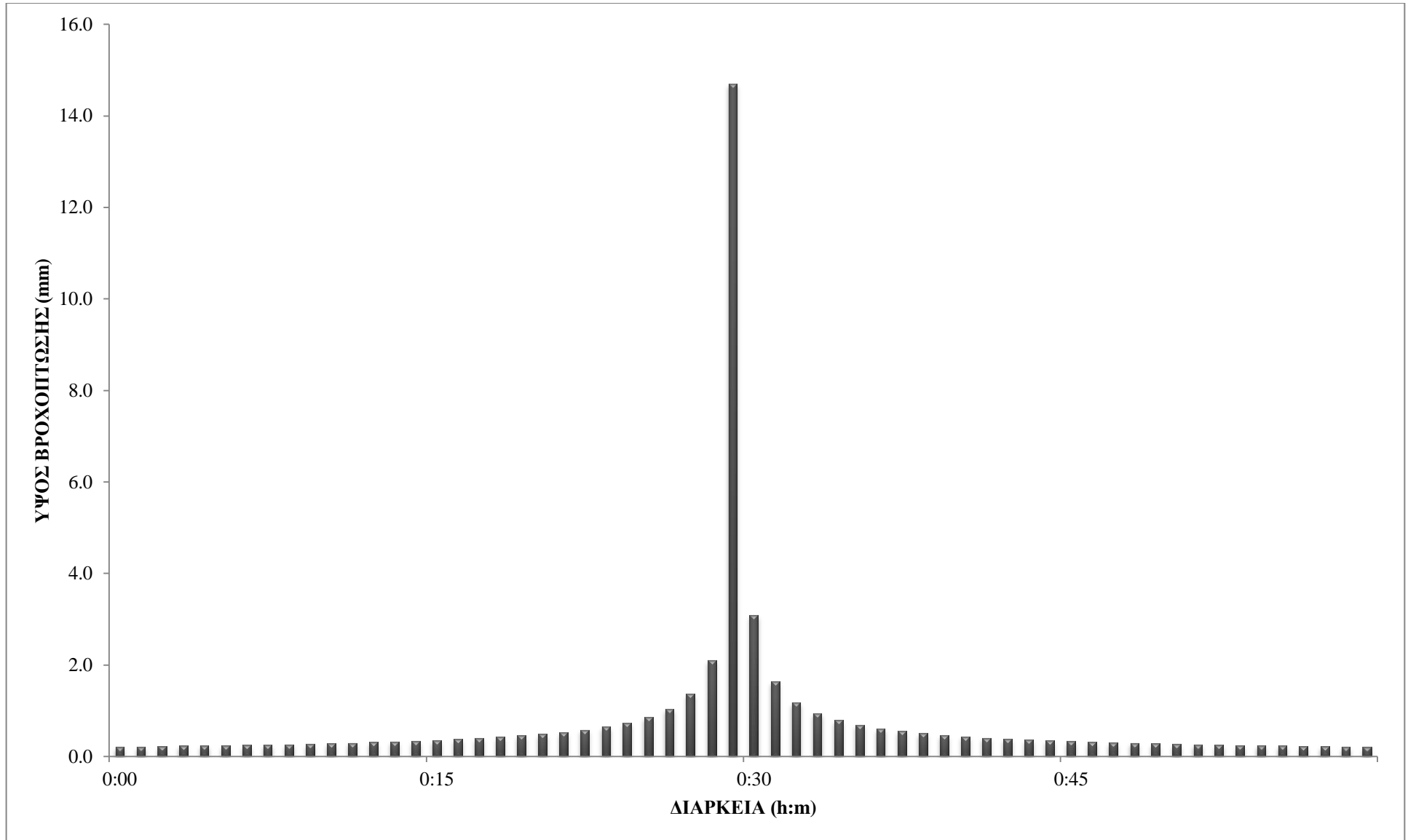
Εικόνα Α.14 Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=25$ έτη, $t=6$ h.



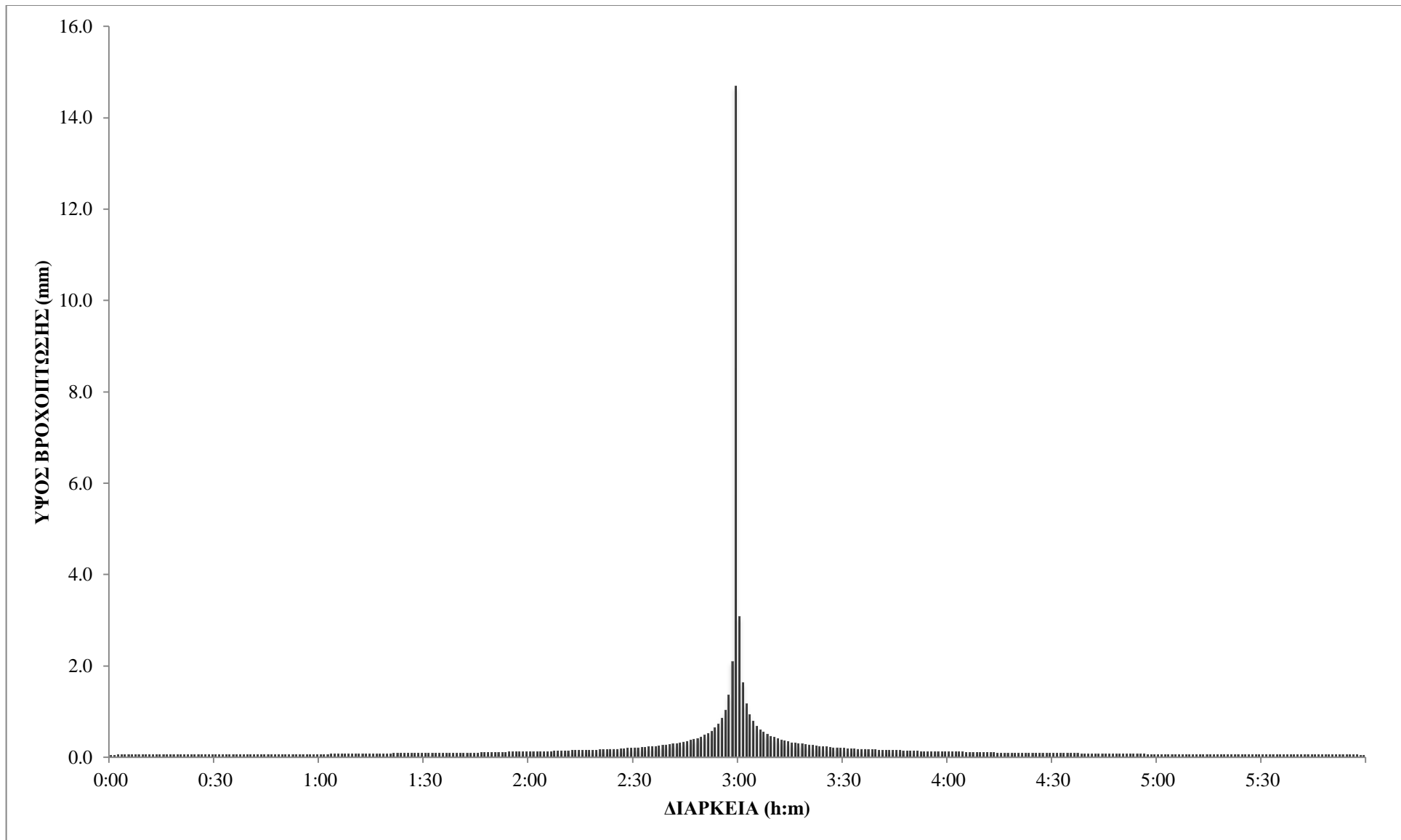
Εικόνα Α.15 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=25 έτη, t=12 h.



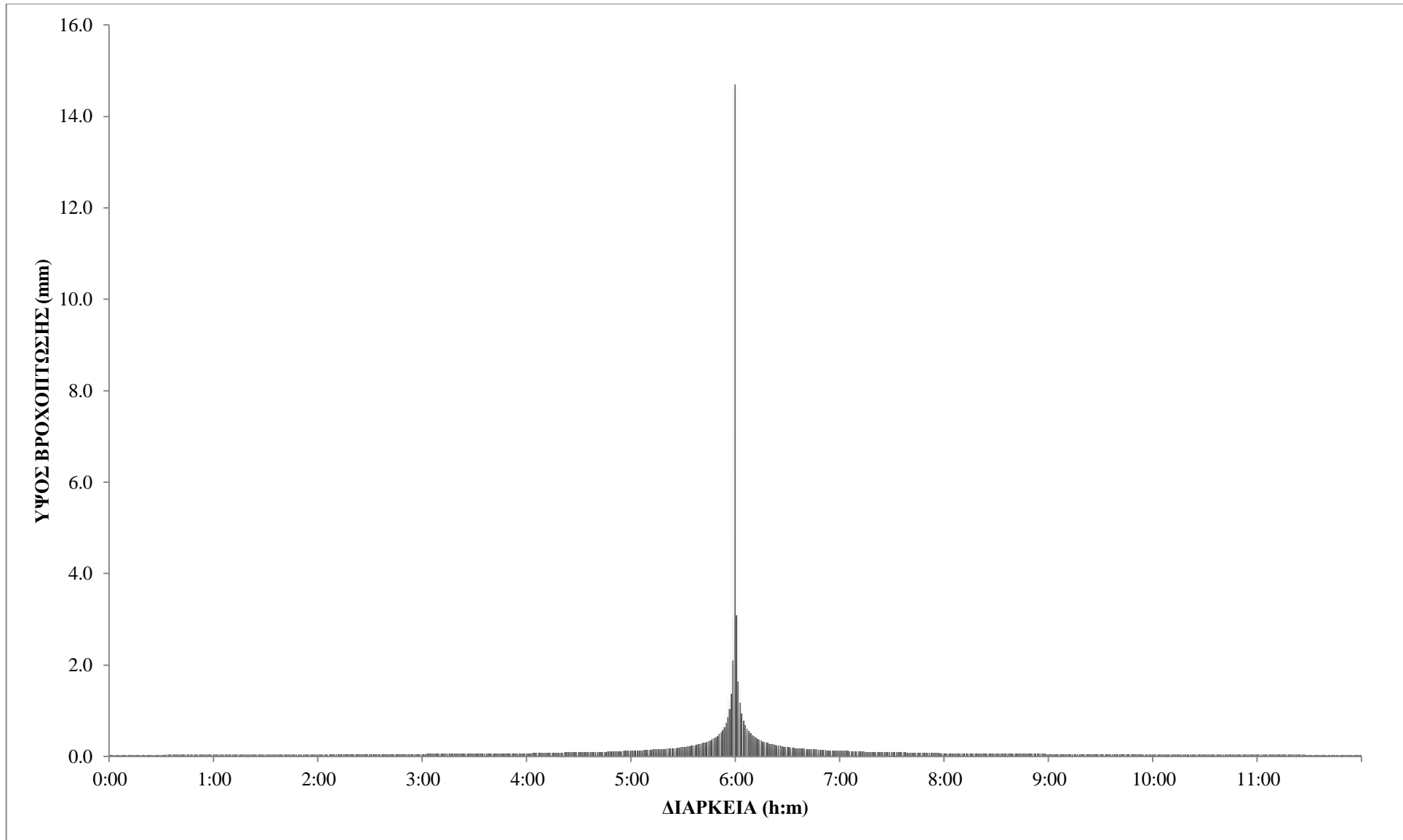
Εικόνα Α.16 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=25 έτη, t=24 h.



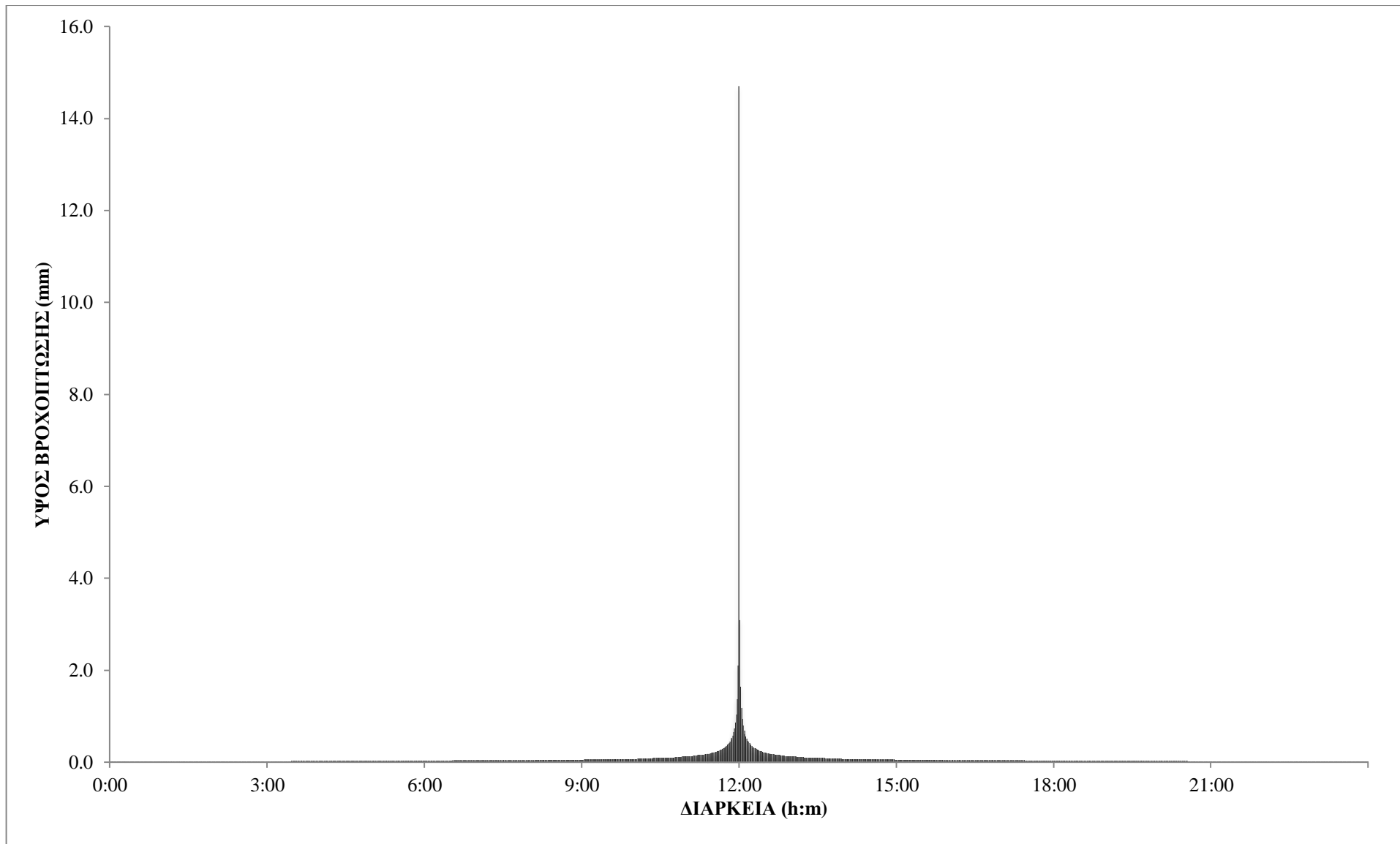
Εικόνα Α.17 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=50 έτη, t=1 h.



Εικόνα Α.18 Υετόγραμμα σχεδιασμού για $T=50$ έτη, $t=6$ h.



Εικόνα Α.19 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=50 έτη, t=12 h.



Εικόνα Α.20 Υετόγραμμα σχεδιασμού για T=50 έτη, t=24 h.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΠΑΡΟΧΗ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ

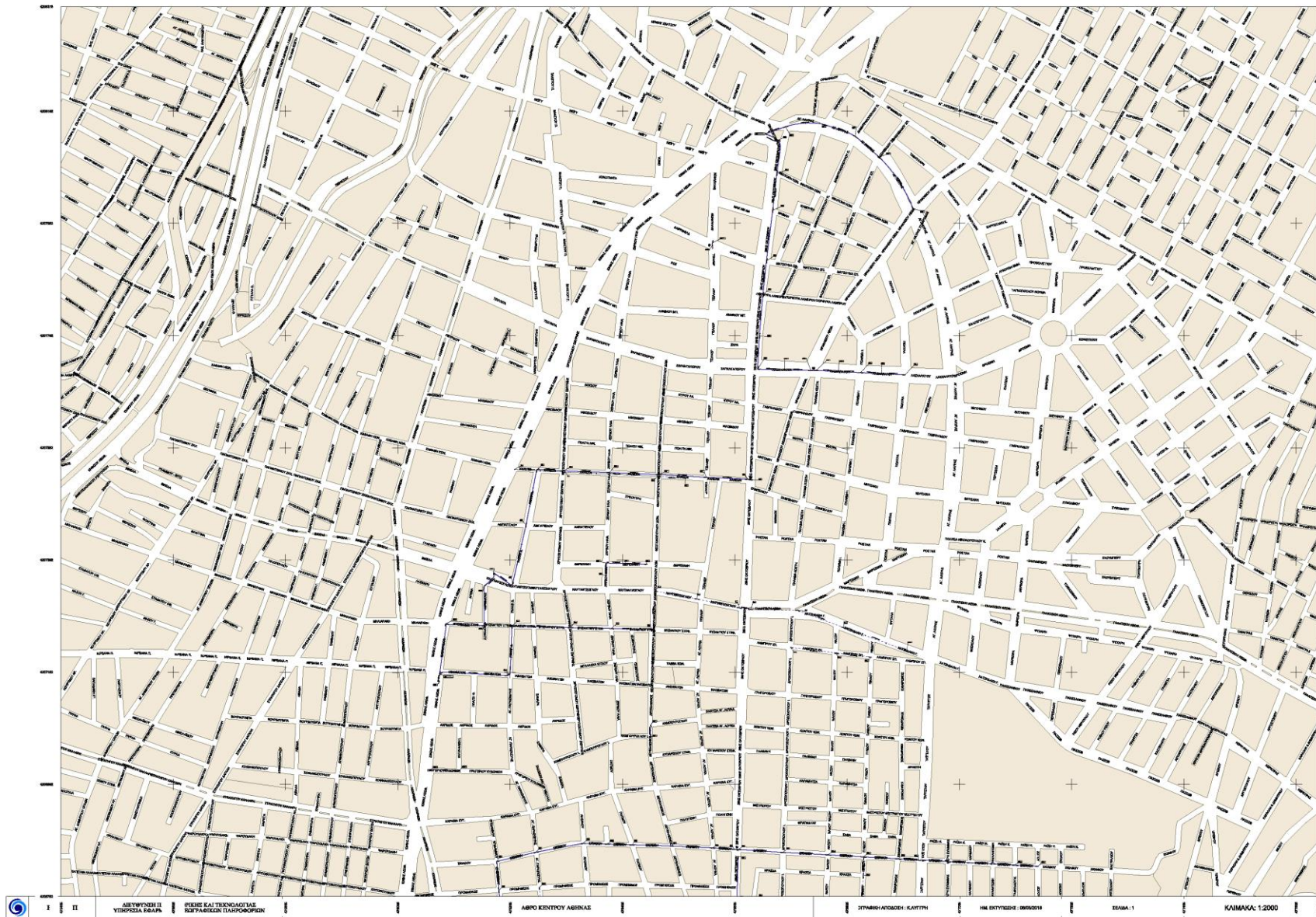
ΑΚΑΘΑΡΤΩΝ

Λεκάνη	Έκταση (ha)	Έκταση (km ²)	Αριθμός κατοίκων/km ²	Αριθμός Κατοίκων	Μέση ανηγμένη ημερήσια κατανάλωση (L/ημέρα*κάτοικο)	Συνολική μέση ημερήσια κατανάλωση P _v (L/ημέρα)	Συνολική μέση ημερήσια κατανάλωση P _v (L/s)	Πολ/στης F ₁ (Peak factor)	Μέγιστη ημερήσια κατανάλωση (L/s)	(μ)	Μέγιστη ημερήσια παροχή ακαθάρτων (L/s)	Συντελεστής P	Μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων (L/s)	Μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων (m ³ /s)
1	15.2	0.152		2551	200	510266	5.91	1.75	10.34	0.8	8.27	2.37	19.59	0.019590929
2	1.56	0.0156	17042	265	200	53173	0.62	2.00	1.23	0.8	0.98	4.02	3.96	0.003957798
3	0.73	0.0073	17042	124	200	24882	0.29	2.00	0.58	0.8	0.46	5.18	2.39	0.00238819
4	1.19	0.0119	17042	202	200	40561	0.47	2.00	0.94	0.8	0.75	4.38	3.29	0.003293402
5	0.74	0.0074	17042	126	200	25223	0.29	2.00	0.58	0.8	0.47	5.16	2.41	0.002409242
6	1.35	0.0135	17042	230	200	46015	0.53	2.00	1.07	0.8	0.85	4.21	3.59	0.00358596
7	0.82	0.0082	17042	139	200	27950	0.32	2.00	0.65	0.8	0.52	4.97	2.57	0.002574974
8	4.07	0.0407	17042	693	200	138726	1.61	2.00	3.21	0.8	2.57	3.06	7.86	0.00786054
9	1.11	0.0111	17042	189	200	37834	0.44	2.00	0.88	0.8	0.70	4.49	3.14	0.003143561
10	0.25	0.0025	17042	42	200	8521	0.10	2.00	0.20	0.8	0.16	7.79	1.23	0.001229808
11	0.16	0.0016	17042	27	200	5454	0.06	2.00	0.13	0.8	0.10	9.37	0.95	0.000945974
12	0.47	0.0047	17042	80	200	16020	0.19	2.00	0.37	0.8	0.30	6.09	1.81	0.001806678
13	0.97	0.0097	17042	165	200	33063	0.38	2.00	0.77	0.8	0.61	4.69	2.87	0.002874595
14	1	0.01	17042	170	200	34085	0.39	2.00	0.79	0.8	0.63	4.65	2.93	0.002933019
15	1.67	0.0167	17042	284	200	56922	0.66	2.00	1.32	0.8	1.05	3.93	4.15	0.00414792
16	19.5	0.195		3139	200	627826	7.27	2.00	14.53	0.8	11.63	2.23	25.96	0.02596398

Πίνακας Β.1 Υπολογισμοί παροχής ακαθάρτων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

**ΠΙΝΑΚΙΔΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΑΠΟΧΕΤΕΥΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ**



Εικόνα Γ.1 Πινακίδα στοιχείων αποχετευτικού δικτύου.

Πηγή: ΕΥΔΑΠ (2018)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΝΤΟΡΡΟΪΚΟΥ
ΔΙΚΤΥΟΥ**

Δ.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης παντοροϊκού δικτύου για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας t=12 h

Στο Παράρτημα Δ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του παντοροϊκού δικτύου της Αθήνας και συγκεκριμένα της Β΄ ζώνης του δικτύου για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας t=12 h και περιόδου επαναφοράς T=2, 5, 25, 50 έτη.

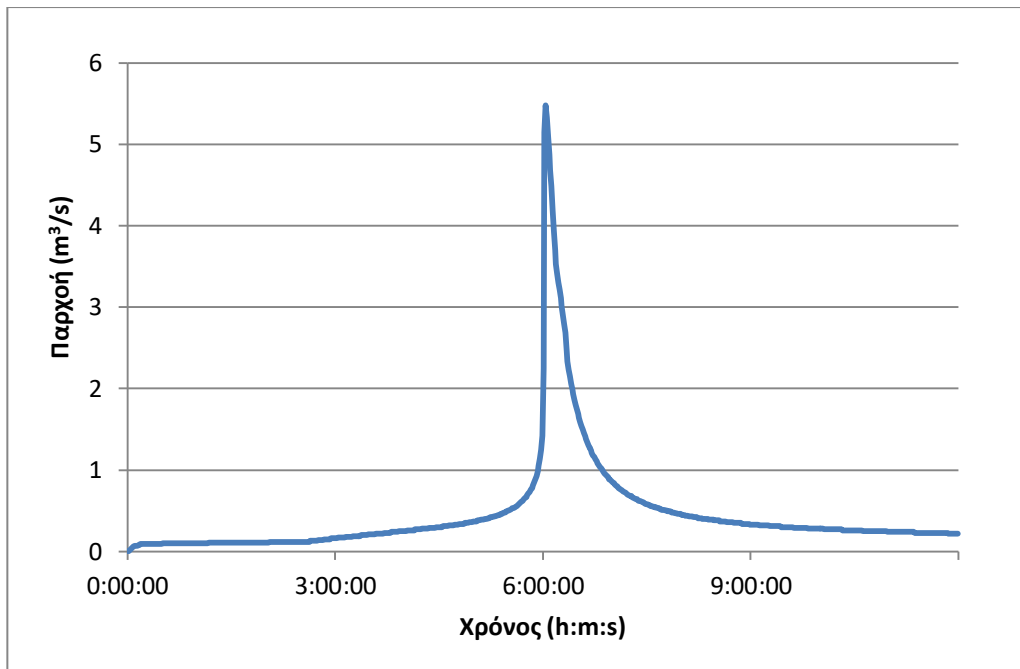
Δ.1.1 T=2 έτη

Στον Πίνακα Δ.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα γενικά αποτελέσματα της προσομοίωσης για βροχόπτωση σχεδιασμού t=12 h και περιόδου επαναφοράς T=2 έτη. Οι αγωγοί του δικτύου δεν είναι επαρκής για την αποχέτευση του συνόλου της απορροής με αποτέλεσμα να παρατηρούνται πλημμυρισμένα φρεάτια. Συγκεκριμένα πλημμυρίζουν τα φρεάτια B-42, B-42α, B-41, B-41α, B-39 και B-38 (όπως περιγράφεται η θέση και η ονομασία των φρεατίων στην Εικόνα 4.11)

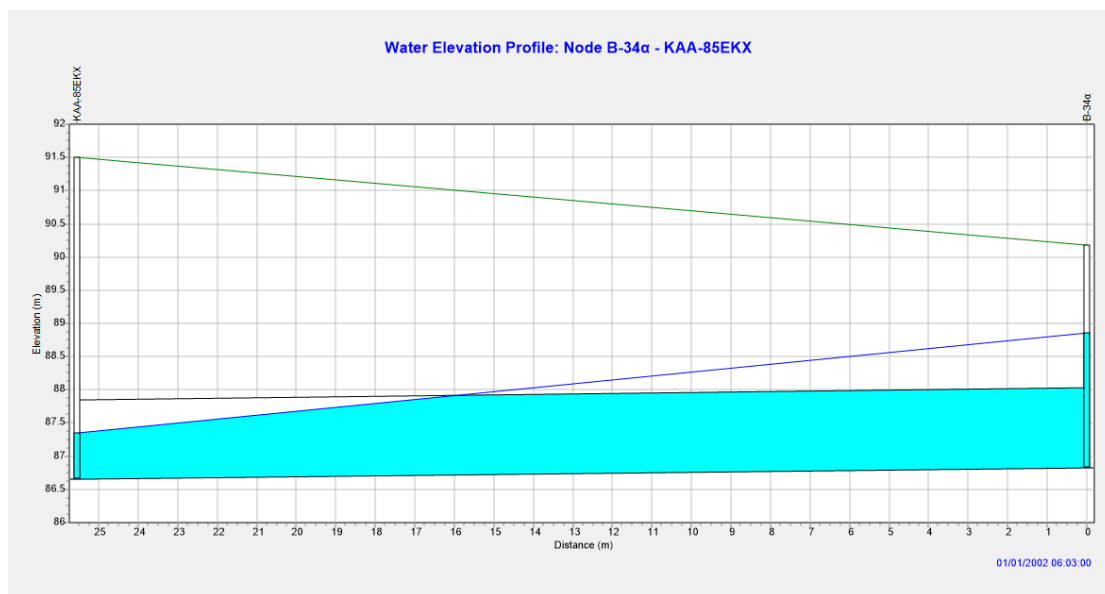
Πίνακας Δ.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας t=12 h και περιόδου επαναφοράς T=2 έτη.

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ t=12 h, T=2 έτη	
Βροχόπτωση (mm)	36.8
Διήθηση (mm)	1.5
Επιφανειακή απορροή (mm)	31.5
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m ³ /s)	5.48
Χρόνος αιχμής (h:m:s)	6:03:00

Στην Εικόνα Δ.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου του οποίου η αιχμή είναι ίση με 5.48 m³/s. Ακόμα στις Εικόνες Δ.2 και Δ.3 εμφανίζεται το προφίλ των δύο τελευταίων αγωγών που καταλήγουν στην έξοδο του δικτύου (B-34α/KAA-85EKX), (KAA-86/KAA-85EKX) τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο του δικτύου.

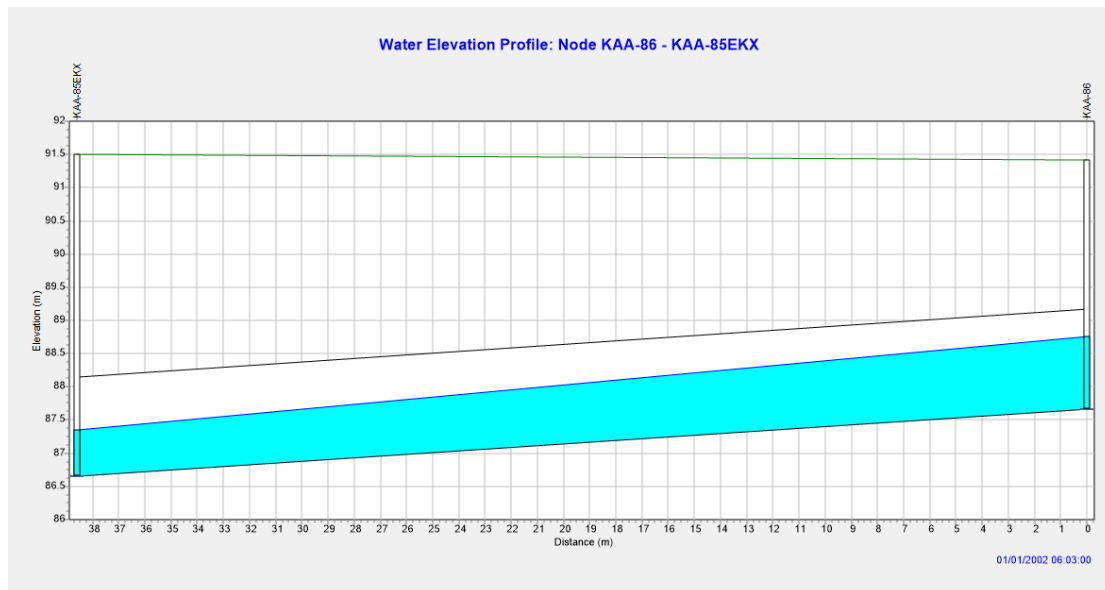


Εικόνα Δ.1 Υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου για t=12h και T=2 έτη.



Εικόνα Δ.2 Προφίλ αγωγού που συνδέει τα φρεάτια B-42a και KAA-85EKX τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.

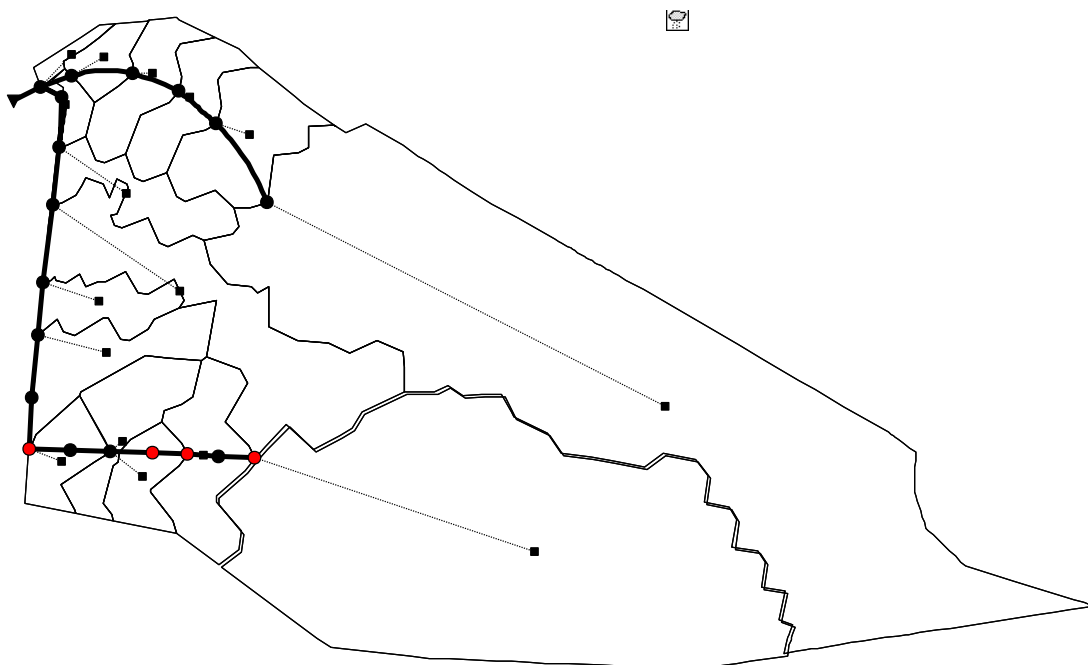
Όπως φαίνεται από την Εικόνα Δ.2 είναι φανερό πως ο αγωγός δεν έχει πλημμυρίσει δηλαδή δεν έχει πληρωθεί. Ωστόσο, το ανάντη μέρος του αγωγού είναι υπερφορτισμένο με αποτέλεσμα να λειτουργεί υπό πίεση και το φρεάτιο B-34a τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής δεν είναι πλημμυρισμένο ωστόσο λειτουργεί υπερφορτισμένο. Αντίθετα δεν συμβαίνει το ίδιο με τον αγωγό που συνδέει τα φρεάτια KAA-86 και KAA-85EKX (Εικόνα Δ.3).



Εικόνα Δ.3 Προφίλ αγωγού που συνδέει τα φρεάτια ΚΑΑ-86 και ΚΑΑ-85ΕΚΧ τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.

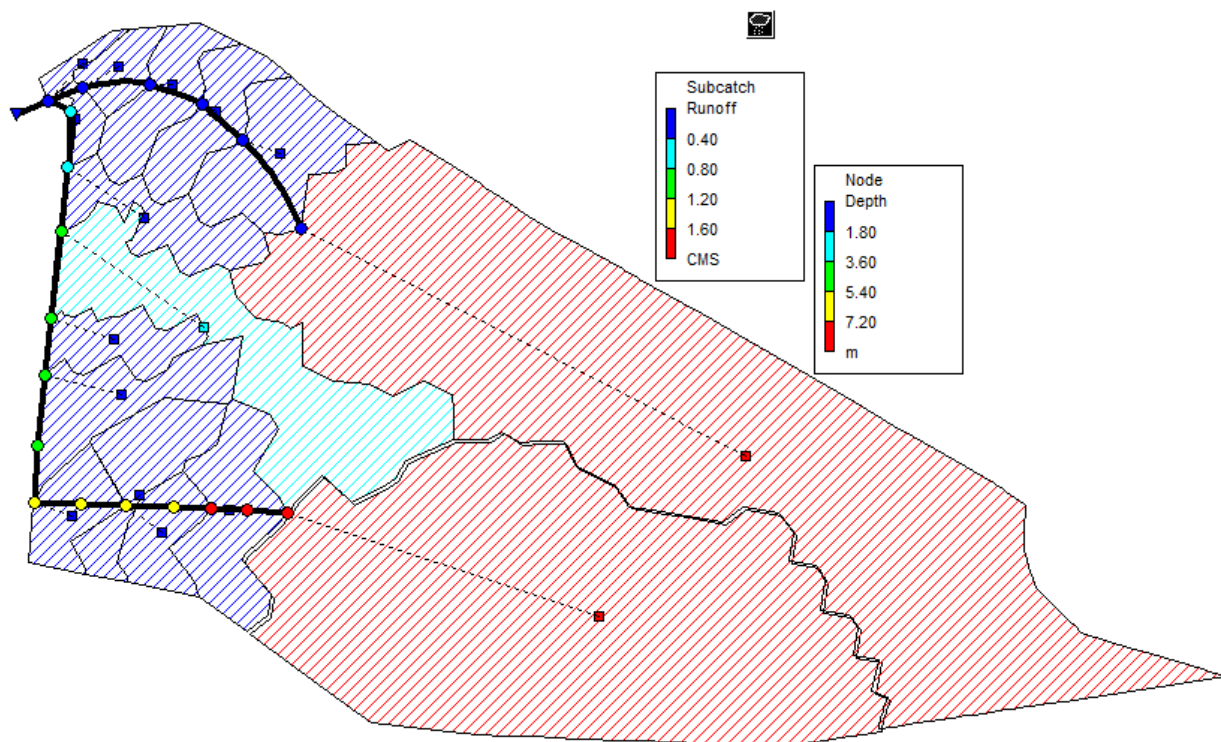
Ο αγωγός δεν έχει πληρωθεί όπως φαίνεται ενώ αντίστοιχα κανένα από τα δύο φρεάτια που συνδέονται στον αγωγό δεν είναι υπερφορτισμένο.

Στην Εικόνα Δ.4 παρουσιάζονται τα πλημμυρισμένα φρεάτια του δικτύου τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο του δικτύου.



Εικόνα Δ.4 Πλημμυρισμένα φρεάτια δικτύου τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο του δικτύου. *όπως περιγράφεται η ονομασία των φρεατίων στην Εικόνα 4.11.

Τέλος, στην Εικόνα Δ.5 παρουσιάζεται το βάθος νερού στα φρεάτια του δικτύου καθώς και η επιφανειακή απορροή ανά υπολεκάνη απορροής τη χρονική στιγμή 6:03:00 που αποτελεί την χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής.



Εικόνα Δ.5 Επιφανειακή απορροή ανά λεκάνη απορροής και βάθος νερού στους κόμβους του δικτύου τη χρονική στιγμή της αιχμής.

Οι αγωγοί του πάνω μέρους του δικτύου (KAA-89α/KAA-85EKX) είναι επαρκείς για την αποχέτευση της απορροής με αποτέλεσμα τα φρεάτια να μην πλημμυρίζουν, ενώ αντίθετα οι αγωγοί του κάτω μέρους (B-42/KAA-85EKX) που καταλήγουν στην έξοδο δεν είναι επαρκείς για την μεταφορά της απορροής. Για τον παραπάνω λόγο, τα φρεάτια του κάτω μέρους του δικτύου έχουν υψηλότερη στάθμη νερού από τα φρεάτια που βρίσκονται στο πάνω μέρος του δικτύου.

Δ.1.2 T=5 έτη

Το αποχετευτικό δίκτυο όπως είναι αναμενόμενο δεν είναι επαρκές για την αποχέτευση και μεταφορά της απορροής που σχηματίζεται από βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περιόδου επαναφοράς $T=5$ έτη. Τα φρεάτια τα οποία πλημμυρίζουν σε αυτή την περίπτωση είναι τα εξής: B-42, B-41, B-41α, B-40α, B-39, B-38, B-37, B-36 (όπως περιγράφεται η ονομασία και η θέση των φρεατίων

στην Εικόνα 4.11. Τα γενικά στοιχεία της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα Δ.2.

Πίνακας Δ.2 Γενικά αποτελέσματα προσομοίωσης δικτύου με βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περίοδο επαναφοράς $T=5$ έτη.

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ $t=12$ h, $T=5$ έτη	
Βροχόπτωση (mm)	47.5
Διήθηση (mm)	1.6
Επιφανειακή απορροή (mm)	41.9
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m^3/s)	7.07
Χρόνος αιχμής (h:m:s)	6:03:00

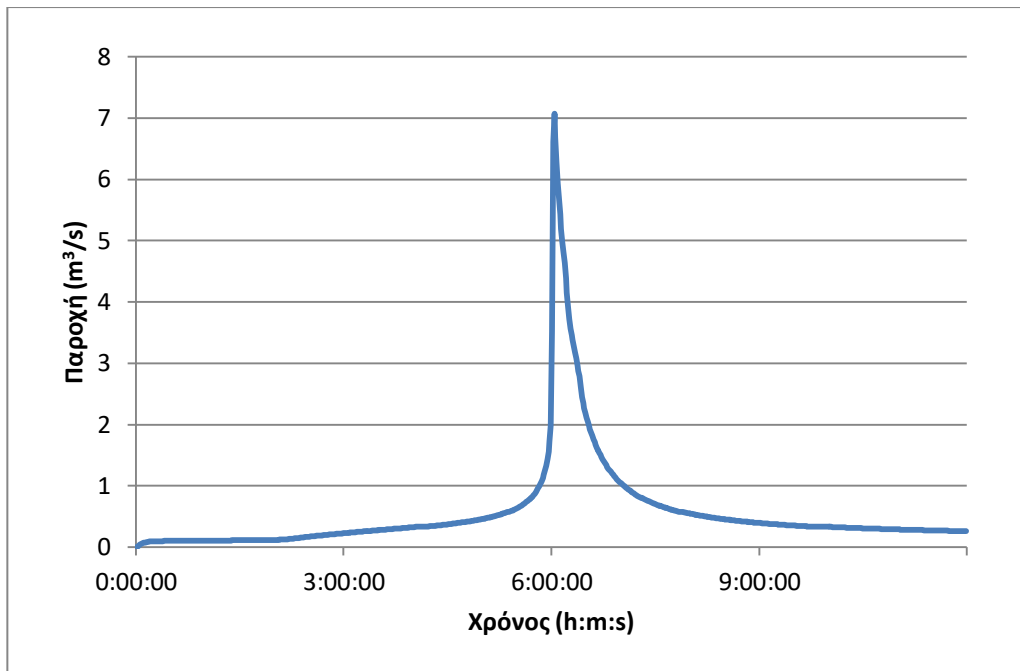
Στην Εικόνα Δ.6 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα πλημμυρισμένα φρεάτια του παντοροϊκού δικτύου τη χρονική στιγμή 6:01:00 η οποία αποτελεί τη χρονική στιγμή στην οποία εμφανίζονται τα περισσότερα πλημμυρισμένα φρεάτια.



Εικόνα Δ.6 Πλημμυρισμένα φρεάτια τη χρονική στιγμή 6:01:00 για βροχόπτωση σχεδιασμού $t=12$ h και $T=10$ έτη. *όπως περιγράφεται η ονομασία των φρεατίων στην

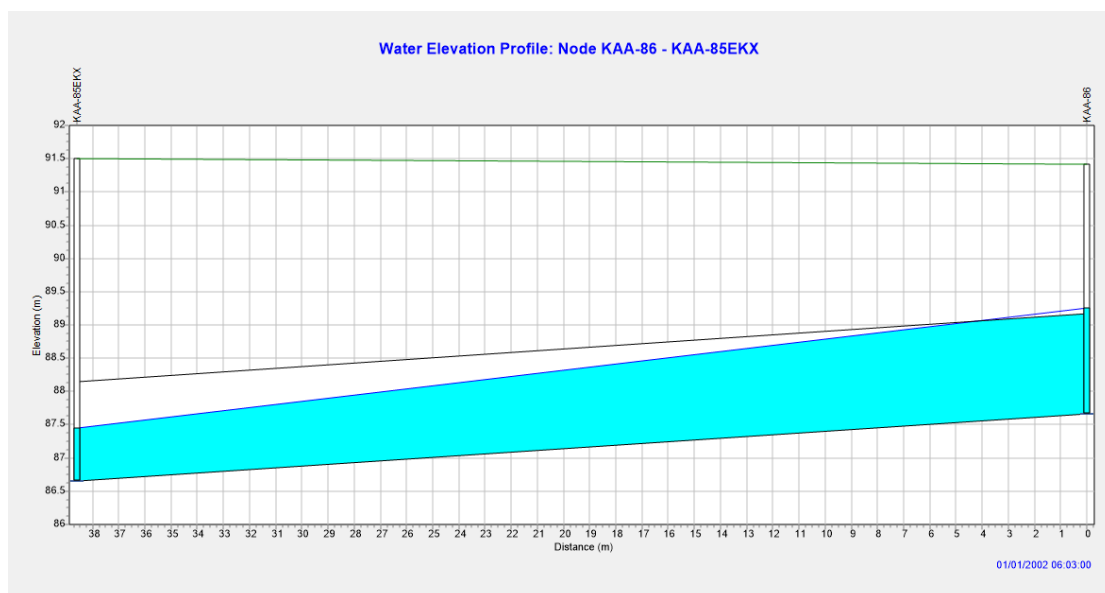
Εικόνα 4.11

Στην Εικόνα Δ.7 παρατίθεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου, δηλαδή στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ (φρεάτιο υπερχειλιστή).



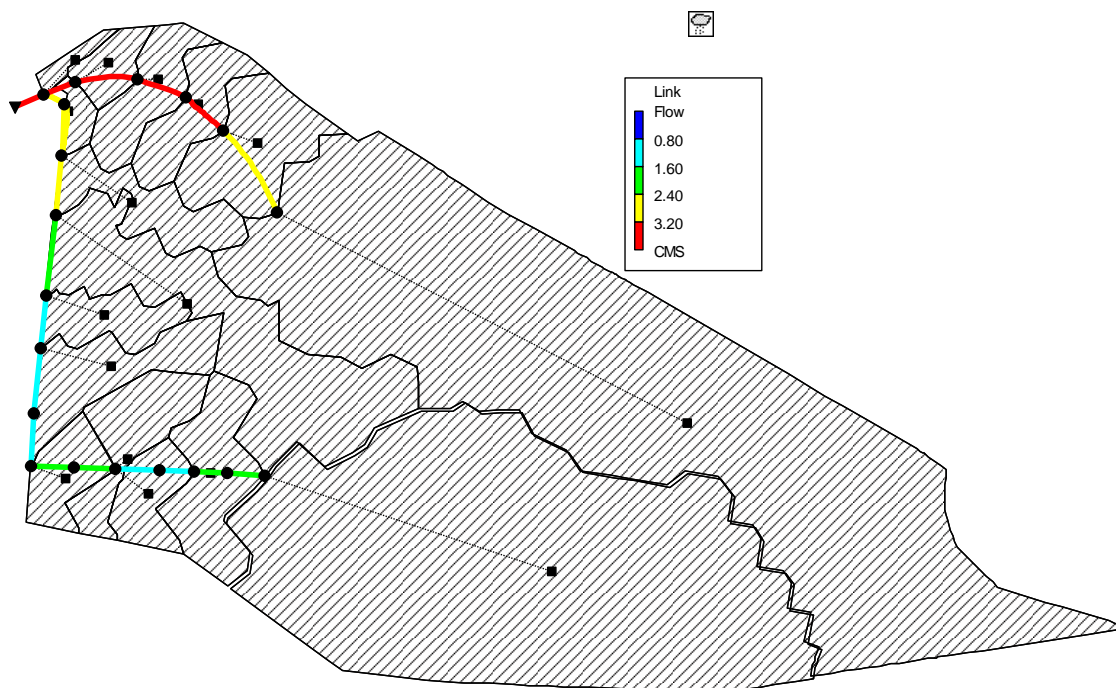
Εικόνα Δ.7 Υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου για $t=12$ h και $T=5$ έτη.

Το εμβαδόν που περικλείει η καμπύλη του υδρογραφήματος αποτελεί τον συνολικό όγκο του νερού που περνάει από την έξοδο του δικτύου. Ο όγκος του νερού σε αυτή την περίπτωση σύμφωνα τα αποτελέσματα του λογισμικού SWMM είναι ίσος με $\text{Total Inflow} = 24.2 \cdot 10^6$ L. Στην Εικόνα Δ.8 παρουσιάζεται το προφίλ του συλλεκτήρα που συνδέει τα φρεάτια ΚΑΑ-86 και ΚΑΑ-85ΕΚΧ.



Εικόνα Δ.8 Παντοροϊκός συλλεκτήρας (ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ) τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.

Παρατηρούμε πως σε αντίθεση με την βροχόπτωση περιόδου επαναφοράς $T=2$ ετών στην περίπτωση αυτή ο αγωγός λειτουργεί υπό πίεση στο ανάντη μέρος του. Επομένως και το φρεάτιο ΚΑΑ-86 είναι υπερφορτισμένο τη χρονική στιγμή 6:01:00. Τέλος, στην Εικόνα Δ.9 φαίνεται η παροχή της απορροής κατά τη στιγμή εμφάνισης της αιχμής στους αγωγούς του δικτύου.



Εικόνα Δ.9 Παροχή απορροής ανά αγωγό τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο του δικτύου.

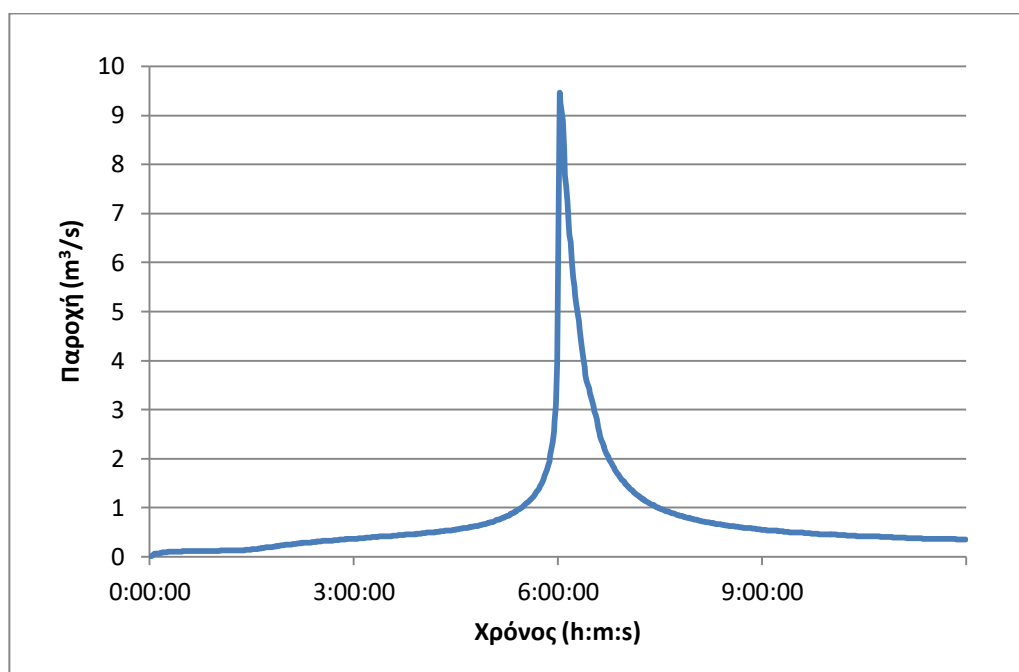
Δ.1.3 $T=25$ έτη

Κατά την προσομοίωση της Β' ζώνης του παντοροϊκού δικτύου Αθηνών όπως είναι αναμενόμενο τα περισσότερα φρεάτια του δικτύου εμφανίζουν πλημμυρικά φαινόμενα αφού οι αγωγοί του δικτύου δεν είναι επαρκείς για την μεταφορά της απορροής που παράγεται από την βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περιόδου επαναφοράς $T=25$ έτη. Τα φρεάτια τα οποία πλημμυρίζουν στη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι τα εξής: B-42, B-41, B-41α, B-40α, B-39, B-38, B-37, B-36, B-35, ΚΑΑ-89α, ΚΑΑ-89 και ΚΑΑ-87. Στον Πίνακα Δ.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης.

Πίνακας Δ.3 Γενικά αποτελέσματα προσομοίωσης για βροχόπτωση σχεδιασμού $t=12$ h και $T=25$ έτη.

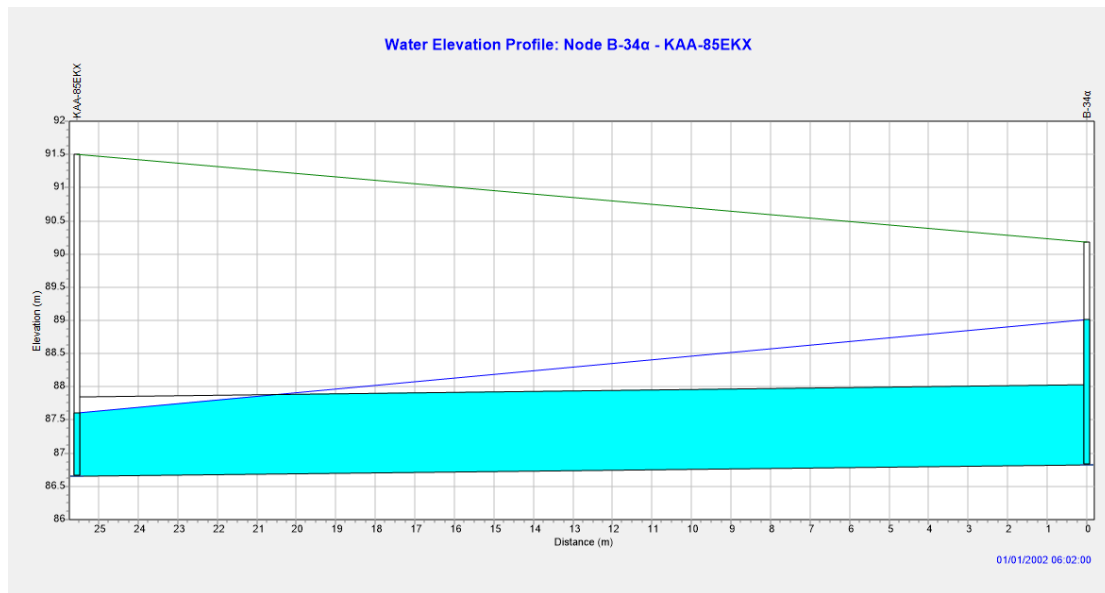
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ $t=12$ h, $T=25$ έτη	
Βροχόπτωση (mm)	74.0
Διήθηση (mm)	1.7
Επιφανειακή απορροή (mm)	67.9
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m^3/s)	9.47
Χρόνος αιχμής (h:m:s)	6:02:00

Επίσης, στην Εικόνα Δ.10 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου (φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ).

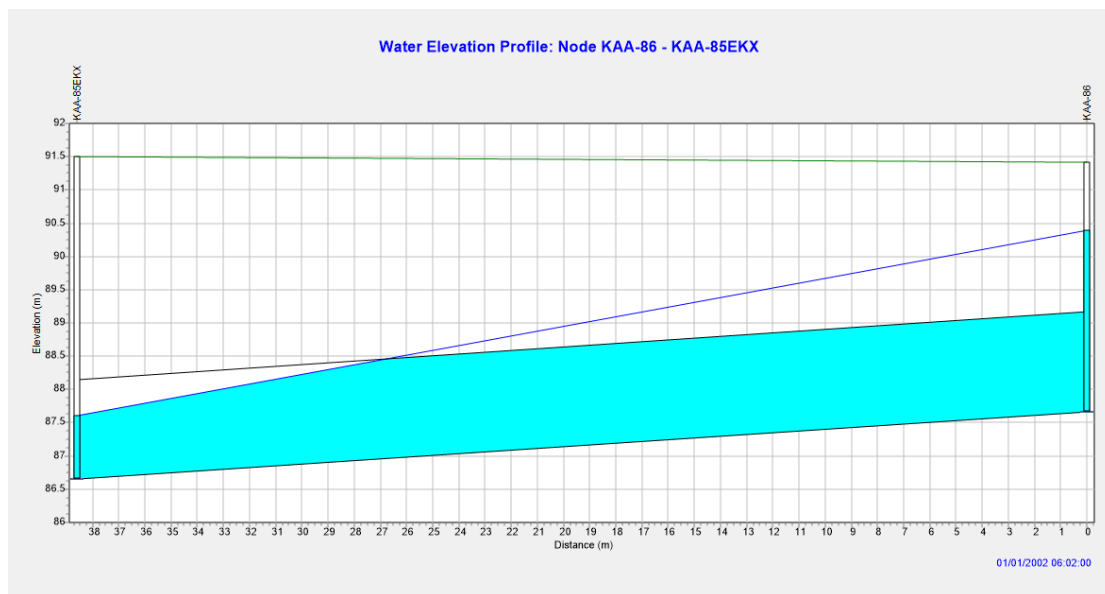


Εικόνα Δ.10 Υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h και περιόδου επαναφοράς $T=25$ έτη.

Στις Εικόνες Δ.11 και Δ.12 εμφανίζεται το προφίλ των παντοροϊκών συλλεκτήρων που καταλήγουν στην έξοδο του δικτύου τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής. Όπως είναι φανερό οι αγωγοί δεν έχουν πληρωθεί ($y/D < 1$) ωστόσο το ανάντη μέρος των αγωγών λειτουργεί υπό πίεση και στις δύο περιπτώσεις με τα αντίστοιχα φρεάτια Β-34α και ΚΑΑ-86 να είναι υπερφορτισμένα.

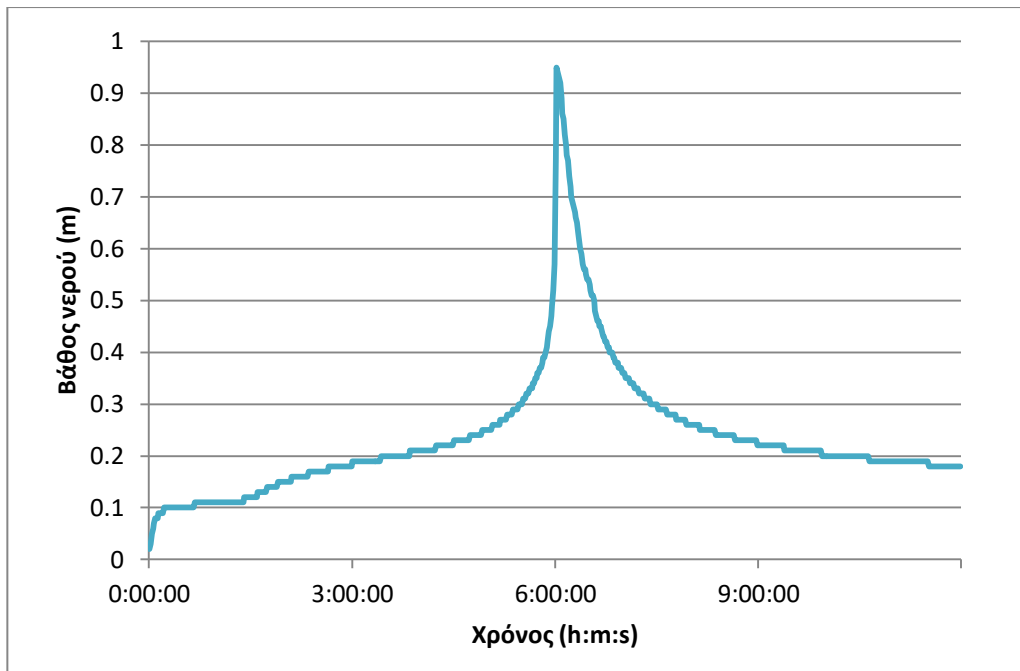


Εικόνα Δ.11 Παντορροικός συλλεκτήρας Β-34α/ΚΑΑ-85ΕΚΧ τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.



Εικόνα Δ.12 Παντορροικός συλλεκτήρας ΚΑΑ-86/ΚΑΑ-85ΕΚΧ τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής.

Τέλος στην Εικόνα Δ.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα βάθος νερού-χρόνου στην έξοδο του δικτύου (φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ). Το φρεάτιο της εξόδου δεν πλημμυρίζει και το μέγιστο βάθος νερού που παρατηρείται όπως φαίνεται είναι μικρότερο του ενός μέτρου.



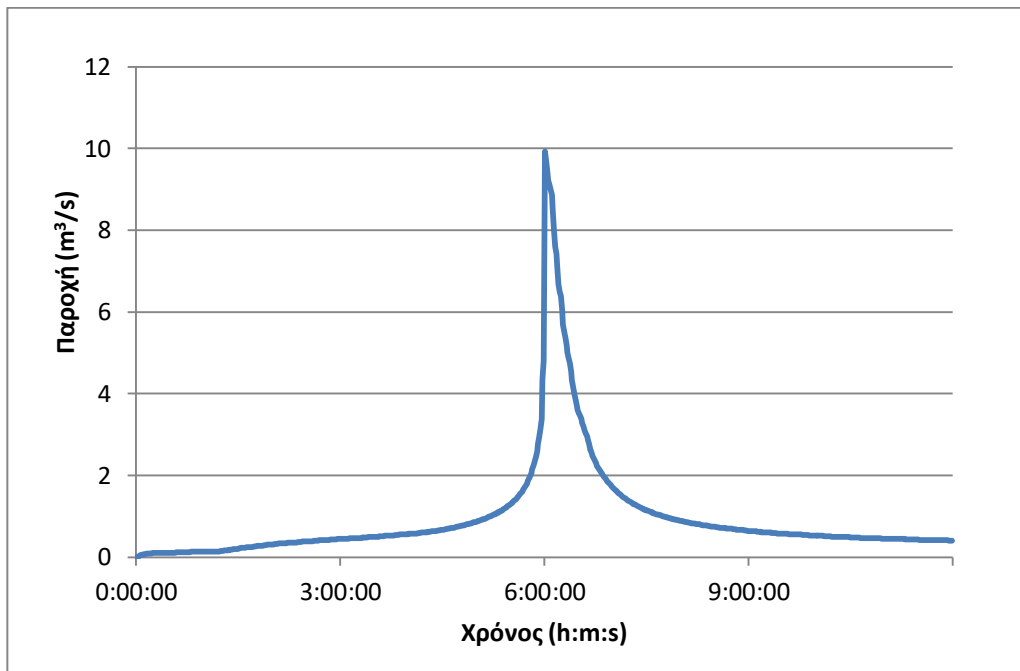
Εικόνα Δ.13 Διάγραμμα βάθος νερού-χρόνου στην έξοδο του δικτύου για βροχόπτωση σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς $T=25$ έτη και διάρκεια $t=12h$.

Δ.1.4 $T=50$ έτη

Τελευταία προσομοίωση που έγινε στην Β' ζώνη του παντοροϊκού δικτύου της Αθήνας για βροχόπτωση σχεδιασμού διάρκειας $t=12$ h ήταν αυτή με περίοδο επαναφοράς της βροχόπτωσης ίση με $T=50$ έτη. Όπως ήταν φυσιολογικό, το δίκτυο κρίθηκε μη επαρκές για την διοχέτευση της απορροής με αποτέλεσμα πολλοί από τους κόμβους του δικτύου να πλημμυρίζουν. Τα φρεάτια τα οποία εμφάνισαν πλημμυρικά φαινόμενα στην προσομοίωση αυτή είναι τα εξής: B-42, B-41, B-41α, B-40α, B-39, B-38, B-37, B-36, B-35, ΚΑΑ-89α, ΚΑΑ-89, ΚΑΑ-87, ΚΑΑ-88, ΚΑΑ-89^α (όπως παρουσιάζεται η ονομασία και η σχετική θέση των φρεατίων στην Εικόνα 4.11). Η παροχή αιχμής στην έξοδο του δικτύου είναι ίση με $Q_{\text{peak}}=9.92$ m³/s ενώ το αντίστοιχο υδρογράφημα απορροής παρουσιάζεται στην Εικόνα Δ.14. Στον Πίνακα Δ.4 παρουσιάζονται τα γενικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.

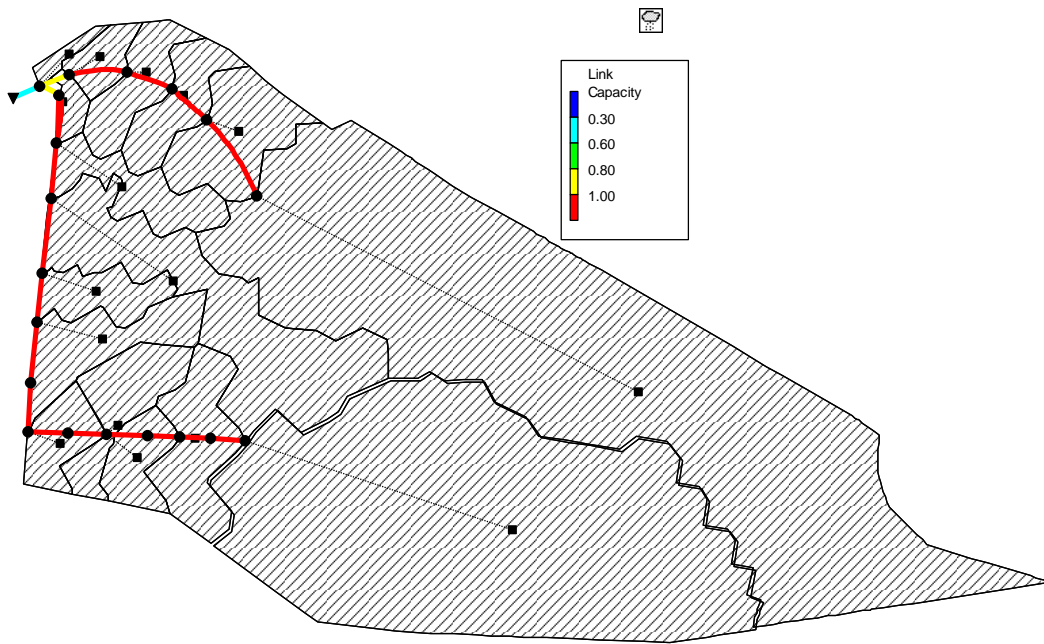
Πίνακας Δ.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης για t=12 h και T=50 έτη.

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ t=12 h, T=50 έτη	
Βροχόπτωση (mm)	89.6
Διήθηση (mm)	1.8
Επιφανειακή απορροή (mm)	83.2
Παροχή αιχμής στην έξοδο (m ³ /s)	9.92
Χρόνος αιχμής (h:m:s)	6:01:00



Εικόνα Δ.14 Υδρογράφημα απορροής στην έξοδο του δικτύου (ΚΑΑ-85ΕΚΧ) για t=12 h και T=50 έτη.

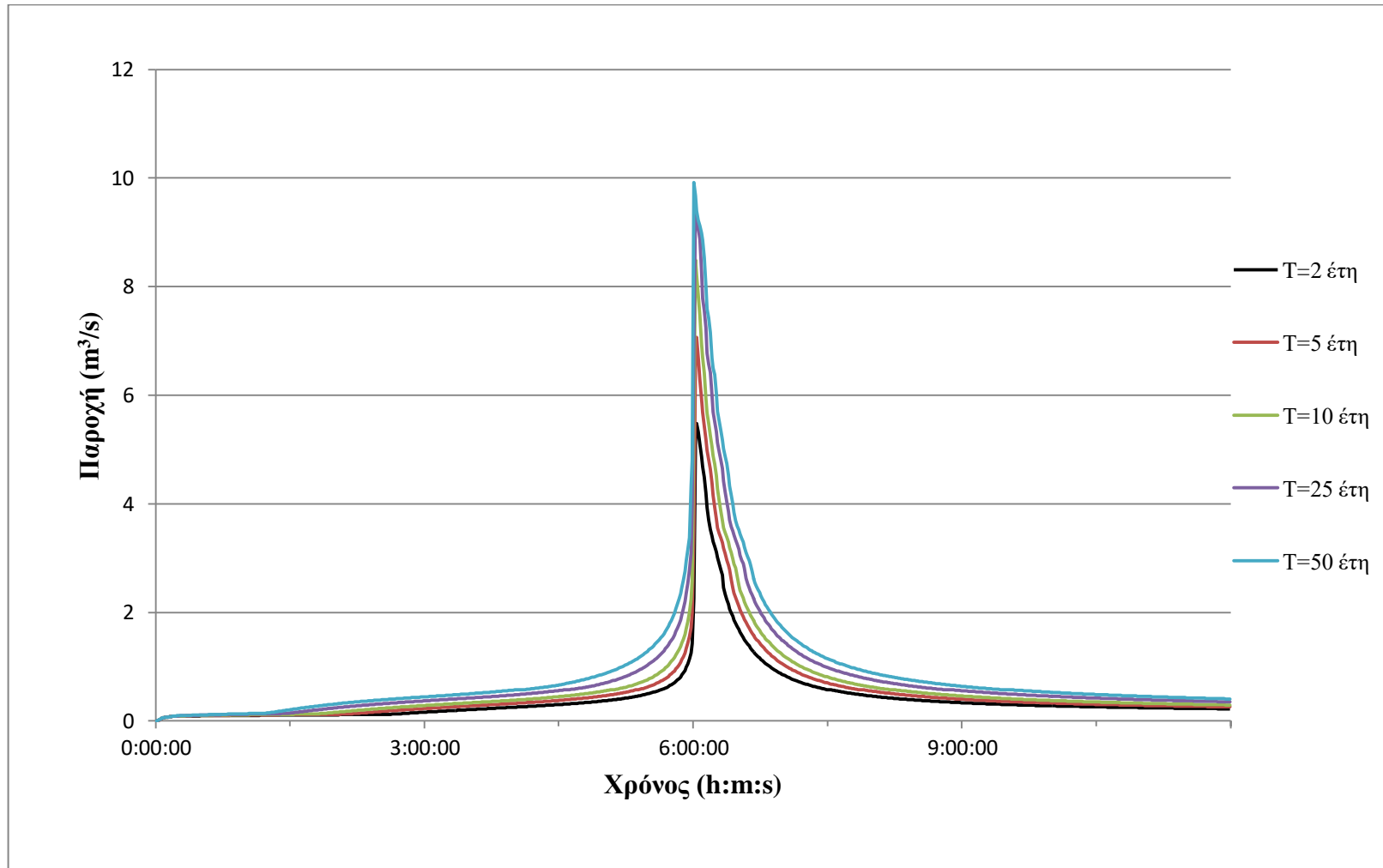
Τέλος, στην Εικόνα Δ.15 που ακολουθεί φαίνεται η χωρητικότητα των αγωγών τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής. Στην εικόνα διακρίνει κανείς πως το σύνολο των αγωγών έχει εξαντλήσει την χωρητικότητά του ($y/D=1$) με αποτέλεσμα οι αγωγοί να είναι πλημμυρισμένοι και τα φρεάτια του δικτύου να λειτουργούν υπερφορτισμένα.



Εικόνα Δ.15 Πλήρωση αγωγών τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής.

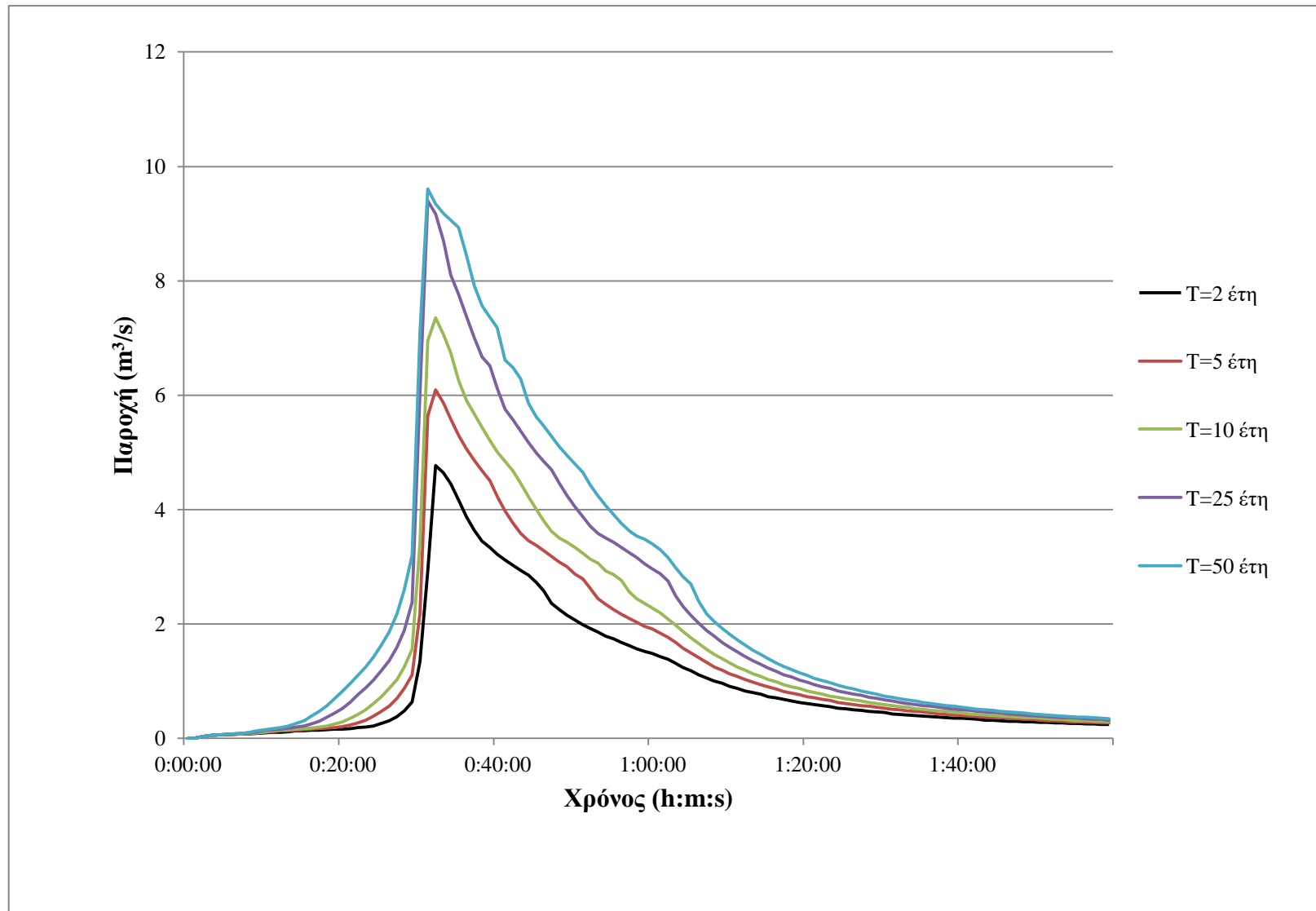
Δ.2 Σύγκριση υδρογραφημάτων

Δ.2.1 Υδρογραφήματα απορροής για $t=12$ h



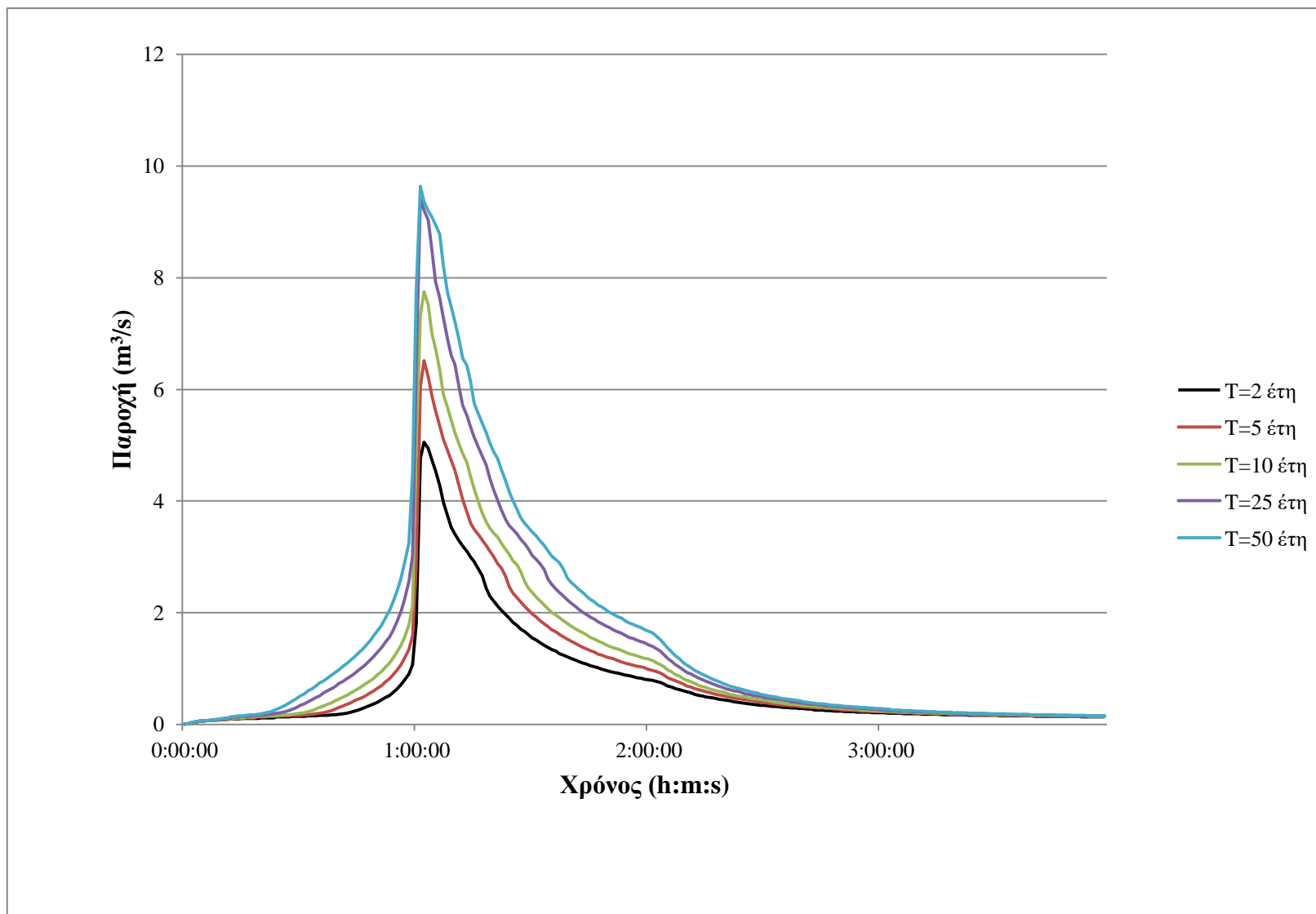
Εικόνα Δ.16 Υδρογραφήματα απορροής στην έξοδο του δικτύου για $t=12$ h και για διάφορα T.

Δ.2.2 Υδρογραφήματα απορροής για $t=1$ h



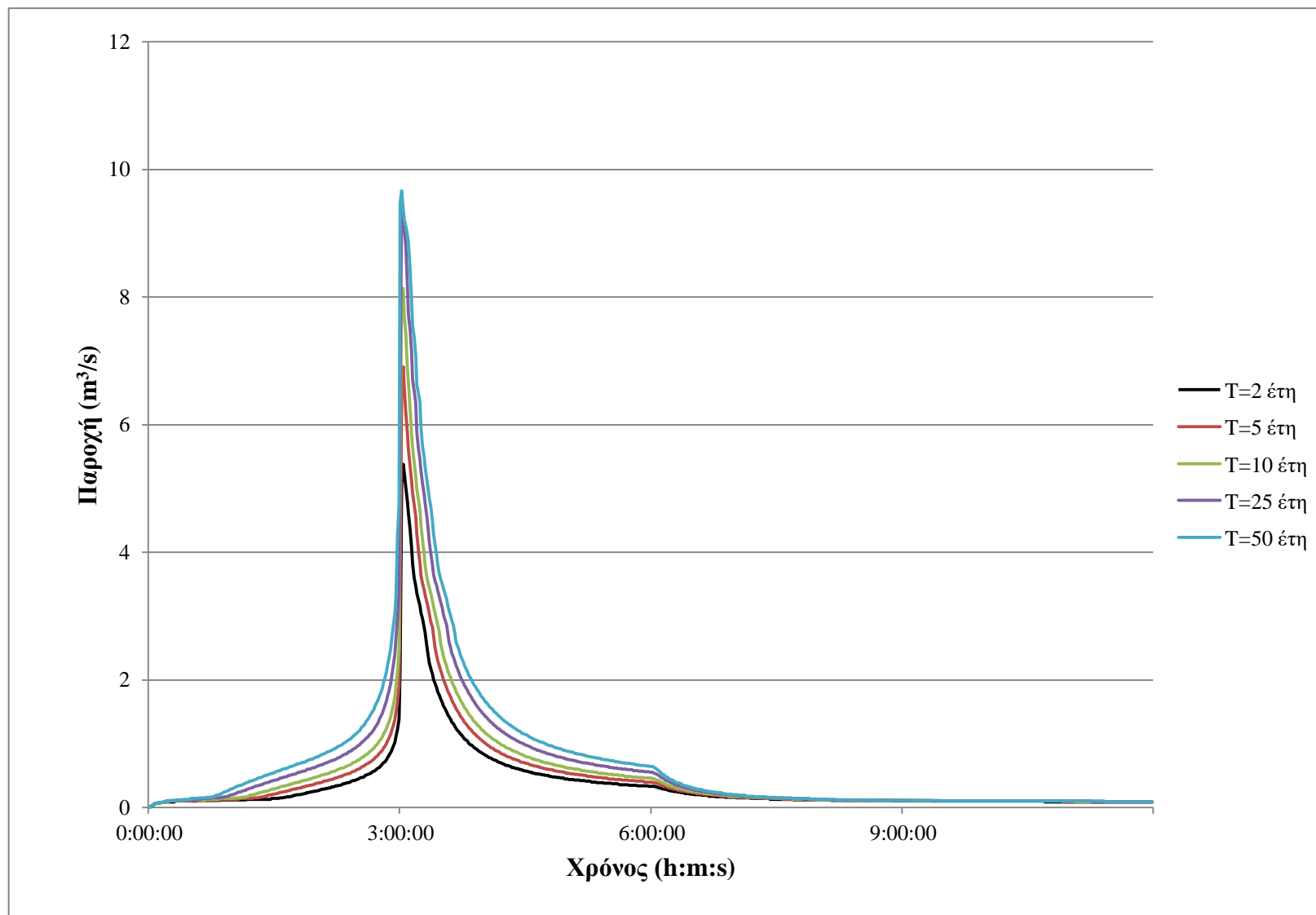
Εικόνα Δ.17 Υδρογραφήματα απορροής για $t=1$ h και για διάφορα T .

Δ.2.3 Υδρογραφήματα απορροής για $t=2$ h.



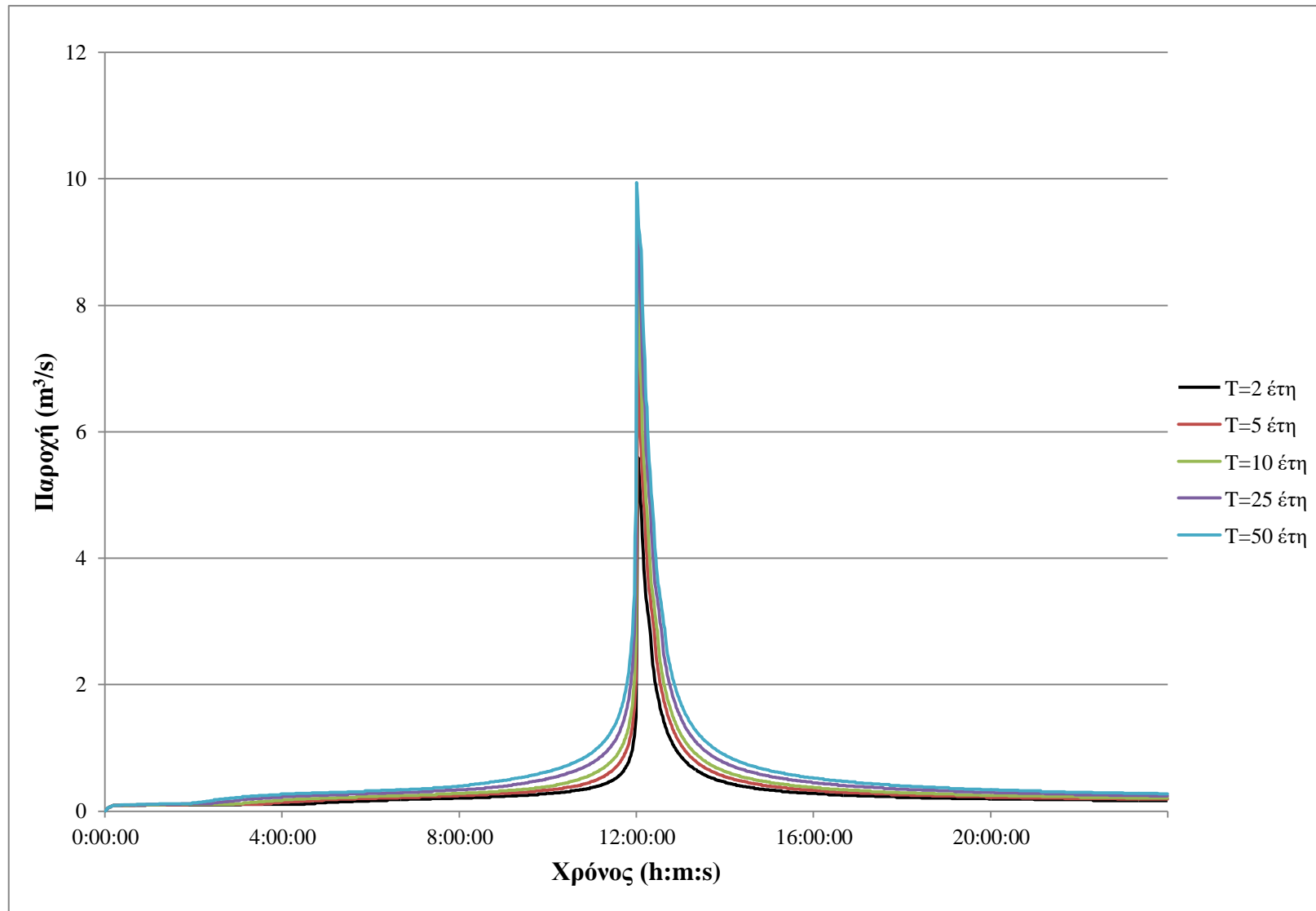
Εικόνα Δ.18 Υδρογραφήματα απορροής για $t=2$ h και για διάφορα T.

Δ.2.4 Υδρογραφήματα απορροής για $t=6$ h



Εικόνα Δ.19 Υδρογραφήματα απορροής για $t=6$ h και για διάφορα T.

Δ.2.5 Υδρογραφήματα απορροής για t=24 h



Εικόνα Δ.20 Υδρογραφήματα απορροής για t=24 h και για διάφορα T.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΤΙΜΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Πίνακας Ε.1 Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές της αδιαπερατότητας των λεκανών απορροής.

	Μεταβολή %Αδιαπερατότητας								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής %αδιαπερατότητας								
	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ-86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m³/s)	3.26	3.61	3.83	4.02	4.27	4.44	4.65	4.77	5.09
Peak στον αγωγό εξόδου (Β-34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m³/s)	2.68	2.77	2.83	2.88	2.92	2.97	3.02	3.06	3.1
Ποσότητα επιφανειακής απορροής 10⁶ (L)	14.22	15.93	17.62	19.27	20.92	22.51	24.08	25.61	27.1
Ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ 10⁶ (L)	17.6	19.2	20.7	22.2	23.6	25	26.4	27.7	29
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα 10⁶ (L)	0.375	0.521	0.681	0.853	1.036	1.227	1.428	1.633	1.839

Πίνακας Ε.2 Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές του πλάτους των λεκανών απορροής.

	Μεταβολή πλάτους								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής πλάτους								
	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ-86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m ³ /s)	3.44	3.74	3.96	4.07	4.27	4.33	4.53	4.91	4.91
Peak στον αγωγό εξόδου (Β-34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m ³ /s)	2.77	2.82	2.86	2.90	2.92	2.95	2.99	3.03	3.06
Ποσότητα επιφανειακής απορροής 10 ⁶ (L)	20.57	20.68	20.78	20.85	20.92	20.97	21.01	21.05	21.08
Ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ 10 ⁶ (L)	23.60	23.60	23.60	23.60	23.6	23.60	23.60	23.60	23.60
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα 10 ⁶ (L)	0.741	0.832	0.910	0.977	1.036	1.088	1.134	1.176	1.215

Πίνακας Ε.3 Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές του συντελεστή κατά Manning των αγωγών.

	Μεταβολή συντελεστή κατά Manning των αγωγών								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής συντελεστή κατά Manning των αγωγών								
	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ-86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m ³ /s)	5.04	4.72	4.69	4.34	4.27	4.19	4.15	4.15	4.1
Peak στον αγωγό εξόδου (Β-34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m ³ /s)	4.03	3.69	3.4	3.14	2.92	2.75	2.64	2.51	2.38
Ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ 10 ⁶ (L)	24.2	24.1	23.9	23.8	23.6	23.5	23.4	23.3	23.1
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα 10 ⁶ (L)	0.461	0.613	0.767	0.911	1.036	1.156	1.271	1.385	1.506

Πίνακας Ε.4 Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές του αριθμού καμπύλης CN.

	Μεταβολή αριθμού καμπύλης CN								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής αριθμού καμπύλης CN								
	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ-86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m ³ /s)	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.32	4.36	4.52	4.71
Peak στον αγωγό εξόδου (Β-34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m ³ /s)	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.93	2.95	2.98	3.05
Ποσότητα επιφανειακής απορροής 10 ⁶ (L)	19.42	19.64	19.96	20.37	20.92	21.6	22.54	23.83	25.73
Ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ 10 ⁶ (L)	22.2	22.4	22.7	23.1	23.6	24.3	25.1	26.3	27.9
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα 10 ⁶ (L)	1.013	1.013	1.013	1.017	1.036	1.075	1.151	1.297	1.536

Πίνακας Ε.5 Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές του συντελεστή N-Imperv.

	Μεταβολή συντελεστή N-Imperv								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής συντελεστή N-Imperv								
	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ-86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m ³ /s)	5.46	4.92	4.7	4.43	4.27	4.08	4.01	3.86	3.79
Peak στον αγωγό εξόδου (Β-34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m ³ /s)	3.12	3.07	3.01	2.95	2.92	2.9	2.88	2.85	2.83
Ποσότητα επιφανειακής απορροής 10 ⁶ (L)	21.05	21	20.98	20.95	20.92	20.88	20.84	20.82	20.81
Ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ-85ΕΚΧ 10 ⁶ (L)	23.5	23.5	23.6	23.6	23.6	23.7	23.7	23.7	23.7
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα 10 ⁶ (L)	1.304	1.218	1.151	1.091	1.036	0.985	0.937	0.892	0.850

Πίνακας Ε.6 Τιμές δεικτών ως προς τις μεταβολές του συντελεστή N-Perv.

	Μεταβολή συντελεστή N-Perv								
	-40%	-30%	-20%	-10%	0	+10%	+20%	+30%	+40%
	Συντελεστής μεταβολής συντελεστή N-Perv								
	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40
Peak στον αγωγό εξόδου (ΚΑΑ- 86,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m ³ /s)	4.29	4.29	4.29	4.29	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27
Peak στον αγωγό εξόδου (Β- 34α,ΚΑΑ-85ΕΚΧ) (m ³ /s)	2.93	2.93	2.93	2.93	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92
Ποσότητα επιφανειακής απορροής 10 ⁶ (L)	21.07	21.01	20.98	20.95	20.92	20.88	20.84	20.81	20.78
Ποσότητα εισροής στο φρεάτιο ΚΑΑ- 85ΕΚΧ 10 ⁶ (L)	23.8	23.7	23.7	23.7	23.6	23.6	23.6	23.6	23.5
Επιφανειακή πλημμυρική ποσότητα 10 ⁶ (L)	1.048	1.044	1.04	1.038	1.036	1.034	1.032	1.031	1.03