

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΣΕ ΜΗΝΙΑΙΑ ΚΑΙ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΧΡΟΝΙΚΗ ΒΑΣΗ

Β. Χρυσάνθου και Μ. Γαλάνη

Τομέας Υδραυλικών Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100 Ξάνθη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός των αποθέσεων φερτών υλών στον ταμιευτήρα Γερμασόγειας συναρτήσει της εδαφικής διάβρωσης στην αντίστοιχη λεκάνη απορροής. Ο ταμιευτήρας Γερμασόγειας βρίσκεται βορειοανατολικά της πόλης της Λεμεσού, στην Κύπρο. Η χωρητικότητα του ταμιευτήρα είναι $13.6 \times 10^6 \text{ m}^3$, ενώ η λεκάνη απορροής που αντιστοιχεί στον ταμιευτήρα, έχει έκταση 122.5 km^2 . Εφαρμόζονται δύο εκδοχές ενός μαθηματικού μοντέλου για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας ποσότητας φερτών υλών που αποτίθεται στον ταμιευτήρα. Στην πρώτη εκδοχή του μοντέλου, οι υπολογισμοί εκτελούνται σε μηνιαία χρονική βάση, ενώ στη δεύτερη εκδοχή σε ημερήσια χρονική βάση. Τα αριθμητικά αποτελέσματα του μέσου ετήσιου ρυθμού εδαφικής διάβρωσης, σύμφωνα με τις δύο εκδοχές του μαθηματικού μοντέλου, συγκρίνονται με αντίστοιχα δεδομένα μετρήσεων. Επίσης, γίνεται σύγκριση μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων της μέσης ετήσιας ποσότητας φερτών υλών που αποτίθεται στον ταμιευτήρα, σύμφωνα με τις δύο εκδοχές του μαθηματικού μοντέλου.

COMPARATIVE COMPUTATION OF SOIL EROSION AND RESERVOIR SEDIMENTATION ON A MONTHLY AND ON A DAILY TIME BASIS

V. Hrissanthou and M. Galani

Section of Hydraulic Engineering, Department of Civil Engineering,
Democritus University of Thrace, 67100 Xanthi, Greece

SUMMARY

The present study aims to compute sedimentation in Yermasoyia Reservoir in terms of soil erosion in the corresponding basin. Yermasoyia Reservoir is located northeast of the town of Limassol, Cyprus. The storage capacity of the reservoir is $13.6 \times 10^6 \text{ m}^3$. Yermasoyia River drains a basin that, upstream of the reservoir, amounts to 122.5 km^2 . Two versions of a mathematical model are used for the computation of the mean annual reservoir sedimentation. In the first version, the calculations are performed on a monthly time basis, while in the second version on a daily time basis. The arithmetic results of the mean annual soil erosion rate, according to both versions of the mathematical model, are compared with erosion measured data. Additionally, a comparison between the two model versions is made in relation to the arithmetic results of the mean annual reservoir sedimentation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Την τελευταία δεκαετία δημοσιεύτηκαν εργασίες του πρώτου συγγραφέα που αφορούσαν τον υπολογισμό του ετήσιου στερεοφορτίου, λόγω βροχής και επιφανειακής απορροής, στην έξοδο μιας μεγάλης λεκάνης απορροής (π.χ. Hrissanthou, 2002, 2005, 2006). Ο υπολογισμός βασίστηκε στην εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου αποτελούμενου από τρία υπομοντέλα: ένα υπομοντέλο βροχής-απορροής, ένα υπομοντέλο εδαφικής διάβρωσης και ένα υπομοντέλο μεταφοράς φερτών υλών σε υδατορρέυματα. Οι υπολογισμοί εκτελέστηκαν σε μηνιαία χρονική βάση, γιατί αφενός ήταν διαθέσιμα μηνιαία ύψη βροχής και αφετέρου προέκυψαν λογικές τιμές του ετήσιου στερεοφορτίου.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η εκτέλεση των ως άνω υπολογισμών σε ημερήσια χρονική βάση. Συγκεκριμένα, εφαρμόζονται δύο εκδοχές ενός μαθηματικού μοντέλου στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα Γερμασόγειας, στην Κύπρο, με μια έκταση 122.5 km², προς υπολογισμό του ετήσιου στερεοφορτίου στην έξοδο της λεκάνης απορροής, δηλ. της ετήσιας ποσότητας φερτών υλών που εισρέει στον ταμιευτήρα. Η πρώτη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου αποτελείται από τρία υπομοντέλα: ένα υπομοντέλο βροχής-απορροής, ένα υπομοντέλο εδαφικής διάβρωσης και ένα υπομοντέλο μεταφοράς φερτών υλών σε υδατορρέυματα. Οι υπολογισμοί εκτελούνται σε μηνιαία χρονική βάση. Στη δεύτερη εκδοχή του μοντέλου, το υπομοντέλο βροχής-απορροής και το υπομοντέλο εδαφικής διάβρωσης παραμένουν τα ίδια όπως και στην πρώτη εκδοχή. Στη θέση, όμως, του υπομοντέλου μεταφοράς φερτών υλών σε υδατορρέυματα εφαρμόζεται η εμπειρική έννοια του βαθμού στερεοπαροχής. Οι υπολογισμοί εκτελούνται σε ημερήσια χρονική βάση. Σ' αυτή τη θέση αξίζει να σημειωθεί ότι η μεταφορά φερτών υλών από τις εξόδους των υπολεκάνων προς την έξοδο μιας μεγάλης λεκάνης απορροής δεν μπορεί να υπολογιστεί ικανοποιητικά σε μια μικρή χρονική βάση, π.χ. σε ημερήσια χρονική βάση (Hrissanthou, 1990). Ειδικά, όμως, στην περίπτωση ακραίων πλημμυρικών γεγονότων, τα οποία είναι συνέπεια ακραίων επεισοδίων βροχής, έχειδειχθεί ότι μπορούν να προκύψουν λογικές τιμές του στερεοφορτίου (Χρυσάνθου και Θεοδωρακόπουλος, 2006).

2. ΠΡΩΤΗ ΕΚΔΟΧΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η πρώτη εκδοχή του εφαρμοζόμενου μαθηματικού μοντέλου αποτελείται από τρία υπομοντέλα, τα οποία δοκιμάστηκαν στο παρελθόν (Hrissanthou, 2006): ένα υπομοντέλο βροχής-απορροής (Giakoumakis et al., 1991), ένα υπομοντέλο εδαφικής διάβρωσης (Poesen, 1985) και ένα υπομοντέλο μεταφοράς φερτών υλών σε υδατορρέυματα (Yang, 1973). Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται συνοπτικά τα τρία υπομοντέλα. Αναλυτικότερη περιγραφή αυτών γίνεται στην εργασία Hrissanthou (2002).

2.1. ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΒΡΟΧΗΣ-ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Για τον υπολογισμό της άμεσης απορροής σε μία υπολεκάνη εφαρμόζεται ένα απλοποιημένο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου στο ριζόστρωμα του εδάφους. Η διαθέσιμη εδαφική υγρασία S (mm) στο ριζόστρωμα του εδάφους αυξάνεται μέσω της βροχής N (mm) και μειώνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής E (mm), της βαθιάς διήθησης IN (mm) και της άμεσης απορροής h_o (mm). Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου έχει την ακόλουθη μορφή:

$$S_n' = S_{n-1} + N_n - E_{pn} \quad (2.1)$$

όπου E_{pn} είναι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή για το χρονικό βήμα n .

Η άμεση απορροή h_{on} (mm) και η βαθιά διήθηση IN_n (mm) για το χρονικό βήμα n εκτιμώνται ως ακολούθως:

Εάν $S_n' < 0$, τότε $S_n = 0$, $h_{on} = 0$ και $IN_n = 0$

Εάν $0 \leq S_n' \leq S_{max}$, τότε $S_n = S_n'$, $h_{on} = 0$ και $IN_n = 0$

Εάν $S_n' > S_{max}$, τότε $S_n = S_{max}$, $h_{on} = k(S_n' - S_{max})$ και $IN_n = k'(S_n' - S_{max})$

όπου $k' = 1 - k$.

Στις ως άνω σχέσεις, S_{max} (mm) είναι η μέγιστη διαθέσιμη εδαφική υγρασία και k , k' συντελεστές αναλογίας. Η μέγιστη διαθέσιμη εδαφική υγρασία εκτιμάται ως συνάρτηση του αριθμού k αμπύλης CN (Curve Number), σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (SCS, 1972):

$$S_{max} = 25.4[(1000/CN) - 10] \quad (2.2)$$

Ο αριθμός καμπύλης εξαρτάται από την εδαφοκάλυψη, την υδρολογική ομάδα εδάφους και την προϋπάρχουσα υγρασία του εδάφους ($0 < CN < 100$).

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή E_p (mm/ημέρα) υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο ακτινοβολίας, όπως βελτιώθηκε από τους Doorenbos και Pruitt (1977):

$$E_p = K_c c WR_s \quad (2.3)$$

όπου K_c είναι φυτικός συντελεστής, εξαρτώμενος από την καλλιέργεια και το μήνα, c διορθωτικός συντελεστής, εξαρτώμενος από τη μέση ημερήσια σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας και τη μέση ημερήσια ταχύτητα του ανέμου, W συντελεστής εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία και το υψόμετρο της περιοχής και R_s ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του εδάφους σε μονάδες ισοδύναμης εξάτμισης (mm/ημέρα).

Το μέγεθος R_s (mm/ημέρα) προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$R_s = (0.25 + 0.5 \frac{P}{P}) R_a \quad (2.4)$$

όπου p ώρες ηλιοφάνειας ανά ημέρα, P μέγιστη τιμή του p για την υπό μελέτη περιοχή και R_a ηλιακή ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας, εκφρασμένη σε ισοδύναμη εξάτμιση (mm/ημέρα). Τα R_a και P δίδονται από πίνακες συναρτήσεων του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους.

Τα αναγκαία δεδομένα εισόδου για το υπομοντέλο βροχής-απορροής είναι το ύψος βροχής, η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, οι ώρες ηλιοφάνειας, η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, η ταχύτητα του ανέμου, το υψόμετρο, το γεωγραφικό πλάτος, η χρήση γης (εδαφοκάλυψη) και η σύσταση του εδάφους. Από τα ανωτέρω δεδομένα, το

υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος των θεωρουμένων υπολεκανών, καθώς και τα μετεωρολογικά δεδομένα της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, των ωρών ηλιοφάνειας, της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας και της ταχύτητας του ανέμου απαιτούνται για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, ενώ η χρήση γης (εδαφοκάλυψη) και η σύσταση του εδάφους απαιτούνται για την εκτίμηση του αριθμού καμπύλης.

2.2. ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Οι ακόλουθες εξισώσεις του Poesen (1985) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εδαφικής διάβρωσης σε μια υπολεκάνη:

$$q_{rs} = C(KE)r_s^{-1} \cos a \quad (2.5)$$

$$q_r = q_{rs} [0.301 \sin a + 0.019 D_{50}^{-0.22} (1 - e^{-2.42 \sin a})] \quad (2.6)$$

όπου q_{rs} είναι η μάζα αποκολλώμενων σωματιδίων του εδάφους ανά μονάδα επιφάνειας λόγω πρόσκρουσης των σταγόνων της βροχής (kg/m^2), C ο συντελεστής εδαφοκάλυψης, KE η κινητική ενέργεια της βροχής (J/m^2), r_s η αντίσταση του εδάφους στην αποκόλληση από τις σταγόνες της βροχής (J/kg), a η κλίση της εδαφικής επιφάνειας, q_r η μάζα εκτινασόμενων σωματιδίων προς τα κατόντη μιας κλιτύος ανά μονάδα πλάτους λόγω πρόσκρουσης των σταγόνων της βροχής (kg/m) και D_{50} η διάμεση διάμετρος εδαφικών σωματιδίων (m).

Η κινητική ενέργεια της βροχής KE (J/m^2) και η αντίσταση του εδαφικού υλικού r_s (J/kg) δίδονται από τις ακόλουθες σχέσεις του Poesen (1985):

$$KE = \beta N \quad (2.7)$$

$$r_s = 1836.5 + 175.7 \ln D_{50}, \text{ για } 0.0001 \text{ m} < D_{50} < 0.0007 \text{ m} \quad (2.8)$$

όπου N είναι το ύψος βροχής (mm) και β συντελεστής ανάλογος προς το τετράγωνο της μέσης ταχύτητας πτώσης των σταγόνων βροχής [$\text{J}/(\text{m}^2 \text{ mm})$].

Ο μεταφερόμενος όγκος αποκολληθέντων εδαφικών σωματιδίων από την επιφανειακή απορροή εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση (Nielsen et al., 1986):

$$q_f = r q_t \quad (2.9)$$

όπου q_f είναι ο μεταφερόμενος όγκος εδαφικών σωματιδίων από την επιφανειακή απορροή ανά μονάδα χρόνου και πλάτους [$\text{m}^3/(\text{s m})$], r ο λόγος παράσυρσης ($r = 1$ για μη συνεκτικά εδάφη, $r < 1$ για συνεκτικά εδάφη) και q_t η μεταφορική ικανότητα της επιφανειακής απορροής σε φερτές ύλες ανά μονάδα χρόνου και πλάτους [$\text{m}^3/(\text{s m})$].

Η μεταφορική ικανότητα της επιφανειακής απορροής σε φερτές ύλες q_t [$\text{m}^3/(\text{s m})$] δίδεται από τον ακόλουθο τύπο (Nielsen et al., 1986), ο οποίος αποτελεί τροποποίηση γνωστού τύπου των Englund-Hansen (1967) για τη μεταφορική ικανότητα της ροής ενός υδατορρέυματος σε φερτές ύλες:

$$q_t = [0.04(2g/f)^{1/6} q^{5/3} s^{5/3}] / [(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)^2 g^{1/2} D_{50}] \quad (2.10)$$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2), f συντελεστής τριβής, q η άμεση απορροή ανά μονάδα πλάτους [$m^3/(s \cdot m)$], s η κλίση γραμμής ενέργειας, ρ_s η πυκνότητα φερτών υλών (kg/m^3) και ρ η πυκνότητα νερού (kg/m^3).

Ο συντελεστής τριβής f δίδεται από τους Engelund-Hansen (1967):

$$f = 2gh_o s / u^2 \quad (2.11)$$

όπου h_o είναι το ύψος της άμεσης απορροής (βάθος ροής) (m) και u η μέση ταχύτητα ροής (m/s), η οποία μπορεί να υπολογιστεί από το γνωστό τύπο του Manning.

Η διαθέσιμη ποσότητα φερτών υλών στην εδαφική επιφάνεια της θεωρούμενης υπολεκάνης προκύπτει ως άθροισμα της εκτινασόμενης μάζας σωματιδίων της εδαφικής επιφάνειας λόγω της πρόσκρουσης των σταγόνων της βροχής και της μεταφερόμενης μάζας εδαφικών σωματιδίων από την επιφανειακή απορροή. Η ποσότητα φερτών υλών που φθάνει στο κύριο υδατόρρευμα της θεωρούμενης υπολεκάνης, εκτιμάται βάσει των ακόλουθων συλλογισμών:

- Εάν η διαθέσιμη ποσότητα φερτών υλών στην υπολεκάνη υπερβαίνει τη μεταφορική ικανότητα της επιφανειακής απορροής σε φερτές ύλες, λαμβάνει χώρα απόθεση φερτών υλών στην εδαφική επιφάνεια. Σ' αυτήν την περίπτωση γίνεται δεκτό ότι η μεταφερόμενη ποσότητα φερτών υλών προς το κύριο υδατόρρευμα της υπολεκάνης ισούται προς την ως άνω μεταφορική ικανότητα.
- Εάν η διαθέσιμη ποσότητα φερτών υλών στην υπολεκάνη είναι μικρότερη της μεταφορικής ικανότητας της επιφανειακής απορροής σε φερτές ύλες, λαμβάνει χώρα πρόσθετη διάβρωση της εδαφικής επιφάνειας. Σ' αυτήν την περίπτωση γίνεται δεκτό ότι η μεταφερόμενη ποσότητα φερτών υλών προς το κύριο υδατόρρευμα της υπολεκάνης ισούται προς τη διαθέσιμη ποσότητα φερτών υλών στην υπολεκάνη.

Τα επιπρόσθετα δεδομένα εισόδου για το υπομοντέλο εδαφικής διάβρωσης, σε σχέση προς το υπομοντέλο βροχής-απορροής, είναι η μέση κλίση της εδαφικής επιφάνειας των υπολεκανών, η έκταση των υπολεκανών, το μήκος του κύριου υδατορρέυματος των υπολεκανών, η τραχύτητα της εδαφικής επιφάνειας, η διάμετρος των κόκκων των φερτών υλών, η πυκνότητα των φερτών υλών και του νερού.

2.3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΩΝ ΣΕ ΥΔΑΤΟΡΡΕΥΜΑΤΑ

Το στερεοφορτίο στην έξοδο του κύριου υδατορρέυματος μιας υπολεκάνης μπορεί να υπολογιστεί βάσει της μεταφορικής ικανότητας του υδατορρέυματος σε φερτές ύλες. Η τελευταία υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις του Yang (1973):

$$\log c_t = 5.435 - 0.286 \log(wD_{50}/\nu) - 0.457 \log(u_* / w) \\ + [1.799 - 0.409 \log(wD_{50}/\nu) - 0.314 \log(u_* / w)] \log[(us/w) - (u_{cr}s/w)] \quad (2.12)$$

$$u_{cr} / w = \{2.5 / [\log(u_* D_{50} / \nu) - 0.06]\} + 0.66, \text{ εάν } 1.2 < u_* D_{50} / \nu < 70 \quad (2.13)$$

$$u_{cr} / w = 2.05, \text{ εάν } u_* D_{50} / \nu \geq 70 \quad (2.14)$$

όπου c_t είναι η ολική συγκέντρωση φερτών υλών εκφρασμένη σε μονάδες βάρους (ppm), w η τελική ταχύτητα καθίζησης αιωρούμενων υλών (m/s), D_{50} η διάμεση διάμετρος υλικού κοίτης (m), ν το κινηματικό ιξώδες νερού (m^2/s), u_* η διατμητική ταχύτητα (m/s), u η μέση ταχύτητα ροής (m/s), u_{cr} η κρίσιμη μέση ταχύτητα ροής (m/s) και s η κλίση της γραμμής ενέργειας.

Η (2.12) προέκυψε από την έννοια της μοναδιαίας ισχύος υδατορρέυματος (unit stream power), η οποία ορίζεται ως ο ρυθμός δυνητικής κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα βάρους του νερού (us), και από διαστατική ανάλυση. Πρόκειται για μια εξίσωση ολικού φορτίου, στην οποία θεωρείται μια κρίσιμη κατάσταση κατά την έναρξη μετακίνησης των κόκκων της κοίτης, όπως στις περισσότερες εξισώσεις μεταφοράς φερτών υλών.

Η τελική ταχύτητα καθίζησης αιωρούμενων υλών w μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση του Stokes (Yang, 1996):

$$w = gD_{50}^2 (\rho_s - \rho) / (18\nu), \text{ εφόσον } wD_{50} / \nu < 0.1 \quad (2.15)$$

όπου D_{50} είναι η διάμεση διάμετρος των αιωρούμενων υλών.

Το στερεοφορτίο στην έξοδο του κύριου υδατορρέυματος της θεωρούμενης υπολεκάνης εκτιμάται με παρόμοιους συλλογισμούς όπως η εισροή φερτών υλών προς το κύριο υδατόρρευμα από την εδαφική διάβρωση της υπολεκάνης:

- Εάν η διαθέσιμη ποσότητα φερτών υλών στο υδατόρρευμα υπερβαίνει τη μεταφορική ικανότητα του υδατορρέυματος σε φερτές ύλες, λαμβάνει χώρα απόθεση φερτών υλών στην κοίτη του υδατορρέυματος. Σ' αυτήν την περίπτωση γίνεται δεκτό ότι το στερεοφορτίο στην έξοδο του υδατορρέυματος ισούται με τη μεταφορική ικανότητα του υδατορρέυματος σε φερτές ύλες.
- Εάν η διαθέσιμη ποσότητα φερτών υλών στο υδατόρρευμα είναι μικρότερη από τη μεταφορική ικανότητα του υδατορρέυματος σε φερτές ύλες, μπορεί να λάβει χώρα διάβρωση της κοίτης. Σ' αυτήν την περίπτωση γίνεται δεκτό ότι το στερεοφορτίο στην έξοδο του υδατορρέυματος ισούται με τη διαθέσιμη ποσότητα φερτών υλών στο υδατόρρευμα.

Τα επιπρόσθετα δεδομένα εισόδου για το υπομοντέλο μεταφοράς φερτών υλών σε υδατορρέυματα, σε σχέση προς τα προηγούμενα υπομοντέλα, αναφέρονται στα κύρια υδατορρέυματα των υπολεκάνων: βασική απορροή, κλίση της κοίτης, πλάτος της κοίτης, τραχύτητα της κοίτης, διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων, διάμετρος των κόκκων της κοίτης και κινηματικό ιξώδες νερού.

3. ΔΕΥΤΕΡΗ ΕΚΔΟΧΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η δεύτερη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου αποτελείται από το υπομοντέλο βροχής-απορροής και το υπομοντέλο εδαφικής διάβρωσης, τα οποία περιγράφηκαν ανωτέρω στην πρώτη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου, καθώς και από την εμπειρική έννοια του βαθμού στερεοπαροχής SDR (Sediment Delivery Ratio). Βαθμός στερεοπαροχής είναι το ποσοστό της ποσότητας εδαφικής διάβρωσης σε μια λεκάνη

απορροής, το οποίο φθάνει στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Συνήθως εκφράζεται σε ετήσια βάση.

Η ακόλουθη εμπειρική εξίσωση του Williams (1977) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του βαθμού στερεοπαροχής:

$$SDR = 1.366 \times 10^{-11} F^{-0.0998} s^{0.3629} CN^{5.444} \quad (3.1)$$

όπου SDR είναι ο βαθμός στερεοπαροχής, F (km^2) είναι η έκταση της λεκάνης απορροής, s η μέση κλίση του κύριου υδατορρέυματος της λεκάνης απορροής (m/km) και CN ο αριθμός καμπύλης.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΓΕΡΜΑΣΟΓΕΙΑΣ

Ο ταμιευτήρας Γερμασόγειας βρίσκεται βορειοανατολικά της πόλης της Λεμεσού, στην Κύπρο. Η χωρητικότητα του ταμιευτήρα είναι $13.6 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η έκταση της λεκάνης απορροής που αντιστοιχεί στον ταμιευτήρα, είναι 122.5 km^2 . Το μήκος του κύριου υδατορρέυματος της λεκάνης απορροής, το οποίο φέρει το όνομα Γερμασόγεια, είναι περίπου 25 km . Το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης απορροής είναι περί τα 1400 m . Οι δύο εκδοχές του μαθηματικού μοντέλου εφαρμόστηκαν στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα Γερμασόγειας, η οποία, σημειωτέον, χωρίστηκε σε τέσσερις υπολεκάνες προς ακριβέστερη εκτέλεση των υπολογισμών (Σχήμα 1). Οι επιφάνειες των υπολεκανών κυμαίνονται μεταξύ 14 και 44 km^2 . Η ποσοστιαία εδαφοκάλυψη της θεωρούμενης λεκάνης απορροής έχει ως εξής: δάσος (57.7%), θάμνοι (33.7%), καλλιέργειες (5.8%), αστική περιοχή (1.8%) και μη σημαντική βλάστηση (1%).

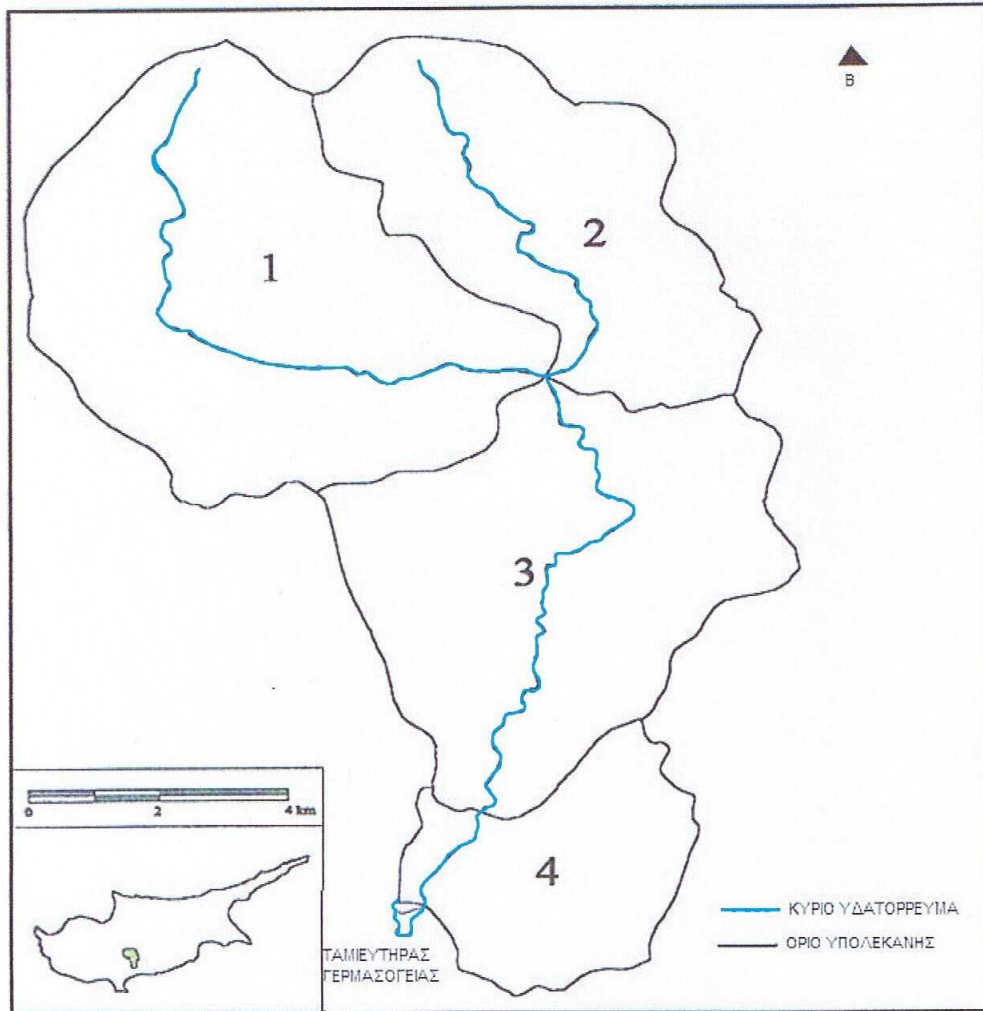
Όσον αφορά τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου του μαθηματικού μοντέλου, αναφέρονται κατωτέρω:

- Ημερήσια ύψη βροχής από τρεις βροχομετρικούς σταθμούς για τρία έτη (1987-1989). Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής σ' αυτούς τους σταθμούς ανέρχεται σε 674 mm . Οι δύο βροχομετρικοί σταθμοί κείνται εκτός της μελετώμενης λεκάνης απορροής, ενώ ο τρίτος κείται οριακά εντός αυτής.
- Μέσες ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας ατμόσφαιρας, σχετικής υγρασίας ατμόσφαιρας και ταχύτητας ανέμου από ένα μετεωρολογικό σταθμό για τα ως άνω τρία έτη.
- Αθροιστικές ημερήσιες τιμές ωρών ηλιοφάνειας από τον ίδιο μετεωρολογικό σταθμό για τα τρία έτη.

Τα φυσιογραφικά και λοιπά δεδομένα εισόδου του μαθηματικού μοντέλου εκτιμήθηκαν ως εξής:

- Η μέση κλίση της εδαφικής επιφάνειας κάθε υπολεκάνης από ψηφιοποιημένο χάρτη ισοϋψών καμπυλών με τη βοήθεια σχετικών τύπων (Χρυσάνθου και Πυλιώτης, 1995).
- Η έκταση των υπολεκανών από αντίστοιχο ψηφιοποιημένο χάρτη (Σχήμα 1).
- Η ποσοστιαία εδαφοκάλυψη των υπολεκανών από ψηφιοποιημένο χάρτη βλάστησης.
- Η τραχύτητα της εδαφικής επιφάνειας από πίνακες (Χρυσάνθου, 2006) συναρτήσει της εδαφοκάλυψης.

- Το μήκος και η κλίση της κοίτης των κύριων υδατορρευμάτων των υπολεκανών από ψηφιοποιημένους χάρτες υδατορρευμάτων (Σχήμα 1) και ισοϋψών καμπυλών.
- Το πλάτος της κοίτης των κύριων υδατορρευμάτων των υπολεκανών εμπειρικά.
- Η τραχύτητα της κοίτης των κύριων υδατορρευμάτων των υπολεκανών από πίνακες (Χρυσάνθου, 2006) συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων της κοίτης.



Σχήμα 1: Χάρτης κύριων υδατορρευμάτων υπολεκανών

- Η διάμετρος των εδαφικών κόκκων, των αιωρούμενων κόκκων στα υδατορρεύματα και των κόκκων της κοίτης των υδατορρευμάτων εμπειρικά.
- Η πυκνότητα του νερού και των φερτών υλών, καθώς και το κινηματικό ιξώδες του νερού εμπειρικά.
- Η βασική απορροή των υδατορρευμάτων από διαθέσιμες μετρήσεις.

Τέλος, όσον αφορά την εδαφική διάβρωση στην Κύπρο, ήταν διαθέσιμη από το Τμήμα Ανάπτυξης Υδάτων (Λευκωσία) η κατανομή του μέσου ετήσιου ρυθμού διάβρωσης στο νησί της Κύπρου. Σύμφωνα με την εν λόγω Υπηρεσία, ο μέσος ετήσιος ρυθμός εδαφικής διάβρωσης στις διάφορες γεωμορφολογικές ζώνες της Κύπρου εκτιμήθηκε έμμεσα από δειγματοληψίες αιωρούμενων φερτών υλών σε τρεις ταμιευτήρες.

Η πρώτη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου εφαρμόστηκε χωριστά σε κάθε υπολεκάνη, σε μηνιαία χρονική βάση για ένα συγκεκριμένο έτος. Στο υπομοντέλο μεταφοράς φερτών υλών σε υδατορρεύματα ελήφθη υπόψη μόνο το κύριο υδατόρρευμα κάθε υπολεκάνης. Η δεύτερη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου εφαρμόστηκε επίσης σε κάθε υπολεκάνη χωριστά, αλλά σε ημερήσια χρονική βάση για ένα συγκεκριμένο έτος.

Το υπομοντέλο βροχής-απορροής, ως μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, μπορεί να εφαρμοστεί θεωρητικά σε οποιαδήποτε χρονική βάση, π.χ. σε μηνιαία ή ημερήσια χρονική βάση. Αυτό σημαίνει ότι οι υδρομετεωρολογικές μεταβλητές του υπομοντέλου βροχής-απορροής μπορούν να εκφραστούν σε μηνιαία ή ημερήσια χρονική βάση αντίστοιχα. Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να υπολογιστεί αξιόπιστα σε μεγάλη χρονική βάση, π.χ. μηνιαία ή ετήσια.

Το ως άνω υπομοντέλο βροχής-απορροής, όπως εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία, υπολογίζει αθροιστικές τιμές του ύψους άμεσης απορροής σε ημερήσια ή μηνιαία χρονική βάση, δεν υπολογίζει, όμως, τη χρονική εξέλιξη της άμεσης απορροής στο χρονικό διάστημα μιας ημέρας ή ενός μήνα. Με άλλα λόγια, δεν υπολογίζει υδρογραφήματα.

5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι μηνιαίες τιμές του στερεοφορτίου στην έξοδο της όλης λεκάνης απορροής, δηλ. στην είσοδο του ταμιευτήρα, οι οποίες προέκυψαν από την πρώτη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου για ένα συγκεκριμένο έτος, προστίθενται για να παραχθεί η ετήσια τιμή του στερεοφορτίου, YA, λόγω εδαφικής διάβρωσης και διάβρωσης της κοίτης των υδατορρευμάτων. Η ετήσια ποσότητα εδαφικής διάβρωσης στην όλη λεκάνη απορροής συμβολίζεται με YD. Ο λόγος YA προς YD είναι ο βαθμός στερεοπαροχής SDR (Sediment Delivery Ratio) της θεωρούμενης λεκάνης απορροής. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα για τις ποσότητες YD, YA και SDR, για τα έτη 1987-1989, δίδονται στον Πίνακα 1.

Οι ημερήσιες τιμές της εδαφικής διάβρωσης των τεσσάρων υπολεκανών, οι οποίες προέκυψαν από τη δεύτερη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου, προστίθενται για να παραχθεί η ημερήσια τιμή της εδαφικής διάβρωσης της όλης λεκάνης απορροής. Οι ημερήσιες τιμές της εδαφικής διάβρωσης της όλης λεκάνης απορροής, για ένα συγκεκριμένο έτος, προστίθενται για να παραχθεί η ετήσια τιμή YD της εδαφικής διάβρωσης για την όλη λεκάνη απορροής.

Πίνακας 1: Υπολογιστικά αποτελέσματα της πρώτης εκδοχής του μαθηματικού μοντέλου

Έτος	YD (t)	YA (t)	SDR (%)
1987	681 000	229 000	34
1988	533 000	255 000	48
1989	72 000	59 000	82
Μέση τιμή	429 000	181 000	55

Ο βαθμός στερεοπαροχής SDR, σύμφωνα με την (3.1), ανέρχεται σε 29%. Η ετήσια τιμή του στερεοφορτίου, YA, λόγω εδαφικής διάβρωσης, στην έξοδο της όλης λεκάνης απορροής προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την αντίστοιχη τιμή του YD με την τιμή του SDR. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα για τις ποσότητες YD, SDR και YA, για τα έτη 1987-1989, δίδονται στον Πίνακα 2. Σ' αυτό το σημείο πρέπει να προστεθεί ότι η πρώτη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου εφαρμόστηκε και σε ημερήσια χρονική

βάση, αλλά έδωσε πολύ μικρές τιμές για την ποσότητα ΥΑ (Γαλάνη και Χρυσάνθου, 2005).

Πίνακας 2: Υπολογιστικά αποτελέσματα της δεύτερης εκδοχής του μαθηματικού μοντέλου

Έτος	ΥD (t)	SDR (%)	ΥΑ (t)
1987	807 000	29	234 000
1988	43 000	29	12 500
1989	474 000	29	138 000
Μέση τιμή	441 000	29	128 000

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2, η τιμή του βαθμού στερεοπαροχής είναι σταθερή από έτος σε έτος, καθόσον εξαρτάται μόνο από φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής σύμφωνα με την (3.1), τα οποία θεωρούνται χρονικώς αμετάβλητα.

Οι μέσες ετήσιες τιμές του ΥD, 429 000 t και 441 000 t, μετασχηματίζονται σε μέσους ετήσιους ρυθμούς εδαφικής διάβρωσης, 1.32 mm και 1.36 mm αντίστοιχα. Οι δύο τελευταίες τιμές είναι περίπου 1.9 φορές μεγαλύτερες από την αντίστοιχη εκτιμημένη τιμή των 0.70 mm (Τμήμα Ανάπτυξης Υδάτων, Λευκωσία, Κύπρος). Η εν λόγω τιμή αντιστοιχεί σε περιοχές με πυριγενή πετρώματα, με μεγάλες κλίσεις εδαφικής επιφάνειας, με ετήσιες βροχοπτώσεις της τάξης των 600 – 800 mm, καλυμμένες από δάσος, θάμνους και λίγες καλλιέργειες. Αυτές οι κλιματικές και φυσιογραφικές συνθήκες πληρούνται στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα Γερμασόγειας.

Σύμφωνα με το κλασικό διάγραμμα του Brune (1953), η ικανότητα παγίδευσης (trap efficiency) του ταμιευτήρα Γερμασόγειας είναι 100%. Αυτό σημαίνει ότι όλη η ποσότητα φερτών υλών στην έξοδο της θεωρούμενης λεκάνης απορροής, δηλ. στην είσοδο του ταμιευτήρα, αποτίθεται στον ταμιευτήρα. Ο μέσος ετήσιος όγκος φερτών υλών που αποτίθεται στον ταμιευτήρα, ανέρχεται σε 97 600 m³ σύμφωνα με την πρώτη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου και σε 69 000 m³ σύμφωνα με τη δεύτερη εκδοχή. Θεωρώντας τη χωρητικότητα του ταμιευτήρα (13.6x10⁶ m³), η ωφέλιμη ζωή του ταμιευτήρα προκύπτει ίση προς 139 έτη, σύμφωνα με την πρώτη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου, και προς 197 έτη, σύμφωνα με τη δεύτερη εκδοχή.

Μια μικρή παραλλαγή του εφαρμοσθέντος στην παρούσα εργασία υπομοντέλου βροχής-απορροής, στην οποία υπολογίστηκε η πραγματική εξατμισοδιαπνοή αντί της δυνητικής, σε συνδυασμό με το υπομοντέλο εδαφικής διάβρωσης του Poesen (1985) παρείχε ένα μέσο ετήσιο ρυθμό εδαφικής διάβρωσης 1.8 φορές μεγαλύτερο από αυτόν που εκτιμήθηκε από μετρήσεις (Hrissanthou, 2006).

Συμπληρωματικά αναφέρεται ότι η μέση τιμή, για τα έτη 1987-1989, του λόγου του υπολογισμένου ετήσιου όγκου άμεσης απορροής προς τον αντίστοιχο μετρημένο, στην έξοδο της υπολεκάνης 3, ήταν λίαν ικανοποιητική, ήτοι 0.97 (Hrissanthou, 2006).

6. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η απόκλιση μεταξύ των μέσων ετησίων ρυθμών εδαφικής διάβρωσης, σύμφωνα με την πρώτη και τη δεύτερη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου, είναι αμελητέα. Συνεπώς, όσον αφορά τον υπολογισμό της ετήσιας εδαφικής διάβρωσης, η χρονική βάση των υπολογισμών δεν παίζει σημαντικό ρόλο. Πάντως, και οι δύο εκδοχές του μαθηματικού μοντέλου υπερεκτιμούν το μέσο ετήσιο ρυθμό διάβρωσης που προέκυψε από μετρήσεις.

Το μέσο ετήσιο στερεοφορτίο στην έξοδο της θεωρούμενης λεκάνης απορροής, σύμφωνα με την πρώτη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου, είναι περίπου 1.4 φορές μεγαλύτερο από την αντίστοιχη τιμή σύμφωνα με τη δεύτερη εκδοχή. Το εν λόγω αριθμητικό αποτέλεσμα μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι το στερεοφορτίο, σύμφωνα με την πρώτη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου, προέρχεται τόσο από εδαφική διάβρωση όσο και από διάβρωση της κοίτης των υδατορρευμάτων, ενώ το στερεοφορτίο, σύμφωνα με τη δεύτερη εκδοχή, προέρχεται μόνο από εδαφική διάβρωση. Πέραν τούτου, η μέση τιμή του βαθμού στερεοπαροχής, σύμφωνα με την πρώτη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου (Πίνακας 1), είναι περίπου 1.9 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη, χρονικώς αμετάβλητη τιμή σύμφωνα με τη δεύτερη εκδοχή (Πίνακας 2). Η μεγαλύτερη τιμή του βαθμού στερεοπαροχής, σύμφωνα με την πρώτη εκδοχή, συμβάλλει κατά κύριο λόγο στη μεγαλύτερη μέση τιμή του YA , σύμφωνα με την πρώτη εκδοχή, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του YA σύμφωνα με τη δεύτερη εκδοχή.

Ο μέσος ετήσιος όγκος αποθέσεων στον ταμιευτήρα, σύμφωνα με την πρώτη εκδοχή του μαθηματικού μοντέλου, είναι περίπου 1.4 φορές μεγαλύτερος από την αντίστοιχη τιμή σύμφωνα με τη δεύτερη εκδοχή. Το παρόν αριθμητικό αποτέλεσμα είναι λογική συνέπεια του αριθμητικού αποτελέσματος της αμέσως προηγούμενης παραγράφου.

Η ωφέλιμη ζωή του ταμιευτήρα, σύμφωνα και με τις δύο εκδοχές του μαθηματικού μοντέλου, υπερβαίνει τα 100 έτη. Αυτό σημαίνει ότι δεν υφίσταται άμεσος κίνδυνος πλήρωσης του ταμιευτήρα με φερτές ύλες. Εντούτοις, θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα απομάκρυνσης των αποθέσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να μη μειώνεται η χωρητικότητα του ταμιευτήρα σε αποθηκευμένο νερό.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υπολογιστική εμπειρία για το ετήσιο στερεοφορτίο στην έξοδο μιας μεγάλης λεκάνης απορροής, λόγω βροχής και επιφανειακής απορροής, έδειξε ότι μπορεί να προκύψουν λογικά αποτελέσματα, όταν οι υπολογισμοί διεξάγονται σε μεγάλη χρονική βάση, π.χ. σε μηνιαία βάση (Hrissanthou, 2002, 2005, 2006). Όταν, όμως, οι υπολογισμοί διεξάγονται σε μικρή χρονική βάση, π.χ. σε ημερήσια βάση, δεν μπορεί να υπολογιστεί ικανοποιητικά το ετήσιο στερεοφορτίο στην έξοδο της λεκάνης απορροής (Hrissanthou, 1990). Απεναντίας, η ετήσια ποσότητα της εδαφικής διάβρωσης στην όλη λεκάνη απορροής μπορεί να υπολογιστεί ικανοποιητικά, όπως προέκυψε από το παράδειγμα εφαρμογής της παρούσας εργασίας.

Η τελευταία διαπίστωση οδηγεί στο συλλογισμό ότι η αδυναμία ικανοποιητικού υπολογισμού του ετήσιου στερεοφορτίου στην έξοδο μιας μεγάλης λεκάνης απορροής, όταν οι υπολογισμοί διεξάγονται σε ημερήσια χρονική βάση, οφείλεται στο γεγονός ότι η διόδευση του στερεοφορτίου από τις εξόδους των υπολεκανών προς την έξοδο της όλης λεκάνης απορροής δεν μπορεί να υπολογιστεί ικανοποιητικά σε ημερήσια χρονική βάση. Προς παράκαμψη του ως άνω εμποδίου εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία η εμπειρική έννοια του βαθμού στερεοπαροχής, μέσω της οποίας προκύπτει απευθείας το ετήσιο στερεοφορτίο στην έξοδο της όλης λεκάνης απορροής από την υπολογιζόμενη ετήσια ποσότητα διάβρωσης.

Το σοβαρότερο μειονέκτημα της εμπειρικής έννοιας του βαθμού στερεοπαροχής, όπως και κάθε εμπειρικής έννοιας, είναι ότι αυτή εκφράζει μία σειρά πολύπλοκων φυσικών διαδικασιών, οι οποίες είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν με σχετική ακρίβεια.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι ο πολύ μικρός αριθμός θεωρουμένων ετών σ' αυτήν την εργασία δεν επιτρέπει την εξαγωγή ευρέως ισχυόντων συμπερασμάτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζονται ευχαριστίες προς το Τμήμα Ανάπτυξης Υδάτων της Κύπρου (Λευκωσία) για την παροχή χαρτών (τοπογραφικού, γεωλογικού, εδαφολογικού, βλάστησης), υδρομετεωρολογικών δεδομένων, καθώς και δεδομένων εδαφικής διάβρωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γαλάνη, Μ. και Χρυσάνθου, Β., 2005. *Μοντέλο στρερεοπαροχής μιας λεκάνης απορροής σε ημερήσια βάση*. Τεχνική Έκθεση, ΚΕ 1192, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 104 σελ.
- Χρυσάνθου, Β., 2006. *Σημειώσεις Ποτάμιας Υδραυλικής και Τεχνικών Έργων*. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 122 σελ.
- Χρυσάνθου, Β. και Θεοδωρακόπουλος, Η., 2006. *Υπολογισμός υδρογραφήματος και στερεογραφήματος μιας πλημμύρας*. Υδροτεχνικά, Τόμος 16, σελ. 91-106.
- Χρυσάνθου, Β. και Πυλιώτης, Α., 1995. *Εκτίμηση της εισροής φερτών υλών σ' έναν ταμιευτήρα υπό κατασκευή*. 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΥΕ, Θεσσαλονίκη, σελ. 355-362.
- Brune, G.M., 1953. *Trap efficiency of reservoirs*. Transactions, American Geophysical Union, 34(3): 407-418.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977. *Crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper 24 (revised). FAO, Rome, Italy.
- Engelund, F. and Hansen, E., 1967. *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.
- Giakoumakis, S., Tsakiris, G. and Efremides, D., 1991. *On the rainfall-runoff modeling in a Mediterranean island environment*. In: G. Tsakiris (Editor), Advances in Water Resources Technology. Balkema, Rotterdam, pp. 137-148.
- Hrissanthou, V., 1990. *Application of a sediment routing model to a middle European watershed*. Water Resources Bulletin, 26(5): 801-810.
- Hrissanthou, V., 2002. *Comparative application of two erosion models to a basin*. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 47(2): 279-292.
- Hrissanthou, V., 2005. *Estimate of sediment yield in a basin without sediment data*. CATENA, 64: 333-347.
- Hrissanthou, V., 2006. *Comparative application of two mathematical models to predict sedimentation in Yermasoyia Reservoir, Cyprus*. Hydrological Processes, 20(18): 3939-3952.
- Nielsen, S.A., Storm, B. and Styczen, M., 1986. *Development of distributed soil erosion component for the SHE hydrological modelling system*. Proceedings, International Conference on Water Quality Modelling in the Inland Natural Environment, Bournemouth, UK, pp. 1-13.
- Poesen, J., 1985. *An improved splash transport model*. Zeitschrift für Geomorphologie, 29(2): 193-211.
- SCS (Soil Conservation Service), 1972. *National Engineering Handbook*. Section of Hydrology, Washington DC, USA.
- Williams, J.R., 1977. *Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models*. In: IAHS Publication No. 122, Proceedings of the Paris Symposium, pp. 168-179.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D., 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning*. US Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537, US Government Printing Office, Washington, DC.
- Yang, C.T., 1973. *Incipient motion and sediment transport*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 99(10): 1679-1704.

Yang, C.T., 1996. *Sediment Transport-Theory and Practice*. McGraw-Hill, New York etc., 396 pp.