

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΕΩΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

—
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΥΠΟΧΡΕΩΤΙΚΟ ΜΑΘΗΜΑ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ (9ου ΕΞΑΜΗΝΟΥ) :
ΑΠΟΡΡΟΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΕΙΣ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΧΕΙΡΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΟΝ
ΔΗΜΗΤΡΗ ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗ

ΑΘΗΝΑ 1982

Ε.Μ.Π.-ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
 ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ
ΜΑΘΗΜΑ: ΑΠΟΡΡΟΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΕΙΣ
ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΩΝ

ΕΠΙΣΤ. ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

27-9-1982

ΕΝΟΤΗΤΑ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
 ΤΩΝ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1. Κατάταξη μεταφερομένων στερεών υλικών

- Φορτίο (Load). Τά στερεά υλικά που μεταφέρονται από το υδατό-
 ρευμα. (Μέγεθος: μάζα ή βάρος).
- Στερεοπαροχή (Sediment discharge): 'Ο ρυθμός μεταφοράς των
 υλικών (Μέγεθος: μάζα ανά χρονική μονάδα ή βάρος ανά χρονική
 μονάδα).
- Ταξινόμηση των μεταφερομένων υλικών.

		Σύστημα ταξινομήσεως	
		Με βάση τό μηχανισμό μεταφοράς	Με βάση τό μέγεθος κόκκων καί τήν προέλευση
Συνολικό φορτίο-Συνολική στερεοπαροχή	Φορτίο (στερεοπαροχή) χωμάτων ή φορτίο άποπλύσεως (Wash Load)	Φορτίο σε αιώρηση (Στερεοπαροχή με αιώρηση) (Suspended sediment load)	Φορτίο (στερεοπαροχή) χωμάτων ή φορτίο άποπλύσεως (Wash Load)
	Φορτίο (στερεοπαροχή) υλικών κοίτης σε αιώρηση (Suspended bed material load)		Φορτίο (στερεοπαροχή) υλικών κοίτης (Bed material load)
	Φορτίο σε σύρση (στερεοπαροχή με σύρση) (Bed load)	Φορτίο σε σύρση (στερεοπαροχή με σύρση) (Bed load)	

2. Ιδιότητες τών φερτῶν ὑλικῶν

2.1 Διαστάσεις μεμονωμένου κόκκου-Φαινόμενη διάμετρος

2.2 Κατάταξη τών φερτῶν σέ κλάσεις ανάλογα μέ τό μέγεθος

2.3 Μορφή κόκκων

σφαιρικότητα (sp), στρογγυλότητα (ar)

συντελεστής σχήματος: $sf = \frac{(\text{μῆκος ἑλάχιστου ἄξονα κόκκου})}{\sqrt{(\text{μῆκος μέγιστου ἄξονα}) * (\text{μῆκος ἑνδιαμ. ἄξονα})}}$

Στόν παραπάνω ὀρισμό οἱ τρεῖς ἄξονες θεωροῦνται κάθετοι μεταξύ τους.

Συνήθεις τιμές τοῦ sf: $0,5 \div 0,9$.

2.4 Πυκνότητα κόκκων

Συνήθης μέση τιμή: $\rho_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$

Εὔρος διακύμανσης πυκνότητας μεμονωμένων κόκκων 2500-5000 Kg/m^3

2.5 Ταχύτητα καθιζήσεως στό νερό

Γενική συναρτησιακή σχέση γιά μεμονωμένο κόκκο

$$w = f(g, d_a, \mu_i, \rho_s, \rho, \nu) \quad (1)$$

ὅπου: w = ταχύτητα καθιζήσεως τοῦ κόκκου στό νερό

g = ἐπιτάχυνση βαρύτητας

d_a = φαινόμενη διάμετρος τοῦ κόκκου

μ_i = παράμετροι μορφῆς τοῦ κόκκου (π.χ. sp, ar, sf)

ρ_s = πυκνότητα τοῦ κόκκου

ρ = πυκνότητα τοῦ νεροῦ

ν = κινηματική συνεκτικότητα τοῦ νεροῦ

Ἄλλοι παράγοντες πού ἐπιδρoῦν στήν ταχύτητα καθιζήσεως:

- Ἡ καθίζηση σέ δοχεῖο μικρῶν διαστάσεων γίνεται μέ μικρότερες ταχύτητες (ἐπίδραση τοῦ λόγου d_a/D)
- Ἡ μεγάλη συγκέντρωση κόκκων μέσα στό ρευστό μειώνει τήν ταχύτητα καθιζήσεως τοῦ μεμονωμένου κόκκου (ἐπίδραση τῆς συγκεντρώσεως C).
- Ἡ ὑπαρξη τύρβης στό ρευστό μειώνει τήν ταχύτητα καθιζήσεως τοῦ μεμονωμένου κόκκου

Ταχύτητα καθιζήσεως σφαιρικῶν κόκκων

$$w = \frac{gd_a^2}{18\nu} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad \text{για} \quad Re = \frac{wd_a}{\nu} \leq 0,1$$
$$w^2 = \frac{4}{3} \frac{gd_a}{c_t} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (\text{για} \text{ } \delta\lambda\epsilon\sigma\text{ } \tau\acute{\iota}\sigma\text{ } \tau\acute{\iota}\mu\epsilon\sigma\text{ } \tau\omicron\upsilon\text{ } Re)$$
(2)

όπου c_t = άδιάστατος συντελεστής σύρσεως, συνάρτηση του Re .

Οι σχέσεις (2) χρησιμοποιούνται σπάνια.

Σχέση Rubey (1933), συναρτησιακά ισοδύναμη με τη (2).

$$w = F_1 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_a},$$
$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{gd_a^3 \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{gd_a^3 \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}}$$

Η σχέση Rubey χρησιμοποιείται στη μέθοδο ύπολογισμού στερεοπαροχής του Einstein.

Γραφική συσχέτιση της American Interagency Comittee (1957).
(Βλέπε διάγραμμα 2).

Η ταχύτητα καθιζήσεως στο νερό ενός φυσικού φερτού σωματιδίου με πυκνότητα $\rho_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$ δίνεται άπευθείας από τό διάγραμμα 2 σάν συνάρτηση της φαινομένης διαμέτρου d_a (διάμετρος κοσκίνου), της θερμοκρασίας T και του συντελεστή σχήματος sf . Η θερμοκρασία του νερού ύποκαθιστά τίς μεταβλητές ρ και ν .

Γραφική συσχέτιση Toffaleti (1969). (Βλέπε διάγραμμα 1). Τό διάγραμμα είναι παρόμοιο μέ τό παραπάνω αλλά ίσχύει μόνο για $sf=0,9$ (και $\rho_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$).

2.6 Κοκκομετρική διαβάθμιση φερτών

Η στατιστική κατανομή της φαινομένης διαμέτρου d_a ενός φυσικού δείγματος φερτών λέγεται συνήθως κοκκομετρική καμπύλη. Συνήθως χαράσσεται σέ ήμιλογαριθμικό χαρτί ή σέ χαρτί μέ λογαριθμικό

Άξονα για την d_a και άξονα κανονικής κατανομής για την πιθανότητα $P(d_a < d_a^*)$. Οι κυριότερες παράμετροι της στατιστικής κατανομής είναι:

- Διάμεσος (d_{50}). Η διάμετρος για την οποία τό 50% του υλικού (κατά βάρος) είναι λεπτότερο.
 - Γεωμετρικός μέσος (d_g). Στην πράξη η τιμή της d_g προκύπτει γραφικά από την κοκκομετρική καμπύλη του υλικού σχεδιασμένη σε χαρτί λογαριθμοκανονικό, σαν η τομή της ευθείας $P=50\%$ και της ευθείας που ενώνει τα σημεία 15,9% και 84,1%, ή $d_g = \sqrt{d_{84,1} d_{15,9}}$, όπου $d_{84,1}$ και $d_{15,9}$ οι διάμετροι για τις οποίες τό 84,1% και 15,9% του υλικού, αντίστοιχα είναι λεπτότερο.
 - Γεωμετρική τυπική απόκλιση: $\sigma_g = \sqrt{d_{84,1}/d_{15,9}}$
 - Άσυμμετρία: $\log(d_g/d_{50})/\log\sigma_g$
 - Κύρτωση: $\log\sqrt{(d_{16} d_{95})/(d_{84} d_5)}/\log\sigma_g$, όπου τα d_5 και d_{95} ορίζονται με αντίστοιχο τρόπο.
- Ακόμα χρησιμοποιούνται συχνά στά προβλήματα μεταφοράς φερτών και οι τιμές d_{65} και d_{35} της κοκκομετρικής καμπύλης.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Τά φερτά υλικά της κοίτης σε μία θέση ενός ποταμού έχουν την ακόλουθη κατά βάρος σύσταση, σύμφωνα με την κατάταξη της American Geophysical Union.

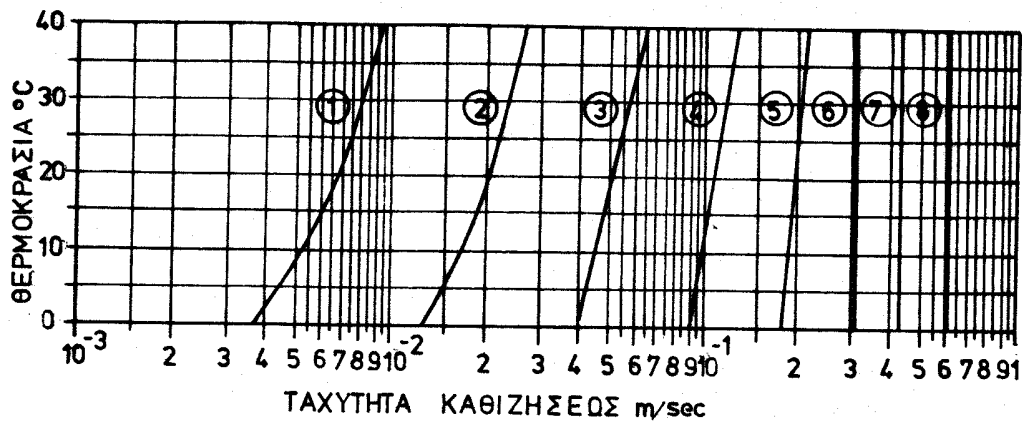
Μέσα χαλίκια	1,8%
Λεπτά χαλίκια	20,2%
Πολύ λεπτά χαλίκια	40,0%
Πολύ χοντρή άμμος	22,0%
Χοντρή άμμος	11,0%
Μέση άμμος	3,9%
Λεπτή άμμος	0,8%
Πολύ λεπτή άμμος	0,2%
Πιο λεπτόκοκκα υλικά	0,1%

Τά φερτά έχουν χαρακτηριστικά $\rho_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$ και $sf = 0,9$.

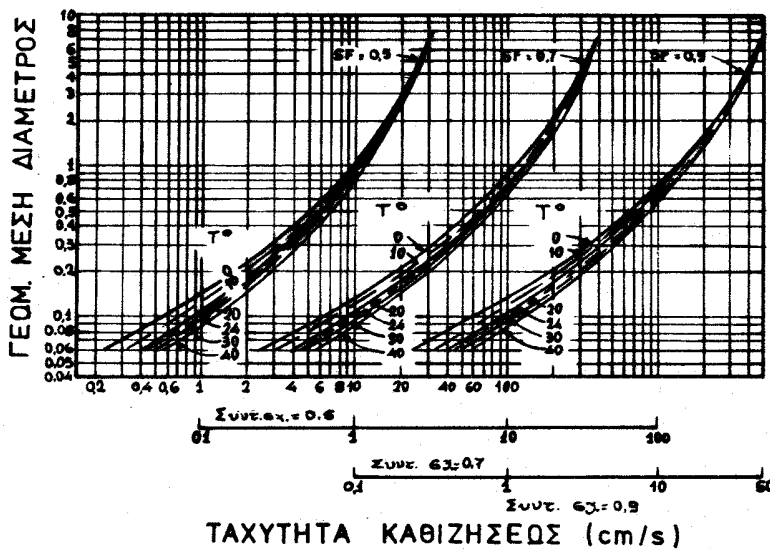
Ζητούνται:

1. Ἡ σχεδίαση τῆς κοκκομετρικῆς καμπύλης τῶν φερτῶν σέ ἡμιλογαριθμικό και λογαριθμικό χαρτί.
2. Ὁ προσδιορισμός τῶν χαρακτηριστικῶν παραμέτρων τῆς κοκκομετρικῆς καμπύλης.
3. Ὁ ὑπολογισμός τῆς ταχύτητας καθιζήσεως τῶν κλάσεων:
α) πολύ λεπτῆς ἄμμου, β) χοντρῆς ἄμμου και γ) μέσων χαλικιῶν μέ τις τέσσερις πιό πάνω μεθόδους. Ἡ θερμοκρασία τοῦ νεροῦ θα θεωρηθεῖ $T=10^{\circ}\text{C}$. Γιά κάθε κλάση ὁ ὑπολογισμός θά ἀφορᾷ τήν γεωμετρικά μέση διάμετρο τῆς κλάσεως.
4. Ὁ ὑπολογισμός και ἡ σχεδίαση τῆς στατιστικῆς κατανομῆς ταχύτητας καθιζήσεως τῶν φερτῶν. Ὁ ὑπολογισμός θά γίνει μέ τή μέθοδο Toffaletti.

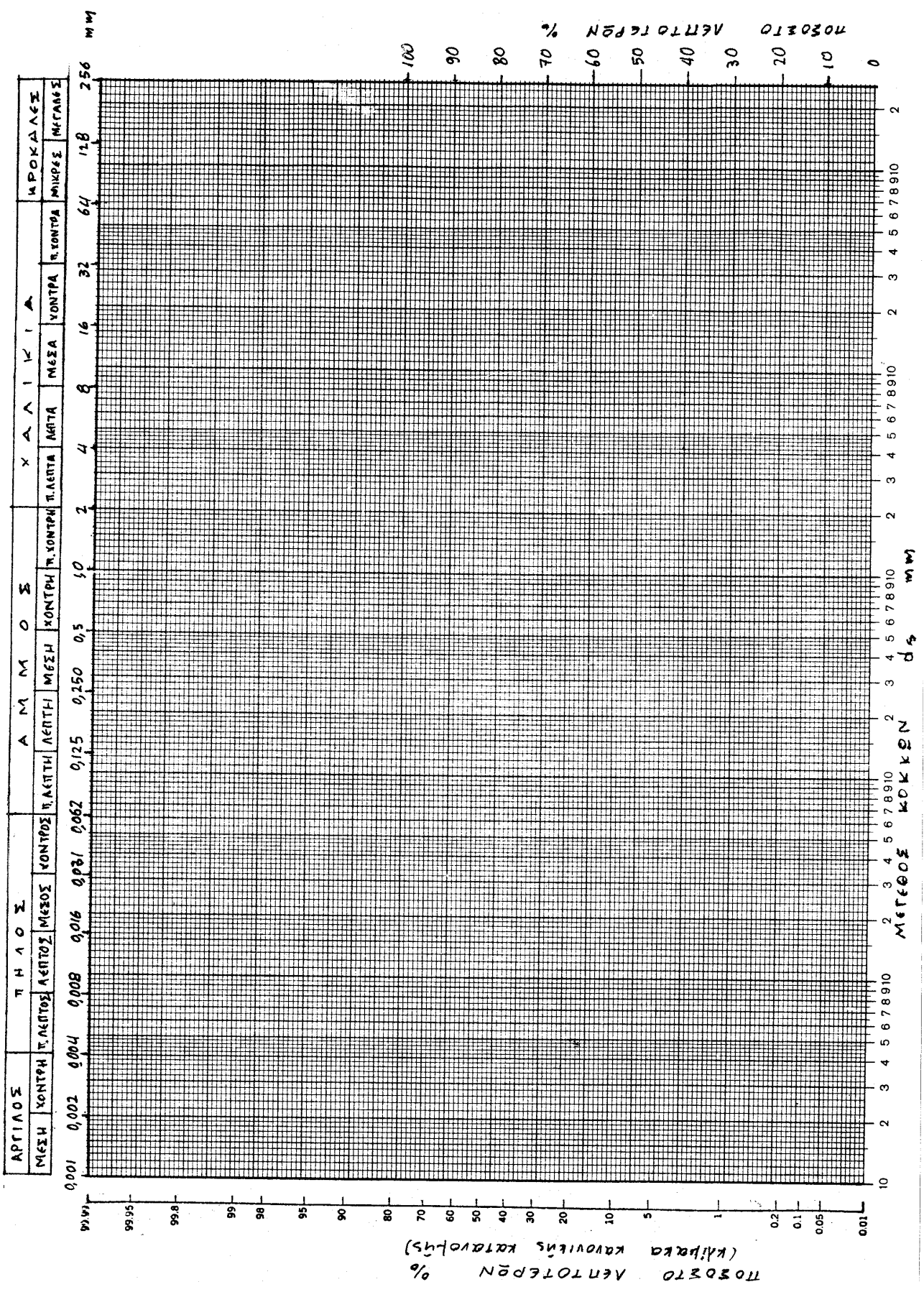
1	ΠΟΛΥ	ΛΕΠΤΗ	ΑΜΜΟΣ	0,062 - 0,125 mm.	$d_g = 0,088$ mm
2		ΛΕΠΤΗ	ΑΜΜΟΣ	0,125 - 0,250 mm	$d_g = 0,177$ mm
3		ΜΕΣΗ	ΑΜΜΟΣ	0,250 - 0,500 mm	$d_g = 0,354$ mm
4		ΧΟΝΤΡΗ	ΑΜΜΟΣ	0,500 - 1,000 mm	$d_g = 0,707$ mm
5	ΠΟΛΥ	ΧΟΝΤΡΗ	ΑΜΜΟΣ	1,000 - 2,000 mm	$d_g = 1,414$ mm
6	ΠΟΛΥ	ΛΕΠΤΟ	ΧΑΛΙΚΙ	2,000 - 4,000 mm	$d_g = 2,828$ mm
7		ΛΕΠΤΟ	ΧΑΛΙΚΙ	4,000 - 8,000 mm	$d_g = 5,657$ mm
8		ΜΕΣΟ	ΧΑΛΙΚΙ	8,000 - 16,000 mm	$d_g = 11,314$ mm



Ταχύτητα καθίζησης θερμών σάν συνάρτηση της θερμοκρασίας και της κοκκομετρικής κλάσεως κατά Toftaleti ($\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$, $S_f = 0,9$)



Ταχύτητα καθίζησης σάν συνάρτηση της θερμ. μέσης διαμέτρου της σφαιροκρασίας και του συντελεστή σήματος ($\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$).



ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΕΝΤΟΤΕΡΩΝ %
(κλίμακα κανονικής κατανομής)

ΜΕΤΡΟΣ d_s ΜΜ

ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΕΝΤΟΤΕΡΩΝ %

Ε.Μ.Π. - ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΜΑΘΗΜΑ: ΑΠΟΡΡΟΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΕΙΣ ΥΔΑΤΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ

ΕΠΙΣΤ. ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

4-10-1982

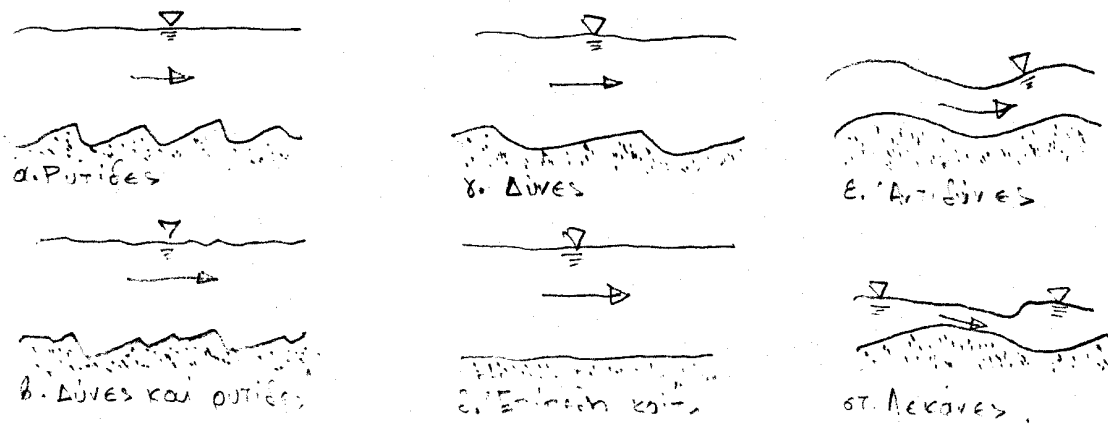
ΕΝΟΤΗΤΑ 2: ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΥΔΑΤΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ
ΣΧΕΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ-ΠΑΡΟΧΗΣ ΓΙΑ ΜΟΝΙΜΗ
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΡΟΗ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1. Σχηματισμοί κοίτης

- Ρυτίδες (ripples): Σχηματίζονται σε ροή με μικρή ταχύτητα. Μήκος κύματος 10-30 cm, ύψος μικρότερο από 3cm. Κινούνται προς τὰ κατάντη με ταχύτητες πολύ μικρές σε σχέση με την ταχύτητα της ροής. Γενικά δέν παρατηρούνται όταν τὰ φερτά είναι χοντρότερα από 0,6 mm.
- Δύνες (dunes): Σχηματίζονται σε πίο μεγάλες ταχύτητες. Μήκος και ύψος κύματος μεγαλύτερο από τίσ ρυτίδες. Μετακινούνται προς τὰ κατάντη. Πολλές φορές συνοδεύονται από ρυτίδες.
- Μεταβατική φάση (transition): Σε πίο μεγάλες ταχύτητες έμφανίζεται κατά περιοχές ο πυθμένος επίπεδος, ενώ σε άλλες περιοχές έμφανίζονται έτερογενείς διατάξεις από ρυτίδες και δύνες.
- Επίπεδη κοίτη (Flat bed). Είναι δυνατό σε άρκετά μεγάλες ταχύτητες, νά εξαφανιστεί κάθε σχηματισμός και ο πυθμένος νά επίπεδοποιηθεί.
- Αντιδύνες (antidunes): Σχηματίζονται σε πίο μεγάλες ακόμα ταχύτητες. Μήκος κύματος = $2\pi V^2/g$. Σχήμα περίπου ήμιτονοειδές. Συνοδεύονται από κύματα στην έλεύθερη επιφάνεια του νερού. Μπορεί νά μετακινούνται προς τὰ άνάντη ή κατάντη ή και νά παραμένουν στάσιμα.

- Λεκάνες (pools): Σέ πολύ μεγάλες ταχύτητες μπορεί νά σχηματίζονται περιοχές έντονης υποσκαφής ακολουθούμενες από περιοχές μέ όγκώδεις αποθέσεις. Ή ελεύθερη έπιφάνεια παρουσιάζει έντονα μεταβαλλόμενη εικόνα.



Σχήμα 1. Σχηματισμοί κοίτης.

2. Βασική παραδοχή τής υδραυλικής τών φυσικών ύδατορρευμάτων

Ή συνολική τραχύτητα κοίτης θεωρείται ότι μπορεί νά διακριθεί σε:

- Τραχύτητα φερτών υλικών ($K_s \cong d_{65}$)
- Τραχύτητα σχηματισμών κοίτης.

3. Άνάλυση Einstein-Barbarossa (1952)

Διατομή : $A = A' + A''$

Ύδρο. ακτίνα: $r = r' + r''$

A', r' : τμήμα μέ συρτική δύναμη προερχόμενη από τήν τραχύτητα φερτών

A'', r'' : τμήμα μέ συρτική δύναμη προερχόμενη από τήν τραχύτητα σχηματισμών.

- Πρώτο τμήμα

$$\frac{V}{U'_{*}} = 7,66 \left(\frac{r'}{d_{65}} \right)^{1/6} \quad \text{γιά} \quad \frac{d_{65}}{\delta} = \frac{d_{65} U'_{*}}{11,6 \nu} \geq 5$$

$$\frac{V}{U'_{*}} = \frac{1}{K} \ln \left(12,2 \frac{r'}{d_{65}} \times \right) \quad \text{γιά} \quad \frac{d_{65}}{\delta} < 5$$

} (1)

όπου: V = μέση ταχύτητα
 U'_{*} = $\sqrt{gr'S}$ = ταχύτητα τριβής όφειλόμενη στην τραχύτητα φερτών
 K = 0,4 = σταθερά von Karman
 S = κλίση πυθμένα
 ν = κινηματική συνεκτικότητα νερού
 δ = $11,6\nu/U'_{*}$ = πάχος στρωτής όριακής ύποστιβάδας
 x = διορθωτικός συντελεστής, πού παίρνει υπόψη την επίδραση τής συνεκτικότητας στην κατανομή ταχυτήτων, συνάρτηση του d_{65}/δ πού δίνεται στο σχήμα 1. Στην πλήρως τραχεία περιοχή ($d_{65}/\delta > 10$) είναι $x = 1$.

- Δεύτερο τμήμα

$$\frac{V}{U''_{*}} = f(\Psi') \quad (\text{πειραματική σχέση}) \quad (2)$$

$$\Psi' = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d_{35}}{r'S} \quad (3)$$

όπου $U''_{*} = \sqrt{gr''S}$ = ταχύτητα τριβής όφειλόμενη στην τραχύτητα σχηματισμών
 ρ, ρ_s = πυκνότητες ρευστού και φερτών
 $f(\Psi')$ = συνάρτηση πού δίνεται στο σχήμα 2.

4. Ανάλυση Toffaleti (1969)

Αφορᾶ μόνο τό τμήμα τό αντίστοιχο μέ την τραχύτητα φερτών

$$\frac{V}{U'_{*}} = \left(\frac{V}{\sqrt{gd_{65}S}}, \frac{V^3}{g\nu S} \right) \quad (4)$$

Τά σύμβολα έχουν τήν ίδια σημασία, όπως στην ανάλυση Einstein. Η συνάρτηση f δίνεται στο σχήμα 3.

5. Ανάλυση Engelund (1966)

Κλίση άπωλειών: $S = S' + S''$
Συρτική τάση (αδιάστατ.) $\tau_* = \tau_*' + \tau_*''$ (5)

όπου $\tau_* = \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d_s} = \frac{\rho g y S}{g(\rho_s - \rho)d_s}$

$$\tau_*' = \frac{\rho y S'}{g(\rho_s - \rho)d_s} \quad (6)$$

$$\tau_*'' = \frac{FF^2}{8} \frac{\rho a h^2}{(\rho_s - \rho)d_s L} \quad (7)$$

y = βάθος ροής

d_s = χαρακτηριστική διάμετρος φερτών (d_g ή d_{50})

FF = αριθμός Froude

h, L = ύψος και μήκος κύματος των σχηματισμών κοίτης

α = $\alpha(L, h, y)$ = συντελεστής γεωμετρίας

Ο Engelund στηριζόμενος σε θεωρήσεις υδραυλικής ομοιότητας και σε πειράματα συσχέτισε το τ_* με τό τ_*' . Η συσχέτιση δίνεται γραφικά στο σχήμα 4.

Γιά να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα παραπάνω στη συνέχεια εισήγαγε την ύδρ. άκτίνα r' και έδωσε νέα έκφραση του τ_*'

$$\tau_*' = \frac{\rho r' S}{(\rho_s - \rho)d_s} \quad (8)$$

όπου το r' δίνεται από τή σχέση:

$$\frac{V}{\sqrt{gr'S}} = 6 + 2,5 \ln \frac{r'}{2d_{65}} \quad (9)$$

Εφαρμογή

Νά υπολογιστεϊ ή παροχή με τις μεθόδους Einstein-Barbarossa και Engelund σε ύδατόρρευμα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

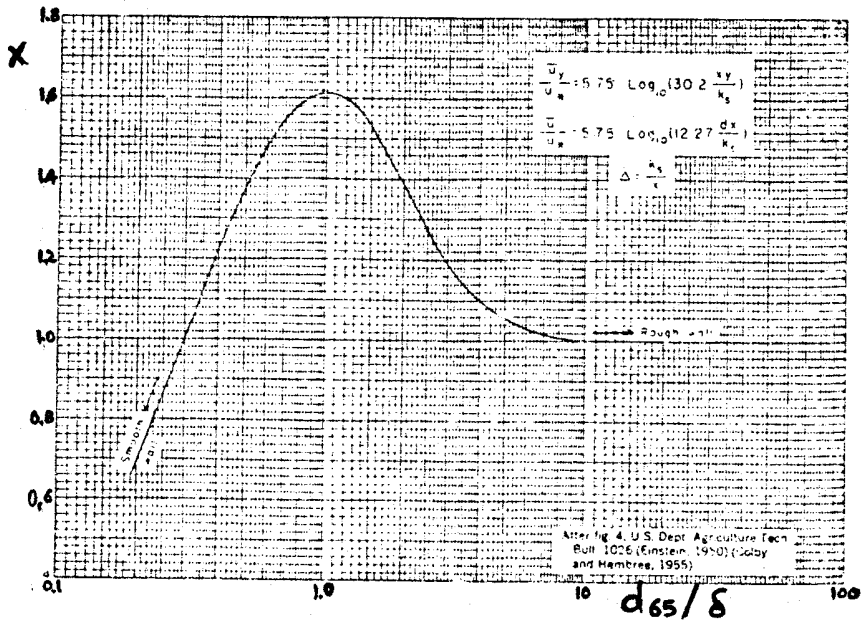
Μέση κλίση : $S = 0,25\%$, ροή ομοιόμορφη

Διατομή παραβολική: πλάτος $B=30,0m$, βάθος $y=3,0m$

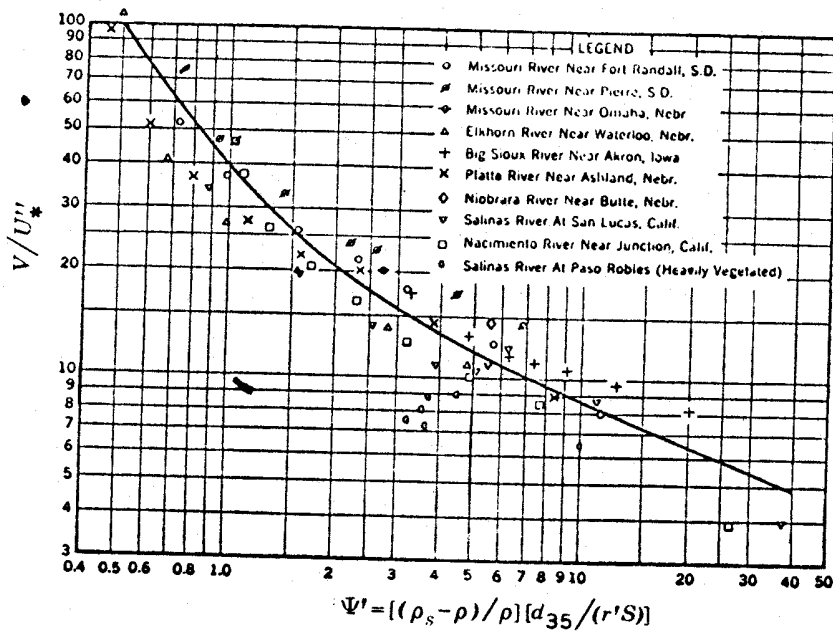
Θερμοκρασία νερού : $T = 10^\circ C$

Φερότα από χαλαζιακή άμμο με χαρακτηριστικά $\rho_s = 2,65 \text{ Mg/m}^3$, $d_{35} = 0,15 \text{ mm}$
 $d_{50} \cong d_g = 0,2 \text{ mm}$, $d_{65} = 0,25 \text{ mm}$.

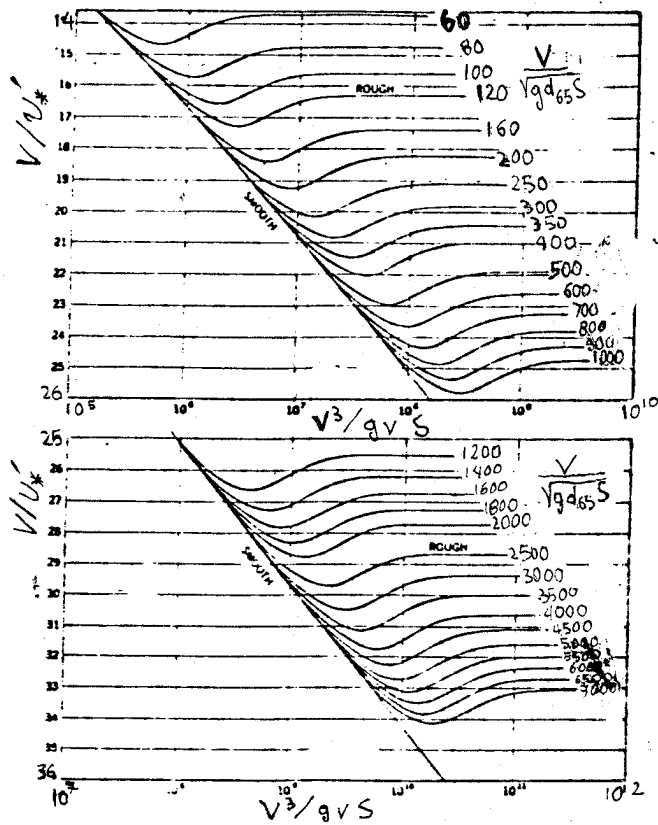
Επίσης νά υπολογιστεῖ τό βάθος ροῆς γιά παροχή $Q = 100 \text{ m}^3/\text{sec}$. Καί
στίς δύο περιπτώσεις νά υπολογιστεῖ ἡ ὕδρ. ἀκτίνα r' κατά Toffaleti
καί νά συγκριθεῖ μέ τήν ἀντίστοιχη κατά Einstein.



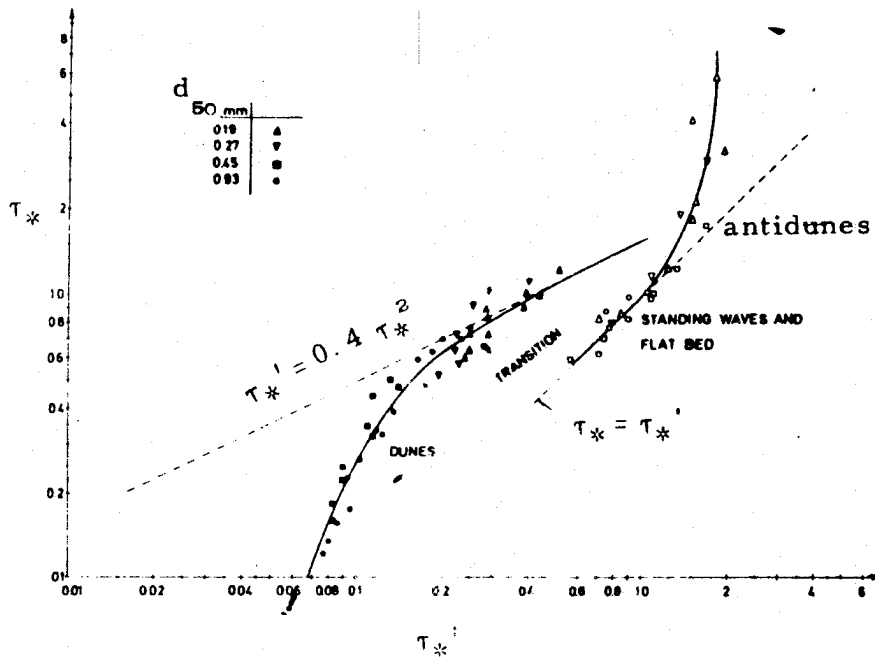
Σχήμα 1. Διορθωτικός συντελεστής X στην εξέλιξη κατανομής ταχυτήτων στη μέθοδο Einstein-Barbarossa.



Σχήμα 2. Διάγραμμα Einstein-Barbarossa για την ταχύτητα τριβής λόγω σχηματισμών κοίτης.



Σχήμα 3. Διάγραμμα Toffaleti για την ταχύτητα τριβής λόγω φερτών.



Σχήμα 4. Συσχέτιση αδιαστατοποιημένων συρ-
τικῶν τάσεων τ^* , καί τ'^* κατά
Engelund.

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΜΑΘΗΜΑ: ΑΠΟΡΡΟΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΕΙΣ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΩΝ

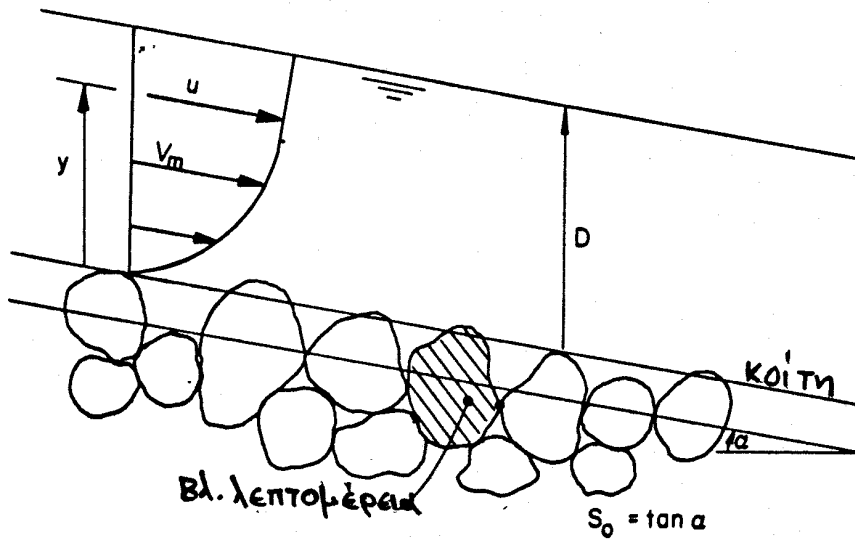
ΕΠΙΣΤ. ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

11-10-1982

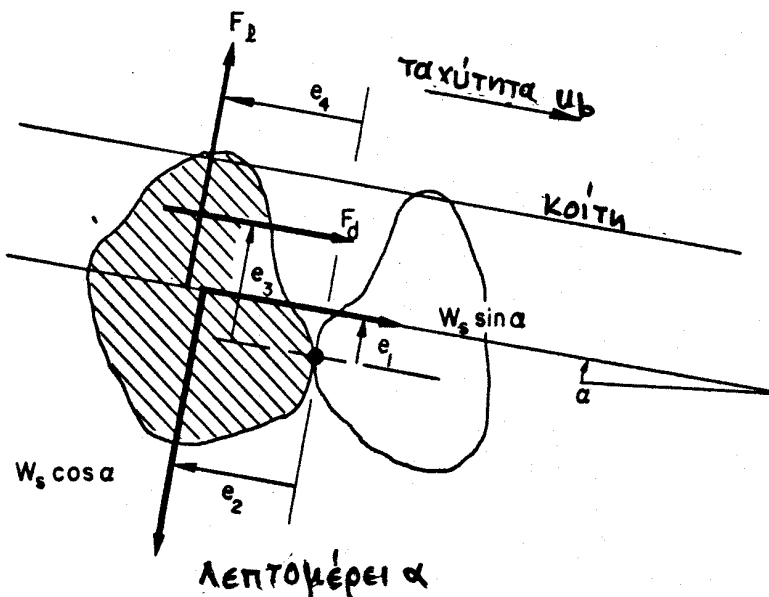
ΕΝΟΤΗΤΑ 3: ΞΕΚΙΝΗΜΑ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗΣ
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΟΙΤΗΣ ΚΑΙ ΠΡΑΝΩΝ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1. Ανάλυση ευστάθειας μεμονωμένου κόκκου



Σχήμα 1



Ανάλυση δυνάμεων

1) Βάρος υπό άνωση

$$W_s = (\gamma_s - \gamma) V = g(\rho_s - \rho) \alpha_1 d_s^3$$

2) Συρτική δύναμη

$$F_d = \frac{1}{2} \rho c_d A_d u_b^2 = \frac{1}{2} \rho c_d \alpha_2 d_s^2 u_b^2$$

3) Ύδροδυναμική άνωση

$$F_l = \frac{1}{2} \rho c_l A_l u_b^2 = \frac{1}{2} \rho c_l \alpha_3 d_s^2 u_b^2$$

Συντελεστής ασφαλείας έναντι μετακινήσεως μεμονωμένου κόκκου.

$$S = \frac{e_2 W_s \cos \alpha}{e_1 W_s \sin \alpha + e_3 F_d + e_4 F_l}$$

Συνθήκη μετακίνησης

$$S = 1 \quad \eta \quad e_3 F_d + e_4 F_l = W_s (e_2 \cos \alpha - e_1 \sin \alpha)$$

Κρίσιμη συρτική τάση

Αν άγνοηθεῖ ἡ ὑδροδυναμική άνωση καί τεθεῖ:

$e_2/e_1 = \tan \varphi$, όπου φ ἡ γωνία τριβῆς τοῦ ὑλικοῦ, καί ἡ κρίσιμη συρτική τάση θεωρηθεῖ $\tau_{mc} = N_s F_d$, όπου N_s ὁ ἀριθμὸς κόκκων ἀνά μονάδα ἐπιφανείας ($N_s = \kappa/d_s^2$), τότε με βάση τις πιο πάνω σχέσεις μετά από πράξεις προκύπτει:

$$\tau_{mc} = A g(\rho_s - \rho) d_s (\tan \varphi - \tan \alpha), \quad \text{ὅπου} \quad A = A(e_1, e_3, \kappa)$$

2. Πειραματική ανάλυση τοῦ Shields (1936) γιὰ τὴν κρίσιμη συρτική τάση

$$\frac{\tau_{mc}}{g(\rho_s - \rho) d_s} = f_c (Re^*), \quad Re^* = \frac{u^* d_s}{\nu}$$

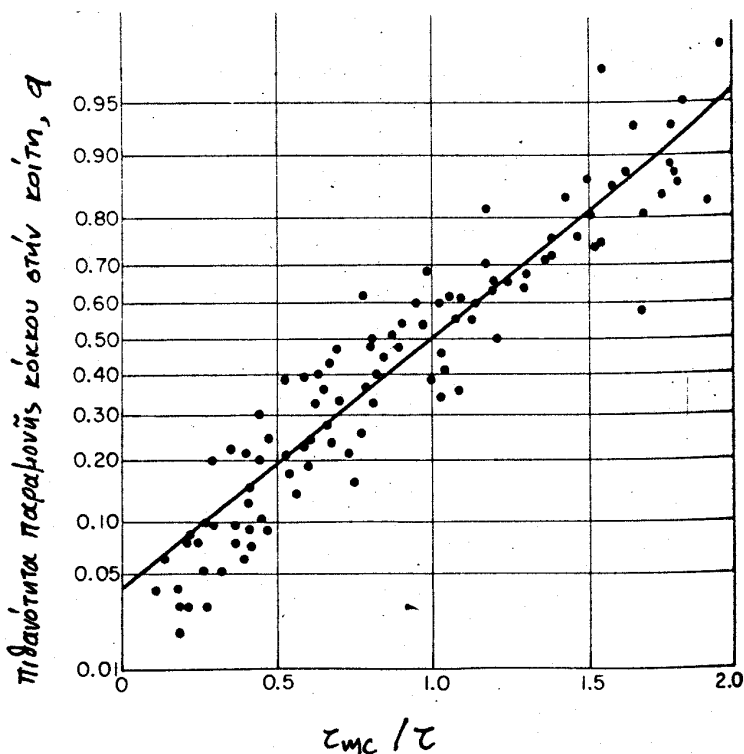
3. Στατιστική φύση της μετακινήσεως των κόκκων

Ἡ φύση τοῦ φαινομένου τῆς μετακινήσεως τῶν φερτῶν εἶναι έντονα στατιστική, ὀφειλόμενη (1) στήν έντονα στοχαστική δομή τῆς τύρβης, ἄρα καί τῶν ὑδροδυναμικῶν δυνάμεων καί (2) στήν τυχαία θέση καί προσανατολισμό τῶν κόκκων. Γιά το λόγο αὐτό, ἔχει εἰσαχθεῖ γιά τή μελέτη τοῦ φαινομένου ἡ έννοια τῆς πιθανότητας μετακίνησης ἑνός κόκκου. Ἡ πειραματική ἔρευνα ἔχει ἀποδείξει ὅτι ἡ πιθανότητα αὐτή ἐπηρεάζεται κύρια ἀπό τήν παράμετρο Shields καί πολύ ἑλαφρά ἀπό τόν ἀριθμό Reynolds (Re^*). Μικροί κόκκοι, με μικρή ἀντίστοιχη τιμή τῆς τ_{mc} ἔχουν μικρή πιθανότητα νά παραμείνουν στόν πυθμένα.

Ἡ πειραματική ἔρευνα τοῦ Gessler (1965) ἀπέδειξε ὅτι ἡ πιθανότητα παραμονῆς q ἑνός κόκκου στήν κοίτη, μπορεῖ νά περιγραφεῖ ἀπό τή σχέση:

$$q = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(\tau_c/\tau)-1} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx$$

πού στήν οὐσία εἶναι τό ὀλοκλήρωμα τῆς κανονικῆς κατανομῆς. Ἡ τυπική ἀπόκλιση ἔχει προκύψει πειραματικά: $\sigma = 0,57$. Γραφική παράσταση τῆς σχέσης δίνεται στό σχῆμα 2. Ἀπό τό διάγραμμα προκύπτει γιά $\tau = \tau_{mc}$ (ἢ $\tau_{mc}/\tau=1$) ἡ τιμή τῆς πιθανότητας ἴση με 0.5, πράγμα πού δέν εἶναι ἀντίθετο μέ τή λογική τῆς θεωρίας τοῦ Shields, δεδομένου ὅτι τό διάγραμμα τοῦ Shields εἶναι μία μέση καμπύλη.



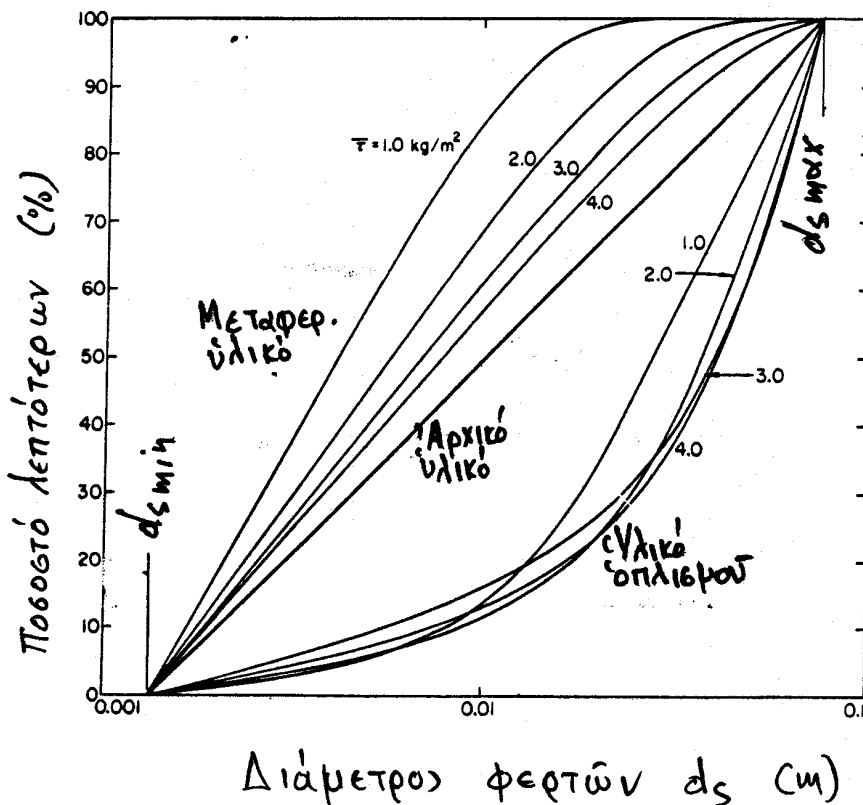
Σχῆμα 2

4. Επίδραση της άνομοιόμορφης κοκκομετρίας

Στά πραγματικά προβλήματα ή κοκκομετρία των φερτών είναι πάντα άνομοιόμορφη. Έτσι για μία δοσμένη παροχή υπάρχουν πάντα κόκκοι με μεγάλη πιθανότητα να μετακινηθούν (μικρής διαμέτρου) καθώς επίσης και κόκκοι που δεν μετακινούνται σχεδόν καθόλου. Οι μη μετακινούμενοι κόκκοι σχηματίζουν μετά από καιρό ένα στρώμα φυσικού όπλισμού στην κοίτη (armor coat). Αν $p_o(d_s)$ είναι η αρχική κοκκομετρική κατανομή των υλικών της κοίτης, ή κατανομή στο στρώμα όπλισμού $p_a(d_s)$ καθώς και η κατανομή των υλικών που μετακινούνται $p_e(d_s)$, είναι διαφορετικές, και δίνονται από τις σχέσεις:

$$p_a(d_s) = \frac{\int_{d_{s \min}}^{d_s} q(\kappa) p_o(\kappa) d\kappa}{\int_{d_{s \min}}^{d_{s \max}} q(\kappa) p_o(\kappa) d\kappa}, \quad p_e(d_s) = \frac{\int_{d_{s \min}}^{d_s} (1-q(\kappa)) p_o(\kappa) d\kappa}{\int_{d_{s \min}}^{d_{s \max}} (1-q(\kappa)) p_o(\kappa) d\kappa}$$

Σάν παράδειγμα των πιο πάνω δίνονται οι κατανομές του σχήματος 3.



Σχήμα 3

5. Ευστάθεια κοίτης και πρανών σύμφωνα με νεότερες εξελίξεις των μεθόδων επιτρεπόμενης ταχύτητας
(Stevens and Simons, 1971)

Σύμφωνα με τή μέθοδο Stevens και Simons, η ευστάθεια τής κοίτης και πρανών, ενός καναλιού ή φυσικού ύδατορρεύματος, μπορεί να περιγραφεί από ένα συντελεστή ασφαλείας S (βλ. παρ. 1), πού εκφράζεται σαν συνάρτηση τής μέσης ταχύτητας τής διατομής. Οι παραδοχές πού στηρίζεται ή έν λόγω μέθοδος είναι οι ακόλουθες:

- Στήν έκφραση τής ισοροπίας τών δυνάμεων στόν μεμονωμένο κόκκο λαμβάνεται υπόψη και ή υδροδυναμική άνωση, και γίνεται δεκτό ότι $F_l/F_d = c_l/c_d$.
- Χρησιμοποιεΐται ως έξιΐωση πού περιγράφει τήν έναρξη τής κινήσεως ή: $\tau_c / \{(\gamma_s - \gamma) d_s\} = 0.047$ (πρβλ. έξιΐωση στερεοπαροχής Meyer-Peter).
- Χρησιμοποιεΐται ή έξιΐωση του Manning για τήν έκφραση τής ταχύτητας.
- Η μέθοδος αναφέρεται σε ύλικά με άνομοιόμορφη κοκκομετρία

Οι τελικές έκφράσεις για το συντελεστή ασφαλείας είναι:

Για τόν πυθμένα:

$$S = \frac{\cos\alpha \tan\phi}{\eta \tan\phi + \sin\alpha}$$

$$\eta = \frac{0.4 V m^2}{(\gamma_s / \gamma - 1) g d_m} \left(\frac{d_{50}}{Y} \right)^{1/3}$$

Για τα πρανή

$$S' = \frac{\cos\theta \tan\phi}{\eta' \tan\phi + \sin\theta \cos\beta}$$

$$\eta' = \frac{1 + \cos\beta}{2} \eta$$

$$\delta = 90^\circ - \beta$$

$$\tan\beta = \frac{\eta \tan\phi}{2 \sin\theta}$$

Στά παραπάνω είναι:

α = γωνία κλίσης πυθμένα (ως προς την οριζόντια)

ϕ = γωνία φυσικοῦ πρανοῦς τοῦ ὑλικοῦ

θ = γωνία κλίσης πρανοῦς (ως προς την οριζόντια)

V_m = μέση ταχύτητα ροῆς

y = τοπικό βάθος ροῆς

$$d_m = \left[\frac{\sum_{i=1}^{10} d_i^3}{10} \right]^{1/3}$$

$$d_1 = (d_0 + d_{10}) / 2$$

$$d_2 = (d_{10} + d_{20}) / 2$$

$$d_{10} = (d_{90} + d_{100}) / 2$$

6. Κριτήρια σχεδιασμοῦ σταθερῆς κοίτης γιά ἀνομοιόμορφη κοκκομετρία φερτῶν

6.1 Σύμφωνα μέ τή μέθοδο τῆς κρίσιμης συρτικῆς τάσης

$$- \tau_{\sigma\chi\epsilon\delta} = 0.050 (\gamma_s - \gamma) d_{75}$$

$$- \tau_{\sigma\chi\epsilon\delta} = 0.024 (\gamma_s - \gamma) d_{75}$$

$$- \bar{q} = 0.650, \quad \delta\text{που}$$

$$\bar{q} = \frac{\int_{d_{smin}}^{d_{smax}} q^2(\kappa) \rho_o(\kappa) d\kappa}{\int_{d_{smin}}^{d_{smax}} q(\kappa) \rho_o(\kappa) d\kappa}$$

6.2 Σύμφωνα μέ τή μέθοδο τῆς ἐπιτρεπόμενης ταχύτητας

$$- S_{\sigma\chi\epsilon\delta} > 1 \quad (\text{π.χ. } 1.5)$$

ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Νά σχεδιασθεῖ τραπεζοειδῆς σταθερή κοίτη ὑδατορροεύματος μέ τά ἀκόλουθα δεδομένα:

Κλίση πυθμένα 1 °/∞

Παροχή 20 m³/sec

Κοικομετρία ύλικών κοίτης: Χαλίκια πολύ λεπτά, λεπτά, μέσα και χοντρά, σε ίσες περίπου ποσότητες ανά κοικομετρική κλάση. Μορφή χαλικιών: λίγο στρογγυλεμένα.

Σημείωση: Ο σχεδιασμός κοίτης και πρανών να γίνει με τα κριτήρια των d_{75} και d_{95} και στη συνέχεια να εφαρμοσθούν για σύγκριση τα υπόλοιπα κριτήρια. Ο συντελεστής ασφαλείας σύμφωνα με τη μέθοδο Stevens και Simons για τα πρανή θα υπολογιστεί στο μέσο των πρανών.

Ε.Μ.Π.

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΜΑΘΗΜΑ: ΑΠΟΡΡΟΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΕΙΣ ΥΔΑΤΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ

ΕΠΙΣΤ. ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

22.11.1982.

ΕΝΟΤΗΤΑ 4: ΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ EINSTEIN, TOFFALETI ΚΑΙ COLBY
ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗΣ

(Σημειώσεις-βοήθημα για τή γενική άσκηση υπολογισμού στερεοπαροχών)

2.2 Όμοιομα Einstein

2.2.1 Γενικά

Τό όμοιομα Einstein είναι τόμόνο πού στηρίζεται σέ συνολική θεωρητική ανάλυση όλων τών υδροδυναμικών φαινομένων πού σχετίζονται μέ τή μεταφορά φερτών σέ φυσικά ύδατορρεύματα. Είναι επίσης τό μόνο όμοιομα πού συμπεριλαμβάνει όλες τις παραμέτρους του φυσικού φαινομένου. Όλες οι μαθηματικές σχέσεις πού περιέχει στηρίζονται σέ θεωρητική ανάλυση, μέ βάση όρισμένες παραδοχές πού θά αναφερθούν παρακάτω, άρκετές όμως σταθερές τών σχέσεων έχουν υπολογιστεί πειραματικά μέ εργαστηριακή έρευνα. Τό όμοιομα προσαρμόζεται άριστα σέ εργαστηριακής κλίμακας κανάλια, σέ φυσικά ύδατορρεύματα όμως συχνά δίνει σοβαρές αποκλίσεις.

2.2.2 Ύδραυλική ανάλυση τής ροής σέ φυσικά ύδατορρεύματα σέ μόνιμη όμοιόμορφη δίαιτα.

Ή παρακάτω ανάλυση έγινε από τούς Einstein καί Barbarossa (1952) καί άφορά τήν παραγωγή τής σχέσεως στάθμης - παροχής για μόνιμη όμοιόμορφη ροή στην ύπό εξέταση διατομή ενός ύδατορρεύματος. Ή παραγωγή τής σχέσεως αύτης είναι τό πρώτο βήμα στη διαδικασία έφαρμογής του όμοιώματος Einstein.

Σύμφωνα μέ τήν έν λόγω ανάλυση ή έπιφάνεια A καί ή ύδραυλική άκτίνα r τής διατομής ενός ύδατορρεύματος μέ άλλουβιακή κοίτη, συνίστανται από δύο τμήματα πού μπορεί νά προστεθούν ήτοι:

$$A = A' + A''$$

$$r = r' + r''$$

όπου στό τμήμα τής διατομής μέ έπιφάνεια A' καί ύδραυλική άκτίνα r' ή συνιστώσα τής δυνάμεως βαρύτητας ή παράλληλη μέ τόν άξονα του ύδατορρεύματος έξισορροπείται από τήν συρτική δύναμη πού οφείλεται στην τραχύτητα τών φερτών, ένώ στό τμήμα μέ έπιφάνεια A'' καί ύδραυλική άκτίνα r'' ή έν λόγω συνιστώσα έξισορροπείται από τή

συρτική δύναμη που οφείλεται στους σχηματισμούς της κοίτης (δύ-
νες, αντιδύνες κλπ).

Για τó πρώτο τμήμα της διατομής οι έρευνήτες δέχτηκαν
μιά σχέση τύπου Manning - Strickler, καί μιά λογαριθμική, ήτοι:

$$\frac{V}{U_*'} = 7,66 \left(\frac{r'}{d_{65}} \right)^{1/6} \quad \text{για} \quad \frac{d_{65}}{\delta} = \frac{d_{65} U_*'}{11,6 V} \gg 5$$

$$\frac{V}{U_*'} = \frac{1}{K} \ln \left(12,2 \frac{r'}{d_{65}} x \right) \quad \text{για} \quad \frac{d_{65}}{\delta} < 5 \quad (2.2.2.a)$$

όπου: V = ή μέση ταχύτητα

$$U_*' = \sqrt{gr'S} = \text{ταχύτητα τριβής οφειλόμενη στην τραχύτητα φερτών}$$

$K = 0,4$ = σταθερά von Karman

d_{65} = ή διάμετρος για τήν οποία τό 65% τών φερτών
πυθμένα είναι λεπτότερα. θεωρείται ότι εκφρά-
ζει τήν ισοδύναμη τραχύτητα φερτών, δηλαδή

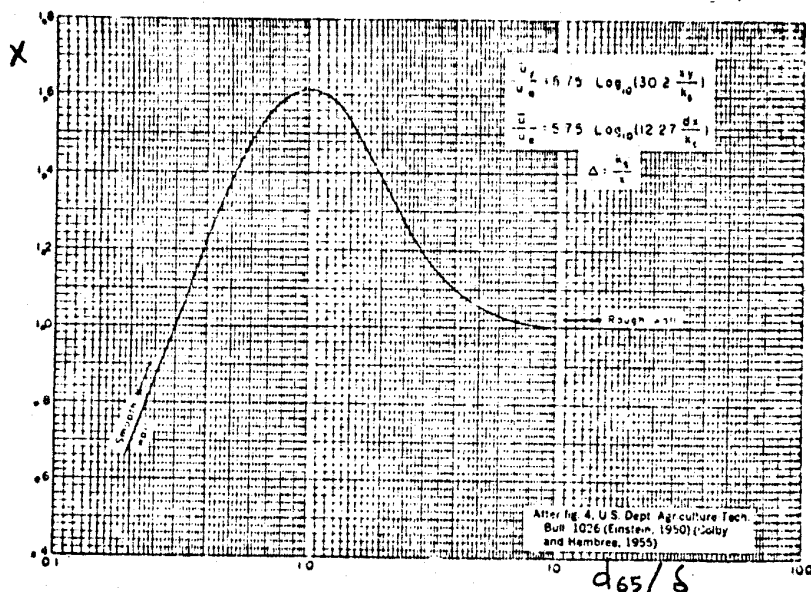
$$k_s = d_{65}$$

V = κινηματική συνεκτικότητα του νερού

$\delta = 11,6V / U_*'$ = πάχος στρωτής οριακής υποστιβάδας

x = διορθωτικός συντελεστής πού παίρνει υπόψη τήν επίδρα-
ση της συνεκτικότητας στην κατανομή ταχυτήτων, συνάρτη-
ση του d_{65}/δ . Η έκφραση της συναρτήσεως δίνεται στό
σχήμα 2.2.2.A. Στην πλήρως τραχεύα περιοχή, δηλαδή
για $d_{65}/\delta > 10$ είναι $x = 1,0$.

S = κλίση πυθμένα



Σχήμα 2.2.2.A. Διορθωτικός συντελεστής x στην 'εξίσωση
κατανομής ταχυτήτων

Γιά τό δεύτερο τμήμα τής διατομής, βρέθηκε πειραματικά από τούς ίδιους έρευνητές ότι

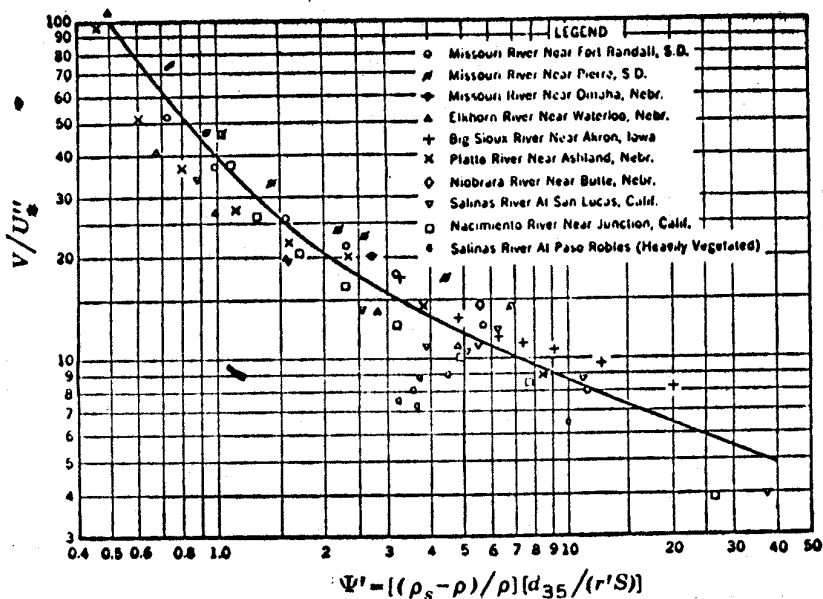
$$\frac{V}{U_*'} = f(\Psi') \quad (2.2.2.β)$$

$$\Psi' = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{d_{35}}{r' \cdot S} \quad (2.2.2.γ)$$

όπου $U_*' = \sqrt{gr'' \cdot S}$ = ταχύτητα τριβής όφειλόμενη στην τραχύτητα σχηματισμών κοίτης, d_{35} = ή διάμετρος για τήν όποία τό 35% τών φερτών κοίτης είναι λεπτότερα.

ρ_s, ρ = πυκνότητα φερτών και ρευστού αντίστοιχα.

Η έκφραση τής σχέσεως (2.2.2.β) έγινε μέ βάση μετρήσεις σέ ποταμούς τής Άμερικης και φαίνεται στό σχήμα (2.2.2.β).



Σχήμα 2.2.2.β Διάγραμμα Einstein-Barralossa (1952) για τήν ταχύτητα τριβής λόγω σχηματισμών κοίτης.

Τά παραπάνω ισχύουν για τήν περίπτωση πού σέ όλη τή βρεχόμενη περίμετρο τής διατομής συναντάμε φερτά. Αν υπάρχουν όχθες, μέ διαφορετική τραχύτητα, τά παραπάνω εφαρμόζονται μόνο για τό τμήμα τής διατομής A_B πού αντίστοιχει στά χαρακτηριστικά τής κοίτης.

Στήν περίπτωση αυτή, γίνεται ή θεώρηση ότι ή συνολική διατομή αποτελείται από δύο τμήματα A_B, A_W , στά όποία, ή συνιστώσα τής βαρύτητας ή παράλληλη μέ τόν άξονα έξισορροπείται,

από την συρτική τάση στην κοίτη και στις όχθες αντίστοιχα. 'Η ανάλυση στηρίζεται στις παρακάτω σχέσεις - υποθέσεις :

$$A = A_b + A_w \quad (2.2.2.δ)$$

$$\frac{V^2}{S} = \frac{8gA}{f \cdot p} = \frac{8gA_b}{f_b p_b} = \frac{8gA_w}{f_w p_w} \quad (2.2.2.ε)$$

όπου p = βρεχόμενη περίμετρος

f = συντελεστής τριβής

και b, w = δείκτες που αναφέρονται στην κοίτη και τις όχθες αντίστοιχα.

'Η σχέση (2.2.2.ε) οδηγεί στην

$$\frac{Re}{f} = \frac{Re_b}{f_b} = \frac{Re_w}{f_w} = \frac{V^3}{2gSv} \quad (2.2.2.ζ)$$

$$\text{όπου } Re = \frac{4rV}{\nu}, \quad Re_b = \frac{4r_b \cdot V}{\nu}, \quad Re_w = \frac{4r_w \cdot V}{\nu} \quad (2.2.2.η)$$

$$\text{και } r = \frac{A}{p}, \quad r_b = \frac{A_b}{p_b}, \quad r_w = \frac{A_w}{p_w} \quad (2.2.2.θ)$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να υπολογιστεί από δεδομένα ένας από τους δύο όρους Re/f ή Re_b/f_b της σχέσεως (2.2.2.ζ), όποτε είναι γνωστό το Re_w/f_w

Τό f_w μπορεί να υπολογιστεί από μία τροποποιημένη σχέση Colebrook :

$$f_w = \left[-2 \log \left(\frac{k_s / 4r_w}{3.7} + \frac{2.51}{(Re_w) \cdot f_w^{1.5}} \right) \right]^{-2} \quad (2.2.2.ι)$$

όπου k_s ή τραχύτητα των όχθων και $r_w \approx r \approx r_b$ για τις ανάγκες της εκτιμήσεως του f .

Μετά τον υπολογισμό του f_w υπολογίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής, με βάση τις σχέσεις (2.2.2δ), (2.2.2ε), (2.2.2θ).

'Η λεπτομερής ανάπτυξη της διαδικασίας τέτοιων υπολογισμών θά γίνει στην παράγραφο 2.2.4.

2.2.3. Ανάλυση των μηχανισμών μεταφοράς φερτών.

Τό πιο σοβαρό τμήμα της εργασίας του Einstein αφορά την ανάλυση του μηχανισμού μεταφοράς φερτών με σύρση. 'Η ανάλυση στηρίχτηκε στις παρακάτω υποθέσεις:

- Οι κόκκοι μετακινούνται στον πυθμένα με βήματα με μέσο μήκος L_1 , πού είναι ανάλογο της διαμέτρου d_a
- Η πιθανότητα p ώστε η δύναμη υδροδυναμικής ανώσεως ενός κόκκου να είναι μεγαλύτερη από το βυθισμένο βάρος του κόκκου, είναι συνάρτηση του λόγου των δύο δυνάμεων, ήτοι

$$p = f \left[\frac{g(\rho_s - \rho) d_a}{\tau_0} \right] \quad (2.2.3.a)$$

Η υδροδυναμική άνοση στην παραπάνω σχέση θεωρήθηκε ανάλογη του $\tau_0 d_a^2$, όπου τ_0 η συρτική τάση.

- Η ταχύτητα καθιζήσεως ενός κόκκου δίνεται από τον τύπο του Rubey

$$W = F_1 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_a} \quad (2.2.3.b)$$

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g d_a^3 \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}} = \sqrt{\frac{36v^2}{g d_a^3 \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}} \quad (2.2.3.γ)$$

όπου v η κινηματική συνεκτικότητα του νερού

- Σε περίπτωση πού τά φερτά δέν είναι ομογενή ως προς τις διαστάσεις, αν d_{si} είναι η διάμετρος μιας κλάσεως φερτών πού βρίσκεται σε αναλογία κατά βάρος p_i στο σύνολο των φερτών, η πραγματική στερεοπαροχή είναι ίση με τό γινόμενο p_i επί την ιδεατή στερεοπαροχή ομογενών φερτών, στά οποία η έν λόγω κλάση θά αποτελούσε τό 100% δηλαδή

$$(Q_{si})_{\text{πραγματική}} = p_i (Q_{si})_{\text{ιδεατή}}$$

Τά αποτελέσματα της ανάλυσεως αυτής αποτελούν την λεγόμενη στη διεθνή βιβλιογραφία Einstein Bed Load Function, πού αναλυτικά είναι:

$$1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{(-B_* \Psi_{*1}^{-1/n_0})}^{(+B_* \Psi_{*1}^{-1/n_0})} e^{-t^2} dt = \frac{A_* \Phi_{*1}}{1 + A_* \Phi_{*1}} \quad (2.2.3.δ)$$

όπου $A_* = 1/0,023 = 43,5$ $B_* = 1/7 = 0,143$, $n_0 = 1/2$
είναι παγκόσμιες σταθερές πού υπολογίστηκαν πειραματικά

$$\Psi_{*1} = E_1 \cdot \Psi \left(\frac{\log 10,6}{\log \frac{10,6xX}{d_{65}}} \right)^2 \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{d_{si}}{r_b^3 s} \quad (2.2.3.ε)$$

$$\phi_{*1} = \frac{1}{\rho_1} \frac{q_{sbi}}{g\rho_s} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{1}{gd_{si}^3}} \quad (2.2.3.ζ)$$

$$x = f\left(\frac{d_{65}}{\delta}\right) = f\left(\frac{d_{65} U_*'}{11,6V}\right) \quad \text{πού δίνεται στο διάγραμμα} \quad (2.2.2.A)$$

$$\begin{aligned} x &= 0,77 \frac{d_{65}}{x} \quad \text{όταν} \quad \frac{d_{65}}{x\delta} > 1,80 \\ x &= 1,398 \delta \quad \text{όταν} \quad \frac{d_{65}}{x\delta} < 1,80 \end{aligned} \quad (2.2.3.η)$$

ή όταν τά φερτά είναι ομογενή

$$Y = g\left(\frac{d_{65}}{\delta}\right) \quad \text{πού δίνεται στο διάγραμμα} \quad (2.2.3.A)$$

$$E_i = \sigma\left(\frac{d_{si}}{x}\right) \quad \text{πού δίνεται στο διάγραμμα} \quad (2.2.3.B)$$

ρ_1 = ποσοστό κατά βάρος της υπό εξέταση κλάσεως

d_{si} = ή μέση διάμετρος της κλάσεως (Συνήθως λαμβάνεται ο γεωμετρικός μέσος των ορίων της κλάσεως)

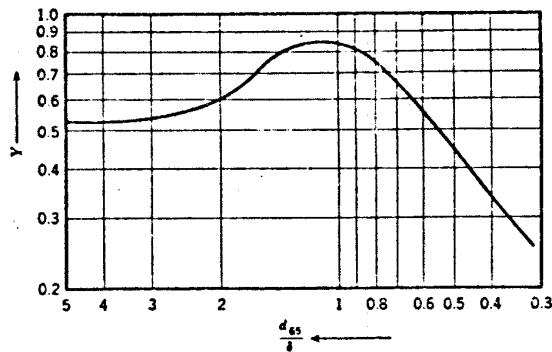
r'_b = υδραυλική ακτίνα όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 2.2.2

s = κλίση πυθμένα

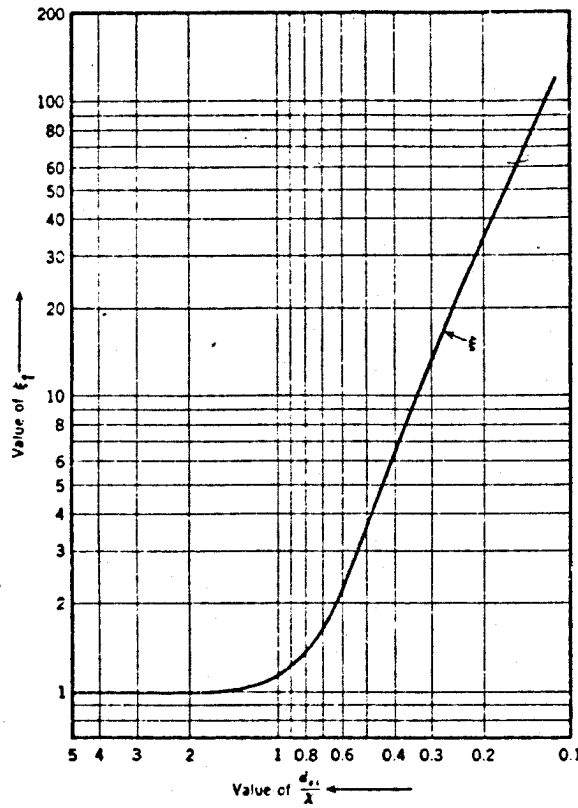
$$U_*' = \sqrt{gr'_b s} \quad = \text{ταχύτητα τριβής}$$

q_{sbi} = στερεοπαροχή με σύρση της έν λόγω κλάσεως ανά μέτρο πλάτους πυθμένα με μονάδες βάρος ανά χρόνο και μήκος.

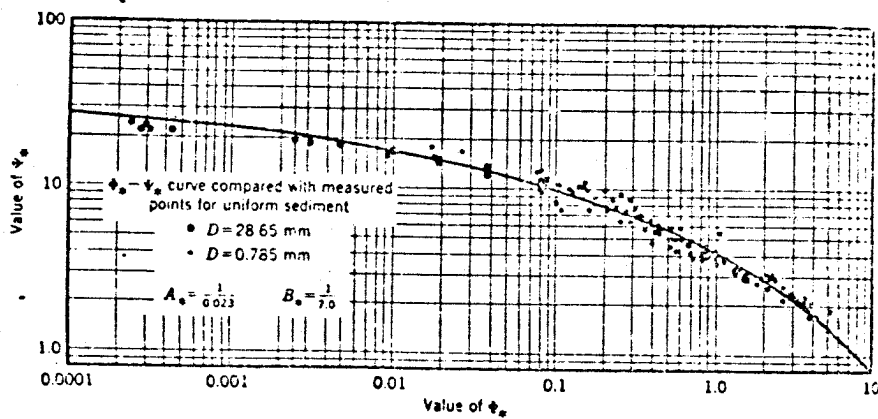
Τό ολοκλήρωμα της σχέσεως 2.2.3.δ δίνεται γραφικά στο διάγραμμα (2.2.3.γ).



Σχήμα 2.2.3.A: Συντελεστής Y της σχέσεως Einstein σαν συνάρτηση του d_{65}/δ



Σχήμα 2.2.3.Β Συντελεστής E ; της σχέσεως Einstein
 σαν συνάρτηση του $1/k$



Σχήμα 2.2.3.Γ Γραφική έκφραση της σχέσεως Einstein μεταξύ
 των άδιαστάτων παραμέτρων Φ^* και Ψ^*

Οι πρόσθετες θεωρήσεις για την παραγωγή της σχέσεως στερεοπαροχής με αιώρηση είναι:

- Η κατανομή της συγκεντρώσεως σε διδιάστατη ροή δίνεται από την εξίσωση του Rouse (1937) :

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{y-x_2}{x_2} \frac{a}{y-a} \right)^z \quad (2.2.3.θ)$$

όπου $z = \frac{W}{\beta K U_*} \quad (2.2.3.ι)$

y = βάθος ροής

x_2 = Κατακόρυφη συντεταγμένη

C = συγκέντρωση φερτών στη θέση x_2 (μονάδες μάζα ανά όγκο ή βάρος ανά όγκο)

C_a = συγκέντρωση φερτών στη θέση $x_2 = a$

W = ταχύτητα καθιζήσεως φερτών

β = αριθμητική σταθερά

$K = 0,4$ = παγκόσμια σταθερά του von Karman

U_* = ταχύτητα τριβής.

Ο Einstein θεώρησε τη σταθερά β της σχέσεως (2.2.3ι)

με 1 και στη θέση της U_* χρησιμοποίησε την $U_* = \sqrt{g r_b' S}$

- Η κατανομή ταχυτήτων σε διδιάστατη ροή δίνεται από λογαριθμική εξίσωση

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{K} \ln \left(30,2 \frac{x_2}{d_{65}} x \right) \quad (2.2.3.κ)$$

όπου U = ταχύτητα στη θέση x_2 και

$K = 0,4$ = παγκόσμια σταθερά von Karman

x = διορθωτικός συντελεστής, συνάρτηση του d_{65}/δ (βλ. διάγραμμα 2.2.2.A)

- Για τον υπολογισμό της συγκεντρώσεως κοντά στον πυθμένα, που απαιτείται σαν οριακή τιμή στη σχέση 2.2.3.θ, έγινε η παραδοχή ότι η στερεοπαροχή με σύρση πραγματοποιείται σε στοιβάδα με πάχος

$$\delta_s = 2d_{s1} \quad (2.2.3.λ)$$

και ότι η ταχύτητα κινήσεως της στοιβάδας είναι

$$U_{\delta_s} = 11,6 U_* \quad (2.2.3.μ)$$

οπότε η συγκέντρωση κοντά στον πυθμένα (άκριβέστερα στη θέση $x_2 = \delta_s$) προκύπτει

$$C_{a1} = \frac{q_{sb1}}{2 \cdot 11,6 \cdot d_{s1} \cdot U_*} \quad (2.2.3.ν)$$

- Η στερεοπαροχή σε αιώρηση μιās δοσμένης κλάσεως φερτῶν ανά μονάδα πλάτους κοίτης προκύπτει από τήν εξίσωση

$$q_{ssi} = \int_{0}^{y} C U dx_2 \quad (2.2.3.ε)$$

- Η ὀλική στερεοπαροχή Q_s σε ένα πραγματικό ὑδατόρρευμα μέ πλάτος κοίτης b καί ὑδραυλική ἀκτίνα r_b θεωρεῖται ἴση μέ τή στερεοπαροχή σε ἰσοδύναμο ἀγωγό μέ διδιάστατη ροή, μέ πλάτος b καί βάθος ροῆς $y=r_b$

Τά ἀποτελέσματα τῆς συνολικῆς ἐργασίας εἶναι οἱ παρακάτω σχέσεις:

$$q_{ssi} = q_{sbi} \left[P_r I_1 + I_2 \right] \quad (2.2.3.ο)$$

$$I_1 = 0,216 \frac{n_{oi}^{z_i-1}}{(1-n_{oi})^{z_i}} \int_{n_{oi}}^1 \left(\frac{1-n}{n} \right)^{z_i} dn \quad (2.2.3.π)$$

$$I_2 = 0,216 \frac{n_{oi}^{z_i-1}}{(1-n_{oi})^{z_i}} \int_{n_{oi}}^1 \left(\frac{1-n}{n} \right) \ln n dn \quad (2.2.3.ρ)$$

$$P_r = \ln \frac{30,2 x r_b}{d_{65}} \quad (2.2.3.σ)$$

$$z_i = \frac{W_i}{0,4 U_*'} \quad (2.2.3.τ)$$

$$n_{oi} = 2d_{si} / r_b \quad (2.2.3.υ)$$

Τά ὀλοκληρώματα I_1 καί I_2 εἶναι προφανῶς συναρτήσεις τῶν n_{oi} καί z_i καί δίνονται γραφικά στά σχήματα (2.2.3.Δ) καί (2.2.3.Ε) ἀντίστοιχα.

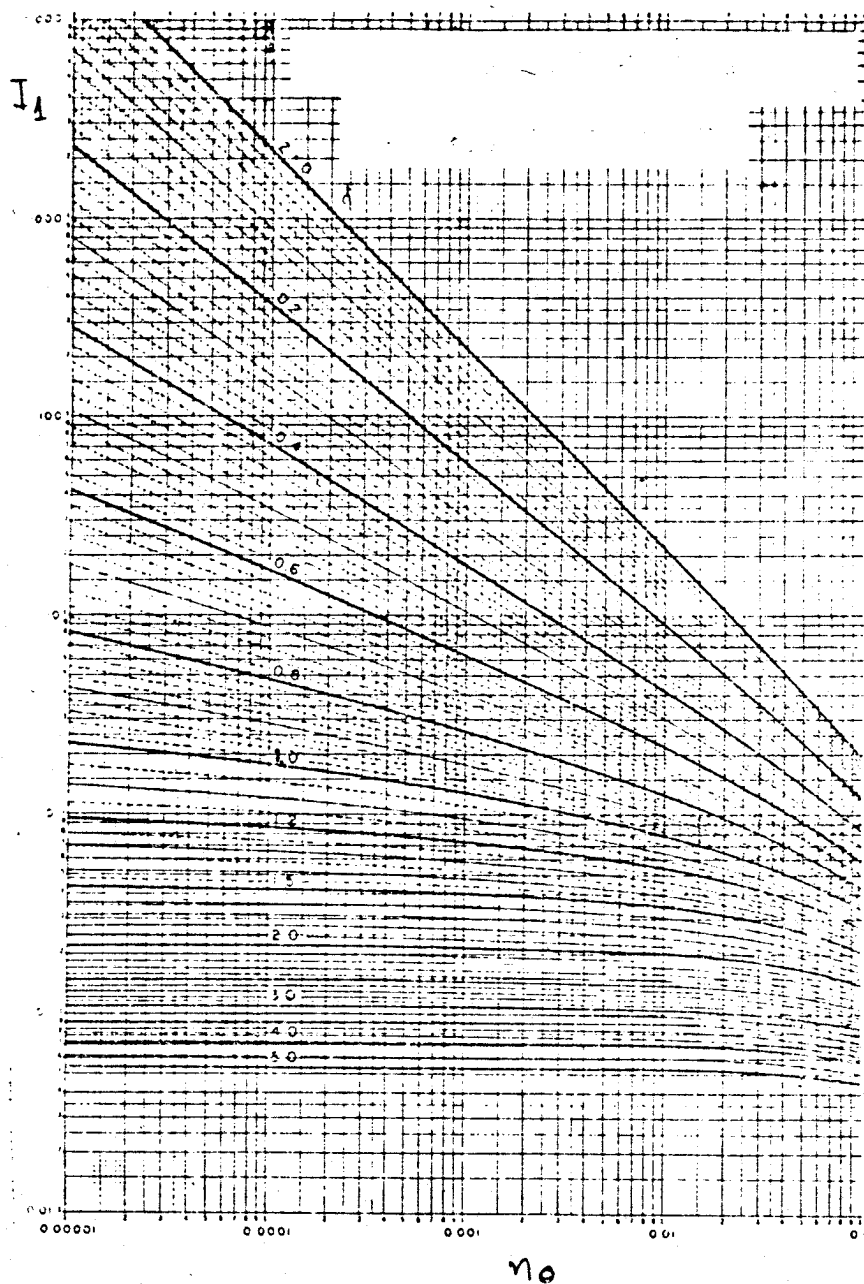
Συμπερασματικά ἡ συνολική διαδικασία ὑπολογιστῶν στερεοπαροχῆς κατά Einstein περιλαμβάνει:

- Τήν διαίρεση τῶν ὑλικῶν κοίτης σε κλάσεις μέ διαμέτρους d_{si} καί ποσοστά κατά βάρος d_{si}
- Τόν ὑπολογισμό τῆς στερεοπαροχῆς μέ σύρση ανά μονάδα πλάτους κοίτης, γιά κάθε κλάση i (q_{sbi}) σύμφωνα μέ τίς σχέσεις (2.2.3.δ-η)
- Τόν ὑπολογισμό τῆς στερεοπαροχῆς μέ αιώρηση ανά μονάδα πλάτους κοίτης γιά κάθε κλάση i (q_{ssi}) μέ βάση τίς σχέσεις (2.2.3.ο) μέχρι (2.2.3.υ)
- Τόν ὑπολογισμό τῆς συνολικῆς στερεοπαροχῆς ανά μονάδα πλάτους κοίτης, γιά κάθε κλάση i σύμφωνα μέ τή σχέση:

$$q_{si} = q_{sbi} + q_{ssi} \quad (2.2.3.φ)$$

- Τόν ὑπολογισμό τῆς συνολικῆς στερεοπαροχῆς ανά μονάδα πλάτους πυθμένα, γιά τό σύνολο τῶν φερτῶν σύμφωνα μέ τή σχέση:

$$q_s = \sum q_{si} \quad (2.2.3.χ)$$



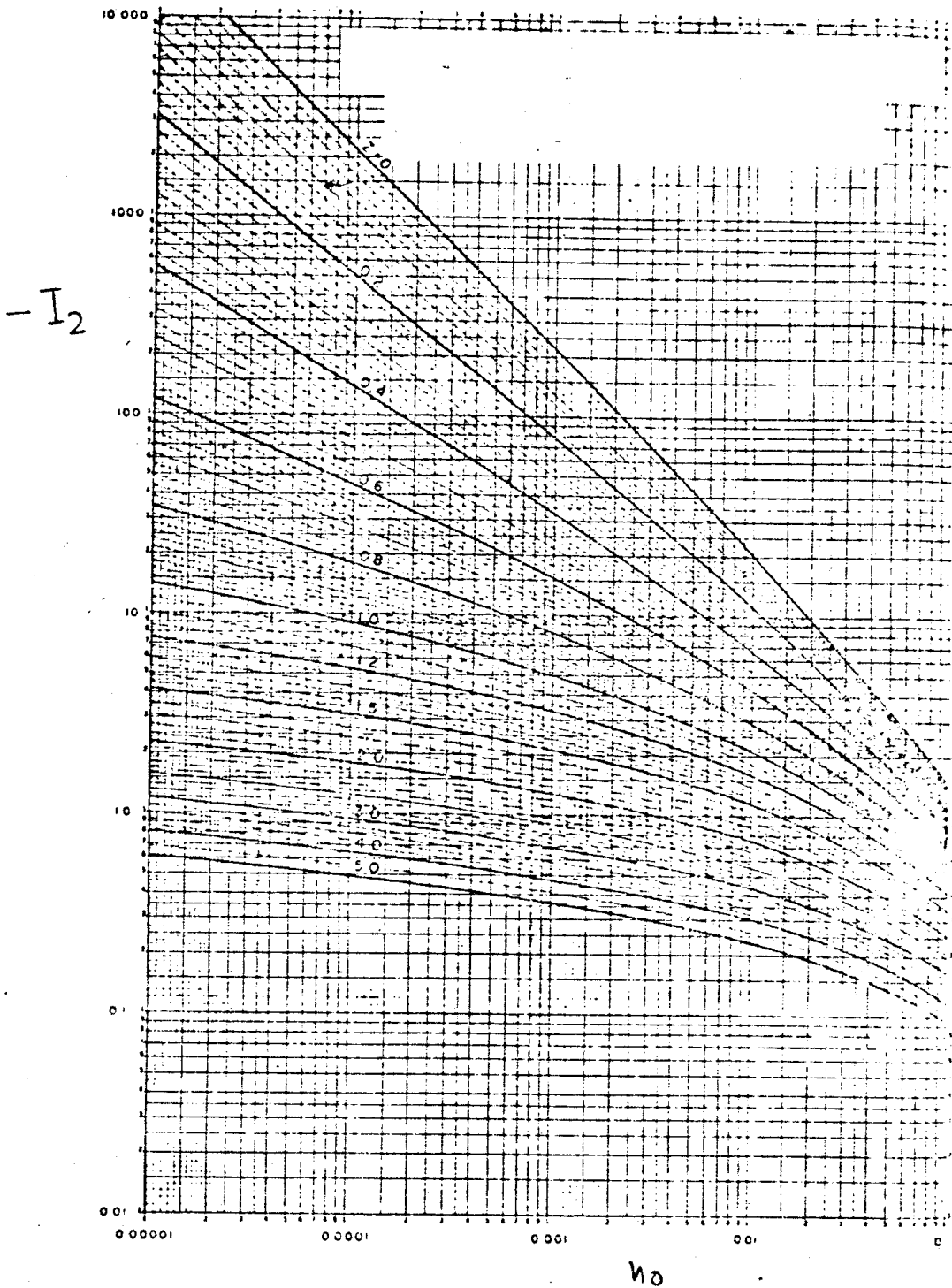
Σχήμα 2.2.3.Δ 'Ολοκλήρωμα I_1 , σάν συνάρτηση του εκθέτη z και του κάτω ορίου n_0

- Τόν υπολογισμό της συνολικής στερεοπαροχής στή διατομή με βάση τη σχέση:

(2.2.3.ψ)

$$Q_S = bq_S$$

όπου b τό πλάτος πυθμένα (μονάδες Q_S : βάρος ανά χρόνο)



Σχῆμα 2.2.3. Ε. 'Ολοκλήρωμα $(-I_2)$ εἰς συνάρτησιν τοῦ ἑκθέτη z καὶ τοῦ κάτω ὁρίου η_0

2.2.4 Αναλυτική διαδικασία εφαρμογής του ομοιώματος Einstein

Η εφαρμογή του ομοιώματος συνολικά σε μία διατομή ενός ύδατορρεύματος περιλαμβάνει τὰ ἑξῆς τρία στάδια:

1. Συλλογή στοιχείων
2. Ὑδραυλικοί ὑπολογισμοί
3. Ὑπολογισμοί στερεοπαροχῆς

Αναλυτικά οἱ ἐργασίες ὄλων τῶν σταδίων μποροῦν νὰ κωδικοποιηθοῦν στὰ παρακάτω:

Στάδιο 1 (Συμβολ. E1) Συλλογή στοιχείων

- E.1.1 Ἐκλογή ἀντιπροσωπευτικῆς διατομῆς τοῦ ὕδατορρεύματος. Ἡ διατομή πρέπει νὰ βρίσκεται σέ εὐθύγραμμο τμήμα τοῦ ὕδατορρεύματος. Στό ἐν λόγω τμήμα δέν πρέπει νὰ παρατηροῦνται σοβαρές μεταβολές τῆς διατομῆς.
- E.1.2 Μέτρηση τῆς μέσης κλίσεως \bar{s} στό τμήμα τοῦ ὕδατορρεύματος
- E.1.3 Λήψη στοιχείων γεωμετρίας διατομῆς. Γραφική ἀπεικόνιση τῶν στοιχείων, ἥτοι κατασκευή καμπύλης στάθμης - ἔμβασου διατομῆς (z-A), καμπύλης στάθμης - πλάτους κοίτης (z-b), καμπύλης στάθμης - βρεχόμενης περιμέτρου (z-p) καί καμπύλης στάθμης ὑδραυλικῆς ἀκτίνας (z-r). Ἐάν ὑπάρχουν, γιά ψηλές στάθμες νεροῦ ὄχθες ὄχι ἀλλουβιακές πρέπει νὰ κατασκευαστοῦν δύο ἀνεξάρτητες καμπύλες βρεχόμενης περιμέτρου, μία γιά τό ἀλλουβιακό τμήμα καί μία γιά τίς ὄχθες.
- E.1.4 Ἐκτίμηση ἰσοδύναμης τραχύτητας k_s τῶν μὴ ἀλλουβιακῶν ὄχθων, σέ περίπτωση πού ὑπάρχουν τέτοιες.
- E.1.5 Λήψη ἀντιπροσωπευτικοῦ δείγματος φερτῶν κοίτης. Μηχανική ἀνάλυση τοῦ δείγματος τῆς ὁποίας τὰ ἀποτελέσματα πρέπει νὰ εἶναι:
- Πυκνότητα ρ_s
 - Κοκκομετρική καμπύλη τοῦ δείγματος.
- Ἀπό τήν κοκκομετρική καμπύλη ὑπολογίζονται τὰ d_{65} καί d_{35} . Ἡ καμπύλη χωρίζεται σέ κλάσεις, συνήθως μέ βάση τήν τυποποιημένη διαίρεση τοῦ πίνακα 1.1. Μέση διάμετρος d_{s1} τῆς κάθε κλάσεως λαμβάνεται ὁ γεωμετρικός μέσος τῶν ὀρίων τῆς κλάσεως. Ἀπό τήν κοκκομετρική καμπύλη ὑπολο-

γίνονται τά ποσοστά p_i τών διαφόρων κλάσεων.

E.1.6 Έκτός από τά παραπάνω στοιχεΐα, στοιχεΐο εισόδου αποτελεΐ καί ή θερμοκρασία νερού, γιά τήν έκτίμηση τής κινηματικής συνεκτικότητας. Έπομένως στό βήμα αυτό πρέπει νά καθοριστεΐ ή τιμή τής θερμοκρασίας.

Σημείωση "Αν υπάρχει καμπύλη στάθμης - παροχής τής διατομής, μπορεί νά χρησιμοποιηθεΐ σάν στοιχεΐο εισόδου, άλλιώς αυτή προσδιορίζεται όπως περιγράφεται στό στάδιο 2.

Στάδιο 2 (Συμβολ. E2) 'Υδραυλικοί 'Υπολογισμοί

E.2.1 Συγκέντρωση στοιχείων εισόδου γιά τό στάδιο 2, ήτοι:

- d_{65}, d_{35}

- k_s δχθης

- κινημ. συνεκτικότητα V (συνάρτηση τής θερμοκρασίας)

- καμπύλες του βήματος E.1.3.

E.2.2 Καθορισμός εύρους τιμών υδραυλικής ακτίνας r'_b . Τά βήματα E.2.3 έως E.2.15 έκτελοϋνται γιά κάθε τιμή r'_b στό καθορισμένο εύρος.

E.2.3 Γιά τήν υπόψη τιμή του r'_b υπολογίζεται ή ταχύτητα τριβής $U = \sqrt{gr'_b}$ καί ο λόγος $(d_{65}/\delta) = (d_{65}U^*) / (11,6V)$.

E.2.4 'Υπολογίζεται ή ταχύτητα V από τίς σχέσεις (2.2.2.α). "Αν $(d_{65}/\delta) < 5$ προηγείται ο υπολογισμός του συντελεστή λ από τό διάγραμμα (2.2.2.Α).

E.2.5 'Υπολογίζεται ή άδιάστατη παράμετρος Ψ τής σχέσεως (2.2.2.γ) καί στή συνέχεια από τό διάγραμμα 2.2.2.Β ή τιμή του λόγου V/U^* .

E.2.6 'Υπολογίζονται τά $U^* = V / (V/U^*)$, $r_b'' = U^*{}^2 / gS$

E.2.7 'Υπολογίζεται ή υδραυλική ακτίνα $r_b = r'_b + r_b''$

E.2.8 "Αν δέν υπάρχουν μη άλλουβιακές δχθες $r=r_b$, από τήν καμπύλη $(z-r)$ προκύπτουν τά z, A, b . Στήν περίπτωση αυτή ή διαδικασία συνεχίζει μέ τό βήμα E.2.15.

E.2.9 "Αν υπάρχουν μη άλλουβιακές δχθες είναι γνωστή (άπό τήν καμπύλη $z - r_b$ ή περίμετρος r_b τής κοΐτης, γιατί είναι όριακή.

'Υπολογίζεται τό $A_b = r_b \cdot P_b$

- E.2.10 Υπολογίζεται τό $(R_w/f_w) = v^3/(2gSv)$
Τίθεται $r_w \approx r_b$ και υπολογίζεται ή σχετική τραχύτητα $k_s/4r_w$
- E.2.11 Υπολογίζεται ό f_w με έπαναληπτική εφαρμογή τής (2.2.2ι)
- E.2.12 Υπολογίζεται από τή σχέση 2.2.2.ε ή r_w ($r_w = f_w v^2/8gS$)
- E.2.13 Καταστρώνεται ή έξίσωση $r_w p_w = A - A_b (=A_w)$,
(βλέπε 2.2.2.δ) με άγνωστους τά p_w και A , τά όποια όμως είναι συναρτήσεις τής στάθμης z .
- E.2.14 Λύνεται ή πιό πάνω έξίσωση με τή χρήση τών καμπυλών $(z - p_w)$ και $(z - A)$, δηλαδή προσδιορίζεται ή στάθμη z για τήν όποία ικανοποιείται, και στή συνέχεια τά A, b όπως στό βήμα E.2.8.
- E.2.15 Υπολογίζεται ή παροχή $Q = V \cdot A$
- E.2.16 Αφού έκτελεστούν τά παραπάνω για όλες τίς τιμές του r'_b , κατασκευάζονται οι καμπύλες $(z - V), (z - Q), (z - r'_b), (z - r_b)$
Στήν περίπτωση πού υπάρχει για τή διατομή καμπύλη στάθμης-παροχής, ή διαδικασία τροποποιείται σύμφωνα με τά παρακάτω:
- E.2.21 Συγκεντρώνονται τά στοιχεΐα όπως στό βήμα E.2.1 αλλά επί πλέον και ή καμπύλη στάθμης-παροχής.
- E.2.22 Καθορίζεται τό εύρος τιμών τής παροχής Q . Τά βήματα E.2.23 μέχρι E.2.30 έκτελούνται για κάθε τιμή του Q στό καθορισμένο εύρος.
- E.2.23 Για τήν ύψψη τιμή του Q βρίσκεται από τήν καμπύλη $z - Q$ ή στάθμη z και από τίς υπόλοιπες καμπύλες τά p_b, p_w, p, A, r .
- E.2.24 Υπολογίζεται ή ταχύτητα $V = Q/A$
Αν $p_w = 0$ θέτουμε $r_b = r$ και προχωράμε στό βήμα E.2.28.
- E.2.25 Αν $p_w \neq 0$ έκτελούνται άκριβώς τά βήματα E.2.11 και E.2.12 και υπολογίζεται ό f_w .
- E.2.26 Υπολογίζονται οι συντελεστές τριβών f και f_b από τίς σχέσεις $f = (8grS)/v^2$ και $f_b = (p/p_b)f - (p_w/p_b)f_w$ (ή τελευταία προκύπτει μετά από άντικατάσταση τής (2.2.2ε) στήν (2.2.2.δ))
- E.2.27 Υπολογίζεται τό $r_b = (f_b/8g) \cdot (v^2/S)$
- E.2.28 Υπολογίζεται τό $r'_b = \left[d_{65}^{1/6} v \right] / (7,66 \sqrt{gS})^{2/3}$ και ή $u_* \sqrt{gr'_b S}$

Ε.2.29 Υπολογίζεται τό $(d_{65}/\delta) = (d_{65} U_*') / (11,6v)$

*Αν $(d_{65}/\delta) \geq 5$ προχωράμε στό βήμα Ε.2.31

Ε.2.30 *Αν $(d_{65}/\delta) < 5$ καταστρώνουμε τήν έξίσωση $(v/\sqrt{gr_b S}) = 5,75 \cdot$

$\log(12,2 \cdot x \cdot r_b' / d_{65})$ καί τή λύνουμε αριθμητικά ώς πρός r_b'
Σέ κάθε δοκιμή τό x λαμβάνεται από τό διάγραμμα (2.2.2.A)
συναρτήσεϊ του $(d_{65}/\sqrt{gr_b S} / 11,6v)$ Κρατάμε τήν τελική τιμή
του r_b' .

Ε.2.31 *Αφού έκτελεστούν τά παραπάνω γιά όλες τίς τιμές του Q ,
κατασκευάζονται οί καμπύλες $(z-r_b')$ καί $(z-r_b)$.

Στάδιο 3 (Συμβολ. Ε3) *Υπολογισμοί στερεοπαροχής

Ε.3.1 Συγκέντρωση τών στοιχείων είσόδου γιά τό στάδιο 3

- Κλίση πυθμένα S
- Τιμές υδραυλικής ακτίνας r_b, r_b' γιά τήν επιθυμητή στάθμη
ή παροχή μέ χρήση τών καμπυλών $(z-Q), (z-r_b), (z-r_b')$
- Πλάτος κοίτης b από τήν καμπύλη $(z-b)$
- Πυκνότητα καί συνεκτικότητα νερού ρ, ν (συναρτήσεις τής
θερμοκρασίας).
- Πυκνότητα φερτών ρ_s
- d_{65}
- Πίνακας τιμών $(d_{si}-r_i)$ ύλικών κοίτης

Ε.3.2 *Υπολογίζονται οί παρακάτω παράμετροι πού είναι ανεξάρτη-
τες του d_{si} :

- $U_*' = \sqrt{gr_b S}$
- $\delta = 11,6\nu / U_*'$
- $d_{65}/\delta, d_{65}/x\delta$
- x από διάγραμμα (2.2.2.A) συναρτήσεϊ του d_{65}/δ
- X από τή σχέση (2.2.3.η) συναρτήσεϊ τών $d_{65}/x\delta, d_{65}/x, \delta$
- Y από τό διάγραμμα (2.2.3.A) συναρτήσεϊ του d_{65}/δ
- Σταθερά P_r από τή σχέση (2.2.3.σ)
- Σταθερά $K = \left[\log 10,6 / \log(10,6xX/d_{65}) \right]^2$ τής σχέσεως (2.2.3.ε)

Ε.3.3 Καθορίζεται τό d_{si} . Τά βήματα Ε.3.3 μέχρι Ε.3.5 έπιανα-
λαμβάνονται γιά όλες τίς τιμές d_{si} του πίνακα.

Ε.3.4 *Υπολογίζεται ή στερεοπαροχή μέ σύρση, γιά τήν κλάση δια-
μέτρου d_{si} μέ τήν ακόλουθη πορεία:

- d_{si} / X
- E_i από διάγραμμα (2.2.3.Β) συναρτήσει του d_{si}/X
- Ψ_{*i} από τη σχέση (2.2.3.ε)
- Φ_{*i} από το διάγραμμα (2.2.3.Γ)
- q_{sbi} από τη σχέση (2.2.3.ζ) (Μονάδες: βάρος ανά χρόνο ανά μονάδα πλάτους κοίτης)

Ε.3.5 Υπολογίζεται η στερεοπαροχή με αιώρηση, και η συνολική στερεοπαροχή για την κλάση διαμ. d_{si} με την ακόλουθη πορεία:

- $n_{oi} = 2d_{si}/r_b$
- F_{1i} από τη σχέση (2.2.3.γ)
- W_i από τη σχέση (2.2.3.β)
- $z_i = W_i / (0,4U^*)$
- I_{1i} από το διάγραμμα (2.2.3.Δ), συναρτήσει των n_{oi}, W_i
- I_{2i} από το διάγραμμα (2.2.3.Ε), συναρτήσει των n_{oi}, W_i ($I_{2i} < 0$)
- q_{ssi} από τη (2.2.3.0) (μονάδες όπως q_{sbi})
- $q_{si} = q_{sbi} + q_{ssi}$

Ε.3.5 Αφού υπολογιστούν τα q_{si} για όλες τις κλάσεις υπολογίζεται η συνολική στερεοπαροχή με τις σχέσεις $q_s = \sum q_{si}$
 $Q_s = b q_{si}$ (Μονάδες: βάρος ανά χρόνο)

Σημείωση Με πολλαπλή εφαρμογή του σταδίου 3 για διάφορες τιμές των r_b', r_b προκύπτουν οι καμπύλες $(Q-Q_s), (z-Q_s), (V, Q_s)$

2.2.5 Βελτιώσεις του ομοιώματος Einstein

Τό ομοίωμα Einstein με τη μορφή που περιγράφηκε παραπάνω διαπιστώθηκε ότι είχε άριστη εφαρμογή σε πειραματικά κανάλια, αλλά παρουσιάζει αποκλίσεις σε φυσικά ύδατορρέυματα με μεγάλες τιμές στερεοπαροχής.

Νεότερες έρευνες (Einstein - Akel Aal) έδειξαν ότι ένας λόγος αποκλίσεως είναι ότι η σταθερά von Karman K σε ύδατορρέυματα με μεγάλες τιμές στερεοπαροχής έχει αισθητά μικρότερες τιμές [7] (1972).

Μετά από πειραματική έρευνα βρέθηκε ότι η τιμή του K είναι μεταβλητή, και μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση της άδιαστατης παραμέτρου

$$\frac{W_{35} \cdot d_{65}}{\sqrt{q_s V}}$$

όπου W_{35} η ταχύτητα καθιζήσεως για φερτά διαμέτρου d_{35} και q η παροχή ανά μονάδα πλάτους. Η εν λόγω συνάρτηση δίνεται γραφικά στο διάγραμμα (2.2.5.Α).

Μέ βάση τὰ συμπεράσματα τῆς ἴδιας ἐργασίας προτείνεται ὅτι καί στή σχέση κατανομῆς ταχυτήτων (2.2.3κ) ἀλλά καί στή σχέση κατανομῆς συγκεντρώσεων (2.2.3.ι), (2.2.3.τ) πρέπει νά ἀντικατασταθεῖ ἡ τιμὴ $K = 0,4$ μέ τήν τιμὴ πού προκύπτει ἀπό τό ἐν λόγω διάγραμμα.

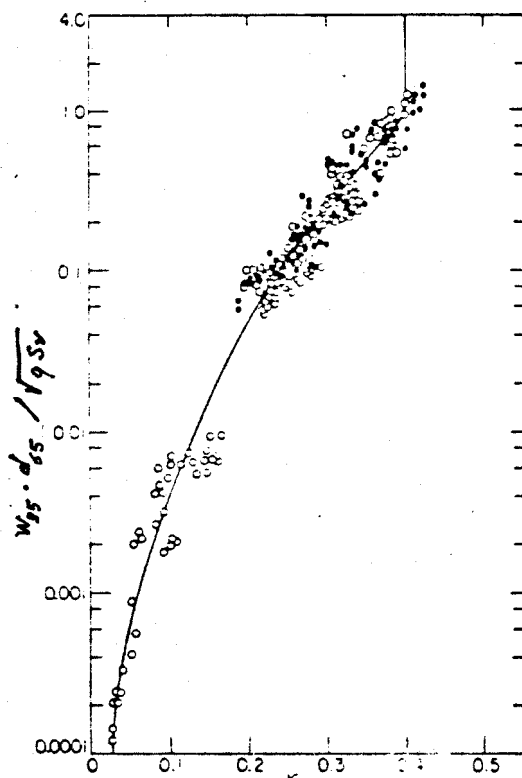
Οἱ ἀλλαγές πού προκύπτουν σύμφωνα μέ τὰ παραπάνω στήν διαδικασία ἐφαρμογῆς τοῦ ὁμοιώματος ἀναφέρονται ἀποκλειστικά στό βῆμα Ε.3.5 καί εἶναι

- ἀντί τῆς (2.2.3.τ)

$$z_i = \frac{W_i}{K U_*} \quad (2.2.5.α)$$

- ἀντί τῆς (2.2.3.0)

$$q_{ssi} = \frac{0,4}{K} q_{sbi} (P_r I_1 + I_2) \quad (2.2.5.β)$$



Σχήμα 2.2.5.Α Σταθερά von Karman K ὡς συνάρτηση τοῦ

$$\frac{W_{35} d_{65}}{\sqrt{q_s V}}$$

2.3 Όμοιομα Toffaleti

2.3.1 Γενικά

Τό όμοίωμα Toffaleti είναι αρκετά νεότερο του όμοίωμα-τος Einstein. (1969) [2,8]. Δέν έχει τήν θεωρητική πληρότητα πού έχει τό όμοίωμα Einstein (άλλωστε δανείζεται πολλά στοιχεία τής ανάλυσεως Einstein), αλλά γενικά πλεονεκτεϊ από αυτό στά εξής:

- Προσεγγίζει καλύτερα τά δεδομένα φυσικών ύδατορρευμάτων. Έχει εφαρμοστεϊ, από τόν ίδιο σέ πάρα πολλές περιπτώσεις μέ πολύ καλά αποτελέσματα προσαρμογής [8].
- Είναι πιο εύρη στο ως πρός τούς ύπολογισμούς. Οί σχέσεις καί τά διαγράμματα του είναι απλά, καί εύκολα μετατρέπονται σέ πρόγραμμα ηλεκτρονικού ύπολογιστή, ή ακόμα καί σέ πρόγραμμα προγραμματιζόμενης αριθμομηχανής.

Τό όμοίωμα Toffaleti έχει μορφωθεί από τόν ίδιο σέ ένα σύστημα σχέσεων στό Άγγλοσαξωνικό σύστημα μονάδων, σέ αντίθεση μέ τό όμοίωμα Einstein πού χρησιμοποιεϊ άδιαστατοποιημένες μεταβλητές. Στίς σημειώσεις αυτές δέν παρατίθενται οί αύθεντικές σχέσεις Toffaleti, αλλά όλες έχουν άδιαστατοποιηθεί, έκτός από τή βασική έμπειρική σχέση πού έχει μετατραπεί σέ μονάδες του S.I. (System International). Είναι άυτονόητο ότι καί τά σχετικά διαγράμματα έχουν μετατραπεί, μέ τόν ίδιο τρόπο.

2.3.2 Ύδραυλική ανάλυση τής ροής σέ φυσικά ύδατορρεύματα σέ μόνιμη όμοιόμορφη δίαίτα

Ό Toffaleti δέν έχει αναπτύξει μεθοδολογία για τήν πλήρη παραγωγή σχέσεως στάθμης - παροχής για μόνιμη όμοιόμορφη ροή. Έπομένως τέτοια σχέση, αν δέν έχει καταρτιστεϊ μέ βάση μετρήσεις στην διατομή, μπορεί νά παραχθεϊ μέ οποιοδήποτε άλλη μεθοδολογία (π.χ. Einstein - Barlarossa).

Στίς σχέσεις Toffaleti όμως διατηρεϊται ή έννοια τής ύδραυλικής ακτίνας r' πού αντιστοιχεϊ στην τραχύτητα κόκκων ($k_s = d_{65}$) καί ή αντίστοιχη ταχύτητα τριβής $U_* = \sqrt{gr'S}$, όπως στό όμοίωμα Einstein.

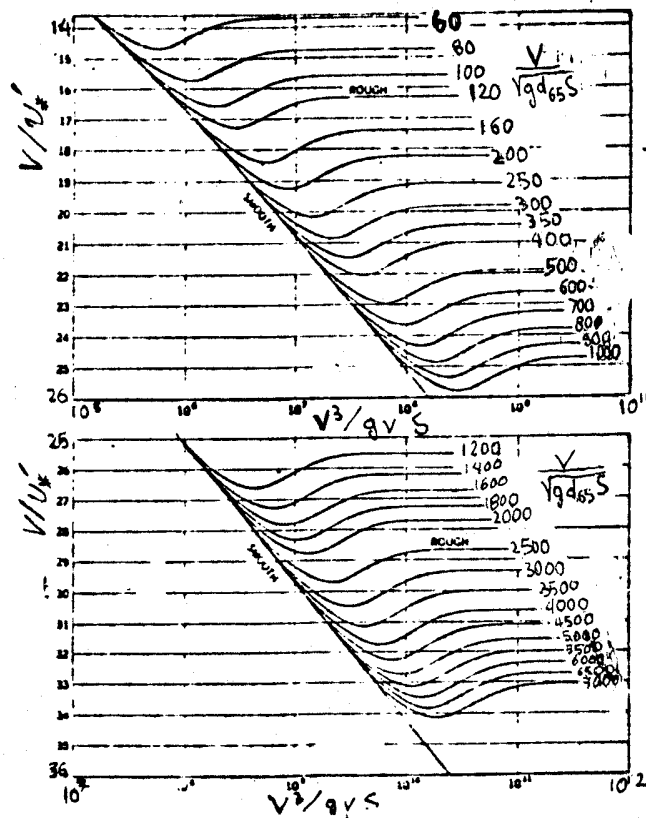
Η διαφορά μέ τήν ανάλυση Einstein είναι ότι αντί ο λόγος (V/U_*') νά συσχετίζεται μέ τά (r'/d_{65}) καί (d_{65}/δ) , εδώ χρησιμοποιεϊται ή συσχέτιση τής μορφής

$$\frac{V}{U_*'} = f\left(\frac{V}{\sqrt{g \cdot d_{65} S}}, \frac{V^3}{g v S}\right)$$

(2.3.2.a)

Ἡ συσχέτιση ἔχει δοθεῖ γραφικὰ στό διάγραμμα (2.3.2.A) Σημειώνεται τέλος ὅτι στό ὁμοίωμα Toffaleti δέν γίνεται καμμιά ἀναφορά γιά τήν περίπτωση πού ὑπάρχουν μὴ ἀλλουβιακές ὄχθες.

Τό ἐνδεχόμενο αὐτό ἴθι μπόρουσε πάντως νά ἀντιμετωπιστεῖ μέ ἀνάλυση παρόμοια μέ αὐτή πού περιγράφεται στό ὁμοίωμα Einstein



Σχῆμα 2.3.2.A. Γραφικὴ συσχέτιση τοῦ λόγου V/U_*' μέ τίς παραμέτρους $V/\sqrt{gd_{65}S}$ καί V^3/gvS

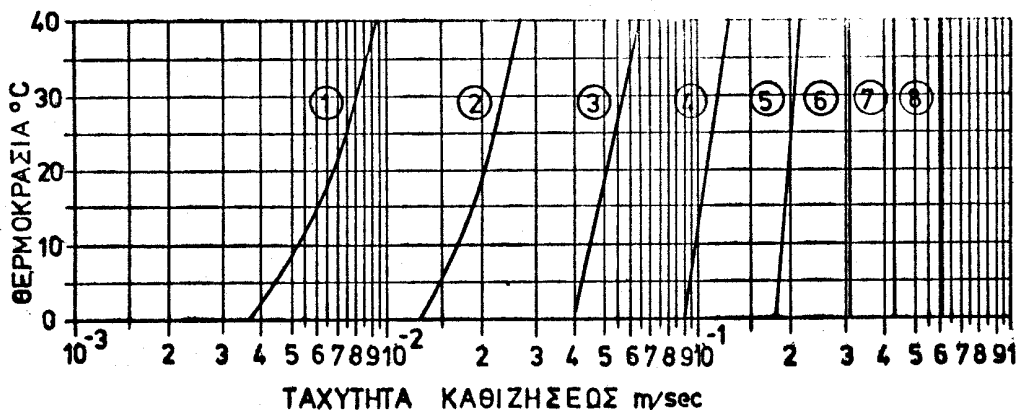
2.3.3. Ἀνάλυση τῶν μηχανισμῶν μεταφορᾶς φερτῶν. Οἱ ὑποθέσεις καί θεωρήσεις τοῦ Toffaleti γιά τούς μηχανισμούς μεταφορᾶς φερτῶν, πού σέ μεγάλο βαθμό εἶναι ἐμπειρικές, εἶναι οἱ ἀκόλουθες:

- Ἡ ὀλική στερεοπαροχή Q_s σέ ἕνα πραγματικό ὑδατόρρευμα μέ πλάτος κοίτης b καί ὑδραυλική ἀκτίνα θεωρεῖται ἴση μέ τή στερεοπαροχή σέ ἰσοδύναμο ἀγωγό μέ διδιάστατη ροή, μέ πλάτος b καί βάθος ροῆς $y = r$ (ὅπως καί στό ὁμοίωμα Einstein).

- 'Η στερεοπαροχή με σύρση, για μιά κλάση φερτών διαμέτρου d_{s1} , πραγματοποιείται σε στοιβάδα κοντά στον πυθμένα με πάχος $2 \cdot d_{s1}$ ("Όπως και στο όμοιομα Einstein).
- 'Η πραγματική στερεοπαροχή μιὰς κλάσεως φερτών διαμέτρου d_{s1} , πού βρίσκεται στα ύλικά κοίτης σε αναλογία p_1 είναι ίση με τό γινόμενο p_1 επί τήν ιδεατή στερεοπαροχή ομογενών φερτών, στα όποια ή έν λόγω κλάση θα άποτελοϋσε τό 100% ("Όπως και στο όμοίωμα Einstein).
- 'Η ταχύτητα καθιζήσεως W δίνεται από τό διάγραμμα (2.2.3.A) συναρτήσει τής θερμοκρασίας και τής διαμέτρου τής κλάσεως. 'Ας σημειωθεί ότι στο όμοιομα Toffaleti ο διαχωρισμός τών κλάσεων φερτών για τούς ύπολογισμούς γίνεται με βάση τήν τυποποιημένη διαίρεση τής American Geophysical Union.

Τό διάγραμμα (2.3.3.A) αναφέρεται σε φερτά με πυκνότητα $p_s = 2.650 \text{ Kg/m}^3$ και με συντελεστή σχήματος $sf = 0,9$. Σε περίπτωση πού τά υπό μελέτη φερτά έχουν διαφορετικό sf , μπορεί νά χρησιμοποιηθεί τό διάγραμμα (1.3.4.B)

1	ΠΟΛΥ	ΛΕΠΤΗ	ΑΜΜΟΣ	0,062 - 0,125 mm.	$d_g = 0,088 \text{ mm}$
2		ΛΕΠΤΗ	ΑΜΜΟΣ	0,125 - 0,250 mm	$d_g = 0,177 \text{ mm}$
3		ΜΕΣΗ	ΑΜΜΟΣ	0,250 - 0,500 mm	$d_g = 0,354 \text{ mm}$
4		ΧΟΝΤΡΗ	ΑΜΜΟΣ	0,500 - 1,000 mm	$d_g = 0,707 \text{ mm}$
5	ΠΟΛΥ	ΧΟΝΤΡΗ	ΑΜΜΟΣ	1,000 - 2,000 mm	$d_g = 1,414 \text{ mm}$
6	ΠΟΛΥ	ΛΕΠΤΟ	ΧΑΛΙΚΙ	2,000 - 4,000 mm	$d_g = 2,828 \text{ mm}$
7		ΛΕΠΤΟ	ΧΑΛΙΚΙ	4,000 - 8,000 mm	$d_g = 5,657 \text{ mm}$
8		ΜΕΣΟ	ΧΑΛΙΚΙ	8,000 - 16,000 mm	$d_g = 11,314 \text{ mm}$



Σχήμα 2.3.3.A. Ταχύτητα καθιζήσεως φερτών σαν συνάρτηση τής θερμοκρασίας και τής κλάσεως
($p_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$, $sf = 0,9$)

- Για υπολογιστικούς σκοπούς το βάθος ροής r του ισοδύναμου άγωγού διαιρείται σε 4 ζώνες ήτοι:

Ζώνη σύρσεως μέ όρια $X_2/r=0$ και $X_2/r=2d_{si}/r$

Κάτω ζώνη μέ όρια $X_2/r=2d_{si}/r$ και $X_2/r=1/11,24$

Μέση ζώνη μέ όρια $X_2/r=1/11,24$ και $X_2/r=1/2,5$

Άνω ζώνη μέ όρια $X_2/r=1/2,5$ και $X_2/r=1$

Στά παραπάνω μέ X_2 συμβολίζεται η κατακόρυφη συντεταγμένη.

- Η κατανομή ταχυτήτων σε διδιάστατη, ροή περιγράφεται από την έκθετική σχέση:

$$U/V = (1+n_v) (X_2/r)^{n_v} \quad (2.3.3.α)$$

όπου $n_v = 0,1352 + 0,86 \times 10^{-3} T$ (2.3.3.β)

V = μέση ταχύτητα

X_2 = κατακόρυφη συντεταγμένη

r = βάθος ροής \equiv υδραυλική ακτίνα

U = ταχύτητα στη θέση 2

T = θερμοκρασία σε $^{\circ}C$

- Η κατανομή συγκεντρώσεων σε διδιάστατη ροή δίνεται ανά ζώνη από τις ακόλουθες έκθετικές εξισώσεις:

Ζώνη σύρσεως $C = C_L \cdot (2d_{si}/r)^{-0,756z_1}$ (2.3.3.γ)

Κάτω ζώνη $C = C_L \cdot (X_2/r)^{-0,756z_1}$ (2.3.3.δ)

Μέση ζώνη $C = C_M \cdot (X_2/r)^{-z_1}$ (2.3.3.ε)

Άνω ζώνη $C = C_U \cdot (X_2/r)^{-1,5z_1}$ (2.3.3.ζ)

όπου $z_1 = \frac{W_i V}{C_z g r S}$ αν $z_1 > n_v$ (2.3.3.η)

$z_1 = 1,5 n_v$ σε αντίθετη περίπτωση

$C_z = 7,44 - 37,3 \times 10^{-3} T$ (2.3.3.θ)

C_L = άγνωστη τιμή συγκεντρώσεως

C_M, C_U = τιμές συγκεντρώσεως που μπορούν να έκφραστούν σαν συναρτήσεις του C_L από την έξίσωση των σχέσεων (2.3.3.δ-ζ) στά όριακά σημεία.

- Σε αντίθεση μέ τον Einstein, που χρησιμοποίησε σαν αναφορά για τον υπολογισμό της συγκεντρώσεως C_a κοντά στην κοίτη τη στερεοπαροχή μέ σύρση q_{sb} , ο Toffaletti υπολογίζει την άγνωστη συγκέντρωση C_L μέ αναφορά την στερεοπαροχή κάτω ζώνης q_{ssL} . Μετά

άπό πειραματική έρευνα κατέληξε σέ συσχέτιση τής q_{ssL} μέ μιá παράμετρο αντίστοιχη τής Ψ_* του Einstein, σύμφωνα μέ τήν έξί-
σωση

$$q_{ssLi} = \frac{0,388p_i}{\Psi_0^{5/3} \left(\frac{d_{si}}{d_{so}} \right)^{5/3}} \quad (\text{Kg/sec/m}) \quad (2.3.3.ι)$$

όπου:

$$\Psi_0 = \frac{gT_T k A d_{so}}{v^2} \quad (2.3.3.κ)$$

$$T_T = 18,4 + 55,4 \times 10^{-3} T \quad (2.3.3.λ)$$

$$A = f(P) \quad (2.3.3.μ)$$

$$k = g(R) \quad (2.3.3.ν)$$

$$P = \frac{(gv)^{1/3}}{U_*} \quad (2.3.3.ξ)$$

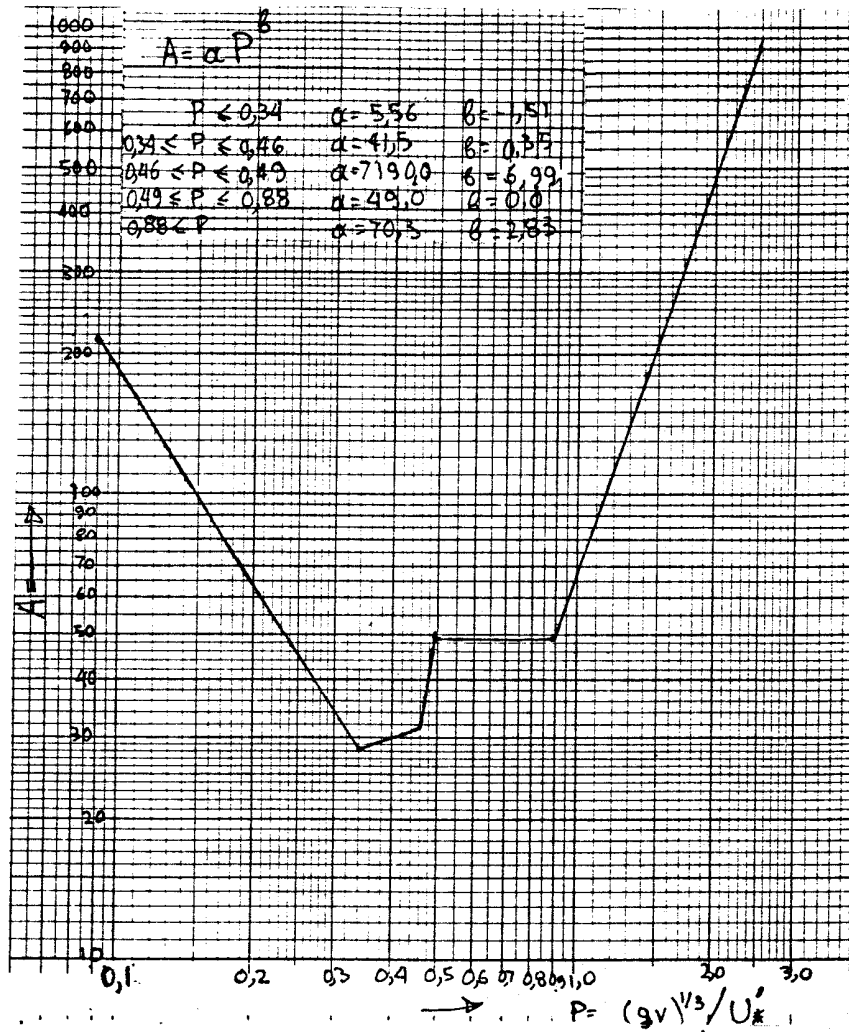
$$R = P \cdot S \cdot \frac{d_{65}}{d_{so}} \quad (2.3.3.ο)$$

$d_{so} = 0,177 \text{ mm} =$ γεωμ. μέσος τής κλάσεως λεπτής άμμου
 $d_{si} =$ γεωμ. μέσος τής υπό έξέταση κλάσεως
 $p_i =$ ποσοστό τής υπό έξέταση κλάσεως.

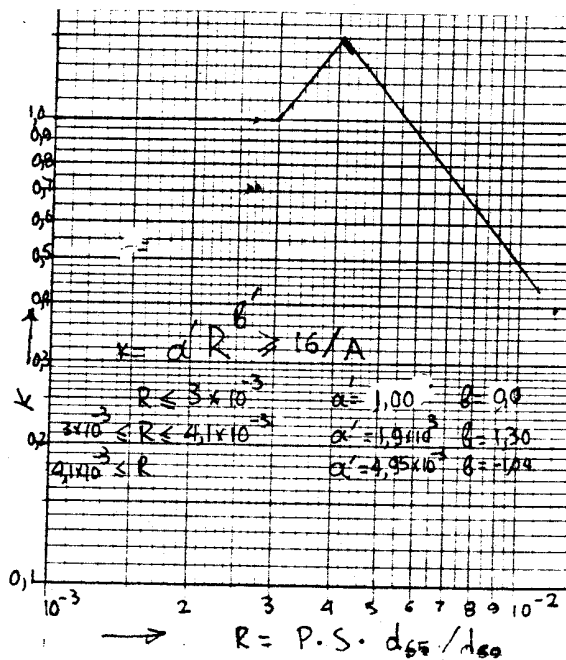
Οι σχέσεις (2.3.3.μ) και (2.3.3.ν) δίνονται γραφικά και άναλυτικά στά σχήματα (2.3.3.β) και (2.3.3.γ).

Στήν έξίσωση (2.3.3.ι) ό όρος $\Psi_0 \frac{d_{si}}{d_{so}}$ είναι αντίστοιχος του όρου Ψ_* τής σχέσεως Einstein. 'Η άδιάστατη παράμετρος A τής σχέσεως (2.3.3.κ) είναι συνδυασμένη έκφραση τών παραμέτρων x, X, Y τής σχέσεως Einstein. 'Η παράμετρος k είναι διορθωτικός συντελεστής και σέ φυσικά ύδατορρεύματα σπάνια διαφέρει άπό τό 1.

Σέ περίπτωση πού $k \cdot A < 16$ λαμβάνεται $k \cdot A = 16$ (2.2.3.τ)



Σχήμα 2.3.3.Β. Παράμετρος A συναρτήσει του $P = (gV)^{1/3} / U_*'$



Σχήμα 2.3.3.Γ. Διορθωτικός συντελεστής k συναρτήσει του $R = P.S. d_{65} / d_{50}$

Παράλληλα όμως η στερεοπαροχή της κάτω ζώνης προκύπτει με ολοκλήρωση της σχέσεως:

$$q_{ssLi} = \frac{1/11,24}{2d_{si}/r} \int_{C_{Li}}^{C_{Li}} CUd(x_2/r) \cdot r \quad (2.3.3.\rho)$$

αφού αντικατασταθούν τά U και C με τις εκφράσεις τους (2.3.3.δ) και (2.3.3.α), απ' όπου προκύπτει

$$q'_{ssLi} = M_i \cdot \frac{\left(\frac{1}{11,24}\right)^{1+n_v-0,756z_1} - \left(\frac{2d_{si}}{r}\right)^{1+n_v-0,756z_1}}{1+n_v-0,756z_1} \quad (2.3.3.\sigma)$$

όπου $M_i = p_i (1+n_v) V C_{Li} \cdot r \quad (2.3.3.\tau)$

Από τό συνδυασμό των δύο παραπάνω σχέσεων με την (2.3.3.ι) προκύπτει η άγνωστη συγκέντρωση C_{Li} .

Οι στερεοπαροχές στις ανώτερες ζώνες προκύπτουν από ολοκλήρωση σχέσεων αντίστοιχων με την (2.3.3.ρ) και τελικά είναι:

$$q_{ssM_i} = M_i \cdot \left(\frac{1}{11,24}\right)^{+0,244z_1} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2,5}\right)^{1+n_v-z_1} - \left(\frac{1}{11,24}\right)^{1+n_v-z_1}}{1+n_v-z_1} \quad (2.3.3.\upsilon)$$

$$q_{ssU_i} = M_i \cdot \left(\frac{1}{11,24}\right)^{+0,244z_1} \cdot \left(\frac{1}{2,5}\right)^{0,5z_1} \cdot \frac{1 - \left(\frac{1}{2,5}\right)^{1+n_v-1,5z_1}}{1+n_v-1,5z_1} \quad (2.3.3.\phi)$$

Τέλος η στερεοπαροχή με σύρση προκύπτει εάν γινόμενο του p_1 , της απόστασης $2d_{si}$ και της ταχύτητας και συγκεντρώσεως στη θέση $x_2=2d_{si}$, και είναι

$$q_{sbi} = M_i \left(\frac{2d_{si}}{r}\right)^{1+n_v-0,756z_1} \quad (2.3.3.\chi)$$

και η αντίστοιχη συγκέντρωση είναι

$$C_b = C_{Li} \cdot \left(\frac{2d_{si}}{r}\right)^{-0,756z_1} \quad (2.3.3.\psi)$$

Σε περίπτωση που η τελευταία προκύπτει μεγαλύτερη από 1.600 Kg/m^3 πρέπει να λαμβάνεται

$$C_b = 1600 \text{ Kg/m}^3 \quad (2.3.3.\omega)$$

Στην τελευταία περίπτωση δεν θα χρησιμοποιείται η σχέση (2.3.3.ι) για τόν υπολογισμό του C_{Li} αλλά η (2.3.3.ψ).

Τέλος η ολική στερεοπαροχή ανά μονάδα πλάτους κοίτης για την κλάση d_{si} είναι

$$q_{si} = q_{sbi} + q_{ssLi} + q_{ssMi} + q_{ssUi} \quad (2.3.3.a)$$

η ολική στερεοπαροχή ανά μονάδα πλάτους κοίτης

$$q_s = \sum_i q_{si} \quad (2.3.3.b)$$

καί η ολική στερεοπαροχή στη διατομή

$$Q_s = b q_s \quad (2.3.3.c)$$

Σέ όλες τις παραπάνω σχέσεις τά q_s έχουν διαστάσεις μάζα ανά χρόνο ανά μήκος, τό Q_s μάζα ανά χρόνο καί οι συγκεντρώσεις C μάζα ανά όγκο.

2.3.4. Αναλυτική διαδικασία εφαρμογής του όμοιώματος Toffaleti

Η συνολική εφαρμογή του όμοιώματος σε μία διατομή ύδατορρεύματος περιλαμβάνει τά εξής δύο στάδια:

1. Συλλογή στοιχείων
2. Υπολογισμοί στερεοπαροχής

Αναλυτικά οι εργασίες των σταδίων μπορούν νά κωδικοποιηθοῦν στά παρακάτω:

Στάδιο 1 (Συμβολ. T1) Συλλογή στοιχείων

T.1.1 Έκλογή αντιπροσωπευτικής διατομής ύδατορρεύματος (βλ. κεφ. 2.2.4, βήμα E.1.1.)

T.1.2 Μέτρηση τής μέσης κλίσεως S (βλ. E.1.2.)

T.1.3 Λήψη στοιχείων γεωμετρίας διατομής κατασκευή καμπυλών $(z-A, z-p, z-r)$, (βλ. E.1.3.)

T.1.4 Λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος φερτών κοίτης, μηχανική ανάλυση του δείγματος (βλ. E.1.5). Τά αποτελέσματα θά είναι d_{65} , πίνακας τιμών $(d_{si} - p_i)$

T.1.5 Λήψη στοιχείων για τήν κατασκευή στάθμης - παροχής. Σε περίπτωση πού είναι αδύνατη η έκτέλεση μετρήσεων ή καμπύλη μπορεί νά κατασκευαστεί μέ κάποια από τίς σχετικές μεθόδους (π.χ Einstein - Barlarossa) (βλ. E.2)

T.1.6 Καθορισμός τής θερμοκρασίας νερού, για τήν όποια θά γίνουν οι υπολογισμοί.

Σημείωση: Τό όμοίωμα προϋποθέτει ότι $\rho_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$

Στάδιο 2 (Συμβολ. T2) 'Υπολογισμοί στερεοπαροχής

T.2.1 Συγκέντρωση τών στοιχείων εισόδου, ήτοι :

- Κλίση πυθμένα S
- Ταχύτητα V και υδραυλική ακτίνα r , για τήν επιθυμητή στάθμη ή παροχή με χρήση τών καμπυλών (z-Q) , (z-r) και (z-A)
- Πλάτος κοίτης b, από τήν καμπύλη (z-b)
- θερμοκρασία νεροῦ T (°C)
- d_{65}
- Πίνακας τιμών ($d_{s1}-p_1$) ὑλικῶν κοίτης

T.2.2 'Υπολογισμός αδιάστατων παραμέτρων - συναρτήσεων τῆς θερμοκρασίας, και συνεκτικότητας

$$n_v = 0,1352 + 0,86 \times 10^{-3} T \quad (\text{σχέση } 2.3.3.\beta)$$

$$C_z = 7,44 - 37,3 \times 10^{-3} T \quad (\text{σχέση } 2.3.3.\theta)$$

$$T_T = 18,4 + 55,4 \times 10^{-3} T \quad (\text{σχέση } 2.3.3.\lambda)$$

Υ από πίνακες συνεκτικότητας

T.2.3 'Υπολογισμός τῆς U_*' συναρτήσει τών V, $V/\sqrt{gd_{65} \cdot S}$, V^3/gvS με βάση τό διάγραμμα (2.3.2.A)

T.2.4 'Υπολογισμός τῆς παραμέτρου Ψ_0 με τήν παρακάτω πορεία :

- $P = (gv)^{1/3} / U_*'$ (2.3.3.ε)

- A από τό διάγραμμα ή τίς σχέσεις τοῦ σχήματος 2.2.2.A.

- $R = P S d_{65} / d_{s0}$ ὅπου $d_{s0} = 0,177\text{mm}$ (2.3.3.ο)

- k από τό διάγραμμα ή τίς σχέσεις τοῦ σχήματος 2.3.3.Γ.

- "Έλεγχος: "Αν $kA < 16$ τίθεται $kA = 16$

- Ψ_0 από σχέση 2.3.3.κ.

T.2.5 Καθορισμός τοῦ d_{s1} . Τά βήματα T.2.5 μέχρι T.2.9 ἐπιναλαμβάνονται για ὅλες τίς τιμές d_{s1} τοῦ πίνακα.

T.2.6 'Υπολογισμός τών q_{ssLi} , C_{Li} , C_b με τήν παρακάτω πορεία :

- W_1 από τό διάγραμμα 2.3.3.A.

- z_1 από τή σχέση 2.3.3η

- q_{ssLi} από τή σχέση 2.3.3.κ

- M_1 από τή σχέση 2.3.3.σ

- $C_{Li} = M_1 / p_1 (1+n_v) \cdot V \cdot r$ (σχέση 2.3.3.τ)

- C_b από τή σχέση (2.2.3.ψ)

T.2.7 Έλεγχος της τιμής του C_b

- Αν $C_b \leq 1600 \text{ Kg/m}^3$ τό βήμα T.2.8 δέν έκτελεΐται.
- Αν $C_b > 1600 \text{ Kg/m}^3$ έκτελεΐται τό βήμα T.2.8

T.2.8 Τροποποίηση τών τιμών τών $C_b, C_{Li}, M_i, q_{ssLi}$ για τήν περίπτωση πού $C_b > 1600$, μέ τόν παρακάτω τρόπο:

- $C_b = 1.600 \text{ Kg/m}^3$
- $C_{Li} = C_b \left(\frac{2d_{si}}{r} \right)^{0,756z_i}$ (2.3.3.ψ)
- M_i από τή σχέση (2.3.3.τ)
- q_{ssLi} από τή σχέση (2.3.3.σ)

T.2.9 Υπολογισμός επί μέρους καί συνολικής στερεοπαροχής ανά μονάδα πλάτους κοίτης, για τήν κλάση διαμέτρου d_{si} , μέ τήν παρακάτω πορεία:

- q_{ssMi} από τή σχέση (2.3.3.υ)
- q_{ssUi} από τή σχέση (2.3.3.φ)
- q_{sbi} από τή σχέση (2.3.3.χ)
- $q_{si} = q_{sbi} + q_{ssLi} + q_{ssMi} + q_{ssUi}$

T.2.10 Υπολογισμός της συνολικής στερεοπαροχής ανά μέτρο πλάτους κοίτης: $q = \sum q_{si}$ καί της συνολικής στερεοπαροχής της διατομής $Q_s = b q_s$

Σημείωση Μέ πολλαπλή εφαρμογή του σταδίου 2 για διάφορες τιμές τών r, V προκύπτουν οι καμπύλες $(Q-Q_s), (z-Q_s), (V-Q_s)$

2.4. Όμοιομα Colby (1964)

Ούσιαστικά πρόκειται για μία πολύ απλή μέθοδο υπολογισμού της συνολικής στερεοπαροχής μέ εφαρμογή μιας απλής εξίσωσης καί τεσσάρων διαγραμμάτων. Για τήν δημιουργία της ο Colby στηρίχτηκε στό όμοιομα Einstein καί σε πολλές μετρήσεις σε ποτάμια καί διώρυγες. Η μέθοδος είναι αξιόλογη καί λόγω της απλότητάς της καί της καλής προσαρμογής της σε πραγματικά δεδομένα, αλλά καί γιατί παίρνει υπόψη καί τή συγκέντρωση λεπτόκοκκων υλικών.

Τά διαγράμματα είναι καταρτισμένα σε μονάδες του Άγγλοσαξωνικού συστήματος, καί έδω διατηρήθηκαν έτσι.

Στήν μέθοδο δέν περιλαμβάνεται τρόπος συσχέτισεως της στάθμης ελεύθερης επιφάνειας μέ τήν ταχύτητα ή τήν παροχή, επομένως αυτές πρέπει να μετρηθούν ή να παραχθούν μέ άλλες μεθόδους.

Οι είσοδοι του ομοιώματος συγκεντρωτικά είναι :

- Βάθος ροής y (ft)
- Ταχύτητα V (ft/sec)
- Θερμοκρασία νερού T ($^{\circ} F$)
- Χαρακτηριστική διάμετρος φερτών κοίτης (διάμεσος) d_{50} (mm)
(είναι τό μόνο χαρακτηριστικό της κοκκομετρίας της κοίτης που χρησιμοποιείται)
- Συγκέντρωση λεπτοκοκκων υλικών C_w (ppm)
καί ή έξοδος
- Συνολική στερεοπαροχή ανά μονάδα πλάτους κοίτης q_s (tn/day/ft)

Είναι αυτόνοτο ότι ή εφαρμογή του ομοιώματος προϋποθέτει μέτρηση της C_w .

Ή έξίσωση του Colby είναι :

$$q_s = [1 + (K_1 K_2 - 1) 0,01 K_3] q_{s1}$$

όπου q_{s1} = πρώτη προσέγγιση της στερεοπαροχής που δίνεται στο διάγραμμα 2.4.A συναρτήσει των V, y, d_{50} . Τό έν λόγω διάγραμμα έχει συνταχθεί για 4 βάθη $y = 0,1 \text{ ft}, 1 \text{ ft}, 10 \text{ ft}$ καί 100 ft .

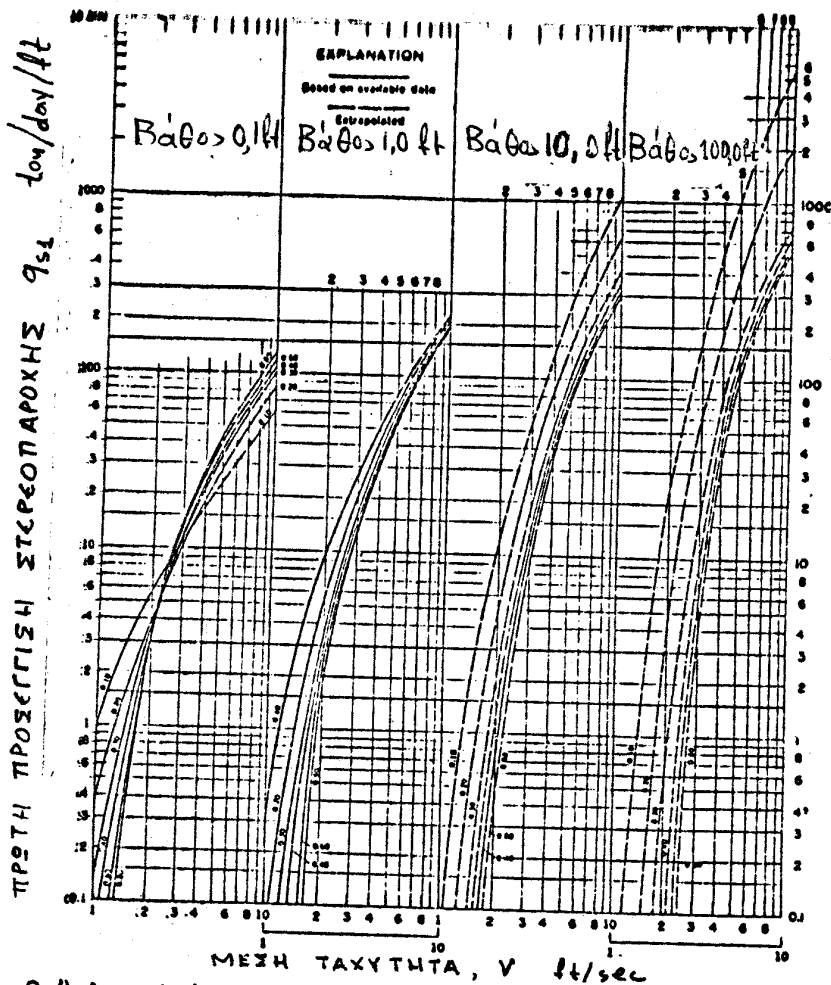
K_1 = διορθωτικός συντελεστής που παίρνει υπόψη τήν επίδραση της θερμοκρασίας. ($K_1 = 1$ για $T = 60^{\circ} F$)

K_2 = διορθωτικός συντελεστής που παίρνει υπόψη τήν επίδραση της συγκεντρώσεως λεπτόκοκκων υλικών C_w ($K_2 = 1$ για άμελητέα C_w)

K_3 = διορθωτικός συντελεστής που παίρνει υπόψη τήν επίδραση του d_{50} ($K_3 = 100$ για $d_{50} = 0,2 \text{ mm} - 0,3 \text{ mm}$)

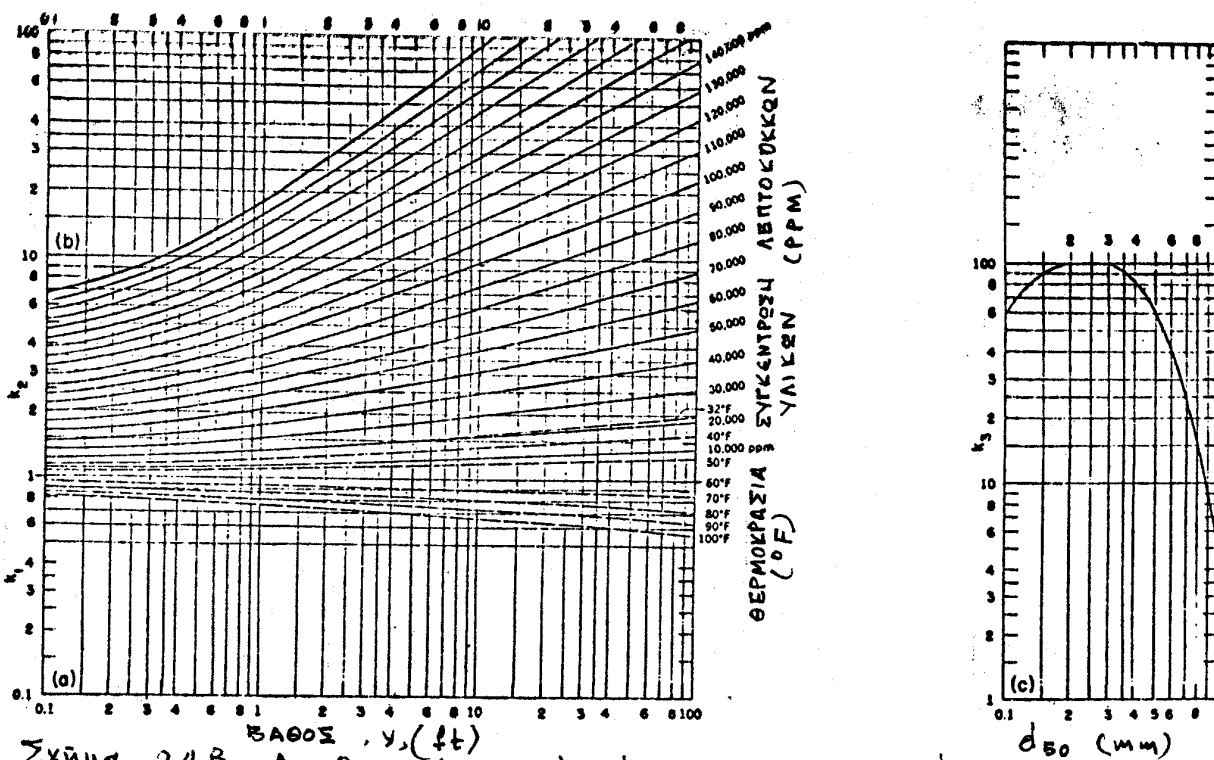
Οι τιμές των K_1, K_2, K_3 δίνονται στά διαγράμματα του σχήματος 2.4.B συναρτήσει των T, C_w καί d_{50} αντίστοιχα.

Ή Colby έδωσε επίσης ένα διάγραμμα στερεοπαροχής συναρτήσει της ταχύτητας που προέκυψε από μετρήσεις σέ πέντε ποταμούς της Αμερικής (σχήμα 2.4.Γ). Τό διάγραμμα αυτό προτείνει νά χρησιμοποιείται για χοντρικό έλεγχο των τιμών της στερεοπαροχής που προκύπτουν από τή μέθοδό του.

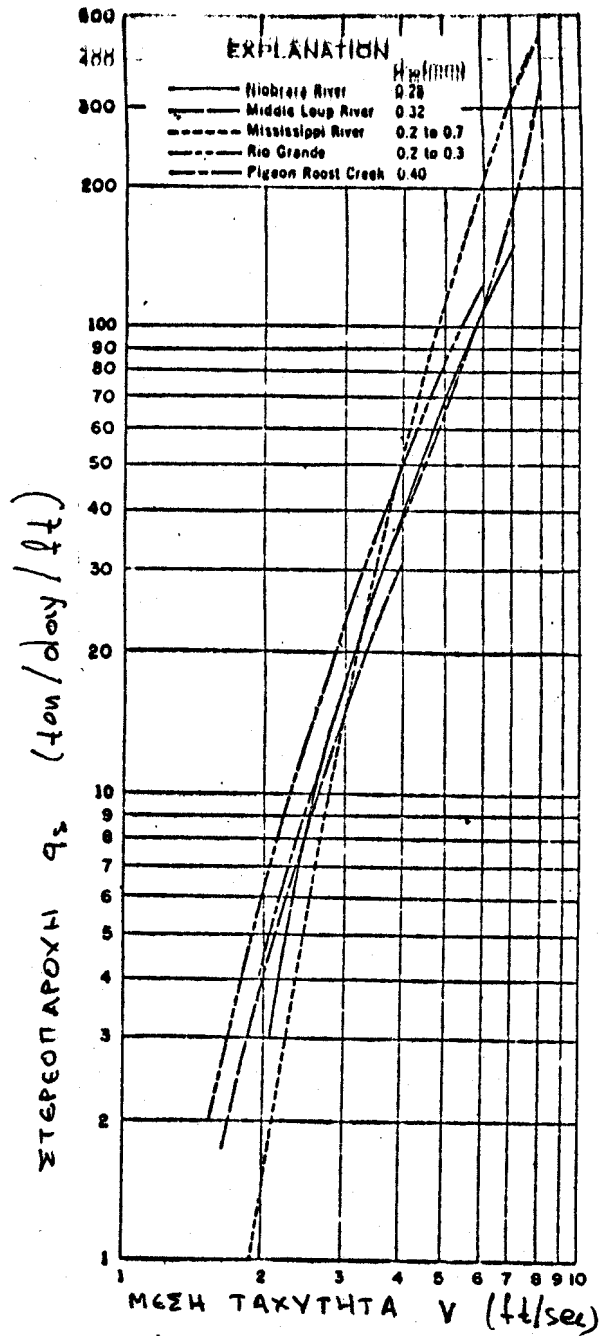


$1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m}$
 $1 \text{ lton} = 907,2 \text{ kg}$
 $1 \text{ lton/day/ft} = 0,03445 \text{ kg/sec/m}$
 $^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} \cdot ^{\circ}\text{C} + 32$
 $1 \text{ ppm} \approx 10^{-3} \text{ kg/m}^3$

Σχήμα 2.4.A. Πρώτη προσέγγιση στερεοπαροχής ανά μονάδα πλάτους κοίτης, κατά Colby, συνάρτηση των V , y , d_{50}



Σχήμα 2.4.B. Διορθωτικοί συντελεστές K_1, K_2, K_3 τῆς σχέσεως Colby



Σχῆμα 2.4.Γ. Σχέση στερεοπαροχῆς - ταχύτητας ἀπὸ μετρήσεις σὲ πέντε ποταμοὺς τῆς Ἀμερικῆς (Colby)

ΕΦΑΡΜΟΓΗ (Γενική άσκηση ύπολογισμού στερεοπαροχών)

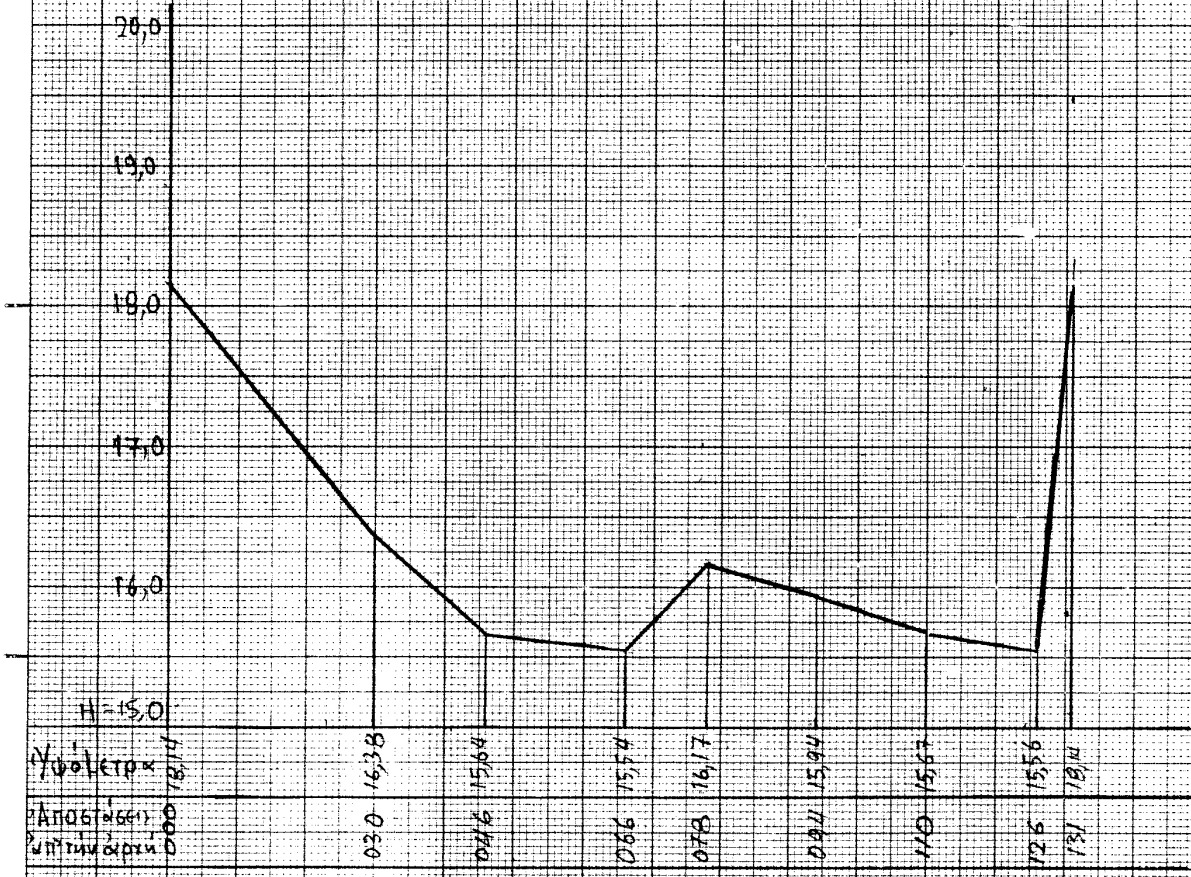
Δίνεται: ή διατομή του Άράχθου κοντά στη γέφυρα Άρτας (στή θέση του υδρομετρικού σταθμού τής ΔΕΗ), καθώς και χαρακτηριστικές κοκκομετρικές καμπύλες από τά υλικά κοίτης στή διατομή αυτή. Η κλίση του ποταμού στήν περιοχή είναι 0.7%. Επίσης στον πίνακα 1 δίνονται τά αποτελέσματα 52 μετρήσεων στερεοπαροχής πού έγιναν στον υδρομετρικό σταθμό από τή ΔΕΗ, τήν περίοδο 1965-76.

Ζητείται ή κατάρτιση καμπύλης παροχής-στερεοπαροχής μέ τίς μεθόδους Einstein καί Toffaleti, καί ή σύγκρισή τους μέ τά δεδομένα τών μετρήσεων στερεοπαροχής. Χρησιμοποιήστε μία διακύμανση στάθμης, κοκκομετρική καμπύλη, καθώς καί θερμοκρασία νερού τής επιλογής σας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗΣ ΜΕ ΑΙΩΡΗΣΗ ΣΤΟΝ ΑΡΑΧΘΟ ΣΤΗ ΘΕΣΗ
ΓΕΦΥΡΑΣ ΑΡΤΑΣ

Α/Α	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΠΑΡΟΧΗ Q (m ³ /sec)	ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗ Q _{SS} (Kg/sec)	Α/Α	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΠΑΡΟΧΗ Q (m ³ /sec)	ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗ Q _{SS} (Kg/sec)
1	16-11-65	81,90	58,0	31	30-04-69	---	---
2	20-11-65	243,16	1139,4	32	27-11-69	200,18	1174,1
3	25-11-65	144,76	49,3	33	16-02-70	432,71	1741,9
4	29-11-65	414,87	1099,1	34	16-03-70	150,90	39,9
5	3-12-65	277,24	259,2	35	3-04-70	106,90	36,5
6	8-12-65	88,33	5,9	36	12-12-70	13,81	0,3
7	14-12-65	104,93	10,0	37	27-01-71	101,24	24,1
8	17-12-65	65,88	2,2	38	27-01-71	79,72	16,5
9	1-02-66	69,48	1,9	39	10-03-71	331,55	468,1
10	8-02-66	42,15	0,5	40	15-03-71	92,31	19,6
11	15-02-66	280,96	116,2	41	3-06-71	28,35	16,0
12	1-03-66	53,31	0,7	42	16-11-71	16,76	3,2
13	13-12-66	--	--	43	14-12-71	48,17	3,9
14	10-02-67	39,34	0,4	44	15-01-72	41,10	0,9
15	1-03-67	31,61	0,8	45	31-01-72	231,89	776,3
16	17-03-67	26,02	0,5	46	2-03-72	73,50	5,8
17	29-03-67	20,53	0,2	47	13-10-72	56,54	12,1
18	5-04-67	40,98	1,3	48	2-11-72	60,39	5,1
19	1-03-68	53,62	1,0	49	20-02-73	179,80	42,8
20	11-06-68	37,01	11,0	50	3-07-75	8,03	7,3
21	27-06-68	16,63	10,0	51	25-09-76	4,07	0,1
22	11-11-68	19,62	9,9	52	30-11-76	55,05	3,9
23	20-11-68	45,86	20,9				
24	10-12-68	281,51	1654,3				
25	16-12-68	140,50	159,7				
26	20-12-68	156,93	362,0				
27	18-01-69	129,78	14,7				
28	7-02-69	183,42	77,3				
29	13-02-69	212,37	285,7				
30	31-03-69	91,51	15,2				

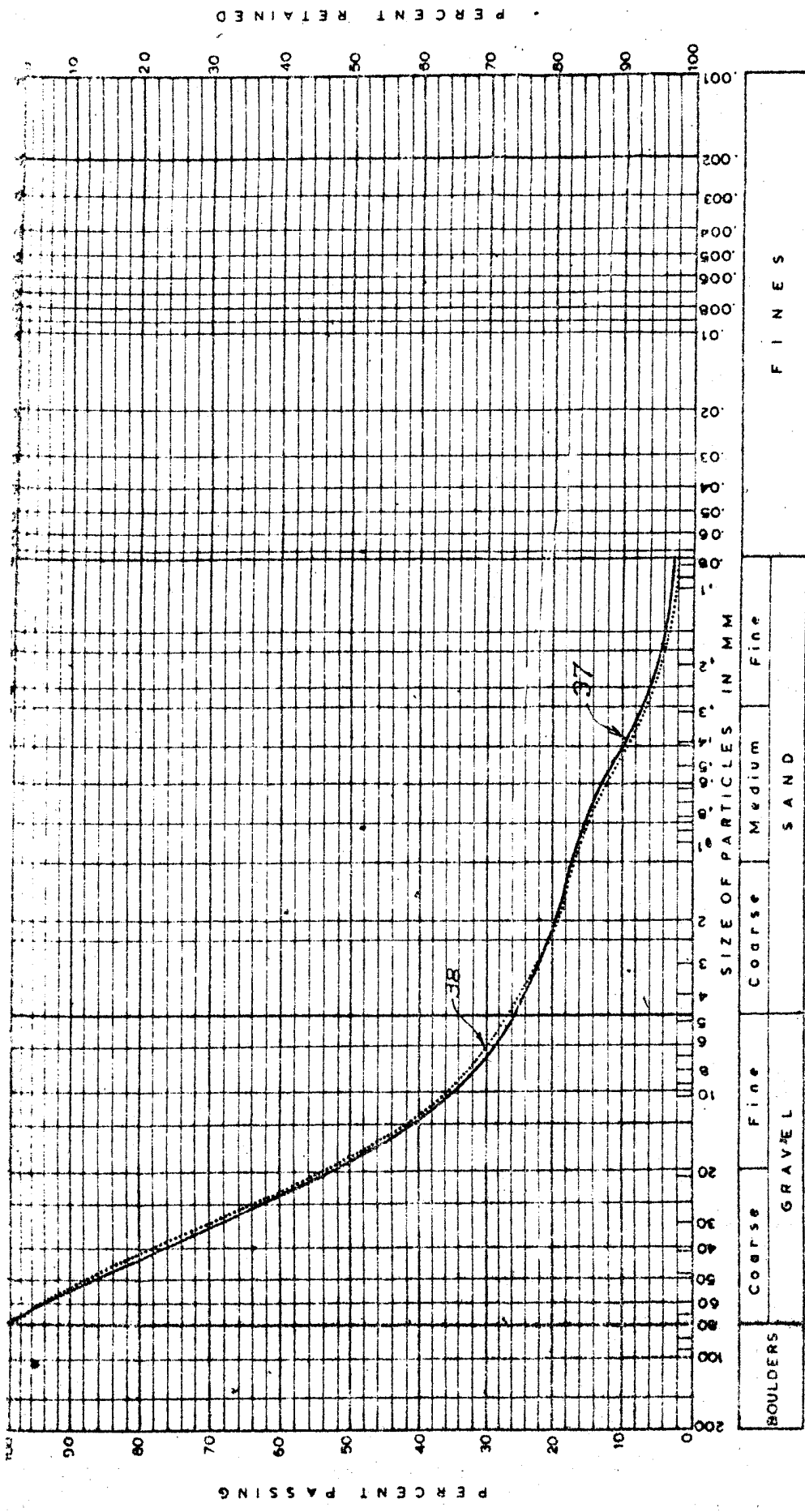
ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΡΑΧΘΟΥ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗ ΓΕΩΥΡΑ ΤΗΣ ΑΡΤΑΣ



H=15.0

Υψόμετρο

Απόσταση από την αρχή



+ 3" in 37 is 15.3% of total. MAX. SIZE 11"
 + 3" in 38 is 20.0% of total. MAX. SIZE 10"

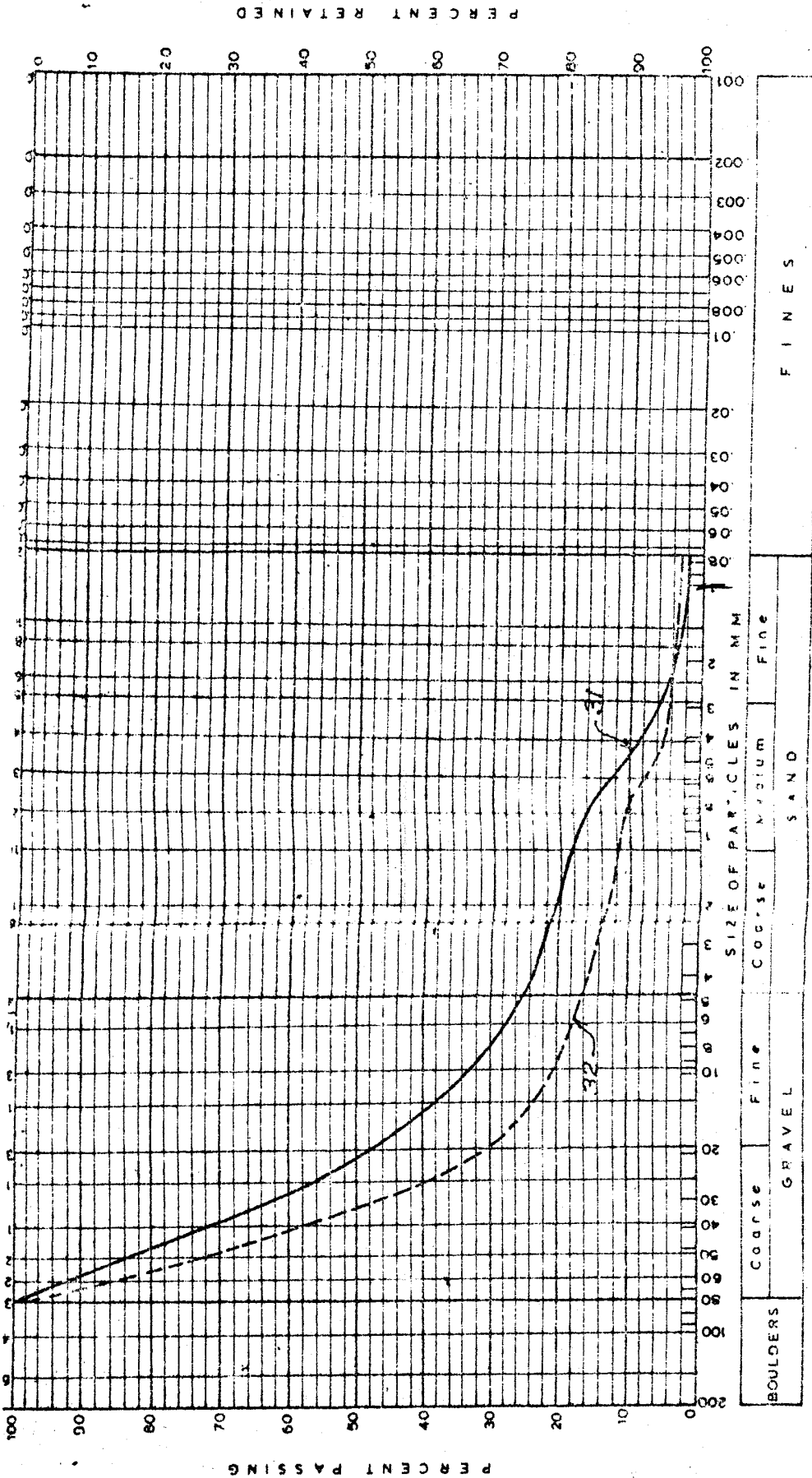
PUBLIC POWER CORPORATION
 OFFICE FOR POURNARI HYDROELECTRIC PROJECT

GRAINSIZE DISTRIBUTION CURVES

SAMPLES: 37 - 38

NOVEMBER 1972

PLATE D-24



+ 3" in 31 is 15.5% of total. MAX. SIZE 8"
 + 3" in 32 is 13.3% of total. MAX. SIZE 7"

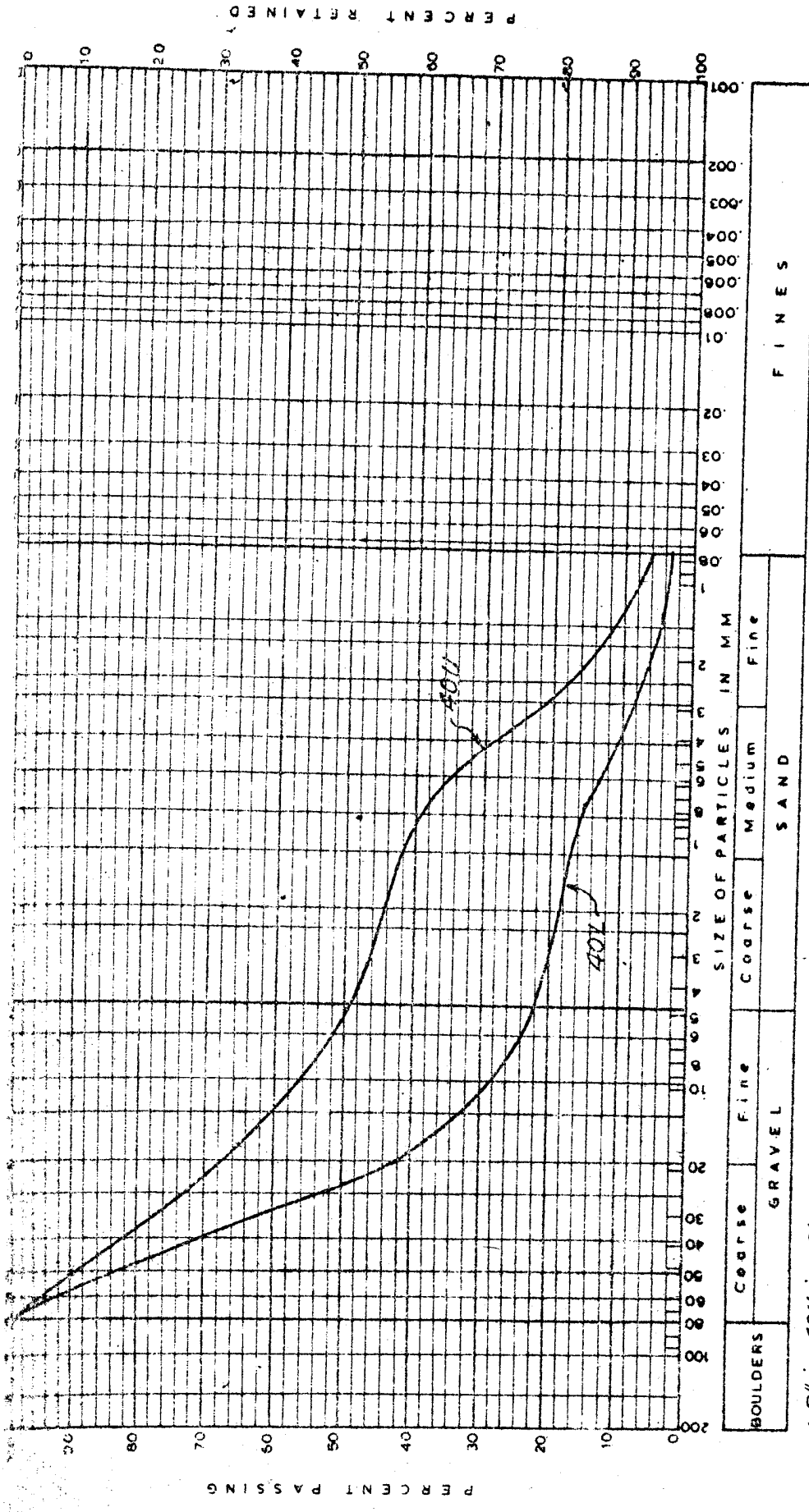
PUBLIC POWER CORPORATION
 OFFICE FOR POURNARI HYDROELECTRIC PROJECT

GRAINSIZE DISTRIBUTION CURVES

SAMPLES: 31-32

NOVEMBER 1972

PLATED-D-21



+ 3" in 40U is 99% OF TOTAL, MAX. SIZE 5"
+ 3" in 40L is 14.5% OF TOTAL, MAX. SIZE 8"

PUBLIC POWER CORPORATION
OFFICE FOR POURNARI HYDROELECTRIC PROJECT
GRAINSIZE DISTRIBUTION CURVES
SAMPLES: 40U - 40L
NOVEMBER 1972
PLATE D-26

ΕΝΟΤΗΤΑ 5: ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ
ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΩΝ-ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΕΤΗΣΙΩΝ
ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΩΝ ΦΕΡΤΩΝ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.4 Γενικές παράμετροι στερεοπαροχής σε ύδατορρέυματα

1.4.1 Γενικά

Ἡ συνολική στερεοπαροχή μιᾶς συγκεκριμένης κοκκομετρικῆς κλάσεως φερτῶν σε ἓνα υδατόρρευμα ἐξαρτᾶται ἀπὸ δύο γενικούς παράγοντες:

- Ἀπὸ τὴν ἱκανότητα τοῦ υδατορρέυματος νὰ μεταφέρει τὰ ἐν λόγω φερτὰ τῆς δοσμένης κλάσεως.
- Ἀπὸ τὴ διαθεσιμότητα τῶν φερτῶν τῆς κλάσεως αὐτῆς στὸ υδατόρρευμα.

Ἔτσι γιὰ τὰ ὑλικά κοίτης πού ὑπάρχουν σε μεγάλες ποσότητες, ἡ διαθεσιμότητα μπορεῖ νὰ θεωρηθεῖ σταθερή, καί ἐπομένως ἡ στερεοπαροχή καθορίζεται μόνο ἀπὸ τὴν ἱκανότητα τοῦ υδατορρέυματος νὰ τὰ μεταφέρει.

Ὅμως γιὰ τὰ λεπτόκοκκα ἔδαφικά ὑλικά, πού βρίσκονται σε πολὺ μικρές ποσότητες στὴν κοίτη, ἡ ἱκανότητα τοῦ υδατορρέυματος γιὰ τὴ μεταφορά τους, ὑπερτερεῖ σε σχέση τὴν διαθεσιμότητά τους καί ἔτσι ἡ στερεοπαροχή καθορίζεται μόνο ἀπὸ τὴν διαθεσιμότητα. Δεδομένου ὅτι τὰ λεπτόκοκκα ἔδαφικά ὑλικά εἰσάγονται σε μεγάλες ποσότητες στὸ υδατόρρευμα ἀπὸ πλευρικές εἰσορές, ἡ διαθεσιμότητά τους - ἄρα καί ἡ στερεοπαροχή - ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὰ μεγέθη τῆς ἐπιφανειακῆς ἀπορροῆς καί τῆς ἐπιφανειακῆς διαβρώσεως τῶν ἔδαφῶν κατὰ τὴν ὑπόψη χρονικὴ φάση.

Ἡ ποσοτικὴ ἐκτίμηση τῆς ἱκανότητας ἑνὸς υδατορρέυματος γιὰ μεταφορά μιᾶς κλάσεως φερτῶν μέθοσμένα ὁμογενῆ χαρακτηριστικά, εἶναι πρόβλημα μηχανικῆς ρευστῶν. Οἱ παράμετροι πού τὴν ἐπιρεάζουν, σε γενικὲς γραμμὲς εἶναι: α) οἱ μηχανικὲς ἰδιότητες τοῦ ρευστοῦ (β) ἡ γεωμετρία τοῦ υδατορρέυματος καί (γ) οἱ παράμετροι ροῆς σε αὐτό .

Ἀντίθετα ἐκτίμηση τῆς διαθεσιμότητας τῶν ὑλικῶν πού δέν βρίσκονται μέ ἐπάρκεια στὴν κοίτη, θά ἀπαιτοῦσε τὴν γνώση τῆς γεωλογίας, τῆς τοπογραφίας, τῆς φυτοκαλύψεως καί χρήσεως γῆς, καί τῆς ὑδρολογίας τῆς λεκάνης ἀπορροῆς.

Λόγω τῆς πολυπλοκότητας ὅμως τῶν φαινομένων ἐπιφανειακῆς διαβρώσεως καί μεταφορᾶς τῶν προϊόντων τῆς, δέν ὑπάρχει ἀποτελεσματικὴ μεθοδολογία ἐκτιμῆσεως τῆς στερεοπαροχῆς τῶν λεπτόκοκκων ἔδαφικῶν ὑλικῶν ἀπευθείας ἀπὸ τίς γεωλογικὲς, τοπογραφικὲς καί ὑδρολογικὲς παραμέτρους τῆς λεκάνης ἀπορροῆς (τούλάχιστον σε μικρὴ χρονικὴ βάση).

Πάντως, αφού η στερεοπαροχή λεπτόκοκκων έδαφικών υλικών μπορεί να είναι πολύ σοβαρό ποσοστό της συνολικής, είναι σαφές ότι μόνο η υδροδυναμική αντιμετώπιση του προβλήματος μεταφοράς φερτών σε φυσικά ύδατορρέυματα, δεν έπαρκει για την περιγραφή και την ποσοτική εκτίμηση του φαινομένου.

1.4.2 Έμπειρική θεώρηση των παραμέτρων

1.4.2.1 Ύδραυλικές παράμετροι (παροχή Q, ταχύτητα V, βάθος ροής y)

Παρόλο ότι οι υδραυλικές παράμετροι δεν άρκοϋν για την εκτίμηση της στερεοπαροχής, όμως υπάρχει ίσχυρή συσχέτιση μεταξύ στερεοπαροχής και κάθε μιας από αυτές, (οι τρεις παράμετροι Q-V-y είναι έξαρτημένες για μια συγκεκριμένη διατομή ύδατορρέυματος).

Η πιο συνηθισμένη από τις παραπάνω συσχετίσεις είναι η συσχέτιση της στερεοπαροχής με την παροχή που εκφράζεται με την λεγόμενη καμπύλη μεταφοράς φερτών (Sediment transport Curve).

Η ύπαρξη ίσχυρης τέτοιας συσχετίσεως δικαιολογείται από τα εξής:

- Η παροχή Q του ύδατορρέυματος, για δοσμένη γεωμετρία της διατομής, αντιπροσωπεύει σε ικανοποιητικό βαθμό όλες τις υδραυλικές παραμέτρους της διατομής, άρα μπορεί να οδηγήσει σε ποσοτική εκτίμηση της ικανότητας του ύδατορρέυματος για μεταφορά φερτών.
- Η παροχή Q είναι ταυτόχρονα και υδρολογική παράμετρος και, τουλάχιστον για μεγάλες τιμές της, δίνει ένα μέτρο της άπορροής και της διαβρώσεως της λεκάνης, για δοσμένα γεωλογικά και άλλα χαρακτηριστικά της λεκάνης.

Η συσχέτιση συνήθως εκφράζεται με σχέση της μορφής

$$Q_s = kQ^m$$

όπου Q_s η συνολική στερεοπαροχή και k και m σταθερές για την υπόψη λεκάνη άπορροής. Ο εκθέτης m σε όρισμένες περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι μεταβάλλεται κατά διαστήματα μεταβολής του Q. Συνηθισμένες τιμές του m βρίσκονται στο διάστημα $1,0 \div 3,0$ όπου οι τιμές κοντά στο 1,0 παρατηρούνται για πολύ μεγάλες τιμές της παροχής.

Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι μια καμπύλη μεταφοράς φερτών δεν δίνει πολύ σαφείς πληροφορίες για τη στερεοπαροχή, γιατί στην πραγματικότητα η διασπορά των τιμών της στερεοπαροχής, σε μια διατομή ύδατορρέυματος, για μια τιμή της παροχής, είναι τεράστια.

Έχουν παρατηρηθεί αποκλίσεις της μέγιστης στερεοπαροχής από την ελάχιστη, που πραγματοποιήθηκαν για την ίδια τιμή της παροχής, της τάξεως του 5.000% (δηλαδή μέγιστη: ελάχιστη = 50). Η διασπορά αυτή είναι μεγαλύτερη για μικρές τιμές της παροχής και μικραίνει με την αύξηση της παροχής. Αυτό εξηγείται αν ληφθεί υπόψη ότι πολύ μεγάλες τιμές της απορροής πραγματοποιούνται κάτω από περιορισμένου αριθμού συνδυασμούς, των υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης.

1.4.2.2 Γεωμετρία ύδατορρέυματος (διατομή-κλίση πυθμένα)

Η επίδραση της γεωμετρίας της διατομής και της κλίσεως πυθμένα του ύδατορρέυματος στη στερεοπαροχή είναι προφανής, δεδομένου ότι τα έν λόγω στοιχεία επηρεάζουν άμεσα τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής, άρα και την ικανότητα του ύδατορρέυματος να μεταφέρει φερτά.

Η γεωμετρία της διατομής δεν είναι πάντα σταθερή στο χρόνο σε μιά θέση ύδατορρέυματος. Η κλίση πυθμένα γενικά δεν παρουσιάζει σοβαρές αλλαγές στο χρόνο, αντίθετα όμως η κλίση ελεύθερης επιφάνειας, που κατά προσέγγιση είναι ίση με την κλίση ενέργειας μεταβάλλεται. Έχει παρατηρηθεί τέτοια μεταβολή της τάξεως του 400% (MISSISSIPPI, St Louis [2]).

1.4.2.3 Χαρακτηριστικά φερτών υλικών κοίτης

Η επίδραση των στατιστικών παραμέτρων των διαφόρων ιδιοτήτων των υλικών κοίτης στη στερεοπαροχή είναι άμεσα κατανοητή, δεδομένου ότι από αυτές εξαρτάται η ικανότητα του ύδατορρέυματος για τη μεταφορά τους.

Οι έν λόγω παράμετροι, και κύρια αυτές που αφορούν διαστάσεις φερτών, μπορεί να παρουσιάζουν αλλαγές στο χρόνο. Έχει παρατηρηθεί μεταβολή της διαμέσου τιμής της κοκκομετρικής καμπύλης στον ποταμό MISSISSIPPI από 0,2 mm σε 1,1 mm μέσα στον ίδιο χρόνο (1952, St Louis) [2].

1.4.2.4 Τραχύτητα κοίτης

Σύμφωνα με τις σχετικές έρευνες στην ποτάμια υδραυλική, η τραχύτητα κοίτης θεωρείται ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες. - Την τραχύτητα που οφείλεται στα φερτά κοίτης και που περιγράφεται από κάποια χαρακτηριστική στατιστικά ορισμένη διάσταση φερτών (συνήθως $k_s = d_{65}$).

- Τήν τραχύτητα πού όφείλεται στους σχηματισμούς τής κοίτης (ρυτίδες, δύνες, άντιδύνες). Οί σχηματισμοί αυτοί μεταβάλλονται ανάλογα μέ τά ύδραυλικά χαρακτηριστικά του ύδατορρεύματος και έτσι οί ιδιότητες τών φερτών και οί ύδραυλικές παράμετροι άρκοϋν για τήν περιγραφή τους.

Έπομένως ή τραχύτητα κοίτης θεωρείται σέ γενικές γραμμές γνωστή, άν είναι γνωστές οί ιδιότητες τών φερτών κοίτης και οί ύδραυλικές παράμετροι.

1.4.2.5 Θερμοκρασία νεροϋ

Η επίδραση τής θερμοκρασίας του νεροϋ είναι σημαντική και άρκετά πολύπλοκη.

Κατ'άρχήν ή θερμοκρασία έπηρεάζει τίς ιδιότητες του νεροϋ (πυκνότητα - κινηματική συνεκτικότητα) και, σάν άμεση συνέπεια, τήν ταχύτητα καθιζήσεως τών φερτών. Μείωση τής θερμοκρασίας T οδηγεί σέ μείωση τής ταχύτητας καθιζήσεως W . Αυτό οδηγεί σέ αύξηση τής στερεοπαροχής, λόγω αύξήσεως τής συγκεντρώσεως φορτίου σέ αιώρηση, υπό τήν προϋπόθεση ότι δέν μεταβάλλονται οί ιδιότητες ροής (V, τ_0). Έχει παρατηρηθεϊ όμως ότι ή μεταβολή στην θερμοκρασία προκαλεί άλλες και στίς ιδιότητες ροής. Συγκεκριμένα μείωση τής θερμοκρασίας παρατηρήθηκε ότι οδηγεί σέ έπιπεδοποίηση του πυθμένα και έπομένως μείωση τής τραχύτητάς του. (Έχει παρατηρηθεϊ, μεταβολή στον συντελεστή Manning n κατά 50% για μεταβολή θερμοκρασίας $20^{\circ}C$).

Τό γεγονός αυτό οδηγεί σέ μείωση τής άντιστάσεως στή ροή, αύξηση τής ταχύτητας V και έπομένως αύξηση τής ικανότητας του ρεύματος νά παρασύρει φερτά. Παράλληλα όμως, λόγω τής πτώσεως τής θερμοκρασίας, αύξάνει ή συνεκτικότητα του νεροϋ και έπομένως και τό πάχος του στρωτου όριακου ύποστρώματος, πού τείνει νά προστατεύσει τόν πυθμένα από τή σύρση. Η ίσορροπία ανάμεσα στους δύο αυτούς παράγοντες (αύξηση ικανότητας του ρεύματος για μεταφορά φερτών αλλά και μεγαλύτερη προστασία του πυθμένα από τή σύρση) καθορίζει σέ τελευταία άνάλυση τήν αύξηση ή μείωση τής στερεοπαροχής. Αν και ή ίσορροπία δέν είναι μονοσήμαντα καθορισμένη, συνήθως σέ φυσικά ύδατορρεύματα ο πρώτος παράγων υπερτερεί και έτσι πτώση τής θερμοκρασίας οδηγεί τελικά σέ αύξηση τής στερεοπαροχής. Έτσι στον ποταμό Colorado έχει παρατηρηθεϊ για τήν ίδια παροχή, αύξηση τής στερεοπαροχής κατά 250% (2,5 φορές) για μείωση τής θερμοκρασίας κατά $20^{\circ} C$. [2].

1.4.2.6 Ύδρολογικές παράμετροι

Ἡ ἱστορικά ὀρισμένη ἐξέλιξη τῶν τιμῶν τῶν ὑδρολογικῶν μεταβλητῶν τῆς λεκάνης ἀπορροῆς, σάν καθοριστικός παράγοντας τῆς ἐξελίξεως τῆς διαβρώσεως, ἐπηρεάζει τὴν στερεοπαροχὴ ἑνός ὕδατορρέυματος μέ τούς παρακάτω τρόπους:

- Σέ μεγάλη χρονική κλίμακα (ὑδρολογικό ἔτος ἢ ἔτη) προκαλεῖ ἀλλαγές στά στατιστικά χαρακτηριστικά τῶν ὑλικῶν κοίτης καί στή γεωμετρία τοῦ ὕδατορρέυματος.
- Σέ μικρή χρονική κλίμακα (καταιγίδα) καθορίζει τὴν ποσότητα τοῦ εἰσερχόμενου στό ὕδατόρρευμα λεπτόκοικου ἑδαφικοῦ ὑλικοῦ.

Εἰδικότερα ὡς πρός τὴν μικρὴ χρονική κλίμακα οἱ ὑδρολογικές μεταβλητές πού ἔχουν καθοριστική σημασία γιά τὴ στερεοπαροχὴ εἶναι:

- Ἔνταση καί ἐνέργεια βροχοπτώσεως
- Ποσότητα ἀπορροῆς
- Ἑδαφική ὑγρασία πρὶν ἀπὸ τὴν βροχόπτωση
- Κάλυψη ἢ ὄχι ἀπὸ στρώματα χιονιοῦ ἢ πάγου - κατάσταση στρωμάτων (π.χ τήξη).

Ἔτσι ἰσχυρές καλοκαιρινές βροχοπτώσεις δίνουν πολὺ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις φερτῶν ἀπὸ βροχές σέ καλυμμένο μέ χιόνι ἑδαφος ἢ ἀπὸ ἀπορροές ὀφειλόμενες σέ τήξη χιονιῶν (παρατηρηθεῖσες ἀναλογίες μεγεθῶν 2:1 ἕως 3:1).

Πάντως ἡ ἐπίδραση τῶν παραπάνω παραμέτρων στή στερεοπαροχὴ, σέ μικρὴ χρονική κλίμακα εἶναι σοβαρὴ στὸν βαθμὸ πού ἡ στερεοπαροχὴ λεπτόκοικων ἑδαφικῶν ὑλικῶν εἶναι σοβαρὸ ποσοστὸ τῆς συνολικῆς.

1.4.2.7. Φυσικὲς παράμετροι τῆς λεκάνης

Στὴν κατηγορία αὐτὴ ἀνήκουν οἱ ἐξῆς παράμετροι:

- Τοπογραφία
- Γεωλογία
- Φυτοκάλυψη
- Χρῆση γῆς

Γενικά οἱ ἐν λόγω παράμετροι δέν παρουσιάζουν ἀλλαγές στό χρόνο, στήν ἴδια λεκάνη ἀπορροῆς. Ἡ ἐπίδρασή τους ἐνδιαφέρει ὅταν γίνεται σύγκριση τῶν στερεοπαροχῶν διαφορετικῶν λεκανῶν.

Ἐξαίρεση ἀποτελεῖ ἡ φυτοκάλυψη πού παρουσιάζει ἐποχιακὲς διακυμάνσεις καί σέ εἰδικὲς περιπτώσεις ἡ χρῆση γῆς πού μπορεῖ νά ὑποστεῖ μεταβολές.

3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ-ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΣΟΤΙΚΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗΣ

3.1 Γενικά

Ἡ ὑδρολογικὴ προσέγγιση τῆς ἐκτίμησης τῆς στερεοπαροχῆς προϋποθέτει τὴν ἐκτέλεση μετρήσεων στερεοπαροχῆς στὴν ὑπὸ μελέτη διατομὴ τοῦ ὑδατορροεύματος.

Ἐνα πρόγραμμα τέτοιων μετρήσεων γενικὰ περιλαμβάνει τὰ παρακάτω:

- Ἐκλογή ἀντιπροσωπευτικῆς διατομῆς. Ἡ διατομὴ πρέπει νὰ βρίσκεται σὲ εὐθύγραμμο τμῆμα τοῦ ὑδατορροεύματος, πού κατὰ μῆκος του νὰ μὴ παρατηροῦνται σοβαρὲς μεταβολές τῆς διατομῆς.
- Λήψη στοιχείων γεωμετρίας τῆς διατομῆς καὶ κατασκευὴ καμπυλῶν στάθμης - ἔμβαδοῦ διατομῆς, στάθμης - βρεχομένης περιμέτρου καὶ στάθμης - ὑδραυλικῆς ἀκτίνας.
- Λήψη ἀντιπροσωπευτικῶν δειγμάτων φερτῶν ὑλικῶν κοίτης. Μηχανικὴ ἀνάλυση τῶν δειγμάτων γιὰ τὴν παραγωγή κοκκομετρικῆς καμπύλης καὶ τὸν ὑπολογισμό τῆς πυκνότητας τῶν φερτῶν.
- Μετρήσεις ταχυτήτων σὲ καθορισμένα σημεῖα τῆς διατομῆς, γιὰ ἓνα κατάλληλο εὔρος τιμῶν τῆς παροχῆς ἢ τῆς στάθμης. Ἀπὸ τίς μετρήσεις αὐτές ὑπολογίζεται ἡ παροχὴ καὶ παρέχεται ἡ κατανομὴ ταχυτήτων στὴ διατομὴ.
- Μετρήσεις τῆς στάθμης, τῆς κλίσεως ἐλεύθερης ἐπιφάνειας καὶ τῆς θερμοκρασίας τοῦ νεροῦ, γιὰ κάθε μέτρηση παροχῆς.
- Μετρήσεις συγκεντρώσεων αἰωρούμενων στερεῶν σὲ προεπιλεγμένα σημεῖα, σὲ συνδυασμὸ κάθε φορὰ μὲ τὴ μέτρηση τῆς παροχῆς.

Ἡ φύση τοῦ προβλήματος καθορίζει κάθε φορὰ τίς εἰδικότερες ἀπαιτήσεις τοῦ προγράμματος μετρήσεων, ἥτοι τὴν χρονικὴ βάση τῶν μετρήσεων, τὸ κατάλληλο εὔρος τιμῶν τῆς στάθμης ἢ τῆς παροχῆς, τὴν πυκνότητα τῶν σημείων στάθμης ἢ τῆς ταχύτητας καὶ τῆς συγκεντρώσεως. Συνήθως μετροῦνται μέσες συγκεντρώσεις αἰωρούμενων στερεῶν σὲ ὀρισμένες κατακόρυφες τῆς διατομῆς, μὲ ὀλοκληρωτικούς ὡς πρὸς τὸ ὕψος δειγματοληπτες, ἀλλὰ ἐνδέχεται νὰ ἀπαιτοῦνται σημειακὲς μετρήσεις συγκεντρώσεως μὲ ὀλοκληρωτικούς ὡς πρὸς τὸ χρόνο δειγματοληπτες. Ἡ στερεοπαροχὴ μὲ σύρση στίς περισσότερες περιπτώσεις ἐκτιμᾶται ἀπὸ τίς συγκεντρώσεις αἰωρούμενων, μὲ τὴ χρήση κατάλληλων μεθόδων (τροποποιημένη μέθοδος Einstein, μέθοδος Colly) Ἐνδέχεται ὅμως νὰ ἀπαιτοῦνται ἀπευθείας μετρήσεις τῆς στερεοπαροχῆς μὲ σύρση.

Τά δεδομένα τών μετρήσεων στή συνέχεια έπεξεργάζονται κατάλληλα μέ σκοπό τήν κατάρτιση ενός έμπειρικοῦ ομοιώματος.

Συνήθως ή μαθηματική δομή τών εφαρμοζομένων έμπειρικών ομοιωμάτων είναι απλούστατη.

Έτσι στήν κατάρτιση έμπειρικών ομοιωμάτων τό κύριο βάρος από άποψη άπαιτούμενης έργασίας έχει ή συλλογή στοιχείων ύπαίθρου.

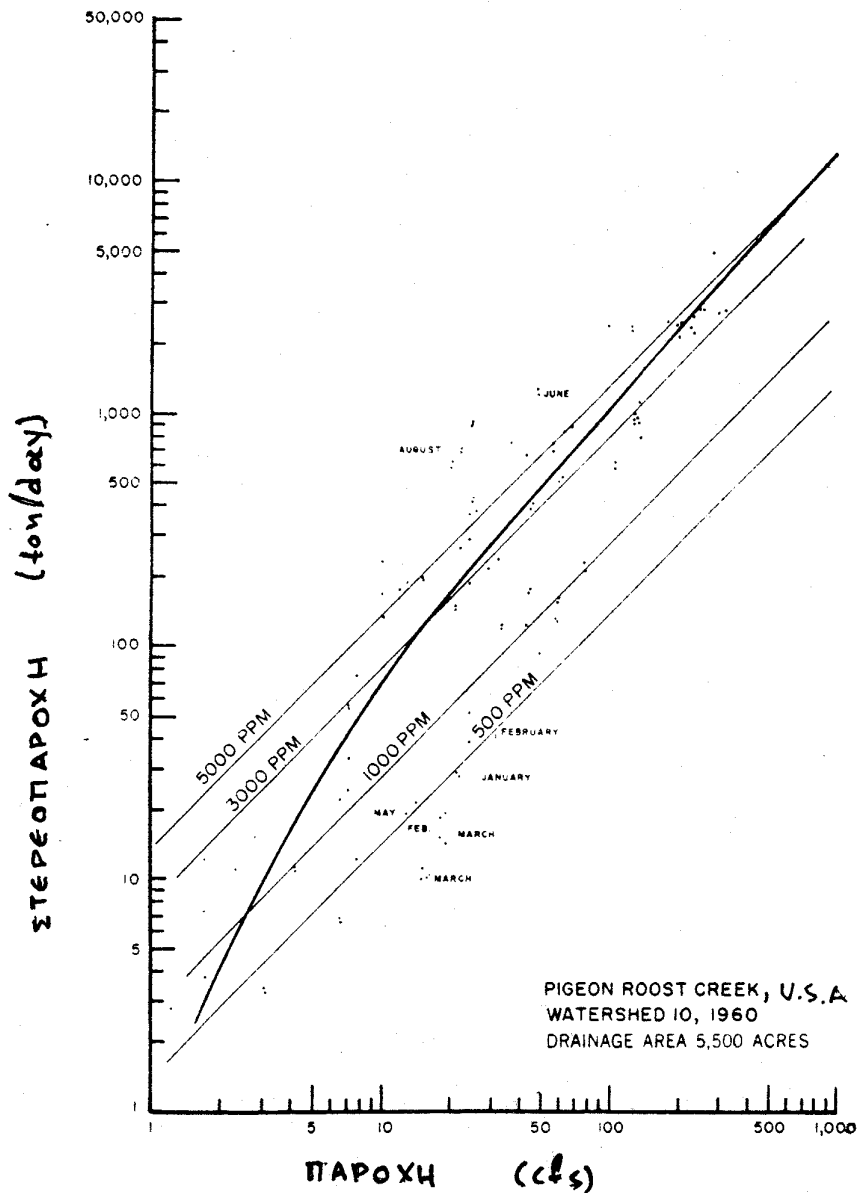
Τά έμπειρικά ομοιώματα περιλαμβάνουν γενικά πολύ μικρότερο πλήθος εισόδων από τά υδροδυναμικά ομοιώματα. Αυτό όμως δέν είναι σέ βάρος τής ακρίβειάς τους στήν πραγματικότητα είναι πολύ ακριβέστερα από τά υδροδυναμικά. Αυτό είναι άλλωστε άυτόνοήτο, δεδομένου ότι ή κατάρτισή τους στηρίζεται σέ μετρημένες τιμές στερεοπαροχών. Η βασική τους διαφορά από τά υδροδυναμικά ομοιώματα είναι ότι οι υδραυλικές παράμετροι στά έμπειρικά ομοιώματα έχουν καί υδρολογικό χαρακτήρα, καί μέ έμμεσο τρόπο άπεικονίζουν τόν συνδυασμό τών υδρολογικών καί φυσικών παραμέτρων τής λεκάνης.

Τά κυριότερα έμπειρικά ομοιώματα πού χρησιμοποιούνται ανήκουν σέ δύο τύπους: Τά ομοιώματα τύπου καμπύλης μεταφορᾶς φερτῶν καί τά ομοιώματα τύπου μοναδιαίου στερεογραφήματος. Στά δεύτερα οι εισοδοι (παροχή, βροχή κλπ) καί οι έξοδοι (στερεοπαροχή) είναι άμεσα συναρτήσεις του χρόνου.

3.2. Ομοιώματα τύπου καμπύλης μεταφορᾶς φερτῶν.

Η καμπύλη μεταφορᾶς φερτῶν (Sediment Transport Curve) είναι ή γραφική έκφραση τής σχέσεως στερεοπαροχῆς συναρτήσει τής παροχῆς σέ μιá ορισμένη διατομή ενός ύδατορρεύματος. Η καθιέρωση σή της όφείλεται στήν αρκετά καλή συσχέτιση πού ύπάρχει ανάμεσα στά δύο μεγέθη, πού δικαιολογεϊται από τό γεγονός ότι ή παροχή ενός φυσικοῦ ύδατορρεύματος αντιπροσωπεύει καί τίς υδραυλικές παραμέτρους τής διατομῆς αλλά καί τίς υδρολογικές παραμέτρους τής λεκάνης άπορροῆς.

Στό σχήμα (3.2.A) παρουσιάζεται μιá τέτοια καμπύλη πού έχει κατασκευαστεϊ μέ γραφική



Σχήμα 3.2.A. Τυπική καμπύλη μεταφοράς φερτών (σέ αιώρηση).

μέθοδο σέ διπλά λογαριθμικό χαρτί καί αναφέρεται στήν στερεοπαροχή σέ αιώρηση συναρτήσει τῆς παροχῆς. Στό ἴδιο σχῆμα φαίνεται ἡ πολύ μεγάλη διασπορά τῶν μετρημένων τιμῶν τῆς στερεοπαροχῆς γιά τήν ἴδια τιμή τῆς παροχῆς, πού φτάνει σέ ποσοστό τό 5.000% (μεγίστη: ἐλάχιστη = 50 γιά παροχή \approx 20 cfs)

Φαίνεται ἐπίσης ἡ ἐπίδραση τῆς ἐποχῆς τοῦ ἔτους στή στερεοπαροχή. Τέλος παρατηρεῖται μιά μείωση τῆς κλίσεως τῆς καμπύλης στό λογαριθμικό χαρτί γιά μεγάλες τιμές τῆς παροχῆς, μέ ταυτόχρονη τάση νά γίνεи εὐθεῖα καί ἀντίστοιχη μείωση τῆς διασπορᾶς τῶν πειρα-

ματικών σημείων. Η μείωση της διασποράς εξηγείται λόγω του περιορισμένου αριθμού συνδυασμών μετεωρολογικών και υδρολογικών παραμέτρων για την πραγματοποίηση εξαιρετικών τιμών της παροχής. Το γεγονός αυτό καθιστά την καμπύλη αξιόπιστη για τις εφαρμογές παρόλη την μεγάλη γενικότερα διασπορά, δεδομένου ότι στην πράξη ενδιαφέρουν οι μεγάλες τιμές της στερεοπαροχής, που δίνουν μεγάλο συνολικό όγκο φερτών.

Συμπερασματικά στο υπό εξέταση ομοίωμα μόνη είσοδος είναι η παροχή Q και οι δυνατές έξοδοι είναι η συνολική στερεοπαροχή Q_s , η στερεοπαροχή με αιώρηση Q_{ss} και με σύρση Q_{sb} .

Η κατάρτιση των ομοιωμάτων συνίσταται στην γραφική ή αναλυτική προσαρμογή κάποιας καμπύλης σε πραγματικά δεδομένα μετρήσεων.

Οι συνηθέστερες αναλυτικές εκφράσεις που χρησιμοποιούνται είναι της μορφής:

$$\text{για τη στερεοπαροχή με αιώρηση: } Q_{ss} = L_s Q^n \quad (3.2. \alpha)$$

$$\text{για τη στερεοπαροχή με σύρση: } Q_{sb} = L_b Q^n \quad (3.2. \beta)$$

όποτε για τη συνολική στερεοπαροχή προκύπτει:

$$Q_s = Q_{ss} + Q_{sb} = L_s Q^n + L_b Q^n \quad (3.2. \gamma)$$

Αν η στερεοπαροχή λεπτόκοικων έδαφικών υλικών είναι σημαντική, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις, αντί για τις (3.2.α - γ).

$$\text{για τη στερεοπαροχή υλικών κοίτης: } Q_{bs} = k_b Q^m \quad (3.2. \delta)$$

για τη στερεοπαροχή λεπτόκοικων έδαφικών υλικών (απόπλυσης):

$$Q_w = k_w Q^m \quad (3.2. \epsilon)$$

όποτε για τη συνολική στερεοπαροχή προκύπτει:

$$Q_s = Q_{bs} + Q_w = k_b Q^m + k_w Q^m \quad (3.2. \zeta)$$

Η εφαρμογή των τελευταίων σχέσεων βέβαια προϋποθέτει ανάλυση των μετρημένων συγκεντρώσεων κατά κοκκομετρική κλάση, ώστε να μπορεί να γίνει η διάκριση των συγκεντρώσεων υλικών κοίτης και λεπτόκοικων έδαφικών υλικών.

Συχνά χρησιμοποιείται μία μόνο έκθετική σχέση για τη συνολική στερεοπαροχή, αν δέν ενδιαφέρουν οι συνιστώσες της.

$$Q_{ss} = k Q^j \quad (3.2. \eta)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, αντί για τις στερεοπαροχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ισοδύναμα οι αντίστοιχες μέσες συγκεντρώσεις

στερεοπαροχής, πού δρίζονται σάν λόγοι στερεοπαροχής καί παροχής. Στήν περίπτωση αὐτή οἱ ἐκθέτες τῶν σχέσεων θά εἶναι κατά μία μονάδα μικρότεροι, καί ὀπωσδήποτε θετικοί, δεδομένου ὅτι οἱ μέσες συγκεντρώσεις εἶναι φυσικό νά αὐξάνουν μέ τήν αὐξηση τῆς παροχής. Τό τελευταῖο σημαίνει ὅτι οἱ ἐκθέτες τῶν σχέσεων (3.2.α-η) εἶναι ὀπωσδήποτε μεγαλύτεροι τοῦ 1.

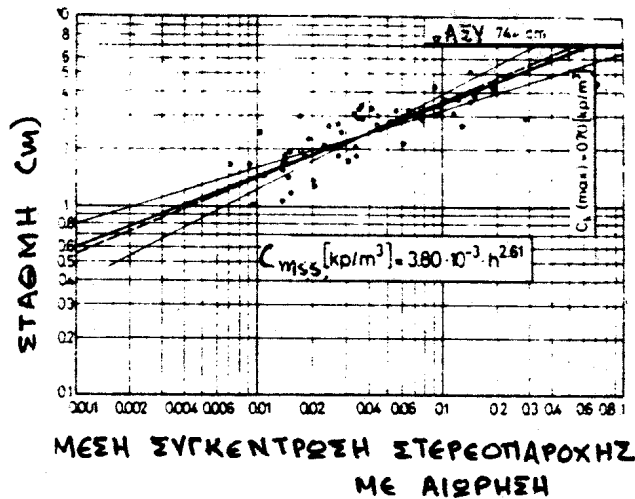
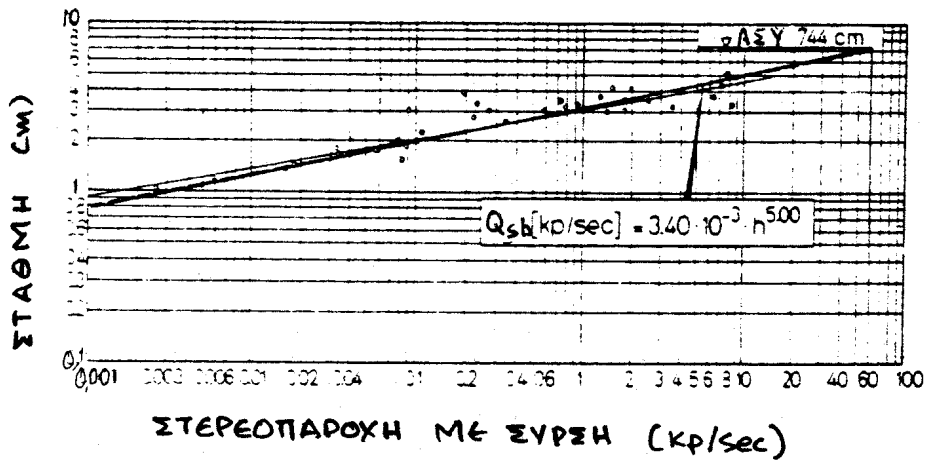
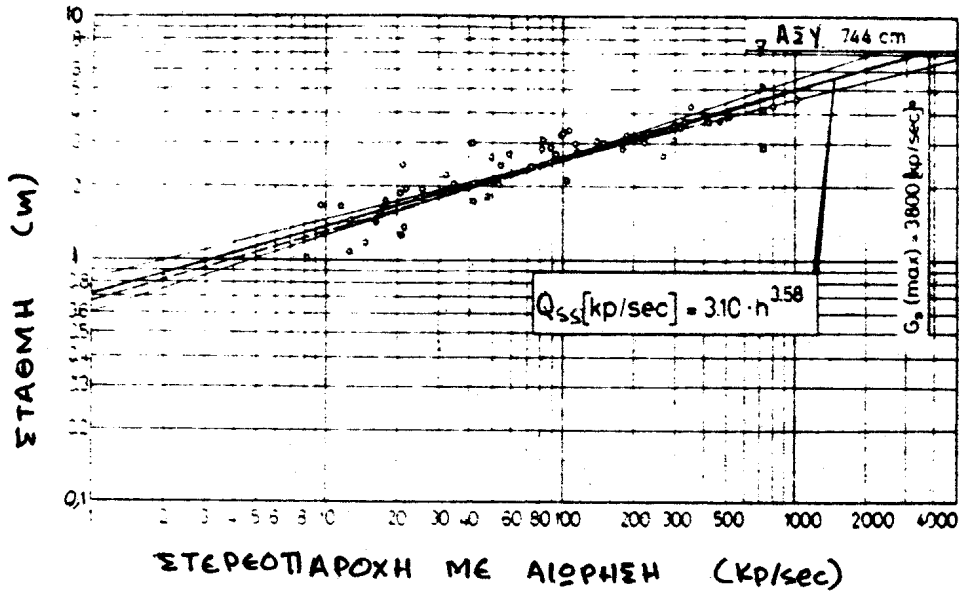
Ἐκτός ἀπό τίς καμπύλες μεταφορᾶς φερτῶν πολύ συχνά χρησιμοποιοῦνται καμπύλες τῆς στερεοπαροχής συναρτήσεως τῆς στάθμης, πού βέβαια εἶναι ἰσοδύναμες μέ τίς πρώτες, δεδομένου ὅτι ἡ στάθμη συσχετίζεται μέ τήν παροχή μέ κάποια ἐπίσης ἐκθετική συνάρτηση. Τέτοιες καμπύλες δίνονται στό σχῆμα (3.2.Β) πού ἀναφέρονται στόν ποταμό Δούναβη, στή θέση Dunaalmas. Στά ἴδια σχήματα γράφονται καί οἱ ἀναλυτικές τους ἐκφράσεις, πού εἶναι παρόμοιες μέ τίς (3.2.α-γ). Τέλος στό σχῆμα (3.2.Γ) δίνονται παρόμοιες καμπύλες γιά τόν ποταμό Sajó, θέση Miscoi (Οὐγγαρία), στίς ὁποῖες ἡ στάθμη h στίς ἐκθετικές σχέσεις ἔχει ἀντικατασταθεῖ μέ $h+1m$ γιά καλύτερη προσαρμογή μέ τά πειραματικά δεδομένα [3].

Καλύτερα ἀποτελέσματα δίνει ἡ κατάρτιση ἐποχιακῶν ὁμοιωμάτων, στά ὁποῖα ἡ σχέση στερεοπαροχής παροχής (ἢ στάθμης) εἶναι διαφορετική γιά κάθε ἐποχή τοῦ ἔτους. Μέ τή θεώρηση αὐτή λαμβάνονται ἔμμεσα ὑπόψη στό ὁμοίωμα οἱ παρακάτω παράμετροι πού παρουσιάζουν ἀρκετά κανονική ἐποχιακή διακύμανση.

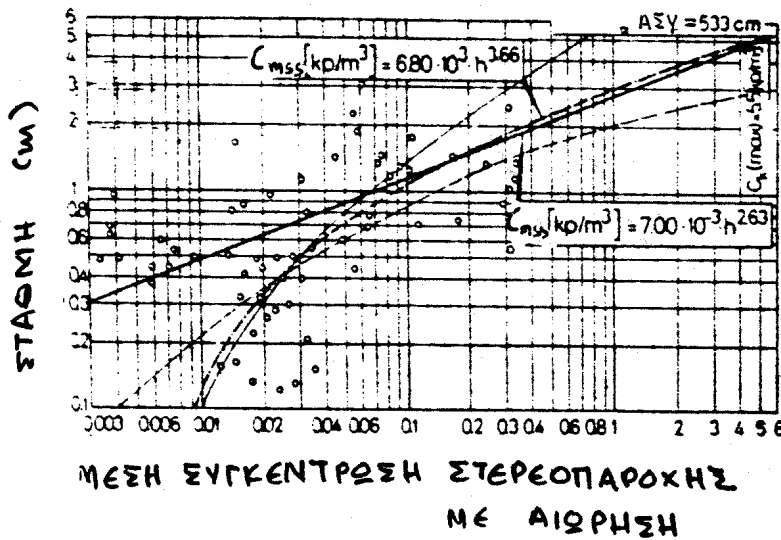
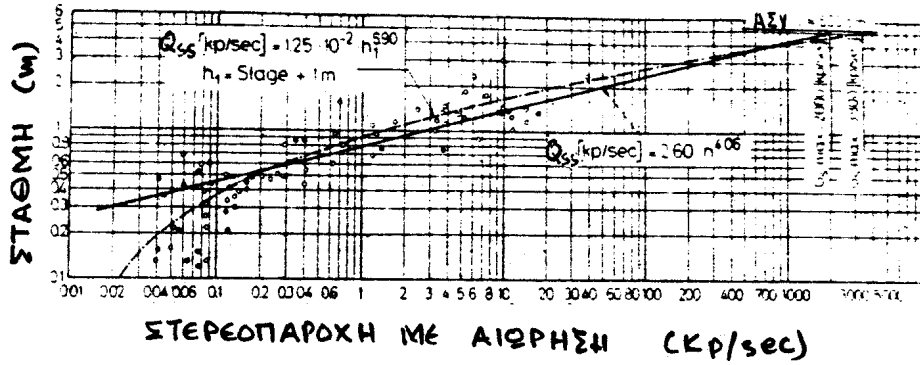
- Ἡ θερμοκρασία τοῦ νεροῦ
- Τά ἐποχιακά χαρακτηριστικά τῶν ὑδρολογικῶν παραμέτρων (π.χ. ροή βάσεως, τύπος καταγίδων)
- Οἱ ἐποχιακές διακυμάνσεις τῆς φυτοκαλύψεως τῆς λεκάνης ἀπορροῆς
- Γενικότερα, οἱ ἐποχιακές διακυμάνσεις τῶν μηχανισμῶν διαβρώσεως.

Ἡ κατασκευή τέτοιου ὁμοιώματος προϋποθέτει βέβαια πιό ἐκτεταμένο πρόγραμμα συλλογῆς στοιχείων ὑπαίθρου, ἐνῶ ὅσο ἀφορᾷ τήν ἐπεξεργασία ἀπαιτεῖ μόνο πολλαπλή κατάρτιση σχέσεων τῆς μορφῆς (3.2.α - η).

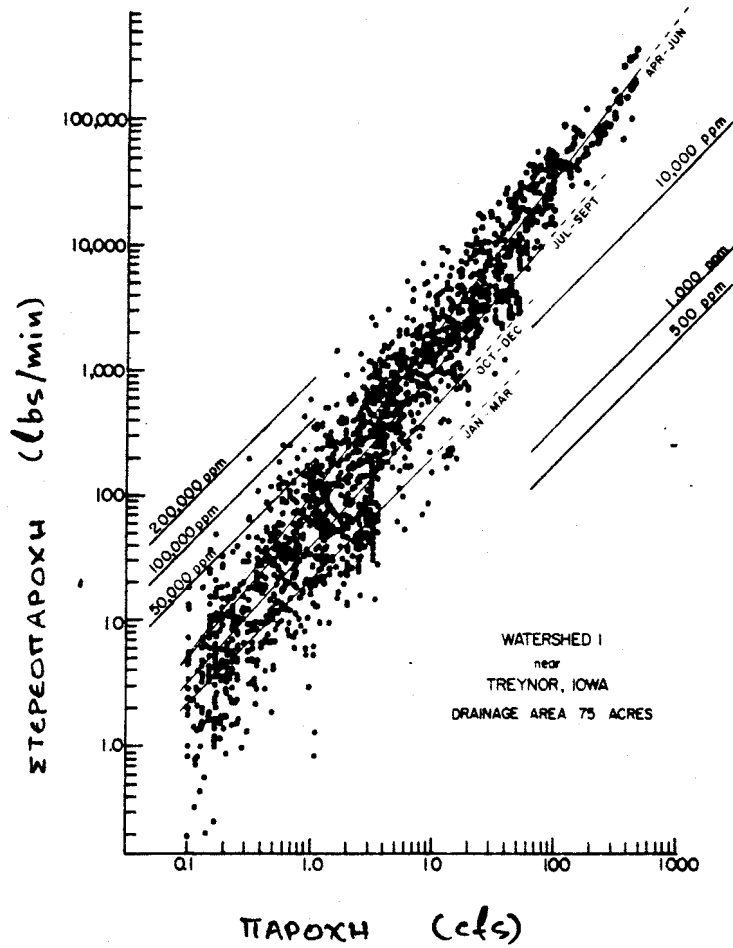
Παράδειγμα τέτοιου ὁμοιώματος ἀποτελοῦν οἱ καμπύλες τοῦ σχήματος 3.2.Δ. (ὁμοίωμα 4 ἐποχῶν).



Σχήμα 2.3.β Καμπύλες στάθμης-στερεοπαροχής στο Δούναβη, Θέση Dunaalmas [3]



Σχήμα 3.2.Γ. Καμπύλες στάθμης-στερεοπαροχής στον ποταμό Sajó, θέση Miskolc (Ουγγαρία), [3]

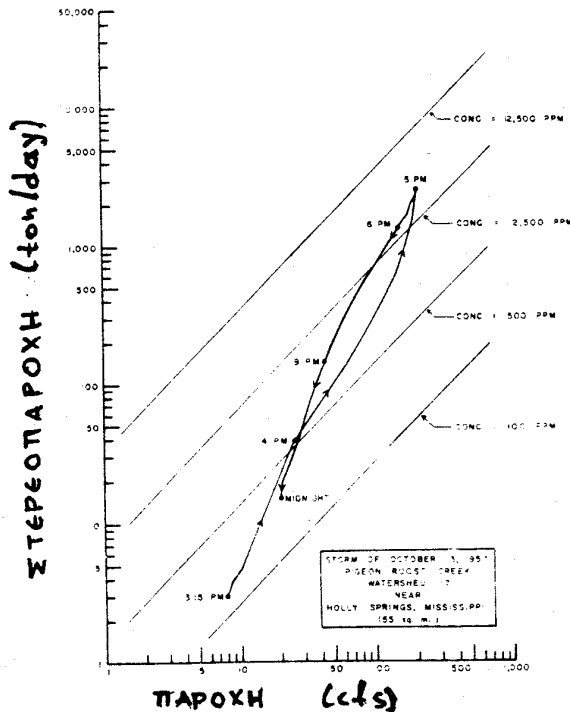


Σχήμα 3.2.Δ. Τυπικές εποχιακές καμπύλες μεταφοράς φερτών.

3.3 Όμοιώματα τύπου μοναδιαίου στερεογραφήματος.

Τά όμοιώματα αυτού του τύπου είναι τά ακριβέστερα γιατί δίνουν τήν πλήρη εικόνα τής χρονικής εξέλιξεως τής στερεοπαροχής σέ κλίμακα καταιγίδας.

Σύμφωνα μέ τά όμοιώματα αυτά ή συσχέτιση τής στερεοπαροχής μέ τήν παροχή έξαρτάται καί από τό χρόνο. Αυτό είναι σύμφωνο μέ τήν πραγματικότητα, όπως διαπιστώνεται καί στό σχήμα 3.3.A πού παρουσιάζει τήν χρονική εξέλιξη τής σχέσεως Q_s-Q κατά τή διάρκεια μιᾶς καταιγίδας.



Σχήμα 3.3.A Χρονική εξέλιξη στερεοπαροχής κατά τή διάρκεια καταιγίδας χαμηλής έντάσεως.

Ή κατάρτιση τέτοιων όμοιωμάτων είναι ιδιαίτερα σκόπιμη σέ ποταμούς μέ μεγάλο ποσοστό στερεοπαροχής λεπτόκοκκων έδαφικων ύλικων, όπου ή έπιρροή τής χρονικής φάσεως τής εξέλιξεως τής άπορροής είναι πολύ σημαντική στή στερεοπαροχή.

Ή έννοια του μοναδιαίου στερεογραφήματος είναι παράλληλη μέ τήν έννοια του μοναδιαίου ύδρογραφήματος. Τό δεύτερο όρίζεται σάν ή καμπύλη παροχής άπορροής συναρτήσει του χρόνου, για έδεατή άφέλιμη βροχόπτωση δοσμένης χρονικής διάρκειας D καί ύψους $h_0=1\text{cm}$, όμοιόμορφα κατανεμημένη στή λεκάνη άπορροής.

Ἡ μαθηματική ἔκφραση τῆς θεωρίας τοῦ μοναδιαίου ὑδρογραφήματος εἶναι: $Q(t) = Q_{\beta}(t) + U(D, t) (h/h_0)$ (3.3.α)

ὅπου $Q(t)$ ἡ συνολική παροχή στή διατομή, στό χρόνο t

$Q_{\beta}(t)$ ἡ παροχή ροῆς βάσεως στό χρόνο t

h = ὠφέλιμο ὕψος βροχῆς μέ διάρκεια D

$h_0 = 1 \text{ cm}$

$U(D, t)$ ἡ τεταγμένη τοῦ μοναδιαίου ὑδρογραφήματος γιά διάρκεια βροχῆς D στό χρόνο t

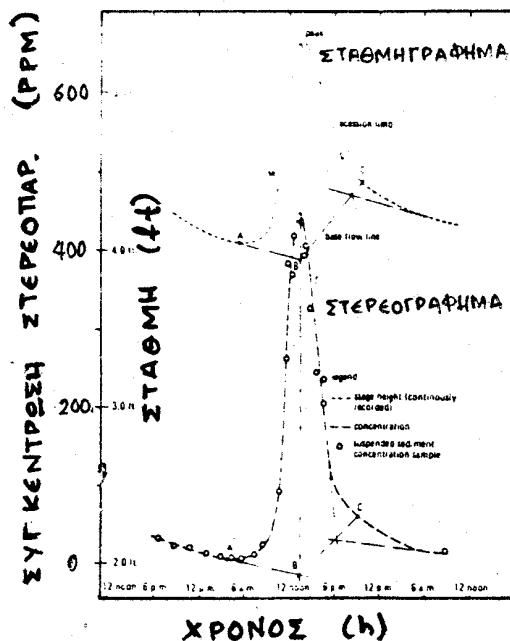
Ἄμεσο συμπέρασμα τῆς θεωρίας εἶναι: $\int_0^{\infty} U(D, t) = h_0 A$

ὅπου A ἡ ἔκταση τῆς λεκάνης

Τό στερεογράφημα ὀρίζεται ὡς ἡ καμπύλη στερεοπαροχῆς συναρτήσεως τοῦ χρόνου. Σέ ἀναλογία μέ τό ὑδρογράφημα τό στερεογράφημα ἑνός πλημμυρικοῦ γεγονότος θεωρεῖται ὅτι ἀποτελεῖται ἀπό δύο ἐπάλλληλες συνιστώσες, τό στερεογράφημα βάσεως καί τό στερεογράφημα ἀπορροῆς

$$Q_s(t) = Q_{s\beta}(t) + Q_{s\alpha}(t) \quad (3.3.γ)$$

Ὁ διαχωρισμός τῶν συνιστωσῶν γίνεται μέ μεθόδους παρόμοιες μέ τίς ἀντίστοιχες τοῦ ὑδρογραφήματος ἢ σταθμηγράφηματος. Μιά τυπική μορφή στερεογραφήματος καί μία μέθοδος διαχωρισμοῦ τῶν συνιστωσῶν φαίνεται στό σχῆμα (3.3.β).



Σχῆμα 3.3.β. Τυπική μορφή στερεογραφήματος συγκεντρώσεως καί ἀντίστοιχο σταθμηγράφημα.

Για τόν όρισμό του μοναδιαίου στερεογραφήματος εισάγεται ή έννοια του φορτίου κινητοποιουμένων φερτών ανά μονάδα επιφάνειας τής λεκάνης μέγεθος αντίστοιχο μέ τό ύψος βροχής πού όρίζεται μαθηματικά:

$$S = \frac{1}{A} \int_0^T Q_{\text{σα}}(t) dt = \frac{1}{A} \int_0^T (Q_S(t) - Q_{\text{σβ}}(t)) dt \quad (3.3.δ)$$

όπου A ή έκταση τής λεκάνης καί T χρονική τιμή άρκετά μεγαλύτερη τής διάρκειας άποροής.

Τό μοναδιαίο στερεογράφημα όρίζεται μετά από αυτά σάν ή καμπύλη στερεοπαροχής άποροής συναρτήσσει του χρόνου, για φορτίο κινητοποιουμένων φερτών $S_0 = 1 \text{ ton/Km}^2$, όμοιόμορφα κατανεμημένο στη λεκάνη σε δοσμένο χρόνο D.

Αντίστοιχα μέ τήν (3.3.α) ή (3.3.γ) γράφεται

$$Q_S(t) = Q_{\text{σβ}}(t) + U_S(D, t) \cdot S/S_0 \quad (3.3.ε)$$

όπου $Q_S(t)$ = συνολική στερεοπαροχή στό χρόνο t

$Q_{\text{σβ}}(t)$ = στερεοπαροχή βάσεως στό χρόνο t, $S_0 = 1 \text{ ton/Km}^2$

S = τό μέγεθος τών κινητοποιουμένων φερτών

$U_S(D, t)$ = ή τεταγμένη του μοναδιαίου στερεογραφήματος διάρκειας D στό χρόνο t καί βέβαια ισχύει.

$$\int_0^{\infty} U_S(D, t) dt = A \cdot S_0 \quad (3.3.ζ)$$

Η παραγωγή του μοναδιαίου στερεογραφήματος μιās δοσμένης διάρκειας D, άν υπάρχει ένα τούλάχιστον μετρημένο στερεογράφημα πού νά όφείλεται σε πραγματοποιημένη βροχόπτωση μέ διάρκεια D καί μέ περίπου όμοιόμορφη χρονικά καί τοπικά ένταση, γίνεται μέ τήν παρακάτω διαδικασία.

- Διαχωρίζονται οι συνιστώσες του στερεογραφήματος
- Υπολογίζεται τό S μέ βάση τή σχέση (2.3.3.δ). Τά όλοκληρώματα βέβαια υπολογίζονται άριθμητικά.
- Υπολογίζεται για κάθε χρόνο t ή τεταγμένη $U_S(D, t)$ μέ βάση τή σχέση (3.3.ε)

Για νά μπορεϊ νά χρησιμοποιηθεϊ τό όμοίωμα πού περιγράφεται από τήν έξίσωση 3.3.ε πρέπει για κάθε καταγίδα νά είναι γνωστό τό μέγεθος S. Έχει παρατηρηθεϊ ότι τό S συσχετίζεται ικανοποιητικά μέ τό ώφέλιμο ύψος βροχής h μέ έκθετική σχέση τής μορφής:

$$S = \alpha \cdot h^\beta$$

(3.3.η)

Μιά τέτοια σχέση μπορεί να παραχθεί αν έχουμε μετρήσεις στερεοπαροχής σε αρκετά πλημμυρικά γεγονότα. Οι συντελεστές α και β της σχέσης (3.3.η) παίρνουν διάφορες τιμές στις διαφορετικές εποχές του χρόνου.

Τέλος η εφαρμογή του ομοιώματος προϋποθέτει μια σχέση της μορφής $Q_{S\beta} = f(Q_{\beta})$ (3.3.θ) πού η κατάρτισή της είναι αρκετά εύκολη.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, το ομοίωμα του μοναδιαίου στερεογραφήματος συνολικά περιλαμβάνει:

- Τό μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης $U(D,t)$
- Τό μοναδιαίο στερεογράφημα της λεκάνης $U_S(D,t)$
- Μιά σχέση υπολογισμού του ωφελίμου ύψους βροχής h συναρτήσει του συνολικού ύψους
- Ένα σύνολο σχέσεων $S = f(h)$ της μορφής της εξίσωσης (3.3.η), μία για κάθε εποχή ή τύπο καταιγίδας.
- Μιά σχέση $Q_{S\beta} = f(Q_{\beta})$

Λόγω των πολλών και χρονικά πυκνών μετρήσεων πού απαιτούνται για την παραγωγή τέτοιου ομοιώματος, η χρήση του δέν είναι διαδεδομένη, ώστε τελικά να υπάρχουν πολλά κενά ως προς τη γνώση της συμπεριφοράς του. Τα κενά αφορούν κυρίως την αμβίβολη ύπαρξη σχέσεως σαν την (3.3.η) για όλες τις λεκάνες, καθώς επίσης και την δυνατότητα αλλαγής, της χρονικής βάσεως D του μοναδιαίου στερεογραφήματος. Τέτοια προβλήματα πρέπει να αντιμετωπίζονται με ιδιαίτερο τρόπο κάθε φορά πού εφαρμόζεται.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στόν ποταμό "Αραχθό στή θέση Τσίμοβο (έκταση λεκάνης 640 Km²) έκτελέστηκε ένα πενταετές πρόγραμμα μετρήσεων στερεοπαροχής, τά αποτελέσματα του οποίου δίνονται στον πίνακα 1. Επίσης δίνονται οι παρατηρηθείσες συχνότητες ήμερήσιων παροχών του ποταμού στήν ίδια θέση, στόν πίνακα 2.

Ζητούνται:

- α) 'Η παραγωγή καί ή διερεύνηση καμπύλης μεταφοράς φερτών στήν έν λόγω διατομή.
- β) 'Η χάραξη τής καμπύλης διάρκειας παροχών.
- γ) 'Ο ύπολογισμός τής έτήσιας μάζας φερτών.
- δ) 'Ο ύπολογισμός του έτήσιου όγκου φερτών καί του μέσου ύψους διαβρώσεως τής λεκάνης. Νά ληφθεϊ μέση πυκνότητα έδάφους ίση με 1400 Kg/m³.

Σημειώσεις:

1) Μέση συγκέντρωση αιώρουμένων $C := Q_s / Q$

$$1 \text{ ppm} \cong 10^{-3} \text{ Kg/m}^3.$$

2) Μέση έτήσια μάζα μεταφερομένων φερτών:

$$M_s = N \int_0^1 g(Q) dF(Q)$$

όπου: $Q_s = g(Q)$ ή καμπύλη μεταφοράς φερτών

$F(Q) =$ ή καμπύλη διάρκειας ήμερήσιων παροχών

$N = 365$ ήμέρες

ΠΙΝΑΚΑΣ Α - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΕΡΕΟΠΑΡΟΧΗΣ		ΠΙΝΑΚΑΣ Β - ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΠΑΡΟΧΗΣ	
Ημερομηνία	Παροχή (m ³ /sec)	Αιθέριμα Υδρογονάνθρακες (ppm)	Αιθέριμα Υδρογονάνθρακες (m ³ /sec)
14. 2. 1966	87.48	916.96	0.00-
19. 2. 1966	37.71	38.50	1.00-
24. 2. 1966	39.35	307.98	2.00-
14. 3. 1966	69.65	189.75	3.00-
26. 3. 1966	39.19	48.36	4.00-
28. 3. 1966	28.15	17.98	5.00-
2. 5. 1966	29.35	698.45	6.00-
7. 5. 1966	18.21	132.19	7.00-
20. 5. 1966	13.98	20.80	8.00-
6. 6. 1966	14.87	38.43	9.00-
11. 6. 1966	11.86	26.74	10.00-
14. 11. 1966	33.17	279.21	11.00-
6. 12. 1966	139.80	1175.26	12.00-
3. 3. 1967	18.08	20.18	13.00-
18. 4. 1967	28.74	99.38	14.00-
25. 5. 1967	27.15	345.93	15.00-
1. 6. 1967	16.30	88.51	16.00-
1. 7. 1967	5.39	149.83	17.00-
8. 7. 1967	5.70	458.72	18.00-
31. 7. 1967	5.93	337.37	19.00-
27. 2. 1968	35.10	75.32	20.00-
5. 4. 1968	22.94	54.58	21.00-
28. 5. 1968	18.49	463.33	22.00-
18. 6. 1968	11.95	277.86	23.00-
26. 6. 1968	9.03	586.67	24.00-
8. 11. 1968	3.46	54.21	25.00-
16. 11. 1968	15.16	153.37	26.00-
14. 12. 1968	13.01	98.52	27.00-
21. 12. 1968	59.08	959.16	28.00-
16. 1. 1969	71.15	947.46	29.00-
1. 3. 1969	77.32	570.00	30.00-
24. 3. 1969	24.09	171.15	31.00-
25. 4. 1969	35.49	187	32.00-
7. 5. 1969	21.38	149	33.00-
6. 12. 1969	170.96	6082	34.00-
16. 12. 1969	177.02	8032	35.00-
23. 12. 1969	25.29	87.6	36.00-
8. 1. 1970	106.88	967	37.00-
28. 1. 1970	17.12	24.29	38.00-
9. 2. 1970	25.06	130.59	39.00-
27. 2. 1970	34.92	63.10	40.00-
13. 3. 1970	64.71	301.27	41.00-
19. 3. 1970	31.88	96.48	42.00-

Συνολική Παροχή (m³/sec) 5.8
 57.6
 33.8
 19.4
 12.0
 6.4
 6.2
 5.2
 4.6
 7.4
 16.6
 14.2
 19.4
 15.8
 14.8
 32.2
 23.4
 22.0
 11.6
 7.2
 5.4
 3.8
 3.8
 2.2
 4.8
 2.2
 2.4
 1.0
 1.4
 0.4
 0.6
 0.2
 0.4
 0.2
 0.2
 0.2
 0.2
 360.00-569.80

Βιβλιογραφία

1. Θ.Σ. Ξανθόπουλος "Στερεοπαροχές και Διευθετήσεις Ύδατορρευμάτων", Πρόχειρες σημειώσεις, 'Αθήνα 1978.
2. A.S.C.E "Sedimentation Engineering", (Vito A. Vanoni editor) A.S.C.E, New York 1977 (reprinted)
3. J. Bogardi "Sediment Transport in Alluvial Streams", Akademiai Kiado - Budapest 1974.
4. W. Graf "Hydraulics of Sediment Transport", Mc Graw Hill, N. York 1971.
5. H.A. Einstein "River Sedimentation" in "Handbook of Hydrology" (V.T. Chow Editor) Section 17-II Mc Graw - Hill, 1964.
6. F.M. Henderson "Open Channel Flow", Chapter 10, Macmillan Publishing Co, Inc, New York.
7. H.A. Einstein, F.M. Abdel-Aal "Einstein Bed load Function at high Sediment rates" Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E, HY1, Jan 1972 p.137.
8. F.B. Toffaleti "Definitive Computations of Sand Discharge in Rivers", Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E., HY1, Jan 1969, p.225.
9. O. Rendon - Herrevo "Estimation of Wash Load produced on Certain Small Watersheds" Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E, HY7, July 1974, p835.
10. N. Tywoniuk "Sediment Discharge Computation Procedures" Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E, HY3, March 1972, p 521.
11. RH Cooper, A.W. Peterson, T. Blench "Critical Review of Sediment Transport Experiments" Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E, HY5, May 1972 p.827.

