



**Πολυτεχνείο Κρήτης**

**Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών  
Περιβάλλοντος**

**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ  
ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΣΤΑΛΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ  
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HEC-HMS**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΛΕΝΗ ΚΟΥΡΟΥΠΑΚΗ**

**ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης



**Πολυτεχνείο Κρήτης**  
**Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος**

**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ  
ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΣΤΑΛΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ  
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HEC-HMS**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΕΛΕΝΗ ΚΟΥΡΟΥΠΑΚΗ**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)**

**ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΒΟΖΙΝΑΚΗ ΑΝΘΗ-ΕΙΡΗΝΗ**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική μελετά την επίδραση της αλλαγής των χρήσεων γης και πιο συγκεκριμένα την μελέτη της αστικοποίησης στην υδρολογική λεκάνη απορροής του ρέματος του Σταλού κατά την πάροδο των δεκαετιών (1990-2020). Η ολοένα αυξανόμενη αστικοποίηση στην περιοχή μελέτης καθώς και η αύξηση της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων τα τελευταία χρόνια στην περιοχή μελέτης, με συχνότερες βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης που προκαλούν επικίνδυνα πλημμυρικά γεγονότα, οδήγησαν στην ανάγκη αξιολόγησης της πλημμυρικής επικινδυνότητας στην περιοχή μελέτης μέσα από την παρούσα εργασία. Για τις ανάγκες αυτές χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, του λογισμικού υδρολογικής προσομοίωσης που έχει αναπτυχθεί από το Σώμα Μηχανικών του στρατού των ΗΠΑ (US Army Corps of Engineers, USACE). Στο μοντέλο αυτό στήθηκε η περιοχή μελέτης και εισήχθησαν τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου, όπως της βροχόπτωσης και της στάθμης νερού, τα οποία αντλήθηκαν από ήδη εγκατεστημένους σταθμούς μέτρησης βροχόπτωσης και στάθμης νερού στο ποτάμι, αντίστοιχα, στην περιοχή του Σταλού. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από χάρτες χρήσεων γης του Ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus, ώστε να εξεταστεί η επίδραση της αλλαγής των χρήσεων γης στην υδρολογία της περιοχής μελέτης κατά την πάροδο των ετών με τη χρήση του υδρολογικού μοντέλου. Τέλος, δημιουργήθηκε και εξετάστηκε ένα μελλοντικό σενάριο εντατικοποίησης της αστικοποίησης και παράλληλης αύξησης της βροχόπτωσης για το έτος 2048, το οποίο αναμένεται να οδηγήσει σε περαιτέρω αύξηση του κινδύνου εμφάνισης πλημμύρας στην περιοχή μελέτης. Το σενάριο αυτό κάνει χρήση του υπολογιστικού μοντέλου αύξησης πληθυσμού καθώς επίσης και συγκεκριμένων σεναρίων αλλαγής των χρήσεων γης και της βροχόπτωσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν μέσω του μοντέλου, υπάρχει αισθητή αύξηση της αστικοποίησης, η οποία σε συνδυασμό με το ανεπαρκές σύστημα απομάκρυνσης όμβριων υδάτων στην περιοχή, οδηγεί στη συγκέντρωση μεγάλου όγκου επιφανειακού νερού και την εμφάνιση μιας πλημμύρας. Ως προτάσεις αντιμετώπισης του προβλήματος προτείνεται η μελέτη και δημιουργία καλύτερου δικτύου όμβριων υδάτων καθώς και η υλοποίηση αντιπλημμυρικών έργων στην περιοχή.

## **ABSTRACT**

The present thesis studies the role of land use change and more specifically the effect of urbanization in the hydrological catchment area of the Stalos stream over the decades (1990-2020). The increasing urbanization as well as the increase in the frequency of extreme weather events in recent years in the study area, with more frequent heavy rains causing dangerous flood events, led to the need to assess flood risk in the study area through this study.

For this purpose, the hydrological model HEC-HMS was used, the hydrological simulation software developed by the US Army Corps of Engineers (USACE). In this model, the study area was set up and the necessary input data were entered, such as rainfall and water level, which were obtained from rainfall and water level measuring stations, respectively, in the area of Stalos. In addition, data from land use maps of the European Copernicus program were used to examine the effect of land use change on the hydrology of the study area over the years using the hydrological model. Finally, a future scenario of intensification of urbanization and parallel increase of rainfall for the year 2048 was created and examined, which is expected to lead to a further increase of the risk of flooding in the study area. This scenario makes use of the computer model of population growth as well as specific scenarios of land use change and rainfall. According to the results conducted through the model, there is a significant increase in urbanization but is not the main cause of flood risk in the area. The main reason for the concentration of a large volume of surface water is the absence of a proper rainwater collecting system. Therefore, as a proposal to address the problem, it is proposed to study and create a better rainwater network as well as the implementation of flood protection projects in the area.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Γεώργιο Καρατζά για την βοήθεια και την καθοδήγηση του κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και το μέλος της εξεταστική επιτροπής κ. Νικόλαο Νικολαΐδη για την εξέταση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Ανθή – Ειρήνη Βοζινάκη για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε, για την καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας και για όλες τις γνώσεις που μου μετέδωσε πάνω στον τομέα εκμάθησης του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και γενικότερα στον τομέα της υδρολογίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

## Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
ABSTRACT .....	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	6
Πίνακας περιεχομένων .....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	11
1.1 ΣΚΟΠΟΣ .....	11
1.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ .....	11
1.2.1 Διεργασίες υδρολογικού κύκλου .....	12
1.3 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ .....	13
1.3.1 Πεδία εφαρμογής υδρολογικών μοντέλων .....	13
1.3.2 Υδρολογικά μοντέλα .....	14
1.3.3 Σύγκριση HEC-HMS με τα υπόλοιπα υδρολογικά μοντέλα .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	17
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	17
2.1.1 Χρήση του HEC-HMS μοντέλου σε παγκόσμιο επίπεδο .....	17
2.1.2 Βασικά στοιχεία και μέθοδοι του μοντέλου HEC-HMS .....	18
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS – GIS) .....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ .....	31
3.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	31
3.1.1 Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης .....	34
3.1.2 Γεωλογία της περιοχής μελέτης .....	38
3.1.3 Εδαφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης .....	39
3.2 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ .....	40
3.2.1 Στοιχεία βροχόπτωσης από τον μετεωρολογικό σταθμό .....	41
3.2.2 Στοιχεία στάθμης νερού από τον υδρομετρικό σταθμό .....	42
3.3 ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ .....	45
3.3.1 Υπολογισμός CN για τις ιστορικές περιόδους μελέτης 1990, 2006, 2018 .....	45
3.3.2 Υπολογισμός CN για το μελλοντικό σενάριο αλλαγής χρήσεων γης .....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	48
4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	48
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ .....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	55

5.1 Συμπεράσματα.....	55
5.2 Προτάσεις.....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....	60



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Απεικόνιση υδρολογικού κύκλου, (USGS, Public domain, 2017) .....	12
Εικόνα 2: Εισαγωγή δεδομένων στην απλή μέθοδο φυτοκάλυψης (simple canopy).....	20
Εικόνα 3: Εισαγωγή δεδομένων στην απλή μέθοδο επιφανειακής αποθηκευτικότητας (simple surface). .....	21
Εικόνα 4: Εισαγωγή δεδομένων στην SCS Curve Number μέθοδο απώλειας. ....	22
Εικόνα 5: Εισαγωγή δεδομένων στη SCS Unit hydrograph μέθοδο μετασχηματισμού. ....	24
Εικόνα 6: Εισαγωγή δεδομένων για τη μέθοδο ύφεσης. ....	25
Εικόνα 7: Εισαγωγή δεδομένων για τη μέθοδο Muskingum. ....	26
Εικόνα 8: Εισαγωγή δεδομένων για τη μέθοδο σταθερής απώλειας. ....	27
Εικόνα 9: Εισαγωγή δεδομένων στο μετεωρολογικό μοντέλο. ....	27
Εικόνα 10: Εισαγωγή δεδομένων, ημερομηνίας και ώρας για τις προδιαγραφές ελέγχου. ....	28
Εικόνα 11: Εισαγωγή δεδομένων χρονοσειράς. ....	29
Εικόνα 12: Απεικόνιση της υδρολογικής λεκάνης απορροής του Σταλού της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων. ....	31
Εικόνα 13: Απεικόνιση του ρέματος Σταλού και της ομώνυμης υδρολογικής λεκάνης απορροής. ....	32
Εικόνα 14: Υψόμετρο στη λεκάνη απορροής του Σταλού. ....	33
Εικόνα 15: Καταστροφικές πλημμύρες στην περιοχή μελέτης του Σταλού. ....	34
Εικόνα 16: Η κατανομή των χρήσεων γης της λεκάνης απορροής για το 2018-2020. ....	35
Εικόνα 17: Αεροφωτογραφία από την ευρύτερη περιοχή του Σταλού την χρονική περίοδο 1945-1960. ....	36
Εικόνα 18: Αεροφωτογραφία από την ευρύτερη περιοχή του Σταλού την χρονική περίοδο 2015-2016. ....	36
Εικόνα 19: Οι αλλαγές των χρήσεων γης κατά τα έτη 1990 (α), 2006 (β) και 2018 (γ). ....	37
Εικόνα 20: Γεωλογικοί μετασχηματισμοί στην περιοχή μελέτης του Σταλού. ....	38
Εικόνα 21: Ευρωπαϊκός χάρτης εδαφικής κατανομής, (ESDAC JRC, 2014). ....	39
Εικόνα 22: Όργανα μέτρησης στη λεκάνη απορροής του Σταλού (α) μετεωρολογικός σταθμός τοποθετημένος στη θέση «Βιβλιοθήκη» στον Άνω Σταλό και (β) υδρομετρικός σταθμός εγκατεστημένος στα κατάντη του ποταμού. ....	41
Εικόνα 23: Γράφημα χρονοσειρών βροχόπτωσης και στάθμης νερού στο ρέμα του Σταλού. ....	42
Εικόνα 24: Γράφημα χρονοσειρών βροχόπτωσης και παροχής στο ρέμα του Σταλού. ....	45
Εικόνα 25: Αποτελέσματα του HEC-HMS μοντέλου για την παροχή στο ρέμα του Σταλού, κατά την περίοδο βαθμονόμησης (1 Νοεμβρίου 2019 έως 31 Μαΐου 2020). ....	49
Εικόνα 26: Αποτελέσματα του HEC-HMS μοντέλου για την παροχή στο ρέμα του Σταλού κατά την περίοδο επαλήθευσης (1 Νοεμβρίου 2018 έως 31 Ιανουαρίου 2019). ....	49
Εικόνα 27: Αποτελέσματα μοντέλου για την άμεση επιφανειακή απορροή κατά τα ιστορικά σενάρια αλλαγής χρήσεων γης 1990, 2006 και 2018/2020. ....	51
Εικόνα 28: Αποτελέσματα μοντέλου για την άμεση απορροή μεταξύ των ετών 2018 και 2048 για 5% και 10% αύξηση της βροχόπτωσης ....	52
Εικόνα 29: Περιοχή Σταλού (α) Αυτοσχέδιο φρεάτιο από κατοίκους περιοχής, (β) κακοτεχνίες και αμέλεια από Δήμο. ....	56

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Curve Number για κάθε μεμονωμένη χρήση γης.	45
Πίνακας 2: Τελικός Curve Number κάθε έτος μελέτης.	46
Πίνακας 3: Αποτελέσματα μοντέλου για τα τρία μεγέθη peak discharge, direct runoff και discharge volume.	53
Πίνακας 4: Ποσοστιαίες μεταβολές των διάφορων μεγεθών μεταξύ των ετών μελέτης.	54

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΣΚΟΠΟΣ

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ιδιαίτερη αύξηση στην συχνότητα των πλημμυρικών φαινομένων στην Ελλάδα αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην εντατικοποίηση της αστικοποίησης στα μεγάλα αστικά κέντρα καθώς και στα επικίνδυνα καιρικά φαινόμενα που προκύπτουν συχνότερα πλέον λόγω της κλιματικής αλλαγής. Ο νομός Χανίων αποτελεί έναν από τους νομούς που όλο και συχνότερα πλήττεται από επικίνδυνα καιρικά φαινόμενα τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα την αύξηση όγκου των επιφανειακών νερών σε διάφορες περιοχές και την εμφάνιση υλικών ζημιών. Όλα τα παραπάνω καθιστούν επιτακτική τη μελέτη της υδρολογίας μιας περιοχής, που είναι επιρρεπής στον πλημμυρικό κίνδυνο και της υδρολογικής και πλημμυρικής συμπεριφοράς της κατά την εμφάνιση του ακραίου πλημμυρικού γεγονότος. Επίσης είναι σημαντικό να μελετάται και η επίδραση της αστικοποίησης και των αλλαγών χρήσεων γης σε μια περιοχή επιρρεπή στην πλημμύρα.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής του ρέματος του Σταλού, στην περιοχή του Κάτω Σταλού, Νέας Κυδωνίας Χανίων. Τα τελευταία χρόνια την περιοχή μελέτης έχουν παρουσιαστεί πλημμυρικά γεγονότα λόγω αυξημένης επιφανειακής απορροής, κυρίως μετά από κάποιο συμβάν κατακρήμνισης. Είναι βασικό να εξεταστεί αν ο κύριος παράγοντας αύξησης του όγκου των επιφανειακών υδάτων και η επίδραση της αστικοποίησης στην περιοχή και γενικότερα οι αλλαγές των χρήσεων γης που έχουν πραγματοποιηθεί κατά την πάροδο των ετών. Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη, αυτή εξετάζεται η επίδραση της μεταβολής χρήσεων γης λόγω της αστικοποίησης στα αποτελέσματα του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS για μια εκτεταμένη χρονική περίοδο (1990-2020), μέσω της αλλαγής της παραμέτρου του αριθμού καμπύλης (Curve Number).

### 1.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Ο υδρολογικός κύκλος, ή αλλιώς ο κύκλος του νερού, περιγράφει την παρουσία και την κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια της Γης, κάτω και πάνω απ' αυτή (Εικόνα 1). Το νερό της Γης είναι πάντα σε κίνηση και πάντα σε αλλαγή, από την υγρή μορφή στην αέρια ή σε πάγο ξανά και αντίστροφα. Ο κύκλος του νερού λειτουργεί εδώ και δισεκατομμύρια χρόνια και η ζωή στη Γη εξαρτάται απ' αυτόν (United States Geological Survey, Public domain, 2017).

Η Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS) έχει διακρίνει 16 μέρη του υδρολογικού κύκλου: αποθήκευση νερού στη θάλασσα, εξάτμιση, εξατμισοδιαπνοή, εξάχνωση, αποθήκευση του νερού στην ατμόσφαιρα, συμπύκνωση, κατακρημνίσματα, αποθήκευση νερού σε πάγους και χιόνια, απορροή από λιώσιμο του χιονιού, επιφανειακή απορροή, ροή σε υδατορεύματα, αποθήκευση γλυκού νερού, διήθηση, αποθήκευση υπόγειου νερού, εκφόρτιση υπόγειου νερού, πηγές και κατανομή νερού σε ωκεανούς, λίμνες και θάλασσες.



Εικόνα 1: Απεικόνιση υδρολογικού κύκλου, (USGS, Public domain, 2017)

### 1.2.1 Διεργασίες υδρολογικού κύκλου

Η αρχή του υδρολογικού κύκλου μπορεί θεωρητικά να τοποθετηθεί στην ατμόσφαιρα στην οποία 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. Οι υδρατμοί αυτοί μεταφέρονται υπό την επίδραση των ανέμων και κάτω από κατάλληλες συνθήκες, συμπυκνώνονται σε νέφη και στη συνέχεια υπό την μορφή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι) επανέρχονται στην επιφάνεια της γης. Από το νερό που φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους, ένα μέρος συγκρατείται από τη βλάστηση και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά, ένα άλλο μέρος διηθείται εντός του εδάφους και τέλος ένα τρίτο μέρος απορρέει επιφανειακά προς τα ρεύματα και τους ποταμούς καταλήγοντας στις λίμνες ή τις θάλασσες. Από το νερό που διηθείται, ένα μέρος εξατμίζεται ή διαπνέεται μέσω των φυτών και το υπόλοιπο διηθείται σε βαθύτερα στρώματα επαναφορτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς. Από τη θάλασσα, μέσω της εξάτμισης, το νερό επανέρχεται στην ατμόσφαιρα συμπληρώνοντας τον υδρολογικό κύκλο.

### 1.3 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Ως υδρολογικά μοντέλα ορίζονται οι μαθηματικοί μετασχηματισμοί που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου (υδρολογικά, γεωμορφολογικά, κτλ.) και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους μηχανισμούς του υδρολογικού κύκλου, με σκοπό την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών, σε κατάλληλη χωρική και χρονική κλίμακα. Τα υδρολογικά μοντέλα χωρίζονται με βάση την χωρική κλίμακα σε:

1. Αδιαμέριστα (lumped): Κοινές παράμετροι για όλη τη λεκάνη απορροής.
2. Ημι-αδιαμέριστα (semi-lumped): Διαφορετικές φορτίσεις αλλά κοινές παράμετροι ανά χωρική ενότητα.
3. Ημι-κατανεμημένα (semi-distributed): Διαφορετικές φορτίσεις και παράμετροι ανά χωρική ενότητα.
4. Πλήρως κατανεμημένα (distributed): Κατάτμηση σε πολύ μικρές χωρικές ενότητες και χρήση φυσικών εξισώσεων.

Τα υδρολογικά μοντέλα χωρίζονται επιπλέον με βάση την μαθηματική δομή σε:

1. Μοντέλα φυσικής βάσης: Περιγράφονται με εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής, και άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες.
2. Εννοιολογικά μοντέλα: Περιγράφονται με παραμετρικές σχέσεις, σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες.
3. Στατιστικά/Στοχαστικά μοντέλα: Περιγράφονται από σχέσεις που αναπαράγουν την στατιστική δομή των μετρημένων αποκρίσεων.
4. Μοντέλα «μαύρου κουτιού»: Περιγράφονται από διαδοχικούς και μη γραμμικούς μετασχηματισμούς σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος.

#### 1.3.1 Πεδία εφαρμογής υδρολογικών μοντέλων

Τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την:

Εκτίμηση επιφανειακού και υπόγειου υδατικού δυναμικού, σε διάφορες θέσεις ενδιαφέροντος (μελέτες σχεδιασμού και διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων). Επίσης, χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών (υδρογραφήματα, παροχές αιχμής), σε διάφορες θέσεις ενδιαφέροντος (μελέτες σχεδιασμού αντιπλημμυρικών έργων). Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση επιπτώσεων λόγω αλλαγών στις πρακτικές διαχείρισης των υδατικών πόρων, αλλαγών στα χαρακτηριστικά της λεκάνης (αστικοποίηση, αποψίλωση, διευθετήσεις ποταμών) και των αλλαγών στις χρήσεις γης. Τέλος, εκτός από τις παραπάνω δυνατότητες, τα μοντέλα έχουν και την δυνατότητα πρόγνωσης υδρολογικών μεγεθών σε πραγματικό χρόνο (επιχειρησιακή διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων, διαχείριση πλημμυρικής διακινδύνευσης κ.α.).

### 1.3.2 Υδρολογικά μοντέλα

Για την προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου έχουν χρησιμοποιηθεί από την επιστημονική κοινότητα αρκετά υδρολογικά μοντέλα, όπως είναι το HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) των Η.Π.Α., το HSPF (Hydrological Simulation Program – FORTRAN) των Η.Π.Α., το MIKE SHE των Γαλλίας – Δανίας – Ηνωμένου Βασιλείου, το SWAT (Soil & Water Assessment Tool) των Η.Π.Α., το HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) της Σουηδίας, το Sacramento των Η.Π.Α., το HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) της Σουηδίας, το TOPMODEL του Πανεπιστημίου Lancaster της Αγγλίας κ.α.

Το κάθε υδρολογικό μοντέλο εκπροσωπεί διαφορετικό σκοπό, χρησιμοποιεί συγκριμένα δεδομένα εισόδου και εξάγει διαφορετικά αποτελέσματα. Για την επιλογή του μοντέλου ο χρήστης κάθε φορά πρέπει να λαμβάνει υπόψη του διαφορετικές παραμέτρους καθώς και τα δεδομένα που έχει στη διαθεσιμότητά του κάθε φορά. Παρακάτω ακολουθούν περιληπτικά κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά των πιο ευρέως γνωστών υπολογιστικών υδρολογικών πακέτων.

**Μοντέλο HSPF:** Το μοντέλο HSPF χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της υδρολογίας αλλά και της ποιότητας των υδάτων σε μια λεκάνη απορροής. Προσομοιώνει τις υδρολογικές διεργασίες και τις αντίστοιχες διεργασίες της ποιότητας των υδάτων σε διαπερατές και αδιαπερατές επιφάνειες εδάφους, σε ρέματα και καλώς αναμεμιγμένες αποθέσεις. Είναι το μόνο ολοκληρωμένο υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής και μοντέλο ποιότητας υδάτων που επιτρέπει την ολοκληρωμένη προσομοίωση των διεργασιών της εδαφικής απορροής και των διεργασιών απορροής ρύπων στο έδαφος με υδραυλικές και χημικές αλληλεπιδράσεις κατά σειρά. Το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων μπορεί να είναι το χρονικό ιστορικό της επιφανειακής απορροής, του φορτίου ιζήματος, και των συγκεντρώσεων σε θρεπτικά και φυτοφάρμακα, μαζί με το χρονικό ιστορικό της ποσότητας και της ποιότητας του νερού σε κάθε σημείο της λεκάνης απορροής κ.α. Το HSPF χρησιμοποιείται κυρίως για ποιοτική ανάλυση.

**Μοντέλο HYPE:** Το μοντέλο HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) είναι μοντέλο υδρολογικών προβλέψεων για το περιβάλλον. Είναι ένα ημι-κατανεμημένο μοντέλο λεκάνης απορροής, το οποίο προσομοιώνει τη ροή του νερού και τις ουσίες κατά μήκος της διαδρομής τους από τη βροχόπτωση έως τη θάλασσα μέσω διαφορετικών αποθηκευτικών τμημάτων και ροών (Lindström et al., 2010). Το μοντέλο αυτό είναι ανοιχτού κώδικα και περιγράφει τις υδρολογικές διαδικασίες σε διαφορετικές υπολεκάνες. Οι αλγόριθμοί του δε βασίζονται αποκλειστικά σε φυσικούς νόμους αλλά έχουν περισσότερο έναν εννοιολογικό χαρακτήρα. Μπορεί να αξιολογηθεί βάσει σημειακών μετρήσεων στο δίκτυο ποταμού και έναντι χωρικά κατανεμημένων παρατηρήσεων από δορυφόρους ή με βάση τα αποτελέσματα από μετρήσεις πεδίου.

**Μοντέλο MIKE SHE:** Το μοντέλο MIKE SHE χρησιμοποιείται για μια ολοκληρωμένη μοντελοποίηση λεκάνης απορροής, μοντελοποίηση υπόγειων υδάτων, επιφανειακών υδάτων, επαναφόρτισης και εξατμισοδιαπνοής. Περιλαμβάνει όλες τις σημαντικές διαδικασίες του υδρολογικού κύκλου. Έχει ένα ευρύ φάσμα από εφαρμογές, όπως η προηγμένη υδρολογία λεκάνης απορροής, συνδυαστική χρήση και διαχείριση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, διαχείριση άρδευσης και ξηρασίας, περιβαλλοντικές



ροές ποταμών, διαχείριση πλημμυρών, επίδραση χρήσεων γης και κλιματικής αλλαγής στα υπόγεια και τα επιφανειακά ύδατα κ.α.

**Μοντέλο SACRAMENTO:** Το μοντέλο αυτό είναι μοντέλο για την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου σε μια λεκάνη απορροής που σχετίζει την απορροή με τη βροχόπτωση με χρήση ημερήσιων δεδομένων. Το μοντέλο αποτελείται από πέντε συντελεστές και δεκαέξι παραμέτρους. Είναι ένα συνεχές μοντέλο βροχής-απορροής που χρησιμοποιείται για να παράγει ημερήσιες χρονοσειρές παροχής από ημερήσιες χρονοσειρές βροχόπτωσης και πιθανά δεδομένα εξατμισοδιαπνοής. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο λογιστικής υγρασίας εδάφους (soil moisture accounting) για να προσομοιώσει το υδατικό ισοζύγιο μέσα στη λεκάνη απορροής.

**Μοντέλο SWAT:** Το μοντέλο SWAT αναπτύχθηκε με σκοπό να προβλέπει τις επιδράσεις των πρακτικών διαχείρισης στα ύδατα, στα εδάφη και στον κύκλο των θρεπτικών συστατικών σε μια λεκάνη απορροής. Είναι ένα διεθνώς αποδεκτό εργαλείο και αποτελεί ένα από τα πλέον κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης μεγάλων και πολύπλοκων λεκανών απορροής με διάφορους τύπους εδάφους, χρήσεων γης και συνθηκών διαχείρισης. Βασίζεται σε εύκολα προσβάσιμα δεδομένα και μπορεί να προσομοιώσει μεγάλες χρονικές περιόδους σε μεγάλες λεκάνες σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, βοηθάει στην υλοποίηση του στόχου και το καθιστά εύκολο να το επιλέξουν οι μελετητές. Είναι ένα κατανεμημένο (πλήρως ή μερικώς) υδρολογικό μοντέλο λεκάνης απορροής, φυσικής βάσης (physically-based) και συνεχούς χρόνου (continuous-time), που λειτουργεί με ημερήσιο βήμα προσομοίωσης. Μπορούν με αυτό να προσομοιωθούν διαφορετικές φυσικές διαδικασίες σε μια λεκάνη απορροής, όπως η διαδρομή των φυτοφαρμάκων, των νιτρικών, των ιζημάτων, του μικροβιακού φορτίου, της διάβρωσης που προκαλείται από τη ροή του νερού και τις γεωργικές πρακτικές, κ.α. Το μοντέλο λειτουργεί χωρίζοντας τη λεκάνη απορροής σε μικρότερα κομμάτια, σε υπο-λεκάνες, που ονομάζονται HRUs (Hydrologic Response Units). Αυτές οι υπο-λεκάνες έχουν μοναδικά χαρακτηριστικά ως προς την κλίση του εδάφους, το έδαφος και τις χρήσεις γης. Το μοντέλο δίνει ως αποτέλεσμα την απορροή, το ίζημα και την φόρτωση από μη σημειακές πηγές ρύπανσης για κάθε μονάδα HRU, αλλά και για το σύνολο τους, όπου τα επιμέρους ποσά προστίθενται και καταλήγουν στην έξοδο της λεκάνης μέσω των καναλιών.

**Μοντέλο HBV:** Το μοντέλο HBV είναι ένα διανεμημένο μοντέλο βροχόπτωσης-απορροών που βασίζεται σε μαθηματικές εξισώσεις και χρησιμοποιεί ημερήσιες μετρήσεις χιονιού, εδαφολογικής υγρασίας και δρομολόγησης του νερού στις πλαγιές της λεκάνης απορροής.

**Μοντέλο TOPMODEL:** Το μοντέλο TOPMODEL είναι ένα φυσικό κατανεμημένο μοντέλο λεκάνης απορροής που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ροής του νερού (διήθηση περσισσας επιφανειακής ροής, κορεσμός επιφανειακής ροής, διήθηση, ροή υπο-επιφανειακής ροής, εξατμισοδιαπνοής και δρομολόγηση ροής κατά μήκος καναλιού) στη λεκάνης απορροής. Το μοντέλο προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις υπόγειων/επιφανειακών υδάτων προβλέποντας την κατάσταση του υδροφόρου ορίζοντα, και κατά συνέπεια τις κορεσμένες εκτάσεις εδάφους που προκαλούν στη συνέχεια επιφανειακή απορροή.

**Μοντέλο HEC-HMS:** Το μοντέλο HEC-HMS είναι ένα ενιαίο μοντέλο και πραγματοποιεί συνεχείς προσομοιώσεις αλλά και προσομοιώσεις που βασίζονται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μελέτης. Πρόκειται για ένα φυσικό και εννοιολογικά ημι-κατανεμημένο μοντέλο σχεδιασμένο για προσομοίωση διαδικασιών απορροής βροχοπτώσεων σε ένα ευρύ φάσμα

γεωγραφικών περιοχών. Χρησιμοποιείται σε μεγάλες λεκάνες απορροής ποταμού καθώς και σε μικρές απορροές αστικών και φυσικών λεκανών.

### 1.3.3 Σύγκριση HEC-HMS με τα υπόλοιπα υδρολογικά μοντέλα

Το μοντέλο HEC-HMS έχει αναπτυχθεί για το Στρατιωτικό Σώμα των Μηχανικών του στρατού των ΗΠΑ (US Army Corps of Engineers, USACE). Έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τις πλήρεις υδρολογικές διεργασίες των δενδριτικών συστημάτων λεκανών απορροής. Πρόκειται για ένα φυσικό και εννοιολογικά ημι-κατανεμημένο μοντέλο σχεδιασμένο για προσομοίωση διαδικασιών απορροής βροχοπτώσεων σε ένα ευρύ φάσμα γεωγραφικών περιοχών. Χρησιμοποιείται σε μεγάλες λεκάνες απορροής ποταμού καθώς και σε μικρές απορροές αστικών και φυσικών λεκανών (HEC Manual, 2018).

Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά του HEC-HMS είναι ότι διατίθεται δωρεάν παγκοσμίως μέσω του διαδικτύου, είναι εύχρηστο και αρκετά ευέλικτο εργαλείο. Χρησιμοποιεί απλή μοντελοποίηση σε σύντομο χρονικό διάστημα. Το λογισμικό αυτό εφαρμόζεται τόσο σε φυσικές όσο και σε αστικές λεκάνες απορροής και είναι από τα μόνα εργαλεία υδρολογικής προσομοίωσης που περιλαμβάνουν δυνατότητες συνεχούς προσομοίωσης. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει σε ένα μοντέλο λεκάνης απορροής που αναπτύχθηκε για έναν σκοπό, να επαναχρησιμοποιηθεί με ελάχιστη προσπάθεια. Έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες που αφορούν λεκάνες απορροής σε Ευρώπη και Αμερική καθώς και στον ιδιωτικό τομέα για την υλοποίηση μελετών. Μερικές εφαρμογές του HEC-HMS έχουν πραγματοποιηθεί από τους εξής οργανισμούς: Στην Γερμανία από το University of Rostock, στην Κορέα από το Korean Society of Civil Engineers, στην Αμερική από το American Society of Civil Engineers, στο Ηνωμένο Βασίλειο από το International Water Association, και στην Ιταλία από το Food and Agriculture Organization. Επομένως, ως καταλληλότερο υδρολογικό μοντέλο για την προσομοίωση της περιοχής μελέτης στην παρούσα εργασία κρίθηκε το HEC-HMS.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS έχει αναπτυχθεί για το Στρατιωτικό Σώμα των Μηχανικών του στρατού των ΗΠΑ (US Army Corps of Engineers, USACE). Έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τις πλήρεις υδρολογικές διεργασίες των δενδριτικών συστημάτων λεκανών απορροής. Πρόκειται για ένα φυσικό και εννοιολογικά ημι-κατανεμημένο μοντέλο σχεδιασμένο για την προσομοίωση των υδρολογικών διαδικασιών σε ένα ευρύ φάσμα γεωγραφικών περιοχών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοιώσεις σε μεγάλες λεκάνες απορροής ποταμού καθώς και για την προσομοίωση μικρών απορροών σε αστικές και φυσικές λεκάνες (HEC Manual, 2018).

Το λογισμικό συμπεριλαμβάνει ποικίλες υδρολογικές διεργασίες όπως διήθηση (infiltration), μοναδιαίο υδρογράφημα (unit hydrograph) και υδρολογική δρομολόγηση (hydrologic routing). Το HEC-HMS περιλαμβάνει επίσης διαδικασίες απαραίτητες για τη συνεχή προσομοίωση, συμπεριλαμβανομένης της εξατμισοδιαπνοής, του χιονιού και της υγρασίας του εδάφους. Προηγμένες δυνατότητες παρέχονται επίσης για προσομοιώσεις σε κানাβο (grid). Μέσα στο μοντέλο, υπάρχουν συμπληρωματικά εργαλεία ανάλυσης για τη βελτιστοποίηση του μοντέλου, την πρόβλεψη της ροής, την αξιολόγηση της αβεβαιότητας του μοντέλου, τη διάβρωση, τη μεταφορά ιζημάτων και την ποιότητα του νερού. Ως δεδομένα εισόδου δέχεται δεδομένα βροχόπτωσης, εξάτμισης, ποικίλες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στις ρουτίνες του μοντέλου (φυτοκάλυψη-canopy, επιφανειακή αποθηκευτικότητα-surface, μετασχηματισμού της κατακρήμνισης σε επιφανειακή απορροή-transform, απώλειες από τη διήθηση-loss και βασική απορροή-baseflow. Τα δεδομένα εξόδου προκύπτουν από τα αποτελέσματα μετά το τρέξιμο του μοντέλου, π.χ. χρονοσειρές παροχής (discharge) κ.α. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορεί να αποθηκεύονται σε ένα ειδικό σύστημα αποθήκευσης δεδομένων της HEC (HEC-DSS), ώστε να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλα λογισμικά της HEC για διάφορες μελέτες όπως για παράδειγμα τη διαθεσιμότητα του νερού, την αποστράγγιση αστικών πόρων, την πρόβλεψη της ροής, τυχόν μελλοντικές επιπτώσεις της αστικοποίησης, τον σχεδιασμό υπερχειλίσης δεξαμενής, τη μείωση των ζημιών από πλημμύρα κ.α.

#### 2.1.1 Χρήση του HEC-HMS μοντέλου σε παγκόσμιο επίπεδο

Το μοντέλο HEC-HMS χρησιμοποιείται παγκόσμια σε ποικίλες περιπτώσεις μελετών. Για παράδειγμα χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ροής σε υδρολογικές λεκάνες απορροής, όπως στην περίπτωση του ποταμού Gilgel Abay, στη λεκάνη απορροής Upper Blue Nile, στην Αιθιοπία (Tassew et al., 2019). Στη συγκεκριμένη μελέτη η προσομοίωση βροχόπτωσης – απορροής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση έξι ημερήσιων χρονοσειρών με παρατηρήσεις ακραίων γεγονότων. Η κατανόηση των πολύπλοκων διαδικασιών που συμβαίνουν μεταξύ του διαστήματος της βροχόπτωσης και της απορροής είναι απαραίτητη ώστε να πραγματοποιηθεί σωστά η εκτίμηση της ποσότητας της απορροής σε μια λεκάνη απορροής.

Επιπρόσθετα, το HEC-HMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση και την εύρεση του τρόπου με τον οποίο μια λεκάνη αποκρίνεται σε ένα μεμονωμένο συμβάν βροχόπτωσης (π.χ. ποσότητα επιφανειακής απορροής, αιχμή, χρονισμός κορύφωσης συμβάντος, κράτηση) (Xuefeng et al., 2009). Επιπλέον, το HEC-HMS χρησιμοποιείται για την εύρεση χαρακτηριστικών απορροής για μοντελοποίηση υδρογράφου καταιγίδας σε λεκάνη πετρελαίου (Yusop et al., 2007), για την αξιολόγηση των υδρολογικών επιπτώσεων του έργου διαχείρισης μιας λεκάνης απορροής, όπως της λεκάνης Jafar-Abad στην επαρχία Golestan στο Ιράν (Mostafazadeh et al., 2010).

Επιπρόσθετα, είναι αξιοσημείωτο ότι υπάρχουν πολλές μελέτες στις οποίες γίνεται η σύγκριση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS με άλλα υδρολογικά μοντέλα όπως για παράδειγμα η σύγκριση με το μοντέλο πλημμύρας ReFH σε δύο κορεατικές λεκάνες απορροής (Jaewon et al., 2014). Τα αποτελέσματα από αυτήν την μελέτη απέδειξαν ότι η μοντελοποίηση του HEC-HMS είναι αποτελεσματική για τη μοντελοποίηση της μέγιστης ροής σε μεγάλη λεκάνη απορροής καθώς αποτελεί ένα ημι-κατανεμημένο μοντέλο.

Το HEC-HMS χρησιμοποιείται και από πολλές εταιρίες σε μελέτες για τον προσδιορισμό του υδατορεύματος καθώς είναι ένα ελεύθερο λογισμικό και αρκετά εύχρηστο. Η χρήση του HEC-HMS είναι συχνή και στην έρευνα και σε εκπαιδευτικά ιδρύματα της Ελλάδας όπως το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, το Πολυτεχνείο Κρήτης κ.α. Το HEC-HMS έχει χρησιμοποιηθεί σε υδρολογική προσομοίωση της διευρυμένης πειραματικής λεκάνης της Ανατολικής Αττικής, στα ρέματα Ραφήνας και Λυκορέματος (Kassela et al., 2011) από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Άλλη μια μελέτη του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου που έκανε χρήση του HEC-HMS αναφέρεται στις αλλαγές των χρήσεων γης και στην επίδρασή τους στη μέγιστη πλημμυρική παροχή (Kastridis et al., 2015). Επιπλέον, έχει χρησιμοποιηθεί από το Πολυτεχνείο Κρήτης για την ανάλυση καταιγίδας που οδήγησε σε πλημμύρα στη Δυτική Κρήτη (Sarchani et al., 2019), καθώς και σε συνδυασμό με δορυφορικά δεδομένα πολύ υψηλής ανάλυσης για την προσομοίωση ενός ακραίου πλημμυρικού γεγονότος στη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη στην Κρήτη (Vozinaki et al., 2016).

### 2.1.2 Βασικά στοιχεία και μέθοδοι του μοντέλου HEC-HMS

Τα βασικά στοιχεία που χρειάζεται να εισαχθούν στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS ώστε να λειτουργήσει είναι:

1. Το Μοντέλο Λεκάνης Απορροής (Basin Model),
2. Το Μετεωρολογικό Μοντέλο (Meteorologic Model),
3. Οι Προδιαγραφές Ελέγχου (Control Specifications),
4. Τα Δεδομένα Χρονοσειράς (Time – Series Data).

#### 2.1.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ (BASIN MODEL)

Για την ομαλή λειτουργία του μοντέλου λεκάνης απορροής χρειάζεται η εισαγωγή συγκεκριμένων δεδομένων που περιγράφονται στα επιμέρους τμήματά του (μέθοδοι μοντελοποίησης των υδρολογικών διεργασιών). Σε περιπτώσεις που είναι αδύνατο να βρεθούν όλα τα δεδομένα εισαγωγής για τη μοντελοποίηση ή σε περιπτώσεις που δεν χρειάζεται τόσο μεγάλη ακρίβεια στα δεδομένα εισόδου, το πρόγραμμα μπορεί να λειτουργήσει με κάποιες προκαθορισμένες ρυθμίσεις.


Στο μοντέλο λεκάνης απορροής εισάγονται και αρχικοποιούνται οι υδρολογικές διεργασίες της φυτοκάλυψης (canopy), της επιφανειακής αποθηκευτικότητας—(surface), του μετασχηματισμού της κατακρήμνισης σε επιφανειακή απορροή (transform), της διήθησης (loss) και της βασικής απορροής (baseflow), οι οποίες προσομοιώνονται με την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου από μια λίστα διαθέσιμων μεθόδων που παρέχει το HEC-HMS μοντέλο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι το HEC-HMS παρέχει τη δυνατότητα να μην αρχικοποιηθούν όλες οι υδρολογικές διεργασίες ή να μη συμπληρωθούν υποχρεωτικά όλα τα πεδία των μεθόδων, εφόσον δεν υπάρχουν δεδομένα παρατήρησης γι' αυτά. Μάλιστα, κάποια πεδία γίνεται να συμπληρωθούν αυτόματα με προκαθορισμένες τιμές από το μοντέλο. Έπειτα από την εισαγωγή όλων των διαθέσιμων δεδομένων, για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων, πραγματοποιείται η εκτέλεση της προσομοίωσης κάθε φορά. Παρακάτω αναλύονται οι υδρολογικές διεργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς επίσης και οι μέθοδοι που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας. Τα αναλυτικά βήματα που ακολουθήθηκαν για τη δημιουργία και το στήσιμο του μοντέλου της συγκεκριμένης εργασίας βρίσκονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

#### Φυτοκάλυψη (Canopy method)

Η φυτοκάλυψη (canopy) είναι ένα από τα συστατικά στοιχεία που μπορούν να περιληφθούν σε μια υπολεκάνη και αντιπροσωπεύει την παρουσία φυτών στο τοπίο μελέτης. Τα φυτά παρεμποδίζουν την κατείσδυση, καθώς μειώνουν την ποσότητα της βροχόπτωσης που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Το παρεμποδισμένο νερό εξατμίζεται μεταξύ των γεγονότων καταιγίδας. Επιπλέον, τα φυτά αποβάλλουν νερό κυρίως από τα φύλλα στο πλαίσιο της διαδικασίας της διαπνοής. Η εξάτμιση και η διαπνοή συχνά αναφέρεται ως εξατμισοδιαπνοή. Η επιλογή μιας μεθόδου φυτοκάλυψης είναι προαιρετική για το HEC-HMS μοντέλο, ωστόσο πρέπει να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές συνεχούς προσομοίωσης για μεγάλα χρονικά διαστήματα προσομοίωσης.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της απλής φυτοκάλυψης (simple canopy) στην οποία δίνεται μια απλή αναπαράσταση του φυτού. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή τη μέθοδο, όλα τα κατακρημνίσματα συγκρατώνται στα φύλλα μέχρι να γεμίσει η χωρητικότητα αποθήκευσης της φυτοκάλυψης. Μόλις πληρωθεί η χωρητικότητα, όλη η περαιτέρω κατακρήμνιση πέφτει στην επιφάνεια (surface), ή απευθείας στο έδαφος εάν δεν περιλαμβάνεται στο μοντέλο η μέθοδος της επιφανειακής αποθήκευσης (surface). Αρχικά, όλη η πιθανή εξατμισοδιαπνοή γίνεται από την φυτοκάλυψη μέχρι να απομακρυνθεί το νερό που αποθηκεύεται εκεί. Όταν η αποθήκευση της φυτοκάλυψης αδειάσει, μόνο τότε θα πραγματοποιηθεί εξατμοδιαπνοή και από την επιφάνεια του εδάφους και το έδαφος. Η αρχική φυτοκάλυψη (initial storage) καθορίζεται ως το ποσοστό του αποθηκευμένου νερού στη φυτοκάλυψη κατά την αρχή της προσομοίωσης. Η μέγιστη αποθηκευτικότητα (max

storage) αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να κρατιέται στα φύλλα πριν αρχίσει η πτώση του στην επιφάνεια (Εικόνα 2).

Transform	Baseflow	Options
 Subbasin	Canopy	Loss

<b>Basin Name: Basin 1</b>	
<b>Element Name: Subbasin-1</b>	
*Initial Storage (%)	<input type="text"/>
*Max Storage (MM)	<input type="text"/>
Crop Coefficient:	1.0
Evapotranspiration:	Only Dry Periods <input type="button" value="v"/>
Uptake Method:	--None-- <input type="button" value="v"/>

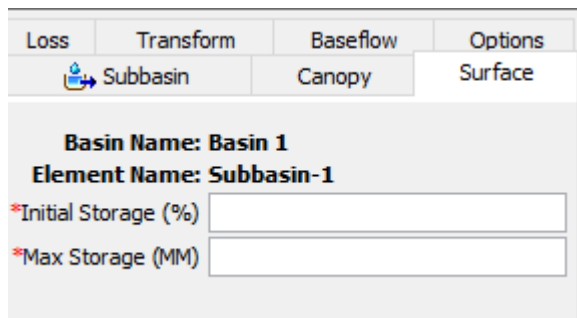
Εικόνα 2: Εισαγωγή δεδομένων στην απλή μέθοδο φυτοκάλυψης (simple canopy).


#### *Επιφανειακή αποθηκευτικότητα εδάφους (Surface method)*

Η επιφανειακή αποθηκευτικότητα εδάφους (surface) είναι ένα από τα συστατικά στοιχεία που μπορούν να συμπεριληφθούν στο μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model) του HEC-HMS και αντιπροσωπεύει τη συνολική επιφάνεια του εδάφους, στην οποία το νερό μπορεί να συσσωρευτεί και να αποθηκευτεί επιφανειακά. Για παράδειγμα, η αποθηκευτικότητα σε μια αδιαπέραστη επιφάνεια, όπως είναι ένας χώρος στάθμευσης, είναι κοντά στο μηδέν, ενώ η αποθηκευτικότητα σε ένα γεωργικό χωράφι μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη εάν χρησιμοποιούνται πρακτικές οργάνωσης. Η βροχόπτωση που αποθηκεύεται αρχικά στο κομμάτι της φυτοκάλυψης ή η άμεση βροχόπτωση (εάν δεν υπάρχει φυτοκάλυψη), καταλήγει στην επιφάνεια του εδάφους. Η βροχόπτωση αυτή συσσωρεύεται σε επιφανειακά σημεία αποθήκευσης (όπως είναι οι επιφανειακές λακκούβες του εδάφους) και έπειτα κατεισδύει σύμφωνα με την ικανότητα του εδάφους να απορροφήσει το νερό. Η επιφανειακή απορροή ξεκινάει όταν ο ρυθμός βροχόπτωσης υπερβαίνει τον ρυθμό διήθησης, ενώ η χωρητικότητα του νερού στην επιφάνεια του εδάφους έχει πληρωθεί. Το νερό που έχει αποθηκευτεί στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να κατεισδύσει, ενώ όταν η κατείσδυση σταματήσει τότε πλέον το νερό που παραμένει στην επιφάνεια του εδάφους υπόκειται σε εξατμισοδιαπνοή. Η επιλογή της μεθόδου για την επιφανειακή αποθηκευτικότητα του εδάφους είναι προαιρετική στο μοντέλο HEC-HMS και χρησιμοποιείται γενικά μόνο σε εφαρμογές συνεχούς προσομοίωσης.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η απλή μέθοδος επιφανειακής αποθηκευτικότητας (Simple surface). Σε αυτήν, όλη η βροχόπτωση ή η κατείσδυση μέχρι το φθινόπωρο, η οποία φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους, δεσμεύεται στην επιφάνεια του εδάφους έως ότου γεμίσει η χωρητικότητά της. Το αποθηκευμένο νερό στην επιφάνεια διεισδύει στο έδαφος. Δηλαδή, το νερό θα διεισδύσει ακόμη και όταν η χωρητικότητα αποθήκευσης δεν είναι πλήρης. Η επιφανειακή απορροή θα δημιουργηθεί όταν η χωρητικότητα αποθήκευσης πληρωθεί και ο ρυθμός κατείσδυσης υπερβεί τη διηθητική τιμή. Η αρχική κατάσταση της επιφάνειας (initial surface) του εδάφους προσδιορίζεται ως το ποσοστό του αποθηκευμένου νερού στην επιφάνεια στην αρχή της προσομοίωσης. Η

μέγιστη αποθηκευτικότητα της επιφάνειας (max storage) αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να διατηρείται στην επιφάνεια του εδάφους πριν αρχίσει η επιφανειακή απορροή (Εικόνα 3). Η ποσότητα αποθήκευσης ορίζεται ως ένα αποτελεσματικό βάθος νερού.



Loss	Transform	Baseflow	Options
 Subbasin	Canopy		Surface

**Basin Name: Basin 1**  
**Element Name: Subbasin-1**

\*Initial Storage (%)

\*Max Storage (MM)

Εικόνα 3: Εισαγωγή δεδομένων στην απλή μέθοδο επιφανειακής αποθηκευτικότητας (simple surface).

#### *Μέθοδος απωλειών-διήθησης (Loss method)*

Ενώ το μοντέλο λεκάνης απορροής του μοντέλου HEC-HMS περιγράφει εννοιολογικά τη διήθηση, την επιφανειακή απορροή και τις διεργασίες υπο-επιφάνειας που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, οι πραγματικοί υπολογισμοί διήθησης πραγματοποιούνται με την επιλογή μιας μεθόδου απώλειας που περιέχεται εντός της υπολεκάνης, μεταξύ δώδεκα διαφορετικών μεθόδων που είναι διαθέσιμες από το μοντέλο. Μερικές από τις μεθόδους έχουν σχεδιαστεί κυρίως για προσομοίωση μεμονωμένων συμβάντων, ενώ άλλες προορίζονται για συνεχείς προσομοιώσεις. Όλες οι μέθοδοι στηρίζονται στην αρχή διατήρησης της μάζας, δηλαδή, στο γεγονός ότι το άθροισμα της βροχόπτωσης που διηθείται και της βροχόπτωσης που παραμένει στην επιφάνεια θα είναι πάντα ίσο με το σύνολο των αρχικών κατακρημνίσεων.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος διήθησης SCS – CN (Soil Conservation Service – Curve Number), η οποία αποτελεί μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους υπολογισμού του επιφανειακού όγκου ροής σε μικρής κλίμακας λεκάνες απορροής, γεωργικών εκτάσεων, δασών και αστικών λεκανών για ένα δοθέν συμβάν κατακρήμνισης (Soulis and Valiantzas, 2012). Η SCS – CN μέθοδος εφαρμόζει τη μεθοδολογία αριθμού καμπύλης για αυξητικές απώλειες (NRCS, 2007). Η μέθοδος αυτή στο μοντέλο HEC-HMS υπολογίζει σταδιακά την κατείσδυση κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας υπολογίζοντας εκ νέου τον όγκο διείσδυσης στο τέλος κάθε χρονικού διαστήματος. Η διήθηση σε κάθε χρονικό διάστημα είναι η διαφορά όγκου στο τέλος δύο γειτονικών χρονικών διαστημάτων. Μπορεί προαιρετικά να εισαχθεί μια αρχική τιμή διαφοράς των δύο χρονικών διαστημάτων. Η αρχική τιμή διαφοράς (initial abstraction) καθορίζει το ποσό της κατείσδυσης που πρέπει να πέσει πριν ξεκινήσει η επιφανειακή απορροή. Ωστόσο, δεν είναι το ίδιο με την αρχική παρακολούθηση ή την αρχική απώλεια μιας που αλλάζοντας την αρχική αφαίρεση, αλλάζει η διηθητική απόκριση αργότερα στην καταιγίδα. Εάν αυτή η τιμή παραμείνει κενή, θα υπολογίζεται αυτόματα ως 0,2 φορές την πιθανή κατακράτηση, δηλαδή υπολογίζεται από τον αριθμό καμπύλης. Επομένως, είναι σημαντικό να γίνεται εισαγωγή του αριθμού καμπύλης (curve number) στο μοντέλο. Αυτός πρέπει να είναι ένας αριθμός σύνθετης καμπύλης που αντιπροσωπεύει όλες τις διαφορετικές ομάδες εδάφους και των συνδυασμών χρήσεων γης της περιοχής μελέτης.

Επιπλέον, πρέπει να προσδιορίζεται το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας (impervious) στην περιοχή μελέτης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο σύνθετος αριθμός καμπύλης δεν πρέπει να περιλαμβάνει καμία αδιαπέρατη περιοχή, η οποία καθορίζεται ξεχωριστά ως ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας (impervious). Κανένας υπολογισμός απώλειας δεν πραγματοποιείται σε αδιαπέρατες περιοχές, καθώς όλη η βροχόπτωση που πέφτει σε αδιαπέρατο τμήμα της υπολεκάνης καθίσταται υπερβολική βροχόπτωση και υπόκειται σε άμεση απορροή (Εικόνα 4).

Εικόνα 4: Εισαγωγή δεδομένων στην SCS Curve Number μέθοδο απώλειας.

#### *Παράμετρος Curve Number κατά τη μελέτη των αλλαγών χρήσης γης*

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάστηκε η επίδραση της μεταβολής των χρήσεων γης και κυρίως της αστικοποίησης της περιοχής στα αποτελέσματα του υδρολογικού μοντέλου. Για το λόγο αυτό μελετήθηκε εκτενέστερα και χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένα η παράμετρος Curve Number του μοντέλου, της μεθόδου διήθησης SCS – CN.

Γενικά, ο CN εκτιμά την περίσσεια υετού ως συνάρτηση της αθροιστικής βροχόπτωσης, της κάλυψης εδάφους, της χρήσης γης και της προηγούμενης υγρασίας, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη Εξίσωση 1:

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia) + S} \quad \text{Εξ. 1}$$

Όπου:

$Pe$ : η συσσωρευμένη περίσσεια βροχόπτωσης σε χρόνο  $t$

$P$ : το συσσωρευμένο βάθος βροχόπτωσης σε χρόνο  $t$

$Ia$ : η αρχική απώλεια

$S$ : η πιθανή μέγιστη κατακράτηση, ένα μέτρο της ικανότητας της λεκάνης απορροής να αφαιρεί και να διατηρεί τη βροχόπτωση.

Έως ότου οι συσσωρευμένες βροχοπτώσεις υπερβούν την αρχική αφαίρεση, η περίσσεια βροχόπτωσης, και συνεπώς η απορροή, θα είναι μηδέν.

Μετά από την ανάλυση των αποτελεσμάτων σε πολλές μικρές πειραματικές λεκάνες απορροής, το SCS ανέπτυξε μια εμπειρική σχέση μεταξύ των  $Ia$  και  $S$ :

$$Ia = 0.2 \cdot S \quad \text{Εξ. 2}$$

Επομένως, η σωρευτική περίσσεια στο χρόνο  $t$  είναι:

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8 \cdot S} \quad \text{Εξ. 3}$$

Το στοιχειώδες πλεόνασμα για ένα χρονικό διάστημα υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της συσσωρευμένης περίσσειας στο τέλος και την αρχή της περιόδου. Η μέγιστη κατακράτηση,  $S$ , και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής σχετίζονται με μια ενδιάμεση παράμετρο, τον αριθμό καμπύλης (συνήθως συντομευμένο CN) ως:

$$S = \left( \frac{1000}{CN} \right) - 10 \quad \text{Εξ. 4}$$

Οι τιμές του CN κυμαίνονται από 100 (για υδάτινα σώματα) έως περίπου 30 για διαπερατά εδάφη με υψηλούς ρυθμούς διήθησης. Δημοσιεύσεις από την Υπηρεσία Διατήρησης Εδάφους (1971, 1986) παρέχουν περαιτέρω υπόβαθρο και λεπτομέρειες σχετικά με τη χρήση του μοντέλου CN.

Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας, χρειάστηκε να υπολογιστεί ο σταθμισμένος μέσος όρος των αριθμών CN κάθε έτους μελέτης, σύμφωνα με το ποσοστό που κατέχει κάθε μεμονωμένο είδος χρήσης γης στη λεκάνη απορροής. Επομένως, για κάθε έτος, υπολογίστηκε το ποσοστό κάθε μεμονωμένης χρήσης γης στο σύνολο της επιφάνειας της λεκάνης μελέτης, το οποίο πολλαπλασιάστηκε με τον αντίστοιχο CN του από τον πίνακα του National Resources Conservation Service (NRCS, 2019) και στη συνέχεια με χρήση του σταθμισμένου μέσου όρου προέκυψε ένας τελικός αριθμός CN για κάθε έτος μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω Εξίσωση 5 για τον σταθμισμένο μέσο όρο CN κάθε έτους μελέτης:

$$CN = \sum_{i=1}^n CN_i \cdot Landuse_i \quad \text{Εξ. 5}$$

Όπου:

$CN$ : ο τελικός CN του έτους μελέτης

$CN_i$ : η τιμή του CN για κάθε μεμονωμένη χρήση γης,  $i$

$Landuse_i$ : το ποσοστό της επιφάνειας που καταλαμβάνει η συγκεκριμένη χρήση γης,  $i$ , στο σύνολο της επιφάνειας της λεκάνης μελέτης

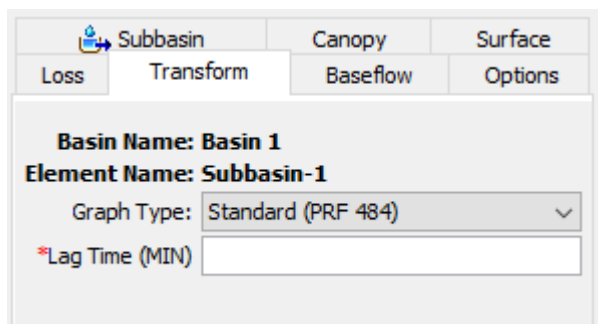
$n$ : το συνολικό πλήθος των διάφορων χρήσεων γης που συναντώνται στην περιοχή μελέτης το έτος μελέτης



### *Μέθοδος μετασχηματισμού κατακρήμνισης σε επιφανειακή απορροή (Transform method)*

Κατά τη μέθοδο αυτή πραγματοποιούνται όλοι οι υπολογισμοί της επιφανειακής απορροής. Το μοντέλο HEC-HMS διαθέτει οκτώ μεθόδους μετασχηματισμού. Οι επιλογές περιλαμβάνουν μεθόδους μοναδιαίου υδρογραφήματος, κινηματικού κύματος και γραμμικά κατανεμημένες μεθόδους κ.α.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μετασχηματισμού SCS μοναδιαίου υδρογραφήματος (SCS Unit hydrograph). Η μέθοδος SCS Unit hydrograph ορίζει ένα καμπυλόγραμμα μοναδιαίο υδρογράφημα καθορίζοντας πρώτα το ποσοστό της μοναδιαίας απορροής που συμβαίνει πριν από τη μέγιστη ροή (NRCS, 2007). Το ποσοστό της μοναδιαίας απορροής που συμβαίνει πριν από τη μέγιστη ροή δεν είναι ομοιόμορφο σε όλες τις λεκάνες απορροής επειδή εξαρτάται από το μήκος ροής, την πλαγιά εδάφους και άλλες ιδιότητες της λεκάνης απορροής. Αλλάζοντας το ποσοστό της μοναδιαίας απορροής πριν από την κορυφή, μπορούν να υπολογιστούν εναλλακτικά μοναδιαία υδρογραφήματα για λεκάνες απορροής με διαφορετική τοπογραφία και άλλες συνθήκες που επηρεάζουν την απορροή. Ο χρόνος υστέρησης της λεκάνης (lag time) ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που χρειάζεται το κέντρο βάρους του ωφέλιμου υετογραφήματος έως το χρόνο εμφάνισης της πλημμυρικής αιχμής/μέγιστης παροχής (Εικόνα 5).



The image shows a software window with several tabs: 'Subbasin', 'Canopy', 'Surface', 'Loss', 'Transform', 'Baseflow', and 'Options'. The 'Transform' tab is selected. Inside this tab, the 'Basin Name' is 'Basin 1' and the 'Element Name' is 'Subbasin-1'. Below these, there is a 'Graph Type' dropdown menu set to 'Standard (PRF 484)'. At the bottom, there is a text input field for '\*Lag Time (MIN)' which is currently empty. A red asterisk is next to the label.

Εικόνα 5: Εισαγωγή δεδομένων στη SCS Unit hydrograph μέθοδο μετασχηματισμού.

### *Μέθοδος βασικής ροής (Baseflow method)*

Το HEC-HMS μοντέλο παρέχει συνολικά έξι διαφορετικές μεθόδους για την προσομοίωσή της βασικής ροής σε μια υπολεκάνη. Ορισμένες από τις μεθόδους αυτές έχουν σχεδιαστεί κυρίως για προσομοίωση συμβάντων, ενώ άλλες προορίζονται για συνεχείς προσομοιώσεις. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ύφεσης (recession), η οποία έχει σχεδιαστεί για να προσεγγίζει την τυπική συμπεριφορά που παρατηρείται στις λεκάνες απορροής όταν η ροή των καναλιών υποχωρεί εκθετικά μετά από ένα συμβάν. Αυτή η μέθοδος προορίζεται κυρίως για την προσομοίωση μεμονωμένων συμβάντων. Ωστόσο, έχει τη δυνατότητα να κάνει αυτόματα επαναφορά μετά από κάθε συμβάν καταιγίδας και κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για συνεχή προσομοίωση. Η μέθοδος αυτή δεν στηρίζεται στην αρχή διατήρησης της μάζας εντός της υπολεκάνης, επομένως κάθε φορά πρέπει να καθορίζεται η αρχική βασική ροή στην αρχή μιας προσομοίωσης. Υπάρχουν δύο μέθοδοι για τον καθορισμό της αρχικής κατάστασης: η



αρχική εκφόρτιση και αρχική εκφόρτιση ανά περιοχή. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της βασικής εκφόρτισης (initial discharge). Χρησιμοποιώντας αυτή την μέθοδο, πρέπει να καθοριστεί η αρχική βασική ροή ως εκφόρτιση με μονάδες όγκου ανά ώρα. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα καλή όταν παρατηρούνται δεδομένα ροής στην έξοδο της υποπεριοχής για τον προσδιορισμό της αρχικής ροής στο κανάλι. Η σταθερά ύφεσης (recession constant) περιγράφει το ρυθμό με τον οποίο υποχωρεί η βασική ροή μεταξύ γεγονότων καταιγίδας (Εικόνα 6).

The image shows a software window for configuring a subbasin. At the top, there are tabs: 'Subbasin' (selected), 'Canopy', 'Surface', 'Loss', 'Transform', 'Baseflow', and 'Options'. Below the tabs, the 'Basin Name' is 'Basin 1' and the 'Element Name' is 'Subbasin-1'. There are four input fields: 'Initial Type' (a dropdown menu set to 'Discharge'), '\*Initial Discharge (M3/S)' (an empty text box), '\*Recession Constant' (an empty text box), and 'Threshold Type' (a dropdown menu set to 'Ratio To Peak'). Below this is another field '\*Ratio' (an empty text box).

Εικόνα 6: Εισαγωγή δεδομένων για τη μέθοδο ύφεσης.

### Επιπρόσθετα στοιχεία Μοντέλου Λεκάνης Απορροής

Ένας χρήστης του μοντέλου HEC-HMS, έχει τη δυνατότητα να προσθέσει κάποιο στοιχείο ποταμού (reach element) στο μοντέλο μελέτης του, πράγμα το οποίο πραγματοποιήθηκε και στο πλαίσιο της εργασίας αυτής.

### Στοιχεία ποταμού (Reach Elements)

Το στοιχείο αυτό είναι ένα στοιχείο με μία ή περισσότερες εισροές και μόνο μία εκροή. Η εισροή προέρχεται από άλλα στοιχεία του μοντέλου της λεκάνης απορροής. Εάν υπάρχουν περισσότερες από μία εισροή, όλη η εισροή προστίθεται μαζί πριν από τον υπολογισμό της εκροής. Η εκροή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μια από τις διαθέσιμες μεθόδους προσομοίωσης ροής ανοιχτού καναλιού. Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση ποταμών και ρευμάτων.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη διόδευση της ροής στο κομμάτι του ποταμού (reach) στο πλαίσιο αυτής της εργασίας είναι η μέθοδος Muskingum, η οποία αποτελεί ένα μοντέλο δρομολόγησης υδρολογικής ροής με στρογγυλοποιημένες παραμέτρους, οι οποίες περιγράφουν τον μετασχηματισμό των κυμάτων εκροής σε μια κοίτη του ποταμού χρησιμοποιώντας δύο εξισώσεις. Η πρώτη είναι η εξίσωση συνέχειας (διατήρηση της μάζας) και η δεύτερη εξίσωση είναι η σχέση μεταξύ της αποθήκευσης, της εισροής και της εκροής (η εξίσωση της αποθήκευσης εκφόρτισης). Αυτές οι εξισώσεις εφαρμόζονται στα πλαίσια ενός ποταμού μεταξύ δύο διατομών του. Οι παράμετροι του μοντέλου μπορούν να εκτιμηθούν με διάφορες μεθόδους. Οι πιο σημαντικές παράμετροι στη μέθοδο αυτή είναι η παράμετρος *Muskingum K*, δηλαδή ο χρόνος όδευσης του νερού μέσα στο ποτάμι. Το *K*

μπορεί να εκτιμηθεί από τη γνώση των ιδιοτήτων διατομής και ροής. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι παράμετρος βαθμονόμησης. Επιπρόσθετη παράμετρος του μοντέλου είναι η παράμετρος *Muskingum X*, δηλαδή η στάθμιση επιρροής μεταξύ εισροής και εκροής. Η παράμετρος αυτή κυμαίνεται από 0.0 έως 0.5. Πρακτικά, η τιμή 0,0 αναφέρεται σε μέγιστη εξασθένηση της ροής και η τιμή 0.5 έχει αποτέλεσμα μηδενική εξασθένηση. Οι περισσότερες προσεγγίσεις ροής απαιτούν μια ενδιάμεση τιμή βαθμονόμησης. Στη συγκεκριμένη μέθοδο πρέπει να γίνει εισαγωγή του αριθμού των δευτερευόντων κλάδων (*Subreaches*) οι οποίοι επηρεάζουν την εξασθένηση της ροής (Εικόνα 7). Ένας δευτερεύων κλάδος οδηγεί σε μεγαλύτερη εξασθένηση της ροής. Μεγαλύτερος αριθμός κλάδων αυξάνει την εξασθένηση. Μια αρχική εκτίμηση αυτής της παραμέτρου μπορεί να ληφθεί διαιρώντας το πραγματικό μήκος του ποταμού με την κυματικότητα και το χρονικό βήματος προσομοίωσης. Για φυσικά κανάλια που διαφέρουν σε διαστάσεις διατομής, κλίση και αποθήκευση, ο αριθμός των δευτερευόντων κλάδων μπορεί να αντιμετωπιστεί ως παράμετρος βαθμονόμησης. Ο αριθμός των δευτερευόντων κλάδων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή αριθμητικής εξασθένησης η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καλύτερη αναπαράσταση της κίνησης πλημμυρικών κυμάτων μέσω του φυσικού συστήματος.

Εικόνα 7: Εισαγωγή δεδομένων για τη μέθοδο Muskingum.

Επιπλέον, η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη διόδευση της ροής στο πλαίσιο αυτής της εργασίας είναι η μέθοδος Muskingum, η οποία αποτελεί ένα μοντέλο δρομολόγησης υδρολογικής ροής με στρογγυλοποιημένες παραμέτρους,

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τις απώλειες από το τμήμα του ποταμού (reach) στο πλαίσιο αυτής της εργασίας είναι η μέθοδος σταθερής απώλειας (Constant Loss/Gain method). Η μέθοδος σταθερής απώλειας χρησιμοποιεί μια εμπειρική σχέση για να υπολογίσει την απώλεια στο κανάλι μειώνοντας σταθερά το ρυθμό ροής και ορίζοντας μια αναλογία ροής. Έτσι, ένας σταθερός ρυθμός ροής (flow rate) αφαιρείται από τη δρομολογημένη ροή και στη συνέχεια το υπόλοιπο πολλαπλασιάζεται με την αναλογία ροής (fraction) (Εικόνα 8). Η μειωμένη ροή γίνεται η εκροή προς προσέγγιση. Αυτή η μέθοδος είναι συμβατή με όλες τις μεθόδους διαδρομής.

Εικόνα 8: Εισαγωγή δεδομένων για τη μέθοδο σταθερής απώλειας.

#### 2.1.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (METEOROLOGIC MODEL)

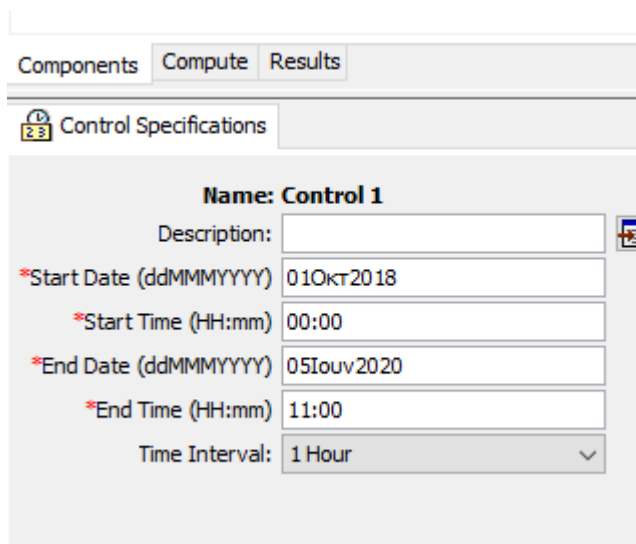
Το μετεωρολογικό μοντέλο είναι ένα από τα κύρια συστατικά μιας εφαρμογής στο HEC-HMS μοντέλο (Εικόνα 9). Ο βασικός σκοπός του είναι να προετοιμάσει τις μετεωρολογικές οριακές συνθήκες (ηλιακή ακτινοβολία, κατακρήμνιση, εξατμισοδιαπνοή, χιόνι) για τις υπολεκάνες μελέτης. Κατά συνέπεια, πρέπει να δημιουργηθεί τουλάχιστον ένα μοντέλο λεκάνης (basin model) πριν από τη δημιουργία ενός μετεωρολογικού μοντέλου. Ένα μετεωρολογικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλά διαφορετικά μοντέλα λεκανών. Ωστόσο, τα αποτελέσματα υπολογίζονται από το μετεωρολογικό μοντέλο που θα αντιστοιχιστεί στις υπολεκάνες των μοντέλων λεκάνης χρησιμοποιώντας το όνομα της εν λόγω λεκάνης. Αν οι υπολεκάνες σε διαφορετικά μοντέλα λεκανών έχουν το ίδιο όνομα και οι δύο θα λαμβάνουν τις ίδιες οριακές συνθήκες από το ίδιο μετεωρολογικό μοντέλο (Εικόνα 9). Απαιτείται επομένως η προσεκτική ονομασία των υπολεκανών έτσι ώστε να υπολογίζονται σωστά οι ορθές οριακές συνθήκες για κάθε μία υπολεκάνη. Στο μετεωρολογικό μοντέλο εισάγεται όλη η διαθέσιμη πληροφορία κατακρήμνισης, εξατμισοδιαπνοής της περιοχής μελέτης.

Basin Model	Include Subbasins
Stalos Basin	Yes

Εικόνα 9: Εισαγωγή δεδομένων στο μετεωρολογικό μοντέλο.

### 2.1.2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL SPECIFICATIONS)

Οι προδιαγραφές ελέγχου είναι ένα από τα κύρια συστατικά μιας εφαρμογής στο HEC-HMS, παρόλο που δεν περιέχουν πολλά δεδομένα παραμέτρων. Ο αρχικός σκοπός τους είναι να ελέγχουν την εκκίνηση και το πέρας των προσομοιώσεων, καθώς και το συνολικό χρονικό διάστημα προσομοίωσης (Εικόνα 10).



Control Specifications	
<b>Name: Control 1</b>	
Description:	
*Start Date (ddMMYYYY)	01Οκτ2018
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMYYYY)	05Ιουν2020
*End Time (HH:mm)	11:00
Time Interval:	1 Hour

Εικόνα 10: Εισαγωγή δεδομένων, ημερομηνίας και ώρας για τις προδιαγραφές ελέγχου.

### 2.1.2.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ (TIME-SERIES DATA)

Τα υδρολογικά μοντέλα γενικά χρησιμοποιούν χρονοσειρές δεδομένων εισόδου όπως χρονοσειρές υετού ή απορροής ή στάθμης νερού ή θερμοκρασίας, ή ακτινοβολίας ή ταχύτητας ανέμου ή υγρασίας ή εξατμισοδιαπνοής κ.α. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν συνήθως δεδομένα παρατήρησης στο πεδίο και προέρχονται κυρίως από εγκατεστημένους σταθμούς παρατήρησης στην εκάστοτε περιοχή μελέτης ή δορυφόρους. Τα δεδομένα αυτά είναι χρήσιμα για τη βαθμονόμηση του μοντέλου ή/και την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Στο HEC-HMS, τα δεδομένα χρονοσειρών μπορούν να εισαχθούν χειροκίνητα (manual entry) (Εικόνα 11) ή να εισαχθούν μέσα από ήδη υπάρχοντα HEC-DSS αρχεία βάσεων δεδομένων της HEC. Στην πρώτη περίπτωση, ο χρήστης πρέπει να δίνει τη μονάδα μέτρησης (units) του μεγέθους της χρονοσειράς και το χρονικό διάστημα μετρήσεων (time interval)

Εικόνα 11: Εισαγωγή δεδομένων χρονοσειράς.

#### 2.1.2.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HEC-HMS – ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ NASH SUTCLIFFE

Στα αποτελέσματα του μοντέλου στην επιλογή του συνοπτικού πίνακα υπάρχει η ένδειξη του συντελεστής απόδοσης μοντέλου Nash-Sutcliffe. Ο συντελεστής χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των υδρολογικών μοντέλων. Ορίζεται από την Εξίσωση 6:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \quad \text{Εξ. 6}$$

Όπου:

$Q_m^t$ : η μετρημένη απορροή

$Q_0^t$ : η εκτιμώμενη απορροή από το μοντέλο

$\bar{Q}_0$ : η μέση τιμή της μετρημένης απορροής

T: το πλήθος των παρατηρήσεων

Η απόδοση Nash-Sutcliffe υπολογίζεται ως ένα μείον το λόγο της διακύμανσης σφάλματος της πρότυπης χρονοσειράς διαιρούμενης με τη διακύμανση της παρατηρούμενης χρονοσειράς. Στην περίπτωση ενός τέλει μοντέλου με διακύμανση σφάλματος εκτίμησης ίση με μηδέν, η προκύπτουσα απόδοση Nash-Sutcliffe ισούται με 1 ( $NSE = 1$ ). Αντίθετα, ένα μοντέλο που παράγει μια διακύμανση σφάλματος εκτίμησης ίση με τη διακύμανση της παρατηρούμενης χρονοσειράς έχει ως αποτέλεσμα απόδοση Nash-Sutcliffe 0,0 ( $NSE = 0$ ). Στην πραγματικότητα, όταν  $NSE = 0$ , τότε το μοντέλο έχει την ίδια ικανότητα πρόβλεψης με το μέσο όρο της χρονολογικής σειράς από την άποψη του αθροίσματος του τετραγωνικού σφάλματος. Στην περίπτωση μιας πρότυπης χρονοσειράς με διακύμανση σφάλματος εκτίμησης που είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη διακύμανση των παρατηρήσεων, το NSE γίνεται αρνητικό. Μια απόδοση μικρότερη από το μηδέν ( $NSE < 0$ ) συμβαίνει όταν η παρατηρούμενη μέση τιμή είναι καλύτερος δείκτης πρόβλεψης από το μοντέλο. Οι τιμές του NSE πιο κοντά στο 1, προτείνουν ένα μοντέλο με πιο καλή προγνωστική ικανότητα. Αρνητική τιμή του συντελεστή NSE σημαίνει ότι το μοντέλο συμπεριφέρεται χειρότερα από την απλή θεώρηση της μέσης τιμής της μετρημένης απορροής και το μοντέλο δεν είναι αποδεκτό. Αντίθετα, καλή προσαρμογή του μοντέλου σημαίνει υψηλή τιμή του συντελεστή

προσδιορισμού που τείνει στη μονάδα. Γενικά, το όριο για να θεωρηθεί ικανοποιητική η προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα παρατήρησης είναι κοντά στο 0.7 ή 0.8.

## 2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS – GIS)

Σε κάθε υδρολογική μελέτη είναι απαραίτητη η χωρική αποτύπωση της λεκάνης απορροής, του ποταμού μελέτης, των χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης κ.α. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information Systems – GIS), τα οποία είναι ολοκληρωμένα συστήματα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απόδοσης πληροφορίας, σχετικής με φαινόμενα που εξελίσσονται στο χώρο (Goodchild, 1985). Τα γεωγραφικά δεδομένα μπορούν να χαρτογραφηθούν και να εντοπιστούν στο χώρο και να παρέχουν χωρική και περιγραφική πληροφορία. Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε χρήση του ArcGIS Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών, το οποίο είναι εργαλείο που χρησιμοποιείται σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους και έχει τη δυνατότητα να ενσωματώνει και να συνδέει τα χωρικά με τα περιγραφικά δεδομένα, κάτι το οποίο συμβάλλει στην υλοποίηση μιας ολοκληρωμένης χωρικής ανάλυσης. Το ArcGIS επιτρέπει στους χρήστες να αποτυπώσουν το πραγματικό κόσμο, να αναλύσουν τα χωρικά δεδομένα (spatial data), να τα προσαρμόσουν και να τα αποδώσουν χαρτογραφικά.

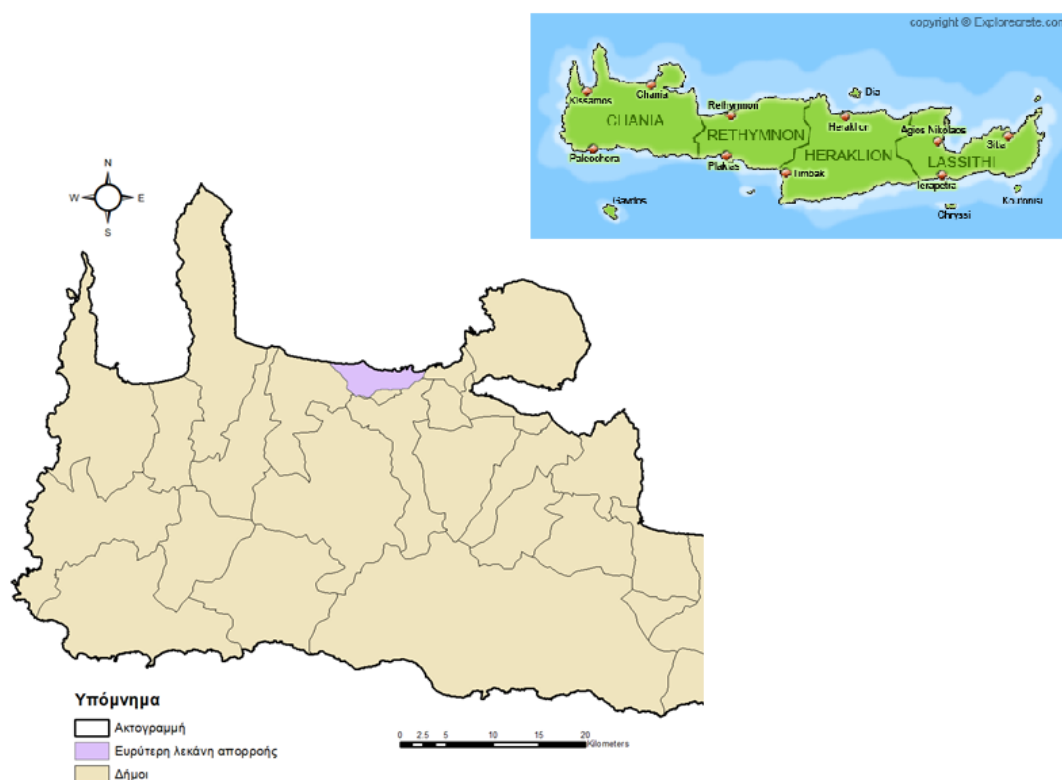
Η σύνδεση του ArcGIS με το HEC-HMS είναι άμεση. Η ισχύς και η ταχύτητα του προγράμματος HEC-HMS καθιστούν δυνατή την αναπαράσταση λεκανών απορροής με εκατοντάδες υδρολογικά στοιχεία. Υπό άλλες συνθήκες αυτά τα στοιχεία θα προσδιοριστούν με επιθεώρηση τοπογραφικού χάρτη και μη αυτόματη αναγνώριση ορίων αποστράγγισης, πράγμα αρκετά χρονοβόρο. Γι' αυτό ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) μπορεί να χρησιμοποιήσει δεδομένα υψόμετρου και γεωμετρικούς αλγόριθμους για την εκτέλεση του ίδιου έργου πολύ πιο γρήγορα. Ένα συνοδευτικό προϊόν GIS αναπτύχθηκε για να βοηθήσει στη δημιουργία μοντέλων λεκάνης για τέτοια έργα, το οποίο ονομάζεται Geospatial Hydrologic Modeling Extension (HEC-GeoHMS) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία λεκανών απορροής και μετεωρολογικών μοντέλων. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει ένα DEM (Digital elevation model) ώστε με την εισαγωγή του στο ArcGIS να εξαχθεί η υδρολογική λεκάνη μελέτης και το ποτάμι μελέτης.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το συνοδευτικό αυτό εργαλείο, HEC-GeoHMS, ώστε να προσδιοριστεί η περιοχή μελέτης της εργασίας αυτής, να αποτυπωθεί η λεκάνη απορροής που μελετήθηκε και να εξαχθεί το ποτάμι μελέτης (Κεφάλαιο 3).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

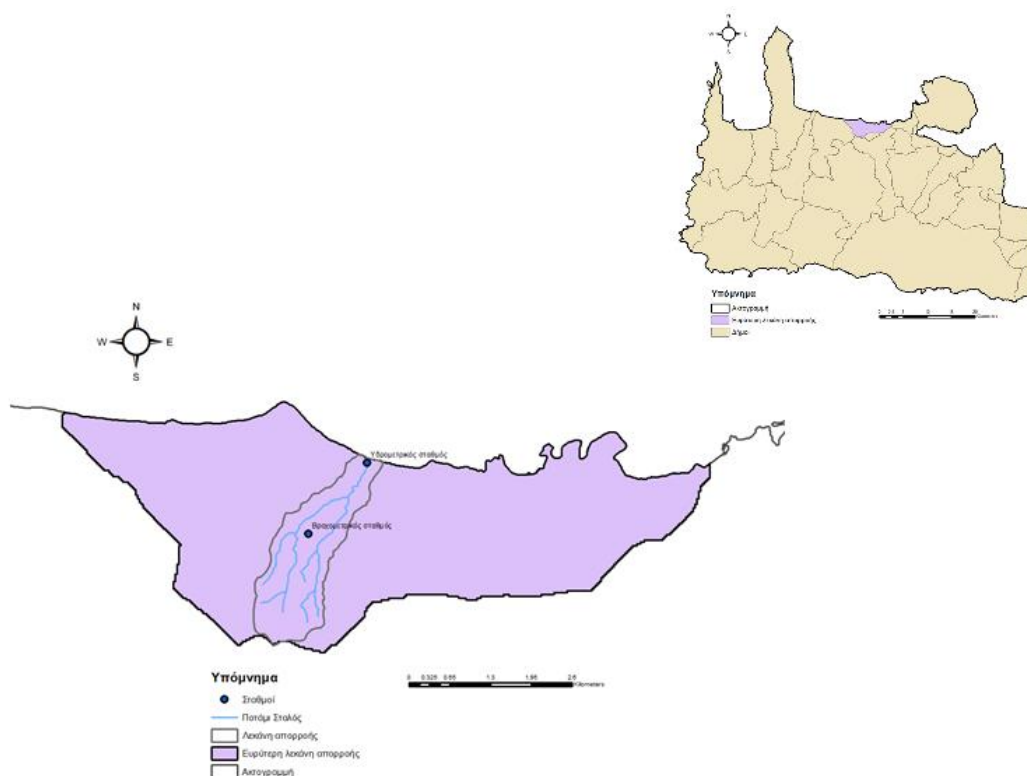
### 3.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η λεκάνη απορροής του Σταλού, 6 χιλιόμετρα δυτικά της πόλης των Χανίων, στην βόρεια ακτή της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων, στα δυτικά της Περιφέρειας Κρήτης. Με την χρήση του προγράμματος ArcGIS 10.5 απεικονίστηκε η λεκάνη απορροής σε shapefile αρχείο (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Απεικόνιση της υδρολογικής λεκάνης απορροής του Σταλού της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων.

Η ευρύτερη περιοχή του Σταλού χωρίζεται στον Άνω Σταλό και στον Κάτω Σταλό και σύμφωνα με τα τελευταία δημογραφικά στοιχεία του 2011 ο πληθυσμός ανέρχεται σε 868 κατοίκους. Στη λεκάνη απορροής του Σταλού διαρρέει το ομώνυμο ποτάμι του Σταλού (Εικόνα 13).

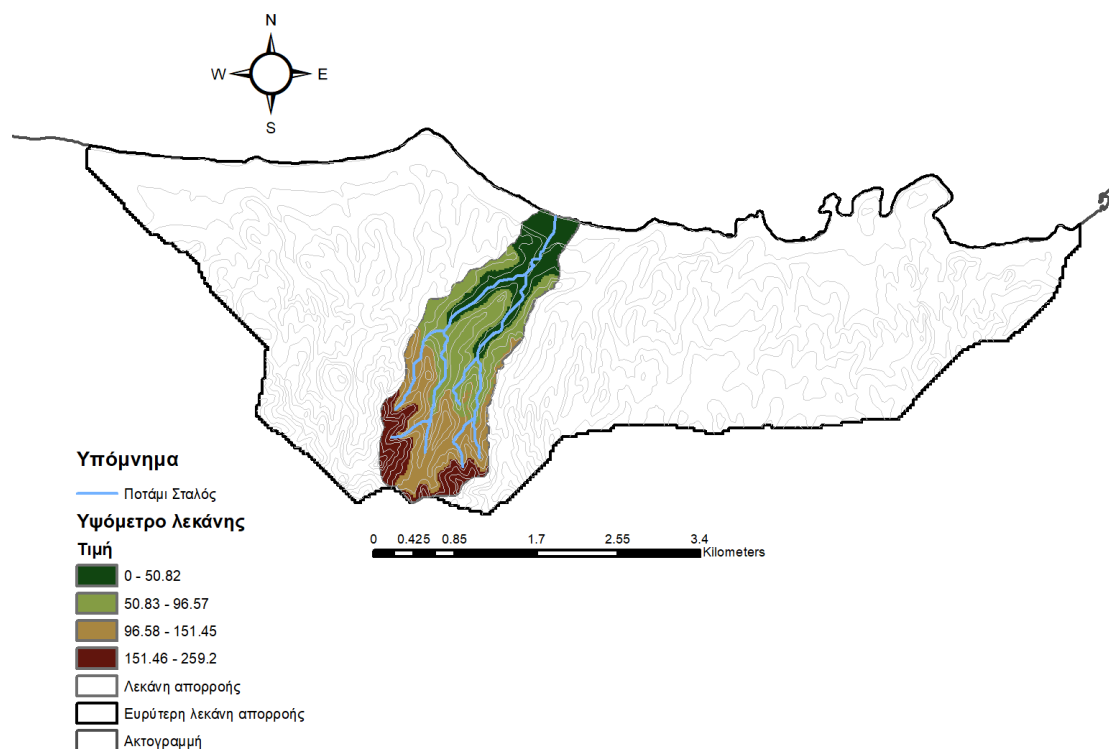


Εικόνα 13: Απεικόνιση του ρέματος Σταλού και της ομώνυμης υδρολογικής λεκάνης απορροής.

Η ευρύτερη λεκάνη απορροής καταλαμβάνει έκταση 21.9 τετραγωνικά χιλιόμετρα, με περίμετρο 31.9 χιλιόμετρα, κι εκτείνεται σε κατεύθυνση Βορρά – Νότου από τα βόρεια παράλια του Νομού Χανίων, στον Κάτω Σταλό, έως τα νότια όρια του Άνω Σταλού, ενώ σε κατεύθυνση Δύση – Ανατολή από τον Πλατανιά έως το ρέμα του Κλαδισού. Η επιμέρους λεκάνη απορροής, που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, καταλαμβάνει έκταση 2.9 τετραγωνικά χιλιόμετρα και αποτελεί τμήμα της ευρύτερης λεκάνης απορροής.


Το τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής ποικίλει, με το μέσο υψόμετρο της περιοχής μελέτης να εκτιμάται στα 80 μέτρα, ενώ το μέγιστο υψόμετρο να φτάνει τα 265 μέτρα στα νότια της λεκάνης απορροής, και το ελάχιστο να βρίσκεται στα Βόρεια της περιοχής μελέτης, με υψόμετρο 0 μέτρα, στα παράλια του Κάτω Σταλού, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 14.





Εικόνα 14: Υψόμετρο στη λεκάνη απορροής του Σταλού.

Λόγω της αυξημένης τουριστικής ανάπτυξης στην περιοχή μελέτης, η μεγαλύτερη επιφάνεια της παραλιακής ζώνης της περιοχής καλύπτεται από τουριστικά καταλύματα, εστιατόρια, θέρετρα και γενικότερα τουριστικής φύσεως επιχειρήσεις. Η αυξημένη αυτή κάλυψη του εδάφους από κτίσματα αυξάνει και τα επίπεδα απορροής στην περιοχή ειδικότερα τους χειμερινούς μήνες, όπου παρατηρούνται έντονα και ξαφνικά καιρικά και πλημμυρικά φαινόμενα. Κατά το πέρασμα των ετών έχουν καταγραφεί αρκετές ιστορικές πλημμύρες στην περιοχή με τα πιο πρόσφατα γεγονότα να είναι η κακοκαιρία του 2015, όπου υλικές καταστροφές συνέβησαν στον Σταλό και στην Αγία Μαρίνα. Σύμφωνα με δεδομένα που συλλέχθηκαν από αυτή την ιστορική πλημμύρα, αμέτρητα σπίτια και επιχειρήσεις πλημμύρισαν, ενώ σοβαρές ζημιές προκλήθηκαν στο οδικό δίκτυο και το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Επιπλέον, η κακοκαιρία «Δαίδαλος» το 2017 (Εικόνα 15α) επέφερε σημαντικές πλημμύρες και κατολισθήσεις στο βόρειο παραλιακό μέτωπο και στο επαρχιακό και οδικό δίκτυο του Σταλού, ενώ στην κακοκαιρία «Ηφαιστίων» το 2020 (Εικόνες 15β και γ) σημειώθηκαν πλημμύρες σε όλο το παραλιακό οδικό δίκτυο του Σταλού.

		
<p>α. Καταστροφή οδικού δικτύου από την κακοκαιρία «Δαίδαλος» το 2017 στον Σταλό.</p>	<p>β. Πλημμύρα στο παραλιακό κομμάτι Σταλού-Αγίας Μαρίνας από την κακοκαιρία «Ηφαιστίων» το 2020.</p>	<p>γ. Πλημμύρα στο παραλιακό οδικό δίκτυο Σταλού-Αγίας Μαρίνας από την κακοκαιρία «Ηφαιστίων» το 2020.</p>

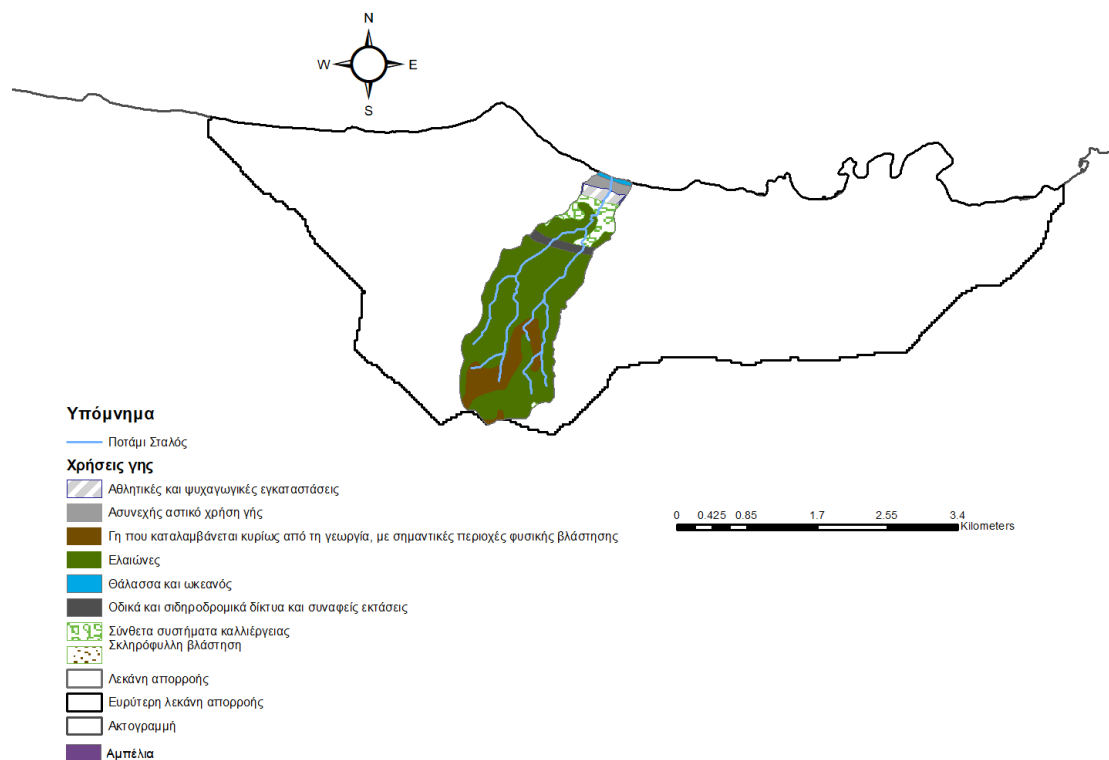
Εικόνα 15: Καταστροφικές πλημμύρες στην περιοχή μελέτης του Σταλού, (Flashnews).

### 3.1.1 Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης

Οι κυριότερες χρήσεις γης της περιοχής μελέτης του Σταλού είναι:

1. Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας
2. Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με ιδιόκτητες γεωργικές εκτάσεις
3. Σκληροφυλλική βλάστηση

Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιοποίηση των χρήσεων γης της περιοχής μελέτης στη συγκεκριμένη εργασία, είναι το πρόγραμμα παρακολούθησης της γης Copernicus, ένα πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης που συντονίζεται και διαχειρίζεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή σε συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (European Space Agency (ESA)), τα κράτη μέλη της ΕΕ και τους οργανισμούς της ΕΕ. Σύμφωνα με τα στοιχεία του Copernicus, προέκυψε ο χάρτης χρήσεων γης της περιοχής μελέτης (Εικόνα 16), όπου για το έτος 2018 καταγράφονται εκτάσεις γεωργικές με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης, ελαιώνες, σύνθετα συστήματα καλλιέργειας, σκληροφυλλική βλάστηση, καθώς επίσης και αστική περιοχή (αθλητικές εγκαταστάσεις, αστική χρήση γης, δρόμοι κ.α.).



Εικόνα 16: Η κατανομή των χρήσεων γης της λεκάνης απορροής για το 2018-2020.

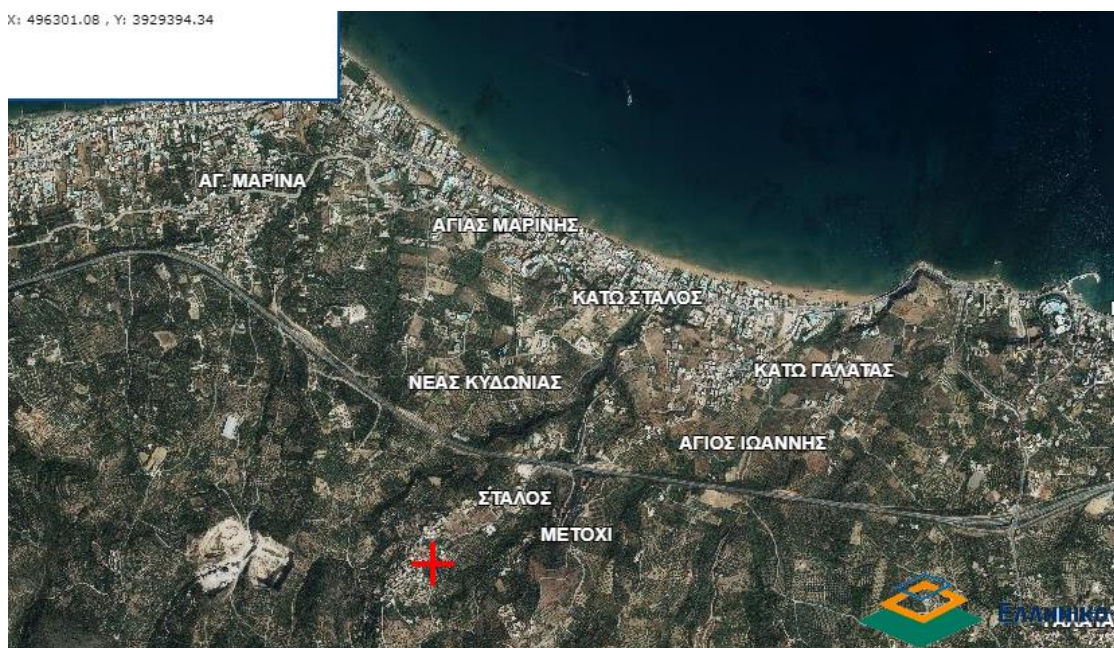
Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, και για την καλύτερη διερεύνηση της κατάστασης στην έντονα αστικοποιημένη ζώνη της περιοχής μελέτης και των αλλαγών που έχουν υποστεί οι χρήσεις γης κατά τις τελευταίες δεκαετίες, συλλέχθηκαν επιπλέον πληροφορίες από τους κάτοικους της περιοχής του Σταλού. Οι κάτοικοι διαβεβαίωσαν ότι η ευρύτερη περιοχή του Σταλού έχει αστικοποιηθεί έντονα κατά τα τελευταία έτη. Τόνισαν, ότι τους καλοκαιρινούς μήνες, υπάρχει έντονη τουριστική δραστηριότητα με πλήθος τουριστών να συρρέουν στα τουριστικά καταλύματα της περιοχής στις ψυχαγωγικές δραστηριότητες και στα καταστήματα εστίασης που βρίσκονται εκεί. Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο, σύμφωνα με τις μαρτυρίες των κατοίκων, είναι ο ανεπαρκής σχεδιασμός του συστήματος όμβριων υδάτων στην περιοχή μελέτης, όπου προκαλεί σημαντικά προβλήματα ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες, κατά τη διάρκεια των έντονων καιρικών και πλημμυρικών φαινομένων. Οι κάτοικοι σημειώνουν ότι ο συνδυασμός της έντονης αστικοποίησης στην περιοχή και του ανεπαρκούς συστήματος όμβριων υδάτων, οδηγεί σε σφοδρές πλημμύρες και σε σημαντικές υλικές καταστροφές, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της κατακρήμνισης συνήθως μετατρέπεται σε έντονη επιφανειακή απορροή, στο οδικό δίκτυο της παράκτιας ζώνης, μην έχοντας άλλο τρόπο διαφυγής, παρασέρνοντας φερτά υλικά και κατακλύζοντας υπόγεια και επιφάνειες που βρίσκονται παραλιακά, σε χαμηλά υψόμετρα της περιοχής μελέτης.

Οι μαρτυρίες των κατοίκων έδωσαν το έναυσμα για τη μελέτη και ανάλυση της επίδρασης της αλλαγής των χρήσεων γης στην ευρύτερη περιοχή μελέτης του Σταλού, τα τελευταία 70 περίπου έτη (1945 – 2020), στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Επομένως, συλλέχθηκαν ιστορικά στοιχεία χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης. Αρχικά, μελετήθηκαν τα στοιχεία του αρχείου του Ελληνικού Κτηματολογίου για τις χρήσεις γης των ετών 1945 – 1960 (Εικόνα 17) και 2015-2016 (Εικόνα 18).





Εικόνα 17: Αεροφωτογραφία από την ευρύτερη περιοχή του Σταλού την χρονική περίοδο 1945-1960.

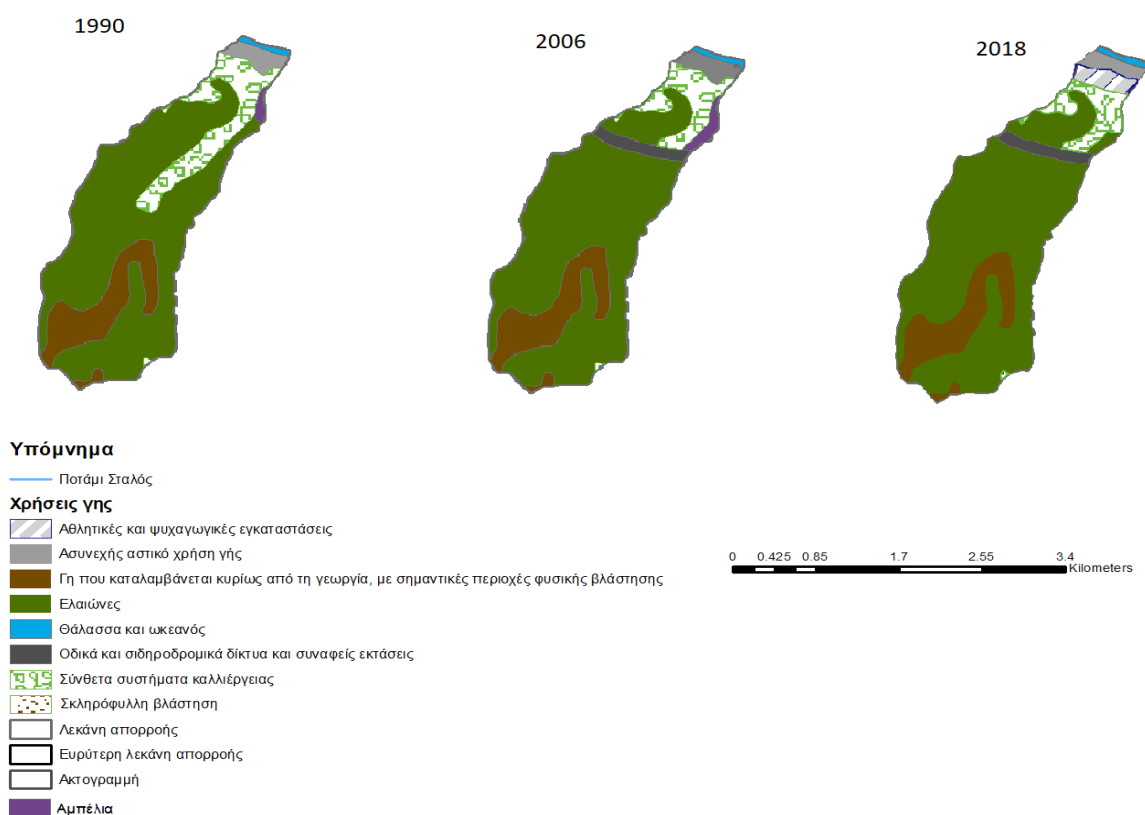


Εικόνα 18: Αεροφωτογραφία από την ευρύτερη περιοχή του Σταλού την χρονική περίοδο 2015-2016.

Από τις δυο παραπάνω αεροφωτογραφίες του Ελληνικού Κτηματολογίου μπορεί να γίνει διακριτό ότι η περιοχή του Σταλού υπέστη έντονη αλλαγή κατά την περίοδο 1945-2016. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε έντονη αστικοποίηση. Ενδεχομένως το γεγονός αυτό να συνδέεται άμεσα με την αύξηση του Διεθνούς Τουρισμού κατά τη δεκαετία του 1970, όπου σημαντικές γεωργικές εκτάσεις αναγκάστηκαν να απαλλοτριωθούν ώστε να καλύψουν τις ανάγκες της βιομηχανίας του τουρισμού. Είναι χαρακτηριστικό ότι μεταξύ της χρονικής περιόδου 1967 και 1991, το πρότυπο του μαζικού τουρισμού έχει μόλις αρχίσει να επικρατεί στην Ελλάδα και μεγάλες ξενοδοχειακές μονάδες κάνουν την εμφάνισή τους στις αρχές της περιόδου. Πιο συγκεκριμένα, η ανάπτυξη του τουριστικού κλάδου γίνεται εμφανής και

στατιστικά το 1970, όπου οι αφίξεις τουριστών στην Ελλάδα έχουν ξεπεράσει το 1,6 εκατ. (+302,87% σε σχέση με το 1960) και το 1980 φτάνουν πλέον στα 5,2 εκατ. (+227,56%, σε σχέση με το 1970), πριν διαμορφωθούν στα 8,87 εκατ. το 1990 (Επιστημονικό Συμπόσιο «Ποιά Ελλάδα», 2014). Έτσι και στην περιοχή του Σταλού, το μεγαλύτερο ποσοστό της γης κοντά στα κατάντη του ποταμού στη δεκαπενταετία του 1945-1960 καλυπτόταν από ελαιώνες και σκληροφυλλική βλάστηση. Ωστόσο, χρόνο με τον χρόνο η ανάγκη για την κάλυψη των ολοένα και αυξανόμενων τουριστικών αναγκών στην περιοχή οδήγησε στη μετατροπή των αγροτικών καλλιεργειών σε αστική ζώνη με τουριστικά καταλύματα και ασφαλτοδρομήσεις κατά μήκος της παραλιακής οδού ώστε να εξυπηρετούνται ευκολότερα οι νέες ανάγκες της βιομηχανίας του τουρισμού.

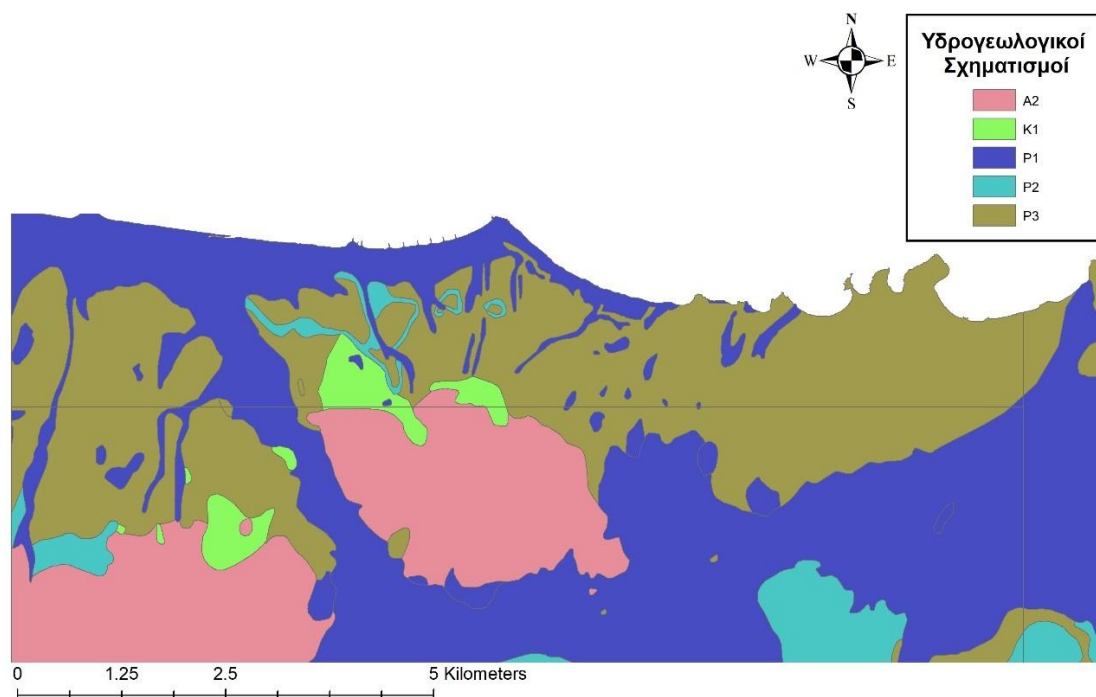
Οι ενδείξεις αυτές από τα παραπάνω στοιχεία του Ελληνικού Κτηματολογίου, οδήγησαν σε περαιτέρω μελέτη των παρατηρήσεων αυτών και με ανάλυση των δεδομένων χρήσεων γης του προγράμματος Copernicus, από όπου αντλήθηκε πληροφορία για τις χρήσεις γης της περιοχής του Σταλού σε μορφή shapefile αρχείου για τα έτη 1990, 2006 και 2018. Πραγματοποιήθηκε, επομένως, επεξεργασία της πληροφορίας αυτής στο λογισμικό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, ArcGIS 10.5, ώστε να βρεθεί η ακριβής κατανομή των χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης για τα έτη που μελετήθηκαν, και πιο συγκεκριμένα το ποσοστό επιφάνειας που καταλαμβάνει κάθε χρήση γης σε σχέση με τη συνολική επιφάνεια της λεκάνης μελέτης. Στη συνέχεια, απεικονίστηκε σε περιβάλλον ArcGIS 10.5 η κατανομή των χρήσεων γης του προγράμματος Copernicus για τα έτη 1990 (Εικόνα 19α), 2006 (Εικόνα 19β) και για το 2018 (Εικόνα 19γ).



Εικόνα 19: Οι αλλαγές των χρήσεων γης κατά τα έτη 1990 (α), 2006 (β) και 2018 (γ).

### 3.1.2 Γεωλογία της περιοχής μελέτης

Στην περιοχή μελέτης του Σταλού οι κυριότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι πορώδεις σχηματισμοί κυμαινόμενης υδροπερατότητας ως επί το πλείστον, με σημαντικές ποσότητες αδιαπέρατων γεωλογικών σχηματισμών, αλλά Καρστικών πετρωμάτων (Εικόνα 20).



Εικόνα 20: Γεωλογικοί μετασχηματισμοί στην περιοχή μελέτης του Σταλού.

Παρακάτω ακολουθεί συνοπτική επεξήγηση των γεωλογικών σχηματισμών που εμφανίζονται στην υδρολογική λεκάνη του Σταλού.

**A2:** Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας.

**K1:** Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι έντονα καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης, τα ανθρακικά Τρυπαλίου και οι Τριαδικοί κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες της Ιονίου ζώνης. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.

**P1:** Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες, τα κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων όταν έχουν σημαντική εξάπλωση. Αναπτύσσονται, κατά θέσεις, αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες. Κοντά στη θάλασσα οι υδροφορίες αυτές έχουν υποστεί κατά θέσεις, υποβάθμιση εξαιτίας της υφαλμύρισης.

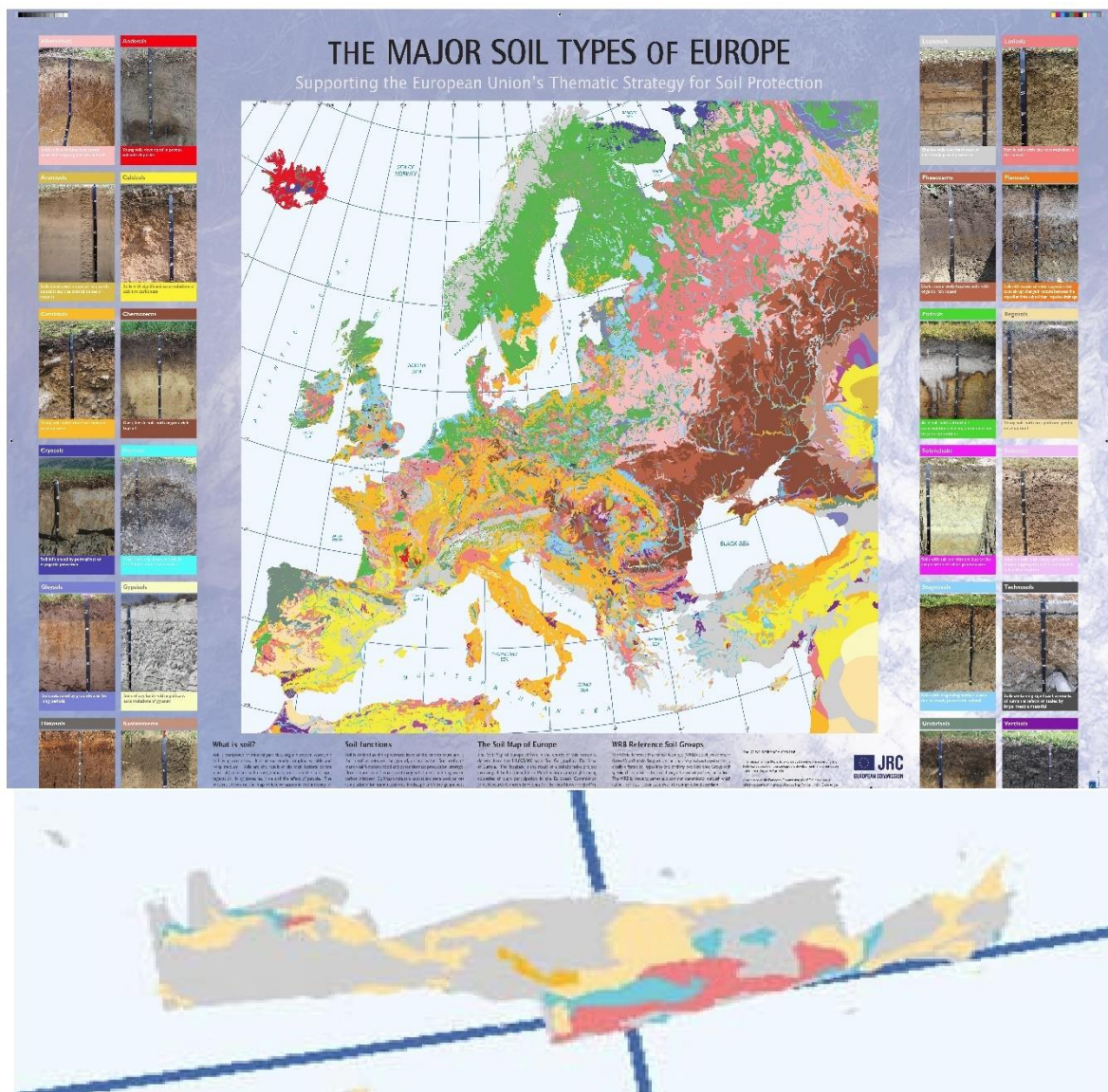
**P3:** Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες, καθώς και ο



αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς. Τοπικά στον αδιαίρετο σχηματισμό των νεογενών αναμένεται η ανάπτυξη ασθενών υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Κατά θέσεις στις νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία εντόνως όμως υποβαθμισμένη εξαιτίας των θειικών ιόντων.

### 3.1.3 Εδαφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης

Το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης απορροής αποτελείται από δύο ήδη εδάφους, τις Σταγνόσολες (Stagnosols) και τις Λεπτοσόλες (Leptosols) (ESDAC JRC, 2014) (Εικόνα 21).



Εικόνα 21: Ευρωπαϊκός χάρτης εδαφικής κατανομής, (ESDAC JRC,2014).

**Σταγνοσόλες (Stagnosols):** Αποτελεί χώμα με έντονο στίγμα του προφίλ του εδάφους λόγω διαδικασιών οξειδοαναγωγής που προκαλούνται από στασιμότητα των επιφανειακών υδάτων. Τα σταγνοσόλια είναι περιοδικά βρεγμένα στίγματα στο έδαφος και στο υπέδαφος, με ή χωρίς σκυροδέματα ή / και λεύκανση. Ένα κοινό όνομα σε πολλά εθνικά συστήματα ταξινόμησης για τα περισσότερα Stagnosols είναι το pseudogley. Οι σταγνοσόλες εμφανίζονται σε επίπεδη έως ήπια επικλινή γη σε ψυχρές, εύκρατες έως υποτροπικές περιοχές με υγρές έως υπεροξειδικές κλιματολογικές συνθήκες. Η γεωργική καταλληλότητα των Stagnosols είναι περιορισμένη λόγω της έλλειψης οξυγόνου που προκύπτει από τη στασιμότητα του νερού πάνω από ένα πυκνό υπέδαφος. Επομένως, πρέπει να αποστραγγιστούν.

**Λεπτοσόλες (Leptosols):** Αποτελεί ένα πολύ ρηχό έδαφος πάνω από σκληρό βράχο ή ένα βαθύτερο έδαφος που είναι εξαιρετικά χαλικώδες και/ή πετρώδες. Οι λεπτοσόλες καλύπτουν περίπου 1,7 δισεκατομμύρια εκτάρια της επιφάνειας της Γης. Βρίσκονται από τις τροπικές περιοχές έως τις κρύες πολικές περιοχές και από τη στάθμη της θάλασσας έως τις υψηλότερες κορυφές. Οι Λεπτοσόλες είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες σε ορεινές περιοχές, ιδίως στην Ασία, τη Νότια Αμερική, τον βόρειο Καναδά και την Αλάσκα. και στις ερήμους της Σαχάρας και της Αραβίας. Οι λεπτοσόλες είναι μη ελκυστικά εδάφη για τη γεωργία λόγω της αδυναμίας τους να συγκρατήσουν νερό, αλλά μπορεί μερικές φορές να έχουν δυνατότητες για καλλιέργειες δέντρων ή εκτεταμένη βόσκηση. Οι λεπτοσόλες διατηρούνται καλύτερα κάτω από το δάσος.

### 3.2 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στους κλάδους της μηχανικής, μια από τις σημαντικότερες πηγές άντλησης δεδομένων είναι η χρήση οργάνων μέτρησης. Όσο πιο ακριβή και έγκυρα αποτελέσματα δίνει ένα όργανο μέτρησης τόσο πιο ομαλά και με λιγότερα σφάλματα εκπονεείται μία μελέτη, στην οποία γίνεται χρήση των δεδομένων αυτών. Είναι σημαντικό τα όργανα μέτρησης να ελέγχονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα έτσι ώστε να πραγματοποιούνται διορθώσεις, όπου είναι απαραίτητο και εφικτό. Επιπροσθέτως, η συντήρηση των οργάνων από ειδικούς παίζει σημαντικό ρόλο στην μακροπρόθεσμη αντοχή τους, καθώς πολλά όργανα μέτρησης είναι τοποθετημένα σε σημεία που χαρακτηρίζονται από δυσμενείς συνθήκες.

Στην συγκεκριμένη εργασία, για τις ανάγκες της μοντελοποίησης της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του Σταλού, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα βροχόπτωσης και στάθμης από τους ήδη υπάρχοντες σταθμούς, τον μετεωρολογικό και τον υδρομετρικό σταθμό, αντίστοιχα. Οι σταθμοί αυτοί, έχουν τοποθετηθεί στην περιοχή μελέτης στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου «Διαδικτυακή Υπηρεσία Περιβαλλοντικών Κινδύνων, ERMIS-F (2014 – 2020)», ενός Προγράμματος Συνεργασίας Interreg V–A «Ελλάδα – Κύπρος 2014 – 2020». Επομένως, στην εργασία αυτή γίνεται χρήση των δεδομένων βροχόπτωσης από τον μετεωρολογικό σταθμό του Σταλού, που βρίσκεται στην τοποθεσία «Βιβλιοθήκη», στον Άνω Σταλό, ενώ γίνεται επιπλέον χρήση δεδομένων στάθμης από τον υδρομετρικό σταθμό, που βρίσκεται στα κατάντη της λεκάνης απορροής. Τα διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης καλύπτουν την χρονική περίοδο 1 Οκτωβρίου 2018 έως 5 Ιουνίου 2020, μια σχετικά σύντομη χρονική περίοδο μελέτης.



### 3.2.1 Στοιχεία βροχόπτωσης από τον μετεωρολογικό σταθμό

Για τα δεδομένα βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης έγινε χρήση του υφιστάμενου μετεωρολογικού σταθμού, ο οποίος έχει τοποθετηθεί στα ανάντη της υπολεκάνης, 93 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, στην τοποθεσία «Βιβλιοθήκη», στον Άνω Σταλό (Εικόνα 22α).



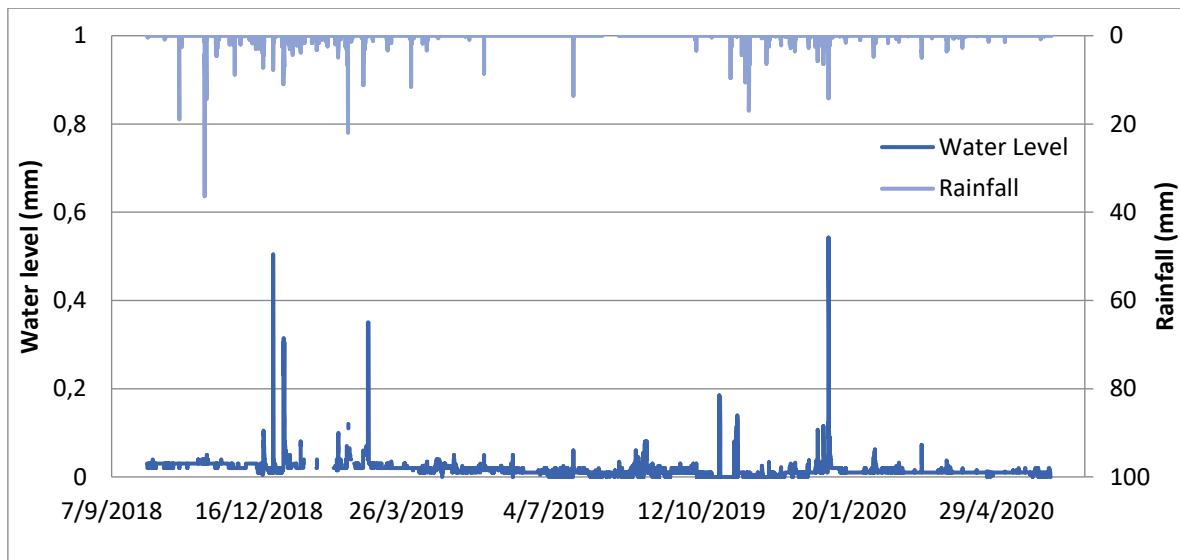
A



β

Εικόνα 22: Όργανα μέτρησης στη λεκάνη απορροής του Σταλού (α) μετεωρολογικός σταθμός τοποθετημένος στη θέση «Βιβλιοθήκη» στον Άνω Σταλό και (β) υδρομετρικός σταθμός εγκατεστημένος στα κατάντη του ποταμού.

Ο συγκεκριμένος σταθμός καταγράφει την βροχόπτωση (mm) στο ανάντη τμήμα της λεκάνης απορροής. Η χρονοσειρά της βροχόπτωσης όπως προέκυψε από τον βροχομετρικό σταθμό για τη χρονική περίοδο 1 Οκτωβρίου 2018 έως 5 Ιουνίου 2020 παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα (Εικόνα 23):



Εικόνα 23: Γράφημα χρονοσειρών βροχόπτωσης και στάθμης νερού στο ρέμα του Σταλού.

Οι μέγιστες τιμές της παρατηρημένης βροχόπτωσης που έχουν καταγραφεί από το σταθμό είναι 36.4 mm στις 11 Σεπτεμβρίου 2018 και 22 mm στις 14 Φεβρουαρίου 2019.

### 3.2.2 Στοιχεία στάθμης νερού από τον υδρομετρικό σταθμό

Για την μέτρηση της στάθμης του νερού στο ρέμα του Σταλού έχει τοποθετηθεί στα κατάντη του ρέματος ένας υδρομετρικός σταθμός (Εικόνα 22β). Στο κατακόρυφο τοίχωμα από τον πυθμένα του καναλιού, σε απόσταση 1.60 m από τον πυθμένα έχει τοποθετηθεί ένας σένσορας, ο οποίος παρέχει τα δεδομένα της στάθμης του νερού (water level). Στην Εικόνα 23 δίνονται τα δεδομένα παρατήρησης για τη στάθμη του νερού, όπου για το χρονικό διάστημα 1 Οκτωβρίου 2018 έως 5 Ιουνίου 2020, οι μέγιστες στάθμες που καταγράφηκαν από το σταθμό ήταν 0.505 mm στις 25 Δεκεμβρίου 2018 και 0.543 mm στις 6 Ιανουαρίου 2020. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη εργασία, για τις ανάγκες της μοντελοποίησης της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του Σταλού με χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS, χρειάστηκε να μετατραπούν τα δεδομένα της στάθμης του νερού (water level) σε δεδομένα παροχής (discharge), καθώς το μοντέλο εξάγει μόνο αποτελέσματα παροχής. Για τη μετατροπή αυτή έγινε χρήση της εξίσωσης Manning, όπως αναλύεται παρακάτω.

#### 3.2.2.1 Εξίσωση Manning

Καθώς το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS εξάγει τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης σε παροχή, κρίθηκε αναγκαία η μετατροπή των διαθέσιμων δεδομένων της στάθμης νερού (water level) στα κατάντη της λεκάνης απορροής του ρέματος του Σταλού σε δεδομένα παροχής (discharge), ώστε να είναι εφικτή η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου από τα ιστορικά δεδομένα του πεδίου. Για το λόγο αυτό έγινε χρήση της εξίσωσης Manning.

Ο τύπος Manning είναι ένας εμπειρικός τύπος που υπολογίζει τη μέση ταχύτητα ενός υγρού που ρέει σε έναν αγωγό που δεν περικλείει πλήρως το υγρό, δηλαδή, τη ροή ανοιχτού καναλιού. Αυτή η εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των μεταβλητών ροής σε περίπτωση ροής σε πλήρεις αγωγούς, οι οποίοι διαθέτουν επίσης μια ελεύθερη επιφάνεια

όπως αυτή της ροής ανοιχτού καναλιού. Σημειώνεται ότι όλη η ροή στα λεγόμενα ανοιχτά κανάλια καθοδηγείται από τη βαρύτητα. Ο τύπος Manning παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Γάλλο μηχανικό Philippe Gauckler το 1867 και αργότερα αναδημιουργήθηκε από τον Ιρλανδό μηχανικό Robert Manning το 1890. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση του Manning είναι φυσικές ιδιότητες του ρεύματος όπως: η επιφάνεια διατομής,  $A$  ( $m^2$ ), η κλίση,  $s$  (αδιάστατο), η υδραυλική ακτίνα,  $R$  (m), η βρεχόμενη περίμετρος,  $P$  (m), ο συντελεστής τραχύτητας,  $n$  (αδιάστατο) και η ταχύτητα,  $v$  ( $\frac{m}{s}$ ). Ο τύπος της εξίσωσης του Manning παρουσιάζεται στην Εξίσωση 7:

$$Q = v \cdot A \quad \text{Εξ. 7}$$

Όπου:

$Q$ : η παροχή ( $\frac{m^3}{s}$ )

$v$ : η ταχύτητα ( $\frac{m}{s}$ )

$A$ : η επιφάνεια διατομής ( $m^2$ )

Για την ταχύτητα,  $v$ , ισχύει: επιπλέον η Εξίσωση 8:

$$v = \frac{R^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{n} \quad \text{Εξ. 8}$$

Όπου:

$R$ : η υδραυλική ακτίνα (m) και

$$R = \frac{A}{P} \quad \text{Εξ. 9}$$

$P$ : η βρεχόμενη περίμετρος (m)

$s$ : η κλίση (αδιάστατο)

$n$ : ο συντελεστής τραχύτητας (αδιάστατο)

Με την χρήση της εξίσωσης Manning (Εξ. 7), επομένως, προκύπτει ότι:

$$Q = \frac{\left(\frac{A}{P}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{n} \cdot A \quad \text{Εξ. 10}$$

Δηλαδή προκύπτει ότι:

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{P^{\frac{2}{3}} \cdot n} \quad \text{Εξ. 11}$$

Όμως για την επιφάνεια διατομής,  $A$ , ισχύει ότι:

$$A = x \cdot W \quad \text{Εξ. 12}$$

Όπου:

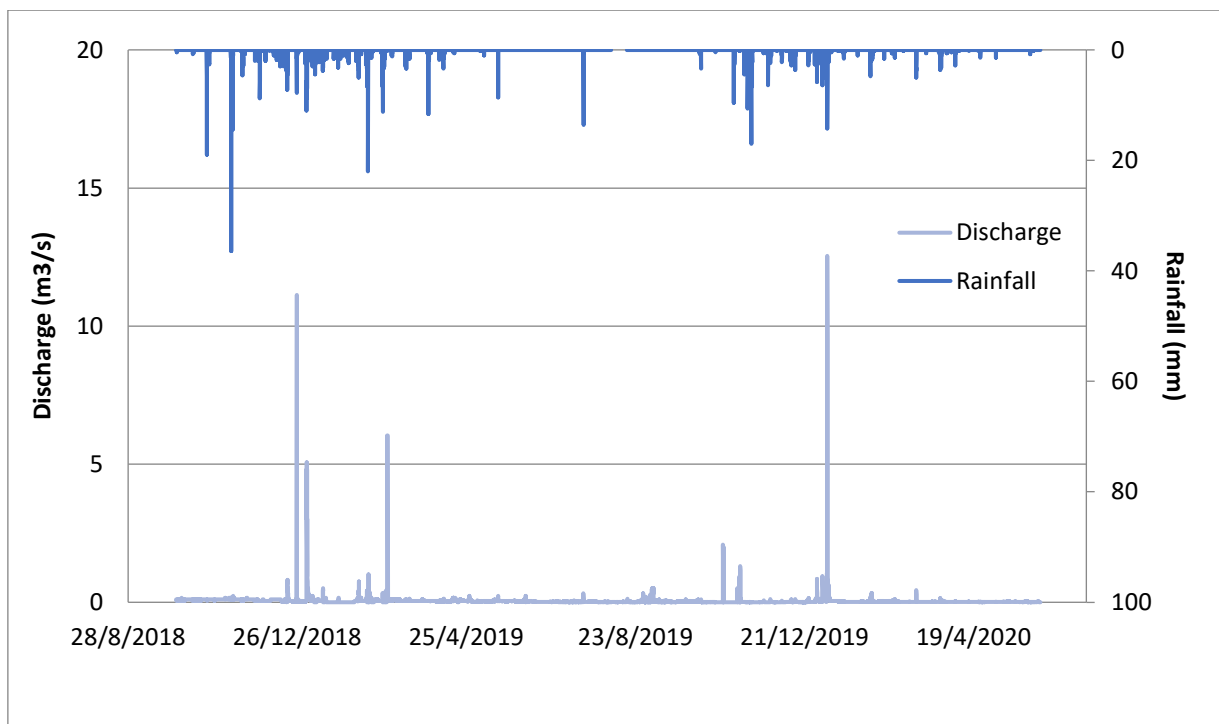
$x$ : το πλάτος διατομής (m)

$W$ : το ύψος του νερού στη διατομή (m)

Επομένως, προκύπτει ότι:

$$Q = \frac{x^{\frac{5}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{P^{\frac{2}{3}} \cdot n} \cdot W^{\frac{5}{3}} \quad \text{Εξ. 13}$$

Η Εξίσωση 8 αποτελεί την σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την τελική μετατροπή των παρατηρημένων τιμών στάθμης νερού σε παροχή, για τις ανάγκες του υδρολογικού μοντέλου. Ήταν επομένως σημαντικό να βρεθεί ο συντελεστής τραχύτητας,  $n$ , της διατομής, όπου χρειάστηκε να γνωρίζουμε το υλικό κατασκευής του καναλιού στο συγκεκριμένο σημείο. Στο συγκεκριμένο τμήμα μελέτης του ποταμού, όπου μετράται η στάθμη του νερού από τον εγκατεστημένο σταθμό, το νερό ρέει πάνω σε τσιμεντένια επιφάνεια, επομένως, μέσω του πίνακα του Chow (1959) επιλέχθηκε η τιμή 0.15 μεταξύ των ενδεδειγμένων τιμών 0.13 – 0.17 του πίνακα. Για την κλίση,  $s$ , βρέθηκε η διαφορά ύψους στα σημεία κάτω από το κανάλι και από την απόσταση των δυο σημείων με εφαρμογή του τύπου της εφαπτομένης γωνίας. Το αποτέλεσμα αυτό ισοδυναμεί με την κλίση του καναλιού. Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα και με τους υπολογισμούς της Εξίσωσης 8 προέκυψαν οι ζητούμενες τιμές της παροχής του ρέματος Σταλού στο κατάντη σημείο της λεκάνης απορροής, όπου είναι εγκατεστημένος ο σταθμός, οι οποίες απεικονίζονται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24: Γράφημα χρονοσειρών βροχοπτώσης και παροχής στο ρέμα του Σταλού.

### 3.3 ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ

#### 3.3.1 Υπολογισμός CN για τις ιστορικές περιόδους μελέτης 1990, 2006, 2018

Όπως σημειώθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, για τις ανάγκες αυτής της εργασίας υπολογίστηκε ο σταθμισμένος μέσος όρος για τον αριθμό CN για κάθε έτος μελέτης, σύμφωνα με το ποσοστό που κατέχει κάθε μεμονωμένο είδος χρήσης γης στη λεκάνη απορροής. Επομένως, για κάθε έτος, υπολογίστηκε το ποσοστό κάθε μεμονωμένης χρήσης γης στο σύνολο της επιφάνειας της λεκάνης μελέτης, το οποίο πολλαπλασιάστηκε με τον αντίστοιχο CN του, από τον πίνακα του National Resources Conservation Service (NRCS, 2019) (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Curve Number για κάθε μεμονωμένη χρήση γης.

Urban fabric	77
Industrial, commercial and transport units	98
Artificial, non-agricultural vegetated areas	96
Permanent crops	67
Permanent crops	67
Heterogeneous agricultural areas	58
Heterogeneous agricultural areas	58
Scrub and/or herbaceous vegetation associations	48

Με χρήση της Εξ. 5 (Κεφάλαιο 2) και από τα δεδομένα του Πίνακα 1 υπολογίστηκε ο τελικός αριθμός CN για κάθε έτος μελέτης όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Τελικός Curve Number κάθε έτους μελέτης.

	1990	2006	2018
<b>Τελικό Curve Number</b>	<b>64.8436</b>	<b>66.1922</b>	<b>67.0857</b>

Από σύγκριση των τριών αριθμών CN που προέκυψαν προκύπτει ότι ο αριθμός CN αυξάνει με την πάροδο των χρόνων, πράγμα το οποίο δικαιολογείται και από τους χάρτες χρήσεων γης του οργανισμού Copernicus, στους οποίους είναι εμφανής η αύξηση της αστικοποίησης για την περίοδο 1990-2018 κυρίως στα κατάντη της λεκάνης απορροής για το 2018, όπου φαίνεται να ισοπεδώθηκαν οι αγροτικές εκτάσεις του 1990 και 2006. Στα ανάντη της λεκάνης απορροής έχουν σχετικά διατηρηθεί αρκετές αγροτικές εκτάσεις κατά την πάροδο των ετών 1990 – 2018. Είναι εύλογο ότι μικρότεροι αριθμοί CN υποδηλώνουν χαμηλό δυναμικό απορροής, ενώ μεγαλύτεροι αριθμοί προορίζονται για αύξηση του δυναμικού απορροής. Όσο χαμηλότερος είναι ο αριθμός καμπύλης, τόσο πιο διαπερατό είναι το έδαφος, πράγμα το οποίο εξηγεί γιατί στις μελλοντικές περιόδους μελέτης, όπου εντάθηκε η αστικοποίηση, αυξήθηκε και ο αριθμός καμπύλης.

### 3.3.2 Υπολογισμός CN για το μελλοντικό σενάριο αλλαγής χρήσεων γης

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας δημιουργήθηκε ένα υποθετικό μελλοντικό σενάριο για την πρόβλεψη της αλλαγής των χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης με βάση τη μέθοδο της γραμμικής αύξησης (Α. Τραγάκη et al., 2015). Αρχικά, βάση των παλαιότερων δημογραφικών στοιχείων βρέθηκε ο πληθυσμός του Σταλού για τα έτη 1991 (373 κάτοικοι) και 2011 (868 κάτοικοι). Χρησιμοποιήθηκε η χρονική περίοδος 1991-2011 για να βρεθεί το ποσοστό αύξησης του πληθυσμού της περιοχής με χρήση της εξίσωσης αύξησης του πληθυσμού (Εξίσωση 14).

$$E_t = E_0 \cdot (1 + P)^t \quad \text{Εξ. 14}$$

Όπου:

$E_t$ : Πληθυσμός απογραφής 2011

$E_0$ : Πληθυσμός απογραφής 1991

P: Ποσοστό αύξησης πληθυσμού

t: Χρόνος ενδιαφέροντος

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς P προκύπτει ότι το ποσοστό αύξησης του πληθυσμού για την παραπάνω 20ετία είναι περίπου 0.043%.

Έπειτα, για την εύρεση του μελλοντικού πληθυσμού σε βάθος χρόνου 37 έτη (το έτος 2048) χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο το ποσοστό αύξησης πληθυσμού που βρέθηκε πριν (0.043)

και η τιμή του πληθυσμού για το έτος 2011 (868 κάτοικοι). Για να μπορέσει να γίνει μια σωστή σύγκριση βρέθηκε μέσω της ίδιας εξίσωσης και ο πληθυσμός του 2018 (1166).

Σύμφωνα με τα παραπάνω η θεωρητική τιμή πληθυσμού για το έτος 2048 είναι περίπου 4121 κάτοικοι. Παρατηρείται λοιπόν ότι ο πληθυσμός της περιοχής σε βάθος χρόνου 37 ετών αυξάνεται στο τετραπλάσιο. Όμως, για την πιο ρεαλιστική απεικόνιση της αστικοποιημένης γης στο μέλλον, η αύξησή της θεωρήθηκε διπλάσια και ότι οι μόνιμες καλλιέργειες της περιοχής (permanent crops) θα μετατραπούν σε αστικές χρήσεις γης το 2048. Άρα η επιφάνεια των μόνιμων καλλιεργειών του 2018 θεωρήθηκε αστική επιφάνεια και για το 2048. Αυτό συμβαίνει, διότι ενώ αυξάνεται στο τετραπλάσιο ο πληθυσμός κάποιοι από τους νέους κατοίκους συνεχίζουν να κατοικούν στα ίδια κτίσματα, καθώς τα κτίσματα αυτά μπορεί να αποτελούν πολυκατοικίες ή οικογενειακή περιουσία η οποία είναι ήδη οικοδομημένη. Δεν υπάρχει αντικειμενική αναλογία μεταξύ του πληθυσμού και των οικοδομικών κατασκευών, καθώς δεν αντιστοιχεί κάθε κάτοικος σε ένα κτίσμα, γι' αυτό εκτιμάται μέσω όρο μια αύξηση 2 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του 2018.

Επομένως, υπολογίστηκε ο τελικός Curve Number του έτους 2048 ως  $CN=69.0369$ , ανάλογα με το ποσοστό που κατέχει κάθε μεμονωμένη χρήση γης στη λεκάνη απορροής, με την χρήση της Εξίσωσης 5.

Τέλος, στο μελλοντικό αυτό σενάριο θεωρήθηκε και αύξηση της βροχόπτωσης κατά 5% και με 10% αντίστοιχα, στο πλαίσιο της επικείμενης κλιματικής αλλαγής, που παρατηρείται με την πάροδο των ετών. Επομένως η ήδη υπάρχουσα χρονοσειρά βροχόπτωσης του 2018/2020 πολλαπλασιάστηκε με 0.05 και 0.10, αντίστοιχα, ενώ πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες προσομοιώσεις.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του Σταλού με χρήση του μοντέλου HEC-HMS και επιπλέον τα αποτελέσματα της μελέτης της επίδρασης της αστικοποίησης στην υδρολογική λεκάνη του Σταλού Νέας Κυδωνίας, Χανίων. Η αναλυτική περιγραφή των βημάτων που ακολουθήθηκαν για το στήσιμο του μοντέλου βρίσκεται στο Παράρτημα Α της παρούσας εργασίας.

Το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS στήθηκε για τη χρονική περίοδο 1 Οκτωβρίου 2018 έως 5 Ιουνίου 2020, ωστόσο στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε δυο χρονικές υποπεριόδους, την πρώτη που αναφέρεται στο χρονικό διάστημα από 1 Νοεμβρίου 2018 έως 31 Ιανουαρίου 2019 και στη δεύτερη, που αναφέρεται στο χρονικό διάστημα από 1 Νοεμβρίου 2019 έως 31 Μαΐου 2020. Η δεύτερη περίοδος (1 Νοεμβρίου 2019 έως 31 Μαΐου 2020) αποτέλεσε την περίοδο βαθμονόμησης (calibration) και η πρώτη περίοδος (1 Νοεμβρίου 2018 έως 31 Ιανουαρίου 2019) αποτέλεσε την περίοδο επαλήθευσης (verification) των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Για την εκτίμηση της καλής συμπεριφοράς του μοντέλου και την καλή του προσαρμογή στα διαθέσιμα δεδομένα από τον υδρομετρικό σταθμού του πεδίου, στις δυο παραπάνω χρονικές περιόδους, χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης απόδοσης Nash-Sutcliffe. Ο δείκτης αυτός λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 1 και όσο πιο κοντά στην μονάδα βρίσκεται τόσο πιο ικανοποιητική είναι η απόδοση του μοντέλου.

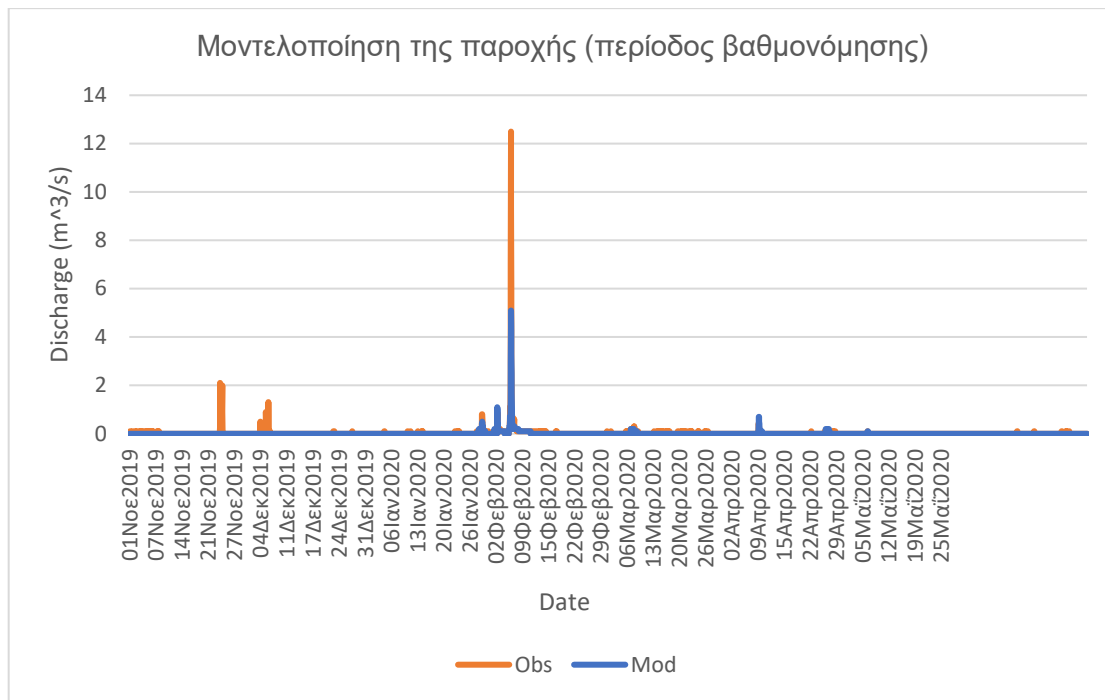
Τέλος, το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την εξέταση και ανάλυση συγκεκριμένων σεναρίων χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης, τόσο ιστορικά όσο και μελλοντικά. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μια ιστορική μελέτης της αλλαγής των χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης, κατά την οποία εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια χρήσεων γης, για τα έτη 1990, 2006 και 2018/2020, αντίστοιχα, στα οποία έγινε αλλαγή της τιμής του CN στη μέθοδο απωλειών SCS-Curve Number, σύμφωνα με τις χρήσεις γης στην περιοχή σε κάθε έτος μελέτης. Παράλληλα, έγινε και μια μελλοντική πρόβλεψη χρήσεων γης για το έτος 2048, όπου υπολογίστηκε ένα νέο CN σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η επεξεργασία και η ανάλυση όλων των παραπάνω, ακολουθεί παρακάτω.

### 4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Παρακάτω απεικονίζονται τα διαγράμματα της μοντελοποίησης της υδρολογίας της λεκάνης απορροής του ρέματος Σταλού, που πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο HEC-HMS. Οι τιμές παροχής που προέκυψαν από το μοντέλο, συγκρίθηκαν με τις διαθέσιμες τιμές παρατήρησης της παροχής, οι οποίες προέκυψαν από τη μετατροπή της παρατηρούμενης στάθμης νερού σε παροχή, μέσω της Manning.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου για την περίοδο βαθμονόμησης (1 Νοεμβρίου 2019 έως 31 Μαΐου 2020) παρουσιάζονται στην Εικόνα 25.

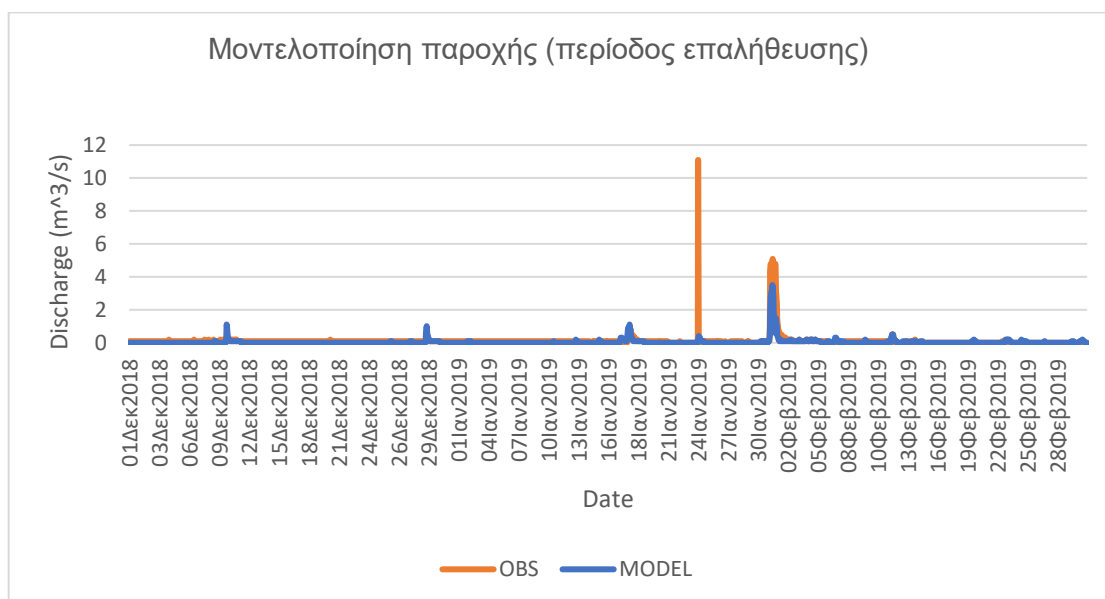




Εικόνα 25: Αποτελέσματα του HEC-HMS μοντέλου για την παροχή στο ρέμα του Σταλού, κατά την περίοδο βαθμονόμησης (1 Νοεμβρίου 2019 έως 31 Μαΐου 2020).

Για την περίοδο βαθμονόμησης, η τιμή του δείκτη απόδοσης, Nash – Sutcliffe, είναι 0.677, πράγμα το οποίο πιστοποιεί μια αρκετά καλή προσαρμογή των αποτελεσμάτων παροχής του μοντέλου στα διαθέσιμα δεδομένα παρατήρησης.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου για την περίοδο επαλήθευσης (1 Δεκεμβρίου 2018 έως 31 Ιανουαρίου 2019) απεικονίζονται στην παρακάτω Εικόνα 26.



Εικόνα 26: Αποτελέσματα του HEC-HMS μοντέλου για την παροχή στο ρέμα του Σταλού κατά την περίοδο επαλήθευσης (1 Δεκεμβρίου 2018 έως 31 Ιανουαρίου 2019).

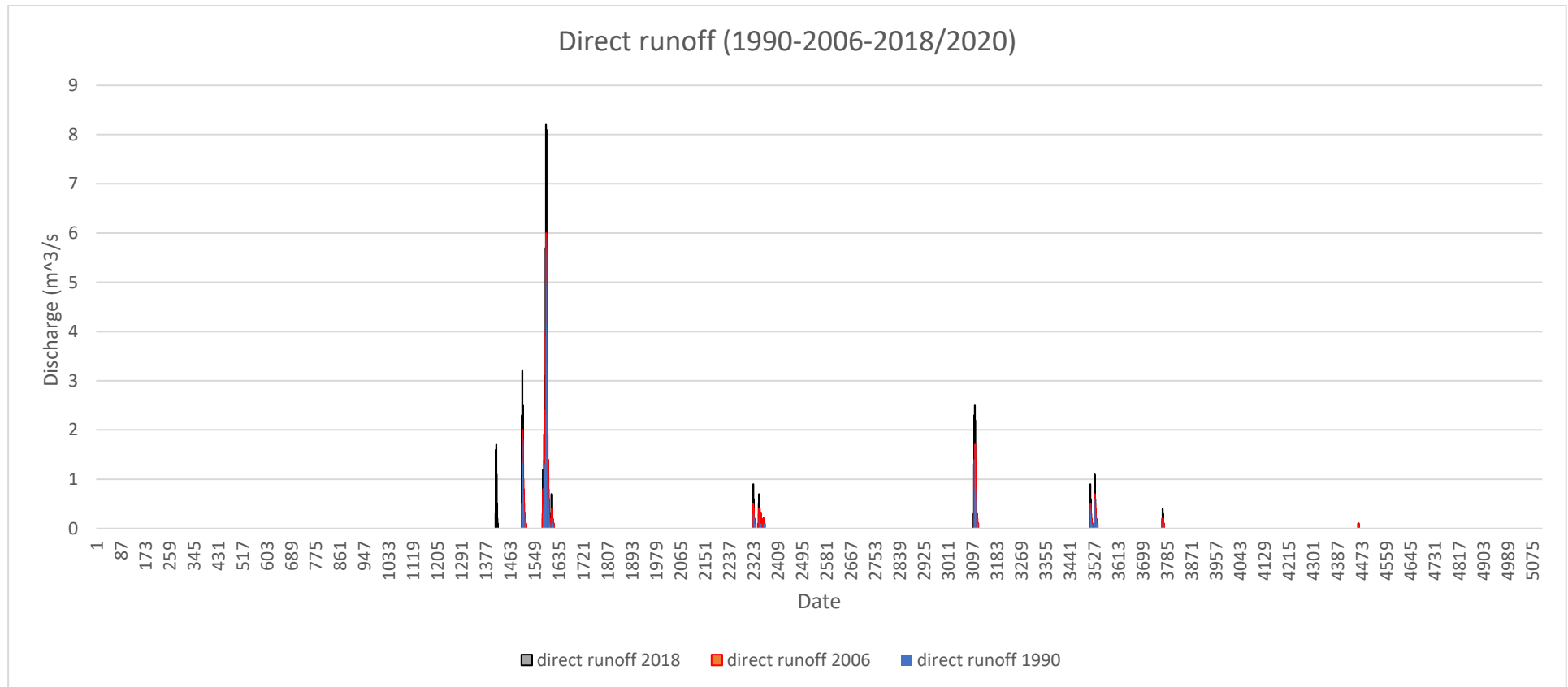
Στη συγκεκριμένη περίοδο επαλήθευσης, ο δείκτης απόδοσης, Nash – Sutcliffe, είναι ίσος με 0.437, πράγμα το οποίο επαληθεύει τη σχετικά καλή προσαρμογή των αποτελεσμάτων παροχής του μοντέλου στα δεδομένα παρατήρησης.

#### 4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ

Στην περίπτωση των σεναρίων χρήσεων γης, για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα στα σενάρια για τα διάφορα έτη μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής μεγέθη, στα οποία το μοντέλο μεταφράζει τα αποτελέσματά του:

1. Peak discharge (μέγιστη εκφόρτιση): η τιμή της υψηλότερης παροχής.
2. Excess volume: ο όγκος των διαθέσιμων βροχοπτώσεων που εμφανίζεται ως άμεση επιφανειακή απορροή. Ισούται με το συνολικό ποσό βροχόπτωσης μείον όλες τις απώλειες.
3. Direct runoff (απευθείας επιφανειακή απορροή): η βροχή ή το λιωμένο νερό που εκρέει κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης ή του γεγονότος τήξης ως υπερχείλιση κ.α. Το λιωμένο νερό και η βροχή που πέφτουν στο χιόνι ή στο παγωμένο έδαφος φτάνουν στο ρέμα κατά μήκος διαφορετικών μονοπατιών.
4. Baseflow volume (όγκος βασικής ροής): ο όγκος της παροχής που θα υπήρχε στο ποτάμι χωρίς τη συμβολή της άμεσης απορροής από τις βροχοπτώσεις.
5. Discharge volume (όγκος παροχής): Η ποσότητα υγρού που περνά από ένα τμήμα του ρεύματος σε μονάδα χρόνου.

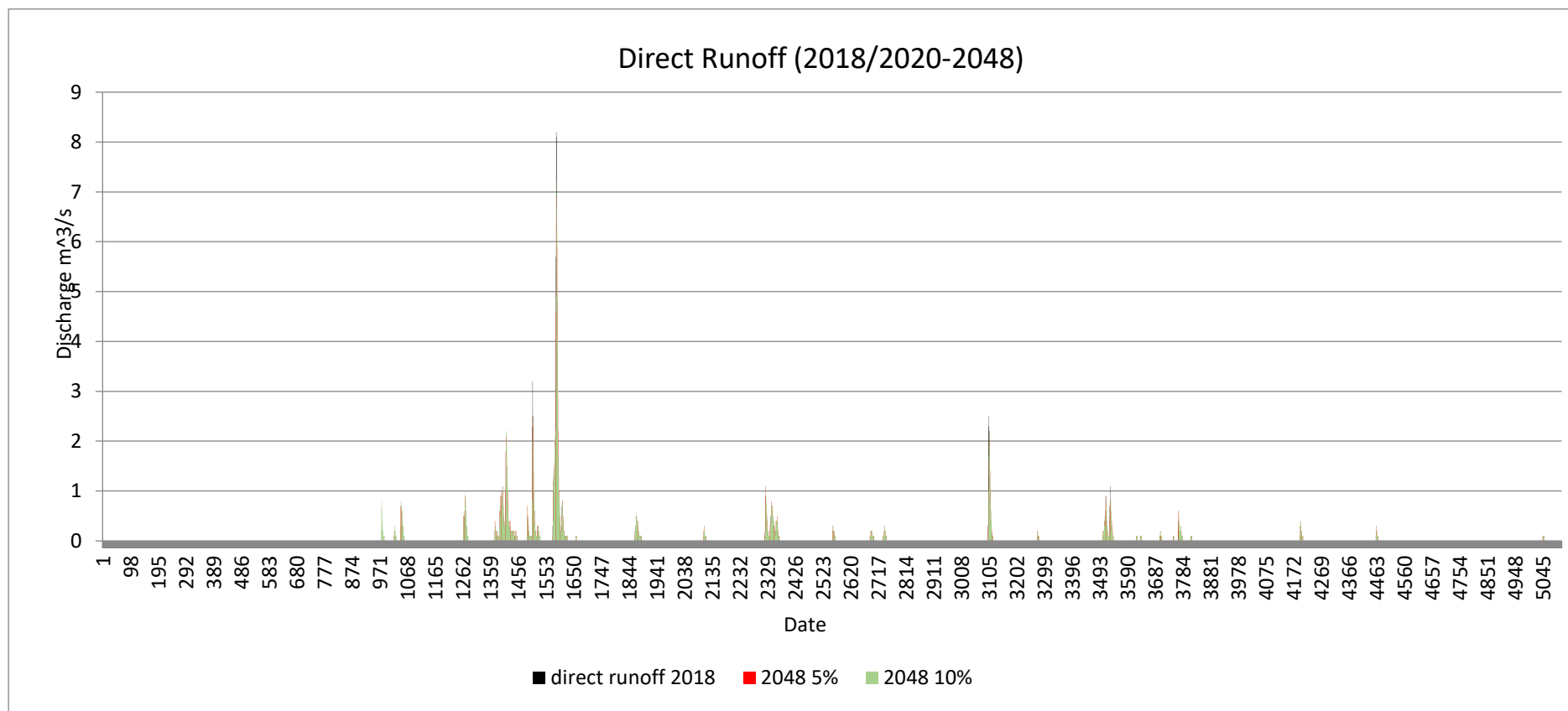
Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της άμεσης επιφανειακής απορροής τόσο για τα τρία ιστορικά σενάρια χρήσεων γης (1990, 2006 και 2018/2020), (Εικόνα 27).



Εικόνα 27:Αποτελέσματα μοντέλου για την άμεση επιφανειακή απορροή κατά τα ιστορικά σενάρια αλλαγής χρήσεων γης 1990, 2006 και 2018/2020.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται αύξηση της απορροής κατά την πάροδο των ετών. Μικρότερα ποσά άμεσης επιφανειακής απορροής απεικονίζονται το έτος 1990, τα οποία αυξάνονται το 2006, ενώ η μεγαλύτερη απορροή απεικονίζεται το έτος 2018/2020.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα για το μελλοντικό σενάριο πρόβλεψης χρήσεων γης για το έτος 2048 σε σχέση με την παρούσα κατάσταση (2018/2020), (Εικόνα 28).



Εικόνα 28: Αποτελέσματα μοντέλου για την άμεση απορροή μεταξύ των ετών 2018 και 2048 για 5% και 10% αύξηση της βροχόπτωσης

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται μεγάλη άνοδος στις τιμές της απορροής κατά τα μελλοντικά σενάρια αύξησης της βροχόπτωσης κατά 5% και 10%. Αυτό συμβαίνει καθώς, όσο αυξάνεται η βροχόπτωση τόσο μεγαλύτερη είναι και η απορροή. Αν γίνει σύγκριση μεταξύ των τιμών του 2018/2020 και του 2048 παρατηρείται αύξηση στις τιμές απορροής του 2048, εκτός από κάποια σημεία που δεν έχουν αποτυπωθεί με ακρίβεια από το μοντέλο. Η διαφορά μεταξύ των ετών είναι αναμενόμενη καθώς οι τιμές της βροχόπτωσης και η αστικοποίηση της περιοχής αυξάνονται.

Επιπλέον, παρουσιάζεται παρακάτω οι ποσοστιαίες μεταβολές της μέγιστης εκφόρτισης (peak discharge), της άμεσης απορροής (direct runoff), και του όγκου εκφόρτισης (discharge volume) μεταξύ των ετών 1990 – 2006, 2006 – 2018 και 2018 – 2048, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου και με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Ποσοστιαία μεταβολή ποσότητας } X = \frac{\Delta X}{X_{\text{αρχ.}}} \cdot 100\% \quad \text{Εξ. 15}$$

Όπου:

$\Delta X$  = Μεταβολή ποσότητας μεταξύ των συγκρινόμενων ετών (τελική – αρχική τιμή)

$X_{\text{αρχ.}}$  = Αρχική τιμή ποσότητας

Έτσι προκύπτει ο Πίνακας 3 στον οποίο φαίνεται καθαρά η αύξηση της άμεσης επιφανειακής απορροής (direct runoff), κατά το πέρασμα των ετών από το 1990 έως το 2018/2020, όπου οι χρήσεις γης αλλάζουν και η αστική επιφάνεια ολοένα και αυξάνεται στη λεκάνη απορροής που μελετήθηκε. Ομοίως συμβαίνει για τον όγκο παροχής στη λεκάνη απορροής. Τέλος, για το μελλοντικό σενάριο του 2048 με αύξηση της βροχόπτωσης κατά 5% έχουμε επίσης αύξηση των μεγεθών αυτών και ομοίως συμβαίνει για το σενάριο του 2048 με αύξηση της βροχόπτωσης 10%.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα μοντέλου για τα τρία μεγέθη peak discharge, direct runoff και discharge volume.

$\left(\frac{m^3}{s}\right)$	1990	2006	2018/2020	2048 (5%)	2048 (10%)
<b>Peak discharge</b>	6	6.1	8.3	7	7.4
<b>Direct runoff</b>	297.6	318.7	337.3	763.5	818.7
<b>Discharge volume</b>	829.8	866.1	1079.8	1661.1	1768.2

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει αντίστοιχα τις ποσοστιαίες μεταβολές των παραπάνω μεγεθών μεταξύ των ετών 1990 – 2006 , 2006 – 2018/2020 και 2018 – 2048 (5%) και 2018 – 2048 (10%).

Πίνακας 4: Ποσοστιαίες μεταβολές των διάφορων μεγεθών μεταξύ των ετών μελέτης.

Ποσοστιαίες μεταβολές (%)	1990-2006	2006-2018	2018-2048 (5%)	2018-2048 (10%)
<b>Peak discharge</b>	1.6%	36.0%	-15.6%	-10.8%
<b>Direct runoff</b>	7.0%	5.8%	126.3%	142.7%
<b>Discharge volume</b>	4.3%	24.6%	53.8%	63.7%

Η αρνητική τιμή πρόσημού των ποσοστιαίων μεταβολών αναφέρεται σε μείωση ανάμεσα στα έτη μελέτης, ενώ η θετική τιμή πρόσημού αναφέρεται σε αύξηση ανάμεσα στα έτη μελέτης. Όπως ήταν αναμενόμενο, η άμεση επιφανειακή απορροή και ο όγκος παροχής αυξάνεται από έτος μελέτης σε έτος μελέτης, καθώς η περιοχή μελέτης αστικοποιείται ολοένα και περισσότερο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας ήταν να μελετηθεί η επίδραση της αλλαγής χρήσεων γης, και πιο συγκεκριμένα της αστικοποίησης, στην υδρολογία της λεκάνης απορροής του Σταλού, στη Νέα Κυδωνία Χανίων. Χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, το οποίο είναι αρκετά εύχρηστο και απλό λογισμικό. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της εργασίας αυτής, αντιμετωπίστηκαν διάφορες δυσκολίες, οι οποίες και συνοψίζονται παρακάτω.

Η περιορισμένη διαθεσιμότητα των δεδομένων βροχόπτωσης και στάθμης νερού (συγκεκριμένα υπήρχαν δεδομένα για τη χρονική περίοδο 1 Οκτωβρίου 2018 έως 5 Ιουνίου 2020, περίπου δυο έτη μετρήσεων) δεν επέτρεψε την υλοποίηση μιας ολοκληρωμένης υδρολογικής μελέτης της περιοχής για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους, όπου θα υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα και για πιο έντονα πλημμυρικά γεγονότα στο ποτάμι. Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου «Διαδικτυακή Υπηρεσία Περιβαλλοντικών Κινδύνων, ERMIS-F» (2014 – 2020) του προγράμματος συνεργασίας Interreg V–A «Ελλάδα – Κύπρος 2014 – 2020», η λεκάνη του Σταλού αποτέλεσε περιοχή εφαρμογής της έρευνας του προγράμματος, όπου και εγκαταστάθηκαν ένας μετεωρολογικός και ένας υδρομετρικός σταθμός για την ολοκληρωμένη παρακολούθηση της λεκάνης. Οι υπάρχουσες αυτές χρονοσειρές δεδομένων βροχόπτωσης και παροχής χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της μοντελοποίησης της παρούσας διπλωματικής και το μοντέλο προσαρμόστηκε σε ικανοποιητικό βαθμό στα ιστορικά δεδομένα τόσο για την περίοδο βαθμονόμησης, όσο και για την περίοδο επαλήθευσης, πράγμα το οποίο πιστοποίησε ο συντελεστής απόδοσης Nash-Sutcliffe. Είναι σημαντικό, ωστόσο, να σημειωθούν κάποιες δυσλειτουργίες κατά την άντληση δεδομένων κατά την περίοδο παρακολούθησης της περιοχής μελέτης καθώς ο μετεωρολογικός σταθμός που βρίσκεται στα ανάντη της λεκάνης συχνά παρουσιάζει κάποιες ασυνέχειες κατά την μέτρηση της βροχόπτωσης, ειδικά τις ημέρες που παρατηρείται αυξημένη βροχόπτωση, ενώ ο σταθμός μέτρησης στάθμης στην εκβολή του ρέματος, συχνά παρουσιάζει εσφαλμένες μετρήσεις λόγω εξωτερικών παραγόντων, όπως είναι κορμοί δέντρων και φερτά αντικείμενα, τα οποία παρασύρονται από το νερό του ποταμού, εγκλωβίζονται στο σημείο που είναι τοποθετημένος ο σταθμός, παρεμποδίζουν τη ροή και εμφανίζουν τελικά στο όργανο εσφαλμένες μετρήσεις της μέγιστης στάθμης (άρα και παροχής) η οποίες ενδέχεται να μην περιγράφουν ορθώς την πραγματικότητα.

Επιπλέον, το μοντέλο δεν έχει τη δυνατότητα να εξάγει αποτελέσματα παροχής, πράγμα το οποίο οδήγησε στη μετατροπή των διαθέσιμων δεδομένων στάθμης σε παροχή με χρήση της εξίσωσης Manning. Η μετατροπή αυτή οπωσδήποτε έχει προκαλέσει σφάλμα στις τελικές τιμές παροχής με τις οποίες βαθμονομήθηκε και επαληθεύτηκε το μοντέλο. Ωστόσο, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας πραγματοποιήθηκε στο πεδίο μέτρηση των φυσικών χαρακτηριστικών του σημείου του ποταμού, στο οποίο είναι εγκατεστημένος ο υδρομετρικός σταθμός, ώστε να πραγματοποιηθεί η μετατροπή αυτή με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Επιπρόσθετα, η σύγκριση των αποτελεσμάτων των σεναρίων αλλαγών χρήσεων γης για την ιστορική περίοδο, 1990 – 2006 – 2018/2020 αποδεικνύει ότι με την πάροδο των ετών υπάρχει αισθητή αύξηση της άμεσης επιφανειακής απορροής στη λεκάνη απορροής του Σταλού, πράγμα το οποίο αποδίδεται στην εντατική αστικοποίηση της περιοχής από τη

δεκαετία του 1960 για την ικανοποίηση των αναγκών της βιομηχανίας του τουρισμού, καθώς και στην μορφολογία του εδάφους, όπου στα ανάντη της λεκάνης το υψόμετρο είναι υψηλότερο ενώ στα κατόντη χαμηλότερο. Αυτό επιδεινώνει τον πλημμυρικό κίνδυνο καθώς σε συνδυασμό με την αυξημένη αστικοποίηση της περιοχής συσσωρεύονται μεγάλα ποσά νερού στα κατόντη της λεκάνης. Η περιοχή παρουσιάζει έντονη τουριστική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια με την αστική επιφάνεια να έχει αυξηθεί αισθητά, το νερό δεν βρίσκει δρόμο να διηθηθεί στο έδαφος και άρα ως μόνη διέξοδος καταλήγει ως άμεση επιφανειακή απορροή, ειδικότερα κατά τη διάρκεια πλημμυρικών φαινομένων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται στην περιοχή μελέτης συχνά ακραία πλημμυρικά φαινόμενα, που προκαλούν πολλές υλικές ζημιές σε περιουσίες, στο οδικό δίκτυο κ.α. και καθιστούν την περιοχή ως αυξημένου πλημμυρικού κινδύνου ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες. Όλα τα παραπάνω αναλύθηκαν με την εξέταση της αλλαγής της παραμέτρου CN στη μέθοδο της απώλειας, SCS-Curve Number.

Το μελλοντικό σενάριο του έτους 2048 σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου και η σύγκρισή του με την υπάρχουσα τωρινή κατάσταση (έτος 2018/2020) προβλέπει ότι μελλοντικά αναμένεται ένταση της αστικοποίησης, η οποία σε συνδυασμό με μια επικείμενη αύξηση της βροχόπτωσης (κατά 5% ή 10%, λόγω κλιματικής αλλαγής) θα επιφέρει μεγαλύτερα προβλήματα στην ήδη προβληματική αστική περιοχή. Κρίνεται αναγκαίος ο σχεδιασμός της πλημμυρικής διαχείρισης στην περιοχή αυτή ιδιαίτερα κατά τις χειμερινές περιόδους, όπου η συχνότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών γεγονότων είναι μεγαλύτερη.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι από μαρτυρίες κατοίκων της περιοχής του Σταλού αποδεικνύεται ότι το σύστημα απομάκρυνσης των όμβριων υδάτων της περιοχής είναι σχεδόν ανύπαρκτο με αποτέλεσμα να εντείνεται η πιθανότητα πλημμύρας κατά την εμφάνιση ακραίων καιρικών γεγονότων. Είναι χαρακτηριστικό ότι κάτοικοι έχουν αναγκαστεί κατά το παρελθόν να δημιουργήσουν αυτοσχέδιους τρόπους απομάκρυνσης των όμβριων υδάτων γύρω από την περιουσία τους για την αποφυγή πλημμύρας (Εικόνα 29α). Σε άλλες περιπτώσεις κακοτεχνίες του Δήμου (Εικόνα 29β) στο οδικό δίκτυο, σχετικές με το σύστημα απομάκρυνσης των όμβριων υδάτων αλλά και η έλλειψη καθαρισμού των φρεατίων των όμβριων υδάτων ειδικά κατά τους χειμερινούς μήνες δύνανται να επιβαρύνουν την κατάσταση σε περίπτωση ακραίου καιρικού φαινομένου.



α.



β.

Εικόνα 29: Περιοχή Σταλού (α) Αυτοσχέδιο φρεάτιο από κατοίκους περιοχής, (β) κακοτεχνίες και αμέλεια από Δήμο.



## 5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Δεδομένου ότι η περιοχή μελέτης αντιμετωπίζει μεγάλο πρόβλημα αστικοποίησης και ενδεχόμενης πλημμύρας σε περίπτωση ακραίου καιρικού φαινομένου κρίνεται αναγκαίος ο σωστός προγραμματισμός και σχεδιασμός των δράσεων αντιμετώπισης του κινδύνου αυτού. Το ανεπαρκές σύστημα απομάκρυνσης των όμβριων υδάτων της περιοχής εντείνει το πρόβλημα και απαιτείται άμεση υλοποίηση των απαραίτητων έργων για την αποκατάσταση του συστήματος, ώστε τα όμβρια ύδατα να απομακρύνονται αποτελεσματικά από τους δρόμους σε περίπτωση έντονης βροχόπτωσης και να αποφεύγεται η κατάκλιση σπιτιών, μαγαζιών, ξενοδοχείων κ.α., καθώς επίσης και ο εγκλωβισμός ανθρώπων σε υπόγεια, αυτοκίνητα, δρόμους κ.α. Η υλοποίηση λοιπόν ενός αποτελεσματικότερου δικτύου απομάκρυνσης και διοχέτευσης των όμβριων υδάτων χρήζει άμεσης ανάγκης για την καταπολέμηση του πλημμυρικού κινδύνου της περιοχής, καθώς και γενικότερα η υλοποίηση αντιπλημμυρικών έργων τα οποία θα επαρκούν για την αντιμετώπιση οποιοδήποτε καιρικού φαινομένου.

Επιπλέον, καθώς παρατηρούνται παρεμβάσεις στην κοίτη του ρέματος, με την εισχώρηση κτισμάτων κατά μήκος της κρίνεται αναγκαίο να γίνει εκτροπή της κοίτης ώστε να αποφεύγεται η επιβάρυνση των κτισμάτων αυτών. Επιπλέον σημαντικός είναι και ο συχνός καθαρισμός της κοίτης του ρέματος από τις ποσότητες φερτών υλικών, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες, ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευση του νερού σε σημεία με αποτέλεσμα την κατάκλισή τους.

Για μια ολοκληρωμένη μελέτη της υδρολογίας της περιοχής κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη μιας μεγαλύτερης χρονοσειράς δεδομένων, πράγμα το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με τη συνέχιση της συστηματικής παρακολούθησης των σταθμών ώστε να αποφεύγονται τυχόν ασυνέχειες στις χρονοσειρές ή τυχόν λάθη στις μετρήσεις. Είναι σημαντικό να ελέγχονται και να συντηρούνται σωστά τα όργανα μέτρησης ώστε να παρέχουν ακριβείς μετρήσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην πιστοποίηση και επαλήθευση των μοντέλων. Επιπλέον, είναι σημαντικό να δημιουργηθεί ένα ευρύτερο δίκτυο σταθμών παρατήρησης, με την τοποθέτηση επιπλέον σταθμών σε διάφορα σημεία της λεκάνης, για μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις, σε περισσότερα σημεία της περιοχής μελέτης.

Όλα τα παραπάνω, απαιτούν τη συνεργασία των φορέων της περιοχής μελέτης τόσο για την αντιμετώπιση του πλημμυρικού κινδύνου στην περιοχή, για τον ορθό σχεδιασμό της διαχείρισης του κινδύνου και τον σωστό συντονισμό των έργων. Είναι σημαντικό να υπάρξει συνεργασία μεταξύ του μηχανικού και των δημόσιων φορέων αλλά και μεταξύ του μηχανικού και των κατοίκων της περιοχής, για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των απαραίτητων και απαιτούμενων έργων και ενεργειών στην περιοχή.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γκούμας, Χ., (2019) Διπλωματική Εργασία: Ανάλυση Πλημμυρικής Επικινδυνότητας και Μοντελοποίηση Ροής του ρέματος Σταλού Χανίων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Ελληνικό κτηματολόγιο, [www.ktimanet.gr](http://www.ktimanet.gr) [12/2020].
- Επιστημονικό Συμπόσιο «Ποιά Ελλάδα», (2014) Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Ευστρατιάδης, Α. και Μαμάσης, Ν., (2017) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα, 3-15.
- Κασσελά, Α. Ε. (2011) Υδρολογική προσομοίωση της διευρυμένης πειραματικής λεκάνης της Ανατολικής Αττικής: ρέματα Ραφήνας και Λυκορέματος, με χρήση του μοντέλου HEC-HMS, DOI: 10.26240/heal.ntua.8625
- Μαρής, Φ. Π., Τμήμα Δασολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων και Διαχείρισης Κινδύνου, Τεχνική Υδρολογία, Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή, 11-16.
- Ομάδα Σύνταξης Flashnews, [www.flashnews.gr](http://www.flashnews.gr) [10/2020].
- Ομάδα Σύνταξης Hania news, [www.hania.news](http://www.hania.news) [10/2020].
- Ομάδα Σύνταξης Ελεύθερος Τύπος, [www.eleftherostypos.gr](http://www.eleftherostypos.gr) [10/2020].
- Τραγάκη, Α., Μπάγκαβος, Χ. και Ντούνας, Δ. (2015) Περί Δημογραφίας και Πληθυσμιακών Εξελίξεων, Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
- Chow, V.T. (1959) Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill, New York.
- Chu, X., A.M.ASCE; and Steinman, A., (2009) Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, (ASCE)0733-9437(2009)135:1(119)
- Copernicus, [www.land.copernicus.eu](http://www.land.copernicus.eu) [12/2020].
- Elstat, ΕΘΝΙΚΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ, (1994) Πραγματικός πληθυσμός της Ελλάδος κατά την απογραφή της 17<sup>ης</sup> Μαρτίου 1991.
- Ermis – F, [www.ermis-f.eu](http://www.ermis-f.eu) [11/2020].
- Explore Crete, [www.explorecrete.com](http://www.explorecrete.com) [10/2020].
- Goodchild, M.F. (1985) Geographic information systems in undergraduate geography: a contemporary dilemma, Operational Geographer.
- H. Perlman, USGS and Evans J. (2019) The Natural Water Cycle, U.S. Geological Survey's (USGS) Water Science School.
- Hawkins, R. H., Jiang, R., Woodward, D. E.; Hjelmfelt, A. T., Van Mullem, J. A. (2002) "Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio". Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada. 42 (3): 629–643. DOI:10.1111/j.1752-1688.2006.tb04481.x.
- HEC – HMS User's Manual (2018)
- Hydrologic Cycle, United States Geological Survey, Public domain, (2017).
- Joo J., Kjeldsen, T., Hyeon-Jun, K. and Lee, H. (2014) A comparison of two event-based flood models (ReFH-rainfall runoff model and HEC-HMS) at two Korean catchments, Bukil and Jeungpyeong. KSCE J Civil Engineering 18, 330–343.
- Kastridis A. and Stathis, D., (2015) The Land Use Change and the Influence on the Maximum Discharge, 17th Panhellenic Forestry Conference At: Argostoli, Kefalonia Volume: p.p. 445 – 451.

- Lim Kyoung J., Engel B. A., Muthukrishnan S. and Harbor J. (2007) EFFECTS OF INITIAL ABSTRACTION AND URBANIZATION ON ESTIMATED RUNOFF USING CN TECHNOLOGY, JARWA, Volume42, Issue3, 629-643, DOI:/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04481.x
- Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., Strömqvist, J. & Arheimer, B. (2010) Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales. *Hydrology Research* 41.3–4, 295-319
- Manning's Values, FishXing, Version 3.0 Beta, (2006).
- Mostafazadeh, R.,; Sadoddin, A.; Bahremand, A.; Sheikh, V, et al. (2010) Assessing hydrological effects of Jafar-Abad watershed management project in Golestan province using HEC-HMS model, *Journal of Watershed Engineering and Management*, 2summer, 83-93.
- Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. (1970) "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles". *Journal of Hydrology*. 10 (3): 282–290. DOI:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Sarchani, S.; Seiradakis, K.; Flocas, H. and Tsanis, I., (2019) Analysis of a severe storm resulting in a flash flood in Western Crete, *Geophysical Research Abstracts*. 2019, Vol. 21, p1-1. 1p.
- Tassew, B. G., Belete M. A., and Miede, K. (2019) Application of HEC-HMS Model for Flow Simulation in the Lake Tana Basin: The Case of Gilgel Abay Catchment, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia, *Hydrology*, 6, 21.
- The European Commission's science and knowledge service, [www.ec.europa.eu](http://www.ec.europa.eu) [12/2020].
- Vozinaki, A. E., K., Morianou, G. G., Alexakis, D. D., and Tsanis, I. K. (2017) Comparing 1D and combined 1D/2D hydraulic simulations using high-resolution topographic data: a case study of the Koiliaris basin, Greece, *Hydrological Sciences Journal*, 62:4, 642-656, DOI: 10.1080/02626667.2016.1255746.
- Wikipedia, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) [09/2020].
- Z. Yusop ; C.H. Chan ; A. Katimon (2007) Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modelling stormflow hydrograph in an oil palm catchment, *Water Science and Technology* 56 (8): 41–48.

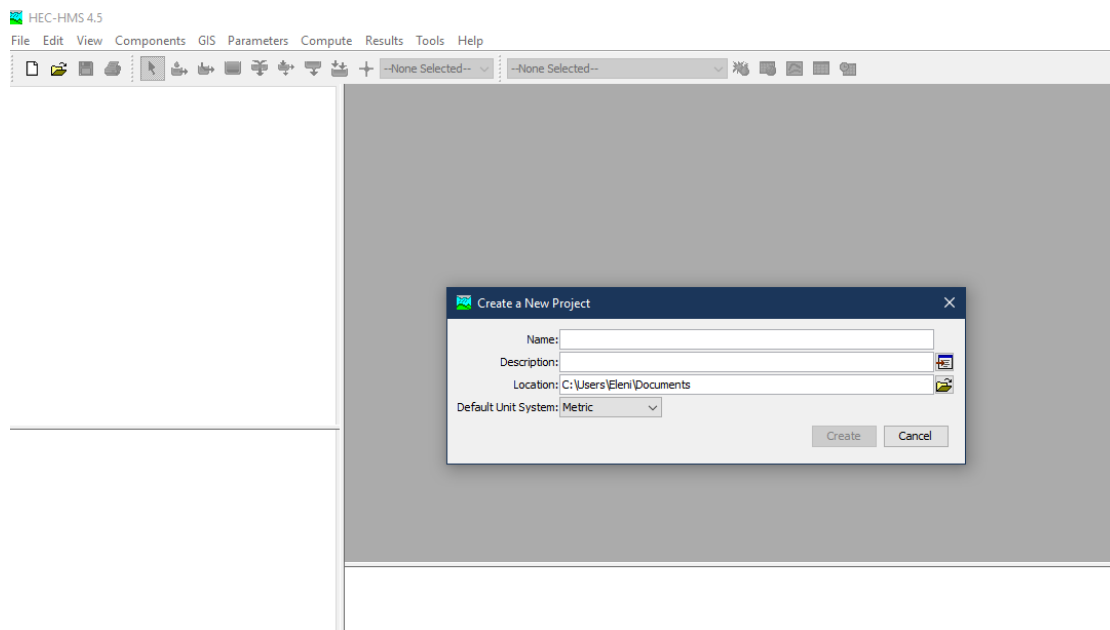
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

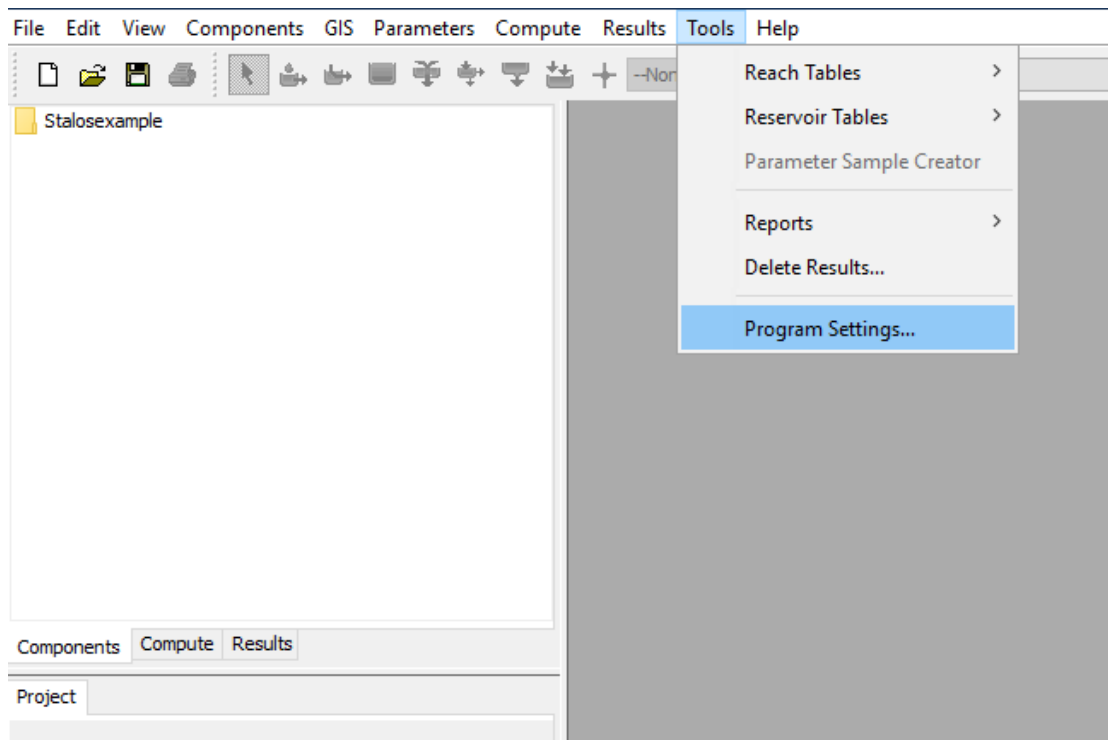
### ΣΤΗΣΙΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HEC-HMS

Στο συγκεκριμένο παράρτημα απεικονίζεται η ακολουθία βημάτων για το στήσιμο του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

#### Δημιουργία νέας εργασίας (Create a new project)

1. Για την δημιουργία μοντέλου επιλέγετε **File** → **New**.
2. Καταχωρείτε **Name**, **Description**, **Location**, **Unit system** στο καινούριο project και έπειτα επιλέγετε το κουμπί **Create**.
3. Για την επιλογή μονάδων και γενικών ρυθμίσεων του μοντέλου επιλέγετε **Tools** → **Program settings**.

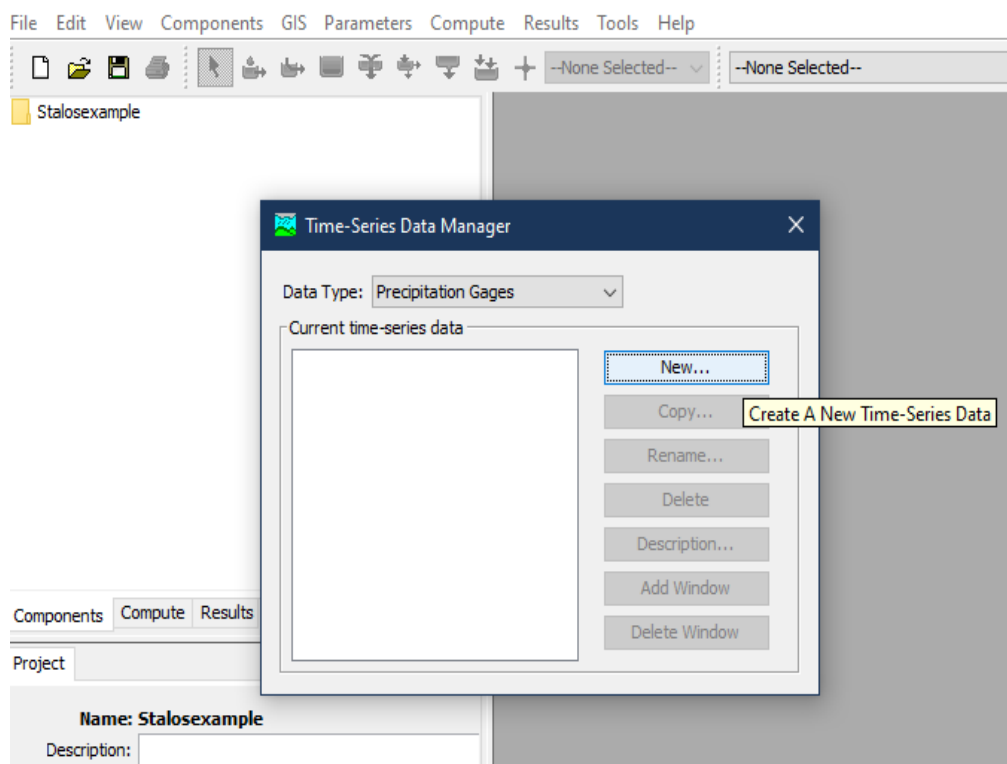
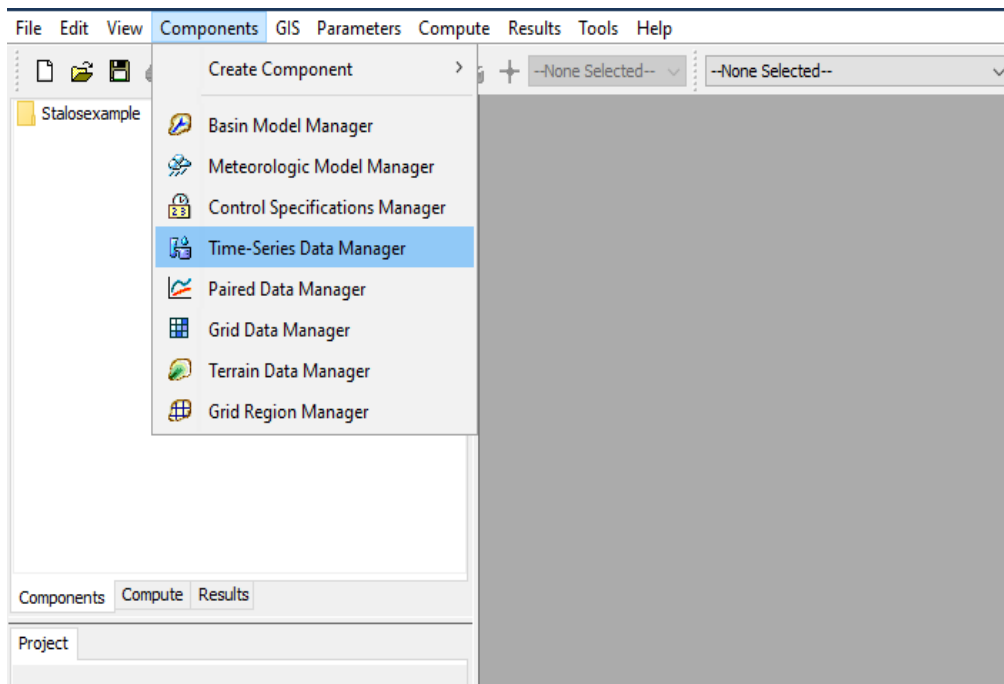


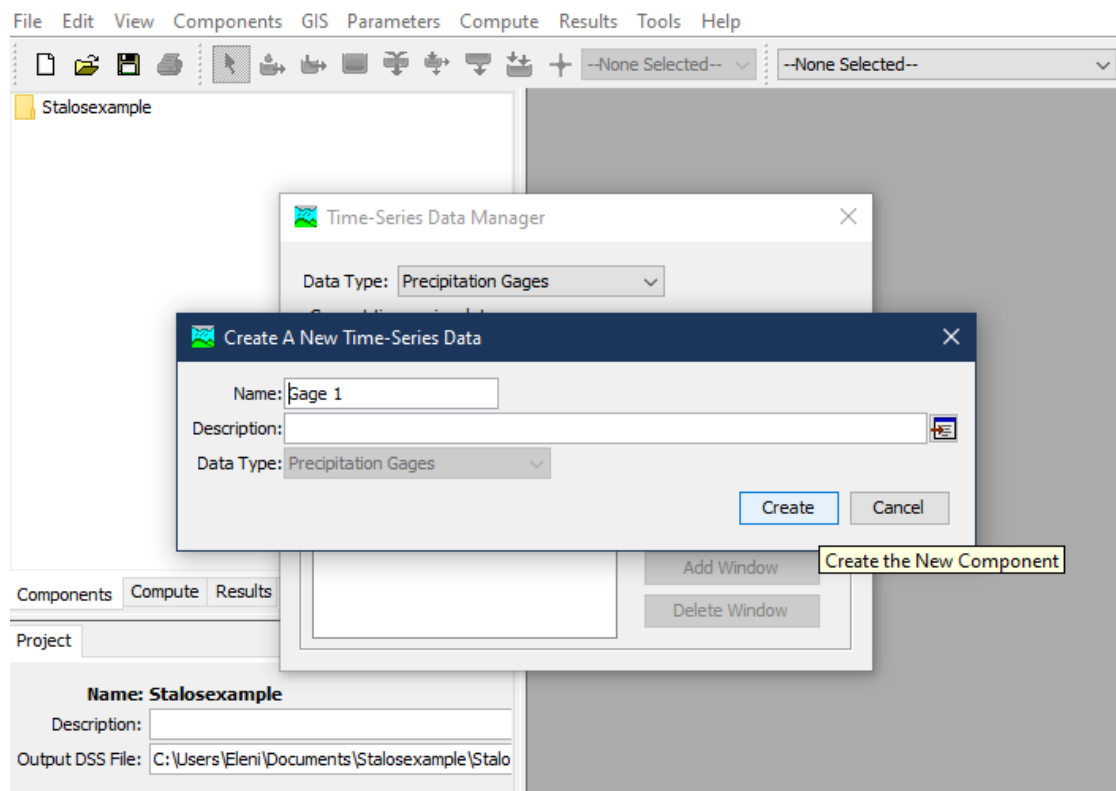


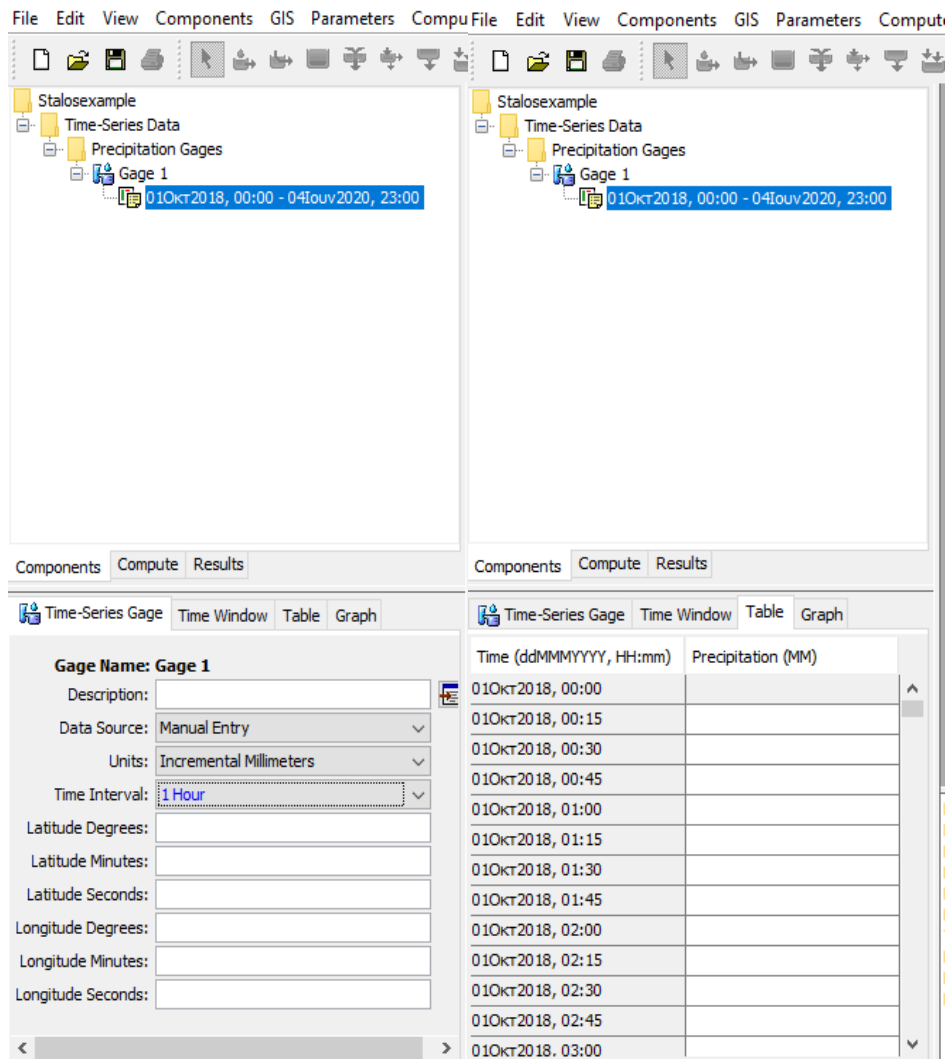
### Δεδομένα εισόδου (Input Data)

Όπως είπαμε το HEC-HMS μπορεί να στηθεί με δεδομένα χρονοσειρών (π.χ. βροχόπτωσης, παροχής, εξατμισοδιαπνοής κ.α.)




1. Για την εισαγωγή της χρονοσειράς της βροχόπτωσης για παράδειγμα επιλέγετε **Components** → **Time-Series Data Manager**.
2. Επιλέγεται το κουμπί **New**.
3. Προσθέτετε ένα όνομα **Name** και επιλέγετε το κουμπί **Create**.
4. Στην επιλογή **Time-Series Gage** επιλέγετε τις απαραίτητες ρυθμίσεις της χρονοσειράς.
5. Στην επιλογή **Time window** επιλέγονται οι ημερομηνίες των διαθέσιμων δεδομένων.
6. Στην επιλογή **Table** προστίθεται η χρονοσειρά της βροχόπτωσης όπως προκύπτει από το διαθέσιμο αρχείο δεδομένων σας.



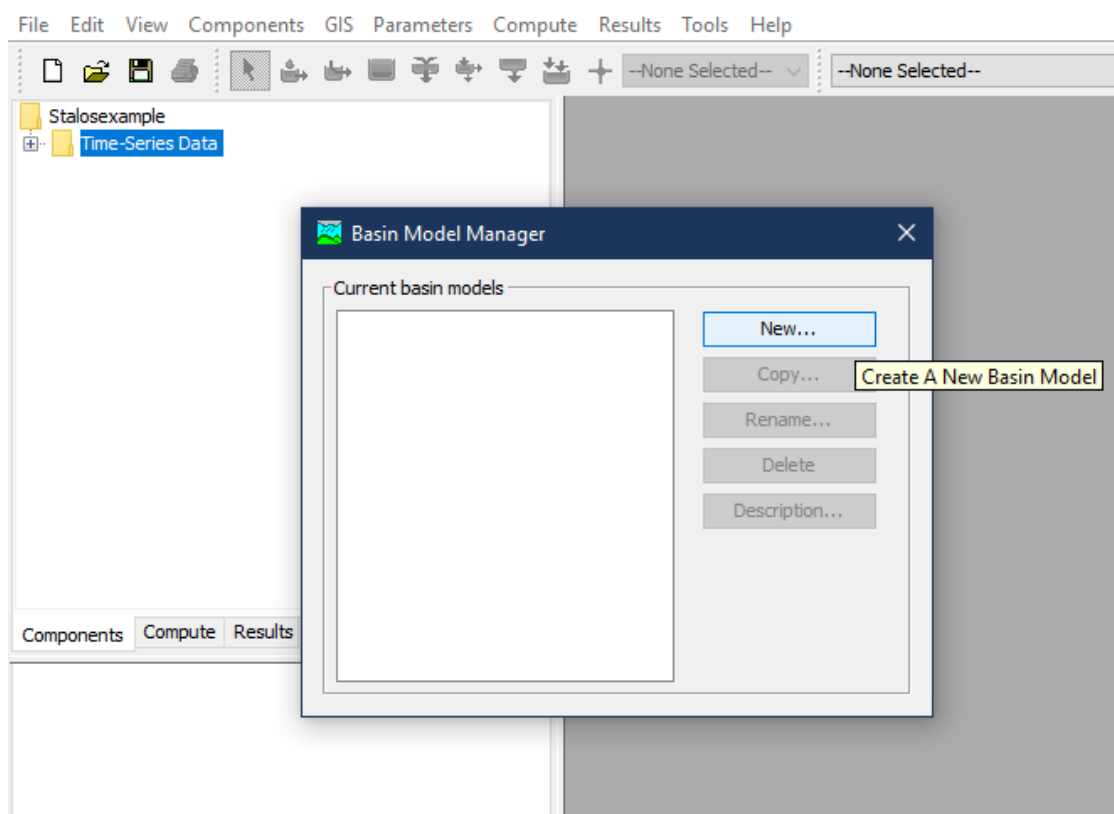
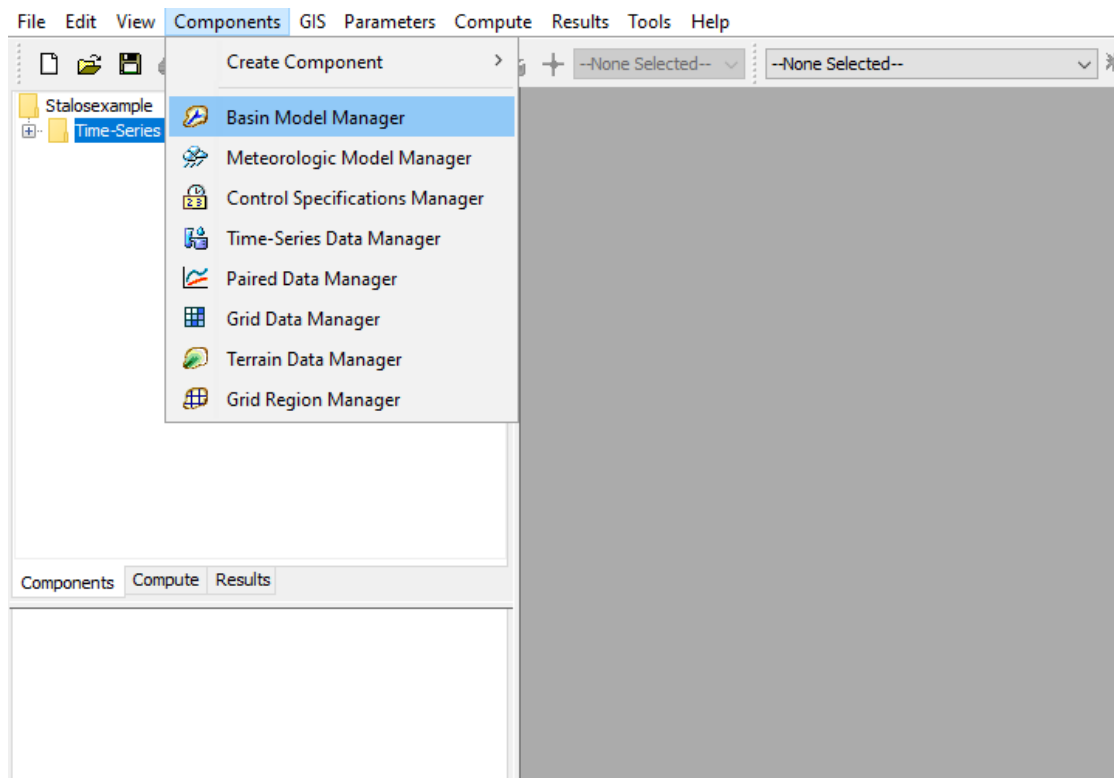


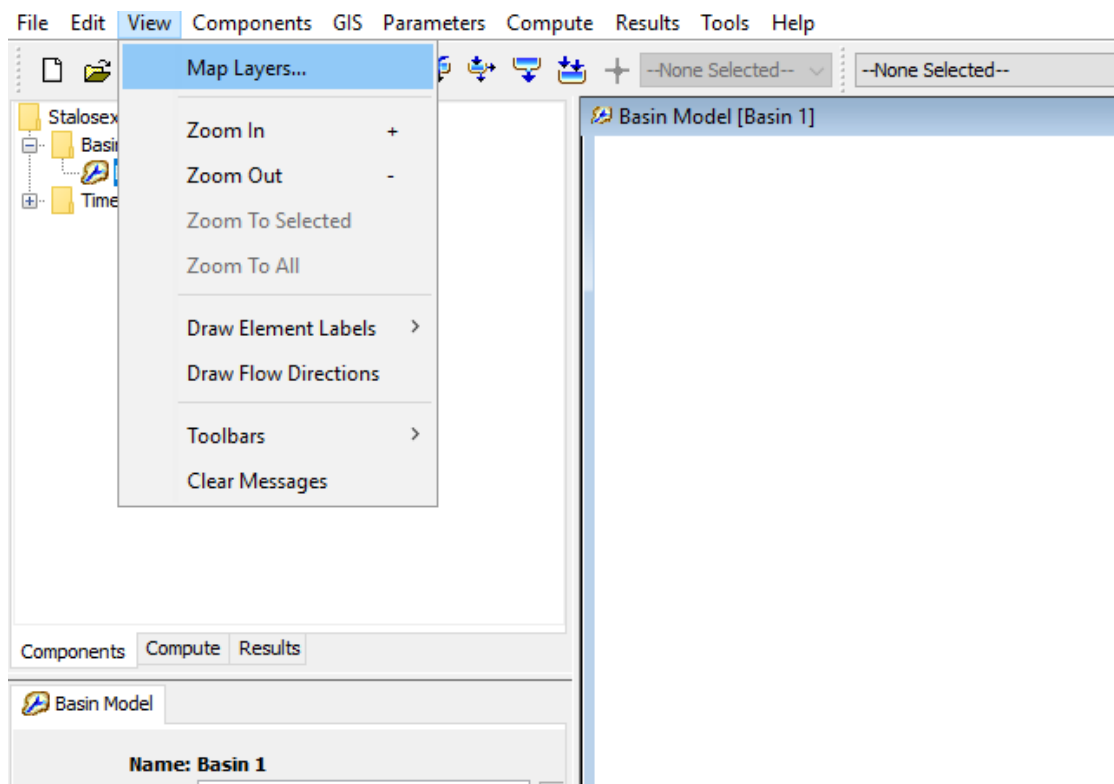
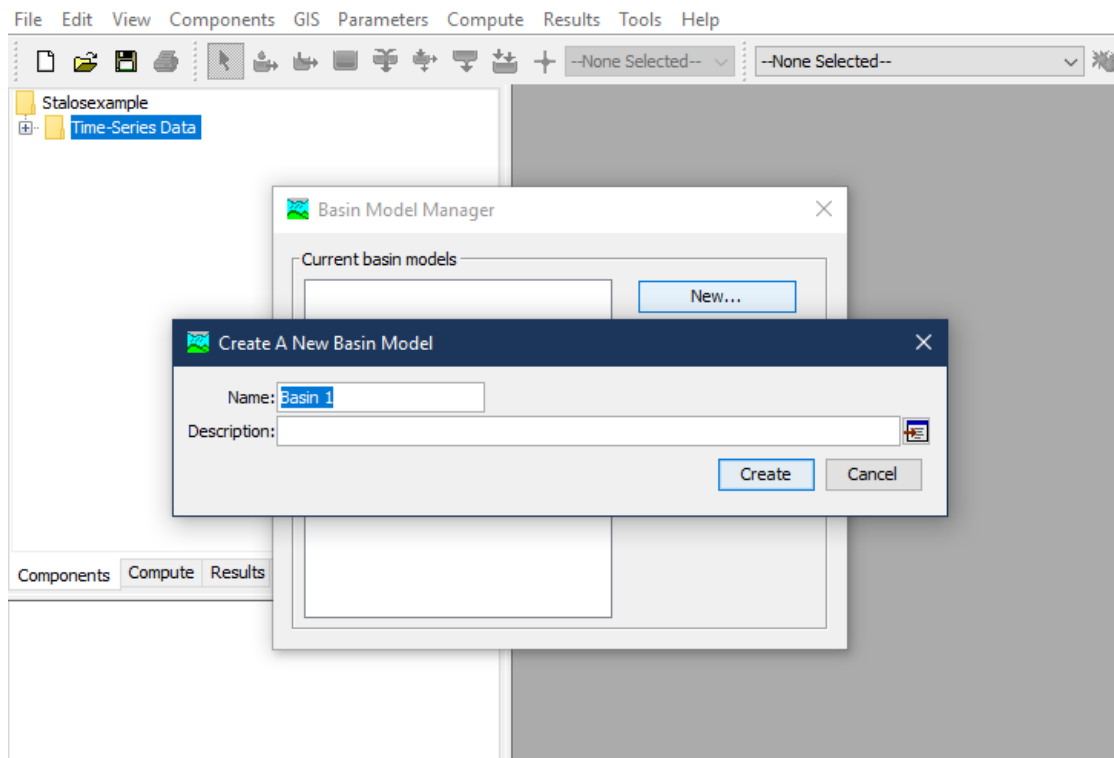


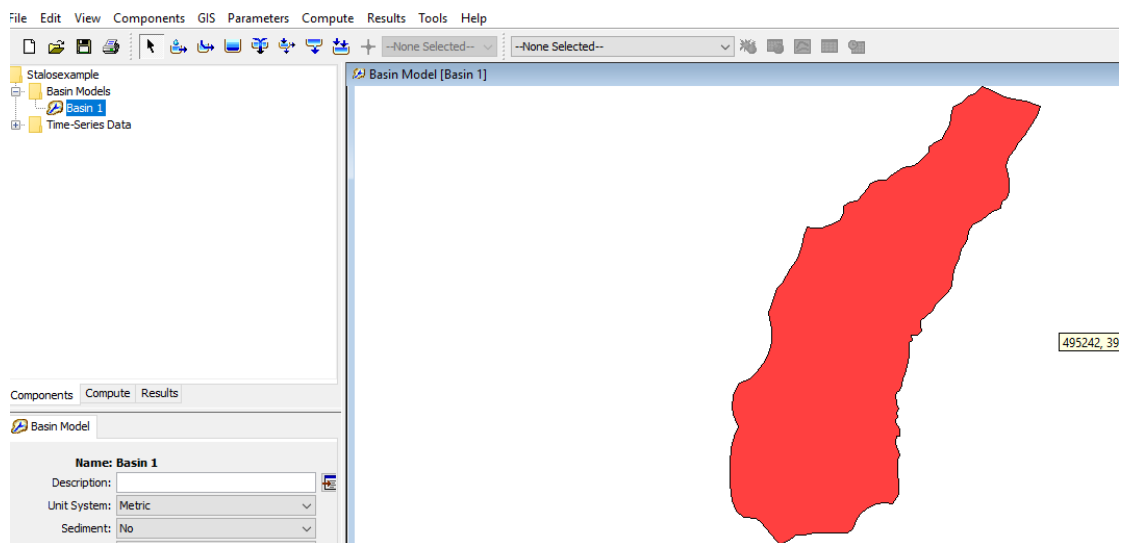
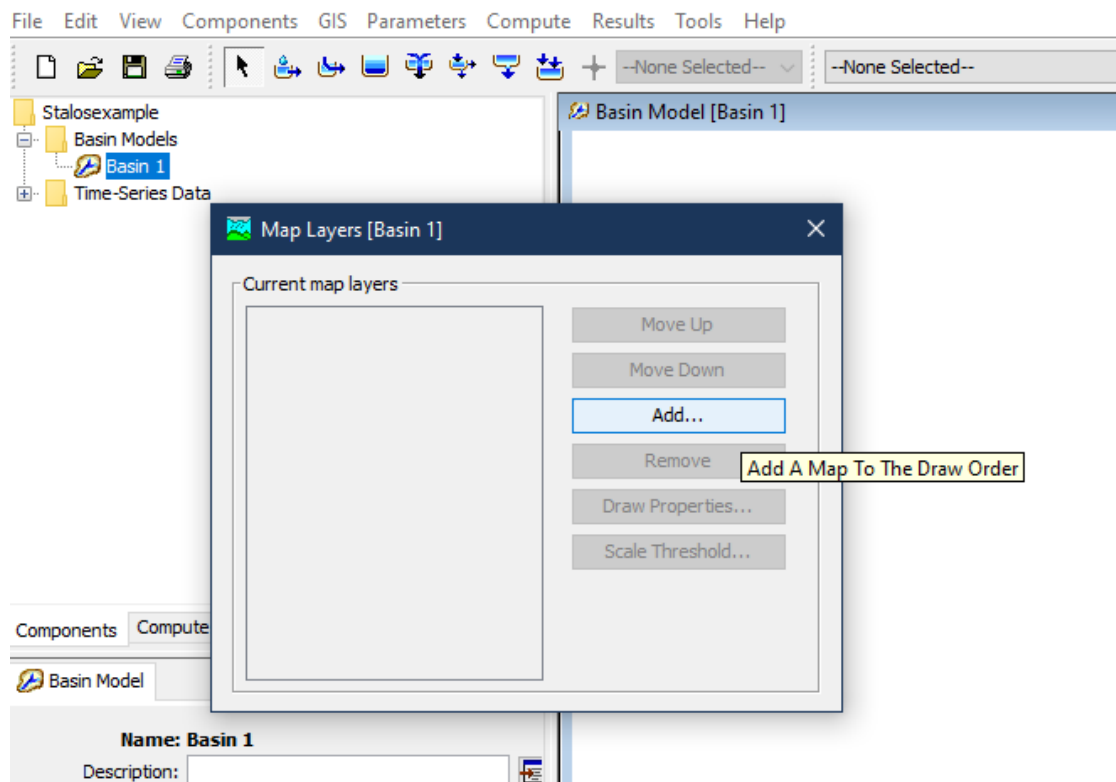
### Δημιουργία μοντέλου υδρολογικής λεκάνης απορροής (Create a basin model)

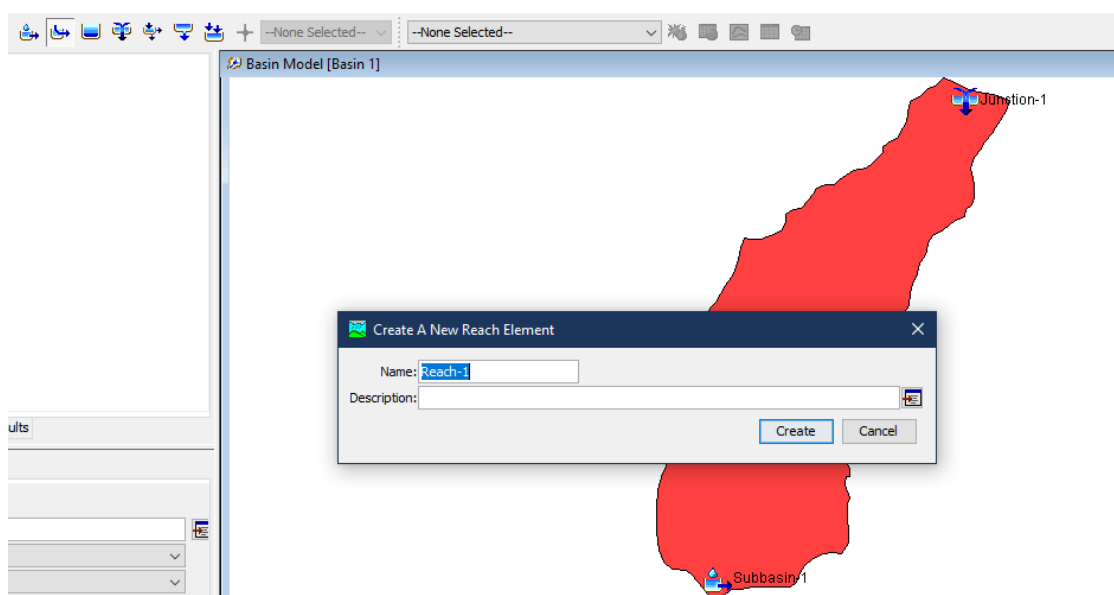
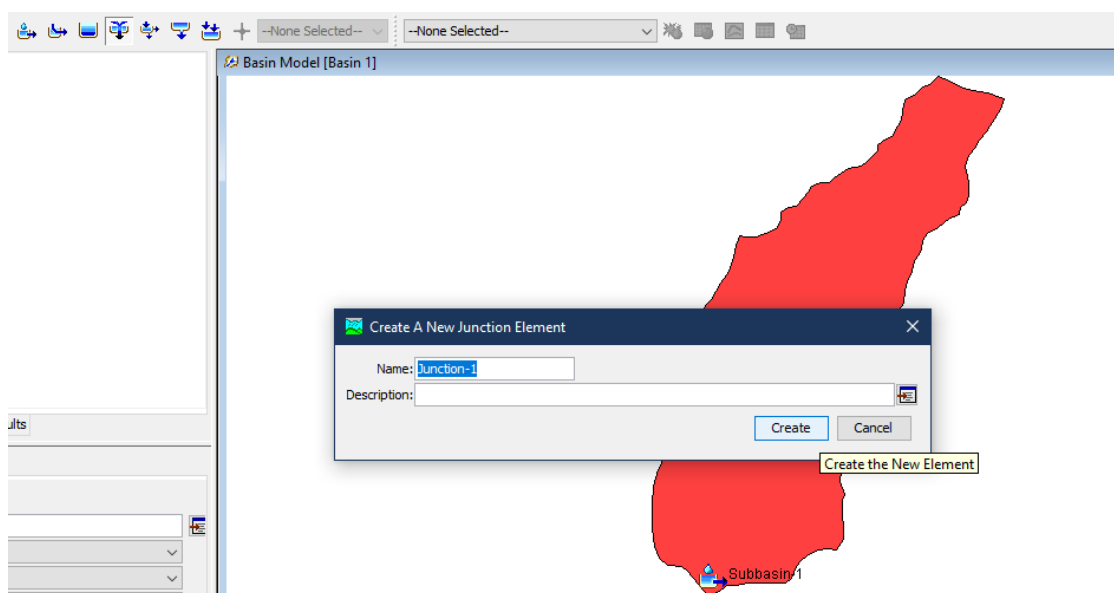
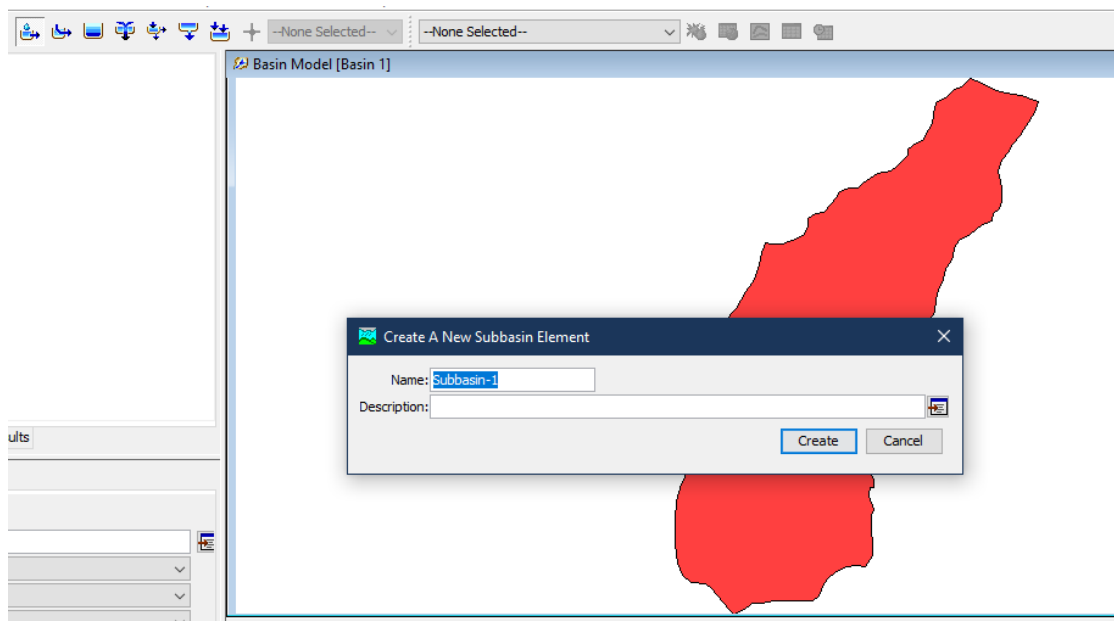
1. Για την δημιουργία της υδρολογικής λεκάνης επιλέγετε **Components** → **Basin Model Manager**.
2. Για την εισαγωγή του χάρτη της λεκάνης επιλέγεται **View** → **Map Layers**.
3. Προστίθενται το στοιχείο της υπολεκάνης (**Subbasin Creation Tool**) από το εικονίδιο .
4. Προστίθενται το στοιχείο σύνδεσης (**Junction Creation Tool**) από το εικονίδιο , όπου τοποθετείται στα κατάντη της λεκάνης.
5. Προστίθενται το στοιχείο του ποταμού (**Reach Creation Tool**) από το εικονίδιο , όπου συνδέεται πάνω στο εικονίδιο υπολεκάνης με κατεύθυνση προς τα κατάντη.
6. Πατώντας δεξί κλικ πάνω στο εικονίδιο Junction που έχει τοποθετηθεί στην λεκάνη, επιλέγεται το **Connect Downstream** για την ένωση του ποταμού με τη σύνδεση (junction).

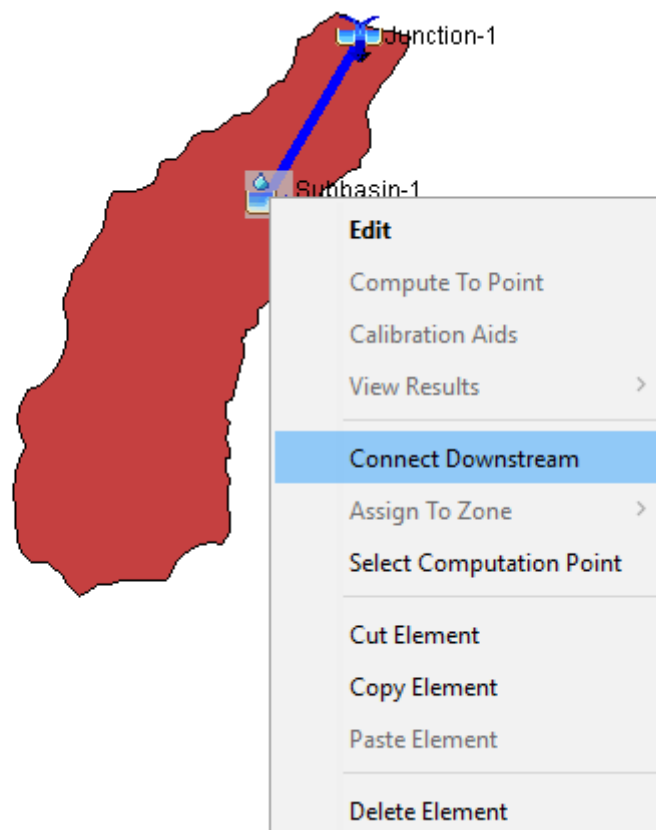
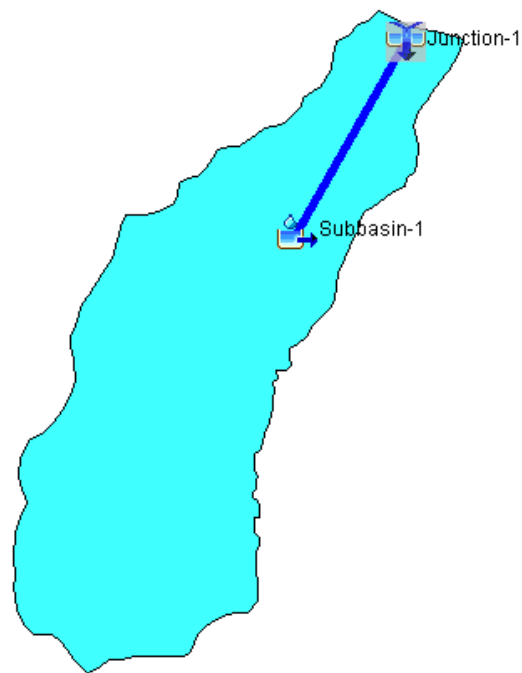












## Εισαγωγή στοιχείων για την λεκάνη απορροής (Enter Element Data for Subbasin-1)

1. Επιλέγεται από το αριστερό πάνελ το **Subbasin-1** και προστίθενται τα στοιχεία της λεκάνης.
2. Προστίθεται **Canopy method** (προαιρετικά).
3. Προστίθεται **Surface method** (προαιρετικά).
4. Προστίθεται **Loss method**.
5. Προστίθεται **Transform method**.
6. Προστίθενται τα στοιχεία της ροής στο **Baseflow**.

Τα επιμέρους αυτά στοιχεία για τη λεκάνη απορροής καθώς επίσης και οι απαιτούμενες παράμετροι που τα περιγράφουν έχουν αναλυθεί στην παραπάνω ενότητα της περιγραφής του μοντέλου.

Components		Compute	Results
Loss	Transform	Baseflow	Options
Subbasin	Canopy	Surface	
<b>Element Name: Subbasin-1</b>			
Description: <input type="text"/>			
Downstream: Reach-1			
*Area (KM2) 2.9			
Latitude Degrees: <input type="text"/>			
Latitude Minutes: <input type="text"/>			
Latitude Seconds: <input type="text"/>			
Longitude Degrees: <input type="text"/>			
Longitude Minutes: <input type="text"/>			
Longitude Seconds: <input type="text"/>			
Canopy Method: Simple Canopy			
Surface Method: Simple Surface			
Loss Method: SCS Curve Number			
Transform Method: SCS Unit Hydrograph			
Baseflow Method: Recession			

Components		Compute	Results
Loss	Transform	Baseflow	Options
Subbasin	Canopy	Surface	
<b>Basin Name: Stalos Basin</b>			
<b>Element Name: Subbasin-1</b>			
*Initial Storage (%) 5			
*Max Storage (MM) 5			
Crop Coefficient: 1.0			
Evapotranspiration: Only Dry Periods			
Uptake Method: --None--			

Components		Compute	Results
Loss	Transform	Baseflow	Options
Subbasin	Canopy	Surface	
<b>Basin Name: Stalos Basin</b>			
<b>Element Name: Subbasin-1</b>			
*Initial Storage (%) 5			
*Max Storage (MM) 5			



Components Compute Results

Subbasin Canopy Surface

Loss Transform Baseflow Options

**Basin Name: Stalos Basin**  
**Element Name: Subbasin-1**

Initial Abstraction (MM)

\*Curve Number:

\*Impervious (%)

Components Compute Results

Subbasin Canopy Surface

Loss Transform Baseflow Options

**Basin Name: Stalos Basin**  
**Element Name: Subbasin-1**

Graph Type:

\*Lag Time (MIN)

Components Compute Results

Subbasin Canopy Surface

Loss Transform Baseflow Options

**Basin Name: Stalos Basin**  
**Element Name: Subbasin-1**

Initial Type:

\*Initial Discharge (M3/S)

\*Recession Constant:

Threshold Type:

\*Ratio:

Components Compute Results

Subbasin Loss Transform Baseflow Options

**Basin Name: Basin 1**  
**Element Name: Subbasin-1**

Observed Flow:

Observed Stage:

Observed SWE:

Elev-Discharge:

Ref Flow (M3/S)

Ref Label:

## Enter Parameter for Reach elements

1. Επιλέγεται από το αριστερό πάνελ το **Reach-1** και προστίθενται τα στοιχεία του ποταμιού.
2. Προστίθενται τα στοιχεία στο **Routing**.
3. Προστίθενται τα στοιχεία στο **Loss/Gain**.

Components Compute Results

Reach Routing Loss/Gain Options

**Basin Name: Stalos Basin**  
**Element Name: Reach-1**

Description:

Downstream:

Routing Method:

Loss/Gain Method:

Components Compute Results

Reach Routing Loss/Gain Options

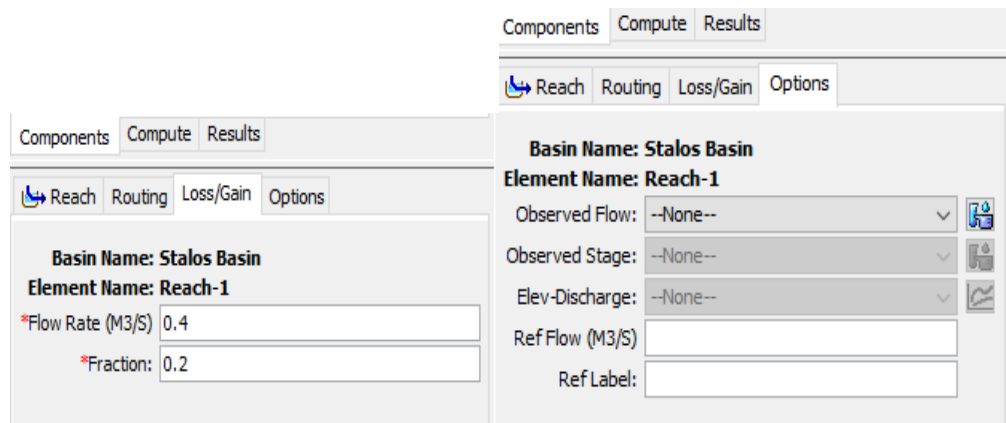
**Basin Name: Stalos Basin**  
**Element Name: Reach-1**

Initial Type:

\*Muskingum K (HR)

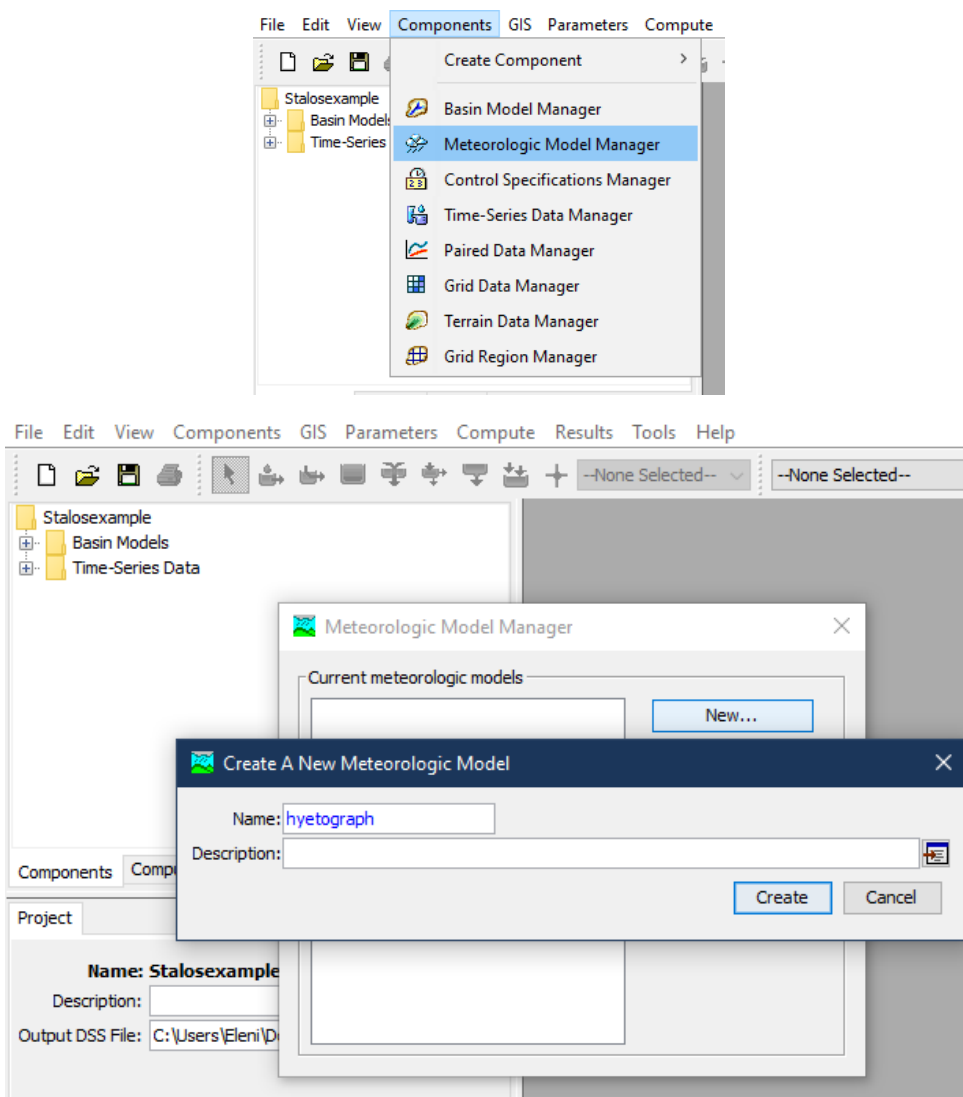
\*Muskingum X:

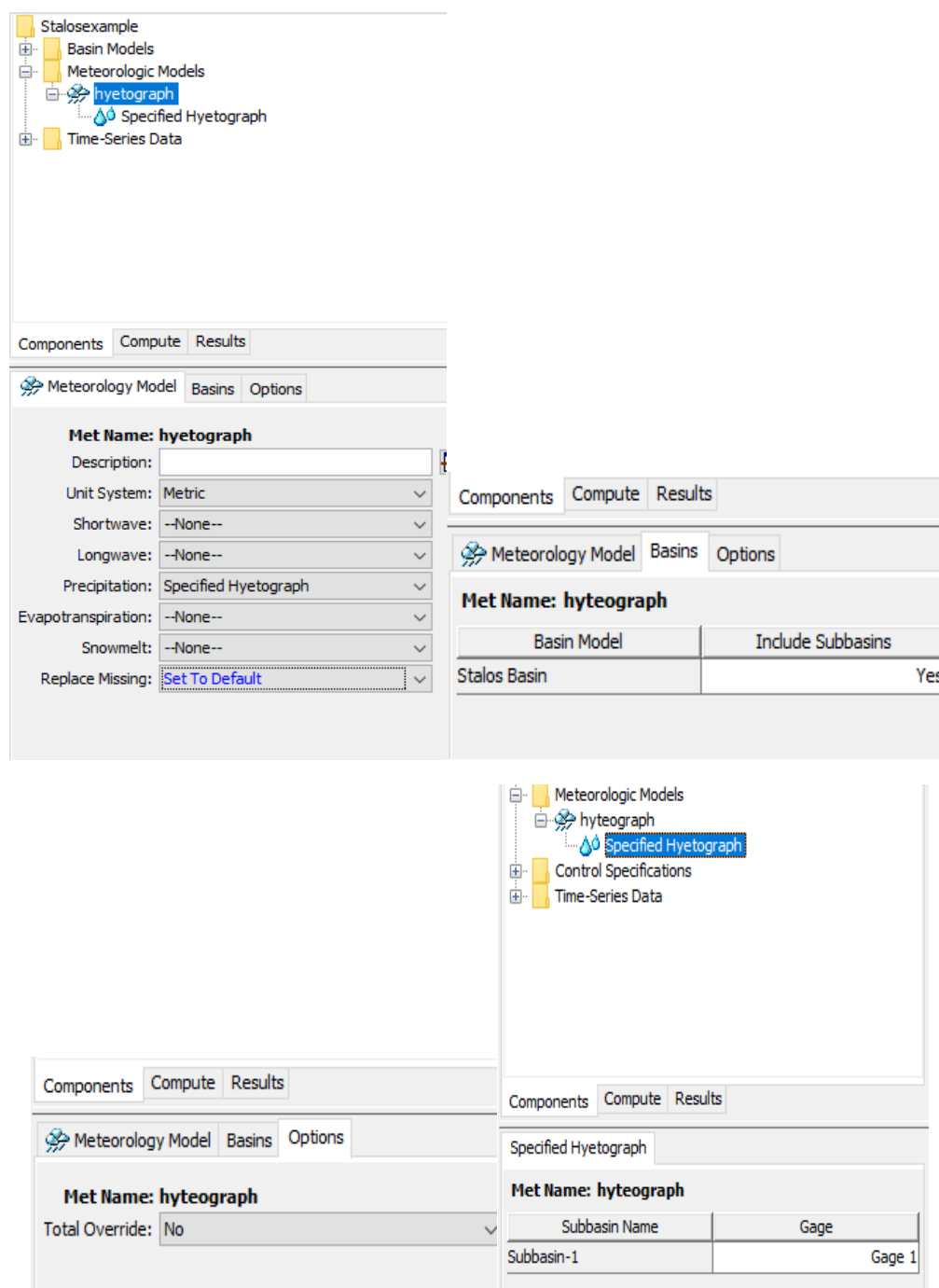
Subreaches:



### Δημιουργία Μετεωρολογικού μοντέλου (Create Meteorologic Model)

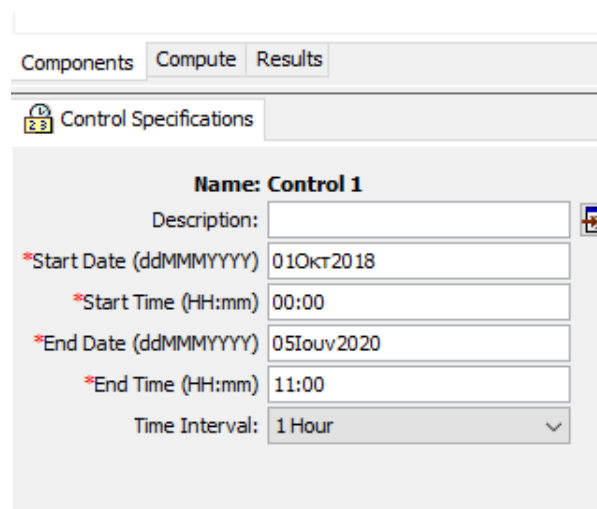
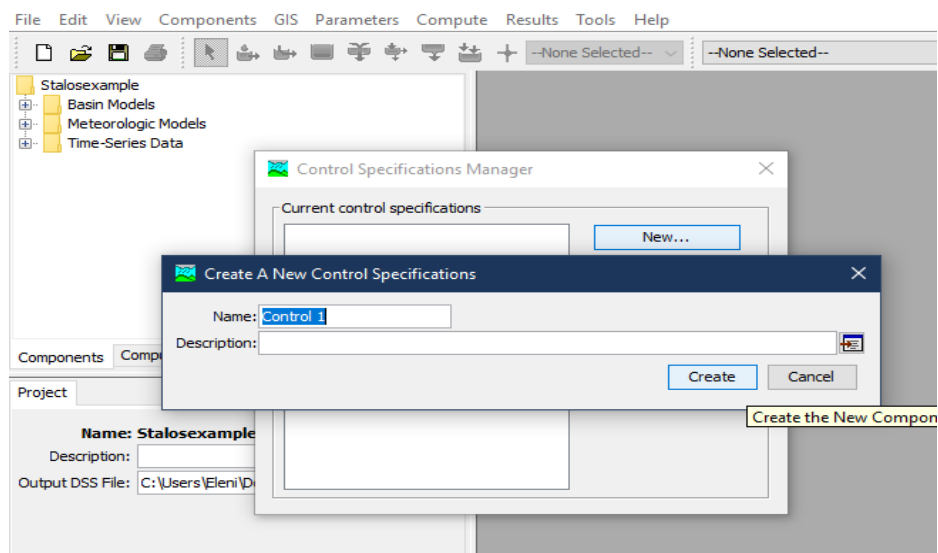
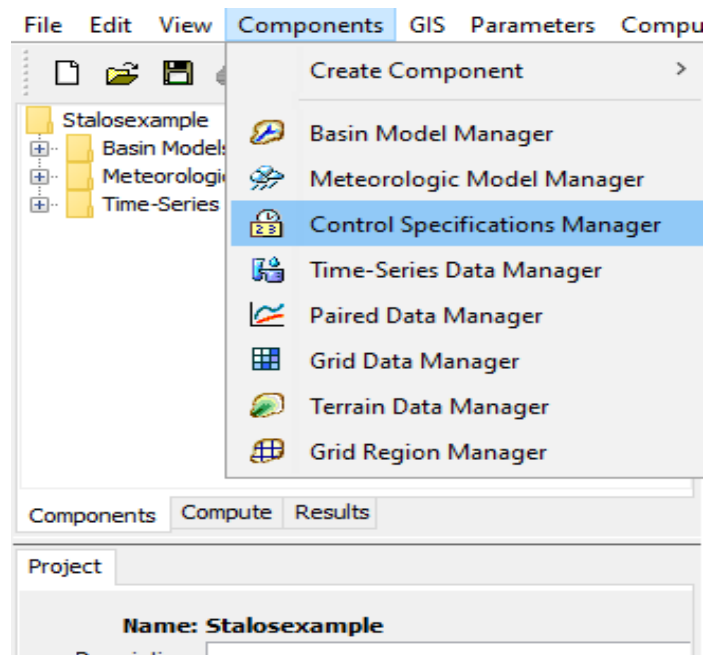
1. Για την εισαγωγή μετεωρολογικού μοντέλου επιλέγετε **Components** → **Meteorologic Model Manager**.
2. Επιλέγετε **New** και δίνετε όνομα στο μετεωρολογικό μοντέλο.
3. Έπειτα προσθέτετε τα στοιχεία στο **Meteorology model, Basins, Options**.





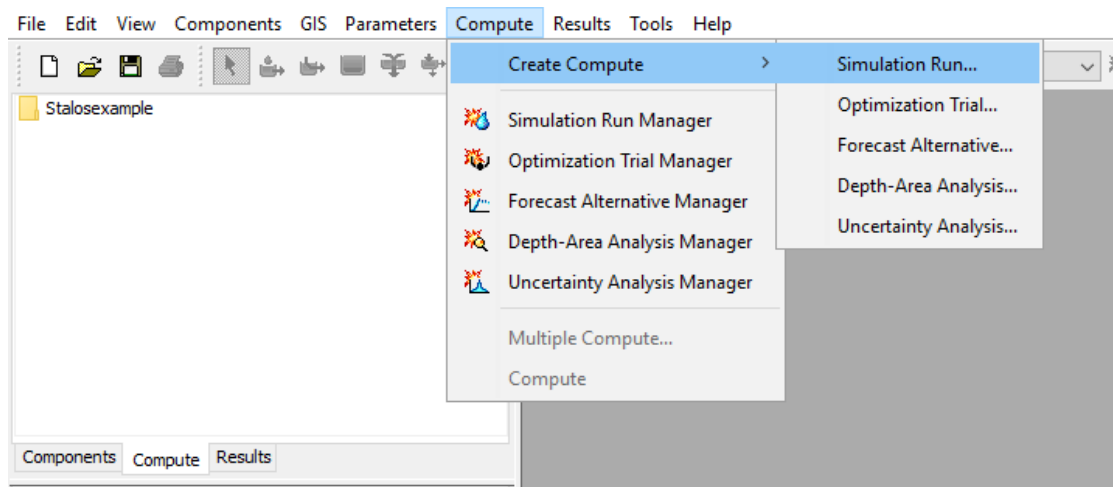
### Προσδιορισμός προδιαγραφών ελέγχου (Define Control Specifications)

1. Για την εισαγωγή προδιαγραφής ελέγχου επιλέγετε **Components** → **Control Specifications Manager**.
2. Επιλέγετε **New** και εισάγεται όνομα.
3. Επιλέγετε τη χρονική περίοδο τρεξίματος του μοντέλου στο **Control Specifications**.



## Δημιουργία εκτέλεσης προσομοίωσης (Create a Simulation Run)

1. Για να τρέξει το μοντέλο επιλέγετε **Compute** → **Create Compute** → **Simulation Run**.

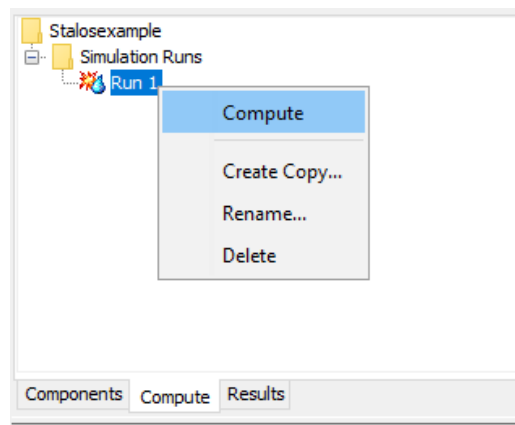


The wizard consists of four steps, each in a separate dialog box:

- Step 1 of 4:** A simulation run must have a name. You can give it a description after it has been created. The 'Name' field contains 'Run 1'. The instruction is 'To continue, enter a name and click Next.' Buttons: '< Back', 'Next >', 'Cancel'.
- Step 2 of 4:** A simulation run includes a basin model. Select one from the list below. A table lists 'Basin 1'. The instruction is 'To continue, select a basin model and click Next.' Buttons: '< Back', 'Next >', 'Cancel'.
- Step 3 of 4:** Selected basin model "Basin 1". A simulation run includes a meteorologic model. Select one from the list below. A table lists 'hyetograph'. The instruction is 'To continue, select a meteorologic model and click Next.' Buttons: '< Back', 'Next >', 'Cancel'.
- Step 4 of 4:** Selected basin model "Basin 1" and meteorologic model "hyetograph". A simulation run includes a control specifications. Select one from the list below. A table lists 'Control 1'. The instruction is 'Select a control specifications and click Finish.' Buttons: '< Back', 'Finish', 'Cancel'.

### Υπολογισμός εκτέλεσης προσομοίωσης (Compute a Simulation Run)

1. Για να εκτελεστεί το τρέξιμο επιλέγεται **Compute** και δεξί κλικ πάνω στο **Run 1**→ **Compute**.



### Προβολή αποτελεσμάτων μοντέλου (View Model Results)

1. Τα αποτελέσματα του μοντέλου βρίσκονται στην επιλογή **Results**.

