

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΠΛΗΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΗΘΗΣΗ ΝΕΡΟΥ

Γιώργος Π. Κουρόπουλος

Απόφοιτος Τμήματος Ενεργειακής Τεχνολογίας,
Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Αθηνών.
Στοιχεία επικοινωνίας (e-mail): etmecheng@gmail.com

Περίληψη.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να εξετάσουμε την επίδραση του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος εντός αγωγού ροής νερού, στην απόδοση που θα έχει ένα διηθητικό στοιχείο κατά την διεργασία διήθησης του νερού, εφόσον το στοιχείο αυτό είναι ευρισκόμενο στον αγωγό κατά την διάρκεια που ρέει το διηθούμενο νερό. Στην μελέτη αρχικά θα περιγραφεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που χρειάζεται και σχετίζεται με τις βασικές εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος, καθώς και την ανάλυση των παραμέτρων που διέπουν τους μηχανισμούς διήθησης ενός ρευστού δια μέσω ενός διηθητικού στοιχείου και επηρεάζουν την αποδοτικότητα του. Εν συνεχεία μετά από τον συνδυασμό των εξισώσεων και μεγεθών του υδραυλικού πλήγματος και της διήθησης ρευστού θα εξαχθούν οι τελικές εξισώσεις και οι καμπύλες που θα μας βοηθήσουν να περιγράψουμε το φαινόμενο της επίδρασης του υδραυλικού πλήγματος στην απόδοση ενός φίλτρου. Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει, είναι ότι η ύπαρξη υδραυλικού πλήγματος μειώνει την απόδοση συλλογής σωματιδίων για την νανοδιήθηση, ενώ για εύρος μεγάλων διαμέτρων η απόδοση δεν επηρεάζεται καθόλου.

Λέξεις κλειδιά: υδραυλικό πλήγμα, διήθηση, διήθηση νερού, απόδοση διήθησης

Εισαγωγή.

Η διήθηση είναι μια διεργασία διαχωρισμού της ύλης που διαχωρίζει στερεά σωματίδια από κάποιο υλικό μέσον, συνήθως ρευστό σε υγρή ή αέρια φάση. Ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται με την χρήση κάποιου διηθητικού μέσου ή φίλτρου το οποίο συγκρατεί απ' την υγρή ή αέρια ύλη την στερεά η οποία συνήθως έχει την μορφή μικροσωματιδίων. Η διήθηση είναι μια διεργασία με ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως στις περιβαλλοντικές τεχνολογίες για την απομάκρυνση ρυπαντών και μικροβίων από τον εσωτερικό ή εξωτερικό αέρα, την υγεία και την αποστείρωση νοσοκομειακών χώρων, τον καθαρισμό του νερού από στερεά και μικροοργανισμούς, όσο και την χημική βιομηχανία για τον διαχωρισμό υλικών. Η παρούσα εργασία επικεντρώνει το ενδιαφέρον της στον τομέα του καθαρισμού του νερού τόσο σε βιομηχανικό επίπεδο όσο και σε οικιακό με την χρήση φίλτρου.

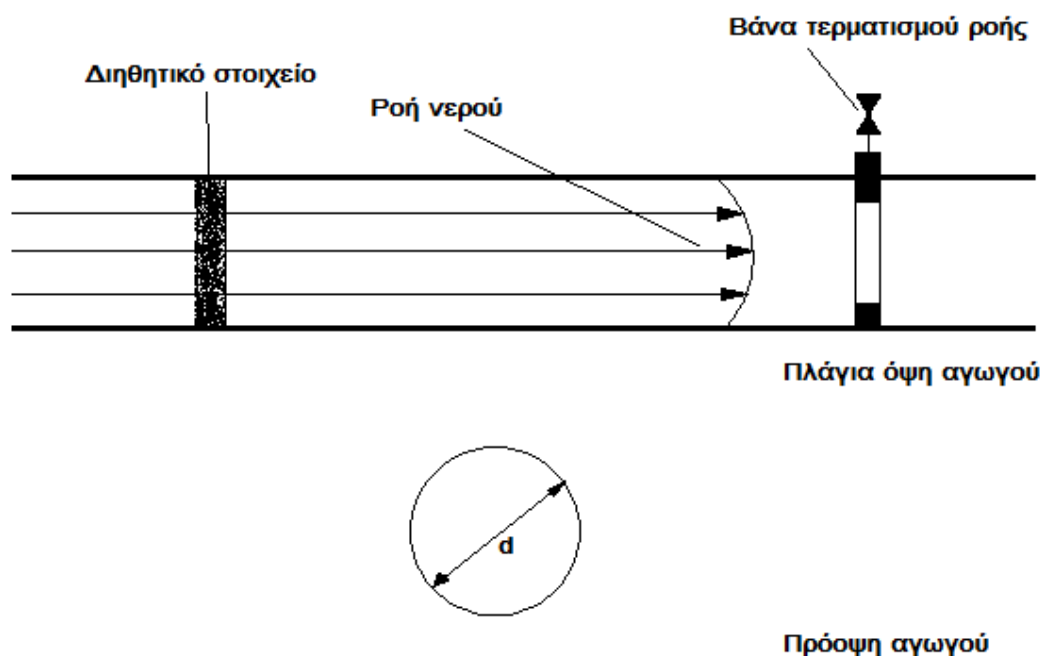
Στην περίπτωση καθαρισμού του νερού με χρήση διηθητικού στοιχείου εντός κλειστού αγωγού, είναι αρκετά αυξημένη η πιθανότητα ύπαρξης του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος. Το υδραυλικό πλήγμα είναι φαινόμενο που εμφανίζεται σε σωληνώσεις νερού και συμβαίνει όταν κλείσει απότομα η βάνα ροής του νερού. Συνήθως το αντιλαμβανόμαστε με έναν κρότο που ακούγεται από τις σωληνώσεις. Σε περίπτωση που κλείσει απότομα η βαλβίδα ενός αγωγού, τα μόρια του νερού προσκρούουν στα τοιχώματα της βαλβίδας. Επειδή η μάζα των μορίων έχει αδράνεια και το νερό είναι ασυμπίεστο, δημιουργούνται απότομες αλλαγές στην πίεση η οποία φορτίζει τα τοιχώματα του αγωγού και παράγεται ένας κρότος.

Οι αλλαγές στην πίεση ειδικά όταν έχουμε υπερπίεση, προκαλούν κύματα ροής υψηλής ταχύτητας εντός του αγωγού. Όταν είναι συνδεδεμένο στον αγωγό ένα διηθητικό στοιχείο για τον καθαρισμό του νερού τότε επηρεάζονται πολλές παράμετροι στο στοιχείο αυτό. Μπορεί να προκληθούν φθορές στο φίλτρο ή να αυξηθούν τη γήρανσή του, μπορεί να επηρεαστεί και η αποδοτικότητά του ώστε να συγκρατεί σωματίδια συγκεκριμένων διαμέτρων. Η επίδραση

του φαινομένου αυτού στην αποδοτικότητα του φίλτρου θα ερευνηθεί παρακάτω. Το συγκεκριμένο θέμα δεν έχει μελετηθεί επαρκώς στο παρελθόν, σχετική έρευνα έχουν κάνει οι Broens., et al 2011.

Γενικές παραδοχές της έρευνας.

Θεωρούμε ότι έχουμε έναν αγωγό με ροή νερού, εσωτερικής διαμέτρου d και εσωτερικής κυκλικής διατομής A . Ο αγωγός φέρει βαλβίδα η οποία είναι ανοιχτή ώστε να ρέει το νερό είτε με μόνιμη είτε με μη μόνιμη ροή, με πίεση P και παροχή Q . Ο αγωγός στο εσωτερικό του φέρει διηθητικό στοιχείο για την φίλτρανση του νερού. Το διηθητικό στοιχείο έχει πάχος L , διάμετρο d ίση με την εσωτερική διάμετρο του αγωγού ροής και διατομή A ίση με την εσωτερική διατομή του αγωγού ροής.



Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση του σωλήνα ροής νερού σε πρόοψη και πλάγια όψη. Ο αγωγός φέρει το διηθητικό στοιχείο και την βαλβίδα (βάνα) η οποία μπορεί να ανοίγει και να κλείνει. Στην περίπτωση κλεισίματος τότε μπορεί να εμφανιστεί το υδραυλικό πλήγμα.

Το βασικό στοιχείο των παραδοχών μας, είναι ότι η διατομή καθώς και η διάμετρος του διηθητικού στοιχείου θα είναι ίσα με την εσωτερική διάμετρο και διατομή του αγωγού ροής. Στην πράξη δύσκολα μπορούμε να συναντήσουμε κάποιο διηθητικό στοιχείο (φίλτρο), το οποίο θα έχει ακριβώς ίση διατομή με αυτή του σωλήνα ροής τόσο σε οικιακή όσο και σε βιομηχανική εγκατάσταση καθαρισμού του νερού. Παρά ταύτα η συγκεκριμένη παραδοχή γίνεται για την απλοποίηση των υπολογισμών μας και την θεωρητική προσέγγιση των φαινομένων διήθησης και υδραυλικού πλήγματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις η διατομή του διηθητικού στοιχείου διαφέρει από αυτή του αγωγού ροής. Επίσης θεωρούμε πως οι υδραυλικές σωληνώσεις είναι κατασκευασμένες από χαλκό και το ρευστό που ρέει είναι νερό.

Βασικές εξισώσεις για το υδραυλικό πλήγμα.

Το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος μελετήθηκε από τον Joukowsky. Για βαλβίδα η οποία θα κλείσει σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και θα δημιουργήσει

υδραυλικό πλήγμα με ύπαρξη κρότου, η εξίσωση που δίνει την μέγιστη πίεση εξαιτίας του φαινομένου, είναι:

$$\Delta P = \rho \alpha_0 \Delta v \quad (1)$$

Όπου: ΔP η διαφορά πιέσεως μεταξύ πριν και μετά το υδραυλικό πλήγμα σε Pascal.

α_0 η ταχύτητα διάδοσης του υδραυλικού πλήγματος σε m/sec.

Δv η διαφορά ταχύτητας μεταξύ πριν και μετά το υδραυλικό πλήγμα σε m/sec.

Η ταχύτητα ροής του κύματος α_0 , δύναται να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\alpha_0 = \frac{K/\rho}{1 + \frac{v}{\alpha} \left(1 + \frac{Kdc}{Et} \right)} \quad (2)$$

Όπου:

v : Η ταχύτητα ροής του ρευστού εντός του αγωγού (m/sec).

α : Η ταχύτητα του ήχου μέσα στο νερό (1437 m/sec).

ρ : Η πυκνότητα του νερού υπό την θερμοκρασία που αυτό υφίσταται (kg/m^3).

d : Η εσωτερική διάμετρος του αγωγού (m).

t : Το πάχος των τοιχωμάτων του αγωγού (m).

K : Το μέτρο διόγκωσης του ρευστού (για το νερό $K = 2.2 \times 10^9$ Pa).

E : Ο συντελεστής ελαστικότητας του υλικού του αγωγού (για χαλκό 16×10^6 Pa, για χάλυβα 20×10^6 Pa, για αλουμίνιο 10.5×10^6 Pa).

c : Κατασκευαστική παράμετρος εξαρτώμενη από το σύστημα στήριξης του αγωγού.

Αν λάβουμε υπόψη ότι στην εξίσωση (2) το κλάσμα v/α στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ίσο ή μικρότερο του 0.01, αν λάβουμε υπόψη απ' τις παραδοχές ότι το υλικό του αγωγού μας θα είναι ο χαλκός και η πυκνότητα του νερού είναι 1000 kg/m^3 , τότε το κλάσμα K/ρ ισούται με $2.2 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{sec}^2$. Επίσης, έχουμε ήδη γνωστό το κλάσμα K/E στον παρονομαστή το οποίο ισούται με 137.5. Άρα η εξίσωση (2) για την παρούσα έρευνα τροποποιείται σε:

$$\alpha_0 = \frac{2.2 \times 10^6}{1 + \frac{137.5dc}{t}} = \frac{1483.2}{1 + \frac{137.5dc}{t}} \quad (3)$$

Ο συντελεστής c εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο στηρίζεται ο αγωγός ροής νερού μαζί με το διηθητικό στοιχείο, υπολογίζεται από τον συντελεστή Poisson του υλικού, που για τον χαλκό έχουμε $\mu = 0.26$ και διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις στήριξης σύμφωνα με τους Wylie και Streeter (Παπακώστα, 2009). Επειδή ο συντελεστής c για τον χαλκό και με βάση τους τρεις τρόπους στήριξης έχει ένα εύρος τιμών 0.9324, 0.99 και 1, για απλοποιητικούς λόγους επιλέγουμε τον μέσο όρο των τριών τιμών, άρα $c = 0.974$. Έτσι λοιπόν η εξίσωση (3) για την παρούσα έρευνα λαμβάνει την τελική απλοποιημένη μορφή της:

$$\alpha_0 = \frac{1483.2}{1 + \frac{133.9d}{t}} \quad (4)$$

Από την παραπάνω εξίσωση συμπεραίνουμε πως όταν εξετάζουμε το φαινόμενο υδραυλικού πλήγματος, η ταχύτητα του κύματος ήχου μέσα στον αγωγό, εξαρτάται κυρίως από το πάχος των τοιχωμάτων και την εσωτερική διάμετρο του αγωγού, δηλαδή τα

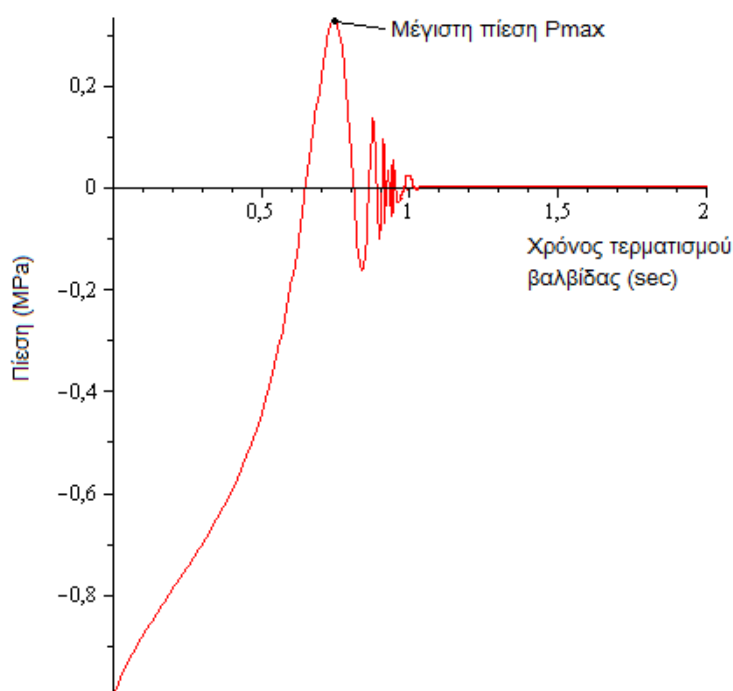
γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Και δευτερευόντως από τα υπόλοιπα φυσικά μεγέθη τα οποία μεταβάλλονται ανάλογα το είδος του ρευστού το είδος του υλικού και σε πολύ εξειδικευμένες περιπτώσεις όπως με τον συντελεστή c.

Η τελική εξίσωση που δίνει την πίεση που δημιουργείται απ' το υδραυλικό πλήγμα, προκύπτει από αντικατάσταση της (4) στην (1), άρα:

$$\Delta P = \frac{1483,2\rho\Delta v}{1 + \frac{133,9d}{t}} \quad (5)$$

Επειδή η πυκνότητα ρ του νερού είναι δεδομένη για την έρευνα, η (5) τροποποιείται εκ νέου:

$$\Delta P = \frac{1,483 \times 10^6 \Delta v}{1 + \frac{133,9d}{t}} \quad (6)$$



Διάγραμμα 1. Η μεταβολή της πίεσης του υδραυλικού πλήγματος σε σχέση με τον χρόνο

Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι μετά την εμφάνιση της μέγιστης υπερπίεσης P, αρχίζει και εκτονώνεται το σύστημα ώσπου να μηδενιστεί η στατική πίεση εξαιτίας του υδραυλικού πλήγματος. Η μέγιστη πίεση υπολογίζεται από την (6).

Μηχανισμοί διήθησης και εξισώσεις.

Η διήθηση μικροσωματιδίων από ένα ρευστό αποτελείται από τρεις ξεχωριστούς μηχανισμούς την διήθηση εξαιτίας της διάχυσης σωματιδίων, εξαιτίας της παρεμπόδισης καθώς και της ενσφήνωσης του σωματιδίου λόγω αδράνειας πάνω στην ίνα του διηθητικού στοιχείου. Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί ο καθένας εκ των οποίων έχει την δική του αποδοτικότητα, αλληλεπιδρούν ταυτόχρονα σχηματίζοντας την συνολική αποδοτικότητα διήθησης για το φίλτρο.

Ο σημαντικότερος παράγοντας για την επιλογή ενός φίλτρου είναι η χαρακτηριστική του καμπύλη η οποία εικονίζει την απόδοση που έχει για διάφορες διαμέτρους σωματιδίων.

Ως απόδοση του φίλτρου καλούμε το ποσοστό των σωματιδίων κατά μάζα που μπορούν να συγκρατήσουν οι ίνες του και δεν επιτρέπουν να διαπεράσουν μετά από αυτό. Υπάρχουν φίλτρα με πολύ καλή απόδοση που μπορούν να φτάσουν ποσοστό συλλογής σωματιδίων ως και 99.9999%.

Υπάρχουν επιστήμονες που έχουν αναλύσει τους τρεις μηχανισμούς διήθησης και την συνολική απόδοση ενός φίλτρου σε σχέση με πολλά φυσικά μεγέθη και κατασκευαστικούς παραμέτρους του διηθητικού στοιχείου. Έτσι λοιπόν έχουν εξαγάγει μαθηματικά μοντέλα για τον θεωρητικό προσδιορισμό της απόδοσης ενός διηθητικού στοιχείου από διάφορα δεδομένα (Kowalski et al., 1999; Wang et al., 2006; Lee and Liu 1982). Τα παρακάτω μοντέλα αφορούν την διήθηση αέρα, παρά ταύτα μπορούν να εφαρμοστούν και για το νερό εφόσον τα φυσικά μεγέθη όπως πυκνότητα ιξώδες κτλ είναι σωστά. Τους μηχανισμούς και τα μοντέλα αυτά θα εξηγήσουμε συνοπτικά παρακάτω.

Η βασική σχέση που διέπει την αποδοτικότητα του διηθητικού στοιχείου είναι:

$$E_F = 1 - \exp - \frac{4La_r}{\pi d_f} n_R + n_D + n_I \quad (7)$$

- L: Το πάχος του διηθητικού στοιχείου (mm).
 d_f : Την διάμετρο της ίνας του διηθητικού στοιχείου (mm).
 a_r : Τον λόγο του όγκου των ινών του φίλτρου V_f προς τον όγκο όλου του στοιχείου V_F .
 n_R, n_D, n_I Τους βαθμούς απόδοσης εξαιτίας παρεμπόδισης, διάχυσης και αδράνειας.

Το άθροισμα $n_R + n_D + n_I$ των επιμέρους μηχανισμών διήθησης, ισούται με:

$$n_R + n_D + n_I = \frac{1 - a_r N_R^2}{Ku(1 + N_R)} + 1.61 \frac{1 - a_r}{Ku} Pe^{\frac{1}{3}} + \frac{Stk \times J}{2Ku^2} \quad (8)$$

- N_R : Τον λόγο της διαμέτρου σωματιδίων d_p σε μm προς την μέση διάμετρο της ίνας του διηθητικού στοιχείου d_f σε μm .
 Ku : Τον αδιάστατο υδροδυναμικό συντελεστή Kuwabara, ο οποίος είναι συνάρτηση ως προς το a_r και ισούται με:

$$Ku = \frac{4a_r - a_r^2 - 3}{4} - \frac{\ln a_r}{2} \quad (9)$$

Με Pe τον αδιάστατο αριθμό Peclet ο οποίος συναρτάται από αρκετά φυσικά μεγέθη και δίνεται υπό την παρακάτω μορφή:

$$Pe = \frac{3 \times 10^{-12} \pi \mu v d_f d_p}{kT \left(1 + \frac{0.067}{d_p} \right) \left(2.492 + 0.84 \exp -6.49 d_p \right)} \quad (10)$$

- v : Την ταχύτητα του διερχόμενου ρευστού στον αγωγό ροής (m/sec).
 μ : Το απόλυτο ιξώδες του νερού (Kg/m×sec).
 k : Την σταθερά Boltzmann (1.3708×10^{-23} J°K).
 T : Την απόλυτη θερμοκρασία του νερού (°K).

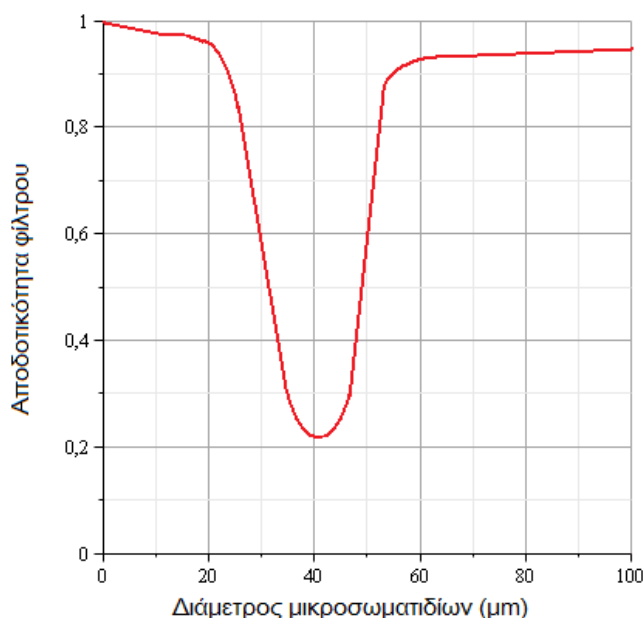
Ως Stk καλούμε τον αδιάστατο αριθμό Stokes. Ο αριθμός αυτός ισούται με:

$$Stk = \frac{\rho d_p^2 v C_D}{18 \mu d_f} \quad (11)$$

Με C_D τον αδιάστατο συντελεστή τριβής ο οποίος μπορεί να προσδιοριστεί εμπειρικά σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds της ροής του νερού. Για την περίπτωση του υδραυλικού πλήγματος και δεδομένου ότι συνήθως για να συμβεί το υδραυλικό πλήγμα πρέπει να έχουμε υψηλές ταχύτητες ροής νερού καθώς και πιέσεις, σημαίνει πως θα έχουμε και αυξημένο αριθμό Reynolds που θα κυμαίνεται μεταξύ $500 < Re < 100000$. Άρα λαμβάνουμε $C_D = 0.44$. Η εξίσωση (11) απλοποιείται περαιτέρω:

$$Stk = \frac{0.024 \rho d_p^2 v}{\mu d_f} \quad (12)$$

Το J είναι μια αδιάστατη παράμετρος η οποία εξαρτάται από τον λόγο N_R (Wang et al., 2006). Η παράμετρος αυτή μπορεί να έχει εύρος από 0 μέχρι 2. Για απλοποιητικούς λόγους θα λάβουμε τον μέσο όρο του εύρους αυτού δηλαδή $J = 1$. Συνήθως σ' ένα διηθητικό στοιχείο νερού, ο λόγος διαμέτρου σωματιδίων προς την μέση διάμετρο της ίνας είναι μικρότερος από 0.4 μπορεί όμως να είναι και μεγαλύτερος, πχ για $N_R = 0.3$ έχουμε $J = 1.5$. Με αντικατάσταση των σχέσεων (12), (10) και (9) στην (8) και την (8) στην (7) έχουμε την τελική συνάρτηση της αποδοτικότητας του φίλτρου σε σχέση με την διάμετρο των μικροσωματιδίων που μπορεί να συλλέξει, άρα μπορούμε να εξάγουμε την χαρακτηριστική καμπύλη του φίλτρου.



Διάγραμμα 2. Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη φίλτρου. Η συνεργασία δύο ή περισσότερων μηχανισμών διήθησης μας οδηγούν στην εξαγωγή της καμπύλης της συνολικής αποδοτικότητας.

Η επίδραση του υδραυλικού πλήγματος στην διήθηση.

Έχοντας στην διάθεσή μας την τελική εξίσωση της συνολικής απόδοσης ενός διηθητικού στοιχείου σε σχέση με την διάμετρο σωματιδίων, μπορούμε να εισάγουμε στην εξίσωση παραμέτρους που αφορούν την περίπτωση εμφάνισης υδραυλικού πλήγματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο είμαστε σε θέση να δούμε πως μεταβάλλεται η αποδοτικότητα του διηθητικού στοιχείου κατά το υδραυλικό πλήγμα μετά απ' τον συνδυασμό των δύο θεωριών.

Κατάστροφηση της μεθόδου.

Μέχρι να κλείσει η βαλβίδα στον αγωγό ροής, το νερό ρέει με ταχύτητα u . Όταν κλείσει η βαλβίδα τότε η ταχύτητα ροής μηδενίζεται και ακαριαία εμφανίζεται η ταχύτητα του κύματος διάδοσης του υδραυλικού πλήγματος α_0 . Σε αυτό το ακαριαίο χρονικό διάστημα εμφάνισης του φαινομένου και διάδοσης του κύματος πίεσης εντός του αγωγού, θα μπορούσαμε να πούμε ότι στις σχέσεις (10) (12) καθώς και στην εξίσωση που μας δίνει την τελική αποδοτικότητα συλλογής σωματιδίων του στοιχείου, η ταχύτητα u που υπάρχει στις σχέσεις μπορεί να ταυτιστεί με την ταχύτητα διάδοσης α_0 , άρα στις σχέσεις αυτές έχουμε $u = \alpha_0$.

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (13) λοιπόν στις (10) και (12) και εν συνεχεία με αντικατάσταση των σχέσεων (15) και (16) στην (8) και αυτή με την σειρά της στην (7), έχουμε την τελική συνάρτηση $E = f(d_p)$ για την εμφάνιση του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος. Στην συνέχεια θα είμαστε σε θέση να κάνουμε ένα παράδειγμα σύγκρισης για χαρακτηριστικές καμπύλες αποδοτικότητας διηθητικών στοιχείων για κανονική ροή ρευστού και για εμφάνιση υδραυλικού πλήγματος.

Σε όλες τις παρακάτω σχέσεις από την (12) και έπειτα, όσα μεγέθη εμπεριέχουν μονάδες σχετιζόμενες με απόσταση, όπως m , m^2 και m^3 έχουν μετατραπεί αντιστοίχως σε μm , διότι στην τελική σχέση $E = f(d_p)$, η διάμετρος σωματιδίων είναι εκφρασμένη σε μm . Αν λοιπόν παραλειφθούν αυτές οι μετατροπές, δεν θα προκύψουν σωστές χαρακτηριστικές καμπύλες.

Η σχέση (4) με μετατροπή των μονάδων της στην κλίμακα των μm , γίνεται:

$$\alpha_0 = \frac{1483.2 \times 10^6}{1 + \frac{133.9d}{t}} \quad (13)$$

Με αντικατάσταση της (13) στην (12) για τον αριθμό Stokes, έχουμε:

$$Stk = \frac{0.024\rho d_p^2}{\mu d_f} \times \frac{1483.2 \times 10^6}{1 + \frac{133.9d}{t}} = \frac{35.6 \times 10^6 \rho d_p^2}{\mu d_f \left(1 + \frac{133.9d}{t}\right)} \quad (14)$$

Και επειδή η πυκνότητα του νερού είναι δεδομένη, η σχέση απλοποιείται επιπλέον σε:

$$Stk = \frac{3.56 \times 10^{-8} d_p^2}{\mu d_f \left(1 + \frac{133.9d}{t}\right)} \quad (15)$$

Με αντικατάσταση της (13) στην (10) για τον αριθμό Peclet, έχουμε:

$$Pe = \frac{0.0044\pi\mu d_f d_p}{kT \left(1 + \frac{0.067}{d_p}\right) \left(2.492 + 0.84 \exp -6.49d_p\right) \left(1 + \frac{133.9d}{t}\right)} \quad (16)$$

Παράδειγμα

Παρακάτω θα παραθέσουμε τεχνικά χαρακτηριστικά ενός τυχαίου διηθητικού στοιχείου νερού της αγοράς. Τα αριθμητικά στοιχεία θα εισαχθούν στις αντίστοιχες εξισώσεις. Αρχικά θα εφαρμόσουμε τις εξισώσεις (7) (8) (9) (10) και (12), για να εξάγουμε

την θεωρητική χαρακτηριστική καμπύλη του διηθητικού στοιχείου. Στο δεύτερο μέρος του παραδείγματος θα θεωρήσουμε ότι συνέβη υδραυλικό πλήγμα και θα εφαρμοστούν οι εξισώσεις (7) (8) (9) (15) και (16). Τέλος θα γίνει μια σύγκριση των διαγραμμάτων απόδοσης – διαμέτρου σωματιδίων για να δούμε την επίδραση του πλήγματος.

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά διηθητικού στοιχείου.

Στοιχείο	
Υλικό κατασκευής	Πολυπροπυλένιο
Διατομή	Κυκλική
Σχήμα	Κυλινδρικό
Ύψος/πάχος στοιχείου (L)	250.8 mm
Διάμετρος στοιχείου (d_F)	114.3 mm
Μέσο πάχος ινών (d_f)	5 μm

Μέρος Α΄.

Υπολογισμός λοιπών παραμέτρων.

Ο όγκος όλου του στοιχείου διήθησης είναι $V_F = 0.00256 \text{ m}^3$. Το πολυπροπυλένιο έχει πυκνότητα $\rho_{PP} = 946 \text{ Kg/m}^3$. Το κλάσμα όγκου a_r για το φίλτρο δεν μπορεί να προσδιοριστεί καθώς δεν είναι γνωστός ο συνολικός όγκος των ινών του στοιχείου V_f . Το κλάσμα αυτό είναι γνωστό ότι για το πολυπροπυλένιο έχει εύρος από 0 – 2% (Patel et al., 2012), λόγω του ότι τέτοια στοιχεία δεν δίδονται απ’ τους κατασκευαστές, θα λάβουμε τον μέσο όρο αυτού του εύρους ως μια προσέγγιση, άρα $a_r = 0.01$.

Ο υδροδυναμικός συντελεστής Kuwabara ισούται με:

$$Ku = \frac{4 \times 0.01 - 0.01^2 - 3}{4} - \frac{\ln 0.01}{2} = 1.56 \quad (17)$$

Η θερμοκρασία του νερού που βρίσκεται υπό διήθηση είναι 15°C ή $T = 288^\circ\text{K}$. Το απόλυτο ιξώδες του νερού για την συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι $\mu = 0.00114 \text{ Kg/m} \times \text{sec}$, και η σταθερά Boltzmann είναι $k = 1.3708 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$. Τα τοιχώματα του σωλήνα ροής νερού έχουν πάχος $t = 3 \text{ mm}$. Θεωρούμε ότι η εσωτερική διάμετρος του αγωγού είναι ίση με την διάμετρο του διηθητικού στοιχείου, άρα $d = d_F$.

Πίνακας 2. Φυσικά μεγέθη του παραδείγματος.

Φυσικό μέγεθος	Τιμή (S.I)
Κλάσμα όγκου φίλτρου a_r	0.01
Ταχύτητα ροής νερού v	1.5 m/sec
Απόλυτο ιξώδες νερού μ	0.00114 $\text{Kg/m} \times \text{sec}$
Θερμοκρασία νερού T	288 $^\circ\text{K}$
Σταθερά Boltzmann k	$1.3708 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$
Τοιχώματα σωλήνα t	3 mm

Με αντικατάσταση των παραπάνω τιμών στην (10) για τον αριθμό Peclet:

$$Pe(d_p) = \frac{2.026 \times 10^7 d_p^2}{d_p + 0.167 + 0.14 \exp -6.49d_p} \quad (18)$$

Με αντικατάσταση των τιμών στην (12) για τον αριθμό Stokes:

$$Stk(d_p) = 0.0063d_p^2 \quad (19)$$

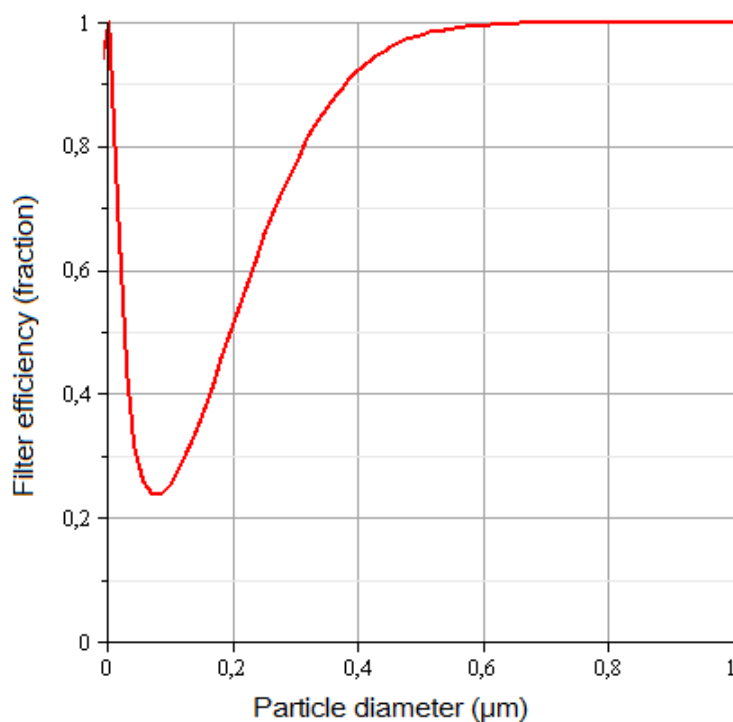
Η εξίσωση (8) με αντικατάσταση των παραπάνω και εκφρασμένη ως προς d_p , για το άθροισμα $n_R + n_D + n_I$, γίνεται:

$$n_R + n_D + n_I = \frac{0.126d_p^2}{5 + d_p} + 1.38 \frac{2.026 \times 10^7 d_p^2}{d_p + 0.167 + 0.14 \exp -6.49d_p}^{-\frac{2}{3}} + 0.0013d_p^2 \quad (20)$$

Η σχέση (7) γίνεται:

$$E_F(d_p) = 1 - \exp -636.9 n_R + n_D + n_I \quad (21)$$

Με αντικατάσταση της (20) στην (21) έχουμε στην διάθεσή μας την συνάρτηση $E(d_p)$ για την θεωρητική χαρακτηριστική καμπύλη διηθητικού στοιχείου για ταχύτητα ροής 1.5 m/sec.



Διάγραμμα 3. Χαρακτηριστική καμπύλη φίλτρου για διήθηση νερού ($v = 1.5$ m/sec).

Μέρος Β΄.

Θεωρούμε ότι η βαλβίδα της εγκατάστασης κλείνει και εμφανίζεται υδραυλικό πλήγμα. Η ταχύτητα ροής ήταν 1.5 m/sec. Η πίεση του υδραυλικού πλήγματος στον αγωγό είναι:

$$P = \frac{1.483 \times 10^6 \times 1.5m/sec}{1 + \frac{133.9 \times 0.25m}{0.003m}} = 14.04 kPa \quad (22)$$

Η σχέση (15) για τον αριθμό Stokes κατά την εμφάνιση υδραυλικού πλήγματος, γίνεται:

$$Stk(d_p) = 0.0591d_p^2 \quad (23)$$

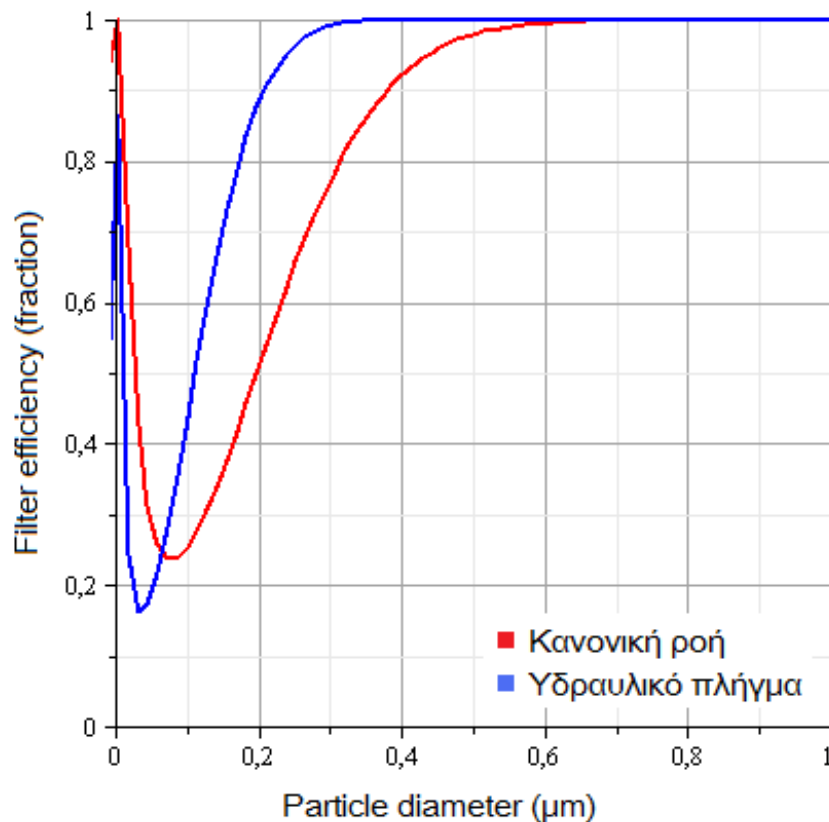
Η σχέση (16) για τον αριθμό Peclet κατά την εμφάνιση υδραυλικού πλήγματος, γίνεται:

$$Pe(d_p) = \frac{1.88 \times 10^8 d_p^2}{d_p + 0.167 + 0.14 \exp -6.49d_p} \quad (24)$$

Η εξίσωση (8) με αντικατάσταση των παραπάνω και εκφρασμένη ως προς d_p , για το άθροισμα $n_R + n_D + n_I$, γίνεται:

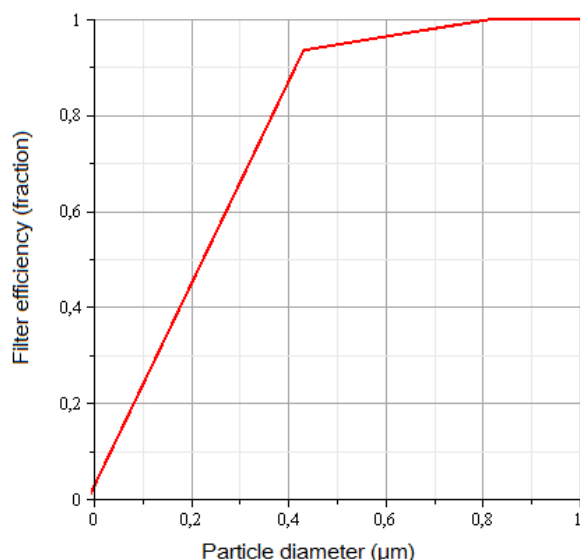
$$n_R + n_D + n_I = \frac{0.126d_p^2}{5 + d_p} + 1.38 \frac{1.88 \times 10^8 d_p^2}{d_p + 0.167 + 0.14 \exp -6.49d_p} + 0.0591d_p^2 \quad (25)$$

Με αντικατάσταση της (25) στην (21) έχουμε την τελική συνάρτηση $E_F(d_p)$ η οποία δίνει την χαρακτηριστική καμπύλη αποδοτικότητας σε περίπτωση υδραυλικού πλήγματος.

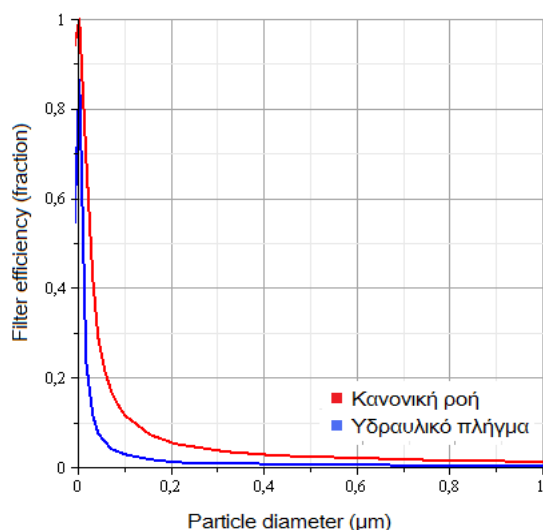


Διάγραμμα 4. Σύγκριση καμπυλών αποδοτικότητας φίλτρου για κανονική ροή και για περίπτωση υδραυλικού πλήγματος.

Η κανονική ροή νερού έχει ταχύτητα $v = 1.5\text{m/sec}$. Η ταχύτητα του κύματος κατά την εμφάνιση υδραυλικού πλήγματος, είναι $v = a_0 = 14.8\text{m/sec}$. Παρακάτω ακολουθούν και οι καμπύλες αποδοτικότητας των επιμέρους μηχανισμών διήθησης, δηλαδή της διήθησης λόγω διάχυσης λόγω παρεμπόδισης και λόγω αδρανειακής ενσφίνωσης.

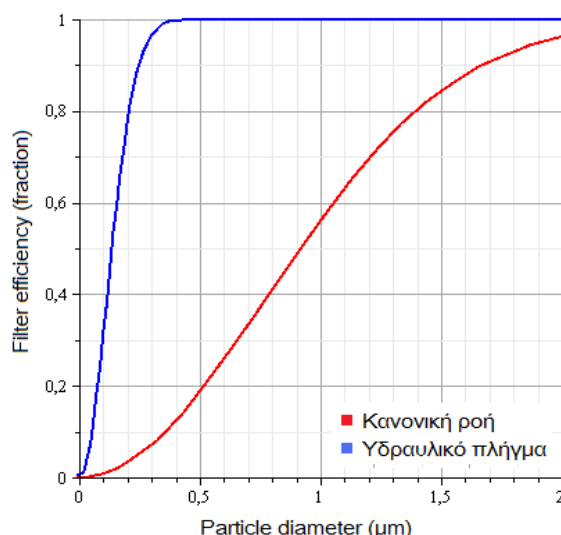


Διάγραμμα 5. Καμπύλες αποδοτικότητας διήθησης για τον μηχανισμό παρεμπόδισης



Διάγραμμα 6. Καμπύλες αποδοτικότητας διήθησης για τον μηχανισμό διάχυσης.

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να επισημανθεί είναι πως η σύγκριση των χαρακτηριστικών καμπυλών του διηθητικού στοιχείου για διήθηση νερού, νοείται για ένα ακαριαίο χρονικό διάστημα, το διάστημα αυτό είναι ο χρόνος που διαρκεί το υδραυλικό πλήγμα μέχρι να εκτονωθεί ο αγωγός από τις ασκούμενες πιέσεις λόγω του φαινομένου. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται κρίσιμος χρόνος πλήγματος και σπάνια είναι πάνω από 2sec. Στην περίπτωση της σταθερής ροής νερού με ταχύτητα $v=1.5\text{m/sec}$, η διήθηση νερού μπορεί να διαρκεί για ένα άριστο χρονικό διάστημα, στην περίπτωση του υδραυλικού πλήγματος η διήθηση διαρκεί όσο ο κρίσιμος χρόνος πλήγματος. Στην σύγκριση λοιπόν κάνουμε την παραδοχή ότι και η διήθηση στην πρώτη περίπτωση με ταχύτητα 1.5m/sec διαρκεί όσο και η διήθηση στην δεύτερη περίπτωση.



Διάγραμμα 7. Καμπύλες αποδοτικότητας διήθησης για τον μηχανισμό αδράνειας.

Συμπεράσματα από τα διαγράμματα.

Στο διάγραμμα 5 βλέπουμε ότι η απόδοση διήθησης μικροσωματιδίων λόγω του μηχανισμού παρεμπόδισης, δεν επηρεάζεται από το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος, έτσι οι καμπύλες και των δύο περιπτώσεων είναι ίδιες. Το γεγονός αυτό είναι εμφανές και από τις εξισώσεις υπολογισμού της τελικής αποδοτικότητας του διηθητικού στοιχείου, αφού στην σχέση που υπολογίζει την απόδοση λόγω παρεμπόδισης δεν συμπεριλαμβάνεται η ταχύτητα ροής ή κάποιο άλλο φυσικό μέγεθος που μπορεί να μεταβληθεί και να επηρεάσει την απόδοση.

Στο διάγραμμα 6 βλέπουμε ότι η απόδοση διήθησης μικροσωματιδίων λόγω του μηχανισμού διάχυσης, επηρεάζεται από το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος. Ποιο συγκεκριμένα, η ύπαρξη υδραυλικού πλήγματος μειώνει την αποδοτικότητα του στοιχείου για πολύ μικρές διαμέτρους ως και 1μm, όμως όσο αυξάνεται η διάμετρος του διηθημένου σωματιδίου, τόσο συγκλίνουν μεταξύ τους οι βαθμοί απόδοσης των δύο φαινομένων ούτως ώστε σε κάποιο εύρος διαμέτρων με $d_p > 1\mu m$ να ταυτίζονται. Συμπεραίνουμε ότι η διήθηση λόγω διάχυσης επηρεάζει τις εφαρμογές νανοδιήθησης η οποίες αφορούν διήθηση με εύρος διαμέτρων $0.1nm < d_p < 1nm$, αλλά δεν επηρεάζει τις εφαρμογές μικροδιήθησης.

Στο διάγραμμα 7 βλέπουμε ότι η απόδοση διήθησης μικροσωματιδίων εξαιτίας του μηχανισμού αδρανειακής ενσφήνωσης, επηρεάζεται σαφώς από την εμφάνιση του υδραυλικού πλήγματος. Ποιο συγκεκριμένα, μέχρι και το όριο των 2μm η απόδοση επηρεάζεται θετικά εν αντιθέσει με τα διαγράμματα 5, 6 όπου η απόδοση επηρεαζόταν αρνητικά από το φαινόμενο. Μετά από το όριο των 2μm, οι καμπύλες συγκλίνουν αρκετά ώστε σε σωματίδια μεγαλύτερων διαμέτρων να ταυτίζονται, πράγμα που σημαίνει ότι η απόδοση λόγω αδράνειας δεν επηρεάζεται καθόλου από το υδραυλικό πλήγμα όσο αυξάνεται η διάμετρος του ρυπογόνου σωματιδίου στο νερό που συγκράτησε το φίλτρο.

Το διάγραμμα 5 μας δίνει τον συνολικό βαθμό απόδοσης συλλογής σωματιδίων για την διήθηση. Η εμφάνιση υδραυλικού πλήγματος επηρεάζει την απόδοση διήθησης για μικρές διαμέτρους μεταξύ $0 < d_p < 0.05\mu m$. Από εκείνο το σημείο και έπειτα για εύρος διαμέτρων $0.05 < d_p < 0.6\mu m$, το υδραυλικό πλήγμα ευνοεί θετικά την συνολική αποδοτικότητα διήθησης, ενώ πλέον σε μεγάλες διαμέτρους σωματιδίων οι καμπύλες ταυτίζονται, πράγμα που σημαίνει ότι η διήθηση δεν επηρεάζεται από το υδραυλικό πλήγμα.

Γενικό συμπέρασμα.

Η εμφάνιση υδραυλικού πλήγματος σε νερό που βρίσκεται στην διεργασία της διήθησης εντός αγωγού, επηρεάζει αρνητικά την αποδοτικότητα συλλογής σωματιδίων μόνο για συγκεκριμένο εύρος διαμέτρων των σωματιδίων. Το εύρος αυτό αφορά κυρίως εφαρμογές

νανοδιήθησης δηλαδή πολύ μικρές διαμέτρους σωματιδίων. Για το αμέσως επόμενο εύρος διαμέτρων σωματιδίων η απόδοση ευνοείται θετικά από το υδραυλικό πλήγμα, η αιτία προέρχεται κυρίως από τον μηχανισμό διήθησης λόγω αδράνειας (διάγραμμα 7). Για διαμέτρους σωματιδίων άνω των 2μm το υδραυλικό πλήγμα δεν επηρεάζει καθόλου την αποδοτικότητα του διηθητικού στοιχείου και γενικώς όσο περισσότερο αυξάνεται η διάμετρος σωματιδίων τόσο λιγότερο επηρεάζεται η πιθανότητα μεταβολής της απόδοσης συλλογής σωματιδίων από το διηθητικό στοιχείο εξαιτίας του υδραυλικού πλήγματος.

Βιβλιογραφία.

1. Παπανικολάου, Π.Ν., (2012). "Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση & αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια" 2η έκδοση, διδακτικές σημειώσεις. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.
2. Παπακώστα, Κ., (2009). "Πλήγμα κριού – Ανάλυση", μεταπτυχιακή διατριβή. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ξάνθη.
3. Broens, F., Menne, D., Pothof, I., Blankert, B., Roesink, H.D., Futselaar, H., Lammertink, R.G. and Wessling, M. (2011). "Water hammer reduces fouling during natural water ultrafiltration". *Water Research*, 46(4) : 1113-1120.
4. Kowalski, W.J., Bahnfleth, W.P. and Whittam, T.S. (1999). "Filtration of airborne microorganisms: Modeling and prediction". *ASHRAE Transactions*, 105 : 4-17.
5. Lee, K.W. and Liu, B.Y.H. (1982). "Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters". *Aerosol Science and Technology*, 1(2) : 147-161.
6. Patel, P.A., Desai, A.K. and Desai, A.J. (2012). "Evaluation of engineering properties for polypropylene fiber reinforced concrete". *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 3(1) : 42-45.
7. Street, R.L., Watters, G.Z. and Vennard, J.K. (1996). "Elementary Fluid Mechanics" 7th Edition, Willey Publications, ISBN13: 9780471013105.
8. Wang, Q., Maze, B., Tafreshi, H.V. and Pourdeyhimi, B. (2006). "Approaches for predicting collection efficiency of fibrous filters". *Journal of Textile and Apparel Technology and Management*, 5(2) : 1-7.
9. C.R. Nave, (2014). "Hyperphysics – Bulk Elastic Properties". Georgia State University, Department of Physics and Astronomy. Available from internet: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/permot3.html>

THEORETICAL APPROACH OF WATER HAMMER EFFECT ON THE EFFICIENCY OF FILTER ELEMENT DURING THE FILTRATION OF WATER.

George P. Kouropoulos

Graduate of Energy Technology Department, Faculty of Technological Applications,
Technological Educational Institute of Athens.

Contact information (e-mail): etmecheng@gmail.com

Abstract.

The purpose of the present study is to examine the effect of water hammer phenomenon within water flow pipeline, on the efficiency that a filter element will have in the process of water filtration, as long as this element is situated in the pipeline when the filtered water flows. In the study initially the necessary theoretical background will be described that is related to the basic equations governing the water hammer phenomenon, as well as the analysis of the parameters governing the mechanisms of fluid filtration through a filter element and affect its efficiency. Subsequently after the combination of equations and water hammer sizes and fluid filtration, the final equations and curves will be drawn so that will help us to describe the phenomenon of water hammer effect on the efficiency of a filter. The general conclusion which arises is that the existence of water hammer reduces the particle collection efficiency for nanofiltration, while for range of large diameters, the efficiency is not affected at all.

Keywords: water hammer, filtration, water filtration, filtration efficiency