



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική εργασία

Ανάλυση επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία της λεκάνης του ποταμού Γιοφύρου



Σκιτζής Αναστάσιος

Εξεταστική επιτροπή:

Τσάνης Ιωάννης (Επιβλέπων)

Λαζαρίδης Μιχαήλ

Κουτρούλης Αριστείδης



WATER
RESOURCES
MANAGEMENT
&
COASTAL
ENG LAB

Χανιά 2013

There are two secrets to success:

1. Never tell everything you know

~Steven Shelton

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ι. Τσάνη για τις πολύτιμες γνώσεις του και την αμέριστη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνάς μου. Παράλληλα, τον κ. Α. Κουτρούλη για την σημαντική του καθοδήγηση και τις συμβουλές του σε αυτήν την προσπάθεια, καθώς και τον καθηγητή κ. Μ. Λαζαρίδη, μέλος της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το ερευνητικό προσωπικό του εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής για τη βοήθεια και τα συνεργασία που είχα μαζί τους· και τις πιο θερμές μου ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Μ. Γρυλλάκη για τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας.

Τέλος, θέλω να αφιερώσω την συγκεκριμένη εργασία στην οικογένειά μου, που με στηρίζει σε κάθε μου βήμα.

Χανιά, Νοέμβριος 2013

Αναστάσιος Σκιτζής

Περίληψη

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία της λεκάνης του ποταμού Γιοφύρου. Για την επίτευξη του στόχου, πραγματοποιήθηκε η υδρολογική προσομοίωση της βροχόπτωσης – απορροής μέσω του υδρολογικού μοντέλου HBV/IHMS.

Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και απορροής 12 ετών, και στη συνέχεια, επαληθεύτηκε με επιπλέον δεδομένα 11 ετών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χαρακτηρίστηκαν ικανοποιητικά, με μικρό σφάλμα βαθμονόμησης σε όρους συντελεστή Nash – Sutcliffe και διαφοράς όγκου απορροής, καθώς έγινε σύγκριση και οπτικά από το υδρογράφημα απορροής.

Έπειτα, για την προσομοίωση των μελλοντικών περιόδων, χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια δεδομένα από 7 περιοχικά κλιματικά μοντέλα του προγράμματος ENSEMBLES, τα οποία δρουν υπό το A1B σενάριο του IPCC. Τα δεδομένα από τα RCMs, παρουσιάζοντας συστηματική απόκλιση από τις παρατηρούμενες τιμές, θεωρήθηκε αναγκαία η διόρθωση και η προσαρμογή των στατιστικών παραμέτρων τους σε αυτά των τιμών παρατήρησης, έτσι ακολούθησε διόρθωση του σφάλματος μεροληψίας για κάθε περίοδο μελέτης.

Συμπερασματικά, από την εκτίμηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, προκύπτει ότι λόγω κλιματικής αλλαγής, τα επόμενα χρόνια, θα υπάρξει σημαντική αύξηση στη μέση ημερήσια θερμοκρασία, ενώ αντίθετα, θα σημειωθεί κλιμακωτή μείωση στην βροχόπτωση και την απορροή στην περιοχή της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Γιοφύρου.

Abstract

The aim of this thesis is to analyze the climate change impact on hydrology of Giofiros river basin. This objective was achieved through hydrological simulation of the conceptual hydrological model HBV/IHMS.

The model was calibrated with daily rainfall, temperature and runoff data of 12 years, and then verified with additional data of 11 years. Model calibration results are characterized satisfactory, achieving good results in terms Nash – Sutcliffe, error in total discharge volume and visual comparison between the observed and the model derived hydrographs.

Projections from seven ENSEMBLES RCMs under A1B emission scenario were considered. Results show that RCM model data present systematic errors and deviations from the observed values, resulting to the need for bias adjustment of the statistical properties of the GCMS, in order to meet those of the observed data.

The analysis results indicate that climate change, will pose significant increase in mean daily temperature, while there will be a gradual decrease in rainfall and runoff at Giofiros river basin.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract.....	5
Πίνακας περιεχομένων.....	6
1 Εισαγωγή.....	12
1.1 Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στο καθεστώς της πλημμυρικής επικινδυνότητας.....	12
1.2 Πλημμύρες στη Μεσόγειο και στον Ελληνικό χώρο	16
1.1 Κλιματική αλλαγή και πλημμύρες	18
1.2 Κλιματικά μοντέλα προσομοίωσης της κλιματικής αλλαγής	19
1.5 Σενάρια κλιματικής αλλαγής.....	22
2 Μεθοδολογία.....	25
2.1 Υδρολογικό ισοζύγιο	25
2.2.1 Μέθοδος των Αντιστρόφων Σταθμισμένων Αποστάσεων (Inverse Distance Weighted – IDW).....	28
2.2 Μέθοδος Blaney – Criddle	29
2.3 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας (Bias correction)	30
2.3.1 Διόρθωση σφάλματος στα δεδομένα βροχόπτωσης	30
2.3.2 Διόρθωση σφάλματος στα δεδομένα θερμοκρασίας	31
2.4 Το υδρολογικό μοντέλο HBV/IHMS.....	31

2.4.1	Περιγραφή του μοντέλου	31
2.4.2	Βαθμονόμηση.....	34
2.4.3	Εκτίμηση αποτελεσμάτων	34
2.4.4	Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων	36
2.5	Το λογισμικό Hydrognomon.....	36
2.5.1	Στατιστική ανάλυση χρονοσειρών	38
2.5.2	Πυθία - Στατιστική επεξεργασία χρονοσειρών.....	39
3	Περιοχή Μελέτης.....	41
3.1	Υδρολογική λεκάνη Γιοφύρου	41
3.1.1	Γεωλογική – Υδρογεωλογική επισκόπηση.....	41
3.1.2	Κλιματολογικές συνθήκες	43
3.2	Εφαρμογή του μοντέλου HBV/IHMS στη λεκάνη του Γιοφύρου	44
3.2.1	Δεδομένα εισόδου	44
3.2.2	Βαθμονόμηση του μοντέλου (Calibration)	45
3.2.3	Επαλήθευση του μοντέλου (Validation).....	45
3.3	Κλιματικά μοντέλα προσομοίωσης.....	46
4	Αποτελέσματα.....	47
4.1	Βαθμονόμηση – Επαλήθευση του μοντέλου	47
4.2	Αλλαγή στη βροχόπτωση	48
4.2.1	Αλλαγή στις ακραίες τιμές βροχόπτωσης.....	50

4.3	Αλλαγή στη θερμοκρασία.....	53
4.3.1	Αλλαγή στις ακραίες τιμές θερμοκρασίας	55
4.4	Αλλαγή στην απορροή.....	57
4.4.1	Αλλαγή στις ακραίες τιμές απορροής	59
4.5	Σύγκριση ακραίων τιμών βροχόπτωσης – απορροής.....	62
5	Συμπεράσματα και προτάσεις.....	66
5.1	Συμπεράσματα	66
5.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	67
	Βιβλιογραφία.....	69

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. Ταξινόμηση τύπων πλημμυρών σε σχέση με τα συμβατικά αίτια και τις επιπτώσεις τους (Martini και Loat 2007).	14
Πίνακας 2. Σενάρια κλιματικής αλλαγής (Nakicenovic, N. et al 2000)	24
Πίνακας 3. Kolmogorov-Smirnov test στα δεδομένα βροχόπτωσης για την περίοδο 2025-2050.	39
Πίνακας 4. Κλιματικά μοντέλα προσομοίωσης.	46
Πίνακας 5. Αποτελέσματα Βαθμονόμησης – Επαλήθευσης του μοντέλου.	47
Πίνακας 6. Παρουσίαση αναλυτικών αποτελεσμάτων των κλιματικών μοντέλων ανά εκατοστημόρια.	55
Πίνακας 7. Μέσες τιμές εδαφικής υγρασίας και εξατμισοδιαπνοής για κάθε περίοδο μελέτης (Υπολογισμένες τιμές από το μοντέλο HBV/IHMS και μέσω της εξίσωσης Blaney Criddle).	64

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. Παράγοντες που σχετίζονται με το φαινόμενο των πλημμυρών (Smith και Ward 1998, τροποποιημένο).....	15
Εικόνα 2. Απεικόνιση υδρολογικού ισοζυγίου (Πηγή: ministry of Natural Resources, Ontario).....	26
Εικόνα 3. Σχηματική παρουσίαση του μοντέλου HBV για μια υπολεκάνη.....	33
Εικόνα 4. Υδρολογική λεκάνη Γιοφύρου.....	42
Εικόνα 5. Υδρογράφημα απορροής παρατήρησης και προσομοίωσης για το έτος 1991.....	48
Εικόνα 6. Μέση ετήσια βροχόπτωση για την λεκάνη του Γιοφύρου όπως προκύπτει από το μέσο όρο των RCMs (γαλάζια γραμμή). Το εύρος των τιμών μεταξύ των διάφορων μοντέλων δίνεται από τις γκρι γραμμές, ενώ παρουσιάζεται και η τάση ανά 25ετία.....	49
Εικόνα 7. Αλλαγή στην εποχικότητα για την βροχόπτωση.....	50
Εικόνα 8. Σύγκριση των δεδομένων παρατηρημένης βροχόπτωσης (αριστερά) με των υπολογισμένων τιμών από τα κλιματικά μοντέλα (δεξιά) για την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης (Annual Exceedance Probability, AEP).....	51
Εικόνα 9. Σύγκριση ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης των ακραίων τιμών βροχόπτωσης ανά περίοδο μελέτης.....	52
Εικόνα 10. Μέση ετήσια θερμοκρασία όπως προκύπτει από το μέσο όρο των RCMs (καφέ γραμμή). Το εύρος των τιμών μεταξύ των διάφορων μοντέλων δίνεται από τις γκρι γραμμές, ενώ παρουσιάζεται και η τάση ανά 25ετία.....	54
Εικόνα 11. Αλλαγή στην εποχικότητα για την θερμοκρασία.....	54

Εικόνα 12. Σχηματική παρουσίαση των αναλυτικών αποτελεσμάτων των κλιματικών μοντέλων ανά εκατοστημόριο.	56
Εικόνα 13. Μέση ετήσια απορροή για την λεκάνη του Γιοφύρου όπως προκύπτει από το μέσο όρο των RCMS (τιρκουάζ γραμμή). Το εύρος των τιμών μεταξύ των διάφορων μοντέλων δίνεται από τις γκρι γραμμές, ενώ παρουσιάζεται και η τάση ανά 25ετία.	57
Εικόνα 14. Αλλαγή στην εποχικότητα για την απορροή.	58
Εικόνα 15. Σύγκριση των δεδομένων παρατηρημένης απορροής (αριστερά) με των υπολογισμένων τιμών από τα κλιματικά μοντέλα (δεξιά) για την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης.....	59
Εικόνα 16. Σύγκριση ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης των ακραίων τιμών απορροής ανά περίοδο μελέτης.....	60
Εικόνα 17. Σύγκριση βροχόπτωσης – απορροής για την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης.....	62
Εικόνα 18. Σύγκριση βροχόπτωσης – απορροής για την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης.....	63
Εικόνα 19. Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην εξατμισοδιαπνοή και την υδατοϊκανότητα του εδάφους	65

1 Εισαγωγή

1.1 Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στο καθεστώς της πλημμυρικής επικινδυνότητας

Οι πλημμύρες θεωρούνται από τους πλέον συχνούς και καταστρεπτικούς τύπους φυσικών καταστροφών σε παγκόσμιο επίπεδο. Η έκθεση της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας σε κίνδυνο, η καταστροφή έργων υποδομής, γεωργικών και κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων, η έντονη διάβρωση εδαφών και η μόλυνση υδατικών μαζών είναι μερικές από τις πιο σημαντικές επιπτώσεις τους.

Οι πλημμύρες επηρεάζουν το μεγαλύτερο αριθμό ανθρώπων και επιφέρουν τις περισσότερες ζημιές από όλες τις φυσικές καταστροφές σε ετήσια βάση. Τα πλημμυρικά φαινόμενα προκαλούν το ένα τρίτο των εκτιμώμενων ζημιών από φυσικές καταστροφές παγκοσμίως.

Σύμφωνα με ασφαλιστικούς οργανισμούς παγκοσμίου εμβέλειας, οι πλημμύρες καταγράφουν σημαντικά ποσοστά ανάμεσα στα άλλα είδη καταστροφών τόσο σε απόλυτο αριθμό συμβάντων, όσο και σε ότι αφορά τις οικονομικές απώλειες. Συγκεκριμένα οι πλημμύρες αντιστοιχούν στο 26% του αριθμού των μεγάλης κλίμακας καταστροφικών γεγονότων μεταξύ 1950-2002, στο 8% των θανάτων και στο 27% του οικονομικού κόστους που προκαλούνται από φυσικές καταστροφές στην ίδια περίοδο (Munich Re., 2002).

Τα τελευταία χρόνια η διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου εστιάζει σε προσεγγίσεις όπως η πρόγνωση πλημμυρών (flood forecasting), η έγκαιρη προειδοποίηση, ο σχεδιασμός των χρήσεων γης και η αποτύπωση της

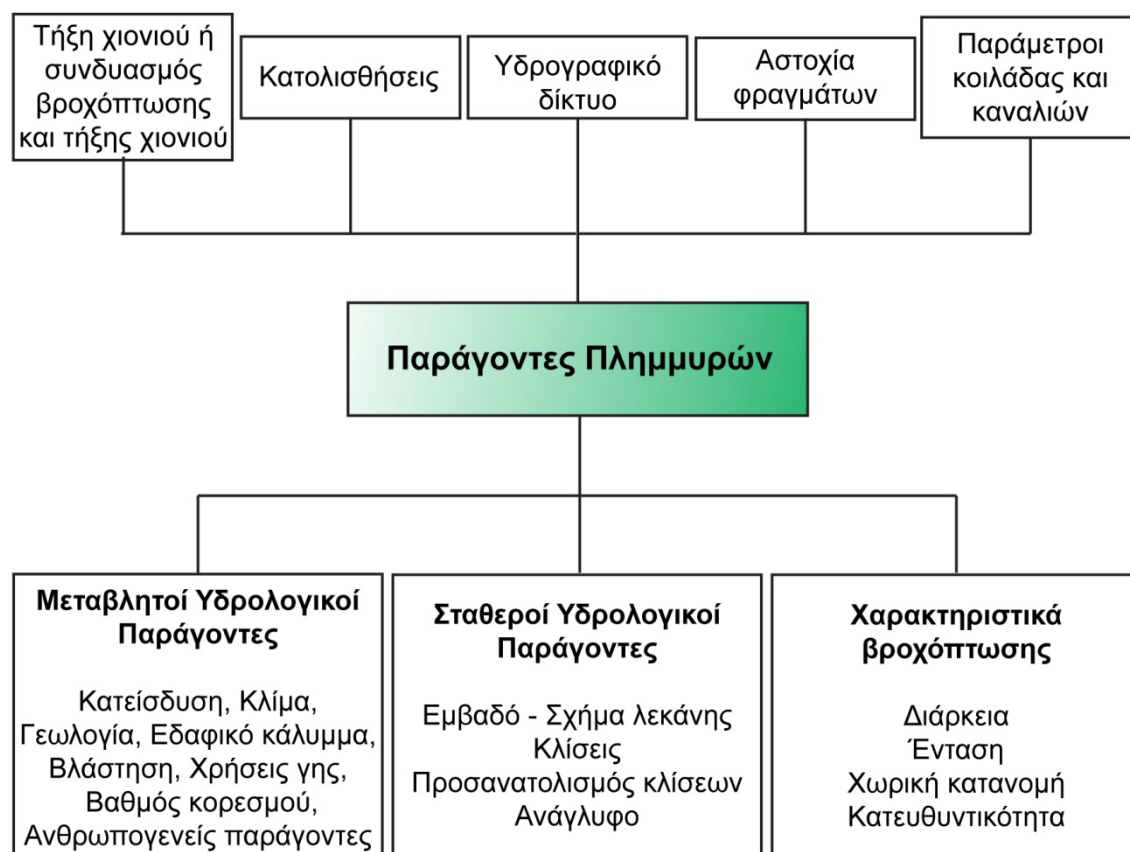
επικινδυνότητας σε χάρτες. Παράλληλα τα δομικά και μηχανικά μέτρα (φράγματα, κανάλια και άλλα) έχουν περιβληθεί από σκεπτικισμό λόγω των οικονομικών και περιβαλλοντικών τους μειονεκτημάτων (Golian et al., 2010).

Οι μεθοδολογίες που ακολουθούνται για τη μείωση του κινδύνου πλημμυρών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο τους. Οι κύριοι τύποι πλημμυρών σύμφωνα με μία από τις πιο συνηθισμένες ταξινομήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Στην περιοχή της Μεσογείου οι αιφνίδιες (ή ξαφνικές) πλημμύρες (“flashfloods”) είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος πλημμυρών καθώς ευνοείται ιδιαίτερα από τη γεωμορφολογία, τη γεωλογία και τις κλιματικές παραμέτρους.

Πίνακας 1. Ταξινόμηση τύπων πλημμυρών σε σχέση με τα συμβατικά αίτια και τις επιπτώσεις τους (Martini και Loat, 2007).

Τύπος πλημμύρας	Ενδεικτικά Αίτια	Ενδεικτικές Επιπτώσεις
Ποτάμιες πλημμύρες	Έντονη βροχόπτωση, βροχόπτωση μακράς διάρκειας, λιώσιμο χιονιού, αστοχία αντιπλημμυρικών	Πλημμυρικά ύδατα κατά μήκος πλημμυρικών πεδίων (στάσιμα ή ρέοντα)
Παράκτιες πλημμύρες	Υψηλές παλίρροιες, καταιγίδες, τσουνάμι, συνδυασμός των παραπάνω με έντονη βροχόπτωση	Στάσιμα πλημμυρικά ύδατα κοντά στην ακτή, υποχώρηση της ακτής, υφαλμήρηση της αγροτικής γης κοντά στο παραλιακό μέτωπο
Πλημμύρες ορεινών χειμάρρων	Καταιγίδες, αστάθεια πτάνων	Λασπορροές, έντονη διάβρωση, ορμητικά πλημμυρικά ύδατα και μεταφερόμενο υλικό, δημιουργία αλλουβιακού ριπιδίου
Αιφνίδιες πλημμύρες (flashfloods) σε εφήμερους χειμάρρους	Ιδιαίτερα έντονη βροχόπτωση	Έντονη διάβρωση, ορμητικά πλημμυρικά ύδατα πολλές φορές εμπλουτισμένα με εδαφικό υλικό, λασπορροές
Πλημμύρες που συνδέονται με το υπεδαφικό νερό	Υψηλή στάθμη υπεδαφικού νερού, κορεσμός υδροφόρου ορίζοντα	Στάσιμα πλημμυρικά ύδατα στο πλημμυρικό πεδίο
Πλημμύρες λιμνών	Ταχεία αύξηση των υδατικών αποθεμάτων	Στάσιμα πλημμυρικά ύδατα πέραν της ακτής

Η εκδήλωση πλημμυρών εξαρτάται από μια σειρά από παράγοντες που σχετίζονται με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υδρολογικών λεκανών, τις μετεωρολογικές παραμέτρους, τα χαρακτηριστικά των καταιγίδων, τη γεωλογία και τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (Εικόνα 1). Ορισμένα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι σχετικά στατικά (π.χ. τοπογραφία, σχήμα υδρολογικής λεκάνης) ενώ άλλα διαφοροποιούνται με το χρόνο (π.χ. βαθμός κορεσμού εδάφους, ένταση βροχόπτωσης κ.α.).



Εικόνα 1. Παράγοντες που σχετίζονται με το φαινόμενο των πλημμυρών (Smith και Ward 1998, τροποποιημένο).

Ένας από τους πιο σημαντικούς δυναμικούς παράγοντες στην εκδήλωση πλημμυρών είναι η ένταση της βροχόπτωσης (Amadio et al., 2003; Georgakakos, 2006; Norbiato et al., 2008; Golian et al., 2010). Υποστηρίζεται ότι οι καταιγίδες υψηλής έντασης και μικρής διάρκειας τείνουν να δημιουργούν πολύ μεγαλύτερους όγκους απορροής από ότι οι καταιγίδες μεγάλης διάρκειας ή οι καταιγίδες μεγάλου συνολικού ύψους βροχής (Martin-Vide et al., 1999). Με αυτό τον τρόπο έδειξαν τη σημασία του μεγέθους της έντασης της βροχόπτωσης στο φαινόμενο των πλημμυρών.

Ένας από τους πιο άμεσους κινδύνους που μπορεί να προκύψει από μια ενδεχόμενη κλιματική αλλαγή είναι η αύξηση των πλημμυρών που συνδέεται με την αύξηση της έντασης της βροχόπτωσης (Wilbanks et al., 2007).

Εκτός των μετεωρολογικών παραγόντων, είναι σαφές ότι και άλλες μεταβλητές χρήζουν προσεκτικής μελέτης καθώς παράγοντες όπως η αστικοποίηση, η αλλαγή χρήσεων γης και η κατάσταση των δασών διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον πλημμυρικό κίνδυνο (EEA, 2005).

Οι αλλαγές στην μεταβλητότητα του παράγοντα της βροχόπτωσης μπορούν να οδηγήσουν σε εκτεταμένες διαφοροποιήσεις την πιθανότητα εκδήλωσης ακραίων γεγονότων (Katz και Brown, 1992).

Η εξάρτηση αυτή των πλημμυρικών φαινομένων από την βροχόπτωση και τα χαρακτηριστικά της καθιστά το καθεστώς εκδήλωσής τους ευάλωτο σε μια πιθανή αλλαγή των κλιματικών παραμέτρων. Το εύρος, το πρόσημο καθώς και η κατανομή της επίδρασης μιας ενδεχόμενης κλιματικής αλλαγής είναι σημαντικό να εξετασθούν ώστε να αποτυπωθούν οι επικείμενες αλλαγές στο καθεστώς εκδήλωσης των πλημμυρών και του συσχετιζόμενου κινδύνου.

1.2 Πλημμύρες στη Μεσόγειο και στον Ελληνικό χώρο

Στο χώρο της Μεσογείου καταγράφονται ιδιαίτερες συνθήκες στο καθεστώς των πλημμυρών δεδομένης της επίδρασης του κλίματος, των ιδιαίτερων γεωλογικών, γεωμορφολογικών και κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών της περιοχής. Οι περισσότερες υδρολογικές λεκάνες των παραλίων της Μεσογείου είναι επιδεκτικές σε αιφνίδιες πλημμύρες (“flashfloods”) οι οποίες αποτελούν ένα

από τα πιο σημαντικά καταστροφικά φαινόμενα στην περιοχή και στον Ελληνικό χώρο (Ανδρεαδάκης και Φουντούλης, 2007). Κατά κύριο λόγο οι υδρολογικές λεκάνες έχουν μικρό έως μέσο μέγεθος και αποστραγγίζονται από εφήμερους χειμάρρους με ελάχιστο ή καθόλου νερό κατά τη διάρκεια του έτους.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η εκδήλωση έντονων βροχοπτώσεων τους χειμερινούς μήνες, φαινόμενο τυπικό του Μεσογειακού κλίματος, το οποίο κατά κύριο λόγο αποτελεί σημαντικό τμήμα του μηχανισμού εκδήλωσης ξαφνικών πλημμυρών ("flash floods"). Οι πλημμύρες αυτές έχουν μικρή διάρκεια και παρουσιάζουν μεγάλες απορροές. Κατά τη διάρκεια των φαινομένων αυτών παρουσιάζονται εκτεταμένα φαινόμενα διάβρωσης και μεταφοράς εδαφικού υλικού τα οποία δημιουργούν επιπρόσθετους κινδύνους όπως λασπορροές και κατολισθήσεις. Στην ιδιαιτερότητα αυτή συμβάλλει το ιδιαίτερο γεωτεκτονικό καθεστώς της περιοχής, που περιλαμβάνει ενεργό τεκτονική, μεγάλες μορφολογικές κλίσεις και ιδιαίτερες λιθολογίες.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η συγκέντρωση μεγάλων πληθυσμών σε αστικά κέντρα σε παραποτάμιες και παραλιακές περιοχές η οποία συνδυαζόμενη με τη αξιοσημείωτη οικιστική πίεση και την ταχεία τουριστική ανάπτυξη συμβάλλει συχνά στην παρεμπόδιση της ομαλής λειτουργίας των ποτάμιων συστημάτων. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στη ραγδαία αύξηση των οικονομικών επιπτώσεων των πλημμυρών τις τελευταίες δεκαετίες (Ganoulis, 2003).

Οι πλημμύρες είναι μια από τις πιο σημαντικές κατηγορίες φυσικών καταστροφών και στον Ελληνικό χώρο, τόσο από οικονομικής πλευράς όσο και από πλευράς κόστους σε ανθρώπινες ζωές. Τα θύματα στον Ελληνικό χώρο μεταξύ 1887-1994 ανήλθαν στα 216 (Νικολαΐδου και Χατζηχρίστου, 1995).

Εκτός από τις ανθρώπινες ζωές οι πλημμύρες έχουν σημαντικές επιπτώσεις σε περιουσίες (οικίες, καταστήματα, βιομηχανίες), στην γεωργία, στην κτηνοτροφία, στις υποδομές (τεχνικά έργα, οδικό δίκτυο) και στα δίκτυα κοινής ωφελείας. Σημαντικά είναι επίσης τα επακόλουθα στον τομέα του περιβάλλοντος αν και το εύρος των επιπτώσεων δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς.

1.1 Κλιματική αλλαγή και πλημμύρες

Το ζήτημα μιας πιθανής αύξησης του πλημμυρικού κινδύνου σε περίπτωση κλιματικής μεταβολής είναι εξαιρετικά σημαντικό. Περίπου το 20% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε υδρολογικές λεκάνες που είναι πιθανό να επηρεασθούν από αύξηση του πλημμυρικού κινδύνου που μπορεί να προκύψει από μια ενδεχόμενη κλιματική αλλαγή (Kleinen και Petschel-Held, 2007).

Πιθανές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής στις φυσικές καταστροφές:

- Αύξηση των περιοχών που υποφέρουν από ξηρασία
- Αύξηση των έντονων βροχοπτώσεων και της κυκλονικής δραστηριότητας με άμεση επιρροή στις πλημμύρες

Τα περισσότερα μοντέλα προβλέπουν μια αυξητική τάση στα πλημμυρικά συμβάντα (White et al., 1996), όμως τα αντιθετικά αποτελέσματα που προκύπτουν σε ορισμένες περιπτώσεις, επιβάλουν το να συνυπολογίζεται ένας βαθμός αβεβαιότητας. Καταγραφές σχετικά με την εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων δείχνουν ότι δεν υπάρχουν στοιχεία για αύξηση της συχνότητας των πλημμυρών σε γενικό παγκόσμιο επίπεδο (Rosenzweig et al., 2007).

Στον Ελληνικό χώρο υπάρχει εξάρτηση της συχνότητας και του μεγέθους των πλημμυρών από τις αλλαγές στη βροχόπτωση (κατά κύριο λόγο) και στη θερμοκρασία (Panagoulia και Dimou., 1997), και διαπιστώνεται πως η αύξηση της βροχόπτωσης θα οδηγήσει σε αύξηση της συχνότητας και της διάρκειας των πλημμυρών (Panagoulia, 1991; 1992).

1.2 Κλιματικά μοντέλα προσομοίωσης της κλιματικής αλλαγής

Για την προσομοίωση της κλιματικής αλλαγής χρησιμοποιούνται τα Συζευγμένα Ατμοσφαιρικά-Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (Coupled Atmospheric-Ocean General Circulation Models, AOGCMs), που βασίζονται στις βασικές αρχές του γήινου συστήματος, όπως οι βασικές εξισώσεις της μηχανικής των ρευστών και της διάδοσης της ακτινοβολίας.

Τα AOGCMs χωρίζονται σε Ατμοσφαιρικά (AGCMs) και Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (OGCMs) ενώ μπορεί να είναι και συζευγμένα μεταξύ τους (AOGCMs) καθώς και με άλλα μοντέλα όπως τα μοντέλα προσομοίωσης της παγοκάλυψης στην ξηρά και την θάλασσα, της βιόσφαιρας (Denman et al., 2007) και άλλα. Επίσης, δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στις διεργασίες του εδάφους, του ωκεανού και των παγετώνων καθώς και στην ισορροπία των διεργασιών μεγάλης χρονικής κλίμακας όπως ο υδρολογικός κύκλος.

Τονίζεται ότι η γνώση ορισμένων φυσικών διεργασιών είναι ακόμα περιορισμένη και για το λόγο αυτό στις κλιματικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται παραμετροποιήσεις και απλουστεύσεις ορισμένων φαινομένων. Η χωρική ανάλυση των AOGCMs, εξαιτίας των περιορισμένων υπολογιστικών

δυνατοτήτων, είναι της τάξης των εκατοντάδων χιλιομέτρων (Mearns et al., 2001). Σε αυτή τη χωρική ανάλυση είναι δυνατόν να αναπαραχθούν ικανοποιητικά η γενική κυκλοφορία σε ολόκληρο τον πλανήτη καθώς και τα γενικά χαρακτηριστικά των διαφόρων κλιματικών παραμέτρων σε συνοπτική κλίμακα. Ωστόσο, δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν με ακρίβεια φαινόμενα που σχετίζονται με την επίδραση της τοπογραφίας σε τοπική και περιοχική κλίμακα.

Οι τεχνικές με τις οποίες εισάγεται η περιοχική πληροφορία στις κλιματικές προσομοιώσεις ονομάζονται τεχνικές υποβιβασμού κλίμακας (υποκλιμάκωσης) και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. 1) Τα υψηλής ή μεταβλητής ανάλυσης παγκόσμια ατμοσφαιρικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας. 2) Τις στατιστικές ή εμπειρικές μεθόδους υποκλιμάκωσης (Statistical-Empirical Downscaling) και 3) τη δυναμική υποκλιμάκωση. Η δυναμική υποκλιμάκωση βασίζεται στη χρήση των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (Regional Climate Models, RCMs) και πρόκειται για μοντέλα περιορισμένου πεδίου και υψηλής ανάλυσης τα οποία βασίζονται στη δυναμική υποκλιμάκωση και αναπτύχθηκαν προκειμένου να εισαχθεί η περιοχική πληροφορία στα μεγάλης κλίμακας πεδία που παρέχονται από τα GCMs ή που προκύπτουν από επανα-ανάλυση (NCEP/ ERA-40) (Dickinson et al., 1989, Giorgi, 1990). Για να λειτουργήσουν είναι απαραίτητο να τους παρέχονται αρχικές συνθήκες σε ολόκληρο το πεδίο τους, χρονομεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες στα πλευρικά τους όρια και επιφανειακές οριακές συνθήκες. Οι πλευρικές οριακές συνθήκες προέρχονται από προσομοιώσεις με GCMs ή από ανάλυση παρατηρήσεων. Λόγω των μικρών τους απαιτήσεων σε υπολογιστικούς πόρους μπορούν να πραγματοποιούν προσομοιώσεις διάρκειας μερικών δεκαετιών σε αρκετά υψηλή

ανάλυση, μέχρι και κάτω από τα 10km. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουν να υποκλιμακώσουν την πληροφορία από τα αποτελέσματα των GCMs που περιέχει την γενική κυκλοφορία η οποία οφείλεται στα μεγάλης κλίμακας παράγοντες (large-scale forcings) και να την εμπλουτίσουν χάρη (α) στην καλύτερη αναπαράσταση της τοπογραφίας (λόγω της υψηλότερης ανάλυσης) και (β) στην δυνατότητα αναπαράστασης διεργασιών μικρότερης κλίμακας οι οποίες δεν μπορούν να προσομοιωθούν στην κλίμακα των GCMs. Πρόκειται για βασικό πλεονέκτημα των RCMs, καθώς περιγράφουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας όπως την ορογραφία, την κατανομή ξηράς και θάλασσας και την χρήση της γης, τα οποία δεν είναι δυνατό να παρασταθούν ακόμα στις προσομοιώσεις των GCMs επειδή οι διαστάσεις τους είναι μικρότερες από τις διαστάσεις του πλέγματος του GCM. Επιπρόσθετα, η αυξημένη χωρική ανάλυση των RCMs επιτρέπει να αναλύονται φαινόμενα μικρότερης χωρικής κλίμακας που δεν αναλύονται από τα GCMs και με αυτό τον τρόπο μπορούν να προσομοιώσουν τη λειτουργία μηχανισμών ανάδρασης που δρουν σε περιοχική κλίμακα. Ενώ, το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ότι αν τα αποτελέσματα του GCM που παρέχει τις οριακές συνθήκες είναι εσφαλμένα το ίδιο θα ισχύσει και για τα αποτελέσματα του RCM και ισχύει για όλες τις τεχνικές υποκλιμάκωσης. Επίσης, μειονέκτημα αποτελεί η έλλειψη της δυνατότητας αλληλεπίδρασης με το GCM, όπως και η ανάγκη ρύθμισης τους, διότι μπορεί να αποδειχτεί χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η εκτίμηση των κλιματικών συνθηκών που θα επικρατήσουν στο μέλλον σε ένα τόπο εμπεριέχει πολλούς παράγοντες αβεβαιότητας οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι:

1. Η επιλογή του σεναρίου εκπομπής θερμοκηπικών αερίων βάσει του οποίου γίνεται η προσομοίωση του μελλοντικού κλίματος
2. Η επιλογή του GCM με το οποίο θα διεξαχθούν οι κλιματικές προσομοιώσεις
3. Η επιλογή του RCM στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μεθοδολογία δυναμικής υποκλιμάκωσης
4. Η επιλογή των αρχικών συνθηκών της κλιματικής προσομοίωσης του GCM δεδομένα του οποίου χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου του RCM.

Μια συνήθης πρακτική, που χρησιμοποιείται προκειμένου να μειωθούν οι αβεβαιότητες που οφείλονται στις διαφορετικές παραμετροποιήσεις και τους διαφορετικούς δυναμικούς κώδικες που χρησιμοποιούνται από τα διαφορετικά κλιματικά μοντέλα αλλά και στην αβεβαιότητα των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στο μέλλον, είναι το να αναλύονται αποτελέσματα ενός συνόλου από προσομοιώσεις διαφορετικών κλιματικών μοντέλων και για διάφορα σενάρια εκπομπών (Ensembles).

1.5 Σενάρια κλιματικής αλλαγής

Η διαμόρφωση των σεναρίων κλιματικής αλλαγής στηρίχτηκε σε ορισμένους βασικούς άξονες που σχετίζονται με την εξέλιξη του παγκόσμιου πληθυσμού, τις πολιτικές που θα ακολουθηθούν γύρω από θέματα ενέργειας, το ρυθμό της οικονομικής ανάπτυξης, τη μελλοντική τεχνολογική ανάπτυξη καθώς και το κατά πόσο οι αποφάσεις γύρω από οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα λαμβάνονται σε τοπικό ή διεθνές επίπεδο.

Βάσει της βαρύτητας του κάθε ενός από τους παραπάνω παράγοντες, τα διάφορα σενάρια εκπομπών ταξινομήθηκαν σε έξι ομάδες σεναρίων, η καθεμία των οποίων περιλαμβάνει παρόμοια σενάρια εκπομπών. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

- Η οικογένεια σεναρίων **A1** που χωρίζεται σε 3 υποκατηγορίες: τις **A1F**, **A1B** και **A1T**
- Η οικογένεια σεναρίων **A2**
- Η οικογένεια σεναρίων **B1** και
- Η οικογένεια σεναρίων **B2**.

Στο Κέντρο Έρευνας Φυσικής της Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας της Ακαδημίας Αθηνών (ΚΕΦΑΚ) έχουν αναπτυχθεί βάσεις δεδομένων και προσομοιώσεων μοντέλων με βάσει τα σενάρια εκπομπών **A2**, **A1B**, **B2** και **B1**. Στον Πίνακα 2 αναφέρονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων σεναρίων.

Πίνακας 2. Σενάρια κλιματικής αλλαγής (Nakicenovic, N. et al., 2000)

Σενάριο A2	Μέτρια αύξηση του μέσου παγκόσμιου κατά κεφαλήν εισοδήματος. Ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Αργή και τμηματική τεχνολογική ανάπτυξη και μέτριες έως μεγάλες αλλαγές στη χρήση γης. Ραγδαία αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 850 ppm το 2100.
Σενάριο A1B	Ραγδαία οικονομική ανάπτυξη. Ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας αλλά παράλληλα διάδοση νέων και αποδοτικών τεχνολογιών. Χρήση τόσο ορυκτών καυσίμων όσο και εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Μικρές αλλαγές στη χρήση γης. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού μέχρι το έτος 2050 και σταδιακή μείωσή του στη συνέχεια. Έντονη αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 720 ppm το 2100.
Σενάριο B2	Ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας με μέτριους ρυθμούς. Ηπιότερες τεχνολογικές αλλαγές σε σύγκριση με τα σενάρια εκπομπών A1 και B1. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα με μέτριους αλλά σταθερούς ρυθμούς η οποία θα φτάσει το 2100 τα 620 ppm .
Σενάριο B1	Μεγάλη αύξηση του παγκόσμιου κατά κεφαλήν εισοδήματος. Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Μείωση της χρήσης των συμβατικών πηγών ενέργειας και στροφή στη χρήση τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού μέχρι το έτος 2050 και σταδιακή μείωσή του στη συνέχεια. Αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα με ήπιους σχετικά ρυθμούς ιδιαίτερα από το 2050 και μετά η οποία θα φτάσει το 2100 τα 550 ppm .

2 Μεθοδολογία

2.1 Υδρολογικό ισοζύγιο

Το υδρολογικό ισοζύγιο αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του υδρολογικού κύκλου μιας λεκάνης απορροής και η εξίσωση του περιγράφει την αρχή διατήρησης της μάζας. Το αλγεβρικό άθροισμα των διακινήσεων και των μεταβολών αποθήκευσης νερού σε έναν όγκο αναφοράς είναι μηδέν σε οποιαδήποτε χρονική διάρκεια. Η γενική του μορφή εκφράζει την ισότητα των εισροών και εκροών στη λεκάνη παρουσιάζεται στην Εξίσωση 1.

$$\Delta S = \text{Εισροές} - \text{Εκροές} \quad \text{Εξίσωση 1}$$

όπου ΔS , η διαφορά της αποθήκευσης νερού στον όγκο αναφοράς τη συγκεκριμένη περίοδο.

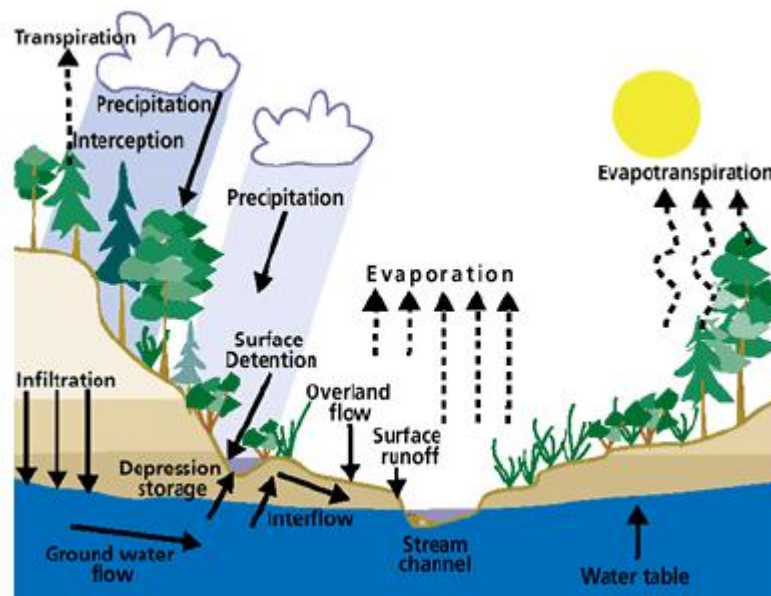
Εισροή σε μια λεκάνη αποτελεί η βροχόπτωση, ενώ εκροή θεωρείται η εξατμισοδιαπνοή και η επιφανειακή απορροή. Η αποθήκευση νερού πρόκειται για την αποθήκευση στο έδαφος. Η εξίσωση του ισοζυγίου μπορεί να γραφεί αναλυτικότερα στην μορφή που παρουσιάζεται στην Εξίσωση 2.

$$\Delta(S_S + S_G) = P + R_1 + G_1 + E_S - E_\xi - R_2 - G_2 - E - T \Rightarrow$$

$$\Delta(S_S + S_G) = P - (R_2 - R_1) - (G_2 - G_1) - (E + T) + E_S - E_\xi \quad \text{Εξίσωση 2}$$

όπου,	S_S	το επιφανειακό απόθεμα
	S_G	το υπόγειο απόθεμα
	P	τα κατακρημνίσματα
	R_1	η επιφανειακή εισροή
	G_S	η υπόγεια εισροή
	E_S	οι εισαγωγές
	E_x	οι εξαγωγές
	E_2	οι επιφανειακές εκροές
	G_2	οι υπόγειες εκροές
	E	η εξάτμιση
	T	η διαπνοή

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση του υδρολογικού ισοζυγίου.



Εικόνα 2. Απεικόνιση υδρολογικού ισοζυγίου.

2.2 Μέθοδος χωρικής παρεμβολής

Η παρεμβολή είναι μια διαδικασία μέσω της οποίας, οι άγνωστες τιμές προβλέπονται με έναν μαθηματικό τύπο που χρησιμοποιεί τις τιμές των κοντινών γνωστών σημείων. Μια χαρακτηριστική χρήση για την παρεμβολή σημείου είναι να δημιουργηθεί μια επιφάνεια ανύψωσης από ένα σύνολο μετρήσεων δειγμάτων. Ανάλογα με τη μέθοδο παρεμβολής, η προκύπτουσα επιφάνεια μπορεί είτε να εξαναγκαστεί να περάσει μέσω των μετρημένων δειγμάτων είτε όχι, ανάλογα με το αν είναι ακριβείς ή ανακριβείς οι μετρήσεις αυτές. Υπάρχουν πολυάριθμες μέθοδοι παρεμβολής, βασισμένες είτε σε αιτιοκρατικές (ντετερμινιστικές), είτε σε πιθανολογικές (στοχαστικές) διαδικασίες. Η αιτιοκρατική τεχνική παρεμβολής χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των επιφανειών από μετρημένα σημεία βασιζόμενη είτε στο βαθμό και την έκταση της ομοιότητας (π.χ. η μέθοδος IDW), είτε στο βαθμό ομαλότητας. Οι αιτιοκρατικές τεχνικές παρεμβολής μπορούν να διαιρεθούν σε δύο ομάδες: σφαιρικές και τοπικές. Οι σφαιρικές τεχνικές υπολογίζουν τις προβλέψεις χρησιμοποιώντας ολόκληρο το σύνολο των στοιχείων, ενώ οι τοπικές τεχνικές υπολογίζουν τις προβλέψεις από τα μετρημένα σημεία εντός συγκεκριμένων περιοχών, οι οποίες είναι υποπεριοχές της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Η στοχαστική τεχνική παρεμβολής είναι βασισμένη στη στατιστική και χρησιμοποιείται για πιο προηγμένη πρόβλεψη επιφανειών, που περιλαμβάνει επίσης τα λάθη ή την αβεβαιότητα των προβλέψεων.

2.2.1 Μέθοδος των Αντιστρόφων Σταθμισμένων Αποστάσεων (Inverse Distance Weighted – IDW)

Η μέθοδος IDW, είναι μία αιτιοκρατική μέθοδος παρεμβολής, επειδή είναι άμεσα βασισμένη στις περιβάλλουσες μετρημένες τιμές ή σε συγκεκριμένους μαθηματικούς τύπους που καθορίζουν την ομαλότητα της προκύπτουσας επιφάνειας. Είναι μία ακριβής μέθοδος κινούμενου μέσου όρου που εφαρμόζεται συνήθως σε στοιχεία υψηλής μεταβλητότητας. Η IDW υποθέτει ότι η μεταβλητή που μοντελοποιείται μειώνεται, όσο η απόσταση από την επιλεγθείσα μετρημένη θέση του σημείου αυξάνεται. Αυτή η τεχνική υπολογίζει μια τιμή για κάθε κόμβο πλέγματος εξετάζοντας και λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των γύρω από αυτήν μετρημένων σημείων που βρίσκονται μέσα σε μια καθορισμένη ακτίνα. Όσο πιο κοντά στη ζητούμενη τιμή είναι ένα σημείο, τόσο μεγαλύτερη η επιρροή, ή το βάρος που αυτό έχει στον υπολογισμό της τιμής που αναζητείται. Καθορίζει τις τιμές σε κάθε κελί, χρησιμοποιώντας έναν γραμμικά σταθμισμένο συνδυασμό ενός σετ δειγμάτων. Το «βάρος» είναι συνάρτηση της αντίστροφης απόστασης.

Δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να καθορίζει τη σημασία του κάθε σημείου επάνω στην περιοχή μελέτης, αλλάζοντας ποικίλες παραμέτρους με στόχο την όσο το δυνατόν πιο «ρεαλιστική» χάραξη των ισοϋψών καμπυλών. Για παράδειγμα, με τον καθορισμό μεγαλύτερης δύναμης, ακόμη περισσότερη έμφαση θα δοθεί στα κοντινότερα σημεία, τα οποία θα έχουν την μεγαλύτερη επιρροή και έτσι η επιφάνεια θα έχει περισσότερη λεπτομέρεια (θα είναι λιγότερο ομαλή).

Στη παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος IDW για τον υπολογισμό των στοιχείων μέσης ημερήσιας βροχόπτωσης στο κεντροειδές της λεκάνης και για τη δημιουργία χρονοσειρών δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

2.2 Μέθοδος Blaney – Criddle

Η μέθοδος Blaney – Criddle (Blaney και Criddle, 1950, 1962) είναι μια εμπειρική μέθοδος υπολογισμού δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (ET_0) που βασίζεται σε δεδομένα θερμοκρασίας και ηλιοφάνειας. Η διαδικασία των Blaney-Criddle για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών αναπτύχθηκε κατ' αρχή στις δυτικές ΗΠΑ αλλά γρήγορα έτυχε παγκόσμιας αποδοχής. Η αρχική διαδικασία βασίστηκε σε μετρήσεις εξατμισοδιαπνοής που έγιναν τις δεκαετίες 1920 και 1930, με παρακολούθηση των μεταβολών της εδαφικής υγρασίας σε δείγματα εδάφους. Η σχέση που δημιούργησαν οι Blaney-Criddle αναφερόταν στον υπολογισμό της εποχιακής εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών, με τη βασική παραδοχή ότι αυτή άμεσα διαμορφώνεται από το άθροισμα των γινομένων των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών και των μέσων μηνιαίων ποσοστών των ωρών ημέρας του έτους, για μια δυναμικά αναπτυσσόμενη καλλιέργεια υπό συνθήκες επαρκούς εδαφικής υγρασίας. Οι Allen και Pruitt (1986) παρουσίασαν μια τροποποιημένη εκδοχή των Blaney και Criddle (Εξίσωση 3), που βασίζεται σε δεδομένα θερμοκρασίας και μόνο.

$$ET_0 = p \cdot (0,46 \cdot T_{\text{mean}} + 8) \quad \text{Εξίσωση 3}$$

όπου,	ET_0	η δυνητική εξατμισοδιαπνοή
	T_{mean}	η μέση ημερήσια θερμοκρασία (°C)
	p	το μέσο ημερήσιο ποσοστό της ετήσιας ηλιοφάνειας

Σημειώνεται ότι η εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής όπως αυτή υπολογίζεται από την εξίσωση του Blaney – Criddle θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή καθώς μπορεί να υπερεκτιμήσει την δυνητική εξατμισοδιαπνοή ως και κατά 40% σε ήρεμες, υγρές, συννέφιασε περιοχές και αντίστοιχα να τις υποτιμήσει ως και κατά 60% σε ανεμώδεις, ξηρές, ηλιόλουστες περιοχές (FAO, 1983). Μια ολοκληρωμένη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για το νησί της Κρήτης δίνεται από τους Xystrakis και Matzarakis (2011). Οι Doorenbos και Pruitt (1977), τροποποίησαν την μέθοδο ώστε να υπολογίζει καλύτερα την δυνητική εξατμισοδιαπνοή, εισάγοντας παράμετρους μηνιαίας σχετικής υγρασίας, ημερήσιας ταχύτητας ανέμους κ.α. Άλλες τροποποιήσεις και βελτιώσεις εισήχθησαν επίσης από την Soil Conservation Service των ΗΠΑ (USDA, 1970) και τους Allen και Pruitt (1991). Το μειονέκτημα των τροποποιήσεων ήταν η απαίτηση σε περεταίρω δεδομένα από αυτά της θερμοκρασίας.

2.3 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας (Bias correction)

2.3.1 Διόρθωση σφάλματος στα δεδομένα βροχόπτωσης

Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη διόρθωση σφάλματος μεροληψίας στα δεδομένα βροχόπτωσης, χρησιμοποιήθηκε μια νέα μεθοδολογία που ανήκει στη μέθοδο διόρθωσης ποσοστημοριακής χαρτογράφησης. Η μέθοδος αυτή έχει δοκιμαστεί σε παγκόσμια κλιματικά μοντέλα που εμφανίζουν πολύ καλή απόδοση στη διόρθωση του σφάλματος μεροληψίας στα αποτελέσματά τους (Grillakis et al., 2013).

2.3.2 Διόρθωση σφάλματος στα δεδομένα θερμοκρασίας

Για την διόρθωση του σφάλματος μεροληψίας στα δεδομένα θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ποσοστημοριακής χαρτογράφησης σε κανονική κατανομή (Samuel et al., 2011).

$$T_i^{\text{corr ctrl}} = F_{\text{obs}}^{-1} [F_{\text{GCM}}^{\text{ctrl}}(T_i^{\text{raw ctrl}})] \quad \text{Εξίσωση 4}$$

όπου, $T_i^{\text{raw ctrl}}$ η θερμοκρασία από το κλιματικό μοντέλο και
 $T_i^{\text{corr ctrl}}$ η διορθωμένη τιμή θερμοκρασίας

$$T_i^{\text{corr prj}} = F_{\text{obs}}^{-1} [F_{\text{GCM}}^{\text{cal}}(T_i^{\text{raw prj}})] \quad \text{Εξίσωση 5}$$

όπου, $T_i^{\text{raw prj}}$ η προβολή θερμοκρασίας του μοντέλου
 $T_i^{\text{corr ctrl}}$ η διορθωμένη τιμή θερμοκρασίας για την προβολή

Ενώ, τα $F(\)$ και $F(\)^{-1}$ είναι δείκτες που αναφέρονται στην συνάρτηση κανονικής κατανομής και την αντίστροφή της αντίστοιχα.

2.4 Το υδρολογικό μοντέλο HBV/IHMS

2.4.1 Περιγραφή του μοντέλου

Το λογισμικό HBV είναι ένα ημικαταμεμημένο εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο για συνεχή υπολογισμό της απορροής. Αναπτύχθηκε από το Σουηδικό Μετεωρολογικό και Υδρολογικό Ινστιτούτο (Swedish Meteorological and Hydrological Institute - SMHI) στις αρχές της δεκαετίας του '70 για την υποβοήθηση των υδροηλεκτρικών λειτουργιών (Bergström and Forsman, 1973; Bergström, 1976) παρέχοντας υδρολογικές προβλέψεις. Στόχος ήταν η δημιουργία ενός υδρολογικού μοντέλου με λογικές απαιτήσεις και εύκολο στο

χειρισμό του λογισμικού και των δεδομένων βαθμονόμησης. Το μοντέλο πήρε το όνομά του από τη συντομογραφία του Οργανισμού Υδρολογικού Ισοζυγίου (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning), του τμήματος που αναπτύχθηκε το SMHI εκείνη τη περίοδο. Οι πρώτες επιχειρησιακές προβλέψεις έγιναν για υδρολογικές λεκάνες στο βόρειο τμήμα της Σουηδίας το 1975 και από τότε το μοντέλο έχει εφαρμοστεί σε περισσότερες από 50 χώρες.

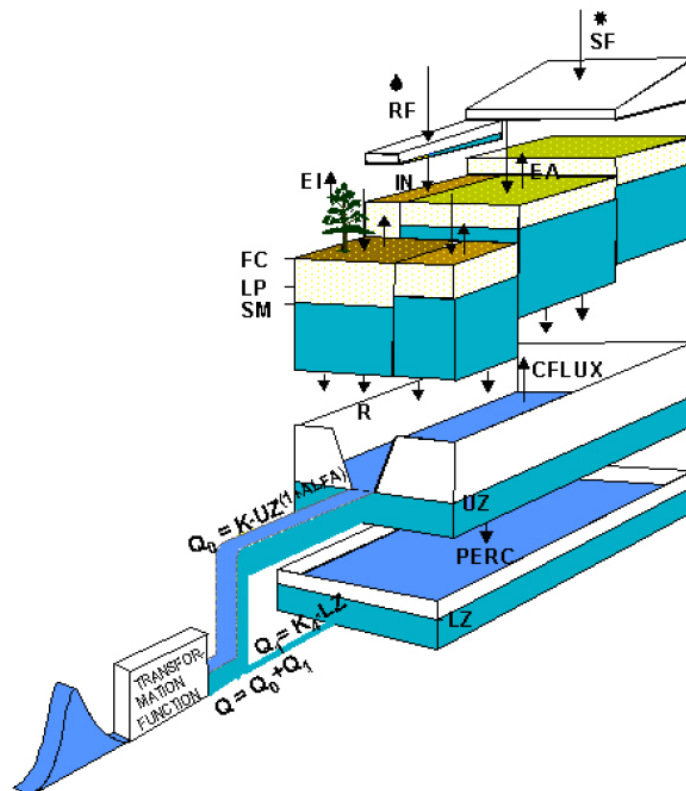
Η φιλοσοφία πίσω από την μοντελοποίηση του λογισμικού εξαρχής ήταν πως:

- Το μοντέλο πρέπει να βασίζεται σε ένα αναγνωρισμένο επιστημονικό ίδρυμα
- Να πληρούνται οι απαιτήσεις δεδομένων σε τυπικές λεκάνες
- Η πολυπλοκότητα του μοντέλου να δικαιολογείται από την απόδοσή του
- Το μοντέλο πρέπει να επικυρωθεί κατάλληλα
- Το μοντέλο πρέπει να είναι κατανοητό στο χρήστη.

Τις πρώτες δύο δεκαετίες, έγιναν μόνο μικρές αλλαγές στη βασική δομή του μοντέλου. Όμως, στις αρχές της δεκαετίας του '90 έγινε μια συνολική επαναξιολόγηση των ρουτινών του μοντέλου HBV και είχε ως αποτέλεσμα την έκδοση HBV-96. Κατά τη διάρκεια του 2004-2005 ακολούθησε μια πλήρως αναθεωρημένη έκδοση του Graphical User Interface (GUI) για το μοντέλο και ονομάζεται IHMS 5 (Integrated Hydrological Modeling System), η αγγλική έκδοση του οποίου κυκλοφόρησε το φθινόπωρο του 2005. Περαιτέρω, κατά τη διάρκεια του 2008, το σύστημα βελτιώθηκε και η τελευταία έκδοση ονομάζεται IHMS 6.0.

Το μοντέλο αποτελείται από υπορουτίνες για τη συσσώρευση και την τήξη του χιονιού, υπολογιστικές διαδικασίες για την υγρασία του εδάφους, ρουτίνες για την απορροή και, τέλος, από μια απλή διαδικασία δρομολόγησης.

Το μοντέλο είναι δυνατόν να τρέξει ξεχωριστά τις υπολεκάνες και στη συνέχεια να προστεθεί η συνεισφορά τους, καθώς και να γίνει ξεχωριστά και η βαθμονόμησή τους, αφού μπορούν να γίνουν οι προβλέψεις για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά. Για λεκάνες απορροής με σημαντική υψομετρική διαφορά μπορεί να γίνει υποδιαίρεση σε ζώνες υψομέτρου, όπου η κάθε μια μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω σε διαφορετικές ζώνες βλάστησης (δασικές και μη δασικές περιοχές). Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται σχηματικά η δομή του μοντέλου HBV.



Εικόνα 3. Σχηματική παρουσίαση του μοντέλου HBV για μια υπολεκάνη.

2.4.2 Βαθμονόμηση

Τα δεδομένα εισόδου, για τους υπολογισμούς, είναι ημερήσιες τιμές της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας του αέρα από αντιπροσωπευτικούς σταθμούς κοντά στη λεκάνη. Για τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, τυπική προσέγγιση είναι η χρησιμοποίηση των μακροπρόθεσμων μέσων μηνιαίων τιμών, αλλά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και εκτιμήσεις για κάθε χρονικό βήμα.

Τα δεδομένα της παρατηρούμενης απορροής χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση, την αξιολόγηση και τη διόρθωση του μοντέλου πριν την πρόβλεψη της απορροής.

Κατά τη διάρκεια της περιόδου βαθμονόμησης απαιτούνται δεδομένα απορροής για κάθε χρονικό βήμα και προτείνεται να χρησιμοποιηθούν δεδομένα τουλάχιστον 10 ετών για τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

Η βασική διαδικασία βαθμονόμησης είναι να βαθμονομηθούν οι παράμετροι με την εξής σειρά:

1. Παράμετροι όγκου
2. Παράμετροι χιονιού
3. Παράμετροι εδάφους
4. Παράμετροι ανταπόκρισης
5. Παράμετροι υγρασίας

2.4.3 Εκτίμηση αποτελεσμάτων

Κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου, είναι σημαντική και η εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Το HBV/IHMS εκτιμά τα αποτελέσματα με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

1. Υπολογίζοντας τον συντελεστή συσχέτισης

$$R^2 = \frac{\sum(QR - QR_{\text{mean}})^2 - \sum(QC - QR)^2}{\sum(QR - QR_{\text{mean}})^2} \quad \text{Εξίσωση 6}$$

όπου, QR η παρατηρούμενη απορροή

QR_{mean} η μέση παρατηρούμενη απορροή

QC η προσομοιωμένη απορροή

Αυτό το κριτήριο αξιολόγησης παρουσιάστηκε από τους Nash και Sutcliffe (1970) και χρησιμοποιείται συνήθως στα υδρολογικά μοντέλα.

Οι τιμές του συντελεστή κυμαίνονται από $-\infty$ έως 1. Η μονάδα αποτελεί τη βέλτιστη τιμή. Τιμές μεταξύ 0.0 και 1.0 θεωρούνται αποδεκτές τιμές απόδοσης του μοντέλου, ενώ, αρνητικές τιμές υποδεικνύουν ότι οι τιμές παρατήρησης αποτελούν καλύτερο δείκτη από τις προσομοιωμένες και αποτελούν μη αποδεκτή απόδοση. Όσο, λοιπόν, ο συντελεστής πλησιάζει τη μονάδα, τόσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο.

2. Υπολογίζοντας το άθροισμα της διαφοράς της απορροής προσομοίωσης και παρατήρησης

$$\text{Accdiff} = \sum(QC - QR) \cdot C_t \quad \text{Εξίσωση 6}$$

όπου, C συντελεστής μεταμόρφωσης

t ο χρόνος

3. Με οπτική επιθεώρηση και σύγκριση του υδρογραφήματος της απορροής προσομοίωσης και παρατήρησης

2.4.4 Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων

Η λογική της βελτιστοποίησης βασίστηκε στην καλύτερη δυνατή προσομοίωση του συνολικού όγκου απορροής, σε συνδυασμό με την καλύτερη δυνατή ελαχιστοποίηση σφάλματος των υπόλοιπων δεικτών εκτίμησης.

2.5 Το λογισμικό Hydrognomon

Ο «Υδρογνώμων» ή «Υδρογνώμονας» (Αγγλική ονομασία: “Hydrognomon”), είναι μία αυτόνομη εφαρμογή λογισμικού επεξεργασίας χρονοσειρών. Πρόκειται για ένα λογισμικό που αναπτύσσεται εντός του Ε.Μ.Π. εδώ και μία δεκαετία για να καλύψει διάφορες ερευνητικές ανάγκες και κυρίως για τα εξής ερευνητικά προγράμματα:

«Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, 1999–2003» και «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ), 2003–2006».

Το εν λόγω σύστημα πραγματοποιεί απλές (τυπικές υδρολογικές) επεξεργασίες, οι οποίες λειτουργούν βοηθητικά. Οι σημαντικότερες λειτουργίες που επιτελεί το

σύστημα είναι οι ακόλουθες:

- Μετατροπή χρονοσειρών σε σταθερό χρονικό βήμα (ως γνωστόν, οι πρωτογενείς χρονοσειρές έχουν κάποια σταθερότητα, αλλά συχνά παρουσιάζουν διαταραχές, η εξάλειψη των οποίων είναι αναγκαία για περαιτέρω επεξεργασία)
- Εξαγωγή χρονοσειρών μεγαλύτερου χρονικού βήματος (συνάθροιση), π.χ. ωριαίων από δεκάλεπτες, ημερήσιων από ωριαίες, μηνιαίων από ημερήσιες
- Τυπικοί έλεγχοι συνέπειας όπως ακραίων τιμών και χρονικής συνέπειας
- Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ χρονοσειρών, πολλαπλή παλινδρόμηση, οργανική συσχέτιση και αυτοσυσχέτιση
- Υδατικά ισοζύγια: αδρομερές μοντέλο βροχής – απορροής (Το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι γνωστό και ως «Ζυγός»)
- Συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών με χρήση της γραμμικής παλινδρόμησης, δυνατότητα εισαγωγή τυχαίου όρου για διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών. Επέκταση χρονοσειρών
- Γραμμικές πράξεις μεταξύ χρονοσειρών
- Κατάρτιση καμπυλών στάθμης – παροχής με στατιστικές μεθόδους και καμπυλών επέκτασης με χρησιμοποίηση υδραυλικών εξισώσεων
- Εξαγωγή χρονοσειρών παροχών από χρονοσειρές στάθμης, καθώς και χρονοσειρών όγκου και επιφανείας από χρονοσειρές στάθμης ταμιευτήρων και λιμνών
- Υπολογισμός εξάτμισης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής με αναλυτικές ή ημιεμπειρικές μεθόδους
- Επέκταση δειγμάτων εξατμοδιαπνοής

- Εύρεση στατιστικών χαρακτηριστικών δείγματος χρονοσειράς, προσαρμογή στατιστικών παραμέτρων, στατιστικές προγνώσεις, στατιστικοί έλεγχοι και εύρεση διαστημάτων εμπιστοσύνης. (Το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι γνωστό και ως «Πυθία»)
- Ανάλυση χρονοσειρών εξαιρετικών βροχοπτώσεων - κατάρτιση ομβρίων καμπυλών με συνεπείς μεθοδολογίες. (Το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι γνωστό και ως «Όμβρος»).

2.5.1 Στατιστική ανάλυση χρονοσειρών

Η στατιστική ανάλυση των χρονοσειρών με το λογισμικό «Υδρογνώμων» συνίσταται από τις εξής λειτουργίες:

- Στατιστική επεξεργασία χρονοσειρών (Πυθία). Κατά την επεξεργασία αυτή υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών (στατιστικά χαρακτηριστικά δείγματος) και προσαρμόζονται στατιστικές συναρτήσεις κατανομής. Στην συνέχεια ο χρήστης μπορεί να ελέγξει την προσαρμογή του δείγματος στις συναρτήσεις κατανομής αλλά να κάνει και προβλέψεις (forecasts), στατιστικούς ελέγχους (test) καθώς και εκτίμηση διαστημάτων εμπιστοσύνης.
- Ανάλυση εξαιρετικών υδρολογικών γεγονότων. Με την ειδική αυτή λειτουργία συνάθροισης, παράγονται ετήσιες ή μηνιαίες χρονοσειρές μεγίστων εντάσεων ή υψών βροχόπτωσης συγκεκριμένης διάρκειας. Τα

αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης αξιοποιούνται στην συνέχεια για την κατάρτιση όμβριων καμπυλών.

- Κατάρτιση όμβριων καμπυλών (Όμβρος). Ένα εξελιγμένο σύστημα για την κατάρτιση όμβριων καμπυλών με δυνατότητες προσαρμογής από ένα πλήθος στατιστικών κατανομών, εύρεση διαστημάτων εμπιστοσύνης σε όμβρια καμπύλη, κ.α.

2.5.2 Πυθία - Στατιστική επεξεργασία χρονοσειρών

Μέσω της μονάδας «Πυθία» δίνονται δυνατότητες στατιστικής ανάλυσης σε δείγματα που σχηματίζονται από τα δεδομένα χρονοσειρών. Ο χρήστης μπορεί να εκτιμήσει στην συνέχεια τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος, να προσαρμόσει στατιστικές κατανομές και να εκτελέσει στατιστικές προγνώσεις. Η ανάλυση γίνεται επί χρονοσειρών μηνιαίου ή ετήσιου χρονικού βήματος.

Μέσω των επιλογών Forecasts ο χρήστης κάνει στατιστικές προγνώσεις, ενώ μέσω των επιλογών Test ο χρήστης εκτελεί στατιστικούς ελέγχους για τις κατανομές, επιλέγοντας X-Square test ή Kolmogorov-Smirnov test.

Πίνακας 3. Kolmogorov-Smirnov test στα δεδομένα βροχόπτωσης για την περίοδο 2025-2050.

Kolmogorov-Smirnov test for:All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
Normal	REJECT	REJECT	REJECT	0,27%	0,13758
Normal (L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	0,29%	0,13659
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	74,20%	0,05151
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	48,14%	0,06346
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	33,54%	0,07133
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23,51%	0,07818
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23,61%	0,0781
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	59,31%	0,05823

Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	74,06%	0,05157
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	40,92%	0,06714
EV2-Max	ACCEPT	REJECT	REJECT	1,65%	0,11708
EV1-Min (Gumbel)	REJECT	REJECT	REJECT	0,00%	0,2072
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	REJECT	REJECT	2,96%	0,10973
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	48,81%	0,06313
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	65,34%	0,05552
Pareto	REJECT	REJECT	REJECT	%	0,38902
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95,98%	0,03827
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	69,02%	0,05387
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	41,99%	0,06658
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	25,03%	0,07702
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	0,00%	0,20703
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	REJECT	REJECT	2,24%	0,11329
Pareto (L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	%	0,35429
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	72,37%	0,05235
GEV-Min (kappa specified)	REJECT	REJECT	REJECT	0,01%	0,17025
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96,61%	0,03754
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	0,01%	0,16936

Η λέξη REJECT αντιστοιχεί σε μη-αποδοχή της κατανομής ενώ η λέξη ACCEPT σε επιτυχία του τεστ για διάφορα επίπεδα σημαντικότητας (εδώ φαίνονται τα 1%, 5% και 10%).

Τέλος, είναι δυνατή η στατιστική πρόγνωση παρεμβάλλοντας στις καμπύλες τα διαστήματα εμπιστοσύνης των κατανομών, που υπολογίζονται μέσω μίας διαδικασίας στοχαστικής προσομοίωσης - Monte Carlo. Δύναται η επιλογή ανάμεσα στα 90%, 95%, 99% και 99,9% ως διάστημα εμπιστοσύνης.

3 Περιοχή Μελέτης

3.1 Υδρολογική λεκάνη Γιοφύρου

3.1.1 Γεωλογική – Υδρογεωλογική επισκόπηση

Η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Γιοφύρου (Εικόνα 4) βρίσκεται στο κεντρικό-βόριο τμήμα του νομού Ηρακλείου, καλύπτει μια έκταση περίπου 185 km² και η μέγιστη υδραυλική πορεία του ποταμού είναι 34 km. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες της λεκάνης είναι: +35° 17' 27.58", +25° 6' 45.49".

Από την εκβολή του ποταμού, στο Κρητικό πέλαγος, και κατά τη διεύθυνση Β-Ν η λεκάνη έχει μήκος 25 km, ενώ το πλάτος της παρουσιάζει ελάχιστο, λιγότερο από 1 km. Μεγαλύτερα πλάτη στη λεκάνη εμφανίζονται νοτιότερα, με μέγιστο πλάτος 17,8 km στις νότιες ορεινές περιοχές.

Εντός της υδρολογικής λεκάνης δεν παρουσιάζεται μεγάλη διακύμανση τοπογραφικών υψομέτρων. Το μέγιστο υψόμετρο φτάνει τα 904 m, το ελάχιστο τα 0 m στην εκβολή του ποταμού, ενώ το μέσο υψόμετρο της λεκάνης εκτιμάται στα 330 m και η μέση κατά μήκος κλίση της 17,8 km.



Εικόνα 4. Υδρολογική λεκάνη Γιοφύρου.

Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι μορφολογικά η λεκάνη απορροής, του Γιοφύρου, μπορεί να διακριθεί σε δύο τμήματα. Το νότιο τμήμα που μπορεί να χαρακτηριστεί ως τραχιά ημιορεινή έκταση, και το βόρειο, που παρουσιάζει ηπιότερες κλίσεις.

Από γεωλογική σκοπιά, πρόκειται για προσχισιγενή εδάφη με υψηλό ποσοστό αργιλικού υλικού, ενώ σποραδικά συναντώνται σε μικρές περιοχές αμμοχάλικα,

κορίματα, λατυπαγή, πηλός και θίνες, δηλαδή ηπειρωτικές αποθέσεις. Στην περιοχή έχουν αναπτυχθεί διάφορες καλλιέργειες και συναντώνται δασώδεις εκτάσεις.

Η παροχή του Γιοφύρου είναι εποχιακή λόγω του ότι κατά τους θερινούς μήνες είναι άνυδρος και εμφανίζεται ύστερα από βροχοπτώσεις. Υπάρχουν, επίσης, λίγες πηγές οι οποίες έχουν σχετικά μικρές παροχές.

Το βάθος της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται από 4 έως 5,2 m και μέση ετήσια πτώση της υδροστατικής στάθμης του είναι μικρή και κυμαίνεται από 0,48 m το χειμώνα έως 0,53 m το καλοκαίρι. Για την ετήσια πτώση στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα παρατηρείται πως είναι πολύ μικρότερη στο νότιο τμήμα της λεκάνης και κυμαίνεται από 0,25 m το χειμώνα έως 0,19 m το καλοκαίρι.

3.1.2 Κλιματολογικές συνθήκες

Το κλίμα στη λεκάνη του Γιοφύρου είναι τυπικού μεσογειακού τύπου, με θερμά, ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες. Οι κλιματολογικές συνθήκες εξαρτώνται άμεσα από τους ανέμους, την εξάτμιση, ηλιοφάνεια, θερμοκρασία, υγρασία, χιονόπτωση, βροχή κ.λπ. που επηρεάζουν και το υδατικό δυναμικό.

Για την θερμοκρασία, λήφθηκαν οι μέσες ημερήσιες τιμές όπως υπολογίστηκαν μέσω πολλαπλής γραμμικής παρεμβολής (Multi Linear Regression – MLR) στο κεντροειδές της λεκάνης από δεδομένα θερμοκρασίας που παραχωρήθηκαν από την ΕΜΥ (Αριστείδης Γ. Κουτρούλης, 2010).

Ως δεδομένα βροχόπτωσης λήφθηκε η μέση ημερήσια τιμή αυτής για τη λεκάνη του Γιοφύρου, όπως αυτή υπολογίστηκε μέσω χωρικής παρεμβολής, με τη μέθοδο των Αντιστρόφων Σταθμισμένων Αποστάσεων (Inverse Distance Weighted – IDW) από βροχομετρικά στοιχεία 52 μετεωρολογικών σταθμών για όλη την Κρήτη.

Για την εξάτμιση, έγινε εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (E_{T0}) μέσω της μεθόδου Blaney - Criddle, καθώς η λεκάνη του Γιοφύρου δεν διαθέτει σταθμό μέτρησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

3.2 Εφαρμογή του μοντέλου HBV/IHMS στη λεκάνη του Γιοφύρου

Σκοπός των προσομοιώσεων βροχόπτωσης – απορροής για την υδρολογική λεκάνη του Γιοφύρου είναι η εξαγωγή αξιόπιστων δεδομένων απορροής για τον υπολογισμό των αλλαγών στο καθεστώς της απορροής του ποταμού λόγω κλιματικής αλλαγής.

Επιλέχθηκε η προσομοίωση της υδρολογικής λεκάνης ως μία ενιαία ενότητα. Η επιλογή αυτή ενισχύει την απλότητα του μοντέλου, γεγονός που αυξάνει την ευκολία της προσομοίωσης και ελαττώνει την ανάγκη για δεδομένα, καθώς δίνει και ταχύτητα στους υπολογισμούς, άρα και στο χρόνο προσομοίωσης.

3.2.1 Δεδομένα εισόδου

Δεδομένα εισάχθηκαν για την περίοδο 01-09-1976 έως 31-08-2001. Τα δεδομένα ημερήσιας σημειακής βροχόπτωσης υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των Αντιστρόφων Σταθμισμένων Αποστάσεων (Inverse Distance Weighted – IDW),

τα δεδομένα θερμοκρασίας με τη μέθοδο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στο κεντροειδές της λεκάνης (Multiple Linear Regression – MLR). Ενώ, τα δεδομένα χρονοσειρών εξατμισοδιαπνοής υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Blaney – Criddle, χρησιμοποιώντας τον υπολογισμένο, για την περιοχή μελέτης, συντελεστή για το μέσο ημερήσιο ποσοστό της ετήσιας ηλιοφάνειας κάθε μήνα.

3.2.2 Βαθμονόμηση του μοντέλου (Calibration)

Για την περίοδο βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την 01-09-1976 έως την 01-09-1990.

Για την αρχικοποίηση των μεταβλητών του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η περίοδος 01-09-1976 έως 01-09-1978 ώστε να γίνει ο προσδιορισμός των σωστών ρυθμίσεων από το μοντέλο, όπου προσδιόρισε τις βέλτιστες τιμές για την αρχική κατάσταση της βαθμονόμησης, για την 01-09-1978.

Στη συνέχεια, βαθμονομήθηκαν οι παράμετροι χειροκίνητα με τη σειρά που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2.

3.2.3 Επαλήθευση του μοντέλου (Validation)

Περίοδος επαλήθευσης αποτέλεσε από 01-09-1990 έως 31-08-2001.

Προτού γίνει η επαλήθευση όμως, έγινε αποθήκευση των μεταβλητών για την 01-09-1990 από την βαθμονόμηση και ορίστηκαν ως αρχική κατάσταση για την περίοδο επαλήθευσης.

3.3 Κλιματικά μοντέλα προσομοίωσης

Τα κλιματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα ENSEMBLES που η εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος έγινε υπό το σενάριο A1B και όλα περιέχουν δεδομένα μέχρι 31-12-2099. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και το Ινστιτούτο ανάπτυξής τους.

Πίνακας 4. Κλιματικά μοντέλα προσομοίωσης.

Ακρωνύμιο του RCM	Μοντέλο	Ινστιτούτο Ανάπτυξης του RCM	GCM από όπου προέρχεται το RCM	Βασική Βιβλιογραφική Αναφορά
DMI-HIRHAM5	HIRHAM5	DMI, Denmark	ARPEGE	Christensen et al., 1998
DMI-HIRHAM5	HIRHAM5	DMI, Denmark	ECHAM5	Christensen et al., 1998
ICTP-REGCM3	REGCM3	ICTP, Italy	ECHAM5_r3	Giorgi et al., 1999
KNMI-RACMO2	RACMO2	KNMI, Netherlands	ECHAM5-r3	Christensen et al., 2008
MPI-M-REMO	REMO	MPI, Germany	ECHAM5	Jacob et al., 2001
SMHIRCA	RCA	SMHI, Sweden	ECHAM5-r3	Kjellström et al., 2005
SMHIRCA	RCA	SMHI, Sweden	BCM	Kjellström et al., 2005

4 Αποτελέσματα

4.1 Βαθμονόμηση – Επαλήθευση του μοντέλου

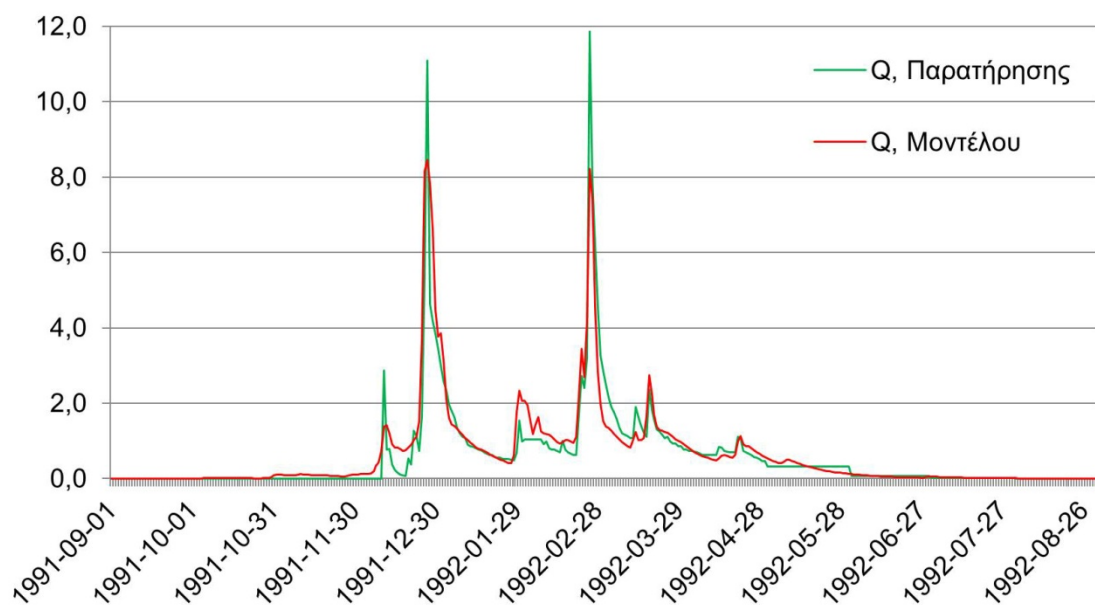
Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων κατά τη βαθμονόμηση και την επαλήθευση του μοντέλου έγινε και με χρήση των δεικτών Nash – Sutcliffe (R^2), της διαφοράς όγκου απορροής όπως και οπτικά από το υδρογράφημα.

Ξεκινώντας από τον συντελεστή συσχέτισης R^2 , όπου δόθηκε και το μεγαλύτερο βάρος, καθώς και από το άθροισμα της διαφοράς της απορροής προσομοίωσης και παρατήρησης (Acc Diff), προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τις δύο περιόδους αντίστοιχα:

Πίνακας 5. Αποτελέσματα Βαθμονόμησης – Επαλήθευσης του μοντέλου.

	Βαθμονόμηση	Επαλήθευση
R^2	0,72	0,71
Acc Diff (mm)	3,20	8,1

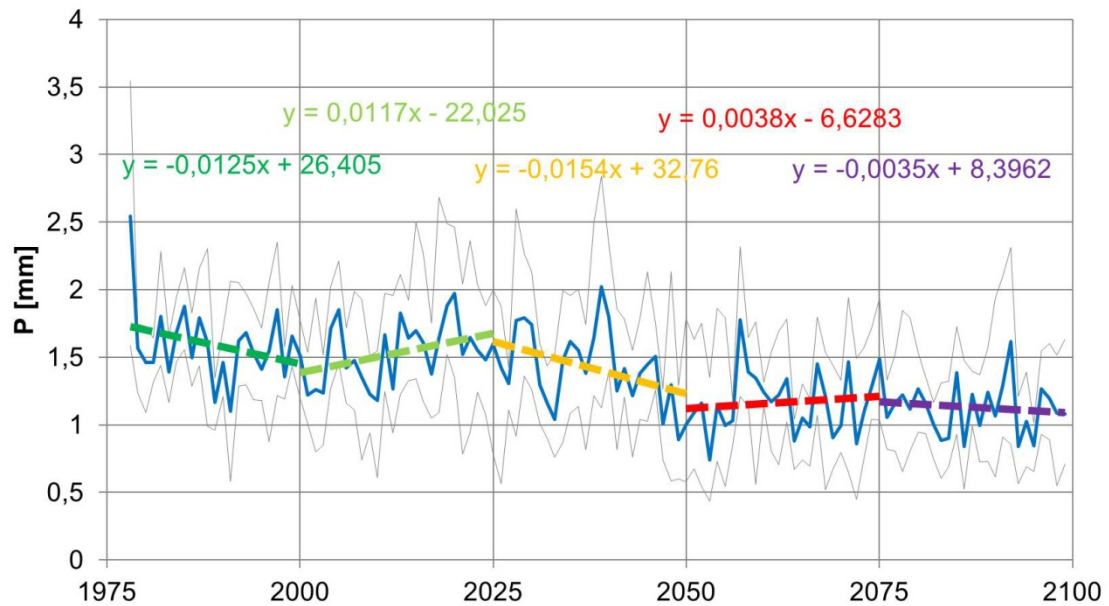
Καθώς ασφαλώς, τελικά, έγινε και οπτική σύγκριση του υδρογραφήματος της απορροής προσομοίωσης και παρατήρησης. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται το υδρογράφημα για το έτος 1991.



Εικόνα 5. Υδρογράφημα απορροής παρατήρησης και προσομοίωσης για το έτος 1991.

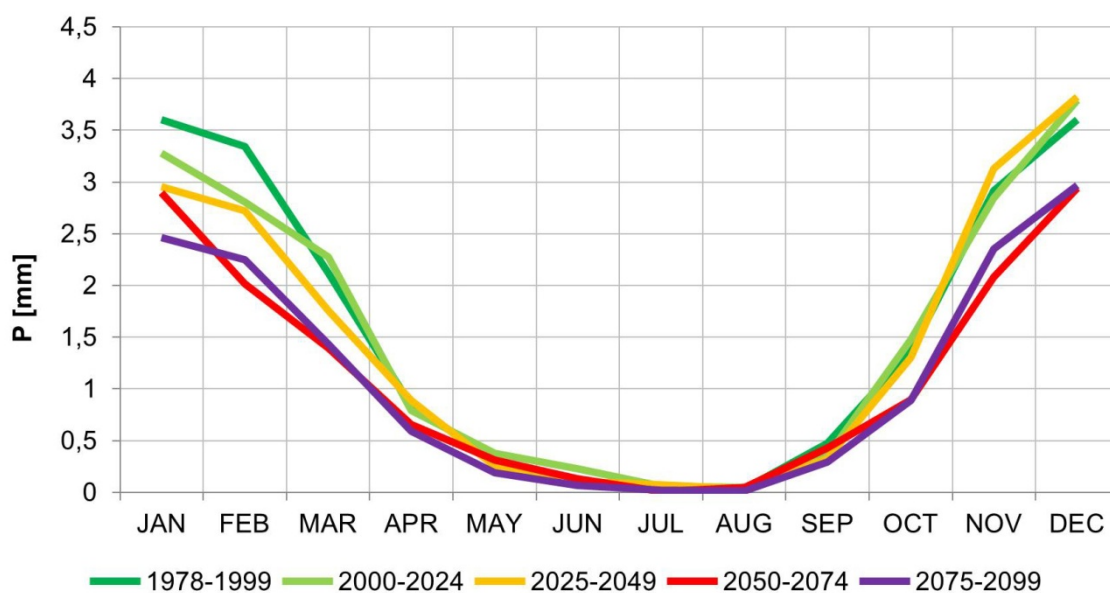
4.2 Αλλαγή στη βροχόπτωση

Τα βροχομετρικά δεδομένα των κλιματικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στις Εικόνες 6 και 7. Για μεγαλύτερη ευκολία και τον ποιοτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων, η συνολική περίοδος της εκατονταετίας χωρίστηκε σε υποπεριόδους των 25 ετών.



Εικόνα 6. Μέση ετήσια βροχόπτωση για την λεκάνη του Γιοφύρου όπως προκύπτει από το μέσο όρο των RCMs (γαλάζια γραμμή). Το εύρος των τιμών μεταξύ των διάφορων μοντέλων δίνεται από τις γκρι γραμμές, ενώ παρουσιάζεται και η τάση ανά 25ετία.

Το γεγονός αυτό, αμέσως βοήθησε στο να διαπιστωθεί ότι στο διάγραμμα βροχόπτωσης εμφανίζεται διαφορετική τάση για κάθε περίοδο. Πέρα από το γενικότερο συμπέρασμα ότι υπάρχει σταδιακή μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, παρατηρείται ότι η τάση, σε κάθε περίοδο, εμφανίζει διαφορετικό πρόσημο στην κλίση της, με αποτέλεσμα την διέγερση των μέσων τιμών κάθε 50 έτη. Ωστόσο, το φαινόμενο αυτό δείχνει να επιβραδύνεται και εν τέλει να ομαλοποιείται η πτώση του διαγράμματος.



Εικόνα 7. Αλλαγή στην εποχικότητα για την βροχόπτωση.

Για να μελετηθεί το πως αλλάζει η κατανομή της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια του έτους, υπολογίστηκαν οι ημερολογιακοί μηνιαίοι μέσοι όροι της βροχόπτωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.

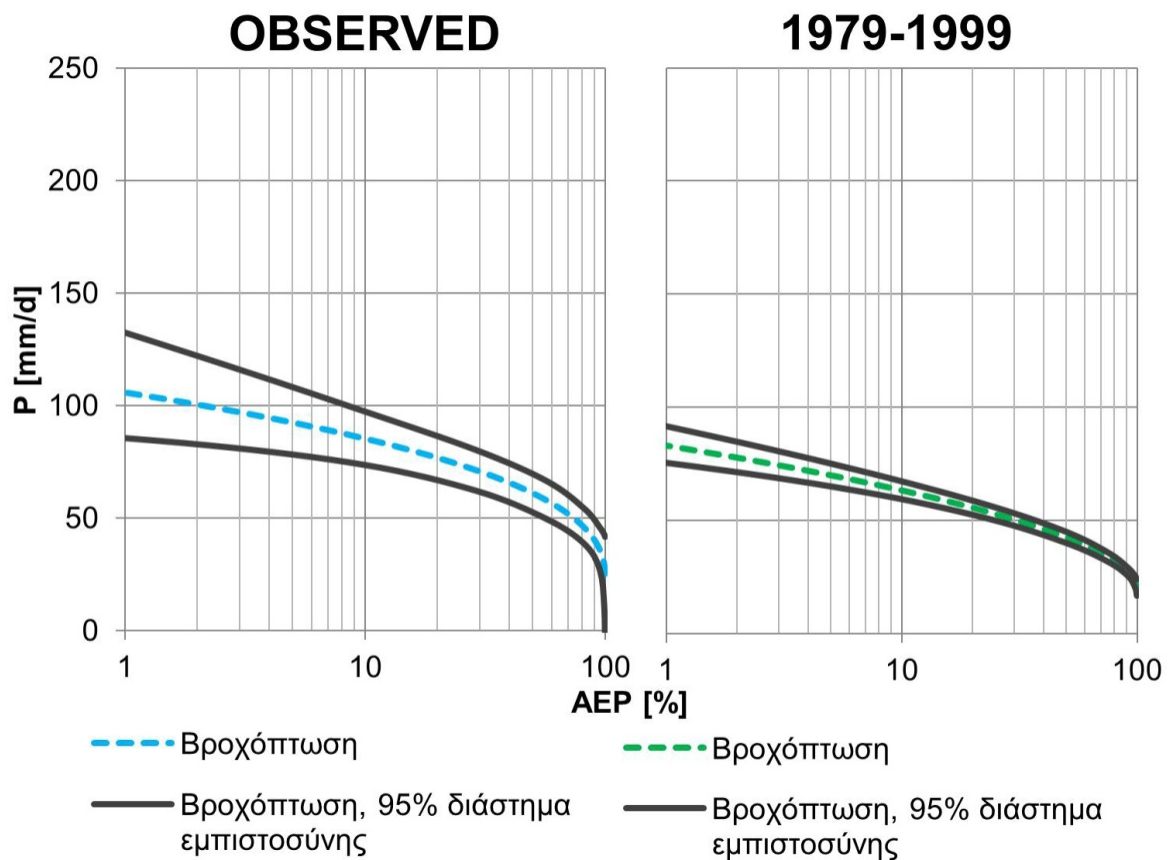
Σύμφωνα με το διάγραμμα εποχικότητας, παρατηρείται σταθερή πτώση στις τιμές της βροχόπτωσης σε κάθε περίοδο μελέτης, διατηρώντας κοινή συμπεριφορά εποχιακά και χωρίς αξιοσημείωτες μεταβολές.

4.2.1 Αλλαγή στις ακραίες τιμές βροχόπτωσης

Η ανάλυση για τις ακραίες τιμές βροχόπτωσης έγινε με την βοήθεια του λογισμικού Hydrognomon. Δεδομένα εισόδου αποτέλεσαν οι μέγιστες τιμές βροχόπτωσης που εμφανίστηκαν ανά έτος, σε κάθε κλιματικό μοντέλο αντίστοιχα.

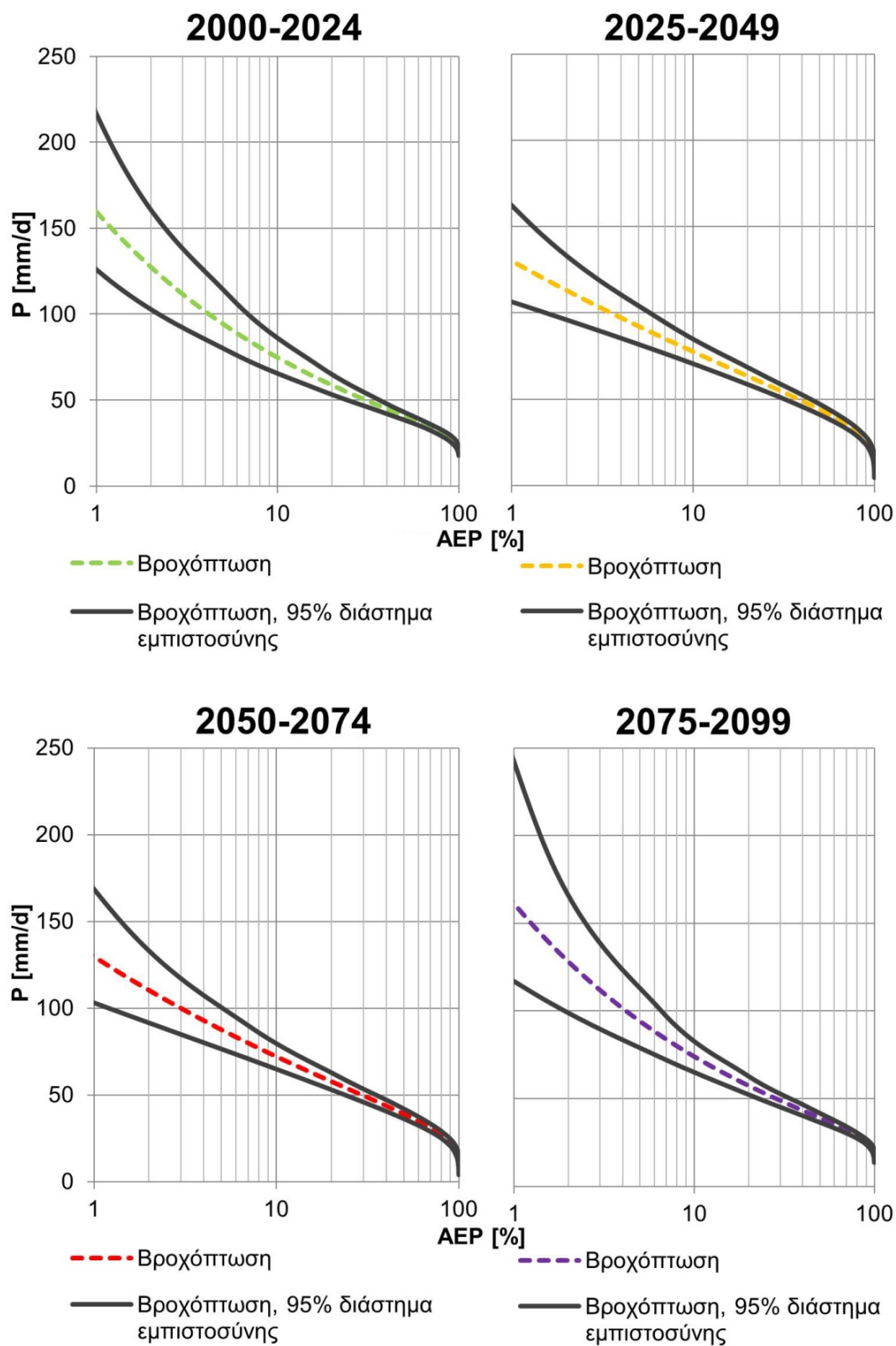
Έπειτα, τα δεδομένα υποβλήθηκαν στο στατιστικό τεστ Kolmogorov – Smirnov, για να διαπιστωθεί ποια κατανομή χαρακτηρίζει βέλτιστα την κύρια μάζα τους.

Υπολογίστηκαν τα διαστήματα εμπιστοσύνης 95% για τις κατανομές που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 8. Σύγκριση των δεδομένων παρατηρημένης βροχόπτωσης (αριστερά) με των υπολογισμένων τιμών από τα κλιματικά μοντέλα (δεξιά) για την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης (Annual Exceedance Probability, AEP).

Συγκρίνοντας τις κατανομές των παρατηρηθέντων με των υπολογισμένων από τα μοντέλα δεδομένων, διαπιστώνεται μια σταθερή απόκλιση, παρά το γεγονός ότι έχουν εφαρμοστεί οι απαραίτητες διορθώσεις σφάλματος μεροληψίας. Το γεγονός αυτό συμβαίνει λόγω της διαφοράς του όγκου των δεδομένων για κάθε περίπτωση, αφού προφανώς χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω από ένα RCM. Για το λόγο αυτό, η περεταίρω σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις μελλοντικές περιόδους, γίνεται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα κλιματικά μοντέλα για την περίοδο 1979-1999, αντί των τιμών παρατήρησης.



Εικόνα 9. Σύγκριση ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης των ακραίων τιμών βροχόπτωσης ανά περίοδο μελέτης.

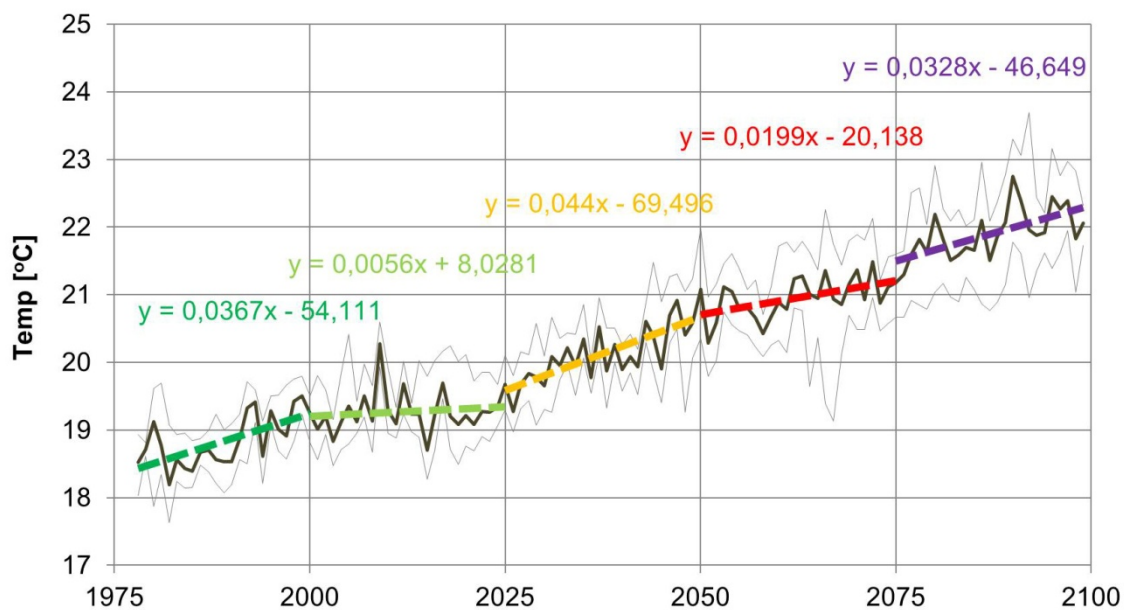
Παρατηρώντας τα διαγράμματα ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης για τα δεδομένα βροχόπτωσης (Εικόνα 9), διαπιστώνεται σημαντική διακύμανση στις ακραίες τιμές από περίοδο σε περίοδο.

Η κύρια και η σημαντικότερη πληροφορία που αντλείται, είναι πως αντίθετα με την τάση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, που μειώνεται στο σύνολο των περιόδων, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6, οι ακραίες τιμές βροχόπτωσης τείνουν να αυξάνουν ποσοτικά. Δηλαδή, κατά την πάροδο των ετών, παρόλο που η βροχόπτωση μειώνεται, προβλέπονται ακραία γεγονότα μεγαλύτερης έντασης απ' ότι προγενέστερα.

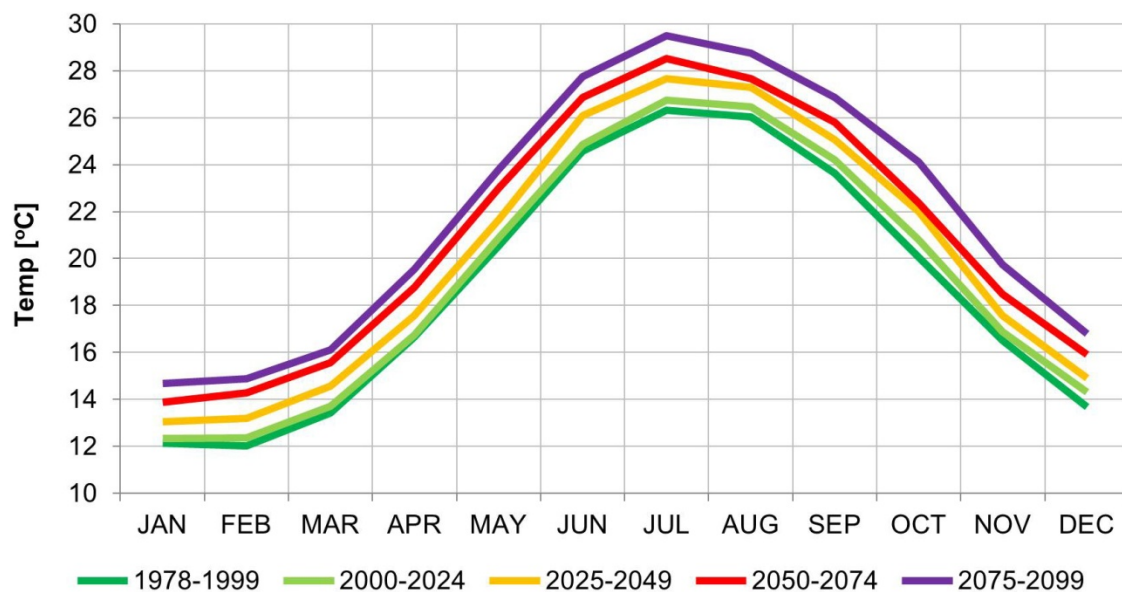
4.3 Αλλαγή στη θερμοκρασία

Τα αποτελέσματα της διακύμανσης στη θερμοκρασία, όπως υπολογίστηκαν από το υδρολογικό μοντέλο, παρουσιάζονται γραφικά στις Εικόνες 10 και 11.

Παρατηρείται σταδιακή αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας, μεταξύ 3-4°C συνολικά μέσα στην περίοδο μελέτης, χωρίς ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις και αλλαγές στη συμπεριφορά του γραφήματος ανά υποπερίοδο ή εποχιακά.



Εικόνα 10. Μέση ετήσια θερμοκρασία όπως προκύπτει από το μέσο όρο των RCMs (καφέ γραμμή). Το εύρος των τιμών μεταξύ των διάφορων μοντέλων δίνεται από τις γκρι γραμμές, ενώ παρουσιάζεται και η τάση ανά 25ετία.



Εικόνα 11. Αλλαγή στην εποχικότητα για την θερμοκρασία.

4.3.1 Αλλαγή στις ακραίες τιμές θερμοκρασίας

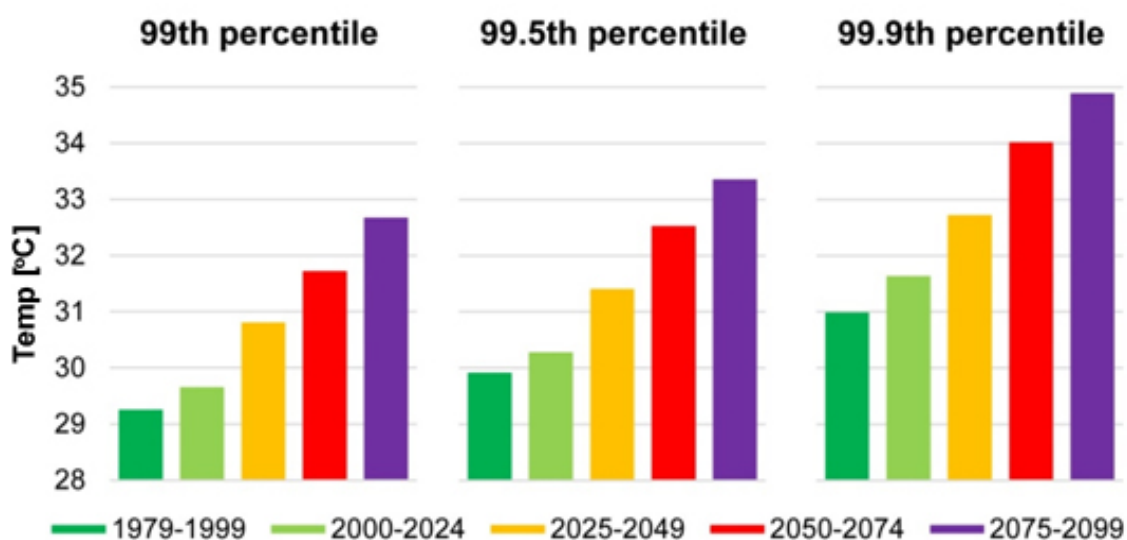
Για την ανάλυση των ακραίων τιμών στα δεδομένα θερμοκρασίας, πραγματοποιήθηκε έλεγχος αυτών, για τα 99, τα 99,5 και τα 99,9 εκατοστημόρια για κάθε υποπερίοδο, σε κάθε κλιματικό μοντέλο αντίστοιχα.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Παρουσίαση αναλυτικών αποτελεσμάτων των κλιματικών μοντέλων ανά εκατοστημόρια.

	PERCENTILE	DMI-HIRHAM5_A1B_ARPEGE	DMI-HIRHAM5_A1B_ECHAM5	ICTP-REGCM3_A1B_ECHAM5_r3	KNMI-RACMO2_A1B_ECHAM5-r3	MPI-M-REMO_SCN_ECHAM5	SMHIRCA_A1B_ECHAM5-r3	SMHIRCA_CTR_BCM	AVERAGE
1979-1999	0,99	29,51	29,33	29,49	29,37	29,12	29,31	28,67	29,26
	0,995	30,19	30,17	30,18	30,06	29,54	30,00	29,32	29,92
	0,999	31,99	31,45	31,36	30,78	30,26	30,76	30,36	30,99
2000-2024	0,99	29,93	29,82	29,52	29,38	29,46	29,57	29,94	29,66
	0,995	30,65	30,51	30,16	30,00	30,06	30,13	30,43	30,28
	0,999	31,96	32,44	31,35	31,51	30,97	31,52	31,75	31,64
2025-2049	0,99	31,09	30,96	30,36	30,64	30,45	30,69	31,46	30,81
	0,995	31,84	31,52	30,99	31,33	30,91	31,24	32,05	31,41
	0,999	33,16	32,79	32,13	32,34	31,89	32,63	34,09	32,72

2050-2074	0,99	30,91	32,08	31,38	31,54	31,44	32,24	32,45	31,72
	0,995	31,57	32,97	32,16	32,49	32,06	33,15	33,29	32,53
	0,999	32,82	34,93	33,75	34,03	33,37	34,57	34,68	34,02
2075-2099	0,99	31,97	32,66	32,34	32,47	32,34	33,03	33,90	32,67
	0,995	32,82	33,72	33,00	33,07	32,77	33,67	34,46	33,36
	0,999	34,59	35,03	34,53	34,68	34,20	35,55	35,67	34,89



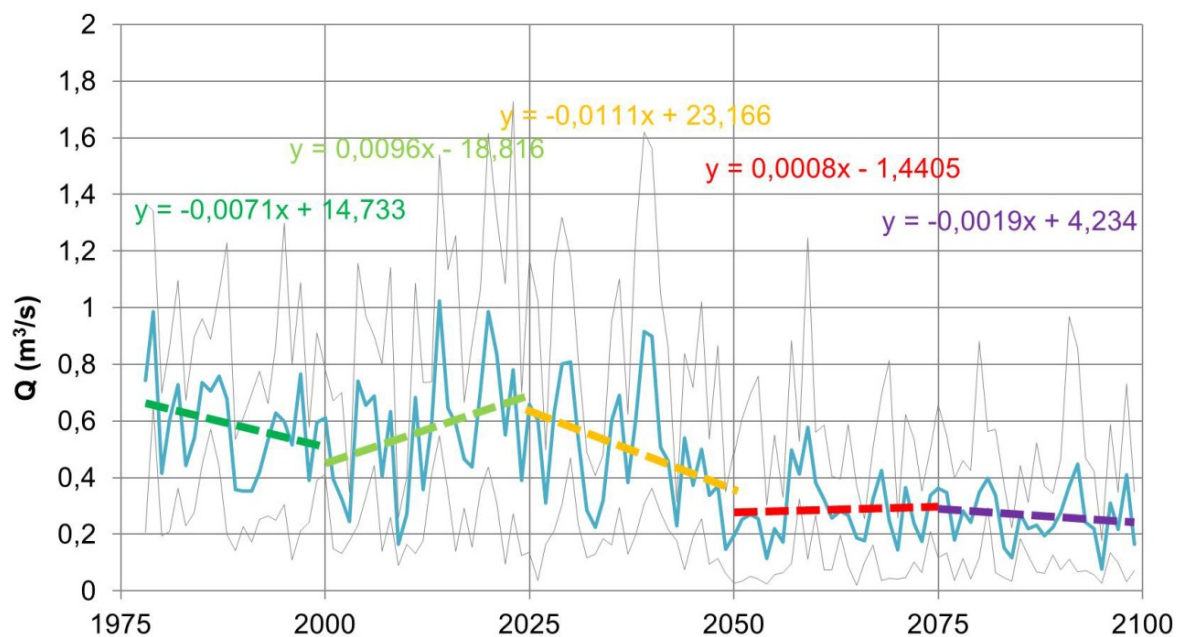
Εικόνα 12. Σχηματική παρουσίαση των αναλυτικών αποτελεσμάτων των κλιματικών μοντέλων ανά εκατοστημόριο.

Ακολουθώντας κοινή συμπεριφορά στα αντίστοιχα εκατοστημόρια, παρατηρείται σταδιακή αύξηση των μέγιστων τιμών θερμοκρασίας από υποπερίοδο σε υποπερίοδο, μεταξύ 3-4°C στη συνολική περίοδο μελέτης. Σε αυτή την περίπτωση, σε αντίθεση με τα δεδομένα βροχόπτωσης, τα αποτελέσματα κατέληξαν κατά την ίδια κατεύθυνση με τις υποψίες μας, βάσει της κατανομής θερμοκρασιών, Εικόνα 10.

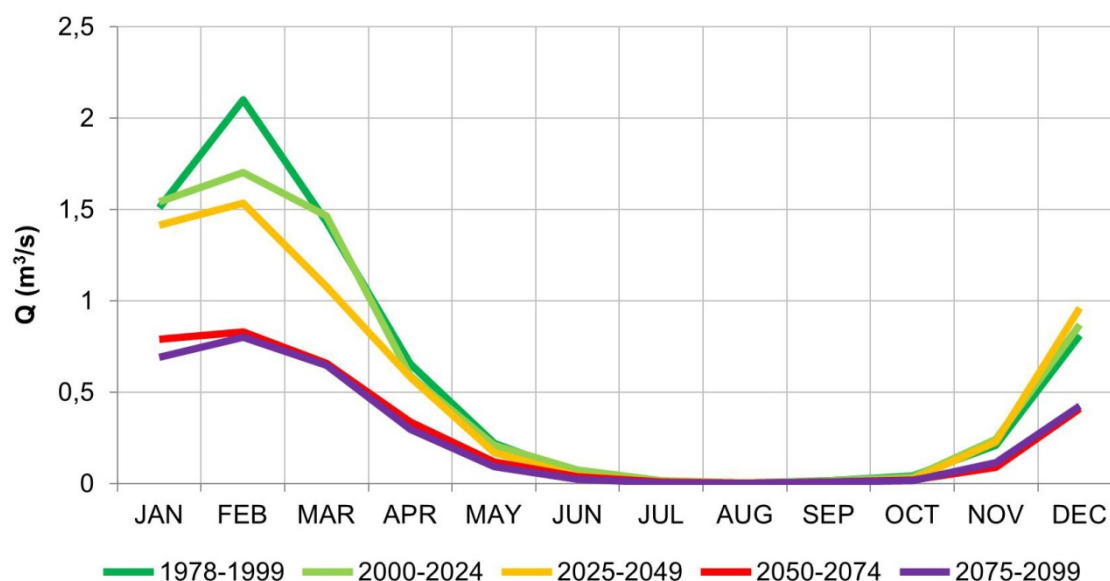
4.4 Αλλαγή στην απορροή

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο HBV/IHMS για την απορροή, για την συνολική περίοδο 1979-2099, παρουσιάζονται στις Εικόνες 13 και 14.

Η αρχική και κύρια διαπίστωση, είναι πως το γράφημα ακολουθεί το ίδιο μοτίβο που παρουσιάστηκε και στα δεδομένα βροχόπτωσης, στην Εικόνα 6. Δηλαδή, παρά την συνολική πτώση του γραφήματος, παρατηρείται μια διέγερση των τιμών κατά την περίοδο 2000-2025 που κατόπιν επιβραδύνεται, ενώ στη συνέχεια, το γράφημα δείχνει να ομαλοποιείται μέχρι το τέλος της περιόδου μελέτης.



Εικόνα 13. Μέση ετήσια απορροή για την λεκάνη του Γιοφύρου όπως προκύπτει από το μέσο όρο των RCMs (γαλάζια γραμμή). Το εύρος των τιμών μεταξύ των διάφορων μοντέλων δίνεται από τις γκρι γραμμές, ενώ παρουσιάζεται και η τάση ανά 25ετία.

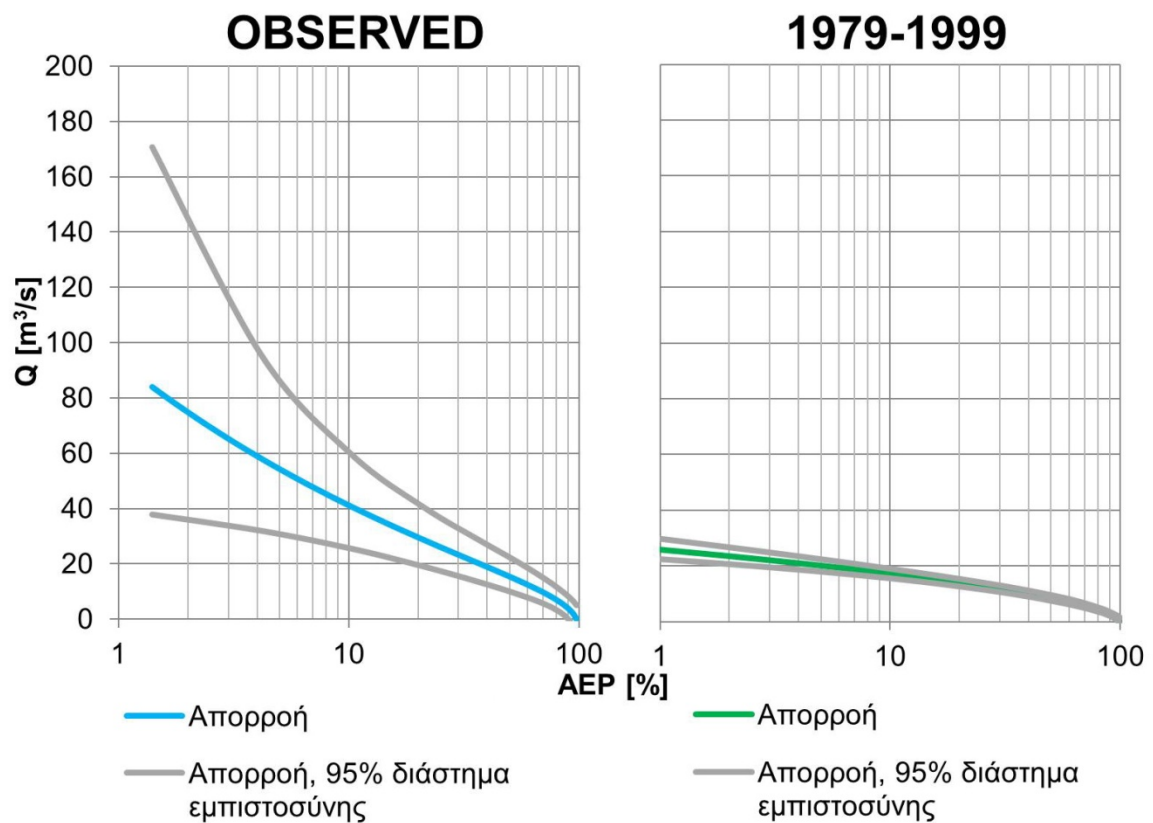


Εικόνα 14. Αλλαγή στην εποχικότητα για την απορροή.

Παρατηρώντας την κατανομή της εποχικότητας, για τη μηνιαία διακύμανση της απορροής στην Εικόνα 14, παρατηρείται σταδιακή μείωση της απορροής ανά περίοδο, διατηρώντας κοινή συμπεριφορά εποχιακά, εμφανίζοντας όμως μια απότομη μείωση στην περίοδο 2050-2074, αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση στην βροχόπτωση για την ίδια περίοδο, όπως φάνηκε στην Εικόνα 7. Παρόλα αυτά όμως, το φαινόμενο αυτό διαπιστώνεται κι από το διάγραμμα της απορροής, στην Εικόνα 13 και θα μπορούσε να θεωρηθεί και προβλέψιμο.

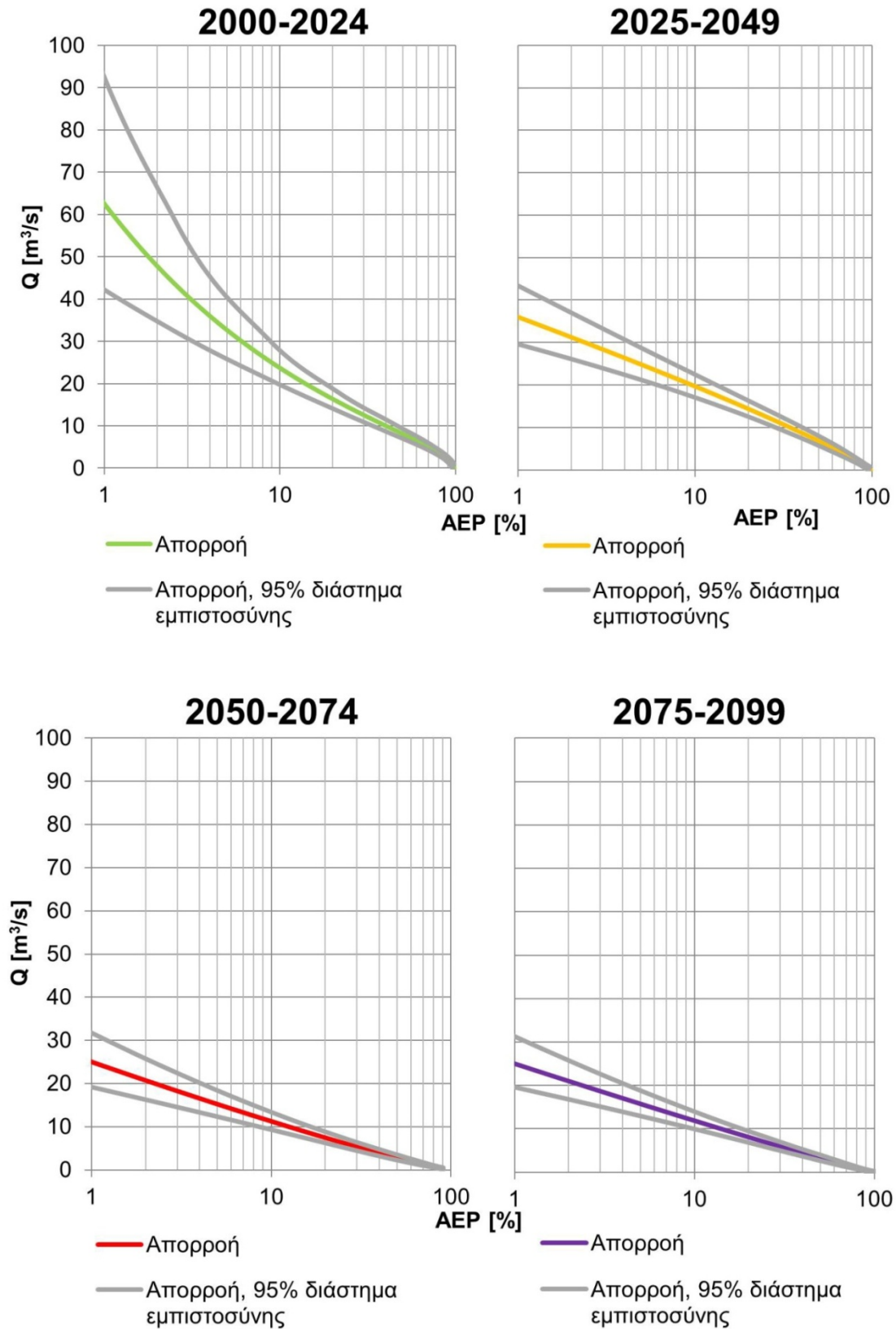
4.4.1 Αλλαγή στις ακραίες τιμές απορροής

Η ανάλυση των ακραίων τιμών απορροής για την περίοδο μελέτης έγινε, επίσης, με την βοήθεια του λογισμικού Hydrognomon.



Εικόνα 15. Σύγκριση των δεδομένων παρατηρημένης απορροής (αριστερά) με των υπολογισμένων τιμών από τα κλιματικά μοντέλα (δεξιά) για την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης.

Παρατηρώντας τις κατανομές στην Εικόνα 15, διαπιστώνεται για ακόμη μια φορά, σταθερή απόκλιση μεταξύ τους, παρά το γεγονός ότι έχουν εφαρμοστεί οι απαραίτητες διορθώσεις σφάλματος μεροληψίας, επαναλαμβάνοντας τη συμπεριφορά που αναλύθηκε και στα διαγράμματα βροχόπτωσης. Το γεγονός αυτό συμβαίνει λόγω της διαφοράς του όγκου των δεδομένων για κάθε περίπτωση, αφού προφανώς χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω από ένα RCM. Για το λόγο αυτό, η περεταίρω σύγκριση γίνεται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα κλιματικά μοντέλα για την περίοδο 1979-1999, αντί των τιμών παρατήρησης.



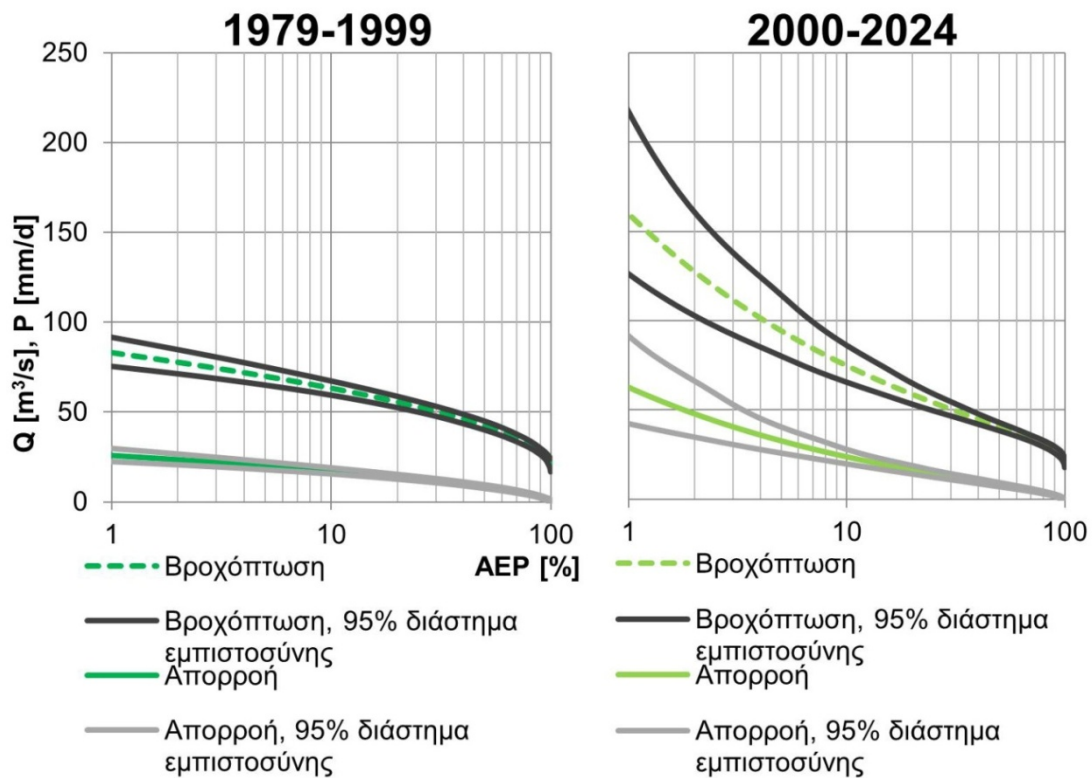
Εικόνα 16. Σύγκριση ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης των ακραίων τιμών απορροής ανά περίοδο μελέτης.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης για τα δεδομένα απορροής, στην Εικόνα 16, διαπιστώνεται μια σημαντική διέγερση στις ακραίες τιμές κατά την περίοδο 2000-2024, όπου και την διαφοροποιεί από τις υπόλοιπες περιόδους, που κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα.

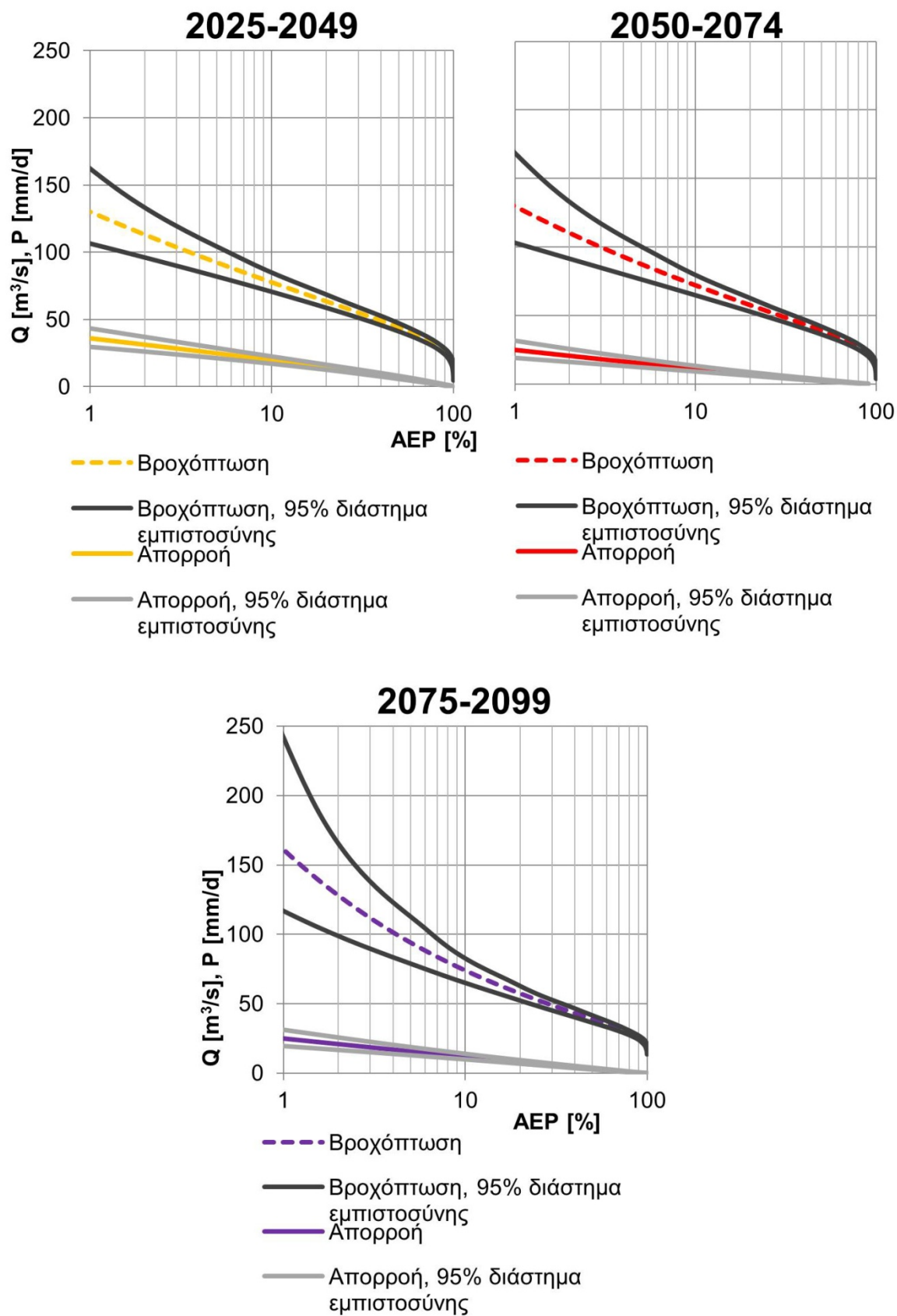
Η διέγερση αυτή, γίνεται κατανοητή κι από το διάγραμμα απορροής, Εικόνα 13, λόγω του ότι κατά την ίδια περίοδο σημειώνεται κορύφωση στα δεδομένα απορροής. Εξίσου όμως, και στις υπόλοιπες περιόδους υπάρχει συμφωνία με τα συμπεράσματα που έχουν διεξαχθεί, καθώς με την πάροδο των ετών παρατηρείται πως ομαλοποιείται η απορροή.

4.5 Σύγκριση ακραίων τιμών βροχόπτωσης – απορροής

Για να επιτευχθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις ακραίες τιμές βροχόπτωσης κι απορροής, συγκεντρώθηκαν τα δεδομένα σε κοινά διαγράμματα ανά υποπεριόδους. Στις Εικόνες 17 και 18 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα.



Εικόνα 17. Σύγκριση βροχόπτωσης – απορροής για την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης.



Εικόνα 18. Σύγκριση βροχόπτωσης – απορροής για την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης.

Παρατηρώντας τα συγκεντρωτικά διαγράμματα ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης για την βροχόπτωση και την απορροή, συνοψίζοντας, το συμπέρασμα που εξάγεται είναι πως στη περιοχή μελέτης, την υδρολογική λεκάνη του Γιοφύρου, προβλέπεται τον αιώνα που διανύεται να σημειωθούν ακραία φαινόμενα με τιμές βροχόπτωσης μεγαλύτερες απ' ότι στην περίοδο παρατήρησης, με αποκορύφωμα στην τελευταία περίοδο μελέτης, 2075-2099.

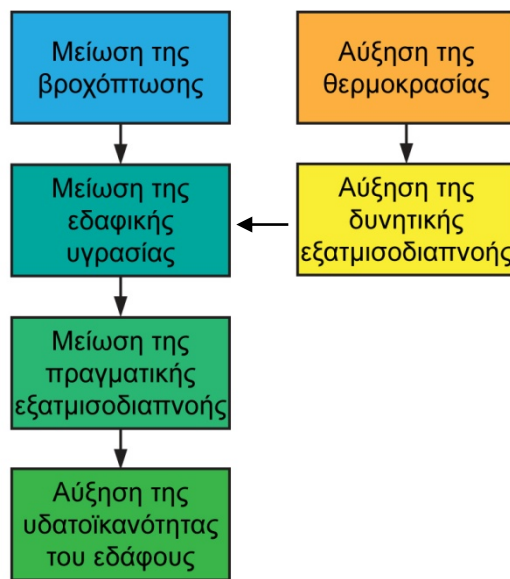
Ενδιαφέρον είναι το γεγονός, ότι παρά αυτή την έξαρση των ακραίων φαινομένων στη βροχόπτωση, η απορροή διατηρεί σταθερά επίπεδα συμπεριφοράς.

Αυτή η συμπεριφορά, μπορεί να δικαιολογηθεί τόσο από το γεγονός ότι το υδρολογικό μοντέλο HBV/IHMS δεν παράγει πλήρως τα γεγονότα έντονης απορροής, όπως φαίνεται άλλωστε κι στο υδρογράφημα απορροής, στην Εικόνα 5. Άλλος ένας μηχανισμός ο οποίος συμβάλει στο φαινόμενο αυτό, μπορεί να παρατηρηθεί στα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7, όπου καταγράφονται οι υπολογισμένες από το υδρολογικό μοντέλο, υγρασία του εδάφους και εξατμισοδιαπνοή.

Πίνακας 7. Μέσες τιμές εδαφικής υγρασίας και εξατμισοδιαπνοής για κάθε περίοδο μελέτης (Υπολογισμένες τιμές από το μοντέλο HBV/IHMS και μέσω της εξίσωσης Blaney Criddle).

	Υγρασία εδάφους [mm]	Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή [mm/day]	Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή μέσω Blaney Criddle [mm/day]
1979-1999	159,0	1,254	4,204
2000-2024	154,2	1,233	4,246
2025-2049	147,6	1,191	4,345
2050-2074	120,5	1,005	4,443
2075-2099	116,8	0,984	4,548

Παρατηρείται πως κατά την πάροδο των ετών, η εδαφική υγρασία μειώνεται ως αποτέλεσμα της μείωσης της βροχόπτωσης και της αύξησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, μειώνοντας έτσι και το διαθέσιμο προς εξατμισοδιαπνοή νερό. Έτσι, γίνεται πιθανότερο, το έδαφος να έχει μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης βροχόπτωσης (το φαινόμενο του initial abstraction) πριν από κάποιο γεγονός βροχόπτωσης, εξομαλύνοντας με τον τρόπο αυτό την ένταση των τιμών της απορροής του δεδομένου γεγονότος. Έτσι, υποστηρίζονται τα αποτελέσματα της απορροής που παραμένουν σε ομαλά επίπεδα, παρά τα ακραία φαινόμενα βροχόπτωσης. Ο μηχανισμός αυτός εξηγείται σχηματικά στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19. Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην εξατμισοδιαπνοή και την υδατοϊκανότητα του εδάφους.

5 Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία της λεκάνης του ποταμού Γιοφύρου. Η ανάλυση επιτεύχθηκε με την υδρολογική προσομοίωση της βροχόπτωσης – απορροής, μέσω του υδρολογικού μοντέλου HBV/IHMS, για την περίοδο 1979-2099.

Για την προσομοίωση των μελλοντικών περιόδων, χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια δεδομένα από 7 περιοχικά κλιματικά μοντέλα του προγράμματος ENSEMBLES, τα οποία δρουν υπό το A1B σενάριο του IPCC. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που εξήχθηκαν από το HBV/IHMS, προκύπτει αρχικά ότι τα δεδομένα από τα RCMs παρουσιάζουν συστηματικό σφάλμα μεροληψίας και τείνουν να υπερεκτιμούν την αλλαγή της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης.

Στην περιοχή μελέτης, την υδρολογική λεκάνη του ποταμού Γιοφύρου, παρουσιάζεται μία μέση αύξηση της θερμοκρασίας 3-4°C, ενώ, παρατηρείται σταδιακή μείωση της βροχόπτωσης έως το τέλος του αιώνα. Ενδιαφέρον όμως παρουσιάζεται στο ότι, παρά τη μείωση στη βροχόπτωση, κατά την πάροδο των ετών, θα εμφανίζονται υψηλότερης έντασης ακραία φαινόμενα βροχόπτωσης.

Όσον αφορά την απορροή, παρουσιάζει εξίσου καθοδική τάση συνολικά μέσα στην περίοδο μελέτης. Αυτό όμως που κέντρισε το ενδιαφέρον ήταν πως παρά την αύξηση στην ένταση των ακραίων φαινομένων βροχόπτωσης, όπως παρατηρήθηκε, οι ακραίες τιμές για την απορροή εμφανίζονται με ομαλότητα στις αντίστοιχες χρονικές περιόδους. Γι' αυτό το λόγο, πραγματοποιήθηκε

έλεγχος στα δεδομένα εξόδου υγρασίας εδάφους και εξατμισοδιαπνοής του υδρολογικού μοντέλου HBV/IHMS και διαπιστώθηκε πως πράγματι τα ποσοστά συγκράτησης της υγρασίας του εδάφους επηρεάστηκαν από την αύξηση της θερμοκρασίας, παρά τα ακραία φαινόμενα βροχόπτωσης.

Συνοψίζοντας, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως λόγω του ότι η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ημερήσια δεδομένα παρατήρησης, μην υπάρχοντας διαθέσιμα δεδομένα μικρότερης χρονικής κλίμακας. Τα αποτελέσματά που εξήχθησαν είναι περιορισμένα όσον αφορά την εκτίμηση του πλημμυρικού κίνδυνου, αφού η ημερήσια κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε δεν αποτελεί την πιο κατάλληλη για εκτίμηση ακραίων φαινομένων, καθώς ιδανική θα αποτελούσε η χρήση ωριαίων ή ακόμη και 5λεπτων τιμών.

Έτσι, συνυπολογίζοντας την παραπάνω παρατήρηση, συμπεραίνεται πως ακόμη υπάρχει πλημμυρικός κίνδυνος, σε περίπτωση εκδήλωσης έντονης βροχόπτωσης και το έδαφος είναι κορεσμένο.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Προς υποστήριξη των αυξανόμενων απαιτήσεων, δημιουργήθηκε το πρόγραμμα CORDEX, το οποίο βασίζεται στα νέα σενάρια εκπομπών. Δημιουργεί κλιματικές προσομοιώσεις όπου βασίζονται σε πολλαπλά δυναμικά και εμπειρικά στατιστικά μοντέλα όπου αναφέρονται ως CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project) και μεγαλώνουν την χωρική ανάλυση στην Ευρώπη από 25 km σε 12 km (EURO-CORDEX).

Τα δεδομένα των RCMs του CORDEX δεν είναι ακόμα διαθέσιμα στην επιστημονική κοινότητα, ωστόσο, με την αξιοποίηση των νέων κλιματικών προσομοιώσεων θα δοθεί μελλοντικά η δυνατότητα για περαιτέρω έρευνα πάνω στην επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία των λεκανών απορροής των ποταμών.

Βιβλιογραφία

- Allen G. Richard and Pruitt O. William, Members ASCE 1991. FAO-24 Reference evapotranspiration factors. Journal of Irrigation and Drainage Engineering Vol. 117, No. 5.: 758-773.
- Amadio P., Mancini M., Menduni G., Rabuffetti D., Ravazzani G., (2003), A real-time flood forecasting system based on rainfall thresholds working on the Arno Watershed: definition and reliability analysis. In: Proceedings of the 5th EGS Plinius Conference held at Ajaccio, Corsica, France
- Blaney, H.F. and W.D. Criddle, 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Cons. Serv. SCS-TP 96:44.
- Blaney, H.F. and W.D. Criddle, 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements. USDA Tech Bull. 1275:59.
- Christensen J. H., Christensen O. B., Lopez P., van Meijgaard E. and M. Botzet, (1996), The HIRHAM4 Regional Atmospheric Climate Model. DMI Scientific Report 96-4, 1996.
- Christensen, J. H. et al., (2008), On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. Geophysical Research Letters, 35(20), p.L20709. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008GL035694> [Accessed May 28, 2013].
- Doorenbos J., W.O. Pruitt, 1977, Guidelines for predicting crop water requirements, FAO-ONU, Rome, Irrigation and Drainage Paper no. 24 (rev.), 144 pp.
- EEA, (2005), Climate change and river flooding in Europe. EEA Briefing, 1, 1-4.
- FAO, 1986. Irrigation water management, Training manuals S2022, ISSN 1020-4261
- Ganoulis J., (2003), Risk-based floodplain management: A case study from Greece. Intl. J. River Basin Management Vol. 1, No. 1, pp. 41–47
- Georgakakos K. P., (2006), Analytical results for operational flash flood guidance. J Hydrol 317:81–103
- Golian S., Saghafian B., Maknoon R., (2010), Derivation of Probabilistic Thresholds of Spatially Distributed Rainfall for Flood Forecasting. Water Resour Manage, doi: 10.1007/s11269-010-9619-7

- Grillakis, M. G., A. G. Koutroulis, and I. K. Tsanis, (2013), Multisegment statistical bias correction of daily GCM precipitation output, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 3150–3162, doi:10.1002/jgrd.50323.
- Jacob, D., (2001), A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol.77, Issue 1-4, 61-73.
- Kjellström, E., L. Bärring, S. Gollvik, U. Hansson, C. Jones, P. Samuelsson, M. Rummukainen, A. Ullerstig, U. Willén, and K. Wyser, (2005), A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3), *SMHI Reports Meteorology and Climatology*, 108, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 54 pp.
- Kleinen, T. and G. Petschel-Held, (2007), Integrated assessment of changes in flooding probabilities due to climate change. *Climatic Change*, 81, 283-312.
- Martini F., Loat R., (2007), Handbook on good practices for flood mapping in Europe. Paris/Bern: European exchange circle on flood mapping (EXCIMAP)
- Martin-Vide J. P., Ninerola D., Bateman A., Navarro A., Velasco E., (1999), Runoff and sediment transport in a torrential ephemeral stream of the Mediterranean coast. *Journal of Hydrology* 225: 118–129.
- Munich Re, (2002), Topics, an annual review of natural catastrophes. Munich Reinsurance Company Publications, Munich
- Nakicenovic, N. et al., (2000), Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp.
- Norbiato D., Borga M., Esposti S. D., Gaume E., Anquetin S., (2008), Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: an assessment for gauged and ungauged basins. *J Hydrology* 362:274–290
- Panagoulia D., (1991), Hydrological response of a medium-sized mountainous catchment to climate changes. *Hydrological Sciences Journal*, 36:525-547.
- Panagoulia D., (1992), Impacts of GISS-modelled climate changes on catchment hydrology. *Hydrological Sciences Journal* 37:141-163.
- Panagoulia D., Dimou G., (1997), Sensitivity of flood events to global climate change. *Journal of hydrology* 191:208-222.
- Rosenzweig, C., G. Casassa, D. J., Karoly, A., Imeson, C., Liu, A., Menzel, S., Rawlins, T. L. Root, B. Seguin, P. Tryjanowski, (2007), Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. *Climate*

- Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 79-131.
- Samuel, J., Coulibaly, P., and Metcalfe, R., (2011), Estimation of Continuous Streamflow in Ontario Ungauged Basins: Comparison of Regionalization Methods, J. Hydrol. Eng., 16(5), 447–459
- Smith K., Ward R., (1998), Floods – physical processes and human impacts, John Wiley and Sons, Chichester.
- USDA Soil Conservation Service, 1970. Irrigation water requirements. Tech. RealiseNo 21: 92.
- Wilbanks, T. J., P. Romero Lankao, M. Bao, F. Berkhout, S. Cairncross, J.- P. Ceron, M. Kapshe, R. Muir-Wood and R. Zapata-Marti, (2007), Industry, settlement and society. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 357-390.
- Xystrakis, F. and Matzarakis, A. (2011). "Evaluation of 13 Empirical Reference Potential Evapotranspiration Equations on the Island of Crete in Southern Greece." J. Irrig. Drain Eng., 137(4), 211–222.
- Ανδρεαδάκης Ε., Φουντούλης Ι., (2007), Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας σε τεκτονικά ενεργές περιοχές. Συμπόσιο τεκτονικής γεωλογίας προς τιμή του Ομότιμου Καθηγητή Ηλία Μαριολάκου της Επιτροπής Τεκτονικής της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας.
- Αριστείδης Γ. Κουτρούλης et al., (2004), Προσομοίωση πλημμυρικών φαινομένων λεκάνης απορροής με ανεπαρκή στοιχεία πεδίου. Εφαρμογή στην υδρολογική λεκάνη του Γιοφύρου. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Αριστείδης Γ. Κουτρούλης, (2010), Ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα και επίδραση της κλιματικής μεταβολής στην εξέλιξή τους. Εφαρμογή στην περιοχή της Κρήτης. Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Δημήτρης Παπανικολάου και Μιχάλης Διακάκης, (2011), Μεταβολές στην ένταση και την κατανομή των φυσικών καταστροφών, Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής.

Ιωάννης Καψωμενάκης et al., (2011), Σενάρια ανθρωπογενούς παρέμβασης στην κλιματική αλλαγή και τα προγράμματα Prudence και Ensembles, Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής.

Νικολαΐδου Μ., Χατζηχρίστου Ε., (1995), Καταγραφή και αποτίμηση των καταστροφών από πλημμύρες στην Ελλάδα και την Κύπρο. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλασσίων Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.