

Λουκάς, Α., Λ. Βασιλειάδης, and Ν. Μπαστρογιάννης (2003). “Υδρολογική Προσομοίωση Υδατικού Ισοζυγίου Λεκάνης Απορροής Γερμασόγειας, Κύπρος.” *Πρακτικά Ημερίδας «Μελέτες και Έρευνες Υδατικών Πόρων στον Κυπριακό Χώρο*, Λευκωσία, Κύπρος, 20 Ιουνίου 2003, pp. 83-114.

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ, ΚΥΠΡΟΣ

Α. Λουκάς¹, Λ. Βασιλειάδης² και Ν. Μπαστρογιάννης
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

1 aloukas@uth.gr

2 lvassil@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διάφορα αδρομερή μοντέλα υδατικού ισοζυγίου έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της μηνιαίας απορροής στη λεκάνη της Γερμασόγειας στη Κύπρο. Ένα μοντέλο υδατικού ισοζυγίου που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή και τρία μοντέλα, όπως έχουν προταθεί από τους Abulohom et al. (2001), Giakoumakis et al. (1991), και Thornthwaite (1948) τροποποιημένο από τον Alley (1984), έχουν αναπτυχθεί. Τα μοντέλα αυτά χρειάζονται ως δεδομένα εισόδου την μέση επιφανειακή μηνιαία βροχόπτωση και δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Η μέση επιφανειακή βροχόπτωση έχει εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τις μεθόδους του αριθμητικού μέσου όρου, των πολυγώνων Thiessen, και της βροχοβαθμίδας. Η μέση επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε με τις εμπειρικές μεθόδους Turc, Jensen-Haise, Thornthwaite, Blaney-Griddle, Kharuffa, Hargreaves. Η μηνιαία απορροή προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας τα τέσσερα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου και συνδυασμούς των μεθόδων εκτίμησης της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου και η πιστοποίησή τους έδειξε ότι το προτεινόμενο μοντέλο δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα προσομοίωσης της απορροής από τη λεκάνη της Γερμασόγειας.

ABSTRACT

In this study various lumped water balance models have been evaluated for the estimation of monthly runoff in Yermasoyia watershed, Cyprus. A water balance model presented in this study and three water balance models have been developed as proposed by Abulohom et al (2001), Giakoumakis et al (1991), and Thornthwaite (1948) modified by Alley (1984). These models require as input data, mean monthly areal precipitation and potential evapotranspiration. The areal precipitation has been estimated using the methods of the arithmetic mean, Thiessen polygons, and the precipitation gradient method. Areal potential evapotranspiration was calculated using the Turc, Jensen-Haise, Thornthwaite, Blaney-Griddle, Kharuffa, Hargreaves empirical methods. The monthly runoff was simulated using the four water balance models and combinations of the methods for the estimation of areal precipitation and potential evapotranspiration. The calibration and validation results show that the proposed model is the most efficient model in simulating the runoff from Yermasoyia watershed.

1 Εισαγωγή

Απλά αδρομερή υδρολογικά μοντέλα, παραμετρικά ή εμπειρικά, τα οποία ενοποιούν τα ετερογενή χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής και προσομοιώνουν την μετατροπή της βροχόπτωσης σε απορροή, είναι γενικά εύκολα στην εφαρμογή τους και απαιτούν περιορισμένα δεδομένα εισόδου. Αν και η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε γενίκευση των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, τέτοια μοντέλα είναι απλά και αποδοτικά στη χρήση τους, όπως έχει αναφερθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, και είναι χρήσιμα εργαλεία για μηχανικούς και επιστήμονες που ασχολούνται με τη διαχείριση των υδατικών πόρων (Perrin et al., 2001).

Αδρομερή μοντέλα υδατικού ισοζυγίου έχουν αναπτυχθεί για διάφορες κλίμακες χρόνου (π.χ. ωριαία, ημερήσια, μηνιαία, και ετήσια) και διάφορους βαθμούς πολυπλοκότητας. Το πρώτο μηνιαίο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1940 από τον Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), το οποίο αργότερα αναθεωρήθηκε από τους Thornthwaite και Mather (Thornthwaite and Mather, 1955). Από τότε αδρομερή μοντέλα έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοσθεί σε ένα μεγάλο φάσμα υδρολογικών προβλημάτων (Gabos and Gasparri, 1983; Alley, 1984; Vandewiele and Win, 1998). Πρόσφατα, τέτοια μοντέλα έχουν εφαρμοσθεί για να διαπιστωθούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Arnell, 1992; Panagoulia and Dimou, 1997; Yates and Strzepek, 1998; Guo et al., 2002), και την μακροχρόνια πρόγνωση της απορροής (Alley, 1985; Xu and Vandewiele, 1995). Αν και για τις παραπάνω εφαρμογές χρησιμοποιούνται ωριαία ή ημερήσια υδρολογικά μοντέλα, τα μοντέλα αυτά απαιτούν πολλά δεδομένα και έχουν πολλές περισσότερες παραμέτρους από τα αντίστοιχα μηνιαία μοντέλα.

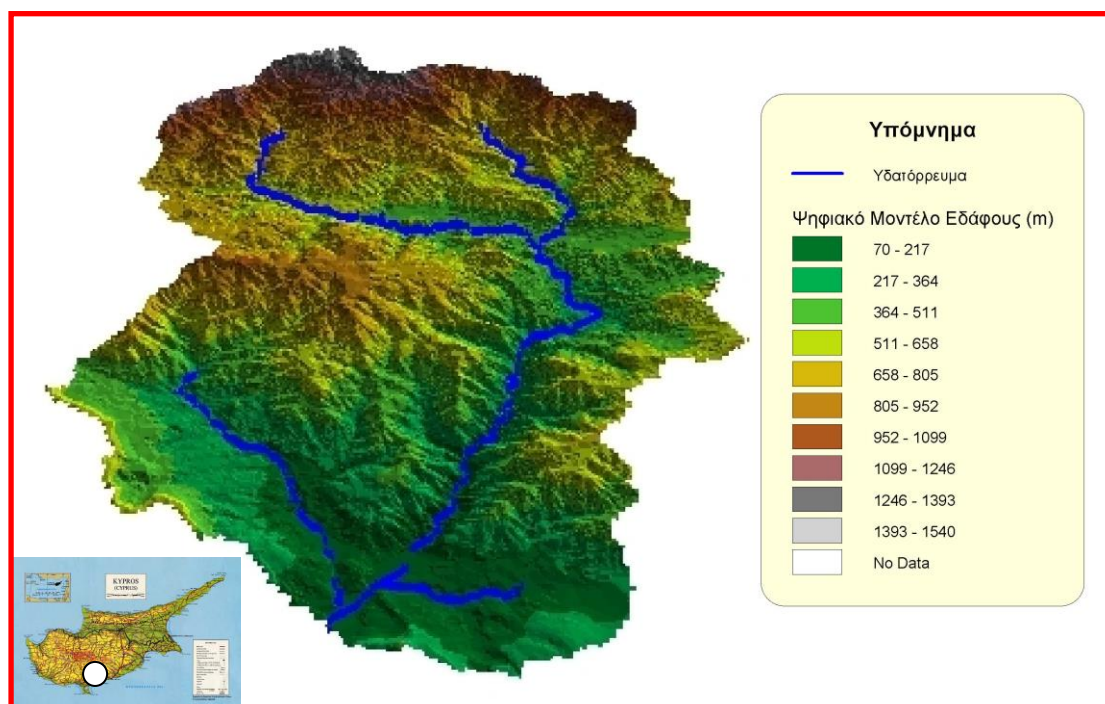
Με την συνεχώς αυξανόμενη χρήση των μηνιαίων υδρολογικών μοντέλων ή μοντέλων υδατικού ισοζυγίου σε ένα μεγάλο εύρος υδρολογικών προβλημάτων, έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια για την ανάπτυξη νέων μοντέλων και τεχνικών για τον προσδιορισμό των παραμέτρων τους. Τέτοια μοντέλα έχουν αναπτυχθεί με μεγάλη διαφορά στην πολυπλοκότητα των αλγορίθμων και τον αριθμό των παραμέτρων τους. Για παράδειγμα, τα μοντέλα του Pitman (1973) που έχει προταθεί για εφαρμογή σε ξηρές περιοχές της Αφρικής με 10 έως 20 παραμέτρους και μοντέλα για εφαρμογή σε υγρές και ήπιες κλιματολογικά περιοχές με 2 έως 5 παραμέτρους (Vandewiele et al., 1992). Αν και σημαντική εμπειρία έχει αποκτηθεί για πολλά μοντέλα, υπάρχει συνεχώς η ανάγκη για αναθεώρηση των μοντέλων αυτών καθώς και την εφαρμογή και έλεγχο τους σε άλλες περιοχές.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αναπτυχθούν, εφαρμοσθούν, συγκριθούν, και αξιολογηθούν διάφορα μηνιαία μοντέλα υδατικού ισοζυγίου στη λεκάνη της Γερμασόγειας της Κύπρου, χρησιμοποιώντας διαφορετικά δεδομένα εισόδου μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής αναπτύχθηκε και προτάθηκε ένα νέο υδρολογικό μοντέλο τα αποτελέσματα του οποίου συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα τριών μοντέλων που προτάθηκαν από τους Abulohom et al. (2001), Giakoumakis et al. (1991), και Thornthwaite (1948) τροποποιημένο από τον Alley (1984). Οι κυριότερες διαφορές των παραπάνω μοντέλων βρίσκονται στη χρήση της εξατμισοδιαπνοής, της εδαφικής υγρασίας, της φόρτισης του υδροφορέα και της διόδευσης της απορροής, που έχει ως αποτέλεσμα τον διαφορετικό αριθμό παραμέτρων σε κάθε μοντέλο.

2 Λεκάνη απορροής Γερμασόγειας και βάση δεδομένων

Η υδρολογική λεκάνη του ποταμού Γερμασόγεια βρίσκεται στη νότια πλευρά του βουνού Τρόδος και διοχετεύεται στη θάλασσα σε ένα σημείο περίπου 5 km ανατολικά της πόλης της Λεμεσού (Σχ. 1). Η έκταση της λεκάνης απορροής είναι 175 km² και το υψόμετρό της ανέρχεται στα 1400 m πάνω από την μέση στάθμη της θάλασσας. Περί το 80% της λεκάνης αποτελείται από πυριγενή πετρώματα, αλλοιωμένο βασάλτη και λάβες, ενώ τα κατώτερα στρώματα από ασβεστόλιθο και ίλη (Water Development Department, 1996).

Ο ετήσιος μέσος όρος κατακρήμνισης πάνω από τη λεκάνη είναι 638 mm, κυμαινόμενος από 450 mm κοντά στην ακτή μέχρι 850 mm στα ορεινά. Η ετήσια μέση απορροή της Γερμασόγειας εκτιμάται σε 22,5 εκατομμύρια m³, 65% της οποίας δημιουργείται κατά την διάρκεια του χειμώνα. Το υδατόρρευμα είναι συνήθως ξερό κατά τους θερινούς μήνες. Εντός των 5 km από την ακτή, σχηματίζεται μια αμμώδης κοίτη με συγκέντρωση ιλύος σημαντικού πάχους, καθιστώντας την μεγάλης τοπικής σημασίας για την εκμετάλλευση του εδαφικού νερού.

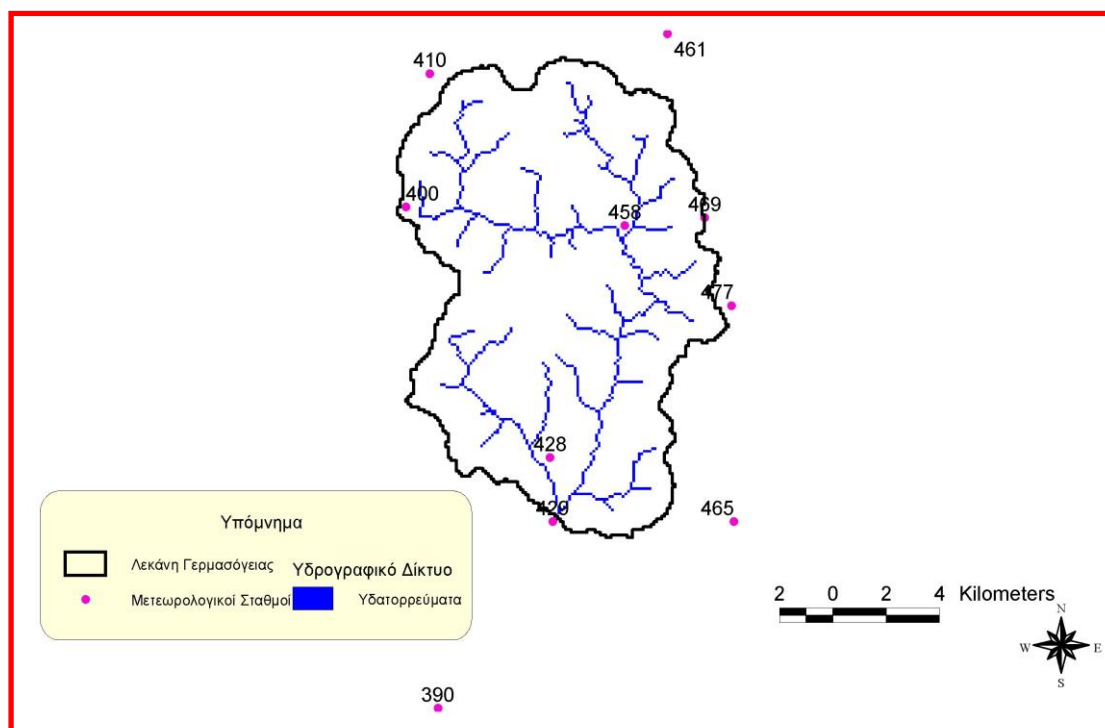


Σχήμα 1. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας

Ένα χωμάτινο φράγμα με μέγιστη αποθηκευτική χωρητικότητα ταμιευτήρα 13,6 εκατομμυρίων m³ και μέγιστη έκταση καθρέφτη 110 he, κατασκευάστηκε το 1969. Το φράγμα συγκεντρώνει και αποθηκεύει την απορροή της άνω λεκάνης της Γερμασόγειας, η οποία έχει έκταση 156.7 km² και είναι η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας. Σκοπός του φράγματος είναι η τροφοδότηση του τοπικού οικιακού δικτύου της ευρύτερης περιοχής της Λεμεσού, καθώς και η άρδευση της περιοχής του Ακρωτηρίου δυτικά της Λεμεσού.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ημερήσιας βροχόπτωσης από τους σταθμούς 390 (Λεμεσός) με απόλυτο υψόμετρο 12 m, 400 (Καλοχώριο) με απόλυτο υψόμετρο 740 m, 410 (Άγιος Θεόδωρος) με απόλυτο υψόμετρο 995 m και 429 (Γερμασόγεια) με απόλυτο υψόμετρο 70 m, δεδομένα ημερήσιας θερμοκρασίας από τους σταθμούς 390 (Λεμεσός) και 429 (Γερμασόγεια), και δεδομένα ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας από τον σταθμό 390 (Λεμεσός). Αν και όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 υπάρχουν και άλλοι μετεωρολογικοί σταθμοί στην περιοχή, πολλοί από αυτούς είχαν ελλιπή δεδομένα. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν μόνο οι μετεωρολογικοί σταθμοί που είχαν κοινή περίοδο δεδομένων αντί να γίνει επεξεργασία και συμπλήρωση των δεδομένων τους. Τέλος, τα δεδομένα ημερήσιας απορροής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από τον παροχομετρικό σταθμό που υπάρχει στην έξοδο της λεκάνης απορροής της Άνω Γερμασόγειας, ανάντι του ταμιευτήρα. Η χρονική περίοδος που επιλέχθηκε για την εφαρμογή της εργασίας ήταν από τον Οκτώβριο του 1986 έως το Σεπτέμβριο του 1998 (12 υδρολογικά έτη). Τα μετεωρολογικά και υδρομετρικά δεδομένα διατέθηκαν από το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων του Υπουργείου Γεωργίας Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Κύπρου.

Για την εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων υδατικού ισοζυγίου είναι απαραίτητα διάφορα γεωμορφολογικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό δομήθηκε σε G.I.S. το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (digital elevation model) της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας με τη χρήση ισοϋψών καμπυλών ισοδιάστασης 20 m (Σχ. 1). Από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης υπολογίσθηκε το μέσο υψόμετρο της λεκάνης ίσο με 575.18 m, το υδρογραφικό δίκτυο, η έκταση της λεκάνης, και άλλα γεωμορφολογικά στοιχεία.



Σχήμα 2. Μετεωρολογικοί σταθμοί της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας

3 Εκτίμηση και υπολογισμός δεδομένων εισόδου

Από τους διαθέσιμους μετεωρολογικούς σταθμούς με κοινή περίοδο δεδομένων Οκτώβριος 1986 έως Σεπτέμβριος 1998 (μετεωρολογικοί σταθμοί 390, 400, 410 και 429) υπολογίστηκε η μέση επιφανειακή βροχόπτωση και δυνητική εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης της Γερμασόγειας. Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν.

3.1 Εκτίμηση και υπολογισμός μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης

Η μέση επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης της Γερμασόγειας εκτιμήθηκε με τη μέθοδο του αριθμητικού μέσου όρου, των πολυγώνων Thiessen και της βροχοβαθμίδας. Τα δεδομένα των ημερήσιων τιμών της βροχόπτωσης σε mm, που πάρθηκαν από τους βροχομετρικούς σταθμούς 390, 400, 410 και 429, επεξεργάστηκαν έτσι ώστε να μετατραπούν οι ημερήσιες τιμές σε μηνιαίες (mm/month).

3.1.1 Μέθοδος του αριθμητικού μέσου όρου

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο απλή μέθοδος εκτίμησης της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης. Με τη μέθοδο αυτή αθροίστηκαν τα ύψη βροχόπτωσης, που παρατηρήθηκαν στους σταθμούς 390, 400, 410 και 429 και το άθροισμα αυτό διαιρέθηκε με τον αριθμό των σταθμών για να εκτιμηθεί η μέση επιφανειακή βροχόπτωση.

3.1.2 Μέθοδος των πολυγώνων Thiessen

Με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen υπολογίστηκαν οι συντελεστές στάθμισης για κάθε σταθμό που αντιστοιχούν στα εμβαδά των πολυγώνων επηρεασμού των σταθμών 400, 410, και 429, όπως προκύπτει με τη χάραξη των μεσοκαθέτων επί των αποστάσεων των σταθμών μεταξύ τους (Σχ. 3). Η μέση επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης της Γερμασόγειας P_o προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους μηνιαίων υψών βροχόπτωσης P_i των σταθμών πολλαπλασιασμένες επί τους αντίστοιχους συντελεστές στάθμισης, σύμφωνα με την Εξίσωση 1:

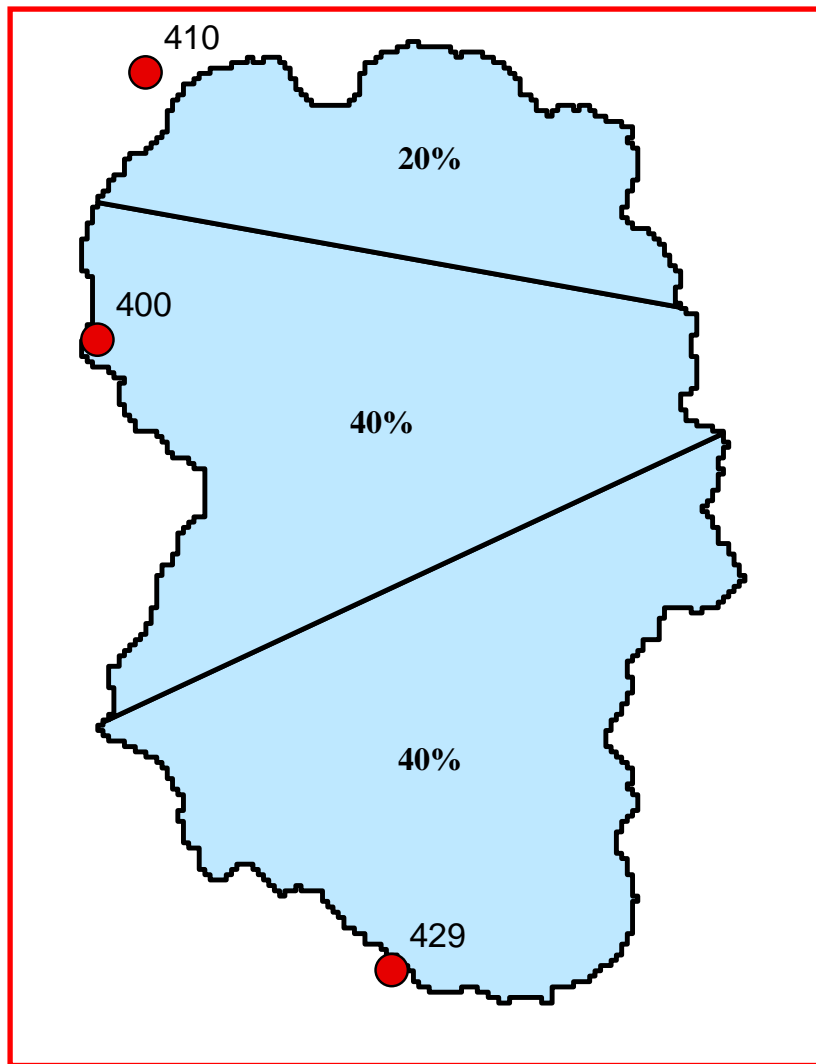
$$P_o = \frac{P_1 A_1 + P_2 A_2 + P_3 A_3}{A} = \sum \left(\frac{A_1}{A} P_1 + \frac{A_2}{A} P_2 + \frac{A_3}{A} P_3 \right) \quad (1)$$

όπου, P_1, P_2 και P_3 το μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης των σταθμών 400, 410 και 429

αντίστοιχα, $\frac{A_1}{A} = 40\%$, το ποσοστό εκτάσεως επηρεασμού του σταθμού 400,

$\frac{A_2}{A} = 20\%$, το ποσοστό εκτάσεως επηρεασμού του σταθμού 410, $\frac{A_3}{A} = 40\%$, το

ποσοστό εκτάσεως επηρεασμού του σταθμού 429.



Σχήμα 3. Εφαρμογή της μεθόδου πολυγώνων Thiessen στη λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας

3.1.3 Μέθοδος βροχοβαθμίδας

Η υψομετρική μέθοδος ή μέθοδος της βροχοβαθμίδας βασίζεται στην παρατήρηση ότι το ύψος βροχής αυξάνει με την αύξηση του υψομέτρου και χρησιμοποιεί τη βροχοβαθμίδα που είναι ο όρος που περιγράφει την αύξηση του ετήσιου βροχομετρικού ύψους ανά 100 m αύξηση του υψομέτρου. Η μέθοδος χρησιμοποιεί μία απλή γραμμική σχέση που συσχετίζει τα υψόμετρα των σταθμών με το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κάθε σταθμού και εφόσον υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση (συντελεστής συσχέτισης $r > 0.70$), η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του ύψους βροχής σε οποιαδήποτε υψόμετρο (Παπαμιχαήλ, 2001).

Από την εξέταση των μέσων όρων των ετήσιων βροχοπτώσεων (Πίνακας 1), των κοινών υδρολογικών ετών παρατηρήσεων (1986-87 μέχρι 1997-98), των τεσσάρων βροχομετρικών σταθμών προκύπτει ότι ο σταθμός 410 με υψόμετρο 995 m δέχεται τη μεγαλύτερη βροχόπτωση από τους υπόλοιπους σταθμούς, οι οποίοι και έχουν μικρότερο υψόμετρο.

Πίνακας 1. Μέση ετήσια βροχόπτωση για τους μετεωρολογικούς σταθμούς της λεκάνης απορροής Γερμασόγειας

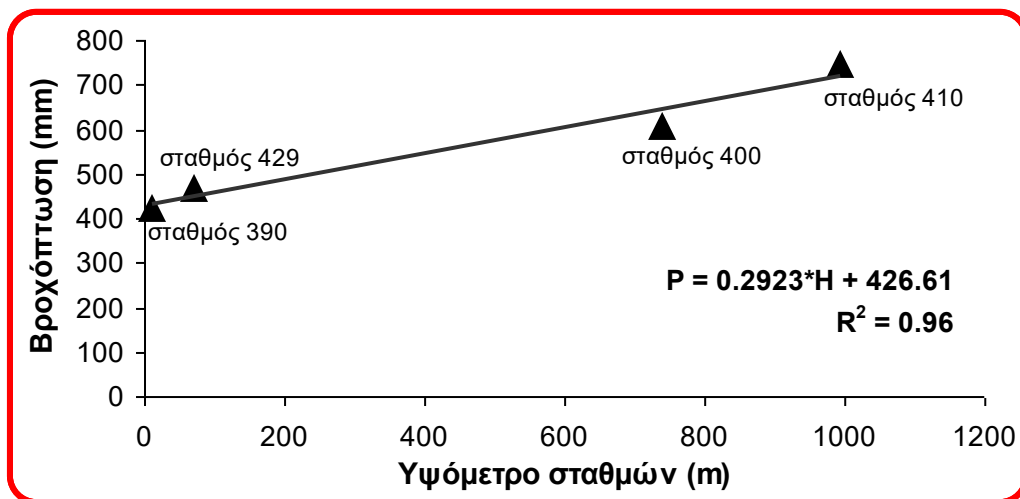
Μετεωρολογικοί Σταθμοί	Υψόμετρο (m)	Μέση Ετήσια Βροχόπτωση (mm)
390	12	422.48
429	70	465.68
400	740	604.83
410	995	744.51

Με τη χρήση των δεδομένων του Πίνακα 1 βρέθηκε η σχέση μεταβολής της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης με το υψόμετρο (Σχ. 4) που είναι η εξής:

$$P = 0.2923H + 426,61 \quad R^2 = 0.96 \quad (2)$$

όπου, P το ετήσιο ύψος βροχής σε mm και H το υψόμετρο του σταθμού σε m.

Σύμφωνα με τη Εξίσωση 2, για κάθε αύξηση του υψομέτρου κατά 100 m το ετήσιο ύψος βροχής αυξάνεται κατά 29.23 mm.



Σχήμα 4. Γραμμική σχέση μέσης ετήσιας βροχόπτωσης με το υψόμετρο των 4 μετεωρολογικών σταθμών.

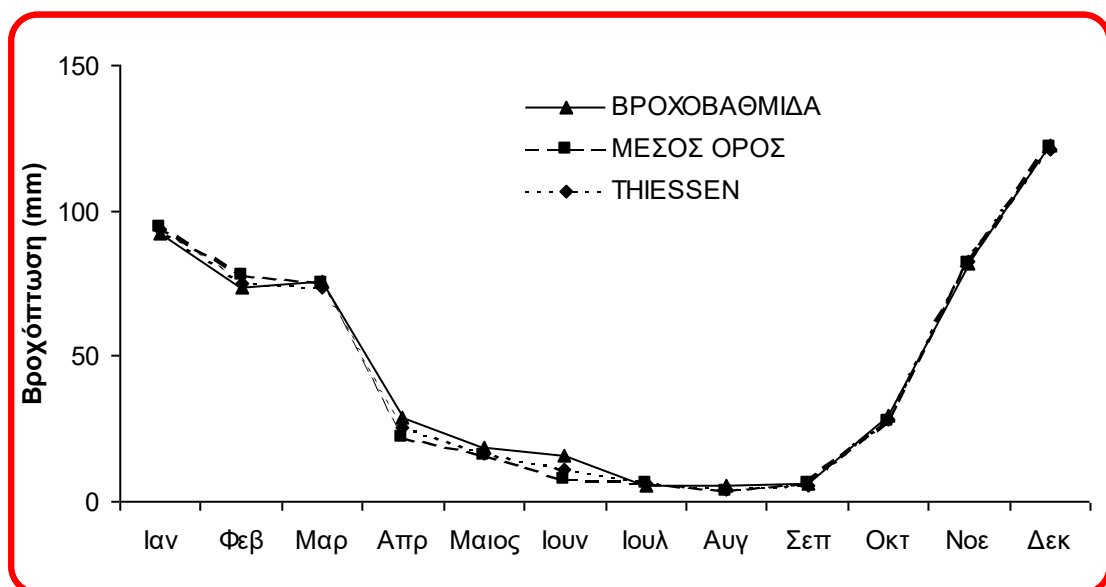
Για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του σταθμού 400, της περιόδου των υδρολογικών ετών 1986-87 έως 1997-98 γιατί είναι ο μόνος σταθμός εντός της λεκάνης απορροής με υψόμετρο (740 m) πλησιέστερα στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής. Η εκτίμηση των μηνιαίων υψών βροχόπτωσης που αντιστοιχούν στο μέσο υψόμετρο (575.18 m) της λεκάνης της Γερμασόγειας, για κάθε έτος, γίνεται με τις σχέσεις:

$$P_k = P_{T(k)} - \frac{164.82 \cdot 29.23}{100}, \text{ και} \quad (3)$$

$$P_i^k = \frac{P_k * P_{T(i)}^k}{P_{T(k)}} \quad (4)$$

όπου, $P_{T(k)}$ το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στο σταθμό 400, κατά το έτος k σε mm, P_k το ετήσιο ύψος της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης στη λεκάνη της Γερμασόγειας, κατά το έτος k σε mm, P_i^k το μηνιαίο ύψος επιφανειακής βροχόπτωσης, κατά το μήνα i και το έτος k, στη λεκάνη της Γερμασόγειας σε mm, $P_{T(i)}^k$ το μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης, κατά το μήνα i και το έτος k, στο σταθμό 400 σε mm, 29.23 η βροχοβαθμίδα που υπολογίστηκε με τη Εξίσωση 2, 164.82 η διαφορά ανάμεσα στο υψόμετρο του σταθμού 400 και του μέσου υψομέτρου της λεκάνης της Γερμασόγειας.

Στο Σχήμα 5 συγκρίνονται οι τιμές της μέσης μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης όπως υπολογίστηκαν από τις τρεις μεθόδους. Παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των εκτιμήσεων των τριών μεθόδων είναι πολύ μικρές.



Σχήμα 5. Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού μέσης μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας για την περίοδο Οκτώβριος 1986 έως Σεπτέμβριος 1998

3.2 Εκτίμηση και υπολογισμός μέσης επιφανειακής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

Η εκτίμηση της μέσης επιφανειακής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής έγινε με τη χρήση εμπειρικών μεθόδων που βασίζονται στη θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία. Η μέση επιφανειακή θερμοκρασία υπολογίστηκε με τη μέθοδο της θερμοβαθμίδας, η οποία είναι όμοια με αυτή της βροχοβαθμίδας χρησιμοποιώντας τους δύο σταθμούς, 390 και 429. Η ηλιακή ακτινοβολία της λεκάνης θεωρήθηκε ίση με την ηλιακή ακτινοβολία του σταθμού 390, ελλείψει άλλων δεδομένων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται στις παρακάτω παραγράφους.

3.2.1. Μέθοδος Turc

Η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με τη μέθοδο Turc (Turc, 1954) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_p = \frac{P + 80}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + 45}{L^{T_c}}\right)^2}} \quad (5)$$

όπου, P η μηνιαία βροχόπτωση υπολογισμένη με τη μέθοδο της βροχοβαθμίδας σε mm, T_a η μέση θερμοκρασία της λεκάνης σε °C, $L^{T_c} = \frac{(T + 2)\sqrt{H_{sh}}}{16}$, H_{sh} η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης σε $\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ που υπολογίζεται με βάση τον τύπο: $H_{sh} = H_{sh}^{top} (a + bn / N)$, όπου H_{sh}^{top} η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας, το οποίο υπολογίζεται από μετεωρολογικούς πίνακες ως συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους για περίοδο δέκα ημερών.

Στην παραπάνω σχέση τα a και b είναι εμπειρικές σταθερές που σύμφωνα με τον Koormanis (Shuttleworth, 1993) παίρνουν τις τιμές: $a = 0.20$ και $b = 0.53$ για εύκρατα κλίματα και $a = 0.28$ και $b = 0.45$ για τροπικά. Το n είναι η πραγματική διάρκεια των ωρών λαμπρής ηλιοφάνειας, ενώ το N η μέγιστη δυνατή διάρκεια των ωρών λαμπρής ηλιοφάνειας τα οποία υπολογίζονται από μετεωρολογικούς πίνακες ως συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους για περίοδο δέκα ημερών.

3.2.2. Μέθοδος Jensen – Haise

Η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με τη μέθοδο Jensen- Haise (1963) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_p = (0.025T_a + 0.008) H_{sh} / 59 \quad (6)$$

όπου, H_{sh} η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε $\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$, T_a η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης σε °C.

Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν από τον Turc (1954) και τους Jensen-Haise (1963) υπολογίζουν μικρότερες τιμές από τις πραγματικές τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά την διάρκεια της άνοιξης και μεγαλύτερες κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. Η ανακολουθία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι δύο μέθοδοι υπερεκτιμούν την επίδραση της θερμοκρασίας σε σχέση με την επίδραση της ακτινοβολίας.

3.2.3. Μέθοδος Thornthwaite

Ο Thornthwaite (1948) περιέγραψε τη βιολογική και φυσική σημασία της εξατμισοδιαπνοής στην κλιματική ταξινόμηση και ανέπτυξε μια εξίσωση για την εκτίμηση της δυνατής εξατμισοδιαπνοής:

$$E_p = 1.6 L_d (10 T_a / I)^a \quad (7)$$

όπου, T_a η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης απορροής σε °C, I ο δείκτης θερμότητας που δίνεται από την σχέση:

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{T_n}{5} \right)^{1.514} \quad (8)$$

όπου, T_n η κανονική θερμοκρασία κάθε μήνα, L_d ένας διορθωτικός συντελεστής που υπολογίζεται από μετεωρολογικούς πίνακες ως συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους και α ένας συντελεστής που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = 0.000000675I^3 - 0.000077I^2 + 0.01792I + 0.49239 \quad (9)$$

Η μέθοδος Thornthwaite παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα, αφού η υπολογιζόμενη εξατμισοδιαπνοή υποεκτιμάται, όταν η ακτινοβολία που προσλαμβάνει η γη έχει τη μέγιστη τιμή της, δηλαδή στη διάρκεια του καλοκαιριού, και κατά συνέπεια είναι εκτός φάσης το φθινόπωρο. Αυτό αποδίδεται στην χρονική υστέρηση που παρουσιάζει η ετήσια πορεία της θερμοκρασίας ως προς την ακτινοβολία. Μεγάλη υποεκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με αυτή την μέθοδο διαφαίνεται στα ξηρά και ημίξηρα κλίματα όπως είναι αυτό της Γερμασόγειας. Επίσης η χρησιμοποίηση της μεθόδου για μικρά χρονικά διαστήματα δεν είναι κατάλληλη επειδή η μέση θερμοκρασία μικρών χρονικών περιόδων δεν αποτελεί κατάλληλο μέτρο για την ενέργεια που διατίθεται στο φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής. Είναι περισσότερο επιτυχής η μέθοδος για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, όπως μηνιαία, και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τόσο η θερμοκρασία όσο και η εξατμισοδιαπνοή είναι όμοιες συναρτήσεις της καθαρής ακτινοβολίας και ως εκ τούτου αυτοσυσχετίζονται όταν οι θεωρούμενες χρονικές περίοδοι είναι μεγάλες.

3.2.4. Μέθοδος Blaney- Criddle

Οι Blaney και Criddle (1950) ανέπτυξαν μια μέθοδο για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ή όπως την ονόμασαν καταναλωτικής χρήσης. Η καταναλωτική χρήση c_u σε μηνιαία βάση δίνεται από τη σχέση:

$$c_u = k_m f \quad (10)$$

όπου, k_m είναι ένας εμπειρικός μηνιαίος συντελεστής καταναλωτικής χρήσης (συναρτήσει του τύπου του φυτού) και f είναι ένας μηνιαίος παράγοντας καταναλωτικής χρήσης ίσος με: $0.01(1.8T_a + 32)P$, όπου T_a είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C και P είναι το μηνιαίο ποσοστό διάρκειας των ωρών ημέρας ως προς το ολικό ετήσιο πόσο ωρών ημέρας. Η ολική καταναλωτική χρήση για μια εποχή C_u είναι :

$$C_u = \sum c_u = \sum k_m f \quad (11)$$

Στη λεκάνη απορροής της Γερμασόγειας χρησιμοποιήθηκε μια τροποποιημένη μέθοδος της Blaney - Criddle (Doorenbos-Pruitt, 1977) στην οποία η εκτίμηση για τη μηνιαία εξατμισοδιαπνοή δίνεται από τον τύπο:

$$E_p = k P (0.46T_a + 8.13) \quad (12)$$

όπου, k ο φυτικός συντελεστής της λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας ίσος με 0.80 (γενικά εξαρτώμενος από τον τύπο βλάστησης, την εποχή και την τοποθεσία και με τιμές $0.5 < k < 1.2$), T_a η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης σε $^{\circ}\text{C}$, P μηνιαίο ποσοστό ωρών ημέρας τον χρόνο, που υπολογίζεται από μετεωρολογικούς πίνακες.

3.2.5. Μέθοδος Kharrufa

Σύμφωνα με τον Kharrufa (1985) η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή συσχετίζεται με την θερμοκρασία με την εξής εξίσωση:

$$E_p = 0.34 P T_a^{1.3} \quad (13)$$

όπου, T_a η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης σε $^{\circ}\text{C}$, P μηνιαίο ποσοστό ωρών ημέρας τον χρόνο, το οποίο υπολογίζεται από μετεωρολογικούς πίνακες.

3.2.6. Μέθοδος Hargreaves

Ο Hargreaves (1974) ανέπτυξε μια μέθοδο για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που είναι απλή και απαιτεί ελάχιστα κλιματικά δεδομένα. Η μέθοδος μπορεί να γραφτεί ως:

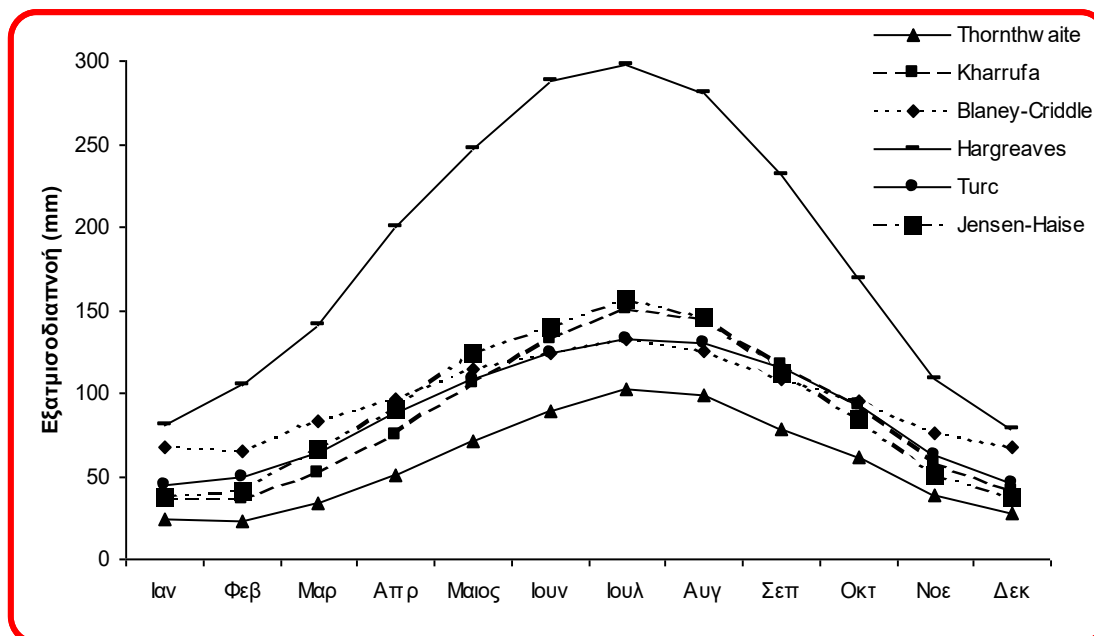
$$E_p = 0.0023 H_{sh}^{top} TD^{1/2} (T_a + 17.8) \quad (14)$$

όπου, T_a η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης σε $^{\circ}\text{C}$, TD η διάφορα μεταξύ μέσης μηνιαίας μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας σε $^{\circ}\text{C}$, H_{sh}^{top} η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε $\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-2}$ στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας που δίδεται από μετεωρολογικούς πίνακες ως συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους.

Στο Σχήμα 6 συγκρίνονται οι τιμές της μέσης επιφανειακής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής όπως υπολογίσθηκαν από τις έξι μεθόδους που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Από τη σύγκριση αυτή φαίνεται ότι η μέθοδος του Hargreaves υπερεκτιμάει την δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε σχέση με τις άλλες μεθοδολογίες οι οποίες δίνουν παρόμοιες τιμές. Αυτό οφείλεται στο ότι η μέθοδος του Hargreaves υπολογίζει την τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιώντας την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας, H_{sh}^{top} , και όχι την προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης, H_{sh} , η οποία είναι μικρότερη της H_{sh}^{top} . Μάλιστα τους καλοκαιρινούς μήνες η υπερεκτίμηση γίνεται ακόμα μεγαλύτερη, σε σχέση με τους χειμερινούς. Αντίθετα η μέθοδος του Jensen-Haise, χρησιμοποιεί την H_{sh} και υπολογίζει τιμές και οι οποίες συμφωνούν με τις τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που υπολογίζονται από τις άλλες μεθοδολογίες.

Μια δεύτερη παρατήρηση είναι ότι η μέθοδος Thornthwaite δίνει τις μικρότερες τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής γιατί το μοντέλο αυτό υποεκτιμάει την δυνητική

εξατμισοδιαπνοή σε ξηρά και ημίξηρα κλίματα όπως είναι και αυτό της Κύπρου. Γενικά το μοντέλο αυτό παρουσιάζει αυτό το μειονέκτημα όταν η ακτινοβολία που προσπίπτει στη γη έχει τη μέγιστη τιμή της, στη διάρκεια του καλοκαιριού, και κατά συνέπεια είναι εκτός φάσης το φθινόπωρο. Αυτό αποδίδεται στην χρονική υστέρηση που παρουσιάζει η ετήσια πορεία της θερμοκρασίας ως προς την ακτινοβολία.



Σχήμα 6. Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού μέσης μηνιαίας επιφανειακής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής λεκάνης απορροής της Γερμασόγειας για την περίοδο Οκτώβριος 1986 έως Σεπτέμβριος 1998

4 Υδρολογικά μοντέλα υδατικού ισοζυγίου

Απώτερος σκοπός των υδρολογικών μοντέλων υδατικού ισοζυγίου είναι να εκτιμήσουν την απορροή από βροχομετρικά δεδομένα χρησιμοποιώντας την εξίσωση της συνέχειας που δίνεται από την εξίσωση:

$$R = P - L \quad (15)$$

όπου, R η συνολική απορροή σε mm, P η βροχόπτωση σε mm, και L οι υδρολογικές απώλειες σε mm.

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου και χρησιμοποιήθηκαν τρία γνωστά μοντέλα που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Τα μοντέλα αυτά περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

4.1 Προτεινόμενο νέο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου

Το προτεινόμενο μοντέλο διακρίνει την συνολική απορροή σε τρεις συνιστώσες απορροής, δηλαδή, την επιφανειακή απορροή, την ενδιάμεση ή επιδερμική απορροή, και την βασική απορροή ή απορροή που προέρχεται από την εκροή του υδροφορέα. Σύμφωνα με το μοντέλο πρώτη προτεραιότητα στο υδατικό ισοζύγιο πριν τη

δημιουργία απορροής αποτελεί η ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή E_a του μήνα J εξαρτάται από τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία του μήνα J , και την μέση επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή E_p του μήνα J . Η μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται από τη σχέση που πρότειναν οι Vandewiele και Win (Vandewiele and Win, 1998):

$$E_a(J) = \min\{E_p(J) * (1 - \alpha^{S_{moist}(J)/E_p(J)}), S_{moist}(J)\} \quad (16)$$

όπου $S_{moist}(J)$ η διαθέσιμη εδαφική εργασία του μήνα J για πλήρωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, α ένας συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ($0 \leq \alpha \leq 1$), και $E_p(J)$ η δυνητική εξατμισοδιαπνοή του μήνα J .

Η επιφανειακή απορροή, SR , του μήνα J υπολογίζεται ως:

$$SR(J) = (1 - K) * (AS_{moist}(J) - S_{max}) \text{ εάν } AS_{moist}(J) > S_{max} \quad (17)$$

ή

$$SR(J) = 0 \text{ εάν } AS_{moist}(J) \leq S_{max} \quad (18)$$

όπου, $AS_{moist}(J) = S_{moist}(J) - E_a(J)$, η υπολειπόμενη εδαφική υγρασία του μήνα J μετά την ικανοποίηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, $S_{max} = \frac{25400}{CN} - 254$, η μέγιστη εδαφική υγρασία, CN το Curve Number της Soil Conservation Method (SCS, 1972) ($0 \leq CN \leq 100$), και K ο συντελεστής κατείσδυσης ($0 \leq K \leq 1$).

Η διήθηση προς τον υπόγειο υδροφόρο, D , του μήνα J υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$D(J) = K * (AS_{moist}(J) - S_{max}) \text{ εάν } AS_{moist}(J) > S_{max} \quad (19)$$

ή

$$D(J) = 0 \text{ εάν } AS_{moist}(J) \leq S_{max} \quad (20)$$

Η διαθέσιμη εδαφική εργασία του μήνα J , N_{moist} , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{moist}(J) = AS_{moist}(J) - SR(J) - D(J) \quad (21)$$

Η ενδιάμεση απορροή από την εδαφική υγρασία, MR , του μήνα J υπολογίζεται ως:

$$MR(J) = \beta * [N_{moist}(J-1) + N_{moist}(J)] \quad (22)$$

όπου, β ο συντελεστής ενδιάμεσης απορροής ($0 \leq \beta \leq 1$)

Η υπολειπόμενη υγρασία στο τέλος του μήνα J , NS_{moist} , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NS_{moist}(J) = N_{moist}(J) - MR(J) \quad (23)$$

Η διαθέσιμη εδαφική εργασία για πλήρωση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής του επόμενου μήνα J+1 είναι:

$$S_{\text{moist}}(J+1) = P(J+1) + NS_{\text{moist}}(J) \quad (24)$$

Η βασική απορροή ή απορροή από την εκροή του υδροφορέα, Q_g , του μήνα J υπολογίζεται από τη διήθηση, D, του προηγούμενου μήνα J-1, από τη σχέση:

$$Q_g(J) = \gamma * D(J-1) \quad (25)$$

όπου, γ ο συντελεστής βασικής απορροής ή συντελεστής εκροής του υδροφορέα ($0 \leq \gamma \leq 1$).

Η επαναφόρτιση του υδροφορέα, R_g , είναι ίση με:

$$R_g = (1 - \gamma) * D(J-1) \quad (26)$$

Τέλος, η συνολική απορροή, Q_c , υπολογίζεται ως άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών της απορροής, δηλαδή της επιφανειακής απορροής, ενδιάμεσης απορροής και βασικής απορροής:

$$Q_c(J) = SR(J) + MR(J) + Q_g(J) \quad (27)$$

Το προτεινόμενο μοντέλο υδρολογικού ισοζυγίου είναι ένα μοντέλο πέντε παραμέτρων. Είναι όμως δυνατόν δύο από τους παραμέτρους του μοντέλου, το CN και ο συντελεστής κατείσδυσης, K, να εκτιμηθούν άμεσα από εδαφολογικούς και γεωλογικούς αναλογικούς ή ψηφιακούς χάρτες, και χάρτες χρήσεων γης, περιορίζοντας έτσι σημαντικά τον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να προσδιορισθούν με τη βοήθεια μεθόδων βελτιστοποίησης.

5 Εφαρμογή υδρολογικών μοντέλων υδατικού ισοζυγίου στη λεκάνη της Γερμασόγειας - Αποτελέσματα

Η μηνιαία απορροή προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας τα τέσσερα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου. Συνδυασμοί των τιμών της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για όλες τις μεθόδους εκτίμησής τους χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου σε κάθε ένα μοντέλο. Με αυτή την έννοια τα αποτελέσματα της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης που υπολογίσθηκαν για τη λεκάνη της Γερμασόγειας από τις τρεις μεθόδους, δηλαδή, αριθμητικού μέσου όρου, πολυγώνων Thiessen, και βροχοβαθμίδας συνδυάστηκαν με τα αποτελέσματα της μέσης επιφανειακής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής που εκτιμήθηκαν από τις έξι μεθόδους, δηλαδή, Turc, Jensen-Haise, Thornthwaite, Blaney-Griddle, Kharuffa, Hargreaves. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν δεκαοκτώ σετ δεδομένων μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ένα μοντέλο υδατικού ισοζυγίου. Συνολικά, δηλαδή, έγιναν εβδομήντα δύο προσομοιώσεις του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης της Γερμασόγειας.

Για κάθε μία από τις εβδομήντα δύο παραπάνω προσομοιώσεις οι παράμετροι των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου βελτιστοποιήθηκαν (calibration) και η αποδοτικότητα των μοντέλων ελέγχθηκε (validation) με τη μέθοδο του χωριστού δείγματος (split sample test). Η μέθοδος του χωριστού δείγματος είναι μια ανεξάρτητη και χωρίς προκατάληψη (unbiased) μέθοδος ελέγχου των προσομοιώσεων. Οι παράμετροι των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου βελτιστοποιήθηκαν για έξι υδρολογικά έτη από Οκτώβριο 1986 έως Σεπτέμβριο 1992 και ελέγχθηκαν ή πιστοποιήθηκαν για έξι υδρολογικά έτη από Οκτώβριο 1992 έως Σεπτέμβριο 1998. Οι παράμετροι των μοντέλων προσαρμόστηκαν στις βέλτιστες τιμές τους με ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων μεταξύ παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση είναι η model efficiency (*Eff*) η οποία έχει προταθεί από τους Nash και Sutcliffe (1970), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στις υδρολογικές προσομοιώσεις, και δίνεται από τον τύπο:

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \overline{Qobs})^2} \quad (45)$$

όπου, $Qobs_i$ η παρατηρημένη απορροή του μήνα i , $Qsim_i$ η προσομοιωμένη απορροή του μήνα i , \overline{Qobs} ο μέσος όρος των τιμών της μηνιαίας παρατηρημένης απορροής.

Εκτός της αντικειμενικής συνάρτησης διάφορες άλλες στατιστικές παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της πιστότητας των προσομοιώσεων της απορροής, όπως ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination, R^2), η σύγκριση μεταξύ της μέσης παρατηρημένης απορροής (mean observed runoff, \overline{Qobs}) και της μέσης προσομοιωμένης απορροής (mean simulated runoff, \overline{Qsim}), καθώς και η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των παρατηρημένων και προσομοιωμένων όγκων της απορροής (percentage volume difference, %DV), η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\%DV = \frac{Vsim - Vobs}{Vobs} \times 100 \quad (46)$$

όπου, $Vobs$ ο παρατηρημένος όγκος απορροής για την περίοδο της προσομοίωσης, $Vsim$ ο προσομοιωμένος όγκος της απορροής για την περίοδο της προσομοίωσης. Επίσης, έγινε οπτικός έλεγχος των παρατηρουμένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων της απορροής καθώς και διαγράμματα διασποράς της απορροής για τις περιόδους βελτιστοποίησης των παραμέτρων των μοντέλων και πιστοποίησης.

Πίνακας 2. Στατιστικές παράμετροι των προσομοιώσεων της απορροής της λεκάνης της Γερμασόγειας με το νέο προτεινόμενο μοντέλο

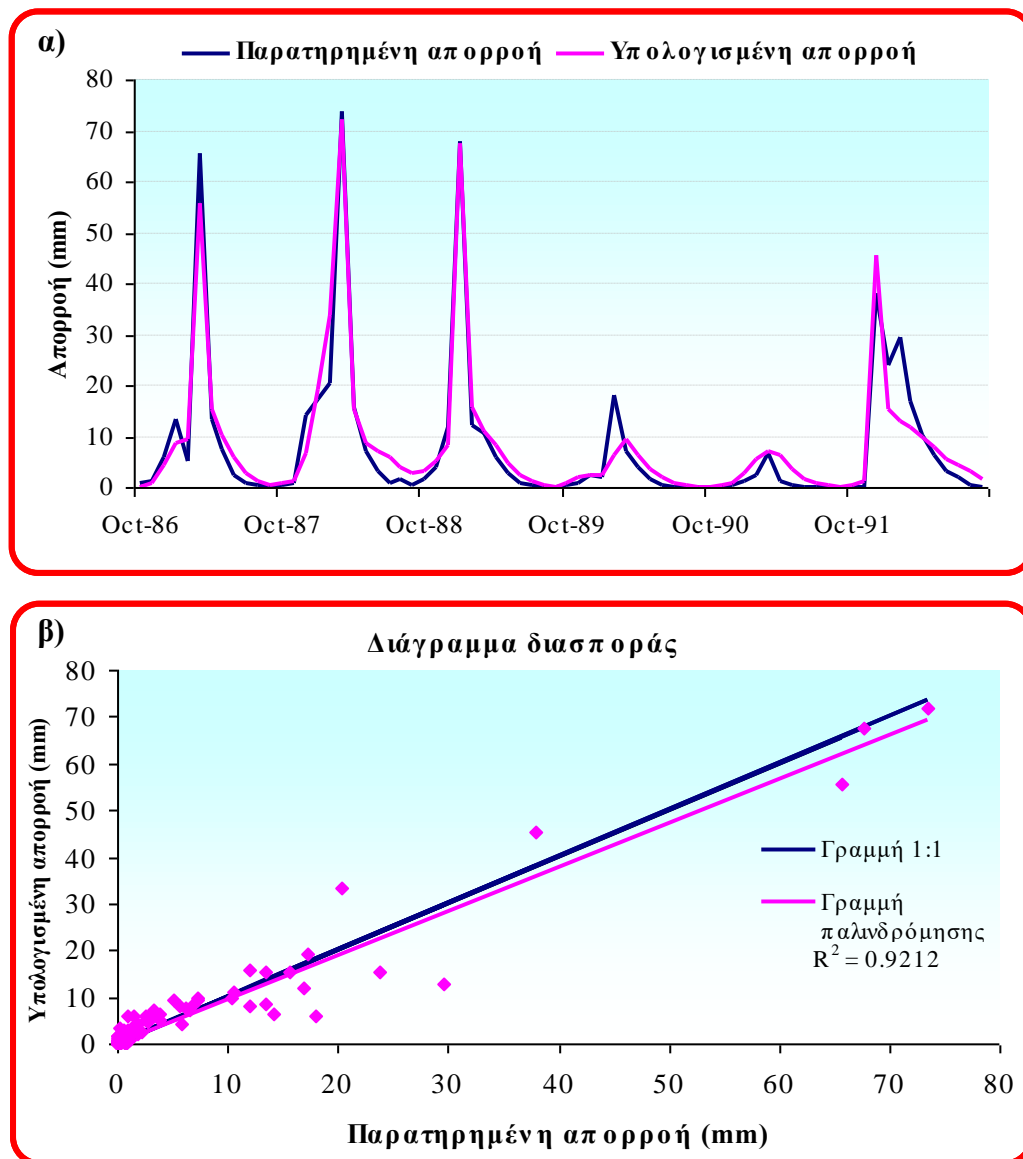
ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ	Eff		R ²		DV(%)		Q _{sim}		Q _{obs}	
		ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ	ΒΕΛ	ΠΙΣ
ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑ	THORNTHWAITE	0.91	0.72	0.91	0.75	1.13	-0.53	7.98	5.14	7.89	5.17
	TURC	0.93	0.76	0.93	0.80	1.34	-8.16	7.99	4.75		
	HARGREAVES	0.90	0.76	0.90	0.76	9.11	10.47	8.61	5.71		
	JENSEN-HAISE	0.93	0.73	0.93	0.75	1.90	-4.03	8.04	4.96		
	BLANEY-CRIDDLE	0.93	0.78	0.93	0.78	6.14	2.03	8.37	5.27		
	KHARRUFA	0.92	0.73	0.92	0.76	3.56	-1.84	8.17	5.07		
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	THORNTHWAITE	0.88	0.80	0.88	0.82	1.23	6.30	7.99	5.50		
	TURC	0.92	0.54	0.92	0.58	4.52	-5.10	8.25	4.91		
	HARGREAVES	0.89	0.56	0.89	0.70	6.50	-2.08	8.40	5.06		
	JENSEN-HAISE	0.91	0.49	0.91	0.50	4.84	-2.32	8.27	5.05		
	BLANEY-CRIDDLE	0.90	0.60	0.90	0.70	5.04	-3.37	8.29	5.00		
	KHARRUFA	0.91	0.51	0.91	0.51	5.11	-0.28	8.29	5.16		
THIESSEN	THORNTHWAITE	0.91	0.68	0.91	0.68	2.59	10.76	8.09	5.73		
	TURC	0.92	0.72	0.92	0.73	3.61	4.79	8.17	5.42		
	HARGREAVES	0.88	0.70	0.89	0.71	9.69	13.42	8.65	5.86		
	JENSEN-HAISE	0.92	0.68	0.92	0.68	4.20	7.80	8.22	5.57		
	BLANEY-CRIDDLE	0.90	0.73	0.90	0.74	8.20	12.10	8.54	5.80		
	KHARRUFA	0.92	0.68	0.92	0.69	8.92	8.99	8.28	5.63		
Ελάχιστη Τιμή Στατιστικών Παραμέτρων		0.88	0.49	0.88	0.50	1.13	-8.16	7.98	4.75		
Μέγιστη τιμή Στατιστικών Παραμέτρων		0.93	0.80	0.93	0.82	9.69	13.42	8.65	5.86		

Σημείωση: Οι τονισμένες τιμές αναφέρονται στη βέλτιστη προσομοίωση

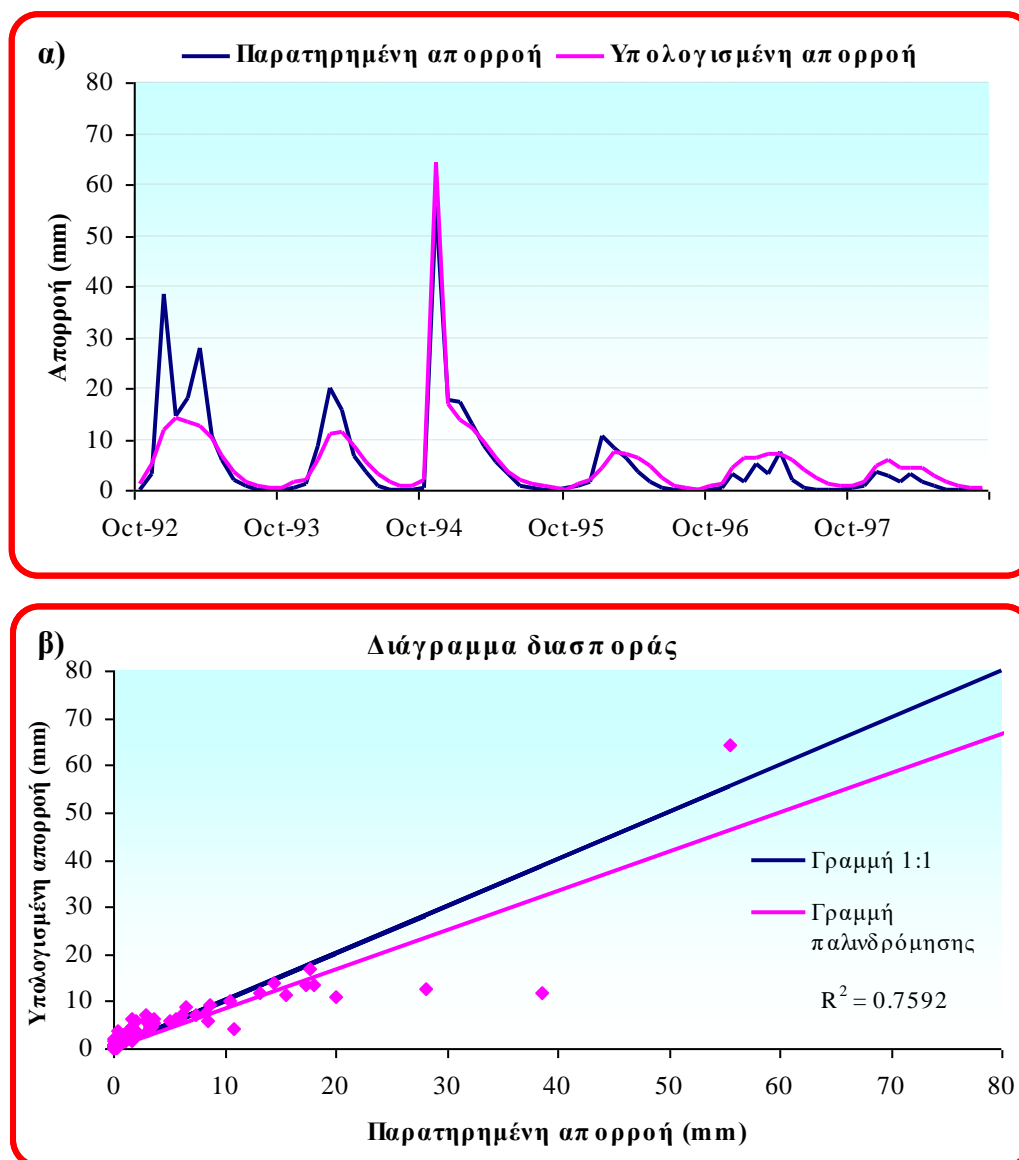
Το νέο προτεινόμενο μοντέλο έδωσε τη καλύτερη προσομοίωση από όλα τα τέσσερα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή. Το νέο μοντέλο προσομοίωσε την απορροή της λεκάνης της Γερμασόγειας πολύ καλά, σε σύγκριση με τα άλλα μοντέλα, για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των εκτιμημένων τιμών μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και δυναμικής εξατμισοδιαπνοής, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 που παρουσιάζει τις στατιστικές παραμέτρους για τις περιόδους βελτιστοποίησης των παραμέτρων του μοντέλου και πιστοποίησης. Οι στατιστικές παράμετροι ελέγχου της προσομοίωσης της απορροής με το νέο μοντέλο παρουσιάζουν το μικρότερο εύρος τιμών από όλα τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου που χρησιμοποιήθηκαν για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς δεδομένων εισόδου του μοντέλου (Πίνακας 2).

Η βέλτιστη προσομοίωση επιλέχθηκε βάση των τιμών όλων των στατιστικών παραμέτρων και όχι μόνο της παραμέτρου model efficiency. Η απορροή της λεκάνης της Γερμασόγειας προσομοιώθηκε βέλτιστα με το νέο προτεινόμενο μοντέλο (οι τιμές των στατιστικών παραμέτρων της βέλτιστης προσομοίωσης είναι σημειωμένες με έντονα γράμματα στο Πίνακα 2) χρησιμοποιώντας τις τιμές της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης που προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της βροχοβαθμίδας και τις τιμές της μέσης επιφανειακής δυναμικής εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Blaney-Griddle. Τα υδρογραφήματα παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής και το διάγραμμα

διασποράς για τη βέλτιστη προσομοίωση με το νέο μοντέλο και την περίοδο βελτιστοποίησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 7, ενώ στο Σχήμα 8 φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για την περίοδο πιστοποίησης.



Σχήμα 7. α) Υδρογραφήματα παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής και β) το διάγραμμα διασποράς για τη βέλτιστη προσομοίωση με το νέο μοντέλο και την περίοδο βελτιστοποίησης



Σχήμα 8. α) Υδρογραφήματα παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής και β) το διάγραμμα διασποράς για τη βέλτιστη προσομοίωση με το νέο μοντέλο και την περίοδο πιστοποίησης

6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα αδρομερή μοντέλα υδατικού ισοζυγίου για την εκτίμηση της μηνιαίας απορροής στη λεκάνη της Γερμασόγειας στη Κύπρο. Ένα νέο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου αναπτύχθηκε καθώς και τρία μοντέλα υδατικού ισοζυγίου με διαφορετικό βαθμό πολυπλοκότητας (Abulohom et al., 2001; Giakoumakis et al., 1991; Alley, 1984) εφαρμόστηκαν για την προσομοίωση της απορροής. Τα δεδομένα εισόδου για όλα τα μοντέλα είναι η μέση επιφανειακή μηνιαία βροχόπτωση και δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Η μέση επιφανειακή βροχόπτωση εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας τις μεθόδους του

αριθμητικού μέσου όρου, των πολυγώνων Thiessen, και της βροχοβαθμίδας, ενώ η μέση επιφανειακή δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίσθηκε με τις εμπειρικές μεθόδους Turc, Jensen-Haise, Thornthwaite, Blaney-Griddle, Kharuffa, Hargreaves. Η μηνιαία απορροή προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας τα τέσσερα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου και συνδυασμούς των μεθόδων εκτίμησης της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν δεκαοκτώ σετ δεδομένων εισόδου των μοντέλων και πραγματοποιήθηκαν εβδομήνα δύο προσομοιώσεις του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης της Γερμασόγειας. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου και η πιστοποίησή τους έγινε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του χωριστού δείγματος.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εκτίμηση της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης δεν επηρεάζεται από την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε. Αντίθετα, η σύγκριση των τιμών της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής έδειξε ότι οι διάφορες μέθοδοι δίνουν διαφορετικές εκτιμήσεις. Η μέθοδος Hargreaves έδωσε τις μεγαλύτερες τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και η μέθοδος Thornthwaite τις μικρότερες εκτιμήσεις.

Χρησιμοποιώντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ως δεδομένα εισόδου στα τέσσερα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου παρατηρήθηκε ότι διαφορετικές μεθοδολογίες εκτίμησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής δίνουν τα βέλτιστα αποτελέσματα για κάθε μοντέλο υδατικού ισοζυγίου. Το προτεινόμενο μοντέλο δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα προσομοίωσης του υδρογραφήματος της απορροής για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των δεδομένων εισόδου και προσομοιώνει βέλτιστα τον όγκο της απορροής. Το μοντέλο Abulohom προσομοιώνει πολύ καλά τη μορφή του υδρογραφήματος αλλά παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις στην εκτίμηση του όγκου απορροής. Το μοντέλο Giakoumakis προσομοιώνει ικανοποιητικά τις μέγιστες απορροές αλλά εκτιμά μηδενικές απορροές κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων του έτους (καλοκαίρι) και ξηρών ετών με αποτέλεσμα την σημαντική υποεκτίμηση του όγκου της απορροής. Το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου Thornthwaite όπως τροποποιήθηκε από τον Alley υποεκτιμά σημαντικά την απορροή σε πολλές χρονικές περιόδους και κρίνεται απορριπτέο.

Πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι στην παραπάνω αξιολόγηση των μοντέλων υδατικού ισοζυγίου πρέπει να ληφθεί υπόψη η πολυπλοκότητα των μοντέλων και ο αριθμός των παραμέτρων τους. Το νέο προτεινόμενο μοντέλο και το μοντέλο Abulohom είναι μοντέλα πέντε παραμέτρων ενώ τα μοντέλα Giakoumakis και Thornthwaite έχουν δύο και μία παράμετρο, αντίστοιχα. Όπως έχει διαπιστωθεί από προηγούμενες μελέτες (Pitman, 1973; Vandewiele et al., 1992; Xu and Singh, 1998) τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου που εφαρμόζονται σε λεκάνες απορροής ξηρών και ημίξηρων κλιμάτων απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό παραμέτρων από μοντέλα που εφαρμόζονται σε υγρές και ήπιες κλιματολογικά περιοχές. Σύμφωνα με τα προηγούμενα τα μοντέλα Giakoumakis και Thornthwaite σε λεκάνες απορροής με υγρά κλιματολογικά χαρακτηριστικά μπορεί να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα. Στη λεκάνη απορροής της Γερμασόγειας, όμως, που έχει ημίξηρο κλίμα προτείνεται η εφαρμογή του νέου προτεινόμενου μοντέλου και του μοντέλου Abulohom. Επιπλέον, το προτεινόμενο μοντέλο προσομοιώνει καλύτερα τον όγκο της απορροής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαχείριση και λειτουργία του ταμιευτήρα της Γερμασόγειας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abulohom, M.S., Shah, S.M.S. and Ghumman, A.R., 2001. "Development of a Rainfall-Runoff Model, its Calibration and Validation", *Water Resources Management*, 15(3), pp. 149-163.
2. Alley, W.M., 1984. "On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models", *Water Resources Research*, 20(8), pp. 1137-1149.
3. Alley, W.M., 1985. "Water balance models in one-month-ahead stream flow forecasting", *Water Resources Research*, 21(4), pp. 597-606.
4. Arnell, N.W., 1992. "Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment", *Journal of Hydrology*, 132, pp. 321-342.
5. Blaney, H.F. and Criddle, W.D., 1950. "Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigated data". USDA Soil Conservation Service SCS-TP96, 44 pp.
6. Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977. "Crop water requirements". FAO Irrigation and Drainage Paper, No 156.
7. Gabos, A. and Gasparri, L., 1983. "Monthly runoff model for regional planning", *Water International*, 8, pp. 42-45.
8. Giakoumakis, S., Tsakiris, G. and Efremides, D., 1991. "On the Rainfall-runoff Modeling in a Mediterranean Island Environment", *Advances in Water Resources Technology*, Balkema, Rotterdam.
9. Guo, S., Wang, J., Xiong, L., Ying, A. and Li, D., 2002. "A macro-scale and semi-distributed monthly water balance model to predict climate change impacts in China", *Journal of Hydrology*, 268, pp. 1-15.
10. Hargreaves, G.H., 1974. "Estimation of potential and crop evapotranspiration", *Transactions of ASAE*, 17, pp. 701-704.
11. Jensen, M.E. and Haise, H.R., 1963. "Estimating evapotranspiration from solar radiation", *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE*, 89, pp. 15-41.
12. Kharrufa, N.S., 1985. "Simplified equation for evapotranspiration in arid regions", *Beitrag zur Hydrologie Sonderheft*, 5(1), pp. 39-47.
13. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. "River flow forecasting through conceptual models. Part-1 A discussion of principles", *Journal of Hydrology*, 10(3), pp. 282-290.
14. Panagoulia, D. and Dimou, G., 1997. "Linking space-time scale in hydrological modeling with respect to global climate change: model properties and experimental design", *Journal of Hydrology*, 194, pp. 15-37.

15. Perrin, C., Michel, C. and Andreassian, V., 2001. "Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments", *Journal of Hydrology*, 242, pp. 275-301.
16. Pitman, W.V., 1973. "A mathematical model for generating monthly river flows from meteorological data in South Africa", *Report 2/73, Hydrological Research Unit*, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
17. Shuttleworth, W., 1993. "Evaporation", Chapter 4 in *Handbook of Hydrology*, D.R. Maidment, editor, McGraw-Hill, Inc., New York.
18. Soil Conservation Service (SCS), 1972. "*National Engineering Handbook*", Washington D.C., Section 4, Hydrology.
19. Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R., 1955. "The water balance", *Publication in Climatology, Laboratory of Climatology Dresel Institute of Technology*, 8(8), pp. 1-104.
20. Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R., 1957. "Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance", *Publication in Climatology, Laboratory of Climatology Dresel Institute of Technology*, 10(3), pp. 185-311.
21. Thornthwaite, C.W., 1948. "An approach toward a radiation classification of climate", *Geographical Reviews*, 38(1), pp. 55-94.
22. Turc, L., 1954. "Le bilan d'eau des sols: relations entre les precipitations, l'évaporation et l'écoulement", *Annales de Agronomie*, 5, pp. 491-595.
23. Vandewiele, G.L. and Win, N.L., 1998. "Monthly water balance for 55 basins in 10 Countries", *Hydrological Sciences Journal*, 43(5), pp. 687-699.
24. Vandewiele, G.L., Xu, C.-Y. and Win, N.L., 1992. "Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Burma", *Journal of Hydrology*, 134, pp. 315-347.
25. Water Development Department, 1996. "*Water development in Cyprus*", Ministry of Agriculture, Natural Resources and Environment of Cyprus, Cyprus.
26. Xu, C.-Y. and Singh, V.P., 1998. "A Review on Monthly Water Balance Models for Water Resources Investigations", *Water Resources Management*, 12(1), pp. 20-50.
27. Xu, C.-Y. and Vandewiele, G.L., 1995. "Parsimonious monthly rainfall-runoff models for humid basins with different input requirements", *Advances in Water Resources*, 18, pp. 39-48.
28. Yates, D.N. and Strzepek, K.M., 1998. "Modeling the Nile Basin under climatic change", *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(2), pp. 98-108.

29. Παπαμιχαήλ, Δ., 2001. “Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων”, Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, 394 σελ.
30. Τσακίρης, Γ., 1995. “Υδατικοί Πόροι: I. Τεχνική Υδρολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία, 675 σελ.