



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών  
*Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών*  
*«Περιβάλλον και Ανάπτυξη των Ορεινών Περιοχών»*

---

**«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΤΕΡΟΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΛΑΦΟΥΣ:  
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΠΗΓΩΝ ΑΩΟΥ»**

**ΧΡΙΣΤΙΝΑ Α. ΠΡΙΑΒΟΛΟΥ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Επιβλέπων:**

Νικόλαος Μαμάσης, Επ. Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Αθήνα, Ιούνιος 2016

## Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Περιβάλλον και Ανάπτυξη των Ορεινών Περιοχών» της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο έρευνας αποτελεί η ανάπτυξη, ο σχεδιασμός και η εφαρμογή συστημάτων και μοντέλων εκτίμησης των εδαφικών απωλειών και της στερεοαπορροής. Αφορμή για την εκπόνησή της αποτέλεσε το έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον που παρατηρείται παγκοσμίως σχετικά με την εφαρμογή τεχνικών μοντελοποίησης διαδικασιών που σχετίζονται με τη στερεομεταφορά προκειμένου να επιτυγχάνεται ο ορθολογικός και αποδοτικός σχεδιασμός μεγάλων υδραυλικών έργων.

Θα ήταν σοβαρή παράλειψή μου να μην ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με βοήθησαν στην πραγματοποίηση της μεταπτυχιακής μου εργασίας και ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Νικόλαο Μαμάση, ο οποίος μου εμπιστεύθηκε την ανάθεση της παρούσας εργασίας και προσέφερε την πολύπλευρη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς το Γιώργο Παναγιωτόπουλο, επιστημονικό συνεργάτη του μεταπτυχιακού προγράμματος, και τον Πολυχρόνη Κολοκούση, μέλος Ε.Ε.Δ.Ι.Π. του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη βοήθειά τους σε τεχνικά θέματα. Επιπλέον, ευχαριστώ τον κύριο Δημήτριο Σπυράκη, διευθυντή του ΥΗΣ Πηγών Αώου, για τη γνώση και το χρόνο που μου αφιέρωσε προκειμένου να συλλέξω τις απαιτούμενες πληροφορίες για την ολοκλήρωση της μελέτης μου καθώς και τον κύριο Μιχαήλ Ξανθάκη, δασολόγο Α.Π.Θ., για την καθοδήγησή του.

Τέλος, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για τη διακριτική αλλά σημαντικότερη στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Η μελέτη των συστημάτων μεταφοράς εδαφικού υλικού εντός του υδρογραφικού δικτύου αποτελεί αντικείμενο έντονου ερευνητικού ενδιαφέροντος παγκοσμίως, δεδομένου ότι η προστασία και ο έλεγχος των εδαφικών και υδατικών πόρων, καθώς επίσης η ορθολογική τους διαχείριση, θα μπορούσε να συνεισφέρει στον περιορισμό των πλημμυρικών φαινομένων, στην επίλυση προβλημάτων κλιματικής αλλαγής και στη βελτίωση της παραγωγικότητας των γαιών. Παράλληλα, μέσω της συνεχούς παρακολούθησης και γνώσης των παραπάνω διεργασιών επιτυγχάνεται η ενίσχυση της αποδοτικότητας και η αύξηση της οικονομικής ζωής, βάσει του σχεδιασμού, των τεχνικών έργων. Ωστόσο, οι συνθήκες που επηρεάζουν τα φαινόμενα είναι πολυσύνθετες και παρουσιάζουν δυναμική συμπεριφορά, γεγονός που δυσχεραίνει την άμεση και ακριβή ποσοτική της εκτίμηση και τις ανάλογες διαδικασίες μοντελοποίησης.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη των δυνατοτήτων του μοντέλου RUSLE μέσα από την εφαρμογή του στη λεκάνη απορροής Πηγών Αώου. Με τη μέθοδο της περιπτώσιολογικής μελέτης αξιολογείται η χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας αναφορικά με την εκτίμηση της στερεοαπορροής και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από μετρήσεις πεδίου για τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του φράγματος Πηγών Αώου.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας RUSLE σε συνδυασμό με λογισμικά διαχείρισης της γεωγραφικής πληροφορίας (Geographic Information Systems – GIS) επιβεβαίωσε ορισμένα οφέλη που προσφέρει η χρήση της στην εκτίμηση του στερεοφορτίου σε επίπεδο λεκάνης απορροής, ενώ αναδείχθηκαν περιορισμοί που εμποδίζουν την αξιοποίηση των δυνατοτήτων της στο έπακρον και την ευρεία επέκτασή της σε ιδιαίτερα περιβάλλοντα. Επομένως, μέσα από την παρούσα μελέτη, προκύπτει το συμπέρασμα πως το μοντέλο RUSLE στη σημερινή του μορφή δεν αποτελεί ολοκληρωμένη λύση για την εκτίμηση της στερεοαπορροής.

**Λέξεις κλειδιά:** Στερεοαπορροή, Παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας, Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, Συντελεστής στερεοαπορροής, Νεκρός όγκος.

## **Abstract**

The study of systems for soil material transportation within hydrographic networks is subject to intense academic interest worldwide, since the protection and control of soil and water resources, as well as their effective management, could contribute to reducing flood phenomena, mitigating climate change and improving land productivity. At the same time, through the continuous monitoring and improving of these processes it is possible to enhance efficiency and boost the economic life, design-wise, of engineering structures. However, the conditions that affect the phenomena are complex and dynamic, making direct and accurate assessment and the appropriate modelling processes difficult.

This thesis aims to study the capabilities of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model through its implementation on the basin of the river Aaos. Utilising the case study method, the use of this technology is evaluated with respect to the assessment of sediment yield and the results are compared with those obtained from field measurements from the first years of operation for the Aaos river dam.

The implementation of RUSLE technology combined with Geographic Information Systems (GIS) software confirmed certain benefits for its use to estimate the load at the basin level and highlighted constraints that prevent its use to the fullest potential and broad expansion in more peculiar environments. Therefore we conclude that the RUSLE model, in its current form, does not offer a complete solution for assessing sediment yield.

**Keywords:** Sediment yield, Universal Soil Loss Equation, Geographic Information Systems, Sediment Delivery Ratio, Dead volume.

## Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος.....	i
Περίληψη.....	ii
Abstract.....	iii
Ευρετήριο.....	vii
<b>Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
<b>Κεφάλαιο 2: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....</b>	<b>5</b>
2.1. ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....	5
2.1.1. Ερευνητικός σκοπός.....	5
2.1.2. Ερευνητικό πλαίσιο - θέμα.....	6
2.2. ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....	7
2.2.1. Ερευνητικό υλικό.....	7
2.2.2. Στρατηγική.....	7
<b>Κεφάλαιο 3: ΕΔΑΦΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ - ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗ.....</b>	<b>9</b>
3.1. ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ.....	9
3.2. ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ.....	16
3.2.1. Ορισμός και κατηγορίες.....	16
3.2.2. Εξήγηση των φαινομένων.....	20
3.2.3. Παράγοντες διάβρωσης.....	26
3.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ.....	29
3.3.1. Εμπειρικά μοντέλα (empirical models).....	32
3.3.1.1. Παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας (Universal Soil Loss Equation-USLE).....	33

3.3.1.2. Εμπειρικές σχέσεις παροχής – στερεοπαροχής.....	36
3.3.1.3. Μοντέλο Gavrilovic .....	39
3.3.1.4. Λοιπά διαθέσιμα εμπειρικά μοντέλα.....	40
<b>3.3.2. Φυσικά μοντέλα (physically-based models).....</b>	<b>40</b>
3.3.2.1. Μοντέλο CREAMS (Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems).....	41
3.3.2.2. Μοντέλο WEPP (Water Erosion Prediction Project).....	42
3.3.2.3. Λοιπά φυσικά μοντέλα.....	42
<b>3.3.3. Στοχαστικά μοντέλα (conceptual models).....</b>	<b>43</b>
3.3.3.1. Διαθέσιμα στοχαστικά μοντέλα.....	44
<b>3.3.4. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS - GIS).....</b>	<b>45</b>
<b>Κεφάλαιο 4: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....</b>	<b>48</b>
4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ .....	49
4.2. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	53
4.3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	56
4.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑΣ.....	61
4.5. ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ-ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ.....	66
4.6. ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΠΗΓΩΝ ΑΩΟΥ.....	71
<b>Κεφάλαιο 5: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΛΑΦΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ.....</b>	<b>74</b>
5.1. ΜΕΘΟΔΟΣ RUSLE.....	74
5.1.1. Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (Rainfall erosivity factor-R).....	76

5.1.2. Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας (Soil erodibility factor-K).....	82
5.1.3. Τοπογραφικός συντελεστής ή συντελεστής αναγλύφου (Slope Length & Steepness factor-LS).....	84
5.1.4. Συντελεστής διαχείρισης/κάλυψης γης και συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (Cover/Management factor-C και Support practices factor-P).....	85
5.1.5. Συντελεστής στερεοαπορροής.....	88
5.1.6. Πυκνότητα αποθέσεων.....	89
5.2. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΠΗΓΩΝ ΑΩΟΥ.....	90
5.2.1. Προσδιορισμός στερεοαπορροής από μετρήσεις πεδίου.....	91
5.2.2. Εφαρμογή μεθόδου RUSLE.....	95
5.3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ.....	109
<b>Κεφάλαιο 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....</b>	<b>116</b>
6.1. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	116
6.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	120
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>123</b>
<b>Βιβλιογραφικές αναφορές .....</b>	<b>126</b>
<b>Παράρτημα .....</b>	<b>134</b>

## **Ευρετήριο**

### **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

<b>Σχήμα 2.1:</b> Ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας μελέτης.....	6
<b>Σχήμα 3.1:</b> Διάκριση του ολικού φορτίου των φερτών υλών.....	24
<b>Σχήμα 3.2:</b> Κατηγορίες μοντέλων εκτίμησης των εδαφικών απωλειών.....	32



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 3.1:</b> Εκτιμήσεις αιωρούμενου φορτίου παγκοσμίως.....	11
<b>Εικόνα 3.2:</b> Εκτιμήσεις στερεοαπορροής παγκόσμιας βάσης δεδομένων.....	12
<b>Εικόνα 3.3:</b> Εκτιμήσεις στερεοαπορροής μεσογειακών χωρών.....	13
<b>Εικόνα 3.4:</b> Τρωτότητα εδαφών στην υδατική διάβρωση.....	15
<b>Εικόνα 3.5:</b> Εκτίμηση μεταβολής των αγροτικών εκτάσεων λόγω υδατικής διάβρωσης.....	16
<b>Εικόνα 3.6:</b> Διάβρωση κατά στρώσεις.....	19
<b>Εικόνα 3.7:</b> Αυλακωτή διάβρωση.....	19
<b>Εικόνα 3.8:</b> Διάβρωση χαντακιών.....	20
<b>Εικόνα 3.9:</b> Σχηματική αναπαράσταση μεταφοράς και απόθεσης φερτών υλών.....	21
<b>Εικόνα 3.10:</b> Φυσικές διεργασίες του φαινομένου της εδαφικής διάβρωσης.....	22
<b>Εικόνα 3.11:</b> Φερτές ύλες χειμαρρικών υδατορευμάτων.....	23
<b>Εικόνα 3.12:</b> Απόσπαση και μεταφορά εδαφικού υλικού υπό την επίδραση βροχόπτωσης.....	27
<b>Εικόνα 3.13:</b> Θέσεις μέτρησης της στερεοπαροχής στον ελλαδικό χώρο.....	30
<b>Εικόνα 3.14:</b> Καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής δύο υδρολογικών εποχών.....	38
<b>Εικόνα 3.15:</b> Χάρτης επικινδυνότητας διάβρωσης και απόθεσης φερτών υλών με χρήση GIS.....	47
<b>Εικόνα 4.1:</b> Τεχνητή λίμνη πηγών Αώου.....	48
<b>Εικόνα 4.2:</b> Γεωγραφική τοποθέτηση ταμιευτήρα πηγών Αώου.....	50
<b>Εικόνα 4.3:</b> Γεωμορφολογία της τεχνητής λίμνης.....	51
<b>Εικόνα 4.4:</b> Κύριο φράγμα και σήραγγα εκτροπής στην παλιά κοίτη Αώου.....	51

<b>Εικόνα 4.5:</b> Εκχειλιστής και θυροφράγματα του ΥΗΣ πηγών Αώου.....	52
<b>Εικόνα 4.6:</b> Χιονόπτωση και εποχική ξήρανση υδατορευμάτων.....	56
<b>Εικόνα 4.7:</b> Στρωματογραφική στήλη Ιονίου Ζώνης.....	57
<b>Εικόνα 4.8:</b> Στρωματογραφική στήλη Ζώνης Πίνδου.....	58
<b>Εικόνα 4.9:</b> Κατανομή γεωλογικών σχηματισμών στη λεκάνη απορροής Αώου.....	59
<b>Εικόνα 4.10:</b> Ποσοστά κάλυψης της λεκάνης απορροής ανά γεωλογικό σχηματισμό.....	60
<b>Εικόνα 4.11:</b> Σχηματισμοί φλύσχη στον ταμιευτήρα Αώου.....	61
<b>Εικόνα 4.12:</b> Τυπικό αναπαραγωγικό πεδίο υδατορεύματος του Αώου.....	62
<b>Εικόνα 4.13:</b> Δασικές εκτάσεις περιμετρικά του ταμιευτήρα πηγών Αώου.....	63
<b>Εικόνα 4.14:</b> Εποχική κατανομή δασικών εκτάσεων του ταμιευτήρα πηγών Αώου.....	64
<b>Εικόνα 4.15:</b> Προστατευόμενες περιοχές της ευρύτερης περιοχής.....	65
<b>Εικόνα 4.16:</b> Αποψιλωμένες περιοχές του ταμιευτήρα πηγών Αώου.....	67
<b>Εικόνα 4.17:</b> Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής πηγών Αώου.....	68
<b>Εικόνα 4.18:</b> Ποσοστά κάλυψης της λεκάνης απορροής ανά χρήση γης.....	69
<b>Εικόνα 4.19:</b> Τεχνικά έργα περιμετρικά του ταμιευτήρα.....	71
<b>Εικόνα 4.20:</b> Βυθομετρικός χάρτης ταμιευτήρα Πηγών Αώου έτους 1996.....	73
<b>Εικόνα 5.1:</b> Ισοτιμικές ζώνες του παράγοντα R.....	81
<b>Εικόνα 5.2:</b> Ψηφιακό μοντέλο εδάφους από υψόμετρα της Γ.Υ.Σ.....	91
<b>Εικόνα 5.3:</b> Διάβρωση και αποθέσεις φερτών υλών στον ταμιευτήρα πηγών Αώου.....	93
<b>Εικόνα 5.4:</b> Ποσοστά κλάσεων διάβρωσης και απόθεσης φερτών στον ταμιευτήρα.....	94
<b>Εικόνα 5.5:</b> Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης.....	96
<b>Εικόνα 5.6:</b> Συντελεστής R λεκάνης πηγών Αώου.....	97
<b>Εικόνα 5.7:</b> Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας λεκάνης πηγών Αώου.....	100

<b>Εικόνα 5.8:</b> Απομειωμένες τιμές του συντελεστή $K$ .....	101
<b>Εικόνα 5.9:</b> Συντελεστής φυτοκάλυψης λεκάνης πηγών Αώου.....	103
<b>Εικόνα 5.10:</b> Τοπογραφικός συντελεστής λεκάνης πηγών Αώου.....	105
<b>Εικόνα 5.11:</b> Συντελεστής μέτρων ελέγχου κατά της διάβρωσης λεκάνης πηγών Αώου.....	106
<b>Εικόνα 5.12:</b> Χάρτης ολικής εδαφικής απώλειας λεκάνης πηγών Αώου.....	107
<b>Εικόνα 5.13:</b> Χάρτης εδαφικής απώλειας μοντέλου RUSLE2015.....	107
<b>Εικόνα 5.14:</b> Διάγραμμα τιμών των εμπειρικών σχέσεων του συντελεστή $R$ .....	114
<b>Εικόνα 5.15:</b> Περιοχές εναπόθεσης φερτών υλών στον ταμιευτήρα.....	115
<b>Εικόνα 6.1:</b> Τιμές μετρημένης στερεοαπορροής στην Ελλάδα.....	117
<b>Εικόνα 6.2:</b> Αποτελέσματα εκτιμήσεων αιωρούμενου φορτίου.....	119

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 5.1:</b> Εύρη τιμών πυκνότητας αποθέσεων σε ταμιευτήρες.....	89
<b>Πίνακας 5.2:</b> Εκτίμηση του συντελεστή R με εμπειρικές σχέσεις.....	98
<b>Πίνακας 5.3:</b> Συντελεστής R βάσει της σχέσης Toy και λοιπών (1998).....	99
<b>Πίνακας 5.4:</b> Συντελεστής K βάσει βιβλιογραφικών τιμών.....	102
<b>Πίνακας 5.5:</b> Συντελεστής C βάσει βιβλιογραφικών τιμών.....	104
<b>Πίνακας 5.6:</b> Τιμές συντελεστή στερεοαπορροής.....	108

## **Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο πλαίσιο των έντονων περιβαλλοντικών μεταβολών παγκοσμίως, η ανάγκη προστασίας των φυσικών πόρων προβάλλει επιτακτική. Παράλληλα, η ανθρώπινη δραστηριότητα στο περιβάλλον, η οποία εκδηλώνεται μέσω της αστικοποίησης, της αλλαγής των χρήσεων γης, της εκτεταμένης υλοτομίας κ.α., συνεπάγεται τον συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων (Βλαχόπουλος, 2007). Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η στροφή στην αντιπλημμυρική προστασία και θωράκιση των περιοχών με στόχο την αποφυγή ανεξέλεγκτων κοινωνικοοικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Προκειμένου οι φυσικές καταστροφές που παρατηρούνται στον πλανήτη να υφίστανται ορθή και αποτελεσματική διαχείριση, η χωρική και ποσοτική μελέτη της διάβρωσης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, δεδομένου ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της εδαφικής διάβρωσης και της εκδήλωσης κατολισθητικών και πλημμυρικών φαινομένων (Μπαθρέλλος et al, 2010). Ωστόσο, οι διαδικασίες της εδαφικής διάβρωσης παρουσιάζουν ενδημικότητα, καθώς επηρεάζονται από ποικίλους βιοφυσικούς και ανθρώπινους παράγοντες, οι οποίοι επιδρούν με διαφορετική ένταση στο εκάστοτε περιβάλλον (Ξανθάκης, 2011). Συνεπώς, η διάβρωση αποτελεί ένα σύνθετο και πολυπαραμετρικό πρόβλημα, λόγω κλιματολογικών, φυσιολογικών και υδρογεωλογικών παραγόντων που εμπεριέχει, γεγονός που δυσχεραίνει το συνεχή έλεγχο και την καταγραφή του μεγέθους της.

Η ανάπτυξη της επιστημονικής έρευνας γύρω από διεργασίες που σχετίζονται με τη διάβρωση και την υποβάθμιση των εδαφών εν γένει είναι εύλογη, αν αναλογιστεί κανείς την έκταση και τη σοβαρότητα του προβλήματος στο σύγχρονο κόσμο (Ξανθάκης et al, 2010). Πλήθος μελετών έχουν καταγράψει παγκοσμίως δισεκατομμύρια τόνους παρασυρόμενου εδαφικού υλικού, των οποίων οι οικονομικές συνέπειες είναι σημαντικές αλλά δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν (Λυκούδη και Ζαρής, 2006). Επιπλέον, η ανάγκη για διεπιστημονική συνεργασία ειδικοτήτων όπως μηχανικοί, γεωλόγοι, οικονομολόγοι, γεωπόνοι κ.α. αναφορικά με την αντιμετώπιση προβλημάτων διάβρωσης είναι προφανής.

Όσον αφορά στην Ελλάδα, φυσικοί παράγοντες, όπως το έντονο ορεινό ανάγλυφο, το μεσογειακό τύπου κλίμα με ξηρά και θερμά καλοκαίρια και σημαντικές κατακρημνίσεις, η σχετικά μεγάλη έκταση αδιαπέρατων πετρωμάτων, καθώς επίσης ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως εκτεταμένες και επαναλαμβανόμενες δασικές πυρκαγιές, μη ορθολογική χρήση των φυσικών πόρων, ανεξέλεγκτη υπερβόσκηση και υλοτομία, συντελούν στην απογύμνωση των εδαφών (Ξανθάκης, 2011). Ως αποτέλεσμα, τα ελληνικά εδάφη

παρουσιάζουν μειωμένη παραγωγικότητα, υποβαθμίζεται η ποιότητα των υδάτων, αμφισβητείται η ασφάλεια των τροφίμων και επηρεάζεται αρνητικά η βιοποικιλότητα.

Ειδικότερα, ο ορεινός χαρακτήρας διαφόρων περιοχών της Ελλάδας οδηγεί στην ανάπτυξη ορμητικών και χειμαρρωδών ποταμών και ρεμάτων, τα οποία διασχίζουν βραχώδεις περιοχές, αναπτύσσοντας υψηλές ταχύτητες, εμφανίζουν σημαντική διαβρωτική δράση και εναποθέτουν σημαντικές ποσότητες φερτών υλών στις εκβολές τους (Κουσουρής, 2007). Οι φερτές αυτές ύλες (εδαφικό υλικό, χαλίκια, λίθοι, κορμοί και κλαδιά δέντρων) αποτελούν ουσιαστικά μια έμμεση επίπτωση διαβρωτικών φαινομένων και ενδέχεται να δημιουργήσουν προβλήματα καθ' όλο το μήκος των ποταμών, καθώς και στο θαλάσσιο ή λιμναίο αποδέκτη τους, ανάλογα με τη φερτική ικανότητα των ποταμών. Το γεγονός αυτό, καθιστά τη στερεοπαροχή ενός ποταμού ή ρέματος σημαντική παράμετρο για τη μελέτη του.

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό πως η εδαφική διάβρωση και η μεταφορά φερτών υλών αποτελούν βασικές παραμέτρους για το σχεδιασμό ενός υδραυλικού έργου και την ασφαλή μετέπειτα λειτουργία του. Δεδομένης της πολυπλοκότητας των φαινομένων αυτών, απαιτείται λεπτομερής μελέτη για την επαρκή γνώση και κατανόηση των φυσικών μηχανισμών τους (Λυκούδη και Ζαρρής, 2006). Παρά τη σημαντικότητα προσδιορισμού των ανωτέρω μεγεθών, στη χώρα μας, στις περιπτώσεις που λαμβάνεται μέριμνα για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων, χρησιμοποιούνται απαρχαιωμένες και ακατάλληλες μέθοδοι για το σκοπό αυτό, οι οποίες συχνά επιβαρύνουν το πρόβλημα σε βάθος χρόνου. Συστηματικές μετρήσεις του στερεοφορτίου καθώς και του ρυθμού διάβρωσης εκλείπουν, ενώ η ύπαρξη σποραδικών στερεοϋδρομετρήσεων (προερχόμενες κυρίως από τη Δ.Ε.Η.) αδυνατεί να προσφέρει μια πλήρη εκτίμηση της χρονικής και χωρικής μεταβολής της στερεοαπορροής.

Απεναντίας, η Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (Universal Soil Loss Equation - USLE), όπως και τροποποιήσεις αυτής, αποτελούν μια αξιόλογη εμπειρική μέθοδο εκτίμησης του όγκου των φερτών υλών διεθνώς (Βλαχόπουλος, 2007). Μάλιστα, το εν λόγω μοντέλο σε συνδυασμό με Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών θεωρείται εν δυνάμει ένα ολοκληρωμένο εργαλείο διαχείρισης μιας λεκάνης απορροής, αναφορικά με διαβρωτικές δράσεις (Ξανθάκης et al, 2010).

Στο παραπάνω πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική φιλοδοξεί να ερευνήσει τις δυνατότητες του τεχνολογικού μοντέλου RUSLE σε συνδυασμό με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών αναφορικά με την εκτίμηση της στερεοαπορροής. Για το λόγο

αυτό, υλοποιείται εφαρμογή του μοντέλου, χρησιμοποιώντας ως μελέτη περίπτωσης τον ταμιευτήρα Πηγών Αώου, και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από επεξεργασία των πραγματικών μετρήσεων. Συνεπώς, η διερεύνηση του βαθμού στον οποίο προσεγγίσεις όπως η RUSLE κρίνονται ικανοποιητικές για την αυτοματοποίηση της συνολικά ακολουθούμενης διαδικασίας προσδιορισμού του στερεοφορτίου αποτελεί το κεντρικό ερώτημα της παρούσας διπλωματικής.

Επιμέρους στόχοι, στους οποίους αποβλέπει η εργασία και μέσω των οποίων θα απαντήσει στο βασικό ερευνητικό ερώτημα, περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Περιγραφή και αξιολόγηση του παραδοσιακού-συμβατικού τρόπου εκτίμησης της στερεοαπορροής.
- Επισκόπηση και κριτική ανάλυση της υφιστάμενης γνώσης περί του μηχανισμού μεταφοράς φερτών υλών (ορισμοί και παραδείγματα, διαθέσιμα εργαλεία υπολογισμού των φερτών υλών).
- Προσπάθεια διατύπωσης ανιχνευτικών προτάσεων για τη βελτίωση του υπό μελέτη μοντέλου καθώς και για τη συνολική διαδικασία προσέγγισης προβλημάτων στερεοαπορροής.

Όσον αφορά στη διάρθρωση, η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται σε επτά κεφάλαια. Η εισαγωγή αποτελεί το πρώτο κεφάλαιο στο οποίο παρατίθεται το γενικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται η εργασία, καθώς επίσης οι στόχοι που καλείται να επιτύχει. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η στρατηγική και η μεθοδολογία ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε προκειμένου να επιτευχθούν οι επιδιωκόμενοι στόχοι. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το βασικό εννοιολογικό υπόβαθρο του φαινομένου της διάβρωσης και της στερεοαπορροής, μέσα από τους κύριους επίσημους ορισμούς της, καθώς και με άλλες έννοιες και διαδικασίες που συνδέονται με αυτό.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης και αναλύονται τα ιδιαίτερα κλιματολογικά, γεωμορφολογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της. Επιπροσθέτως, αναφέρονται στοιχεία σχετικά με τις μετρημένες τιμές διαφόρων μεγεθών εντός του ταμιευτήρα, ώστε να δοθεί η σκυτάλη στο κεφάλαιο πέντε, το οποίο ασχολείται ενδελεχώς με την περίπτωση της υιοθέτησης εναλλακτικών πρακτικών εκτίμησης της στερεοαπορροής. Τι καινοτομίες, τεχνολογικές και μη, εισάγει η RUSLE; Ποιά η σχέση της με την υπάρχουσα υποδομή; Υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης του μοντέλου και αν ναι, προς ποιά κατεύθυνση και προσανατολισμό; Τα παραπάνω είναι τα κύρια ερωτήματα που

προσπαθεί να απαντήσει το κεφάλαιο πέντε μέσα από την εφαρμογή της προσέγγισης RUSLE στη λεκάνη απορροής Πηγών Αώου.

Στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια συγκριτική ανάλυση μεταξύ των μετρημένων τιμών στερεοαπορροής και των αποτελεσμάτων της μεθόδου RUSLE με μετρήσεις και σχέσεις που προέκυψαν από έρευνες στην ευρύτερη περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας. Επιπλέον, προτείνονται ορισμένα ανοιχτά θέματα που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας στον συγκεκριμένο τομέα. Τέλος, το έβδομο κεφάλαιο αποτελεί μια σύνοψη των ευρημάτων/συμπερασμάτων που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



## **Κεφάλαιο 2: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο σχεδιασμός και η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας βασίζεται στο βιβλίο *Designing a Research Project* των Verschuren και Doorewaard (2005). Σύμφωνα με την ανάλυσή τους, ο σχεδιασμός μιας ερευνητικής εργασίας περιλαμβάνει δύο κύρια στοιχεία: τον εννοιολογικό σχεδιασμό (conceptual research design) και τον τεχνικό (technical research design). Το πρώτο στοιχείο αφορά ό,τι κανείς φιλοδοξεί να πετύχει μέσα από μια μελέτη, ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει μία σειρά δραστηριοτήτων που στοχεύουν στην ταυτοποίηση του τρόπου με τον οποίο θα πετύχει τους στόχους του (Verschuren και Doorewaard, 2005). Το παρόν κεφάλαιο, λοιπόν, εξηγεί τον εννοιολογικό σχεδιασμό της παρούσας μελέτης (ερευνητικός σκοπός, πλαίσιο και θέμα) και έπειτα περιγράφει τον τεχνικό σχεδιασμό (ερευνητικό υλικό και στρατηγική).

### **2.1 ENNOΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ**

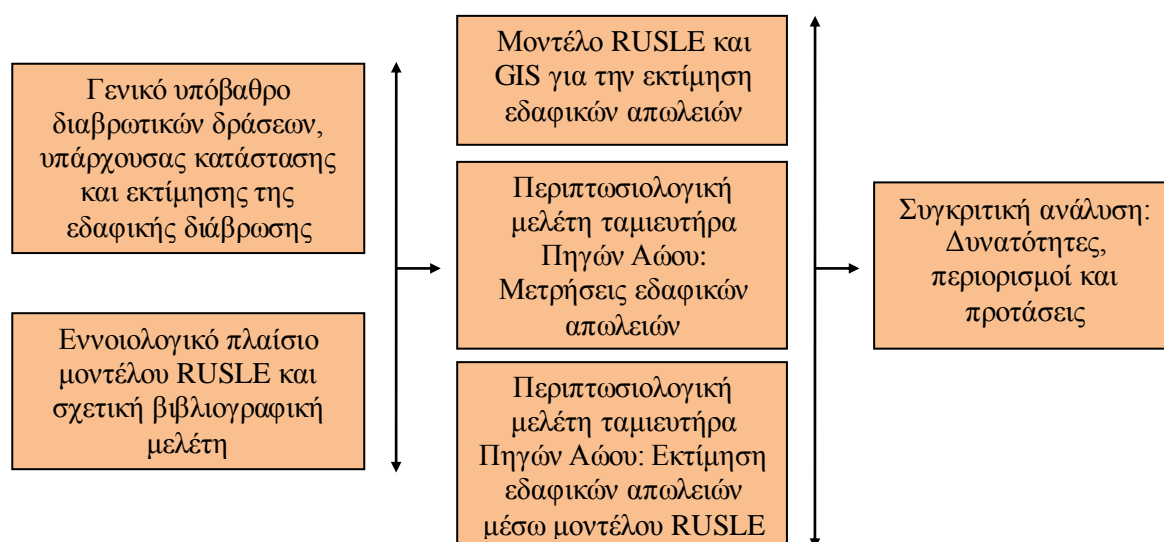
#### **2.1.1 Ερευνητικός σκοπός**

Η παρούσα εργασία σκοπεύει να αποτελέσει μία μελέτη της μεθόδου RUSLE για την ποσοτική εκτίμηση του στερεοφορτίου σε σχέση με την πραγματική της τιμή, όπως προέκυψε από μετρήσεις. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση των δυνατοτήτων της μεθόδου RUSLE σε συνδυασμό με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών αναφορικά με τον προσδιορισμό των φερτών υλών που παράγονται σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Επιπλέον, επιχειρείται η ανίχνευση απαντήσεων σχετικών με την ύπαρξη περιθωρίων βελτίωσης της εν λόγω μεθοδολογίας αποτίμησης του στερεοφορτίου, προσδιορίζοντας την κατεύθυνση και τον προσανατολισμό στον οποίο οφείλουμε να στραφούμε.

Ως μια θεωρητική και εμπειρική προσπάθεια εμπλουτισμού της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και κατανόησης των υπό διερεύνηση φαινομένων, διατυπώνεται ο ακόλουθος ερευνητικός σκοπός: Η περαιτέρω ανάπτυξη της δυναμικής αναδύμεων υποδομών, όπως είναι η μέθοδος RUSLE, μέσω της περιπτώσιολογικής μελέτης ενός τεχνητού ταμιευτήρα διαφωτίζοντας τη φύση, τη δυναμική και τους σχετικούς κινδύνους/προβλήματα και, παράλληλα, η διατύπωση προτάσεων για περαιτέρω βελτίωση.

## 2.1.2 Ερευνητικό πλαίσιο - θέμα

Μέσα από την ακόλουθη σχηματική απεικόνιση συγκεκριμενοποιείται καλύτερα το ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας εργασίας και τα διάφορα βήματα προς την ολοκλήρωσή της (Verschuren και Doorewaard, 2005).



**Σχήμα 2.1:** Ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας μελέτης.

*Τα κάθετα βέλη αντιπροσωπεύουν την “αντιπαράθεση” κάποιων συγκεκριμένων στοιχείων, η οποία καταλήγει σε συμπέρασμα (οριζόντια βέλη).*

(Πηγή: Verschuren και Doorewaard, 2005)

Το ερευνητικό θέμα περιλαμβάνει, το λιγότερο, ένα κεντρικό ερώτημα και δύο υποερωτήματα, οι απαντήσεις στα οποία πρέπει να ικανοποιούν τον ερευνητικό σκοπό (Verschuren και Doorewaard, 2005). Στο πλαίσιο αυτό, διατυπώνεται το παρακάτω κεντρικό ερώτημα: Ποιά είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του μοντέλου RUSLE στην εκτίμηση των εδαφικών απωλειών; Και τα σχετικά υποερωτήματα: α) Ποιές καινοτομίες, τεχνολογικές και μη, εισάγει το RUSLE; β) Ποιά η σχέση του με την υπάρχουσα υποδομή; γ) Υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης του μοντέλου και αν ναι, προς ποιά κατεύθυνση και προσανατολισμό;

## 2.2 ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

### 2.2.1 Ερευνητικό υλικό

Σύμφωνα με τους Verschuren και Doorewaard (2005), πριν καταπιαστεί κανείς με την ανάλυση πρέπει να απαντηθούν ορισμένα ερωτήματα. Η πρώτη ερώτηση αφορά το υπό διερεύνηση αντικείμενο, το οποίο στην παρούσα εργασία είναι ένα “προϊόν” (και όχι, π.χ., μια φιλοσοφική έννοια), καθώς μελετάμε το μοντέλο RUSLE και τη σχετική διαδικασία προσδιορισμού των εδαφικών απωλειών ψηφιακά. Η δεύτερη ερώτηση αφορά το είδος των πηγών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν: δεδομένα (data) και γνώση. Σχετικά με την τρίτη ερώτηση, η οποία αναφέρεται στην προέλευση των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν, θα μπορούσαν να αναφερθούν οι εξής: ο τύπος και άλλα μέσα μαζικής επικοινωνίας (ηλεκτρονικά και ψηφιακά), κείμενα και φυσικά η βιβλιογραφία (έρευνες ή δοκίμια που ακολουθούν μια συστηματική, επιστημονική προσέγγιση).

### 2.2.2 Στρατηγική

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια μελέτη που χρησιμοποιεί μια ποικιλία στρατηγικών: από βιβλιογραφική έρευνα μέχρι περιπτωσιολογική μελέτη. Η βιβλιογραφική έρευνα (ο όρος βιβλιογραφία αναφέρεται σε επιστημονικά βιβλία, άρθρα, πρακτικά συνεδρίων και άλλα συναφή συγγράμματα) είχε ως στόχο τη συγκέντρωση ενός πλήθους (συχνά διεπιστημονικών) πληροφοριών και παράλληλα την προσέγγιση του θέματος από διαφορετικές οπτικές, παρέχοντας ερμηνείες.

Η περιπτωσιολογική μελέτη χαρακτηρίζεται από μικρή ποσότητα αντικειμένων προς εξέταση (αναφέρονται ως “περιπτώσεις”) βάσει μιας εντατικοποιημένης βάσης γνώσης (αναλύσεις περιεχομένου, συνεντεύξεις κ.α.). Σύμφωνα με σχετική βιβλιογραφία (Festinger et al., 1956; Radloff and Helmreich, 1968; Hare and Naveh, 1986; White, 1977) η προσέγγιση της περιπτωσιολογικής μελέτης είναι χρήσιμη για τη μελέτη ενός αναδυόμενου φαινομένου. Παρά, λοιπόν, το γεγονός ότι η διάβρωση και η στερεοπαροχή ως φαινόμενα είναι γνωστά εδώ και χιλιάδες χρόνια, η μελέτη και η εκτίμηση αυτών μέσω μοντέλων αποτελεί σχετικά πρόσφατη εξέλιξη, ιδιαίτερα για την Ελλάδα (Φωτεινής, 2014). Επομένως, η περιπτωσιολογική μελέτη φαίνεται ως μία κατάλληλη τεχνική που μπορεί να “ρίξει φως”,

επιτρέποντας τη συγκέντρωση σημαντικού μεγέθους δεδομένων και πληροφορίας για μία σε βάθος μελέτη του φαινομένου (Dafermos, 2001).

Ακόμη, η προσέγγιση αυτή παρέχει “τροφή για σκέψη” προσφέροντας τη δυνατότητα διατύπωσης υποθέσεων ικανών να προετοιμάσουν το έδαφος για άλλες έρευνες που ίσως ακολουθήσουν (Dafermos, 2001). Επιπλέον, η περιπτωσιολογική μέθοδος μπορεί να δώσει μια ολιστική εικόνα του προς μελέτη αντικειμένου ενώ είναι περισσότερο ευέλικτη, για παράδειγμα, από τις εμπειρικές προσεγγίσεις οι οποίες απαιτούν αρκετή προεργασία στη δομή (Verschuren και Doorewaard, 2005).

Ωστόσο, μία συνηθισμένη κριτική κατά της περιπτωσιολογικής μελέτης ως μέθοδο έρευνας αφορά την εξάρτησή της από περιορισμένο αριθμό περιπτώσεων, αδυνατώντας να οδηγήσει σε αξιόπιστα, γενικευμένα συμπεράσματα (Tellis, 1997). Επιπροσθέτως, ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα της περιπτωσιολογικής αλλά και της βιβλιογραφικής μελέτης αποτελεί η προκατάληψη, καθώς η κρίση κάποιου μπορεί να επηρεαστεί από τις υποθέσεις και τις πεποιθήσεις του. Ακόμη, η δυνατότητα ποσοτικοποίησης των αποτελεσμάτων συνήθως είναι αδύνατη ή περιορισμένη.

### **Κεφάλαιο 3: ΕΛΑΦΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ-ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗ**

Στόχο του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η εξοικείωση του αναγνώστη με την έννοια της εδαφικής διάβρωσης και τη στερεοπαροχή. Το κεφάλαιο ξεκινά με μια αναδρομή σε χαρακτηριστικά προβλήματα εδαφικής διάβρωσης και στερεοπαροχής παγκοσμίως. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το βασικό εννοιολογικό υπόβαθρο των φαινομένων (σχετικές έννοιες και ορισμοί) και παρατίθενται οι διαθέσιμες μέθοδοι προσδιορισμού τους.

#### **3.1. ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μελέτη της εδαφικής διάβρωσης και της μεταφοράς φερτών υλών εντός λεκανών απορροής εμπεριέχει κλιματολογικές και φυσιογραφικές παραμέτρους, παράγοντες βλάστησης και ανθρωπογενών επιδράσεων. Οι ιδιαίτερες αυτές εδαφικές και πολιτισμικές συνθήκες καθιστούν τη διάβρωση ενδημικό φαινόμενο.

Παραδείγματα και μαρτυρίες διαταραχών από διάβρωση χρονολογούνται εδώ και τουλάχιστον 2.500 χρόνια. Ο Πλάτωνας τον 4ο αι. π.Χ. απέδωσε την έντονη διάβρωση της Αττικής στις εκτεταμένες εκχερσώσεις του Υμηττού και στην υπερβόσκηση, γεγονότα που συνέβαλαν στην εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων (Κουλούρη, 2004). Στη συνέχεια, περί τον 3<sup>ο</sup> αι. π.Χ. η υλοτομία στις όχθες του Ευφράτη προκάλεσε έντονες πλημμύρες, οι οποίες αποδόθηκαν σε οργή του θεού, ενώ μαρτυρίες για πλημμυρικά φαινόμενα υπάρχουν και για την Αμερική, την Πολυνησία και τις Ινδίες. Επιπλέον, η κατάρρευση του πολιτισμού των Μάγια θεωρείται πως οφείλεται σε διαβρωτικά φαινόμενα λόγω εκτεταμένων αποδασώσεων (Deleage και Hemery, 1989).

Ήδη από την 4<sup>η</sup> χιλιετία, οι πρώτες ανθρώπινες κοινωνίες δημιούργησαν αξιόλογα τεχνικά έργα προκειμένου να αξιοποιήσουν τους υδατικούς πόρους. Ο Στράβωνας περιγράφει λεπτομερώς τα υδραυλικά και υδρονομικά έργα της Βοιωτίας με τα οποία άρδευαν τις καλλιεργούμενες εκτάσεις και αποστράγγιζαν τα πλεονάζοντα νερά διαμέσου καταβοθρών προς τον Ευβοϊκό κόλπο (Κουσουρή, 2007). Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί σε επιφάνειες αρχαίων λατομείων, όπως το λατομείο των Μαρμάρων, επίχωση με φερτές ύλες, τις οποίες μετέφερε και εναπόθετε παρακείμενος ξεροπόταμος στις όχθες του. Στην αρχαία Ολυμπία έχουν εντοπιστεί στον μεν ποταμό Κλαδέο τείχος μήκους 800 m, πλάτους και ύψους 3 m και στον δε Αλφειό ανάχωμα, μήκους 1000 m, ύψους 2 m και πλάτους περίπου

30 m, το οποίο κατασκευάστηκε από τους Μινύες. Για το χρόνο ανέγερσης των αντιπλημμυρικών έργων οι απόψεις δίστανται (1500 π.Χ ή και παλαιότερα), ενώ ήδη ρωμαϊκές εγκαταστάσεις εντός του αρχαιολογικού χώρου έχουν καταχωθεί από φερτές ύλες παλαιότερων πλημμυρών (Μαριολάκος και Φουντούλης, 2007). Σήμερα, οι πυρκαγιές στον ευρύτερο χώρο της Ολυμπίας έχουν μεταβάλει αρνητικά το καθεστώς της διάβρωσης των φαινομένων κατολισθήσεων, ερπυσμού και πλημμυρών, με αποτέλεσμα ο χώρος να έχει κατακλυστεί από τα νερά του Κλαδέου, που είτε θα παρασύρουν ό,τι βρουν είτε τμήμα του θα καταχωθεί κάτω από τις φερτές ύλες.

Φυσικά, η εδαφική διάβρωση, με τη γενική έννοια του όρου, αποτελεί φαινόμενο που εμφανίζεται σε όλη την διάρκεια ζωής της γης, από τη στιγμή που οι βράχοι βρέθηκαν εκτεθειμένοι στη δράση της ατμόσφαιρας και έλαβε χώρα η εδαφογένεση (Κουλούρη, 2004). Ωστόσο, πρέπει να διευκρινιστεί πως οι κύριες μορφές διάβρωσης είναι η γεωλογική ή φυσική και η ανθρωπογενής ή επιταχυνόμενη. Η πρώτη περιλαμβάνει το μακροχρόνιο φαινόμενο της αποσάθρωσης των πετρωμάτων και της εδαφογένεσης, διαδικασίες οι οποίες επηρεάζουν και διαμορφώνουν τη σύσταση και τα χαρακτηριστικά του εδάφους, της βλάστησης, της βιοποικιλότητας και των τοπογραφικών στοιχείων όπως είναι οι χαράδρες, οι κοιλάδες, οι κοίτες των ποταμών κ.α. Η ανθρωπογενής διάβρωση συνιστά προϊόν επέμβασης του ανθρώπου στα οικοσυστήματα και οδηγεί στην καταστροφή των συσσωματωμάτων του εδάφους. Συνήθως, ο όρος διάβρωση χρησιμοποιείται για την επιταχυνόμενη ή ανθρωπογενή διάβρωση που προκαλείται από την επέμβαση του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον και εκδηλώνεται μέσω εκχερσώσεων λόγω υπερβόσκησης, ανεξέλεγκτης υλοτομίας και πυρκαγιών (Συλλαίος et al, 2007).

Στο πλαίσιο αυτό, κατά τη διάρκεια των μεγάλων γεωλογικών περιόδων, ο ρυθμός σχηματισμού του εδάφους υπερέβαινε το ρυθμό φυσικής διάβρωσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πλούσιου και εύφορου επιφανειακού εδαφικού στρώματος. Εξαίρεση αποτέλεσαν οι περίοδοι κατά τις οποίες οι έντονες βροχοπτώσεις και η αυξημένη απώλεια εδάφους οδήγησαν σε ταχεία γεωλογική διάβρωση, οπότε η τιμή της γεωλογικής διάβρωσης προσέγγισε την αντίστοιχη της επιταχυνόμενης. Ωστόσο, ιδιαίτερα κατά την περίοδο της βιομηχανικής επανάστασης, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες εντατικοποιήθηκαν με αποτέλεσμα να διακυβεύεται η ποιότητα και η επάρκεια του νερού. Έκτοτε, η φυσική-δυναμική λειτουργία του βιογεωφυσικού χώρου μέσω της δυνατότητας του αυτοκαθαρισμού της δυσκολευόταν να αντισταθμίζει τις ανθρώπινες επεμβάσεις πάνω στους υδατικούς πόρους (Κουσουρή, 2007).

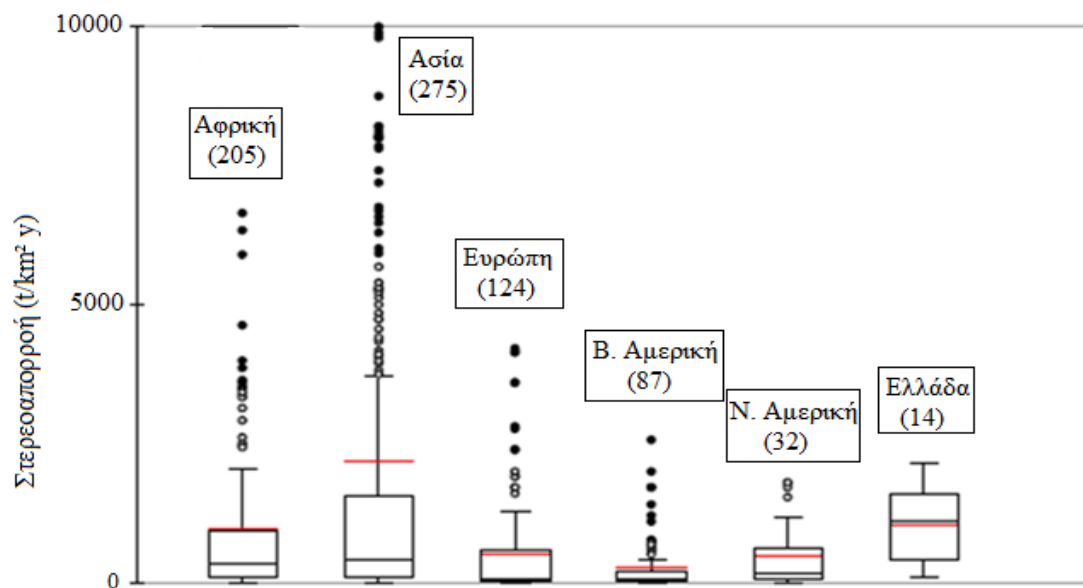
Η επιταχυνόμενη διάβρωση των τελευταίων 30 ετών εξαιτίας ανθρωπίνων παρεμβάσεων (αποψίλωση δασών, υπερβόσκηση, υλοτομία, επέκταση της γεωργίας σε εύκολα διαβρώσιμα εδάφη) επηρέασε σημαντικά τη μακροχρόνια διαδικασία εμπλουτισμού του εδάφους, οδηγώντας σταδιακά στην υποβάθμισή του. Με τον τρόπο αυτό, οι τοπικοί χαρακτήρα καταστροφές λόγω διαβρωτικών δράσεων του παρελθόντος διαρκώς εξαπλώνονται υπό την επίδραση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων παγκοσμίως. Το γεγονός αυτό επιβαρύνεται από την έλλειψη σχετικών μέτρων προστασίας ή βελτίωσης προκειμένου η επιταχυνόμενη διάβρωση να παραμένει ελεγχόμενη και να κυμαίνεται στο επίπεδο της φυσικής.

Σήμερα, η διάβρωση πλήττει το 18% των συνολικά καλλιεργούμενων εκτάσεων, ενώ εξ' αυτών το 12% πλήττεται σοβαρά (ΕΛ.Γ.Ο.-So.S, 2011). Η μελέτη της εδαφικής διάβρωσης παρουσιάζει ευρύ ενδιαφέρον στην Ευρώπη, καθώς χιλιάδες έτη εντατικής καλλιέργειας στις Μεσογειακές χώρες έχουν οδηγήσει σε εκτενείς απώλειες εδαφών εξαιτίας διαβρωτικών δράσεων. Όσον αφορά στη στερεοαπορροή, το μεγαλύτερο πρόβλημα αντιμετωπίζει η Κεντρική Αμερική και η Αφρική. Ωστόσο, η Ασία προηγείται βάσει του συνολικού εμβαδού των εκτάσεων που έχουν διαβρωθεί και ακολουθούν η Αφρική και η Ευρώπη, όπως φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες.



**Εικόνα 3.1:** Εκτιμήσεις αιωρούμενου φορτίου παγκοσμίως.

(Πηγή: Walling και Webb, 1996)



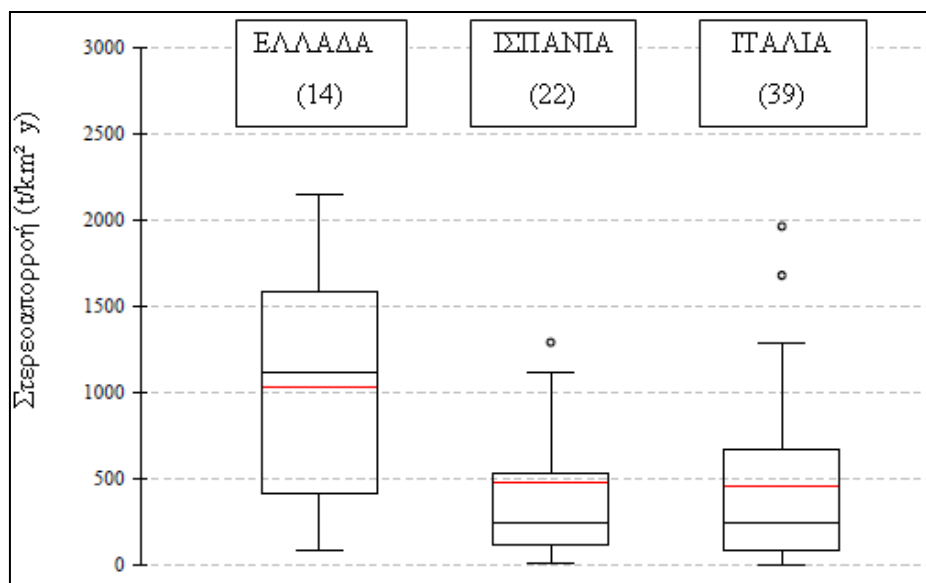
**Εικόνα 3.2:** Εκτιμήσεις στερεοαπορροής παγκόσμιας βάσης δεδομένων.

Οι αριθμοί στις παρενθέσεις υποδηλώνουν τον αριθμό των λεκανών απορροής στις οποίες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στερεοαπορροής.

(Πηγή: Παναγούλια και Ζαρρής, 2008)

Επιπλέον, σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.3), η Ελλάδα, στην οποία η διάβρωση συνιστά τον κύριο παράγοντα υποβάθμισης του εδάφους, καταλαμβάνει την πρώτη θέση μεταξύ άλλων Μεσογειακών χωρών. Φυσικά, οι μετρήσεις αφορούν λεκάνες απορροής της βορειοδυτικής Ελλάδας, όπου υπάρχει έντονη διαβρωτική δράση, και, επομένως, δε μπορεί να γίνει γενίκευση για το σύνολο της επικράτειας. Παράλληλα, στην Ισπανία οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε μικρούς κυρίως ταμιευτήρες, οπότε υπάρχουν περιθώρια σφαλμάτων. Επίσης, από τη λεκάνη του Άρνου στην Ιταλία μεταφέρονται ετησίως σημαντικές ποσότητες εύφορου εδάφους στη θάλασσα ( $20 \text{ hm}^3$ ), εκ των οποίων τα μισά προέρχονται από ζωικά λιπάσματα που παρασύρονται και απομακρύνονται από τις γεωργικές εκτάσεις (Παπαθεοδοσίου και Χριστοδούλου, 2009). Ωστόσο, βάσει μελετών ευρωπαϊκού επιπέδου, η Ελλάδα και η Ουκρανία φαίνεται να καταλαμβάνουν τις δύο πρώτες θέσεις μεταξύ των χωρών της Ευρώπης που έχουν υποστεί κάποιου βαθμού διάβρωση, με ποσοστό μεγαλύτερο του 55% του συνολικού τους εδάφους (ΕΛ.Γ.Ο.-So.S, 2011).





**Εικόνα 3.3:** Εκτιμήσεις στερεοαπορροής μεσογειακών χωρών.

Οι αριθμοί στις παρενθέσεις υποδηλώνουν τον αριθμό των λεκανών απορροής στις οποίες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στερεοαπορροής.

(Πηγή: Παναγούλια και Ζαρρής, 2008)

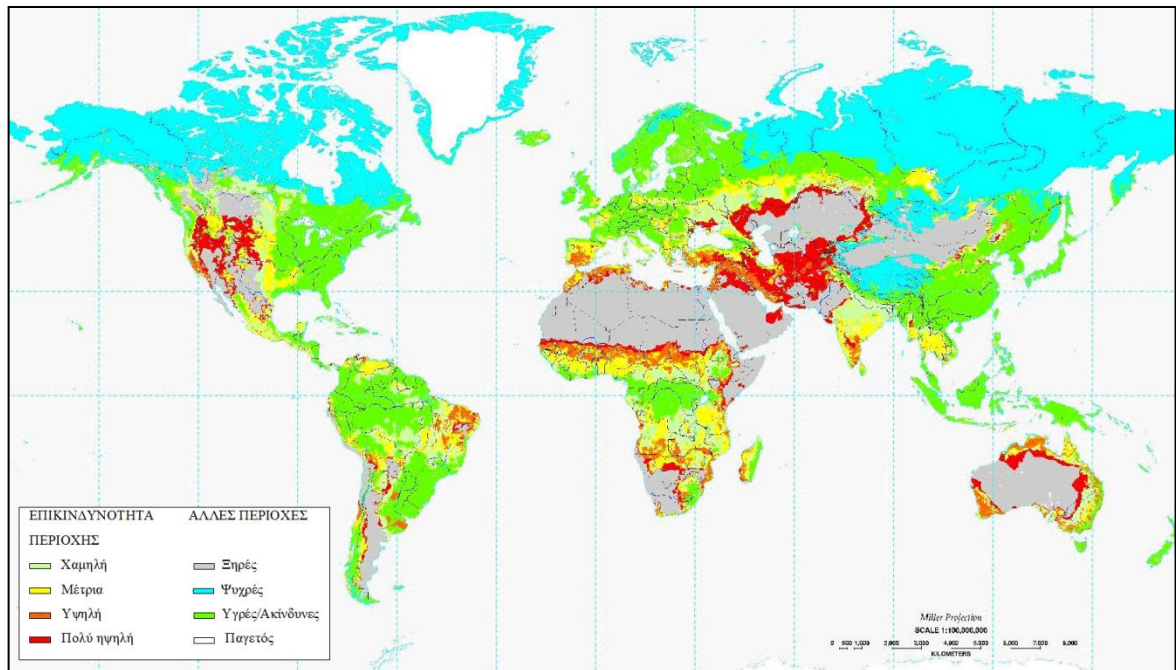
Στην Ελλάδα, η υποβάθμιση των δασών και δασικών εκτάσεων εξαιτίας της δράσης του ανθρώπινου παράγοντα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους λόγους που δικαιολογούν τους υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης. Ως αποτέλεσμα, από τα συνολικά 13 εκατ. εκτάρια της συνολικής έκτασης της χώρας τα 20 εκατ. στρέμματα παραμένουν άγονα και γυμνά, ενώ άλλα 29 εκατ. στρέμματα εμφανίζονται εξασθενημένα λόγω σοβαρών διαβρωτικών δράσεων. Η διάβρωση του εδάφους επιφέρει τεράστιες ζημιές στη γεωργία και αποτελεί δυναμικό παράγοντα ρύπανσης των επιφανειακών νερών. Τα παραπάνω δικαιολογούν το χαρακτηρισμό που αποδίδεται στη χώρα μας, ως " Χώρα διάβρωσης " (Αγοράκη, 2004).

Αναφορικά με το υδρογραφικό δίκτυο, η πλειονότητα των ελληνικών ποταμών διασχίζουν απότομες και βραχώδεις περιοχές και προκαλούν εδαφικές διαβρώσεις, ενώ η γοργή και χειμαρρική τους ροή εναποθέτει σημαντικές ποσότητες φερτών υλών στις εκβολές τους. Τα φερτά υλικά είναι απόρροια της απογύμνωσης των εδαφών και ενδέχεται να προκαλέσουν προβλήματα καθ' όλο το μήκος των ποταμών, αλλά και στο θαλάσσιο ή λιμναίο αποδέκτη τους (Κουσουρής, 2007). Επιπλέον, οι ποταμοί μπορούν να δημιουργήσουν ή να διαχωρίσουν λίμνες, εφόσον οι ποσότητες φερτών υλών που μεταφέρονται στη λίμνη είναι σημαντικές. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ο

ποταμός Κομψάτος στη Θράκη, η στερεοαπορροή του οποίου απομόνωσε εν μέρει από τη θάλασσα τη λίμνη Βιστωνίδα, καθώς και ο ποταμός της Πολυκάρπης, ο οποίος τείνει να χωρίσει τη λίμνη Καστοριά. Αντίθετα, η λίμνη του Τσιβλού στην Πελοπόννησο δημιουργήθηκε μετά από κατολισθήσεις που έφραξαν τη ροή γειτονικού ποταμού στις αρχές του αιώνα μας (Κουσουρής, 2007). Τέλος, η μεγαλύτερη λιμνοθάλασσα της Ελλάδας, η λιμνοθάλασσα Μεσολογγίου - Αιτωλικού οφείλει τη δημιουργία της στις προσχώσεις φερτών υλών των ποταμών Αχελώου και Ευήνου.

Οι πολυάριθμοι ελληνικοί χείμαρροι, οι οποίοι ανέρχονται περί τους 700, έχουν ιδιαίτερα σημαντική διαβρωτική δράση. Η υποεκτίμηση των στρεοπαροχών σε ποταμούς και ρέματα κατά το σχεδιασμό υδραυλικών έργων μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το φράγμα του Λούρου στην Άρτα, όπου ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα καλύφθηκε από προσχώσεις μέσα σε λίγα χρόνια (Παναγούλια και Ζαρρής, 2008). Ως αποτέλεσμα, ο ταμιευτήρας έχει μηδενική αποθηκευτική ικανότητα και, συνεπώς, δεν εξυπηρετεί το σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκε. Παρόλα αυτά, η Οδηγία – Πλαίσιο για τα νερά (2000/60/ΕΕ) δε λαμβάνει μέριμνα σχετικά με διαδικασίες μεταφοράς και απόθεσης φερτών υλών, οι οποίες, αποδεδειγμένα θα έπρεπε να αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων.

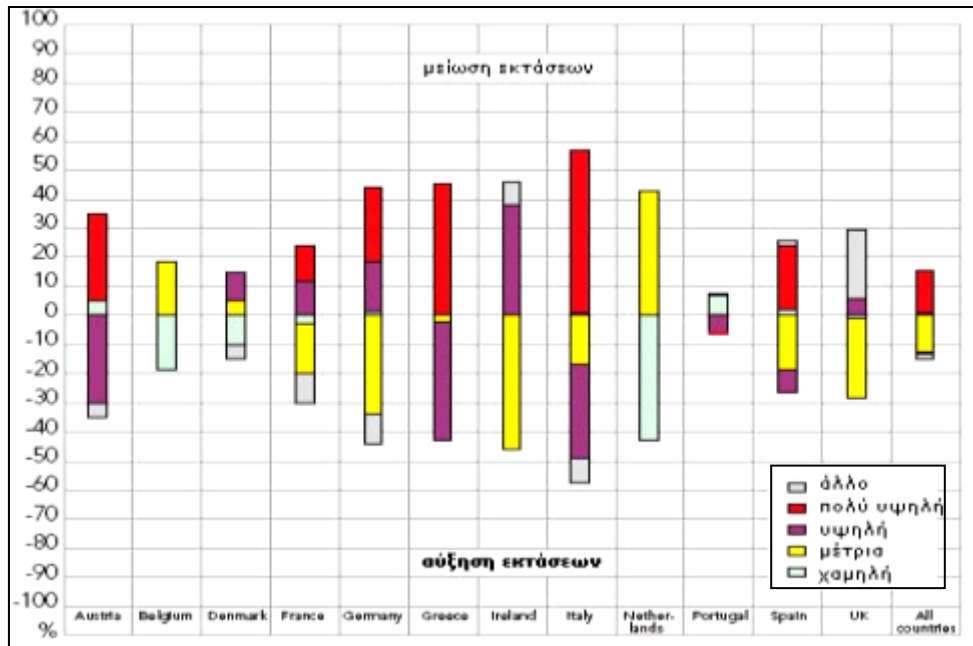
Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας έχει αναγνωριστεί παγκοσμίως η ανάγκη προστασίας του εδάφους, γεγονός που αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την αειφόρο ανάπτυξη (E.E.COM 231, 2006). Διάφορες πολιτικές προστασίας και διαφύλαξης του εδάφους έχουν προωθηθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, όπως είναι η θεματική Στρατηγική για το Έδαφος και η Οδηγία Πλαίσιο για το Έδαφος (ΕΛ.Γ.Ο.-So.S, 2011). Ο ακόλουθος χάρτης συνοψίζει τη σημερινή παγκόσμια κατάσταση αναφορικά με τη διάβρωση (Εικόνα 3.4).



**Εικόνα 3.4:** Τρωτότητα εδαφών στην υδατική διάβρωση

(Πηγή: USDA-NRCS, 2003)

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 3.5) αναπτύσσεται ένα σενάριο για τις μεταβολές των αγροτικών εκτάσεων διαφόρων ευρωπαϊκών χωρών εξαιτίας της υδατικής διάβρωσης έως το 2050. Φυσικά, εξαιτίας της πολυπλοκότητας του φαινομένου δεν υπάρχει κάποια γενική και συστηματική προσέγγιση, η οποία αποτιμά συνολικά την εξέλιξη του φαινομένου σε ολόκληρη την έκταση της Ευρώπης. Επομένως, το παρόν σενάριο, το οποίο παρουσιάζει τον κίνδυνο αύξησης της υδατικής διάβρωσης στο 80% των αγροτικών εκτάσεων των χωρών της ΕΕ υπό την επίδραση της κλιματικής αλλαγής, στηρίζεται σε παραδοχές με γενική ισχύ. Σύμφωνα με αυτό, ήδη υπάρχοντα φαινόμενα διάβρωσης αναμένεται να ενταθούν και να αυξηθούν (ΕΛ.Γ.Ο.-So.S, 2011).



**Εικόνα 3.5:** Εκτίμηση μεταβολής των αγροτικών εκτάσεων λόγω υδατικής διάβρωσης.

Αφορά σε διάφορες Ευρωπαϊκές Χώρες για το διάστημα 1990-2050 (ως ποσοστό επί της συνολικής χερσαίας επιφάνειας).

(Πηγή: Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, 2000)

## 3.2. ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

### 3.2.1. Ορισμός και κατηγορίες

Προκειμένου να γίνουν αντιληπτοί οι μηχανισμοί διάβρωσης και στερεομεταφοράς, κρίνεται σκόπιμο να δοθούν αρχικά οι βασικοί, κοινώς αποδεκτοί, ορισμοί των φαινομένων:

- **Εδαφική απώλεια** (soil loss) ορίζεται η ποσότητα του εδαφικού υλικού που τελικά απομακρύνεται από μία εδαφική έκταση μια δεδομένη χρονική στιγμή και εκφράζεται σε μονάδες μάζας ανά επιφάνεια (Παναγούλια, 2010).
- Ως **επιφανειακή διάβρωση** (sheet erosion) αναφέρεται το αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης της ενέργειας της βροχής και της διαβρωτικής, μεταφορικής ικανότητας της επιφανειακής ροής (Παναγούλια, 2010). Αποτελεί, δηλαδή, σύνολο της επιφανειακής στρώσης της γήινης επιφάνειας που απομακρύνεται ως αποτέλεσμα της δράσης του νερού ή/και του αέρα και μπορεί να οφείλεται σε φυσικά αίτια ή σε ανθρωπογενείς επιδράσεις, δηλαδή σε ακατάλληλες πρακτικές διαχείρισης (ΕΛ.Γ.Ο.-So.S, 2011).

Όσον αφορά στις διαδικασίες μεταφοράς και απόθεσης των φερτών υλικών, δίνονται οι ακόλουθοι ορισμοί:

- Το σύνολο των φερτών υλών που μετακινείται από τη ροή μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή περιγράφεται με τον όρο **φορτίο/στερεοφορτίο** (load) και εκφράζεται σε μονάδες μάζας ή βάρους.
- Ο όρος **συντελεστής στερεοαπορροής** (sediment delivery ratio) αναφέρεται στο λόγο της στερεοαπορροής προς την διαβρωμένη ποσότητα στη λεκάνη απορροής ανάντη της διατομής αναφοράς και χρησιμοποιείται για να περιγράψει την απομείωση των φερτών υλών λόγω ενδιάμεσων αποθέσεων (Κουτσογιάννης και Ταρλά, 1987).
- Ως **στερεοαπορροή** (sediment yield) ορίζεται η ποσότητα των φερτών υλών που διέρχονται από μία διατομή αναφοράς (π.χ. διατομή ποταμού) σε μία καθορισμένη χρονική διάρκεια. Εκφράζεται σε μονάδες μάζας και συχνά ανάγεται στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάντη της διατομής αναφοράς (Παναγούλια, 2010).
- Η **στερεοπαροχή** (sediment discharge) χρησιμοποιείται ως όρος για να περιγράψει το στιγμιαίο ρυθμό μεταφοράς των φερτών υλών που παρατηρείται σε μια διατομή αναφοράς (Παναγούλια και Ζαρρής, 2008).

Η έρευνα και η γνώση των παραπάνω ποσοτήτων αποτελεί ουσιώδη παράμετρο για την εκτίμηση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής καθώς και για τη βελτιστοποίηση του υδραυλικού και υδρολογικού σχεδιασμού ενός έργου. Τα φερτά υλικά παράγονται με τη διαδικασία της εδαφικής διάβρωσης και αποτίθενται ανάντη έργων (π.χ. φραγμάτων), καλύπτοντας το νεκρό όγκο των ταμιευτήρων. Η υποεκτίμηση του όγκου των φερτών υλών οδηγεί σε πλήρωση του ταμιευτήρα πέραν του νεκρού όγκου και, συνεπώς, σε μείωση της αποθηκευτικής του ικανότητας, γεγονός που συνεπάγεται μη ορθολογική διαχείρισή του και βλάβες, άρα και μείωση, βάσει του σχεδιασμού, της οικονομικής ζωής του έργου (Ξανθάκης et al, 2010).

Δεδομένου ότι τα φερτά υλικά μεταφέρονται στο υδρογραφικό δίκτυο λόγω ανάπτυξης διαβρωτικών δράσεων, η διάβρωση αποτελεί βασική συνιστώσα που πρέπει να μελετάται. Οι παράγοντες γένεσης της διάβρωσης, λόγω της κινητικής ενέργειας που προσδίδουν στα εδαφικά σωματίδια, οδηγούν τελικά στην αποκόλληση ορισμένων συσσωματωμάτων. Ανάλογα με τους παράγοντες αυτούς, η εδαφική διάβρωση διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες: την αιολική και την υδατική διάβρωση. Οι τοπικές συνθήκες

διαθέσιμης υγρασίας μιας περιοχής καθορίζουν κάθε φορά τον παράγοντα ο οποίος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην πρόκληση διαβρωτικών φαινομένων.

Η αιολική διάβρωση (wind erosion) αναφέρεται στην απομάκρυνση μεμονωμένων τεμαχιδίων από την επιφάνεια του εδάφους μέσω της δύναμης και ταχύτητας του ανέμου. Η ασθενής συγκράτηση των τεμαχιδίων αυτών με την παρουσία της οργανικής ουσίας, των ριζών ή της αργίλου/άμμου, συντελεί στην εύκολη διάβρωσή τους. Η απόσπαση των σωματιδίων μπορεί να γίνει με τριβή αυτών με την επιφάνεια του εδάφους, με τριβή αυτών μεταξύ τους ή με αναπήδηση και απομάκρυνσή τους, ενώ η μεταφορά μπορεί να λάβει χώρα υπό τη δράση αιολικών ταχυτήτων τουλάχιστον 30 km/h (Παναγούλια et al, 2006). Σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές όπου πνέουν ζεστοί και ξηροί άνεμοι η αιολική διάβρωση υποβαθμίζει σημαντικά το έδαφος, λόγω της απουσίας πυκνής προστατευτικής βλάστησης. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μορφή διάβρωσης δεν ενδιαφέρει άμεσα την υδρολογία (Μάρης, 2016).

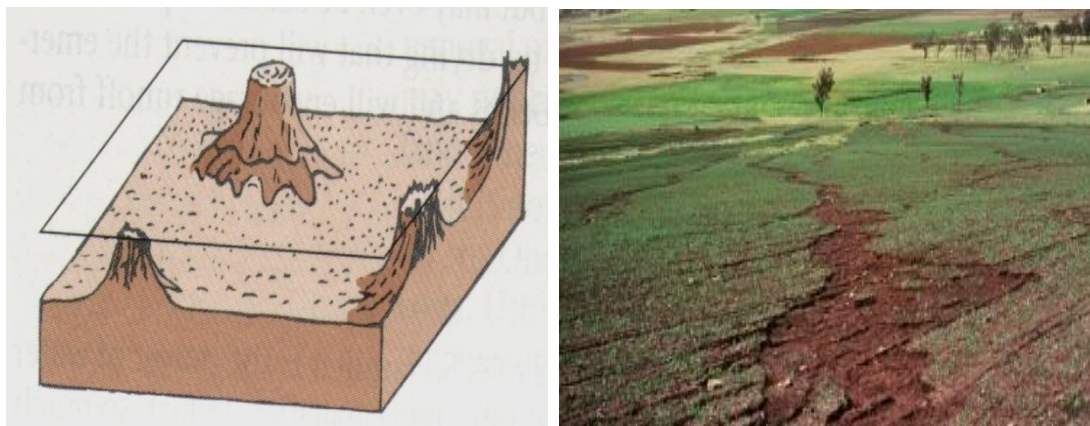
Αντίθετα, η υδατική διάβρωση (water erosion) απασχολεί την υδρολογία, δεδομένου ότι οι διαβρωτικές δυνάμεις της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής οδηγούν σε απόσπαση εδαφικού υλικού. Επιπλέον, ο εν λόγω τύπος διάβρωσης αποτελεί τη βασικότερη αιτία καταστροφής της γεωργικής γης στην Ελλάδα και στον ευρύτερο μεσογειακό χώρο (Κουλούρη, 2004). Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, για το 92% των εκτάσεων που έχουν υποστεί διάβρωση γενεσιουργός αιτία θεωρείται η δράση του νερού (ΕΛ.Γ.Ο.-So.S, 2011). Επιπλέον, οι διαδικασίες της υδατικής διάβρωσης κρίνονται ιδιαίτερα σημαντικές για τη μελέτη της μεταφοράς φερτών υλών σε υδατόρευμα, καθώς τα φερτά υλικά αντιμετωπίζονται ως προϊόντα της διαδικασίας της υδατικής διάβρωσης (Μάρης, 2016).

Η υδατική διάβρωση εμφανίζεται κυρίως σε τρεις μορφές, ανάλογα με το στάδιο της διάβρωσης και τα εδαφικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά: την επιφανειακή διάβρωση, την αυλακωτή διάβρωση και τη χαραδρωτική διάβρωση. Η πρόσκρουση των σταγόνων της βροχής στην επιφάνεια του εδάφους, η συγκέντρωση του νερού και η ταχύτητα ροής καθορίζουν την ανάπτυξη των ανωτέρω μορφών (Συλλαίος et al, 2007).

Η επιφανειακή διάβρωση ή διάβρωση κατά στρώσεις (sheet erosion) συνιστά το πρώτο στάδιο κάθε είδους διάβρωσης. Η απομάκρυνση του λεπτού στρώματος εδάφους λαμβάνει χώρα σχεδόν ομοιόμορφα από την επιφάνεια του εδάφους εξαιτίας των βροχοπτώσεων και της επιφανειακής απορροής (Εικόνα 3.6). Αποτελεί μια αργή, αφανή διαδικασία, κατά την οποία σταδιακά μειώνεται η διηθητικότητα του εδάφους σε ευρείες επιφάνειες, με αποτέλεσμα την απώλεια του μεγαλύτερου ποσοστού του εδάφους (Αγοράκη,

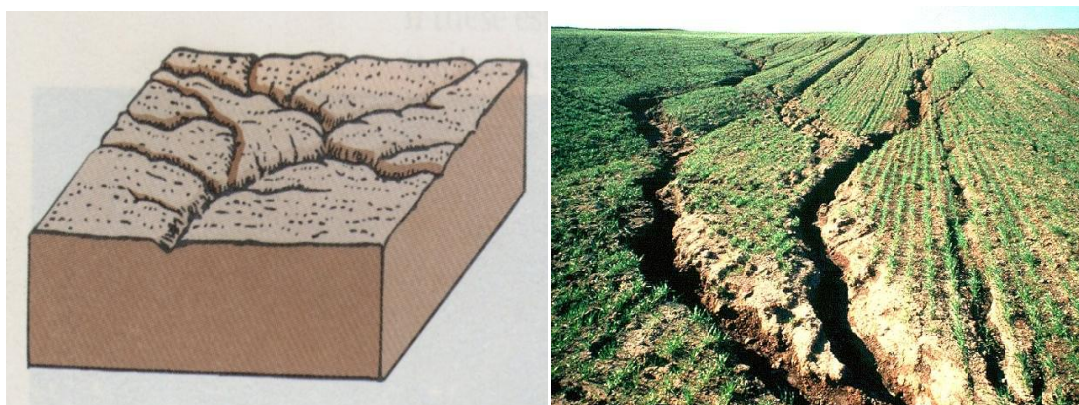


2004). Επιπλέον, η ροή του νερού δημιουργεί αβαθή ρυάκια, τα οποία σε βάθος χρόνου βαθαίνουν και διαμορφώνουν τα πρανή τους (Πασχαλίδης, 2015).



**Εικόνα 3.6:** Διάβρωση κατά στρώσεις

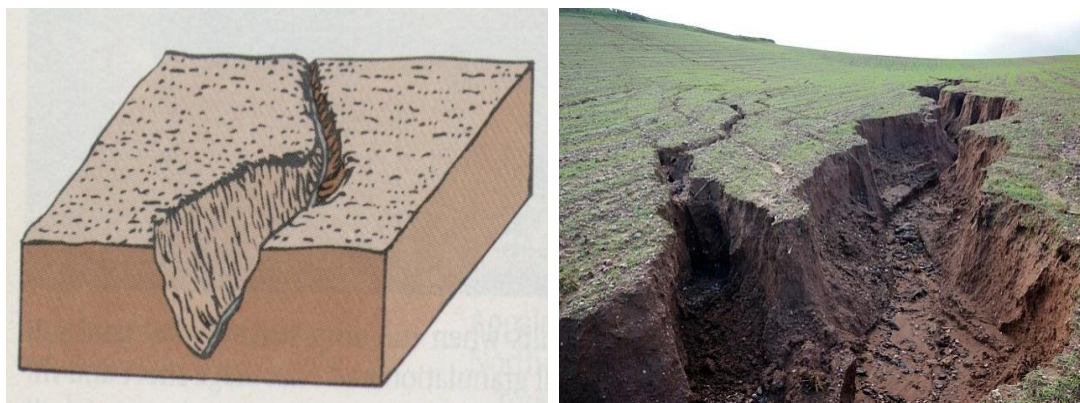
Στην αυλακωτή διάβρωση ή διάβρωση ρυακίων (rill erosion) η άροση αποτελεί κρίσιμο στοιχείο κατά την κλίση του εδάφους και, συνεπώς, μεταφέρονται υλικά μέσω τοπικών συγκεντρώσεων ασταθούς μορφής στα αυλάκια της άροσης. Διαφέρει από την επιφανειακή διάβρωση ως προς την ελαφρώς αυξημένη κρίσιμη τιμή της ταχύτητας ροής και τη διαβρωτική δύναμη (Συλλαίος et al, 2007). Επακόλουθο αυτής της μορφής διάβρωσης είναι ο σχηματισμός πολυάριθμων μικρών ρυακίων, βάθους έως 50 εκατοστών κυρίως σε εκτάσεις που βρίσκονται σε αγρανάπαυση ή σε πρόσφατα καλλιεργούμενες εκτάσεις (Εικόνα 3.7).



**Εικόνα 3.7:** Αυλακωτή διάβρωση

Η χαραδρωτή διάβρωση ή διάβρωση χαντακίων (gully erosion) οφείλεται στη ροή του νερού σε σαφώς σχηματισμένη κοίτη. Αποτελεί εξέλιξη της αυλακωτής διάβρωσης, επομένως είναι ιδιαίτερα έντονη και εμφανής (Εικόνα 3.8). Πρόσκαιρες ροές κατά τη διάρκεια καταγίδων οδηγούν σε υπερσυγκέντρωση του νερού απορροής και αύξηση του

πλάτους και του βάθους των αυλάκων έως κάποια δεκάδες μέτρα (Πασχαλίδης, 2015). Με τον τρόπο αυτό, σχηματίζονται χαράδρες οι οποίες είναι ιδιαίτερα υγρές και ασταθείς και, επομένως, αποκόβουν εδαφικό υλικό με γοργούς ρυθμούς, ιδιαίτερα σε ορεινές περιοχές (Μπαθρέλλος et al, 2010). Η παρουσία ψαθυρών εδαφικών υλικών κυρίως στα ποτάμια και στα πρανή των δρόμων βοηθά την ταχεία εξέλιξη διαβρωτικών φαινομένων και μορφών διάβρωσης (αυλακωτή, χαραδρωτική).



**Εικόνα 3.8:** Διάβρωση χαντακιών

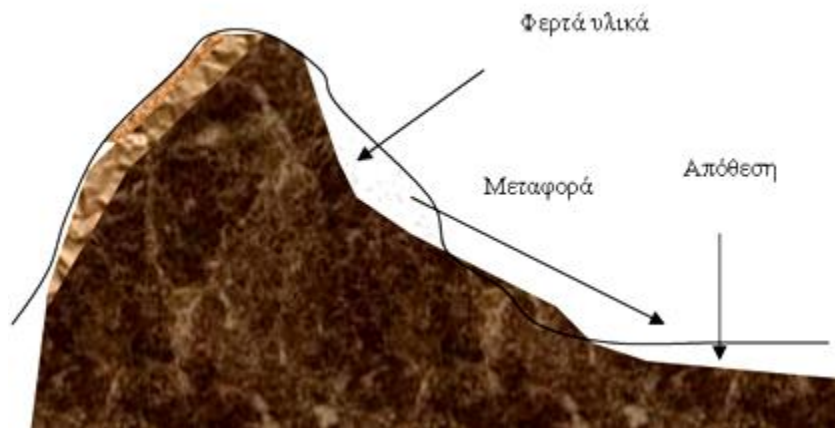
Τέλος, η διάβρωση διασποράς αναφέρεται στην αποκόλληση και την απομάκρυνση μέσω εκτόξευσης μικρών εδαφικών τεμαχιδίων, που προκαλείται από την πρόσκρουση σταγόνων βροχής στο έδαφος, ενώ υπόγεια διάβρωση μπορεί να λάβει χώρα σε αργιλικά εδάφη, όπου διευκολύνονται οι υπόγειες διαφυγές (Παναγούλια et al, 2006).

### **3.2.2. Εξήγηση των φαινομένων**

Η διάβρωση αποτελεί μια μορφή υποβάθμισης του εδάφους, το οποίο συνιστά ένα σύνθετο ζωντανό οργανισμό. Η δράση της ξεκινά όταν πλεονάζον νερό υπερβεί τη διηθητικότητα του εδάφους και κινηθεί σε χαμηλότερες κοιλότητες. Εφόσον η αποθηκευτική ικανότητα των κοιλοτήτων αυτών ξεπεραστεί, το πλεονάζον αυτό νερό θα αρχίσει να απορρέει (Πασχαλίδης, 2015).

Όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 3.9), η εδαφική διάβρωση αποτελεί τη φυσική διεργασία απόσπασης, μεταφοράς και απόθεσης εδαφικών ή/και βραχωδών υλικών, κυρίως υπό την επίδραση του νερού και του ανέμου. Οι διαδικασίες αυτές εξαρτώνται από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής καθώς και από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ποικιλόμορφων φερτών υλών.





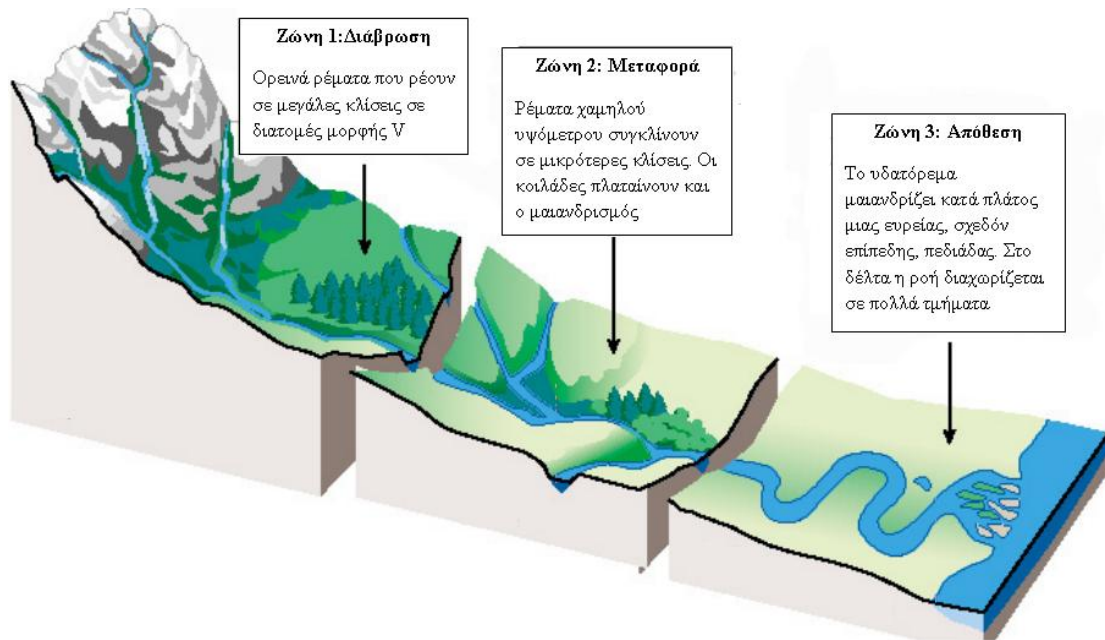
**Εικόνα 3.9:** Σχηματική αναπαράσταση μεταφοράς και απόθεσης φερτών υλών

Οι φερτές ύλες δημιουργούνται από τη διάβρωση της εδαφικής επιφάνειας σε μία λεκάνη απορροής λόγω της πρόσκρουσης σταγόνων βροχής στο έδαφος και της επιφανειακής απορροής. Η συρτική τάση του νερού στο έδαφος προκαλεί απορροή, η οποία αποτελεί μέσο μεταφοράς των σωματιδίων που προέρχονται από τη διάβρωση (Παναγούλια, 2010). Δηλαδή, τα φερτά υλικά μεταφέρονται από τις κινούμενες υδάτινες μάζες ή με την επιφανειακή απορροή σε κεκλιμένη επιφάνεια, όταν η δύναμη που ασκείται επί ενός μεμονωμένου σωματιδίου από το ρευστό ξεπεράσει τη δύναμη της τριβής (Παναγούλια, 2010). Υπό αυτές τις συνθήκες, η διατμητική τάση του πυθμένα αυξάνεται και πραγματοποιείται αποκόλληση των κόκκων, οι οποίοι τελικά μεταφέρονται προς την κατεύθυνση του ρέματος.

Για την κατανόηση του μηχανισμού μετακίνησης των φερτών υλών, αναπτύχθηκαν δύο προσεγγίσεις: η θεωρία συρτικής δύναμης και η θεωρία των φερτών σε ισορροπία. Η πρώτη έχει βασιστεί σε εργαστηριακά, κυρίως, πειράματα, εμπεριέχει οριακές τιμές διατμητικών τάσεων και σ' αυτή στηρίζονται οι υδροδυναμικές μέθοδοι υπολογισμού της στερεοπαροχής. Αντίθετα, η δεύτερη θεωρία προέκυψε από έρευνα σε φυσικά υδάτινα οικοσυστήματα και αποτέλεσε τη βάση για τις υδροδυναμικές μεθόδους εκτίμησης της στερεοπαροχής (Μάρης, 2016).

Καθώς η μεταφορά φερτών υλών εξελίσσεται κατά μήκος ενός χειμάρρου, κατάντη του λαιμού της λεκάνης συναντά τον κώνο ή τη λεκάνη εναπόθεσης. Στο χώρο αυτό, μειώνεται η συρτική τάση και η ταχύτητα ροής των χειμάρρων και συγκεντρώνονται τελικά τα φερτά υλικά. Ο συνολικός όγκος των αποθέσεων υλικού ενός ρέματος εκφράζει τη γενική διάβρωση στην ορεινή λεκάνη απορροής και κατ' επέκταση τη χειμαρρική του (Παναγούλια και Ζαρρής, 2008). Ωστόσο, η διάθεση φερτών υλών στην ξηρά ενδέχεται να

οδηγήσει σε συσσώρευση μπαζών και στράγγιση αυτών, η οποία επηρεάζει τα ύδατα, υπόγεια και επιφανειακά. Ο μηχανισμός και οι περιοχές διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης περιγράφονται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 3.10).



**Εικόνα 3.10:** Φυσικές διεργασίες του φαινομένου της εδαφικής διάβρωσης

(Πηγή: Παναγούλια και Ζαρρής, 2008)

Ειδικότερα, η ορμητικότητα και η σημαντική διαβρωτική δράση των ποταμών στις ορεινές περιοχές της Ελλάδας είναι ικανές να προκαλέσουν προβλήματα στις ανθρώπινες δραστηριότητες, μέσω της μεταφοράς φερτών υλών. Οι σοβαρότερες επιπτώσεις παρουσιάζονται στα κατώτερα αλλουβιακά πεδία, δηλαδή στις πεδινές περιοχές, οι οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον ως προς τη δυναμική ισορροπία μεταφοράς και απόθεσης φερτών υλών. Επιπλέον, στις εκβολές και τα δέλτα των ποταμών καθώς και στις συμβολές παραποτάμων αυξάνεται η πλημμυρική επικινδυνότητα, λόγω της μειωμένης φυσικής κλίσης και της συρτικής δύναμης του νερού.

Οι φερτές ύλες που μεταφέρονται και εναποθέτονται σε υδάτινους αποδέκτες περιλαμβάνουν εδαφικό υλικό, χαλίκια, λίθους, κορμούς και κλαδιά δέντρων και κατεστραμμένες κατασκευές λόγω πλημμυρικών επεισοδίων (Εικόνα 3.11). Η φερτική ικανότητα των ρεμάτων ή ποταμών και ο περιβάλλον χώρος προσδιορίζουν τη σύνθεση και την ποσότητά τους.



**Εικόνα 3.11:** Φερτές ύλες χειμαρρικών υδατορευμάτων

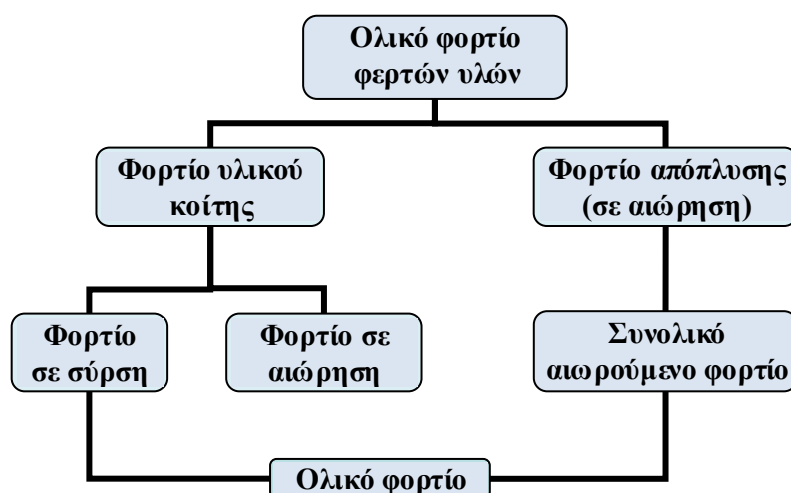
Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά των μεταφερόμενων ποτάμιων φερτών υλών, η κοκκομετρική τους διαβάθμιση ποικίλλει, δεδομένης της πληθώρας των υλικών που μεταφέρονται. Ο διαχωρισμός τους μπορεί να γίνει μόνο ποιοτικά μέσω της κατηγοριοποίησης των διαφόρων ειδών. Η δυσκολία αυτή έγκειται στο γεγονός ότι τα φερτά υλικά διακρίνονται ως προς το μέγεθος των κόκκων, το σχήμα, τη σωματιδιακή πυκνότητα και συνοχή, την ορυκτολογική τους σύσταση καθώς και την ταχύτητα καθίζησης των αιωρούμενων σωματιδίων (Μάρης, 2016). Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά της ευρύτερης λεκάνης απορροής επηρεάζουν σημαντικά το είδος και τη συνολική ποσότητα των φερτών υλών.

Ωστόσο, οι φερτές ύλες στην ποτάμια ροή βρίσκονται συνεχώς αναμεμειγμένες με το υγρό στοιχείο του νερού. Επομένως, στον προσδιορισμό της στερεοπαροχής υπεισέρχεται ταυτόχρονα ο παράγοντας της περιεκτικότητας των στερεών της ροής, δηλαδή απαιτείται η μελέτη διφασικής ροής, υγρού και στερεού στοιχείου. Παράλληλα, η εξέταση της ταχύτητας ροής (μέσω της εδαφικής κλίσης και της παροχής) και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του ρέματος ή ποταμού κρίνεται απαραίτητη, καθώς επηρεάζει τη δυνατότητα μεταφοράς των φερτών υλών.

Όλα τα παραπάνω στοιχεία συνηγορούν στο γεγονός ότι ο μηχανισμός κίνησης των ποτάμιων φερτών υλών αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό και πολύπλοκο πρόβλημα. Εξίσου δύσκολο έργο αποτελεί η οικονομική αποτίμηση των συνεπειών της εδαφικής διάβρωσης, δεδομένου ότι η επακόλουθη ελάττωση του στρωματικού πάχους της εύφορης γης που προκαλείται συνεπάγεται μείωση της εδαφικής γονιμότητας και αγροτικής παραγωγής (Παναγούλια et al, 2006). Επομένως, αναμένεται πτώση της αξίας της γης στις περιοχές

αυτές και ενδεχομένως ρύπανση στο σημείο απόθεσης, λόγω αγροχημικών και λιπασμάτων που περιέχουν τα μεταφερόμενα υλικά.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η διάκριση των φερτών υλικών, η οποία μπορεί να γίνει ως προς δύο παράγοντες (Εικόνα 3.12). Πρώτος παράγων είναι ο μηχανισμός μεταφοράς των φερτών υλών και ο δεύτερος αναφέρεται στην προέλευσή τους.



Σχήμα 3.1: Διάκριση του ολικού φορτίου των φερτών υλών

Ως προς τον τρόπο μεταφοράς, παρατηρούνται δύο τύποι φορτίων: το φορτίο σε αιώρηση (suspended load) και το φορτίο σε σύρση (bed load). Το φορτίο σε αιώρηση χρησιμοποιείται όταν τα στερεά υλικά μεταφέρονται με την τύρβη χωρίς καμία επαφή με την κοίτη για μεγάλο χρονικό διάστημα, πάνω από αυτή, ενώ το φορτίο σε σύρση, όταν τα στερεά υλικά μεταφέρονται σχεδόν σε απόλυτη επαφή με την κοίτη. Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας ροής (π.χ. τύρβη, ταχύτητα ροής κ.α.) καθορίζουν τον τρόπο μεταφοράς των φερτών υλών (Bagnold, 1966). Σύμφωνα με το κριτήριο εξίσωσης της συρτικής ταχύτητας με την ταχύτητα καθίζησης, θεωρείται ότι φερτά υλικά με μέγεθος μεγαλύτερο των 0.85 mm αποτελούν φορτίο σε σύρση (Παναγούλια και Ζαρρής, 2008).

Βάσει προέλευσης, οι φερτές ύλες διακρίνονται σε φορτίο υλικού κοίτης (bed sediment load) και φορτίο απόπλυσης ή χωμάτων (wash load). Το φορτίο κοίτης (ίλύς ή άργιλος) ενδέχεται να μετακινείται σε αιώρηση ή σε σύρση και προέρχεται κυρίως από τη διάβρωση της κοίτης του υδατορεύματος (Κουτσογιάννης και Ταρλά, 1987). Παράλληλα, αποτελεί τη μοναδική πηγή φερτών υλών σε ξηρές περιόδους. Αντίθετα, το φορτίο απόπλυσης προέρχεται συνήθως από τη διάβρωση της λεκάνης απορροής και παράγεται μόνο κατά τη διάρκεια πλημμυρικών φαινομένων. Πρόκειται, επομένως, κυρίως για υλικό

σε αιώρηση. Συγκρινόμενο με το υλικό κοίτης είναι περισσότερο λεπτόκοκκο, ενώ η μέτρησή του στο πεδίο είναι πιο εφικτή, αφού παρουσιάζει ομοιόμορφη κατανομή στη διατομή της κοίτης. Ιδιαίτερα στις Μεσογειακές χώρες, το φορτίο απόπλυσης αποτελεί το σημαντικότερο ποσοστό της συνολικής στερεοαπορροής της λεκάνης (Παναγούλια et al, 2006). Το άθροισμα του φορτίου κοίτης με σύρση και με αιώρηση αποτελούν το ολικό φορτίο. Ο υπολογισμός του ολικού φορτίου μπορεί να γίνει μέσω του προσδιορισμού της συνάρτησής του ή υπολογίζοντας ξεχωριστά τις δύο συνιστώσες του, δηλαδή το φορτίο με σύρση και αιώρηση, και αθροίζοντάς τες (Μάρης, 2016).

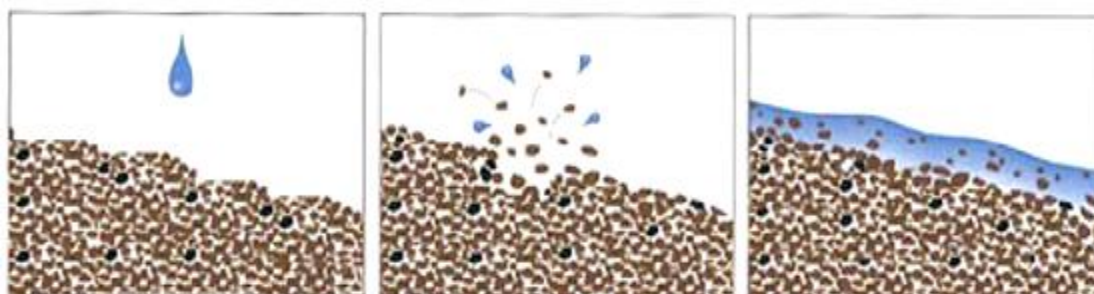
Η μελέτη της κίνησης των φερτών υλών αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία, δεδομένου ότι η στερεοαπορροή επηρεάζει τους υδάτινους αποδέκτες μέσω της πρόσχωσης αυτών σε ταμιευτήρες και της ποιότητας των υδάτων (π.χ. αύξηση της θολότητας των επιφανειακών υδάτων). Παράλληλα, οι χρήσεις γης μεταβάλλονται καθώς και οι κοίτες των ποταμών λόγω εκσκαφών, διαβρωτικών φαινομένων στις όχθες, αποθέσεων φερτών υλών κ.α. Επιπλέον, επηρεάζονται οι χώροι κατάντη φραγμάτων και ταμιευτήρων και υποβαθμίζεται το περιβάλλον από ρυπαντικές ουσίες που μεταφέρονται μέσω των φερτών υλών, οδηγώντας σε ανισορροπία των οικοσυστημάτων (Παναγούλια και Ζαρρής, 2008). Τέλος, τίθεται σε αμφισβήτηση η ασφάλεια των τροφίμων, δεδομένου ότι το υποβαθμισμένο έδαφος αποτελεί το μέσο στο οποίο καλλιεργείται το 99% των τροφίμων (ΕΛ.Γ.Ο.-So.S, 2011).

Όσον αφορά στην επιστημονική θεμελίωση του φαινομένου της διάβρωσης, τα μέσα του 19ου αιώνα αποτελούν ορόσημο. Την εποχή αυτή, διατυπώθηκαν οι διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή προβλημάτων διάβρωσης. Αξίζουν να αναφερθούν η θεωρία της τυρβώδους μεταφοράς που αναπτύχθηκε το 1925 από τον Prandl, το κριτήριο έναρξης της στερεοπαροχής του Shields (1936) και οι εξισώσεις στερεοπαροχής των Meyer-Peter και Muller το 1948 και του Einstein το 1950 (Παναγούλια, 2010). Η στατιστική θεώρηση αναφορικά με τη στερεοπαροχή μέσω των παραπάνω εξισώσεων ήταν εφικτή μετά την προσέγγιση του Horton το 1945 περί επιφανειακής απορροής και διάβρωσης. Σύμφωνα με αυτή, η απορροή δεν ξεκινά αμέσως μόλις οι πρώτες σταγόνες προσκρούσουν στο έδαφος, αλλά το νερό διεισδύει ανάλογα με τη δομή του εδάφους, τη φυτοκάλυψη της περιοχής, τους βιολογικούς παράγοντες καθώς και την υγρασία (Πασχαλίδης, 2015). Τέλος, το 1965 το Σώμα Μηχανικών του στρατού στις Η.Π.Α. ανέπτυξε το πρώτο πακέτο υδρολογικών εφαρμογών, στο οποίο αργότερα προστέθηκαν αλγόριθμοι για τον προσδιορισμό στερεοπαροχής (Παναγούλια, 2010).

### 3.2.3. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Αποτελεί κοινή διαπίστωση το γεγονός ότι οι ιδιαίτερες φυσικές, γεωλογικές, εδαφικές, γεωμορφολογικές, κλιματολογικές, σεισμικές και τοπογραφικές συνθήκες της χώρας ευνοούν την ανάπτυξη διαβρωτικών φαινομένων στα ελληνικά εδάφη (Αγοράκη, 2004). Τα χαμηλά ποσοστά οργανικών ουσιών τους, το ξηρό μεσογειακό κλίμα με τις ραγδαίες βροχοπτώσεις, η ύπαρξη ψαθυρών και έντονα ανισότροπων πετρωμάτων (φλύσχης, μολάσσα, πλειο-πλειστοκαινικά ιζήματα), η μειωμένη φυτοκάλυψη, οι απότομες κλίσεις και ο ορεινός χαρακτήρας αποτελούν βασικούς παράγοντες για την αύξηση του ρυθμού της διάβρωσης. Ωστόσο, πέρα από τους ανωτέρω λόγους υπάρχουν και ανθρωπογενείς παράγοντες που επιταχύνουν την εδαφική διάβρωση και οδηγούν σε σταδιακή υποβάθμιση των εδαφών, όπως οι εκχερσώσεις, οι πυρκαγιές, η υπερβόσκηση, η ανεξέλεγκτη υλοτόμηση και η όξινη βροχή.

Αναλυτικότερα, κινητήρια δύναμη της διάβρωσης αποτελεί η δύναμη της βροχόπτωσης, που προκύπτει από το άθροισμα της κινητικής ενέργειας μεμονωμένων σταγόνων βροχής. Συνιστά τον κύριο κλιματικό παράγοντα που επηρεάζει την ένταση των διαβρωτικών φαινομένων. Παράγοντα γένεσης των βροχοπτώσεων αποτελούν τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης, δηλαδή το ύψος, η συχνότητα και κυρίως η έντασή της. Η κινητική ενέργεια των σταγόνων αυξάνει με την ένταση της βροχής, ενώ, όταν η ένταση ξεπερνά την ταχύτητα διήθησης του νερού, ορισμένη ποσότητα νερού απορρέει, συμβάλλοντας στην εδαφική διάβρωση. Παράγοντα γένεσης της διάβρωσης αποτελεί και το ύψος βροχόπτωσης, ενώ η συχνότητα εντείνει τη διαβρωτική δράση. Επιπλέον, η εδαφική κατάσταση υγρασίας κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης έχει κάποια επίδραση στην απορροή, αφού σε κορεσμένα εδάφη η απορροή εμφανίζεται αυξημένη (Βιδάλη, 2013). Στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 3.12) φαίνεται σχηματικά ο μηχανισμός απόσπασης και μεταφοράς εδαφικών κόκκων που προκαλείται από τη δράση μιας σταγόνας βροχής.



**Εικόνα 3.12:** Απόσπαση και μεταφορά εδαφικού υλικού υπό την επίδραση βροχόπτωσης



Όσον αφορά στα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, η εδαφική κλίση, η καμπυλότητα αλλά και το μήκος κλιτύος εντείνουν την εξέλιξη των φαινομένων και τη μεταφορική ικανότητα των φερτών υλών, παρά την έναρξή του (Συλλαίος et al, 2007). Επιπλέον, η καμπυλότητα επηρεάζει τη διάβρωση, δεδομένου ότι εδάφη σε επιφάνειες που παρουσιάζουν κυρτότητα διαβρώνονται έντονα, λόγω της συμπαράσυρσης ποσοτήτων υλικών σε χαμηλότερα σημεία. Αντίθετα, σε εδάφη που βρίσκονται σε κοίλη επιφάνεια μπορούν είτε να προκληθούν φαινόμενα χαραδρωτής διάβρωσης εξαιτίας της υπερχειλίσης των βροχοπτώσεων είτε να ενισχυθεί η εδαφική γονιμότητα και η βιολογική δραστηριότητα σε ανώτερα τμήματα της πλαγιάς λόγω συσσώρευσης οργανικών ουσιών που προέρχονται από τις φερτές ύλες (Αγοράκη, 2004). Η δημιουργία αναβαθμίδων αποτελεί συνήθη τεχνική προστασίας μιας κεκλιμένης επιφάνειας από απώλειες, μειώνοντας το μήκος της διαδρομής.

Η φυτοκάλυψη και η βλάστηση συνιστούν προληπτικά και προστατευτικά στοιχεία της διάβρωσης των εδαφών. Το ριζικό σύστημα των φυτών σχηματίζει ένα είδος πλέγματος που συγκρατεί και συνενώνει εδαφικά σωματίδια, ενώ το φύλλωμα συγκρατεί σημαντικό ποσοστό της βροχής (Βιδάλη, 2013). Επιπροσθέτως, η προστατευτική τους δράση έναντι διάβρωσης έγκειται στην αύξηση της εδαφικής διηθητικής ικανότητας, μείωση της εδαφικής υγρασίας και, συνεπώς, μείωση της απορροής και, παράλληλα, στην ενίσχυση της εδαφικής τραχύτητας, που συνεπάγεται μείωση της υδατικής μεταφορικής ικανότητας (Μάρης, 2016). Με τον τρόπο αυτό, οι εδαφικές συνθήκες βελτιώνονται και εμποδίζεται η πρόσκρουση σταγόνων βροχής στο έδαφος. Ωστόσο, η βλάστηση δε συνεισφέρει πάντα στην παρεμπόδιση της εξέλιξης της διάβρωσης, καθώς ο βαθμός προστασίας των εδαφών από διαβρωτικά φαινόμενα εξαρτάται από το ποσοστό και το είδος της (Συλλαίος et al, 2007).

Επιπροσθέτως, η εδαφική δομή και σύσταση συνιστούν ευαίσθητους δείκτες ποιότητας του εδάφους και του κινδύνου που αντιμετωπίζει αυτό ως προς τη μείωση της συνοχής του και τη διάβρωση (Βιδάλη, 2013). Το αυξημένο βάθος του εδάφους και η ύπαρξη αδιαπέρατων, σκληρών και χονδρόκοκκων σχηματισμών, καθυστερούν ή παρεμποδίζουν την εκδήλωση της διάβρωσης. Επίσης, η ηλικία των γεωλογικών σχηματισμών επηρεάζει τη διάβρωση, καθώς νεότεροι σχηματισμοί και νεοτεκτονικές κινήσεις εμφανίζουν σημαντική διαβρωτική δράση, η οποία εντείνεται στα στάδια της ωριμότητας και του γήρατος (Αγοράκη, 2004).

Παράλληλα, η διηθητικότητα, η διαπερατότητα, η σταθερότητα των συσσωμάτων και η υδατοϊκανότητα αποτελούν ιδιότητες των εδαφών που σχετίζονται με την έκταση των

εδαφικών απωλειών. Η διηθητικότητα εκφράζει την ποσότητα νερού που μπορεί να περάσει διά μέσου των εδαφικών πόρων και μειώνεται όταν σταγόνες βροχής προσκρούουν στο έδαφος. Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων (ανάπτυξη και είδος εδαφικής δομής) προσφέρει σημαντική αντοχή στα εδάφη έναντι της διάβρωσης, διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση υψηλών τιμών διηθητικότητας και αυξάνεται με την υψηλή περιεκτικότητα των εδαφών σε οργανικές ουσίες (Αγοράκη, 2004). Η διαπερατότητα εκφράζει την ταχύτητα κίνησης του νερού μέσα σε μια ορισμένη εδαφική μάζα και καθορίζεται βάσει του λιγότερο διαπερατού ορίζοντα της εδαφοτομής (Συλλαίος et al, 2007). Λόγω της φύσης της διαπερατότητας, δεδομένου ότι αναφέρεται σε σχετικά βαθιά εδαφικά στρώματα, το εν λόγω μέγεθος παρουσιάζει μικρή μεταβλητότητα.

Η ανθρώπινη δραστηριότητα άλλοτε ευνοεί τη διάβρωση και άλλοτε την αναστέλλει. Παρεμπόδιση της διάβρωσης επιτυγχάνεται μέσω αναχλοάσεων, αναδασώσεων και κατασκευής στραγγιστικών και προστατευτικών έργων (Αγοράκη, 2004). Αντίθετα, θετικά στην εκδήλωση διάβρωσης επιδρούν οι στενώσεις και οι επιχωματώσεις κοιτών, η «τσιμεντοποίηση» σημαντικών τμημάτων των λεκανών απορροής και η απόθεση μπαζών σε θέσεις που παρασύρονται από τις πλημμυρικές παροχές (Συλλαίος et al, 2007). Παράλληλα, λανθασμένες πρακτικές διαχείρισης του εδάφους, όπως η εξαντλητική βόσκηση, η καύση φυτικών υπολειμμάτων, οι πυρκαγιές, η μετατροπή των δασικών εκτάσεων σε γεωργικές, η περιορισμένη χρήση κοπριάς και άλλων οργανικών λιπασμάτων και η μηχανική κατεργασία κατά τη διεύθυνση της μέγιστης επιφανειακής κλίσης επιταχύνουν την ανάπτυξη φαινομένων διάβρωσης. Επιπλέον, η υποβάθμιση των δασών και δασικών εκτάσεων αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες εντατικοποίησης της διάβρωσης, που οφείλεται στις εκχερσώσεις, στη ληστρική υλοτομία, στη γεωργική χρήση και στους λατομικούς χώρους.

Ως αποτέλεσμα, η επιφανειακή φυλλοειδής διάβρωση, η αυλακοειδής επιφανειακή διάβρωση και η χαραδρώδης διάβρωση αποτελούν το 26.5% της συνολικής επιφάνειας της χώρας μας, καταλαμβάνοντας έκταση 35 εκατομμυρίων στρεμμάτων (Ζωσιμά, 2010). Το υδρογραφικό δίκτυο αποτελεί χώρο εναπόθεσης ιζημάτων, με τους μικρούς ορεινούς χειμάρρους να αντιμετωπίζουν τα μεγαλύτερα προβλήματα, λόγω της χειμαρρώδους διαίτατός τους. Η εισροή φερτών υλών στους ταμιευτήρες, εξαιτίας μειωμένων ταχυτήτων ροής, οδηγεί σε μέση ετήσια απώλεια της χωρητικότητάς τους παγκοσμίως περίπου κατά 1% (Παναγούλια, 2010). Συνεπώς, η ανάγκη ελέγχου της πρόσχωσης των φερτών υλών σε ταμιευτήρες προβάλλει επιτακτική για τον ορθό σχεδιασμό των υδραυλικών έργων.



### 3.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ

Εξαιτίας της έντονης χωρικής μεταβλητότητας και ετερογένειας των παραγόντων που επιδρούν στη στερεοπαροχή (π.χ. βροχόπτωση, γεωμορφολογία), η αβεβαιότητα των επιτόπιων μετρήσεων κρίνεται σημαντική, δεδομένου ότι οι μετρήσεις είναι σημειακές. Για παράδειγμα, δε συγκεντρώνονται οι απαραίτητες πληροφορίες για την κοκκομετρική διαβάθμιση, την καθ' ύψος κατανομή του φορτίου, την επιμήκη κλίση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και τη θερμοκρασία των υδάτων, παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στη στερεοπαροχή με ποικίλους τρόπους (Κουτσογιάννης και Ταρλά, 1987). Ορισμένες αποσπασματικές μετρήσεις του αιωρούμενου στερεοφορτίου μέσω δειγματοληπτών έχουν υλοποιηθεί σε ελληνικά ποτάμια προκειμένου να υπολογιστεί ο νεκρός όγκος, στοιχείο απαραίτητο για το σχεδιασμό ενός υδραυλικού έργου. Ωστόσο, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε πρώιμα στάδια της κατασκευής του έργου, χωρίς να ελέγχονται αποκλίσεις στη μετέπειτα ζωή του. Όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα την ανυπαρξία μιας ολοκληρωμένης χωροχρονικής εκτίμησης της στερεοπαροχής και, συνεπώς, του πραγματικού ρυθμού πρόσχωσης φερτών υλών σε έναν ταμιευτήρα. Το 1985 η Δ.Ε.Η., η οποία εκτελούσε στερεοϋδρομετρήσεις (ταυτόχρονες μετρήσεις παροχής και στερεοπαροχής) του αιωρούμενου φορτίου κυρίως σε περιπτώσεις κατασκευής υδροηλεκτρικών έργων, σταμάτησε τις μετρήσεις. Οι θέσεις όπου έχουν υλοποιηθεί σχετικές μετρήσεις φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 3.13).



**Εικόνα 3.13:** Θέσεις μέτρησης της στερεοπαροχής στον ελλαδικό χώρο

(Πηγή: Παναγούλια και Ζαρρής, 2008)

Έκτοτε, έχουν υλοποιηθεί κάποιες σποραδικές μετρήσεις του όγκου των φερτών υλών στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων του Εθνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών (Ε.Κ.Θ.Ε), του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.) και του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.) (Παναγούλια και Ζαρρής, 2008). Το αποτέλεσμα που προκύπτει από τέτοιες μετρήσεις είναι οι καμπύλες παροχής - στερεοπαροχής, οι οποίες συνεπάγονται την εκτίμηση της μέσης ημερήσιας στερεοπαροχής. Ωστόσο, η αναξιοπιστία της μεθόδου αυτής, παρά το χαμηλό σχετικά κόστος της, την καθιστά ανακριβή και η χρήση της περιορίζεται κυρίως σε μικρές λεκάνες απορροής. Παράλληλα, η υιοθέτηση εξειδικευμένων οργάνων για την αυτόματη μέτρηση του φορτίου των φερτών υλών αποτελεί συνήθη πρακτική διεθνώς, το κόστος των οποίων, όμως, καθιστά απαγορευτική τη χρήση τους στην Ελλάδα (Λυκούδη και Ζαρρής, 2006). Έμμεσες μετρήσεις στερεοαποροής

μπορούν να προκύψουν από μετρήσεις της μάζας των φερτών υλών των ταμιευτήρων καθώς επίσης από μέτρηση εναλλακτικών μεταβλητών, όπως η θολότητα, η μέτρηση χαρακτηριστικών ουσιών κ.α.

Όπως έχει προαναφερθεί, η εκτίμηση του στεροφορτίου αποτελεί πολυσύνθετο πρόβλημα, λόγω της διφασικής φύσης του προβλήματος και της δυσκολίας προσδιορισμού των φερτών υλών σε αιώρηση και κυρίως σε σύρση (Βαχαβιώλος, 2014). Το φορτίο σε αιώρηση συνιστά περίπου τα δύο τρίτα του συνολικού στερεοφορτίου στα ελληνικά ποτάμια (στα ορεινά ποτάμια το αντίστοιχο κλάσμα είναι μικρότερο), ενώ ο υπολογισμός του γίνεται με δειγματοληψία και εργαστηριακή ανάλυση (Γουρδουμπάς et al, 2007). Για την εκτίμηση του φορτίου σε σύρση χρησιμοποιούνται διεθνώς τεχνικές “παγίδευσης” των συρόμενων και σε επαφή με την κοίτη φερτών υλών και ζύγιση αυτών. Ωστόσο, για την υλοποίηση της διαδικασίας αυτής απαιτούνται ειδικές κατασκευές και συστηματικοί έλεγχοι, καθώς πιθανά πλημμυρικά φαινόμενα και η προγενέστερη κατάσταση της λεκάνης απορροής επηρεάζουν το φορτίο πυθμένα, γεγονός που καθιστά τη συνολική διαδικασία ιδιαίτερα χρονοβόρα και δαπανηρή (Βαχαβιώλος, 2014).

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω εγγενείς δυσκολίες ακριβούς μέτρησης του μεγέθους της στερεοπαροχής, οι επιστήμονες ανέπτυξαν συγκεκριμένα μοντέλα εκτίμησης του μεγέθους αυτής μέσα από τη μοντελοποίηση της διαδικασίας της μεταφοράς και απόθεσης των φερτών υλών. Αξιολογώντας τον τρόπο με τον οποίο οι παράγοντες που αναλύθηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο επηρεάζουν τη διάβρωση, λήφθηκαν υπόψη για τη δημιουργία των υδρολογικών μοντέλων, διαφορετικού επιπέδου ακριβείας και πολυπλοκότητας. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν εν δυνάμει χρήσιμα εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιούνται από την πολιτεία για τη διατύπωση προτάσεων διαχείρισης του στερεοφορτίου και για την πρόβλεψη των φαινομένων που σχετίζονται με εδαφικές απώλειες. Στόχο τους αποτελεί η συμβολή στις ανάλογες διαδικασίες λήψης αποφάσεων, αλλά και στην προώθηση της επιστημονικής κατανόησης των διαδικασιών μεταφοράς και απόθεσης εδαφικών τεμαχιδίων σε άλλες περιοχές.

Σήμερα υπάρχουν διαθέσιμα διάφορα μοντέλα τα οποία οφείλουν να είναι συμβατά με τις ιδιαίτερες εδαφοβιοκλιματικές συνθήκες της κάθε περιοχής που μελετάται. Τα μοντέλα αυτά (RUSLE, RMMF, Gavrilovic) έχουν τη δυνατότητα προσομοίωσης λαμβάνοντας υπόψη υδρολογικές και φυσιογραφικές παραμέτρους, καθώς και τον ετήσιο ρυθμό διάβρωσης των λεκανών απορροής. Παράλληλα, η εφαρμογή λογισμικών διαχείρισης

της γεωγραφικής πληροφορίας και τηλεπισκόπησης σε συνδυασμό με τα μοντέλα αυτά βελτιώνει την ολική διαδικασία μοντελοποίησης της διάβρωσης. Στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 3.2) απεικονίζονται τα βασικά είδη μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της στερεοαπορροής και την προσομοίωση των σχετικών διεργασιών.



**Σχήμα 3.2:** Κατηγορίες μοντέλων εκτίμησης των εδαφικών απωλειών

Τα εμπειρικά μοντέλα βασίζονται σε αναλύσεις των μετρήσεων στερεοπαροχής, τα φυσικώς θεμελιωμένα μοντέλα στηρίζονται στην επίλυση θεμελιωδών φυσικών εξισώσεων (π.χ. παροχής - στερεοπαροχής), ενώ τα στοχαστικά αποτελούν συνδυασμό των δύο. Παρά τις μικρές διαφορές μεταξύ των τριών βασικών τύπων, η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου καθορίζεται βάσει του επιδιωκόμενου στόχου, των διαθέσιμων δεδομένων, του απαιτούμενου χρόνου και του κόστους.

### **3.3.1. Εμπειρικά μοντέλα (empirical models)**

Τα εμπειρικά προσομοιώματα είναι στατιστικής φύσης και βασίζονται αρχικά στην παρατήρηση, την επαγωγική λογική. Είναι απλούστερα από τα υπόλοιπα είδη μοντέλων, απαιτούν την ύπαρξη υπαίθριων μετρήσεων σε μια συγκεκριμένη περιοχή και εξάγουν ως συμπεράσματα εξισώσεις με στατιστικές μεθόδους, οι οποίες θεωρείται ότι ισχύουν και για άλλες θέσεις στην ίδια περιοχή αναφοράς. Χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση του φορτίου των φερτών υλών σε υδρογραφικά δίκτυα, καθώς αποτελούν χρήσιμα πρώτα εργαλεία για τον προσδιορισμό των πηγών διαβρωμένου εδαφικού υλικού (Ξανθάκης, 2011). Παράλληλα, χρησιμοποιούνται σε περίπτωση έλλειψης μετρήσεων ή αδυναμίας

εφαρμογής άλλης μεθόδου, εφόσον η περιοχή μελέτης παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά με την περιοχή αναφοράς των σχέσεων.

Ωστόσο, τα εμπειρικά μοντέλα αμφισβητούνται συχνά ως προς τη διατύπωση μη ρεαλιστικών υποθέσεων, κυρίως λόγω των ανεπαρκών διαθέσιμων μετεωρολογικών δεδομένων και της χωρικής ετερογένειας των εδαφικών πόρων. Ως αποτέλεσμα, αγνοείται η ετερογένεια των χαρακτηριστικών μιας λεκάνης απορροής (π.χ. είδος βροχοπτώσεων και εδάφους), γεγονός που ενδέχεται να περιορίζει την ανάπτυξη τέτοιου είδους σύνθετων μοντέλων (Ξανθάκης, 2011).

Τα πιο διαδεδομένα εμπειρικά μοντέλα εδαφικής διάβρωσης αναλύονται στη συνέχεια. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας και παραλλαγές αυτής, η μέθοδος Gavrilovic, το μοντέλο Morgan/Morgan/Finney και η μέθοδος Kronfellner–Kraus.

#### 3.3.1.1. Παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας (Universal Soil Loss Equation-USLE)

Η USLE αποτελεί το πλέον αποτελεσματικότερο και ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο και ολοκληρωμένο τεχνολογικό εργαλείο εδαφικής διάβρωσης, στην περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις (Μάρης, 2016). Εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από την Υπηρεσία Διατήρησης Εδαφών και την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών, αξιοποιώντας μια ευρεία βάση δεδομένων διάβρωσης στις Η.Π.Α. (Μπαθρέλλος et al, 2010). Η πρώτη δημοσίευσή της έλαβε χώρα το 1965 σε εγχειρίδιο του υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ, ενώ ως πλήρως μηχανογραφημένη έκδοση δημοσιεύτηκε αρχικά το 1991.

Η Παγκόσμια Εξίσωση Απώλειας Εδάφους προσδιορίζει τη μακροπρόθεσμη μέση ετήσια απώλεια εδάφους και βασίζεται σε εμπειρικές συσχετίσεις για την εκτίμηση διαφόρων παραγόντων σχετικών με τη λεκάνη απορροής που μελετάται. Οι παράγοντες αυτοί εκφράζουν την εγγενή ευαισθησία του εδάφους απέναντι στη διάβρωση μέσα από τις ιδιαίτερες συνθήκες μιας περιοχής και αναφέρονται στη διαβρωτικότητα της βροχόπτωσης, τη διαβρωσιμότητα του εδάφους, τη μορφολογία του εδάφους, τη φυτοκάλυψη του εδάφους και τις διάφορες πρακτικές διαχείρισης των εδαφών κατά της διάβρωσης. Οι παράγοντες αυτοί αναλύονται εκτενώς στο υποκεφάλαιο 5.1.

Η χρήση της εν λόγω μεθόδου είναι σχετικά απλή και γρήγορη, διότι οι σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές ποικίλουν και η δομή της είναι απλή. Παράλληλα, ενδείκνυται για περιοχές όπου οι συντελεστές της εξίσωσης μπορούν να προσδιοριστούν και σε μικρές

λεκάνες απορροής με σχετικά απλές χρήσεις γης. Φυσικά, η κατάτμηση μιας λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες με παρόμοια χαρακτηριστικά ενισχύει τη χρήση της USLE μέσα από την εφαρμογή της στις επιμέρους υπολεκάνες.

Αρχικά, η USLE αναπτύχθηκε αποκλειστικά για την εκτίμηση της εδαφικής απώλειας πολυετούς χρονικής κλίμακας, ορισμένων εδαφικών κλίσεων και καλλιεργήσιμων εκτάσεων και βοσκοτόπων. Σύμφωνα με τους θεμελιωτές της, Wischmeier and Smith (1978), η μέθοδος USLE προσφέρει τη δυνατότητα επιλογής διαχειριστικών πρακτικών που σχετίζονται με εδαφικές απώλειες μιας ορισμένης έκτασης, με το είδος των καλλιεργειών και τις μέγιστες επιτρεπόμενες επιμήκεις κλίσεις.

Ωστόσο, η μεγαλύτερη κριτική εναντίον της USLE έγκειται στην αναποτελεσματικότητά της σε εφαρμογές της πέραν των συνθηκών για τις οποίες αναπτύχθηκε, καθώς η χρήση της σε νέα περιβάλλοντα απαιτεί κόστος και χρόνο για την προσαρμογή και δημιουργία της απαιτούμενης βάσης δεδομένων (Συλλαίος et al, 2007). Για παράδειγμα, δεν ενδείκνυται για την εκτίμηση της εδαφικής απώλειας που λαμβάνει χώρα σε χείμαρρους και ποτάμια, καθώς και για απώλειες λόγω μιας ορισμένης καταρρακτώδους βροχής. Επιπλέον, η USLE εκτιμά τις ποσότητες εδαφικών απωλειών που προκύπτουν λόγω επιφανειακής διάβρωσης, χωρίς να λαμβάνει υπόψη άλλες μορφές διάβρωσης (π.χ. χαραδρωτική διάβρωση) (Πασχαλίδης, 2015).

Η ανάγκη αντιμετώπισης των αδυναμιών της Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας οδήγησε σε προσπάθειες προσαρμογής και βελτίωσης του μοντέλου για την καλύτερη και πιο αξιόπιστη εκτίμηση της εδαφικής απώλειας. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν η Τροποποιημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (Modified Universal Soil Loss Equation - MUSLE), η Αναθεωρημένη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE) και η USLE-M (empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration) (1998).

Η RUSLE αναπτύχθηκε το 1985 και διατηρεί τη βασική μορφή της USLE, περιλαμβάνοντας τροποποιήσεις στην εκτίμηση των παραγόντων που συνθέτουν το συνολικό όγκο εδαφικής απώλειας. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό εδαφικών απωλειών που προκαλείται λόγω επιφανειακής και αυλακωτής διάβρωσης (Βαχαβιώλος, 2014). Ειδικότερα, λαμβάνει υπόψη παράγοντες διαβρωσιμότητας συναρτήσεως του χρόνου, τιμές για ένα μεγαλύτερο εύρος χρήσεων γης, εδαφικών κλίσεων και κλιματικών συνθηκών, ενισχύοντας την ευελιξία του μοντέλου. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου έναντι της USLE έγκειται στην εκτίμηση του συντελεστή φυτοκάλυψης C από δεδομένα που

αφορούν τον τύπο, τη ζωτικότητα της βλάστησης και τις πρακτικές καλλιέργειας (Merritt et al, 2003). Η επιλογή των κατάλληλων και περισσότερο αντιπροσωπευτικών κάθε φορά παραμέτρων διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην ορθή χρήση του μοντέλου και, συνεπώς, στην εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων για μια λεκάνη απορροής.

Προβλήματα κατά της εφαρμογή της μεθόδου RUSLE, αλλά και της USLE, προκύπτουν όταν στόχο αποτελεί ο προσδιορισμός του στερεοφορτίου που μεταφέρεται μέσω του υδρογραφικού δικτύου εκτός της λεκάνης απορροής (Βαχαβιάλος, 2014). Για την αντιμετώπιση αυτών, αναπτύχθηκε ο συντελεστής στερεοαπορροής, ο οποίος, αφού πολλαπλασιαστεί με το μέγεθος της εδαφικής διάβρωσης, προκύπτει η ζητούμενη στερεοαποροή. Οι νεότερες εκδόσεις του μοντέλου RUSLE στρέφονται στην επέκταση της μεθόδου με σκοπό να καταστεί δυνατός ο έλεγχος της απόθεσης φερτών υλών μέσω της εκτίμησης της στερεοαπορροής.

Η μέθοδος MUSLE συνιστά εργαλείο εκτίμησης της εδαφικής απώλειας μικρών ορεινών λεκανών απορροής (έως 26 km<sup>2</sup>) σε περίπτωση πλημμυρικού φαινομένου, χρησιμοποιώντας όρους απορροής. Η χρήση της ενδείκνυται για λεκάνες απορροής χειμαρρικών υδατορευμάτων, ενώ θεωρείται ακατάλληλη για περιοχές με έντονη δασοκάλυψη, καθώς δε σχηματίζεται υδαταποροή λόγω της αργής απορροής των υδάτων και μέσω των ριζών στο έδαφος (Βιδάλη, 2013).

Οι τροποποιήσεις της μεθόδου MUSLE περιλαμβάνουν την αντικατάσταση του συντελεστή διαβρωτικότητας R με τον όγκο της επιφανειακής απορροής λόγω βροχόπτωσης και τη μέγιστη επιφανειακή απορροή (Παπαρρίζος και Χατζημηλιάδης, 2010). Με άλλα λόγια, στην παρούσα μέθοδο ο παράγοντας της κινητικής ενέργειας της βροχόπτωσης που χρησιμοποιούν οι RUSLE και USLE έχει αντικατασταθεί από τον παράγοντα της επιφανειακής απορροής. Με τον τρόπο αυτό, βελτιώνεται η εκτίμηση της στερεοαπορροής, αφού η επιφανειακή απορροή περιέχει την ενέργεια της βροχόπτωσης καθώς και προγενέστερες συνθήκες υγρασίας (Βιδάλη, 2013).

Τέλος, η USLE - M αποτελεί μια πολύπλοκη αναπαράσταση της διαδικασίας μεταφοράς και απόθεσης φερτών υλών, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της απορροής σε διαβρωτικά φαινόμενα (Merritt et al, 2003). Η επίδραση αυτή υποδηλώνεται μέσω ενός πρόσθετου όρου στο συντελεστή διαβρωτικότητας R, ο οποίος περιλαμβάνει τη μέγιστη ένταση της βροχόπτωσης για βροχή διάρκειας τριάντα λεπτών και του συντελεστή απορροής (Kinnell, 2001). Οι μέθοδοι της USLE και USLE - M ταυτίζονται, όταν ο συντελεστής απορροής λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα, δηλαδή στην ιδανική περίπτωση που

η ποσότητα κατείσδυσης της βροχόπτωσης λαμβάνει μηδενική τιμή (Kinnell και Risse, 1998). Φυσικά, οι τιμές των υπόλοιπων συντελεστών της εξίσωσης USLE απαιτούν επανεκτίμηση, καθώς διακυμάνσεις στις τιμές διαφόρων παραγόντων (όπως το έδαφος και η διαχείριση των καλλιεργειών αναφορικά με την απορροή) αντιμετωπίζονται ξεχωριστά από τις επιπτώσεις συγκέντρωσης των φερτών υλών.

Όσον αφορά παραλλαγές της USLE, χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το μοντέλο SEDD (SEdiment Delivery Distributed model) που αναπτύχθηκε περίπου 15 χρόνια πριν. Σύμφωνα με αυτό, η τεχνική του Monte Carlo χρησιμοποιείται προκειμένου να ελεγχθεί η αβεβαιότητα των επιμέρους παραμέτρων που εμπεριέχονται στον προσδιορισμό της στερεοπαροχής (Βιδάλη, 2013). Στην USLE βασίζεται και το μοντέλο LASCAM (Large Scale Catchment Model) που ενσωματώνει διαδικασίες υπαρχόντων προσδιοριστικών μοντέλων και περιλαμβάνει παραμέτρους που απαιτούν βαθμονόμηση μέσω επιτόπιων μετρήσεων.

Πέρα από τα προαναφερθέντα μοντέλα, η πλειονότητα των μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της στερεοαπορροής και θα περιγραφούν στη συνέχεια (όπως τα CREAM, WEPP, EUROSEM κ.α.) βασίζονται στην USLE (Συλλαίος et al, 2007). Το γεγονός αυτό δικαιολογεί τη σημαντικότητα του μοντέλου και την ευρεία εφαρμογή αυτού ή παραλλαγών του σε πληθώρα χωρών.

### 3.3.1.2. Εμπειρικές σχέσεις παροχής – στερεοπαροχής

Οι καμπύλες παροχής - στερεοπαροχής (sediment discharge rating curves) αποτελούν βασικό τύπο εμπειρικού μοντέλου στερεοαπορροής. Προκύπτουν από στερεοϋδρομετρήσεις, δηλαδή ταυτόχρονες μετρήσεις παροχής και στερεοπαροχής σε μια καθορισμένη διατομή υδατορεύματος, δεδομένου ότι τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτώνται από παρόμοιους παράγοντες (βροχόπτωση, γεωλογία, φυτοκάλυψη) (Ταρλά, 1984). Επομένως, προκύπτει μια γραφική ή αναλυτική έκφραση μεταξύ ετήσιων ποσοτήτων απορροής και φερτών υλών από ταυτόχρονες μετρήσεις της παροχής και στερεοπαροχής σε μια ορισμένη διατομή. Η προσαρμογή της καμπύλης γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, ενώ η συσχέτιση παροχής – στερεοπαροχής πραγματοποιείται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$Q_s = a \cdot Q^b, \quad [3.1]$$

όπου

$Q_s$ : στερεοπαροχή (ολική ή αιωρούμενου φορτίου) (kg/s),



Q: παροχή ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),

a, b: σταθερές

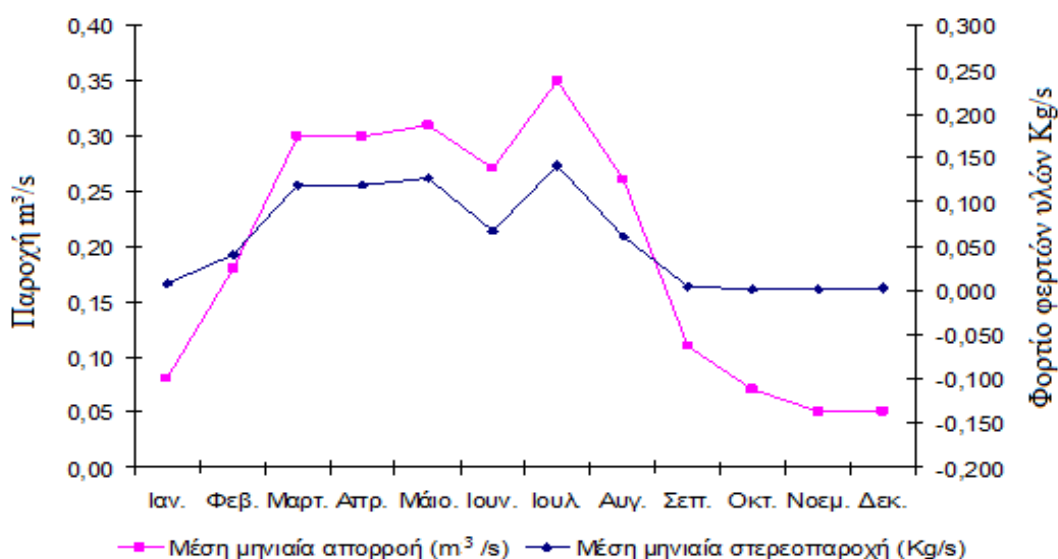
Όσον αφορά στις τιμές των σταθερών, η παράμετρος a υποδηλώνει τη διαβρωσιμότητα της λεκάνης απορροής, ενώ ο συντελεστής b υποδηλώνει τη διαβρωτική ικανότητα του υδατορεύματος. Σύμφωνα με σχετική έρευνα στη βορειοδυτική Ελλάδα (Μιμίκου, 1982), οι τιμές των σταθερών εξαρτώνται από τη μέση ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης απορροής, την έκτασή της και από τοπογραφικές παραμέτρους (όπως η υψομετρική πτώση). Ωστόσο, η μονιμότητα της σχέσης παροχής - στερεοπαροχής στο χρόνο που υπονοείται μέσω των σταθερών συντελεστών αποτελούν βασικό μειονέκτημα της μεθόδου (Λυκούδη και Ζαρρής, 2006). Παράγοντες που μεταβάλλουν τη μονιμότητα της σχέσης αυτής είναι η διακύμανση της απόσπασης φερτών υλών κατά τη διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων, η εποχιακή διακύμανση των στερεοπαροχών, εκτεταμένες μεταβολές στις χρήσεις γης κ.α.

Δεδομένου ότι οι καμπύλες παροχής – στερεοπαροχής στηρίζονται σε πρωτογενείς μετρήσεις και όχι απλά σε παραδοχές μοντέλων, η συνεισφορά τους στην εξαγωγή εμπειρικών σχέσεων εκτίμησης της στερεοαπορροής είναι εμφανής. Ωστόσο, οι μετρήσεις περιλαμβάνουν μόνο τα αιωρούμενα φερτά υλικά και το υπόλοιπο τμήμα των φερτών σε σύρση συνυπολογίζεται με κατάλληλες προσαυξήσεις. Όπως έχει προαναφερθεί, οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες για ορεινούς χειμάρρους, ενώ για μεγάλα ελληνικά ποτάμια τα φερτά σε σύρση συνήθως δεν ξεπερνούν το 30%. Επομένως, οι καμπύλες αναφέρονται είτε στα αιωρούμενα φερτά υλικά είτε στο συνολικό όγκο φερτών υλών, αφού έχουν προηγηθεί οι απαιτούμενες προσαυξήσεις.

Παράλληλα, η πολυπλοκότητα των φαινομένων προσδίδει σημαντική μεταβλητότητα αναφορικά με τη συσχέτιση των δύο μεγεθών. Το γεγονός αυτό αφορά κυρίως υδραυλικούς και υδρολογικούς κυρίως παράγοντες, οι οποίοι αγνοούνται, με αποτέλεσμα την αύξηση της διασποράς και των αποκλίσεων στις τιμές της στερεοπαροχής (Ζαρρής, 2008). Έτσι, παρά την καλή συσχέτιση παροχής – στερεοπαροχής σε μια διατομή υδατορεύματος, λόγω υδραυλικών και υδρολογικών παραμέτρων που αντιπροσωπεύει η παροχή, οι τιμές της στερεοπαροχής παρουσιάζουν αποκλίσεις μεγαλύτερες της μιας τάξης μεγέθους (έως και τρεις τάξεις μεγέθους) για την ίδια τιμή παροχής (Μαμάσης, 2009).

Επιπροσθέτως, εποχιακές καμπύλες μεταφοράς φερτών υλών έχουν αποδειχθεί καλύτερες και πιο ακριβείς προσεγγίσεις για την εκτίμηση της στερεοπαροχής (Ταρλά, 1984). Στις καμπύλες αυτές η σχέση παροχής – στερεοπαροχής διαφοροποιείται για κάθε

εποχή ή για δύο υδρολογικές εποχές του έτους (υγρή και ξηρή περίοδος). Στην Ελλάδα, λόγω ανεπαρκών πρωτογενών δεδομένων ανά εποχή, ο διαχωρισμός γίνεται ως προς τις δύο υδρολογικές εποχές του έτους, δηλαδή από Δεκέμβριο μέχρι Μάιο (υγρή περίοδος) και από Ιούνιο μέχρι Νοέμβριο (ξηρή περίοδος). Φυσικά, οι μεταβατικοί μήνες ενδέχεται να μεταβάλλονται ανάλογα με τις μετρημένες τιμές ημερήσιων παροχών. Η βελτίωση των αποτελεσμάτων έγκειται στο γεγονός ότι λαμβάνονται έμμεσα υπόψη παράγοντες όπως η θερμοκρασία του νερού, οι διακυμάνσεις της φυτοκάλυψης καθώς και των χαρακτηριστικών των υδρολογικών παραμέτρων (π.χ. μορφή καταγίδων) κ.α. (Μαμάσης, 2009). Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια καμπύλη υγρής ξηρής περιόδου (Εικόνα 3.14).



**Εικόνα 3.14:** Καμπύλη παροχής – στερεοπαροχής δύο υδρολογικών εποχών

Αξίζει να σημειωθεί πως για την ίδια παροχή, οι αντίστοιχες στερεοπαροχές κατά την ξηρή περίοδο εμφανίζονται αυξημένες. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται ενδεχομένως από την ένταση των φυσικών, χημικών και άλλων διεργασιών (ραγδαίες βροχοπτώσεις κ.α.) κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου που συμβάλλει στην αυξημένη διαθεσιμότητα φερτών υλών και την έντονη διαβρωτική δράση κατά την ξηρή περίοδο. Το μέσο σφάλμα εκτίμησης της στερεοπαροχής για τις μέγιστες μετρημένες παροχές της υγρής και της ξηρής περιόδου ανέρχεται περίπου στο 30% και 50%, αντίστοιχα. Τα σφάλματα αυτά οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι η βαθμονόμηση των συντελεστών γίνεται βάσει της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής, αγνοώντας έντονα πλημμυρικά φαινόμενα, κατά τη διάρκεια των οποίων μεταφέρεται η πλειονότητα των φερτών υλών αλλά δεν εκτελούνται στερεοϋδρομετρήσεις. Ως αποτέλεσμα, η πραγματική στερεοπαροχή υποεκτιμάται ή

υπερεκτιμάται, στις περιπτώσεις που εκτελούνται στερεοϋδρομετρήσεις μόνο όταν το φορτίο απόπλυσης είναι εμφανές, όπως γίνεται στην Ελλάδα. Επιπλέον, το μέγεθος της λεκάνης απορροής επηρεάζει την ορθότητα των αποτελεσμάτων, καθώς σε μεγάλες λεκάνες απορροής τα αποτελέσματα προσεγγίζουν περισσότερο τα πραγματικά (Λυκούδη και Ζαρρής, 2006).

Τέλος, παρόμοιες συσχετίσεις έχουν υλοποιηθεί για την εκτίμηση της στερεοαπορροής σε συνδυασμό με υδρολογικούς (βροχόπτωση, απορροή) και άλλες παραμέτρους (π.χ. γεωλογικές) (Βαχαβιάλος, 2014). Για παράδειγμα, η εκτίμηση της στερεοαπορροής από τη βροχόπτωση εφαρμόζεται σε μικρές λεκάνες απορροής και επιτυγχάνεται μέσω του συντελεστή στερεοαπορροής, ο οποίος εξαρτάται από φυσικά χαρακτηριστικά (μήκος υδατορεύματος, ανάγλυφο κ.α.) και από χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής.

### 3.3.1.3. Μοντέλο Gavrilovic

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα παραμετρικό κατανεμημένο μοντέλο που προσδιορίζει τη μέση ετήσια παραγωγή φερτών υλών σε ορεινές λεκάνες απορροής χειμαρρικών υδατορευμάτων. Αναπτύχθηκε αρχικά με εφαρμογή σε υπολεκάνη του Αξιού ποταμού στην Π.Γ.Δ.Μ. και έκτοτε χρησιμοποιείται ευρέως κυρίως σε ορεινές υδρολογικές λεκάνες μεγάλης κλίμακας της Βαλκανικής χερσονήσου, των Ιταλικών, Σουηδικών και Ελβετικών Άλπεων στο πλαίσιο της δασικής διαχείρισης και προστασίας από τη διάβρωση (Βαχαβιάλος, 2014).

Βασική αρχή της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι οι φερτές ύλες που μεταφέρονται από χειμαρρικά ρέματα σχετίζονται με τον όγκο των φερτών υλών που παράγονται από την εδαφική διάβρωση και με τον όγκο που κατακρατείται στον υδροκρίτη. Παράλληλα, εμπειρικοί συντελεστές (διαβρωσιμότητας, διάβρωσης και προστασίας εδάφους) και φυσικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής (βροχόπτωση, θερμοκρασία) και της λεκάνης απορροής (εμβαδόν, κλίση) χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του όγκου των φερτών υλών (Παπαρρίζος et al, 2012).

#### 3.3.1.4. Λοιπά διαθέσιμα εμπειρικά μοντέλα

Το μοντέλο Morgan/Morgan/Finney (MMF) εκτιμά την ετήσια εδαφική απώλεια μικρών κεκλιμένων αγροτεμαχίων. Σύμφωνα με αυτό, η απορροή είναι συνάρτηση της βροχόπτωσης και της εδαφικής υγρασίας κάτω από συνθήκες φυσικής βλάστησης, ενώ συγκρίνοντας τη ροή του ύδατος με την ικανότητα μεταφοράς εδαφικού υλικού, η μικρότερη τιμή θεωρείται η εδαφική απώλεια του αγροτεμαχίου (Ξανθάκης, 2011). Τροποποιήσεις του μοντέλου συμπεριέλαβαν κάποιες παραμέτρους βλάστησης (π.χ. ύψος των φυτών, συντελεστής επιφανειακής κάλυψης), οι οποίες συνεισφέρουν στην ανασχεση της απορροής και οδηγούν σε περισσότερο ακριβή συμπεράσματα.

Η μέθοδος των Kronfellner και Kraus προσδιορίζει το μέγιστο δυνατό φορτίο φερτών υλών και ιδίως μικρών (έως 120 km<sup>2</sup>) και ορεινών χειμαρρικών ρεμάτων, το οποίο μπορεί να αποθεθεί μετά από πλημμυρικό φαινόμενο (Πασχαλίδης, 2015). Το φορτίο αυτό υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη μέση κλίση της κοίτης, την έκταση της λεκάνης απορροής και το συντελεστή χειμαρρικότητας (Παπαρρίζος et al, 2012).

#### 3.3.2. Φυσικά μοντέλα (physically-based models)

Τα φυσικά ή ντετερμινιστικά ή προσδιοριστικά ή αναλυτικά μοντέλα απαιτούν ένα πλήθος δεδομένων σχετικών με το φυσικό πρόβλημα που διερευνάται (εδαφολογικά χαρακτηριστικά, φυτοκάλυψη κ.α.), δεδομένου ότι στοχεύουν στην αναπαράσταση του συνόλου των μηχανισμών αλληλεπίδρασης σε φαινόμενα εδαφικών απωλειών (Συλλαίος et al, 2007). Η ανάγκη ανάπτυξης διεπιστημονικής συνεργασίας για τη δημιουργία τέτοιου είδους μοντέλων κρίνεται σημαντική, δεδομένου ότι μεμονωμένα μοντέλα συντίθενται προκειμένου να προσομοιωθεί ένα πρόβλημα εδαφικής υδατικής διάβρωσης (Κουλούρη, 2004).

Τα μοντέλα αυτά εμφανίστηκαν μετά τη δεκαετία του '70. Βασίζονται σε φυσικούς νόμους μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας και στην κατανόηση των φυσικών διαδικασιών που σχετίζονται με φαινόμενα εδαφικής διάβρωσης και στερεομεταφοράς (Ξανθάκης, 2011). Με τον τρόπο αυτό, ο προσδιορισμός του φορτίου των φερτών υλών επιτυγχάνεται μέσω μαθηματικών σχέσεων που σχετίζονται με τις υδρολογικές διαδικασίες της μεταφοράς και απόθεσης φερτών υλών. Ωστόσο, οι υπολογιστικές απαιτήσεις για την

πλήρη μοντελοποίηση της διαδικασίας παραγωγής φερτών υλών σε μια λεκάνη απορροής είναι υψηλές.

Η χρήση των φυσικών μοντέλων ενδείκνυται για την πρόβλεψη φαινομένων εδαφικής διάβρωσης και παραγωγής φερτών υλών κάτω από διαφορετικά περιβάλλοντα (Merritt et al, 2003). Μαθηματικές σχέσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό εδαφικών απωλειών, οι οποίες προέκυψαν και από εμπειρικά δεδομένα. Ωστόσο, παρόλο που οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι είναι σε σημαντικό ποσοστό μετρήσιμες, πιθανά σφάλματα καθώς και η έντονη χωρική ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών τους αυξάνουν τα ποσοστά αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων (Merritt et al, 2003). Ακολούθως, αναλύονται τα πιο διαδεδομένα προσδιοριστικά μοντέλα εδαφικής διάβρωσης.

### 3.3.2.1. Μοντέλο CREAMS (Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)

Το CREAMS αποτελεί μοντέλο μεταφοράς ρύπων και εκτίμησης της διάβρωσης, απορροής, διήθησης, θρεπτικών συστατικών, ποσοτήτων φυτοφαρμάκων και διαλυμένων ουσιών. Εφαρμόζεται σε μεμονωμένα φαινόμενα πλημμύρας αλλά και για μακροπρόθεσμες προβλέψεις (2-50 έτη) και υπολογίζει αναλυτικά τα δεδομένα διάβρωσης και στερεομεταφοράς, λαμβάνοντας υπόψη τη χαραδρωτική διάβρωση (Βιδάλη, 2013). Επιπλέον, χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των πιθανών επιδράσεων των καλλιεργητικών πρακτικών στην επιφανειακή απορροή και στο νερό του εδάφους. Όσον αφορά στην εφαρμογή του σε μια λεκάνη απορροής, απαιτούνται χρονοσειρές βροχόπτωσης, θερμοκρασιακά, εδαφολογικά δεδομένα, στοιχεία ηλιακής ακτινοβολίας και είδη καλλιέργειας (Merritt et al, 2003). Επιπροσθέτως, η δυναμικότητα των φαινομένων που σχετίζονται με την απορροή ενδέχεται να επηρεάσει την ακρίβεια του μοντέλου, καθώς τα δεδομένα εισόδου οφείλουν να τροποποιούνται συχνά. Επιπλέον, πρόσθετες αμφιβολίες για την ορθότητα των αποτελεσμάτων τίθενται, δεδομένου ότι βασική υπόθεση για την ισχύ του μοντέλου είναι η ομοιογένεια ως προς την τοπογραφία και τις χρήσεις γης (Merritt et al, 2003).

Τροποποιήσεις του μοντέλου αυτού οδήγησαν στην ανάπτυξη αντίστοιχου μοντέλου για υπόγεια ύδατα (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems - GLEAMS). Ωστόσο, στην Ελλάδα τα εν λόγω μοντέλα βρίσκουν περιορισμένες εφαρμογές

λόγω του σημαντικού όγκου δυσεύρετων δεδομένων που απαιτούνται για την ορθή εφαρμογή τους (Παπαρρίζος et al, 2012).

### 3.3.2.2. Μοντέλο WEPP (Water Erosion Prediction Project)

Το μοντέλο WEPP δημιουργήθηκε ώστε να αντικαταστήσει το μοντέλο USLE και να επεκτείνει τη χρήση του σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Αναπτύχθηκε από το Τμήμα Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών και περιλαμβάνει παράγοντες όπως το κλίμα, τη διάβρωση, την απόθεση και την υδρολογία. Χρησιμοποιείται σε περιοχές μέσης κλίσης και έκτασης περί τα 2.5km<sup>2</sup> (Βιδάλη, 2013). Ωστόσο, οι υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις του μοντέλου περιορίζουν την εφαρμογή του σε λεκάνες όπου υπάρχουν λίγα διαθέσιμα δεδομένα ή πόροι (Merritt et al, 2003). Επιπλέον, ενδέχεται η μέθοδος να μην ισχύει σε εδάφη τα οποία δεν έχουν καλλιεργηθεί, ενώ απαιτούμενες παραδοχές περί ομοιόμορφης ροής της πλημμυρικής απορροής λειτουργούν αποτρεπτικά για τη χρήση του μοντέλου σε λεκάνες απορροής με μεσογειακά χαρακτηριστικά (Βαχαβιώλος, 2014).

### 3.3.2.3. Λοιπά φυσικά μοντέλα

Το EUROSEM (EUROpean Soil Erosion Model) αποτελεί χωρικά κατανεμημένο μοντέλο σε βάση πλημμυρικού γεγονότος, το οποίο προσομοιώνει τη διάβρωση, μεταφορά και απόθεση φερτών υλών. Εφαρμόζεται κυρίως σε αυλακοειδείς επιφάνειες και σε σχετικά ομαλές πλαγιές χωρίς τάφρους. Εμπεριέχει παραμέτρους σχετικές με τη φυτοκάλυψη και τα θραύσματα πετρωμάτων που επιδρούν στη διάβρωση και διήθηση (Παπαρρίζος et al, 2012), ενώ οι υπολογιστικές απαιτήσεις πρωτογενών δεδομένων παρουσιάζονται αρκετά υψηλές. Το φυσικό μοντέλο LISEM (Limburg Soil Erosion Model) βασίζεται στη μέθοδο EUROSEM. Η λεπτομερής χωρική αναπαράσταση που απαιτείται για την εφαρμογή του, ακόμη και σε περίπτωση που συνδέεται με GIS, περιορίζει την εφαρμογή του σε σχετικά μικρές λεκάνες απορροής. Επιπλέον, όπως στα περισσότερα φυσικά μοντέλα, ενδέχεται να προκύπτουν προβλήματα που συνδέονται με την αναγνωρισιμότητα και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων που εμπεριέχει.

Το εργαλείο ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation) αναπτύχθηκε σε μια προσπάθεια αξιολόγησης των αποτελεσμάτων πρακτικών χρήσης γης, καθώς και διαχείρισης και διασφάλισης της ποιότητας και επαρκούς

ποσότητας νερού σε ορεινές λεκάνες απορροής. Η προσομοίωση που υλοποιείται περιλαμβάνει ένα υδρολογικό μοντέλο και ένα μοντέλο μεταφοράς φερτών υλών και χρησιμοποιείται κυρίως για τη μελέτη ενός φαινομένου κατά τη διάρκεια εκδήλωσής του (Beasley και Huggins, 1978). Η χρησιμότητα της μεθόδου έγκειται στην προσομοίωση συστημάτων διαχείρισης σε μεγάλες λεκάνες απορροής. Ωστόσο, οι αδυναμίες και τα απαιτούμενα δεδομένα για την εφαρμογή του μοντέλου είναι ποικίλα, γεγονός που οδηγεί στην περιορισμένη χρήση του (Merritt et al, 2003).

Το εργαλείο PERFECT (Productivity, Erosion and Runoff, Functions to Evaluate Conservation Techniques) αναπτύχθηκε προκειμένου να διευρύνει την εφαρμογή άλλων φυσικών μοντέλων, όπως το CREAMS, αναφορικά με την ανάλυση των συνεπειών των πρακτικών εδαφικής διαχείρισης. Θεωρείται αρκετά πιο αξιόπιστο από το CREAMS στην πρόβλεψη της απορροής. Ωστόσο, η εφαρμογή του δε συνίσταται σε περιβάλλοντα διαφορετικά από αυτά της βορειοανατολικής Αυστραλίας, για τα οποία αναπτύχθηκε, διότι απαιτούνται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη διαχείριση των καλλιεργειών σε άλλες περιοχές. Πάντως, αποτελεί ένα δυναμικά πολύτιμο εργαλείο για την αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων σχετικών με τη διαχείριση των καλλιεργειών.

Τέλος, αναφέρονται τρία ακόμη φυσικά μοντέλα που βρίσκουν ορισμένες εφαρμογές. Αρχικά, το GUEST αποτελεί ένα σύνθετο μοντέλο που στρέφεται κυρίως στη διαδικασία της στερεομεταφοράς και, κατά συνέπεια, απαιτεί υψηλό όγκο πρωτογενών δεδομένων. Το MIKE 11 αποτελεί ένα σύστημα λογισμικού που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της ποιότητας του νερού, με σημαντικές, όμως, απαιτήσεις δεδομένων εισόδου, όπως και το TOPOG, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου, της ισορροπίας του άνθρακα, των διαλυμένων ουσιών και των ιζημάτων σε λεκάνες απορροής.

### **3.3.3. Στοχαστικά μοντέλα (conceptual models)**

Τα στοχαστικά ή εννοιολογικά ή θεμελιώδη μοντέλα βασίζονται σε εξισώσεις υδατικής και ιζηματολογικής συνέχειας και συνδυάζουν στοιχεία των προηγούμενων δύο τύπων μοντέλων. Επομένως, στόχο τους αποτελεί η προσομοίωση των φυσικών διαδικασιών διάβρωσης, με παράλληλη αξιοποίηση εμπειρικών σχέσεων. Επιπλέον, οι μετρήσεις πεδίου αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για τη βαθμονόμηση των μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά λειτουργούν σε επίπεδα υπολεκανών μιας ευρύτερης λεκάνης απορροής με παρόμοια

χαρακτηριστικά και συμπεριφορά. Μέσα από τις επιμέρους αναλύσεις, προκύπτουν γενικά ποιοτικά και ποσοτικά συμπεράσματα σχετικά με αλλαγές στις χρήσεις γης, διαδικασίες εδαφικών απωλειών κ.α.

Η διάκριση μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών μοντέλων δεν καθίσταται πάντοτε σαφής, με αποτέλεσμα την ύπαρξη μοντέλων που ανήκουν σε περισσότερες από μία κατηγορίες (π.χ. τα μοντέλα IHACRES-WQ και SEDNET θεωρούνται εμπειρικά και στοχαστικά). Στη συνέχεια, αναλύονται τα διαθέσιμα εννοιολογικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της διάβρωσης και της στερεοαπορροής.

### 3.3.3.1. Διαθέσιμα στοχαστικά μοντέλα

Το EMSS (Environmental Management Support System) αποτελεί λογισμικό εργαλείο που αναπτύχθηκε προκειμένου να αντιμετωπίζονται θέματα ποιότητας υδάτων σε περιοχές της Αυστραλίας. Τα επιμέρους μοντέλα που το αποτελούν είναι σχετικά απλά, ενώ η αναπροσαρμογή και η χρήση του σε άλλες χώρες δεν αποτελεί δύσκολο έργο (Merritt et al, 2003). Ωστόσο, βρίσκεται ακόμη σε πιλοτικό στάδιο και απαιτούνται περαιτέρω δοκιμές και εφαρμογές για τη βελτίωσή του.

Το HSPF (Hydrologic Simulation Program, Fortran) προσομοιώνει υδρολογικά φαινόμενα μιας λεκάνης απορροής και της ποιότητας του νερού (άζωτο, φώσφορος, αιωρούμενα ιζήματα και τοξικά ρύπων). Σύμφωνα με αυτό, η ποσότητα και ποιότητα υδάτων υπολογίζεται για κάθε χρήση γης στα επιμέρους ομοιογενή τμήματα μιας λεκάνης απορροής. Ωστόσο, ο σημαντικός αριθμός παραμέτρων που προϋποθέτει και η ανάγκη βαθμονόμησής τους δημιουργούν προβλήματα σχετικά με τον προσδιορισμό των παραμέτρων και το φυσικό τους νόημα.

Το IQQM (Integrated Water Quantity and Quality Model) αναπτύχθηκε από το Τμήμα Διαφύλαξης Εδάφους και Υδάτων στην Αυστραλία (Merritt et al, 2003). Το μοντέλο είναι σχεδιασμένο για χρήση ως εργαλείο σχεδιασμού και αξιολόγησης των πρακτικών διαχείρισης των υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού. Ο μεγάλος αριθμός παραμέτρων προς βαθμονόμηση συνιστά ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου.



Παρόμοιο μοντέλο μη σημειακών πηγών ρύπανσης αποτελεί το AGNPS (Agricultural Non-Point Source model), το οποίο εφαρμόζεται για την πρόβλεψη και την εκτίμηση της ποιότητας των υδάτων που απορρέουν σε ορεινές λεκάνες απορροής. Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με αποφάσεις διαχείρισης των υδατικών πόρων, των φερτών υλών και χημικών φορτίων εντός μιας λεκάνης απορροής.

Το μοντέλο LASCAM περιλαμβάνει αλγόριθμο παραγωγής και μεταφοράς φερτών υλικών αλλά και θρεπτικών συστατικών για τη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης. Έχει χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη και τη μακροπρόθεσμη εκτίμηση της αλατότητας, της συγκέντρωσης αζώτου και φωσφόρου κ.α.

Τέλος, το μοντέλο SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) αναπτύχθηκε για την προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών, φαινομένων καθίζησης και τη μεταφορά θρεπτικών ουσιών και φυτοφαρμάκων σε μεγάλες ορεινές λεκάνες απορροής. Περιλαμβάνει συνιστώσες της υδατικής ποιότητας και απόδοσης των φυτοφαρμάκων. Ωστόσο, απαιτείται η δημιουργία μιας τεράστιας βάσης δεδομένων, ώστε να ληφθούν υπόψη όλοι οι παράγοντες του μοντέλου και να μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα περιβάλλοντα.

#### 3.4. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS - GIS)

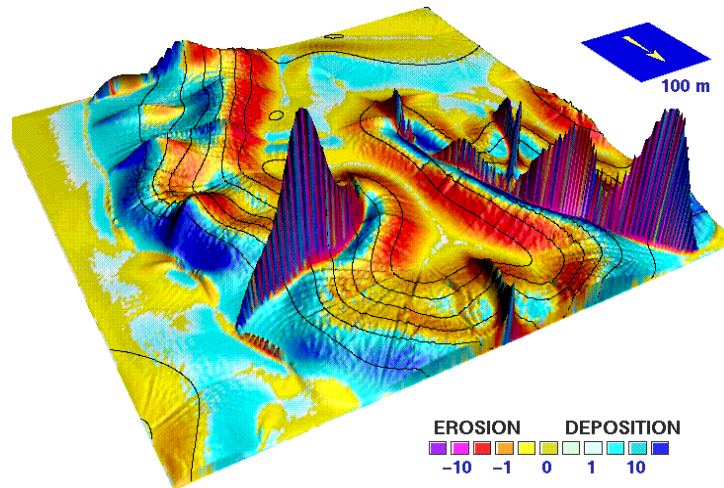
Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών αποτελούν μια οργανωμένη βάση γεωγραφικών δορυφορικών δεδομένων, σχεδιασμένη ώστε να αποθηκεύει, να ενημερώνει, να διαχειρίζεται και να αναλύει σχετικές πληροφορίες. Αποτελούν, επομένως, ένα δυναμικό εργαλείο για τη μελέτη θεμάτων που σχετίζονται με χωρικά δεδομένα του πραγματικού κόσμου. Τα συστήματα αυτά άρχισαν να αναπτύσσονται τη δεκαετία του 1980, ενώ μια δεκαετία αργότερα δημιουργήθηκαν τα πρώτα χωρικά δεδομένα που απαιτούνταν για τη λειτουργία τους (Βιδάλη, 2013).

Όπως έχει γίνει αντιληπτό, τα διαθέσιμα μοντέλα εδαφικής διάβρωσης δεν εξετάζουν τη χωρική διάσταση των φαινομένων. Με τη συμπερίληψη της γεωπληροφορικής στην εξέταση ενός διαβρωτικού φαινομένου, η προσπάθεια ολοκληρωμένης μοντελοποίησης της εδαφικής διάβρωσης είναι πιθανό να αποτελεί μια περισσότερο εφικτή διαδικασία. Παράλληλα, η δυνατότητα απεικόνισης των αποτελεσμάτων που προσφέρεται από τέτοιες

εφαρμογές οδηγεί στην πληρέστερη κατανόηση των φαινομένων και συνεισφέρει στη διεπιστημονική έρευνά τους.

Το πρόγραμμα CORINE αναπτύχθηκε το 1985, σε μια προσπάθεια αξιολόγησης της χωρικής συνιστώσας της διάβρωσης ως προς το βαθμό επικινδυνότητάς της. Με τον τρόπο αυτό, καταρτίστηκαν παγκόσμιοι χάρτες επικινδυνότητας της εδαφικής διάβρωσης, με χρήση βασικών αρχών οι οποίες χρησιμοποιούνται και στην παγκόσμια εξίσωση απώλειας εδάφους (USLE). Οι χάρτες αυτοί ουσιαστικά εκφράζουν την εγγενή πιθανότητα ανάπτυξης διάβρωσης σε μια περιοχή, χωρίς, δηλαδή, να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως οι χρήσεις γης, η εδαφοκάλυψη κ.α., οι οποίοι, ωστόσο, επηρεάζουν σε κάποιο βαθμό την εξέλιξη του φαινομένου (Παπαρρίζος et al, 2012). Σκοπό της συνολικής διαδικασίας αποτέλεσε η λήψη μέτρων για τη διαχείριση προβλημάτων διάβρωσης στις περισσότερο ευάλωτες στο φαινόμενο περιοχές.

Με την περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, η αποτελεσματικότητά τους στην εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης ενισχύθηκε. Στο γεγονός αυτό συνετέλεσε η χρήση Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (Digital Elevation Model- DEM), τα οποία πρόσθεσαν την επίδραση της εδαφικής κλίσης σε διαβρωτικά φαινόμενα. Επιπλέον, η ολική μεθοδολογία βελτιώθηκε μέσα από τη συμπερίληψη κλιματικών και τοπογραφικών παραγόντων, αλλά και παραμέτρων βλάστησης και τη δημιουργία αντίστοιχων ψηφιακών επιπέδων. Ως αποτέλεσμα, τεχνολογίες GIS χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση του συνόλου των συντελεστών που υπεισέρχονται στην Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (USLE) και μέσω του γινομένου τους δημιουργούνται δυναμικοί χάρτες εδαφικής διάβρωσης (Βιδάλη, 2013). Στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 3.15) φαίνεται η χρήση της τεχνολογίας GIS για τον εντοπισμό πιθανών θέσεων απόσπασης ή εναπόθεσης εδαφικού υλικού.



**Εικόνα 3.15:** Χάρτης επικινδυνότητας διάβρωσης και απόθεσης φερτών υλών με χρήση GIS

Τέλος, η χρονική συνιστώσα συμπεριλαμβάνεται στα συστήματα GIS μέσω των γεωγραφικών συστημάτων υποστήριξης και ανάλυσης πόρων (GRASS) και της ενσωματωμένης γλώσσας μοντελοποίησης PCRaster. Υπάρχει πληθώρα βιβλιογραφικών αναφορών σχετικών με τον προσδιορισμό εδαφικών απωλειών με τεχνολογίες GIS (Hill και Schütt, 2000, Martínez-Casasnovas κ.λπ., 2002), ενώ συνδυασμοί GIS με διάφορα μοντέλα διάβρωσης (μοντέλα ANSWER, LISEM, AGNPS κ.α.) έχουν υλοποιηθεί.

#### **Κεφάλαιο 4: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ**

Περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας αποτελεί ο τεχνητός ταμιευτήρας του ποταμού Αώου, ο οποίος βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της Ελλάδας. Στις πηγές του ποταμού έχει δημιουργηθεί ταμιευτήρας συνολικής χωρητικότητας 180 hm<sup>3</sup> (ωφέλιμη χωρητικότητα 145 hm<sup>3</sup>), ο οποίος είναι γνωστός ως Υδροηλεκτρικός Σταθμός Πηγών Αώου ή τεχνητή λίμνη Πηγών Αώου. Πρόκειται για ένα έργο διασυνοριακού χαρακτήρα, αφού πραγματοποιείται εκτροπή τμήματος του υδατικού δυναμικού του Αώου από την Αδριατική θάλασσα (όπου θα κατέληγε φυσιολογικά) στον Άραχθο, δηλ. ποταμό εξολοκλήρου εντός των ελληνικών συνόρων. Επιπλέον, μικρές τιμές εισροής και απορροής νερού από τον ταμιευτήρα συμβάλλουν στην περιορισμένη ανανέωση αυτού. Συνεπώς, ο ταμιευτήρας Πηγών Αώου παρουσιάζει αρκετά χαρακτηριστικά όμοια με εκείνα των φυσικών λιμνών.



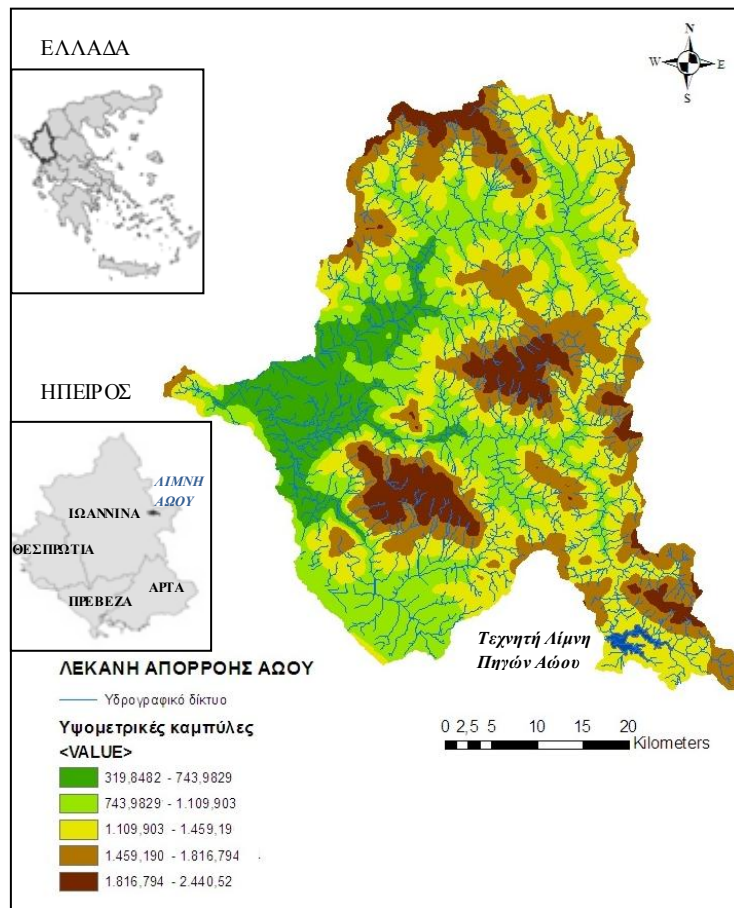
**Εικόνα 4.1:** Τεχνητή λίμνη πηγών Αώου

Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, αναλύονται τα ιδιαίτερα κλιματολογικά-μετεωρολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της και παρατίθενται στοιχεία σχετικά με τη βλάστηση και τις χρήσεις γης που αναπτύχθηκαν στην περιοχή. Μέσα από τη γνώση της υφιστάμενης κατάστασης αναφορικά με τα προαναφερθέντα στοιχεία, ακολουθεί το κεφάλαιο πέντε, στο οποίο αξιοποιούνται οι πληροφορίες αυτές για την εφαρμογή του μοντέλου RUSLE και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

#### 4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ

Ο ποταμός Αώος πηγάζει από τις βόρειες πλαγιές της οροσειράς της Πίνδου βορειοδυτικά του Μετσόβου και εκβάλλει στην Αδριατική θάλασσα. Το συνολικό μήκος του σε ελληνικό έδαφος προσεγγίζει τα 70 km με συνολική λεκάνη τροφοδοσίας 2150 km<sup>2</sup> και σε αλβανικό τα 26 km (Υ.Π.Ε.Κ.Α, 2013). Η μέση ετήσια παροχή του Αώου υπολογίζεται σε 3,53 m<sup>3</sup>/s στις πηγές και 26,61 m<sup>3</sup>/s στην Κόνιτσα. Η ευρύτερη υδρολογική λεκάνη του Αώου περιλαμβάνει τις υπολεκάνες των ποταμών Σαρανταπόρου, Αώου και Βοΐδομάτη.

Ο ταμιευτήρας Πηγών Αώου ανήκει στη λεκάνη απορροής Αώου-Σαραντάπορου, η οποία ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα της Ηπείρου (Εικόνα 4.2). Βρίσκεται στο οροπέδιο της «Πολιτσάς», στους πρόποδες του Μαυροβουνίου σε υψόμετρο 1350 m. Δημιουργήθηκε το 1987 με την κατασκευή του υδροηλεκτρικού φράγματος της ΔΕΗ και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας από τα τέλη του 1990, με ετήσια παραγωγή να αγγίζει τις 160 GWh. Παράλληλα, πραγματοποιείται εκτροπή νερού από τον Αώο προς τον Άραχθο, το οποίο χρησιμοποιείται για την άρδευση της πεδιάδας της Άρτας και την ενίσχυση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κοντινών υδροηλεκτρικών σταθμών. Η συνεχής καταγραφή της παροχής του ποταμού μετά την κατασκευή του έργου υποδηλώνει τη διατήρηση αυτής σε μια μέση τιμή της τάξης των 3,53 m<sup>3</sup>/s ετησίως.



**Εικόνα 4.2:** Γεωγραφική τοποθέτηση ταμιευτήρα Πηγών Αώου

Δεδομένου ότι κάθε τεχνητή λίμνη δε δημιουργείται από φυσικές διεργασίες, αποτελεί μια σύντομη διαδικασία για τα φυσικά δεδομένα. Η μορφολογία της λίμνης μεταβλήθηκε σημαντικά μετά την ανθρώπινη παρέμβαση στη λίμνη, αφού γειτονικές περιοχές διαφορετικών υψομέτρων κατακλύστηκαν με νερό με αποτέλεσμα την ανάπτυξη έντονων και απότομων κλίσεων στην παραλίμνια περιοχή και τη δημιουργία κολπίσκων και χερσονήσων, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 4.3). Επιπλέον, η περιοχή χαρακτηρίζεται από υψηλές κορυφές, πυκνά δασωμένες εκτάσεις, ορμητικούς χειμάρρους, άφθονες πηγές, βραχώδεις κορυφογραμμές, απότομες χαράδρες και ορεινές λίμνες, ενώ περισσότερο αμμώδεις και ομαλές παρουσιάζονται οι ακτές στο ανατολικό τμήμα της λίμνης. Αξίζει να σημειωθεί πως στη διαδικτυακή βάση δεδομένων για την ελληνική φύση “ΦΙΛΟΤΗΣ” του τομέα υδατικών πόρων και περιβάλλοντος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου αναφέρεται πως ο σημαντικότερος κίνδυνος που χρήζει αντιμετώπισης στη λίμνη αποτελεί η διάβρωση.





**Εικόνα 4.3:** Γεωμορφολογία της τεχνητής λίμνης

Επτά χωμάτινα φράγματα χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό της τεχνητής λίμνης, εκ των οποίων τα πέντε είναι αυχενικά, ένα κύριο και ένα βοηθητικό (Εικόνα 4.20). Η υψομετρική στάθμη της ρυθμίζεται ώστε να κυμαίνεται μεταξύ 1315 m. και 1343 m., ενώ ο όγκος της προσεγγίζει τα 145 hm<sup>3</sup>, το μέγιστο βάθος της τα 63 m. και η επιφάνειά της τα 9 km<sup>2</sup> στην ανώτατη στάθμη λειτουργίας της. Τα φράγματα έχουν συνολικό όγκο 4 hm<sup>3</sup> και είναι κατασκευασμένα από περιδοτίτη, φίλτρα από αμμοχάλικο και αργιλικό πυρήνα. Στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 4.4) φαίνεται το μεγαλύτερο φράγμα του σταθμού, το κύριο φράγμα, στο δεξιό αντέρεισμα του οποίου υπάρχει η κεκλιμένη σήραγγα εκτροπής, μέσω της οποίας τα νερά μεταφέρονται από τον εκχειλιστή στην παλιά κοίτη του ποταμού Αώου προς τη Βωβούσα.



**Εικόνα 4.4:** Κύριο φράγμα και σήραγγα εκτροπής στην παλιά κοίτη Αώου

(Πηγή: Διεύθυνση ΥΗΣ Πηγών Αώου)

Όσον αφορά στις λοιπές εγκαταστάσεις και τα τεχνικά έργα του οροπεδίου των Πολιτσών, αυτά περιλαμβάνουν την υδροληψία, τον εκχειλιστή, τον εκκενωτή πυθμένα, το θάλαμο άνω βαλβίδας, το αντλιοστάσιο, το σταθμό παραγωγής ενέργειας, το κτίριο ελέγχου και λειτουργίας, τον υποσταθμό, ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις, σήραγγα προσαγωγής μήκους 3 km. και τον πύργο ανάπαλσης ύψους 90 m. Σήραγγα προσπέλασης μήκους 2 km. χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του υπόγειου σταθμού παραγωγής με τον υποσταθμό και το κτίριο ελέγχου και λειτουργίας. Ο εκχειλιστής (Εικόνα 4.5) διαθέτει δύο τοξωτά θυροφράγματα για την εκφόρτιση της λίμνης σε περίπτωση πλημμυρικού ή άλλου απρόβλεπτου φαινομένου. Με τη βοήθεια του εκκενωτή πυθμένα, ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος στη χώρα με παροχή που ανέρχεται σε  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ , υλοποιείται ολική εκτόνωση της λίμνης σε περίπτωση που αυτή απαιτείται ή για λόγους συντήρησης. Ο υπόγειος πύργος εκτόνωσης χρησιμοποιείται για την προστασία του αγωγού προσαγωγής έναντι υπερπίεσεων καθώς επίσης για την παροχή πρόσθετων ποσοτήτων νερού για την εκκίνηση των μονάδων. Τέλος, η άνω βαλβίδα προστατεύει τον αγωγό προσαγωγής από την ανάπτυξη υπερβολικά υψηλών ταχυτήτων νερού εντός αυτού.



**Εικόνα 4.5:** Εκχειλιστής και θυροφράγματα του ΥΗΣ Πηγών Αώου

(Πηγή: Διεύθυνση ΥΗΣ Πηγών Αώου)

Η παραγωγή ενέργειας λαμβάνει χώρα αφού το νερό μεταφερθεί μέσω υπόγειου αγωγού από την υδροληψία και πραγματοποιηθεί πτώση ύψους 675 m. πάνω σε στρόβιλο τύπου PELTON. Η κινητική ενέργεια του στρόβιλου οδηγεί σε περιστροφή της γεννήτριας και, συνεπώς, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα άκρα της. Στη συνέχεια, αφού το νερό χάσει την κινητική του ενέργεια διοχετεύεται μέσω της σήραγγας φυγής (μήκους 2707 m.) στο Μετσοβίτικο, ο οποίος αποτελεί παραπόταμο του Άραχθου.



Αξίζει να σημειωθεί πως το ύψος πτώσης των 675 m καθώς και το βάθος των 130 m όπου βρίσκεται κατασκευασμένος ο υπόγειος σταθμός παραγωγής καθιστούν το υδροσύστημα Πηγών Αώου ιδιαίτερο και μοναδικό στον ελλαδικό χώρο. Παράλληλα, δεδομένου ότι το μέσο υψόμετρο της επιφάνειας του ταμιευτήρα προσεγγίζει τα 1343 m η λίμνη Πηγών Αώου δικαιολογημένα χαρακτηρίζεται ως λίμνη αλπικού τύπου (Υπουργείο Ανάπτυξης, 1998), κατέχοντας το μεγαλύτερο υψόμετρο στάθμης για τα ελληνικά δεδομένα. Παράλληλα, ο χαρακτηρισμός της ευρύτερης περιοχής ως Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου, η ύπαρξη περιοχών που ανήκουν στο Ευρωπαϊκό Δίκτυο Προστατευόμενων Περιοχών «Natura 2000», η ένταξη της περιοχής της τεχνητής λίμνης εντός των ορίων της Ζώνης Ειδικής Προστασίας «Βάλια Κάλντα και τεχνητή λίμνη Αώου» και ο χαρακτηρισμός ως Τοπίο Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους στη διαδικτυακή βάση δεδομένων της ελληνικής φύσης “ΦΙΛΟΤΗΣ” καταδεικνύουν πως το τοπίο διαθέτει ιδιαίτερα υψηλή οικολογική, αισθητική και γεωμορφολογική αξία.

#### 4.2. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Οι κλιματολογικές συνθήκες συνιστούν βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών, δεδομένων των διαβρωτικών και αποσαθρωτικών τους επιπτώσεων στα πρανή, αλλά και της υποβάθμισης των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Όσον αφορά στα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής, ο δήμος Μετσόβου χαρακτηρίζεται ως η υδρολογική καρδιά της Ελλάδας, καθώς οι βροχοπτώσεις και η απορροή κυμαίνονται σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα για τα ελληνικά δεδομένα.

Το κλίμα κατά Koppen υπάγεται στην κατηγορία C.b.f. και χαρακτηρίζεται ηπειρωτικό, υγρό με όχι πολύ ψυχρούς χειμώνες, ενώ κατά Thornthwaite θεωρείται πολύ υγρό, με μέτριο - μικρό έλλειμμα υγρασίας το καλοκαίρι. Οι περιοχές περιμετρικά της λίμνης παρουσιάζουν πιο ήπια χαρακτηριστικά. Αντίθετα, στο βόρειο κυρίως τμήμα της λίμνης που παρουσιάζει μεγαλύτερο υψόμετρο ο ηπειρωτικός χαρακτήρας του κλίματος γίνεται ιδιαίτερα έντονος.

Οι εγκατεστημένοι σταθμοί του δήμου Μετσόβου είναι ο Εθνικός Μετεωρολογικός Σταθμός Μετσόβου και ο μετεωρολογικός σταθμός στις εγκαταστάσεις του Μετσόβιου

Κέντρου Διεπιστημονικής Έρευνας που λειτουργεί τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού Μετσόβου, η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα υπολογίζεται ίση με 10,5°C, η μέση σχετική υγρασία αέρα 77% και τα 1472,6 mm (χρονικό διάστημα μετρήσεων 1925-2000). Στο χρονικό διάστημα 1951 έως 1990, το μέγιστο ετήσιο ύψος βροχής παρατηρήθηκε το 1962 (2221,8 mm), το ελάχιστο το 1953 (655,6 mm) και η μέση τιμή των βροχοπτώσεων ανέρχεται σε 1254 mm.

Η μέση ετήσια σχετική υγρασία αέρα εμφανίζει μέγιστη τιμή (86%) τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο και ελάχιστη (64%) τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο (Κατσούλης, 2011). Η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα φτάνει τους 0°C τον ψυχρότερο μήνα (συνήθως Ιανουάριος) και τους 20°C συνήθως κατά το μήνα Ιούλιο. Στην περιοχή πνέουν ισχυροί άνεμοι και η ηλιοφάνεια εμφανίζεται σχετικά μικρή. Παράλληλα, χιονοπτώσεις λαμβάνουν χώρα από το Νοέμβριο έως τον Απρίλιο, η τήξη των οποίων δημιουργεί πρόσθετες απορροές προς τη λίμνη. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ανέρχεται περίπου σε 470-475 mm, προκύπτει ότι οι μέσες ετήσιες ποσότητες πλεονάζοντος νερού (κατείδυση και επιφανειακή απορροή) ανέρχονται περί το ένα μέτρο (Μιμίκου, 2007).

Επιφανειακές και υπόγειες απορροές και αποστραγγίσεις από γειτονικές χαμηλότερου υψομέτρου περιοχές (οροπέδιο Πολιτσών) καταλήγουν στη λεκάνη απορροής του ταμιευτήρα και προέρχονται κυρίως από τη δασική έκταση και τους βοσκοτόπους που περιβάλλουν τη λίμνη. Ειδικότερα, απορροές που προέρχονται από άρδευση γεωργικής έκτασης 1590 στρεμμάτων δίπλα στον ταμιευτήρα τροφοδοτούν τη λίμνη μέσω αντλιοστασίου με ετήσια απορροή προσεγγιστικά ίση με 10 hm<sup>3</sup>.

Αναφορικά με τη διακύμανση της επιφανειακής στάθμης της λίμνης, οι σχετικές καμπύλες παρουσιάζουν ετήσια περιοδικότητα, με εξαίρεση το πρώτο έτος λειτουργίας του σταθμού (1990). Η έντονη διακύμανση της στάθμης της λίμνης οφείλεται στη λειτουργία του ετήσιου υδροηλεκτρικού σταθμού καθώς και στις άμεσες εισροές του ταμιευτήρα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (βροχοπτώσεις, χιονόπτωση), με τις οποίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένη. Σε γενικές γραμμές, υψηλότερη στάθμη εμφανίζεται περί τα τέλη Μαΐου και σταδιακά μειώνεται, λαμβάνοντας τη χαμηλότερη τιμή τους μήνες Σεπτέμβριο ή Οκτώβριο. Στο πλαίσιο της ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών αποθεμάτων, υπάρχει σημαντική αναλογική συσχέτιση μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και του όγκου των εισροών προκειμένου να διατηρείται η στάθμη εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

Δεδομένου ότι το τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Αώου που ανήκει σε ελληνικό έδαφος απέχει από τη θάλασσα, δεν παρατηρείται υφαλμύριση στους υπόγειους υδροφορείς από διείσδυση θαλασσινού νερού. Επιπλέον, από σχετική μελέτη των χαρακτηριστικών του νερού του ταμιευτήρα (Υπουργείο Ανάπτυξης, 1998) προκύπτει πως η λίμνη προσεγγίζει περισσότερο τα χαρακτηριστικά μιας φυσικής λίμνης, η υδροχημική της σύσταση παρουσιάζει χωρική και χρονική ομοιογένεια και οι υγρές μάζες εμφανίζουν μικρή κινητικότητα.

Η διαφάνεια των υδάτων της λίμνης εμφανίζεται σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα. Ειδικότερα, τους μήνες Ιούλιο και Οκτώβριο παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές, ενώ οι χαμηλότερες εμφανίζονται συνήθως το Μάρτιο (Υπουργείο Ανάπτυξης, 1998). Στη συνήθη αύξηση της θολότητας το μήνα αυτό συμβάλλει η αυξημένη συγκέντρωση αιωρούμενου υλικού λόγω της στερεοπαροχής αλλά και η αύξηση του φυτοπλαγκτού. Φυσικά, διαφορές υπάρχουν και χωρικά εντός του ταμιευτήρα δεδομένου ότι, για παράδειγμα, η θολότητα αυξάνει με την απόσταση από το φράγμα. Επιπλέον, στα επιφανειακά νερά της λίμνης η διαφάνεια είναι μειωμένη σε σύγκριση με τα βαθύτερα στρώματα.

Τα νερά χαρακτηρίζονται μαλακά με χαμηλές συγκεντρώσεις ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου. Η παρουσία θερμοκλινούς και θερμικής στρωμάτωσης της υδάτινης στήλης παρατηρείται κατά το διάστημα Ιουνίου - Σεπτεμβρίου, ενώ τον Ιανουάριο και Μάρτιο η υδάτινη στήλη εμφανίζεται ομογενοποιημένη (Υπουργείο Ανάπτυξης, 1998). Φυσικά στρωμάτωση ενδέχεται να υπάρχει και κατά τους χειμερινούς μήνες κατά τους οποίους η επιφάνεια της λίμνης καλύπτεται με χιόνι. Οι χιονοπτώσεις αποτελούν σύνθετο φαινόμενο στην περιοχή και λαμβάνουν συνήθως χώρα περί τα τέλη Οκτωβρίου. Διαρκούν έως τον Απρίλιο, με μέγιστο ύψος χιονιού να σημειώνεται συνήθως το μήνα Φεβρουάριο. Αντίθετα, κατά τους θερινούς μήνες πολλά από τα ρυάκια που εκβάλλουν στον ταμιευτήρα ξηραίνονται.



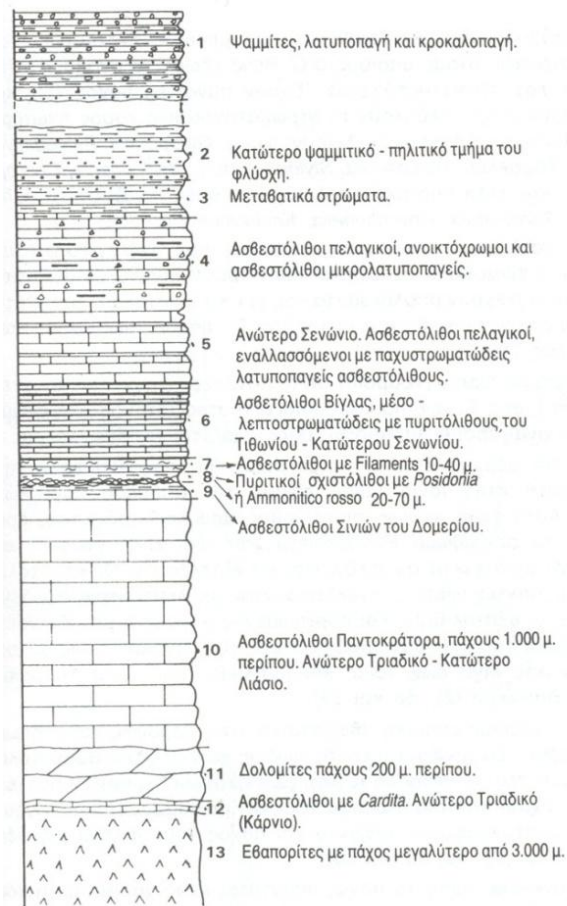
**Εικόνα 4.6:** Χιονόπτωση και εποχική ξήρανση των υδατορευμάτων

Η χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένων ανόργανων συστατικών στα νερά της τεχνητής λίμνης και η υψηλή συγκέντρωση θρεπτικών αλάτων δικαιολογείται από την ύπαρξη μεγάλου υψομέτρου του ταμιευτήρα, χαμηλών τιμών εξατμισοδιαπνοής, σημαντικών αποστάσεων από τη θάλασσα, την απουσία ανθρακικών πετρωμάτων στην ευρύτερη λεκάνη απορροής και τη μηδαμινή ανθρωπογενή παρέμβαση (Υπουργείο Ανάπτυξης, 1998). Επομένως, τα νερά της τεχνητής λίμνης προσεγγίζουν αρκετά τις αντίστοιχες τιμές διαλυμένων ουσιών των πηγαίων νερών.

#### 4.3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

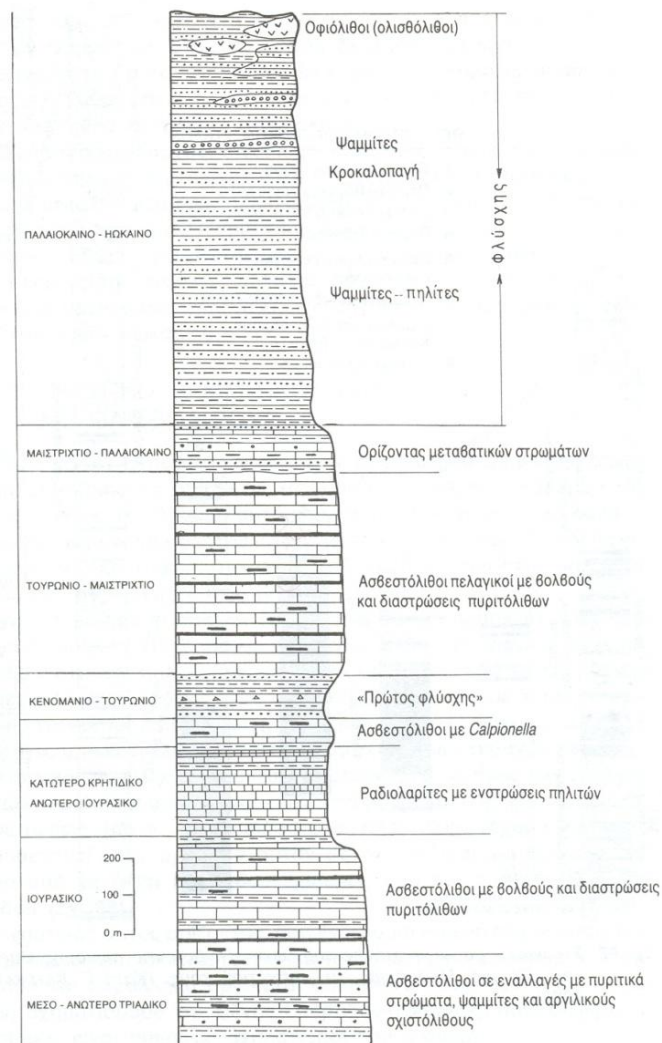
Όσον αφορά στους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντώνται στην ευρύτερη περιοχή, η ποικιλία είναι ευρεία ως προς τη φύση και τη σύστασή τους. Ανθρακικοί σχηματισμοί της Ιονίου Ζώνης καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης, ενώ η Ζώνη της Πίνδου, σχηματισμοί μεσοελληνικής αύλακας, πελαγονικό τεκτονικό κάλυμμα οφιολίθων και νεογενείς σχηματισμοί (κροκαλοπαγή, μάργες κ.α.) αναπτύσσονται σε μικρότερες εκτάσεις (Υ.Π.Ε.Κ.Α., 2013).

Η ζώνη Ωλονού-Πίνδου παρουσιάζει στρωματογραφική διάρθρωση που χαρακτηρίζεται από εναλλαγές ιζηματογένεσης (κλαστική, πυριτική, ανθρακική) και εμφανίζεται στις ανατολικές περιοχές της Ηπείρου. Η παλαιογεωγραφική της σύσταση αποτελείται από την υπερπινδική, την αξονική και την εξωτερική υποζώνη (ανατολική, ενδιάμεση και δυτική αντίστοιχα). Συνίσταται κυρίως από ασβεστολιθικά πετρώματα διαφορετικής σύστασης και συμπεριφοράς, τα οποία απεικονίζονται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 4.7).



**Εικόνα 4.7:** Στρωματογραφική στήλη Ιονίου Ζώνης

Η ζώνη της Πίνδου περιλαμβάνει κυρίως πετρώματα φλύσχη, τα οποία έχουν αργιλοαμμώδη σύσταση και αποτελούν το λεγόμενο μανδύα αποσάθρωσης αργιλοαμμώδους υλικού. Η εν λόγω ζώνη έχει επωθηθεί πάνω στην Ιόνιο ζώνη, με διεύθυνση κίνησης από ανατολικά προς δυτικά (Εικόνα 4.8). Λεπτόκοκκα υλικά των αργίλων, ιλύολιθων και μαργών, τα οποία εναλλάσσονται για το σχηματισμό φλύσχη, είναι εύκολα διαβρώσιμα και επιρρεπή σε κατολισθητικά φαινόμενα.

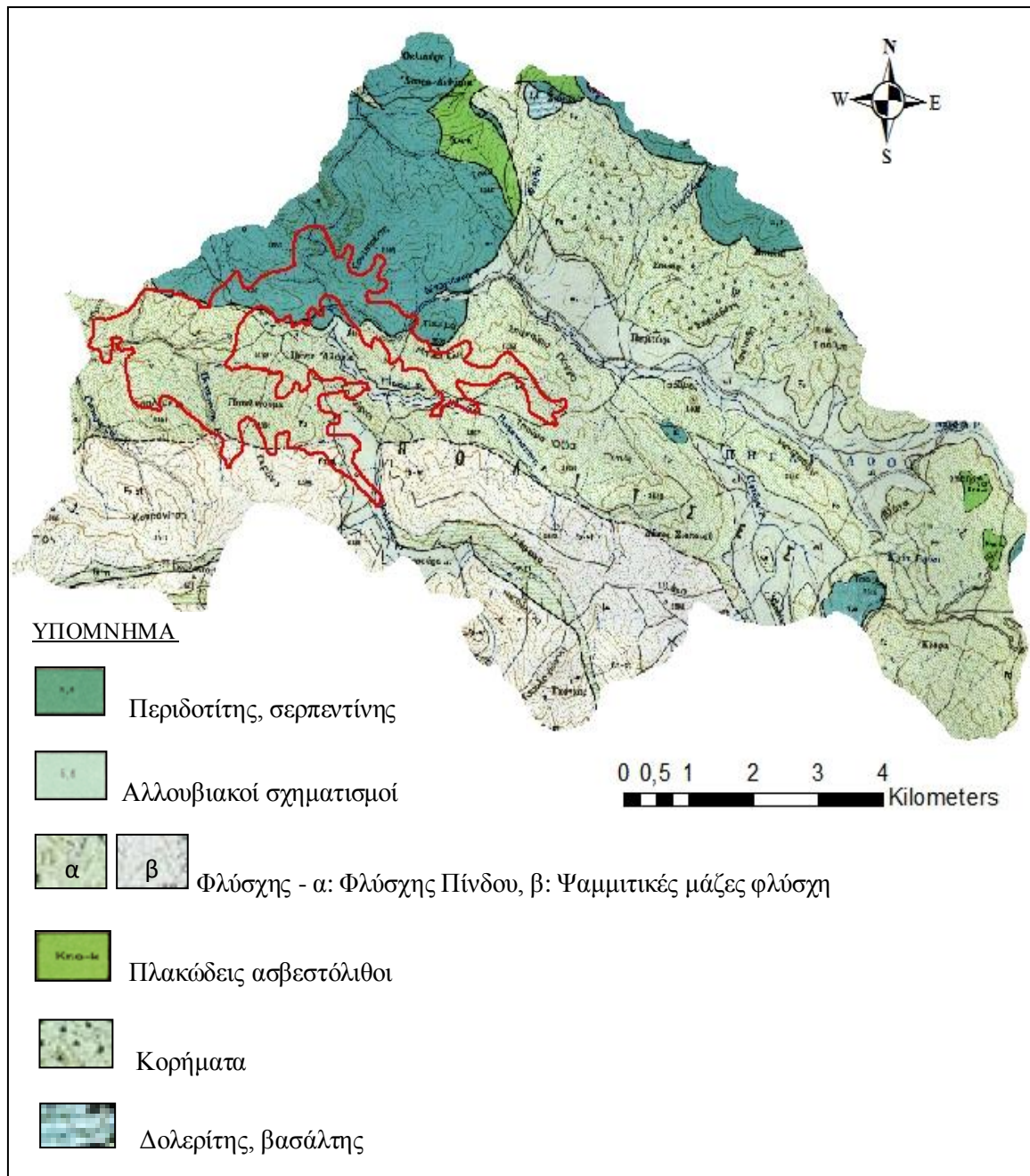


**Εικόνα 4.8:** Στρωματογραφική στήλη Ζώνης Πίνδου

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής Πηγών Αώου (Εικόνα 4.9). Όπως γίνεται αντιληπτό, ο φλύσχη Πίνδου καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της, ο οποίος εμφανίζεται σε μορφή αδιαίρετου σχηματισμού, ψαμμιτικών μαζών ή αργλικών σχιστόλιθων υποκείμενων των ψαμμιτών. Σε ορισμένες εκτάσεις του βορειοανατολικού μέρους ο φλύσχη συνυπάρχει με πλευρικές αποθέσεις (παλαιά κορήματα) που αποτελούνται από θραύσματα ασβεστολίθων και πυριτολίθων σε αργλικό συνδετικό υλικό. Παράλληλα, σε σημαντικό τμήμα εκτείνονται σύγχρονοι αλλουβιακοί σχηματισμοί αμμοχάλικου, ιλυώδους και αργλικής σύστασης, κυρίως ποτάμιας προέλευσης καθώς και πετρώματα οφιολιθικής σειράς (περιδοτίτης, δολερίτης, βασάλτης). Επιπλέον, μικρή έκταση καταλαμβάνεται από

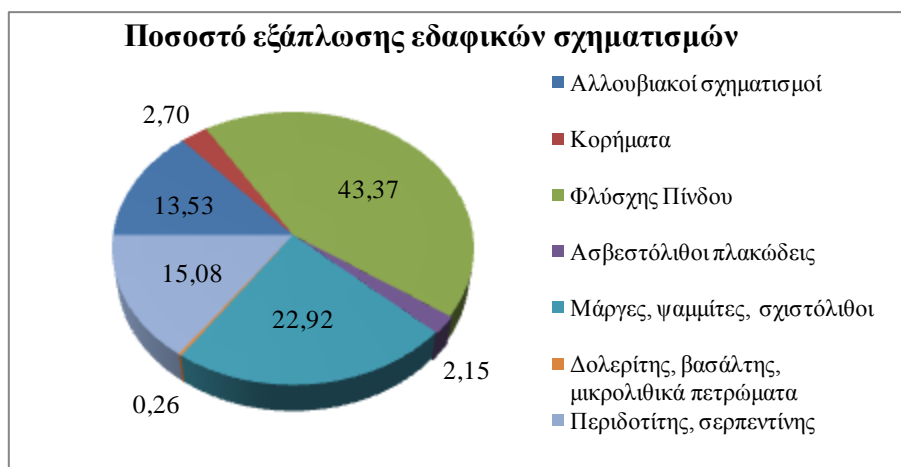


πλακώδεις ασβεστόλιθους κοκκινοπράσινου συνήθως χρώματος που χαρακτηρίζονται από μέτρια διαβρωσιμότητα.



**Εικόνα 4.9:** Κατανομή γεωλογικών σχηματισμών στη λεκάνη απορροής Πηγών Αώου. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η ακτογραμμή της τεχνητής λίμνης

Τα ποσοστά εξάπλωσης και κατάληψης της λεκάνης απορροής Πηγών Αώου ανά γεωλογικό σχηματισμό φαίνονται στο ακόλουθο κυκλικό διάγραμμα (Εικόνα 4.10).



**Εικόνα 4.10:** Ποσοστά κάλυψης της λεκάνης απορροής ανά γεωλογικό σχηματισμό

Ειδικότερα, ο περιδοτίτης αποτελεί ένα εκρηξιγενές πέτρωμα που συναντάται κυρίως σε μια νοητή γραμμή, η οποία ξεκινά από την Αλβανία και διέρχεται από το Μέτσοβο, την Καλαμπάκα και τη Φθιώτιδα (Γεωργαλάς, 1966). Το πέτρωμα αυτό σχηματίστηκε στο μανδύα της γης πριν από περίπου 170 εκατομμύρια χρόνια και κυριαρχεί στο βόρειο τμήμα της λίμνης Πηγών Αώου. Η άνοδος των πετρωμάτων προς την επιφάνεια της γης οδήγησε σε τήξη ορισμένων από αυτά. Τα πετρώματα που παρέμειναν άτηκτα μετατράπηκαν στους σημερινούς περιδοτίτες, οι οποίοι έδωσαν σημαντικά στοιχεία για τον ωκεανό της Τηθύως. Πρόκειται για αιχμηρά και σκληρά πετρώματα με πρασινωπό χρώμα το οποίο υποδηλώνει έντονη καταπόνηση και παραμόρφωση (Κατσούλης, 2011). Περισσότερο μαλακά πετρώματα ενδέχεται να είναι οι σερπεντινίτες που δημιουργούνται από τη διαβροχή των περιδοτιτών.

Με τις συνεχείς μετατοπίσεις των λιθοσφαιρικών πλακών και την ολίσθηση των πετρωμάτων αυτών πάνω σε νεότερα, δημιουργήθηκε ο φλύσσης, που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της έκτασης του ταμιευτήρα. Αποτελείται κυρίως από άμμο, άργιλο και ιλύ, είναι αρκετά μαλακό και διαθέτει πολύ διαφορετική γεωχημική σύσταση από τον περιδοτίτη. Συνιστά ένα ιζηματογενές πέτρωμα με σημαντική διαβρωσιμότητα, το οποίο ανήκει σε δύο γεωτεκτονικές ενότητες (Πίνδου και Ιονίου). Ο σχηματισμός του φλύσσης, γενικά μπορεί να χαρακτηριστεί ως αδιαπέρατος σχηματισμός, ιδιαίτερα αν επικρατεί η ιλυολιθική του φάση. Ωστόσο, δεδομένου ότι στην περιοχή μελέτης συναντώνται και ενότητες κροκαλοπαγών και ψαμμιτών, υπάρχει η δυνατότητα υδροπερατότητας εντός των



ρωγμών του πετρώματος (δευτερογενής περατότητα) και ανάπτυξης υπόγειας υδροφορίας. Ιδιαίτερα ο φλύσχη της Πίνδου παρουσιάζει τεκτονικές παραμορφώσεις και σε συνδυασμό με τις απότομες κλίσεις, την υδατική δράση και την ανομοιογενή στρωματοποίηση των σχηματισμών χαρακτηρίζεται από έντονη αστάθεια (Εικόνα 4.11).



**Εικόνα 4.11:** Σχηματισμοί φλύσχη στον ταμιευτήρα Αώου.

Ο κατακερματισμός των πετρωμάτων στην περιοχή μελέτης οφείλεται στην τεκτονική καταπόνηση και οδηγεί στη δημιουργία πολλαπλών υδροφοριών και λιμνών που διατηρούν το νερό εποχιακά ή όλο το έτος. Παράλληλα, οι έντονες μορφολογικές κλίσεις και η περαιτέρω μείωση της ανθεκτικότητας του φλύσχη λόγω δράσεων των επιφανειακών και υπόγειων νερών οδηγούν σε εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Ε.Α.Κ.), η περιοχή μελέτης ανήκει στην κατηγορία II, δηλαδή στη ζώνη μέσης σεισμικότητας.

#### 4.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑΣ

Όπως είναι γνωστό, η φυσική βλάστηση προκύπτει από την αλληλεπίδραση παραγόντων όπως το κλίμα, η γεωλογία, το μορφολογικό ανάγλυφο και η ανάπτυξη ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε μια περιοχή. Σχετικά με την υπό μελέτη περιοχή, η γεωγραφική της θέση σε συνδυασμό με την ευρεία ποικιλία ενδιαιτημάτων σε υψομετρική διαβάθμιση συνθέτουν ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη πλούσιας πανίδας και χλωρίδας. Παράλληλα, ο συνδυασμός της έντονης ποικιλομορφίας του κλίματος της ευρύτερης

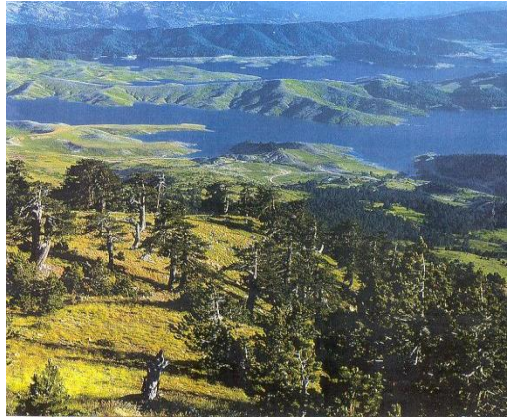
περιοχής και των μεγάλων υψομετρικών διαφορών και συνεχών εναλλαγών του αναγλύφου οδηγούν στη δημιουργία διαφόρων μικροπεριβαλλόντων.

Η απουσία σταθερής ευφωτικής ζώνης και φυτικής βλάστησης, κυρίως από ανώτερα φυτά, χαρακτηρίζει τον ταμιευτήρα της τεχνητής λίμνης Αώου. Η υδρόβια βλάστηση αποτελεί δείκτη ποιότητας των υδάτων και του οικοσυστήματος και πηγή αποθήκευσης διαφόρων συστατικών και αναπαραγωγικό υπόστρωμα πάνω στο οποίο αναπτύσσονται κάποιοι ζωικοί οργανισμοί. Η περιορισμένη φυτική βλάστηση οφείλεται στη διαρκή ίζηματογένεση και τη διακύμανση της στάθμης του νερού. Κατά τους θερμούς μήνες παρατηρείται η ανάπτυξη επιλιθικών φυκών, τα οποία καλύπτουν τις βιολογικές τους ανάγκες αξιοποιώντας τις υπάρχουσες τροφικές συνθήκες, καθώς και η δημιουργία φυτικής επικάλυψης από ένα είδος χαρόφυτου, το οποίο αναπτύσσεται το διάστημα Μαΐου-Σεπτεμβρίου (Υπουργείο Ανάπτυξης, 1998). Ζωοπλαγκτονικοί οργανισμοί και ιδιαίτερα τα κλαδοκεραιωτά, δηλαδή μικρά υδρόβια αρθρόποδα, συναντώνται σε αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις στη λίμνη, οι οποίες προσεγγίζουν τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις των φυσικών λιμνών.



**Εικόνα 4.12:** Τυπικό αναπαραγωγικό πεδίο υδατορεύματος του Αώου

Το ιδιαίτερο φυσικό περιβάλλον οδηγεί στην ανάπτυξη σπάνιων ενδημικών ειδών τα οποία συνθέτουν αξιόλογη πλούσια πανίδα και χλωρίδα. Στην ευρύτερη περιοχή, συναντώνται βελονοειδή, δάση οξιάς και ψηλοί θάμνοι (πυρνάρια κ.α.), ενώ στα μεγαλύτερα υψόμετρα κυριαρχεί η ποώδης βλάστηση έναντι της δενδρώδους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία βοσκοτόπων και την υποβάθμιση των εδαφών λόγω υπερβόσκησης. Παράλληλα, γεωργικές εκτάσεις υπάρχουν στο οροπέδιο Πολιτσών όπου καλλιεργούνται πατάτες Χρυσοβίτσας, κτηνοτροφικά φυτά (μηδική και χορτολίβαδα), καρυδιές, μηλιές, κ.α.



**Εικόνα 4.13:** Δασικές εκτάσεις περιμετρικά του ταμειυτήρα πηγών Αώου

(Πηγή: <http://filotis.itia.ntua.gr>)

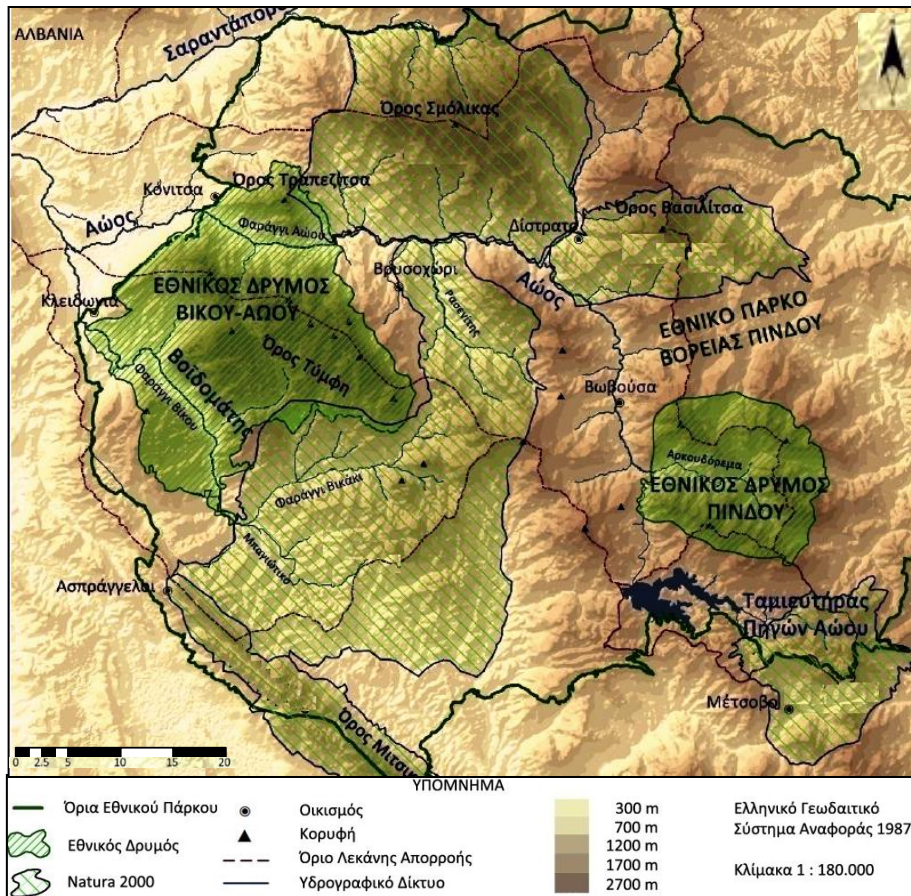
Οι εκτάσεις που περιβάλλουν τη λίμνη είναι κατά κύριο λόγο δασικές και θαμνώδεις μεταβατικές εκτάσεις, ενώ παρόμοιας μορφής δάση και λιβαδικές εκτάσεις κατακλύστηκαν μετά την αποψίλωση που απαιτήθηκε για τις ανάγκες του έργου. Ειδικότερα, το νότιο τμήμα της λίμνης περιλαμβάνει δάση πλατύφυλλων που ανήκουν στην ορομεσογειακή διάπλαση της οξιάς και της υβριδιγενούς ελάτης, ενώ η βορινή και βορειοδυτική πλευρά περιλαμβάνει κωνοφόρα και ανήκει στην ορομεσογειακή διάπλαση της μαύρης πεύκης. Τα δάση αυτά αποτελούν κυρίαρχο ορεινό τύπο βλάστησης και βρίσκονται σε στάδιο ανάκαμψης κυρίως λόγω της μείωσης φαινομένων πυρκαγιάς, βόσκησης κ.α. Ανατολικά της λίμνης υψώνονται ορεινοί όγκοι στους οποίους δεσπόζουν δάση ψυχρόβιων κωνοφόρων, κυρίως μαύρης πεύκης και διάσπαρτα ρόμπολα. Στη δυτική πλευρά υπάρχει μια μικρή περιοχή μικτού δάσους και δάση οξιάς, ενώ οι υπόλοιπες εκτάσεις καταλαμβάνουν θαμνώδεις μεταβατικές και διάσπαρτα μεμονωμένα δένδρα (κορομηλιές, κράταιγοι). Κατά τους θερινούς μήνες είναι εμφανής η ύπαρξη αιθαλούς βλάστησης, ενώ τα δάση οξιάς κυριαρχούν στην περιοχή κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου. Ακολούθως (Εικόνα 4.14), φαίνονται οι δασικές εκτάσεις που κυριαρχούν στην ευρύτερη περιοχή της λίμνης Πηγών Αώου σε διάφορες εποχές του έτους.



**Εικόνα 4.14:** Εποχική κατανομή δασικών εκτάσεων του ταμιευτήρα πηγών Αώου

Η αξιοποίηση ορισμένων από τις ανωτέρω εκτάσεις υλοποιείται από δημόσιες υπηρεσίες των δασαρχείων της περιοχής και από τοπικούς Ελεύθερους Δασικούς Συνεταιρισμούς Εργασίας (Ε.Δ.Σ.Ε) (Κατσούλης, 2011). Οι υπηρεσίες αυτές εξασφαλίζουν την ορθολογική διαχείριση των δασών και δασικών εκτάσεων, προσφέροντας, συνάμα, οικονομικά οφέλη στους κατοίκους των γειτονικών περιοχών (π.χ Μέτσοβο, Βωβούσα). Παράλληλα, λόγω της σημαντικότητας και της ανάγκης διαφύλαξης των περιβαλλόντων στοιχείων της λίμνης (φυσικό κάλλος, χλωρίδα, πανίδα), η ευρύτερη περιοχή της λίμνης έχει χαρακτηριστεί ως προστατευόμενος Εθνικός Δρυμός. Έτσι, βορειοανατολικά της λίμνης εκτείνεται ο Εθνικός Δρυμός Πίνδου και βορειοδυτικά βρίσκεται ο Εθνικός Δρυμός Βίκου-Αώου, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 4.15).





Εικόνα 4.15: Προστατευόμενες περιοχές της ευρύτερης περιοχής

(Πηγή: Λεονταρίτης, 2011)

Αναφορικά με τη χλωρίδα της περιοχής, παρατηρείται αφθονία διαφόρων ειδών. Μεταξύ αυτών, υπάρχουν φυτά με φαρμακευτικές ιδιότητες (φασκόμηλο, μέντα, τσάι βουνού), αυστραλιανή τουλίπα καθώς επίσης πέντε είδη άγριου κρίνου στο βορειοδυτικό κυρίως τμήμα της λίμνης. Αξίζει να αναφερθεί πως τα παραπάνω φυτά αποτελούν το ένα έκτο του συνόλου της ελληνικής χλωρίδας. Εξίσου πλούσια εμφανίζεται και η ορνιθοπανίδα της ευρύτερης περιοχής, γεγονός που συνέβαλε στην ένταξη της περιοχής στις περιοχές Natura 2000. Στα κυριότερα είδη που συναντώνται ανήκουν μεταναστευτικά και παρυδάτια είδη πουλιών (αλκυόνες, βουτηχτάρια, μαυροπελαργός, σταχτοσουσουράδες, τσικνιάδες κ.α.), αλλά και άλλα είδη, όπως ξεφτέρι, πετρίτης, κούκος, γκιώνης, φάσσα, μαυροσταχτάρα, χιονότσιχλα, στραβολαίμης, κοκκινολαίμης, κοκκινοκαλιακούδα, διάφορα είδη χελιδονιού, παπιών και τσικλιτάρας κ.α.

Το μεγάλο υψόμετρο της περιοχής ευνοεί την ανάπτυξη της "ζώνης πέστροφας", δηλαδή ψυχρόφιλων και έντονα ρεόφιλων ειδών, ενδημικών της Ελλάδας, που προϋπήρχαν

στην περιοχή. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται τρία είδη αυτόχθονων ψαριών (πέστροφα, μπριάνα και πλατίτσα), ένα είδος караβίδας καθώς και ένα είδος αμερικανικής πέστροφας που μεταφέρθηκε στον ταμιευτήρα μετά την ολοκλήρωση των έργων (Υπουργείο Ανάπτυξης, 1998). Επιπλέον, συναντάται χέλι, τυρινάρι, λαυράκι, πλατίνα και συρτάρι (Κατσούλης, 2011). Η εισαγωγή νέου είδους πέστροφας για την πιθανή βελτίωση του οικοσυστήματος έλαβε χώρα καθώς η υπάρχουσα ιχθυοπανίδα προήλθε από την προϋπάρχουσα του ποταμού Αώου η οποία συνίσταται από ελάχιστα είδη (Υπουργείο Ανάπτυξης, 1998). Φυσικά, τα παραπάνω είδη εμφανίζουν οικολογική και μορφολογική σταθερότητα που προκύπτει από την ομαλή προσαρμογή των συγκεκριμένων ψαριών στις νέες περιβαλλοντικές και οικολογικές συνθήκες (λιμναίες). Ωστόσο, οι μεταβολές που προκλήθηκαν από τα υλοποιούμενα τεχνικά έργα επέφεραν σημαντική μείωση ή εξαφάνιση ειδών τα οποία δεν κατάφεραν να προσαρμοστούν και η κατανομή τους περιορίζεται πλέον στο χώρο εκβολής στους ταμιευτήρες ή απορροής από αυτούς.

Τέλος, αναφορικά με την πανίδα, στα δασόβια θηλαστικά της περιοχής συμπεριλαμβάνονται η αλεπού, λύκος, ζαρκάδι, ελάφι, αγριογούρουνο, σκίουρος κ.α. Επιπλέον, έχουν σημειωθεί διελεύσεις αρκούδας, λύκων και η ύπαρξη δενδρομυωξού και νανομυγαλίδας. Στα αμφίβια της περιοχής ανήκουν η σαλαμάνδρα, ο τρίτων, ο φρύνος, ο τυφλίτης, ο αβλέφαρος, η σαΐτα, η οχιά, το νερόφιδο, διάφορα είδη σαύρας και βατράχων κ.α.

#### 4.5. ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ-ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ

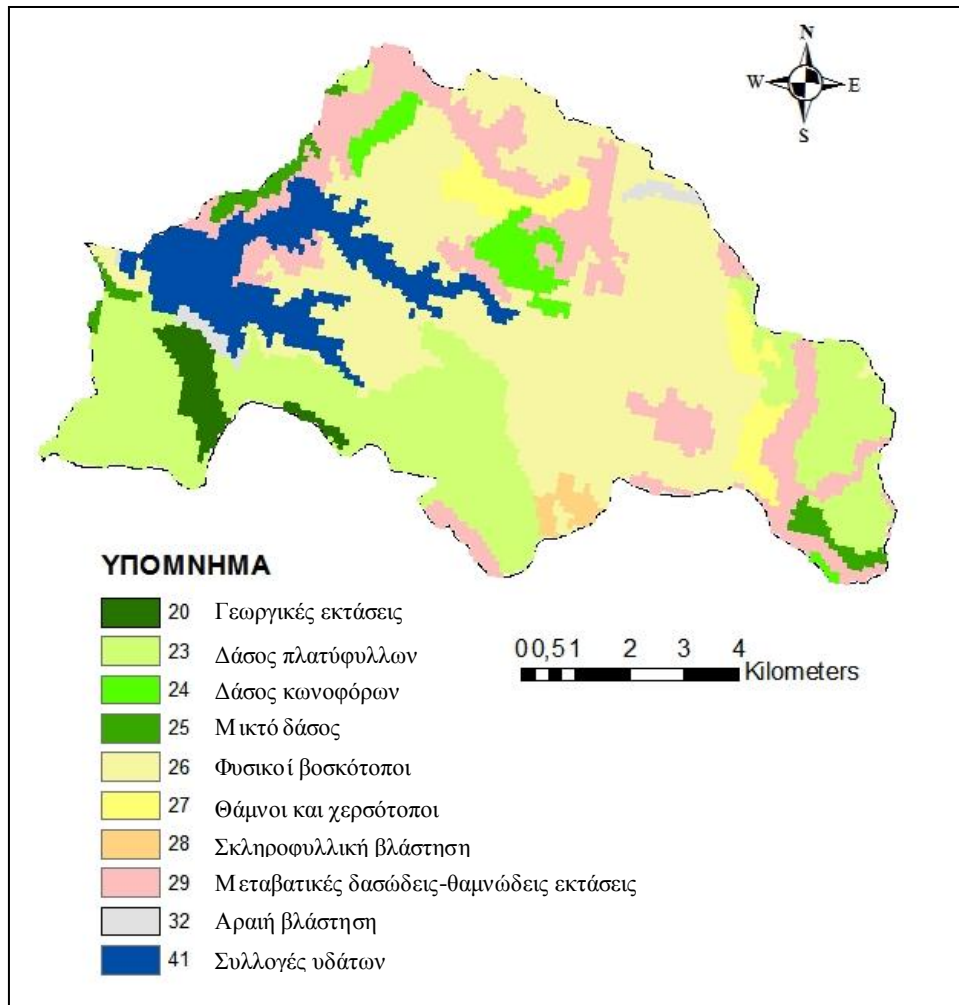
Όπως είναι ευρέως γνωστό, οι ανθρώπινες δραστηριότητες και κυρίως η γεωργική και η κτηνοτροφική προκαλούν εμφανείς επιδράσεις σε ταμιευτήρες μέσω ρυπαντικών φορτίων που παράγονται. Η ανάπτυξη οικονομικών δραστηριοτήτων μεταβάλλει την οικολογική ισορροπία και καθιστά ακατάλληλη ή απαγορευτική τη χρήση νερού για κατανάλωση και για την κάλυψη υδρευτικών αναγκών. Παράλληλα, οι μεταβολές των κλίσεων και του ύψους των φυσικών κλιτύων που προκαλούνται κυρίως μέσω ανθρώπινων παρεμβάσεων (π.χ. διανοίξεις και διαπλατύνσεις οδικού δικτύου) οδηγούν συνήθως σε εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 4.16), περιοχές

περιμετρικά της τεχνητής λίμνης κατακλύστηκαν με νερό μετά από αποψιλώσεις δασών και δασικών εκτάσεων που έλαβαν χώρα για τη διαμόρφωση του ταμιευτήρα.



**Εικόνα 4.16:** Αποψιλωμένες περιοχές του ταμιευτήρα πηγών Αώου

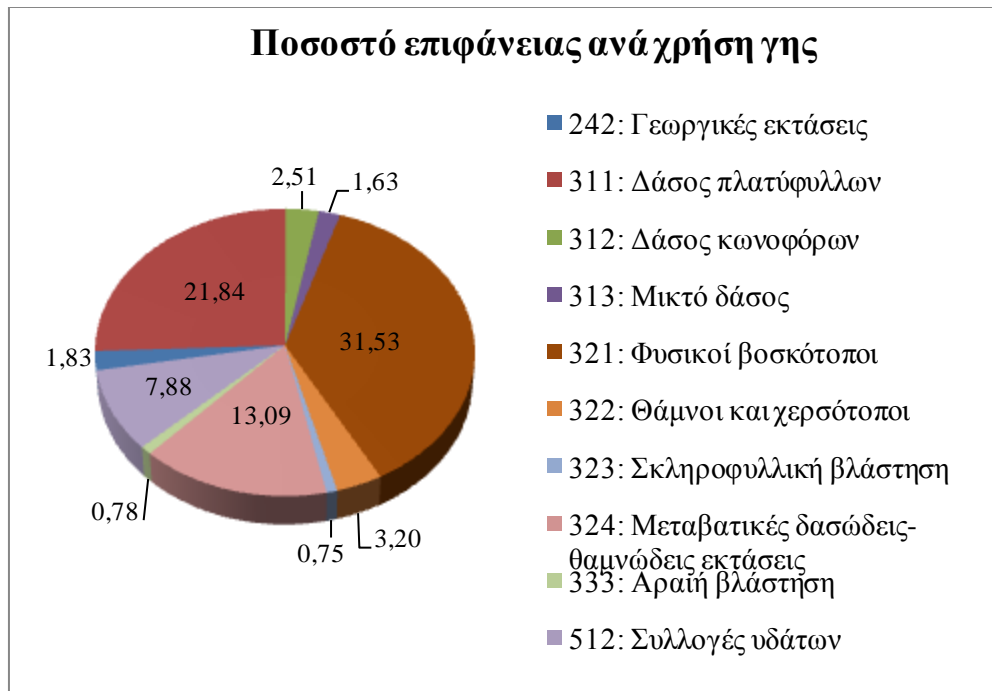
Όσον αφορά στον υπό μελέτη ταμιευτήρα, οι περιβαλλοντικές οχλήσεις που προκαλεί είναι ελάχιστες (Υπουργείο Ανάπτυξης, 1998). Οι κύριες χρήσεις γης που αναπτύσσονται στην περιοχή είναι η κτηνοτροφία, η δασοπονία και η γεωργία. Επιπλέον, η θήρα, η αλιεία και η δασική αναψυχή αποτελούν δευτερεύουσες χρήσεις γης. Στον επόμενο χάρτη (Εικόνα 4.17) παρουσιάζεται η κατανομή των χρήσεων γης στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής σύμφωνα με την ονοματολογία της Βάσης Δεδομένων Κάλυψης Γης CORINE (Co-ordination of Information on the Environment) για το έτος 2000.



**Εικόνα 4.17:** Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής πηγών Αώου

Όπως γίνεται αντιληπτό, σημαντικό τμήμα της λεκάνης καταλαμβάνεται από φυσικούς βοσκότοπους και δάση πλατύφυλλων. Οι γεωργικές εκτάσεις που συναντώνται αποτελούνται κυρίως από γη που χρησιμοποιείται για γεωργία σε συνδυασμό με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης. Η νοτιοανατολική πλευρά της λεκάνης, η οποία ανήκει σε προστατευόμενη περιοχή Natura 2000, καλύπτεται από εκτάσεις μικτού δάσους, πλατύφυλλων και μεταβατικών δασώδων και θαμνώδων. Στο παρακάτω κυκλικό διάγραμμα (Εικόνα 4.18) φαίνονται τα ποσοστά της επιφάνειας της λεκάνης απορροής που καταλαμβάνει η κάθε χρήση γης.





**Εικόνα 4.18:** Ποσοστά κάλυψης της λεκάνης ανά χρήση γης

Πριν την κατασκευή των έργων και του Εθνικού Δρυμού, η κτηνοτροφία αποτελούσε κυρίαρχη χρήση γης στην ευρύτερη περιοχή. Σήμερα, πρόβατα, αγελάδες, κατσίκια, άλογα και ημίονοι συνθέτουν το ζωικό κεφάλαιο της περιοχής. Η έντονη κτηνοτροφική δραστηριότητα δημιουργεί εστίες διάβρωσης λόγω αγροτικών οχημάτων που διακινούνται στις λιβαδικές εκτάσεις αλλά και της υπερβόσκησης. Η ανάπτυξή της παρουσιάζεται κυρίως στην παραλίμνια περιοχή στο ανατολικό και βορειοανατολικό τμήμα όπου υπάρχουν χορτολιβαδικές εκτάσεις, βοσκότοποι καθώς επίσης σταβλικές εγκαταστάσεις και ποιμνιοστάσια (Κατσούλης, 2011). Οι εκτάσεις αυτές ανήκουν στην ψευδοαλπική ζώνη και προσφέρουν βοσκήσιμη ύλη καθ' όλη τη διάρκεια των θερινών μηνών (περίοδος Μαΐου-Οκτωβρίου), κατά τους οποίους Βλαχόφωνοι πληθυσμοί μεταφέρονται στην περιοχή. Τις υπόλοιπες εποχές του έτους τα λιβάδια ξηραίνονται και καθίστανται ακατάλληλα για βόσκηση. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη την εγγύτητα της περιοχής όπου λαμβάνει χώρα η κτηνοτροφική δραστηριότητα αλλά και το επικλινές του εδάφους, η τεχνητή λίμνη Πηγών Αώου αποτελεί δέκτη θρεπτικών συστατικών λόγω της απόπλυσης της κοπριάς.

Φυσικά, η κτηνοτροφική δραστηριότητα της ευρύτερης περιοχής οδηγεί στην παραγωγή ρυπαντικού φορτίου, το οποίο αποτελεί συνάρτηση του πλήθους και του μέσου βάρους των διαφόρων ζωικών ειδών. Η ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων στην παραλίμνια περιοχή της τεχνητής λίμνης δε θεωρείται σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη το

γεγονός ότι τα ζώα είναι ελεύθερης βοσκής και, συνεπώς, κλάσμα της ποσότητας αυτής αποικοδομείται, ανάλογα με τις εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες. Έτσι, μικρές ποσότητες αζώτου και φωσφόρου ενδέχεται να φτάσουν στη λίμνη.

Γεωργικές και καλλιεργητικές δραστηριότητες αναπτύσσονται κυρίως στο οροπέδιο των Πολιτσών σε εύφορη περιοχή στο νότιο τμήμα της λίμνης. Στην περιοχή αυτή, και συγκεκριμένα κάτω από το βοηθητικό φράγμα και τα τρία αυχενικά φράγματα του σταθμού, υπάρχουν οργανωμένες καλλιέργειες πατάτας και κηπευτικών. Οι εν λόγω καλλιέργειες υλοποιούνται με ιδιαίτερη προσοχή ως προς τη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, καθώς, όπως έχει προαναφερθεί, το πλεονάζον νερό τους υδροδοτεί τη λίμνη και, επομένως, ενδέχεται να τη ρυπάνει (Κατσούλης, 2011).

Σύμφωνα με σχετική μελέτη για τον έλεγχο της ποιότητας υδάτων της τεχνητής λίμνης (Υπουργείο Ανάπτυξης, 1998), ο ταμιευτήρας δεν επιβαρύνεται σημαντικά από τα ρυπαντικά φορτία που δέχεται. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση αζωτούχων λιπασμάτων για τη λίπανση γεωργικών εκτάσεων γίνεται με σύνεση, ξεπερνώντας ελάχιστα την πραγματικά απαιτούμενη ποσότητα για την ανάπτυξη των φυτών. Παράλληλα, οι ποσότητες καλίου που χρησιμοποιούνται για τη λίπανση υπολείπονται σημαντικά των πραγματικών, ενώ, αντίθετα, παρατηρούνται ορισμένες πλεονάζουσες, αδιάλυτες ποσότητες φωσφορικών ενώσεων, οι οποίες μακροχρόνια ενδέχεται να προκαλέσουν προβλήματα στον υδροφόρο ορίζοντα. Επιπλέον, στη λεκάνη απορροής του ποταμού Αώου και της λίμνης δεν υπάρχουν αναπτυγμένοι οικισμοί, επομένως η ποσότητες αστικών λυμάτων που δέχεται η λίμνη παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα.

Τέλος, δεν παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις της απορροής των νερών διότι η παροχή είναι σχετικά σταθερή και χαμηλή. Ωστόσο, η ιχθυοπανίδα της περιοχής επηρεάζεται από ορμητικούς μικρούς καταρράκτες οι οποίοι δημιουργήθηκαν υπό την επίδραση γεφυρών με τσιμεντένιες βάσεις. Οι γέφυρες αυτές κατασκευάστηκαν σε διάφορες θέσεις του δρόμου περιμετρικά του ταμιευτήρα και εμποδίζουν την άνοδο των ιχθυοπληθυσμών προς τα γεννητικά τους πεδία (Εικόνα 4.19).



**Εικόνα 4.19:** Τεχνικά έργα περιμετρικά του ταμιευτήρα

#### 4.6. ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΠΗΓΩΝ ΑΩΟΥ

Σημείο – κλειδί της ερευνητικής μεθοδολογίας αποτελεί η υδρογραφική αποτύπωση της λίμνης Πηγών Αώου που διενεργήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος "Ογκομέτρηση Ταμιευτήρα ΥΗΣ Πηγών Αώου" και πραγματοποιήθηκε από ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου Ιζηματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, με επιστημονικό υπεύθυνο τον κ. Αναστασάκη Γεώργιο. Στην εν λόγω μελέτη, υλοποιήθηκαν εργασίες πεδίου με χρήση των σκαφών ΟΔΥΣΣΕΑΣ και ΔΗΜΗΤΡΗΣ του Πανεπιστημίου Αθηνών και του ΑΩΟΣ της Δ.Ε.Η. Οι εργασίες έλαβαν χώρα κατά το διάστημα από 4/6/1996 έως 2/7/1996 και περιελάμβαναν την εγκαθίδρυση ενός σταθμού βάσης δορυφορικού συστήματος παγκόσμιου εντοπισμού GPS στη στέψη του φράγματος, τη χαρτογράφηση της ακτογραμμής της λίμνης και των νησίδων με χρήση διαφορικού δέκτη GPS με ασύρματη μεταφορά διορθώσεων και, τέλος, τη βυθομέτρηση της λίμνης με συλλογή της θέσης του σκάφους με διαφορικό δέκτη GPS με ασύρματη μεταφορά διορθώσεων.

Ο σταθμός βάσης συλλογής δορυφορικών δεδομένων GPS εγκαταστάθηκε στο οίκημα της στέψης του κυρίως φράγματος και η επιλογή των τριγωνομετρικών σημείων έγινε σύμφωνα με πληροφορίες τις Δ.Ε.Η. Οι συντεταγμένες που χρησιμοποιήθηκαν για την εγκατάσταση του σταθμού περιελάμβαναν συντεταγμένες τριγωνομετρικού βάθρου στην αρχή της στέψης του κυρίως φράγματος συναρτήσεως άλλων δύο που βρίσκονται στη στέψη του φράγματος σε προβολή Hatt. Η μεταφορά συντεταγμένων στο σημείο εγκατάστασης της

κεραίας GPS πραγματοποιήθηκε με χρήση δύο διαφορετικών συστημάτων διαφορικού GPS, ενώ ο έλεγχος του υψομέτρου έγινε με χωροστάθμιση.

Δεδομένου ότι το σύστημα GPS χρησιμοποιεί ως σύστημα αναφοράς το Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (WGS '84), οι καρτεσιανές συντεταγμένες Hatt μετατράπηκαν σε ελλειψοειδείς (Bessel) το οποίο χρησιμοποιεί η απεικόνιση Hatt. Στη συνέχεια, οι ελλειψοειδείς αυτές μετατράπηκαν στο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς μέσω παραμετροποιημένων τιμών και χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή των σημείων. Η απόδοση των στοιχείων στο χάρτη βυθομετρίας του ταμιευτήρα έγινε σε συντεταγμένες Hatt ακολουθώντας την αντίστροφη πορεία.

Δωδεκακάναλος δέκτης χρησιμοποιήθηκε στο σταθμό βάσης, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με προσωπικό υπολογιστή συλλογής στοιχείων. Παράλληλα, ο δέκτης GPS βρισκόταν σε σειρά συνδεδεμένος με ασύρματο μεταφοράς διορθώσεων. Η χαρτογράφηση της ακτογραμμής πραγματοποιήθηκε με χρήση ενός φορητού δωδεκανάναλου δέκτη συνδεδεμένου με ένα φορητό καταγραφέα στοιχείων και έναν ασύρματο δέκτη διορθώσεων.

Για την εγκατάσταση της κεραίας του σταθμού βάσης έγινε μεταφορά συντεταγμένων (με ακρίβεια μεγαλύτερη των 40 εκατοστών) από το τριγωνομετρικό βάθρο στην αρχή της στέψης του κυρίως φράγματος σε σημείο που προϋπήρχε με μόνιμη σήμανση από την οδοποιία της περιφερειακής οδού της λίμνης. Η ακρίβεια που επιτεύχθηκε ικανοποιεί τις απαιτήσεις της Ελληνικής Υδρογραφικής Υπηρεσίας και του Διεθνούς Υδρογραφικού Οργανισμού, οι οποίες αφορούν ακρίβεια εντοπισμού 1 και 1,5 χλστ. αντίστοιχα επί της κλίμακας του χάρτη.

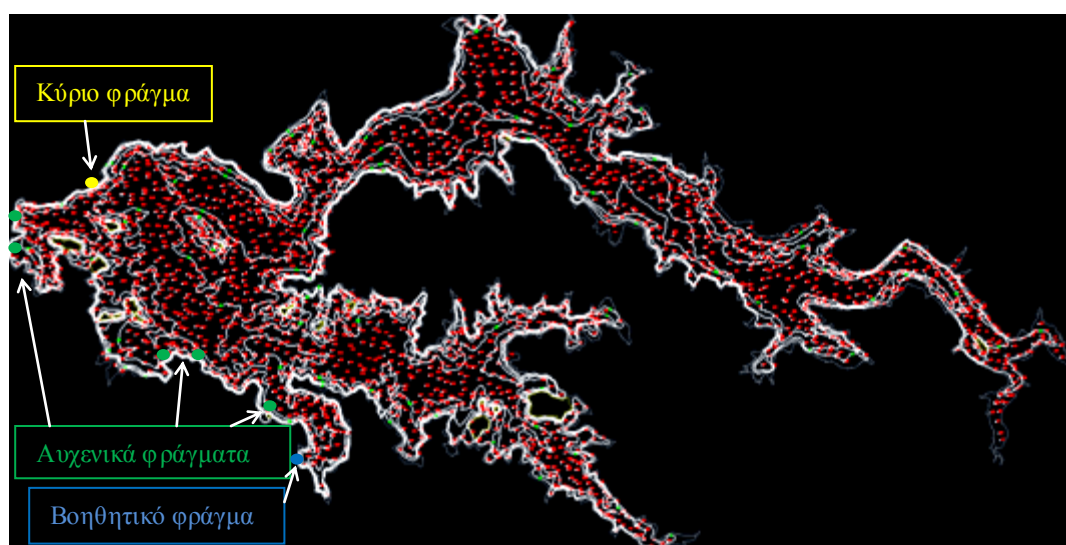
Η βυθομέτρηση έγινε με ψηφιακό βυθόμετρο ικανοποιητικής ακρίβειας σύμφωνα με τις προδιαγραφές, ενώ η ακτίνα του διαφορικού GPS ήταν σε ευθεία κατακόρυφη γραμμή στερεωμένη στον εκπομπέα του βυθομέτρου συνδεδεμένου σε σειρά με ασύρματο δέκτη μεταφοράς διορθώσεων θέσης GPS από το σταθμό βάσης. Η ολική διάταξη ήταν συνδεδεμένη με καταγραφέα στοιχείων, ενώ η καταγραφή των συντεταγμένων και του ψηφιακού βάθους επαναλαμβανόταν ανά δευτερόλεπτο.

Φυσικά, η ύπαρξη ψηλών δέντρων και βλάστησης στο ύψος της στάθμης των υδάτων του ταμιευτήρα αλλά και απότομων κορυφών κοντά στην ακτογραμμή προκάλεσε δυσκολίες επικοινωνίας των στοιχείων GPS, απαιτώντας πολλές φορές την εκ νέου αποτύπωση ορισμένων περιοχών. Παράλληλα, η πολυπλοκότητα της γεωμορφολογίας του

ταμιευτήρα, η ύπαρξη νεόφερτων όγκων ιζημάτων στις εκβολές των χειμάρρων τροφοδοσίας κ.α. κατέστησαν απαραίτητη τη χρήση των τριών σκαφών που προαναφέρθηκαν, προκειμένου να εκτελεστεί η αξιόπιστη αποτύπωση της περιοχής.

Το υψόμετρο της στάθμης της λίμνης λήφθηκε από τις μετρήσεις του σταθμήμετρου που βρίσκεται εγκατεστημένο στο σταθμό υδροληψίας. Λόγω της σχετικά περιορισμένης επιφάνειας της λίμνης, το υψόμετρο αυτό θεωρήθηκε κοινό για το σύνολο της επιφάνειας με ακρίβεια καλύτερης του εκατοστού. Με τον τρόπο αυτό, διορθώθηκε το σφάλμα βυθίσματος του προβολέα. Επιπλέον, με δεδομένο το υψόμετρο στάθμης της λίμνης ανά οκτώ ώρες και με καταγραφή του βυθίσματος του προβολέα και της ώρας σε κάθε έξοδο για βυθομετρία του σκάφους ΟΔΥΣΣΕΑΣ ήταν γνωστό το απόλυτο υψόμετρο του προβολέα.

Τα δεδομένα εξοπλισμού και η συλλεγόμενη πληροφορία χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση του πυθμένα της λίμνης και της ακτογραμμής. Η αποτύπωση του πυθμένα διήρκησε 10 ημέρες και το πλήθος των σημείων που συγκεντρώθηκαν ήταν περίπου 130.000. Αντίστοιχα, η αποτύπωση της ακτογραμμής διήρκησε 14 ημέρες και χρησιμοποιήθηκαν 11.000 σημεία για το σκοπό αυτό. Ως αποτέλεσμα, μέσω των προγραμμάτων AutoCAD και Surfer, δημιουργήθηκε το ακόλουθο σχέδιο (Εικόνα 4.20) και καταστρώθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και ισοβαθών. Τέλος, σύμφωνα με την παραπάνω μελέτη, για τους υπολογισμούς της οποίας λήφθηκε στάθμη αναφοράς της λίμνης 1342,64 m, η επιφάνεια της λίμνης ανέρχεται σε 8.638.237 m<sup>2</sup>, ενώ το μήκος της ακτογραμμής της προσεγγίζει τα 61.484 m.



**Εικόνα 4.20:** Βυθομετρικός χάρτης ταμιευτήρα πηγών Αώου έτους 1996.

## **Κεφάλαιο 5: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ**

Αρχικά, στόχο του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η περισσότερο λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου RUSLE, η οποία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα μελέτη για την εκτίμηση του στερεοφορτίου. Στη συνέχεια, ακολουθεί η ανάλυση της διαδικασίας που υλοποιήθηκε στον ταμιευτήρα Πηγών Αώου ώστε να προσδιοριστεί ο όγκος φερτών υλών, αξιοποιώντας πραγματικές μετρήσεις και δεδομένα, και να συγκριθεί με την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει με χρήση της μεθόδου RUSLE. Τέλος, παρουσιάζονται τα αρχικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση της ολικής διαδικασίας.

### **5.1. ΜΕΘΟΔΟΣ RUSLE**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας USLE δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά το 1965 ως ολοκληρωμένο τεχνολογικό εργαλείο για την εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης και, αρχικά, χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της μακροπρόθεσμης μέσης ετήσιας εδαφικής διάβρωσης συγκεκριμένων εδαφικών κλίσεων και για συγκεκριμένες χρήσεις γης και διαχειριστικές πρακτικές (καλλιέργειες, βοσκότοποι). Με την αναθεώρηση και τις συνεχείς βελτιώσεις του μοντέλου, η παγκόσμια αναθεωρημένη εξίσωση εδαφικής απώλειας (Revised Universal Soil Loss Equation-RUSLE) δημοσιεύτηκε αρχικά ως πλήρως μηχανογραφημένη έκδοση το 1991 και αποτελεί μία εμπειρική εξίσωση που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση εδαφικών απωλειών κάτω από διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές. Σε συνδυασμό με την τροποποιημένη παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας (Modified Universal Soil Loss Equation- MUSLE), η οποία αποτελεί μέτρο εκτίμησης της εδαφικής απώλειας σε επίπεδο πλημμυρικού επεισοδίου συνιστούν την “οικογένεια” των USLE μοντέλων.

Διατηρώντας τη βασική μορφή της USLE, η RUSLE χρησιμοποιείται για τη λεπτομερέστερη εκτίμηση της επιφανειακής και αυλακωτής διάβρωσης συναρτήσει βελτιωμένων παραγόντων. Στα πρόσθετα δεδομένα που εισάγει η RUSLE σε σύγκριση με την USLE συμπεριλαμβάνονται στοιχεία χαρτών με ισοδιαβρωτικές καμπύλες, υποπαράμετροι σχετικές με την επίδραση της κάλυψης του εδάφους, της έντονης εδαφικής κλίσης και του μήκους των πρανών, παράγοντες συσχέτισης διαβρωσιμότητας και χρόνου και δεδομένα εκτίμησης νέων πρακτικών συντήρησης πέραν των καλλιεργήσιμων εδαφών

(ΕΛ.Γ.Ο.-So.S, 2011). Ως αποτέλεσμα, η RUSLE εφαρμόζεται αποτελεσματικά σε επίπεδο λεκάνης απορροής, μεγάλης ποικιλίας κλιμάτων και περιοχών. Επιπλέον, η σχετική απλότητα στη χρήση του λόγω του μικρού αριθμού δεδομένων που απαιτούνται σε συνδυασμό με την ιδιαίτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του μοντέλου καθιστούν το RUSLE το πλέον ευρέως διαδεδομένο εμπειρικό μοντέλο (Φλαμπούρης, 2008). Η τελευταία έκδοση της (RUSLE2) αποτελεί ένα εργαλείο λογισμικού ανοικτού κώδικα με τις κατάλληλες βοηθητικές βάσεις δεδομένων για την επικράτεια των ΗΠΑ (Βαχαβιώλος, 2014).

Ωστόσο, ο εμπειρικός χαρακτήρας του μοντέλου απαιτεί εξοικείωση με τη φυσική διαδικασία και ύπαρξη επαρκών και υψηλής ακρίβειας δεδομένων εισόδου για την εξαγωγή αντίστοιχης ακρίβειας συμπερασμάτων. Παράλληλα, δεν υλοποιείται σαφής διαχωρισμός του κλάσματος της εδαφικής διάβρωσης που μετατρέπεται σε στερεοαπορροή και, συνεπώς, οι περιοχές εναπόθεσης φερτών υλών παραμένουν άγνωστες. Η αδυναμία συσχέτισης της εδαφικής απώλειας με τη στερεοαπορροή αντιμετωπίζεται με τη χρήση του συντελεστή στερεοαπορροής. Ο συντελεστής αυτός αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960 και εκφράζει το ποσοστό της εδαφικής διάβρωσης που μετατρέπεται σε στερεοαπορροή. Η συσχέτιση για τον προσδιορισμό του γίνεται είτε βάσει της έκτασης της λεκάνης απορροής είτε βάσει των γεωμορφολογικών/φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης ή/και του υδρογραφικού δικτύου. (Βαχαβιώλος, 2014)

Αναφορικά με τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας των μοντέλων USLE και RUSLE, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P, \quad [5.1]$$

όπου:

- R: συντελεστής διαβρωτικότητας βροχόπτωσης (Rainfall Erosivity)
- K: συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους (Soil Erodibility)
- L: συντελεστής μήκους κλίσης (Slope Length)
- S: συντελεστής βαθμού κλίσης (Slope Steepness)
- C: συντελεστής διαχείρισης - κάλυψης γης (Cover Management)
- P: συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (Support Practice)

Οι ανωτέρω συντελεστές αποτελούν τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την εδαφική διάβρωση (Κουλούρη, 2004). Σχετίζονται με τη δομική σταθερότητα του

εδάφους και την ικανότητα απορρόφησης σταγονιδίων βροχής, ενώ η λανθασμένη εκτίμηση κάποιου εξ' αυτών σπάνια οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Επομένως, η χρήση του μοντέλου οφείλει να γίνεται προσεκτικά, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής (βροχογραφικά δεδομένα, βλάστηση κ.α.). Ο παράγων της βροχόπτωσης  $R$  ( $MJ \cdot mm/ha \cdot hr \cdot year$ ) και ο παράγων διαβρωσιμότητας του εδάφους  $K$  ( $ton \cdot hr/MJ \cdot mm$ ), οι οποίοι υποδηλώνουν το αίτιο και το αποτέλεσμα της διάβρωσης, έχουν διαστάσεις, ενώ οι υπόλοιποι, οι οποίοι θεωρούνται συντελεστής προσαρμογής, είναι αδιάστατοι.

Φυσικά, τεχνικές GIS διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή των τιμών των συντελεστών της USLE, καθώς μπορούν αν αξιοποιηθούν για την αποθήκευσή τους ως μεμονωμένα ψηφιακά επίπεδα (Βιδάλη, 2013). Ο πολλαπλασιασμός αυτών οδηγεί στη δημιουργία ενός δυναμικού χάρτη εδαφικής διάβρωσης, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση πιθανών διαβρωτικών δυνάμεων με στόχο την πρόληψη της εδαφικής υποβάθμισης μέσω κατάλληλων προληπτικών αντιδιαβρωτικών μέτρων.

Αξιόλογη προσπάθεια προσδιορισμού των τιμών των πέντε συντελεστών της εξίσωσης σε ευρωπαϊκό επίπεδο πραγματοποιήθηκε σε πρόσφατη σχετική μελέτη μέσω του μοντέλου RUSLE 2015 (E.S.DA.C., 2015). Στην εν λόγω μελέτη χρησιμοποιήθηκε πλήθος βροχομετρικών δεδομένων, κανονισμοί της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής, η βάση δεδομένων χρήσεων γης Corine, στοιχεία της ευρωπαϊκής στατιστικής υπηρεσίας Eurostat και διεξήχθησαν δειγματοληπτικοί έλεγχοι εδαφικών υλικών σε ολόκληρη την Ευρώπη. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκε το μοντέλο εκτίμησης της υδατικής διάβρωσης σε ευρωπαϊκό επίπεδο, δεδομένα του οποίου αξιοποιούνται και αξιολογούνται στην παρούσα εργασία.

### **5.1.1. Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης (Rainfall erosivity factor-R)**

Εμβαθύνοντας στην έννοια του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης, ο συντελεστής αυτός αντιπροσωπεύει τη διαβρωτική δύναμη της βροχόπτωσης στο έδαφος ανεξαρτήτως του εδαφικού τύπου, ενώ η ένταση και η χρονική κατανομή των βροχοπτώσεων καθορίζουν κυρίως το μέγεθός του. Ειδικότερα, η τιμή του συντελεστή εξαρτάται από τη συνολική κινητική ενέργεια των βροχοπτώσεων και τη μέγιστη ένταση βροχόπτωσης διάρκειας 30 λεπτών. Αρχικά, εκτιμάται ο συντελεστής για κάθε επεισόδιο βροχής διάρκειας τουλάχιστον 30 λεπτών εντός ενός έτους και το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών συνιστά τον ετήσιο συντελεστή, όπως υποδεικνύεται στην ακόλουθη σχέση:



$$\bullet \quad R = \sum_{j=1}^n (60 \cdot E \cdot I_{30}) \quad [\text{MJ} \cdot \text{mm} / \text{ha} \cdot \text{hour} \cdot \text{year}] \quad [5.2]$$

όπου:

n: ο ετήσιος αριθμός καταιγίδων

P: το ολικό ύψος βροχόπτωσης μιας καταιγίδας [mm]

$I_{30}$ : η μέγιστη ένταση βροχής σε χρονικό διάστημα 30 λεπτών [mm/min]

E: η κινητική ενέργεια =  $0,29 \cdot (1 - 0,72 \cdot e^{-3i})$  [MJ/ha . mm]

i: η μέση ένταση της βροχόπτωσης [mm/min].

Δεδομένου ότι η μέση ετήσια τιμή του συντελεστή R για μια χρονοσειρά ετών είναι η παράμετρος που ενδιαφέρει, απαιτείται η εκτέλεση μιας επίπονης και χρονοβόρας διαδικασίας μέσω της μελέτης μακροχρόνιων μετεωρολογικών μετρήσεων (Παπαρρίζος και Χατζημηλιάδης, 2010). Επιπλέον, τα δεδομένα που απαιτούνται είναι αδύνατο να καταγραφούν και να διατεθούν από τους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί παγκοσμίως εναλλακτικές προσεγγίσεις εκτίμησης της διαβρωτικότητας της βροχής συναρτήσει των ετήσιων βροχοπτώσεων για την αντιμετώπιση της ευμεταβλητότητας του μεγέθους του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης χωρικά αλλά και σε ετήσια, εποχιακή και μηνιαία βάση.

Η έντονη χωρική μεταβλητότητα του παράγοντα R κατά τη διάρκεια του έτους δυσχεραίνει τον ακριβή υπολογισμό του μεγέθους του. Η σημαντική διασπορά τιμών του R είναι εμφανής και στην Ελλάδα, καθώς, για παράδειγμα, οι περιοχές που βρίσκονται δυτικά της οροσειράς της Πίνδου δίνουν τουλάχιστον διπλάσιο R σε σύγκριση με τις ανατολικές (Φλαμπούρης, 2008). Παραδείγματα εναλλακτικών προσεγγίσεων προσδιορισμού της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης αποτελούν η ύπαρξη σχετικών πινάκων, χαρτών και εμπειρικών γραμμικών σχέσεων, οι οποίες συσχετίζουν το μέσο ετήσιο/μηνιαίο/ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης μιας λεκάνης απορροής με την ετήσια τιμή του συντελεστή R (Μαμάσης et al, 2015).

Μεταξύ των γραμμικών σχέσεων μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και ετήσιου συντελεστή R που έχουν καθιερωθεί σε διάφορες περιοχές του κόσμου, αναφέρονται η εξίσωση του El-Swaify (1985) για την Ταϊλάνδη [5.3], των Lo και λοιπών (1985) για τη Χαβάη [5.4], των Renard και Freimund (1994) [5.5α,β], του Roose (1997) στη Δυτική Αφρική [5.6], του Lenvain (1989) [5.7] και του Toy (1998) [5.8]. Σχετικά με τις σχέσεις των

Renard and Freimund (1994) αξίζει να σημειωθεί ότι προέκυψαν από βροχομετρικά δεδομένα με τιμές μέσης ετήσιας βροχόπτωσης εύρους 67-1.640 mm, τιμές MFI 7-150 mm και διαβρωτικότητας R μεταξύ 85-11.000 MJ . mm . ha<sup>-1</sup> . h<sup>-1</sup> (Βαχαβιώλος, 2014). Επιπλέον, η σχέση του Roose προϋποθέτει την ύπαρξη δεδομένων τουλάχιστον δεκαετίας, ενώ του Toy χρησιμοποιείται όταν δε διατίθενται αναλυτικά δεδομένα βροχογράφου για την εκάστοτε περιοχή μελέτης, αλλά είναι γνωστές οι τιμές του συντελεστή R σε γειτονικό σταθμό. Οι αντίστοιχες εξισώσεις περιέχουν την ετήσια βροχόπτωση (mm) και διατυπώνονται ακολούθως:

$$\bullet \quad R = 38,35 + 0,35 \cdot P \quad [5.3]$$

$$\bullet \quad R = 38,46 + 3,48 \cdot P \quad [5.4]$$

$$\bullet \quad R = 0,0483 \cdot P^{1,61}, \quad \text{για } P < 850 \text{ mm} \quad [5.5 \alpha]$$

$$\bullet \quad R = 587,8 - 1,219 \cdot P + 0,004105 \cdot P^2, \quad \text{για } P > 850 \text{ mm} \quad [5.5 \beta]$$

$$\bullet \quad R = P \cdot a \quad [5.6]$$

όπου:

a = 0,5 ± 0,05 στις περισσότερες περιπτώσεις

0,6 σε περιοχές κοντά σε θάλασσα (< 40 km)

0,3 - 0,2 σε τροπικές ορεινές περιοχές

0,1 σε Μεσογειακές ορεινές περιοχές

$$\bullet \quad R = 2,21 \cdot P^{1,36} \quad [5.7]$$

$$\bullet \quad R_{\text{νέο}} = R_{\text{βάσης}} \cdot (P_{\text{νέο}}/P_{\text{βάσης}})^{1,75} \quad [5.8]$$

Ανάλογες εξισώσεις γραμμικής συσχέτισης έχουν αναπτυχθεί και ειδικότερα για τον ευρωπαϊκό χώρο. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η εξίσωση της Βαυαρίας των Rogler και Schwertmann (1981) [5.9], των D' Asaro και Santoro (1983) για την περιοχή της Ιταλίας [5.10], η εξίσωση της Τοσκάνης των Van der Knijff και λοιπών (1999) καθώς και η απλοποίησή της (2002) για χρήση σε ολόκληρη την Ιταλία [5.11], του Torri και λοιπών (2006) για την Ιταλία [5.12] και των de Santos Loureiro και de Azevedo Coutinho (2001) για την Πορτογαλία [5.13]. Η σχέση της Τοσκάνης για την κεντρική Ιταλία προέκυψε από δεδομένα 25 σταθμών με εύρος μέσης ετήσιας βροχόπτωσης 600~1200 mm, ενώ για την απλοποίηση αυτής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 47 ιταλικούς μετεωρολογικούς

σταθμούς (Φλαμπούρης, 2008). Ακολουθούν οι τύποι που διατυπώθηκαν για την περιγραφή των παραπάνω σχέσεων.

$$\bullet \quad R = 10 \cdot (1,48 \cdot N_S - 1,48) \quad [5.9]$$

όπου:

$N_S$ : η συνολική βροχόπτωση κατά τους μήνες Μάιο έως Οκτώβριο (mm)

$$\bullet \quad R = 0,21 \cdot q^{-0,096} \cdot P^{2,3} \cdot NGP \quad [5.10]$$

όπου:

$q$ : το υψόμετρο του σταθμού (m)

$P$ : η ετήσια βροχόπτωση (mm)

$NGP$ : ο ετήσιος αριθμός ημερών με βροχόπτωση

$$\bullet \quad R = P \cdot a \quad [5.11]$$

όπου:

$P$ : η ετήσια βροχόπτωση (mm)

$a$ : συντελεστής αναλογίας (με τιμές 1,1 έως 1,5). Η τιμή 1,3 χρησιμοποιείται σε ολόκληρη την επικράτεια της Ιταλίας.

$$\bullet \quad R = 3,08 \cdot P - 944 \quad [5.12]$$

όπου:

$P$ : η ετήσια βροχόπτωση (mm)

$$\bullet \quad R = \frac{\sum_{i=1}^{12} (7,05 \cdot r_{10} - 88,92 \cdot d_{10})}{N} \quad [5.13]$$

όπου:

$N$ : ο αριθμός μηνών που υπολογίστηκαν ετησίως

$r_{10}$ : η μηνιαία βροχόπτωση που ξεπερνά τα 10 mm

$d_{10}$ : ο αριθμός ημερών με ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης που ξεπερνά τα 10mm μηνιαίως

Η συσχέτιση του τροποποιημένου δείκτη Fournier (Modified Fournier Index - MFI) με το συντελεστή  $R$  θεμελιώθηκε από τον Arnoldus (1977) για το Μαρόκο. Με τον τρόπο

αυτό, συμπεριλαμβάνεται στο τελικό αποτέλεσμα η επίδραση της εποχιακής διακύμανσης της βροχόπτωσης στο συντελεστή διαβρωτικότητας. Η σχέση που εκφράζει την παραπάνω συσχέτιση έχει εφαρμοστεί σε όλες σχεδόν τις ηπείρους (Παπάζογλου, 2009) και περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\bullet \quad R = 0,264 \cdot MFI^{1,50} \quad [MJ \cdot mm / ha \cdot hour \cdot year] \quad [5.14]$$

όπου:

$$MFI = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P}$$

$p_i$ : η μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm)

$P$ : η μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)

Παρόμοιες λογικές σχέσεις εξήγαγαν οι Renard και Freimund (1994), οι οποίοι διέκριναν δύο κατηγορίες σχέσεων βάσει μιας οριακής τιμής του MFI. Οι σχέσεις αυτές δίνονται ακολούθως.

$$\bullet \quad R = \frac{0,07397 \cdot MFI^{1,847}}{17,2}, \quad \text{για } MFI < 55m \quad [5.15 \alpha]$$

$$\bullet \quad R = \frac{95,77 - 6,081 \cdot MFI + 0,477 \cdot MFI^2}{17,2}, \quad \text{για } MFI > 55m \quad [5.15 \beta]$$

Σε περιβάλλοντα που επικρατούν ανομοιογενείς συνθήκες βροχοπτώσεων, η γραμμική συσχέτιση του MFI με την ετήσια βροχόπτωση εμπεριέχει σημαντικές πιθανότητες σφαλμάτων και υπερεκτιμήσεων των αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό, οι Ferro κ.λπ. το 1991 στην προσπάθεια να εξομαλυνθούν τέτοιες ακραίες διακυμάνσεις ανέπτυξαν την έννοια του υπερετήσιου τροποποιημένου δείκτη Fournier  $F_F$ . Στην περιοχή της νότιας Ιταλίας χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για τον προσδιορισμό του συντελεστή R σε υπερετήσια βάση.

$$\bullet \quad F_F = \sum_{j=1}^N \frac{F_{a,j}}{N} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{12} \frac{p_{i,j}^2}{P_j} \quad [5.16]$$

$N$ : ο αριθμός ετών

$F_{a,j}$ : ο ετήσιος τροποποιημένος δείκτης Fournier

$P_j$ : ετήσια βροχόπτωση έτους  $j$

$p_{i,j}$ : η μηνιαία βροχόπτωση  $i$  μήνα  $j$  έτους

Στον ελληνικό χώρο, ο Φλαμπούρης (2008) εξήγαγε συντελεστές συσχέτισης μεταξύ της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και του συντελεστή διαβρωτικότητας για 24 μετεωρολογικούς σταθμούς της ελληνικής επικράτειας (Εικόνα 5.1). Ωστόσο, μέχρι σήμερα δε διατίθεται κάποιος ολοκληρωμένος και υψηλής ακρίβειας χάρτης για την εκτίμηση του  $R$  στο σύνολο του ελληνικού χώρου. Επομένως, δεδομένης της ύπαρξης ιδιαίτερα ανομοιογενών περιοχών στη χώρα, η χρήση μιας σχέσης πρέπει να γίνεται κατά περίπτωση και με μέρμνα την εγγύτητα και την ομοιότητα των κλιματικών συνθηκών της περιοχής μελέτης με την περιοχή εξαγωγής της εκάστοτε εμπειρικής σχέσης (Panagos et al, 2015).



**Εικόνα 5.1:** Ισοκλιμικές ζώνες του παράγοντα  $R$

### 5.1.2. Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας (Soil erodibility factor-K)

Ο συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας, ο οποίος μετράται σε τόνους ανά εκτάριο ανά μοναδιαίο R δεδομένου εδάφους και κλίσης, εκφράζει το βαθμό ανθεκτικότητας ενός συγκεκριμένου εδαφικού τύπου έναντι διαβρωτικών διεργασιών. Οι ιδιότητες του εδάφους είναι εκείνες που καθορίζουν την τιμή του. Πιο συγκεκριμένα, χαρακτηριστικές παράμετροι προσδιορισμού του συντελεστή K είναι η δομή, η οργανική ύλη, η διαπερατότητα και η υφή-κοκκομετρία του εδάφους, δηλαδή το ποσοστό άμμου, αργίλου και ιλύος (Μπαθρέλλος et al, 2010). Αναλύοντας τους ανωτέρω παράγοντες, χαμηλές τιμές του συντελεστή παρατηρούνται σε εδάφη με υψηλά ποσοστά αργιλικού υλικού, χαμηλές ποσότητες ιλύος καθώς και σε αδρόκοκκα (αμμώδη), δεδομένου ότι όλα αυτά παρουσιάζουν σημαντική αντοχή έναντι διάβρωσης (ΕΛ.Γ.Ο.-So.S, 2011). Παράλληλα, χαμηλές τιμές του συντελεστή συνδέονται με σημαντικές ποσότητες οργανικής ύλης στο έδαφος, γεγονός που συνεπάγεται αυξημένη διηθητικότητα και μειωμένη απορροή. Επιπλέον, η διαδικασία διαβρωσιμότητας ενός εδάφους αποτελεί μια δυναμική διεργασία, καθώς η διάβρωση επιφανειακών στρωμάτων οδηγεί σε έκθεση άλλων, πιθανώς διαφορετικών χαρακτηριστικών από τα αντίστοιχα των προγενέστερων.

Ο αναλυτικός τύπος υπολογισμού του συντελεστή K εδαφών με περιεκτικότητα σε άργιλο < 70% γίνεται μέσω της ακόλουθης σχέσης (διά τον αριθμό 7,59 για μονάδες στο SI), η οποία απαιτεί τον προσδιορισμό ποσοστών της οργανικής ουσίας και των εδαφικών στρώσεων [5.17]. Ανάλογη σχέση αναπτύχθηκε από τους Römken και λοιπούς (1986), η οποία συσχετίζει τη διάσταση των σωματιδίων του επιφανειακού εδαφικού στρώματος με το συντελεστή K. Επιπροσθέτως, νομογράφημα που δημιούργησαν οι Wischmeier και Smith (1978) για τον προσδιορισμό του παράγοντα K απαιτεί τον προσδιορισμό της ποσοστιαίας αναλογίας σε άμμο, άργιλο και ιλύ, το βαθμό εδαφικής διηθητικότητας και τον τύπο της δομής για την επιλογή της αντιπροσωπευτικότερης τιμής.

$$K = \frac{2,1 \cdot [(ιλύς + άμμος) \cdot (100 - άργιλος)] + 3,25(b - 2) + 2,5 \cdot (c - 3)}{100} \quad [5.17]$$

όπου:

ιλύς, άμμος (πολύ λεπτή), άργιλος: ποσοστά μηχανικής σύστασης

b: συντελεστής εδαφικής δομής

c: βαθμός διαπερατότητας

Φυσικά, η δειγματοληψία εδαφικού υλικού στην εκάστοτε περιοχή μελέτης και η εργαστηριακή ανάλυση αυτών αποτελεί τη βέλτιστη, ασφαλέστερη και πιο αξιόπιστη μέθοδο καθορισμού του συντελεστή K (Βαχαβιώλος, 2014). Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τις δυσκολίες που εμπεριέχει μια τέτοια διαδικασία (χρόνος, κόστος κ.α.) αλλά και ο προσδιορισμός δεδομένων μηχανικής σύστασης που απαιτούν οι παραπάνω σχέσεις, έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές εξισώσεις και νομογραφήματα για την προσέγγιση της τιμής του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας βιβλιογραφικά. Η εξαγωγή των επιμέρους τιμών του συντελεστή γίνεται μέσω της συμπερίληψης των ποσοστών των διάφορων εδαφικών και γεωλογικών σχηματισμών στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα στην Ελλάδα αποτελεί η μελέτη των Κουτσογιάννης και Ταρλά (1987), οι οποίοι ομαδοποίησαν τα πετρώματα σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το βαθμό διαβρωσιμότητάς τους από το νερό (υψηλή, μέτρια, χαμηλή). Παρόμοιες κατατάξεις ανά κατηγορία εδαφικού σχηματισμού σε ευρωπαϊκό επίπεδο έχουν υλοποιηθεί από τους Van der Knijff και λοιπούς (2000), καθώς και σε παγκόσμιο (Wischmeier and Smith, 1978).

Συνεπώς, πετρώματα, όπως ο φλύσχης, που χαρακτηρίζονται από σημαντικούς ρυθμούς διάβρωσης και τα προϊόντα διάβρωσής τους συμβάλλουν στο φορτίο αιώρησης λαμβάνουν τιμές συντελεστών που προσεγγίζουν τη μονάδα, ενώ άλλα, όπως τα ασβεστολιθικά, παρουσιάζουν μικρή διαβρωσιμότητα και συμβάλλουν στο φορτίο σύρσης (χαλίκια, κροκάλες κ.α.), άρα και χαμηλές τιμές του αντίστοιχου συντελεστή.

### **5.1.3. Τοπογραφικός συντελεστής ή συντελεστής αναγλύφου (Slope Length & Steepness factor-LS)**

Ο τοπογραφικός συντελεστής της εξίσωσης RUSLE εκφράζει την επίδραση της γεωμορφολογίας και του αναγλύφου αναφορικά με την εδαφική διάβρωση μέσω δύο συντελεστών: του μήκους της κλιτύς (L) και του βαθμού της κλίσης (S). Ο πολλαπλασιασμός των δύο παραγόντων οδηγεί στην εύρεση του τοπογραφικού συντελεστή. Ως μήκος της κλίσης ορίζεται η απόσταση από το σημείο έναρξης της επιφανειακής απορροής κατά μήκος μιας διαδρομής απορροής μέχρι το σημείο απόθεσης των υλικών διάβρωσης ή μέχρι τη συγκέντρωση της απορροής σε κάποιο κανάλι (Witchmeier και Smith, 1978).

Και οι δύο παραπάνω παράμετροι καθορίζουν την τιμή της διάβρωσης καθώς υψηλές τιμές τους συνεπάγονται σημαντική διαβρωτική και μεταφορική ικανότητα του νερού. Ειδικότερα, μόλις ξεπεραστεί μια οριακή τιμή του βαθμού της κλίσης η διάβρωση αρχίζει να

αυξάνεται λογαριθμικά. Μάλιστα, ο βαθμός της κλίσης ασκεί αρκετά σημαντικότερη επίδραση στο μέγεθος της εδαφικής απώλειας σε σύγκριση με το μήκος της κλίσης (Βαχαβιώλος, 2014). Ωστόσο, η επίδραση της κλίσης δεν είναι μονοσήμαντη καθώς, για παράδειγμα, κεκλιμένες επιφάνειες υποδηλώνουν την ύπαρξη γεωλογικά ανθεκτικότερων πετρωμάτων και, συνεπώς, σημαντική αντοχή έναντι διάβρωσης. Επιπλέον, η πυκνότητα της χαμηλής βλάστησης και το μέγεθος των εδαφικών κόκκων επηρεάζουν την κλίση (ΕΛ.Γ.Ο.-So.S, 2011).

Οι ιδιαίτερες τοπογραφικές συνθήκες μιας περιοχής απαιτούν μια λεπτομερή καταγραφή των τοπογραφικών της στοιχείων λόγω του τοπικού τους χαρακτήρα. Τα απαραίτητα δεδομένα περιλαμβάνουν δεδομένα πεδίου και τοπογραφικών χαρτών μέσω της δημιουργίας Ψηφιακού Υψομετρικού Μοντέλου. Φυσικά, πιθανά εμπόδια της επιφανειακής ροής, όπως οι τάφροι, οι περιφράξεις, οι τοίχοι κ.α., οφείλουν να αντιμετωπίζονται προκειμένου να επιτυγχάνεται μια αξιόπιστη εκτίμηση του μήκους της κλίσης.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μήκους κλίσης διακρίνονται ανάλογα με το αν ο βαθμός κλίσης ξεπερνά το 9%. Αποτελούν συνάρτηση της εδαφικής έκτασης και ενός εκθέτη του μήκους-κλίσης, ο οποίος εξαρτάται από την κλίση. Ο αριθμός 22,13 στην εξίσωση του μήκους κλίσης εκφράζει το μήκος της πειραματικής επιφάνειας του μοντέλου RUSLE. Σύμφωνα με τους Wischmeier και Smith (1978) και τους McCool και λοιπούς (1989), ο βαθμός κλίσης (S) και το μήκος κλίσης (L) αντίστοιχα περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$S = 10,8 \cdot \sin\theta + 0,03 \text{ (για κλίσεις μικρότερες των 9\%)} \quad [5.18 \alpha]$$

$$S = 16,8 \cdot \sin\theta - 0,50 \text{ (για κλίσεις ίσες και μεγαλύτερες των 9\%)} \quad [5.18 \beta]$$

$$L = (A / 22,13)^m \quad [5.19]$$

$$m = \beta / (1+\beta) \quad [5.20]$$

Όπου:

$$\beta = (\sin\theta / 0,0896) / (3 \cdot \sin^{0,8}\theta + 0,56)$$

A: η έκταση εδάφους για την οποία υπολογίζεται το μήκος κλίσης

m: εκθέτης του μήκους – κλίσης

θ: η κλίση σε μοίρες.



Οι διάφορες σχέσεις που έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση του συντελεστή LS εφαρμόζονται σε περιοχές που έχουν υποστεί διάβρωση, ενώ η χρήση τους σε περιοχές απόθεσης φερτών οδηγεί σε υπερεκτιμήσεις. Η εφαρμογή του μοντέλου RUSLE σε περιβάλλον GIS και η χρήση ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου έχει ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό συγκλινουσών και αποκλινουσών επιφανειών, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ασφαλέστερη εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης και των αποθέσεων φερτών υλών για το σύνολο μιας λεκάνης απορροής.

#### **5.1.4. Συντελεστής διαχείρισης/κάλυψης γης και συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης (Cover/Management factor-C και Support practices factor-P)**

Ο συντελεστής διαχείρισης/κάλυψης γης ή φυτοκάλυψης αποτελεί μέτρο απομείωσης της εδαφικής απώλειας η οποία οφείλεται στη φυσική φυτοκάλυψη (δάση, θάμνοι, χόρτα) ή στις εκάστοτε εδαφικές καλλιέργειες και διαχειριστικές πρακτικές. Όπως είναι εύλογο, η τιμή του συντελεστή παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους, ανάλογα με το είδος των καλλιεργειών, το στάδιο ανάπτυξης στο οποίο βρίσκονται και το ποσοστό κάλυψης της βλάστησης. Φυτά που βρίσκονται σε νεότερα στάδια ανάπτυξης ευνοούν την εδαφική διάβρωση λόγω της αραιής κάλυψης που παρέχουν. Σε γενικές γραμμές η ύπαρξη πυκνής βλάστησης και φυτοκάλυψης μειώνουν την κινητική ενέργεια της βροχόπτωσης, παρεμποδίζουν την απόπλυση των εδαφών και προστατεύουν τα εδάφη έναντι διάβρωσης.

Ειδικότερα, αναφορικά με τις καλλιεργητικές πρακτικές, η παράλληλη στις ισοϋψείς καλλιέργεια, η καλλιέργεια με λωρίδες εναλλασσόμενων καλλιεργειών και η χρήση αναβαθμών και αναχωμάτων κάθετων στην εδαφική κλίση επηρεάζουν σημαντικά τη ανάπτυξη διάβρωσης (Μαμάσης et al, 2015). Παράλληλα, η πυκνότητα των ριζικών συστημάτων προσφέρει σημαντική συνοχή και συγκράτηση των εδαφικών κόκκων, μέσω της αυξημένης διηθητικής ικανότητας. Οι ανθρώπινες παρεμβάσεις με σκοπό τη μεταβολή του παράγοντα φυτοκάλυψης και κατ' επέκταση την ελάττωση της διάβρωσης κρίνονται βασικές. Η τελική τιμή του συντελεστή λαμβάνει τιμή ίση με τη μονάδα για αγρούς υπό διαρκή και αδιατάρακτη αγρανάπαυση, τα οποία έχουν αροθεί κατά μήκος της κλίσης με αποτέλεσμα την ανυπαρξία φυτοκάλυψης και την καταστροφή της εδαφικής κρούστας (Βαχαβιώλος, 2014). Υψηλές τιμές παρατηρούνται σε οργωμένες και ανυψωμένες επιφάνειες, η οποίες βρίσκονται εκτεθειμένες σε αυλακωτή διάβρωση, ενώ μειωμένες τιμές σημειώνονται σε καλά προστατευόμενα εδάφη.

Η ακριβής τιμή του συντελεστή φυτοκάλυψης στη RUSLE προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό πέντε επιμέρους αδιάστατων συντελεστών: εδαφικής τραχύτητας (Surface Roughness), εδαφικής υγρασίας (Soil Moisture), πρότερης χρήσης γης (Prior Land Use), επιφανειακής κάλυψης (Surface Cover) και φυτοκάλυψης (Canopy Cover) (Μαμάσης et al, 2015). Από τους υποπαράγοντες αυτούς, ο συντελεστής επιφανειακής κάλυψης θεωρείται ότι ασκεί τη σημαντικότερη επίδραση στη διαμόρφωση της τιμής του συντελεστή φυτοκάλυψης. Ο όρος της επιφανειακής κάλυψης αναφέρεται στις αρόσιμες επιφάνειες, στα ριζικά συστήματα, τους βολβούς και τα οργανικά και φυτικά υπολείμματα, καθώς και τις πέτρες και κροκάλες (Βαχαβιώλος, 2014). Ο παράγων της εδαφικής τραχύτητας επιδρά στην εδαφική διάβρωση μέσω των επιφανειακών φυτικών υπολειμμάτων, ενώ ο συντελεστής εδαφικής υγρασίας σε ιδιαίτερα υγρές περιοχές προσεγγίζει τη μονάδα. Η παράμετρος πρότερης εδαφικής χρήσης εκφράζει την επιρροή των υπολειμμάτων των προηγούμενων καλλιεργειών αλλά και καλλιεργητικών πρακτικών στην ανάπτυξη διαβρωτικών δράσεων και ο παράγων φυτοκάλυψης εκφράζει το βαθμό προστασίας του φυτοκαλύμματος έναντι διάβρωσης. Οι ετήσιοι μέσοι όροι των ανωτέρω συντελεστών, με εξαίρεση το συντελεστή εδαφικής υγρασίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα διαχείρισης, όπως λιβαδικές εκτάσεις, βοσκότοποι και δάση που χαρακτηρίζονται από ομαλά μεταβαλλόμενες συνθήκες (Ξαnthάκης, 2011).

Στη μέθοδο USLE η τιμή του συντελεστή φυτοκάλυψης επιλέγεται από ένα μικρό εύρος τιμών μέσω πινακοποιημένων δεδομένων. Οι πίνακες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό περιλαμβάνουν διαβαθμίσεις τιμών ανάλογα με την ύπαρξη αγροτολιβαδικής ή δασικής έκτασης, το ύψος και τον τύπο της βλάστησης, το ποσοστό εδαφικής κάλυψης από χαμηλά φυτά χωρίς φύλλωμα, από θαμνώδη και δενδρώδη βλάστηση, καθώς και το συνολικό ποσοστό κάλυψης (Παπαρρίζος και Χατζημηνιάδης, 2010).

Αξίζει αν σημειωθεί πως ουσιαστικό ρόλο για τον προσδιορισμό του συντελεστή διαχείρισης/κάλυψης γης κατέχει η χρήση μεθόδων τηλεπισκόπησης και δεικτών βλάστησης. Οι χρήσεις γης του προγράμματος CORINE ενισχύουν τη λεπτομερή χωρική απεικόνιση και κατανομή του συντελεστή φυτοκάλυψης. Συνεπώς, καθίσταται δυνατή η δημιουργία ψηφιακών χαρτών που περιλαμβάνουν τιμές του συντελεστή φυτοκάλυψης ανά κατηγορία βλάστησης που παρατηρείται σε μια περιοχή.

Ο συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης ή συντελεστής υποστηρικτικών πρακτικών κατά της διάβρωσης ορίζεται ως η αναλογία της εδαφικής απώλειας υπό συγκεκριμένη διαχειριστική πρακτική προς την αντίστοιχη απώλεια υπό καλλιεργημένο έδαφος

(Wischmeier και Smith, 1978). Στις πρακτικές αυτές συμπεριλαμβάνεται η κατασκευή φραγμάτων, η καλλιέργεια κατά μήκος των ισοϋψών καμπυλών (με τιμές συντελεστή 0,6-0,9) αναχώματα κάθετη στη διεύθυνση της κλίσης (με τιμές συντελεστή 0,12-0,18) και η κατασκευή φραγμάτων. Ουσιαστικά, αναφέρεται στην υλοποίηση ανθρώπινων παρεμβάσεων, πρακτικών και τεχνικών έργων ενίσχυσης του εδάφους προκειμένου να προστατευθεί έναντι διάβρωσης, εξαρτάται από την εδαφική κλίση και η τιμή του λαμβάνεται από σχετικούς πίνακες. Χαμηλές τιμές του συντελεστή υποδηλώνουν περισσότερο αποτελεσματικές πρακτικές για την αποφυγή της διάβρωσης, ενώ τιμές που προσεγγίζουν τη μονάδα λαμβάνονται για εδάφη στα οποία δεν έχουν εφαρμοστεί τεχνικές ενίσχυσης.

Όσον αφορά στους δύο συντελεστές που αναλύονται στην παρούσα υποενότητα, υπολογίζονται συνήθως μέσες ετήσιες τιμές, ενώ υπάρχει δυνατότητα πρόβλεψης των τιμών για διαφορετικές περιόδους κατά τη διάρκεια του έτους (ΕΛ.Γ.Ο.-So.S, 2011). Παραδείγματα διαφορετικής εδαφικής συμπεριφοράς αποτελούν η κατεργασία του εδάφους για την προετοιμασία της σποράς κατά την άνοιξη και η περίοδος συγκομιδής των ετήσιων καλλιεργειών προς το τέλος του θέρους ή τις αρχές της χειμερινής περιόδου για τα χειμερινά σιτηρά. Με τον τρόπο αυτό, οι παράγοντες P και C υπολογίζονται εποχιακά και το άθροισμά τους συνιστά την ετήσια τιμή.

#### **5.1.5. Συντελεστής στερεοαπορροής**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ποσοστό της ολικής διάβρωσης που μετατρέπεται σε στερεοαπορροή αποτελεί το συντελεστή στερεοαπορροής. Οι ετήσιες διακυμάνσεις που εμπεριέχει η διαδικασία υπολογισμού της στερεοαπορροής μπορούν να εξομαλυνθούν όταν ο εν λόγω συντελεστής χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του στερεοφορτίου σε ετήσια βάση.

Πλήθος σχέσεων έχουν αναπτυχθεί οι οποίες συσχετίζουν το συντελεστή στερεοαπορροής αποκλειστικά και μόνο με την επιφάνεια της λεκάνης απορροής. Παρά την παράλειψη άλλων παραγόντων που αναμένεται να επηρεάζουν την παραγόμενη στερεοαπορροή (π.χ. εδαφολογικά, μορφολογικά χαρακτηριστικά), η εκτίμηση της στερεοαπορροής μέσω της έκτασης της λεκάνης απορροής θεωρείται πως οδηγεί σε αρκετά ικανοποιητικά και αξιόπιστα αποτελέσματα ιδιαίτερα για λεκάνες απορροής μικρής έκτασης (Λυκούδη και Ζαρρής, 2006).

Όσον αφορά στις σχέσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως, αξίζει να σημειωθούν η σχέση του Maner (1962) [5.21], του Renfro (1975) [5.22], του Varoni (1975) [5.23], του Boyce (1975) [5.24] και της Υπηρεσίας Προστασίας των Εδαφών του Υπουργείου Γεωργίας των Η.Π.Α. (United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service-USDA SCS) (1979) [5.25]. Οι σχέσεις αυτές περιγράφονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

- $\log \text{SDR} = 1,8768 - 0,14191 \cdot \log (3,861 \cdot A)$  [5.21]

όπου: A: εμβαδόν της λεκάνης απορροής (km<sup>2</sup>)

- $\log \text{SDR} = 1,7935 - 0,14191 \cdot \log A$  [5.22]

όπου: A: εμβαδόν της λεκάνης απορροής (km<sup>2</sup>)

- $\text{SDR} = 0,42 \cdot A^{-0,125}$  [5.23]

όπου: A: εμβαδόν της λεκάνης απορροής (mi<sup>2</sup>)

- $\text{SDR} = 0,41 \cdot A^{-0,3}$  [5.24]

όπου: A: εμβαδόν της λεκάνης απορροής (mi<sup>2</sup>)

- $\text{SDR} = 0,51 \cdot A^{-0,11}$  [5.25]

όπου: A: εμβαδόν της λεκάνης απορροής (mi<sup>2</sup>)

Οι παραπάνω σχέσεις προέκυψαν από επεξεργασία δεδομένων σε ποικίλες λεκάνες απορροής ανά τον κόσμο ή σε περιοχές μικρότερης κλίμακας. Ο τύπος του Varoni, για παράδειγμα, προέκυψε από συλλογή στοιχείων 300 λεκανών απορροής παγκόσμιας κλίμακας, ενώ οι Renfro, Maner και το Υπουργείο Γεωργίας των Η.Π.Α. ανέπτυξαν τύπο που ισχύει σε 14 λεκάνες απορροής συγκεκριμένης πολιτείας των Η.Π.Α. (Τέξας). Τέλος, για τις ευρωπαϊκές συνθήκες έχει εφαρμοστεί η ακόλουθη σχέση [5.] στην ευρύτερη περιοχή της Βαυαρίας (Maniak, 2010).

- $\text{SDR} = -0,02 + 0,385 \cdot A^{-0,2}$  [5.26]

όπου: A: εμβαδόν της λεκάνης απορροής (mi<sup>2</sup>)

#### 5.1.6. Πυκνότητα αποθέσεων

Οι αποθέσεις σε έναν ταμιευτήρα επηρεάζονται από τα έτη λειτουργίας καθώς και τον τρόπο λειτουργίας αυτού. Παράλληλα, ο ρυθμός συμπίεσης και η κοκκομετρική σύνθεση και

σύσταση των φερτών υλών πρέπει να προσδιορίζεται ώστε να καθίσταται δυνατή η μετατροπή του στερεοφορτίου σε όγκο φερτών και αντίστροφα.

Ωστόσο, η πυκνότητα των φερτών υλικών που περιέχει ένας ταμιευτήρας είναι δύσκολο έως αδύνατο να υπολογιστεί με ακρίβεια, δεδομένου ότι παράγοντες όπως οι διαστάσεις των κόκκων των επιμέρους υλικών και το ποσοστό και η συχνότητα ανάδυσης αυτών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές μέθοδοι οι οποίες οδηγούν σε ένα εύρος τιμών πυκνοτήτων συναρτήσεων των αποτιθέμενων υλικών. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5.1), η πυκνότητα υλικών αργιλικής σύστασης παρουσιάζεται χαμηλή, ενώ υψηλότερες τιμές λαμβάνουν φερτά υλικά με αμμώδη σύσταση φτωχής διαβάθμισης. Σε γενικές γραμμές, η πυκνότητα των σωματιδίων των φερτών υλικών (dry bulk density) μπορεί να θεωρηθεί πως κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.0 και 1.6 t/m<sup>3</sup> (Μαμάσης et al, 2015).

**Πίνακας 5.1:** Εύρη τιμών πυκνότητας αποθέσεων σε ταμιευτήρες

	Μονίμως βυθισμένο	Συχνά αναδύομενο
<b>Διάσταση Κόκκου</b>	<b>Πυκνότητα (t/m<sup>3</sup>)</b>	
Άργιλος	0.64~0.96	0.96~1.28
Ιλύς	0.88~1.20	1.20~1.36
Μίγμα αργίλου-ιλύος	0.64~1.04	1.04~1.36
Μίγμα άμμου-ιλύος	1.20~1.52	1.52~1.76
Άμμος	1.36~1.60	1.36~1.60
Χαλίκι	1.36~2.00	1.36~2.00
Άμμος-χαλίκι φτωχής διαβάθμισης	1.52~2.08	1.52~2.08

(Πηγή: Morris και Fan, 1998)

Δεδομένου ότι οι διακυμάνσεις της στάθμης και κατ' επέκταση η έκθεση φερτών υλών στην ατμόσφαιρα επιταχύνει τη συγκέντρωσή τους, ο τρόπος λειτουργίας του ταμιευτήρα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο αναφορικά με τις παραγόμενες αποθέσεις. Η κατάταξη ενός ταμιευτήρα σε ένα συγκεκριμένο τύπο λειτουργίας καθορίζει την πυκνότητα άμμου, αργίλου και ιλύος και σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα ποσοστά των φερτών υλικών προκύπτει η αρχική πυκνότητα των αποθέσεων. Εντούτοις, αυτό που ενδιαφέρει είναι η

χρονική κατανομή της συγκέντρωσης του στερεοφορτίου σε έναν ταμιευτήρα που προκαλείται κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Για το σκοπό αυτό, έχουν διατυπωθεί σχέσεις οι οποίες συνδέουν την αρχική πυκνότητα με μια μέση που σχετίζεται με τα έτη λειτουργίας του ταμιευτήρα που παρήλθαν σε συγκεκριμένο διάστημα. Η πιο διαδεδομένη σχέση που εφαρμόζεται ευρέως είναι ο τύπος του Miller (1953), ο οποίος εκφράζεται ως εξής:

$$= \rho_0^{-1+0,4343 \cdot T} \cdot \ln / ( -1) \quad [5.27]$$

όπου:

$\rho$ : μέση πυκνότητα αποθέσεων μετά από T έτη λειτουργίας (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_0$ : αρχική πυκνότητα αποθέσεων

$K$ : άθροισμα γινομένων του παράγοντα K (πυκνότητα αργίλου, άμμου και ιλύος που προκύπτει από πίνακες για δεδομένο τύπο λειτουργίας ταμιευτήρα) και των αντίστοιχων ποσοστών των επιμέρους φερτών υλών.

Επομένως, καθίσταται δυνατή η μετατροπή της μάζας των αποτιθέμενων φερτών σε όγκο και η εκτίμηση του νεκρού όγκου ενός ταμιευτήρα, εφόσον είναι γνωστή η κοκκομετρία και η έκταση των αποθέσεων.

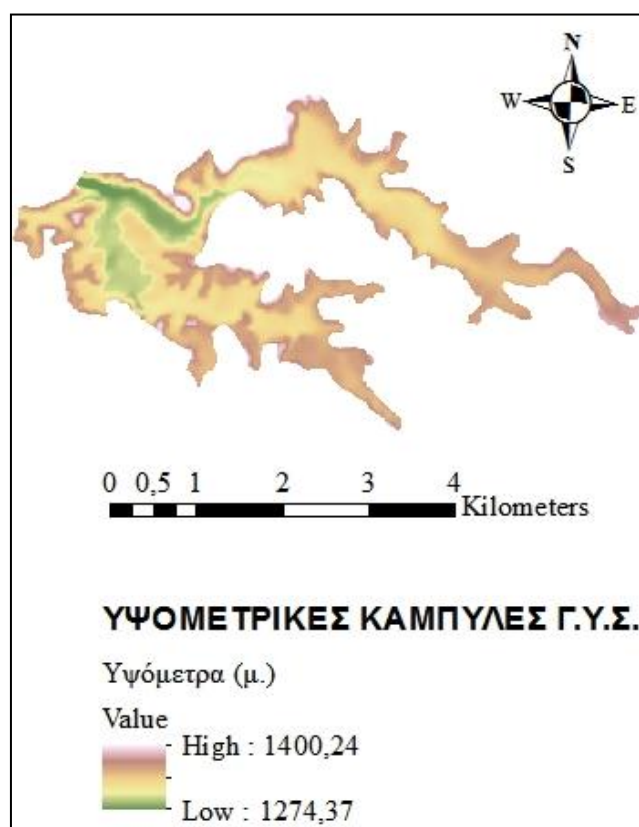
## 5.2. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΠΗΓΩΝ ΑΩΟΥ

Στην παρούσα υποενότητα περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να εκτιμηθεί ο όγκος φερτών υλών που προέκυψε από επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου, καθώς και η αντίστοιχη τιμή από την εφαρμογή της μεθόδου RUSLE. Στόχο αποτελεί η σύγκριση των δύο μεθόδων ώστε να αναδειχθούν οι δυνατότητες, οι περιορισμοί και οι προοπτικές εξέλιξης ψηφιακών μεθόδων, όπως η RUSLE, για τον προσδιορισμό του στερεοφορτίου σε ταμιευτήρες.

### 5.2.1. Προσδιορισμός στερεοαπορροής από μετρήσεις πεδίου

Το πρώτο σκέλος της μελέτης περιελάμβανε την αφαίρεση δύο ψηφιακών μοντέλων: του αναγλύφου πριν την κατασκευή του ταμιευτήρα Πηγών Αώου και του αναγλύφου, όπως αυτό διαμορφώθηκε σύμφωνα με τις βυθομετρήσεις του 1996. Μέσα από την παραπάνω αφαίρεση, αναδεικνύεται η απόθεση φερτών υλών εντός του ταμιευτήρα, η αντίστοιχη έκταση και ο όγκος που καταλαμβάνουν τα ιζήματα.

Αρχικά, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η υψομετρική αποτύπωση του πυθμένα του ταμιευτήρα Πηγών Αώου πριν κατασκευαστεί το έργο, λήφθηκαν δεδομένα υψομετρικών καμπυλών που διατίθενται από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.). Για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, διατέθηκε τοπογραφικός χάρτης του έτους 1970 κλίμακας 1:50.000 εντός των ορίων που καταλαμβάνει σήμερα ο ταμιευτήρας Πηγών Αώου. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκε το ακόλουθο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους του ταμιευτήρα Πηγών Αώου (Εικόνα 5.2).



**Εικόνα 5.2:** Ψηφιακό μοντέλο εδάφους από υψόμετρα της Γ.Υ.Σ.

Όσον αφορά στο βυθομετρικό χάρτη της λίμνης για το έτος 1996, αφού υλοποιήθηκε η μετατροπή των συντεταγμένων Hatt στο ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (ΕΓΣΑ

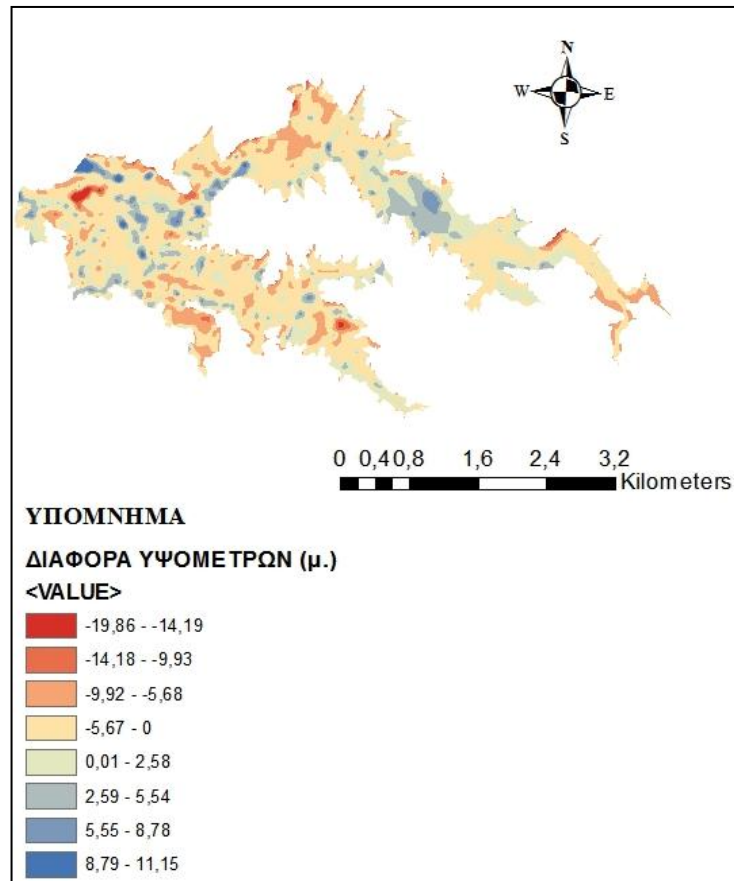
'87), επιλέχθηκαν τα σημεία που καθορίζουν τις θέσεις των βυθομετρήσεων μέσω της εντολής `select by location` του ArcMap. Δεδομένου ότι τα σημεία εντός του ταμιευτήρα ενδιαφέρουν, αγνοήθηκαν τα σημεία που ορίζουν την ακτογραμμή. Παράλληλα, προστέθηκε πεδίο στον πίνακα δεδομένων των ιδιοτήτων, ώστε να αναχθούν τα βάθη σε υψόμετρα. Όπως έχει αναφερθεί, σύμφωνα με την υδρογραφική μελέτη του 1996, το υψόμετρο της στάθμης αναφοράς της λίμνης θεωρείται σταθερό και ίσο με 1342,64 m.

Η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε την παραγωγή raster μοντέλων επιφάνειας είναι η `topo to raster`, η οποία χρησιμοποιείται για την εξαγωγή επιφανειών όμοιων με υδρολογικές λεκάνες απορροής. Δεδομένου ότι η υδατική διάβρωση κατέχει πρωτεύοντα ρόλο στη διαμόρφωση του αναγλύφου, η εν λόγω μέθοδος παρεμβολής ενδείκνυται για την αναπαράσταση κορυφογραμμών, κοιλάδων και υψομετρικών μεγεθών που απαιτούνται για τη δημιουργία υδρολογικά ορθών ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων.

Η εντολή `topo to raster` ανήκει στην κατηγορία `3D Analyst Tools` του ArcToolbox του λογισμικού ArcMap. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε αρχικά για τις υψομετρικές καμπύλες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, όπου στο πεδίο `field` επιλέχθηκαν οι υψομετρικές τιμές και στο πεδίο `type` ο κατάλληλος τύπος (`contour`). Αντίστοιχα, για τις σημειακές βυθομετρήσεις του 1996 επιλέχθηκε το κατάλληλο πεδίο `field` που περιείχε τις κατάλληλες τιμές, ενώ στο πεδίο `type` ο τύπος `pointElevation`, λόγω του σημειακού χαρακτήρα των δεδομένων. Και στις δύο μεθόδους επιλέχθηκε ισοδιάσταση κελιού ίση με 16 m, η οποία καθορίστηκε βάσει της ακρίβειας των πρωτογενών δεδομένων (χάρτης 1:50.000).

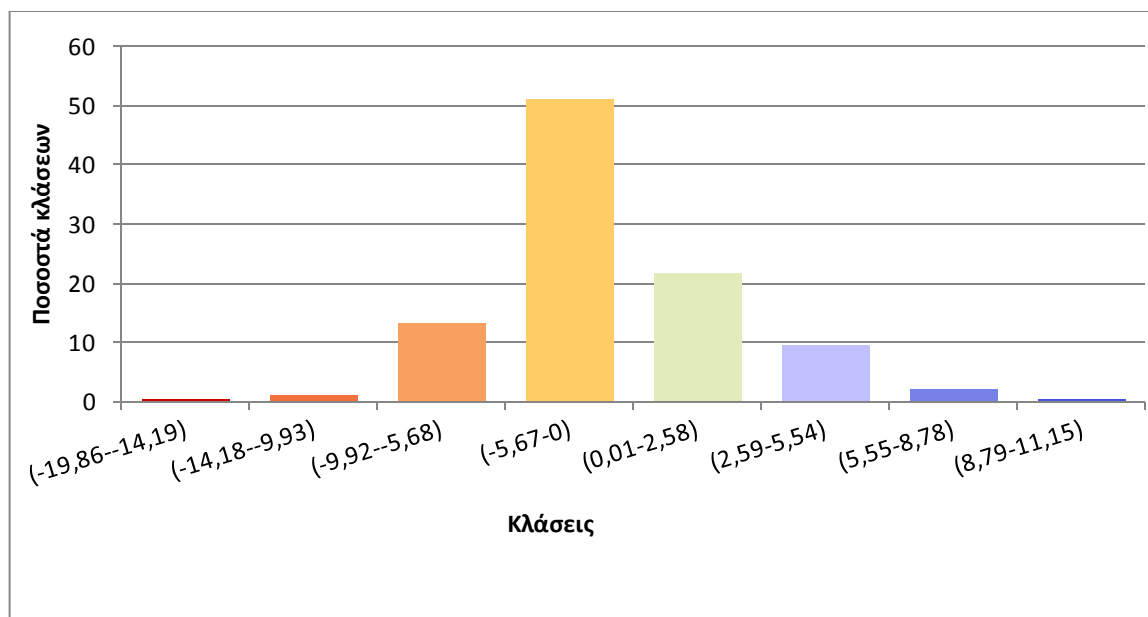
Αφού δημιουργήθηκαν τα δύο raster μοντέλα επιφάνειας, η εντολή `raster calculator` χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να υπολογιστεί η διαφορά των υψομέτρων των ψηφιακών μοντέλων και κατ' επέκταση να ποσοτικοποιηθεί σημειακά το στερεοφορτίο. Στον επόμενο χάρτη (Εικόνα 5.3) εμφανίζονται οι τιμές των φερτών υλών που έχουν αποτεθεί στη λίμνη καθώς και του εδαφικού υλικού που έχει απομακρυνθεί από τον ταμιευτήρα κατά το διάστημα 1970 έως 1996.





**Εικόνα 5.3:** Διάβρωση και αποθέσεις φερτών υλών στον ταμιευτήρα πηγών Αώου

Όπως είναι προφανές, τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν ορισμένες ιδιαίτερα υψηλές τιμές, οι οποίες είναι αδύνατο να υφίστανται στην πραγματικότητα. Σύμφωνα με το ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 5.4), το μεγαλύτερο τμήμα του ταμιευτήρα έχει υποστεί διάβρωση. Συγκεκριμένα, το 51% της έκτασης ανήκει στην κλάση (-5,67-0), ενώ σε σημαντικό κομμάτι (ποσοστό κατάληψης 13,2%) φαίνεται να έχει απομακρυνθεί ακόμα περισσότερο εδαφικό υλικό. Επιπλέον, αποθέσεις φερτών έως 2,58 m καταλαμβάνουν τμήμα 21,85% του ταμιευτήρα. Παράλληλα, προφανώς εσφαλμένες τιμές εμφανίζονται σε ορισμένα σημεία όπου η διάβρωση και οι αποθέσεις λαμβάνουν υπερβολικά υψηλές τιμές. Συνολικά, σύμφωνα με τα διαθέσιμα πρωτογενή δεδομένα, το 65,81% του ταμιευτήρα έχει υποστεί διάβρωση, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα έχουν εναποτεθεί φερτές ύλες.



**Εικόνα 5.4:** Ποσοστά κλάσεων διάβρωσης και απόθεσης φερτών στον ταμιευτήρα

Όσον αφορά στις περιοχές απόθεσης φερτών υλών, σύμφωνα με υδρογραφικές αποτυπώσεις που έχουν υλοποιηθεί παγκοσμίως, επιβεβαιώνεται πως αρχικά εμφανίζονται στις εκβολές των ποταμών και όχι μόνο στην περιοχή του φράγματος, ενώ σταδιακά επεκτείνονται σε ολόκληρο τον ταμιευτήρα. Στην προκειμένη περίπτωση, εκτεταμένες αποθέσεις παρουσιάζονται στη θέση του φράγματος, καθώς και σε άλλες θέσεις εντός του ταμιευτήρα. Επίσης, εδάφη που δεν έχουν υποστεί καμία διάβρωση αποτελούνται κυρίως από πεδινές εκτάσεις, όπου δημιουργούνται κατάλληλες περιοχές απόθεσης φερτών υλών λόγω της μειωμένης ταχύτητας ροής. Αντίθετα, υψηλές τιμές διάβρωσης εμφανίζονται σε περιοχές που αντιπροσωπεύονται από σημαντικές κλίσεις και οριοθετούνται κυρίως περιμετρικά του ταμιευτήρα καθώς και εντός αυτού, κατά μήκος των ρεμάτων.

Δεδομένου ότι ο Υδροηλεκτρικός Σταθμός Πηγών Αώου λειτουργεί παράγοντας ενέργεια από τα τέλη του 1990, μεσολαμβάν 5,5 χρόνια μέχρι την υδρογραφική αποτύπωση που έλαβε χώρα κατά το θέρος του 1996. Θεωρώντας πως η στερεοαπορροή μετά την κατασκευή του ταμιευτήρα προκαλεί το σημαντικότερο όγκο φερτών υλών σε σχέση με τις αποθέσεις φερτών υλών πριν την κατασκευή του, η εκτίμηση του συνολικού όγκου του ταμιευτήρα που καταλήφθηκε από αποθέσεις φερτών υλικών ισούται με  $3508 \text{ m}^3$  (ή 0,024% της ωφέλιμης χωρητικότητάς του) για τα 5,5 πρώτα χρόνια λειτουργίας του ταμιευτήρα. Συνεπώς, ο μέσος ετήσιος όγκος φερτών ανέρχεται σε  $638 \text{ m}^3$ .

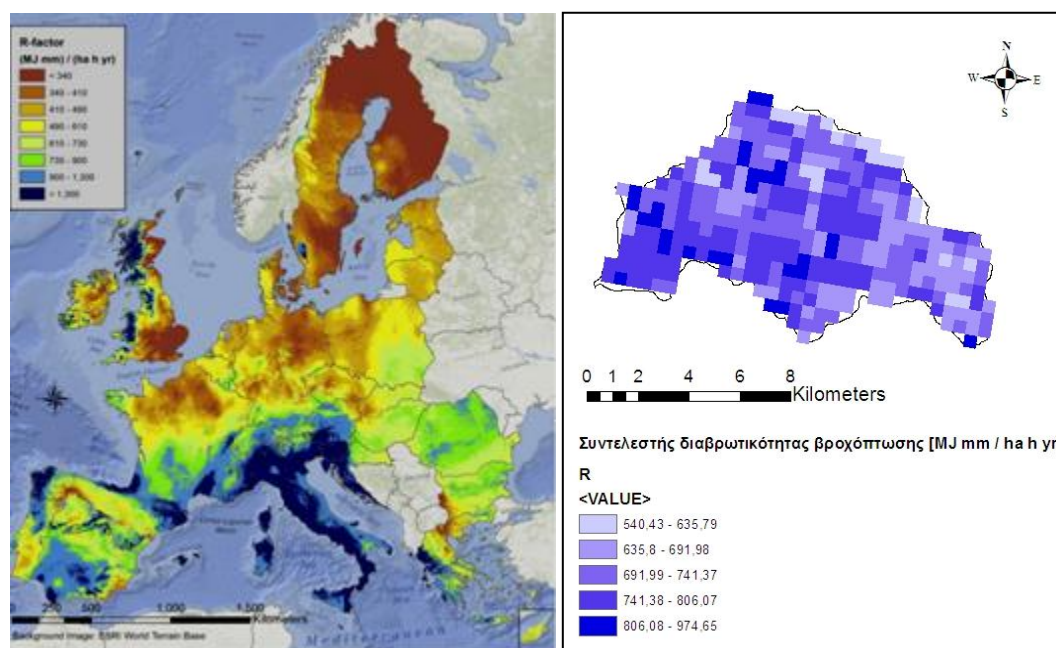
Επόμενο βήμα αποτέλεσε ο προσδιορισμός της πυκνότητας των αποθέσεων των φερτών υλικών, μέγεθος που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του ολικού όγκου σε ισοδύναμη μάζα. Όπως έχει προαναφερθεί, το φάσμα τιμών της πυκνότητας παρουσιάζεται ευρύ και επηρεάζεται από την κοκκομετρική και ορυκτολογική των φερτών υλών, την ηλικία τους και τον τρόπο λειτουργίας του ταμιευτήρα. Δεδομένου ότι δεν κατέστη δυνατή η διενέργεια εκτεταμένων δειγματοληψιών των αποθέσεων στο σύνολο του ταμιευτήρα το στερεοφορτίο προέκυψε αξιοποιώντας το αναμενόμενο εύρος των πυκνοτήτων του ταμιευτήρα σύμφωνα με βιβλιογραφικές τιμές. Σύμφωνα με αυτές, η πυκνότητα των σωματιδίων των φερτών υλικών για τα ελληνικά δεδομένα βρίσκεται συνήθως μεταξύ των τιμών 1.0 και 1.6 t/m<sup>3</sup>. Επομένως, η μέση ετήσια στερεοαπορροή βάσει της διαφοράς των ψηφιακών μοντέλων εδάφους κυμαίνεται μεταξύ 75 και 120 t/km<sup>2</sup>. Θεωρώντας μια μέση πυκνότητα αποτιθέμενων φερτών υλών ίση με 1,3 t/m<sup>3</sup>, προκύπτει η προσδοκώμενη μάζα τους ανά επιφάνεια του ταμιευτήρα προσεγγιστικά ίση με 98 t/km<sup>2</sup>.

### **5.2.2. Εφαρμογή μεθόδου RUSLE**

Προκειμένου να γίνει η εφαρμογή της μεθόδου RUSLE για την προσέγγιση της τιμής του στερεοφορτίου ψηφιακά, κρίθηκε απαραίτητη η συλλογή ενός πλήθους δεδομένων για την περιοχή μελέτης. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν βροχομετρικά στοιχεία, γεωλογικές παραμέτρους, πληροφορίες κλίσεων και βαθμού του πυθμένα, φυτοκάλυψης και μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας.

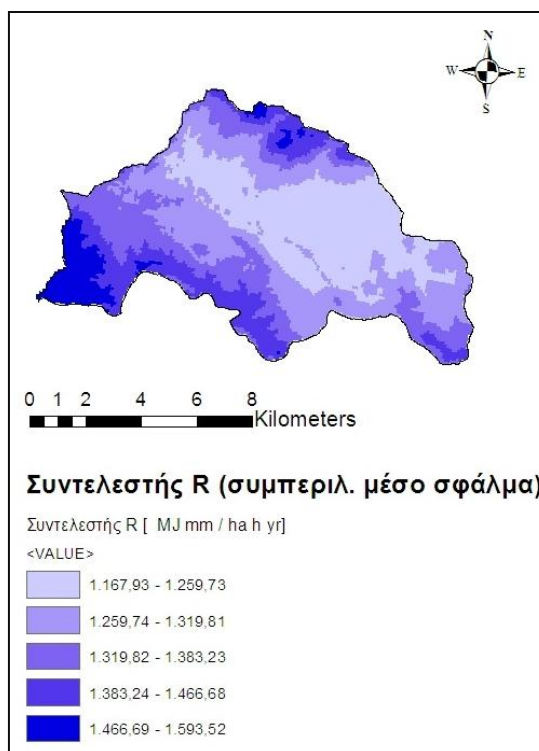
Αρχικά, συλλέχθηκαν δεδομένα που διατίθενται από το Κοινό Ερευνητικό Κέντρο (Joint Research Centre - JRC), το οποίο αποτελεί υπηρεσία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής που στοχεύει στην παραγωγή γνώσης και τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων της Ευρώπης μέσω της ελεύθερης απόκτησης, διαχείρισης και αξιοποίησης ερευνητικών δεδομένων. Στην εν λόγω ιστοσελίδα, υπάρχει κατάλογος χαρτών και στοιχείων διαφόρων περιεχομένων, τα οποία είναι ανοικτά και άμεσα προσβάσιμα εφόσον ζητηθούν μέσω της συμπλήρωσης κατάλληλης φόρμας. Στην παρούσα εργασία, αξιοποιήθηκαν δεδομένα της υποκατηγορίας "διάβρωση" που περιλαμβάνουν τα πέντε επιμέρους επίπεδα των συντελεστών της μεθόδου RUSLE και τη συνολική στερεοαπορροή, όπως προέκυψαν από εκτεταμένες μελέτες και δειγματοληπτικές μετρήσεις στον ευρωπαϊκό χώρο.

Αξιόλογη προσπάθεια για την εκτίμηση του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης σε ευρωπαϊκό επίπεδο έγινε σε σχετική έρευνα (Panagos et al, 2015). Τα απαραίτητα δεδομένα συλλέχθηκαν από 1541 μετεωρολογικούς σταθμούς 28 ευρωπαϊκών χωρών, για κάθε έναν από τους οποίους υπολογίστηκε αναλυτικά ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης. Για τις μετρήσεις επί ελληνικού εδάφους οι τιμές του συντελεστή κυμαίνονται μεταξύ 152.0-2728.5 MJ.mm ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>. Ο χάρτης διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης ισοδιαστάσεων καννάβου 500 m χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση του εν λόγω συντελεστή εντός της λεκάνης πηγών Αώου με χρήση της εντολής extract by mask του λογισμικού ArcMap 10.4.



**Εικόνα 5.5:** Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης

Ωστόσο, λόγω της έντονης χωρικής μεταβλητότητας της τιμής του συντελεστή R και του μικρού αριθμού διαθέσιμων στοιχείων από γειτονικούς μετεωρολογικούς σταθμούς (βλ. Παράρτημα-Εικόνα 14), το σφάλμα της μεθόδου που εμφανίζεται στην υπό μελέτη περιοχή δε μπορεί να αγνοηθεί (βλ. Παράρτημα-Εικόνα 13). Για το λόγο αυτό, στην ιστοσελίδα δεδομένων του Κοινού Ερευνητικού Κέντρου διατίθενται, επίσης, ειδικότεροι χάρτες για την ελληνική επικράτεια που περιλαμβάνουν τους μηνιαίους συντελεστές R (βλ. Παράρτημα-Εικόνες 1 έως 12) και τη μέση ετήσια τιμή τους, συμπεριλαμβάνοντας στους υπολογισμούς το μέσο σφάλμα των εκτιμήσεων. Σύμφωνα με αυτούς, η ετήσια τιμή του συντελεστή εντός της λεκάνης ισοδιάστασης καννάβου 100 m κυμαίνεται μεταξύ 1.168-1.593,5 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>, όπως φαίνεται στον ακόλουθο χάρτη (Εικόνα 5.6), με μέση τιμή 1317 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>.



**Εικόνα 5.6:** Συντελεστής R λεκάνης πηγών Αώου

Η απουσία αναλυτικών δεδομένων βροχογράφου αποτέλεσε εμπόδιο για τον αναλυτικό υπολογισμό της διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης. Επομένως, στην παρούσα εργασία, προκειμένου να συγκριθεί η ευρεθείσα τιμή με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από άλλες εμπειρικές σχέσεις, θεωρήθηκε σκόπιμο να αξιοποιηθούν δεδομένα του γειτονικού στην περιοχή μετεωρολογικού σταθμού του Μετσόβου για τον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή R. Στόχος είναι η εξαγωγή ενός εύρους τιμών του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης για το σύνολο των διαθέσιμων μηνιαίων υψών βροχόπτωσης (έτη 1951~1990 και 2010-2011), ο οποίος αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο για τον προσδιορισμό της ετήσιας στερεοαπορροής μέσω της εξίσωσης RUSLE.

Ο πίνακας που ακολουθεί συνοψίζει τα αποτελέσματα όλων των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την εμπειρική εκτίμηση συντελεστή διαβρωτικότητας R (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2: Εκτίμηση του συντελεστή R με εμπειρικές σχέσεις

Έτος	Rogler & Schwertmann	Van der Knijff et al.	Renard & Freimund (~P)	Arnoldus	Renard & Freimund (~MFI)	Torri et al.	Lenvain	Lo et al.	El-Swaify
1951	7978,7	1508,65	4701,6	482,48	9845,05	2580	1420,07	4077	444,53
1952	3640,8	1339,91	3692,3	474,35	9616,38	2181	1208,52	3625	399,1
1953	4599,84	652,21	1009,47	231,64	3545,32	551	453,94	1784	213,95
1954	5520,4	1105,52	2519,82	360,39	6570,89	1625	930,42	2998	335,99
1955	11273,16	2128,23	9593,97	691,78	16171,96	4048	2267,43	5736	611,34
1956	8399	1704,82	6048,86	657,8	15090,95	3045	1676,92	4602	497,34
1957	10767	1709,89	6086,16	627,23	14135,13	3057	1683,71	4616	498,71
1958	7189,84	1805,83	6815,49	504,16	10461,3	3284	1813,47	4873	524,54
1959	10755,16	2258,36	10858,48	612,16	13670,06	4357	2458,04	6084	646,37
1960	-14,8	2035,28	8741,11	664,63	15306,78	3828	2133,82	5487	586,31
1961	5758,68	1229,8	3108,26	477,52	9705,28	1920	1075,49	3331	369,45
1962	6378,8	2457,26	12950,22	1125,35	31465,41	4828	2757,04	6616	699,92
1963	8974,72	2199,47	10276,04	654,62	14990,81	4217	2371,28	5926	630,52
1964	9002,84	2190,63	10190,07	702,9	16529,84	4196	2358,32	5903	628,14
1965	9575,6	1980,16	8255,19	871,03	22177,13	3698	2055,62	5339	571,47
1966	4294,96	2487,94	13289,98	859,6	21779,91	4901	2803,96	6699	708,18
1967	8937,72	1559,09	5030,16	449,84	8936,181	2700	1485,03	4212	458,11
1968	8301,32	1431,17	4220,98	374,95	6942,49	2397	1321,81	3870	423,67
1969	6670,36	1882,01	7426,46	594,10	13118,27	3465	1918,29	5077	545,05
1970	4644,24	1816,1	6896,21	422,7	8198,48	3309	1827,51	4900	527,3
1971	6899,76	1453,27	4355,1	370,77	6835,2	2449	1349,65	3929	429,62
1972	5940,72	1703,39	6038,36	586,22	12879,34	3042	1675,01	4598	496,96
1973	9839,04	1387,75	3964,4	321,12	5596,25	2294	1267,57	3753	411,98
1974	7102,52	1869,01	7320,20	704,55	16583,16	3434	1900,3	5042	541,55
1975	9936,72	1377,74	3906,54	286,97	4784,04	2270	1255,15	3727	409,28
1976	7453,28	1452,75	4351,92	482,20	9837,13	2448	1348,99	3927	429,48
1977	6068	1297,14	3458,44	369,93	6813,84	2079	1156,36	3511	387,58
1978	5806,04	1427,92	4201,46	408,46	7818,2	2389	1317,73	3861	422,79
1979	5217	1752,01	6400,85	503,85	10452,42	3157	1740,36	4729	510,05
1980	5246,6	1574,69	5134,28	485,96	9943,19	2737	1505,27	4254	462,31
1981	9349,16	1399,71	4034,16	543,14	11593,52	2322	1282,45	3785	415,2
1982	7641,24	1392,56	3992,37	465,18	9360,46	2305	1273,55	3766	413,27
1983	4623,52	1488,5	4573,80	361,37	6595,84	2533	1394,34	4023	439,1
1984	8903,68	1612,52	5391,67	414,12	7968,72	2826	1554,66	4355	472,49
1985	6565,28	1891,24	7502,4	633,24	14321,89	3487	1931,1	5101	547,53
1986	6433,56	1457,82	4383,01	345,47	6195,8	2460	1355,4	3941	430,84
1987	5732,04	1854,32	7201,12	610,67	13624,48	3399	1880,01	5002	537,59
1988	6208,6	1158,56	2761,77	426,76	8307,63	1751	991,65	3140	350,27
1989	2153,4	1392,17	3990,1	403,88	7696,81	2304	1273,07	3765	413,17
1990	6402,48	1260,09	3263,05	618,61	13868,67	1991	1111,67	3412	377,61
2010	4875,12	994,5	2057,61	353,57	6398,74	1362	805,7	2701	306,1
2011	4114,4	1782,3	6632,48	659,05	15130,5	3229	1781,41	4810	518,2
<b>M.O</b>	<b>6789,535</b>	<b>1630,05</b>	<b>5872,045</b>	<b>528,436</b>	<b>11449,13</b>	<b>2868</b>	<b>1599,3</b>	<b>4402</b>	<b>477,21</b>

Σχετικά με τη σχέση που προτάθηκε από τους Toy και λοιπούς (1998), λήφθηκαν ετήσιες τιμές του συντελεστή R, ο οποίος υπολογίστηκε σε σχετική διατριβή (Φλαμπούρης, 2008) από αναλυτικές μετρήσεις γειτονικού μετεωρολογικού σταθμού, όπως επιτάσσει η μέθοδος (Παράρτημα-Εικόνα 25). Πρόκειται για το σταθμό των Ιωαννίνων (υψομέτρου 484 m), ενώ για τον υπολογισμό του συντελεστή R στη λεκάνη πηγών Αώου λήφθηκαν τα κοινά έτη μετρήσεων της βροχόπτωσης και του συντελεστή R του σταθμού των Ιωαννίνων και των αντίστοιχων γνωστών ετήσιων βροχοπτώσεων του Μετσόβου. Ο επόμενος πίνακας συνορίζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου (Πίνακας 5.3).

**Πίνακας 5.3:** Συντελεστής R βάσει της σχέσης Toy και λοιπών (1998)

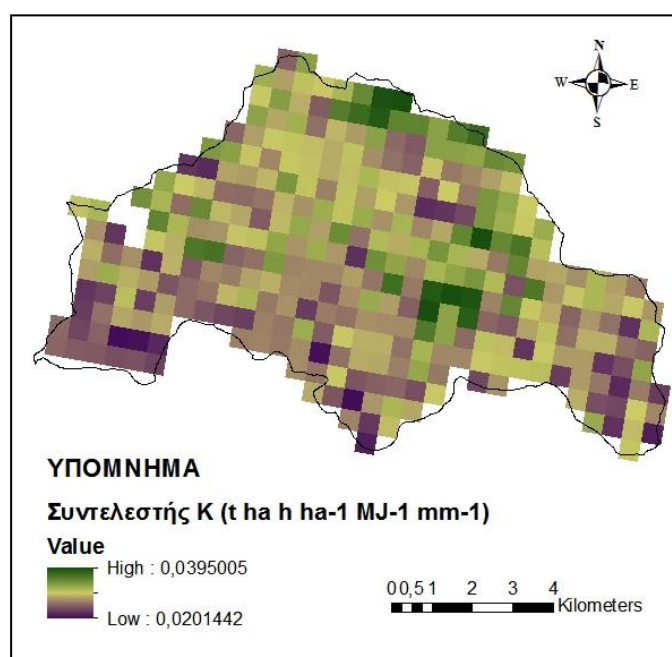
Έτος	Συντελεστής R
1972	2.538,22
1973	905,94
1976	929,44
1977	1.008,97
1978	714,34
1979	1.971,23
1980	2.151,56
1983	1.769,61
1984	2.177,14
1985	1.496,95
1986	1.443,25
1988	648,03
1990	1.108,33
<b>M.O.</b>	<b>1.451,00</b>

Τέλος, η εφαρμογή της σχέσης των de Santos Loureiro και de Azevedo Couthino (2001) για την Πορτογαλία οδήγησε σε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές του συντελεστή για όλα τα έτη, ενώ η εξίσωση του Ferro έδωσε τιμή του R ίση με  $1627,75 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ . Εξαιρώντας τις σχέσεις των Arnoldus, El-Swaify και de Santos Loureiro και de Azevedo Couthino, οι οποίες άλλωστε αναπτύχθηκαν σε περιοχές διαφορετικών υδρολογικών συνθηκών από την υπό μελέτη (Μαρόκο, Ταυλάνδη και Πορτογαλία, αντίστοιχα), όλες οι υπόλοιπες τιμές του μέσου συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης προκύπτουν μεγαλύτερες από τη



μέση τιμή του βάσει των δεδομένων του Κοινού Ερευνητικού Κέντρου ( $1317 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ ).

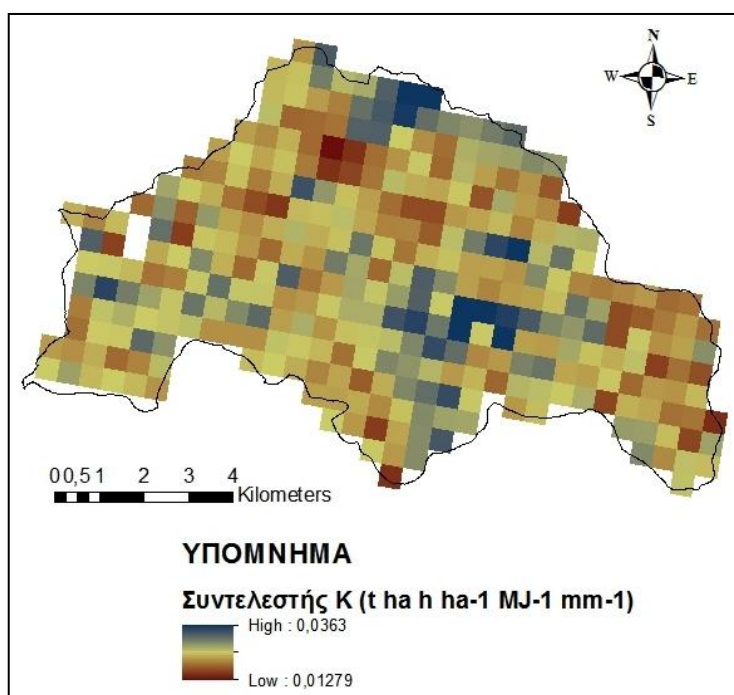
Αναφορικά με τον προσδιορισμό του παράγοντα Κ, έχουν λάβει χώρα αξιολογικές προσπάθειες για τον προσδιορισμό της εδαφικής διαβρωσιμότητας στο σύνολο της ευρωπαϊκής επικράτειας. Σε έρευνα του Πανάγου και λοιπών (2014), στοιχεία της οποίας χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, αξιοποιήθηκε η βάση δεδομένων LUCAS (2009) (Land Use/Cover Area frame Survey). Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων δημιουργήθηκε μετά από εκτεταμένες δειγματοληψίες (σύνολο δειγμάτων 20000) σε πανευρωπαϊκό επίπεδο. Ο παραγόμενος χάρτης του συντελεστή Κ διατίθεται στην ιστοσελίδα δεδομένων του Κοινού Ερευνητικού Κέντρου σε κάρναβο ισοδιάστασης 500 m. Με εφαρμογή της εντολής extract by mask του λογισμικού ArcMap 10.4, στα όρια της υπό μελέτη λεκάνης, προκύπτει ο ακόλουθος χάρτης (Εικόνα 5.7), με τη μέση τιμή του Κ να ανέρχεται σε  $0,0287 \text{ t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} / \text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$ .



**Εικόνα 5.7:** Συντελεστής εδαφικής διαβρωσιμότητας λεκάνης απορροής πηγών Αώου



Φυσικά, η επίδραση των βραχωδών εξαπλώσεων στην τιμή του συντελεστή  $K$  δε λαμβάνονται υπόψη για την εξαγωγή του παραπάνω χάρτη. Ωστόσο, ειδικά για τις μεσογειακές χώρες, η ύπαρξη, συμπαγών ή μη, βραχωδών σχηματισμών επηρεάζει σημαντικά την εδαφική διαβρωσιμότητα, η οποία εμφανίζει έως 40% μικρότερες τιμές (Βαχαβιώλος, 2014). Προκειμένου να αποφευχθεί η υπερεκτίμηση της τιμής του  $K$ , δημιουργήθηκε ο ακόλουθος χάρτης (Εικόνα 5.8), ο οποίος συμπεριλαμβάνει πλέον τον αντίκτυπο των βραχωδών εξαπλώσεων στη διαβρωσιμότητα των εδαφών. Σύμφωνα με αυτόν, η απομείωση του συντελεστή για τη λεκάνη απορροής Πηγών Αώου κυμαίνεται μεταξύ 0-56% με μέση τιμή 22%, ενώ η μέση τιμή του συντελεστή πλέον ανέρχεται σε 0,0223 t . h . h / ha . MJ . mm.



**Εικόνα 5.8:** Απομειωμένες τιμές του συντελεστή  $K$

Όπως έχει αναφερθεί, ο αναλυτικός προσδιορισμός του συντελεστή διαβρωσιμότητας απαιτεί τη συλλογή και επεξεργασία εδαφικού υλικού από την εκάστοτε περιοχή μελέτης. Στην παρούσα εργασία, λόγω τεχνικοοικονομικών περιορισμών δεν κατάφερε να υλοποιηθεί η προβλεπόμενη διαδικασία. Ωστόσο, θεωρήθηκε σκόπιμο να χαρτογραφηθούν οι γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής Πηγών Αώου, αξιοποιώντας το φύλλο Μετσόβου του ΙΓΜΕ κλίμακας 1:50.000, στο οποίο υπάγεται η λεκάνης απορροής Πηγών Αώου.

Μετά από ψηφιοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών, και βάσει των τιμών του συντελεστή  $K$  προέκυψε ο χάρτης κατανομής της διαβρωσιμότητας των εδαφικών σχηματισμών της υπό μελέτη λεκάνης (Εικόνα 4.10). Στη συνέχεια, από αξιοποίηση σχετικής βιβλιογραφίας (Λυκούδη και Ζαρρής, 2006, Tombus et al, 2012; Βαχαβιώλος, 2014; Παπάζογλου, 2009; Παπαρρίζος και Χατζημηριάδης, 2010), προκύπτουν οι επιμέρους μέσες τιμές του  $K$  ανά γεωλογικό σχηματισμό. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκε ο Πίνακας 5.4, ο οποίος περιλαμβάνει τις επιμέρους τιμές του συντελεστή  $K$  για το σύνολο της λεκάνης απορροής, λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό εξάπλωσης του κάθε σχηματισμού. Η μέση τιμή του συντελεστή που προέρχεται από βιβλιογραφική μελέτη ισούται με  $0,0255 \text{ t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} / \text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$ .

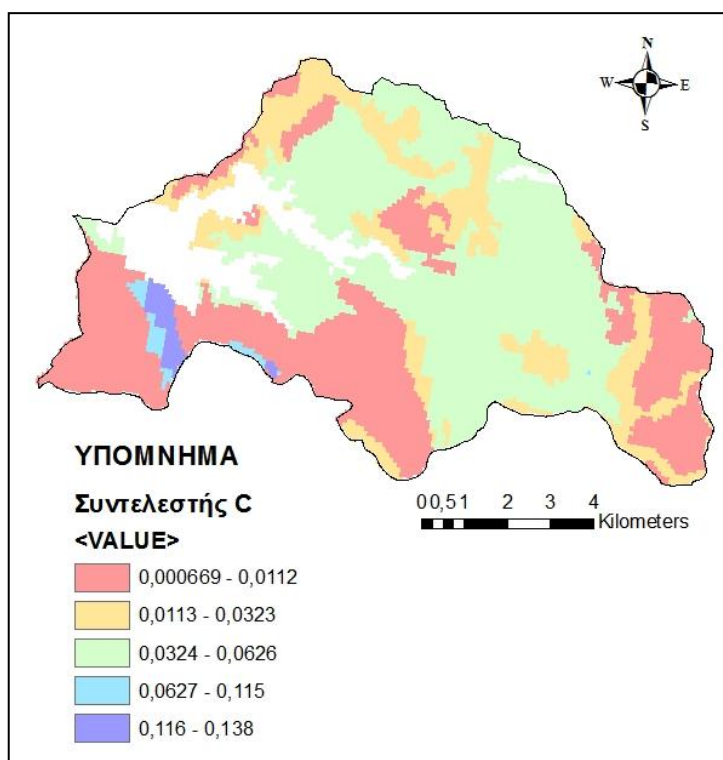
**Πίνακας 5.4:** Συντελεστής  $K$  βάσει βιβλιογραφικών τιμών

Γεωλογικός σχηματισμός	$A_i$ (km <sup>2</sup> )	$\rho_i$ ( $A_i/A$ )	$k_i$	$k_i \cdot \rho_i$
Αλλουβιακοί σχηματισμοί	11,50	0,1353	0,080	0,0108
Κορήματα	2,29	0,0270	0,045	0,0012
Φλύσχης Πίνδου	36,88	0,4337	0,010	0,0043
Πλακάδες ασβεστόλιθοι	1,83	0,0215	0,006	0,0001
Μάργες, ψαμμίτες, σχιστόλιθοι	19,49	0,2292	0,022	0,0050
Δολερίτης, βασάλτης, μικρολιθικά	0,22	0,0026	0,020	0,0001
Περιδοτίτης, σερπεντίνης	12,82	0,1508	0,026	0,0039
<b>Αθροίσματα</b>	<b>85,03</b>	<b>1,00</b>		<b>0,0255</b>

Όσον αφορά στο συντελεστή  $C$ , οι τιμές του προέκυψαν από επεξεργασία βιβλιογραφικών στοιχείων (αξιοποίηση βάσης δεδομένων CORINE Land Cover), τεχνικών τηλεπισκόπησης και στατιστικών δεδομένων της Ευρωπαϊκής Στατιστικής Υπηρεσίας (Eurostat) που σχετίζονται με καλλιεργητικές πρακτικές. Τα στοιχεία που διατίθενται από το Κοινό Ερευνητικό Κέντρο διακρίνονται ανάλογα με την αροσιμότητα και την παραγωγικότητα των γαιών. Σε αρόσιμες εκτάσεις χρησιμοποιούνται κυρίως πληροφορίες της Eurostat, ενώ για τις υπόλοιπες μελετήθηκε ένα εύρος 20 τιμών που προκύπτει από σχετική βιβλιογραφία σε συνδυασμό με τηλεσκοπικά δεδομένα για την υλοποίηση της απαιτούμενης βαθμονόμησης.

Η μέση τιμή του συντελεστή για τα ευρωπαϊκά δεδομένα ανέρχεται σε 0,1043, με τις δασικές εκτάσεις να κατέχουν τις χαμηλότερες τιμές. Αντίθετα, οι καλλιεργήσιμες και οι εκτάσεις με αραιή βλάστηση λαμβάνουν υψηλές τιμές. Στον

ακόλουθο χάρτη (Εικόνα 5.9) ισοδιάστασης καννάβου 100 m φαίνονται τα μεγέθη του συντελεστή C στο σύνολο της λεκάνης απορροής πηγών Αώου. Κάθε κελί λαμβάνει μια τιμή βάσει του εύρους τιμών που συγκεντρώθηκαν από τη βιβλιογραφία, η οποία καθορίζεται από την ποσοστιαία κατανομή της βλάστησης στο εκάστοτε κελί. Για τον ταμιευτήρα δεν υπάρχουν τιμές, ενώ η μέση τιμή του συντελεστή φυτοκάλυψης που προκύπτει με τον τρόπο αυτό ανέρχεται σε 0,03.



**Εικόνα 5.9:** Συντελεστής φυτοκάλυψης λεκάνης Πηγών Αώου

Ακολουθώντας παρόμοια λογική με τον προσδιορισμό του συντελεστή εδαφικής διαβρωσιμότητας, καταγράφηκαν οι τιμές του συντελεστή C που προέρχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία για τις χρήσεις γης κατά CORINE (Ξανθάκης et al, 2010; Λυκούδη και Ζαρρής, 2006; Βαχαβιώλος, 2014; Παπάζογλου, 2009; Παπαρρίζος και Χατζημηνιάδης, 2010). Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης των χρήσεων του έτους 2000 μετά την κατασκευή του ταμιευτήρα, ο οποίος διατίθεται στην επίσημη ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Περιβαλλοντικής Υπηρεσίας, για την εξαγωγή των αντίστοιχων ποσοστών. Ως αποτέλεσμα, προέκυψε η μέση τιμή του συντελεστή C βάσει των μέσων βιβλιογραφικών τιμών των επιμέρους συντελεστών  $c_i$  ανά κωδικοποιημένη χρήση γης που απαντάται στη λεκάνη Πηγών Αώου (Πίνακας 5.5).

**Πίνακας 5.5:** Συντελεστής C βάσει βιβλιογραφικών τιμών

Χρήση γης κατά Corine	A <sub>i</sub> (km <sup>2</sup> )	ρ <sub>i</sub> (A <sub>i</sub> /A)	c <sub>i</sub>	c <sub>i</sub> * ρ <sub>i</sub>
242: Γεωργικές εκτάσεις	1,83	0,022	0,088	0,0019
311: Δάσος πλατύφυλλων	21,84	0,2568	0,001	0,0003
312: Δάσος κωνοφόρων	2,51	0,0295	0,001	0,00003
313: Μικτό δάσος	1,63	0,0192	0,001	0,00002
321: Φυσικοί βοσκότοποι	31,53	0,3708	0,2	0,074
322: Θάμνοι και χερσότοποι	3,20	0,0376	0,05	0,0019
323: Σκληροφυλλική βλάστηση	0,75	0,0088	0,025	0,0002
324: Μεταβατικές δασώδεις- θαμνώδεις εκτάσεις	13,09	0,1539	0,02	0,0031
333: Αραιή βλάστηση	0,78	0,0092	0,05	0,0005
512: Συλλογές υδάτων	7,88	0,0927	0	0
<b>Αθροίσματα</b>	<b>85,03</b>	<b>1,00</b>	<b>0,082</b>	<b>0,082</b>

Στη συνέχεια, ο τοπογραφικός συντελεστής LS εκτιμήθηκε αναλυτικά με χρήση του αλγορίθμου των Desmet και Govers (1996) ([5.28]) σε επίπεδο κελιού καννάβου. Η εφαρμογή της υλοποιήθηκε μέσω γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών (GIS) ανοιχτού κώδικα και συγκεκριμένα του συστήματος Αυτοματοποιημένης Γεωεπιστημονικής Ανάλυσης (System for Automated Geoscientific Analyses-SAGA). Η παρούσα εξίσωση αποτελεί επέκταση των αναλυτικών εξισώσεων 5.19 και 5.20 του υποκεφαλαίου 5.1. για χρήση τους σε περιβάλλον GIS για διάφορα επίπεδα ανάλυσης ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

$$L_{ij-n} = \frac{[(A_{ij-n} + D^2)^{m+1} - (A_{ij-n})^{m+1}]}{(D^{m+2}) \cdot (x_{ij}^m) \cdot (22,13^m)} \quad [5.28]$$

όπου: L<sub>ij-n</sub>= μήκος κλίσης κανναβικού κελιού (m)

A<sub>ij-n</sub>= συμβάλλουσα επιφάνεια κανναβικού κελιού (m<sup>2</sup>)

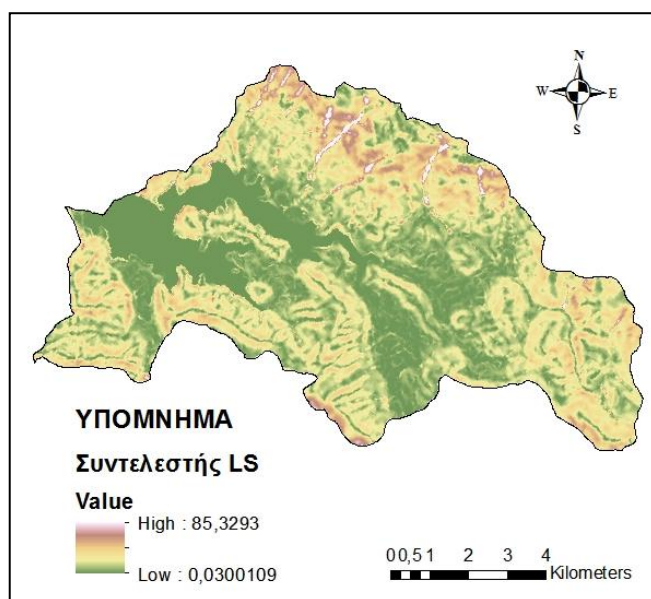
D = μέγεθος κελιού (m.)

m = συντελεστής μήκους (βάσει της εξίσωσης [5.20])

x<sub>ij</sub> = (sinα<sub>ij</sub>+cosα<sub>ij</sub>)

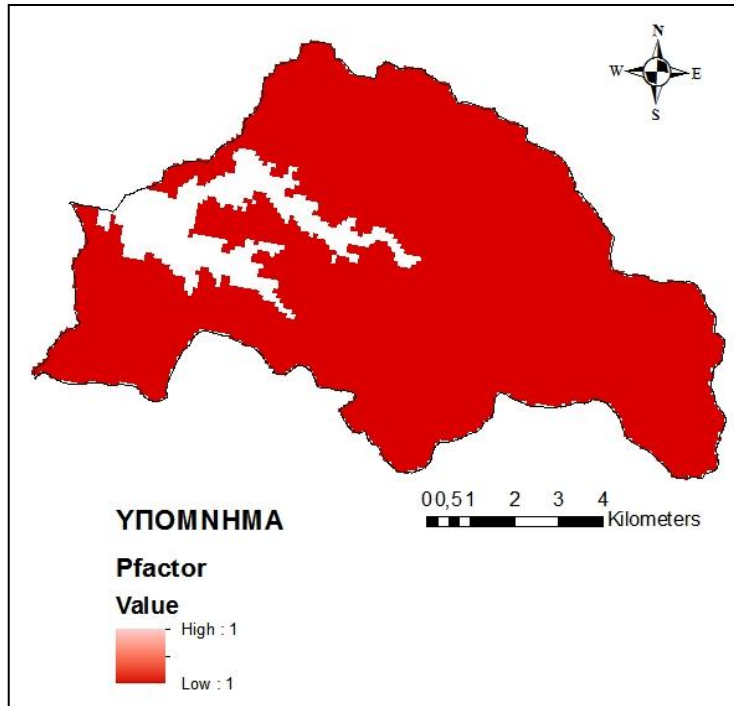
Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίστηκε η ροϊκή συγκέντρωση, η οποία απαιτείται για τον υπολογισμό των ανερχόμενων τμημάτων της συμβάλλουσας

επιφάνειας  $A_{ij-n}$  κάθε κελιού, και δημιουργήθηκαν χάρτες σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Η ανάλυση στην οποία διατίθενται είναι ισοδιάστασης 100 m, ενώ έχουν παραχθεί χάρτες σε επίπεδο χώρας υψηλότερης ανάλυσης (ισοδιάστασης 25 m). Ορεινές περιοχές των Άλπεων, της Πίνδου, των Πυρηναίων, των Απένινων και των Καρπάθιων Ορέων έλαβαν τις υψηλότερες τιμές του συντελεστή C. Οι ακόλουθοι χάρτες αφορούν την υπό μελέτη λεκάνη απορροής πηγών Αώου και δημιουργήθηκαν βάσει της παραπάνω μεθοδολογίας για ισοδιάσταση καννάβου 25 m (Εικόνα 5.10). Η μέση τιμή του συντελεστή στο σύνολο της λεκάνης ισούται με 3,34.



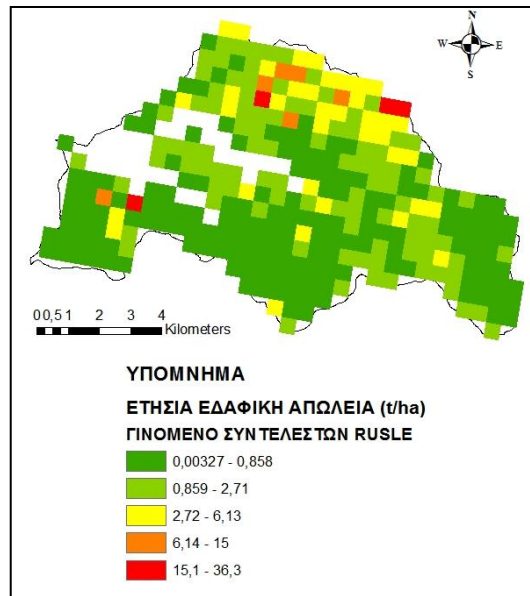
**Εικόνα 5.10:** Τοπογραφικός συντελεστής λεκάνης απορροής πηγών Αώου

Αναφορικά με το συντελεστή μέτρων ελέγχου κατά της διάβρωσης για την περιοχή της λεκάνης Πηγών Αώου, δεν υπάρχουν σχετικές διατάξεις αναστολής των διαβρωτικών φαινομένων. Δεδομένου, μάλιστα, ότι οι εν λόγω πρακτικές ελέγχου οφείλουν να έχουν συστηματικό και ολοκληρωμένο χαρακτήρα προκειμένου να μεταβάλουν το μέγεθος του συντελεστή P, η τιμή 1 λήφθηκε για το σύνολο της περιοχής μελέτης. Στον ακόλουθο χάρτη (Εικόνα 5.11) φαίνεται το αποτέλεσμα που προκύπτει αξιοποιώντας τους χάρτες του Πανάγου και λοιπών, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τις διατάξεις της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής και 270.000 επιτόπιες παρατηρήσεις στο πλαίσιο της στατιστικής έρευνας LUCAS σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Παρόλο που στο σύνολο της ελληνικής επικράτειας οι εφαρμοζόμενες πρακτικές μειώνουν έως 5% τον κίνδυνο εκδήλωσης διαβρωτικών δράσεων, στη λεκάνη Πηγών Αώου η τιμή του συντελεστή P λαμβάνει μοναδιαία τιμή.



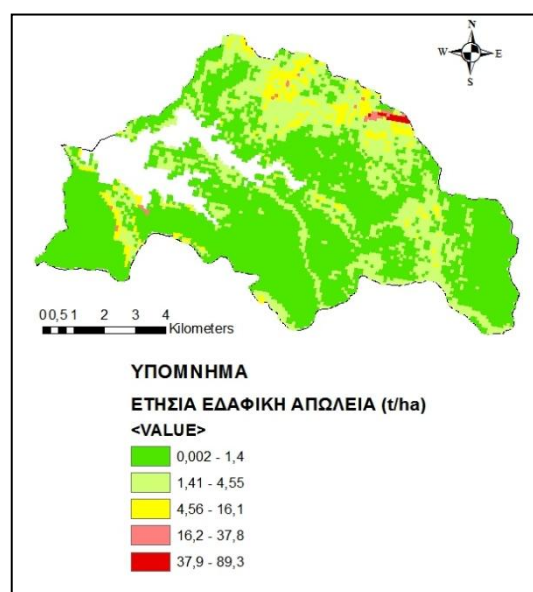
**Εικόνα 5.11:** Συντελεστής μέτρων ελέγχου κατά της διάβρωσης λεκάνης πηγών Αώου

Αφού υπολογίστηκαν οι επιμέρους συντελεστές της εξίσωσης RUSLE, με χρήση του εργαλείου Raster Calculator σε περιβάλλον GIS καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός του γινομένου τους και κατ' επέκταση της ετήσιας εδαφικής διάβρωσης. Η συνένωση των πέντε επιμέρους επιπέδων πληροφορίας οδήγησε στη δημιουργία του επόμενου χάρτη (Εικόνα 5.12), όπου η εδαφική απώλεια στη λεκάνη Πηγών Αώου εκτιμάται ίση με 1,52 t/ha ετησίως.



**Εικόνα 5.12:** Χάρτης ολικής εδαφικής απώλειας λεκάνης πηγών Αώου

Το αποτέλεσμα που προκύπτει από το γενικό ευρωπαϊκό χάρτη εδαφικής διάβρωσης ισοδιάστασης καννάβου 500 m που διατίθεται στην ιστοσελίδα του Κοινού Κέντρου Ερευνών ανέρχεται σε 1,4 t/ha ετησίως. Στον ακόλουθο χάρτη (Εικόνα 5.13) φαίνονται οι τιμές και οι αντίστοιχες κλάσεις της ολικής στερεοαπορροής του μοντέλου RUSLE για τη λεκάνη απορροής Πηγών Αώου που προέκυψαν από τον ευρωπαϊκό χάρτη μέσω της εντολής extract by mask του ArcMap. Οι τιμές εποχικής εδαφικής διάβρωσης είναι επίσης διαθέσιμες (Παράρτημα-Εικόνες 18 έως 21).



**Εικόνα 5.13:** Χάρτης εδαφικής απώλειας μοντέλου RUSLE2015



Όπως έχει προαναφερθεί, η στερεοαπορροή συνιστά ένα κλάσμα της εδαφικής διάβρωσης. Η μετατροπή της εδαφικής απώλειας σε στερεοαπορροή υλοποιείται μέσω του συντελεστή στερεοαπορροής. Για τη λεκάνη Πηγών Αώου εμβαδού 85,03 km<sup>2</sup> ο συντελεστής αυτός υπολογίστηκε για τις σχέσεις του ακόλουθου πίνακα (Πίνακας 5.6).

**Πίνακας 5.6:** Τιμές συντελεστή στερεοαπορροής

Σχέσεις	Συντελεστής στερεοαπορροής
<b>USDA SCS (1979)</b>	0,35
<b>Renfro (1975)</b>	0,22
<b>Varoni(1975)</b>	0,27
<b>Boyce (1979)</b>	0,14
<b>Maner (1962)</b>	0,18
<b>Σχέση Βαυαρίας</b>	0,17

Οι τρεις πρώτες σχέσεις συνιστούν τις επικρατέστερες και έχουν καθιερωθεί ευρέως για τον προσδιορισμό του συντελεστή στερεοαπορροής μιας λεκάνης απορροής, ενώ για τις υπόλοιπες η τιμή του συντελεστή προκύπτει αρκετά μειωμένη. Λαμβάνοντας το μέσο όρο των τριών πρώτων, ο μέσος συντελεστής στερεοαπορροής για τη λεκάνη Πηγών Αώου ισούται με 0,28. Πολλαπλασιάζοντας τη μέση εδαφική απώλεια της μεθόδου RUSLE με το συντελεστή αυτό, προκύπτει το ποσοστό των παραγόμενων φερτών υλών που φτάνει μέσω της στερεοπαροχής στον ταμιευτήρα του φράγματος σε ετήσια βάση, το οποίο προσεγγίζει τους 0,41 t/ha ή **41 t/km<sup>2</sup>**. Επιπλέον, λοιπές μορφές διάβρωσης είναι δυνατόν να υπολογιστούν μέσω σχετικών χαρτών της ιστοσελίδας του Κοινού Κέντρου Ερευνών (Παράρτημα-Εικόνες 22 έως 24).



### 5.3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

Η μέθοδος RUSLE αποτελεί ένα βασικό εργαλείο μιας αρχικής αξιολόγησης διαβρωτικών φαινομένων. Η μεθοδολογία εφαρμογής της απαιτεί την εκτίμηση παραμέτρων εύκολα προσδιορίσιμων με χρήση σχετικής βιβλιογραφίας. Παρόλα αυτά, κρίνεται σημαντική η λεπτομερής μελέτη της εκάστοτε περιοχής, ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της με στόχο τη μελλοντική επέκταση της μεθοδολογίας σε ευρύτερες περιοχές παρόμοιων γνωρισμάτων και συμπεριφοράς.

Δεδομένου ότι το παρόν φράγμα έχει κατασκευαστεί στις πηγές του ποταμού Αώου δεν εγκυμονεί ο κίνδυνος ανύψωσης της κοίτης λόγω αποθέσεων στις εκβολές των ποταμών στους ταμιευτήρες. Συνεπώς, δεν αναμένεται η εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί, στόχο της εργασίας δεν αποτελεί η μελέτη προβλημάτων που δημιουργούνται λόγω απόθεσης φερτών υλών σε ταμιευτήρες, αλλά η διερεύνηση των δυνατοτήτων εργαλείων όπως η μέθοδος RUSLE σε περιβάλλον GIS αναφορικά με την εκτίμηση της στερεοαπορροής.

Όσον αφορά στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής, σημαντικό ποσοστό της καλύπτεται από δασικές εκτάσεις. Ωστόσο, το μοντέλο RUSLE το οποίο εφαρμόστηκε έχει αναπτυχθεί στις Η.Π.Α. για την εκτίμηση της επιφανειακής διάβρωσης σε γεωργικά κυρίως εδάφη, τα οποία καταλαμβάνουν προσεγγιστικά μόλις το 1% της λεκάνης. Επομένως, απαιτείται να έχει προηγηθεί μια πολύ καλή βαθμονόμηση των επιμέρους συντελεστών του προκειμένου να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε περιοχές διαφορετικών χαρακτηριστικών, όπως η ορεινή λεκάνη απορροής Πηγών Αώου.

Επιπλέον, το μοντέλο εκτιμά το σύνολο του αιωρούμενου φορτίου που προκύπτει αποκλειστικά λόγω της επιφανειακής και αυλακωτής διάβρωσης, αγνοώντας την ύπαρξη άλλων μορφών διάβρωσης (χαραδρωτή, υπόγεια, πραινική κ.α.), οι οποίες ενδεχομένως να συμβάλλουν σε πρόσθετο όγκο αποθέσεων. Συνεπώς, μια γενική υποεκτίμηση του μεγέθους της στερεοαπορροής για την παρούσα μελέτη αναμένεται και δικαιολογείται, ενώ, παράλληλα, αποκαλύπτονται οι αδυναμίες εφαρμογής του μοντέλου σε μεσογειακά περιβάλλοντα.

Αναλύοντας ειδικότερα τους επιμέρους συντελεστές της εξίσωσης RUSLE, παρατηρείται μια αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση του μοντέλου RUSLE2015. Φυσικά, η σταθερότητα των περισσότερων συντελεστών σε όλες τις χρονικές κλίμακες αγνοεί πιθανές μεταβολές του φυσικού συστήματος. Επομένως, η καταγραφή της εξέλιξης των συντελεστών κρίνεται απαραίτητη για την ορθή και αξιόπιστη λειτουργία του μοντέλου.

Αναφορικά με της γεωλογία της υπό μελέτη περιοχής, οι όγκοι των αποθέσεων αναμένονται σημαντικοί, καθώς σημαντική έκταση των πετρωμάτων της λεκάνης απορροής χαρακτηρίζεται από σημαντική διαβρωσιμότητα (π.χ. φλύσχης Πίνδου). Παράλληλα, οι σύγχρονες προσχώσεις και οι κώνοι κορημάτων αποτελούν ιδιαίτερα ευδιάβρωτους σχηματισμούς με κύριο υλικό αποσάθρωσης την άργιλο και ιλύ. Επίσης, οι σχιστόλιθοι και τα πετρώματα της οφιολιθικής σειράς της λεκάνης απορροής (περιδοτίτης, δολερίτης, βασάλτης κ.α.) ανήκουν στους βραχώδεις - ημιβραχώδεις σχηματισμούς με αμμώδες ή ιλυώδες υλικό αποσάθρωσης. Επιπλέον, οι πλακάδεις ασβεστόλιθοι της ζώνης Πίνδου αποτελούν ευδιάλυτους, βραχώδεις σχηματισμούς.

Η τιμή του συντελεστή K για τη λεκάνη Πηγών Αώου προσδιορίστηκε μέσω του μοντέλου RUSLE2015 και μέσω βιβλιογραφικών τιμών. Η τιμή που προέκυψε από τη βιβλιογραφική μελέτη αποτελεί τη μέση τιμή των τιμών που προέκυψαν από τη χρήση του μοντέλου. Έτσι, οι τιμές 0,0223 και 0,0287 t·ha·h / ha·MJ·mm προέκυψαν συμπεριλαμβάνοντας ή όχι, αντίστοιχα, την επίδραση των βραχωδών εξαπλώσεων στην εδαφική διαβρωσιμότητα, ενώ η τιμή 0,0255 λήφθηκε αξιοποιώντας τις υπάρχουσες βιβλιογραφικές τιμές. Επιπλέον, ο συντελεστής φυτοκάλυψης του μοντέλου RUSLE2015 παρουσιάζει μικρή απόκλιση από την αντίστοιχη βιβλιογραφική τιμή (0,03 έναντι 0,082) που οφείλεται κυρίως στις υψηλότερες βιβλιογραφικές τιμές του συντελεστή για τους φυσικούς βοσκοτόπους, οι οποίοι καταλαμβάνουν και το μεγαλύτερο ποσοστό τη λεκάνης απορροής. Ωστόσο, η τιμή που προέκυψε από την εφαρμογή του μοντέλου RUSLE2015 θεωρείται ακριβέστερη, εφόσον, πέραν της βιβλιογραφίας, λαμβάνει υπόψη πρόσθετες τεχνικές τηλεπισκόπησης και στατιστικά δεδομένα. Αξίζει να σημειωθεί πως οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών σε σχετική μελέτη (Zarphs et al, 2012) στη θέση Γέφυρα Κόνιτσας του ποταμού Αώου παρουσιάζονται χαμηλότερες (συντελεστής K=0,017 και συντελεστής C=0.0061).

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στον προσδιορισμό του συντελεστή R, δεδομένου ότι διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στη διαμόρφωση του μεγέθους εδαφικής απώλειας. Ο προσδιορισμός του συντελεστή σε ορεινές λεκάνες απορροής, όπως η παρούσα, καθίσταται δύσκολος και απαιτεί περαιτέρω μελέτη λόγω των έντονων κλιματικών συνθηκών που επικρατούν. Παράλληλα, εφόσον τα σημεία μέτρησης βροχογραφικών δεδομένων στη βορειοδυτική Ελλάδα μέσω του μοντέλου RUSLE2015 είναι ελάχιστα, θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση του συντελεστή. Στην παρούσα εργασία, μέσα από την εφαρμογή τους στη λεκάνη Πηγών Αώου, παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:

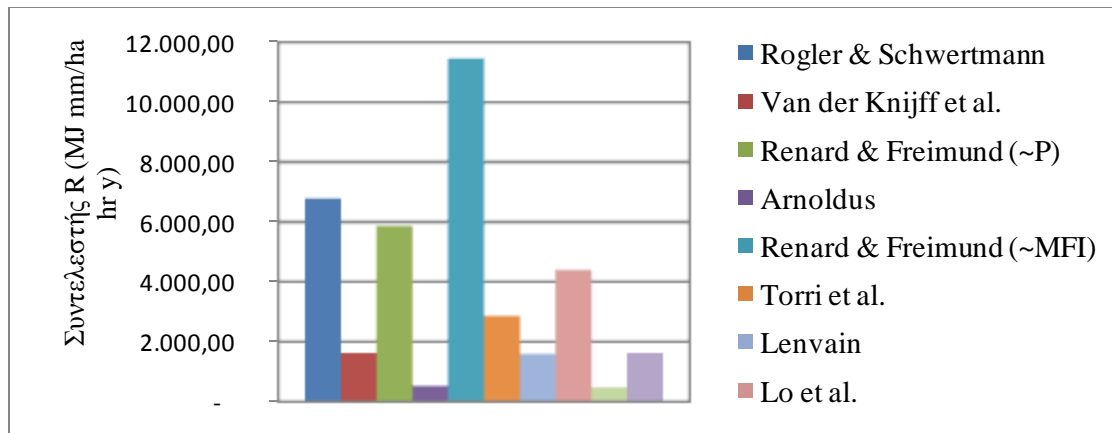
- Η σχέση των Renard and Freimund συναρτήσει του MFI οδήγησε στην υψηλότερη τιμή του συντελεστή με μέση τιμή για το σύνολο των υπό μελέτη ετών  $11449 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ . Παράλληλα, παρόμοιες σχέσεις όπως η σχέση του Arnoldus που εμπεριέχει τον MFI και του Ferro κρίνονται ακατάλληλες για περιβάλλοντα με χαρακτηριστικά που προσομοιάζουν την περιοχή μελέτης. Συνεπώς, η γραμμική συσχέτιση του MFI με την ετήσια βροχόπτωση, παρά την εισαγωγή και των μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης στην εκτίμηση της διαβρωτικότητας, δεν ενδείκνυται σε περιβάλλοντα όπου επικρατούν ανομοιογενείς συνθήκες βροχοπτώσεων (π.χ. μεσογειακά). Αντίθετα, η εφαρμογή της σχέσης των Renard and Freimund που συσχετίζει το συντελεστή R με την ετήσια βροχόπτωση οδήγησε σε μικρότερες τιμές.
- Οι σχέσεις του El-Swaify και των de Santos Loureiro και de Azevedo Couthino παρουσίασαν σημαντική απόκλιση από τις υπόλοιπες σχέσεις, υποεκτιμώντας την τιμή του συντελεστή. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται απόλυτα, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορετικότητα των συνθηκών μεταξύ των περιοχών για τις οποίες αναπτύχθηκαν (Ταυλάνδη και Πορτογαλία αντίστοιχα) και της ορεινής λεκάνης Πηγών Αώου. Επίσης, αμφίβολη κρίνεται και η χρήση της σχέσης των Lo και λοιπών για την ορεινή λεκάνη Πηγών Αώου, δεδομένου ότι η σχέση αναπτύχθηκε στην περιοχή της Χαβάης.
- Η σχέση των Rogler και Schwertmann καθώς και των Renard και Freimund συναρτήσει της ετήσιας βροχόπτωσης έχει οδηγήσει σε ικανοποιητική προσέγγιση της αναλυτικής τιμής του R στις ελληνικές συνθήκες (Βαχαβιώλος, 2014). Ωστόσο, λόγω της παράλειψης των χειμερινών μηνών (Νοέμβριος-Απρίλιος) και των βαυαρικών συνθηκών ισχύος της, η χρήση της

- σε ορεινές λεκάνες απορροής όπου οι χειμερινές απορροές είναι σημαντικές κρίνεται επισφαλής. Επιπλέον, χαμηλότερη τιμή σε σχέση με τις παραπάνω προέκυψε από τη σχέση των  $Topti$  και λοιπών που αναπτύχθηκε για την περιοχή της νότιας Ιταλίας.
- Η σχέση των  $Toy$  και λοιπών εφαρμόστηκε αξιοποιώντας τιμές του  $R$  αναλυτικά υπολογισμένες στο γειτονικό σταθμό των Ιωαννίνων που υπολογίστηκαν στο πλαίσιο διδακτορικής διατριβής (Φλαμπούρης, 2008). Ωστόσο, οι κοινές μετρήσεις της τιμής του  $R$  για το σταθμό Ιωαννίνων και των βροχοπτώσεων του σταθμού Μετσόβου ήταν μόλις 13, ενώ θεωρείται σκόπιμο να χρησιμοποιούνται δεδομένα χρονικής εμβέλειας μεγαλύτερης της 20ετίας για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Επιπλέον, η σχέση των  $Toy$  και λοιπών που εφαρμόστηκε είναι προσεγγιστική, χωρίς να διευκρινίζει σαφώς το εύρος της απαιτούμενης εγγύτητας των δύο σταθμών.
  - Γραμμικές συσχετίσεις της ετήσιας βροχόπτωσης και του συντελεστή  $R$ , όπως η σχέση Van der Knijff και λοιπών και του Lenvain, οδήγησαν σε τιμές προσεγγιστικά ίσες με  $1600 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ . Η εγγύτητα και η σχετική υδρολογική ομοιότητα της Ιταλίας με διάφορες περιοχές της Ελλάδας καθιστά συχνή την εφαρμογή της σχέσης Van der Knijff σε διάφορες λεκάνες απορροής της ελληνικής επικράτειας (Vlastara et al, 2011; Λυκούδη και Ζαρρής, 2006). Παρόμοιας λογικής σχέσεις έχουν αναπτυχθεί για την Ελλάδα (Φλαμπούρης, 2008), σύμφωνα με τις οποίες ο συντελεστής αναλογίας της ετήσιας βροχόπτωσης συναρτήσει του  $R$  δεν ισούται με 1,3 αλλά προσεγγίζει τη μονάδα, δεδομένου ότι η υπό μελέτη λεκάνη απορροής σχεδόν ταυτίζεται με την ισοτιμική ζώνη με μια μικρή απόκλιση προς τα ανατολικά. Επιπλέον, σχέσεις που οδηγούν σε μειωμένες τιμές του συντελεστή  $R$  σε σχέση με την ετήσια βροχόπτωση (όπως  $R = 0,83 \cdot P - 1,77$ ) έχουν χρησιμοποιηθεί για το σύνολο της ελληνικής επικράτειας (Μυρωνίδης, 2012) και η μέση τιμή τους για τη λεκάνη Πηγών Αώου προκύπτει ίση με  $1039 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ .
  - Τα αποτελέσματα των σχέσεων Van der Knijff και λοιπών και του Lenvain, παρόλο που συμπεριλαμβάνονται στις χαμηλότερες μεταξύ των εμπειρικών σχέσεων, είναι υψηλότερες από τη μέση ετήσια τιμή (συμπεριλαμβανομένου του σφάλματος) που λήφθηκε από την ιστοσελίδα της Κοινής Ευρωπαϊκής Επιτροπής ( $1317 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ ). Επομένως, απαιτείται περαιτέρω

διερεύνηση για την υιοθέτηση της συγκεκριμένης τιμής του συντελεστή R στη λεκάνη απορροής Πηγών Αώου. Σε κάθε περίπτωση, ο αναλυτικός υπολογισμός του R από δεδομένα ικανοποιητικής χωρικής και χρονικής εμβέλειας, τα οποία εν προκειμένω δεν ήταν διαθέσιμα, οδηγεί στην εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων και την ασφαλή αξιολόγηση των εμπειρικών σχέσεων, δεδομένου ότι η ένταση και η ενέργεια των βροχοπτώσεων διαμορφώνουν την ακριβή τιμή του συντελεστή.

Βάσει της τελευταίας διαπίστωσης και λαμβάνοντας υπόψη τη μέση τιμή των συντελεστών R των εμπειρικών σχέσεων (εξαιρούμενων των ακραίων, ακατάλληλων για την περιοχή μελέτης τύπων), η εκτίμηση της στερεοαπορροής πλέον μπορεί να θεωρηθεί πως κυμαίνεται μεταξύ 45 και 58 t/km<sup>2</sup>. Φυσικά το παραπάνω αποτέλεσμα αφορά μόνο στο αιωρούμενο φορτίο που προσδιορίζει η μέθοδος RUSLE, ενώ για το φορτίο σε σύρση συνήθως γίνεται διεθνώς η παραδοχή ότι αποτελεί το 10% του φορτίου σε αιώρηση. Για τα ελληνικά δεδομένα ενδέχεται να αγγίζει το 30% ή να το ξεπεράσει (στην περίπτωση ορεινών χειμάρρων), οπότε το συνολικό στερεοφορτίο κυμαίνεται μεταξύ 59 και 75 t/km<sup>2</sup>.

Συνολικά, το μοντέλο RUSLE2015 οδήγησε σε αποτελέσματα που προσεγγίζουν τις αντίστοιχες τιμές των επιμέρους συντελεστών που προκύπτουν από βιβλιογραφική μελέτη. Περιθώρια βελτίωσης ίσως επιδέχεται ο συντελεστής R, μέσω της σύγκρισης των τιμών του με τις αναλυτικά υπολογισμένες τιμές. Σχετικά με τα αποτελέσματα της εφαρμογής των εμπειρικών σχέσεων για τον προσδιορισμό του R, οι προκύπτουσες τιμές συνοψίζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 5.14). Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν υποεκτίμηση της τιμής που προκύπτει από το μοντέλο. Ωστόσο, ο αναλυτικός υπολογισμός του συντελεστή R κρίνεται αναγκαίος για την εξαγωγή ασφαλών και βέβαιων συμπερασμάτων.

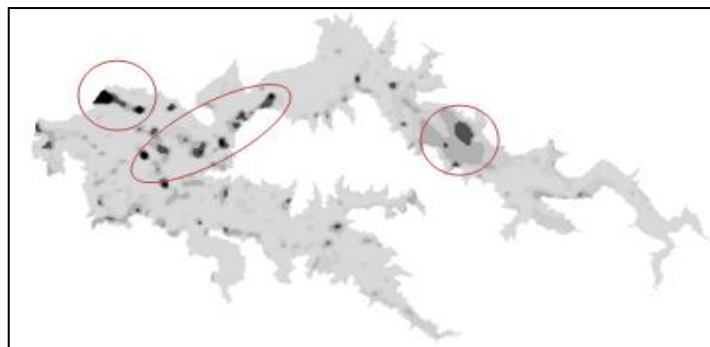


**Εικόνα 5.14:** Διάγραμμα τιμών των εμπειρικών σχέσεων του συντελεστή R

Αναφορικά με τις πραγματικές μετρήσεις που λήφθηκαν υπόψη για τον προσδιορισμό του όγκου του στερεοφορτίου, η ακρίβεια των πρωτογενών δεδομένων κρίθηκε ανεπαρκής. Η διαφορά των δύο ψηφιακών μοντέλων εδάφους οδήγησε σε ορισμένες ιδιαίτερα υψηλές τιμές, οι οποίες θεωρήθηκε σκόπιμο να αποκλειστούν. Δεδομένου, μάλιστα, ότι στο μεσοδιάστημα των μετρήσεων της Γ.Υ.Σ. και των βυθομετρήσεων του 1996 έλαβαν χώρα οι εργασίες για την κατασκευή του φράγματος, η αξιοπιστία των μετρήσεων επηρεάστηκε. Επομένως, παρά τις πληροφορίες περί ελάχιστων, σχεδόν μηδαμινών, υλοποιούμενων διαμορφώσεων, προέκυψαν αναπόφευκτα σφάλματα κυρίως σε θέσεις κοντά στην ακτογραμμή και στην περιοχή του κυρίως φράγματος.

Παρά τις αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν στις ποσότητες της εδαφικής απώλειας και των αποθέσεων φερτών υλών, οι θέσεις εναπόθεσης φερτών εκ πρώτης όψεως φαίνονται ορθές. Έτσι, τμήματα του κλάσματος της εδαφικής διάβρωσης που συνεισφέρει στην παραγωγή φερτών υλών αποτίθενται σε περιοχές του ταμιευτήρα που χαρακτηρίζονται από πιο ήπιες κλίσεις ή στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου. Ιδιαίτερα αυξημένες ποσότητες φερτών υλικών παρατηρούνται στο ανατολικό τμήμα του ταμιευτήρα, σε διάσπαρτες πεδινές εκτάσεις χαμηλότερου υψομέτρου και στην περιοχή του φράγματος. Αντίθετα, αυξημένη ταχύτητα ροής και κατ' επέκταση σημαντική διαβρωτική δράση παρατηρείται σε περιοχές περιμετρικά κυρίως του ταμιευτήρα που χαρακτηρίζονται από σημαντικές κλίσεις. Επίσης, σε ορισμένες διάσπαρτες θέσεις του κυρίως ταμιευτήρα παρουσιάζονται αποθέσεις, γεγονός που ίσως υποδηλώνει αδυναμία κατακράτησης των φερτών υλών στον ταμιευτήρα και πιθανές διαφυγές μέσω της υδροληψίας ή του υπερχειλιστή λόγω της μικρής έκτασης

του ταμιευτήρα. Οι θέσεις εμφάνισης εκτεταμένων αποθέσεων φερτών υλών σημειώνονται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 5.15).



**Εικόνα 5.15:** Περιοχές εναπόθεσης φερτών υλών στον ταμιευτήρα

Συνοψίζοντας, ανακριβή μετρητικά δεδομένα λόγω αναπόφευκτων σφαλμάτων του GPS κατά τη βυθομέτρηση αλλά και κατά την απόδοση του αρχικού αναγλύφου, καθώς και πιθανές διαμορφώσεις κατά την κατασκευή του φράγματος ή και μετέπειτα δυσχεραίνουν την ακριβή μελέτη της στερεοαπορροής στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής. Επομένως, κρίθηκε απαραίτητος ο αποκλεισμός ορισμένων ακραίων τιμών της διαφοράς των δύο ψηφιακών μοντέλων που δημιουργήθηκαν προκειμένου να υλοποιηθεί η σύγκριση των πρωτογενών δεδομένων με τα αποτελέσματα της μεθόδου RUSLE σε περιβάλλον GIS. Οι προκύπτουσες τιμές στερεοαπορροής εμφανίζονται αρκετά χαμηλότερες σε σύγκριση με παρόμοιες μελέτες (Βαχαβιώλος, 2014; Ξανθάκης et al, 2010), γεγονός που δικαιολογείται από τη θέση κατασκευής του ταμιευτήρα, δεδομένου ότι στις πηγές του ποταμού δεν αναμένεται σημαντικός όγκος φερτών υλών. Η εφαρμογή του μοντέλου RUSLE οδήγησε σε υποεκτίμηση του πραγματικού μεγέθους της στερεοαπορροής. Ωστόσο, οι αποκλίσεις των μεγεθών καθορίζονται βάσει πλήθους ασαφών παραμέτρων, όπως ο προσδιορισμός της πυκνότητας των φερτών υλών, η έντονη χωρική διακύμανση της στερεοαπορροής κ.α. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση του συντελεστή στερεοαπορροής αποκλειστικά μέσω της επιφάνειας της λεκάνης απορροής αποτελεί διεθνή απλουστευμένη αλλά και αρκετά αξιόπιστη πρακτική. Ωστόσο, παραμένει επισφαλής, δεδομένου ότι δε λαμβάνονται υπόψη υδρολογικά, γεωλογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.

## **Κεφάλαιο 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ**

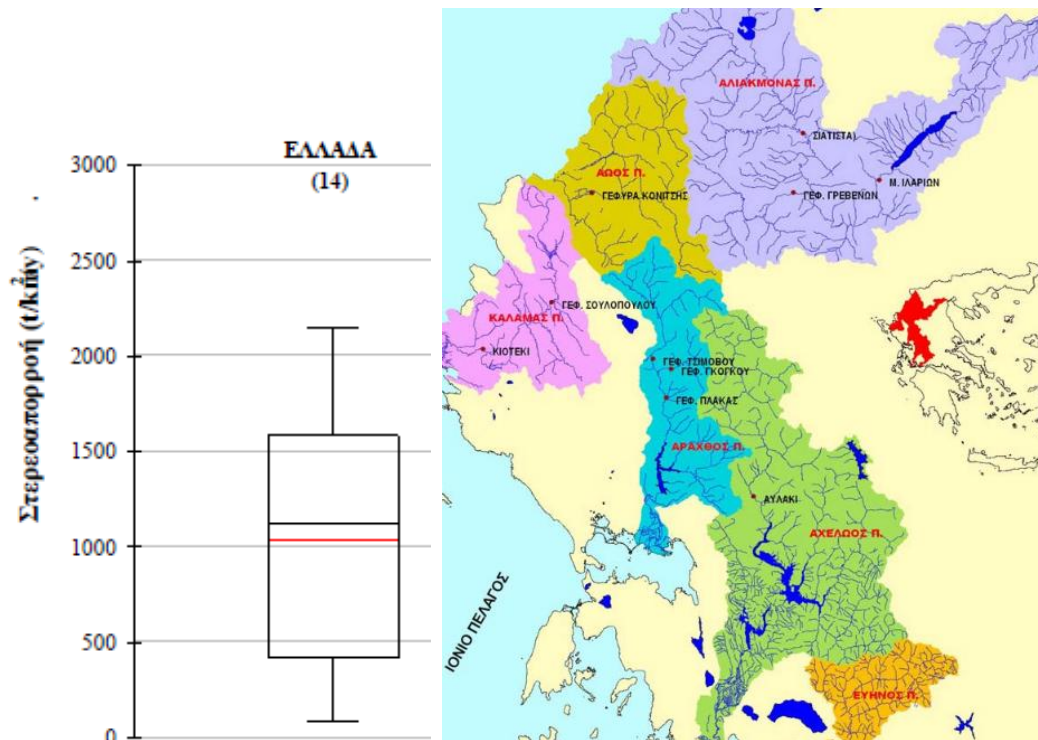
Στόχο του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου RUSLE σε περιβάλλον GIS αλλά και από τη διαφορά των ψηφιακών μοντέλων εδάφους και η σύγκρισή τους με κατάλληλες σχέσεις και μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί για την περιοχή μελέτης. Επιπλέον, προτείνονται πιθανές μελλοντικές μελέτες σχετικές με τους μηχανισμούς κίνησης του εδαφικού υλικού σε ταμειυτήρες.

### **6.1 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο έλεγχος της συμβατότητας των τιμών της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής, όπως προέκυψε από την παρούσα εργασία, σε σύγκριση με προηγούμενες εκτιμήσεις από άλλες πηγές που έχουν υλοποιηθεί για παρόμοιες περιοχές της βορειοδυτικής Ελλάδας αναφορικά με το υδρολογικό και γεωλογικό υπόβαθρο. Η αξιοποίησή τους κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική, δεδομένου ότι οι στερεοϋδρομετρήσεις στην ελληνική επικράτεια είναι περιορισμένες.

Αρχικά, ο Ζαρρής και λοιποί (2012), αφού επεξεργάστηκαν 73 στερεοϋδρομετρήσεις στον ποταμό Αώο, οι οποίες διενεργήθηκαν κατά το διάστημα 1968-1983, κατέληξαν στην εξαγωγή διαφόρων σχέσεων. Σύμφωνα με την έρευνα, η μέση ετήσια στερεοαπορροή στη λεκάνη απορροής Αώου, επιφάνειας 706 km<sup>2</sup> και παροχής 24,9 m<sup>3</sup>/s και συγκεκριμένα στη θέση Γέφυρα Κόνιτσας, υπολογίστηκε ίση με 2150,7 t/km<sup>2</sup>. Η τιμή αυτή αποτέλεσε την υψηλότερη τιμή μεταξύ των στερεοαπορροών που υπολογίστηκαν σε 14 θέσεις ποταμών της βόρειας Ελλάδας, το εύρος των οποίων φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 6.1).





**Εικόνα 6.1:** Τιμές μετρημένης στερεοαποροής στην Ελλάδα

Οι παραπάνω μετρήσεις αναφέρονται στο αιωρούμενο φορτίο που φθάνει στους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου. Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διεθνώς τεχνολογίες μέτρησης της στερεοπαροχής μέσω οργάνων που καταγράφουν σε συνεχή χρόνο τη συγκέντρωση του στερεοφορτίου (αιωρούμενου αλλά και σύρσης).

Παράλληλα, η σχέση των Κουτσογιάννη και Ταρλά (1987) αποτελεί απλουστευμένη έκφραση της εξίσωσης RUSLE και προέκυψε από την επεξεργασία στερεοϋδρομετρήσεων που διενεργήθηκαν σε επτά θέσεις ποταμών της βορειοδυτικής Ελλάδας. Η εξίσωση που εξήγαγαν είναι εύκολα εφαρμόσιμη, απαιτώντας ελάχιστα δεδομένα που σχετίζονται με την κατανομή των γεωλογικών σχηματισμών και το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης.

Πιο συγκεκριμένα, οι Κουτσογιάννης και Ταρλά κατέταξαν τους εδαφικούς σχηματισμούς σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη διαβρωσιμότητά τους (χαμηλή, μέτρια, υψηλή). Χαμηλές τιμές (ίσες με 0,1) παρατηρούνται για ασβεστολιθικά πετρώματα, μεταμορφωμένα και εκρηξιγενή (π.χ. δολερίτης, περιδοτίτης), μέτριες (ίσες με 0,5) για πετρώματα όπως μάργες, ψαμμίτες και σχιστόλιθους, ενώ την τιμή 1 λαμβάνουν ο φλύσχης και αλλουβιακοί σχηματισμοί. Τα ποσοστά εξάπλωσης των

πετρωμάτων εξήχθησαν μέσω του λογισμικού ArcMap και αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο (Εικόνα 4.11).

Η μέση ετήσια στερεοαπορροή σε αιώρηση προκύπτει εφαρμόζοντας την ακόλουθη σχέση:

$$\bullet G = 15 \gamma e^{3P} \quad [t/km^2] \quad [6.1]$$

όπου:

P: το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (m)

$\gamma$ : γεωλογικός συντελεστής ίσος με το άθροισμα των γινομένων του ποσοστού εμφάνισης των σχηματισμών επί την εδαφική τους διαβρωσιμότητα.

Ο γεωλογικός συντελεστής για τη λεκάνη απορροής Πηγών Αώου υπολογίστηκε ίσος με 0,728, ενώ η μέση ετήσια βροχόπτωση μεταξύ των ετών 1950-1990 και 2010-2011 ισούται με 1,254 m. Επομένως, η σχέση των Κουτσογιάννη και Ταρλά εκτιμά το αιωρούμενο φορτίο της στερεοαπορροής ίσο με 469,94 t/km<sup>2</sup>.

Επιπροσθέτως, το μέσο ετήσιο φορτίο αιωρούμενου υλικού μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση των Ρουλος και λοιπών (1996) ([6.2]). Η εν λόγω σχέση βασίζεται σε μετρήσεις που υλοποιήθηκαν σε 35 ποταμούς της Ανατολικής Μεσογείου και συσχετίζουν τη μέση ετήσια στερεοαπορροή με την επιφάνεια της λεκάνης απορροής. Για τη λεκάνη πηγών Αώου εμβαδού 85,03 km<sup>2</sup>, η μέση ετήσια στερεοαπορροή αιωρούμενου φορτίου 1146,5 t/km<sup>2</sup>.

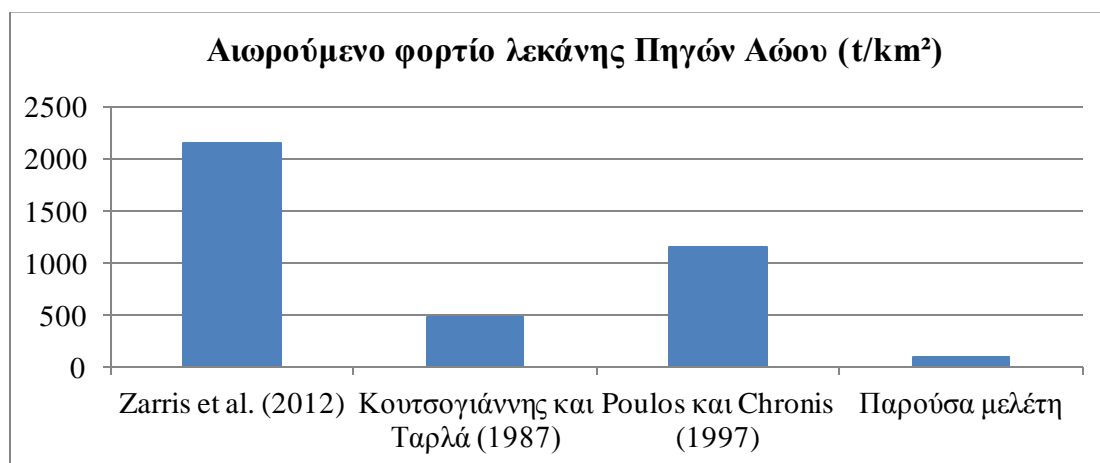
$$\bullet S = 1954 * A^{0,88} \quad [6.2]$$

Το αιωρούμενο υλικό που υπολογίζεται μέσω των παραπάνω σχέσεων αποτελεί περίπου το 66,67% της συνολικής στερεοαπορροής, ενώ το υπόλοιπο συνιστά το σύνολο του διαλυμένου υλικού και του φορτίου πυθμένα (Ρουλος και Chronis, 1997). Το ποσοστό ενδέχεται να είναι χαμηλότερο για τα ορεινά ποτάμια λόγω του έντονου αναγλύφου. Επομένως, η συνολική στερεοαπορροή για τη λεκάνη Πηγών Αώου ισούται με 1719,66 t/km<sup>2</sup>.

Η τιμή του συνολικού αιωρούμενου φορτίου της παρούσας εργασίας προέκυψε μικρότερη από όλες τις παραπάνω εκτιμήσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι σημαντικές διαφορές του μεγέθους της στερεοαπορροής ακόμη και στον ίδιο ποταμό

είναι αποδεκτές λόγω της έντονης χωρικής ανομοιογένειας του μεγέθους. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη πως ο παρών ταμιευτήρας κατασκευάστηκε στις πηγές του ποταμού Αώου, ο προσδωκόμενος όγκος φερτών αναμένεται μειωμένος σε σχέση με άλλες θέσεις του ίδιου υδρογραφικού δικτύου. Συγκεκριμένα, στη θέση Γέφυρα Κόνιτσας της λεκάνης απορροής Αώου όπου υλοποιήθηκαν στερεοϋδρομετρήσεις, η παροχή του ποταμού παρουσιάζεται οκταπλάσια και η στερεοαπορροή σημαντικά υψηλότερη από την αντίστοιχη που εκτιμήθηκε για την περιοχή των πηγών του.

Επιπρόσθετα, η σχέση των Πούλος και Χρόνης που αναπτύχθηκε βάσει της μελέτης ποταμών στην Ανατολή Μεσόγειο οδήγησε σε υψηλότερες εκτιμήσεις στερεοαπορροής για τη λεκάνη Πηγών Αώου. Το αποτέλεσμα της σχέσης των Κουτσογιάννη και Ταρλά προσέγγισε περισσότερο την εκτιμημένη τιμή της στερεοαπορροής στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής. Ωστόσο, η εφαρμογή των ανωτέρω σχέσεων για ιδιαίτερα περιβάλλοντα και θέσεις του υδρογραφικού δικτύου, όπως είναι η περιοχή των πηγών που μελετάται, φαίνεται να οδηγούν σε υπερεκτίμηση της πραγματικής τιμής. Τα αποτελέσματα των μεγεθών στερεοαπορροής που προέκυψαν για το σύνολο των σχέσεων και των μετρημένων τιμών συνοψίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 6.2).



**Εικόνα 6.2:** Αποτελέσματα εκτιμήσεων αιωρούμενου φορτίου

Όσον αφορά στην εκτίμηση του όγκου των αποθέσεων σε ταμιευτήρες του ελληνικού χώρου, έχουν διενεργηθεί υδρογραφικές αποτυπώσεις με σκοπό τον προσδιορισμό της στερεοαπορροής. Σύμφωνα με αυτές, η μέση ετήσια στερεοαπορροή στον ταμιευτήρα Κρεμαστών (εμβαδού λεκάνης απορροής 3.292 km<sup>2</sup>) προσεγγίζει τους 1.005,6 t/km<sup>2</sup> και η μέση ετήσια απόθεση φερτών υλών τα 2

hm<sup>3</sup>, προερχόμενη κυρίως από τις εκβολές τριών ποταμών εντός του ταμιευτήρα (Zarrής et al, 2002). Επιπλέον, η μέση ετήσια απόθεση φερτών υλικών ανέρχεται σε 58.460 m<sup>3</sup> και η μέση ετήσια στερεοαπορροή σε 508,2 t/km<sup>2</sup> για τον ταμιευτήρα του Μαραθώνα εμβαδού της ανάντη λεκάνης απορροής ίσου με 117,8 km<sup>2</sup> (Ξανθάκης et al, 2011).

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, οι μέσες ετήσιες αποθέσεις φερτών υλικών στον ταμιευτήρα Πηγών Αώου εκτιμώνται σε 41 t/km<sup>2</sup> μέσω της μεθόδου RUSLE και σε 98 t/km<sup>2</sup> μέσω της διαφοράς των ψηφιακών μοντέλων εδάφους. Τα αποτελέσματα είναι συμβατά με τις προβλέψεις κατά το σχεδιασμό του έργου που αναφέρουν ιδιαίτερα χαμηλούς όγκους των αναμενόμενων αποτιθέμενων φερτών υλικών, ενώ παράλληλα η διαφορά των ψηφιακών μοντέλων εδάφους που προέκυψε βρίσκεται εντός των ορίων των μετρημένων τιμών στερεοαπορροής στον ελλαδικό χώρο (Εικόνα 6.1). Ωστόσο, λόγω των ιδιοτήτων της κατασκευής του ταμιευτήρα, και κυρίως λόγω της κατασκευής του στις πηγές του ποταμού Αώου, τα μεγέθη της παρούσας εργασίας προέκυψαν μικρότερα από τα αντίστοιχα άλλων ταμιευτήρων παρόμοιας έκτασης. Λαμβάνοντας υπόψη τις χαμηλές τιμές που προέκυψαν, ο νεκρός όγκος στον πυθμένα του υπό μελέτη ταμιευτήρα δεν κινδυνεύει να γεμίσει από προσχώσεις φερτών υλών.

## 6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Όσον αφορά στην παρούσα μελέτη, παρουσιάστηκαν σημαντικές δυσκολίες τεχνικο-οικονομικής φύσεως που εμπόδισαν τη μέτρηση του συνόλου των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο πολυσύνθετο πρόβλημα της εδαφικής διάβρωσης. Ωστόσο, συστηματικές μελλοντικές προσπάθειες σε συνδυασμό με πειραματικές μετρήσεις αναμένεται να συμβάλουν στην αντιμετώπιση προβλημάτων προσδιορισμού της εδαφικής διάβρωσης και κατ' επέκταση στην ορθολογική διαχείριση των λεκανών απορροής.

Τα επιμέρους αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν για τη διεξαγωγή μελλοντικών μελετών των διαδικασιών της εδαφικής διάβρωσης σε εθνικό αλλά και παγκόσμιο επίπεδο, καθώς παρατηρούνται ελλείψεις

στη βιβλιογραφία σχετικά με τις μεθοδολογίες προσδιορισμού του στερεοφορτίου σε ταμιευτήρες. Προκειμένου να οριστικοποιηθούν τα συμπεράσματα της εργασίας και να καταρτιστεί ένα γενικό, απλό και αξιόπιστο πλαίσιο υπολογισμού της στερεοαπορροής, κρίνονται σκόπιμες περαιτέρω έρευνες σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Ειδικότερα προτείνονται τα ακόλουθα:

- Άμεση μέτρηση του φορτίου των φερτών υλών (π.χ. με χρήση ιζηματοπαγίδων, βυθομέτρηση, χρήση προηγμένων τεχνολογικών εργαλείων) με στόχο την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων για την επιλογή του κατάλληλου εμπειρικού μοντέλου. Δεδομένης της δυναμικής φύσεως των διαδικασιών απόθεσης φερτών υλών και των διαβρωτικών φαινομένων, προτείνεται οι μετρήσεις να επαναλαμβάνονται περιοδικά για την εξασφάλιση πρόσθετης ακρίβειας και αξιοπιστίας.
- Υλοποίηση δειγματοληπτικών γεωτρήσεων σε ταμιευτήρες προκειμένου να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα των εμπειρικών τύπων σχετικά με το συντελεστή στερεοαπορροής, την πυκνότητα των φερτών υλικών και τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στη χρήση εμπειρικών σχέσεων εδαφικής απώλειας.
- Εφαρμογή πρόσθετων μοντέλων εκτίμησης της εδαφικής διάβρωσης και του στερεοφορτίου ώστε να βρεθεί το κατάλληλο, που προσεγγίζει περισσότερο τα πραγματικά δεδομένα μέσω της βαθμονόμησης των παραμέτρων που περιλαμβάνει και της προσαρμογής τους στις συνθήκες της εκάστοτε περιοχής.
- Η λεπτομερής μελέτη και ο αναλυτικός υπολογισμός των συντελεστών της εξίσωσης RUSLE σε διάφορες περιοχές, προκειμένου να αναδειχθούν οι δυνατότητες, οι περιορισμοί και τα περιθώρια βελτίωσης του ευρωπαϊκού μοντέλου RUSLE2015.
- Η συλλογή και επεξεργασία αναλυτικών δεδομένων βροχογράφου για τον άμεσο υπολογισμό του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης και τον προσδιορισμό της χρονικής και χωρικής του διακύμανσης.

- Η επίδραση του παράγοντα της χιονόπτωσης ιδιαίτερα ορεινών περιοχών στη διαμόρφωση της τιμής του συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης.

## **Κεφάλαιο 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Το γεγονός πως η κίνηση και η απόθεση των φερτών υλών αποτελεί μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία στην οποία υπεισέρχονται ποικίλες παράμετροι καθιστά τον υπολογισμό της στερεοαπορροής πολύπλοκο και αβέβαιο. Η διφασική φύση του προβλήματος απαιτεί την ταυτόχρονη μελέτη των χαρακτηριστικών υγρών και στερεών στοιχείων που δύσκολα μπορούν να προσδιοριστούν στο πεδίο. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, χρησιμοποιούνται εμπειρικοί τύποι και ποιοτικά χαρακτηριστικά εκτίμησης της κοκκομετρίας και των γνωρισμάτων των μεταφερόμενων υλικών.

Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα προσδιορισμού του συνολικού όγκου του στερεοφορτίου προκύπτουν με επιφύλαξη από εμπειρικούς τύπους, προβάλλει επιτακτική η ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης και ελέγχου τους. Η ύπαρξη μετρήσεων πεδίου εδαφικής απώλειας ή στερεοαπορροής κρίνεται αναγκαία για την εξαγωγή ασφαλών και αξιόπιστων συμπερασμάτων καθώς και για τον προσδιορισμό ενός εύρους σφάλματος των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με χρήση εμπειρικών μεθόδων. Με τον τρόπο αυτό, η υπάρχουσα γνώση για τις διαδικασίες υπολογισμού των εδαφικών απωλειών και αποθέσεων αναμένεται να αναβαθμιστεί και να επεκταθεί με στόχο την καθιέρωση ενός γενικού, απλού και αξιόπιστου μοντέλου.

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι δυνατότητες, οι περιορισμοί και τα περιθώρια βελτίωσης ενός εμπειρικού μοντέλου υπολογισμού της στερεοαπορροής μέσω της μελέτης περίπτωσης του ταμιευτήρα Πηγών Αώου του φράγματος του ποταμού Αώου. Το γεγονός αυτό, κατέστη δυνατό με τη συνδυαστική χρήση του εμπειρικού μοντέλου της Αναθεωρημένης Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας (RUSLE) και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Το λογισμικό ArcMap αποτέλεσε το εργαλείο για τον υπολογισμό των επιμέρους συντελεστών της μεθόδου RUSLE, τιμές των οποίων λήφθηκαν και αξιολογήθηκαν αξιοποιώντας δεδομένα του Κοινού Ερευνητικού Κέντρου (JRC). Η μέση ετήσια εδαφική απώλεια που προέκυψε ανέρχεται σε 41 t/km<sup>2</sup>.

Παράλληλα, έγινε προσπάθεια εκτίμησης της μεταβολής του εδαφικού υλικού εντός του ταμιευτήρα μέσω της διαφοράς δύο ψηφιακών μοντέλων εδάφους. Το πρώτο μοντέλο προέκυψε από βυθομετρικές μετρήσεις που υλοποιήθηκαν το έτος 1996 στο πλαίσιο του προγράμματος "Όγκομέτρηση Ταμιευτήρα ΥΗΣ Πηγών Αώου"

και το δεύτερο από χρήση υψομετρικών καμπυλών της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.) του έτους 1970. Φυσικά, η αξιοπιστία του αποτελέσματος παραμένει επισφαλής, καθώς οι εργασίες για την κατασκευή του φράγματος έλαβαν χώρα στο μεσοδιάστημα. Για το λόγο αυτό, αφού απορρίφθηκαν ορισμένες ακραίες τιμές, υπολογίστηκε η διαφορά τους σε περιβάλλον GIS η οποία προσεγγίζει τους 98 t/ha εδαφικού υλικού. Το αποτέλεσμα αυτό παραμένει επισφαλές, καθώς τα διαθέσιμα πρωτογενή δεδομένα περιέχουν σφάλματα που οφείλονται σε ανακριβείς μετρήσεις πεδίου για την απόδοση του αρχικού αναγλύφου, σε αναπόφευκτα σφάλματα κατά τη βυθομέτρηση, καθώς και πιθανές διαμορφώσεις κατά την κατασκευή του φράγματος ή λίγο μετέπειτα.

Όσον αφορά στην εκτίμηση της στερεοαπορροής με χρήση του εμπειρικού μοντέλου RUSLE, πραγματοποιείται μια σημαντική προκαταρκτική προσπάθεια αξιολόγησης του φαινομένου. Παράλληλα, η συμπερίληψη της χωρικής μεταβολής των παραμέτρων της RUSLE με αρωγό το λογισμικό ArcMap βελτιώνει την ορθότητα των αποτελεσμάτων και ενισχύει την ανάδειξη των περιοχών που χρήζουν προστασίας. Η απλότητα στη χρήση του μοντέλου σε συνδυασμό με το μικρό πλήθος των απαιτούμενων δεδομένων δεν επηρεάζει την αξιοπιστία του, αρκεί η εφαρμογή του να γίνεται με γνώμονα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής. Για το λόγο αυτό, οι υλοποιούμενες παραδοχές και απλουστεύσεις απαιτούν την ύπαρξη πραγματικών δεδομένων για την εκάστοτε περιοχή μελέτης και το συνδυασμό αυτών με βιβλιογραφικές τιμές προκειμένου να επιτευχθεί η αποτελεσματική διαχείριση μιας λεκάνης απορροής και η λήψη μέτρων προστασίας των ταμιευτήρων από προσχώσεις φερτών υλικών.

Η αξιολόγηση των επιμέρους συντελεστών του μοντέλου εκτίμησης της διάβρωσης RUSLE2015 που προέκυψε από έρευνα των Πανάγου και λοιπών μπορεί να αναδείξει τους περιορισμούς καθώς και τις προοπτικές για καθιέρωση και χρήση του σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η χρήση του για τον προσδιορισμό των πέντε συντελεστών της μεθόδου RUSLE στη λεκάνη Πηγών Αώου οδήγησε σε αρκετά αξιόπιστα συμπεράσματα, ενώ αναδείχθηκαν πιθανά περιθώρια βελτίωσης της προσέγγισης του συντελεστή διαβρωτικότητας R. Για τον εν λόγω συντελεστή, η πλειονότητα των τιμών που προέκυψαν από βιβλιογραφικές σχέσεις παρουσιάζονται υψηλότερες. Ωστόσο, λόγω της σημαντικής ευαισθησίας των εμπειρικών σχέσεων στις διαφορετικές συνθήκες κάθε περιοχής, θεωρείται



απαραίτητος ο υπολογισμός του εν λόγω συντελεστή μέσω αναλυτικών δεδομένων βροχογράφου προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή και σίγουρα συμπεράσματα.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από μετρήσεις και σχέσεις που αναπτύχθηκαν για τη βορειοδυτική Ελλάδα οδηγούν σε υπερεκτίμηση του μεγέθους της στερεοαπορροής βάσει της παρούσας μεθοδολογίας. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι στερεοϋδρομετρήσεις στις οποίες βασίζονται οι σχέσεις υλοποιήθηκαν σε θέσεις ποταμών που παρουσιάζουν αρκετά σημαντικότερη στερεοπαροχή σε σύγκριση με το παρόν έργο που κατασκευάστηκε στις πηγές του ποταμού Αώου. Ως αποτέλεσμα, στερεοϋδρομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε πιο απομακρυσμένη από τις πηγές θέση του ποταμού Αώου (Γέφυρα Κόνιτσας) έλαβαν τις υψηλότερες τιμές στο σύνολο των στερεοϋδρομετρήσεων που υλοποιήθηκαν, ενώ η τιμή της στερεοαπορροής στις πηγές του Αώου προέκυψε ιδιαίτερα χαμηλή, σύμφωνα με την παρούσα εργασία. Τα παρόντα αποτελέσματα που αφορούν τα πρώτα έντεκα εξάμηνα λειτουργίας του έργου επιβεβαιώνουν τις προβλέψεις περί ασήμαντου προβλεπόμενου όγκου των αποθέσεων κατά τη μελέτη σχεδιασμού.

Συνοψίζοντας, η μελέτη της στερεοαπορροής αποτελεί ένα πολυσύνθετο πρόβλημα, στο οποίο υπεισέρχονται διάφορες παράμετροι που είναι δύσκολο να προσδιοριστούν στο πεδίο. Δεδομένης της πολυπλοκότητας των φαινομένων, η προσέγγιση μιας τάξης μεγέθους των σχετικών ποσοτήτων αποτελεί σημαντικό στοιχείο. Για το λόγο αυτό, η ανάπτυξη απλών και αξιόπιστων μοντέλων κρίνεται απαραίτητη όπως και η συνεχής βελτίωσή τους προκειμένου να αποτελέσουν εργαλείο αποτελεσματικής διαχείρισης των διαβρωτικών φαινομένων και προβλημάτων απόθεσης φερτών υλών. Βασικό απαιτούμενο συνιστά η ύπαρξη αξιόπιστων μετρητικών δεδομένων, κατάλληλων βιβλιογραφικών τιμών/σχέσεων και η εφαρμογή ενός ορθώς επιλεγμένου μοντέλου με γνώμονα πάντα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής μελέτης.

Τέλος, η καταγραφή της υφιστάμενης κατανομής της επιφανειακής και αυλακωτής διάβρωσης θα αποτελέσει το βασικό επίπεδο πληροφορίας, συνδυαζόμενο με τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, για τον προσδιορισμό ζωνών προτεραιότητας και την τελική πρόταση μέτρων για την αποτροπή της διάβρωσης στις εστίες παραγωγής φερτών υλικών όσο και της προστασίας των υποδομών και του ορθότερου πολεοδομικού σχεδιασμού.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

### Ελληνόγλωσση

- Αγοράκη, Φ., 2004, Εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης της νήσου Λέσβου με τη χρήση σύγχρονων μεθόδων γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και τηλεπισκόπησης, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Βαχαβιώλος, Θ., 2014, Εκτίμηση εδαφικής διάβρωσης, στερεοαπορροής και αποθέσεων ταμιευτήρα από εμπειρικές μεθόδους με έμφαση στην επίδραση της βροχόπτωσης, Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Βιδάλη, Μ., 2013, Εκτίμηση μοντέλου διάβρωσης και στερεοπαροχής στον ταμιευτήρα του φράγματος Πηνειού Νομού Ηλείας, Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Βλαχόπουλος, Γ., 2007, Αναγκαιότητα για τον εκσυγχρονισμό των τεχνικών προδιαγραφών σύνταξης μελετών αντιπλημμυρικών έργων, <<https://home.asda.gr/modules/files/othrpdffiles/%CE%95%CE%B9%CF%83%CE%AE%CE%B3%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CE%92%CE%BB%CE%B1%CF%87%CF%8C%CF%80%CE%BF%CF%85%CE%BB%CE%BF%CF%82.pdf>>, Τελευταία επίσκεψη: 8/6/2016.
- Γεωργαλάς, Γ., 1966, Στοιχεία γεωλογίας και ορυκτολογίας, Οργανισμός εκδόσεως διδακτικών βιβλίων, Αθήνα.
- Γουρδουμπάς, Ι., Π. Νάστος και Χ. Μαουκιάν, 2007, Μελέτη της υδατοπαροχής και στερεοπαροχής των ποταμών της Βόρειας Πελοποννήσου που εκβάλλουν στον Κορινθιακό κόλπο, 8<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο: Παράκτια Γεωμορφολογία - Ωκεανογραφία.
- Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός "Δήμητρα", Γενική διεύθυνση Έρευνας, LIFE07 ENV/GR/000278 Soil Sustainability (ΕΛ.Γ.Ο.-So.S), 2011, Αειφορική διαχείριση εδάφους στην Υδρολογική λεκάνη του Ανθεμόντα με βάση την Ευρωπαϊκή Θεματική στρατηγική για το έδαφος, <[http://79.129.78.202/lifesos/images/stories/pdf/deliverables/06\\_02.pdf](http://79.129.78.202/lifesos/images/stories/pdf/deliverables/06_02.pdf)>, Προσπελάστηκε στις 9/6/2016.

- Επιτροπή των Ευρωπαϊκών κοινοτήτων (Ε.Ε. COM 231), 2006, *Θεματική στρατηγική για την προστασία του εδάφους*, <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=celex:52006DC0231>>, Προσπελάστηκε στις 9/6/2016.
- Ζαρρής, Δ., 2008, *Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών στον ταμιευτήρα Κρεμαστών και εκτιμήσεις στερεοαπορροής στη Β.Α. Ελλάδα*, Πανελλήνιο συνέδριο μεγάλων φραγμάτων, Λάρισα.
- Ζάρρης, Δ., 2008, *Ανάλυση δεδομένων και εκτιμήσεις στερεοαπορροής σε υδρολογικές λεκάνες μεγάλης κλίμακας*, 2η Συνάντηση Υποψηφίων Διδασκτόρων & Μεταπτυχιακών Φοιτητών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- Ζωσιμά Α., 2010, *Εκτίμηση της στερεοπαροχής στη λεκάνη απορροής της λίμνης Πλαστήρα με την εφαρμογή του μοντέλου PESERA*, Μεταπτυχιακή εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Κατσούλης, Α., 2011, *Τουριστική Αξιοποίηση Τεχνητών Λιμνών: Το παράδειγμα της Λίμνης Πηγών Αώου*, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουλούρη, Μ., 2004, *Εδαφική υδατική διάβρωση και αλλαγή χρήσης γης στην Μεσόγειο: Εγκατάλειψη παραδοσιακής εντατικής καλλιέργειας*, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Κουσουρής, Θ., 2007, *Υδατικοί πόροι (Προέλευση, Ταξινόμηση, Κατανομή, Αποθέματα, Υγρότοποι, Αξιοποίηση, Διαχείριση)*, <[http://new.ims.forth.gr/water/sites/new.ims.forth.gr.water/files/documents/papers/YDATIKOI\\_POROI.pdf](http://new.ims.forth.gr/water/sites/new.ims.forth.gr.water/files/documents/papers/YDATIKOI_POROI.pdf)>, Προσπελάστηκε στις 8/6/2016.
- Κουτσογιάννης, Δ. και Κ. Τάρλα, 1987, *Εκτιμήσεις Στερεοαπορροής στην Ελλάδα*, Τεχνικά Χρονικά, Τόμος 7 (3).
- Λεονταρίτης, Α., 2014, *Υδρολογική Ανάλυση και Διερεύνηση του Υδροσυστήματος Αώου-Βοϊδομάτη*, Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Λυκούδη, Ε., και Δ. Ζαρρής, 2006, *Εκτίμηση στερεοαπορροής υδρολογικών λεκανών με συνδυαστική ανάλυση υδρολογικών και γεωμορφολογικών παραμέτρων*, Πρόγραμμα Ενίσχυσης Βασικής Έρευνας «ΠΡΩΤΑΓΟΡΑΣ», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μαμάσης, Ν., 2009, *Υδρογραφήματα-Διόδευση-Στερεοπαροχή*, Σημειώσεις για το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- Μαμάσης, Ν., Α. Ευστρατιάδης και Δ. Κουτσογιάννης, 2015, *Υδροηλεκτρικά έργα-Στερεομεταφορά*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μάρης, Φ., 2016, *Κίνηση Φερτών Υλών σε κοίτη*, Σημειώσεις για το μάθημα Διευθετήσεις Χειμάρρων, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
- Μαριολάκος, Η. και Ι. Φουντούλης, 2007, *Γεωπεριβαλλοντικές επιπτώσεις των πυρκαγιών στον ευρύτερο χώρο της Αρχαίας Ολυμπίας, Κρόνιος λόφος - Προτάσεις μέτρων*, Η προοπτική της ανασυγκρότησης μετά την καταστροφή, ΤΕΕ, Πύργος Ηλείας.
- Μπαθρέλλος, Γ., Χ. Σκυλοδήμου και Κ. Χουσιανίτης, 2010, *Εκτίμηση της εδαφικής διάβρωσης στην νήσο Ζάκυνθο με χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών*, 9ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, Αθήνα, 04 -06 Νοεμβρίου 2010.
- Μυρωνίδης, Δ., 2012, *Αποτίμηση του κινδύνου διάβρωσης τν εδαφών της Ελλάδας ως εργαλείο για τη διαχείριση των λεκανών απορροής*, Γεωγραφίες, Νο 19, pp 59-69.
- Ξανθάκης, Μ., Κ. Παυλόπουλος, Γ. Αποστολόπουλος, Β. Καψιμάλης, Α. Γκορέγια, Π. Στεφανίδης και Χ. Μαρουκιάν, 2010, *Εφαρμογή μεθοδολογίας εκτίμησης φερτών υλών σε τεχνητούς ταμιευτήρες – μελέτη περίπτωσης λίμνης Μαραθώνα*, 9ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας, Αθήνα, 4-6 Νοεμβρίου 2010.
- Ξανθάκης, Μ., 2011, *Η μελέτη της εδαφικής διάβρωσης σε ορεινές λεκάνες απορροής με σύγχρονα τεχνολογικά εργαλεία*, Διδακτορική Διατριβή, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Παναγούλια, Δ. και Ζαρρής Δ., 2008, *Διάβρωση, μεταφορά και απόθεση φερτών υλών*, Σημειώσεις στο πλαίσιο Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παναγούλια, Δ., 2010, *Εισροή φερτών υλικών σε ταμιευτήρες*, Σημειώσεις για το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παναγούλια, Δ., 2010, *Υδρολογία και εκτιμήσεις στερεοαπορροής*, Σημειώσεις για το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- Παναγούλια, Δ., 2010, *Εισαγωγικές έννοιες, Σημειώσεις για το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παπάζογλου Π., 2009, *Εκτίμηση του βαθμού διάβρωσης στη λεκάνη του Ανθεμούντα*, Δράση 3 του έργου LIFE07/ENV/GR/000278-Soil Sustainability.
- Παπαθεοδοσίου, Μ. και Δ. Χριστοδούλου, 2009, *Επιπτώσεις των πυρκαγιών στην υδρολογία και τη διάβρωση: Η περίπτωση της Πάρνηθας*, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παπαρρίζος, Σ., και Α. Χατζημηνιάδης, 2010, *Το χειμαρρικό περιβάλλον του ποταμού Σπερχειού*, Διπλωματική εργασία, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. Ορεστιάδα.
- Παπαρρίζος, Σ., Θ. Αναστασίου και Σ. Ποτουρίδης, 2012, *Εκτίμηση μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας με χρήση τριών εμπειρικών μεθόδων και τη βοήθεια των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. Η περίπτωση των χειμάρρων Τσάι, Βαθύ, Λυκόρεμα της περιοχής Αλεξανδρούπολης*, 4<sup>ος</sup> Τόμος: Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
- Πασχαλίδης, Γ., 2015, *Προσομοίωση στερεομεταφοράς σε λεκάνη απορροής καπάντη φράγματος*, Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Συλλαίος Ν., Γ. Μπίλας και Ν. Καραπέτσας, 2007, *Χαρτογράφηση γεωργικών εδαφών με τη χρήση σύγχρονων μεθόδων γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και τηλεπισκόπησης*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (Υ.Π.Ε.Κ.Α.), 2013, *Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ηπείρου*, Ειδική Γραμματεία Υδάτων.
- Φλαμπούρης, Κ., 2008, *Μελέτη της επίδρασης του παράγοντα βροχόπτωσης R στον νόμο RUSLE*, Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Φωτεινής, Σ., 2014, *Η διάβρωση των ακτογραμμών της Ελλάδας. Αξιολόγηση - Τρόποι αντιμετώπισης*, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Υπουργείο Ανάπτυξης, 1998, *Μελέτη της υφιστάμενης κατάστασης στους ταμειευτήρες Αώου και Πουρναρίου της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού*, Εθνικό κέντρο θαλάσσιων ερευνών, Γενική γραμματεία έρευνας και τεχνολογίας, Αθήνα.

## Ξενόγλωσση

- Bagnold., R.A., 1966, *An approach to the sediment transport problem from general physics*, United States Government Printing Office, Washington.
- Dafermos, G., 2001, *Management and Virtual Decentralised Networks: The Linux Project*, First Monday, [Monday, <http://www.firstmonday.org/issues/issue6\\_11/dafermos/#d5>](http://www.firstmonday.org/issues/issue6_11/dafermos/#d5), Προσπελάστηκε στις 10 Μαρτίου 2016.
- Deleage, M. and J. Hemery, 1989, *De l'ecohistoire a l'ecologie monde. L'home et la societe*, Paris, [Persee, <http://www.persee.fr/doc/homso\\_0018-4306\\_1989\\_num\\_91\\_1\\_2386>](http://www.persee.fr/doc/homso_0018-4306_1989_num_91_1_2386), Προσπελάστηκε στις 9/6/2016.
- European Soil DATA Centre (E.S.DA.C), 2015, *RUSLE2015*, [ESDAC, <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/rusle2015>](http://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/rusle2015), Προσπελάστηκε στις 10/6/2016.
- Festinger, L., H. W. Riecken and S. Schachter, 1956, *When Prophecy Fails*, MN: University of Minneapolis Press, Minneapolis.
- Hare, A.P. and D. Naveh, 1986, *Conformity and Creativity: Camp David. Small Group Behavior*, Vol. 17, pp. 243-268.
- Hill, J. and B. Schutt, 2000, *Mapping complex patterns of erosion and stability in dry Mediterranean ecosystems*, Remote Sens. Environ, pp. 557-569
- Kinneil, P.I.A and L.M. Risse, 1998, *USLE-M: Empirical Modeling Rainfall Erosion through Runoff and Sediment Concentration*, Alliance of crop, Soil and environmental science societies.
- Kinnell, P.I.A, 2001, *The USLE - M and Modeling Erosion Within Catchments*, The Australian National University, Canberra.
- Maniak, U., 2010, *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure*, Berlin: Springer-Verlag.
- Martínez-Casasnovas, J.A., M.C. Ramos and Ribes-Dasi M., 2001, *Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models*, Elsevier, University of Lleida, Spain.
- Merritt, W.S., R.A. Letcher και A.J. Jakeman, 2003, *A review of erosion and sediment transport models*, Elsevier, University of British Columbia, Australia.

- Mimikou, M., 1982, *An investigation of suspended sediment rating curves in western and northern Greece*, Hydrological Sciences Journal, Athens Technical University, Greece.
- Morris, G. L. and J. Fan, 2009, *Reservoir Sedimentation Handbook*, <[http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce\\_old/classes/CE716/ResSedHandbook1\\_01.pdf](http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/classes/CE716/ResSedHandbook1_01.pdf)>, Προσπελάστηκε στις 15 Μαρτίου 2016.
- Panagos, P., C. Ballabio, P. Borrelli, K. Meusburger, A. Klik, S. Rousseva, M. P. Tadić, S. Michaelides, M. Hrabalíková, P. Olsen, J. Aalto, M. Lakatos, A. Rymaszewicz, A. Dumitrescu, S. Beguería and C. Alewell, 2015, *Rainfall erosivity in Europe*, Science of The Total Environment, pp 801–814.
- Poulos, S. and G. Chronis, 1997, *The importance of the Greek River Systems in the Evolution of the Greek*, In Transformation and evolution of the Mediterranean coastline, F. Briand and A. Maldonado (Eds), CIESM Science Series no 3, Bulletin del'Institut oceanographique, Monaco, no18, 75-96.
- Radloff, R. and R. Helmreich, 1968, *Groups Under Stress: Psychological Research in SEALAB II*, New York: Irvington.
- Tarla, K., 1984, *Estimation of suspended sediment yield from topographical, hydrometeorological and geological parameters*, Diploma thesis, 214 pages, National Technical University of Athens.
- Tellis, W., 1997, *Introduction to Case Study*, The Qualitative Report, Vol. 3, no 2. The Joint Contracts Tribunal, 2014, *The traditional/conventional procurement method*, <<http://www.jctltd.co.uk/traditional-procurement.aspx>>, Προσπελάστηκε στις 15 Μαρτίου 2016.
- Tombuş, E., M. Yüksel, M. Şahin, İ. M. Ozulu, and M. Coşar, 2012, *Assessment of Soil Erosion Based on the Method USLE: Çorum Province Example.*, Fig Working Week 2012, Roma-Italya.
- Toy, T.J. and G. Foster, 1998, Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Version 1.06 on Mined Lands, Construction Sites, and Reclaimed Lands. Galetovic. Western Regional Coordinating Center Office of Surface Mining, Denver, USA, p. 148.
- United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service Soils, 2003, *Vulnerability to Water Erosion Map*,

[http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/?cid=nrcs142p2\\_054006](http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/?cid=nrcs142p2_054006)>, Προσπελάστηκε στις 15 Απριλίου 2016.

- Verschuren, P. and H. Doorewaard, 2005, *Designing a Research Project*, Lemma Utrecht.
- Walling, D.E. and B.W. Webb, 1996, *Erosion and sediment yield: a global overview*, Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives (Proceedings of the Exeter Symposium), IAHS Publ. no. 236.
- White, M.J., 1977, *Counternormative Behavior as Influenced by Deindividuating Conditions and Reference Group Salience*, Journal of Social Psychology, Vol 103, pp. 73-90.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, 1978, *Predicting rainfall erosion losses – a guide for conservation planning*, Agriculture Handbook 537, U.S. Department of Agriculture (USDA), USA.
- Zarris, D., E. Lykoudi and D. Koutsoyiannis, 2002, *Sediment yield estimation of a hydrological basin using measurements of reservoir deposits: A case study for the Kremasta reservoir, Western Greece*, Proceedings of the 5th International Conference of European Water Resources Association: "Water Resources Management in the Era of Transition", edited by G. Tsakiris, Athens, European Water Resources Association, pp. 338–345.
- Zarris, D., M. Vlastara and D. Panagoulia, 2011, *Sediment delivery assessment for a transboundary Mediterranean catchment: The example of Nestos River catchment*, Water Resources Management.
- Zarris, D., E. Lykoudi and D. Panagoulia, 2012, *Sediment yield assessment in Greece*, International Conference Sediment Transport Modeling in Hydrological Watersheds and Rivers, 14-16 November 2012, Istanbul, Turkey.



Ιστότοποι

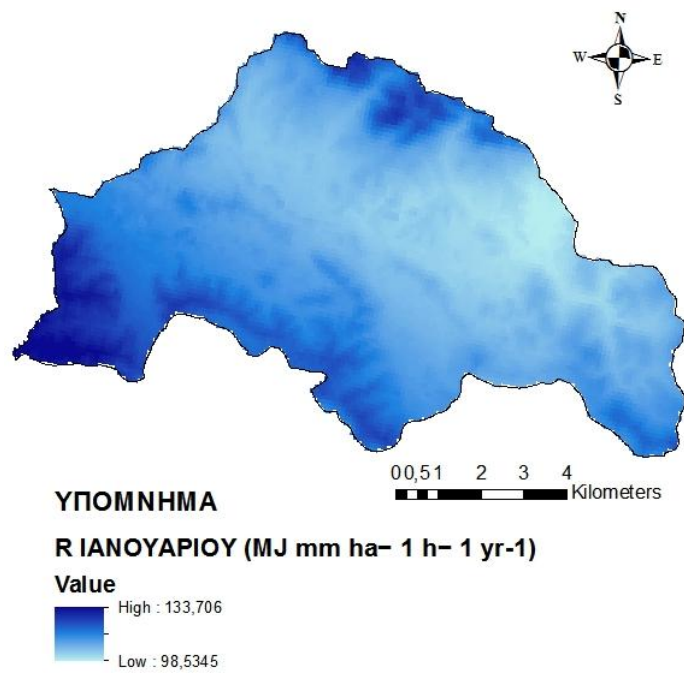
[http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/Leaflets/B1\\_Leaflet\\_GR.pdf](http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/Leaflets/B1_Leaflet_GR.pdf)

<http://esdac.jrc.ec.europa.eu/>

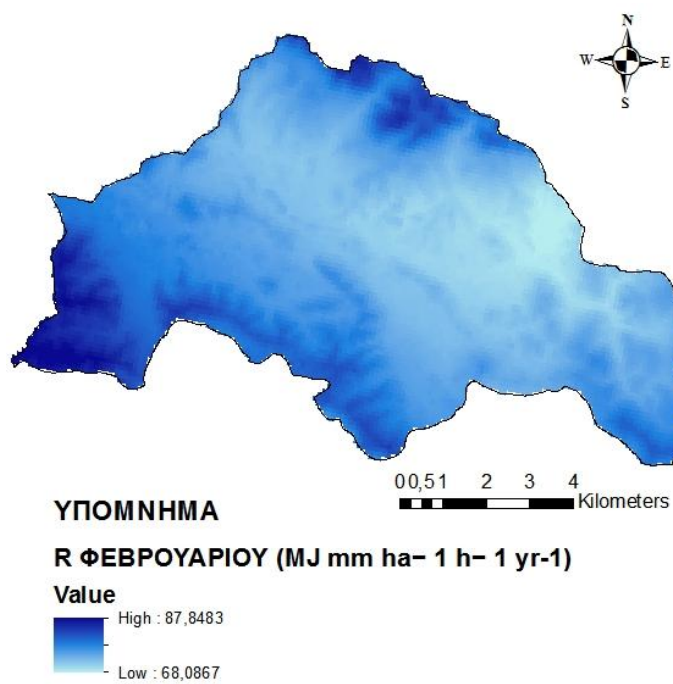
<http://filotis.itia.ntua.gr/biotopes/c/AT3011035/>

<https://www.arcgis.com/features/>

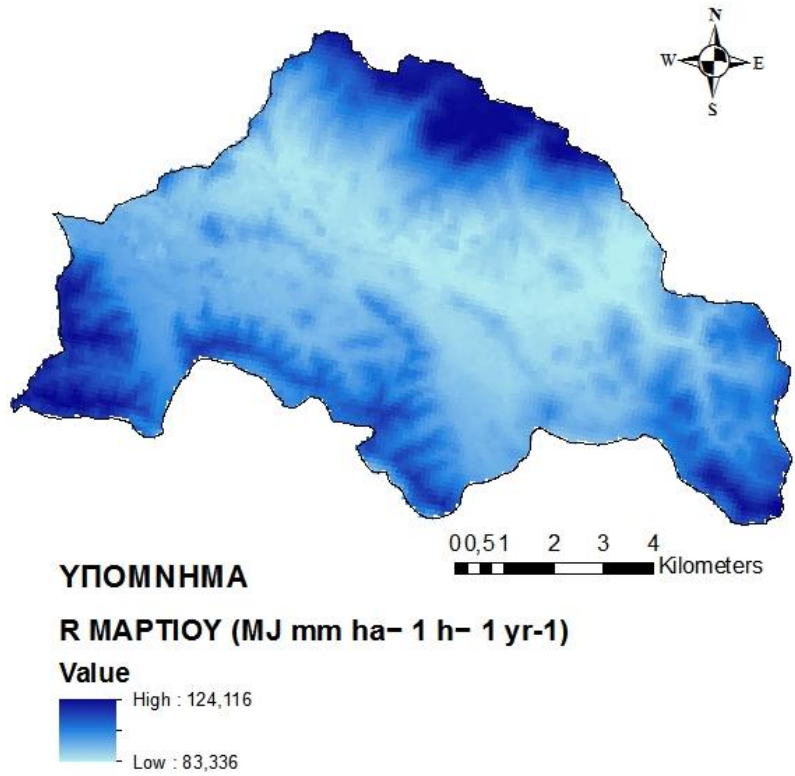
## **Παράρτημα**



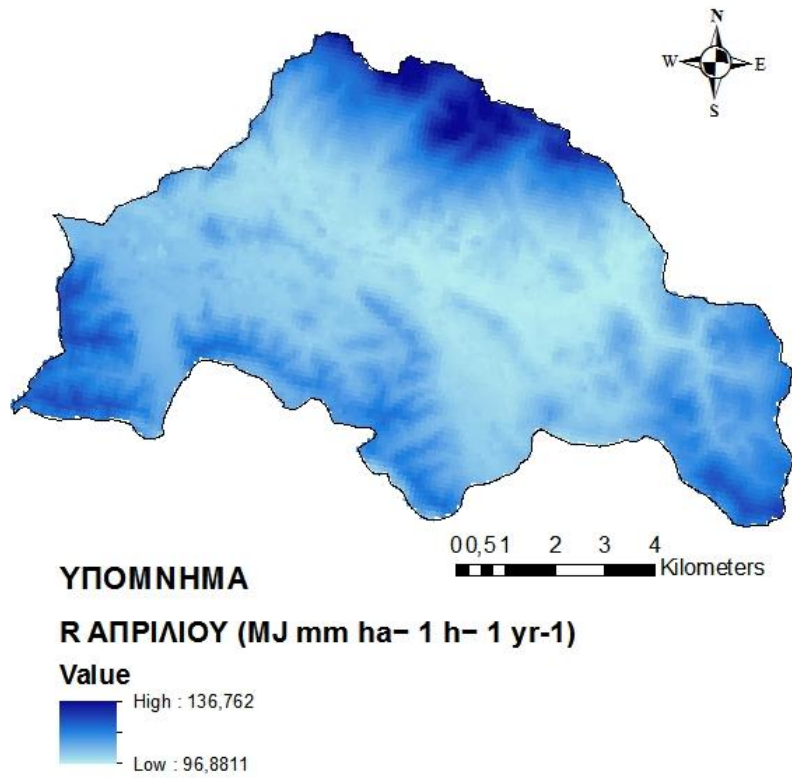
**Εικόνα 1:** Συντελεστής R Ιανουαρίου λεκάνης απορροής πηγών Αώου



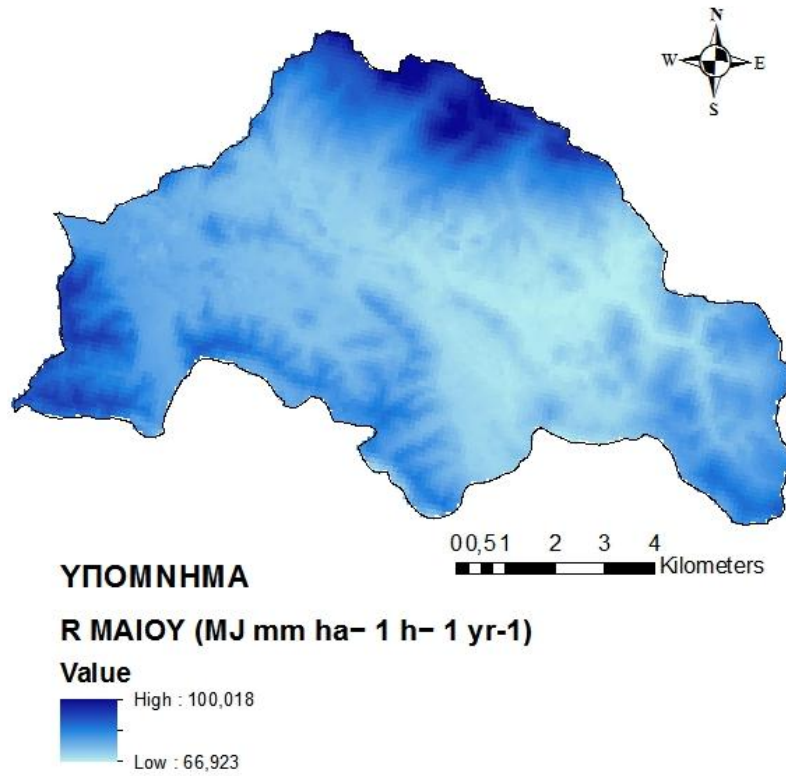
**Εικόνα 2:** Συντελεστής R Φεβρουαρίου λεκάνης απορροής πηγών Αώου



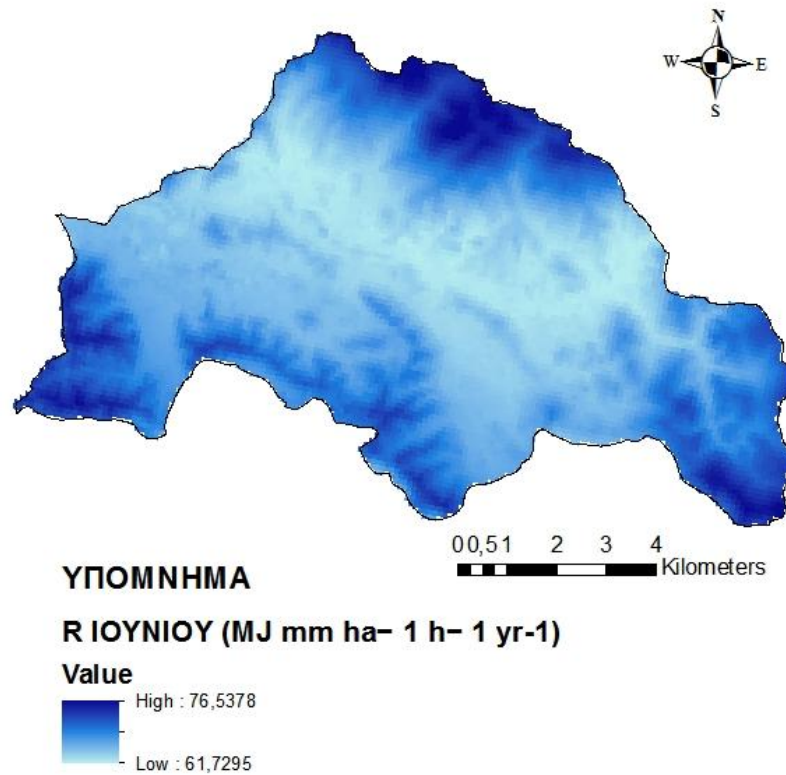
**Εικόνα 3:** Συντελεστής R Μαρτίου λεκάνης απορροής πηγών Αώου



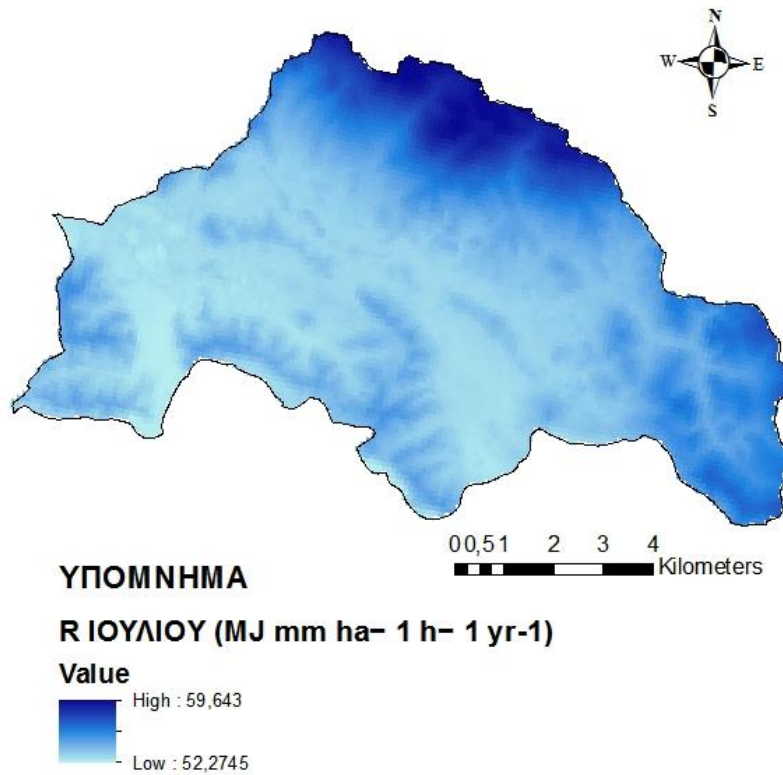
**Εικόνα 4:** Συντελεστής R Απριλίου λεκάνης απορροής πηγών Αώου



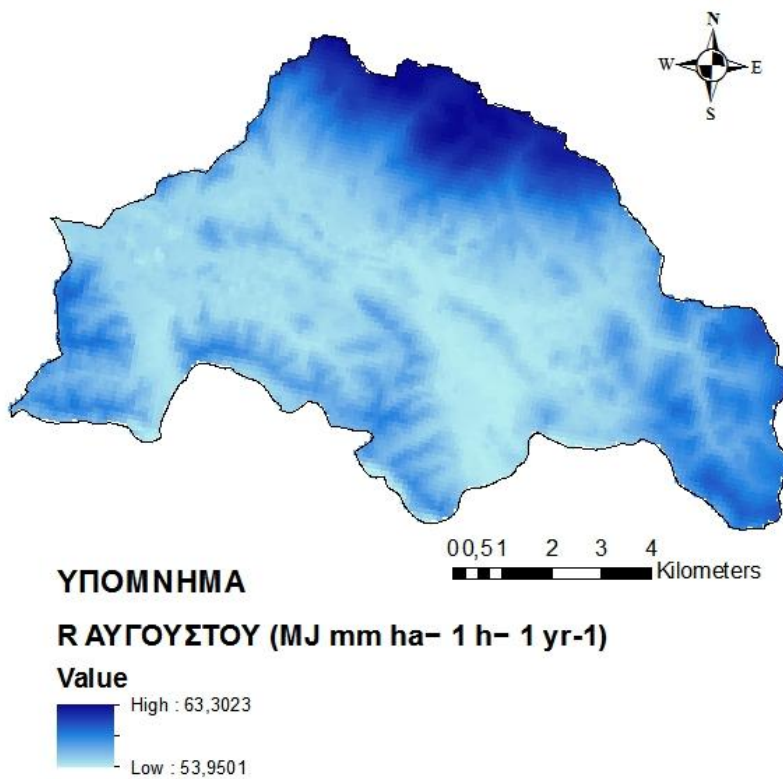
**Εικόνα 5:** Συντελεστής R Μαΐου λεκάνης απορροής πηγών Αώου



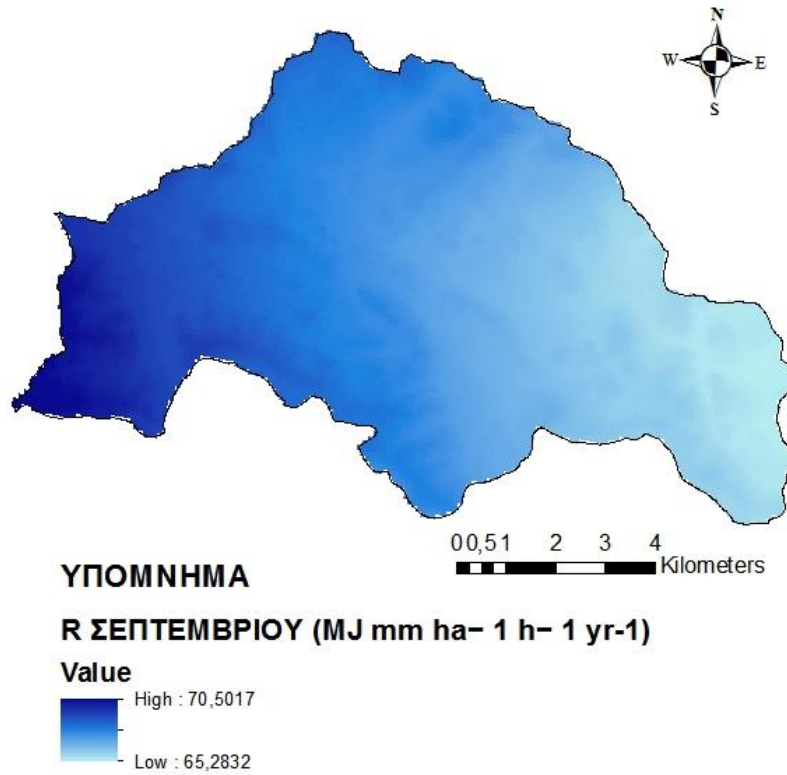
**Εικόνα 6:** Συντελεστής R Ιουνίου λεκάνης απορροής πηγών Αώου



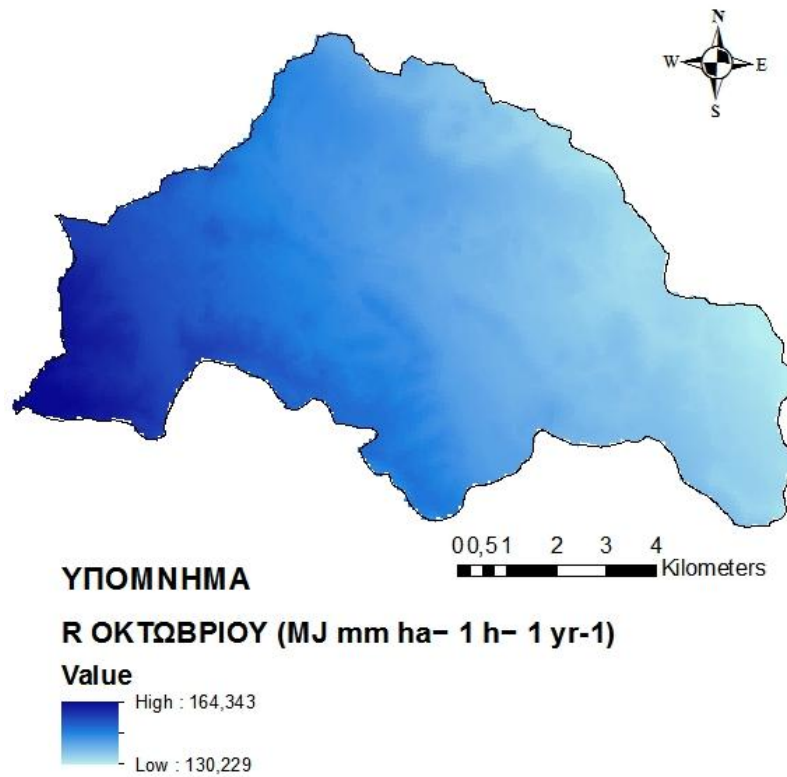
**Εικόνα 7:** Συντελεστής R Ιουλίου λεκάνης απορροής πηγών Αώου



**Εικόνα 8:** Συντελεστής R Αυγούστου λεκάνης απορροής πηγών Αώου

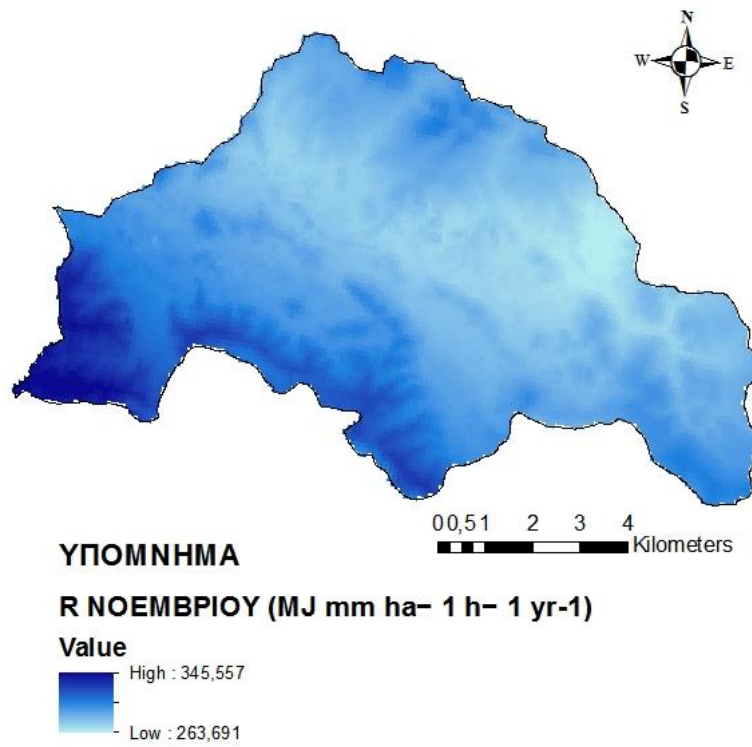


**Εικόνα 9:** Συντελεστής R Σεπτεμβρίου λεκάνης απορροής πηγών Αώου

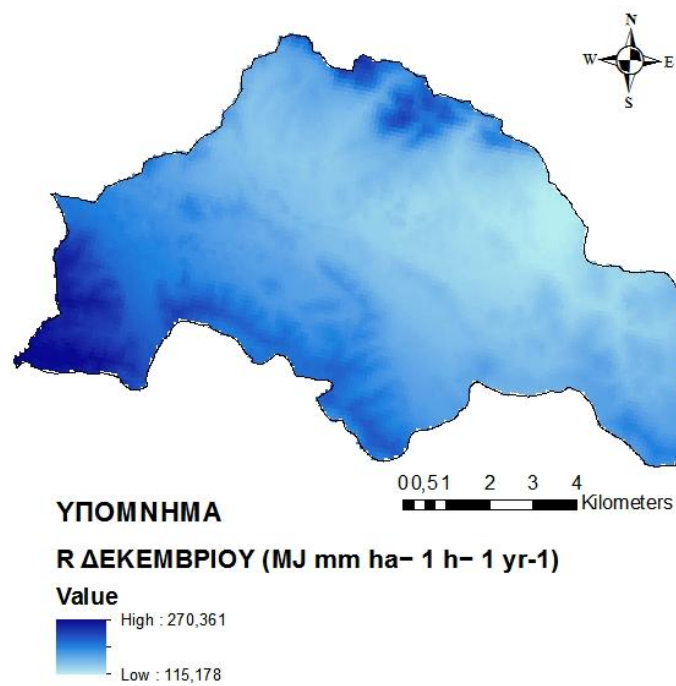


**Εικόνα 10:** Συντελεστής R Οκτωβρίου λεκάνης απορροής πηγών Αώου



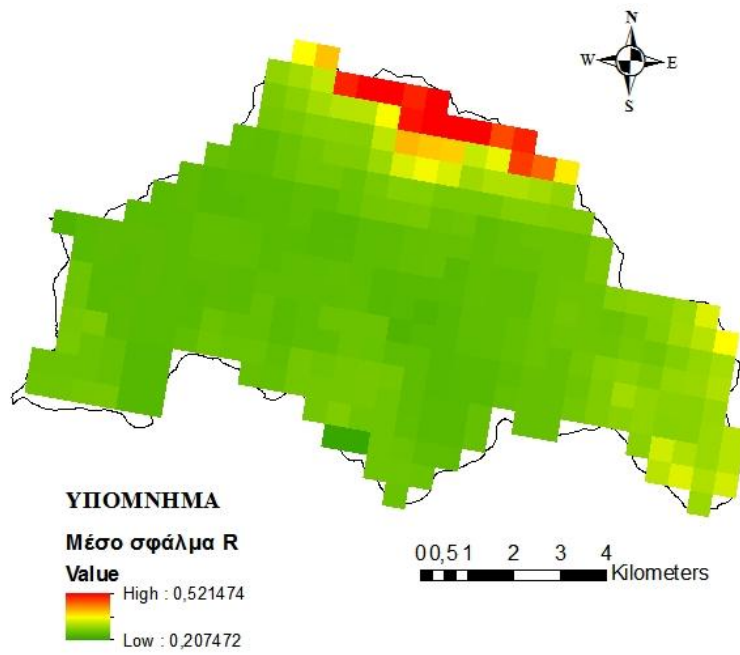


**Εικόνα 11:** Συντελεστής R Νοεμβρίου λεκάνης απορροής πηγών Αώου



**Εικόνα 12:** Συντελεστής R Δεκεμβρίου λεκάνης απορροής πηγών Αώου

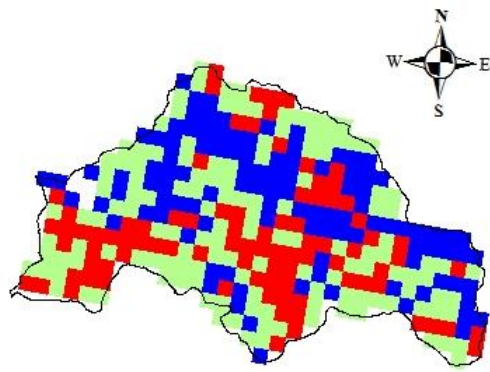




**Εικόνα 13:** Μέσο σφάλμα υπολογισμού συντελεστή R



**Εικόνα 14:** Θέσεις μετεωρολογικών σταθμών μετρητικών δεδομένων του R



0 1 2 4 6 8  
Kilometers

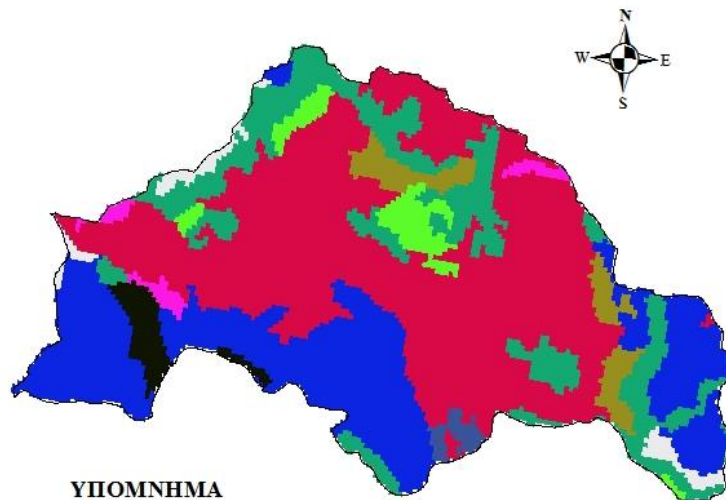
**ΥΠΟΜΝΗΜΑ**

**Μείωση τιμών του συντελεστή Κ**

**<VALUE>**

- 0 - 0,145
- 0,146 - 0,28
- 0,281 - 0,562

**Εικόνα 15:** Μείωση του συντελεστή Κ λόγω συμπερίληψης βραχόδων σχηματισμών

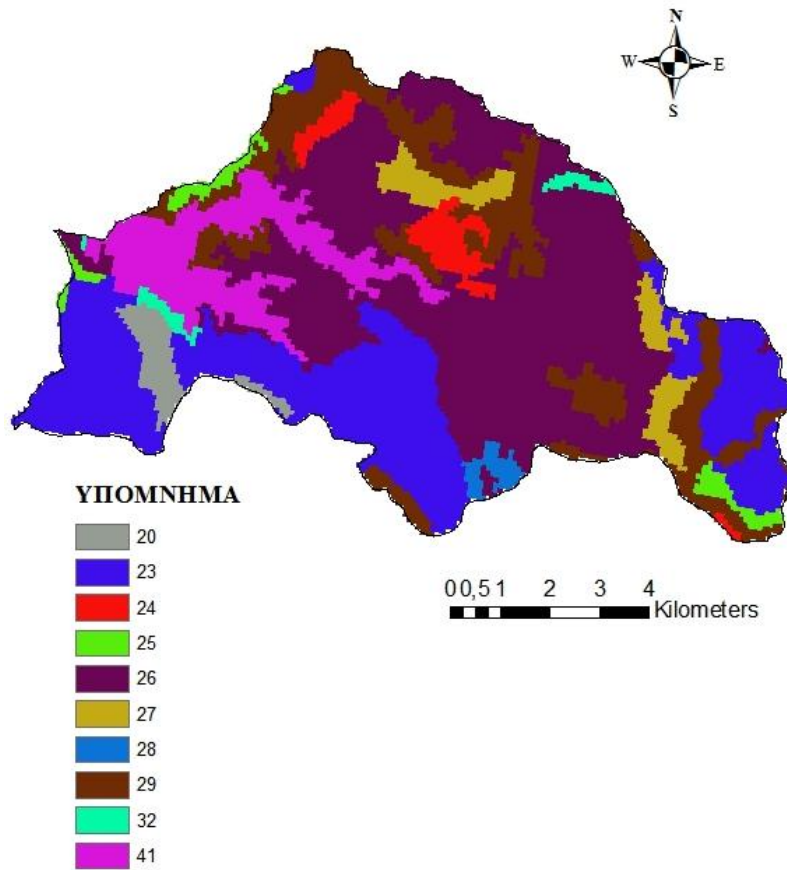


0,5 1 2 3 4  
Kilometers

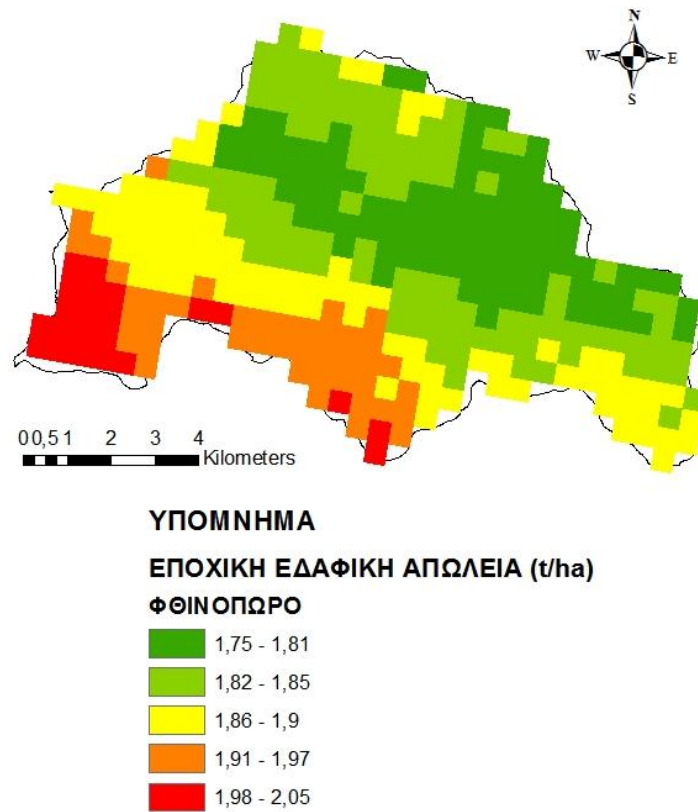
**ΥΠΟΜΝΗΜΑ**

- 20
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 32

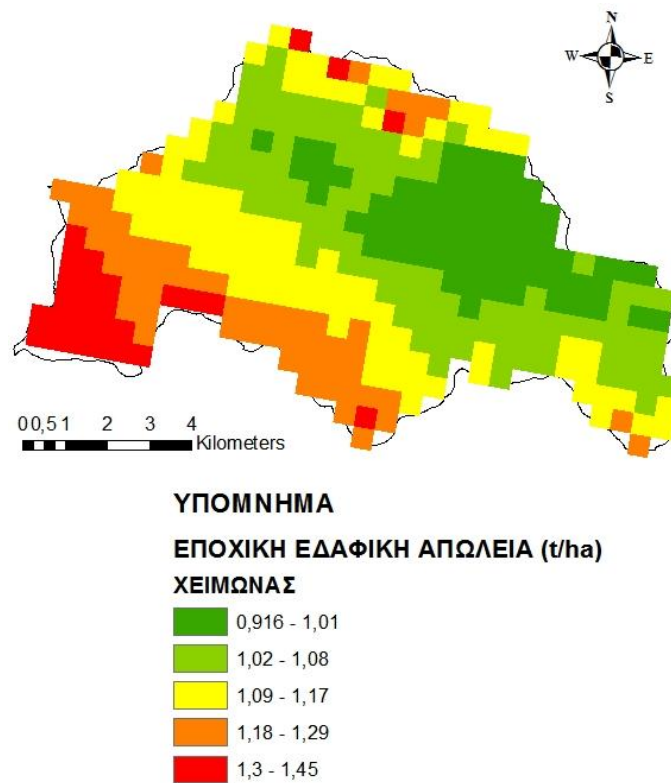
**Εικόνα 16:** Κωδικοποιημένες χρήσεις γης λεκάνης απορροής πηγών Αούου πριν την κατασκευή του ταμιευτήρα



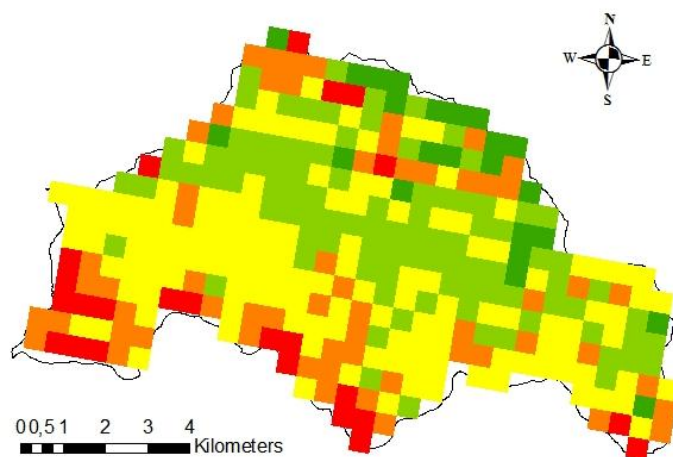
**Εικόνα 17:** Κωδικοποιημένες χρήσεις γης λεκάνης απορροής πηγών Αώου μετά την κατασκευή του ταμιευτήρα



Εικόνα 18: Εδαφική απώλεια Φθινοπώρου στη λεκάνη απορροής πηγών Αώου



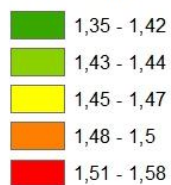
Εικόνα 19: Εδαφική απώλεια Χειμώνα στη λεκάνη απορροής πηγών Αώου



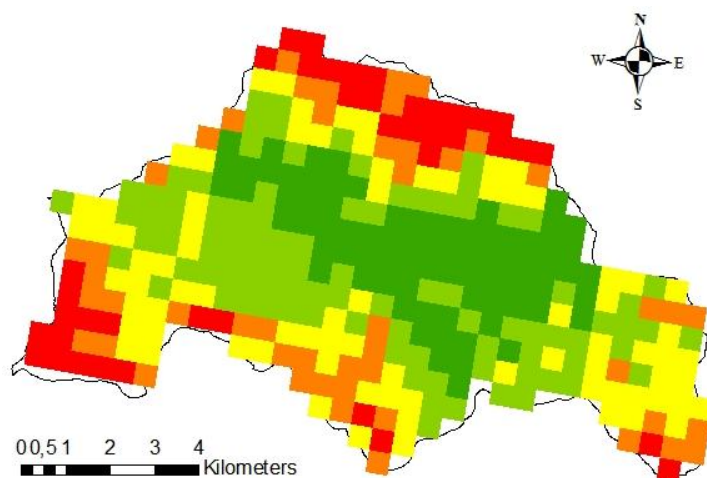
**ΥΠΟΜΝΗΜΑ**

**ΕΠΟΧΙΚΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ (t/ha)**

**ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ**



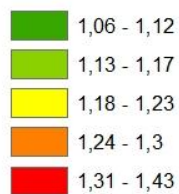
**Εικόνα 20:** Εδαφική απώλεια Καλοκαιριού στη λεκάνη απορροής πηγών Αώου



**ΥΠΟΜΝΗΜΑ**

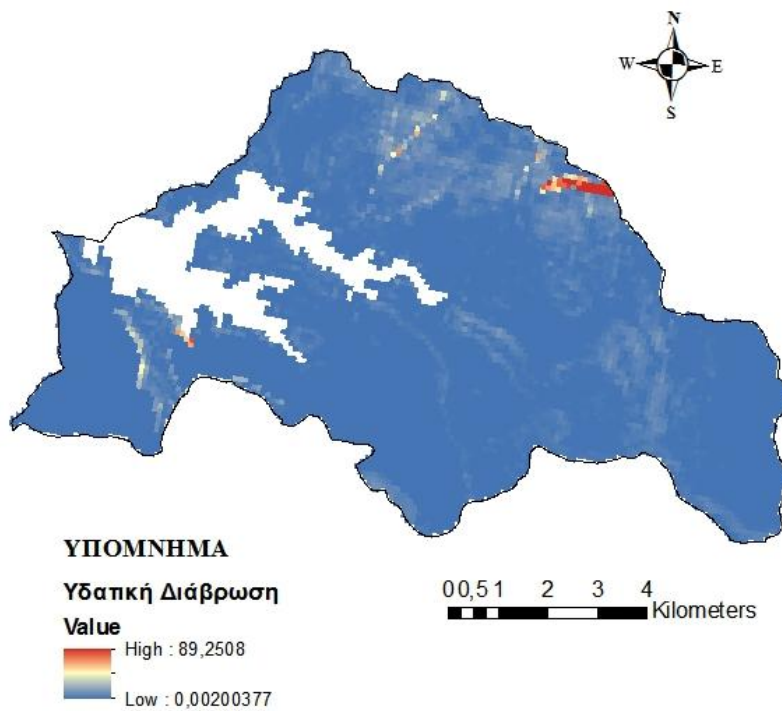
**ΕΠΟΧΙΚΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ (t/ha)**

**ΑΝΟΙΞΗ**

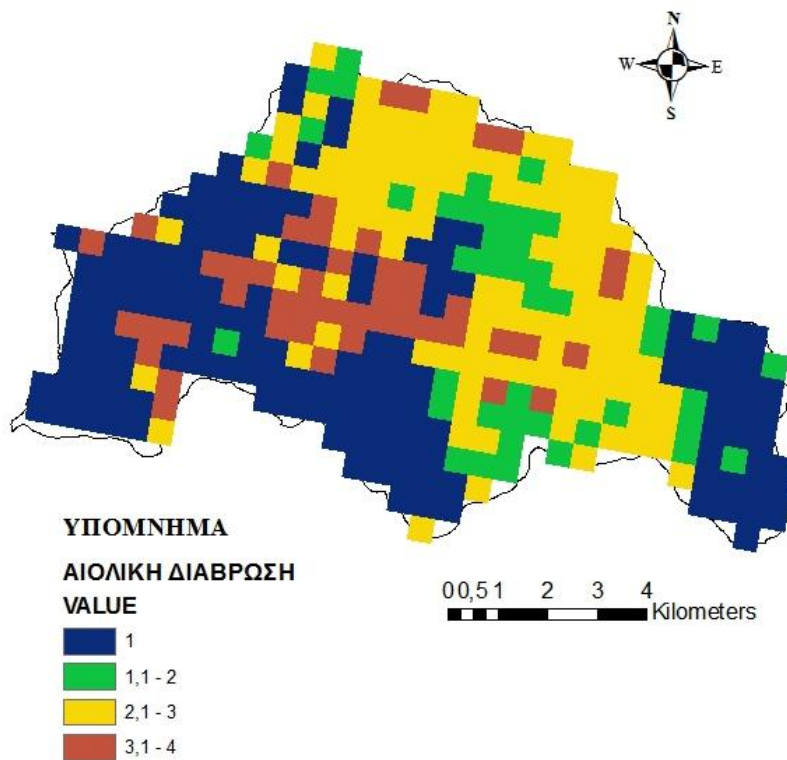


**Εικόνα 21:** Εδαφική απώλεια Άνοιξης στη λεκάνη απορροής πηγών Αώου

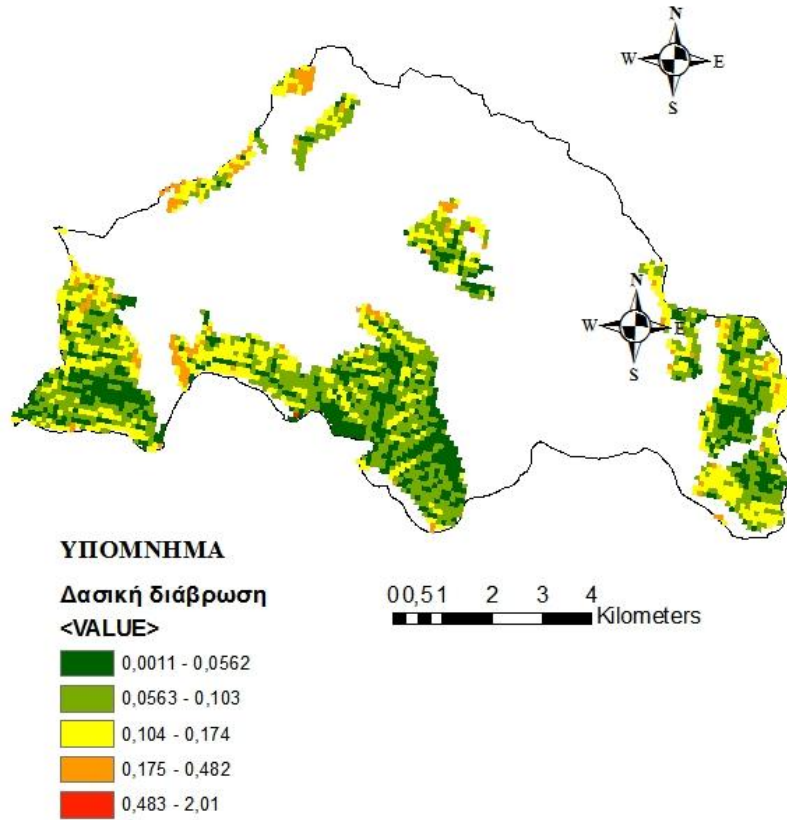




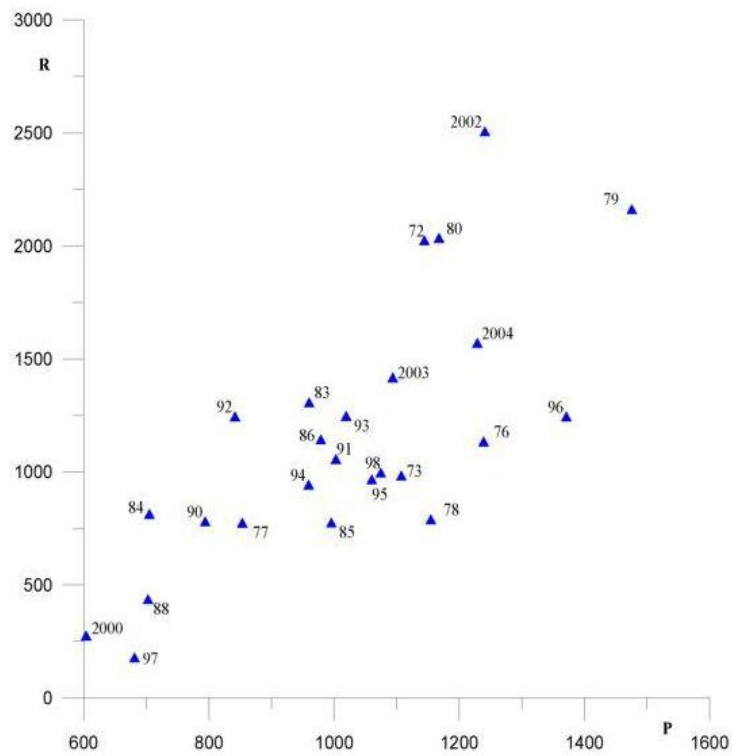
**Εικόνα 22:** Υδατική διάβρωση στη λεκάνη απορροής πηγών Αώου



**Εικόνα 23:** Αιολική διάβρωση στη λεκάνη απορροής πηγών Αώου



**Εικόνα 24:** Δασική διάβρωση στη λεκάνη απορροής πηγών Αώου



**Εικόνα 25:** Συσχέτιση ετήσιας βροχόπτωσης και συντελεστή R για το σταθμό των Ιωαννίνων