



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ  
ΠΑΝΤΟΡΡΟΪΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ  
ΑΘΗΝΑΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ  
ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΩΝ ΜΕ  
ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SWMM**

*Ηλέκτρα Ι. Ανδρεάδου*

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»**

**Αθήνα, Ιούνιος 2020**

**Επιβλέπων: Καθηγητής Ε. Μπαλτάς**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ολοκληρώνεται η διαδρομή του μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών, μια διαδρομή σχετικά σύντομη, αλλά ιδιαίτερα επικοινωνιακή, που μας άνοιξε νέους επιστημονικούς ορίζοντες, δρόμους σκέψης και αναζήτησης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω κατ' αρχάς, τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ευάγγελο Μπαλτά, η υποστήριξη και καθοδήγηση του οποίου, κατέστησαν δυνατή την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Θα ήθελα, επίσης, να τον ευχαριστήσω θερμά για τις πολύτιμες γνώσεις και τα επιστημονικά ερεθίσματα που μου μετέδωσε, μέσα από τη διδασκαλία του καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσιχριντζή, καθηγητή της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων του Ε.Μ.Π. και τον κ. Παπακωνσταντή, λέκτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας εργασίας.

Θερμά ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ιωάννη Κούρτη, η συνεχής υποστήριξη του οποίου σε όλα τα στάδια εκπόνησης της παρούσας εργασίας υπήρξε περισσότερο από καθοριστική. Τον ευχαριστώ θερμά για την απλόχερη προσφορά της επιστημονικής του γνώσης, την αδιάκοπη βοήθεια και το χρόνο που διέθεσε γι' αυτήν την προσπάθεια.

Ευχαριστώ, επίσης, την Ε.Υ.Δ.Α.Π. για την παροχή των στοιχείων που αφορούν το παντοροϊκό δίκτυο της περιοχής μελέτης, πάνω στα οποία βασίστηκε η παρούσα εργασία.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια, τους φίλους και τους δικούς μου ανθρώπους, για την υπομονή και την υποστήριξή τους, που αποτελούν πηγή άντλησης δύναμης και ενέργειας για την ολοκλήρωση κάθε προσπάθειας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |       |
|--|-------|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....  | ii    |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....   | iii   |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....   | vi    |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....   | viii  |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....   | xii   |
| EXTENDED ABSTRACT .....  | xiv   |
| Introduction .....   | xiv   |
| SWMM Software .....  | xiv   |
| Study Area and Applied Methodology .....                             | xv    |
| Study Area.....  | xv    |
| Model Construction .....   | xvi   |
| Sensitivity Analysis and Model Calibration .....                     | xvi   |
| Investigation of system response to multi-year rainfall events.....  | xvi   |
| Runoff hydrographs used as inputs on simulated sewer system .....    | xvii  |
| Urbanization Scenarios .....   | xviii |
| Results.....   | xviii |
| Sensitivity Analysis and Model Calibration .....                     | xviii |
| Investigation of system response to multi-year rainfall events.....  | xx    |
| Runoff hydrographs used as inputs on simulated sewer system .....    | xxi   |
| Urbanization Scenarios .....   | xxiii |
| Conclusions .....  | xxv   |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....  | 27    |
| 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ..... | 27    |
| 1.2 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΡΡΟΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ .....                        | 28    |
| 1.2.1 ΑΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....                                 | 28    |
| 1.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΗ .....                  | 29    |
| 1.2.3 ΑΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ .....                                | 31    |
| 1.2.4 ΠΑΝΤΟΡΡΟΪΚΟ ΔΙΚΤΥΟ .....                                       | 33    |
| 1.2.5 ΧΩΡΙΣΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ .....   | 33    |
| 1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΟΜΒΡΙΩΝ .....                     | 34    |
| 1.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ .....                               | 37    |
| 1.4.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....      | 37    |
| 1.4.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....                                     | 40    |

|   |    |
|---|----|
| 1.4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....                                | 41 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SWMM .....                                     | 43 |
| 2.1 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....                    | 43 |
| 2.2 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ .....     | 44 |
| 2.3 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑ .....    | 45 |
| 2.4 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....  | 47 |
| 2.5 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ.....  | 47 |
| 2.5.1 ΚΥΡΙΑΡΧΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ .....   | 47 |
| 2.5.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ ΣΕ ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΕΣ .....                       | 49 |
| 2.5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑ .....  | 50 |
| 2.5.4 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΣΕ ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ.....                                    | 51 |
| 2.5.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ .....                              | 52 |
| 2.6 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ .....                                     | 56 |
| 2.7 ΔΙΗΘΗΣΗ .....   | 58 |
| 2.8 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ.....                                  | 62 |
| 2.8.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ .....                                     | 62 |
| 2.8.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....               | 63 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....                                       | 66 |
| 3.1 ΤΟ ΑΠΟΧΕΤΕΥΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΟΥ ΛΕΚΑΝΟΠΕΔΙΟΥ ΑΤΤΙΚΗΣ .....              | 66 |
| 3.1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....   | 66 |
| 3.1.2 ΠΑΝΤΟΡΡΟΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ ΑΘΗΝΩΝ .....                      | 67 |
| 3.1.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ .....         | 68 |
| 3.2 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....   | 69 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....   | 76 |
| 4.1 ΒΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ .....   | 76 |
| 4.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ SWMM.....                                     | 77 |
| 4.2.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....   | 77 |
| 4.2.2 ΟΡΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΣΕ ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ.....          | 77 |
| 4.2.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΡΡΟΩΝ ΞΗΡΟΥ ΚΑΙΡΟΥ .....                              | 79 |
| 4.2.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ .....                          | 81 |
| 4.2.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ SWMM .....                                 | 86 |
| 4.2.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ – ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ..... | 87 |
| 4.2.7 ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....                                       | 88 |
| 4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ .....   | 88 |
| 4.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....  | 89 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΡΟΧΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΟΜΒΡΙΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΒΡΟΧΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ..... | 90  |
| 4.6 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟ SWMM ΜΕ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΩΣ ΕΙΣΟΔΟΥΣ .....  | 94  |
| 4.7 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΜΙ-ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ.....   | 99  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....   | 103 |
| 5.1 ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ ΒΡΟΧΗΣ 24/02/2006 .....  | 103 |
| 5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ .....  | 106 |
| 5.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....   | 110 |
| 5.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΒΡΟΧΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ.....  | 114 |
| 5.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟ SWMM ΜΕ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΩΣ ΕΙΣΟΔΟΥΣ .....  | 131 |
| 5.6 ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΗΜΙ-ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ .....   | 145 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....   | 154 |
| 6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....   | 154 |
| 6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....  | 157 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....   | 158 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....  | 163 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....  | 164 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ .....  | 165 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ .....  | 167 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

|   |       |
|---|-------|
| Table 1: Simulation results for multi-year rainfall events .....  | xxi   |
| Table 2: Results of SWMM and SCS method for 50-year rainfall of different durations. ....   | xxiii |
| Table 3: Urbanization scenarios results for 10-year rainfall of 1 hour duration on comparison with simulation results for 25-year and 50-year rainfall of the same duration without urbanization increase. ....   | xxiv  |
| Table 4: Number of nodes flooding under urbanization increase scenarios .....   | xxv   |
| Πίνακας 2.1: Τιμές συντελεστή Manning για αβαθή διάχυτη ροή (Τσιχριντζής, 1999) .....   | 55    |
| Πίνακας 2.2: Τιμές συντελεστή Manning για αγωγούς και κανάλια (Τσιχριντζής, 1999) .....   | 55    |
| Πίνακας 2.3: Επίδραση παραμέτρων στον όγκο και την παροχή αιχμής της απορροής (Rossman and Huber, 2016) .....   | 57    |
| Πίνακας 2.4: Αριθμοί καμπύλης απορροής CN για μέσες προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας, CN <sub>II</sub> (www.floods.ypeka.gr). ....   | 61    |
| Πίνακας 2.5: Υδραυλική Αγωγιμότητα ανά τύπο εδάφους (Rossman and Huber, 2016). ....   | 62    |
| Πίνακας 3.1: Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση και Θερμοκρασία και Συνολικές Μέρες Βροχής ανά μήνα, Μ.Σ. Ν. Φιλαδέλφειας (Δεδομένα από <a href="http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology_city">http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology_city</a> )..... | 74    |
| Πίνακας 4.1: Ποσοστά αδιαπέρατων επιφανειών στο βαθμονομημένο μοντέλο για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης .....  | 101   |
| Πίνακας 5.1: Παράμετροι μοντέλου πριν τη βαθμονόμηση.....   | 103   |
| Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα επίλυσης για το επεισόδιο βροχής στις 24/02/2006.....   | 103   |
| Πίνακας 5.3: Αρχικές τιμές και άνω και κάτω όρια για τις μεταβλητές κατά την πρώτη δοκιμή. ....   | 110   |
| Πίνακας 5.4: Άνω και κάτω όρια και τελικές τιμές των μεταβλητών της λύσης που επιλέχθηκε.....   | 111   |
| Πίνακας 5.5: Τιμές των παραμέτρων, του συντελεστή Nash και της μέγιστης παροχής πριν και μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου. ....   | 112   |
| Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα από το αρχικό και το βαθμονομημένο μοντέλο για όλη τη λεκάνη .....  | 114   |
| Πίνακας 5.7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=25 και d=1hr. ....  | 115   |
| Πίνακας 5.8: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=25 και d=2hr. ....  | 117   |
| Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=25 και d=6hr. ....  | 119   |
| Πίνακας 5.10: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=25 και d=24hr. ....  | 121   |
| Πίνακας 5.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=50 και d=1hr. ....   | 122   |
| Πίνακας 5.12: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=50 και d=2hr. ....   | 124   |
| Πίνακας 5.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από επίλυση του δικτύου για T=50 και d=6hr. ....   | 125   |
| Πίνακας 5.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=50 και d=24hr. ....  | 127   |
| Πίνακας 5.15: Όγκοι εισροής, απορροής και υπερχειλίσης από το δίκτυο και συνολικός αριθμός κόμβων που πλημμυρίζουν για κάθε επεισόδιο βροχής. ....  | 129   |

|   |     |
|---|-----|
| Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα υπολογισμών χρόνου συγκέντρωσης με τις μεθόδους Giandotti, Κινηματικού Κύματος και Kerby για κάθε υπολεκάνη. ....  | 132 |
| Πίνακας 5.17: Σύγκριση όγκου επιφανειακής απορροής από την επίλυση στο SWMM με την εισαγωγή πλημμυρογραφημάτων (για τις 3 μεθόδους υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης) με την παροχή από το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM (Βροχή T=25, d=1 hr)..... | 133 |
| Πίνακας 5.18: Όγκος απορροής στις υπολεκάνες του βαθμονομημένου μοντέλου στο SWMM και από την παραγωγή πλημμυρογραφημάτων με μέθοδο απωλειών της SCS με και χωρίς συνεκτίμηση του ποσοστού αδιαπερατότητας (βροχή T=25 έτη, d=24hr).....          | 141 |
| Πίνακας 5.19: Σύγκριση όγκων απορροής με τη μέθοδο της SCS και με το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM για βροχές διαφορετικής διάρκειας. ....   | 144 |
| Πίνακας 5.20: Συνολικός αριθμός κόμβων που πλημμυρίζουν και όγκος νερού που πλημμυρίζει από το δίκτυο για τις δύο μεθόδους. ....  | 144 |
| Πίνακας 5.21: Σύγκριση τιμών παροχής αιχμής και όγκου απορροής με και χωρίς τα σενάρια αστικοποίησης για βροχή διάρκειας d=1hr και διαφορετικών περιόδων επαναφοράς. ....   | 152 |
| Πίνακας 5.22: Αριθμός των κόμβων του δικτύου που πλημμυρίζουν σε κάθε σενάριο αύξησης της αστικοποίησης και για βροχές διαφορετικής διάρκειας. ....   | 153 |
| Πίνακας 5.23: Ποσοστιαία αύξηση όγκου νερού που πλημμυρίζει από τους κόμβους για κάθε σενάριο σε σχέση με τον αντίστοιχο όγκο για την υφιστάμενη αστικοποίηση. ....   | 153 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

|   |      |
|---|------|
| Figure 1: Study area, subcatchments discretization and drainage network.....  | xv   |
| Figure 2: Sensitivity Analysis Results – Influence on peak discharge at sewer system’s outfall.<br>.....  | xix  |
| Figure 3: Measured and Simulated flow after calibration – Conduit 1640.....   | xix  |
| Figure 4: Measured and Simulated flow after calibration – Conduit 1313.....   | xx   |
| Figure 5: Outfall flow computed using runoff hydrographs as inputs (using three time of<br>concentration methods) compared with the calibrated model for 25-year rainfall of 1 hour<br>duration.....          | xxii |
| Figure 6: Peak runoff increase under urbanization scenarios as percentage – Simulations for<br>rainfall events with different duration, Subcatchment 4.....   | xxiv |
| Figure 7: Runoff volume increase under urbanization scenarios as percentage – Simulations<br>for rainfall events with different duration, Subcatchment 4.....   | xxv  |
| Εικόνα 2.1: Τα βασικά οπτικά αντικείμενα του μοντέλου (Rossman and Huber, 2016).....  | 44   |
| Εικόνα 2.2: Προσομοίωση της λεκάνης απορροής από το SWMM (Rossman and Huber,<br>2016).....  | 47   |
| Εικόνα 2.3: Μοντέλο βροχής απορροής του SWMM – Η υπολεκάνη ως μη γραμμικός<br>ταμιευτήρας (Rossman and Huber, 2016).....  | 48   |
| Εικόνα 2.4: Διαχωρισμός υπολεκάνης σε περατό, αδιαπέρατο με και χωρίς επιφανειακή<br>συγκράτηση τμήμα (Rossman and Huber, 2016).....  | 50   |
| Εικόνα 2.5: Περιπτώσεις υπολεκανών με διαφορετικό πλάτος (Rossman and Huber, 2016).<br>.....  | 53   |
| Εικόνα 2.6: Υδρογραφήματα απορροής των λεκανών της Εικόνας 2.5 για άπειρη διάρκεια<br>βροχής και βροχή 20min (Rossman and Huber, 2016).....   | 53   |
| Εικόνα 2.7: Ύψος εισόδου και εξόδου στον αγωγό (υψόμετρο 1) από μετατόπιση του<br>υψόμετρου του πυθμένα (υψόμετρο 2).....   | 63   |
| Εικόνα 3.1: Απεικόνιση παντοροϊκού συστήματος Αθηνών (Κούρτης, 2016).....   | 68   |
| Εικόνα 3.2: Η περιοχή μελέτης.....  | 70   |
| Εικόνα 3.3: Χάρτης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής μελέτης με ισοϋψείς.....  | 71   |
| Εικόνα 3.4: Χάρτης με τις κλίσεις εδάφους της περιοχής μελέτης.....   | 72   |
| Εικόνα 3.5: Γεωλογικό υπόβαθρο στην περιοχή μελέτης (Παπανικολάου Δ. κ.ά., 2002).....   | 73   |
| Εικόνα 3.6: Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση, Μ.Σ. Ν. Φιλαδέλφειας (Δεδομένα από<br><a href="http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology_city">http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology_city</a> )..... | 74   |
| Εικόνα 4.1: Περιοχή μελέτης, Οικοδομικά Τετράγωνα και Αποχετευτικό Δίκτυο.....  | 78   |
| Εικόνα 4.2: Διχοτόμηση των Ο.Τ., καθορισμός ορίων περιοχής μελέτης και υπολεκανών (η<br>διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό AutoCAD).....   | 79   |
| Εικόνα 4.3: Εκτίμηση ποσοστού αδιαπέρατων επιφανειών κάθε υπολεκάνης.....   | 82   |
| Εικόνα 4.4: Απόσπασμα χάρτη εδαφικών τύπων για το GR06 που ανασύρθηκε από την<br>ιστοσελίδα <a href="http://www.floods.greka.gr">www.floods.greka.gr</a> .....  | 84   |
| Εικόνα 4.5: Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης (Corine 2018).....   | 85   |
| Εικόνα 4.6: Επεισόδιο βροχής 24/02/2006.....  | 87   |
| Εικόνα 4.7: Θέσεις των αγωγών με βάση τους οποίους θα πραγματοποιηθεί η<br>βαθμονόμηση.....   | 90   |
| Εικόνα 4.8: Βροχογράφημα T=25 και d=1hr.....  | 91   |
| Εικόνα 4.9: Βροχογράφημα T=25 και d=2hr.....  | 91   |
| Εικόνα 4.10: Βροχογράφημα T=25 και d=6hr.....   | 92   |
| Εικόνα 4.11: Βροχογράφημα T=25 και d=24hr.....  | 92   |



|  |     |
|--|-----|
| Εικόνα 4.12: Βροχογράφημα T=50 και d=1hr .....   | 93  |
| Εικόνα 4.13: Βροχογράφημα T=50 και d=2hr .....   | 93  |
| Εικόνα 4.14: Βροχογράφημα T=50 και d=6hr .....   | 93  |
| Εικόνα 4.15: Βροχογράφημα T=50 και d=24hr .....  | 94  |
| Εικόνα 4.16: Κόμβοι εισαγωγής των πλημμυρογραφημάτων κάθε λεκάνης στο δίκτυο .....   | 95  |
| Εικόνα 4.17: Αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS<br>( <a href="https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043063">https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043063</a> )..... | 95  |
| Εικόνα 4.18: Υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης που εξήχθη με το λογισμικό ArcGIS.<br>.....   | 98  |
| Εικόνα 4.19: Βροχογράφημα περιόδου επαναφοράς T=10 έτη και διάρκειας d=1hr. ....   | 100 |
| Εικόνα 4.20: Βροχογράφημα περιόδου επαναφοράς T=10 έτη και διάρκειας d=2hr. ....   | 100 |
| Εικόνα 4.21: Βροχογράφημα περιόδου επαναφοράς T=10 έτη και διάρκειας d=6hr. ....   | 100 |
| Εικόνα 4.22: Βροχογράφημα περιόδου επαναφοράς T=10 έτη και διάρκειας d=24hr. ....  | 101 |
| Εικόνα 5.1: Μετρημένη και υπολογισμένη παροχή στον αγωγό 1640 για το επεισόδιο βροχής στις 24/02/2006.....   | 104 |
| Εικόνα 5.2: Μετρημένη και υπολογισμένη παροχή στον αγωγό 1313 για το επεισόδιο βροχής στις 24/02/2006.....   | 104 |
| Εικόνα 5.3: Μετρημένα και υπολογισμένα βάθη ροής στον αγωγό 1640 για το επεισόδιο βροχής στις 24/02/2006.....  | 105 |
| Εικόνα 5.4: Μετρημένα και υπολογισμένα βάθη ροής στον αγωγό 1313 για το επεισόδιο βροχής στις 24/02/2006.....  | 105 |
| Εικόνα 5.5: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας 9 παραμέτρων με κριτήριο τη μεταβολή στην παροχή αιχμής στην έξοδο του δικτύου.....  | 107 |
| Εικόνα 5.6: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας 9 παραμέτρων με κριτήριο τη μεταβολή στην χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο του δικτύου. ....   | 107 |
| Εικόνα 5.7: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας 9 παραμέτρων με κριτήριο τη μεταβολή στο συνολικό όγκο της απορροής στην έξοδο του δικτύου. ....   | 108 |
| Εικόνα 5.8: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας 9 παραμέτρων με κριτήριο τη μεταβολή στο μέγιστο βάθος ροής της απορροής στην έξοδο του δικτύου.....   | 108 |
| Εικόνα 5.9: Μετρημένη, υπολογισμένη με το αρχικό και το βαθμονομημένο μοντέλο παροχή στον αγωγό 1640.....  | 113 |
| Εικόνα 5.10: Μετρημένη, υπολογισμένη με το αρχικό και το βαθμονομημένο μοντέλο παροχή στον αγωγό 1313. ....  | 113 |
| Εικόνα 5.11: Παροχή στην έξοδο του δικτύου, αρχικό και βαθμονομημένο μοντέλο.....  | 114 |
| Εικόνα 5.12: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=25 και d=1hr. ....  | 116 |
| Εικόνα 5.13: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή T=25 και d=1hr. ....   | 116 |
| Εικόνα 5.14: Προφίλ αγωγών του δικτύου τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο (βροχή T=25, d=1hr). ....   | 117 |
| Εικόνα 5.15: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=25 και d=2hr. ....  | 118 |
| Εικόνα 5.16: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή T=25 και d=2hr. ....   | 118 |
| Εικόνα 5.17: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=25 και d=6hr. ....  | 119 |
| Εικόνα 5.18: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή T=25 και d=6hr. ....   | 120 |
| Εικόνα 5.19: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=25 και d=24hr. ....   | 121 |

|  |     |
|--|-----|
| Εικόνα 5.20: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή T=25 και d=24hr. ..  | 122 |
| Εικόνα 5.21: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=50 και d=1hr. ....  | 123 |
| Εικόνα 5.22: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή T=50 και d=1hr. ....   | 123 |
| Εικόνα 5.23: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=50 και d=2hr. ....  | 124 |
| Εικόνα 5.24: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή T=50 και d=2hr. ....   | 125 |
| Εικόνα 5.25: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=50 και d=6hr. ....  | 126 |
| Εικόνα 5.26: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή T=50 και d=6hr. ....   | 126 |
| Εικόνα 5.27: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=50 και d=24hr. ....   | 127 |
| Εικόνα 5.28: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή T=50 και d=24hr. ..  | 128 |
| Εικόνα 5.29: Υδρολογικές συνιστώσες απορροής για βροχές περιόδου επαναφοράς T=25 και διαφορετικής διάρκειας.....   | 130 |
| Εικόνα 5.30: Υδρολογικές συνιστώσες απορροής για βροχές περιόδου επαναφοράς T=50 και διαφορετικής διάρκειας.....   | 130 |
| Εικόνα 5.31: Ο συντελεστής απορροής για κάθε υπολεκάνη, όπως υπολογίστηκε από το SWMM για βροχές περιόδου επαναφοράς T=50 και διαφορετικής διάρκειας. ....   | 131 |
| Εικόνα 5.32: Σύγκριση παροχής στην έξοδο της λεκάνης από την επίλυση στο SWMM με την εισαγωγή πλημμυρογραφημάτων (για τις 3 μεθόδους υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης) με την παροχή από το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM (Βροχή T=25, d=1 hr).....  | 133 |
| Εικόνα 5.33: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 1. ....   | 134 |
| Εικόνα 5.34: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 2. ....   | 134 |
| Εικόνα 5.35: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 3. ....   | 135 |
| Εικόνα 5.36: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 4. ....   | 135 |
| Εικόνα 5.37: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 5. ....   | 136 |
| Εικόνα 5.38: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 6. ....   | 136 |
| Εικόνα 5.39: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 7. ....   | 137 |
| Εικόνα 5.40: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 8. ....   | 137 |
| Εικόνα 5.42: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 10. ....  | 138 |
| Εικόνα 5.43: Σύγκριση παροχής στην έξοδο της λεκάνης από την επίλυση στο SWMM με την εισαγωγή πλημμυρογραφημάτων (για τις 2 μεθόδους υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης) με την παροχή από το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM (Βροχή T=25, d=24hr). .... | 140 |
| Εικόνα 5.44: Παροχή στην έξοδο – Σύγκριση αποτελεσμάτων για βροχή T=50 και d=1hr..   | 142 |
| Εικόνα 5.45: Παροχή στην έξοδο – Σύγκριση αποτελεσμάτων για βροχή T=50 και d=2hr..   | 142 |
| Εικόνα 5.46: Παροχή στην έξοδο – Σύγκριση αποτελεσμάτων για βροχή T=50 και d=6hr..   | 143 |
| Εικόνα 5.47: Παροχή στην έξοδο – Σύγκριση αποτελεσμάτων για βροχή T=50 και d=24hr  | 143 |



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η προσομοίωση και διερεύνηση τμήματος του παντορροϊκού δικτύου των Αθηνών, και συγκεκριμένα, της ανάντη περιοχής της Ζώνης Ζ2. Πρόκειται, για περιοχή της Νέας Κυψέλης, που διοικητικά υπάγεται στο Δήμο Αθηναίων. Περιλαμβάνει την έκταση ανάμεσα στον οικισμό Γεωργίου Παπανδρέου και το Πρωτοδικείο Αθηνών και αποτελείται από αστικές και ημιαστικές περιοχές.

Για τους σκοπούς της διερεύνησης του δικτύου καταρτίστηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης στο λογισμικό Storm Water Management Model (SWMM). Το λογισμικό SWMM είναι ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης που πραγματοποιεί διαδικασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή, η οποία διοδεύεται στη συνέχεια υδραυλικά μέσω ενός συστήματος αγωγών. Για την υδρολογική ανάλυση, επιλέχθηκε ως μέθοδος υπολογισμού απωλειών βροχής η μέθοδος SCS και για την υδραυλική ανάλυση η μέθοδος δυναμικού κύματος.

Η περιοχή μελέτης διαιρέθηκε σε δέκα υπολεκάνες και το μοντέλο επιλύθηκε για συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής, για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις παροχών σε δύο αγωγούς του δικτύου. Με βάση τις μετρήσεις παροχών πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του μοντέλου, με χρήση γενετικού αλγορίθμου. Οι παράμετροι που συμμετείχαν στη βαθμονόμηση επιλέχθηκαν με βάση τα αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας σε εννέα παραμέτρους του μοντέλου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας συμφωνούν με τη σχετική βιβλιογραφία και η μέθοδος βαθμονόμησης που εφαρμόστηκε βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του μοντέλου.

Ακολούθησε διερεύνηση του δικτύου για βροχές περιόδου επαναφοράς  $T=25$  και  $T=50$  ετών και διάρκειας 1hr, 2hr, 6hr και 24hr. Επιλύθηκε το βαθμονομημένο μοντέλο για τις παραπάνω βροχές και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα που αφορούν τον αριθμό των κόμβων του δικτύου που πλημμυρίζουν, τον όγκο της απορροής που το δίκτυο δεν είναι ικανό να παροχετεύσει και τις υδρολογικές συνιστώσες της απορροής.

Στη συνέχεια, διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα μιας συνδυαστικής μεθόδου, κατά την οποία η απορροή κάθε υπολεκάνης εκτιμάται με την παραγωγή πλημμυρογραφήματων με βάση το μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS. Ο υπολογισμός των απωλειών βροχής έγινε με τη μέθοδο της SCS. Παρήχθησαν πλημμυρογραφήματα με βάση τρεις μεθόδους υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης (Giandotti, Κινηματικού Κύματος και Kerby). Τα πλημμυρογραφήματα εισήχθησαν ως είσοδοι στο δίκτυο το οποίο επιλύθηκε στη συνέχεια υδραυλικά στο SWMM. Η μέθοδος παραγωγής πλημμυρογραφήματων με την ανωτέρω διαδικασία και με υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης με την εξίσωση Kerby, φαίνεται πως μπορεί να αποτελέσει μια εναλλακτική της μεθόδου υδρολογικής ανάλυσης για την περιοχή μελέτης.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της απόκρισης των υπολεκάνων και του δικτύου υπό την επίδραση σεναρίων αύξησης της αστικοποίησης κατά 25%, 50% και 75% στις ημιαστικές υπολεκάνες της περιοχής μελέτης. Τα σενάρια αστικοποίησης εφαρμόστηκαν στο μοντέλο για βροχές περιόδου επαναφοράς 10 ετών και διάρκειας 1hr, 2hr, 6hr και 24hr. Από τις επιλύσεις προκύπτει πως η αύξηση της αστικοποίησης αυξάνει τον όγκο της απορροής και την παροχή αιχμής, καθώς και τους κόμβους του δικτύου που πλημμυρίζουν, ενώ φαίνεται πως ισχυρότερη επίδραση ασκεί στην απορροή από βροχές μικρής διάρκειας. Επιπλέον, σε συγκεκριμένες υπολεκάνες, οι τιμές του όγκου και της αιχμής της απορροής για βροχή περιόδου επαναφοράς 10 ετών κατά τα σενάρια μεγάλης αύξησης της αστικοποίησης,

ξεπερνούν τις αντίστοιχες τιμές για βροχές περιόδου επαναφοράς 25 ετών υπό την υφιστάμενη αστικοποίηση.

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Urbanization is associated with various and serious alterations of hydrological cycle. Concerning runoff, it is known that urban development increases total runoff volumes and peak flow rates (Chow et al, 1988). Booth (1991) suggested that urban development not only magnifies peak discharges, it also creates new peak runoff events. Hence, discharges associated with multi-year or multi-decade storm events before development, may occur one or more times a year after urban development takes place. There are many available methodologies for estimating peak runoffs, like the rational formula, hydrograph methods, Kinematic Wave methods and computer programs for runoff computations (Mays, 2001).

The scope of this postgraduate thesis is the simulation and investigation of the combined sewer system of a mostly urban area in Athens. The case study is located in the Zone Z2 of combined sewer system (Nea Kypseli) and comprises highly and less urbanized areas.

The simulation performed with SWMM (EPA), a dynamic rainfall-runoff simulation model. The constructed simulation model is calibrated, in order to predict observed outputs of a single event. Sensitivity analysis, applied to nine SWMM parameters, indicated the most sensitive parameters that were involved in calibration.

Calibrated model is used to investigate the sewer systems capacity under rainfall events with return period  $T=25$  years and  $T=50$  years and different durations. Then, a combined methodology was investigated. Runoff hydrographs, computed using the SCS Unit Hydrograph, inserted as inputs in SWMM simulated sewer system for hydraulic computation. The methodology applied in this thesis concludes with investigating the impacts of three different urbanization scenarios, applied to semi-urban subcatchments of the study area.

### SWMM Software

SWMM is a dynamic rainfall-runoff simulation model for primarily urban areas, first developed in 1969-1971 by EPA. It can be used either for single event or continuous simulation of runoff quantity and quality. According to the model structure, subcatchments receive precipitation and generate runoff and pollutant loads. Runoff is transported through a system of conduits, channels, pumps, regulators etc. Quantity and quality of each subcatchment's runoff and flow rate, flow depth and quality of the water in each conduit or channel are tracked by SWMM during a simulation period comprised of multiple time steps (Rossman, 2010).

The main elements of SWMM model are rain gages, subcatchments, nodes and links of the sewer system. Nodes can be junction or outfall nodes, dividers and storage units and links can be conduits, pumps etc.

Usually the study area is divided into small subcatchments. Different hydrological parameters of each subcatchment aim to represent the spatial variability in topography, land cover, soil characteristics or precipitation data. Discretization also serves the representation of subarea's connection to drainage system. Each subcatchment is connected to a rain gage and a node of sewer system.

SWMM models the subcatchment as a non-linear reservoir, which gets inflows from precipitation (rain gage data) and experiences losses from evaporation and infiltration. There are four methods available for modelling infiltration losses: Horton's method, a modified Horton method, the Green-Ampt method and the Curve Number method. Initial abstractions from rainfall are represented by depression storage depth for each subcatchment. Runoff outflow is the water above the depression storage and it is transported in a junction of the sewer system. Each subcatchment is divided between impervious and pervious areas with different depression storage and Manning coefficient values. Impervious areas are not included in infiltration processes. In order to represent impervious surfaces generating runoff immediately, SWMM allows the user to define a fraction of impervious areas with no depression storage.

Finally, SWMM model offers three options for flow routing within the conduits, the Dynamic Wave method (solves the complete form of the St. Venant flow equations), the Kinematic Wave method (ignores inertial and pressure forces) and the steady flow routing.

## Study Area and Applied Methodology

### Study Area

Study area of the present study is located in Nea Kypseli (Athens). The total area is about 66.92ha or 0.6692 km<sup>2</sup>, comprising highly and less urbanized areas. Sewer system in the study area is part of Zone Z2 of combined sewer system of Athens. For the purposes of the analysis, the area is divided into ten subcatchments, with different width, slope, Curve Number and percentage of impervious area (Figure 1). Discretization takes into consideration the topography of the area and the drainage network.

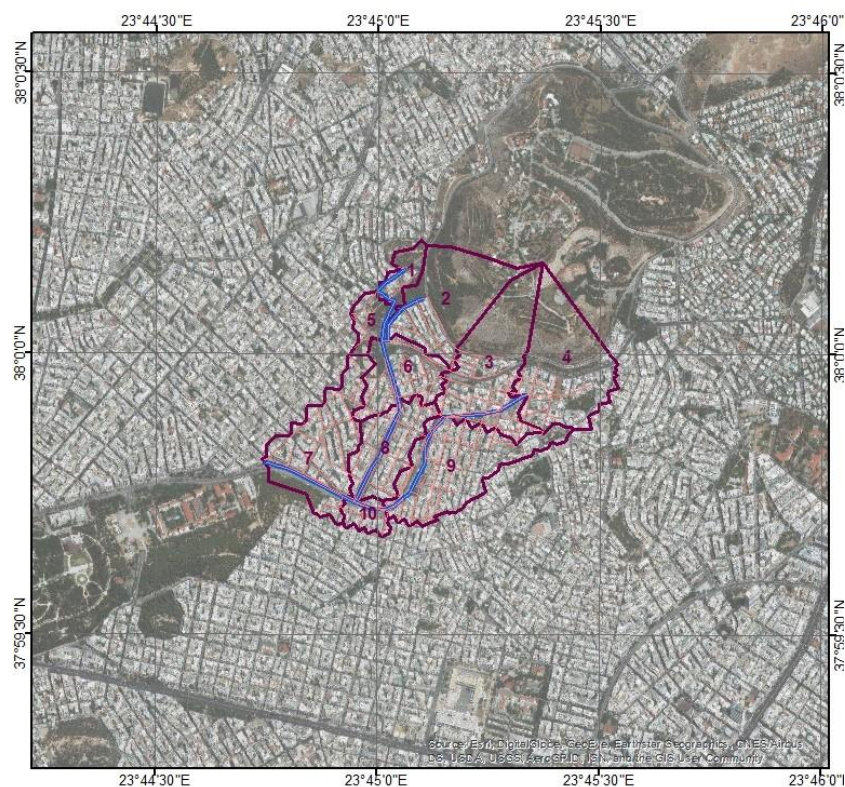


Figure 1: Study area, subcatchments discretization and drainage network.

## Model Construction

First, DEM and digitized sewer network of the study area is inserted in ArcGIS. The discretization into subcatchments takes place with combined use of AutoCAD and ArcGIS.

Parameters such as percentage of impervious areas, depression storage and Manning's roughness coefficient on pervious and impervious areas, percentage of impervious areas without storage depression were estimated, unlike width and slope of each subcatchment that was computed with ArcGIS. After estimating the parameter values, dry weather inflows are estimated for each subcatchment.

Then, subcatchments, conduits and junctions, along with the required parameter values, are inserted to SWMM with the use of inpPINS. Dry weather inflows are inserted manually. Rainfall data referring to a single event with observed outputs are inserted and simulation options are defined.

## Sensitivity Analysis and Model Calibration

After the simulation of a single event, sensitivity analysis is applied to the model, in order to define the most sensitive parameters that will be included in calibration. Sensitivity analysis is performed by Once At a Time method and parameter values are changed by  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$ ,  $\pm 40\%$ ,  $\pm 50\%$ . Effect on peak discharge, runoff volume, peak time and max depth on system outfall of the above alterations are investigated.

Sensitivity analysis is applied to the following parameters:

- Subcatchment width
- Depression storage on impervious areas (D-imp)
- Manning's roughness coefficient on impervious areas (N-imp)
- Manning's roughness coefficient on pervious areas (N-perv)
- Percentage of impervious area with zero depression storage (%zero-imper)
- Percentage of impervious area (%imper)
- Manning's roughness coefficient on conduits (n-con)
- Subcatchment slope

Parameters proved sensitive by sensitivity analysis experienced calibration. Flow measured in two conduits of the area during a single event is used for model calibration. Subcatchments that drain to each conduit calibrated separately. Calibration procedure performed with the use of a genetic algorithm available in MATLAB using Nash-Sutcliffe coefficient as an objective function.

## Investigation of system response to multi-year rainfall events

Hyetographs for 25 years and 50 years rainfalls of 1, 2, 6 and 24 hours duration, with time interval equal to 10 minutes, produced by IDF curves referring to the study area. The hyetographs constructed with alternating block method. Then, SWMM calibrated model is used for the simulation in order to investigate the capacity of the sewer system.



## Runoff hydrographs used as inputs on simulated sewer system

Runoff hydrographs for the mentioned storms produced for each subcatchment with HEC-HMS. Hydrographs created by Unit SCS Hydrograph, considering rainfall losses computed with SCS method. Percentage of imperviousness was also an input in HEC-HMS, in order to except these areas from the infiltration process. Three methods for time of concentration estimation) are investigated, Giandotti method (Eq. 1), developed by Giandotti (1934), Kinematic Wave method (Eq.2), developed by Welle and Woodward (1986), and Kerby equation (Eq. 3), developed by Kerby (1959). Kerby equation was developed from a very small watershed and it is suggested to be used for watersheds with flow length less than 1,000 feet (Woodward, 2010).

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_m - H_{\min}}} \quad (1)$$

$T_c$  : Time of concentration (hr)

$A$  : Watershed area (km<sup>2</sup>)

$L$  : Length of the main cannel (km)

$H_m$  : Mean basin elevation (m)

$H_{\min}$  : Outlet elevation (m)

$$T_t = \frac{0.007(nl)^{0.8}}{(P_2)^{0.5} S^{0.4}} \quad (2)$$

$T_t$  : Travel time (hr)

$n$  : Manning's roughness coefficient

$l$  : Sheet flow length (ft)

$P_2$  : 2-year, 24-hpur rainfall (in)

$S$  : Slope of land surface (ft/ft)

$$T_c = \left[ \frac{2.2nl}{S^{0.5}} \right]^{0.324} \quad (3)$$

$T_c$  : Time of concentration (min)

$n$  : Manning's roughness coefficient

$l$  : length of channel from headwater to outlet (ft)

$S$  : Average slope (ft/ft)

In order to estimate concentration time on each subcatchment, the main channel's length and slope, as well as the difference between the mean basin elevation and the outlet elevation (for Giandotti method) has to be defined. These values were defined with the use of ArcGIS, after the construction of the hydrographic network. Kinematic Wave and Kerby methods require the estimation of Manning's roughness coefficient, which was estimated as the weighted average between values on pervious and impervious areas of each subcatchment.

Runoff hydrographs for each subcatchment are used as inputs in SWMM sewer system's junctions and simulations for each time of concentration method takes place. The computed outfall discharges are compared to the ones of calibrated model. Also, runoff hydrographs are compared with runoff hydrographs computed by SWMM during the hydrological analysis of the calibrated model.

## Urbanization Scenarios

Five out of ten subcatchments of the study area are not highly urbanized. Their percentage of impervious areas is assumed to be between 25% and 50%. These subcatchments experience imperviousness increase by 25%, 50% and 75%. The increase is applied to the imperviousness percentage of the calibrated model, not to the assumed ones. Scenarios are simulated for 10year storm of 1, 2, 6 and 24 hours duration, since design storm for Greek drainage network has return period of 10 years. Results are compared with 25 and 50 years storms before urbanization increase.

## Results

### Sensitivity Analysis and Model Calibration

Sensitivity analysis applied by OAT method indicates that SWMM model is most sensitive to the following parameters:

- Depression storage on impervious areas (D-imp)
- Percentage of impervious area (%imper)
- Percentage of impervious area with zero depression storage (%zero-imper)

On Figure 2, the effect of each parameter on peak discharge is displayed. Values are normalized to 0-1 range, in order to identify the relative effect of each parameter to the model, so that the most sensitive parameters can be defined. Influence of parameters changes on peak discharge considered to be the most crucial indicator, since the calibrated model will be used to investigate sewer system capacity under multi-year storms.

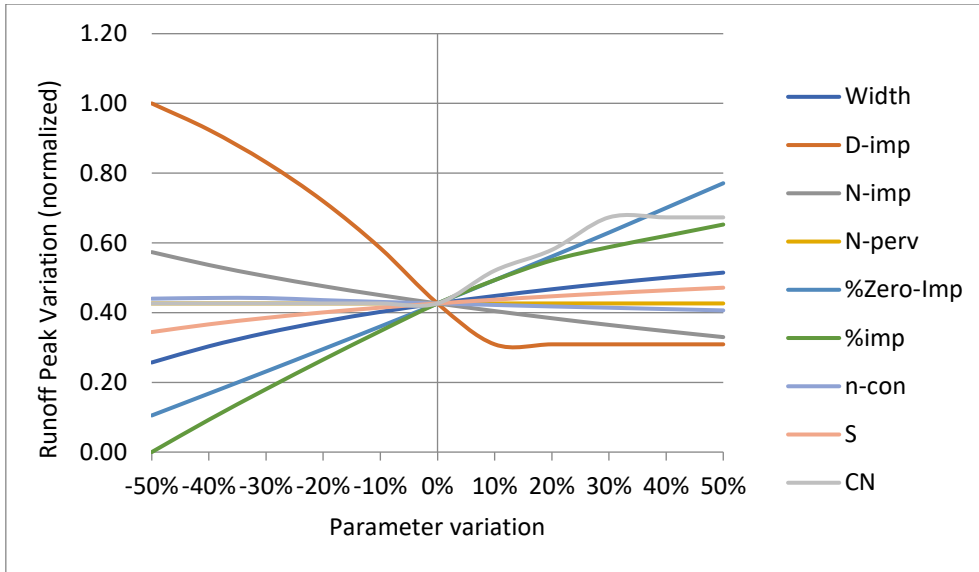


Figure 2: Sensitivity Analysis Results – Influence on peak discharge at sewer system's outfall.

Considering the results of sensitivity analysis, N-perv and CN number are excluded from the calibration. Calibration performed separately for subcatchments 3, 4 and 9 that drain to conduit 1640 and 1, 2, 5, 6 and 8 that drain to conduit 1313.

The calibrated model is able to predict peak discharge values and time peak for both conduits (Figure 3 and 4). NSE values are 0.91 for conduit 1313 and 0.53 for conduit 1640.

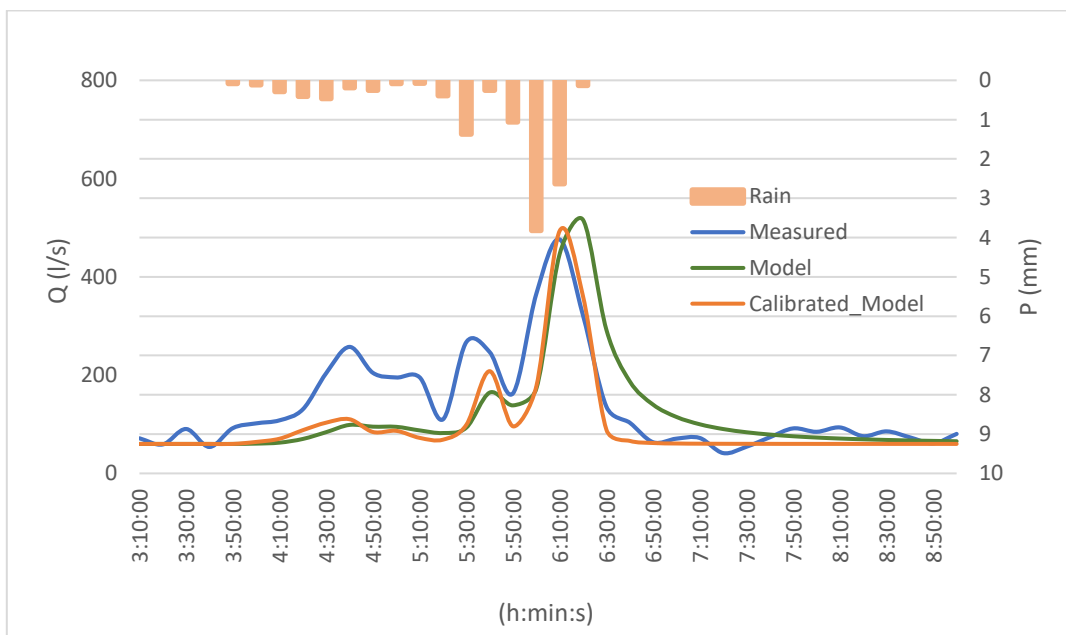


Figure 3: Measured and Simulated flow after calibration – Conduit 1640.

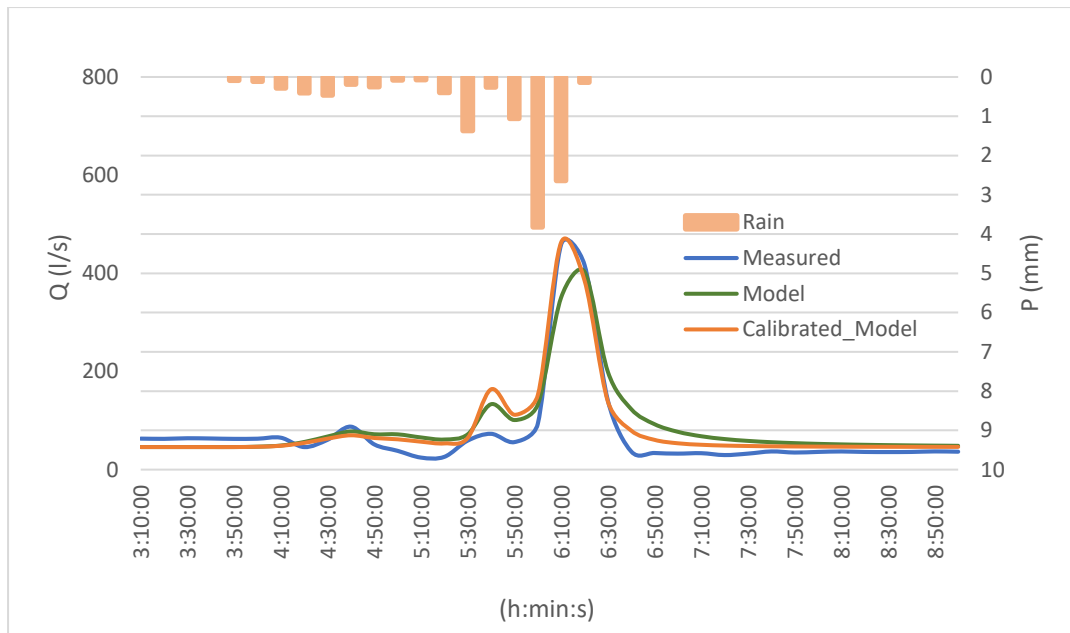


Figure 4: Measured and Simulated flow after calibration – Conduit 1313.

### Investigation of system response to multi-year rainfall events

Simulation results are displayed in Table 1. Sewer system in the study area is not able to drain runoff produced by 25-year or more rainfall, regardless rainfall duration. Rainfall with the lowest precipitation height (T=25 years and d=1hr) results in six system nodes flooding. Flooding loss volume increases as precipitation height increases. On 50-year rainfall of 24 hours duration flow rate exceeds most of the links capacity. Flow rates on outfall conduit slightly differ between simulations with different rainfalls, as a result of flooding nodes.

As for rainfall-runoff processes in the study area, it can be assumed that, as rainfall duration and precipitation height increase for rainfalls with the same return period, surface runoff increases too, while infiltration slightly differs. Hence, on 25-year rainfall of 1 hour duration infiltration capacity of study area subcatchments is mostly fulfilled, leading to increasing direct surface runoff as rainfall duration and precipitation height increases.

Table 1: Simulation results for multi-year rainfall events

|                 | Rainfall (mm) | Infiltration (mm) | Surface Runoff (mm) | Outfall Peak Discharge (l/s) | Outfall Volume (10 <sup>6</sup> l) | Nodes Flooding | Flooding Loss (l/s) |
|-----------------|---------------|-------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------------|----------------|---------------------|
| T=25y<br>d=1hr  | 37.42         | 13.176            | 21.961              | 8798.33                      | 18.153                             | 6              | 0.586               |
| T=25y<br>d=2hr  | 45.274        | 13.353            | 29.26               | 8842.41                      | 22.251                             | 7              | 1.375               |
| T=25y<br>d=6hr  | 61.244        | 13.144            | 44.22               | 8885.38                      | 32.289                             | 9              | 3.167               |
| T=25y<br>d=24hr | 89.666        | 14.077            | 71.284              | 8890.82                      | 59.398                             | 10             | 4.601               |
| T=50y<br>d=1hr  | 45.306        | 14.005            | 28.929              | 8924.91                      | 20.78                              | 9              | 2.628               |
| T=50y<br>d=2hr  | 54.803        | 14.151            | 37.926              | 8944.99                      | 25.384                             | 11             | 4.045               |
| T=50y<br>d=6hr  | 74.156        | 13.901            | 56.327              | 8950.08                      | 37.117                             | 13             | 6.443               |
| T=50y<br>d=24hr | 108.571       | 14.757            | 89.481              | 8950.59                      | 68.757                             | 16             | 7.875               |

### Runoff hydrographs used as inputs on simulated sewer system

First step of the procedure was the estimation of concentration time values with Giandotti, Kinematic Wave and Kerby method. For all ten subcatchments Kerby method gives the lowest values of concentration time (less than 10 minutes) and Kinematic wave the highest.

The results of three simulations, using runoff hydrographs produced with the three methods in comparison with the outfall flow computed by the calibrated model, are displayed in Figure 5. The simulations refer to 25-year rainfall of 1 hour duration. Kinematic Wave and Giandotti methods lead to lower values of peak discharge compared to Kerby method and the SWMM analysis. Peak time occurs 10 minute earlier than the SWMM model when Kerby method is used for runoff hydrograph production and 10 minutes after when Kinematic Wave and Gianodotti methods are used. Concerning nodes flooding, Kinematic Wave and Giandotti methods lead to no flooding node, while Kerby method lead to two flooding nodes. It is mentioned that for the same return period and rainfall duration, the calibrated model indicated six nodes flooding. Total runoff volume slightly differ between the methods, as it is governed by the loss method that was used.

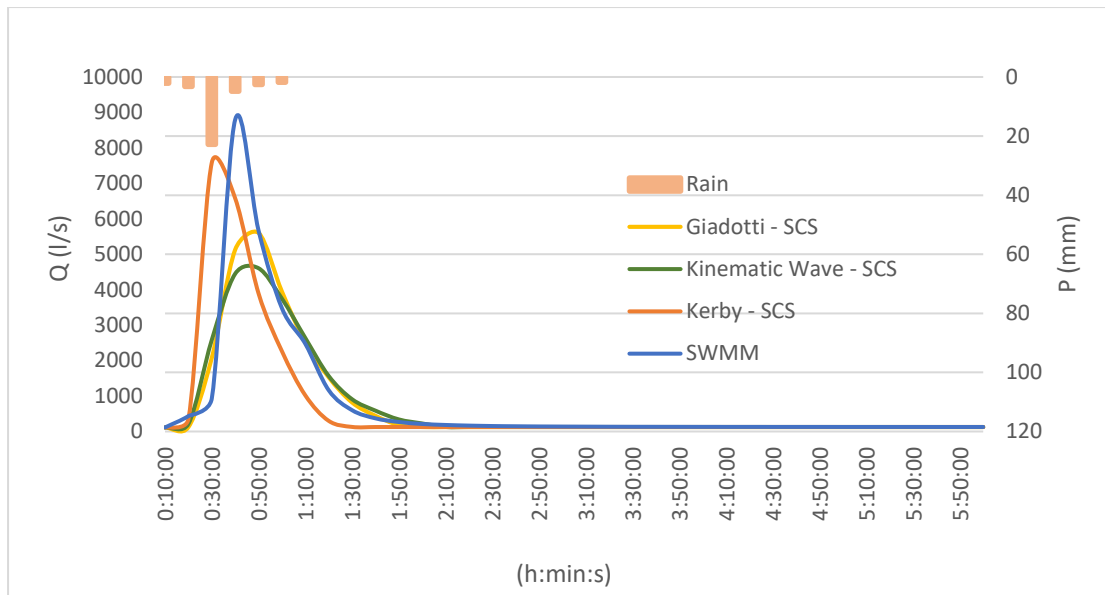


Figure 5: Outfall flow computed using runoff hydrographs as inputs (using three time of concentration methods) compared with the calibrated model for 25-year rainfall of 1 hour duration.

Finally, it seems to be that Kinematic Wave and Giadotti methods give similar results. A comparison between runoff hydrographs computed with Kinematic and Kerby methods and the ones computed by SWMM for each subcatchment for 25-year rainfall of 24 hours duration, concludes that Kerby method gives peak runoff values closest to SWMM than Kinematic Wave method. Peak time occurs 10 minutes earlier with Kerby method than with SWMM, while with Kinematic method occurs at the same time or 10 minutes later in some subcatchments.

Really low concentration time values computed by Kerby method can explain the peak time difference between methods. Lag time is calculated as  $2/3$  of concentration time and it is used as a parameter on HEC-HMS analysis. As lag time calculated considering concentration time by Kerby method is less than 10 minutes, which is the rainfall time interval and the simulation step of HEC-HMS, actually there is no delay on subcatchments runoff. On the contrary lag time values considering Kinematic Wave methods are higher than 10 minutes or more.

The hydrographs mentioned above are used as inputs to sewer system simulated by SWMM. Outfall flow and runoff volume results agree with the results given by simulation for 25-year rainfall of 24 hours. This time seven nodes flood when hydrographs produced by Kerby method are used in contrast with two nodes when Kinematic Wave method is used.

As peak runoff considers to be a critical parameter of sewer systems investigation, it can be assumed that hydrographs produced by Unit SCS Hydrograph and Kerby method can be used as an alternative runoff estimation than SWMM for the examined study area. The method is used to simulations of 50-year rainfall and different durations. The results, compared with the ones of calibrated model for the same rainfall events, are summarized on Table 2.

Results show that runoff volumes calculated by SWMM have slightly lower values than the ones computed with HEC-HMS. The difference can be explained by the fact that SWMM hydrological analysis takes into consideration depression storage height, which was not involved in HEC-HMS procedures. Peak flow values at the outfall are really similar, since Kerby

method is used for concentration time estimation. Finally, nodes flooding are overestimated by hydrograph method for rainfall with short durations and underestimated for rainfalls of longest duration. This can be explained, since hydrographs for 24-hour rainfall computed by SCS method have lower peak runoff values than the runoff hydrographs estimated by SWMM for the same rainfall duration.

Table 2: Results of SWMM and SCS method for 50-year rainfall of different durations.

|   | d=1hr   |         | d=2hr   |         | d=6hr   |         | d=24hr  |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|   | SWMM    | SCS     | SWMM    | SCS     | SWMM    | SCS     | SWMM    | SCS     |
| Total Runoff Volume (10 <sup>6</sup> l) | 19.34   | 21.23   | 25.39   | 26.91   | 37.69   | 38.83   | 59.89   | 60.73   |
| Outfall Peak flow (l/s)                 | 8924.02 | 8947.29 | 8944.98 | 8948.09 | 8949.87 | 8948.88 | 8950.26 | 8897.17 |
| Total nodes flooding                    | 9       | 11      | 11      | 12      | 13      | 14      | 16      | 9       |

## Urbanization Scenarios

Urbanization has a serious impact on subcatchments runoff and sewer systems response on the study area. Peak runoff and runoff volume on five subcatchments that experienced imperviousness increase, has increased and in some cases peak runoff values almost doubled for 75% imperviousness increase. Time peak on runoff hydrographs did not change after urbanization changes.

Simulation results, also, indicate that urbanization increase has the highest impact on runoff peak and volume values for rainfalls of duration 1 and 2 hours (Figure 6, Figure 7). Results for the rest subcatchments are similar to Subcatchment 4.

Table 3 contains results for 10-year rainfall events of 1 hour duration under urbanization increase compared with simulation results for 25-year and 50-year rainfall events under current urbanization conditions for five subcatchments. Subcatchments peak runoff and runoff volume comparisons, indicate that 75% urbanization increase can lead to values similar or higher with the ones simulated for 25-year rainfall events without urbanization increase.

Finally, Table 4 contains the number of flooding nodes under each urbanization scenario. There is a serious increase on number of nodes flooding as urbanization increases. It has to be mentioned that flooding loss increase is up to 933% for 75% urbanization increase and 1 hour rainfall duration, instead of 119% and 34% for 6 and 24 hours rainfall duration. Hence, system capacity is more sensitive to urbanization increase under rainfall events of 1 and to hours duration in comparison to longer rainfall events.

Table 3: Urbanization scenarios results for 10-year rainfall of 1 hour duration on comparison with simulation results for 25-year and 50-year rainfall of the same duration without urbanization increase.

|                |                                   | Current Urbanization |         |         | +25%    | +50%    | +75%    |
|----------------|-----------------------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                |                                   | T=50                 | T=25    | T=10    | T=10    | T=10    | T=10    |
| Subcatchment 1 | Peak Runoff (l/s)                 | 446.23               | 296.95  | 172.14  | 213.59  | 254.96  | 296.34  |
|                | Runoff Volume (10 <sup>6</sup> l) | 0.43                 | 0.32    | 0.21    | 0.24    | 0.27    | 0.31    |
| Subcatchment 2 | Peak Runoff (l/s)                 | 1472.6               | 1123    | 830.35  | 1021.25 | 1201.71 | 1371.91 |
|                | Runoff Volume (10 <sup>6</sup> l) | 1.84                 | 1.34    | 0.87    | 1.07    | 1.26    | 1.46    |
| Subcatchment 3 | Peak Runoff (l/s)                 | 2313.71              | 1471.41 | 767.4   | 935.76  | 1104.38 | 1272.62 |
|                | Runoff Volume (10 <sup>6</sup> l) | 2.39                 | 1.72    | 1.05    | 1.2     | 1.34    | 1.48    |
| Subcatchment 4 | Peak Runoff (l/s)                 | 3046.92              | 2059.59 | 1108.75 | 1277.66 | 1446.24 | 1613.73 |
|                | Runoff Volume (10 <sup>6</sup> l) | 2.95                 | 2.18    | 1.4     | 1.53    | 1.65    | 1.78    |
| Subcatchment 5 | Peak Runoff (l/s)                 | 504.6                | 340.49  | 194.48  | 238.47  | 282.35  | 326.18  |
|                | Runoff Volume (10 <sup>6</sup> l) | 0.48                 | 0.36    | 0.23    | 0.27    | 0.3     | 0.34    |

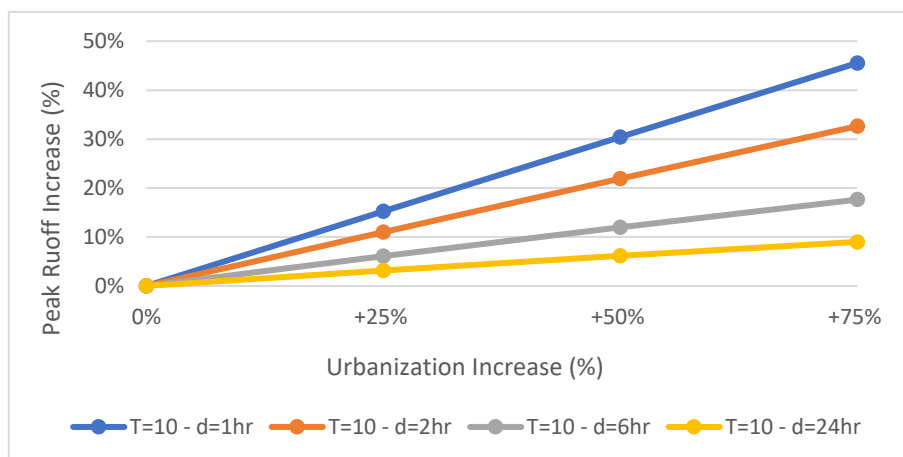


Figure 6: Peak runoff increase under urbanization scenarios as percentage – Simulations for rainfall events with different duration, Subcatchment 4.



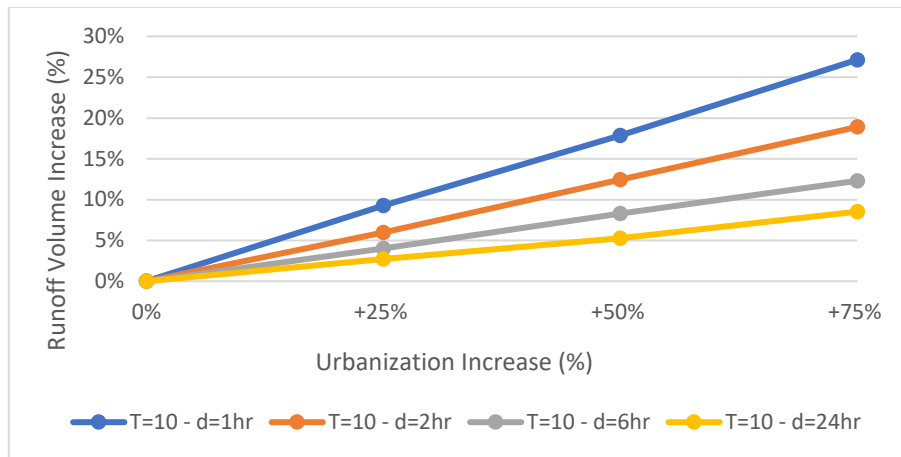


Figure 7: Runoff volume increase under urbanization scenarios as percentage – Simulations for rainfall events with different duration, Subcatchment 4.

Table 4: Number of nodes flooding under urbanization increase scenarios

|              | Nodes Flooding       |                   |                   |                   |
|--------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|              | Current Urbanization | +25% Urbanization | +50% Urbanization | +75% Urbanization |
| T=10, d=1hr  | 0                    | 1                 | 1                 | 2                 |
| T=10, d=2hr  | 3                    | 4                 | 5                 | 8                 |
| T=10, d=6hr  | 7                    | 8                 | 8                 | 9                 |
| T=10, d=24hr | 8                    | 8                 | 9                 | 12                |

## Conclusions

Scope of the current thesis was the simulation and investigation of the combined sewer system at Nea Kypseli (Athens) under multi-year rainfall events and urbanization increase scenarios.

Firstly, the constructed SWMM model experienced sensitivity analysis and calibration. Sensitivity analysis results, indicating that the model is most sensitive to depression storage on impervious areas, impervious percentage and percentage of impervious areas without depression storage, are highly connected with the domination of urban areas.

The calibration method used seems to be able to improve model efficiency. Moreover, the calibrated model is able to avoid underestimating peak flow values, which is important for its usage to investigate the system capacity under multi-year rainfall events. It has to be mentioned that the existence of measured flow for more than one episode could improve calibration results and allow model validation. Measured flows on more than two conduits could also improve the calibrated model efficiency, as well as the inclusion of dry weather inflows on calibration could, especially concerning conduit 1640. Finally, a calibration method that gives different parameter values on each subcatchment could result in parameter values that represent better the physical characteristics of the subcatchments.

Investigation of sewer system capacity with SWMM showed that the combined system capacity in the study area is exceeded for 25-year and 50-year rainfall regardless the rainfall duration. According to SWMM calibrated model many nodes are flooding in most of the examined events.

Using runoff hydrographs constructed with the use of SCS Unit Hydrograph and the SCS loss method, can give results about runoff volume similar to the ones given by the hydrological analysis with SWMM. The prediction of peak runoff values and peak time depends on the concentration time method that is used for lag time calculation. In this thesis, time of concentration was calculated with Kerby equation, which leads to lag time values lower than the time interval used for hyetographs (10 minutes). As a result, peak runoff occurs at the same step that maximum rainfall height occurs. Calculating hyetographs with shorter time interval than ten minutes, could lead to a more accurate estimation of runoff peak time.

Finally, increasing urbanization in the study area leads to more flooding events especially when rainfall of 1 or 2 hours duration occur. Peak runoff and runoff values increase significantly and bigger part of the study area experiences flooding events.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η προσομοίωση και διερεύνηση τμήματος του παντορροϊκού δικτύου των Αθηνών, και συγκεκριμένα, της ανάντη περιοχής της ζώνης Ζ2. Πρόκειται, για περιοχή της Νέας Κυψέλης, που ανήκει διοικητικά στο Δήμο Αθηναίων. Περιλαμβάνει την έκταση ανάμεσα στον οικισμό Γεωργίου Παπανδρέου και το Πρωτοδικείο Αθηνών και αποτελείται από πλήρως αστικές και ημιαστικές περιοχές.

Η προσομοίωση του δικτύου και της λεκάνης απορροής έγινε με τη χρήση του λογισμικού SWMM, σε συνδυασμό με άλλα λογισμικά (ArcGIS, AutoCAD, InRoads). Για τους σκοπούς της διερεύνησης του δικτύου καταρτίστηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης της περιοχής μελέτης στο SWMM. Το μοντέλο υποβλήθηκε σε βαθμονόμηση των παραμέτρων (η βαθμονόμηση έγινε σε περιβάλλον MATLAB) στις οποίες παρουσιάστηκε περισσότερο ευαίσθητο με βάση την ανάλυση ευαισθησίας που προηγήθηκε.

Η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε αφορά:

- Την απόκριση του δικτύου και την εκτίμηση των πλημμυρικών απορροών για βροχές διαφορετικής διάρκειας και περιόδου επαναφοράς.
- Την εφαρμογή μιας συνδυαστικής μεθόδου παραγωγής πλημμυρογραφημάτων και εισαγωγής τους ως εισόδων στο δίκτυο, ως εναλλακτική της υδρολογικής ανάλυσης της περιοχής μελέτης με το SWMM.
- Την απόκριση των υπολεκανών και του δικτύου υπό την επίδραση σεναρίων αύξησης της αστικοποίησης των ημιαστικών υπολεκανών της περιοχής μελέτης.

Αναλυτικότερα, το Κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας, αποτελεί εισαγωγή στα αστικά υδρολογικά συστήματα και στην επίδραση της αστικοποίησης σε αυτά. Αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι τύποι των δικτύων αποχέτευσης. Τέλος, γίνεται αναφορά στις μεθοδολογίες εκτίμησης των παροχών ομβρίων, καθώς και μια ανασκόπηση των διαθέσιμων μοντέλων και των διαδικασιών που εκτελούνται σε αυτά με σκοπό τη βέλτιστη προσομοίωση των φυσικών συστημάτων.

Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται το λογισμικό SWMM που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Αναλύονται οι δυνατότητες και οι επιμέρους λειτουργίες του, ενώ γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών, που αφορά την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφεται η περιοχή μελέτης. Η περιγραφή αφορά το αποχετευτικό σύστημα, τμήμα του οποίου αποτελεί και το παντορροϊκό δίκτυο της περιοχής μελέτης, καθώς και συγκεκριμένα γεωγραφικά, κλιματικά, γεωλογικά και πληθυσμιακά δεδομένα της περιοχής μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 4, αναπτύσσεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία και αφορά την κατασκευή του μοντέλου, τις διαδικασίες ανάλυσης ευαισθησίας και βαθμονόμησης του, τη διερεύνηση του δικτύου για βροχές διαφορετικής διάρκειας και περιόδου επαναφοράς και την εκτίμηση των πλημμυρικών απορροών, τη διερεύνηση μιας συνδυαστικής μεθόδου παραγωγής πλημμυρογραφημάτων και εισαγωγής τους ως εισόδων

στο δίκτυο και την απόκριση των υπολεκανών και του δικτύου υπό την επίδραση σεναρίων αύξησης της αστικοποίησης των ημιαστικών υπολεκανών της περιοχής μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση της παραπάνω μεθοδολογίας.

Στο Κεφάλαιο 6, καταγράφονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εκτέλεση της μεθοδολογίας και την ανάλυση των αποτελεσμάτων, καθώς και προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.

## **1.2 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΡΡΟΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ**

### **1.2.1 ΑΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ**

Ο υδρολογικός κύκλος περιγράφει την αέναη κίνηση του νερού ανάμεσα στους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και την ξηρά, που συνοδεύεται και από αλλαγές ανάμεσα στην υγρή, την αέρια και τη στερεή φάση του νερού (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018). Πρόκειται για ένα δυναμικό και ολοκληρωμένο σύστημα αποθεμάτων και ροών ορμώμενο από πολλαπλές και αλληλοεπιδρώμενες διεργασίες, όπως τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, η κατακράτηση και η διήθηση, η εξατμισοδιαπνοή κ.τ.λ. Για να κατανοήσουμε το σύστημα αυτό ως ολότητα, απαιτείται η κατανόηση όχι μόνο των στοιχείων που το απαρτίζουν αλλά και των δυναμικών αλληλεπιδράσεων και των μηχανισμών ανατροφοδότησης μεταξύ των επιμέρους διαδικασιών του (Sun et. al., 2019).

Αν και, όπως είναι προφανές, δεν είναι εύκολο να ορισθεί η αρχή του υδρολογικού κύκλου, μια σύντομη περιγραφή του θα μπορούσε να λάβει ως αρχή του υδρολογικού κύκλου τις διεργασίες στην ατμόσφαιρα.

Στην ατμόσφαιρα συγκεντρώνονται οι υδρατμοί από την εξάτμιση του νερού από τη θάλασσα και την ξηρά, καθώς και από τη διαπνοή από τα δένδρα και τη βλάστηση. Υπό την επίδραση των ανέμων και κάτω από κατάλληλες συνθήκες, οι υδρατμοί συγκεντρώνονται σε νέφη και επανέρχονται στη συνέχεια στην επιφάνεια της γης υπό τη μορφή ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Από το νερό που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους ένα μέρος συγκρατείται από τη βλάστηση και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά, ένα άλλο μέρος διηθείται στο έδαφος και ένα τρίτο απορρέει επιφανειακά προς τα ρέματα και τους ποταμούς για να καταλήξει σε λίμνες ή θάλασσες. Από το νερό που διηθείται, ένα μέρος εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά, ενώ το υπόλοιπο διηθείται σε βαθύτερα στρώματα, επαναφορτίζει τους υπόγειους υδροφορείς και βρίσκοντας διέξοδο προς την επιφάνεια της γης σε χαμηλότερα υψόμετρα καταλήγει στη θάλασσα. Ο υδρολογικός κύκλος, τελικά ολοκληρώνεται με την εξάτμιση του νερού από τη θάλασσα και την επαναφορά του στην ατμόσφαιρα (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018).

Οι υδρολογικές διεργασίες παρουσιάζουν έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα, ως αποτέλεσμα των περίπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κλιματικών συνθηκών, του εδάφους, του υπεδάφους και της βλάστησης. Η μεταβλητότητα αυτή γίνεται εντονότερη όσο η χωρική κλίμακα μελέτης των διεργασιών μικραίνει, όταν πρόκειται δηλαδή, για μεμονωμένες περιοχές ή λεκάνες απορροής. Οι βασικές φυσικές παράμετροι που επιδρούν στις υδρολογικές διεργασίες σε τέτοια κλίμακα μπορούν να διαιρεθούν στις μετεωρολογικές και τις φυσιογραφικές. Οι μετεωρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά της βροχοπτώσης, της θερμοκρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας, της υγρασίας, της ταχύτητας

των ανέμων κ.τ.λ., ενώ οι φυσιογραφικές αφορούν τους τοπογραφικούς και γεωλογικούς παράγοντες που συμβάλλουν στη διαμόρφωση της επιφάνειας του εδάφους και του υπεδάφους, την κάλυψη γης και τη χρήση γης (Sun et. al., 2019).

Ο υδρολογικός κύκλος, επομένως, καθώς και οι διεργασίες και οι αλληλεπιδράσεις που τον διέπουν, μεταβάλλονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υπό εξέταση υδρολογικού συστήματος. Ως υδρολογικό σύστημα, οι Chow et al. (1988) ορίζουν τη δομή ή το χώρο που περικλείεται από ένα όριο, δέχεται νερό και άλλες εισόδους, τις διαχειρίζεται στο εσωτερικό του και τις αποβάλλει ως εξόδους. Η δομή (όταν πρόκειται για επιφανειακή ή υπόγεια ροή νερού) ή ο χώρος (όταν πρόκειται για ατμοσφαιρικές ροές) είναι η ολότητα των ροών μέσω των οποίων το νερό μπορεί να περάσει από τη στιγμή που εισέρχεται στο σύστημα μέχρι την έξοδό του. Το όριο που περικλείει το σύστημα είναι μια συνεχής επιφάνεια ορισμένη στον τρισδιάστατο χώρο. Το μέσο επεξεργασίας (νερό, αέρας, θερμική ενέργεια) εισέρχεται σαν είσοδος στο σύστημα, αλληλοεπιδρά με τη δομή και με άλλα μέσα μέσω φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, και εξέρχεται ως έξοδος.

Μια ιδιαίτερη κατηγορία υδρολογικών συστημάτων αποτελούν τα αστικά υδρολογικά συστήματα. Το νερό στις αστικές περιοχές ρέει όχι μόνο μέσω των ρεμάτων, λιμνών και υγρότοπων, αλλά και διαμέσου των δικτύων ύδρευσης και των αποχετευτικών αγωγών και καναλιών με βάση τις ανθρώπινες χρήσεις, διεργασίες και ανάγκες (Wei et. al., 2018). Στο γενικό μοτίβο του φυσικού υδρολογικού κύκλου αναπτύσσεται ένας κοινωνικός υδρολογικός κύκλος, ο οποίος συνιστά ένα μοναδικό δυαδικό μοντέλο υδρολογικού κύκλου (Wei et. al., 2018). Ο αστικός υδρολογικός κύκλος τροφοδοτείται από δύο κύριες εισόδους νερού: την παροχή νερού για αστική χρήση και τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

Η παροχή νερού για αστική χρήση, προέρχεται συνήθως από αποθέματα εκτός της πόλης, συχνά από μακρινές λεκάνες. Το νερό αυτό, αφού εισέλθει στην αστική περιοχή, διανέμεται σε αυτήν και ένα μέρος του καταλήγει σε υπόγεια ύδατα, μέσω των απωλειών, ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε ακάθαρτα/λύματα μετά τη χρήση του (Wei et. al., 2018). Τελικός, αποδέκτης των ακαθάρτων μπορεί να είναι ένα φυσικό υδάτινο σύστημα (υδατόρρευμα, λίμνη, θάλασσα).

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα στα αστικά υδρολογικά συστήματα μετατρέπονται σε επιφανειακή απορροή, διηθούνται στο έδαφος και εμπλουτίζουν τους υπόγειους υδροφορείς ή καταλήγουν σε υδρολογικές απώλειες (Wei et. al., 2018). Οι διαδικασίες αυτές, όμως, δεν απαντώνται σε αυτά τα συστήματα με τον ίδιο τρόπο όπως στα φυσικά υδρολογικά συστήματα.

Στα αστικά υδρολογικά συστήματα το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών, επιφανειών δηλαδή που δεν απορροφούν εύκολα το νερό, όπως: δρόμοι, στέγες, χώροι στάθμευσης, πεζοδρόμια, είναι ιδιαίτερα μεγάλο σε σχέση με τις περατές (φυσικό έδαφος, βλάστηση), με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά το ποσοστό του όγκου των κατακρημνισμάτων που καταλήγουν σε επιφανειακή απορροή. Έτσι, ο φυσικός υδρολογικός κύκλος που βασίζεται στη διήθηση και την εξατμισοδιαπνοή μεταβάλλεται σε ένα σύστημα όπου κυριαρχεί η επιφανειακή απορροή (Sun et al., 2019).

### 1.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΗ

Η αστικοποίηση είναι ισοδύναμη με τη μεταβολή των φυσικών τοπίων και την αντικατάσταση επιφανειών με βλάστηση με αδιαπέρατες επιφάνειες. Η αύξηση των κατ' αναλογία

αδιαπέρατων επιφανειών αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα των υδρολογικών μεταβολών που συνδέονται με την αστικοποίηση (Shuster et. al., 2005).

Η μεταβολή του τοπίου εξαιτίας της αστικής ανάπτυξης αφορά ποικίλες αλλαγές που σχετίζονται με τις ανθρώπινες ανάγκες. Μερικά παραδείγματα περιλαμβάνουν (Shuster et. al., 2005): την αύξηση της επιφάνειας του οδικού δικτύου (Forman and Alexander 1998, Forman 2000, Jones et al. 2000), τον κατακερματισμό και την αποστράγγιση υγροτόπων (Hopkinson and Day 1980, Mitsch and Gosselink 1986), τη μείωση της ικανότητας αποστράγγισης (Hicks and Larson, 1997) εξαιτίας της αστικής ανάπτυξης σε πλημμυρικές κοίτες (Nanson and Young, 1981), τη διοχέτευση κύριων επιφανειακών υδάτων και τις επεμβάσεις στη φυσική ροή τους (Hopkinson and Day 1980, Simmons and Reynolds 1982). Αποτέλεσμα, όλων των παραπάνω μεταβολών, είναι ο περιορισμός του αριθμού και του τύπου των πιθανών διόδων του νερού των κατακρημνίσεων διαμέσου του υδρολογικού κύκλου (Cairns 1995), επηρεάζοντας σημαντικά τον αστικό υδρολογικό κύκλο (Sauer et al. 1983, Niemczynowicz, 1999).

Πιο συγκεκριμένα, η αυξημένη αστική ανάπτυξη επιδρά στο υδρογράφημα απορροής μιας λεκάνης αυξάνοντας τις τιμές των παροχών αιχμής και το συνολικό όγκο της απορροής (Chow et al, 1988). Ο Booth (1991) συνέκρινε την απορροή μιας λεκάνης για σενάρια ήπιας και υψηλής αστικοποίησης, κάνοντας χρήση ενός συνεχούς υδρολογικού μοντέλου προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως στην περίπτωση της υψηλής αστικοποίησης οι τιμές των αιχμών των υδρογραφημάτων αυξήθηκαν, ενώ εμφανίστηκαν και νέες αιχμές. Οι νέες αιχμές αφορούν την απόκριση της λεκάνης σε ήπια βροχή, κατά την οποία δεν παρατηρούνταν απορροή πριν την αστικοποίηση. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε πως η αστική ανάπτυξη δεν αυξάνει μόνο τις τιμές των παροχών αιχμής των υδρογραφημάτων της απορροής αλλά δημιουργεί και τελειώς νέα γεγονότα απορροής. Για παράδειγμα, αν η απορροή της πλημμύρας 2-ετών διπλασιάζεται εξαιτίας της αστικοποίησης, είναι προφανές πως θα παρατηρείται υπέρβαση της αρχικής απορροής πολύ συχνότερα. Τελικά, τιμές απορροών που πριν την αστικοποίηση σχετίζονται με γεγονότα βροχής περιόδου επαναφοράς χρόνων ή δεκαετιών, τώρα εμφανίζονται μια ή δύο φορές μέσα στο έτος.

Σε αντίστοιχη έρευνα, σύγκρισης των απορροών πριν και μετά την αστικοποίηση της λεκάνης Valley Creek στη Βαλτιμόρη, ο Emerson (2003) κατέληξε, αφενός στο ότι οι τιμές των παροχών αιχμής των υδρογραφημάτων της απορροής αυξήθηκαν έως και 3 φορές μετά την αστικοποίηση, και αφετέρου στο ότι η έναρξη της απορροής εμφανίζεται πολύ γρηγορότερα. Τέλος, και ο συνολικός όγκος της απορροής είναι πολύ μεγαλύτερος στην μετά την αστικοποίηση περίπτωση.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να συμπεράνουμε πως το υδρογράφημα μιας περιοχής που έχει υποστεί αστικοποίηση παρουσιάζει μεγαλύτερη αιχμή, μικρότερο χρόνο συγκέντρωσης και αυξημένο συνολικό πλημμυρικό όγκο σε σχέση με το υδρογράφημα της ίδιας περιοχής πριν την αστική ανάπτυξη, για δεδομένη βροχόπτωση (Μαραγκουδάκη και Τσακίρης, 2005). Η μείωση του χρόνου συγκέντρωσης, προκύπτει κυρίως από τη συγκέντρωση της απορροής σε ανοιχτούς αγωγούς από σκυρόδεμα ή σε υπονόμους, όπου οι ταχύτητες ροής του νερού είναι σαφώς μεγαλύτερες σε σχέση με την επίγεια ροή νερού ή τη ροή σε φυσικά κανάλια (Mimikou et. al., 2016).

### 1.2.3 ΑΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και του φυσικού υδρολογικού κύκλου, που πραγματοποιείται στις αναπτυγμένες αστικές περιοχές, καθιστά τα συστήματα αποχέτευσης απαραίτητες υποδομές. Δύο είναι οι κύριες μορφές αυτής της αλληλεπίδρασης: η αφαίρεση νερού από το φυσικό υδρολογικό κύκλο με στόχο την παροχή νερού για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών και η κάλυψη της γης με αδιαπέρατες επιφάνειες που μεταβάλλουν το φυσικό σύστημα αποστράγγισης της περιοχής. Οι δύο τύποι αλληλεπιδράσεων εγείρουν την εμφάνιση δύο τύπων νερού που απαιτούν αποχετευτικό σύστημα (Butler and Davies, 2000).

Ο πρώτος τύπος νερού που απαιτεί την ύπαρξη δικτύου αφορά τα ακάθαρτα. Ο Τσακίρης (2010) ορίζει το δίκτυο αποχέτευσης ακαθάρτων ως το δίκτυο συλλογής, μεταφοράς και διάθεσης στον τελικό αποδέκτη των ακαθάρτων υδάτων (υγρά απόβλητα). Τα απόβλητα αυτά μπορεί να προέρχονται από οικίες, βιοτεχνίες, βιομηχανίες, γραφεία, νοσοκομεία, σχολεία, δημόσιους χώρους.

Πρόκειται, δηλαδή, για το νερό του οποίου η παροχή υποστηρίζει τη ζωή, εξασφαλίζει ένα επίπεδο διαβίωσης και ικανοποιεί τις ανάγκες της βιομηχανίας. Τα ακάθαρτα περιέχουν διαλυμένα υλικά, λεπτόκοκκα και μεγαλύτερα στερεά, προερχόμενα από τις τουαλέτες, το πλύσιμο διαφόρων αντικειμένων, από τη βιομηχανία και άλλες υδατικές χρήσεις. Μετά τη χρήση του το νερό αυτό, αν δεν παροχετευτεί κατάλληλα, μπορεί να προκαλέσει ρύπανση και κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία (Butler and Davies, 2000).

Σε περιοχές που δεν υπάρχουν δίκτυα αποχέτευσης λυμάτων παρατηρούνται προβλήματα όπως ρύπανση του εδάφους, των υπόγειων υδροφορέων και των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων, εμφάνιση οσμών εξαιτίας των σηπτικών συνθηκών των βοθρολυμάτων, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία (Κουτσογιάννης, 2011).

Ο δεύτερος τύπος νερού που απαιτεί την ύπαρξη δικτύου αφορά τα όμβρια ύδατα. Πρόκειται για το νερό της βροχής (ή το νερό που προέρχεται από οποιοδήποτε είδος κατακρήμνισης) που καταλήγει σε μια περιοχή με δομημένο περιβάλλον. Περιέχει και αυτό κάποιους ρύπους, προερχόμενους από τη βροχή, τον αέρα ή τις επιφάνειες της λεκάνης απορροής (Butler and Davies, 2000).

Σε περιοχές, που λείπει ένα αποτελεσματικό δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων, σε κάθε καταιγίδα οι δρόμοι μετατρέπονται σε ρέματα, παραλύει η κίνηση και η ζωή, πλημμυρίζουν αυτοκίνητα και σπίτια, ενώ συχνά χάνονται και ανθρώπινες ζωές (Κουτσογιάννης, 2011).

Γενικότερα, η διαχείριση των ομβρίων υδάτων είναι καθοριστική για την προστασία των αστικών περιοχών από πλημμύρες και άλλους κινδύνους. Η διαχείριση ομβρίων αφορά την κατανόηση, τον έλεγχο και την αξιοποίηση του νερού στις διάφορες μορφές του μέσα στον υδρολογικό κύκλο (Wanielista and Yousef, 1993). Κομβικό στοιχείο για τη διαχείριση των ομβρίων αποτελεί το σύστημα αποχέτευσης (Mays, 2001). Οι Urbonas και Roesner (1993) επισημαίνουν τις παρακάτω βασικές λειτουργίες ενός συστήματος αποχέτευσης ομβρίων:

A) Απομακρύνει τα όμβρια ύδατα από τους δρόμους του οδικού δικτύου και επιτρέπει στις οδικές αρτηρίες να παραμένουν λειτουργικές κατά τη διάρκεια ακραίων καιρικών φαινομένων. Όταν αυτό πραγματοποιείται με αποτελεσματικό τρόπο, ο χρόνος ζωής του οδοστρώματος επιμηκύνεται.

Β) Το αποχετευτικό σύστημα ρυθμίζει το ρυθμό και την ταχύτητα της απορροής διαμέσου των αγωγών και άλλων επιφανειών, έτσι ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος για τους κατοίκους και η πιθανότητα πρόκλησης βλάβης στο οδόστρωμα.

Γ) Μέσω του αποχετευτικού συστήματος η απορροή μεταφέρεται στους κύριους συλλεκτήρες.

Δ) Το σύστημα μπορεί να σχεδιαστεί για τον έλεγχο των ρυπογόνων ουσιών που περιέχει το νερό που έχει συλλεχθεί.

Ε) Κύρια ανοιχτά αποχετευτικά κανάλια και υποδομές συγκράτησης νερού προσφέρουν ευκαιρίες για ποικίλες χρήσεις του νερού (αναψυχή, πάρκα, διατήρηση άγριας ζωής κ.ά.)

Γενικά, τα αστικά αποχετευτικά δίκτυα διαχειρίζονται τους δύο τύπους νερού που προαναφέρθηκαν με στόχο την ελαχιστοποίηση των συνεπειών στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Επομένως, τα αστικά αποχετευτικά δίκτυα έρχονται σε επαφή με δύο βασικούς πυλώνες: τον ανθρώπινο πληθυσμό και το περιβάλλον. Συνήθως, ο ανθρώπινος πληθυσμός σχετίζεται με τη μεταφορά νερού και όχι με τους τελικούς αποδέκτες (flush and forget), κάτι που πιθανά να εξηγεί, μερικώς, την απουσία επίγνωσης και αναγνώρισης αυτής της τόσο ζωτικής αστικής υπηρεσίας από τους πολίτες (Butler and Davies, 2000).

Όσον αφορά τα συστήματα αποχέτευσης, μπορεί να γίνει ένας πρώτος διαχωρισμός ανάμεσα σε αυτά που βασίζονται κατά βάση στην ύπαρξη συστήματος αγωγών και στα υπόλοιπα. Αν και η πιο ευρέως διαδεδομένη πρακτική είναι η πρώτη, σήμερα σε διάφορες χώρες επιχειρείται μια καλύτερη αξιοποίηση των φυσικών μηχανισμών αποστράγγισης. Στις Η.Π.Α οι πρακτικές αυτές απαντώνται ως Best Management Practices (Τσιχριντζής, 1999). Στην Αυστραλία με τον γενικό όρο «Water Sensitive Urban Design» περιγράφεται μια φιλοσοφία στη μηχανική του νερού, όπου η χρήση νερού, η επαναχρησιμοποίηση και η αποστράγγιση του, καθώς και οι συνέπειες των διαδικασιών αυτών στο φυσικό και στο αστικό περιβάλλον, αντιμετωπίζονται ολιστικά. Στη Μ. Βρετανία, από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, χρησιμοποιείται ο όρος SUDS, δηλαδή Sustainable Urban Drainage Systems ή SUstainable Drainage Systems (Butler and Davies, 2000).

Στην Ελλάδα η αποχέτευση στις αστικές περιοχές συνδέεται κατά βάση με την ύπαρξη αποχετευτικού συστήματος αγωγών ή αλλιώς αποχετευτικού δικτύου.

Το αποχετευτικό δίκτυο είναι ένα σύνολο από αγωγούς που συλλέγουν και μεταφέρουν τα λύματα ή/και τα όμβρια, εξοπλισμένο με τα κατάλληλα τυπικά και ειδικά τεχνικά έργα, που διευκολύνουν τη ροή στο δίκτυο και επιτρέπουν τη συντήρησή του (Κουτσογιάννης, 2011).

Μπορούν να διακριθούν δύο διαφορετικές κατηγορίες αστικών αποχετευτικών δικτύων, τα παντορροϊκά δίκτυα και τα χωριστικά δίκτυα. Το δίκτυο αποχέτευσης είναι παντορροϊκό όταν συλλέγει και μεταφέρει αδιακρίτως και τα όμβρια και τα λύματα. Σε αντίθετη περίπτωση έχουμε το χωριστικό σύστημα, ένα σύστημα δικτύων που περιλαμβάνει το δίκτυο ακαθάρτων και το δίκτυο ομβρίων. Σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατό να έχουμε συνύπαρξη παντορροϊκού δικτύου σε ένα τμήμα μιας πόλης (συνήθως το παλιότερο) και χωριστικών δικτύων στο υπόλοιπο τμήμα (Κουτσογιάννης, 2011).

Οι αποχετευτικοί αγωγοί, ή υπόνομοι διακρίνονται αντίστοιχα σε παντορροϊκούς, ακαθάρτων και ομβρίων. Ο κεντρικός αγωγός ή κύριος συλλεκτήρας συγκεντρώνει τις αποχετεύσεις των υπόλοιπων αγωγών, που ανάλογα με τη θέση και τη σημασία τους στο δίκτυο διακρίνονται σε πρωτεύοντες, δευτερεύοντες και τριτεύοντες, χωρίς η διάκριση αυτή



να έχει απόλυτο χαρακτήρα. Ειδικά στα δίκτυα ομβρίων συχνά δεν κατασκευάζονται κύριοι συλλεκτήρες, και στη θέση τους χρησιμοποιούνται τα υδατορρέυματα της περιοχής, ενδεχομένως μετά από κατάλληλη διεύθυνση. Το δίκτυο ομβρίων συνδυάζεται και με ένα σύστημα περιμετρικών αποχετευτικών τάφρων που προστατεύουν την αστική περιοχή από την απορροή εξωτερικών γειτονικών λεκανών (Κουτσογιάννης, 2011).

Αποδέκτης των λυμάτων ή των ομβρίων είναι συνήθως ένα φυσικό υδάτινο σύστημα (υδατόρρευμα, λίμνη, θάλασσα) στο οποίο γίνεται η εκβολή των δικτύων λυμάτων ή ομβρίων. Σε περίπτωση χωριστικών δικτύων ο αποδέκτης μπορεί να είναι διαφορετικός για κάθε δίκτυο. Για το δίκτυο ακαθάρτων αποδέκτης μπορεί να είναι και το έδαφος. Η εκβολή των λυμάτων αποδίδεται με τον όρο διάθεση και ο αγωγός μέσω του οποίου γίνεται λέγεται αγωγός διάθεσης. Τα λύματα πριν τη διάθεσή τους οφείλουν να υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία, με στόχο την αφαίρεση των ρύπων (Κουτσογιάννης, 2011).

#### 1.2.4 ΠΑΝΤΟΡΡΟΪΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Όπως έχει ήδη ορισθεί, παντορροϊκό ονομάζεται το δίκτυο αποχέτευσης που συλλέγει και μεταφέρει αδιακρίτως και τα όμβρια και τα λύματα.

Σε περιόδους ξηρού καιρού το σύστημα μεταφέρει τις παροχές των ακαθάρτων. Κατά τις υγρές περιόδους, η προσθήκη των ομβρίων στους αγωγούς του συστήματος οδηγεί σε αύξηση των τιμών της παροχής. Ακόμα και σε μικρά επεισόδια βροχής τα όμβρια κυριαρχούν σε όγκο, ενώ σε ισχυρές βροχοπτώσεις μπορεί η παροχή τους να είναι κατά 50 ή 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή των λυμάτων (Butler and Davies, 2000). Δεδομένου αυτού, τα παντορροϊκά δίκτυα αποχέτευσης διαστασιολογούνται με βάση τις παροχές σχεδιασμού των ομβρίων υδάτων.

Ένα από τα μειονεκτήματα των παντορροϊκών δικτύων αφορά το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των μονάδων επεξεργασίας, στις οποίες πρέπει να καταλήγουν αυτές οι αυξημένες σε σχέση με ένα δίκτυο αμιγώς ακαθάρτων παροχές. Συνήθως, η λύση που προκρίνεται για τη μείωση του κόστους επεξεργασίας είναι η υπερχειλίση του δικτύου προς επιφανειακά υδάτινα σώματα κατά τη διάρκεια μέτριων ή ισχυρών βροχοπτώσεων, όταν η παροχή ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο. Οι δομές αυτές ονομάζονται Combined Sewer Overflows (Butler and Davies, 2000). Ωστόσο, η λύση αυτή προκαλεί τη ρύπανση των υδάτινων σωμάτων, αφού τα λύματα του παντορροϊκού δικτύου καταλήγουν εκεί χωρίς επεξεργασία.

Στα μειονεκτήματα του παντορροϊκού συστήματος πρέπει να προστεθούν και μερικά ακόμα, όπως οι κίνδυνοι πλημμυρίσματος υπογείων σε περιπτώσεις εξαιρετικών καταιγίδων, οι αναδύσεις οσμών κατά τις ξηρές περιόδους από τα ανοιχτά φρεάτια συλλογής ομβρίων στους δρόμους, καθώς και το αυξημένο κόστος αντλήσεων, σε περίπτωση που υπάρχουν αντλιοστάσια μέσα στο δίκτυο. Βεβαίως το παντορροϊκό δίκτυο έχει και ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως την απλότητά του (ένας αγωγός σε κάθε δρόμο) που προσφέρει καλύτερη εποπτεία, τη μικρότερη απασχόληση της διατομής των δρόμων, και κυρίως το μικρότερο αρχικό κόστος κατασκευής (Κουτσογιάννης, 2011).

#### 1.2.5 ΧΩΡΙΣΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Το χωριστικό σύστημα επιτρέπει την πλήρη ανεξαρτησία στο σχεδιασμό των δύο δικτύων, του δικτύου ακαθάρτων και του δικτύου ομβρίων. Έτσι το δίκτυο ακαθάρτων σχεδιάζεται

συγκεντρωτικά, δηλαδή τα ακάθαρτα όλης της πόλης συγκεντρώνονται τελικά σε ένα αγωγό, τον κύριο συλλεκτήρα, ο οποίος τα οδηγεί στην εγκατάσταση επεξεργασίας, πριν καταλήξουν στον τελικό αποδέκτη. Αντίθετα, το δίκτυο ομβρίων σχεδιάζεται αποκεντρωτικά, δηλαδή επιδιώκεται η κατασκευή ανεξάρτητων αγωγών ομβρίων που καταλήγουν σε διαφορετικά σημεία του αποδέκτη, ή και σε διαφορετικούς αποδέκτες. Με τον αποκεντρωτικό σχεδιασμό μειώνονται οι διατομές και κατά συνέπεια το κόστος των αγωγών, και κατά κανόνα αποφεύγονται εντελώς οι αντλήσεις (Κουτσογιάννης, 2011).

Πολλές φορές, όταν η κλίση του εδάφους είναι αρκετά μεγάλη και η ρυμοτομία του οικισμού ευνοϊκή για την επιφανειακή αποχέτευση των νερών της βροχής χωρίς να προκαλούνται πλημμύρες, οι αγωγοί ομβρίων δεν τοποθετούνται σε όλους τους δρόμους, αλλά μόνο σε επιλεγμένους (Γιαννόπουλος, 2002a).

Ένα αξιοσημείωτο μειονέκτημα του χωριστικού συστήματος είναι το γεγονός ότι απαιτεί προσεκτική επιτήρηση, ώστε να αποφεύγονται εσφαλμένες ιδιωτικές συνδέσεις, που δημιουργούν προβλήματα στη λειτουργία και των δύο δικτύων. Η σύνδεση των υδρορροών των κτιρίων με τους αγωγούς ακαθάρτων προκαλεί υπερφόρτωση των τελευταίων, κατά τη διάρκεια καταιγίδων, ενώ η σύνδεση των ακαθάρτων των σπιτιών με τους αγωγούς ομβρίων προκαλεί ρύπανση του αποδέκτη των ομβρίων (Κουτσογιάννης, 2011).

### 1.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΟΜΒΡΙΩΝ

Η αστική απορροή αποτελείται από την επιφανειακή απορροή και τη ροή στο σύστημα αποχέτευσης. Η επιφανειακή απορροή μπορεί να χωριστεί επίσης στην επίγεια ροή και τη ροή σε κανάλια. Τυπικά, η επιφανειακή απορροή απαντάται αρχικά ως επίγεια ροή σε επιφάνειες (όπως πεζοδρόμια, δρόμοι, χώροι πρασίνου) μέχρι να συναντήσει ένα κανάλι, όπως τα αυλάκια (λουκία) ή οι τάφροι. Τέλος, από εκεί οδηγείται σε κάποια είσοδο του αποχετευτικού συστήματος ομβρίων (Akan, 1993).

Κάθε δίκτυο αποχέτευσης παρέχει ένα βαθμό προστασίας, ο οποίος περιγράφεται από την περίοδο επαναφοράς του επεισοδίου βροχής που μπορεί να παροχετεύσει το δίκτυο (Κουτσογιάννης, 2011). Με βάση αυτή τη βροχή υπολογίζεται η παροχή σχεδιασμού του δικτύου ομβρίων. Οι περίοδοι επαναφοράς που λαμβάνονται για τα δίκτυα ομβρίων με βάση το ΠΔ 696/1974 είναι  $T=10$  έτη για κεντρικούς συλλεκτήρες του δικτύου και  $T=5$  έτη για τους υπόλοιπους αγωγούς, πλην ειδικών περιπτώσεων όπου μπορεί να ληφθεί  $T=2$  έτη. Στην περίοδο επαναφοράς που επιλέγεται αντιστοιχεί μια ένταση βροχής. Η ένταση της βροχής αυτής, η οποία ονομάζεται βροχή σχεδιασμού, προκύπτει από τις όμβριες καμπύλες, από τις καμπύλες δηλαδή έντασης ( $i$ ) – χρονικής κλίμακας ( $d$ ) – περιόδου επαναφοράς ( $T$ ) των βροχοπτώσεων. Οι καμπύλες αυτές αποδίδουν την ένταση της βροχής για ένα επεισόδιο συγκεκριμένης διάρκειας και με συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς.

Για τον υδραυλικό σχεδιασμό των δικτύων ομβρίων απαιτείται η εκτίμηση των παροχών αιχμής που θα εξυπηρετεί το δίκτυο. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος εκτίμησης των παροχών αυτών είναι η ορθολογική μέθοδος, η οποία μετασχηματίζει τη βροχή σε απορροή με βάση την Εξίσωση 1.1 (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018):

$$Q_p = 0.278CiA \quad (1.1)$$

Όπου:

$Q_p$  : η παροχή αιχμής της απορροής ( $m^3/s$ )

$C$  : ο αδιάστατος συντελεστής απορροής

$i$  : η ένταση βροχής ( $mm/hr$ )

$A$  : η έκταση της λεκάνης απορροής ή της επιφάνειας που αποχετεύεται ( $km^2$ )

Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει τις εξής παραδοχές (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018):

α) Η ένταση της βροχής είναι ομοιόμορφη σε όλη τη διάρκεια της, με ομοιόμορφη επίσης χωρική κατανομή πάνω στην υδρολογική λεκάνη

β) Η διάρκεια βροχής είναι ίση με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης.

Ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής  $T_c$  ορίζεται σαν ο χρόνος που χρειάζεται μια σταγόνα βροχής που πέφτει στο υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης για να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης.

Σε υδρολογικές λεκάνες με σχετικά μεγάλα μήκη διαδρομής και επιφάνειες που παρουσιάζουν ανομοιομορφία, ο χρόνος συγκέντρωσης μπορεί να υπολογισθεί με διάφορες εμπειρικές μεθόδους, με πιο δημοφιλείς τη σχέση του Kirpich, του Giandotti και τη Soil Conservation Service (SCS).

Σε αστικές λεκάνες, ο χρόνος συγκέντρωσης ισούται με το άθροισμα του χρόνου αβαθούς ή διάχυτης ροής (overland flow)  $T_o$ , του χρόνου μετακίνησης σε δρόμους (street flow)  $T_s$  και του χρόνου μετακίνησης σε υπονόμους ή ανοιχτά κανάλια (conduit flow)  $T_l$ . Ο χρόνος αβαθούς ή διάχυτης ροής υπολογίζεται με βάση εμπειρικές εξισώσεις, όπως οι Kerby, Izzard, Brasby-Williams, η εξίσωση της Aviation Agency των Η.Π.Α., η εξίσωση Manning Κινηματικού Κύματος (Τσιχριντζής, 1999).

Η ορθολογική μέθοδος χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της παροχής αιχμής σε μικρές λεκάνες, καθώς εκεί ισχύει η παραδοχή για τη χωρικά και χρονικά ομοιόμορφη ένταση βροχής. Όταν οι λεκάνες είναι μεγάλες, μέθοδοι όπως η ορθολογική, που εκτιμούν μόνο την αιχμή της απορροής, δεν επαρκούν. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται ο υπολογισμός του υδρογραφήματος της παροχής. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα για τους υδρολογικούς και υδραυλικούς υπολογισμούς που απαιτούν αυτές οι μέθοδοι (Mays, 2001). Τα περισσότερα από αυτά διαθέτουν διάφορες επιλογές για κάθε στάδιο της διαδικασίας που ξεκινά με τη βροχόπτωση και καταλήγει σε ένα υδρογράφημα σε κάποια θέση του συστήματος που μελετάται.

Η διαδικασία μετατροπής της βροχής σε απορροή, ξεκινά με την κατάρτιση των βροχογραφημάτων. Αρχικά, επιλέγεται η περίοδος επαναφοράς και η διάρκεια βροχής. Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων δεν απαιτεί η διάρκεια βροχής να ίση με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης (όπως στην ορθολογική μέθοδο) και μάλιστα είναι προτιμότερο να επιλέγονται διάρκειες βροχής ίσες ή μεγαλύτερες του χρόνου συγκέντρωσης (Mays, 2001).

Για την κατάρτιση των βροχογραφημάτων, η βροχή σχεδιασμού κατανέμεται χρονικά σε διαστήματα μικρότερης διάρκειας, καθένα από τα οποία έχει διαφορετική ένταση βροχής. Το τελικό ιστόγραμμα που αναπαριστά τη χρονική κατανομή των εντάσεων της βροχής αποτελεί το βροχογράφημα. Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για τη σύνθεση

βροχογραφημάτων. Στην παρούσα εργασία η σύνθεση των βροχογραφημάτων έγινε με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής (Alternating Block Method).

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι απώλειες βροχής, οι οποίες αφαιρούνται από το βροχογράφημα, ώστε να προκύψει η ενεργός βροχή. Οι απώλειες αφορούν την παρεμπόδιση (interception) μέρους του νερού της βροχής από επιφάνειες που αναχαιτίζουν την πορεία του, όπως δέντρα, φυτά, γρασίδι, κατασκευές, την κατακράτηση σε επιφανειακές κοιλότητες (depression storage) και τη διήθηση. Για μεμονωμένα επεισόδια βροχής, οι απώλειες λόγω εξάτμισης και εξατμισοδιαπνοής θεωρούνται αμελητέες.

Για υπολογισμούς που αφορούν μεμονωμένα επεισόδια βροχής, οι απώλειες βροχής χωρίζονται στις αρχικές απώλειες και τη διήθηση. Η παρεμπόδιση, η κατακράτηση και η διήθηση που λαμβάνει χώρα πριν την άμεση απορροή αποτελούν τις αρχικές απώλειες. Μετά την αφαίρεση των αρχικών απωλειών, η ενεργός βροχή είναι η διαφορά μεταξύ της βροχής και της διήθησης νερού από το έδαφος. Σημειώνεται, πως η διήθηση νερού από το έδαφος μειώνεται εκθετικά με το χρόνο. Με μοναδική, ίσως εξαίρεση την μέθοδο του απορροϊκού συντελεστή CN της SCS, δεν υπάρχει κάποια μεθοδολογία για τον υπολογισμό των αρχικών απωλειών. Για μικρά ύψη βροχής συνίσταται να αφαιρούνται κάποια χιλιοστά από τη βροχή σχεδιασμού ως αρχικές απώλειες (Mays, 2001).

Για τον υπολογισμό του νερού της διήθησης υπάρχουν διάφορα μοντέλα υπολογισμού με πιο διαδεδομένα τα μοντέλα των Horton, Green-Ampt, Huggings-Monke, Holtan, Kostiakon, Philip και η μέθοδος της SCS (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018).

Τέλος, η μέθοδοι των υδρογραφημάτων ολοκληρώνονται, όταν με βάση την ενεργό βροχή και το μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης υπολογίζεται το πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης. Ως μοναδιαίο υδρογράφημα ορίζεται το υδρογράφημα απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχή 10mm ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την έκταση της λεκάνης, έχει ομοιόμορφη ένταση και συγκεκριμένη διάρκεια.

Τα μοναδιαία υδρογραφήματα αποτελούν εμπειρικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό της απορροής μιας λεκάνης που παρακάμπτουν την αναγκαιότητα της φυσικής αναπαράστασης των εξισώσεων διατήρησης μάζας και ορμής που ορίζουν την κίνηση του νερού στην επιφάνεια του εδάφους. Οι λόγοι που οι μέθοδοι των υδρογραφημάτων προτιμώνται, αφορούν αφενός το γεγονός ότι τα διάφορα στοιχεία και οι διαδικασίες που συνθέτουν τη μετατροπή της βροχής σε απορροή μιας λεκάνης δεν είναι πάντα πλήρως κατανοητά και αφετέρου το ότι η μεγάλη πολυπλοκότητα των διαδικασιών αυτών θα καθιστούσε μη πρακτική αν όχι αδύνατη τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων και την κωδικοποίηση τους σε ένα υπολογιστικό σχήμα. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις (πχ σε μικρές λεκάνες με μεγάλα ποσοστά αδιαπέρατων επιφανειών) οι μέθοδοι του κινηματικού κύματος μπορεί να είναι προτιμότερες για τον υπολογισμό των υδρογραφημάτων της άμεσης απορροής (Mays, 2001).

Οι μέθοδοι του κινηματικού κύματος εφορμούν από τις μονοδιάστατες εξισώσεις συνέχειας και ορμής, τις εξισώσεις Saint Venant, που περιγράφουν τις φυσικές διεργασίες της κίνησης του νερού. Είναι αποτελεσματικές όταν οι όροι αδρανείας και οι όροι πίεσης έχουν ελάχιστη επίδραση στη μεταφορά νερού. Με όρους υπολογισμού της απορροής, οι μέθοδοι είναι αποτελεσματικές για καταστάσεις όπου η είσοδος στο σύστημα συλλεκτών αυξάνεται με ένα ομοιόμορφο ρυθμό κατά μήκος της διαδρομής της ροής (Mays, 2001).

Σήμερα, πέραν αυτών των μεθόδων, έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά ή αλλιώς μοντέλα για τον υπολογισμό της απορροής που υποστηρίζουν υδρολογικούς και υδραυλικούς υπολογισμούς.

Πριν περάσουμε στην περιγραφή των μοντέλων αυτών είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε την αστική λεκάνη απορροής, με βάση την οποία γίνονται όλοι οι υπολογισμοί που προαναφέρθηκαν. Σε μη αστικές περιοχές τα όρια της λεκάνης απορροής καθορίζονται από τον υδροκρίτη. Επομένως, η έκταση και η μορφή της λεκάνης απορροής εξαρτάται αποκλειστικά από την τοπογραφία της περιοχής. Σε μια αστική περιοχή, όμως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το ρυμοτομικό σχέδιο, αφού με βάση αυτό διαμορφώνεται το «υδρογραφικό δίκτυο» των αστικών περιοχών που είναι πλέον το δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων.

Έτσι, χαράσσονται κατ' αρχάς οι διχοτόμοι των γωνιών των οικοδομικών τετραγώνων, που αποτελούν υδροκριτικές γραμμές, εφόσον ισχύει η αρχή ότι τα όμβρια που προέρχονται από κάθε εσωτερικό σημείο ενός οικοδομικού τετραγώνου αποχετεύονται προς την πλησιέστερη στο σημείο οδό (ρείθρο ή αγωγό ομβρίων της οδού). Για την τελική χάραξη των υδροκριτών λαμβάνονται υπόψη και οι κλίσεις των οδών και οι θέσεις των φρεατίων υδροσυλλογής (Κουτσογιάννης, 2011).

## 1.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

### 1.4.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Με βάση τους Sorooshian et al. (2008), ως μοντέλο ορίζεται η απλοποιημένη αναπαράσταση ενός συστήματος του πραγματικού κόσμου. Το καλύτερο μοντέλο είναι αυτό που δίνει αποτελέσματα κοντά στην πραγματικότητα με τη χρήση των λιγότερων δυνατών παραμέτρων και με τη λιγότερη πολυπλοκότητα (Devia et al., 2015).

Με βάση τον Τσακίρη (2013) ως υδρολογικό μοντέλο ορίζεται το σύνολο των μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες απεικονίζουν (κατά προσέγγιση) το σύνολο των αλληλοσυσχετιζόμενων φαινομένων που υπεισέρχονται στη διαδικασία μετατροπής της βροχής σε απορροή. Ένα υδρολογικό μοντέλο δέχεται ως εισόδους μετεωρολογικές μεταβλητές (κατακρημνίσματα, θερμοκρασία, άνεμος κλπ.) τις οποίες μετατρέπει σε απορροή μέσω ενός συνόλου μαθηματικών εξισώσεων που αναπαριστούν φυσικές διαδικασίες όπως η κατακράτηση, η διήθηση, η εξατμισοδιαπνοή κλπ..

Ειδικότερα, τα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης αναπαριστούν τις συνεχείς φυσικές διεργασίες που περιγράφονται από συστήματα διαφορικών εξισώσεων, μέσω παραμετρικών μαθηματικών σχέσεων, καθορισμένης χωρικής και χρονικής διακριτότητας. Με την παραπάνω παραδοχή, κάθε τέτοιο μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μη γραμμικός μετασχηματισμός της μορφής (Ευστρατιάδης κ.α., 2009)  $y' = h(s_0, x, \theta)$ , όπου  $s_0$  οι αρχικές συνθήκες του φυσικού συστήματος στην έναρξη της προσομοίωσης (π.χ. ύψη εδαφικής υγρασίας, στάθμες υπόγειου νερού),  $x$  οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου ή αλλιώς φορτίσεις (π.χ. βροχόπτωση, δυναμική εξατμισοδιαπνοή),  $\theta$  τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος, και  $y'$  οι μεταβλητές εξόδου ή αποκρίσεις του μοντέλου (π.χ. απορροή). Όλες οι μεταβλητές μεταβάλλονται στο χρόνο, δίνονται με τη μορφή χρονοσειρών για χρονικό ορίζοντα  $T$ , και αναπαριστούν διεργασίες σε συγκεκριμένη θέση ή περιοχή της λεκάνης. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που περιγράφονται από το διάνυσμα  $\theta$  αποτυπώνουν τις ιδιότητες

του φυσικού συστήματος, που είτε είναι απευθείας γνωστές από μετρήσεις πεδίου (π.χ. έκταση λεκάνης) είτε εκτιμώνται έμμεσα, με τρόπο ώστε το μοντέλο να αποτυπώνει όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα την παρατηρημένη συμπεριφορά του συστήματος. Στην τελευταία περίπτωση, τα εν λόγω χαρακτηριστικά καλούνται παράμετροι του μοντέλου (Ευστρατιάδης κ.α., 2009).

Ο Beven (1989) διακρίνει δύο βασικούς και, κυρίως, διακριτούς στόχους για την κατάρτιση των υδρολογικών μοντέλων: τη διερεύνηση των επιπτώσεων που έχουν οι υποθέσεις που κάνουμε για τον πραγματικό κόσμο και την πρόγνωση της συμπεριφοράς ενός συστήματος του πραγματικού κόσμου κάτω από ένα σετ συνθηκών που απαντώνται στη φύση.

Τα υδρολογικά μοντέλα κατηγοριοποιούνται με τη χωρική μεταβλητότητα των διεργασιών τους, το είδος των εξισώσεων που χρησιμοποιούν, τον τρόπο με τον οποίο χειρίζονται την αβεβαιότητα και τη λειτουργία τους σε σχέση με το χρόνο (Ναλμπάντης, 2007).

Με βάση τη χωρική τους κλίμακα τα μοντέλα διακρίνονται σε ενιαία ή αδρομερή (lumped), όταν οι παράμετροι έχουν ίδια τιμή σε όλη την περιοχή μελέτης και σε κατανεμημένα (distributed), όταν οι τιμές των παραμέτρων μεταβάλλονται στο διακριτοποιημένο χώρο. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στη διακριτοποίηση της λεκάνης απορροής σε τμήματα με ανομοιόμορφα τοπογραφικά ή άλλα χαρακτηριστικά (Ναλμπάντης, 2007).

Με βάση το είδος των εξισώσεων τα υδρολογικά μοντέλα μπορεί να είναι εννοιολογικά, όταν οι μαθηματικές σχέσεις που τα αποτελούν έχουν καταρτιστεί με εμπειρικό τρόπο, φυσικής βάσης, όταν οι μαθηματικές σχέσεις αναπαριστούν φυσικούς νόμους ή μαύρου κουτιού, όταν λαμβάνουν υπόψιν μόνο τις εξισώσεις του υδατικού ισοζυγίου και τις εισόδους και τις εξόδους του μοντέλου, χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν τα ενδιάμεσα συστήματα (Ναλμπάντης, 2007) .

Όσον αφορά τον τρόπο την αβεβαιότητα που διέπει τα υδρολογικά φαινόμενα και τις υδρολογικές διεργασίες (Ναλμπάντης, 2007), τα μοντέλα μπορεί να λαμβάνουν σταθερές τιμές (ντετερμινιστικά ή αιτιοκρατικά μοντέλα) ή να ενσωματώνουν την αβεβαιότητα ορισμένων εκ των υδρολογικών μεγεθών (στοχαστικά μοντέλα).

Τέλος, μια σημαντική κατηγοριοποίηση των μοντέλων αφορά τη λειτουργία τους σε σχέση με το χρόνο, όπου διακρίνουμε τα μοντέλα υδρολογικού γεγονότος και τα μοντέλα συνεχούς χρόνου. Τα πρώτα λειτουργούν ανά πλημμυρικό γεγονός και αναπαράγουν μόνο τις κύριες φυσικές διεργασίες των πλημμυρών, ενώ τα δεύτερα αναπαριστούν την πλήρη εξέλιξη των υδρολογικών διεργασιών (Ναλμπάντης, 2007).

Ξεκινώντας από τα μέσα του 19ου αιώνα, η εξέλιξη των υδρολογικών μοντέλων προχωρά από τα αδρομερή εννοιολογικά μοντέλα στα κατανεμημένα μοντέλα φυσικής βάσης γεγονός που συνοδεύεται από την ανάπτυξη της κατανόησης των φυσικών διεργασιών, την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και την ανάπτυξη υποδομών συλλογής δεδομένων (Devia et al., 2015).

Σήμερα, πληθώρα υδρολογικών μοντέλων είναι διαθέσιμα με τη μορφή λογισμικού. Τα γνωστότερα από αυτά είναι:

-HEC- 1/HMS

-National Weather Service – River Forecast System (NWS-RFS), μοντέλο Sacramento

-Tank Model

- UBC Watershed Model
- NWSRFS
- SLURP Model
- TOPMODEL
- KINEROS
- MIKE 11
- SWMM
- MIKE SHE
- SWRRB
- EPIC
- MedBasin
- SWAT

Γενικά, η επιλογή του εκάστοτε μοντέλου εξαρτάται από το σκοπό της μελέτης, την εμπειρία του μελετητή και τα διαθέσιμα δεδομένα. Η ποσότητα αλλά και ποιότητα των διαθέσιμων στοιχείων μπορούν να αποτελέσουν περιοριστικό παράγοντα σε μια έρευνα ή μελέτη, καθώς η επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας, η οποία θεωρητικά εξασφαλίζεται από την χρήση αναλυτικότερων σχημάτων προσομοίωσης, προσκρούει στην ανεπάρκεια υδρολογικών μετρήσεων και άλλων δεδομένων (π.χ. κατανεμημένη γεωγραφική πληροφορία), που είναι απαραίτητα για την κατάστρωση και σχηματοποίηση του μοντέλου (Ευστρατιάδης κ.α., 2009).

Στην παρούσα εργασία, η εκτίμηση της απορροής θα γίνει με τη χρήση του λογισμικού Storm Water Management Model (SWMM). Το λογισμικό SWMM αναπτύχθηκε από τον Αμερικάνικο Οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος (U.S. Environmental Protection Agency-EPA). Το παρόν μοντέλο επιλέχθηκε καθώς η λεκάνη απορροής που θα μελετηθεί είναι αστική και το συγκεκριμένο μοντέλο προτείνεται και χρησιμοποιείται από την EPA για την προσομοίωση της ποσότητας και ποιότητας των επιφανειακών νερών για κυρίως αστικές λεκάνες.

Στόχος όλων των υδρολογικών μοντέλων είναι η προσομοίωση του εκάστοτε υδατικού συστήματος. Το κατά πόσο αυτή η προσομοίωση ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα κρίνεται από τον μελετητή που το χρησιμοποιεί ως εργαλείο. Για την εκτίμηση της απόδοσης του μοντέλου από τον μελετητή υπάρχουν ποσοτικά και στατιστικά κριτήρια τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τέλος, αφού γίνει η επιλογή του μοντέλου, ακολουθεί η διαδικασία προσαρμογής του στη συγκεκριμένη λεκάνη, η εκτίμηση, δηλαδή, των παραμέτρων του. Η προσαρμογή/ρύθμιση του μοντέλου μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα, με δοκιμές, είτε με χρήση κάποιου προγράμματος βελτιστοποίησης μιας συνάρτησης στόχου, η οποία εκφράζει την απόκλιση των παρατηρημένων τιμών από τις τιμές εξόδου του μοντέλου. Η διαδικασία αυτή αφορά τη βαθμονόμηση του μοντέλου, για την οποία γίνεται λόγος στο επόμενο κεφάλαιο.

#### 1.4.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Βαθμονόμηση (calibration) είναι η διαδικασία εκτίμησης των τιμών των παραμέτρων ενός μοντέλου ώστε αυτό να προσαρμόζεται όσο το δυνατόν καλύτερα σε παρατηρημένες τιμές (Singh, 2002). Στα υδρολογικά μοντέλα, συνήθως, χρησιμοποιούνται παρατηρημένες τιμές της απορροής, αλλά και της ταχύτητας και του βάθους ροής, όπου υπάρχουν μετρήσεις.

Κατά τη βαθμονόμηση επιδιώκεται η απόκλιση μεταξύ των παρατηρημένων και των προσομοιωμένων τιμών εξόδου του μοντέλου (σφάλμα του μοντέλου) να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Μέσω μιας διαδικασίας δοκιμής-σφάλματος (trial and error) γίνεται σύγκριση των προσομοιωμένων αποκρίσεων της λεκάνης σε σχέση με τις παρατηρημένες, με βάση κάποιο ποσοτικό, ποιοτικό ή εμπειρικό κριτήριο αξιολόγησης της επίδοσης του μοντέλου (Ευστρατιάδης, 2009).

Για την αξιολόγηση της επίδοσης του μοντέλου είναι διαθέσιμα από τη βιβλιογραφία πλήθος ποσοτικών και στατιστικών κριτηρίων. Τα πιο διαδεδομένα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και τη βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων (Τσακίρης, 2013) είναι ο δείκτης Nash-Sutcliffe, το Μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error, MEA), το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Relative root mean square error, RRMSE, ο βαθμός απόδοσης του μοντέλου (Model Efficiency, EF), ο συντελεστής προσδιορισμού (Coefficient of determination, CD), η καταλληλόλητα προσαρμογής (Goodness of fit,  $R^2$ ).

Τα παραπάνω κριτήρια εκφράζουν την απόκλιση μεταξύ των παρατηρημένων και των προσομοιωμένων τιμών. Χρησιμοποιούνται ως συναρτήσεις στόχου, η βελτιστοποίηση των οποίων, οδηγεί στην υιοθέτηση εκείνων των παραμέτρων ή του συνδυασμού τους που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου στις μετρήσεις.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης μπορεί να γίνει με τρεις κύριους τρόπους (Ευστρατιάδης κ.α., 2009):

- Εμπειρική βαθμονόμηση: Ο μελετητής με βάση την κρίση και την εμπειρία του διερευνά εναλλακτικούς συνδυασμούς παραμέτρων που επιλέγει ο ίδιος και η τελική επιλογή των τιμών των παραμέτρων γίνεται ελέγχοντας «με το μάτι» την προσαρμογή του μοντέλου στις παρατηρήσεις. Η μέθοδος είναι μη αντικειμενική (αφού η επιλογή δεν βασίζεται σε κάποιο αριθμητικό κριτήριο σφάλματος) και επίπονη, ωστόσο εφαρμόζεται από υδρολόγους, με το σκεπτικό ότι η εν λόγω διαδικασία ενσωματώνει την υδρολογική εμπειρία, οδηγώντας έτσι σε τιμές παραμέτρων που είναι αντιπροσωπευτικές των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.
- Αυτόματη βαθμονόμηση: Διατυπώνεται ένα μέτρο καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων σε σχέση με τις παρατηρημένες αποκρίσεις της λεκάνης, το οποίο θεωρείται ως η συνάρτηση στόχου ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης, με μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους του μοντέλου. Η τελική επιλογή των παραμέτρων προκύπτει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από αντικειμενικότητα και ευκολία, ωστόσο, λόγω της πλήρους εξάρτησης των αποτελεσμάτων από το μέτρο προσαρμογής που χρησιμοποιείται, των σφαλμάτων που μεταφέρονται από τα δεδομένα, τις υπολογιστικές αδυναμίες της διαδικασίας αναζήτησης και άλλες πηγές αβεβαιότητας, σε ορισμένες περιπτώσεις ένα υδρολογικό μοντέλο, παρόλο που δείχνει να προσαρμόζεται ικανοποιητικά στις μετρήσεις, στην πραγματικότητα μπορεί να λειτουργεί υπό μορφή «μαύρου κουτιού», με παραμέτρους



που δεν έχουν φυσικό νόημα και χωρίς να μπορεί να αναπαράγει όλο το επιθυμητό φάσμα των δυνατών αποκρίσεων της λεκάνης.

- Ημιαυτόματη βαθμονόμηση: Πρόκειται για μια διαδραστική μέθοδο, που αποσκοπεί να αξιολογήσει τα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω μεθόδων, συνδυάζοντάς τες. Με τη μέθοδο αυτή, ο μελετητής κατά την πορεία της βελτιστοποίησης παρακολουθεί τα αποτελέσματα και επεμβαίνει ώστε να κατευθύνει την πορεία αναζήτησης προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Θεωρείται η πλέον πρόσφορη μέθοδος, ιδιαίτερα στην περίπτωση των σύνθετων σχημάτων, στα οποία είναι και πιο έντονη η αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων, λόγω της ύπαρξης πολλών ισοδύναμα καλών λύσεων (Boyle et al., 2000, Mazi et al., 2004, Efstratiadis et al., 2008).

Ανεξάρτητα από τη στρατηγική που υιοθετείται, η βαθμονόμηση ενός υδρολογικού μοντέλου κρίνεται αξιόπιστη εφόσον (Ευστρατιάδης κ.α., 2009):

(α) το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, δηλαδή μπορεί να αναπαράγει όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης, με ικανοποιητική ακρίβεια

(β) στις βελτιστοποιημένες παραμέτρους του μοντέλου μπορεί να αποδοθεί κάποιο φυσικό νόημα, ώστε να θεωρηθούν συμβατές με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης ακολουθείται από τη διαδικασία επαλήθευσης (validation) του μοντέλου κατά την οποία δεδομένα παρατηρημένων τιμών που δεν συμπεριλήφθηκαν στη βαθμονόμηση του μοντέλου, χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν το μοντέλο μετά την υιοθέτηση των τιμών των παραμέτρων που προέκυψε από τη βαθμονόμηση.

#### 1.4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Ανάλυση ευαισθησίας είναι η διαδικασία κατά την οποία εξετάζεται η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων ενός μαθηματικών μοντέλου στις τιμές εξόδου του (Pianosi et al., 2016).

Μικρές διακυμάνσεις μιας παραμέτρου του μοντέλου που προκαλούν σημαντική μεταβολή στο αποτέλεσμα συνηγορούν σε ευαισθησία του μοντέλου στην εν λόγω παράμετρο και επομένως απαιτείται σημαντική ακρίβεια στην εκτίμησή της. Αντίθετα, αν η μεταβολή μιας παραμέτρου δεν επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα, το σύστημα δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην παράμετρο και δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στην εκτίμησή της (Κούρτης, 2016).

Η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να υποστηρίξει και να συμπληρώσει τη βαθμονόμηση ενός μοντέλου, παρέχοντας γνώση που αφορά την επίδραση των μεταβολών στις παραμέτρους που εμπεριέχουν αβεβαιότητα (εισόδων) στις μεταβολές του μέτρου επίδοσης του μοντέλου. Η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να διεξαχθεί πριν τη βαθμονόμηση του μοντέλου με στόχο (Pianosi et al., 2016):

α) την αναγνώριση των παραμέτρων που δεν έχουν σημαντική επίδραση στην επίδοση του μοντέλου και, επομένως, μπορούν να αγνοηθούν από το μελετητή κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης

β) τη διερεύνηση της επιρροής της περιοχής του χώρου των τιμών των παραμέτρων που συνδέεται με υψηλότερη επίδοση του μοντέλου. Έτσι, παρέχει γνώση για μια πιο αποτελεσματική βαθμονόμηση τοπικής αναζήτησης μέσα στην εν λόγω περιοχή τιμών.

γ) την αξιολόγηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών της βαθμονόμησης λόγω αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τιμές πέραν αυτών των παραμέτρων, όπως τα σφάλματα στις παρατηρήσεις.

Από τη βιβλιογραφία φαίνεται πως υπάρχουν διαθέσιμες πολλές μέθοδοι για την ανάλυση ευαισθησίας των μοντέλων. Μια από τις απλούστερες εξ' αυτών είναι η OAT-Once at a time. Η μέθοδος στοχεύει στην παρακολούθηση της επίδρασης η οποία ασκείται στο τελικό αποτέλεσμα, από τη μεταβολή μιας παραμέτρου, ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές (Κούρτης, 2016). Η επίδραση της μεταβολής της παραμέτρου στις τιμές των εξόδων του μοντέλου ελέγχεται οπτικά, πχ με τη σύγκριση κατά ζεύγη των χρονοσειρών των προσομοιωμένων εξόδων πριν και μετά τη μεταβολή των παραμέτρων.

Αναλυτικότερα, η μέθοδος περιλαμβάνει τη μεταβολή της τιμής μιας παραμέτρου κατά ένα ποσοστό, την επίλυση του μοντέλου και την καταγραφή των αποτελεσμάτων και στη συνέχεια την επιστροφή της παραμέτρου στην αρχική της τιμή και τη μεταβολή στην τιμή της επόμενης παραμέτρου.

Η μέθοδος είναι απλή, ωστόσο, δε δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταβλητών εισόδου, αφού εξετάζεται η επίδραση της μεταβολής μιας και μοναδικής παραμέτρου κάθε φορά.

Η μέθοδος OAT θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία με στόχο την αναγνώριση των παραμέτρων στις οποίες το μοντέλο είναι περισσότερο ευαίσθητο και οι οποίες θα υποβληθούν σε βαθμονόμηση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SWMM

### 2.1 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Το EPA Storm Water Management Model (SWMM) είναι ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης βροχής-απορροής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για μεμονωμένα επεισόδια βροχής όσο και για συνεχή προσομοίωση της ποσότητας και της ποιότητας της απορροής σε αστικές κυρίως λεκάνες. Η απορροή στο SWMM προκύπτει ως άθροισμα των απορροών των υπολεκανών που δέχονται βροχή και παράγουν απορροή και ρυπαντικά φορτία. Το SWMM διοδεύει την απορροή αυτή μέσω ενός συστήματος αγωγών, καναλιών, μονάδων αποθήκευσης/επεξεργασίας νερού, αντλιών κ.τ.λ.. Το SWMM υπολογίζει την ποσότητα και την ποιότητα της απορροής σε κάθε υπολεκάνη και την παροχή, το βάθος ροής και την ποιότητα του νερού σε κάθε αγωγό και κανάλι καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης σε πολλαπλά χρονικά βήματα (Rossman, 2010).

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψιν ποικίλες υδρολογικές διεργασίες που σχετίζονται με την απορροή σε αστικές λεκάνες και περιλαμβάνουν (Rossman, 2010):

- Βροχόπτωση με χρονική μεταβλητότητα
- Εξάτμιση στάσιμου επιφανειακού νερού
- Χιονόπτωση και τήξη χιονιού
- Κατακράτηση νερού
- Διήθηση νερού στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους
- Διήθηση νερού από την ακόρεστη ζώνη στους υπόγειους υδροφορείς
- Αλληλεπίδραση μεταξύ της ροής στο αποχετευτικό σύστημα και την υπόγεια ροή
- Μη γραμμική διόδευση της επιφανειακής ροής
- Συγκράτηση βρόχινου νερού και τμήματος της απορροής με διάφορους τύπους πρακτικών ήπιας διαχείρισης (Low Impact Development)

Όπως αναφέρθηκε, το SWMM βασίζεται στο διαχωρισμό της περιοχής μελέτης σε μικρότερες, ομοιογενείς υπολεκάνες κάθε μια από τις οποίες έχει διαφορετικό ποσοστό περατών και αδιαπεράτων επιφανειών. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η χωρική διακριτοποίηση των παραπάνω διεργασιών. Η επίγεια ροή διοδεύεται τόσο μεταξύ των υπολεκανών όσο και μεταξύ των σημείων εισόδου του νερού στο αποχετευτικό σύστημα (Rossman, 2010).

Επιπλέον, το SWMM διαθέτει ένα ευέλικτο σύνολο δυνατοτήτων υδραυλικής προσομοίωσης για τη διόδευση διαμέσου των στοιχείων του αποχετευτικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα και σε ότι αφορά την παρούσα εργασία, το SWMM μπορεί να χειρίζεται δίκτυα αποχέτευσης ανεξαρτήτως μεγέθους και να χρησιμοποιεί ως μέθοδο διόδευσης είτε αυτή του κινηματικού κύματος είτε του πλήρως δυναμικού κύματος, είτε να προσομοιώνεται η ροή ως ομοιόμορφη (Rossman, 2010).

Για τους παραπάνω λόγους το SWMM έχει χρησιμοποιηθεί σε χιλιάδες μελέτες αποχετευτικού συστήματος σε όλο τον κόσμο από το 1971 που αναπτύχθηκε. Τυπικά παραδείγματα εφαρμογών του περιλαμβάνουν (Rossman, 2010):

- Το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση των στοιχείων δικτύων αποχέτευσης για τον έλεγχο των πλημμυρών
- Τη διαστασιολόγηση υποδομών συγκράτησης νερού

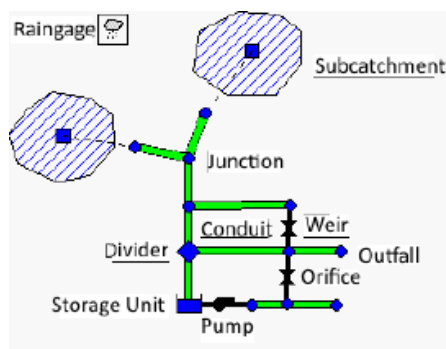
- Τη χαρτογράφηση του πλημμυρικού πεδίου σε φυσικό υδρογραφικό δίκτυο
- Το σχεδιασμό στρατηγικών ελέγχου της υπερχειλίσης παντοροϊκών δικτύων

## 2.2 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ

Το SWMM αντιμετωπίζει το αποχετευτικό σύστημα ως σειρές ροών νερού και υλικών μεταξύ των κύριων στοιχείων του περιβάλλοντος. Τα στοιχεία αυτά και τα αντικείμενα του SWMM που τα αναπαριστούν είναι (Rossman and Huber, 2016):

- Η ατμόσφαιρα, η οποία παράγει τη βροχή και μεταφέρει ρυπαντικά φορτία στην επιφάνεια του εδάφους. Το SWMM χρησιμοποιεί τους βροχογράφους (Rain Gage) ως αντικείμενα για την αναπαράσταση των εισόδων στο σύστημα που προέρχονται από τη βροχή.
- Η επιφάνεια του εδάφους, που αναπαρίσταται με μια ή περισσότερες υπολεκάνες ως αντικείμενα του μοντέλου. Οι υπολεκάνες δέχονται τις κατακρημνίσεις από την ατμόσφαιρα (είτε ως βροχή είτε ως χιόνι), μεταφέρει τις εκροές στους υπόγειους υδροφορείς και την επιφανειακή απορροή και τα ρυπαντικά φορτία στο σύστημα μεταφοράς.
- Οι υπόγειοι υδροφορείς, που δέχονται το νερό της διήθησης και αποδίδουν μέρος αυτού ως είσοδο στο σύστημα μεταφοράς. Το στοιχείο των υπόγειων υδροφορέων αναπαρίσταται με τα ομώνυμα αντικείμενα (Aquifer).
- Το σύστημα μεταφοράς, που περιλαμβάνει ένα δίκτυο από στοιχεία μεταφοράς (κανάλια, αγωγοί, αντλίες και ρυθμιστές) και αποθήκευσης/επεξεργασίας νερού που μεταφέρουν το νερό στις εξόδους ή σε μονάδες επεξεργασίας. Οι εισοδοί στο σύστημα μεταφοράς μπορεί να προέρχονται από επιφανειακή απορροή, από υπόγεια ύδατα, από τις απορροές ξηρού καιρού ή από υδρογραφήματα που ορίζονται από το χρήστη. Τα στοιχεία του συστήματος μεταφοράς μοντελοποιούνται μέσω δύο βασικών αντικειμένων, των συνδέσμων (Links) και των κόμβων (Nodes).

Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζονται τα οπτικά αντικείμενα του SWMM με τα οποία αναπαρίστανται τα φυσικά στοιχεία του πραγματικού συστήματος. Τα κύρια αντικείμενα του μοντέλου που αφορούν τη διαδικασία μετατροπής της βροχής σε απορροή είναι οι βροχογράφοι και οι υπολεκάνες. Το σύστημα μεταφοράς νερού μοντελοποιείται με συνδέσμους και κόμβους. Οι κόμβοι είναι σημεία που αναπαριστούν απλούς κόμβους του αποχετευτικού δικτύου, διαχωριστές ροής (flow dividers), μονάδες αποθήκευσης ή κόμβους εκβολής. Οι σύνδεσμοι συνδέουν τους κόμβους μεταξύ τους και μπορεί να είναι αγωγοί, κανάλια, αντλίες ή ρυθμιστές ροής (Rossman and Huber, 2016).



Εικόνα 2.1: Τα βασικά οπτικά αντικείμενα του μοντέλου (Rossman and Huber, 2016).

Στις παραγράφους 2.3 έως 2.8 θα γίνει εκτενής αναφορά στις υδρολογικές και υδραυλικές διεργασίες που εκτελεί το SWMM, καθώς και στα οπτικά και μη αντικείμενα που χρησιμοποιεί για την εξυπηρέτηση αυτών των διαδικασιών.

### 2.3 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑ

Το SWMM είναι ένα κατανεμημένο μοντέλο διακριτού χρόνου. Οι μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου παίρνουν νέες τιμές σε κάθε χρονικό βήμα, κατά το οποίο το σύστημα δέχεται νέες τιμές εξωτερικών εισόδων. Καθώς οι μεταβλητές κατάστασης αλλάζουν τιμές, υπολογίζονται και καταγράφονται οι τιμές των μεταβλητών εξόδου σε κάθε χρονικό βήμα. Η μαθηματική διατύπωση της παραπάνω διαδικασίας εκφράζεται με τις Εξισώσεις 2.1 και 2.2 οι οποίες επιλύονται σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης (Rossman and Huber, 2016):

$$X_t = (X_{t-1}, I_t, P) \quad (2.1)$$

$$Y_t = g(X_t, P) \quad (2.2)$$

Όπου:

$X_t$  : Διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης τη χρονική στιγμή t

$Y_t$  : Διάνυσμα των μεταβλητών εξόδου τη χρονική στιγμή t

$I_t$  : Διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου τη χρονική στιγμή t

$P$  : Διάνυσμα των σταθερών παραμέτρων

Οι μεταβλητές κατάστασης ( $X_t$ ) αναφέρονται σε όλες τις διαδικασίες που εκτελεί το SWMM και αφορούν την απορροή, την τήξη του χιονιού, τη διήθηση, τα υπόγεια νερά, τη διόδευση στο αποχετευτικό σύστημα και την ποιότητα του νερού. Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι εξής (Rossman and Huber, 2016):

- d, βάθος της επιφανειακής απορροής στην υπολεκάνη (απορροή)
- S, εναπομένουσα αποθηκευτική ικανότητα εδαφικής υγρασίας (διήθηση)
- dL, βάθος ακόρεστης ζώνης (υπόγειο νερό)
- γ, q και a, βάθος ροής σε κάθε κόμβο, παροχή σε κάθε σύνδεσμο και επιφάνεια νερού σε κάθε σύνδεσμο αντίστοιχα (διόδευση στο αποχετευτικό δίκτυο).

Αντίστοιχα, μερικά παραδείγματα μεταβλητών εισόδου ( $I_t$ ) που ορίζονται από το χρήστη και προκαλούν μεταβολές στις τιμές των μεταβλητών κατάστασης είναι (Rossman and Huber, 2016):

- Οι μετεωρολογικές συνθήκες (βροχή, θερμοκρασία αέρα, δυναμική εξατμισοδιαπνοή, ταχύτητα ανέμου)
- Υδρογραφήματα που εισάγονται από το χρήστη σε συγκεκριμένους κόμβους του αποχετευτικού συστήματος
- Εισροές απορροών ξηρού καιρού, που επίσης εισάγονται σε συγκεκριμένους κόμβους του αποχετευτικού συστήματος.
- Ύψη επιφανειακού νερού σε συγκεκριμένες εξόδους από το αποχετευτικό σύστημα
- Ρυθμίσεις ελέγχου για αγωγούς και ρυθμιστές ροής

Όσον αφορά τις μεταβλητές εξόδου ( $Y_i$ ) που το SWMM υπολογίζει λαμβάνοντας τις τιμές των μεταβλητών κατάστασης σε κάθε χρονικό βήμα, κάποιες χαρακτηριστικές είναι (Rossman and Huber, 2016):

- Η παροχή της απορροής και των ρυπαντικών φορτίων κάθε υπολεκάνης
- Το ύψος χιονιού, η διήθηση και οι απώλειες λόγω εξάτμισης σε κάθε υπολεκάνη
- Το ύψος νερού των υπόγειων υδροφορέων και η έξοδος από αυτούς σε κάθε υπολεκάνη
- Η συνολική εισροή (από την απορροή, τον υπόγειο υδροφόρο, τις απορροές ξηρού καιρού κ.τ.λ.), το βάθος νερού και η συγκέντρωση ρυπαντικών φορτίων σε κάθε κόμβο του αποχετευτικού συστήματος
- Η υπερχειλίση και ο όγκος του λιμνάζοντος νερού σε κάθε κόμβο που υπερχειλίζει
- Η παροχή, η ταχύτητα, το βάθος ροής και η συγκέντρωση ρυπαντικών φορτίων σε κάθε σύνδεσμο του αποχετευτικού συστήματος

Τέλος, σε ότι αφορά τις σταθερές παραμέτρους ( $P$ ) το SWMM διαθέτει πάνω από 150 διαφορετικές σταθερές και συντελεστές που συμμετέχουν στις διαδικασίες που εκτελεί. Οι περισσότερες αφορούν είτε φυσικές διαστάσεις, όπως τα εμβαδά των λεκανών, οι διάμετροι των αγωγών, τα μέγιστα βάθη ροής, είτε ποσοότητες που μπορούν να οριστούν από την παρατήρηση στο πεδίο (όπως το ποσοστό διαπερατών και αδιαπέρατων επιφανειών μιας λεκάνης), από εργαστηριακές δοκιμές (όπως οι διάφορες ιδιότητες των εδαφών) ή από πηγές δεδομένων (όπως η τραχύτητα των αγωγών με βάση το υλικό τους). Για τον καθορισμό κάποιων παραμέτρων απαιτείται η βαθμονόμηση του μοντέλου, προκειμένου οι τιμές τους να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Προφανώς, δεν απαιτείται ο ορισμός τιμής σε όλες τις μεταβλητές που το μοντέλο διαθέτει. Αν παραδείγματος χάριν, δε ληφθούν υπόψη τα υπόγεια νερά σε μια μελέτη, οι 14 παράμετροι που αφορούν τα υπόγεια νερά σε κάθε λεκάνη δε θα λάβουν κάποια τιμή (Rossman and Huber, 2016).

Το SWMM χρησιμοποιεί τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής για τον καθορισμό των τιμών των ποσοτήτων σε ενδιάμεσες χρονικές στιγμές, σε χρονικές στιγμές, δηλαδή, ενδιάμεσα των χρονικών στιγμών στις οποίες τίθενται τιμές στις μεταβλητές εισόδου ή στις οποίες υπολογίζονται οι μεταβλητές εξόδου. Μόνη εξαίρεση αποτελούν οι τιμές της βροχοπτώσης και της διήθησης. Οι τιμές των μεταβλητών αυτών παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος που έχει τεθεί για την απορροή. Αν δηλαδή το χρονικό βήμα καταγραφής βρίσκεται διαμέσου ενός χρονικού βήματος υπολογισμού της απορροής, η ένταση βροχής που καταγράφεται δεν προκύπτει από γραμμική παρεμβολή της βροχής αλλά παίρνει την τιμή που είχε στην αρχή του χρονικού βήματος υπολογισμού της απορροής (Rossman and Huber, 2016).

Θα πρέπει να επισημανθεί, τέλος, ότι όλες οι τιμές των παραμέτρων και των μεταβλητών εισόδου και εξόδου μπορούν να εισαχθούν είτε με βάση το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI units) είτε με βάση το Αμερικανικό Σύστημα Μονάδων (US units).

Έχοντας δει το υπολογιστικό σχήμα που χρησιμοποιεί το SWMM στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστούν οι βασικές υδρολογικές και υδραυλικές διεργασίες με τα οπτικά και μη αντικείμενα που είναι διαθέσιμα προς χρήση, ώστε να γίνει μια ολοκληρωμένη γνωριμία με το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία. Οι Παράγραφοι 2.4 έως 2.7 αφορούν τις υδρολογικές διεργασίες που προσομοιώνει το μοντέλο, ενώ η Παράγραφος 2.8 τις υδραυλικές.

## 2.4 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η κατακρήμνιση αποτελεί την κινητήριο δύναμη για την προσομοίωση της βροχής-απορροής σε μια λεκάνη, καθώς η απορροή (αλλά και η ποιότητα της) εξαρτάται άμεσα από τις χρονοσειρές της κατακρήμνισης. Οι χρονοσειρές αυτές μπορεί να αποτελούνται από λίγες χρονικές περιόδους, αν πρόκειται για μεμονωμένα γεγονότα, ή από χιλιάδες χρονικές περιόδους όταν αφορούν συνεχή πολυετή προσομοίωση. Με το SWMM μπορούν να προσομοιωθούν τόσο μεμονωμένα γεγονότα όσο και η συνεχής απόκριση μιας λεκάνης κατά τη διάρκεια πολλών ετών, με τη μοναδική διαφορά να έγκειται στην ορισθείσα από το χρήστη διάρκεια προσομοίωσης και στον καθορισμό των αρχικών συνθηκών για την περίπτωση του μεμονωμένου γεγονότος (Rossman and Huber, 2016).

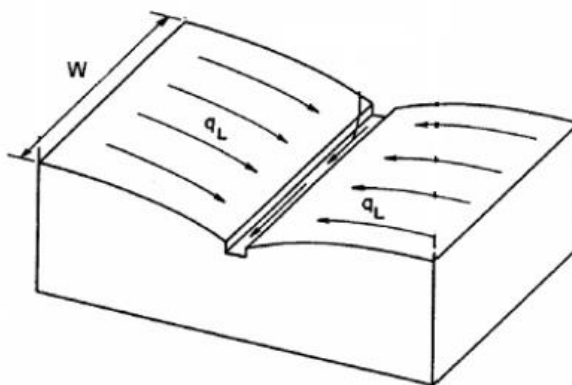
Η προσομοίωση της πηγής των δεδομένων των κατακρημνίσεων στο SWMM πραγματοποιείται με τους βροχογράφους (Rain Gage). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι από ένας βροχογράφοι προκειμένου να αποτυπωθεί η χωρική μεταβλητότητα του φαινομένου. Η είσοδος των δεδομένων μπορεί να γίνει είτε με την αποθήκευση στο βροχογράφο μιας χρονοσειράς από το χρήστη είτε με την εισαγωγή ενός εξωτερικού αρχείου δεδομένων. Τα δεδομένα που εισάγονται στο βροχογράφο από το χρήστη μπορεί να αφορούν την ένταση, το ύψος ή το αθροιστικό ύψος βροχής. Επιπλέον, ο χρήστης εισάγει το χρονικό βήμα, και την ονομασία του βροχογράφου και της χρονοσειράς. Το SWMM θεωρεί ότι οι τιμές έντασης ή ύψους βροχής που εισάγονται σε κάθε χρονικό βήμα εμφανίζονται στην αρχή του χρονικού βήματος και παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκειά του (Rossman and Huber, 2016).

Εκτός από την κατακρήμνιση, στο SWMM μπορούν να εισαχθούν δεδομένα θερμοκρασίας, εξάτμισης και ταχύτητας ανέμου.

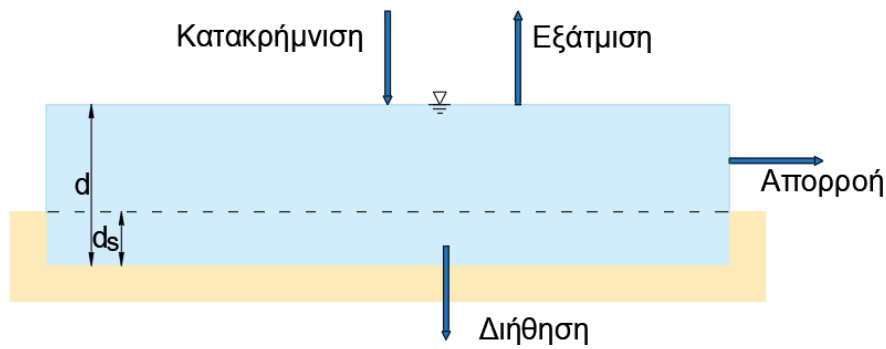
## 2.5 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ

### 2.5.1 ΚΥΡΙΑΡΧΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Το SWMM αντιμετωπίζει τη λεκάνη απορροής ως μια επιφάνεια ορθογώνιου σχήματος με ενιαία κλίση  $S$  και πλάτος  $W$  που αποστραγγίζεται σε ένα κανάλι εξόδου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2. Η επιφανειακή απορροή παράγεται με την προσομοίωση της υπολεκάνης σαν ένα μη γραμμικό ταμειυτήρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3 (Rossman and Huber, 2016).



Εικόνα 2.2: Προσομοίωση της λεκάνης απορροής από το SWMM (Rossman and Huber, 2016).



Εικόνα 2.3: Μοντέλο βροχής απορροής του SWMM – Η υπολεκάνη ως μη γραμμικός ταμειυτήρας (Rossman and Huber, 2016).

Σε αυτή την αναπαράσταση, η υπολεκάνη δέχεται εισροές από την κατακρήμνιση και υφίσταται απώλειες εξαιτίας της εξάτμισης και της διήθησης. Όταν, η ποσότητα νερού που δέχεται η υπολεκάνη υπερβαίνει την ικανότητα επιφανειακής συγκράτησης ( $d_s$ ), το νερό, που λιμνάζει και έχει βάθος  $d$  πάνω από την επιφάνεια της υπολεκάνης, μετατρέπεται σε απορροή. Η ικανότητα επιφανειακής συγκράτησης (Depression storage –  $d_s$ ) αφορά τις αρχικές απώλειες βροχής, όπως η επιφανειακή λίμναση ή η παρεμπόδιση σε επίπεδες στέγες και στη βλάστηση (Rossman and Huber, 2016).

Από την εξίσωση διατήρησης μάζας (Εξίσωση 2.3) προκύπτει πως η μεταβολή στο ύψος  $d$  ανά μονάδα χρόνου  $t$  είναι η διαφορά μεταξύ του ρυθμού που εισέρχεται και εξέρχεται νερό από την υπολεκάνη (Rossman and Huber, 2016):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (2.3)$$

Όπου:

$i$  : ρυθμός βροχόπτωσης και χιονόπτωσης (m/s)

$e$  : ρυθμός επιφανειακής εξάτμισης (m/s)

$f$  : ρυθμός διήθησης (m/s)

$q$  : επιφανειακή απορροή (m/s)

Θεωρώντας ότι η ροή στην επιφάνεια της υπολεκάνης είναι ομοιόμορφη ροή σε κανάλι ορθογωνικής διατομής πλάτους  $W$ , βάθους  $d-d_s$  και κλίσης  $S$ , η εξίσωση του Manning παίρνει τη μορφή της Εξίσωσης 2.4 (Rossman and Huber, 2016):

$$Q = \frac{1}{n} S^{1/2} R_x^{2/3} A_x \quad (2.4)$$

Όπου:

$n$  : ο συντελεστής τραχύτητας της επιφάνειας της υπολεκάνης

$S$  : η μέση κλίση της υπολεκάνης



$A_x$  : το εμβαδό κατά μήκος του πλάτους  $W$  στο οποίο πραγματοποιείται η απορροή ( $m^2$ )

$R_x$  : η υδραυλική ακτίνα της περιοχής με εμβαδό  $A_x$  (m)

Καθώς το πλάτος  $W$  θα είναι πάντα σημαντικά μεγαλύτερο από το βάθος  $d$ , θα ισχύει ότι  $A_x = W * (d - d_s)$  και  $R_x = d - d_s$ . Έτσι, η εξίσωση 2.4, για τον υπολογισμό της απορροής ανά μονάδα επιφάνειας, παίρνει τη μορφή της Εξίσωσης 2.5 (Rossman and Huber, 2016):

$$q = \frac{1}{A_x n} WS^{1/2} (d - d_s)^{5/3} \quad (2.5)$$

Αντικαθιστώντας, την Εξίσωση 2.5 στην εξίσωση διατήρησης μάζας προκύπτει η Εξίσωση 2.6:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \alpha (d - d_s)^{5/3} \quad (2.6)$$

$$\text{όπου } \alpha = \frac{WS^{1/2}}{A_x n}$$

Η Εξίσωση 2.6 είναι μια μη γραμμική διαφορική εξίσωση, που με γνωστές τις τιμές των  $i$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $d_s$  και  $\alpha$  μπορεί να λυθεί αριθμητικά για κάθε χρονικό βήμα για το βάθος  $d$ . Από τη στιγμή που είναι γνωστό το βάθος  $d$ , οι τιμές της απορροής  $q$  μπορούν να υπολογισθούν από την εξίσωση 2.5. Σημειώνεται, ότι η εξίσωση 2.6 έχει εφαρμογή μόνο όταν ισχύει  $d > d_s$ . Αν  $d \leq d_s$  η απορροή είναι μηδενική και η εξίσωση διατήρησης μάζας διαμορφώνεται όπως στην Εξίσωση 2.7 (Rossman and Huber, 2016):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f \quad (2.7)$$

### 2.5.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ ΣΕ ΥΠΟΠΕΡΙΟΧΕΣ

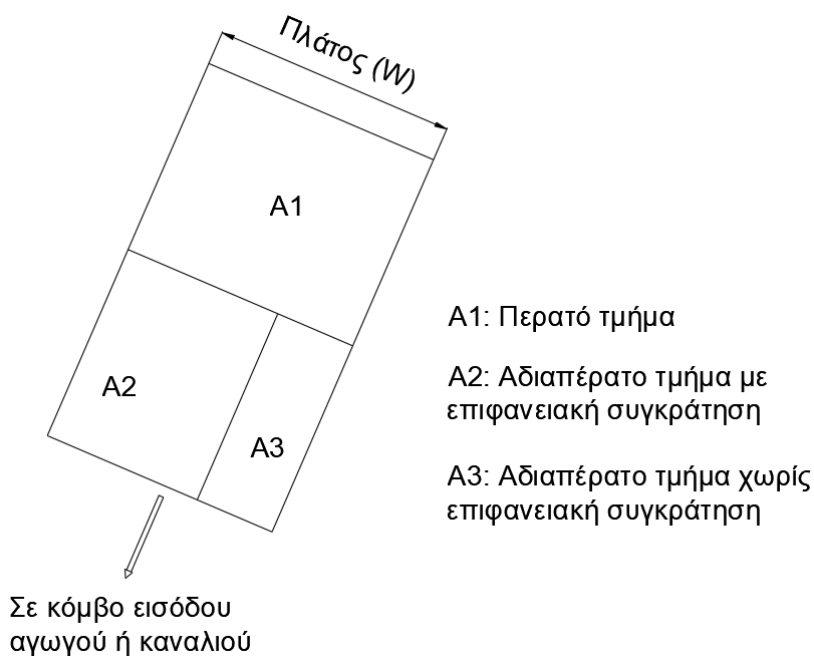
Όπως γνωρίζουμε, οι αστικές λεκάνες απορροής αποτελούνται από αδιαπέρατα τμήματα (όπως δρόμοι, στέγες κ.τ.λ.) και διαπερατά (πάρκα, βλάστηση κ.τ.λ.). Σε αντίθεση με τα διαπερατά τμήματα, στα αδιαπέρατα δεν πραγματοποιείται διήθηση. Το νερό που υπερβαίνει την ικανότητα επιφανειακής συγκράτησης μετατρέπεται κατευθείαν σε απορροή (Rossman and Huber, 2016).

Το SWMM δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να πραγματοποιήσει το διαχωρισμό μεταξύ διαπερατών και αδιαπέρατων τμημάτων, με την εισαγωγή από το χρήστη του ποσοστού της επιφάνειας της υπολεκάνης που είναι αδιαπέρατη (% Imperviousness). Για καθένα από τα δύο τμήματα τίθεται διαφορετικός συντελεστής τραχύτητας Manning.

Επιπλέον, οι αδιαπέρατες επιφάνειες της υπολεκάνης δεν έχουν ενιαία συμπεριφορά. Σε τμήματά τους είναι δυνατό η βροχή να μετατρέπεται απ' ευθείας σε απορροή, ενώ σε άλλα μεσολαβεί η επιφανειακή συγκράτηση (Depression Storage). Το SWMM δίνει τη δυνατότητα και για αυτόν τον επιπλέον διαχωρισμό των αδιαπέρατων τμημάτων, με την εισαγωγή από

το χρήστη του ποσοστού του αδιαπέρατου τμήματος στο οποίο δεν πραγματοποιείται επιφανειακή συγκράτηση (% Zero-Imperv).

Έτσι, το φυσικό σύστημα αναπαρίσταται από το λογισμικό με τον τρόπο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4: Διαχωρισμός υπολεκάνης σε περατό, αδιαπέρατο με και χωρίς επιφανειακή συγκράτηση τμήμα (Rossman and Huber, 2016).

### 2.5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑ

Το υπολογιστικό σχήμα που χρησιμοποιεί το SWMM για τη μετατροπή της βροχής σε απορροή είναι το εξής (Rossman and Huber, 2016):

1. Ορίζεται το χρονικό βήμα των υπολογισμών με βάση την ύπαρξη ή όχι κατακρήμνισης. Αν δεν υπάρχει κατακρήμνιση, λαμβάνεται ως χρονικό βήμα αυτό των απορροών ξηρού καιρού, που έχει εισαχθεί από το χρήστη. Αν υφίσταται κατακρήμνιση, ως χρονικό βήμα των υπολογισμών τίθεται το βήμα της υγρής περιόδου.
2. Για κάθε υπολεκάνη, ανασύρεται η ένταση βροχής ( $i$ ) και ο ρυθμός εξάτμισης ( $e$ ).
3. Για κάθε υποπεριοχή εντός της υπολεκάνης
  - α) Αν προσομοιώνεται τήξη χιονιού, προσαρμόζεται αντίστοιχα η ένταση της κατακρήμνισης

β) Τίθεται ο όγκος της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας  $d_a$  σε  $i\Delta t + d$ , όπου  $d$  το υπάρχον βάθος. Τίθεται ως όριο στην εξάτμιση  $e$  η τιμή  $\frac{d}{\Delta t}$ .

γ) Αν πρόκειται για περατή υποπεριοχή, ορίζεται ο ρυθμός διήθησης  $f$  (με μια από της μεθόδους που θα περιγραφούν στην Παράγραφο 2.7) και αν συνυπολογίζονται τα υπόγεια νερά, λαμβάνεται υπόψιν και η μείωση του ρυθμού διήθησης που μπορεί να

προκύψει λόγω πλήρως κορεσμένου εδάφους. Διαφορετικά, για αδιαπέρατες δηλαδή περιοχές, τίθεται  $f = 0$ .

δ) Αν οι απώλειες υπερβαίνουν τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία (δηλαδή αν  $(e + f)\Delta t \geq d_a$ ) τότε  $d = 0$  και η απορροή είναι μηδενική. Σε αντίθετη περίπτωση, υπολογίζεται το περίσσειμα βροχής  $i_x$  ως εξής:  $i_x = i - e - f$

ε) Αν το περίσσειμα βροχής δεν επαρκεί για να πληρωθεί η ικανότητα επιφανειακής συγκράτησης  $d_s$  κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος (δηλαδή αν  $d + i_x\Delta t \leq d_s$ ) τότε η τιμή του  $d$  γίνεται  $d + i_x\Delta t$  και τίθεται τιμή απορροής  $q = 0$ . Στην αντίθετη περίπτωση οι τιμές  $d$  και  $q$  υπολογίζονται επιλύοντας την εξίσωση 2.6.

4. Υπολογίζεται η συνολική απορροή  $Q$  από την υπολεκάνη στο τέλος του χρονικού βήματος από την Εξίσωση 2.8:

$$Q = \sum_{j=1}^3 q_j A_j \quad (2.8)$$

Όπου:  $q_j$  η απορροή ανά μονάδα επιφάνειας στην υποπεριοχή  $j$  που βρέθηκε στο βήμα 3 και  $A_j$  η επιφάνεια της υποπεριοχής  $j$ .

Η επίλυση της εξίσωσης 2.6 που αναφέρθηκε στο βήμα 3.ε γίνεται με την παρακάτω διαδικασία (Rossman and Huber, 2016):

1. Αν  $d < d_s$  και το περίσσειμα βροχής είναι θετικό, ορίζεται το χρονικό βήμα  $\Delta t_x$  κατά το οποίο το βάθος  $d$  θα υπερβεί το  $d_s$  ως  $\Delta t_x = \Delta t - (d_s - d) / i_x$  και τίθεται  $d = d_s$ . Διαφορετικά τίθεται  $\Delta t_x = \Delta t$ .
2. Χρησιμοποιείται μια ρουτίνα πέμπτης τάξης Runge-Kutta με προσαρμοσμένο βήμα ελέγχου (Press et al, 1992) για την επίλυση της 2.6.
3. Υπολογίζεται η παροχή ανά μονάδα επιφάνειας  $q$  στο τέλος του χρονικού βήματος:  $q = ad_x^{5/3}$ .

#### 2.5.4 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΣΕ ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ

Συχνά, χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής όπως η επίγεια ροή ή οι ιδιότητες της επιφάνειας του εδάφους παρουσιάζουν έντονη χωρική μεταβλητότητα. Για το λόγο αυτό, στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει ανάγκη διακριτοποίησης της υπό εξέταση λεκάνης σε μικρότερες υπολεκάνες (Rossman and Huber, 2016).

Η διακριτοποίηση ξεκινά με την αναγνώριση του υδροκρίτη στον τοπογραφικό χάρτη, τη θέση των εισόδων στους κύριους αποχετευτικούς αγωγούς και την επιλογή των αγωγών που θα προσομοιωθούν. Γενικά, στις αστικές περιοχές η διαδικασία χάραξης των υπολεκανών δε μπορεί να λαμβάνει υπόψιν μόνο την τοπογραφία, αφού το αποχετευτικό σύστημα δεν ακολουθεί πάντα τις κλίσεις του εδάφους. Επομένως, η χαρτογράφηση του υδρογραφικού

δικτύου αποτελεί καθοριστικό στοιχείο για το διαχωρισμό των υπολεκανών (Rossman and Huber, 2016).

### 2.5.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ

Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστούν οι παράμετροι του μοντέλου που επιδρούν στην απορροή. Όπως είδαμε στην Παράγραφο 2.5.1, από την εξίσωση 2.6 προκύπτει ότι η απορροή της υπολεκάνης εξαρτάται από την κλίση, το πλάτος, το συντελεστή Manning, την έκτασή της, καθώς και από την επιφανειακή συγκράτηση. Συνδυαστικά με όσα είδαμε στην Παράγραφο 2.5.4 για το διαχωρισμό των υπολεκανών σε υποπεριοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά, οι παράμετροι που ορίζονται από το χρήστη στο SWMM είναι οι εξής:

- Έκταση υπολεκάνης

Όπως είδαμε στην Παράγραφο 2.5.4, για τις αστικές περιοχές ο διαχωρισμός σε υπολεκάνες γίνεται με βάση όχι μόνο την τοπογραφία της περιοχής αλλά και του αποχετευτικού δικτύου. Γενικά, ο διαχωρισμός μπορεί να συμπίπτει με τη διαφοροποίηση της περιοχής μελέτης ως προς τις χρήσεις γης, να ακολουθεί το διαχωρισμό του αποχετευτικού δικτύου ή να εξυπηρετεί την εκτίμηση παραμέτρων, όπως η κλίση, ο τύπος εδάφους κ.τ.λ. Με βάση αυτό το διαχωρισμό προκύπτει η έκταση της κάθε υπολεκάνης (Rossman and Huber, 2016).

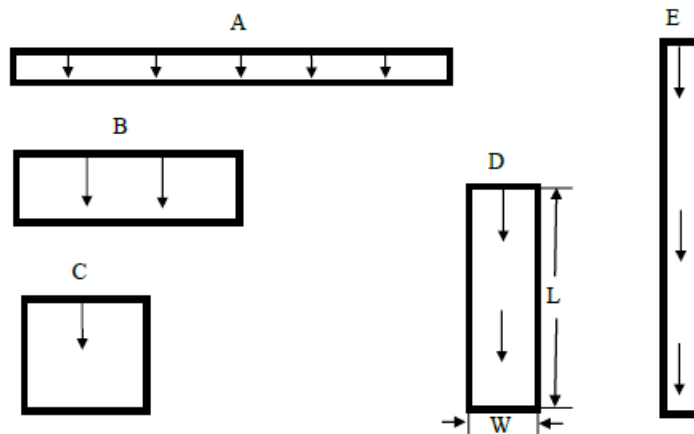
- Ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών (% Imper)

Το ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών της κάθε υπολεκάνης μπορεί να εκτιμηθεί είτε με τη χρήση αεροφωτογραφιών είτε με τη χρήση χάρτη χρήσεων γης. Η διαδικασία αυτή γίνεται σαφώς ευκολότερη αν υφίσταται αναπαράσταση της λεκάνης με τις χρήσεις γης σε περιβάλλον GIS. Συνηθέστερη πρακτική αποτελεί η αντιστοίχιση του κάθε τύπου χρήσης γης που απαντάται στη λεκάνη με ένα ποσοστό διαπερατότητας (Rossman and Huber, 2016).

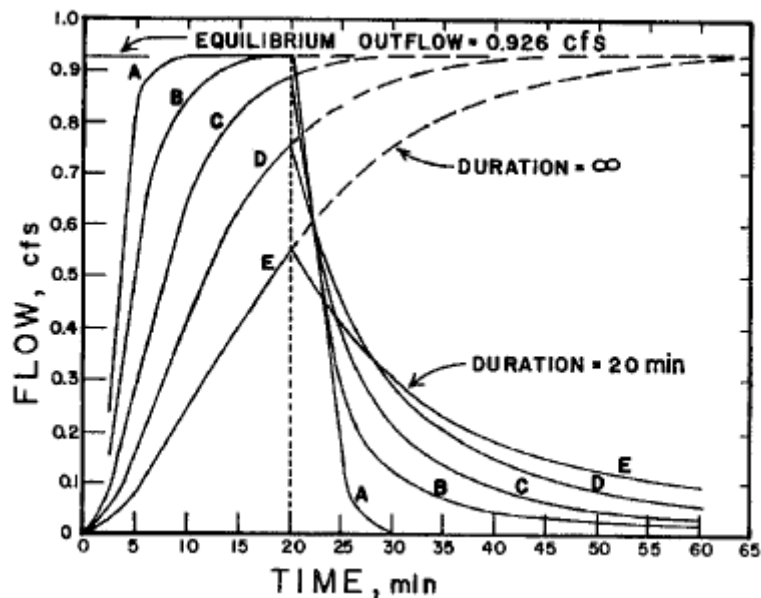
- Πλάτος υπολεκάνης (Width)

Αν η επίγεια ροή μπορεί να οπτικοποιηθεί ως μια ροή από ψηλότερα σε χαμηλότερα σημεία μιας λεκάνης ορθογωνικού σχήματος, τότε το πλάτος της είναι το φυσικό πλάτος της επίγειας ροής. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάστηκε η απεικόνιση αυτού του ιδανικού σεναρίου λεκάνης, όπου η παροχή ανά μονάδα πλάτους  $q_1$  πολλαπλασιαζόμενη με το πλάτος της υπολεκάνης δίνει τη συνολική παροχή. Επίσης, στην ιδανική αυτή περίπτωση τα δύο μέρη της λεκάνης εκατέρωθεν του καναλιού αποστράγγισης είναι συμμετρικά, επομένως το πλάτος της λεκάνης είναι δύο φορές το μήκος του καναλιού (Rossman and Huber, 2016).

Είναι προφανές πως οι λεκάνες που απαντώνται στη φύση και στα αστικά περιβάλλοντα δεν έχουν την ομοιομορφία και τη συμμετρικότητα αυτού του σεναρίου. Επίσης, θεωρώντας την κλίση και την τραχύτητα σταθερές, μεταβολές στο πλάτος της υπολεκάνης προκαλούν μεταβολές στο σχήμα του υδρογραφήματος στην απορροή. Λαμβάνοντας υπόψιν και αναλύοντας διαφορετικά σενάρια λεκανών, μπορούμε να διερευνήσουμε τον τρόπο που επιδρά το πλάτος στην απορροή. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε ενδεικτικά τις περιπτώσεις υπολεκανών της Εικόνας 2.5. Οι υπολεκάνες έχουν την ίδια Έκταση καθώς και όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους (κλίση, συντελεστής Manning, επιφανειακή συγκράτηση) και είναι αδιαπέρατες κατά 100% της επιφάνειάς τους. Τα υδρογραφήματα απορροής για βροχή διάρκειας 20min παρουσιάζονται στο γράφημα της Εικόνας 2.6 (Rossman and Huber, 2016).



Εικόνα 2.5: Περιπτώσεις υπολεκανών με διαφορετικό πλάτος (Rossman and Huber, 2016).



Εικόνα 2.6: Υδρογραφήματα απορροής των λεκανών της Εικόνας 2.5 για άπειρη διάρκεια βροχής και βροχή 20min (Rossman and Huber, 2016).

Παρατηρούμε πως καθώς το πλάτος της υπολεκάνης μικραίνει από τη λεκάνη A στη λεκάνη E η αιχμή του υδρογραφήματος της απορροής μετατοπίζεται χρονικά. Επιπλέον, παρατηρούμε πως για ίση ποσότητα βροχής διάρκειας 20min στην περίπτωση της λεκάνης E ο όγκος της απορροής είναι σημαντικά μειωμένος σε σχέση με αυτόν για τη λεκάνη A. Τέλος, και ο καθοδικός κλάδος του υδρογραφήματος διαφέρει όντας μικρότερος στην περίπτωση της λεκάνης A.

Γενικά, όσον αφορά το μήκος της επίγειας ροής στις μη αστικές λεκάνες, υπάρχει μια μέγιστη τιμή πέρα από την οποία η ροή συγκεντρώνεται σε υδατόρρευμα, έχοντας μεγάλες ταχύτητες και μειωμένη πιθανότητα για διήθηση. Για το μέγιστο αυτό μήκος δεν υπάρχει μια τιμή που να είναι κοινώς αποδεκτή. Ενδεικτικά, η NRCS προτείνει τα 100ft, ενώ το UDFCD τα 500ft. Πάντως σε περίπτωση που το μήκος επίγειας ροής είναι μεγαλύτερο από το επιλεγθέν ως μέγιστο μήκος, η λεκάνη θα πρέπει να διαιρεθεί ώστε να μην συμπεριληφθεί το κομμάτι της ροής που αφορά το σχηματισθέν υδατόρρευμα (Rossman and Huber, 2016).

Όσον αφορά τις αστικές λεκάνες, το μήκος της επίγειας ροής πριν το νερό εισέλθει στο αποχετευτικό σύστημα είναι μικρότερο σε σχέση με τις μη αστικές (Κούρτης, 2016). Στις λεκάνες αυτές λαμβάνεται ως μήκος επίγειας ροής το μήκος από το οπίσθιο τμήμα του οικοδομικού τετραγώνου μέχρι το κέντρο του δρόμου (Gironas, 2009). Γενικά, προτείνεται σε αστικές λεκάνες το μήκος επίγειας ροής να μην ξεπερνά τα 300ft ≈90m (UDFCD, 2016).

Το πλάτος της υπολεκάνης ορίζεται ως η έκταση της υπολεκάνης διαιρεμένη με το μέγιστο μήκος επίγειας ροής του νερού. Στην περίπτωση που υπάρχουν αρκετές τέτοιες διαδρομές για τον υπολογισμό του πλάτους χρησιμοποιείται το μέσο μήκος επίγειας ροής (Gironas, 2009).

Για τον υπολογισμό του πλάτους σε σύνθετες αστικές λεκάνες απαντώνται στη βιβλιογραφία αρκετές μέθοδοι. Σε κάθε περίπτωση όμως, επειδή ο προσδιορισμός του ακριβούς μήκους και πλάτους της υπολεκάνης είναι δύσκολος, το πλάτος της υπολεκάνης αποτελεί για τις περισσότερες μελέτες παράμετρο βαθμονόμησης.

- Κλίση

Η κλίση της υπολεκάνης προτείνεται να εκφράζει τη μέση κλίση κατά μήκος της επίγειας ροής μέχρι τους κόμβους εισόδου στο αποχετευτικό σύστημα. Για λεκάνες με απλή γεωμετρία, ο υπολογισμός είναι εύκολος και προκύπτει με διαίρεση της υψομετρικής διαφοράς με το μήκος της ροής. Για περισσότερες σύνθετες γεωμετρίες, μπορούν να ορισθούν διαφορετικές διαδρομές της επίγειας ροής, να υπολογισθεί η κλίση σε κάθε μια από αυτές και στη συνέχεια να ληφθεί ένας σταθμισμένος μέσος όρος αυτών, ως κλίση της υπολεκάνης (Rossman and Huber, 2016).

- Συντελεστές τραχύτητας Manning

Οι τιμές του συντελεστή Manning,  $n$ , για την επίγεια ροή δεν είναι τόσο εύκολο να καθοριστούν όσο για τη ροή σε κανάλια, λόγω της ανομοιομορφίας των χαρακτηριστικών του εδάφους, των μεταβάσεων μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής, τα μικρά βάθη ροής κ.τ.λ. Με βάση τις περισσότερες μελέτες εξάγεται το συμπέρασμα πως για μια δεδομένη κάλυψη γης, ο συντελεστής τραχύτητας μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το βάθος, την παροχή ή τον αριθμό Reynold's. Σε μελέτες με το SWMM ο συντελεστής Manning τόσο για τα διαπερατά όσο και για τα αδιαπερατά τμήματα των υπολεκανών αποτελεί συχνά παράμετρο βαθμονόμησης (Rossman and Huber, 2016).

Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning για τα περατά και αδιαπερατά τμήματα των υπολεκανών καθορίζονται με βάση τις τιμές του Πίνακα 2.1. Αντίστοιχα, οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning για τους αγωγούς του δικτύου καθορίζονται με βάση τον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.1: Τιμές συντελεστή Manning για αβαθή διάχυτη ροή (Τσιχριντζής, 1999)

| Περιγραφή             | Τιμή N   |          |         |
|-----------------------|----------|----------|---------|
|                       | Ελάχιστη | Κανονική | Μέγιστη |
| Σκυρόδεμα             | 0.010    | 0.011    | 0.013   |
| Άσφαλτος              | 0.010    | 0.012    | 0.015   |
| Γυμνή Άμμος           | 0.010    | 0.010    | 0.016   |
| Επιφάνεια με χαλίκι   | 0.012    | 0.012    | 0.030   |
| Γυμνή αργιλώδης τύρφη | 0.012    | 0.012    | 0.630   |
| Τεχνητό γρασίδι       | 0.390    | 0.450    | 0.200   |
| Κοντό γρασίδι         | 0.100    | 0.510    | 0.300   |
| Πυκνό γρασίδι         | 0.170    | 0.240    | 0.480   |
| Δένδρα, δάση          | 0.300    | 0.450    | -       |

Πίνακας 2.2: Τιμές συντελεστή Manning για αγωγούς και κανάλια (Τσιχριντζής, 1999)

| Περιγραφή Υλικού Αγωγού                  | Τιμή Συντελεστή Manning, n |          |         |
|--|----------------------------|----------|---------|
|  | Ελάχιστη                   | Κανονική | Μέγιστη |
| Ορείχαλκος, λείος                        | 0.009                      | 0.010    | 0.013   |
| Χάλυβας με συγκολλήσεις                  | 0.010                      | 0.012    | 0.014   |
| Χάλυβας με ίλους                         | 0.013                      | 0.016    | 0.017   |
| Χυτοσίδηρος με επίστρωση                 | 0.010                      | 0.013    | 0.014   |
| Χυτοσίδηρος χωρίς επίστρωση              | 0.011                      | 0.014    | 0.016   |
| Σφυρήλατος σίδηρος, μαύρος               | 0.012                      | 0.016    | 0.015   |
| Σφυρήλατος σίδηρος, γαλβανισμένος        | 0.013                      | 0.022    | 0.017   |
| Μεταλλικός αυλακωτός, μικρές αυλάκωσεις  | 0.020                      | 0.022    | 0.025   |
| Μεταλλικός αυλακωτός, μεγάλες αυλάκωσεις | 0.020                      | 0.032    | 0.035   |
| Λείος αυλακωτός από αλουμίνιο            | 0.030                      | 0.012    | 0.014   |
| Αγωγός από σκυρόδεμα, ευθύς              | 0.010                      | 0.012    | 0.013   |
| Αγωγός από σκυρόδεμα, με καμπύλες        | 0.011                      | 0.013    | 0.014   |
| Υπόνομος Ομβρίων                         | 0.013                      | 0.015    | 0.017   |
| Υγειονομικός υπόνομος                    | 0.012                      | 0.013    | 0.016   |

- Επιφανειακή Συγκράτηση

Η επιφανειακή συγκράτηση αφορά τον όγκο που πρέπει να πληρωθεί πριν την εμφάνιση της επιφανειακής απορροής, τόσο στις διαπερατές όσο και στις αδιαπέρατες επιφάνειες. Ο όγκος αυτός αναπαριστά τις απώλειες λόγω επιφανειακής λίμνασης, κατακράτησης και εξάτμισης. Στον αλγόριθμο βροχής απορροής του SWMM, το νερό που αποθηκεύεται ως επιφανειακή συγκράτηση αποτελεί αντικείμενο διήθησης και εξάτμισης για τις διαπερατές επιφάνειες, ενώ για τις αδιαπέρατες υπόκειται μόνο σε εξάτμιση. Έτσι, ενώ στις διαπερατές επιφάνειες η διαθέσιμη αποθηκευτικότητα νερού για επιφανειακή συγκράτηση ανανεώνεται συνεχώς και γρήγορα, στις αδιαπέρατες επιφάνειες η διαδικασία αργεί περισσότερο με αποτέλεσμα η διαθέσιμη αποθηκευτικότητα να μην φτάνει άμεσα τη μέγιστη τιμή της (Rossman and Huber, 2016).

Για την αναπαράσταση ενός μοντέλου άμεσης απορροής στο SWMM ο χρήστης μπορεί είναι να ορίσει το ποσοστό της λεκάνης χωρίς επιφανειακή συγκράτηση (%Zero-imperv), όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.5.4 του παρόντος κεφαλαίου. Εναλλακτικά, ο χρήστης μπορεί να θέσει την ανωτέρω τιμή ίση με 0 και την τιμή της επιφανειακής συγκράτησης για τα αδιαπέρατα τμήματα της υπολεκάνης (D-store-imperv) ίση με 0 (Rossman and Huber, 2016).

Διάφορες μελέτες έχουν γίνει για τον προσδιορισμό των τιμών της επιφανειακής αποθήκευσης. Οι Tholin και Keifer (1960) χρησιμοποιούν τις τιμές 6.4mm και 1.6mm για διαπερατές και αδιαπέρατες επιφάνειες αντίστοιχα. Με τις τιμές αυτές συμφωνεί και η Αμερικάνικη Ένωση Πολιτικών Μηχανικών (1992).

## **2.6 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**

Η ευαισθησία του μοντέλου στις διάφορες παραμέτρους που συμμετέχουν στην προσομοίωση μπορεί να αξιολογηθεί με βάση την επίδρασή τους στην παροχή αιχμής, το μέγιστο βάθος ροής, το συνολικό όγκο της απορροής ή τη χρονική στιγμή της αιχμής. Η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του SWMM έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης της διεθνούς βιβλιογραφίας. Στην παρούσα εργασία έγινε μια καταγραφή κάποιων ενδεικτικών μελετών που αφορούν αστικές λεκάνες απορροής.

Οι παράμετροι του SWMM οι οποίες επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τον όγκο και την αιχμή της απορροής με βάση τους Rossman και Huber (2016) παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Οι απώλειες (εξατμισοδιαπνοή, επιφανειακή αποθήκευση, διήθηση) είναι σχετικά λιγότερο σημαντικές όσο το ύψος βροχής αυξάνεται, αφού σε περιπτώσεις πλημμύρας η συμπεριφορά του εδάφους προσομοιάζει με αυτή των αδιαπέρατων επιφανειών. Αυτός είναι και ο λόγος που η αστικοποίηση επιφέρει μικρότερες αλλαγές στην απορροή που προκαλείται από επεισόδια βροχής μεγάλης περιόδου επαναφοράς σε σχέση με επεισόδια βροχής μεγαλύτερης συχνότητας. Η επιφανειακή συγκράτηση αποκτά μεγαλύτερη σημασία όταν η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιείται για επεισόδια βροχής μεγάλης συχνότητας. Η δυσκολία προσδιορισμού της επιφανειακής αποθήκευσης και η ισχυρή εξάρτησή της από τις αρχικές συνθήκες καθιστά τη βαθμονόμηση με βάση τέτοια γεγονότα αρκετά δύσκολη (Rossman and Huber, 2016).



Πίνακας 2.3: Επίδραση παραμέτρων στον όγκο και την παροχή αιχμής της απορροής (Rossman and Huber, 2016)

| Παράμετροι Υπολεκάνης  | Επίδραση στο υδρογράφημα | Επίδραση της αύξησης της παραμέτρου στον όγκο της απορροής | Επίδραση της αύξησης της παραμέτρου στην αιχμή της απορροής | ΣΧΟΛΙΑ   |
|------------------------|--------------------------|--|---|--|
| Έκταση                 | Σημαντική                | Αύξηση   | Αύξηση  | Μικρότερη επίδραση σε ιδιαίτερα περατές λεκάνες.   |
| Αδιαπερατότητα         | Σημαντική                | Αύξηση   | Αύξηση  | Μικρότερη επίδραση όταν οι περατές επιφάνειες έχουν χαμηλή ικανότητα διήθησης.   |
| Πλάτος                 | Επηρεάζει το σχήμα       | Μείωση   | Αύξηση  | Για επεισόδια βροχής μη σταθερής έντασης η αύξηση του πλάτους οδηγεί σε μεγαλύτερες παροχές αιχμής που εμφανίζονται γρηγορότερα. |
| Κλίση                  | Επηρεάζει το σχήμα       | Μείωση   | Αύξηση  | Όμοια επίδραση με το πλάτος, λιγότερο ισχυρή   |
| Συντ. Τραχύτητας       | Επηρεάζει το σχήμα       | Αύξηση   | Μείωση  | Αντίθετη επίδραση με το πλάτος   |
| Επιφανειακή Συγκράτηση | Μέτρια                   | Μείωση   | Μείωση  | Σημαντική επίδραση μόνο για επεισόδια με χαμηλό ύψος βροχής  |

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για μικρή αστική λεκάνη (5.87ha) στη Νότια Φινλανδία (Krebs et al, 2013) έδειξαν πως το μοντέλο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην επιφανειακή συγκράτηση των αδιαπέρατων επιφανειών (D-imp) και στο συντελεστή τραχύτητας Manning των αγωγών (n-con). Διαπιστώθηκε πως οι υδρολογικές και υδραυλικές παράμετροι που αφορούν τα περατά τμήματα των υπολεκανών δεν επιδρούν ιδιαίτερα στην απορροή, καθώς πρόκειται για μια ιδιαίτερα αστικοποιημένη περιοχή (86% της έκτασης καλύπτεται από αδιαπέρατες επιφάνειες). Τέλος, λόγω της υψηλής χωρικής ανάλυσης του μοντέλου με το οποίο προσομοιώθηκε η λεκάνη, το οποίο αποτελείται από ομοιογενείς ως προς την αδιαπερατότητα τους λεκάνες, η παράμετρος του ποσοστού αδιαπερατότητας (%imper) φαίνεται επίσης να μην επιδρά ιδιαίτερα στα αποτελέσματα. Στην υψηλή ευαισθησία του μοντέλου στις δύο παραμέτρους (D-imp και n-con) κατέληξε και η μελέτη αστικής λεκάνης 24.2 hm<sup>2</sup> με μεγάλο ποσοστό αδιαπερατότητας και πολύ μικρές κλίσεις στην πόλη Shenyang της νοτιοανατολικής Κίνας (Chunlin Li et al, 2015).

Από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε σε μοντέλο SWMM αστικής λεκάνης 217 km<sup>2</sup> στη Νότια Καλιφόρνια (Barco et al, 2008) εξήχθη το συμπέρασμα πως το ποσοστό αδιαπερατότητας (% imper) και η επιφανειακή συγκράτηση (D-imper) είναι οι παράμετροι που επιδρούν εντονότερα τόσο στο συνολικό όγκο της απορροής, όσο και στην παροχή αιχμής. Η χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής φαίνεται να είναι ευαίσθητη μόνο στην παράμετρο του συντελεστή τραχύτητας των αγωγών και μάλιστα με μικρή επίδραση.

Η προσομοίωση αστικής λεκάνης του Βορειοδυτικού Ιράν (Rabori et al, 2017) και η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, αποδίδει στις παραμέτρους της επιφανειακής συγκράτησης (D-imper), του ποσοστού αδιαπερατότητας (%imper) και της τραχύτητας των αδιαπέρατων επιφανειών (N-imp) τη μεγαλύτερη επίδραση τόσο στον όγκο όσο και στην παροχή αιχμής της απορροής.

Μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε λεκάνη οικιστικής, εμπορικής και βιομηχανικής περιοχής στη Μαλαισία (Chow et al, 2012) βρήκε τις παραμέτρους του ποσοστού αδιαπερατότητας (% imper), του πλάτους (Width), της επιφανειακής συγκράτησης και της τραχύτητας των αδιαπέρατων επιφανειών (D-imp και N-imp) να ασκούν τη μεγαλύτερη επίδραση στο βάθος ροής και την παροχή αιχμής της απορροής.

Η ανάλυση ευαισθησίας στις παραμέτρους του μοντέλου για αστική λεκάνη της πόλης Shiraz στο Ιράν (Sharifan et al, 2010) κατέληξε στην υψηλή ευαισθησία του μοντέλου στην έκταση της λεκάνης και το ύψος βροχής καθώς και στο συμπέρασμα ότι άλλες παράμετροι που ασκούν επίδραση στην απορροή είναι η τραχύτητα των αδιαπέρατων και των περατών επιφανειών (N-imp και N-perv), το ποσοστό αδιαπερατότητας (% imper), ο αριθμός καμπύλης CN και οι κλίσεις του εδάφους (S).

Τέλος, η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε σε μοντέλο προσομοίωσης της Ζώνης Δ του παντοροϊκού συστήματος αποχέτευσης των Αθηνών (Κούρτης, 2016) καταλήγει ότι το μοντέλο είναι περισσότερο ευαίσθητο στις παραμέτρους του συντελεστή τραχύτητας Manning (n-con) στους αγωγούς, του πλάτους (Width), της κλίσης της υπολεκάνης (S) και του Routing Time της προσομοίωσης.

Από τα παραπάνω, φαίνεται πως, αν και τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας διαφέρουν ανάλογα με την εξεταζόμενη περιοχή, στις περισσότερες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε αστικές περιοχές, το SWMM είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε παραμέτρους όπως η επιφανειακή συγκράτηση αδιαπέρατου τμήματος, το ποσοστό αδιαπερατότητας, τον συντελεστή τραχύτητας Manning του αδιαπέρατου τμήματος και των αγωγών του εκάστοτε δικτύου. Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 1.4.3, η διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας αποτελεί συχνά εργαλείο επιλογής των παραμέτρων που θα ληφθούν υπόψιν στη βαθμονόμηση του εκάστοτε μοντέλου. Γενικότερα, η επιλογή των παραμέτρων που θα ληφθούν υπόψιν για τη βαθμονόμηση ενός μοντέλου στο SWMM, εξαρτάται από τα διαθέσιμα δεδομένα και το αντικείμενο της μελέτης κάθε φορά (Tsihrintzis and Hamid, 1998).

## 2.7 ΔΙΗΘΗΣΗ

Διήθηση είναι η φυσική διεργασία της εισόδου και κίνησης του νερού στο έδαφος. Ο ρυθμός διήθησης επηρεάζει το χρόνο έναρξης της επιφανειακής απορροής σε μια βροχή ή καταιγίδα (Τσακίρης, 2013).

Το υπολογιστικό σχήμα που ακολουθεί το SWMM περιγράφεται ως εξής (Rossman and Huben, 2016):

Αρχικά, θεωρούνται γνωστές οι τιμές των παρακάτω μεταβλητών που αφορούν το περατό τμήμα της κάθε υπολεκάνης στην αρχή κάθε χρονικού βήματος της προσομοίωσης :

$i$  : ένταση βροχής κατά το τρέχον χρονικό βήμα (in/hr)

$d$  : βάθος λιμνάζοντος νερού στην επιφάνεια (in)

$P_i$  : αθροιστικό ύψος βροχής για το τρέχον επεισόδιο βροχής (in)

$S_e$  : ικανότητα αποθήκευσης εδαφικής υγρασίας στην αρχή του τρέχοντος επεισοδίου βροχής (in)

$S$  : εναπομένουσα ικανότητα αποθήκευσης εδαφικής υγρασίας (in)

$F_1$  : αθροιστικό ύψος διήθησης

$T$  : χρόνος από το τελευταίο επεισόδιο βροχής (hr)

Αντίστοιχα θεωρούνται γνωστές και οι ακόλουθες σταθερές:

$S_{\max}$  : μέγιστη ικανότητα αποθήκευσης υγρασίας όπως υπολογίζεται από τον αριθμό CN (in)

$k_r$  : σταθερά αναπλήρωσης της αποθηκευτικής ικανότητας ( $\text{hr}^{-1}$ )

$T_r$  : ελάχιστος χρόνος αναπλήρωσης πριν την εμφάνιση νέου επεισοδίου βροχής (hr)

Τη χρονική στιγμή 0,  $P_1 = 0$  ,  $S_e = S = S_{\max}$  ,  $F_1 = 0$  και  $T = T_r$  .

Τα υπολογιστικά βήματα για τον υπολογισμό του ρυθμού διήθησης  $f$  για κάθε υπολεκάνη σε κάθε υπολογιστικό βήμα της προσομοίωσης είναι τα εξής:

1. Αν υπάρχει βροχόπτωση ( $i > 0$ ) τότε:

α) Αν ένα νέο επεισόδιο βροχής έχει ξεκινήσει ( $T \geq T_r$ ) τότε επαναφέρονται οι τιμές των μεταβλητών:  $P_1 = 0$  ,  $F_1 = 0$  και  $S_e = S$  .

β) Επαναφορά του χρόνου από τη προηγούμενο επεισόδιο βροχόπτωσης:  $T = 0$

γ) Υπολογίζεται η αθροιστική βροχόπτωση ( $P_2$ ) και διήθηση ( $F_2$ ) στο τέλος του χρονικού βήματος από τις Εξισώσεις 2.9 και 2.10 αντίστοιχα:

$$P_2 = P_1 + i\Delta t \quad (2.9)$$

$$F_2 = P_2 - \frac{P_2^2}{P_2 + S_e} \quad (2.10)$$

δ) Υπολογίζεται ο ρυθμός δυναμικής διήθησης από της Εξίσωση 2.11:

$$f_p = (F_2 - F_1)\Delta t \quad (2.11)$$

ε) Ανανέωση της αθροιστικής βροχόπτωσης και διήθησης (Εξισώσεις 2.12 και 2.13):

$$P_1 = P_2 \quad (2.12)$$

$$F_1 = F_2 \quad (2.13)$$

2. Αν δεν υπάρχει βροχόπτωση, τότε αυξάνεται ο χρόνος μεταξύ των γεγονότων βροχόπτωσης ( $T \leftarrow T + \Delta t$ ) και τίθεται ο ρυθμός δυνητικής διήθησης ίσος με το ρυθμό της προηγούμενης περιόδου ( $f_p = f$ ).

3. Αν υπάρχει δυνητική διήθηση ( $f_p > 0$ ) τότε:

α) Περιορίζεται ο πραγματικός ρυθμός διήθησης στο μέγιστο δυνατό ρυθμό (Εξίσωση 2.14):

$$f = \min[f_p, i + d / \Delta t] \quad (2.14)$$

β) Μειώνεται η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας (Εξίσωση 2.15):

$$S \leftarrow \max[S - f \Delta t, 0] \quad (2.15)$$

4. Διαφορετικά, ξανατίθεται η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας (Εξίσωση 2.16):

$$S \leftarrow \min[S + k_r S_{\max} \Delta t, S_{\max}] \quad (2.16)$$

Η σταθερά αναπλήρωσης της αποθηκευτικής ικανότητας υπολογίζεται από την Εξίσωση 2.17:

$$k_r = \frac{1}{24T_{dry}} \quad (2.17)$$

Όπου  $T_{dry}$  ο χρόνος που απαιτείται ώστε ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος να έρθει σε ξηρή κατάσταση.

Το SWMM δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει οποιαδήποτε μέθοδο από τις παρακάτω: μοντέλο Horton, μοντέλο Green-Ampt, μέθοδος της SCS. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος της SCS. Με βάση τη μοντελοποίηση της μεθόδου από το SWMM ο χρήστης καλείται να εισάγει δύο παραμέτρους: α) Τον αριθμό CN και β) Το χρόνο ξήρανσης, το χρόνο, δηλαδή, που απαιτείται ώστε ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος να επανέλθει σε ξηρή κατάσταση (Κούρτης, 2016).

Ο αριθμός CN για την κάθε υπολεκάνη προέκυψε από τα δεδομένα του Πίνακα 2.3 των Σχεδίων Διαχείρισης Πλημμύρας του ΥΠΕΚΑ και αφορά τιμές της καμπύλης CN για μέσες προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας και περιλαμβάνει τις κατηγορίες γεωργικών γαιών της SCS που απαντώνται συχνότερα στην ελληνική γη. Οι τιμές του χρόνου ξήρανσης, υπολογίζονται με βάση τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, που καθορίζονται από τον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Αριθμοί καμπύλης απορροής CN για μέσες προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας, CN<sub>II</sub> ([www.floods.ypeka.gr](http://www.floods.ypeka.gr)).

| Περιγραφή Χρήσης γης   | Υδρολογική Κατάσταση   | Υδρολογικός Τύπος Εδάφους |    |    |    |
|--|--|---------------------------|----|----|----|
|  |  | A                         | B  | C  | D  |
| Γυμνό Έδαφος   |  | 77                        | 86 | 91 | 94 |
| Ευρείες γραμμικές καλλιέργειες σε κεκλιμένο έδαφος   | Φτωχή  | 72                        | 81 | 88 | 91 |
|  | Καλή   | 67                        | 78 | 85 | 89 |
| Ευρείες γραμμικές καλλιέργειες σε βαθμίδες   | Φτωχή  | 66                        | 74 | 80 | 82 |
|  | Καλή   | 62                        | 71 | 78 | 81 |
| Καλλιέργειες σιτηρών σε κεκλιμένο έδαφος   | Φτωχή  | 65                        | 76 | 84 | 88 |
|  | Καλή   | 63                        | 75 | 83 | 87 |
| Καλλιέργειες σιτηρών σε βαθμίδες   | Φτωχή  | 61                        | 72 | 79 | 82 |
|  | Καλή   | 59                        | 70 | 78 | 81 |
| Πυκνές καλλιέργειες ψυχανθών σε κεκλιμένο έδαφος   | Φτωχή  | 66                        | 77 | 85 | 89 |
|  | Καλή   | 58                        | 72 | 81 | 85 |
| Πυκνές καλλιέργειες ψυχανθών σε βαθμίδες   | Φτωχή  | 63                        | 73 | 80 | 83 |
|  | Καλή   | 51                        | 67 | 76 | 80 |
| Χορτολιβαδικές εκτάσεις  | Φτωχή  | 68                        | 79 | 86 | 89 |
|  | Μέτρια   | 49                        | 69 | 79 | 84 |
|  | Καλή   | 39                        | 61 | 74 | 80 |
| Θάμνοι – υψηλές πόες - θάμνοι με υποβλάστηση αγρωστωδών και άλλων ποών   | Φτωχή  | 48                        | 67 | 77 | 83 |
|  | Μέτρια   | 35                        | 56 | 70 | 77 |
|  | Καλή   | 30                        | 48 | 65 | 73 |
| Δενδρόκηποι ή Δενδροκαλλιέργειες   | Φτωχή  | 57                        | 73 | 82 | 86 |
|  | Μέτρια   | 43                        | 65 | 76 | 82 |
|  | Καλή   | 35                        | 58 | 72 | 79 |
| Δάση   | Φτωχή  | 45                        | 66 | 77 | 83 |
|  | Μέτρια   | 36                        | 60 | 73 | 79 |
|  | Καλή   | 30                        | 55 | 70 | 77 |
| Δρόμοι   |  |                           |    |    |    |
| Χωματόδρομοι   |  | 72                        | 82 | 87 | 89 |
| Χαλικόστρωτοι  |  | 76                        | 85 | 89 | 91 |
| <p>Αστικές περιοχές</p> <p>Με μέσο μέγεθος οικοπέδων &lt;0,5στρ και ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας 65%</p> <p>Με μέσο μέγεθος οικοπέδων 1 στρ και ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας 40%</p> | <p>Για τις αστικές περιοχές ο αριθμός καμπύλης προκύπτει από το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών. Οι διαπερατές επιφάνειες θεωρούνται ισοδύναμες με τις χορτολιβαδικές σε καλή κατάσταση και ο αριθμός καμπύλης προκύπτει από την εξίσωση:</p> $CN = CN_p + \left(\frac{P_i}{100}\right)(98 - CN_p)$ <p>Όπου:</p> <p>CN<sub>p</sub>: Ο αριθμός καμπύλης χορτολιβαδικής έκτασης σε καλή κατάσταση.</p> <p>P<sub>i</sub>: Το ποσοστό % των αδιαπέρατων επιφανειών.</p> |                           |    |    |    |
| Εμποροβιομηχανικές ζώνες   |  |                           |    |    |    |
| Αδιαπέρατες επιφάνειες (καλυμμένες επιφάνειες με άσφαλτο ή σκυρόδεμα)  |  |                           |    |    |    |

Πίνακας 2.5: Υδραυλική Αγωγιμότητα ανά τύπο εδάφους (Rossman and Huber, 2016).

| Τύπος Εδάφους           | Ks (in/h) |
|-------------------------|-----------|
| Άμμος                   | 4.74      |
| Πηλώδης Άμμος           | 1.18      |
| Αμμώδης Πηλός           | 0.43      |
| Πηλός                   | 0.13      |
| Ιλυώδης Πηλός           | 0.26      |
| Αμμώδης Αργιλικός Πηλός | 0.06      |
| Αργιλώδης Πηλός         | 0.04      |
| Ιλυώδης Αργιλικός Πηλός | 0.04      |
| Αμμώδης Άργιλος         | 0.02      |
| Ιλυώδης Άργιλος         | 0.02      |
| Άργιλος                 | 0.01      |

## 2.8 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

### 2.8.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Όπως αναφέραμε στην Παράγραφο 2.2 το εννοιολογικό μοντέλο του SWMM συμπληρώνεται (πέρα από την ατμόσφαιρα, την επιφάνεια του εδάφους και τους υπόγειους υδροφορείς) με το σύστημα μεταφοράς που αφορά τη διόδευση της επιφανειακής απορροής από τα σημεία εισόδου της στο σύστημα αποχέτευσης στις εξόδους του ή στις μονάδες επεξεργασίας. Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε τα βασικά στοιχεία του συστήματος μεταφοράς καθώς και τις μεθόδους διόδευσης που διαθέτει το SWMM για τις ανάγκες της προσομοίωσης (Rossman and Huber, 2017).

Τα βασικότερα στοιχεία που συνθέτουν το αποχετευτικό δίκτυο στην προσομοίωση με το SWMM είναι οι κόμβοι (junctions) και οι σύνδεσμοι (links).

Οι κόμβοι αναπαριστούν τα σημεία συμβολής των φυσικών ανοιχτών καναλιών, καθώς και τα φρεάτια επίσκεψης και τα σημεία σύνδεσης των αγωγών του δικτύου. Περίσσεια νερού σε έναν κόμβο μπορεί να προκαλέσει συνθήκες ροής υπό πίεση με αποτέλεσμα είτε την απώλεια νερού από το δίκτυο είτε τη λίμνασή του πάνω από τον κόμβο και στη συνέχεια την αποστράγγισή του και πάλι από αυτόν (Rossman and Huber, 2017).

Οι κύριες παράμετροι εισόδου που πρέπει να ορισθούν σε κάθε κόμβο είναι (Rossman and Huber, 2017):

- Το υψόμετρο πυθμένα
- Την υψομετρική διαφορά μεταξύ του πυθμένα και της επιφάνειας του εδάφους
- Το πρόσθετο ύψος πίεσης μέχρι την εμφάνιση πλημμύρα
- Την επιφάνεια λίμνασης σε περίπτωση πλημμύρας

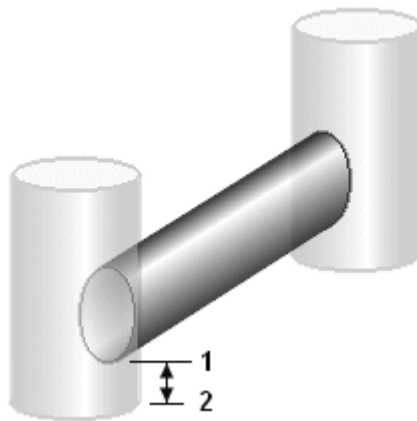
Εκτός από τους κόμβους του δικτύου, στο SWMM εισάγονται και οι κόμβοι εκβολής (outfall nodes) του αποχετευτικού συστήματος. Οι κύριες παράμετροι που εισάγονται στους κόμβους εκβολής είναι (Rossman and Huber, 2017):

- Το υψόμετρο πυθμένα
- Οι οριακές συνθήκες ροή και τα αντίστοιχα δεδομένα υψομέτρου
- Η παρουσία ή όχι θυροφράγματος για την αποτροπή ανάστροφης ροής

Εκτός από τους κόμβους του αποχετευτικού συστήματος και τους κόμβους εκβολής το λογισμικό SWMM διαθέτει ως αντικείμενα σημείων τους διαχωριστές ροής και της μονάδες αποθήκευσης νερού.

Ως προς του συνδέσμους, η βασικότερη κατηγορία αφορά τους αγωγούς (conduits) οι οποίοι αφορούν αγωγούς ή κανάλια που εξυπηρετούν τη μεταφορά νερού από κόμβο σε κόμβο. Το σχήμα της διατομής τους μπορεί να επιλεγεί από μια λίστα διαθέσιμων από το λογισμικό διατομών ή να εισαχθεί από το χρήστη. Στον κάθε αγωγό εισάγονται οι εξής παράμετροι (Rossman and Huber, 2017):

- Οι ονομασίες των κόμβων εισόδου και εξόδου στα άκρα του αγωγού
- Τα μετατοπισμένα σε σχέση με το υψόμετρο πυθμένα ύψη στους κόμβους εισόδου και εξόδου (Εικόνα 2.7)
- Το μήκος του αγωγού
- Ο συντελεστής τραχύτητας Manning του αγωγού
- Το σχήμα και οι ακριβείς διαστάσεις της διατομής



Εικόνα 2.7: Ύψος εισόδου και εξόδου στον αγωγό (υψόμετρο 1) από μετατόπιση του υψομέτρου του πυθμένα (υψόμετρο 2)

Σημειώνεται, πως παρότι η κλίση του αγωγού δεν εισάγεται ως παράμετρος από το χρήστη, λαμβάνεται υπόψιν στους υδραυλικούς υπολογισμούς, και ο υπολογισμός της γίνεται από το λογισμικό με βάση το μήκος του αγωγού και την υψομετρική διαφορά των σημείων εισόδου και εξόδου (Rossman and Huber, 2017).

Εκτός από τους αγωγούς στο SWMM μπορούν να εισαχθούν ως αντικείμενα συνδέσμων οι αντλίες και οι ρυθμιστές ροής.

## 2.8.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Το SWMM επιλύει τις μονοδιάστατες εξισώσεις βαθμιαία μεταβαλλόμενης μη μόνιμης ροής μέσω ενός δικτύου κόμβων-συνδέσμων για να προσδιορίσει το βάθος ροής σε κάθε κόμβο και την παροχή και το βάθος ροής σε κάθε αγωγό σε κάθε χρονικό βήμα της περιόδου προσομοίωσης. Η διόδευση των υδρογραφημάτων εισόδου διαμέσου των αγωγών συνοδεύεται από διεργασίες διάχυσης, μετάθεσης ή επιτάχυνσης της παροχής αιχμής και

πτώση ή αύξησή της. Αυτά τα χαρακτηριστικά του κύματος συνιστούν τις υδραυλικές διεργασίες της διόδευσης της ροής και επηρεάζονται ιδιαίτερα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών, καθώς και από τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες (Rossman and Huber, 2017).

Οι υδραυλικές διεργασίες της μη μόνιμης ροής αναπαρίστανται στο SWMM με τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ορμής, τις γνωστές ως εξισώσεις St. Venant. Η επίλυση των εξισώσεων μπορεί να γίνει είτε με τη μέθοδο του κινηματικού κύματος είτε με τη μέθοδο του δυναμικού κύματος. Κατά την ανάλυση δυναμικού κύματος επιλύονται οι πλήρεις εξισώσεις St. Venant σε αντίθεση με την ανάλυση κινηματικού κύματος κατά την οποία οι εξισώσεις επιλύονται σε απλοποιημένη μορφή. Συγκεκριμένα, στην ανάλυση με τη μέθοδο του κινηματικού κύματος αγνοούνται οι δυνάμεις αδρανείας και οι δυνάμεις πίεσης και λαμβάνονται υπόψη μόνο οι δυνάμεις βαρύτητας για τους υπολογισμούς. Σε αντίθεση με το κινηματικό κύμα, η ανάλυση δυναμικού κύματος μπορεί να συμπεριλάβει διεργασίες όπως η αποθήκευση νερού, τα φαινόμενα ανάστροφης ροής, οι απώλειες στην είσοδο και την έξοδο, η ροή υπό πίεση. Πρόκειται βέβαια για μια μέθοδο με περισσότερες υπολογιστικές απαιτήσεις σε σχέση με αυτή του κινηματικού κύματος, αφού απαιτεί μικρότερο υπολογιστικό βήμα (Rossman and Huber, 2017).

Οι εξισώσεις St. Venant, εξίσωση συνέχειας και εξίσωση ορμής, είναι οι Εξισώσεις 2.18 και 2.19 (Rossman and Huber, 2017):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2 / A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2.19)$$

Όπου:

$x$  : η απόσταση (m)

$t$  : ο χρόνος (sec)

$A$  : Εμβαδό υγρής διατομής (m<sup>2</sup>)

$Q$ : Παροχή (m<sup>3</sup>/s)

$H$  : το υδραυλικό ύψος νερού ( $Z + Y$ ) (m)

$Z$  : το υψόμετρο πυθμένα του αγωγού (m)

$Y$  : το βάθος ροής (m)

$S_f$  : η κλίση της γραμμής ενέργειας (απώλειες ανά μονάδα μήκους)

$g$  : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s<sup>2</sup>)

Η κλίση της γραμμής ενέργειας εκφράζεται από τον τύπο του Manning όπως στην Εξίσωση 2.20 (Rossman and Huber, 2017):



$$S_f = n^2 \frac{Q|U|}{AR^{4/3}} \quad (2.20)$$

Όπου:

$n$  : ο συντελεστής Manning

$R$  : η υδραυλική ακτίνα της διατομής (m)

$U$  : η ταχύτητα ροής (m/s)

Για την εφαρμογή των ανωτέρω εξισώσεων απαιτούνται οι παρακάτω παραδοχές (Rossman and Huber, 2017):

α) Η ροή είναι μονοδιάστατη

β) Υδροστατική κατανομή των πιέσεων

γ) Μικρή κλίση πυθμένα (ώστε το κατακόρυφο και το εγκάρσιο βάθος ροής να έχουν σχεδόν ίδια τιμή)

δ) Η οριακή τριβή να μπορεί να περιγραφεί με τον ίδιο τρόπο όπως στη μόνιμη ροή

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 3.1 ΤΟ ΑΠΟΧΕΤΕΥΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΟΥ ΛΕΚΑΝΟΠΕΔΙΟΥ ΑΤΤΙΚΗΣ

#### 3.1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η αποχέτευση του Λεκανοπεδίου Αττικής πραγματοποιείται με δίκτυο πρωτεύοντων και δευτερευόντων αγωγών ακαθάρτων, οι οποίοι συλλέγουν και μεταφέρουν τα λύματα στη θαλάσσια περιοχή της Ψυττάλειας, αφού προηγηθεί ο βιολογικός καθαρισμός τους στο Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Ψυττάλειας (ΚΕΛΨ).

Το αποχετευτικό δίκτυο ακαθάρτων του Λεκανοπεδίου είναι χωριστικό εκτός από το κέντρο της Αθήνας – από το Γαλάτσι έως την Πλάκα - όπου το δίκτυο είναι παντορροϊκό (μήκος 88 χλμ.) σε ορισμένα σημεία του. Το μεγαλύτερο τμήμα του δικτύου αποχέτευσης ακαθάρτων λειτουργεί με βαρύτητα, καθώς η γεωμορφολογία του εδάφους επιτρέπει αυτή τη λειτουργία. Για τις περιοχές που βρίσκονται χαμηλά, δηλαδή για τις περιοχές που εκτείνονται στο παραλιακό μέτωπο του Σαρωνικού, χρησιμοποιούνται 51 αντλιοστάσια. Τα αντλιοστάσια λειτουργούν με αυτόματες ηλεκτροκίνητες αντλίες, ενώ ο έλεγχος της λειτουργίας τους γίνεται μέσω Συστήματος Τηλεέλεγχου – Τηλεχειρισμού ([www.eydap.gr](http://www.eydap.gr)).

Οι κύριες συνιστώσες του αποχετευτικού συστήματος του Λεκανοπεδίου είναι ([www.eydap.gr](http://www.eydap.gr)):

α) Κεντρικός Αποχετευτικός Αγωγός (ΚΑΑ): Πρόκειται για παντορροϊκό αγωγό, ο οποίος εκτείνεται από το τέρμα της οδού Πατησίων μέχρι τον Ακροκέραμο Κερασινίου. Τα όμβρια και ακάθαρτα ύδατα που μεταφέρει ωθούνται με δίδυμο υποθαλάσσιο αγωγό προς το ΚΕΛΨ για επεξεργασία. Ολοκληρώθηκε το 1959. Έχει μήκος 17 km και στην εκβολή του έχει παροχετευτική ικανότητα 15 m<sup>3</sup>/s.

β) Συμπληρωματικός Κεντρικός Αποχετευτικός Αγωγός (ΣΚΑΑ): Κατασκευάστηκε τη δεκαετία του 1980. Αρχίζει από τον Αγ. Ιωάννη Ρέντη και απολήγει στον Ακροκέραμο. Είναι κυκλικός αγωγός από οπλισμένο σκυρόδεμα, μήκους 7 km και παροχετευτικότητας 15 m<sup>3</sup>/s.

γ) Παρακηφίσιος Συλλεκτής Ακαθάρτων: Ξεκινά από τον από την περιοχή του Αγ. Στεφάνου και καταλήγει στον ΚΑΑ, στο ύψος του Αγ. Ιωάννη Ρέντη. Το μήκος του φτάνει τα 34.5 km, ενώ η παροχετευτική του ικανότητα στην εκβολή είναι 20.2 m<sup>3</sup>/s.

δ) Κεντρικός Παραλιακός Συλλεκτής: Ξεκινά από τη Βάρκιζα και καταλήγει στο Αντλιοστάσιο 29 (περιοχή Αμφιθέας). Έχει μήκος 17 km και μέγιστη παροχή 2.5 m<sup>3</sup>/s.

Όσο αφορά την επεξεργασία των λυμάτων του λεκανοπεδίου της Αττικής, αυτή διεξάγεται μέσω του ολοκληρωμένου συστήματος επεξεργασίας νερού στη Μεταμόρφωση Αττικής, στη νήσο Ψυττάλεια και στο Θριάσιο Πεδίο ([www.eydap.gr](http://www.eydap.gr)):

α) Το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Μεταμόρφωσης (ΚΕΛΜ) αποτελεί την κυριότερη εγκατάσταση υποδοχής και επεξεργασίας οικιακών βοθρολυμάτων στο Νομό Αττικής, εξυπηρετώντας Δήμους και Κοινότητες που στερούνται αποχετευτικού δικτύου. Η εγκατάσταση έχει δυναμικότητα επεξεργασίας 24,000 m<sup>3</sup> βοθρολυμάτων και 20,000 m<sup>3</sup> αστικών λυμάτων ημερησίως.

β) Το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Ψυττάλειας (ΚΕΛΨ) λειτουργεί από το 1994 και σήμερα είναι σε πλήρη λειτουργία. Η επεξεργασία λυμάτων στο ΚΕΛΨ περιλαμβάνει προεπεξεργασία, πρωτοβάθμια επεξεργασία και προχωρημένη δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία με απομάκρυνση αζώτου, επεξεργασία ιλύος και συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

Πρόκειται για ένα από τα μεγαλύτερα ΚΕΛ στην Ευρώπη και διεθνώς, με δυναμικότητα κάλυψης πληθυσμού 5,600,000 κατοίκων. Η μέση παροχή των εισερχόμενων λυμάτων είναι της τάξεως των 730,000 m<sup>3</sup> ημερησίως.

γ) Το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων του Θριασίου Πεδίου (ΚΕΛΘ) λειτουργεί από το 2012 και επεξεργάζεται τα λύματα της ευρύτερης περιοχής που είναι οι περιοχές: του Ασπροπύργου, της Ελευσίνας, της Μάνδρας και της Μαγούλας καθώς και οι γύρω από αυτές βιομηχανικές και βιοτεχνικές περιοχές. Η εγκατάσταση έχει δυναμικότητα επεξεργασίας (στην πρώτη φάση) 21,000 m<sup>3</sup> λυμάτων ημερησίως.

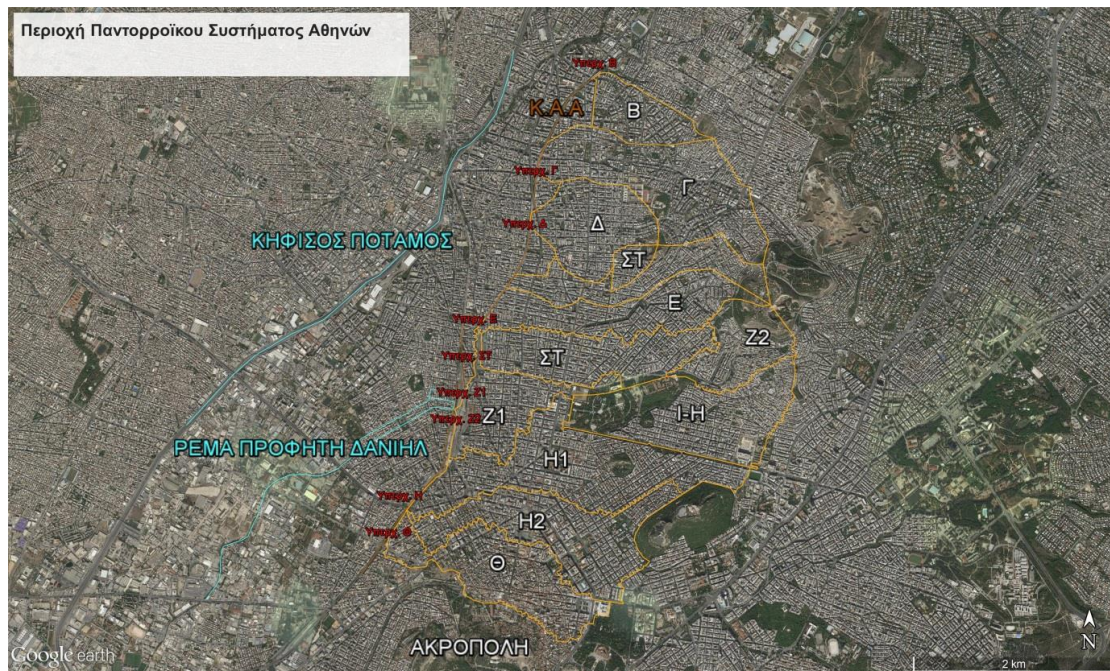
### 3.1.2 ΠΑΝΤΟΡΡΟΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ ΑΘΗΝΩΝ

Το παντορροϊκό σύστημα της Αθήνας είναι ένα σύνολο αγωγών και εγκαταστάσεων για την κοινή απορροή των ομβρίων και ακαθάρτων υδάτων κυρίως των κεντρικών περιοχών της πόλης. Η όλη περιοχή του παντορροϊκού δικτύου της Αθήνας έχει έκταση περίπου 850 εκτάρια ή 8.5 km<sup>2</sup> και εκτείνεται χονδρικά από την Αγ. Βαρβάρα (Πατήσια) μέχρι την περιοχή Πλάκας-Ζάππειου και από τις υπώρειες του Γκύζη μέχρι τον σταθμό Αττικής και περιοχή Κολωνού.

Η λεκάνη απορροής του κεντρικού Παντορροϊκού συστήματος της Αθήνας, χωρίζεται στις εξής υπολεκάνες ή Ζώνες: Β, Γ, Δ, Ε, ΣΤ, Ζ1, Ζ2, Η1, Η2 και Θ (Εικόνα 3.1). Η έκταση της λεκάνης απορροής ομβρίων της περιοχής αυτής είναι 1,310 ha ενώ των ακαθάρτων υδάτων ανέρχεται σε 1,250 ha περίπου. Κορμός απορροής του όλου συστήματος είναι ο αγωγός Κ.Α.Α. στον οποίο εντάχθηκαν εννέα υπερχειλιστές (από τους οποίους δεν έχει κατασκευαστεί ο υπερχειλιστής Η). Στα φρεάτια των υπερχειλιστών γίνεται ο διαχωρισμός απορροής των ακαθάρτων, που συνεχίζουν στον Κ.Α.Α., και των ομβρίων που παραλαμβάνονται μέσω υπερχείλισης και διοχετεύονται στους αντίστοιχους αγωγούς υπερχείλισης Β, Γ, Δ, Ε, ΣΤ, Ζ1 και Ζ2.

Σε περίοδο βροχής και όταν η απορροή των ομβρίων που μεταφέρεται από τους παντορροϊκούς συλλεκτήρες μαζί με τα λύματα της κάθε ζώνης, δεν ξεπερνά ένα όριο, το σύνολο της μικτής αυτής παροχής παροχετεύεται από τον Κ.Α.Α. που λειτουργεί και αυτός σαν παντορροϊκός συλλεκτήρας (οι διατομές του είναι πολύ μεγαλύτερες από τις απαιτούμενες για την παροχέτευση μόνο των λυμάτων).

Αποδέκτες των αγωγών υπερχείλισης των ομβρίων είναι ο ποταμός Κηφισός, όπου εκβάλλουν οι αγωγοί υπερχείλισης των βόρειων ζωνών (από τους Υπερχειλιστές Β ως ΣΤ), και το ρέμα του Προφ. Δανιήλ, για τις χαμηλές ζώνες (από Υπερχειλιστές Ζ1 ως Ζ2). Στο ρέμα αυτό είχε προβλεφθεί και η εκβολή του αγωγού υπερχείλισης Θ. Το ρέμα Πρ. Δανιήλ εκβάλλει στον Κηφισό.



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση παντοροϊκού συστήματος Αθηνών (Κούρτης, 2016)

### 3.1.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ

Τα ελληνικά δίκτυα αποχέτευσης κατασκευάζονται σύμφωνα με το πλαίσιο που ορίζεται από το ΠΔ 696/1974 "Περί αμοιβών μηχανικών δια σύνταξιν μελετών, επίβλεψιν, παραλαβήν κλπ. Συγκοινωνιακών, Υδραυλικών και κτιριακών Έργων, ως και Τοπογραφικών Κτηματογραφικών και Χαρτογραφικών Εργασιών και σχετικών τεχνικών προδιαγραφών μελετών".

Με βάση την παράγραφο 5 του άρθρου 208 του ΠΔ 696/1974 ορίζεται για τα δίκτυα ακαθάρτων πως θα πρέπει να αποτελούν δίκτυα με ελεύθερη επιφάνεια, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ο αερισμός των υδάτων. Επιπλέον, ο καθορισμός των μέγιστων ποσοστών πλήρωσης αποτρέπει την εμφάνιση ασταθειών ροής καθώς και τον κίνδυνο λειτουργίας των αγωγών υπό πίεση και τη συνεπακόλουθη αναστροφή της ροής προς τις ιδιωτικές συνδέσεις. Τα μέγιστα επιτρεπόμενα ποσοστά πλήρωσης των διατομών είναι τα εξής:

- α) 50% για κυκλικές διατομές με διάμετρο μικρότερη των 40 cm
- β) 60% για κυκλικές διατομές με διάμετρο 50-60 cm
- γ) 70% για κυκλικές διατομές με διάμετρο μεγαλύτερη από 60 cm
- δ) 80% για υφιστάμενους αγωγούς

Ως ελάχιστη διάμετρος κυκλικών αγωγών ορίζεται αυτή των 20 cm, ενώ ως ελάχιστη ωοειδής διατομή η διατομή 60/90 cm.

Ορίζεται, επίσης, πως η ελάχιστη επιτρεπόμενη κλίση, είναι τέτοια ώστε για παροχή ίση με το 1/10 της παροχетеυτικότητας πλήρους διατομής να τηρείται η ελάχιστη ταχύτητα αυτοκαθαρισμού 0.30 m/s. Τέλος, ορίζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα ροής στους αγωγούς ίση με 6 m/s.

Σημειώνεται εδώ πως στη διεθνή βιβλιογραφία ασφαλής τιμή για τη μέγιστη ταχύτητα ροής θεωρείται η ταχύτητα των 3.0 m/s, που δεν προκαλεί διάβρωση σε συνήθη υλικά κατασκευής

υπονόμων. Πέραν της αποφυγής της διάβρωσης, ο καθορισμός μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας αποτρέπει την εμφάνιση υπερκρίσιμης ροής και των προβλημάτων που συνδέονται με αυτή, τα οποία είναι (Κουτσογιάννης, 2011):

-μεγάλο ύψος κινητικής ενέργειας με κίνδυνο εμφάνισης ανάστροφων ροών στις συμβολές δευτερευόντων αγωγών και τις ιδιωτικές συνδέσεις,

-εμφάνιση υδραυλικών αλμάτων όταν μικραίνει η κλίση των αγωγών με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο κίνδυνος διάβρωσης των αγωγών και να εμφανίζονται σημαντικές τοπικές απώλειες ενέργειας,

- αστάθειες ροής στους κόμβους και τις ιδιωτικές συνδέσεις, όπως ανάπτυξη στάσιμων κυμάτων στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα να μην είναι προβλέψιμη η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας και οι απώλειες ενέργειας.

Αντίστοιχα στην παράγραφο 10 του ΠΔ ορίζονται οι προδιαγραφές για τα δίκτυα ομβρίων.

Ως ελάχιστη διάμετρος κυκλικών αγωγών ομβρίων ορίζεται αυτή των 40 cm, ως μέγιστο ποσοστό πλήρωσης το 70% της διατομής, ελάχιστη επιτρεπόμενη κλίση τέτοια ώστε για το 1/10 της παροχετευτικότητας πλήρους διατομής να τηρείται η ελάχιστη ταχύτητα αυτοκαθαρισμού 0.60 m/s και η μέγιστη ταχύτητα ροής ίση με 6 m/s, για την οποία επισημαίνεται ότι εξαρτάται από το είδος του αγωγού, τη στερεοπαροχή και των ειδικών συνθηκών υπό τις οποίες αυτός τελεί.

### **3.2 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση τμήματος του παντοροϊκού δικτύου των Αθηνών. Συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης είναι η ανάντη περιοχή της ζώνης Ζ2 του παντοροϊκού δικτύου των Αθηνών.

Πρόκειται, για περιοχή της Νέας Κυψέλης, που ανήκει διοικητικά στο Δήμο Αθηναίων, και περιλαμβάνει την έκταση ανάμεσα στον οικισμό Γεωργίου Παπανδρέου και το Πρωτοδικείο Αθηνών. Στην περιοχή μελέτης εκτείνεται τμήμα του Αττικού άλσους. Συνορεύει βόρεια με το Δήμο Γαλασίου, ανατολικά με την Κυψέλη, δυτικά με τη Νέα Φιλοθέη και νότια με την περιοχή Γκύζη και το Πεδίο του Άρεως. Η περιοχή αυτή, που ανήκει στην ευρύτερη περιοχή με την ονομασία «Τουρκοβούνια», διακρίνεται στην Εικόνα 3.2 εντός του πολυγώνου με κόκκινο χρώμα. Η έκταση που καταλαμβάνει η περιοχή υπολογίστηκε με τη χρήση του ArcMap σε 0.66917 km<sup>2</sup> ή 66.92 ha.

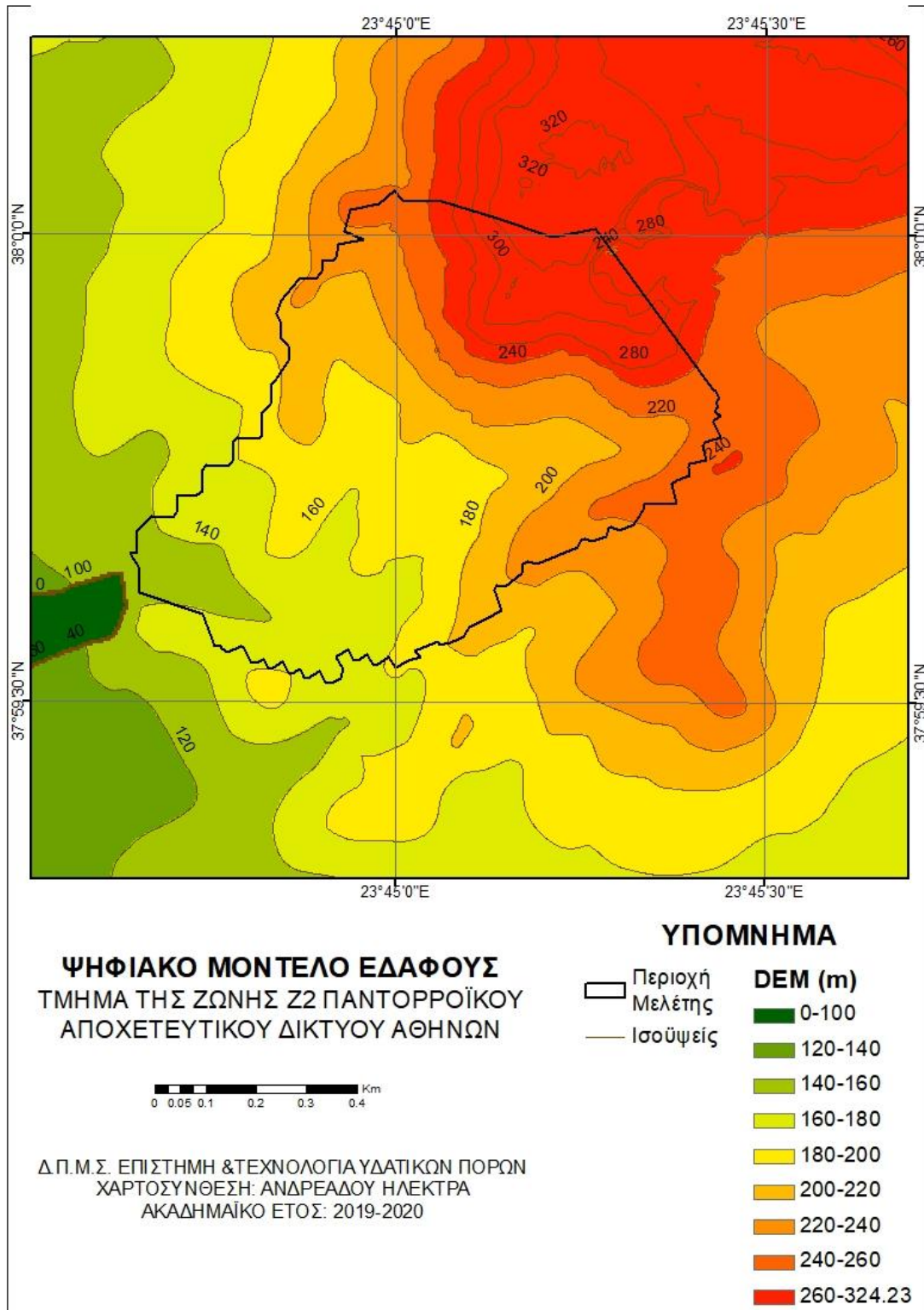
Η περιοχή ανήκει στην ευρύτερη περιοχή των Τουρκοβουνίων και περιλαμβάνει τη νότια πλευρά του λόφου στον οποίο βρίσκεται το Αττικό Άλσος. Το μέσο υψόμετρο της περιοχής μελέτης είναι 197.23 m, το μέγιστο υψόμετρο που συναντάται εντός της περιοχής είναι 320m, ενώ το ελάχιστο περίπου 130 m (Εικόνα 3.3). Οι κλίσεις εδάφους κυμαίνονται από μεγαλύτερες του 50% στα πιο ορεινά τμήματα έως και μικρότερες του 10% στα πιο πεδινά (Εικόνα 3.4). Οι κλίσεις του εδάφους στην περιοχή μελέτης, όπως αυτές φαίνονται στην Εικόνα 3.4, υπολογίστηκαν και χωρίστηκαν σε κλάσεις με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS της ESRI.





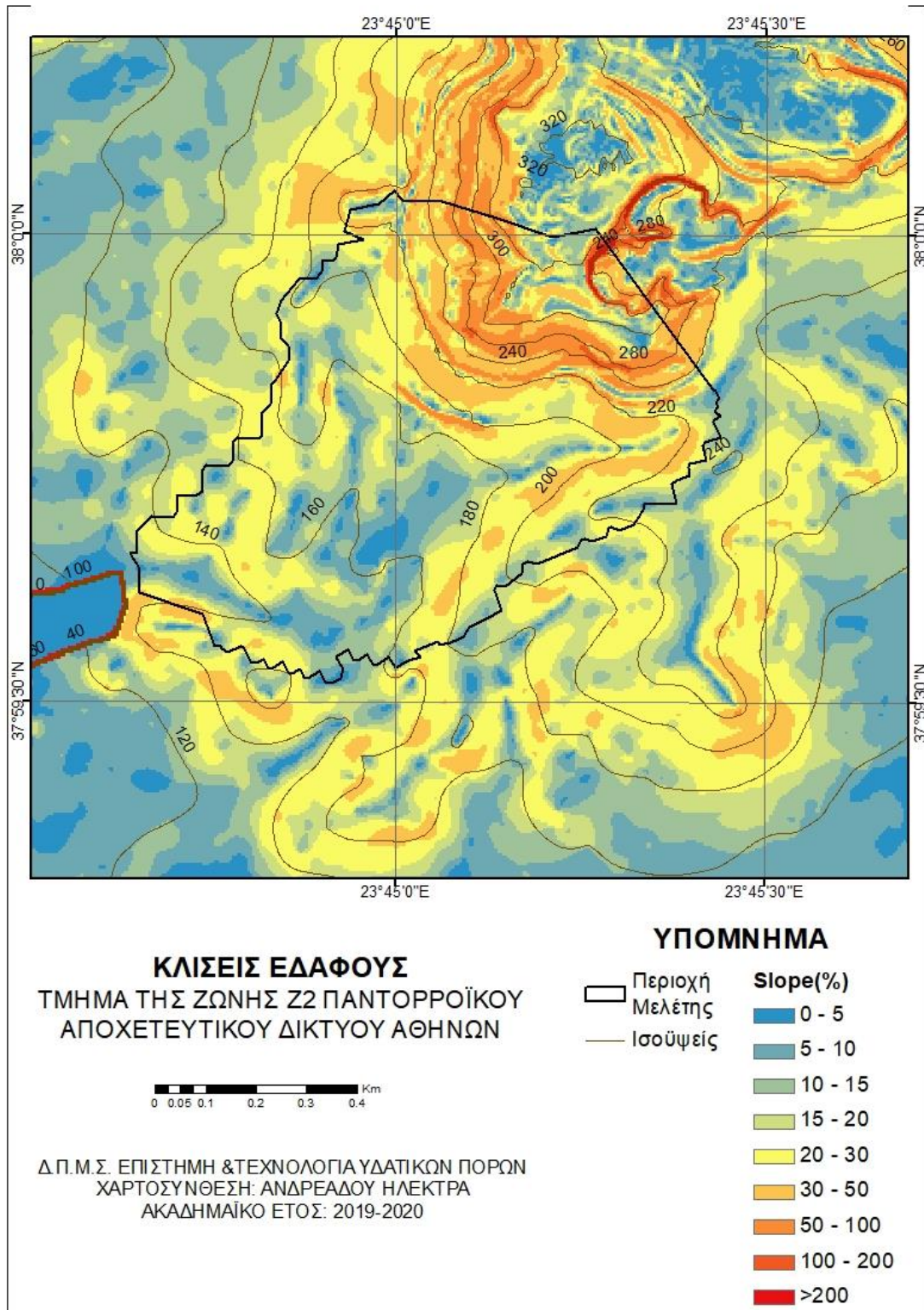
Εικόνα 3.2: Η περιοχή μελέτης.

Ως προς το γεωλογικό υπόβαθρο, με βάση τη Γεωλογική Γεωτεχνική Μελέτη Λεκανοπεδίου Αθηνών που εκπονήθηκε το Μάρτιο του 2002, στην περιοχή απαντώνται ανθρακικοί σχηματισμοί στο πιο ορεινό τμήμα και ασβεστόλιθοι και σχιστόλιθοι στο υπόλοιπο κομμάτι. Στις περιοχές με τις πιο ήπιες κλίσεις (κοντά στο Πολύγωνο) διακρίνονται πλευρικά κορήματα και ριπίδια (Εικόνα 3.5).



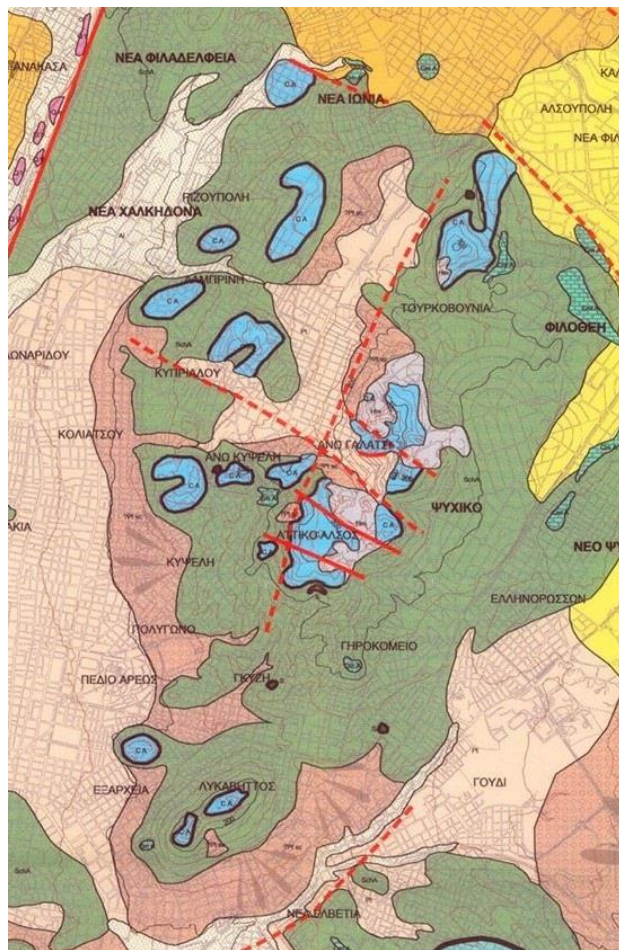
Εικόνα 3.3: Χάρτης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής μελέτης με ισούψεις.





Εικόνα 3.4: Χάρτης με τις κλίσεις εδάφους της περιοχής μελέτης.





## ΥΠΟΜΝΗΜΑ

### I. ΜΕΤΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

#### ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

- Ανθρωπογενείς αποθέσεις
- Αλλούβια
- Τεναγώδεις αποθέσεις
- Παράκτιες αποθέσεις
- Πλευρικά Κορήματα
- Διλυσιακές αποθέσεις
- Ποτάμιες Αναβαθμίδες
- Πλευρικά Κορήματα και ρητίδια (?Πλειστόκαινο)
- Ρητίδια (?Πλειόκαινο - Πλειστόκαινο)

#### ΝΕΟΓΕΝΕΣ

- Πλειοκαινικοί θαλάσσιοι σχηματισμοί
- Πλειοκαινικοί ηπειρωτικοί σχηματισμοί
- Θαλάσσιοι Ανωμειοκαινοί Ασβεστόλιθοι
- Ανωμειοκαινοί σχηματισμοί (παράκτιες και παράλιες φάσεις)
- Ανωμειοκαινοί ηπειρωτικοί - λιμναίοι σχηματισμοί

### II. ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

#### ΕΝΟΤΗΤΑ ΑΘΗΝΩΝ

- Νηρητικοί Ανθρακικοί Σχηματισμοί Άνω Κρητιδικού
- Πελαγικοί ασβεστόλιθοι εντός των Κλαστικών Σχηματισμών
- Λεπτοπλακώδεις Ασβεστόλιθοι Άνω Κρητιδικού και Αργιλικί Σχίστες εν μέρει Άνω Κρητιδικής ηλικίας

#### ΕΝΟΤΗΤΑ ΥΠΟΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗΣ

- Ανθρακικοί Σχηματισμοί Τριαδικής - Ιουραϊκής ηλικίας
- Κλαστικοί σχηματισμοί Άνω Παλαιοζωϊκού - Κάτω Τριαδικού

#### ΕΝΟΤΗΤΑ ΑΛΕΠΟΒΟΥΝΙΟΥ

- Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι εν μέρει Τριαδικής ηλικίας
- Φυλλίτες

#### ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΑΤΤΙΚΗΣ

- Μάρμαρα Μεσοζωϊκής ηλικίας
- Σχιστόλιθοι Μεσοζωϊκής ηλικίας
- Δολομτικά Μάρμαρα Τριαδικής ηλικίας
- Εμφανίσεις οφιολιθικών πετρωμάτων εντός των αλπικών ενοτήτων

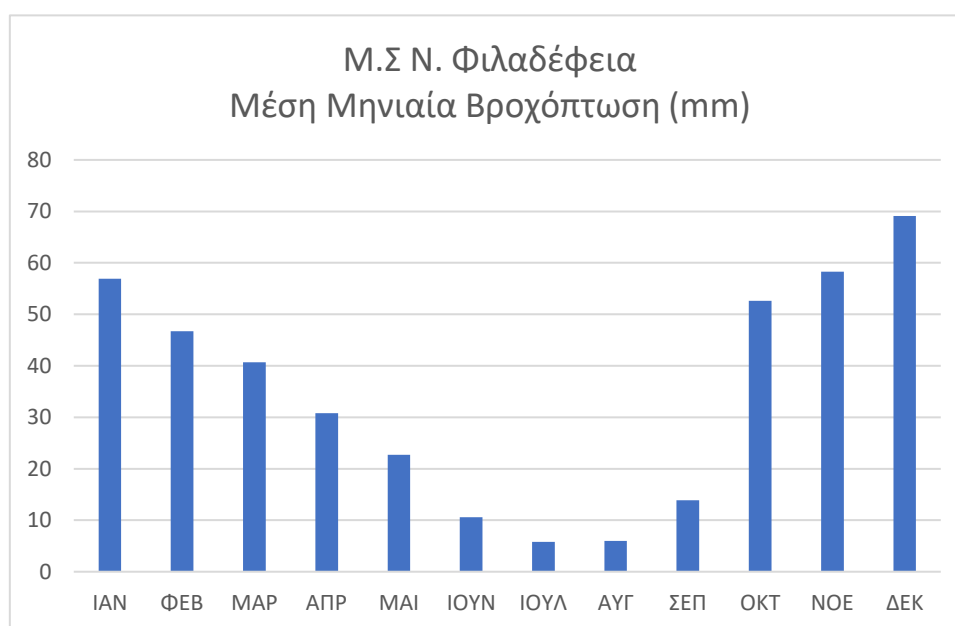
Εικόνα 3.5: Γεωλογικό υπόβαθρο στην περιοχή μελέτης (Παπανικολάου Δ. κ.ά., 2002)

Το κλίμα της περιοχής μελέτης, εντάσσεται στο κλίμα του Ελλαδικού χώρου και χαρακτηρίζεται από ήπιους υγρούς χειμώνες και ξηρά καλοκαίρια. Πιο συγκεκριμένα, σε ότι αφορά την Αττική, παρατηρείται ιδιαίτερα χαμηλό ετήσιο ύψος βροχής τον τελευταίο αιώνα με τιμή κατά μέσο όρο μικρότερη από 400mm (Μαμάσης και Κουτσογιάννης, 2007). Με βάση το Σχέδιο Προγράμματος Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων της χώρας που εκπονήθηκε το 2003 η μέση ετήσια βροχόπτωση στους μετεωρολογικούς σταθμούς της Ε.Μ.Υ. που βρίσκονται κοντά στην περιοχή μελέτης (Ν. Φιλαδέλφειας, Τατοΐου και Ελληνικού) κυμαίνεται από 365mm έως 430mm, ενώ στο σταθμό που βρίσκεται κοντονότερα, αυτόν της Ν. Φιλαδέλφειας, η μέση ετήσια βροχόπτωση, όπως προκύπτει από μετρήσεις 42 χρόνων, είναι 414mm (Εικόνα 3.5). Η μέση ετήσια θερμοκρασία για τον ίδιο σταθμό είναι 18°C.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα δεδομένα για τη μέση ετήσια βροχόπτωση, τις συνολικές ημέρες βροχής και τη μέση θερμοκρασία, που προκύπτουν από μετρήσεις στο σταθμό της Ν. Φιλαδέλφειας για χρονικό διάστημα από το 1961 έως σήμερα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση παρουσιάζεται γραφικά στην Εικόνα 3.6.

Πίνακας 3.1: Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση και Θερμοκρασία και Συνολικές Μέρες Βροχής ανά μήνα, Μ.Σ. Ν. Φιλαδέλφειας (Δεδομένα από [http://www.hnms.gr/emy/el/climatology/climatology\\_city](http://www.hnms.gr/emy/el/climatology/climatology_city))

|                              | ΙΑΝ  | ΦΕΒ  | ΜΑ   | ΑΠΡ  | ΜΑΙ  | ΙΟΥΝ | ΙΟΥΛ | ΑΥΓ  | ΣΕΠ  | ΟΚΤ  | ΝΟΕ  | ΔΕΚ  |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση (mm) | 56.9 | 46.7 | 40.7 | 30.8 | 22.7 | 10.6 | 5.8  | 6    | 13.9 | 52.6 | 58.3 | 69.1 |
| Συνολικές Μέρες Βροχής       | 12.6 | 10.4 | 10.2 | 8.1  | 6.2  | 3.7  | 1.9  | 1.7  | 3.3  | 7.2  | 9.7  | 12.1 |
| Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία     | 8.7  | 9.3  | 11.2 | 15.3 | 20.7 | 25.6 | 28   | 27.4 | 23.3 | 18.1 | 13.7 | 10.3 |



Εικόνα 3.6: Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση, Μ.Σ. Ν. Φιλαδέλφειας (Δεδομένα από [http://www.hnms.gr/emy/el/climatology/climatology\\_city](http://www.hnms.gr/emy/el/climatology/climatology_city))

Όπως έχει προαναφερθεί, η περιοχή ανήκει διοικητικά στο Δήμο Αθηναίων. Με βάση την απογραφή του 2011, η μέση πυκνότητα πληθυσμού συνολικά για το δήμο Αθηναίων είναι 170.44 κάτοικοι/ha. Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από το χάρτη της Εικόνας 3.2, η περιοχή μελέτης είναι αρκετά πυκνοκατοικημένη στο πιο πεδινό κομμάτι της, ενώ στο ορεινό υπάρχουν εκτάσεις χαμηλής βλάστησης και ο μικρός οικισμός του Γεωργίου Παπανδρέου, που χαρακτηρίζεται από αραιή και χαμηλή δόμηση.

Ως προς το αποχετευτικό της δίκτυο, η περιοχή μελέτης ανήκει στη Ζώνη Ζ2 του παντοροϊκού συστήματος αποχέτευσης των Αθηνών, όπως αυτό παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 3.1.2 της παρούσας εργασίας.

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζονται οι ζώνες του παντοροϊκού αποχετευτικού συστήματος των Αθηνών. Η ζώνη Ζ2 αποτελείται επί της ουσίας από δύο τμήματα, ένα ανάντη στην περιοχή της Νέας Κυψέλης και ένα κατάντη στην περιοχή Βικτώρια. Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας αφορά το ανάντη τμήμα της Ζώνης Ζ2 στην περιοχή της Νέας Κυψέλης.

Το αποχετευτικό σύστημα στην περιοχή μελέτης αποτελείται από δίκτυο αγωγών ακαθάρτων, δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων και παντοροϊκό δίκτυο.

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 3.1.2 της παρούσας εργασίας, σε περίοδο βροχής και όταν η απορροή των ομβρίων που μεταφέρεται από τους παντοροϊκούς συλλεκτήρες μαζί με τα λύματα της κάθε ζώνης, δεν ξεπερνά ένα όριο, το σύνολο της μικτής αυτής παροχής παροχετεύεται από τον Κ.Α.Α. που λειτουργεί και αυτός σαν παντοροϊκός συλλεκτήρας (οι διατομές του είναι πολύ μεγαλύτερες από τις απαιτούμενες για την παροχέτευση μόνο των λυμάτων). Η θέση του Κ.Α.Α. φαίνεται στην Εικόνα 3.1.

Όταν οι απορροές των ομβρίων είναι μεγαλύτερες από την ικανότητα του Κ.Α.Α., γίνεται διαχωρισμός των ομβρίων και τον ακαθάρτων στα φρεάτια των υπερχειλιστών της κάθε ζώνης (οι θέσεις τους φαίνονται στην Εικόνα 3.1). Από εκεί τα όμβρια διοχετεύονται στους αγωγούς υπερχειλίσης μέσω των οποίων καταλήγουν στον τελικό τους αποδέκτη. Για τις ζώνες Ζ1 και Ζ2 τελικός αποδέκτης είναι το ρέμα του Πρ. Δανιήλ.

Για την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα μετρημένων παροχών για δύο αγωγούς που αφορούν κοινό επεισόδιο βροχής που σημειώθηκε στις 24/02/2006. Οι αγωγοί αυτοί είναι οι αγωγοί 1640 (Οδός Βαφειοχωρίου) και ο αγωγός 1313 (Οδός Τσαλδάρη).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 4.1 ΒΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία το παντορροϊκό δίκτυο και οι λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης προσομοιώνονται με το λογισμικό SWMM της EPA. Στα πλαίσια των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά:

- SWMM
- ArcGIS
- AutoCAD
- inrPINS
- MATLAB
- HEC-HMS
- Microsoft Excel

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε εκτελέστηκε στα παρακάτω βήματα:

- i. Εισαγωγή και επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και του ψηφιοποιημένου αποχετευτικού δικτύου στο ArcGIS.
- ii. Διαχωρισμός των υπολεκάνων της περιοχής μελέτης με το λογισμικό AutoCAD και εισαγωγή τους στο ArcGIS.
- iii. Υπολογισμός και εκτίμηση των παραμέτρων προσομοίωσης που θα εισαχθούν στο SWMM με το λογισμικό ArcGIS για κάθε υπολεκάνη.
- iv. Εκτίμηση απορροών ξηρού καιρού (οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο Excel).
- v. Εισαγωγή των αντικειμένων των υπολεκάνων, των αγωγών και των φρεατίων του δικτύου και των παραμέτρων τους στο SWMM, μέσω της σύνδεσης ArcGIS και SWMM, με το λογισμικό inrPINS. Εισαγωγή των απορροών ξηρού καιρού στο SWMM χειροκίνητα.
- vi. Καθορισμός επιλογών προσομοίωσης στο SWMM (μέθοδος διόδευσης, μέθοδος διήθησης, χρονικό βήμα υπολογισμών)
- vii. Επίλυση του μοντέλου για το επεισόδιο βροχής 24/02/2006 για το οποίο υπάρχουν μετρήσεις. Αξιολόγηση της απόδοσης του με βάση τις μετρήσεις.
- viii. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων του μοντέλου με σκοπό την επιλογή των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στη βαθμονόμηση.
- ix. Βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση τις μετρημένες παροχές σε δύο αγωγούς για το επεισόδιο βροχής 24/02/2006, με χρήση γενετικού αλγορίθμου που παρέχεται από το λογισμικό MATLAB.
- x. Παραγωγή βροχογραφημάτων από όμβριες καμπύλες για βροχές διάρκειας 1hr, 2hr, 6hr και 24hr και με περίοδο επαναφοράς 25 έτη και 50 έτη.
- xi. Επίλυση του βαθμονομημένου μοντέλου για τις παραπάνω βροχές.
- xii. Υπολογισμός χρόνου συγκέντρωσης για κάθε υπολεκάνη (οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο Excel). Για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης υπολογίζονται με τη βοήθεια του ArcGIS τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των υπολεκάνων.
- xiii. Παραγωγή πλημμυρογραφημάτων για κάθε υπολεκάνη και για τις παραπάνω βροχές με βάση το μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS. Η παραγωγή των πλημμυρογραφημάτων έγινε στο λογισμικό HEC-HMS, λαμβάνοντας ως μέθοδο υπολογισμού απωλειών βροχής τη μέθοδο της SCS.

- xiv. Εισαγωγή των πλημμυρογραφημάτων στο SWMM ως εισόδων στο δίκτυο και σύγκριση αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από την επίλυση του δικτύου με την υδρολογική ανάλυση των υπολεκανών από το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM.
- xv. Παραγωγή βροχογραφημάτων για διάρκεια βροχής 1hr, 2hr, 6hr και 24hr και με περίοδο επαναφοράς 10 έτη.
- xvi. Εφαρμογή σεναρίων αύξησης της αστικοποίησης των ημι-αστικών υπολεκανών για τις παραπάνω βροχές στο βαθμονομημένο μοντέλο του SWMM και σύγκριση αποτελεσμάτων.

## 4.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ SWMM

### 4.2.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Απαραίτητο εργαλείο για την υδρολογική ανάλυση μιας περιοχής μελέτης αποτελεί το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM), με το οποίο αποδίδεται το ανάγλυφο της περιοχής και με την επεξεργασία του οποίου μέσω ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών μπορούν να εξαχθούν υδρολογικές πληροφορίες (κλίσεις εδάφους, κλίμακος διεύθυνσης ροής και υδρογραφικό δίκτυο κ.τ.λ.).

Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μελέτης που χρησιμοποιήθηκε έχει ανάλυση 5\*5m. Από την επεξεργασία του στο ArcMap εξήχθησαν οι ισοϋψείς (Εικόνα 3.3) και οι κλίσεις εδάφους επί τις εκατό (Εικόνα 3.4).

Επόμενο εργαλείο που καθίσταται απαραίτητο για την ανάλυση αποτελεί και το ψηφιοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο της περιοχής μελέτης. Το ψηφιοποιημένο αποχετευτικό δίκτυο (Εικόνα 3.8) περιέχει πληροφορίες για:

- Τις θέσεις των αγωγών του δικτύου ταξινομημένους ανάλογα με το είδος τους (ακαθάρτων, ομβρίων και παντοροϊκοί)
- Τα ονόματα των αγωγών
- Τα μήκη των αγωγών και τις κλίσεις τους
- Το είδος της διατομής τους (κυκλική, ωοειδής κ.τ.λ.)
- Το μέγιστο βάθος ροής στους αγωγούς με βάση τη διατομή τους
- Τις θέσεις των φρεατίων
- Τα ονόματα των φρεατίων
- Το υψόμετρο πυθμένα και το υψόμετρο στέψης των φρεατίων

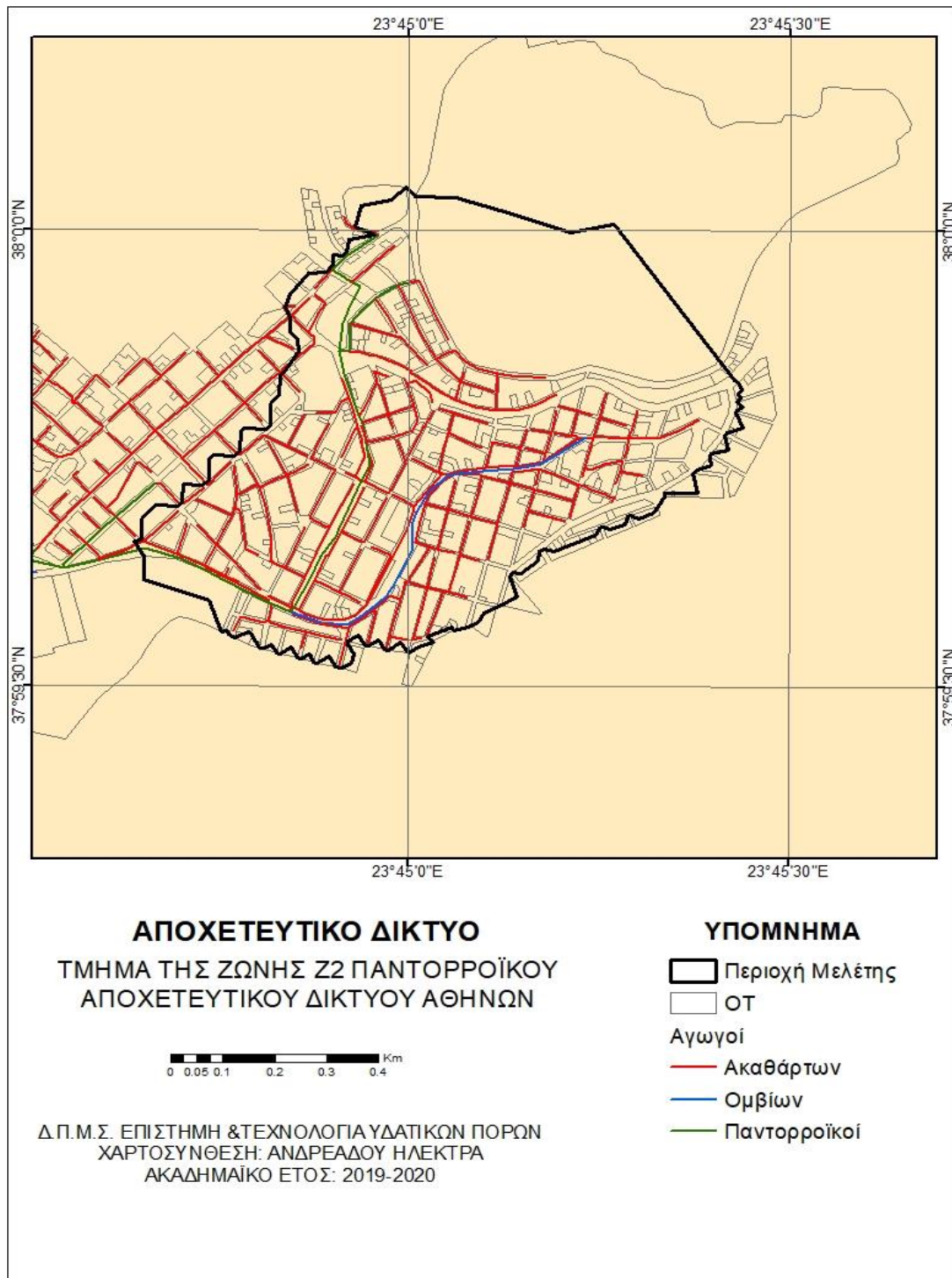
Τα παραπάνω δεδομένα μας παραδόθηκαν από την Ε.Υ.Δ.Α.Π. σε ψηφιακή μορφή για την εισαγωγή και την επεξεργασία τους στο λογισμικό ArcMap.

Επιπλέον, για το διαχωρισμό της περιοχής μελέτης σε υπολεκάνες απαραίτητο στοιχείο αποτελεί, πέρα από το ανάγλυφο της περιοχής, και η χωρική πληροφορία για τα οικοδομικά τετράγωνα της περιοχής μελέτης (Εικόνα 3.7) τα οποία μας παραδόθηκαν, επίσης, σε ψηφιακή μορφή για την εισαγωγή τους στο ArcMap.

### 4.2.2 ΟΡΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΣΕ ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ

Η περιοχή μελέτης που εξετάζεται θα μπορούσε να χωριστεί σε δύο τμήματα. Το ανάντη τμήμα, που αφορά τμήμα του Αττικού άλσους και πρόκειται κατά κύριο λόγο για μη αστική περιοχή και το κατάντη αστικό τμήμα. Η απορροή από το μη αστικό τμήμα εισέρχεται στο δίκτυο και συγκεκριμένα στις εισόδους των τριτευόντων αγωγών στο ανάντη τμήμα. Στην

Εικόνα 4.1 παρουσιάζονται τα όρια της περιοχής μελέτης, τα Οικοδομικά Τετράγωνα και οι αγωγοί του αποχετευτικού συστήματος.



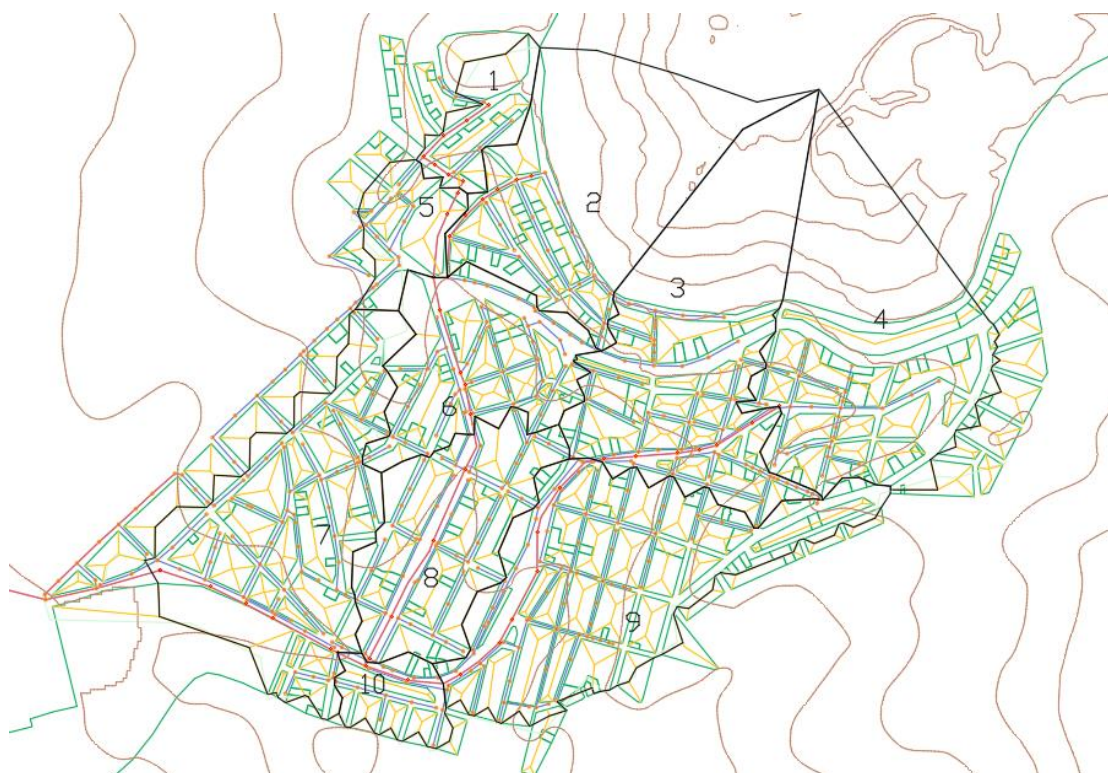
Εικόνα 4.1: Περιοχή μελέτης, Οικοδομικά Τετράγωνα και Αποχετευτικό Δίκτυο

Για τη χάραξη των αστικών λεκανών απορροής χαράσσονται οι διχοτόμοι των γωνιών των Ο.Τ.. Τα όμβρια ύδατα αποχετεύονται από κάθε εσωτερικό σημείο του Ο.Τ. προς τον πλησιέστερο δρόμο και αγωγό ομβρίων. Έτσι, με βάση τις κλίσεις του οδοστρώματος και τις θέσεις των φρεατίων του δικτύου χαράσσονται οι υδροκρίτες των αστικών λεκανών (Κούρτης, 2016).



Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό AutoCAD, αφού πρώτα εξήχθησαν από το ArcMap τα layers των ισοϋψών, των Ο.Τ., των αγωγών, των φρεατίων, της ευρύτερης λεκάνης απορροής που προέκυψε. Με βάση τα παραπάνω και το διαχωρισμό των Ο.Τ. σε επιφάνειες απορροής (με τη μέθοδο της διχοτόμησης των γωνιών τους) ορίσθηκαν τα όρια της περιοχής μελέτης και έγινε ο διαχωρισμός της σε 10 υπολεκάνες.

Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Διακρίνεται το περίγραμμα της λεκάνης απορροής που παρήχθη με βάση το DEM με μωβ χρώμα, τα Ο.Τ. με πράσινο χρώμα και η διχοτόμησή τους με πορτοκαλί, καθώς και οι ισοϋψείς. Το αποχετευτικό δίκτυο διαχωρίζεται σε ακαθάρτων (μπλε χρώμα) και παντοροϊκό ή ομβρίων (κόκκινο χρώμα), ενώ διακρίνονται και οι θέσεις των φρεατίων (πορτοκαλί χρώμα).



Εικόνα 4.2: Διχοτόμηση των Ο.Τ., καθορισμός ορίων περιοχής μελέτης και υπολεκανών (η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό AutoCAD)

Μετά τη διακριτοποίηση της περιοχής μελέτης στο λογισμικό AutoCAD, τα δεδομένα εισήχθησαν στο ArcMap, για να καταστεί δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία τους, η απόδοση, δηλαδή, τιμών στις παραμέτρους της κάθε υπολεκάνης. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στην Παράγραφο 4.2.4.

#### 4.2.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΡΡΟΩΝ ΞΗΡΟΥ ΚΑΙΡΟΥ

Η εκτίμηση απορροών ξηρού καιρού για τη διερεύνηση του δικτύου αποχέτευσης της περιοχής μελέτης συνίσταται στην εκτίμηση της μέγιστης ωριαίας παροχής, αφού η τιμή της αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον υδραυλικό έλεγχο των αγωγών. Δεδομένου ότι στην περιοχή μελέτης υφίσταται παντοροϊκό δίκτυο, η εκτίμηση της μέγιστης ωριαίας παροχής ακαθάρτων και ο συνυπολογισμός της με την παροχή από τα όμβρια ύδατα που προκύπτει για επεισόδια βροχής συγκεκριμένης περιόδου επαναφοράς και διάρκειας, αποδίδει τις τιμές της συνολικής παροχής για τις οποίες διερευνάται η αντοχή του δικτύου.

Η μέγιστη ωριαία παροχή που υπολογίζεται για το σκοπό αυτό, εισάγεται στο δίκτυο και κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης με βάση το επεισόδιο βροχής που σημειώθηκε στις 24/02/2006.

Για τον υπολογισμό την μέγιστης ωριαίας παροχής ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία (Κούρτης 2016, Τσακίρης 2010):

I. Προσδιορίζεται η μέση ανηγμένη ημερήσια κατανάλωση ανά κάτοικο,  $q$ . Η τιμή αυτή για τον Ελλαδικό χώρο κυμαίνεται από 150 l/κατ\*d σε μικρούς οικισμούς έως 250 l/κατ\*d σε μεγάλες πόλεις, με μέση τιμή 200 l/κατ\*d (Κουτσογιάννης, 2011). Στην παρούσα εργασία γίνεται η παραδοχή πως η μέγιστη ημερήσια κατανάλωση ανά κάτοικο στην περιοχή μελέτης είναι 200 l/κατ\*d. Η τιμή αυτή επιλέγεται καθώς στην περιοχή μελέτης υφίσταται ένα πλήρως αστικοποιημένο τμήμα, που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της έκτασής της, αλλά και ο οικισμός Γεωργίου Παπανδρέου.

II. Υπολογίζεται η συνολική μέση ημερήσια κατανάλωση για τον πληθυσμό σχεδιασμού,  $P_v$ , από την Εξίσωση 4.1:

$$Q_d = P_v q \text{ (l/s)} \quad (4.1)$$

III. Υπολογίζεται η συνολική μέγιστη ωριαία κατανάλωση από την Εξίσωση 4.2:

$$Q_h^{\max} = F_1 F_2 Q_d \text{ (l/s)} \quad (4.2)$$

Οι  $F_1$  και  $F_2$  αποτελούν πολλαπλασιαστές ζήτησης, με προτεινόμενες τιμές για τον  $F_2 = 2$  (για πληθυσμό μεγαλύτερο των 10000 κατοίκων) και  $F_2 = 5$  (για πληθυσμό μικρότερο των 2000 κατοίκων) ενώ, για τις ελληνικές πρακτικές επιλέγεται συνήθως  $F_{0\lambda} = F_1 F_2 = 6$ .

IV. Υπολογίζεται η συνολική μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων, ως ποσοστό της μέγιστης ωριαίας κατανάλωσης από την Εξίσωση 4.3:

$$QA_h^{\max} = \mu Q_h^{\max} \text{ (l/s)} \quad (4.3)$$

Το ποσοστό  $\mu$  κυμαίνεται μεταξύ 60%-80%, με συνήθη τιμή για τις ελληνικές πρακτικές το 80%, που λαμβάνεται και στην παρούσα εργασία.

V. Τέλος, υπολογίζεται η συνολική μέγιστη ωριαία παροχή, ως η μέγιστη ημερήσια παροχή επί τον αυξητικό συντελεστή  $P$ , η τιμή του οποίου δίνεται από την Εξίσωση 4.4:

$$P = \min \left\{ \begin{array}{l} 3 \\ 1.5 + \frac{2.5}{\sqrt{QA_d}} \end{array} \right. \quad (4.4)$$

VI. Τέλος, η μέγιστη ωριαία παροχή ακαθάρτων υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.5:

$$QA_h^{\max} = P QA_d^{\max} \text{ (l/s)} \quad (4.5)$$

Η μέγιστη ωριαία παροχή υπολογίστηκε για κάθε μια από τις 10 υπολεκάνες στις οποίες διαιρέθηκε η περιοχή μελέτης. Ο υπολογισμός του πληθυσμού της υπολεκάνης ( $P_v$ ) που χρησιμοποιήθηκε στην εξίσωση (4.1) έγινε λαμβάνοντας υπόψιν την πυκνότητα πληθυσμού για το Δήμο Αθηναίων (170.44 κατ/ha) και πολλαπλασιάζοντάς την με την έκταση της κάθε υπολεκάνης σε ha. Αναλυτικά οι υπολογισμοί και τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.



#### 4.2.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ

Στην Παράγραφο 4.2.2 παρουσιάστηκε ο διαχωρισμός της περιοχής μελέτης σε 10 υπολεκάνες. Τα χαρακτηριστικά των υπολεκανών που επιδρούν στην απορροή εκφράζονται από το μοντέλο μέσω παραμέτρων οι τιμές των οποίων εισάγονται από τον χρήστη. Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστεί η διαδικασία απόδοσης τιμών στις παραμέτρους των υπολεκανών, με βάση τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Αρχικά, η γεωμετρία και οι γεωγραφικές συντεταγμένες των 10 υπολεκανών εισάγονται στο λογισμικό ArcMap ως ένα νέο layer με γεωμετρία polygon.

- Έκταση Υπολεκάνης (Area)

Η έκταση της υπολεκάνης υπολογίζεται αυτόματα από το ArcGIS σε m<sup>2</sup>. Για την εισαγωγή στο SWMM της έκτασης της υπολεκάνης σε ha, εισάγεται ένα νέο πεδίο στον Attribute Table, όπου υπολογίζεται η έκταση της κάθε υπολεκάνης σε ha.

- Πλάτος υπολεκάνης (Width)

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.5.5 το πλάτος της υπολεκάνης μπορεί να ορισθεί γενικά ως η έκταση της υπολεκάνης διαιρεμένη με το μέγιστο μήκος επίγειας ροής του νερού. Το μήκος επίγειας ροής εξαρτάται από τον τύπο της λεκάνης. Σε αστικές λεκάνες ως τιμή του μπορεί να ληφθεί η απόσταση από το πίσω μέρος του Ο.Τ. μέχρι το κέντρο του δρόμου, ενώ σε μη αστικές υπολογίζεται η επίγεια ροή, η οποία δεν πρέπει να ξεπερνά τα 500ft, αφού τότε θεωρείται πως η επίγεια ροή σχηματίζει υδατόρρευμα. Όταν σε μια λεκάνη συνυπάρχει αστικό και μη αστικό τμήμα, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος όρος του μήκους από το αστικό και το μη αστικό τμήμα.

Στην Εικόνα 4.12 παρουσιάζεται δορυφορική εικόνα των 10 υπολεκανών, όπου διακρίνεται πως οι λεκάνες 1, 2, 3 και 4 αποτελούνται τόσο από αστικό όσο και από μη αστικό κομμάτι. Στις λεκάνες 5, 6, 7, 8, 9 και 10 το μήκος επίγειας ροής λαμβάνεται 42 ft, ως τυπική τιμή της απόστασης από το πίσω μέρος του Ο.Τ. μέχρι το κέντρο του δρόμου.

Για τις λεκάνες 1, 2, 3 και 4 υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος όρος του μήκους επίγειας ροής (OFL) με βάση την Εξίσωση 4.6:

$$OFL = aOFL_u + bOFL_r \quad (4.6)$$

Όπου:

$a$  : το ποσοστό επιφάνειας της λεκάνης με αστική χρήση γης

$b$  : το ποσοστό επιφάνειας της λεκάνης με μη αστική χρήση γης

$OFL_u$  : το μήκος επίγειας ροής στο αστικό τμήμα (42 ft)

$OFL_r$  : το μήκος επίγειας ροής στο μη αστικό τμήμα (υπολογίζεται στο ArcMap)

Στη συνέχεια, έχοντας υπολογίσει το μήκος επίγειας ροής για κάθε υπολεκάνη, εισάγεται στον Attribute Table μια στήλη με τις τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε υπολεκάνη. Το πλάτος

της υπολεκάνης προκύπτει σε νέα στήλη, όπου διαιρείται η έκταση της υπολεκάνης με το μήκος επίγειας ροής.

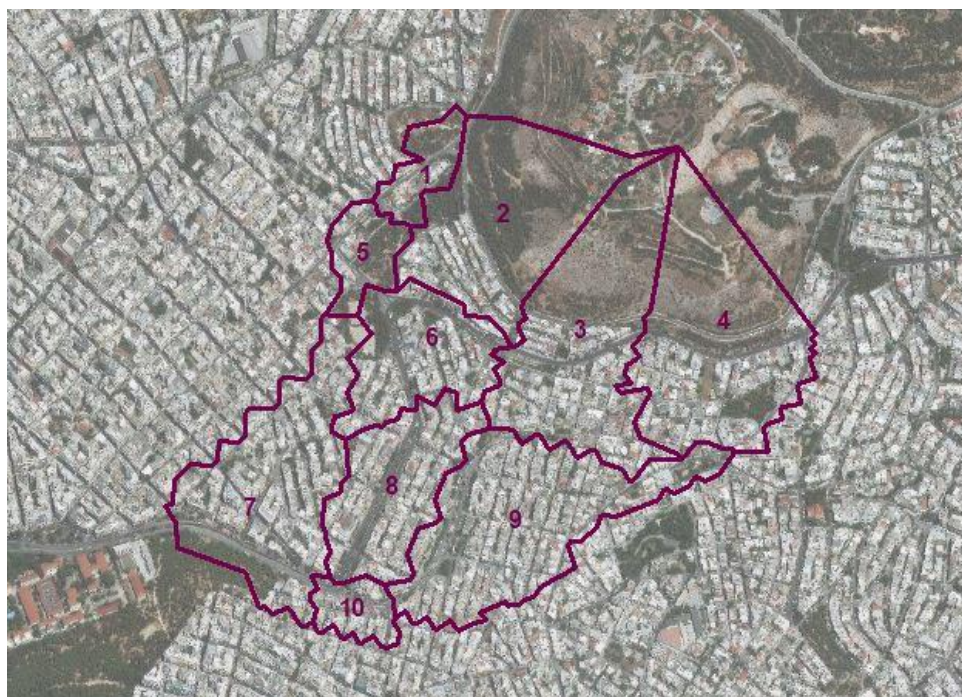
Εξαιτίας του ότι οι τιμές που προέκυψαν από την ανωτέρω διαδικασία κρίθηκαν ιδιαίτερα μεγάλες με βάση τη σχετική βιβλιογραφία και δεδομένου ότι η παράμετρος του πλάτους της υπολεκάνης αποτελεί αντικείμενο βαθμονόμησης, για την αρχική κατασκευή του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 100ft και 60ft για τα πλάτη των μεγαλύτερων και μικρότερων σε έκταση υπολεκανών αντίστοιχα. Για την υπολεκάνη 2 επιλέχθηκε η τιμή 300ft.

- Κλίση (% Slope)

Για τον υπολογισμό της μέσης κλίσης κάθε υπολεκάνης χρησιμοποιείται ο κλίμακας με τις κλίσεις επί τις εκατό (Εικόνα 3.4) και το layer με τις γεωγραφικές συντεταγμένες των 10 υπολεκανών στο λογισμικό ArcMap. Με τη χρήση της εντολής “Zonal Statistics as Table” (Arc Toolbox → Spatial Analyst Tools → Zonal → Zonal Statistics as Table) δημιουργείται πίνακας που περιέχει τη μέση κλίση της κάθε υπολεκάνης (Παράρτημα Β – Πίνακας Π-Β.1).

- Ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών (% Imperv)

Για το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών κάθε υπολεκάνης έγινε μια πρώτη εκτίμηση με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS και την εισαγωγή basemap (Εικόνα 4.3). Το ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών αποτελεί επίσης αντικείμενο βαθμονόμησης του μοντέλου, γι’ αυτό και οι τιμές που δόθηκαν θεωρούνται ως μια πρώτη εκτίμηση του ποσοστού αυτού. Οι τιμές παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β – Πίνακας Π-Β.1.



Εικόνα 4.3: Εκτίμηση ποσοστού αδιαπέρατων επιφανειών κάθε υπολεκάνης.

- Συντελεστής Manning (N)

Καθορίζεται η τιμή του συντελεστή Manning για το περατό (N-Perv) και το αδιαπέρατο τμήμα (N-Imperv) της υπολεκάνης. Με βάση τον Πίνακα 2.1 στην Παράγραφο 2.5.5 της παρούσας εργασίας, επιλέγονται οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας 0.013 για τα αδιαπέρατα τμήματα και 0.2 για τα περατά.

- Επιφανειακή Συγκράτηση

Η επιφανειακή συγκράτηση του περατού τμήματος των υπολεκανών τέθηκε 6mm, ενώ του αδιαπέρατου 2mm, με βάση τις προτεινόμενες τιμές που αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 2.5.5.

Η τιμή της επιφανειακής συγκράτησης του αδιαπέρατου τμήματος άλλαξε κατά τη διάρκεια της εμπειρικής βαθμονόμησης σε 10mm, αφού η τιμή 2mm οδηγούσε σε ιδιαίτερα υψηλή παροχή αιχμής. Με την τιμή αυτή πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου, ενώ κατά τη βαθμονόμηση τέθηκαν στην τιμή τα όρια που ορίζονται από τη βιβλιογραφία.

- Παράμετροι διήθησης (CN)

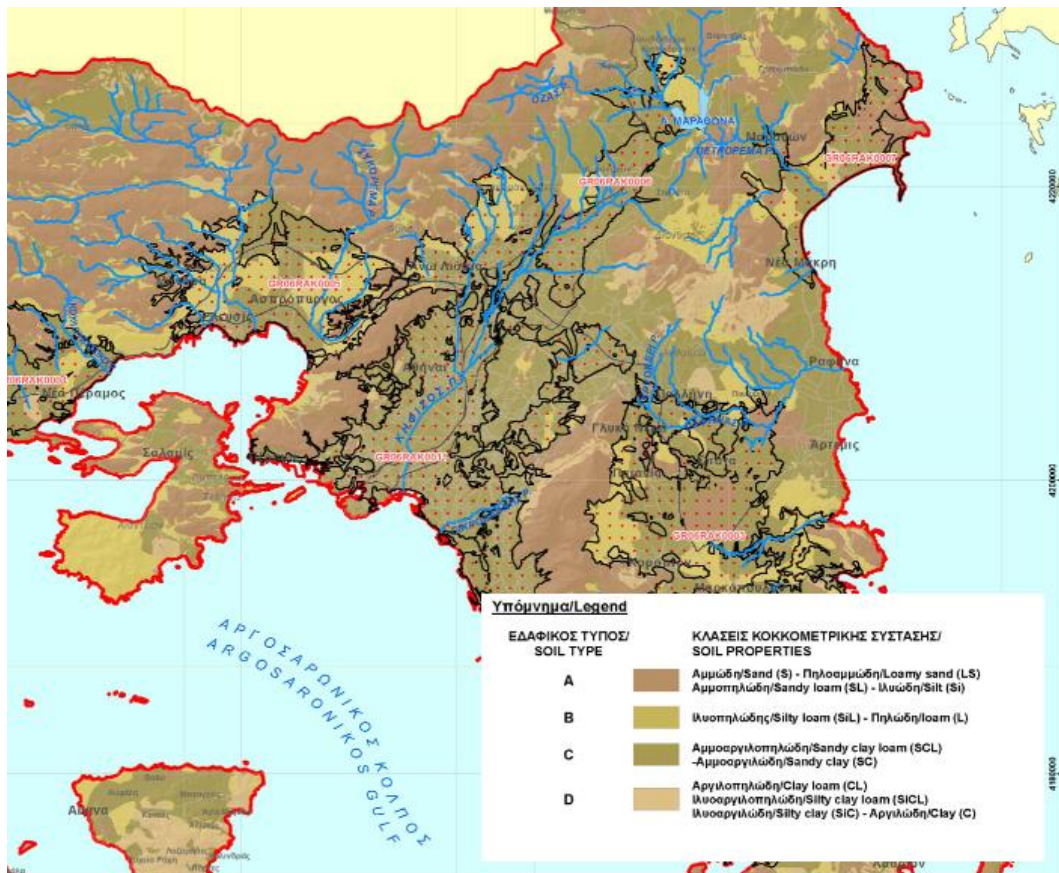
Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.7, για την εφαρμογή της μεθόδου της SCS από το SWMM απαιτείται ο προσδιορισμός δύο παραμέτρων, του αριθμού CN και του χρόνου ξήρανσης.

Ο αριθμός καμπύλης CN εξάγεται από πίνακες, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και την υδρολογική κατάσταση (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018).

Οι υδρολογικοί τύποι εδάφους ακολουθούν τα εξής κριτήρια (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018):

- A. Εδάφη με υψηλούς ρυθμούς διήθησης ακόμα και αν διαβρεχτούν διεξοδικά. Χαμηλό δυναμικό απορροής. Συνήθως πλήρως στραγγιζόμενες άμμοι ή χαλίκια.
- B. Εδάφη με μέτριους ρυθμούς διήθησης, όπως ο αμμώδης πηλός.
- C. Εδάφη με χαμηλούς ρυθμούς διήθησης, όπως είναι τα εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου.
- D. Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, τα οποία παρουσιάζουν πολύ υψηλό δυναμικό απορροής και συνήθως περιλαμβάνουν αργιλώδη εδάφη με υψηλή πιθανότητα διόγκωσης ή ρηχά εδάφη πάνω σε σχεδόν αδιαπέρατο υλικό.

Με βάση τα «Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Λεκανών Απορροής των Υδατικών Διαμερισμάτων Αττικής, Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας & Νήσων Αιγαίου (Βορείου και Νοτίου Αιγαίου)» ο εδαφολογικός χάρτης (Εικόνα 4.4) για το Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής (GR06) αποδίδει στην περιοχή μελέτης την κατηγορία εδάφους C.

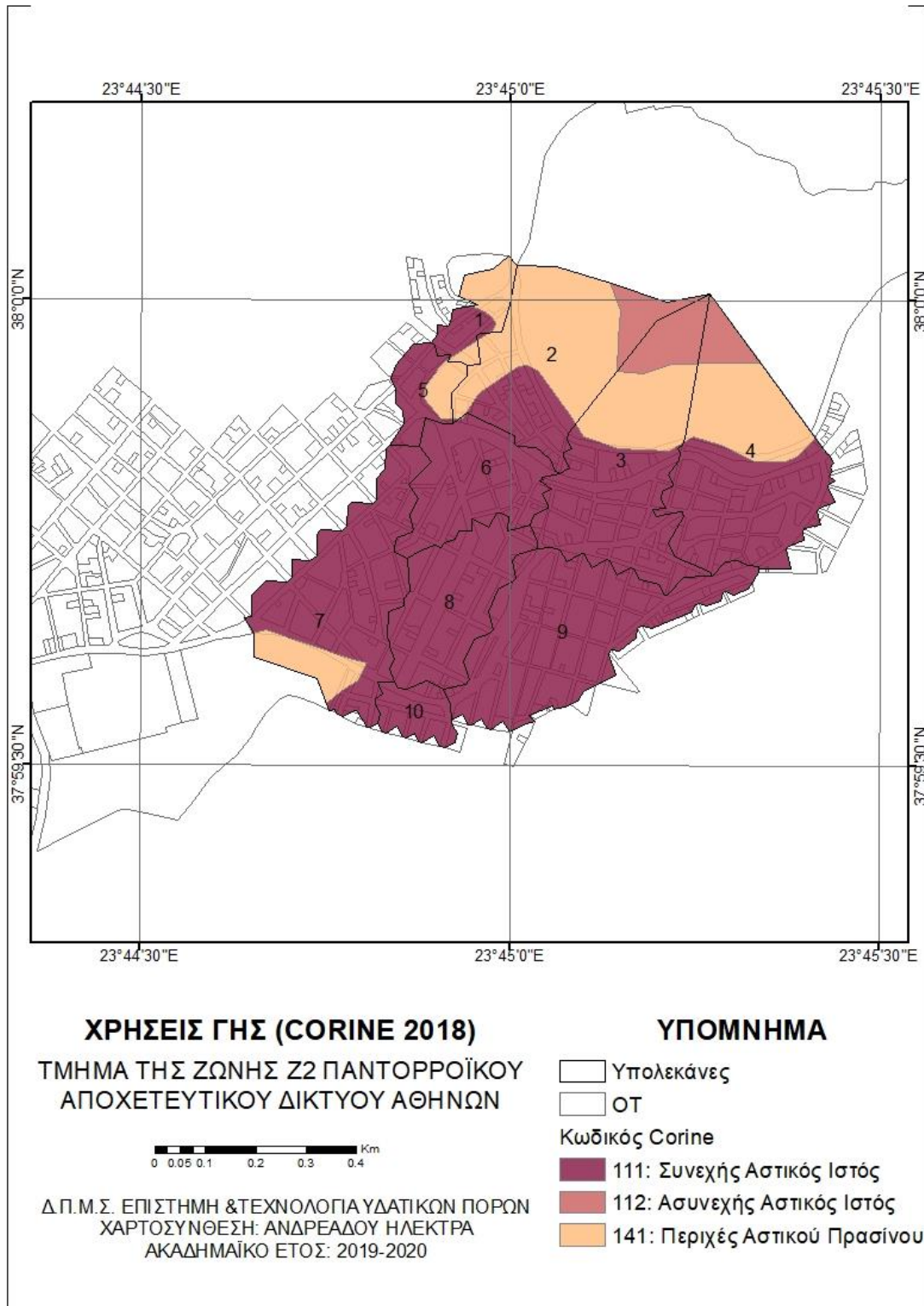


Εικόνα 4.4: Απόσπασμα χάρτη εδαφικών τύπων για το GR06 που ανασύρθηκε από την ιστοσελίδα [www.floods.ypeka.gr](http://www.floods.ypeka.gr).

Όσον αφορά τις χρήσεις γης για την περιοχή μελέτης, ανασύρθηκαν στοιχεία από το Corernicus (Corine 2018), από τα οποία διατηρήθηκε μόνο η περιοχή μελέτης. Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται ο χάρτης χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης με βάση τους κωδικούς Corine. Η περιοχή μελέτης αποτελείται κατά κύριο λόγο από συνεχή αστικό ιστό, ενώ στην περιοχή του οικισμού Γεωργίου Παπανδρέου η χρήση γης χαρακτηρίζεται ως ασυνεχής αστικός ιστός. Διακρίνονται οι περιοχές αστικού πρασίνου που αφορούν μικρά άλση και πάρκα, κυρίως στο

Τελικά, ο αριθμός CN για την κάθε υπολεκάνη προέκυψε από τα δεδομένα του Πίνακα 2.4 των Σχεδίων Διαχείρισης Πλημμύρας του ΥΠΕΚΑ και αφορά τιμές της καμπύλης CN για μέσες προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας και περιλαμβάνει τις κατηγορίες γεωργικών γαιών της SCS που απαντώνται συχνότερα στην ελληνική γη. Με δεδομένο ότι η πλειονότητα των υπολεκανών της περιοχής μελέτης είναι αστικές, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος που αναγράφεται στον πίνακα για τις αστικές περιοχές, λαμβάνοντας ως  $P_i$  τα ποσοστά αδιαπέρατων επιφανειών κάθε υπολεκάνης που εκτιμήθηκαν σε προηγούμενο βήμα (%Imperv). Οι αριθμοί CN που προέκυψαν για κάθε υπολεκάνη παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β – Πίνακας Π-Β.2.





Εικόνα 4.5: Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης (Corine 2018)

Οι τιμές του χρόνου ξήρανσης υπολογίστηκαν με την Εξίσωση 4.7 (Rossman and Huber, 2016):

$$T_{dry} = \frac{3.125}{\sqrt{K_s}} \quad (4.7)$$

Όπου  $K_s$ , η υδραυλική αγωγιμότητα σε in/hr, με τιμές από τον Πίνακα 2.5.

Τέλος, εισάγεται το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας στο οποίο δεν πραγματοποιείται επιφανειακή συγκράτηση και η απορροή πραγματοποιείται άμεσα. Το ποσοστό αυτό ορίστηκε ως το 50% των αδιαπέρατων επιφανειών για κάθε λεκάνη (%Zero-Imperv = 50%).

Η διαδικασία εισαγωγής των παραμέτρων στο SWMM παρουσιάζεται στην Παράγραφο 4.2.5 και η διαδικασία απόδοσης τιμών στα πεδία «RainGage» και «Outlet» στην Παράγραφο 4.2.6, όπου περιγράφεται η διαδικασία σύνδεσης βροχομετρικών σταθμών – υπολεκανών – αποχετευτικού δικτύου.

#### 4.2.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ SWMM

Η εισαγωγή των δεδομένων των υπολεκανών, των αγωγών και των φρεατίων έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού inrPINS. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εξαγωγή από το ArcMap των δεδομένων των παραπάνω στοιχείων με τις συντεταγμένες τους ως αρχεία τύπου .shp. Εξάγονται τα τρία layers που περιλαμβάνουν τα στοιχεία και μέσω του inrPINS κάθε στήλη του πίνακα ιδιοτήτων (Attribute Table) του ArcMap αντιστοιχίζεται με ένα πεδίο παραμέτρου στο SWMM. Με τον τρόπο αυτό σε κάθε υπολεκάνη/αγωγό/φρεάτιο του μοντέλου αποδίδεται η τιμή της κάθε παραμέτρου.

Οι παράμετροι που εισάγονται για τους αγωγούς είναι το όνομα του αγωγού, τα ονόματα των φρεατίων εισόδου και εξόδου του, η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στον πυθμένα του αγωγού και τον πυθμένα των φρεατίων εισόδου και εξόδου, το μέγιστο βάθος ροής για τον αγωγό και ο συντελεστής τραχύτητας Manning. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων στο SWMM, εισάγεται και η γεωμετρία των αγωγών. Στην περιοχή μελέτης, η πλειονότητα των αγωγών είναι ωσειδούς διατομής, με εξαίρεση κάποιους αγωγούς που έχουν κυκλική διατομή.

Όσον αφορά τον συντελεστή τραχύτητας Manning, εξαρτάται από το υλικό του αγωγού. Για τους αγωγούς της περιοχής μελέτης η τιμή του λήφθηκε ίση με 0.013 με βάση τον Πίνακα 2.2 για οπλισμένο σκυρόδεμα.

Με τον ίδιο τρόπο εισάγονται οι παράμετροι των υπολεκανών που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.5 και οι παράμετροι των φρεατίων. Για τα φρεάτια εισάγονται οι εξής παράμετροι: ονόματα φρεατίων, υψόμετρο πυθμένα, μέγιστο βάθος (υψομετρική διαφορά μεταξύ του πυθμένα και της επιφάνειας του εδάφους).

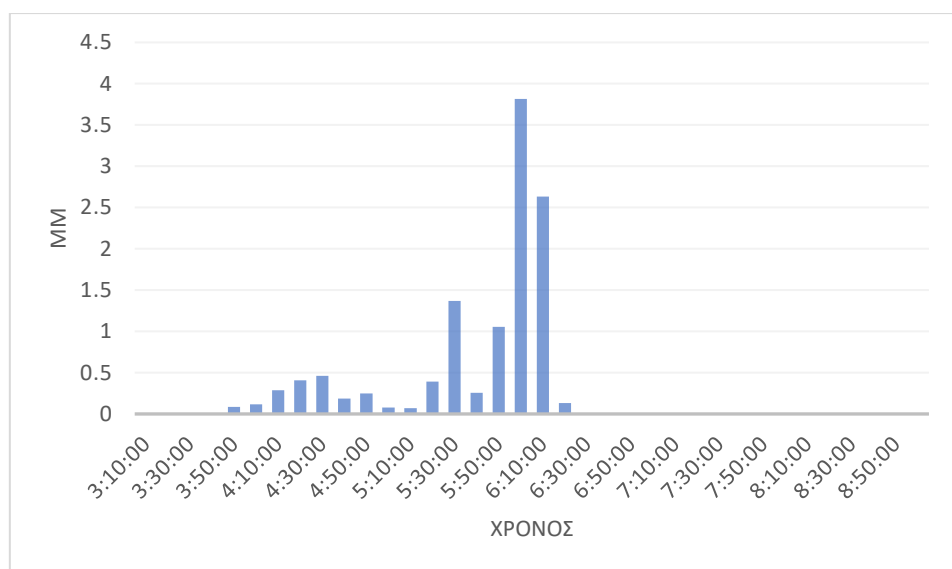
Ως έξοδος της περιοχής μελέτης τίθεται το φρεάτιο 434228 στο κατάντη άκρο της λεκάνης. Ως οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται το μέγιστο βάθος ροής (invert elevation) του φρεατίου.

Σε κάθε υπολεκάνη θεωρείται ότι ένας από τους κόμβους (φρεάτια) παραλαμβάνει τις απορροές ξηρού καιρού. Οι μέγιστες ωριαίες παροχές για κάθε υπολεκάνη, όπως υπολογίστηκαν στην Παράγραφο 4.2.3 εισάγονται στα φρεάτια στο πεδίο «Inflows→Dry Weather» του SWMM. Το SWMM δίνει τη δυνατότητα να εισαχθούν τα δεδομένα των απορροών ξηρού καιρού είτε ως μέση τιμή είτε με τη μορφή χρονοσειρών. Στην παρούσα

εργασία η μέγιστη ωριαία παροχή που υπολογίσθηκε εισάγεται ως μέση τιμή, η οποία συμμετέχει σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

#### 4.2.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ – ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Όπως έχει προαναφερθεί, η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με βάση το επεισόδιο βροχής που σημειώθηκε στην περιοχή μελέτης στις 24/02/2006. Η χρονική κατανομή του ύψους βροχής κατά διάρκεια του επεισοδίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6: Επεισόδιο βροχής 24/02/2006

Οι τιμές του ύψους βροχής σε κάθε χρονικό βήμα εισάγονται στο SWMM ως μια χρονοσειρά (Timeseries). Στη συνέχεια προστίθεται ένας Βροχομετρικός Σταθμός (RainGage) ο οποίος παίρνει τα δεδομένα της χρονοσειράς αυτής (στο πεδίο DataSource γίνεται η επιλογή Timeseries και στο πεδίο Timeseries γίνεται η επιλογή του ονόματος της χρονοσειράς που έχουμε εισάγει). Ορίζεται το χρονικό βήμα μεταξύ δύο παρατηρήσεων του Βροχομετρικού Σταθμού σε 10 min (0:10) με βάση τις μετρήσεις του επεισοδίου που υφίστανται ανά δεκάλεπτο.

Με ανάλογο τρόπο, μετά τη βαθμονόμηση, θα εισαχθούν και οι χρονοσειρές για επεισόδια βροχής με περίοδο επαναφοράς 25 και 50 έτη, για τα οποία θα γίνει διερεύνηση της απόκρισης της λεκάνης και του αποχετευτικού δικτύου.

Για την ολοκλήρωση της αναπαράστασης των φυσικών διεργασιών μέσω του μοντέλου που αναπτύξαμε στο SWMM, κάθε υπολεκάνη συνδέεται αρχικά με έναν Βροχομετρικό Σταθμό, τα δεδομένα του οποίου αποτελούν τη βροχόπτωση που δέχεται η υπολεκάνη. Στην παρούσα εργασία όλες οι λεκάνες συνδέθηκαν με τον ίδιο βροχομετρικό σταθμό, σε περιοχές μελέτης όμως μεγαλύτερης έκτασης είναι δυνατόν οι λεκάνες να μη υφίστανται την ίδια βροχόπτωση.

Στη συνέχεια, κάθε υπολεκάνη διαθέτει μια έξοδο, ένα φρεάτιο του δικτύου, στο οποίο γίνεται η παραδοχή ότι διοχετεύεται η επιφανειακή απορροή της.

#### 4.2.7 ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Τελευταίο βήμα κατασκευής του μοντέλου είναι ο καθορισμός των επιλογών της προσομοίωσης που θα εκτελέσει το SWMM. Επιλέγονται:

- α) Οι διαδικασίες που θα εκτελέσει το μοντέλο: Rainfall/runoff και Flow Routing
- β) Η μέθοδος διόδευσης της απορροής: Dynamic Wave. Καθορίζονται επιλογές για την εφαρμογή της μεθόδου (διατήρηση αρχικών όρων, ορισμός υπερκρίσιμης ροής: βάσει της κλίσης και του αριθμού Froude, εξίσωση υπολογισμού απωλειών ενέργειας: Darcy-Weisbach)
- γ) Η μέθοδος διήθησης: Curve Number
- δ) Η χρονική στιγμή της αρχής και του τέλους της προσομοίωσης (εξαρτάται από το βροχογράφημα εισόδου) και της αρχής της καταγραφής αποτελεσμάτων.
- ε) Το χρονικό βήμα της ανάλυσης για τις απορροές ξηρού καιρού (1h) και υγρού καιρού (1min), το χρονικό βήμα καταγραφής αποτελεσμάτων (Reporting Step: 10min) και το χρονικό βήμα ανάλυσης για τη διόδευση (Routing Time: 1s).

#### 4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Στην Παράγραφο 2.6 έγινε αναφορά στις παραμέτρους του μοντέλου SWMM που επηρεάζουν σημαντικά την παροχή αιχμής και τον όγκο της απορροής, τα βάθη ροής και τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Στην παρούσα εργασία έγινε ανάλυση ευαισθησίας σε 9 παραμέτρους του μοντέλου στις οποίες πραγματοποιήθηκαν μεταβολές  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$ ,  $\pm 40\%$ ,  $\pm 50\%$ . Εξετάστηκε η επίδραση των μεταβολών στις τιμές των παραμέτρων στην παροχή αιχμής, τη χρονική στιγμή της αιχμής, το συνολικό όγκο της απορροής και το μέγιστο βάθος ροής. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι:

- Το πλάτος της υπολεκάνης (Width)
- Επιφανειακή συγκράτηση αδιαπέρατου τμήματος υπολεκάνης (D-imp)
- Συντελεστής τραχύτητας Manning αδιαπέρατου τμήματος (N-imp)
- Συντελεστής τραχύτητας Manning περατού τμήματος (N-perv)
- Ποσοστό αδιαπέρατης περιοχής χωρίς επιφανειακή συγκράτηση (%zero imper)
- Ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών (%imper)
- Συντελεστής τραχύτητας Manning των αγωγών (n-con)
- Κλίση υπολεκάνης (S)
- Αριθμός καμπύλης CN

Η ανάλυση ευαισθησίας έγινε με τη μέθοδο One At a Time (OAT). Η μέθοδος στοχεύει στην παρακολούθηση της επίδρασης η οποία ασκείται στο τελικό αποτέλεσμα, από τη μεταβολή μιας παραμέτρου, ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Στην περιοχή μελέτης έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας και με καθολική μέθοδο, και συγκεκριμένα τη μέθοδο Morris (Κουρτής κ.ά, 2019). Η ανάλυση αφορά ένα απλοποιημένο μοντέλο της περιοχής στο SWMM με δύο υπολεκάνες και συμπεριλήφθηκαν σε αυτή 14 παράμετροι του μοντέλου. Η εν λόγω ανάλυση κατέδειξε ως πιο ευαίσθητες τις παραμέτρους του ποσοστού της αδιαπέρατης επιφάνειας, των απορροών ξηρού καιρού, της επιφανειακής συγκράτησης αδιαπέρατου τμήματος, του συντελεστή Manning αδιαπέρατου τμήματος και



του πλάτους της υπολεκάνης, με το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας να αποτελεί την παράμετρο με τη μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα.

#### 4.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η επιλογή των παραμέτρων που θα ληφθούν υπόψιν στη βαθμονόμηση του μοντέλου εξαρτάται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που προηγήθηκε, καθώς και από τη διερεύνηση των παραμέτρων που θεωρούνται ευαίσθητες με βάση τη βιβλιογραφία. Σημειώνεται, πως για την περιοχή μελέτης έχει πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση μοντέλου στο SWMM με μεταβολή των τιμών των παραμέτρων του πλάτους και του ποσοστού αδιαπερατότητας των υπολεκανών (Kourti et al., 2017).

Στην παρούσα εργασία ακολουθήθηκε μια διαδικασία ημι-αυτόματης βαθμονόμησης, κατά την οποία έγινε χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου με ταυτόχρονη επέμβαση στις τιμές των ορίων των μεταβλητών, με στόχο την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB.

Κριτήριο επίδοσης του μοντέλου για τη βαθμονόμηση αποτελεί ο συντελεστής Nash Sutcliffe. Τιμές του NSE μεταξύ 0.5 και 0.65 θεωρούνται ικανοποιητικές, μεταξύ 0.65 και 0.75 καλές, ενώ από 0.75 έως 1 θεωρούνται πολύ καλές (Moriasi et al, 2007).

Ο δείκτης NSE παίρνει τιμές από  $-\infty$  έως 1, με τη τιμή 1 να αποτελεί τη βέλτιστη τιμή. Υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.8:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \quad (\text{Εξίσωση 4.8})$$

Όπου:

$Y_i^{obs}$  : η τιμή της παρατηρημένης παροχής για το χρονικό βήμα  $i$

$Y_i^{sim}$  : η τιμή της υπολογισμένης από το μοντέλο παροχής για το χρονικό βήμα  $i$

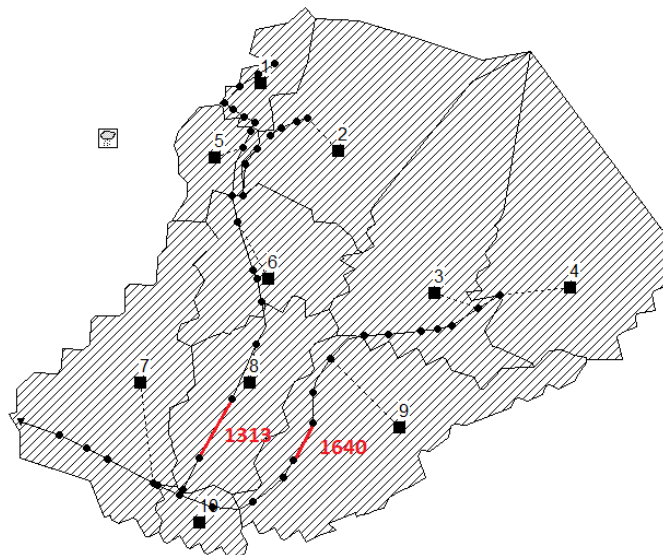
$Y^{mean}$  : η μέση τιμή των παρατηρημένων παροχών

$n$  : το πλήθος των παρατηρήσεων

Το κριτήριο επίδοσης αποτελεί τη συνάρτηση στόχου για τη βελτιστοποίηση, που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου διαθέσιμου στη MATLAB. Συγκεκριμένα, ως συνάρτηση στόχου τέθηκε η Εξίσωση 4.9, η εύρεση του ολικού ελαχίστου της οποίας, αποτελεί το αντικείμενο της εν λόγω βελτιστοποίησης.

$$Nash = -1 + \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} = -NSE \quad (\text{Εξίσωση 4.9})$$

Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για τους δύο αγωγούς (1313 και 1640) του συστήματος για τους οποίους υπάρχουν μετρημένες απορροές από κοινό επεισόδιο βροχής στις 24/02/2006. Η αλλαγή στις τιμές των παραμέτρων γίνεται για τις λεκάνες 1, 2, 5, 6 και 8 με βάση το NSE που προκύπτει από τις μετρημένες και προσομοιωμένες τιμές παροχής στον αγωγό 1313, ενώ για τις λεκάνες 3, 4 και 9 από τις αντίστοιχες τιμές για τον αγωγό 1640. Οι λεκάνες και οι δύο αγωγοί στους οποίους τελικά παροχτεύονται φαίνονται στην Εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7: Θέσεις των αγωγών με βάση τους οποίους θα πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση

#### 4.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΡΟΧΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΟΜΒΡΙΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΒΡΟΧΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ

Μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της απόκρισης του δικτύου σε συνθετικές βροχοπτώσεις διάρκειας 1, 2, 6 και 24hr με περίοδο επαναφοράς 25 και 50 έτη. Για το σκοπό αυτό καταρτίζονται βροχογραφήματα, το ύψος βροχής των οποίων προκύπτει από τις όμβριες καμπύλες για την περιοχή μελέτης, έχοντας κάθε φορά γνωστή τη διάρκεια βροχής και την περίοδο επαναφοράς.

Η όμβρια καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των βροχογραφήματων (Mimikou et al., 2000) περιγράφεται από την Εξίσωση 4.10:

$$i = 15.39T^{0.276}d^{-0.725} \quad (4.10)$$

όπου:

$i$  : η ένταση βροχής (mm/hr)

$T$  : η περίοδος επαναφοράς

$d$  : η διάρκεια βροχής

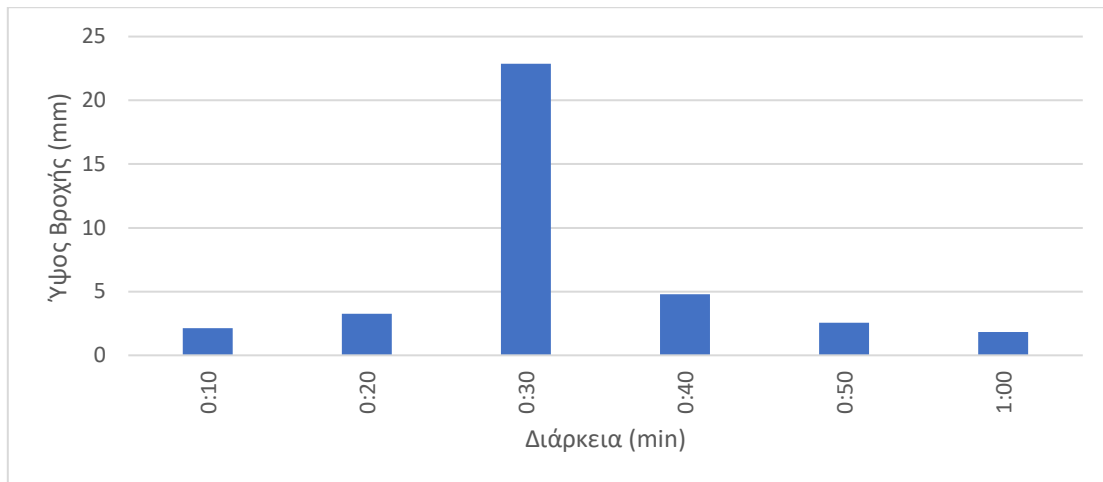
Από την παραπάνω σχέση υπολογίζεται η ένταση βροχής για τα ζεύγη διάρκειας βροχής και περιόδου επαναφοράς που προαναφέρθηκαν. Για τη χρονική κατανομή της βροχόπτωσης επιλέγεται η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ (Alternating Block Method). Από τις

όμβριες καμπύλες και με δεδομένο ότι το ύψος βροχής ισούται με το γινόμενο της έντασης επί τη διάρκεια βροχής, για βροχοπτώσεις της ίδιας περιόδου επαναφοράς ισχύει η Εξίσωση 4.11:

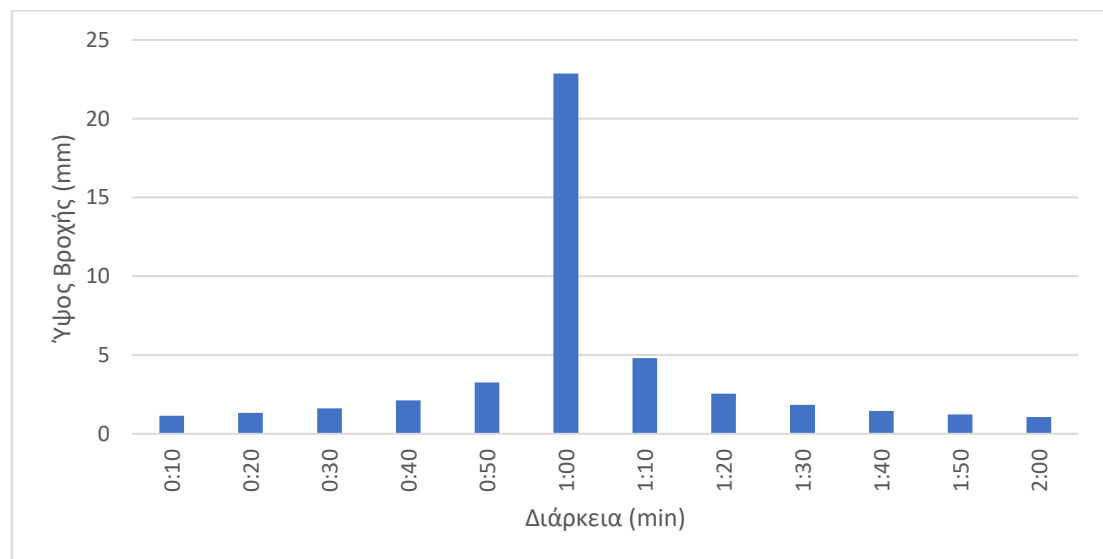
$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1-m} \quad (4.11)$$

Έτσι, υπολογίζονται τα αθροιστικά ύψη βροχής κάθε επιμέρους διάρκειας, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ίση με 10min. Από τις διαφορές τους υπολογίζεται το ύψος βροχής κάθε χρονικού βήματος. Στη συνέχεια, αφού τα ύψη βροχής τοποθετούν σε φθίνουσα σειρά, το μεγαλύτερο ύψος βροχής τοποθετείται στο κεντρικό διάστημα και τα αμέσως μικρότερα δεξιά και αριστερά εναλλάξ, μέχρι να συμπληρωθεί η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης (Κούρτης, 2016).

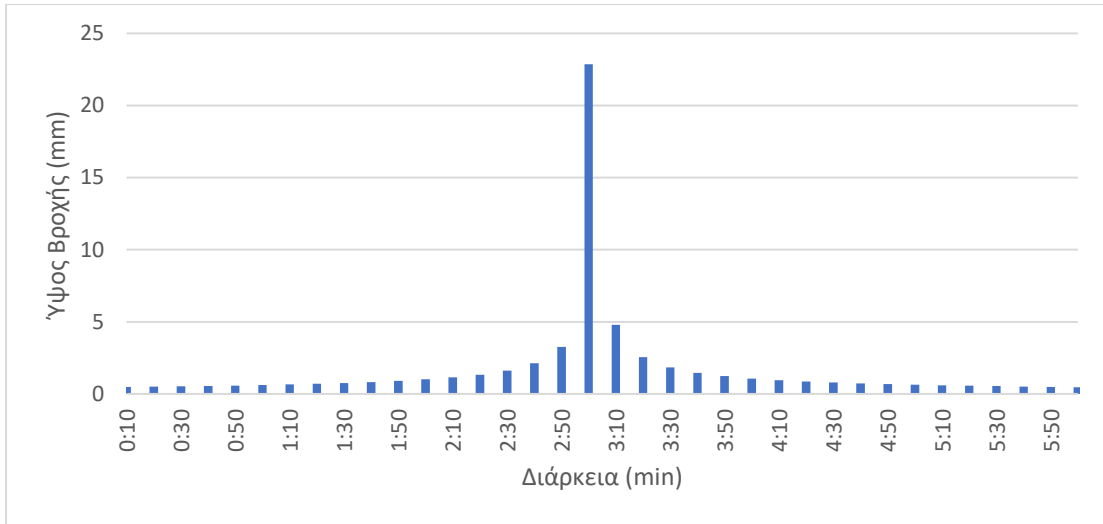
Στις Εικόνες 4.8 έως 4.15 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα βροχογράφημα που κατασκευάστηκαν με την παραπάνω μέθοδο για τις διάρκειες βροχής και περιόδους επαναφοράς που επιλέχθηκαν.



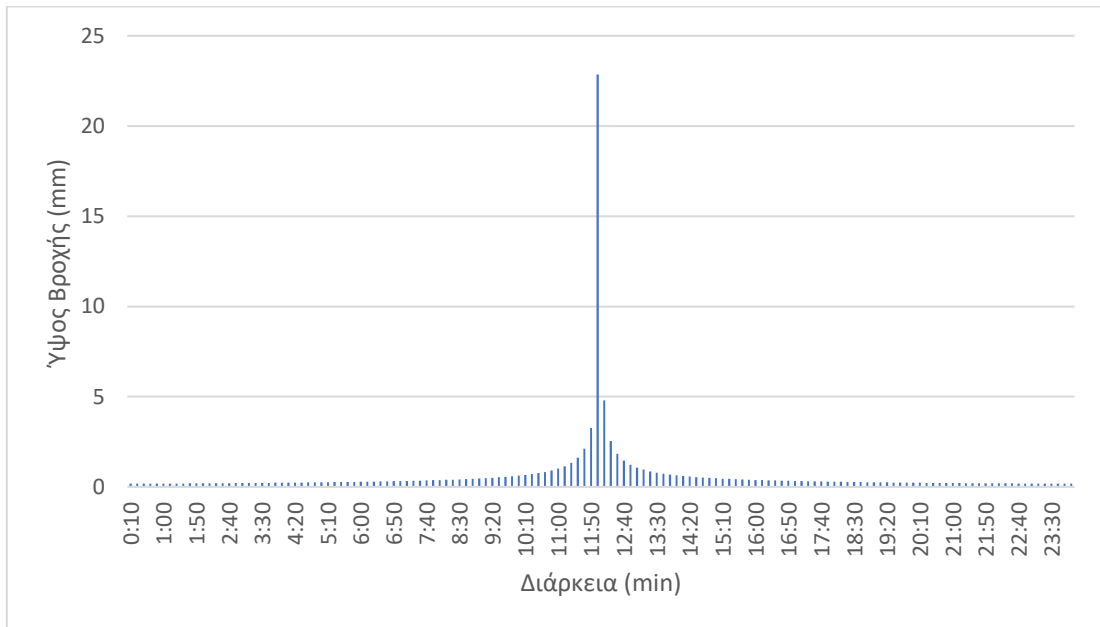
Εικόνα 4.8: Βροχογράφημα T=25 και d=1hr



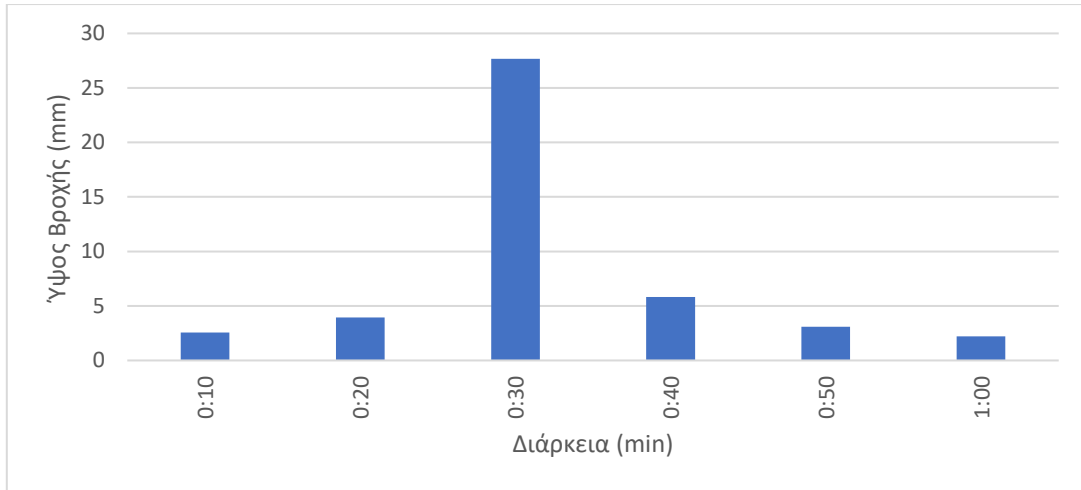
Εικόνα 4.9: Βροχογράφημα T=25 και d=2hr



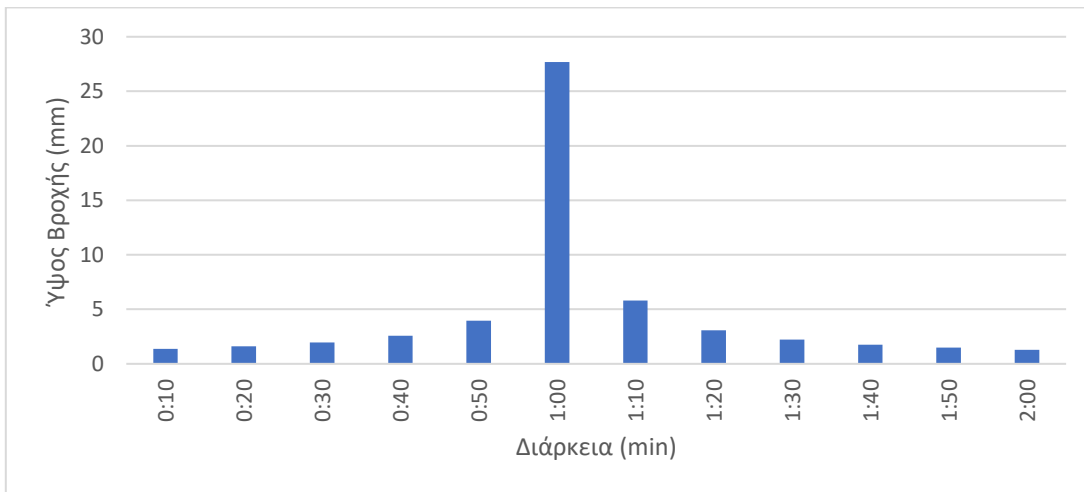
Εικόνα 4.10: Βροχογράφημα T=25 και d=6hr



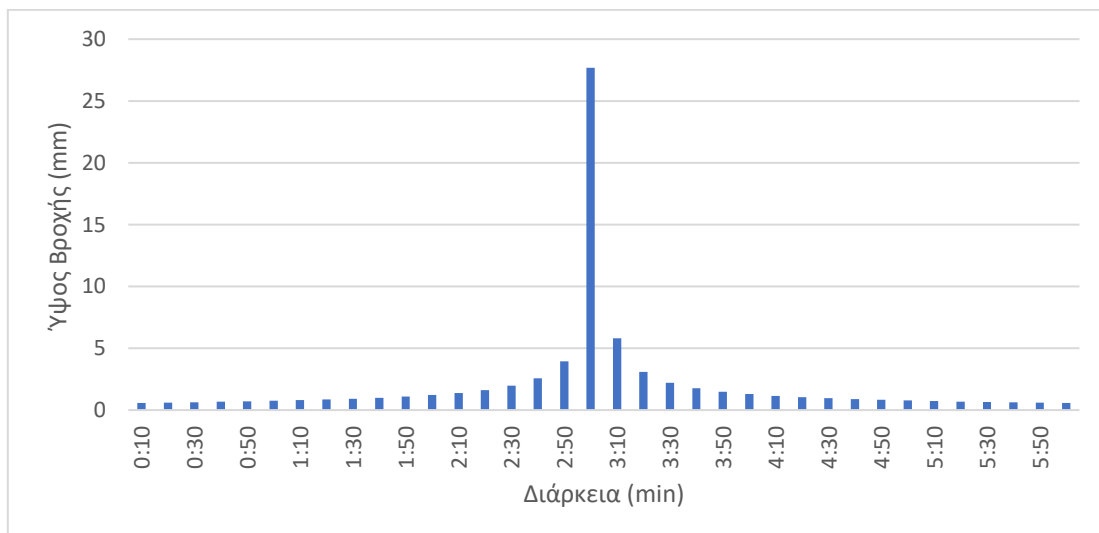
Εικόνα 4.11: Βροχογράφημα T=25 και d=24hr



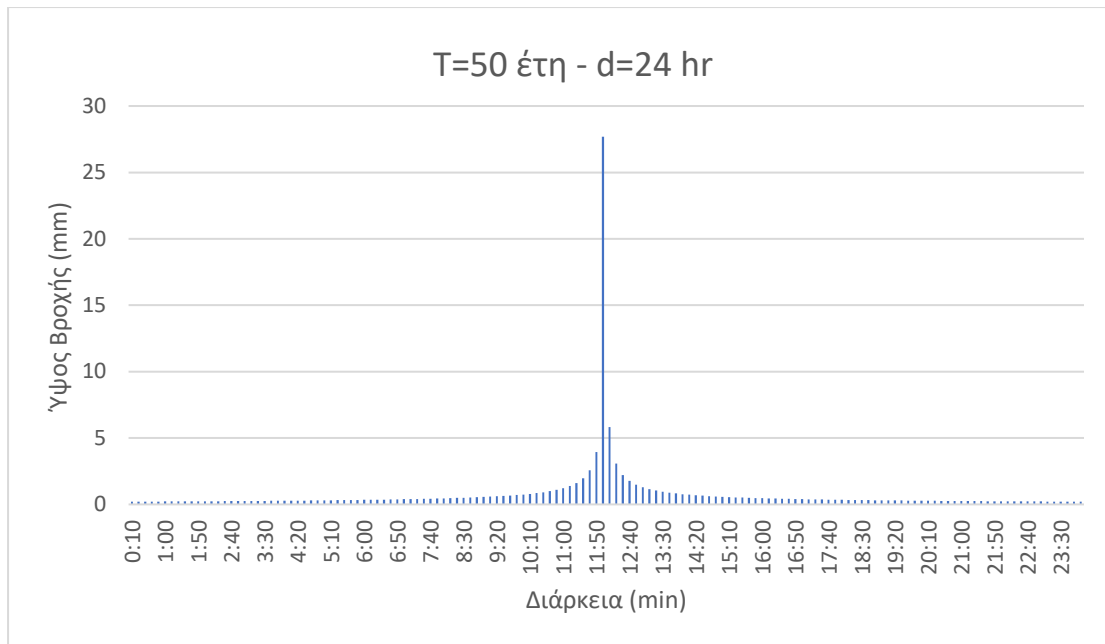
Εικόνα 4.12: Βροχογράφημα T=50 και d=1hr



Εικόνα 4.13: Βροχογράφημα T=50 και d=2hr



Εικόνα 4.14: Βροχογράφημα T=50 και d=6hr

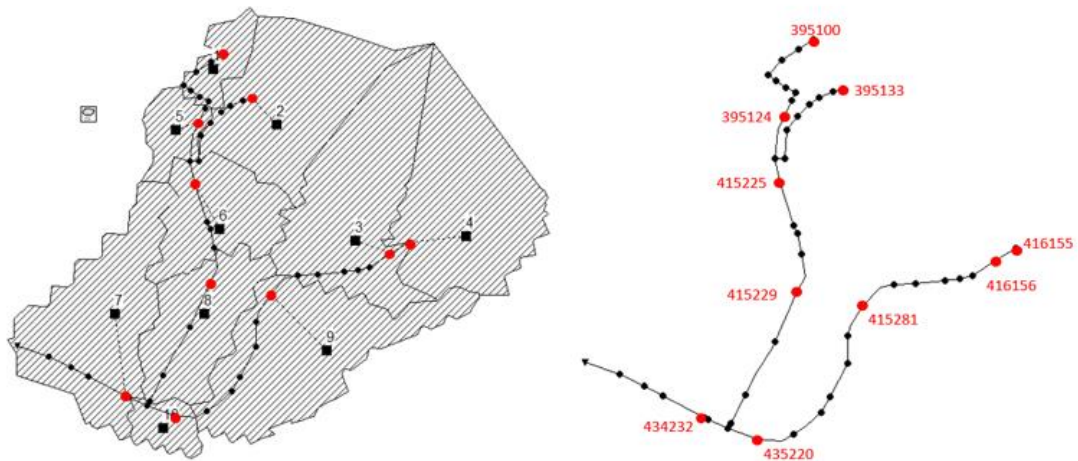


Εικόνα 4.15: Βροχογράφημα T=50 και d=24hr

Εισάγοντας τα παραπάνω βροχογραφήματα στο λογισμικό SWMM και χρησιμοποιώντας το βαθμονομημένο μοντέλο, θα γίνει διερεύνηση του δικτύου. Οι υπόλοιπες παράμετροι και επιλογές προσομοίωσης του μοντέλου παραμένουν ως είχαν κατά την αρχική κατασκευή του. Η διάρκεια προσομοίωσης, επιλέχθηκε να είναι κάθε φορά ίση με τη διάρκεια που απαιτείται, ώστε η παροχή στην έξοδο της λεκάνης να γίνει ίση με την παροχή ξηρού καιρού, θεωρώντας πως τότε έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της απορροής στη λεκάνη.

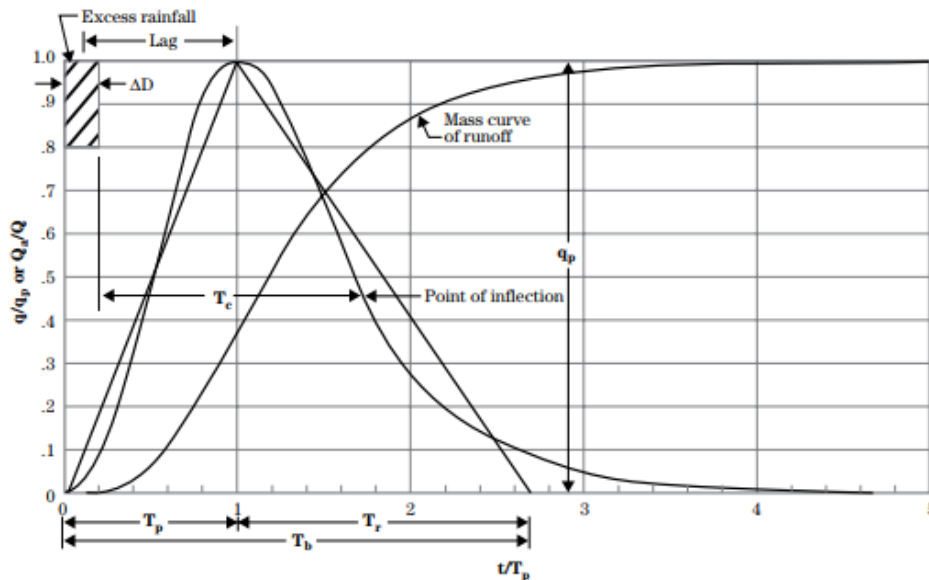
#### 4.6 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟ SWMM ΜΕ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΩΣ ΕΙΣΟΔΟΥΣ

Στην παρούσα παράγραφο επιχειρείται η εφαρμογή μιας μεθοδολογίας κατά την οποία καταρτίζονται πλημμυρογραφήματα εισόδου στο δίκτυο αποχέτευσης της λεκάνης απορροής, το οποίο εν συνεχεία επιλύεται υδραυλικά με το SWMM. Τα πλημμυρογραφήματα παράγονται με βάση το μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS για κάθε μια από τις 10 υπολεκάνες της περιοχής μελέτης και αφορούν βροχές περιόδου επαναφοράς T=25 και T=50 ετών και διάρκειας d=1hr, d=2 hr, d=6 hr και d=24 hr, ομοίως με την Παράγραφο 4.5. Οι θέσεις εισαγωγής των πλημμυρογραφημάτων στο SWMM είναι οι κόμβοι στους οποίους εισάγεται η απορροή κάθε υπολεκάνης στο μοντέλο, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.16. Στους ίδιους κόμβους εισάγονται και οι απορροές ξηρού καιρού για κάθε υπολεκάνη, όπως υπολογίσθηκαν στην Παράγραφο 4.2.3 της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 4.16: Κόμβοι εισαγωγής των πλημμυρογραφημάτων κάθε λεκάνης στο δίκτυο

Για την κατάρτιση των πλημμυρογραφημάτων χρησιμοποιείται το μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS. Κατά τον Sherman (1932) το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι το υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους ίσου με τη μονάδα (στο μετρικό σύστημα ίσης με ένα cm) που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης κι έχει ομοιόμορφη ένταση. Το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS είναι ένα υδρογράφημα στο οποίο η τεταγμένη εκφράζεται ως ο λόγος της παροχής ( $Q$ ) ως προς την αιχμή,  $Q_p$ , και η τετμημένη ως ο λόγος του χρόνου ως προς τον χρόνο που παρατηρείται η μέγιστη παροχή,  $t_p$  (Τσακίρης, 2013). Το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.17, καθώς και το ισοδύναμο του τριγωνικό υδρογράφημα.



Εικόνα 4.17: Αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS (<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043063>)

Το αδιάστατο υδρογράφημα μετατρέπεται σε μοναδιαίο συγκεκριμένης διάρκειας, αν είναι γνωστά τα μεγέθη  $Q_p$  και  $t_p$  τα οποία υπολογίζονται με τις Εξισώσεις 4.12 και 4.13 (Τσακίρης, 2013):

$$Q_p = \frac{2.08A}{t_p} \quad (4.12)$$

$$t_p = \frac{t_0}{2} + t_L \quad (4.13)$$

Όπου:

$Q_p$  : η παροχή αιχμής ( $m^3/s$ ) του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

$A$  : η επιφάνεια της λεκάνης απορροής ( $km^2$ )

$t_p$  : ο χρόνος που παρατηρείται η μέγιστη παροχή – χρόνος αιχμής (hr)

$t_0$  : η διάρκεια του περισσεύματος βροχής (hr)

$t_L$  : ο χρόνος υστέρησης της λεκάνης (hr), δηλαδή ο χρόνος μεταξύ του κέντρου μάζας του υετογράμματος και της αιχμής πλημμύρας, που συνήθως υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.14:

$$t_L = 0.6t_c \quad (4.14)$$

Όπου  $t_c$  είναι ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής (hr). Ο υπολογισμός του χρόνου συγκέντρωσης μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους, σε μερικές από τις οποίες θα γίνει αναφορά στη συνέχεια, αφού με αυτές εκτιμήθηκε ο χρόνος συγκέντρωσης των υπολεκανών στην παρούσα εργασία.

Ανάμεσα στο χρόνο αιχμής  $t_p$  και στο χρόνο υστέρησης  $t_L$ , υφίσταται η Εξίσωση 4.15, με την οποία υπολογίζεται ο χρόνος αποχώρησης,  $t_r$  :

$$t_r = 1.67t_p \quad (4.15)$$

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω εξισώσεις, ο υπολογισμός του μοναδιαίου υδρογραφήματος, βασίζεται στο περίσσειμα βροχής συγκεκριμένης διάρκειας και ύψους 10mm. Επομένως, απαιτείται ο υπολογισμός των απωλειών βροχής συγκεκριμένης διάρκειας. Στην παρούσα εργασία, για τον υπολογισμό του περισσεύματος βροχής επιλέγεται η μέθοδος SCS. Σύμφωνα με τη μέθοδο, οι αρχικές απώλειες (συγκράτησης και εξάτμισης) είναι 20% των συνολικών απωλειών ( $S$ ), δηλαδή της διαφοράς μεταξύ ύψους ( $h_r$ ) και περισσεύματος ( $h_R$ ) βροχής (Τσακίρης, 2013). Το περίσσειμα βροχής υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.16, αν ισχύει  $h_r > 0.2S$  :



$$h_R = \frac{(h_r - 0.2S)^2}{(h_r + 0.8S)} \quad (4.16)$$

Διαφορετικά,  $h_R = 0$ .

Οι συνολικές απώλειες υπολογίζονται βάσει του αριθμού καμπύλης CN, όπως υπολογίσθηκε για κάθε υπολεκάνη στην Παράγραφο 4.2.4 της παρούσας εργασίας, με την Εξίσωση 4.17:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.17)$$

Μετά την κατασκευή του μοναδιαίου υδρογραφήματος για κάθε υπολεκάνη της περιοχής μελέτης, ακολουθεί η παραγωγή πλημμυρογραφήματος για κάθε επεισόδιο βροχής που εξετάζεται. Η διαδικασία παραγωγής μοναδιαίων υδρογραφημάτων και των αντίστοιχων πλημμυρογραφημάτων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού HEC-HMS, όπου εισήχθησαν:

- Οι 10 υπολεκάνες και η έκτασή τους
- Η επιλογή της μεθόδου της SCS για την παραγωγή μοναδιαίου υδρογραφήματος
- Η επιλογή της μεθόδου της SCS για τον υπολογισμό των απωλειών
- Ο αριθμός καμπύλης CN για κάθε υπολεκάνη
- Ο χρόνος υστέρησης για κάθε υπολεκάνη (Lag time),  $t_L$
- Τα 8 βροχογραφήματα για τα οποία θα υπολογιστεί πλημμυρογράφημα (με περιόδους επαναφοράς T=25 έτη και T=50 έτη και διάρκειες βροχής d=1hr, d=2 hr, d=6 hr και d=24hr)

Ο χρόνος υστέρησης υπολογίστηκε βάσει του χρόνου συγκέντρωσης  $t_c$  από την Εξίσωση 4.14. Ως χρόνος συγκέντρωσης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το νερό που συμβάλλει στην άμεση απορροή, από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης στη διατομή εξόδου (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018).

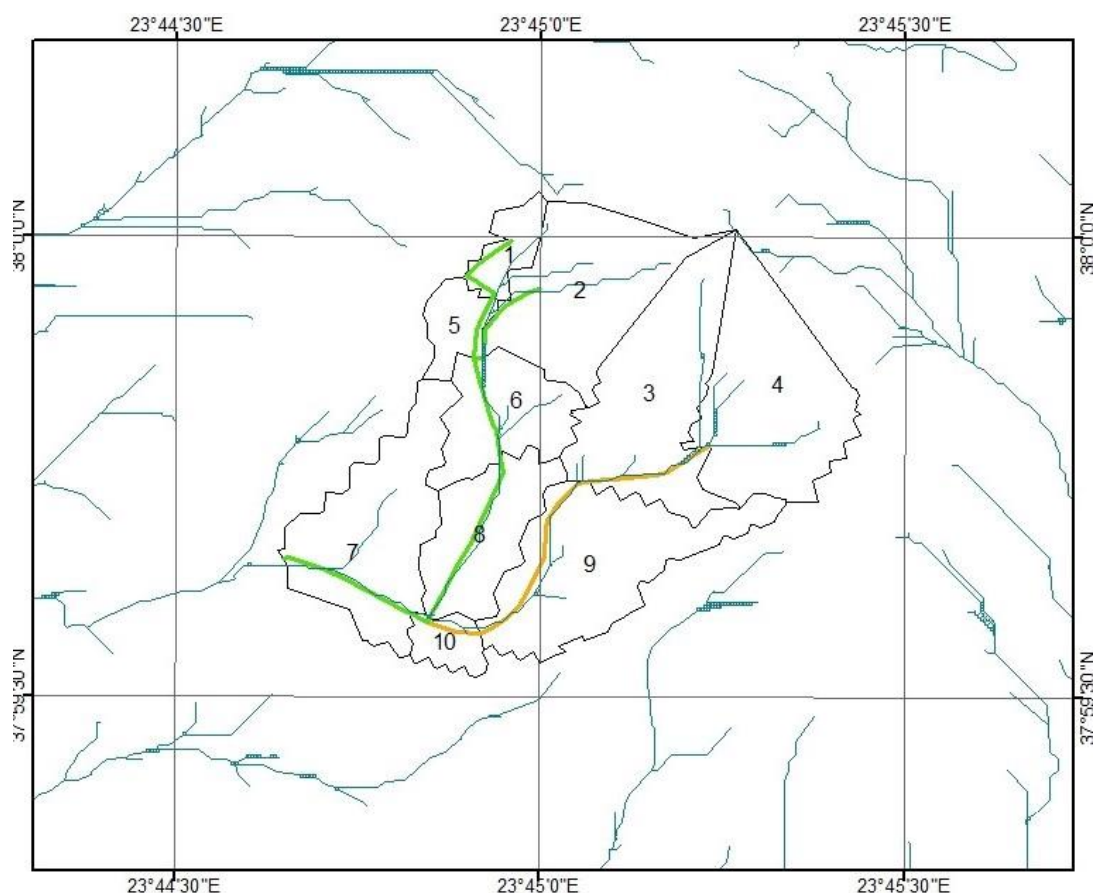
Για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης χρησιμοποιήθηκαν 3 μέθοδοι, η Giandotti, η εξίσωση Κινηματικού Κύματος και η Kerby. Τα αποτελέσματα των 3 μεθόδων συγκρίνονται ως προς την ικανότητά τους να αποδίδουν τις φυσικές διεργασίες των υπολεκανών, μέσω της σύγκρισης με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή βροχής T=25 και d=1hr στο βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM (Παράγραφος 4.5 της παρούσας εργασίας). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται ως προς την χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής, τον όγκο της απορροής και την τιμή της παροχής αιχμής.

Για την εφαρμογή και των τριών μεθόδων απαιτείται ο υπολογισμός του μήκους του κύριου υδατορέματος σε κάθε υπολεκάνη καθώς και η κλίση κατά μήκος αυτού ή υψομετρική διαφορά μεταξύ του μέσου υψομέτρου της λεκάνης και του υψομέτρου στην έξοδο της λεκάνης (μέθοδος Giandotti). Επομένως, απαιτείται η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου για τις 10 υπολεκάνες.

Η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του ArcGIS, επιλέγοντας ως κατώφλι για τον κλίση συγκέντρωσης ροής (Flow Accumulation) την τιμή 0.1%. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερη μικρή γεγονός που δικαιολογείται από το μικρό μέγεθος των υπολεκανών. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.18. Διακρίνεται το υδρογραφικό δίκτυο, καθώς και η ταύτιση του στο μεγαλύτερο τμήμα των αστικών περιοχών της περιοχής μελέτης με το δίκτυο αποχέτευσης. Οι κλίσεις

υδατορεμάτων, καθώς και τα υψόμετρα που απαιτούνται για την εφαρμογή των μεθόδων υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης υπολογίστηκαν, επίσης, μέσω του προγράμματος ArcGIS.

Επιπλέον, για τις μεθόδους Κινηματικού Κύματος και Kerby, παράμετρο υπολογισμού αποτελεί ο συντελεστής Manning της κάθε υπολεκάνης. Ο συντελεστής Manning υπολογίστηκε για κάθε υπολεκάνη ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των τιμών του αδιαπέρατου και περατού τμήματος κάθε μιας από αυτές με βάση το ποσοστό αδιαπέρατων τμημάτων που τους αποδόθηκε στο βαθμονομημένο μοντέλο. Αναλυτικά οι πίνακες υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης με κάθε μέθοδο παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.



Εικόνα 4.18: Υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης που εξήχθη με το λογισμικό ArcGIS.

Για την εφαρμογή της μεθόδου Giandotti (1934) χρησιμοποιείται η Εξίσωση 4.18.

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_m - H_{\min}}} \quad (4.18)$$

Όπου:

$T_c$  : Ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης (hr)

$A$  : Η έκταση της λεκάνης (km<sup>2</sup>)

$L$  : Το μέγιστο μήκος διαδρομής της λεκάνης (km)

$H_m$  : Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης (m)

$H_{\min}$  : Το υψόμετρο εξόδου της λεκάνης (m)

Για την μέθοδο του Κινηματικού Κύματος χρησιμοποιήθηκε η απλοποιημένη εκδοχή που αναπτύχθηκε από τους Welle και Woodward (1986), όπως ορίζεται στην Εξίσωση 4.19

$$T_t = \frac{0.007(nl)^{0.8}}{(P_2)^{0.5} S^{0.4}} \quad (4.19)$$

$T_t$  : Χρόνος συγκέντρωσης (hr)

$n$  : Συντελεστής τραχύτητας Manning

$l$  : Μήκος χερσαίας ροής (ft)

$P_2$  : Βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=2$  έτη και διάρκειας  $d=24$  hr (in)

$S$  : Κλίση εδάφους κατά μήκος της χερσαίας ροής (ft/ft)

Η τελευταία μέθοδος που εξετάστηκε είναι εξίσωση που αναπτύχθηκε από τον Kerby (1959) από δεδομένα μιας πολύ μικρής σε έκταση λεκάνης, στην οποία κυριαρχεί η επίγεια ροή. Η μέθοδος συχνά αναφέρεται ως κατάλληλη για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης σε λεκάνες με μήκος επίγεια ροής μικρότερο των 1000 ft, δηλαδή 304.8 m (Woodward, 2010). Με βάση τη μέθοδο ο χρόνος συγκέντρωσης ορίζεται από την Εξίσωση 4.20.

$$T_c = \left[ \frac{2.2nl}{S^{0.5}} \right]^{0.324} \quad (4.20)$$

$T_c$  : Ο χρόνος συγκέντρωσης (min)

$n$  : Ο συντελεστής τραχύτητας Manning

$l$  : Το μήκος ροής (ft)

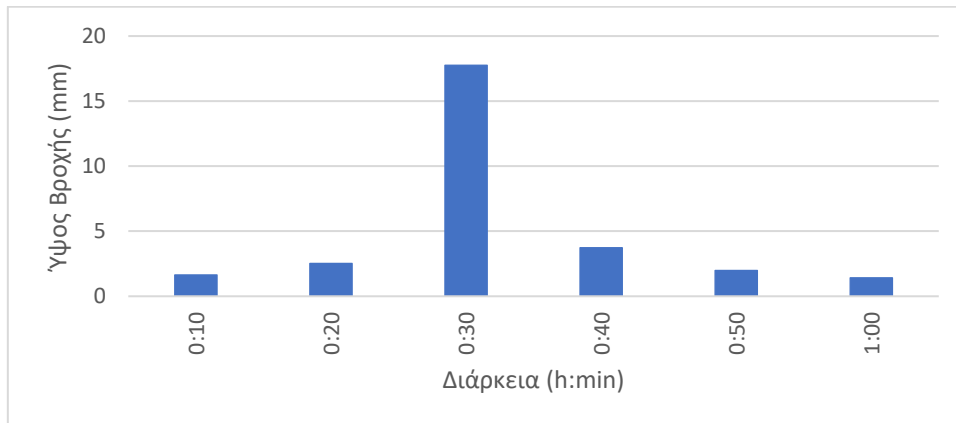
$S$  : Η μέση κλίση (ft/ft)

#### **4.7 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΜΙ-ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ**

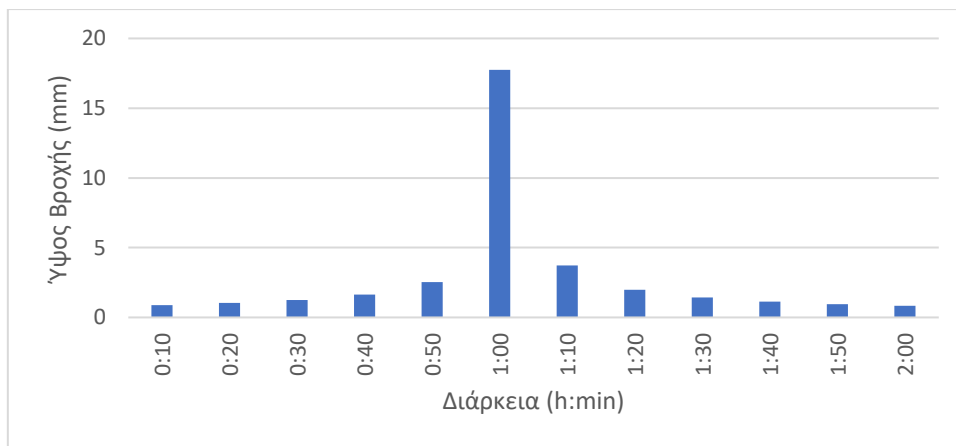
Όπως, αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 1.2.2 της παρούσας εργασίας, η αστική ανάπτυξη μιας περιοχής οδηγεί σε μεγαλύτερους όγκους απορροής, αυξάνει τις τιμές των παροχών αιχμής και μειώνει το χρόνο συγκέντρωσης. Επιπλέον, σε περιοχές με έντονη αστικοποίηση εμφανίζονται πλημμύρες ως αποτέλεσμα βροχών μικρότερης περιόδου επαναφοράς από αυτές που θα προκαλούσαν αντίστοιχη πλημμύρα πριν την αστικοποίηση.

Με βάση τα παραπάνω, εξετάζεται στην περιοχή μελέτης η επίδραση 3 σεναρίων αστικοποίησης στα υδρογραφήματα της απορροής, καθώς και στην υδραυλική συμπεριφορά του παντοροϊκού δικτύου. Τα σενάρια εξετάζονται για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=10$  ετών και διάρκειας  $d=1$  hr,  $d=2$ hr,  $d=6$ hr και  $d=24$ hr. Η περίοδος επαναφοράς 10 ετών επιλέγεται καθώς πρόκειται για τη συνήθη βροχή με την οποία σχεδιάζονται τα δίκτυα

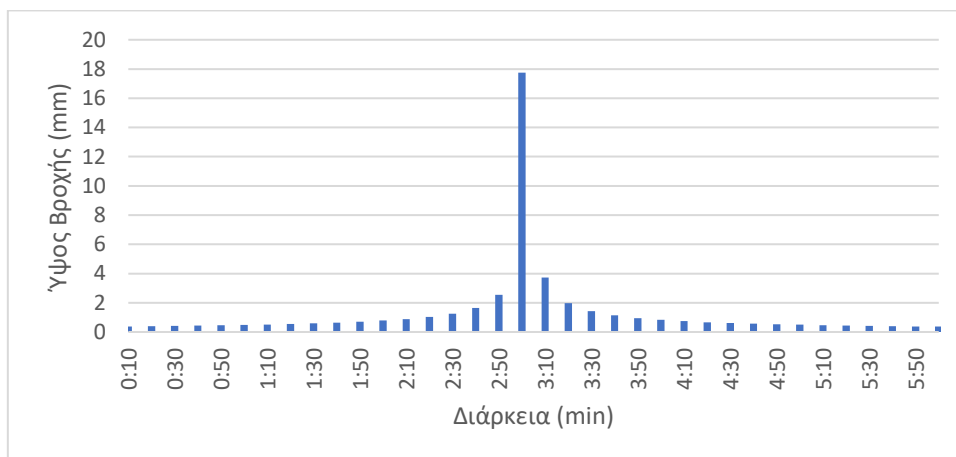
αποχέτευσης βάσει του ΠΔ 696/1974. Τα βροχογράφημα παρήχθησαν με βάση τις όμβριες καμπύλες (ομοίως με την Παράγραφο 4.5) και παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.19 έως 4.22.



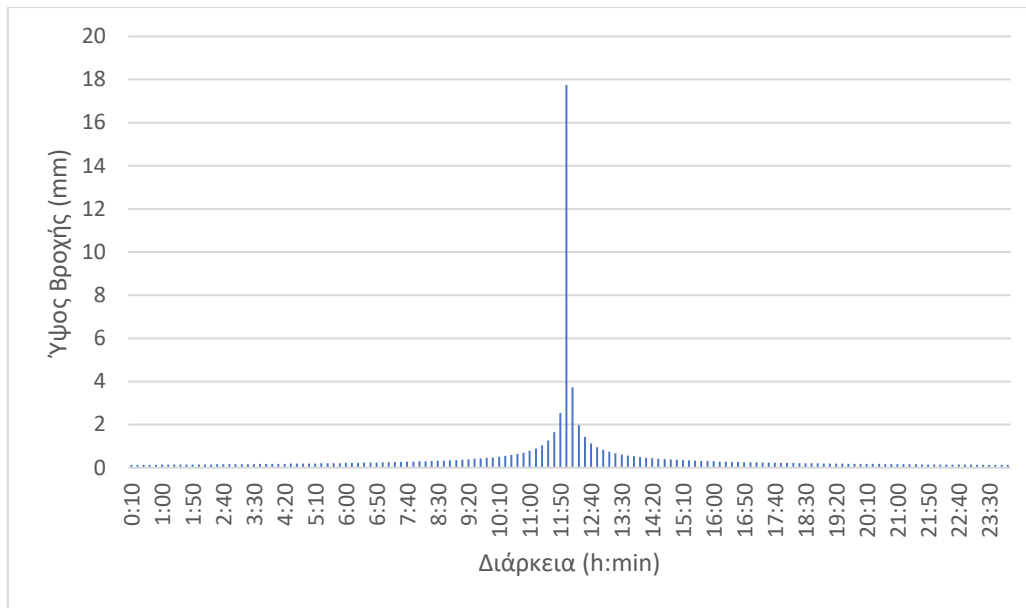
Εικόνα 4.19: Βροχογράφημα περιόδου επαναφοράς  $T=10$  έτη και διάρκειας  $d=1hr$ .



Εικόνα 4.20: Βροχογράφημα περιόδου επαναφοράς  $T=10$  έτη και διάρκειας  $d=2hr$ .



Εικόνα 4.21: Βροχογράφημα περιόδου επαναφοράς  $T=10$  έτη και διάρκειας  $d=6hr$ .



Εικόνα 4.22: Βροχογράφημα περιόδου επαναφοράς  $T=10$  έτη και διάρκειας  $d=24$ hr.

Τα σενάρια αστικοποίησης αφορούν την περιοχή μελέτης που με βάση την υφιστάμενη κατάσταση περιλαμβάνει εκτάσεις χαμηλής βλάστησης και τον οικισμό του Γεωργίου Παπανδρέου, που χαρακτηρίζεται από αραιή και χαμηλή δόμηση. Η εν λόγω περιοχή προσομοιώνεται στο μοντέλο που αναπτύχθηκε από τις υπολεκάνες 1, 2, 3, 4 και 5 τα ποσοστά αδιαπέρατων επιφανειών των οποίων είχαν εκτιμηθεί με βάση το Google Earth ως 40%, 25%, 40%, 50% και 50% αντίστοιχα. Δεδομένων αυτών των ποσοστών τα σενάρια που εξετάζονται αφορούν αύξηση της αστικοποίησης κατά 25%, 50% και 75%. Οι υπόλοιπες υπολεκάνες εκτιμήθηκε πως έχουν ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών μεγαλύτερο του 80%, επομένως δε θεωρείται ότι μπορούν να αστικοποιηθούν περαιτέρω. Η αύξηση των αδιαπέρατων επιφανειών επιβλήθηκε στα ποσοστά αδιαπέρατων επιφανειών που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση, με τις τελικές τιμές για κάθε σενάριο να διαμορφώνονται όπως στον Πίνακα 4.1. Η διερεύνηση του δικτύου έγινε χρησιμοποιώντας το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM.

Πίνακας 4.1: Ποσοστά αδιαπέρατων επιφανειών στο βαθμονομημένο μοντέλο για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης

| Υπολεκάνες | A(km <sup>2</sup> ) | %imper                |            |            |            |
|------------|---------------------|-----------------------|------------|------------|------------|
|            |                     | Βαθμονομημένο Μοντέλο | Αύξηση 25% | Αύξηση 50% | Αύξηση 75% |
| 1          | 0.018137            | 30.9                  | 38.63      | 46.35      | 54.08      |
| 2          | 0.092766            | 30.9                  | 38.63      | 46.35      | 54.08      |
| 3          | 0.106554            | 21.41                 | 26.76      | 32.12      | 37.47      |
| 4          | 0.109668            | 21.41                 | 26.76      | 32.12      | 37.47      |
| 5          | 0.019296            | 30.9                  | 38.63      | 46.35      | 54.08      |

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στην Παράγραφο 5.6 της παρούσας εργασίας και αφορά τη σύγκριση των υδρογραφημάτων απορροής κάθε υπολεκάνης πριν και μετά την εφαρμογή των σεναρίων αστικοποίησης. Επίσης, εξετάζονται οι κόμβοι του δικτύου που πλημμυρίζουν σε κάθε περίπτωση, προκειμένου να διερευνηθεί η αντοχή του δικτύου υπό τη βροχή σχεδιασμού του. Επιπλέον, επιχειρείται να αξιολογηθεί η σχέση μεταξύ της

διάρκειας βροχής και της επίδρασης της αστικοποίησης στην απορροή, μέσω της σύγκρισης βροχών ίδιας περιόδου επαναφοράς και διαφορετικής διάρκειας. Τέλος εξετάζεται και η σχέση μεταξύ των τιμών της μέγιστης απορροής και του όγκου απορροής που προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου για τη βροχή σχεδιασμού και υπό τα σενάρια αύξησης αστικοποίησης, με βροχές μεγαλύτερης περιόδου επαναφοράς και χωρίς αύξηση της αστικοποίησης. Στόχος της τελευταίας ανάλυσης είναι να διερευνηθεί, αν η αύξηση της αστικοποίησης οδηγεί σε γεγονότα πλημμύρας που πριν την αστικοποίηση θα προκαλούνταν από βροχές μεγαλύτερης περιόδου επαναφοράς.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ ΒΡΟΧΗΣ 24/02/2006

Η πρώτη επίλυση του μοντέλου που κατασκευάστηκε στο SWMM αφορά το επεισόδιο βροχής που σημειώθηκε στις 24/02/2006. Η χρονική κατανομή του ύψους βροχής κατά τη διάρκεια του επεισοδίου παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 4.2.6. Το συνολικό ύψος βροχής στο επεισόδιο είναι 11.6 mm. Οι τιμές των παραμέτρων που αποδόθηκαν στο μοντέλο ανά υπολεκάνη παρουσιάζονται συνολικά στον Πίνακα 5.1. ενώ τα αποτελέσματα της επίλυσης στον Πίνακα 5.2.

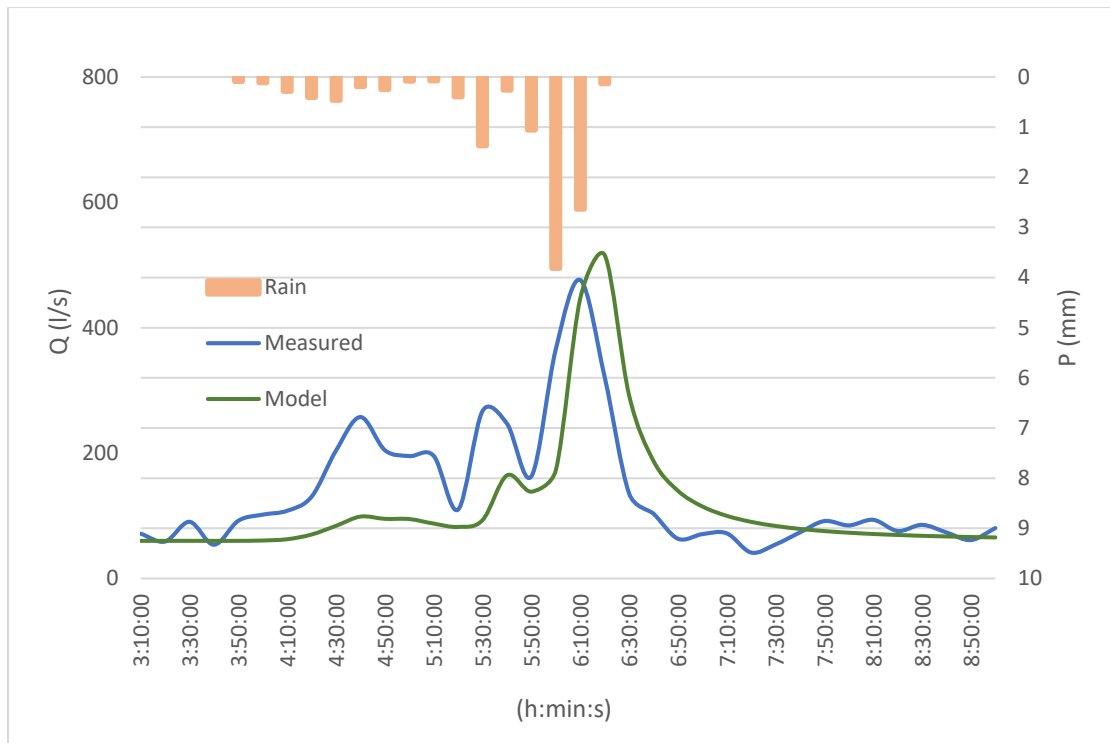
Πίνακας 5.1: Παράμετροι μοντέλου πριν τη βαθμονόμηση.

|             | Υπολεκάνες |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 1          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| Έκταση (ha) | 1.81       | 9.28  | 10.66 | 10.97 | 1.93  | 5.27  | 9.50  | 5.76  | 10.27 | 1.49  |
| %Imper      | 40         | 25    | 40    | 50    | 50    | 80    | 90    | 90    | 90    | 80    |
| Πλάτος (m)  | 60         | 300   | 100   | 100   | 60    | 60    | 60    | 60    | 60    | 60    |
| %Κλίση      | 19.43      | 36.06 | 30.29 | 36.34 | 16.14 | 18.09 | 19.08 | 12.28 | 16.45 | 14.32 |
| CN          | 84         | 80    | 86    | 91    | 86    | 93    | 96    | 96    | 96    | 93    |
| N-imper     | 0.013      | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 |
| N-perv      | 0.2        | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.2   |
| Ds-Imper    | 10         | 10    | 10    | 10    | 10    | 10    | 10    | 10    | 10    | 10    |
| Ds-Perv     | 6          | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     |
| %zero-imper | 50         | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    |
| n-cond      | 0.013      | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 |

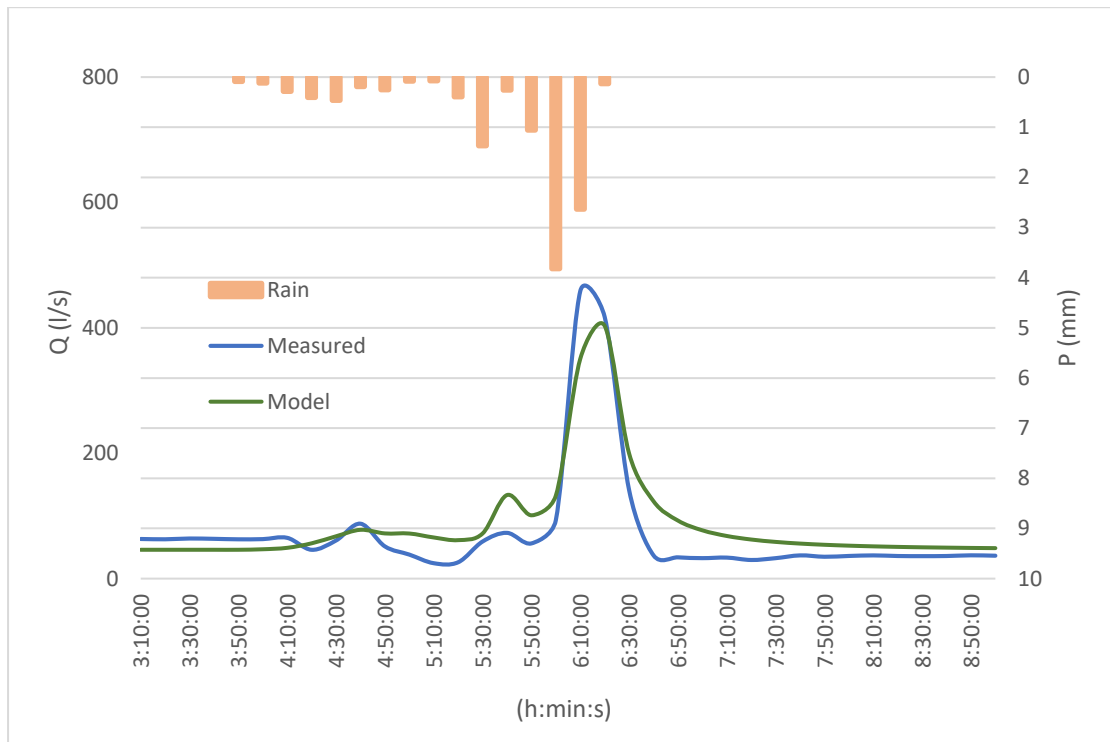
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα επίλυσης για το επεισόδιο βροχής στις 24/02/2006.

| Βροχή 24/02/2006                              |         |
|---|---------|
| Βροχόπτωση (mm)                               | 11.601  |
| Διήθηση (mm)                                  | 3.488   |
| Συγκράτηση (mm)                               | 4.1     |
| Απορροή (mm)                                  | 4.015   |
| Παροχή αιχμής στην έξοδο (l/s)                | 1151.51 |
| Χρόνος αιχμής (h:min:s)                       | 6:21:00 |
| Όγκος απορροής στην έξοδο (10 <sup>6</sup> l) | 6.736   |

Ο έλεγχος της αποδοτικότητας του μοντέλου θα γίνει με βάση τις μετρήσεις απορροής και βάθους ροής στους αγωγούς 1313 και 1640 του δικτύου για το ανωτέρω επεισόδιο. Η πρώτη εκτίμηση της αποδοτικότητας του μοντέλου έγινε με τη βοήθεια της γραφικής απεικόνισης της χρονικής κατανομής της απορροής και του βάθους ροής που υπολογίστηκαν από το μοντέλο και των αντίστοιχων τιμών των παρατηρήσεων (Εικόνα 5.1 έως 5.4).

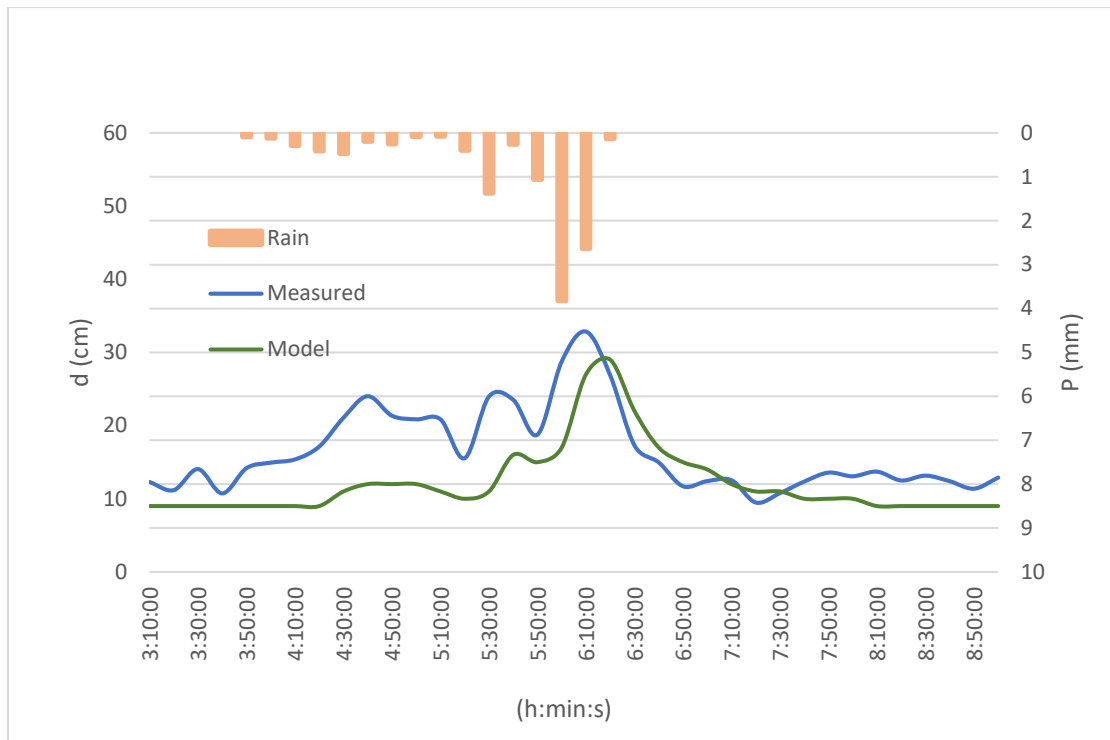


Εικόνα 5.1: Μετρημένη και υπολογισμένη παροχή στον αγωγό 1640 για το επεισόδιο βροχής στις 24/02/2006.

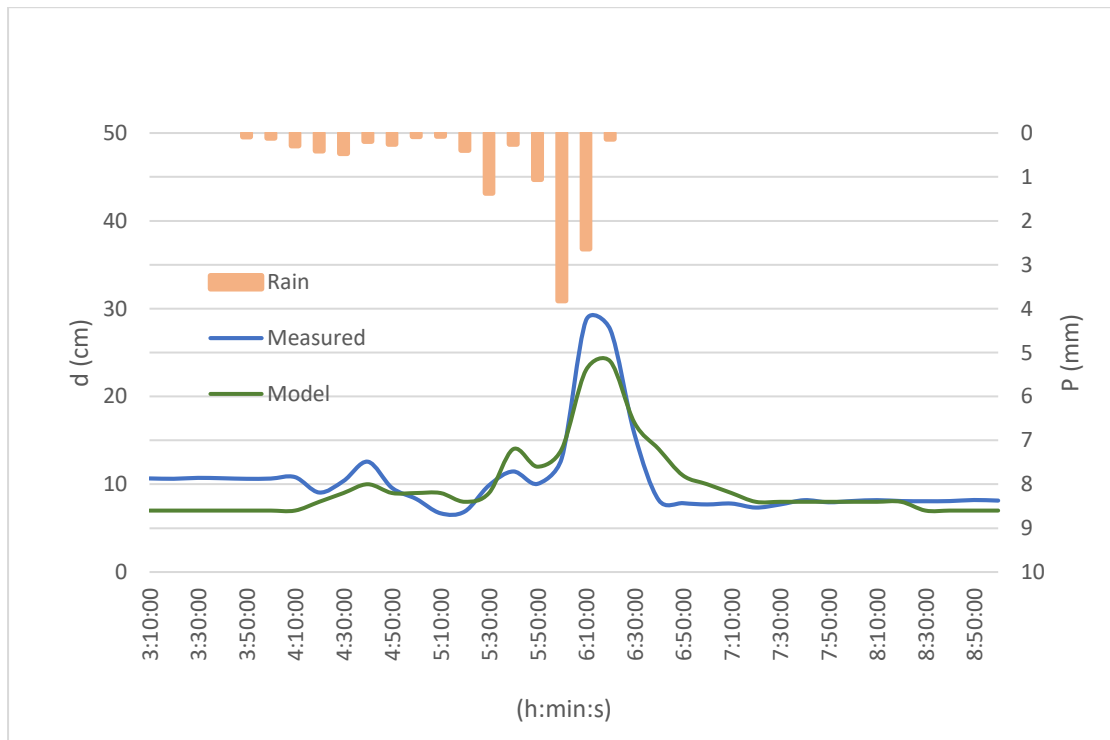


Εικόνα 5.2: Μετρημένη και υπολογισμένη παροχή στον αγωγό 1313 για το επεισόδιο βροχής στις 24/02/2006.





Εικόνα 5.3: Μετρημένα και υπολογισμένα βάθη ροής στον αγωγό 1640 για το επεισόδιο βροχής στις 24/02/2006.



Εικόνα 5.4: Μετρημένα και υπολογισμένα βάθη ροής στον αγωγό 1313 για το επεισόδιο βροχής στις 24/02/2006.

Στη συνέχεια, ως μέτρο επίδοσης του μοντέλου υπολογίστηκε ο συντελεστής αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (NSE) με βάση τις τιμές της παροχής στους αγωγούς.

Ο Nash Sutcliffe παίρνει την τιμή 0.84 για τον αγωγό 1313 και 0.30 για τον αγωγό 1640. Η χαμηλή αποδοτικότητα του μοντέλου για τον αγωγό 1640 φαίνεται και στην Εικόνα 5.1, όπου οι τιμές μεταξύ των παρατηρημένων και υπολογισμένων παροχών αποκλίνουν σημαντικά, ιδιαίτερα στον ανοδικό κλάδο του υδρογραφήματος. Αντίστοιχη απόκλιση παρουσιάζεται και στις τιμές του βάθους ροής στον αγωγό 1640 (Εικόνα 5.3).

Από τα υδρογραφήματα της παροχής για τον αγωγό 1640 φαίνεται πως η προσομοιωμένη παροχή δεν παρουσιάζει την τοπική αιχμή στις 04:40:00 που διακρίνεται στη μετρημένη παροχή. Αντίστοιχα, και στις 05:30:00 η παροχή έχει πολύ χαμηλότερη τιμή στο υδρογράφημα που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου σε σχέση με τις μετρημένες παροχές.

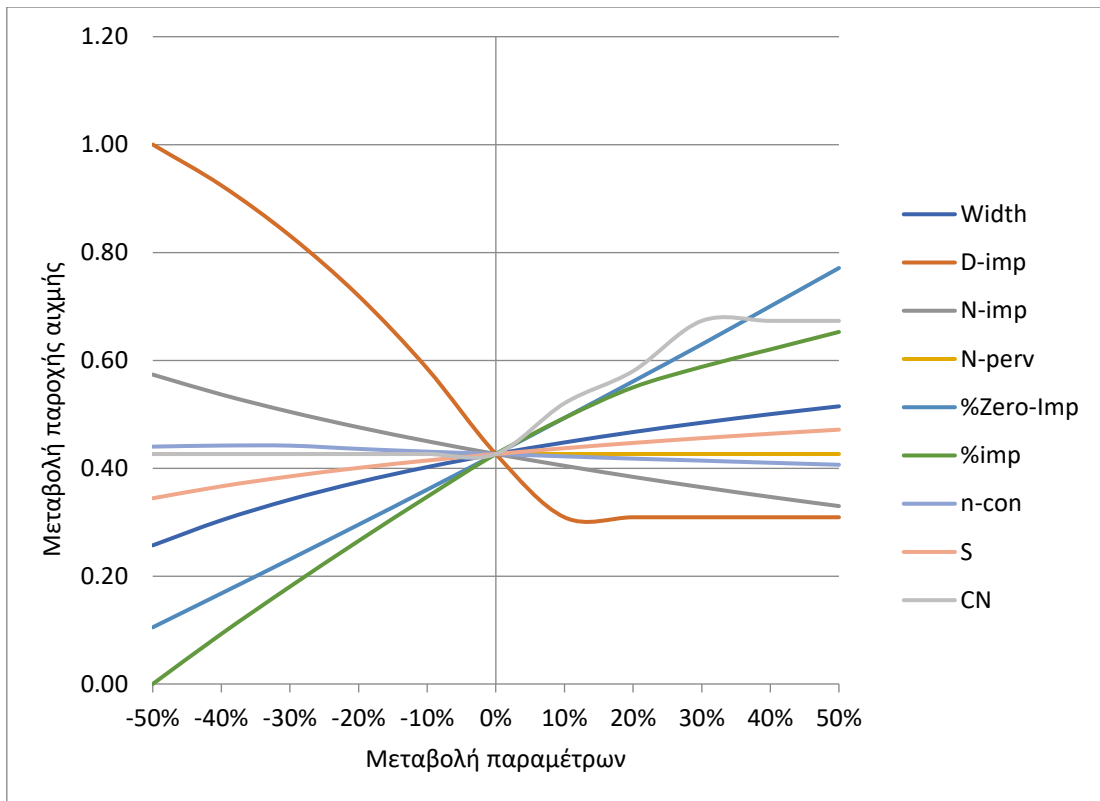
Ιδιαίτερη σημασία, έχει και η υστέρηση που παρουσιάζει το μοντέλο ως προς την παροχή αιχμής. Συγκεκριμένα, η παροχή αιχμής στις μετρήσεις σημειώνεται στις 06:10 και στους δύο αγωγούς, ενώ στα αποτελέσματα του μοντέλου η παροχή εμφανίζεται στις 06:20. Τέλος, φαίνεται πως το μοντέλο υπερεκτιμά την παροχή αιχμής για τον αγωγό 1640, ενώ υποεκτιμά την παροχή αιχμής στον αγωγό 1313.

Με βάση τα παραπάνω, και ιδιαίτερα με βάση τις τιμές του συντελεστή Nash-Sutcliffe, η αποδοτικότητα του μοντέλου που αναπτύχθηκε με βάση τις τιμές των παραμέτρων που αποδόθηκαν στο Κεφάλαιο 4, κρίνεται ικανοποιητική για τις υπολεκάνες 1, 2, 5, 6 και 8 που αφορούν τον αγωγό 1313. Αντίθετα, στις υπολεκάνες 3, 4 και 9 κρίνεται ότι είναι απαραίτητη η μεταβολή των τιμών των παραμέτρων που επιδρούν στην απορροή, προκειμένου να αυξηθεί η αποδοτικότητα του μοντέλου. Απαιτείται, επομένως, βαθμονόμηση του μοντέλου με κριτήριο επίδοσης την τιμή του συντελεστή Nash-Sutcliffe.

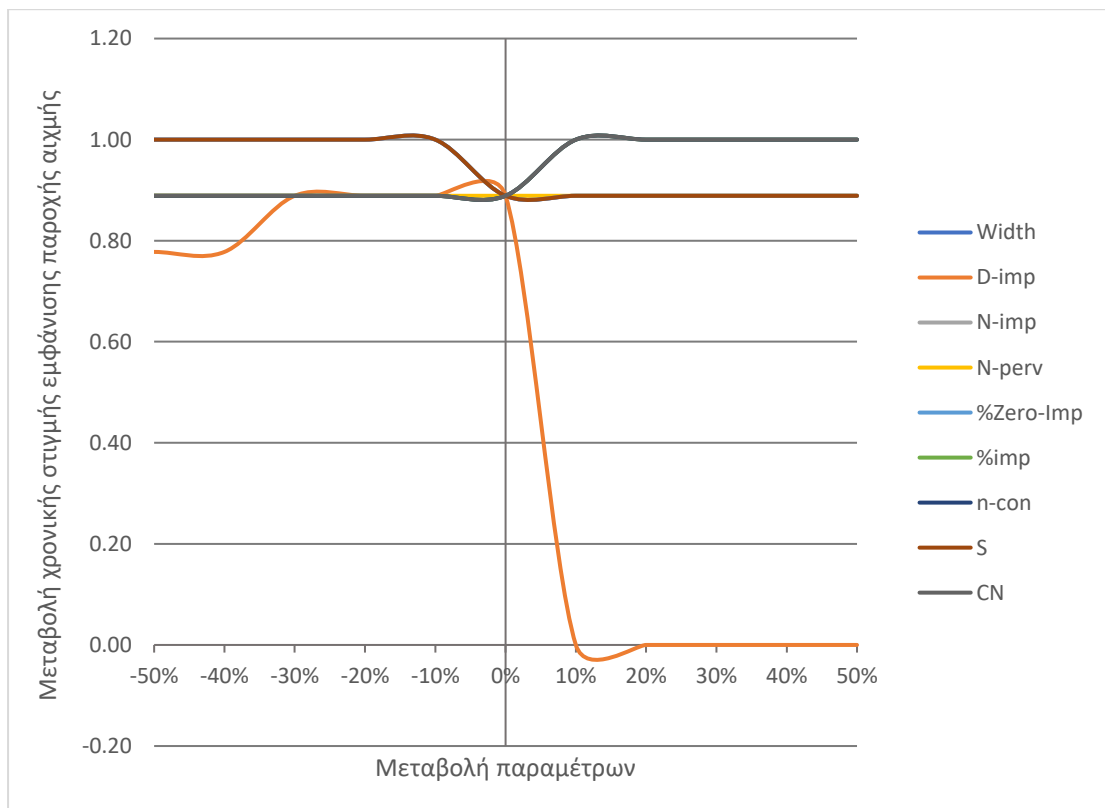
Για την επιλογή των παραμέτρων που θα ληφθούν υπόψιν κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας σε 10 παραμέτρους του μοντέλου. Σκοπός της διαδικασίας είναι η διερεύνηση του βαθμού επίδρασης κάθε παραμέτρου στην παροχή, καθώς και του χώρου των τιμών των παραμέτρων εντός του οποίου αυξάνεται η επίδοση του μοντέλου.

## 5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

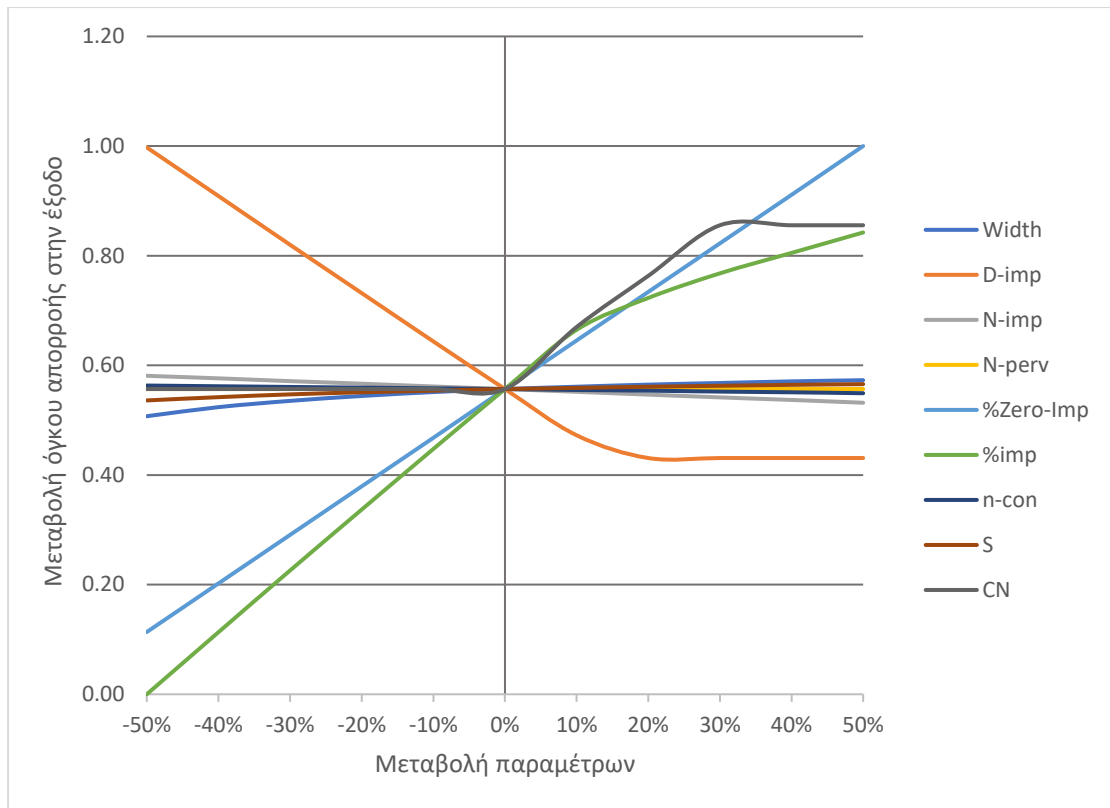
Στις Εικόνες 5.5 έως 5.8 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε για 9 παραμέτρους του μοντέλου και για μεταβολές στις τιμές τους  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$ ,  $\pm 40\%$ ,  $\pm 50\%$ . Οι τιμές των αποτελεσμάτων κανονικοποιήθηκαν στο διάστημα 0-1. Η κανονικοποίηση εξυπηρετεί τη διερεύνηση των παραμέτρων που θα επιλεγούν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, αφού με τον τρόπο αυτό διερευνάται και η σχετική επίδραση της κάθε παραμέτρου στο μοντέλο σε σχέση με τις υπόλοιπες. Οι πίνακες των αναλυτικών αποτελεσμάτων παρατίθενται στο Παράρτημα Δ.



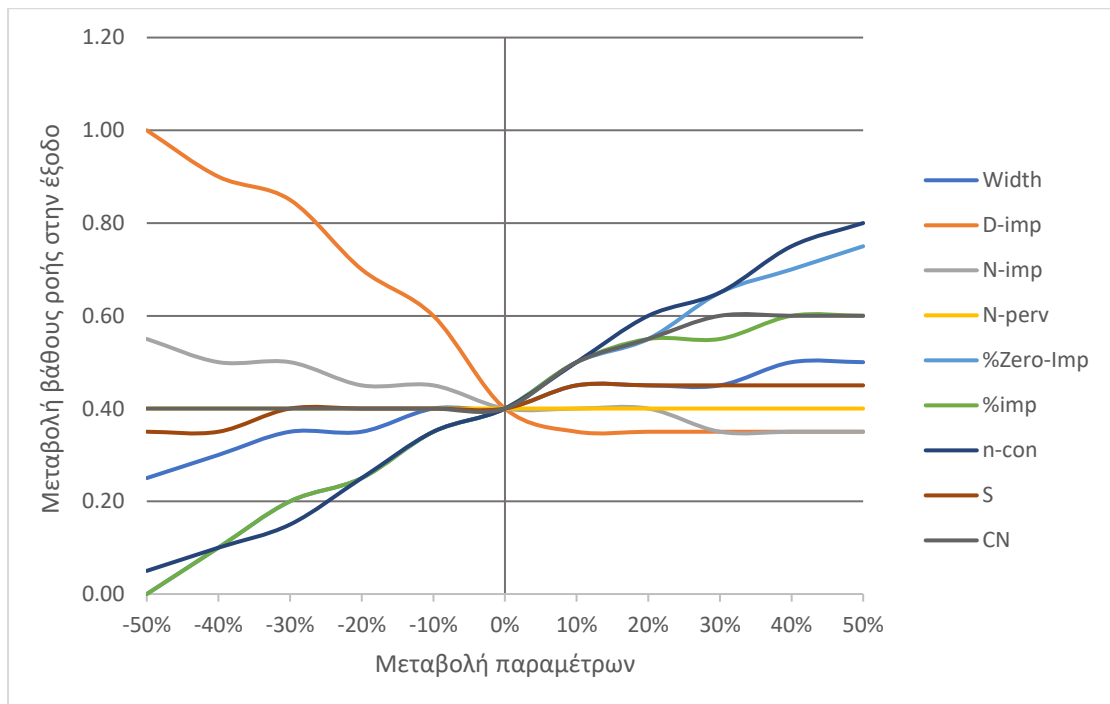
Εικόνα 5.5: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας 9 παραμέτρων με κριτήριο τη μεταβολή στην παροχή αιχμής στην έξοδο του δικτύου.



Εικόνα 5.6: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας 9 παραμέτρων με κριτήριο τη μεταβολή στην χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχή αιχμής στην έξοδο του δικτύου.



Εικόνα 5.7: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας 9 παραμέτρων με κριτήριο τη μεταβολή στο συνολικό όγκο της απορροής στην έξοδο του δικτύου.



Εικόνα 5.8: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας 9 παραμέτρων με κριτήριο τη μεταβολή στο μέγιστο βάθος ροής της απορροής στην έξοδο του δικτύου.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας φαίνεται να συμφωνούν με τη βιβλιογραφική έρευνα (Παράγραφος 2.6 της παρούσας εργασίας) καθώς επιβεβαιώνεται η υψηλή

ευαισθησία του μοντέλου (όταν η ανάλυση αφορά αστικές περιοχές) σε παραμέτρους όπως το ποσοστό αδιαπέρατων τμημάτων, η επιφανειακή συγκράτηση και ο συντελεστής τραχύτητας Manning αδιαπέρατων τμημάτων. Στην παρούσα ανάλυση, υψηλή ευαισθησία παρουσιάζει και η παράμετρος του ποσοστού του αδιαπέρατου τμήματος των υπολεκανών με μηδενική επιφανειακή συγκράτηση. Σε σχέση με την καθολική ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή μελέτης (Κουρτής κ.ά., 2019) τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται λόγω της μη συμπερίληψης των απορροών ξηρού καιρού στην ανάλυση ευαισθησίας της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, στην παρούσα εργασία το μοντέλο παρουσιάζει υψηλότερη ευαισθησία στην επιφανειακή συγκράτηση αδιαπέρατου τμήματος σε σχέση με το ποσοστό αδιαπερατότητας, και ιδιαίτερα στη μείωση της τιμής της παραμέτρου.

Πιο συγκεκριμένα, από την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Όσον αφορά στην παροχή αιχμής της απορροής φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην παράμετρο της επιφανειακής συγκράτησης (D-imp). Ιδιαίτερα παρατηρούμε πως η μείωση της συγκεκριμένης παραμέτρου επιφέρει σημαντική αύξηση στην παροχή αιχμής. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται και από τη σχετικά υψηλή αρχική τιμή που δόθηκε στην παράμετρο στο εν λόγω μοντέλο. Ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται και η επίδραση του ποσοστού αδιαπέρατου τμήματος (% imp<sub>per</sub>) και του ποσοστού του τμήματος με μηδενική επιφανειακή συγκράτηση (%zero-imp), αφού η αύξηση των τιμών των εν λόγω παραμέτρων οδηγεί σε αύξηση της τιμής της παροχής αιχμής και η μείωσή τους σε μείωση της παροχής αιχμής. Τέλος, η αύξηση της τιμής του συντελεστή CN φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την παροχή αιχμής, αυξάνοντας τις τιμές της. Αντίθετα η μείωση της τιμής της παραμέτρου δε φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τις τιμές της παροχής αιχμής. Μικρότερη, αλλά σημαντική ευαισθησία εμφανίζει το μοντέλο στην παράμετρο της τραχύτητας των αδιαπέρατων τμημάτων των υπολεκανών (N-imp). Ιδιαίτερα η μείωση της τιμής της παραμέτρου επιφέρει σημαντική αύξηση της παροχής αιχμής. Αντίστοιχη κρίνεται και η ευαισθησία του μοντέλου στο πλάτος (Width) της υπολεκάνης, η αύξηση του οποίου αυξάνει την παροχή αιχμής, ενώ η μείωσή του το αντίθετο. Την μικρότερη επίδραση στην παροχή αιχμής φαίνεται να έχουν η παράμετρος της κλίσης (S), του συντελεστή τραχύτητας των αγωγών (n-con) και του συντελεστή τραχύτητας των περατών τμημάτων (N-perv).
- Η χρονική στιγμή εμφάνισης της απορροής φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την τιμή της επιφανειακής συγκράτησης των αδιαπέρατων επιφανειών και ιδιαίτερα από την αύξηση της τιμής της. Γενικά, οι μεταβολές, στις παραμέτρους δε φαίνεται να επιδρούν σημαντικά στη χρονική στιγμή εμφάνισης της απορροής, ιδιαίτερα η αύξηση/μείωση των τιμών των παραμέτρων σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10%. Έτσι, από το γράφημα παρατηρούμε πως 10% αύξηση στις παραμέτρους CN, N-imp, %imp<sub>per</sub> και n-con προκαλεί μικρή υστέρηση (1s) στην εμφάνιση της αιχμής. Η υστέρηση αυτή παραμένει σταθερή όσο αυξάνονται επιπλέον οι τιμές των παραμέτρων, ενώ η μείωση των τιμών τους δεν προκαλεί μεταβολή στην εμφάνιση της παροχής αιχμής. Ακριβώς την ίδια επίδραση έχει και η μείωση κατά 10% των τιμών των S, %zero-imp και Width, ενώ η αύξηση των τιμών των παραμέτρων δεν επηρεάζει την εμφάνιση της παροχής αιχμής. Τέλος, η παράμετρος N-perv δε φαίνεται να έχει καμία επίδραση.
- Σε ότι αφορά το συνολικό όγκο της απορροής, τα αποτελέσματα φαίνεται να συμβαδίζουν αρκετά με την επίδραση στην παροχή αιχμής. Η αύξηση της παραμέτρου D-imp μειώνει τον όγκο και η μείωση της το αντίθετο, ενώ αύξηση του %imp<sub>per</sub> και του %zero-imp μειώνει το συνολικό όγκο και το αντίθετο. Επίσης, η αύξηση του CN προκαλεί αύξηση του όγκου.

Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα για την παροχή αιχμής, οι υπόλοιπες παράμετροι φαίνεται να ασκούν αμελητέα επίδραση στον όγκο της απορροής σε σχέση με τις προαναφερθείσες.

- Τέλος, το μέγιστο βάθος ροής στον αγωγό πριν την έξοδο φαίνεται να επηρεάζεται από τις παραμέτρους με παρόμοιο τρόπο με την παροχή αιχμής. Σημαντική διαφορά αποτελεί η επίδραση του συντελεστή τραχύτητας των αγωγών (n-con) που εμφανίζεται ιδιαίτερα σημαντική σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Συνοψίζοντας, και δεδομένης της αυξημένης βαρύτητας που κατέχουν κατά τη διερεύνηση δικτύων αποχέτευσης οι τιμές της παροχής αιχμής, θα μπορούσαμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα πως το μοντέλο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις παραμέτρους D-imp, %imper και %zero-imp. Η κυριαρχία των αστικών τμημάτων σε όλη την περιοχή μελέτης μπορεί να ερμηνεύσει την ευαισθησία του μοντέλου στις παραμέτρους αυτές, καθώς και την αμελητέα επίδραση του N-pern σε όλα τα αποτελέσματα που εξετάστηκαν.

### 5.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας, αλλά και τη σχετική βιβλιογραφία, (Παράγραφος 2.6 της παρούσας εργασίας), επιλέγονται οι παράμετροι που θα ληφθούν υπόψη στη βαθμονόμηση:

- Επιφανειακή συγκράτηση αδιαπέρατων επιφανειών (D-imp)
- Ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών (%imper)
- Ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών με μηδενική επιφανειακή συγκράτηση (%zero-imp)
- Πλάτος υπολεκάνης (Width)
- Συντελεστής Manning αδιαπέρατων επιφανειών (N-imp)
- Συντελεστής Manning αγωγών (n-con)
- Κλίση υπολεκάνης (S)

Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για τους δύο αγωγούς (1313 και 1640) του συστήματος για τους οποίους υπάρχουν μετρημένες απορροές από κοινό επεισόδιο βροχής. Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων, καθώς και τα άνω και κάτω όρια που τέθηκαν για κάθε μια από αυτές κατά την πρώτη δοκιμή, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3. Από τη δοκιμή αυτή προέκυψε NSE=0.73 για τον αγωγό 1313 και NSE=0.55 για τον αγωγό 1640.

Πίνακας 5.3: Αρχικές τιμές και άνω και κάτω όρια για τις μεταβλητές κατά την πρώτη δοκιμή.

|               | Width | %imper | Slope | D-imp | %Zero-imp | N-imp | n-con |
|---------------|-------|--------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| Αρχικές Τιμές | 60    | 85     | 10    | 1     | 50        | 0.013 | 0.013 |
| Κάτω όριο     | 60    | 10     | 0.1   | 1     | 50        | 0.009 | 0.009 |
| Άνω όριο      | 3000  | 95     | 20    | 4     | 100       | 0.025 | 0.025 |

Εκτός από την τιμή του NSE, για την επίδοση του μοντέλου συνεκτιμήθηκε και η ικανότητα του να δίνει παροχή αιχμής κοντά στη μετρημένη για το επεισόδιο 24/02/2006. Επιπλέον, , δεδομένου ότι το βαθμονομημένο μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της απόκρισης του δικτύου σε γεγονότα βροχής μεγαλύτερων περιόδων επαναφοράς, καλύτερες λύσεις θεωρήθηκαν εκείνες που δεν υποεκτιμούν την παροχή αιχμής, υπέρ της ασφαλείας. Στα αποτελέσματα του μοντέλου με βάση τις τιμές των παραμέτρων από την πρώτη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε η παροχή αιχμής υπολογίζεται μικρότερη της μετρημένης κατά 29.84 l/s για τον αγωγό 1313 και μεγαλύτερη κατά 75.69 l/s για τον αγωγό 1640.

Επομένως, χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν επιπλέον δοκιμές αλλάζοντας κάθε φορά τα όρια των τιμών των παραμέτρων, με στόχο να «καθοδηγηθεί» ο αλγόριθμος προς τη βέλτιστη

λύση. Τα όρια και οι τελικές τιμές των μεταβλητών για καθένα από τα δύο τμήματα της περιοχής μελέτης (με βάση τον αγωγό στον οποίο παροχετεύονται) της λύσης που επιλέχθηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Άνω και κάτω όρια και τελικές τιμές των μεταβλητών της λύσης που επιλέχθηκε.

| Λεκάνες 1, 2, 5, 6, & 8 (Αγωγός 1313) |        |        |       |       |           |         |          |
|---------------------------------------|--------|--------|-------|-------|-----------|---------|----------|
|                                       | Width  | %imper | Slope | D-imp | %Zero-imp | N-imp   | N-con    |
| Κάτω όριο                             | 60     | 10     | 0.1   | 1     | 50        | 0.009   | 0.009    |
| Άνω όριο                              | 3000   | 95     | 20    | 2     | 100       | 0.025   | 0.025    |
| Τελικές Τιμές                         | 265.61 | 30.90  | 10.84 | 2     | 50        | 0.025   | 0.012363 |
| Λεκάνες 3, 4 & 9 (Αγωγός 1640)        |        |        |       |       |           |         |          |
|                                       | Width  | %imper | Slope | D-imp | %Zero-imp | N-imp   | N-con    |
| Κάτω όριο                             | 60     | 10     | 5     | 1     | 50        | 0.009   | 0.009    |
| Άνω όριο                              | 1000   | 95     | 30    | 4     | 100       | 0.025   | 0.025    |
| Τελικές Τιμές                         | 840.39 | 21.41  | 27.74 | 3.67  | 96.37     | 0.01957 | 0.024414 |

Η λύση αυτή αποδίδει τιμή  $NSE=0.91$  για τον αγωγό 1313 και  $NSE=0.53$  για τον αγωγό 1640. Παρ' ότι για τον αγωγό 1640 η τιμή  $NSE$  είναι μικρότερη από αυτή της αρχικής και άλλων δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, επιλέγεται η συγκεκριμένη λύση λόγω της μικρής απόκλισης που παρουσιάζεται ανάμεσα στη μετρημένη και την προσομοιωμένη παροχή αιχμής (17.46 l/s) σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες, χωρίς να μειώνεται σημαντικά ο  $NSE$ . Επίσης, η τιμή 0.024 για την τραχύτητα των αγωγών θεωρήθηκε ιδιαίτερα μεγάλη για αποχετευτικούς αγωγούς, και επομένως αντικαταστάθηκε από την τιμή 0.019.

Οι τελικές τιμές των παραμέτρων για τις λεκάνες που συμμετείχαν στη βαθμονόμηση, καθώς και η σύγκρισή τους με τις αρχικές τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του  $NSE$  και η διαφορά μετρημένων-προσομοιωμένων παροχών αιχμής στην έξοδο για κάθε αγωγό. Η λύση που προέκυψε από τη βαθμονόμηση αποδίδει σε όλες τις υπολεκάνες αρκετά μεγαλύτερες τιμές στην παράμετρο του πλάτους σε σχέση με την αρχική εκτίμηση και αρκετά μικρότερες στην επιφανειακή συγκράτηση του αδιαπέρατου τμήματος, με βάση και τα δοθέντα όρια για τις τιμές αυτές. Επίσης, οι τιμές του ποσοστού αδιαπερατότητας προκύπτουν μικρότερες σε σχέση με την αρχική εκτίμηση για τις αστικές λεκάνες, γεγονός που ερμηνεύεται από την κοινή τιμή της παραμέτρου που αποδίδει η βαθμονόμηση σε όλες τις λεκάνες, αστικές και ημι-αστικές. Αντίστοιχη μείωση εμφανίζεται και στις τιμές της κλίσης εδάφους.

Πίνακας 5.5: Τιμές των παραμέτρων, του συντελεστή Nash και της μέγιστης παροχής πριν και μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

| Λεκάνες 1,2,5,6,8 – Αγωγός 1313 |                                  |                       |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
|                                 | Αρχικό Μοντέλο                   | Βαθμονομημένο Μοντέλο |
| Width (m)                       | S1=60, S2=300, S5,S6,S8=60       | 265.61                |
| %imper                          | S1=40,S2=25, S5=50, S6=80, S8=90 | 30.9                  |
| %slope                          | S1=19,S2=36, S5=16, S6=18, S8=12 | 10.84                 |
| Ds-imperv (mm)                  | 10                               | 2                     |
| %zero-imperv                    | 50                               | 50                    |
| N-imp                           | 0.013                            | 0.025                 |
| N-cond                          | 0.013                            | 0.019                 |
| Nash                            | 0.8438                           | 0.9113                |
| maxQsim-maxQobs                 | -55.3300                         | 15.46                 |
| Λεκάνες 3,4,9 – Αγωγός 1640     |                                  |                       |
|                                 | Αρχικό Μοντέλο                   | Βαθμονομημένο Μοντέλο |
| Width (m)                       | S3=100, S4,S9=60                 | 840.39                |
| %imper                          | S3=40, S4=50, S9=90              | 21.41                 |
| %slope                          | S3=30, S4=36, S9=16              | 27.74                 |
| Ds-imperv (mm)                  | 10                               | 3.67                  |
| %zero-imperv                    | 50                               | 96.37                 |
| N-imp                           | 0.013                            | 0.0196                |
| N-cond                          | 0.013                            | 0.019                 |
| Nash                            | 0.3014                           | 0.5325                |
| maxQsim-maxQobs                 | 39.7460                          | 17.446                |

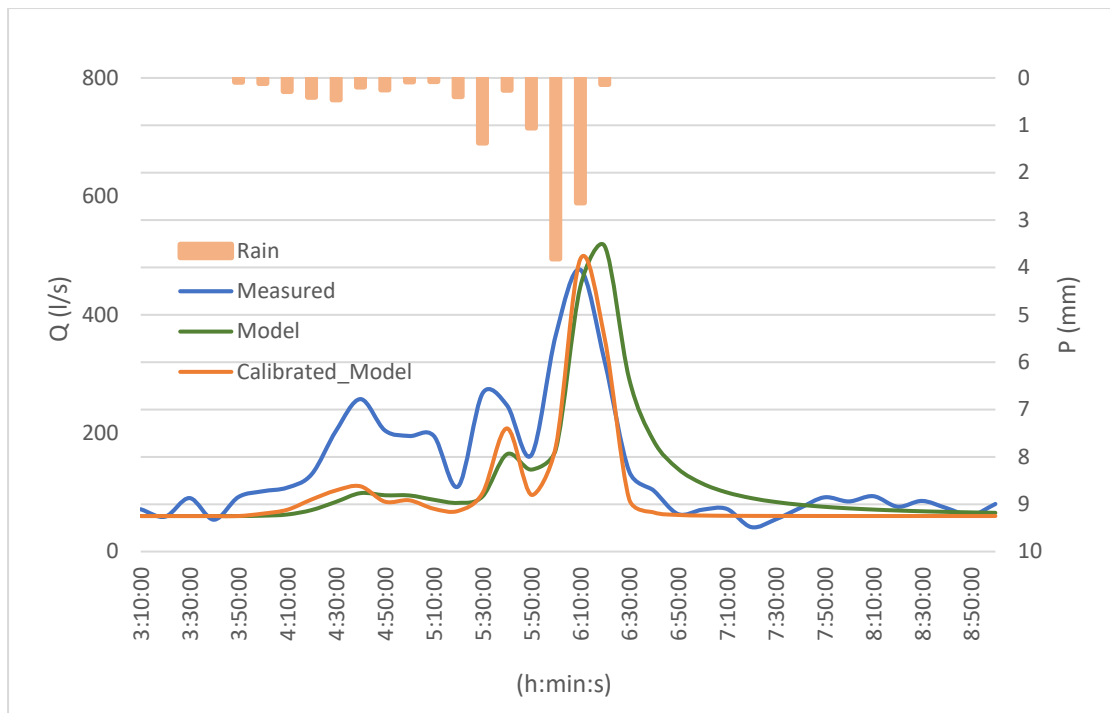
Στις Εικόνες 5.9 έως 5.11 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές της παροχής για τους αγωγούς 1313, 1640 και 1611 (αγωγός στην έξοδο). Τέλος, στον Πίνακα 5.6 συγκρίνονται τα αποτελέσματα στην έξοδο του βαθμονομημένου μοντέλου με αυτά του Πίνακα 5.1 του αρχικού μοντέλου.

Από τα διαγράμματα των παροχών, είναι εμφανής η καλύτερη προσαρμογή του βαθμονομημένου μοντέλου στις μετρημένες απορροές, σε ότι αφορά όλη τη χρονοσειρά, αλλά και την παροχή αιχμής. Οι διαφορές μεταξύ των δύο μοντέλων είναι εντονότερες σε ότι αφορά τον καθοδικό κλάδο και τις τοπικές αιχμές των υδρογραφημάτων, με εμφανή υπεροχή του βαθμονομημένου μοντέλου. Επίσης, στο βαθμονομημένο μοντέλο η χρονική στιγμή εμφάνισης των παροχών αιχμής συμπίπτει με αυτή των μετρήσεων, σε αντίθεση με το αρχικό μοντέλο.

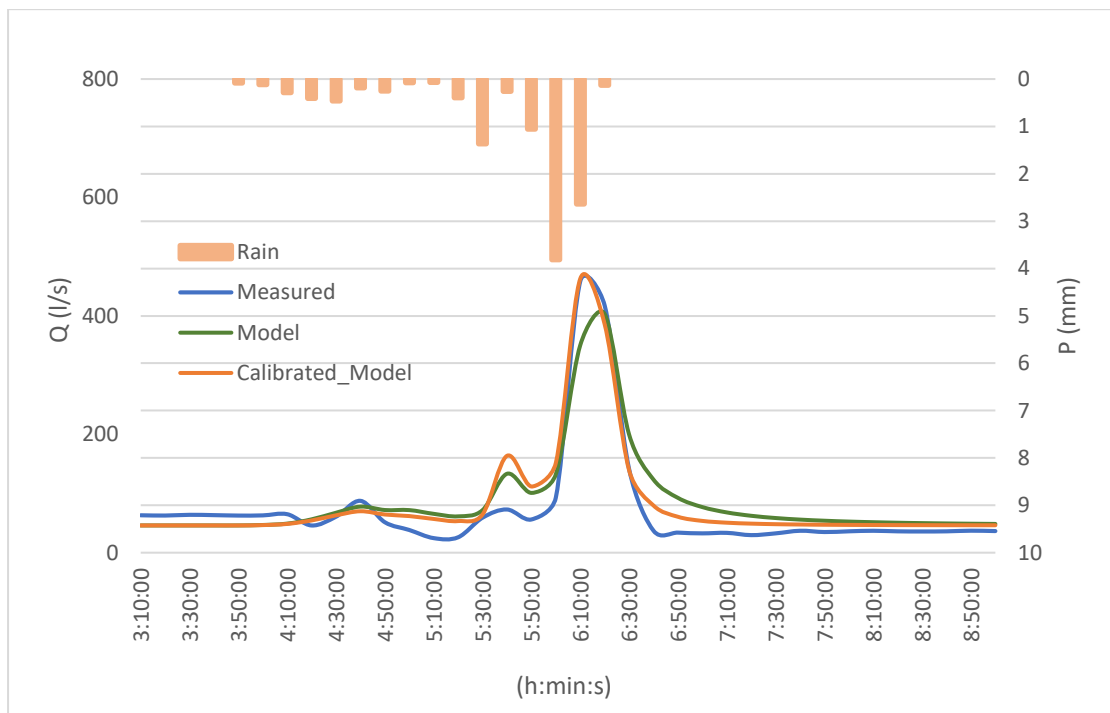
Ο συνολικός όγκος απορροής από τις μετρήσεις είναι  $1.562 \cdot 10^6$  l για τον αγωγό 1313 και  $2.985 \cdot 10^6$  l για τον αγωγό 1640. Το βαθμονομημένο μοντέλο υποεκτιμά τον όγκο που διέρχεται από τον αγωγό 1640, οποίος έχει τιμή  $2.089 \cdot 10^6$  l ενώ υπερεκτιμά τον όγκο για τον αγωγό 1313, ο οποίος έχει τιμή  $2.089 \cdot 10^6$  l.



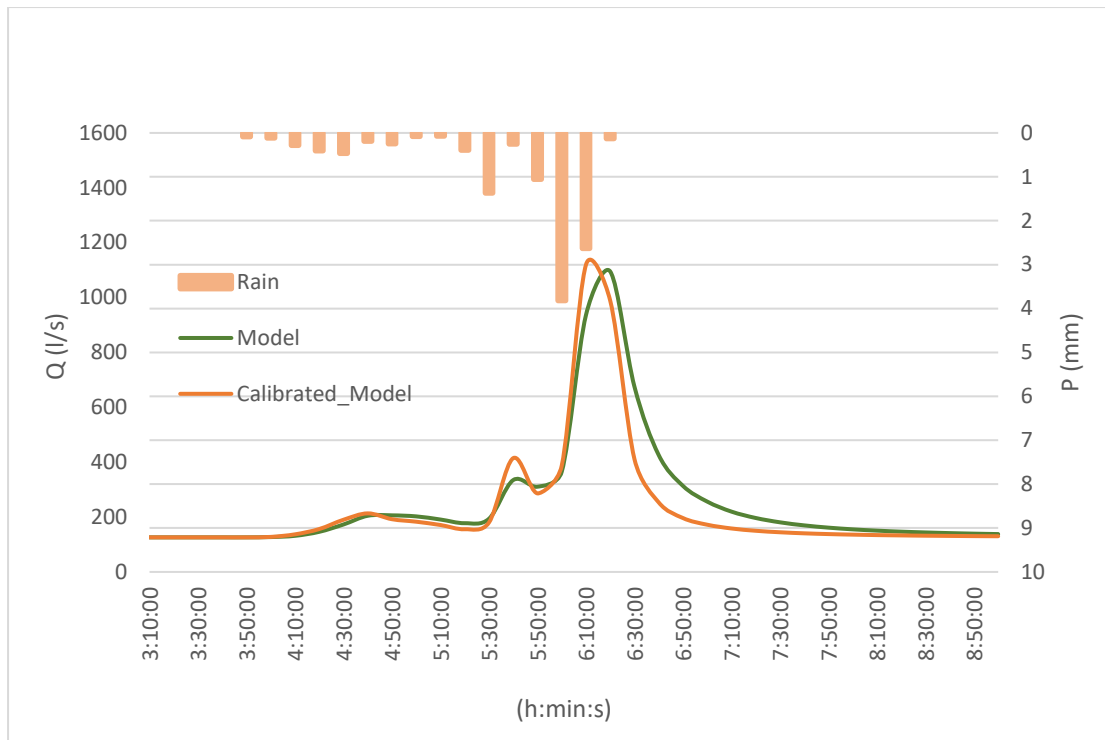
Σε ότι αφορά τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλη τη λεκάνη, από τον Πίνακα 5.5, συμπεραίνουμε πως στο βαθμονομημένο μοντέλο οι απώλειες βροχής από τη διήθηση και την επιφανειακή συγκράτηση είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το αρχικό, μειώνοντας τον συνολικό όγκο της απορροής στην έξοδο.



Εικόνα 5.9: Μετρημένη, υπολογισμένη με το αρχικό και το βαθμονομημένο μοντέλο παροχή στον αγωγό 1640.



Εικόνα 5.10: Μετρημένη, υπολογισμένη με το αρχικό και το βαθμονομημένο μοντέλο παροχή στον αγωγό 1313.



Εικόνα 5.11: Παροχή στην έξοδο του δικτύου, αρχικό και βαθμονομημένο μοντέλο.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα από το αρχικό και το βαθμονομημένο μοντέλο για όλη τη λεκάνη

| Βροχή 24/02/2006                              |                |                       |
|---|----------------|-----------------------|
|   | Αρχικό Μοντέλο | Βαθμονομημένο Μοντέλο |
| Βροχόπτωση (mm)                               | 11.601         | 11.601                |
| Διήθηση (mm)                                  | 3.488          | 5.449                 |
| Συγκράτηση (mm)                               | 4.100          | 2.892                 |
| Απορροή (mm)                                  | 4.015          | 3.262                 |
| Παροχή αιχμής στην έξοδο(l/s)                 | 1151.51        | 1164.05               |
| Χρόνος αιχμής (h:min:s)                       | 6:21:00        | 6:12:00               |
| Όγκος απορροής στην έξοδο (10 <sup>6</sup> l) | 6.736          | 6.219                 |

Στη συνέχεια, με την παραδοχή πως η λεκάνη της περιοχής μελέτης προσομοιώνεται επαρκώς με το βαθμονομημένο μοντέλο, θα γίνει διερεύνηση του δικτύου αποχέτευσης της περιοχής μελέτης για βροχές διαφορετικής διάρκειας και περιόδων επαναφοράς.

#### 5.4 ΔΙΕΥΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΒΡΟΧΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ

Στην παράγραφο αυτή θα διερευνηθεί το δίκτυο αποχέτευσης της περιοχής μελέτης για βροχές περιόδου επαναφοράς T=25 ετών και T=50 ετών και για διάρκεια βροχής d=1 hr, d=2 hr, d=6 hr και d=24 hr. Τα βροχογραφήματα που παρήχθησαν με τα παραπάνω δεδομένα παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 4.5 της παρούσας εργασίας.

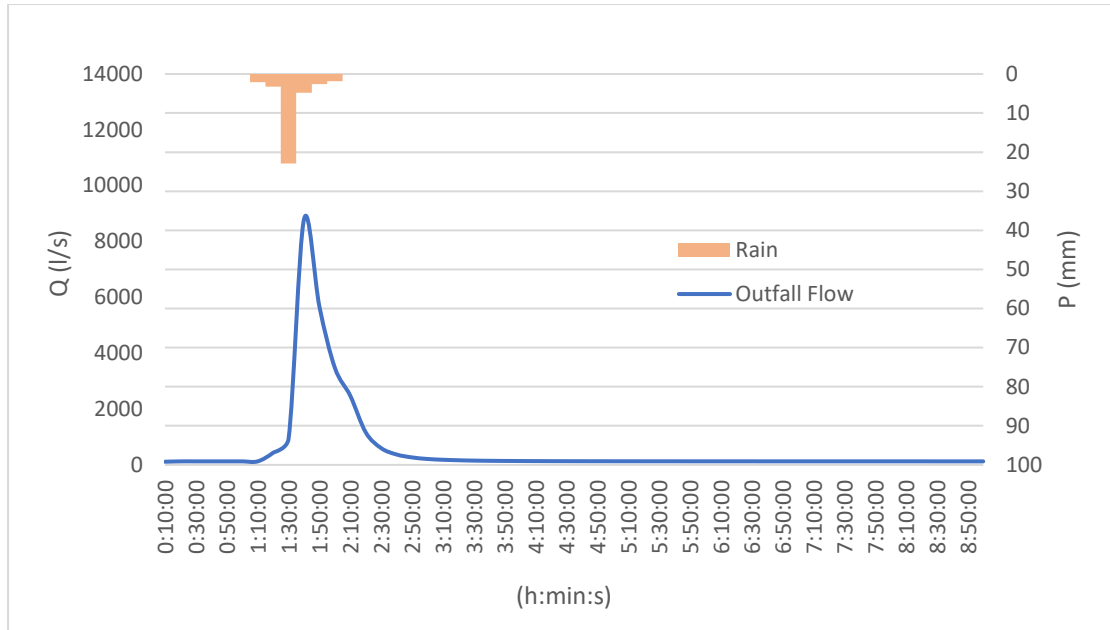
Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των βροχογραφήματων στο βαθμονομημένο μοντέλο αφορούν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλη τη λεκάνη, όπου παρατίθενται σε πίνακες η προσομοιωμένη διήθηση, συγκράτηση και απορροή, τα αποτελέσματα των κόμβων που πλημμυρίζουν και των αγωγών στους οποίους ο λόγος πλήρωσης ( $y/D$ ) είναι μεγαλύτερος της μονάδας, μέσω χαρτών που παρήχθησαν από το SWMM, καθώς και τα υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης συναρτήσει της βροχόπτωσης.

- Επίλυση Μοντέλου για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=25$  και διάρκειας  $d=1hr$

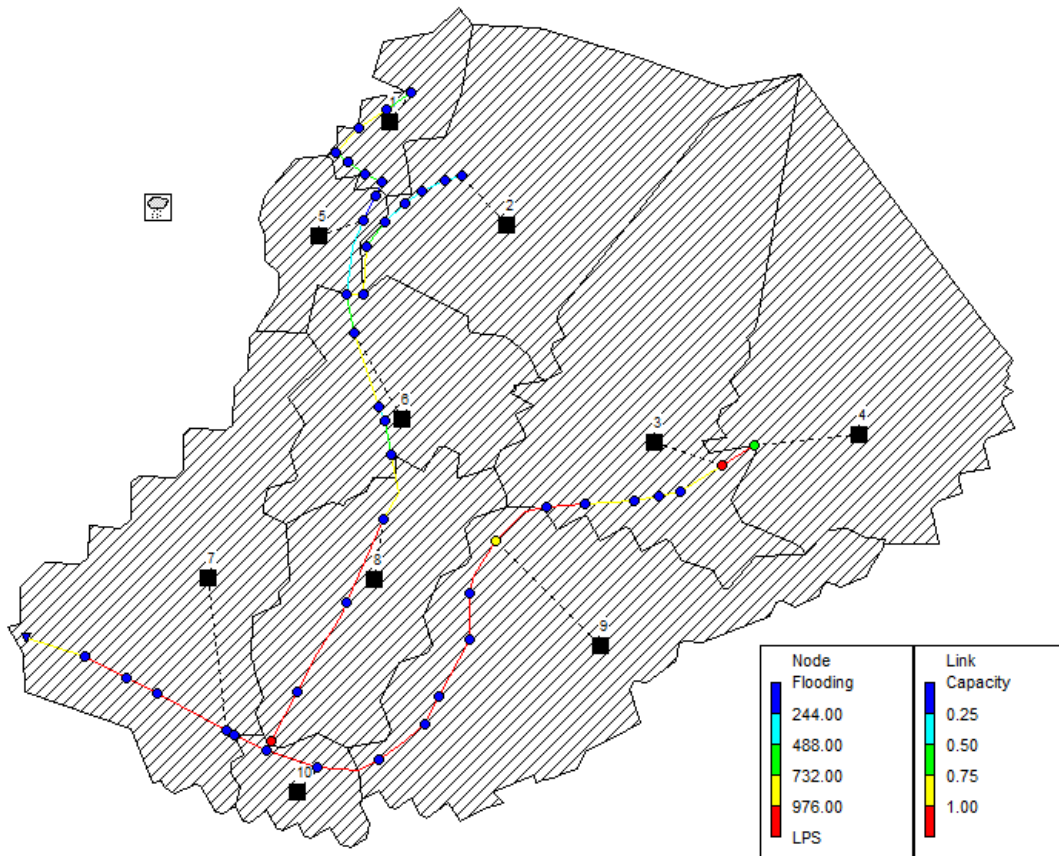
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ολόκληρη τη λεκάνη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7. Στην Εικόνα 5.12 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Από την επίλυση προέκυψε ότι οι 4 κόμβοι που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.13 πλημμυρίζουν τη χρονική στιγμή της μέγιστης παροχής στην έξοδο, ενώ οι αγωγοί της ίδιας εικόνας που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα έχουν υπερβεί την παροχετευτικότητα τους. Ο κόμβος 416156, στον οποίο παροχετεύεται η απορροή των υπολεκανών 3 και 4, πλημμυρίζει για περίπου 8 min, ο κόμβος 435250 στην έξοδο της υπολεκάνης 8 για περίπου 4 min. Στην Εικόνα 5.14 παρουσιάζεται ενδεικτικά το προφίλ των αγωγών από τον κόμβο 416155, όπου εισάγεται η απορροή της υπολεκάνης 4, μέχρι τον κόμβο 415281, όπου εισάγεται η απορροή της υπολεκάνης 7. Στο προφίλ, που αποτυπώνει τα βάθη ροής τη χρονική στιγμή της παροχής αιχμής στην έξοδο, διακρίνονται οι κόμβοι που πλημμυρίζουν.

Πίνακας 5.7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για  $T=25$  και  $d=1hr$ .

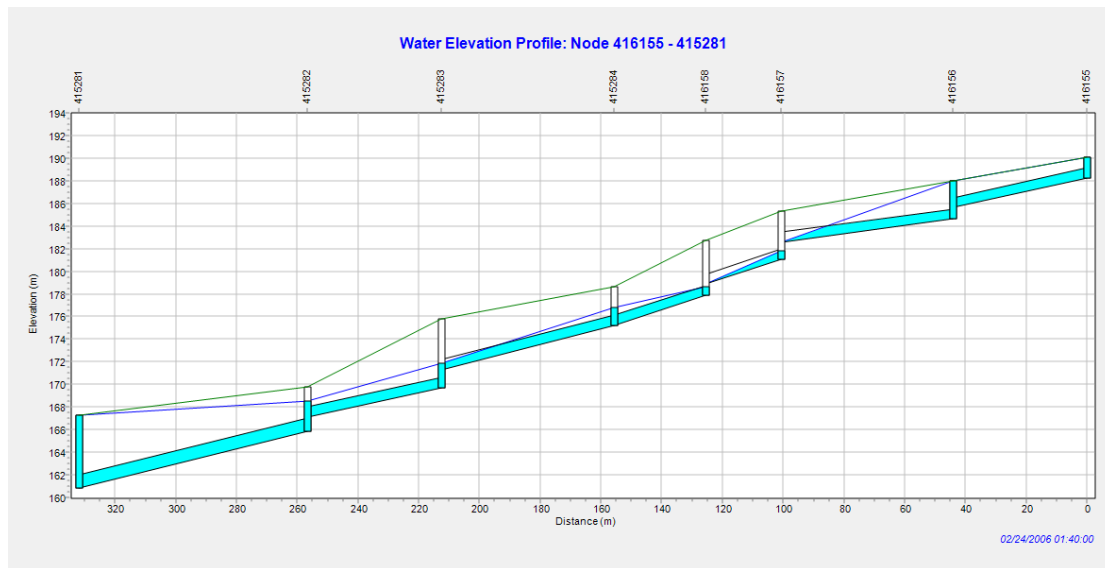
| T=25y, d=1hr                          |         |
|---------------------------------------|---------|
| Βροχόπτωση (mm)                       | 37.42   |
| Διήθηση (mm)                          | 13.176  |
| Επιφανειακή Συγκράτηση (mm)           | 2.318   |
| Επιφανειακή Απορροή (mm)              | 21.961  |
| Παροχή αιχμής στην έξοδο (l/s)        | 8798.33 |
| Χρόνος αιχμής (h:min:s)               | 0:40:00 |
| Όγκος απορροής στην έξοδο ( $10^6$ l) | 18.153  |



Εικόνα 5.12: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=25 και d=1hr.



Εικόνα 5.13: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή T=25 και d=1hr.

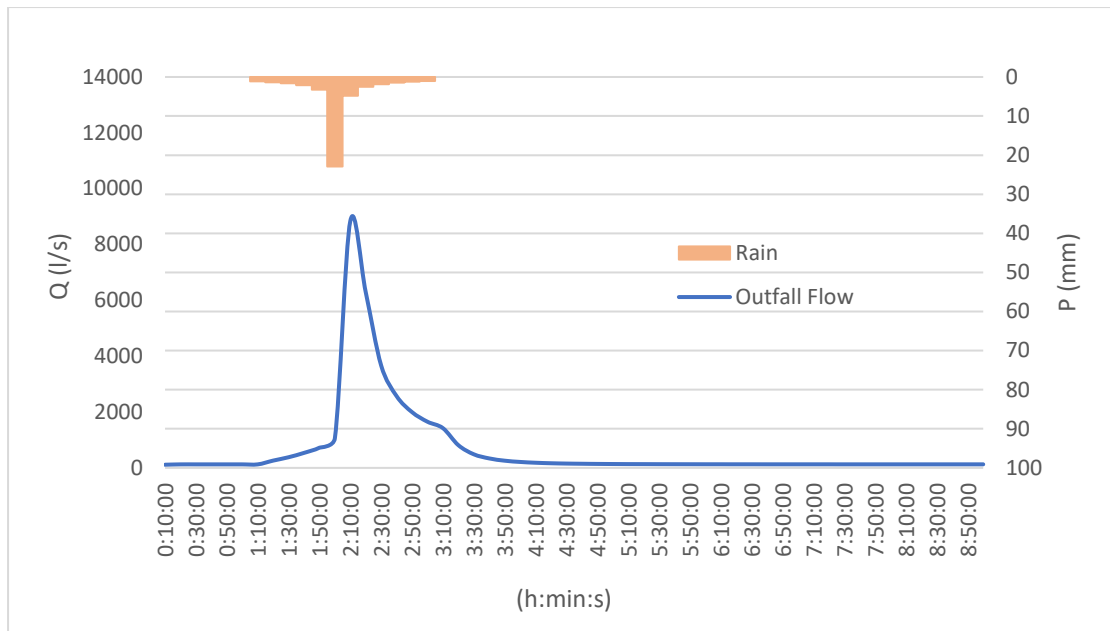


Εικόνα 5.14: Προφίλ αγωγών του δικτύου τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο (βροχή T=25, d=1hr).

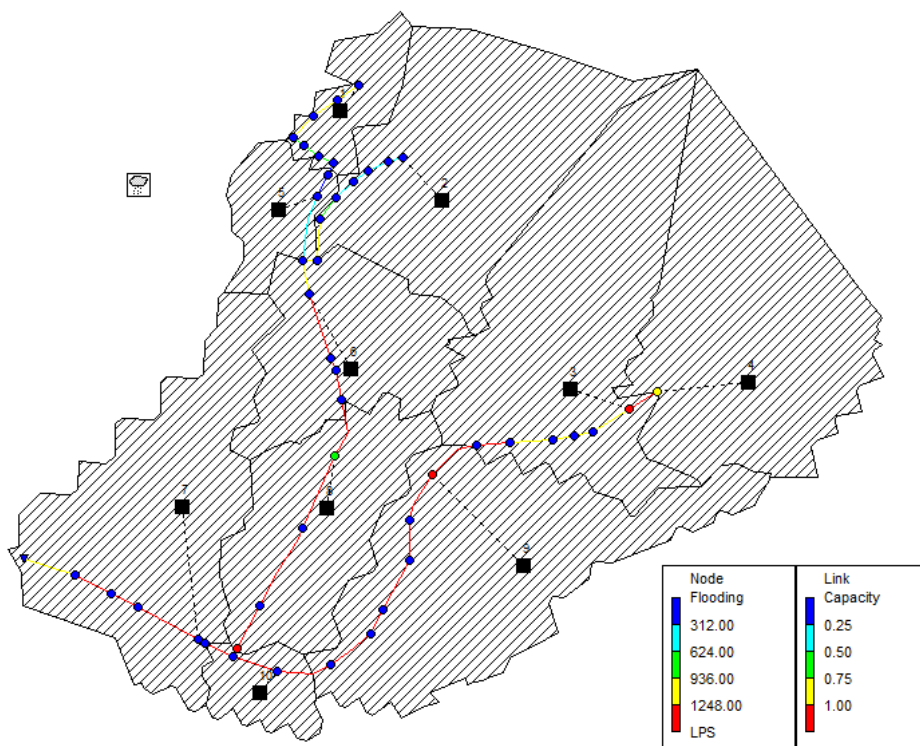
- Επίλυση Μοντέλου για βροχή περιόδου επαναφοράς T=25 και διάρκειας d=2hr  
 Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ολόκληρη τη λεκάνη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8. Στην Εικόνα 5.15 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Από την επίλυση προέκυψε ότι οι 5 κόμβοι που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.16 πλημμυρίζουν τη χρονική στιγμή της μέγιστης παροχής στην έξοδο, ενώ οι αγωγοί της ίδιας εικόνας που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα έχουν υπερβεί την παροχετευτικότητα τους. Ο κόμβος 416156, στον οποίο παροχετεύεται η απορροή των υπολεκανών 3 και 4 πλημμυρίζει για περίπου 13 min, και οι κόμβοι 435250 στην έξοδο της υπολεκάνης 8 και 416155 όπου παροχετεύεται η υπολεκάνη 4 για περίπου 7 min.

Πίνακας 5.8: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=25 και d=2hr.

| T=25y, d=2hr                                  |         |
|---|---------|
| Βροχόπτωση (mm)                               | 45.274  |
| Διήθηση (mm)                                  | 13.353  |
| Επιφανειακή Συγκράτηση (mm)                   | 2.696   |
| Επιφανειακή Απορροή (mm)                      | 29.26   |
| Παροχή αιχμής στην έξοδο(l/s)                 | 8842.41 |
| Χρόνος αιχμής (h:min:s)                       | 1:10:00 |
| Όγκος απορροής στην έξοδο (10 <sup>6</sup> l) | 22.251  |



Εικόνα 5.15: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή  $T=25$  και  $d=2hr$ .



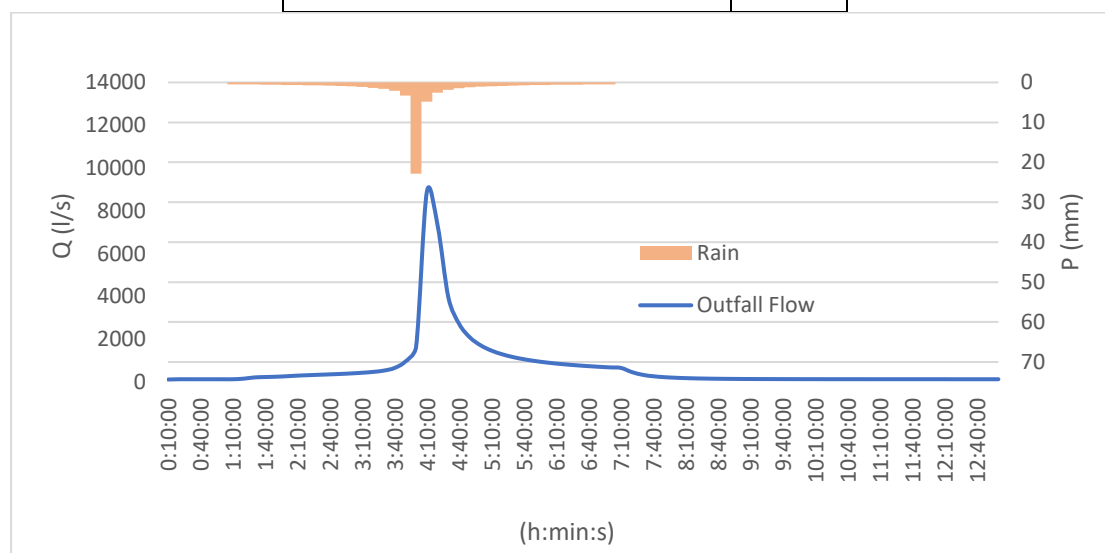
Εικόνα 5.16: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή  $T=25$  και  $d=2hr$ .

- Επίλυση Μοντέλου για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=25$  και διάρκειας  $d=6hr$   
 Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ολόκληρη τη λεκάνη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9. Στην Εικόνα 5.17 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Από την επίλυση προέκυψε ότι οι 5 κόμβοι που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.18 πλημμυρίζουν τη χρονική στιγμή της μέγιστης παροχής στην έξοδο, ενώ οι αγωγοί της ίδιας εικόνας που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα έχουν υπερβεί την παροχευτικότητα τους. Ο κόμβος

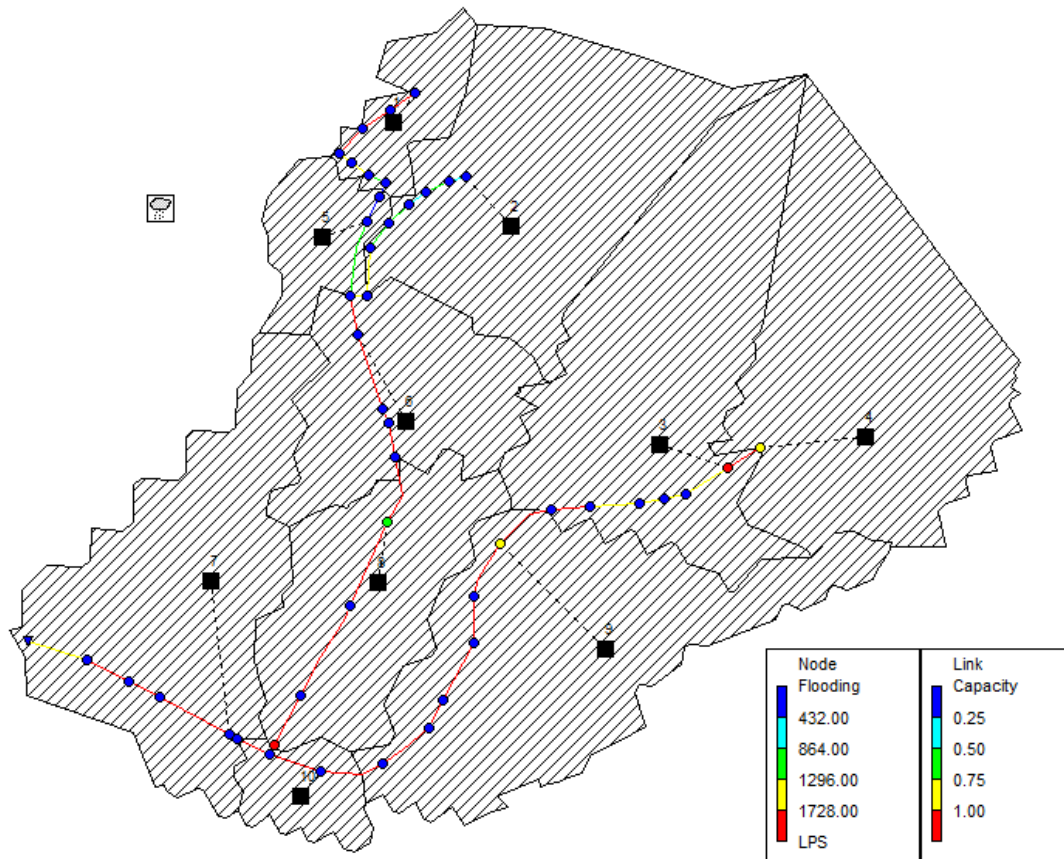
416156 πλημμυρίζει για περίπου 19 min, ο κόμβος 435250 στην έξοδο της υπολεκάνης 8 για περίπου 10 min και ο κόμβος 416155, όπου παροχετεύεται η υπολεκάνη 4 για περίπου 12 min.

Πίνακας 5.9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=25 και d=6hr.

| T=25y, d=6hr                                  |         |
|---|---------|
| Βροχόπτωση (mm)                               | 61.244  |
| Διήθηση (mm)                                  | 13.144  |
| Επιφανειακή Συγκράτηση (mm)                   | 3.912   |
| Επιφανειακή Απορροή (mm)                      | 44.22   |
| Παροχή αιχμής στην έξοδο (l/s)                | 8885.38 |
| Χρόνος αιχμής (h:min:s)                       | 3:10:00 |
| Όγκος απορροής στην έξοδο (10 <sup>6</sup> l) | 32.289  |



Εικόνα 5.17: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=25 και d=6hr.



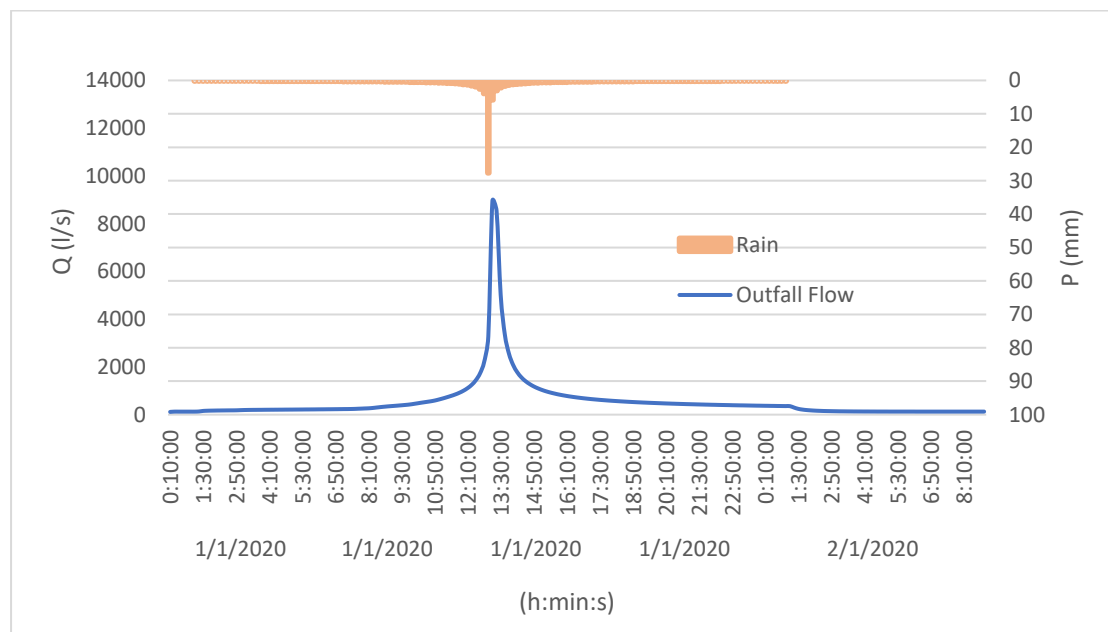
Εικόνα 5.18: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή  $T=25$  και  $d=6hr$ .

- Επίλυση Μοντέλου για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=25$  και διάρκειας  $d=24hr$   
 Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ολόκληρη τη λεκάνη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10. Στην Εικόνα 5.19 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Από την επίλυση προέκυψε ότι οι 8 κόμβοι που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.20 πλημμυρίζουν τη χρονική στιγμή της μέγιστης παροχής στην έξοδο, ενώ οι αγωγοί της ίδιας εικόνας που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα έχουν υπερβεί την παροχευτικότητα τους. Ο κόμβος 416156 πλημμυρίζει για περίπου 20 min, ο κόμβος 435250 στην έξοδο της υπολεκάνης 8 για περίπου 11 min και ο κόμβος 416155, όπου παροχετεύεται η υπολεκάνη 4 για περίπου 14 min.

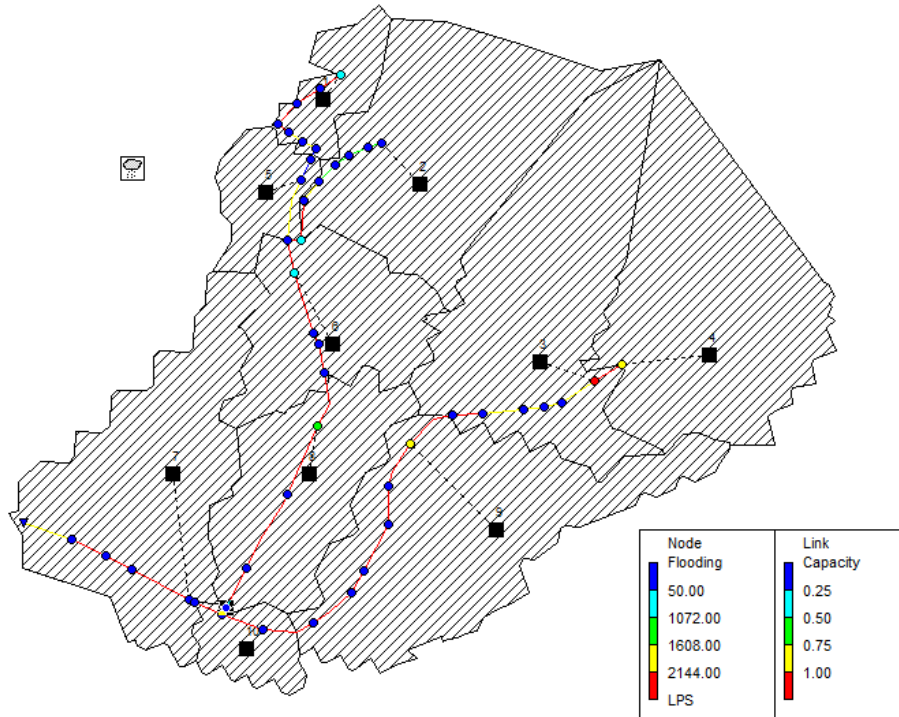


Πίνακας 5.10: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=25 και d=24hr.

| T=25y, d=24hr                                 |          |
|---|----------|
| Βροχόπτωση (mm)                               | 89.666   |
| Διήθηση (mm)                                  | 14.077   |
| Επιφανειακή Συγκράτηση (mm)                   | 4.336    |
| Επιφανειακή Απορροή (mm)                      | 71.284   |
| Παροχή αιχμής στην έξοδο(l/s)                 | 8890.82  |
| Χρόνος αιχμής (h:min:s)                       | 12:10:00 |
| Όγκος απορροής στην έξοδο (10 <sup>6</sup> l) | 59.398   |



Εικόνα 5.19: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=25 και d=24hr.

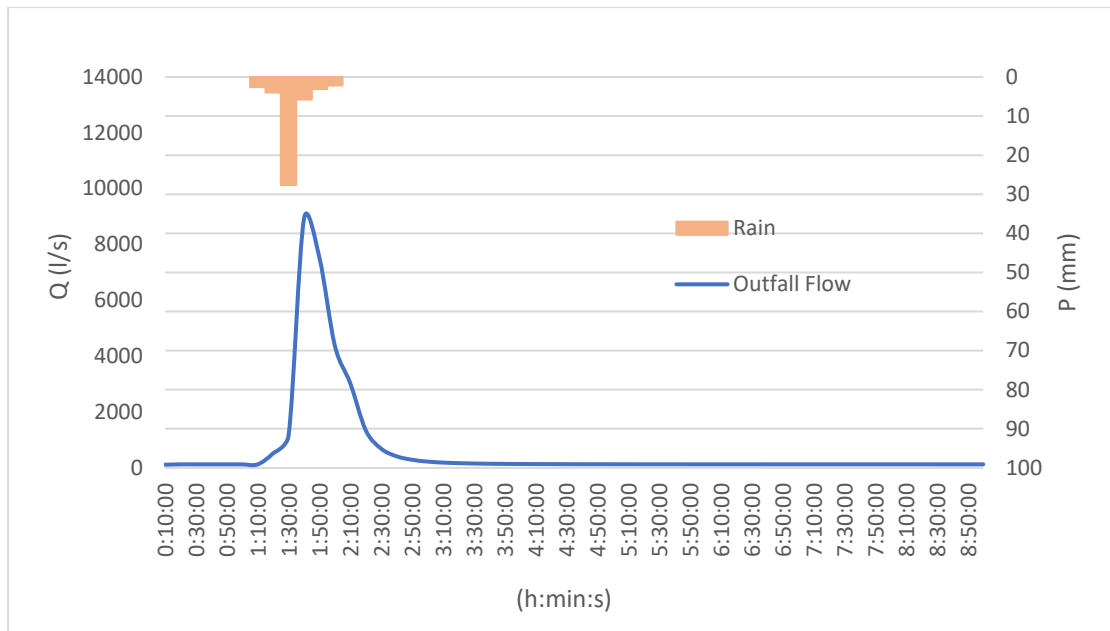


Εικόνα 5.20: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή  $T=25$  και  $d=24hr$ .

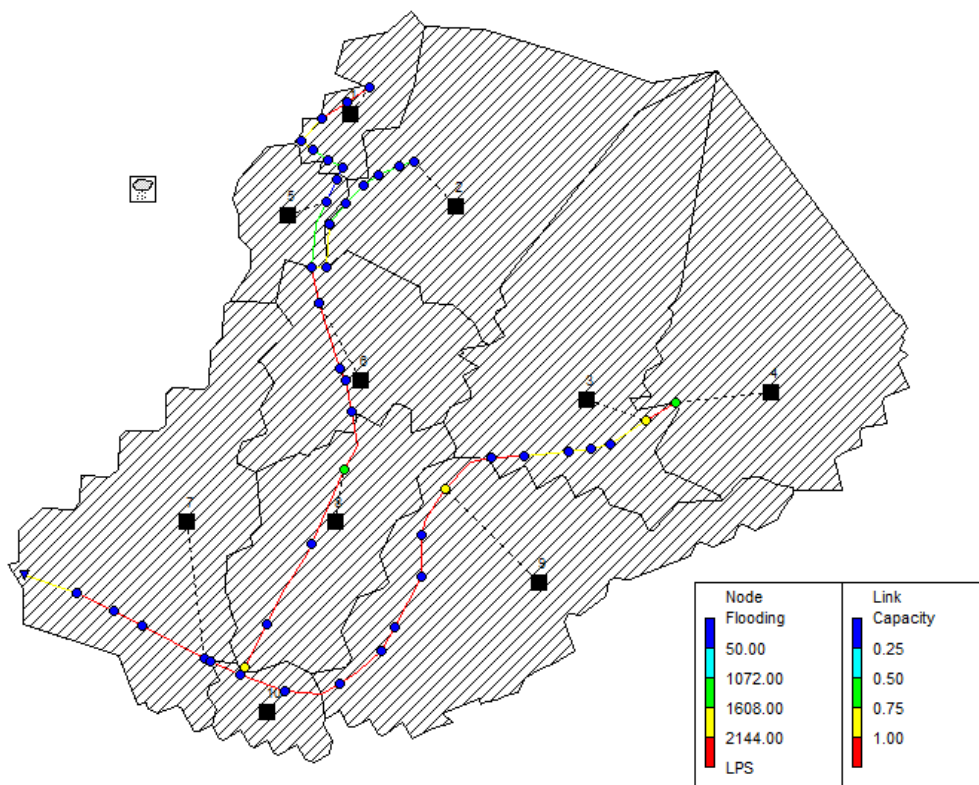
- Επίλυση Μοντέλου για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=50$  και διάρκειας  $d=1hr$   
 Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ολόκληρη τη λεκάνη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11. Στην Εικόνα 5.21 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Από την επίλυση προέκυψε ότι οι 5 κόμβοι που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.22 πλημμυρίζουν τη χρονική στιγμή της μέγιστης παροχής στην έξοδο, ενώ οι αγωγοί της ίδιας εικόνας που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα έχουν υπερβεί την παροχετευτικότητα τους. Ο κόμβος 416156 πλημμυρίζει για περίπου 19 min, ο κόμβος 435250 στην έξοδο της υπολεκάνης 8 για περίπου 10 min και ο κόμβος 416155, όπου παροχετεύεται η υπολεκάνη 4 για περίπου 9 min.

Πίνακας 5.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για  $T=50$  και  $d=1hr$ .

| T=50y, d=1hr                          |         |
|---------------------------------------|---------|
| Βροχόπτωση (mm)                       | 45.306  |
| Διήθηση (mm)                          | 14.005  |
| Επιφανειακή Συγκράτηση (mm)           | 2.42    |
| Επιφανειακή Απορροή (mm)              | 28.929  |
| Παροχή αιχμής στην έξοδο(l/s)         | 8924.91 |
| Χρόνος αιχμής (h:min:s)               | 0:40:00 |
| Όγκος απορροής στην έξοδο ( $10^6$ l) | 20.78   |



Εικόνα 5.21: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=50 και d=1hr.



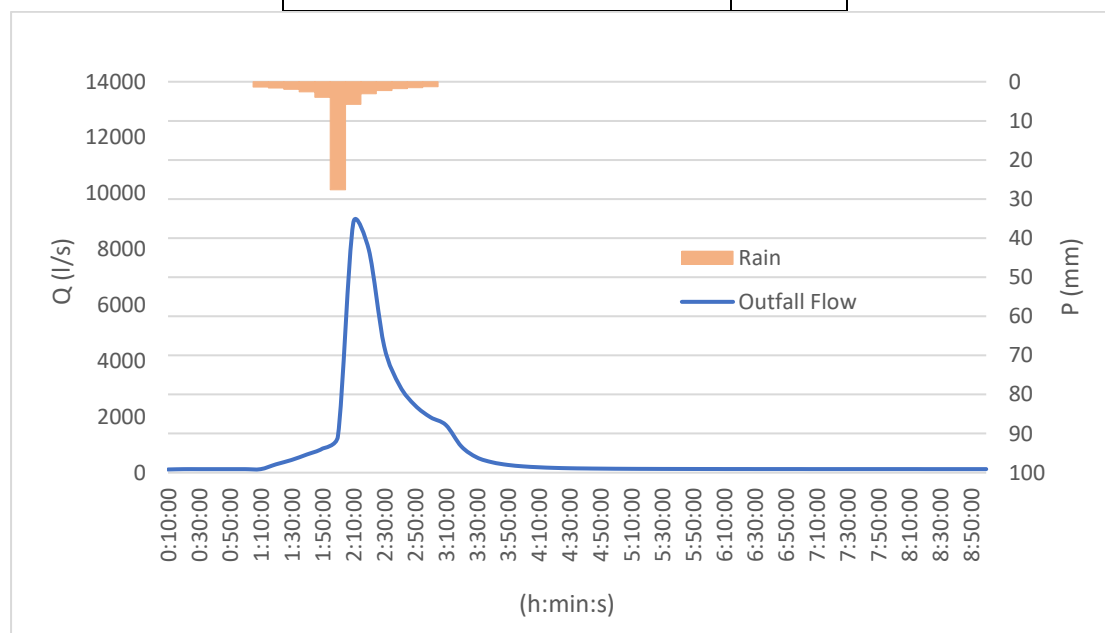
Εικόνα 5.22: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή T=50 και d=1hr.

- Επίλυση Μοντέλου για βροχή περιόδου επαναφοράς T=50 και διάρκειας d=2hr  
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ολόκληρη τη λεκάνη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.12. Στην Εικόνα 5.23 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Από την επίλυση προέκυψε ότι οι 7 κόμβοι που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.24 πλημμυρίζουν τη χρονική στιγμή της μέγιστης παροχής στην έξοδο, ενώ οι αγωγοί της ίδιας εικόνας που

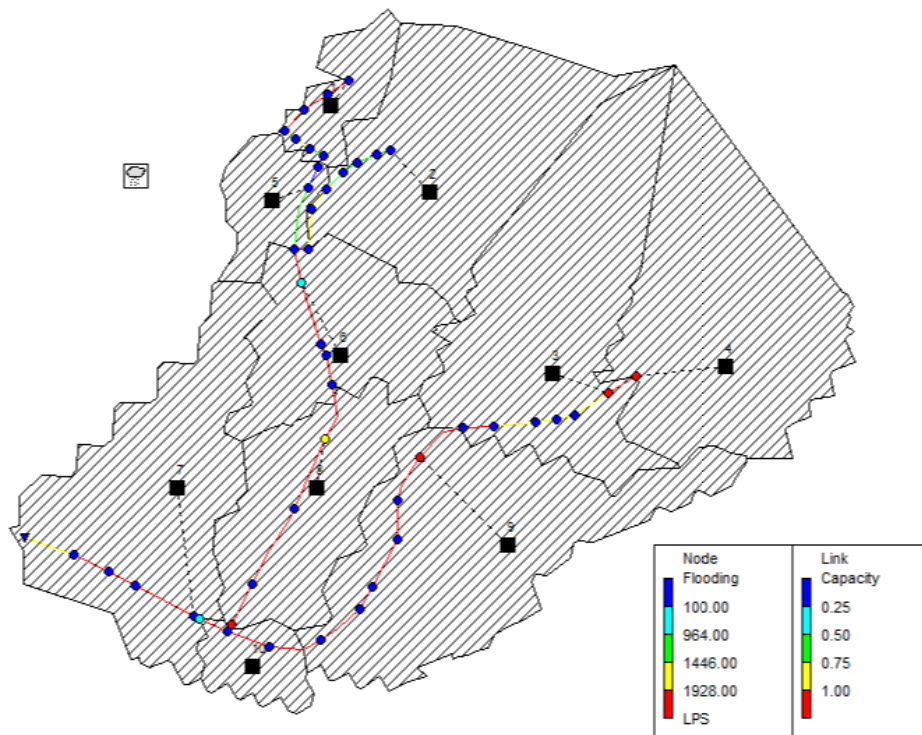
σημειώνονται με κόκκινο χρώμα έχουν υπερβεί την παροχτευτικότητα τους. Ο κόμβος 416156 πλημμυρίζει για περίπου 20 min, ο κόμβος 435250 στην έξοδο της υπολεκάνης 8 για περίπου 11 min και ο κόμβος 416155, όπου παροχτεύεται η υπολεκάνη 4 για περίπου 12 min.

Πίνακας 5.12: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=50 και d=2hr.

| T=50y, d=2hr                                  |         |
|---|---------|
| Βροχόπτωση (mm)                               | 54.803  |
| Διήθηση (mm)                                  | 14.151  |
| Επιφανειακή Συγκράτηση (mm)                   | 2.773   |
| Επιφανειακή Απορροή (mm)                      | 37.926  |
| Παροχή αιχμής στην έξοδο (l/s)                | 8944.99 |
| Χρόνος αιχμής (h:min:s)                       | 1:10:00 |
| Όγκος απορροής στην έξοδο (10 <sup>6</sup> l) | 25.384  |



Εικόνα 5.23: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=50 και d=2hr.

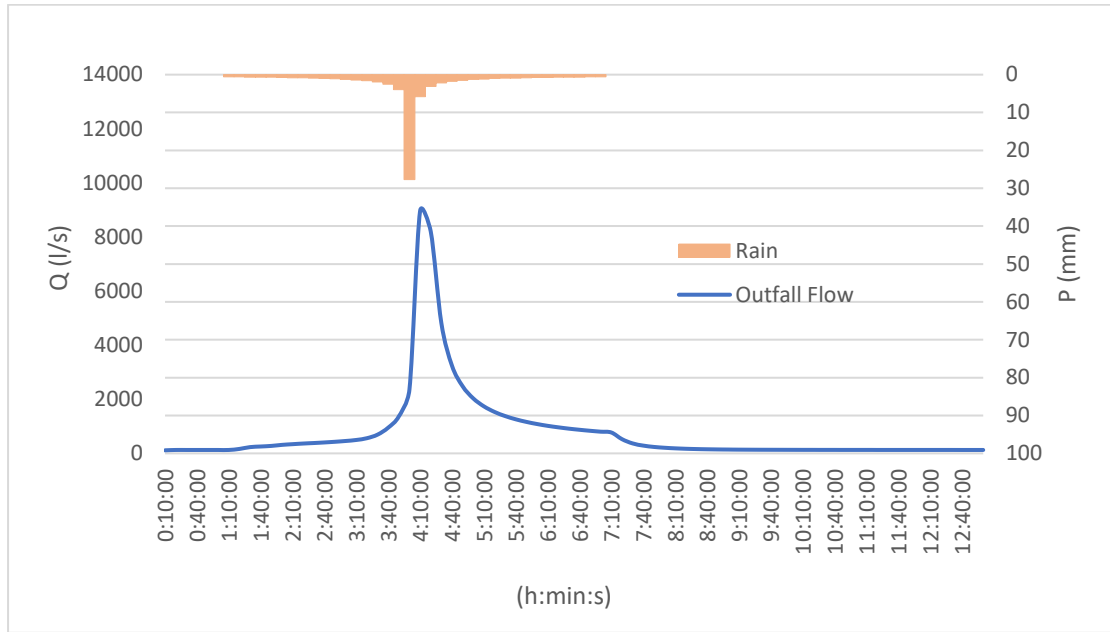


Εικόνα 5.24: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή  $T=50$  και  $d=2hr$ .

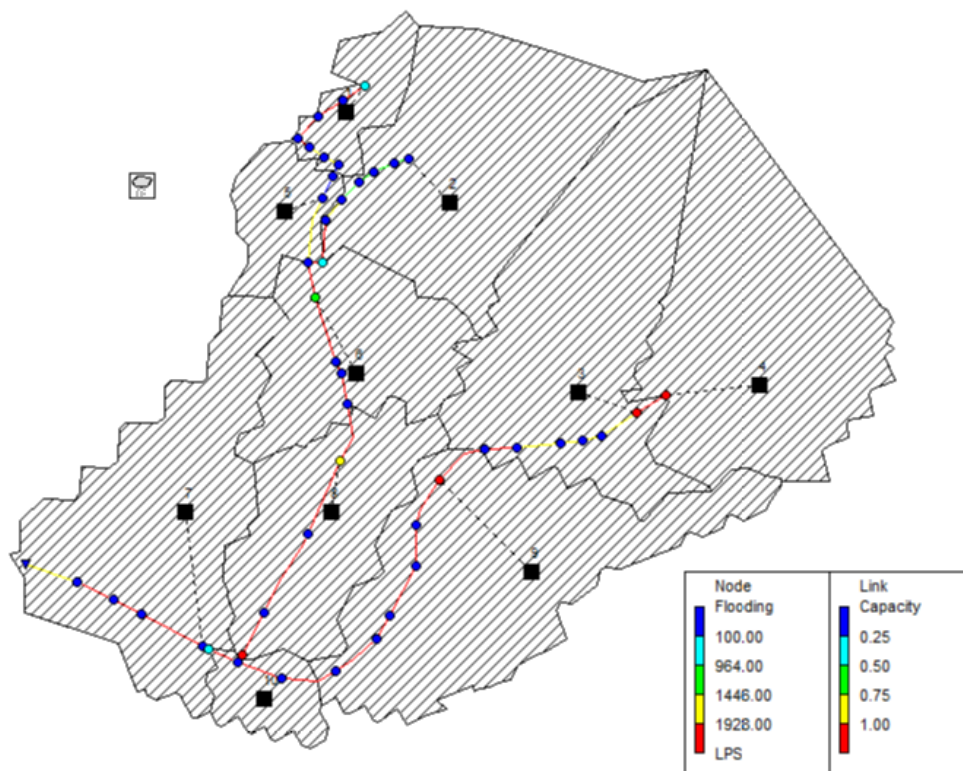
- Επίλυση Μοντέλου για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=50$  και διάρκειας  $d=6hr$   
 Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ολόκληρη τη λεκάνη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.13. Στην Εικόνα 5.25 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Από την επίλυση προέκυψε ότι οι 9 κόμβοι που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.26 πλημμυρίζουν τη χρονική στιγμή της μέγιστης παροχής στην έξοδο, ενώ οι αγωγοί της ίδιας εικόνας που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα έχουν υπερβεί την παροχετευτικότητα τους. Ο κόμβος 416156 πλημμυρίζει για περίπου 21 min, ο κόμβος 435250 στην έξοδο της υπολεκάνης 8 για περίπου 14 min και ο κόμβος 416155, όπου παροχετεύεται η υπολεκάνη 4 για περίπου 16 min.

Πίνακας 5.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από επίλυση του δικτύου για  $T=50$  και  $d=6hr$ .

| T=50y, d=6hr                          |         |
|---------------------------------------|---------|
| Βροχόπτωση (mm)                       | 74.156  |
| Διήθηση (mm)                          | 13.901  |
| Επιφανειακή Συγκράτηση (mm)           | 3.968   |
| Επιφανειακή Απορροή (mm)              | 56.327  |
| Παροχή αιχμής στην έξοδο (l/s)        | 8950.08 |
| Χρόνος αιχμής (h:min:s)               | 3:10:00 |
| Όγκος απορροής στην έξοδο ( $10^6$ l) | 37.117  |



Εικόνα 5.25: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή  $T=50$  και  $d=6hr$ .



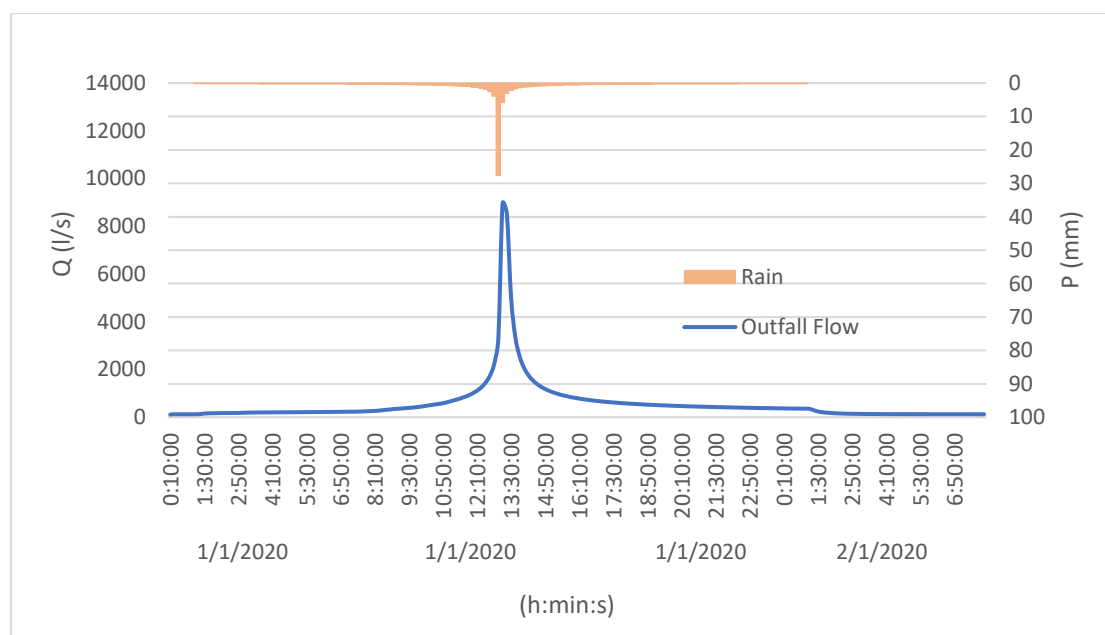
Εικόνα 5.26: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή  $T=50$  και  $d=6hr$ .

- Επίλυση Μοντέλου για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=50$  και διάρκειας  $d=24hr$   
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ολόκληρη τη λεκάνη παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.14. Στην Εικόνα 5.27 παρουσιάζεται το υδρογράφημα απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Από την επίλυση προέκυψε ότι οι 10 κόμβοι που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.28 πλημμυρίζουν

τη χρονική στιγμή της μέγιστης παροχής στην έξοδο, ενώ οι αγωγοί της ίδιας εικόνας που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα έχουν λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο της μονάδας. Ο κόμβος 416156 πλημμυρίζει για περίπου 22 min, ο κόμβος 435250 στην έξοδο της υπολεκάνης 8 για περίπου 15 min και ο κόμβος 416155, όπου παροχετεύεται η υπολεκάνη 4 για περίπου 17 min.

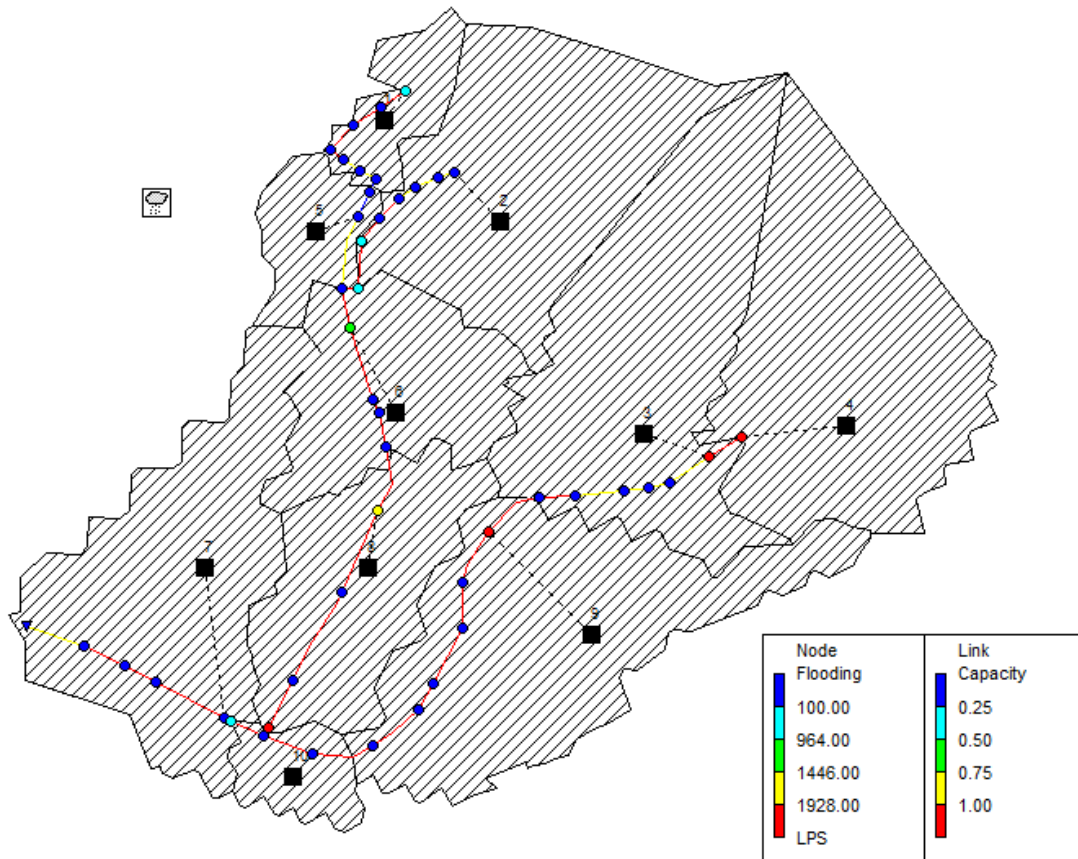
Πίνακας 5.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για T=50 και d=24hr.

| T=50γ, d=24hr                                 |          |
|---|----------|
| Βροχόπτωση (mm)                               | 108.571  |
| Διήθηση (mm)                                  | 14.757   |
| Επιφανειακή Συγκράτηση (mm)                   | 4.372    |
| Επιφανειακή Απορροή (mm)                      | 89.481   |
| Παροχή αιχμής στην έξοδο(l/s)                 | 8950.59  |
| Χρόνος αιχμής (h:min:s)                       | 12:10:00 |
| Όγκος απορροής στην έξοδο (10 <sup>6</sup> l) | 68.757   |



Εικόνα 5.27: Παροχή στην έξοδο του δικτύου για βροχή T=50 και d=24hr.





Εικόνα 5.28: Κόμβοι που πλημμυρίζουν και αγωγοί με λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο του 1 τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής στην έξοδο για βροχή  $T=50$  και  $d=24hr$ .

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου για τα ανωτέρω επεισόδια βροχής, εύκολα συμπεραίνουμε πως το παντοροϊκό δίκτυο της περιοχής μελέτης δεν επαρκεί για την παροχέτευση βροχής με περίοδο επαναφοράς ίση ή μεγαλύτερη των 25 ετών, ανεξαρτήτως της διάρκειας της. Ακόμη, και στην περίπτωση βροχής με το χαμηλότερο συνολικό ύψος ( $T=25$  και  $d=1$  hr) 6 κόμβοι του δικτύου πλημμυρίζουν. Η αύξηση των συνολικών mm βροχής που συνεπάγεται η αύξηση της περιόδου επαναφοράς και της διάρκειας βροχόπτωσης, οδηγεί σε μεγαλύτερη αστοχία του δικτύου, με τη βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=50$  ετών και  $d=24hr$  να οδηγεί σε πλημμύρα 16 κόμβων συνολικά.

Αντίστοιχο με τους κόμβους, είναι και το συμπέρασμα που αντλείται για το λόγο πλήρωσης των αγωγών του δικτύου. Ιδιαίτερα, οι αγωγοί στα κατάντη σημεία της περιοχής μελέτης έχουν λόγο πλήρωσης μεγαλύτερο της μονάδας από το επεισόδιο βροχής περιόδου επαναφοράς  $T=25$  ετών και  $d=1hr$ , ενώ κατά την ανάλυση για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=50$  ετών και  $d=24hr$  λίγοι αγωγοί του δικτύου φαίνεται να μην βρίσκονται σε κατάσταση πλήρωσης, ακόμα και στα ανάντη σημεία της περιοχής μελέτης.

Στον Πίνακα 5.14 παρουσιάζονται οι τιμές των όγκων εισροής ξηρού και υγρού καιρού στο δίκτυο σε όλη τη λεκάνη, οι τιμές του όγκου της απορροής και όγκος που υπερχειλίζει από αυτό, όπως υπολογίστηκαν από το SWMM για κάθε βροχή. Στην τελευταία γραμμή του Πίνακα υπολογίζεται το ποσοστό των συνολικών εισροών (ξηρού και υγρού καιρού) που πλημμυρίζει από τους κόμβους του δικτύου. Σημειώνεται, ότι οι μεταβολές στις απορροές ξηρού καιρού ανάμεσα σε επεισόδια ίδιας περιόδου επαναφοράς και διαφορετικής διάρκειας, οφείλεται στη διαφορετική διάρκεια προσομοίωσης για κάθε βροχή. Η διάρκεια



προσομοίωσης, επιλέχθηκε να είναι κάθε φορά ίση με τη διάρκεια που απαιτείται, ώστε η παροχή στην έξοδο της λεκάνης να γίνει ίση με την παροχή ξηρού καιρού, θεωρώντας πως τότε έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της απορροής στη λεκάνη. Από τα δεδομένα της προτελευταίας γραμμής του Πίνακα συμπεραίνουμε πως η υπερχειλίση από τους κόμβους αυξάνεται όσο αυξάνονται τα αθροιστικά mm βροχής. Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζεται και ο συνολικός αριθμός κόμβων που πλημμυρίζουν κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων που εξετάστηκαν.

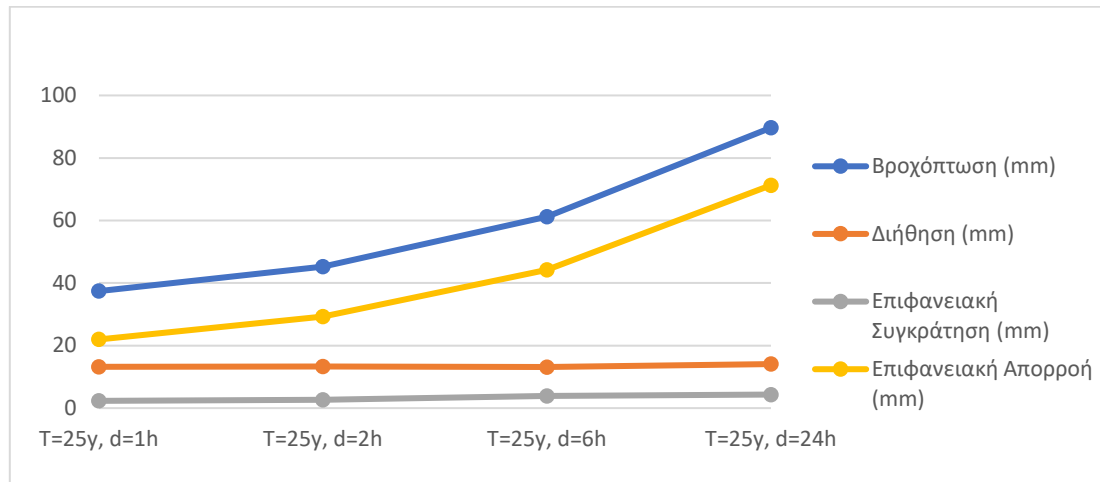
Πίνακας 5.15: Όγκοι εισροής, απορροής και υπερχειλίσης από το δίκτυο και συνολικός αριθμός κόμβων που πλημμυρίζουν για κάθε επεισόδιο βροχής.

|  | T=25y,<br>d=1h | T=25y,<br>d=2h | T=25y,<br>d=6h | T=25y,<br>d=24h | T=50y,<br>d=1h | T=50y,<br>d=2h | T=50y,<br>d=6h | T=50y,<br>d=24h |
|--|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Εισροές ξηρού καιρού στο δίκτυο (10 <sup>6</sup> l)        | 4.082          | 4.082          | 5.897          | 16.783          | 4.082          | 4.082          | 5.897          | 16.783          |
| Εισροές υγρού καιρού στο δίκτυο (10 <sup>6</sup> l)        | 14.696         | 19.581         | 29.591         | 47.702          | 19.359         | 25.379         | 37.693         | 59.879          |
| Όγκος απορροής από το δίκτυο (10 <sup>6</sup> l)           | 18.153         | 22.251         | 32.289         | 59.853          | 20.78          | 25.384         | 37.117         | 68.757          |
| Όγκος που πλημμυρίζει από τους κόμβους (10 <sup>6</sup> l) | 0.586          | 1.375          | 3.167          | 4.601           | 2.628          | 4.045          | 6.443          | 7.875           |
| Συνολικός Αριθμός Κόμβων που πλημμυρίζουν                  | 6              | 7              | 9              | 10              | 9              | 11             | 13             | 16              |

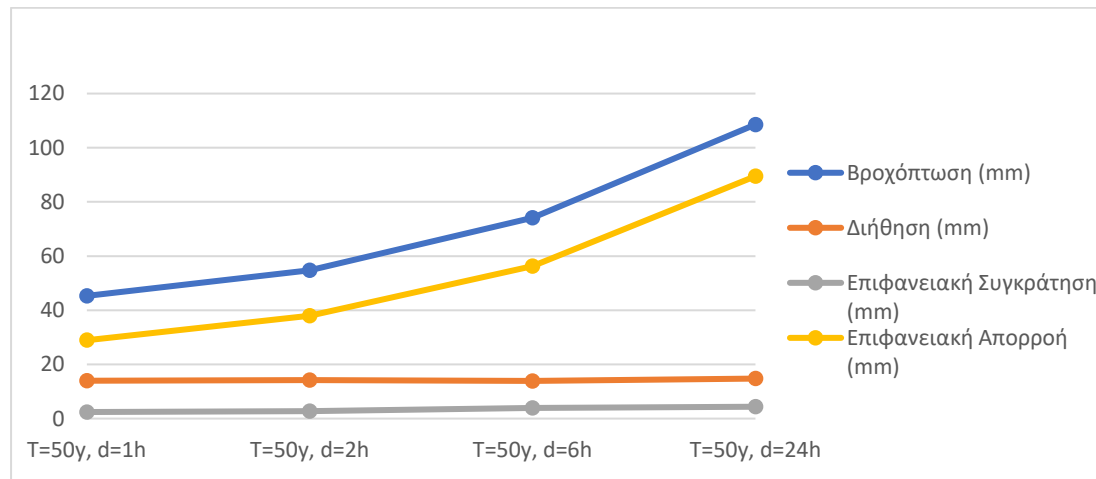
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση των υδρολογικών μεγεθών της απορροής που παρουσιάζεται στις Εικόνες 5.30 και 5.31, τα δεδομένα των οποίων προέρχονται από τους Πίνακες 5.6 έως 5.13. Από τα διαγράμματα, συμπεραίνουμε πως η ικανότητα των υπολεκανών για συγκράτηση και διήθηση εξαντλείται σε μεγάλο βαθμό κατά την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, με αποτέλεσμα η αύξηση του συνολικού ύψους βροχής να οδηγεί σε αύξηση της άμεσης απορροής.

Σε συνέχεια των παραπάνω παρατηρήσεων, παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.31 και 5.32 οι τιμές του συντελεστή απορροής που υπολογίζονται από το SWMM για κάθε υπολεκάνη. Τα

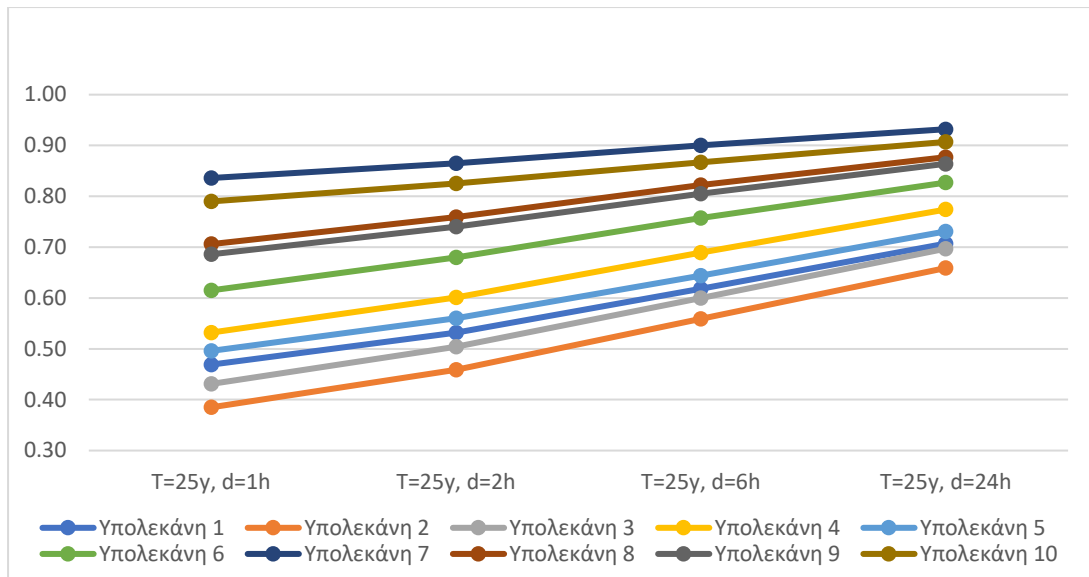
διαγράμματα επιβεβαιώνουν την παρατήρηση πως για βροχές κοινής περιόδου επαναφοράς και αυξανόμενης διάρκειας, αυξάνεται η απορροή ως ποσοστό της βροχόπτωσης.



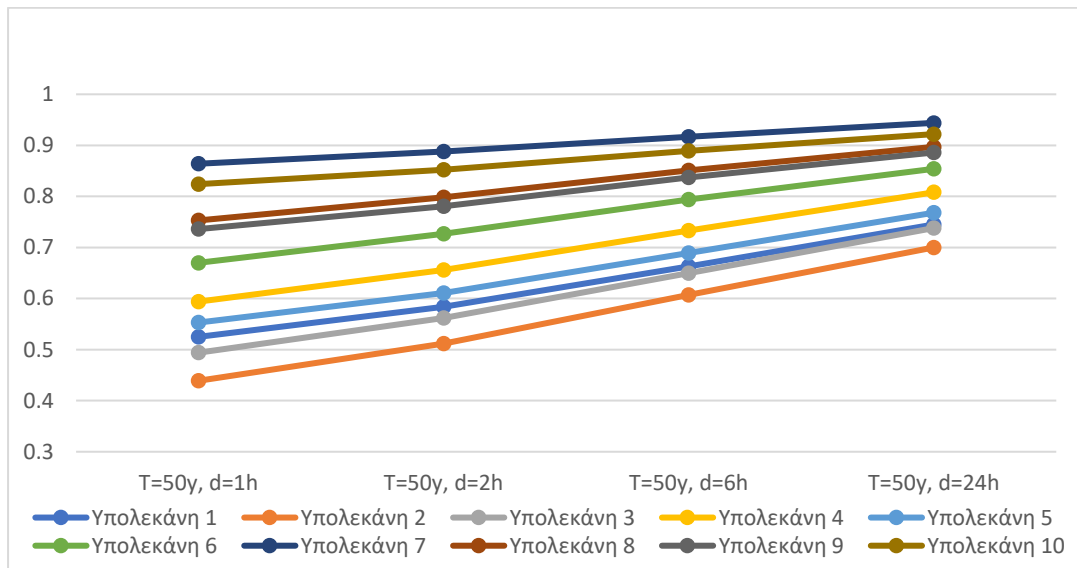
Εικόνα 5.29: Υδρολογικές συνιστώσες απορροής για βροχές περιόδου επαναφοράς T=25 και διαφορετικής διάρκειας.



Εικόνα 5.30: Υδρολογικές συνιστώσες απορροής για βροχές περιόδου επαναφοράς T=50 και διαφορετικής διάρκειας.



Εικόνα 5.31: Ο συντελεστής απορροής για κάθε υπολεκάνη, όπως υπολογίστηκε από το SWMM για βροχές περιόδου επαναφοράς T=25 και διαφορετικής διάρκειας.



Εικόνα 5.31: Ο συντελεστής απορροής για κάθε υπολεκάνη, όπως υπολογίστηκε από το SWMM για βροχές περιόδου επαναφοράς T=50 και διαφορετικής διάρκειας.

## 5.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟ SWMM ΜΕ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΩΣ ΕΙΣΟΔΟΥΣ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση του δικτύου στο SWMM χρησιμοποιώντας ως εισόδους στο δίκτυο, πλημμυρογραφήματα που καταρτίστηκαν για βροχές διαφορετικής διάρκειας και περιόδων επαναφοράς στο λογισμικό HEC-HMS για κάθε μια από τις λεκάνες.

Πρώτο βήμα της διαδικασίας αποτέλεσε η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης και κατά συνέπεια του χρόνου υστέρησης της απόκρισης των λεκανών. Τα αποτελέσματα των χρόνων συγκέντρωσης που προέκυψαν από τις τρεις μεθόδους (Giandotti, Κινηματικού Κύματος και Kerby) για κάθε υπολεκάνη παρουσιάζονται

στον Πίνακα 5.16. Η μέθοδος Kerby αποδίδει τις μικρότερες τιμές χρόνου συγκέντρωσης για όλες τις λεκάνες, ενώ η μέθοδος του Κινηματικού κύματος τις μεγαλύτερες.

Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα υπολογισμών χρόνου συγκέντρωσης με τις μεθόδους Giandotti, Κινηματικού Κύματος και Kerby για κάθε υπολεκάνη.

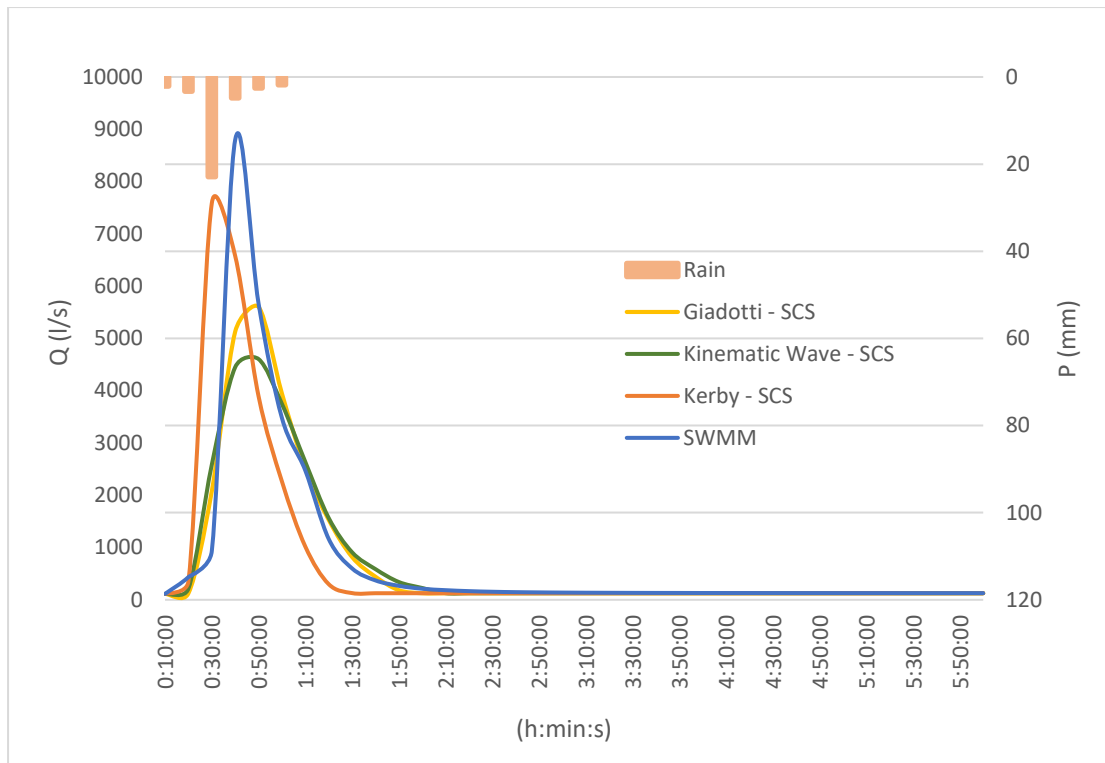
| Στοιχεία Υπολεκανών |                     |        | Χρόνος Συγκέντρωσης - tc (min) |                     |       |
|---------------------|---------------------|--------|--------------------------------|---------------------|-------|
| Υπολεκάνες          | A(km <sup>2</sup> ) | L(m)   | Giandotti                      | Κινηματικού Κύματος | Kerby |
| 1                   | 0.018137            | 187.44 | 15.25                          | 14.85               | 6.13  |
| 2                   | 0.092766            | 393.08 | 21.88                          | 20.78               | 7.03  |
| 3                   | 0.106554            | 271.31 | 17.33                          | 13.60               | 5.92  |
| 4                   | 0.109668            | 305.37 | 20.23                          | 26.61               | 7.77  |
| 5                   | 0.019296            | 120.07 | 16.40                          | 11.74               | 5.58  |
| 6                   | 0.052696            | 228.98 | 24.92                          | 22.60               | 7.27  |
| 7                   | 0.094953            | 280.11 | 25.22                          | 12.21               | 5.67  |
| 8                   | 0.057556            | 349.22 | 25.98                          | 34.57               | 8.64  |
| 9                   | 0.102676            | 393.85 | 25.31                          | 42.45               | 9.38  |
| 10                  | 0.014869            | 126.51 | 17.74                          | 7.14                | 4.56  |

Για τις τρεις μεθόδους έγινε μια πρώτη επίλυση του δικτύου για βροχή περιόδου επαναφοράς T=25 ετών και διάρκειας d=1hr. Με δεδομένους τους χρόνους συγκέντρωσης για κάθε υπολεκάνη παρήχθησαν πλημμυρογραφήματα με βάση το μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS στο HEC-HMS. Στη συνέχεια τα πλημμυρογραφήματα εισήχθησαν στους κόμβους του δικτύου στο SWMM με τον τρόπο που περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.6.

Τα αποτελέσματα της παροχής στην έξοδο της λεκάνης παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.32 σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του βαθμονομημένου μοντέλου στο SWMM για την ίδια βροχή. Παρατηρούμε, πως οι μέθοδοι Κινηματικού Κύματος και Giandotti για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης οδηγούν σε υστέρηση της παροχής αιχμής κατά 10 min σε σχέση με την αρχική επίλυση του βαθμονομημένου μοντέλου στο SWMM, ενώ αντίθετα με τη μέθοδο Kerby η παροχή αιχμής εμφανίζεται 10 min νωρίτερα. Ως προς τα μεγέθη των παροχών, η μέθοδος Kerby βρίσκεται πιο κοντά στις τιμές του μοντέλου SWMM. Σημειώνεται, πως αν και η παροχή αιχμής με τη μέθοδο του Κινηματικού Κύματος εμφανίζεται στις 00:50, η τιμή της παροχής στις 00:40 έχει πολύ κοντινή τιμή.

Από την επίλυση για τις 3 παραπάνω μεθόδους στο SWMM προέκυψε επίσης πως με τις μεθόδους Giandotti και Κινηματικού Κύματος κανένας κόμβος του δικτύου δεν πλημμυρίζει σε αντίθεση με τη μέθοδο Kerby, κατά την οποία πλημμυρίζουν οι δύο κόμβοι (416155 και 416156). Στην επίλυση για την αντίστοιχη βροχή με το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM πλημμυρίζουν συνολικά 6 κόμβοι.

Οι τρεις μέθοδοι συγκρίνονται και ως προς τον όγκο της επιφανειακής απορροής, όπου παρουσιάζουν μικρές διαφορές μεταξύ τους (Πίνακας 5.17).



Εικόνα 5.32: Σύγκριση παροχής στην έξοδο της λεκάνης από την επίλυση στο SWMM με την εισαγωγή πλημμυρογραφήματων (για τις 3 μεθόδους υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης) με την παροχή από το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM (Βροχή T=25, d=1 hr).

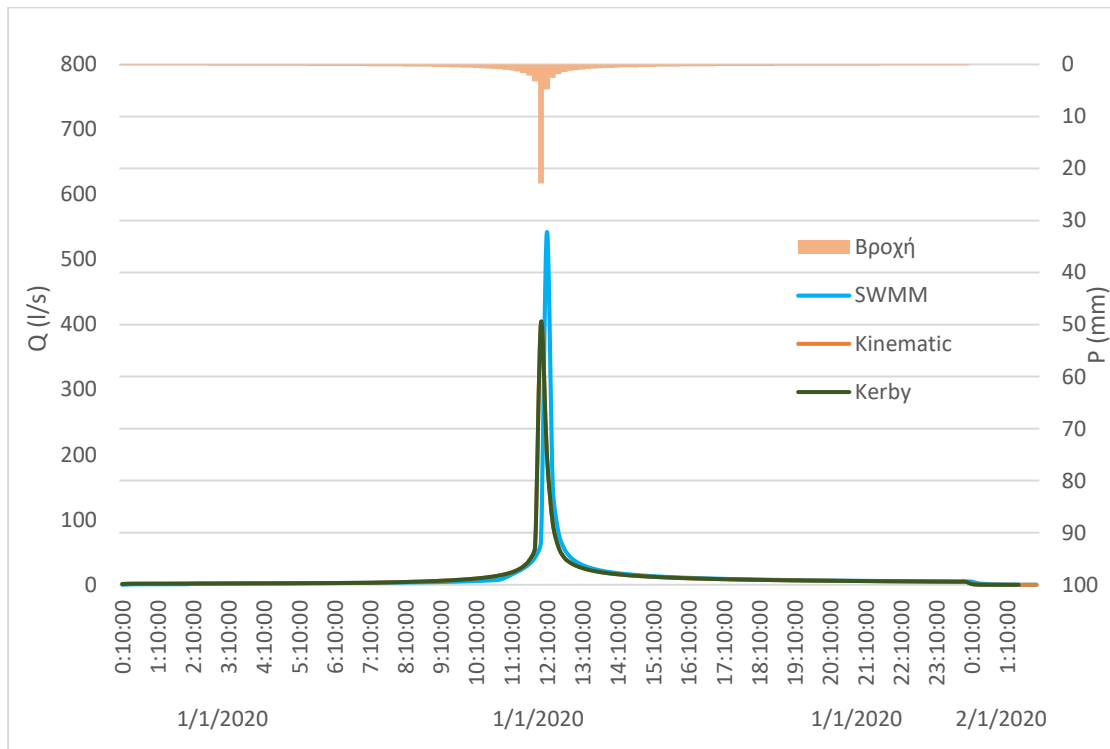
Πίνακας 5.17: Σύγκριση όγκου επιφανειακής απορροής από την επίλυση στο SWMM με την εισαγωγή πλημμυρογραφήματων (για τις 3 μεθόδους υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης) με την παροχή από το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM (Βροχή T=25, d=1 hr).

| T=25y, d=1h                                   |        |                 |                 |             |
|---|--------|-----------------|-----------------|-------------|
|   | SWMM   | SCS - Giandotti | SCS - Kinematic | SCS - Kerby |
| Βροχόπτωση (mm)                               | 37.42  | 37.42           | 37.42           | 37.42       |
| Επιφανειακή Απορροή (mm)                      | 21.961 | 19.210          | 19.047          | 19.257      |
| Όγκος απορροής στην έξοδο (10 <sup>6</sup> l) | 18.153 | 16.64           | 16.25           | 16.61       |

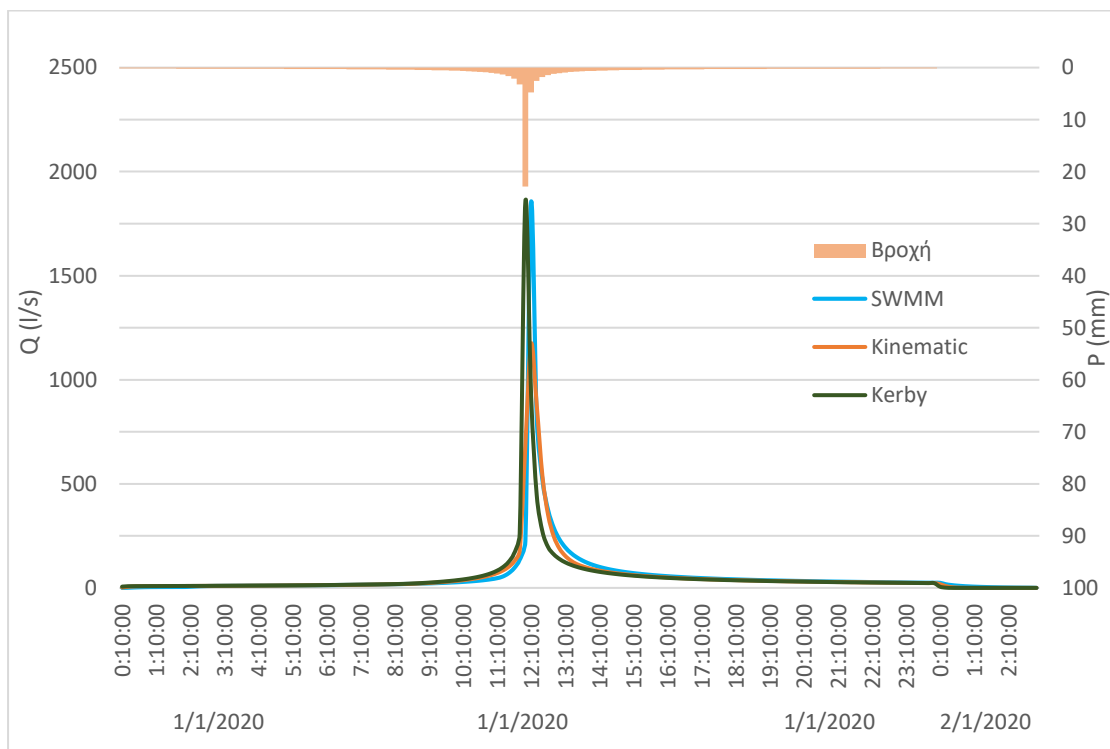
Με βάση τα παραπάνω προκύπτει πως οι μέθοδοι Giandotti και Κινηματικού Κύματος δε διαφέρουν ιδιαίτερα στην μεταξύ τους σύγκριση. Δεδομένου του ότι το SWMM υπολογίζει το χρόνο συγκέντρωσης με τη μέθοδο του Κινηματικού Κύματος και της τιμής της παροχής στην έξοδο που προκύπτει με τη μέθοδο αυτή τη χρονική στιγμή 00:40 (κατά την οποία η παροχή παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της κατά την υδρολογική ανάλυση των υπολεκανών με το SWMM στο βαθμονομημένο μοντέλο), για τις μεθόδους Κινηματικού Κύματος και Kerby ακολουθεί μια εκτενέστερη ανάλυση.

Μια πρώτη διερεύνηση που επιχειρείται είναι να συγκριθούν τα πλημμυρογραφήματα που παρήχθησαν βάσει του μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS για κάθε υπολεκάνη με τα αντίστοιχα πλημμυρογραφήματα που υπολογίζονται από την υδρολογική ανάλυση με το SWMM στο βαθμονομημένο μοντέλο. Η σύγκριση γίνεται για την παραγωγή

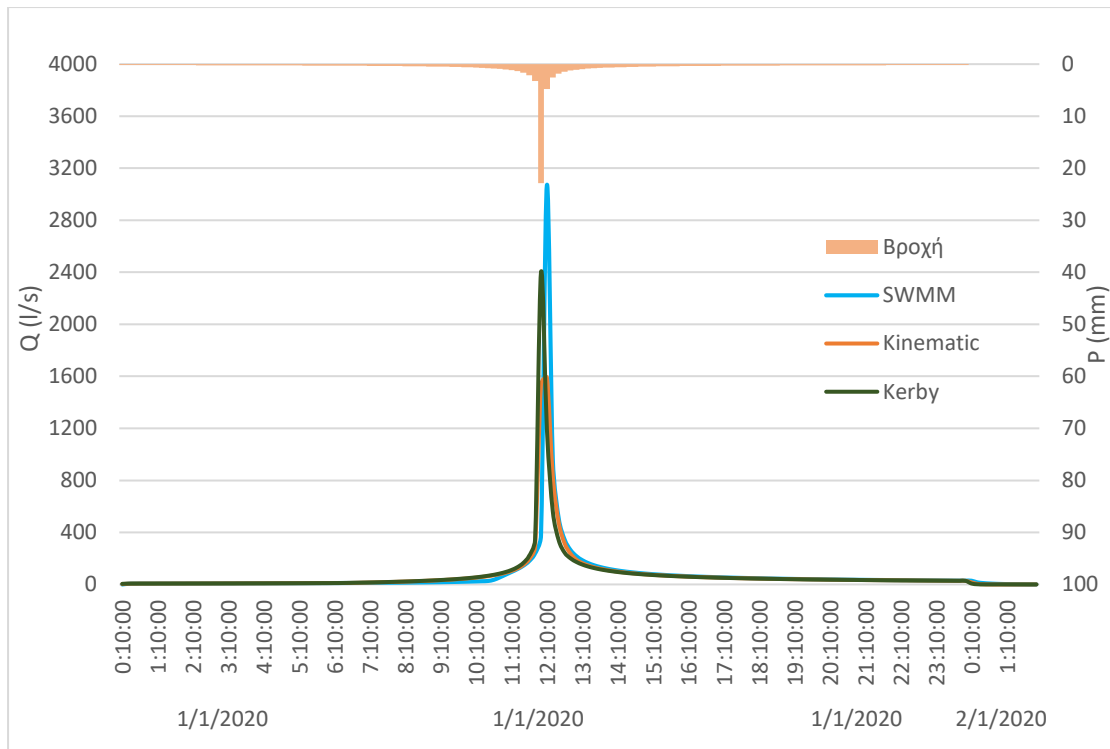
πλημμυρογραφήματων με χρόνο συγκέντρωσης από τις μεθόδους Κινηματικού Κύματος και Kerby και για βροχή με περίοδο επαναφοράς  $T=25$  έτη και διάρκειας  $d=24$ hr. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.33 έως 5.42.



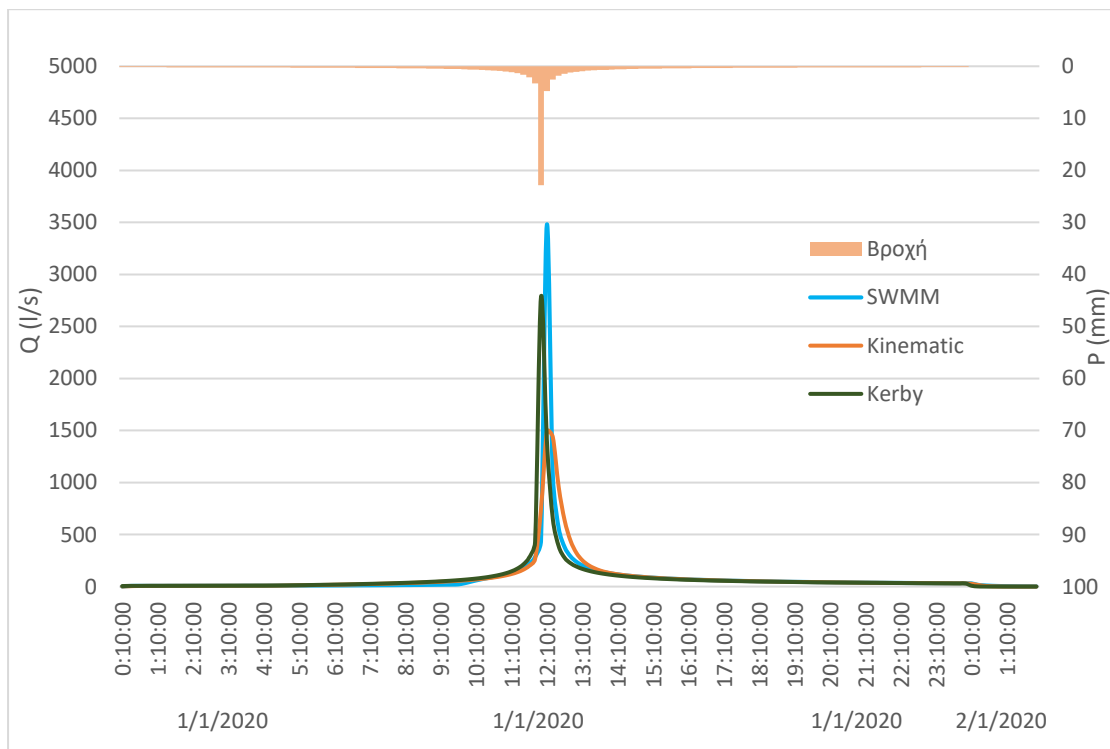
Εικόνα 5.33: Σύγκριση πλημμυρογραφήματων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 1.



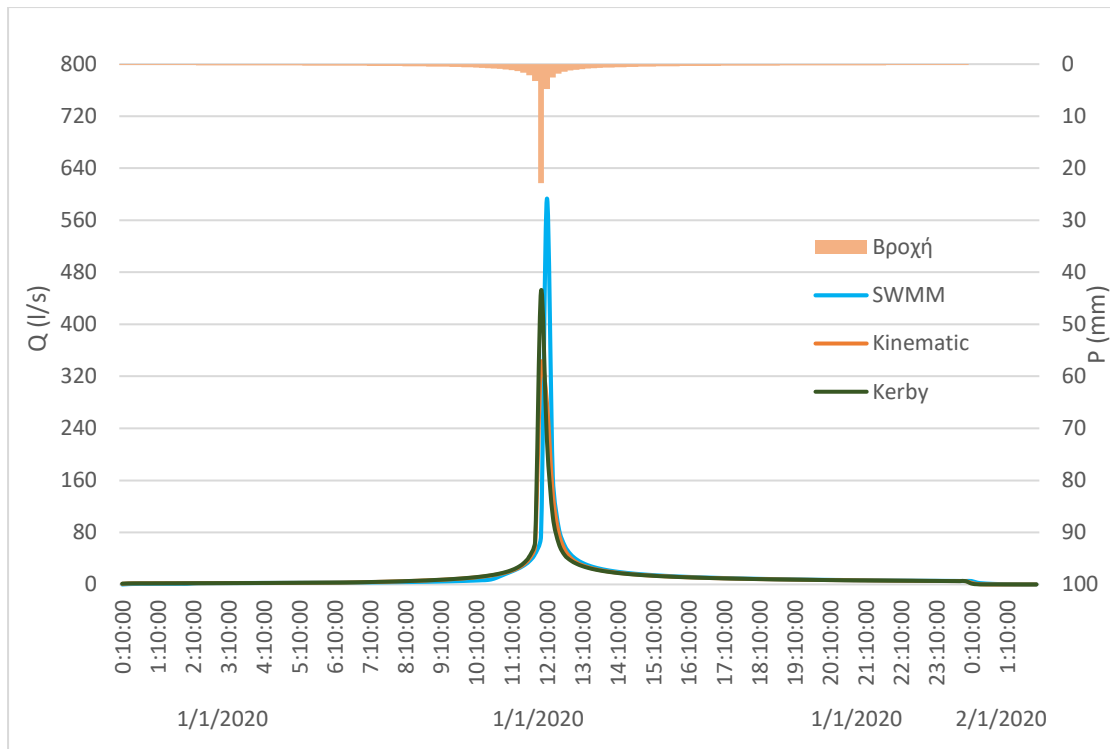
Εικόνα 5.34: Σύγκριση πλημμυρογραφήματων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 2.



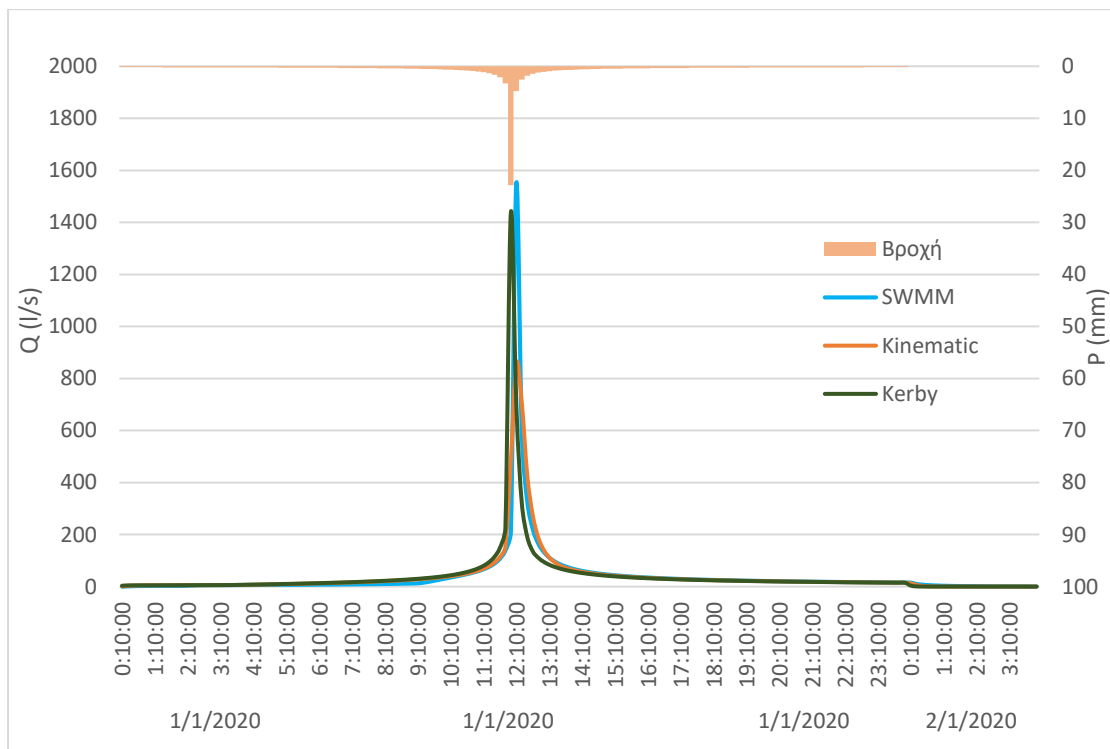
Εικόνα 5.35: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 3.



Εικόνα 5.36: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 4.

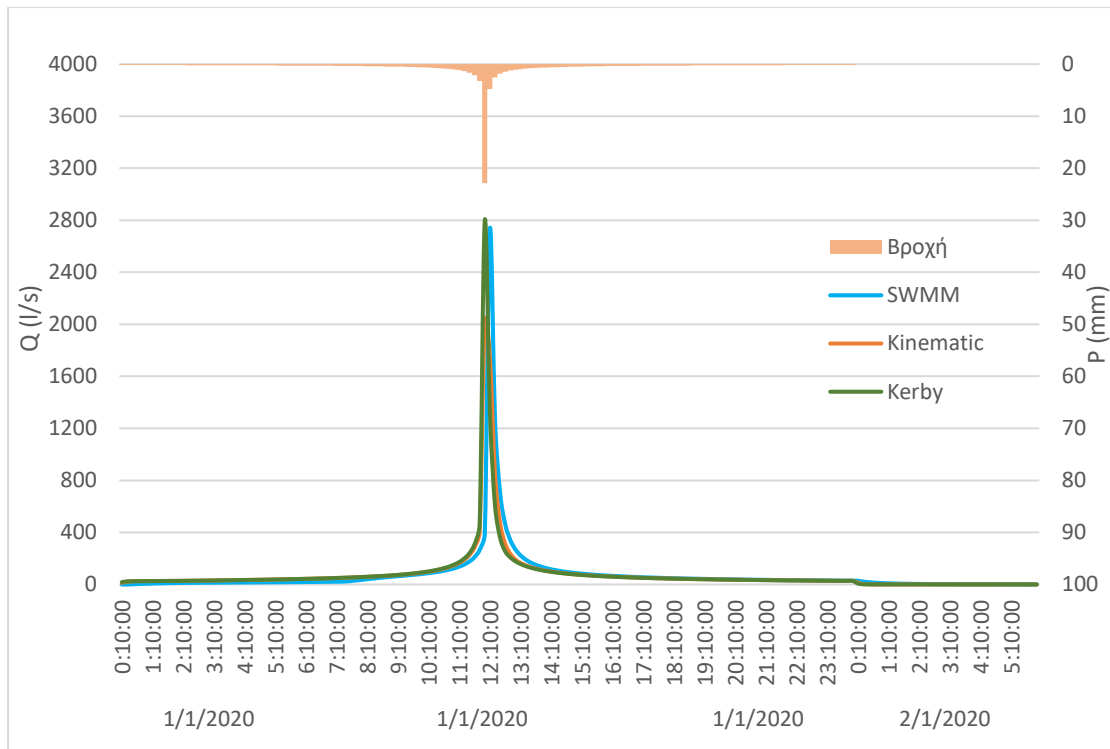


Εικόνα 5.37: Σύγκριση πλημμυρογραφήματων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 5.

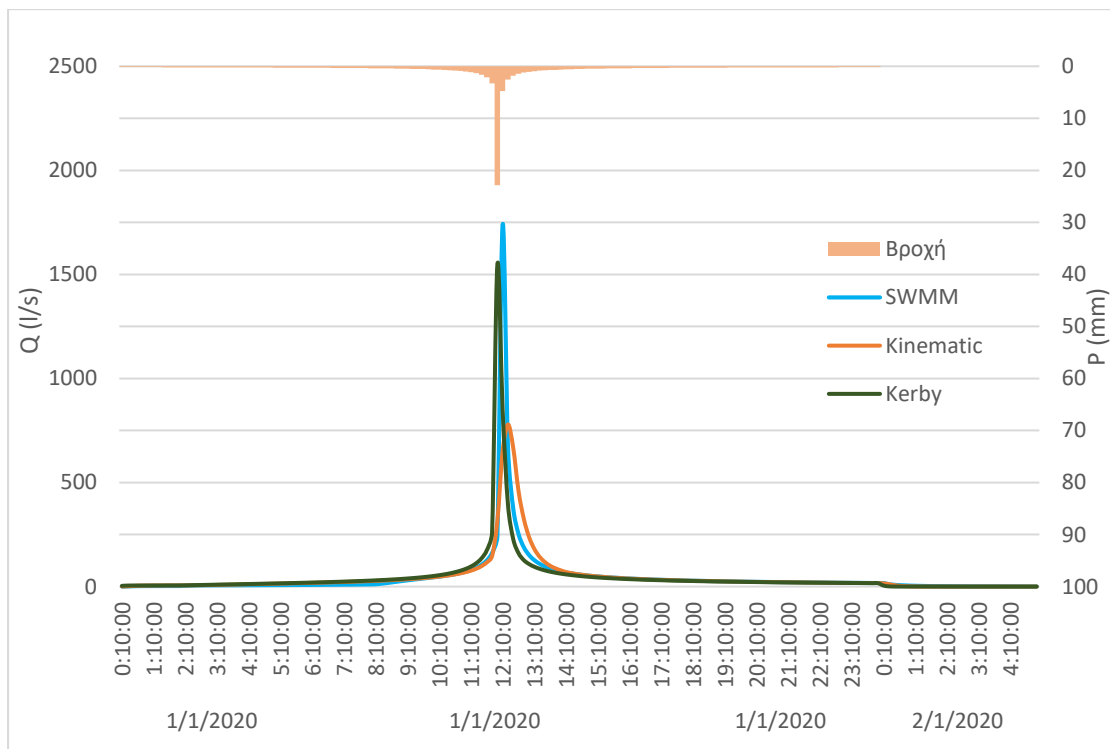


Εικόνα 5.38: Σύγκριση πλημμυρογραφήματων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 6.

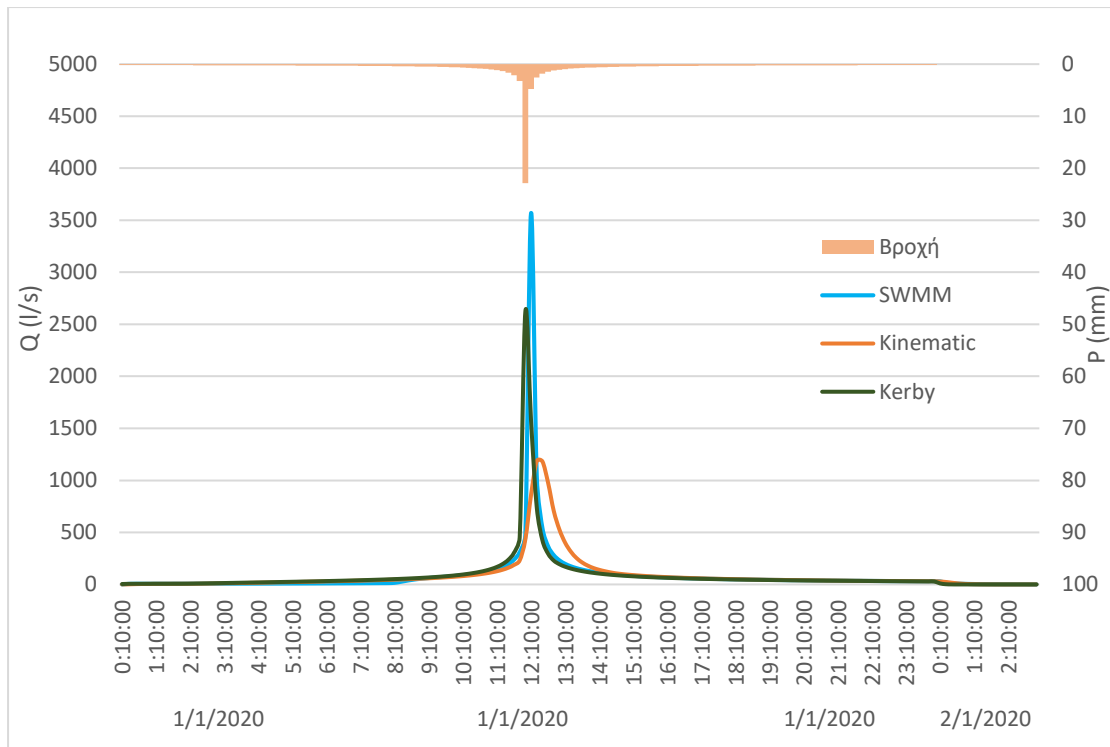




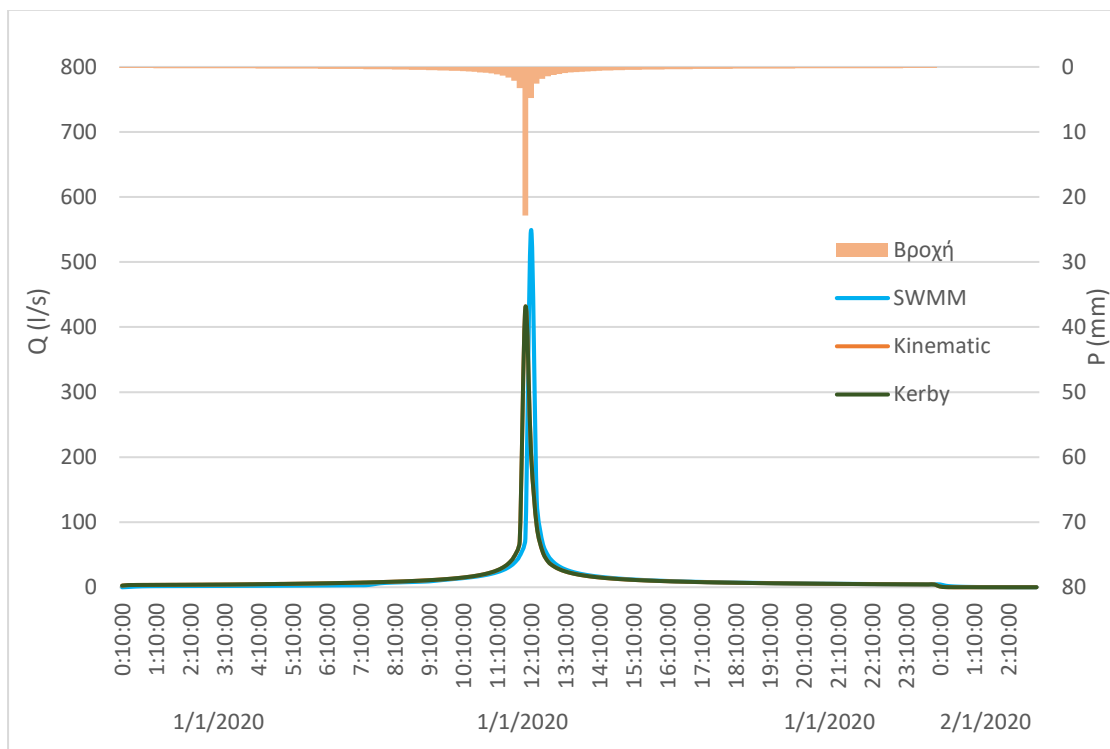
Εικόνα 5.39: Σύγκριση πλημμυρογραφήματων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 7.



Εικόνα 5.40: Σύγκριση πλημμυρογραφήματων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 8.



Εικόνα 5.41: Σύγκριση πλημμυρογραφήματων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 9.



Εικόνα 5.42: Σύγκριση πλημμυρογραφήματων από το SWMM και τη μέθοδο της SCS για την Υπολεκάνη 10.

Από τα παραπάνω πλημμυρογραφήματα, είναι εύκολα κατανοητό πως, σε όλες τις υπολεκάνες τα πλημμυρογραφήματα που υπολογίζονται λαμβάνοντας ως χρόνο συγκέντρωσης αυτόν που προκύπτει από την εξίσωση Kerby, αποδίδουν τιμές παροχής

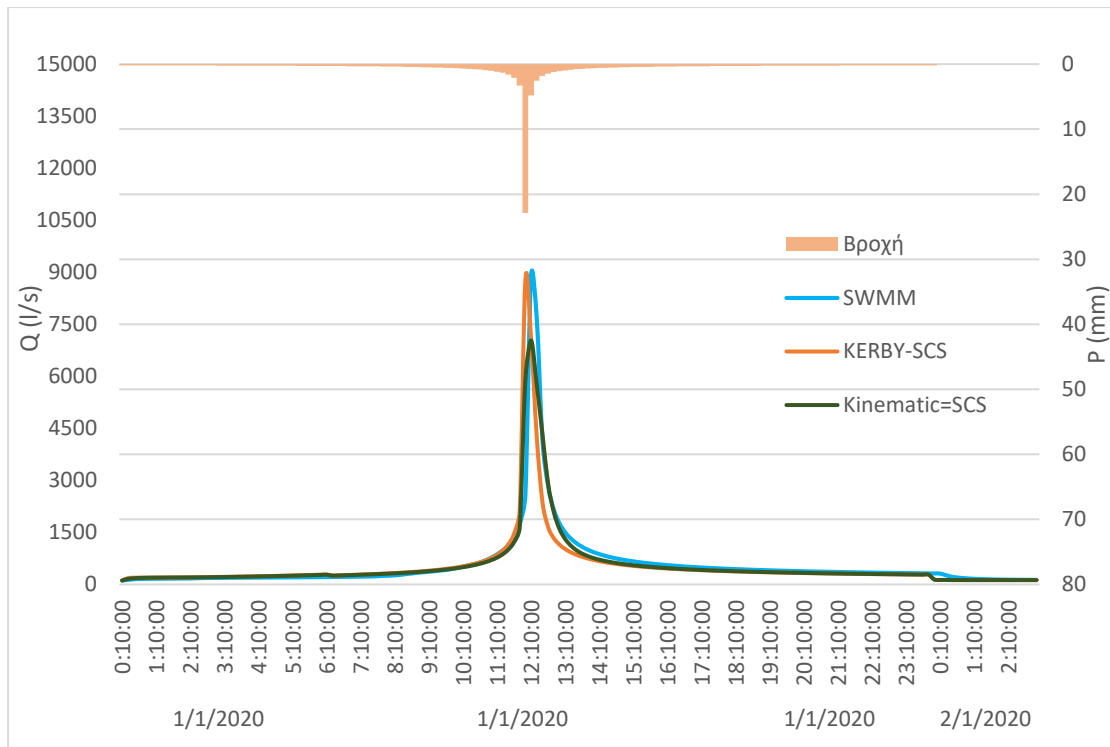
αιχμής κοντινότερες με αυτές που προκύπτουν κατά την υδρολογική ανάλυση με το SWMM, σε σχέση με την περίπτωση υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης με τη μέθοδο του Κινηματικού Κύματος. Εξάιρεση αποτελεί η υπολεκάνη 10, όπου τα πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν με τη μέθοδο της SCS έχουν ίδιες τιμές καθ' όλη τη διάρκεια τους, είτε ο χρόνος συγκέντρωσης υπολογίζεται με τη μέθοδο Kerby είτε με τη μέθοδο του Κινηματικού Κύματος. Παρατηρείται, επίσης, πως με τη μέθοδο Kerby η παροχή αιχμής εμφανίζεται σε όλες τις υπολεκάνες 10 min νωρίτερα σε σχέση με την χρονική στιγμή εμφάνισής της στα πλημμυρογραφήματα που παρήχθησαν από το SWMM.

Η χρονική στιγμή εμφάνισης παροχής αιχμής στα πλημμυρογραφήματα εξαρτάται από τους χρόνους υστέρησης που προκύπτουν από κάθε μέθοδο. Με τη μέθοδο Kerby, οι χρόνοι υστέρησης που προκύπτουν είναι για όλες τις υπολεκάνες μικρότεροι των 10 min. Δεδομένης της κατάρτισης βροχογραφημάτων ανά δεκάλεπτο, με τη μέθοδο αυτή καμία υπολεκάνη δεν παρουσιάζει υστέρηση, καθώς η μέγιστη τιμή απορροής εμφανίζεται στο ίδιο χρονικό βήμα εμφάνισης του μέγιστου ύψους βροχής. Αντίθετα, με τη μέθοδο του Κινηματικού Κύματος οι χρόνοι υστέρησης που υπολογίζονται είναι για κάποιες υπολεκάνες μεγαλύτεροι των 10 min. Παρότι το SWMM χρησιμοποιεί τη μέθοδο Κινηματικού Κύματος για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης, από τα πλημμυρογραφήματα παρατηρείται πως η χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής διαφέρει στις 5 από τις 10 υπολεκάνες σε σχέση με αυτή που υπολογίζεται από την υδρολογική ανάλυση με το SWMM.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι παροχές στην έξοδο της λεκάνης, όπως προέκυψαν από την επίλυση του δικτύου με τα πλημμυρογραφήματα που υπολογίστηκαν με βάση το μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS και τις μεθόδους Κινηματικού Κύματος και Kerby για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης. Οι παροχές στην έξοδο που προκύπτουν από τις δύο παραπάνω επιλύσεις συγκρίνονται και πάλι με την παροχή στην έξοδο που προκύπτει από το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM για την ίδια βροχή (Εικόνα 5.43).

Τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα με τη βροχή διάρκειας 1 hr. Οι τιμές της παροχής αιχμής πλησιάζουν αυτές του βαθμονομημένου μοντέλου, όταν ο χρόνος συγκέντρωσης υπολογίζεται με τη μέθοδο Kerby, ενώ η χρονική στιγμή εμφάνισης ταυτίζεται με αυτήν του βαθμονομημένου μοντέλου όταν ο χρόνος συγκέντρωσης υπολογίζεται με τη μέθοδο του Κινηματικού Κύματος.

Ως προς τους κόμβους που πλημμυρίζουν σε κάθε επίλυση, με τη μέθοδο Kerby πλημμυρίζουν συνολικά 7 κόμβοι του δικτύου, ενώ με τη μέθοδο του Κινηματικού Κύματος 2 κόμβοι. Σημειώνεται, ότι κατά την επίλυση του βαθμονομημένου μοντέλου στο SWMM για την ίδια βροχή πλημμυρίζουν συνολικά 10 κόμβοι.



Εικόνα 5.43: Σύγκριση παροχής στην έξοδο της λεκάνης από την επίλυση στο SWMM με την εισαγωγή πλημμυρογραφήματων (για τις 2 μεθόδους υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης) με την παροχή από το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM (Βροχή T=25, d=24hr).

Τέλος, οι δύο μέθοδοι συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM ως προς τον συνολικό όγκο της απορροής που αποδίδουν σε κάθε υπολεκάνη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.17. Ο όγκος της απορροής εξαρτάται από τη μέθοδο απωλειών που χρησιμοποιήθηκε κατά την παραγωγή πλημμυρογράφηματος από το μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS. Έτσι, για τις δύο μεθόδους υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης ο όγκος της απορροής είναι ίδιος για κάθε λεκάνη, όγκος που προκύπτει για το σύνολο σχεδόν των υπολεκανών και με εξαίρεση την υπολεκάνη 9 μικρότερος από αυτόν που υπολογίζεται από το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM.

Το λογισμικό HEC-HMS δίνει τη δυνατότητα εξαίρεσης από τη διαδικασία διήθησης του τμήματος της υπολεκάνης που είναι αδιαπέρατο. Το τμήμα αυτό ορίζεται από το χρήστη. Μετά από δοκιμή που έγινε κατά την οποία εισήχθησαν στο HEC-HMS και τα ποσοστά αδιαπερατότητας κάθε υπολεκάνης όπως προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου SWMM, εξάγεται το συμπέρασμα πως τα αποτελέσματα αποδίδουν τιμές όγκου απορροής πολύ κοντινές σε αυτές του βαθμονομημένου μοντέλου (Στήλες 5 και 6 του Πίνακα 5.18). Το αποτέλεσμα είναι λογικό, καθώς την ίδια διαδικασία εξαίρεσης από τις διαδικασίες διήθησης των αδιαπέρατων τμημάτων τις υπολεκάνης ακολουθεί και το SWMM. Οι μικρές διαφορές που προκύπτουν οφείλονται στη δυνατότητα του SWMM να διαχωρίζει τα αδιαπέρατα τμήματα σε υποτμήματα με μηδενική ή όχι επιφανειακή συγκράτηση.

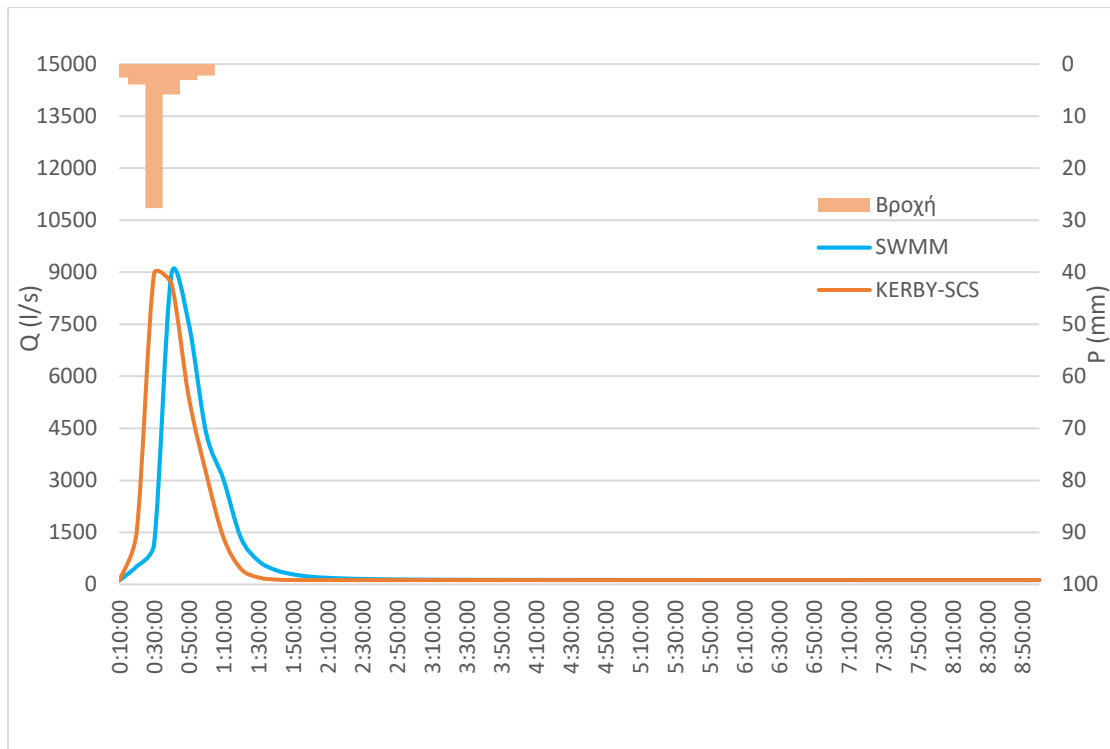
Πίνακας 5.18: Όγκος απορροής στις υπολεκάνες του βαθμονομημένου μοντέλου στο SWMM και από την παραγωγή πλημμυρογραφήματων με μέθοδο απωλειών της SCS με και χωρίς συνεκτίμηση του ποσοστού αδιαπερατότητας (βροχή T=25 έτη, d=24hr).

| Υπολεκάνες | Όγκος (10 <sup>6</sup> l) |      |              |
|------------|---------------------------|------|--------------|
|            | SWMM                      | SCS  | SCS - %imper |
| 1          | 1.15                      | 0.90 | 1.13         |
| 2          | 5.48                      | 3.91 | 5.27         |
| 3          | 6.66                      | 5.75 | 6.57         |
| 4          | 7.61                      | 7.16 | 7.73         |
| 5          | 1.26                      | 1.04 | 1.25         |
| 6          | 3.91                      | 3.70 | 4.02         |
| 7          | 7.94                      | 7.42 | 8.40         |
| 8          | 4.52                      | 4.50 | 4.70         |
| 9          | 7.95                      | 8.02 | 8.27         |
| 10         | 1.21                      | 1.04 | 1.28         |

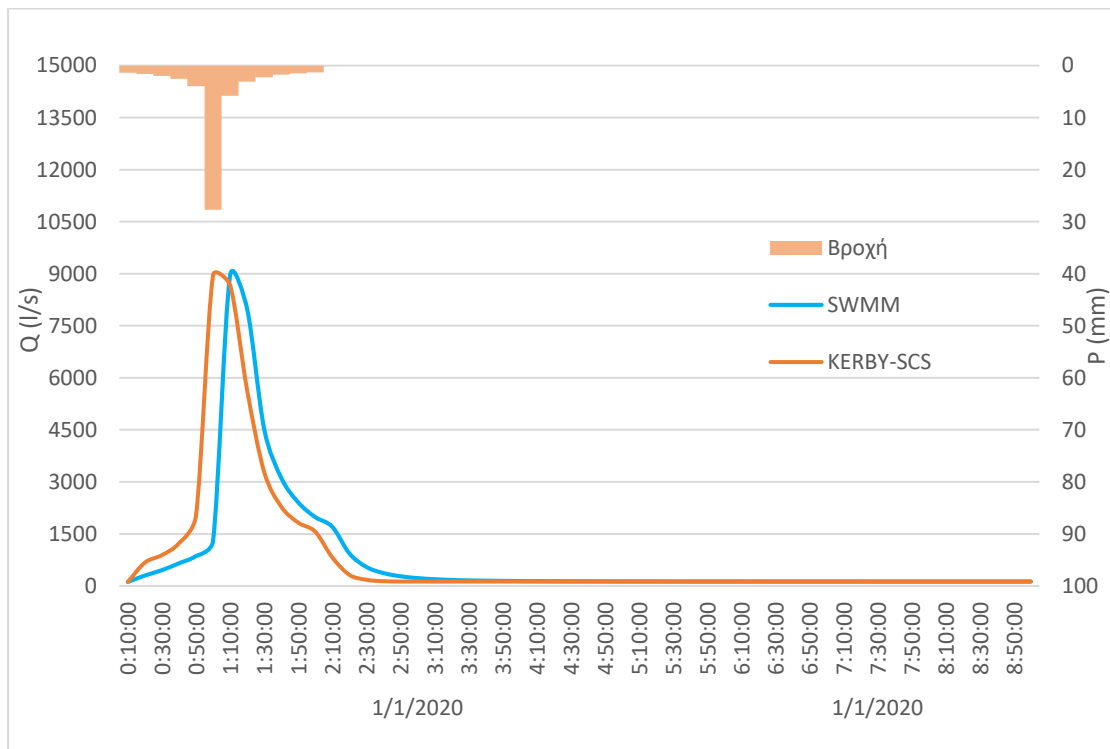
Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει πως μια επιλογή εισόδου πλημμυρογραφήματων ως εναλλακτική της υδρολογικής ανάλυσης με το SWMM, θα μπορούσε να είναι η παραγωγή πλημμυρογραφήματων από το HEC-HMS βάσει του μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS, με εισαγωγή του χρόνου συγκέντρωσης από τη μέθοδο Kerby και συνυπολογισμό του ποσοστού αδιαπερατότητας των υπολεκανών στη μέθοδο απωλειών της SCS. Η συγκεκριμένη εναλλακτική κρίνεται καταλληλότερη από τις υπόλοιπες που δοκιμάστηκαν. Σημειώνεται, ότι η επιλογή της μεθόδου ιδιαίτερα σε ότι αφορά την μέθοδο υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης έχει άμεση σχέση με τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης με τα δεδομένα χαρακτηριστικά υπολεκανών (έκταση, μήκος κύριου υδατορέματος). Τέλος, η μέθοδος επιλέγεται με κριτήριο τη διερεύνηση του δικτύου αποχέτευσης στο οποίο εισάγονται τα πλημμυρογραφήματα, επομένως η παροχή αιχμής αποτελεί κρίσιμο μέγεθος. Για την ακριβέστερη πρόβλεψη της χρονικής στιγμής εμφάνισης της παροχής αιχμής, η μέθοδος Kerby θα μπορούσε να εφαρμοστεί με πλημμυρογραφήματα μικρότερου χρονικού βήματος των 10 λεπτών.

Με βάση τα παραπάνω το δίκτυο επιλύεται στο SWMM με πλημμυρογραφήματα εισόδου από το HEC-HMS για βροχές περιόδου επαναφοράς T=50 ετών και διάρκειας d=1hr, d=2 hr, d=6 hr και d=24 hr. Συγκρίνονται τα πλημμυρογραφήματα εξόδου, ο συνολικός όγκος απορροής από όλες τις υπολεκάνες και οι κόμβοι που πλημμυρίζουν για κάθε βροχή με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του βαθμονομημένου μοντέλου στο SWMM.

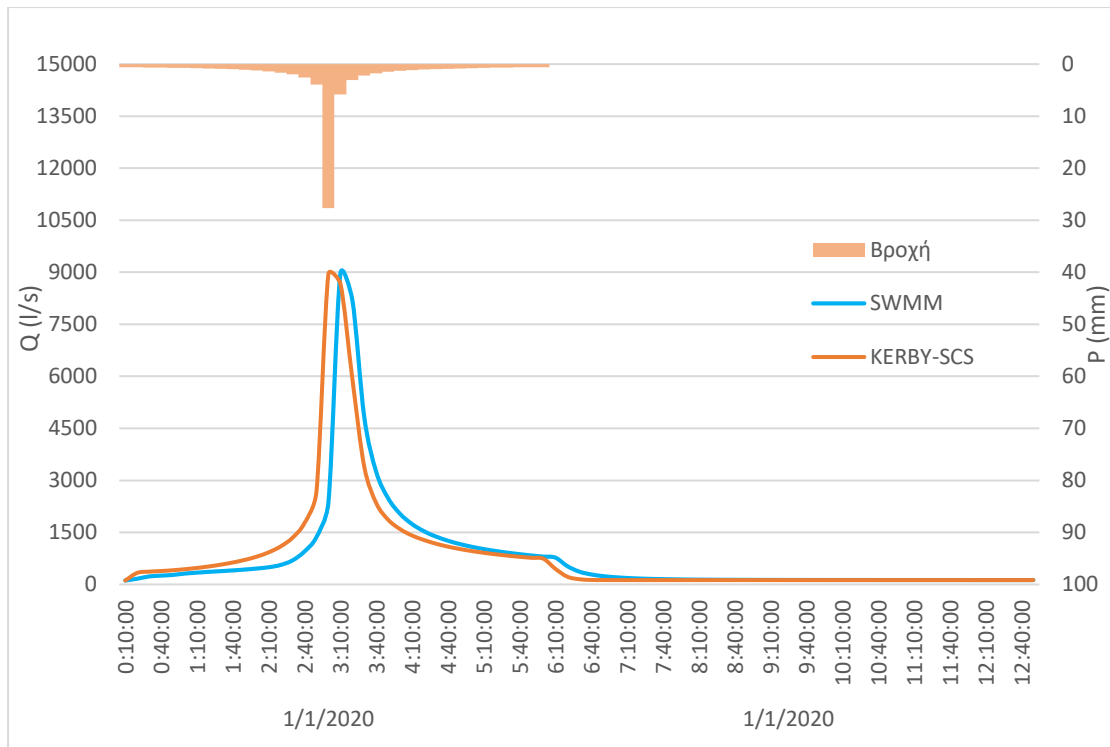
Στις Εικόνες 5.44 έως 5.47 παρουσιάζονται οι παροχές στην έξοδο της λεκάνης για τις εξεταζόμενες βροχές. Η παροχή αιχμής εμφανίζεται σε όλες τις περιπτώσεις διάρκειας βροχής 10 min νωρίτερα στην επίλυση του δικτύου με πλημμυρογραφήματα ως εισόδους, εξαιτίας της έλλειψης υστέρησης της απόκρισης των υπολεκανών που υφίσταται όταν ο χρόνος συγκέντρωσης υπολογίζεται με τη μέθοδο Kerby. Παρατηρείται, πως τη στιγμή που εμφανίζεται η παροχή αιχμής στο βαθμονομημένο μοντέλο η τιμή της παροχής που προκύπτει από τη μέθοδο με τα πλημμυρογραφήματα είναι επίσης ιδιαίτερα ψηλή.



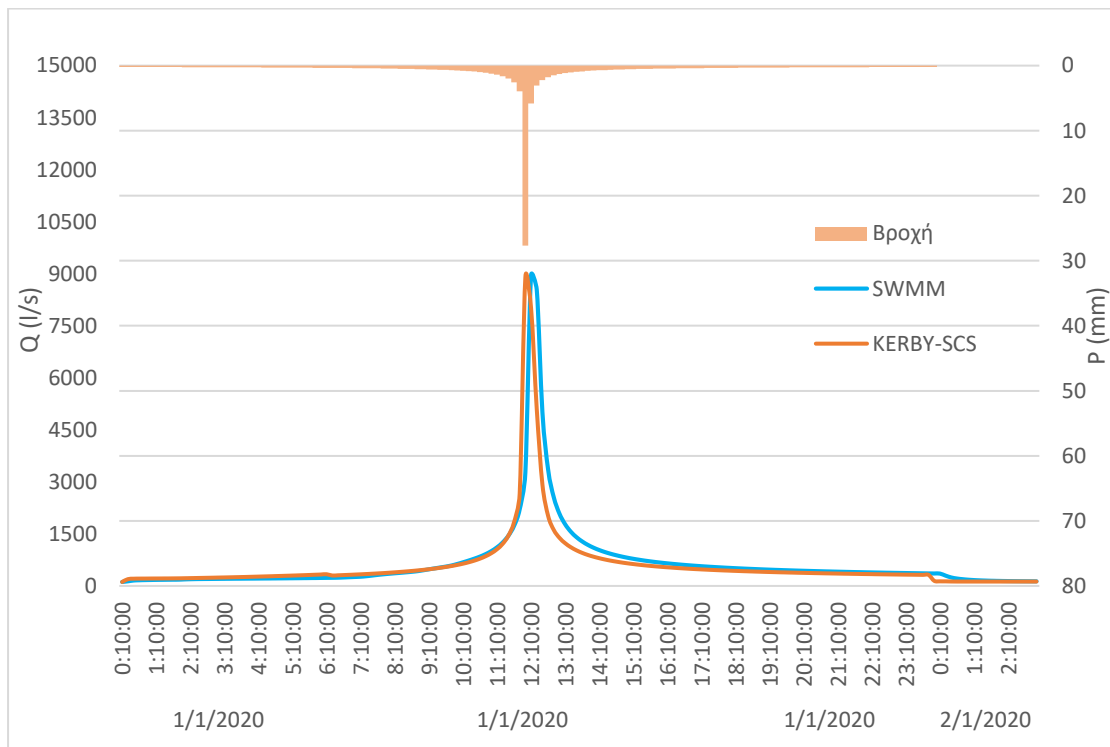
Εικόνα 5.44: Παροχή στην έξοδο – Σύγκριση αποτελεσμάτων για βροχή T=50 και d=1hr



Εικόνα 5.45: Παροχή στην έξοδο – Σύγκριση αποτελεσμάτων για βροχή T=50 και d=2hr



Εικόνα 5.46: Παροχή στην έξοδο – Σύγκριση αποτελεσμάτων για βροχή T=50 και d=6hr



Εικόνα 5.47: Παροχή στην έξοδο – Σύγκριση αποτελεσμάτων για βροχή T=50 και d=24hr

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης του όγκου της απορροής κάθε υπολεκάνης και της περιοχής μελέτης συνολικά από τις δύο μεθόδους (Πίνακας 5.19). Ως προς το σύνολο του όγκου παρατηρούμε πως η μέθοδος της SCS υπερεκτιμά την τιμή του, όχι σημαντικά, σε σχέση με την υδρολογική ανάλυση του SWMM. Σημειώνεται, πως στη μέθοδο της SCS εισήχθησαν στο HEC-HMS οι αδιαπέρατες επιφάνειες των υπολεκανών, η

έκταση των οποίων εξαιρέθηκε από τον υπολογισμό των απωλειών βροχής. Οι διαφορές που προκύπτουν στο συνολικό όγκο απορροής των υπολεκανών οφείλονται στον συνυπολογισμό από το SWMM και της επιφανειακής συγκράτησης στις απώλειες βροχής.

Πίνακας 5.19: Σύγκριση όγκων απορροής με τη μέθοδο της SCS και με το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM για βροχές διαφορετικής διάρκειας.

|            | Όγκος Απορροής (10 <sup>6</sup> l) |       |       |       |       |       |        |       |
|------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|            | d=1hr                              |       | d=2hr |       | d=6hr |       | d=24hr |       |
| Υπολεκάνες | SWMM                               | SCS   | SWMM  | SCS   | SWMM  | SCS   | SWMM   | SCS   |
| 1.00       | 0.43                               | 0.44  | 0.58  | 0.58  | 0.89  | 0.88  | 1.47   | 1.44  |
| 2.00       | 1.84                               | 2.01  | 2.61  | 2.65  | 4.18  | 4.06  | 7.05   | 6.81  |
| 3.00       | 2.39                               | 2.50  | 3.28  | 3.31  | 5.13  | 5.08  | 8.54   | 8.42  |
| 4.00       | 2.95                               | 3.20  | 3.94  | 4.14  | 5.96  | 6.11  | 9.62   | 9.73  |
| 5.00       | 0.48                               | 0.50  | 0.65  | 0.66  | 0.99  | 0.98  | 1.61   | 1.59  |
| 6.00       | 1.60                               | 1.77  | 2.10  | 2.24  | 3.10  | 3.22  | 4.89   | 4.99  |
| 7.00       | 3.72                               | 4.20  | 4.62  | 5.10  | 6.46  | 6.93  | 9.73   | 10.20 |
| 8.00       | 1.96                               | 2.19  | 2.52  | 2.72  | 3.63  | 3.82  | 5.61   | 5.78  |
| 9.00       | 3.42                               | 3.80  | 4.40  | 4.75  | 6.37  | 6.70  | 9.88   | 10.20 |
| 10.00      | 0.55                               | 0.62  | 0.69  | 0.76  | 0.98  | 1.05  | 1.49   | 1.56  |
| Σύνολο     | 19.34                              | 21.23 | 25.39 | 26.91 | 37.69 | 38.83 | 59.89  | 60.73 |

Τέλος, στον Πίνακα 5.20 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός κόμβων που πλημμυρίζουν καθώς και ο όγκος νερού που πλημμυρίζει από το δίκτυο. Φαίνεται πως για βροχές μικρής διάρκειας η μέθοδος κατά την οποία χρησιμοποιήθηκαν πλημμυρογραφήματα ως είσοδος στο δίκτυο αποδίδει μεγαλύτερους πλημμυρικούς όγκους, ενώ για βροχές μεγαλύτερης διάρκειας μικρότερους. Η υποεκτίμηση των κόμβων και του όγκου νερού που πλημμυρίζει από τη μέθοδο εισαγωγής πλημμυρογραφημάτων, οφείλεται στις χαμηλότερες παροχές αιχμής σε σχέση με την υδρολογική ανάλυση με το SWMM που αποδίδει στα πλημμυρογραφήματα για βροχές μεγάλης διάρκειας (Εικόνες 5.33 έως 5.42).

Πίνακας 5.20: Συνολικός αριθμός κόμβων που πλημμυρίζουν και όγκος νερού που πλημμυρίζει από το δίκτυο για τις δύο μεθόδους.

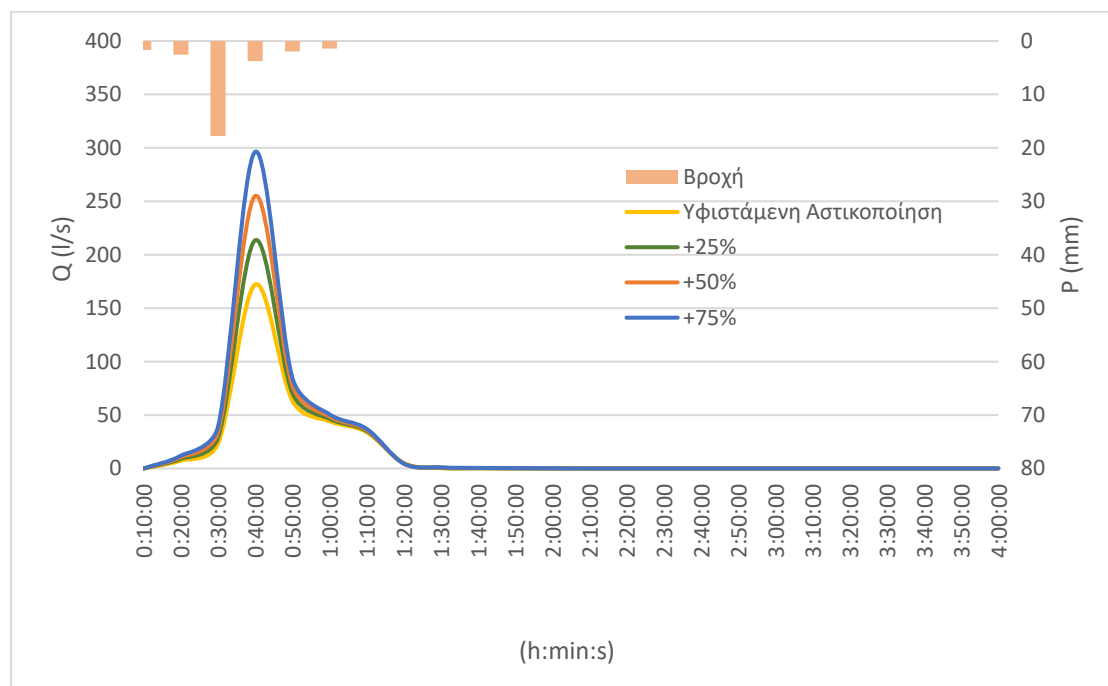
|  | d=1hr |           | d=2hr |           | d=6hr |           | d=24hr |           |
|--|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|--------|-----------|
|  | SWMM  | Kerby-SCS | SWMM  | Kerby-SCS | SWMM  | Kerby-SCS | SWMM   | Kerby-SCS |
| Συνολικός αριθμός κόμβων που πλημμυρίζουν                  | 9     | 11        | 11    | 12        | 13    | 14        | 16     | 9         |
| Όγκος που πλημμυρίζει από τους κόμβους (10 <sup>6</sup> l) | 2.628 | 3.406     | 4.045 | 4.403     | 6.443 | 5.796     | 7.875  | 5.021     |



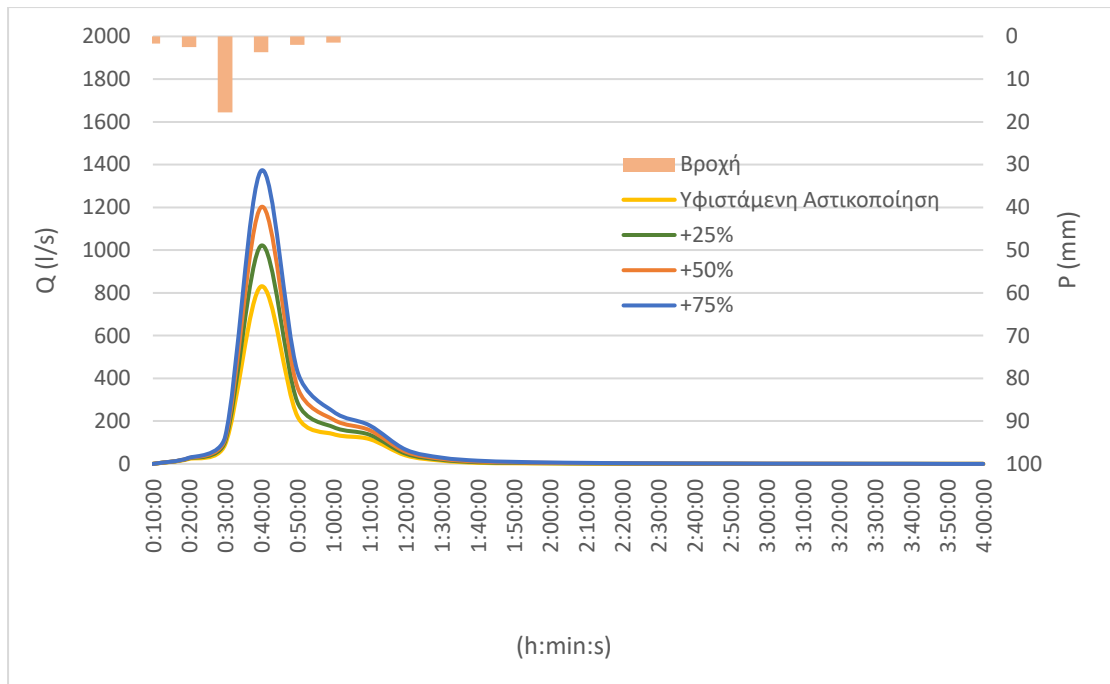
## 5.6 ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΗΜΙ-ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη διερεύνηση του δικτύου για 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης (+25%, +50% και +75%) που αφορούν τις υπολεκάνες 1, 2, 3, 4 και 5.

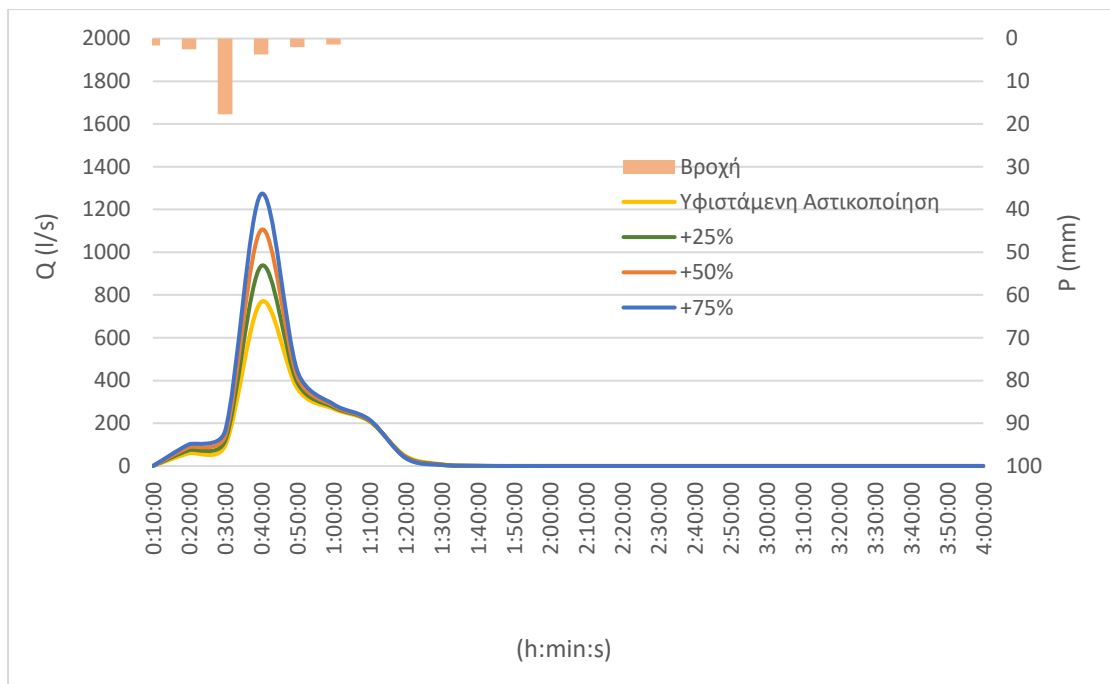
Εξετάζεται, αρχικά, η επίδραση της αστικοποίησης στα υδρογραφήματα απορροής για κάθε υπολεκάνη, όπως αυτά παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.48 έως 5.52. Οι υπολεκάνες εξετάζονται για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=10$  ετών και διάρκειας  $d=1$ hr. Από τα υδρογραφήματα συμπεραίνουμε πως σε όλες τις υπολεκάνες η αύξηση της αστικοποίησης προκαλεί αύξηση της παροχής αιχμής. Ιδιαίτερα, στην υπολεκάνη 1 και για αύξηση της αστικοποίησης κατά 75% η παροχή αιχμής σχεδόν διπλασιάζεται σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Η χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής δεν διαφοροποιείται από σενάριο σε σενάριο ούτε σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Τέλος, από τα υδρογραφήματα είναι κατανοητό πως αντίστοιχη αύξηση παρουσιάζει και ο όγκος της απορροής όσο αυξάνεται το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών, εξαιτίας της αστικοποίησης.



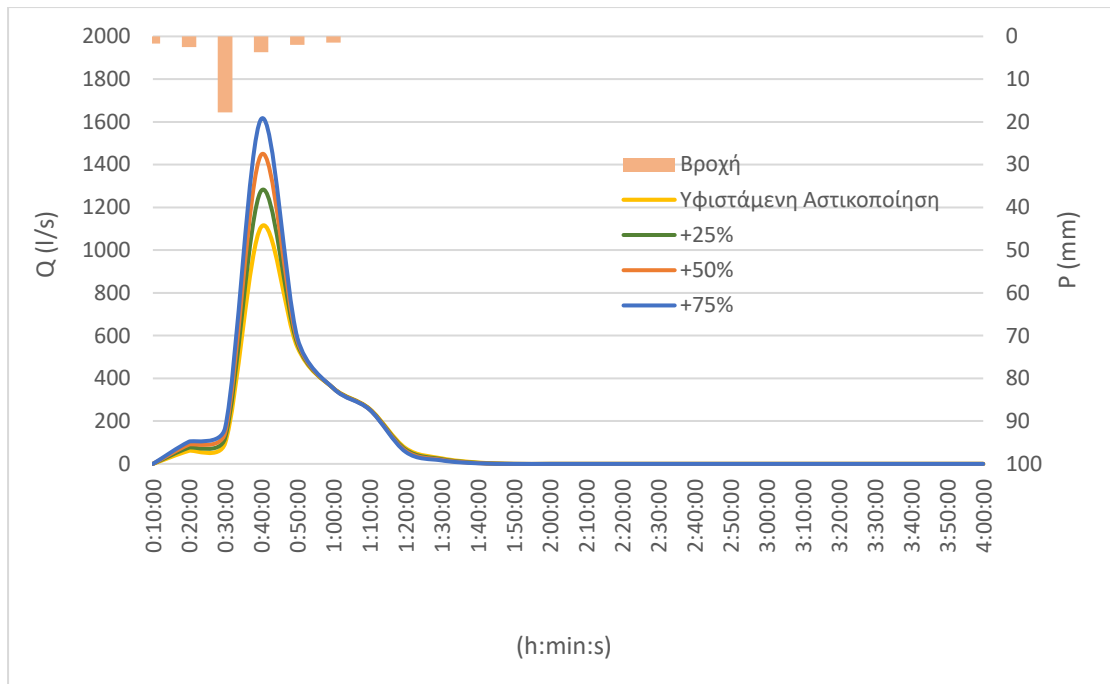
Εικόνα 5.48: Απορροή στην υπολεκάνη 1 για τα 3 σενάρια αύξησης της αστικοποίησης και για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=10$  ετών και διάρκειας  $d=1$ hr.



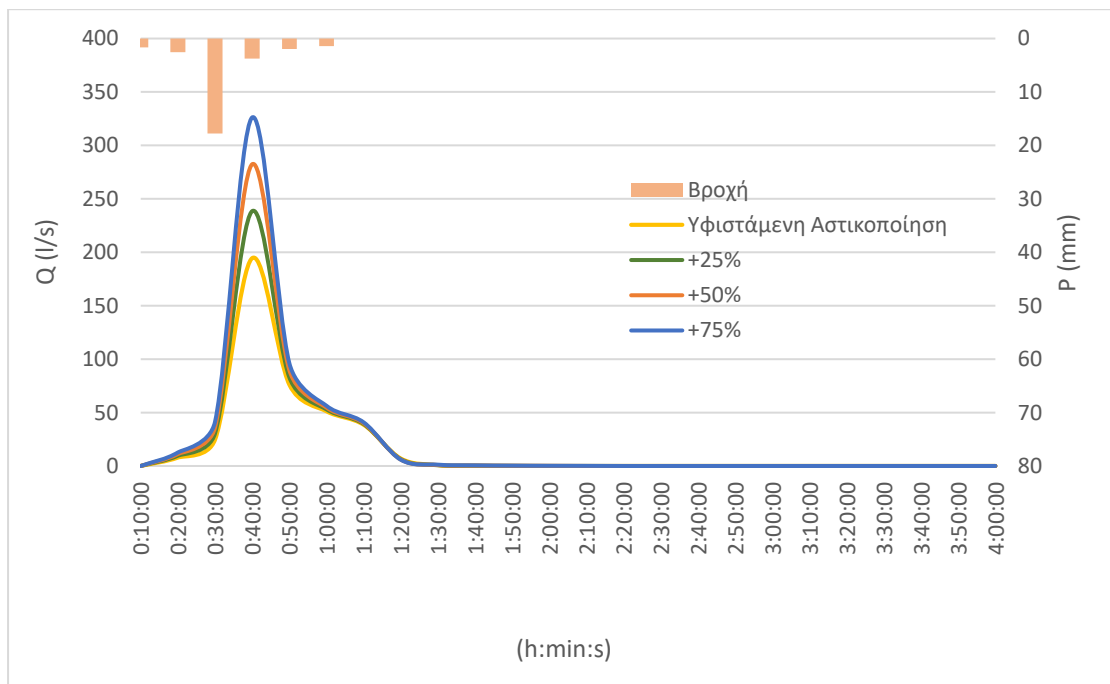
Εικόνα 5.49: Απορροή στην υπολεκάνη 2 για τα 3 σενάρια αύξησης της αστικοποίησης και για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=10$  ετών και διάρκειας  $d=1hr$ .



Εικόνα 5.50: Απορροή στην υπολεκάνη 3 για τα 3 σενάρια αύξησης της αστικοποίησης και για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=10$  ετών και διάρκειας  $d=1hr$ .



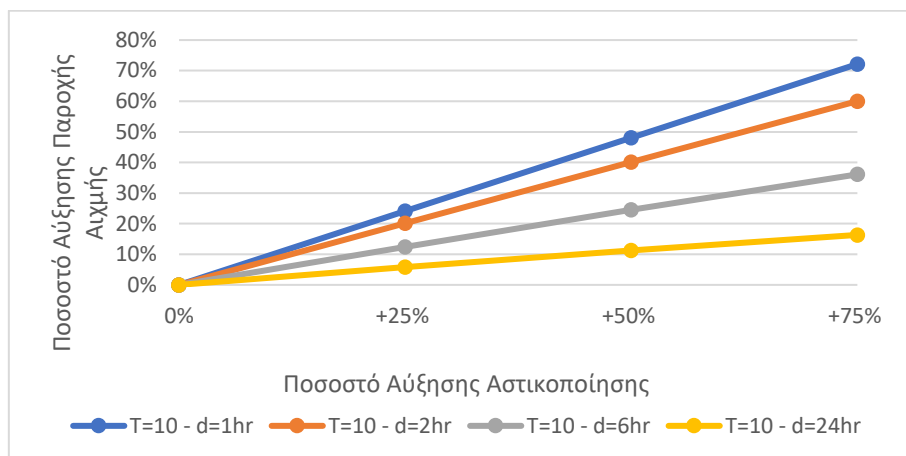
Εικόνα 5.51: Απορροή στην υπολεκάνη 4 για τα 3 σενάρια αύξησης της αστικοποίησης και για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=10$  ετών και διάρκειας  $d=1hr$ .



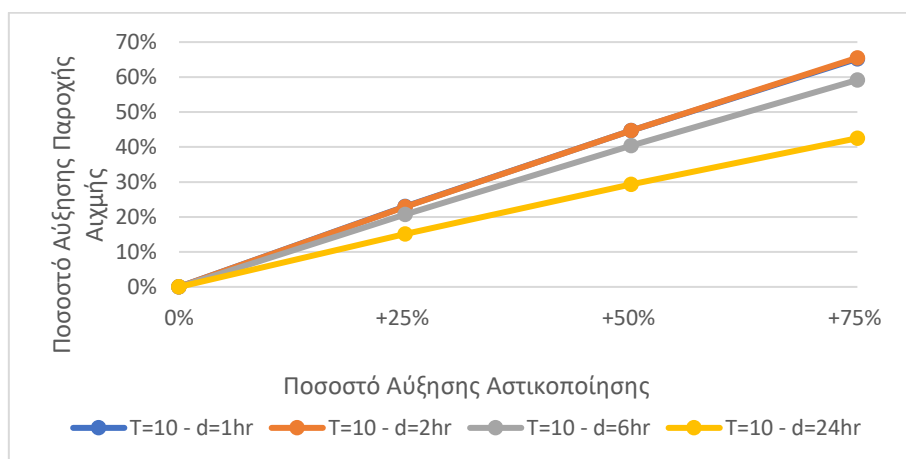
Εικόνα 5.52: Απορροή στην υπολεκάνη 5 για τα 3 σενάρια αύξησης της αστικοποίησης και για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=10$  ετών και διάρκειας  $d=1hr$ .

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των σεναρίων αύξησης της αστικοποίησης για βροχές μεγαλύτερης διάρκειας. Στις Εικόνες 5.53 έως 5.57 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή στην παροχή αιχμής στις 5 υπολεκάνες για κάθε σενάριο και βροχή διαφορετικής διάρκειας. Αντίστοιχα, στις Εικόνες 5.58 έως 5.62

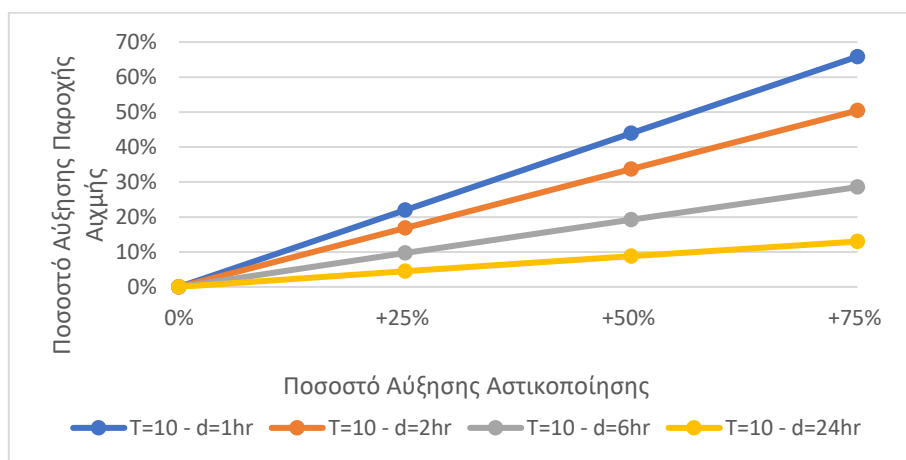
παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή στον όγκο της απορροής στις 5 υπολεκάνες για κάθε σενάριο και βροχή διαφορετικής διάρκειας.



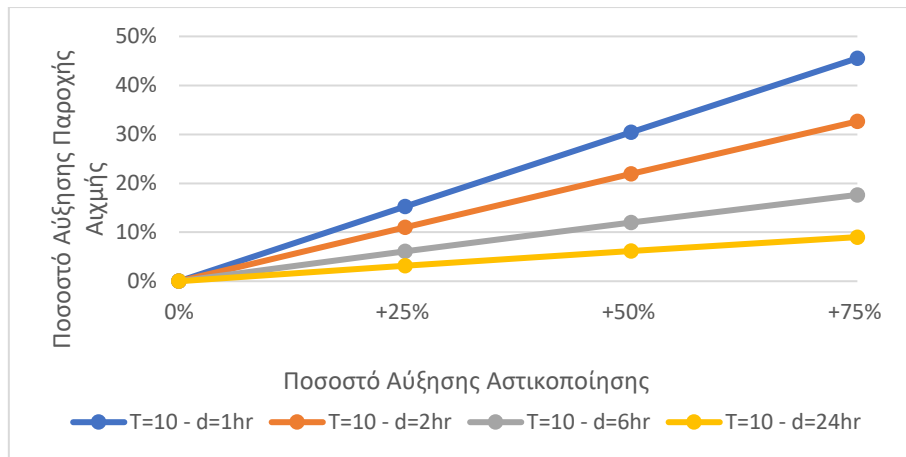
Εικόνα 5.53: Ποσοστιαία αύξηση της παροχής αιχμής για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης και για επεισόδια βροχής διαφορετικής διάρκειας – Υπολεκάνη 1.



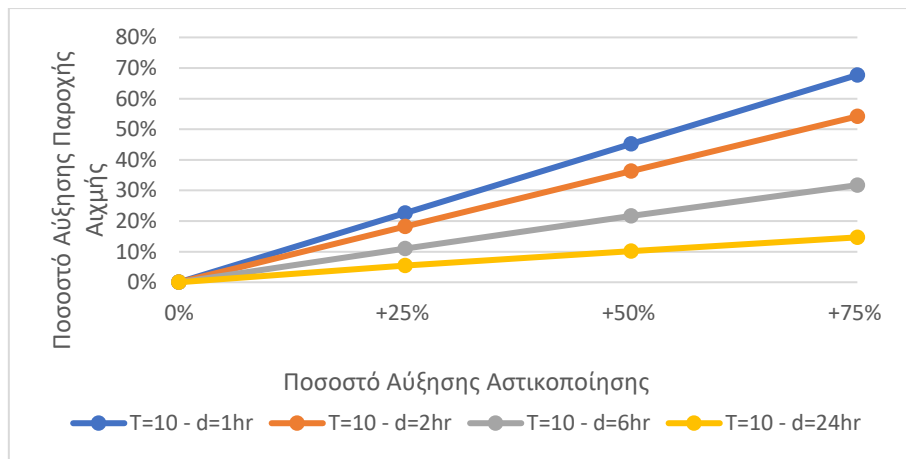
Εικόνα 5.54: Ποσοστιαία αύξηση της παροχής αιχμής για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης και για επεισόδια βροχής διαφορετικής διάρκειας – Υπολεκάνη 2.



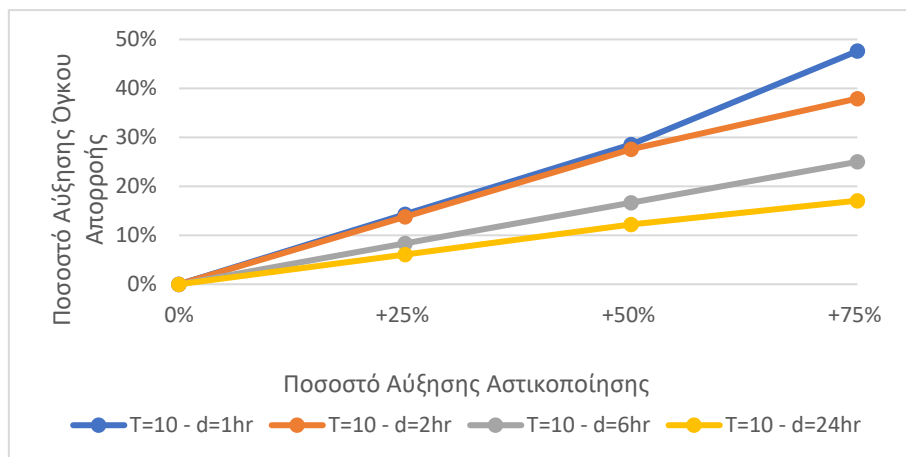
Εικόνα 5.55: Ποσοστιαία αύξηση της παροχής αιχμής για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης και για επεισόδια βροχής διαφορετικής διάρκειας – Υπολεκάνη 3.



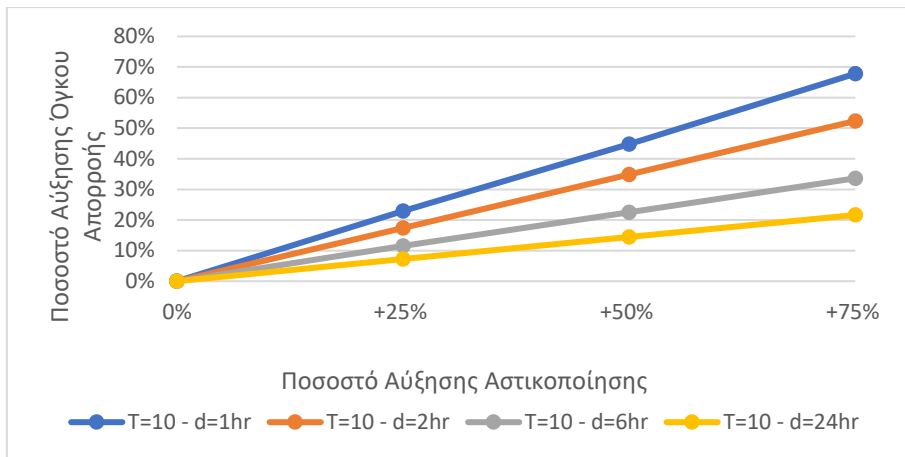
Εικόνα 5.56: Ποσοστιαία αύξηση της παροχής αιχμής για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης και για επεισόδια βροχής διαφορετικής διάρκειας – Υπολεκάνη 4.



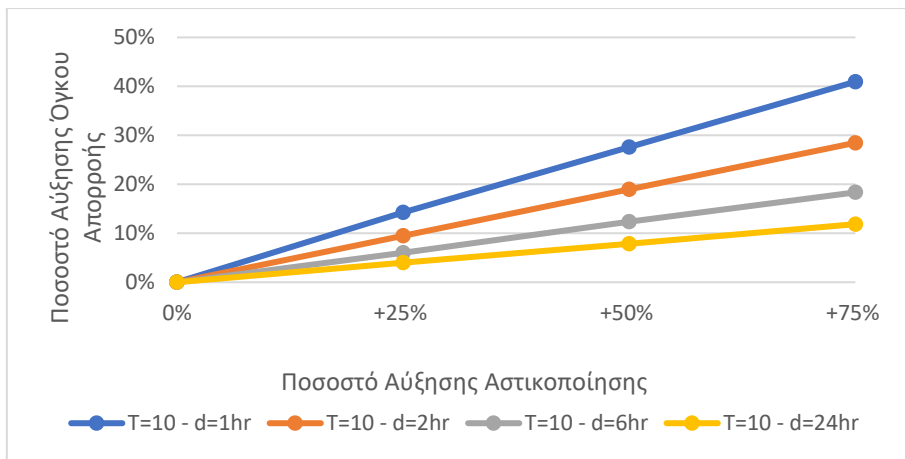
Εικόνα 5.57: Ποσοστιαία αύξηση της παροχής αιχμής για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης και για επεισόδια βροχής διαφορετικής διάρκειας – Υπολεκάνη 5.



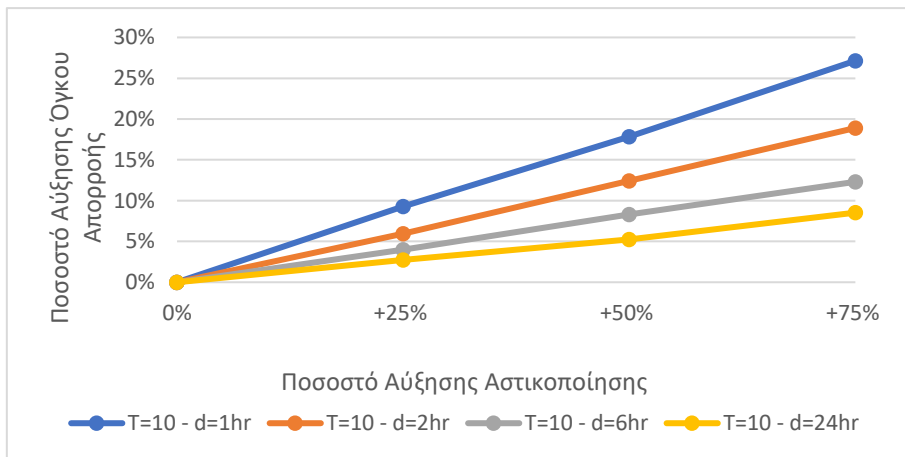
Εικόνα 5.58: Ποσοστιαία αύξηση του όγκου της απορροής για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης και για επεισόδια βροχής διαφορετικής διάρκειας – Υπολεκάνη 1



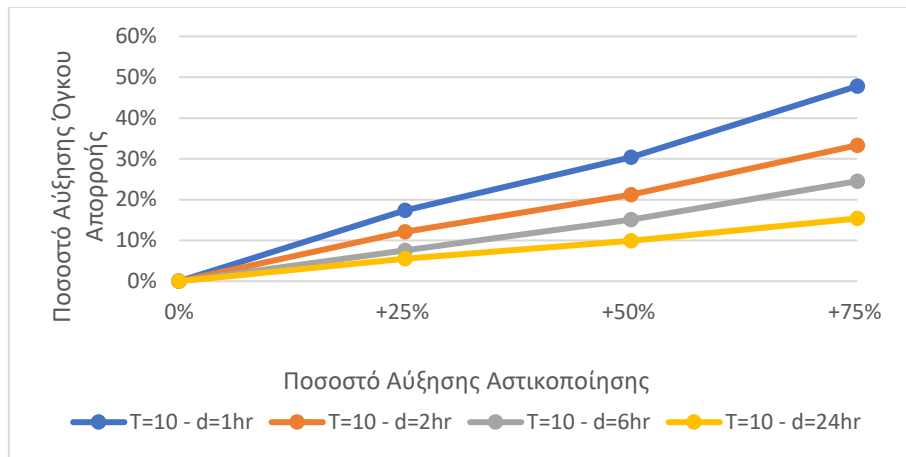
Εικόνα 5.59: Ποσοστιαία αύξηση του όγκου της απορροής για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης και για επεισόδια βροχής διαφορετικής διάρκειας – Υπολεκάνη 2



Εικόνα 5.60: Ποσοστιαία αύξηση του όγκου της απορροής για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης και για επεισόδια βροχής διαφορετικής διάρκειας – Υπολεκάνη 3



Εικόνα 5.61: Ποσοστιαία αύξηση του όγκου της απορροής για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης και για επεισόδια βροχής διαφορετικής διάρκειας – Υπολεκάνη 4



Εικόνα 5.62: Ποσοστιαία αύξηση του όγκου της απορροής για τα 3 σενάρια αύξησης αστικοποίησης και για επεισόδια βροχής διαφορετικής διάρκειας – Υπολεκάνη 5

Από τα ανωτέρω διαγράμματα συμπεραίνουμε, πως ανεξαρτήτως της διάρκειας βροχής, η αύξηση της αστικοποίησης αυξάνει τις τιμές της παροχής αιχμής και του όγκου της απορροής σε όλες τις υπολεκάνες. Εξάγεται, επίσης, το συμπέρασμα πως για βροχές μικρότερης διάρκειας ( $d=1hr$  και  $d=2hr$ ) η ποσοστιαία αύξηση του όγκου της απορροής και της τιμής της παροχής αιχμής είναι μεγαλύτερη. Τέλος, παρατηρούμε πως όσο μικρότερη είναι η διάρκεια βροχής τόσο εντονότερες είναι οι κλίσεις της καμπύλης του ποσοστού αύξησης της απορροής, γεγονός που υποδηλώνει πως ο βαθμός αύξησης της αστικοποίησης επιδρά καθοριστικότερα στην αύξηση της παροχής αιχμής και του όγκου της απορροής σε επεισόδια βροχής μικρής διάρκειας.

Δεδομένης της αύξησης που παρατηρείται στον όγκο και την παροχή αιχμής των απορροών των λεκανών κατά τις επιλύσεις για τα τρία σενάρια, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύγκριση μεταξύ των τιμών αυτών και των αντίστοιχων μεγεθών που προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου υπό την υφιστάμενη αστικοποίηση και βροχές μεγαλύτερης περιόδου επαναφοράς. Η σύγκριση πραγματοποιείται για βροχή διάρκειας  $d=1hr$ , λόγω της ισχυρότερης επίδρασης της αύξησης της αστικοποίησης σε βροχές μικρής διάρκειας που διαπιστώθηκε. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.19.

Από τον Πίνακα 5.21 παρατηρούμε, πως στην υπολεκάνη 1 η παροχή αιχμής για το σενάριο αύξησης της αστικοποίησης κατά 75% και για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=10$  ετών έχει ίδια τιμή με την παροχή αιχμής που παρουσιάζεται κατά την υφιστάμενη κατάσταση για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=25$  ετών, ενώ αντίστοιχα κινείται και η τιμή του όγκου της απορροής. Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζουν και οι τιμές παροχής αιχμής και όγκου για την υπολεκάνη 5. Στην υπολεκάνη 2, η παροχή αιχμής για τα σενάρια αύξησης της αστικοποίησης κατά 50% και κατά 75% και για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=10$  ετών έχει μεγαλύτερη τιμή από την παροχή αιχμής που παρουσιάζεται κατά την υφιστάμενη κατάσταση για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=25$  ετών. Στην ίδια υπολεκάνη ο όγκος για το σενάριο αύξησης αστικοποίησης κατά 75% και για βροχή  $T=10$  ετών είναι μεγαλύτερος από αυτόν που προκύπτει με βάση την υφιστάμενη κατάσταση, για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=25$  ετών. Στις υπολεκάνες 3 και 4 οι τιμές παροχής αιχμής και όγκου για το σενάριο αύξησης της αστικοποίησης κατά 75% και για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=10$  ετών είναι μεν αυξημένες σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, δεν ξεπερνούν όμως τις αντίστοιχες τιμές για βροχή  $T=25$  ετών. Στην υπολεκάνη 5 τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά τις υπολεκάνης 1, με τη διαφορά ότι εδώ και η παροχή αιχμής για το σενάριο αύξησης της

αστικοποίησης κατά 75% και για βροχή περιόδου επαναφοράς T=10 ετών έχει λίγο μικρότερη τιμή από την παροχή αιχμής που παρουσιάζεται κατά την υφιστάμενη κατάσταση για βροχή περιόδου επαναφοράς T=25 ετών, ωστόσο οι δύο τιμές είναι πολύ κοντά, δεδομένης και της μικρής έκτασης της εν λόγω υπολεκάνης.

Πίνακας 5.21: Σύγκριση τιμών παροχής αιχμής και όγκου απορροής με και χωρίς τα σενάρια αστικοποίησης για βροχή διάρκειας d=1hr και διαφορετικών περιόδων επαναφοράς.

|             |                                    | Υφιστάμενη Αστικοποίηση |         |         | +25%    | +50%    | +75%    |
|-------------|------------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|             |                                    | T=50                    | T=25    | T=10    | T=10    | T=10    | T=10    |
| Υπολεκάνη 1 | Απορροή αιχμής (l/s)               | 446.23                  | 296.95  | 172.14  | 213.59  | 254.96  | 296.34  |
|             | Όγκος Απορροής (10 <sup>6</sup> l) | 0.43                    | 0.32    | 0.21    | 0.24    | 0.27    | 0.31    |
| Υπολεκάνη 2 | Απορροή αιχμής (l/s)               | 1472.6                  | 1123    | 830.35  | 1021.25 | 1201.71 | 1371.91 |
|             | Όγκος Απορροής (10 <sup>6</sup> l) | 1.84                    | 1.34    | 0.87    | 1.07    | 1.26    | 1.46    |
| Υπολεκάνη 3 | Απορροή αιχμής (l/s)               | 2313.71                 | 1471.41 | 767.4   | 935.76  | 1104.38 | 1272.62 |
|             | Όγκος Απορροής (10 <sup>6</sup> l) | 2.39                    | 1.72    | 1.05    | 1.2     | 1.34    | 1.48    |
| Υπολεκάνη 4 | Απορροή αιχμής (l/s)               | 3046.92                 | 2059.59 | 1108.75 | 1277.66 | 1446.24 | 1613.73 |
|             | Όγκος Απορροής (10 <sup>6</sup> l) | 2.95                    | 2.18    | 1.4     | 1.53    | 1.65    | 1.78    |
| Υπολεκάνη 5 | Απορροή αιχμής (l/s)               | 504.6                   | 340.49  | 194.48  | 238.47  | 282.35  | 326.18  |
|             | Όγκος Απορροής (10 <sup>6</sup> l) | 0.48                    | 0.36    | 0.23    | 0.27    | 0.3     | 0.34    |

Συμπεραίνουμε, από τον παραπάνω πίνακα πως μια σημαντική αύξηση της αστικοποίησης, είναι δυνατό να οδηγήσει σε παροχές αιχμής και όγκους απορροής που αντιστοιχούν σε επεισόδια βροχής μεγαλύτερης περιόδου επαναφοράς σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση.

Οι μεταβολές στην απορροή των υπολεκανών που προκαλούνται από την αύξηση της αστικοποίησης μεταφέρονται και στο παντοροϊκό δίκτυο αποχέτευσης της περιοχής μελέτης, στο οποίο, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.22, πλημμυρίζουν περισσότεροι κόμβοι όσο αυξάνεται η αστικοποίηση. Η αύξηση των κόμβων που πλημμυρίζουν ισχύει για οποιαδήποτε διάρκεια βροχής.



Πίνακας 5.22: Αριθμός των κόμβων του δικτύου που πλημμυρίζουν σε κάθε σενάριο αύξησης της αστικοποίησης και για βροχές διαφορετικής διάρκειας.

| Αριθμός Κόμβων που πλημμυρίζουν |                            |                      |                      |                      |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                 | Υφιστάμενη<br>Αστικοποίηση | +25%<br>Αστικοποίηση | +50%<br>Αστικοποίηση | +75%<br>Αστικοποίηση |
| T=10, d=1hr                     | 0                          | 1                    | 1                    | 2                    |
| T=10, d=2hr                     | 3                          | 4                    | 5                    | 8                    |
| T=10, d=6hr                     | 7                          | 8                    | 8                    | 9                    |
| T=10, d=24hr                    | 8                          | 8                    | 9                    | 12                   |

Στον Πίνακα 5.23 παρουσιάζεται η ποσοστιαία αύξηση του όγκου νερού που πλημμυρίζει από τους κόμβους για κάθε σενάριο σε σχέση με τον όγκο που πλημμυρίζει κατά την επίλυση για τις παρούσες συνθήκες αστικοποίησης. Ο όγκος νερού που πλημμυρίζει από τους κόμβους υπολογίζεται από το SWMM και αναγράφεται στην καρτέλα "Status Report" μετά την επίλυση. Ο πίνακας της ποσοστιαίας αύξησης δε συμπεριλαμβάνει τα αποτελέσματα για βροχή διάρκειας 1hr, καθώς με την υφιστάμενη αστικοποίηση δεν πλημμυρίζει κανένας κόμβος του δικτύου. Με αύξηση της αστικοποίησης κατά 25% πλημμυρίζουν  $0.021 \cdot 10^6$  l, με αύξηση της αστικοποίησης κατά 50% πλημμυρίζουν  $0.136 \cdot 10^6$  l και με αύξηση της αστικοποίησης κατά 75% πλημμυρίζουν  $0.305 \cdot 10^6$  l. Από τον πίνακα, εξάγεται το συμπέρασμα πως η ποσοστιαία αύξηση του όγκου νερού που πλημμυρίζει είναι εμφανώς μεγαλύτερη για επεισόδια βροχής μικρότερης διάρκειας.

Πίνακας 5.23: Ποσοστιαία αύξηση όγκου νερού που πλημμυρίζει από τους κόμβους για κάθε σενάριο σε σχέση με τον αντίστοιχο όγκο για την υφιστάμενη αστικοποίηση.

| Ποσοστιαία αύξηση όγκου νερού που πλημμυρίζει από τους κόμβους |                      |                      |                      |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|
|  | +25%<br>Αστικοποίηση | +50%<br>Αστικοποίηση | +75%<br>Αστικοποίηση |
| T=10, d=2hr  | 155.81%              | 479.07%              | 932.56%              |
| T=10, d=6hr  | 36.43%               | 75.96%               | 119.31%              |
| T=10, d=24hr   | 11.65%               | 22.89%               | 34.19%               |

Συνοψίζοντας, εξάγεται το συμπέρασμα πως για τις υπολεκάνες της περιοχής μελέτης και με την προσομοίωση αυτών με το SWMM, η αύξηση της αστικοποίησης προκαλεί αύξηση της παροχής αιχμής και του όγκου της απορροής, ενώ δε μεταβάλλει το χρόνο συγκέντρωσης και τη χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής. Επιπλέον, εξάγεται το συμπέρασμα πως η αύξηση της αστικοποίησης επιδρά καθοριστικότερα στην απορροή σε επεισόδια βροχής μικρής διάρκειας. Για τέτοιες βροχές, η παροχή αιχμής και ο όγκος της απορροής για βροχή περιόδου επαναφοράς T=10 ετών πλησιάζει και μπορεί να ξεπεράσει και τις αντίστοιχες τιμές για βροχή περιόδου επαναφοράς T=25 ετών. Τέλος, αντίστοιχη αύξηση προκαλείται και στον όγκο της απορροής που καταλήγει να πλημμυρίζει από τους κόμβους, η οποία είναι ποσοστιαία εμφανώς μεγαλύτερη για βροχή διάρκειας 2hr από ότι για βροχές διάρκειας 6 hr και 24 hr.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η προσομοίωση και διερεύνηση τμήματος του παντοροϊκού δικτύου των Αθηνών, και συγκεκριμένα, της ανάντη περιοχής της ζώνης Z2. Η προσομοίωση του δικτύου έγινε με τη χρήση του λογισμικού SWMM, σε συνδυασμό με άλλα λογισμικά (ArcGIS, AutoCAD, InRoads). Για τους σκοπούς της διερεύνησης του δικτύου καταρτίστηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης της περιοχής μελέτης στο SWMM. Το μοντέλο υποβλήθηκε σε βαθμονόμηση των παραμέτρων (η βαθμονόμηση έγινε σε περιβάλλον MATLAB) στις οποίες παρουσιάστηκε περισσότερο ευαίσθητο με βάση την ανάλυση ευαισθησίας που προηγήθηκε.

Η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε αφορά:

- Την απόκριση του δικτύου σε βροχές διαφορετικής διάρκειας και περιόδου επαναφοράς
- Την αποτελεσματικότητα μιας συνδυαστικής μεθόδου παραγωγής πλημμυρογραφήματων και εισαγωγής τους ως είσοδοι στο δίκτυο, ως εναλλακτική της υδρολογικής ανάλυσης της περιοχής μελέτης με το SWMM.
- Την απόκριση των υπολεκανών και του δικτύου υπό την επίδραση σεναρίων αύξησης της αστικοποίησης των ημιαστικών υπολεκανών της περιοχής μελέτης.

Από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε για τις παραμέτρους του πλάτους της υπολεκάνης, της επιφανειακής συγκράτησης αδιαπέρατου τμήματος υπολεκάνης, του συντελεστή τραχύτητας Manning αδιαπέρατου τμήματος, του συντελεστή τραχύτητας Manning περατού τμήματος, του ποσοστού αδιαπέρατης περιοχής χωρίς επιφανειακή συγκράτηση, του ποσοστού αδιαπέρατων επιφανειών, του συντελεστή τραχύτητας Manning των αγωγών, της κλίσης υπολεκάνης και του αριθμού καμπύλης CN, εξάγεται το συμπέρασμα πως το μοντέλο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις εξής παραμέτρους:

- Επιφανειακή Συγκράτηση αδιαπέρατου τμήματος υπολεκανών
- Ποσοστό αδιαπέρατου τμήματος υπολεκάνης με μηδενική επιφανειακή συγκράτηση
- Ποσοστό αδιαπέρατου τμήματος υπολεκάνης

Η κυριαρχία των αστικών τμημάτων στην περιοχή μελέτης μπορεί να ερμηνεύσει την ευαισθησία του μοντέλου στις παραμέτρους αυτές.

Από τη βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε με βάση τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου επεισοδίου βροχής σε δύο αγωγούς της περιοχής μελέτης, εξάγεται το συμπέρασμα πως η μέθοδος βαθμονόμησης με χρήση γενετικού αλγορίθμου και λαμβάνοντας υπόψιν 7 παραμέτρους (πλάτος υπολεκάνης, επιφανειακή συγκράτηση αδιαπέρατου τμήματος υπολεκάνης, συντελεστή τραχύτητα Manning αδιαπέρατου τμήματος, ποσοστό αδιαπέρατης περιοχής χωρίς επιφανειακή συγκράτηση, ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών, συντελεστή τραχύτητας Manning των αγωγών και κλίση υπολεκάνης), είναι ικανή να αυξήσει την αποδοτικότητα του μοντέλου. Συγκεκριμένα, μετά τη βαθμονόμηση η τιμή του δείκτη NSE αυξήθηκε για τον αγωγό 1313

σε 0.91 (από 0.84 πριν τη βαθμονόμηση) και για τον αγωγό 1640 σε 0.53 (από 0.30 πριν τη βαθμονόμηση).

Επιπλέον, με τη μέθοδο βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε επιτεύχθηκε η μείωση της απόκλισης στην τιμή της υπολογισμένης από το μοντέλο παροχής αιχμής σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή από τις μετρήσεις. Η αποφυγή παροχών αιχμής που αποκλίνουν από τις μετρημένες τιμές ή που υποεκτιμούν την τιμή της, τέθηκε ως ένας από τους στόχους της βαθμονόμησης, δεδομένου ότι το βαθμονομημένο μοντέλο χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τη διερεύνηση της απόκρισης του δικτύου σε γεγονότα βροχής μεγαλύτερων περιόδων επαναφοράς.

Από τη διερεύνηση του δικτύου για βροχές διάρκειας 1hr, 2hr, 6hr και 24hr με περίοδο επαναφοράς 25 έτη και 50 έτη, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Το παντοροϊκό δίκτυο της περιοχής μελέτης δεν επαρκεί για την παροχέτευση βροχής με περίοδο επαναφοράς ίση ή μεγαλύτερη των 25 ετών, ανεξαρτήτως της διάρκειας της. Ακόμη, και στην περίπτωση βροχής με το χαμηλότερο συνολικό ύψος ( $T=25$  και  $d=1$  hr) 6 κόμβοι του δικτύου πλημμυρίζουν. Η αύξηση του συνολικού ύψους βροχής που συνεπάγεται η αύξηση της περιόδου επαναφοράς και της διάρκειας βροχόπτωσης, οδηγεί σε μεγαλύτερη αστοχία του δικτύου, με τη βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=50$  ετών και  $d=24$ hr να οδηγεί σε πλημμύρα 16 κόμβων συνολικά. Στην περίπτωση αυτή, από τους κόμβους του δικτύου πλημμυρίζει όγκος νερού ίσος με  $7.875 \cdot 10^6$  l ή  $7875$  m<sup>3</sup>.
- Οι αγωγοί στα κατάντη σημεία της περιοχής μελέτης εξαντλούν την παροχетеυτικότητα τους από το επεισόδιο βροχής περιόδου επαναφοράς  $T=25$  ετών και  $d=1$ hr, ενώ κατά την ανάλυση για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=50$  ετών και  $d=24$ hr λίγοι αγωγοί του δικτύου φαίνεται να μην βρίσκονται σε κατάσταση πλήρωσης.
- Από την ανάλυση των υδρολογικών συνιστωσών τις απορροής των υπολεκανών προκύπτει πως η ικανότητα των υπολεκανών για συγκράτηση και διήθηση εξαντλείται σε μεγάλο βαθμό κατά την ανάλυση για τις εξεταζόμενες βροχές, με αποτέλεσμα η αύξηση του συνολικού ύψους βροχής να οδηγεί σε αύξηση της άμεσης απορροής. Επομένως, για βροχές κοινής περιόδου επαναφοράς και αυξανόμενης διάρκειας, αυξάνεται η απορροή ως ποσοστό της βροχόπτωσης, ως αποτέλεσμα της αύξησης του συνολικού ύψους βροχής.

Από τη διερεύνηση διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης (Giandotti, Κινηματικού Κύματος και Kerby), κατά τη διαδικασία κατάρτισης πλημμυρογραφήματων βάσει του μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS με χρήση του λογισμικού HEC-HMS, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η σύγκριση των πλημμυρογραφήματων που αποδίδουν για τις 10 υπολεκάνες της περιοχής μελέτης οι μέθοδοι υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης Kerby και Κινηματικού Κύματος, οδηγεί στο συμπέρασμα πως σε όλες σχεδόν τις υπολεκάνες τα πλημμυρογραφήματα που υπολογίζονται λαμβάνοντας ως χρόνο συγκέντρωσης αυτόν που προκύπτει από την εξίσωση Kerby, αποδίδουν τιμές παροχής αιχμής κοντινότερες με αυτές που προκύπτουν κατά την υδρολογική ανάλυση με το βαθμονομημένο μοντέλο στο SWMM, σε σχέση με την περίπτωση υπολογισμού χρόνου συγκέντρωσης με τη μέθοδο του Κινηματικού Κύματος. Επίσης, με τη μέθοδο Kerby η παροχή αιχμής εμφανίζεται σε όλες τις υπολεκάνες 10 min νωρίτερα σε σχέση με τη χρονική στιγμή εμφάνισης της στα πλημμυρογραφήματα που παρήχθησαν από το SWMM.

Η χρονική στιγμή εμφάνισης παροχής αιχμής στα πλημμυρογραφήματα εξαρτάται από τους χρόνους υστέρησης που προκύπτουν από κάθε μέθοδο. Με τη μέθοδο Kerby, οι χρόνοι υστέρησης που προκύπτουν είναι για όλες τις υπολεκάνες μικρότεροι των 10 min. Δεδομένης της κατάρτισης βροχογραφημάτων ανά δεκάλεπτο, με τη μέθοδο αυτή καμία υπολεκάνη δεν παρουσιάζει υστέρηση, καθώς η μέγιστη τιμή απορροής εμφανίζεται στο ίδιο χρονικό βήμα εμφάνισης του μέγιστου ύψους βροχής. Αντίθετα, με τη μέθοδο του Κινηματικού Κύματος οι χρόνοι υστέρησης που υπολογίζονται είναι για κάποιες υπολεκάνες μεγαλύτεροι των 10 min.

Η κατάρτιση βροχογραφημάτων μικρότερου χρονικού βήματος (5 ή 2 λεπτών) για την εφαρμογή της μεθόδου θα οδηγούσε σε ακριβέστερη πρόβλεψη της χρονικής στιγμής εμφάνισης της παροχής αιχμής.

- Το λογισμικό HEC-HMS δίνει τη δυνατότητα εξαίρεσης από τη διαδικασία διήθησης του τμήματος της υπολεκάνης που είναι αδιαπέρατο. Μετά από δοκιμή που έγινε κατά την οποία εισήχθησαν στο HEC-HMS και τα ποσοστά αδιαπερατότητας κάθε υπολεκάνης όπως προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου SWMM, εξάγεται το συμπέρασμα πως τα αποτελέσματα αποδίδουν τιμές όγκου απορροής πολύ κοντινές σε αυτές του βαθμονομημένου μοντέλου. Το αποτέλεσμα είναι λογικό, καθώς την ίδια διαδικασία εξαίρεσης από τις διαδικασίες διήθησης των αδιαπέρατων τμημάτων τις υπολεκάνης ακολουθεί και το SWMM. Οι μικρές διαφορές που προκύπτουν οφείλονται στη δυνατότητα του SWMM να διαχωρίζει τα αδιαπέρατα τμήματα σε περιοχές με μηδενική ή όχι επιφανειακή συγκράτηση.
- Μια επιλογή εισόδου πλημμυρογραφημάτων ως εναλλακτική της υδρολογικής ανάλυσης με το SWMM, θα μπορούσε να είναι η παραγωγή πλημμυρογραφημάτων από το HEC-HMS βάσει του μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS, με εισαγωγή του χρόνου συγκέντρωσης από τη μέθοδο Kerby και συνυπολογισμό του ποσοστού αδιαπερατότητας των υπολεκάνων στη μέθοδο απωλειών της SCS. Η συγκεκριμένη εναλλακτική κρίνεται καταλληλότερη από τις υπόλοιπες που δοκιμάστηκαν.

Σημειώνεται, ότι η επιλογή της μεθόδου ιδιαίτερα σε ότι αφορά την μέθοδο υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης έχει άμεση σχέση με τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης με τα δεδομένα χαρακτηριστικά υπολεκάνων (έκταση, μήκος κύριου υδατορέματος). Τέλος, η μέθοδος επιλέγεται με κριτήριο τη διερεύνηση του δικτύου αποχέτευσης στο οποίο εισάγονται τα πλημμυρογραφήματα, επομένως η παροχή αιχμής αποτελεί κρίσιμο μέγεθος.

Σε ότι αφορά τη διερεύνηση του δικτύου υπό την επίδραση σεναρίων αύξησης αστικοποίησης κατά 25%, 50% και 75% στις 5 ημιαστικές υπολεκάνες της περιοχής μελέτης για βροχές περιόδου επαναφοράς 10 ετών (βροχή σχεδιασμού βάσει του ΠΔ 696/1974) και διάρκειας 1hr, 2hr, 6hr και 24hr, τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι τα εξής:

- Σε όλες τις υπολεκάνες η αύξηση της αστικοποίησης προκαλεί αύξηση της παροχής αιχμής. Η χρονική στιγμή εμφάνισης της παροχής αιχμής δεν διαφοροποιείται από σενάριο σε σενάριο ούτε σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Τέλος, αύξηση παρουσιάζει και ο όγκος της απορροής όσο αυξάνεται το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών, εξαιτίας της αστικοποίησης.
- Η αύξηση της αστικοποίησης επιδρά καθοριστικότερα στην απορροή σε επεισόδια βροχής μικρής διάρκειας. Για τέτοιες βροχές, η παροχή αιχμής και ο όγκος της απορροής για βροχή περιόδου επαναφοράς T=10 ετών και για σενάριο αύξησης αστικοποίησης κατά 75%

(ή και κατά 50%) πλησιάζει και μπορεί να ξεπεράσει τις αντίστοιχες τιμές για βροχή περιόδου επαναφοράς  $T=25$  ετών υπό την υφιστάμενη αστικοποίηση.

- Με αντίστοιχο τρόπο αυξάνεται και ο όγκος της απορροής που καταλήγει να πλημμυρίζει από τους κόμβους. Η ποσοστιαία αύξηση που παρατηρείται σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση είναι εμφανώς μεγαλύτερη για βροχή διάρκειας 2hr από ότι για βροχές διάρκειας 6 hr και 24 hr.

## 6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από τη διαδικασία βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκε αναδείχθηκαν τα εξής ζητήματα:

- Η σημασία ύπαρξης μετρήσεων και σε άλλους αγωγούς του δικτύου προκειμένου να συμπεριληφθούν στη βαθμονόμηση και οι υπολεκάνες 7 και 10.
- Η χαμηλή αποδοτικότητα του βαθμονομημένου μοντέλου όσον αφορά τις λεκάνες που καταλήγουν στον αγωγό 1640 ( $NSE=0.53$ ) ακόμη και μετά τη βαθμονόμηση. Πιθανή συμπερίληψη και των απορροών ξηρού στη διαδικασία της βαθμονόμησης θα μπορούσε να βελτιώσει την αποδοτικότητα του μοντέλου.
- Η σημασία της επαλήθευσης του μοντέλου που προέκυψε από τη βαθμονόμηση, η οποία θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί αν υπήρχαν μετρήσεις παροχών για περισσότερα επεισόδια βροχής. Με την ανωτέρω διαδικασία πιθανά να βελτιωνόταν σημαντικά ο δείκτης  $NSE$  για τον αγωγό 1640.
- Με τη μέθοδο βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκε αποδίδονται κοινές τιμές παραμέτρων σε όλες τις υπολεκάνες που συμμετέχουν στη βαθμονόμηση. Έτσι, δεδομένης της συνύπαρξης στη βαθμονόμηση λεκανών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, οι τελικές τιμές των παραμέτρων δεν αποδίδουν επαρκώς τα φυσικά χαρακτηριστικά της κάθε υπολεκάνης. Αν κατά τη βαθμονόμηση οι τιμές των παραμέτρων αποδοθούν ξεχωριστά ανά λεκάνη, εκτιμάται ότι οι τιμές των παραμέτρων θα αντιπροσωπεύουν καλύτερα τα φυσικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών. Στη διαδικασία αυτή θα συνέβαλε η ύπαρξη μετρήσεων σε περισσότερους αγωγούς.

Σε σχέση με τη διερεύνηση μιας μεθόδου παραγωγής πλημμυρογραφήμάτων και εισαγωγής τους ως εισόδους στο δίκτυο, κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση των υπολεκανών της περιοχής μελέτης με τη χρήση βροχογραφήματων χρονικού βήματος μικρότερου των 10 min. Πλημμυρογραφήματα με μικρότερο χρονικό βήμα και με υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης με την εξίσωση Kerby, εκτιμάται ότι θα μπορούσαν να προβλέψουν, τόσο την τιμή της παροχής αιχμής, όσο και τη χρονική στιγμή εμφάνισής με μεγαλύτερη ακρίβεια.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

Γιαννόπουλος Στ., 2002α. Μαθήματα Τεχνικής Υδρολογίας (έκδοση 2η). Έκδοση Υπηρεσίας Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

Ευστρατιάδης Α., Δ., Ρόζος, Ε., & Κουκουβίνος, Α. (2009). ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ–Μοντέλο υδρολογικής και υδρογρωλογικής προσομοίωσης, Θεωρητική τεκμηρίωση. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ, Αθήνα.

Κούρτης, Ι. (2016). Προσομοίωση παντοροϊκού δικτύου Αθηνών με το λογισμικό SWMM και πρόταση μέτρων αντιμετώπισης πλημμυρικών φαινομένων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Κούρτης Ι., Μπέλλος Β., Κοψιάυτης Γ., Τσιχριντζής Β., (2019) Καθολική ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων εισόδου του λογισμικού SWMM, 14<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (194), Βόλος: Ελληνική Υδροτεχνική Ένωση.

Κουτσογιάννης Δ. (2011). Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης, (έκδοση 4), Αθήνα

Μαμάσης Ν., και Κουτσογιάννης Δ. (2007) Φυσικές, κοινωνικές και τεχνολογικές πτυχές της ξηρασίας - Το παράδειγμα της Αθήνας, Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές στην Ευρώπη και την Ελλάδα, επιμέλεια Κ. Σαπουντζάκη, 61–88, doi:10.13140/RG.2.1.1640.7289, Gutenberg, Αθήνα, 2007.

Μαραγκουδάκη Ρ., Τσακίρης Γ. (2005) Επίδραση της αστικοποίησης στα χαρακτηριστικά της πλημμύρας. 5ο Εθνικό Συνέδριο της ΕΕΔΥΠ «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων με βάση τη λεκάνη απορροής», Ξάνθη, 6 - 9 Απριλίου 2005, pp. 193-199

Μιμίκου Μ. και Μπαλτάς, Ε. (2018). Τεχνική Υδρολογία. 6η έκδοση. Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Ναλμπάντης, Ι. (2007) Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Παπανικολάου, Δ. και συνεργάτες (πάνω από 10 ονόματα) 2002. Γεωλογική-Γεωτεχνική μελέτη Λεκανοπεδίου Αθηνών. Εφαρμοσμένη Ερευνητικό πρόγραμμα, 152.

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

Τσακίρης Γ. (σε συνεργασία με: Αντωνόπουλος Β., Βαγγέλης Χ., Γιακουμάκης Σ., Καββαδίας Γ., Καϊμάκη Σ., Κερκίδης Π., Λατινόπουλος Π., Μπαλούτσος Γ., Μπέλλος Κ., Παπαϊωάννου Γ., Χρυσάνθου Β.). (2013) Υδατικοί πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Δεύτερη Έκδοση, 704 σελίδες, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία

Τσιχριντζής Α. Β. (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

ΥΠΑΝ, ΕΜΠ, ΙΓΜΕ, και ΚΕΠΕ, Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας, Συμπλήρωση της ταξινόμησης ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών

πόρων στα υδατικά διαμερίσματα της χώρας, Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 549 pages, Υπουργείο Ανάπτυξης, Αθήνα, Ιανουάριος 2003.

### Διεθνής Βιβλιογραφία

Akan, O. A. (1993). Urban stormwater hydrology: a guide to engineering calculations. Crc Press.

American Society of Civil Engineers. Urban Water Resources Research Council. (1992). Design and construction of urban stormwater management systems. ASCE.

Barco, J., Wong, K. M., & Stenstrom, M. K. (2008). Automatic calibration of the US EPA SWMM model for a large urban catchment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(4), 466-474.

Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology—the case of physically-based models. *Journal of hydrology*, 105(1-2), 157-172.

Booth, B.D. (1991). Urbanization and the Natural Drainage System – Impacts, Solutions, and Prognoses. *The Northwest Environmental Journal*, 7, 93-118.

Butler, D. and Davies, W.J. (2000). *Urban Drainage*. Second Edition. London and New York: Spon Press

Boyle, D. P., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2000). Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12), 3663-3674.

Cairns Jr, J. (1995). Urban runoff in an integrated landscape context. *Stormwater runoff and receiving systems*. Lewis, 9-20.

Chow, M. F., Yusop, Z., & Toriman, M. E. (2012). Modelling runoff quantity and quality in tropical urban catchments using Storm Water Management Model. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9(4), 737-748.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Larry, W. Mays. (1988). *Applied Hydrology*. International edition, MacGraw-Hill, Inc, 149.

Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 4(1), 1001-1007.

Emerson, C. H. (2003). Evaluation of the additive effects of stormwater detention basins at the watershed scale. Unpublished MSc thesis, Drexel University, Pennsylvania.

Efstratiadis, A., Nalbantis, I., Koukouvinos, A., Rozos, E., & Koutsoyiannis, D. (2008). HYDROGEIOS: a semi-distributed GIS-based hydrological model for modified river basins. *Hydrology & Earth System Sciences*, 12(4).

Forman, R. T. (2000). Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States. *Conservation biology*, 14(1), 31-35.

Forman, R. T., & Alexander, L. E. (1998). Roads and their major ecological effects. *Annual review of ecology and systematics*, 29(1), 207-231.

- Giandotti, M., (1934), Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua, Ministero LL. PP., Servizio Idrografico Italiano, Memorie e studi idrografici, vol. 8, Roma, (Pubbl. N 2 del S.I.I.).
- Gironás, J., Roesner, L. A., Davis, J., Rossman, L. A., & Supply, W. (2009). Storm water management model applications manual. Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Hicks, A. L., & Larson, J. S. (1997). Impervious surface area and benthic macroinvertebrate response as an index of impact from urbanization on freshwater wetlands. Environmental Institute, University of Massachusetts.
- Hopkinson, C. S., & Day, J. W. (1980). Modeling the relationship between development and storm water and nutrient runoff. *Environmental Management*, 4(4), 315-324.
- Jones, J. A., Swanson, F. J., Wemple, B. C., & Snyder, K. U. (2000). Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks. *Conservation Biology*, 14(1), 76-85.
- Kerby, W.S. (1959) Time of concentration for overland flow. *Journal of Civil Engineering* 26(3). Amer. Soc. of Civil Eng., Reston, VA. pp. 60.
- Kourtis, I. M., Kopsiaftis, G., Bellos, V., & Tsihrintzis, V. A. (2017, August). Calibration and validation of SWMM model in two urban catchments in Athens, Greece. In International Conference on Environmental Science and Technology (CEST).
- Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Koivusalo, H., & Setälä, H. (2013). A high resolution application of a stormwater management model (SWMM) using genetic parameter optimization. *Urban Water Journal*, 10(6), 394-410.
- Li, C., Liu, M., Hu, Y., Gong, J., & Xu, Y. (2016). Modeling the Quality and Quantity of Runoff in a Highly Urbanized Catchment Using Storm Water Management Model. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(4).
- Mays, L. W. (2001). Stormwater collection systems design handbook. McGraw-Hill Professional.
- Mazi, K., Koussis, A. D., Restrepo, P. J., & Koutsoyiannis, D. (2004). A groundwater-based, objective-heuristic parameter optimisation method for a precipitation-runoff model and its application to a semi-arid basin. *Journal of Hydrology*, 290(3-4), 243-258.
- Mimikou M., Baltas E. and Varanou E. (2000). A study of extreme storm events in the Athens greater area. The Extreme of Extremes: Extraordinary Floods, Proceedings of a symposium held at Reykjavik, Iceland, July, IAHS Publ. no. 271.
- Mimikou M., Baltas E. and Tsihrintzis V. (2016), *Hydrology and Water Resource Systems*, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (1986). Van Nostrand Reinhold Co., New York. Wetlands.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.



- Niemczynowicz, J. (1999). Urban hydrology and water management—present and future challenges. *Urban water*, 1(1), 1-14.
- Nanson, G. C., & Young, R. W. (1981). Downstream reduction of rural channel size with contrasting urban effects in small coastal streams of southeastern Australia. *Journal of Hydrology*, 52(3-4), 239-255.
- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J. W., Rougier, J., Stephenson, D. B., & Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214-232.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Flannery, B. P., & Vetterling, W. T. (1992). *Numerical recipes in Fortran 77: volume 1, volume 1 of Fortran numerical recipes: the art of scientific computing*. Cambridge university press.
- Rabori, A. M., Ghazavi, R., & Reveshty, M. A. (2017). Sensitivity analysis of SWMM model parameters for urban runoff estimation in semi-arid area. *J Biodivers Environ Sci*, 10(5), 284-294.
- Rossman L. A., (2010). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*, EPA/600/R-05/040, U.S Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- Rossman, L. A., & Huber, W. (2016). *Storm water management model reference manual Volume I—Hydrology (Revised)*. US Environmental Protection Agency: Cincinnati, OH, USA.
- Rossman, L. A., & Huber, W. (2017). *Storm water management model reference manual volume II—hydraulics*. US Environmental Protection Agency, II (Mayo), 190.
- Sauer, V. B., Thomas Jr, W. O., Stricker, V. A., & Wilson, K. V. (1983). *Flood characteristics of urban watersheds in the United States (No. 2207)*. USGPO,.
- Simmons, D. L., & Reynolds, R. J. (1982). EFFECTS OF URBANIZATION ON BASE FLOW OF SELECTED SOUTH-SHORE STREAMS, LONG ISLAND, NEW YORK 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 18(5), 797-805.
- Sharifan, R. A., Roshan, A., Aflatoni, M., Jahedi, A., & Zolghadr, M. (2010). Uncertainty and sensitivity analysis of SWMM model in computation of manhole water depth and subcatchment peak flood. *Procedia-social and behavioral sciences*, 2(6), 7739-7740.
- Sharma, K. D., Sorooshian, S. and Wheeler, H., (2008). *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. New York : Cambridge University Press. 223 p. ISBN-13 978-0-511-37710-5.
- Sherman, L. K. (1932). Streamflow from rainfall by unit-graph method. *Engrg. News Record*, 108, 501-505
- Shuster, W. D., Bonta, J., Thurston, H., Warnemuende, E., & Smith, D. R. (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, 2(4), 263-275.
- Singh, V.P.; Frevert, D.K. *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*; Water Resources Publication: Littleton, CO, USA, 2002.
- Sun, Ning & Limburg, Karin & Hong, Bongghi. (2019). *The Urban Hydrological System*. 10.1007/978-3-030-11259-2.

Tholin, A. L., & Keifer, C. J. (1960). Hydrology of urban runoff. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 125(1), 1308-1355.

Tsihrintzis V.A., Hamid R., (1998). Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM, Hydrological Processes, 12(2): 311-329

Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD) (2016). Drainage Criteria Manual, Chapter 6 – Runoff, Urban Drainage and Flood Control District, Denver, CO.

Urbanas, B. R., & Roesner, L. A. (1993). Hydrologic design for urban drainage and flood control. Handbook of hydrology, 5-1.

Wanielista, M. P., & Yousef, Y. A. (1993). Stormwater Management. John Wiley & Sons. Inc., New York, NY, 579.

Wei, H., Wanga, Y., & Wangc, M. (2018). Characteristic and pattern of urban water cycle: theory. DESALINATION AND WATER TREATMENT, 110, 349-354.

Welle, P.J., and D.E. Woodward (1986) Time of concentration. Hydrology, Technical Note No. N4. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, NENTC, Chester, PA.

Woodward, D. E. (2010) Part 630 Hydrology National Engineering Handbook - Chapter 15 Time Of Concentration.

## Ιστοσελίδες

[http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology\\_city](http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology_city) Τελευταία προσπέλαση: 09/06/2020

<https://land.copernicus.eu/news/corine-land-cover-now-updated-for-the-2018-reference-year> Τελευταία προσπέλαση: 09/06/2020

<https://floods.ypeka.gr/> Τελευταία προσπέλαση: 09/06/2020

<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043063> Τελευταία προσπέλαση: 09/06/2020

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Π-Α.1: Υπολογισμός Απορροών Ξηρού Καιρού

| Λεκάνη | Πυκνότητα Πληθυσμού (κατ/ha) | Έκταση Λεκάνης (ha) | Πληθυσμός Λεκάνης | Μέση Κατανάλωση (lt/κατ/ημ) | Μέση Ημερήσια Κατανάλωση στη Λεκάνη (lt/ημ) | F1 | Μέγιστη Ημερήσια Κατανάλωση Λεκάνης (lt/s) | μ   | Μέγιστη Ημερήσια Παροχή Ακαθάρτων (Qad) | Αυξητικός Συντελεστής (P) | Μέγιστη Ωριαία Παροχή (lt/s) |
|--------|------------------------------|---------------------|-------------------|-----------------------------|---|----|--|-----|---|---------------------------|------------------------------|
| 1      | 170.44                       | 1.81                | 309.12            | 200                         | 61824.04                                    | 2  | 1.43                                       | 0.8 | 1.14                                    | 3.00                      | 3                            |
| 2      | 170.44                       | 9.28                | 1581.10           | 200                         | 316219.17                                   | 2  | 7.32                                       | 0.8 | 5.86                                    | 2.53                      | 15                           |
| 3      | 170.44                       | 10.66               | 1816.10           | 200                         | 363220.59                                   | 2  | 8.41                                       | 0.8 | 6.73                                    | 2.46                      | 17                           |
| 4      | 170.44                       | 10.97               | 1869.19           | 200                         | 373837.95                                   | 2  | 8.65                                       | 0.8 | 6.92                                    | 2.45                      | 17                           |
| 5      | 170.44                       | 1.93                | 328.88            | 200                         | 65776.99                                    | 2  | 1.52                                       | 0.8 | 1.22                                    | 3.00                      | 4                            |
| 6      | 170.44                       | 5.27                | 898.15            | 200                         | 179629.20                                   | 2  | 4.16                                       | 0.8 | 3.33                                    | 2.87                      | 10                           |
| 7      | 170.44                       | 9.50                | 1618.39           | 200                         | 323677.39                                   | 2  | 7.49                                       | 0.8 | 5.99                                    | 2.52                      | 15                           |
| 8      | 170.44                       | 5.76                | 980.98            | 200                         | 196196.42                                   | 2  | 4.54                                       | 0.8 | 3.63                                    | 2.81                      | 10                           |
| 9      | 170.44                       | 10.27               | 1750.02           | 200                         | 350003.63                                   | 2  | 8.10                                       | 0.8 | 6.48                                    | 2.48                      | 16                           |
| 10     | 170.44                       | 1.49                | 253.42            | 200                         | 50683.85                                    | 2  | 1.17                                       | 0.8 | 0.94                                    | 3.00                      | 3                            |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακας Π-Β.1: Παράμετροι Υπολεκανών στο SWMM – Μοντέλο πριν τη βαθμονόμηση

| Subcatchments Name | Rain Gage | Outlet | Area    | %Imperv | Width | %Slope |
|--------------------|-----------|--------|---------|---------|-------|--------|
| 1                  | 1         | 395100 | 1.81366 | 40      | 60    | 19.43  |
| 2                  | 1         | 395133 | 9.27655 | 25      | 300   | 36.06  |
| 3                  | 1         | 416156 | 10.6554 | 40      | 100   | 30.29  |
| 4                  | 1         | 416155 | 10.9668 | 50      | 100   | 36.34  |
| 5                  | 1         | 395124 | 1.92962 | 50      | 60    | 16.14  |
| 6                  | 1         | 415225 | 5.26957 | 80      | 60    | 18.09  |
| 7                  | 1         | 434232 | 9.49535 | 90      | 60    | 19.08  |
| 8                  | 1         | 415229 | 5.75559 | 90      | 60    | 12.28  |
| 9                  | 1         | 415281 | 10.2676 | 90      | 60    | 16.45  |
| 10                 | 1         | 435220 | 1.48685 | 80      | 60    | 14.32  |

Πίνακας Π-Β.2: Παράμετροι Διήθησης Υπολεκανών στο SWMM – Μοντέλο πριν τη βαθμονόμηση

| Subcatchments Name | CurveNumber | Conductivity | DryTime |
|--------------------|-------------|--------------|---------|
| 1                  | 84          | 0.06         | 12.75   |
| 2                  | 80          | 0.06         | 12.75   |
| 3                  | 86          | 0.06         | 12.75   |
| 4                  | 91          | 0.06         | 12.75   |
| 5                  | 86          | 0.06         | 12.75   |
| 6                  | 93          | 0.06         | 12.75   |
| 7                  | 96          | 0.06         | 12.75   |
| 8                  | 96          | 0.06         | 12.75   |
| 9                  | 96          | 0.06         | 12.75   |
| 10                 | 93          | 0.06         | 12.75   |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Πίνακας Π-Γ.1: Υπολογισμός χρόνου συγκέντρωσης με τη μέθοδο Giandotti

| Υπολεκάνες | L(km)   | A(km <sup>2</sup> ) | Hm (μέσο υψόμετρο<br>λεκάνης) | Hmin(υψόμετρο<br>στην έξοδο) | ΔH    | tc (hr) | tc (min) |
|------------|---------|---------------------|-------------------------------|------------------------------|-------|---------|----------|
| 1          | 0.18744 | 0.018137            | 210.51                        | 194.26                       | 16.25 | 0.25    | 15.25    |
| 2          | 0.39308 | 0.092766            | 237.81                        | 199.41                       | 38.4  | 0.36    | 21.88    |
| 3          | 0.27131 | 0.106554            | 223.41                        | 168.46                       | 54.95 | 0.29    | 17.33    |
| 4          | 0.30537 | 0.109668            | 233.09                        | 189.42                       | 43.67 | 0.34    | 20.23    |
| 5          | 0.12007 | 0.019296            | 191.33                        | 180.01                       | 11.32 | 0.27    | 16.40    |
| 6          | 0.22898 | 0.052696            | 177.39                        | 162.97                       | 14.42 | 0.42    | 24.92    |
| 7          | 0.28011 | 0.094953            | 149.66                        | 125.5                        | 24.16 | 0.42    | 25.22    |
| 8          | 0.34922 | 0.057556            | 158.89                        | 140.55                       | 18.34 | 0.43    | 25.98    |
| 9          | 0.39385 | 0.102676            | 176.67                        | 145.89                       | 30.78 | 0.42    | 25.31    |
| 10         | 0.12651 | 0.014869            | 147.49                        | 139.29                       | 8.2   | 0.30    | 17.74    |

Πίνακας Π-Γ.2: Υπολογισμός χρόνου συγκέντρωσης με τη μέθοδο Κινηματικού Κύματος

| Υπολεκάνες | L(ft)   | A(km <sup>2</sup> ) | H <sub>max</sub> (μέγιστο υψόμετρο) | H (υψόμετρο στην έξοδο-m) | L' (m) | Sstr | n      | Pe(mm) | Pe(in) | tc(min) |
|------------|---------|---------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------|------|--------|--------|--------|---------|
| 1          | 614.96  | 0.018137            | 220.22                              | 194.26                    | 175.00 | 0.15 | 0.0768 | 44.66  | 1.76   | 14.85   |
| 2          | 1289.63 | 0.092766            | 297.95                              | 199.41                    | 350.00 | 0.28 | 0.0768 | 44.66  | 1.76   | 20.78   |
| 3          | 890.12  | 0.106554            | 292.00                              | 168.46                    | 275.00 | 0.45 | 0.0828 | 44.66  | 1.76   | 13.60   |
| 4          | 1001.87 | 0.109668            | 216.00                              | 189.42                    | 250.00 | 0.11 | 0.0828 | 44.66  | 1.76   | 26.61   |
| 5          | 393.93  | 0.019296            | 194.26                              | 180.01                    | 130.00 | 0.11 | 0.0768 | 44.66  | 1.76   | 11.74   |
| 6          | 751.25  | 0.052696            | 180.01                              | 162.97                    | 220.00 | 0.08 | 0.0768 | 44.66  | 1.76   | 22.60   |
| 7          | 919.00  | 0.094953            | 139.29                              | 125.50                    | 320.00 | 0.04 | 0.0217 | 44.66  | 1.76   | 12.21   |
| 8          | 1145.73 | 0.057556            | 162.97                              | 140.55                    | 360.00 | 0.06 | 0.0768 | 44.66  | 1.76   | 34.57   |
| 9          | 1292.16 | 0.102676            | 168.46                              | 145.89                    | 410.00 | 0.06 | 0.0828 | 44.66  | 1.76   | 42.45   |
| 10         | 415.06  | 0.014869            | 145.89                              | 139.29                    | 100.00 | 0.07 | 0.0304 | 44.66  | 1.76   | 7.14    |

Πίνακας Π-Γ.3: Υπολογισμός χρόνου συγκέντρωσης με τη μέθοδο Kerby

| Υπολεκάνες | L(ft)   | A(km <sup>2</sup> ) | H <sub>min</sub> (υψόμετρο στην έξοδο) | H <sub>max</sub> (μέγιστο υψόμετρο) | L' (m) | Sstr | n      | tc(min) |
|------------|---------|---------------------|--|-------------------------------------|--------|------|--------|---------|
| 1          | 614.96  | 0.0181366           | 194.26                                 | 220.22                              | 175    | 0.15 | 0.0768 | 6.13    |
| 2          | 1289.63 | 0.09276554          | 199.41                                 | 297.95                              | 350    | 0.28 | 0.0768 | 7.03    |
| 3          | 890.12  | 0.1065538           | 168.46                                 | 292                                 | 275    | 0.45 | 0.0828 | 5.92    |
| 4          | 1001.87 | 0.10966849          | 189.42                                 | 216                                 | 250    | 0.11 | 0.0828 | 7.77    |
| 5          | 393.93  | 0.01929623          | 180.01                                 | 194.26                              | 130    | 0.11 | 0.0768 | 5.58    |
| 6          | 751.25  | 0.052695729         | 162.97                                 | 180.01                              | 220    | 0.08 | 0.0768 | 7.27    |
| 7          | 919.00  | 0.094953471         | 125.5                                  | 139.29                              | 320    | 0.04 | 0.0217 | 5.67    |
| 8          | 1145.73 | 0.057555861         | 140.55                                 | 162.97                              | 360    | 0.06 | 0.0768 | 8.64    |
| 9          | 1292.16 | 0.102676494         | 145.89                                 | 168.46                              | 410    | 0.06 | 0.0828 | 9.38    |
| 10         | 415.06  | 0.014868532         | 139.29                                 | 145.89                              | 100    | 0.07 | 0.0304 | 4.56    |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Πίνακας Π-Δ.1: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για τις παραμέτρους του πλάτους, της επιφανειακής συγκράτησης αδιαπέρατων επιφανειών και του συντελεστή Manning αδιαπέρατων επιφανειών.

|                           | Πλάτος υπολεκάνης (width)                                     |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           | Αρχική Τιμή   | +10%    | -10%    | +20%    | -20%    | +30%    | -30%    | +40%    | -40%    | +50%    | -50%    |
| Παροχή αιχμής (l/s)       | 1151.51   | 1173.70 | 1126.45 | 1193.56 | 1097.62 | 1211.50 | 1064.09 | 1227.87 | 1024.47 | 1242.92 | 976.42  |
| Ώρα αιχμής (min)          | 151.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  |
| Όγκος (10 <sup>6</sup> l) | 6.74  | 6.75    | 6.72    | 6.76    | 6.71    | 6.76    | 6.69    | 6.77    | 6.66    | 6.77    | 6.62    |
| Μέγιστο βάθος ροής (m)    | 0.38  | 0.39    | 0.38    | 0.39    | 0.37    | 0.39    | 0.37    | 0.40    | 0.36    | 0.40    | 0.35    |
|                           | Επιφανειακή συγκράτηση αδιαπέρατων επιφανειών (D_store_imper) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|                           | Αρχική Τιμή   | +10%    | -10%    | +20%    | -20%    | +30%    | -30%    | +40%    | -40%    | +50%    | -50%    |
| Παροχή αιχμής (l/s)       | 1151.51   | 1030.26 | 1315.41 | 1030.26 | 1454.56 | 1030.26 | 1570.08 | 1030.26 | 1666.35 | 1030.26 | 1744.66 |
| Ώρα αιχμής (min)          | 151.00  | 143.00  | 151.00  | 143.00  | 151.00  | 143.00  | 151.00  | 143.00  | 150.00  | 143.00  | 150.00  |
| Όγκος (10 <sup>6</sup> l) | 6.74  | 6.54    | 6.94    | 6.44    | 7.15    | 6.44    | 7.36    | 6.44    | 7.57    | 6.44    | 7.78    |
| Μέγιστο βάθος ροής (m)    | 0.38  | 0.37    | 0.42    | 0.37    | 0.44    | 0.37    | 0.47    | 0.37    | 0.48    | 0.37    | 0.50    |
|                           | Συντελεστής Manning αδιαπέρατων επιφανειών (N_imper)          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|                           | Αρχική Τιμή   | +10%    | -10%    | +20%    | -20%    | +30%    | -30%    | +40%    | -40%    | +50%    | -50%    |
| Παροχή αιχμής (l/s)       | 1151.51   | 1128.88 | 1176.02 | 1107.67 | 1202.75 | 1087.87 | 1232.29 | 1069.22 | 1265.54 | 1051.67 | 1303.71 |
| Ώρα αιχμής (min)          | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  |
| Όγκος (10 <sup>6</sup> l) | 6.74  | 6.72    | 6.75    | 6.71    | 6.76    | 6.70    | 6.77    | 6.69    | 6.78    | 6.68    | 6.79    |
| Μέγιστο βάθος ροής (m)    | 0.38  | 0.38    | 0.39    | 0.38    | 0.39    | 0.37    | 0.40    | 0.37    | 0.40    | 0.37    | 0.41    |

Πίνακας Π-Δ.2: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για τις παραμέτρους του συντελεστή Manning περατών επιφανειών, του ποσοστού αδιαπέρατων επιφανειών χωρίς επιφανειακή συγκράτηση και του ποσοστού αδιαπέρατων επιφανειών.

|                           | Αρχική Τιμή | Συντελεστής Manning περατών επιφανειών (N_per)                            |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|-------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |             | +10%  | -10%    | +20%    | -20%    | +30%    | -30%    | +40%    | -40%    | +50%    | -50%    |
| Παροχή αιχμής (l/s)       | 1151.51     | 1151.51   | 1151.51 | 1151.51 | 1151.51 | 1151.51 | 1151.51 | 1151.51 | 1151.51 | 1151.51 | 1151.51 |
| Ώρα αιχμής (min)          | 151.00      | 151.00  | 151.00  | 151.00  | 151.00  | 151.00  | 151.00  | 151.00  | 151.00  | 151.00  | 151.00  |
| Όγκος (10 <sup>6</sup> l) | 6.74        | 6.74  | 6.74    | 6.74    | 6.74    | 6.74    | 6.74    | 6.74    | 6.74    | 6.74    | 6.74    |
| Μέγιστο βάθος ροής (m)    | 0.38        | 0.38  | 0.38    | 0.38    | 0.38    | 0.38    | 0.38    | 0.38    | 0.38    | 0.38    | 0.38    |
|                           | Αρχική Τιμή | Ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών χωρίς επιφανειακή συγκράτηση (%zero imper) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|                           |             | +10%  | -10%    | +20%    | -20%    | +30%    | -30%    | +40%    | -40%    | +50%    | -50%    |
| Παροχή αιχμής (l/s)       | 1151.51     | 1220.66   | 1083.26 | 1290.76 | 1016.15 | 1361.66 | 949.78  | 1434.75 | 884.35  | 1508.01 | 819.32  |
| Ώρα αιχμής (min)          | 151.00      | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  |
| Όγκος (10 <sup>6</sup> l) | 6.74        | 6.95  | 6.53    | 7.15    | 6.32    | 7.36    | 6.11    | 7.57    | 5.90    | 7.78    | 5.69    |
| Μέγιστο βάθος ροής (m)    | 0.38        | 0.40  | 0.37    | 0.41    | 0.35    | 0.43    | 0.34    | 0.44    | 0.32    | 0.45    | 0.30    |
|                           | Αρχική Τιμή | Ποσοστό αδιαπέρατων επιφανειών (%imper)                                   |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|                           |             | +10%  | -10%    | +20%    | -20%    | +30%    | -30%    | +40%    | -40%    | +50%    | -50%    |
| Παροχή αιχμής (l/s)       | 1151.51     | 1230.37   | 1069.65 | 1279.22 | 984.97  | 1318.54 | 897.30  | 1351.99 | 806.68  | 1385.51 | 710.69  |
| Ώρα αιχμής (min)          | 151.00      | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  |
| Όγκος (10 <sup>6</sup> l) | 6.74        | 6.99  | 6.48    | 7.13    | 6.22    | 7.23    | 5.96    | 7.32    | 5.69    | 7.41    | 5.42    |
| Μέγιστο βάθος ροής (m)    | 0.38        | 0.40  | 0.37    | 0.41    | 0.35    | 0.41    | 0.34    | 0.42    | 0.32    | 0.42    | 0.30    |



Πίνακας Π-Δ.3: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας για τις παραμέτρους του συντελεστή Manning των αγωγών, της κλίσης των υπολεκανών και το αριθμού καμπύλης CN.

|                        | Αρχική Τιμή | Συντελεστής Manning των αγωγών ( $n_{con}$ ) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------|-------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                        |             | +10%   | -10%    | +20%    | -20%    | +30%    | -30%    | +40%    | -40%    | +50%    | -50%    |
| Παροχή αιχμής (l/s)    | 1151.51     | 1147.05                                      | 1156.03 | 1142.64 | 1161.31 | 1138.83 | 1167.53 | 1134.71 | 1167.70 | 1130.88 | 1165.68 |
| Ώρα αιχμής (min)       | 151.00      | 152.00                                       | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  |
| Όγκος ( $10^6$ l)      | 6.74        | 6.73   | 6.74    | 6.73    | 6.74    | 6.73    | 6.75    | 6.72    | 6.75    | 6.72    | 6.75    |
| Μέγιστο βάθος ροής (m) | 0.38        | 0.40   | 0.37    | 0.42    | 0.35    | 0.43    | 0.33    | 0.45    | 0.32    | 0.46    | 0.31    |
|                        | Αρχική Τιμή | Κλίση των υπολεκανών (slope)                 |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|                        |             | +10%   | -10%    | +20%    | -20%    | +30%    | -30%    | +40%    | -40%    | +50%    | -50%    |
| Παροχή αιχμής (l/s)    | 1151.51     | 1162.67                                      | 1139.08 | 1172.75 | 1124.95 | 1181.93 | 1108.65 | 1190.37 | 1089.61 | 1198.16 | 1066.66 |
| Ώρα αιχμής (min)       | 151.00      | 151.00                                       | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  |
| Όγκος ( $10^6$ l)      | 6.74        | 6.74   | 6.73    | 6.75    | 6.72    | 6.75    | 6.71    | 6.75    | 6.70    | 6.76    | 6.69    |
| Μέγιστο βάθος ροής (m) | 0.38        | 0.39   | 0.38    | 0.39    | 0.38    | 0.39    | 0.38    | 0.39    | 0.37    | 0.39    | 0.37    |
|                        | Αρχική Τιμή | Αριθμός καμπύλης CN                          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|                        |             | +10%   | -10%    | +20%    | -20%    | +30%    | -30%    | +40%    | -40%    | +50%    | -50%    |
| Παροχή αιχμής (l/s)    | 1151.51     | 1248.82                                      | 1151.51 | 1310.39 | 1151.51 | 1406.72 | 1151.51 | 1406.72 | 1151.51 | 1406.72 | 1151.51 |
| Ώρα αιχμής (min)       | 151.00      | 152.00                                       | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  | 152.00  | 151.00  |
| Όγκος ( $10^6$ l)      | 6.74        | 7.00   | 6.74    | 7.22    | 6.74    | 7.44    | 6.74    | 7.44    | 6.74    | 7.44    | 6.74    |
| Μέγιστο βάθος ροής (m) | 0.38        | 0.40   | 0.38    | 0.41    | 0.38    | 0.42    | 0.38    | 0.42    | 0.38    | 0.42    | 0.38    |