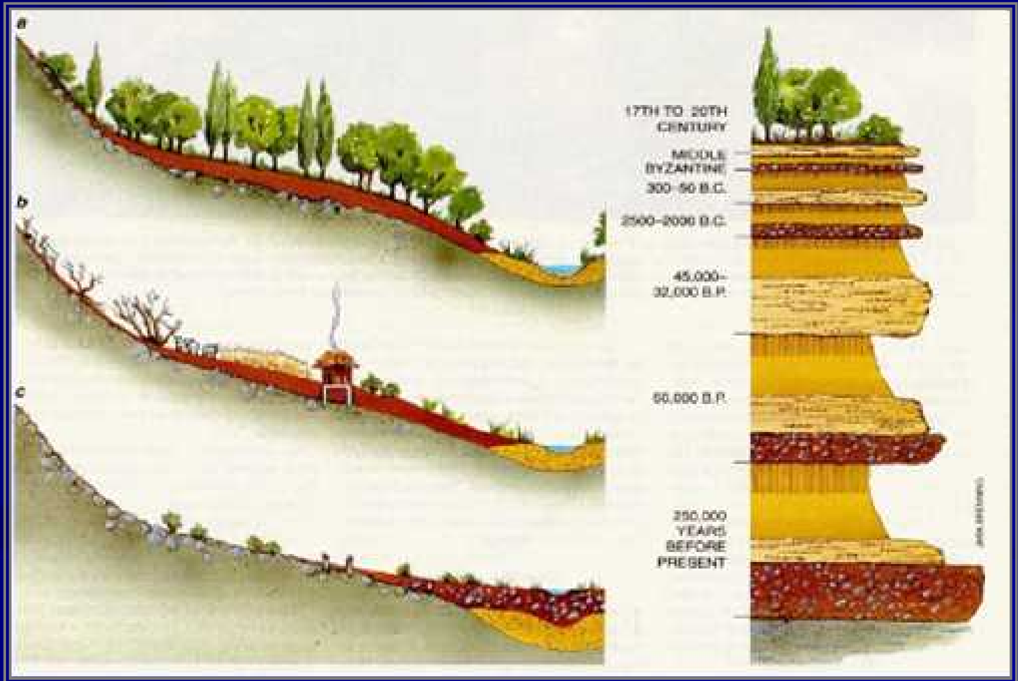
Τμήμα Δασολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων
Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων και Διαχείρισης Κινδύνου
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Κεφάλαιο 15ο: Διάβρωση εδαφών



Φ. Π. Μάρης
Αναπλ. Καθηγητής

Κεφάλαιο 15ο : Διάβρωση Εδαφών

15.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος διάβρωση εδαφών είναι γενικός και αναφέρεται στο σύνολο των πολύπλοκων φυσικών διεργασιών που έχουν ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση εδαφικού υλικού από περιοχές με ορεινό ή ημιορεινό ανάγλυφο σε περιοχές πεδινές ή σε εκβολές υδατορευμάτων, (αποθέσεις φερτών υλών).

Η διάβρωση οφείλεται στη δράση του βρόχινου νερού που μετασχηματίζεται σε απορροή ή στον αέρα (αιολική) ή στη συνδυασμένη δράση των δύο ή σε άλλα φυσικά στοιχεία.

Η διάβρωση που απασχολεί την υδρολογία είναι αυτή που προέρχεται κύρια από τη δράση του νερού.

Η βροχόπτωση (κινητική ενέργεια σταγόνων βροχής), αποσπά το εδαφικό υλικό και το θέτει σε αιώρηση, με την προϋπόθεση ότι δημιουργείται ταυτόχρονα απορροή στην επιφάνεια του εδάφους. Κατά τη μεταφορά του διαλύματος νερού - φερτών, προκαλείται από την δράση της απορροής, περαιτέρω διάβρωση της εδαφικής επιφάνειας.

Η μαθηματική διατύπωση, (μοντελοποίηση), των συνιστωσών του φαινομένου, δεδομένης έντασης και συχνότητας επαναφοράς, αντίστοιχης του μηχανισμού παραγωγής του (βροχόπτωση), είναι ένα ιδιαίτερα περίπλοκο πρόβλημα. Κατά καιρούς διάφορα ομοιώματα (μοντέλα), εμπειρικά ή μη, έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη και εκτίμηση ποσοτήτων φερτών υλών που παράγονται από τη διαβρωτική δράση του νερού σε μικρές αγροτικές εκτάσεις ή ακόμα και σε υδρολογικές λεκάνες.

Είναι γνωστό ότι η επιφανειακή απορροή αρχίζει όταν η ένταση της βροχής είναι μεγαλύτερη του ρυθμού διήθησης στο έδαφος. Η ροή του βρόχινου νερού σε κεκλιμένη εδαφική επιφάνεια, προκαλεί αρχικά την απομάκρυνση του λεπτού επιφανειακού εδαφικού στρώματος που έχει προηγούμενα αποκολληθεί από τη βροχόπτωση (επιφανειακή διάβρωση) και το οδηγεί σε διαμορφωμένη μόνιμη κοίτη (ρυάκι, χαντάκι, χείμαρρος κτλ.), όπου οι συγκεντρώσεις ροής είναι σημαντικές.

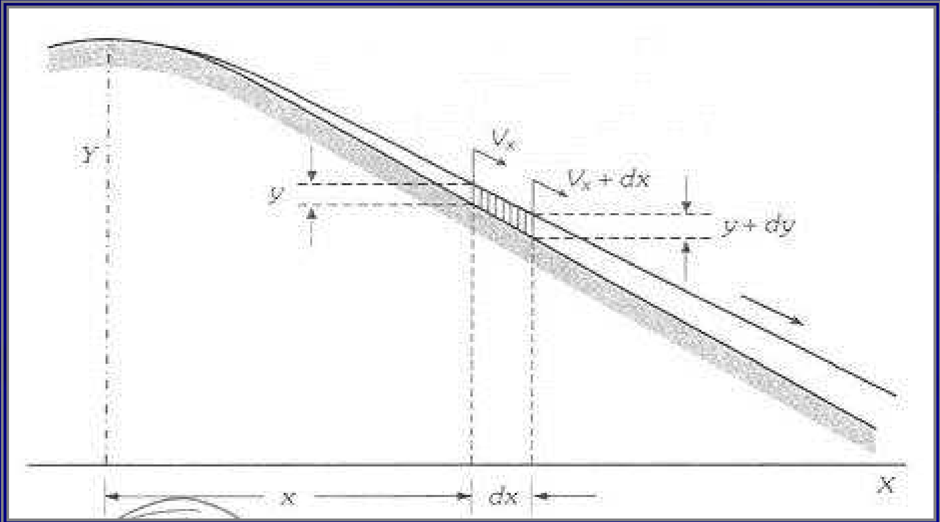
Στην πρώτη περίπτωση, ανάλογα με τη διαβρωσιμότητα του εδάφους και τη διαβρωτική ικανότητα της βροχής, που είναι συνάρτηση της έντασης και της διάρκειας της, η επιφανειακή διάβρωση (sheet erosion), είναι προϊόν της συνδυασμένης δράσης της ενέργειας της βροχής και της μεταφορικής ικανότητας της επιφανειακής ροής.
Στη δεύτερη περίπτωση, όπου η απορροή λαμβάνει χώρα σε διαμορφωμένη κοίτη, γίνεται λόγος για διάβρωση κοίτης και όχθης υδατορεύματος.

Το αποσπώμενο υλικό από την επιφάνεια της λεκάνης απορροής (περίπτωση επιφανειακής διάβρωσης), είναι γενικά πολύ πιο λεπτόκοκκο, (ιλύς - άργιλος, D_{50} < 0.05 mm), από το υλικό κοίτης, (άμμος, χαλίκια, κροκάλες κτλ), είναι δε γνωστό ως φορτίο χωμάτων ή φορτίο απόπλυσης (wash load), ενώ το αποσπώμενο υλικό κοίτης (διάβρωση κοίτης), είναι γνωστό ως φορτίο υλικού κοίτης (bed sediment load).

Στο εσωτερικό της κινούμενης υδάτινης μάζας, τα πιο λεπτόκκοκα σωματίδια (προϊόντα διάβρωσης), κινούνται πάνω από την κοίτη και αποτελούν το φορτίο σε αιώρηση (suspended load). Το φορτίο αυτό προέρχεται τόσο από το φορτίο απόπλυσης, όσο και από τα λεπτόκοκκο αποκολλούμενα υλικά του φορτίου κοίτης. Αντίθετα, τα βαρύτερα σωματίδια τα προερχόμενα από τη διάβρωση της κοίτης του υδατορεύματος, αποτελούν το φορτίο σε σύρση (bed load), που κινείται (σύρεται) στην κοίτη ή πολύ κοντά σ' αυτή.

15.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Είναι γνωστό ότι τα προϊόντα της διάβρωσης (φερτά υλικά) μεταφέρονται από τις κινούμενες υδάτινες μάζες, (απορροή σε κεκλιμένη εδαφική επιφάνεια ή σε διαμορφωμένη κοίτη υδατορεύματος). Η απορροή του βρόχινου νερού σε επικλινείς περιοχές, ξεκινά ως επιφανειακή ροή, η οποία βαθμιαία, λόγω της τραχύτητας της εδαφικής επιφάνειας (surface roughness), δημιουργεί δίκτυα αυλακιών αρχικά μικρής και ασαφούς διατομής, που καταλήγουν συνήθως σε μόνιμα σχηματισμένες κοίτες προς τα χαμηλότερα υψόμετρα, (χαντάκια, χείμαρροι, ποταμοί).
Σε κεκλιμένη επιφάνεια έχει παρατηρηθεί ότι το βάθος της επιφανειακής ροής αυξάνει προς τα κατάντη μιας φυσικής κλιτύος. Για λόγους απλουστεύσεως των υπολογισμών, κεκλιμένη επιφάνεια μοναδιαίου πλάτους, (Σχήμα 15.1).



Σχ. 15.1: ***"Σχηματική παράσταση επιφανειακής ροής***

Η εκτίμηση της μέσης ταχύτητας ροής v_x και της μέσης συρτικής τάσης στον πυθμένα, τ_x, σε απόσταση x από την αρχή (Σχήμα 15.1), μπορεί να γίνει από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$v_x = C\left(RI\right)^{\frac{1}{2}}\left(ms^{-1}\right) \qquad (15.1)$$

$$\tau_x = \gamma_w RI \quad \left(Nm^{-2}\right) \qquad (15.2)$$

Η εξίσωση 15.1 είναι γνωστή ως εξίσωση του Chezy.
Στις παραπάνω εξισώσεις, C είναι ο συντελεστής τραχύτητας ($m^{1/2} \cdot sec^{-1}$), *R* η υδραυλική ακτίνα (m), I η κλίση της εδαφικής επιφάνειας, και y_w το ειδικό βάρος του νερού ($N \cdot m^{-3}$).
Η υδραυλική ακτίνα R, είναι ο λόγος της υγρής διατομής, A προς την βρεχόμενη περίμετρο, *P*, και στη συγκεκριμένη περίπτωση, για επιφάνεια μοναδιαίου πλάτους, μπορεί να θεωρηθεί ότι σε κάθε απόσταση χ, ισούται με το βάθος ροής y. Πράγματι:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{y}{1+2y} \approx y \qquad (15.3)$$

Ο συντελεστής τραχύτητας C, (Εξ. 15.1), είναι ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας του βάθους ροής, (Holy, 1980):

$$C = M y^{\frac{1}{2}}$$

Η παράμετρος *M* (sec^{-1}), είναι συνάρτηση του είδους και κατά συνέπεια της τραχύτητας της επιφάνειας. Συνήθεις τιμές του M αναφέρονται για διαφορετικούς τύπους επιφάνειας εδάφους, στον Πίνακα 15.1:

Πίν. 15.1: *Παράμετρος τραχύτητας, **M***

ΕΙΔΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	M (sec^{-1})
Οργωμένος αγρός	43.5
Λιβάδι με κοντό χορτάρι	14.5 -10.88
Γυμνή τραχεία επιφάνεια	10.88- 5.80

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (15.3) και (15.4), η εξίσωση (15.1) τελικά γράφεται:

$$v_x = M I^{\frac{1}{2}} y = a y \quad (15.5a)$$

$$a = M I^{\frac{1}{2}} \quad (15.5b)$$

Απ' όπου προκύπτει ότι η ταχύτητα ροής σε απόσταση *χ* από την αρχή, είναι ανάλογη του βάθους ροής y, στη θέση *χ*.

Η αύξηση του όγκου της απορροής στη στοιχειώδη διατομή d_x (Σχ. 15.1), είναι :

$$dQ = (y + dy) v_{x+dx} - y v_x \quad (15.6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 15.5a:

$$dQ = (y + dy) a (y + dy) - yay \approx 2aydy \quad (15.7)$$

Επίσης, η ίδια αύξηση, μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει της έντασης της βροχής i(m · sec^{-1}) και του συντελεστή απορροής *C_a*, (αφαίρεση των απωλειών λόγω διήθησης και εξάτμισης):

$$dQ = C_a i dx \qquad (15.8)$$

Εξισώνοντας τις σχέσεις 15.7 και 15.8 και ολοκληρώνοντας *αμφότερα* τα μέλη, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$y = \left(C_a i \frac{x}{a} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (15.9)$$

που συνδέει το βάθος ροής y, με την απόσταση x από το υψηλότερο ανάντη άκρο της ροής.

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις 15.3, 15.5a, 15.5b και 15.9, οι 15.1 και 15.2 γράφονται:

$$v_x = \left(M C_a i x I^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (15.10)$$

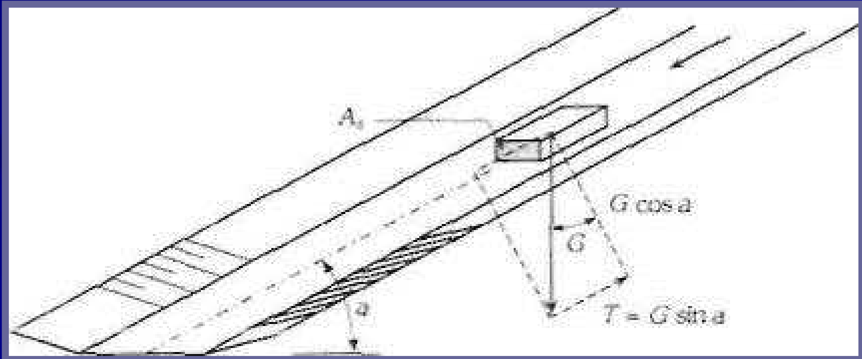
και

$$2_x = ¥_w I \left(M^{-1} C_a i x I^{-\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (15.11)$$

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προκύπτουν από τις εξισώσεις 15.10 και 15.11 εκφράζονται συναρτήσει της έντασης της βροχής i, του συντελεστή απορροής *Ca,* της κλίσης της επιφάνειας *I*, καθώς και της τραχύτητα της.

Σε υδατορεύματα με διαμορφωμένη, μόνιμη κοίτη, οι ποσότητες της απορροής που μεταφέρονται είναι ιδιαίτερα σημαντικές, ενώ τα φερτά που περιέχονται στην υδάτινη μάζα προέρχονται τόσο από επιφανειακή διάβρωση, όσο και από διάβρωση της κοίτης του υδατορεύματος.

Οι κρίσιμες συνθήκες για τη μεταφορά φερτών υλικών, προκύπτουν όταν υπάρχει κατάσταση ισορροπίας μεταξύ των δυνάμεων που επενεργούν στο εδαφικό υλικό των πρανών και του πυθμένα μιας διατομής. Στο Σχήμα 15.2 απεικονίζεται το σύνολο των δυνάμεων που ενεργούν επί ενός μεμονωμένου κόκκου στην επιφάνεια του πυθμένα ενός υδατορεύματος:



Σχ. 15.2: *Δυνάμεις κατά τη μεταφορά φερτών*

Στην περίπτωση αυτή, η δύναμη που ασκείται στο στερεό σωματίδιο από το ρευστό, ισούται με τη δύναμη τριβής:

$$G \sin a = k A_s ¥_w v^2{}_{xcr} \,/\, 2g \qquad (15.12)$$

όπου G είναι το βάρος του στερεού σωματιδίου (N), a η γωνία κλίσεως της κοίτης, *k* ένας αδιάστατος συντελεστής μορφής του σωματιδίου (για κυκλική και ελλειπτική μορφή, κ = 0.8 και για πρισματική *k* = 1.5), *A*s είναι η επιφάνεια πρόσκρουσης του σωματιδίου με το ρευστό κατά τη διεύθυνση της ροής (m^2), v_{xcr} η κρίσιμη ταχύτητα ροής στο πρανές ή στον πυθμένα (m · sec^{-1}), και *g* η επιτάχυνση της βαρύτητας, (m · sec^{-2}).

Από την εξίσωση 15.12, προκύπτει ότι η κρίσιμη ταχύτητα ροής είναι:

$$v_{xcr} = \left\{ \left(V \left[¥_s - ¥_w \right] \sin a \, 2g \right) / \left(k ¥_w A_s \right) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$G = V(¥_s - ¥_w) \qquad (15.13)$$

θεωρώντας ότι το συνολικό βάρος των στερεών σωματιδίων είναι, όπου *V,* (m^3), και $γ_s$, (N · m"3), είναι ο όγκος και το ειδικό βάρος των φερτών αντίστοιχα.
Από πειραματική διερεύνηση για διάφορους τύπους φερτών, έχει καταδειχθεί ότι η σχέση μεταξύ κρίσιμης και μέσης ταχύτητας ροής, είναι:

$$v_{xcr} = (0.5 \div 0.75)\, v_x \qquad (15.14)$$

Στον Πίνακα 15.2 αναφέρονται διάφορες τιμές της κρίσιμης ταχύτητας για διάφορα φερτά υλικά, ανάλογα με την κοκκομετρική τους διαβάθμιση :

Πίν. 15.2: *Κρίσιμη ταχύτητα ροής*

ΕΙΔΟΣ ΦΕΡΤΩΝ	v_{xcr} (m sec^{-1})
Λεπτόκκοκη άμμος	0.108
Μέση άμμος	0.189
Χονδρόκκοκη άμμος	0.325
Λείες κροκάλες ≤ 27 mm	0.65
Κροκάλες > 27 mm	0.975

Από τις εξισώσεις 15.1 και 15.13 προκύπτει:

$$C\left(RI_{cr}\right)^{\frac{1}{2}} = \left\{\left(V\left[¥_s - ¥_w\right]\sin a2g\right) / \left(k¥_w A_s\right)\right\}^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$I_{cr} = \left\{\left(V\left[¥_s - ¥_w\right]\sin a2g\right) / \left(k¥_w RC^2 A_s\right)\right\}$$

όπου I_{cr} είναι η οριακή κλίση πυθμένα κοίτης για τη μεταφορά φερτών. Η οριακή κλίση I_{cr}, μπορεί επίσης να υπολογιστεί από τη μέση συρτική τάση (Εξ. 15.2). Όπως αναφέρθηκε, σε κατάσταση ισορροπίας δυνάμεων, ορίζονται οι κρίσιμες συνθήκες ροής, που η υπέρβαση τους οδηγεί τα φερτά υλικά του πυθμένα και των πρανών της κοίτης, να μετακινούνται προς τα κατάντη. Ισχύει:

$$\tau_{xcr} = \gamma_w R I_{cr} = G \sin \alpha \qquad (15.16)$$

όπου τ_{xcr} είναι η κρίσιμη συρτική τάση, G το βάρος των φερτών ανά μονάδα επιφάνειας, (N · m^{-2}): , και V_n είναι ο όγκος των φερτών ανά μονάδα επιφάνειας, (m). Από την εξίσωση 15.16 προκύπτει:

$$I_{cr} = V_n (\gamma_s - \gamma_w) \sin \alpha / (\gamma_w R) \qquad (15.17)$$

Τιμές της κρίσιμης συρτικής τάσης για διάφορα υλικά κοίτης δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 15.3:

Πίν. 15.3: *Κρίσιμη συρτική τάση*

ΕΙΔΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	τ_{xcr} (N · m^2)
Λεπτόκοκκη-μέση άμμος (0.4 - 1.0 mm)	2.45 - 2.94
Χοντρή άμμος > 2 mm	3.92
Χαλίκι (5-15 mm)	12.26
Αμμόλιθος (40 - 50 mm)	47.07

Η μέση ταχύτητα ροής ελαττώνεται σταθερά, όσο η συγκέντρωση φερτών στην υδάτινη μάζα, αυξάνει. Ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$k_b = v_{xsat} / v_x = \gamma_w / \{\gamma_w + \eta(\gamma_s - \gamma_w)\} \qquad (15.18)$$

όπου v_{xsat} είναι η μέση ταχύτητα ροής του υδάτινου διαλύματος σε κατάσταση κορεσμού του με φερτά, (m · sec^{-1}), v_χ η μέση ταχύτητα ροής του ακόρεστου διαλύματος, (m · sec^{-1}), και, *η*, είναι ο λόγος του όγκου των φερτών προς τον όγκο του νερού. Ο συντελεστής k_b ορίζεται ως παράμετρος διαβρωσιμότητας (erodibility factor) και αποτελεί διορθωτικό παράγοντα για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας της κορεσμένης σε φερτά ροής.

Από πειραματικές μετρήσεις σε φυσικά υδατορεύματα, προέκυψαν διάφορες εμπειρικές εξισώσεις που συσχετίζουν τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής με την ποσότητα των μεταφερόμενων φερτών. Η πληρέστερη αυτών είναι των Meyer-Peter και Muller (1948). Η εξίσωση αυτή περιγράφει το φυσικό πρόβλημα, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ανομοιόμορφη κοκκομετρία φερτών, όσο και την μη ομαλή διαμόρφωση της κοίτης του υδατορεύματος. Στη γενική της μορφή είναι:

$$y^* = 0.047 + 0.25 x^* \qquad (15.19)$$

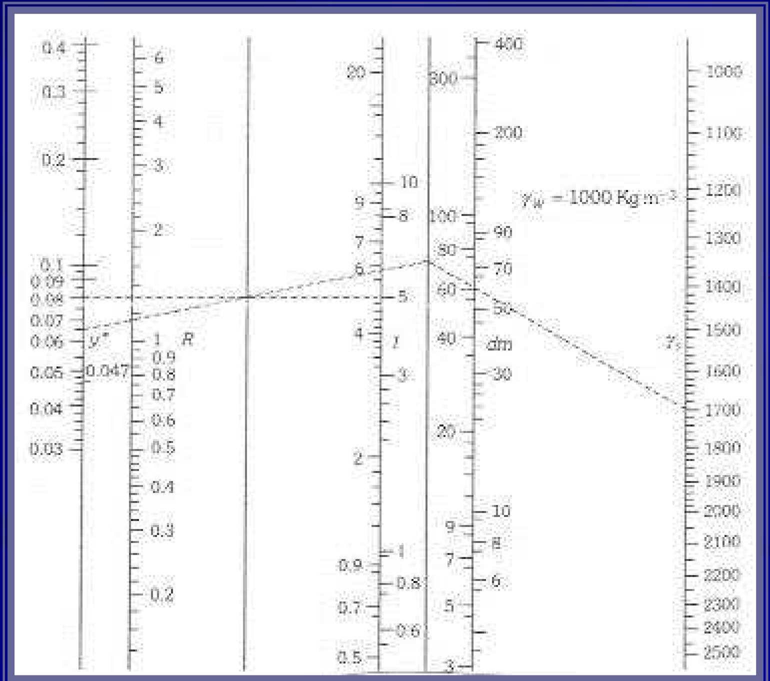
όπου:

$$x^* = \frac{\left(\text{¥}_w / g\right)^{\frac{1}{3}} G_s^{\frac{2}{3}}}{\left\{\left(\text{¥}_s - \text{¥}_w\right) d_m\right\}} \qquad (15.20)$$

και

$$y^* = \frac{\text{¥}_w R I}{\left\{\left(\text{¥}_s - \text{¥}_w\right) d_m\right\}} \qquad (15.21)$$

Η παράμετρος y* περιέχει τα υδραυλικά στοιχεία της ροής (υδραυλική ακτίνα *R* και κλίση πυθμένα I), καθώς και τη μέση διάμετρο στερεών σωματιδίων d_m (m), ενώ η παράμετρος x* περιέχει την ποσότητα G_s που είναι το βάρος των μεταφερόμενων φερτών ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα πλάτους της διατομής του υδατορεύματος, ($Kg \cdot m^{-1} \cdot sec^{-1}$). Η ποσότητα αυτή είναι γνωστή ως στερεοπαροχή υδατορεύματος σε *σύρση,* (bed load sediment discharge). Η λύση της εξίσωσης αυτής δίνεται και σε μορφή νομογραφήματος (Σχήμα 15.3), και ισχύει με τους εξής περιορισμούς: I = 0.4 - 20%ο. *dm* = 0.0004 - 0.03 m και για βάθη ροής, y, από 0.01 έως 1.2 m.



Σχ. 15.3: Νομογράφημα για την επίλυση της εξίσωσης 15.19

Από το νομογράφημα αυτό ή απευθείας από την εξίσωση 15.21, εκτιμάται, γιο δεδομένα ***R, I, dm*** και ***y*s,** η ποσότητα y* και στη συνέχεια, από την εξίσωση 15.19 υπολογίζεται η x*. Τέλος, από την σχέση 15.20, υπολογίζεται **η στερεοπαροχή *σε σύρση Gs.***

Το πρόβλημα της μεταφοράς φερτών υλικών από την επιφανειακή απορροή, είναι αρκετά πολύπλοκο για να περιγραφεί μαθηματικά στην ολότητα του, λόγω κύρια της διφασικής ροής (στερεού-υγρού), αλλά και *ιον* πολυδαίδαλου τοπογραφικού ανάγλυφου όπου λαμβάνει χώρα η ροή, (συνήθως τραχεία επιφάνεια κεκλιμένου εδάφους και κάθε είδους και διατομής φυσικοί ανοικτοί αγωγοί όπως ρυάκια, χαντάκια, χείμαρροι, ποταμοί κλπ.).

Το φυσικό πρόβλημα για μονοδιάστατη ροή περιγράφεται ικανοποιητικά από την εξίσωση διατήρησης της μάζας (Bennet, 1974; Kirkby, 1980):

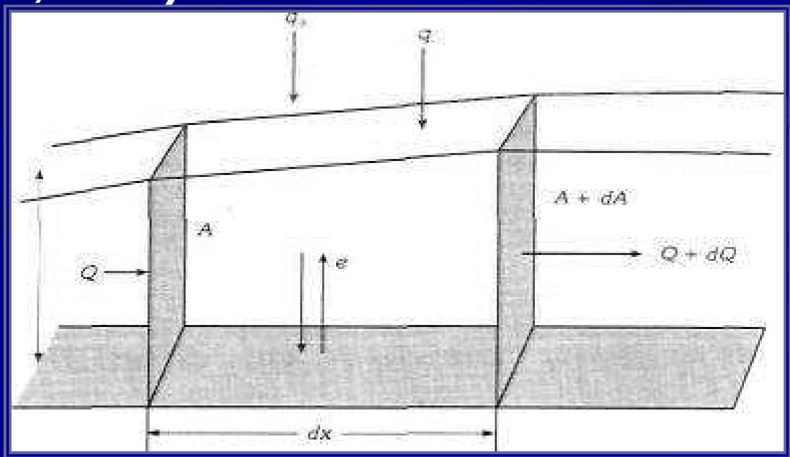
$$\partial(AC)/\partial t+\partial(QC)/\partial x-\left[e(x,t)\right]=q_s(x,t) \qquad (15.22)$$

όπου *C* η κατ' όγκο συγκέντρωση φερτών *σε αιώρηση* στο μείγμα φερτών-νερού (m^3/m^3), *A* η υγρή διατομή στη θέση x (m^2), *Q* η παροχή στην ίδια διατομή($m^3 \cdot sec^{-1}$), e, ο ρυθμός διάβρωσης της κοίτης ανά μονάδα μήκους της ροής ($m^3 \cdot sec^{-1} \cdot m^{-1}$), q_s είναι οι πλευρικές εισροές ανά μονάδα μήκους του υδατορεύματος ($m^3 \cdot sec^{-1} \cdot m^{-1}$), x είναι η οριζόντια απόσταση (m) και *t* ο χρόνος (sec).

Ο όρος των πλευρικών εισροών *qs,* μπορεί να είναι μηδέν ή να έχει θετική τιμή. Αντίθετα, ο όρος *e,* έχει θετική τιμή σε περίπτωση αποκόλλησης εδαφικού υλικού από την κοίτη (διάβρωση), και αρνητική τιμή όταν εδαφικό υλικό αποτίθεται στην κοίτη, (στην περίπτωση αυτή, η ποσότητα των μεταφερόμενων φερτών είναι μεγαλύτερη από τη μεταφορική ικανότητα της ροής / κατάσταση κορεσμού σε φερτά).

Στο Σχήμα 15.4 απεικονίζονται οι μεταβολές των μεγεθών που περιγράφονται από την εξίσωση 15.22, όταν η ροή γίνεται σε υδατόρευμα με μόνιμη κοίτη. Συγκεκριμένα, σε απόσταση *dx* από τη διατομή *A* απεικονίζεται η μεταβολή της υγρής διατομής κατά *dA,* που οφείλεται με τη σειρά της στη μεταβολή της παροχής κατά *dQ* κατά τη διάρκεια του χρόνου *dt.* Η μεταβολή της παροχής μπορεί να οφείλεται είτε στις πλευρικές εισροές *qs* και στο απευθείας πλεόνασμα βροχής, q, που μετασχηματίζεται σε απορροή (αύξηση της διατομής), είτε στη διήθηση (μείωση της διατομής).

Η εξίσωση 15.22 λύνεται με αριθμητικές μεθόδους για δοσμένες αρχικές και οριακές συνθήκες, (Woolhiser et al., 1990).



Σχ. 15.4: *Σχηματική απεικόνιση της εξισώσεως διαβρώσεως.*

15.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ - ΜΟΝΤΕΛΑ

Η ανάγκη της κατά το δυνατό ακριβούς προβλέψεως και εκτιμήσεως φερτών υλών σε υδρολογικές λεκάνες, οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων μοντέλων διαβρώσεως, διαφορετικού βαθμού ακρίβειας και πολυπλοκότητας.

Η ανάγκη αυτή υπαγορεύτηκε τόσο εξαιτίας των σοβαρών συνεπειών της διαβρώσεως των εδαφών στα τεχνικά έργα (π.χ. προσχώσεις σε ταμιευτήρες φραγμάτων), όσο και από την απαίτηση για τον εντοπισμό περιοχών για λήψη μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας, ανάλογα με την επικινδυνότητα στη διάβρωση.

Όπως είναι γνωστό, η αποτελεσματική προστασία του εδάφους από τη διάβρωση, εξασφαλίζεται από τη φυτοκάλυψη και γενικότερα από τη βλάστηση στην επιφάνεια του, που αναστέλλει σημαντικά το ρυθμό της διάβρωσης, αφού ενεργεί σαν φέρων σκελετός του εδάφους ενάντια στις διαβρωτικές δυνάμεις. Η μείωση του ρυθμού της διάβρωσης με τη κατάλληλη φυτοκάλυψη, μπορεί να φτάσει μέχρι και στο 1% του ρυθμού που παρατηρείται στο γυμνό έδαφος.

Η βλάστηση στην επιφάνεια συμβάλλει πολλαπλά στην αντιδιαβρωτική προστασία και συγκεκριμένα, οδηγεί στην αύξηση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους που συνεπάγεται μείωση της απορροής, καθώς επίσης και στην αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας (μείωση ταχύτητας ροής), όπως και στην απορρόφηση της κινητικής ενέργειας της βροχής από τα φυλλώματα των φυτών και των δέντρων.

Ανάλογα με το ζητούμενο αποτέλεσμα, καθώς και από την επιθυμητή ακρίβεια, τα μοντέλα διαβρώσεως χωρίζονται κύρια σε δύο κατηγορίες:

1. τα εμπειρικά (empirical), μέσω των οποίων εκτιμάται η μέση εδαφική απώλεια (soil loss), ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους και ανά μονάδα χρόνου (π.χ. t/ha /έτος ή t/ Km^2/ έτος), που είναι εν γένει χαμηλής ακρίβειας. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν τα μοντέλα του Musgrave (1974), το USLE (Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας) των Wischmeier και Smith (1978) κλπ.
2. η δεύτερη κατηγορία μοντέλων είναι τα γενικής συνθέσεως (conceptual), που είναι κατά κανόνα μεγαλύτερης ακρίβειας, γιατί στηρίζονται στη περιγραφή του συνόλου σχεδόν των συνιστωσών του φυσικού προβλήματος, (αποκόλληση και μεταφορά στερεών σωματιδίων από τη βροχή και την επιφανειακή απορροή κ.λ.π.).

Τα μοντέλα αυτά συνήθως χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των συνεπειών ενός γεγονότος βροχής, στην επιφάνεια του εδάφους μιας περιοχής (αγρός, υδρολογική λεκάνη), περικλείουν δε το μετασχηματισμό της βροχόπτωσης σε επιφανειακή απορροή. Η συνήθης μορφή των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει τα υδρογραφήματα συνολικής απορροής και στερεοπαροχής στην έξοδο της εξεταζόμενης έκτασης, που αντιστοιχούν σε μεμονωμένο επεισόδιο βροχής, (συνήθως μεγάλης έντασης και μικρής διάρκειας). Στη κατηγορία αυτή υπάγονται τα μοντέλα ANSWERS, MODANSW, SEM, EUROSEM κ.τ.λ., που αναφέρθηκαν ήδη στην παράγραφο 15.1.

3. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία μοντέλων που ανήκουν μεν στα γενικής συνθέσεως, πλην όμως αναφέρονται σε μέση χρονική κλίμακα, (μήνας, έτος), όπως τα εμπειρικά και όχι σε στιγμιαίες χρονικές συνθήκες, (πρώτα λεπτά, ώρες). Ένα τέτοιο μοντέλο είναι το MOSEM (Γιακουμάκης και Τσακίρης, 1992), που ουσιαστικά αποτελεί μια τροποποιημένη μορφή του SEM, για μέσες χρονικές συνθήκες, (μήνας/έτος).

Τα μοντέλα γενικής συνθέσεως εν γένει, πέρα του μεγάλου όγκου δεδομένων εισόδου που απαιτούνται, χρησιμοποιούν μια σειρά παραμέτρους που περιγράφουν τις ιδιότητες του εδάφους (μηχανική σύσταση, δομή, διαπερατότητα κτλ), την κατάσταση της επιφάνειας του (τραχύτητα), το ποσοστό φυτοκάλυψης, την ύπαρξη ή μη ροής σε διαμορφωμένη κοίτη κτλ. Οι παράμετροι αυτές συνήθως προσδιορίζονται από στοιχεία μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, (στάδιο βαθμονόμησης του μοντέλου). Η αξιοπιστία του μοντέλου ελέγχεται στη συνέχεια, με βάση την ικανότητα του να εκτιμήσει τα αποτελέσματα της διάβρωσης που μπορεί να προκληθούν μελλοντικά στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων που προσδιορίστηκαν κατά το στάδιο της βαθμονόμησης.
Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται αναλυτικά, η Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (USLE), δίνεται δε επίσης μια συνοπτική περιγραφή του μοντέλου MOSEM.

15.3.1 Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας

Η συνήθης ποσοτική εκτίμηση της εδαφικής απώλειας (soil loss), που οφείλεται στην επιφανειακή διάβρωση, στην περίπτωση που δεν υπάρχουν στοιχεία μετρήσεων, γίνεται με τη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (Universal Soil Loss Equation / Wischmeier and Smith, 1978). Με τον όρο εδαφική απώλεια, εκφράζεται η διαφορά της ποσότητας του εδαφικού υλικού που διαβρώθηκε μείον την ποσότητα που αποτέθηκε ξανά στην ίδια εδαφική έκταση σε δεδομένο χρόνο.

Με την εξίσωση αυτή, γίνεται μια προσεγγιστική εκτίμηση της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας σε εκτάσεις καλλιεργήσιμες ή μη. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση αυτή η διάβρωση κοίτης και οχθών υδατορευμάτων με σημαντική διατομή, (χαντακιών χειμάρρων, ποταμών κτλ).

Η εξίσωση αυτή, γράφεται ως ακολούθως:

$$SL = 2.242 \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \qquad (15.23)$$

όπου:

SL **:** **εδαφική απώλεια σε t/ha/έτος.**

R **:** **συντελεστής διαβρωτικότητας βροχής (Rainfall erosivity factor).**

K **:** **συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους (Soil erodibility factor).**

LS **:** **συντελεστής ανάγλυφου (Topographic factor).**

C **:** **συντελεστής φυτοκάλυψης (Vegetation cover factor).**

P : **συντελεστής ελέγχου διάβρωσης (Support practice factor).**

Αναλυτικά, οι συντελεστές στη παραπάνω εξίσωση ορίζονται ως εξής:

(i) Συντελεστής διαβρωτικότητας βροχής R

Εκφράζει την αποτελεσματικότητα της βροχής ως προς τη διάβρωση. Συνήθως ενδιαφέρει η μέση ετήσια τιμή του *R*, που προσδιορίζεται είτε από πίνακες, είτε από χάρτες (isoerodent maps).

(ii) Συντελεστής διαβρωτικότητας εδάφους K

Εξαρτάται από τη μηχανική σύσταση, (κοκκομετρική καμπύλη), καθώς και από τη δομή και διαπερατότητα του εδάφους.
Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφοροι εμπειρικοί τύποι υπολογισμού της τιμής του *K*, που περιέχουν παραμέτρους αντιπροσωπευτικές της εδαφικής δομής και των υδραυλικών χαρακτηριστικών. Στην πράξη χρησιμοποιούνται περισσότερο πίνακες ή νομό γραφήματα.

(iii) Συντελεστής ανάγλυφου LS

Προσδιορίζεται συνήθως από πίνακες ή νομογραφήματα.

(iv) Συντελεστές φυτοκάλυψης και ελέγχου διάβρωσης - C και P

Για τους δύο αυτούς αδιάστατους συντελεστές υπάρχουν πινακοποιημένες τιμές τους,

$$\left(0 \leq C, P \leq 1\right)$$

Ο συντελεστής φυτοκάλυψης *C* εκφράζει το μέτρο της μείωσης της εδαφικής απώλειας, που οφείλεται στη βλάστηση (φυσική ή καλλιέργειες).

Ο συντελεστής αυτός μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους ανάλογα με την ανάπτυξη του φυλλώματος των φυτών.
Ο συντελεστής ελέγχου διάβρωσης P, εκφράζει το μέτρο της ανθρώπινης παρέμβασης για την προστασία από τη διάβρωση (κατασκευή αναβαθμών κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης του εδάφους, φύτευση δέντρων σε γραμμές παράλληλες προς τις ισοϋψείς κτλ).

Α. Υπολογισμός των συντελεστών στην εξίσωση εδαφικής απώλειας

(i) Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής - R

Ο συντελεστής αυτός είναι συνάρτηση της συνολικής κινητικής ενέργειας της βροχής, καθώς επίσης και της μέγιστης τιμής της έντασης βροχής διάρκειας τουλάχιστον 30 λεπτών. Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$R = 5.910^{-4} E I_{30} \qquad (15.24)$$

όπου:

$$E = 3.79 \sum_j \left(3.14 + \ln\left(I_j\right)\right) I_j \Delta t_j \qquad (15.25)$$

E : συνολική κινητική ενέργεια της βροχής ανά μονάδα επιφάνειας (J/m^2).
I_{30} : μέγιστη ένταση βροχής διάρκειας 30 min, (mm/h).
$Δ_{tj}$: υποδιαίρεση χρόνου βροχής με αντίστοιχη ένταση Ij, (h).

Οι εξισώσεις 15.24 και 15.25 αφορούν ένα μεμονωμένο επεισόδιο βροχής. Στην πράξη ενδιαφέρει η μέση ετήσια τιμή του *R* για μια χρονοσειρά *N* ετών, όπου χρειάζεται να υπολογιστούν οι επιμέρους ετήσιες τιμές του *R* και να προκύψει ο μέσος όρος αυτών, (πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα τα επεισόδια βροχής διάρκειας 30 min κάθε έτους). Η παραπάνω διαδικασία είναι και χρονοβόρα και επίπονη, γι' αυτό το λόγο η τιμή του *R* τελικά προσδιορίζεται είτε από χάρτες (isoerodent maps), είτε από πίνακες. Στην πράξη μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν απλές σχέσεις συσχετίζουν το μέσο ετήσιο ύψος βροχής *P* (mm), με την ετήσιο τιμή του *R*, όπως αυτή των Kirkby και Morgan (1980):

$$R = a \times P \qquad (15.26)$$

όπου: *α*= 0.1 ±0.05 για εύκρατα κλίματα.

(ii) Συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους – K

Εξαρτάται κυρίως από τη μηχανική σύσταση του εδάφους, (ποσοστά of άμμο, ιλύ και άργιλο). Όταν το ποσοστό ιλύος και λεπτής άμμου δεν υπερβαίνει το 70%, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση:

$$K = 2.1 M^{1.14} 10^{-6} \left(12 - a\right) + 0.0325\left(b - 2\right) + 0.025\left(c - 3\right) \qquad (15.27)$$

όπου:

$$M = P_s \left(100 - P_c\right) \qquad (15.28)$$

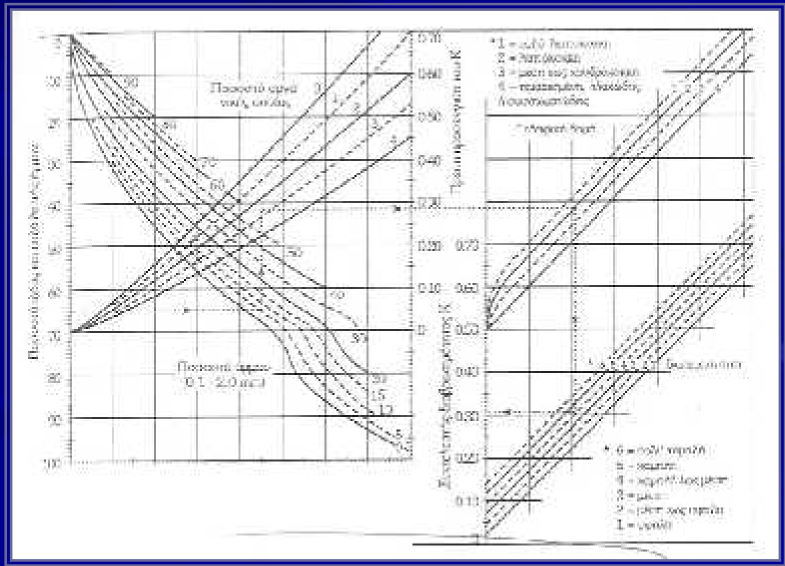
M : η παράμετρος μεγέθους κόκκων,
Ps : ποσοστό ιλύος και πολύ λεπτής άμμου στο έδαφος (%), [0.002 <d<0.1mm),
Pc : ποσοστό αργίλου στο έδαφος (%), [d < 0.002 mm],
a : ποσοστό οργανικού εδαφικού υλικού,(%)
b : κωδικός εδαφικής δομής,
c : κωδικός διαπερατότητας εδάφους

Στη γενικότερη περίπτωση, ο συντελεστής K προσδιορίζεται από το νομογράφημα του Σχήματος 15.5, (Wischmeier and Smith, 1978). Το νομό γράφημα αυτό είναι απλό στη χρήση του, χρειάζεται δε η γνώση της ποσοστιαίας αναλογίας σε άμμο, ιλύ και άργιλο, ο τύπος της δομής (κοκ-κώδης, τεμαχισμένη, πλακώδης κλπ), καθώς και ο βαθμός διαπερατότητας (υψηλή, μέση, χαμηλή) του εδάφους.

Στο Σχήμα αυτό, με εστιγμένη γραμμή, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εδαφικού δείγματος με ποσοστό ιλύος και λεπτής άμμου 65%, ποσοστό άμμου 5%, οργανικού υλικού 3%, με λεπτοκοκκώδη δομή (κωδικός 2) και χαμηλή έως μέση διαπερατότητα (κωδικός 4). Η πρώτη προσέγγιση του *K* (Σχ. 15.5, αριστερά), είναι 0.28, ενώ η δεύτερη ακριβέστερη προσέγγιση 0.305, (Σχ. 15.5, δεξιά).

(iii) Συντελεστής ανάγλυφου LS

Προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση



Σχ. 15.5: ***Υπολογισμός του συντελεστή διαβρωσιμότητας K***

$$LS = (x/22.13)^m \left(65.41\sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065\right) \qquad (15.29)$$

όπου:

x: κεκλιμένο μήκος κλιτύος (m), δηλ. η απόσταση από το σημείο αφετηρίας της επιφανειακής ροής, μέχρι το σημείο συγκεντρώσεως της στο υδατόρευμα.

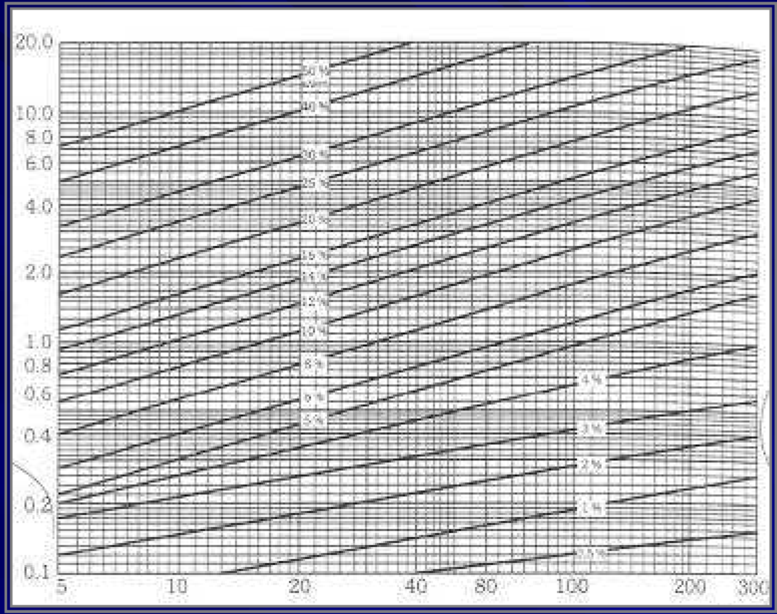
θ: **γωνία κλίσης εδάφους,** $\left(\sin\theta = s/\left(10^4 + s^2\right)^{\frac{1}{2}}\right)$**, όπου s η κλίση, (%).**

Η τιμή του εκθέτη ***m,*** **ανάλογα με την κλίση του εδάφους s, έχει ως εξής:**

Πίν. 15.4: *Τιμές του εκθέτη m*

m	*s*
0.2	< 1%
0.3	1% ≤ *s* ≤ 3%
0.4	3% ≤ *s* ≤ 5%
0.5	≥ 5%

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή LS μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και το νομογράφημα του σχήματος 15.6. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, η τιμή του LS προκύπτει, εάν είναι γνωστά, η κλίση s(%) και το μήκος κλιτύος x, (m)



Πίνακας 15.6: *Υπολογισμός του συντελεστή LS*

Πρέπει να σημειωθεί, ότι τόσο η εξίσωση 15.29, όσο και το νομογράφημα του Σχήματος 15.6, ισχύουν μόνο στην περίπτωση που το συνολικό μήκος κλιτύος x, αντιστοιχεί σε ενιαία κλίση. Σε περίπτωση που αυτό δεν ισχύει, γίνεται χωρισμός του συνολικού μήκους x σε ισομήκη τμήματα ενιαίας κλίσεως το καθένα και ο προσδιορισμός της συνολικής τιμής του *LS* επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του Σχήματος 15.6 και του Πίνακα 15.5, όταν είναι γνωστή η κλίση για το κάθε τμήμα. Ο Πίνακας 15.5 δίνει, (ανάλογα με τον αριθμό των ισομηκών τμημάτων και την τιμή του m, βλ. Πίνακα 15.4), τους διορθωτικούς συντελεστές με τους οποίους πολλαπλασιάζονται οι τιμές *LS* όπως προκύπτουν από το Σχήμα 15.6, για ενιαίο μήκος κλιτύος με διαφορετική όμως κλίση. Στο Σχήμα 15.6, για άλλους συνδυασμούς μήκους κλιτύος και κλίσεως πέραν αυτών που αναφέρονται, χρησιμοποιείται η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής.

Πίν. 15.5: *Διορθωτικοί συντελεστές του LS*

Αριθμός τμημάτων	Σειρά τμήματος	Εκθέτης, m		
		0.5	0.4	0.3
2	1	0.35	0.38	0.41
	2	0.65	0.62	0.59
3	1	0.19	0.22	0.24
	2	0.35	0.35	0.35
	3	0.46	0.43	0.41
4	1	0.12	0.14	0.17
	2	0.23	0.24	0.24
	3	0.30	0.29	0.28
	4	0.35	0.33	0.31
5	1	0.09	0.11	0.12
	2	0.16	0.17	0.18
	3	0.21	0.21	0.21
	4	0.25	0.24	0.23
	5	0.28	0.27	0.25

Εφαρμογή. **Έστω μήκος κλιτύος x ίσο με 200 m, που χωρίζεται σε *τρία* ισομήκη τμήματα κλίσεων 5%, 10% και 15%, αντίστοιχα. Ζητείται η συνολική ενιαία τιμή του *LS.* Η λύση παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα:**

Τμήμα	Κλίση (%)	από (Σχ. 15.6)	από (Πίν. 15.5)	LS
(1)	(2)	(3)	(4)	(3) × (4)
1	5	1.4	0.19	0.266
2	10	3.7	0.35	1.295
3	20	10.5	0.46	4.83
LS (τελική τιμή)				*6.391*

Στη στήλη (1) δίνεται η σειρά των τριών τμημάτων ανάλογα με την κλίση του καθενός, (στήλη 2). Στη στήλη (3) δίνονται οι τιμές του *LS* για το συνολικό μήκος κλιτύος των 200 m με ενιαία κλίση 5, 10, 20% αντίστοιχα, όπως προκύπτουν από το Σχήμα 15.6. Στη στήλη (4) δίνονται οι τιμές των διορθωτικών συντελεστών του *LS,* όπως προκύπτουν από τον Πίνακα 15.5, για , αριθμό τμημάτων 3 και σειρά 1, 2 ,3. Τέλος στην τελευταία στήλη δίνονται οι διορθωμένες τιμές του *LS* για κάθε τμήμα, (γινόμενο των τιμών των στηλών 3 και 4), καθώς και η τελική τιμή για το ενιαίο μήκος κλιτύος, (άθροισμα των τιμών της τελευταίας στήλης).

(iv) Συντελεστές φυτοκάλυψης και ελέγχου διάβρωσης - C και P

Οι τιμές του συντελεστή φυτοκάλυψης *C*, παρουσιάζονται στους Πίνακες 15.6 και 15.7 για αγροτολειβαδικές και δασικές εκτάσεις αντίστοιχα. Ο Πίνακας 15.6 δίνει τις τιμές του *C* ανάλογα με τον τύπο και το ύφος της βλάστησης, το ποσοστό κάλυψης της εδαφικής επιφάνειας από χαμηλά φυτά χωρίς φύλλωμα, καθώς και το αντίστοιχο ποσοστό θαμνώδους και δενδρώδους βλάστησης σε κάθετη προβολή. Επίσης, ο Πίνακας 15.7 δίνει τις τιμές του *C* για δασώδεις εκτάσεις, ανάλογα με το συνολικό ποσοστό κάλυψης.

Σε περίπτωση καλλιεργούμενων εκτάσεων, η τιμή του *C* καθορίζεται από το είδος και το πρόγραμμα της καλλιέργειας και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους, ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης των φυτών. Στις Η.Π.Α. χρησιμοποιούνται πίνακες ανάλογα με τη γεωγραφική θέση της περιοχής και το κλίμα της, που μπορεί κανείς να προμηθευθεί εύκολα από την αρμόδια υπηρεσία, (SCS state office). Επειδή κάτι ανάλογο δεν υπάρχει στη χώρα μας, μπορεί στην περίπτωση χαμηλών φυτών ή δενδροκαλλιεργειών, (αμπέλια, πορτοκαλιές κλπ.), να γίνει μία πρώτη εκτίμηση της τιμής του *C* από τον Πίνακα 15.6, ανάλογα με το ύψος της καλλιέργειας και τα εκτιμώμενα ποσοστά φυτοκάλυψης.

Οι τιμές του συντελεστή ελέγχου διάβρωσης P, εξαρτώνται από τις εφαρμοζόμενες πρακτικές ενίσχυσης του εδάφους έναντι της διάβρωσης. Συγκεκριμένα, ανάλογα με την κλίση της επιφάνειας του εδάφους και την εφαρμοζόμενη τεχνική ενίσχυσης, οι προτεινόμενες τιμές του P παρουσιάζονται στον Πίνακα 15.8.

Πίν. 15.6: *Τιμές του C για αγροτολιβαδικές εκτάσεις*

Θαμνώδης και δενδρώδης βλάστηση		Χαμηλή βλάστηση χωρίς φύλλωμα						
			Ποσοστό κάλυψης (%)					
Είδος και ύψος	Ποσοστό κάλυψης σε κάθετη προβολή (%)	Είδος	0	20	40	60	80	95
Χωρίς αξιόλογη βλάστηση	–	(1) G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		(2) W	0.45	0.24	0.15	0.091	0.043	0.011
Θάμνοι με μέσο ύψος 0.5 m	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.076	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.068	0.038	0.011
Σημαντική θαμνώδης βλάστηση με μέσο ύψος περίπου 2 m	25	G	0.40	0.18	0.09	0.04	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.082	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.078	0.04	0.011
Δέντρα με μέσο ύψος περίπου 4 m, χωρίς αξιόλογη θαμνώδη βλάστηση	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.04	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.087	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.084	0.041	0.011

(1)G : Η φυτοκάλυψη της επιφάνειας αποτελείται κύρια από γρασίδι.
(2) *W:* Η φυτοκάλυψη της επιφάνειας είναι κύρια ποώδη φυτά (όπως αγριόχορτα με αβαθές ριζικό σύστημα).

Πίν. 15.7: *Τιμές του C για δασικές εκτάσεις*

Ποσοστό περιοχής καλυμένης από φύλλωμα δέντρων και υποβλάστηση (θάμνοι, χαμόκλαδα) (%)	***C***
100 - 75	*0.0001 - 0.001*
70 - 45	*0.002 - 0.004*
40 - 20	*0.003 - 0.009*

Πίν. 15.8: *Τιμές του συντελεστή P*

Κλίση (%)	A(*)	B	C
1 - 2	0.6	0.3	0.12
3 - 8	0.5	0.25	0.10
9 - 12	0.6	0.3	0.12
13 - 16	0.7	0.35	0.14
17 - 20	0.8	0.4	0.16
21 - 25	0.9	0.45	0.18

(*)

Κατηγορία Α : Όργωμα και φύτευση σε γραμμές παράλληλες προς τις ισοϋψείς.

Κατηγορία Β : Διαχωρισμός της γης σε λωρίδες παράλληλες με τις ισοϋψείς, με διαφορετική καλλιέργεια στην κάθε μία και ανακύκλωση των καλλιεργειών.

Κατηγορία C : Κατασκευή μικρών αναχωμάτων κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης του εδάφους.

Γίνεται φανερό από τα παραπάνω, ότι τόσο ο συντελεστής C όσο και ο συντελεστής P, επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της εξίσωσης 15.23. Για εντελώς γυμνό και άγονο έδαφος, χωρίς καμία τεχνική ενίσχυσης έναντι της διάβρωσης, και οι δυο συντελεστές παίρνουν την τιμή 1.

β. Επέκταση της εξίσωσης εδαφικής απώλειας σε μικρές υδρολογικές λεκάνες

Η εξίσωση 15.23 εφαρμόζεται συνήθως για περιοχές με σχεδόν ομοειδή χαρακτηριστικά, (ενιαία κλίση, τύπο εδάφους κλπ.), που η έκταση τους ανέρχεται σε μερικές εκατοντάδες στρέμματα.
Στο παρελθόν έχουν γίνει προσπάθειες να επεκταθεί η εφαρμογή της παγκόσμια εξίσωσης εδαφικής απώλειας για τον υπολογισμό της εδαφικής απώλειας σε μικρές λεκάνες απορροής, έκτασης μερικών Km^2, (Williams και Berndt, 1972). Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι οι λεκάνες αυτές επιλέχτηκαν κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να ευσταθεί η παραδοχή ότι η διάβρωση κοίτης των υδατορευμάτων τους δεν παίζει τον κυρίαρχο ρόλο στην παραγωγή φερτών, συνθήκη απαραίτητη για να μπορεί να εφαρμοσθεί η εξίσωση 15.23.
Σύμφωνα με τους Williams και Berndt, όλοι οι όροι της εξίσωσης 15.23 αλλάζουν, εκτός από τον συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχής, *R.* Με την παραδοχή ότι η υδρολογική λεκάνη συνολικής έκτασης *DA* (Km^2), δεν έχει ομοιόμορφα χαρακτηριστικά (ανάγλυφο, εδαφικό τύπο, βλάστηση κτλ), γίνεται χωρισμός της σε n συνολικά υπολεκάνες, κατά το δυνατό ομοιόμορφων χαρακτηριστικών, έκτασης *DAi* η κάθε μία.

Οι όροι της εξίσωσης 15.23, που αφορούν την ενιαία λεκάνη, υπολογίζονται ως εξής:

$$K = \sum_{i=1}^{n} K_i p_i \quad (15.30)$$

όπου:

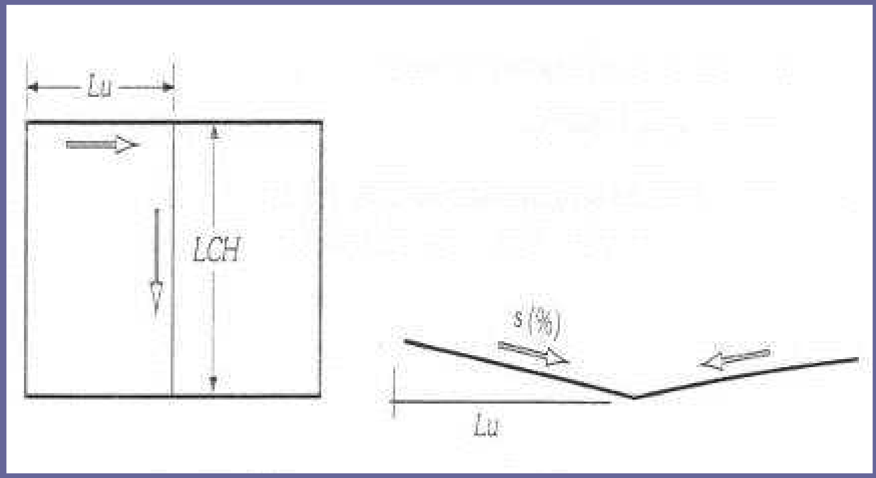
Ki : συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους της υπολεκάνης i.

$$p_i = DA_i / DA \quad (15.31)$$

pi : συντελεστής επιρροής της υπολεκάνης i (i= 1, 2,...,n), *n ο* συνολικός αριθμός των "ομοιόμορφων" υπολεκανών.

$$S = \sum_{i=1}^{n} S_i p_i \quad (15.33)$$

Si : Συντελεστής κλίσης κλιτύος της υπολεκάνης i, (%).



Σχ. 15.7: Σχηματική απεικόνιση υδρολογικής λεκάνης

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i p_i \qquad (15.34)$$

Ci : Συντελεστής φυτοκάλυψης της υπολεκάνης i

$$P = SR + 0.3SRWW + P_t T \qquad (15.35)$$

SR : Τμήμα της Λεκάνης ενισχυμένο με φύτευση σε γραμμές παράλληλες προς τις ισοϋψείς, (0 < *SR* < 1).

SRWW : Τμήμα της Λεκάνης ενισχυμένο με Λωρίδες παράλληλες με τις ισοϋψείς, με διαφορετική καλλιέργεια στην κάθε μία. (0 < *SRWW* < 1).

T : Ποσοστό επιφάνειας της λεκάνης ενισχυμένο με σειρά μικρών αναχωμάτων κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης του εδάφους, (0<T<1).

Pt : Ο συντελεστής ελέγχου διάβρωσης που αντιστοιχεί στο τμήμα T.

Οι παραπάνω εξισώσεις εφαρμόστηκαν στην περίπτωση 5 διαφορετικών υπολεκανών απορροής μιας ενιαίας λεκάνης 24 Km^2 στο Τέξας των Η.Π.Α., για μια περίοδο χρονικού μήκους 8 ετών, (1962-1970), για την οποία υπήρχαν μετρήσεις στερεοπαροχής. Η σύγκριση των μετρήσεων αυτών με τα αποτελέσματα της τροποποιημένης εξίσωσης 15.23, έδωσε μια μέση απόκλιση για την περίοδο που προαναφέρθηκε της τάξης του 35%. Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι οι τιμές της εδαφικής απώλειας που προκύπτουν από την 15.23, υπερεκτιμούν συστηματικά τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές κι αυτό για όλες τις υπολεκάνες που μελετήθηκαν.

Γ. Εφαρμογή

Παρουσιάζεται η διαδικασία εκτίμησης της μέσης ετήσιας εδαφικής απώλειας σε μια σχετικά μικρή υδρολογική λεκάνη, έκτασης 9.663 Km^2. Η λεκάνη εξετάζεται ως ενιαία με τα εξής δεδομένα:

- *Μορφολογικά*
  - *Μέση κλίση,* *S= 18.1%.*
  - *Μήκος κύριας μισγάγγειας,* LCH = 5.21 Km.
  - Χαρακτηριστικό μήκος κλιτύος, LU = 927.4 m.

- Εδαφολογικά
  - Αργιλος και ιλυώδης άργιλος (65% άργιλος, 31% ιλύς και πολύ λεπτή άμμος και 4% οργανική ουσία), με πλακώδη δομή, (κωδ. 4), και πολύ χαμηλή διαπερατότητα, (κωδ. 6).

- *Βλάστηση*
  - Υπάρχουν καλλιέργειες αμπέλου σε γραμμές παράλληλες με τις ισοϋψείς και εν γένει χαμηλή θαμνώδης βλάστηση σε ποσοστό κάθετης προβολής περίπου 75%.

Οι συντελεστές της εξίσωσης 15.23 προκύπτουν ως εξής:

Ο συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής *R,* εκτιμάται ίσος με 76 περίπου (εξίσωση 15.26 με τιμές παραμέτρων, *α* = 0.095 και *P* = 795 mm/μέση ετήσια επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης απορροής).
Ο συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους *K,* προκύπτει, με βάση τα δεδομένα του προβλήματος, είτε από τις εξισώσεις 15.27 και 15.28, είτε από το νομογράφημα του Σχήματος 15.5. Η τιμή του υπολογίστηκε ίση με 0.19.

Οι τιμές των υπόλοιπων συντελεστών είναι:
LS= 19.1 (από Εξ. 15.29),
C = 0.068 (Πίνακας 15.6. Κάλυψη σε κάθετη προβολή 75%, θάμνοι με μέσο ύψος 0.5 m, ποσοστό χαμηλής βλάστησης 60%, συνθήκη *W),*
P* = 0.8 (Πίνακας 15.8, περίπτωση *Α).

Αντικαθιστώντας τις τιμές των επιμέρους συντελεστών στην Εξ. 15.23, προκύπτει μια μέση ετήσια τιμή της εδαφικής απώλειας στην υπόψη λεκάνη απορροής, ίση με 33.6 t/ha/έτος.

15.3.2 Τροποποιημένο μοντέλο διαβρώσεως (MO-SEM)

Το μοντέλο αυτό είναι σπονδυλωτό και περιλαμβάνει τα εξής στάδια υπολογισμού:

1. Προσδιορισμός της ποσότητας παραγομένων φερτών λόγω αποκόλλησης εδαφικού υλικού και μεταφοράς του από τη βροχόπτωση, (Rainfall splash detachment).
2. Υπολογισμός της επιφανειακής απορροής, (Overland flow).
3. Μεταφορική ικανότητα σε φερτά της απορροής και πραγματικό στερεοφορτίο λόγω επιφανειακής απορροής, (Transport capacity of overland flow and flow entrainment).
4. Συνολικό φορτίο φερτών και καθαρή διάβρωση/απόθεση, (Total sediment load and net erosion/deposition).

Το πλέον αξιόλογο χαρακτηριστικό του ΜΟ - SEM είναι ότι ως μοντέλο χωρικής κατανομής (areally distributed), επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό των ευπαθών στη διάβρωση περιοχών στο εσωτερικό μιας υδρολογικής λεκάνης. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη λήψη μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας και ελέγχου της διάβρωσης στις πλέον "ευάλωτες" περιοχές λεκανών με ορεινό ή και ημιορεινό ανάγλυφο.

Στο πλαίσιο εισαγωγής των δεδομένων εισόδου, η υδρολογική λεκάνη διακριτοποιείται σε "μοναδιαίες λεκάνες", συνήθως τετραγωνικού σχήματος, στο οριζόντιο επίπεδο, σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων. Στη συνέχεια, τα στάδια υπολογισμού του μοντέλου εφαρμόζονται σε κάθε μια μοναδιαία λεκάνη (ΜΛ), λαμβάνοντας υπόψη την επικοινωνία των ΜΛ με βάση το ανάγλυφο της περιοχής, υιοθετώντας μια σειρά απλουστευτικές παραδοχές.

Αναλυτικά, τα στάδια υπολογισμού του σύνθετου μοντέλου παρουσιάζονται παρακάτω:

Α. Υπολογισμός της ποσότητας παραγόμενων φερτών λόγω αποκόλλησης από τη βροχόπτωση

Εξ αιτίας της επιδράσεως της κινητικής ενέργειας της βροχής (προσπίπτουσες σταγόνες), τα σωματίδια του εδάφους αποκολλώνται και εκτινάσσονται σε κάποια απόσταση, που εξαρτάται από την διάμετρο των σταγόνων, καθώς και από την ταχύτητα πτώσεως τους στην επιφάνεια του εδάφους.

Για την εκτίμηση της ποσότητας φερτών που παράγονται από τη βροχόπτωση, προτείνονται οι παρακάτω εμπειρικές εξισώσεις (Poesen, 1985). που στηρίζονται σε πειραματικά δεδομένα:

$$WSM = C_u \cdot KE \cdot R_c^{-1} \cdot \cos ¤ \quad (15.36)$$

Και

$$QR = WSM\left(0.301\sin ¤ + 0.019\left(D_{50}\right)^{-0.22}\left(1 - e^{-2.42\sin ¤}\right)\right) \quad (15.37)$$

όπου

WSM : Βάρος αποκολλούμενων σωματιδίων ανά μονάδα επιφάνειας, (Kg/m^2).

Cu : Ποσοστό ακάλυπτης εδαφικής επιφάνειας.
KE :Κινητική ενέργεια της βροχής (Jm^{-2}), που υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$KE = P\varepsilon \qquad (15.38)$$

όπου:

P : το μηνιαίο ύψος βροχής, (mm ύψους νερού) και

ε : ($Jm^{-2} \cdot mm^{-1}$), η ειδική κινητική ενέργεια της βροχής που είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της μέσης ταχύτητας πτώσεως των σταγόνων στην εδαφική επιφάνεια, (Laws, 1941).

R : Συντελεστής που εκφράζει την αντίσταση του εδαφικού υλικού στην αποκόλληση (JKg^{-1}) και εξαρτάται από τη χαρακτηριστική διάμετρο D50 των σωματιδίων και την περιεχόμενη υγρασία στο έδαφος.

φ : Γωνία κλίσεως της εδαφικής επιφάνειας (°).

QR : Μηνιαίο στερεοφορτίο αποκολλούμενων φερτών ανά μονάδα πλάτους επιφάνειας ακάλυπτου εδάφους ($Kg\ m^{-1}$).

Ο όρος στερεοφορτίο (sediment load), είναι διαφορετικός από τον όρο στερεοπαροχή (sediment discharge), επειδή αναφέρεται σε μια καθορισμένη χρονική διάρκεια (μήνας, έτος), ενώ η στερεοπαροχή όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 15.2, σημαίνει τον στιγμιαίο ρυθμό μεταφοράς φερτών σε μια διατομή υδατορεύματος.

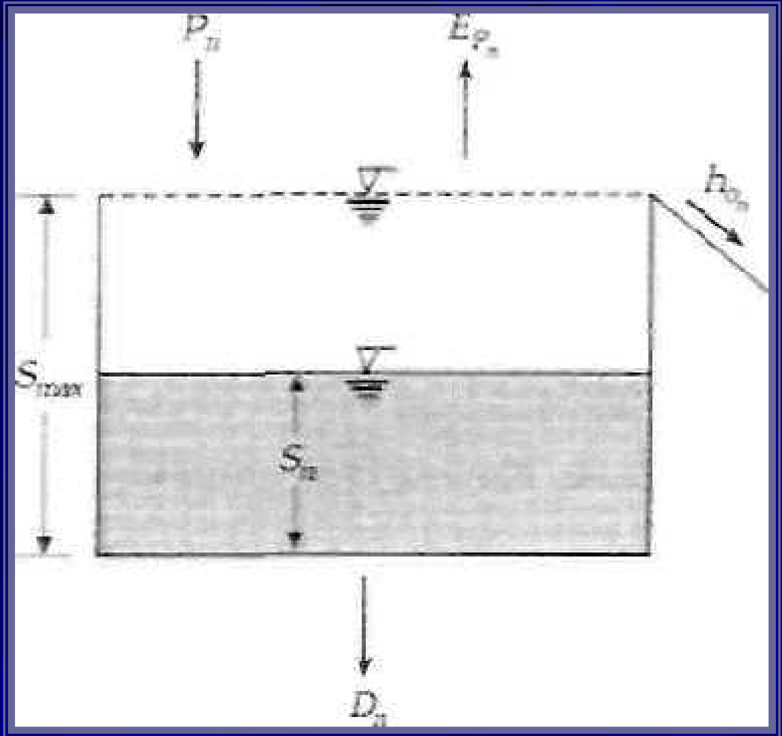
Β. Υπολογισμός επιφανειακής απορροής

Για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο απλού υδατικού ισοζυγίου στην ανώτερη επιφανειακή ζώνη του εδάφους (ζώνη ριζοστρώματος), [Σχήμα 15.8], (Giakoumakis et al., 1991). Από το παραπάνω Σχήμα γίνεται σαφές ότι η ζώνη ριζοστρώματος του εδάφους, θεωρείται ως δεξαμενή αποθήκευσης μέγιστης χωρητικότητας S_{max}, στην οποία η ποσότητα S_n παριστάνει τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία κατά το μήνα η. Επομένως, η διαφορά S_{max} - S_n είναι το μέσο μηνιαίο έλλειμμα υγρασίας στην επιφάνεια μιας μοναδιαίας λεκάνης (ΜΛ). Είναι προφανές ότι το ύψος της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας αυξάνει από την βροχόπτωση $P_η$ και μειώνεται τόσο από την δυναμική εξατμισο-διαπνοή $E_{ρα}$, όσο και από τη βαθειά διήθηση Dn.

Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται μηνιαία ύψη βροχής και δυναμικής εξατμισοδιαπνοής. Η εξίσωση ισοζυγίου είναι η εξής :

(15.39)

$$S_n' = S_{n-1} + P_n - Ep_n$$



Σχ. 15.8: *Σχηματική παρουσίαση του μοντέλου Απλού Υδατικού Ισοζυγίου.*

όπου:

Sn : Διαθέσιμη εδαφική υγρασία (mm ύψους νερού),

Pn : Ύψος βροχής (mm ύψους νερού).

Epn : Ύψος δυν. εξατμισοδιαπνοής (mm ύψους νερού).

(n = 1, 2,...,12) : δείκτης που προσδιορίζει το χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρονται οι μεταβλητές. Εδώ κάθε τιμή του n αντιστοιχεί σε ένα μήνα.

***Ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής S' (Εξ. 15.39), το αντίστοιχο ύψος επιφανειακής απορροής του μήνα* n, hon, εκτιμάται ως ακολούθως:**

Εάν $S'_n < 0$

$$S_n = 0 \quad (15.40)$$

$$h_{on} = 0 \quad (15.41)$$

$$D_n = 0 \quad (15.42)$$

$D_n = 0$ **όπου *Dn,* ύψος βαθειάς διήθησης το μήνα *η,* (mm ύψους νερού).**

Εάν $0 \leq S'_n \leq S_{max}$

$$S_n = S'_n \quad (15.43)$$

$$h_{on} = 0 \quad (15.44)$$

$$D_n = 0 \quad (15.45)$$

Εάν

$$S'_n > S_{max}$$

$$S_n = S_{max} \qquad (15.46)$$

$$h_{on} = K'\left(S'_n - S_{max}\right) \qquad (15.47)$$

$$D_n = K\left(S'_n - S_{max}\right) \qquad (15.48)$$

όπου

$$K' = 1 - K$$

Οι υπολογισμοί με το μοντέλο αυτό, αρχίζουν το μήνα Οκτώβριο του πρώτους υδρολογικού έτους της εξεταζόμενης χρονοσειράς.
Στο μοντέλο περιέχονται δύο παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν, (παράμετροι βαθμονόμησης): η μέγιστη διαθέσιμη εδαφική υγρασία Smax της επιφανειακής εδαφικής ζώνης, (mm ύψους νερού) και ο συντελεστής βαθειάς διήθησης *K*, που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (ανάγλυφο, διηθητικότητα του εδάφους, φυτοκάλυψη κτλ).

Για τον περιορισμό του αριθμού των παραμέτρων βαθμονόμησης, η μέγιστη διαθέσιμη εδαφική υγρασία Smax, μπορεί να εκτιμηθεί από την παρακάτω εξίσωση της Soil Conservation Service, (Mutreja, 1986):

$$S_{max} = 25.4\left[\left(1000/CN\right) - 10\right] \quad (15.49)$$

όπου:

CN : είναι ο ο αριθμός καμπύλης, (Curve Number), που προσδιορίζεται από πίνακες, με βάση τις συνθήκες εδάφους, γεωλογίας, φυτοκάλυψης και χρήσης γης της λεκάνης απορροής, ($0 < CN < 100$).

Γ. Μεταφορική ικανότητα σε φερτά της απορροής και πραγματικό στερεοφορτίο λόγω επιφανειακής απορροής

Για τον υπολογισμό της μεταφορικής ικανότητας σε φερτά της επιφανειακής απορροής, χρησιμοποιείται η εξίσωση των Engelund και Hansen, (1967), της οποίας η ακρίβεια εκτιμήσεως έχει ελεγχθεί πειραματικά, (Julien and Simons, 1985, Meyer and Wishmeier, 1969 κ.ά.). Η εξίσωση αυτή μπορεί στη γενική της μορφή να γραφεί ως ακολούθως:

$$QT = A_k \left(h_o S\right)^{\frac{5}{3}} \quad (15.50)$$

όπου:

QT : το μηνιαίο στερεοφορτίο δυναμένων να μεταφερθούν φερτών ανά μονάδα πλάτους, (Kg · m^{-1}).

Ak : συντελεστής που είναι συνάρτηση της τραχύτητας της επιφάνεια και της χαρακτηριστικής *διαμέτρου* D_{50} των στερεών σωματιδίων Στο μοντέλο, ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται ως παράμετρος βαθμονόμησης,

S = *tan φ*, εδαφική κλίση.

Για συνεκτικά εδάφη, η πραγματική ποσότητα φερτών που μεταφέρεται από την απορροή, είναι στην πραγματικότητα μικρότερη από αυτή που προσδιορίζεται με την εξίσωση 15.50, που τελικά γράφεται:

$$QE = n_s QT \qquad (15.51)$$

όπου *ns* ο λόγος παρασύρσεως (entrainment ratio), *0* <*ns* <1.

Για μη συνεκτικά εδάφη, η τιμή του n_s ισούται με 1. Στο παρόν μοντέλο η τιμή της παραμέτρου n_s προκύπτει *ύστερα* από βαθμονόμηση.

Δ. Συνολικό φορτίο φερτών και καθαρή διάβρωση - απόθεση

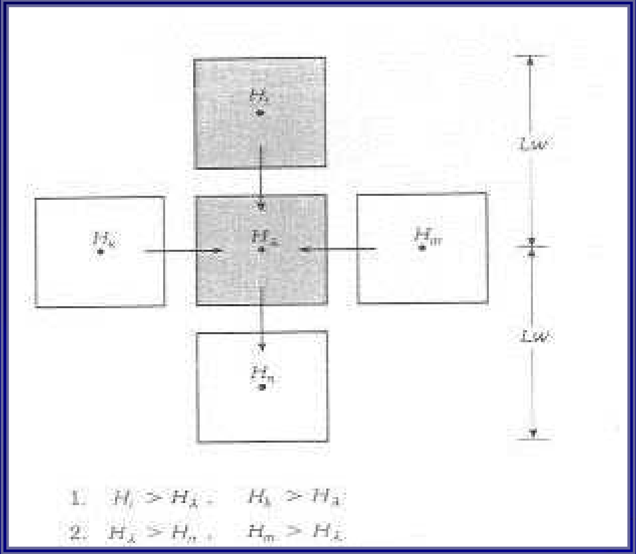
Για τον υπολογισμό του συνολικού φορτίου φερτών, η λεκάνη απορροής διακριτοποιείται στο οριζόντιο επίπεδο *XY, σε* μοναδιαίες λεκάνες, (ΜΛ).
Ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές:
(i) Θεωρείται ότι οι ποσότητες φερτών μεταφέρονται από μια μοναδιαία λεκάνη στις παρακείμενες, μέσω επιφανειακής ροής μικρού βάθους. Δεν θεωρείται ροή σε διαμορφωμένη κοίτη υδατορεύματος.
(ii) Οι ποσότητες φερτών από μια μοναδιαία λεκάνη, διοχετεύονται μόνο σε μία από τις παρακείμενες της, σύμφωνα με τη μέγιστη φυσική κλίση του εδάφους, που υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$S = \tan \text{¤} = \left(H_i - H_\lambda\right) / L_w \qquad (15.52)$$

όπου H_i και H_λ τα μέσα υψόμετρα των μοναδιαίων λεκανών i και λ αντίστοιχα και L_w η απόσταση των κέντρων τους, (Σχήμα 15.9).
Σύμφωνα με το Σχήμα αυτό, το συνολικό φορτίο φερτών στη μοναδιαία λεκάνη *λ,* υπολογίζεται με βάση την εξίσωση :

$$SLO_\lambda = QR_\lambda + QE_\lambda + \sum_{p=1}^{4} I_p \qquad (15.53)$$

όπου οι ποσότητες QR_λ και QE_λ υπολογίζονται από τις εξισώσεις 15.37 και 15.51 αντίστοιχα, για κάθε μοναδιαία λεκάνη *λ (λ*= 1, 2,...,*N), N ο* μέγιστος αριθμός μοναδιαίων λεκανών που συναποτελούν τη λεκάνη απορροής. Επίσης, I_p είναι η συνολική ποσότητα φερτών που μπορεί να διοχετευθεί στη μοναδιαία λεκάνη *λ* από παρακείμενες μοναδιαίες λεκάνες. Η μέγιστη τιμή του δείκτη p είναι 4. (Σχήμα 15.9)



Σχ. 15.9: ***Μεταφορά φερτών μεταξύ μοναδιαίων λεκανών.***

Ανάλογα με την τιμή του συνολικού φορτίου φερτών, (Εξ. 15,53), εξετάζονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις:

(ι) Εάν $SLO_\lambda \leq QR_\lambda$ **τότε ποσότητα φερτών SLO_λ, εγκαταλείπει τη μοναδιαία λεκάνη λ, (περίπτωση διαβρώσεως), όπου η ποσότητα QT_λ είναι η μεταφορική ικανότητα σε φερτά της απορροής, (Εξ. 15.50).**

(ii) Εάν $SLO_a > QR_a$ τότε ποσότητα φερτών ίση με QT_λ εγκαταλείπει τη μοναδιαία λεκάνη *λ*, (περίπτωση διαβρώσεως), ενώ ποσότητα ίση με τη διαφορά QT_λ- SLO_λ αποτίθεται μέσα στη μοναδιαία λεκάνη, *λ)*.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η καθαρή διάβρωση/απόθεση σε μια Μ.Λ., υπολογίζεται ως η διαφορά διαβρώσεως και αποθέσεως στη Μ.Α.:

$$NED_\lambda = ER_\lambda - DEP_\lambda \qquad (15.54)$$

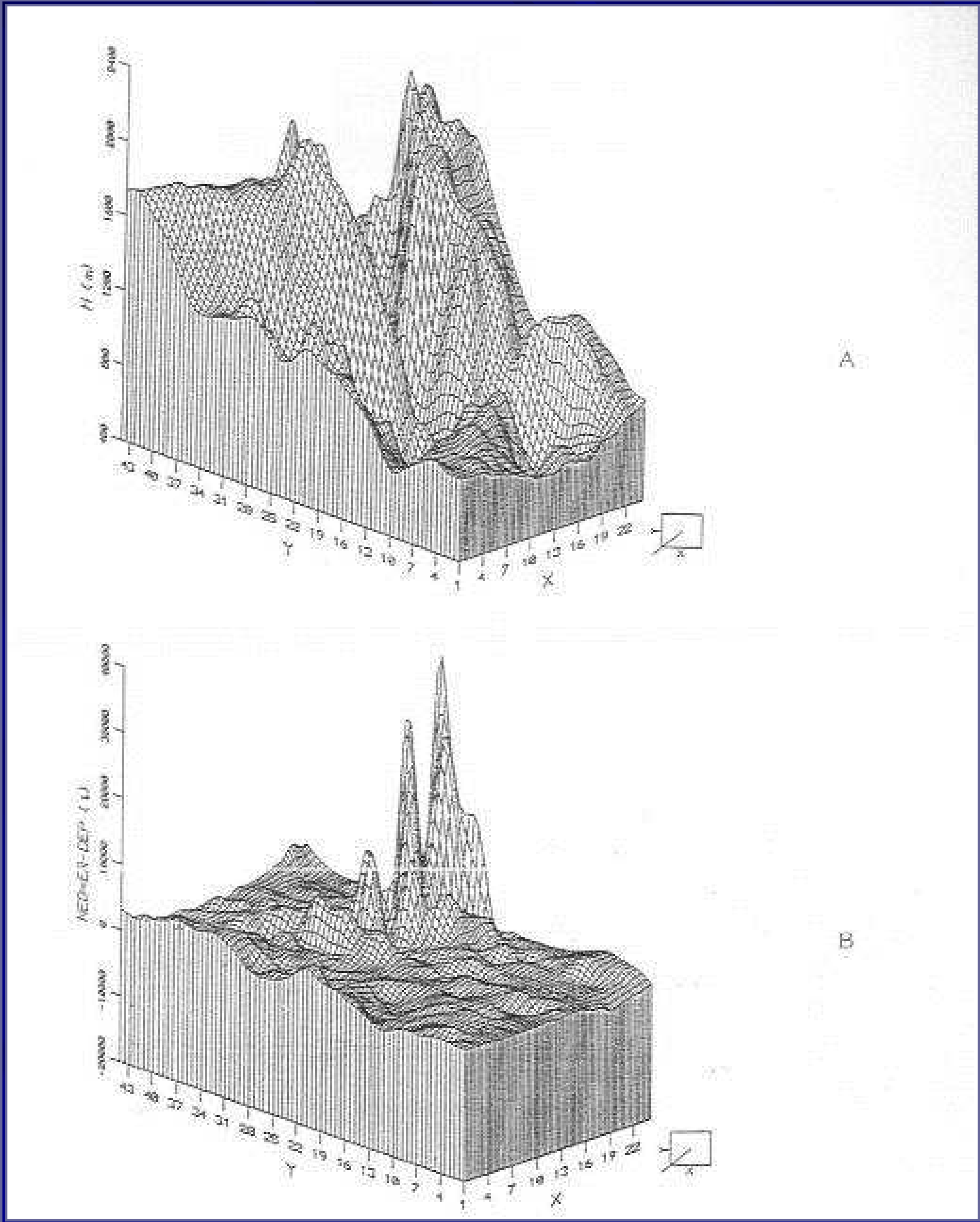
όπου:

NED: Καθαρή διάβρωση/απόθεση, (t)

ER : Διάβρωση, (t)

DEP-. Απόθεση, (t).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το μηνιαίο στερεοφορτίο στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης θα είναι:



Σχ. 15.10: Τρισδιάστατη απεικόνιση: (α) Ανάγλυφου της υδρολογικής λεκάνης του Μόρνου, (β) Μέσων τιμών διαβρώσεων - αποθέσεων στη λεκάνη.

$$SEDY = \sum_{a=1}^{N} \left(NED \right)_{a} ,\left(t \right)$$ (15.55)

Το στερεοφορτίο (sediment load), ανά μήνα μπορεί επίσης να εκφρασθεί σε t/Km^2 :

$$SEDY = \sum_{a=1}^{N} \left(NED \right)_{a} / \left(NSSU \right)$$ (15.56)

όπου *SSU* η έκταση μιας μοναδιαίας λεκάνης σε Km^2.

Είναι προφανές ότι το ετήσιο στερεοφορτίο, (t/Km^2), κατά το υδρολογικό έτος j θα είναι :

$$QS_j = \sum_{a=1}^{12} \left(SEDY \right)_k$$ (15.57)

Στο Σχήμα 15.10β παρουσιάζεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση μέσων τιμών διαβρώσεων - αποθέσεων στην υδρολογική λεκάνη του Μόρνου, όπως υπολογίστηκαν από το παραπάνω μοντέλο. Το σχήμα αυτό, συγκρινόμενο με το χάρτη ανάγλυφου της υδρολογικής λεκάνης (Σχήμα 15.10α), καταδεικνύει τον πολύ ικανοποιητικό βαθμό συσχέτισης μεταξύ κλίσεων ανάγλυφου και υψηλών τιμών διάβρωσης και απόθεσης (έντονες και ήπιες κλίσεις αντίστοιχα).