

Μοντέλο Ισοζυγίου Υδρολογικής Λεκάνης με Χρήση Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας

Κ. ΜΑΝΤΟΥΔΗ
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Ν. ΜΑΜΑΣΗΣ
Δρ Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό σύστημα το οποίο καταρτίζει υδρολογικό ισοζύγιο στο γεωγραφικό χώρο μιας λεκάνης απορροής. Το σύστημα χρησιμοποιεί υδρομετεωρολογικά δεδομένα εισόδου και παράγει χωρικά κατανεμημένα επίπεδα πληροφορίας που αφορούν στην απορροή, εξατμοδιαπνοή και αποθήκευση νερού στα διάφορα εδαφικά στρώματα. Η ανάπτυξη του μοντέλου έγινε σε αντικειμενοστραφή γλώσσα προγραμματισμού σε περιβάλλον Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας. Το μοντέλο εφαρμόστηκε στη λεκάνη απορροής του ποταμού Αχελώου ανάντη της θέσης φράγματος Κρεμαστών, έκτασης 3424 km². Η λεκάνη διαμερίστηκε σε τετραγωνικά κύτταρα διάστασης 2 km, ενώ οι εισόδοι και εξόδοι του μοντέλου είναι επιφάνειες της ίδιας ισοδιάστασης. Η βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου έγινε με τη σύγκριση των εξαγόμενων από το μοντέλο παροχών με τις μετρημένες παροχές στην έξοδο της λεκάνης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου δίνουν συνολική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου και των συνιστωσών του σε μια συγκεκριμένη χωρική ενότητα, όπως η υδρολογική λεκάνη, μέσω της οποίας τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα μετασχηματίζονται σε απορροή.

Η επισκόπηση στη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία δείχνει ότι αρκετοί ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει μελέτες που αφορούν μοντέλα υδατικού ισοζυγίου σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές και για διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες [3, 4, 9, 22, 23]. Ωστόσο, οι περισσότερες μελέτες αναφέρονται σε συγκεντρωτικά μοντέλα παρόλο που οι υδρολογικές μεταβλητές εξελίσσονται και μεταβάλλονται χωρικά. Ακόμη, τα πιο διαδεδομένα μοντέλα βροχής-απορροής (π.χ. HEC-1, SACRAMENTO) και υπόγειων ροών (π.χ. MODFLOW)

χαρακτηρίζονται από μεγάλο αριθμό παραμέτρων και απαιτούν σημαντική εμπειρία για την κατάστροψη και βαθμονόμηση τους. Όμως, αρκετές σε βάθος διερευνήσεις [15] έχουν δείξει ότι για την ικανοποιητική μαθηματική αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών αρκεί ένας μικρός αριθμός παραμέτρων (τρεις έως πέντε), ενώ η προσθήκη μεγάλου αριθμού παραμέτρων σε υδρολογικά μοντέλα έχει χαρακτηριστεί ως «υπερπαραμετροποίηση» (overparameterization). Εξάλλου, όπως πρόσφατα έχει διαπιστωθεί σε εφαρμογές υδρολογικών μοντέλων στην πράξη [14], είναι συνήθως αρκετή η χρήση ενιαίων τιμών για τις παραμέτρους σε όλο το χώρο της υδρολογικής λεκάνης, ακόμα και όταν το μοντέλο είναι κατανεμημένο (distributed) ή ημι-κατανεμημένο (semi-distributed). Ειδικότερα, τα ημι-κατανεμημένα μοντέλα με ενιαίες τιμές παραμέτρων (γνωστά και με τον όρο ημι-αδιαμέριστα – semi-lumped) δίνουν αποτελέσματα που πρακτικώς δεν υστερούν από αυτά των πλήρως κατενεμημένων ή ημι-κατανεμημένων μοντέλων με πολλές παραμέτρους. Παράλληλα, η εκτίμηση των παραμέτρων τους είναι κατά τάξεις μεγέθους ταχύτερη από αυτή των μοντέλων που χρησιμοποιούν χωρικά διαφοροποιημένες παραμέτρους. Τα τελευταία χρόνια πολλά υδρολογικά μοντέλα έχουν τη δυνατότητα να ενσωματώνουν άμεσα τα γεωγραφικά δεδομένα μέσα από τη συνεργασία τους με Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ). Χαρακτηριστικά μοντέλα αυτής της κατηγορίας είναι το SWAT [23] και το TOPMODEL [7] που έχουν αναπτυχθεί για τη μοντελοποίηση λεκανών απορροής λαμβάνοντας υπόψη τα γεωγραφικά, γεωλογικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά τους. Η χρήση των ΣΓΠ δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης της χωρικής κατανομής των συνιστωσών του υδρολογικού

κύκλου και της προσομοίωσης στοιχείων του γεωγραφικού χώρου, όπως αυτά διατάσσονται πραγματικά. Ταυτόχρονα, επιτυγχάνεται η σύνδεση της γεωγραφικής πληροφορίας με βάση δεδομένων και η ποσοτική εκτίμηση της χωρικής κατανομής όλων των μεταβλητών που εμπλέκονται στο υδατικό ισοζύγιο υδρολογικής λεκάνης. Ειδικότερα, η εκπόνηση υδατικού ισοζυγίου με χρήση ΣΓΠ αποτελεί θέμα για το οποίο έχει πραγματοποιηθεί σχετικά περιορισμένος αριθμός εργασιών [6, 8, 17, 19, 21, 22].

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση της απορροής λεκάνης από υδρομετεωρολογικά και γεωγραφικά δεδομένα καθώς και ο επιμερισμός της απορροής σε ανάντη υπολεκάνες. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα καταναμημένο μοντέλο υδρολογικής λεκάνης που προσομοιώνει τις χωρικά μεταβαλλόμενες φυσικές διεργασίες με τη χρήση μικρού αριθμού παραμέτρων οι οποίες δεν μεταβάλλονται χρονικά και χωρικά και εκτιμώνται με ευκολία από τις παρατηρημένες απορροές στην έξοδο της λεκάνης.

Η περιοχή εφαρμογής του μοντέλου είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Αχελώου, ανάντη της θέσης φράγματος Κρεμαστών. Η λεκάνη έχει έκταση 3.424 km², είναι ορεινή με έντονο ανάγλυφο και χαρακτηρίζεται από μεγάλα ύψη βροχής και χιονιού, ενώ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πλευράς υδατικών πόρων.

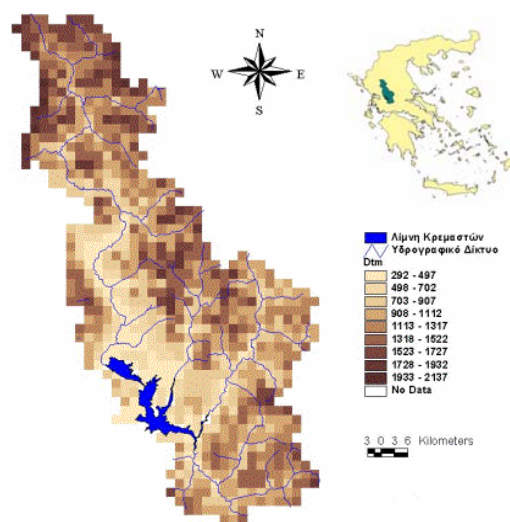
Το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του ΣΓΠ-ArcView, με τη χρήση της ενσωματωμένης στο σύστημα γλώσσας προγραμματισμού (Avenue). Ως χρονικό βήμα προσομοίωσης των υδρολογικών μεταβλητών επιλέχθηκε ο μήνας.

Η μελέτη ολοκληρώθηκε με τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου, που βασίστηκαν στη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μετρημένες παροχές στην έξοδο της λεκάνης.

2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

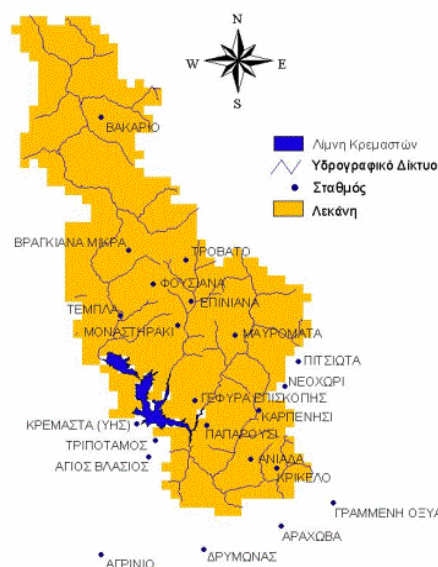
Τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για την υλοποίηση της εφαρμογής διακρίνονται σε γεωγραφικά και υδρομετεωρολογικά. Στα γεωγραφικά περιλαμβάνονται το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου της λεκάνης (Digital Terrain Model-DTM) (Σχήμα 1), οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών, η γεωλογία της λεκάνης και το υδρογραφικό δίκτυο. Το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου προέρχεται από την ψηφιοποίηση δεδομένων χαρτών κλίμακας 1:100000.

Τα υδρομετεωρολογικά δεδομένα περιλαμβάνουν τις μηνιαίες τιμές κατακρήμνισης, θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και ηλιοφάνειας των σταθμών της περιοχής. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν 22 μετεωρολογικοί σταθμοί (Σχήμα 2), οι οποίοι καλύπτουν σχετικά επαρκώς την περιοχή μελέτης. Επίσης, για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τιμές παροχών, οι οποίες έχουν εκτιμηθεί από την εκπόνηση υδρολογικού ισοζυγίου για τον ταμιευτήρα Κρεμαστών.



Σχήμα 1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και γεωγραφική θέση λεκάνης απορροής

Figure 1: Digital terrain model and location of the river basin



Σχήμα 2: Θέσεις μετεωρολογικών σταθμών

Figure 2: Sites of meteorological stations

3. ΜΟΝΤΕΛΟ-ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

3.1 Γενικά

Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ως αρχική βάση ένα συγκεντρωτικό (lumped) μοντέλο υδατικού ισοζυγίου [4]. Το μοντέλο επεκτάθηκε σε καταναμημένο (distributed) ενιαίων παραμέτρων με τη χρήση των λειτουργιών του ΣΓΠ, ενώ έγιναν και ορισμένες απλοποιήσεις, για την προσομοίωση σε μηνιαία βάση. Η λεκάνη απορροής έχει διαμεριστεί σε τετραγωνικά κύτταρα διάστασης 2 km (Σχήμα 1). Οι εισοδοι και έξοδοι του μοντέλου είναι επίσης σε μορφή κανάβου της ίδιας ισοδιάστασης με τη λεκάνη απορροής και όλοι οι υπολογισμοί μεταξύ των μεταβλητών γίνονται για κάθε κύτταρο ξεχωριστά.

3.2 Δομή Υδρολογικού Μοντέλου

Ο μετασχηματισμός της βροχής σε απορροή στην έξοδο της εξεταζόμενης λεκάνης, πραγματοποιείται με εφαρμογή διαδοχικών μετασχηματισμών της βροχόπτωσης μέσα σε ένα σύστημα διασυνδεδεμένων δεξαμενών (Σχήμα 3).

Σχήμα 3: Διάγραμμα ροής λειτουργίας του μοντέλου

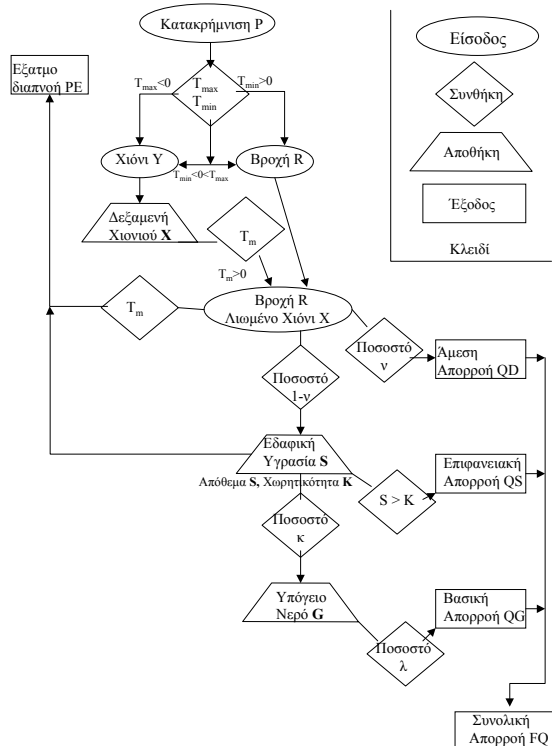


Figure 3: Flowchart of the model

Οι δεξαμενές αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια:

Δεξαμενή συγκέντρωσης χιονιού

Είσοδος: Χιονόπτωση

Έξοδος: Λιωμένο χιόνι

Δεξαμενή εδαφικής υγρασίας

Είσοδος: Η ποσότητα της βροχόπτωσης και του λιωμένου χιονιού που διηθείται στο έδαφος.

Έξοδος: Επιφανειακή απορροή (υπερχείλιση της δεξαμενής) και εκροή προς την επόμενη δεξαμενή του υπόγειου νερού.

Δεξαμενή υπόγειου νερού

Είσοδος: Εισροή μέρους του αποθέματος της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας.

Έξοδος: Εκροή μέρους του αποθέματός της προς το ποτάμι.

Οι μεταβλητές εισόδου του μοντέλου είναι:

- Επιφανειακή ολική κατακρήμνιση, P
- Δυνητική εξατμοδιαπνοή, E_p
- Μέση θερμοκρασία, T_m
- Ελάχιστη μέση ημερήσια θερμοκρασία, T_{min}
- Μέγιστη μέση ημερήσια θερμοκρασία, T_{max}

Οι μεταβλητές εξόδου του μοντέλου είναι:

- Απόθεμα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, S
- Απόθεμα δεξαμενής υπόγειου νερού, G
- Πραγματική εξατμοδιαπνοή, RE
- Συνολική απορροή, Q

3.3 Παράμετροι του μοντέλου

Έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν όσο το δυνατόν λιγότερες παράμετροι, ώστε να είναι σχετικά εύκολη η βαθμονόμηση του μοντέλου. Παράλληλα, όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν έχουν εννοιολογική σημασία. Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο μοντέλο είναι οι εξής:

- 1 **Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας ν** , που εκφράζει το ποσοστό της βροχόπτωσης (και του λιωμένου χιονιού) που μετατρέπεται σε άμεση απορροή μέσα στο μήνα χωρίς να εξατμίζεται ή να διεισδύει στο έδαφος.
- 2 **Χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας K** , που εκφράζεται σε mm ύψους νερού.
- 3 **Συντελεστής στέρωσης εδαφικής υγρασίας κ** , που εκφράζει το ποσοστό της αποθηκευμένης ποσότητας στη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας, η οποία διακινείται κάθε μήνα προς τη δεξαμενή υπόγειου νερού.

④ **Συντελεστής στείρευσης υπόγειου νερού** λ , που εκφράζει το ποσοστό του αποθέματος υπόγειου νερού που εισέρχεται στο υδρογραφικό δίκτυο ως βασική απορροή κατά τη διάρκεια του μήνα.

3.4 Λειτουργία υδρολογικού μοντέλου

Για τη λειτουργία του μοντέλου, σε κάθε χρονικό βήμα i (ένας μήνας) θεωρείται γνωστή η συνολική κατακρήμνιση P_i , η δυναμική εξατμοδιαπνοή PE_i , καθώς και η αποθήκευση των δεξαμενών χιονιού X_{i-1} , εδαφικής υγρασίας S_{i-1} και υπόγειου νερού G_{i-1} στο τέλος του προηγούμενου μήνα.

Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 3.

Η συνολική κατακρήμνιση P_i επιμερίζεται σε βροχόπτωση R_i και χιονόπτωση (σε ισοδύναμο ύψος νερού) Y_i . Ο επιμερισμός αυτός γίνεται με βάση την ελάχιστη και μέγιστη μέση ημερήσια θερμοκρασία (T_{\min_i} και T_{\max_i}) για κάθε μήνα και για κάθε κύτταρο της λεκάνης. Οι σχέσεις που περιγράφουν τον επιμερισμό δίνονται στη συνέχεια:

$$\begin{aligned} (\alpha) \quad (T_{\min_i} \geq 0) \\ Y_i = 0 \text{ και } R_i = P_i \\ (\beta) \quad (T_{\max_i} < 0) \\ Y_i = P_i \text{ και } R_i = 0 \\ (\gamma) \quad (T_{\min_i} < 0 \text{ και } T_{\max_i} \geq 0) \\ Y_i = P_i T_{\min_i} / (T_{\max_i} - T_{\min_i}) \text{ και } R_i = P_i - Y_i \end{aligned} \quad (1)$$

Η χιονόπτωση Y_i , τους μήνες που υπάρχει, αποθηκεύεται στη δεξαμενή συγκέντρωσης χιονιού. Αν η μέση θερμοκρασία του μήνα T_{m_i} είναι μεγαλύτερη από 0°C , μια ποσότητα του συσσωρευμένου χιονιού X τήκεται και προστίθεται στη βροχόπτωση και κατά συνέπεια στην ποσότητα του νερού που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Η ποσότητα του συσσωρευμένου χιονιού που τήκεται κάθε μήνα δίδεται από τη σχέση:

$$X_i = a T_{m_i} \quad (2)$$

όπου η ποσότητα a υπολογίζεται από τον αριθμό των ημερών του μήνα και το ρυθμό τήξης του χιονιού σε mm ανά $^\circ\text{C}$ και ημέρα.

Αρχικά ένα ποσοστό ν της συνολικής βροχόπτωσης μετατρέπεται σε άμεση απορροή (QD) σύμφωνα με τη σχέση:

$$QD_i = \nu(R_i + X_i) \quad (3)$$

Η υπόλοιπη ποσότητα $PG_i = (1-\nu)(R_i + X_i)$ συγκρίνεται με τη δυναμική εξατμοδιαπνοή (PE) και εφαρμόζονται οι παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} (\alpha) \quad (PG_i \geq PE_i) \\ RE_i = PE_i \\ RS_i = PG_i - PE_i \\ EVS_i = 0 \\ S_i = \min(S_{i-1} + RS_i, K)(1-\kappa) \\ IG_i = \kappa S_i \\ QS_i = \max(S_{i-1} + RS_i - K - IG_i, 0) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} (\beta) \quad (PG_i < PE_i) \\ EVS_i = \min\{(PE_i - PG_i)(S_{i-1}/K), PE_i - RE_i, S_{i-1}\} \\ IG_i = \kappa(S_i - EVS_i) \\ S_i = S_{i-1} - EVS_i - IG_i \\ RS_i = 0 \\ QS_i = 0 \\ RE_i = PG_i + EVS_i \end{aligned} \quad (5)$$

Στην περίπτωση (α) το περίσσειμα βροχής (RS) αποθηκεύεται στη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας μέχρι να κορεστεί το έδαφος και στη συνέχεια η ποσότητα που δεν μπορεί να αποθηκευτεί, απορρέει επιφανειακά (QS), ενώ η εξάτμιση της δεξαμενής εδάφους (EVS) είναι μηδενική. Η δεξαμενή υπόγειου νερού τροφοδοτείται από τη δεξαμενή εδάφους με ποσότητα (IG) ανάλογη (συντελεστής αναλογίας κ) του αποθηκευμένου νερού. Η πραγματική εξατμοδιαπνοή (RE) είναι ίση με τη δυναμική (PE).

Στη περίπτωση (β) η πραγματική εξατμοδιαπνοή είναι μικρότερη από τη δυναμική και θεωρείται ότι όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης εξατμίζεται, ενώ επιπλέον εξατμίζεται και μέρος της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας (S_{i-1}), εφόσον υπάρχει.

Η δεξαμενή υπόγειου νερού δίνει μια ποσότητα (QG), ανάλογη του αποθέματός της, προς το ποτάμι (βασική ροή) με συντελεστή αναλογίας λ . Το τελικό απόθεμα (G) στο τέλος του μήνα προκύπτει με την πρόσθεση της εισροής από τη δεξαμενή εδάφους και την αφαίρεση της βασικής ροής σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} QG_i = \lambda(G_{i-1} + IG_i) \\ G_i = G_{i-1} + IG_i - QG_i \end{aligned} \quad (6)$$

Η τελική απορροή στην έξοδο (Q) υπολογίζεται με την πρόσθεση της άμεσης, της επιφανειακής και της βασικής ροής σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_i = QD_i + QS_i + QG_i \quad (7)$$

3.5 Υπολογιστικό σύστημα

Η εφαρμογή αναπτύχθηκε στο ΣΓΠ-ArcView με τη βοήθεια προγραμμάτων που συντάχθηκαν στην ενσωματωμένη γλώσσα προγραμματισμού, Avenue.

Η Avenue ανήκει στις αντικειμενοστραφείς (object oriented) γλώσσες, δηλαδή όλες οι οντότητες θεωρούνται αντικείμενα που οργανώνονται σε κλάσεις, ενώ μεταξύ τους υπάρχει μια συγκεκριμένη ιεραρχία [13].

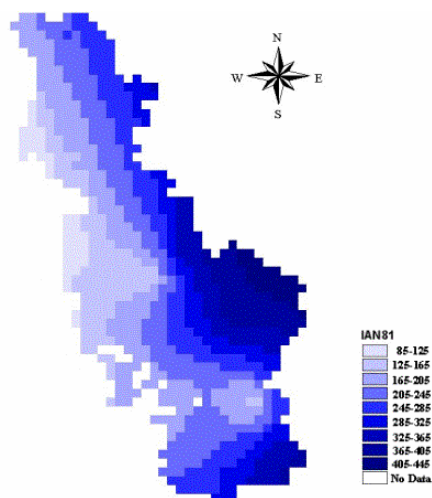
Η δημιουργία και εμφάνιση των κανάβων στο πρόγραμμα ArcView γίνεται με την ενεργοποίηση ενός ειδικού υποπρογράμματος, του χωρικού αναλυτή (Spatial Analyst Extension) [12]. Αυτός περιλαμβάνει εργαλεία δημιουργίας επιφανειών και ανάλυσης των χαρακτηριστικών τους (κλίση, προσανατολισμός, σκίαση, δημιουργία ισοϋψών κ.λ.π.).

Τα επίπεδα γεωγραφικής πληροφορίας, που κυρίως χρησιμοποιήθηκαν, είχαν τη μορφή κανάβου (grid), ώστε η γεωγραφική μεταβλητότητα να αναπαρίσταται με τη διαίρεση του χώρου σε διακριτά τετράγωνα που ονομάζονται κύτταρα (cells), σε καθένα από τα οποία αποθηκεύεται μια τιμή (value).

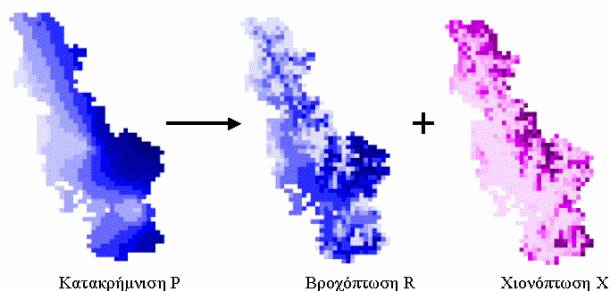
Για τη δημιουργία των κανάβων εισόδου χρησιμοποιήθηκαν υποπρογράμματα στη γλώσσα Avenue, στα οποία χρησιμοποιήθηκαν και έτοιμες συναρτήσεις του συστήματος. Η αξιολόγηση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής από σημειακές μετρήσεις έχει γίνει για διάφορα είδη μεταβλητών από πολλούς ερευνητές [2, 5, 10, 11, 18]. Με βάση τη βιβλιογραφία επιλέχθηκε η μέθοδος παρεμβολής kriging για τη δημιουργία των επιφανειών κατακρήμισης (Σχήμα 4) και χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη συνάρτηση του συστήματος, η οποία μετατρέπει τη σημειακή πληροφορία (κατακρήμιση στα σημεία των σταθμών της λεκάνης) σε επιφανειακή.

Οι επιφάνειες βροχόπτωσης και χιονόπτωσης προέκυψαν από τις επιφάνειες κατακρήμισης με εφαρμογή υποπρογραμμάτων, στα οποία εφαρμόστηκαν οι συνθήκες για τις θερμοκρασίες που περιγράφονται στη λειτουργία του μοντέλου (Σχήμα 5). Οι επιφάνειες θερμοκρασίας δημιουργήθηκαν με την υψομετρική αναγωγή των μετρήσεων των μετεωρολογικών σταθμών, στο υψόμετρο κάθε κυττάρου της λεκάνης με τη χρήση θερμοβαθμίδων

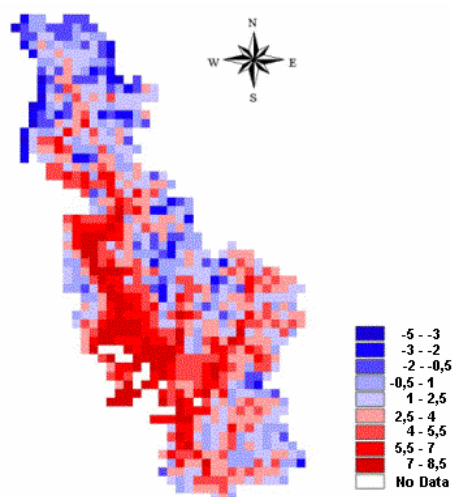
της περιοχής. Ενδεικτικά στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται μία επιφάνεια μέγιστης θερμοκρασίας.



Σχήμα 4: Επιφάνεια κατακρήμισης σε mm
Figure 4: Precipitation grid in mm

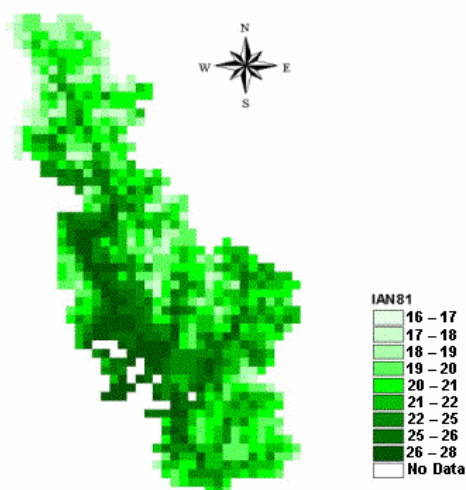


Σχήμα 5: Επιφάνειες βροχόπτωσης και χιονόπτωσης
Figure 5: Rainfall and snowfall grids



Σχήμα 6: Επιφάνεια μέγιστης θερμοκρασίας σε °C
Figure 6: Maximum temperature grid in °C

Η δυναμική εξατμοδιαπνοή υπολογίστηκε με την εφαρμογή της μεθόδου Penman και οι αντίστοιχες επιφάνειες (Σχήμα 7) με υποπρόγραμμα, στο οποίο γίνεται γραμμική παλινδρόμηση με εξαρτημένη μεταβλητή την εξατμοδιαπνοή και ανεξάρτητες το υψόμετρο και τη θερμοκρασία της λεκάνης.



Σχήμα 7: Επιφάνεια δυναμικής εξατμοδιαπνοής σε mm
Figure 7: Potential evapotranspiration grid in mm

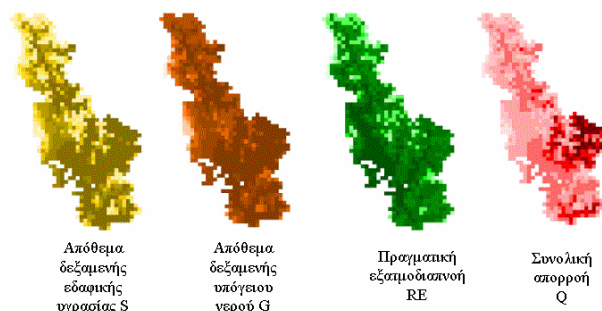
4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Η βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στο συγκεντρωτικό (lumped) μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου. Η διαδικασία βασίζεται στη βελτιστοποίηση της προσαρμογής των υπολογισμένων από το μοντέλο παροχών, στο ιστορικό δείγμα που έχει εκτιμηθεί από το ισοζύγιο του ταμιευτήρα Κρεμαστών στην έξοδο της λεκάνης. Ως μέθοδος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η μη γραμμική μέθοδος της γενικευμένης ανηγμένης κλίσης (generalized reduced gradient-GRD) [16]. Ως αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση χρησιμοποιήθηκε το αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα ανάμεσα στην προσομοιωμένη και την παρατηρημένη χρονοσειρά

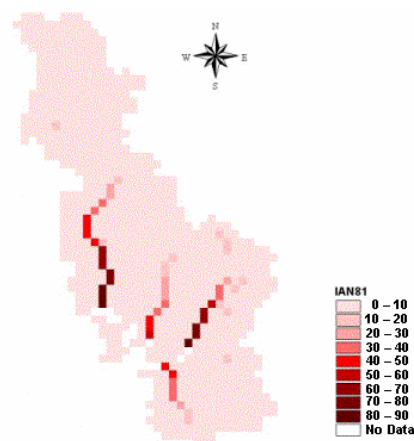
Οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση είναι: $\nu=0.218$, $K=154.0$ mm, $\kappa=0.087$, $\lambda=0.069$.

Στη συνέχεια, οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση του συγκεντρωτικού μοντέλου

χρησιμοποιήθηκαν έτοιμες στον αλγόριθμο του καταναμημένου μοντέλου για την κατασκευή των κανάβων των μεταβλητών εξόδου (Σχήμα 8) καθώς και των κανάβων συγκεντρωτικής απορροής. Οι τελευταίοι εξάγονται με τη λειτουργία ενσωματωμένης στο σύστημα συνάρτησης που υπολογίζει σε κάθε σημείο, κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, το μηνιαίο όγκο απορροής (Σχήμα 9).



Σχήμα 8: Επιφάνειες μεταβλητών εξόδου
Figure 8: Output variables grids



Σχήμα 9: Επιφάνεια συγκεντρωτικής απορροής σε hm^3
Figure 9: Accumulated runoff grid in hm^3

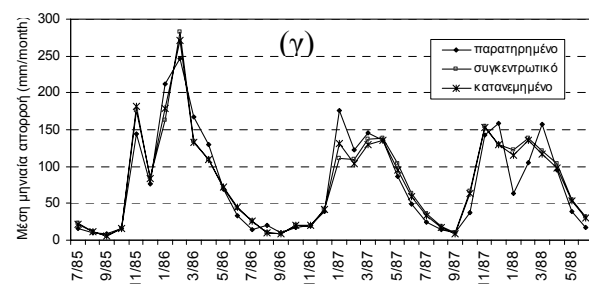
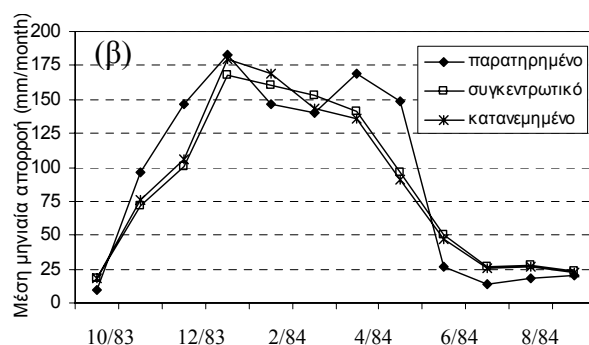
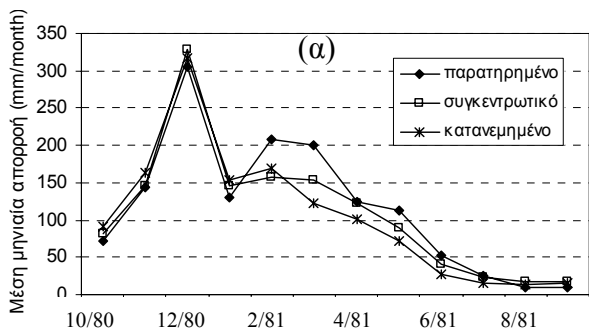
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η περίοδος βαθμονόμησης ήταν 57 μήνες (Οκτώβριος 1980 – Ιούνιος 1985) και η περίοδος επαλήθευσης 36 μήνες (Ιούλιος 1985 – Ιούνιος 1988).

Στα Σχήματα 10(α) και 10(β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσαρμογής του μοντέλου για το αρχικό και τελικό έτος της περιόδου βαθμονόμησης, ενώ στο Σχήμα 10(γ) τα αποτελέσματα κατά την περίοδο επαλήθευσης.

Ως μέτρο της επίδοσης του καταναμημένου και του συγκεντρωτικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν η μεροληπία (b), μία ποσοστιαία έκφραση βασισμένη στο μέσο

τετραγωνικό σφάλμα (R) και ο συντελεστής προσδιορισμού (d) [1].



Σχήμα 10: Σύγκριση απορροής κατά την περίοδο βαθμονόμησης (α: έτος 1980-81, β: έτος 1983-84) και κατά την περίοδο επαλήθευσης (γ)

Figure 10: Comparison between both lumped and distributed estimated runoff values and the historical runoff values at the basin outlet for calibration period (α: year 1980-81, β: year 1983-84) and for verification period (γ)

Αναλυτικά οι τύποι των μέτρων απόδοσης περιέχονται στον Πίνακα 1, όπου x_i και y_i είναι αντίστοιχα η παρατηρημένη και εκτιμημένη από το μοντέλο απορροή στο χρονικό βήμα i , ενώ \bar{x} και \bar{y} οι μέσες τιμές των παρατηρημένων και εκτιμημένων από το μοντέλο τιμών. Για την περίοδο επαλήθευσης τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Και στις δύο περιπτώσεις οι δείκτες επίδοσης έχουν πολύ ικανοποιητικές τιμές με καλύτερες αυτές του καταναμημένου μοντέλου.

Μεροληψία	$b = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\bar{x}} * 100$
Ποσοστιαία έκφραση βασισμένη στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα	$R = \frac{\sqrt{\sum (x_i - y_i)^2 / n}}{\bar{x}}$
Συντελεστής προσδιορισμού	$d = 1 - \frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$

Πίνακας 1: Μέτρα επίδοσης
Table 1: Measures of performance

	Συγκεντρωτικό	Καταναμημένο
b	2,1%	1,2%
R	29,8%	26,0%
d	0,89	0,92

Πίνακας 2: Επίδοση στην περίοδο επαλήθευσης
Table 2: Performance at verification period

6. ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό σύστημα, το οποίο καταρτίζει υδρολογικό ισοζύγιο στο γεωγραφικό χώρο μιας λεκάνης απορροής, χρησιμοποιώντας υδρομετεωρολογικά δεδομένα εισόδου και εξάγοντας γεωγραφικά καταναμημένα επίπεδα πληροφορίας που αφορούν στην απορροή, εξατμοδιαπνοή και αποθήκευση νερού στα διάφορα στρώματα του εδάφους. Η ανάπτυξη του μοντέλου βασίστηκε στην αντικειμενοστραφή γλώσσα προγραμματισμού Avenue που λειτουργεί σε περιβάλλον ΣΓΠ-ArcView. Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε στη λεκάνη απορροής του ποταμού Αχελώου, που εκτείνεται ανάντη της θέσης φράγματος Κρεμαστών.

Το μοντέλο λόγω του καταναμημένου χαρακτήρα και της ανάπτυξής του σε περιβάλλον ΣΓΠ έχει δυνατότητα να δίνει τη χωρική κατανομή όλων των μεταβλητών, που εμπλέκονται, πλεονεκτώντας έναντι του συγκεντρωτικού μοντέλου που δίνει τη χωρικά μέση μηνιαία τιμή της μεταβλητής. Επιπλέον, ολοκληρώνοντας τον κύκλο των παροχών είναι δυνατός ο υπολογισμός του μηνιαίου όγκου απορροής σε κάθε σημείο του υδρογραφικού δικτύου.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι με ένα απλό ως προς τη δομή υδρολογικό μοντέλο και με ένα πολύ μικρό αριθμό παραμέτρων, μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά το υδατικό ισοζύγιο και η γεωγραφική κατανομή του σε μια λεκάνη απορροής. Παράλληλα, αποδεικνύεται ότι τα

προγραμματιστικά εργαλεία που έχει ένα διαδομένο ΣΓΠ μπορούν να αξιοποιηθούν σε μια υδρολογική εφαρμογή, όπως το υδατικό ισοζύγιο.

Η βαθμονόμηση του συγκεντρωτικού μοντέλου έγινε με βάση μία σειρά παροχών στην έξοδο της λεκάνης. Ειδικότερα, η συνολική περίοδος για την οποία υπήρχαν δεδομένα χωρίστηκε σε δύο τμήματα εκ των οποίων το μεγαλύτερο χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση και το μικρότερο για επαλήθευση. Η σύγκριση των υπολογισμένων από το μοντέλο παροχών, τόσο για την περίοδο βαθμονόμησης όσο και για την περίοδο επαλήθευσης, με τις διαθέσιμες παροχές στην έξοδο της λεκάνης δείχνουν ότι η επίδοση του μοντέλου είναι αρκετά ικανοποιητική. Τόσο οι αιχμές όσο και οι ελάχιστες τιμές παροχών που υπολογίστηκαν από το μοντέλο ακολουθούν πολύ καλά τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές.

Η γλώσσα του συστήματος, Avenue, αποτελεί αναμφισβήτητα ένα πολύτιμο εργαλείο με το οποίο αυτοματοποιούνται και επιταχύνονται πολύπλοκες λειτουργίες του συστήματος. Παρ' όλα αυτά σε πολλές από αυτές δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική ταχύτητα. Ο υπολογιστικός φόρτος της λειτουργίας των προγραμμάτων είναι μεγάλος λόγω της δομής των καναβικών δεδομένων, των οποίων η διαχείριση και οι απαιτούμενοι υπολογισμοί γίνονται σε επίπεδο κυττάρου.

Η συμπεριφορά του ΣΓΠ-ArcView όσον αφορά στη διαχείριση κανάβων κρίνεται ικανοποιητική. Το πρόγραμμα επέδειξε μεγάλη σταθερότητα παρά τον όγκο των παραγόμενων κανάβων (στα πλαίσια της εφαρμογής παράχθηκαν περισσότεροι από 2000 κανάβοι). Η απόδοσή του βέβαια μειώθηκε αισθητά (μικρές ταχύτητες) αλλά αυτή εξαρτάται και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε καθώς και του λειτουργικού συστήματος (Windows).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κουτσογιάννης Δ., **Βελτιστοποίηση Συστημάτων Υδατικών Πόρων**, Διδακτικές Σημειώσεις, Αθήνα, 1999.
2. Μαμάσης Ν., **Ανάλυση βροχοπτώσεων κατά τύπο καιρού**, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 1997.
3. Μαμάσης Ν. και Ι. Ναλμπάντης, **Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας (ΦΑΣΗ Β)**. Τεύχος 20: Μελέτη Υδρολογικών ισοζυγίων, ΥΠΕΧΩΔΕ, ΕΜΠ, Αθήνα, 1995.
4. Ναλμπάντης Ι., **Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας. Τεύχος 8: Προγράμματα προσομοίωσης της σχέσης βροχής - απορροής**, ΥΠΕΧΩΔΕ, ΕΜΠ, Αθήνα, 1992.
5. Τζούλης Β., **Διερεύνηση της χωρικής κατανομής των βροχοπτώσεων με τη χρήση ΣΓΠ**, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 1996.
6. Batelaan O. and de Smedt F., **WetSpa: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology, for regional ground water modelling**, Proceedings of a symposium held during the Sixth IAHS Scientific Assembly, The Netherlands 2001.
7. Beven, K. J., **Distributed Modelling in Hydrology: Applications of TOPMODEL**, Wiley, Chichester, 1997.
8. Bregt A. K. and J. Bulens, **Integrating GIS and process models for land resource planning**, Proceedings of EU Workshop on 'Land Information Systems - Developments for planning the sustainable use of land resources', 1996.
9. Chow V. T., Maidment D., Mays L., **Applied Hydrology**, McGraw-Hill, 1988.
10. Creutin, J.D., and C. Obled, **Objective analysis and mapping techniques for rainfall fields: An objective comparison**, Water Resources Research, 25, 781-792, 1982.
11. Dingman L., **Physical Hydrology**, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1994.
12. ESRI, ARCVIEW, **Advanced Spatial Analysis using Raster and Vector data**, 1996.
13. ESRI, AVENUE, **Customization and Application Development for ArcView**, 1996.
14. Gupta, H. V., Khodatalab, N., Wagener, T. and S. Sorooshian, **Advances in semi-distributed watershed modeling**, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, Nice, April 2003, European Geophysical Society, American Geophysical Union, 2003.
15. Jakeman, A. J., and G. M. Hornberger, **How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?** Water Resour. Res., 29(8), 2637-2649, 1993.
16. Lasdon L.S., Waren A.D., Jain A. and M. Ratner, **Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming**, ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), Vol. 4, n. 1, pp. 34-50, 1978.
17. Maidment D. R., **Hydrology Workshop: Intergration of GIS and Hydrologic Modeling**, ESRI User Conference, 1997.
18. Meijerink A., Brouwer H., Mannaerts C., and C. Valenzuela, **Introduction to the use of Geographic Information Systems for practical hydrology**, UNESCO, Publication Number 23, 1995.
19. Olivera F., **Water balance of the Souss basin, Morocco**, Report from visit to the Direction Generale de l'Hydraulique (DGH) of Morocco, October 23 – November 2, 1995.
20. Olivera F. and D.R. Maidment, **Runoff Computation Using Spatially Distributed Terrain Parameters**, Proceedings of the ASCE – North American Water and Environment Congress '96 (NAWEC'96), Anaheim, California, June 22-28, 1996.
21. Pimenta Maria Teresa, **Waters balances using GIS**, Instituto Da Agua, XXIV General Assembly-European Geophysical Society The Hague, Netherlands, 1999.
22. Reed S., Maidment D., Patoux J., **Spatial water balance of Texas**, Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin, 1997.
23. **SWAT2000 Theoretical Documentation**, www.brc.tamus.edu/swat, 2000.

Κ. Μαντούδη,

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Χλόης 85, 151 25 Μαρούσι, Αθήνα

Ν. Μαμάσης,

Δρ Μηχανικός Ε.Μ.Π., Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλασσιών Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 157 80 Ζωγράφος, Αθήνα

Δ. Κουτσογιάννης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π., Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλασσιών Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 157 80 Ζωγράφος, Αθήνα

Water Basin Balance Model Using a Geographical Information System

K. MANTOUDI
Civil Engineer NTUA

N. MAMASSIS
Dr Engineer NTUA

D. KOUTSOYIANNIS
Associate Professor NTUA

Abstract

Based on a Geographical Information System (GIS), a hydrological model was developed that calculates the water balance in a hydrological basin. The system uses hydrometeorological data as input and produces spatial data of runoff, evapotranspiration and water storage to various ground levels, for output. The model development is based on the object oriented programming language that is incorporated in the GIS environment. The model was applied to Acheloos River basin, upstream of the Kremasta Dam. The basin was divided into cells of 4 square kilometers each and the inputs and outputs of the model were grids with the same cell size. Measured river discharges were used for the calibration and verification of the model.

1. INTRODUCTION

An application of a Geographical Information System (GIS) for the study of the water balance in a hydrological basin, was developed. The model input was hydrometeorological data from the area and the output is spatially distributed estimations of runoff, evapotranspiration and water storage.

The study area was the Acheloos River basin, upstream of the Kremasta Dam. The ArcView-GIS program and its embedded programming language AVENUE were employed for the application. The digital terrain model and the location of the basin in the Greek territory are presented in Figure 1 and the sites of meteorological stations in the basin are shown in Figure 2.

2. METHODOLOGY

The basin was divided into cells of 4 square kilometers each and the inputs and outputs of the model were grids with the same cell size. The model is distributed as the calculations between variables take place on individual cell basis. The time step of the model is monthly.

The transformation of rainfall to runoff at the basin outlet is accomplished by successive transformations of precipitation in an interconnected system of hypothetical reservoirs. The flowchart of the model is presented in Figure 3. A short description of these reservoirs follows:

Reservoir of snow accumulation

Input: Snowfall

Output: Snowmelt

Reservoir of soil moisture

Input: Part of rain and snowmelt that percolated to the ground

Output: Surface runoff and outflow to the next reservoir of ground water

Reservoir of groundwater

Input: Part of the soil moisture reservoir storage

Output: Outflow to the river from the groundwater reservoir storage

The input variables are:

- Precipitation P
- Potential evapotranspiration E_p
- Average temperature T_m
- Maximum average daily temperature T_{max}

- Minimum average daily temperature T_{\min}

The output variables are:

- Storage of soil moisture reservoir S
- Storage of groundwater reservoir G
- Real evapotranspiration RE
- Total runoff Q

The model parameters are:

- Imperviousness v
- Storage capacity of soil moisture reservoir K
- Recession coefficient of soil moisture κ
- Recession coefficient of ground water λ

The entire application was built in the AVENUE programming language and the various grids of hydrometeorological variables are presented in Figures 4 through 9.

The water balance model was run in two modes: lumped mode and distributed mode. Firstly, the lumped model was calibrated and the estimated parameters were entered in the distributed model algorithm. The values of the parameters were:

$$v=0.218, \kappa=0.087, \lambda=0.069, K=154.0 \text{ mm}$$

The calibration and verification periods were 57 and 36 months respectively. The comparison between both lumped and distributed estimated runoff values and the historical runoff values at the basin outlet for both calibration and verification period are shown in Figure 10.

3. CONCLUSIONS

The model, due to its distributed character and development in a GIS environment, allows the calculation of the spatial distribution of output variables. Furthermore, the integration of output variables results in the monthly runoff volume along the rivers.

The comparison between the computed and the observed values indicates that the performance of the model is very satisfactory. The model deviation for a typical calibration year was measured at 6.6% for bias, 27.3% for root mean square error and 0.86 for the determination coefficient. The respective values for the verification period, were: 1.2% for bias, 26% for root mean square error and 0.92 for the determination coefficient

As far as the computation part of the model is concerned, the development of the programs in Avenue language presents advantages and disadvantages. It comprises a powerful tool that automates and accelerates complicated procedures even though its processing speed is not always satisfactory. The computational demand of the program is high, due to the nature of grid data, whose management and calculations are performed on a grid cell basis.

Grid management in ArcView-GIS program was satisfactory. The program was quite stable despite the large number of created grids (more than 2000 grids were created for this application's needs). The performance of the program gradually decreased as the application execution proceeded.

K. Mantoudi,

Civil Engineer NTUA, Chloes 85, 151 25 Maroushi, Athens, Greece

N. Mamassis,

Dr. Engineer NTUA, Department of Water Resources, Hydraulic and Maritime Engineering, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Heron Polytechniou 5, 157 80 Zografou, Athens, Greece

D. Koutsoyiannis

Associate Professor NTUA, Department of Water Resources, Hydraulic and Maritime Engineering, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Heron Polytechniou 5, 157 80 Zografou, Athens, Greece