

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ,  
ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ & ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ ΔΗΜ. ΕΠΙΚ. ΚΑΘ.**



**ΦΕΡΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΥΠΟΝΟΜΟΥΣ  
εφαρμογή στο δίκτυο της αθηνas**

**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΒΛ. ΖΑΡΡΗΣ**

**ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1995  
ΑΘΗΝΑ**

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ, ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ  
ΕΡΓΩΝ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ Δ., ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΦΕΡΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΥΠΟΝΟΜΟΥΣ  
εφαρμογή στο δίκτυο της Αθήνας**

**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΒΛ. ΖΑΡΡΗΣ**

**ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1995**

**ΑΘΗΝΑ**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>3</b>
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</b>	
1.1. Εισαγωγή και Αντικείμενο .....	6
1.2. Επιδράσεις των Αποθέσεων .....	8
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΓΕΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ</b>	
2.1. Γενικές Εισαγωγικές Έννοιες .....	11
2.2. Ταξινόμηση και Κατάταξη των Δικτύων Αποχέτευσης .....	12
2.3. Κατηγορίες Φερτών Υλικών .....	14
2.4. Παραγωγή Φερτών Υλικών .....	17
2.5. Φυσικές Ιδιότητες Φερτών Υλικών .....	19
2.6. Συμπεράσματα .....	26
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΟΡΦΕΣ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΥΠΟΝΟΜΟΥΣ</b>	
3.1. Εισαγωγικές Έννοιες .....	28
3.2. Συστήματα Στερεομεταφοράς .....	28
3.3. Ροή με Ομογενή Αιώρηση .....	30
3.4. Ροή με Ετερογενή Αιώρηση .....	31
3.5. Ροή με Συρτικό Φορτίο .....	32
3.6. Ροή με Απόθεση .....	35
3.7. Σχόλια στην Εφαρμογή της Θεωρίας της Ποτάμιας Υδραυλικής .....	39
3.8. Σχόλια στις Πρακτικές της Πειραματικής Υδραυλικής .....	40
3.9. Συμπεράσματα .....	40
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΟΜΒΡΙΩΝ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ</b>	
4.1. Εισαγωγικές Έννοιες .....	43
4.2. Περιγραφή της Ερευνητικής Διαδικασίας .....	43
4.3. Καταγραφή των Μετρήσεων - Ανάλυση Αιτιών Δημιουργίας των Αποθέσεων .....	49
4.4. Γενικά Συμπεράσματα και Ταξινόμηση των Αποτελεσμάτων .....	64
4.5. Εκτιμήσεις Μάζας Φερτών Υλικών .....	68
4.6. Συνέπειες των Αποθέσεων στην Υδραυλική Λειτουργία .....	72
4.7. Συμπεράσματα .....	75
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΠΟΝΟΜΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ</b>	
5.1. Γενικές Εισαγωγικές Έννοιες .....	76

5.2.Υπάρχουσες Σχεδιαστικές Πρακτικές . . . . .	76
5.3. Σύγχρονες Αντιλήψεις στο Σχεδιασμό των Δικτύων . . . . .	79
5.4. Επιμέρους Πρακτικές Σχεδιασμού για την Ελαχιστοποίηση των Αποθέσεων . . . . .	89
5.5. Συγκεκριμένες Κατασκευαστικές Οδηγίες . . . . .	94
5.6. Προτεινόμενο Σχεδιαστικό Μοντέλο . . . . .	95
5.7. Συμπεράσματα . . . . .	99

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ**

6.1. Γενικές Εισαγωγικές Έννοιες . . . . .	101
6.2. Σκοπός και Χρησιμότητα των Δεξαμενών Κατακράτησης - Καθίζησης . . . . .	101
6.3. Μορφές Δεξαμενών Κατακράτησης - Καθίζησης . . . . .	102
6.4. Διαστασιολόγηση Δεξαμενών Κατακράτησης -Καθίζησης . . . . .	107
6.5. Εισαγωγή στις Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης . . . . .	113
6.6. Συμπεράσματα . . . . .	118

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΠΟΝΟΜΩΝ**

7.1. Εισαγωγικές Έννοιες . . . . .	121
7.2.Μέθοδοι Καθαρισμού των Αγωγών . . . . .	121
7.3.Μέθοδοι Καθαρισμού Δεξαμενών Κατακράτησης - Καθίζησης . . . . .	125

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

8.1. Συμπεράσματα . . . . .	127
8.2.Προτάσεις . . . . .	128

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ . . . . .</b>	<b>129</b>
-------------------------------	------------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 . . . . .</b>	<b>131</b>
------------------------------	------------

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τα φερτά υλικά των αστικών επιφανειών που εισρέουν στα δίκτυα υπονόμων μέσω της επιφανειακής απορροής. Η σύνθετη υδραυλική λειτουργία του δικτύου υπονόμων αρκετές φορές δεν είναι σε θέση να μεταφέρει όλα τα εισρέοντα στερεά μέχρι την έξοδο του δικτύου, παρόλο που το δίκτυο είχε μελετηθεί και κατασκευαστεί με την αρχή της ταχύτητας αυτοκαθαρισμού. Έτσι αρκετά από τα φερτά υλικά αποτίθενται σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου στα οποία παρατηρούνται έντονες ανομοιομορφίες της ροής. Το κύριο ερευνητικό μέρος της διπλωματικής περιλαμβάνει τα εξής: Επιλογή μιας από τις παρακηφίσιες υπολεκάνες απορροής και των συγκεκριμένων σημείων ελέγχου του δικτύου. Συγκεκριμένα από τη μελέτη των χαρτών του δικτύου επιλέχθηκαν να εξεταστούν έξι σημεία με κριτήριο τις έντονες μεταβολές στη ροή που παρουσιάζουν, λόγω των γεωμετρικών μεταβολών (π.χ. κάθετη στροφή ενός αγωγού, μείωση της κλίσης πυθμένα προς τα κατάνη κ.α.).

Στα συγκεκριμένα σημεία έγινε επι τόπου επίσκεψη που έδειξε ότι τέσσερα στα έξι σημεία παρουσιάζουν αποθέσεις διαφόρων μορφών και σε διαφορετική έκταση. Αναμφισβήτητο όμως είναι το γεγονός ότι οι αποθέσεις φερτών υλικών είναι όντως πρόβλημα με συνέπειες στη σωστή υδραυλική λειτουργία του δικτύου. Η πρωταρχική προσφορά αυτής της διπλωματικής είναι ότι εντοπίζει την ύπαρξη των αποθέσεων όταν η τεχνολογική κοινότητα στη χώρα μας αγνοεί την ύπαρξή τους και κυρίως τις δυσλειτουργίες που προκαλούν. Μάλιστα σε μία παρατηρούμενη απόθεση το βάθος της ξεπερνά το μισό μέτρο (το 25% του συνολικού ύψους της συγκεκριμένης διατομής).

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που ακολούθησαν της δειγματοληψίας (κοκκομετρικές καμπύλες, οργανικό φορτίο) έδειξαν δύο κύριες κατηγοριοποιήσεις των αποθέσεων. Πρώτη κατηγορία είναι οι χονδρόκοκκες αποθέσεις με πάνω από το 95% της συνολικής μάζας να αποτελείται από άμμο και χαλίκι ενώ το οργανικό μέρος των αποθέσεων αυτών είναι πρακτικά μηδενικό. Οι αποθέσεις αυτές παρατηρούνται πάντα προς στα ανάντη των δικτύων. Οι συρτικές τάσεις που ασκούν οι αποθέσεις αυτές φαίνονται να είναι μεγαλύτερες από εκείνες που προκύπτουν από το νόμο του Shields. Δεύτερη κατηγορία είναι οι λεπτόκοκκες αποθέσεις με πολύ μεγάλο ποσοστό τους (πάνω από 35%) να αποτελείται από ιλύ και άργιλο. Η διαπίστωση αυτή είναι σημαντική γιατί τέτοια κοκκομετρία δεν παρατηρείται πουθενά στη βιβλιογραφία των δικτύων ομβρίων αγωγών. Το οργανικό υλικό είναι συνήθως αρκετά μεγάλο (πάνω από 20%) και συνδέεται με την αυξημένη ρύπανση που παρατηρείται στην αρχή κάθε πλημμυρικού γεγονότος.

Από τις κοκκομετρικές καμπύλες διαπιστώνουμε τη σημαντική απόκλιση των διαστάσεων κόκκων ακόμα και σε αποθέσεις με παρόμοιες φυσικές ιδιότητες. Το γεγονός αυτό δείχνει τη έντονη τυχαιότητα των φαινομένων, λόγω των πολλών παραμέτρων που συμμετέχουν. Από το πείραμα της ταχύτητας καθίζησης που έγινε διαπιστώθηκε ότι τα πιο λεπτόκοκκα σωματίδια έχουν την ικανότητα να συσσωματώνονται, επιτυγχάνοντας έτσι καλύτερες συνθήκες καθίζησης.

Τέλος, η διπλωματική αυτή εργασία κλείνει με την αναφορά του τρόπου διαστασιολόγησης των δεξαμενών κατακράτησης-καθίζησης, αφού προηγουμένως αναλυθεί η χρησιμότητά τους.

## ABSTRACT

The main purpose of this Diploma of Engineering Thesis is to examine the phenomena which are related with the stormwater solids on urban surfaces which are found their way into the sewer system due to run-off. The hydraulic function of the sewer networks is not in position several times to transfer the solids till the outlet of the network, even though the network had been planned and constructed under the principle of the minimum self-cleansing flow velocity. As a consequence some of the sewer solids are deposited in particular points of the network where flow irregularities are occurred. The main research part of the Thesis includes the selection one of the near Kifissos river subcatchments and the selection of the particular points of the network where we are going to investigate the presence of the deposits and to collect samples of the deposits for further study. From the study of the network maps we decided to examine six particular points with the selection criteria the flow irregularities because of the geometry of these particular points (turning of the sewer with an angle of  $90^{\circ}$ , the lowering of the invert slope downstream etc.).

On these selected points there was an on-site investigation which shown that four from the six points had deposits of different properties and different lengths and depths. Unquestionable though is the fact that stormwater solids constitute a serious problem for the proper hydraulic function of the network. The most significant contribution of this Thesis is that realizes a problem when the whole technological community of the country ignores their presence and their consequences. In one case the depth of a deposit exceeds the depth of 50 cm (that means the 25% of the whole height of the cross section).

From the results of the experiments (granulometric sieving, organic load) two major categories of the deposits had been shown. The first category is the coarser deposits with more than 90% of the whole mass constitute from sand and gravel and the organic load of those deposits is practically zero. These deposits are present only in the upstream parts of the network. The bed shear stresses of these deposits seem to be higher than the values from the Shields' formula. The second category is the deposits from fine materials. The proportion of the material from mud and clay is in excess of 35%. This remark is very important because such granulometries are very rare in the related bibliography elsewhere regarding stormwater solids. The measured organic load is very high for storm sewers (over 35%). The organic load is responsible for the pollution which always is occurred at the onset of the runoff.

From a study of the granulometry of the samples there is a significant variation of the particle sizes of the sediments of the deposits with close properties. This shows the stochastic nature of the procedures, because of the unoumerous variables taken into account.

From the experiment of the settling velocity it is clearly shown that the finest stormwater solids have a tendency to coagulate and flocculate, making better settling characteristics.

At last, this work closes with the dimension of a retention-sedimentation basin based on the results of the settling experiment, after a comprehensive report of the advantages from the use of such basins.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Διπλωματική αυτή Εργασία έχει για μένα ένα ξεχωριστό νόημα. Αποτέλεσε προσωπική μου ιδέα όταν το Καλοκαίρι του 1994 βρισκόμουν στη Βουδαπέστη με την Ι.Α.Ε.Σ.Τ.Ε.. Η επίσκεψη μιας από εκείνες τις ημέρες αφορούσε τον καθαρισμό και τη συντήρηση του παντοροϊκού δικτύου αποχέτευσης το οποίο "θριαμβεύει" σε εκείνες τις χώρες. Η μέχρι τότε επαφή μου με τα φερτά υλικά και τις αποθέσεις που δημιουργούν στα δίκτυα υπονόμων ήταν ότι μαθαίναμε στο μάθημα του 7ου εξαμήνου "Τυπικά Συστήματα Υδραυλικών Έργων" που, κρυμμένοι πίσω από τη βαθμοθηρία, κανείς δεν ενδιαφερόταν τότε να μάθει τι κρύβεται πίσω από την αφελή αυτή διατύπωση. Οι παντοροϊκοί αγωγοί της Βουδαπέστης λόγω των πολύ μικρών κλίσεων (ιδιαίτερα της Πέστης) αλλά και από τη χρήση των αντλιοστασίων για τη διάθεση των λυμάτων στο Δούναβη (που πολύ απέχει από εκείνον που μελοποίησε ο Strauss), παρουσίαζαν τρομερές αποθέσεις υλικών υπονόμων (οικιακών αποβλήτων αλλά και στερεών αστικής απορροής). Φροντίδα των συνεργείων ήταν να καθαρίζουν τον πυθμένα των αγωγών από τις αποθέσεις με συμβατικές μεθόδους που όμως εκτός από αναποτελεσματικές ήταν και χρονοβόρες και το κόστος τους ήταν υπέρογκο.

Η ιδέα ήταν να δούμε τι γίνεται με τις αποθέσεις και στο δίκτυο της ΕΥΔΑΠ. Την ιδέα αυτή αποδέχθηκε με ενθουσιασμό ο Επίκουρος Καθηγητής (και φίλος ελπίζω) κ. Δ. Κουτσογιάννης και το θέμα της διπλωματικής ήταν προ των πυλών. Το πεδίο της έρευνας είναι το δίκτυο ομβρίων της Αθήνας. Τέτοιου είδους μελέτη δεν είχε ξαναγίνει, οπότε ξεκινήσαμε "για το άγνωστο με βάρκα την ελπίδα" για να χρησιμοποιήσω και εγώ τόν ποιητή, οπότε οι δυσκολίες ήταν πολλές, αλλά ευτυχώς όχι ανυπέρβλητες. Αλλωστε το θέμα αυτό απασχολεί εδώ και αρκετά χρόνια τη διεθνή επιστημονική κοινότητα, οπότε το βιβλιογραφικό υλικό ήταν αρκετό και πολύ αξιόλογο.

Οι παρατηρήσεις φίλων και γνωστών για την ανάγκη να προχωρήσω στις επι τόπου επισκέψεις περιορίζονταν σε παρατηρήσεις (πνευματώδεις, οφείλω να παρατηρήσω) του στύλ "αμάν βρωμιά" ή σε αφελής παρατηρήσεις όπως π.χ. "υπάρχει περίπτωση να πάθεις ασφυξία από τις αναθυμιάσεις ;". Ακόμα και εγώ ο ίδιος ένιωθα κατά κάποιο τρόπο μειονεκτικά απέναντι σε συναδέλφους που έκαναν πιο "αξιοπρεπείς" και πιο "επιστημονιστικές" διπλωματικές μπροστά στη οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή σε σύνθετα θέματα υδρολογίας, σε αντίθεση με μένα που η χειρωνακτική φύση της εργασίας μου δεν μου επέτρεπε και τόσο μεγάλη προβολή (sic). Πάντως η ανταπόκριση πολλών από τους συναδέλφους μου στο άκουσμα και μόνο της διαδικασίας που ήμουν υποχρεωμένος να ακολουθήσω, δείχνει ότι πολλοί φοιτητές πιστεύουν ότι ο πολιτικός μηχανικός ανήκει στην οθόνη του υπολογιστή και στο γραφείο και αποστρέφεται και μόνο την ιδέα να ασχοληθεί με πρακτικά θέματα που τα θεωρεί βρώμικα ή τέλος πάντων αναξιοπρεπή για έναν απόφοιτο του Ε.Μ.Π..

Δεν θα ξεχάσω ποτέ την εμπειρία από τις "καταδύσεις" μαζί με τους φίλους εργαζόμενους του συνεργείου της εταιρίας στους υπονόμους για την ανακάλυψη των αποθέσεων και την αποκρυπτογράφηση της ιστορίας τους, πως και γιατί δημιουργήθηκαν. Το σκοτάδι του υπονόμου διακόπτεται από το φώς των φακών κάνει ένα καταπληκτικό ντεκόρ για ταινίες του Wim Venders ή του Jean-Luc Goddard, καθώς τα βήματά μου δυσκολεύονται από τις άβολες μπότες,

τη ροή του νερού που κάνει το πυθμένα να γλιστρά επικίνδυνα και από τη τεταμένη μου προσοχή για κάποια απρόσμενη συνάντηση με το οικοσύστημα των υπονόμων (ποντίκια, κατσαρίδες και άλλα συμπαθή (?) ερπετά και έντομα). Η χαρά μου όταν ανακαλύπταμε τις αποθέσεις δεν περιγραφόταν, αφού όλα πηγαίνουν ρολόι. Συνιστώ αναπιφύλακτα στους αναγνώστες του προλόγου να επιχειρήσουν, αν τους δοθεί η ευκαιρία, μια τέτοια κατάδυση στους υπονόμους. Μήπως η μυστηριακή τους ατμόσφαιρα δεν ήταν η πλέον κατάλληλη για τον Hugo στο μνημειώδες "Les Miserables" ;.

Τελειώνοντας τον, ελπίζω όχι κουραστικό, πρόλογο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με βοήθησαν στην εκπόνηση της εργασίας, με την ελπίδα να μην ξεχάσω κανένα.

Πρώτον απόλους ευχαριστώ φυσικά τον Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ κ. Δ. Κουτσογιάννη, για την ανάθεση του θέματος και για τη βοήθεια και τις εύστοχες παρατηρήσεις του κατά τη διάρκεια της μελέτης. Σημαντική ήταν και η βοήθεια της ΕΥΔΑΠ και προσωπικά του προέδρου της εταιρίας κ. Γ. Ανδρεάδη, που παραχώρησε ειδικευμένο συνεργείο της εταιρίας για τη επιθεώρηση του δικτύου και της συλλογής των δειγμάτων. Από την πλευρά της ΕΥΔΑΠ ευχαριστώ πολύ το διευθυντή του δικτύου αποχέτευσης κ. Κουλουριώτη καθώς και τους φίλους πιά υπεύθυνους του εργοταξίου της εταιρίας στην οδό Δυραχίου, τον κ. Γρ.Χαλούλο, υπεύθυνο μηχανικό του εργοταξίου, τον κ. Μ. Κανούση, εργοταξιάρχη, καθώς και τα μέλη των δύο συνεργείων που η βοήθειά τους ήταν ανεκτίμητη και τους ευχαριστώ όλους.

Στο πειραματικό μέρος της Εργασίας ευχαριστώ την κ. Αλεξάνδρα Κουζέλη-Κατσίρη, τον υπ. Διδάκτορα ΕΜΠ κ. Φ. Γιαννακόπουλο για την πολύτιμη βοήθειά του στο πείραμα της καθίζησης, τη συνάδελφο και φίλη Μπούτσικου Έλενα καθώς και την παρασκευάστρια του Εργαστηρίου Υγειονομικής Τεχνολογίας κ. Μ. Στραφιώτου για την πολύτιμη βοήθειά τους στις εργαστηριακές μετρήσεις. Ευχαριστώ επίσης και τον Καθηγητή του τομέα Γεωτεχνικής κ. Α. Αναγνωστόπουλο για τη συμβολή του στο πρώτο μέρος των κοκκομετρικών αναλύσεων και τον κ. Τσακαλάκη, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Μεταλλειολόγων Μηχανικών για το δεύτερο μέρος των κοκκομετρικών αναλύσεων.

Για τις πολύ εύστοχες παρατηρήσεις ευχαριστώ θερμά τον κ. Κ. Ξανθόπουλο, Καθηγητή στο Universitat Karlsruhe Am Fasanengarten της Γερμανίας καθώς και τον Richard Ashley, Coordinator and Research Director του Wastewater Technology Centre στο University of Abertay Dundee. Πολλά ευχαριστώ επίσης και στον Καθηγητή ΕΜΠ και πρόεδρο του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών κ. Θ. Ξανθόπουλο για τη συμβολή του στην ανάληψη του θέματος.. Τέλος ευχαριστώ το φίλο μου Γ. Τσέρκη για τη δημιουργία του εξωφύλλου της διπλωματικής.

*Η φωτογραφία του εξωφύλλου είναι από το περιοδικό της IAWQ "Water Quality International" με τίτλο "The Secret Life of Sewers".*



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

## ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

*"... Τα αυτο-οργανωμένα συστήματα δεν τρέφονται μόνο με τάξη, βρίσκουν και θόρυβο στο μενού τους. Δεν είναι κακό να υπάρχει θόρυβος στο σύστημα. Εάν ένα σύστημα γίνει άκαμπτο σε μια επιμέρους κατάσταση, θα είναι ανίκανο να προσαρμοσθεί σε οποιαδήποτε ακατάλληλη περίπτωση..."*

*von Forster*

## 1.1. Εισαγωγή και Αντικείμενο

Τα φερτά υλικά σε υπονόμους δεν είχαν στο παρελθόν θεωρηθεί σαν ένα βασικό στοιχείο της μελέτης και σχεδιασμού των αστικών δικτύων αποχέτευσης. Η θεώρηση τότε ήταν ότι όσα φερτά υλικά εισέρεαν στο δίκτυο τόσα θα εκβάλλονταν από αυτό. Όμως όσα ντετερμινιστικά μοντέλα είχαν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της μάζας των φερτών που θα μετρούνταν στην εκβολή του συστήματος είχαν αποτύχει. Ο λόγος ήταν προφανώς ότι κάποιες σημαντικές ποσότητες φερτών παρέμεναν στο δίκτυο δημιουργώντας αποθέσεις γιατί για κάποιο λόγο που κανείς δεν είχε υποθέσει τότε, η υδάτινη ροή δεν μπορούσε να μεταφέρει τις ποσότητες των φερτών μέχρι την έξοδο των δικτύων.

Με τον καιρό βέβαια έγιναν αρκετές έρευνες στα πλαίσια της ποτάμιας υδραυλικής με την εμπειρία της ποτάμιας στερεομεταφοράς, όπου είχαν ασχοληθεί με σημαντικά αποτελέσματα λαμπροί υδραυλικοί μηχανικοί όπως ο H.A. Einstein, ο Shields, ο Vanoni, ο J. Bogardi και άλλοι. Σήμερα παρατηρείται διεθνώς μια έντονη κινητικότητα σε θέματα στερεομεταφοράς σε υπονόμους καθώς τα φερτά υλικά είναι φορείς επικίνδυνης ρύπανσης των οικοσυστημάτων των εκβολών. Στην Ελλάδα υπάρχει καθυστέρηση σε σχέση με αυτά τα θέματα αλλά κάτι αρχίζει να κινείται στους χώρους του Ε.Μ.Π.

Ο αντικειμενικός σκοπός αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι : *“η κατανόηση, περιγραφή και θεώρηση των διαδικασιών οι οποίες συμμετέχουν στη μεταφορά των φερτών υλών και στη δημιουργία των αποθέσεων καθώς και στην αντιρρυπαντική προστασία με τη χρήση κατάλληλων κατασκευών. Πεδίο εφαρμογής της διπλωματικής εργασίας είναι το δίκτυο ομβρίων της Αθήνας.”*

Για την επιτυχία της εργασίας αποφασίστηκε να γίνει επί τόπου εκτίμηση των αποθέσεων με επίσκεψη του γράφοντος στο δίκτυο ομβρίων μιας συγκεκριμένης υπολεκάνης απορροής της Αθήνας, που ανήκει στη δικαιοδοσία της ΕΥΔΑΠ. Η αναγνωριστική μελέτη δεν έγινε στα τυφλά αλλά εκτιμήθηκαν ποιά σημεία του δικτύου παρουσιάζουν τις περισσότερες πιθανότητες για εμφάνιση αποθέσεων. Με τη βοήθεια συνεργείου που παραχωρήθηκε από τη διοίκηση της ΕΥΔΑΠ έγινε επίσκεψη στα σημεία που επιλέξαμε για μελέτη και διαπιστώσαμε ότι μέσα στους αγωγούς αυτούς υπήρχαν σημαντικές αποθέσεις φερτών. Από τη συλλογή των δειγμάτων και την αναμονή των αποτελεσμάτων της κοκκομετρίας κυρίως, πολλές υποθέσεις για τους λόγους εμφάνισης των αποθέσεων έγιναν και αξιολογήθηκαν μέχρι να καταλήξουμε στο τελικό κείμενο της διπλωματικής.

Η συνολική μελέτη του θέματος που ακολουθήθηκε από το γράφοντα είναι :



ΣΧΗΜΑ 1.1 : Ενότητες Εργασίας της Διπλωματικής

Η κύρια συνεισφορά της Διπλωματικής Εργασίας βρίσκεται στο γεγονός ότι βγάζει στην επιφάνεια ένα σοβαρό πρόβλημα που δεν έχει μελετηθεί σε ένταση στην Ελλάδα. Εξάλλου ασχολείται και με τα ακόλουθα :

- την εκτίμηση και ποιοτική περιγραφή των αποθέσεων που παρατηρούνται στους υπονόμους της υπό μελέτης υπολεκάνης.
- την καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών που οδηγούν τη δημιουργία και παραμονή των αποθέσεων.
- την εκτίμηση της δημιουργίας σοβαρών προβλημάτων από πλημμύρες, λόγω περιπτώσεων εκτεταμένων αποθέσεων που παρατηρήθηκαν από την έρευνα.
- τη διατύπωση οδηγιών για την αποφυγή των προβλημάτων λόγω των αποθέσεων κατά το σχεδιασμό των δικτύων.
- τη διατύπωση σχεδίου για τη βέλτιστη διαχείριση και έλεγχο των διάχυτων πηγών φερτών υλών με στόχο τη μείωση της ποσότητάς τους και της σχετιζόμενης με αυτά ρύπανσης.

Ακολουθώντας, αναφέρουμε τι θα συναντήσει ο αναγνώστης σε καθένα Κεφάλαιο.

- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2** : Το Κεφάλαιο αυτό είναι βιβλιογραφικό και ασχολείται με τις φυσικές ιδιότητες των φερτών υλικών της αστικής απορροής. Συμπεριλαμβάνονται πίνακες με τα μεγέθη των φερτών υλικών, τις ταχύτητες καθίζησης, τις ειδικές πυκνότητες κ.α.. Από τις παρατηρήσεις πάνω στα δεδομένα βγαίνουν συμπεράσματα που θα χρησιμοποιήσουμε και στη μελέτη μας.
- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**: Το Κεφάλαιο αυτό είναι επίσης βιβλιογραφικό και ασχολείται με τις μορφές στερεομεταφοράς σε υπονόμους. Στο κεφάλαιο αυτό ερχόμαστε

σε επαφή με την αιώρηση και το συρτικό φορτίο καθώς και με τους παράγοντες που συμμετέχουν στη στερεομεταφορά. Οι αναφορές του Κεφαλαίου προκύπτουν από εγχειρίδια Ποτάμιας Υδραυλικής και στο τέλος του κεφαλαίου υπάρχει μια πολύ σημαντική παράγραφος που επισημαίνει τις διαφορές της στερεομεταφοράς σε ποταμούς με την αντίστοιχη σε υπονόμους.

- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Το Κεφάλαιο αυτό είναι το πλέον σημαντικό όλης της Εργασίας γιατί περιγράφει όλη την ερευνητική διαδικασία που ακολουθήθηκε με τα αποτελέσματά της. Για κάθε δείγμα αποθέσεων παρατίθενται οι κοκκομετρικές καμπύλες και οι μετρήσεις του οργανικού υλικού και γίνεται μια στοιχειώδης υδραυλική ανάλυση για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τις αιτίες που οδήγησαν στο σχηματισμό των αποθέσεων. Κατατάσσονται έπειτα οι αποθέσεις ανάλογα με τη σύστασή τους και τη θέση σχηματισμού τους. Τέλος εκτιμούνται κατά βάση με εμπειρικές μεθόδους την ετήσια ποσότητα φερτών υλικών που βρίσκει πρόσβαση στα δίκτυα ομβρίων.
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Το Κεφάλαιο αυτό ασχολείται με το σχεδιαστικό μέρος. Δηλαδή προτείνονται τρόποι για το σχεδιασμό των δικτύων ώστε να έχουμε ελαχιστοποίηση των αποθέσεων. Στο Κεφάλαιο αυτό παρατίθενται επίσης και οι νέες σχεδιαστικές αντιλήψεις που αρχίζουν να κερδίζουν έδαφος στο εξωτερικό (κυρίως στην Αγγλία) που οι θεωρήσεις τους είναι σημαντικές για την οικονομικότητα του σχεδιασμού. Τέλος προτείνεται από το γράφοντα ένα σχεδιαστικό μοντέλο λειτουργίας με το Λογικό Διάγραμμα Ροής
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Το Κεφάλαιο αυτό ασχολείται με την περιβαλλοντική συνιστώσα και τη διαστασιολόγηση των δεξαμενών κατακράτησης - καθίζησης. Πρώτα αναλύεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της ταχύτητας καθίζησης δείγματος απόθεσης από τις εκβολές του υπό μελέτη δικτύου. Οι δεξαμενές κατακράτησης θεωρούνται από τη Διπλωματική Εργασία ως πολύ σημαντικές κατασκευές για τη βελτίωση της ποιότητας της αστικής απορροής. Τέλος αναλύονται οι Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης Αστικής Λεκάνης και προτείνεται ένα σχέδιο (master plan) για το έλεγχο των διάχυτων πηγών φερτών και ρύπανσης.
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Στο Κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται οι υπάρχουσες μέθοδοι για τον καθαρισμό και τη συντήρηση των υπονόμων. Τέλος αναφέρονται μέθοδοι για τον καθαρισμό των δεξαμενών κατακράτησης - καθίζησης.
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : Το Κεφάλαιο αυτό έχει χαρακτήρα επιλόγου. Συνοψίζει τα σπουδαιότερα από τα αποτελέσματα και προτείνει τρόπους ώστε η μελέτη αυτή να συνεχισθεί σε πιο εξελιγμένο επίπεδο με σαφώς πιο ολοκληρωμένα και ποσοτικά αποτελέσματα.

## 1.2. Επιδράσεις των Αποθέσεων

Η δημιουργία των αποθέσεων σε συγκεκριμένα σημεία των δικτύων είναι ατυχές φαινόμενο για τη σωστή λειτουργία των δικτύων αποχέτευσης για τους εξής λόγους:

- Προκαλούν μείωση της παροχетеυτικότητας λόγω μείωσης της επιφάνειας ροής και λόγω αύξησης της υδραυλικής τραχύτητας. Η αύξηση της υδραυλικής τραχύτητας (το  $k_s$  του τύπου του Nikuradse) προκαλεί τη μεγαλύτερη μείωση της παροχетеυτικότητας. Περισσότερα στην ενότητα 4.6. Άμεση συνέπεια αποτελεί το επόμενο:

- Προκαλούν επιπλέον πτώση της ενέργειας ροής, οπότε μειώνουν την ικανότητα της ροής να μεταφέρει τα στερεά μέχρι τις εκβολές του δικτύου.
- Σε ακραίες περιπτώσεις αποθέσεων δημιουργείται ροή υπό πίεση με απρόβλεπτες συνέπειες για τις ανάντη περιοχές.  
Λόγω του οργανικού φορτίου που παρατηρείται ακόμα και στις αποθέσεις των ομβρίων αγωγών, έχουμε τις εξής συνέπειες :
- Δημιουργούνται άσχημες οσμές (κυρίως στους παντοροϊκούς αγωγούς), που αναδύονται στην επιφάνεια μέσω των φρεατίων υδροσυλλογής.
- Υπάρχει πιθανότητα ανάπτυξης εκρηκτικών αερίων (μόνο στους παντοροϊκούς και στους αγωγούς ακαθάρτων με παράνομη διάθεση βιομηχανικών λυμάτων)
- Υπάρχει κίνδυνος αύξησης του ρυθμού διάβρωσης των αγωγών από σκυρόδεμα
- Τέλος, με τη διαδικασία της απόπλυσης των ρυπογόνων αποθέσεων, το περιβάλλον και οι αποδέκτες των ομβρίων λυμάτων, δέχονται αυξημένες ποσότητες και συγκεντρώσεις ρυπαντών σε ελάχιστο χρονικό διάστημα. Το περιβαλλοντικό κόστος είναι προφανές και ονομάζεται περιβαλλοντική επιβάρυνση (environmental shock)

Περισσότερα για τις συνέπειες των αποθέσεων για τη σωστή υδραυλική λειτουργία του δικτύου αποχέτευσης στο Κεφάλαιο 4 (ενότητα 4b)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΓΕΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

*“Οτιδήποτε έχει κάνει και σκεφθεί το ανθρώπινο είδος στρέφεται γύρω από την ικανοποίηση των αισθηματικών αναγκών και την καταπράυνση του πόνου. Πρέπει να το έχουμε αυτό σταθερά στο μυαλό μας , αν θέλουμε να κατανοήσουμε τα πνευματικά κινήματα και την ανάπτυξή τους. Αίσθημα και επιθυμία είναι οι κινητήριες δυνάμεις πίσω από κάθε ανθρώπινη προσπάθεια και ανθρώπινη δημιουργία, με όσο εξυπωμένη αμφίεση και αν παρουσιάζεται, ίσως, η τελευταία, σε μας.”*

*Albert Einstein “The World As I See It”, Εκδόσεις Νέα Σύνορα*

## 2.1. Γενικές Εισαγωγικές Έννοιες

Η μελέτη των φερτών υλικών σε υπονόμους είναι ένα θέμα που σχετίζεται άμεσα με την αποχέτευση αστικών περιοχών (urban storm drainage είναι ο διεθνής όρος). Διεθνώς η μελέτη των φερτών υλικών και όσα φυσικά φαινόμενα σχετίζονται με αυτά έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές και έχουν γραφτεί πολλές και αξιόλογες εργασίες και δημοσιεύσεις στα αντίστοιχα επιστημονικά περιοδικά. Ο διεθνής επιστημονικός κόσμος είναι πλέον πεπεισμένος ότι η σωστή λειτουργία των δικτύων αποχέτευσης (παντοροϊκών και χωριστικών) απαιτεί και ένα προσεκτικό σχεδιασμό για την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων από την είσοδο και την απόθεση των υλικών αυτών σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου. Τα προβλήματα αυτά είναι ήδη γνωστά στη διεθνή βιβλιογραφία, παρόλαυτα όμως συνεχίζουν να είναι πολύ λιγότερο γνωστά τα φαινόμενα που επικρατούν, καθώς η πολυπλοκότητα και η στοχαστικότητα των παραμέτρων που απαιτούνται για την περιγραφή του φαινομένου κάνουν πολύ δύσκολη, αν όχι αδύνατη, την μαθηματική περιγραφή του φαινομένου. Γιαυτόν το λόγο άλλωστε τα ντετερμινιστικής βάσης μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί έχουν περιορισμένη επιτυχία στην πρόγνωση, για παράδειγμα, των αιωρούμενων υλικών για μία συγκεκριμένη βροχοπτώση και είναι συνήθως μοντέλα προσομοίωσης ενός γεγονότος.

Δεν είναι μόνο η πολλαπλότητα και η πολυπλοκότητα των παραμέτρων που σχετίζονται με το φαινόμενο αυτό, αλλά και η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων αυτών που κάνει ακόμα πιο δύσκολη τη δυνατότητα μοντελοποίησης. Αλλά αν υποθέσουμε ότι είχαμε τα μέσα για την ανάπτυξη ενός πολύ καλού και ακριβούς μοντέλου, τότε για το αναγκαίο "καλιμπράρισμα" του μοντέλου αλλά και για τη λειτουργία του ως υπολογιστικού πακέτου, θα έπρεπε να συλλεγθθούν τόσα πολλά στοιχεία από μετρήσεις πεδίου που α) θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο και δαπανηρό να συλλεγθθούν όλες αυτές οι μετρήσεις και β) οι αποκλίσεις των μετρήσεων αυτών από τις πραγματικές, τα αναπόφευκτα σφάλματα δηλαδή, θα έθεταν υπό δίκαιη αμφισβήτηση την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

Η προηγούμενη εισαγωγική αναφορά για τα μαθηματικά μοντέλα έγινε για να δείξει την πολυπλοκότητα του φαινομένου που θα αγγίξουμε ευθύς αμέσως. Τα φερτά υλικά είναι στερεά που εναποτίθενται στις αστικές επιφάνειες από διάφορες αιτίες. Η αστικοποίηση, η εκρηκτική αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου, η βιομηχανοποίηση, το εμπόριο και οι μάλλον άσχημες πρακτικές καθαρισμού των αστικών επιφανειών είναι αρκετές από τις αιτίες για την απόθεση των υλικών αυτών στις αστικές επιφάνειες (δρόμοι, τaráτσες σπιτιών, εργοτάξια κ.α). Αν δεν μεσολαβήσει περίοδος βροχοπτώσεων τότε η συγκέντρωση των υλικών αυτών γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη. Η διαβρωτική ικανότητα της βροχής αποκολλά τα υλικά αυτά, τα παρασύρει με τη ροή του νερού και τα οδηγούν στο δίκτυο (ομβρίων ή παντοροϊκό ανάλογα με την περίπτωση). Η είσοδος των φερτών υλικών στο δίκτυο γίνεται μέσω των φρεατίων υδροσυλλογής, τα οποία είναι κατασκευές σχεδιασμένες να κατακρατούν τα φερτά υλικά ώστε να μην εισρέουν στο δίκτυο. Δυστυχώς, όμως, η κατακράτηση δεν είναι πάντα ικανοποιητική, οπότε τα στερεά εισρέουν στο δίκτυο και μεταφέρονται μαζί με τη ροή του νερού κατά μήκος του δικτύου. Οι αποθέσεις των φερτών υλικών αυτών σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου οφείλονται κυρίως στις χαμηλές συρτικές τάσεις πυθμένα που είναι εκεί μικρότερες από τις απαιτούμενες ώστε τα στερεά να μην δημιουργήσουν αποθέσεις αλλά να συνεχίσουν την πορεία τους έως τις εκβολές του δικτύου και τον αποδέκτη που είναι ένα φυσικό υδατόρεμα ή η θάλασσα.

Στο εισαγωγικό αυτό πρώτο κεφάλαιο περιέχονται βιβλιογραφικά στοιχεία για την ταξινόμηση των αγωγών αποχέτευσης γενικότερα, για την κατάταξη των φερτών υλικών που εισρέουν στα δίκτυα, την παραγωγή των στερεών, τις φυσικές τους ιδιότητες (μέγεθος, ταχύτητα καθίζησης, ειδική μάζα), καθώς και μια σύγκριση με τις θεωρίες της Ποτάμιας Υδραυλικής για την μελέτη της στερεομεταφοράς σε αγωγούς και μια κριτική για την αναγκαιότητα της Πειραματικής Υδραυλικής για τη μελέτη του θέματος.

## 2.2. Ταξινόμηση και Κατάταξη των Δικτύων Αποχέτευσης

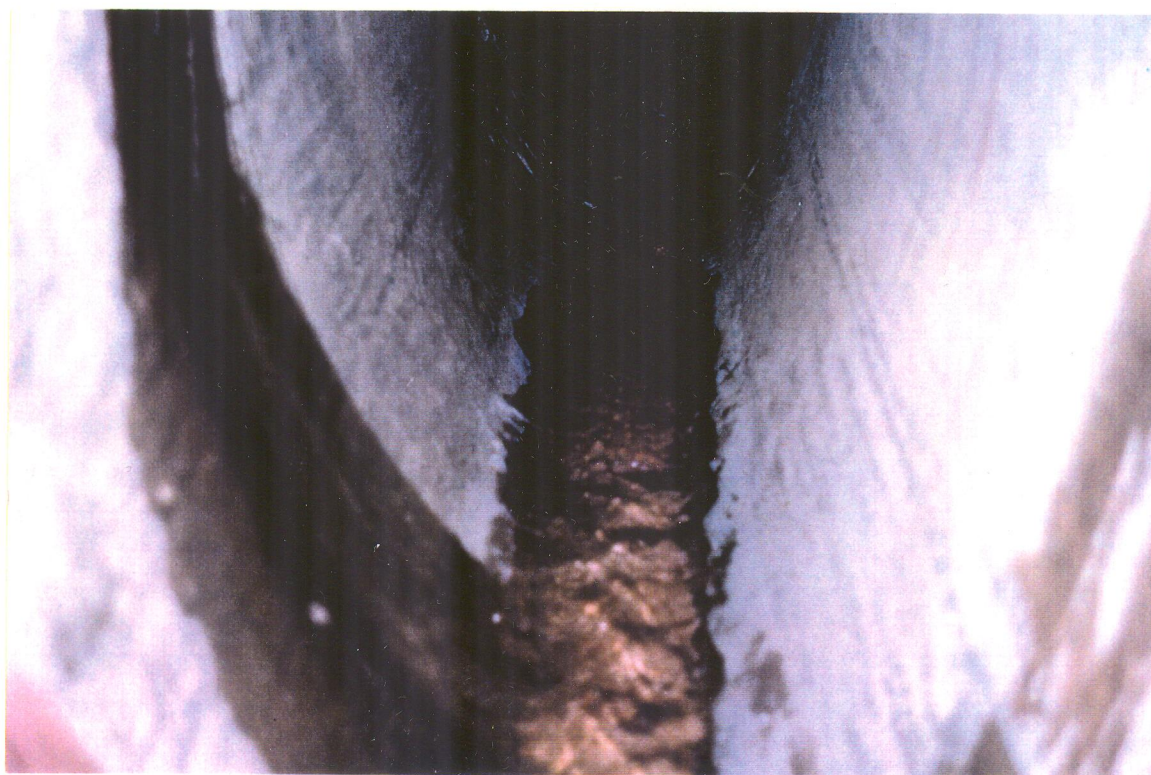
Όπως είναι ήδη γνωστό από το μάθημα “*Τυπικά Συστήματα Υδραυλικών Έργων*” τα δίκτυα αποχέτευσης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες.

Το Παντοροϊκό Δίκτυο όπου τα οικιακά απόβλητα αναμιγνύονται με τα όμβρια ύδατα και απάγονται σε κοινό αγωγό από τις αστικές περιοχές προς την εγκατάσταση επεξεργασίας, αν αυτή υπάρχει, ή στην φυσική εκβολή του παντοροϊκού δικτύου. Η εκβολή του παντοροϊκού γίνεται συνήθως μέσω μιας κατασκευής για το στοιχειώδη διαχωρισμό της ροής από τα στερεά, που στην περίπτωση των παντοροϊκών δικτύων είναι εξαιρετικά οργανικά και ρυπασμένα. Η κατασκευή αυτή που συνήθως είναι ένας υπερχειλιστής λέγεται “*υπερχειλιστής παντοροϊκού δικτύου*” (Combined Sewer Overflow), πιο γνωστοί διεθνώς με τη συντομογραφία C.S.O's. Το παντοροϊκό δίκτυο απαντάται και στο παλαιότερο τμήμα του δικτύου αποχέτευσης της Αθήνας, επικρατεί σε όλες σχεδόν τις χώρες της Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης, όπου ο υγρός καιρός και κατά την περίοδο του καλοκαιριού επιτρέπει την σχεδόν διαρκή αραίωση των οικιακών αποβλήτων και απαγορεύει την ανάδευση οσμών από τα φρεάτια υδροσυλλογής. Η ανάμιξη όμως φερτών υλικών από τις αστικές επιφάνειες και με τα στερεά από τα οικιακά απόβλητα εμφανίζουν σύμφωνα με τους μελετητές καλύτερες ιδιότητες καθίζησης στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Πλεονέκτημα που μάλλον αντισταθμίζεται από την μείωση της απόδοσης της εγκατάστασης επεξεργασίας καθαρισμού λυμάτων, ιδίως στις βροχερές περιόδους, αφού οι παροχές αυξάνονται απότομα. Αυτή η αρνητική κατάσταση μπορεί εν μέρει να αντισταθμισθεί με την κατασκευή δεξαμενών κατακράτησης (retention basins), που θα συγκρατούν τη ροή και θα την κατανέμουν κατόπιν στην εγκατάσταση επεξεργασίας σύμφωνα με ένα σχεδιασμένο και προκαθορισμένο υδρογράφημα. Περισσότερα για τις δεξαμενές κατακράτησης / καθίζησης (retention / sedimentation basins) θα αναπτυχθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Σημειώνεται επίσης ότι η μελέτη των παντοροϊκών αγωγών δεν είναι στους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Σε αντίθεση με το παντοροϊκό δίκτυο, το χωριστικό σύστημα χρησιμοποιεί ξεχωριστούς αγωγούς για τα οικιακά απόβλητα και για τα όμβρια ύδατα. Το χωριστικό σύστημα έχει επικρατήσει στη χώρα μας καθώς ακόμα και στις Η.Π.Α. Στην περιοχή της Αθήνας οι αγωγοί ακαθάρτων καταλήγουν μέσω του *Κεντρικού Αποχετευτικού Αγωγού (Κ.Α.Α.)* στην εγκατάσταση επεξεργασίας της Ψυτάλλειας, ενώ οι αγωγοί ομβρίων, που αποτελούν και ουσιαστικό αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής αυτής εργασίας, καταλήγουν μέσω των φυσικών υδατορεμάτων της Αθήνας, όπως ο Κηφισός και ο Υλισός, στον Σαρωνικό κόλπο ανεπεξέργαστα. Παρολαυτά, τα όμβρια ύδατα είναι φορείς ρύπανσης καθώς οι ρυπαντές προσκολλώνται στα πιο λεπτόκοκκα υλικά. Όμως, όπως έδειξε και μια πρώτη επιθεώρηση του δικτύου, στους αγωγούς ομβρίων καταλήγουν πολλές παράνομες συνδέσεις αγωγών ακαθάρτων ή αγωγών που αποχετεύουν βιομηχανικά απόβλητα ενώ δεν αποκλείεται και η είσοδος ρυπασμένων υδάτων στους αγωγούς μέσω των αρμών. Επίσης το βιοτικό και



πολιτισμικό επίπεδο της κατά περίπτωση αστικής επιφάνειας και ο αποτελεσματικός καθαρισμός από τα συνεργεία καθαρισμού παίζει σημαντικό ρόλο στο κατά πόσο απαλλαγμένοι από οργανικό υλικό είναι οι αγωγοί ομβρίων. Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ότι το μέγιστο ποσοστό οργανικού υλικού στους αγωγούς ομβρίων δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 5%. Στην υπό εξέταση περιοχή που αφορά τη διπλωματική αυτή εργασία (την περιοχή του Περιστερίου) τα δείγματα που συλλέχθηκαν έδειχναν ποσοστό οργανικού υλικού από λίγο λιγότερο του 10% έως και πάνω του 25%. Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνεται καθαρά μια τυχαία είσοδος ακαθάρτων σε αγωγό ομβρίων.



Φωτ. 2.1 : Εισροή ακαθάρτων σε αγωγό ομβρίων (Ζαρρής, 1995)

Επομένως, αν θέλουμε να μιλάμε σε αυστηρή επιστημονική γλώσσα τότε όλα τα δίκτυα είναι *λιγότερο ή περισσότερο παντορροικά* με την έννοια της ύπαρξης οργανικού φορτίου στους αγωγούς ομβρίων. Περισσότερα πάνω σε αυτό το θέμα θα ακολουθήσουν σε επόμενα κεφάλαια.

Όσο αφορά το μέγεθος των αγωγών και την έκταση της αστικής περιοχής που αποχετεύουν οι αγωγοί διακρίνονται στους *πρωτεύοντες, στους δευτερεύοντες και στους τριτεύοντες* με φθίνοντα μεγέθη διατομής από τους πρωτεύοντες έως τους τριτεύοντες. Η διάκριση αυτή πάντως έχει μόνο τυπικό χαρακτήρα και δεν υπάρχει συγκεκριμένο μέγεθος που να κατατάσσει τους αγωγούς στις προηγούμενες κατηγορίες. Γενικά πάντως, προς τα ανάντη του δικτύου χρησιμοποιούνται μικρότερης διαμέτρου αγωγοί ενώ όσο πηγαίνουμε προς τα κατόντη τα μεγέθη αυξάνονται καθώς αυξάνονται και οι παροχές με το μέγιστο του μεγέθους να παρατηρούνται στις εκβολές των δικτύων.

Μια αρχική απόπειρα κατηγοριοποίησης των αγωγών από τη σκοπιά της δημιουργίας αποθέσεων θα πρότεινε τα εξής:

- Δευτερεύοντες (Συλλεκτήριοι) Αγωγοί: Μικρής διαμέτρου αγωγοί που έχουν πολύ μεγάλη διακύμανση παροχής και απαιτούνται συνήθως αρκετά μικρές βροχοπτώσεις ώστε να διατηρούνται οι αγωγοί αυτοί καθαροί από αποθέσεις.
- Κύριοι Αγωγοί: Συνδέουν τους δευτερεύοντες αγωγούς με τις εκβολές. Γενικά έχουν μεγαλύτερες κλίσεις από τις εκβολές των δικτύων και οι αποθέσεις που παρατηρούνται είναι στο μεγαλύτερό τους ποσοστό από ανόργανο και κοκκώδες υλικό σχετικά μεγάλου μεγέθους (χαλίκι, άμμος).
- Αγωγοί Εκβολών: Έχουν τις μικρότερες κλίσεις και το μεγαλύτερη διατομή, συνεπώς και το μεγαλύτερο δυναμικό για αποθέσεις, αφού οι αποθέσεις σε αυτούς τους αγωγούς είναι και εκτεταμένες αλλά και λεπτόκοκκες.

Έχουν όμως γίνει προσπάθειες διεθνώς για μια πιο ουσιαστική κατάταξη των αγωγών ώστε να εξυπηρετήσουν μια καλύτερη μελέτη των αποθέσεων των φερτών υλών. Όπως θα δείξουμε στο σχετικό κεφάλαιο η σύνθεση των αποθέσεων που παρατηρούνται εξαρτώνται και από το μέγεθος των αγωγών καθώς και από την επιφάνεια απορροής του συγκεκριμένου δικτύου. Κριτήριο για τους ερευνητές (Ashley et al., 1992) τέθηκε το γινόμενο (ΚΛΙΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ) [m/km] \* (ΕΜΒΑΔΟΝ ΔΙΑΤΟΜΗΣ) [m<sup>2</sup>] \* (ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΗΣ) [ha]. Το γινόμενο αυτό είναι ουσιαστικά ο συντελεστής κατάταξης, έστω  $a$ .

Ο συντελεστής  $a$  δίνει:

$$a < 6 \Rightarrow \text{Συλλεκτήριοι Αγωγοί}$$

$$6 < a < 8000 \Rightarrow \text{Κύριοι Αγωγοί}$$

$$a > 8000 \Rightarrow \text{Αγωγοί Εκβολών}$$

Όμως, η κατάταξη αυτή που επιχειρήθηκε είναι μάλλον αυθαίρετη, αφού όπως θα δούμε και σε επόμενα κεφάλαια, το δυναμικό για δημιουργία αποθέσεων είναι συνισταμένη πολλών παραγόντων και όχι μόνο της κλίσης πυθμένα, της επιφάνειας απορροής και του εμβαδού της διατομής του αγωγού. Επιπλέον η κατάταξη αυτή αφορά μόνο μια περιοχή, πολύ διαφορετική από εκείνη της Αθήνας, θα πρέπει να διαμορφωθεί η κατάταξη αυτή ανάλογα με την περίπτωση. Πάντως η διαφορά στις αποθέσεις μπορεί να αποτελέσει κριτήριο για μια παρόμοια κατάταξη και για το δίκτυο της Αθήνας. Τέλος, η μορφή της διατομής των αγωγών είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας γιατί επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την ικανότητα στερομεταφοράς της ροής στο δίκτυο. Έτσι, έχουμε τους κυκλικούς αγωγούς, τους ωοειδείς, τους ορθογωνικούς, τους πεταλοειδείς κ.α.

### 2.3. Κατηγορίες Φερτών Υλικών

Οι μελέτες που έχουν γίνει διεθνώς έχουν καταλήξει σε αρκετές ταξινομήσεις των φερτών υλικών. Έρευνες πεδίου που έχουν ήδη αναφερθεί έχουν δείξει ότι τα φερτά που βρίσκονται στους αγωγούς ομβρίων δεν μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι ομοιόμορφα. Παρόλαυτα, αν αγνοηθούν οι επενέργειες λόγω ειδικών συνθηκών (π.χ. διάθεση βιομηχανικών αποβλήτων στους υπονόμους, αλληλεπίδραση με ποταμούς κ.α.), τα στερεά που βρίσκονται στους υπονόμους, είτε σε αιώρηση είτε σε απόθεση, μπορούν γενικά να περιγραφούν ως εξής: (Verbanck and Ashley, 1994)

## 1) Για υπονόμους ομβρίων (χωριστικό σύστημα)

### 1.1. Λεπτόκοκκο Υλικό

- πάντα παρόν σε αιώρηση στην υδάτινη ροή
- λιγότερο συνήθης η παρουσία τους στις αποθέσεις αν και σε ορισμένες θέσεις (π.χ. στις εκβολές) παρουσιάζονται αποθέσεις από λεπτόκοκκο υλικό

### 1.2. Χονδρόκοκκο Υλικό

- πάντα παρόν στις αποθέσεις
- σε αιώρηση βρίσκεται μόνο όταν έχουμε πλημμυρικό γεγονός μεγάλης έντασης

## 2) Για παντοροϊκά σύστημα

### 2.1. Απόβλητα οικιακής προέλευσης

- πάντα παρόντα σε αιώρηση
- μερικές φορές επίσης σε αποθέσεις

### 2.2 Λεπτόκοκκο Υλικό }

} όπως και στους αγωγούς ομβρίων

### 2.3. Χονδρόκοκκο Υλικό }

Είναι προφανής η ταξινόμηση αυτή με κριτήριο τις δύο γενικές μορφές στερεομεταφοράς στους υπονόμους: το συρτικό φορτίο ή φορτίο πυθμένα και το αιωρούμενο φορτίο. Όμως είναι φανερό ότι η διακρίση αυτή εξαρτάται από τις υδραυλικές συνθήκες που επικρατούν κάθε φορά και κυρίως από την ενέργεια ροής στον αγωγό. Δηλαδή το ίδιο μέγεθος σωματιδίου μπορεί να παρατηρηθεί και σαν αιώρηση και σαν συρτικό φορτίο πυθμένα για κάποιο εύρος σωματιδίων (περισσότερα στο επόμενο κεφάλαιο).

Μια άλλη διάκριση αφορά το μέγεθος των κόκκων, με την ικανότητα καθίζησης και το ρυπαντικό φορτίο των σωματιδίων. Τα φερτά υλικά που εισρέουν στο δίκτυο ομβρίων έχουν γενικά διαστάσεις από μερικά μικρά έως λίγα χιλιοστά. Η ανάλυση ρυπαντικού φορτίου γίνεται γιατί τα πιο λεπτόκοκκα υλικά σχετίζονται με τους ρυπαντές, όπως βαριά μέταλλα και επικίνδυνες τοξικές ουσίες (Xanthopoulos and Augustin, 1992)

Πίνακας 2.1. Κατηγοριοποίηση φερτών υλικών

Μέγεθος > 600 $\mu\text{m}$	συρτικό φορτίο
Μέγεθος 60 $\mu\text{m}$ έως 60 $\mu\text{m}$	μέση ρύπανση καθιζήσιμα στερεά
Μεγεθος 6 $\mu\text{m}$ έως 60 $\mu\text{m}$	υψηλή ρύπανση καθιζήσιμα υλικά
Μέγεθος < 6 $\mu\text{m}$	υψηλή ρύπανση μη-καθιζήσιμα υλικά

Το συρτικό φορτίο ή φορτίο πυθμένα μετακινείται με πολύ αργούς ρυθμούς κατά το μήκος του πυθμένα του αγωγού. Η συνεισφορά του στην ρύπανση είναι ελάχιστη αλλά προξενεί βλάβες στην ομαλή λειτουργία και στην αξιοπιστία του δικτύου. Η δεύτερη κατηγορία μετακινείται κοντά στον πυθμένα των αγωγών αλλά σε περιόδους μικρών παροχών ή πτώσης του πλημμυρογραφήματος μπορούν να δημιουργήσουν αποθέσεις. Η τρίτη κατηγορία μετακινείται με αιώρηση (suspended form). Εξαρτώμενες από τις υδραυλικές συνθήκες που επικρατούν κάθε στιγμή μπορεί να έχουμε ομοιογενή ή ετερογενή αιώρηση. Οι δύο τελευταίες κατηγορίες πάντως παίζουν το σημαντικότερο ρόλο στην μεταφορά των λεπτόκοκκων στερεών και κυρίως των σχετιζόμενων με αυτών ρυπαντών. Η ταξινόμηση αυτή φαίνεται να είναι η πιο αξιόπιστη αφού η εξάρτησή της από τις υδραυλικές συνθήκες δεν είναι τόσο μεγάλη, αλλά και η συσχέτιση των σωματιδίων με το ρυπαντικό τους δυναμικό και την ικανότητα καθίζησης δίνει περισσότερες πληροφορίες.

Δύο ακόμα κατηγορίες δίνουν τα χαρακτηριστικά των στερεών που δημιουργούν αποθέσεις αλλά για παντοροϊκούς αγωγούς. Η δεύτερη από αυτές τις κατηγορίες παρουσιάζει ομοιότητα με τους τύπους των αποθέσεων που παρατηρήθηκαν στη δική μας έρευνα για τις αποθέσεις στους αγωγούς ομβρίων.

Η πρώτη κατάταξη αφορά τους παντοροϊκούς αγωγούς της Βρετανίας (Crabtree, 1989).

### Είδη Στερεών στους Υπονόμους

- A : Χονδρόκοκκο κοκκώδες Υλικό
- B : Συσσωματωμένες αποθέσεις τύπου A
- C : Λεπτόκοκκο Υλικό- υπερκαλυπτει τα A
- D : Οργανική "γλίτσα" τοιχωμάτων αγωγών
- E : Αποθέσεις σε δεξαμενές

Η "γλίτσα" από τα τοιχώματα των αγωγών έχει πολύ μικρές ποσότητες αλλά η συγκέντρωσή της σε ρυπαντές είναι μέγιστη. Η κατηγορία C έχει πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις σε οργανικό υλικό και σε ρυπαντές και μετακινούνται εύκολα ακόμα και με την μέγιστη ημερήσια παροχή μιας *Ροής Ξηρής Περιόδου (Dry-Weather Flow)*. Η κατηγορία A παρουσιάζει τις μεγαλύτερες ποσότητες. Το οργανικό υλικό που βρίσκεται παρόν ακόμα και στις χονδρόκοκκες αποθέσεις βοηθά στη συσσωμάτωση των αποθέσεων, οπότε οι αποθέσεις αυτές παρουσιάζουν μεγαλύτερες διατμητικές αντοχές.

Μελέτη των αποθέσεων των φερτών υλικών στην πόλη των Βρυξελλών του Βελγίου (Verbanck, 1992) έδειξε την παρουσία γενικά δύο ειδών αποθέσεων: α) για αγωγούς που αποχετεύουν μεγάλες επιφάνειες (συνήθως επισκέψιμοι), οι αποθέσεις είναι καλά διαβαθμισμένες απο μέση έως χονδρόκοκκη άμμο, με πολύ μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών και πολύ μικρή οργανική περιεκτικότητα. β) Για τους μικρότερους αγωγούς, σχετικά ανάντη στο δίκτυο, οι αποθέσεις είναι μορφής ιλύος διεσπαρμένες στο δίκτυο. Οι αποθέσεις αυτές είναι λεπτόκοκκες με μεγάλο οργανικό φορτίο. Για το δίκτυο των Βρυξελλών κοκκομετρικές αναλύσεις των τριών τετάρτων των δειγμάτων των αποθέσεων που συλλέχθηκαν αποτελούνται απο άμμο με μεγέθη που ποικιλουν απο 125 έως 1000 μm. Για τα δείγματα αυτά το οργανικό υλικό γενικά κυμαίνεται χαμηλότερα του 10%. Οι τιμές αυτές που βρέθηκαν στο παντοροϊκό δίκτυο των Βρυξελλών λίγο-πολύ συμπίπτουν με τις δικές μας μετρήσεις από το δίκτυο ομβρίων. Οι ποσότητες άμμου που βρέθηκαν μάλλον είναι μεγάλες για παντοροϊκό δίκτυο ενώ επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι το οργανικό φορτίο σχετίζεται άμεσα με τα πιο λεπτά σωματίδια. Οι μεγάλες ποσότητες άμμου σε

κάθε περίπτωση στα παντοροϊκά δίκτυα κάνουν συγγενή στις φυσικές ιδιότητες και στο σχηματισμό των αποθέσεων τα παντοροϊκά δίκτυα και τα δίκτυα ομβρίων. Η παρατήρηση αυτή όμως είναι εξειδικευμένη και γενικά οι διαφορές στα φερτά υλικά στα δύο συστήματα είναι σημαντικές.

Το μόνο συμπέρασμα που είναι γενικά αποδεκτό είναι ότι τα στερεά υλικά στους υπονόμους είναι μια στοχαστική διεργασία, αφού οι διακυμάνσεις των φερτών υλών είναι σημαντικές όχι μόνο κατά διαφορετικούς χρόνους μέσα σε ένα διαφορετικό πλημμυρικό γεγονός αλλά και στο ίδιο γεγονός αλλά σε γειτονικές θέσεις μετρήσεων. Οι μεγάλες διακυμάνσεις των διαστάσεων των σωματιδίων κάνει αναποτελεσματική τη χρήση μιας μέσης τιμής, παρόλο που αυτή είναι επιβεβλημένη στα πλαίσια ενός απλοποιημένου μοντέλου ροής στους αγωγούς.

## 2.4. Παραγωγή Φερτών Υλικών

Η παραγωγή των φερτών υλών από τις αστικές επιφάνειες είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο θέμα καθώς η παραγωγή των φερτών υλών αφορά την ανθρώπινη δραστηριότητα, η οποία είναι διεσπαρμένη σε όλη την αστική επιφάνεια. Οι τοποθεσίες παραγωγής φερτών υλών είναι τόσο πολλές που πρέπει να μιλάμε πλέον για *μη-σημιακές ή διάχυτες* πηγές φερτών υλών, τις οποίες πηγές είναι εξαιρετικά δύσκολο να ελεγχθούν και να διαχειρισθούν στο σύνολό τους. Ακόμα περισσότερο οδυνηρό αποτελεί το γεγονός ότι οι ίδιες διάχυτες πηγές είναι και πηγές ρύπανσης οι οποίες απο την φύση τους δεν μπορούν να τύχουν επεξεργασίας σε εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, αφού η συγκέντρωσή τους κάνει οικονομικά ασύμφορη και με αμφισβητούμενη απόδοση την αποτελεσματικότητα των έργων συγκέντρωσης και επεξεργασίας των τεράστιων ποσοτήτων ρυπαντών. Γιαυτό και στις μη σημιακές πηγές ρύπανσης δεν κάνουμε λόγο για αποτελεσματική επεξεργασία (η οποία άλλωστε είναι αδύνατη), αλλά σε αποτελεσματική διαχείριση των πηγών αυτών (λεπτομέρειες στο αντίστοιχο κεφάλαιο).

Οι ανθρώπινες και μη δραστηριότητες που προκαλούν αυξημένη παραγωγή φερτών υλών είναι οι εξής:

**Διάβρωση:** Η γεωλογική διάβρωση ορίζεται σαν τη διάβρωση της επιφάνειας της γης κάτω από φυσικές συνθήκες. Η γεωλογική διάβρωση διαφέρει σε διαφορετικές περιοχές λόγω των διαφορών στο χαρακτήρα του εδάφους, των κλιματολογικών συνθηκών και της φυτοκάλυψης. Παρόλαυτα η συνεισφορά της γεωλογικής διάβρωσης στα αστικά δίκτυα αποχέτευσης είναι σχετικά μικρή, αφού οι διαπερατές επιφάνειες είναι πλέον ελάχιστες στις πόλεις. Όμως, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, υπάρχουν πολλά προβλήματα φερτών από τον ορεινό όγκο του Υμηττού στις περιοχές που βρίσκονται στους πρόποδες του βουνού. Η ελάχιστη φυτοκάλυψη, οι σχετικά μεγάλες τοπογραφικές κλίσεις και η απουσία της περιμετρικής τάφρου στους πρόποδες του Υμηττού αυξάνουν (μέσω της Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας) τη μάζα των φερτών υλικών που αποκολλώνται και παρασύρονται από τη ροή των κατακρημνισμάτων.

**Αστικοποίηση:** Οι αστικοποιημένες περιοχές, όταν είναι εντελώς ανεπτυγμένες, είναι περιοχές με μικρές ποσότητες φερτών γιατί ένα μεγάλο ποσοστό της γης προστατεύεται έναντι της διάβρωσης λόγω των δρόμων, και των στεγών. Κατά τη διάρκεια κατασκευής τους όμως η παραγωγή φερτών υλών είναι πολύ υψηλή. Αυτό είναι αποτέλεσμα της απομάκρυνσης των δένδρων και της υπόλοιπης βλάστησης και των εργασιών εκσκαφής και κατασκευής. Κατά τους *Holeman and Geiger (1959)*, η αστικοποίηση συμπεριλαμβανομένου και της κατασκευής μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων και εμπορικών έργων φαίνεται

να είναι μεγάλης σημασίας γιατί σημαντικές εκτάσεις είναι εκτεθειμένες στη διάβρωση για μια χρονική περίοδο 2 με 3 χρόνια πριν την τελική κατασκευή και σταθεροποίηση. Ιδιωτικές κατοικίες χρειάζονται χρόνο κατασκευής τουλάχιστον 1 έτους αλλά δεν δημιουργούν τόσες πολλές ποσότητες φερτών όσο οι μεγαλύτερες κατασκευές. Για την ελληνική πραγματικότητα όμως ο χρόνος κατασκευής είναι μεγαλύτερος και υπάρχουν αρκετά παραδείγματα κατασκευών που παραμένουν ανολοκλήρωτες χωρίς την στοιχειώδη προστασία από την συμπάρασυρση φερτών υλών στο δίκτυο. Η ποσότητα φερτών υλών που παρέχονται στο δίκτυο ομβρίων από κατασκευαστικές επιφάνειες διαφέρουν σημαντικά εξαρτώμενες από τις



Φωτ. 2.2: Στερεοαπορροή απο εργοτάξιο (University of Wisconsin)

πρακτικές διαχείρισης των υλικών εκσκαφής και κατασκευής. Ανεξέλεγκτη ή ελάχιστα ελεγχόμενη κατασκευή εκτιμάται ότι συνεισφέρει "φορτίο φερτών" της τάξης των 35-45 τόννων ανά εκτάριο και ανά έτος. Οι ρυθμοί στερεοαπορροής από κατασκευαστικές επιφάνειες είναι 10 έως 20 φορές μεγαλύτεροι από τις επιφάνειες των γεωργικών περιοχών και 1000 έως 2000 φορές μεγαλύτεροι από δασικές επιφάνειες. Για μικρές χρονικές περιόδους, οι κατασκευαστικές επιφάνειες συνεισφέρουν μεγαλύτερες ποσότητες φερτών υλών από όσο οι ίδιες επιφάνειες για πολλές δεκαετίες.

**Κατασκευή Οδικών Έργων:** Σημαντική παραγωγή φερτών υλών μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια των οδικών κατασκευών όταν η προστατευτική βλάστηση αφαιρεθεί και τα απότομα πρανή παραπλεύρως των δρόμων μείνουν απροστάτευτα. Τέτοια παραγωγή φερτών μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στο δίκτυο κατάντη του σημείου κατασκευής. Για την κατασκευή σημαντικών αστικών οδικών έργων μεγάλες επιφάνειες παραμένουν εκτεθειμένες προς διάβρωση για μεγάλο χρονικό διάστημα.

**Μεταβολή Συνθηκών Στερεοαπορροής:** Η διαβρωτική ενέργεια του νερού είναι συνάρτηση του όγκου απορροής και της ταχύτητας του νερού. Όσο ο όγκος του απορρέοντος νερού αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η διαβρωτική του ικανότητα. Πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες που εφαρμόζονται γενικά στο έδαφος είτε αυξάνουν τον όγκο του απορρέοντος νερού είτε αυξάνουν τη συγκέντρωση της απορροής. Επομένως, μια αναντιστοιχία ή αντίφαση με τη συζήτηση στην αστικοποίηση είναι ότι ενώ με την αστικοποίηση ουσιαστικά μειώνουμε την ποσότητα των φερτών που αποτίθενται στις αστικές επιφάνειες, την ίδια στιγμή η αύξηση του όγκου απορροής, λόγω αύξησης του συντελεστή απορροής, δημιουργεί μεγαλύτερο διαβρωτικό δυναμικό και φυσικά η ποιότητα των φερτών υλικών είναι διαφορετική όσο και περιβαλλοντικά επικίνδυνη.

**Άλλοι Δυνατοί Μηχανισμοί:** Τα στερεά που μεταφέρονται στα δίκτυα αποχέτευσης, παράγονται κυρίως λόγω της απελευθέρωσης των επιφανειακά αποτιθέμενων στερεών από τη βροχόπτωση και της συμπαρασύρσής τους από την απορροή και εισάγονται στο σύστημα κατά τη διάρκεια της καταιγίδας. Άλλοι πιθανοί μηχανισμοί παραγωγής φερτών είναι η δράση του ανέμου και η τύρβη από τις δονήσεις που παράγονται από τα οχήματα. Οι Ellis and Harrop (1984) ανέφεραν ότι ένα μεγάλο ποσοστό από την οργανική σκόνη προέρχεται από την πνοή του ανέμου. Οι Butler and Clark (1993) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι κακές πρακτικές καθαρισμού των οδικών επιφανειών παίζουν κάποιο σημαντικό ρόλο. Επίσης στα δίκτυα αποχέτευσης μπορούν να βρεθούν στερεά που δεν προέρχονται από τις αστικές επιφάνειες. Σημαντικές ποσότητες συνεισφέρουν και οι διαβρώσεις των ίδιων των αγωγών που μπορεί να προέρχονται από υψηλές ταχύτητες ροής μέσα στον αγωγό απο κακό υδραυλικό σχεδιασμό (μέγιστη ταχύτητα 6,0 m/s για τις Ελληνικές συνθήκες) ή από διάβρωση λόγω του οργανικού φορτίου των αποθέσεων που δρουν με μεγάλη αποτελεσματικότητα κυρίως στους αγωγούς από σκυρόδεμα. Τέλος θα πρέπει να αναφερθούν και περιπτώσεις παράνομων διαθέσεων βιομηχανικών αποβλήτων με μεγάλη οξειδωτική και διαβρωτική ικανότητα που μπορούν να διαβρώσουν και να καταστρέψουν ολόκληρα τμήματα των αγωγών μεταφέροντας μεγάλες ποσότητες των υλικών προς τα κατάντη. Τέτοια γεγονότα παράνομης διάθεσης βιομηχανικών αποβλήτων έχουν καταγραφεί και στο δίκτυο ομβρίων της Αθήνας με καταστρεπτικές συνέπειες. Επομένως, είναι σημαντική η καταγραφή των βιομηχανιών με επικίνδυνα λύματα και η καταγραφή του τρόπου διάθεσης των λυμάτων καθώς και ο συνεχής έλεγχος των δικτύων αποχέτευσης για την ύπαρξη επικίνδυνων αποβλήτων.

## 2.5. Φυσικές Ιδιότητες Φερτών Υλών

Οι φυσικές ιδιότητες των φερτών υλών στους αγωγούς ομβρίων που θα παραθέσουμε στη συνέχεια έχουν αποφασιστικής σημασίας ρόλο στη μελέτη της στερεομεταφοράς με τη υδάτινη ροή, το σχηματισμό των αποθέσεων και την επεξεργασία των φερτών υλών στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Σημειώνουμε εδώ εκ των προτέρων ότι τα στοιχεία που παρατίθενται σε αυτήν την ενότητα προέρχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία και δεν αφορούν κατανάλωση και τις ιδιότητες των φερτών υλών που βρέθηκαν κατά την έρευνά μας. Τα στοιχεία αυτά παρατίθενται στο Κεφάλαιο 4. Οι σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες που αναφέρονται εδώ είναι το μέγεθος, η ταχύτητα καθίζησης, η ειδική μάζα και το οργανικό φορτίο.

Ξεκινώντας θα πρέπει να αναφέρουμε το εντελώς στοχαστικό φαινόμενο της εισροής των φερτών υλών στα δίκτυα αποχέτευσης. Ως συνέπεια όλα τα φυσικά μεγέθη παρουσιάζουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις από τη μέση τιμή. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται σε πολλούς παράγοντες όπως η διάρκεια και η ένταση της βροχόπτωσης, η διάρκεια της προηγούμενης άνυδρης περιόδου, τις χρήσεις γης της λεκάνης απορροής κ.α. Μελέτες στην Αγγλία (CIRIA, 1987) δείχνει ότι οι περισσότερες δυτικές χώρες εμφανίζουν το ίδιο εύρος συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών πλημμυρικών υδάτων με ένα μέσο όρο γύρω στα 350 mg/l. Πράγματι, νέες μελέτες (Threllfall *et al*., 1991) επιβεβαίωσαν τα προηγούμενα δεδομένα και βρήκαν μια μέση τιμή γύρω στα 358 mg/l αλλά με εύρος από 53 έως 2035 mg/l. Αποτελέσματα εξάλλου από το ερευνητικό πρόγραμμα της United States Environmental Protect Agency, Urban Runoff Program (EPA, 1983) έδειξαν μέση συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών για όλες τις αστικές επιφάνειες γύρω στα 100 mg/l.

- **Μέγεθος Σωματιδίων (grain size):** Το συνολικό μέγεθος των σωματιδίων που μεταφέρονται στους αγωγούς ομβρίων είναι της τάξης των μερικών μμ έως λίγων mm. Η μέθοδος της μέτρησης του μεγέθους είναι το υγρό κοσκίνισμα (wet sieving) για τα μεγέθη έως τα 100 μμ ενώ για ακόμα μικρότερες διαστάσεις χρησιμοποιείται το όργανο που ονομάζεται Laser Defraction Analyzer (CLASS HM850). Οι δικές μας μετρήσεις αποτελούνται από υγρά κόσκινα με διαχωρισμό έως τα 74 μμ ενώ το προαναφερθέντα εργαστηριακό όργανο κατέστη αδύνατο να βρεθεί στα ελληνικά εργαστήρια. Για τα διεθνή δεδομένα ισχύουν τα εξής:
  1. Τα λεπτόκοκκα σωματίδια (μικρότερα των 100 μμ) αποτελούν το 66 με 85% της συνολικής μάζας με μέση διάμετρο  $D_{50}$  μεταξύ των 25 με 44 μμ. Στους επόμενους πίνακες φαίνονται τα αποτελέσματα από έρευνες σε πόλεις της Γαλλίας (G. Chebbo and A. Bachoc, 1992). Η έρευνα περιλαμβάνει και παντοροϊκούς αγωγούς. Παρακάτω, παρατίθενται οι πίνακες με τις περιοχές που μελετήθηκαν και τα αποτελέσματα. Σημειώνεται επίσης ότι τα φερτά αυτά υλικά είναι υλικά από δείγματα που πάρθηκαν κατά τη διάρκεια πλημμυρικών φαινομένων και είναι και αιωρούμενα στερεά και φορτία πυθμένα, σε αντίθεση με τη δική μας έρευνα που τα δείγματα που συγκεντρώθηκαν ήταν δείγματα αποθέσεων μετά από το τέλος των πλημμυρικών γεγονότων.

Περιοχή	Τύπος Δικτύου	Επιφάνεια Απορροής	Συντελεστής Απορροής
1 Δεξ. Κατακράτησης Bordeaux	Ομβρίων	606 εκτάρια	50%
2 Δεξ. Κατακράτησης Seine Saint Denis	Ομβρίων	8310 εκτάρια	~ 14%
3 Δεξ. Κατακράτησης La Molette Seine Saint Denis	Παντ. Υπερχειλιστής	~8000 εκτάρια	~ 30%
4 Κύριος Αγωγός No. 13 Marseille	Παντοροϊκός Αγωγός	134 εκτάρια	87%

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά Επιλεγόμενων Περιοχών της Γαλλίας (G. Chebbo and A. Bachoc, 1992).

Η μελέτη των φερτών υλικών γίνεται κατά τη διάρκεια πολλών και με διαφορετικά χαρακτηριστικά βροχοπτώσεων, ώστε να έχουμε ένα όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα των φερτών. Εύκολα συμπεραίνει κανείς ότι για την επιτυχή ολοκλήρωση μιας τέτοιας εργασίας και τη συγκέντρωση δειγμάτων από όλους τους συνδυασμούς βροχοπτώσεων και προηγούμενων άνυδρων περιόδων, απαιτείται μια χρονική κλίμακα δύο με τριών χρόνων. Τα υδρολογικά μεγέθη που απαιτούνται για τη κατάλληλη περιγραφή και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων γενικά είναι ο αριθμός των πλημμυρικών γεγονότων κατά τη διάρκεια της μελέτης, το ύψος της μετρούμενης βροχόπτωσης (mm), η μέση ένταση βροχόπτωσης (mm/h), η μέση μέγιστη ένταση για διάρκεια 6 λεπτών (mm/h), καθώς και η προηγούμενη άνυδρη χρονική περίοδος σε ώρες.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων φαίνονται στον Πίνακα 2.3. Σημειώνουμε ότι η έκφραση  $D_{10}$  σημαίνει ότι το 10% της μάζας των



στερεών θα περάσει το κόσκινο με μέγεθος οπής  $D_{10}$ . Επομένως εύκολα διαπιστώνεται ότι  $D_{10} < D_{50} < D_{90}$ .

Περιοχή	Τύπος Δικτύου	$D_{10}$ (μm)	$D_{50}$ (μm)	$D_{90}$ (μm)	%<100 μm	
1	Ομβρίων	7.4-8.6	29-38	265-1375	76-85	
2 *	Ομβρίων	5.7	29	400	82	
3	Παντοροϊκό	3.7-5.4	25-32	243-403	76-82	
4	Παντοροϊκό	5-13	31-44	183-497	66-79	
Δίκτυα Ομβρίων		Μέση Τιμή	7.4	32	617	81
		Τυπική Απόκλιση	1.1	3.5	442	3.3
Παντοροϊκά Δίκτυα						
		Μέση Τιμή	6.8	34	331	75
		Τυπική Απόκλιση	3.3	6.4	112	5.5
Γενικός Μέσος Όρος			7.1	33	458	78
Τυπική Απόκλιση			2.5	5.4	338	5.4

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά των κόκκων για τα διαφορετικά δίκτυα του Πίνακα 2.2. (G. Chebbo and A. Bachoc, 1992).

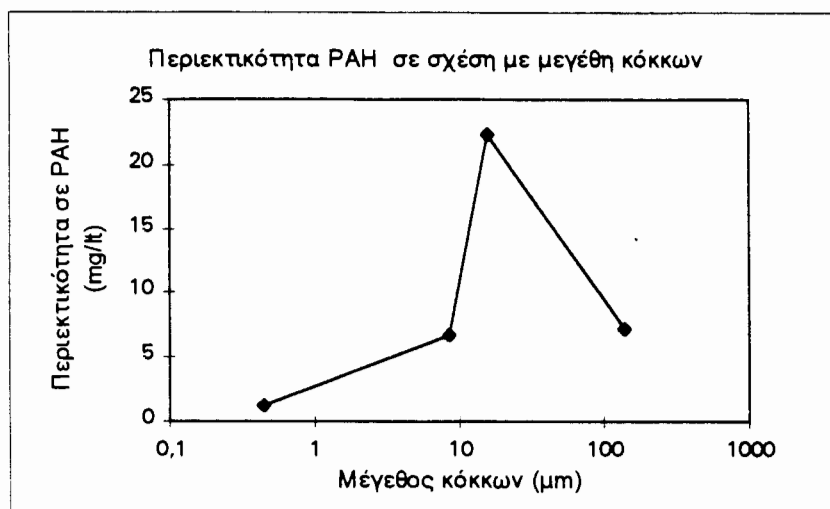
Μελετώντας κανείς προσεκτικά τον παραπάνω πίνακα μπορεί να βγάλει σημαντικά συμπεράσματα. Πρώτον, ότι σε γενικό βαθμό τα μεγέθη των σωματιδίων είναι σχετικά ανομοιογενή με μια αυξημένη απόκλιση από το μέσο όρο για τις μεγάλες διαμέτρους. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη χονδροκόκκων σωματιδίων με αρκετά διαφορετικά μεγέθη. Όμως η ύπαρξη αυτή των πιο χονδροκόκκων σωματιδίων είναι αρκετά μικρή (αφού το ποσοστό τους γενικά δεν υπερβαίνει το 30%) οπότε και η επίδρασή τους στη συνολική ανομοιογένεια δεν είναι μεγάλη. Επίσης, το ποσοστό του πιο λεπτόκοκκου υλικού (<100 μm) είναι μικρότερο στους παντοροϊκούς αγωγούς από τους αγωγούς ομβρίων. Γεγονός που δεν έρχεται σε συμφωνία με τη γενική διαπίστωση ότι το πιο λεπτόκοκκο υλικό αντιστοιχεί στο οργανικό υλικό. Πάντως τα στερεά υλικά των παντοροϊκών αγωγών εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά στα μικρά μεγέθη ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τους αγωγούς ομβρίων. Παρόλαυτα, τα μεγέθη των σωματιδίων επηρεάζονται σημαντικά και από τη μέθοδο μέτρησης. Γιαυτό θα περίμενε κανείς σημαντικές αποκλίσεις ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης αλλά και τον τρόπο που συλλέγονται τα δείγματα. Επομένως, καταλήγει κανείς ότι το μέγεθος των σωματιδίων δεν είναι η πιο κατάλληλη παράμετρος όταν αναφερόμαστε σε προβλήματα στερεομεταφοράς ή όταν επιζητούμε παραμέτρους για τη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου περιγραφής των φαινομένων στερεομεταφοράς.

Εκτός των άλλων τα σωματίδια τα μικρότερα των 100  $\mu\text{m}$  έχουν την ικανότητα να συσσωματώνονται και να κροκιδώνονται, σχηματίζοντας συσσωματώματα μεγαλύτερου μεγέθους. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από τον Πίνακα 2.4.

Βροχόπτωση	Διαδικασία	Μέγεθος Σωματιδίων ( $\mu\text{m}$ )		
		$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$
Bequigneaux 2-4/12/1988	1	3.9	22	53
	2	1.8	13	36
	3	2.5	18	37

Πίνακας 2.4: Απόδειξη της ικανότητας για συσσωμάτωση (G. Chebbo and A. Bachoc, 1992).

Οι διαδικασίες που περιγράφονται με τους αριθμούς 1,2,3 έχουν ως εξής: Η διαδικασία 1 είναι απλώς ανάμιξη αλλά χωρίς (ultrasonic dispersion). Αυτό σημαίνει ότι τα σωματίδια παραμένουν με την ίδια φυσικοχημική σύνθεση που είχαν και στο μίγμα νερού και στερεών των ομβρίων υδάτων. Με την εφαρμογή της διαδικασίας 2 που είναι εφαρμογή της ultrasonic dispersion για ικανό χρόνο διαπιστώνουμε από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.4 ότι έχουμε μια πτώση του  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  στο μισό. Αυτό συμβαίνει γιατί διασπώνται τα συσσωματώματα των σωματιδίων και επιστρέφουν στο αρχικό τους μέγεθος. Με τη διαδικασία 3, που σημαίνει ότι αφήνουμε το δείγμα να ηρεμήσει για 5 λεπτά από την εφαρμογή της ultrasonic dispersion. Πάλι από τον Πίνακα 2.4 διαπιστώνουμε ότι οι αντίστοιχες τιμές των  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  αυξάνονται χωρίς όμως να φθάσουν στις τιμές που είχαν αρχικά. Διαπιστώνουμε επίσης ότι η % αύξηση για το  $D_{10}$  είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το αντίστοιχο  $D_{50}$  και το  $D_{90}$ . Η ανακάλυψη αυτή είναι η πλέον σημαντική για τη συμπεριφορά των φερτών υλών και για την επεξεργασία τους αφού η αύξηση των διαστάσεων λόγω συσσωμάτωσης οδηγεί σε αύξηση του βάρους τους και συνεπώς σε αύξηση της ταχύτητας καθίζησης με πολύ καλές συνέπειες για την αποτελεσματικότητα των δεξαμενών καθίζησης. Επίσης διαπιστώνουμε ότι η συσσωμάτωση είναι πιο έντονη για τα πιο λεπτόκοκκα υλικά. Αυτή η διαπίστωση είναι εξίσου σημαντική γιατί τα πιο λεπτόκοκκα υλικά είναι φορείς επικίνδυνων ρυπαντών όπως τα βαρέα μέταλλα ( $F_e$ ,  $N_i$ ,  $Z_n$ ,  $P_b$ ,  $M_n$ ) καθώς και επικίνδυνες ρυπαντικές ουσίες, όπως οι Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες (P.A.H's). Στο παρακάτω διάγραμμα (C. Xanthopoulos and A. Augustin, 1992) βλέπουμε την κατανομή των Πολυκυκλικών Αρωματικών Υδρογονανθράκων σε συνάρτηση με το μέγεθος κόκκου. Διαπιστώνουμε μεγάλη συγκέντρωση P.A.H's γύρω στα 60  $\mu\text{m}$ .

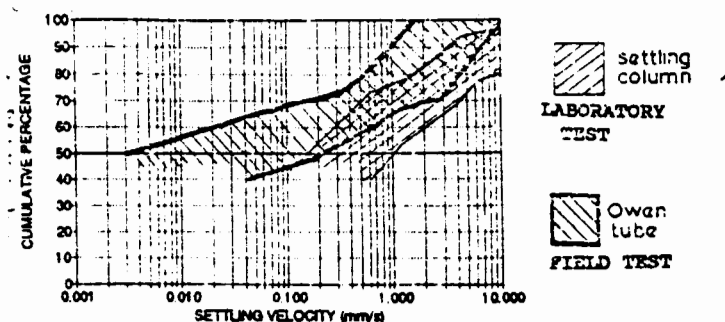


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.1: Συσχέτιση Διαστάσεων Σωματιδίων με τη Σχετιζόμενη Συγκέντρωση PAH's

### • Ταχύτητα Καθίζησης

Η μελέτη της ταχύτητας καθίζησης των σωματιδίων είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που παίζει κύριο ρόλο στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων είτε στις δεξαμενές κατακράτησης / καθίζησης για το σωστό και αποτελεσματικό τους σχεδιασμό. Η ταχύτητα καθίζησης επηρεάζεται και αυτή από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος των σωματιδίων, οι υδραυλικές συνθήκες ροής, η τύρβη κ.α. Οι πολύ καλές ιδιότητες συσσωμάτωσης και κροκίδωσης που πετυχαίνεται για σωματίδια με διαστάσεις μικρότερες των 50 μm επιβεβαιώνονται με σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις πειραματικές μετρήσεις με το νόμο του Stokes. Πάντως, δεν έχει βρεθεί μέχρι τώρα ένας γενικά αποδεκτός πειραματικός τρόπος για την αξιόπιστη μέτρηση των ταχυτήτων καθίζησης, ενώ οι διαφορές των διαφόρων μεθόδων μεταξύ τους διαφέρουν σημαντικά αλλά και από τις πραγματικές συνθήκες. Για παράδειγμα όλες οι πειραματικές μέθοδοι μετράνε την ταχύτητα καθίζησης σε νερό εν ηρεμία. Εξάλλου, εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα δίνουν μετρήσεις με δείγματα παρμένα από την πραγματική ροή στους υπονόμους και δείγματα σε αποσταγμένο νερό στο εργαστήριο. Επίσης κανείς δεν ξέρει αν τα επιτόπου δείγματα, συλλέγονται με την αντιπροσωπευτική συγκέντρωση σε στερεά. Εκτός των άλλων, μετρήσεις ταχυτήτων καθίζησης σε διαφορετικά δείγματα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στο ίδιο σημείο και για την ίδια πλυμμήρα έδωσαν διαφορετικές τιμές.

Επομένως, η μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας καθίζησης επηρεάζει και την τιμή της, όπως άλλωστε δείχνει και το παρακάτω γράφημα (Ashley and Crabtree, 1992)



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.2: Διαφορές στις Μετρήσεις της Ταχύτητας Καθίζησης από Διαφορετικές Πειραματικές Αναλύσεις (Ashley, 1992)**

Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των ταχυτήτων καθίζησης είναι η στήλη καθίζησης, ο κώνος Imhoff και ο σωλήνας του Owen. Σε επόμενο κεφάλαιο περιγράφουμε τη μέθοδο της στήλης καθίζησης που χρησιμοποιήσαμε και στα δικά μας πειράματα.

1. Για σωματίδια με διαστάσεις < 50 μm η μέση ταχύτητα καθίζησης είναι :

- μεταξύ των 3 m/h έως 5.7 m/h, για φερτά υλικά ομβρίων αγωγών

- για παντοροϊκούς αγωγούς οι αποκλίσεις των ταχυτήτων καθίζησης είναι σημαντικές και για διαφορετικά πλημμυρικά γεγονότα, για διαφορετικά σημεία αλλά και για διαφορετικούς χρόνους μέσα στο ίδιο πλημμυρικό φαινόμενο. Οι διαφορές στις τιμές των  $V_{10}$  και  $V_{50}$  είναι σημαντικές μεταξύ των παντοροϊκών αγωγών και των ομβρίων αλλά αυτές οι διαφορές αυτές μειώνονται και εξομαλύνονται στις τιμές των  $V_{90}$ .

Απο την ίδια μελέτη (G.Chebbo and A.Bachoc, 1992) έχουμε τον παρακάτω Πίνακα 2.5.

Τάξη Μεγέθους Σωματιδίων	Στατιστικά		Δείκτες Ταχύτητας Καθίζησης		
			$V_{10}$ (m/h)	$V_{50}$ (m/h)	$V_{90}$ (m/h)
< 50 μm	Δίκτυα Ομβρίων Αγωγών	Μέση Τιμή	0,13	4,1	11,43
		Τυπική Απόκλιση	0,083	1,0	1,91
< 50 μm	Δίκτυα Παντοροϊκών Αγωγών	Μέση Τιμή	<0,036	2,4	12,34
		Τυπική Απόκλιση	-	1,3	2,6
< 50 μm	Δίκτυα Ομβρίων Αγωγών	Μέση Τιμή	13	50	326
		Τυπική Απόκλιση	5,2	16	247
< 50 μm	Δίκτυα Παντοροϊκών Αγωγών	Μέση Τιμή	14,3	38,5	151
		Τυπική Απόκλιση	2,0	7,3	66
Ολικά	Δίκτυα	Μέση Τιμή	0,37	7,2	89

Ομβρίων Αγωγών	Τυπική Απόκλιση	0,22	1,3	37
-----				
Δίκτυα Παντοροϊκών Αγωγών	Μέση Τιμή Τυπική Απόκλιση	<0,058 -	8,1 2,6	67 21

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5: Ταχύτητες Καθίζησης Σωματιδίων Ομβρίων και Παντοροϊκών Δικτύων (G.Chebbo and A.Bachoc,1992)

Σημαντική είναι η σύγκριση των μετρούμενων ταχυτήτων καθίζησης σε σχέση με τις ταχύτητες καθίζησης που προκύπτουν από την εφαρμογή του νόμου του Stokes.

Τοποθεσία	Bequigneaux	Les Brouillards	La Molette	Αγωγός No 13
$V_{50,mean}/V_{St.}$	1,9-4,6	3,2	2,6-5,5	0,9-3,9

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6: Σύγκριση μέσης ταχύτητας με το νόμο Stokes (G.Chebbo and A.Bachoc,1992)

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.6 δείχνουν με το πλέον χαρακτηριστικό τρόπο την φύση των υλικών να συσσωμώνονται και να κροκιδώνονται. Φαίνεται όμως πιο έντονη η συσσωμάτωση στους παντοροϊκούς αγωγούς χωρίς πάντως να φαίνεται έντονη η τάση αυτή. Φαίνεται πάντως έντονη η επίδραση του οργανικού φορτίου που ευνοεί τη συσσωμάτωση των σωματιδίων, με μηχανισμό που δεν είναι πλήρως γνωστος μέχρι και σήμερα.

Τελειώνοντας την αναφορά για την ταχύτητα καθίζησης, σαν συμπέρασμα προκύπτει ότι η ταχύτητα καθίζησης είναι γενικά αναξιόπιστο σαν μετρούμενο μέγεθος, για τους εξής λόγους:

1. Λόγω της μη-συντηρητικής μορφής των σωματιδίων και κυρίως λόγω της ικανότητας τους να συσσωμώνονται. οπότε μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά και χωρικά και χρονικά.
2. Λόγω της εξάρτησης των χαρακτηριστικών καθίζησης από την περιβάλλουσα αιώρηση, ιδίως τη συγκέντρωση των συσσωματωμάτων για σωματίδια μικρού μεγέθους.
3. Λόγω των διαφορών που παρουσιάζουν οι πειραματικές μετρήσεις, είτε είναι εργαστηριακές είτε είναι μετρήσεις πεδίου.

Επομένως η ταχύτητα καθίζησης δεν μπορεί να αποτελέσει το κρίσιμο μέγεθος για τη ανάπτυξη μοντέλων πρόγνωσης των σημείων που θα δημιουργηθούν αποθέσεις μέσα στο δίκτυο.

### • Ειδική Μάζα

Η μέτρηση της ειδικής μάζας (specific masses) μπορεί να μην είναι σημαντική για το σχεδιασμό των δικτύων ομβρίων αγωγών για αποφυγή των αποθέσεων αλλά είναι καλός οδηγός για την κατάταξη των φερτών υλικών χωρίς πολύπλοκες εργαστηριακές μετρήσεις.

Τύπος Δικτύου	Ειδικές Μάζες Σωματιδίων			
	< 100 μm	> 100μm	Ολικά	
Δίκτυα Ομβρίων Αγωγών	Μέση Τιμή	2,5	1,83	2,33
	Τυπ. Απόκλιση	0,084	0,45	0,15
Παντοροϊκά Δίκτυα	Μέση Τιμή	2,09	1,74	2,00
	Τυπ. Απόκλιση	0,13	0,24	0,18

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.7: Ειδικές Μάζες Ομβρίων & Παντοροϊκών Σωματιδίων (G.Chebbo and A.Bachoc, 1992)

Απο την παραπάνω εργασία φαίνεται ότι τα στερεά υλικά ομβρίων υδάτων έχουν συγκριτικά μεγαλύτερες ειδικές μάζες σε σχέση με τα στερεά παντοροϊκών αγωγών. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα στερεά σε αγωγούς ομβρίων είναι "βαρύτερα" οπότε παρουσιάζουν μεγαλύτερο δυναμικό για αποθέσεις. Επίσης φαίνεται ότι τα υλικά με μέγεθος μικρότερο των 100 μm παρουσιάζουν μεγαλύτερες ειδικές μάζες σε σχέση με τα υλικά μεγαλύτερα των 100 μm. Αυτό συμβαίνει γιατί τα σωματίδια μεγαλύτερα των 100 μm παρουσιάζουν οργανικό υλικό που είναι πολύ λιγότερο πυκνό.

## 2.6. Συμπεράσματα

Απο την πρώτη αυτή αναφορά για τα φερτά υλικά αγωγών ομβρίων, καταλαβαίνει κανείς πόσο δύσκολο είναι να εκτιμηθούν στα πλαίσια πάντα ενός αριθμητικού μοντέλου, τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα και στις αστικές επιφάνειες αλλά και στους αγωγούς.

Οι μελέτες που έχουν γίνει μέχρι τώρα έχουν δείξει μεγάλες αποκλίσεις και, όχι λίγες φορές, αντικρουόμενα αποτελέσματα. Οι προσπάθειες που γίνονται για την ανάπτυξη ενός "παγκόσμιου" μοντέλου είναι πολλές, πάντα όμως δεν κατορθώνουν μια ικανοποιητική προσέγγιση.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε τα είδη της στερεομεταφοράς σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, τη χρησιμότητά τους στο φαινόμενο και θα αναλύσουμε πληρέστερα τη *ροή με συρτικό φορτίο* που είναι το πιο κρίσιμο είδος στερεομεταφοράς για τη δημιουργία αποθέσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

### ΜΟΡΦΕΣ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΥΠΟΝΟΜΟΥΣ

*« . . . οι τεχνικές λύσεις τείνουν να είναι εκείνες, που υπαγορεύει η κατασκευή και συντήρηση συστημάτων σύνθετων, μεγάλης κλίμακας, υψηλής ενέργειας και μεγάλης απορρόφησης παραγωγικών μέσων. Η συνέχεια της κατασκευής και τελειοποίησης τέτοιων συστημάτων είναι αυτή η ίδια ένας ορισμός της προόδου . . . »*

*L. Winner: Ηπολιτική φιλοσοφία της εναλλακτικής τεχνολογίας  
Signum, Αρ. 19-20, 9/1982*

### 3.1. Εισαγωγικές Έννοιες

Η μελέτη της στερεομεταφοράς στους κλειστούς αγωγούς (με ή χωρίς ελεύθερη επιφάνεια) άργησε πολύ να γίνει σε σχέση με τη στερεομεταφορά σε ποταμούς και χειμάρους. Η αργοπορία αυτή οφείλεται στο περιορισμένο ενδιαφέρον που έδειξαν στα φερτά υλικά των δικτύων αποχέτευσης οι επιστήμονες που μελετούσαν την πλημμυρική αποχέτευση αστικών περιοχών. Η μελέτη της στερεομεταφοράς στους ποταμούς μελετήθηκε λόγω της ανάγκης για εκτίμηση του νεκρού όγκου στους ταμειυτήρες φραγμάτων και της χαμηλότερης στάθμης τοποθέτησης της υδροληψίας για παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.

Η στερομεταφορά στις δύο αυτές περιπτώσεις διαφέρουν σε πολλά σημεία αλλά η βασική ιδέα παραμένει και στις δύο περιπτώσεις η ίδια. Δύο είναι οι κύριες κατηγορίες στερεομεταφοράς: η στερεομεταφορά με αιώρηση (suspended load sediments) και η στερεομεταφορά με σύρση ή φορτίου πυθμένα (bed load sediments).

Οι εκτιμήσεις για τη στερεομεταφορά που δίνονται στα εγχειρίδια της A.S.C.E για τους υπονόμους προέρχονται από την εμπειρία των υδραυλικών μηχανικών από την ποτάμια υδραυλική. Οι μηχανισμοί στερεομεταφοράς στις δύο αυτές περιπτώσεις μπορεί να μοιάζουν μεταξύ τους, όμως υπάρχουν σημαντικές διαφορές που καθιστούν αδύνατη την κοινή τους μελέτη. Σκοπός βέβαια του κεφαλαίου είναι η μελέτη των μηχανισμών στερεομεταφοράς και η καλύτερη κατανόηση των φαινομένων που προκαλούν τη δημιουργία αποθέσεων αλλά και τη διάβρωση ήδη σχηματισμένων αποθέσεων, καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο για την αρτιότερη και πιο αποτελεσματική πρακτική διαχείρισης των φερτών υλικών ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα από το σχηματισμό αποθέσεων.

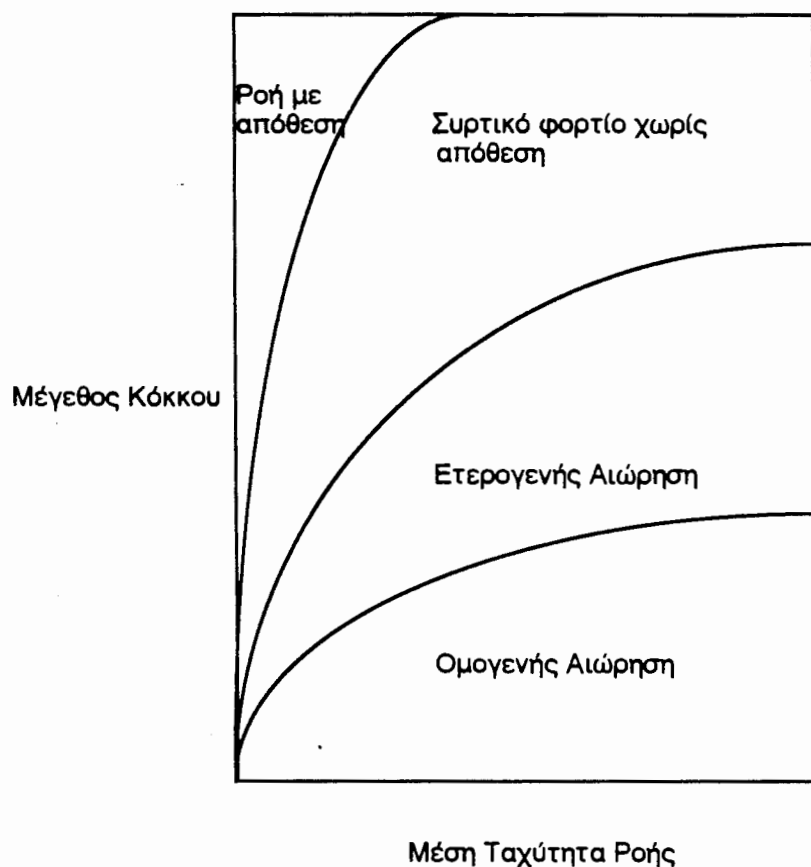
Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε και τη μεγάλη χρησιμότητα και εφαρμογή των φαινομένων αυτών στη μεταφορά υλικών για βιομηχανική χρήση. Από μεταφορά άνθρακα και την απόθεση στερεών αποβλήτων μέχρι τη μεταφορά οικοδομικών υλικών με φέρον ρευστό το νερό αλλά και με πεπιεσμένο αέρα.

### 3.2 Συστήματα Στερεομεταφοράς

Ερευνητές έχουν κατατάξει τα συστήματα στερεομεταφοράς στους υπονόμους σε τέσσερις κατηγορίες: α) την ομογενή αιώρηση (homogenous suspension), β) την ετερογενή αιώρηση (heterogenous suspension), γ) την ροή με συρτικό φορτίο πυθμένα χωρίς απόθεση (flow with moving bed) και δ) ροή με μόνιμες αποθέσεις (flow with stationary bed). Οι τέσσερις αυτό τρόποι για δεδομένο υγρό ροής και μέγεθος σωλήνα μπορεί ποιοτικά να περιγραφεί απο το επόμενο διάγραμμα.

Απο το διάγραμμα βλέπουμε αυτό που ήδη διαπιστώναμε απο το πρώτο κεφάλαιο, ότι δηλαδή για ίδια διάσταση σωματιδίου, ανάλογα με τις υδραυλικές συνθήκες (ταχύτητα ροής), μπορεί να παρουσιαστούν και οι τέσσερις μορφές στερεομεταφοράς. Σημειώνουμε εδώ, όπως θα δείξουμε και σε επόμενο κεφάλαιο, η ταχύτητα ροής δεν είναι το κρίσιμο υδραυλικό μέγεθος για το χαρακτηρισμό της ροής. Επίσης, οι γραμμές διαχωρισμού είναι καθαρά ποιοτικές και δεν υπάρχει καθαρά ποσοτικό διάγραμμα αυτής της μορφής. Δηλαδή δεν μπορούμε να ορίσουμε με καθαρά ποσοτικά κριτήρια τα όρια καθεμιάς μορφής στερεομεταφοράς.

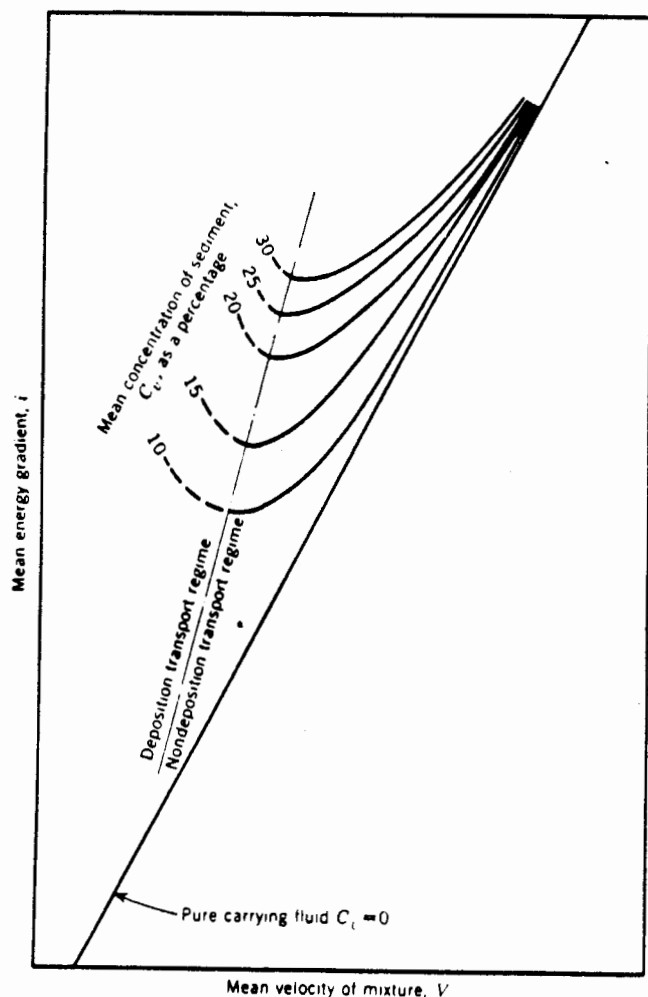




ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.1 : Ποιοτικό διάγραμμα μορφών στερεοαπορροής

Ένα σχεδιαστικό μέγεθος το οποίο λαμβάνεται υπόψιν στο σχεδιασμό των αγωγών είναι το ύψος κινητικής ενέργειας ροής (energy -head-flow). Οι απώλειες ενέργειας αυξάνονται με την αύξηση της συγκέντρωσης των φερτών υλικών,  $C_v$ . Είναι επομένως αναμενόμενο ότι στην ομογενή αιώρηση θα έχουμε την ελάχιστη απώλεια ενέργειας ροής και η υδραυλική συμπεριφορά θα τείνει σε εκείνη της ροής χωρίς καθόλου στερεά.

Στο επόμενο Διάγραμμα 3.2 φαίνεται η μεταβολή της κλίσης ενέργειας,  $i$ , σε συνάρτηση με τη μέση ταχύτητα ροής του μίγματος νερού-φερτών,  $V$ , και τη μέση επί τοις εκατό συγκέντρωση φερτών υλικών,  $C_v$ . Στο διάγραμμα φαίνονται ακόμα η κλίση ενέργειας για ροή χωρίς την ύπαρξη φερτών υλικών και η γραμμή που διαχωρίζει τις περιοχές καθιζησιμότητας και μη-καθιζησιμότητας. Πάλι διαπιστώνουμε ότι το διάγραμμα είναι ποιοτικό και ότι για πολύ μεγάλες ταχύτητες ροής οι απώλειες ενέργειας μεταξύ της ροής με παρουσία φερτών υλικών και χωρίς την παρουσία φερτών εξομοιώνονται. Η παρατήρηση αυτή είναι πολύ σημαντική καθώς και το γεγονός ότι το όριο καθιζησης - μη καθιζησης είναι η περιοχή με τις μεγαλύτερες απώλειες ροής. Η κρίσιμη αυτή περιοχή δεν είναι ενιαία, όπως είναι εύκολα αντιληπτό, ούτε μπορεί να περιοριστεί επακριβώς. Η υδραυλική μελέτη πάντως των φαινομένων αυτών είναι πολύ δύσκολη λόγω της τρομερής πολυπλοκότητας του φαινομένου.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.2: Τυπικές καμπύλες κλίσης ενέργειας και συγκέντρωσης φερτών για δεδομένα φερτά και μέγεθος αγωγού. (ASCE, 1987)

### 3.3. Ροή με Ομογενή Αιώρηση

Η περιοχή που ονομάζεται «ομογενής αιώρηση» στο χαμηλότερο σημείο του Διαγράμματος 3.1, παριστάνει την περιοχή που οι συγκεντρώσεις των φερτών υλικών είναι τόσο μικρές ώστε οι ταχύτητες καθίζησης των σωματιδίων είναι αμελητέες. Επομένως, η κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων των στερεών είναι σχεδόν ομοιόμορφη.

Ο βασικός μηχανισμός με τον οποίον τα φερτά παραμένουν σε αιώρηση σε τυρβώδη ροή είναι η αλληλεπίδραση του περιβάλλοντος νερού που περιέχει μεγαλύτερη συγκέντρωση στερεών σε μεγαλύτερα βάθη και του περιβάλλοντος νερού που περιέχει μικρότερη συγκέντρωση στερεών στα μικρότερα βάθη. Αυτή η μετακίνηση γίνεται για να αντισταθμιστεί η προς τα κάτω κίνηση λόγω της βαρύτητας. Αυτό γίνεται ικανοποιητικά μέσω της τυρβώδους ανάμιξης των στερεών.

Μια πολύ σημαντική παρατήρηση είναι ότι η ύπαρξη λεπτόκοκκων σωματιδίων στη ροή προκαλεί ελάχιστες απώλειες ενέργειας. Αυτό δικαιολογεί την ύπαρξη των φρεατίων υδροσυλλογής, τα οποία έχουν πολύ μεγάλη

αποτελεσματικότητα στην συγκράτηση των πιο χονδρόκοκκων υλικών από την εισροή τους στο δίκτυο. Επιτρέπουν όμως την είσοδο λεπτών σωματιδίων στη ροή που δεν προκαλούν σημαντικές απώλειες στο δίκτυο.

### 3.4. Ροή με Ετερογενή Αιώρηση

Η ετερογενής αιώρηση συναντάται ευρύτατα σε περιπτώσεις στερεομεταφοράς. Είναι ο πιο οικονομικός τρόπος μεταφοράς αφού συνδυάζει τη μέγιστη ποσότητα μεταφερόμενων φερτών υλικών για κάθε μονάδα δαπανούμενης ενέργειας. Σε αντίθεση με την ομογενή αιώρηση, στην ετερογενή η κατανομή των συγκεντρώσεων των φερτών υλικών σε όλο το βάθος της ροής δεν είναι ομοιόμορφο, αλλά οι συγκεντρώσεις αυξάνονται με το βάθος.

Οι γραμμικές απώλειες ενέργειας εκτιμήθηκαν από τον Wilson (1942), χωρίζοντας την κλίση της πιεζομετρικής γραμμής σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος παριστάνει την απώλεια ενέργειας λόγω του περιβάλλοντος νερού μόνον. Το δεύτερο μέρος αναπαριστά την επιπλέον ενέργεια ώστε τα σωματίδια να παραμείνουν σε αιώρηση.

$$h_L / L = f * V^2 / (2gD) + K * C_V * (w / V) * (1+\delta) \quad (3.1)$$

όπου  $h_L$  είναι οι γραμμικές απώλειες ενέργειας σε m,  $f$  είναι ο συντελεστής τριβής του αγωγού κατά τον Darcy-Weisbach,  $w$  η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων και  $V$  η ταχύτητα ροής σε m/sec. Ο συντελεστής  $\delta$  μπορεί να πάρει θετικές αλλά και αρνητικές τιμές, δεδομένου ότι για εντελώς συγκεκριμένες υδραυλικές συνθήκες η παρουσία λεπτόκοκκων σωματιδίων μπορεί να μειώσει τις απώλειες ενέργειας σε επίπεδα λίγο μεγαλύτερα από εκείνα για υδάτινη ροή μόνο. Δηλαδή η τιμή του  $\delta$  έχει τιμές πάντα μεγαλύτερες του -1.

Ο Newitt et al., (1955), χρησιμοποιώντας την ενεργειακή προσέγγιση όπως ο Wilson, κατέληξε στην ακόλουθη έκφραση της απώλειας ενέργειας για ετερογενή αιώρηση :

$$(i_m - i) / (C_V * i) = 1,10 * (s - 1) * (g * D * w) / (V^2 * v) \quad (3.2)$$

όπου,  $i_m$  είναι η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής για τη ροή του μίγματος και  $i$  είναι το αντίστοιχο μόνο για το νερό,  $s$  είναι το πηλίκο των πυκνοτήτων των στερεών προς τη πυκνότητα του νερού. Για την ομογενή αιώρηση ο συντελεστής της (3.2) είναι  $0,6 * (s-1)$ . Από την εξίσωση 3.2. διαπιστώνουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του αγωγού και η πυκνότητα των φερτών υλικών, τόσο μεγαλύτερες θα είναι και οι απώλειες ενέργειας. Ενώ αντίθετα μεγάλες ταχύτητες ροής εμφανίζουν λιγότερες απώλειες ενέργειας.

Είναι εξαιρετικά δύσκολο να μπορέσει κάποιος να ορίσει ένα ποσοτικό κριτήριο για το διαχωρισμό μεταξύ της ομογενούς και της ετερογενούς αιώρησης. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα ροής, επομένως και η τύρβη, η κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων φερτών υλών τείνει προς την ομοιομορφία. Ο Newitt, et al. (1955) όρισε την κρίσιμη ταχύτητα διαχωρισμού από τις δύο μορφές αιώρησης. Η εξίσωση αυτή δίνει:

$$V_H^3 = 1,80 * g * D * w \quad (3.3)$$

όπου  $w$  είναι η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων. Ο συντελεστής 1,80 προέκυψε από την ανάλυση πειραμάτων με ίδια διάμετρο κόκκου άμμου για ομογενή αιώρηση.

### 3.5. Ροή με Συρτικό Φορτίο

Η ροή με συρτικό φορτίο ή με φορτίο πυθμένα (bed load transport) είναι και αυτή μια πολύ σημαντική διαδικασία στερεομεταφοράς, αφού είναι ιδιαίτερως κρίσιμη για τη δημιουργία των αποθέσεων. Γενικά, οι απώλειες ενέργειας σε αγωγούς με συρτικό φορτίο είναι αρκετά μεγαλύτερες από την ετερογενή αιώρηση. Αν θεωρήσουμε ξανά την έκφραση των Newitt, et al. από πειράματα που διενήργησε, τότε έχουμε την εξίσωση:

$$(i_m - i) / (C_v * i) = 66 * (s - 1) * D / V^2 \quad (3.4)$$

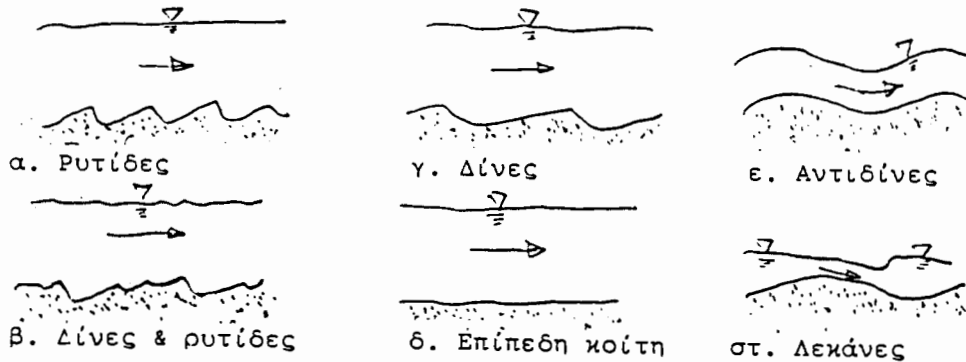
Όσο η ταχύτητα ροής μειώνεται από την ετερογενή αιώρηση, κάποια από τα αιωρούμενα σωματίδια (πρώτα τα πιο ευμεγέθη) αρχίζουν να καθιζάνουν και να κινούνται κατά μήκος του πυθμένα του αγωγού σαν ροή με συρτικό φορτίο. Για ακόμα μικρότερες ταχύτητες ροής σχηματίζεται συρτική επιφάνεια, ενώ πριν τα σωματίδια κινούνταν ευδιάκριτα το ένα ανεξάρτητα με το άλλο. Η συρτική αυτή επιφάνεια μετακινείται πολύ αργά προς τα κατάντη της ροής, ενώ περαιτέρω μείωση της ταχύτητας ροής οδηγεί στον πλήρη σχηματισμό της απόθεσης που ασκεί συρτική (διατμητική) αντίσταση στη ροή με συνέπεια τη δημιουργία με τον καιρό μόνιμου καθεστώτος ροής με απόθεση.

Ανάλογα με τις επικρατούσες υδραυλικές συνθήκες τη στιγμή της καθίζησης, το πάνω όριο της απόθεσης μπορεί να είναι εντελώς επίπεδη ή να παρουσιάζει κυματώσεις και διαταράξεις της επιφάνειας. Οι τυπικές μορφές της επιφάνειας των αποθέσεων που μπορούν να εμφανιστούν είναι οι εξής:

- Ρυτίδες (Ripples): Σχηματίζονται με μικρή ταχύτητα ροής και με αριθμό Froude  $\ll 1$ . Το ύψος των κυματώσεων σπάνια ξεπερνά τα 3 εκατοστά. Γενικά δεν παρατηρούνται όταν τα στερεά έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από 0,6 mm. Οι απώλειες ενέργειας στις ρυτίδες είναι μεγαλύτερες από την επίπεδη επιφάνεια και μικρότερες από τις δίνες.
- Δίνες (Dunes): Εμφανίζονται σε μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με τις ρυτίδες ( $F < 1$ ). Αν σχηματίζονται δίνες, τότε το νέο πυθμενικό όριο είναι υδραυλικά τραχύ, οπότε και οι απώλειες ενέργειας είναι σημαντικά περισσότερες από οποιαδήποτε άλλη μορφή απόθεσης. Το ύψος των κυματισμών είναι μεγαλύτερο από τις ρυτίδες.
- Επίπεδη Κοίτη (Plane Bed): Σε αρκετά μεγάλες ταχύτητες ( $F \approx 1$ ) είναι δυνατόν να εξαφανιστεί οποιαδήποτε μορφή κοίτης. Η μορφή αυτή είναι γενικά ασταθής εκτός αν τα φερτά υλικά της κοίτης αποτελούνται από χονδρόκοκκο υλικό. Η υδραυλική τραχύτητα της απόθεσης είναι η μικρότερη από όλες τις μορφές, οπότε και οι απώλειες ενέργειας είναι λιγότερες.
- Αντιδίνες (Antidunes): Οι αντιδίνες σχηματίζονται σε μεγάλες ταχύτητες ροής ( $F > 1$ ) και όταν οι κυματώσεις της ελεύθερης επιφάνειας είναι στην ίδια φάση με τις κυματώσεις της απόθεσης. Επομένως, οι αντιδίνες είναι πολύ σπάνιο φαινόμενο στους υπονόμους.

- **Λεκάνες (Pools):** Είναι εξαιρετικά απίθανο να συμβούν στους υπονόμους, γιατί οι λεκάνες σχηματίζονται σε πολύ υψηλές ταχύτητες ροής, γεγονός που είναι ανπίτρεπτο να συμβεί στους υπονόμους.

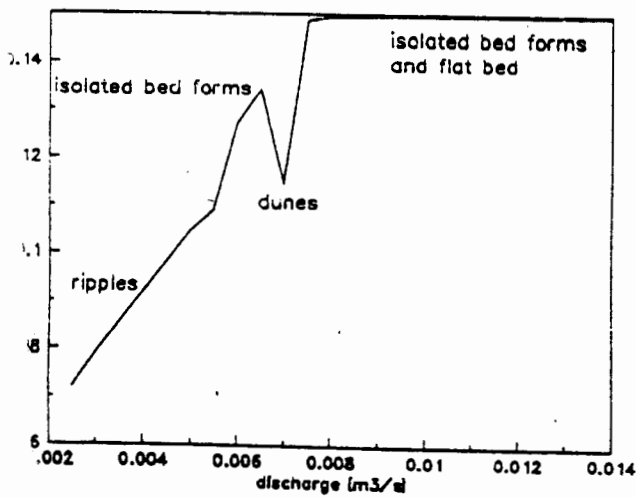
Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται και οι μορφές κούτης που μόλις αναφέραμε. Σημειώνουμε όμως ότι, επειδή οι πληροφορίες προέρχονται από βιβλιογραφία της ποτάμιας στερεομεταφοράς (Θ. Ξανθόπουλος, 1990 : "Εισαγωγή στην Τεχνική Υδρολογία"), οι μορφές κούτης στους υπονόμους δεν θα έχουν τόσο τυπικά χαρακτηριστικά λόγω της διαφορετικής κατανομής των συρτικών τάσεων πυθμένα.



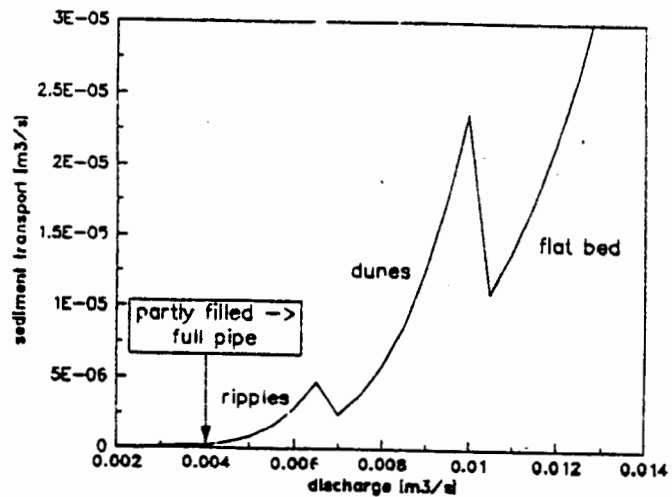
Αναλύσεις πειραμάτων που έχουν γίνει για τη συμπεριφορά της υδάτινης ροής με την παρουσία διάφορων μορφών αποθέσεων, έχουν δείξει ότι γενικά το βάθος ροής ( $y_0$ ) και η στερεοπαροχή ( $Q_s$ ) δεν αυξάνονται υποχρεωτικά με την αύξηση της παροχής. Αυτό συμβαίνει για τους εξής λόγους:

1. Οι αλλαγές στη μορφή των αποθέσεων, που προκαλούνται από μεταβολές στις υδραυλικές συνθήκες, εμφανίζονται να έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά τραχύτητας. Αυτές οι μεταβολές εμφανίζονται υπεύθυνες για την απότομη μεταβολή του βάθους ροής και της στερεοαπορροής.
2. Η μετάβαση από τη ροή με ελεύθερη επιφάνεια στη ροή υπό πίεση, δημιουργεί πρόσθετες υδραυλικές μεταβολές.

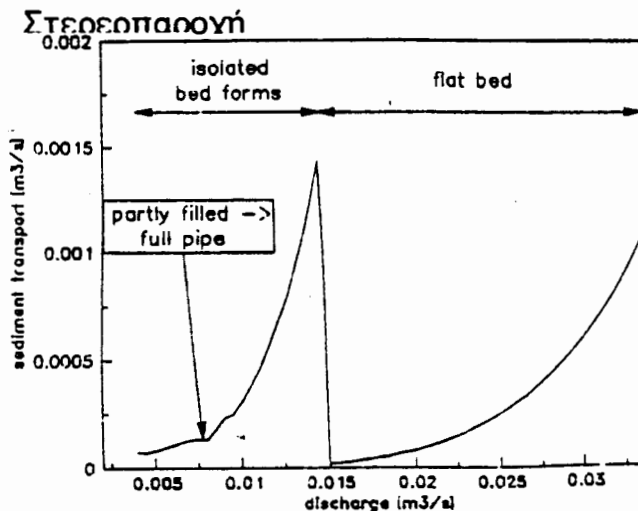
Βάθος Ροής



Στερεοπαροχή



Διαγραμμα 3.3:  $D_{50}=0,2mm, i_b=0,002, z_b/D=0,1, D=150mm$  Διαγραμμα 3.4 :  $D_{50}=0,2mm, i_b=0,002, z_b/D=0,3, D=150mm$



Διάγραμμα 3.5:  $D_{50}=0,1\text{mm}$ ,  $i_b$ ,  $z_b/D=0,1$ ,  $D=150\text{mm}$

Όσον αφορά για την ποσότητα των φερτών υλικών που τελικά καθιζάνουν, αυτή φυσικά είναι συνάρτηση της ποσότητας των φερτών υλικών που εισρέουν στο δίκτυο. Στη ροή με ελεύθερη επιφάνεια με παρουσία αποθέσεων, όπως θα δούμε στο παρακάτω κεφάλαιο, προσπαθεί να προσαρμοστεί στις νέες συνθήκες.

Κριτήριο διαχωρισμού της ετερογενούς αιώρησης με τη ροή με συρτικό φορτίο είναι η τιμή της ταχύτητας που αναφέρεται σαν "κρίσιμη ταχύτητα". Η τιμή αυτή της κρίσιμης ταχύτητας δεν είναι ενιαία. Εξαρτάται αν η ταχύτητα ροής αυξάνεται ή μειώνεται περνώντας από τη μια περιοχή στην άλλη. Η κρίσιμη ταχύτητα είναι μικρότερη όταν η ταχύτητα ροής μειώνεται ενώ είναι μεγαλύτερη όταν η ταχύτητα αυξάνεται. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το μεγαλύτερο δυναμικό για απόθεση εμφανίζεται όταν έχουμε κάθοδο του πλημμυρογραφήματος, δηλαδή όταν το πλημμυρικό γεγονός τελειώνει. Βλέπουμε δηλαδή ότι η κρίσιμη ταχύτητα είναι σαφώς εξαρτημένη από την ιστορία της ροής.

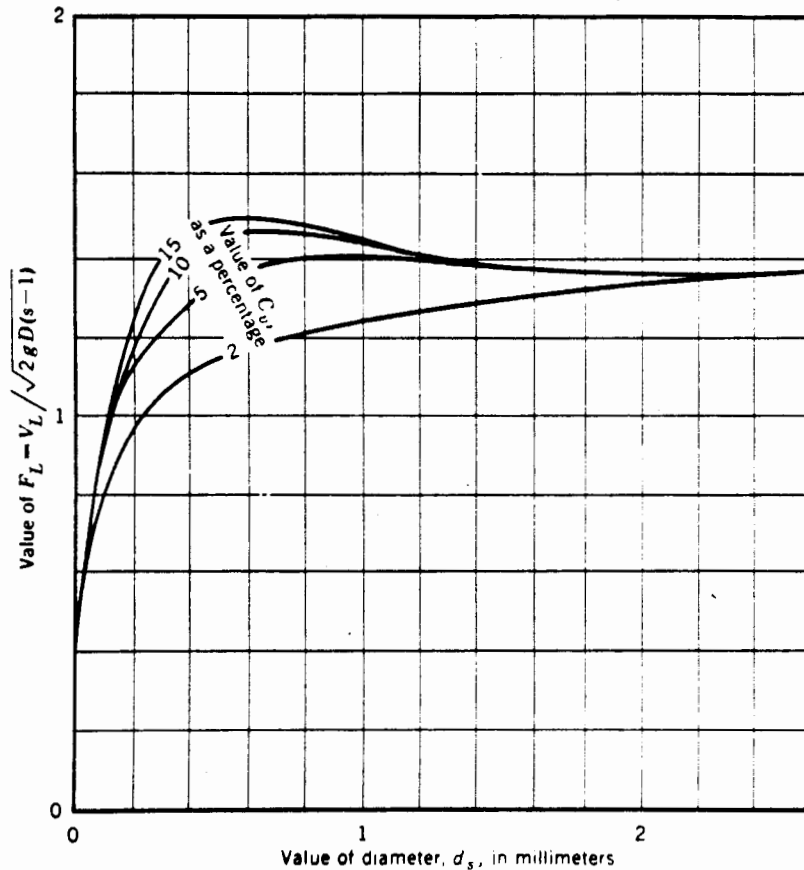
Ο Durand (1953) σχεδίασε την κλίση ενέργειας ως συνάρτηση της μέσης ταχύτητας ροής και συγκεκριμένων συγκεντρώσεων των φερτών υλικών, που φαίνεται στο Διάγραμμα 3.2. Η διακεκομμένη γραμμή διαχωρίζει τις ζώνες ροής με αποθέσεις και χωρίς αποθέσεις. Η ταχύτητα που αντιστοιχεί στο πέρασμα από τη μία ζώνη στην άλλη ονομάστηκε από τον Durand ως "οριακή ταχύτητα απόθεσης". Επίσης η οριακή ταχύτητα απόθεσης φαίνεται να λειτουργεί με την ελάχιστη ενέργεια, γεγονός που έχει μεγάλο ενδιαφέρον, από οικονομική άποψη. Βέβαια, από εντελώς πρακτική σκοπιά, η περισσότερο χρήσιμη ταχύτητα είναι εκείνη που σχετίζεται με  $\theta_i/\theta_N=0$ , όπου  $i$  η συνάρτηση  $i=\varphi(Q_s,V)$  (Carstens, 1969). Οι μελετητές μηχανικοί θα πρέπει κάθε φορά να βρίσκουν την ελάχιστη κλίση ενέργειας για τη μετακίνηση συγκεκριμένης στερεοπαροχής  $Q_s$ .

Οι Newitt, et al. (1955) εξίσωσαν τη σχέση της απώλειας ενέργειας για ροή με συρτικό φορτίο και για ετερογενή αιώρηση και διαπίστωσαν ότι

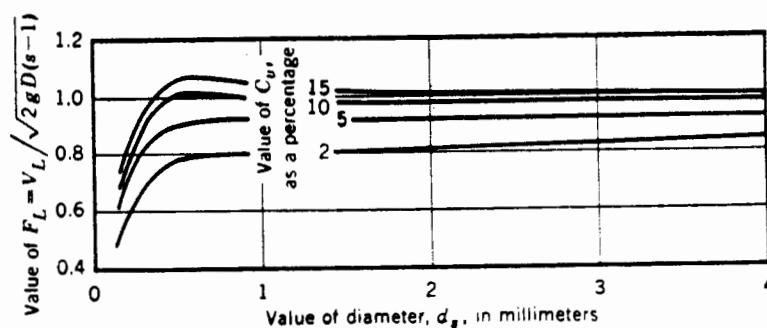
$$V_B = 17 w \quad (3.5)$$

όπου,  $V_B$  η μέση ταχύτητα ροής που διαχωρίζει τις δύο περιοχές. Οι ίδιοι μελετητές βρήκαν επίσης ότι οι ταχύτητες που προκύπτουν από το Διάγραμμα 3.2 είναι εκείνες κάτω από τις οποίες δημιουργούνται μόνιμες αποθέσεις.

Τα επόμενα διαγράμματα δίνουν τις τιμές των οριακών ταχυτήτων καθίζησης για ομοιόμορφο υλικό (Durand, 1953) και για διαβαθμισμένο υλικό (Durand and Condolios, 1952). Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.6, για ομοιόμορφη άμμο (μέγεθος μεγαλύτερου του 1 mm) η συγκέντρωση των φερτών και το μέγεθος των κόκκων δεν επηρεάζουν σημαντικά την τιμή της οριακής ταχύτητας απόθεσης, γεγονός που δεν επιβεβαιώνεται και για τη διαβαθμισμένη άμμο.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.6: Οριακή Ταχύτητα Καθίζησης για Ομοιόμορφο Υλικό (Durand, 1953)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.7: Οριακή Ταχύτητα Καθίζησης για Διαβαθμισμένο Υλικό. (Durand and Condolios, 1952)

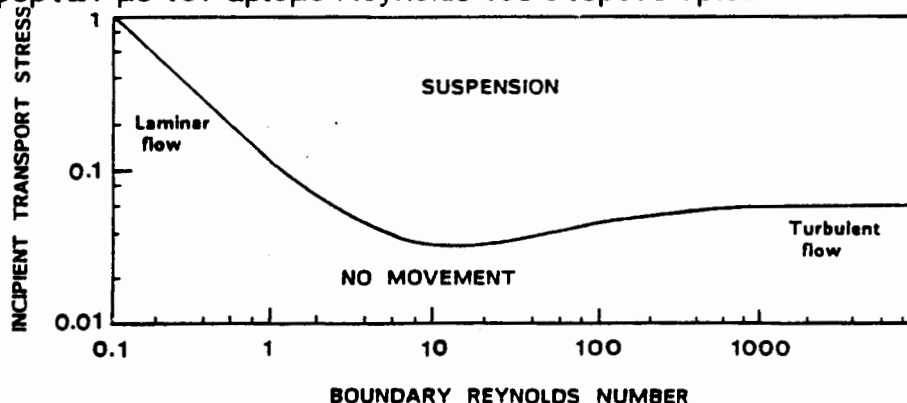
### 3.6. Ροή με Απόθεση

Όταν μειωθεί επιπλέον η ταχύτητα ροής τότε και η πολύ μικρή μετακίνηση στη ροή με συρτικό φορτίο σταματάει, οπότε έχουμε τη δημιουργία στρώματος απόθεσης, που ανάλογα με τις υδραυλικές συνθήκες, μπορεί είτε να διαβρωθεί

και τα σωματίδια που αποτελούν την απόθεση να μετακινούνται προς τα κατάντη, είτε να παραμείνει σαν απόθεση ασκώντας συρτική (διατμητική) αντοχή. Στα σωματίδια των αποθέσεων εξασκούνται δύο μορφές δυνάμεων από τη ροή, η υδροδυναμική άνωση και δυνάμεις λόγω του σχήματος των σωματιδίων. Αν αυτές οι δύο συνδυασμένες δυνάμεις δεν ξεπεράσουν τις δυνάμεις των σωματιδίων λόγω του υπό - άνωση βάρους τους, τις δυνάμεις συνοχής και συσσωμάτωσης, τότε τα στερεά σωματίδια παραμένουν ακίνητα. Αν όμως γίνουν μεγαλύτερες τότε τα σωματίδια κινούνται κατά μήκος του στερεού ορίου απόθεσης - ροής. Φυσικά, δεν μετακινούνται όλα τα σωματίδια κατά την ίδια χρονική στιγμή, λόγω του γεγονότος ότι η ροή είναι τυρβώδης και οι ταχύτητες ροής υπόκεινται σε συνεχείς αυξομειώσεις. Η οριακή κατάσταση κατά την οποία η μετακίνηση στερεών είναι ασημαντή, γνωστή και σαν όριο μετακίνησης (threshold of movement), ορίζεται συνήθως με τους όρους της κρίσιμης ταχύτητας ροής ή με τη κρίσιμη συρτική τάση.

Πιο συγκεκριμένη εκτίμηση της διαδικασίας αποτελεί και το εξής: Η απόθεση θα παραμείνει αν η συρτική τάση που εξασκεί η υδάτινη ροή είναι μικρότερη από τη συρτική αντοχή της απόθεσης. Αν όμως η συρτική τάση ξεπεράσει τη συρτική αντοχή τότε θα έχουμε τον πλήρη καθαρισμό (scouring) απόθεσης.

Το μεταβατικό στάδιο μεταξύ της πλήρης απόθεσης και της **αρχικής μετακίνησης (incipient motion)**, ορίζεται πλέον όχι σαν κρίσιμη ταχύτητα αλλά χρησιμοποιούμε την συρτική (διατμητική) τάση σαν κρίσιμο φυσικό μέγεθος. Μέγιστη συνεισφορά σε αυτό το πρόβλημα αποτελεί το **Διάγραμμα του Shields**. Το διάγραμμα αυτό που φαίνεται παρακάτω (Διάγραμμα 3.8), συσχετίζει την κρίσιμη συρτική τάση (critical shear stress) στην οποία έχουμε μετακίνηση των φερτών με τον αριθμό Reynolds του στερεού ορίου.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.8: Το Διάγραμμα Shields Προσαρμοσμένο σε Υπονόμους (CIRIA, 1987)

Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται η αδιάστατη κρίσιμη συρτική τάση  $\tau_s$  με τον αριθμό Reynolds του στερεού ορίου. Η σχέση της αδιάστατης κρίσιμης συρτικής τάσης είναι:

$$\tau_s = \tau / [g * (\rho_s - \rho) * d] \quad (3.6)$$

$$\text{όπου} \quad \tau = \gamma * R * J$$

Ο αριθμός Reynolds του στερεού ορίου που απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα προκύπτει από τη σχέση:



$$R_* = u_* * d * \nu \quad (3.7)$$

όπου το μέγεθος  $u_*$  υπολογίζεται από την επόμενη σχέση:

$$u_* = \mu_* * \rho \quad (3.8)$$

όπου το μέγεθος  $\mu_* = (\tau/\rho)^{0.5}$  είναι η συρτική ταχύτητα και  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα του νερού.

Το μέγεθος  $\tau$  είναι η συρτική τάση πυθμένα που ασκεί η ροή στον πυθμένα,  $\rho_s$  και  $\rho$  είναι οι πυκνότητες των φερτών και του νερού αντίστοιχα,  $d$  είναι το μέγεθος κόκκου σε mm,  $R$  είναι η υδραυλική ακτίνα της ροής και  $S$  είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας που αν θεωρήσουμε τη ροή ομοιόμορφη τότε η γραμμή ενέργειας είναι παράλληλη με τον πυθμένα του αγωγού.

Απο μία απλή παρατήρηση του Διαγράμματος Shields συμπαιρνουμε ότι για μικρές ταχύτητες (μικρός αριθμός Reynolds→στρωτή ροή) απαιτούνται μεγάλες τιμές των κρίσιμων συρτικών τάσεων για να επιτευχθεί το ξεκίνημα της μετακίνησης. Αντίθετα, για αρκετά μεγαλύτερες ταχύτητες (τυρβώδης ροή) η κρίσιμη συρτική τάση είναι αρκετά μικρότερη, γεγονός που εξηγείται από το ότι η τύρβη είναι ο βασικός μηχανισμός για τη διατήρηση των σωματιδίων σε αιώρηση.

Αριθμητικά, η οριακή τιμή της κρίσιμης συρτικής τάσης απο το διάγραμμα Shields (Θ. Ξανθόπουλος, 1990), προκύπτει απο τη σχέση:

$$\tau_{mc} = \beta * (\rho - \rho_s) * g * d_s \quad (3.9)$$

Για συνθήκες πλήρους τραχείας ροής στους υπονόμους, η χαρακτηριστική αδιάστατη παράμετρος του Shields  $\beta$ , που θεωρείται ότι αντιστοιχεί στο ξεκίνημα της απόπλυσης του πυθμένα του αγωγού χωρίς τη ήδη δημιουργία απόθεσης έχει τιμή  $\beta=0,04$ , ενώ για την εξασφάλιση πλήρους καθαρισμού του αγωγού που έχει δημιουργηθεί απόθεση η τιμή του  $\beta$  γίνεται είκοσι φορές μεγαλύτερη ( $\beta=0,8$ ), δηλαδή χρειάζεται είκοσι φορές μεγαλύτερη συρτική τάση για την απόπλυση του αγωγού, αν για κάποιο λόγο έχει ήδη δημιουργηθεί απόθεση.

Το Διάγραμμα του Shields προέκυψε από την ανάλυση πειραμάτων που έγιναν σε εργαστηριακή διώρυγα, με ομοιόμορφη και μόνιμη ροή και με υλικά που προσομοίωσαν τη μελέτη της ποτάμιας στερεοαπορροής. Έχει δειχθεί ότι το παραδοσιακό Διάγραμμα του Shields μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει την κρίσιμη συρτική τάση για την αρχική μετακίνηση των στερεών στους υπονόμους με ακρίβεια αποδεκτή για πρακτικές εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα, στη περίπτωση μη-συσσωματώσιμων φερτών υλικών (πολύ μικρό ποσοστό οργανικού φορτίου), γενικά το Διάγραμμα του Shields δίνει υπερεκτιμημένες τιμές της κρίσιμης συρτικής τάσης, αλλά σε ευρεία βάση είναι ένα αποδεκτό κριτήριο για τον υπολογισμό της κρίσιμης συρτικής τάσης για ομοιόμορφα, μη-συσσωματώσιμα στερεά και για επίπεδο πυθμένα. Οι συρτικές τάσεις στον πυθμένα των αγωγών υπόκεινται σε τυχαίες χρονικές μεταβολές. Οι μέγιστες συρτικές τάσεις που μπορούν να οδηγήσουν στον πλήρη καθαρισμό των αγωγών είναι περίπου διπλάσιες απο τη μέση συρτική τάση σε ένα ορθογώνιο αγωγό και ακόμα μεγαλύτερες σε ένα κυκλικό αγωγό, λόγω της πολυπλοκότητας της ροής. Οπότε είναι προφανές ότι έχοντας ως οδηγό τη μέση συρτική τάση μπορεί να έχουμε λάθος εκτιμήσεις για την αρχική μετακίνηση αφού αυτή μπορεί να συμβεί και με χαμηλές τιμές της μέσης συρτικής τάσης. Τέλος, για την αρχική

μετακίνηση το Διάγραμμα του Shields δίνει υπερεκτιμημένες τιμές, και στη περίπτωση ροής με επίπεδη απόθεση σε κυκλικό αγωγό το διάγραμμα θα πρέπει να μεταβληθεί. Μελέτες (Kleijwegt, 1990) έχουν δείξει ότι η κρίσιμη συρτική τάση είναι το 70% απο εκείνο του διαγράμματος του Shields. Πάντως στη δική μας μελέτη δεν προκ. ύπτει τέτοιο συμπέρασμα, αντιθέτως οι κρίσιμες συρτικές τυάσεις εμφανίζονται μεγαλύτερες από το νόμο του Shields (βλέπε και Κεφάλαιο 5).

Για την περίπτωση των συσσωματώσιμων στερεών υλών (cohesive sediments) και των μερικώς-συσσωματώσιμων στερεών (partly-cohesive sediments), που παρατηρούνται στους παντοροικούς και στους αγωγούς ομβρίων αντίστοιχα, η πραγματικότητα είναι διαφορετική απο εκείνη του διαγράμματος του Shields. Η συσσωμάτωση και κροκίδωση, όπως άλλωστε περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορεί να συμβεί με την παρουσία οργανικού υλικού στα φερτά υλικά που αποτελούν τις αποθέσεις. Στους παντοροϊκούς αγωγούς το οργανικό ποσοστό φθάνει μέχρι το 78%, ενώ για το υπό μελέτη δίκτυο ομβρίων της παρούσας εργασίας (βλέπε και ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : "Αναγνωριστική Μελέτη στο Δίκτυο Ομβρίων της Αθήνας") το οργανικό φορτίο ξεπερνούσε σε μερικές περιπτώσεις και το 25%. **Το αποτέλεσμα αυτό θεωρεί ότι τα φερτά υλικά των αγωγών ομβρίων της Αθήνας ασκούν δυνάμεις συσσωμάτωσης, οπότε μπορούν να χαρακτηριστούν μερικώς-συσσωματώσιμα στερεά.** Οπότε οι δυνάμεις αυτές ασκούν επιπλέον συρτικές τάσεις, οπότε η κρίσιμη συρτική τάση θα είναι γενικά μεγαλύτερη απο εκείνη που περιγράφεται απο τον Shields. Η συσσωμάτωση προκύπτει από τη συγκόλληση λόγω της πίσσας και των ελαίων που εναποτίθενται στις οδικές επιφάνειες, απο τη χημική τσιμεντοποίηση (chemical cementation) και βιολογικές διαδικασίες μέσα στους αγωγούς, παρά από την κλασσική θεωρία της ηλεκτροστατικής συσσωμάτωσης (electrostatic cohesion). Η σχετική βιβλιογραφία (Nalluri, 1989) αναφέρει ότι για συσσωματωμένες αποθέσεις η κρίσιμη συρτική τάση δεν ξεπερνά τα 5-7 N/m<sup>2</sup>. Η παρατήρηση μάλλον δεν ισχύει για τη δική μας μελέτη, αφού αποθέσεις έχουν παραμείνει και υπό τριπλάσιες και τετραπλάσιες συρτικές τάσεις σε σχέση με αυτές που αναφέρονται από τον Nalluri. Άλλες μελέτες (Ashley et. al., 1990) από μετρήσεις πεδίου έχουν δείξει πολύ μεγαλύτερες κρίσιμες συρτικές τάσεις σε σχέση με τις εργαστηριακές μετρήσεις του Nalluri, που φθάνουν στις τιμές των 800 N/m<sup>2</sup>. Είναι επίσης προφανές ότι για τον καθορισμό των κρίσιμων συρτικών τάσεων σπουδαίο ρόλο παίζουν και η συγκεντρώσεις των στερεών σε όλο το βάθος της απόθεσης. Είναι ευνόητο ότι τα επιφανειακά στρώματα θα επαναιωρούνται σε αρκετά μικρότερες συρτικές τάσεις σε σχέση με τα βαθύτερα στρώματα. Αυτό συμβαίνει λόγω της στερεοποίησης των βαθύτερων στρωμάτων υπό την επίδραση του βάρους των υπερκείμενων στρωμάτων. Επίσης, η χρονική διαβάθμιση στην συρτική αντοχή των αποθέσεων είναι σημαντική. Μια αδύνατη αρχικά απόθεση μπορεί να εξελιχθεί σε μόνιμη απόθεση με το πέρασμα του χρόνου. Εξάλλου η τιμή της συρτικής τάσης της ροής που δίνεται για το σχηματισμό απόθεσης κυμαίνεται γύρω στα 1.8 N/m<sup>2</sup>.

Όλες οι μελέτες που έχουν γίνει έχουν δείξει ότι τα φαινόμενα της απόθεσης και της μετακίνησης είναι εξαιρετικά πολύπλοκα. Μια ολοκληρωμένη μελέτη πεδίου θα έπρεπε να συμπεριλαμβάνει υδραυλικές παραμέτρους όπως η τραχύτητα του στερεού ορίου της απόθεσης, η μη-μόνιμη και ανομοιόμορφη ροή στους υπονόμους, η φύση των υλικών των αποθέσεων και η συγκέντρωση των φερτών υλών που μεταφέρονται με την υδάτινη ροή. Το τελευταίο είναι πολύ σημαντικό με την έννοια ότι δύο πλημμύρες με τα ίδια ροικά χαρακτηριστικά (παροχή και ταχύτητα ροής) στον ίδιο αγωγό, με την ίδια απόθεση αλλά με διαφορετικές συγκεντρώσεις φερτών υλών μπορεί να προκαλέσουν διαφορετικά

αποτελέσματα, δηλαδή η ροή με την μικρότερη συγκέντρωση φερτών υλών παρουσιάζει περισσότερες πιθανότητες να προκαλέσει απόπλυση της απόθεσης σε σχέση με τη ροή με μεγαλύτερη συγκέντρωση φερτών υλών.

Γίνεται πλέον φανερό ότι η ταχύτητα ροής παύει πλέον να είναι το κρίσιμο μέγεθος που ορίζει το κριτήριο απόθεσης - μη απόθεσης. Το καταλληλότερο μέγεθος εμφανίζεται να είναι οι συρτικές τάσεις πυθμένα που όμως είναι πολύ πιο δύσκολο να μετρηθούν, κυρίως στις μετρήσεις πεδίου. Περισσότερη ανάλυση των υδραυλικών παραμέτρων στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

### 3.7. Σχόλια στην Εφαρμογή της Θεωρίας της Ποτάμιας Υδραυλικής

Η μελέτη της στερομεταφοράς στους υπονόμους, από την υδραυλική άποψη, απασχόλησε πρώτους από όλους υδραυλικούς μηχανικούς με μεγάλη εμπειρία στην ποτάμια υδραυλική και στη στερομεταφορά σε ποταμούς. Η ενασχόλησή τους με τους αγωγούς ήταν αρχικά ένα ευτυχές γεγονός αφού η εμπειρία τους ήταν πολύ χρήσιμη σε θέματα όπως ο υπολογισμός της τριδιάστατης κατανομής της μετακίνησής των φερτών υλών σε διάφορες περιπτώσεις όπως οι αγωγοί, οι δεξαμενές κατακράτησης και οι δεξαμενές καθίζησης στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Επίσης, τα φαινόμενα της στερομεταφοράς στους αγωγούς ποιοτικά έχουν την ίδια δομή με τη στερομεταφορά στους ποταμούς.

Παρόλαυτα η στερομεταφορά στους αγωγούς παρουσιάζει σημαντικές διαφορές που ουσιαστικά καθιστά εντελώς διαφορετικά τα φαινόμενα. Για παράδειγμα, πειράματα που έχουν γίνει σε πειραματικές διώρυγες για την ετερογενή αιώρηση, είχαν χρησιμοποιηθεί στερεά υλικά με κόκκους διαμέτρων από 0,5 έως 1 mm. Διαστάσεις που μπορεί να είναι πολύ συχνές για τη ποτάμια στερομεταφορά αλλά καθόλου τυπική για τα αιωρούμενα σωματίδια στους υπονόμους. Πο συγκεκριμένα, οι Graf and Acaroglu (1967) χρησιμοποίησαν άμμο με διάσταση κόκκων 2,85 mm, ενώ ο Craven (1953) χρησιμοποίησε άμμο διαμέτρου κόκκου 1,62 mm. Τέλος, οι Newitt, et al. (1955) χρησιμοποίησαν άμμο με διάστημα κόκκων από 0,203 έως 5,098 mm. Αντιθέτως, τα αιωρούμενα φερτά υλικά στους υπονόμους έχουν διαστάσεις μικρότερες των 0,5 mm και η σχετική τους πυκνότητα δεν ξεπερνά την τιμή 2,65 (άμμος).

Η μεγαλύτερη διαφορά που μπορεί κανείς να εκτιμήσει είναι η διαφορά στη φύση των σωματιδίων που αιωρούνται. Στα φερτά υλικά αστικής αποχέτευσης τα σωματίδια έχουν την ικανότητα να συσσωματώνονται και να κροκιδώνονται δημιουργώντας συσσωματώματα μεγαλύτερου βάρους και μεγαλύτερης ταχύτητας καθίζησης. Τα αιωρούμενα σωματίδια στις ποτάμιες ροές δεν έχουν αυτήν την ικανότητα και έχουν συντηρητική εξέλιξη σε αντίθεση με την διαρκώς μεταβαλλόμενη φύση των φερτών στους αστικούς υπονόμους. Η απρόβλεπτη και διαρκώς μεταβαλλόμενη φύση τους δυσχαιρένουν ακόμα περισσότερο την απόπειρα δημιουργίας ενός παγκόσμιου αριθμητικού μοντέλου.

Οι επιδράσεις του σχήματος της διατομής του αγωγού είναι πολύ πιο σημαντικές για τους υπονόμους από ότι το σχήμα της κοίτης ενός ποταμού. Η σημαντικά μικρότερη διατομή στους υπονόμους δημιουργεί μια εντελώς διαφορετική κατανομή των συρτικών τάσεων πυθμένα, περισσότερο έντονη που δεν επιτρέπει την ανάπτυξη τόσο έντονων και τυπικών μορφών κοίτης. Επίσης, το σχήμα της διατομής των υπονόμων παίζει πολύ πιο σημαντικό ρόλο σε αντίθεση με το αντίστοιχο ενός ποταμού. Το σχήμα της διατομής επηρεάζει την κατανομή των συρτικών τάσεων στον πυθμένα και προκαλεί νέες απώλειες ενέργειας. Η ανάπτυξη των αποθέσεων επίσης προκαλεί μια μικρή αύξηση του πλάτους ροής στον πυθμένα του αγωγού οπότε και αύξηση της ταχύτητας της

ροής, οπότε έχουμε μια περιορισμένη ανάπτυξη των μορφών πυθμένα. Τέλος, σημαντική είναι η παρατήρηση ότι το πέρασμα από τη ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε ροή υπό πίεση σηματοδοτεί νέες αλλαγές στο καθεστώς στερεομεταφοράς.

Τελειώνοντας, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι πηγές των φερτών υλών στις δύο περιπτώσεις είναι διαφορετικές, έχοντας μεγάλη επίδραση και στην ποιότητα της ροής που απαιτούν διαφορετικά έργα αντιμετώπισης της ρύπανσης. Εξάλλου, η κοίτη των ποταμών είναι εξαιρετικά διαβρώσιμη που τροφοδοτεί τη ροή με συγκεκριμένη ποιότητα φερτών υλών ενώ στους αστικούς υπονόμους που ο πυθμένας είναι γενικά μη-διαβρώσιμος τα φερτά υλικά έχουν γενικά διάχυτες πηγές με εντελώς διαφορετικά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά και μεγαλύτερο ρυπαντικό φορτίο.

### 3.8. Σχόλια στις Πρακτικές της Πειραματικής Υδραυλικής

Πολλές πειραματικές διατάξεις έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα για την κατανόηση του περίπλοκου φαινομένου της στερεομεταφοράς. Σε τεχνητές διώρυγες και σε καθεστώς μόνιμης και ομοιόμορφης ροής, μελετώνται και μετρούνται τα μεγέθη που ήδη έχουμε αναφέρει, ενώ αρκετά μοντέλα στερεομεταφοράς έχουν προκύψει από μελέτες στο εργαστήριο.

Η πειραματική προσομοίωση της στερεομεταφοράς στους υπονόμους αποτελεί μια ιδεατή θεώρηση της πραγματικότητας, που γενικά δεν είναι ιδιαίτερα συμβατή με την πραγματικότητα αυτή καθαυτή. Η ροή στους υπονόμους είναι μη-μόνιμη και ανομοιόμορφη και η απλούστευση της μονιμότητας και της ομοιομορφίας αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις αναίρεση της πραγματικότητας. Περιπτώσεις αποθέσεων φαίνονται να δημιουργούνται (βλέπε και ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4) από το σχηματισμό καμπυλών βραδέως μεταβαλλόμενης ροής. Επίσης, πολλά προβλήματα αποθέσεων δημιουργούνται στους υπονόμους, λόγω κακής και πρόχειρης κατασκευής των αγωγών γεγονός που δεν αναγνωρίζεται στο εργαστήριο.

Εξάλλου, τα πειράματα που έχουν γίνει χρησιμοποιούν κατά κανόνα υλικά ομοιόμορφου μεγέθους ή , στην καλύτερη περίπτωση, υλικά με πολύ περιορισμένο εύρος μεγεθών. Αυτό οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα, αφού η διακύμανση των μεγεθών των φερτών υλών που συναντούμε στην πράξη είναι τεράστια (από υλικά μικρότερα των 50 μm μέχρι πλαστικές σακούλες σκουπιδιών). Οι διακυμάνσεις αυτές στα μεγέθη διαφοροποιούν συστηματικά τα υπό μελέτη φαινόμενα.

Γιαυτόν ακριβώς το λόγο τα μοντέλα που έχουν προκύψει από την εργαστηριακή προσομοίωση δεν έχουν καταφέρει να δώσουν αξιολογικά αποτελέσματα όταν πρόκειται για αποτελέσματα από μετρήσεις πεδίου. Γιαυτό και οι νέες απόπειρες για ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων βασίζονται στην στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου.

### 3.9. Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των μορφών στερεομεταφοράς φαίνεται πλήρως ότι δεν μπορούμε να διαχωρίσουμε επακριβώς τα κριτήρια διαχωρισμού, αφού οι υδραυλικές συνθήκες ροής αλλάζουν διαρκώς. Κάποια κριτήρια με σχετικά ευρεία έννοια έχουν τεθεί με τη χρησιμοποίηση της συρτικής τάσης σαν το κρίσιμο υδραυλικό μέγεθος. Κι αυτό γιατί η ταχύτητα ροής δίνει μάλλον εσφαλμένα αποτελέσματα, αφού και ελάχιστες μεταβολές στις ταχύτητες ροής προκαλούν σημαντικές μεταβολές στις συρτικές τάσεις. Εξάλλου, δύο

ταχύτητες ροής με το ίδιο μέγεθος μπορούν να προκαλέσουν διαφορετικά αποτελέσματα (απόθεση ή απόπλυση), ανάλογα αν αντιστοιχούν στην άνοδο ή στην πτώση του πλημμυρογραφήματος.

Διαπιστώνουμε επίσης ότι κάποιες αποθέσεις στους υπονόμους μπορεί να καταστούν μόνιμες λόγω της αδυναμίας της ροής να προκαλέσει διάβρωση των αποθέσεων: Η συγκόλληση της άμμου λόγω του οργανικού φορτίου εντείνει την μονιμότητα των αποθέσεων. Το κριτήριο του Shields για την αρχική μετακίνηση των μη-συσσωματώσιμων στερεών δεν είναι εφαρμόσιμο σε αγωγούς με κυκλική διατομή με επίπεδο στρώμα απόθεσης. Τα σωματίδια τείνουν να κινούνται υπό πολύ μικρότερες συρτικές τάσεις από εκείνες που δείχνονται από το Διάγραμμα του Shields (γύρω στο 70% περίπου). Σε μεγαλύτερες συρτικές τάσεις κινούνται τα συσσωματώσιμα και τα μερικώς συσσωματώσιμα στερεά, παρόλα αυτά το Διάγραμμα του Shields εφαρμόζεται για εντελώς πρακτικούς σκοπούς.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

### ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΟΜΒΡΙΩΝ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

*“ . . . Η περιοχή του επιστημονικά εξακριβωμένου γεγονότος έχει επεκταθεί φοβερά. Η θεωρητική γνώση έχει γίνει απείρως πιο εμβριθής σε κάθε τομέα της επιστήμης. Η αφομοιωτική ικανότητα της ανθρώπινης διάνοιας είναι και παραμένει αυστηρά περιορισμένη. Γιαυτό και ήταν αναπόφευκτο η δραστηριότητα του ανεξάρτητου ερευνητή να περιορίζεται σε όλο και μικρότερο τμήμα της ανθρώπινης γνώσης. Και το χειρότερο, σαν αποτέλεσμα αυτής της εξειδίκευσης, ακόμα και μια πρόχειρη γενική ιδέα της επιστήμης ως σύνολο γίνεται περιπλοκότερη, χωρίς την οποία όμως το αληθινό πνεύμα της έρευνας είναι αναπότρεπτα δύσκολο να κρατήσει το συμβάδιμα με την πρόοδο. Μια κατάσταση εξελίσσεται παρόμοια με αυτή που περιγράφεται σαν ιστορία του Πύργου της Βαβέλ. Κάθε σοβαρός εργάτης της επιστήμης είναι απόλυτα ενήμερος αυτού του ακούσιου υποβιβασμού, σε μια όλο και στενότερη σφαίρα γνώσης, η οποία απαιτεί να στερήσει τον ερευνητή από τον ευρύ του ορίζοντα και να τον φθείρει μέχρι το επίπεδο του τεχνικού. . . ”*

*Albert Einstein “The World As I See It” Εκδόσεις “Νέα Σύνορα”*

## 4.1. Εισαγωγικές Έννοιες

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το Κεφάλαιο 4 είναι το πιο σημαντικό γιατί αναπτύσσει με λεπτομέρεια το επιχειρησιακό μέρος της διπλωματικής. Με λίγα λόγια στο Κεφάλαιο αυτό θα δείξουμε την επιλογή της επιφάνειας απορροής, των αγωγών που θα ελέξουμε, τα αποτελέσματα των ερευνών καθώς και τα αποτελέσματα από το εργαστήριο. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά εκτιμούμε το “ιστορικό” των αποθέσεων και την εξέλιξή τους. Σημαντικό είναι ότι συναντάμε αποθέσεις που παρόμοιες δεν αναφέρονται πουθενά στη διεθνή βιβλιογραφία. Για παράδειγμα αποθέσεις με μέσο βάθος γύρω στα 60 εκατοστά και αποθέσεις με το 50 και πλέον της εκατό της συνολικής μάζας του δείγματος να περνάει από το κόσκινο των 74 μικρών δεν έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία των δικτύων ομβρίων αγωγών. Τέλος υπολογίζουμε προσεγγιστικά τις ποσότητες φερτών υλικών που “παράγονται” από τη λεκάνη απορροής ενώ τέλος αναλύουμε εκτενέστερα τις συνέπειες των αποθέσεων στην υδραυλική λειτουργία του δικτύου.

## 4.2. Περιγραφή της Ερευνητικής Διαδικασίας

Επιλέχθηκε μια υπολεκάνη απορροής της μείζονος περιοχής Αθηνών με αρχικό κριτήριο τις γενικά χαμηλές κλίσεις πυθμένα των αγωγών ομβρίων της περιοχής. Η υπολεκάνη που επιλέχθηκε είναι η υπολεκάνη με κωδικό K<sub>27</sub> που περιλαμβάνει τις περιοχές του Περιστερίου, του Μπουρναζίου, των Άσπρων Χωμάτων και της Ανθούπολης. Η συνολική επιφάνεια είναι 920 εκτάρια και ο συντελεστής απορροής είναι ίσος με c=0,70.(σύμφωνα με την παραδοχή της μελέτης που παρουσιάζεται στον χάρτη στο τέλος της Εργασίας)

Λεκάνη Απορροής	Έκταση	Πληθυσμός	Συντ. Απορροής	Χρήσεις Γης
K <sub>27</sub> (Περιστέρι, κ.α.)	920 εκτ.	≈200,000	0,70	Μεικτές

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1. : Χαρακτηριστικά Επιλεγόμενης Λεκάνης Απορροής

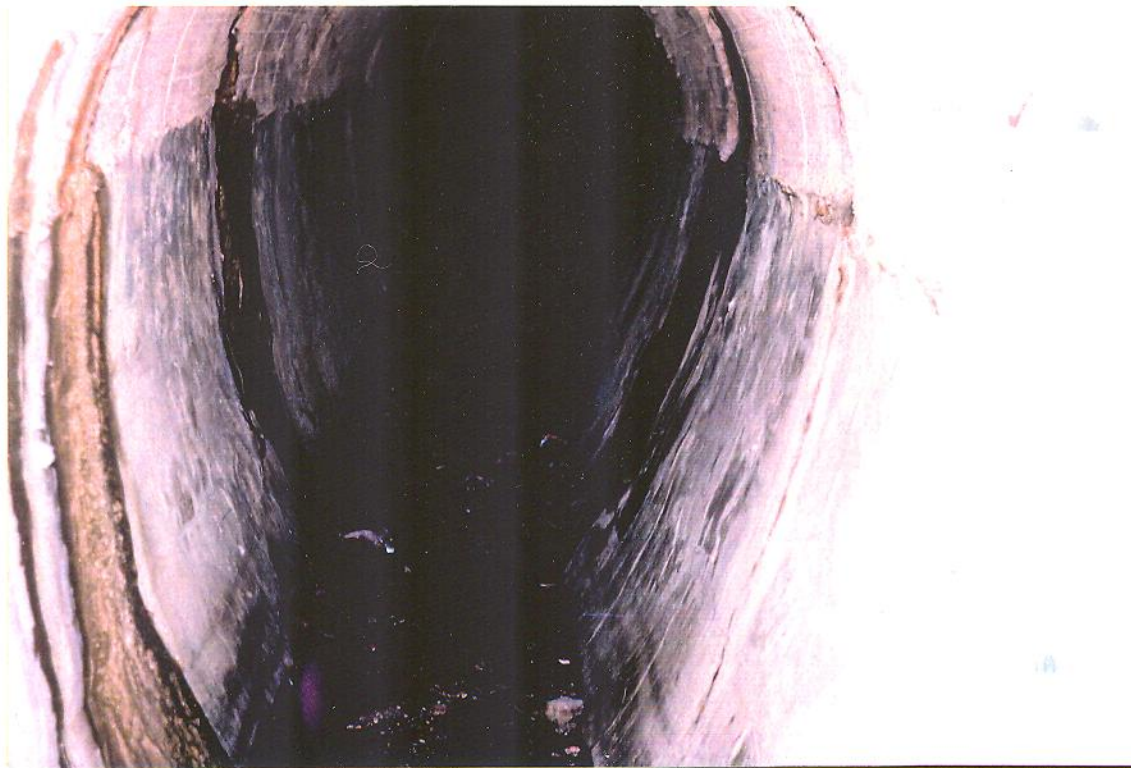
Ο αρκετά μεγάλος πληθυσμός δείχνει μια υπερσυσσώρευση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων που πιθανόν να σημαίνει αυξημένη παραγωγή φερτών υλών. Οι χρήσεις γης στην περιοχή είναι μεικτές, δηλαδή υπάρχουν πάρα πολλές κατοικίες, βιομηχανικές ζώνες, οδικές επιφάνειες με όλες τις περιπτώσεις κυκλοφοριακού φόρτου καθώς και επιφάνειες με εκτεταμένη εμπορική δραστηριότητα. Οι μεικτές χρήσεις γης επιτρέπουν ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα ποιότητας των φερτών υλών από όλες τις δραστηριότητες που μπορούν να αναπτυχθούν.

Εξάλλου οι γενικά χαμηλές τοπογραφικές κλίσεις της περιοχής που ταυτόχρονα σημαίνει και χαμηλές κλίσεις πυθμένα με μέσο όρο κλίσης γύρω στα 8 m/km. Οι χαμηλές κλίσεις πυθμένα δημιουργούν σημαντικές πιθανότητες για αποθέσεις αλλά, όπως θα δείξουμε παρακάτω δεν είναι η μόνη παράμετρος. Μετά από μελέτη των χαρτών της ΕΥΔΑΠ του δικτύου ομβρίων της περιοχής, επιλέχθηκαν συνολικά 6 σημεία του δικτύου. Τα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκαν τα σημεία αυτά θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα. Η πρώτη αναγνωριστική δειγματοληψία έγινε την Παρασκευή 22 Μαρτίου 1995. Οι καιρικές συνθήκες ήταν σχετικά καλές αν και την προηγούμενη ημέρα είχαμε ένα αρκετά

έντονο γεγονός βροχόπτωσης, με αποτέλεσμα την στιγμή της δειγματοληψίας να υπήρχε μια πολύ μικρή πλημμυρική ροή στους αγωγούς. Οι δειγματοληψίες αποτελούνταν από μία επισκόπηση του αγωγού με εξακρίβωση των στοιχείων της χαρτογράφησης (είδος διατομής, μέγεθος κ.α), καθώς και το σχηματισμό μιας πρώτης εντύπωσης για την κατασκευή του θεωρούμενου σημείου και μια πρόχειρη προσομοίωση της ροής στο συγκεκριμένο αγωγό. Η επίσκεψη και η δειγματοληψία έγινε με τη συμμετοχή του γράφοντος και ειδικευμένου συνεργείου που παραχωρήθηκε γιαυτόν ακριβώς το λόγο από τη διοίκηση της εταιρίας. Έπειτα παρατηρήσαμε αν υπάρχουν αποθέσεις στους αγωγούς. Αν υπήρχαν αποθέσεις τότε παίρναμε αρκετό δείγμα που το τοποθετούμε σε ειδικά κουτάκια που χρησιμοποιούνται γιαυτό το σκοπό. Η λήψη φωτογραφιών και slides ολοκληρώνει την αποστολή της συλλογής δειγμάτων. Σε έναν αγωγό που δεν βρέθηκαν αποθέσεις πάρθηκε δείγμα της ροής για τον εργαστηριακό υπολογισμό των αιωρούμενων σωματιδίων SS (Suspended Solids) και των εξαερώσιμων οργανικών αιωρούμενων σωματιδίων VSS (Volatile Suspended Solids) που έγινε στο Εργαστήριο Υγιεινομικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τέλος, σε αγωγούς που οι διαστάσεις τους το επέτρεπαν έγινε επιθεώρηση του δικτύου σε συνολικό μήκος 100 μέτρων για την καταγραφή παράνομων συνδέσεων, είσοδος του υπόγειου υδροφορέα στο δίκτυο μέσω των αρμών των αγωγών και ατυχηματική είσοδος ακαθάρτων από λανθασμένες συνδέσεις ή από εκτεταμένες διαρροές των παραπλήσιων αγωγών ακαθάρτων. Η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων έχουν ως εξής:

1. Οδός Πτολεμαΐδος και Πάρνηθος: Ο αγωγός που διατρέχει κατά μήκος την οδό Πτολεμαΐδος έχει ωσειδή διατομή, από ωπλισμένο σκυρόδεμα, με διαστάσεις  $\Omega = 1.30 * 1.95 \text{ m}^2$ , ενώ η κλίση πυθμένα του αγωγού είναι  $i = 0.003$ . Η είσοδος στο προς εξακρίβωση σημείο έγινε από το φρεάτιο επίσκεψης, το οποίο βρίσκεται ακριβώς στη κάθετη στροφή του αγωγού της Πτολεμαΐδος προς την οδό Πάρνηθος. Ο αγωγός που διατρέχει κατά μήκος την οδό Πάρνηθος έχει ωσειδή διατομή με μέγεθος ίδιο με το προηγούμενο αλλά με κλίση πυθμένα  $i = 0,0017$ , δηλαδή έχουμε την περίπτωση μιας ροής με κάθετη στροφή του αγωγού, με ίδια διατομή και με την κλίση πυθμένα να μειώνεται κατάντη κατά το μισό περίπου. Η απόθεση που παρατηρήθηκε ήταν εντυπωσιακή, αφού το μήκος της εκτεινόταν πάνω από 30 μέτρα με μέσο βάθος της γύρω στα 20-25 cm με σαφή τάση αύξηση του βάθους προς τα ανάντη. Το πραγματικά εντυπωσιακό είναι ότι όλη η απόθεση παρατηρήθηκε ακριβώς ανάντη από τη θέση του φρεατίου επίσκεψης επί της οδού Πτολεμαΐδος, ενώ αμέσως κατάντη επί της οδού Πάρνηθος ο αγωγός ήταν χωρίς καθόλου αποθέσεις. Με μια πρώτη ματιά διαπίστωνε κανείς ότι η απόθεση αυτή αποτελείται από χονδρόκοκκο υλικό σε διάταξη κοίτης χωρίς συγκεκριμένη μορφή αλλά με έντονες διαταράξεις του στρώματος της απόθεσης, λόγω της μεγάλης παρουσίας υλικών μεγάλης διαμέτρου και της μεγάλης έντασης της βροχόπτωσης. Μια αρκετά παραστατική άποψη της συγκεκριμένης απόθεσης φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



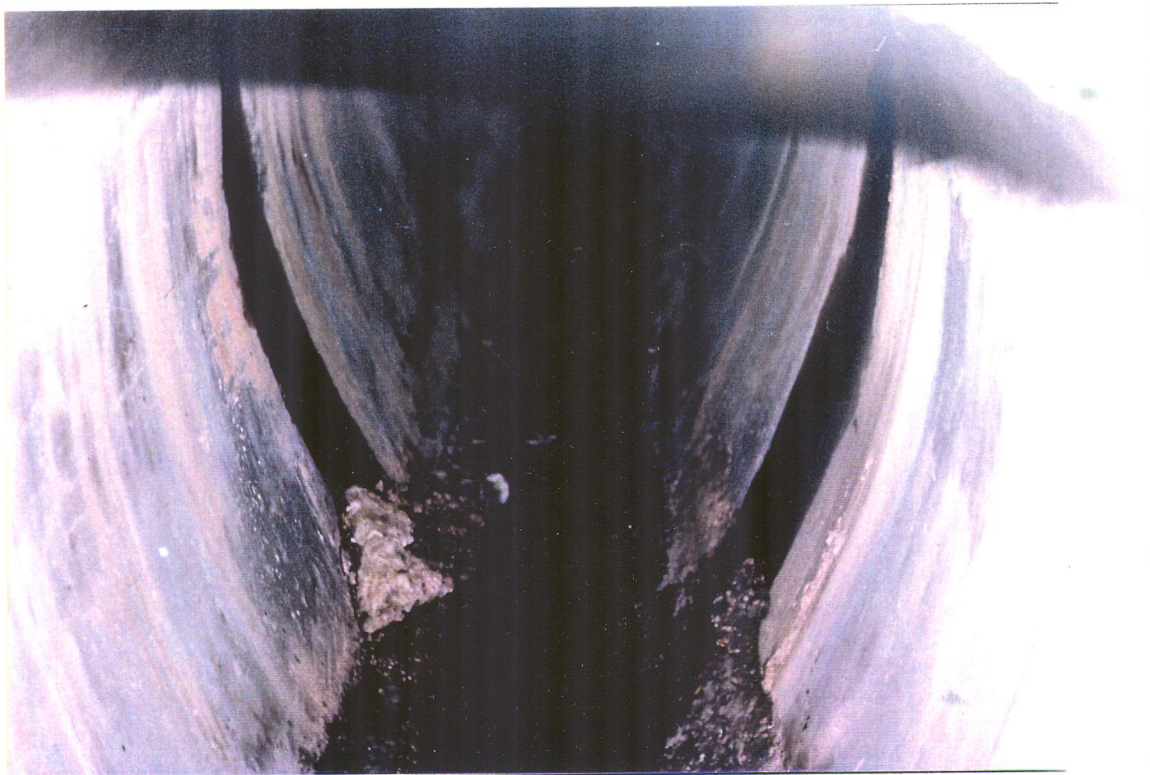


Φωτογραφία 4.1.: Άποψη της Απόθεσης της Οδού Πτολεμαΐδος

Από την απόθεση αυτή πάρθηκε δείγμα από όλο το βάθος της απόθεσης και έγινε κοκκομετρική ανάλυση με τη μέθοδο των υγρών κοσκίνων (wet sieving). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών παρατίθενται σε άλλη ενότητα αυτού του κεφαλαίου. Δεύτερη πιο λεπτομερής ανάλυση έγινε με μια δεύτερη επίσκεψη στον ίδιο αγωγό την Δευτέρα 22 Μαΐου 1995. Οι βροχές που μεσολάβησαν μεταξύ των δύο επισκέψεων ήταν ελάχιστης έντασης και διάρκειας, ώστε η απορροή να ήταν οριακή. Η μορφή της απόθεσης ήταν σχεδόν επίπεδη χωρίς τις έντονες αναταράξεις του πυθμένα που παρατηρήθηκαν κατά την πρώτη επίσκεψη. Αυτή τη φορά πάρθηκαν τρία δείγματα των αποθέσεων. Το πρώτο ξανά από όλο το βάθος της απόθεσης και άλλα δύο από το πάνω μέρος της απόθεσης κοντά στην επιφάνεια και το άλλο από το κάτω μέρος της απόθεσης κοντά στον πυθμένα του αγωγού. Η δειγματοληψία αυτή έγινε με σκοπό να διαπιστωθεί η κατανομή των μεγεθών των κόκκων σε όλο το βάθος της απόθεσης. Με μια γρήγορη ματιά διαπιστώνει κανείς τις κατασκευαστικές ατέλειες και προχειρότητες κατά την κατασκευή του συγκεκριμένου αγωγού. Η ευθυγράμμιση του αγωγού ουσιαστικά δεν υπάρχει, ο πυθμένας δεν είναι επίπεδος και δημιουργεί κοιλότητες και κορυφές και σε κάποια σημεία υπήρχε διάβρωση του αγωγού. Συναρμογή της κάθετης στροφής δεν υπήρχε ούτε σαν σκέψη ενώ δεν υπήρχε πτώση πυθμένα στη στροφή.

**2. Οδός Πτολεμαΐδος και Παραμυθιάς:** Το σημείο αυτό βρίσκεται ανάντη του προηγούμενου σημείου επί της Πτολεμαΐδος. Η γεωμετρία της περίπτωσης αυτής είναι η εξής. Η οδός Πτολεμαΐδος σε ευθυγραμμία αλλάζει διατομή και κλίση πυθμένα ενώ ένας μικρός συλλεκτήριος αγωγός επί της Παραμυθιάς εκβάλλει στον αγωγό της Πτολεμαΐδος με πτώση. Οι διαστάσεις είναι ανάντη της συμβολής ωοειδής με διατομή  $\Omega = 0.90 * 1.35 \text{ m}^2$  και με κλίση  $i = 0,0147$ , ενώ

κατάντη η διατομή αυξάνεται σε  $\Omega = 1.30 * 1.95 \text{ m}^2$  και με κλίση πολύ μικρότερη  $i = 0,0032$ . Το σημείο αυτό ήταν ακριβώς κάτω από ένα φρεάτιο επίσκεψης. Δεν παρατηρήθηκαν αποθέσεις παρόλο που η κλίση του κατάντη αγωγού ήταν περίπου ίδια με τον προηγούμενου αγωγό που παρατηρήθηκε απόθεση. Το μόνο δείγμα που συλλέχθηκε ήταν ένα δείγμα αιωρούμενων στερεών. Οπτικό δείγμα της ροής που υπήρχε κατά τη χρονική στιγμή της δειγματοληψίας φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία.



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 4.2.: Υδάτινη Ροή Κατά τη Δειγματοληψία Αιωρούμενων Στερεών

Σημειώνουμε ότι και τα δύο σημεία ανήκαν σε περιοχές κατοικιών με μέτριο κυκλοφοριακό φόρτο.

3. Οδός Παρασκευοπούλου και Ελευθερίου Βενιζέλου: Στην περίπτωση αυτή έχουμε τη συμβολή ενός αγωγού με έναν πολύ μεγαλύτερό του. Ο αγωγός της Ελευθερίου Βενιζέλου είναι ωσειδής με διατομή  $\Omega = 2.20 * 2.49 \text{ m}^2$  και με κλίση  $i = 0.007$ . Ο αγωγός της οδού Παρασκευοπούλου είναι ωσειδής από ωπλισμένο σκυρόδεμα με διατομή  $\Omega = 0.90 * 1.35 \text{ m}^2$  και με κλίση  $i = 0.012$ . Η εκβολή της μικρότερης ροής στη μεγαλύτερη γίνεται με πτώση πυθμένα. Δεν παρατηρήθηκαν αποθέσεις.

4. Οδός Λεβέντη και Λεβιδίου: Και στην περίπτωση αυτή έχουμε μια κάθετη στροφή του αγωγού. Είναι η πρώτη περίπτωση που συναντάμε κυκλική διατομή με διάμετρο  $D=0,70\text{m}$  και κλίση  $i = 0,004$  ανάντη (στην οδό Λεβέντη), ενώ κατάντη (στην οδό Λεβιδίου) η διάμετρος γίνεται  $D=0,80\text{m}$  και κλίση  $i = 0,004$ . Επομένως έχουμε την περίπτωση κάθετης στροφής του αγωγού με ίδια κλίση πυθμένα, αλλά αύξηση της διατομής από ανάντη προς τα κατάντη. Στο σημείο αυτό βρέθηκαν αρκετά λεπτόκοκκες αποθέσεις μόνο ανάντη από τη στροφή του αγωγού (στην οδό Λεβέντη), ενώ αμέσως κατάντη ο αγωγός ήταν εντελώς καθαρός από αποθέσεις. Ο αγωγός ήταν σε πολύ καλή κατάσταση, με

κατασκευή κάποιας συναρμογής στη στροφή αλλά και πάλι οι άντυγες των δύο αγωγών δεν βρίσκονται σε περασιά. Στο σημείο αυτό έγινε και δεύτερη δειγματοληψία στις 22 Μαΐου. Η απόθεση είχε παραμείνει με βάθος που δεν ξεπερνούσε τα 5-8 εκατοστά. Το μήκος της απόθεσης εκτιμήθηκε γύρω στα 20 m, αφού ο αγωγός λόγω διαστάσεων δεν είναι επισκέψιμος. Στην επόμενη φωτογραφία φαίνεται άποψη της απόθεσης από το φρεάτιο επίσκεψης και φαίνεται το τέλος της απόθεσης ακριβώς πριν τη στροφή του αγωγού. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σημείο αυτό βρίσκεται σε ελαφράς μορφής βιομηχανική ζώνη.



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 4.3 : Άποψη της Απόθεσης στην Οδό Λεβέντη

5. Υδατόρεμα Αγίας Λαύρας Περιστερίου : Από την γενική χαρτογραφική αναγνώριση της περιοχής, φάνηκε η ύπαρξη ενός φυσικού αστικού υδατορέματος, το οποίο είχε δεχθεί εκτεταμένες καταπατήσεις. Η κοίτη του είχε μπαζωθεί σε αρκετά σημεία και είχαν κτισθεί πρόχειρα κτίσματα. Στο τελικό του στάδιο το ρέμα διακόπτεται από έναν δρόμο και συνεχίζεται με τη μορφή αγωγού ομβρίων με διαστάσεις  $\Omega = 1.05 * 2.25 \text{ m}^2$ . Οι αποθέσεις που παρατηρήθηκαν στον αγωγό ήταν πράγματι εντυπωσιακές. Περισσότερα στοιχεία, εκτός από τη συλλογή ενός δείγματος, δεν υπάρχουν αφού το φρεάτιο επίσκεψης δεν είχε βαθμίδες (σιδερένιες προεξοχές), οπότε ήταν επικίνδυνο το εγχείρημα της καθόδου μέσα στον αγωγό. **Σαν άμεσο συμπέρασμα αναφέρεται η τεράστια σπουδαιότητα των αστικών φυσικών υδατορεμάτων στη στερεομεταφορά των φερτών υλών, καθώς και ότι η καταπάτησή τους προκαλεί σημαντικά προβλήματα αποθέσεων σε γειτονικούς αγωγούς.** Παρακάτω παραθέτουμε φωτογραφία του φυσικού ρέματος. η θέση της λήψης ήταν πάνω στο δρόμο ενώ ο κατάντη αγωγός ξεκινά αμέσως κάτω από τη θέση λήψης της φωτογραφίας.



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 4.4. : Άποψη του Αστικού Υδατορέματος της Αγίας Λαύρας

6. Μελέτη Εκβολών του Δικτύου Ομβρίων στον Κηφισό Ποταμό : Οι αγωγοί εκβολών λόγω των πολύ μικρών κλίσεων πυθμένα και της εξαιρετικά μεγάλης διατομής θεωρούνται να έχουν υψηλό δυναμικό για απόθεση. Για να θεωρηθεί ολοκληρωμένη η μελέτη της υπολεκάνης της εργασίας μας, κρίθηκε απαραίτητο να γίνει επίσκεψη στην εκβολή του δικτύου ομβρίων της υπολεκάνης στον Κηφισό Ποταμό. Οι αποθέσεις των εκβολών είναι οι πιο σημαντικές, γιατί έχουμε πλέον μια πλήρη εικόνα για τα χαρακτηριστικά των φερτών υλικών που εισρέουν στο συγκεκριμένο δίκτυο. Με την έννοια ότι όποιο μέγεθος κόκκου υλικού δεν είχε δημιουργήσει αποθέσεις ανάντη, ήταν πολύ πιθανό να δημιουργήσει αποθέσεις στις εκβολές αφού οι συνθήκες ήταν κάτι παραπάνω από ευνοϊκές. Οι αγωγοί των εκβολών είναι δίδυμοι αγωγοί από ωπλισμένο σκυρόδεμα, ορθογωνικής διατομής  $D=2*2.50*2.0 \text{ m}^2$  και με κλίση πυθμένα  $2 \text{ m/km}$ . Η επίσκεψη σε αυτούς τους αγωγούς έσβησε οποιαδήποτε αμφιβολία μας για τη σοβαρότητα της κατάστασης. Οι αποθέσεις ήταν εντυπωσιακά εκτεταμένες, ύψους γύρω στα  $60 \text{ cm}$  και μήκους που υπέρβαινε τα  $50 \text{ με } 60 \text{ μέτρα}$ . Το στρώμα της απόθεσης ήταν τόσο συνεκτικό που με πολύ κόπο καταφέραμε να αποσπάσουμε το δείγμα. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο, όπως θα δούμε αργότερα, είναι ότι ο πυθμένας του αγωγού εκβολής και του Κηφισού είναι ακριβώς στο ίδιο επίπεδο, δηλαδή δεν υπάρχει πτώση πυθμένα (επομένως και υδραυλική πτώση) κατά την έξοδο των ομβρίων υδάτων στον Κηφισό. Φωτογραφία των αγωγών εκβολής φαίνεται αμέσως μετά.



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 4.5. : Άποψη των Εκβολών στον Κηφισό

Από τα 6 σημεία που παρατηρήσαμε τα τέσσερα παρουσίαζαν σημαντικές αποθέσεις με αποκορύφωμα βεβαίως τις εκβολές στον Κηφισό, που αποτελεί σημαντική και πολύ ενδιαφέρουσα περίπτωση και για τη διεθνή επιστημονική έρευνα. Η μέγιστη συμβολή αυτής της διπλωματικής εργασίας καταγράφεται από τη επιστημονική ανωγνώριση και διαστασιολόγηση των προβλημάτων που δημιουργούν οι αποθέσεις των φερτών υλικών που αγνοείτο εντελώς από την Ελληνική πραγματικότητα και που εγκυμονεί σοβαρότατους κινδύνους αν δεν αντιμετωπισθεί έγκαιρα.

### 4.3. Καταγραφή των Μετρήσεων - Ανάλυση Αιτιών Δημιουργίας των Αποθέσεων

Σε αυτήν την ενότητα και για κάθε περίπτωση σχηματισμού αποθέσεων από αυτές που μελετήθηκαν θα γίνει λεπτομερής καταγραφή των αποτελεσμάτων και μετρήσεων και θα επιχειρηθεί μια θεωρητική εξήγηση του φαινομένου.

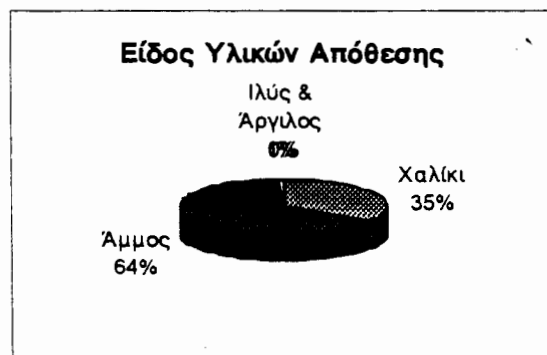
1. Πτολεμαΐδος και Πάρνηθος : Το δείγμα που συλλέχθηκε κατά την πρώτη επίσκεψη στάλθηκε στο εργαστήριο για κοκκομετρική ανάλυση. Η κοκκομετρική καμπύλη φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα και διαπιστώνουμε ότι πρόκειται για μια χονδρόκοκκη απόθεση με μέση τιμή διαμέτρου σωματιδίου  $D_{50} = 3.3 \text{ mm}$ . Οι υπόλοιπες χαρακτηριστικές τιμές των μεγεθών είναι  $D_{90} = 9.6 \text{ mm}$  ενώ το μικρότερο ποσοστό υλικών είναι  $D_{10} = 0.46 \text{ mm}$ . Το μέγεθος  $D_{90}$  είναι το μέσο μέγεθος εκείνο των σωματιδίων που είναι μεγαλύτερο από το 90% των

σωματιδίων. Σε πλήρη αντιστοιχία, το μέγεθος  $D_{10}$  σημαίνει ότι μόνο το 10% των σωματιδίων έχουν μέγεθος χαμηλότερο της τιμής  $D_{10}$ .



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2. : Κοκκομετρική Καμπύλη Δείγματος Απόθεσης

Παρακάτω φαίνεται και η σύσταση της απόθεσης σε χαλίκι, άμμο και ιλύ και άργιλο:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3. : Σύσταση Υλικών Απόθεσης

Προσπαθώντας μια ανάλυση για τα αίτια που δημιούργησαν την απόθεση κάνουμε την παραδοχή ότι δεν δημιουργήθηκε κατά τη διάρκεια μόνο ενός πλημμυρικού γεγονότος αλλά είναι ένα δυναμικό φαινόμενο που η σχηματοποίησή της συνεχίζεται σε κάθε βροχόπτωση, ανάλογα με την ένταση και τη διάρκειά της. Επίσης, επειδή δεν έχουμε μετρήσεις της ροής σε κάθε περίπτωση μελετούμε μια υποθετική ροή με ποσοστό πλήρωσης  $y/H = 0.50$ , ποσοστό που είναι αρκετά λογικό και πλησίον της πραγματικότητας. Κάνουμε την υπόθεση ότι η ροή είναι μόνιμη και ομοιόμορφη, οπότε ισχύουν οι σχέσεις της ομοιόμορφης ροής και πιο συγκεκριμένα ο τύπος του Manning.

Έχουμε ωοειδή διατομή με διαστάσεις  $\Omega = 1.30 \times 1.95 \text{ m}^2$ , οπότε από ειδικές σχέσεις υπολογισμού ωοειδών διατομών (Martz, 1992) έχουμε:

$$\text{Εμβαδόν διατομής } E = 4.8 \text{ m}^2$$

$$\text{Βρεχόμενη Περίμετρος } \Pi = 8.5 \text{ m}$$

$$\text{Υδραυλική ακτίνα } R = E / \Pi, R = 0.5647 \text{ m}$$

**Πτολεμαΐδος:**

Κλίση πυθμένα  $i = 0.003$   
 Από τον τύπο του Manning

$$V_{01} = (1 / \eta) * R^{2/3} * J^{1/2} \quad (4.1)$$

Αντικαθιστώντας, έχουμε ότι η ταχύτητα της ροής με πλήρη πλήρωση του αγωγού είναι

$$V_{01} = 2.49 \text{ m / sec}$$

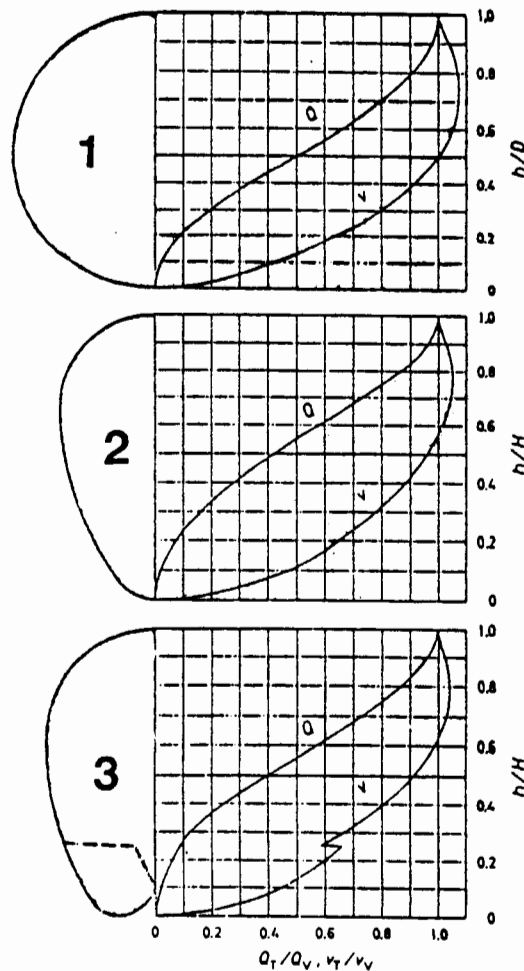
οπότε και η παροχή πλήρους πλήρωσης θα προκύπτει από τη σχέση

$$Q_{01} = V_{01} * E \quad (4.2)$$

οπότε και

$$Q_{01} = 11.95 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

Από τις καμπύλες βάθους ροής - παροχής για τυπικές διατομές υπονόμων που παρατίθενται παρακάτω, για σταθερό συντελεστή τριβής  $\eta$ , έχουμε:



**ΣΧΗΜΑ 4.1.** : Καμπύλες Ύψους Ροής και Παροχής για Τυπικές Διατομές Υπονόμευων (Lautrich, 1969)

για  $y / H = 0.50$  έχουμε: (όπου  $H = 1.30 + 1.95 = 3.25 \text{ m}$ )

$$Q_{\Sigma} / Q_0 = 0.43 \Rightarrow Q_{\Sigma} = 5.13 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

$$V_1 / V_0 = 0.96 \Rightarrow V_1 = 2.4 \text{ m} / \text{sec}$$

ενω το βάθος ροής είναι  $y_1 = 1.625 \text{ m}$

**Πάρνηθος:**

Κλίση πυθμένα  $i = 0.0017$

Ξανά από τον τύπο του Manning

$$V_{02} = (1 / n) * R^{2/3} * J^{1/2}$$

οπότε έχουμε ότι  $V_{02} = 1.88 \text{ m} / \text{sec}$ , οπότε και η αντίστοιχη παροχή πλήρωσης θα είναι  $Q_{02} = 1.88 \text{ m} / \text{sec} * 4.8 \text{ m}^2 = 9.024 \text{ m}^3 / \text{sec}$ .

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε την ίδια παροχή και στα δύο μέρη του αγωγού τότε θα προσπαθήσουμε να βρούμε το ομοιόμορφο βάθος ροής στο κατάντη τμήμα του αγωγού.

$$Q_{\Sigma} / Q_{02} = 5.13 / 9.024 = 0.568,$$

οπότε από τις καμπύλες του σχήματος 4.1. έχουμε  $y / H = 0.6$ , δηλαδή το βάθος ροής κατάντη είναι

$$y_2 = 1.95 \text{ m}$$

Η ομοιόμορφη ταχύτητα κατάντη με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται σε  $V_2 = 1.92 \text{ m} / \text{sec}$ .

Εξάλλου, οι απώλειες ενέργειας λόγω της αλλαγής διεύθυνσης της ροής, υπολογίζονται ως εξής:

$$h_T = k_T * [ ( V_1^2 / 2g ) - ( V_2^2 / 2g ) ] \quad (4.3)$$

όπου  $k_T$  συντελεστής που προσδιορίζει τη συναρμογή και στην περίπτωση μας λαμβάνεται ίσος προς 0.7 λόγω της κακής κατασκευής της διατομής. Η τιμή της  $h_T = 0.074 \text{ m}$ .

Υδραυλικά λοιπόν έχουμε μια αύξηση του βάθους ροής προς τα κατάντη, από 1.625 μέτρα σε 1.95 μέτρα, δηλαδή μια ποσοστιαία αύξηση του βάθους ροής κατά 20%. Αντιθέτως, η ταχύτητα ροής μειώνεται από τα ανάντη προς τα κατάντη, από 2.4 m/sec ανάντη σε 1.92m/sec κατάντη, δηλαδή έχουμε μια μείωση της ταχύτητας ροής κατά 20% ξανά. **Είναι προφανές πλέον ότι δεν βρισκόμαστε στην περιοχή της ομοιόμορφης ροής, αλλά έχουμε μια βραδέως μεταβαλλόμενη ροή και μάλιστα με μορφή της ελεύθερης επιφάνειας την καμπύλη οπισθοδρομίας  $M_1$ .** Με κλίσεις πυθμένα πολύ μικρές, 3 m/km και 1.7 m/km, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι έχουμε υποκρίσιμη ροή γιαυτό και η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας είναι η καμπύλη  $M_1$ . Το συμπέρασμα είναι πολύ σημαντικό, αφού οι μειώσεις των ταχυτήτων από τα



ανάντη προς τα κατάντη (backwater effects) δημιουργούν τις αποθέσεις μόνο στο ανάντη τμήμα. Κατάντη οι ταχύτητες σταθεροποιούνται και δεν υπάρχουν αποθέσεις.

Η πτώση των ταχυτήτων κατά 20% δημιουργούν και πτώση της υδραυλικής ακτίνας της ροής κατά 29% συνολικά. Ας δούμε ποιές είναι οι συνέπειες αυτής της μείωσης της υδραυλικής ακτίνας. Για στερεά με μεγέθη από 1 έως 10 mm και με πυκνότητα  $2.68 \text{ gr/cm}^3$ , ισχύει μια διαφοροποιημένη μορφή της σχέσης του Shields, που μπορεί να γραφεί ως εξής: (D. Laplace et.al. ,1992)

$$D_{\text{critical}} = ( R * J + 5.1 * 10^{-5} ) / 0.101 \quad (4.4)$$

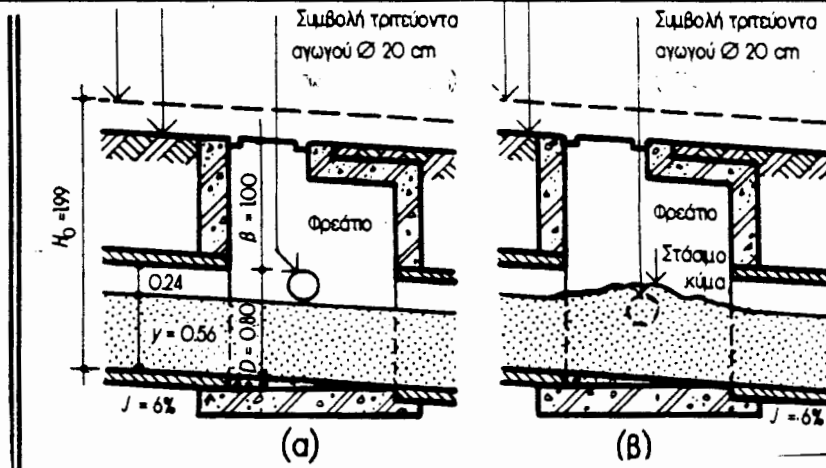
όπου  $D_{\text{critical}}$ : είναι η μέση διάμετρος των σωματιδίων που μετακινούνται και R είναι φυσικά η υδραυλική ακτίνα. Η πτώση της τιμής της υδραυλικής ακτίνας κατά 30% περίπου έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση της διαμέτρου των στερεών που μετακινούνται, οπότε έχουμε αυξημένες πιθανότητες αποθέσεων.

Αμέσως παρακάτω ακολουθεί ένας βήμα προς βήμα υπολογισμός της καμπύλης  $M_1$ .

y (m)	E (m <sup>2</sup> )	R (m)	V (m/s)	H <sub>E</sub>	DH <sub>E</sub>	J <sub>E</sub>	J <sub>EM</sub> (* 10 <sup>3</sup> )	J <sub>O</sub> -J <sub>E</sub>	Dx (m)
1,95	2,88	0,565	2,495	2,267		0,00299			
1,85	2,73	0,564	2,493	2,167	0,10	0,003	2,9	0,1	1000
1,75	2,58	0,563	2,492	2,066	0,101	0,003	3,0	0,0	0
1,65	2,44	0,56	2,481	1,964	0,102	0,003	3,0	0,0	0
1,625									

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2. : Υπολογισμός Καμπύλης  $M_1$

Το μήκος της καμπύλης  $M_1$  είναι 1000 μέτρα, ενώ η απόσταση του φρεατίου επίσκεψης από το αμέσως ανάντη φρεάτιο είναι 67.80 μέτρα που σημαίνει ότι σημαντικό κομμάτι του δικτύου βρίσκεται σε καθεστώς ανομοιόμορφης ροής. Οι επιλέον απώλειες ενέργειας στην ανομοιόμορφη ροή μπορεί να είναι σημαντικές και να επηρεάζει τον υδραυλικό σχεδιασμό των δικτύων. Οι δημιουργίες καμπυλών ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας της ροής σε βάθη μεγαλύτερα του μέγιστου ποσοστού πλήρωσης ή ακόμα, σε ακραίες περιπτώσεις και ροή υπό πίεση στα ανάντη που είναι κατηγορηματικά απαγορευτικό για τα δίκτυα αποχέτευσης. Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ανάντη μπορεί να οδηγήσει σε βυθισμένη συμβολή τριτεύοντων αγωγών σε πρωτεύοντα. Η μόρφωση αυτή ευνοεί τη δημιουργία στάσιμων κυμάτων στην κύρια ροή, που καθιστά ακόμα πιο πιθανό το ενδεχόμενο να είναι βυθισμένη η εκβολή του τριτεύοντα αγωγού (σχήμα 4.2). Στη περίπτωση αυτή η ροή στον τριτεύον αγωγό θα γίνει υπό πίεση και θα αναστραφεί η κατεύθυνσή της. Τότε τα ανάντη φρεάτια υδροσυλλογής και τα φρεάτια των ιδιωτικών συνδέσεων (στους παντοροϊκούς αγωγούς), θα αποτελέσουν σημεία διεξόδου της ροής με απρόβλεπτες συνέπειες.



ΣΧΗΜΑ 4.2 : α) Τοποθέτηση Συμβολής Τριτεύοντος Αγωγού β) Βυθισμένη Εκβολή Αγωγού Λόγω Αύξησης του Βάθους Ροής (Κουτσογιάννης, 1993)

Όπως είδαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο η δημιουργία αποθέσεων ευνοεί τη δημιουργία νέων αποθέσεων λόγω της αύξησης της κρίσιμης συρτικής τάσης για να έχουμε μετακίνηση των στερεών σωματιδίων. Μετρήσεις των βαθών της συγκεκριμένης απόθεσης προς τα ανάντη δείχνει μια σαφή αύξηση του βάθους της με μέσο όρο γύρω στο 1 - 1.5 εκατοστά για κάθε μέτρο μήκους. Με κάθε επιφύλαξη λόγω των εξαιρετικά δύσκολων συνθηκών εκτέλεσης των μετρήσεων, δημιουργείται ένα νέο πυθμενικό στρώμα, που καλύπτει τον αρχικό πυθμένα, με κλίση πυθμένα σαφώς μεγαλύτερη από την αρχική. Αυτό συμβαίνει γιατί η απόθεση δημιουργείται λόγω πτώσης των ταχυτήτων ροής από ανάντη προς τα κατόντη, οπότε φαίνεται λογικά να δημιουργείται κλίση πυθμένα με τέτοια μορφή. Πιο συγκεκριμένα, ενώ η αρχική κλίση είναι 0.003, η νέα κλίση λόγω αύξησης του βάθους της απόθεσης προς τα ανάντη γίνεται 0.01 με 0.015. Η αύξηση αυτή της κλίσης πυθμένα, συνεπάγεται και αύξηση των συρτικών τάσεων που θα παρουσιαστούν, σύμφωνα με τη σχέση :

$$\tau_o = \gamma * R * J_o \quad (4.5)$$

όπου  $J_o$  είναι η κλίση πυθμένα.

Επίσης η αύξηση της κλίσης πυθμένα του αγωγού δημιουργεί και αύξηση της παροχетеυτικότητας που έρχεται σε αντίφαση με την μείωση της παροχетеυτικότητας λόγω αύξησης της υδραυλικής τραχύτητας λόγω των αποθέσεων. Το φαινόμενο είναι πολύ περίπλοκο, αφού δεν είμαστε σίγουροι για τις πραγματικές διαστάσεις των μεταβολών αυτών. Πολλοί ερευνητές έχουν δώσει τιμές για τη μεταβολή της υδραυλικής τραχύτητας λόγω των αποθέσεων. Για παράδειγμα ο Van Rijn (1982) χρησιμοποίησε για την ισοδυναμη τραχύτητα του Nikuradse την σχέση:  $K_s = 3 D_{90}$ , που όμως θεωρείται πολύ μεγάλη τιμή, κυρίως για τις πιο χονδρόκοκκες αποθέσεις. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις διάφορες τιμές του  $K_s$  που έχουν δοθεί κατά καιρούς από διάφορους ερευνητές. Οι διαφορές είναι σημαντικές. (Περισσότερα για το συντελεστή τραχύτητας στην ενότητα 3.6)

Ερευνητής	Εμπειρικές Σχέσεις Υπολογισμού $K_S$
Ackers-White	$K_S = 1.25 D_{35}$
Hey	$K_S = 3.50 D_{85}$
Engelund-Hansen	$K_S = 2.00 D_{65}$
Kamphius	$K_S = 2.50 D_{30}$
Mahmood	$K_S = 5.10 D_{84}$
Van Rijn	$K_S = 3.00 D_{90}$

Επίσης, η αύξηση της κλίσης του πυθμένα είναι γενικά δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί αν και γενικά φαίνεται ότι ισχύει. Οι συγκρουόμενες αυτές διαπιστώσεις δείχνουν ξανά το μέγεθος της πολυπλοκότητας των φαινομένων.

Ο υπολογισμός των συρτικών τάσεων με την υποτιθέμενη ροή δίνει και ένα μέγεθος μη-απόπλυσης κάποιας παρόμοιας απόθεσης. Με κλίση πυθμένα την αρχική κλίση έχουμε:

$$\tau_1 = \gamma * R * J_1 \Rightarrow \tau_1 = 15.71 \text{ Nt} / \text{m}^2$$

ενώ για ολική πλήρωση του αγωγού έχουμε ότι

$$\tau_o = 16.65 \text{ Nt} / \text{m}^2$$

δηλαδή η διαφορά στις συρτικές τάσεις με ολική και στο μισό πλήρωση είναι ελάχιστες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η υδραυλική ακτίνα μειώνεται με το βάθος ροής πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή μερικής πλήρωσης ( $y/D > 0.70$ ). Αν δεχθούμε τώρα τη νέα κλίση πυθμένα (και αγνοήσουμε τη μείωση της υδραυλικής ακτίνας), τότε η συρτική τάση για  $J = 0.01$  θα είναι

$$\tau_2 = 55.51 \text{ Nt} / \text{m}^2$$

δηλαδή θα έχουμε μια σημαντική αύξηση της συρτικής τάσης. Η παραμονή της απόθεσης δείχνει ότι η συρτική αντοχή της ξεπερνά τις τιμές που μόλις αναφέραμε. Αυτό οφείλεται στη φύση της απόθεσης και στο μέγεθος των σωματιδίων και όχι στις δυνάμεις συσσωμάτωσης, που άλλωστε δεν υπάρχουν αφού το οργανικό ποσοστό είναι πολύ μικρό στη συγκεκριμένη απόθεση.

Με τη δεύτερη επίσκεψη παρατηρήθηκε αφενός μια σταθεροποίηση των βαθών της απόθεσης και αφετέρου μια ομαλοποίηση της επιφάνειας της απόθεσης. Η πρώτη διαπίστωση μάλλον οφείλεται στο γεγονός ότι η απόθεση έχει φθάσει σε ένα είδος ισορροπίας που όσο υλικό αποτίθεται στην απόθεση τόσο υλικό αποσπάται από αυτήν. Αυτή η ισορρόπηση της ανταλλαγής του υλικού οφείλεται στην ισορροπία των αλληλοσυγκρουόμενων μηχανισμών που περιγράφηκαν πιο πάνω. Η κατάσταση του “μέγιστου βάθους απόθεσης” παρατηρείται γενικά και στη διεθνή βιβλιογραφία. Η διαπίστωση αυτή είναι πολύ σημαντική, που βέβαια εξαρτάται πρεισσότερο από το ενεργειακό ύψος της ροής, αφού οι αποθέσεις έχουν ένα οριακό σημείο ανάπτυξης, όχι όμως σε όλες τις περιπτώσεις. Η εμφάνιση του μέγιστου (οριακού) βάθους απόθεσης είναι πλέον χωρίς νόημα γιατί τότε θα έχουμε τη μέγιστη μείωση της παροχетеυτικότητας. Άλλη πιθανή εξήγηση του φαινομένου είναι ότι τα λεπτόκοκκα υλικά που εναποτίθεται κατά το τέλος του πλημμυρικού γεγονότος στην επιφάνεια της απόθεσης ασκούν πολύ μικρή συρτική τάση, οπότε αυτά

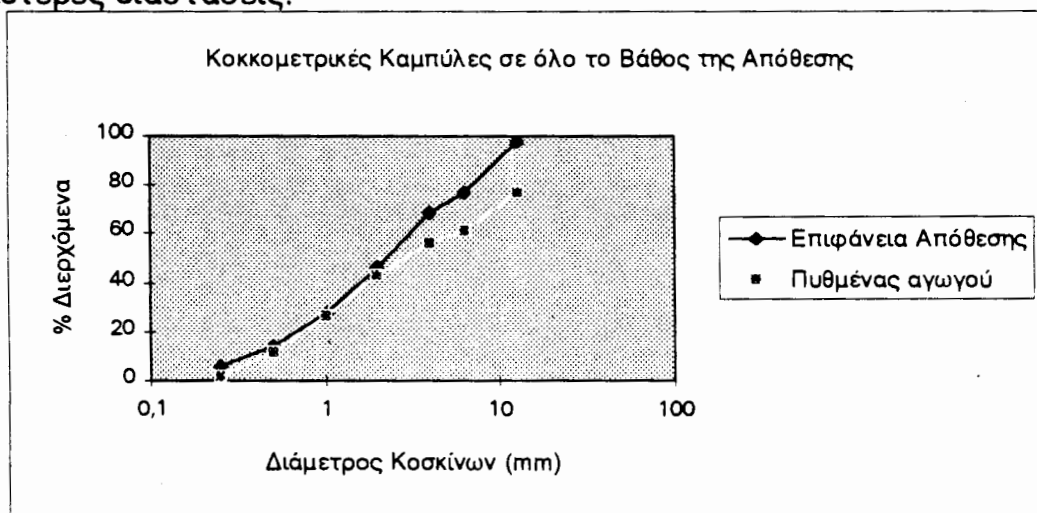
**παρασύρονται ακόμα και με πολύ μικρές ροές, όπως η μέγιστη ημερήσια παροχή σε ξηρή περίοδο ενός παντορροϊκού αγωγού.**

Βεβαίως, το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ των δύο επισκέψεων ήταν τόσο μικρό ώστε δεν είχαν προλάβει να συσσωρευθούν ικανές ποσότητες φερτών υλικών στις αστικές επιφάνειες, για να τροφοδοτήσουν εκ νέου τις αποθέσεις. Αυτό σημαίνει ότι δεν είμαστε καθόλου σίγουροι αν η απόθεση αυτή έχει φθάσει στο μέγιστο βάθος της ή βρίσκεται σε εξέλιξη, γεγονός πάντως είναι ότι δεν παρατηρήσαμε μεταβολές στα βάθη της σε σχέση με την πρώτη επίσκεψη. Η διαπίστωση των θεωριών αυτών απαιτεί, όπως αντιλαμβάνεται ο αναγνώστης, συνεχή και πολύχρονη επιστημονική έρευνα.

Οι προηγούμενες παρατηρήσεις οδηγούν στα ακόλουθα συνοπτικά διατυπωμένα συμπεράσματα:

- Η απόθεση αυτή σχηματίστηκε βαθμιαία από τα ανάντη προς τα κατόντη.
- Τα βάθη των αποθέσεων μειώνονται από τα ανάντη προς τα κατόντη.
- Η επιφάνεια της απόθεσης έχει την τάση να είναι γραμμική, δημιουργώντας μια νέα κλίση πυθμένα, μεγαλύτερη από την αρχική κλίση του αγωγού.
- Ένα έντονο πλημμυρικό γεγονός, όπως αυτό που τελείωνε κατά τη πρώτη δειγματοληψία, έχει την τάση να μεταβάλλει τη γραμμικότητα της απόθεσης αποθέτοντας μεγάλων διαστάσεων στερεά, σε ακανόνιστα σημεία πάνω στην απόθεση.
- Μικρές βροχοπτώσεις και απορροές, όπως εκείνες που μεσολάβησαν στο μεσοδιάστημα των δύο επισκέψεων, έχουν την τάση να επαναφέρουν την γραμμικότητα της απόθεσης, μετακινώντας τα στερεά ώστε να εξομαλύνονται οι κορυφές και οι κοιλότητες της προηγούμενης μορφής απόθεσης. (λόγω των ισχυρών βροχοπτώσεων).

Κατά τη δεύτερη επίσκεψη πάρθηκαν δύο δείγματα για να εξομοιωθεί η κατανομή των φερτών σε όλο το βάθος της απόθεσης. Από τις κοκκομετρικές αναλύσεις δεν προέκυψε κάτι το ιδιαίτερο και λεπτόκοκκα σωματίδια βρίσκονται και κοντά στο πυθμένα όπως και κοντά στην επιφάνεια. Πάντως υπάρχει μια αύξηση των πιο χονδρόκοκκων σωματιδίων κοντά στον πυθμένα του αγωγού. Αυτό είναι πολύ λογικό γιατί καθώς οι ταχύτητες βαθμιαία μειώνονται προς τα κατόντη καθιζάνουν πρώτα τα πιο βαρεια υλικά. Το πορώδες των χονδρόκοκκων τμημάτων επιτρέπουν την εισχώρηση πιο λεπτόκοκκων σωματιδίων σε πιο μεγάλα βάθη, τα οποία δεν μετακινούνται ακόμα και αν οι συρτικές τάσεις ξεπεράσουν τη συρτική αντοχή των σωματιδίων αυτών. Αυτό συμβαίνει γιατί αποκτούν τη συρτική αντοχή των περιβαλλόντων σωματιδίων με τις μεγαλύτερες διαστάσεις.



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.4 : Κατανομή Μεγεθών Κόκκων σε όλο το Βάθος της Απόθεσης**

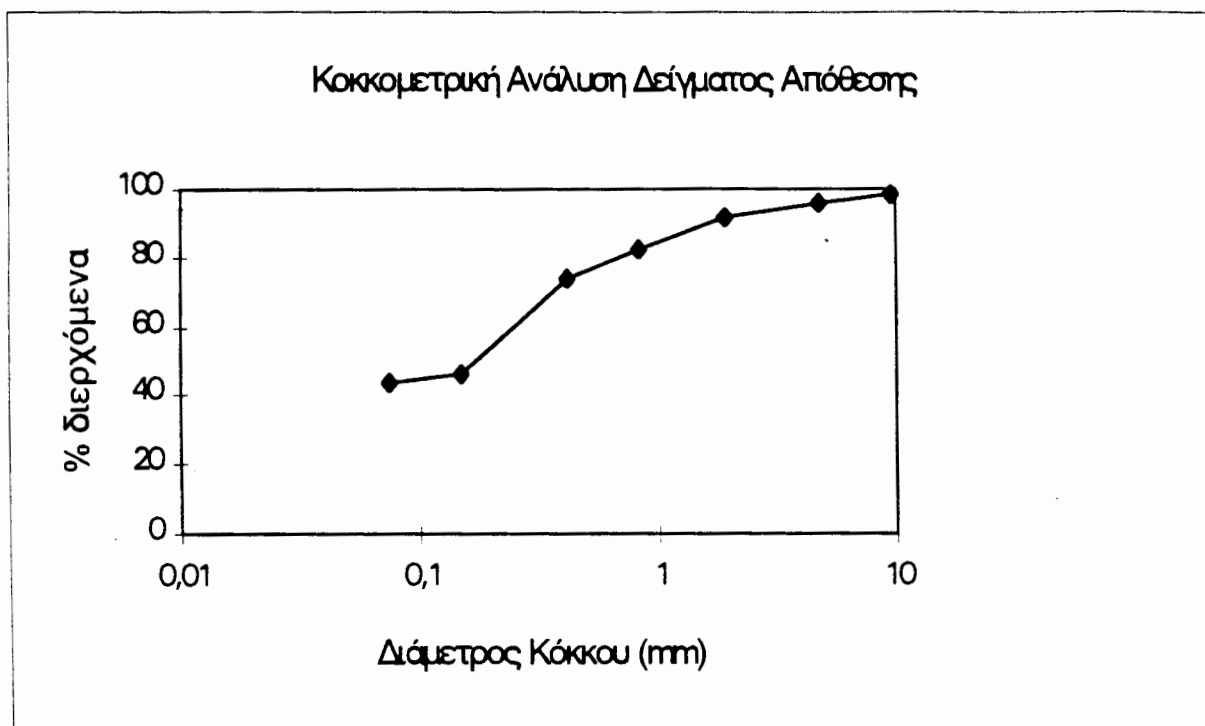
Από τη παρατήρηση του Διαγράμματος 4.4 φαίνεται αφενός μια επικράτηση των χονδροκόκκων υλικών στο κάτω μέρος της απόθεσης γεγονός που δηλώνει τη μονιμότητα της απόθεσης και αφετέρου μια ομοιόμορφη κατανομή των μικρότερων μεγεθών σε όλο το βάθος της απόθεσης. Αξιοσημείωτο είναι πάντως το γεγονός ότι στην επιφάνεια της απόθεσης έχουμε γενικά διπλάσιο ποσοστό υλικών μικρότερων των 250 μm που σημαίνει ότι οι μικρές ενδιάμεσες παροχές προκάλεσαν την απόθεση των πιο λεπτόκοκκων υλικών στην επιφάνεια και ακόμα είναι πολύ πιθανό να έχουν αναπτύξει δυνάμεις συσσωμάτωσης. Επίσης η έντονη οσμή πίσσας των δειγμάτων δηλώνει ότι η συγκεκριμένη απόθεση προήλθε από την απόρριψη ασφαλικών υλικών στο δίκτυο κατά τις εργασίες ασφαλιτοστρώσης. Η παρουσία τέτοιων υλικών είναι πιθανόν να δημιουργεί την ομοιογένεια στο βάθος της απόθεσης αλλά και τη δημιουργία ανθεκτικού επιφανειακού λεπτόκοκκου στρώματος.

Διαβλέποντας μια πρόβλεψη το βαθύτερο μέρος της απόθεσης αυτής είναι πλέον μια μόνιμη απόθεση, ενώ το επιφανειακό μέρος θα αποπλυθεί μόνο σε εξαιρετική περίπτωση και μόνο τα πιο λεπτόκοκκα υλικά. Η απόθεση αυτή θα πρέπει να καθαριστεί με μηχανικά μέσα γιατί εν δυνάμει μπορεί να δημιουργήσει ακόμα περισσότερα προβλήματα.

**2. Οδός Πτολεμαΐδος και Παραμυθιάς:** Η αύξηση της διατομής και η μείωση της κλίσης κατάντη δεν έχει δημιουργήσει καμιά απόθεση. Η κλίση πυθμένα του κατάντη αγωγού είναι ίδια σχεδόν με του αγωγού που προηγουμένως είχε απόθεση. Επομένως η κλίση πυθμένα δεν είναι το κρίσιμο μέγεθος για τη δημιουργία αποθέσεων. Φαίνεται λοιπόν ότι πρέπει να υπάρχει κάθετη στροφή του αγωγού για να υπάρχει απόθεση. Από τη ροή που υπήρχε εκείνη τη στιγμή πάρθηκε δείγμα αιωρούμενων στερεών. Με την εργαστηριακή μέθοδο των φίλτρων, μετρήθηκαν τα ολικά αιωρούμενα στερεά με τιμή SS=855 mg/lit ενώ τα οργανικά αιωρούμενα στερεά μετρήθηκαν VSS=185 mg/lit. Η τιμή που μετρήθηκε είναι εξαιρετικά υψηλή σε σχέση με τα διεθνή δεδομένα, όσο και με μετρήσεις σε άλλες περιοχές της Αθήνας. Η τιμή του οργανικού φορτίου είναι επίσης μεγάλη για αγωγούς ομβρίων και φθάνει σε ποσοστό το 21.64%. (ενώ στη διεθνή βιβλιογραφία δεν φαίνεται να ξεπερνάει το 10%).

Μια εξήγηση του γεγονότος είναι το χαμηλό βιοτικό επίπεδο της περιοχής καθώς και οι αναποτελεσματικές πρακτικές καθαρισμού των επιφανειών της περιοχής.

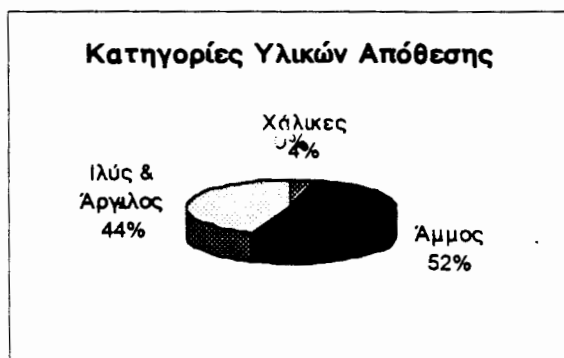
**3. Οδός Λεβέντη και Λεβιδίου:** Η περίπτωση αυτή όπως και η περίπτωση 1 είναι μια κάθετη στροφή του αγωγού. Αυτή τη φορά όμως ο αγωγός είναι κυκλικός πολύ μικρότερων διαστάσεων ενώ έχουμε μόνο αύξηση της διατομής κατάντη χωρίς αλλαγή της κλίσης πυθμένα. Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η κοκκομετρική καμπύλη της απόθεσης.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.5 : Κοκκομετρική Καμπύλη Απόθεσης Οδού Λεβέντη

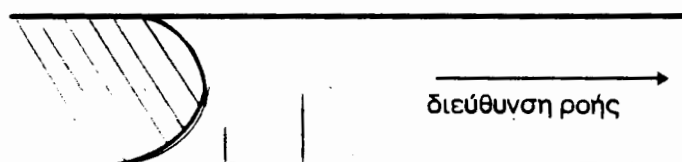
Παρατηρώντας τη κοκκομετρική καμπύλη βλέπουμε ότι η απόθεση είναι πολύ λεπτόκοκκη με το 44% του υλικού να έχουν διαστάσεις μικρότερες των 74 μm. Τέτοιες τιμές μεγέθους παρατηρούνται για πρώτη φορά ακόμα και σε παγκόσμια βιβλιογραφία. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά κοκκομετρικά μεγέθη είναι  $D_{10}=0.0168\text{mm}$ , η μέση τιμή της διάστασης των υλικών είναι  $D_{50}= 0.155 \text{ mm}$ , ενώ το  $D_{90}=2.0\text{mm}$ . Το ποσοστό του οργανικού υλικού στη συγκεκριμένη απόθεση είναι πολύ μεγάλο και ξεπερνά το 30%. Φαίνεται επομένως ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του οργανικού και του λεπτόκοκκου υλικού. Η μορφή της απόθεσης είναι λασπώδους μορφής το οποίο αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως “επιφανειακό υγρό στρώμα” (heavy fluid layer). Οι ιδιότητες της μορφής αυτής της απόθεσης είναι εξαιρετικά ενδιαφέρουσες, αφού ασκούν δυνάμεις συσσωμάτωσης λόγω του οργανικού φορτίου που μετρήθηκε στην απόθεση. Το στρώμα αυτό της απόθεσης δημιουργήθηκε από πολύ λεπτόκοκκα και οργανικά υλικά που σχημάτισαν ένα μετακινούμενο στρώμα υψηλής συγκέντρωσης (που αναφέρεται ως “επιφανειακό υγρό στρώμα”) πολύ κοντά στον πυθμένα των αγωγών. Το συγκεντρωμένο υλικό συνεχίζει γενικά να μετακινείται ως ρεύμα σωματιδίων χωρίς απόθεση, μια μορφή δηλαδή συρτικού φορτίου. Παρόλαυτα, κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, τα φερτά αυτά υλικά θα σχηματίσουν ένα στρώμα απόθεσης με τη μετακίνηση να συμβαίνει μόνο στο πάνω μέρος και κατά το μήκος της απόθεσης αυτής. Αν η ταχύτητα ροής μειωθεί ακόμα περισσότερο, όπως συνέβη κατά το τέλος του πλημμυρικού γεγονότος, τότε έχουμε μια εξολοκλήρου απόθεση χωρίς καμμία μετακίνηση φερτών κοντά στον πυθμένα. Οι συνθήκες ροής ικανές να εμποδίσουν την τελική απόθεση εξαρτώνται από το μέγεθος του αγωγού και τις ιδιότητες των φερτών, όπως το μέγεθός τους και η ειδική πυκνότητά τους. Ακόμα και η κροκίδωση των λεπτών σωματιδίων μπορεί να είναι σημαντικός παράγοντας.

Η σύνθεση της απόθεσης σε χαλίκι, άμμο, ιλύ και άργιλο είναι :



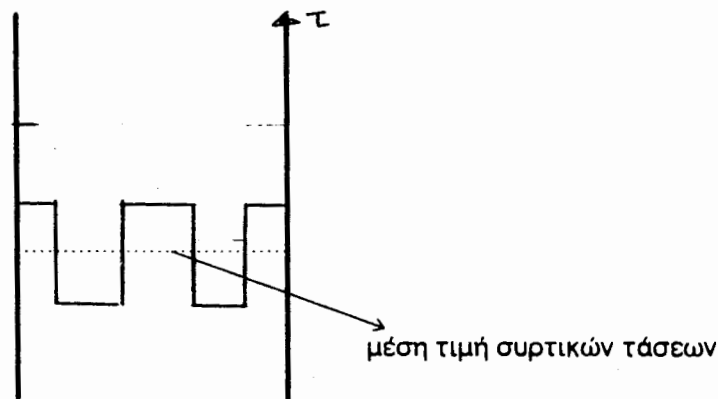
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.6 : Κατηγορίες Υλικών Απόθεσης

Ο όρος “επιφανειακό υγρό στρώμα” χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μετακίνησης των στερεών αυτών που δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως “ροή με συρτικό φορτίο”, αν και έχει παραπλήσιες ιδιότητες. Αυτό συμβαίνει αφού το μέγεθος των υλικών αυτών δεν ανήκουν στο φάσμα των υλικών που μετακινούνται ως συρτικό φορτίο. Η μελέτη αυτού του είδους του πυθμενικού στρώματος δεν έχει γίνει ούτε σε διεθνές επίπεδο ακόμα. Η αργιλική του σύσταση επιτρέπει την εύκολη μεταβολή των μορφών της επιφάνειας σε σχέση με τις υδραυλικές συνθήκες. Στο κατάντη τέλος της απόθεσης η μορφή της απόθεσης είχε τη μορφή, που δείχνει ανάγλυφα και την διεύθυνση της ροής.



Κατα τη διάρκεια της δεύτερης επίσκεψης στον ίδιο αγωγό διαπιστώθηκε η παραμονή της απόθεσης. Ο αγωγός ήταν εντελώς στεγνός και αυτό δίνει σημαντικά συμπεράσματα. Πριν ακόμα γίνουν οι κοκκομετρικές αναλύσεις των δειγμάτων της δεύτερης επίσκεψης, παρατηρήθηκε μια μείωση του οργανικού υλικού στο 6%. Επομένως προβλέφθηκε ότι οι κοκκομετρικές αναλύσεις θα δείξουν μια σημαντική μείωση του λεπτόκοκκου υλικού, όπως και τελικά αποδείχθηκε με μια πολύ σημαντική μείωση των λεπτόκοκκων υλικών. Φαίνεται ότι το οργανικό υλικό (επομένως και το πιο λεπτόκοκκο) βρίσκονταν στην επιφάνεια της απόθεσης με συνέπεια να παρασυρθούν με την επίδραση συρτικών τάσεων πολύ μικρότερων σε μέγεθος από τις συρτικές τάσεις αντοχής της υπόλοιπης απόθεσης, η οποία και παρέμεινε. Επομένως, θα πρέπει οι ενδιάμεσες βροχοπτώσεις να προκάλεσαν τέτοιες ροές μέσα στον αγωγό που να είχαν συρτικές τάσεις μεγαλύτερες από τη συρτική αντοχή των οργανικών επιφανειακών υλικών και να προκάλεσαν την απόπλυσή τους. Οι τιμές αυτές των συρτικών τάσεων έχουν μελετηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία και έχουν δοθεί κάποιες τιμές, όπως  $2,5 \text{ Nt/m}^2$  (Nalluri and Alvarez, 1992) που φαίνεται να ισχύει για τη συγκεκριμένη απόθεση. Το υπόλοιπο μέρος της απόθεσης με τις μεγαλύτερες διαστάσεις παρέμεινε. Πολύ μικρές παροχές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (πλύσεις αυτοκινήτων κ.α.) θα δημιουργήσουν νέο οργανικό επιφανειακό υλικό και ο κύκλος θα συνεχίζεται.

Η μορφή της επιφάνειας της απόθεσης ήταν ακανόνιστη χωρίς καμία συγκεκριμένη μορφή επιφάνειας. Στα πλευρικά όρια της απόθεσης δίπλα στα τοιχώματα του αγωγού εμφανίζονται καθαρά κάποιες κοιλότητες στην απόθεση που είναι καθαρές από φερτά υλικά. Αυτό οφείλεται στην κατανομή των συρτικών τάσεων κατά την έννοια του πλάτους στους κυκλικούς αγωγούς. Η κατανομή αυτή παρουσιάζει τρία μέγιστα, ένα στο μέσο του πυθμένα και στα δύο άκρα του πυθμένα. Αυτός είναι ο λόγος που εμφανίζονται κατά τόπους καθαρισμοί των αποθέσεων στα όρια με τα τοιχώματα του αγωγού. Στο πιο κάτω σχήμα βλέπουμε την κατανομή (σε άνοψη) των συρτικών τάσεων σε σύγκριση με την μέση συρτική τάση.



Κάνουμε ακριβώς την ίδια διαδικασία με προηγούμενα. Θεωρούμε μια πλήρωση του αγωγού  $y/D=0.60$ .

**Λεβέντη:**

$$D = 0.70 \text{ m}$$

$$\text{Εμβαδόν πλήρους διατομής } E_0 = 0.384 \text{ m}^2$$

$$\text{Υδραυλική Ακτίνα } R = D/4 = 0.175 \text{ m}$$

Κλίση πυθμένα  $i = 0.004$ , οπότε  $y_{\text{critical}} < y_0$ , οπότε η ροή είναι υποκρίσιμη.

$$V_{01} = (1 / n) * R^{2/3} * J^{1/2} \Rightarrow V_{01} = 1.32 \text{ m / sec}$$

$$Q_{01} = 1.32 \text{ m / sec} * 0.384 \text{ m}^2 = 0.51 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

για  $y/D= 0.6$

$$y_1 = 0.42 \text{ m}$$

οπότε από τις καμπύλες για κυκλικούς αγωγούς, έχουμε

$$V_1 / V_{01} = 1.07 \Rightarrow V_1 = 1.41 \text{ m / sec}$$

$$Q_1 / Q_{01} = 0.67 \Rightarrow Q_1 = 0.342 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

**Λεβιδίου :**

$$D = 0.80 \text{ m}$$

$$\text{Εμβαδόν πλήρους διατομής } E_0 = 0.502 \text{ m}^2$$

$$\text{Υδραυλική Ακτίνα } R = D/4 = 0.2 \text{ m}$$



$$V_{02} = (1 / n) * R^{2/3} * J^{1/2} \Rightarrow V_{02} = 1.44 \text{ m / sec}$$

$$Q_{02} = 1.44 \text{ m / sec} * 0.502 \text{ m}^2 = 0.72 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

οπότε  $Q_2 / Q_{02} = 0.473 \Rightarrow y_2 / D = 0.48 \Rightarrow y_2 = 0.384 \text{ m}$  ( $Q_2 = Q_1$ )

$$V_2 / V_{02} = 0.97 \Rightarrow V_2 = 1.40 \text{ m / sec}$$

Από την ανάλυση διαπιστώνουμε ότι έχουμε μια μείωση του βάθους ροής προς τα κατάντη κατά 17.14%, ενώ έχουμε μια ανεπαίσθητη μείωση της ταχύτητας προς τα κατάντη στο ανάντη τμήμα του αγωγού. Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας στην βραδέως μεταβαλλόμενη ροή είναι καμπύλη ανύψωσης  $M_2$  που δημιουργεί την πολύ μικρή μείωση της ταχύτητας, σε σχέση με τη  $M_1$  που προκάλεσε πιο σημαντικές μειώσεις της ταχύτητας ροής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ακόμα και οι πολύ μικρές μειώσεις της ταχύτητας ροής δημιουργεί μια αρκετά σημαντική απόθεση (αν και δεν είναι η μόνη παράμετρος, λόγω των άλλων υδραυλικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα). Εδώ φαίνεται πόσο πολύπλοκο είναι το πρόβλημα, αφού τόσο μικρές μεταβολές σε μια υδραυλική παράμετρο προκαλούν σημαντικά προβλήματα αποθέσεων. Επιβεβαιώνεται επομένως, με το πλέον κατηγορηματικό τρόπο, ότι η ταχύτητα ροής δεν μπορεί να είναι το κρίσιμο μέγεθος σχεδιασμού και τα αριθμητικά μοντέλα που βασίζουν την πρόγνωση των αποθέσεων στις μεταβολές της ταχύτητας δεν καταλήγουν σε σωστά αποτελέσματα. Επομένως βρισκόμαστε στην ανάγκη θέσπισης ενός νέου κρίσιμου υδραυλικού μεγέθους το οποίο φυσικά είναι οι **συρτικές τάσεις πυθμένα**, που παρουσιάζουν όμως το μειονέκτημα ότι είναι αρκετά δύσκολος ο ακριβής ποσοτικός προσδιορισμός τους.

Στη διαπίστωση αυτή συνηγορούν επίσης το γεγονός ότι εντελώς ίδιες τιμές των ταχυτήτων ροής δίνουν διαφορετικές τιμές των συρτικών τάσεων, εξαρτημένου αν βρισκόμαστε στην άνοδο ή στην κάθοδο του πλημμυρογραφήματος. Οι συρτικές τάσεις στην κάθοδο του πλημμυρογραφήματος είναι μικρότερες, οπότε οι αποθέσεις παρουσιάζονται όταν αποσύρεται το πλημμυρικό επεισόδιο. Επίσης πολύ μικρές μεταβολές της ταχύτητας ροής προκαλούν σημαντικές μεταβολές στις υδραυλικές συνθήκες γενικά.

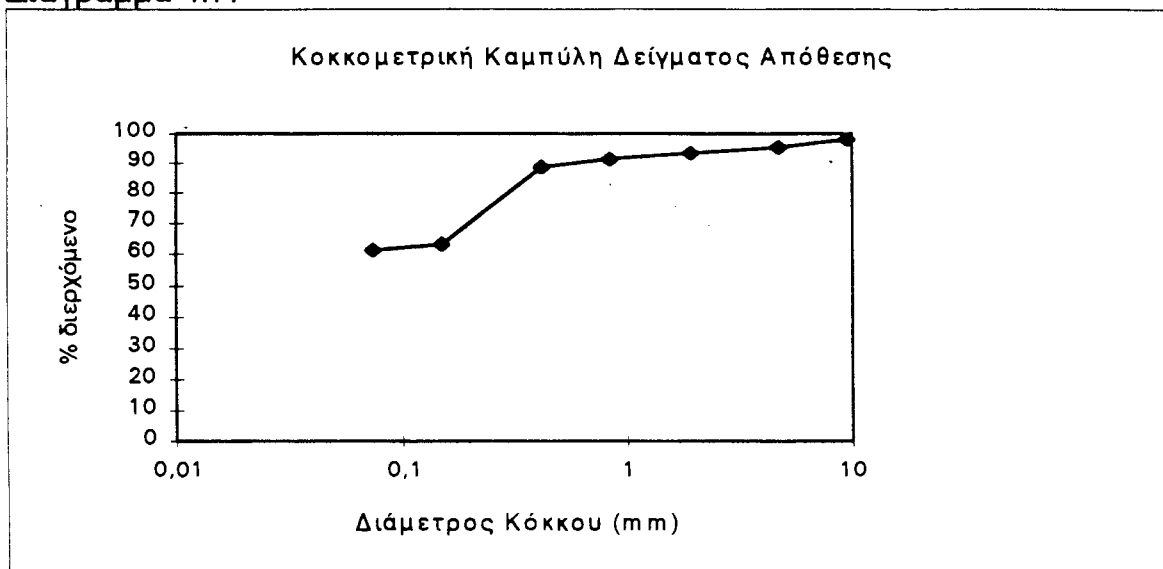
Οι συρτικές τάσεις πυθμένα με τη δεδομένη ροή υπολογίζονται με το νόμο του Manning. Έχουμε επομένως ότι :

$$\tau_0 = \gamma * R * J_0 \Rightarrow \tau_0 = 6.88 \text{ Nt / m}^2$$

Όπως φαίνεται η συρτική αντοχή αυτής τη απόθεσης είναι έως και τρεις φορές μικρότερη της προηγούμενης απόθεσης. Πάντως, η συρτική αντοχή ξεπερνά τα  $7 \text{ Nt/m}^2$ , ενώ η συρτική αντοχή του οργανικού επιφανειακού στρώματος δεν φαίνεται να ξεπερνά τα  $2 - 3 \text{ N/m}^2$ . Πάντως το χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο δειγματοληψιών ήταν πολύ μικρό ώστε το επιφανειακό οργανικό στρώμα να προλάβει να αποκτήσει σημαντική αντοχή λόγω της συσσωμάτωσης. Οι τιμές αυτές πάντως είναι αρκετά υψηλές για μερικώς-συσσωματώσιμα υλικά που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία.

**4. Υδατόρεμα Αγίας Λαύρας:** Οι αποθέσεις στον αγωγό που αντικαθιστά κατάντη το αστικό ρέμα της Αγ. Λαύρας, είναι πολύ εκτεταμένες και περιέχουν πολύ λεπτόκοκκο υλικό, που το 61.6% του δείγματος έχει διαστάσεις μικρότερες των

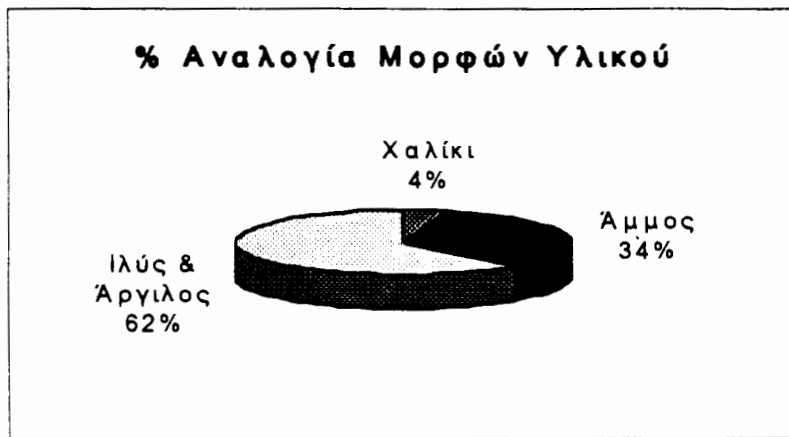
74 μικρών. Η κοκκομετρική καμπύλη της απόθεσης φαίνεται στο επόμενο Διάγραμμα 4.7.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.7. : Κοκκομετρική Ανάλυση Δείγματος Απόθεσης

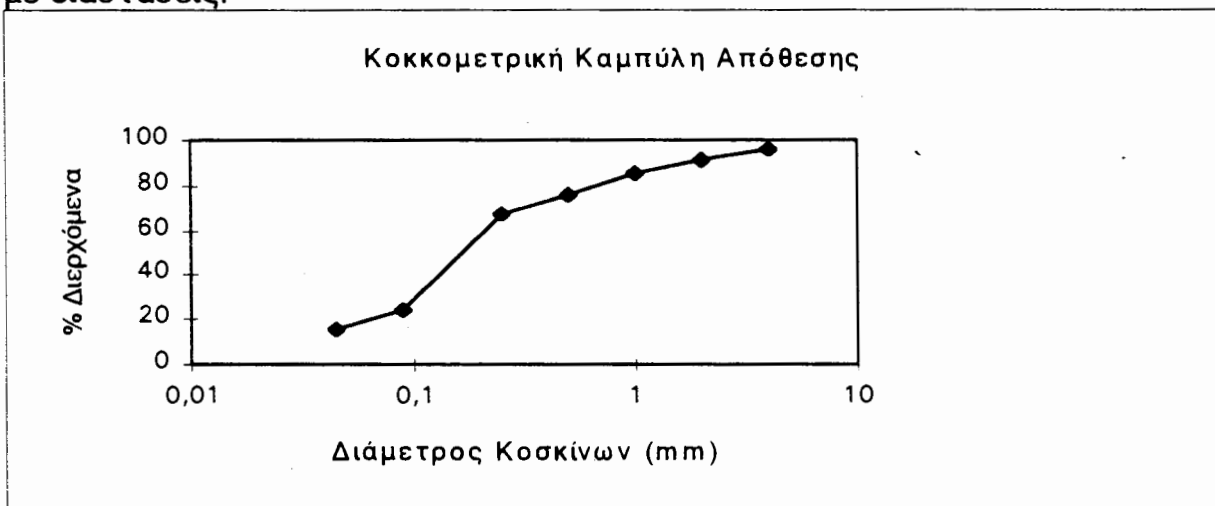
Η απόθεση αυτή είναι πολύ χαρακτηριστική για την έντονα λεπτόκοκκη μορφή της. Είναι μια αργιλική απόθεση με φυσικές ιδιότητες που περιγράφηκαν και προηγουμένως ως “στρώμα υγρής λάσπης”. Η μέση διάσταση των σωματιδίων είναι  $D_{50} = 0.06$  mm, ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη είναι  $D_{10} = 0.012$  mm και  $D_{90} = 0.60$  mm. Η σύσταση της απόθεσης είναι τέτοια ώστε κυριαρχεί το αργιλικό στοιχείο όπως φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα. Πάντως η μελέτη της απόθεσης αυτής μέσα σε ένα μακρύτερο χρονικό ορίζοντα θα δώσει σημαντικές πληροφορίες για τη συμπεριφορά των αποθέσεων αυτής της μορφής. Το οργανικό φορτίο της απόθεσης (7%) δηλώνει ότι η συρτική αντοχή της απόθεσης προέρχεται από τις δυνάμεις συσσωμάτωσης, οι οποίες προφανώς δεν θα είναι σημαντικές. Όσο περισσότερο χρονικό διάστημα παραμένουν οι αποθέσεις χωρίς καθαρισμό τόσο πιο έντονες διατμητικές τάσεις ασκούν. Παρόλαυτα οι συρτικές τάσεις που εξασκεί η απόθεση δεν είναι σημαντικές και η απόθεση θα αποπλυθεί στην επόμενη έντονη βροχόπτωση. Περίεργο είναι το γεγονός ότι παρόλο που τα λεπτόκοκκα σωματίδια υπερέχουν συντριπτικά, το οργανικό υλικό είναι πολύ μικρό. Πιστεύουμε ότι η παρατήρηση είναι μάλλον εξαίρεση, αλλά η απόθεση αυτή χρειάζεται περισσότερη μελέτη.

Τέλος, το συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι τα φυσικά αστικά υδατορέματα παίζουν σπουδαίο ρόλο στη στερεοαπορροή και μια πολιτική ελέγχου των πηγών φερτών υλών και της στερεομεταφοράς θα πρέπει να δώσει μεγάλο βάρος στην ανάδειξη και σωστή λειτουργία τέτοιων υδατορεμάτων.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.8. : Σχηματική Παράσταση της Αργιλικής Απόθεσης

5. Εκβολές του Δικτύου Ομβρίων στον Κηφισό Ποταμό : Ο αγωγός της εκβολής του συγκεκριμένου δικτύου ομβρίων υδάτων είναι διδυμος αγωγός ορθογωνικής διατομής, με διαστάσεις  $D= 2*2.0m*2.5m$  και κλίση 0.002. Ο Κηφισός ποταμός στο σημείο αυτό έχει κλίση πυθμένα περίπου 0.006 και τραπεζοειδούς διατομής με διαστάσεις.



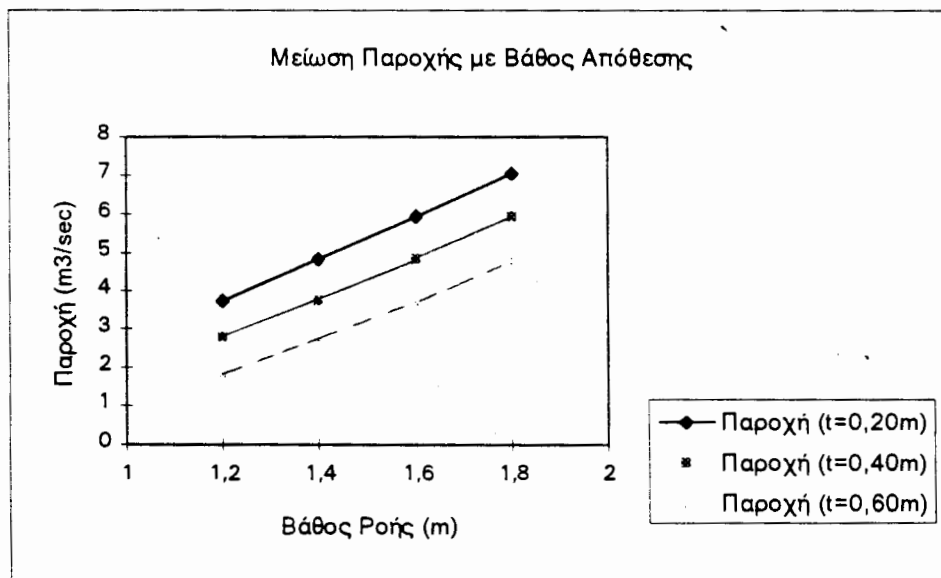
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.9 Κοκκομετρική Καμπύλη Δείγματος Απόθεσης

Όπως φαίνεται από τη μελέτη της καμπύλης του Διαγράμματος 4.9 οι αποθέσεις των αποθέσεων είναι κατά βάση λεπτόκοκκες, όπως άλλωστε είχαμε προβλέψει και στα προηγούμενα Κεφάλαια. Αυτό γιατί οι μεγάλες διαστάσεις και οι πολύ μικρές κλίσεις πυθμένα των εκβολών, αποτελούν τις καλύτερες συνθήκες για τον σχηματισμό αποθέσεων.

Το ομοίωμα της υδραυλικής λειτουργίας της εκβολής είναι η εκβολή μιας ροής σε μια πολύ πιο μεγάλη παροχή. Ο πυθμένας του αγωγού εκβολής είναι στο ίδιο επίπεδο με τον πυθμένα του Κηφισού. Αυτό σημαίνει ότι σε περιόδους υψηλών βροχοπτώσεων, όπου και η συγκέντρωση των φερτών στο δίκτυο ομβρίων είναι μέγιστη, η παροχή της εκβολής του δικτύου ομβρίων θα μηδενίζεται, γιατί παρεμποδίζεται από μια πολύ μεγαλύτερη ροή. Υδραυλικά, έχουμε την εκβολή μιας δώρυγας σε ταμιευτήρα με βάθος ροής μικρότερο από το βάθος του ταμιευτήρα. Η δημιουργία των υδραυλικών φαινομένων αρχικά θα είναι η καμπύλη ανύψωσης  $M_1$  και τέλος μηδενισμό των ταχυτήτων ροής. Οι πτώσεις των ταχυτήτων κάθε φορά που υπάρχει έντονη βροχόπτωση δημιουργεί τις τεράστιες αυτές αποθέσεις, οι οποίες δεν αποπλύονται όταν σιγά-σιγά

μειώνεται η στάθμη ροής στον Κηφισό. Η ανάσχεση της ροής στον αγωγό εκβολής και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας προς τα ανάντη, σε συνδυασμό με τις πολύ χαμηλές τοπογραφικές κλίσεις της περιοχής, δημιουργούν μεγάλες πιθανότητες καταστροφών από την επιφανειακή διόδευση των ομβρίων υδάτων.

Σημαντικό γεγονός είναι επίσης ότι η εκβολή είναι ακριβώς κάθετη στην κατεύθυνση ροής του Κηφισού. Αυτό σημαίνει ότι γίνεται ακόμα πιο δύσκολη η έξοδος της απορροής και των φερτών στο ποτάμι. Εξάλλου, το γεγονός ότι η εκβολή είναι βυθισμένη σε περιόδους έντονης βροχόπτωσης δεν είναι κατανάγκη κακό. Κακό είναι το γεγονός ότι η ταχύτητα των ομβρίων (ο αριθμός Froude της ροής) δεν φαίνεται ικανή να ξεπεράσει το εμπόδιο της κατά πολύ σημαντικότερης και σε παροχή και σε ταχύτητα ροή του Κηφισού. Σε περίπτωση όμως που το δίκτυο είναι παντοροϊκό θα ήταν γενικά συμφέρον να ήταν βυθισμένη η εκβολή ώστε να είχαμε καλύτερη αραίωση των οικιακών λυμάτων στη ροή του Κηφισού. Αυτό βέβαια με την προϋπόθεση ότι είχαμε ικανές συνθήκες για τη διάχυση των ρυπαντών στο ποταμό (η λειτουργία σε αυτήν την περίπτωση μοιάζει με τη λειτουργία των διαχυτήρων στους υποβρύχιους αγωγούς εκβολής). Αυτό γίνεται ή με μείωση της διατομής του αγωγού της εκβολής ή με τη χρήση αντλιοστασίου σχεδιασμένο για μεγάλη παροχή και με μικρό ενεργειακό ύψος. Σε αυτό το σημείο παραθέτουμε ένα διάγραμμα του αγωγού της εκβολής που δείχνει την πτώση της παροχетеυτικότητας σε συνάρτηση με το βάθος ροής και με το βάθος του αποτιθέμενου υλικού.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.10 : Μείωση της Παροχетеυτικότητας με Αύξηση του Βάθους Απόθεσης για Δεδομένο Ύψος Ροής.

Όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα (όπου t είναι τα βάθη της απόθεσης) αύξηση των βαθών της απόθεσης προκαλούν μείωση της παροχетеυτικότητας και κατά συνέπεια θα λειτουργήσει ο αγωγός εκβολής σε καθαστώς υπό πίεση σε αρκετά μικρότερες παροχές από εκείνες για τις οποίες είχε σχεδιαστεί ο αγωγός (αν είχε φυσικά μελετηθεί ο αγωγός να λειτουργεί υπό πίεση):

#### 4.4. Γενικά Συμπεράσματα και Ταξινόμηση των Αποτελεσμάτων

Από την αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των παρατηρήσεων μπορούμε αρχικά να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι η στερεομετάφορά στους υπονόμους έχει κάποια στοιχεία χάους. Οι τρομερές διακυμάνσεις στην κοκκομετρία των αναλύσεων που δεν προσφέρεται για μέσους όρους είναι χαρακτηριστική παρατήρηση. Οι διαφορές στην ποιότητα των φερτών σε γειτονικά σημεία εισόδου στο δίκτυο ομβρίων ακόμα και για το ίδιο πλημμυρικό γεγονός είναι σημαντικές με μια πολύ καλή συσχέτιση πάντως.

Σε αυτό οφείλεται το γεγονός ότι υπάρχουν πάρα πολλές παράμετροι που επηρεάζουν τους μηχανισμούς των αποθέσεων.

##### 1) ΠΗΓΕΣ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- Αποχετευόμενη Επιφάνεια
- Πληθυσμός Περιοχής
- Χρήσεις Γης
- Υπόγεια Διήθηση
- Προηγούμενη Ξηρή (Άνυδρη) Περίοδος

##### 2) ΔΙΚΤΥΟ ΥΠΟΝΟΜΩΝ

- Συνολικό Μήκος
- Μέση Κλίση Πυθμένα
- Σχήμα Διατομής των Αγωγών
- Ηλικία των Υπονόμων
- Υδραυλική Τραχύτητα
- Κατασκευή και Συντήρηση

##### 3) ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- Κοκκομετρική Διαβάθμιση Στερεών
- Πυκνότητα και Ταχύτητα Καθίζησης
- Οργανικό Ποσοστό
- Ύψος Αποθέσεων
- Ισοδύναμη Υδραυλική Τραχύτητα Απόθεσης

##### 4) ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

- Γεωμετρία Δικτύου
- Ταχύτητα Ροής και Διακυμάνσεις
- Συρτικές Τάσεις Πυθμένα (Μέσες & Τοπικές)
- Υδραυλικές Ανομοιομορφίες

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3. : Παράθεση Παραμέτρων για Αποθέσεις

Αν θα θέλαμε να ξεχωρίσουμε τις τρεις πιο σημαντικές παραμέτρους στη δημιουργία των αποθέσεων αυτές θα ήταν

- Η γεωμετρία του δικτύου που προκαλεί υδραυλικές ανομοιομορφίες.
- Η κατανομή των συρτικών τάσεων της υδάτινης ροής που ουσιαστικά αναγγέλουν και το σχηματισμό των αποθέσεων.
- Η χρονική διάρκεια της πρόσφατης άνυδρης περιόδου.

Κατά τη διάρκεια μιας άνυδρης περιόδου συσσωρεύονται μεγάλες ποσότητες των φερτών υλών στις αστικές επιφάνειες, που είναι εύκολα διαβρώσιμες ανάλογα και με την ένταση της βροχόπτωσης. Γενικά παρατηρούνται έντονα γεγονότα βροχόπτωσης μετά από μια παρατεταμένη άνυδρη περίοδο. αυτό έχει ως άμεση συνέπεια την αύξηση της ποσότητας των φερτών υλικών που προωθούνται στο δίκτυο ομβρίων. Συγκεκριμένα η μορφή του ρυθμού απόπλυσης των φερτών υλών από τις αστικές επιφάνειες φαίνεται να υπακούει το μοντέλο Price-Mance (Price and Mance, 1978), με τη μορφή

$$dm / dt = K * i_t^n \quad (\text{mg / sec για μονάδα επιφάνειας})$$

όπου  $i_t$  είναι η ένταση της βροχόπτωσης για μονάδα επιφάνειας και  $K, n$  είναι διαφορετικοί συντελεστές για διαφορετικές χρήσεις γης.

Οι διάφορες πιο συγκεκριμένες προϋποθέσεις που απαιτούνται για να υπάρξουν αποθέσεις, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ερευνάς μας φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα:

#### ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ

- Χαμηλές κλίσεις πυθμένα (μικρότερες των 4 m/km).
- Σε κάθετη στροφή του αγωγού χωρίς συναρμογή.
- Σε κατάντη εκβολή σε πιο σημαντική ροή ή σε αστικό υδατόρεμα.
- Σε αύξηση της εγκάρσιας διατομής κατάντη.
- Κατάντη από αγωγούς που διακλαδίζονται.
- Ανάντη από τις εκβολές των αγωγών (φυσικό ρέμα ή θάλασσα).
- Σε μείωση της κλίσης προς τα κατάντη.
- Σε στοιβαγμένα υπολείματα υλικών μετά το πέρας της κατασκευής των αγωγών.
- Κακή κατασκευή των αγωγών και ηλικία.
- Κακή λειτουργία ή απουσία αμμοσυλλεκτών στα φρεάτια υδροσυλλογής.
- Με κλίση πυθμένα αντίθετη στη ροή (λόγω διαφορικής καθίζησης αγωγού με πολύ μικρή κλίση κλίση πυθμένα)

#### ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4. : Ταξινόμηση Συνθηκών για Αποθέσεις.

Η ιδιαίτερη σημασία και συμμετοχή καθεμιάς από τις παραμέτρους μεταβάλλεται από περίπτωση σε περίπτωση. Γενικά, έχουμε και τα υπόλοιπα συμπεράσματα.

- Οι αποθέσεις εμφανίζονται μόνο σε συγκεκριμένες θέσεις που, σε κάθε περίπτωση ροής, συμβαίνουν υδραυλικές ανωμαλίες και με εμφάνιση συγκεκριμένων μορφών ανομοιομορφίας, όπως οι καμπύλες ανύψωσης  $M_1$ .
- Γενικά χρειάζεται ένας συνδυασμός δύο ή τριών συνθηκών από τον Πίνακα 4.4, εκτός αν πρόκειται για τις εκβολές όπου αρκεί μόνο αυτή η παράμετρος. Πράγματι για τις αποθέσεις της οδού Πτολεμαΐδος και της οδού Λεβέντη, δεν αρκεί μόνο η κλίση πυθμένα αλλά απαιτούνται και η εφαρμογή άλλων συνθηκών όπως η μείωση της κλίσης ή η αύξηση της εγκάρσιας διατομής

κατάντη. Μόνο οι ανάντη επιδράσεις των εκβολών (με κακό υδραυλικό σχεδιασμό) αρκούν από μόνες τους για να δημιουργήσουν αποθέσεις.

- Οι αποθέσεις που βρέθηκαν κατά την έρευνά μας και οι οποίες σχηματίστηκαν απο τις παραπάνω αιτίες, είναι καθαρά τοπικές. Το μήκος τους σπάνια ξεπερνά τα 40 μέτρα.

Σχετικά με το είδος των αποθέσεων, δηλαδή τη σύστασή τους σε υλικό, έχουμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

Παρατηρούνται γενικά δύο είδη αποθέσεων, οι οποίες διαφοροποιούνται όχι μόνο για την κοκκομετρία τους αλλά και τη θέση σχηματισμού τους στο δίκτυο.

**α ) Χονδρόκοκκες αποθέσεις που σχηματίζουν αρκετά ανάντη των εκβολών του δικτύου. Οι αποθέσεις αυτές είναι αμμώδεις και με σχετικά μεγάλο ποσοστό χαλικιών και σχηματίζονται σε μεγάλους αγωγούς.**

**β) Λεπτόκοκκες αποθέσεις με μεγάλο ποσοστό αργιλικού υλικού που παρατηρούνται σχεδόν πάντοτε στα κατάντη τμήματα του αγωγού που η πτώση της μεταφορικής ικανότητας της ροής είναι μέγιστη. Παρατηρούνται επίσης και σε αρκετά μικρούς αγωγούς. Η κατηγοριοποίηση αυτή των αποθέσεων της εργασίας μας συμπίπτουν σε πολύ μεγάλο βαθμό με τα χαρακτηριστικά των αποθέσεων στους παντοροικούς αγωγούς της πόλης των Βρυξελλών στο Βέλγιο. (M. Verbanck, 1992)**

Στον επόμενο Πίνακα παραθέτουμε τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά των αποθέσεων:

Αποθέσεις	Κοκκομετρία (χιλ)		
	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>
Πτολεμαΐδος & Πάρνηθος	0,46	3,3	9,6
Λεβέντη & Λεβιδίου	0,0168	0,155	2,0
Ρέμα Αγ. Λαύρας	0,012	0,06	0,6

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5. : Συνοπτική Παρουσίαση Κοκκομετρικών Μεγεθών Αποθέσεων

Από τον παραπάνω Πίνακα φαίνονται οι μεγάλες διαφορές στις δύο μορφές αποθέσεων. Μεγαλύτερες είναι οι διαφορές στις τιμές του D<sub>90</sub> και του D<sub>50</sub>, λόγω της ύπαρξης αργίλου στις λεπτόκοκκες αποθέσεις. Στο Παράρτημα 1 εμφανίζονται συγκεντρωμένες όλες οι κοκκομετρικές καμπύλες των δειγμάτων των αποθέσεων.

## 4.5. Εκτιμήσεις Μάζας Φερτών Υλικών

Για να δοθεί το πρόβλημα στις πραγματικές του διαστάσεις θα πρέπει να ξέρουμε τις ποσότητες των φερτών υλικών που παράγονται σε ετήσια βάση, ώστε να είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε τα προβλήματα γενικά απο την είσοδο των φερτών υλικών στα δίκτυα ομβρίων αγωγών. Η γνώση μιας τάξης μεγέθους της μάζας των φερτών υλών θα δώσει το έναυσμα για ένα οργανωμένο σχέδιο διαχείρισης και ελέγχου των αστικών επιφανειών.

Παίρνουμε ως οδηγό την υπολεκάνη απορροής της μελέτης μας που έχει συνολική επιφάνεια 920 εκταρίων και συντελεστή απορροής ίσο με  $c=0.70$ . Η δεδομένη επιφάνεια απορροής χωρίζεται σε δύο υποπεριοχές : μία καθαρά αστική που είναι αδιαπέρατη και μία που δεν υπάρχουν ανθρώπινες δραστηριότητες, εκτός της αποψίλωσης των τοπικών δασών, που μπορεί να χαρακτηριστεί ως περατή περιοχή. Η περιοχή αυτή, όπως φαίνεται και στο χάρτη που επισυνάπτεται στο τέλος της διπλωματικής εργασίας, βρίσκεται στο πιο ανάντη τμήμα της υπολεκάνης. Ο συντελεστής απορροής γενικά είναι μεταβλητός ακόμα και ανάμεσα σε διαφορετικές βροχοπτώσεις, τύπο εδάφους κ.ά. Επειδή όμως δεν υπάρχουν αναλυτικές μετρήσεις των επιφανειών με διαφορετικές χρήσεις γης, θεωρούμε ότι το 70% της συνολικής επιφάνειας είναι αδιαπέρατη με όση σχεδόν ποσότητα κατακρημνίζεται τόση ακριβώς να απορρέει και το υπόλοιπο 30% της επιφάνειας να είναι περατό με μεγάλη περατότητα. Όμως επειδή έχουμε ως αναφορά τη μέση ετήσια βροχόπτωση τότε ο συντελεστής απορροής θα έχει έναν συντελεστή 0.60 που θα παίρνει υπόψιν και τα γεγονότα βροχόπτωσης που δεν δίνουν ανάλογη απορροή.

Τα φερτά υλικά θα προκύψουν από τη διάβρωση του εδάφους της περατής περιοχής και από τη συμπάρασυρση των αποτιθέμενων στερεών στις αστικές επιφάνειες.

Η μάζα των αποσπώμενων στερεών από την εδαφική επιφάνεια θα προκύψει απο την Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (Universal Soil Loss Equation) ( βλέπε Wischmeier and Smith, 1978 και Kirkby and Morgan, 1980). Η διατύπωση της Παγκόσμιας Εξίσωσης Εδαφικής Απώλειας (Κουτσογιάννης, 1986) έχει ως εξής :

$$A = 0.224 * R * K * L * S * C * P \quad (4.6)$$

όπου:

A = Εδαφική απώλεια σε  $kg/m^2$  - αναφέρεται στο ίδιο διάστημα που αναφέρεται και το R.

R = Συντελεστής Διαβρωτικότητας Βροχής (Rainfall Erosivity Factor)

K = Συντελεστής Διαβρωσιμότητας Εδάφους (Soil Erosivity Factor)

L = Συντελεστής Μήκους Κλιτύος (Slope - Length Factor)

S = Συντελεστής Κλίσης Κλιτύος (Slope - Steepness Factor)

C = Συντελεστής Φυτοκάλυψης / Καλλιέργειας (Cover and Management Factor)

P = Συντελεστής Ελέγχου Διάβρωσης (Support Practice Factor)

Παρακάτω υπολογίζουμε καθένα συντελεστή ξεχωριστά

### 4.5.1. Συντελεστής Διαβρωτικότητας Βροχής R

Ο συντελεστής αυτός είναι μέτρο της αποτελεσματικότητας της βροχής ως προς τη διάβρωση. Ο συντελεστής αυτός έχει πρακτικό νόημα για ετήσια βάση. Για να υπολογιστεί η μέση ετήσια τιμή του R πρέπει να υπολογισθεί η



ακολουθία τιμών του συντελεστή για όλα τα επεισόδια βροχής μιας χρονικής περιόδου N ετών, να ληφθεί το άθροισμα και να διαιρεθεί με το N.

Λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας υπολογισμού του συντελεστή, έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές σχέσεις με απλούστερα υπολογιζόμενες παραμέτρους βροχής, όπως το μέσο ετήσιο ύψος βροχής. Μία τέτοια σχέση είναι:

$$R_{ET} / P_{ET} = 0.50 \pm 0.05 \quad (4.7)$$

όπου :  $R_{ET}$ : μέσος ετήσιος συντελεστής διαβρωτικότητας  
 $P_{ET}$ : μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)

Για την περιοχή της Αθήνας, το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι περίπου 400 mm, οπότε και ο συντελεστής διαβρωτικότητας βροχής είναι  $R=200$ .

#### 4.5.2 Συντελεστής Διαβρωσιμότητας Εδάφους K:

Η σχέση που δίνει το συντελεστή K είναι :

$$100 K = 2.1 * 10^{-4} * M^{1.14} * (12 - a) + 3.25 (b - 2) + 2.5 (c - 3) \quad (4.8)$$

$$M = P_s (100 - P_c)$$

όπου:  $M$  = Παράμετρος Μεγέθους Κόκκων  
 $a$  = Ποσοστό Οργανικού Εδαφικού Υλικού (%)  
 $b$  = Κωδικός Εδαφικής Δομής  
 $c$  = Κωδικός Διαπερατότητας Εδάφους  
 $P_s$  = Ποσοστό Ιλύος και πολύ Λεπτής Άμμου (%)  
 $P_c$  = Ποσοστό Αργίλου στο Έδαφος (%)

Θεωρούμε ότι η εδαφική δομή είναι αρκετά τεμαχισμένη δομή (ώστε να έχει μεγάλη περατότητα, οπότε ο συντελεστής  $b$  παίρνει την τιμή  $b=3$ ). Θεωρούμε επίσης τον κωδικό διαπερατότητας  $c$  ότι παίρνει την τιμή  $c=1$ , γιατί υποθέτουμε ότι έχουμε πολύ γρήγορη διαπερατότητα. Το ποσοστό ιλύος και πολύ λεπτής άμμου στο έδαφος, με διαμέτρους κόκκων  $0,002 \pm 0.1$  mm, προκύπτει από την κοκκομετρική ανάλυση των αποθέσεων ελλείψει άλλων στοιχείων, οπότε  $P_s=35.19\%$ . Το ποσοστό αργίλου στο έδαφος θα προκύψει με τον ίδιο τρόπο, οπότε  $P_c=0.96\%$ . Το ποσοστό του οργανικού υλικού στο έδαφος προκύπτει ξανά από το μέσο όρο του οργανικού ποσοστού των αποθέσεων, οπότε  $a=8\%$ .

#### 4.5.3 Τοπογραφικοί Συντελεστές L και S :

Οι τοπογραφικοί συντελεστές υπολογίζονται από τις σχέσεις :

$$L = ( x / 22.13 )^m \quad (4.9)$$

$$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065 \quad (4.10)$$

όπου  $x$  είναι το κεκλιμένο μήκος κλιτύος, δηλαδή η απόσταση από το σημείο που αρχίζει η περατή περιοχή μέχρι το σημείο που η απορροή απάγεται από το δίκτυο ομβρίων της περιοχής. Από τον χάρτη η απόσταση αυτή θα έχει την τιμή  $x=70$  m. Η μέση τοπογραφική κλίση της περιοχής εκτιμείται κατά μέσο 3%,

οπότε ο συντελεστής  $m$  δίνεται ίσος με 0.35. Η γωνία κλίσης  $\sin\theta$  είναι  $\sin\theta=0.03$ . Οπότε από την εκτέλεση των πράξεων έχουμε  $L= 1.4963$  και  $S=0.26$ .

#### 4.5.4 Οι Συντελεστές Φυτοκάλυψης και Ελέγχου Διάβρωσης - C και P :

Ο συντελεστής φυτοκάλυψης για τη συγκεκριμένη περιοχή τείνει στη μονάδα αφού η φυτοκάλυψη είναι ελάχιστη. Εξάλλου οι καλλιέργειες είναι μηδενικές, οπότε δεν υπάρχει ο συντελεστής ελέγχου διάβρωσης. Εφαρμόζοντας τη Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας έχουμε ότι  $A=1.29 \text{ kg/m}^2$ , οπότε για το 30% περατής επιφάνειας έχουμε ότι η συνολική ετήσια εκτιμώμενη ποσότητα είναι 3560.4 τόννοι.

#### 4.5.5 Εκτιμήσεις Ποσοτήτων Φερτών Από τις Αδιαπέρατες Επιφάνειες :

Οι εκτιμήσεις του φορτίου φερτών από αστικές αδιαπέρατες επιφάνειες είναι εξαιρετικά δύσκολες, λόγω της διάχυτης (μη-σημειακής) παραγωγής των φερτών υλικών. Επομένως δεν υπάρχει μια ντετερμινιστική γραμμική εξίσωση που να δίνει τα φορτία φερτών όπως η Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας. Εμπειρικά μοντέλα υπάρχουν με την προϋπόθεση της συλλογής πολλών μετρήσεων πεδίου. Για παράδειγμα η εξίσωση που δίνει τα μοναδιαία φορτία ρυπαντών (όπως τα αιωρούμενα στερεά) από αδιαπέρατες αστικές επιφάνειες (Sartor and Boyd, 1972) είναι :

$$P = L * CD * A * r \quad (4.11)$$

όπου :  $P$  = Φορτίο Αιωρούμενων Στερεών σε Υπονόμους ( kg / storm)  
 $L$  = Συγκεντρωμένο Φορτίο στο Ρείθρο των Πεζοδρομίων κατά τη Διάρκεια της Προηγούμενης Ξηρής Περιόδου, gr/m  
 $CD$ = Πυκνότητα Ρείθρων Πεζοδρομίου για Δεδομένη Επιφάνεια (m/ha)  
 $A$  = Επιφάνεια Λεκάνης Απορροής (ha)  
 $r$  = Συντελεστής Απορροής

Όπως εύκολα συμπαιρένει κανείς είναι ουσιαστικά αδύνατο να έχει κανείς ανά πάσα στιγμή τις μετρήσεις του συγκεντρωμένου φορτίου στα ρείθρα των πεζοδρομίων για κάθε ξηρή περίοδο.

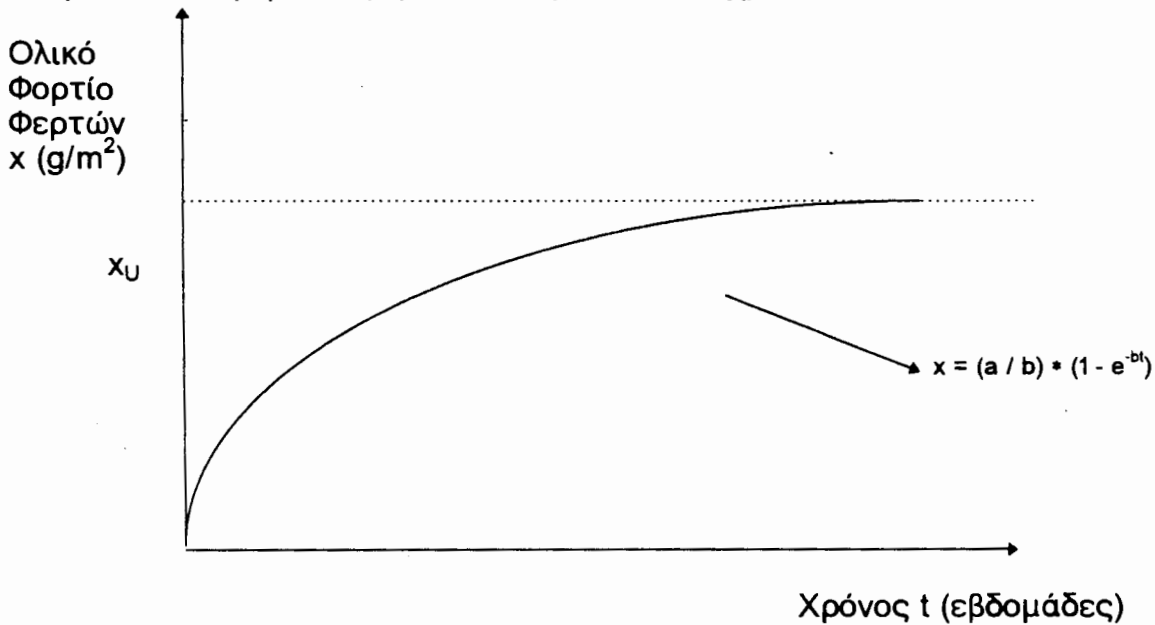
Άλλη μέθοδος που αναφέρεται στο σχεδιασμό των ομβρίων και παντοροικών αγωγών της Μεγάλης Βρετανίας (Butler and Clark, 1993), αναφέρει ότι το αποτιθέμενο υλικό στις αστικές επιφάνειες είναι μια ασυμπτωτική συνάρτηση με μέγιστο την τιμή

$$x_U = a / b \quad (4.12)$$

όπου  $x_U$  είναι το επιφανειακό φορτίο φερτών (surface sediment loading) με μονάδες ( $\text{gr/m}^2$ ),  $a$  είναι ο ρυθμός απόθεσης φερτών στις αστικές επιφάνειες (sediment supply rate) με μονάδες ( $\text{gr/m}^2/\text{week}$ ) και  $b$  είναι μια σταθερά απομάκρυνσης (removal constant) που παριστάνει την αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση των φερτών λόγω της βροχόπτωσης και του καθαρισμού των αστικών επιφανειών. Το επιφανειακό φορτίο φερτών, όπως χουμε δείξει και προηγουμένως, έχει άμεση σχέση με τη προηγούμενη άνυδρη χρονική περίοδο. Η νέα εξίσωση υπολογισμού του επιφανειακού φορτίου φερτών είναι:

$$x = (a / b) * (1 - e^{-bt}) \quad (4.13)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ακριβώς η ασυμπτωτική σχέση του επιφανειακού φορτίου φερτών σε σχέση με το χρόνο:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.11 : Μακράς Διάρκειας Σχηματισμός Επιφανειακών Αποθέσεων Φερτών (Butler and Clark, 1993)

Επομένως αναζητείται μια εναλλακτική λύση με τιμές όμως όχι για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο, αλλά ετήσιες τιμές που θα επιτρέπουν και πιο μακροπρόθεσμες προβλέψεις. Μετρήσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων στερεών στη συγκεκριμένη υπολεκάνη (ελλειπέστατες όμως) έχουν δείξει συγκεντρώσεις γύρω στα 855 mg/lit. Από πρόσφατη διπλωματική εργασία (Β. Γκόγκος. “Ρυπαντικό Φορτίο Αστικής Απορροής, ΕΜΠ, 1995), έχουν βρεθεί συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών για άλλες υπολεκάνες απορροής της Αθήνας γύρω στα 415 mg/lit. Εξάλλου πιο πρόσφατη διπλωματική εργασία (Ε. Μπούτσικου. “Εκτίμηση Ρυπαντικού Φορτίου Απορροής Αστικής Λεκάνης”, ΕΜΠ, 1995) εκτίμησε τη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών γύρω στα 600 mg/lit. Θεωρούμε επομένως μια μέση τιμή των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων στερεών στην αστική απορροή ίση με 500 mg/lit. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην περιοχή είναι 400 mm και αν δεχθούμε 10 ημέρες συνολικές βροχοπτώσεις, τότε η μέση ετήσια ένταση βροχόπτωσης είναι  $i = 2 \text{ mm/hr}$ . Επομένως η μέση ετήσια πλημμυρική απορροή είναι :

$$Q = c * i * A \tag{4.14}$$

όπου  $c = 0.95 * 0.60 = 0.57$ , για τηναδιαπέρατη αστική περιοχή, δηλαδή για το 70% της συνολικής επιφάνειας. Το γινόμενο του συντελεστή απορροής οφείλεται στο σχεδιαστικό μέρος της καλυμμένης επιφάνειας και το συντελεστή 0.60 που ανάγει την επίδραση της μέσης βροχόπτωσης. Οπότε με την αναγωγή των δέκα ημερών συνολικών βροχοπτώσεων έχουμε τη συνολική ετήσια εκτίμηση για τα αιωρούμενα στερεά στη υπολεκάνη απορροής K27. Μετά από πράξεις στο απλό εμπειρικό μοντέλο βρίσκουμε ότι η ετήσια ποσότητα αιωρούμενων στερεών αποκλειστικά από την αστική περιοχή ανέρχονται σε 602.78 τόννους.

Είναι ευνόητο όμως ότι δεν θα εισέλθει όλη αυτή η ποσότητα στο δίκτυο ομβρίων, αφού διάφορες ποσότητες θα εναποτεθούν ξανά στις αστικές

επιφάνειες και ενδέχεται να αφαιρεθούν από τα συνεργεία καθαρισμού των δρόμων. Επίσης άλλες μεγάλες ποσότητες θα κατακρατηθούν από τους αμμοσυλλέκτες των φρεατίων υδροσυλλογής (κυρίως το υλικό που μετακινείται ως συρτικό φορτίο). Αυτές οι ποσότητες που δεν βρίσκουν πρόσβαση στο δίκτυο ομβρίων εκτιμώνται με τη χρήση του συντελεστή κατανομής DR (Delivery Ratio Factor). Η τιμή του συντελεστή κατανομής DR εξαρτάται από την καλή λειτουργία των φρεατίων υδροσυλλογής, από την αποτελεσματικότητα των μεθόδων καθαρισμού και φυσικά από το πολιτισμικό επίπεδο των κατοίκων της περιοχής, που άλλωστε είναι και οι χρήστες του δικτύου. Εξάλλου από τη συνολική μάζα των στερεών υπάρχουν συντελεστές που ονομάζονται Δυναμικοί Συντελεστές (Potency Factors), που συσχετίζουν κάθε διαφορετικό ρυπαντή με τη ποσότητα των στερεών.

Σε σύνολο έχουμε περίπου 4163.2 τόννους φερτών υλικών ετησίως, που αποτελούν μια τεράστια ποσότητα που απαιτεί μια ολοκληρωμένη μελέτη διαχείρισης και ελέγχου των μη σημειακών πηγών φερτών υλικών. όσο μεγαλύτερες οι ποσότητες των φερτών υλών που παράγονται και εισρέουν στο δίκτυο, τόσο μεγαλύτερες είναι οι πιθανότητες δημιουργίας αποθέσεων. Φυσικά, η πιο πάνω μελέτη έχει μόνο προσεγγιστικό χαρακτήρα και έχει ως σκοπό την παρουσίαση ως τάξη μεγέθους των ετήσιων φορτίων φερτών.

#### 4.6 Συνέπειες των Αποθέσεων στην Υδραυλική Λειτουργία

Η παρουσία των φερτών υλικών στη ροή των υπονόμευων μπορεί να επηρεάσει την απαιτούμενη υδραυλική κλίση για τη συνέχεια της ροής. Στην περίπτωση της στερεομεταφοράς σε έναν καθαρό αγωγό χωρίς αποθέσεις, η παρουσία φερτών στη ροή (σε αιώρηση ή σε συρτικό φορτίο) μπορεί να προκαλέσει μια μικρή αύξηση των απωλειών ενέργειας της ροής. Πειραματικές μετρήσεις με λείους αγωγούς (CIRIA, 1994), έδειξαν ότι η αύξηση της υδραυλικής κλίσης στο όριο της απόθεσης είναι περίπου 7% σε σχέση με την αντίστοιχη ροή χωρίς φερτά υλικά. Για τραχείς αγωγούς η αύξηση είναι μόνο 2%. Σε ταχύτητες ροής μεγαλύτερες από εκείνες στο όριο της απόθεσης οι απώλειες ενέργειας είναι ακόμα μικρότερες.

Για ροή σε αγωγούς με αποθέσεις, οι απώλειες ενέργειας σε σχέση με τη μετακίνηση των φερτών υλικών, είναι λιγότερο σημαντικές, λόγω της επίδρασης δύο αντίθετων φαινομένων στην παροχетеυτικότητα των αγωγών. Πρώτον, οι αποθέσεις μειώνουν τη διατιθέμενη εγκάρσια επιφάνεια ροής και επομένως αυξάνουν την ταχύτητα ροής (για δεδομένη παροχή) και τις απώλειες ενέργειας (μόνο για τους αγωγούς πλήρους πλήρωσης). Η απώλεια της επιφάνειας ροής είναι σχετικά μικρή (2%), για βάθη των αποθέσεων έως και 5% της διαμέτρου των κυκλικών αγωγών, αλλά αυξάνεται και γίνεται σημαντική για βάθος απόθεσης πάνω του 10%.

Δεύτερον και περισσότερο σημαντικό είναι ότι έχουμε μια σημαντική αύξηση της συνολικής τραχύτητας του αγωγού λόγω της τραχείας υφής των αποθέσεων. Πάνω από την έναρξη της μετακίνησης, η απόθεση δημιουργεί ρυτίδες και δίνες, τα μεγέθη των οποίων αυξάνονται όσο αυξάνεται και η ταχύτητα ροής. Η τραχύτητα πυθμένα των δινών (το  $k_s$  στον τύπο Colebrook-White) μπορεί να φθάσει σε τιμές που ξεπερνούν και το 10% της διαμέτρου του αγωγού. Κάτω από τέτοιες συνθήκες, αποθέσεις με βάθος που φθάνει το 5% της διαμέτρου με σχηματισμό δινών τυπικά μειώνει την παροχетеυτικότητα ενός αγωγού με ολική πλήρωση περίπου στο 10 - 20% , επιπροσθέτως στη μείωση 2% λόγω της μείωσης της επιφάνειας ροής. Οι παραπάνω ποσοστιαίες εκτιμήσεις αφορούν μόνο αγωγούς με ολική πλήρωση. Με μερική πλήρωση είναι πολύ δύσκολη η αναφορά τέτοιων εκτιμήσεων. Σημαντική επίδραση γενικά προκύπτει

και από την αύξηση της κλίσης πυθμένα λόγω των χονδροκόκκων αποθέσεων. Πάντως σε σημαντικά μεγαλύτερες ταχύτητες οι δίνες χάνουν την τραχύτητα των χαρακτηριστικών τους και η τραχύτητα της ροής προκύπτει μόνο από το μέγεθος των στερεών κόκκων της απόθεσης. Επομένως η απώλεια της παροχτευτικότητας διαφέρει σημαντικά με τις συνθήκες της ροής.

Αν ένας αγωγός αρχικά χωρίς αποθέσεις μεταφέρει ροή με φερτά υλικά, αλλά οι συνθήκες δεν είναι ικανές ώστε να αποφευχθεί η απόθεση, η ανάπτυξη της απόθεσης θα αυξήσει την τραχύτητα του αγωγού καθώς και θα μειώσει την ταχύτητα λόγω αύξησης του βάθους ροής (και μείωση της υδραυλικής ακτίνας στους αγωγούς μερικής πλήρωσης). Τα δύο πιθανά σενάρια, κατά τους ξένους μελετητές, είναι :

1. Η μείωση της ταχύτητας ροής οδηγεί σε μείωση της στερεομεταφορικής ικανότητας της ροής και οδηγεί σε παραπέρα αποθέσεις. Τελικά το βάθος της απόθεσης θα αυξηθεί έως ότου θα έχουμε ροή ολικής πλήρωσης ή ακόμα ροή υπό πίεση. Αν η ενέργεια της ροής επαρκεί τότε θα έχουμε μια ισορροπία μεταξύ του υλικού που αποτίθεται και του υλικού που επαναμετακινείται. Αν όμως η ενέργεια της ροής συνεχίζει να είναι μικρή, τότε θα έχουμε νέες αποθέσεις που σε μεγάλη έκταση θα οδηγήσουν στο φράξιμο της διατομής. Συνήθως όμως δεν παρατηρείται φράξιμο των αγωγών εκτός από σπάνιες και πολύ σοβαρές περιπτώσεις.
2. Η παρουσία στρώματος απόθεσης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της στερεομεταφοράς που να εξισορροπεί τη μείωση της ταχύτητας ροής λόγω της αύξησης της τραχύτητας του πυθμένα. Επομένως, η ισορροπία αυτή μπορεί να οδηγήσει στη σταθεροποίηση των αποθέσεων.

Το δεύτερο ενδεχόμενο κατά τους ξένους μελετητές δεν φαίνεται από υδραυλική άποψη, να έχει νόημα τη στιγμή που η δημιουργία μόνιμου πυθμενικού στρώματος προκαλεί μείωση της υδραυλικής ακτίνας, οπότε και μείωση της ταχύτητας ροής και κατά συνέπεια αναμφισβήτητη μείωση της στερεομεταφορικής ικανότητας. Επομένως η πραγματοποίηση του δεύτερου σεναρίου φαίνεται απίθανο να συμβεί. Αντίθετα, το πρώτο σενάριο είναι το πλέον επικρατέστερο αφού η ταχύτητα ροής εξαρτάται μόνο από το ύψος ενέργειας της ροής.

Στις αποθέσεις που παρατηρήθηκαν στη μελέτη μας, λόγω του πολύ μικρού χρονικού διαστήματος μελέτης, δεν μπορούμε να ξέρουμε σε πιά περίπτωση ανήκουν. Πάντως, οι εκτεταμένες αποθέσεις στην εκβολή του Κηφισσού δείχνουν ότι το φαινόμενο βρίσκεται σε εξέλιξη. Πάντως, οι μεγάλες διακυμάνσεις στη ροή και στη στερεοπαροχή, ακόμα και στο ίδιο πλημμυρικό γεγονός, δείχνουν την ανάγκη να σκεφτόμαστε σε όρους δυναμικής προσομοίωσης μακράς διάρκειας του φαινομένου (long term dynamic simulation).

#### 4.6.1. Επιπτώσεις των Αποθέσεων στην Τιμή της Υδραυλικής Τραχύτητας

Η μορφή της απόθεσης και επομένως η τιμή της τραχύτητας εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων, τη πυκνότητα και τη συγκέντρωσή τους, την ταχύτητα ροής, το μέγεθος του αγωγού και το βάθος ροής. Οι διακυμάνσεις στην υδραυλική τραχύτητα είναι σημαντικές εξαρτημένου αν το στρώμα της απόθεσης είναι επίπεδο ή με ρυτίδες και δίνες. Στην επίπεδη απόθεση η τραχύτητα οφείλεται στο μέγεθος των κόκκων ενώ στις συνθήκες με ρυτίδες και δίνες η τραχύτητα του πυθμένα μπορεί να φθάσει και στο 20% της διαμέτρου του αγωγού. Για την περίπτωση δινών και ρυτίδων, η μέγιστη τραχύτητα του πυθμένα ορίζεται από εργαστηριακές μετρήσεις, για ροή με ολική πλήρωση, του HR Wallingford (May, 1993) από τη σχέση :

$$k_b = 5.62 * R^{0.61} * d_{50}^{0.39} \quad (4.15)$$

ενω, για ροή με ολική πλήρωση του αγωγού, έχουμε :

$$k_b = 2.41 * D^{0.61} * d_{50}^{0.39} \quad (4.16)$$

Φαίνεται επομένως ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάσταση των σωματιδίων της απόθεσης τόσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα πυθμένα. Στον επόμενο Πίνακα 4.6 βλέπουμε τις μέγιστες τιμές του  $k_b$  για κυκλικούς αγωγούς με στρώμα απόθεσης και με ολική πλήρωση.

Διάμετρος Αγωγού σε mm	Τραχύτητα Πυθμένα Απόθεσης $k_b$ (mm)
300	80
600	120
900	150
1500	210
2100	260
3000	320
4000	380
5000	430

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6.: Εκτιμώμενες Μέγιστες Τραχύτητες Πυθμένα με Διαστάσεις Υλικού Πυθμένα  $d=1mm$

Στον επόμενο Πίνακα 4.7. φαίνονται τα αποτελέσματα στη ροή κυκλικού αγωγού με ολικήπλήρωση και με στρώμα απόθεσης που φθάνει και μέχρι 10% της διαμέτρου του αγωγού. Οι μειώσεις που φαίνονται στον Πίνακα 4.7. οφείλονται μόνο στην απώλεια επιφάνειας ροής και όχι στην τραχύτητα του πυθμένα της απόθεσης.

Βάθος Απόθεσης σε % της διαμέτρου αγωγού	Επιφάνεια ροής σε αναλογία με τη συνολική επιφάνεια	Υδραυλική ακτίνα σε αναλογία με την πλήρη	Συντελεστής Παροχτευτικότητ ας
0	1.000	1.000	1.000
1	0.998	0.999	0.997
2	0.995	0.996	0.993
3	0.991	0.993	0.987
4	0.987	0.990	0.980
5	0.981	0.986	0.973
6	0.976	0.982	0.964
8	0.963	0.972	0.946
10	0.948	0.961	0.925

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: Γεωμετρικές Ιδιότητες Αγωγών Ολικής Πλήρωσης με Στρώμα Απόθεσης

Όπως μπορεί κανείς να δει από τον παραπάνω Πίνακα 4.7. η επίδραση του βάθους απόθεσης για 1 - 2% είναι ασήμαντη, ενώ ακόμα μέχρι και 10% οι επιδράσεις είναι αρκετά μικρές. Βέβαια στις παραπάνω τιμές δεν έχουν

υπολογιστεί η επίδραση στη μείωση της παροχτετευτικότητας της τραχύτητας των αποθέσεων.

#### 4.7 Συμπεράσματα

Από τη μελέτη του δικτύου της θεωρούμενης υπολεκάνης διαπιστώνουμε ότι γενικά υπάρχει πρόβλημα με τις αποθέσεις των φερτών υλικών. Σε μία περίπτωση οι αποθέσεις ξεπέρασαν σε βάθος τα 50 εκατοστά δηλαδή σε ποσοστό το 25% του ύψους της διατομής. Ερευνήθηκαν τα αίτια σχηματισμού των αποθέσεων και βγήκαν συμπεράσματα για τη δομή των αποθέσεων ενώ έγιναν μετρήσεις για την καλύτερη κατάταξη των αποθέσεων με διάφορους παράγοντες. Παγκόσμια ιδιαιτερότητα αποτελεί η ύπαρξη πολύ λεπτόκοκκων αποθέσεων σε αγωγούς ομβρίων που ονομάστηκε “επιφανειακό υγρό στρώμα” και η πιο ολοκληρωμένη μελέτη τους θα δώσει χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των αποθέσεων αυτών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΠΟΝΟΜΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ

*" ... Η κατηγορία της "πολυπλοκότητας" είναι θεμελιωμένη ουσιαστικά σε τρεις εννοιολογικές βάσεις. . . Η τρίτη εννοιολογική βάση είναι η αναγνώριση της αναγκαίας συμπαρουσίας του τυχαίου συμβάντος και του κανόνα, του θορύβου και του σήματος, σε κάθε σύστημα που είναι ικανό για οργάνωση και ομοίωση. . ."*

*Marcelo Cini : " Επιστήμη και Αυτοσυντηρούμενη Κοινωνία"*



## 5.1. Γενικές Εισαγωγικές Έννοιες.

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσπαθήσουμε να δώσουμε έναν υποτυπώδη σχεδιαστικό κανόνα για την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων που προκύπτουν από το σχηματισμό των αποθέσεων. Επίσης, θα εξετάσουμε τους διεθνείς και τους Ελληνικούς κανονισμούς και θα επισημάνουμε τα αρνητικά, κατά τη γνώμη μας, σημεία που χρειάζονται αλλαγή και πως αυτά μπορούν να μεταβληθούν. Επίσης αφού έχουμε εξετάσει τις αιτίες που δημιουργήσαν τα προβλήματα στο προηγούμενο Κεφάλαιο, εδώ θα προτείνουμε συγκεκριμένες σχεδιαστικές λύσεις ώστε να μην δημιουργηθούν αποθέσεις. Πιστεύουμε, ότι το Κεφάλαιο αυτό είναι πολύ σημαντικό αφού μπορεί να δώσει το έναυσμα για τη μελέτη των φαινομένων και την έκδοση νέων σύγχρονων Ελληνικών κανονισμών.

## 5.2. Υπάρχουσες Σχεδιαστικές Πρακτικές

Θα εξετάσουμε τους σχεδιαστικούς κανονισμούς που ισχύουν στην Ελλάδα και στη Μ. Βρετανία.

**5.2.1. Οι Ελληνικοί Κανονισμοί :** Για τη διαστασιολόγηση των αγωγών αποχέτευσης, ώστε να μην δημιουργούνται αποθέσεις, οι Ελληνικοί κανονισμοί (ΠΔ 696, 1974) προτιμούν την παράθεση των ελαχίστων κλίσεων, οι οποίες θα εξασφαλίζουν επαρκή ταχύτητα αυτοκαθαρισμού (self-cleansing velocity). Οι Ελληνικές προδιαγραφές συνιστούν οι ελάχιστες κλίσεις των αγωγών να καθορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η ταχύτητα που αντιστοιχεί στο 10% της παροχετευτικότητας του αγωγού ( $Q/Q_0=0.10$ ) να υπερβαίνει τα 0.30 m/sec για τους αγωγούς ακαθάρτων και τα 0.60 m/sec για τους αγωγούς ομβρίων. Επομένως για κυκλικούς αγωγούς για  $Q/Q_0=0.10$  και για μεταβλητό συντελεστή τραχύτητας  $n$  ισχύει ότι  $V/V_0 = 0.54$  (ή 0.64 για σταθερό συντελεστή τραχύτητας), οπότε οι πιο πάνω ελάχιστες ταχύτητες αντιστοιχούν σε ταχύτητες πλήρωσης  $V_0 = 0.56$  m/sec για αγωγούς ακαθάρτων και σε  $V_0 = 1.11$  m/sec για τους αγωγούς ομβρίων. Για κυκλικούς αγωγούς και από τη σχέση

$$V_0 = (1 / n_0) * (D / 4)^{2/3} * J^{1/2} \quad (5.1)$$

έχουμε τον παρακάτω Πίνακα 5.1 των εφαρμοστέων ελάχιστων κλίσεων. (Κουτσογιάννης, 1993). Επισημαίνεται (Κουτσογιάννης, 1993) ότι όπου οι κλίσεις πυθμένα υπολογίζονται με κλίσεις μικρότερες του 0.1% οι αγωγοί θα πρέπει να τοποθετούνται με την ελάχιστη κλίση των 0.1%, γιατί η πρακτική εφαρμογή τέτοιων κλίσεων είναι πολύ δύσκολη και κάποια διαφορική καθίζηση να δημιουργηθεί με το πέρασμα του χρόνου μπορεί να δημιουργήσει κλίση πυθμένα αντίθετα στη ροή, οπότε όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 3, να δημιουργούνται αποθέσεις.

Επίσης οι ελάχιστες κλίσεις είναι μεγαλύτερες (όπως και οι ελάχιστες ταχύτητες) στους αγωγούς ομβρίων σε σχέση με τους αγωγούς ακαθάρτων. Αυτό συμβαίνει γιατί τα φερτά υλικά στους αγωγούς ομβρίων έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις και μεγαλύτερη πυκνότητα, οπότε θα χρειάζονται μεγαλύτερη ελάχιστη ταχύτητα για να διασφαλιστεί η μετακίνηση των φερτών υλικών.

Αγωγοί Ομβρίων ( $V_0=1.11\text{m/sec}$  και τραχύτητα  $n_0=0.015$ )

Διάμετρος (cm)	Ελάχιστη Κλίση (m/km)	Επιτρεπόμενη Πλήρωση (y/D)	ντίστοιχη Παροχή (lt/sec)
20	-	-	-
25	-	-	-
30	-	-	-
35	-	-	-
40	6.0	0.7	99.0
50	4.4	0.7	155
60	3.5	0.7	225
70	2.8	0.7	303
80	2.4	0.7	396
90	2.0	0.7	501
100	1.8	0.7	619
110	1.6	0.7	749
120	1.4	0.7	891
130	1.2	0.7	1046
140	1.1	0.7	1213
150	1.0	0.7	1393
160	0.94 (1.0)	0.7	1584(1624)
180	0.80 (1.0)	0.7	2005(2237)
200	0.70 (1.0)	0.7	2476(2962)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1. : Εφαρμοστές Ελάχιστες Κλίσεις για Αγωγούς Ομβρίων

Όπως φαίνεται, οι ελληνικές προδιαγραφές είναι μάλλον απαρχαιωμένοι καθώς δεν λαμβάνουν υπόψιν τους πολλές παραμέτρους που αναλύθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο όπως η σύσταση των φερτών υλικών, το μέγεθός τους και την πυκνότητά τους. Επίσης δεν κάνει μνεία της διαφοροποίησης μεταξύ αιωρούμενου και συρτικού φορτίου, ούτε καταλήγει σε μαθηματικές σχέσεις για τον ορισμό της κρίσιμης συρτικής τάσης. Εξάλλου δεν αναφέρει τι γίνεται σε περιπτώσεις που παρελπίδα σχηματισθούν αποθέσεις σε αγωγούς που υποτίθεται ότι κατασκευάσθηκαν σύμφωνα με το κριτήριο της ταχύτητας αυτοκαθαρισμού. Για παράδειγμα ο αγωγός στην οδό Λεβέντη παρουσίασε αποθέσεις αν και η κλίση πυθμένα είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη κλίση που φαίνεται στον παραπάνω Πίνακα. Κλίση αγωγού με  $D=0.70$  μέτρα είναι 0.004 ενώ η ελάχιστη κλίση είναι 0.0028. Όπως έχουμε ήδη δείξει από τη στιγμή που θα σχηματισθεί ένα στρώμα απόθεσης οποιεσδήποτε αρχικές συνθήκες αυτοκαθαρισμού καταργούνται στην πράξη, αφού η ροή είναι τώρα εντελώς διαφορετική από εκείνη του σχεδιασμού. Αυτό που χρειάζεται επομένως είναι η έρευνα που θα καταλήξει σε νέους κανονισμούς για το σχεδιασμό των αγωγών ομβρίων.

5.2.2. Στοιχεία των Αγγλικών Κανονισμών. : Για το σχεδιασμό των αυτοκαθαριζόμενων αγωγών χρησιμοποιείται ευρύτατα η ελάχιστη ταχύτητα ροής (minimum flow velocity)  $V_m$ . Η ελάχιστη ταχύτητα ροής πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα που αντιστοιχεί στην έναρξη της μετακίνησης (threshold velocity)  $V_t$ . Στην ταχύτητα αυτή δεν υπάρχει καμία μετακίνηση

φερτών σε αντίθεση με τη ελάχιστη ταχύτητα ροής που η μετακίνηση των φερτών υλών γίνεται χωρίς τη δημιουργία απόθεσης. Και πάλι εδώ, όπως και στους δικούς μας κανονισμούς, στον ορισμό αυτών των ταχυτήτων δεν συμμετέχουν σημαντικές παράμετροι όπως η ποιότητα των φερτών υλικών και η διάμετρος των αγωγών. Σε αντίθεση ο διαφοροποιημένος τύπος του Shields δίνει τιμή της ελάχιστης ταχύτητας ροής σε συνάρτηση με τις φυσικές ιδιότητες των φερτών υλικών. Ο μετασχηματισμός έχει ως εξής:

$$\tau_{mc} = \beta g (\rho_s - \rho) d_s \quad (5.2)$$

Για συνθήκες αυτοκαθαρισμού θα πρέπει να είναι  $\tau_{mc} = \tau_m$ , όπου η τελευταία συρτική τάση προκύπτει φυσικά από το νόμο του Manning. Από τη (5.1) και (5.2) έχουμε

$$R i = \beta ((\rho_s - \rho) / \rho) d_s \quad (5.3)$$

Σε συνδυασμό με την εξίσωση του Chezy (5.4)

$$V = C (R i)^{1/2} \quad (5.4)$$

και αν χρησιμοποιήσουμε τον τύπο του Darcy - Weisbach, ο συντελεστής Chezy δίνεται από τη σχέση  $C = (8g / f)^{1/2}$ , οπότε και η τελική διαφοροποιημένη μορφή του νόμου του Shields είναι :

$$V_m = [ 8 g \beta (s - 1) d / f ]^{1/2} \quad (5.5)$$

όπου  $s$  και  $d$  είναι ο λόγος των πυκνοτήτων των φερτών και του νερού και το μέσο μέγεθος των φερτών αντίστοιχα και  $f$  ο συντελεστής τριβής του Darcy - Weisbach.

Ο συντελεστής  $\beta$  όπως έχουμε δείξει και στο Κεφάλαιο 2 είναι ίσον με 0.04 που αντιστοιχεί στην έναρξη της μετακίνησης και 0.8 που αντιστοιχεί στην ταχύτητα αυτοκαθαρισμού. Επομένως, έχουμε ότι

$$V_m = (0.8 / 0.04)^{1/2} * V_t = 4.5 V_t \quad (5.6)$$

Παρόλη τη σαφή βελτίωση των συνθηκών, μένουν χωρίς υπολογισμό και άλλες παράμετροι όπως η συγκέντρωση των φερτών και η διάμετρος του αγωγού.

Τέλος, ο τύπος του Shields για την ελάχιστη ταχύτητα ροής δίνει και την ελάχιστη συρτική τάση  $\tau_m$ , η οποία, όπως δείξαμε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, προτιμείται σαν σχεδιαστικό μέγεθος λόγω του ότι σχετίζεται πιο άμεσα σε σχέση με την ταχύτητα ροής με τις δυνάμεις που προκαλούν μετακίνηση των φερτών. Η μέση τιμή της συρτικής τάσης που ασκείται στην βρεχόμενη περίμετρο δίνεται από τη γνωστή σχέση

$$\tau = \gamma * R * i \quad (5.7)$$

Για τη μετακίνηση των αιωρούμενων στερεών η προηγούμενη τιμή της συρτικής τάσης είναι η πιο κατάλληλη. Όμως για τη μεταφορά με συρτικό φορτίο η πιο κατάλληλη τιμή της συρτικής τάσης είναι εκείνη που αντιστοιχεί στον πυθμένα του αγωγού, δηλαδή η συρτική τάση πυθμένα  $\tau_b$ . Η διαφορά έγκειται στην υδραυλική ακτίνα που στην περίπτωση της συρτικής τάσης πυθμένα, είναι

αντίστοιχη της συρτικής επιφάνειας. Για μια δεδομένη ροή, η συρτική τάση πυθμένα μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την μέση συρτική τάση και η σχέση μεταξύ των δύο τάσεων εξαρτάται από το μέγεθος των στερεών και από το ποσοστό της βρεχόμενης περιμέτρου που καταλαμβάνει το συρτικό φορτίο. Στην περίπτωση της ελάχιστης ταχύτητας ροής η μέση συρτική τάση θα πρέπει να ξεπερνά την κρίσιμη συρτική τάση και μάλιστα θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερες ώστε να εξασφαλισθεί ο αυτοκαθαρισμός. Ο Yao (1974) μέτρησε τις μεταβολές των συρτικών τάσεων στη περίμετρο κυκλικών αγωγών με μερική πλήρωση. Βρήκε λοιπόν ότι οι συρτικές τάσεις πυθμένα είναι πάντα μεγαλύτερες από τις μέσες συρτικές τάσεις και η ακτίνα των συρτικών τάσεων αυτοκαθαρισμού πρέπει να είναι στην ακτίνα μεταξύ 1 - 4 Nt/m<sup>2</sup>. Εκτιμήθηκε επίσης ότι το κύριο πρόβλημα για το σχεδιασμό των κυκλικών αγωγών είναι η σχετικά πλατιά περιοχή κοντά στον πυθμένα, αφού σε βάθος 10% της διαμέτρου του αγωγού εμφανίζονται οι περισσότερες αποθέσεις. Ο Lysne (1969) εκτίμησε από το διάγραμμα του Shields ότι οι συρτικές τάσεις αυτοκαθαρισμού δεν ξεπερνούν τα 4 Nt/m<sup>2</sup>.

Η ορθότερη σχέση πάντως είναι πάλι ο διαφοροποιημένος τύπος του Shields (ASCE / WPCF, 1970) , που δίνει τη σχέση

$$\tau_m = \gamma \beta (s - 1) d \quad (5.8)$$

Για  $\beta = 0.80$  και για ειδική πυκνότητα  $S=2.6$  η απαιτούμενη συρτική τάση θα είναι 1.26 Nt/m<sup>2</sup> για φερτά υλικά 100 μm ενώ θα είναι 12.6 Nt/m<sup>2</sup> για φερτά διαστάσεων 1 mm. Για την απόθεση της οδού Λεβέντη έχουμε ότι  $d_{50} = 0.155$  mm επομένως η ελάχιστη συρτική τάση θα είναι 1.95 Nt/m<sup>2</sup>. Όπως, όμως διαπιστώσαμε από την ανάλυση του προηγούμενου Κεφαλαίου φαίνεται ότι η ελάχιστη συρτική τάση της απόθεσης στην οδό Λεβέντη είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή που προκύπτει από τον τύπο του Shields. Γενικά, διαπιστώνουμε ότι ο νόμος του Shields δίνει υποεκτιμημένες τιμές των ελάχιστων (οριακών) τιμών των συρτικών τάσεων. Μια εξήγηση του φαινομένου είναι ότι οι αποθέσεις έχουν αναπτύξει συσσωματώσιμα χαρακτηριστικά. Αντιθέτως όμως για την απόθεση της οδού Πτολεμαΐδος η ελάχιστη συρτική τάση φαίνεται να δίνεται ικανοποιητικά από το νόμο του Shields, αν και δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι για τα ακριβή μεγέθη. Πάντως ισχύει η γενική τάση ότι ο νόμος του Shields δίνει υποεκτιμημένες τιμές της ελάχιστης συρτικής τάσης ενώ οι διαφορές μειώνονται όσο αυξάνει η μέση διάσταση των στερεών της απόθεσης.

### 5.3. Σύγχρονες Αντιλήψεις στο Σχεδιασμό των Δικτύων.

Οι σύγχρονες αντιλήψεις για το σχεδιασμό των δικτύων αποχέτευσης εμπεριέχουν και την έννοια της οικονομικότητας. Για παράδειγμα μπορεί να τοποθετήσουμε τους αγωγούς σε περιοχές με μικρή κλίση εδάφους με μεγάλη κλίση ώστε πρακτικά να μην έχουμε αποθέσεις, επομένως ούτε έξοδα καθαρισμού των αγωγών, αλλά θα έχουμε αυξημένα έξοδα λόγω του μεγάλου βάθους εκσκαφής αλλά και της ενδεχόμενης άντλησης των πλημμυρικών υδάτων στις εκβολές τους. Αντίθετα τοποθέτηση μικρής κλίσης θα δημιουργήσει προβλήματα από τις αποθέσεις αλλά θα έχει μειωμένο κόστος λόγω του μικρού απαιτούμενου βάθους εκσκαφής.

Η συζήτηση που θα ακολουθήσει παρακάτω προέρχεται από επαφές και συζητήσεις του υπογράφοντος με Άγγλους ερευνητές και κυρίως με τον R.M.

Ashley. Οι κύριες διαφορές των σύγχρονων αντιλήψεων σε σχέση με την παραδοσιακή αντίληψη της ελάχιστης ταχύτητας είναι :

1. Το κριτήριο της ελάχιστης ταχύτητας δεν αναπαριστάνει επαρκώς την ικανότητα του αγωγού για στερεομεταφορά, είτε χωρίς απόθεση είτε με ένα ελεγχόμενο στρώμα απόθεσης.
2. Η τρέχουσα πρακτική σχεδιασμού δεν θεωρεί τις διαθέσιμες νέες πρακτικές ελέγχου της εισόδου των φερτών ή εναλλακτικά τη σχηματοποίηση αποθέσεων στους αγωγούς.

Οι οικονομικοί παράγοντες είναι σχετικοί στην γενική θεώρηση του σχεδιασμού των δικτύων. Η επόμενη πρόταση ακριβώς αντανakλά την ιδεατή προσέγγιση στο σχεδιασμό των υπονόμων.

*Ένας ικανοποιητικά αυτοκαθαριζόμενος αγωγός είναι εκείνος ο οποίος έχει την στερεομεταφορική ικανότητα που είναι αρκετή για να συντηρήσει μια ισορροπία μεταξύ της απόθεσης και της επαναμετακίνησης και με ένα συνδυασμό χρόνου και μέσου βάθους της απόθεσης που να ελαχιστοποιεί το συνδυασμένο κόστος της κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης των δικτύων. (CIRIA, 1994)*

Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν δύο εναλλακτικές λύσεις όταν σχεδιάζουμε δίκτυα υπονόμων.

- Στερεομεταφορά χωρίς απόθεση
- Στερεομεταφορά με ένα προκαθορισμένο στρώμα απόθεσης

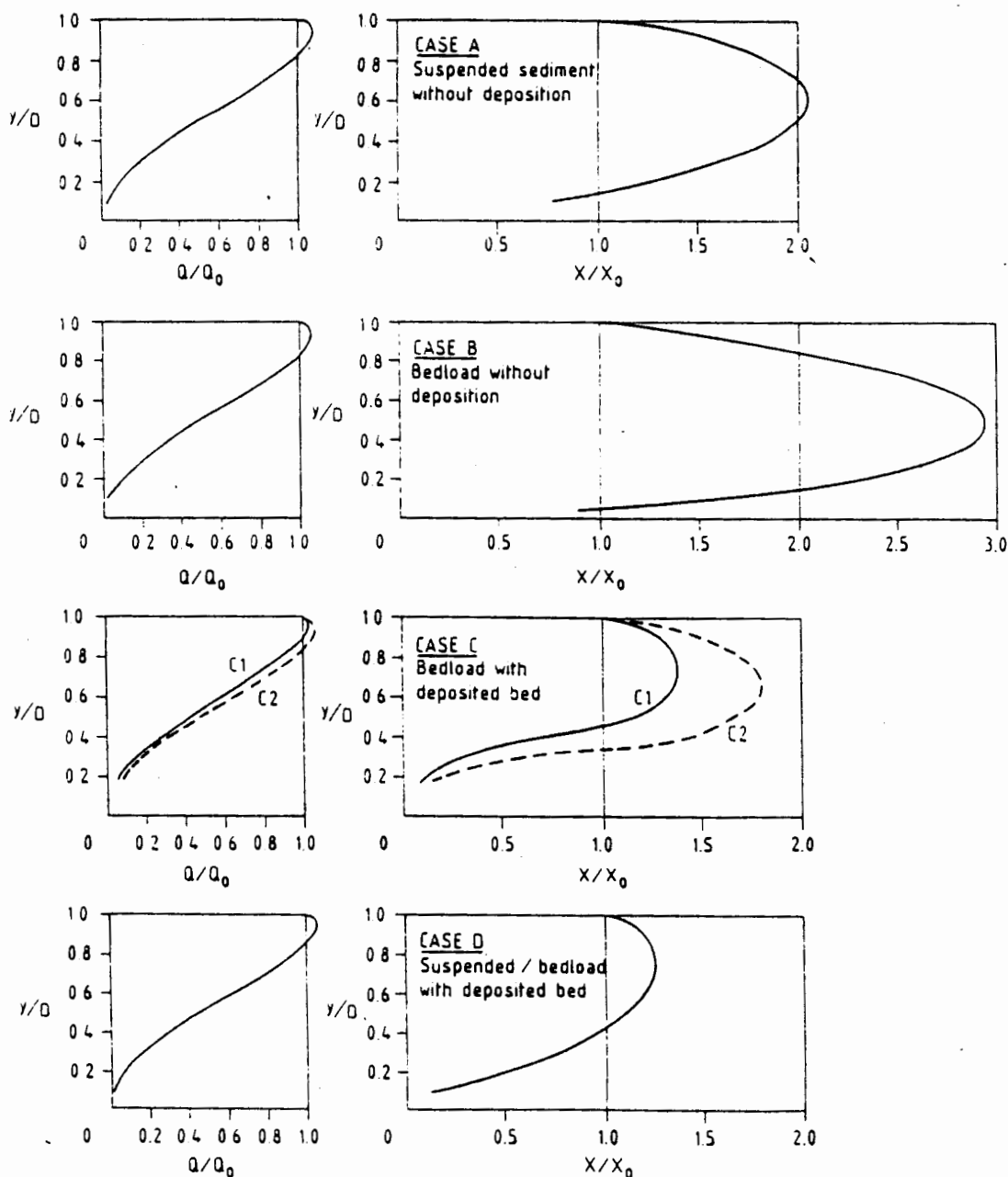
Η πρώτη εναλλακτική λύση που ήδη χρησιμοποιείται είναι ότι δεν επιτρέπονται καθόλου αποθέσεις στον πυθμένα των αγωγών και όλα τα φερτά υλικά θα μετακινούνται είτε ως αιωρούμενο φορτίο (για τα πιο λεπτόκοκκα) είτε ως συρτικό φορτίο (για τα πιο ευμεγέθη υλικά). Οι ελάχιστες ταχύτητες ροής και συρτικές τάσεις θα υπολογισθούν από εξισώσεις που συσχετίζουν το ρυθμό στερεομεταφοράς με τις δεδομένες υδραυλικές συνθήκες στην οριακή στιγμή της απόθεσης. Η σχεδιαστική αυτή προσέγγιση ελαχιστοποιεί την απώλεια της επιφάνειας ροής και την αύξηση της τραχύτητας, αλλά σε αρκετές περιπτώσεις οδηγεί σε αντιοικονομικές και καθόλου πρακτικές κλίσεις των αγωγών.

Η δεύτερη εναλλακτική λύση επιτρέπει το σχηματισμό μιας συγκεκριμένης, προκαθορισμένης και περιορισμένης απόθεσης στον αγωγό, δεδομένου ότι το βάθος της απόθεσης θα παραμένει σταθερό και δεν θα υπερβεί ένα ανεκτό όριο. Η παρουσία της απόθεσης (όπως υποστηρίζουν οι Άγγλοι ερευνητές) θα μειώσει κάπως την επιφάνεια ροής αλλά η αύξηση του πλάτους ροής στο πυθμένα μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της στερεομεταφορικής ικανότητας της ροής και επομένως σε μια πιο οικονομική σχεδίαση από ότι προκύπτει από την πρώτη εναλλακτική λύση. Όπως έχουμε δείξει όμως η παρουσία της απόθεσης μειώνει την ταχύτητα ροής οπότε είναι αδύνατο να οδηγήσει σε αύξηση της στερεομεταφορικής ικανότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί αύξηση του ενεργού πλάτους πυθμένα προκαλεί μείωση της υδραυλικής ακτίνας και κατά συνέπεια της στερεομεταφοράς. Εξάλλου όπως θα δείξουμε παρακάτω οι ωειδείς αγωγοί υπερισχύουν των κυκλικών γιατί είναι πιο στενοί στο κάτω μέρος, οπότε μπορούν να επιτύχουν για δεδομένη παροχή μεγαλύτερες ταχύτητες ροής. **Από το Κεφάλαιο 3 έχουμε δείξει (και επαληθεύει μέχρι ένα βαθμό την οικονομικότητα) ότι η δημιουργία της απόθεσης δημιουργεί ένα νέο πυθμένα του αγωγού που γενικά έχει ενεργό κλίση**

(effective slope) μεγαλύτερη από την κλίση πυθμένα του αγωγού χωρίς αποθέσεις. Επομένως με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται κάπως η στερεομεταφορική ικανότητα. Η οικονομικότητα έχει να κάνει όχι με την απόλυτη στερεομεταφορική ικανότητα η οποία αναμφισβήτητα μειώνεται αλλά με την ανοιγμένη στερεομεταφορική ικανότητα σε σχέση με την ελάχιστη ταχύτητα αυτοκαθαρισμού και την ελάχιστη κλίση του πυθμένα των αγωγών. Για το σχεδιασμό με την επιτρεπόμενη απόθεση χρειαζόμαστε τις εξισώσεις εκείνες που θα ορίζουν το ρυθμό στερεομεταφοράς και την επίδραση της υδραυλικής τραχύτητας στην ταχύτητα της ροής.

Το πλέον σημαντικό που βγαίνει από τη δεύτερη εναλλακτική λύση είναι ότι μπορούμε να επιτρέψουμε μια εκ των προτέρων γνωστή απόθεση που βέβαια θα μειώσει κάπως την στερεοπαροχή, όμως θα είναι σίγουρα πιο οικονομική λύση.

Στο παρακάτω Διάγραμμα 5.1 φαίνονται οι αδιάστατες καμπύλες παροχής και στερεοπαροχής (CIRIA, 1994) σε κυκλικό αγωγό για τέσσερις μορφές στερεομεταφοράς. Αιωρούμενο φορτίο χωρίς αποθέσεις, συρτικό φορτίο χωρίς αποθέσεις, συρτικό φορτίο με αποθέσεις και αιωρούμενο και συρτικό φορτίο μαζί με αποθέσεις.



### ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1. : Αδιάστατες καμπύλες παροχής και στερεοπαροχής για διάφορες μορφές στερεομεταφοράς.

Από το Διάγραμμα 5.1 φαίνεται με το πλέον παραστατικό τρόπο ότι η ύπαρξη αποθέσεων δημιουργεί σημαντική μείωση της στερεομεταφορικής ικανότητας της ροής. Μεγαλύτερη στερεομεταφορική ικανότητα βλέπουμε ότι έχει η ροή με συρτικό φορτίο χωρίς απόθεση (bed load without deposition) ενώ η μικρότερη παρουσιάζεται στη σύγχρονη στερεομεταφορά συρτικού και αιωρούμενου φορτίου με την παρουσία αποθέσεων (suspended / bed load sediments with deposition). Σε όλες τις καμπύλες διαπιστώνουμε ότι η μέγιστη στερεομεταφορική ικανότητα της ροής παρουσιάζεται με μερική πλήρωση του αγωγού. Επομένως, αν διαστασιοποιούμε έναν αγωγό από άποψη στερεομεταφοράς υπό συνθήκες ολικής πλήρωσης (για συγκεκριμένες ποσότητες φερτών σχεδιασμού) τότε ο σχεδιασμός θα είναι υπέρ της ασφαλείας.

Η κάθε φορά βέλτιστη οικονομική λύση εξαρτάται φυσικά από πολλούς παράγοντες, όπως η τοπογραφία της περιοχής, το φορτίο φερτών και οι υδραυλικές συνθήκες ροής και άλλες τοπικές συνθήκες και κόστη υλικών και εργατικών εξόδων.

Ανάλογα τώρα το είδος των αγωγών και του υλικού που μετακινείται σε κάθε αγωγό, τίθενται ορισμένα κριτήρια που οι αυτοκαθαριζόμενοι αγωγοί θα πρέπει να ικανοποιούν. Για τους αγωγούς ομβρίων πιο συγκεκριμένα τα κριτήρια αυτά είναι τα εξής :

1. Οι παροχές των ροών που μεταφέρουν ευμεγέθη κοκκώδη υλικά ως συρτικό φορτίο θα πρέπει να είναι ικανές ώστε να περιορίσουν το βάθος της απόθεσης σε ένα προκαθορισμένο ποσοστό της διαμέτρου των αγωγών.
2. Ροές με μια καθορισμένη περίοδο επαναφοράς  $T$  θα πρέπει να έχουν την ικανότητα να συμπαρασύρουν σωματίδια από ένα στρώμα απόθεσης που ενδεχομένως να έχει αναπτύξει σε κάποιο βαθμό δυνάμεις συσσωμάτωσης.

Τα δύο αυτά κριτήρια ταιριάζουν απόλυτα και στους αγωγούς της μελέτης μας καθώς και στη σύσταση των αποθέσεων. Το πρώτο κριτήριο απαιτεί μια ικανοποιητική εξίσωση στερεομεταφοράς που να συσχετίζεται με τις συνθήκες ροής και με τις φυσικές ιδιότητες των φερτών υλικών. Ακόμα χρειάζεται μια εξίσωση που να προσδιορίζει την τραχύτητα του πυθμένα και τις επιδράσεις του στη ροή. Εξάλλου το μέσο βάθος της απόθεσης θα πρέπει να προσδιοριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε τη βέλτιστη οικονομικά λύση.

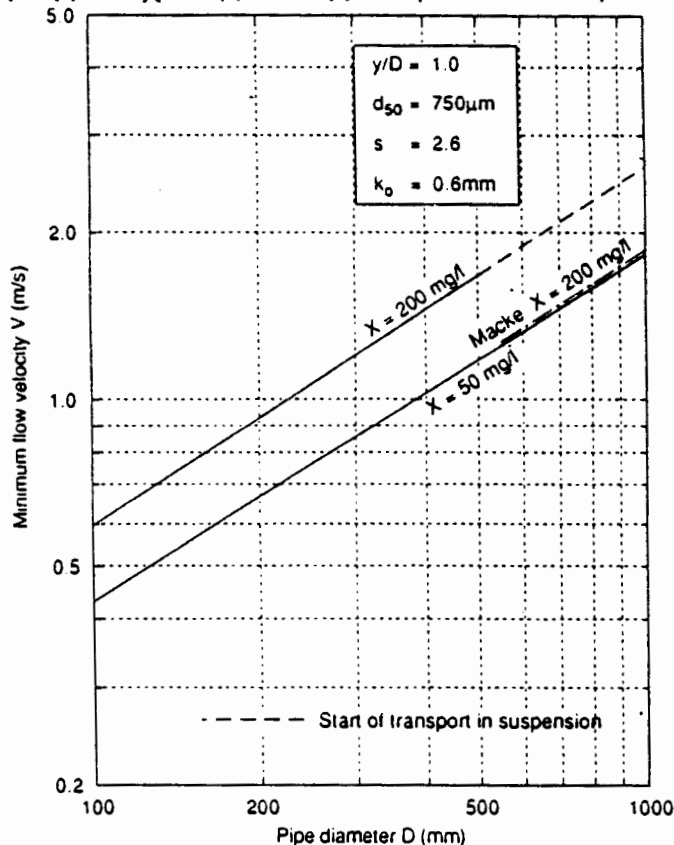
Το δεύτερο κριτήριο, όπως έχουμε ήδη δείξει και στο προηγούμενο Κεφάλαιο (συγκεκριμένα στην απόθεση της οδού Λεβέντη), αφορά τις ελάχιστες συρτικές τάσεις για τη διάβρωση τέτοιων λεπτόκοκκων οργανικών αποθέσεων. Το υλικό που αποπλύθηκε και στην προηγούμενη απόθεση ήταν οργανικό λεπτόκοκκο υλικό που βρισκόταν στην επιφάνεια του στρώματος της απόθεσης.

#### 5.3.1. Μεταφορά με Συρτικό Φορτίο (Κριτήριο 1)

##### *Στερεομεταφορά χωρίς απόθεση*

Τα επόμενα διαγράμματα δείχνουν την ελάχιστη ταχύτητα ροής και την ελάχιστη κλίση πυθμένα για πλήρη πλήρωση του αγωγού και για δύο συγκεντρώσεις φερτών υλικών 50 και 200 mg/lit. Από τη μορφή του διαγράμματος της ελάχιστης ταχύτητας ροής φαίνεται ότι όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του αγωγού τόσο μικρότερη είναι και η ελάχιστη ταχύτητα. Εξάλλου φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση των φερτών τόσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ταχύτητα ροής ώστε να μπορεί να μεταφέρει τη

συγκεκριμένη συγκέντρωση. Επίσης φαίνεται από το Διάγραμμα 5.3. ότι οι διακυμάνσεις της ελάχιστης κλίσης πυθμένα είναι αρκετά μικρές.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2. : Μεταβολές της Ελάχιστης Ταχύτητας Ροής με τη Συγκέντρωση των Στερεών και τη Διάμετρο των Αγωγών

Για τη στερεομεταφορά χωρίς απόθεση η απαιτούμενη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην έναρξη της μετακίνησης  $V_t$ , μπορεί να βρεθεί από την επίλυση της εξίσωσης (May, 1994), που προέκυψε από πειραματικά δεδομένα.

$$V_t = 0.125 * (g (s - 1) d)^{0.5} * (y / D)^{0.47} \quad (5.9)$$

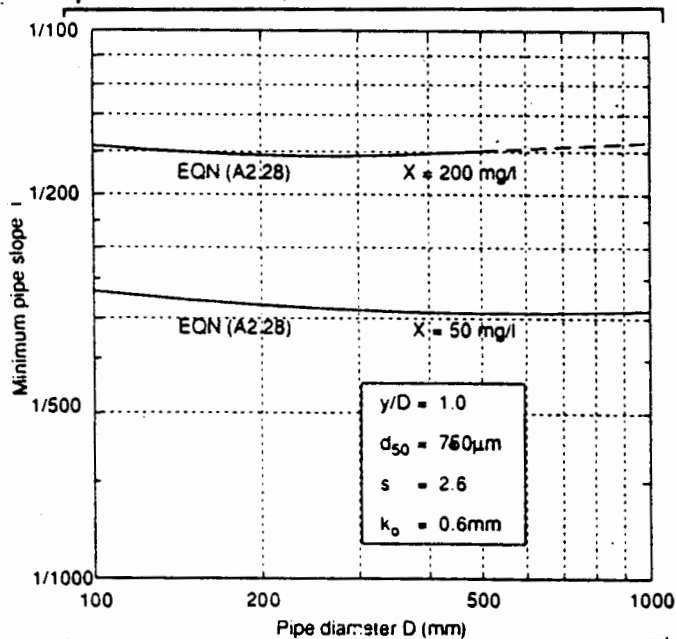
όπου  $y$  είναι το βάθος ροής στον αγωγό. Στο επόμενο Διάγραμμα (5.3) φαίνεται οι μεταβολές της ελάχιστης κλίσης πυθμένα με τη συγκέντρωση των φερτών και τη διάμετρο του αγωγού. Από το Διάγραμμα 5.3 φαίνεται ότι η ελάχιστη κλίση πυθμένα των αγωγών που είναι αναγκαία για να μην δημιουργηθεί απόθεση δεν μειώνεται παραπέρα από ένα συγκεκριμένο σημείο. Δηλαδή, για φερτά υλικά μέσης διάστασης  $d_{50}=750 \mu\text{m}$ , η ελάχιστη κλίση πυθμένα είναι 1/390 για συγκέντρωση φερτών 50 mg/lit ενώ είναι 1/182 για φερτά 200 mg/lit. Επίσης παρατηρούμε ότι οι ελάχιστες κλίσεις αυξάνονται και πέρα των αγωγών με διάμετρο 500 χιλ. οπότε για αγωγούς πέρα των 500 χιλ. ο σχεδιασμός τους με την αρχή της στερεομεταφοράς χωρίς απόθεση θα οδηγήσει σε ακριβές κατασκευές. Σε τέτοια περίπτωση προτιμούμαι το σχεδιασμό των δικτύων με την ύπαρξη ενός περιορισμένου στρώματος απόθεσης.

Επίσης πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν τις ακόλουθες ελάχιστες συρτικές τάσεις, οι οποίες δείχνουν να αντιστοιχούν στις δικές μας τιμές των συρτικών τάσεων (για την οδό Πτολεμαΐδος που αφορά το κριτήριο αυτό, ενώ



για την απόθεση της οδού Λεβέντη οι τιμές είναι μικρότερες ακόμα και από τις τιμές που δίνει ο Shields).

Για  $d_{50}=300 \mu\text{m} \Rightarrow \tau=0,88 \text{ Nt/m}^2$   
 $d_{50}=750 \mu\text{m} \Rightarrow \tau=7,4 \text{ Nt/m}^2$   
 $d_{50}=1000 \mu\text{m} \Rightarrow \tau=12,9 \text{ Nt/m}^2$



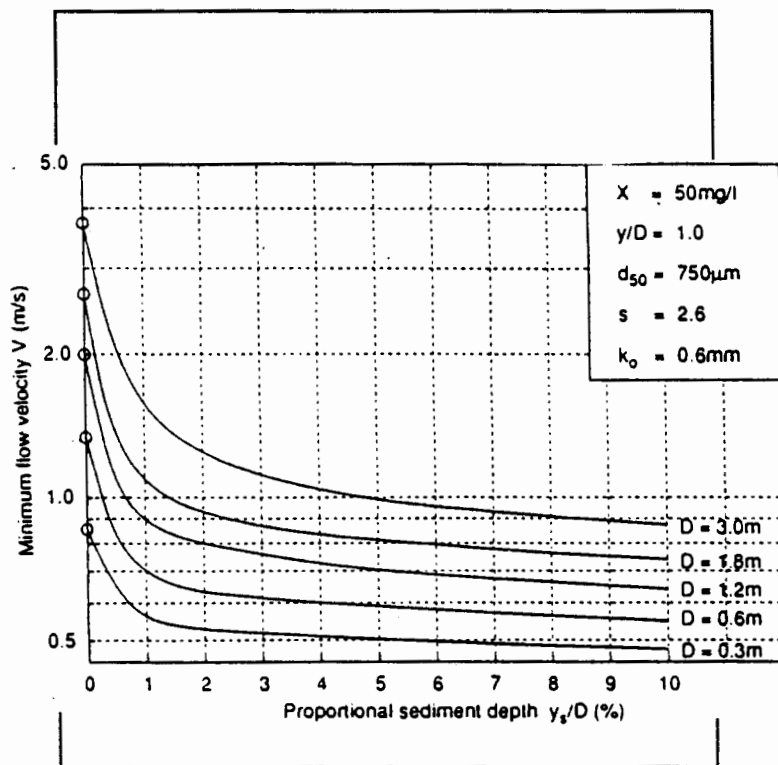
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.: Μεταβολή της Ελάχιστης Κλίσης Πυθμένα με τη Συγκέντρωση των Φερτών και τη Διάμετρο των Αγωγών

*Στερομεταφορά με Στρώμα Απόθεσης*

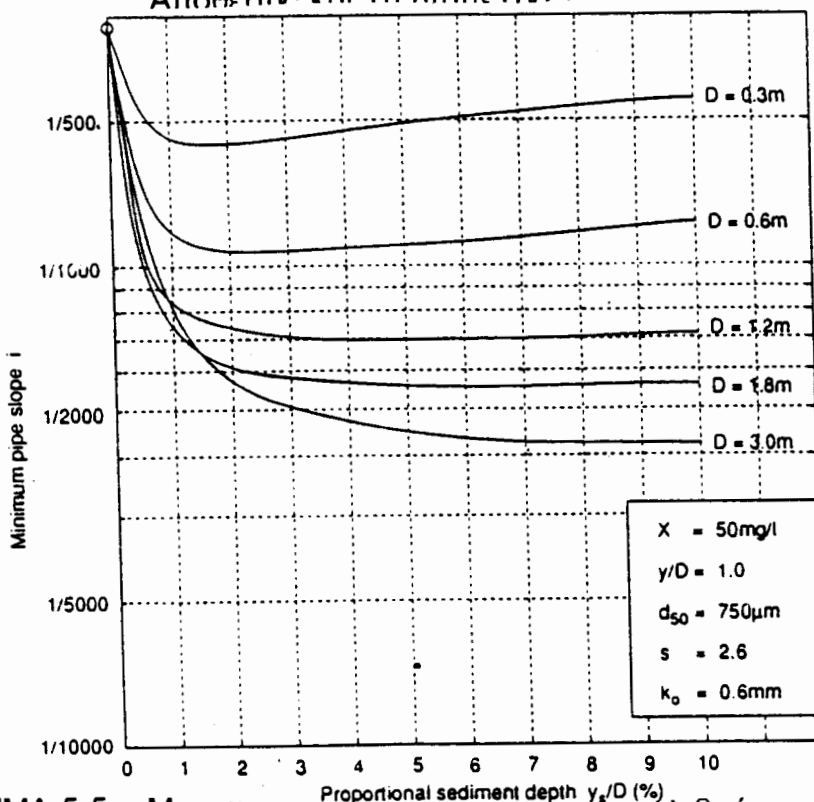
Τα επόμενα δύο διαγράμματα που προέκυψαν μετά από πειράματα σε κυκλικούς αγωγούς ολικής πλήρωσης δείχνουν τις μεταβολές της ελάχιστης ταχύτητας και της ελάχιστης κλίσης πυθμένα σε σχέση με τη διάμετρο των αγωγών και του βάθους της απόθεσης.

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι όσο μεγαλώνει το βάθος της απόθεσης τόσο μειώνεται η ελάχιστη ταχύτητα ροής του αγωγού. Για την καλύτερη μελέτη έχουν υποθεθεί στρώματα αποθέσεων με βάθη 1%, 2%, 5% και 10% της εσωτερικής διαμέτρου των αγωγών. Φαίνεται επίσης ότι επιτρέποντας μόνο 1% απόθεση στον πυθμένα του αγωγού η μείωση της ελάχιστης ταχύτητας γίνεται με ένα συντελεστή γύρω στο 1.5 με 2.3 σε σχέση με την αντίστοιχη ταχύτητα χωρίς απόθεση. Όσο όμως το βάθος της απόθεσης αυξάνεται τόσο μειώνεται και ο ρυθμός μείωσης της ελάχιστης ταχύτητας και κυρίως για τους μικρότερους αγωγούς.

Οι αντίστοιχες εξισώσεις του HR Wallingford (May, 1994) για τη στερομεταφορά με απόθεση προκύπτουν από εκτεταμένα πειράματα που έγιναν σε αγωγούς από σκυρόδεμα διαφόρων διαμέτρων D=0,3, 0,6, 1,2, 1,8 και 3,0 m. Από τα πειράματα αυτά προέκυψαν τα παρακάτω τρία διαγράμματα 5.4, 5.5 και 5.6 τα οποία δίνουν τις ελάχιστες ταχύτητες και κλίσεις πυθμένα για δύο συγκεντρώσεις φερτών υλικών 50 και 200 mg/l.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.4. : Μεταβολή της Ελάχιστης Ταχύτητας με το Βάθος της Απόθεσης και τη Διάμετρο του Αγωγού

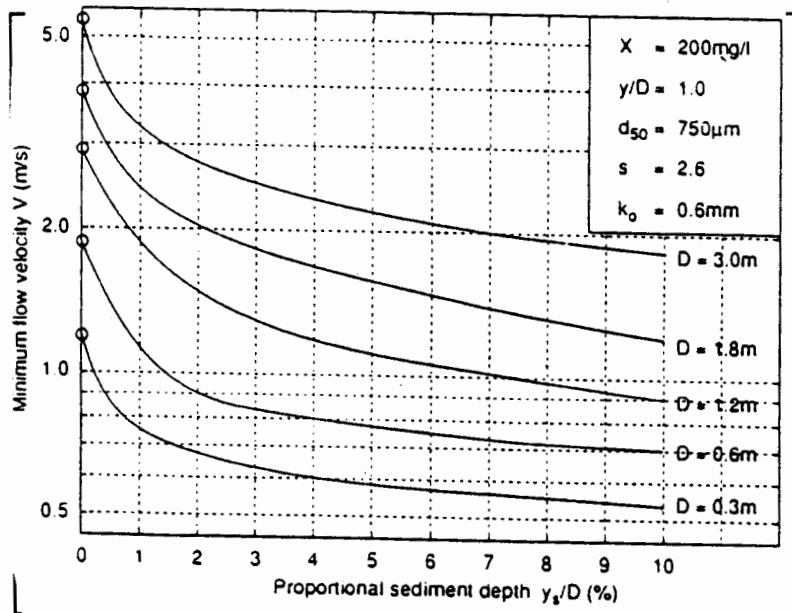


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.5. : Μεταβολή της ελαχίστης κλίσης  $i$  αυθμένα με το Βάθος της Απόθεσης και τη Διάμετρο των Αγωγών

Το Διάγραμμα 5.5 δείχνει και αυτό που παρατηρήσαμε και στη δική μας μελέτη για την αύξηση της κλίσης του πυθμενικού στρώματος της απόθεσης σε

σχέση με την κλίση του πραγματικού πυθμένα αλλά και για την εξήγηση ότι η αύξηση της κλίσης προκαλεί αύξηση της στερεομεταφοράς. Η μείωση της απαιτούμενης ελάχιστης κλίσης είναι εντυπωσιακή για ποσοστό απόθεσης 1% ενώ μειώνεται για μεγαλύτερα βάθη απόθεσης. Οπότε για μια συντηρητική αποδοχή της σχεδιαστικής μεθόδου η επιτρεπόμενη απόθεση 1% της εσωτερικής διαμέτρου μπορεί να οδηγήσει σε πολύ καλά αποτελέσματα.

Από τα τελευταία δύο διαγράμματα μπορούμε εύκολα πλέον να καταλάβουμε τις διαφορές μεταξύ των δύο σχεδιαστικών εναλλακτικών λύσεων. Όταν έχουμε στερεομεταφορά με επιτρεπόμενη απόθεση οι ελάχιστες ταχύτητες αυτοκαθαρισμού θα είναι μικρότερες σε σχέση με τη στερεομεταφορά χωρίς απόθεση. Δηλαδή με την ίδια συγκέντρωση μεταφερόμενων φερτών οι αγωγοί με αποθέσεις θα δουλεύουν με μικρότερες ταχύτητες και με μικρότερες κλίσεις πυθμένα, που σημαίνει ότι είναι πιο οικονομικοί σε σχέση με τους αγωγούς με καθόλου αποθέσεις που απαιτούν μεγαλύτερες κλίσεις πυθμένα για να επιτευχθούν οι ελάχιστες ταχύτητες αυτοκαθαρισμού. Σε μια τέτοια περίπτωση όμως η συγκέντρωση των μεταφερόμενων φερτών θα είναι σαφώς μεγαλύτερη από εκείνη με τις αποδεκτές αποθέσεις. Οπότε η οικονομικότητα βέβαια είναι σχετική έννοια και προκύπτει από εμπειριστατωμένη τεχνική και οικονομική μελέτη. Αυτό συμπεραίνει κανείς από τη μελέτη των διαγραμμάτων, όπου για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις φερτών απαιτούνται μεγαλύτερες ελάχιστες ταχύτητες για την πλήρη μεταφορά τους.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.6 : Μεταβολή της Ελάχιστης Ταχύτητας με Διαφορετική Συγκέντρωση Φερτών στη Ροή (σύγκριση με ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.4)

### 5.3.2. Διάβρωση Συσσωματώσιμων Αποθέσεων (Κριτήριο 2)

Το κριτήριο αυτό αναφέρεται στην συμπαράσυρση σωματιδίων από σχετικά λεπτόκοκκες και οργανικές αποθέσεις που ενδεχομένως να έχουν αναπτύξει σε κάποιο βαθμό δυνάμεις συσσωμάτωσης. Το κριτήριο αυτό, όπως είδαμε, ταιριάζει στις λεπτόκοκκες αποθέσεις (π.χ. στην οδό Λεβέντη) που παρατηρήσαμε στα πιο κατάντη σημεία του δικτύου μας, όπως έχουμε δείξει παρόμοιες αποθέσεις στο δίκτυο ομβρίων της Αθήνας παρουσιάζουν δυνάμεις συσσωμάτωσης, οπότε μπορούν να ενταχθούν στο κριτήριο αυτό.

Οι Nalluri and Alvarez (1992), που έκανα πειραματικές μελέτες χρησιμοποιώντας συνθετικά συσσωματώσιμα φερτά υλικά, έδειξαν ότι υπάρχουν δύο διαφορετικές τιμές των συρτικών αντοχών στις οποίες παρατηρείται απόπλυση των αποθέσεων. Για το επιφανειακό και πιο ασθενές στρώμα (που έχει χαρακτηριστεί ως “επιφανειακό υγρό στρώμα”) η συρτική αντοχή δεν ξεπερνά τα  $2,5 \text{ Nt} / \text{m}^2$  ενώ το βαθύτερο στερεοποιημένο στρώμα εξασκεί μεγαλύτερη συρτική αντοχή και φθάνει τις τιμές των  $6-7 \text{ Nt} / \text{m}^2$ .

Το κριτήριο αυτό, όπως διατυπώνεται, απαιτεί η συρτική τάση πυθμένα να μην είναι μικρότερη των  $2 \text{ Nt/m}^2$ , θεωρώντας ότι έχουμε συσσωματώσιμα σωματίδια μεγέθους 1 χιλιοστού και με σχετιζόμενη ελάχιστη τραχύτητα πυθμένα  $k_b=1.23\text{mm}$ . Το κριτήριο καταλήγει στη ελάχιστη ταχύτητα ολικής πλήρωσης, η οποία είναι ανεξάρτητη από την τραχύτητα των τοιχωμάτων του αγωγού (σε αντίθεση με το προηγούμενο κριτήριο). Η ελάχιστη ταχύτητα αυτοκαθαρισμού δίνεται από τη σχέση

$$V_m = (8 \tau_b / (\rho f_b))^{0.5} \tag{5.10}$$

όπου  $f_b$  είναι ο αδιάστατος συντελεστής τριβής για τον πυθμένα της απόθεσης που προκύπτει από τη σχέση:

$$f_b = 1 / [ 4 (\log_{10} (k_b / (3.7 D)))^2 ] \tag{5.11}$$

Στον επόμενο Πίνακα παραθέτουμε ένα παράδειγμα διαστασιολόγησης της ελάχιστης ταχύτητας αυτοκαθαρισμού.

*Δεδομένα*

*Τραχύτητα τοιχωμάτων αγωγού  $k_0=0.6\text{mm}$*

*Πυκνότητα νερού  $1000 \text{ kg/m}^3$*

*Θερμοκρασία νερού  $15^\circ \text{C}$*

**ΚΡΙΤΗΡΙΟ 1**

*Μέγεθος στερεών υλικών  $d_{50}=750 \mu\text{m}$*

*Ειδική Μάζα  $s= 2.6$*

*Απαιτούμενη ικανότητα στερεομεταφοράς =  $50 \text{ mg/lit}$*

*Μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος απόθεσης =  $2\%$*

*Μέγιστη τραχύτητα πυθμένα  $k_b$  (σχέση 4.12)*

**ΚΡΙΤΗΡΙΟ 2**

*Απαιτούμενη συρτική τάση πυθμένα  $\tau_b = 2 \text{ Nt/m}^2$*

*Ελάχιστη τραχύτητα πυθμένα  $k_b = 1.23 \text{ mm}$*

**Ελάχιστη Ταχύτητα Ροής Πλήρους Πλήρωσης (m/sec)**

**ΚΡΙΤΗΡΙΟ 1**

Διάμετρος Αγωγών (mm)	Χωρίς Αποθέσεις	1% Απόθεση	2% Απόθεση	ΚΡΙΤΗΡΙΟ 2
150	0,56	0,47	0,46	0,67
225	0,72	0,52	0,50	0,72
300	0,86	0,56	0,53	0,75
450	1,11	0,62	0,59	0,79
600	1,33	0,69	0,63	0,82
750	1,53	0,75	0,68	0,85
900	1,72	0,80	0,73	0,87
1000	1,84	0,83	0,76	0,88

1200	-	0,89	0,81	0,90
1500	-	0,97	0,88	0,92
1800	-	1,08	0,94	0,94
2100	-	1,20	1,00	0,96
2400	-	1,32	1,07	0,98
2700	-	1,45	1,16	0,99
3000	-	1,58	1,25	1,00
3400	-	1,79	1,37	1,01
4000	-	1,97	1,56	1,03
5000	-	2,24	1,89	1,06

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2. : Παράδειγμα Σύγκρισης Κριτηρίων Στερεομεταφοράς

Στα σημεία που οι ταχύτητες αυτοκαθαρισμού σημειώνονται με παύλες σημαίνει ότι έχουμε στερεομεταφορά με αιώρηση. Για το δεύτερο κριτήριο θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι οι ελάχιστες ταχύτητες είναι μικρότερες του πρώτου κριτηρίου για διαμέτρους αγωγών από 2100 χιλ. και πάνω. Αυτό σημαίνει ότι το δεύτερο κριτήριο είναι το κρίσιμο κριτήριο (governing criteria) για αυτούς τους αγωγούς. Ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τους αγωγούς με διαμέτρους μικρότερες των 2100 χιλ. Επομένως αν για παράδειγμα για έναν αγωγό των 2700 χιλ. επιτύχουμε συνθήκες αυτοκαθαρισμού με το πρώτο κριτήριο τότε είναι σίγουρο ότι θα έχουμε συνθήκες αυτοκαθαρισμού και για το δεύτερο κριτήριο. Αυτό είναι πολύ λογικό γιατί στους μεγάλους αγωγούς το δυναμικό για αποθέσεις είναι πολύ μεγάλο (αφού τοποθετούνται πάντα με πολύ μικρές κλίσεις), επομένως διασφαλίζοντας τη μετακίνηση των χονδρόκοκκων σωματιδίων έχουμε ήδη διασφαλίσει την επαναιώρηση των λεπτόκοκκων αποθέσεων. Το αντίθετο συμβαίνει για ένα αγωγό με διάμετρο π.χ. 900 χιλ.

Επίσης βλέπουμε και τις διαφορές στις ελάχιστες ταχύτητες για τις τρεις περιπτώσεις του πρώτου κριτηρίου. Μεγαλύτερες ταχύτητες έχουμε για ροή χωρίς απόθεση απόθεση ενώ ελαττώνονται για ροή με απόθεση. Οι διαφορές στις ταχύτητες των αγωγών είναι μικρές για μικρές διαμέτρους, όσο όμως αυξάνονται τόσο μεγαλύτερες είναι οι διαφορές που κάνουν τη λύση της ροής με απόθεση 2% την πιο οικονομική λύση.

Για τους Βρετανικούς Κανονισμούς χρησιμοποιείται ευρύτατα η ταχύτητα ολικής πλήρωσης. Αυτό εκτιμάται ότι είναι υπέρ της ασφαλείας, γιατί έχει παρατηρηθεί ότι η στερεομεταφορά είναι μεγαλύτερη για αγωγούς με μερική πλήρωση. Αυτό υδραυλικά εξηγείται γιατί η υδραυλική ακτίνα μειώνεται από ένα ποσοστό πλήρωσης (γύρω στα 70 με 80%) της πλήρους διατομής και πάνω.

### 5.3.3. Συμπεράσματα

Από την προηγούμενη ανάλυση φαίνεται ότι οι νέες αντιλήψεις δεν αποφεύγουν κάποιες εμπειρικές εκτιμήσεις που προκύπτουν από την εμπειρική γνώση της πραγματικότητας. Για παράδειγμα στο δεύτερο κριτήριο είναι εντελώς εμπειρική η χρήση της ελάχιστης απαιτούμενης συρτικής τάσης πυθμένα  $\tau_b=2 \text{ Nt/m}^2$ , η οποία τελικά ορίζει σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες παραμέτρους και την ελάχιστη ταχύτητα ροής. Εξάλλου δεν προσδιορίζεται πως θα γίνει η εγκατάσταση της δεδομένης απόθεσης στην αρχή της λειτουργίας του δικτύου.

Πάντως, οι νέες οδηγίες φέρνουν στο σχεδιαστικό προσκήνιο την παράμετρο της οικονομικότητας και χρησιμοποιούν προς όφελος της οικονομικής υδραυλικής λειτουργίας κάποια θετικά αποτελέσματα (όπως η αύξηση της ταχύτητας ροής από τη μείωση της επιφάνειας ροής). Πάντως το

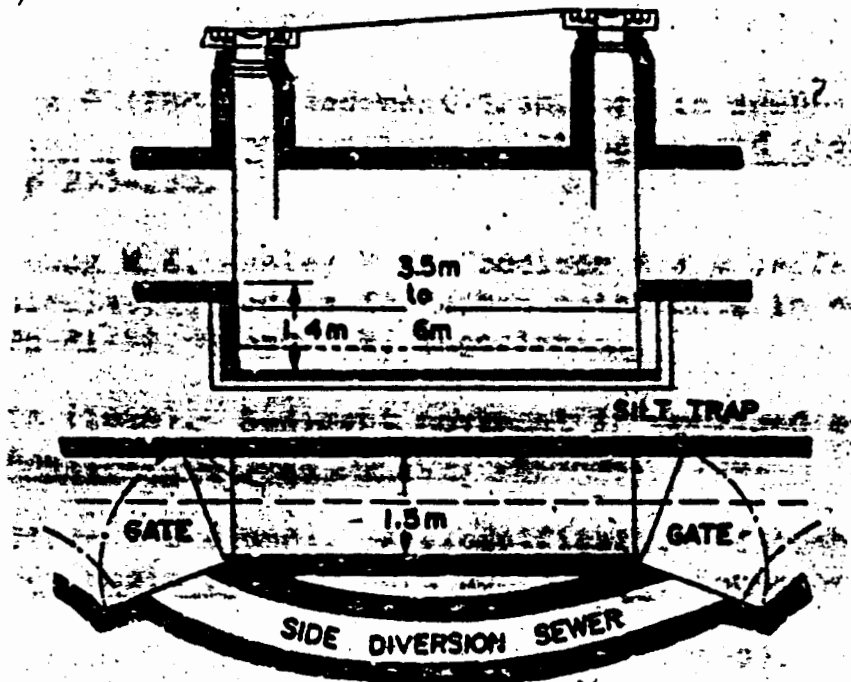
σημαντικό με τις νέες αντιλήψεις είναι ότι η λειτουργία των δικτύων αποκτά αρκετή ελαστικότητα καθώς μπορεί να λειτουργήσει αξιόπιστα και υπό διαφορετικές υδραυλικές συνθήκες ροής που θα προκαλέσουν κάποιες αποθέσεις. Έτσι μεγάλης διαμέτρου αγωγοί που αναγκαστικά τοποθετούνται με μικρή κλίση τώρα θα αντιμετωπίζουν λιγότερα προβλήματα αποθέσεων ενώ μικρότερης διαμέτρου αγωγοί πλέον δεν χρειάζεται να τοποθετούνται με μεγάλες κλίσεις, ώστε να μην αντιμετωπίζουν προβλήματα αποθέσεων. Παρόλαυτα η οικονομικότητα είναι ένας σχετικός όρος και θα πρέπει να εκτιμάται διαφορετικά σε κάθε περίπτωση.

#### 5.4. Επιμέρους Πρακτικές Σχεδιασμού για την Ελαχιστοποίηση των Αποθέσεων.

Για ήδη κατασκευασμένα δίκτυα που υποφέρουν από προβλήματα αποθέσεων προτείνονται σε αυτήν την ενότητα σχεδιαστικές μέθοδοι καθώς και συγκεκριμένες κατασκευαστικές διατάξεις για τη βέλτιστη διαχείριση των φερτών υλών και πάνω στις αστικές επιφάνειες και μέσα στους υπονόμους.

*Σταμάτημα της διαδικασίας της απόθεσης σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου.*  
Είναι διαπιστωμένο ότι η στερεομεταφορά με συρτικό φορτίο είναι αποκλειστικά υπεύθυνη για το σχηματισμό των αποθέσεων. Επομένως, μια καλή λύση θα είναι η συλλογή του συρτικού φορτίου λίγο ανάντη από τα ευαίσθητα σημεία του δικτύου που σχηματίζονται αποθέσεις. Από τη στιγμή που τα αιωρούμενα στερεά δεν συμμετέχουν γενικά στο σχηματισμό των αποθέσεων είναι άσκοπο να συλλέγονται και τα αιωρούμενα σωματίδια. Οι κατασκευές αυτές μπορεί να είναι από τις λεγόμενες “παγίδες φερτών” που είναι ειδικά ορύγματα που δημιουργούνται ακριβώς στον πυθμένα των αγωγών.

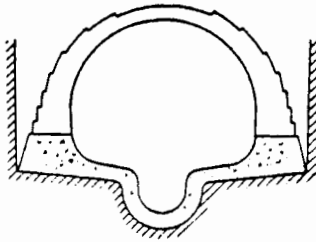
Μια πιο εκτεταμένη παγίδα συρτικού φορτίου εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα. Η διάταξη αυτή είναι περισσότερο χρήσιμη για τους παντοροϊκούς αγωγούς όπου υπάρχει συνεχόμενη ροή ακόμα και σε άνυδρες περιόδους (Dry Weather Flow)



ΣΧΗΜΑ 5.1. : Σύνθετη Παγίδα Φερτών Συρτικού Φορτίου

Όταν η παγίδα είναι άδεια, τότε ανοίγουμε το θυρόφραγμα της κατασκευής (κλείνουμε τον αγωγό εκτροπής (side diversion sewer)), οπότε προοδευτικά γεμίζει φερτά υλικά η παγίδα με βάθος 1.4 μέτρα. Όταν γεμίσει η παγίδα τότε κλείνουμε το θυρόφραγμα ανοίγουμε τον αγωγό εκβολής για να συνεχιστεί η ροή. Ο καθαρισμός της παγίδας θα γίνει με χειρωνακτικά μέσα που όμως είναι απαράδεκτος από άποψης υγιεινής, κυρίως στους παντορορικούς αγωγούς, καθώς το κόστος του καθαρισμού είναι μεγάλο.

Μια άλλη λύση είναι η δημιουργία ενός αυλακίου στον πυθμένα του αγωγού. Πρόκειται δηλαδή για μια πρόχειρη υπερδιαστασιολόγηση του υπάρχοντος αγωγού ώστε να συγκεντρώνει το συρτικό φορτίο χωρίς μείωση της πραγματικής επιφάνειας ροής. Ένα τέτοιο σχήμα φαίνεται αμέσως κάτω.



*Μείωση της διάστασης των φερτών υλικών που εισρέουν στο δίκτυο υπονόμων.*

Η διάσταση των φερτών υλικών που εισρέουν στο δίκτυο υπονόμων εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες:

- Την αποτελεσματική πρακτική καθαρισμού των αστικών επιφανειών
- Τη σωστή και αποτελεσματική λειτουργία των αμμοσυλλεκτών στα φρεάτια υδροσυλλογής.

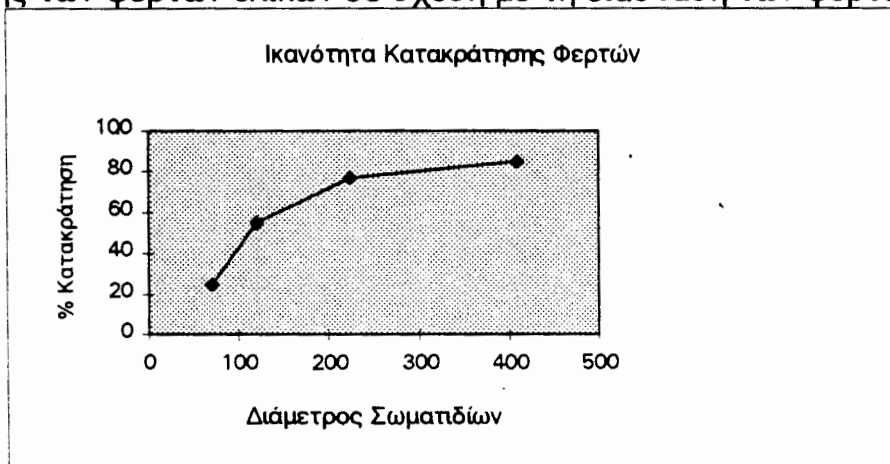
Ο πρώτος παράγοντας θα αναλυθεί εκτενέστερα στο επόμενο Κεφάλαιο. Οι αμμοσυλλέκτες των φρεατίων υδροσυλλογής (English: gully pots, American : catch-basins) είναι από τα πιο χρήσιμα έργα κεφαλής των δικτύων αστικής αποχέτευσης. Η σωστή λειτουργία και ο περιοδικός καθαρισμός των φρεατίων θα έχει ως αποτέλεσμα την όσο το δυνατόν περισσότερη κατακράτηση των πιο χονδροκόκκων υλικών.

Στην περιοχή της Αθήνας τα φρεάτια υδροσυλλογής χρησιμοποιούνται ευρύτατα αλλά όμως με πολύ μικρή, αν όχι αμελητέα, συχνότητα καθαρισμού. Τα φρεάτια υδροσυλλογής που χρησιμοποιούνται στην περιοχή της Αθήνας είναι τύπου με την επίπεδη εσχάρα και τη σχισμή στο ρείθρο του πεζοδρομίου ώστε να συνδυάζει τη όσο το δυνατόν μέγιστη παροχή ομβρίων και τη αποτελεσματική κατακράτηση των πιο χονδροκόκκων υλικών και στην εσχάρα αλλά και στον αμμοσυλλέκτη. Τα παλαιότερα φρεάτια μόνο με τη σχισμή στο ρείθρο του πεζοδρομίου δεν αποτελούν ικανοποιητική λύση στην κατακράτηση των φερτών υλικών αλλά και ο καθαρισμός των φρεατίων αυτών είναι εξαιρετικά δύσκολος και γίνεται μόνο με χειρωνακτικό τρόπο. Αντιθέτως στα νέου τύπου φρεάτια

είναι δυνατός ο καθαρισμός του φρεατίου με εφαρμογή μηχανικών μέσων. Ο νέος τύπος φρεατίων υδροσυλλογής έχει την κωδική ονομασία “τύπου Α” για τους αγωγούς ομβρίων και “τύπου Β” για τους παντορροϊκούς αγωγούς. Ειδικά για τους παντορροϊκούς αγωγούς στο φρεάτιο είναι προσαρμοσμένος ένας σφηνοειδής αγωγός ο οποίος ακόμα και στις άνυδρες περιόδους είναι γεμάτος νερό από την τελευταία βροχόπτωση και δεν επιτρέπει τις οσμές να αναδυθούν στην επιφάνεια.

Τα φρεάτια υδροσυλλογής είναι εξαιρετικής σημασίας έργα κεφαλής τα οποία λειτουργούν ως μικρές δεξαμενές κατακράτησης των φερτών υλικών πριν την είσοδό τους στο δίκτυο υπονόμων. Περισσότερα για τις δεξαμενές κατακράτησης / καθίζησης στο επόμενο Κεφάλαιο. Επομένως, η καλή λειτουργία των φρεατίων υδροσυλλογής είναι σημαντική για την αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου.

Από μελέτες που έχουν γίνει στην Μ. Βρετανία (D. Butler and S.H.P.G Karunaratne, 1995) έχουν δείξει ότι η ικανότητα κατακράτησης φερτών υλικών των φρεατίων υδροσυλλογής μειώνεται σημαντικά με τη μείωση των διαστάσεων των εισρεόντων φερτών. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η ικανότητα κατακράτησης των φερτών υλικών σε σχέση με τη διάσταση των φερτών.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.7. : Ικανότητα Κατακράτησης Φρεατίων Υδροσυλλογής σε Σχέση με το Μέγεθος των Στερεών (mm)

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η ικανότητα κατακράτησης μειώνεται όσο μειώνονται και οι διαστάσεις των υλικών. Αυτό σημαίνει ότι τα φρεάτια υδροσυλλογής είναι αποτελεσματικά στην κατακράτηση στερεών συρτικού φορτίου αλλά είναι αναποτελεσματικά στην κατακράτηση των λεπτόκοκκων σωματιδίων. Επομένως είναι πολύ καλή λύση στ μείωση του συρτικού φορτίου στους αγωγούς αλλά δεν κατακρατούν τα ρυπαντικά σωματίδια από την είσοδό τους στο δίκτυο. Την κατακράτηση των λεπτόκοκκων σωματιδίων αναλαμβάνουν οι δεξαμενές κατακράτησης / καθίζησης.

Επίσης θα πρέπει τα φρεάτια υδροσυλλογής να καθαρίζονται τακτικά ώστε τα κατακρατούνται να μην φθάνουν μέχρι το χείλος του υπερχειλιστή του αμμοσυλλέκτη. Σε αντίθετη περίπτωση τα επόμενα φερτά θα καταλήγουν κατευθείαν στο δίκτυο. Πάντως σύμφωνα με την παραπάνω μελέτη η κατακράτηση των φερτών είναι σχεδόν η ίδια άσχετα από το βάθος των κατακρατούμενων φερτών στον αμμοσυλλέκτη. Η παρατήρηση αυτή έχει μεγάλη σημασία, γιατί θα μπορούσε να φτιαχτεί ένα οικονομικό χρονοδιάγραμμα εργασίας από τις αρμόδιες υπηρεσίες ώστε τα φρεάτια να καθαρίζονται όταν το βάθος των παγιδευμένων φερτών φθάσουν κοντά στο χείλος του αμμοσυλλέκτη.



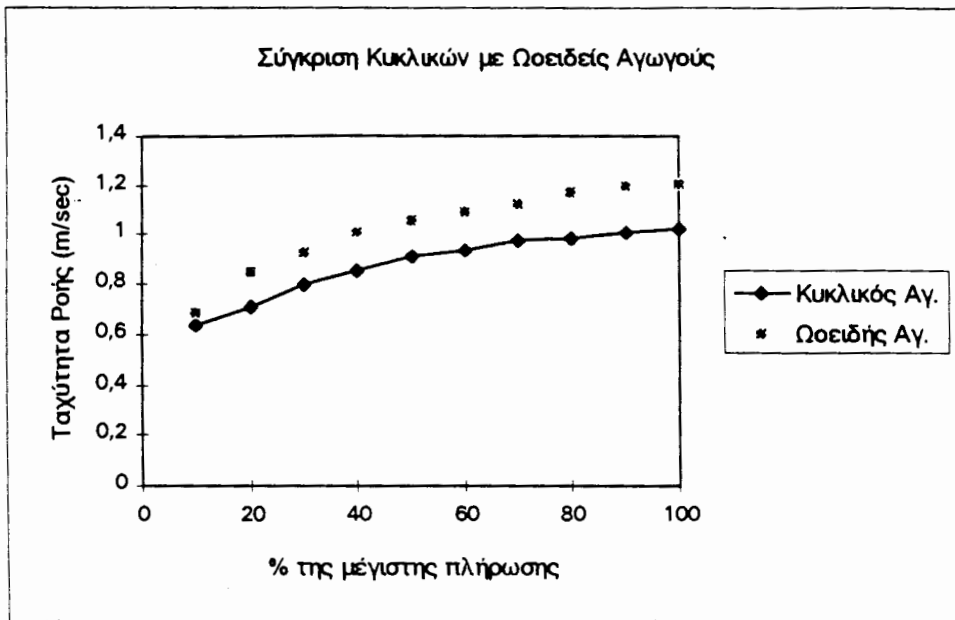
### *Ρύθμιση του Χρόνου Μεταξύ Διαδοχικών Καθαρισμών των Αγωγών*

Επειδή το κόστος καθαρισμού των αγωγών και των φρεατίων υδροσυλλογής είναι μεγάλο και αυξάνεται συνεχώς, θα πρέπει να προγραμματίζονται οι εργασίες καθαρισμού με τέτοιο τρόπο, ώστε να απομακρύνονται όσο το δυνατόν περισσότερες ποσότητες αποτιθέμενων φερτών υλικών με το λιγότερο κόστος. Αυτό σημαίνει ότι θα είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τον ρυθμό απόθεσης των φερτών υλικών κυρίως σε αγωγούς οι οποίοι λόγω μεγέθους δεν είναι επισκέψιμοι. Αυτό γίνεται είτε αναπτύσσοντας ένα προηγμένο αριθμητικό μοντέλο που να προβλέπει τον ρυθμό σχηματοποίησης των αποθέσεων είτε πιο πρακτικά δημιουργώντας την υποδομή εκείνη (αυτόματες τηλεοπτικές κάμερες που διανύουν τον αγωγό κατά μήκος) που θα επιτρέψει την συνεχή επιστάσια του δικτύου.

### *Επίδραση της Διατομής των Αγωγών*

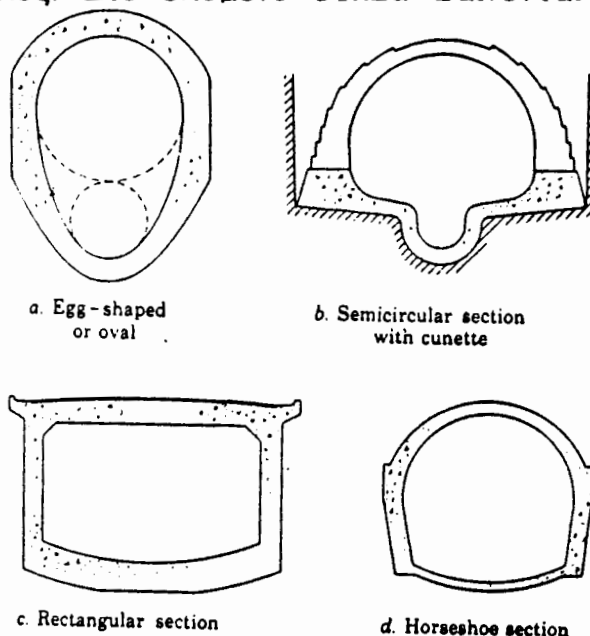
Πολύς λόγος έχει γίνει για την κατάλληλη επιλογή του σχήματος της διατομής. Από τη θεωρία της βέλτιστης διατομής στην Υδραυλική έχουμε ότι το βέλτιστο σχήμα είναι το ημικυκλικό (με ελεύθερη επιφάνεια) γιατί έχει το μεγαλύτερο πηλίκο του εμβαδού ροής και της βρεχόμενης επιφάνειας. Αυτό συμβαίνει όμως όταν η ροή είναι χωρίς φερτά υλικά. Τότε η κυκλική διατομή ενδεχομένως να μην είναι η καλύτερη. Εξάλλου όταν το βάθος ροής αυξάνεται σημαντικά στους κυκλικούς αγωγούς η υδραυλική ακτίνα μειώνεται. Έρευνες έχουν δείξει ότι η ορθογωνική διατομή είναι η βέλτιστη από άποψη στερεομεταφοράς. Οι ορθογωνικοί αγωγοί χρησιμοποιούνται σε αγωγούς ομβρίων με μεγάλες παροχές (όπως για παράδειγμα οι αγωγοί των εκβολών) γιατί οι υδραυλικές ιδιότητες είναι αρκετά καλές και ότι η κατασκευή τους είναι σχετικά εύκολη. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η τιμή της υδραυλικής ακτίνας στους ορθογώνιους αγωγούς μειώνεται κατά περίπου 30% όταν η ροή φθάνει στο μέγιστο της πλήρωσης γιατί η βρεχόμενη περίμετρος αυξάνει σημαντικά με την είσοδο και της οροφής του αγωγού. Οι ωσειδείς αγωγοί χρησιμοποιούνται κυρίως για τους παντοροϊκούς αγωγούς. Η ευρύτερα χρησιμοποιημένη τυπική ωσειδής διατομή έχει στο πάνω καμμάτι της ένα ημικύκλιο με ακτίνα ίση με τα δύο τρίτα του συνολικού ύψους της διατομής. Η χρησιμοποίησή τους στους παντοροϊκούς αγωγούς οφείλεται στην διαίρεση της ροής σε δύο μέρη : στο χαμηλότερο που πρόκειται για τη ροή άνυδρης περιόδου και το ψηλότερο κομμάτι σε περιόδους βροχοπτώσεων. Για τους παντοροϊκούς αγωγούς επίσης χρησιμοποιείται και ο κυκλικός αγωγός με ένα κατάλληλα διαμορφωμένο αυλάκι στο πυθμένα του αγωγού για να παροχετεύει τα οικιακά απόβλητα. Η τελευταία διατομή είναι πολύ γνωστή από τους υπονόμους του Παρισιού. Εμείς μελετήσαμε τις πιο διαδεδομένες μορφές αγωγών στο κομμάτι του δικτύου που επιλέξαμε, την ωσειδή διατομή και την κυκλική διατομή. Επιλέξαμε μια τυπική ωσειδή διατομή 600/900 και για το μέγιστο ποσοστό πλήρωσης 0,70 βρισκουμε την παροχή  $Q_s = 0,315 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Για την ίδια παροχή βρίσκω την αντίστοιχη κυκλική διατομή που θα έχει διάμετρο  $D = 0,7246 \text{ m}$ . Για ποσοστά 10,20. . .100% της μέγιστης πλήρωσης βρίσκουμε την ταχύτητα ροής σε κάθε περίπτωση διατομής. Στο επόμενο Διάγραμμα 5.8. φαίνεται τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας.

Από το Διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι οι ωσειδείς αγωγοί υπερέχουν γιατί δίνουν καλύτερες ταχύτητες ροής οπότε και η στερεοπαροχετετευτικότητα τους θα είναι μεγαλύτερη έναντι των κυκλικών.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.8. : Σύγκριση των Ταχυτήτων Ροής Μεταξύ των Κυκλικών και των Ωσειδών Αγωγών

Αυτό συμβαίνει γιατί οι ωσειδείς αγωγοί είναι πιο στενοί στο κάτω μέρος τους γιαυτό εξασφαλίζουν και μεγαλύτερες ταχύτητες ροής. Αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την αιτιολογία των Άγγλων μηχανικών ότι η αύξηση του ενεργού πλάτους του πυθμένα δημιουργεί καλύτερη στερεομεταφορική ικανότητα. Επίσης οι ωσειδείς αγωγοί προσφέρονται για έντονα μεταβαλλόμενη παροχή ( $maxQ \gg minQ$ ). Επειδή η περιοχή του πυθμένα είναι στενότερη σημαίνει ότι το βάθος ροής θα είναι μεγαλύτερο και οι συρτικές τάσεις πυθμένα θα είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τους κυκλικούς αγωγούς. Παρολαυτά οι ωσειδείς αγωγοί εμφανίζουν το μειονέκτημα ότι έχουν χειρότερα στατικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τους κυκλικούς (ιδίως εκείνοι που έχουν το στενότερο μέρος κάτω) και η κατασκευή τους είναι δύσκολη. Επίσης για ίδια παροχεταιυτικότητα σε σχέση με έναν αντίστοιχο κυκλικό αγωγό, ο ωσειδής έχει πολύ μεγαλύτερο ύψος. Επομένως, ο ωσειδής αγωγός ενδέχεται να είναι αντισυκονομικός παρόλο που εμφανίζει ελαφρά μεγαλύτερες ταχύτητες ροής. Άλλες διατομές που χρησιμοποιούνται είναι η στοματοσειδής διατομή, η υπερυψωμένη στοματοσειδής διατομή και άλλες. Στο επόμενο σήμα φαίνονται μερικές απο αυτές τις διατομές.



## 5.5. Συγκεκριμένες Κατασκευαστικές Οδηγίες

Στην ενότητα αυτή θα δούμε πως θα μπορούσαμε να αποφύγουμε τη δημιουργία των αποθέσεων στα σημεία που μελετήθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Από τη μελέτη αυτή φάνηκε ότι οι μεταβολές της ταχύτητας από ανάντη σε κατάντη δημιουργούν το πρόβλημα των αποθέσεων. Οι μεταβολές των ταχυτήτων όπως φάνηκε προκύπτουν από τη μεταβολή των επιπέδων της ελεύθερης επιφάνειας της ροής (επομένως δημιουργούνται οι καμπύλες της ανομοιομορφίας ροής). Μια πρόχειρη κατασκευαστική εναλλακτική λύση θα προέβλεπε τη μη ύπαρξη τέτοιων διακυμάνσεων στην ελεύθερη επιφάνεια ροής από ανάντη σε κατάντη και ειδικά όπου έχουμε μεταβολή της διατομής και της κλίσης πυθμένα. Ας δούμε πιο συγκεκριμένα καθεμία από τις περιπτώσεις του προηγούμενου Κεφαλαίου.

### *Πτολεμαΐδος και Πάρνηθος*

Στην περίπτωση αυτή και για συγκεκριμένη ροή μέσα στον αγωγό ( $y/H=0,5$ ) έχουμε μια αύξηση του βάθους της ελεύθερης επιφάνειας από 1,625 μέτρα σε 1,95 μέτρα. Αυτό σημαίνει (και για τη συγκεκριμένη ροή) ότι θα πρέπει να κατασκευαστεί ένας αναβαθμός πτώσης στον πυθμένα του αγωγού, ώστε τα βάθη ροής προσεγγιστικά να βρίσκονται στην ίδια ευθεία ώστε να μην έχουμε δημιουργία φαινομένων ανομοιομορφίας της ροής. Οπότε το βάθος της πτώσης του πυθμένα θα είναι (Κουτσογιάννης, 1993) :

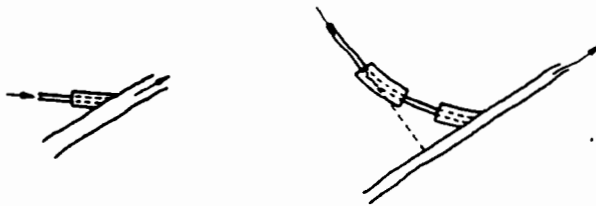
$$\Delta z = (1,95 + 1,92^2 / (2 * 9,81)) - (1,625 + 2,4^2 / (2 * 9,81)) + 0,074 = 0,293 \text{ m}$$

όπου 0,074 m είναι οι τοπικές απώλειες ενέργειας στον αγωγό (Ενότητα 4.3). Από την πιο πάνω σχέση προκύπτει ότι για τη συγκεκριμένη ροή και για το συγκεκριμένο αγωγό θα πρέπει να κατασκευαστεί μια πτώση τουλάχιστον κατά 30 εκατοστά του πυθμένα με συναρμογή που να ξεκινάει και να τελειώνει μέσα στο φρεάτιο επίσκεψης. Η πρακτική αυτή είναι υδραυλικά ασφαλής γιατί δεν δημιουργείται καμπύλη υπερύψωσης που ενδεχομένως να επηρεάσει ανάντη τμήματα του δικτύου. Βέβαια καταλαβαίνει κανείς την πολύ συγκεκριμένη εφαρμογή αλλά πιστεύουμε ότι μπορεί να δώσει μια κατασκευαστική πρακτική για όλες τις παρόμοιες περιπτώσεις. Στην περίπτωση του αγωγού στη Λεβέντη και Λεβιδίου η πτώση του βάθους ροής οδηγεί σε ελάχιστες μεταβολές μεταβολές της ταχύτητας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν μπορούμε να κάνουμε κανένα ουσιαστικό αναβαθμό στον πυθμένα.

### *Εκβολές στον Κηφισό Ποταμό*

Οι εκβολές των δικτύων ομβρίων στον Κηφισό Ποταμό όπως έχουμε αναφέρει είναι σχεδιασμένοι με πολύ μικρή κλίση πυθμένα (γύρω στα 4 τοις χιλίοις) και μάλιστα χωρίς υδραυλική πτώση στην εκβολή της ροής. Βέβαια στην συγκεκριμένη μελέτη μεγάλο ρόλο μπορεί να έπαιξαν και οι πολύ μικρές κλίσεις εδάφους της περιοχής αλλά και ότι η κοίτη του Κηφισού σε εκείνη την περιοχή είναι αδιευθέτητη με αποτέλεσμα την ενδεχόμενη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στη ροή του Κηφισού, λόγω επιδράσεων της ροής από τα κατάντη. Γεγονός είναι όμως ότι σε εξαιρετικά υδρολογικά γεγονότα όπου η στερεοπαροχή στους αγωγούς ομβρίων είναι η μέγιστη είναι πιθανόν η εκβολή να λειτουργεί με σοβαρή περίπτωση καμπύλης M1 ή στη χειρότερη περίπτωση να είναι εντελώς βυθισμένη (όπως έγινε στην καταστροφική πλημμύρα του περσινού φθινοπώρου) και οι ταχύτητες της ροής μέσα στον αγωγό της εκβολής

να είναι πολύ μικρές έως και μηδενικές. Επομένως δημιουργείται το καταλληλότερο περιβάλλον για τη δημιουργία των αποθέσεων. Βέβαια η βυθισμένη εκβολή, όπως είδαμε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, η βυθισμένη εκβολή, κυρίως στα παντοροϊκά δίκτυα εξασφαλίζει ικανοποιητική αραίωση των ρυπαντών, (αν και με την τύρβη της ροής τοη Κηφισού δύσκολα τίθεται θέμα αραίωσης των ρυπαντών) αρκεί η ταχύτητα της ροής στον αγωγό να είναι τέτοια ώστε να μπορέσει να εξασφαλιστεί η διάχυση των ρυπαντών (μεγάλος αριθμός Froude). Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει η σχεδόν (κάθετη εκβολή του αγωγού στον Κηφισό. Η ροή του αγωγού βρίσκει τότε το μέγιστο της αντίστασης από τη μεγαλύτερη ροή του Κηφισού. Αυτό που θα μπορούσε να γίνει επομένως είναι η αλλαγή της διεύθυνσης του αγωγού εκβολής, οπότε να εκβάλλει στο ποτάμι με γωνία γύρω στις 30 με 45 μοίρες με τη φορά ροής του ποταμού. Συνεπάγεται φυσικά ότι επιβάλλονται και τα έργα συναρμογής για την αλλαγή κατεύθυνσης του αγωγού ώστε να μην προκαλούνται επιπλέον απώλειες ενέργειας. Πρόχειρο σκίτσο της κατασκευής εμφανίζεται στο επόμενο σχήμα. Αυτό που είναι εφικτό είναι ο συστηματικός καθαρισμός των εκβολών και κυρίως μετά από μια έντονη και μεγάλης διάρκειας βροχόπτωση.



ΣΧΗΜΑ 5.2. :Τεχνικά Έργα Σωστών Εκβολών στον Κηφισό

## 5.6. Προτεινόμενο Σχεδιαστικό Μοντέλο

Στον παρακάτω Λογικό Διάγραμμα Ροής (Ζαρρής, 1995) σκιαγραφούμε ένα μοντέλο πρόγνωσης των σημείων που θα παρατηρηθούν αποθέσεις. Το μοντέλο αποτελείται από μία συνιστώσα βροχής - απορροής, από ένα μοντέλο συγκέντρωσης φερτών υλικών στις αστικές επιφάνειες και από μία συνιστώσα κατακράτησης των φερτών υλικών στα φρεάτια υδροσυλλογής. Το μοντέλο αυτό παρέχει τη δυνατότητα να προσομοιωθούν και οι ήδη υπάρχουσες αποθέσεις του δικτύου αρκεί ο χρήστης του μοντέλου να γνωρίζει εκ των προτέρων τα σημεία εμφάνισης των αποθέσεων καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Επίσης το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα να γνωρίζουμε αν θα έχουμε απόπλυση ή παραμονή των αποθέσεων. Με την εξίσωση Manning έχουμε τη συρτική τάση που προκαλεί η ροή στον πυθμένα του αγωγού  $\tau_b$ . Ο υπολογισμός των συρτικών τάσεων θα είναι βήμα προς βήμα σε όλο το μήκος του αγωγού και σε κάθε φρεάτιο υδροσυλλογής θα προστίθεται στα αντίστοιχα προηγούμενα χαρακτηριστικά η ποσότητα των στερεών και η παροχή των ομβρίων υδάτων. Έτσι σε κάθε βήμα θα έχουμε τα νέα χαρακτηριστικά της ροής και κατά συνέπεια τις νέες συρτικές τάσεις για κάθε σημείο. Βέβαια όπως δείξαμε και σε προηγούμενα κεφάλαια τα σημεία που μας ενδιαφέρουν είναι εκείνα που παρατηρούνται ανωμαλίες στη ροή. Η τιμή της συρτικής τάσης που προκύπτει από τη σχέση του Manning συγκρίνεται με τη ελάχιστη συρτική τάση αυτοκαθαρισμού που προκύπτει από τη διαφοροποιημένη σχέση του Shields. Για περίπτωση που υπάρχει απόθεση στον πυθμένα των αγωγών η τιμή του  $\beta$  είναι 20 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της ροής χωρίς αποθέσεις. Αν η τιμή της συρτικής τάσης που θα υπολογίζεται από το μοντέλο είναι μικρότερη από

την αντίστοιχη ελάχιστη αυτοκαθαρισμού τότε το μοντέλο θα δείχνει σε ποιό σημείο του αγωγού υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να δημιουργηθούν αποθέσεις. Το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να προγνώσει την ποσότητα των φερτών που θα αποτεθούν. Ο τύπος του Shields δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δώσει ως δεδομένα τα στοιχεία των φερτών υλών της συγκεκριμένης λεκάνης απορροής (διαστάσεις, πυκνότητα κ.α.). Αν ο χρήστης δεν διαθέτει ανάλογα δεδομένα ή είναι χρονοβόρα μια εκτίμηση των ιδιοτήτων των φερτών υλών τότε μπορεί να χρησιμοποιεί τα δεδομένα που διαθέτει το μοντέλο από το καλιμπράρισμα μιας πιλοτικής λεκάνης απορροής.

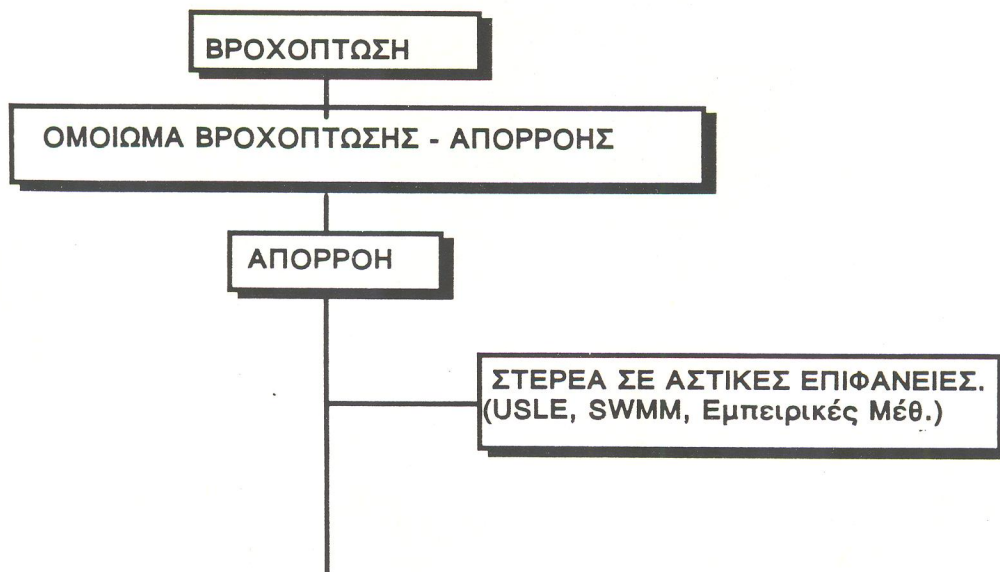
Από τη μελέτη των αποθέσεων της μελέτης μας διαπιστώθηκε η τάξη μεγέθους της συρτικής τάσης που απαιτείται για την πλήρη απόπλυση των αποθέσεων, που όπως δείξαμε είναι διαφορετική από εκείνη που εκτιμάται από το νόμο του Shields. Οπότε για τον ορισμό των συρτικών τάσεων απόπλυσης (ή επαναιώρησης) των αποθέσεων, χρησιμοποιούμε τις συρτικές αντοχές των αποθέσεων που υπολογίσαμε για τις δύο κατηγορίες αποθέσεων με εκτίμηση από την υδραυλική ανάλυση αλλά και με συνυπολογισμό των τιμών που δίνονται από τις νέες αντιλήψεις με τα δύο κριτήρια στερεομεταφοράς που αναλύθηκαν στο παρόν Κεφάλαιο. Σημειώνουμε ότι οι συρτικές αντοχές είναι μόνο εκτίμηση και όχι κάποια πειραματικώς μετρούμενη τιμή.

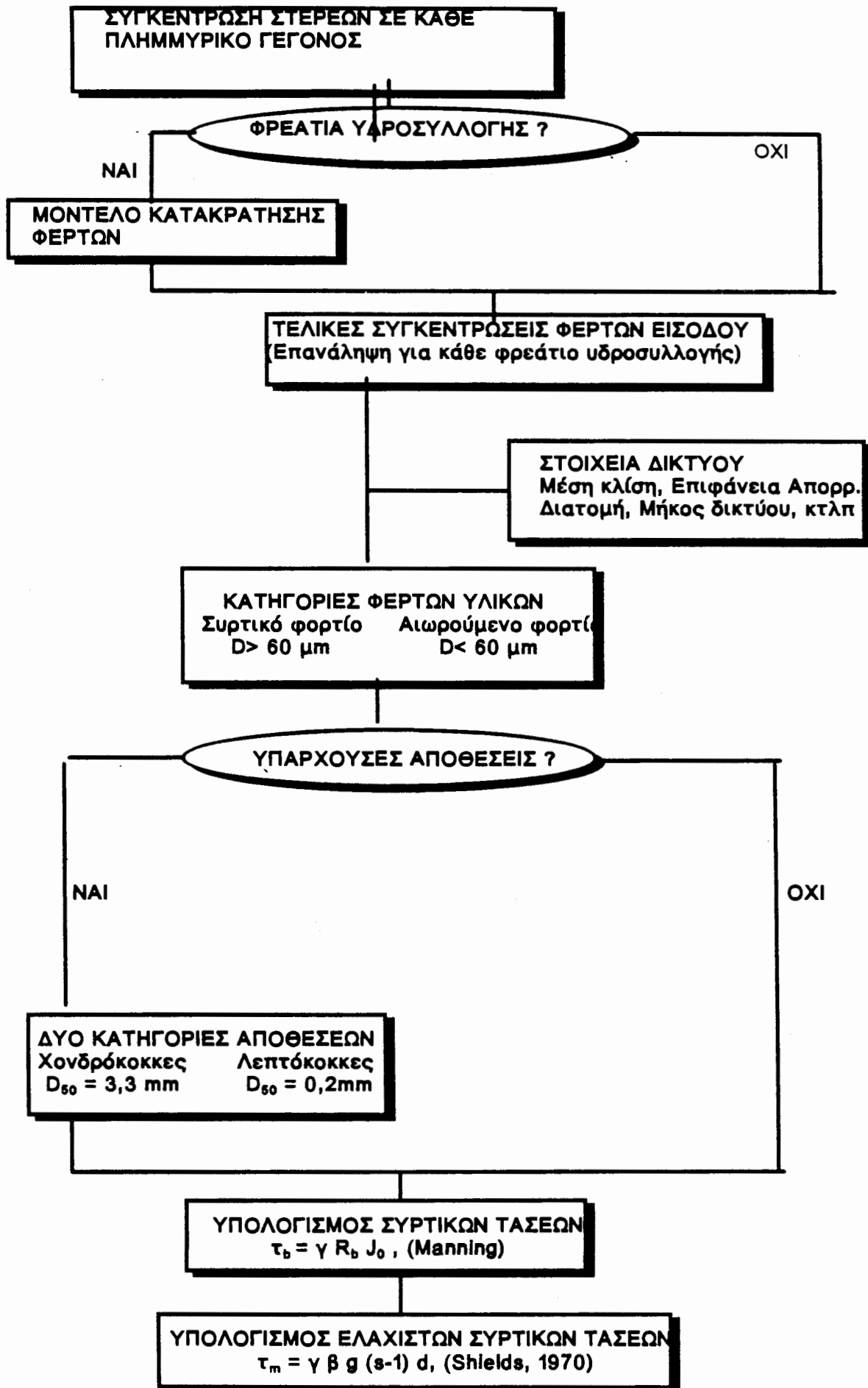
Το μοντέλο αυτό έχει ως μειονεκτήματα ότι είναι εξαιρετικά κοπιώδης η βήμα προς βήμα επαναληπτική διαδικασία καθώς και δεν δίνει εκτιμήσεις μάζας που εκβάλλεται στον αποδέκτη ούτε και του οργανικού φορτίου που εκπλύονται από τις αποθέσεις. Μια μελλοντική ερευνητική προσπάθεια θα μπορούσε να είναι εκτός της πρόγνωσης των σημείων σχηματισμού των αποθέσεων, η πρόγνωση της μάζας φερτών υλικών που θα αποτεθούν ή θα αποπλυθούν κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος. Η δυνατότητα αυτή του μοντέλου θα πρόσφερε τη δυνατότητα οργάνωσης ενός χρονοδιαγράμματος για τον πιο οικονομικό καθαρισμό των αγωγών.

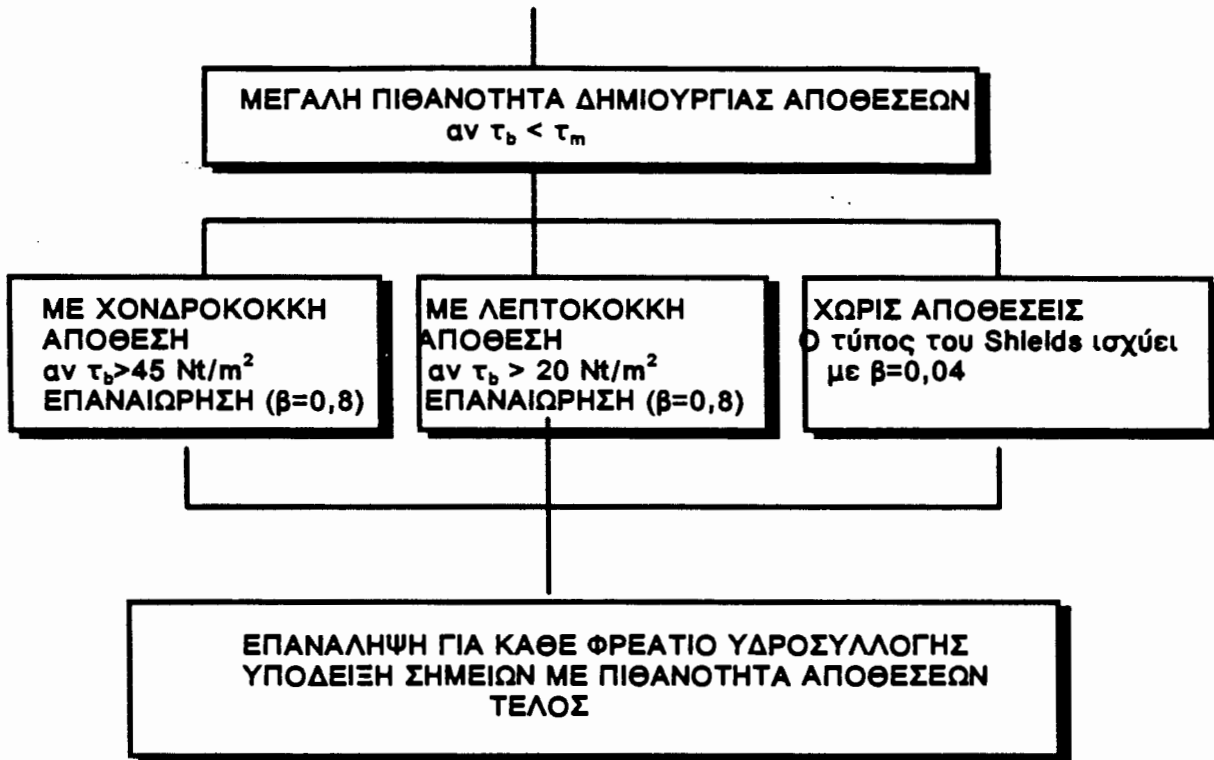
Στο επόμενο Λογικό Διάγραμμα Ροής φαίνεται το σχεδιάσμα του μοντέλου που μπορεί να οικοδομηθεί είτε σαν ένα πρόγραμμα σε γλώσσα FORTRAN ( όπως το SWMM) είτε σε λειτουργικό περιβάλλον Windows, όπου θα μπορούσαν να δημιουργηθούν παραθυρικής μορφής κάρτες διαλόγου, να υπάρχουν έτοιμα δεδομένα σε περίπτωση που ο χρήστης αδυνατεί να έχει τα δικά του στοιχεία και τέλος με τη λειτουργία Help ο χρήστης να μαθαίνει τα επιμέρους μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα αλλά και να αποτελέσει ένα πρότυπο εργαλείο εκμάθησης στοιχείων της Υδρολογίας, της Στερεομεταφοράς και του Σχεδιασμού των Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης. Πριν το Λογικό Διάγραμμα Ροής εμφανίζεται μία κάρτα διαλόγου του προγράμματος και του χρήστη, όπου το πρόγραμμα ζητάει από το χρήστη το είδος της συγκεκριμένης επιφάνειας απορροής. Το παράθυρο αυτό διαλόγου ανήκει στο πρόγραμμα UDMIA (Urban Drainage Modelling Intelligent Assistant) που αναπτύχθηκε πρόσφατα. (S.Griffin, W. Bauwens and K. Ahmad, 1994). Το πρόγραμμα αυτό περιέχει σχεδόν όλα τα μοντέλα και ανάλογα με την κάθε περίπτωση το πρόγραμμα προτείνει στο χρήστη ποιό μοντέλο είναι το πιο ενδεδειγμένο για την περίπτωσή του.

ΣΧΗΜΑ 5.2. : Παράθυρο Διαλόγου του UDMIA για την Εκλογή Λεκάνης Απορροής

Πιο κάτω παρατίθεται το λογικό διάγραμμα ροής που αναπτύξαμε μετά από τη μελέτη στους αγωγούς ομβρίων της περιοχής της Αθήνας. Φυσικά το παρακάτω πρόγραμμα δεν διεκδικεί καμία αποκλειστικότητα ή επιστημονική πρωτοτυπία, πάντως αποτελεί ένα λογικό και σχετικά αξιόπιστο ντετερμινιστικό μοντέλο για την πρόγνωση των σημείων που αναμένουμε τη δημιουργία αποθέσεων μετά από κάθε πλημμυρικό γεγονός.







ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.8.: Λογικό Διάγραμμα Ροής Προτεινόμενου Μοντέλου (Ζαρρής, 1995)

## 5.7. Συμπεράσματα

Το Κεφάλαιο αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί δίνει κάποιες σχεδιαστικές εκτιμήσεις και αναλύσεις καθώς και μια αναφορά σε νέες αντιλήψεις για ένα οικονομικό σχεδιασμό των δικτύων που θα αποκτήσει ελαστικότητα για ένα μεγάλο εύρος υδραυλικών συνθηκών ροής. Η εξήγηση που δίνεται όμως από τους Άγγλους μελετητές δεν είναι, κατά τη γνώμη μας, σωστή και δίνεται μια δική μας εξήγηση της οικονομικότητας με μια υδραυλική ανάλυση από τις παρατηρήσεις μας στο δίκτυο ομβρίων αγωγών της Αθήνας.

Τέλος δίνονται κάποιες σχεδιαστικές πρακτικές για την ελαχιστοποίηση την αποθέσεων καθώς και ένα απλοποιημένο ντετερμινιστικό μοντέλο πρόγνωσης των σημείων του δικτύου που είναι πιθανόν να σχηματισθούν αποθέσεις.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

### ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗΣ & ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

“ ...Είμαι πεπεισμένος ότι τόσο η ερμηνεία της κβαντομηχανικής μηχανικής της Κοπεγχάγης, όσο και η αλγεβρική φορμαλιστική άποψη υπέρσχυσαν των αντίπαλων θεωριών, γιατί ήταν σε θέση να εγγυηθούν περισσότερα αποτελέσματα και περισσότερα θεωρήματα ...”

*L. Tonietti : “Επιστημονική Πολιτική & Εκλογίκευση στη Γερμανία της Βαϊμάρης”, Signum Ap. 19-20, 9/1982*

## 6.1. Γενικές Εισαγωγικές Έννοιες

Οι δεξαμενές κατακράτησης (retention basins) χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην Ευρώπη. Είναι έργα ανακούφισης του παντοροϊκού δικτύου ή του δικτύου ομβρίων τα οποία αποταμιεύουν το νερό των βροχών και το παροχετεύουν κατόπιν χρονικά κατανεμημένο στο δίκτυο και στον τελικό αποδέκτη. Έτσι ανακουφίζεται το κατάντη τμήμα του δικτύου, η εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, που δεν θα μπορούσε να ανταποκριθεί στην μεγάλη αύξηση της παροχής, εργάζεται τώρα με την παροχή σχεδιασμού της. Επίσης ανακουφίζεται και ο αποδέκτης από την περιβαλλοντική επιβάρυνση που δέχεται στα πρώτα λεπτά της απορροής. Όπως είναι ήδη γνωστό τα λεπτόκοκκα υλικά είναι οι κυριότεροι φορείς ρύπανσης της αστικής απορροής. Επίσης όσο πιο έντονο είναι το επεισόδιο βροχόπτωσης τόσο πιο μεγάλες είναι οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων στα πλημμυρικά ύδατα. Επίσης οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις των ρυπαντών παρατηρούνται στα πρώτα στάδια του πλημμυρικού γεγονότος. Η ιδέα που θα περιγραφεί στο Κεφάλαιο αυτό είναι η διπλή λειτουργία των δεξαμενών ως δεξαμενών κατακράτησης - καθίζησης (retention - sedimentation basins), με σκοπό την καθίζηση και την απόρριψη από τη ροή των αιωρούμενων σωματιδίων πριν αυτά φθάσουν και ρυπάνουν τον κεντρικό αποδέκτη. Η λειτουργία των δεξαμενών αυτών θα είναι παρόμοια με εκείνων των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων με τη διαφορά ότι ο χρόνος παραμονής θα είναι αρκετά μικρότερος στις δεξαμενές κατακράτησης - καθίζησης. Πληροφοριακά στην Γερμανία υπάρχουν γύρω στις 10,000 δεξαμενές κατακράτησης και υπάρχει ανάγκη για 20,000 δεξαμενές ακόμα. Ο αριθμός αυτός δεν αναφέρεται σε συνδυασμένες δεξαμενές καθίζησης. Οι Γερμανικές δεξαμενές κατακράτησης για παντοροϊκά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί με όγκο αποθήκευσης γύρω στα 20-40 κυβικά μέτρα ανά εκτάριο αδιαπέρατης έκτασης. Οι δεξαμενές κατακράτησης της Δανίας για δίκτυο ομβρίων είναι 200 κυβικά μέτρα ανά εκτάριο αδιαπέρατης έκτασης. Στην Ελλάδα δεν χρησιμοποιούνται καθόλου δεξαμενές κατακράτησης προς το παρόν.

## 6.2. Σκοπός και Χρησιμότητα των Δεξαμενών Κατακράτησης - Καθίζησης

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η αστική απορροή είναι ρυπασμένη από κάθε μορφής ρυπαντές. Από αιωρούμενα σωματίδια και BOD μέχρι βαρεία μέταλλα και πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Η ρύπανση αυτή προέρχεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες που κατά το πλείστον είναι ρυπογόνες. Η βροχόπτωση παρασύρει τα στερεά αυτά και τα εκβάλλει στον φυσικό αποδέκτη. Δεν είναι όμως η μόνη πηγή μόλυνσης. Όπως είδαμε και στο προηγούμενο Κεφάλαιο πολλές αποθέσεις είναι πλούσιες σε οργανικό υλικό και με σχετικά μικρές συρτικές αντοχές. Αυτό σημαίνει ότι με ένα ισχυρό γεγονός βροχόπτωσης οι αποθέσεις αυτές θα αποπλυθούν εκβάλλοντας όλη τη ρυπογόνο σύστασή τους σε αυξημένες συγκεντρώσεις στην αρχή της βροχής δημιουργώντας σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αρχική απόπλυση (first flush). Συνήθως τα δίκτυα ομβρίων δεν καταλήγουν σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (λόγω του μεγάλου κόστους απομάκρυνσης των ρυπαντών από τα όμβρια ύδατα) αλλά στο οικοσύστημα των εκβολών, οπότε η συστηματική απόρριψη ρυπαντών μπορεί να συντελέσει μεγάλες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Η ιδέα στην οποία βασίζονται οι δεξαμενές κατακράτησης-καθίζησης είναι ακριβώς η κατακράτηση

της ρυπογόνου πρώτης απόπλυσης. Επομένως οι στόχοι των δεξαμενών κατακράτησης -καθίζησης είναι οι εξής:

- Να κατακρατηθούν οι ρυπαντές μέσα στο δίκτυο ομβρίων, οπότε σταδιακά να έχουμε μια βελτίωση της ποιότητας των πλημμυρικών υδάτων που εκβάλλονται από το σύστημα και επομένως μείωση των βλαβερών επιδράσεων στα οικοσυστήματα των εκβολών.
- Να αποτρέψει το ενδεχόμενο πλημμυρών κατάντη κατακρατώντας προσωρινά σημαντικές ποσότητες ομβρίων, επομένως να λειτουργεί το κατάντη δίκτυο με μικρότερη παροχή λόγω ανάσχεσης και
- Στην περίπτωση που έχουμε εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, η δεξαμενή κατακράτησης τροφοδοτεί την εγκατάσταση με μία μικρότερη παροχή αιχμής της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων.

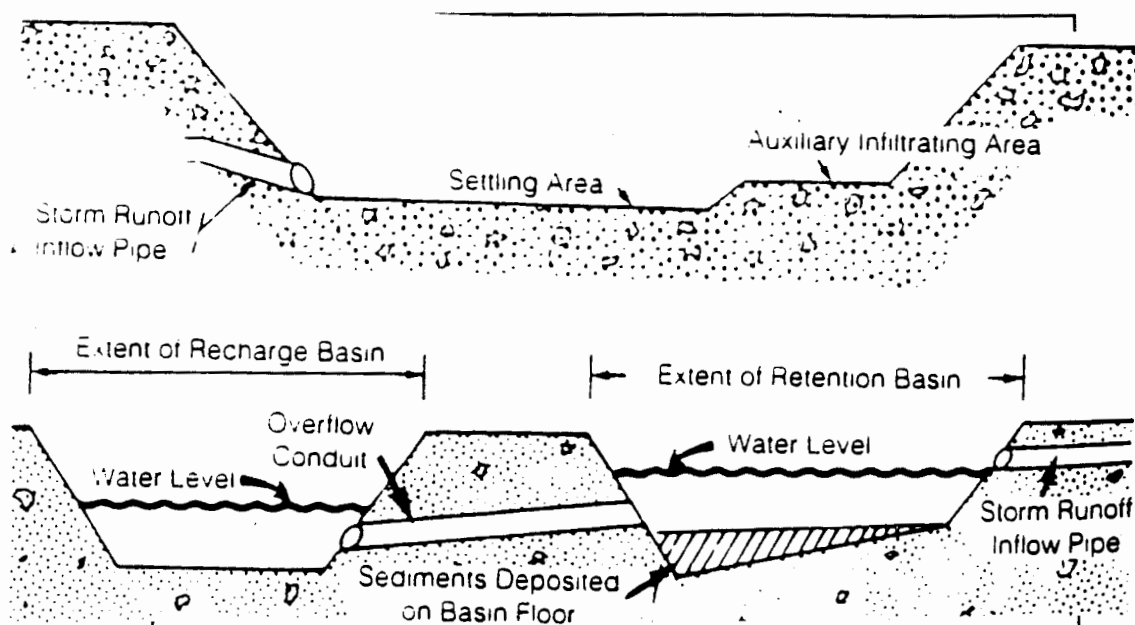
### 6.3. Μορφές Δεξαμενών Κατακράτησης-Καθίζησης

Οι δεξαμενές κατακράτησης - καθίζησης μπορεί να είναι είτε ανοιχτές είτε κλειστές.

Ανοιχτές γίνονται μόνο για δίκτυα ομβρίων και όταν το κόστος γης είναι μικρό αφού η έκταση που καταλαμβάνουν οι ανοιχτές δεξαμενές είναι μεγάλη. Οι δεξαμενές πρέπει να έχουν βάθος τουλάχιστον ενός μέτρου για να μην προκαλέσει πυκνή βλάστηση το οργανικό φορτίο των φερτών υλών. Οι κλίσεις στις όχθες πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να διευκολύνονται οι εργασίες καθαρισμού της κοίτης της δεξαμενής ενώ απαιτούνται και μέτρα φύλαξης από ατυχήματα (είσοδος μικρών παιδιών). Φυσικά το όλο σύστημα διαθέτει και υπερχειλιστή ασφαλείας ώστε σε εξαιρετικά υδρολογικά γεγονότα να απορρέει η επιπλέον παροχή στους υδάτινους αποδέκτες. Η καθίζηση των φερτών υλικών γίνεται στο χώρο αυτό και ο χρόνος παραμονής των υδάτων εξαρτάται από τη βροχόπτωση και κυρίως από τις ταχύτητες καθίζησης των φερτών υλικών. Η απομάκρυνση των υδάτων προς τον αποδέκτη γίνεται με το άνοιγμα κατάλληλων θυροφραγμάτων. Οι δεξαμενές αυτές εκ των πραγμάτων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περιοχή της Αθήνας. Στο παρακάτω σχήμα 6.1 φαίνεται το περίγραμμα μίας ανοιχτής δεξαμενής κατακράτησης-καθίζησης.

Πιο ρεαλιστική λύση για την περιοχή της Αθήνας φαίνεται να είναι οι κλειστές υπόγειες δεξαμενές. Οι δεξαμενές αυτές μπορεί να είναι είτε κεντρικές είτε αποκεντρωμένες. Δηλαδή μπορούμε να έχουμε μία κεντρική δεξαμενή στο τελευταίο σημείο του δικτύου πριν την τελική εκβολή είτε σπανιότερα την εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Όπως γίνεται αμέσως φανερό, τουλάχιστον για την περιοχή της Αθήνας, η εναλλακτική λύση της κεντρικής δεξαμενής είναι απίθανη λόγω των πολύ μεγάλων διαστάσεων που αναγκαστικά θα πρέπει να έχει η δεξαμενή. Η εναλλακτική αυτή λύση θα μπορούσε να βρει εφαρμογή σε οικισμό με μικρή λεκάνη απορροής. Η άλλη λύση είναι οι αποκεντρωμένες τοπικές δεξαμενές που τοποθετούνται στην έξοδο κάθε υπολεκάνης απορροής της Αθήνας. Προσωπική μας γνώμη αποτελεί η άποψη ότι οι αποκεντρωμένες μικρές δεξαμενές είναι η προσφορότερη λύση αφού το κόστος τους μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερο, ενώ ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι αν κάποια δεξαμενή δεν λειτουργεί τότε η περιβαλλοντική επιβάρυνση δεν θα είναι τόσο μεγάλη σε σύγκριση με το ενδεχόμενο να τεθεί εκτός λειτουργίας η τελική δεξαμενή. Η διαστασιολόγηση των δεξαμενών όσον αφορά την κατακράτηση πλημμυρικού όγκου γίνεται από κατάλληλα υδρολογικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί γιαυτόν το σκοπό. Η δική μας συμβολή θα είναι η

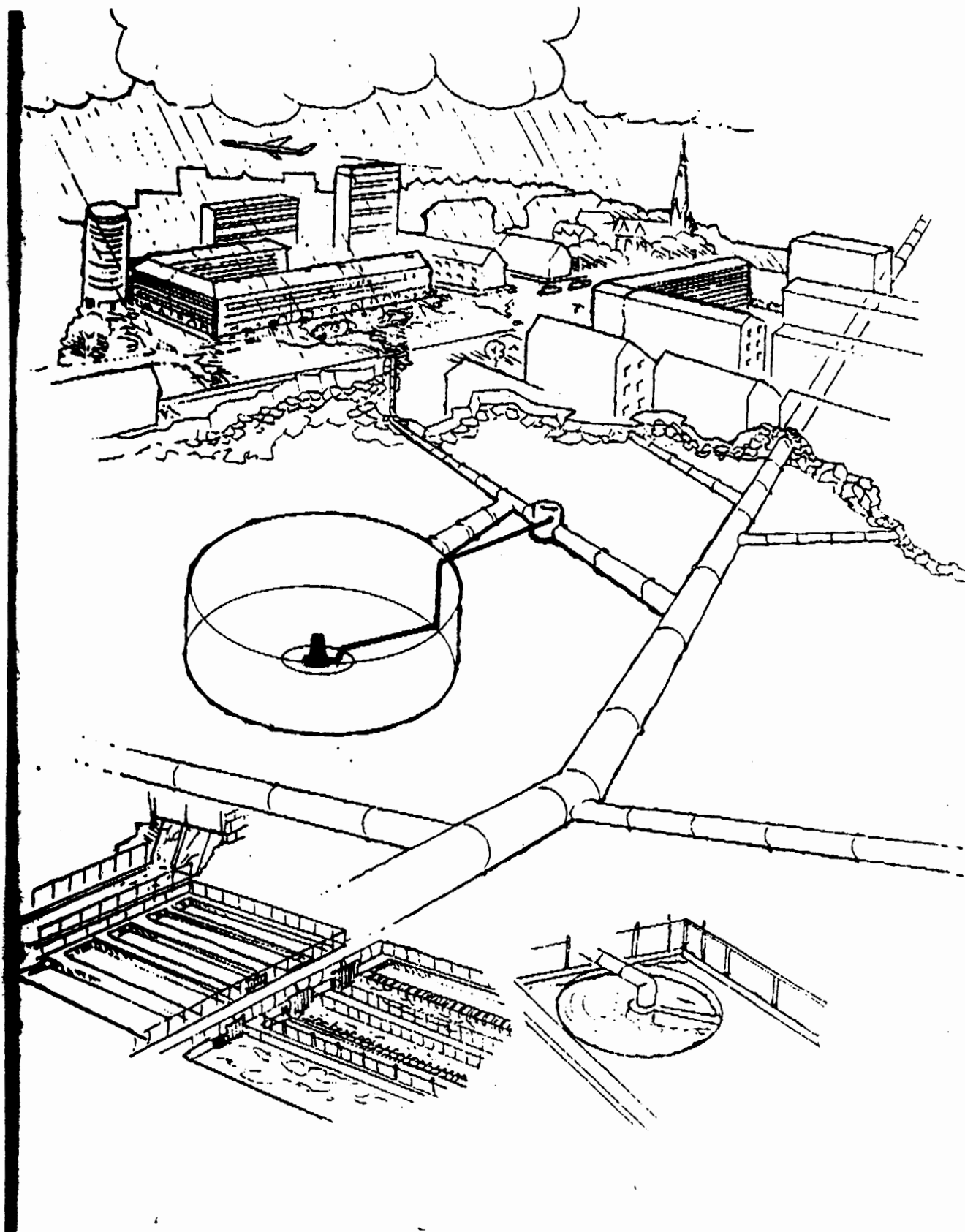
διασπορά των δεξαμενών αυτών ώστε να καθιζάνει ένα ικανοποιητικό ποσοστό των κατακρατούμενων φερτών υλικών.



ΣΧΗΜΑ 6.1: Ανοιχτές Δεξαμενές Κατακράτησης-Καθίζησης (ASCE, 1985)

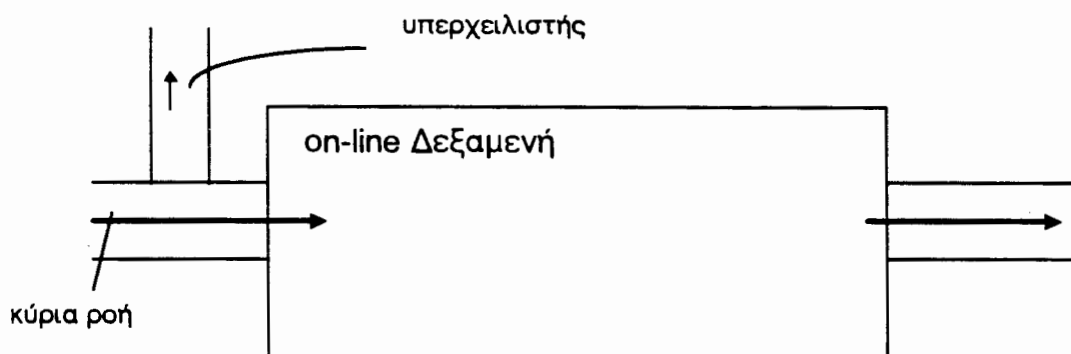
Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η αποστολή των δεξαμενών κατακράτησης-καθίζησης στο πλαίσιο της γενικότερης αστικής αποχέτευσης. Η δεξαμενή βρίσκεται στην έξοδο της λεκάνης και κατακρατά τα πρώτα στάδια της απορροής με τη βοήθεια κάποιας σχετικής κατασκευής όπως μια βαλβίδα αντεπιστροφής, ενός θυροφράγματος ή ενός υπερχειλιστή. Όπως επομένως διαπιστώνουμε οι δεξαμενές κατακράτησης-καθίζησης αποκτούν σημαντικό ρόλο και στην απομάκρυνση των ρυπαντών από την αστική απορροή.

Στις κλειστές δεξαμενές κατακράτησης-καθίζησης μπορούμε να διακρίνουμε δύο κατηγορίες. Τις on-line δεξαμενές και τις off-line δεξαμενές. Στα παντοροϊκά δίκτυα η ροή άνυδρης περιόδου περνά από τις on-line δεξαμενές. Στην περίοδο βροχοπτώσεων στις on-line δεξαμενές τα νερά θα έχουν αναγκαστικά μικρότερο χρόνο παραμονής μέσα στη δεξαμενή επομένως δεν θα είναι ικανοποιητική η καθιζισιμότητα των φερτών υλικών. Στις off-line δεξαμενές ο χρόνος παραμονής είναι πολύ μεγαλύτερος με συνέπεια τη μεγαλύτερη απόδοση της εγκατάστασης. Αναλυτικότερη παρουσίαση στην επόμενη σελίδα. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η διάταξη και η χρησιμότητα των δεξαμενών κατακράτησης / καθίζησης. Βέβαια στο σχήμα η δεξαμενή αυτή υπηρετεί μόνο ως δεξαμενή κατακράτησης αλλά η αρχή παραμένει η ίδια αφού η ίδια δεξαμενή μπορεί να λειτουργήσει και ως δεξαμενή καθίζησης. Είναι φανερό ότι το δίκτυο του σχήματος είναι ένα παντοροϊκό δίκτυο.



ΣΧΗΜΑ 6.2. : Σχηματική Παρουσίαση της Δεξαμενής Κατακράτησης-Καθίζησης (ITP-Flygt)

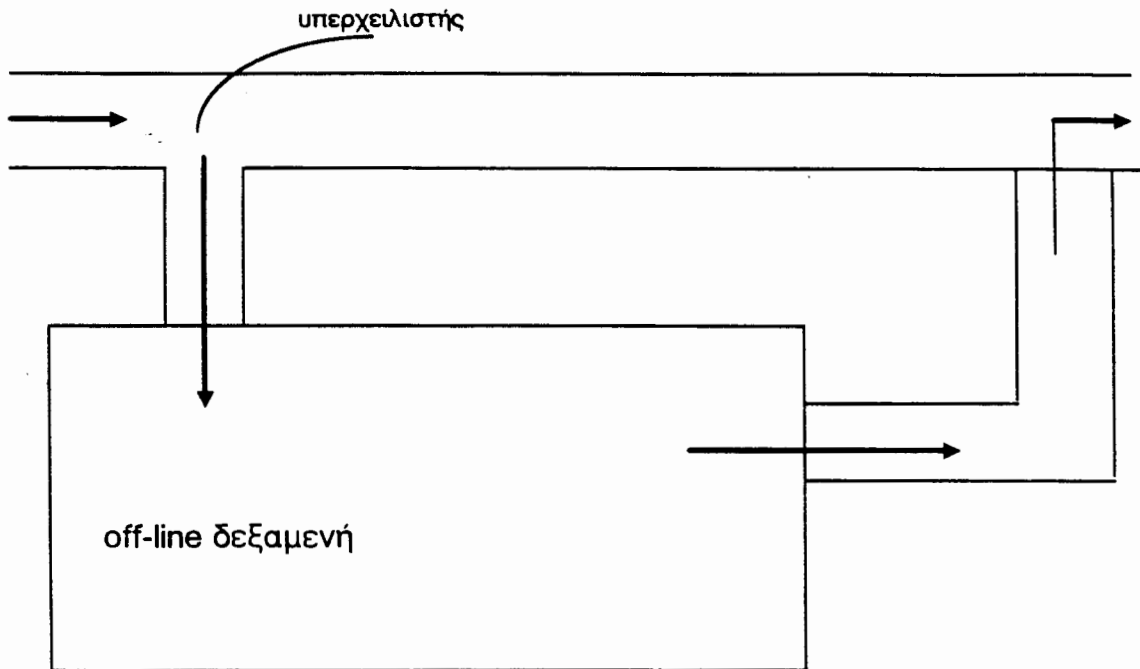
**6.3.1. On-Line Δεξαμενές:** Μια on-line δεξαμενή είναι συνέχεια σε χρήση καθώς η κύρια ροή του αγωγού περνά μέσα από τη δεξαμενή και περιορίζεται από μια κατασκευή ελέγχου όπως είναι μια βαλβίδα αντεπιστροφής ή ένας υπερχειλιστής ή ακόμα και μιά αντλία αν η δεξαμενή λειτουργεί και ως μέρος αντλιοστασίου. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η σχηματική παράσταση μίας on-line δεξαμενής.



ΣΧΗΜΑ 6.3. : On-line Δεξαμενή Κατακράτησης-Καθίζησης

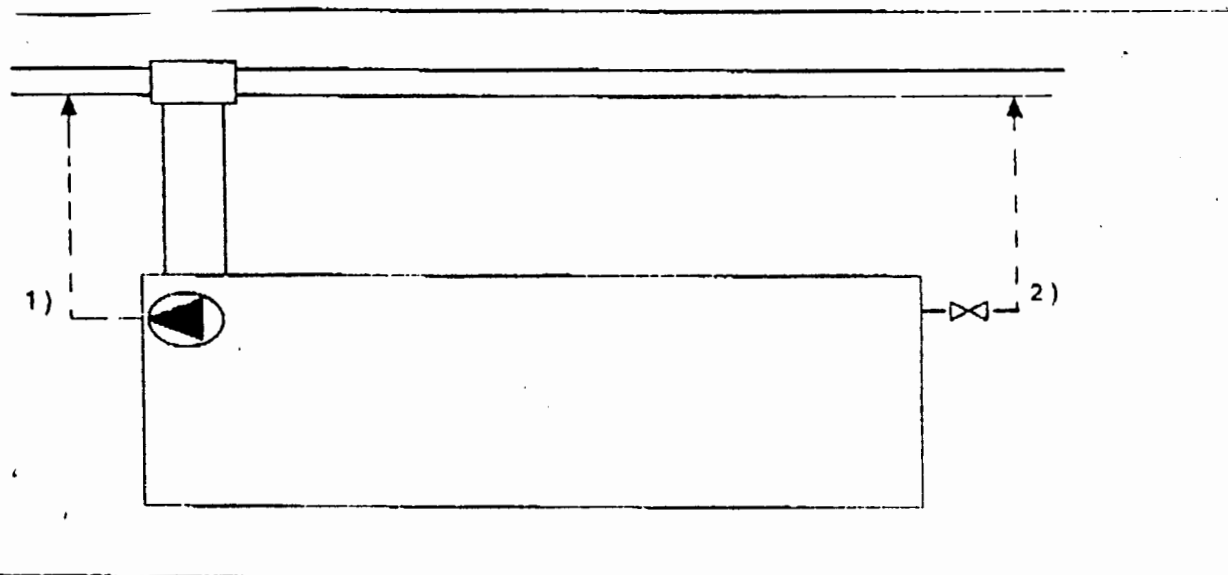
Το μειονέκτημα της on-line δεξαμενής σαν δεξαμενή καθίζησης είναι ότι επειδή είναι συνεχούς ροής ο χρόνος παραμονής στη δεξαμενή θα είναι πολύ μικρός για να καθιζάνει ένα ικανοποιητικό ποσοστό φερτών υλικών ενώ δεν μας ενδιαφέρουν και οι ροές που δεν αντιστοιχούν στην πρώτη απόπλυση. Βέβαια μπορεί να τοποθετηθεί υπερχειλιστής στην είσοδο της δεξαμενής κατά τέτοιο τρόπο ώστε όταν γεμίσει η δεξαμενή με την πρώτη απορροή, ο υπερχειλιστής να στέλνει την υπόλοιπη ροή από παρακαμπτήριο αγωγό που θα καταλήγει στην προέκταση του κύριου αγωγού. Ο υπερχειλιστής μπορεί να μπαίνει σε λειτουργία με τη βοήθεια αυτοματοποιημένου συστήματος αισθητήρων που θα είναι συνδεδεμένοι με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αισθητήρες θα παρακολουθούν τη στάθμη του νερού στη δεξαμενή. Όταν η δεξαμενή τείνει να γεμίσει η κεντρική μονάδα του υπολογιστή θα δίνει εντολή στον υπερχειλιστή να μπαίνει σε λειτουργία. Το σύστημα αυτό όμως είναι εξαιρετικά πολύπλοκο και δαπανηρό ενώ οι συνεχείς βλάβες λόγω ελλιπούς συντήρησης κάνει το σύστημα αναξιόπιστο. Η δεξαμενή μετά το πέρας της καθίζησης των φερτών υλών μπορεί να αδειάσει με φυσικό τρόπο (με τη βαρύτητα) μέσω βαλβίδων αντεπιστροφής που τοποθετούνται στο πίσω μέρος της δεξαμενής. Αν δεν τοποθετηθεί σύστημα υπερχειλιστή και παρακαμπτήριου αγωγού τότε ή ο χρόνος παραμονής πρέπει να είναι πολύ μικρός (για να μην δημιουργηθεί ανάσχεση πλημμύρας με απρόβλεπτες συνέπειες για τις ανάντη περιοχές) ή το διάστημα ροής μέσα στη δεξαμενή να είναι μεγαλύτερο, ώστε να επιτευχθούν κατάλληλες συνθήκες καθίζησης. Επομένως για σκοπούς καθίζησης οι on-line δεξαμενές πρέπει να αποφεύγονται.

**6.3.2. Off-Line Δεξαμενές:** Το κυριότερο πλεονέκτημα των off-line δεξαμενών είναι ότι αποτελούν απλές εφαρμογές με απλά και αξιόπιστα συστήματα ελέγχου. Η είσοδος του νερού στη δεξαμενή γίνεται με τη χρήση υπερχειλιστή που όταν, κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος, η ελεύθερη επιφάνεια φθάσει σε ένα προκαθορισμένο ύψος ο υπερχειλιστής οδηγεί την ροή της πρώτης απόπλυσης στη off-line δεξαμενή. Σχηματική παράσταση μίας off-line δεξαμενής παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



ΣΧΗΜΑ 6.4. : Σχηματική Παράσταση off-line Δεξαμενής Κατακράτησης-Καθίζησης

Με τις off-line δεξαμενές μπορούμε να κατακρατήσουμε τη ροή που μας ενδιαφέρει και η οποία να παραμείνει για τέτοιο χρόνο ώστε να ολοκληρωθεί η καθίζηση και η απομάκρυνση των ρυπαντών. Η δεξαμενή μπορεί να τοποθετηθεί αμέσως μετά τον υπερχειλιστή. Καλύτερη περίπτωση είναι να τοποθετηθεί η δεξαμενή μετά από έναν αγωγό μεγάλων διαστάσεων που να προκαλεί καταστροφή της ενέργειας από την υπερχειλίση και να μειώνει όσο το δυνατόν τις ταχύτητες εισόδου στη δεξαμενή, για να έχουμε καλύτερες συνθήκες καθίζησης.



ΣΧΗΜΑ 6.5 : Σχηματική Παράσταση Εκκένωσης Δεξαμενής (1) με αντλία, (2) με βαλβίδα

Μετά το πέρας της διαδικασίας οι off-line δεξαμενές μπορούν να αδειάσουν είτε με τη χρήση αντλίας που αντλεί τα νερά πίσω στο δίκτυο ή, αν η τοπογραφία το επιτρέπει, με βαρύτητα μέσω μιας βαλβίδας αντεπιστροφής. Η διαδικασία της εκκένωσης της δεξαμενής φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

Πολλές δεξαμενές επίσης έχουν ως σύστημα εκκένωσης ένα υπερχειλιστή ο οποίος έχει ως στάθμη υπερχειλίσης τη στάθμη πλήρωσης. Σε τέτοια περίπτωση θα πρέπει ο υπερχειλιστής να είναι όσο το δυνατόν καλύτερα σχεδιασμένος ώστε να μην προκαλεί τύρβη κατά την υπερχείλιση που θα είχε αρνητικές συνέπειες στην απόδοση της καθίζησης.

#### 6.4. Διαστασιολόγηση Δεξαμενών Κατακράτησης-Καθίζησης

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η διαστασιολόγηση που θα ακολουθήσει θα αφορά την ικανότητα της δεξαμενής ώστε να καθίζουν όσο το δυνατόν περισσότερα φερτά υλικά. Η πειραματική διαδικασία που θα περιγραφεί παρακάτω έγινε στο πιλοτικό σταθμό της ΕΥΔΑΠ στη Μεταμόρφωση και θα ήταν αδύνατη χωρίς τη πολύτιμη συμβολή του υπ. διδάκτορα ΕΜΠ κ. Φώτη Γιαννακόπουλου.

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας ήταν να μετρήσουμε τις ταχύτητες καθίζησης των στερεών σωματιδίων από την απόθεση της εκβολής στον Κηφισό Ποταμό. Η ιδέα ήταν ότι στην υποθετική περίπτωση που κατασκευάζαμε μια τέτοια δεξαμενή λίγο πριν την εκβολή του δικτύου τότε το πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα φερτών θα είναι φυσικά τα φερτά των αποθέσεων της εκβολής. Επίσης με το πείραμα της καθίζησης θα προσπαθήσουμε να διαπιστώσουμε αν τα λεπτόκοκκα στερεά της πλημμυρικής απορροής έχουν την τάση να συσσωματώνονται.

Το πείραμα της καθίζησης έγινε σε στήλη καθίζησης (settling column) ύψους δύο μέτρων. Σε ύψη 1.4m (σημείο 3) και 0,5m (σημείο 6) από τη βάση της στήλης υπάρχουν ειδικά προσαρμοσμένες κάνουλες για τη λήψη δειγμάτων αιωρούμενων στερεών. Ζυγίζουμε 25 γραμμάρια στερεών και τα αραιώνουμε σε μίγμα αρχικής συγκέντρωσης  $SS=500 \text{ mg/l}$ . Το αρχικό μίγμα έχει σκοπό να υποκαταστήσει την πραγματική συγκέντρωση φερτών, ελλείψει πραγματικών μετρήσεων που πάντως βρίσκεται σε λογικά πλαίσια. Γεμίζουμε τη δίμετρη στήλη με νερό και αφήνουμε το μίγμα από την κορυφή της στήλης. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα παίρνουμε από τις κάνουλες δείγματα των μιγμάτων και στο εργαστήριο έγινε η μέτρηση των SS στα δείγματα αυτά. Από την ποσότητα των αιωρούμενων στερεών σε κάθε δείγμα παίρνουμε τις % απομακρύνσεις στερεών σε κάθε δείγμα. Ο δείκτης της απομάκρυνσης  $X_{ij}$  αντιστοιχεί στο κατά βάρος ποσοστό των στερεών που έχουν απομακρυνθεί, δηλαδή δεν υπάρχουν στο δείγμα που πάρθηκε στο βάθος  $Z_i$  τη χρονική στιγμή  $t_j$ . Στην επόμενη σελίδα φαίνονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε κάθε θέση. Μερικά δείγματα δεν ταίριαζαν στην γενική τάση, λόγω χονδροειδών λαθών που είναι άλλωστε αναμενόμενα, και τα οποία απομακρύνθηκαν και δεν πάρθηκαν υπόψιν στον υπολογισμό των ταχυτήτων. Η γενική τάση είναι το ποσοστό των απομακρυνόμενων σωματιδίων πρέπει να αυξάνονται με το χρόνο για την ίδια θέση και για τον ίδιο χρόνο τα απομακρυνόμενα στην πάνω θέση πρέπει να είναι περισσότερα από την κάτω θέση.



α/α πειραματος	Αθροιστικός Χρόνος (sec)	Όγκος Δείγματος (ml)	SS (mg/lit)	% Απομακρυνόμενα	Όγκος Δείγματος (ml)	SS (gr/ml)	% Απομακρυνόμε να
1	60	145	125	67	145	141	72
2	90	135	130	74	120	76	85
3	180	79	163	75	55	94	81
4	360	71	113	77	80	69	86
5	660	77	91	82	79	71	86
6	1260	88	74	85	86	64	87
7	2160	94	59	88	89	49	90
8	3960	160	46	91	99	15	97

**ΘΕΣΗ 3**

**ΘΕΣΗ 4**

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1. : Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας**

Από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας προέκυψαν αποτελέσματα που συμφωνούν γενικά με την τάση που αναφέραμε σε προηγούμενο σημείο. Για τον ίδιο χρόνο συλλογής των δειγμάτων το ποσοστό των απομακρυνόμενων στερεών από το μίγμα στο ψηλότερο σημείο είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο στο χαμηλότερο σημείο. Εξάλλου για μεγαλύτερους χρόνους το ποσοστό απομάκρυνσης αυξάνεται.

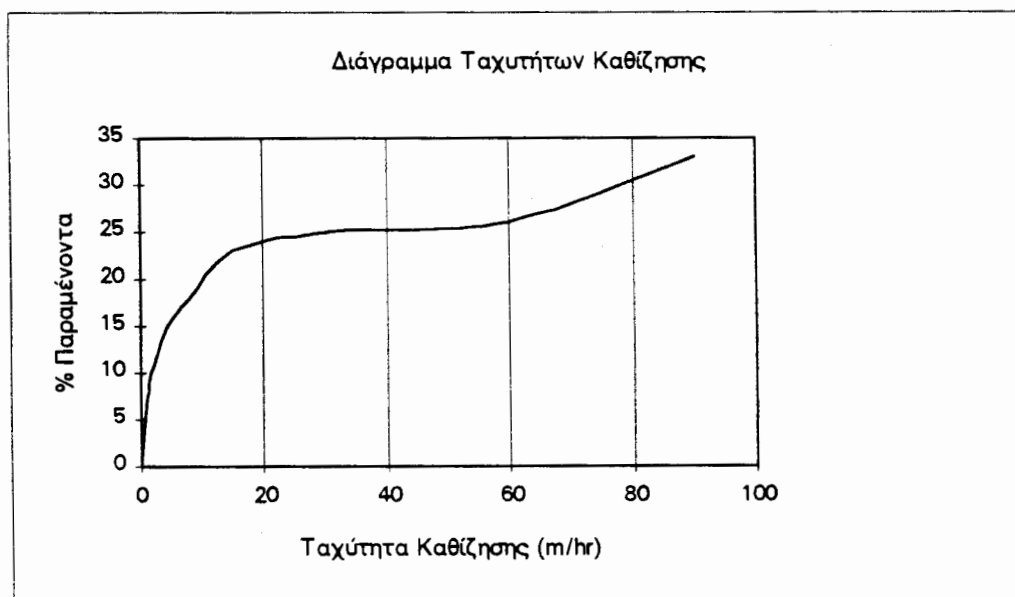
Από τον παραπάνω Πίνακα σχεδιάζουμε τις καμπύλες ίσων ποσοστών δηλαδή τις καμπύλες ίσου ποσοστού απόδοσης. Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζονται στην επόμενη σελίδα.

Θεωρούμε ότι πιο αξιόπιστα αποτελέσματα των ταχυτήτων καθίζησης δίνει το σημείο 6 που βρίσκεται μόλις 0,5 μέτρα από τον πυθμένα της στήλης. Τα αποτελέσματα δίνουν τον επόμενο Πίνακα με τις τιμές των ταχυτήτων καθίζησης.

Χρόνος Καθίζησης (sec)	60	90	180	360	660	1260	2160	3960
% Απομακρυνόμενο	67	74	75	77	82	85	88	91
Ταχύτητα Καθίζησης (m/h)	90	60	30	15	8	4,3	2,5	1,4

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2. : Ταχύτητες Καθίζησης με Απομάκρυνση

Σχεδιάζουμε τα αποτελέσματα του προηγούμενου πίνακα και έχουμε το διάγραμμα 6.1. Το διάγραμμα δείχνει τη μεταβολή των ταχυτήτων καθίζησης με την μεταβολή του ποσοστού των παραμένοντων στερεών στα συλλεγόμενα δείγματα. Το ποσοστό των παραμένοντων στερεών δείχνει τη διάσταση των στερεών και φυσικά την ταχύτητα καθίζησης τους.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.1. : Ταχύτητες Καθίζησης Ανά Παραμένοντα Στερεά



Φαίνεται λοιπόν από το Διάγραμμα 6.1 ότι τα παραμένοντα σωματίδια με μικρό ποσοστό είναι τα πιο λεπτόκοκκα με μικρότερες ταχύτητες καθίζησης. Όσο το ποσοστό των παραμενόντων σωματιδίων αυξάνεται τόσο αυξάνουν και οι ταχύτητες καθίζησης αφού οι διαστάσεις των σωματιδίων ήταν αρκετά μεγάλες. Πράγματι, από τις παρατηρήσεις μας κατά την εκτέλεση του πειράματος καθώς το μίγμα των στερεών τοποθετείτο στη στήλη τότε αμέσως πολλά σωματίδια έπεφταν ως μεμονωμένα (discrete) σωματίδια ενώ τα πολύ λεπτόκοκκα σωματίδια δημιουργούσαν ένα νέφος σωματιδίων με αρκετά μικρότερες ταχύτητες καθίζησης. Όπως βλέπουμε επίσης από τις καμπύλες ίσης απόδοσης (Διάγραμμα 6.2) τα χονδρόκοκκα σωματίδια έχουν ευθείες γραμμές που σημαίνει ότι δεν συσσωματώνονται ενώ για απομάκρυνση 90% (πολύ λεπτά σωματίδια) η γραμμή είναι καμπύλη που σημαίνει ότι τα λεπτόκοκκα σωματίδια αστικής απορροής έχουν τη τάση να συσσωματώνονται δημιουργώντας καλύτερες συνθήκες καθίζησης.

Η ταχύτητα καθίζησης που αντιστοιχεί στην 90% της απομάκρυνσης είναι η  $V_{10}$  που σημαίνει ότι μόνο το 10% των σωματιδίων έχουν ταχύτητες καθίζησης μικρότερη από αυτήν την τιμή. Η τιμή αυτή επομένως που θα χρησιμοποιήσουμε στη διαστασιολόγηση είναι η  $V_{10}=1.4$  m/hr. Η τιμή αυτή είναι 10 φορές μεγαλύτερη από τις τιμές που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία (G. Chebbo et A. Bachoc, 1992) για σωματίδια μικρότερα των 50 μm ενώ είναι 10 φορές μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή για σωματίδια μεγαλύτερα των 50 μm. Δυστυχώς την περίοδο που γράφεται το κείμενο της διπλωματικής δεν γνωρίζουμε την ακριβή κοκκομετρία του δείγματος ώστε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα.

Μια καλά σχεδιασμένη δεξαμενή καθίζησης είναι εκείνη που επιτρέπει το μεγαλύτερο ποσοστό των φερτών υλικών να καθιζάνουν. Όμως όσο πιο τέλεια να έχει κατασκευαστεί η δεξαμενή παραμένει ουτοπία να παγιδεύει το 100% των φερτών υλικών. Ας υποθέσουμε ότι μετά από οικονομική και περιβαλλοντική μελέτη θέλουμε να έχουμε 75% απομάκρυνση φερτών υλών. Ας θεωρήσουμε ότι η ταχύτητα ροής μέσα στη δεξαμενή θα είναι 1 cm/sec. Ας θεωρήσουμε επίσης ότι το βάθος της δεξαμενής είναι 3 μέτρα. Τότε ο χρόνος καθίζησης θα είναι :

$$D / w = 300 \text{ cm} / 0,039 \text{ cm/sec} = 7692,31 \text{ sec}$$

Δηλαδή ο χρόνος παραμονής της δεξαμενής θα είναι λίγο περισσότερος από δύο ώρες, που σημαίνει ότι η δεξαμενή κατακράτησης θα κατακρατά μόνο την αρχή της απορροής.

Αν υποθέσουμε επομένως ότι η ροή στη δεξαμενή θα είναι 1 cm/sec, τότε το συνολικό μήκος της δεξαμενής θα είναι:

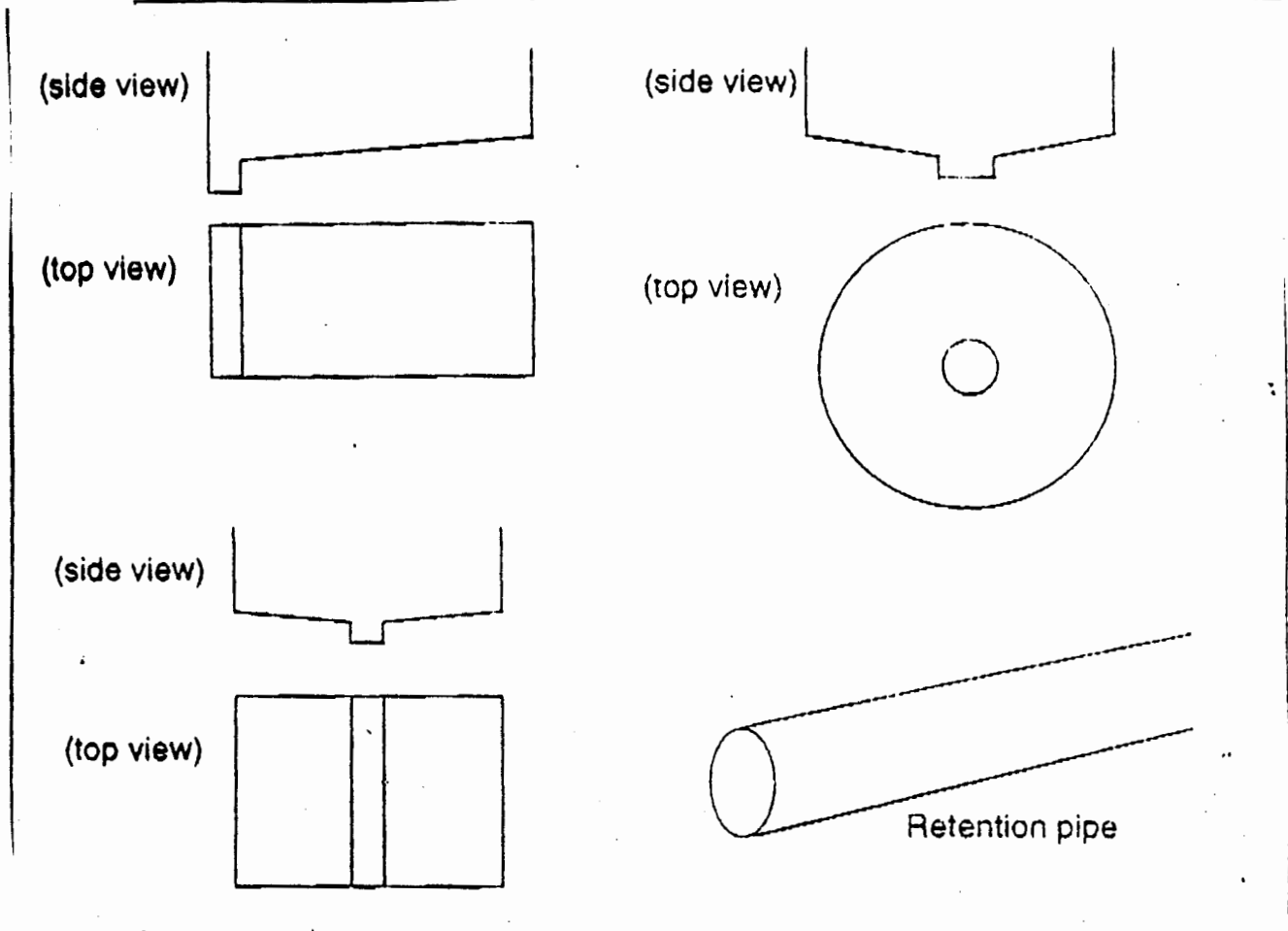
$$L = 1 \text{ cm} / \text{sec} * 7692,31 \text{ sec} = 7692,31 \text{ cm} = 76,92 \text{ m}$$

Επειδή έχουμε υποθέσει ότι επιθυμούμε να καθιζάνει το 75% των στερεών, τότε το συνολικό μήκος της δεξαμενής θα είναι:

$$L_1 = 0,75 * 76,92 \text{ m} = 57,69 \text{ m} \approx 58 \text{ m}$$

οπότε το συνολικό μήκος της δεξαμενής θα είναι 58 μέτρα και ο όγκος της, αν υποθέσουμε ένα πλάτος γύρω στα 20 μέτρα, θα είναι 3480 κυβ.

μέτρα. Επομένως η δεξαμενή θα έχει ορθογωνικό σχήμα με πυθμένα που θα έχει κλίση 1 έως 5% αλλά 1% είναι αρκετή για την πλήρη εκκένωση του νερού από τη δεξαμενή. Τα φερτά υλικά που θα καθιζάνουν θα συγκεντρώνονται σε ένα αυλάκι στην άκρη της δεξαμενής οπότε και θα απομακρύνονται αργότερα. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε σχηματικές παραστάσεις διαφόρων μορφών δεξαμενών. Ο αγωγός κατακράτησης (retention pipe) είναι ένας υπερδιαστασιοποιημένος αγωγός με σκοπό την αποθήκευση πλημμυρικής απορροής μέσα στο σύστημα ομβρίων.



ΣΧΗΜΑ 6.6 : Παραδείγματα Δεξαμενών Κατακράτησης - Καθίζησης

Παρακάτω παραθέτουμε και μια φωτογραφία μιας από τις δύο δεξαμενές κατακράτησης που λειτουργούν στο αεροδρόμιο του Μονάχου για την αποθήκευση και επεξεργασία των εξαιρετικά ρυπασμένων ομβρίων που απορρέουν από τους διαδρόμους προσγείωσης - απογείωσης. Η δεξαμενή βρίσκεται σε λειτουργία με αντλίες και εκτοξευτήρες που μεταφέρουν το νερό στη δεξαμενή και τα φερτά της απορροής καθιζάνουν στον πυθμένα. Ο καθαρισμός του πυθμένα γίνεται με την επαναιώρηση των φερτών υλικών με τη χρήση πανίσχυρων στροβίλων που δίνουν τύρβη και επαναιωρούν τα στερεά υλικά.

Σαν συμπέρασμα από την παρουσίαση των δεξαμενών κατακράτησης - καθίζησης προκύπτει ότι το όφελος από μια γενικευμένη χρήση τους είναι σημαντικό και για την αντιπλημμυρική προστασία των αστικών περιοχών αλλά και για τη βελτίωση της ποιότητας της αστικής απορροής και κατά συνέπεια τη προστασία των οικοσυστημάτων των

εκβολών. Κατά συνέπεια προτείνεται η συστηματική εφαρμογή τους στην περιοχή της Αθήνας.



ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 6.1 : Δεξαμενή Κατακράτησης Σε Λειτουργία (ITT-Flygt)

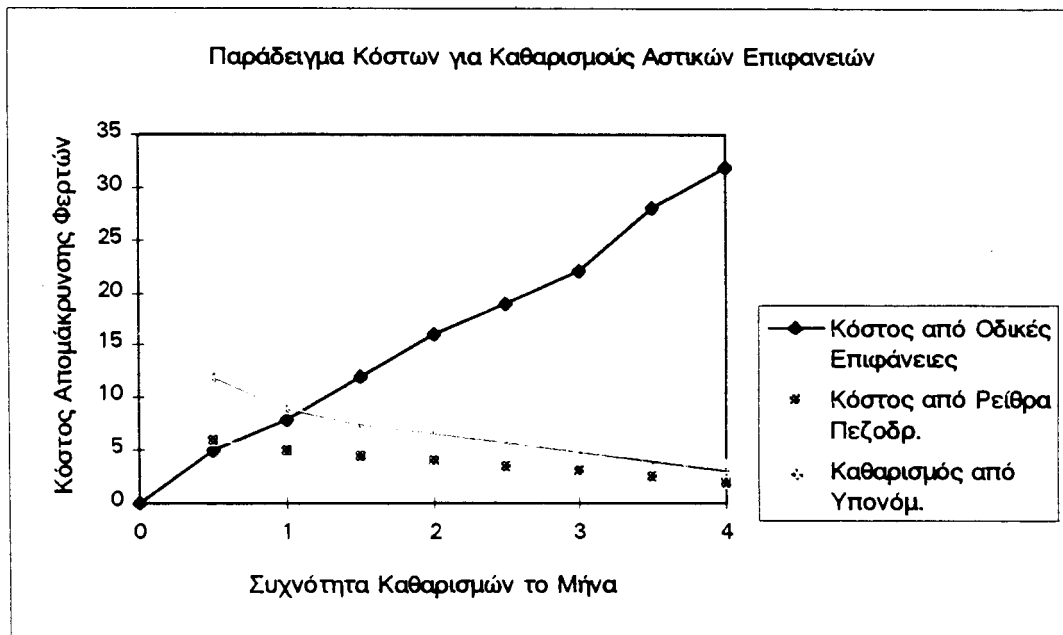
## 6.5. Εισαγωγή στις Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης

Οι Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης (Best Management Practices) είναι τρόποι διαχείρισης των αστικών επιφανειών ώστε να μειώνονται όσο το δυνατόν οι ποσότητες των φερτών υλικών που αποτίθενται σε αυτές. Οι Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης έχουν να κάνουν με τα προγράμματα καθαρισμού των αστικών επιφανειών και τα όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα, με τρόπους μείωσης της αστικής απορροής που μειώνει και την στερεοαπορροή με κατακράτηση ακόμα από την επιφάνεια και την οργάνωση ενός νομοθετικού πλαισίου για τον έλεγχο των αστικών πηγών φερτών υλικών και της σχετιζόμενης με αυτά ρύπανσης.

### 6.5.1 Πρακτικές Καθαρισμού των Αστικών Επιφανειών

Λόγω των συχνά μη προσδιορισμένων αρμοδίων υπηρεσιών για τον καθαρισμό των αστικών επιφανειών, η βελτιστοποίηση και ο έλεγχος των πρακτικών αυτών είναι εξαιρετικά δύσκολος, πόσο μάλλον στη χώρα μας. Πάντως το κόστος μιας ολοκληρωμένης επιχείρησης είναι πολύ μεγάλο και επομένως έχει πολύ μεγάλη σημασία η όσο το δυνατόν ελαχιστοποίηση του κόστους καθαρισμού. Στο παρακάτω διάγραμμα που προέκυψε από συστηματικές έρευνες (D. Butler et al, 1994) , φαίνεται ότι ο καθαρισμός των οδικών επιφανειών είναι αναποτελεσματικός καθώς το κόστος της απομάκρυνσης των φερτών υλικών αυξάνει με τη συχνότητα καθαρισμού των επιφανειών αυτών. Αυτό συμβαίνει γιατί ο κύριος όγκος των φερτών υλικών εναποτίθεται στις οδικές επιφάνειες και με πολύ γρήγορο ρυθμό μετά το προηγούμενο καθαρισμό. Αντιθέτως το κόστος καθαρισμού από τα ρείθρα πεζοδρομίου και από τις αποθέσεις των αγωγών είναι πολύ μικρότερο και συνεχώς μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα καθαρισμού των σημείων αυτών. Μια εξήγηση είναι ότι τα

ρείθρα πεζοδρομίων έχουν συνολικά πολύ μικρότερη έκταση σε σχέση με τις οδικές επιφάνειες και τα φερτά παρατηρούνται σε πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση. Φέβαια το κόστος καθαρισμού των αγωγών από τις αποθέσεις είναι κάπως μεγαλύτερο λόγω του ειδικού μηχανικού εξοπλισμού που απαιτείται και που θα περιγραφεί αναλυτικά στο επόμενο Κεφάλαιο.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.3 :Κόστη Απομάκρυνσης Φερτών Από Αστική Λεκάνη Απορροής (Butler et al, 1993)

Εξάλλου σημαντικό ρόλο παίζει και ο ρυθμός που τα φερτά εναποτίθενται στις αστικές επιφάνειες. Όσο ο ρυθμός αυτός αυξάνεται τόσο αυξάνει και το κόστος του καθαρισμού.

Τέλος αναφέρουμε ότι οι υπάρχουσες πρακτικές καθαρισμού των αστικών επιφανειών είναι ο κλασικός χειρωνακτικός καθαρισμός, η απόπλυση των ρείθρων των πεζοδρομίων από ειδικά οχήματα με τη χρήση jets νερού καθώς και η απομάκρυνση πολύ λεπτόκοκκων ρυπαντών με τη χρήση συσκευών όμοιου τύπου με τις οικιακές “ηλεκτρικές σκούπες” (vacuum cleaners).

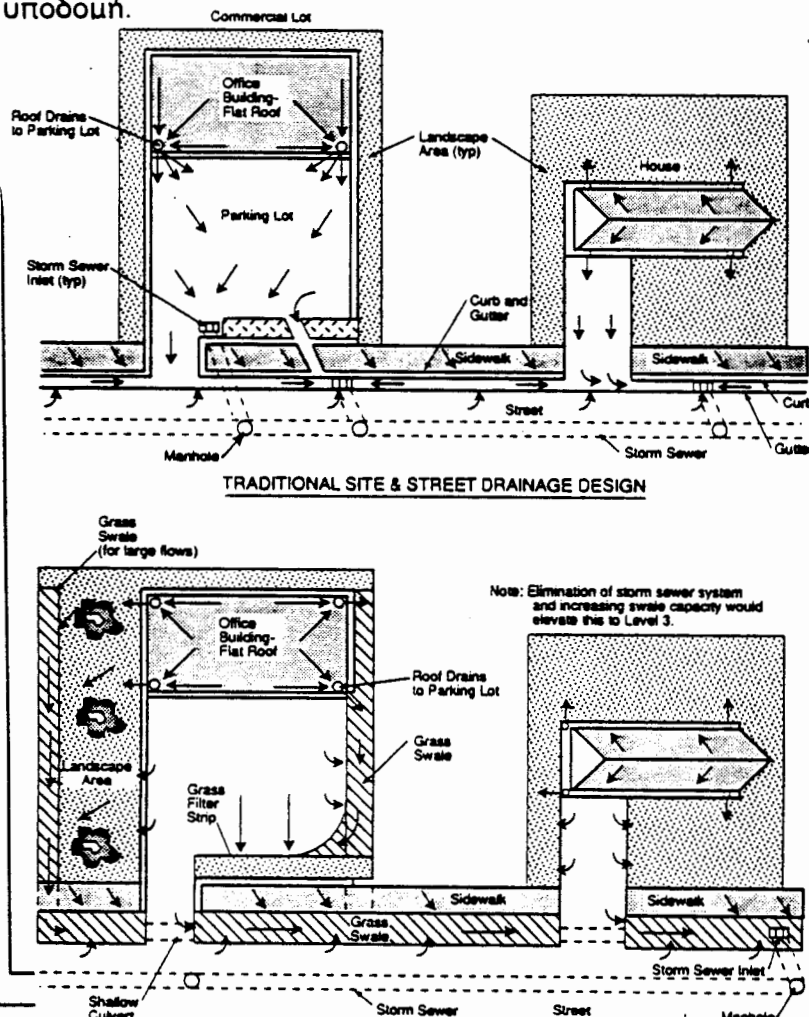
### 6.3.2. Πρακτικές Μείωσης όγκου Απορροής

Επιτυγχάνοντας τη μείωση του όγκου απορροής ομβρίων επιτυγχάνουμε ταυτόχρονα και τη μείωση των φερτών υλικών που αποπλύνονται. Επίσης οι πρακτικές αυτές έχουν σκοπό την κατακράτηση των φερτών υλικών πριν αυτά εισβάλλουν στο αποχετευτικό δίκτυο. Επομένως με τις πρακτικές αυτές έχουμε διπλό όφελος : μειώνουμε τον όγκο απορροής βοηθώντας στην αντιπλημμυρική προστασία και κατακρατούμε στην πηγή τους τα φερτά υλικά. Παρακάτω δίνουμε μια συνοπτική παρουσίαση των πρακτικών αυτών. Αντικειμενικός σκοπός είναι η μείωση της έκτασης των αδιαπέρατων αστικών επιφανειών που είναι άμεσα συνδεδεμένα με τα δίκτυα ομβρίων.

- *Λωρίδες Γρασιδιού (grass swales)* : Τοποθετούνται κατά μήκος των πεζοδρομίων. Όσο πιο αργή είναι η ροή στις λωρίδες αυτές (γύρω στα 0,15 m/sec) τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα κατακράτησης. Οι Whalen and Callum (1988) έχουν υπολογίσει ότι αν τα εδάφη των λωρίδων έχουν μεγάλες περατότητες τότε η ικανότητα κατακράτησης και καθίζησης των

αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να φθάσει και σε ποσοστό γύρω στο 80%.

- **Πορώδη Πεζοδρόμια (porous pavements)** : Τα πορώδη πεζοδρόμια χρησιμοποιούνται στην Αμερική και στην Ευρώπη από τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Κατασκευάζονται από πορώδη άσφαλτο ή σκυρόδεμα και απορροφούν το νερό της βροχής και τους ρυπαντές από την επιφάνεια. Το ποσοστό απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών από τα πορώδη πεζοδρόμια κυμαίνεται μεταξύ των 85 έως 95%.
- **Δεξαμενές Διήθησης (infiltration basins)** : Οι δεξαμενές διήθησης αποθηκεύουν προσωρινά όμβρια και μετά διηθούνται μαζί με τα αιωρούμενα στερεά. Περιπτώσεις δεξαμενών διήθησης έχουν αποτύχει αλλά όταν είναι σωστά κατασκευασμένες μπορούν να κατακρατήσουν μέχρι και 99% των αιωρούμενων στερεών. Η διήθηση των ομβρίων γίνεται κατόπι μέσω του εδάφους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι πρέπει να δίνεται πολύ μεγάλη προσοχή για την περίπτωση μόλυνσης του υπόγειου υδροφορέα από τους διηθούμενους ρυπαντές.
- **Δεξαμενές Αμμόφιλτρων (sand filter basins)** : Είναι μια πολύ ακριβή πρακτική πρώτον γιατί θα χρειάζεται πολύ συχνά καθαρισμό από τυχόν φράξιμο των πόρων της άμμου από τα διηθούμενα σωματίδια αλλά και γιατί ανάντη από τις δεξαμενές θα απαιτηθεί η κατασκευή έργων για την εξομάλυνση της ροής πάνω από τα αμμόφιλτρα.
- **Άλλες Πρακτικές** : Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί παρόμοια συστήματα όπως οι δεξαμενές κατακράτησης-καθίζησης που έχουμε ήδη αναφέρει καθώς και η δημιουργία μόνιμων υγρότοπων (wetland basins) για τη μόνιμη παροχέτευση των ομβρίων υδάτων και τη φυσική επεξεργασία των ρυπαντών με τη χρήση ειδικής βλάστησης. Οι υγρότοποι αυτοί μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν και ως πάρκα ψυχαγωγίας με την κατάλληλη φυσικά υποδομή.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ



### ΣΧΗΜΑ 6.7: Παράδειγμα της Εφαρμογής των Βέλτιστων Πρακτικών Διαχείρισης (Urbonas, 1994)

Στο προηγούμενο σχήμα φαίνεται ένα παράδειγμα μείωσης του όγκου απορροής και της στερεοαπορροής με τις Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης σε σχέση με τις παραδοσιακές μορφές. Φαίνεται ξεκάθαρα η μείωση της αδιαπέρατης έκτασης που συνδέεται άμεσα με τις εισόδους των δικτύων. Τέλος σημειώνονται ότι οι πρακτικές αυτές είναι εφαρμόσιμες μόνο σε αναπτυσσόμενες αστικές περιοχές ή σε περχές που προηγούμενες καταστροφές απαιτούν παρόμοια έργα.

#### 6.5.3. Προτεινόμενο Σχέδιο Ελέγχου και Διαχείρισης των Πηγών Ρύπανσης της Αστικής Απορροής

Στην παράγραφο αυτή θα κάνουμε μια εισαγωγή σε ένα προτεινόμενο σχέδιο διαχείρισης και ελέγχου των φερτών υλικών και της ρύπανσης από τη ροή των ομβρίων υδάτων. Το σχέδιο αυτό μπορεί να αποκτήσει χαρακτήρα γενικού προγράμματος (master plan). Το πρόγραμμα αυτό θα έχει σαν στόχο την καταγραφή των αστικών πηγών ρύπανσης (σημειακών και διάχυτων) με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας των εκβαλλόμενων αστικών απορροών. Τέτοια προγράμματα γενικά σπανίζουν ενώ σημαντική προσπάθεια έχει γίνει από την USEPA (United States Environmental Protect Agency) με το γενικό τίτλο NPDES (National Pollutant Discharge Elimination System). Το προτεινόμενο master-plan θα έχει τα εξής βασικά σημεία :

- *Νόμιμη Αρμοδιότητα* : Είναι γνωστή η σύγχυση που επικρατεί γενικά εκεί που οι αρμοδιότητες υπερκαλύπτονται από διάφορες υπηρεσίες που αποδुकνεύονται τελικά αναρμόδιες. Πρέπει να διασαφηνιστεί ποιά υπηρεσία θα έχει την ευθύνη της απαγόρευσης της παράνομης απόρριψης οικιακών, βιομηχανικών ή άλλων αποβλήτων στα δίκτυα ομβρίων. Η υπηρεσία αυτή (τοπική αυτοδιοίκηση, ΕΥΔΑΠ κ.α) θα πρέπει να εξουσιοδοτηθούν με τη δυνατότητα να επιβάλλουν πρόστιμα στις περιπτώσεις εκείνες που παρατηρούνται παράνομες απορρίψεις λυμάτων στα δίκτυα ομβρίων. Γενικά το πρόβλημα της εξουσιοδότησης παραμένει σοβαρό πρόβλημα για τις τοπικές κοινωνίες.
- *Αναγνώριση Λεκάνης Απορροής και Πηγών Ρύπανσης* : Η αναγνώριση αυτή στην αρχή θα είναι χαρτογραφική από τους διαθέσιμους χάρτες. Η επιχείρηση αυτή περιλαμβάνει :
  - Χαρτογράφηση όλων των εκβολών της λεκάνης απορροής και αναγνώριση της χρήσης γης της υπολεκάνης απορροής που εξυπηρετεί η κάθε εκβολή.
  - Εκτίμηση της έκτασης που εξυπηρετεί η κάθε εκβολή, αναγνώριση του τύπου του εδάφους και εκτίμηση του συντελεστή απορροής.. Χαρτογράφηση των βιομηχανικών ζωνών, των χωματερών (αν υπάρχουν), νοσοκομείων και γενικά ότι θεωρείται επικίνδυνο για ατυχηματική ρύπανση της αστικής απορροής.
  - Μελέτη για τη βραχυπρόθεσμη, μακροπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη εκτίμηση του πληθυσμού και των κοινωνικών δραστηριοτήτων (π.χ. ρυθμός οικιστικής και βιομηχανικής ανάπτυξης)

- *Χαρακτηρισμός Αστικής Απορροής* : Το κομμάτι αυτό έχει να κάνει με την συλλογή και ανάλυση υπάρχοντων δεδομένων και μελέτη πεδίου για τις εκβολές της λεκάνης απορροής. Ο σκοπός είναι να ανιχνευτούν οι παράνομες ή οι λάθος συνδέσεις εξετάζοντας στο εργαστήριο δείγματα απορροής άνυδρης περιόδου. Σε περίπτωση που παρατηρηθούν υψηλές συγκεντρώσεις ρυπαντών τότε πρέπει να ακολουθήσει έλεγχος σε όλο το ανάντη δίκτυο. Στο κομμάτι αυτό συμπεριλαμβάνονται και το ακόλουθα :
  - Αναπτύσσουμε μοντέλια βροχόπτωσης-απορροής για τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής ή επαληθεύουμε το τυχόν υπάρχον.
  - Συμπληρώνουμε λίστα με όλους τους αποδέκτες και μελετούμε την κατάστασή τους από πλευράς ρύπανσης.
  - Επίσης μελετούμε και τη σύνθεση του ρυπαντογραφήματος σε σχέση με την απορροή. Δηλαδή μετρούμε τη ρύπανση και την εξέλιξή της για κάθε σημαντική βροχόπτωση. Η συλλογή δειγμάτων θα γίνεται στην εκβολή και θα μοντελοποιούνται τρεις βροχές για κάθε εκβολή. Η κάθε βροχή πρέπει να έχει μέσο ύψος βροχόπτωσης γύρω στα 3 χιλιοστά και να μην έχει προηγηθεί κανενός είδους βροχής πριν από 72 ώρες. Κάθε μία μελετούμενη βροχόπτωση πρέπει να απέχει χρονικά από την επόμενη τουλάχιστον ένα μήνα. Για κάθε βροχόπτωση θα παίρνονται δείγματα της απορροής και θα μετρώνται όλοι οι ρυπαντές ώστε να είμαστε σε θέση να προγνώσουμε την περιβαλλοντική επιβάρυνση των αποδεκτών μετά από κάθε μελλοντική βροχόπτωση. Αυτό βέβαια θα γίνει με την ανάπτυξη κατάλληλων ντετριμινιστικών ή στοχαστικών μοντέλων.
  - Κάνουμε λεπτομερή έλεγχο για την εξακρίβωση παράνομων συνδέσεων σε όλο το επισκέψιμο δίκτυο.
- *Προγράμματα Διαχείρισης και Ενημέρωσης Κοινού* : Τα προγράμματα αυτά έχουν να κάνουν με τη μελέτη και κατασκευή συγκεκριμένων έργων όπως οι δεξαμενές κατακράτησης και τα υπόλοιπα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Τέλος οποιοσδήποτε προγραμματισμός είναι καταδικασμένος χωρίς την ενημέρωση και τη συμμετοχή των πολιτών. Φυλλάδια, κατοίκων επισκέψεις ενημερωτικών συνεργείων, καμπάνιες για την αντιρρυπαντική τεχνολογία θα πρέπει να προγραμματιστούν με το πιο κατάλληλο τρόπο. Άλλωστε η επιτυχία του προγράμματος βασίζεται στην ενημέρωση του κόσμου και στην ευαισθητοποίηση παρά στην απειλή ενός χρηματικού προστίμου.
 

Στον επόμενο Πίνακα παρουσιάζουμε συνοπτικά τις δραστηριότητες που πρέπει άμεσα να γίνουν στα πλαίσια των προγραμμάτων αυτών. Οι κύριες φροντίδες παρόλαυτά θα πρέπει να είναι :

  - Έλεγχος πηγών φερτών υλικών και απαγόρευση των παράνομων συνδέσεων στους αγωγούς ομβρίων.
  - Κατασκευή έργων για την επεξεργασία των ρυπαντών.
  - Έλεγχος φερτών και ρύπανσης από εργοταξιακούς χώρους

<p><u>Για Οικιστικές/Εμπορικές Περιοχές :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Προγράμματα συντήρησης και λειτουργίας οδικών επιφανειών και των αποχετευτικών συστημάτων</li> <li>• Εφαρμογή των Βέλτιστων Πρακτικών Διαχείρισης για αναπτυσσόμενες ή επαναπτυσσόμενες περιοχές.</li> <li>• Τοπικές πρακτικές συλλογής και διάθεσης όλων των ειδών των αποβλήτων.</li> <li>• Έλεγχος στη χρήση λιπασμάτων, απορρυπαντικών και εντομοκτόνων.</li> </ul>
<p><u>Για τις Παράνομες Συνδέσεις :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Πρόγραμμα ανακάλυψης και απομάκρυνσης των παράνομων συνδέσεων από τους αγωγούς ομβρίων.</li> <li>• Πρόγραμμα για τη σωστή διαχείριση τοξικών αποβλήτων.</li> <li>• Ελλάτωση της ρύπανσης των ομβρίων από διήθηση του υπογείου ορίζοντα ή από ατυχείς εισόδους ακαθάρτων από γειτονικούς αγωγούς με προβλήματα αποφόρτισης από οπές.</li> </ul>
<p><u>Για Βιομηχανικές Δραστηριότητες:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Προτεραιότητα στο έλεγχο των βιομηχανιών και των συστημάτων διάθεσης των αποβλήτων.</li> <li>• Συνεχής εργαστηριακός έλεγχος της ποιότητας των ομβρίων κατόπιν από κάθε βιομηχανική μονάδα.</li> </ul>
<p><u>Για Οικοδομικές και Αναπτυξιακές Δραστηριότητες :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Έλεγχος της ποιότητας της αστικής απορροής και προσπάθεια για την εφαρμογή των Βέλτιστων Πρακτικών Διαχείρισης κατά τη διάρκεια της πολεοδομικής μελέτης και κατασκευής.</li> <li>• Επιτόπου επιθεώρηση στα εργοτάξια και μέτρα για την ασφαλή αποθήκευση των οικοδομικών υλικών.</li> <li>• Επιμορφωτικά σεμινάρια για μηχανικούς και εργολάβους.</li> </ul>

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.: Δραστηριότητες που Επιβάλλονται στο Πρόγραμμα Διαχείρισης των Αστικών Επιφανειών.

## 6.6. Συμπεράσματα

Στην παρουσίαση αυτή του ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 6 έγινε μια μελέτη των δεξαμενών κατακράτησης-καθίζησης, εκτιμήθηκαν τα θετικά αποτελέσματα από μια τυχόν γενικευμένη εφαρμογή τους και στην περιοχή της Αθήνας, κυρίως από περιβαλλοντική άποψη. Από τα αποτελέσματα πειράματος ταχύτητας καθίζησης εκτιμήσαμε τις διαστάσεις που θα πρέπει να έχει μια τέτοια δεξαμενή ώστε να έχει ένα ικανοποιητικό ποσοστό απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών γύρω στα 75%.

Επίσης παρουσιάσαμε τις Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης των αστικών επιφανειών με σκοπό τη μείωση των αδιαπέρατων αστικών επιφανειών που βρίσκονται σε άμεση επαφή με τις εισόδους του δικτύου ομβρίων. Δηλαδή μειώνοντας τον συνολικό όγκο απορροής μειώνουμε τελικά και τη μάζα των φερτών που βρίσκουν πρόσβαση στα δίκτυα. Τέλος κάναμε μια εισαγωγή σε ένα διαχειριστικό πρόγραμμα (master plan) όχι μόνο για την περιοχή της Αθήνας αλλά και για άλλους σημαντικούς δήμους (πάνω από 100000 κατοίκους). Πιστεύουμε ότι η εφαρμογή ενός τέτοιου προγράμματος θα βοηθήσει στη βελτίωση της ποιότητας της αστικής απορροής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

### ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ ΑΠΟ ΥΠΟΝΟΜΟΥΣ

*“. . . Για να σώσουμε την ίδια την τεχνική, πρέπει να  
βάλουμε όρια στην ανεξέλεγκτη ως τώρα επέκτασή της . . .”*

*Lewis Mumford : “ Technics and the Future” 1948*

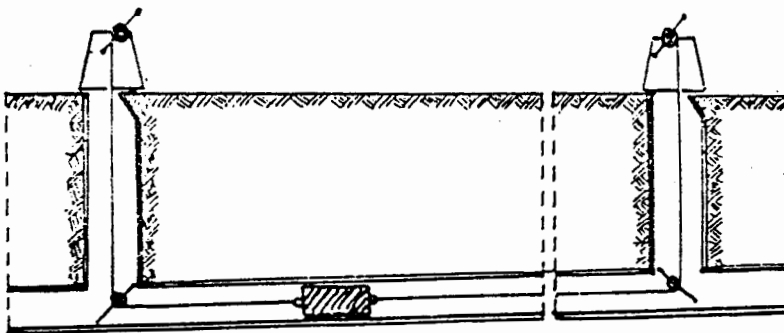
## 7.1. Εισαγωγικές Έννοιες

Όπως έχουμε δείξει οι αποθέσεις στα δίκτυα υπονόμων είναι δυσάρεστο γεγονός και πρέπει να απομακρυνθούν τουλάχιστον από εκεί που έχουν τη μεγαλύτερη έκταση. Όπως έχουμε επίσης δει σημαντικό ρόλο παίζει και η οικονομικότητα του καθαρισμού. Δηλαδή η καλύτερη μέθοδος είναι εκείνη που απομακρύνει τα περισσότερα φερτά με το μικρότερο κόστος. Στο κεφάλαιο αυτό θα δώσουμε τις υπάρχουσες μεθόδους καθαρισμού των αγωγών καθώς και σχόλια για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου. Τέλος θα δώσουμε και στοιχεία μεθόδων καθαρισμού των δεξαμενών κατακράτησης-καθίζησης. Επισημαίνουμε από την αρχή ότι σημαντικότερο ρόλο και από την οικονομικότητα παίζει κυρίως η υγιεινή και η ασφάλεια των εργαζομένων στα συνεργεία καθαρισμού των αγωγών. Οι καθαρισμοί των αγωγών ομβρίων σπάνια κρύβουν κινδύνους ενώ η κάθοδος εργαζομένων στους παντοροϊκούς αγωγούς και στους αγωγούς ακαθάρτων πρέπει να αποφεύγεται εκτός από την περίπτωση που το προσωπικό χρησιμοποιεί σωστά τις συσκευές ασφαλείας. Επομένως μεγάλο βάρος πρέπει να δοθεί στην αγορά τέτοιων συσκευών αλλά κυρίως στην εκπαίδευση των εργαζομένων ώστε να χρησιμοποιούν σωστά τις συσκευές αυτές.

## 7.2. Μέθοδοι Καθαρισμού των Αγωγών

Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται διεθνώς για τον καθαρισμό των αγωγών αποχέτευσης είναι οι εξής :

**7.2.1. Καθαρισμός με τη Χρήση Τροχαλιών :** Η ιδέα του καθαρισμού με τη βοήθεια των τροχαλιών φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Μεταξύ δύο φρεατίων επίσκεψης προσαρμόζονται δύο τροχαλίες με ένα καλώδιο που σέρνει τη συσκευή καθαρισμού. Η συσκευή καθαρισμού μπορεί να είναι οτιδήποτε από μια μορφή κουβά έως τις συσκευές που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση της ιλύος στις δεξαμενές καθίζησης. Συνήθως όμως οι συσκευές αυτές μοιάζουν πολύ με την κλασσική μορφή του γεωργικού άροτρου.

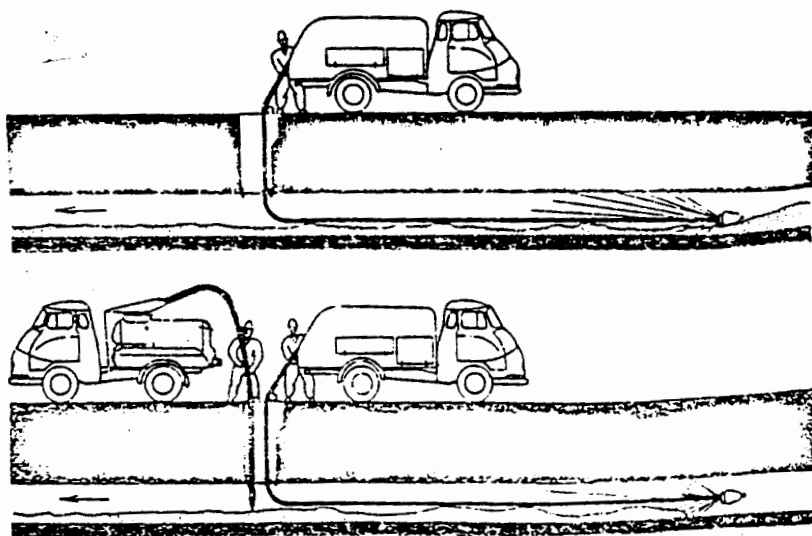


ΣΧΗΜΑ 7.1. : Καθαρισμός με τη Μέθοδο των Τροχαλιών

Το μέγεθος της καθαριστικής συσκευής λαμβάνεται αντίστοιχο με τη διατομή του αγωγού και το βάθος των αποθέσεων στον πυθμένα. Οι τροχαλίες με χειρωνακτικό τρόπο αν ο αγωγός είναι μικρός ή με κατάλληλο μηχανισμό, αν ο αγωγός είναι μεγαλύτερος θέτουν σε κίνηση τη συσκευή από το ένα φρεάτιο στο άλλο. Με την κίνησή του αυτή η συσκευή συμπαρασύρει τις αποθέσεις όπου στο επόμενο φρεάτιο επίσκεψης αντλούνται συνήθως με ειδικό φορτηγό

αυτοκίνητο. Η μέθοδος αυτή δεν έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τους παντοροϊκούς αγωγούς και για τους αγωγούς ακαθάρτων, παρόλο που οι διαστάσεις και η ειδική πυκνότητα των φερτών των αποθέσεων είναι μικρότερες. Στους αγωγούς ομβρίων δεν θα έχει τόσο ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά πάντως καλύτερα σε σχέση με άλλες μεθόδους. Πάντως από την εμπειρία του γράφοντος από τους παντοροϊκούς αγωγούς της Βουδαπέστης, η μέθοδος αυτή δεν είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα και έτεινε να εγκαταληφθεί. Πρόβλημα είναι ότι κατά τις περιόδους καθαρισμού χρειάζεται κατάληψη τμήματος του οδοστρώματος από το συνεργείο καθαρισμού με παρεμπόδιση της συγκοινωνίας που μπορεί να διαρκέσει δύο με τρεις εβδομάδες. Τέλος ένα σημαντικό πρόβλημα είναι ότι κανείς δεν μπορεί να εγγυηθεί ότι η συσκευή θα εφάπτεται εντελώς στον πυθμένα του αγωγού, ώστε να έχουμε πλήρη καθαρισμό των αγωγών. Επίσης σε κυκλικούς ή ωσειδείς αγωγούς με κατασκευαστικές ατέλειες η συσκευή θα βρίσκει εμπόδια στο δρόμο της και θα σταματάει συνέχεια, οπότε κάθε φορά το συνεργείο θα πρέπει να φροντίζει με κάθοδο στον αγωγό για την αποκόλληση της συσκευής.

7.2.2. Καθαρισμός με Εκτόξευση Φλέβας Νερού : Η μέθοδος αυτή έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους και χρησιμοποιείται ευρύτατα διεθνώς, καθώς και στη χώρα μας. Γίνεται χωρίς την ανάγκη επίσκεψης του συνεργείου μέσα στον αγωγό επομένως είναι η καλύτερη μέθοδος για τον καθαρισμό παντοροϊκών και ακαθάρτων. Η συσκευή που ακτοξεύει φλέβα νερού με μεγάλη πίεση έχει τη μορφή που εμφανίζεται στο επόμενο σχήμα και το νερό εκτοξεύεται από μικρές οπές (ακροφύσια) που είναι κατάλληλα προσαρμοσμένα στη συσκευή. Το νερό παροχετεύεται με μεγάλη πίεση από ειδικό βυτιοφόρο και μεταφέρεται με λάστιχο που στην άκρη του είναι προσαρμοσμένη η συσκευή εκτόξευσης του νερού. Πάλι χρησιμοποιούμε δύο γειτονικά φρεάτια επίσκεψης. Από το ανάντη φρεάτιο τοποθετούμε τη συσκευή με τέτοιο τρόπο που οι φλέβες νερού να έχουν κατευθυνση το κατάντη φρεάτιο που βρίσκονται το βυτιοφόρο και η αντλία που θα αντλήσει τα φερτά που καταλήγουν από την απόπλυση στη θέση του φρεατίου.

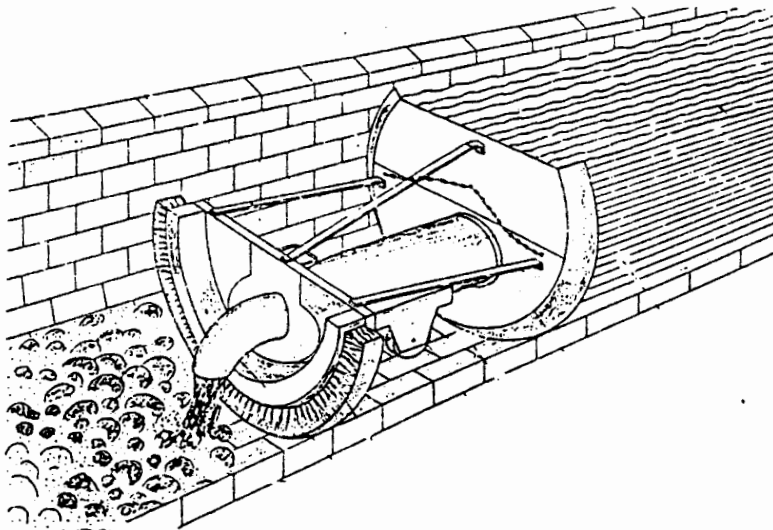


ΣΧΗΜΑ 7.2. : Καθαρισμός Αγωγών με τη Χρήση Φλεβών Νερού

Το λάστιχο μαζεύεται προς το κατάντη φρεάτιο και η συσκευή παρασύρει τα φερτά προς τα κατάντη αποπλύοντας τις αποθέσεις. Το φυσικό νόημα είναι

προφανώς ότι οι φλέβες νερού ασκούν στις αποθέσεις τις κατάλληλες συρτικές τάσεις για την απόπλυση των αποθέσεων. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο αποτελεσματική αλλά έχει και αρκετά μειονεκτήματα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιείται σε όλες τις μορφές διατομών αλλά όχι σε όλα τα μεγέθη. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου συνίσταται σε αγωγούς με διάμετρο μικρότερης των 1.30 μέτρων και για μήκος αγωγού μικρότερων των 100 μέτρων. Αυτό συμβαίνει γιατί οι παρασυρόμενες αποθέσεις συγκεντρώνονται πάνω στις επόμενες δημιουργώντας καινούργιες αποθέσεις που είναι πλέον δύσκολο να παρασύρει με την ίδια πίεση νερού. Άλλο πρόβλημα είναι ότι η μέθοδος αυτή έχει το μεγαλύτερο κόστος. Εξάλλου εκφράζονται φόβοι μήπως η συνδυασμένη πίεση από το εκτοξευόμενο νερό αλλά και από τα στερεά που μετακινούνται δημιουργήσουν τοπικές διαβρώσεις των αγωγών.

**7.2.3. Καθαρισμός με Εκτόξευση Φλέβας Χαμηλής Πίεσης :** Η μέθοδος αυτή είναι συγγενική με την προηγούμενη με τη διαφορά ότι το διαθέσιμο νερό το παίρνει από την ίδια τη ροή ενώ η πίεση του νερού είναι μικρότερη. Κατά συνέπεια η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στους παντοροϊκούς αγωγούς. Σχηματική παράσταση της λειτουργίας καθαρισμού της μεθόδου αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



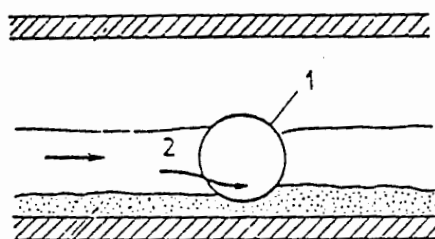
ΣΧΗΜΑ 7.3. : Λειτουργία Καθαρισμού με Φλέβα Χαμηλής Πίεσης

Τοποθετείται μια συσκευή σαν θυρόφραγμα που προκαλεί ανάσχεση της ανάντη ροής και τη δημιουργία μιας μορφής ταμιευτήρα προς τα ανάντη. Από το θυρόφραγμα ξεκινάει μια συσκευή που καταλγχει σε ένα ακροφύσιο που εκτοξεύει το νερό της ροής με κάποια πίεση. Με την πτώση του νερού πάνω στις αποθέσεις υποτίθεται ότι θα προκαλέσει την απόπλυσή τους. Μετά η συσκευή μεταφέρεται σιγά-σιγά προς τα κατάντη. Το κύριο πλεονέκτημα της διαδικασίας είναι η οικονομικότητά της που την κάνει ελκυστική. Τα μειονεκτήματα είναι σημαντικά και περιλαμβάνει τα εξής : Πρώτον η τοποθέτηση της κατασκευής στο αρχικό σημείο απαιτεί δύσκολη εργασία του συνεργείου μέσα στον αγωγό που είναι εξαιρετικά επικίνδυνο. Δεύτερον η ανάσχεση της πλημμύρας πίσω από τη συσκευή δημιουργεί νέες αποθέσεις, γεγονός που αποτελεί και το σημαντικότερο μειονέκτημα. Τρίτον, σημαντικό μειονέκτημα παρουσιάζει γιατί ο



χρόνος απόσυρσης της συσκευής από τον αγωγό είναι αρκετά μεγάλος. Επομένως σε περίπτωση ξαφνικής ωροχόπτωσης η συσκευή ενδεχομένως να προκαλέσει σοβαρή ανάσχεση της πλημμύρας με άσχημα αποτελέσματα. Τέλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε παντοροϊκούς αγωγούς.

**7.2.4. Πρόληψη Δημιουργίας Αποθέσεων Χρησιμοποιώντας Μεταλλικές Σφαίρες Καθαρισμού :** Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για τον καθαρισμό των υπονόμων της πόλης του Αννόβερου στη Γερμανία. Η μέθοδος συνίσταται με τη είσοδο στη ροή των υπονόμων σφαιρών με συγκεκριμένο ρυθμό (π.χ. μία σφαίρα ανά ημέρα). Οι σφαίρες αυτές έχουν συνήθως διάμετρο μικρότερη της διαμέτρου του αγωγού (συνήθως λαμβάνεται το ένα τρίτο). Οι σφαίρες αυτές τοποθετούνται στη ροή του υπονόμου που τη μεταφέρει στην έξοδο του συστήματος όπου συλλέγεται και αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση. Η λειτουργία των σφαιρών αυτών συνίσταται στο γεγονός ότι μετακινούμενες προς τα κατάντη στροβιλίζοντας δημιουργεί ένα είδος εμποδίου και εξαναγκάζει τη ροή να το προσπεράσει αυξάνοντας την ταχύτητά της. Επίσης ο στροβιλισμός της σφαίρας δημιουργεί φαινόμενα τύρβης που προκαλούν αιώρηση των σωματιδίων. Η αρχή λειτουργίας των μεταλλικών σφαιρών φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



ΣΧΗΜΑ 7.4. : Αρχή της Λειτουργίας των Μεταλλικών Σφαιρών  
( 1 = σφαίρα καθαρισμού , 2 = ροή γύρω από τη σφαίρα )

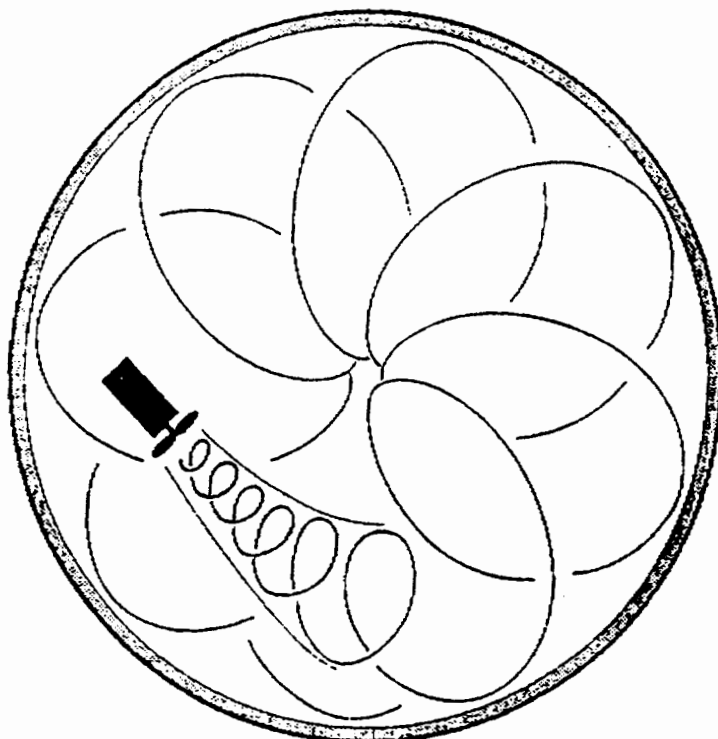
Τα αρχικά πειράματα έγιναν με λείες σφαίρες. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν ήταν καθόλου ικανοποιητικά. Αιτία ήταν ο πολύ χαμηλός συντελεστής τριβής της διεπιφάνειας της σφαίρας και της ροής, οπότε η κίνηση της σφαίρας δεν ήταν αυτή που έπρεπε ώστε να απαγορεύσει τη δημιουργία των αποθέσεων. Επομένως αναπτύχθηκαν σφαίρες με αυξημένο συντελεστή τριβής. Το πιο κατάλληλο σχήμα ήταν το σχήμα S με χορδές τέτοιου σχήματος σε όλη την επιφάνεια της σφαίρας. Οι χορδές αυτές επιτρέπουν στη ροή να περνάει με αρκετά μεγαλύτερες ταχύτητες κάτω από τη σφαίρα δημιουργώντας συνθήκες αιώρησης. Τέλος το σχήμα της επιφάνεια επιτρέπει στη σφαίρα να μην μετακινείται μόνο προς μια κατεύθυνση αλλά να αλλάξει φορά συνεχώς καλύπτοντας όσο περισσότερο κομμάτι του πυθμένα του αγωγού. Με το νέο σχήμα τα αποτελέσματα ήταν πολύ καλύτερα. Αυτή η πρακτική καθαρισμού είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο.

Για τις περισσότερες αποθέσεις της μελέτης μας ο μοναδικός τρόπος απομάκρυνσής τους είναι πλέον ο χειρωνακτικός τρόπος. Κι αυτό γιατί η συνεκτικότητα που έχουν αναπτύξει (κυρίως η απόθεση της εκβολής) είναι μεγάλη και η εφαρμογή οποιασδήποτε από τις προηγούμενες μεθόδους θα ήταν προβληματική.

### 7.3. Μέθοδοι Καθαρισμού Δεξαμενών Κατακράτησης-Καθίζησης

Ο καθαρισμός των δεξαμενών κατακράτησης-καθίζησης είναι ανάγκη να αυτοματοποιηθεί γιατί ο χειρωνακτικός καθαρισμός είναι επικίνδυνος όσον αφορά την υγεία των μελών του συνεργείου καθαρισμού. Επειδή οι δεξαμενές αυτές είναι υπόγειες και κλειστές καταλαβαίνει κανείς πόσο άσχημο και επικίνδυνο είναι το περιβάλλον εργασίας. Εξάλλου το κόστος του χειρωνακτικού καθαρισμού είναι υπέρογκα μεγάλο.

Επομένως έχουν αναπτυχθεί αυτοματοποιημένες διαδικασίες καθαρισμού των δεξαμενών από τα αποτιθέμενα υλικά. Σε περίπτωση που δεν έχει επιλεγεί η περίπτωση σαν εκείνη της δεξαμενής καθίζησης στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, τότε μπορούμε να εγκαταστήσουμε ένα σύστημα καθαρισμού το οποίο θα δημιουργεί ικανή τύρβη ώστε να επαναιωρεί τα αποτιθέμενα σωματίδια. Επισημαίνεται ότι αυτή η μέθοδος θα εφαρμόζεται μόνο όταν κατάντη υπάρχει εγκατάσταση επεξεργασίας. Γεμίζουμε τη δεξαμενή με νερό και με τη βοήθεια αεριστήρων πως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, επαναιωρεί τα σωματίδια τα οποία απομακρύνονται από τη δεξαμενή μέσω της βαλβίδας εξόδου ή του υπερχειλιστή και κετευθύνονται στη εγκατάσταση επεξεργασίας. Όπως όμως είναι κατανοητό προτιμείται ο μηχανικός τρόπος απομάκρυνσης των αποτιθέμενων υλικών, ακριβώς όπως στις δεξαμενές καθίζησης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.



ΣΧΗΜΑ 7.5. : Εγκατάσταση Καθαρισμού και Δυναμικό Πεδίο Ροής Αεριστήρα

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

## 8.1. Συμπεράσματα

Στο τελευταίο Κεφάλαιο θα συνοψίσουμε όλη τη Διπλωματική Εργασία βγάζοντας συνοπτικά συμπεράσματα για ένα θέμα που ποτέ δεν είχε μελετηθεί στην Ελλάδα.

Κύρια προσφορά αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι ότι διαπίστωσε την ύπαρξη ενός προβλήματος για το οποίο αγνοούνε την ύπαρξή του ακόμα και οι μελετητές που ασχολούνται με τη μελέτη των δικτύων αποχέτευσης, εκτός από την και ελλιπή οδηγία των Ελληνικών Κανονισμών. Το πρόβλημα των αποθέσεων γενικά είναι σοβαρό σε σχετικά λίγες περιπτώσεις, αλλά τείνει να γενικευτεί αν δεν παρθούν άμεσα μέτρα για τον καθαρισμό των αποθέσεων. Η μείωση της παροχτευτικότητας είναι ένα σημαντικό πρόβλημα που δημιουργείται και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ασφάλεια των ανάντη περιοχών. Πάντως για τη σωστή υδραυλική λειτουργία των δικτύων αποχέτευσης, η ύπαρξη των αποθέσεων παίζει σημαντικό ρόλο.

Πρώτο συμπέρασμα είναι η φοβερή πολυπλοκότητα των φαινομένων που σχετίζονται με την μεταφορά των φερτών υλικών στους υπονόμους. Αναφέραμε φαινόμενα που έχουν αντίθετα αποτελέσματα χωρίς βέβαια να γνωρίζουμε απόλυτα τις επιδράσεις τους. Για παράδειγμα οι αποθέσεις δημιουργούν αύξηση της υδραυλικής τραχύτητας της ροής αλλά παράλληλα μπορούν να οδηγήσουν και σε αύξηση των ταχυτήτων ροής λόγω αύξησης της κλίσης πυθμένα.

Δεύτερον διαπιστώσαμε τις θέσεις που παρατηρούνται αποθέσεις μέσα στο δίκτυο. Οι κυριότερες θέσεις όπως είδαμε είναι οι κάθετες στροφές των αγωγών σε συνδυασμό με μείωση της κλίσης προς τα κατάντη ή με αύξηση της διατομής προς τα κατάντη. Επίσης αποθέσεις παρατηρούνται στις εκβολές των δικτύων (κυρίως όταν αυτές λειτουργούν βυθισμένες στην πρωτεύουσα ροή) και σε αγωγούς οι οποίοι ή διακλαδίζονται ή μετατρέπονται σε δίδυμους προς τα κατάντη. Επίσης η χαμηλή κλίση πυθμένα παίζει πάντα σημαντικό ρόλο σε συνδυασμό με κάποιες από τις παραπάνω αιτίες.

Τρίτον, από τις κοκκομετρικές αναλύσεις των δειγμάτων των αποθέσεων πάρθηκαν σημαντικά συμπεράσματα για τη φύση των αποθέσεων. Έχουμε επομένως τις λεπτόκοκκες αποθέσεις οι οποίες σχηματίζονται στα πιο κατάντη τμήματα του δικτύου που γίνονται λόγω των μεγάλων απωλειών ενέργειας. Οι χονδρόκοκκες αποθέσεις παρατηρούνται σχετικά ανάντη του δικτύου και παρουσιάζουν πολύ μεγάλες συρτικές αντοχές. Αντίθετα οι λεπτόκοκκες αποθέσεις παρουσιάζουν έντονα οργανικό επιφανειακό υλικό το οποίο έχει πολύ μικρές διατμητικές αντοχές και κατά συνέπεια απομακρύνεται και κατά τη διάρκεια πολύ μικρών πλημμυρικών παροχών. Το οργανικό υλικό που αποπλύεται στην έναρξη της απορροής δημιουργούν έντονα προβλήματα ρύπανσης στους τελικούς αποδέκτες.

Αιτία δημιουργίας των αποθέσεων ήταν οι έντονες ανομοιομορφίες της ροής κατά μήκος του αγωγού που προκαλούνται σε μεγάλο ποσοστό από τη γεωμετρία του δικτύου. Διαπιστώσαμε όμως ότι το πιο σωστό μέγεθος για τη μελέτη των φαινομένων είναι οι συρτικές τάσεις πυθμένα, πού όμως είναι έμμεσος ο ποσοτικός προσδιορισμός τους.

Τέλος παραθέτουμε τις νέες αντιλήψεις που τείνουν να κωδικοποιηθούν υπό μορφή κανονισμών για εφαρμογή στη Μ. Βρετανία και κάνουμε μια κριτική σε αυτούς καθώς και στους Ελληνικούς κανονισμούς οι οποίοι χρειάζονται, κατά τη γνώμη μας άμεση και ριζική αναδιάρθρωση.

## 8.2. Προτάσεις

Η έντονη πολυπλοκότητα των φαινομένων απαιτούν την πλήρη επιστημονική έρευνα καθώς όλα τα στοιχεία που διαπιστώνονται στη Διπλωματική Εργασία χρειάζονται επιβεβαίωση με μακροπρόθεσμες παρατηρήσεις. Επίσης και άλλες υδραυλικές κατασκευές χρειάζονται επιθεώρηση (όπως π.χ. οι παντοροϊκοί υπερχειλιστές του Κ.Α.Α καθώς και άλλες σημαντικές εκβολές στο σκεπασμένο τμήμα του Κηφισού). Οι συστηματικές αποθέσεις που παρατηρούνται στις εκβολές των δικτύων στον Κηφισό πρέπει να αντιμετωπισθούν άμεσα γιατί επηρεάζουν σημαντικά τη υδραυλική λειτουργία του ανάντη δικτύου.

Επίσης σημαντική επιστημονική μελέτη χρειάζεται να γίνει για να εξακριβωθούν οι επιδράσεις σημαντικών βροχοπτώσεων σε ένταση και διάρκεια στη συνολική μάζα των αποθέσεων, καθώς το θέμα αυτό είναι υπό διερεύνηση ακόμα και στο διεθνή χώρο. Το πρόβλημα παραμένει αν οι ισχυρές βροχοπτώσεις προκαλούν απομάκρυνση των αποθέσεων ή δημιουργούν αύξηση της μάζας των αποθέσεων.

Σημαντική δουλειά χρειάζεται να γίνει ως προς το σχεδιαστικό μέρος. Χρειάζεται πρώτα η ανάπτυξη ενός αριθμητικού μοντέλου πρόβλεψης των αποθέσεων καθώς και πρόβλεψης της μάζας των ρυπαντών που θα εκβάλλονται και κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος και κατά τη διάρκεια π.χ. ενός έτους. Το μοντέλο αυτό εκτός από το μοντέλο βροχής απορροής θα συμπεριλαμβάνει και μοντέλα απόπλυσης φερτών υλών από τις αστικές επιφάνειες, μοντέλα στερεοαπορροής σε υπονόμους καθώς και ντετρμινστικά κατά βάση μοντέλα που με οδηγό τις συρτικές τάσεις πυθμένα θα είναι σε θέση να προγνώσουν τις τοποθεσίες που πιθανόν να δημιουργηθούν αποθέσεις.

Επίσης μεγάλη ανάγκη υπάρχει για την ανάπτυξη νέων κανονισμών για τη διαστασιολόγηση των δικτύων υπονόμων παίρνοντας ως σημαντική παράμετρο τα φερτά υλικά. Ο Ελληνικός κανονισμός είναι αναποτελεσματικός και χρειάζεται αναμόρφωση. Τέλος για τους αγωγούς που εμφανίζουν σοβαρά προβλήματα αποθέσεων παρατίθενται στο αντίστοιχο Κεφάλαιο κατασκευαστικές ιδέες για την αποφυγή νέων προβλημάτων στο μέλλον.

Τέλος συνιστάται η εφαρμογή των δεξαμενών κατακράτησης-καθίζησης για την κατακράτηση των φερτών υλών και της σχετιζόμενης ρύπανσης στο δίκτυο για επεξεργασία πριν αυτά διατεθούν στο περιβάλλον. Οι τιμές της μάζας των φερτών που προσεγγιστικά υπολογίστηκαν είναι πολύ μεγάλες, καθώς μεγάλες είναι και οι τιμές των ρύπων της αστικής απορροής.

Το σημαντικότερο όμως σημείο σε ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα διαχείρισης των αστικών επιφανειών είναι, όχι μόνο να εγγυηθούμε τις υδραυλικές εκείνες συνθήκες για την πλήρη μεταφορά των φερτών, αλλά να μειώσουμε τις συνολικές ποσότητες που βρίσκουν πρόσβαση στα δίκτυα.

Με την εμπειρία του γράφοντος για το θέμα για ένα χρόνο περίπου και με την επικοινωνία με επιστήμονες του εξωτερικού που ασχολούνται σε παρόμοια πεδία φαίνεται ότι είμαστε πολύ πίσω από άποψη τεχνογνωσίας και σχεδιασμού. Ελπίζω ότι η Διπλωματική αυτή Εργασία θα δώσει το έναυσμα για μια πιο οργανωμένη μελέτη της στερεομεταφοράς σε υπονόμους στις ελληνικές συνθήκες.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ανδρεαδάκης Α. (1986). Εγκαταστάσεις επεξεργασίας και διάθεσης αστικών αποβλήτων. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Αθήνα.
- ASCE (1985). Design and construction of urban stormwater management systems, New York, USA
- Ashley R.M., Crabtree R.W. (1992). Sediments origins, deposition and built-up in combined sewer systems. *Wat. Sci. Tech.* **25**, 1-12
- Ashley R.M. et al. (1992). The deposition and erosion of sediments in sewers. *Wat. Sci. Tech.* **26**, 1283-1293
- Bachoc A. (1992). Location and general characteristics of sediment deposits into man-entry combined sewers. *Wat. Sci. Tech.* **25**, 47-55
- Butler D., Karunaratne. S.H.P.G.(1995). The suspended solids efficiency of the roadside gully pot. *Water Research* **29**, 719-729
- Butler D., Clark P., Payne J. (1993). Management of sediments in drainage catchments. *Proceedings of 6th International Conference on Urban Storm Drainage. Niagara Falls, Canada.* 736-741
- CIRIA (1994). Design of sewers to control sediments problems.
- Chebbo G., Bachoc A. (1992). Characterization of suspended solids in urban wet weather discharges. *Wat. Sci. Tech.* **25**, 171-179
- Chebbo G., Musquere P., Milisic V., and Bahcoc A. (1992). Characterization of solids transferred into sewer trunks during wet weather. *Wat. Sci. Tech.* **22**, 231-238
- Γκόγκος Β. (1995). Ρυπαντικό φορτίο αστικής απορροής. *Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*. Αθήνα.
- Dinkelacker A. (1992). Cleaning of sewers. *Wat. Sci. Tech.* **25**, 37-46
- Goodison M.J., Ashley R.M. (1990). Sediment movement in combined sewers in Dundee. *Wat. Sci. Tech.* **22**, 283-286
- Griffin S., Bauwens W., Ahmad K. (1994). Urban drainage modeling intelligent assistant. *Wat. Sci. Tech.* **29**, 427-436
- Kleijwegt R.A. (1992) Sewer sediment models and basic knowledge. *Wat. Sci. Tech.* **25**, 123-130
- Kleijwegt R.A., Veldkamp R.G., Nalluri C., (1992). Sediments in sewers: Initiation of transport. *Wat. Sci. Tech.* **22**, 239-246
- Κουτσογιάννης Δ. (1993). Σχεδιασμός αστικών δικτύων αποχέτευσης. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Αθήνα
- Κουτσογιάννης Δ. (1986). Υδρολογία και ποσοτικές εκτιμήσεις φερτών υλικών. *Σεμινάριο Έργων Εγγείων Βελτιώσεων*. Π.Σ.Δ.Α.Τ.Π.Μ Αθήνα
- Laplace D., Bachoc A., Sanchez Y., and Dartus D. (1992). Trunk sewer clogging development-description and solutions. *Wat. Sci. Tech.* **25**, 91-100
- Martz G. (1987). Υδραυλική των οικισμών : Αποχετεύσεις. *Εκδόσεις Γκιούρδας*, Αθήνα
- Μπούτσικου Ελ. (1995). Εκτίμηση ρυπαντικού φορτίου απορροής αστικής λεκάνης. *Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, Αθήνα
- Nalluri C., Alvarez E.M. (1992). The influence of cohesion on sediment behaviour. *Wat. Sci. Tech.* **25**, 151-164
- Ξανθόπουλος Θ. (1990). Εισαγωγή στην Τεχνική Υδρολογία. *Εκδόσεις Συμμετρία*. Αθήνα

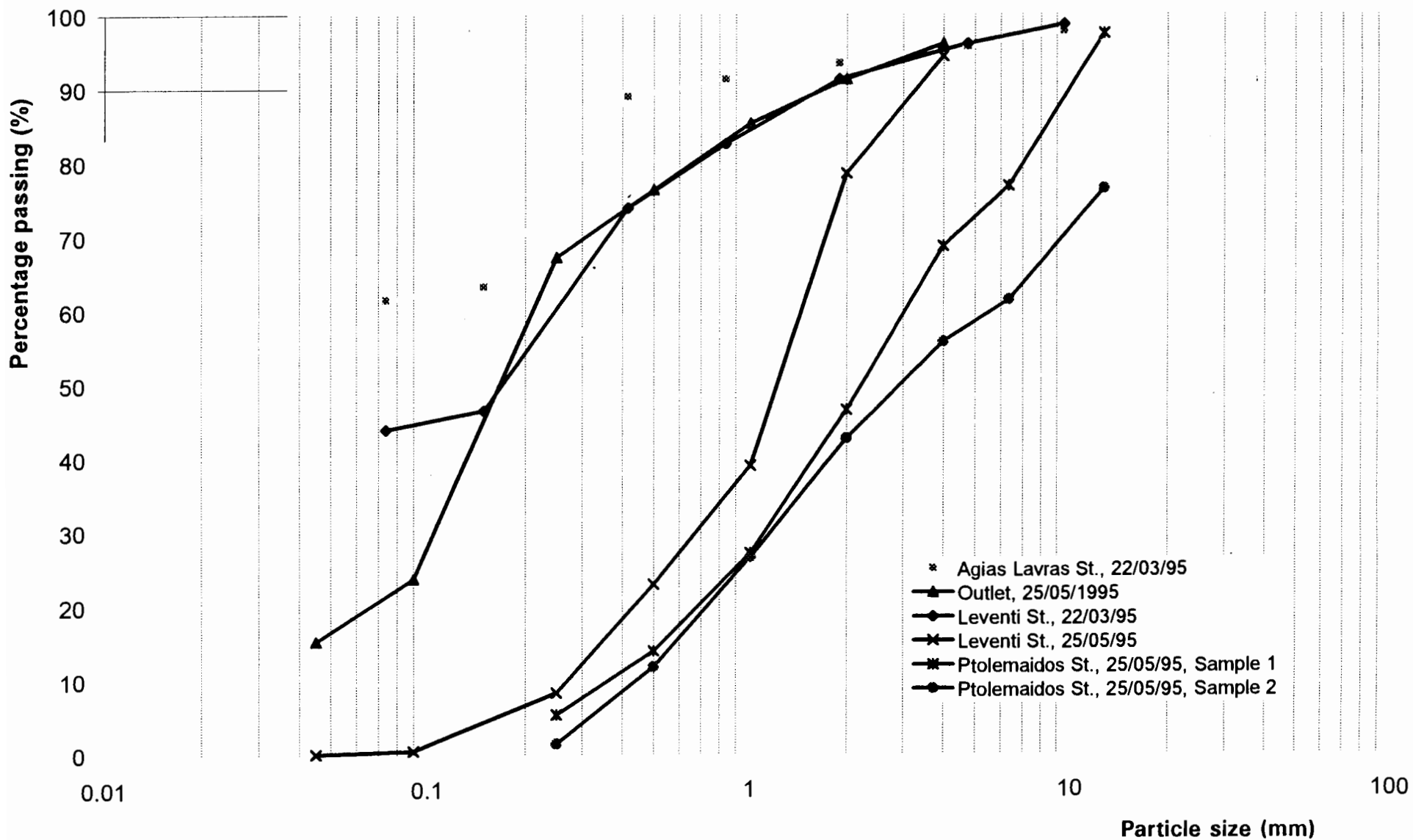
- Roesner L.A., Traina P. (1994). Overview of federal law and USEPA regulations for urban runoff. *Wat. Sci. Tech.* **29**, 445-454
- Saul A.J. and Ellis D.R., (1992). Sediment deposition in storage tanks. *Wat. Sci. Tech.* **25**, 189-198
- Vanoni V.A. (editor) (1977). Sedimentation engineering (prepared by the ASCE Task Committee), ASCE, New York, USA
- Verbanck M. (1992). Field investigations on sediment occurrence and behavior in Brussels combined sewers. *Wat. Sci. Tech.* **25**, 71-82
- Verbanck M., Ashley R.M., Bachoc A. (1994). International workshop on origin, occurrence and behavior of sediments in sewer systems : summary of conclusions. *Water Research* **28**, 187-194
- Urbonas B. (1994). Assessment of stormwater BMP's and their technology. *Wat. Sci. Tech.* **29**, 347-353
- Xanthopoulos C., Augustin A. (1992). Input and characterization of sediments in urban sewer systems. *Wat. Sci. Tech.* **25**, 21-28
- Zarris D., Koutsoyiannis D. (1995). Occurrence and general characteristics of deposits in Athens storm sewers. *Poster Presentation. International Conference on Sewer Solids, University of Abertay Dundee, Dundee, 5-8 September 1995*

Brochures:

ITT-Flygt: Cleaning the run-away from the runways

Sheet2 Chart 1

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ↓





ΛΕΚΑΝΟΠΕΔΙΟ ΑΘΗΝΩΝ - ΟΙΚΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

