

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΩΝ ΣΕ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ - ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΛΙΜΝΗ ΜΑΡΑΘΩΝΑ

Ξανθάκης Μιχαήλ^{1,*}, Παυλόπουλος Κοσμάς², Αποστολόπουλος Γεώργιος³,
Κασιμάλης Βασίλειος⁴, Γκορέγια Άριελ⁵, Στεφανίδης Παναγιώτης⁶
και Μαρουκιάν Χαμπίκ⁷

¹ Υποψ. Διδάκτορας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Ελ. Βενιζέλου 70, Καλλιθέα - Αθήνα 17671, Τηλ. 210 9549294, email:mxanthak@hua.gr

² Αναπληρωτής Καθηγητής, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας

³ Λέκτορας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων - Μεταλλουργών,

⁴ Εντεταλμένος Ερευνητής, Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.)

⁵ Φοιτήτρια, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας

⁶ Αναπληρωτής Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος

⁷ Καθηγητής, Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

Περίληψη: Στη παρούσα εργασία γίνεται η παρουσίαση μιας πρότυπης μεθοδολογίας που επιτρέπει την εκτίμηση φερτών υλών που αποτέθηκαν σε τεχνητούς ταμιευτήρες με χρήση σύγχρονων μεθόδων χωρικής ανάλυσης, μοντελοποίησης και χαρτογραφίας. Σκοπός της μελέτης είναι η εκτίμηση των φερτών υλών στη λίμνη του Μαραθώνα με τη χρήση βυθομέτρου οι οποίες βρέθηκαν 4,68 hm³, η εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στις λεκάνες απορροής των χειμάρρων που εκβάλουν στην λίμνη του Μαραθώνα με τη χρήση της τροποποιημένης εξίσωσης εδαφικής απώλειας (RUSLE), τιμή ή οποία εκτιμήθηκε ίση με 2,87 hm³ και η σύγκριση των δύο αποτελεσμάτων ώστε να καταδειχθεί η απόδοση του μοντέλου εδαφικής διάβρωσης στην εκτίμηση των φερτών υλών που έχουν εισρεύσει στο ταμιευτήρα από την αρχή της λειτουργίας του έως και σήμερα. Παράλληλα έγινε και μία εκτίμηση της αύξησης του στερεοφορτίου ύστερα από την καταστροφική πυρκαγιά του Αυγούστου του 2009 στην Βορειοανατολική Αττική. Η μέθοδος κατέδειξε ότι το μοντέλο έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την εκτίμηση των προσχώσεων στον ταμιευτήρα και ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία και σε άλλους ταμιευτήρες της Ελλάδας.

METHODOLOGY OF SEDIMENT ESTIMATION IN RESERVOIRS – CASE STUDY IN LAKE MARATHON

Xanthakis Michael^{1,*}, Pavlopoulos Kosmas², Apostolopoulos Georgios³, Kapsimalis Vasileios⁴, Goregia Ariel⁵, Stefanidis Panagiotis⁶ and Maroukian Hampik⁷

¹ Harokopio University of Athens, Dept. of Geography, El. Venizelou 70, Kallithea - Athens 17671, Tel. 210 9549294, email:mxanthak@hua.gr

² Harokopio University of Athens, Dept. of Geography

³ National Technical University of Athens, School of Mining and Metallurgical Engineering

⁴ Hellenic Centre for Marine Research (HMRC)

⁵ Harokopio University of Athens, Dept. of Geography

⁶ Aristotle University of Thessaloniki, Faculty of Forestry and Natural Environment

⁷ National Kapodistrian University of Athens, Dept. of Geology and Geoenvironment

Abstract:

In the current study the presentation of a methodology is illustrated that allows the estimate of incoming sediment loads in the Marathonas reservoir (lake) in Attica region in central Greece. The first stage of the proposed method is to construct the Digital Elevation Models (DEM) for two

periods of interest, one prior to the dam construction (1929) and the other during the hydrographic survey (2009). The hydrographical survey has been carried out using a Global Positioning System (GPS) and a typical bathymetric instrument for depth determination. The difference in elevation of the two DEMs results in the volume of deposited sediments which were estimated equal to 4,68 hm³. The second stage of the proposed method is to use simple erosion model such as the Rectified Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in order to estimate soil erosion in the basins of the torrents that flow into the Marathon lake using simple sampling techniques in soils and vegetation which were estimated equal to 2,87 hm³. An estimate was also made for the accumulation of sediment after the fire of August 2009 in Attica. The method showed that the RUSLE model gave satisfactory results with regard to the estimate of sediment yield in Marathons reservoir and that it can be used with success in other reservoirs of Greece as well.

Λέξεις κλειδιά: Λεκάνη απορροής, μοντελοποίηση εδαφικής διάβρωσης, βυθομετρία, RUSLE, σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας

Keywords: Watershed, soil erosion model, bathymetry, RUSLE, Geographic information system

1. Εισαγωγή

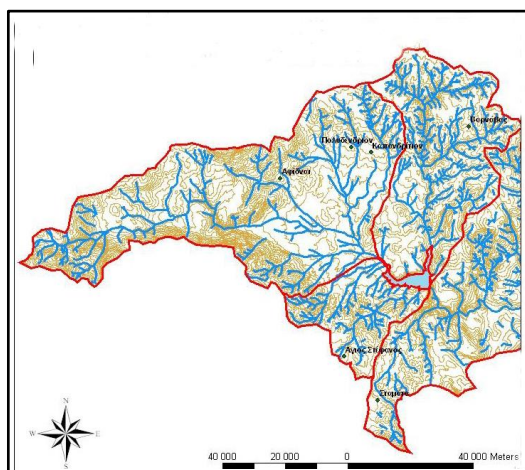
Η εδαφική διάβρωση είναι ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο σύγχρονος κόσμος. Ειδικά τα τελευταία 30 χρόνια, πολλές μελέτες έχουν καταγράψει το μέγεθος του προβλήματος της εδαφικής διάβρωσης σε δισεκατομμύρια τόνους παρασυρόμενου εδαφικού υλικού που μεταφράζονται σε δισεκατομμύρια ξοδεμένων χρημάτων για μέτρα αντιδιαβρωτικής προστασίας (Lal, 1994, Morgan 1991). Στην Ελλάδα πολλές περιοχές κινδυνεύουν άμεσα από το φαινόμενο κυρίως λόγω των κακών πρακτικών διαχείρισης των εδαφικών πόρων και των ανθρωπογενών επιδράσεων καθώς και του έντονου αναγλύφου και της κλιματικής αλλαγής. Ειδικά σε περιοχές που έχουν κατασκευαστεί τεχνητοί ταμιευτήρες η προστασία τους από τις αποθέσεις φερτών υλών είναι ζωτικής σημασίας για την απρόσκοπτη λειτουργία τους. Ένας τέτοιος ταμιευτήρας βρίσκεται στο Μαραθώνα Αττικής. Η σημασία του εν λόγω φράγματος και η περιοχή χωροθέτησής του καθιστά την απρόσκοπτη λειτουργία του σημαντικότερη για την ύδρευση της Αθήνας και για την εύρυθμη ενσωμάτωσή του στην λειτουργία του οικοσυστήματος της ευρύτερης περιοχής.

Η σημαντικότερη απειλή ως προς την λειτουργία του είναι οι τάσεις πρόσχωσης του ταμιευτήρα που δημιουργείται ανάντη του φράγματος, ιδιαίτερα έπειτα από την καταστροφική πυρκαγιά που συνέβει τον Αύγουστο του 2009 στην Βορειοανατολική Αττική και έκαψε μεγάλη έκταση από δύο λεκάνες απορροής του φράγματος αυτές του Βαρνάβα και του Αγίου Στεφάνου. Για το λόγο αυτό η εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης με την χρήση εξισώσεων όπως η τροποποιημένη εξίσωση εδαφικής απώλειας (RUSLE) και η ενσωμάτωση γεωγραφικών δεδομένων μέσα από την συνεργασία τους με Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ) μπορεί να αποτελέσει ένα ολοκληρωμένο εργαλείο διαχείρισης του ταμιευτήρα μετά τη πυρκαγιά. Η χρήση των ΣΓΠ δίνει την δυνατότητα 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 στην εκτίμηση της διάβρωσης

Η αποτελεσματικότητα μιας ολοκληρωμένης μεθόδου εκτίμησης της εδαφικής απώλειας στις λεκάνες απορροής στα ανάντη του φράγματος του Μαραθώνα και η σύγκρισή της με τις προσχώσεις που έχουν αποτεθεί στο ταμιευτήρα του Μαραθώνα από την έναρξη λειτουργία του έως και σήμερα με τη χρήση σύγχρονων τεχνολογικών μέσων όπως ενός ηχοβολιστικού, συσκευής εντοπισμού θέσης και γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία.

2. Περιοχή μελέτης

Η λίμνη του Μαραθώνα ή σωστότερα ο ταμιευτήρας είναι ένα τεχνικό έργο που δημιουργήθηκε ύστερα από την κατασκευή του ομώνυμου φράγματος στη συμβολή των χειμάρρων Χάραδρου και Βαρνάβα (Σχήμα 1) κοντά στον οικισμό του Μαραθώνα Αττικής. Το εμβαδόν του ταμιευτήρα στο ύψος του φράγματος είναι 2,45 τετραγωνικά χιλιόμετρα, και το μέγιστο βάθος είναι 50 m περίπου, ο ταμιευτήρας συλλέγει νερό από μία λεκάνη απορροής 118 τετραγωνικών χιλιομέτρων περίπου με μία μέση βροχόπτωση 589 mm το χρόνο (Πίνακας 1).



Σχήμα 1. Η ευρύτερη λεκάνη απορροής του Οινόη ποταμού.

Το μητρικό πέτρωμα της λεκάνης απορροής συνίσταται από ασβεστόλιθους και αργιλικούς σχιστόλιθους. Στην περιοχή απαντώνται επίσης τριτογενείς αποθέσεις που περιλαμβάνουν αλλουβιακές αποθέσεις, συνεκτικά πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων, λεπτομερείς προσχωματικές αποθέσεις με διάσπαρτες κροκάλες που αποτελούν υλικά ποτάμιων αποθέσεων του Χάραδρου και του Βαρνάβα και μια μικρή περιοχή στην Πάρνηθα που εδράζεται ο φλύσχης (Καρκάνας κ.α. 2002).

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται μεσογειακό με σχετικά θερμό καλοκαίρι και ήπιο χειμώνα. Η βλάστηση της περιοχής χαρακτηρίζεται ως ένα τυπικό Μεσογειακό οικοσύστημα κυρίως με πευκοδάση, πρινώνες, φρύγανα και πύες.

3. Δεδομένα-Μεθοδολογία

Σε ένα πρώτο στάδιο μελέτης, ο ταμιευτήρας του Μαραθώνα βυθομετρήθηκε με τη βοήθεια σύγχρονου τεχνολογικού εξοπλισμού (βυθομέτρο: LCX-15MT, ακρίβειας 10 m με ενσωματωμένο GPS). Συλλέχθηκαν 32000 σημεία περίπου που κάλυψαν το σύνολο του ταμιευτήρα. Τα δεδομένα της βυθομετρίας του ταμιευτήρα εισήχθησαν σε λογισμικό γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και δημιουργήθηκε ένα ψηφιακό ανάγλυφο της σημερινής κατάστασης του πυθμένα. Η μέθοδος της παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε ήταν η μέθοδος Kriging. Παράλληλα, ψηφιοποιήθηκαν τοπογραφικοί χάρτες του 1929 πριν από την κατασκευή του φράγματος και δημιουργήθηκε ψηφιακό ανάγλυφο του πυθμένα. Ο τελικός σκοπός πρώτης φάσης της μελέτης ήταν ο υπολογισμός του μέσου όγκου των ιζημάτων που αποτέθηκαν μέσα στην λίμνη από την κατασκευή του φράγματος έως και σήμερα έτσι ώστε να συγκριθούν με τα αποτελέσματα ενός μοντέλου διάβρωσης.

Σε ένα δεύτερο στάδιο της μελέτης ερευνήθηκαν οι διεργασίες αποσάθρωσης, διάβρωσης και απόθεσης φερτών υλικών στις λεκάνες απορροής των χειμάρρων που τροφοδοτούν τη λίμνη του Μαραθώνα, οι οποίες επηρέασαν και μετέβαλλαν τη μορφή του αναγλύφου της περιοχής έρευνας. Στην παρούσα εργασία αυτό έγινε με τη χρήση μιας απλής εμπειρικής μεθόδου εκτίμησης της εδαφικής απώλειας. Η μέθοδος αυτή είναι η Τροποποιημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) (Wischmeier and Smith, 1965 & 1978), η οποία αναπτύχθηκε ως μια τεχνική εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης και αποτίμησης των διαφόρων πρακτικών διατήρησης του εδαφικού στρώματος. Η σχέση που δίνει την εδαφική διάβρωση είναι μια απλή πολλαπλασιαστική σχέση της μορφής:

$$A=R*K*LS*C*P \quad (1)$$

Όπου:

A, η εδαφική απώλεια ανά μονάδα επιφάνειας λεκάνης απορροής (t/ha),

R, ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$),

K, ο συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας ($t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$),

LS, ο αδιάστατος τοπογραφικός συντελεστής που αποτελείται από το γινόμενο του συντελεστή μήκους κλιτύος (L) και του συντελεστή κλίσης κλιτύος (S)

C, ο αδιάστατος συντελεστής φυτοκάλυψης και

P, ο αδιάστατος συντελεστής διαχείρισης των εδαφών κατά της διάβρωσης

Αρχικά έγινε ο σχεδιασμός του υδροκρίτη της λεκάνης απορροής, εμβαδομέτρηση της και ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα σε σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της τροποποιημένης εξίσωσης εδαφικής απώλειας διακρίνονται σε γεωγραφικά και υδρομετεωρολογικά. Στα γεωγραφικά περιλαμβάνονται η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου ανάγλυφου της λεκάνης (Digital Terrain model - DTM), οι χρήσεις γης (χρησιμοποιήθηκε η κατηγοριοποίηση κατά CORINE), η γεωλογία και η εδαφολογία της λεκάνης (ψηφιοποιήθηκαν ο γεωλογικός χάρτης του ΙΓΜΕ και ο χάρτης εδαφολογικών μονάδων του ΥΠ.ΓΕ.) και το

υδρογραφικό δίκτυο. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν μηνιαίες τιμές κατακρήμνισης του μετεωρολογικού σταθμού Μαραθώνα της ΕΥΔΑΠ (πίνακας 1).

Πίνακας 1. Μηνιαία βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Μαραθώνα για τα υδρολογικά έτη 1932-33 έως 2002-2003 (mm).

	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Έτος
Μηνιαία βροχόπτωση (mm)	62.9	79.9	110.7	93.4	69.1	64.9	35.6	25.7	15.2	7.6	5.8	18.1	588.9

Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν χωρικοί χάρτες ή δόθηκαν τιμές όπου ήταν αναγκαίο για καθένα από τους συντελεστές της εξίσωσης (1). Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιγράφεται παρακάτω:

Ο υπολογισμός του συντελεστή της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης R είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για τη σωστή και αποτελεσματική χρήση της εξίσωσης. Η εδαφική απώλεια είναι ανάλογη με ένα συντελεστή EI_{30} , όπου E είναι η κινητική ενέργεια της βροχόπτωσης και I_{30} είναι η μέγιστη 30-λεπτη ένταση βροχόπτωσης σε κάθε καταιγίδα. Η τιμή του συντελεστή R είναι τότε το άθροισμα όλων των EI_{30} για όλες τις ισχυρές βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού έτους. Για το υπολογισμό του παράγοντα αυτού απαιτείται η ύπαρξη δεδομένων από βροχογράφο με χρονικό βήμα 30 min. Η πληροφορία αυτή δεν ήταν διαθέσιμη, για την περιοχή μελέτης. Για την παράκαμψη αυτού του προβλήματος αναζητήθηκαν τεχνικές που συσχετίζουν το συντελεστή R με άλλες μεταβλητές που είναι πιο εύκολα μετρήσιμες και διαθέσιμες. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αυτή των Renard and Freimund (1994) με την οποία:

$$MF = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P} \quad (3)$$

$$R = 0,7397 * MF^{1,847} \text{ για } MF < 55 \text{ mm}$$

$$R = 95,77 - 6,081MF + 0,477MF^2 \text{ για } MF > 55 \text{ mm}$$

όπου, MF είναι ο δείκτης Fournier (Arnoldus, 1977), P_i (mm) είναι η μέση υπερετήσια μηνιαία βροχόπτωση, P (mm) η μέση ετήσια βροχόπτωση και R ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης.

Η σχέση που δίνει τον συντελεστή K ($t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), όπως προδιαγράφεται στο RUSLE Handbook (Wischmeier & Smith, 1978), είναι η εξής:

$$K = \frac{2,1M^{1,14}10^{-4}(12 - \alpha) + 3,25(b - 2) + 2,5(c - 3)}{100 * 7,59} \quad (4)$$

όπου, $M = (\% \text{Ιλύς} + \% \text{Πολύ Λεπτή Άμμος}) * (100 - \% \text{Αργίλος})$, α : το οργανικό ποσοστό (%), b : ο κωδικός εδαφικής δομής, και c : η τάξη εδαφικής διαπερατότητας. Στη περιοχή μελέτης επειδή τα εδαφολογικά δεδομένα δεν ήταν διαθέσιμα, έγιναν εκτεταμένες δειγματοληψίες σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής και ακολούθησαν εργαστηριακές αναλύσεις μηχανικής σύστασης, οργανικής ουσίας και κοκκομετρικής σύστασης οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του τύπου. Για κάθε ξεχωριστό γεωλογικό σχηματισμό δόθηκε μια τιμή συντελεστή K , η οποία προέκυψε από τις εργαστηριακές αναλύσεις.

Σε ότι αφορά την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, αρχικά έγινε σάρωση των ισοϋψών στους χάρτες της ΓΥΣ κλίμακας 1:50.000 και ακολούθησε μετατροπή του χάρτη αυτών σε εικόνα μορφής tiff με ανάλυση 200 dpi. Στη συνέχεια με το πρόγραμμα γεωγραφικών πληροφοριών (ArcGIS) γεωαναφέρθηκαν οι χάρτες σύμφωνα με το ελληνικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ87. Με κατάλληλο προγραμματισμό και με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού N-SPECT (NOAA, 2000) υπολογίστηκε ο συντελεστής LS αυτόματα.

Ο συντελεστής φυτοκάλυψης (C) προέκυψε από το χάρτη των χρήσεων γης κατά CORINE. Σε κάθε κωδικοποιημένη χρήση γης που απαντάται στη λεκάνη απορροής δόθηκε μια τιμή του συντελεστή C η οποία προέκυψε από εκτεταμένες δειγματοληψίες βλάστησης που περιελάμβανε μετρήσεις επιφανειακής κάλυψης, κάλυψης κόμης, ύψους φυτών, εδαφικής τραχύτητας. Για κάποιες χρήσεις γης που δεν μπορούσαν να γίνουν μετρήσεις αξιοποιήθηκαν τιμές από τη διεθνή βιβλιογραφία προσαρμοσμένες στην περιγραφή των συγκεκριμένων χρήσεων γης (Wischmeier and Smith, 1978; Schwertmann et al., 1990; Χρυσάνθου και Πυλιώτης, 1995; van der Knijff et al., 2000, Ζαρρής, 2008). Ο συντελεστής αυτός υπολογίστηκε πριν και μετά την πυρκαγιά ώστε να

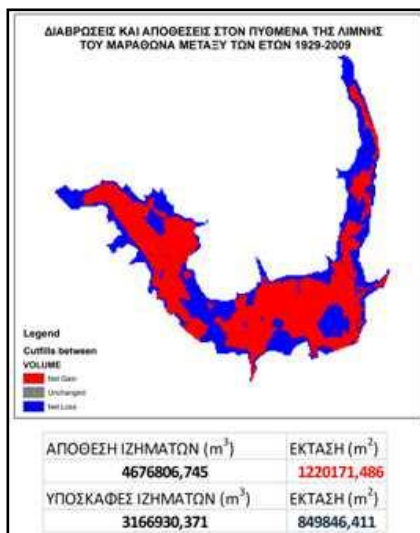
μελετηθεί και η αύξηση του στερεοφορτίου από την επίδραση της ανθρωπογενούς αυτής παρέμβασης.

Αφού υπολογίστηκαν οι τιμές για κάθε συντελεστή εφαρμόστηκε η εξίσωση ώστε να υπολογιστεί η μάζα φερτών υλών σε t/ha τόσο πριν όσο και μετά την πυρκαγιά. Η μέση ετήσια στερεοαπορροή και κατά συνέπεια η μάζα των φερτών υλικών σε αιώρηση που για κάθε έτος μεταφέρονται από την επιφανειακή και συγκεντρωμένη απορροή και εκβάλλονται στη λίμνη υπολογίστηκαν με βάση τη μέση ετήσια διάβρωση στη λεκάνη απορροής. Η μέση ετήσια στερεοαπορροή (S_V (t/km²)) αποτελεί ένα ποσοστό της συνολικής διάβρωσης καθώς ένα τμήμα της διάβρωσης αποτίθεται σε τμήματα της λεκάνης απορροής με μικρές κλίσεις ή και στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου με μικρές κλίσεις (π.χ. πλημμυρικές κοίτες ποταμών).

Το ποσοστό αυτό της εδαφικής διάβρωσης που μεταφέρεται στη λίμνη με τη στερεοπαροχή ονομάζεται συντελεστής στερεοαπορροής και γενικά είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα και μάλιστα μειώνεται όσο αυξάνεται η επιφάνεια της λεκάνης απορροής. Στην υπόψη περιοχή εκτιμήθηκε ο συντελεστής στερεοαπορροής (SDR) βάσει της επιφάνειας της λεκάνης απορροής (F σε km²) με την εξίσωση Renfro (1972), η οποία έχει προκύψει από τη μελέτη πολυάριθμων δεδομένων διάβρωσης και στερεοαπορροής στις ΗΠΑ και γράφεται ως:

$$\log(\text{SDR}) = 1,877 - 0,1419 \cdot \log(25,9 \cdot F) \quad (5)$$

Ως τελική ανάλυση υπολογίστηκε ο προσδοκώμενος όγκος φερτών υλικών που εκτιμάται ότι θα έχουν εισρεύσει στον ταμιευτήρα Μαραθώνα από την κατασκευή του φράγματος έως και σήμερα και έγινε σύγκριση του με τα αποτελέσματα της βυθομετρίας ώστε να γίνει ένας έλεγχος για την απόδοση του μοντέλου RUSLE.



Σχήμα 2. Διαβρώσεις και αποθέσεις στη λίμνη του Μαραθώνα (1929-2009).

4. Αποτελέσματα

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής των διαφόρων μεθόδων που εφαρμόστηκαν για τον υπολογισμό των φερτών υλών που αποτέθηκαν στη λίμνη του Μαραθώνα.

4.1 Αποτελέσματα βυθομέτρησης του ταμιευτήρα Μαραθώνα και υπολογισμός του όγκου των φερτών υλών

Ύστερα από την ανάλυση που προέκυψε από την αφαίρεση των ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου πριν την κατασκευή του φράγματος και του αναγλύφου της σημερινής κατάστασης προέκυψε ότι η απόθεση των ιζημάτων στην Λίμνη του Μαραθώνα στα 80 χρόνια λειτουργίας του είναι περίπου ίση με 4,68 hm³ που αντιστοιχεί σε έκταση ίση με 1,22 km², ενώ αντίστοιχα οι υποσκαφές των ιζημάτων είναι ίσες με 3,17 hm³

και καταλαμβάνουν έκταση ίση με 0,85 km² (Σχήμα 2). Παρακάτω, υπολογίζεται η τελική μείωση του όγκου της λίμνης για την περίοδο των 80 χρόνων, ενώ στα συμπεράσματα η παραπάνω μέση ετήσια τιμή συγκρίνεται με τις τιμές που

υπολογίστηκαν από την εφαρμογή του μοντέλου RUSLE.

4.2 Υπολογισμός του συντελεστή διαβρωσιμότητας της βροχόπτωσης R

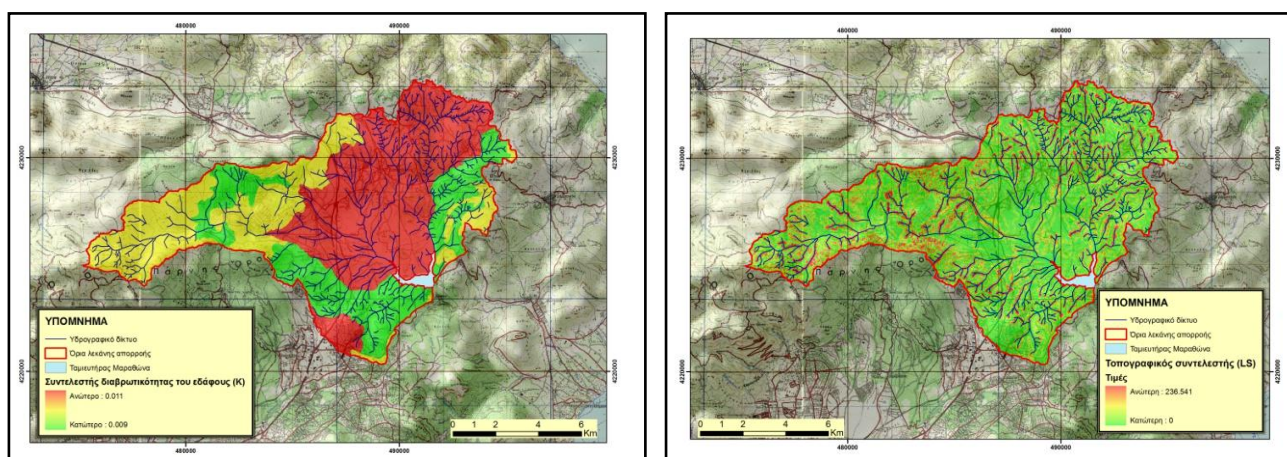
Για τη λεκάνη απορροής του Μαραθώνα ο υπολογισμός του συντελεστή διαβρωσιμότητας της βροχόπτωσης με βάση την εξίσωση (2) έδωσε τιμή ίση με 2182,31 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

4.3 Υπολογισμός του συντελεστή διαβρωσιμότητας του εδάφους K

Με βάση τις εργαστηριακές αναλύσεις και τις μετρήσεις πεδίου, οι τιμές του συντελεστή K, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 και στο Σχήμα 3 για κάθε γεωλογικό σχηματισμό που εμφανίζεται στην λεκάνη.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή διαβρωτικότητας K για κάθε γεωλογικό σχηματισμό.

Γεωλογικός σχηματισμός	Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας (K) (από εργαστηριακές αναλύσεις) ($t h MJ^{-1} mm^{-1}$)	Επιφάνεια (km^2)	Ποσοστό επιφάνειας
Σκληροί ασβεστόλιθοι	0,01	32,19	27,36%
Τριτογενείς αποθέσεις	0,011	54,20	46,09%
Σχιστόλιθοι	0,009	29,48	25,07%
Φλύσχης	0,01	1,74	1,48%
ΣΥΝΟΛΟ		117,7	100



Σχήμα 3. Κάναβος του συντελεστή διαβρωτικότητας του εδάφους K (αριστερά) και του τοπογραφικού συντελεστή LS (δεξιά).

4.4 Υπολογισμός του συντελεστή αναγλύφου LS

Στο Σχήμα 3 δίνεται ο χάρτης του τοπογραφικού συντελεστή LS για τη λεκάνη απορροής ανάντη του φράγματος. Οι τιμές του συντελεστή κυμαίνονται από 0 έως 236.

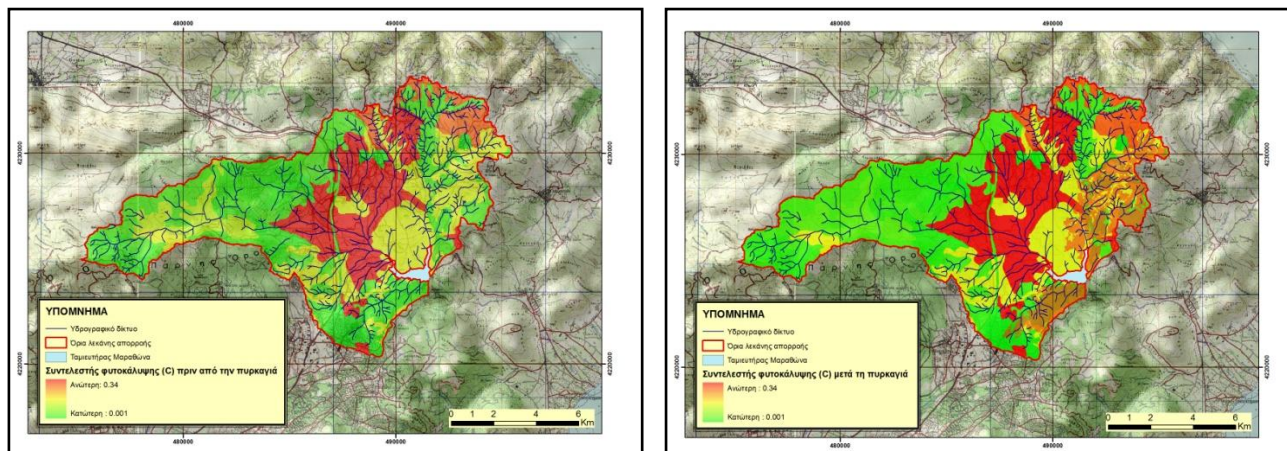
4.5 Υπολογισμός του συντελεστή διαχείρισης της βλάστησης C

Με βάση τις μετρήσεις πεδίου, οι τιμές του συντελεστή C , παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 και στο Σχήμα 6

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή φυτοκάλυψης (C) για διαφορετικές χρήσεις γης.

Χρήσεις γης	Συντελεστής C	Επιφάνεια (km^2)	Ποσοστό επιφάνειας
Διακεκομμένη αστική δόμηση (112)	0,001	4,36	3,70%
Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες (121)	0,01	0,82	0,69%
Οδικά-σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη (122)	0,01	1,09	0,93%
Χώροι οικοδόμησης (133)	0,01	5,12	4,34%
Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη (211)	0,3	5,89	5,00%
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας (242)	0,34	23,57	20,01%
Γεωργική γη με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης (243)	0,15	18,18	15,43%
Δάσος πλατύφυλλων (311)	0,16	1,30	1,10%
Δάσος κωνοφόρων (312)	0,005	11,06	9,39%
Μικτό δάσος (313)	0,12	6,60	5,60%
Σκληροφυλλική βλάστηση (323)	0,02	5,75	4,89%

Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις (324)	0,02	18,32	15,56%
Αποτεφρωμένες εκτάσεις (334)	0,31	15,71	13,34%
ΣΥΝΟΛΟ	-	117,7	100%



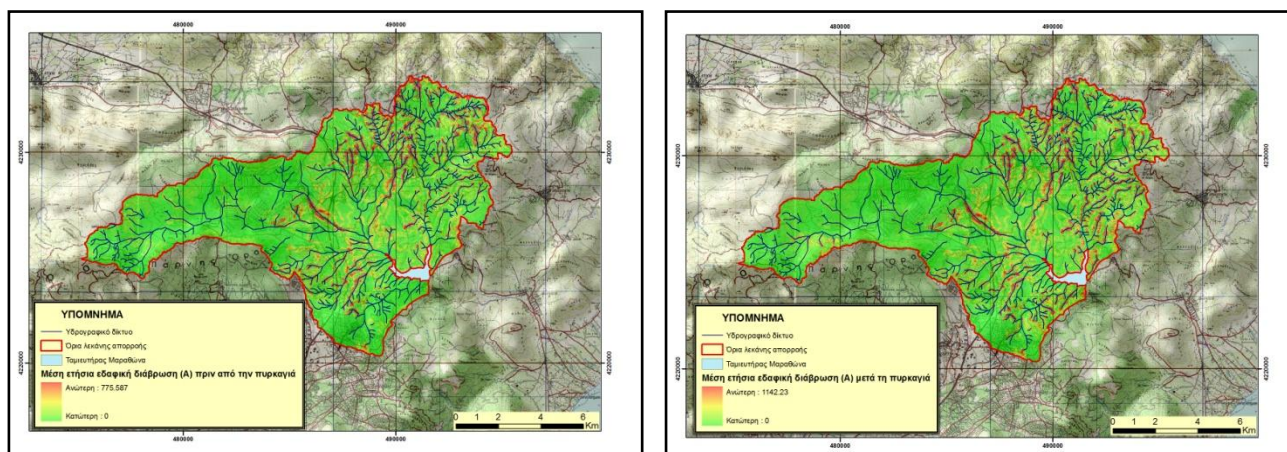
Σχήμα 4. Κάναβος του συντελεστή φυτοκάλυψης (C) πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη πυρκαγιά του Αυγούστου 2009.

4.6 Υπολογισμός του συντελεστή μέτρων κατά της διάβρωσης P

Για την παρούσα εργασία ο συντελεστής P λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα διότι δεν έχουν υλοποιηθεί μέτρα προστασίας από τη διάβρωση στη λεκάνη απορροής.

4.7 Υπολογισμός της μέσης ετήσιας εδαφικής διάβρωσης A για τη λεκάνη απορροής

Η τελική τιμή της μέσης ετήσιας εδαφικής διάβρωσης για τη λεκάνη απορροής του π. Οινόη επιφάνειας 117, 7 km² υπολογίστηκε ίση με 7,52 t/ha ή 752 t/km² πριν την πυρκαγιά και 14,57 t/ha ή 1457 t/km² μετά την πυρκαγιά. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι χάρτες της μέσης ετήσιας εδαφικής διάβρωσης πριν και μετά τη πυρκαγιά.



Σχήμα 5. Κάναβος της μέσης ετήσιας εδαφικής διάβρωσης A (t/ha) της λεκάνης απορροής πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη πυρκαγιά του Αυγούστου 2009.

Με βάση τη σχέση (5) προκύπτει ότι ο συντελεστής στερεοαπορροής είναι ίσος με 0,24 (24,13%) και επομένως η μέση ετήσια στερεοαπορροή ίση με 180 t/km² και το ετήσιο φορτίο αιωρούμενων φερτών υλικών ίσο με 21 t πριν την πυρκαγιά, αυξάνεται σε 350 t/km² και 41 t μετά την πυρκαγιά αντίστοιχα. Θεωρώντας μια πυκνότητα των αποτιθέμενων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα ίση με 1,75 t/m³ (Σαπουντζής κ.α., 2009) προκύπτει ότι για T=80 έτη, ο προσδοκώμενος όγκος φερτών υλικών που εκτιμάται ότι θα έχουν εισρεύσει στον ταμιευτήρα Μαραθώνα είναι ίσος με 2,78 hm³ φερτών υλικών περίπου.

5. Συμπεράσματα

Η λεκάνη απορροής των χειμάρρων που τροφοδοτούν τη λίμνη του Μαραθώνα υπέστη τις συνέπειες μιας καταστροφικής πυρκαγιάς των Αύγουστο του 2009 που έχει ως αποτέλεσμα το ετήσιο φορτίο αιωρούμενων φερτών υλών να αυξηθεί (διπλασιαστεί) από 21 t πριν την πυρκαγιά σε 41 t μετά την πυρκαγιά. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα αφού η εφαρμογή του μοντέλου RUSLE έδωσε προσδοκώμενο όγκο φερτών υλικών που έχουν εισρεύσει στον ταμιευτήρα Μαραθώνα ίσο με 2,78 hm³ σε σχέση με την απόθεση των ιζημάτων στην Λίμνη του Μαραθώνα που υπολογίστηκε με βάση τη βυθομέτρηση που εκτιμήθηκε ίση με 4,68 hm³. Συμπερασματικά η εφαρμογή της μεθοδολογίας εκτίμησης φερτών υλών σε τεχνητούς ταμιευτήρες με χρήση σύγχρονων τεχνολογικών μέσων, μοντέλων εδαφικής διάβρωσης και μετρήσεων των παραμέτρων των μοντέλων στο πεδίο μπορεί να βοηθήσει στην αποτελεσματική διαχείριση των λεκανών απορροής και στην υλοποίηση έργων για την προστασία των ταμιευτήρων από τις προσχώσεις των φερτών υλών.

Βιβλιογραφία

- Ζαρρής Δ., 2008: *Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα Κρεμαστών και εκτιμήσεις στερεοαπορροής στη ΒΔ Ελλάδα*. 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων με Διεθνή Συμμετοχή, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας & Διεθνή Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, Λάρισα, 13 – 15 Οκτωβρίου.
- Καρκάνας Π., Κ. Παυλόπουλος, Μ. Τριανταφύλλου, Ε. Καρύμπαλης, Θ. Τσούρου, Ν. Παλυβός, 2002: *Γεωμορφολογική εξέλιξη της λεκάνης απορροής και του παράκτιου αλλουβιακού ριπιδίου του Οινόη (Χάραδρου) ποταμού (Β.Αττική) κατά το Τεταρτογενές*. 18-24, Γεωγραφίες, Τεύχος 7, Εξάντας.
- Παυλόπουλος Κ, Ε. Καρύμπαλης, Χ. Μαρουκιάν, 2001: *Γεωμορφολογική εξέλιξη της λεκάνης απορροής του Οινόη ποταμού (Β. Αττική) κατά το Τεταρτογενές*. 6ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, Θεσσαλονίκη, 3-6 Οκτωβρίου 2002.
- Σαπουντζής Μ., Δ. Μυρωνίδης, Δ. Στάθης, Π. Στεφανίδης, 2009: *Σύγκριση των αποτελεσμάτων εφαρμογής των μεθόδων πρόβλεψης της διάβρωσης USLE και Gavrilovic με πραγματικές μετρήσεις σε λεκάνη απορροής*. Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ & ΕΕΔΥΠ «Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων σε συνθήκες κλιματικών αλλαγών» Βόλος, 27-30 Μαΐου 2009 σελ. 155-163.
- Χρυσάνθου Β., και Α. Πυλιώτης., 1995: *Εκτίμηση της εισροής φερτών υλών σε έναν ταμιευτήρα υπό κατασκευή*, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΥΕ, Θεσσαλονίκη.
- Lal R., 1994: *Soil erosion by wind and water: problems and prospects*. In R. Lal, (ed.), Soil erosion Research Methods, 2nd ed. Soil and Water conservation Society and St. Lucie Press, Ankeny, IA.
- Morgan, R.P.C., 1991: *Strategies for erosion control*. In D.A. Davinson (ed.), Soil erosion and Conservation, Wiley New York, pp 162-185.
- Renard K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C. Yoder (coordinators). "Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)." USDA Agr. Handb. No 703, 1997.
- Renard K. G. and J. R. Freimund, 1994: Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE, *Journal of Hydrology*, **157**, 287-306.
- Renfro G.W., 1972: *Use of erosion equations and sediment delivery ratios for predicting sediment yield*, in "Sediment yield workshop: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources", Proceedings USDA Sedim. Labor., USA, 33-45.
- Schwertmann U., 1986: *Soil erosion: extent, prediction and protection in Bavaria*, in: Chisci G. and R.P.C. Morgan (eds), Soil erosion in the European Community: Impact of Changing Agriculture, Balkema, Rotterdam, 157-163.
- Van der Knijff J. M., R. J. A. Jones, L. Montanarella., 2000: *Soil Erosion risk Assessment in Europe*, European Commission, European Soil Bureau.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith., 1965: *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains*, Agric. Handbook 282, U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith., 1978: *Predicting rainfall erosion losses*, Agriculture Handbook No. 537, USDA Sci. and Educ. Admin., Washington D.C.