



# ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ Ν. ΒΕΝΕΤΣΑΝΟΥ MSc Γεωλόγος

# ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΧΑΒΡΙΑ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

# ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

# ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2020

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης





PANAGIOTA N. VENETSANOU MSc Geologist

# HYDROGEOLOGICAL SIMULATION OF THE COASTAL ALLUVIAL AQUIFER OF THE HAVRIAS RIVER BASIN IN CHALKIDIKI UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS

DISSERTATION THESIS

THESSALONIKI 2020

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης





«Visibilia ex Invisibilibus»





### ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ Ν. ΒΕΝΕΤΣΑΝΟΥ MSc Γεωλόγος

### ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΧΑΒΡΙΑ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Εκπονήθηκε στον Τομέα Γεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. τον Φεβρουάριο του 2020

### Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 16/12/2019

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°: 194

### Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Καθηγητής, Βουδούρης Κωνσταντίνος Επιβλέπων Αναπλ. Καθηγήτρια, Αναγνωστοπούλου Χριστίνα, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής Αναπλ. Καθηγητής, Λουκάς Αθανάσιος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

### Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Βουδούρης Κωνσταντίνος, Επιβλέπων Αναπλ. Καθηγήτρια Αναγνωστοπούλου Χριστίνα Αναπλ. Καθηγητής Λουκάς Αθανάσιος Καθηγητής Πεταλάς Χρήστος Καθηγητής Μυλόπουλος Νικήτας Αναπλ. Καθηγητής Γεωργίου Πανταζής Επίκ. Καθηγήτρια Τολίκα Κωνσταντία



© Παναγιώτα Ν. Βενετσάνου, MSc Γεωλόγος, 2020 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΧΑΒΡΙΑ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ. – Διδακτορική Διατριβή

© Panagiota N. Venetsanou, MSc Geologist, 2020 All rightS reserved. HYDROGEOLOGICAL SIMULATION OF THE COASTAL ALLUVIAL AQUIFER OF THE HAVRIAS RIVER BASIN IN CHALKIDIKI UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS. – *Ph.D. Thesis* 

Η παρούσα διδακτορική διατριβή χρηματοδοτήθηκε από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) στο πλαίσιο της «1ης ΠΡΟΚΗΡΥΞΗΣ ΥΠΟΤΡΟΦΙΩΝ ΕΛΙΔΕΚ ΓΙΑ ΥΠΟΨΗΦΙΟΥΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΕΣ» (Κωδικός Υποτροφίας: 174, 95543).

Citation:

Βενετσάνου Π. Ν., 2020. – Υδρογεωλογική Προσομοίωση του Παράκτιου Αλλουβιακού Υδροφορέα της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Χαβρία Χαλκιδικής σε Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμ. Γεωλογίας Νο 194, 200 σελ.

Venetsanou P. N., 2020. –Hydrogeological Simulation of the Coastal Aquifer of the Havrias River Basin in Chalkidiki under Climate Change Conditions. Ph.D. Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Annex Number of Scientific Annals of the School of Geology No 194, 200 pp.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας του Τομέα Γεωλογίας του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Επιβλέπων της διδακτορικής διατριβής ήταν ο Καθηγητής κ. Βουδούρης Κωνσταντίνος. Τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής ήταν η Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κ. Αναγνωστοπούλου Χριστίνα και ο Αναπληρωτής Καθηγήτης κ. Λουκάς Αθανάσιος. Μέλη της επταμελούς επιτροπής ήταν ο Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, κ. Πεταλάς Χρήστος, ο Καθηγητής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, κ. Μυλόπουλος Νικήτας, ο Αναπλ. Καθηγητής του Τμήματος Γεωπονίας, ΑΠΘ, κ. Γεωργίου Πανταζής και η Επικ. Καθγήτρια του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, κ. Τολίκα Κωνσταντία.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

**OPA** 

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή χρηματοδοτήθηκε από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) στο πλαίσιο της «1<sup>ης</sup> ΠΡΟΚΗΡΥΞΗΣ ΥΠΟΤΡΟΦΙΩΝ ΕΛΙΔΕΚ ΓΙΑ ΥΠΟΨΗΦΙΟΥΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΕΣ» (Κωδικός Υποτροφίας: 174, 95543).

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλλαν για την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Ευχαριστίες, που περικλείουν ένα ταξίδι μιας τετραετίας γεμάτης έντονων και ιδιαίτερων στιγμών, που αποτελούν σταθμό στη ζωή μου και δύσκολα αποτυπώνονται με λέξεις.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Βουδούρη Κωνσταντίνο για την εμπιστοσύνη, την υποστήριξη, την καθοδήγηση, τις συμβουλές, καθώς και για όλα όσα με δίδαξε καθ' όλη τη διάρκεια τόσο της διδακτορικής όσο και της μεταπτυχιακής μου διατριβής. Θερμές και ειλικρινείς ευχαριστίες οφείλω στην καθηγητριά μου κ. Αναγνωστοπούλου Χριστίνα. Καθοδήγηση, συμβουλές, συμπαράσταση, εμπιστοσύνη, αφοσίωση και φροντίδα καθοριστικοί παράγοντες της εξέλιξης και της ολοκλήρωσης της παρούσας διατριβής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Λουκά Αθανάσιο για τα εποικοδομητικά σχόλια, τις επισημάνσεις και τις παρατηρήσεις του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Θερμά ευχαριστώ και στα υπόλοιπα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, κ. Πεταλά Χρήστο, κ. Μυλόπουλο Νικήτα, κ. Γεωργίου Πανταζή και κ. Τολίκα Κωνσταντία για τις επισημάνσεις και τις παρατηρήσεις τους επί του κειμένου.

Ευχαριστίες οφείλω σε όλα τα πρόσωπα, που απαρτίζουν το Εργαστηρίο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Διδάκτορα Υδρογεωλογίας κ. Μάττα Χρήστο για τις συμβουλές και τη βοήθειά του. Θερμές ευχαριστίες και στη Διδάκτορα Γεωθερμίας κ. Παπαχρήστου Μαρία για τις πολύτιμες συμβουλές και την υποστηρίξη της.

Θερμό ευχαριστώ στο Στάθη Παπαδόπουλου και την Παρθένα για την άψογη και άρτια συνεργασία κατά τις υπαίθριες παρατηρήσεις. Η βοήθειά τους ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον κ. Μανάκο Αντώνη, γεωλόγο του ΕΑΓΜΕ, για τις συμβουλές του, τις γνώσεις, καθώς και για τα πολύτιμα στοιχεία, που μου παρείχε. Θερμά ευχαριστώ στον γεωλόγο Τζιρίνη Αποστόλη για τη βοήθειά του. Τέλος, επιθυμώ να ευχαριστήσω, τον κ. Σαραφίδη, πρόεδρο του Δημοτικού Συμβουλίου της Ορμύλιας, τους δημοτικούς υπαλλήλους, καθώς και τους κατοίκους της Ορμύλιας, που με καλοδέχτηκαν και με διευκόλυναν κατά τη διάρκεια των υπαίθριων μετρήσεων.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες επιθυμώ να εκφράσω στους δικούς μου ανθρώπους... Ένα τεράστιο ευχαριστώ, από τα βάθη της καρδιάς μου, δεν αρκεί προς την οικογένειά μου! Οι γονείς μου, η Αποστολίτσα μου, ο παππούς, οι γιαγιάκες μου, ο θείος, η θεία, η Μαργαρίτα και η Χριστίνα... Βράχοι...στηλοβάτες, δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια, με πολλή αγάπη, φως και πίστη...

Καπού εδώ, οφείλω και ένα ευχαριστώ στη Χριστίνα Ντζίφα, που με δίδαξε να ακολουθώ αυτό που μου προτείνει η αβεβαιότητα, κοιτάζοντας εκεί που θέλω να πάω...γιατί αλλιώς θα πάω εκεί που κοιτάω...

Τα ευχαριστώ συνεχίζονται προς τη συνοδοιπόρο όλων των φοιτητικών μου χρόνων, Διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας, Δημητράκη Λαμπρινή. Σκέψεις, ανησυχίες, δάκρυα, χαμόγελα, γέλια συντρόφευαν, αλλά και θα συντροφεύουν το ταξίδι μας προς την εξερεύνηση της επιστήμης και της ζωής...

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Θερμό ευχαριστώ οφείλω στις πολύ καλές μου φίλες, Υποψήφιες Διδάκτορες του τμήματος Γεωλογίας, Λάζογλου Γεωργία, Κοκκαλά Αλίκη, Δεβλιώτη Κυριακή, Ζωή Πανταζοπούλου και Διδάκτορα Μακρή Κυριακή. Η καθεμιά, με τον ξεχωριστό και μοναδικό της τρόπο συνέβαλλαν σε αυτό το ταξίδι. Πολλά ευχαριστώ στους καλούς μου φίλους Αχιλλέα Πεϊτσίδη και Αραμπέλο Νικόλα για την αμέριστη βοήθειά τους. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στις πολύ καλές φίλες Φλώρου Λυδία και Μακαρατζή Χριστίνα, αρχικά, για την εμπιστοσύνη που υπέδειξαν στο πρόσωπό μου, για την αμέριστη βοήθεια κατά τις υπαίθριες παρατηρήσεις, αλλά και για την υποστηριξή τους.

Οι ευχαριστίες ολοκληρώνονται με την έκφρασή τους, στους φίλους μου, του φίλους καρδιάς, όπως τους αποκαλώ: Σόνια, Αναστασία, Αλέκος, Αθηνά, Άλεξ, Στέλλα, Βίρτζι που βρίσκονται πάντα δίπλα μου, εδώ και 13 χρόνια...

Η παρούσα διδακτορική διατριβή είχε ως αντικείμενο την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας με καινοτόμα στοιχεία για την αξιόπιστη και βέλτιστη συνδυασμένη εφαρμογή των κλιματικών και των υδρολογικώνυδρογεωλογικών μοντέλων σε υδροφορείς με ελάχιστα ή και χωρίς παρατηρούμενα μετεωρολογικά και υδρολογικά-υδρογεωλογικά δεδομένα. Για την επίτευξη του στόχου συνδυάστηκαν διαφορετικά μοντέλα (κλιματικά μοντέλα, μοντέλα υδρολογίας και προσομοίωσης υπόγειας ροής), επιστημονικά εργαλεία (Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών-GIS), καθώς και στατιστικά πακέτα (πακέτο γλώσσας προγραμματισμού R). Η εφαρμογή της μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκε στον αλλουβιακό υδροφορέα, που αναπτύσσεται στο παράκτιο τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία Χαλκιδικής. Για την εκτίμηση της κλιματικής αλλαγής, χρησιμοποιήθηκε το περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4, στο οποίο ενσωματώθηκαν τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας MPI και HadGEM2 με χωρική ανάλυση 50 x 50 km, ακολουθώντας μια από τις πλέον πρόσφατες προσεγγίσεις και συγκεκριμένα, το πιο ακραίο σενάριο εκπομπών RCP8.5. Για τη ρεαλιστική αναπαράσταση του παροντικού κλίματος και την εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος της περιοχής έρευνας δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων, αποτελούμενη από κλιματικές παραμέτρους υψηλής χωροχρονικής κλίμακας, η οποία επιτεύχθηκε μέσω της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging. Από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging στις μελλοντικές παραμέτρους των δεδομένων εισόδου του περιοχικού κλιματικού μονέλου RegCM4, εκτιμήθηκαν οι μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων για τις μελλοντικές περιόδους 2031-2050 και 2080-2099. Τα ποσοστά μείωσης και αύξησης των κλιματικών παραμέτρων, που προέκυψαν, διαφέρουν ανάλογα με το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας, που χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου στο περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4. Η προσομοίωση της υπόγειας ροής του παράκτιου υδροφορέα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής πραγματοποιήθηκε μέσω της εφαρμογής του κώδικα MODFLOW. Για τον προσδιορισμό του παροντικού και του μελλοντικού εμπλουτισμού του υδροφορέα, που γίνεται μέσω της κατείσδυσης του νερού της βροχόπτωσης, της διήθησης από τον ποταμό Χαβρία και των επιστροφών άρδευσης, χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗγίας

μοντέλο ArcSWAT. Από τα αποτελέσματα της συνδυασμένης εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με το περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4, παρατηρήθηκε τάση μείωσης της κατείσδυσης έως το τέλος του 21° αιώνα, που ποικίλει ανάλογα με το μοντέλο γενικής κυκλοφορορίας και κυμαίνεται από 4,5-11% (περίοδος 2031-2050) έως 15-27% (περίοδος 2080-2099). Επιπρόσθετα, διαπιστώθηκε ότι όχι μόνο οι μεταβολές στη βροχόπτωση αλλά και οι μεταβολές στη θερμοκρασία επιδρούν καθοριστικά στις συνιστώσες του υδρολογικού ισοζυγίου. Τέλος, η διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη στάθμη του υπόγειου νερού επιτεύχθηκε μέσω της εφαρμογής του κώδικα MODFLOW με δεδομένα εισαγωγής τα αποτελέσματα της εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τα διάφορα κλιματικά δεδομένα. Από την προσομοίωση του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής προέκυψε η συνεχής ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου νερού έως το τέλος του 21° αιώνα, ως επακόλουθο της μείωσης της κατείσδυσης και κατ'επέκταση της επανατροφοδοσίας του. Η ελάττωση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού και η διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα εκτιμάται ότι θα προκαλέσει την ποσοτική μείωση και ποιοτική υποβάθμιση του υδροφόρου συστήματος. Το γεγονός αυτό θα αποτελέσει τροχοπέδη για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών της περιοχής έρευνας, καθώς συνδέονται άμεσα με το υπόγειο νερό.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

# Abstract Woving

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΦΡΑΣ

The object of the dissertation thesis is to introduce a comprehensive methodology, which can be implemented into any ungauged or data-scarce aquifer, reducing the uncertainties in hydrogeological-hydrological simulation due to the limited observed hydrogeological-hydrological and meteorological data. Overall, the proposed methodology leads to the reliable estimation of the potential climate change impacts on an aquifer. For this purpose, climate, hydrological and groundwater flow models, tools (GIS) and statistical packages (R statistical program) were coupled. The proposed methodology was carried out in a coastal alluvial aquifer, being part of the Havrias river basin (Chalkidiki, Greece). The general circulation models (GCMs), Hadley Global Environment Model 2 (HadGME2) and MPI Earth System Model running on mixed resolution grid (MPI) under the extreme RCP8.5 pathway were used as forcing data to the Regional Climate Model Version 4 (RegCM4) in order to represent the future climate over the research area. The reliability of the RegCM4 climate model to represent the climate conditions over the research area was enhanced by applying the spatio-temporal Kriging approach. The spatio-temporal Kriging was also implemented into the climate model simulations for the future periods (2031-2050 and 2080-2099). Based on the results, the changes (increase/decrease) in the future climate parameters vary between the general circulation models (GCMs). Then, the MODFLOW was employed to simulate the groundwater system of the coastal aquifer of the Havrias river basin under climate change conditions. The aquifer's recharge was quantified by using the ArcSWAT hydrological model. The aquifer is mainly recharged mainly by rainfall infiltration, infiltration through torrent beds and irrigation returns. The potential climate change effects on the hydrological components (infiltration, surface runoff and evapotranspiration) over the research area until the end of the 21<sup>st</sup> century were investigated by driving the ArcSWAT model with the Regional Climate Model Version 4 (RegCM4) forcing data, resulted from the spatio-temporal Kriging approach. According to the results, the response of the hydrological components varies between the climate model simulations. In particular, the infiltration reduction ranges between 4.5-11% (2031-2050) and 15-27% (2080-2099). Moreover, it is proved that both precipitation and temperature are the most influential climate

parameters in determining the water balance of the study area. The results from the SWAT application with the climate model data, namely the estimated infiltration and runoff, were used as input data to drive the MODFLOW model. The groundwater simulation indicated that the reduce in infiltration resulted in the groundwater level decline until the end of the 21<sup>st</sup> century. The estimated decline of the groundwater level implies the decrease in the water resources availability and the seawater intrusion, causing the qualitative and quantitative deterioration of the aquifer system. In conclusion, the above methodology can be applied into any ungauged or datascarce aquifer for the reasonable assessment of hydrogeological-hydrological impacts of climate change.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



1. Εισαγωγή	10
1.1 Γενικά	10
1.2 Ελαχιστοποίηση των αβεβαιοτήτων των παραμέτρων των κλιματικών μοντέλων	13
1.3 Υδρολογική-Υδρογεωλογική Προσομοίωση σε Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής	15
1.4 Αντικείμενο και Σκοπός	21
2. Δεδομένα	26
2.1 Ανάλυση της περιοχής έρευνας	26
2.1.1 Γεωγραφική θέση	26
2.1.2 Μορφολογία	27
2.1.3 Υδρογραφικό Δίκτυο	28
2.1.4 Χρήσεις Γης	30
2.1.5 Γεωλογία	32
2.1.6 Εδαφολογικά Χαρακτηριστικά	33
2.2 Κλιματικά Δεδομένα	36
2.2.1 ERA-Interim Επανάλυσης Δεδομένα	36
2.2.2 Πάραμετροι Κλιματικών Μοντέλων	42
2.3 Εκτίμηση Πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής	44
2.4 Υδρογεωλογία	46
2.5 Υδροχημεία	54
2.6 Εκτίμηση Υδατικών Αναγκών	65
3. Κλιματική Αλλαγή	66
3.1 Εισαγωγή	66
3.2 Αξιολόγηση των κλιματικών δεδομένων	66
3.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	73
3.3 Μέθοδος Βέλτιστης Παρεμβολής Kriging	77
3.4 Μεθοδολογία	80
3.5 Αποτελέσματα	87
3.5.1 Αξιολόγηση του κατάλληλου χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance model)	88
3.5.2 Εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Krigin (spatio-temporal Kriging)	ıg 106

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη	
ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"	
3.5.3 Ποσοτικοποίηση της κλιματικής αλλαγής για το τέλος του 21 <sup>οι</sup> μέσω της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging	' αιώνα, 114
3.6 Επιμέρους Συμπεράσματα	
4.Υδρολογική-Υδρογεωλογική Προσομοίωση	122
4.1. Υδρολογική Προσομοίωση της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού	Χαβρία 124
4.1.1 Επισκόπηση του υδρολογικού μοντέλου SWAT	
4.1.2 Μέθοδοι Εκτίμησης των Υδρολογικών Παραμέτρων	
4.1.3 Μεθοδολογία	
4.1.4 Εφαρμογή του Υδρολογικού Μοντέλου ArcSWAT	
4.1.5 Έλεγχος Αξιοπιστίας της Προτεινόμενης Μεθοδολογίας	139
4.1.6 Ανάλυση Ευαισθησίας	140
4.1.7 Διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο υδρα ισοζύγιο	ολογικό 141
4.1.8 Αποτελέσματα	
4.2 Υδρογεωλογική Προσομοίωση του Παράκτιου Υδροφορέα της Λε Απορροής του Ποταμού Χαβρία	κάνης 155
4.2.1 Επισκόπηση MODFLOW	155
4.2.2 Μεθοδολογία	157
4.2.3 Εφαρμογή κώδικα MODFLOW	165
4.2.4 Διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο υπόγ	νειο νερό 166
4.2.5 Αποτελέσματα	
4.2.6 Διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο υπόγ	νειο νερό 172
4.3 Επιμέρους Συμπεράσματα	
5. Συμπεράσματα-Συζήτηση	
Βιβλιογραφία	196



### 1.1 Γενικά

Το νερό είναι ένας φυσικός πόρος ζωτικής σημασίας, συνεισφέροντας σε ποικίλες ανθρώπινες δραστηριότητες, καθορίζοντας το βιοτικό επίπεδο. Ο σύγχρονος όμως, τρόπος ζωής, η συνεχής αστικοποίηση, οι βιομηχανικές και οι εντατικές γεωργικές δραστηριότητες απειλούν τους επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους. Οι συνεχώς αυξανόμενες πιέσεις στο νερό έχουν ως επακόλουθο την ποσοτική και ποιοτική υποβάθμισή του, με την κλιματική αλλαγή να αποτελεί έναν επιπρόσθετο παράγοντα άσκησης πίεσης στους υδατικούς πόρους.

Από τις πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, οι μεταβολές στον υδρολογικό κύκλο θα επιφέρουν άμεσο κοινωνικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Ως εκ τούτου, η κλιματική αλλαγή αποτελεί μία πρόκληση, με την οποία καλείται να έρθει αντιμέτωπη τόσο η κοινωνία σε ατομικό επίπεδο όσο και και η παγκόσμια επιστημονική και πολιτική κοινότητα.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1950, παρατηρείται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης, η οποία κορυφώθηκε την δεκαετία 2001-2010. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος αποδίδει την αύξηση της θερμοκρασίας, κυρίως, σε ανθρωπογενείς παράγοντες λόγω της παρατηρούμενης αύξησης της συγκέντρωσης των θερμοκηπικών αερίων. Απόρροια της υπερθέρμανσης της γης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας των ωκεανών, της μέσης στάθμης της θάλασσας και το λιώσιμο των πάγων (IPCC, 2007; 2013).

Οι τελευταίες έρευνες της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC, 2007; IPCC, 2013) υποδεικνύουν μια σημαντική μεταβολή στον υδρολογικό κύκλο. Η μεταβολή του βροχομετρικού καθεστώτος, η ενίσχυση της συχνότητας και της έντασης των ακραίων φαινομένων (πλημμύρες, ξηρασία), η αύξηση της εξάτμισης, καθώς και οι αλλαγές στην απορροή και στην εδαφική υγρασία θα απειλήσουν άμεσα τη διαθεσιμότητα και την προσβασιμότητα των υδατικών πόρων έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Ειδικότερα, οι ξηρές και οι ημίξηρες περιοχές, όπως η περιοχή της Μεσογείου, ενέχουν τον κίνδυνο να βιώσουν αρνητικά τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους.

Η διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής, της κοινωνικής ευημερίας και η προστασία του περιβάλλοντος προτάσσουν τη διερεύνηση των επιπτώσεων της

κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους. Τα τελευταία χρόνια, πληθώρα επιστημονικών άρθρων πραγματεύονται τις δυνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία, δίνοντας έμφαση στις παραμέτρους του υδρολογικού κύκλου και στα υδατικά συστήματα, γενικότερα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα υδατικά συστήματα επιτυγχάνεται μέσω της συνδυασμένης εφαρμογής των κλιματικών και των υδρολογικών μαθηματικών μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι των κλιματικών μοντέλων χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στα μοντέλα υδρολογικής-υδρογεωλογικής προσομοίωσης.

Τα υδρολογικά μοντέλα αξιοποιούνται στη μαθηματική προσομοίωση των υδατικών πόρων με σκοπό την αξιολόγηση της ποσοτικής και της ποιοτικής κατάστασης των υδατικών συστημάτων, καθώς και τη δημιουργία σεναρίων, τα οποία στοχεύουν στην πρόταση μέτρων και δράσεων για την ορθολογική και βιώσιμη διαχείρισή τους. Εφαρμόζονται είτε σε επίδεδο λεκάνης απορροής είτε σε επίπεδο υδροφορέα. Βάσει της μαθηματικής τους δομής διακρίνονται σε μοντέλα φυσικής βάσης, σε εννοιολογικά μοντέλα, σε στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα και σε μοντέλα μαύρου κουτιού. Τέλος, σύμφωνα με τη χωρική κλίμακα των μοντέλων κατηγοριοποιούνται σε ενιαία (lumped) και κατανεμημένα (distributed), ενώ λαμβάνονας υπόψη τη χρονική κλίμακα σε συνεχή μοντέλα και μοντέλα μεμονωμένου επεισοδίου.

Οι πρώτες προσπάθειες της υδρολογικής εκτίμησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής αφορούν τη σύζευξη των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Models, GCMs) και των υδρολογικών μοντέλων. Η συγκεκριμένη διαδικασία ενέχει αβεβαιότητες, οι οποίες αποδίδονται στη διαφορετική χωρική κλίμακα μεταξύ των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας και των υδρολογικών μοντέλων. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας είναι η μεγάλη χωρική κλίμακα και κατά συνέπεια, η αδυναμία προσομοίωσης των τοπικών κλιματικών συνθηκών. Εν αντιθέσει, τα μοντέλα υδρολογικής-υδρογεωλογικής προσομοίωσης απαιτούν δεδομένα εισαγωγής υψηλής χωρικής κλίμακας.

Η επίλυση του συγκεκρίμενου προβλήματος, του χωρικού κενού (spatial gap), δηλαδή, μεταξύ των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (GCMs) και των υδρολογικών

μοντέλων, δόθηκε μέσω της ανάπτυξης των μεθόδων υποβιβασμού κλίμακας (Wilby and Wigley, 1997). Οι μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας κατηγοριοποιούνται στα Moντέλα περιοχικής κλίμακας ή Δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας (Regional Climate Models (RCMs), Dynamical downscaling) και στον Στατιστικό υποβιβασμό κλίμακας (Statistical downscaling methods). Τέλος, για τη συμπλήρωση των χωρικών κενών μεταξύ των κλιματικών και των υδρολογικών μοντέλων χρησιμοποιούνται, επιπρόσθετα και οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής (Felzer and Heard, 1999).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

) OD

Για τη δημιουργία των μελλοντικών προβολών του κλίματος, τα κλιματικά μοντέλα χρησιμοποιούν σενάρια εκπομπών. Η τελευταία έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC, 2013) αντικατέστησε τα σενάρια της ομάδας SRES (Sres Emission Scenarios, Nakicenovic and Swart, 2000) με τα Representative Concentration Pathway (RCPs) (Van Vuuren et al., 2011). Τα RCPs διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες καθορίστηκαν βάσει της εκτιμώμενης τιμής του radiative forcing έως το 2100. Οι κατηγορίες περιλαμβάνουν το RCP2.6 (2.6 W/m<sup>2</sup>), το RCP4.5 (4.5 W/m<sup>2</sup>), το, RCP6 (6 W/m<sup>2</sup>) και το RCP8.5 (8.5 W/m<sup>2</sup>).

Παρά την ανάπτυξη των μεθόδων υποβιβασμού κλίμακας και τη συνεχή βελτίωση των υδρολογικών-υδρογεωλογικών μοντέλων, με σκοπό τη ρεαλιστική αναπαράσταση των υδρολογικών-υδρογεωλογικών συνθηκών, οι αβεβαιότητες στην υδρολογική εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής παραμένουν. Τα σφάλματα ενσωμάτωσης των δεδομένων των κλιματικών μοντέλων στα υδρολογικά μοντέλα παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία (Krysanova et al., 2017; Kundzewicz et al., 2018). Επιπρόσθερα, οι τάσεις μείωσης και αύξησης των κλιματικών και υδρολογικών παραμέτρων ποικίλουν ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα (Arnell, 1999a).

Οι αβεβαιότητες αυξάνονται στην περίπτωση της σύζευξης των κλιματικών και υδρολογικών-υδρογεωλογικών μοντέλων σε περιοχές με ελάχιστα διαθέσιμα δεδομένα (Candela et al., 2012). Ένα κρίσιμο θέμα προς επίλυση, το οποίο καλείται να διαχειριστεί η επιστημονική κοινότητα, καθώς συναντάται σε πολλές περιοχές ανά τον κόσμο. Παρόλα αυτά, περιορισμένος αριθμός ερευνητικών εργασιών

πραγματεύεται την διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε υδατικά συστήματα των προαναφερθέντων περιοχών.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τέλος, η άναγκη για προσαρμογή και λήψη μέτρων μετριασμού απέναντι στην κλιματική αλλαγή επιτάσσει την αξιόπιστη υδρολογική εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, καθώς η επιτυχία των μέτρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα αποτελέσματα της εφαρμογής των κλιματικών και των υδρολογικών μοντέλων.

# 1.2 Ελαχιστοποίηση των αβεβαιοτήτων των παραμέτρων των κλιματικών μοντέλων

Η υδρολογική-υδρογεωλογική προσομοίωση των συνθηκών, που λαμβάνουν χώρα τόσο σε επίπεδο λεκάνης απορροής όσο και υδροφορέα και ειδικότερα, υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής απαιτεί κλιματικά δεδομένα υψηλής χωροχρονικής κλίμακας. Η αναπαράσταση και η εκτίμηση του τοπικού παροντικού και μελλοντικού κλίματος, ελαχιστοποιώντας, παράλληλα, τις όποιες αβεβαιότητες, επιτυγχάνεται, πλέον, όχι μόνο μέσω των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs), αλλά και μέσω των μεθόδων χωροχρονικής παρεμβολής (spatio-temporal interpolation methods) (Gething et al., 2007; Hengl et al., 2012; Kilibarda et al., 2014).

Οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής χρησιμοποιούνται ευρέως στις γεωεπιστήμες. Ανάλογα με τη μέθοδο παρεμβολής και την κλίμακα που εφαρμόζονται, μπορούν να διακριθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις απλές μεθόδους παρεμβολής, όπως είναι τα Πολύγωνα Thiessen (Brassel and Douglas, 1979), η μέθοδος Spline (Hutchinson, 1989), η μέθοδος Σταθμισμένων Αντίστροφων Αποστάσεων (Inverse Distance Weighting, IDW), (Zimmerman et al., 1999), η μέθοδος Γειτνίασης (Nearest Neighbor, Sibson, 1981), καθώς και οι υποκατηγορίες της μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging. Οι πιο διαδεδομένες υποκατηγορίες της μεθόδου Kriging είναι η Συνήθης μέθοδος Kriging (Ordinary Kriging), η μέθοδος Universal Kriging, η μέθοδος Co-Kriging, η Διαζευκτική μέθοδος Kriging (Disjunctive Kriging) και η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging σε συνδυασμό με παλινδρόμηση (Regression Kriging) (Matheron, 1962; Cressie, 1993; Wackernagel, 2003). Η δεύτερη κατηγορία των μεθόδων της χωρικής παρεμβολής αφορά δεδομένα, προερχόμενα από δορυφορικές εικόνες και από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (Digital Elevation Models, DEM). Στην τελευταία κατηγορία εντάσσονται οι σύνθετες χωρικές μέθοδοι παρεμβολής, για παράδειγμα, μέσω των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial Neural Networks, ANNs) και των μεθόδων Ασαφούς Λογικής (Fuzzy reasoning method) (Friedman, 1994; Wong et al., 2003).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Πληθώρα ερευνητικών εργασιών έχουν εκπονηθεί, παραθέτοντας τόσο τις εφαρμογές, όσο και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεθόδων χωρικής παρεμβολής. Οι Yang et al. (2015) εφάρμοσαν τέσσερις μεθόδους χωρικής παρεμβολής (μέθοδος ANUDEM, Spline, μέθοδος Σταθμισμένων Αντίστροφων Αποστάσεων (IDW) και τη μέθοδο βέλτιστης χωρικής παρεμβολής, Kriging) σε δεδομένα βροχόπτωσης περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs), με σκοπό την εκτίμηση της ημερήσιας βροχόπτωσης για μελλοντικές περιόδους. Από τα αποτελέσματά τους προκύπτει ότι η μέθοδος Σταθμισμένων Αντίστροφων Αποστάσεων (IDW) είναι πιο αξιόπιστη μέθοδος σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις. Σύμφωνα με τους Mair και Fares (2011), η απλή μέθοδος βέλτιστης χωρικής παρεμβολής (Simple Kriging) παρουσίασε το μικρότερο σφάλμα, εφαρμοσμένη σε δεδομένα βροχόπτωσης σε μια ορεινή περιοχή ενός τροπικού νησιού. Αντίθετα, η μέθοδος των Πολυγώνων Thiessen αποδείχθηκε ως η πιο αναξιόπιστη για τη συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμογής. Τέλος, σύμφωνα με τους Hofstra et al. (2008), η γενικευμένη μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής (Global Kriging) υπερέχει ελαφρώς των άλλων μεθόδων χωρικής παρεμβολής, εφαρμοσμένη σε δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών περιοχών της Ευρώπης για τη χρονική περίοδο 1961-1990.

Η ανάγκη για υψηλής χωρικής ανάλυσης δεδομένα σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, οδήγησε στην ανάπτυξη των μεθόδων χωροχρονικής παρεμβολής (spatio-temporal interpolation approaches). Με την πάροδο του χρόνου οι μέθοδοι χωροχρονικής παρεμβολής εδραιώθηκαν και πλέον, αποτελούν βασικό εργαλείο των γεωεπιστημών, με ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών (Heuvelink and Griffth, 2010; Heuvelink et al., 2012; Gräler et al., 2016).

Ενδεικτικά, αναφέρονται οι Gräler et al. (2016), οι οποίοι διερεύνησαν τις ημερήσιες συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων για το έτος 2005, από σταθμούς

της Γερμανίας, χρησιμοποιώντας διάφορα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance models). Σύμφωνα με τους Heuvelink et al. (2012), η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging σε συνδυασμό με παλινδρόμηση (spatio-temporal regression-Kriging), μαζί με δορυφορικές εικόνες, οδηγούν στη δημιουργία πιο αξιόπιστων χαρτών θερμοκρασίας, εν συγκρίσει με τις μεθόδους χωρικής παρεμβολής.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

### 1.3 Υδρολογική-Υδρογεωλογική Προσομοίωση σε Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής

Η εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις υδρολογικές παραμέτρους επιτυγχάνεται μέσω της σύζευξης των υδρολογικών και των κλιματικών μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα (climate model outputs) των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (GCMs) και των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου (input data) στα υδρολογικά μοντέλα. Τις τελευταίες δεκαετίες, πληθώρα υδρολογικών μοντέλων, όπως, MIKE-SHE, SWAT, HELP, έχουν αναπτυχθεί, με σκοπό την προσομοίωση και την κατανόηση των σύνθετων υδρολογικών συνθηκών, συμβάλλοντας καθοριστικά στην ολοκληρωμένη και ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων.

Η επιλογή του κατάλληλου υδρολογικού μοντέλου εξαρτάται τόσο από τα διαθέσιμα δεδομένα όσο και από τον σκοπό της έρευνας. Τα μοντέλα φυσικής βάσης προτείνονται για την προσομοίωση λεκανών απορροής με ελάχιστα ή και χωρίς διαθέσιμα δεδομένα (Candela et al., 2012). Ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης λεκανών απορροής είναι το SWAT (Neitsch et al. 2005).

Πλήθος ερευνητικών εργασιών πραγματεύεται την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου SWAT σε λεκάνες απορροής με ποικίλες κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως και διαφορετικών πρακτικών διαχειρίσης ανά τον κόσμο. Οι Gassman et al. (2007; 2014a; 2014b), οι Douglas-Mankin et al. (2010), οι Tuppad et al. (2011), οι Krysanova και Srinivasan (2015), και οι Krysanova και White (2015) συνοψίζουν τις διάφορες εφαρμογές του υδρολογικού μοντέλου SWAT, παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα και τους όποιους περιορισμούς ανακύπτουν.

Ο Binger (1996), για παράδειγμα, χρησμοποίησε το υδρολογικό μοντέλο SWAT για την προσομοίωση της επιφανειακής απορροής σε τμήμα της λεκάνης

απορροής του ποταμού Μισσισσιπή. Βάσει των αποτελεσμάτων του, υποδεικνύεται η αποτελεσματικότητα του μοντέλου SWAT στην εκτίμηση των υδρολογικών συνιστωσών.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Άξια μνείας είναι και η εργασία των Fadil et al. (2011), οι οποίοι προσομοίωσαν μέσω του μοντέλου SWAT τις διεργασίες της λεκάνης απορροής Bouregreg, η οποία βρίσκεται στο Μαρόκο, με σκοπό την εκτίμηση της απόκρισης της λεκάνης σε φαινόμενα διάβρωσης, ξηρασίας και ρύπανσης. Η εν λόγω λεκάνη απορροής είναι μείζονος σημασίας, καθώς στην έξοδό της, είναι κατασκευασμένο φράγμα, το οποίο χρησιμοποιείται για την κάλυψη των υδατικών αναγκών 6 εκατομμυρίων ανθρώπων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, προκύπτει ότι το μοντέλο SWAT είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο, ικανό να συμβάλλει σημαντικά στη διαχείριση των υδατικών πόρων ημίξηρων περιοχών.

Πολλές είναι και οι εφαρμογές του υδρολογικού μοντέλου SWAT με σκοπό την προσομοίωση λεκανών απορροής με ελάχιστα ή και χωρίς διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα. Οι Odusanya et al. (2019) εφάρμοσαν το μοντέλο SWAT σε μια λεκάνη απορροής της Νιγηρίας με ελάχιστα παρατηρούμενα δεδομένα. Το μοντέλο ρυθμίστηκε και επαληθεύτηκε μέσω της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, η οποία πρόεκυψε από δεδομένα τηλεπισκόπησης. Οι Emam et al. (2017) προσομοίωσαν μέσω του υδρολογικού μοντέλου SWAT τις υδρολογικές παραμέτρους μιας λεκάνης απορροής του Βιετνάμ. Ελλείψει πραγματικών δεδομένων, η ρύθμιση του μοντέλου επιτεύχθηκε μέσω της χρήσης των διαθέσιμων παρατηρούμενων δεδομένων από γειτονικές λεκάνες απορροής, οι οποίες παρουσιάζουν όμοια χαρακτηρστικά (regionalization method). Οι Srinivasan et al. (2010) εφάρμοσαν το μοντέλο SWAT στη λεκάνη απορροής του Άνω Μισσισσιπή, υπό συνθήκες απουσίας πραγματικών διαθέσιμων δεδομένων. Βάσει των αποτελεσμάτων τους, μολονότι το μοντέλο δεν ρυθμίστηκε, το υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής έρευνας αποδόθηκε ικανοποιητικά.

Την τελευταία εικοσαετία, το αντικείμενο έρευνας των επιστημονικών εργασιών, που αφορούν στο υδρολογικό μοντέλο SWAT, επικεντρώνεται στη διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις διεργασίες, που διέπουν μια λεκάνη απορροής.Οι Serpa et al. (2015), χρησιμοποιώντας το μοντέλο SWAT, διερεύνησαν, τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και των αλλαγών των χρήσεων

γης σε δύο λεκάνες απορροής της Μεσογείου με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (υγρές και ξηρές). Από τα αποτελέσματά τους προκύπτει η μείωση της απορροής λόγω της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής και των αλλαγών στις χρήσεις γης. Οι Nilawar and Waikar et al (2018) χρησιμοποίησαν το υδρολογικό μοντέλο SWAT και τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 για την εκτίμηση των δυνητικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην απορροή και στη συγκέντρωση των φερτών υλικών της λεκάνης του ποταμού Purna, στην Ινδία.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Εν αντιθέσει, μικρός αριθμός επιστημονικών εργασιών αναφέρεται στη διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις υδρολογικές συνθήκες λεκανών απορροής με ελάχιστα ή και χωρίς διαθέσιμα στοιχεία, λόγω των δυσκολιών που ενέχουν. Οι Stehr et al. (2008) πρότειναν το υδρολογικό μοντέλο SWAT με σκοπό την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και των αλλαγών των χρήσεων γης στις υδρολογικές συνθήκες μιας λεκάνης απορροής στη Χιλή με ελάχιστα πραγματικά δεδομένα. Οι Candela et al. (2012) συνδύασαν τα αποτελέσματα των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (GCMs) με υδρολογικά μοντέλα, ώστε να διερευνήσουν την απόκριση των υδατικών πόρων μιας λεκάνης απορροής στην Ισπανία, στην οποία εκλείπουν παρατηρούμενα δεδομένα, απέναντι στην αλλαγή του κλίματος και των χρήσεων γης.

Περιορισμένος αριθμός ερευνητικών εργασιών για την εκτίμηση της τάσης μείωσης ή αύξησης των υδρολογικών παραμέτρων μέσω της σύζευξης του υδρολογικού μοντέλου SWAT και των κλιματικών μοντέλων έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα, έχουν πραγματοποιηθεί και για τον Ελληνικό χώρο. Οι Varanou et al. (2002), χρησιμοποίησαν το υδρολογικό μοντέλο SWAT και τα αποτελέσματα κλιματικών μοντέλων για την προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου και του κύκλου του αζώτου στην λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη, η οποία αποτελεί υπολεκάνη του ποταμού Πηνειού. Από τα αποτελέσματά τους προκύπτει μείωση της επιφανειακής απορροής, η οποία συνεπάγεται τη μείωση της μεταφοράς του αζώτου.

Οι Baltas και Karaliolidou (2007), διερεύνησαν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και της μεταβολής των χρήσεων γης στους υδατικούς πόρους της λεκάνης απορροής του ποταμού Αλιάκμονα. Βάσει των συμπερασμάτων τους, επισημαίνεται η βαρύτητα των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής στο υδατικό ισοζύγιο εν συγκρίσει των αλλαγών στις χρήσεις γης. Οι Kalogeropoulos and Chalkias (2013), αξιολόγησαν την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους της Άνδρου, εφαρμόζοντας το υδρολογικό μοντέλο SWAT. Λόγω της έλλειψης δεδομένων παροχής εντός της ερευνώμενης λεκάνης απορροής, το μοντέλο ρυθμίστηκε και επαληθεύτηκε χρησιμοποιώντας τα δεδομένα παροχής από γειτονική λεκάνη απορροής. Τέλος, αναφέρεται η εργασία της Partsinevelou (2017), που χρησιμοποίησε το μοντέλο SWAT για την προσομοίωση του μελλοντικού υδρολογικού ισοζυγίου της Νάξου.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Αντικείμενο διερεύνησης πληθώρας επιστημονικών άρθρων αποτελεί και η εφαρμογή των μοντέλων υπόγειας ροής για την προσομοίωση υδροφόρων συστημάτων σε ποικίλες υδρογεωλογικές συνθήκες, στα οποία επισημαίνεται η συνεισφορά των μαθηματικών μοντέλων στην αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης των υδροφόρων συστημάτων, καθώς και στην πρόταση μέτρων για την ορθολογική και βιώσιμη διαχείρισή τους. Ο Singh (2014) με μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση παραθέτει τις εφαρμογές των μοντέλων για την προσομοίωση υδροφόρων συστημάτων, καθώς και τη συμβολή τους στη διαχείριση των υπόγειων υπόγειων υδροφορέων, κυρίως, ξηρών και ημίξηρων περιοχών.

Οι Fayez και Tamer (2006), για παράδειγμα, προσομοίωσαν μέσω του MODFLOW ένα υδροφόρο σύστημα της Ιορδανίας σε συνθήκες ισορροπίας και μεταβαλλόμενου ισοζυγίου. Από την εφαρμογή του μοντέλου, προσδιορίστηκαν οι τιμές των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα.

Οι El Yaouti et al. (2008) εφάρμοσαν το MODFLOW για την προσομοίωση των υδρογεωλογικών συνθηκών ενός ελεύθερου υδροφορέα, ο οποίος εντοπίζεται στο βορειοανατολικό Μαρόκο. Πιο συγκεκριμένα, ποσοτικοποίηθηκαν οι μεταβολές των πιεζομετρικών σε σχέση με την εποχική διακύμανση του εμπλουτισμού. Επιπρόσθετα, από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανακύπτει η ευαισθησία του υδροφορέα στις μεταβολές του εμπλουτισμού συγκριτικά με τις αλλαγές στην υδραυλική αγωγιμότητα και την αποθηκευτικότητα.

Οι Andreu et al. (2010) προσομοίωσαν έναν καρστικό υδροφορέα, μικρής έκτασης, στη νοτιοανατολική Ισπανία μέσω του κώδικα MODFLOW. Από τα αποτελέσματά τους, δεν διαπιστώθηκε γραμμική συσχέτιση μεταξύ της βροχόπτωσης και του εμπλουτισμού. Αντίθετα, ο εμπλουτισμός αυξάνει εκθετικά με την ένταση του επεισοδίου βροχόπτωσης. Οι Lachaal et al. (2012) χρησιμοποίησαν τον κώδικα MODFLOW για τη τρισδιάστατη προσομοίωση ενός υδροφορέα στην Τυνησία. Από τους Lachaal et al. (2012) διαπιστώνεται η ευαισθησία του υδροφορέα τόσο στις μεταβολές της κατείσδυσης και όσο και της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ερευνητικές εργασίες, οι οποίες αφορούν στην προσομοίωση υδροφόρων συστημάτων απαντώνται και για τον ελληνικό χώρο. Οι Kallioras et al. (2010), εφάρμοσαν το MODFLOW για την προσομοίωση ενός κοκκώδους υδροφορέα της Βόρειας Ελλάδας, ο οποίος υπεραντλείται. Σύμφωνα με τους Kallioras et al. (2010), διαπιστώνεται η ικανότητα του MODFLOW να αποδώσει επιτυχώς τις επικρατούσες υδρογεωλογικές συνθήκες του ερευνώμενου υδροφορέα.

Ο Panagopoulos (2012) προσομοίωσε το καρστικό υδροφόρο σύστημα της Τριφυλίας (Κυπαρισσία). Ο κώδικας MODFLOW εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο πορώδες μέσο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, προκύπτει η αποτελεσματική προσομοίωση της πιεζομετρίας του υδροφορέα σε συνθήκες ισορροπίας και μεταβαλλόμενου ισοζυγίου. Οι Sidiropoulos et al. (2016) σύζευξαν το υδρολογικό μοντέλο UTHRL (Loukas et al., 2007) με το MODFLOW, εφαρμόζοντας διαχειριστικά σενάρια, με σκοπό την ορθολογική εκμετάλλευση του υδροφόρου συστήματος της λίμνης Κάρλας για την κάλυψη των υδατικών αναγκών. Απώτερος στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η άνοδος της στάθμης του υδροφορέα.

Η διαφαινόμενη κλιματική αλλαγή έχει στρέψει το ενδιαφέρον των ερευνητών στην κατανόηση της απόκρισης των υδροφόρων συστημάτων απέναντι στις μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων. Ο Kirshen (2002) χρησιμοποίησε τον κώδικα MODFLOW και διάφορα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCMs) με σκοπό τη διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε έναν υδροφορέα των ΗΠΑ. Διαπιστώθηκε σημαντική μείωση της υπόγειας στάθμης, η οποία ποικίλει ανάλογα με το κλιματικό σενάριο.

Οι Scibek and Allen (2006) ανέπτυξαν μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία με σκοπό την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη στάθμη ενός ελεύθερου υδροφορέα στον Καναδά έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Οι Woldeamlak et al. (2007) εφάρμοσαν το MODFLOW σε συνθήκες ισορροπίας για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε υδροφόρα συστήματα του Βελγίου, χρησιμοποιώντας σενάρια με υγρές, ψυχρές και ξηρές κλιματικές συνθήκες. Με βάση το σενάριο υπό υγρές συνθήκες, εκτιμάται αύξηση της στάθμης του υπόγειου νερού. Εν αντιθέσει, σύμφωνα με το σενάριο, που αναπαριστά τις ξηρές κλιματικές συνθήκες, αναμένεται σημαντική πτώση της στάθμης.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι Candela et al. (2009) διερεύνησαν την απόκριση ενός παράκτιου υδροφορέα στη Μαγιόρκα (Ισπανία) απέναντι στην κλιματική αλλαγή. Για την επίτευξη του στόχου, συνδυάστηκαν ο κώδικας MODFLOW και το κλιματικό μοντέλο HadCM3. Οι Candela et al. (2009) ποσοτικοποίησαν τη μελλοντική μείωση του εμπλουτισμού του υδροφορέα, επισημαίνοντας τις αβεβαιότητες, που ανακύπτουν κατά την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο υπόγειο νερό.

Οι Stigter et al. (2012) αντιπαρέθεσαν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε Μεσογειακούς παράκτιους υδροφορείς. Η έρευνα αφορά τρεις υδροφορείς, οι οποίοι αναπτύσσονται στην Πορτογαλία, στην Ισπανία και στο Μαρόκο. Η προσομοίωση της υπόγειας ροής των παράκτιων υδροφορέων επιτεύχθηκε μέσω των λογισμικών FEN, FEFLOW, MODFLOW και CORE2D. Η διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής πραγματοποιήθηκε μέσω της σύζευξης των προααναφερθέντων μοντέλων και των κλιματικών μοντέλων του ENSEMBLES προγράμματος, τα οποία ακολουθούν το σενάριο A1B. Βάσει των αποτελεσμάτων, ανακύπτει σημαντική μείωση του εμπλουτισμού στους ερευνώμενους υδροφορείς της Πορτογαλίας και του Μαρόκου.

Οι Romanazzi et al. (2015) προσομοίωσαν έναν καρστικό παράκτιο υδροφορέα της Νότιας Ιταλίας σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής χρησιμοποιώντας τους κώδικες MODFLOW και SEAWAT, καθώς και το κλιματικό μοντέλο MGME. Σύμφωνα με τους Romanazzi et al. (2015), η παρατηρούμενη πτώση της στάθμης του καρστικού υδροφορέα θα συνεχιστεί κατά τις μελλοντικές περιόδους, εντείνοντας το φαινόμενο της υφαλμύρισης.

Οι Ghazavi and Ebrahimi (2019) διερεύνησαν τις επιπτώσεις της έντασης του φαινομένου του θερμοκηπίου σε μια ξηρή περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, το κλιματικό μοντέλο HadCM3 και ο κώδικας MODFLOW συνδυάστηκαν με σκοπό την εκτίμηση της διακύμανσης της στάθμης ενός υδροφορέα στο δυτικό Ιράν. Από τα αποτελέσματα, προκύπτει η ποσοτική υποβάθμιση του υδροφορέα εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής. Οι Tirzo et al. (2019) εφάρμοσαν τον κώδικα MODFLOW με σκοπό τη διερεύνηση της απόκρισης ενός υδροφορέα του δυτικού Ιράν στις μεταβολές του εμπλουτισμού. Οι παράμετροι του κλιματικού μοντέλου RegCM-CLM χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του εμπλουτισμού έως το 2025. Διαπιστώθηκε αύξηση της στάθμης του υδροφορέα, η οποία επιτυγχάνεται με βελτίωση της αποτελεσματικότητας της άρδευσης (irrigation efficiency).

Τέλος, αναφέρονται οι σχετικές εργασίες, που επικεντρώνονται στον Ελληνικό χώρο. Οι Venetsanou et al. (2016) συνδύασαν τον κώδικα MODFLOW και το περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM3, το οποίο ακολουθεί το σενάριο εκπομπών A1B, για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο υδατικό ισοζύγιο του παράκτιου υδροφορέα του Δήμου Θερμαϊκού (Θεσσαλονίκη). Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, ποσοτικοποιήθηκε η μείωση του εμπλουτισμού του υδροφορέα. Επακόλουθο της μείωσης του εμπλουτισμού είναι η αντιστροφή της υδραυλικής κλίσης και η διείσδυση της θάλασσας στο παράκτιο τμήμα.

Αντίστοιχα συμπεράσματα με τους Venetsanou et al. (2016) εξάγονται από την εργασία του Theodosiou (2016), ο οποίος προσομοίωσε το υδροφόρο σύστημα των Νέων Μουδανίων σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Ο Theodosiou (2016) επισημαίνει την ανάγκη για τη λήψη μέτρων για την ορθολογική και βιώσιμη διαχείριση του υδατικού συστήματος. Τέλος, αναφέρεται η σημαντική μείωση της στάθμης του υδροφορέα, που αναπτύσσεται στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κόσυνθου (Θράκη), η οποία προκύπτει από την προσομοίωση του υδροφορέα, που βαιαχείριση του υδροφορέα.

### 1.4 Αντικείμενο και Σκοπός

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει ως αντικείμενο την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας με καινοτόμα στοιχεία για την αξιόπιστη και βέλτιστη συνδυασμένη εφαρμογή των κλιματικών και των υδρολογικώνυδρογεωλογικών μοντέλων σε υδροφορείς με ελάχιστα ή και χωρίς παρατηρούμενα μετεωρολογικά και υδρολογικά-υδρογεωλογικά δεδομένα. Ειδικότερα, ο αρχικός σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, αποτελούμενη από κλιματικές παραμέτρους υψηλής χωροχρονικής κλίμακας, ικανής να προσομοιώνει αποτελεσματικά το παροντικό και μελλοντικό κλίμα της περιοχής έρευνας. Ο απώτερος στόχος της έρευνας ανάγεται στη βέλτιστη υδρογεωλογική προσομοίωση υδροφορέων με ελάχιστα ή χωρίς παρατηρούμενα δεδομένα, ώστε να αυξηθεί η αξιοπιστία στην εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα ερευνητικά ερωτήματα που πρόκειται να απαντηθούν στην παρούσα διδακτορική διατριβή συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Ποιά είναι η υφιστάμενη ποσοτική και ποιοτική κατάσταση του ερευνώμενου υδροφορέα;
- Πώς επιτυγχάνεται η αξιόπιστη προσομοίωση ενός υδροφόρου συστήματος στην περίπτωση έλλειψης ή παρουσίας ελάχιστων διαθέσιμων πραγματικών μετεωρολογικών, υδρολογικών και υδρογεωλογικών δεδομένων;
- Πώς θα επηρεάσει η κλιματική αλλαγή τις κλιματικές και υδρολογικές παραμέτρους, καθώς και τη στάθμη του υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα;

Τα προαναφερθέντα ερευνητικά ερωτήματα απαντώνται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διατριβής. Στο δεύτερο κεφάλαιο της διατριβής παρατίθενται λεπτομερώς τα δεδομένα, που απαιτούνται για την προσομοίωση του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία (Χαλκιδική) σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται η μεθοδολογία της δημιουργίας της βάσης δεδομένων με κλιματικές παραμέτρους υψηλής χωροχρονικής κλίμακας, αξιολογείται η απόκριση των κλιματικών μοντέλων, έπειτα από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας και τέλος, εκτιμάται η τάση μείωσης ή αύξησης των κλιματικών παραμέτρων έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα.

Το τέταρτο κεφάλαιο πραγματεύεται την προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Αρχικά, προσομοιώνονται οι παρούσες και οι μελλοντικές υδρολογικές συνθήκες της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία, προτείνοντας μια εναλλακτική μεθοδολογία ρύθμισης του μοντέλου, λόγω των ελάχιστων μετεωρολογικών και υδρολογικών παρατηρούμενων δεδομένων της περιοχής έρευνας. Η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης του Χαβρία αποσκοπεί στον προσδιορισμό των υδρολογικών παραμέτρων και συγκεκριμένα, της κατείσδυσης και της επιφανειακής απορροής έως το τέλος του 21° αιώνα, καθώς και στην κατανόηση της απόκρισης των υδρολογικών παραμέτρων λόγω των δυνητικών μελλοντικών αλλαγών του κλίματος. Τα κλιματικά δεδομένα, που χρησιμοποιήθηκαν κατά την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης του Χαβρία, αφορούν δεδομένα επανάλυσης (reanalysis), καθώς και τις παραμέτρους των κλιματικών μοντέλων (climate model outputs). Η υδρογεωλογική προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα της λεκάνης του Χαβρία επιτεύχθηκε εισάγοντας τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης με δεδομένα τις προαναφερεθείσες κλιματικές παραμέτρους. Τέλος, εκτιμάται η στάθμη του υδροφορέα έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο τελευταίο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5) συνοψίζονται και αξιολογούνται τα επιμέρους συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν από την παρούσα διδακτορική διατριβή.

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι εργασίες, που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Περατωθείσες Εργασίες		
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	<ul> <li>Επιστημονικά άρθρα</li> <li>Αποδελτίωση προγενέστερων μελετών σχετικά με την περιοχή έρευνας</li> </ul>	
Υπαίθριες Παρατηρήσεις	<ul> <li>Απογραφή σημείων υδροληψίας (υδρογεωτρήσεις και πηγάδια)</li> <li>Μετρήσεις στάθμης υπόγειου νερού</li> <li>Επι τόπου μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων του υπόγειου νερού</li> <li>Συλλογή εδαφικών δειγμάτων και δειγμάτων υπόγειου νερού</li> </ul>	
Δημιουργία Βάσης Κλιματικών Δεδομένων	<ul> <li>Συλλογή κλιματικών δεδομένων από υφιστάμενους σταθμούς</li> <li>Χρησιμοποίηση των μετεωρολογικών επανάλυσης δεδομένων (reanalysis)</li> <li>Έλεγχος της αξιοπιστίας των ERA-Interim δεδομένων</li> <li>Επεξεργασία των κλιματικών παραμέτρων για την περίοδο 1981-2017 μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Fortran95</li> <li>Υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής μέσω των μεθόδων Penman-Montheith (FAO-56) και Thorhthwaite-Mather (1955)</li> </ul>	
Εργαστηριακές Αναλύσεις	<ul> <li>Χημικές αναλύσεις</li> </ul>	

Πίνακας 1.1: Οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη	6
ΘΕΟΦΡΑΣΤΟ	Σ"
Τμήμα Γεωλογίας	1
Allio	10

πα Γεωλογίας	• Κοκκομετρικές αναλύσεις και Αναλύσεις
А.П.Ө	λεπτόκοκκων
A DETENDED AND A DESCRIPTION OF A DESCRI	• Ψηφιοποίηση χαρτών με τη χρήση Γ.Σ.Π.
Δημιουργία Θεματικών Χαρτών	(015) Δημιουργια θεματικών χαρτών
	(πεςομετρικών και υσροχημικών)
	<ul> <li>Δημιουργία σιαγραμματιών</li> <li>Δέτολόνηση των κλιματικών παραμέτρων των</li> </ul>
	μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (GCMs)
	HadGEM2 και MPI, τα οποία ακολουθούν το
	σενάριο εκπομπών RCP8.5 και επιλέγθηκαν
	ως δεδομένα εισόδου (drivers) στο περιοχικό
	κλιματικό μοντέλο RegCM4
	• Επιλογή κατάλληλης μεθόδου χωροχρονικής
	μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging
	(spatio-temporal Kriging), αξιολόγηση και
	ελεγχος αξιοπιστιας στη γλωσσα
Δημιουργία Βάσης Κλιματικών Δεδομένων	προγραμματισμού κ • Εφαρμονή της κατάλληλης γαρογοριμικής
Υψηλής Χωροχρονικής Κλίμακας	μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging στα
	ιστορικά και στα μελλοντικά δεδομένα των
	μοντέλων MPI και HadGEM2.
	χρησιμοποιώντας το κατάλληλο χωροχρονικό
	μοντέλο συμμεταβλητότητας
	• Αξιολόγηση της απόκρισης των κλιματικών
	μοντέλων έπειτα από την εφαρμογή της
	χωροχρονικης μεθοδου βελτιστης παρεμβολης
	• Extinging (spano-temporal Kinging)
	παραμέτρων έως το τέλος του 21ου αιώνα
	<ul> <li>Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου</li> </ul>
	ArcSWAT με κλιματικά δεδομένα εισόδου τα
	ERA-Interim και τις παραμέτρους των
	μοντέλων MPI και HadGEM2, που
	ενοωματωθηκαν στον περιοχικο κλιματικο
	μοντέλω παχωτη, για τον προσοιορισμο του υδοολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορορής
	του ποταμού Χαβρία έως το τέλος του 2100
	αιώνα
Υδρολογική-Υδρογεωλογική Προσομοίωση	• Ανάλυση ευαισθησίας των υδρολογικών
σε Συνθήκες Κλιματικής Αλλαγής	παραμέτρων απέναντι στην κλιματική αλλαγή
	• Προσομοίωση της υπόγειας ροής του
	παρακτιου υδροφορεα της λεκάνης απορροής
	100 ποταμού Δαρριά με τον κωσικά MODELOW με δεδομένα εισόδου τα
	αποτελέσματα της εφαρμονής του
	υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τις
	διάφορες κλιματικές παραμέτρους
	• Εκτίμηση της διακύμανσης της στάθμης του
	υδροφορέα έως το τέλος του 21ου αιώνα
	• venetsanou P., Anagnostopoulou, C,. Voudouris K (2016): Climate projections on
	estimating water balance in Havrias River
	Basin, Greece. 13ο Διεθνές Συνέδοιο
Συγγραφή Επιστημονικών Άρθρων	Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και
	Ατμοσφαιρικής Φυσικής, Θεσσαλονίκη
	• Βενετσάνου Π. (2016): Στατιστική ανάλυση
	των υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης
	Ι απορροης του Ποταμού Χαβρία, 290

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας	Πανελλήνιο Συνέδριο Στατιστικής,
	<ul> <li>Θεσσαλονικη</li> <li>Venetsanou P., Papadopoulos E., Mattas C., (2017): Preliminary results from the hydrogeological investigation of the coastal aquifer of the Havrias basin (Halkidiki, Northern Greece). The application of the Swot analysis, 110 Διεθνές Υδρογεωλογικό Συνέδριο, Αθήνα</li> <li>Venetsanou P., Anagnostopoulou C., Loukas A., Voudouris K. (2018): Analysis of climate future projections using spatio-temporal Kriging method, 14ο Διεθνές Συνέδριο Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικής Φυσικής, Αλεξανδρούπολη</li> <li>Venetsanou P., Anagnostopoulou C., Loukas A., Lazoglou G., Voudouris K. (2019): Minimizing the uncertainties of RCMs climate data by using spatio-temporal geostatistical modeling, Earth Science Informatics, 12:183–196 https://doi.org/10.1007/s12145-018-0361-7</li> <li>Venetsanou P., Anagnostopoulou C., Loukas A., Voudouris K. (2020): Hydrological impacts of climate change on a data scarce Greek catchment, Theoretical and Applied Climatology, Springer,</li> </ul>

https://doi.org/10.1007/s00704-020-03130-6

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται τα απαιτούμενα δεδομένα και εργαλεία, που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του παράκτιου υδροφόρου συστήματος της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται τα δεδομένα εισαγωγής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT και του κώδικα MODFLOW προσομοίωσης της υπόγειας ροής, τα οποία εφαρμόστηκαν, με σκοπό την αξιόπιστη προσομοίωση, σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής, του ερευνώμενου υδροφορέα, στον οποίο τα παρατηρούμενα δεδομένα είναι ελάχιστα.

Η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης του Χαβρία αποτελεί το εργαλείο για τον προσδιορισμό του εμπλουτισμού του υδροφορέα. Ουσιαστικά, τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής.

Συνεπώς, τα απαραίτητα δεδομένα περιλαμβάνουν τα μορφολογικά, γεωλογικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τις χρήσεις γης, καθώς και τη βάση δεδομένων με τις κλιματικές παραμέτρους υψηλής χωροχρονικής κλίμακας, που χρησιμοποιήθηκαν για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής.

Τέλος, περιγράφονται οι υφιστάμενες υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες, οι οποίες επικρατούν στον παράκτιο υδροφορέα και συμβάλλουν καθοριστικά στη σύνθεση του εννοιολογικού μοντέλου, που απαιτείται για την προσομοίωσή του.

### 2.1 Ανάλυση της περιοχής έρευνας

### 2.1.1 Γεωγραφική θέση

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

2. Δεδομένα γιας

Η περιοχή έρευνας αφορά το παράκτιο υδροφόρο σύστημα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία. Το υδροφόρο σύστημα εντοπίζεται στην περιοχή της Ορμύλιας Χαλκιδικής και αναπτύσσεται εντός των κοκκώδων σχηματισμών. Εντάσσεται στο Υδατικό Διαμέρισμα της Κεντρικής Μακεδονίας (10° Υδατικό Διαμέρισμα) και με βάση το Αναθεωρημένο Διαχειριστικό Σχέδιο (Γενική Γραμματεία Υδάτων), χαρακτηρίζεται ως κακής ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Χαβρία βρίσκεται στην Χαλκιδική, στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και διοικητικά υπάγεται στους δήμους Πολυγύρου, Σιθωνίας και Αριστοτέλη. Η λεκάνη διαρέεται από τον ομώνυμο ποταμό, ο οποίος πηγάζει από την περιοχή του Παλαιοχωρίου-Νεοχωρίου και εκβάλλει στον κόλπο της Κασσάνδρας (ή Τορωναίος κόλπος). Η λεκάνη απορροής του Χαβρία οριοθετείται στα βόρεια και βορειοανατολικά από τους ορεινούς όγκους της Ασπρόπετρας και του Χολομώντα, στα βορειοδυτικά από τα όρη Σταύρου Τούμπα και Καστρί, στα ανατολικά από τη Σβούλα και στα νότια από τον κόλπο της Κασσάνδρας (Σχήμα 2.1).

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Χαβρία μπορεί να χαρακτηριστεί ως τυπικό παράδειγμα λεκάνης απορροής του Ελληνικού χώρου, διότι παρουσιάζει σύνθετη ορεογραφία, γεωργική, καθώς και τουριστική δραστηριότητα. Επιπρόσθετα, ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης λεκάνης, όπως και πολλών ελληνικών λεκανών απορροής, είναι η απουσία συστηματικής παρακολούθησης και καταγραφής των μετεωρολογικών και υδρολογικών-υδρογεωλογικών συνθηκών.

Εντός της λεκάνης απορροής του Χαβρία, εκτός από τον παράκτιο υδροφορέα, υδροφορία αναπτύσσεται και εντός των ανθρακικών σχηματισμών. Τα εν λόγω υδροφόρα συστήματα χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της λεκάνης.

Τέλος, επισημαίνεται ότι η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής έρευνας στηρίχθηκε, αρχικά, στο ιδιαίτερο ενδιαφέρον, που παρουσιάζει ως προς τα χαρακτηριστικά της (ορεογραφία, τουριστική και γεωργική δραστηριότητα). Επιπλέον, ο παράκτιος υδροφορέας, που αναπτύσσεται εντός της λεκάνης του Χαβρία, διερευνάται, εκτενώς, για πρώτη φορά με την παρούσα, χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία.

#### 2.1.2 Μορφολογία

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ο προσδιορισμός των μορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής του Χαβρία επιτεύχθηκε μέσω του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) με χωρική ανάλυση 5 m, το οποίο παραχωρήθηκε από το Εθνικό Κτηματολόγιο, σε περιβάλλον GIS. Ως προβολικό σύστημα ορίστηκε το ΕΓΣΑ87 (Greek Grid).

Η λεκάνη καταλαμβάνει έκταση 472 km<sup>2</sup> και έχει επίμηκες σχήμα. Το μέγιστο και το ελάχιστο υψόμετρο ισούνται με 0 m και 1090 m, αντίστοιχα. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης είναι ίσο με 380 m. Τα μεγαλύτερα υψόμετρα συναντώνται στο βορειοδυτικό και βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης, ενώ το νότιο τμήμα της χαρακτηρίζεται ως πεδινό (Σχήμα 2.1).

Η μέση κλίση της λεκάνης απορροής του Χαβρία ισούται με 22%. Η κλίση αυξάνεται από το νότιο προς το βόρειο τμήμα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στο νότιο τμήμα, η κλίση κυμαίνεται από 0% έως 3%.

### 2.1.3 Υδρογραφικό Δίκτυο

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ο Χαβρίας είναι αποδέκτης πλήθους μικρότερων ρεμάτων, τα οποία παρουσιάζουν παροδική επιφανειακή απορροή έπειτα από έντονη βροχόπτωση. Μόνιμη επιφανειακή απορροή παρατηρείται στον κύριο κλάδο του Χαβρία, στην περιοχή του Μεταγγιτσίου και των Πλανών, όπου, όμως, κατά τη θερινή περίοδο μειώνεται. Στην περιοχή της Ορμύλιας, ο Χαβρίας διηθείται εντός των αποθέσεων και 2 km πριν από την εκβολή του στη θάλασσα, ένα μέρος του ρέει και πάλι επφανειακά. Το μήκος της μισγάγγειας ισούται με 59 km. Η διεύθυνση ροής του ποταμού Χαβρία είναι BBA-NNΔ. Το υδρογραφικό δίκτυο είναι δενδριτικής και παράλληλης μορφής και είναι ιδιαίτερα πυκνό στο βόρειο και κεντρικό τμήμα της λεκάνης (Σχήμα 2.2).




Σχήμα 2.1: Ο μορφολογικός χάρτης της λεκάνης του Χαβρία.



Σχήμα 2.2: Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης του Χαβρία.

Οι χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία (Corrine Land Cover, 2012) παρατίθενται στο Σχήμα 2.3 και στον Πίνακα 2.1. Το βόρειο τμήμα της λεκάνης του Χαβρία συγκροτείται από δασικές εκτάσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο ποσοστό (66,2%) κάλυψης των χρήσεων γης. Το 33% της λεκάνης καλύπτεται από γεωργικές περιοχές και συγκεκριμένα, από τα σύνθετα συστήματα καλλιεργειών, τους ελαιώνες, και τις μη αρδεύσιμες αρόσιμες εκτάσεις. Η συγκομιδή της βρώσιμης ελιάς αποτελεί τη σημαντικότερη γεωργική δραστηριότητα, που λαμβάνει χώρα στην περιοχή. Τέλος, παραθαλάσσιοι βάλτοι εντοπίζονται στο παράκτιο τμήμα της λεκάνης του Χαβρία.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

2.1.4 Χρήσεις Γης

Υποκατηγορία	Χρήσεις Γης	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Ποσοστό%	
Τενρητές Επιφάνειες	Αστικός ιστός	2.45	0,52	
τοχνητος Επιφανοιος	Χώροι εξόρυξης ορυκτών	2,75		
	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη			
	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας			
Γεωργικές Περιοχές	Ελαιώνες	155.46	32,85	
	Γη που καλύπτεται κυρίως από την	155,40		
	γεωργία με σημαντικές εκτάσεις			
	φυσικής βλάστησης			
	Δάσος πλατύφυλλων			
Δάση και ημιφυσικές περιοχές	Δάσος κωνοφόρων			
	Σκληροφυλλική βλάστηση	315,23	66,21	
	Μεταβατικές δασώδεις και			
	θαμνώδεις εκτάσεις			
Υγρότοποι	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	0,14	0,03	

Πίνακας 2.2: Η	κατανομή γ	των χρήσεων	γης της λεκάνης	απορροής του	ποταμού Χαβρία.
		<b>M</b> 1	1 15 15 15	11 12	



Σχήμα 2.3: Οι χρήσεις γης της λεκάνης του ποταμού Χαβρία (Corine, 2012).

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Χαβρία δομείται από λιθολογικούς σχηματισμούς της Σερβομακεδονικής, της Περιροδοπικής ζώνης και της Υποζώνης της Παιονίας (Μουντράκης, 2010).

Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται ο γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία. Το κεντρικό τμήμα της λεκάνης συγκροτείται από χαλαζίτες, ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους και φυλλίτες, ηλικίας Μεσοζωικού. Το ανατολικό και κεντρικό τμήμα της λεκάνης αποτελείται από Παλαιοζωικούς διμαρμαργυγιακούς γνεύσιους στης σειράς του Βερτίσκου, καθώς και από το ανώτερο σύστημα αναβαθμίδων, Πλειστοκαινικής ηλικίας. Στο βόρειο τμήμα της λεκάνης συναντώνται ο γρανιτής τύπου Αρναίας, ο διορίτης, οι αμφβολίτες και ο διμαρμαρυγιακός γνεύσιος.

Στο παράκτιο τμήμα της λεκάνης του Χαβρία, στο οποίο αναπτύσσεται σημαντική υδροφορία, εντοπίζονται οι ακόλουθοι σχηματισμοί, από τους νεότερους προς τους παλαιότερους:

#### Ολόκαινο:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

2.1.5 Γεωλογία ΥΙΟς

- Αλλουβιακές αποθέσεις: αμμούχες άργιλοι, άμμοι και ψηφίδες
- Παράκτιες αποθέσεις: άμμοι και θίνες
- Ιζήματα λιμνοθαλασσών: άμμοι και αμμούχες άργιλοι
- Λιμναία Ιζήματα: άργιλοι, ιλύς και άμμος

### Πλειστόκαινο:

Ανώτερο Σύστημα Αναβαθμίδων: άμμοι, ψηφίδες, ψηφίδες, κροκάλες κυρίως
 σχιστολιθικής προέλευσης

### Τεταρτογενές Αδιαίρετο:

Ριπίδια προσχώσεων: παλαιοί και νέοι κώνοι κορημάτων

### Νεογενές (Ανώτερο Μειόκαινο-Κάτω Πλειόκαινο):

- Βασική σειρά κροκαλοπαγών: κροκαλοπαγή με εναλλαγές ψαμμιτών, χερσαίου περιβάλλοντος
- Σειρά ερυθρών αργίλων: ερυθρές έως κεραμόχρωμες άργιλοι και κατά τόπους αμμούχες



- Γάββρος
- Πρασινοσχιστόλιθοι και αλβιτικοί γνεύσιοι
- Φυλλίτες

Αναφορικά με την ρηξιγενή τεκτονική, στο παράκτιο τμήμα της λεκάνης απορροής παρατηρούνται ρηξιγενείς δομές ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης. Στην υπόλοιπη περιοχή εντοπίζονται ρήγματα διεύθυνσης Β-Ν και ΒΔ-ΝΑ (Μουντράκης, 2010).

### 2.1.6 Εδαφολογικά Χαρακτηριστικά

Απαραίτητο δεδομένο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι ο εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης του Χαβρία. Για τη δημιουργία του εδαφολογικού χάρτη της περιοχής έρευνας ελήφθησαν υπόψη ο γεωλογικός χάρτης, ο εδαφολογικός χάρτης που συντάχθηκε από τους Billas et al. (2016), καθώς και οι εργαστηριακές δοκιμές (κοκκομετρική ανάλυση και ανάλυση λεπτόκοκκων), που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Σχετικά με τις εργαστηριακές δοκιμές, συλλέχθηκαν, συνολικά 27 εδαφικά δείγματα, από το βάθος των 30 cm, η θέση των οποίων απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5. Η συλλογή των εδαφικών δεγμάτων έλαβε χώρα στο παράκτιο τμήμα της λεκάνης, όπου εντοπίζονται οι Τεταρτογενείς και Νεογενείς σχηματισμοί. Η κοκκομετρική ανάλυση και η ανάλυση των λεπτόκοκκων πραγματοποιήθηκαν βάσει του πρωτοκόλλου, που ακολουθείται στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας και περιγράφεται αναλυτικά από τους Χρηστάρα και Χατζηαγγέλου (2011). Η ταξινόμηση της διαβάθμισης του υλικού επιτεύχθηκε με βάση το Unified Soil Classification System (USAE, 1953; AASHO, 1961; IAEG, 1981). Στο Παράρτημα 1 παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες των 27 εδαφικών δειγμάτων με τους αντίστοιχους πίνακες της ποσοστιαίας κατανομής του υλικού.

Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται ο εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία.





Σχήμα 2.4: Ψηφιοποιημένος γεωλογικός χάρτης της λεκάνης του Χαβρία κλίμακας 1:50.000 (ΕΑΓΜΕ)



Ψηφιακή συλλογή

Σχήμα 2.5: Ο εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία, όπου. L-SIL-SI-FSI: πηλός, ιλύς-πηλός, ιλύς, λιπώδης ιλύς, S-LS: άμμος, πηλόςάμμος, SCL-CL-SICL: άμμος-άργιλος-πηλός, άργιλος, ιλύς-άργιλος-πηλός, SIC-C-SC: ιλύς-άργιλος, άργιλος, άμμος-άργιλος, SL: πηλός-άμμος.

2.2 Κλιματικά Δεδομένα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα κλιματικά δεδομένα, που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου των υδρολογικών-υδρογεωλογικών μοντέλων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα επανάλυσης (reanalysis) δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των παροντικών συνθηκών της περιοχής έρευνας, καθώς και για την αξιολόγηση των κλιματικών μοντέλων. Η δεύτερη κατηγορία αφορά τις κλιματικές παραμέτρους, οι οποίες αξιοποιήθηκαν για τη μελλοντική προβολή των κλιματικών και υδρολογικών-υδρογεωλογικών συνθηκών

### 2.2.1 ERA-Interim Επανάλυσης Δεδομένα

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Χαβρία, εντοπίζονται 3 μετεωρολογικοί σταθμοί (Σχήμα 2.1). Ο μετεωρολογικός σταθμός στην Ορμύλια, ο οποίος είναι εγκατεστημένος σε υψόμετρο 40 m, διαθέτει, μόνο, τις μέσες μηνιαίες και ετήσιες τιμές της βροχόπτωσης, οι οποίες καλύπτουν τη χρονική περίοδο 1975-2006. Μοναδικά διαθέσιμα βροχομετρικά δεδομένα απαντώνται και στο σταθμό των Πλανών, ο οποίος βρίσκεται σε υψόμετρο 115 m. Τα εν λόγω δεδομένα αφορούν την περίοδο 1976-2000. Τέλος, ο σταθμός του Ταξιάρχη είναι εγκατεστημένος σε υψόμετρο 862 m και τα διαθέσιμα δεδομένα του αφορούν μέσες μηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης, μέγιστης, μέσης και ελάχιστης θερμοκρασίας της περίόδου 1974-2000.

Η έλλειψη ημερήσιων δεδομένων βροχόπτωσης και θερμοκρασίας, καθώς επίσης δεδομένων ταχύτητας ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας και σχετικής υγρασίας (απαραίτητων δεδομένων εισαγωγής στο υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT, Κεφάλαιο 4), με επαρκή χωρική κατανομή εντός της λεκάνης του Χαβρία, οδήγησε στη χρήση επανάλυσης κλιματικών παραμέτρων (reanalysis data). Τα συγκεκριμένα δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή, προέρχονται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προβλέψεων (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF). Το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προβλέψεων είναι ένας ανεξάρτητος κυβερνητικός οργανισμός, ο οποίος παρέχει, δημόσια, πλήθους κλιματικών δεδομένων.

Τα εν λόγω κλιματικά δεδομένα περιγράφουν αριθμητικά το κλίμα, συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των προγνωστικών μοντέλων, τις πραγματικές παρατηρήσεις και τα δορυφορικά δεδομένα. Περιλαμβάνουν ποικίλες ατμοσφαιρικές παραμέτρους, όπως πίεση, ταχύτητα ανέμου σε διάφορα υψόμετρα, θερμοκρασία αέρα, σημείο δρόσου, ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και επιφανειακές παραμέτρους, όπως βροχόπτωση, υγρασία εδάφους, δείκτη λευκάγειας ή ανακλαστικότητας (albedo) και θερμοκρασία θαλάσσιας επιφάνειας. Έχουν παγκόσμια χωρική κλίμακα, καλύπτοντας ένα ευρύ χρονικό φάσμα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα ERA-Interim δεδομένα, τα οποία περιλαμβάνουν κλιματικές παραμέτρους από το 1979 έως τις 31 Αυγούστου του 2019 (<u>http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc</u>). Η ανάλυση των ERA-Interim είναι τετραδιάστατη (4D-VAR), με χωρικό φάσμα 80 km, σε 60 κάθετα επίπεδα από την επιφάνεια έως το 0.1 hPa. Πιο συγκεκριμένα, το ατμοσφαιρικό μοντέλο συνδυάστηκε με ένα ωκεάνιο μοντέλο με αρχική χωρική ανάλυση 1° × 1°. Εν συνεχεία, ακολούθησε υποβιβασμός κλίμακας σε διάφορες χωρικές αναλύσεις (0.75°, 0,5°, 0.25°, 0.125°) (Dee et al., 2011).

Τα απαιτούμενα ERA-Interim δεδομένα για την εκπόνηση της διατριβής περιλαμβάνουν τις ημερήσιες τιμές της βροχόπτωσης, της μέγιστης, της ελάχιστης και της μέσης θερμοκρασίας, του σημείου δρόσου, της ταχύτητας ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας και του δείκτη ανακλαστικότητας (albedo). Τα δεδομένα έχουν χωρική ανάλυση 12,5 km × 12,5 km και καλύπτουν το χωρικό παράθυρο με γεωγραφικό πλάτος από 40,0 έως 40,5 και γεωγραφικό μήκος από 23,5 έως 24,0. Στην παρούσα εργασία, τα ERA-Interim αφορούν τις χρονικές περιόδους 1981-2000 και 2016-2017. Η πρώτη περίοδος αναφέρεται ως η περίοδος αναφοράς και χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των παραμέτρων των κλιματικών μοντέλων, ενώ η περίοδος 2016-2017 αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής και στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι υπαίθριες παρατηρήσεις. Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται η θέση των σημείων πλέγματος.

Τα ERA-Interim δεδομένα χρησιμοποιούνται, ευρέως, τόσο για την προσομοίωση των υδρολογικών συνθηκών όσο και για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε περιοχές με σύνθετη ορεογραφία, αλλά και σε περιοχές με έλλειψη μετεωρολογικών δεδομένων. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι εργασίες των Romanou et al. (2010) και Lazoglou et al. (2018), που χρησιμοποίησαν τα ERA-Interim σε περιοχές του ελληνικού χώρου, οι Essou et al. (2016) στις ΗΠΑ και οι Nkiaka et al. (2017) στην Αφρική.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η αξιοπιστία των ERA-Interim δεδομένων ελέγχθηκε μέσω της χρήσης των στατιστικών μέτρων του συντελεστή συσχέτισης (r), της τυπικής απόκλισης και της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Ουσιαστικά, τα συγκεκριμένα στατιστικά μέτρα των ετήσιων βροχομετρικών δεδομένων των ERA-Interim της περιόδου 1981-2000 συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα δεδομένα βροχόπτωσης των 3 διαθέσιμων μετεωρολογικών σταθμών. Η γραφική απεικόνιση της στατιστικής αξιολόγησης επιτεύχθηκε μέσω του διαγράμματος Taylor (Σχήμα 2.6). Η χρήση των διαγραμμάτων Taylor περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Από την στατιστική αξιολόγηση διαπιστώνεται ότι τα βροχομετρικά δεδομένα των ERA-Interim παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή συσχέτισης και μικρές τιμές τυπικής απόκλισης και ρίζας μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής συσχέτισης κυμαίνεται από 0,72 έως 0,86. Ο μικρότερος συντελεστής συσχέτισης (0,72) εμφανίζεται σε σχέση με τα βροχομετρικά δεδομένα του σταθμού του Ταξιάρχη, υποδηλώνοντας τη μικρότερη ικανότητα των ERA-Interim να αποδώσουν τα μεγαλύτερα ύψη βροχής, που παρατηρούνται στις πιο ορεινές περιοχές. Η ετήσια ποσοστιαία διαφορά (bias) μεταξύ των βροχομετρικών δεδομένων των ERA-Interim και των δεδομένων βροχόπτωσης των 3 μετεωρολογικών σταθμών ισούται με 10%.



Σχήμα 2.6: Το διάγραμμα Taylor, στο οποίο απεικονίζεται η στατιστική αξιολόγηση μεταξύ των ετήσιων βροχομετρικών δεδομένων των ERA-Interim και των πραγματικών δεδομένων (με μπλε: η μέση ετήσια βροχόπτωση του σταθμού του Ταξιάρχη, με γκρι: η μέση ετήσια βροχόπτωση του σταθμού των Πλανών και με τιρκουάζ: μέση ετήσια βροχόπτωση του σταθμού της Ορμύλιας).

Η μέση ετήσια βροχόπτωση της περιόδου 1981-2000, βάσει των ERA-Interim δεδομένων ισούται με 520 mm, χωρίς να διαπιστώνεται αξιόλογη μεταβολή στη διακύμανσή της κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης εικοσαετίας (Σχήμα 2.7). Τα μέγιστα ύψη βροχόπτωσης παρατηρούνται κατά τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο, ενώ η ελάχιστη τιμή της βροχόπτωσης καταγράφεται τον Αύγουστο (Σχήμα 2.7).



**Σχήμα 2.7:** Η μέση ετήσια και μηνιαία βροχόπτωση βάσει των ERA-Interim στην περιοχή έρευνας για την περίοδο 1981-2000.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία της περιόδου 1981-2000, σύμφωνα με τα ERA-Interim, είναι ίση με 15,6°C (Σχήμα 2.8) και η διακύμανσή της παρουσιάζει αυξητική τάση (Σχήμα 2.8). Θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος, ενώ ο Ιανουάριος είναι ο ψυχρότερος μήνας.



**Σχήμα 2.8:** Η μέση ετήσια και μηνιαία βροχόπτωση βάσει των ERA-Interim στην περιοχή έρευνας για την περίοδο 1981-2000

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία και ετήσια βροχόπτωση των ετών 2016 και 2017. Η μέση ετήσια βροχόπτωση των δύο ετών ισούται με 546,8 mm και η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι ίση με 14,1°C.



Πίνακας 2.3: Η μέση μηνιαία και ετήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία της περιοχής έρευνας για τα έτη 2016 και 2017.

	Παράμετροι	Ι	Φ	Μ	А	Μ	Ι	Ι	А	Σ	0	Ν	Δ	Ετήσια
	Βροχόπτωση	50.3	41 9	102.4	77	79 5	39.1	57.3	17.6	29.9	58.8	45.4	4.0	533.9
2016	( <b>mm</b> )	50.5	11.9	102.1	/./	17.5	57.1	57.5	17.0	27.7	50.0	13.1	1.0	0000
2020	Θερμοκρασία	51	96	93	13.9	15.8	22.0	23.9	24.0	19.8	14 5	10.0	29	14 2
	(°C)	5.1	2.0	2.5	15.7	15.0	22.0	23.7	24.0	17.0	14.5	10.0	2.7	1702
	Βροχόπτωση	82.7	40.5	65 5	26.5	85 /	26.9	10 7	64	30.0	20.0	1123	12.8	559 7
2017	( <b>mm</b> )	02.7	40.5	05.5	20.5	0+	20.7	17.7	0.4	50.7	20.0	112.3	42.0	557.1
2017	Θερμοκρασία	11	6.0	9.6	117	16.6	21.4	26.0	24.7	20.5	14 1	10.3	57	14.0
	(°C)	1.1	0.0	2.0	11./	10.0	21.4	20.0	<i>2</i> − <b>r</b> ./	20.5	14.1	10.5	5.1	14.0

## 2.2.2 Πάραμετροι Κλιματικών Μοντέλων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι κλιματικές παράμετροι (climate model outputs) του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, με δεδομένα εισόδου (driving forcing) τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCMs) HadGEM2-ES και MPI-ESM-MR, χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαράσταση του μελλοντικού κλίματος της περιοχής έρευνας έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα.

Ο δυναμικός υποβιβασμός κλίμακας μέσω του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4 πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος Med-Cordex (www.medcordex.eu; Ruti et al., 2016) Το Med-Cordex αποτελεί τμήμα των προγραμμάτων Cordex (COordinated Regional climate Downscaling Experiment) και Coupled Models Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), τα οποία χρηματοδοτούνται από τον Παγκόσμιο Πρόγραμμα για τη Μελέτη του Κλίματος και κύριος στόχος τους είναι η βελτίωση και η αξιολόγηση των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) και των μεθόδων υποβιβασμού κλίμακας (downscaling methods), καθώς και η δημιουργία καινούριων σεναρίων εκπομπών για την προβολή του κλίματος.

Τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCMs) HadGEM2-ES και MPI-ESM-MR, τα οποία ενσωματώθηκαν (nested) στο περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4, ακολουθούν το πιο ακραίο και απαισιόδοξο σενάριο εκμπομπών το RCP8.5, βάσει του οποίου το radiative forcing εκτιμάται ίσο με 8.5 W/m<sup>2</sup> (Van Vuuren et al. 2011). Η χωρική ανάλυση των μοντέλων HadGEM2-ES και MPI-ESM-MR είναι 50 km x 50 km (MED44). Στην παρούσα εργασία, τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας HadGEM2-ES και MPI-ESM-MR, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, θα αναφέρονται με τις συντομογραφίες RegCM4\_H και RegCM4\_M, αντίστοιχα.

Αναφορικά με το περιοχικό μοντέλο RegCM4, αποτελεί την εξέλιξη και την αναβάθμιση του μοντέλου RegCM3, που αρχικά δημιουργήθηκε από τους Giorgi et al. (1993a,b), ενώ στη συνέχεια τροποποιήθηκε και βελτιώθηκε σύμφωνα με τους Giorgi and Mearns (1999) και Pal et al. (2007). Το περιοχικό μοντέλο RegCM4 αποτελεί ένα υδροστατικό μοντέλο και έχει σ-κατακόρυφη προβολή (sigma vertical coordinate) (Giorgi et al. 2012). Στους Πίνακες 2.3 και 2.4 παρατίθενται τα

κυριότερα χαρακτηριστικά του περιοχικού μοντέλου RegCM4 και των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας HadGEM2-ES και MPI-ESM-MR.

Οι κλιματικές παράμετροι των μοντέλων RegCM4\_Η και RegCM4\_Μ, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή, περιλαμβάνουν τις ημερήσιες τιμές της βροχόπτωσης, της μέγιστης, ελάχιστης και μέσης θερμοκρασίας, καθώς και της ταχύτητας του ανέμου και αφορούν την περίοδο αναφοράς 1981-2000 (ιστορική περίοδος) και τις μελλοντικές εικοσαετίες 2031-2050 και 2080-2099.

Πίνακας 2.4: Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4

Χαρακτηριστικά Μοντέλου	Περιγραφή-Αναφορές
Δυναμική	Υδροστατικό μοντέλο, σ-κατακόρυφη προβολή (Giorgi et
	al., 1993a)
Σχήμα μεταφοράς ακτινοβολιών	Τροποποιημένο CCM3 (Kiehl et al., 1996)
Φυσική του οριακού στρώματος	Κατακόρυφο σχήμα διάχυσης των Holtslag et al. (1990) UW-PBL (Bretherton et al., 2004)
Σχήμα ροής μάζας σε σωρειτόμορφα νέφη (cumulus)	Kuo (Anthes et al. 1987)
	Grell (Grell 1993)
	MIT (Emanuel & Zivkovic-Rothman, 1999)
	Tiedtke (Tiedtke, 1989)
Βροχόπτωση λόγω κατακόρυφης ανάπτυξης	SUBEX (Pal et al., 2000)
Αναπαράσταση της επιφάνειας του εδάφους	BATS: σχήμα μεταφοράς βιόσφαιρας-ατμόσφαιρας
	(Dickinson et al., 1993)
	Sub-grid BATS (Giorgi et al., 2003)
	CLM (Steiner et al. 2009)
Ωκεάνια κυκλοφορία (Ocean fluxes)	BATS: σχήμα μεταφοράς βιόσφαιρας- ατμόσφαιρας
	(Dickinson et al., 1993)
	Zeng (Zeng et al., 1998)
	Diurnal sea surface temperature (Zeng & Beljaars, 2005)
Αιωρούμενα σωματίδια (Interactive aerosols)	Organic and black carbon, SO <sub>4</sub> (Solmon et al., 2006)
	Dust (Zakey et al., 2006)
	Sea salt (Zakey et al.,2008)
Interactive lake	1D diffusion/convection (Hostetler et al., 1993)
Τροπική Ζώνη (Tropical band)	Coppola et al. (2012, this Special)
Συζευγμένα Ωκεάνια (Coupled Ocean)	MIT (Artale et al., 2010)
	ROMS (Ratnam et al., 2009)

Πίνακας 2.5: Τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας, που ενσωματώθηκαν στο περιοχικό κλιματικό

μοντέλο RegCM4.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (GCMs)									
Όνομα μοντέλου	HadGEM2-ES (HadGEM2)	MPI-ESM-MR (MPI)							
Πρόγραμμα	Coupled Models Intercomparison Project	Coupled Models Intercomparison Project							
	Phase 5 (CMIP5)	Phase 5 (CMIP5)							
Ινστιτούτο	Met Office Hadley Centre (MOHC)	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-							
		M)							
Είδος μοντέλου	Coupled Earth System Model	Coupled Earth System Model							
Φορέας	Met Office Handley Centre	Bundesministerium fuer Bildung und							
Χρηματοδότησης		Forschung							
Κύριες Αναφορές	Collins et al. 2011, Jones et al. 2011	Popke et al. 2013, Giorgetta et al. 2013							

# 2.3 Εκτίμηση Πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Βασικό εργαλείο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία. Η έλλειψη ημερήσιων, συνεχών και μεγάλης χρονοσειράς μετεωρολογικών και υδρολογικών δεδομένων οδήγησε στην ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας, κατά την οποία η πραγματική εξατμισοδιαπνοή χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του υδρολογικού μοντέλου ArCSWAT (η λεπτομερής περιγραφή της παρουσιάζεται στο σχετικό κεφάλαιο, Κεφάλαιο 4).

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία εκτιμήθηκε μέσω των μεθόδων Penman-Monteith (FAO-56) και Thornthwaite-Mather. Η μέθοδος Penman-Monteith (FAO-56) επιλέχθηκε να εφαρμοστεί, καθώς προτείνεται από τον οργανισμό FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) ως η πρότυπη και πιο ακριβής μέθοδος εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής. Η μέθοδος Thornthwaite-Mather είναι ευρέως διαδεδομένη, καθώς, οι τιμές της πραγματικής εξατμισοδιανοής, που προκύπτουν από την εφαρμογή της, είναι αντιπροσωπευτικές για τον Ελληνικό χώρο (Βουδούρης, 2013).

Η μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή βάσει της μεθόδου Penman-Monteith (FAO-56) υπολογίζεται μέσω της σχέσης (2.1):

$$ET_a = ET_O \times K_C \times K_s \tag{2.1}$$

Όπου:

 $ET_{\alpha} = η πραγματική εξατμισοδιαονοή (mm/day)$ 

 $ET_o = η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm/day)$ 

 $K_c = o$  αδιάστατος φυτικός συντελεστής μιας συγκεκριμένης καλλιέργιεας, που βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο στάδιο καλλιέργειας. Ο οργανισμός FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) προτείνει για κάθε καλλιέργεια την αντίστοιχη τιμή του συντελεστή καλλιέργειας (http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e0b.htm#chapter%206%20%20%20etc%20%2 0%20single%20crop%20coefficient%20(kc)). Κ<sub>s</sub> = συντελεστής, ο οποίος εξαρτάται από το διαθέσιμο εδαφικό νερό στη ζώνη του ριζοστρώματος και παίρνει την τιμή 1, όταν δεν υπάρχει έλλειψη νερού. Σε κάθε άλλη περίπτωση έχει τιμή μικρότερη της μονάδας.

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET<sub>0</sub>) με βάση τη μέθοδο Penman-Monteith (FAO-56) δίνεται μέσω της σχέσης (2.2). Απαιτούμενα κλιματικά δεδομένα για τον υπολογισμό της είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία, η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, η θερμοκρασία του σημείου δρόσου, η ταχύτητα ανέμου, καθώς και η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)}$$
(2.2)

Όπου:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

 $ET_o = η$  εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm/day)

γ = ο ψυχρομετρικός συντελεστής, ο οποίος εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση, τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (λ), την ειδική θερμότητα αέρα και το λόγο των μοριακών βαρών κορεσμένου και ξηρού αέρα

G = η ροή αισθητής θερμότητας στο έδαφος (MJm<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>)

 $\Delta = \eta$  κλίση της καμπύλης κορεσμού (kPa/ °C)

 $R_n = η$  καθαρή ακτινοβολία (MJm<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>)

 $u_2 = η$  ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m (m/s)

es = η πίεση κορεσμού υδρατμών (kPa)

ea = η πραγματική πίεση των υδρατμών (kPa)

Η μεθοδολογία για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής με βάση τη μέθοδο Penman-Monteith (FAO-56) περιγράφεται, εκτενώς, από τους Allen et al. (1998).

Η μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή βάσει της μεθόδου Thornthwaite-Mather εκτιμήθηκε σύμφωνα με την εξίσωση (2.3). Η αναλυτική περιγραφή του ισοζυγίου Thornthwaite-Mather παρατίθενται από τους Thornthwaite-Mather (1955).

$$P = E + Q + \Delta S \pm \mathrm{dq} \tag{2.3}$$

Όπου:



- Q = Ολική Απορροή
- ΔS = μεταβολή αποθεμάτων
- Dq = το αποτέλεσμα της ανθρώπινης παρέμβασης

Τα ημερήσια ERA-Interim δεδομένα, τα οποία αφορούν την περίοδο αναφοράς 1981-2000, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ΕΤ<sub>0</sub> (FAO-56) υπολογίστηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran95. Ο φυτικός συντελεστής K<sub>c</sub> θεωρήθηκε ίσος με 0,5, λαμβάβοντας υπόψη τις τιμές, που προτείνει ο FAO, καθώς και τους προτεινόμενους φυτικούς συνελεστές για τον Ελληνικό χώρο (Παπαζαφειρίου 1999). Ο συντελεστής K<sub>s</sub> θεωρήθηκε ίσος με 0,5.

Βάσει της σχέσης (2.2) η εξατμισοδιανοή αναφοράς υπολογίστηκε ίση με 1400 mm. Ο συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής βάσει της μεθόδου Penman-Monteith (FAO-56) (Σχέση 2.1), ισούται με 353 mm και αντιστοιχεί στο 68% της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (520 mm).

Οι απαραίτητοι υπολογισμοί, για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής με βάση τη μέθοδο Thornthwaite-Mather, πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό, το οποίο έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο Υδρογεωλογίας του Α.Π.Θ. Η εφαρμογή της μεθόδου επιτεύχθηκε θεωρώντας αμελητέες τη μεταβολή των αποθεμάτων (ΔS) και την ανθρώπινη παρέμβαση (dq). Λαμβάνοντας υπόψη τους γεωλογικούς σχηματισμούς και τις χρήσεις γης, που δομούν τη λεκάνη του Χαβρία, η μέγιστη ικανότητα κατακράτησης του εδάφους θεωρήθηκε ίση με 60 mm, βάσει των προτεινόμενων βιβλιογραφικών τιμών (Boυδούρης, 2013). Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι ίση με 340 mm και αντιπροσωπεύει το 66% της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (520 mm).

# 2.4 Υδρογεωλογία

Το παράκτιο υδροφόρο σύστημα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία αναπτύσσεται εντός Τεταρτογενών και Νεογενών αποθέσεων και πιο συγκεκριμένα, εντός αλλουβιακών αποθέσεων, παράκτιων λιμναίων και λιμνοθαλάσσιων ιζημάτων και ποταμοχειμάρριων αποθέσεων, καταλαμβάνοντας έκταση 22 km<sup>2</sup>, όπως και υπολογίστηκε στο περιβάλλον του GIS (Σχήμα 2.4). Επικρατούν, κυρίως, εναλλαγές άμμων, χαλικών, ψαμμιτών και αργίλων. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα λιθολογικά προφίλ των γεωτρήσεων (Σχήμα 2.12), το μέσο πάχος του υδροφορέα εκτιμάται σε 60 m.

Για τη διερεύνηση της πιεζομετρίας του αλλουβιακού υδροφορέα και της διεύθυνσης ροής του υπόγειου νερού, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου νερού με τη χρήση βαθμονομημένου σταθμημέτρου. Συνολικά, εντός του υδροφορέα απογράφηκαν περίπου 300 υδρογεωτρήσεις και πηγάδια. Οι μετρήσεις στάθμης του υπόγειου νερού έλαβαν χώρα την υγρή (τέλη Απριλίου) και την ξηρή περίοδο (μέσα Οκτωβρίου) των ετών 2016 και 2017.

Από τις μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου νερού κατά τα έτη 2016 και 2017 διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

1. 2016

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Κατά την υγρή περίοδο του έτους, το ελάχιστο και μέγιστο βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού ισούται με 0,19 m και 12,5 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και παρατηρήθηκαν στο παράκτιο και δυτικό τμήμα, αντίστοιχα. Η μέση τιμή της στάθμης του υπόγειου νερού είναι ίση με 3,1 m, κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Εκατέρωθεν του ποταμού Χαβρία, το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού κυμαίνεται από 2 m έως 8 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.
- Κατά τη ξηρή περίοδο του έτους, το ελάχιστο και μέγιστο βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού ισούται με 1,58 m και 17,7 m και καταγράφηκαν στο παράκτιο και δυτικό τμήμα, αντίστοιχα. Το μέσο βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού είναι ίσο με 5,4 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.
- Η πτώση στάθμης μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου του 2016 κυμαίνεται από 0,4 m έως 4 m στο παράκτιο τμήμα, από 1 m έως 4 m στις περιοχές εκατέρωθεν του ποταμού Χαβρία και από 5 m έως 8 m, στο βόρειο τμήμα του αλλουβιακού υδροφορέα (Σχήμα 2.9). Η μέση πτώση στάθμης μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου είναι ίση με 2,35 m.

## 2017 oyias

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Κατά την υγρή περίοδο του έτους, το ελάχιστο και μέγιστο βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού ισούται με 1,2 m και 14,7 m και παρατηρήθηκαν στο παράκτιο και δυτικό τμήμα, αντίστοιχα. Η μέση τιμή της στάθμης του υπόγειου νερού είναι ίση με 3,43 m, κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.
- Κατά τη ξηρή περίοδο του έτους, το ελάχιστο και μέγιστο βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού ισούται με 3 m και 21,9 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και εντοπίστηκαν στο παράκτιο και δυτικό τμήμα, αντίστοιχα. Το μέσο βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού είναι ίσο με 6,9 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Η πτώση στάθμης μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου του 2017 κυμαίνεται από 0,52 m έως 4,8 m στο παράκτιο τμήμα, από 1 m έως 7 m στις περιοχές εκατέρωθεν του ποταμού Χαβρία και από 5 m έως 7 m, στο βόρειο τμήμα του αλλουβιακού υδροφορέα (Σχήμα 2.9). Η μέση πτώση στάθμης μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου είναι ίση με 3,53 m.



458000 459000 460000 461000 462000 463000 464000 465000 466000





Σχήμα 2.9: Η πτώση στάθμης (m) του υπόγειου νερού μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου του 2016 και 2017.

Αξιολογώντας τη διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου των ετών 2016 και 2017 διαπιστώνεται μέση πτώση της στάθμης περίπου 3 m, η οποία αποδίδεται στην υπερ-εκμετάλευση του υπόγειου νερού, λόγω των αυξημένων υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Μετά το πέρας της αρδευτικής και τουριστικής περιόδου (Μέσα Οκτωβρίου) παρατηρείται άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στα Σχήματα 2.10 και 2.11 απεικονίζονται οι πιεζομετρικές καμπύλες των τεσσάρων περιόδων, όπου έλαβαν χώρα οι σταθμημετρήσεις. Από τους πιεζομετρικούς χάρτες προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Οι πιεζομετρικές τιμές κυμαίνονται από 0,2 m έως 32 m και από 0 m έως 24 m κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου των 2016 κα 2017, αντίστοιχα.
- Κατά τη ξηρή περίοδο των ετών 2016 και 2017, η πιεζομετρική επιφάνεια κυμαίνεται από -0,5 m έως 20,7 m και από -7 m έως 9 m, αντίστοιχα.
- Το πιεζομετρικό φορτίο παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές στο βόρειο τμήμα του υδροφορέα, ενώ οι μικρότερες τιμές του απαντώνται στο παράκτιο τμήμα.
- Η ροή του υπόγειου νερού ακολουθεί την τοπογραφία της περιοχής.
- Οι μηδενικές τιμές, καθώς και οι αρνητικές πιεζομετρίας, οι οποίες παρατηρούνται, στο νότιο και ανατολικό τμήμα του υδροφορέα κατά την ξηρή περίοδο των ετών 2016 και 2017, αντίστοιχα, υποδηλώνουν την πιθανότητα διείσδυσης του θαλασσινού νερού.



458000 459000 460000 461000 462000 463000 464000 465000 466000



Σχήμα 2.10: Οι πιεζομετρικοί χάρτες της υγρής και ξηρής περιόδου του 2016.

Ν

3 Km





Σχήμα 2.11: Οι πιεζομετρικοί χάρτες της υγρής και ξηρής περιόδου του 2017.

Ο προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα επιτεύχθηκε βάσει των δοκιμαστικών αντλήσεων, που πραγματοποιήθηκαν από το ΕΑΓΜΕ (πρώην ΙΓΜΕ) (Βεράνης κ.ά, 2010). Από τα αποτελέσματα των δοκιμαστικών αντλήσεων διαπιστώνεται ότι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κυμαίνονται μεταξύ K=2,2 x  $10^{-5}$  m/s και K=2,765 x  $10^{-3}$  m/s. Η μέση τιμής της μεταβιβαστικότητας ισούται με T=4,628 x  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Ο συντελεστής εναποθήκευσης κυμαίνεται από S=0,42 x  $10^{2}$  έως S=83,32 x  $10^{-2}$  με μέση τιμή S=27,65 x  $10^{-2}$ .

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Λαμβάνοντας υπόψη τα διαθέσιμα υδρολιθολογικά προφίλ των γεωτρήσεων (Σχήμα 2.12), καθώς και τα αποτελέσματα των δοκιμαστικών αντλήσεων, ο υδροφορέας είναι αβαθής και ελεύθερος και μόνο τοπικά μεταβαίνει σε μερικώς υπό πίεση λόγω των αργιλικών παρεμβολών.



**Σχήμα 2.12:** Τα λιθολογικά προφίλ των υδρογεωτρήσεων εντός του αλλουβιακού υδροφορέα.

μη Ο εμπλουτισμός του ελεύθερου υδροφορέα επιτυγχάνεται μέσω της κατείσδυσης των κατακρημνισμάτων, της διήθησης του ποταμού Χαβρία, όπως αποδεικνύεται από τις διαφορικές μετρήσεις της παροχής του ποταμού, που έχουν πραγματοποιηθεί από το ΕΑΓΜΕ (Βεράνης κ.ά, 2010), καθώς και των επιστροφών από τις αρδεύσεις. Ο παράκτιος αλλουβιακός υδροφορέας δεν επικοινωνεί υδραυλικά με τις γειτονικές λεκάνες λόγω των γεωλογικών συνθηκών, που επικρατούν στην περιοχή έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, όπως προκύπτει από τον γεωλογικό χάρτη (Σχήμα 2.4), ο υδροφορέας γειτνιάζει με αδιαπέρατους και ημιπερατούς σχηματισμούς. Αναλυτικότερα, στο βόρειο και ανατολικό τμήμα, ο υδροφορέας είναι σε επαφή με χαλαζίτες, ερυθρές αργίλους και γάββρο, ενώ στο δυτικό τμήμα εντοπίζονται η βασική σειρά κροκαλοπαγών, δουνίτες και πυροξενίτες, καθώς πρασινοσχιστόλιθοι και αλβιτικοί γνεύσιοι. Αναφορικά με τη βασική σειρά κροκαλοπαγών, έχει έκταση περίπου 13 km<sup>2</sup> και η υδροφορία τους είναι πολύ μικρή. Γεγονός, που επαληθεύεται από την απουσία ανορυγμένων υδρογεωτρήσεων ή πηγαδιών στον σχηματισμό αυτό, όπως διαπιστώθηκε κατά τη διαδιακασία της απογραφής στην ύπαιθρο.

### 2.5 Υδροχημεία

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Για την πιο ολοκληρωμένη και πλήρη διερεύνηση και κατανόηση των υδρογεωλογικών συνθηκών, που επικρατούν στον ελεύθερο αλλουβιακό υδροφορέα, προσδιορίστηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υπόγειου νερού. Για τον καθορισμό της ποιότητας του υπόγειου νερού, πραγματοποιήθηκαν 4 δειγματοληψίες κατά τα έτη 2016 και 2017. Στη συνέχεια, αναφέρονται ο αριθμός των δειγμάτων και το ακριβές χρονικό διάστημα των εκάστοτε δειγματοληψιών:

- Τον Ιούνιο και τον Οκτώβριο του 2016 πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες
  από 11 αρδευτικές γεωτρήσεις.
- Τον Ιούνιο και τον Οκτώβριο του 2017 πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες από 15 και 11 αρδευτικές γεωτρήσεις, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, κατά τις δύο περίοδους του 2017, κρίθηκε σκόπιμο να ληφθεί και δείγμα επιφανειακού νερού.

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των κύριων ιόντων ασβεστίου (Ca<sup>2+</sup>), μαγνησίου (Mg<sup>2+</sup>), όξινων ανθρακικών (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), χλωρίου (Cl<sup>-</sup>), νιτρικών (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) και

θειικών οξέων (SO4<sup>2-</sup>) πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, ενώ του καλίου (K<sup>+</sup>) και του νατρίου (Na<sup>+</sup>) στο χημικό εργαστήριο του Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού ΔΗΜΗΤΡΑ. Οι φυσικοχημικές παράμετροι (pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), σύνολο διαλυμένων στερεών (TDS)) προσοδιορίστηκαν επιτόπου στην ύπαιθρο με φορητό όργανο της εταιρείας Crison.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας των κατιόντων νατρίου (Na<sup>+</sup>) και καλίου (K<sup>+</sup>) επιτεύχθηκε με φλογοφωτόμετρο. Η συγκέντρωση του ασβεστίου (Ca<sup>2+</sup>), του μαγνησίου (Mg<sup>2+</sup>) και των όξινων ανθρακικών (HCO<sup>3-</sup>) προσδιορίστηκε με τη μέθοδο τιτλοδότησης τύπου HACH. Τέλος, τα ιόντα χλωρίου (Cl<sup>-</sup>), τα θειικά (SO<sub>4</sub><sup>2</sup>) και τα νιτρικά ανιόντα (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) προσδιορίστηκαν με φασματοφωτόμετρο τύπου HACH DR/2000.

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας των χημικών αναλύσεων επιτεύχθηκε μέσω του υπολογισμού του σφάλματος του ισοζυγίου των ιόντων. Επισημαίνεται ότι η τιμή του σφάλματος, σε κανένα από τα δείγματα, δεν υπερβαίνει το 5%.

Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών παραμέτρων για τις τέσσερις περιόδους κατά τις οποίες πραγματοποίηθηκαν οι δειγματοληψίες (Ιούνιος και Οκτώβριος 2016 και 2017).

Από τον Πίνακα 2.5 διαπιστώνεται ότι η μέση τιμή του pH ισούται περίπου με 7,5 και και στις τέσσερις περιόδους, υποδεικνύοντας τον ελαφρά αλκαλικό χαρακτήρα του υπόγειου νερού.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) κυμαίνεται από 500 μS/cm έως 4970 μS/cm κατά τις τέσσερις δειγματοληπτικές περιόδους. Τα Ολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS) κυμαίνονται από 240 mg/l και 3190 mg/l.

	Ιούνιος 2016		Οκτώβριος 2016			Ιούνιος 2017			Οκτώβριος 2017			
	pН	EC	TDS	pН	EC	TDS	pН	EC	TDS	pН	EC	TDS
Μέγιστη Τιμή	8,83	3800	1900	7,83	7260	4650	8,1	4620	2960	7,00	4970	3190
Ελάχιστη Τιμή	7,03	500	240	6,74	534	342	7,1	553	354	7,62	554	355
Μέση Τιμή	7,56	1310	650	7,44	1415	906	7,5	1760	1128	7,37	1349	864
Τυπική	0.44	005	457	0.3	1719	1100	0.28	1466	040	0.18	1001	700
Απόκλιση	0,44	903	437	0,5	1/10	1100	0,20	1400	940	0,18	1091	700

**Πίνακας 2.6**: Αποτελέσματα φυσικοχημικών παραμέτρων, όπου ΕC: η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε μS/cm και TDS: τα Ολικά Διαλυμένα Στερεά σε mg/l

Στον Πίνακα 2.6, παρουσιάζεται η μέση, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της περιεκτικότητας των κύριων ιόντων, όπως προσδιορίστηκε από τις χημικές αναλύσεις των δειγμάτων του υπόγειου νερού στις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας. Το επικρατέστερο κατιόν και ανιόν είναι το ασβέστιο και τα όξινα ανθρακικά, αντίστοιχα. Στο Παράρτημα 2 παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η χημική σύσταση του υπόγειου νερού, όσον αφορά τα κατιόντα ακολουθεί την εξής σειρά και στις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας:

 $Ca^{2+}>Mg^{2+}>Na^+>K^+$ 

Η σειρά των ανιόντων για τις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 2.7: Η περιεκτικότητα των κύριων ιόντων στις τέσσερις περιόδους δειγματοληψίας.

Περιεκτικότητα Ιόντων (mg/l)	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέση Τιμή
Ασβέστιο	23	479	111
Μαγνήσιο	6	230	44
Νάτριο	20	675	105
Κάλιο	1,1	12,2	3,3
Όξινα ανθρακικά	750	160	314
Χλώριο	1553	13	167
Θειικά	640	18	121
Νιτρικά	2,3	65	30,3

Στα Σχήματα 2.13 έως 2.16 απεικονίζονται, ενδεικτικά, η χωρική κατανομή των ιόντων του χλωρίου και των νιτρικών κατά τις τεσσέρις περιόδους δειγματοληψίας. Υψηλή συγκέντρωση νιτρικών ιόντων, που υπερβαίνει το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο των 50 mg/l (Ευρωπαϊκή Κοινοτική οδηγία, 2000/60) παρατηρείται κατά θέσεις. Η αυξημένη περιεκτικότητα των νιτρικών ιόντων αποδίδεται στα αζωτούχα λιπασμάτα, τα οποία χρησιμοποιούνται στις αγροτικές δραστηριότητες, που λαμβάνουν χώρα εντός του αλλουβιακού υδροφορέα. Στη χρησιμοποίηση θειικών λιπασμάτων κατά την καλλιέργεια της ελιάς, οφείλεται και η κατά τόπους αυξημένη περιεκτικότητα των θειικών οξέων.

Υψηλές συγκεντρώσεις των ιόντων του χλωρίου εντοπίζονται, κυρίως, στο παράκτιο τμήμα του υδροφορέα. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου σε συνδυασμό με τις παρατηρούμενες αρνητικές τιμές πιεζομετρίας στο νότιο τμήμα

του υδροφορέα, κυρίως κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, υποδηλώνουν την πιθανότητα της διείσδυσης της θάλασσας.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Πολύ υψηλές τιμές της περιεκτικότητας όλων των κύριων ιόντων σε δείγματα του υπόγειου νερού εντοπίστηκαν στο δυτικό και νότιο τμήμα του υδροφορέα. Τα συγκεκριμένα δείγματα παρουσιάζουν πολύ υψηλή τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) (7000 μS/cm) και TDS (>4000 mg/l), ενώ η τιμή του pH είναι ίση με 6,8 υποδηλώνοντας έναν πιο όξινο χαρακτήρα συγκριτικά με τα υπόλοιπα δείγματα. Ιδιαίτερα αυξημένες τιμές παρατηρούνται στη συγκέντρωση των ιόντων του νατρίου (>600 mg/l), του καλίου (>12 mg/l) και του χλωρίου (>1500 mg/l).

Τα εν λόγω σημεία υδροληψίας βρίσκονται πλησίον των εργοστασίων επεξεργασίας βρώσιμης ελιάς, τα οποία λειτουργούν στην περιοχή και στα οποία χρησιμοποιείται καυστικό νάτριο. Από την υπαίθρια παρατήρηση διαπιστώθηκε ότι τα λύματα των συγκεκριμένων εργοστασίων διατίθενται επιφανειακά σε τάφρους των όμβριων υδάτων. Για τον ακριβή προσδιορισμό της χημικής σύστασης του νερού των τάφρων, συλλέχθηκαν επιφανειακά δείγματα κατά τις δύο περιόδους δειγματοληψίας του 2017.

Αντιπαραβάλλοντας τα αποτέλεσματα των χημικών αναλύσεων των 2 επιφανειακών νερών και των δειγμάτων από τις γεωτρήσεις πλησίον της τάφρου διαπιστώνεται η κοινή χημική τους σύσταση. Συνεπώς, η αυξημένη περιεκτικότητα των κύριων ιόντων, που εντοπίστηκε στο υπόγειο νερό των συγκεκριμένων γεωτρήσεων, αποδίδεται στην ανεξέλεγκτη διάθεση των λυμάτων των εργοστασίων επεξεργασίας βρώσιμης ελιάς.





Σχήμα 2.13: Η χωρική κατανομή των νιτρικών ιόντων κατά τις δύο περιόδους δειγματοληψίας του 2016.





Σχήμα 2.14: Η χωρική κατανομή των νιτρικών ιόντων κατά τις δύο περιόδους δειγματοληψίας του 2017.



Σχήμα 2.15: Η χωρική κατανομή των ιόντων του χλωρίου κατά τις δύο περιόδους δειγματοληψίας του 2016.



Σχήμα 2.16: Η χωρική κατανομή των ιόντων του χλωρίου κατά τις δύο περιόδους δειγματοληψίας του 2017.

Ψηφιακή συλλογή

Για την παρουσιάση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων χρησιμοποιήθηκαν τα υδροχημικά διαγράμματα DUROV (Σχήμα 2.17 και Σχήμα 2.18)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Οι υδροχημικοί τύποι, όπως προκύπτουν από τα διαγράμματα των τεσσάρων περιόδων δειγματοληψίας, κατηγοριοποιούνται σε τρεις κύριες ομάδες. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τους τύπους στους οποίους κυρίαρχον κατιόν είναι το ασβέστιο (Ca-HCO<sub>3</sub>, Ca-Na-HCO<sub>3</sub>, Ca-Na-Mg-HCO<sub>3</sub>-Cl, Ca-Na-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>, Ca-Na-SO<sub>4</sub>). Στη δεύτερη ομάδα εντάσσονται οι τύποι με κυρίαρχον κατιόν το μαγνήσιο (Mg-Ca-HCO<sub>3</sub>-Cl, Mg-Ca-Na-HCO<sub>3</sub>-Cl) και οι οποίοι υποδηλώνουν νερά αποστράγγισης αγροτικών περιοχών (Bουδούρης, 2013). Τέλος, εμφανίζονται υδροχημικοί τύποι με κυρίαρχον κατιόν το νάτριο (Na-Mg-Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>, Na-HCO<sub>3</sub>-Cl), υποδεικνύοντας την πιθανότητα ανάμειξης του γλυκού με το θαλασσινό νερό.

Συνοψίζοντας, οι γεωργικές δραστηριότητες, οι οποίες λαμβάνουν χώρα εντός του αλλουβιακού υδροφορέα, καθώς και η λειτουργία των εργοστασίων επεξεργασίας βρώσιμης ελιάς, διαμορφώνουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του. Οι υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών είναι αποτέλεσμα της αλόγιστης χρήσης των λιπασμάτων. Οι υψηλές συγκεντρώσεις των ιόντων του νατρίου, καλίου και χλωρίου οφείλονται στα λύματα των εργοστασίων επεξεργασίας βρώσιμης ελιάς.

Επιπρόσθετα, οι αυξημένες συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου σε συνδυασμό με τις παρατηρούμενες αρνητικές τιμές πιεζομετρίας στο νότιο τμήμα του υδροφορέα, κυρίως κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, μπορούν να αποδοθούν στην πιθανότητα υφαλμύρισης του υδροφορέα, λόγω της υπεράντλησής του. Το πιθανό φαινόμενο της υφαλμύρισης του υδροφορέα χρήζει περαιτέρω διερεύνησης και συστηματικής παρακολούθησης, το οποίο, όμως, δεν αποτελεί αντικείμενο της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής.

Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψη τις γεωλογικές, υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες, ο αλλουβιακός υδροφορέας που αναπτύσσεται στο παράκτιο τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία (στην περιοχή της Ορμύλιας) είναι ελεύθερος και μόνο κατά θέσεις μεταβαίνει σε μερικώς υπό πίεση.

62



Σχήμα 2.17: Το υδροχημικό διάγραμμα Durov για τις δύο δειγματοληπτικές περιόδους του 2016 (Ιούνιος, αριστερά και Οκτώβριος, δεξιά).



Σχήμα 2.18: Το υδροχημικό διάγραμμα Durov για τις δύο δειγματοληπτικές περιόδους του 2017 (Ιούνιος, αριστερά και Οκτώβριος, δεξιά).
## 2.6 Εκτίμηση Υδατικών Αναγκών

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ο παράκτιος αλλουβιακός υδροφορέας της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία χρησιμοποιείται για την κάλυψη των υδατικών αναγκών του Δήμου της Ορμύλιας και συγκεκριμένα των χωριών Ορμύλιας, Ψακουδιών, Νησιού και Βατοπεδίου.

Βάσει της τελευταίας απογραφής του 2011, ο πληθυσμός, ο οποίος κατοικεί εντός του υδροφορέα ισούται σε 3682 κατοίκους (ΕΛΣΤΑΤ, 2011). Η μέση ημερήσια κατανάλωση σε νερό για οικιακή χρήση ισούται με 200 λίτρα ανά κάτοικο (Βουδούρης, 2015). Κατά τη θερινή περίοδο, βάσει των στοιχείων του Δήμου, ο πληθυσμός υπερβαίνει τους 10.000 κατοίκους. Οι εκτιμώμενες υδρευτικές ανάγκες ισούνται με 0,48 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, στις οποίες προστίθεται το 5% των απωλειών του δικτύου.

Οι αρδευόμενες εκτάσεις εντός του υδροφορέα είναι ίσες με 15.500 στρέμματα (διαθέσιμα στοιχεία από τον ΕΛ.ΓΑ) και πρόκειται για ελαιώνες, οπωροφόρα δένδρα, και κηπευτικά φυτά. Οι αρδευτικές ανάγκες εκτιμήθηκαν, με βάση την χωρική κατανομή των καλλιεργειών και των ποσοτήτων νερού, που απαιτούνται ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας (τυπικές τιμές προτείνονται από τον Παπαζαφειρίου, 1999), μέσω της μεθόδου Penman-Monteith (FAO-56) και ανέρχονται σε 5,5 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/χρόνο. Οι εκτιμώμενες κτηνοτροφικές ανάγκες ισούνται με 0,1 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/χρόνο.

Οι συνολικές ετήσιες εκτιμώμενες υδατικές ανάγκες ανέρχονται σε 6 x $10^6$  m<sup>3</sup>.



Το παρόν κεφαλαίο πραγματεύεται τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων με κλιματικές παραμέτρους υψηλής χωροχρονικής κλίμακας για την αναπαράσταση του παροντικού και μελλοντικού κλίματος της περιοχής έρευνας. Η υλοποίηση του στόχου επιτεύχθηκε μέσω της εφαρμογής της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging) στις κλιματικές παραμέτρους των δεδομένων εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, δηλαδή, στα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCMs) MPI (RegCM4\_M) και HadGEM2 (RegCM4\_H).

Απώτερος σκοπός είναι η βέλτιστη προσαρμογή μεταξύ των παραμέτρων των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H και των ERA-Interim δεδομένων της περιόδου αναφοράς 1981-2000, καθώς και η ρεαλιστική προβολή του κλίματος της περιοχής έρευνας έως το το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων θα χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο εισόδου στο υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT, συμβάλλοντας στην αξιόπιστη προσομοίωση των μελλοντικών υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία (Κεφάλαιο 4).

## 3.2 Αξιολόγηση των κλιματικών δεδομένων

Πρωταρχικό στάδιο των ερευνητικών εργασιών, που ασχολούνται με την κλιματική αλλαγή είναι ο έλεγχος της αξιοπιστίας των δεδομένων, που χρησιμοποιούνται για τη διερεύνησή της, δηλαδή των κλιματικών μοντέλων.

Στην παρούσα εργασία, ο έλεγχος της αξιοπιστίας των παραμέτρων των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_Η και RegCM4\_Μ επιτεύχθηκε μέσω της αξιολόγησης με τα αντίστοιχα ERA-Interim δεδομένα.

Για την άμεση και την πιο λεπτομερή σύγκριση μεταξύ των παραμέτρων των κλιματικών μοντέλων και των δεδομένων ERA-Interim δημιουργήθηκαν θηκογράμματα (boxplots). Τα θηκογράμματα είναι γραφήματα τα οποία απεικονίζουν, συγκεντρωτικά, τη διάμεσο, τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή, το πρώτο και το τρίτο ενδοτεταρτημόριο (quartile), καθώς και τις παράτυπες τιμές (outliers). Επομένως, μέσω της διαμέσου, προσδιορίζεται, άμεσα, η θέση των

δεδομένων, ενώ η διασπορά τους δίνεται μέσω του μήκους του κουτιού. Τέλος, η ύπαρξη των ακραίων τιμών προσδιορίζεται μέσω των μυστάκων, δηλαδή συγκεκριμένων αποστάσεων (Σχήμα 3.1).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα θηκογράμματος.

Στα θηκογράμματα (Σχήμα 3.2 και Σχήμα 3.3) απεικονίζονται η μέση τιμή του ύψους της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας, ανά εποχή, των σημείων πλέγματος των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_H και RegCM4\_M, καθώς και των ERA-Interim, τα οποία καλύπτουν την περιοχή έρευνας και αφορούν την περίοδο αναφοράς 1981-2000.

Από την ανάλυση και την αξιολόγηση των θηκογραμμάτων της μηνιαίας διακύμανσης της βροχόπτωσης (Σχήμα 3.2) διαπιστώνονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_H και RegCM4\_M και των ERA-Interim. Οι διαφοροποιήσεις αφορούν στο ύψος της βροχόπτωσης, ενώ η ενδοετήσια μεταβλητότητα της βροχόπτωσης των μοντέλων RegCM4\_H και RegCM4\_M παρουσιάζει ευκρινείς ομοιότητες με των ERA-Interim.

Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εντοπίζονται μεταξύ των δεδομένων βροχόπτωσης του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_Η και των ERA-Interim. Τα θηκογράμματα των συγκεκριμένων δεδομένων διαφοροποιούνται ως προς όλες τις παραμέτρους τους, δηλαδή ως προς τη διάμεσο, τις ακραίες τιμές και τις τιμές του 1<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> τεταρτημόριου. Αναλυτικότερα, η χειμερινή, εαρινή και φθινοπωρινή βροχόπτωση του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_Η παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές διαμέσου, μέσης τιμής και ακραίων τιμών εν συγκρίσει των αντίστοιχων ERA-Interim δεδομένων. Εν αντιθέσει των άλλων εποχών, η καλοκαιρινή βροχόπτωση του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_Η είναι υποεκτιμημένη σε σχέση με των ERA-Interim.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Από την άλλη πλευρά, οι διαφορές μεταξύ της βροχόπτωσης των ERA-Interim και του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M δεν είναι τόσο διευρυμένες. Ειδικότερα, μεγαλύτερα ύψη βροχόπτωσης καταγράφονται από το κλιματικό μοντέλο RegCM4\_M κατά τη χειμερινή, εαρινή και φθινοπωρινή περίοδο εν συγκρίσει των ERA-Interim. Ωστόσο, οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ της βροχόπτωσης του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M και των ERA-Interim διαπιστώνονται στην εαρινή και φθινοπωρινή περίοδο. Υποεκτίμηση της θερινής βροχόπτωσης παρατηρείται και στην περίπτωση του μοντέλου RegCM4\_M (Σχήμα 3.2).

Εν αντιθέσει της βροχόπτωσης, μη σημαντικές διαφοροποιήσεις διαπιστώνονται μεταξύ των θερμοκρασιακών δεδομένων των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_Η και RegCM4\_M και των ERA-Interim (Σχήμα 3.3). Πιο συγκεκριμένα, αντιπαραβάλλοντας τα θηκογράμματα της θερμοκρασίας του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M και των ERA-Interim, οι μεταξύ τους ομοιότητες είναι ευκρινείς. Η διαφορά μεταξύ της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M και των ERA-Interim ανέρχεται, μόλις, στους 0,3 °C κατά την περίοδο αναφοράς 1981-2000. Αποκλίσεις, ωστόσο, παρατηρούνται στη χειμερινή θερμοκρασία.

Στην περίπτωση των θερμοκρασιακών δεδομένων του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_H, διαφοροποιήσεις από τα αντίστοιχα ERA-Interim δεδομένα, παρατηρούνται, κυρίως, το χειμώνα και το καλοκαίρι. Η διαφορά της μέσης καλοκαιρινής θερμοκρασίας μεταξύ του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_H ανέρχεται σε 1,8 °C και της μέσης χειμερινής εκτιμάται σε 3,6 °C





**Σχήμα 3.2:** Τα θηκογράμματα απεικονίζουν την εποχική σύγκριση μεταξύ της βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_H (HadGEM2) και RegCM4\_M (MPI) και των δεδομένων ERA-Interim για την περίοδο 1981-2000.

Τέλος, στον Πίνακα 3.1 αντιπαραβάλλονται οι τιμές της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας των ERA-Interim και των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H για την περίοδο αναφοράς 1981-2000.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Πίνακας 3.1: Η μέση ετήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία των ERA-Interim και των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_Η για την περίοδο αναφοράς 1981-2000.

	ERA-Interim	RegCM4_M	RegCM4_H
Βροχόπτωση (mm)	520	839	1270
Θερμοκρασία (°C)	15,6	15,9	17

Από την προαναφερθείσα ανάλυση υποδεικνύεται ότι η προσομοιωμένη βροχόπτωση από τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας HadGEM2 και MPI, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου (drivers) στο περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4, διαφοροποιείται σημαντικά από τη βροχόπτωση των ERA-Interim, στην περιοχή έρευνας, κατά την περίοδο αναφοράς 1981-2000. Τα κλιματικά μοντέλα RegCM4\_H και RegCM4\_M υπερεκτιμούν τη χειμερινή, εαρινή και φθινοπωρινή βροχόπτωση, αναπαριστώντας έτσι, ένα πιο υγρό κλίμα σε σχέση με το παροντικό κλίμα της περιοχής έρευνας, ενώ υποεκτιμούν τη θερινή βροχόπτωση. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η βροχόπτωση της περιοχής έρευνας δεν αναπαράγεται σε ικανοποιητικό βαθμό από το περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4. Ωστόσο, η ενδοετήσια κατανομή της βροχόπτωσης προσομοιώνεται αποτελεσματικά.

Ικανοποιητική, όμως, είναι η προσαρμογή των θερμοκρασιακών δεδομένων των κλιματικών μοντέλων και ιδιαίτερα του RegCM4\_M, στα αντίστοιχα ERA-Interim δεδομένα. Ωστόσο, υπερεκτίμηση της χειμερινής και θερινής θερμοκρασίας διαπιστώνεται στο κλιματικό μοντέλο RegCM4\_H.

Διαφοροποιήσεις των παραμέτρων των κλιματικών μοντέλων MPI και HadGEM2 από τα πραγματικά δεδομένα έχουν διαπιστωθεί και από άλλους ερευνητές. Οι Demicran et al. (2017) έλεγξαν την αξιοπιστία των κλιματικών μοντέλων HadGEM2 και MPI στην Τουρκία, για την περίοδο 1971-2000. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, η θερμοκρασία υποεκτιμάται και από τα δύο κλιματικά μοντέλα. Από την άλλη πλευρά, το κλιματικό μοντέλο MPI υπερεκτιμά τη χειμερινή βροχόπτωση, ενώ το μοντέλο HadGEM2 υπερεκτιμά την εαρινή και φθινοπωρινή βροχόπτωση.





Σχήμα 3.3:Τα θηκογράμματα απεικονίζουν την εποχική σύγκριση μεταξύ της θερμοκρασίας των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_H (HadGEM2) και RegCM4\_M (MPI) και των δεδομένων ERA-Interim για την περίοδο 1981-2000.

ΤμημΤο περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4, με δεδομένα εισόδου τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας HadGEM2 και MPI, χρησιμοποιήθηκε και από τους Ozturk et al. (2018), με σκοπό τη διερεύνηση της ικανότητας προσομοίωσης του παροντικού κλίματος διάφορων περιοχών της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής. Τα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας των δεδομένα κλιματικών μοντέλων αξιολογήθηκαν βάσει των ERA-Interim δεδομένων για την περίοδο 1980-2000. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Ozturk et al. (2018), η θερμοκρασία των κλιματικών μοντέλων HadGEM2 και MPI διαφοροποιείται κατά 3°C από την αντίστοιχη των ERA-Interim. Η βροχόπτωση των κλιματικών μοντέλων υπερεκτιμάται. Οι αποκλίσεις μεταξύ των προσομοιωμένων κλιματικών παραμέτρων και των επανάλυσης δεδομένων ποικίλουν με την εποχή και την περιοχή εφαρμογής. Ωστόσο, και από την εν λόγω εργασία διαπιστώνεται η πιο ικανοποιητική προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου γενικής κυκλοφορίας MPI στα ERA-Interim δεδομένα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η πολυπλοκότητα της προσομοίωσης της βροχόπτωσης από τα κλιματικά μοντέλα και ιδιαίτερα του Ελληνικού χώρου, επισημαίνεται από πολλές ερευνητικές εργασίες. Οι Tolika et al. (2006) και οι Nikitopoulou et al. (2006) τονίζουν τις δυσκολίες, που ενέχει η προσομοίωση της βροχόπτωσης στην περιοχή της Ελλάδας, εξαιτίας των ιδιαίτερων γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της.

Αναφορικά με την περιοχή έρευνας, η μη ικανοποιητική αναπαραγωγή της βροχόπτωσης αποδίδεται στη σύνθετη ορεογραφία της. Όπως προαναφέρθηκε, η περιοχή έρευνας εντοπίζεται μεταξύ του ορεινού όγκου του Χολομώντα και του κόλπου της Κασσάνδρας. Η εναλλαγή μεταξύ ξηράς και θάλασσας επιδρά καθοριστικά στο σήμα των κλιματικών μοντέλων και έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένησή/μείωσή του.

Η αδυναμία του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4 να προσομοιώσει αποτελεσματικά τη βροχόπτωση της περιοχής έρευνας, καθιστά αναπόφευκτη την εφαρμογή μεθόδων με σκοπό την προσομοίωση των τοπικών κλιματικών συνθηκών της περιοχής έρευνας με όσο το δυνατόν μικρότερες αβεβαιότητες.

Η ανάγκη για πιο ρεαλιστική αναπαράσταση τόσο του παροντικού όσο και του μελλοντικού τοπικού κλίματος της περιοχής έρευνας με υψηλή χωρική και χρονική

ανάλυση οδήγησε στην εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging).

#### 3.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Θεμελιώδης αρχή των μεθόδων χωρικής παρεμβολής αποτελεί η παραδοχή ότι οι τιμές μιας μεταβλητής παρουσιάζουν ομοιότητες, όταν αυτές δεν απέχουν σημαντικά (Diggle and Ribeiro, 2007). Ο προσδιορισμός της μεταβολής της ομοιότητας των τιμών μιας μεταβλητής σε συνάρτηση της απόστασης επιτυγχάνεται μέσω της μεθόδου της ημιδιασποράς (semivariance). Η μέθοδος ημιδιασποράς εκφράζει το βαθμό της χωρικής συσχέτισης των σημειακών μετρήσεων και δίνεται από τη σχέση (Isaaks and Srivastana, 1989):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{m} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$
(3.1)

Όπου:

m ο αριθμός των ζευγών με απόσταση h  $z(x_i)$ : η τιμή της μεταβλητής στη θέση i  $z(x_i + h)$ : η τιμή της μεταβλητής σε απόσταση h από τη θέση i

Η τιμή της συνάρτησης z(x) στη θέση στην οποία εκλείπει η μέτρηση  $x_0$ , βάσει των παρατηρήσεων  $z(x_1)$ ,  $z(x_2)$ , ...,  $z(x_n)$ , εκτιμάται μέσω της σχέσης:

$$z(x_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \, z(x_i) \tag{3.2}$$

Όπου

λι: τα βάρη

Ο προσδιορισμός των βαρών επιτυγχάνεται μέσω των γεωστατιστικών μεθόδων και στηρίζεται στη χωρική διακύμανση της μεταβλητής. Η εκτίμηση και η μοντελοποίηση της δομής της χωρικής διακύμανσης μιας μεταβλητής πραγματοποιείται βάσει του ημιμεταβλητογράμματος ή βαριογράμματος (variogram).

Ημι-μεταβλητόγραμμα ή βαριόγραμμα (variogram) ονομάζεται το διάγραμμα της ημιδιασποράς (semivariance) συναρτήσει της απόστασης και αποτελεί το σημαντικότερο εργαλείο των μεθόδων παρεμβολής. Το θεωρητικό ή πειραματικό βαριόγραμμα (theoretical/sample/emperical variogram) περιγράφεται από τις ακόλουθες παραμέτρους, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 3.:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Κατώφλι (sill) και ζώνη επιρροής (range): Το κατώφλι (sill) είναι η μέγιστη τιμή (ανώτατο όριο) στην οποία ανέρχεται το βαριόγραμμα σε απόσταση, που ονομάζεται ζώνη επιρροής (range). Το κατώφλι συνδέεται με τη διασπορά του δείγματος, ενώ με τη ζώνη επιρροής αναφέρεται ο χώρος εντός του οποίου οι τιμές παρουσιάζουν συσχέτιση.
- Nugget effect: Η παρουσία θορύβου ή λαθών στις μετρήσεις, καθώς και η μη πραγματοποίηση ταυτόχρονων μετρήσεων έχει ως αποτέλεσμα, η ημιδιασπορά να είναι διάφορη του μηδενός στη μηδενική απόσταση.
- Επίδραση της διεύθυνσης (anisotropy): Η ύπαρξη ανισοτροπίας στα δεδομένα μπορεί να διερευνηθεί με τη δημιουργία ημι-μεταβλητογραμμάτων σε συγκεκριμένες διευθύνσεις, όπου τα διαστήματα σχεδιάζονται σε διάγραμμα ρόδου.





Τα κύρια χαρακτηριστικά του βαριογράμματος συνοψίζονται ως εξής:

- Το γ(h) αποτελεί θετική συνάρτηση, ισχύει δηλαδή,  $\gamma(h) \ge 0$
- Η ημιδιασπορά ισούται με μηδέν στη μηδενική απόσταση (h=0)
- Η συνάρτηση γ(h) αυξάνεται μέχρι μια ορισμένη τιμή του h και στη συνέχεια σταθεροποιείται

Η μορφή (μοντέλο) του βαριογράμματος συμβάλλει σημαντικά στη διαδικασία της χωρικής παρεμβολής, καθώς παρέχει πληροφορίες για το χωρικό χαρακτηρισμό των δεδομένων. Η ορθή επιλογή του μοντέλου του βαριογράμματος οδηγεί στη βέλτιστη προσαρμογή (fitting) του θεωρητικού βαριογράμματος (sample variogram).

Εν συνεχεία, αναφέρονται τα κυριότερα μοντέλα (μορφές) του βαριογράμματος με τις αντίστοιχες συναρτήσεις τους (Lichtenstern, 2013; Webster and Oliver, 2007):

## Σφαιρικό μοντέλο (Spherical Model):

$$\gamma(h) = \begin{cases} b & \left(\frac{3}{2}\frac{|h|}{a} - \frac{1}{2}\left(\frac{|h|}{a}\right)^3\right), \ 0 \le |h| \le a \\ b & (3.3) \end{cases}$$

## > Γραμμικό Μοντέλο (Linear Model):

$$\gamma(h) = \begin{cases} b & \left(\frac{|h|}{a}\right), \ 0 \le |h| \le a \\ b & (3.4) \end{cases}$$

> Εκθετικό Μοντέλο (Exponential Model):

$$\gamma(h) = b\left(1 - \exp\left(-\frac{|h|^2}{a^2}\right)\right) |h| \ge 0$$
 (3.5)

Γκαουσιανό Μοντέλο (Gaussian Model):

$$\gamma(h) = b\left(1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right)\right) |h| \ge 0 \tag{3.6}$$

Movτέλο Matèrn (Matèrn, 1960; Guttorp and Gneiting, 2006):

$$\gamma(h) = b\left[1 - \frac{1}{2^{\nu - 1}\Gamma(\nu)} \left(\frac{|h|}{\alpha}\right)^{\nu} K_{\nu}\left(\frac{|h|}{\alpha}\right)\right] \ |h| \ge 0$$
(3.7)

Όπου:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

a: παράμετρος η οποία αναφέρεται στη ζώνη επιρροής (range)

b: παράμετρος η οποία αντιπροσωπεύει την τιμή του κατωφλίου (sill)

ν: παράμετρος ομαλότητας που κυμαίνεται από 0 έως <br/>  $\infty$ 

 $\Gamma(\mathbf{v})$ : η συνάρτηση της κατανομής Γάμμα

K(ν): η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δεύτερου είδους

Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζονται τα γραφήματα των προαναφερθέντων μοντέλων βαριογράμματος. Να σημειωθεί ότι, βιβλιογραφικά, παρατίθενται διάφορα μοντέλα (μορφές) βαριογράμματος (Journel and Huijbregts, 1978; Webster and Oliver, 2007).



β) Γραμμικό Μοντέλο



γ) Εκθετικό Μοντέλο







ε) Μοντέλο Matèrn



Σχήμα 3.5: Τα μοντέλα (μορφές) του βαριογράμματος.

## 3.3 Μέθοδος Βέλτιστης Παρεμβολής Kriging

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging, η οποία αναπτύχθηκε το 1962 από τον Matheron, αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο χωρικής παρεμβολής. Η μέθοδος Kriging είναι το εξελικτικό στάδιο μιας πρώιμης εμπειρικής τεχνικής, την οποία, αρχικά, ανέπτυξε ο Krige, για την εκτίμηση τιμών σε σημεία, στα οποία δεν έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις. Απώτερος σκοπός του Krige, ήταν η πρόβλεψη των αποθεμάτων χρυσού στα ορυχεία της Νότιας Αφρικής, χρησιμοποιώντας δεδομένα γεωτρήσεων.

Η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging είναι στατιστική μέθοδος, η οποία στηρίζεται στη θεωρία των πιθανοτήτων και εντάσσεται στις μεθόδους BLUE (Best Linear Unbiased Estimation). Πιο συγκεκριμένα, βασίζεται στην ιδέα των χωρομεταβλητών, θεωρώντας, τυχαία, τη μεταβολή της μεταβλητής. Η άγνωστη τιμή σε ένα τυχαίο σημείο υπολογίζεται μέσω της γραμμικής σχέσης των παρατηρούμενων τιμών (Matheron, 1962).

Η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging αποτελεί έναν από τους τρόπους προσδιορισμού των βαρών λ<sub>i</sub> με απώτερο σκοπό την εκτίμηση της χωρικής μεταβλητότητας. Τα βάρη λ<sub>i</sub> αποδίδονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι μαθηματικά βέλτιστος. Τέλος, μέσω της μεθόδου Kriging, δίνεται πλην της εκτίμησης των τιμών της μεταβλητής και η δυνατότητα υπολογισμού του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (mean square error, MSE), σε σημεία στα οποία απουσιάζουν οι μετρήσεις (Λουκάς 2015, Καπαγερίδης, 2006).

Η συμπλήρωση των χωρικών κενών μιας μεταβλητής, που εντοπίζονται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα επιτυγχάνεται μέσω της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging). Οι Lasinio et al. (2007) περιέγραψαν τη χωροχρονική ανάλυση ως την πρόβλεψη μιας μεταβλητής, που αναπτύσσεται κατά ένα χρονικό διάστημα σε έναν δοσμένο χώρο. Ειδοποιός διαφορά μεταξύ της μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging και της χωροχρονικής παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging) αποτελεί η προσθήκη της χρονικής διάστασης των δεδομένων (Cressie and Wikle, 2011).

Επομένως, το χωροχρονικό βαριόγραμμα (spatio-temporal variogram) αποτελεί μια επιφάνεια και όχι μια απλή γραμμή, συνιστάμενη από ένα ζεύγος αποστάσεων, που αναφέρεται τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Το χωροχρονικό

βαριόγραμμα (spatio-temporal variogram) διαμορφώνεται ως εξής (Gräler et al., 2016; Pebesma and Gräler, 2017):

$$\gamma(h,u) = \frac{1}{2|N_{h,u}|} \sum_{(i,j) \in N_{h,u}} ((Z(s_i, t_i) - Z(s_j, t_j))^2$$
(3.8)

Όπου:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

 $\gamma(h,u)$ : συνδιασπορά σε απόσταση h και χρόνο u στην εκάστοτε θέση (s, t)

Z=η τυχαία συνάρτηση Z=Z(s,t)

Στη διεθνή βιβλιογραφία, αναφέρονται πέντε χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance models), όπως παρατίθενται στη συνέχεια, με τις αντίστοιχες χωροχρονικές συναρτήσεις και τα χωροχρονικά βαριογράμματα (spatio-temporal variograms) και τα οποία χρησιμοποιούνται στην επίλυση της χωροχρονικής μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging) (Gräler et al., 2016; Pebesma and Gräler, 2017):

Σύμφωνα με το μοντέλο συμμεταβλητότητας separable (separable covariance model), σε κάθε θέση αντιστοιχεί η τιμή μιας παρατήρησης στην εκάστοτε χρονική στιγμή. Η χωροχρονική συνάρτηση του μοντέλου separable (spatio-temporal covariance function) αναπαρίσταται βάσει της ακόλουθης σχέσης (Gräler et al., 2016; Pebesma and Gräler, 2017):

$$C_{sep}(h, u) = C_s(h) \times C_t(u) \tag{3.9}$$

Το χωροχρονικό βαριόγραμμα για το μοντέλο συμμεταβλητότητας separable δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{sep}(h, u) = sill \times (\gamma_s(h) + \gamma_t(u) - \gamma_s(h) \times \gamma_t(u)$$
(3.10)

Όπου:

sill: το κατώφλι

- γ<sub>s</sub>, γ<sub>t</sub> :το χωρο και χρονικό βαριόγραμμα με χωριστά nugget effects και κατώφλι (sill) ίσον με 1.
- Προέκταση του μοντέλου συμμεταβλητότητας separable αποτελεί το μοντέλο product-sum (product-sum covariance model), το οποίο αρχικά προτάθηκε από τους De Cesare et al. (2001) και De Iaco et al. 2011. Στη συνέχεια,

τροποποιήθηκε από τους Gräler et al. (2016) και Pebesma and Gräler (2017), Α.Π.Θ προτείνοντας την ακόλουθη συνάρτηση:

$$C_{ps}(h,u) = C_s(h) + C_t(u) + k \times C_s(h) \times C_t(u)$$
(3.11)

 $\mu\epsilon k > 0.$ 

Ψηφιακή συλλογί

Το αντίστοιχο χωροχρονικό βαριόγραμμα εκφράζεται από τη σχέση:

 $\gamma_{ps}(h, u) = (k \times sill_t + 1) \times \gamma_s(h) + (k \times sill_s + 1) \times \gamma_t(u) - k_{\gamma s}(h) \times \gamma_t(u) (3.12)$ 

Όπου:

γs ,γt : το χωρικό και το χρονικό βαριόγραμμα

Το κατώφλι (sill) περιγράφεται από τη σχέση:

$$sill_{st} = k \times sill_s \times sill_t + sill_s + sill_t$$
 (3.13)

Βάσει του μοντέλου συμμεταβλητότητας metric (metric covariance model), ο χρόνος αναπροσαρμόζεται, ώστε να συνάδει με το χώρο, προκειμένου να επιτευχθεί ισοτροπία των δεδομένων. Η συνάρτηση που περιγράφει το μοντέλο συμμεταβλητότητας metric είναι:

$$C_m = C_j(\sqrt{h^2 + (k \times u)^2})$$
 (3.14)

Το αντίστοιχο χωροχρονικό βαριόγραμμα δίνεται από:

$$\gamma_m(h, u) = \gamma_j(\sqrt{h^2 + (k \times u)^2})$$
 (3.15)

Όπου τα γ<sub>s</sub>, γ<sub>t</sub> αντιπροσωπεύουν το χωρικό και χρονικό βαριόγραμμα και το γ<sub>j</sub> οποιοδήποτε γνωστό βαριόγραμμα περιλαμβάνει nugget-effect.

Η σύζευξη ενός χωροχρονικού μοντέλου και του μοντέλου συμμεταβλητότητας metric, με παράμετρο ανισοτροπίας k, οδήγησε στη δημιουργία του μοντέλου συμμεταβλητότητας sum-metric (sum-metric covariance model). Το μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric περιγράφεται, λεπτομερώς, από τους Bilonick (1988) και Snepvangers et al. (2003) και η συνάρτηση δίνεται από τη σχέση:

$$C_{sm}(h,u) = C_s(h) + C_t(u) + C_j(\sqrt{h^2 + (k \times u)^2})$$
(3.16)

Το αντίστοιχο χωροχρονικό βαριόγραμμα εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$\gamma_{sm}(h, u) = \gamma_s(h) + \gamma_t(u) + \gamma_j(\sqrt{h^2 + (k \times u)^2})$$
 (3.17)

Όπου:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

γs, γt και γj: το χωρικό, χρονικό και συζευγμένο (joint) βαριόγραμμα με χωριστά Nugget.

Τέλος, το μοντέλο συμμεταβλητότητας simple sum-metric (simple-summetric covariance model) αποτελεί μια απλοποιημένη εκδοχή του μοντέλου συμμεταβλητότητας.

Το χωροχρονικό βαριόγραμμα δίνεται από τη σχέση:

$$C_{ssm}(h, u) = nug \times 1_{h > 0vu > 0} + \gamma_s(h) + \gamma_t(u) + \gamma_j \times (\sqrt{h^2 + (k * u)^2})$$
(3.18)

#### 3.4 Μεθοδολογία

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η χωροχρονική μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging) εφαρμόστηκε στις ιστορικές, καθώς και στις μελλοντικές παραμέτρους του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4 (climate model outputs), στο οποίο ενσωματώθηκαν (nested) τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας MPI (RegCM4\_M) και HadGEM2 (RegCM4\_H). Οι παράμετροι του μοντέλου αφορούν τις ημερήσιες τιμές της βροχόπτωσης, της μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, καθώς και της ταχύτητας του ανέμου. Η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου δημοσιεύτηκαν από τους Venetsanou et al., 2019 και Venetsanou et al., 2018.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα στάδια της μεθοδολογίας, που αναπτύχθηκε.

3.4.1 Διερεύνηση κατάλληλου χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance model):

- Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη δημιουργία του χωρογρονικού βαριόγραμματος (sample spatio-temporal variogram), καθορίζοντας τις απαιτούμενες χωρικές και χρονικές αποστάσεις μεταξύ των ζευγών (spatial lags και time lags, αντίστοιχα), καθώς και το προβολικό σύστημα των συντεταγμένων των σημείων πλέγματος (grid points). Απαραίτητο και καθοριστικό βήμα στη διαδικασία της χωροχρονικής παρεμβολής, αποτελεί η διερεύνηση της μορφής (μοντέλο) του χωροχρονικού βαριογράμματος (spatio-temporal variogram), η οποία στοχεύει στη βέλτιστη προσαρμογή (best fitting) του θεωρητικού χωροχρονικού βαριογράμματος (sample spatio-temporal variogram). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, για τον προσδιορισμό του χωρικού βαριογράμματος (space), του χρονικού βαριογράμματος (time) και του συζευγμένου βαριογράμματος (joint variogram), εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα μοντέλα βαριογράμματος, με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς αυτών:
  - Σφαιρικό Μοντέλο (Spherical, Sph)
  - Γραμμικό Μοντέλο (Linear, Lin)
  - Εκθετικό Μοντέλο (Exponential, Exp)
  - Μοντέλο Matèrn (Mat)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Την προσαρμογή (best fitting) του θεωρητικού χωροχρονικού βαριογράμματος (sample variogram) διαδέχεται το δεύτερο στάδιο της μεθοδολογίας, που αφορά την επιλογή του κατάλληλου χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance models), το οποίο θα εφαρμοστεί τελικά, με σκοπό την επίλυση της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging). Τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance models), που εξετάστηκαν είναι τα ακόλουθα:
  - Separable
  - Product-sum
  - Metric



Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα μοντέλα (μορφές) του βαριογράμματος (variogram) με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, καθώς και τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance models), τα οποία ελέγχθηκαν.

## 3.4.2 Αξιολόγηση των χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας (spatiotemporal covariance model):

- Ο έλεγχος του κατάλληλου μοντέλου χωροχρονικού βαριογράμματος (spatio-temporal variogram) πραγματοποιήθηκε μέσω των γραφημάτων, που προέκυψαν και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Mean Square Error, MSE).
- Η σύγκριση των 5 χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας (spatiotemporal covariance models), καθώς και η αξιολόγηση του πλέον κατάλληλου μοντέλου συμμεταβλητότητας επιτεύχθηκε μέσω των διαγραμμάτων Taylor.

Τα διαγράμματα Taylor αποτελούν ένα σημαντικό και αξιόπιστο εργαλείο για την αξιολόγηση πολύπλοκων μοντέλων, καθώς αναπαριστούν, συνοπτικά, το βαθμό που ένα σύνολο δεδομένων προσεγγίζει τις παρατηρούμενες τιμές (τιμές αναφοράς). Η αξιολόγηση των δεδομένων επιτυγχάνεται μέσω τριών στατιστικών μεγεθών: της συσχέτισης (correlation), της τυπικής απόκλισης (standard deviation) και της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (root mean square error, RMSE). Οι τιμές της συσχέτισης προκύπτουν από τις ακτίνες, ενώ η τυπική απόκλιση περιγράφεται από τους άξονες του διαγράμματος, όπου η σύνδεσή τους σχηματίζει νοητά ημικύκλια. Τέλος, η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) δίνεται μέσω των ημικυκλίων που εμφανίζονται (Σχήμα 3.6) (Taylor, 2001).



Πίνακας 3.2: Τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance models) και οι δυνατοί συνδυασμοί των μοντέλων (μορφές) του βαριογράμματος (variogram) (+) και οι μη εφικτοί εφαρμόσιμοι συνδυασμοί των μοντέλων του βαριογράμματος (-).

## Μοντέλο

Χωρικό Βαριόγραμμα + Χρονικό Βαριόγραμμα

## Συμμεταβλητότητας

	<b>join</b> t	Exp+Exp	Exp+Sph	Sph+Exp	Sph+Sph	Lin+Lin	Lin+Exp	Lin+Sph	Sph+Lin	Exp+Lin	Mat
Separable	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Product-sum	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Metric	Exp	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-
	Sph	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-
	Lin	-	-	-	-		-	-	+	+	-
	Mat	-	-	-	-	-	-	+	+	+	
Sum-metric	Exp	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
	Sph	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
	Lin	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Simple sum-metric	Exp	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
	Sph	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
	Lin	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-

Επομένως, για την εξεταζόμενη τιμή (f) και την παρατηρούμενη τιμή (τιμή αναφοράς) (r), ο συντελεστής συσχέτισης (R), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (E') και η τυπική απόκλιση αυτών δίνονται από τους ακόλουθους μαθηματικούς τύπους (Taylor 2001):

$$R = \frac{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(f_n - f)(r_n - r)}{\sigma_f \sigma_r}$$
(3.19)

$$E'^{2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} [(f_{n} - f) * (r_{n} - r)]^{2}$$
(3.20)

$$\sigma_{f=1}^{2} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} (f_{n} - f)^{2}$$
(3.21)

$$\sigma_{r=1}^2 \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r_n - r)^2$$
(3.22)

Όπου:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

σf : η τυπική απόκλιση της εξεταζόμενης τιμής

και σr: η τυπική απόκλιση της παρατηρούμενης τιμής

Η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) δίνεται από τον τύπο:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{obs,i} - x_{model,i})^2}{n}}$$
(3.23)

Όπου:

xods οι παρατηρούμενες τιμές

xmodel: οι τιμές των μοντέλων



Σχήμα 3.6: Ενδεικτικό διάγραμμα Taylor (Taylor, 2001).

Αξιόπιστο μοντέλο θεωρήθηκε το χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance model) με τη μικρότερη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), τη μικρότερη τυπική απόκλιση και το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης.

Τέλος, στην επιλογή του κατάλληλου μοντέλου συμμεταβλητότητας συνέβαλλε και η σύγκριση του θεωρητικού βαριογράμματος (sample variogram) σε σχέση με τα 5 προσαρμοσμένα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας (fitted spatio-temporal covariance models).

# 3.4.3 Εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging):

Η χωροχρονική μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging), εφαρμόστηκε, στις παραμέτρους του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, στο οποίο εισήχθησαν, ως δεδομένα εισόδου, τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας MPI (RegCM4\_M) και HadGEM2 (RegCM4\_H) και αφορούν την περίοδο αναφοράς 1981-2000 και τις μελλοντικές περιόδους 2031-2050 και 2080-2099, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance model). Για την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης

παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging) ορίστηκε κάναβος με μέγεθος κελιού 12,5 km × 12,5 km, αντίστοιχος, δηλαδή, με τον κάναβο των δεδομένων ERA-Interim.

- Τονίζεται ότι, έπειτα από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας, τα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, θα αναφέρονται με τις συντομογραφίες I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.
- 3.4.4 Αξιολόγηση της απόκρισης των κλιματικών μοντέλων έπειτα από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging:
  - Τα αποτελέσματα της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging, που αφορούν την περίοδο αναφοράς 1981-2000, συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα ERA-Interim δεδομένα. Σκοπός της αξιολόγησης είναι να διερευνηθεί εάν η εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής συνέβαλλε στην προσαρμογή μεταξύ των παραμέτρων των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H και των ERA-Interim.
  - Η σύγκριση και η αξιολόγηση των κλιματικών παραμέτρων πραγματοποιήθηκε μέσω της χρήσης των θηκογραμμάτων (boxplots).
- 3.4.5 Ποσοτικοποίηση της κλιματικής αλλαγής για το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα: Λαμβάνοντας υπόψη, τις τιμές των παραμέτρων των κλιματικών μοντέλων Ι\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H, όπως δηλαδή προσδιορίστηκαν από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου, με τη χρήση του κατάλληλου χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας, εκτιμήθηκε η τάση μείωσης ή αύξησης τους έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα.

Τα ποσοστά μείωσης ή αύξησης των κλιματικών παραμέτρων υπολογίστηκαν μέσω της σχέσης:

$$p = \left(\frac{x_i - x_o}{x_o}\right) \times 100 \tag{3.24}$$

Όπου:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

p: το ποσοστό μείωσης ή αύξησης των κλιματικών παραμέτρων

x<sub>i</sub>: η τιμή των κλιματικών παραμέτρων των μοντέλων I\_RegCM4\_M και
 I\_RegCM4\_H, όπως προέκυψε από τη χωροχρονική μέθοδο βέλτιστης παρεμβολής Kriging έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα

x<sub>0</sub>: η τιμή των κλιματικών παραμέτρων των μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H, όπως προέκυψε από τη χωρο-χρονική μέθοδο βέλτιστης παρεμβολής Kriging για την περίοδος αναφοράς 1981-2000

Η εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging), καθώς και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (διαγράμματα Taylor και θηκογράμματα) επιτεύχθηκαν μέσω της στατιστικής γλώσσας προγραμματισμού R. Η γλώσσα προγραμματισμού R διατίθεται, δημόσια, στο διαδίκτυο (https://www.r-project.org/), γεγονός που συνέβαλλε καθοριστικά στην ραγδαία ανάπτυξή της (R Development Core Team, 2012). Για την εφαρμογή και την επίλυση των στατιστικών μοντέλων εισάγονται πακέτα (packages), που και αυτά, διατίθενται ελεύθερα στους χρήστες.

Τα πακέτα gstat, sp, spacetime, raster, rgdal, rgeos, και xts, χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή και την εκτέλεση (τρέξιμο) της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (R Development Core Team, 2012; Pebesma, 2004; Gräler et al., 2016; Pebesma and Gräler, 2017). Για τη δημιουργία των διαγραμμάτων Taylor χρησιμοποιήθηκαν τα πακέτα Metrics και plotrix και ο υπολογισμός του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) επιτεύχθηκε μέσω του πακέτου metrics.

Το θεωρητικό βαριόγραμμα (sample variogram) δημιουργήθηκε με χωρική απόσταση μεταξύ των ζευγών (spatial lags) των σημείων πλέγματος (grid points) ανά 0,2 μοίρες (degrees) και χρονικό βήμα ανά ημέρα (time lags). Προβολικό σύστημα συντεταγμένων ορίστηκε το WGS84, με αρχικό εισαγόμενο χωρικό παράθυρο με γεωγραφικό πλάτος από 39,45 έως 40,97 και γεωγραφικό μήκος από 22,94 έως 24,93.

### 3.5 Αποτελέσματα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, κρίθηκε σκόπιμο, να παρουσιαστούν εκτενώς, μόνο τα αποτελέσματα της εφαρμογής της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging) στις σημαντικότερες παραμέτρους των κλιματικών μοντέλων, δηλαδή στη βροχόπτωση και στη μέση θερμοκρασία, που αφορούν την περίοδο αναφοράς 1981-2000 και τις

μελλοντικές περιόδους 2031-2050 και 2080-2099. Αντίστοιχη επεξεργασία έγινε για τις υπόλοιπες κλιματικές παραμέτρους (μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου), που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στα υδρολογικά μοντέλα (Κεφάλαιο 4).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

## 3.5.1 Αξιολόγηση του κατάλληλου χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance model)

Από τη γραφική σύγκριση του θεωρητικού χωροχρονικού βαριογράμματος (sample spatio-temporal variogram) με τα χωροχρονικά βαριογράμματα των πέντε μοντέλων συμμεταβλητότητας των δεδομένων της βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H (Σχήμα 3.7 και Σχήμα 3.8) διαπιστώνεται ότι τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας separable και metric αποκλίνουν σημαντικά από το θεωρητικό χωροχρονικό βαριόγραμμα, ενώ τα μοντέλα συμμεταβλητότητας product-sum και simple sum-metric φαίνεται ότι ανταποκρίνονται πιο ικανοποιητικά. Η πιο αποτελεσματική αναπαραγωγή της βροχόπτωσης φαίνεται ότι επιτυγχάνεται από το μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric.

Όσον αφορά τα χωροχρονικά βαριογράμματα των θερμοκρασιακών δεδομένων των δύο κλιματικών μοντέλων προκύπτει ότι τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας simple sum-metric και metric παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες διαφορές σε σχέση με το θεωρητικό χωροχρονικό βαριόγραμμα (Σχήμα 3.9 και Σχήμα 3.10). Αντίθετα, το χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric φαίνεται ότι αποδίδει πολύ ικανοποιητικά τα δεδομένα θερμοκρασίας.

Ωστόσο, η γραφική σύγκριση των χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας, ενέχει αβεβαιότητες, οι οποίες αποδίδονται στην υποκειμενικότητα, ως προς τον τρόπο ανάλυσης των γραφημάτων (Gräler et al., 2016). Για την πιο αντικειμενική αξιολόγηση των χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE).

Στην παρούσα διατριβή, κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα που αφορούν το υγρότερο, το ξηρότερο, το θερμότερο και το ψυχρότερο έτος της περίοδου αναφοράς 1981-2000.





**Σχήμα 3.7:** Το θεωρητικό βαριόγραμμα σε αντιπαραβολή των προσαρμοσμένων χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας, όπως προκύπτουν για τη βροχόπτωση του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_H, κατά τη διάρκεια του πιο υγρού έτους της περιόδου αναφοράς (1981-2000).





Σχήμα 3.8: Το θεωρητικό βαριόγραμμα σε αντιπαραβολή των προσαρμοσμένων χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας, όπως προκύπτουν για τη βροχόπτωση του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M, κατά τη διάρκεια του πιο υγρού έτους της περιόδου αναφοράς (1981-2000).





**Σχήμα 3.9:** Το θεωρητικό βαριόγραμμα σε αντιπαραβολή των προσαρμοσμένων χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας, όπως προκύπτουν για τη θερμοκρασία του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_H, κατά τη διάρκεια του πιο ψυχρού έτους της περιόδου αναφοράς (1981-2000).





**Σχήμα 3.10:** Το θεωρητικό βαριόγραμμα σε αντιπαραβολή των προσαρμοσμένων χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας, όπως προκύπτουν για τη θερμοκρασία του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M, κατά τη διάρκεια του πιο ψυχρού έτους της περιόδου αναφοράς (1981-2000).

Στους Πίνακες 3.3 έως 3.10 παρουσιάζονται τα ετήσια αποτελέσματα, του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) των μοντέλων (μορφές) του χωροχρονικού βαριογράμματος (variogram) με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, σε κάθε χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance model) για την εκάστοτε παράμετρο των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Από τους Πίνακες 3.3 έως 3.10 διαπιστώνεται ότι το μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric παρουσιάζει, σαφώς, το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) στα δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H. Χαρακτηριστικά, αναφέρεται ότι εφαρμόζοντας τη χωροχρονική μέθοδο βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging), χρησιμοποιώντας το μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric στα θερμοκρασιακά δεδομένα του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M, στο πιο θερμό έτος της περιόδου αναφοράς, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) είναι στατιστικά ασήμαντο (~3). Εν αντιθέσει, το χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας metric, εμφανίζει το μεγαλύτερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (862).

Οι κλιματικές παράμετροι του μοντέλου RegCM4\_M παρουσιάζουν σχεδόν υποτριπλάσιο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) συγκριτικά με το κλιματικό μοντέλο RegCM4\_H. Διπλάσιο μέσο τετραγωνικό σφάλμα παρατηρείται στο υγρότερο και στο ψυχρότερο έτος εν συγκρίσει του ξηρότερου και του θερμότερου έτους της περιόδου αναφοράς 1981-2000, αντίστοιχα, των βροχομετρικών δεδομένων και θερμοκρασιακών δεδομένων των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) συμπεραίνεται ότι η βέλτιστη προσαρμογή στο θεωρητικό βαριόγραμμα (sample variogram) των θερμοκρασιακών δεδομένων της βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων RegCM\_M και RegCM4\_H επιτυγχάνεται στην περίπτωση, που χρησιμοποιείται το σφαιρικό μοντέλο (Sph) στον προσδιορισμό του χωρικού και χρονικού βαριογράμματος και το γραμμικό μοντέλο (Lin) για την εκτίμηση του συζευγμένου (joint) βαριογράμματος.

Στην περίπτωση των θερμοκρασιακών δεδομένων των δυο κλιματικών μοντέλων, η καλύτερη προσαρμογή στο θεωρητικό χωροχρονικό βαριόγραμμα πραγματοποιείται όταν το χρονικό βαριόγραμμα (time) προσδιορίζεται μέσω του

γραμμικού μοντέλου (Lin), το χωρικό βαριόγραμμα μέσω του εκθετικού μοντέλου (Exp), ενώ το συζευγμένο (joint) βαριόγραμμα μέσω του σφαιρικού μοντέλου (Sph).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ωστόσο, παρατηρείται ότι στο μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric, οι τιμές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE), οι οποίες προκύπτουν ανάλογα με το επιλεγόμενο μοντέλο βαριογράμματος, διαφέρουν ελάχιστα έως καθόλου. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα δεν μπορεί να εξαχθεί και για τα υπόλοιπα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας, καθώς οι τιμές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) αποκλίνουν σημαντικά.



**Πίνακας 3.3**: Τα αποτελέσματα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) των δεδομένων βροχόπτωσης του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M, για ένα ξηρό έτος της περιόδου αναφοράς (1981-2000), σχετικά με τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας και τα μοντέλα βαριογράμματος.

Μοντέλο				Vo	οιμό Βαοιόμ		ουντά Βαστά							
Συμμεταβλητότητας		Αθρικό Βάριογραμμα - Αρόνικό Βάριογραμμα												
	joint	Exp+Exp	Exp+Sph	Sph+Exp	Sph+Sph	Lin+Lin	Lin+Exp	Lin+Sph	Sph+Lin	Exp+Lin	Mat			
Separable	-	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58	-			
Product-sum	-	35,63	15,51	40,34	17,1	20,64	36,97	15,61	27,81	20,26	-			
Metric	Exp	199,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	Sph	-	-	-	633,95	-	-	-	-	-	-			
	Lin	-	-	-	-	217,86	-	-	-	-	-			
	Mat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	254,65			
Sum-metric	Exp	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,36	10,37	10,37	-			
	Sph	10,37	10,38	10,37	10,37	10,37	10,37	10,36	10,36	10,36	-			
	Lin	10,36	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,36	10,4	10,37	-			
Simple sum-metric	Exp	30,34	34,26	35,04	37,15	35,18	36,86	31,26	45,09	34,70	-			
	Sph	35,70	31,83	34,87	37,23	40,82	28,06	32,09	40,93	34,71	-			
	Lin	45,70	32,00	32,00	31,35	29,25	40,51	31,36	38,44	43,98	-			



Πίνακας 3.4: Τα αποτελέσματα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) των δεδομένων βροχόπτωσης του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M, για ένα υγρό έτος της περιόδου αναφοράς (1981-2000), σχετικά με τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας και τα μοντέλα βαριογράμματος.

Μοντέλο				Va	οικό Βαοιόν		οιυικό Βασιό							
Συμμεταβλητότητας		Αφρικό Βαριογραμμα + Αρόνικό Βαριογραμμα												
	joint	Exp+Exp	Exp+Sph	Sph+Exp	Sph+Sph	Lin+Lin	Lin+Exp	Lin+Sph	Sph+Lin	Exp+Lin	Mat			
Separable	-	58,57	58,57	58,57	58,57	58,57	58,57	58,57	58,57	58,57	-			
Product-sum	-	188,51	59,99	81,07	42,03	492,94	61,97	133,21	125,04	79,91	-			
Metric	Exp	1576,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	Sph	-	-	-	2041,53	-	-	-	-	-	-			
	Lin	-	-	-	-	1648,95	-	-	-	-	-			
	Mat	-	-	-	-	-	-		-	-	1398,3			
Sum-metric	Exp	21,24	21,21	21,16	21,18	21,20	21,19	21,19	21,16	21,20	-			
	Sph	21,20	21,21	21,15	21,17	21,21	21,17	21,27	21,15	21,17	-			
	Lin	21,24	21,22	21,16	21,18	21,26	21,18	21,27	21,15	21,19	-			
Simple sum-metric	Exp	85,57	57,06	48,10	65,86	96,78	799,16	98,4	1151,7	88,14	-			
	Sph	469,39	58,07	90,92	66,35	55,68	806,20	98,76	50,03	87,27	-			
	Lin	86,40	577,81	1233,25	53,28	809,71	91,06	98,04	50,08	514,65	-			



Πίνακας 3.5: Τα αποτελέσματα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) των δεδομένων βροχόπτωσης του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_H, για ένα ξηρό έτος της περιόδου αναφοράς (1981-2000), σχετικά με τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας και τα μοντέλα βαριογράμματος.

Μοντέλο		Υφοικό Βαριόνραμμα + Υρονικό Βαριόνραμμα											
Συμμεταβλητότητας				Λωμ	σικό Βάμισγι	αμμα – Αρ	ονικό Βάριο	չիսիկս					
	joint	Exp+Exp	Exp+Sph	Sph+Exp	Sph+Sph	Lin+Lin	Lin+Exp	Lin+Sph	Sph+Lin	Exp+Lin	Mat		
Separable	-	1212,27	1212,27	1212,27	1212,27	1212,27	1212,27	1212,27	1212,2	1212,2	-		
Product-sum	-	11373,2	5086,4	2697,3	1635,7	5142,6	790,7	2066,7	2061,8	6496,0	-		
Metric	Exp	11261,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Sph		-	-	12084,41	-	-	-	-	-	-		
	Lin	-	-	-	-	12090,6	-	-	-	-	-		
	Mat	-	-	-	-	-	-		-	-	10941		
Sum-metric	Exp	168,0	168,0	167,0	167,0	170,0	171,0	170,3	168,7	171,1	-		
	Sph	167,4	167,4	166,9	167,0	171,3	170,3	165,2	165,5	171,1	-		
	Lin	167,9	167,9	166,2	167,5	165,6	170,4	171,2	169,9	171,1	-		
Simple sum-metric	Exp	11008,04	5481,90	9201,39	9080,41	13228	14227,74	5489,19	13751	8797	-		
	Sph	11477,34	5181,88	10869,3	12717,53	8288	10932,16	6743,24	11256	11333	-		
	Lin	13238,80	7933,80	8772,57	8985,2	11329	8819	8398,90	8431	10330	-		



Πίνακας 3.6: Τα αποτελέσματα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) των δεδομένων βροχόπτωσης του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_H, για ένα υγρό έτος της περιόδου αναφοράς (1981-2000), σχετικά με τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας και τα μοντέλα βαριογράμματος.

Μοντέλο	Υφοικό Βαοιόνοσμμα + Υρονικό Βαριόνοσμμα											
Συμμεταβλητότητας				Λωj	σικό Βάριογι	σαμμα – Αρ	ονικο Βάριο	չիսարո				
	joint	Exp+Exp	Exp+Sph	Sph+Exp	Sph+Sph	Lin+Lin	Lin+Exp	Lin+Sph	Sph+Lin	Exp+Lin	Mat	
Separable	-	2519,3	2519,3	2519,3	2519,3	2519,3	2519,3	2519,3	2519,3	2519,3	-	
Product-sum	-	23046,8	15136,2	8560,4	12359,8	12203,7	44053,6	438,9	7483,1	5211,8	-	
Metric	Exp	1576,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Sph	-	-	-	2041,53	-	-	-	-	-	-	
	Lin	-	-	-	-	1648,95	-	-	-	-	-	
	Mat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1398,3	
Sum-metric	Exp	368,80	364,81	368,81	370,56	367,75	368,85	370,58	364,68	364,82	-	
	Sph	368,84	362,16	368,71	362,13	365,36	368,68	362,04	362,13	362,05	-	
	Lin	368,80	370,59	368,74	363,28	370,58	368,27	370,28	364,43	364,42	-	
Simple sum-metric	Exp	4500,4	9498,4	5412,1	6443,8	4310,11	3409,9	3729,2	5253,8	6546,6	-	
	Sph	2760,3	8823,9	3075,8	12873,6	8222,3	3317,9	7688,6	4385,7	5770,4	-	
	Lin	4206,3	5858,8	4986,8	8131,5	5770,1	4593,4	6297,5	4952,2	6032,4	-	



**Πίνακας 3.7:** Τα αποτελέσματα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) των θερμοκρασιακών δεδομένων του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M, για ένα ψυχρό έτος της περιόδου αναφοράς (1981-2000), σχετικά με τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας και τα μοντέλα βαριογράμματος.

Μοντέλο				Vo	οικό Βαοιόν	nauna + Vo	ονικό Βαοιό				
Συμμεταβλητότητας				Au	ρικο Βαριογ	σαμμα + Αρ	υνικο Βάριο	չիսիկս			
	joint	Exp+Exp	Exp+Sph	Sph+Exp	Sph+Sph	Lin+Lin	Lin+Exp	Lin+Sph	Sph+Lin	Exp+Lin	Mat
Separable	-	77,39	77,36	77,41	77,35	77,37	77,42	77,36	77,37	77,37	-
Product-sum	-	7,94	15,66	11,19	16,23	10,54	8,04	16,23	16,62	9,94	-
Metric	Exp	256,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sph	-	-	-	862,16	-	-	-	-	-	-
	Lin	-	-	-	-	389,99	-	-	-	-	-
	Mat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	253,28
Sum-metric	Exp	3,12	3,19	3,09	3,16	3,11	3,86	4,03	2,90	3,86	-
	Sph	3,11	3,18	3,08	3,15	3,09	3,07	4,02	2,94	3,14,	-
	Lin	3,11	3,18	3,09	3,16	2,88	3,08	3,99	3,18	3,17	-
Simple sum-metric	Exp	20,82	25,94	20,71	22,33	21,1	19,82	23,38	20,87	22,04	-
	Sph	21,0	24,79	17,16	18,47	26,02	23,39	25,01	21,74	22,12	-
	Lin	21,22	21,57	25,95	22,24	22,89	24,86	33,11	21,99	20,49	-



Μοντέλο

**Πίνακας 3.8:** Τα αποτελέσματα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) των θερμοκρασιακών δεδομένων του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M, για ένα θερμό έτος της περιόδου αναφοράς (1981-2000), σχετικά με τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας και τα μοντέλα βαριογράμματος.

Συμμεταβλητότητας		Χωρικό Βαριόγραμμα + Χρονικό Βαριόγραμμα												
	joint	Exp+Exp	Exp+Sph	Sph+Exp	Sph+Sph	Lin+Lin	Lin+Exp	Lin+Sph	Sph+Lin	Exp+Lin	Mat			
Separable	-	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1	-			
Product-sum	-	11,29	6,77	106,17	23,98	4,7	19,4	6,9	26,83	5,34	-			
Metric	Exp	372,42	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	Sph	-	-	-	1086,27	-	-	-	-	-	-			
	Lin	-	-	-	-	239,49	-	-	-	-	-			
	Mat	-	-	-	-	-	-		-		529,78			
Sum-metric	Exp	1,43	1,43	1,45	1,46	1,43	1,43	1,60	1,42	1,42	-			
	Sph	1,40	1,42	1,40	1,44	1,60	1,39	1,61	1,43	1,42	-			
	Lin	1,43	1,44	1,41	1,45	1,62	1,39	1,62	1,43	1,42	-			
Simple sum-metric	Exp	12,57	11,83	15,61	16,47	13,08	14,53	33,82	8,28	14,08	-			
	Sph	7,54	12,49	7,33	5,99	24,6	7,17	28,97	12,06	9,61	-			
	Lin	13,1	11,52	16,47	10,7	15,3	15,31	10,7	16,8	7,01	-			


Πίνακας 3.9: Τα αποτελέσματα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) των θερμοκρασιακών δεδομένων του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_H, για ένα ψυχρό έτος της περιόδου αναφοράς (1981-2000), σχετικά με τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας και τα μοντέλα βαριογράμματος.

Μοντέλο				Vo	οικό Βαοιόν		ουμκό Βαοιό				
Συμμεταβλητότητας				ΛW	μικο σαμισγ	ραμμα τ Αρ	ονικο Βάριο	չիռարս			
	joint	Exp+Exp	Exp+Sph	Sph+Exp	Sph+Sph	Lin+Lin	Lin+Exp	Lin+Sph	Sph+Lin	Exp+Lin	Mat
Separable	-	24,49	24,36	24,49	24,36	24,39	24,51	24,37	24,39	24,39	-
Product-sum	-	25,30	15,21	46,96	15,01	19,04	25,9	13,88	19,82	19,09	-
Metric	Exp	573,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sph	-	-	-	1063,86	-	-	-	-	-	-
	Lin	-	-	-	-	233,68	-	-	-	-	-
	Mat	-	-	-	-	-	-	-		-	548,97
Sum-metric	Exp	10,35	10,35	10,27	10,27	10,32	10,32	10,65	10,23	10,36	-
	Sph	10,34	10,34	10,34	10,27	10,61	10,21	10,65	10,22	10,34	-
	Lin	10,33	10,38	10,25	10,31	10,29	10,32	10,66	10,10	10,33	-
Simple sum-metric	Exp	30,10	50,21	33,67	51,33	40,53	29,01	59,75	36,31	32,02	-
	Sph	30,01	25,57	33,38	67,65	35,80	31,23	36,13	36,47	32,18	-
	Lin	29,98	40,57	33,67	69,93	27,45	30,28	59,75	28,87	32,07	-



Πίνακας 3.10: Τα αποτελέσματα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE) των θερμοκρασιακών δεδομένων του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_H, για ένα θερμό έτος της περιόδου αναφοράς (1981-2000), σχετικά με τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας και τα μοντέλα βαριογράμματος.

Μοντέλο				Vo	orrá Darorán		οιπιά Βασιά				
Συμμεταβλητότητας	<b>χωρικο Βαριογραμμα + χρονικο Βαριογραμμα</b>										
	joint	Exp+Exp	Exp+Sph	Sph+Exp	Sph+Sph	Lin+Lin	Lin+Exp	Lin+Sph	Sph+Lin	Exp+Lin	Mat
Separable	-	8,16	8,91	8,16	8,9	8,73	8,17	8,91	8,73	8,73	-
Product-sum	-	37,21	11,04	85,53	12,99	12,15	36,75	10,94	16,75	16,65	-
Metric	Exp	684,78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sph	-	-	-	1131,52	-	-	-	-	-	-
	Lin	-	-	-	-	274,11	-	-	-	-	-
	Mat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	663,72
Sum-metric	Exp	4,47	4,41	4,41	4,47	4,35	4,47	4,27	4,46	4,46	-
	Sph	4,19	4,46	4,19	4,45	4,46	4,15	4,54	4,40	4,14	-
	Lin	4,47	4,19	4,46	4,44	4,48	4,15	4,59	4,46	4,46	-
Simple sum-metric	Exp	22,20	28,74	28,73	6,46	18,47	24,22	646,53	20,09	18,47	-
	Sph	18,06	1002,67	11,97	664,62	1428,23	14,24	448,09	24,22	20,43	-
	Lin	27,86	268,50	20,93	1925,2	468,55	17,45	1429,25	28,84	1072,5	-

ΓμημΤέλος, για τη λεπτομερέστερη και πολυδιάστατη σύγκριση των πέντε χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance model) δημιουργήθηκαν, τα διαγράμματα Taylor. Αναλύοντας και αξιολογώντας το διάγραμμα Taylor (Σχήμα 3.11) συμπεραίνεται ότι τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας metric (με μπλε χρώμα) και simple-sum-metric (με κίτρινο γρώμα) αναπαράγουν ανεπαρκώς τα δεδομένα βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M (όπου στο διάγραμμα Taylor απεικονίζεται με τρίγωνο) και RegCM4\_H (όπου στο διάγραμμα Taylor απεικονίζεται με κύκλο). Μολονότι, ο συντελεστής συσχέτισης των προαναφερθέντων μοντέλων συμμεταβλητότητας υπερβαίνει το 0,6, οι μεγάλες τιμές της τυπικής απόκλισης και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE), τα καθιστούν μη αξιόπιστα. Μη αποτελεσματικά, στην αναπαραγωγή της βροχόπτωσης των μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H θεωρούνται και τα μοντέλα συμμεταβλητότητας separable (με μαύρο χρώμα) και product-sum (με κίτρινο χρώμα). Ο συγκεκριμένος χαρακτηρισμός αποδίδεται εξαιτίας του πολύ μικρού συντελεστή συσχέτισης, που εμφανίζει το μοντέλο separable, καθώς και της μεγάλης τιμής της τυπικής απόκλισης του μοντέλου product-sum.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Εν αντιθέσει, των προαναφερθέντων χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας, το μοντέλο sum-metric, προσεγγίζει, πολύ ικανοποιητικά, τα δεδομένα βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H, εμφανίζοντας το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης (0,7 στο κλιματικό μοντέλο RegCM4\_H και 0,8 στο RegCM4\_M). Παράλληλα, το μοντέλο sum-metric υπερέχει των άλλων μοντέλων συμμεταβλητότητας, καθώς παρουσιάζει τη μικρότερη τυπική απόκλιση και κατά συνέπεια το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE).



Σχήμα 3.11: Το διάγραμμα Taylor στο οποίο απεικονίζεται η στατιστική σύγκριση των χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας separable (μαύρο), product-sum (κόκκινο), metric (μπλε), sum-metric (πράσινο) και simple sum-metric (κίτρινο) για τα δεδομένα βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M (τρίγωνο) και RegCM4\_H (κύκλος).

Όσον αφορά τα θερμοκρασιακά δεδομένα των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H, τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας ανταποκρίνονται παρόμοια με τη βροχόπτωση. Αναλυτικότερα, και στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα μοντέλα metric (με μπλε χρώμα) και simple sum-metric παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη τιμή της τυπικής απόκλισης και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Σχήμα 3.12). Αρνητικό συντελεστή συσχέτισης εμφανίζει το μοντέλο separable (με μαύρο χρώμα), ενώ τα μοντέλα product-sum και summetric αναπαράγουν αποτελεσματικότερα τη θερμοκρασία των μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H. Όμως, ο συντελεστής συσχέτισης, που εμφανίζει το μοντέλο sum-metric, υπερέχει έναντι του συντελεστή συσχέτισης του μοντέλου product-sum, καθιστώντας, έτσι το μοντέλο sum-metric ως το πιο αξιόπιστο.



**Σχήμα 3.12:** Το διάγραμμα Taylor στο οποίο απεικονίζεται η στατιστική σύγκριση των χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας separable (μαύρο), product-sum (κόκκινο), metric (μπλε), sum-metric (πράσινο) και simple sum-metric (κίτρινο) για τα δεδομένα θερμοκρασίας των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M (τρίγωνο) και RegCM4\_H (κύκλος).

Αντιπαραβάλλοντας, τα αντίστοιχα διαγράμματα Taylor της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης (Σχήμα 3.11 και Σχήμα 3.12), διαπιστώνεται ότι τα χωροχρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας αναπαράγουν πιο ικανοποιητικά τα θερμοκρασιακά δεδομένα. Το εν λόγω συμπέρασμα προκύπτει, καθώς, στην περίπτωση της θερμοκρασίας, τα μοντέλα συμμεταβλητότητας παρουσιάζουν μικρότερη τιμή τυπικής απόκλισης και μέσου τετραγωνικού σφάλματος, χωρίς να υπερβαίνουν τα όρια του διαγράμματος Taylor, όπως, αντίθετα, συμβαίνει στην περίπτωση της βροχόπτωσης.

Συμπερασματικά, από τη στατιστική ανάλυση, καθώς και τη σύγκριση των χωροχρονικών βαριογραμμάτων (spatio-temporal variogram) των πέντε χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας συμπεραίνεται ότι το μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric αναπαράγει πιο αποτελεσματικά, εν συγκρίσει των υπολοίπων μοντέλων συμμεταβλητότητας, τις δύο παραμέτρους (βροχόπτωση και θερμοκρασία) των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H. Αντίθετα, ως το πλέον μη αξιόπιστο, προκύπτει το μοντέλο συμμεταβλητότητας metric. Η αξιοπιστία του χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας sum-metric επιβεβαιώνεται και από τους Heuvelink et al. (2012), βάσει των οποίων, θεωρείται ως το πλέον αξιόπιστο, με τις μικρότερες αβεβαιότητες, για τη δημιουργία ημερήσιων χαρτών θερμοκρασίας. Επιπρόσθετα, οι Kilibarda et al. (2014) εφάρμοσαν το μοντέλο sum-metric με σκοπό την πρόβλεψη της μέσης, της ελάχιστης και της μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας σε παγκόσμια κλίμακα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

## 3.5.2 Εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging)

Η εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging), στις παραμέτρους (βροχόπτωση και θερμοκρασία) των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H της περιόδου αναφοράς 1981-2000, επιτεύχθηκε μέσω της χρήσης του χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας sum-metric (sum-metric covariance model). Εν συνεχεία, αναλύονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging) στις σημαντικότερες κλιματικές παραμέτρους (βροχόπτωση, μέση θερμοκρασία) σε εποχική κλίμακα.

# 3.5.2.1 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging)

Τα δεδομένα της βροχόπτωσης των κλιματικών RegCM4\_M και RegCM4\_H παρουσιάζουν διαφορές με τα αντίστοιχα ERA-Interim δεδομένα κατά την περίοδο αναφοράς 1981-2000, με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να εντοπίζονται κατά την υγρή περίοδο. Η εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging, χρησιμοποιώντας το χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance model) sum-metric, έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση των δεδομένων της βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H.

Στόχος είναι τα δεδομένα των κλιματικών μοντέλων να προσεγγίσουν τα χαρακτηριστικά ERA-Interim. Στο Σχήμα 3.13 απεικονίζεται η μέση μηνιαία διακύμανση, για την περίοδο αναφοράς 1981-2000 της βροχόπτωσης των μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H σε αντιδιαστολή με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H), καθώς και της μέσης μηνιαίας διακύμανσης και της αβεβαιότητας (μέση τιμή ± τυπική απόκλιση) των ERA-Interim δεδομένων βροχόπτωσης (ERA-Interim).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα (Σχήμα 3.13), η εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging έχει ως αποτέλεσμα, τα δεδομένα βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H να προσεγγίζουν ικανοποιητικότερα τη μέση τιμή των αντίστοιχων ERA-Interim δεδομένων, της περιόδου αναφοράς 1981-2000.

Το μοντέλο I\_RegCM4\_Μ παρουσιάζει βελτιωμένες τιμές βροχόπτωσης για όλους τους μήνες, εκτός από το Νοέμβριο (Σχήμα 3.13). Πιο συγκεκριμένα, η βροχόπτωση κατά τους μήνες Δεκέμβριο-Ιανουάριο-Φεβρουάριο ελαττώθηκε κατά 14%, με αποτέλεσμα οι νέες τιμές να βρίσκονται εντός του εύρους των τιμών των ERA-Interim.

Τα αποτελέσματα για το I\_RegCM4\_Η δεν είναι το ίδιο ικανοποιητικά (Σχήμα 3.13). Μολονότι, οι τιμές της βροχόπτωσης μειώθηκαν σημαντικά, δεν επιτεύχθη ο στόχος της προσέγγισης των ERA-Interim. Ειδικότερα, τα βροχομετρικά δεδομένα του I\_RegCM4\_Η είναι εκτός του εύρους των ERA-Interim τους μήνες Σεπτέμβριο, Οκτώβριο, Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο. Ενώ, κατά τους μήνες Φεβρουάριο, Μάρτιο, Απρίλιο και Μάιο, οι βελτιωμένες τιμές της βροχόπτωσης ανήκουν στο εύρος των Era-Interim. Αμελητέα βελτίωση παρατηρείται στη θερινή βροχόπτωση και των δύο κλιματικών μοντέλων, καθώς η τιμή της είναι ελάχιστη ή ακόμα και μηδενική.





Σχήμα 3.13: Η μέση μηνιαία διακύμανση των δεδομένων βροχόπτωσης των ERA-Interim (συνεχής γραμμή) και των μοντέλων α) RegCM4\_M και β) RegCM4\_H (διακεκομένη γκρι γραμμή) για την περίοδο αναφοράς 1981-2000. Η διακεκομένη μπλε γραμμή αντιστοχεί στις βελτιωμένες τιμές των μοντέλων και η γραμμοσκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί στο διάστημα εμπιστοσύνης των ERA-Interim.

Αντίθετα, τα θερμοκρασιακά δεδομένα των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H προσεγγίζουν ικανοποιητικότερα σε σχέση με τη βροχόπτωση, τα αντίστοιχα ERA-Interim (Σχήμα 3.14). Θετικό είναι το γεγονός ότι η εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatiotemporal Kriging), χρησιμοποιώντας το χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric, οδήγησε στη βελτίωση της θερμοκρασίας, μόνο για τους μήνες κατά τους οποίους υπερεκτιμάται.

Αναλυτικότερα, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα θερμοκρασιακά δεδομένα του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M δεν αποκλινούν σημαντικά από τα αντίστοιχα ERA-Interim. Ωστόσο, ακόμη και στη συγκεκριμένη περίπτωση, η χωροχρονική μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging συνέβαλλε, κυρίως, στη βελτίωση της χειμερινής και φθινοπωρινής θερμοκρασίας του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_M, δηλαδή στους μήνες στους οποίες εντοπίστηκαν οι διαφορές.

Όσον αφορά τα δεδομένα θερμοκρασίας του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H, παρουσιάζουν μεγαλύτερες διαφορές με τα ERA-Interim δεδομένα. Εφαρμόζοντας τη χωροχρονική μέθοδο βέλτιστης παρεμβολής Kriging, προκύπτει ότι θερμοκρασία του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H μειώνεται το χειμώνα κατά 2.7°C, ενώ την εαρινή περίοδο κατά 1.1°C. Αντίθετα, κατά τη θερινή περίοδο,

όπου η θερμοκρασία του μοντέλου RegCM4\_Η συγκλίνει με τη θερμοκρασία των ERA-Interim, δεν παρατηρείται βελτίωση (Σχήμα 3.14).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging στις υπόλοιπες παραμέτρους (μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου) των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H.



Σχήμα 3.14: Η μέση μηνιαία διακύμανση των δεδομένων βροχόπτωσης των ERA-Interim (συνεχής γραμμή) και των μοντέλων α) RegCM4\_M και β) RegCM4\_H (διακεκομένη γκρι γραμμή) για την περίοδο αναφοράς 1981-2000. Η διακεκομένη μπλε γραμμή αντιστοχεί στις βελτιωμένες τιμές των μοντέλων και η γραμμοσκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί στο διάστημα εμπιστοσύνης των ERA-Interim. 3.5.2.2 Αζιολόγηση της απόκρισης των κλιματικών μοντέλων έπειτα από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η αξιολόγηση και η σύγκριση των κλιματικών μοντέλων προκειμένου να διαπιστωθεί το κλιματικό μοντέλο, το οποίο αναπαριστά πιο ικανοποιητικά το κλίμα της περιοχής έρευνας, επιτεύχθηκε μέσω των θηκογραμμάτων (boxplots).

Από τα θηκογράμματα (Σχήμα 3.15 και Σχήμα 3.16) συμπεραίνεται ότι οι κλιματικές παράμετροι (βροχόπτωση και θερμοκρασία) του μοντέλου I\_RegCM4\_M, προσεγγίζουν πιο ικανοποιητικά, τα ERA-Interim δεδομένα της περιόδου αναφοράς 1981-2000, έπειτα από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging, εν συγκρίσει των δεδομένων του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H.

Πιο συγκεκριμένα, μελετώντας τα θηκογράμματα της ενδοετήσιας διακύμανσης της βροχόπτωσης της περιόδου αναφοράς (Σχήμα 3.15) διαπιστώνεται ότι η τιμή της διαμέσου των δεδομένων της βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της διαμέσου των ERA-Interim δεδομένων κατά το χειμώνα, την άνοιξη και το φθινόπωρο. Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στο κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι, τον Οκτώβριο, η τιμή της διαμέσου της βροχόπτωσης του μοντέλου I\_RegCM4\_M είναι μεγαλύτερη κατά 80% από την τιμή των ERA-Interim. Ενώ, η αντίστοιχη τιμή του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H υπερεκτιμάται κατά 600% (130 mm). Μικρότερες διαφορές παρατηρούνται στις τιμές της διαμέσου κατά τον μήνα Μάιο. Τα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H υπερεκτιμούν τη διάμεσο κατά 5% και 20%, αντίστοιχα.

Αντίθετα, τους καλοκαιρινούς μήνες, η τιμή της διαμέσου της βροχόπτωσης των δύο μοντέλων είναι μικρότερη από την τιμή της διαμέσου των ERA-Interim. Ειδικότερα, τα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H δεν μπορούν να εντοπίσουν τη μηνιαία διακύμανση της βροχόπτωσης, ιδιαίτερα τον μήνα Ιούλιο.

Επομένως, τα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H υπερεκτιμούν τη χειμερινή, εαρινή και φθινοπωρινή βροχόπτωση, ενώ κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η βροχόπτωση υποεκτιμάται.



Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη







Σχήμα 3.15: Τα θηκογράμματα απεικονίζουν την εποχιακή σύγκριση μεταξύ της βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων HADGEM2 (I\_RegCM4\_H) και MPI (I\_RegCM4\_M), όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging και των δεδομένων ERA-Interim.

Αξιολογώντας τα θηκογράμματα, που αφορούν τα θερμοκρασιακά δεδομένα των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης πρεμβολής Krging σε σχέση με τα ERA-Interim δεδομένα θερμοκρασίας, διαπιστώνεται ότι η θερμοκρασία του μοντέλου I\_RegCM4\_M προσομοιώνεται πιο αποτελεσματικά, προσεγγίζοντας ικανοποιητικά τη θερμοκρασία των ERA-Interim (Σχήμα 3.16). Αντίθετα, το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H υπερεκτιμά τη θερμοκρασία. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι τον μήνα Μάρτιο, η τιμή της διαμέσου των θερμοκρασιακών δεδόμενων του μοντέλου I\_RegCM4\_M και των ERA-Interim είναι ίσες (9,5°C), ενώ η αντίστοιχη τιμή του μοντέλου I\_RegCM4\_H είναι μεγαλύτερη κατά 2 °C. Ωστόσο, τους χειμερινούς μήνες, τα θερμοκρασιακά δεδομένα του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_M υπερεκτιμώνται ελαφρώς.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Αντίστοιχα αποτελέσματα εξάγονται και για τις υπόλοιπες παραμέτους (μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία και ταχύτητα ανέμου) των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.

Εν κατακλείδι, οι κλιματικές παράμετροι, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής (spatio-temporal Kriging) προσομοιώνονται πιο αποτελεσματικά από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M. Συνεπώς, το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M αναπαριστά πιο ικανοποιητικά τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής έρευνας, της περιόδου αναφοράς 1981-2000, εν συγκρίσει του μοντέλου I\_RegCM4\_H.



Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη







Σχήμα 3.16: Τα θηκογράμματα απεικονίζουν την εποχική σύγκριση μεταξύ της βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_H (HADGEM2) και I\_RegCM4\_M (MPI), όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging και των δεδομένων ERA-Interim.

## 3.5.3 Ποσοτικοποίηση της κλιματικής αλλαγής για το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα, μέσω της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging, χρησιμοποιώντας το χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric στα μελλοντικά δεδομένα του περιοχικού μοντέλου RegCM4, το οποίο ακολουθεί το πιο ακραίο και απαισιόδοξο σενάριο RCP8.5, συμπεραίνονται τα ακόλουθα:

Σύμφωνα με το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M, εκτιμάται ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση θα μειωθεί αμελητέα (0,2%) κατά τη μελλοντική περίοδο 2031-2050, ενώ την τελευταία εικοσαετία (2080-2099) κατά 2,9% (Πίνακας 3.11). Αντίθετα, αύξηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης κατά 5,8%, εκτιμάται από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H, για την περίοδο 2031-2050, ενώ στο τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα αναμένεται ελάττωσή της κατά 5,9% (Πίνακας 3.11). Στα ραβδογράμματα (Σχήμα 3.17 και Σχήμα 3.18) παριστάνεται η μέση μηνιαία μεταβολή της βροχόπτωσης μεταξύ της περιόδου αναφοράς 1981-2000 και των μελλοντικών περιόδων 2031-2050 και 2080-2099 των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.

Αναλυτικότερα, βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_M, η μεγαλύτερη μείωση της βροχόπτωσης κατά την περίοδο 2031-2050 αναμένεται τον Αύγουστο και ισούται με 54,8% (Σχήμα 3.17). Για την τελευταία εικοσαετία του 21<sup>ου</sup> αιώνα, σημαντική ελάττωση της βροχόπτωσης εκτιμάται καθ'ολη τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Αντίθετα, αύξηση της βροχόπτωσης κατά 35% και 62% εκτιμάται τον Οκτώβριο των μελλοντικών περιόδων 2031-2050 και 2080-2099, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_Η, εκτιμάται ότι η βροχόπτωση κατά την περίοδο 2031-2050 θα αυξηθεί σε όλους τους μήνες, πλην των μηνών από Ιούλιο έως και Οκτώβριο, που αναμένεται ένα μέσο ποσοστό μείωσης 40% (Σχήμα 3.17). Μείωση της φθινοπωρινής βροχόπτωσης κατά 23% εκτιμάται για την περίοδο 2080-2099. Το μέσο ποσοστό της ελάττωσης της βροχόπτωσης για τον Ιούλιο και Αύγουστο ισούται 64%. Αντίθετα, αύξηση αναμένεται να παρουσιάσει η χειμερινή βροχόπτωση της τελευταίας εικοσαετίας του 21<sup>ου</sup> αιώνα (Σχήμα 3.18).

## Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη ΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

Πίνακας 3.11: Η μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm) για την περίοδο αναφοράς 1981-2000 και τις μελλοντικές περιόδους 2031-2050 και 2080-2099, όπως προέκυψε από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging στα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.

		I_RegCM4_N	ſ		I_RegCM4_I	H
	1981-2000	2031-2050	2080-2099	1981-2000	2031-2050	2080-2099
Ι	91,3	92,4	97,7	121,6	148,0	134,1
Φ	64,3	57,9	81,4	82,1	90,4	101,2
Μ	79,5	83,3	64,1	80,8	81,7	83,3
Α	54,0	55,4	35,4	73,3	73,5	72,6
Μ	34,1	22,8	33,2	52,3	60,4	40,5
Ι	13,7	18,9	5,2	18,5	25,5	23,7
Ι	4,4	4,4	3,0	6,7	2,0	2,3
Α	15,9	10,3	11,8	13,0	5,6	4,7
Σ	30,3	31,5	27,9	57,9	38,3	44,6
0	60,1	93,0	97,5	166,8	152,2	118,4
Ν	126,3	136,3	115,8	146,2	184,6	119,9
Δ	115,9	82,1	96,7	153,6	167,7	169,9
Ετήσια	689,9	688,3	669,9	972,8	1029,9	915,3



**Σχήμα 3.17:** Η μέση μηνιαία μεταβολή της βροχόπτωσης μεταξύ της περιόδου αναφοράς 1981-2000 και της μελλοντικής περιόδου 2031-2050 των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.



Σχήμα 3.18: Η μέση μηνιαία μεταβολή της βροχόπτωσης μεταξύ της περιόδου αναφοράς 1981-2000 και της μελλοντικής περιόδου 2080-2099 των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.

Αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας της περιοχής έρευνας έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα εκτιμάται τόσο από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M, όσο και από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H. Πιο συγκεκριμένα, βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_M εκτιμάται αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας κατά 0,9°C και 3,4°C κατά τις μελλοντικές περιόδους 2031-2050 και 2080-2099 (Πίνακας 3.12). Η μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας κατά την περίοδο 2031-2050 αναμένεται να σημειωθεί το Μάιο και ισούται με 1,6 °C (Σχήμα 3.19). Μέση αύξηση της καλοκαιρινής θερμοκρασίας κατά 4,2°C εκτιμάται κατά την τελευταία εικοσαετία του 21<sup>ου</sup> αιώνα (Σχήμα 3.20).

Σημαντικότερη αύξηση της θερμοκρασίας προκύπτει έπειτα από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging στο κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H. Η μέση ετήσια θερμοκρασία της περιοχής έρευνας εκτιμάται ότι θα αυξηθεί κατά 2,3°C και 4,8°C τις μελλοντικές περιόδους 2031-2050 και 2080-2099, αντίστοιχα (Πίνακας 3.12). Κατά τη μελλοντική περίοδο 2031-2050, η μέση καλοκαιρινή θερμοκρασία θα αυξηθεί κατά 2,8 °C, ενώ τον Δεκέμβριο θα ελαττωθεί κατά 0,8 °C (Σχήμα 3.19). Τέλος, η μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας εκτιμάται τους καλοκαιρινούς μήνες της μελλοντικής περίοδου 2080-2099 και ανέρχεται σε 6,3°C (Σχήμα 3.20).



Πίνακας 3.12: Η μέση μηνιαία θερμοκρασία για την περίοδο αναφοράς 1981-2000 και τις μελλοντικές περιόδους 2031-2050 και 2080-2099, όπως προέκυψε από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging στο κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.

		I_RegCM4_N	1		I_RegCM4_I	H
	1981-2000	2031-2050	2080-2099	1981-2000	2031-2050	2080-2099
Ι	8,1	8,9	11,0	9,3	11,6	13,5
Φ	8,5	9,7	11,6	9,2	11,3	13,1
Μ	9,6	10,9	13,2	10,6	12,3	14,6
Α	12,9	13,2	16,2	13,1	15,2	17,7
Μ	16,2	17,8	20,4	17,9	20,1	23,0
Ι	21,7	22,8	25,9	23,6	25,9	29,3
Ι	24,9	25,4	29,1	26,7	29,1	33,5
Α	24,4	25,5	28,3	26,3	29,2	32,9
Σ	21,3	22,9	24,7	22,5	25,3	28,6
0	17,6	18,0	19,9	18,5	20,6	23,0
Ν	12,8	13,8	16,0	14,6	16,2	18,0
Δ	10,2	10,6	12,7	11,2	10,9	14,9
Ετήσια	15,7	16,6	19,1	16,9	19,3	21,8







**Σχήμα 3.20:** Η μέση μηνιαία μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ της περιόδου αναφοράς 1981-2000 και του τέλους του 21<sup>ου</sup> αιώνα (2080-2099) των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.

### 3.6 Επιμέρους Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε προσπάθεια να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων ικανή να αναπαριστά το παροντικό και μελλοντικό κλίμα της περιοχής έρευνας. Ως εκ τούτου, για πρώτη φορά στην Ελλάδα, χρησιμοποιήθηκε η χωροχρονική μεθόδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging). Συνολικά, αξιολογήθηκαν πέντε χωρογρονικά μοντέλα συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance models), προκειμένου να διαπιστωθεί το πλέον αξιόπιστο. Η χωροχρονική μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging εφαρμόστηκε στις κλιματικές παραμέτρους (βροχόπτωση, μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, καθώς και ταχύτητα ανέμου) περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, του στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου (drivers), τα δεδομένα των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (GCMs) MPI και HadGEM2, με χωρική ανάλυση  $50 \times 50$  km, τα οποία ακολουθούν το σενάριο εκπομπών RCP8.5 και αφορούν στην περίοδο αναφοράς 1981-2000 και τις μελλοντικές περιόδους 2031-2050 και 2080-2099.

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας του κατάλληλου χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας επιτεύχθηκε μέσω στατιστικών μέτρων, των διαγραμμάτων Taylor και της σύγκρισης του θεωρητικού χωροχρονικού βαριογράμματος (sample spatio-temporal variogram) με τα αντίστοιχα βαριογράμματα των χωροχρονικών

μοντέλων συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance models), τα οποία απεικονίστηκαν σε τρισδιάστατη μορφή. Τα συμπεράσματα της αξιολόγησης συνοψίζονται στα ακόλουθα:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Από τη σύγκριση του θεωρητικού βαριογράμματος με τα αντίστοιχα βαριογράμματα των χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας (spatiotemporal covariance models), διαπιστώθηκε ότι το χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric (sum-metric covariance model) προσαρμόζεται καλύτερα στο θεωρητικό χωροχρονικό βαριόγραμμα, στα δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας της περιόδου αναφοράς 1981-2000 τόσο του κλιματικού μοντέλου RegCM4\_M, όσο και του RegCM4\_H. Η χειρότερη προσαρμογή του θεωρητικού χωροχρονικού βαριογράμματος παρατηρήθηκε από το χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας metric (metric covariance model).
- Τα διαγράμματα Taylor επιβεβαίωσαν την υπεροχή του χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας sum-metric έναντι των υπολοίπων χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance models). Ειδικότερα, από την αξιολόγηση των διαγραμμάτων Taylor προέκυψε ότι το μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric παρουσιάζει τον υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης, τη μικρότερη τυπική απόκλιση, συνεπάγοντας το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE). Η ικανότητα της ρεαλιστικής αναπαράστασης των παραμέτρων των κλιματικών μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H από το μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric, παρατηρήθηκε σε κάθε εποχή του έτους.

Η εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging, χρησιμοποιώντας το χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric, συνέβαλλε στη βελτίωση των κλιματικών παραμέτρων των μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H, της περιόδου αναφοράς, χωρίς να μεταβάλλει την ενδοετήσια μεταβλητότητα της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας της περιοχής έρευνας. Συγκεκριμένα:

Η σημαντικότερη βελτίωση παρατηρείται στη χειμερινή και φθινοπωρινή βροχόπτωση του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H, με ποσοστά μείωσης, τα οποία ανέρχονται σε 18% και 26%, αντίστοιχα. Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν για τη βροχόπτωση του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_M, όπου μειώνεται κατά 14% τη χειμερινή περίοδο και κατά 20% το φθινόπωρο.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Μικρή βελτίωση διαπιστώνεται στη θερμοκρασία του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_M. Εν αντιθέσει, στη χειμερινή και φθινοπωρινή θερμοκρασία του μοντέλου I\_RegCM4\_Η παρατηρείται μείωση κατά 2,7 °C και 1,1 °C, αντίστοιχα.
- Η εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής οδήγησε στην ικανοποιητικότερη προσέγγιση των δεδομένων βροχόπτωσης και θερμοκρασίας των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H, στα αντίστοιχα ERA-Interim δεδομένα της περιόδου αναφοράς 1981-2000.
- Η θερμοκρασία των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_Η προσαρμόζεται πολύ πιο ικανοποιητικά στα δεδομένα ERA-Interim, εν συγκρίσει της βροχόπτωσης.
- Αδιαμφισβήτητα, τα ERA-Interim δεδομένα προσεγγίζονται, πιο ικανοποιητικά, από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M.

Συνοψίζοντας, συμπεραίνεται ότι ο προσδιορισμός του κατάλληλου χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance model) με σκοπό την επίλυση της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging εξαρτάται από το είδος των δεδομένων, την περιοχή έρευνας και από την επιθυμητή χωροχρονική ανάλυση. Επισημαίνεται ότι για την αξιολόγηση και την επιλογή του κατάλληλου χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance model) θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης όσο και η βέλτιστη προσαρμογή των βαριογραμμάτων των χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας (spatio-temporal covariance model) στο θεωρητικό χωροχρονικό βαριόγραμμα (sample spatio-temporal variogram).

Η χωροχρονική μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής (spatio-temporal Kriging) συνέβαλλε στη βελτίωση της ικανότητας των κλιματικών μοντέλων να αναπαράγουν αποτελεσματικότερα τις κλιματικές παραμέτρους της περιοχής έρευνας, μειώνοντας τις αβεβαιοτήτες των κλιματικών μοντέλων.

Από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging στα μελλοντικά δεδομένα θερμοκρασίας και βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H, των περιόδων 2031-2050 και 2080-2099, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

## Μελλοντική περίοδος 2031-2050:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Αμελητέα μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης της περιοχής έρευνας κατά 0,2% εκτιμάται από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M, ενώ βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H, η μέση ετήσια βροχόπτωση εκτιμάται ότι θα αυξηθεί κατά 5,8%.
- Μικρή αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας της περιοχής έρευνας κατά 0,9°C αναμένεται από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M. Βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H, η αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας εκτιμάται σε 2,3°C.

## Μελλοντική περίοδος 2080-2099:

- Μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης της περιοχής έρευνας κατά 2,9% εκτιμάται από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M, ενώ βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H, η μέση ετήσια βροχόπτωση εκτιμάται ότι θα ελαττωθεί κατά 5,4%.
- Αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας της περιοχής έρευνας κατά 2,3°C αναμένεται από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M, για το τέλος του 21°<sup>0</sup> αιώνα. Τέλος, σύμφωνα με το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H, η αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας θα είναι σημαντική και εκτιμάται σε 4,9°C.

## 4. Υδρολογική-Υδρογεωλογική Προσομοίωση

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

δρασ

Τμήμα Γεωλογίας

Αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου είναι η προσομοίωση του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Ειδικότερα, το κύριο σημείο διερεύνησης αφορά την εκτίμηση της διακύμανσης της στάθμης του υπόγειου νερού υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του παράκτιου υδροφορέα, όπως έχει ήδη επισημανθεί, αλλά και γενικότερα, της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία, είναι η απουσία συνεχών και μεγάλης χρονοσειράς παρατηρούμενων μετεωρολογικών και υδρολογικών-υδρογεωλογικών δεδομένων. Μία από τις προκλήσεις, που ο ερευνητής καλείται να αντιμετωπίσει κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης ενός υδροφορέα, είναι ο ακριβής προσδιορισμός του εμπλουτισμού του. Πρόβλημα που οξύνεται, όταν τα διαθέσιμα παρατηρούμενα δεδομένα είναι ελάχιστα ή και εκλείπουν.

Ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου εστιάζεται στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για την αξιόπιστη και βέλτιστη προσομοίωση των υδρολογικών-υδρογεωλογικών συνθηκών των υδροφορέων με ελάχιστα ή και χωρίς διαθέσιμα παρατηρούμενα δεδομένα υπό το καθεστώς της κλιματικής αλλαγής. Τα προσδοκώμενα αποτελέσματα θα συμβάλλουν στην κατανόηση της απόκρισης των υδρολογικών-υδρογεωλογικών παραγόντων απέναντι στις μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων και επομένως, στην ορθή λήψη μέτρων και δράσεων μετριασμού και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή.

Για την υλοποίηση του στόχου, το υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT, το οποίο εφαρμόζεται σε επίπεδο λεκάνης απορροής, συνδυάστηκε με το μοντέλο υπόγειας ροής GMS (Groundwater Modeling System), που έχει ενσωματωμένο τον κώδικα MODFLOW. Αρχικά, εφαρμόστηκε το υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT με κλιματικά δεδομένα τα ERA-Interim, με σκοπό τον προσδιορισμό της υφιστάμενης κατείσδυσης και της επιφανειακής απορροής της λεκάνης του ποταμού Χαβρία. Για τον εντοπισμό των επιπτώσεων μιας πιθανής κλιματικής αλλαγής στις παραμέτρους του υδρολογικού ισοζυγίου, το μοντέλο ArcSWAT εφαρμόστηκε, χρησιμοποιώντας ως κλιματικά δεδομένα, τη βάση δεδομένων, όπως προέκυψε από την εφαρμογή της χωροχρονικής

μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής (spato-temporal Kriging) στα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, δηλαδή, τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCMs) MPI και HadGEM2, τα οποία ακολουθούν το ακραίο σενάριο RCP8.5.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΠΦΡΑΣ

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του μοντέλου ArcSWAT, εφαρμόστηκε ο κώδικας MODFLOW. Πιο συγκεκριμένα, η προσομοίωση της υφιστάμενης υπόγειας ροής επιτεύχθηκε μέσω της εισαγωγής στο MODFLOW, των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArCSWAT με κλιματικά δεδομένα εισόδου τα ERA-Inrerim. Τέλος, η διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα εκτιμήθηκε, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισαγωγής στο MODFLOW, τα αποτελέσματα της συνδυασμένης εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με το περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4. Στο Σχήμα 4.1 περιγράφεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε.



Σχήμα 4.1: Το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας, που ακολουθήθηκε.

# 4.1. Υδρολογική Προσομοίωση της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Χαβρία

### 4.1.1 Επισκόπηση του υδρολογικού μοντέλου SWAT

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

EUQDAL

Ως υδρολογικό μοντέλο SWAT αναφέρεται το ακρωνύμιο των λέξεων Soil and Water Assessment Tool, το οποίο αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του'90 από τη Γεωργική Yπηρεσία των H.Π.A. (United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service (UDSA-ARS). Κύριος σκοπός του SWAT είναι η εκτίμηση των επιπτώσεων των χρήσεων γης και της ανθρώπινης δραστηριότητας, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής, στους υδατικούς πόρους, στο έδαφος και στον κύκλο των θρεπτικών συστατικών (Arnold et al., 1998). Πρόκειται για ένα μοντέλο φυσικής βάσης (physically-based), συνεχούς χρόνου (continuous time) και διακριτικότητας (semi-distributed). ημικατανεμημένης γωρικής Ουσιαστικά, εφαρμόζεται, με ημερήσιο χρονικό βήμα, για την προσομοίωση των σύνθετων διεργασιών, που διέπουν μια λεκάνη απορροής (υδρολογικές και υδροχημικές διαδικασίες, διεργασίες διάβρωσης, κίνηση μικροβιακού φορτίου, κλιματική αλλαγή), συμβάλλοντας στην κατανόηση της φυσικής λειτουργίας τους και της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Απώτερος σκοπός του είναι η λήψη αποφάσεων για την ορθολογική και βιώσιμη διαχείριση των λεκανών απορροής.

Το SWAT χαρακτηρίζεται ως ένα εύχρηστο και διεπιστημονικό εργαλείο, καθώς παρουσιάζει εύρος πλεονεκτημάτων, τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια (Neitsch et al., 2005):

- Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου SWAT, ακόμα και σε λεκάνες απορροής, στις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα (υδρολογικά, μετεωρολογικά, εδαφολογικά δεδομένα).
- Ελάχιστα απαιτούμενα δεδομένα για την εφαρμογή του μοντέλου.
- ✓ Συμβατότητα του μοντέλου SWAT με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) και συγκεκριμένα με το περιβάλλον ArcMap.
- Προσομοίωση των υδρολογικών, υδροχημικών, γεωμορφολογικών διεργασιών,
  που λαμβάνουν χώρα εντός της λεκάνης απορροής.

Διερεύνηση των μακρογρόνιων επιπτώσεων των πρακτικών διαχείρισης της λεκάνης απορροής, όπως για παράδειγμα στη συγκέντρωση των ρύπων και στην πλήρωση του ταμιευτήρα με φερτά υλικά έπειτα από χρονική περίοδο.

- Άμεση ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων σε μεταβολές των δεδομένων, που εισάγονται στο υδρολογικό μοντέλο SWAT (όπως είναι η μεταβολή των χρήσεων γης, η κλιματική αλλαγή, η αλλαγή στις πρακτικές αγροτικής διαχείρισης), στην ποσότητα και στην ποιότητα των υδατικών πόρων, καθώς και στη στερεομεταφορά.
- Δυνατότητα χρονικού προγραμματισμού των αγροτικών εργασιών στη διάρκεια του έτους (άρδευση, ημερομηνίες φύτευσης και συγκομιδής, χρήση λιπασμάτων).

Τα κύρια στοιχεία, που συνθέτουν το μοντέλο SWAT είναι οι κλιματικές συνθήκες, τα υδρολογικά χαρακτηριστικά, οι ιδιότητες και ο τύπος του εδάφους, η ανάπτυξη των φυτών, τα θρεπτικά συστατικά, τα παρασιτοκτόνα, τα βακτήρια και οι παθογόνοι οργανισμοί, καθώς και οι πρακτικές διαχείρισης της γης (Gassman et al., 2007b).

Το μοντέλο SWAT στηρίζεται στην επίλυση της εξίσωσης του υδρολογικού κύκλου (Εξίσωση 4.1.1), καθώς αποτελεί τον ρυθμιστή όλων των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη απορροής (Arnold et al., 1996).

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R - Q_{surf} - ET - P - QR)$$
(4.1.1)

Όπου:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

 $SW_t = \eta$  τελική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm)

 $SW_0 = \eta$  αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό (mm)

t= το χρονικό διάστημα προσομοίωσης (π.χ σε ημέρες)

R= η ημερήσια βροχόπτωση (mm)

 $Q_{surf} = η$  ημερήσια απορροή (mm)

ET= η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή (mm)

P= η ημερήσια κατείσδυση (mm)

QR = η βασική ροή (mm)

Οι υδρολογικές διαδικασίες οι οποίες προσομοιώνονται από το SWAT συνοψίζονται στις κάτωθι (Neitsch et al., 2005):

- Κατακράτηση από τη βλάστηση
- Διήθηση στον εδαφικό ορίζοντα
- Ανακατανομή υγρασίας εντός του εδαφικού ορίζοντα
- Εξατμισοδιαπνοή

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Υποδερμική ροή
- Κατείσδυση νερού στον αβαθή υδροφορέα
- Εξάτμιση νερού από τον αβαθή υδροφορέα
- Εμπλουτισμός του βαθύτερου υδροφορέα
- Επιφανειακή απορροή
- Επιστροφή νερού από τον αβαθή υδροφορέα προς το υδρογραφικό δίκτυο (βασική ροή)
- Απώλειες νερού από το υδρογραφικό δίκτυο προς τον αβαθή υδροφορέα

Κατά την προσομοίωση από το SWAT, η λεκάνη απορροής διαχωρίζεται σε υπολεκάνες, βάσει της τοπογραφίας και του υδρογραφικού δικτύου. Σε κάθε υπολεκάνη αντιστοιχούν τα κλιματικά δεδομένα του πλησιέστερου μετεωρολογικού σταθμού. Εν συνεχεία, οι υπολεκάνες διακριτοποιούνται εκ νέου σε μικρότερες χωρικές ενότητες, οι οποίες ονομάζονται μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs, Hydrological Response Units). Η μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) αποτελεί περιοχή με μοναδικό συνδυασμό χρήσεων γης, ιδιοτήτων-χαρακτηριστικών εδάφους και κλίσης. Για τη δημιουργία των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRUs) ορίζεται ένα κατώφλι (threshold). Το κατώφλι αναφέρεται στο ποσοστό της έκτασης της χρήσης γης, του εδάφους και της κλίσης, που θα ληφθεί υπόψη, ώστε να σχηματιστούν οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Σύμφωνα με τους Winchell et al. (2007), τιμές κατωφλίου έως 20% για τις χρήσεις γης και την κλίση και έως 10% για το έδαφος θεωρούνται αποδεκτές. Είναι προφανές ότι, όσο μικρότερη τιμή δίνεται στο κατώφλι τόσο πιο λεπτομερής διαγωρισμός της λεκάνης απορροής επιτυγγάνεται. Η διακριτοποίηση αυτή διευκολύνει τους υπολογισμούς και συμβάλλει στην αύξηση της αξιοπιστίας του μοντέλου, καθώς οι συγκεκριμένες παράμετροι (χρήσεις γης, εδαφικά χαρακτηριστικά και τοπογραφική κλίση) διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των υδρολογικών-υδρογεωλογικών συνθηκών σε μια λεκάνη απορροής. Στο Σχήμα 4.1.1, περιγράφεται, συνοπτικά, η διαδικασία που ακολουθείται για τη δημιουργία της μονάδας υδρολογικής απόκρισης (HRUs). Τέλος, οι παράμετροι του υδρολογικού κύκλου υπολογίζονται, αρχικά, για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης (HRU) και στη συνέχεια στο σύνολο της λεκάνης απορροής.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ϿΡΔΣ



Σχήμα 4.1.1: Σχηματική απεικόνιση του τρόπου σχηματισμού των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRUs) (από Yer et al., 2015, με τροποποιήσεις).

Η διαδικασία της προσομοίωσης διακρίνεται στις ακόλουθες φάσεις (Neitsch et al., 2005):

α) στις επιφανειακές διεργασίες, οι οποίες καθορίζουν την ποσότητα του νερού, των ιζημάτων και των χημικών συστατικών, που καταλήγουν στον εγγύτερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου, καθώς και στον αβαθή υδροφορέα.

β) στις διεργασίες που περιγράφουν την κίνηση του νερού, των ιζημάτων και των χημικών συστατικών εντός του κλάδου του υδρογραφικού δικτύου.

Τα απαραίτητα δεδομένα που εισάγονται στο μοντέλο είναι τα εξής:

- ✓ Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model, DEM)
- Χρήσεις γης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Εδαφολογικά χαρακτηριστικά
- Κλιματικά δεδομένα, τα οποία περιλαμβάνουν τις ημερήσιες τιμές της βροχόπτωσης, της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, της ταχύτητας του ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας και της σχετικής υγρασίας. Σε περίπτωση έλλειψης των ημερήσιων τιμών των κλιματικών παραμέτρων, είναι εφικτό να εισαχθούν οι μέσες μηνιαίες τιμές αυτών και μέσω της χρήσης κατάλληλου αλγόριθμου και συγκεκριμένα της γεννήτριας καιρού (weather generator) να προσομοιωθούν οι ημερήσιες τιμές.

#### 4.1.2 Μέθοδοι Εκτίμησης των Υδρολογικών Παραμέτρων

Για τον υπολογισμό των υδρολογικών παραμέτρων χρησιμοποιείται πλήθος εξισώσεων, οι οποίες περιγράφονται με λεπτομέρεια από τους Neitsch et al. (2005). Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής κρίνεται απαραίτητη, η αναφορά, μόνο των μεθόδων εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της επιφανειακής απορροής.

Εκτίμηση δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (Potential Evapotranspiration): Το μοντέλο SWAT παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής μέσω των μεθόδων Penman-Monteith (Penman 1956, Allen, 1986, Allen et al. 1998), Priestley-Taylor (Priestley-Taylor, 1972) και Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985). Η μέθοδος Penman-Monteith απαιτεί δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, ταχύτητας ανέμου, σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας. Αντίστοιχα δεδομένα απαιτούνται και για την εφαρμογή της μεθόδου Priestley-Taylor, πλην της ταχύτητας του ανέμου. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή, μέσω της μεθόδου Hargreaves, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μόνο θερμοκρασιακά δεδομένα. Συνεπώς, η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τα διαθέσιμα κλιματικά δεδομένα.

Εκτίμηση επιφανειακής απορροής (Surface Runoff): Η επιφανειακή απορροή εκτιμάται στο SWAT, μέσω της μεθόδου του αριθμού καμπύλης απορροής (SCS-CN) και της μεθόδου διήθησης Green & Ampt (Green and Ampt, 1911). Η μέθοδος διήθησης Green & Ampt απαιτεί δεδομένα βροχόπτωσης σε τακτά χρονικά διαστήματα της ημέρας (sub-daily), γεγονός που αποτρέπει την επιλογή της. Εν αντιθέσει, η μέθοδος αριθμού καμπύλης απορροής (SCS-CN) εφαρμόζεται ευρέως. Πρόκειται για μια εμπειρική μέθοδο εκτίμησης της επιφανειακής απορροής. Αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Γεωργίας των Η.Π.Α. (Soil Conservation Survey, 1972), έπειτα από την πραγματοποίηση πειραμάτων σε λεκάνες απορροής των Η.Π.Α. Η μέθοδος αριθμού καμπύλης απορροής (SCS-CN) περιγράφεται εκτενώς από τους Neitsch et al. (2005) και η επιφανειακή απορροή υπολογίζεται βάσει της σχέσης (4.1.2):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)}$$
(4.1.2)

Όπου:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Qsurf: η ημερήσια επιφανειακή απορροή (mm)

Rday: η βροχόπτωση (mm)

Ια: οι αρχικές απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής, διήθησης ή επιφανειακής
 αποθήκευσης (mm)

S: η μέγιστη δυνητική κατακράτηση νερού (mm)

Η μέγιστη δυνητική κατατακράτηση μεταβάλλεται τόσο χωρικά, εξαιτίας της διαφορετικής σύστασης του εδάφους, των χρήσεων γης, της κλίσης και των

πρακτικών διαχείρισης της γης, όσο και χρονικά, λόγω των διαφορετικών τιμών της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό. Η μέγιστη δυνητική κατακράτηση (S) δίνεται από την ακόλουθη σχέση (4.1.3):

$$S = 25.4 \times \left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \tag{4.1.3}$$

Όπου:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- CN:ο αριθμός καμπύλης απορροής. Ο αριθμός καμπύλης απορροής είναι μια παράμετρος η οποία προκύπτει συναρτήσει των χρήσεων γης, των εδαφολογικών χαρακτηριστικών και των προηγούμενων συνθηκών εδαφικής υγρασίας. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 100. Ο αριθμός καμπύλης απορροής είναι αντιπροσωπευτικός και μοναδικός για κάθε λεκάνη απορροής και ουσιαστικά, αποτελεί ένα μέτρο της διηθητικής ικανότητας των εδαφών της λεκάνης.
- Τα εδάφη διακρίνονται σε τέσσερις τύπους βάσει της διηθητικής τους ικανότητας:
- Τύπος Α: Έδαφος χαμηλού δυναμικού απορροής και συνεπώς, υψηλής διηθητικής ικανότητας. Τα συγκεκριμένα εδάφη συνιστώνται κυρίως, από χαλίκια πλήρως στραγγιζόμενες άμμους.
- Τύπος Β: Έδαφος μέτριας διηθητικής ικανότητας, όπως αμμώδης πηλός.
- Τύπος C: Έδαφος μικρής διηθητικής ικανότητας. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου.
- Τύπος D: Έδαφος υψηλού δυναμικού απορροής. Σε αυτόν τον τύπο ανήκουν τα αργιλώδη εδάφη, καθώς και τα εδάφη με μικρό πάχος (σχεδόν αδιαπέρατο υλικό).
- Θεωρώντας ότι οι αρχικές απώλειες Ι<sub>α</sub> ισούνται με 0.2\*S, η σχέση (4.1.3) μετατρέπεται ως εξής:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2 \times S)^2}{(R_{day} + 0.8 \times S)}$$
(4.1.4)



4.1.3.1 Περιγραφή του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία επιτεύχθηκε μέσω του υδρολογικού μοντέλου SWAT2012, το οποίο συνδέεται με το περιβάλλον GIS μέσω της επέκτασης ArcSWAT. Το ArcSWAT συγκροτείται από δύο βάσεις δεδομένων. Η πρώτη αφορά τη γεωβάση δεδομένων, στην οποία αποθηκεύονται όλα τα χωροχρονικά δεδομένα της περιοχής έρευνας (τοπογραφικά και κλιματικά δεδομένα, χρήσεις γης, εδαφολογικά χαρακτηριστικά). Η δεύτερη βάση δεδομένων περιλαμβάνει τις προκαθορισμένες (default) τιμές των παραμέτρων (όπως, ο μέγιστος δείκτης κατακράτησης φυλλώματος CANMAX, Soil Evaporation Compensation, ESCO, ο συντελεστής λευκάγειας), που απαιτούνται για τη διαδικασία της προσομοίωσης.

Η προσομοίωση της λεκάνης απορροής μέσω του ArcSWAT περιλαμβάνει την οριοθέτηση της λεκάνης απορροής, τον καθορισμό των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (HRUs), την εισαγωγή των κλιματικών δεδομένων, τη δημιουργία των αρχείων εισόδου SWAT, την επεξεργασία της βάσης δεδομένων, την εκτέλεση του μοντέλου, τη γραφική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, τη ρύθμιση (calibration) και την επαλήθευση (validation) του μοντέλου.

### 4.1.3.2 Δεδομένα Εισαγωγής

Η διαδικασία προσομοίωσης της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία από το ArcSWAT, καθώς και τα απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής για την εφαρμογή του, παρατίθενται στη συνέχεια:

Η οριοθέτηση (watershed delineation) της λεκάνης του Χαβρία και του υδρογραφικού δικτύου επιτεύχθηκε μέσω του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM), το οποίο, όπως προαναφέρθηκε (Κεφάλαιο 2) παραχωρήθηκε από το Εθνικό Κτηματολόγιο με χωρική ανάλυση 5 m. Με βάση την τοπογραφία και το υδρογραφικό δίκτυο, η λεκάνη απορροής διακριτοποιήθηκε σε 23 υπολεκάνες.

Για τη δημιουργία των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (HRUs), χρησιμοποιήθηκαν ο θεματικός χάρτης των χρήσεων γης (Σχήμα 2.3) και ο εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης του Χαβρία (Σχήμα 2.5). Οι χρήσεις γης της περιοχής έρευνας, οι οποίες περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2, μετασχηματίστηκαν στις αντίστοιχες χρήσεις γης, που αναγνωρίζει η βάση δεδομένων του μοντέλου ArcSWAT και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.1.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Κωδικός (Corine, 2012)	Περιγραφή (Corine, 2012)	Αντιστοιχία SWAT
112	Ασυνεχής αστικός ιστός	URML
131	Χώροι εξόρυξης ορυκτών	SWRN
211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	ORCD
223	Ελαιώνες	OLIV
242	Σύνθετες καλλιέργειες	AGRC
243	Γη που χρησιμοποιείται	AGRR
	κυρίως για γεωργία μαζί με	
	σημαντικά τμήματα φυσικής	
	βλάστησης	
311	Δάσος πλατύφυλλων	FRST
312	Δάσος Κωνοφόρων	FRST
313	Μικτό δάσος	FRST
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	RNGE
421	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	WETN

Πίνακας 4.1.1: Οι κατηγορίες των χρήσεων γης όπως εισήχθησαν στο υδρολογικό μοντέλο ArCSWAT

Ο εδαφολογικός χάρτης της λεκάνης (Σχήμα 2.5), ο οποίος παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2, εισήχθη στη βάση δεδομένων του ArcSWAT. Για τον υπολογισμό των εδαφικών παραμέτρων, που απαιτούνται για την εφαρμογή του ArcSWAT, χρησιμοποιήθηκε το ευρέως διαδεδομένο λογισμικό SPAW (Soil-Plant-Air-Water), το οποίο διατίθεται δωρεάν (https://www.ars.usda.gov). Οι εδαφικοί παράμετροι που υπολογίστηκαν μέσω του SPAW είναι: η διαθέσιμη εδαφική υγρασία (available water capacity, AWC, mm H2O/mm εδάφους), ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας της ακόρεστης ζώνης (mm/h) και η φαινόμενη πυκνότητα (g/cm<sup>3</sup>).

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων και σύμφωνα με τους Billas et al. (2016), οι εδαφικοί σχηματισμοί που απαντώνται στην περιοχή έρευνας βάσει του μεγέθους των κόκκων τους και της διηθητικής τους ικανότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.2. Πίνακας 4.1.2: Οι τύποι των εδαφών και οι τύποι υδροπερατότητας, όπως εισήχθησαν στη γεωβάση του μοντέλου ArcSWAT.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

	Τύπος Εδάφους	Περιγραφή	Τύπος Υδροπερατότητας
1	SCL, CL, SiCL	Αμμοαργιλοπηλώδες Αργιλοπηλώδες Ιλυοαργιλοπηλώδες	В
2	L, SiL, Si, FSL	Πηλώδες Ιλυοπηλώδες Ιλυώδες	В
3	SL	Αμμώδες Πηλώδες Ιλυοαργιλώδες	D
4	SiC, C, SC	Αργιλώδες Αμμοαργιλώδες	В

Το τελικό στάδιο, που οδηγεί στη δημιουργία των μονάδων υδρολογικής απόκρισης, αντιστοιχεί στον καθορισμό των κλάσεων με τις κλίσεις της επιφάνειας του εδάφους. Στην παρούσα εργασία ορίστηκαν 5 κλάσεις, οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.3.

**Πίνακας 4.1.3:** Κατηγοριοποίηση των κλίσεων(%) της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία.

ΚΛΑΣΗ	ΚΛΙΣΗ (%)
1	0-10
2	10-20
3	20-30
4	30-50
5	>50

Βάσει των χρήσεων γης, των εδαφολογικών χαρακτηριστικών και των κλίσεων και θέτοντας μηδενικό κατώφλι στην έκταση των προαναφερθέντων, δημιουργήθηκαν 309 μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs) (Σχήμα 4.1.2).

Τη δημιουργία των μονάδων υδρολογικής απόκρισης διαδέχεται η εισαγωγή των κλιματικών δεδομένων. Για την προσομοίωση της υφιστάμενης ποσοτικής κατάστασης της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία, χρησιμοποιήθηκαν τα ERA-Interim δεδομένα και αφορούν τις ημερήσιες τιμές της βροχόπτωσης, της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και της σχετικής υγρασίας. Τα κλιματικά δεδομένα αφορούν την περίοδο αναφοράς 1981-2000. Η χωρική τους ανάλυση είναι 12.5 km x 12.5 km. Στο Σχήμα 4.1.2 αποτυπώνονται οι υπολεκάνες και οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης, όπως δημιουργήθηκαν από την εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT, καθώς, επίσης και η θέση των σημείων πλέγματος των ERA-Interim δεδομένων και των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη



**Σχήμα 4.1.2:** Οι υπολεκάνες (αριστερά) και οι υδρολογικές μονάδες απόκρισης (HRUs, αριστερά), όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT.

## 4.1.4 Εφαρμογή του Υδρολογικού Μοντέλου ArcSWAT

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Χαβρία, έχουν πραγματοποιηθεί από το ΕΑΓΜΕ (πρώην IΓΜΕ), σποραδικές, μόνο, μετρήσεις της παροχής. Επομένως, η ρύθμιση του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT (calibration) δεν ήταν εφικτή να επιτευχθεί μέσω της τυπικής διαδικασίας, δηλαδή της προσαρμογής των προσομοιωμένων τιμών (modeled), δηλαδή των τιμών παροχής που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου, με τις πραγματικές-παρατηρούμενες τιμές παροχής (observed). Κατά συνέπεια, προτάθηκε μια νέα μεθοδολογία ρύθμισης του υδρολογικού μοντέλου.

Στο Σχήμα 4.1.3 απεικονίζεται συνοπτικά η μεθοδολογία, που αναπτύχθηκε. Ο σκοπός της προτεινόμενης μεθοδολογίας ανάγεται στη βέλτιστη προσαρμογή του συντελεστή πραγματικής εξατμισοδιαπνοής του μοντέλου ArcSWAT με το συντελεστή πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, όπως προέκυψε βάσει των μεθόδων Penman-Montheith (FAO-56) και Thorhthwaite-Mather, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.

Αναλυτικά, η αρχική εφαρμογή (run model) του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με κλιματικά δεδομένα εισόδου, τα ERA-Interim, που αφορούν την περίοδο αναφοράς 1981-2000, καθώς και με τις προκαθορισμένες τιμές (default) των παραμέτρων, που διαθέτει η βάση δεδομένων του ArcSWAT. Κατά την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT, η δυνητική εξατμισοδιαπνοή εκτιμήθηκε μέσω της μεθόδου Penman-Monteith (Penman, 1956; Allen, 1986; Allen et al., 1998) και η επιφανειακή απορροή υπολογίσθηκε μέσω της μεθόδου του αριθμού καμπύλης απορροής (SCS-CN, Soil Conservation Soil, 1972).

Εφαρμόζοντας το υδρολογικό μοντέλο ArCSWAT με τα προαναφερθέντα δεδομένα εισόδου, προέκυψε το υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής έρευνας. Εν συνεχεία, ο συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, που υπολογίστηκε βάσει του ArcSWAT, συγκρίθηκε με τον αντίστοιχο συντελεστή πραγματικής εξατμισοδιαπνοής των μεθόδων Penmam-Montheith (FAO-56) και Thornthwaite-Mather. Η εκτέλεση του μοντέλου (model run) ArcSWAT επαναλήφθηκε, ακολουθώντας τη διαδικασία δοκιμής και λάθους (trial – and error procedure) και μεταβάλλοντας τις κατάλληλες παραμέτρους
του ArcSWAT, έως την επίτευξη της βέλτιστης προσαρμογής της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, την προσέγγιση, δηλαδή, της προσομοιωμένης πραγματικής εξατμισοδιαπνοής στην τιμή της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής βάσει των μεθόδων Penmam-Montheith (FAO-56) και Thornthwaite-Mather. Η εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT πραγματοποιήθηκε με ημερήσιο βήμα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

έοδρας

Οι τιμές των παραμέτρων που μεταβλήθηκαν, είναι εκείνες που σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (Krishnan et al., 2018; Abbaspour et al., 2017; Brouziyne et al., 2017; Nkiaka et al., 2017) διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην προσομοίωση των υδρολογικών συνιστωσών και κυρίως, στην εξατμισοδιαπνοή και περιγράφονται στον Πίνακα 4.1.4. Η συγκεκριμένη διαδικασία συμβάλλει σημαντικά στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του μοντέλου ArcSWAT, καθώς επίσης και στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων, που δομούν το ArcSWAT και των υδρολογικών συνιστωσών.



Σχήμα 4.1.3: Το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε.



Πίνακας4.1.4: Οι παράμετροι που μεταβλήθηκαν με σκοπό τη βέλτιστη προσαρμογή των παραμέτρων.

Παράμετρος	Περιγραφή	Μονάδες	Διακύμανση τιμών	Προκαθορισμένη τιμή (default)
CANMX	Μέγιστος dείκτης Κατακράτησης	Mm	0.0-100.0	0.0
	Φυλλώματος			
ESCO	Soil Evaporation Compensation Factor	Αδιάστατο μέγεθος	0.01-1.0	0.95
EPCO	Plant Uptake Compensation Factor	Αδιάστατο μέγεθος	0.01-1.0	1.0
ELVAI	Leaf area Index	Αδιάστατο μέγεθος	0.0-10.0	3
REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow	Mm	0.0-1000	750
	aquifer for revap or percolation to the			
	deep aquifer movement			
GW_REVAP	Συντελεστής επανατροφοδότησης	Αδιάστατο μέγεθος	0.02-0.20	0
	υπόγειου νερού			

## 4.1.5 Έλεγχος Αξιοπιστίας της Προτεινόμενης Μεθοδολογίας

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ο δείκτης αποδοτικότητας Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) (4.1.5), η ποσοστιαία απόκλιση Percent Bias (PBIAS) (4.1.6) και ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προς την τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων (Standard deviation of measured data Ratio, RSR) (4.1.7) χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης του υδρολογικού μοντέλου SWAT. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης των μέσων μηνιαίων τιμών της προσομοιωμένης παροχής και των σποραδικών διαθέσιμων παρατηρούμενων μετρήσεων παροχής.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{i,o} - Q_{i,s})^2}{\sum_{i=1}^{n} (Q_{i,o} - Q_{i,m})^2}\right]$$
(4.1.5)

$$PBIAS = 100 \times \left[\frac{\Sigma(Q_{i,o} - Q_{i,s})}{\sum_{i=1}^{n} Q_{i,o}}\right]$$
(4.1.6)

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEVo} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Q_{i,o} - Q_{i,s})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Q_{i,o} - Q_{i,m})^2}}$$
(4.1.7)

όπου:

Q<sub>i,o</sub> = παρατηρούμενες τιμές Q<sub>i,s</sub> = προσομοιώμενες τιμές Q<sub>i,m</sub> = μέσος όρος παρατηρούμενων τιμών

Οι Moriasi et al. (2007) διερεύνησαν τη χρήση των στατιστικών μέτρων ως εργαλείων αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης ποικίλων μοντέλων, συμπεριλαμβανομένου και του μοντέλου SWAT. Βάσει των συμπερασμάτων τους, διαπιστώνεται ότι στην περίπτωση που ο έλεγχος αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του SWAT πραγματοποείται σε μηνιαίο βήμα, η προσομοίωση θεωρείται αξιόπιστη, όταν ο δείκτης αποδοτικότητας NSE είναι μεγαλύτερος από 0,50, η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των προσομοιωμένων και των παρατηρούμενων τιμών (PBIAS) ανέρχεται έως 25% και ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προς την τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων (RSR) είναι μικρότερος από 0,70. Στον Πίνακα 4.1.5 παρουσιάζεται η



Πίνακας 4.1.5: Η ικανότητα προσομοίωσης του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT βάσει των στατιστικών μέτρων (Moriasi et al., 2007).

	Ικανότητα Προσομοίωσης						
Στατιστικός	ικός Πολύ Καλή Καλή Ικανοποιητική Μη Ικανοπο						
Δείκτης							
NSE	0,75 <nse≤1< th=""><th>0,65<nse≤0,75< th=""><th>0,5<nse≤0,65< th=""><th>NSE≤0,5</th></nse≤0,65<></th></nse≤0,75<></th></nse≤1<>	0,65 <nse≤0,75< th=""><th>0,5<nse≤0,65< th=""><th>NSE≤0,5</th></nse≤0,65<></th></nse≤0,75<>	0,5 <nse≤0,65< th=""><th>NSE≤0,5</th></nse≤0,65<>	NSE≤0,5			
PBIAS	PBIAS≤±10	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$	PBIAS≥±25			
RSR	0 <rsr≤0,5< th=""><th>0,5<rsr≤0,6< th=""><th>0,6<rsr≤0,7< th=""><th>RSR&gt;0,7</th></rsr≤0,7<></th></rsr≤0,6<></th></rsr≤0,5<>	0,5 <rsr≤0,6< th=""><th>0,6<rsr≤0,7< th=""><th>RSR&gt;0,7</th></rsr≤0,7<></th></rsr≤0,6<>	0,6 <rsr≤0,7< th=""><th>RSR&gt;0,7</th></rsr≤0,7<>	RSR>0,7			

## 4.1.6 Ανάλυση Ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) των συνιστωσών του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία απέναντι σε μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η συγκεκριμένη διαδικασία συμβάλλει στην εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων για την απόκριση των υδρολογικών παραμέτρων στις εκάστοτε αλλαγές των κλιματικών παραμέτρων. Συνεπώς, η ανάλυση ευαισθησίας κατά αυτόν τον τρόπο, αποτελεί ένα πρόδρομο στάδιο της έρευνας των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο υδρολογικό ισοζύγιο, παρέχοντας τα εχέγγυα για την πιο εκτεταμένη ανάλυση και κατανόηση τους.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή η ανάλυση ευαισθησίας υλοποιήθηκε μέσω μιας πειραματικής διαδικασίας, η οποία περιλαμβάνει την εφαρμογή του ArcSWAT, εισάγοντας ως κλιματικά δεδομένα, υποθετικές μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων (υποθετικά σενάρια), ενώ τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου (τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά, χρήσεις γης) παρέμειναν ως είχαν. Τα εν λόγω σενάρια αφορούν διάφορους συνδυασμούς αύξησης και μείωσης των ERA-Interim κλιματικών παραμέτρων συνδυασμούς που πραγματοποιήθηκαν. Τονίζεται ότι, στα σενάρια, στα οποία αναπαριστάται αύξηση της θερμοκρασίας.

Πίνακας 4.1.6: Τα σενάρια με τις υποθετικές μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

This Part I a set a set of the se				
Υποθετικό Σενάριο	Θερμοκρασία (°C)	Βροχόπτωση (%)	Ταχύτητα Ανέμου (%)	Σχετική Υγρασία (%)
1	+1	0	0	0
2	+2,5	0	0	0
3	0	-5	0	0
4	0	-10	0	0
5	+2,5	0	+50	0
6	+2,5	-5	+50	0
7	+2,5	-5	+50	-25
8	+2,5	+5	+50	+10
9	0	+5	0	0
10	0	+5	0	+5
11	0	0	+50	0

# 4.1.7 Διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο υδρολογικό ισοζύγιο

Η εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις παραμέτρους του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία πραγματοποιήθηκε μέσω της συνδυασμένης εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT και του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, ακολουθώντας την παρακάτω μεθοδολογία:

- Η εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα στηρίχθηκε στην παραδοχή ότι οι χρήσεις γης και τα εδαφικά χαρακτηριστικά θα παραμείνουν αμετάβλητα.
- Ως κλιματικά δεδομένα εισαγωγής στο ArcSWAT χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων, η οποία προέκυψε από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής (Spatio-temporal Kriging) στα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, δηλαδή στις παραμέτρους των κλιματικών μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (GCMs) MPI (I\_RegCM4\_M) και HadGEM2 (I\_RegCM4\_H). Η χωρική ανάλυση των μελλοντικών κλιματικών δεδομένων είναι αντίστοιχη με των ERA-Interim (12,5 km x 12,5 km, Σχήμα 4.1.2) και αφορούν την περίοδο αναφοράς 1981-2000, καθώς και τις μελλοντικές περιόδους 2031-2050 και 2080-2099 (τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα). Τα δεδομένα περιλαμβάνουν τις ημερήσιες τιμές της βροχόπτωσης, της μέγιστης

και της ελάχιστης θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου. Επισημαίνεται ότι η προσομοίωση του μελλοντικού υδρολογικού ισοζυγίου έλαβε χώρα υπό συνθήκες πραγματικής ηλιακής ακτινοβολίας και σημείου δρόσου.

- Το ArcSWAT εφαρμόστηκε, αρχικά, εισάγοντας ως κλιματικές παραμέτρους, τα ιστορικά δεδομένα των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H, που αφορούν, δηλαδή, στην περίοδο 1981-2000.
- Το μοντέλο ArcSWAT εφαρμόστηκε, στη συνέχεια, με τα μελλοντικά δεδομένα των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H για τις περιόδους 2031-2050 και 2089-2099.
- Βάσει των αποτελεσμάτων, εκτιμήθηκαν οι τάσεις αύξησης και μείωσης των παραμέτρων του υδρολογικού ισοζυγίου έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα και διερευνήθηκε η ευαισθησία των υδρολογικών παραμέτρων απέναντι στην κλιματική αλλαγή.

Στο Σχήμα 4.1.4, που ακολουθεί απεικονίζονται τα διαφορετικά κλιματικά δεδομένα που εισήχθησαν, συνολικά, στο υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT.

## 4.1.8 Αποτελέσματα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

## 4.1.8.1 Αρχική εφαρμογή του Υδρολογικού Μοντέλου ArcSWAT

Το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία, που προέκυψε από την αρχική εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT με κλιματικά δεδομένα εισόδου τα ERA-Interim που αφορούν την περίοδο αναφοράς 1981-2000 και θέτοντας τις προκαθορισμένες τιμές (default) στις παραμέτρους του SWAT, παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.7.



**Σχήμα 4.1.4:** Τα διαφορετικά κλιματικά δεδομένα που εισήχθησαν στο υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT.

**Πίνακας 4.1.7:** Το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία για την περίοδο 1981-2000, όπως διαμορφώθηκε από την αρχική εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT.

Παράμετρος	Τιμή (mm/έτος)
Βροχόπτωση	520,1
Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή	949,0
Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή	229,6
Κατείσδυση νερού	138,57
Επιφανειακή απορροή	74,86

Βάσει των αποτελεσμάτων του μοντέλου ArcSWAT, η δυνητική εξατμισοδιαπνοή εκτιμήθηκε ίση με 949 mm, ενώ η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ανέρχεται σε 229,6 mm. Ο συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής αντιπροσωπεύει το 44% της ΒΙβλιοθήκη ΟΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" ποσότητας των κατακρημνισμάτων (520,1 mm), που δέχεται η λεκάνη απορροής του ποταμού Χαβρία.

## 4.1.8.2 Προσδιορισμός του Υφιστάμενου Υδρολογικού Ισοζυγίου

Από την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας διαπιστώθηκε ότι η παράμετρος CANMX (ο μέγιστος δείκτης κατακράτησης φυλλώματος) αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Όπως προκύπτει και από το Σχήμα 4.1.5, η αύξηση της παραμέτρου CANMX συνεπάγεται την αύξηση της παραμάτρου CANMX συνεπάγεται την αύξηση της παραμάτρου ESCO (Soil Evaporation Compensation Factor) και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής είναι αντιστρόφως ανάλογη (Σχήμα 4.1.5). Στην αμελητέα μεταβολή της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής συμβάλλει η παράμετρος EPCO (Plant Uptake Compensation Factor) (Σχήμα 4.1.5). Ενώ, η αλλαγή της παραμέτρου GW\_REVAP (Συντελεστής επανατροφοδότησης υπόγειου νερού) δεν επιδρά στην πραγματική εξατμισοδιαπνοή.

Επιπρόσθετα, από το Σχήμα 4.1.5 διαπιστώνεται ότι η μείωση της τιμής της παραμέτρου ESCO προκαλεί τη μείωση της τιμής των υπόλοιπων συνιστωσών του υδρολογικού ισοζυγίου (κατείσδυση και επιφανειακή απορροή).

Μειώνοντας την παράμετρο EPCO, η επιφανειακή απορροή αυξάνεται. Όσον αφορά την κατείσδυση, η σχέση που τη συνδέει με την παράμετρο EPCO, είναι αναλογική (Σχήμα 4.1.5). Ανεπηρέαστες στις διακυμάνσεις της παραμέτρου GW\_REVAP παραμένουν η κατείσδυση και η επιφανειακή απορροή (Σχήμα 4.1.5).









Σχήμα 4.1.5: Η αλληλεπίδραση μεταξύ των κύριων παραμέτρων του ArcSWAT και των παραμέτρων του υδρολογικού ισοζυγίου.

Λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματικές, γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στη λεκάνη απορροής του ποταμού Χαβρία, καθώς και των τιμών της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, που απαντώνται στον Ελληνικό χώρο, οι οποίες κυμαίνονται από 60% έως 85% στις πεδινές και παράκτιες περιοχές και από 30% έως 50% στις ορεινές (Βουδούρης, 2013), προέκυψαν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων CANMX, ESCO, EPCO, ELVIAL, REVAPMN και GW\_REVAP (Πίνακας 4.1.8).

Παράμετρος	Μονάδες	Βέλτιστη Τιμή	
CANMX	Mm	80,0	
ESCO	Αδιάστατο μέγεθος	0,02	
EPCO	Αδιάστατο μέγεθος	0,1	
ELVAI	Αδιάστατο μέγεθος	3	
REVAPMN	Mm	750	
GW_REVAP	Αδιάστατο μέγεθος	0,12	

Πίνακας 4.1.8: Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου ArcSWAT.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στον Πίνακα 4.1.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, όπως πρόεκυψε από την εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT, θέτοντας τις βέλτιστες τιμές στις παραμέτρους, βάσει της προτεινόμενης μεθοδολογίας, σε αντιπαραβολή με την τιμή της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής εκτιμώμενη βάσει των μεθόδων Penman-Montheith (FAO-56) και της Thornthwaite-Mather. Από τη σύγκριση των μεθόδων, διαπιστώνεται η ικανοποιητική προσομοίωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής από το υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT για την περίοδο 1981-2000.

Πίνακας 4.1.9: Η εξατμισοδιαπνοή όπως εκτιμήθηκε βάσει του μοντέλου ArcSWAT και των μεθόδων Penaman-Montheith Method (FAO-56) και Thornthtwaite-Mather για την περίοδο αναφοράς 1981-2000.

		Πραγματική Εξατμισοδιαπνοι	í
	ArcSWAT	Thornthwaite-Mather	FAO-56
mm	310	344,3	353,6
%	60	66	68

Το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης του Χαβρία με κλιματικά δεδομένα εισόδου τα ERA-Interim, που αφορούν την περίοδο αναφοράς 1981-2000, διαμορφώνεται ως εξής: Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ισούται με 309,6 mm και αντιπροσωπεύει το 60% της μέσης βροχόπτωσης (520,1 mm) της λεκάνης του Χαβρία. Ο συντελεστής κατείσδυσης αντιστοιχεί στο 19% της μέσης ποσότητας των κατακρημνισμάτων, που δέχεται η λεκάνη του Χαβρία και ο συντελεστής επιφανειακής απορροής αντιπροσωπεύει το 21%. Στον Πίνακα 4.1.10 παρουσιάζεται το προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης του Χαβρία για την περίοδο αναφοράς 1981-2000, όπως προέκυψε από την εφαρμογή τον μοντέλου ArcSWAT.

Πίνακας 4.1.10: Το προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία για την περίοδο 1981-2000.

	Βροχόπτωση	Εξατμισοδιαπνοή	Κατείσδυση	Επιφανειακή Απορροή
mm	520	310	101	109
%	100	60	19	21
x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	231	137	45	49

Το υδρολογικό μοντέλο ArCSWAT εφαρμόστηκε και για τον προσδιορισμό του υδρολογικού ισοζυγίου της περιόδου 2016-2017 (Πίνακας 4.1.1.11), η οποία αντιστοιχεί στην περίοδο εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής, όπου πραγματοποιήθηκαν και οι υπαίθριες παρατηρήσεις.

Πίνακας 4.1.11: Το προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία για την περίοδο 2016-2017

	Βροχόπτωση	Εξατμισοδιαπνοή	Κατείσδυση	Επιφανειακή Απορροή
mm	563	346	105	112
%	100	61	19	20
x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	252	155	47	50

## 4.1.8.3 Έλεγχος Αξιοπιστίας

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η ικανοποιητική απόδοση των υδρολογικών συνθηκών της λεκάνης του Χαβρία από το μοντέλο ArcSWAT για την περίοδο 1981-2000 επαληθεύεται από τη σύγκριση της διακύμανσης της μέσης μηνιαίας προσομοιωμένης παροχής με την αντίστοιχη πραγματική-παρατηρούμενη παροχή, κατά τα χρονικά διαστήματα, στα οποία υπάρχουν διαθέσιμες καταγεγραμμένες τιμές (Σχήμα 4.1.6). Ωστόσο, παρατηρείται η αδυναμία του μοντέλου ArcSWAT να προσομοιώσει ικανοποιητικά τις μέγιστες τιμές της παροχής.

Η ικανοποιητική προσέγγιση των υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης του Χαβρία από το ArcSWAT για την περίοδο 1981-2000 επαληθεύεται, επίσης και μέσω των στατιστικών μέτρων (Πίνακας 4.1.12). Πιο συγκεκριμένα, η ποσοστιαία απόκλιση κυμαίνεται μεταξύ 19% και 20%, υποδηλώνοντας ότι οι μέσες προσομοιωμένες τιμές της παροχής προσεγγίζουν τις παρατηρούμενες. Ο δείκτης αποδοτικότητας NSE ισούται περίπου με 0,5 και ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προς την τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων (RSR) είναι μικρότερος από 0,59.



Σχήμα 4.1.6: Οι προσομοιωμένες και οι παρατηρούμενες τιμές της παροχής κατά τα χρονικά διαστήματα, όπου υπάρχουν διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα.

Πίνακας 4.1.12: Στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του υδρολογικού μοντέλου

ArcSWAT.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Περίοδοι με διαθέσιμες	Στο	ατιστικά Μ	Ιέτρα	Ικανότητα Προσομοίωσης
παρατηρούμενες παροχές	NSE	RSR	PBIAS	
1991	0,49	0,58	19,2%	Ικανοποιητική
1997-1998	0,51	0,59	20%	Ικανοποιητική

## 4.8.1.4 Αποτελέσματα Ανάλυσης Ευαισθησίας

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας των συνιστωσών του υδρολογικού ισοζυγίου απέναντι στις υποθετικές μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.13 και συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2,5°C, όπως αναπαριστάται από το υποθετικό κλιματικό σενάριο 2, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση 8% και 1,4% της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, αντίστοιχα. Ως επακόλουθο, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της ποσότητας του νερού που κατεισδύει κατά 9,3%.
- Η μείωση και η αύξηση της βροχόπτωσης συνεπάγεται την αντίστοιχη μείωση και αύξηση της ποσότητας του νερού που κατεισδύει και ρέει επιφανειακά. Το ποσοστό μείωσης και αύξησης των προαναφερθέντων υδρολογικών παραμέτρων εξαρτάται από το ποσοστό μείωσης και αύξησης της βροχόπτωσης.
- Αμελητέα μείωση της εξατμισοδιαπνοής και της κατείσδυσης προκαλεί η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, όπως διαπιστώθηκε από τα αποτελέσματα του υποθετικού κλιματικού σεναρίου 11.
- Τα μεγαλύτερα ποσοστά αύξησης της εξατμισοδιαπνοής και μείωσης της κατείσδυσης και της επιφανειακής απορροής προέκυψαν με την ταυτόχρονη μεταβολή όλων των κλιματικών παραμέτρων, δηλαδή της θερμοκρασίας, της βροχόπτωσης, της ταχύτητας του ανέμου και της σχετικής υγρασίας.
- Χαρακτηριστικά, αναφέρεται το υποθετικό κλιματικό σενάριο 7, στο οποίο καταγράφηκε αύξηση κατά 59% και 13% της δυνητικής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, αντίστοιχα. Τα ποσοστά μείωσης της κατείσδυσης και της επιφανειακής απορροής ανέρχονται σε 50% και 11%, αντίστοιχα.

Πίνακας 4.1.13: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας των συνιστωσών του υδρολογικού ισοζυγίου απέναντι στις υποθετικές μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων.

Σενάριο	Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή (mm)	Εξατμισοδιαπνοή (mm)	Κατείσδυση (mm)	Επιφανειακή Απορροή (mm)
1981-2000	949	309,6	100,6	59,5
1	979	311,3	98,6	60,2
2	1024,5	314,0	96,2	60,3
3	949,0	299,1	93,9	53,2
4	949,0	289,4	86,3	47,7
5	1219,3	332,1	84,4	56,5
6	1219,3	321,9	77,6	50,3
7	1515,6	359,4	52,9	41,9
8	1143,9	350,2	54,6	61,5
9	949,0	316,9	108,7	66,9
10	900,8	321,1	106,0	66,0
11	949	308,2	101,2	59,8

## 4.1.8.5 Διερεύνηση των Επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής στο Υδρολογικό Ισοζύγιο

Από την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τα δεδομένα εισόδου (δηλαδή, τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCMs) MPI και HadGEM2) του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4 εξάγονται τα κάτωθι αποτελέσματα:

## 1. Περίοδος Αναφοράς 1981-2000

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Η εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H έχει ως αποτέλεσμα την ικανοποιητική προσέγγιση των υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης του Χαβρία κατά την περίοδο αναφοράς, σε σχέση με την εφαρμογή του ArcSWAT με κλιματικά δεδομένα εισόδου τα ERA-Interim. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή του ArcSWAT με δεδομένα εισόδου τις παραμέτρους του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_M οδήγησε στην πολύ ικανοποιητική αναπαραγωγή της διακύμανσης της μέσης ετήσιας παροχής, όπως αποδεικνύεται από τον πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης, που παρουσιάζει (r = 0,88). Ικανοποιητικά προσεγγίζεται η διακύμανση της μέσης ετήσιας παροχής και από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H, γεγονός που αποτυπώνεται στον συντελεστή συσχέτισης, ο οποίος ισούται με 0,55. Ωστόσο, οι τιμές της μέσης ετήσιας παροχής υπερεκτιμάνται (Σχήμα 4.1.7). Ο συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής υπερεκτιμάνται, ενώ η ποσότητα

του νερού, που κατεισδύει, υποεκτιμάται κατά την εφαρμογή του ArcSWAT με τα δύο κλιματικά μοντέλα. Οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στο μοντέλο I\_RegCM4\_H. Στον Πίνακα 4.1.14 παρατίθενται το υδρολογικό ισοζύγιο (σε ποσοστά) της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H, σε αντιπαραβολή με τα ERA-Interim.



Σχήμα 4.1.7: Η μέση ετήσια παροχή, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT με τα διαφορετικά κλιματικά δεδομένα για την περίοδο αναφοράς 1981-2000.

**Πίνακας 4.1.14:** Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H για την περίοδο αναφοράς 1981-2000.

Παράμετρος (%)	ERA-Interim	I_RegCM4_M	I_RegCM4_H
Εξατμισοδιαπνοή	60,0	66,0	69,0
Κατείσδυση	19,0	13,5	13,0
Επιφανειακή Απορροή	21	20,5	18,0

## 2. Μελλοντική Περίοδος 2031-2050

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_M, εκτιμάται μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης κατά 0,2%, αύξηση της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας κατά 1,4 °C και 0,7 °C, αντίστοιχα, αύξηση της ταχύτητας του ανέμου κατά 5,7% και μείωση της σχετικής υγρασίας κατά 4% κατά τη διάρκεια της εικοσαετίας 2031-2050.
- Από την άλλη πλευρά, το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_Η, για την περίοδο 2031-2050 εκτιμά αύξηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και της σχετικής υγρασίας κατά 6%, αύξηση της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας κατά 2 °C και 3,2 °C, αντίστοιχα και αμελητέα αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.

Οι επιπτώσεις στις υδρολογικές συνθήκες της λεκάνης του Χαβρία, λόγω των προαναφερθέντων μεταβολών στις κλιματικές παραμέτρους, όπως εκτιμήθηκαν από την εφαρμογή του ArcSWAT με δεδομένα τα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H για την περίοδο 2031-2050, συνοψίζονται στις ακόλουθες:

- Βάσει της συνδυασμένης εφαρμογής του ArcSWAT με το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M εκτιμάται αύξηση της μέσης ετήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής κατά 2% (Πίνακας 4.1.15). Σύμφωνα με το I\_RegCM4\_H, η μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή ελαττώνεται κατά 1%. Η μείωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής αποδίδεται στην αύξηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης που εκτιμάται από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H.
- Σχετικά με την κατείσδυση, βάσει του μοντέλου I\_RegCM4\_M, εκτιμάται μείωση κατά 11%. Μείωση της κατείσδυσης κατά 4% εκτιμάται και από το μοντέλο I\_RegCM4\_H, μολονότι της εκτιμώμενης αύξησης της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (Πίνακας 4.1.15). Όπως έγινε κατανοητό, από την ανάλυση ευαισθησίας, η μείωση της κατείσδυσης, παρά την αύξηση της βροχόπτωσης, οφείλεται στην αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η κατείσδυση κατά τους καλοκαιρινούς ισούται με 0 βάσει των εκτιμήσεων και των δύο κλιματικών μοντέλων.

Από τη συνδυασμένη εφαρμογή του ArcSWAT με το μοντέλο I\_RegCM4\_M, δεν προκύπτει αξιοσημείωτη μεταβολή στη μέση ετήσια επιφανειακή απορροή, καθώς το εκτιμώμενο ποσοστό ελάττωσης της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης είναι πολύ μικρό (0,2%) και όπως προέκυψε από την ανάλυση ευαισθησίας, μεγάλη μείωση της επιφανειακής απορροής προκαλείται στην περίπτωση που η βροχόπτωση μειώνεται σημαντικά. Αντίθετα, η εκτιμώμενη αύξηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης από το μοντέλο I\_RegCM4\_H (5,8%) επιφέρει την αύξηση κατά 1% της μέσης ετήσιας επιφανειακής απορροής (Πίνακας 4.1.15).

## 3. Μελλοντική Περίοδος 2080-2099

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Για την τελευταία εικοσαετία του 21<sup>ου</sup> αιώνα, σύμφωνα με το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M, το ποσοστό μείωσης της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης ανέρχεται σε 2,8% και της σχετικής υγρασίας σε 13,8%, ενώ η αύξηση της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας εκτιμάται σε 3,8 °C και 2,4 °C.
- Βάσει των αποτελεσμάτων του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H, η μείωση της βροχόπτωσης ανέρχεται στο 5,9% και της σχετικής υγρασίας στο 22,7%. Η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία εκτιμάται ότι θα παρουσιάσουν αύξηση κατά 4,9% και 5,9%, αντίστοιχα. Αύξηση κατά 1,3% αναμένεται να σημειώσει και η ταχύτητα του ανέμου.

Οι εκτιμώμενες αλλαγές των κλιματικών παραμέτρων αντικατοπτρίζονται στις υδρολογικές παραμέτρους ως εξής:

- Μείωση της κατείσδυσης κατά 15% και 27% εκτιμάται από την εφαρμογή του ArcSWAT με τα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H, αντίστοιχα για την τελευταία εικοσαετία του 21<sup>ου</sup> αιώνα (Πίνακας 4.1.15).
- Μικρή αύξηση της μέσης ετήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής προκύπτει από την εφαρμογή του ArcSWAT με το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M, ενώ δεν παρατηρείται αλλαγή της μέσης ετήσιας πραγματικής εξατμισοδιαπνοής βάσει του I\_RegCM4\_H.

Μη σημαντική μεταβολή της μέσης ετήσιας επιφανειακής απορροής διαπιστώνεται από την εφαρμογή του ArcSWAT με τα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

**Πίνακας 4.1.15:** Η μεταβολή των υδρολογικών παραμέτρων έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με δεδομένα εισόδου με τα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.

Μεταβολή Παραμέτρου (%)	I_RegCM4_M		I_RegCM4_H		
· · · ·	2031-2050	2080-2099	2031-2050	2080-2099	
Εξατμισοδιαπνοή	+2	+1	-1	0	
Κατείσδυση	-11	-15	-4,5	-27	
Επιφανειακή Απορροή	-0,7	-0,9	+1	-0,8	

## 4.2 Υδρογεωλογική Προσομοίωση του Παράκτιου Υδροφορέα της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Χαβρία

#### 4.2.1 Επισκόπηση MODFLOW

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ο κώδικας MODFLOW αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '80 από την Αμερικανική Υπηρεσία Γεωλογικών ερευνών (U.S.G.S.). Με τη χρήση του κώδικα MODFLOW είναι δυνατή η προσομοίωση της υπόγειας ροής σε 1, 2 και 3διαστάσεις. Πρόκειται για ένα εννοιολογικό μοντέλο (conceptual model) κατανεμημένης χωρικής διακριτικότητας (distributed) (Harbaugh and McDonald, 1996). Εφαρμόζεται για την προσομοίωση, κυρίως πορωδών-κοκκωδών υδροφόρων συστημάτων σε συνθήκες ισορροπίας (steady-state case) και μεταβαλλόμενου ισοζυγίου (transient case) και συμβάλλει στην περαιτέρω και πιο ολοκληρωμένη κατανόηση του μηχανισμού τους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνεισφέρουν στην πρόταση μέτρων και δράσεων υλοποίησης για την ολοκληρωμένη διαχείριση και αξιοποίηση των υπόγειων υδατικών συστημάτων.

Εφικτή είναι και η προσομοίωση καρστικών υδροφορέων μέσω του MODFLOW, χρησιμοποιώντας, όμως ισοδύναμες παραμέτρους (Essink, 2000; Καλλιώρας, 2007; Βουδούρης, 2013). Το MODFLOW χαρακτηρίζεται ως ένα εύχρηστος και λειτουργικός κώδικας, καθώς ενσωματώνεται σε διάφορα πακέτα λογισμικών, όπως το GMS, Visual MODFLOW, Groundwater Vistas, Processing MODFLOW και συνδέεται άμεσα με τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Γ.Σ.Π).

Ο κώδικας MODFLOW είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και στηρίζεται στην επίλυση της κύριας διαφορικής εξίσωσης, η οποία προκύπτει συναρτήσει των εξισώσεων της διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy (Harbaugh and McDonald, 1996).

Η ροή του υπόγειου νερού εκφράζεται μέσω της εξίσωσης 4.2.1 (Anderson and Woessner, 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial h}(T_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_y\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (4.2.1)$$



 $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$ ,  $T_{zz}$  = οι τιμές της μεταβιβαστικότητας κατά μήκος των χ, y και z αξόνων συντεταγμένων, οι οποίες θεωρούνται να είναι παράλληλοι προς τους κύριους άξονες της μεταβιβαστικότητας ( $L^2T^{-1}$ ).

h = το υδραυλικό φορτίο (L)

 $W=\eta$ παροχή ανά μονάδα χρόνου που προ<br/>έρχεται από εισροές ή εκροές του νερού  $(T^{\text{-1}}).$ 

Sy = η ειδική απόδοση του πορώδους μέσου

t = 0 χρόνος (T).

Ο κώδικας MODFLOW χρησιμοποιεί την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method) για την επίλυση της εξίσωσης (5.1). Θεμελιώδης αρχή των πεπερασμένων διαφορών είναι η διακριτοποίηση του συνεχούς συστήματος σε ένα πλέγμα διακριτών σημείων στο χώρο και στο χρόνο. Ως εκ τούτου, η επιφάνεια του υδροφορέα διακρίνεται σε κόμβους και η μερική διαφορική εξίσωση (5.1) αντικαθίσταται από ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, οι οποίες αναπαριστούν τις διαφορές του υδραυλικού φορτίου σε κάθε σημείο. Η επίλυση των γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων επιτυγχάνεται μέσω των επαναληπτικών μεθόδων και συγκεκριμένα είτε μέσω της ισχυράς πεπλεγμένης διαδικασίας (Strongly Implicit Procedure, S.I.P.), είτε της σταδιακής υπερχαλάρωσης των κόμβων (Slice Successive Overlation, S.O.R.) ή τέλος, της υπό προϋποθέσεις συζυγών κλίσεων (Preconditioned Conjugate Gradient, P.C.G.) και συνεπάγεται την τιμή της στάθμης σε κάθε κόμβο (Boυδούρης, 2013).

Ο κώδικας MODFLOW αποτελείται από το κεντρικό πρόγραμμα, καθώς και από ανεξάρτητα υποπρογράμματα (packages), τα οποία συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Βασικό πακέτο (Basic package, BAS)
- Block centered flow (BCF)
- Πακέτο Εμπλουτισμού (Recharge package, RCH)
- Πακέτο Γεωτρήσεων (Wells package)
- Πακέτο Υδρορευμάτων (River Package, RIV)

• Πακέτο Αποστράγγισης (Drain package)

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

• Πακέτο Εξατμισοδιαπνοής (Evapotranspiration package, ET)

• Πακέτο Ορίου γενικού φορτίου (General Head Boundary package. GHB)

• Πακέτο Σταθερού φορτίου (Constant head)

Η λεπτομερής περιγραφή του κώδικα MODFLOW, καθώς και των πακέτων που χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση παρατίθενται από τους Harbaugh & McDonald (1996) και Harbaugh et al. (2000).

Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για την εφαρμογή του MODFLOW είναι τα ακόλουθα:

• Η γεωμετρία του υδροφορέα

• Οι τιμές του υδραυλικού φορτίου, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις αρχικές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που εισάγονται είτε με τιμές υδραυλικού φορτίου,
είτε με τη μορφή ροής στα όρια του κανάβου

- Το βάθος του υδροφορέα
- Οι τιμές των υδραυλικών παραμέτρων
- Οι τιμές των παροχών των αντλήσεων

 Ο εμπλουτισμός του υδροφορέα, ο οποίος προκύπτει από τα κατακρημνίσματα, τις επιστροφές των αρδεύσεων, την εξατμισοδιαπνοή και τη λιθολογία του ερευνώμενου υδροφορέα

- Η διήθηση από τους ποταμοχειμάρρους
- Πακέτο Ελέγχου εξόδου (Output control package)

## 4.2.2 Μεθοδολογία

## 4.2.2.1 Σύνθεση Εννοιολογικού Μοντέλου

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η προσομοίωση του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία πραγματοποιήθηκε μέσω του κώδικα MOFLOW-2000 σε συνθήκες ισορροπίας (steady-state) και μεταβαλλόμενου ισοζυγίου (transient state) και αφορά τη χρονική περίοδο 2016-2017 και τις μελλοντικές

περιόδους 2031-2050 και 2080-2099. Τα στάδια προσομοίωσης του υδροφορέα περιλαμβάνουν τη σύνθεση του εννοιολογικού μοντέλου, την εισαγωγή των απαιτούμενων δεδομένων, τη ρύθμιση του μοντέλου (calibration model) σε σταθερές (steady-state case) και μεταβαλλόμενες συνθήκες (transient case) και τέλος, την εφαρμογή του μοντέλου σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

**Ε**ΩΦΡΑΣΤ(

Το εννοιολογικό μοντέλο του ερευνώμενου υδροφορέα συντίθεται βάσει των γεωλογικών, γεωμετρικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών του, καθώς επίσης και των περιοχών εμπλουτισμού και εκφόρτισης. Ο αλλουβιακός υδροφορέας, που αναπτύσσεται στην παράκτια περιοχή της λεκάνης του Χαβρία, είναι ελεύθερος και μόνο τοπικά, μεταβαίνει σε υπό πίεση. Η προσομοίωση του υδροφορέα πραγματοποιήθηκε με τις παραδοχές ότι είναι ομοιογενής και ισότροπος, καθώς και ότι η κίνηση του υπόγειου νερού λαμβάνει χώρα σε ένα στρώμα. Συνεπώς, δημιουργήθηκε ένα διδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής.

Ο αλλουβιακός υδροφορέας έχει έκταση 22 km<sup>2</sup>, όπως υπολογίστηκε στο περιβάλλον του GIS (Σχήμα 4.2.1). Λαμβάνοντας υπόψη τα διαθέσιμα λιθολογικά προφίλ των γεωτρήσεων, το μέσο πάχος του υδροφορέα εκτιμήθηκε ίσο με 60 m (Σχήμα 2.12). Από τις πιεζομετρικές και τις γεωλογικές συνθήκες, που επικρατούν στον ερευνώμενο υδροφορέα (Κεφάλαιο 2), δεν διαπιστώνεται υδραυλική επικοινωνία με τις γειτονικές λεκάνες, καθώς ο υδροφορέας περιβάλλεται από αδιαπέρατους (χαλαζίτες, ερυθρές άργιλοι και γάββρος, στο βόρειο και ανατολικό τμήμα, αντίστοιχα) και ημιπερατούς σχηματισμούς (βασική σειρά κροκαλοπαγών στο δυτικό τμήμα). Οι εκροές από τον υδροφορέα αποδίδονται στις υδρευτικές και αρδευτικές καταναλώσεις, καθώς και στην εκφόρτιση προς τον Χαβρία ποταμό στο παράκτιο τμήμα της λεκάνης. Συνεπώς, ο εμπλουτισμός του υδροφορέα επιτυγχάνεται μέσω της κατείσδυσης του κατακρημνισμάτων, της επιστροφής από τις αρδεύσεις, καθώς και της διήθησης του ποταμού Χαβρία.





## 4.2.2.2 Δεδομένα Εισαγωγής

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

#### 4.2.2.2.1 Συνθήκες ισορροπίας (Steady-state case)

Τα δεδομένα, που εισήχθησαν στο MODFLOW για την προσομοίωση του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης του Χαβρία σε συνθήκες ισορροπίας (steady-state case), περιγράφονται στη συνέχεια:

Αρχικά, αναφέρεται ότι οι μονάδες των εισαχθέντων δεδομένων που επιλέχθηκαν, είναι τα μέτρα (m) για το χώρο και η ημέρα (d) για το χρόνο. Ως προβολικό σύστημα

ορίστηκε το ΕΓΣΑ87 (Greek Grid). Ο κάναβος, που χρησιμοποιήθηκε για τη διακριτοποίησή του έχει διαστάσεις 100 m × 100 m. Η προσομοίωση του υδροφορέα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του πακέτου Block Centered Flow (BCF), βάσει του οποίου, τα δεδομένα εισάγονται στο κέντρο του κόμβου κάθε κυψελίδας και στη συγκεκριμένη θέση προκύπτουν οι προσομοιωμένες τιμές.

Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

σρας

Ο προσδιορισμός της ανώτερης επιφάνειας (Top elevation) και του πυθμένα του υδροφορέα (Bottom elevation) επιτεύχθηκε μέσω του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) της περιοχής έρευνας με χωρική ανάλυση 5 m. Η άνω επιφάνεια του υδροφορέα ορίστηκε ίση με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας, ενώ ο πυθμένας του υδροφορέα ίσος με 60 m κάτω από την ανώτερη επιφάνεια.

Υδραυλικά χαρακτηριστκά

Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας (k), που εισήχθη στο MODFLOW, πρόεκυψε από τα διαθέσιμα δεδομένα των δοκιμαστικών αντλήσεων, που έχουν πραγματοποιηθεί από την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Βεράνης κ.ά, 2010). Βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμαστικών αντλήσεων, η μέση υδραυλική αγωγιμότητα ισούται με 2 × 10<sup>-5</sup> m/sec, δηλαδή 1, 278 m/d.

Αρχικές συνθήκες

Η πιεζομετρία της υγρής περιόδου του 2016 χρησιμοποιήθηκε για την αρχική κατανομή των πιεζομετρικών φορτίων (initial heads).

Οριακές Συνθήκες

Όπως προαναφέρθηκε, δεν παρατηρούνται εισροές προς τον υδροφορέα από τις γειτονικές λεκάνες, λόγω της παρουσίας αδιαπέρατων και ημιπερατών σχηματισμών. Επομένως, το βόρειο, το ανατολικό και το δυτικό όριο του υδροφορέα, ορίστηκαν ως όρια μηδενικής ροής (no flow boundary condition). Το νότιο όριο του υδροφορέα, που ουσιαστικά αποτελεί την ακτογραμμή, καθορίστηκε ως όριο σταθερής ροής (δηλαδή, κατά μήκους του ορίου, η εισροή

διατηρείται σταθερή και η μεταβολή της στάθμης εξαρτάται από το φορτίο των γειτονικών κυψελίδων).

> Φυσικός Εμπλουτισμός

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

> Η τροοφοδοσία του υδροφορέα, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποείται μέσω της κατείσδυσης των κατακρημνισμάτων, των επιστροφών από τις αρδεύσεις και της διήθησης του ποταμού Χαβρία. Η εκτίμηση της κατείσδυσης των κατακρημνισμάτων και της διήθησης του ποταμού Χαβρία στον υδροφορέα επιτεύχθηκαν μέσω του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT (Κεφάλαιο 4.1).

> Από την εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT με κλιματικά δεδομένα εισαγωγής τα ERA-Interim της περίοδου 2016-2017 (Πίνακας 4.1.11), προέκυψε ότι η κατείσδυση ισούται με το 19% της μέσης ετήσιας ποσότητας των κατακρημνισμάτων της περιοχής έρευνας. Στην τιμή της κατείσδυσης, που εισήχθη στο MODFLOW, μέσω του πακέτου Εμπλουτισμού (Recharge package), συνεκτιμήθηκαν και οι επιστροφές των αρδεύσεων, οι οποίες αντιστοιχούν στο 15% των εκτιμώμενων αρδευτικών αναγκών (Κεφάλαιο 2). Συμπερασματικά, η κατείσδυση και οι επιστροφές των αρδεύσεων εκτιμήθηκαν σε  $3,92 \times 10^{-4}$  m/day.

Αναφορικά με τη διήθηση του ποταμού Χαβρία, βάσει των σποραδικών διαφορικών μετρήσεων, που έχουν πραγματοποιηθεί από την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΕΑΓΜΕ) (Βεράνης κ.ά, 2010), διαπιστώνεται ότι το 60% του ποταμού Χαβρία διηθείται στο βόρειο τμήμα του αλλουβιακού υδροφορέα. Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της επιφανειακής απορροής, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT, η διήθηση εκτιμήθηκε σε 2,4 × 10<sup>-4</sup> m/day.

Η διήθηση από το ποτάμι δεν συνυπολογίστηκε στην τιμή του εμπλουτισμού, αλλά εισήχθη μέσω του πακέτου Υδρορεύματα (River package, RIV). Απαραίτητα δεδομένα εισόδου του συγκεκριμένου πακέτου είναι το ύψος της στάθμης και το βάθος του πυθμένα του ποταμού, καθώς και η παράμετρος conductance (αγωγιμότητα). Οι τιμές του ύψους της στάθμης και το βάθος του πυθμένα του ποταμού προέκυψαν βάσει των υπαίθριων παρατηρήσεων. Η παράμετρος conductance (αγωγιμότητα), η οποία εκφράζει την αντίσταση στη ροή μεταξύ ποταμού και υδροφορέα, προσδιορίστηκε κατά τη ρύθμιση του μοντέλου, καθώς δεν υπάρχουν τα απαιτούμενα διαθέσιμα δεδομένα για τον άμεσο προσδιορισμό της.

Παροχή των γεωτρήσεων

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

> Το σύνολο των υδατικών αναγκών της περιοχής έρευνας, όπως εκτιμήθηκε και περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2, ανέρχεται σε  $6 \times 10^6$  m<sup>3</sup> ανά έτος και καλύπτονται αποκλειστικά από το υπόγειο νερό μέσω των υδρογεωτρήσεων. Οι υδρευτικές ανάγκες εκτιμήθηκαν ίσες με 0,5 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, συμπεριλαμβανομένων και των απωλειών του δικτύου ύδρευσης (5%) και κατανεμήθηκαν σε 4 υδρογεωτρήσεις. Οι συγκεκριμένες γεωτρήσεις αντιστοιχούν στις 4 δημοτικές γεωτρήσεις, που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών των χωριών Ορμύλιας, Βατοπεδίου και Ψακουδιών. Οι αρδευτικές και κτηνοτροφικές ανάγκες ισούνται με 5,5 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> και κατά την προσομοίωση από το MODFLOW αντιπροσωπεύονται από 98 γεωτρήσεις. Οι τιμές των αντλήσεων εισήχθησαν στο MODFLOW μέσω του πακέτου των Γεωτρήσεων (Wells package).

Σημεία παρατήρησης

Δέκα γεωτρήσεις (Σχήμα 4.2.1) με κατάλληλη χωρική κατανομή χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία παρατήρησης (observations points) με σκοπό τη σύγκριση των προσομοιωμένων πιεζομετρικών τιμών με τις αντίστοιχες πραγματικές.

Στο Σχήμα 4.2.2 παρουσιάζεται η δομή του μοντέλου. Το όριο σταθερού φορτίου απεικονίζεται με μωβ χρώμα. Η μπλε γραμμή αντιστοιχεί στο προσομοιωμένο ποτάμι του Χαβρία και τέλος οι κίτρινες κουκίδες αναπαριστούν τις γεωτρήσεις.



Σχήμα 4.2.2: Η χωρική δομή του μοντέλου

## 4.2.2.2.2 Συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου

Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ της εφαρμογής του κώδικα MODFLOW σε συνθήκες ισορροπίας και μεταβαλλόμενου ισοζυγίου, είναι η εισαγωγή των δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο. Για την εφαρμογή του MODFLOW σε μεταβαλλόμενες συνθήκες απαιτείται ο ορισμός των χρονικών περιόδων φόρτισης (stress periods) και το βήμα της κάθε περιόδου (time steps). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η προσομοίωση του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης του Χαβρία, σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου, πραγματοποιήθηκε για την περίοδο 2016-2017 με μηνιαίο βήμα.

Η προσομοίωση του υδροφορέα σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας τις οριακές και αρχικές συνθήκες, όπως ορίστηκαν κατά

την εφαρμογή του μοντέλου σε συνθήκες ισορροπίας, καθώς και τα αποτελέσματα της ρύθμισής του σχετικά με τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και της παραμέτρου conductance (αγωγιμότητα). Εν συνεχεία, αναφέρονται τα επιπρόσθετα εισαγόμενα δεδομένα και οι απαραίτητες τροποποιήσεις, που έλαβαν χώρα για την εφαρμογή του μοντέλου σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου:

Υδραυλικά χαρακτηριστικά

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Για την εφαρμογή του μοντέλου σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, εκτός από την υδραυλική αγωγιμότητα, απαιτείται η εισαγωγή της ειδικής απόδοσης (specific yield, S). Η τιμή της ειδικής απόδοσης εκτιμήθηκε ίση με 0,08 βάσει των διαθέσιμων δεδομένων των δοκιμαστικών αντλήσεων, που έχουν πραγματοποιηθεί από την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΕΑΓΜΕ) (Βεράνης, κ.ά, 2010).

> Φυσικός Εμπλουτισμός

Η μηνιαία τιμή της κατείσδυσης (Πίνακας 4.2.1) για τα έτη 2016 και 2017, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με κλιματικά δεδομένα εισόδου τα ERA-Interim, εισήχθη στο MODFLOW. Οι επιστροφές των αρδεύσεων συνυπολογίστηκαν στην τιμή της κατείσδυσης, μόνο κατά την αρδευτική περίοδο, δηλαδή από τέλη Απριλίου έως τα μέσα Οκτωβρίου.

**Πίνακας 4.2.1**: Η μηνιαία τιμή της κατείσδυσης (mm), όπως προέκυψε από την εφαρμοφή του ArcSWAT με κλιματικά δεδομένα εισόδου τα ERA-Interim και εισήχθη στο MODFLOW.

Mm	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	0	Ν	Δ
2016	18,5	14,2	39,6	0,0	13,6	0,0	2,2	0,0	0,0	4,3	3,4	5,0
2017	33,7	9,0	24,1	0,2	12,7	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	24,3	14,7

Σχετικά με τη διήθηση από το ποτάμι, η μόνη τροποποίηση αφορά στο ύψος της στάθμης του ποταμού, με τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή να δίνεται στους μήνες της υγρής και της ξηρής περιόδου, αντίστοιχα.



Οι τιμές των παροχών των γεωτρήσεων εισήχθησαν βάσει της χρονικής διάρκειας της λειτουργίας των γεωτρήσεων του ερευνώμενου υδροφορέα. Οι 4 γεωτρήσεις, που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των υρδευτικών αναγκών, λειτουργούν καθ'όλη τη διάρκεια του έτους. Οι υδρευτικές ανάγκες για τη χειμερινή περίοδο εκτιμήθηκαν ίσες με  $0,17 \times 10^6 \text{ m}^3$ , ενώ κατά τους θερινούς μήνες σε  $0,33 \times 10^6 \text{ m}^3$ , λόγω του τουρισμού.

Οι γεωτρήσεις, που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, λειτουργούν μόνο κατά την αρδευτική περίοδο. Επομένως, η τιμή 0 m<sup>3</sup>/d δόθηκε για τους μήνες από μέσα Οκτωβρίου έως μέσα Απριλίου. Οι τιμές των αντλήσεων, που εισήχθησαν για τους υπόλοιπους μήνες, δηλαδή τους αρδευτικούς μήνες αντιστοιχούν στα 5,5 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (Κεφάλαιο 2).

## 4.2.3 Εφαρμογή κώδικα MODFLOW

#### 4.2.3.1 Ρύθμιση του μοντέλου

Η ρύθμιση του μοντέλου (calibration) πραγματοποιήθηκε τόσο σε συνθήκες ισορροπίας (steady-state case) και όσο και σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου (transient case) με την παρουσία αντλήσεων. Η τεχνική του επαναληπτικού τύπου δοκιμής λάθους (trial – and – error procedure) χρησιμοποιήθηκε για τη ρύθμιση του μοντέλου. Η μεταβολή των παραμέτρων του μοντέλου επιτεύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις επικρατούσες γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας. Η ρύθμιση σε συνθήκες ισορροπίας έγινε για την υγρή περίοδο του 2016 και σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου για την ξηρή περίοδο του 2016, όπως επίσης και για την υγρή και ξηρή περίοδο του 2017 και αντιστοιχούν στις περιόδους με τα διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα (μετρήσεις, δηλαδή, που διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής).

Σκοπός της ρύθμισης του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ των παρατηρούμενων μετρήσεων και των τιμών, οι οποίες προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου. Επιπρόσθετα, η ρύθμιση του μοντέλου συμβάλλει στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του, καθώς επίσης, στην εξαγωγή χρήσιμων

συμπερασμάτων για την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων, που δομούν το MODFLOW και της πιεζομετρίας.

Η ικανότητα προσομοίωσης του MODFLOW διερευνήθηκε μέσω των διαγραμμάτων Q-Q (Q-Q plot), δηλαδή της αντιπαραβολής των προσομοιωμένων και των πραγματικών πιεζομετρικών τιμών σε σχέση με τη διαγώνιο, και των στατιστικών μέτρων και συγκεκριμένα, της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE) (4.2.2) και του μέσου απόλυτου σφάλματος (Mean Absolute Error, MAE) (4.2.3).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{obs,i} - x_{model,i})^2}{n}}$$
(4.2.2)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |x_{obs} - x_{model}|}{n}$$
(4.2.3)

Όπου:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

xods: οι πραγματικές πιεζομετρικές τιμές (m) xmodel: οι προσομοιωμένες πιεζομετρικές τιμές (m) n: το πλήθος των τιμών

#### 4.2.4 Διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο υπόγειο νερό

Η διακύμανση της στάθμης του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα επιτεύχθηκε μέσω της εισαγωγής στο MODFLOW των αποτελεσμάτων της συνδυασμένης εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT και του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, αναπτύσσοντας την παρακάτω μεθοδολογία:

- Η προσομοίωση των μελλοντικών υδρογεωλογικών συνθηκών του ερευνώμενου υδροφορέα πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου για τις περιόδους 2031-2050 και 2080-2099.
- Ο κώδικας MODFLOW εφαρμόστηκε εισάγοντας τις τιμές της κατείσδυσης (Πίνακας 4.2.2) και της διήθησης του ποταμού Χαβρία, όπως προέκυψαν από

την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με κλιματικά δεδομένα εισόδου, τα μελλοντικά δεδομένα των κλιματικών μοντέλων Ι RegCM4 M, I\_RegCM4\_H, που αφορούν στις 2031-2050 και 2089-2099. Η προσομοίωση, πραγματοποιήθηκε σε δύο επιμέρους στάδια. Αργικά, τα υδραυλικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως και το καθεστώς των αντλήσεων διατηρήθηκαν σταθερά. Κατά το δεύτερο στάδιο προσομοίωσης του υδροφορέα σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής μεταβλήθηκαν οι αντλήσεις των γεωτρήσεων, βάσει των εκτιμώμενων μελλοντικών υδατικών αναγκών. Οι μελλοντικές υδρευτικές ανάγκες εκτιμήθηκαν μέσω της αριθμητικής αύξησης (Βουδούρης, 2015), χρησιμοποιώντας τα πληθυσμιακά στοιχεία των δύο τελευταίων απογραφών (2001 και 2011, ΕΛΣΤΑΤ). Οι μελλοντικές αρδευτικές ανάγκες εκτιμήθηκαν μέσω της Penman-Monteith (FAO-56), χρησιμοποιώντας τα κλιματικά δεδομένα των μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H. Βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_M, οι μελλοντικές αρδευτικές ανάγκες εκτιμώνται ότι θα αυξηθούν κατά 7% και 25% τις περιόδους 2031-2050 και 2080-2099, αντίστοιχα. Σύμφωνα με το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H, η αύξηση εκτιμάται ίση με 30% κατά την περίοδο 2031-2050 και κατά 50% την τελευταία εικοσαετία του  $21^{00}$  αιώνα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Βάσει των αποτελεσμάτων, εκτιμήθηκε η διακύμανση της στάθμης του παράκτιου υδροφορέα έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα.

Πίνακας 4.2.	<b>2:</b> Η κατεί	σδυση (mm)	στο	ν υδ	ροφορεά,	όπως προε	έκυψ	ε από την εφ	ραρμογή του
υδρολογικού	μοντέλου	ArCSWAT	με	τα	δεδομένα	εισόδου	του	περιοχικού	κλιματικού
μοντέλου RegCM4 για την ιστορική και τις μελλοντικές περιόδους.									

		K	ατείσδυση (mn	n)		
	I RegCM4_M I_RegCM4_H					
	Μέση	Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέγιστη	Ελάχιστη
Περίοδος Αναφοράς	92,86	157,73	25,4	127,37	254,9	30,61
2031-2050	82,54	169,37	32,43	121,76	211,20	53,24
2080-2099	78,66	164,86	24,66	93,02	145,99	65,93



## 4.2.5.1 Ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες ισορροπίας

Η ρύθμιση του μοντέλου, σε συνθήκες ισορροπίας, με την τεχνική του επαναληπτικού τύπου δοκιμής λάθους (trial – and – error procedure) συνέβαλλε στην προσαρμογή μεταξύ των προσομοιωμένων και των πραγματικών τιμών της πιεζομετρίας (Πίνακας 4.2.3). Από την αντιπαραβολή του πιεζομετρικού χάρτη (Σχήμα 4.2.3), όπως προέκυψε από την εφαρμογή του MODFLOW και τις υπαίθριες σταθμημετρήσεις, διαπιστώνεται ότι η προσομοιωμένη υπόγεια ροή είναι αντίστοιχη με την πραγματική.

Η αποτελεσματική προσομοίωση των πραγματικών υδρογεωλογικών συνθηκών του υδροφορέα αποτυπώνεται και στο διάγραμμα Q-Q (Σχήμα 4.2.4), στο οποίο παρατηρείται μικρή απόκλιση των τιμών από τη διαγώνιο. Τέλος, η μικρή ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, η οποία ισούται με 0,69 και το μικρό μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) (0,57) υποδεικνύουν την αξιοπιστία της προσομοίωσης.

Γεώτρηση	Πραγματικό Πιεζομετρικό Φορτίο(m)	Προσομοιωμένο Πιεζομετρικό Φορτίο (m)	Διαφορά (m)
G1	0,93	1,61	-0,68
G5	1,49	0,84	+0,64
G14	3,00	1,56	+1,44
G27	3,54	3,98	-0,44
G62	4,11	4,50	-0,39
G82	5,51	6,44	-0,93
G84	5,76	5,39	+0,37
G45	7,26	7,35	-0,09
G32	10,08	10,10	-0,02
G85	13,78	14,52	-0,74

**Πίνακας 4.2.3:** Αποτελέσματα ρύθμισης του μοντέλου σε συνθήκες ισορροπίας για την υγρή περίοδο (Απρίλιος) του 2016.



Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

**Σχήμα 4.2.3:** Ο πιεζομετρικός χάρτης, όπως προέκυψε βάσει των πραγματικών και προσομοιωμένων πιεζομετρικών τιμών

Από τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες ισορροπίας προσδιορίστηκε η τιμή της παραμέτρου conductance (αγωγιμότητα) και διαπιστώθηκε η ευαισθησία του μοντέλου στις μεταβολές της. Οι βέλτιστες τιμές της παραμέτρου conductance (αγωγιμότητα) κυμαίνονται μεταξύ 8,8 και 3,5 (m<sup>2</sup>/day), οι οποίες ποικίλουν κατά μήκος του προσομοιωμένου υδατορέματος. Επιπρόσθετα, συμπεραίνεται ότι η δοθείσα τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, που ισούται με 2 × 10<sup>-5</sup> m/sec (1, 278 m/day), είναι

αντιπροσωπευτική των υδρογεωλογικών συνθηκών, που επικρατούν στον ερευνώμενο υδροφορέα. Στον Πίνακα 4.2.4 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας με την εισαγωγή διαφορετικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Πίνακας 4.2.4: Η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος όπως προέκυψε με βάση τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας με την εισαγωγή διαφορετικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/sec)	RMSE
$2 \times 10^{-4}$	1,00
$8 \times 10^{-4}$	6,13
10 <sup>-4</sup>	6,52
10 <sup>-3</sup>	6,69





#### 4.2.5.2 Ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου

Η πολύ καλή ικανότητα απόδοσης των πραγματικών υδρογεωλογικών συνθηκών του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης του Χαβρία παρατηρείται και κατά

την εφαρμογή του MODFLOW σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των στατιστικών μέτρων, για κάθε περίοδο φόρτισης, παρατίθενται στον Πίνακα 4.2.5. Πιο συγκεκριμένα, η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) κυμαίνεται από 0,52 έως 1,83 και του μέσου απόλυτου σφάλματος (MAE) μεταξύ 0,4 και 1,2 υποδηλώνοντας την αξιόπιστη προσομοίωση. Στον Πίνακα 4.2.6 παρουσιάζονται οι τιμές του προσομοιωμένου πιεζομετρικού φορτίου για κάθε περίοδο φόρτισης, όπως προέκυψαν από τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΔΡΔ

Πίνακας 4.2.5: Αποτελέσματα ρύθμισης του μοντέλου σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου για κάθε περίοδο φόρτισης.

Περίοδοι Φόρτισης	RMSE	MAE
Υγρή Περίοδος 2016	0,69	0,57
Ξηρή περίοδος 2016	0,52	0,49
Υγρή Περίοδος 2017	1,83	1,27
Ξηρή Περίοδος 2017	0,67	0,55

**Πίνακας 4.2.6:** Αποτελέσματα ρύθμισης του μοντέλου σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου.

	Διαφορά μεταξύ Πραγαμτικού και Προσομοιωμένου Πιεζομετρικού Φορτίου (m)				
		Περίοδοι Φόρτισης			
Γεώτρηση	Ξηρή Περίοδος 2016	Υγρή Περίοδος 2017	Ξηρή Περίοδος 2017		
G1	-0,05	+1,26	+0,41		
G5	-0,14	+0,41	+0,93		
G14	-0,67	-0,97	-0,71		
G27	+0,23	+0,67	-0,81		
G62	+0,45	+5,00	-0,37		
G82	-0,70	-0,25	+0,14		
G84	-0,04	+0,71	+0,95		
G45	+0,25	+0,20	+0,89		
G32	-0,19	+0,50	+0,30		
G85	-0,40	+1,86	+0,60		



## 4.2.6 Διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο υπόγειο νερό

Από την εισαγωγή στο MODFLOW των αποτελεσμάτων της σύζευξης του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τα δεδομένα εισόδου (I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H) του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4 προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα για τη διακύμανση της στάθμης του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης του ποταμού Χαβρία έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα:

## 1. Μελλοντική Περίοδος 2031-2050

Σύμφωνα με το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M, εκτιμάται μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης κατά 0,2%, αύξηση της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας κατά 1,4 °C και 0,7 °C, αντίστοιχα, αύξηση της ταχύτητας του ανέμου κατά 5,7% και μείωση της σχετικής υγρασίας κατά 4% κατά τη διάρκεια της εικοσαετίας 2031-2050. Οι αλλαγές στις κλιματικές παραμέτρους έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέσης ετήσιας κατά 11% και την αμελητέα μεταβολή (μείωση) της μέσης ετήσιας επιφανειακής απορροής.

Απόρροια της μείωσης της κατείσδυσης είναι η ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα έως το 2050. Από τον πιεζομετρικό χάρτη (Σχήμα 4.2.5), που συντάχθηκε βάσει των αποτελεσμάτων του MODFLOW, διαπιστώνονται οι αρνητικές τιμές της πιεζομετρίας σε όλη την έκταση του υδροφορέα, με τις τιμές να ανέρχονται στο νοτιοανατολικό τμήμα στα 20 m κάτω από το επίπεδο της μέσης στάθμης της θάλασσας. Συνεπώς, η υδραυλική κλίση εκτιμάται ότι θα αντιστραφεί.

Εν αντιθέσει, το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_Η εκτιμά αύξηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και της σχετικής υγρασίας κατά 5,9%, αύξηση της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας κατά 2 °C και 3,2 °C, αντίστοιχα και αμελητέα αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Παρά την αύξηση της βροχόπτωσης, η αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας επιφέρει τη μείωση της μέσης ετήσιας κατείσδυσης κατά 4,5%, ενώ και στην περίπτωση
του μοντέλου I\_RegCM4\_Η, η μέση ετήσια επιφανειακή απορροή επηρεάζεται αμελητέα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Εισάγοντας στο MODFLOW, τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου ArcSWAT με τα δεδομένα του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H, προκύπτουν αρνητικές τιμές πιεζομετρίας, οι οποίες κυμαίνονται από -1 m έως -3 m στο νότιο τμήμα του υδροφορέα, από -7 m έως -15 m στο ανατολικό και από 6 m έως 7 m κάτω από το επίπεδο της μέσης στάθμης της θάλασσας στο βόρειο τμήμα (Σχήμα 4.2.5).

Στο Σχήμα 4.2.6 απεικονίζεται η αντιπαραβολή της διακύμανσης του πιεζομετρικού φορτίου, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του MODFLOW με τα αποτελέσματα της εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT και των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H σε τέσσερις αντιπροσωπευτικές γεωτρήσεις του προσομοιωμένου υδροφορέα (η θέση των γεωτρήσεων παρατίθεται στο Σχήμα 4.2.1). Μεγαλύτερα βάθη της στάθμης του υπόγειου νερού εκτιμώνται από το μοντέλο I\_RegCM4\_M σε σύγκριση με το I\_RegCM4\_H. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι το πιεζομετρικό φορτίο της γεώτρησης G62 εκτιμάται το 2050, ίσο με 7,26 m κάτω από το επίπεδο της μέσης στάθμης της θάλασσας, βάσει του μοντέλου I\_RegCM4\_M, ενώ σύμφωνα με το I\_RegCM4\_H, είναι ίσο με -3,66 m.



Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

μήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

**Σχήμα 4.2.5:** Οι πιεζομετρικοί χάρτες για το έτος 2050, όπως προέκυψαν βάσει της εισαγωγής στο MODFLOW των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του ArcSWAT με δεδομένα εισόδου τα κλιματικά μοντέλα Ι RegCM4\_M και Ι RegCM4 H.





Σχήμα 4.2.6: Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου κατά τη μελλοντική περίοδο 2031-2050, βάσει της εφαρμογής του MODFLOW με τα αποτελέσματα της σύζευξης του μοντέλου ArcSWAT με τα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4.

# Μελλοντική Περίοδος 2080-2099

Βιβλιοθήκη

- Την τελευταία εικοσαετία του 21<sup>ου</sup> αιώνα, η μέση ετήσια βροχόπτωση και η σχετική υγρασία εκτιμάται ότι θα μειωθούν κατά 2,8% και 13,8%, αντίστοιχα, ενώ η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία εκτιμάται ότι θα αυξηθούν κατά 3,8 °C και 2,4 °C, αντίστοιχα, βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_M. Η σημαντική πτώση στάθμης που εκτιμάται στο τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα είναι αποτέλεσμα της μείωσης της μέσης ετήσιας κατείσδυσης κατά 15%. Η τιμή της πιεζομερίας εκτιμάται ίση με 24 m και 22 m κάτω από το επίπεδο της μέσης στάθμης της θάλασσας, στο βόρειο και δυτικό τμήμα του παράκτιου υδροφορέα, αντίστοιχα (Σχήμα 4.2.7).
- Μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης κατά 5,9% και της σχετικής υγρασίας κατά 22,7% εκτιμάται από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H. Αντίθετα, η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία εκτιμάται ότι θα αυξηθούν κατά 4,9% και 5,9%, αντίστοιχα. Η μείωση της μέσης ετήσιας βρχόπτωσης και η αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας επιφέρουν τη μείωση της μέσης ετήσιας κατείσδυσης κατά 27%. Με βάση το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H το πιεζομετρικό φορτίο εκτιμάται ότι θα κυμανθεί από 1 m έως 15 m κάτω από το επίπεδο της μέσης στάθμης της θάλασσας, στο τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα (Σχήμα 4.2.7).
- Μεγαλύτερη πτώση στάθμης του ερευνώμενου υδροφορέα εκτιμάται από το μοντέλο I\_RegCM4\_M συγκριτικά με το I\_RegCM4\_H (Σχήμα 4.2.8).
- Τέλος, στο Σχήμα 4.2.9 αποτυπώνεται η χωρική μεταβολή του πιεζομετρικού φορτίου μεταξύ των ετών 2017 και 2099. Οι μεγαλύτερες διαφορές του πιεζομετρικού φορτίου παρατηρούται στο βόρειο τμήμα του υδροφορέα τόσο βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_M όσο και βάσει του μοντέλου I\_RegCM4\_H και ανέρχονται σε 28 m και 17 m, αντίστοιχα.





**Πίνακας 4.2.7:** Οι πιεζομετρικοί χάρτες για το έτος 2099, όπως προέκυψαν βάσει της εισαγωγής στο MODFLOW των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του ArcSWAT με δεδομένα εισόδου τα κλιματικά μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H.





Σχήμα 4.2.8: Η μεταβολή του πιεζομετρικού φορτίου κατά τη μελλοντική περίοδο 2080-2099, βάσει της εφαρμογής του MODFLOW με τα αποτελέσματα της σύζευξης του μοντέλου ArcSWAT με τα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4.



**Σχήμα 4.2.9:** Η χωρική μεταβολή του πιεζομετρικού φορτίου κατά την περίοδο 2017-2099, βάσει της εφαρμογής του MODFLOW με τα αποτελέσματα της σύζευξης του μοντέλου ArcSWAT με τα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του MODFLOW σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής και μεταβολής των αντλήσεων των γεωτρήσεων βάσει των εκτιμώμενων μελλοντικών υδατικών αναγκών εμφανίζουν ένα κοινό σήμα, τη μεγάλη πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού, με αποτέλεσμα την εξάντληση του υδροφορέα (depletion). Η εμφάνιση αρνητικών πιεζομετριών θα έχει ως επακόλουθο τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα και συνεπώς, την ποιοτική υποβάθμιση του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα.

Η σημαντική ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα αποδίδεται στη μείωση της βροχόπτωσης, καθώς και στη σημαντική αύξηση θερμοκρασίας έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα, η οποία συνεπάγεται την αύξηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArCSWAT με δεδομένα εισαγωγής τα μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H και βάσει της οποίας (εξατμισοδιαπνοής), υπολογίστηκαν οι μελλοντικές αρδευτικές ανάγκες. Οι αρδευτικές ανάγκες εκτιμάται ότι θα αυξηθούν σημαντικά λόγω επιμήκυνσης της αρδευτικής περίόδου και της ζήτησης νερού.

### 4.3 Επιμέρους Συμπεράσματα

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αναπτύχθηκε μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία, που στοχεύει στην αξιόπιστη εκτίμηση των επιπτώσεων μιας πιθανής κλιματικής αλλαγής σε υδροφορείς με ελάχιστα ή και χωρίς διαθέσιμα παρατηρούμενα δεδομένα. Για την επίτευξη του στόχου, συνδυάστηκαν το υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT και το μοντέλο προσομοίωσης υπόγειας ροής GMS και συγκεκριμένα, ο κώδικας MODFLOW.

Το υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία σε ποικίλες κλιματικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, η προσομοίωση των υφιστάμενων συνθηκών της λεκάνης του Χαβρία πραγματοποιήθηκε με την εισαγωγή των ERA-Interim δεδομένων στο ArcSWAT, ως κλιματικών δεδομένων εισόδου και αφορούν στην περίοδο 1981-2000 και 2016-2017. Η εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις υδρολογικές παραμέτρους επιτεύχθηκε μέσω της συνδυασμένης εφαρμογής του ArcSWAT με το περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4, στο οποίο

ενσωματώθηκαν τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας MPI (RegCM4\_M) και HadGEM2 (RegCM4\_H). Στο μοντέλο ArcSWAT εισήχθη η βάση δεδομένων, η οποία προέκυψε από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging) στα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4 (δηλαδή τα μοντέλα RegCM4\_M και RegCM4\_H).

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΙΦΡΔΣ

Η αρχική εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT με κλιματικά δεδομένα εισόδου τα ERA-Interim και με τις προκαθορισμένες δοσμένες τιμές (default) των παραμέτρων, για την περίοδο 1981-2000, δεν απέδωσε ικανοποιητικά την προσομοίωση των υδρολογικών συνιστωσών της λεκάνης του Χαβρία. Πιο συγκεκριμένα, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή υποεκτιμήθηκε.

Η απουσία συνεχών και μεγάλης χρονοσειράς μετρήσεων της παροχής του ποταμού Χαβρία οδήγησε σε μια εναλλακτική διαδικασία ρύθμισης του μοντέλου ArcSWAT, βασιζόμενη στην πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Από την εφαρμογή της μεθοδολογίας επιτεύχθηκε η βέλτιστη προσαρμογή της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής στις τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, οι οποίες προέκυψαν βάσει των μεθόδων Penmam-Montheith (FAO-56) και Thornthwaite-Mather. Επιπρόσθετα, διαπιστώθηκε η βαρύτητα της συμβολής των παραμέτρων CANMX, ESCO (Soil Evaporation Compensation Factor), EPCO (Plant Uptake Compensation Factor) GW\_REVAP (Συντελεστής επανατροφοδότησης υπόγειου νερού) στην αποτελεσματική απόδοση των υδρολογικών συνθηκών της λεκάνης του Χαβρία. Ειδικότερα, σημειώνεται η σημαντική επίδραση της παραμέτρου CANMX στη διαμόρφωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής

Η αξιοπιστία της μεθοδολογίας, που αναπτύχθηκε, επιβεβαιώθηκε μέσω της σύγκρισης των προσομοιωμένων και των διαθέσιμων πραγματικών τιμών της παροχής, καθώς και μέσω της στατιστικής αξιολόγησης. Βάσει των αποτελεσμάτων, διαπιστώθηκε η ικανοποιητική προσομοίωση των υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης του Χαβρία για την περίοδο 1981-2000 από το υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT. Ο μέσος ετήσιος συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής εκτιμήθηκε ίσος με το 60% της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και ο συντελεστής της μέσης ετήσιας κατείσδυσης αντιστοιχεί στο 19% της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης.

Εν συνεχεία, μέσω της συνδυασμένης εφαρμογής του μοντέλου ArcSWAT με τα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, όπως προέκυψαν από τη χωροχρονική μέθοδο βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging), τα οποία ακολουθούν το ακραίο σενάριο RCP8.5, διερευνήθηκαν οι δυνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις συνιστώσες του υδρολογικού ισοζυγίου έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης του Xαβρία με τα ιστορικά δεδομένα των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας MPI (I\_RegCM4\_M) και HadGEM2 (I\_RegCM4\_H), που αφορούν στην περίοδο 1981-2000, παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις συγκριτικά με την εφαρμογή του ArcSWAT με κλιματικά δεδομένα τα ERA-Interim. Εδικότερα, η συνδυασμένη εφαρμογή του μοντέλου ArcSWAT με τα κλιματικά μοντέλα είχε ως αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και της επιφανειακής απορροής και την υποεκτίμηση της κατείσδυσης. Ωστόσο, η ενδοετήσια διακύμανση των υδρολογικών παραμέτρων αναπαρήχθηκε πολύ ικανοποιητικά από τα κλιματικά μοντέλα. Οι συγκεκριμένες διαφορές αποδίδονται στις μεγαλύτερες τιμές, που παρουσιάζουν οι κλιματικές παράμετροι των μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H σε σύγκριση με των ERA-Interim.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας των συνιστωσών του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία απέναντι σε μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων και της εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4 συμπεραίνονται τα ακόλουθα:

- Η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται την αύξηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, καθώς και της επιφανειακής απορροής και τη μείωση της κατείσδυσης.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατείσδυσης, ακόμα και στην περίπτωση που η βροχόπτωση παρουσιάζει αύξηση.

Η μείωση και η αύξηση της βροχόπτωσης επιφέρει την αντίστοιχη μείωση και
 αύξηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, της κατείσδυσης και της
 επιφανειακής απορροής.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Επομένως, συμπεραίνεται ότι, οι κλιματικές παράμετροι με τη μεγαλύτερη βαρύτητα στη διαμόρφωση του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης του Χαβρία είναι η θερμοκρασία και η βροχόπτωση. Οι μεταβολές όχι μόνο της βροχόπτωσης, αλλά και της θερμοκρασίας επιδρούν άμεσα στην ποσότητα του νερού που πραγματικά εξατμισοδιαπνέεται, κατεισδύει και ρέει επιφανειακά. Από τα ανωτέρω εκτεθέντα, διαφαίνεται η ευαισθησία των υδρολογικών συνιστωσών της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία απέναντι στην κλιματική αλλαγή.

Τον προσδιορισμό των παραμέτρων του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης του Χαβρία σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής, ακολούθησε η προσομοίωση των υδρογεωλογικών συνθηκών του παράκτιου υδροφορέα της λεκάνης σε συνθήκες ισορροπίας (steady-state case) και σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου (transient case).

Αναλυτικότερα, η προσομοίωση της υφιστάμενης υπόγειας ροής σε σταθερές και μεταβαλλόμενες συνθήκες επιτεύχθηκε μέσω της εισαγωγής στο MODFLOW των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArCSWAT με κλιματικά δεδομένα εισόδου τα ERA-Interim και τα οποία καλύπτουν το διάστημα 2016-2017. Από την εφαρμογή του MODFLOW με δεδομένα κατείσδυσης και απορροής, τα αποτελέσματα της εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τα μελλοντικά δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, δηλαδή τα μοντέλα I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H, διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη στάθμη του υπόγειου νερού για την περίοδο 2031-2050 και την τελευταία εικοσαετία του 21<sup>ω</sup> αιώνα.

Η ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες ισορροπίας και συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου οδήγησε στην αξιόπιστη προσομοίωση των υδρογεωλογικών συνθηκών του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα. Η βέλτιστη προσαρμογή μεταξύ των προσομοιωμένων και πραγματικών πιεζομετρικών τιμών διαφαίνεται τόσο στην γραφική απεικόνιση μέσω του διαγράμματος Q-Q, όσο και στην αξιολόγηση των στατιστικών μέτρων. Επιπρόσθετα, από τη ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες ισορροπίας προσδιορίστηκε η τιμή της παραμέτρου conductance (αγωγιμότητα) και διαπιστώθηκε ο καθοριστικός της ρόλος στην αποτελεσματική προσομοίωση του υδροφορέα, ενώ τέλος, επαληθεύθηκαν οι αρχικές δοθείσες τιμές των υδραυλικών παραμέτρων, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα της εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

δράς

Εν συνεχεία, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της εφαρμογής του ArcSWAT με δεδομένα εισόδου τα μελλοντικά δεδομένα των κλιματικών μοντέλων I\_RegCM4\_M και I\_RegCM4\_H, το MODFLOW εφαρμόστηκε σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ισοζυγίου έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Βάσει των αποτελεσμάτων, προκύπτει μείωση της μέσης ετήσιας κατείσδυσης και αμελητέα μεταβολή (μείωση) της μέσης ετήσιας επιφανειακής απορροής. Ειδικότερα, σύμφωνα με το μοντέλο I\_RegCM4\_M, η μείωση ισούται με 11% κατά τη διάρκεια της περιόδου 2031-2050 και ανέρχεται στο 15% στην τελευταία εικοσαετία του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο Ι\_ RegCM4\_H εκτιμά ότι η κατείσδυση θα μειωθεί κατά 4,5% στα μέσα του αιώνα, ενώ την περίοδο 2080-2099 η μείωση είναι ίση με 27%.

Η μείωση της κατείσδυσης των κατακρημνισμάτων στον παράκτιο υδροφορέα έχει ως αποτέλεσμα την πτώση των πιεζομετρικών τιμών κάτω από το επίπεδο της μέσης στάθμης της θάλασσας, σε όλη την έκτασή του, έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Όπως διαπιστώνεται από τους πιεζομετρικούς χάρτες, που συντάχθηκαν βάσει των αποτελεσμάτων του MODFLOW, τα μεγαλύτερα βάθη της στάθμης του υπόγειου νερού απαντώνται από την εφαρμογή του MODFLOW με δεδομένα εισαγωγής τα αποτελέσματα της εφαρμογής του ArcSWAT με το μοντέλο I\_RegCM4\_M. Οι εν λόγω διαφοροποιήσεις αποδίδονται στη μικρότερη τιμή της κατείσδυσης, που εκτιμάται από την εφαρμογή του I\_RegCM4\_H.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του MODFLOW με δεδομένα εισαγωγής τις τιμές της κατείσδυσης και απορροής, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4 συμπεραίνονται τα ακόλουθα:

Η μείωση της κατείσδυσης των κατακρημνισμάτων στον υδροφορέα προκαλεί την ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου νερού έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Η συνεχής πτώση στάθμης θα επιφέρει τη μείωση των αποθεμάτων του ερευνώμενου υδροφορέα.
- Η αρνητική πιεζομετρία που εκτιμάται έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα έχει ως αποτέλεσμα την αντιστροφή της υδραυλικής κλίσης και τη διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα και ως εκ τούτου, την ποιοτική υποβάθμιση του υδροφορέα. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι, η διερεύνηση του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Επομένως, συνάγεται ότι οι μεταβολές στις συνιστώσες του υδρολογικού ισοζυγίου, λόγω των αλλαγών στις κλιματικές παραμέτρους, αντικατοπτρίζονται στον παράκτιο αλλουβιακό υδροφορέα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία. Ειδικότερα, η εκτιμώμενη μείωση της κατείσδυσης του υδροφορέα, ως απόρροια της μείωσης της βροχόπτωσης και της αύξησης της θερμοκρασίας έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα, συνεπάγεται την πτώση της στάθμης του υδροφορέα πολλά μέτρα κάτω από το επίπεδο της μέσης στάθμης της θάλασσας.

# Βιβλιοθήκη ΟΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" 5. Συμπεράσματα-Συζήτηση

Ψηφιακή συλλογή

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναπτύχθηκε μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία με καινοτόμα στοιχεία για την αξιόπιστη εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε έναν παράκτιο υδροφορέα του Ελληνικού χώρου, στον οποίο τα διαθέσιμα μετεωρολογικά, υδρολογικά και υδρογεωλογικά παρατηρούμενα δεδομένα είναι ελάχιστα. Για την υλοποίηση του στόχου συνδυάστηκαν μοντέλα (κλιματικά μοντέλα, μοντέλα υδρολογίας και προσομοίωσης υπόγειας ροής), επιστημονικά εργαλεία (Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών-GIS), καθώς και στατιστικά πακέτα (πακέτο γλώσσας προγραμματισμού R).

Αναλυτικότερα, χρησιμοποιήθηκε το περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4, στο οποίο ενσωματώθηκαν τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας MPI και HadGEM2 με χωρική ανάλυση 50 × 50 km, ακολουθώντας το πιο ακραίο και απαισιόδοξο σενάριο εκπομπών RCP8.5, μια από τις πλέον πρόσφατες προσεγγίσεις για την κλιματική αλλαγή. Τα δεδομένα αφορούν στην περίοδο αναφοράς 1981-2000 και τις μελλοντικές περιόδους 2031-2050 και 2080-2099. Επιπρόσθετα, εφαρμόσθηκαν το υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT και ο κώδικας προσομοίωσης της υπόγειας ροής MODFLOW.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκε στον υδροφορέα, που αναπτύσσεται στις αλλουβιακές αποθέσεις (εναλλαγές άμμων, χαλικιών και αργίλων) του παράκτιου τμήματος της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία (στην περιοχή της Ορμύλιας Χαλκιδικής). Ο υδροφορέας έχει έκταση 22 km<sup>2</sup>, είναι ελεύθερος και μόνο κατά θέσεις μεταβαίνει σε μερικώς υπό πίεση συνθήκες. Αξιοποιείται εντατικά για την κάλυψη αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών μέσω πολυάριθμων γεωτρήσεων. Η στάθμη του υπόγειου νερού, για την περίοδο 2016-2017, κυμαίνεται μεταξύ 0,19-21,9 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων καταγράφονται και αρνητικές πιεζομετρίες.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων του υπόγειου νερού, τα οποία ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της υγρής και ξηρής περιόδου των ετών 2016 και 2017, προκύπτει ότι η πλειονότητά τους ανήκει στον αβσεστούχο οξυανθρακικό τύπο (Ca-HCO<sub>3</sub>). Τοπικά, καταγράφονται υψηλές περικτικότητες νιτρικών ιόντων, που οφείλονται σε ρύπανση αγροτικής προέλευσης. Επιπλέον, κατά

θέσεις, παρατηρούνται υψηλές περιεκτικότητες ιόντων καλίου, νατρίου και χλωρίου, τα οποία αποδίδονται στη χρήση αλάτων κατά την επεξεργασία της βρώσιμης ελιάς.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Κατά το πρώτο στάδιο της διατριβής, δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων μέσω της γλώσσας προγραμματισμού R, αποτελούμενη από κλιματικές παραμέτρους υψηλής χωροχρονικής κλίμακας. Ο σκοπός της συγκεκριμένης βάσης δεδομένων ήταν διττός. Αρχικός στόχος της ήταν η ρεαλιστική αναπαράσταση του παροντικού κλίματος και η εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος της περιοχής έρευνας. Απώτερος στόχος της βάσης δεδομένων ήταν η χρήση της, ως δεδομένο εισαγωγής στο υδρολογικό μοντέλο ArCSWAT, για την αξιόπιστη υδρολογική εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

Αρχικά, διερευνήθηκε η ικανότητα του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4 να προσομοιώνει αποτελεσματικά το παροντικό κλίμα της περιοχής έρευνας. Η αξιολόγηση επιτεύχθηκε μέσω της σύγκρισης των βροχομετρικών και θερμοκρασιακών δεδομένων των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας MPI και HadGEM2, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4 με τα αντίστοιχα ERA-Interim και αφορά την περίοδο αναφοράς 1981-2000. Εξαιτίας της έλλειψης ημερήσιων βροχομετρικών και θερμοκρασιακών δεδομένων, καθώς επίσης δεδομένων ταχύτητας ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας και σχετικής υγρασίας, χρησιμοποιήθηκαν τα ERA-Interim επανάλυσης δεδομένα, η αξιοπιστία των οποίων ελέγχθηκε.

Από την αξιολόγηση του κλιματικού μοντέλου διαπιστώθηκαν διαφοροποιήσεις μεταξύ της ετήσιας βροχόπτωσης των μοντέλων RegCM4\_M και RegCM4\_H και των ERA-Interim, ενώ η ενδοετήσια μεταβλητότητα της βροχόπτωσης, καθώς και η θερμοκρασία αναπαρήχθησαν ικανοποιητικά. Οι διαφορές στα ύψη βροχόπτωσης αποδίδονται στη σύνθετη ορεογραφία της περιοχής έρευνας, ιδιαίτερο χαρακτηριστικό και του Ελληνικού χώρου, γενικότερα, καθώς η εναλλαγή ξηράς και θάλασσας έχει ως συνέπεια την εξασθένηση του σήματος των κλιματικών μοντέλων (Tolika et al., 2006).

Στη συνέχεια, έγινε μια προσπάθεια να δημιουργηθεί μια αξιόπιστη βάση δεδομένων για την πιο λεπτομερή αναπαράσταση του παροντικού και μελλοντικού κλίματος τη περιοχής έρευνας, η οποία επιτεύχθηκε μέσω της χωροχρονικής μεθόδου

βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging). Η χωροχρονική μεθόδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα και ειδικότερα, στην περιοχή έρευνας και πραγματοποιήθηκε αναπτύσσοντας μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία διερεύνησης της κατάλληλης μορφής του βαριογράμματος και του αξιόπιστου χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας. Η αξιολόγηση έγινε μέσω της χρήσης στατιστικών μέτρων και των γραφημάτων της βέλτιστης προσαρμογής των βαριογραμμάτων των χωροχρονικών μοντέλων συμμεταβλητότητας (spatiotemporal covariance model) στο θεωρητικό χωροχρονικό βαριόγραμμα, υποδεικνύοντας το χωροχρονικό μοντέλο συμμεταβλητότητας sum-metric ως το πλέον αξιόπιστο.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

δράς

Η χωροχρονική μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής Kriging οδήγησε στη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, αποτελούμενη από κλιματικές παραμέτρους υψηλής χωροχρονικής κλίμακας. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκαν βελτιώσεις στις τιμές των κλιματικών παραμέτρων, συμβάλλοντας στην πιο λεπτομερή αναπαράσταση του παροντικού κλίματος της περιοχής έρευνας, που είχε ως αποτέλεσμα και τη βελτίωση της ικανότητας του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4 να προσομοιώνει τα κλιματικά δεδομένα. Η βελτίωση αποδίδεται στον προσδιορισμό του κατάλληλου χωροχρονικού μοντέλου συμμεταβλητότητας για την επίλυση της μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (Heuvelink et al., 2012) και κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη η διάσταση τόσο του χώρου όσο και του χρόνου.

Τα αποτελέσματα κρίθηκαν σημαντικά, καθώς συμβάλλουν στη δημιουργία χαρτών υψηλής χωρικής ανάλυσης των ημερήσιων κλιματικών παραμέτρων, χρησιμοποιώντας παγκόσμια χωροχρονικά μοντέλα. Ειδικότερα, η βροχόπτωση παρέμεινε η κλιματική παράμετρος με τις μεγαλύτερες αβεβαιότητες. Πιστεύεται, βέβαια, ότι η χωροχρονική μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην εκτίμηση της χωροχρονικής αβεβαιότητας (Spadavecchia and Williams, 2009). Ένα επιπρόσθετο σημαντικό πλεονέκτημα της χωροχρονικής μεθόδου Kriging είναι ότι αποδίδει μία χρονοσειρά δεδομένων για κάθε παράμετρο (Kilibarda et al., 2014). Αντίθετα, η χρήση των μεθόδων απλής χωρικής παρεμβολής οδηγεί στη δημιουργία ενός αρχείου για κάθε ημέρα μελέτης, στην περίπτωση δηλαδή των 10 ετών, θα έπρεπε να δημιουργηθούν τουλάχιστον 3650 αρχεία για κάθε κλιματική παράμετρο. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η ικανότητα προσομοίωσης του παροντικού κλίματος ποικίλει ανάλογα με το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας (MPI και HadGEM2), που χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου στο περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4.

Στη συνέχεια, η χωροχρονική μέθοδο βέλτιστης παρεμβολής εφαρμόστηκε στις μελλοντικές παραμέτρους των δεδομένων εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, δηλαδή στα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας MPI και HadGEM2 και δημιουργήθηκε η μελλοντική βάση κλιματικών δεδομένων υψηλής χωροχρονικής κλίμακας. Εκτιμήθηκαν οι μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων για τις μελλοντικές περιόδους 2031-2050 και 2080-2099. Αναλυτικότερα προέκυψαν οι παρακάτω εκτιμήσεις για τις δύο μελλοντικές περιόδους:

## Μελλοντική περίοδος 2031-2050:

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Αμελητέα μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης της περιοχής έρευνας κατά 0,2% εκτιμάται από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M, ενώ βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H, η μέση ετήσια βροχόπτωση εκτιμάται ότι θα αυξηθεί κατά 5,8%.
- Μικρή αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας της περιοχής έρευνας κατά 0,9°C αναμένεται από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M. Βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H, η αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας εκτιμάται σε 2,3°C.

## Μελλοντική περίοδος 2080-2099:

- Μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης της περιοχής έρευνας κατά 2,9% εκτιμάται από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M, ενώ βάσει του κλιματικού μοντέλου I\_RegCM4\_H, η μέση ετήσια βροχόπτωση εκτιμάται ότι θα ελαττωθεί κατά 5,9%.
- Αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας της περιοχής έρευνας κατά 2,3°C αναμένεται από το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_M, για το τέλος του 21ου αιώνα. Τέλος, σύμφωνα με το κλιματικό μοντέλο I\_RegCM4\_H, η αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας θα είναι σημαντική και εκτιμάται σε 4,9°C.

Τα ποσοστά μείωσης και αύξησης των κλιματικών παραμέτρων, που προέκυψαν, διαφέρουν ανάλογα με το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας, που χρησιμοποιείται ως

δεδομένο εισόδου στο περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4. Σύμφωνα με τους Jha et al. (2004), επισημαίνεται ότι η εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος με βάση τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCMs) και τα σενάρια εκπομπών, που ενσωματώνονται σε αυτά. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει την ανάγκη για τη χρήση πολλών μοντέλων με σκοπό τον εντοπισμό ενός κοινού σήματος της μεταβολής των κλιματικών παραμέτρων.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Την ολοκλήρωση της βάσης των δεδομένων, αποτελούμενη από κλιματικές παραμέτρους υψηλής χωροχρονικής κλίμακας, διαδέχθηκε η ανάπτυξη της μεθοδολογίας με σκοπό την αξιόπιστη εκτίμηση των επιπτώσεων μιας πιθανής κλιματικής αλλαγής σε υδροφορείς με ελάχιστα ή και χωρίς διαθέσιμα παρατηρούμενα δεδομένα.

Η προσομοίωση της υπόγειας ροής του παράκτιου υδροφορέα της λεκάνης απορροής του ποταμού Χαβρία σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής πραγματοποιήθηκε μέσω της εφαρμογής του κώδικα MODFLOW στο περιβάλλον του GMS. Για τον προσδιορισμό του παροντικού και του μελλοντικού εμπλουτισμού του υδροφορέα, που επιτυγχάνεται μέσω της κατείσδυσης του νερού της βροχόπτωσης, της διήθησης από τον ποταμό Χαβρία και των επιστροφών άρδευσης, χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT.

Αρχικά, το υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT εφαρμόστηκε με κλιματικά δεδομένα εισόδου, τα ERA-Interim, προσδιορίζοντας τις παροντικές τιμές των υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης απορροής του Χαβρία, δηλαδή της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, της κατείσδυσης και της επιφανειακής απορροής. Η ρύθμιση του μοντέλου, λόγω των ελάχιστων διαθέσιμων παρατηρούμενων υδρολογικών δεδομένων, πραγματοποιήθηκε μέσω μιας εναλλακτικής μεθοδολογίας, η οποία στηρίζεται στην πραγματική εξατμισοδιαπνοή συγκρινόμενη με τα αποτελέσματα των μεθόδων Penmam-Montheith (FAO-56) και Thornthwaite-Mather. Η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας επιβεβαιώθηκε μέσω της αντιπαραβολής των προσομοιωμένων και των διαθέσιμων πραγματικών τιμών της παροχής, καθώς και της στατιστικής αξιολόγησης. Από την εφαρμογή του ArcSWAT προέκυψε ότι τα ποσοστά της κατείσδυσης και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ανέρχονται σε 19% και 60% του μέσου ετήσιου ύψους βροχόπτωσης, αντίστοιχα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Εν συνεχεία, το υδρολογικό μοντέλο ArcSWAT εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων με κλιματικές παραμέτρους, τα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4, δηλαδή τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας MPI και HadGEM2, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της χωροχρονικής μεθόδου βέλτιστης παρεμβολής Kriging (spatio-temporal Kriging). Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί ότι για τη διερεύνηση των μελλοντικών υδρολογικών συνθηκών της λεκάνης του ποταμού Χαβρία, μεταβλήθηκαν όλες οι απαιτούμενες κλιματικές παράμετροι του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT και όχι μόνο η βροχόπτωση ή και η θερμοκρασία. Η βαρύτητα της μεταβολής όλων των κλιματικών παραμέτρων στην υδρολογική προσομοίωση των μελλοντικών συνθηκών της λεκάνης του Χαβρία προέκυψε, εμφανώς, από τον σχετικό έλεγχο της ανάλυσης ευαισθησίας, που πραγματοποιήθηκε.

Από τα αποτελέσματα της συνδυασμένης εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με το περιοχικό κλιματικό μοντέλο RegCM4, παρατηρήθηκε τάση μείωσης της κατείσδυσης έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα, η οποία ποικίλει ανάλογα με το μοντέλο γενικής κυκλοφορορίας (MPI και HadGEM2), τα οποία ενσωματώθηκαν στο RegCM4. Η τάση αυτή κυμαίνεται από 4,5-11% (περίοδος 2031-2050) έως 15-27% (περίοδος 2080-2099). Η διαφορετική απόκριση των υδρολογικών παραμέτρων στα εκάστοτε χρησιμοποιούμενα κλιματικά μοντέλα τονίζεται και από τους Stehr et al. (2008).

Τα συμπεράσματα, που εξάγονται από την εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4 είναι τα ακόλουθα:

- Η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται την αύξηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, καθώς και της επιφανειακής απορροής και τη μείωση της κατείσδυσης.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατείσδυσης, ακόμα και στην περίπτωση που η βροχόπτωση παρουσιάζει αύξηση.

Η μείωση και η αύξηση της βροχόπτωσης επιφέρει την αντίστοιχη μείωση και αύξηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, της κατείσδυσης και της επιφανειακής απορροής.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Τέλος, διαπιστώθηκε η βαρύτητα, που διαδραματίζει η μεταβολή της θερμοκρασίας, στις υδρολογικές παραμέτρους. Αντίστοιχο αποτέλεσμα ανακύπτει και από τους Ficklin et al. (2009). Οι συγκεκριμένοι ερευνητές ποσοτικοποίησαν, μέσω του υδρολογικού μοντέλου SWAT, την απόκριση των υδρολογικών παραμέτρων απέναντι στην αύξηση της συγκέντρωσης των εκπομπών του CO<sub>2</sub>, σε μια λεκάνη απορροής της Καλιφόρνιας, όπου λαμβάνει χώρα έντονη γεωργική δραστηριότητα. Βάσει των Ficklin et al. (2009), διαπιστώνεται η ευαισθησία της λεκάνης απορροής στην κλιματική αλλαγή, επισημαίνοντας τη σημαντική επίδραση της θερμοκρασίας στις συνιστώσες του υδρολογικού ισοζυγίου.

Στο τελικό στάδιο της διατριβής, εφαρμόστηκε ο κώδικας MODFLOW, σε περιβάλλον GMS, με σκοπό τη διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού. Ο κώδικας MODFLOW εφαρμόστηκε τόσο σε σταθερές, όσο και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες με δεδομένα εισαγωγής τα αποτελέσματα της εφαρμογής του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT με τα διάφορα κλιματικά δεδομένα, δηλαδή τα ERA-Intertim και τα δεδομένα εισόδου του περιοχικού κλιματικού μοντέλου RegCM4.

Η αξιόπιστη προσομοίωση των υδρογεωλογικών συνθηκών του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα επιτεύχθηκε μέσω της ρύθμισης του μοντέλου σε σταθερές και μεταβαλλόμενες συνθήκες. Μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας επαληθεύθηκε και η αξιοπιστία της μεθοδολογίας, που ακολουθήθηκε για τη ρύθμιση του υδρολογικού μοντέλου ArcSWAT, λόγω των ελάχιστων διαθέσιμων παρατηρούμενων υδρολογικών δεδομένων.

Από την προσομοίωση του παράκτιου αλλουβιακού υδροφορέα σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής προέκυψε η συνεχής ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου νερού έως το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα, ως επακόλουθο της μείωσης της κατείσδυσης και κατ'επέκταση της επανατροφοδοσίας του. Η πτώση αυτή υπερβαίνει τα 20 m στο τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Η ελάττωση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού και η διείσδυση του

θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα εκτιμάται ότι θα προκαλέσει την ποσοτική μείωση και ποιοτική υποβάθμιση του υδροφόρου συστήματος. Το γεγονός αυτό θα αποτελέσει τροχοπέδη για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών της περιοχής έρευνας, καθώς συνδέονται άμεσα με το υπόγειο νερό.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Ως εκ τούτου, κρίνεται απαραίτητο η λήψη μέτρων μετριασμού και προσαρμογής απέναντι στην κλιματική αλλαγή. Εν συνεχεία, προτείνονται μέτρα και δράσεις υλοποίησης, τα οποία θα συμβάλλουν στην προστασία του υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας απέναντι στην κλιματική αλλαγή:

- Συστηματική παρακολούθηση της στάθμης του υπόγειου νερού και των • ποιοτικών χαρακτηριστικών (monitoring) σε όλη την έκταση του υδροφορέα, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην παράκτια ζώνη με σκοπό τη διερεύνηση του φαινομένου της υφαλμύρισης.
- Εγκατάσταση αυτοματοποιημένων μετεωρολογικών σταθμών και σταθμηγράφων για την καταγραφή της στάθμης του ποταμού Χαβρία με σκοπό τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, αποτελούμενη από συνεχή και μεγάλης χρονοσειράς μετερωρολογικά και υδρολογικά δεδομένα.
- Αλλαγή των παλιών δικτύων ύδρευσης με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών.
- Βελτίωση της αποτελεσματικότητας της άρδευσης (irrigation efficiency) με σκοπό τη μείωση του αντλούμενου όγκου νερού για άρδευση και συνεπώς, την αύξηση των αποθεμάτων του υπόγειου νερού.
- Απαγόρευση της ανόρυξης νέων γεωτρήσεων στο παράκτιο τμήμα, ώστε να εμποδιστεί μια πιθανή διείσδυση του θαλασσινού νερού.
- Επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων για αρδευτική χρήση από τη Μονάδα Βιολογικού Καθαρισμού, η οποία λειτουργεί στην Ορμύλια Χαλκιδικής.
- Ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των πολιτών, αγροτών και κυρίως των μαθητών για την κλιματική αλλαγή και την ορθολογική χρήση του νερού.
- Τέλος, αναφέρεται ότι στη λεκάνη απορροής του ποταμού Χαβρία έχει προταθεί η κατασκευή φράγματος για την κάλυψη των υδατικών αναγακών

της ευρύτερης περιοχής. Κρίνεται, όμως απαραίτητο οι σχετικές μελέτες, οι οποίες έχουν ήδη εκπονηθεί, να επικαιροποιηθούν, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις μιας πιθανής κλιματικής αλλαγής στις υδρολογικές παραμέτρους της λεκάνης.

Βιβλιοθήκη

Η αξιοπιστία της υδρολογικής-υδρογεωλογικής προσομοίωσης σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής εξαρτάται άμεσα από τα δεδομένα εισόδου των μοντέλων και ειδικότερα, από τις εισαχθέντες κλιματικές παραμέτρους, καθώς επίσης και από τη διαδικασία ρύθμισής τους. Η ποιότητα των δεδομένων, όπως οι τυχόν διαφοροποιήσεις μεταξύ των πραγματικών βροχομετρικών τιμών και των αντίστοιχων τιμών των κλιματικών μοντέλων, μπορεί να προκαλέσει αβεβαιότητες, οι οποίες ενσωματώνονται στα υδρολογικά-υδρογεωλογικά μοντέλα. Αδιαμφισβήτητα, η ύπαρξη παρατηρούμενων μετεωρολογικών, υδρολογικών και υδρογεωλογικών δεδομένων μεγάλης χρονοσειράς συμβάλλει καθοριστικά στην επιτυχή ρύθμιση των μοντέλων, αυξάνοντας την ακρίβεια της υδρολογικής-υδρογεωλογικής προσομοίωσης και κατά συνέπεια την αξιόπιστη εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υδροφορείς.

Συνοψίζοντας, τα κύρια συμπεράσματα, τα οποία εξάγονται από την παρούσα διδακτορική διατριβή είναι τα ακόλουθα:

- Η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα της υδρολογικής-υδρογεωλογικής προσομοίωσης εξαρτώνται άμεσα από τις κλιματικές παραμέτρους.
- Η υδρολογική-υδρογεωλογική εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής απαιτεί τη χρήση πολλών περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs), στα οποία θα πρέπει να ενσωματώνονται διάφορα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCMs), ακολουθώντας διαφορετικά σενάρια εκπομπών, με σκοπό τον αξιόπιστο εντοπισμό της τάσης μείωσης ή αύξησης των κλιματικών παραμέτρων.
- Για την αξιόπιστη υδρολογική-υδρογεωλογική εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής απαιτείται η διερεύνηση της μεταβολής όλων των απαραίτητων εισαχθέντων κλιματικών παραμέτρων στο εκάστοτε υδρολογικό-υδρογεωλογικό μοντέλο.

 Το πρόβλημα της ύπαρξης ελάχιστων παρατηρούμενων δεδομένων ή ακόμα και της απουσίας τους αντιμετωπίζεται ακολουθώντας την ανάλογη μεθοδολογία, διαχειρίζοντας και αξιοποιώντας κατάλληλα τα διαθέσιμα δεδομένα.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- ✓ Η συνδυασμένη εφαρμογή των κλιματικών και των υδρογεωλογικών μοντέλων ενέχει αβεβαιότητες, οι οποίες αποδίδονται στις παραμέτρους των κλιματικών μοντέλων, καθώς επίσης και στη ρύθμιση των μοντέλων. Τα αποτελέσματα θα πρέπει να αναλύονται και να ερμηνεύονται με προσοχή, λαμβάνοντας υπόψη τις επικρατούσες κλιματικές, υδρολογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες.
- Οι εργασίες, που πραγματεύονται τη διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα υδατικά συστήματα, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται ως εργαλεία πρόγνωσης των υδρολογικών-υδρογεωλογικών παραμέτρων, αλλά ως εργαλεία εκτίμησης.

Εν κατακλείδι, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή, καθώς και τα αποτελέσματά της είναι ικανά να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο για την ολοκληρωμένη και αξιόπιστη εκτίμηση των επιπτώσεων μιας πιθανής κλιματικής αλλαγής σε υδροφορείς με ελάχιστα μετεωρολογικά, υδρολογικά και υδρογεωλογικά παρατηρούμενα δεδομένα.



Ελληνική Βιβλιογραφία

Βεράνης, Ν. κ.ά. 2010. Υδρογεωλογική Μελέτη-Υδροφόρα Συστήματα Επανομής-Μουδανιών, Κασσάνδρας, Ορμύλιας και Σιθωνίας του Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (ΥΔ10), ΙΓΜΕ, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος-Διεύθυνση Υδρογεωλογίας-Περιφερειακή Μονάδα Κεντρικής Μακεδονίας, Γ ΚΠΣ Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα

Βουδούρης, Κ. 2013. Τεχνική Υδρογεωλογία, Υπόγεια Νερά, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη

- Βουδούρης, Κ. 2015. Εκμετάλλευση και Διαχείριση Υπόγειου Νερού, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονική
- Καλλιώρας, Α. 2007. Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων σε υδροφορείς που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος της Ροδόπης. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ξάνθη, σελ. 290

Καπαγερίδης, Ι. 2006. Εισαγωγή στην Γεωστατιστική, Εκδόσεις Ιων, Αθήνα

Μουντράκης, Δ. 2010. Γεωλογία της Ελλάδας, Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη

- Λουκάς, Α. 2015. Υδρολογική Προσομοίωση και Πρόγνωση: Γεωστατιστική, Διαδυκτιακές Σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ. 1999. Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη
- Χρηστάρας Β., και Χατζηαγγέλου Μ., 2011. Απλά Βήματα στην Εδαφομηχανική, Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

AASHO, 1961. The classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. In Standard specifications for highway materials and methods for sampling and testing, 8<sup>th</sup> ed., Part 1, Specifications, Am. Assoc. State Highway Officials, 45-51 Abbaspour, K.C., Vaghefi, S.A. and Srinivasan, R. 2017. A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference, Water 2018, 10(6); doi:10.3390/w10010006

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

Allen, R.G. 1986. A Penman for all seasons, J. Irrig. and Drain Engng., ASCE, 112(4), 348-368

- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L. and Burman R.D. 1989. Operational estimates of evapotranspiration, Agron. J., 81, 650-662
- Anderson, M.D. and Woessner, W.W. 1992. Applied Ground Water Modeling: Simulation of flow and adjective transport. Academic Press, 372
- Andreu, M., Martínez-Santos, P., Pulido-Bosch, A., García-Sánchez, E. 2010. Resources Assessment of a Small Karstic Mediterranean Aquifer (South-Eastern, Spain), J. Advances in Research in Karst Media, 13, doi: 10.1007/978-3-642-12486-0
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. Journal of the American Water Resources Association, 34 (1), 73–89. doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x
- Arnold, J.G., et al., 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE, 55 (4), 1491–1508. doi:10.13031/2013.42256
- Artale, V., Calmanti, S., Carillo, A., Dell'Aquila, A., et al. 2010. An atmosphere-ocean regional climate model for the Mediterranean area: assessment of a present climate simulation. *Clim Dyn*, 35, 721–740
- Anthes, R.A., Hsie, E.Y., Kuo, Y.H. 1987. Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4). National Center for Atmospheric Research Tech Note TN-282+ STR, NCAR, Boulder, CO
- Baltas, E. and Karaliolidou, M.C. 2007. Hydrological effects of land use and climate changes in Greece, Journal of Land Use Science, northern 2(4), 225–241, doi: 10.1080=17474230701622908
- Bilas, G., Dionysiou, N., Karapetsas, N., Silleos, K., Misopolinos, N. 2016. Development of a national geodatabase (Greece) for soil surveys and land evaluation using space



- Binger, R.L., 1996. Runoff simulated from Goodwin Creek watershed using SWAT, Transaction of the American Society of Agricultural Engineering (ASAE), 19, 85-90
- Bilonick, R.A. 1988. Monthly hydrogen ion deposition maps for the northeastern U.S. from July
  1982 to September 1984. *Atmospheric Environment* 22(9), 1909–1924,
  doi:10.1016/00046981(88)90080-7
- Brassel, K.E., and Douglas, R., 1979. A Procedure to Generate Thiessen Polygons. *Geographic Analysis*, 11(3), 290-303, doi: 0016-7363/79/0779-0289\$00.!50/0
- Bretherton, C.S., McCaa, J.R., Grenier, H. 2004. A new parameterization for shallow cumulus convection and its application to marine subtropical cloud-topped boundary layers. I. Description and 1D results. *Mon Weather Rev* 132, 864–882
- Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Bouabid, R., Benaabidate L., Oueslati, O. 2017. SWAT manual calibration and parameters sensitivity analysis in a semi-arid watershed in Northwestern Morocco, *Arab J Geosci*, 10: 427, doi 10.1007/s12517-017-3220-9
- Candela, L., Wolf von Igel F, Elorza, J., Aronica, G., 2009. Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain), Journal of Hydrology 376: 510–52
- Candela, L., Tamoh, K., Olivares, O., Gomez, M. 2012. Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). Science of the Total Environment 440, 253-260. 10.1016/j.scitotenv.2012.06.062
- Collins, W.J., Bellouin, N., and Doutriaux-Boucher M, et. al 2011. Development and evaluation of an Earth-system model HadGEM2. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 4, 997–1062, doi:10.5194/gmdd-4-9972011
- Coppola, E., Giorgi, F., Mariotti, L., Bi, X. 2012. RegT-Band: a tropical band version of RegCM4. *Clim Res*, 52, 115–133

Cressie, N.A.C. 1993. Statistics for Spatial Data. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics: Applied Probability and Statistics. New York: *John Wiley & Sons, Inc* 

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΦΡΑΣ

Cressie, N.A.C., and Wikle, C.K. 2011. Statistics for Spatio-Temporal Data. Wiley, 204, 205

- Dee, P., Uppala, M.S., Simmons, A.J., et. al 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Royal Meteorological Society*, 137, 553–597
- De Cesare, L. Myers, D., and Posa, D. 2001. Estimating and modeling space-time correlation structures. *Statistics & Probability Letters*, 51(1), 9–14, doi: 10.1016/S0167-7152(00)00131-0
- De Iaco, S., Myers, D., and Posa, D. 2001. Space-time analysis using a general product-sum model. *Statistics & Probability Letters*, 52(1), 21–28, doi: 10.1016/S0167-7152(00)00200-5
- Demircan, M., Hüdaverdi Gürkan, H., Eskioğlu, O., Arabacı, H., Coşkun, M. 2017. Climate Change Projections for Turkey: Three Models and Two Scenarios, *Turkish Journal of Water Science & Management*, 1(1), 22-43
- Dickinson, R.E., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P. 1993. Bio sphere–atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model. Tech Rep, National Center for Atmospheric Research Tech Note NCAR.TN-387+STR, NCAR, Boulder, CO
- Diggle, P. and Ribeiro, P.J. 2007. Model-Based Geostatistics, Springer Series in Statistics, Springer
- Douglas-Makin, K.R., Srinivasan, R., Arnold, J.G. 2010. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 53(5), 1423-1431
- El Yaouti F., El Mandour A., Khattach D. and Kaufmann, O. 2008. Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco), Journal of Hydro-environment Research, 2, 192-209

Emam, A.R., Kappas, M., Linh, N.H.K., Renchin, T. 2017. Hydrological Modeling and Runoff Mitigation in an Ungauged Basin of Central Vietnam Using SWAT Model. Hydrology 4(16), 10.3390/hydrology4010016 hydrology

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

ΦΡΑΣ

- Emanuel, K.A. and Zivkovic-Rothman, M. 1999. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models, *J Atmos Sci* 56, 1766–1782
- Essink, H.P. 2000. Groundwater Modeling. Academic Publishing of Utrecht University, f.15
- Essou, G.R.C., Sabarly, F., Lucas-Picher, P., Brissette, F., Poulin, A. 2016. Can precipitation and temperature from meteorological reanalyses be used for hydrological modelling? J. Hydrometeorol. 17, 1929–1950
- Fadil, A., Rhinane, H, Kaoukaya, A., Kharchaf, Y, Alami Bachir, O. 2011. Hydrologic modeling of Bouregreg watershed (Morocco) Using GIS and SWAT model, J Geogr Inf Syst 3, 279–289
- Fayez, A. and Tamer, A. 2006. Modeling of groundwater flow for Mujib aquifer, Jordan, J. Earth Syst. Sci., 115(3), 289-297
- Felzer, B. and Heard, P.1999. Precipitation differences amongst GCMs used for the U.S. national assessment, *Journal of the American Water Resources Association*, 35, 1327–1339
- Ficklin, D.L., Luo, Y., Luedeling, E., Zhang, M. 2009. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 374, 16-29, doi: 10.1016/j.hydrol.2009.05.016
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE, 50 (4), 1211–1250. doi:10.13031/2013.23637
- Gassman, P.W., et al., 2014a. The SWAT literature database: overview of database structure and key SWAT literature trends. In: Proceedings of the 2014 SWAT conference, 28 July–1 August 2014 Pernambuco. Texas Water Resource Institute Technical Report no. TR-472. Available from: http://swat.tamu.edu/ conferences/2014/ [Accessed 10 March 2015]

Gassman, P.W., Sadeghi, A.M., and Srinivasan, R., 2014b. Applications of the SWAT Model, special section: overview and insights. Journal of Environmental Quality, 43, 1–8. doi:10.2134/jeq2013.11.0466

- Gething, P., Atkinson, P., Noor A, Gikandi, P., Hay, S., and Nixon, M. 2007. A local space-time kriging approach applied to a national outpatient malaria data set, *Computer Geosciences*, 33(10), 1337–1350, doi:10.1016/j.cageo.2007.05.006
- Ghazavi, R., and Ebrahimi, K. 2019. Predicting the impacts of climate change on groundwater recharge in an arid environment using modeling approach, *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 11(1), 88-99, doi:10.1108/IJCCSM-04-2017-0085
- Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, C.H., et. al 2011. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 5, 572–597, doi:10.1002/jame.20038
- Giorgi, F., Marinucci M. R, Bates G. T. 1993a. Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary layer and radiative transfer process. *Monthly Weather Review*, 121, 2794-2813
- Giorgi, F., Marinucci M. R, Bates G. T, DeCanio G. 1993b. Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Monthly Weather Review*, 121, 2814-2832.
- Giorgi, F., and Mearns, L.O. 1999. Introduction to special section: regional climate modeling revisited, Journal of Geophysical Research, 104, 6335-6352
- Giorgi, F., Francisco, R., Pal, J.S. 2003. Effects of a sub-grid scale topography and landuse scheme on surface climate and hydrology. I. Effects of temperature and water vapor disaggregation. J Hydrometeorol 4, 317–333
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., et. al 2012. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52, 7–29, doi:0.3354/cr01018

Gräler, B., Gerharz, L., and Pebesma, E. 2016. Spatio-Temporal Interpolation using gstat. *The R Journal*, 8(1), 204-218

- Green, W.H. and Ampt, G.A. 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils, Journal of Agricultural Sciences, 4:11-24
- Grell, G.A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon Weather Rev*, 121, 764–787
- Harbaugh, A.W., Banta E. R., Hill M.C. and McDonald M.G. 2000. Modflow–2000, the U.S.
  Geological Survey Modular Groundwater Model: User guide to modularization concepts and groundwater flow process. U.S. Geological Survey Open File Report, 00 92
- Harbaugh, A.W. and McDonald M. G. 1996. User's documentation for MODFLOW–96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite- difference groundwater flow model. U.S. Geological Survey Open – File Report, 96-485
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Transaction of ASAE 1(2), 96-99
- Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., Per cec Tadic, M., and Pebesma, E.J. 2012. Spatio-temporal prediction of daily temperatures using time-series of MODIS LST images. *Theor. Appl. Climatol.*, 107
- Her, Y., Frankenberger, J., Chaubey, I., and Srinivasan R. 2015. Threshold Effects in HRU definition of the Soil Assessment Water Tool. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 58(2), 367-378, doi: 10.13031/trans.58.10805
- Heuvelink, G.B.M., and Griffith, D.A. 2010. Space-time geostatistics for geography: A case study of radiation monitoring across parts of Germany. *Geog. Anal.*, 42(2), 161–179, doi:10.1111/j.1538-4632.2010.00788.x
- Heuvelink, G.B.M., Griffith, D.A., Hengl, T., and Melles, S.J. 2012. Sampling Design Optimization for Space-Time Kriging. *John Wiley*, Oxford, 207–230, doi:10.1007/s00704-011-0464-2

Hofstra, N., Haylock, M., New, M., Jones, P., and Frei, C. 2008. Comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data. J. Geophys. Res., 113, D21110, doi:10.1029/2008JD010100

Holtslag, A., de Bruijn, E, Pan, H.L. 1990. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Mon Weather Rev*, 118, 1561–1575

- Hostetler, S.W., Bates, G.T., Giorgi, F. 1993. Interactive nesting of a lake thermal model within a regional climate model for climate change studies. *J Geophys Res*, 98, 5045–5057
- Hutchinson, M.F. 1889. Calculation of hydrologically sound digital elevation models, Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney. Australia, vol 3(1):120-127
- IAEG 1981. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. Bull. IAEG, 24, 235-274
- IPCC 2007. Climate Change 2007. Synthesis Report

- IPCC 2013. Climate Change 2013. Synthesis Report
- Isaaks, E. H. and Srivastana R.M. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University, New York, 592.
- Jha, M.K., Pan, Z., Takle, E.S. 2004. Impacts of climate change on streamflow in the Upper Mississippi River Basin: A regional climate model perspective, *Journal of Geophysical Research*, Atmospheres 109, D09105, doi:10.1029/2003JD003686
- Jones, C.D., Hughes, J.K., Belloin, N., et. al. 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations, *Geosci. Model Dev.*, 4, 543–570, doi:10.5194/gmd-4-543-2011
- Journel, A.G. and Huijbregts, Ch. J. 1978. Mining geostatistics. Academic Press, London
- Kallioras, A, Pliakas, F.K. and Diamantis, J. 2010. Simulation of Groundwater Flow in a Sedimentary Aquifer System Subjected to Overexploitation, Water Air and Soil Pollution, 211(1), 177-201, doi: 10.1007/s11270-009-0291-6

Kalogeropoulos, K. and Chalkias, C. 2013. Modelling the impacts of climate change on surface runoff in small Mediterranean catchments: empirical evidence from Greece, *Water and Environment Journal*, 27, 505–513

- Kiehl, J., Hack, J., Bonan, G., Boville, B., Breigleb, B., Williamson, D., Rasch, P. 1996.
   Description of the NCAR Commun ity Climate Model (CCM3). National Center for Atmospheric Research Tech Note NCAR/TN-420+STR, NCAR, Boulder, CO
- Kilibarda, M., Hengl, T., and Heuvelink, G.B.M., et. al 2014. Spatio-temporal interpolation of daily temperatures for global land areas at1 km resolution. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, 2294-2313 doi: 10.1002/2013JD020803
- Köppen, W., 1954. Classification of climates and world patterns. G.T. Trewartha (Ed.), An Introduction to Climate. McGraw-Hill, New York, 225–226
- Kirshen, P.H. 2002. Potential impacts of global warming on groundwater in Eastern Massachusetts, Journal of Water Resources Planning and Management, 128 (3), 216-226
- Krishnan, N., Cibin, R., Chaubey, I. and Sudheer, K.P. 2018. Parameter estimation of SWAT and quantification of consequent confidence bands of model simulations, Environmental Earth Sciences, 77(470), <u>https://doi.org/10.1007/s12665-018-7619-8</u>
- Krysanova, V., Vetter, T., Eisner, S., Huang, S., Pechlivanidis, I., Strauch, M., Gelfan, A., Kumar R., Valentin Aich, V., Arheimer, B., Chamorro, A., van Griensven, A., Kund,D., Lobanova, A., Mishra, V., Plotner S., Reinhardt, J., Seidou, O., Wang, X., Wortmann, M., Zeng, X., and Hattermann, F.F. 2017. Intercomparison of regional-scale hydrological models and climate change impacts projected for 12 large river basins worldwide—a synthesis, *Environmental Research Letter*, 12, 105002, http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa8359
- Krysanova, V., and White, M. 2015. Advances in water resources assessment with SWAT-an overview, Hydrological Sciences Journal Journal des Sciences Hydrologiques, Special



- Krysanova, V. and Srinivasan, R. 2015. Assessment of climate and land use change impacts with SWAT, *Regional Environmental Change*, 15, 431–434. doi:10.1007/s10113-014-0742-5
- Kundzewicz Z.W., Krysanova, V., R.E. Benestad R.E., Hov, Ø., PiniewskiI. M., and Otto, M. 2018. Uncertainty in climate change impacts on water resources, *Environmental Science* and Policy, 79, 1-8, <u>https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.008</u>
- Lachaal, F., Mlayah, A., Bédir, M., Jamila Tarhouni, J., Leduc, C. 2012. Implementation of a 3-D groundwater flow model in a semi-arid region using MODFLOW and GIS tools: The Zéramdine–Béni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia), *Computers & Geosciences*, 48, 187–198, http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.00
- Lasinio, G.J., Sahu, S.K., and Mardia, K.V. 2007. Modeling rainfall data using a Bayesian Kriged-Kalman model. In: Upadhyay, S. K.; Singh, Umesh, Dey, Dipak K. (Ed.).Bayesian statistics and its applications. Tunbridge Wells, UK: Anshan., 61-86
- Lazoglou, G., Anagnostopoulou, C., Koundouras, S., 2018. Climate change projections for Greek viticulture as simulated by a regional climate model, *Theoretical and applied climatology*, 133(1-2), 551-567, 10.1007/s00704-017-2198-2
- Lee, S., Yeo, I.Y., Sadeghi, A.M., McCarty, G.W., Hively, W.D., Megan W. Lang, W.D. and Amir Sharifi, A. 2018. Comparative analyses of hydrological responses of two adjacent watersheds to climate variability and change using the SWAT model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 689-708, https://doi.org/10.5194/hess-22-689-2018
- Lichtenstern, A. 2013. Kriging methods in spatial statistics, Bachelor's thesis, Technische Universität München, Department of Mathematics
- Loukas, A., Mylopoulos, N., and Vasiliades, L. 2007. A Modelling System for the Evaluation of Water Resources Management Scenarios in Thessaly, Greece, Water Resources Management, 21, 1673 – 1702.

Mair, A., and Fares, A., 2011. Comparison of rainfall interpolation methods in a mountainous region of a tropical island, Journal of Hydrologic Engineering, 371-383

- Matheron, G. 1962. Traité de Geostatistique Appliquée. Memoires du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres, Tome I(14). Paris: Editions Technip (in French)
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. 2003. The history of MODFLOW, Ground –Water, 41(2), 280-283
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900
- Nakicenovic, N. and Swart, R. 2000. Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Publisher: Cambridge University Press, Cambridge, UK, ISBN: 0521800811, 570
- Nkiaka, E., Nawaz, N.R. and Lovett, J.C. 2017. Evaluating Global Reanalysis Datasets as Input for Hydrological Modelling in the Sudano-Sahel Region, *Hydrology*, 4(13), doi:10.3390/hydrology4010013
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R. 2005. Soil and water assessment toolversion 2005-Theoretical documentation, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX
- Nikitopoulou, Th., Proedrou, M., Cartalis, C. (1996). Study of Climatic Changes for the European and Greek Regions as Deduced from the Use of the ESCAPEN Climatic Model. Proceedings of International Conference Protection and Restoration of the Environment III, Chania, Crete 28-30 August, 1996.
- Nilawar, A.P. and Waikar, M.L 2018. Use of SWAT to determine the effects of climate and land use changes on streamflow and sediment concentration in the Purna River basin, India, *Environmental Earth Sciences*, 77(783), https://doi.org/10.1007/s12665-018-7975-4
- Odusanya, A.E., Mehdi, B., Schürz, C., Oke, A.O., Awokola, O.S., Awomeso, J.A., Adejuwon, J.O., Schulz, K. 2019. Multi-site calibration and validation of SWAT with satellite-based

evapotranspiration in a data-sparse catchment in southwestern Nigeria. Hydrol. Earth Syst. Sci. 23, 1113–1144. https://doi.org/10.5194/hess-23-1113-2019

- Ozturk, T., Tufan Turp, M, Türkeş, M., Kurnaz, L. 2018. Future projections of temperature and precipitation climatology for CORDEX-MENA domain using RegCM4.4, *Atmospheric Research*, 206, 87-107, https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.009
- Pal, J.S., Small, E., Eltahir, E. 2000. Simulation of regional-scale water and energy budgets: representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. J Geophys Res, 105, 29579–29594
- Pal, J.S., Giorgi, F., Elguindi, X.Bi., et. al 2007. Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1395-1409
- Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., Baltas, E., Mimikou, M. 2011. SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source area under data limitations, *Ecological Modelling*, 222, 3500-3512. 10.1016/j.ecolmodel.2011.08.008
- Panagopoulos, G. 2012. Application of MODFLOW for simulating groundwater flow in the Trifilia karst aquifer in Greece, *Environ Earth Sci*, 67, 1877-1889
- Partsinevelou A.S Using the SWAT model in analyzing hard rock hydrogeological environments: Application in Naxos Island, Greece, Bulletin of the Geological Society of Greece, 2017, doi: http://dx.doi.org/10.12681/bgsg.11960
- Pebesma, E., 2004. Multivariable Geostatistics in S: The gstat package. *Comput. Geosci.*, 30(7), 683–691, doi:10.1016/j.cageo.2004.03.012
- Pebesma, E., 2012. Spacetime: Spatio-temporal data in R. *Journal of Statistical Software*, 51(7), 1–30, doi: 10.18637/jss.v051.i07
- Pebesma, E., and Gräler, B. 2017. Introduction to Spatio-Temporal Variography. Institute for Geoinformatics University of Münster, 1-11
- Penman, H.L. 1956. Evaporation: An introductory survey, *Netherlands Journal of Agricultural* Science 4, 7-29



- Popke, D., Stevens., B., and Voigt, A, 2013. Climate and climate change in a radiativeconvective equilibrium version of ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5, 1–14, doi:10.1029/2012MS000191
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters, Mon. Wea. Rev., 100, 81-92
- R Core Team 2016. A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria., see <a href="https://www.R-project.org/">https://www.R-project.org/</a>
- Ratnam, J.V., Giorgi, F., Kaginalkar, A., Cozzini, S. 2009. Simulation of the Indian monsoon using the RegCM3-ROMS regional coupled model. *Clim Dyn*, 33,119–139
- Romanazzi, A., Gentile, F., Polemio, M. 2015. Modelling and management of a Mediterranean karstic coastal aquifer under the effects of seawater intrusion and climate change, *Environ Earth Sci*, 74, 115–128, doi:10.1007/s12665-015-4423-6
- Romanou, A., Tselioudis, G., Zerefos, C.S., Clayson, A., Curry, J.A., Andersson, A. 2010.
  Evaporation–precipitation variability over the Mediterranean and the Black Seas from satellite and reanalysis estimates, *Journal of Climate* 23(19), 5268-5287.
  10.1175/2010JCLI3525.1
- Ruti, P.M., Somot, S, Giorgi, F. et al. (2016) MED-CORDEX initiative for Mediterranean Climate studies. Bull. Amer. Meteor. Soc., 97(7), 1187-1208
- Serpa, D., Nunes, J.P., Santos, J., Sampaio, E., Jacinto, R., Veiga, S., Lima, J.C., Moreira, M., Corte-Real, J., Keizer, J.J., Abrantes, N. 2015. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion process of two contrasting Mediterranean catchments, *Science of the Total Environment*, <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.033</u>
- Scibek, J. and Allen, D.M. 2006. Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels, Water Resources Research, 42, W11405, 18p
Sibson, R. 1981. A brief description of natural neighbour interpolation, in Interpreting Multivariate Data. John Wiley and Sons, Chichester UK, 21–36

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Sidiropoulos, P., Mylopoulos, N., and Loukas, A. 2016. Reservoir-aquifer combined optimization for groundwater restoration: The case of Lake Karla watershed, Greece, Water Utility Journal 12, 17-26
- Singh, A. 2014. Groundwater resources management through the applications of simulation modeling: A review, Science of the Total Environment, 499(15), 414-423, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.048
- Snepvangers, J., Heuvelink, G., and Huisman, J. 2003. Soil water content interpolation using spatio-temporal kriging with external drift. *Geoderma*, 112(3–4), 253–271, doi: 10.1016/S0016-7061(02)00310-5
- Solmon, F., Giorgi, F., Liousse, C. 2006. Aerosol modeling for regional climate studies: application to anthropogenic particles and evaluation over a European/African domain. Tellus Ser B Chem Phys Meterol, 58, 51–72
- Sood, A., Muthuwatta, L. and & McCartney, M. 2013. A SWAT evaluation of the effect of climate change on the hydrology of the Volta River basin, *Water International*, 38(3), 297–311, <u>http://dx.doi.org/10.1080/02508060.2013.792404</u>

Soil Conservation Service, 1972. Section 4: Hydrology in National Engineering Handbook, SCS

- Spadavecchia, L., and Williams M. 2009: Can spatio-temporal geostatistical methods improve high resolution regionalization of meteorological variables? *Agric. For. Meteorol.*, 149(6), 1105–1117
- Srinivasan, R., Zhang, X., Arnold, J. 2010. SWAT ungauged hydrological budget and crop yield predictions in the Upper Mississippi River Basin. Transactions of the ASABE American Society of Agricultural and Biological Engineers (53)5, 1533-1546
- Stehr, A., Debels, P., Romero, F., Alcayaga, H. 2008. Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological Sciences*, 53(3), 588-601. 10.1623/hysj.53.3.588

Steiner, A.L., Pal, J.S., Rauscher, S.A., Bell, J.L. et al. 2009. Land surface coupling in regional climate simulations of the West Africa monsoon. *Clim Dyn*, 33, 869–892

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Stigter, J., Nunes, P., Pisani, B., Fakir, Y., Hugman, R.,Li, Y., Tome, S., Ribeiro, L., Samper, J., Oliveira, R., Monteiro, J.P., Silva, A., Tavares, P.C.F., Shapouri, M., Cancela da Fonseca, L., El Himer, H., 2012. Comparative assessment of climate change and its impacts on three coastal aquifers in the Mediterranean, *Reg Environ Change* (2014) 14 (Suppl 1):S41–S56, doi:10.1007/s10113-012-0377-3
- Taylor, K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, Journal of Geophysical Research, 106(D7), 7183–7192
- Theodosiou, N. 2016. Assessing the Impacts of Climate Change on the Sustainability of Groundwater Aquifers. Application in Moudania Aquifer in N. Greece, Environmental Processes, 3(4), 1045-1061
- Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R. 1955. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, (Publications in Climatology, vol.VIII, n.1), 104
- Tiedtke, M. 1989. A comprehensive mass-flux scheme for cumulus parameterization in largescale models. *Mon Weather Rev*, 117, 1779–1800
- Tizro, T., Fryar, A.E., Pour, M.K, K.S. Voudouris, K.S., Mashhadian, M.J. 2019. Groundwater conditions related to climate change in the semi-arid area of western Iran A. *Groundwater* for Sustainable Development, 9, <u>https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100273</u>
- Tolika, K., Maheras, P., Flocas, H.A., Arseni-Papadimitriou, A. 2006. An evaluation of a general circulation model (GCM) and the NCEP-NCAR reanalysis data of winter precipitation in Greece, *International Journal of Climatology*, 26(7), 935-955, <a href="https://doi.org/10.1002/joc.1290">https://doi.org/10.1002/joc.1290</a>

Tuppad P, Douglas-Mankin, K.R., Srinivasan, R., Arnold, J.G. 2011. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic/water quality model: Extended capability and wider adoption, *Trans ASABE*, 54, 1677–1684

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- USAE, 1953. The United Soil Classification System (USC), U.S. Army Eng. Wa-terw. Exp. Stn., Tech. Memo, 3-357, 1, 30
- Van Vuuren, D.P., Emonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic N, Smith SJ, Rose SK 2001. The representative concentration pathways: An Overview, Climatic Change 109:5-31, 10.1007/s10584-011-0148-z
- Varanou E., Gkouvatsou, E., Baltas, E. and Mimikou, M. 2007. Quantity and Quality Integrated Management Modeling under Climate Change with use of the Soil and Water Assessment Tool, *Journal Hydrol. Eng.* 7(3), 228-244
- Venetsanou, P., Kazakis N., Anagnostopoulou C., and Voudouris, K. 2016. Impacts of Rainfall changes on groundwater balance of a coastal aquifer: A case study of Thermaikos Gulf, North Greece, Global Nest: The International Journal, 18, 185-196
- Venetsanou, P., Anagnostopoulou, C., Loukas, A., Voudouris, K. 2018. Analysis of climate future projections using spatio-temporal Kriging method, 14° Διεθνές Συνέδριο Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικής Φυσικής, Αλεξανδρούπολη
- Venetsanou, P., Anagnostopoulou C., Loukas, A., Lazoglou G., Voudouris, K. 2019. Minimizing the uncertainties of RCMs climate data by using spatio-temporal geostatistical modeling, *Earth Science Informatics*, 12, 183–196 <u>https://doi.org/10.1007/s12145-018-0361-7</u>
- Wackernagel, H. 2003. Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications (3rd ed.). Berlin, Heidelberg: Springer
- Webster, R. and Oliver, M.A. 2007. Geostatistics for Environmental Scientists, 2<sup>nd</sup> Edition, Willey
- Wilby, R. and T.M.L. Wigley, T.M.L. 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations, *Progress in Physical Geography*, 21, 530–548

Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M. and Arnold, J. 2007. Arc-SWAT interface for SWAT2005 user's guide, Texas Agricultural Experiment Station and United States Department of Agriculture, Temple, TX

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη

- Woldeamlak, S. T., Batelaan, O. and De Smedt, F. 2007. Effects of climate change on the groundwater system in the Grote-Nete catchment, Belgium, Hydrogeology Journal, 15(5), 891-901
- Wong, K.W, P Wong P.M., T. D. Gedeon T.D., Fung C.C. 2003. Rainfall prediction model using soft computing technique. Soft Computing, 7(6):434–438
- Yang, X., Xie, X., Liu Ji, F., and Wang, L. 2015. Spatial Interpolation of Daily Rainfall Data for Local Climate Impact Assessment over Greater Sydney Region. Hindawi Publishing *Corporation Advances in Meteorology*, 1-12. doi.org/10.1155/2015/563629
- Zakey, A.S., Solmon, F., Giorgi, F. 2006. Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model. *Atmos Chem Phys*, 6, 4687–4704
- Zakey, A.S., Giorgi, F., Bi, X. 2008. Modeling of sea salt in a regional climate model: fluxes and radiative forcing. *J Geophys Res*, 113, D14221, doi:10.1029/2007JD009209
- Zeng, X., Zhao, M., Dickinson, R.E. 1998. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data. J Clim, 11, 2628–2644
- Zimmerman, D, Pavlik, C., Ruggles, A., and Armstrong, M.P. 1999. An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting. *Mathematical Geology*, 31(4), 375-390



Παράρτημα 1: Αποτελέσματα κοκκομετρικών αναλύσεων και ανάλυσης ιλύος

<u>Δείγμα 1:</u> **X:**459065.8 **Y**: 4456171



Δείγμα 2:

**X**: 459155.8

**Y**: 4455517



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ΓΛ1	16	54	29	1
ΓΛ2	16	44	40	0



#### **X**: 439771.0 **Y**: 4454567



### Δείγμα 4:

X: 461668.9

#### Y: 4455486



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ΓΛ3	16	49	34	1
ΓΛ5	29	41	28	3





### Δείγμα 6:





Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ΓΛ7	22		48	30
ГЛ9	9		71	20





### <u>Δείγμα 8:</u> X: 462476.3 Y: 4459961



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ΓΛ10	5	45	40	10
ΓΛ11	3	42	55	0





### Δείγμα 10:

X: 461982.4

Y: 4459495



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ΓΛ12	0	50	50	ΓΛ12
ГЛ13	2	18	62	18





### Δείγμα 12:

#### X: 461689.7

#### Y: 4459598



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ΓΛ14	0	29	71	0
ГЛ15	8	70	22	ΓΛ15





#### Δείγμα 14:

X: 461141.1 Y: 4459527



Αριθμός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ГЛ16	10		68	22
ΓΛ17	8		43	34





### Δείγμα 16:

X: 460686.5 Y: 4457652



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ΓΛ18	5	45	48	2
ГЛ19	2	53	35	10





### <u>Δείγμα 17:</u>

X: 461088.4 Y: 4458375



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ΓΛ20	5	45	50	0
ΓΛ21	8	52	38	2



Y: 4457282.47



### <u>Δείγμα 19:</u>

X: 458675.49 Y: 4457109.18



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ΓΛ22	10	38	40	12
ГЛ23	28	50	22	0





### <u>Δείγμα 21:</u>

X: 460912.7 Y: 4459204



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ΓΛ24	5		67	28
	30	68	2	0





### Δείγμα 23:

X: 462239.2 Y: 4459570



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ΓΛ26	5	25	38	32
ΓΛ27	9	89	2	ΓΛ27





### Δείγμα 25:

X:460424.6 Y: 4460424



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια	
ГЛ28	5	45	45	5	
ГЛ29	5	75	20	ΓΛ29	





### <u>Δείγμα 27:</u>

X: 458017.1 Y: 4456449



Κωδικός δείγματος	Άργιλος	Ιλύς	Άμμος	Χαλίκια
ГЛ30	5	80	15	0
ГЛ31	5	85	10	ΓΛ31



### Παράρτημα 2: Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων δειγμάτων υπόγειου νερού

	Περιεκτικότητα Ιόντων (mg/l)										
Δείγμα	Х	Y	Cl	NO <sub>3</sub> -	<b>SO</b> <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> -	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	$\mathbf{K}^{+}$	$Na^+$	
1	462036	4458383	49,00	28,75	60,00	250,00	90,40	17,73	2,61	36,70	
2	462575	4459411	57,17	2,35	21,00	419,00	106,40	7,33	3,81	72,40	
3	461999	4459558	19,30	9,65	46,00	220,00	78,00	9,00	2,41	24,13	
4	461181	4455755	263,40	43,71	121,33	320,00	128,00	70,00	3,81	138,27	
5	462174	4459553	85,00	12,32	243,33	323,00	182,80	22,22	2,01	64,36	
6	459145	4457323	115,15	56,17	74,67	360,00	90,00	69,00	1,40	58,00	
7	462018	4458183	21,97	2,64	30,67	160,00	55,00	7,00	2,41	20,21	
8	459375	4457170	124,00	58,00	69,00	362,00	85,00	65,00	1,20	58,00	
9	458395	4455888	760,00	24,20	91,67	430,00	113,00	150,00	9,43	357,04	
10	462464	4459019	38,73	4,99	48,00	250,00	88,00	13,80	2,11	28,16	
11	461413	4457104	35,46	10,27	39,00	224,00	85,20	9,03	1,40	22,93	

### Υγρή Περίοδος 2016:



### Ξηρή Περίοδος 2016:

		Περιεκτικότητα Ιόντων (mg/l)										
Δείγμα	Х	Y	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> -	<b>SO</b> <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> -	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	$\mathbf{K}^{+}$	$Na^+$		
1	462036	4458383	44,00	17,90	65,00	233	92,00	20,00	2,40	25,00		
2	462575	4459411	94,65	4,84	22,00	402	105,20	21,24	3,5	73,90		
3	461181	4455755	139,00	56,03	178,50	311	138,00	42,00	2,8	101,00		
4	459375	4457170	100,90	14,00	18,00	366	47,00	70,00	1,1	50,00		
5	461413	4457104	25,46	12.76	42,00	212	83,00	6,60	1,35	24,80		
6	460303	4456174	24,46	16,00	40,33	214	81,00	6,00	1,43	28,70		
7	462458	4455828	29,35	39,00	263,65	345	174,50	21,50	2,00	75,70		
8	462138	4459607	27,66	8,20	37,00	200	69,00	9,90	2,30	24,15		
9	460671	4457419	1553	65,27	400,00	507	479,00	230,00	9,90	570,00		
10	459309	4455602	29,06	22,88	36,00	280	23,00	17,00	4,30	102,00		
11	459691	4456047	80,00	9,97	258,00	311	170,00	28,00	6,70	68,98		



<u>Υγρή Περίοδος 2017</u>

	Περιεκτικότητα Ιόντων (mg/l)									
Δείγμα	Х	Y	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> -	<b>SO</b> <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> -	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	$\mathbf{K}^+$	Na <sup>+</sup>
1	462036	4458382	66,00	16,43	18,00	390,00	94,40	89,00	3,50	73,52
2	462575	4459410	66,10	32,85	60,33	214,00	86,40	13,43	2,40	42,72
3	460303	4456173	31,60	23,03	35,00	192,00	74,00	10,26	1,50	25,83
4	459751	4455479	100,00	24,93	140,00	320,00	108,00	35,00	5,80	100,00
5	461020	4457239	34,67	22,15	126,00	236,00	106,40	14,16	2,40	43,71
6	461022	4457701	32,50	31,53	51,00	166,00	60,00	15,00	1,80	25,83
7	460917	4458418	152,00	83,31	158,33	390,00	128,00	30,00	5,30	179,00
8	461972	4459824	13,20	26,69	50,67	220,00	70,00	14,00	2,40	30,80
9	461181	4455754	107,00	48,69	140,00	270,00	98,00	49,00	3,30	81,47
10	459058	4456159	440,00	16,13	586,67	660,00	140,00	180,00	5,50	447,08
11	459309	4455601	81,33	35,64	35,33	280,00	23,00	17,00	4,90	109,29
12	459691	4456047	77,67	28,60	306,67	197,00	141,20	6,35	6,20	93,39
13	460671	4457418	1083,00	36,96	136,67	227,00	372,00	107,44	5,40	193,73
14	461413	4457104	41,90	27,28	39,00	203,00	80,40	9,28	2,10	75,51
15	462138	4459607	79,00	29,92	41,00	160,00	66,40	12,94	2,40	25,33



## Ξηρή Περίοδος 2017

	Περιεκτικότητα Ιόντων (mg/l)									
Δείγμα	Х	Y	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> -	<b>SO</b> <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> -	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	$\mathbf{K}^{+}$	Na <sup>+</sup>
1	462036	4458382	40,2	17,75	63,67	240	89	9,00	2,40	45,0
2	462575	4459410	44,00	31,24	26,00	430	99	29,00	3,40	67,1
3	461181	4455754	67,30	36,23	129,30	295	108	30,00	2,70	63,6
4	459691	4456047	67,67	22,14	231,67	320	150	13,43	5,70	66,6
5	459145	4457323	53,00	83,00	68,00	410	70	79,00	1,50	60,0
6	461413	4457104	31,30	29,63	51,00	219	81,6	8,30	1,40	25,8
7	461972	4459824	37,00	31,39	53,00	220	80	10,00	2,30	25,3
8	459751	4455479	33,00	76,00	115,00	340	120	19,00	2,60	70,0
9	444910	4455666	540,0	35,00	640,00	750	168	200	3,30	570
10	459085	4455577	1400	22,29	180,00	690	180	105	12,2	675
11	462138	4459607	28,8	27,28	49,00	195	63,2	16,36	2,30	24,8