



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΤΑΧΕΩΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΡΟΗ ΣΕ ΒΥΘΙΣΜΕΝΟ
ΚΑΤΑΒΑΘΜΟ ΣΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΩΡΥΓΑ**



ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΣΤΙΒΑΝΑΚΗΣ

Επιβλέπων: Η. Παπακωνσταντής, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ένα τεράστιο ευχαριστώ στον κ. Π. Παπανικολάου, Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ και στον κ. Ε. Ρετσίνη, Διδάκτορα Μηχανικό ΕΜΠ, για την αμέριστη στήριξη και την υπομονή τους κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Χωρίς τη συμβολή τους η ολοκλήρωση της εργασίας δεν θα ήταν εφικτή.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Η. Παπακωνσταντή, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ, για τις παρατηρήσεις του και τη συμβολή του.

Φυσικά δεν μπορώ να παραλείψω τους γονείς μου για την ηθική και υλική στήριξη που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια της προσπάθειας αυτής.

Τέλος σε όλους τους ανθρώπους μου, που δε σταμάτησαν να πιστεύουν σε μένα, σε ευκολίες και δυσκολίες.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραματικής έρευνας που αφορά τα χαρακτηριστικά της ταχέως μεταβαλλόμενης ροής στην περιοχή βυθισμένου καταβαθμού σε ανοικτό ορθογωνικό αγωγό, τόσο για υπερκρίσιμη όσο και για υποκρίσιμη ροή στα ανάντη. Στην περιοχή του βυθισμένου καταβαθμού εμφανίζονται πέντε διαφορετικοί τύποι ροής τόσο για την περίπτωση που η ανάντη φλέβα νερού βρίσκονταν σε συνθήκες υπερκρίσιμης ροής όσο και για την περίπτωση που η ανάντη φλέβα βρίσκονταν σε υποκρίσιμες συνθήκες ροής. Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος προέκυψε ότι με την διαδοχική αύξηση του κατάντη βάθους, στην περίπτωση που η ανάντη ροή είναι υπερκρίσιμη, εμφανίζονται πέντε διαφορετικοί τύποι υδραυλικών αλμάτων με την εξής σειρά: minimum B jump, B jump, wave train, wave jump και A jump. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για όλους τους τύπους ροών εκτός από το B jump λόγω της μη σταθεροποίησης του συγκεκριμένου τύπου ροής εξαιτίας του μικρού αριθμού Froude της υπερκρίσιμης ροής στην διατομή ανάντη του καταβαθμού. Στην περίπτωση της υποκρίσιμης ροής ανάντη, οι διαφορετικοί τύποι υδραυλικών αλμάτων είναι οι εξής, minimum B Jump, Submerged Jump, Standing Surface Jump και No Jump. Για υπερκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού, ο αριθμός Froude έλαβε τιμές κοντά στη μονάδα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διακριτά προφίλ ροής όπως αυτά προέκυψαν από το δικό μας πείραμα. Παράλληλα με την λεπτομερή περιγραφή του εκάστοτε προφίλ, έγινε συσχέτιση κρίσιμων μεγεθών της ροής βάσει της διαστατικής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα της συσχέτισης αυτής παρουσιάζονται λεπτομερώς σε διαγράμματα, με κύριο στόχο την περαιτέρω κατανόηση των απωλειών ενέργειας και της κατανομής πιέσεων για τον εκάστοτε τύπο ροής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξάγονται συμπεράσματα θεωρητικού και πρακτικού ενδιαφέροντος τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό λεκανών ηρεμίσσεως και βυθισμένων καταβαθμών.

ABSTRACT

In the present experimental work, the results of experimental research on the characteristics of rapidly varied flow around a fully submerged negative step in a horizontal open channel are presented. Experiments have been carried out for both subcritical and supercritical flow upstream of the step. Five different flow types were observed as the tailwater varied for each type of flow and they are described in detail. For supercritical flow upstream the step, the main focus was on collecting data for Froude numbers close to one. After a detailed description of each profile, critical flow parameters were correlated based on dimensional analysis. The results of this correlation are presented in detail in graphs, attempting to improve our understanding regarding the energy loss. Finally, conclusions are drawn with theoretical and practical interest in the design of stilling basins and submerged steps.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	9
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	11
3.1. Ειδική Ενέργεια.....	11
3.2. Ειδική Δύναμη.....	12
3.3. Μονοδιάστατη εξίσωση ποσότητας κίνησης	12
3.4. Μονοδιάστατη εξίσωση ενέργειας.....	13
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	15
4.1. Πειραματική Συσκευή.....	15
4.2. Σύμβολα που χρησιμοποιήθηκαν	21
4.3. Πειραματική Διαδικασία.....	22
4.4. Προφίλ ροής.....	23
4.4.1. Υποκρίσιμη Ροή.....	23
4.4.2. Υπερκρίσιμη Ροή	29
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	34
5.1. Υποκρίσιμη Ροή	34
5.2. Υπερκρίσιμη Ροή	36
5.3. Γενικά.....	37
5.4 Διαχωρισμός προφίλ ροής.....	38
5.4.1 Συσχέτιση y_b/d και y_t/d	40
5.4.2 Συσχέτιση y_b/y_c και $y_t/(y_c+d)$	41
5.4.3 Συσχέτιση του $y_t/((y_c+d)Fr_1)$ με το $y_t/((y_a+d)Fr_1)$	42
5.4.4 Συσχέτιση του αριθμού Froude με τον λόγο $Fr_1(y_c+d)/y_t$	43
5.5 Πιέσεις στο μέτωπο του καταβαθμού	45
5.5.1 Συσχέτιση της πίεσης στο μέτωπο του καταβαθμού με την κατακόρυφη απόσταση των σημείων των μετρήσεων από τον πυθμένα.....	45
Υποκρίσιμη Ροή:.....	46
Υπερκρίσιμη Ροή:	49
5.6 Πιέσεις στον πυθμένα της διώρυγας	52

5.6.1	Συσχέτιση της αδιάστατης μέγιστης πίεσης του πυθμένα στον αγωγό με τη κανονικοποιημένη απόστασή της από τον καταβαθμό.....	52
	Υποκρίσιμη Ροή:.....	53
	Υπερκρίσιμη Ροή:.....	56
5.6.2	Συσχέτιση του $\max(\rho/\rho_g)/y_i$ με τον $y_i/(y_c+d)$	58
5.7	Απώλειες ενέργειας.....	60
5.7.1	Συσχέτιση του H_1/H_2 και $y_i/(y_c+d)$	60
5.7.2	Συσχέτιση των $\Delta H/H_1$ και $y_i/(y_c+d)$	62
5.7.3	Συσχέτιση του $\Delta H/y_c$ με τον $Fr_1(y_c+d)/y_i$	63
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	65
7.	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	67

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της ταχέως μεταβαλλόμενης ροής στην περιοχή βυθισμένου κατακόρυφου καταβαθμού σε οριζόντιο ορθογωνικό αγωγό. Στη μελέτη του φαινομένου υπάρχουν δύο διακριτές κατηγορίες: η περίπτωση της υποκρίσιμης και η περίπτωση υπερκρίσιμης ροής ανάντη του καταβαθμού. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα και για τις δύο αυτές περιπτώσεις.

Κατακόρυφος καταβαθμός συναντάται τόσο σε φυσικούς όσο και σε τεχνητούς αγωγούς. Φυσικές πτώσεις δημιουργούνται σε ποταμούς λόγω διάβρωσης, ενώ τεχνητοί καταβαθμοί κατασκευάζονται σε συστήματα άρδευσης και αποχέτευσης για την μείωση της κλίσης του αγωγού. Άλλες χρήσεις του καταβαθμού, στην περίπτωση όπου το κανάλι έχει μικρότερη κλίση από αυτή του εδάφους, είναι σε κατασκευές για τον έλεγχο της στάθμης.

Η συνηθέστερη χρήση του καταβαθμού παρατηρείται σε έργα καταστροφής ενέργειας, εξαιτίας των τυρβωδών αναμειξεων που προκύπτουν στη ροή. Τέτοια έργα είναι οι λεκάνες ηρεμίσσεως που στοχεύουν στη μείωση της κινητικής ενέργειας και τη σταθεροποίηση της θέσης του υδραυλικού άλματος. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία της κατασκευής.

Η απότομη πτώση της ροής στον καταβαθμό αποτελεί περίπτωση ταχέως μεταβαλλόμενης ροής. Συνεπώς καθίσταται αδύνατον να χρησιμοποιηθούν παραδοχές της βαθμιαία μεταβαλλόμενης ροής για την απλοποίηση στην ανάλυση του φαινομένου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται πειραματική διερεύνηση για υποκρίσιμη και για υπερκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού, με έμφαση στην υποκρίσιμη ροή. Οι απώλειες ενέργειας στον καταβαθμό είναι το βασικό ζήτημα υπό διερεύνηση, καθώς η παράμετρος αυτή παρουσιάζει μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Το φαινόμενο που θα μελετηθεί στη παρούσα διπλωματική εργασία έχει ερευνηθεί εκτενώς στο παρελθόν. Οι βασικές αρχές της ροής σε απότομη κατακόρυφη πτώση δόθηκαν από τον Rouse (1936) και στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά της ροής για υποκρίσιμη ροή ανάντη της πτώσης ερευνήθηκαν από το πείραμα του Moore (1943). Αναφορές υπάρχουν επίσης στα βιβλία για ανοιχτούς αγωγούς του Chow (1979) και Henderson (1966), οι οποίες εστιάζουν στη σταθεροποίηση της θέσης του υδραυλικού άλματος για την ασφαλέστερη λειτουργία λεκανών ηρεμίσσεως. Οι Λιάτης και Παπανικολάου (1978), όσο και οι Wu και Rajaratnam (1998) διερεύνησαν το φαινόμενο της μεταβαλλόμενης ροής σε καταβαθμό και παρουσίασαν τα προφίλ ροής που παρατηρούνται για υποκρίσιμη ροή ανάντη. Αντίστοιχα οι Ohtsu & Yasuda (1991) και οι Mossa et al. (2003) διεξήγαγαν έρευνες και παρουσίασαν τύπους ροής για υπερκρίσιμη ροή.

Στην έρευνά τους οι Wu & Rajaratnam (1998) διερεύνησαν το φαινόμενο της μεταβαλλόμενης ροής για υποκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού. Κεντρικό σημείο της έρευνάς τους ήταν πως η μεταβολή του βάθους στα κατάντη επηρεάζει τον τύπο ροής στον καταβαθμό και συγκεκριμένα μελέτησαν το φαινόμενο για βάθη που πλησιάζουν το ύψος του καταβαθμού και μεγαλύτερα. Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποίησαν ορθογωνικό αγωγό μήκους 7.6 m, πλάτους 0.466 m και ύψους 0.6 m. Πραγματοποίησαν πειράματα για 5 διαφορετικά ύψη καταβαθμού (195 mm, 247 mm, 297 mm, 348 mm, 396 mm) και για ένα εύρος παροχών από 10 έως 45 L/s. Με βάση αυτά τα πειράματα πρότειναν ένα διαχωρισμό τύπων ροής στον καταβαθμό σε δύο κύριες κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα οι κατώτεροι είναι αυτοί για βάθη μικρότερα από αυτά που εμφανίζονται στο πείραμά τους και οι ανώτεροι στη συνέχεια χωρίζονται και αυτοί σε δύο βασικές κατηγορίες: στη ροή βυθισμένης φλέβας, που αφορά βάθη που προσεγγίζουν το ύψος του καταβαθμού, και στην επιφανειακή ροή που αφορά ίσα ή μεγαλύτερα βάθη. Επιπλέον, για την επιφανειακή ροή παρουσίασαν τρεις διακριτούς τύπους ροής, οι οποίοι με τη σειρά που εμφανίζονται αυξάνοντας το κατάντη βάθος είναι, (i) το επιφανειακό κύμα θραύσεως, (ii) οι επιφανειακοί κυματισμοί και (iii) η επιφανειακή φλέβα. Στα συμπεράσματά τους παρουσίασαν ένα διάγραμμα με τη βοήθεια του οποίου μπορεί να προβλεφθεί, βάσει χαρακτηριστικών μεγεθών της ροής, αν στη ροή κατάντη του καταβαθμού θα επικρατεί βυθισμένη υδάτινη φλέβα ή επιφανειακή ροή.

Οι Mossa et al. (2003) διεξήγαγαν αντίστοιχο πείραμα για υπερκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού. Χρησιμοποίησαν δύο διαφορετικά κανάλια διαστάσεων, όπου οι διαστάσεις του πρώτου ήταν 7.72 m μήκος, 0.3 m πλάτος και 0.4 m ύψος, ενώ οι διαστάσεις του δεύτερου ήταν 24.4 m μήκος, 0.4 m πλάτος και 0.5 m ύψος. Επιπλέον, ενσωμάτωσαν στα πειράματά τους διαφορετικά ύψη αναβαθμών χρησιμοποιώντας αναβαθμούς ύψους 0.053 m, 0.1 m και 0.16 m στο πρώτο κανάλι και 0.032 m και 0.0652 m στο δεύτερο. Στα αποτελέσματά τους παρουσίασαν ένα συσχετισμό του αριθμού Froude της ροής ανάντη του αναβαθμού με το βάθος ροής στα κατάντη. Κύριος στόχος των πειραμάτων τους ήταν η δημιουργία διαγραμμάτων που θα έβρισκαν εφαρμογή στην κατασκευή λεκανών ηρεμίσσεως.

Ο Ματζιούνης (2004) στη διπλωματική του εργασία εκτέλεσε πειράματα για όλους του τύπους ροής. Στην εργασία αυτή, όπου το ύψος του καταβαθμού ήταν μεταβλητό, έγιναν μετρήσεις για ύψη 2.5 cm, 5 cm, 7.5 cm, και 10 cm, ενώ η μέγιστη δυνατή παροχή ήταν 9 L/s. Αντίστοιχα, και σε αυτή την εργασία παρουσιάστηκαν διαγράμματα συσχετισμού χαρακτηριστικών μεγεθών της ροής. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην διερεύνηση των απωλειών ενέργειας στον καταβαθμό και στις συνθήκες πίεσης που επικρατούν στο μέτωπο του καταβαθμού, με κύριο στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων που μπορούν να φανούν χρήσιμα για σχεδιαστικούς και κατασκευαστικούς σκοπούς υδραυλικών έργων.

Ο Ρετσίνης (2022) στη διδακτορική διατριβή του διερεύνησε το φαινόμενο για υπερκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού, και επικεντρώθηκε εκτός από τις απώλειες ενέργειας, και στην μελέτη των τυρβωδών χαρακτηριστικών των αλμάτων που εμφανίζονταν. Πιο συγκεκριμένα, σε πειραματική συσκευή με ύψος καταβαθμού 10.3 cm για ένα εύρος παροχών 5-40 L/s, μελετήθηκε το φαινόμενο της ταχέως μεταβαλλόμενης ροής για αριθμό Froude στην διατομή ανάντη του καταβαθμού με υπερκρίσιμη ροή μεγαλύτερο από την τιμή 1.88. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε διαγράμματα που συσχετίζουν διάφορα χαρακτηριστικά γραμμικά μεγέθη της ροής, όπως αυτά προέκυψαν από διαστατική ανάλυση. Για παράδειγμα μελετήθηκαν οι κατακόρυφες πιέσεις στο μέτωπο του καταβαθμού ως προς την απόστασή τους από τον πυθμένα, καθώς και η κατά μήκος κατανομή των πιέσεων στον αγωγό ως προς την κανονικοποιημένη απόστασή τους από τον καταβαθμό και τον αριθμό Froude ανάντη της πτώσης.

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

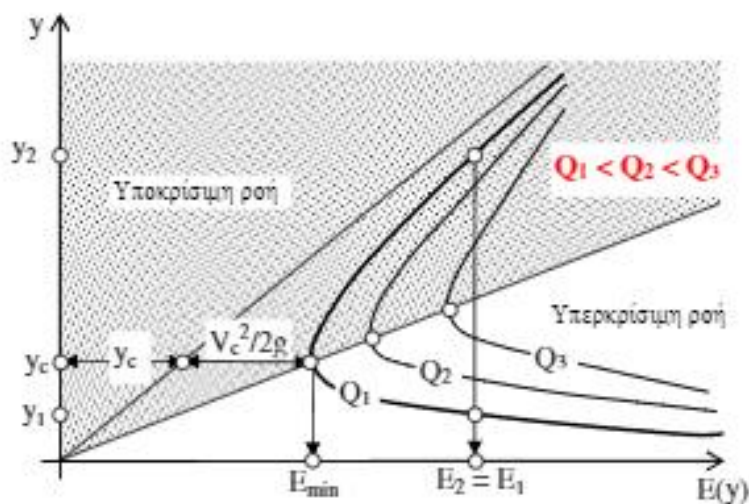
Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε διερεύνηση της ταχέως μεταβαλλόμενης ροής σε καταβαθμό, τόσο για υπερκρίσιμες όσο και για υποκρίσιμες ροές ανάντη του καταβαθμού. Βασική στόχευση της εργασίας είναι η διερεύνηση των απωλειών ενέργειας για κάθε προφίλ ροής στον καταβαθμό.

3.1. Ειδική Ενέργεια

Ορίζουμε σαν ειδική ενέργεια E μίας διατομής το ύψος της ενέργειας της διατομής πάνω από το υψόμετρο του πυθμένα z , δηλαδή το άθροισμα του έργου πίεσης και κινητικής ενέργειας (Chow 1959):

$$E = y + a V^2/2$$

Για μία συγκεκριμένη παροχή Q και μεταβάλλοντας το βάθος ροής προκύπτει η καμπύλη της ειδικής ενέργειας. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το διάγραμμα για μία συγκεκριμένη διατομή και τρεις διαφορετικές παροχές (Παπανικολάου 2014).



Εικόνα 3.1 Διάγραμμα ειδικής ενέργειας (Πηγή: Παπανικολάου 2014)

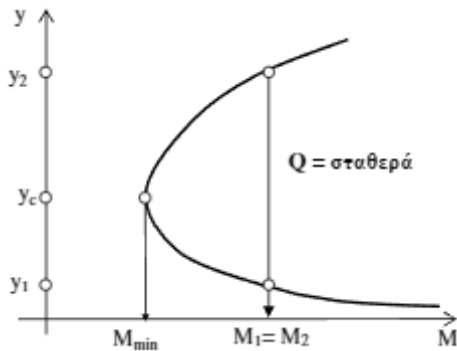
3.2. Ειδική Δύναμη

Ως ειδική δύναμη M ορίζεται η ποσότητα της ορμής ανά μονάδα βάρους του ρευστού (Chow 1959):

$$M = Q^2/gA + (\bar{y})$$

Όπου \bar{y} η απόσταση του κέντρου βάρους της υγρής διατομής από την ελεύθερη επιφάνεια. Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι στο υδραυλικό άλμα για περιπτώσεις οριζόντιου πυθμένα η ειδική δύναμη (ορμή) παραμένει σταθερή.

Αντίστοιχα με την ειδική ενέργεια για δεδομένη παροχή Q σε συγκεκριμένη διατομή, το διάγραμμα της ειδικής δύναμης είναι:



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα ειδικής δύναμης (Πηγή: Παπανικολάου 2014)

3.3. Μονοδιάστατη εξίσωση ποσότητας κίνησης

Η εξίσωση ποσότητας της κίνησης για πεπερασμένο όγκο αναφοράς σε ροή με ελεύθερη επιφάνεια μεταξύ δύο διατομών είναι:

$$F_g + F_p + F_t = \rho Q(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad (3.3.1)$$

Όπου β είναι διορθωτικός συντελεστής ο οποίος αμελείται λόγω ομοιόμορφης κατανομής της ταχύτητας. Επίσης, F_t , η δύναμη λόγω τριβής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα λόγω του

πεπερασμένου μήκους του όγκου αναφοράς και $F_g = 0$ εφόσον ο πυθμένας μας είναι οριζόντιος. Επομένως η σχέση (3.3.1) γίνεται:

$$F_p = \rho Q(V_2 - V_1) \quad (3.3.2)$$

$$F_p = \rho g \bar{y} A \quad (3.3.3)$$

Διαιρώντας την (3.3.1) με ρg και γνωρίζοντας ότι $V = Q / A$ προκύπτει :

$$Q^2 / (g A_1) + (\bar{y}_1)(A_1) = Q^2 / (g A_2) + (\bar{y}_2)(A_2) \quad (3.3.4)$$

3.4. Μονοδιάστατη εξίσωση ενέργειας

Για ένα συγκεκριμένο όγκο αναφοράς, ο οποίος ορίζεται από δύο διατομές του αγωγού, η μία ανάντη και η δεύτερη κατάντη του καταβαθμού, με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας, και αμελώντας της απώλειες λόγω τριβών, προκύπτει η εξίσωση:

$$H_1 = H_2 + \Delta H_{(1-2)} \quad (3.4.1)$$

Το ύψος ενέργειας H στη διατομή είναι :

$$H = z + p / \rho g + a V^2 / 2g \quad (3.4.2)$$

Εφόσον πρόκειται για ανοιχτό αγωγό :

$$H = z + y + a V^2 / 2g \quad (3.4.3)$$

Τα σύμβολα που χρησιμοποιούμε είναι :

z : Υψόμετρο πυθμένα από το επίπεδο αναφοράς

y : Βάθος ροής

V : Μέση ταχύτητα ροής

g : Επιτάχυνση της βαρύτητας

α: Διορθωτικός συντελεστής κινητικής ενέργειας λόγω ανομοιομορφίας της ταχύτητας, θεωρούμε ότι (α=1)

Η εξίσωση ενέργειας στη διατομή (1) ανάντη του καταβαθμού:

$$H_1 = d + y_1 + (V_1^2)/2g \quad (3.4.4)$$

Στη διατομή (2) κατόντη :

$$H_2 = y_2 + (V_2^2)/2g \quad (3.4.5)$$

$$\Delta H_{1-2} = H_1 - H_2 = d + y_1 - y_2 + (V_1^2)/2g - (V_2^2)/2g \quad (3.4.6)$$

$$V_1 = Q/(by_1) \quad V_2 = Q/(by_2) \quad (3.4.7)$$

$$\Delta H_{1-2} = d + y_1 - y_2 + Q^2/(gb^2 y_1^2) - Q^2/(gb^2 y_2^2) \quad (3.4.8)$$

Στις περιπτώσεις υποκρίσιμης ροής, γνωρίζοντας ότι το βάθος ανάντη σταδιακά ελαττώνεται, και ότι υπάρχει μία περιοχή μετάβασης της ροής από υπερκρίσιμη σε υποκρίσιμη, συγκεκριμένα σε απόσταση 3-4 y_c ανάντη του καταβαθμού, υπάρχει και μία διατομή στην οποία ισχύει $y_1 = y_c$. Συνεπώς:

$$y_1 = y_c \quad \text{ή} \quad V^2/2g = y_c/2$$

$$H_1 = d + y_c + y_c/2 = d + (3y_c)/2 \quad (3.4.9)$$

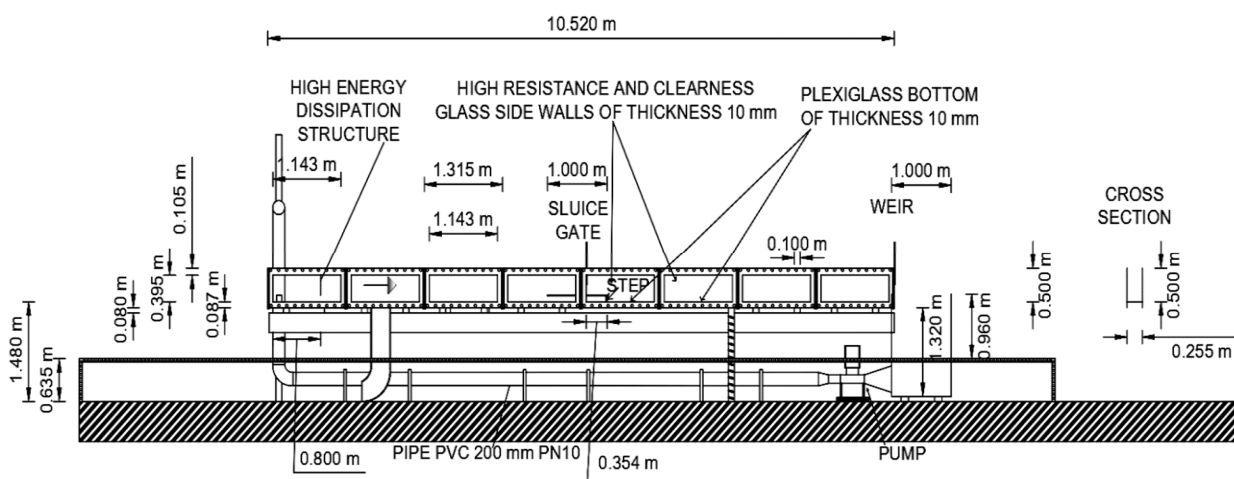
$$\Delta H_{1-2} = d + (3y_c)/2 - y_2 - Q^2/(gb^2 y_2^2) \quad (3.4.10)$$

Από τη σχέση (3.4.10) καταλήγουμε πως σε ροή με γνωστή παροχή και συγκεκριμένο ύψος καταβαθμού, για τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας αρκεί να γνωρίζουμε το βάθος ροής σε μία διατομή κατόντη του καταβαθμού $y_2 = y_t$.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

4.1. Πειραματική Συσκευή

Τα πειράματα έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Χρησιμοποιήθηκε ανοικτός αγωγός μήκους 10.5 μέτρων με ορθογωνική διατομή πλάτους 0.255 μέτρων και βάθους 0.5 μέτρων. Για τον έλεγχο της ροής ανάντη του καταβαθμού έχει τοποθετηθεί κατακόρυφο θυρόφραγμα, ενώ κατάντη στην απόληξη της ροής έχει τοποθετηθεί υπερχειλιστής λεπτής στέψης. Η περιοχή του αγωγού όπου έγιναν οι μετρήσεις είναι τροποποιημένη καταλλήλως. Ο σιδερένιος, αδιαφανής πυθμένας έχει αντικατασταθεί με plexiglass όπου έχουν τοποθετηθεί μία σειρά από πιεζόμετρα.



Σχήμα 4.1 Κατά μήκος τομή της πειραματικής συσκευής (Retsinis, E. and Papanicolaou, P., 2022).

Η παροχή νερού επιτεύχθηκε μέσω συστήματος ανακυκλοφορίας, το οποίο αποτελείται από μία αντλία ονομαστικής ισχύος 3 kW με μοτέρ μεταβλητής ταχύτητας και μέγιστη παροχή 40 L/s. Η αντλία είναι συνδεδεμένη με δεξαμενή νερού χωρητικότητας 2.65 m³ στο κατάντη άκρο του αγωγού. Το νερό αντλείται στα ανάντη της διώρυγας με σωλήνα PVC ονομαστικής διαμέτρου 0.2 m. Η παροχή μετρήθηκε με παροχόμετρο υπερήχων με ακρίβεια 2-5%, προσκολλημένο στον

οριζόντιο σωλήνα PVC, όπου η ροή είναι υπό πίεση κατάντη της αντλίας σε απόσταση 10 διαμέτρων.

Ο καταβαθμός από plexiglass ύψους 10.3 cm και μήκους 1 m, τοποθετήθηκε σε απόσταση 4.85 m ανάντη του άκρου του αγωγού όπου το νερό επιστρέφει στη δεξαμενή ηρεμίας. Το θυρόφραγμα τοποθετήθηκε 0.35 m ανάντη του καταβαθμού ώστε να μπορούμε να ελέγχουμε την ροή από τα ανάντη. Τοποθετήθηκαν δέκα πιεζόμετρα κατά μήκος του οριζόντιου πυθμένα στο μέσον της κατασκευής του καταβαθμού και τρία στο κατακόρυφο μέτωπο. Στη συνέχεια 21 πιεζόμετρα τοποθετήθηκαν στον πυθμένα από plexiglass κατάντη του καταβαθμού.

Για την επίτευξη της υποκρίσιμης ροής χρησιμοποιήθηκε κεκλιμένο επίπεδο από plexiglass για την ομαλοποίηση της ροής στο ανάντη άκρο της κατασκευής του καταβαθμού, ενώ για την υπερκρίσιμη χρησιμοποιήθηκε το θυρόφραγμα το οποίο επέτρεπε ροή με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά (αριθμό Froude και βάθος ροής ανάντη).



Εικόνα 4.1 Δεξαμενή ηρεμίας.



Εικόνα 4.2 Αντλία.



Εικόνα 4.3 Ηλεκτρομαγνητικό παροχόμετρο.



Εικόνα 4.4 Γενική όψη αγωγού.



Εικόνα 4.5 Καταβαθμός.

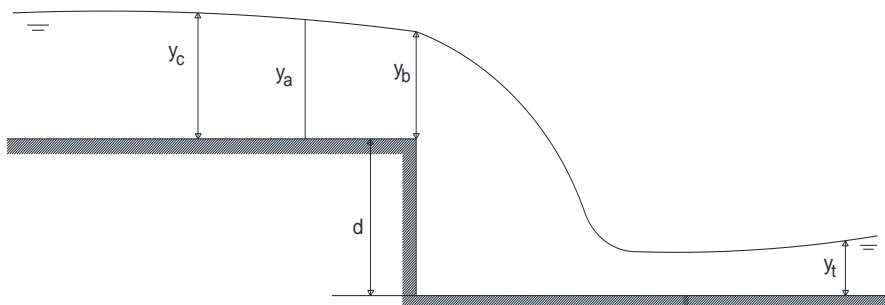


Εικόνα 4.6 Κατάντη υπερχειλιστής.

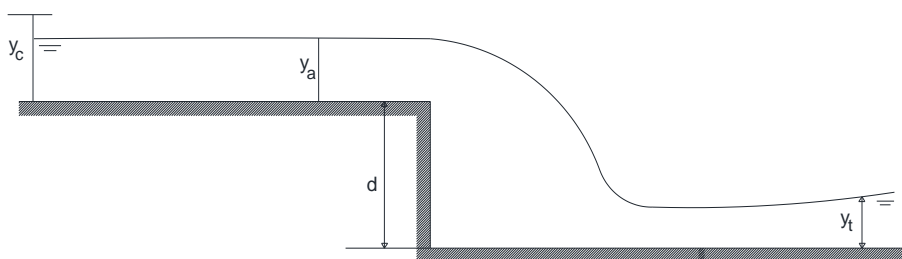


Εικόνα 4.7 Σταθμήμετρο.

4.2. Σύμβολα που χρησιμοποιήθηκαν



Σχήμα 4.2.1 Συμβολισμοί γραμμικών μεγεθών της ταχέως μεταβαλλόμενης ροής. (Υποκρίσιμη ροή)



Σχήμα 4.2.2 Συμβολισμοί γραμμικών μεγεθών της ταχέως μεταβαλλόμενης ροής. (Υπερκρίσιμη ροή)

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται τα βασικά σύμβολα που χρησιμοποιήθηκαν για τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής στην πειραματική διαδικασία, καθώς και μία προσέγγιση των θέσεων στις οποίες έγιναν οι μετρήσεις.

y_a Βάθος ροής ανάντη του καταβαθμού

y_b Βάθος ροής στον καταβαθμό

y_t Βάθος ροής κατόντη του καταβαθμού

d Ύψος καταβαθμού

y_c Κρίσιμο βάθος ροής

4.3. Πειραματική Διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: Χρησιμοποιώντας το μοτέρ ταχύτητας επιλέγαμε την επιθυμητή παροχή, η ένδειξη της οποίας μας έδινε το παροχόμετρο υπερήχων. Τα πιεζόμετρα είχαν εξαιρωθεί για την αποφυγή σφαλμάτων στη μέτρηση της πίεσης στην αρχή κάθε πειραματικής διαδικασίας. Για την υποκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού δεν χρειαζόταν παρέμβαση στη γεωμετρία του αγωγού. Για την επίτευξη της υπερκρίσιμης ροής ανάντη χρησιμοποιήσαμε το εγκατεστημένο θυρόφραγμα με το οποίο ρυθμίζονταν η εισερχόμενη ροή στον επιθυμητό αριθμό Froude ($Fr_1 > 1$). Στη συνέχεια, οι συνθήκες ροής κατάντη του καταβαθμού προσαρμόζονταν χρησιμοποιώντας τον υπερχειλιστή στο κατάντη άκρο. Ανυψώνοντας τον υπερχειλιστή σταδιακά επιτεύχθηκαν τα εξής πέντε (5) προφίλ ροής: απλή πτώση, minimum B-jump, wave-train, standing wave-jump, A-jump για υπερκρίσιμη ροή. Στη συγκεκριμένη εργασία δεν γίνανε μετρήσεις για το προφίλ B jump λόγω της μη σταθεροποίησης του συγκεκριμένου τύπου ροής εξαιτίας του μικρού αριθμού Froude της υπερκρίσιμης ροής στην διατομή ανάντη του καταβαθμού. Όσον αφορά την υποκρίσιμη ροή τα πέντε προφίλ ροής ήταν τα εξής: απλή πτώση, minimum B jump, Submerged Jump, Standing Surface Jump, No Jump. Τα βάθη ροής μετρήθηκαν με χρήση σταθμίμετρου με ακρίβεια 0,0001 m.

Ακολουθούν οι συνθήκες για τα πειράματα με υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή. Για την υπερκρίσιμη ροή επιλέχθηκαν παροχές από 9 έως 25 L/s με τυχαίο βήμα. Τα 25 L/s κρίθηκαν ως το ανώτατο όριο για το πείραμα μας ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες ($Fr_1 < 2$), καθώς θέλαμε να μελετήσουμε το φαινόμενο κοντά στη μεταβατική περιοχή από υπερκρίσιμη σε υποκρίσιμη ροή. Ξεκινώντας το πείραμα καθορίζαμε με το θυρόφραγμα το βάθος ροής ανάντη ώστε να επιτευχθούν οι συνθήκες ροής που θέλαμε ($1 < Fr_1 < 2$). Κατά τη διαδικασία αυτή ο υπερχειλιστής στο άκρο του καναλιού ήταν πλήρως κατεβασμένος. Σταδιακά τον ανυψώναμε με βήμα της τάξεως των λίγων χιλιοστών, αυξάνοντας έτσι το βάθος ροής κατάντη του καταβαθμού. Μετά από κάθε ανύψωση αφήναμε τον απαραίτητο χρόνο ώστε η ροή να μονιμοποιηθεί. Εφόσον η μορφολογία της ροής στο άλμα ήταν η κατάλληλη, διεξάγονταν οι μετρήσεις των γραμμικών μεγεθών. Ειδικότερα μετρούνταν το βάθος ροής ανάντη σε απόσταση 30 εκατοστών από τον καταβαθμό, το βάθος ροής κατάντη σε απόσταση περίπου 1.5 μέτρα από τον καταβαθμό και το ύψος πίεσης από τα πιεζόμετρα κατά μήκος του αγωγού και στο μέτωπο του καταβαθμού. Αντίστοιχα για την υποκρίσιμη ροή επιλέχθηκαν παροχές από 6.8 έως 20 L/s , με τυχαίο βήμα

και πάλι, ενώ η διαδικασία του πειράματος ήταν η ίδια, με εξαίρεση τον καθορισμό του ανάντη βάρους ροής με χρήση του θυροφράγματος.

4.4. Προφίλ ροής

Σε αυτήν την ενότητα περιγράφονται τα διαφορετικά προφίλ ροής που προέκυψαν στην πειραματική διαδικασία. Σε όλες τις έρευνες, τόσο στην παρούσα όσο και σε παλαιότερες, η σειρά με την οποία εμφανίζεται ο κάθε τύπος ροής είναι περίπου η ίδια. Η βασική διαφοροποίηση εμφανίζεται στο είδος ροής, υπερκρίσιμη-υποκρίσιμη, και με βάση αυτό το κριτήριο γίνεται και η κατανομή των αποτελεσμάτων μας.

4.4.1. Υποκρίσιμη Ροή

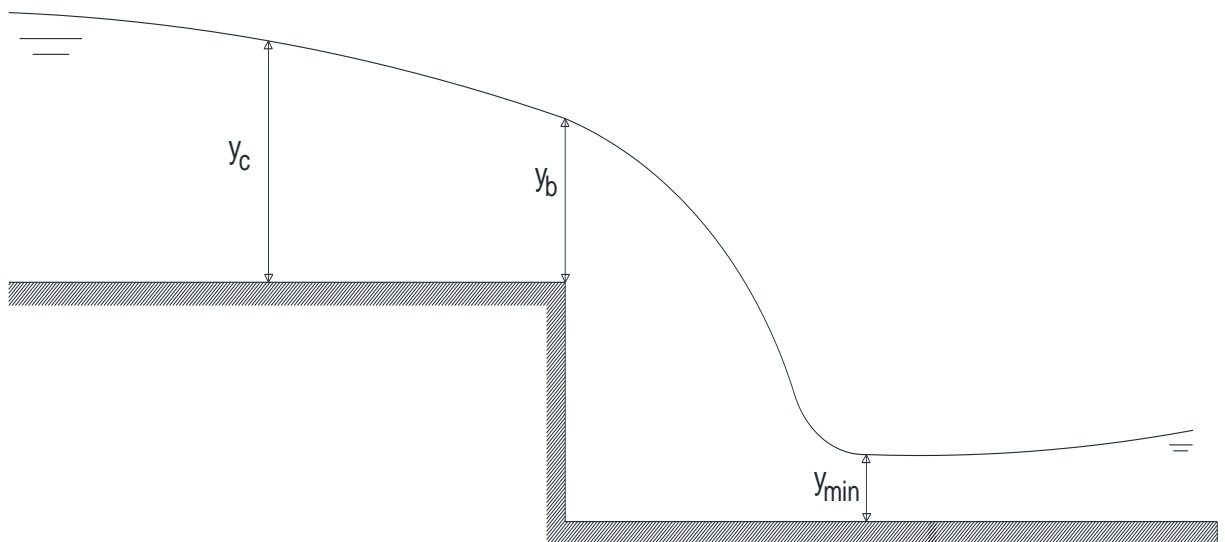
Πέντε κύρια προφίλ ροών παρατηρήθηκαν για τα πειράματα με υποκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού. Εδώ θα περιγραφούν αυτά τα προφίλ και η ακολουθία εμφάνισής τους, την οποία πετυχαίναμε με την προσαρμογή του ύψους του υπερχειλιστή στο κατάντη άκρο του καναλιού. Για κάθε προφίλ ροής έχει γίνει το ανάλογο σκαρίφημα, και υπάρχει φωτογραφικό υλικό από την ίδια την πειραματική διαδικασία. Τα παρακάτω πέντε προφίλ ροής αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες κατά τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις των γραμμικών μεγεθών.

Απλή πτώση (ροή Τύπου 1)

Ο πρώτος και πιο απλός τύπος ροής εμφανίζεται χωρίς καμία παρέμβαση στην πειραματική μας συσκευή αφού ενεργοποιήσουμε την αντλία και δώσουμε την ελάχιστη παροχή για να υπάρξει ροή στον αγωγό. Παρατηρείται πτώση της υδάτινης φλέβας προς τον πυθμένα, ο καταβαθμός είναι πλήρως βυθισμένος, ενώ στα κατάντη η ροή γίνεται υπερκρίσιμη.



Εικόνα 4.4.1 Απλή πτώση



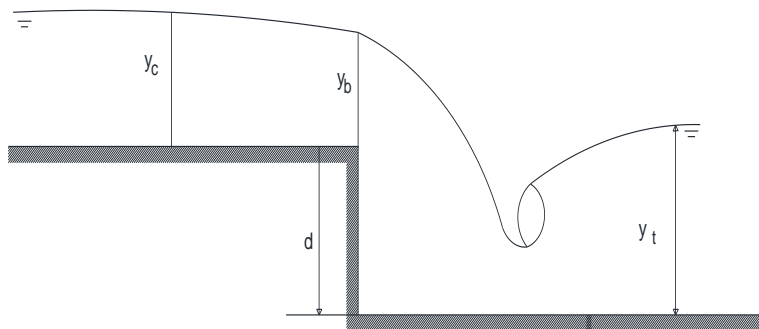
Σχήμα 4.4.1 Απλή πτώση

Minimum B Jump (ροή Τύπου 2).

Χρησιμοποιώντας τον υπερχειλιστή στο κατάντη άκρο αυξάνουμε το βάθος ροής y_t (tailwater depth) κατάντη του καταβαθμού. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται υδραυλικό άλμα το οποίο μετακινείται ανάντη. Ως ροή τύπου 2, ορίζουμε το προφίλ ροής στο οποίο το υδραυλικό άλμα ξεκινάει ακριβώς στο πόδι της πτώσης.



Εικόνα 4.4.2 minimum B Jump



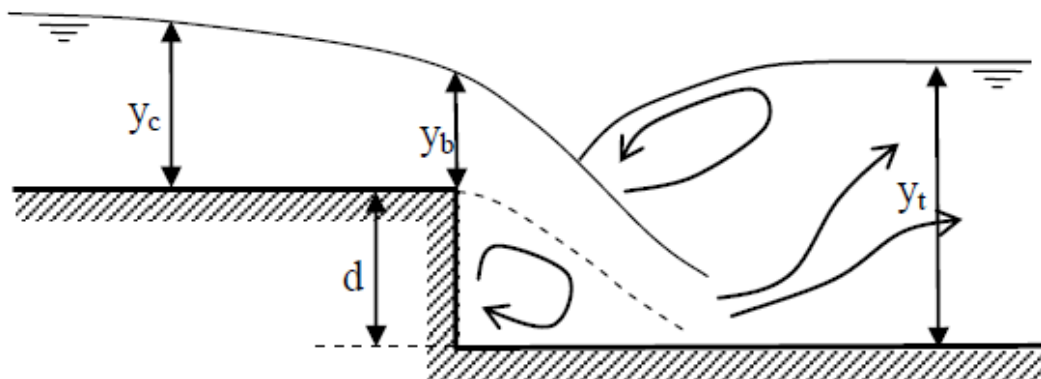
Σχήμα 4.4.2 Minimum B Jump

Submerged Jump (Ροή Τύπου 3).

Συνεχίζοντας την ανύψωση του υπερχειλιστή στην έξοδο του καναλιού, και ενώ η ροή ανάντη παραμένει υποκρίσιμη, το άλμα μετακινείται από το πόδι της πτώσης προς τα κατάντη και η υδάτινη φλέβα βυθίζεται. Δημιουργείται μία περιοχή βυθισμένου υδραυλικού άλματος με έντονη τύρβη και πιθανό αερισμό.



Εικόνα 4.4.3 Submerged Jump



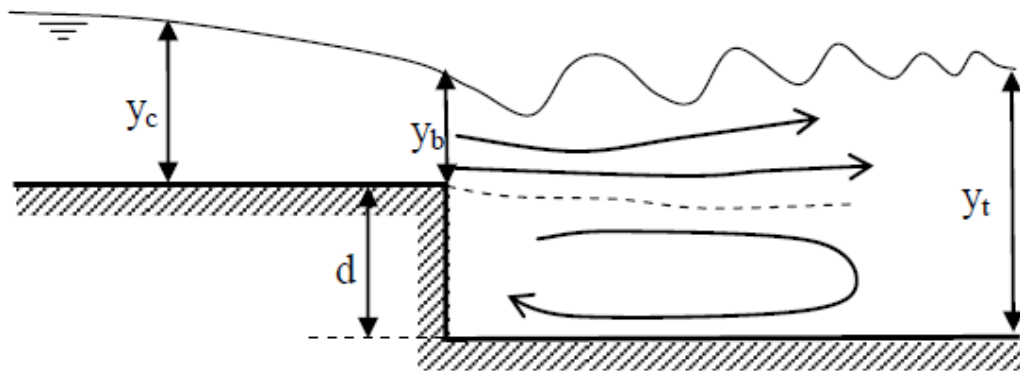
Σχήμα 4.4.3 Submerged Jump (Λιάτης & Παπανικολάου 1978)

Standing Surface Jump (Ροή Τύπου 4).

Στο στάδιο αυτό, το οποίο προκύπτει αυξάνοντας περαιτέρω το κατάντη βάθος ροής ενώ η υποκρίσιμη υδάτινη φλέβα παραμένει επιφανειακή, κατάντη του καταβαθμού υπάρχει μία επιμήκης περιοχή στην οποία εμφανίζονται έντονες τυρβώδεις ροές και στην επιφάνεια παρατηρούνται κυματισμοί.



Εικόνα 4.4.4 Standing Surface Jump



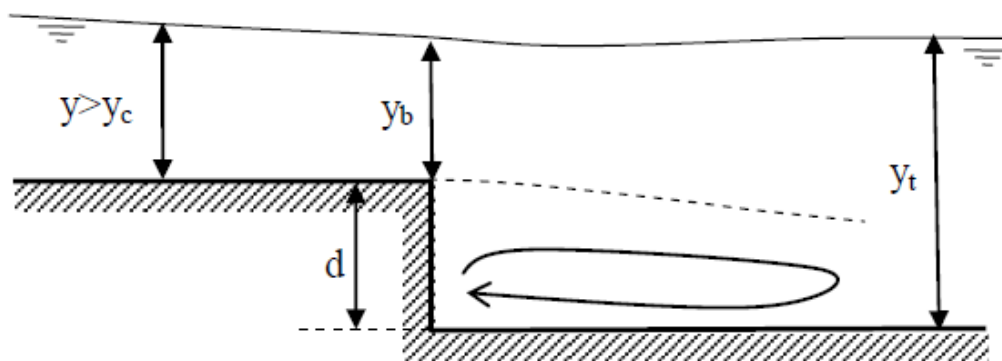
Σχήμα 4.4.4 Standing Surface Jump (Λιάτης, Δ. & Παπανικολάου, Π., 1978)

No Jump (Ροή Τύπου 5).

Σε αυτό το προφίλ ροής, παρατηρείται πλήρης εξάλειψη των κυματισμών με την σταδιακή ανύψωση του κατάντη υπερχειλιστή και η υδάτινη φλέβα παραμένει επιφανειακή. Όταν η επιφάνεια ροής γινόταν επίπεδη, ήταν το τέλος του κύκλου του πειράματος για τη συγκεκριμένη παροχή.



Εικόνα 4.4.5 No Jump



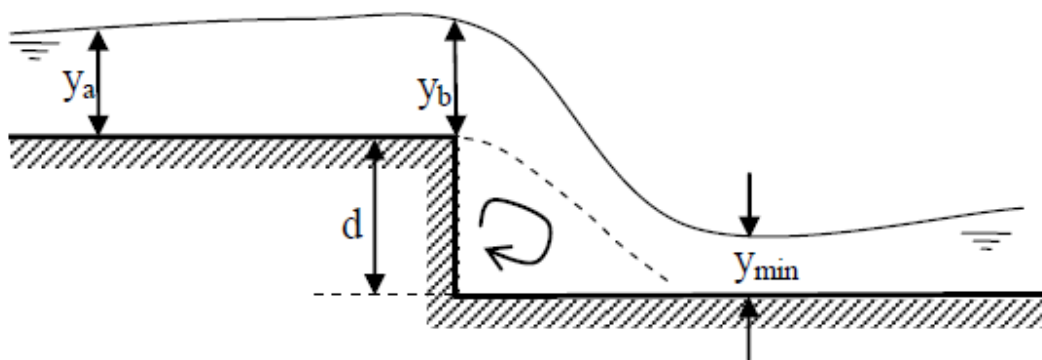
Σχήμα 4.4.5 No Jump (Λιάτης, Δ. & Παπανικολάου, Π., 1978)

4.4.2. Υπερκρίσιμη Ροή

Όπως και στην υποκρίσιμη ροή, έτσι και στην υπερκρίσιμη ροή εντοπίσαμε πέντε διακριτά προφίλ, τα οποία θα περιγράψουμε με την σειρά που εμφανίστηκαν. Για κάθε προφίλ ροής έχει γίνει το ανάλογο σκαρίφημα, ενώ παράλληλα παρέχεται φωτογραφικό υλικό από την ίδια την πειραματική διαδικασία όπως και παραπάνω.

Απλή πτώση (Ροή τύπου 1).

Όπως και στην απλή πτώση για υποκρίσιμη ροή ανάντη, έτσι και σε αυτή την περίπτωση, δεν έχει γίνει χρήση του υπερχειλιστή συνεπώς το προφίλ αυτό δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαιτερότητα.



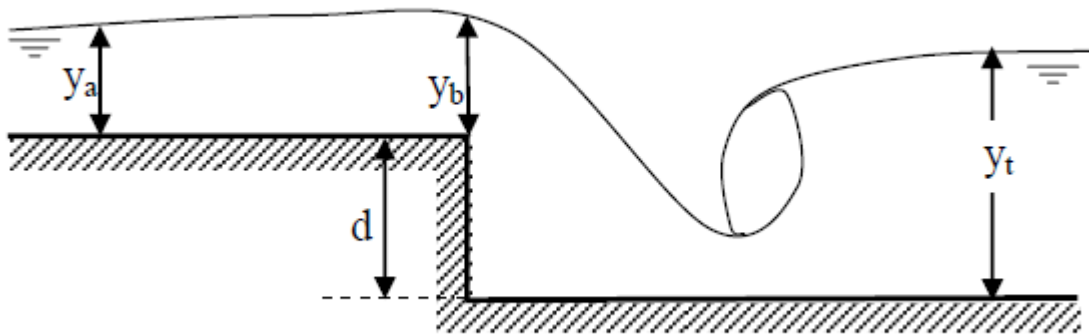
Σχήμα 4.4.6 Απλή πτώση

Minimum B Jump (Ροή τύπου 2)

Αυξάνοντας το ύψος του υπερχειλιστή αυξάνεται το βάθος ροής κατάντη ενώ το υδραυλικό άλμα φτάνει στο πόδι της πτώσης. Η υδάτινη φλέβα της ανάντη ροής προσκρούει στον πυθμένα κοντά στο πόδα του καταβαθμού όπου δημιουργείται υδραυλικό άλμα με έντονη τύρβη και αερισμό.



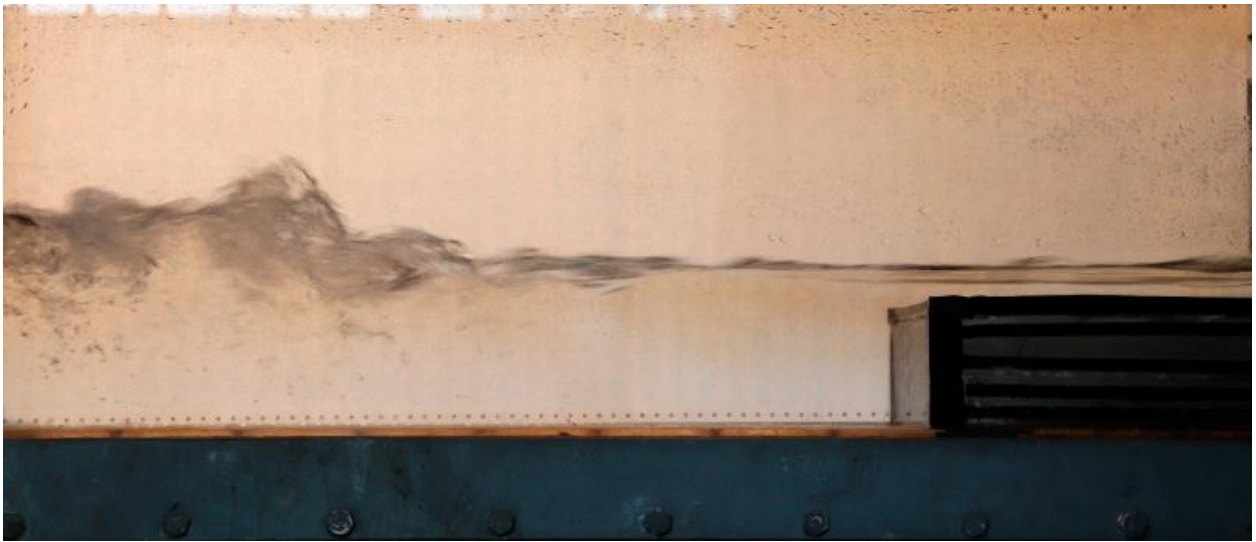
Εικόνα 4.4.6 Minimum B Jump (Retsinis and Papanicolaou 2022)



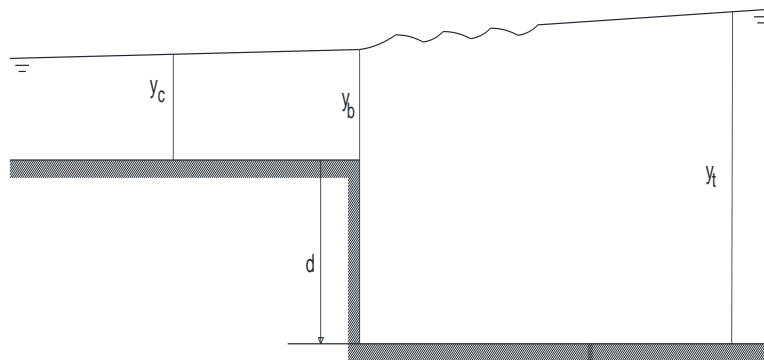
Σχήμα 4.4.7 Minimum B Jump (Λιάτης, Δ. & Παπανικολάου, Π., 1978)

Wave Train (επιφανειακή ροή, ροή τύπου 3).

Στο προφίλ αυτό η ροή γίνεται επιφανειακή, δηλαδή η υδάτινη φλέβα δεν προσκρούει στον πυθμένα. Χαρακτηριστικό της είναι η παρουσία μικρών επιφανειακών κυματισμών. Η κατάσταση αυτή της ροής σε αντίθεση με την υποκρίσιμη δεν είναι η τελευταία που παρατηρείται. Αντιθέτως αποτελεί στάδιο μετάβασης πριν τη δημιουργία στάσιμου κύματος.



Εικόνα 4.4.7 Wave Train (Retsinis, E. and Papanicolaou, P., 2022)



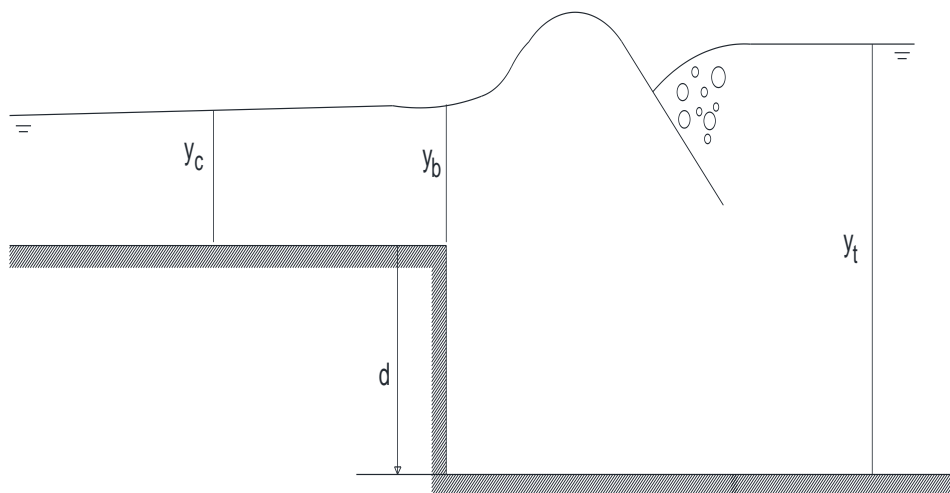
Σχήμα 4.4.8 Wave Train

Wave Jump (Ροή τύπου 4).

Στο προφίλ αυτό παρατηρούμε τη δημιουργία ενός μοναχικού στάσιμου κύματος το οποίο δημιουργείται λίγα χιλιοστά μετά το πέρας του καταβαθμού. Χαρακτηριστικά του κύματος αυτού είναι πως ενώ η θέση και το μήκος του παραμένουν σταθερά για τις διαφορετικές τιμές παροχών, το ύψος του αυξάνεται σταδιακά. Σημαντική παρατήρηση είναι επίσης ότι αυτό το προφίλ εμφανίζεται μόνο για υπερκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού.



Εικόνα 4.4.8 Wave Jump (Retsinis, E. and Papanicolaou, P., 2022)



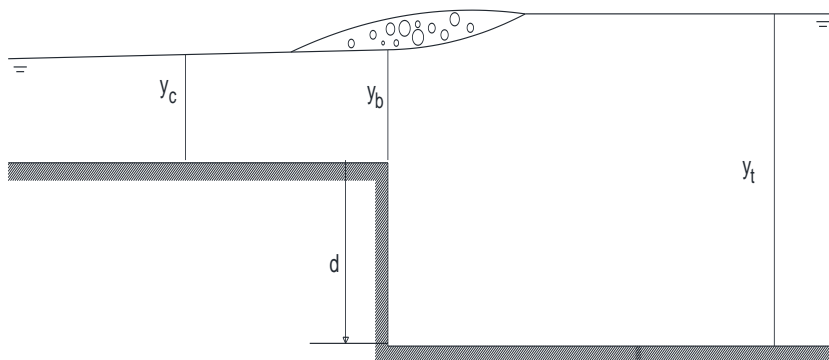
Σχήμα 4.4.9 Wave Jump

A Jump (Ροή τύπου 5).

Αυξάνοντας το βάθος ροής κατάντη μετά τη δημιουργία του στάσιμου κύματος, παρατηρούμε τη θέση σχηματισμού του να μετατοπίζεται ανάντη και τη δημιουργία υδραυλικού άλματος εκεί. Αυτό αποτελεί το τελευταίο προφίλ ροής όπου το άλμα λαμβάνει χώρα ανάντη του καταβαθμού και έχει τη μορφή κύματος θραύσης (breaking wave). Συνεχίζοντας την ανύψωση του υπερχειλιστή, το κύμα θραύσης μετατοπίζεται ανάντη μέχρι να φτάσει στη θέση του θυροφράγματος όπου η ροή είναι ένα βυθισμένο υδραυλικό άλμα.



Εικόνα 4.4.10 A Jump (Retsinis, E. and Papanicolaou, P., 2022)



Σχήμα 4.4.11 A Jump

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα παρουσιάσουμε σε πίνακες τις τιμές των γραμμικών μεγεθών που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Τα αποτελέσματα είναι ομαδοποιημένα βάσει της αρχικής παροχής την οποία επιλέξαμε και αφορούν τους τύπους ροής στη σειρά με την οποία εμφανίστηκαν.

5.1. Υποκρίσιμη Ροή

Για την υποκρίσιμη ροή, τα προφίλ είναι τα εξής: (i) απλή πτώση, (ii) minimum B jump, (iii) Submerged Jump, (iv) Standing Surface Jump, (v) No Jump. Τα σύμβολα που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

Q: Παροχή

y_a : Βάθος ροής ανάντη του καταβαθμού

y_b : Βάθος ροής στον καταβαθμό (brink depth)

y_t : Βάθος κατάντη του καταβαθμού (tailwater depth)

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα υποκρίσιμης ροής

Q(L/s)	$y_a(cm)$	$y_b(cm)$	$y_t(cm)$	Τύπος Ροής
6.8	4.8	3.30667	2.14	Απλή Πτώση
6.8	4.8	3.52	9.3	Minimum B Jump
6.8	4.8	3.52	10	Submerged Jump
6.8	4.8	3.52	10.7	Standing Surface Jump
6.2	4.6	3.52	14.3	No Jump
8.1	5.5	3.83333	3.2	Απλή Πτώση
7.6	5	3.62667	10.2	Minimum B Jump
7.5	5	3.62667	11	Submerged Jump
7.4	5	3.79333	11.8	Standing Surface Jump
7.1	4.8	3.77667	13.74	No Jump

Q(L/s)	$y_a(cm)$	$y_b(cm)$	$y_t(cm)$	Τύπος Ροής
9.8	6.6	4.4	3.56	<i>Απλή Πτώση</i>
9.2	6.4	4.26	11.2	<i>Minimum B Jump</i>
9.2	6.4	4.3	12.1	<i>Submerged Jump</i>
9.2	6.4	4.3	13	<i>Standing Surface Jump</i>
8.9	6.2	4.5	15	<i>No Jump</i>
11.6	7.2	4.73667	3.72	<i>Απλή Πτώση</i>
11	7.2	4.5	12.1	<i>Minimum B Jump</i>
10.8	7.2	4.5	13.2	<i>Submerged Jump</i>
10.7	7.2	4.73667	14.4	<i>Standing Surface Jump</i>
10.7	7.2	4.9	16.2	<i>No Jump</i>
14.6	7.7	5.8	4.5	<i>Απλή Πτώση</i>
14	7.5	5.8	13.05	<i>Minimum B Jump</i>
14	7.5	5.8	14.55	<i>Submerged Jump</i>
14	7.5	5.8	16.1	<i>Standing Surface Jump</i>
13.9	7.5	6.1	17.5	<i>No Jump</i>
16.2	8.4	6.2	4.8	<i>Απλή Πτώση</i>
15.6	8.2	6.2	14.7	<i>Minimum B Jump</i>
15.6	8.2	6.2	15.2	<i>Submerged Jump</i>
15.6	8.2	6.2	15.7	<i>Standing Surface Jump</i>
15.6	8.2	6.7	18.25	<i>No Jump</i>
18.2	9.1	6.53333	5.2	<i>Απλή Πτώση</i>
17.9	9	6.5	15.5	<i>Minimum B Jump</i>
17.9	9	6.5	16.2	<i>Submerged Jump</i>
17.8	8.9	6.63333	16.9	<i>Standing Surface Jump</i>
17.5	8.9	7.1	19	<i>No Jump</i>
19.8	9.7	6.8	5.4	<i>Απλή Πτώση</i>
19.7	9.7	6.8	16.9	<i>Minimum B Jump</i>
19.6	9.7	7	17.2	<i>Submerged Jump</i>
19.6	9.7	7	17.5	<i>Standing Surface Jump</i>
19.4	9.6	7.4	19.3	<i>No Jump</i>

5.2. Υπερκρίσιμη Ροή

Για την υπερκρίσιμη ροή (i) απλή πτώση, (ii) minimum B Jump, (iii) Wave Train, (iv) Wave Jump, (v) A Jump.

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα υπερκρίσιμης ροής

$Q(L/s)$	$y_a(cm)$	$y_t(cm)$	Τύπος Ροής
9	3.61	3.3	Απλή Πτώση
8.8	3.61	11.7	Minimum B Jump
8.6	3.61	14.2	Wave Train
8.4	3.61	16.4	Wave Jump
8.3	3.61	17.8	A Jump
12.5	4.46	4.3	Απλή Πτώση
12.2	4.46	13.75	Minimum B Jump
12.1	4.46	16.5	Wave Train
11.8	4.46	18.2	Wave Jump
11.7	4.46	19.8	A Jump
15	5.2	4.74	Απλή Πτώση
14.8	5.2	15	Minimum B Jump
14.7	5.2	17.6	Wave Train
14.6	5.2	18.95	Wave Jump
14.5	5.2	20.9	A Jump
20	6.14	5.14	Απλή Πτώση
19.7	6.28	17.13	Minimum B Jump
19.4	6.28	20.48	Wave Train
19.4	6.37	22.48	Wave Jump
19.4	6.42	23.24	A Jump
25	7	5.75	Απλή Πτώση
24.7	7	20.03	Minimum B Jump
24.6	7.04	22.84	Wave Train
24.5	7.04	24.65	Wave Jump
24.5	7.11	26	A Jump

5.3. Γενικά

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζουμε συμπεράσματα βάσει της ανάλυσης και της επεξεργασίας των δεδομένων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Η ανάλυση βασίστηκε στη συσχέτιση των βαθών ροής σε χαρακτηριστικές θέσεις του αγωγού, στην αρχή διατήρησης της ορμής, στο θεώρημα ποσότητας κίνησης, στην εξέταση απωλειών ενέργειας καθώς και στη διαστατική ανάλυση.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν έχει γίνει η κατάλληλη συσχέτιση μεγεθών ώστε αυτά να αποκτήσουν τη μορφή αδιάστατων μονώνυμων. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε τα συμπεράσματά μας να είναι ανεξάρτητα από επιμέρους χαρακτηριστικά της ροής και να έχουν γενικευμένη εφαρμογή. Επιπλέον, τα διαγράμματα που προκύπτουν έχουν μία πιο ενιαία μορφή.

Συνδυάζοντας διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη της πειραματικής διαδικασίας, σχηματίσαμε τα κατάλληλα αδιάστατα μονώνυμα. Συσχετίζοντας τα μεγέθη αυτά και τα μονώνυμα που προκύπτουν, πετύχαμε μία πολύπλευρη ανάλυση του προβλήματος, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε βαθύτερη κατανόηση του, ενώ τα αποτελέσματα στα οποία καταλήξαμε μπορούν δυνητικά να αξιοποιηθούν σε πρακτικές εφαρμογές.

Βάσει παλιότερων ερευνών όπως αυτές του Ματζιούνη (2004) και του Ρετσίνη (2022), προκύπτει ότι για την ανάλυση της ταχέως μεταβαλλόμενης ροής σε ορθογωνικό καταβαθμό, τα κύρια μεγέθη είναι το βάθος ροής στα ανάντη (y_a), το βάθος ροής στα κατάντη (y_t), το ύψος του καταβαθμού (d), ο αριθμός Froude (Fr_1), και το κρίσιμο βάθος (y_c) το οποίο στα πειράματά μας αντιπροσωπεύει την παροχή. Χρησιμοποιώντας αυτά τα μεγέθη δημιουργήσαμε αδιάστατα μονώνυμα και συσχετίζοντας τα μεταξύ τους λάβαμε τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατανόηση του προβλήματος. Μία χαρακτηριστική κλίμακα είναι το άθροισμα των όρων y_c και d μέσω του οποίου παίρνουμε πληροφορίες για την κινητική και τη δυναμική ενέργεια της ροής.

Σύνολα και υποσύνολα των πειραματικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διαγραμμάτων για την εις βάθος ανάλυση του φαινομένου.

Σε πολλά διαγράμματα έχει υπολογιστεί ο συντελεστής συσχέτισης. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται μία εικόνα για την ομοιομορφία και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία και από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.

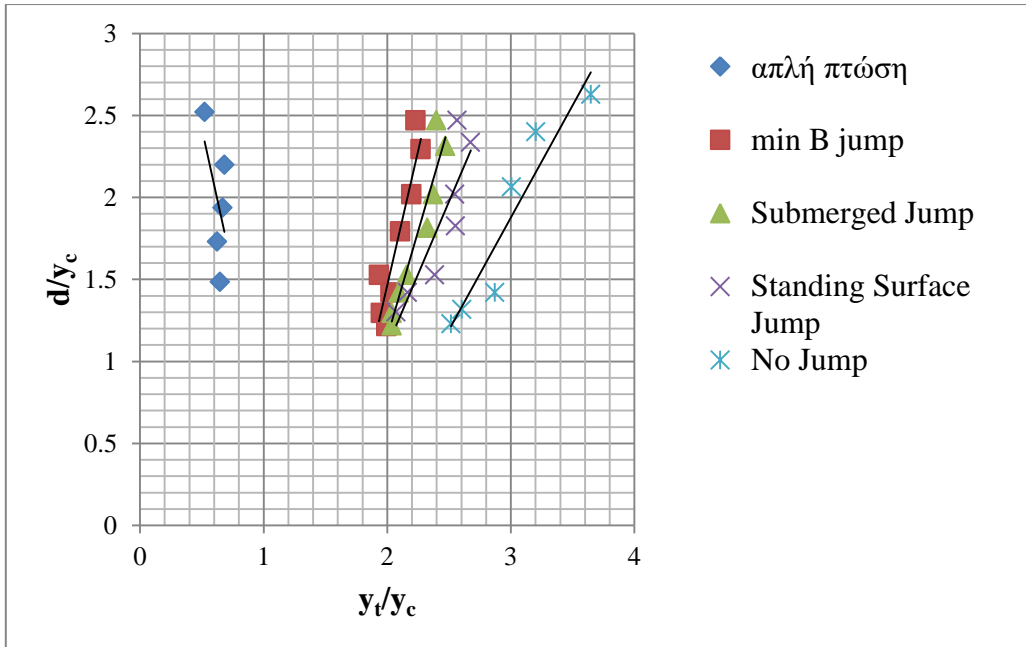
5.4 Διαχωρισμός προφίλ ροής

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία παρουσίαση των διαγραμμάτων που χρειάζονται ώστε να γίνουν διακριτά τα όρια των βασικών μεγεθών, εντός των οποίων παρουσιάζονται τα διαφορετικά προφίλ ροής που μπορούν να εμφανιστούν σε ροή σε ανοιχτό αγωγό με καταβαθμό. Στην ανάλυση περιέχονται τα όρια τόσο για υποκρίσιμη ροή όσο και για υπερκρίσιμη ροή με πολύ χαμηλούς αριθμούς Froude, δηλαδή σε μια μεταβατική ροή που προσεγγίζει την κρίσιμη. Η ανάλυση αυτή μας επιτρέπει να κατατάξουμε την εκάστοτε ροή του αγωγού σε ένα από τα συγκεκριμένα προφίλ που παρουσιάστηκαν παραπάνω, εφόσον υπάρχουν δεδομένα για κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη.

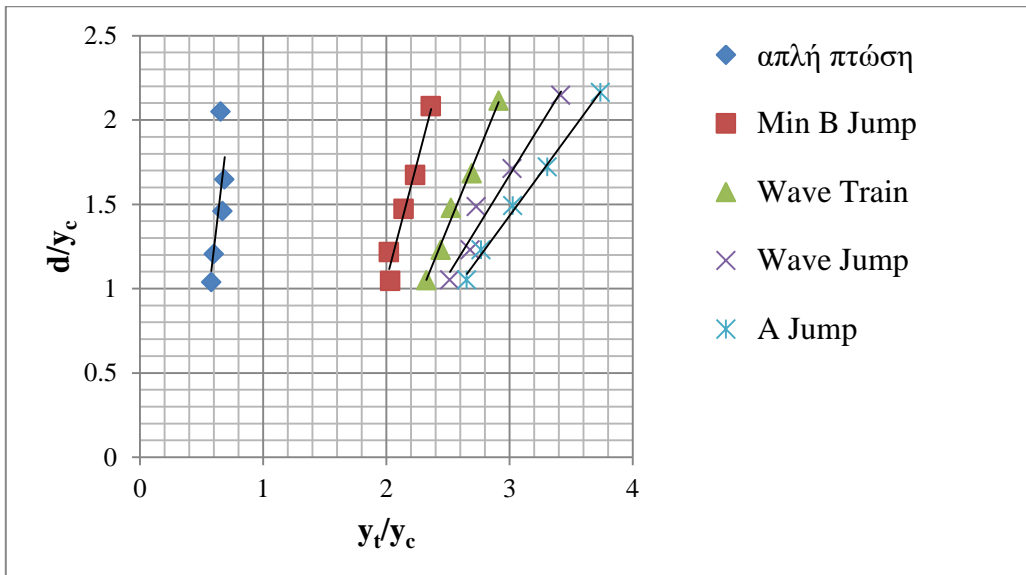
Για την υποκρίσιμη ροή χρησιμοποιείται το παρακάτω διάγραμμα (5.1) για να γίνει ο διαχωρισμός. Συγκεκριμένα η συσχέτιση των λόγων d / y_c και y_t / y_c μας δίνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία της ροής για να γίνει η κατάταξή της σε ένα συγκεκριμένο προφίλ.

Για την κατασκευή του διαγράμματος έγιναν μετρήσεις στις οριακές θέσεις μεταξύ των διαφορετικών προφίλ ροών. Η μετάβαση μεταξύ του κάθε τύπου ροής γινόταν με σταδιακή ανύψωση του υπερχειλιστή που είναι τοποθετημένος στο κατάντη άκρο του αγωγού, συνεπώς με αύξηση του κατάντη βάθους ροής. Οι σειρές που παρουσιάζονται στο διάγραμμα παρακάτω ομαδοποιούν τις μετρήσεις, όπου κάθε μία αντιστοιχεί σε μία οριακή μεταβατική κατάσταση μεταξύ δύο προφίλ ροής.

Η σειρά 1 παρουσιάζει τα δεδομένα όταν ροή δεν είναι επηρεασμένη από τον κατάντη υπερχειλιστή. Η σειρά 2 είναι η θέση στην οποία η ροή στο υδραυλικό άλμα ξεκινάει να είναι βυθισμένη. Η σειρά 3 μας παρουσιάζει μία θέση στην οποία η ροή είναι πλήρως βυθισμένη, και δεν αποτελεί μεταβατική κατάσταση. Η σειρά 4 μας παρουσιάζει την οριακή φάση από την οποία και έπειτα η ροή αρχίζει να εμφανίζει επιφανειακούς κυματισμούς. Τέλος, η σειρά 5 είναι το όριο της ροής με κυματισμό, όπου η ροή ξεκινάει να γίνεται επιφανειακή.



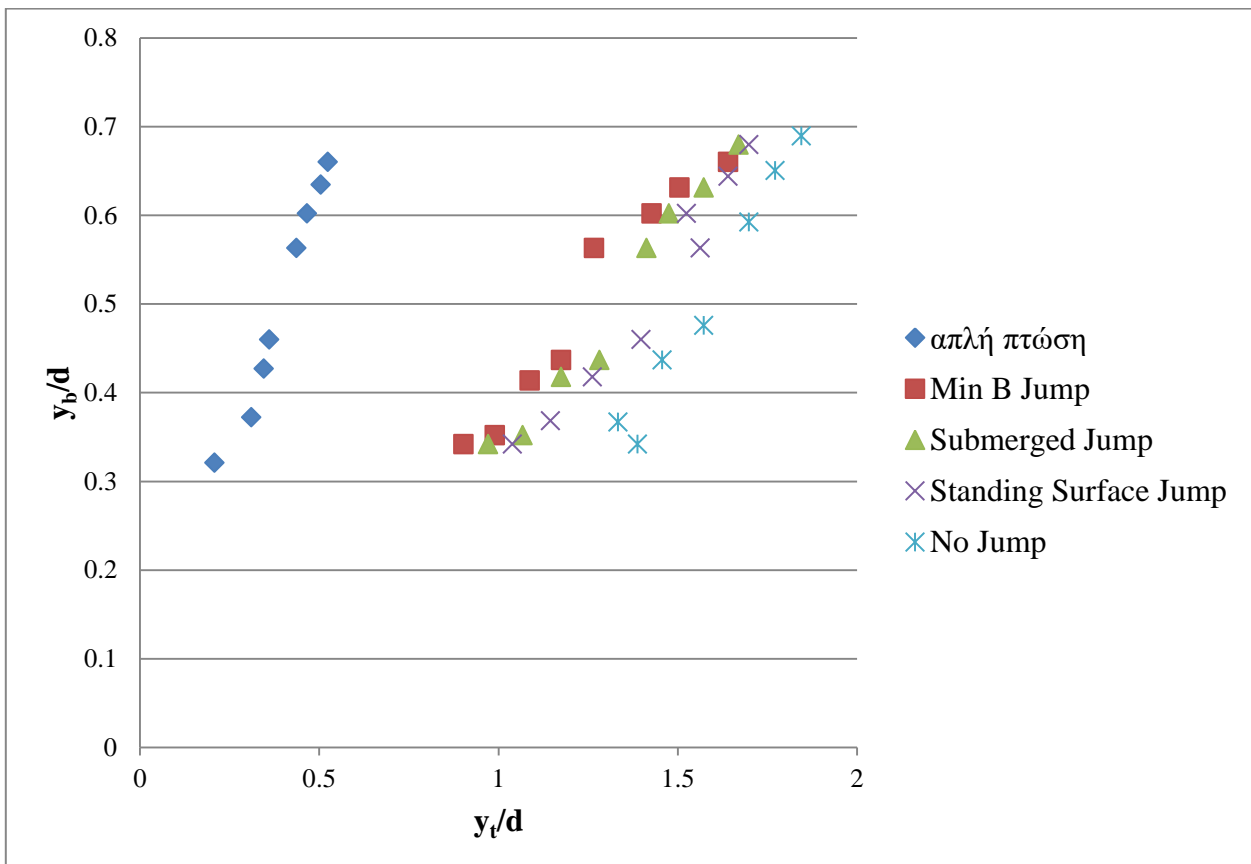
Διάγραμμα 5.1 Μεταβολή του κατάντη βάθους ροής συναρτήσει του αδιάστατου ύψους του καταβαθμού (Υποκρίσιμη ροή).



Διάγραμμα 5.2 Μεταβολή του κατάντη βάθους ροής συναρτήσει του αδιάστατου ύψους του καταβαθμού (Υπερκρίσιμη ροή).

5.4.1 Συσχέτιση y_b/d και y_t/d

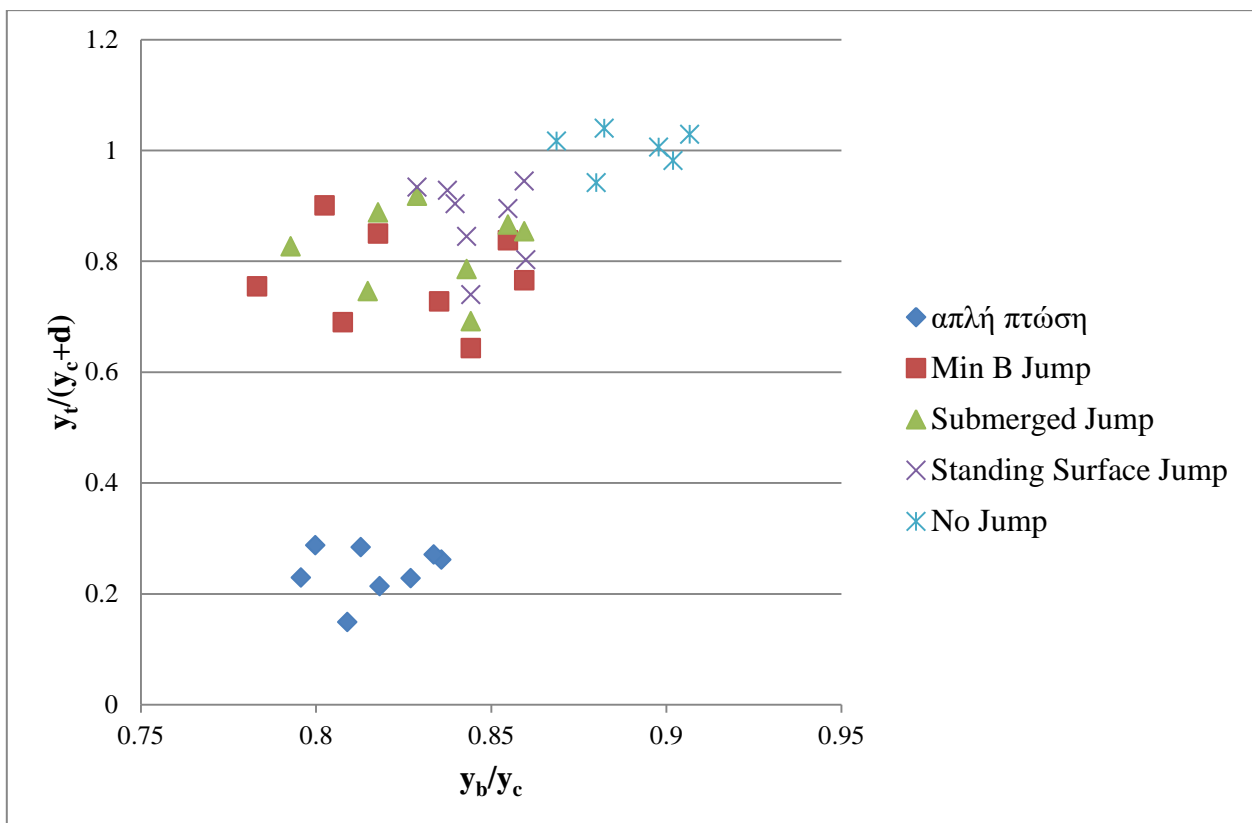
Η συσχέτιση αυτών των μεγεθών κρίνεται πολύ σημαντική καθώς περιέχει τρία βασικά μεγέθη της ροής στη περιοχή του καταβαίμου. Συγκεκριμένα το βάθος ροής στη θέση του καταβαθμού, το βάθος ροής κατάντη και το ύψος του καταβαθμού. Στη συγκεκριμένη εργασία το d διατηρείται σταθερό. Παρατηρούμε τη μεταβολή του y_b σε σχέση με τη μεταβολή του y_t για το εκάστοτε προφίλ ροής, ενώ η αύξηση μπορεί να θεωρηθεί γραμμική. Επιπλέον, όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρούμε ότι η αύξηση μεγαλύτερης τάξεως παρατηρείται στη μετάβαση από την απλή πτώση στο άλμα στον πόδα του καταβαθμού, ενώ το υδραυλικό άλμα εμφανίζεται όταν το βάθος ροής κατάντη προσεγγίζει ή είναι μεγαλύτερο του ύψους του καταβαθμού.



Διάγραμμα 5.3 Μεταβολή του βάθους ροής στον καταβαθμό, σαν συνάρτηση του βάθους ροής κατάντη (Υποκρίσιμη ροή).

5.4.2 Συσχέτιση y_b/y_c και $y_t/(y_c+d)$

Πρόκειται για άλλη μία βασική συσχέτιση, καθώς στα μονώνυμα y_b/y_c και $y_t/(y_c + d)$ περιέχονται και τα τέσσερα χαρακτηριστικά μεγέθη επιρροής του φαινομένου. Στο διάγραμμα παρουσιάζεται η σχέση των μεγεθών μόνο για υποκρίσιμη ροή ανάντη. Μολονότι στο διάγραμμα δεν φαίνεται κάποια γραμμική σχέση στη μεταβολή των δύο μονωνύμων, παρατηρούμε ότι ο λόγος $y_t / (y_c + d)$ έχει οριακή τιμή τη μονάδα ($\max y_t / (y_c + d) = 1.05$), δηλαδή για υποκρίσιμη ροή ανάντη το βάθος ροής κατάντη του καταβαθμού είναι μικρότερο ή ίσο με το άθροισμα του ύψους του καταβαθμού και του κρίσιμου βάθους ροής. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η ροή γίνεται επιφανειακή στη μεταβολή από το προφίλ ‘Submerged Jump’, στο προφίλ ‘Standing Surface Jump’, για τιμές του λόγου y_b/y_c μεγαλύτερες του 0.83.



Διάγραμμα 5.4 Μεταβολή του αδιάστατου βάθους ροής κατάντη $y_t / (y_c + d)$ σαν συνάρτηση του αδιάστατου βάθους ροής στον καταβαθμό.

5.4.3 Συσχέτιση του $y_t/((y_c+d)Fr_1)$ με το $y_t/((y_a+d)Fr_1)$

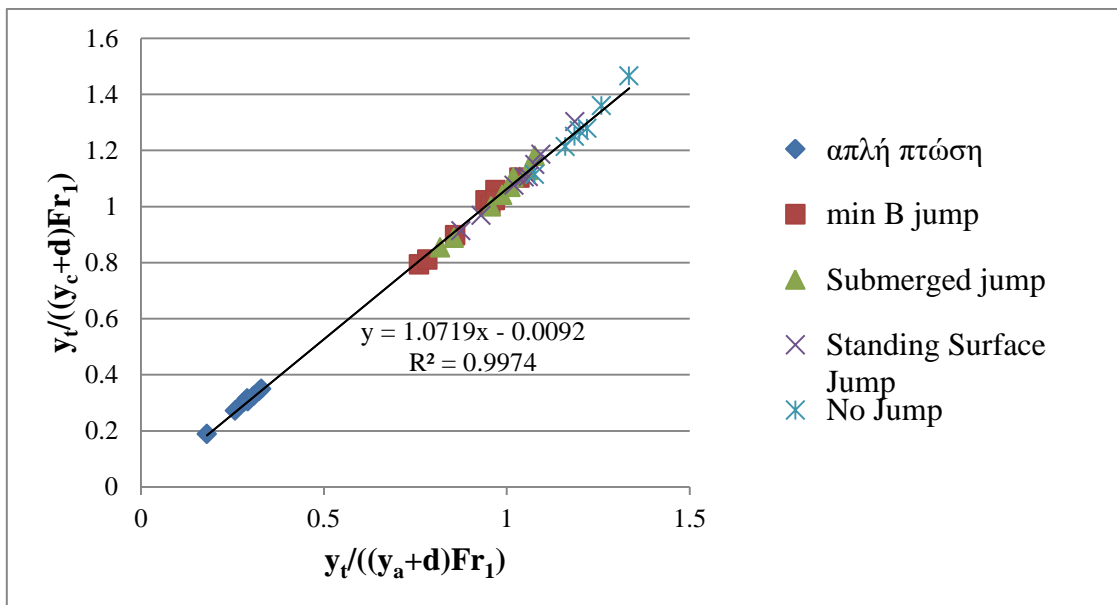
Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται το βάθος ροής κατάντη αδιαστατοποιημένο με το άθροισμα του βάθους ροής και του ύψους του καταβαθμού επί τον αριθμό Froude, συναρτήσει του αντίστοιχου μονωνύμου, στο οποίο έχουμε αντικαταστήσει το κρίσιμο βάθος με αυτό ανάντη του καταβαθμού. Με την αδιαστατοποίηση αυτή τα δεδομένα τόσο για υποκρίσιμη (διάγραμμα 5.5) όσο και για υπερκρίσιμη ροή (διάγραμμα 5.6) δεν παρουσιάζουν διαφοροποίηση μεταξύ των διαφόρων περιπτώσεων και ακολουθούν την ίδια αδιάστατη καμπύλη. Ειδικότερα προέκυψε :

(i) $y_t / ((y_c + d)Fr_1) = 1.0719y_t / ((y_a + d)Fr_1) - 0.0092$ με συντελεστή $R^2 = 0.9974$

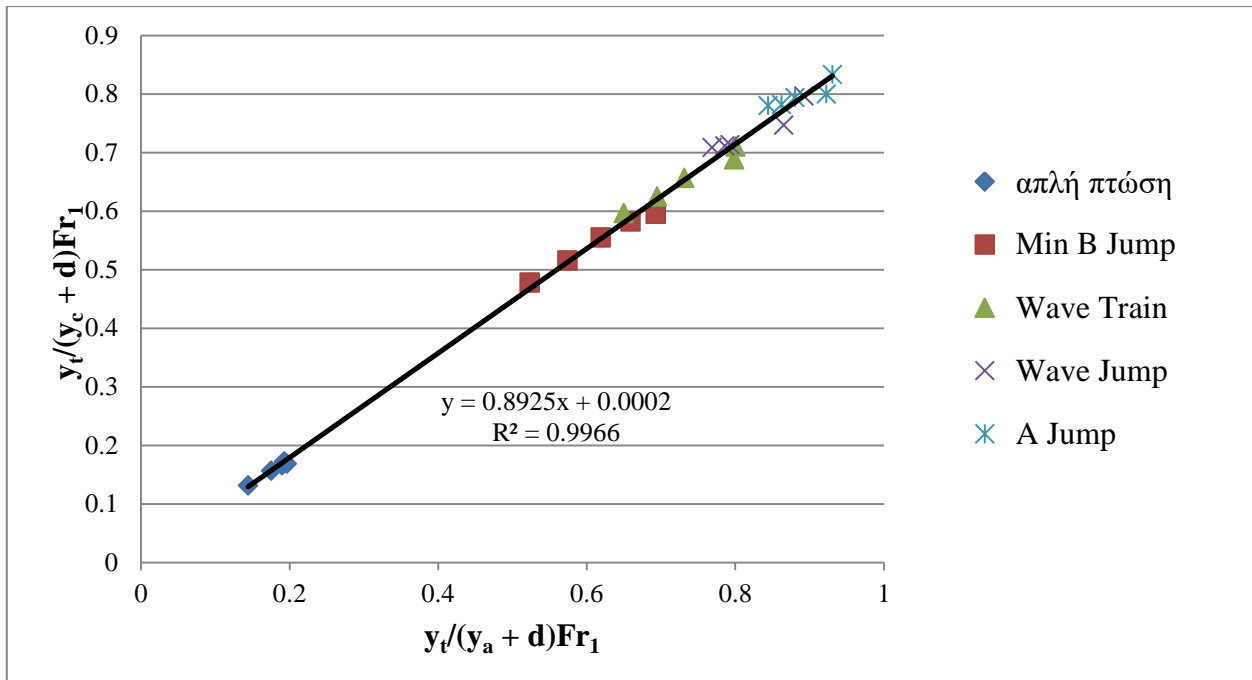
(ii) $y_t / (y_c + d)Fr_1) = 0.8925y_t / ((y_a + d)Fr_1) + 0.0002$ με συντελεστή $R^2 = 0.9966$

για υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού αντίστοιχα.

Οι πληροφορίες που προκύπτουν από την παραπάνω συσχέτιση είναι σημαντικές για τεχνικά ζητήματα σχεδιασμού, καθώς επιτρέπουν τον υπολογισμό του ύψους του καταβαθμού που χρειαζόμαστε για αγωγό με συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της ροής, δηλαδή βάθος ανάντη και κατάντη του καταβαθμού και παροχή.



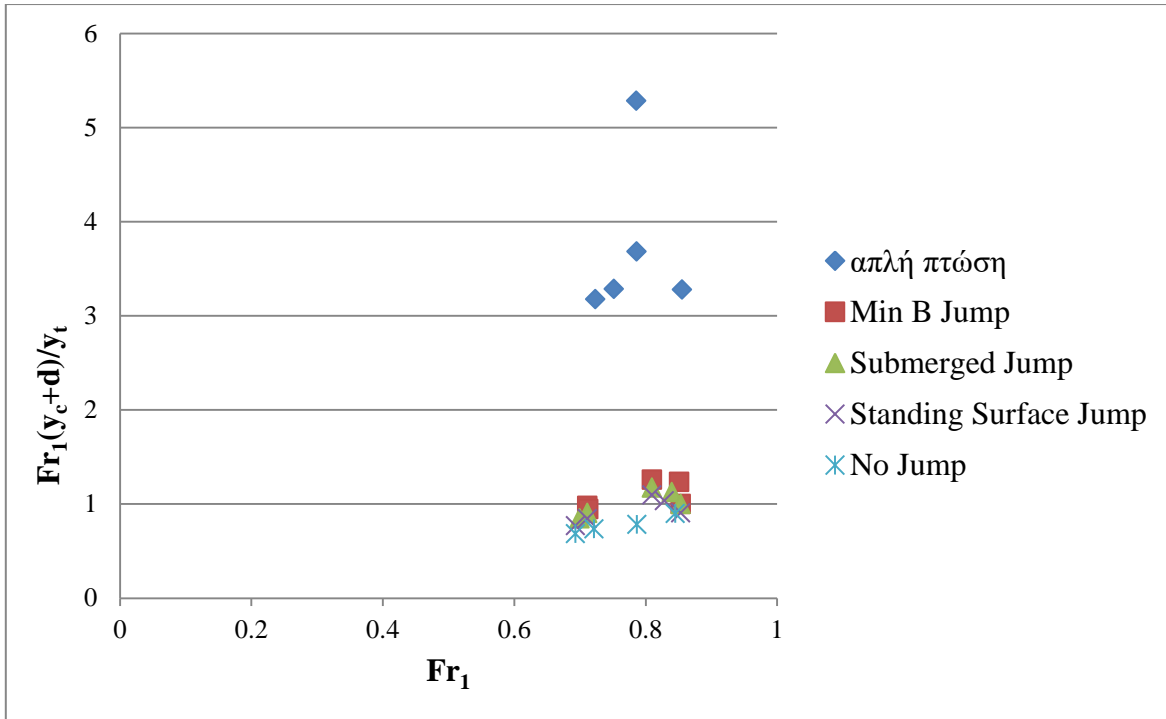
Διάγραμμα 5.5 Συσχέτιση του κατάντη βάθους ροής, με το κρίσιμο βάθος, το ύψος του καταβαθμού, τον αριθμό Froude, και το ανάντη βάθος ροής. (Υποκρίσιμη ροή).



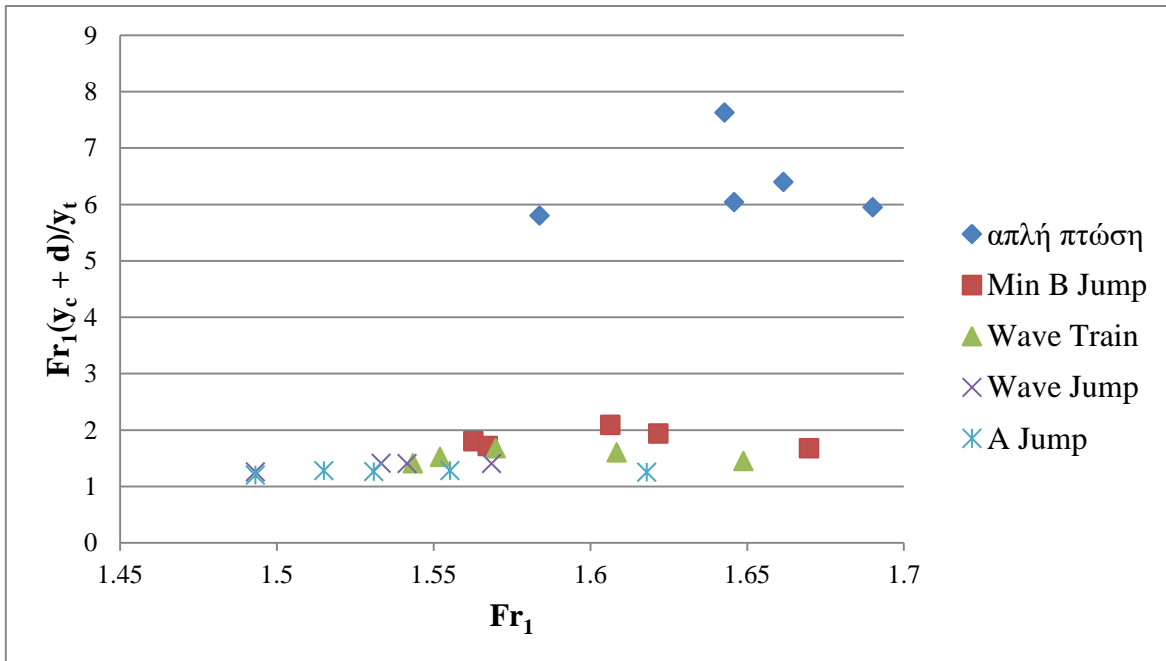
Διάγραμμα 5.6 Συσχέτιση του κατάντη βάθους ροής, με το κρίσιμο βάθος, το ύψος του καταβαθμού, τον αριθμό Froude, και το ανάντη βάθος ροής. (Υπερκρίσιμη ροή).

5.4.4 Συσχέτιση του αριθμού Froude με τον λόγο $Fr_1(y_c+d)/y_t$

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα γίνεται συσχέτιση του κανονικοποιημένου βάθους (y_c+d) με τον αριθμό Froude της εισερχόμενης ροής ανάντη του καταβαθμού. Λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του πειράματός μας για μικρούς αριθμούς Froude στην υπερκρίσιμη ροή και αντίστοιχα για παρόμοιους αριθμούς στην υποκρίσιμη, η μόνη πληροφορία που αντλούμε από το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι ότι για την υποκρίσιμη ροή η μετάβαση από την απλή πτώση στο υδραυλικό άλμα στη θέση του καταβαθμού γίνεται για τιμές του μονωνύμου $Fr_1(y_c+d)/y_t > 3.1$ και αντίστοιχα για υπερκρίσιμη ροή για $Fr_1(y_c+d)/y_t > 5.8$.



Διάγραμμα 5.7 Μεταβολή του μονωνύμου $Fr_1(y_c+d)/y_t$ συναρτήσει του αριθμού Froude (Υποκρίσιμη ροή).



Διάγραμμα 5.8 Μεταβολή του μονωνύμου $Fr_1(y_c+d)/y_t$ συναρτήσει του αριθμού Froude (Υπερκρίσιμη ροή).

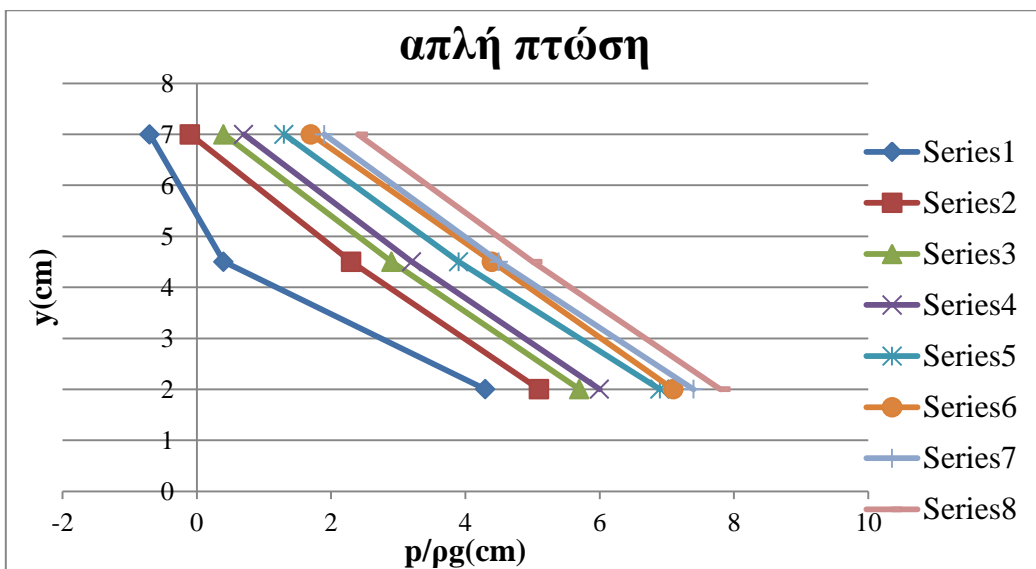
5.5 Πιέσεις στο μέτωπο του καταβαθμού

5.5.1 Συσχέτιση της πίεσης στο μέτωπο του καταβαθμού με την κατακόρυφη απόσταση των σημείων των μετρήσεων από τον πυθμένα

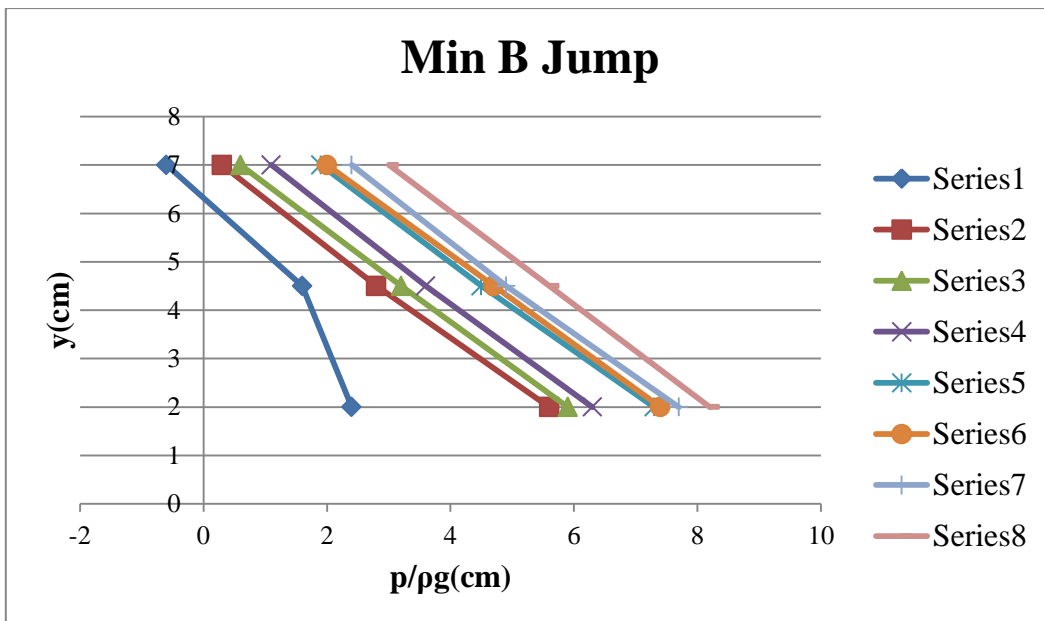
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουμε τις μετρήσεις του ύψους πίεσης, όπως αυτές προέκυψαν από τα τρία πιεζόμετρα τοποθετημένα στο κατακόρυφο επίπεδο του καταβαθμού και σε αποστάσεις 2.0 cm, 4.5 cm και 7 cm από τον πυθμένα του αγωγού. Τα διαγράμματα κατασκευάστηκαν για κάθε προφίλ ροής, για 8 διαφορετικές παροχές από 6.6 L/s έως 19.8 L/s. Για υποκρίσιμη ροή ανάντη στα πρώτα δύο προφίλ (απλή πτώση, min B jump (στο πόδα)), παρατηρείται στις χαμηλές παροχές ότι μέρος του μετώπου του καταβαθμού εμφανίζει αρνητικές πιέσεις. Στις άλλες δύο περιπτώσεις ροών, Submerged Jump και Standing Surface Jump, οι πιέσεις είναι οριακά θετικές, ενώ για το προφίλ No Jump παρατηρούνται μεγαλύτερες θετικές πιέσεις. Επιπλέον για την ελάχιστη παροχή 6.6 L/s, παρατηρούμε ότι η κατανομή των πιέσεων δεν είναι γραμμική για τα προφίλ του βυθισμένου υδραυλικού άλματος.

Στα αντίστοιχα διαγράμματα για υπερκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού η κατανομή των πιέσεων μπορεί να θεωρηθεί γραμμική. Εκεί, όπως και στην υποκρίσιμη, παρατηρούμε, για το πρώτο προφίλ (απλή πτώση) αρνητικές πιέσεις στο μέτωπο του καταβαθμού, για $y > 6.2$, ενώ για το δεύτερο προφίλ (min B jump) υπάρχει περιοχή υποπίεσεων στο άνω τμήμα του καταβαθμού για χαμηλές παροχές. Όταν η ροή γίνεται επιφανειακή, δηλαδή για τα προφίλ 3,4,5, η πίεση στο μέτωπο είναι παντού θετική, για όλο το εύρος των παροχών του πειράματος.

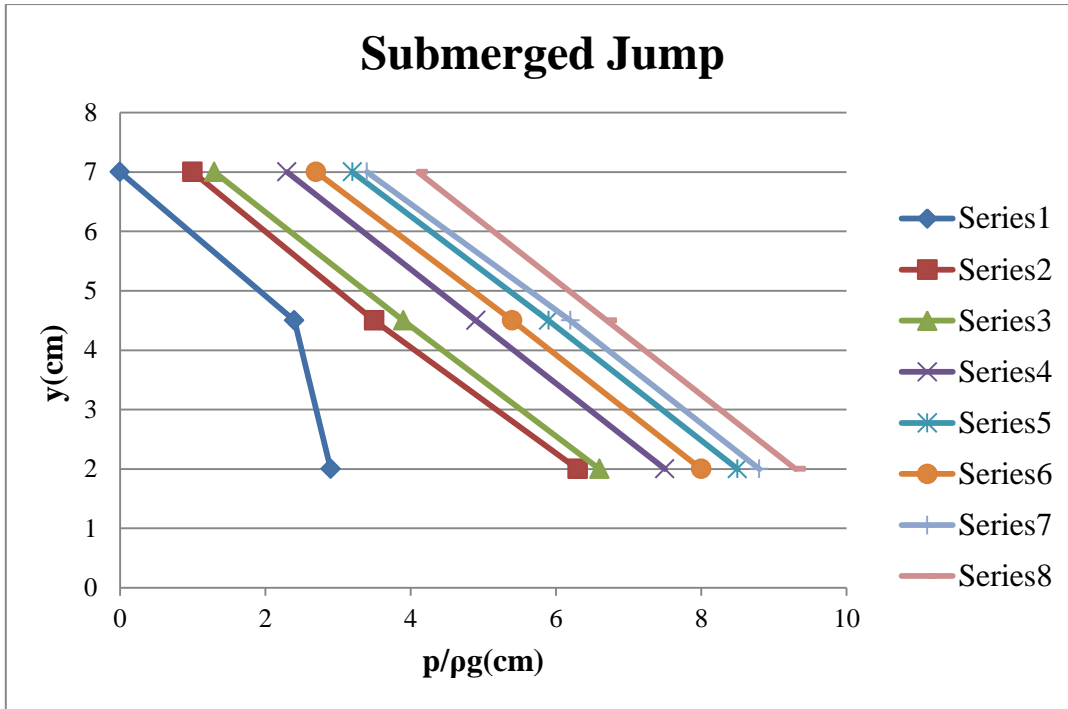
Υποκρίσιμη Ροή:



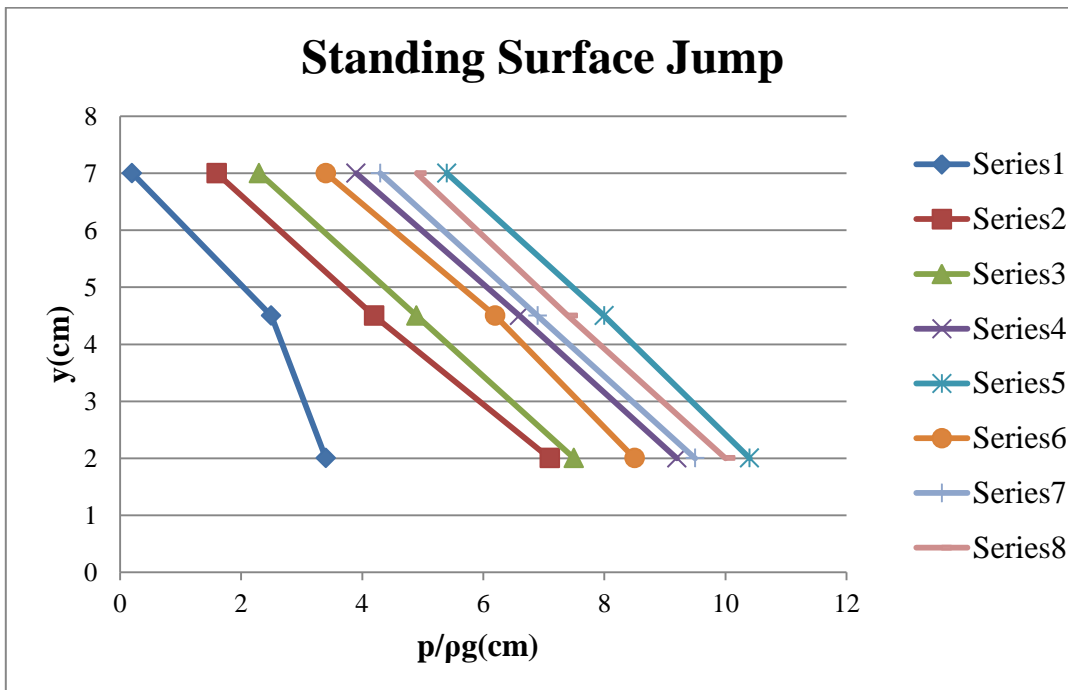
Διάγραμμα 5.9 Απλή πτώση (Υποκρίσιμη ροή).



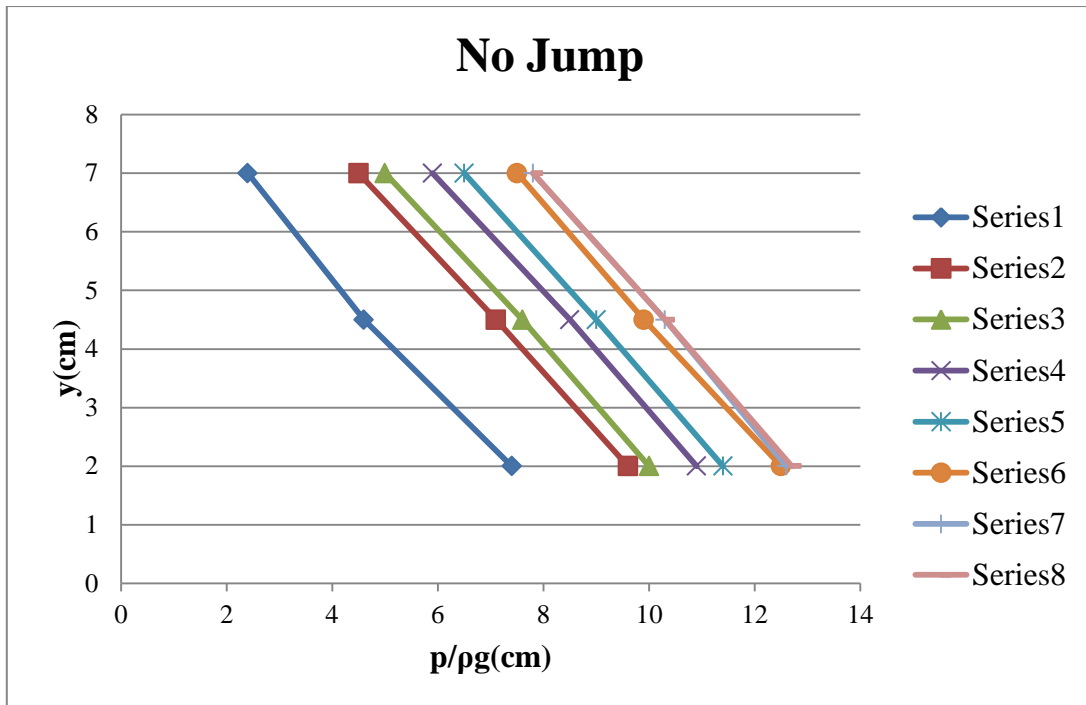
Διάγραμμα 5.10 Minimum B Jump (Υποκρίσιμη ροή).



Διάγραμμα 5.11 Submerged Jump (Υποκρίσιμη ροή).

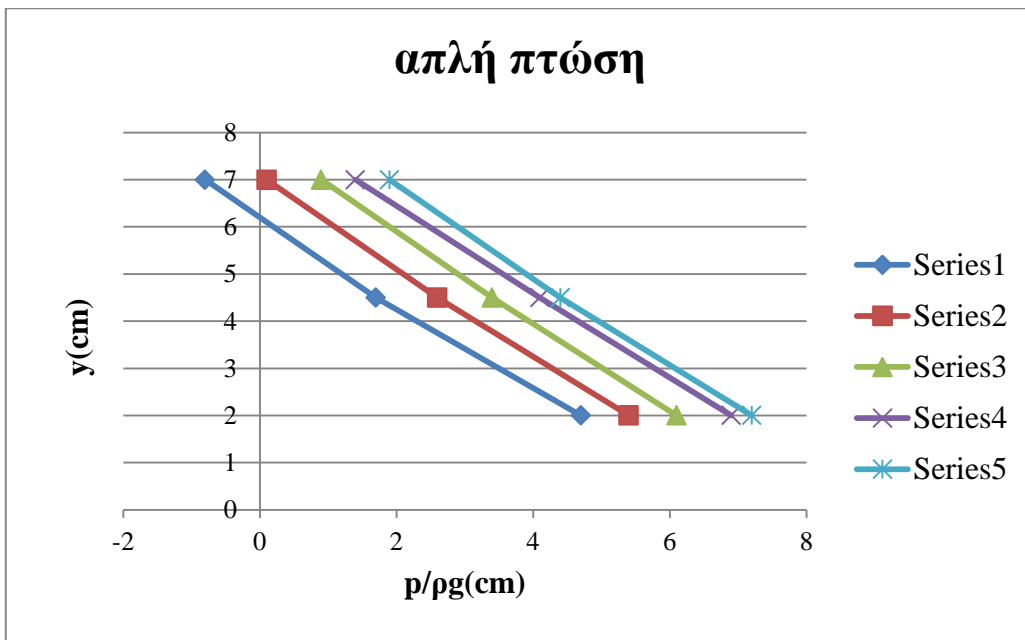


Διάγραμμα 5.12 Standing Surface Jump (Υποκρίσιμη ροή).

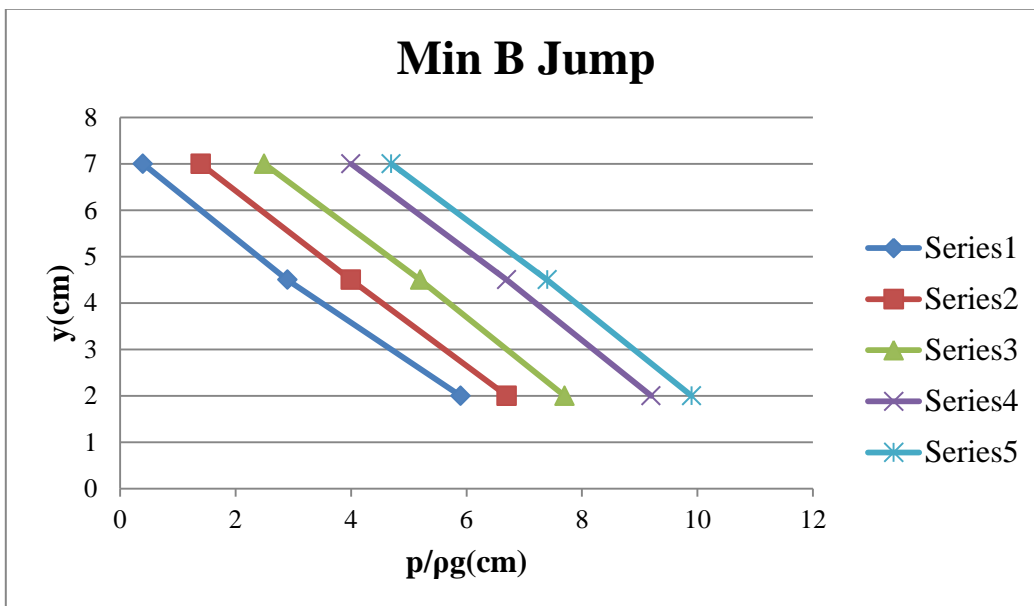


Διάγραμμα 5.13 No Jump (Υποκρίσιμη ροή).

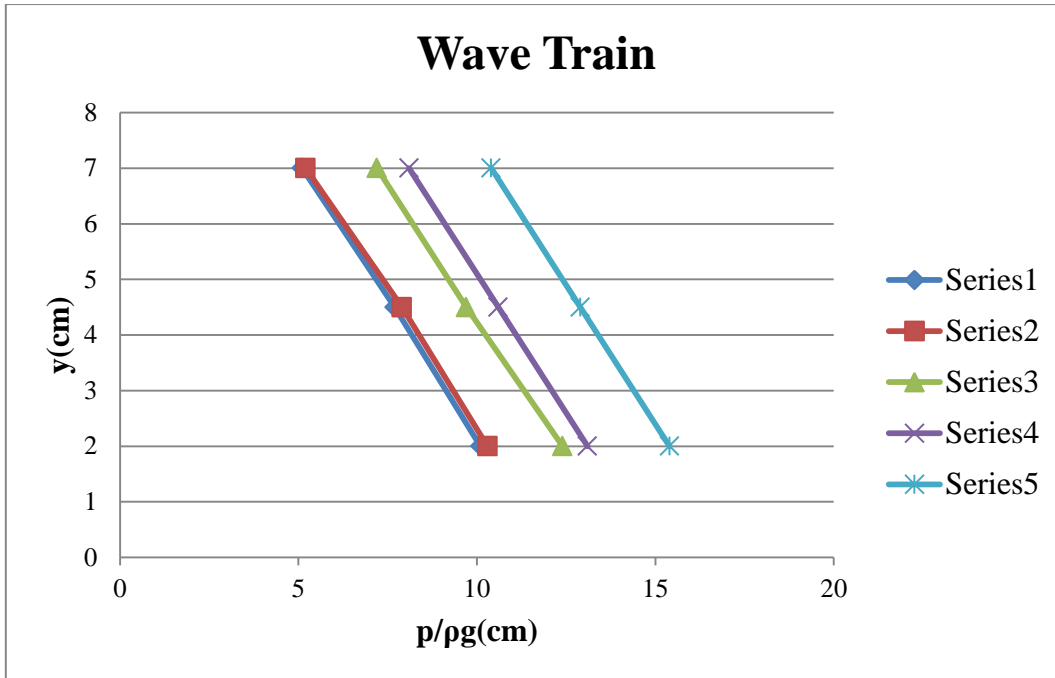
Υπερκρίσιμη Ροή:



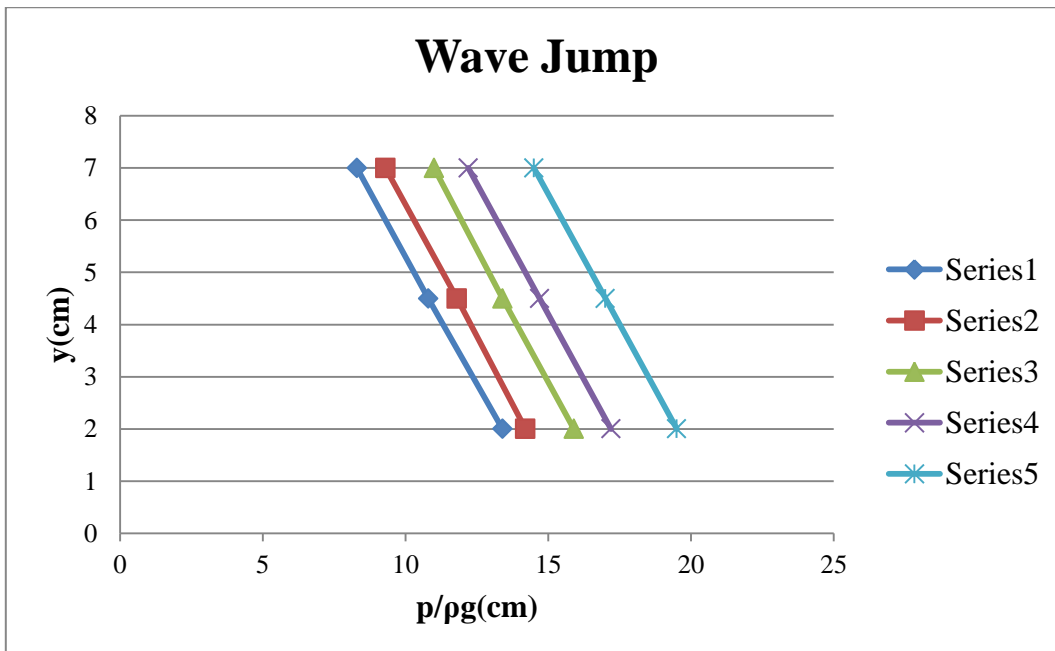
Διάγραμμα 5.14 Απλή πτώση (Υπερκρίσιμη ροή).



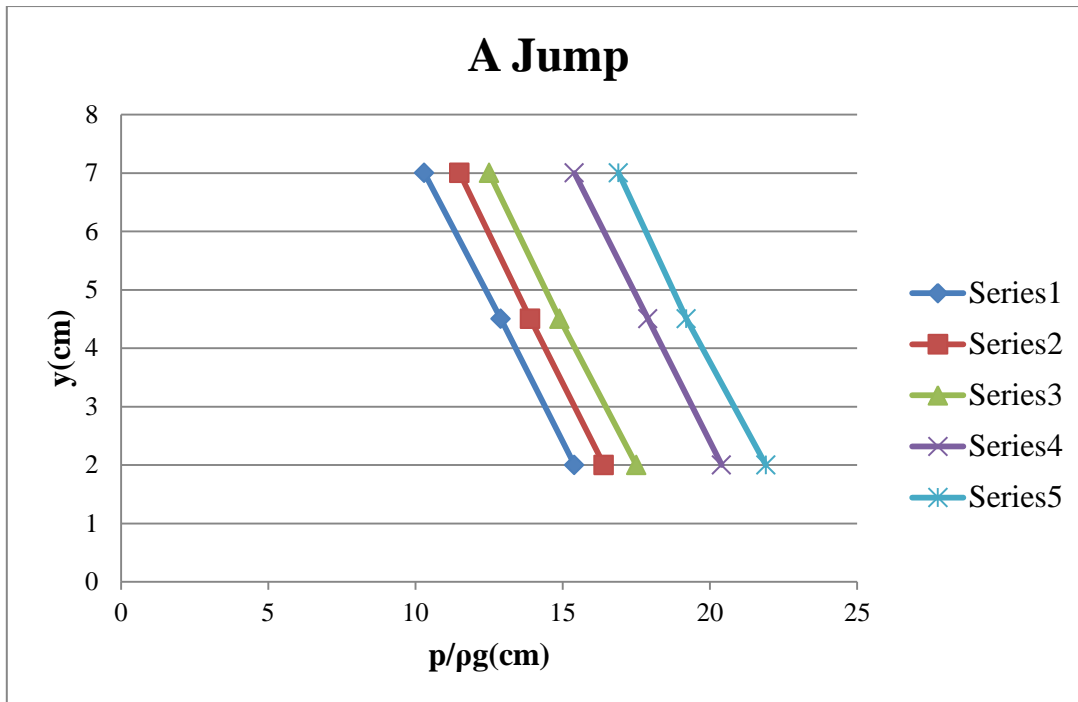
Διάγραμμα 5.15 Minimum B Jump (Υπερκρίσιμη ροή).



Διάγραμμα 5.16 Wave Train (Υπερκρίσιμη ροή).



Διάγραμμα 5.17 Wave Jump (Υπερκρίσιμη ροή).



Διάγραμμα 5.18 Υδραυλικό άλμα ανάντη του καταβαθμού (Υπερκρίσιμη ροή).

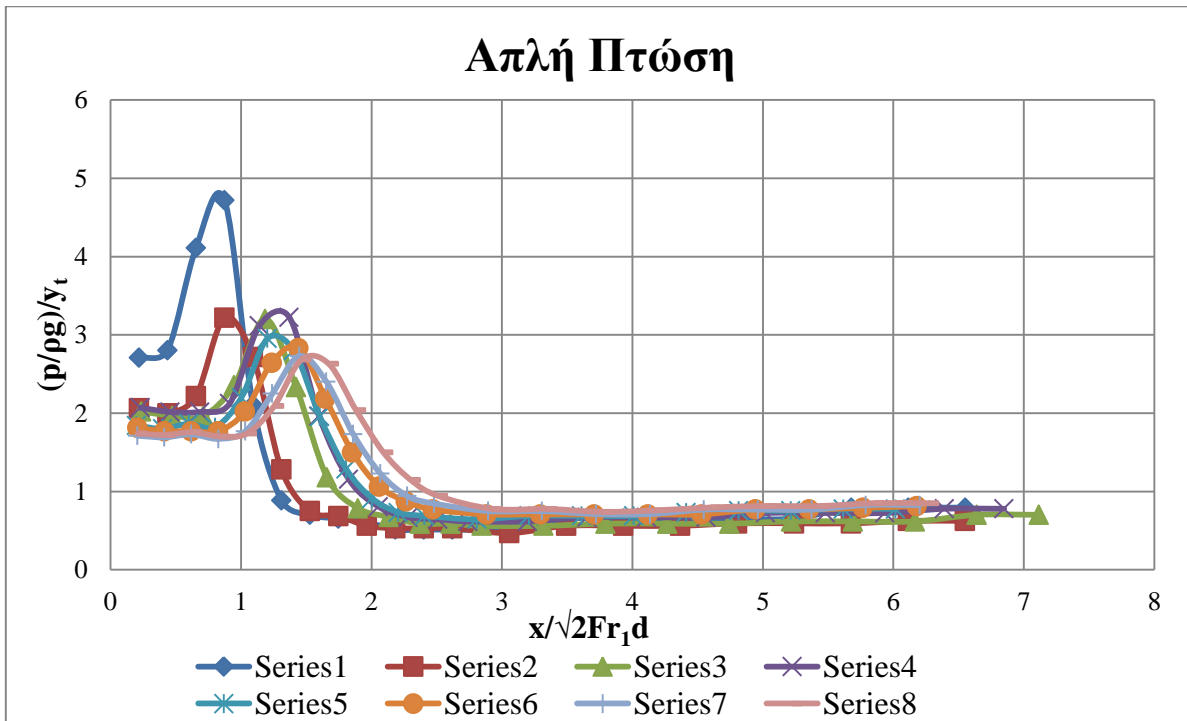
5.6 Πιέσεις στον πυθμένα της διώρυγας

5.6.1 Συσχέτιση της αδιάστατης μέγιστης πίεσης του πυθμένα στον αγωγό με τη κανονικοποιημένη απόστασή της από τον καταβαθμό

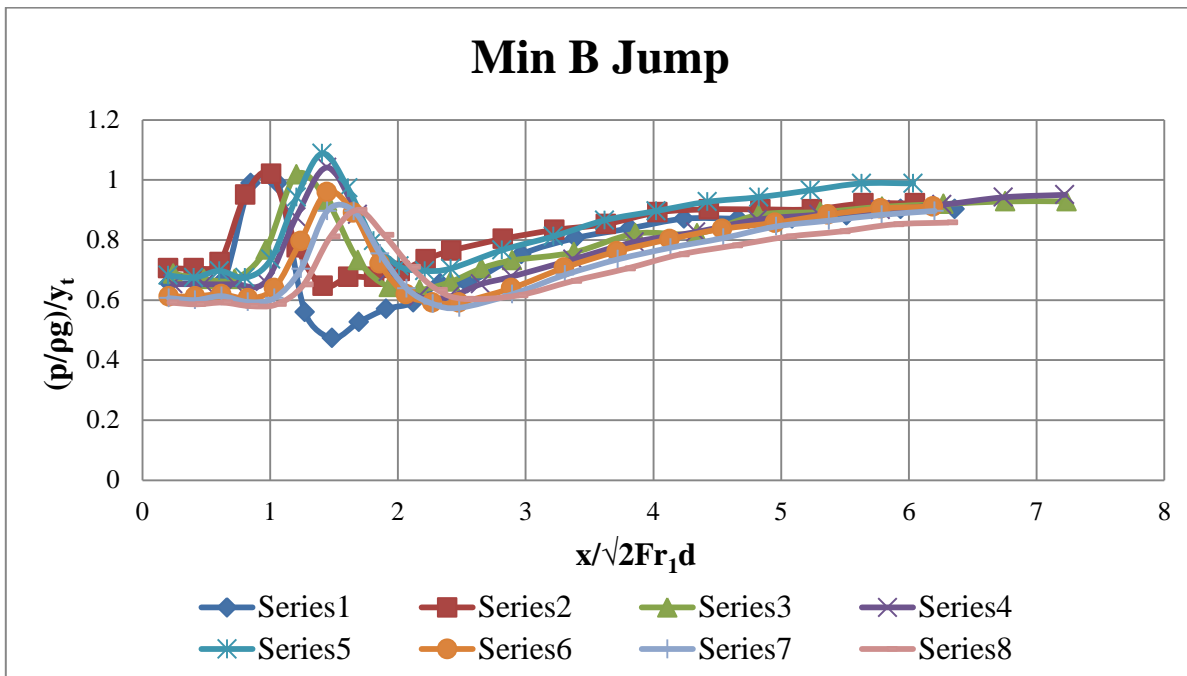
Για να κανονικοποιήσουμε την οριζόντια απόσταση x , η οποία είναι το μήκος που απέχει το κάθε πιεζόμετρο που έχουμε τοποθετήσει στον πυθμένα του αγωγού από τον πόδα του καταβαθμού, χρησιμοποιήσαμε τη θεωρητική απόσταση στην οποία μία υδάτινη φλέβα με ταχύτητα V_1 ανάντη του καταβαθμού, θα συναντούσε τον πυθμένα κατάντη. Η απόσταση αυτή υπολογίστηκε $\frac{1}{2^{\frac{1}{2}}} Fr_1 d$. Στο επόμενο διάγραμμα έχουμε συσχετίσει το λόγο του ύψους πίεσης, όπως αυτό μετρήθηκε στον πυθμένα του αγωγού από τα τοποθετημένα πιεζόμετρα κατά μήκος της ροής, προς το βάθος ροής κατάντη του αναβαθμού, με την αδιάστατη απόσταση $x / \frac{1}{2^{\frac{1}{2}}} Fr_1 d$ για κάθε διαφορετικό προφίλ ροής.

Στα διαγράμματα για την υποκρίσιμη ροή παρατηρούμε ότι στα 2 πρώτα προφίλ όπου η υδάτινη φλέβα προσκρούεται στον πυθμένα κατάντη του καταβαθμού, παρουσιάζεται μέγιστη πίεση σε μικρή απόσταση από το πόδα, γεγονός που οφείλεται στη στασιμότητα της ροής στην εκεί περιοχή και στη κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας. Συγκεκριμένα για την απλή πτώση, η κορυφή αυτή εμφανίζεται όταν η αδιάστατη απόσταση παίρνει τιμές $x / (\frac{1}{2^{\frac{1}{2}}} Fr_1 d) = 0.87 - 1.45$, ενώ για το min B jump $x / (\frac{1}{2^{\frac{1}{2}}} Fr_1 d) = 1 - 1.4$ στην υποκρίσιμη ροή. Για την υπερκρίσιμη τα αντίστοιχα σημεία εμφανίζονται στις θέσεις $x / (\frac{1}{2^{\frac{1}{2}}} Fr_1 d) = 0.5 - 0.9$ για την απλή πτώση και $x / (\frac{1}{2^{\frac{1}{2}}} Fr_1 d) = 0.75 - 1.25$ για το min B jump.

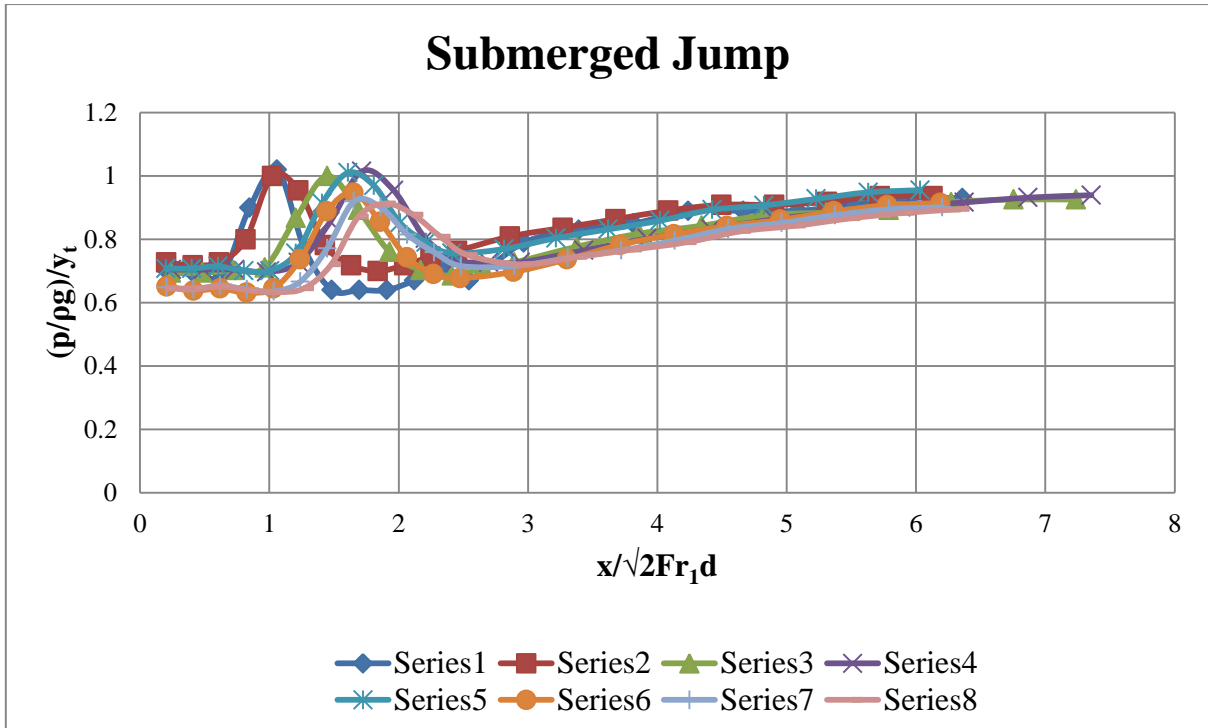
Υποκρίσιμη Ροή:



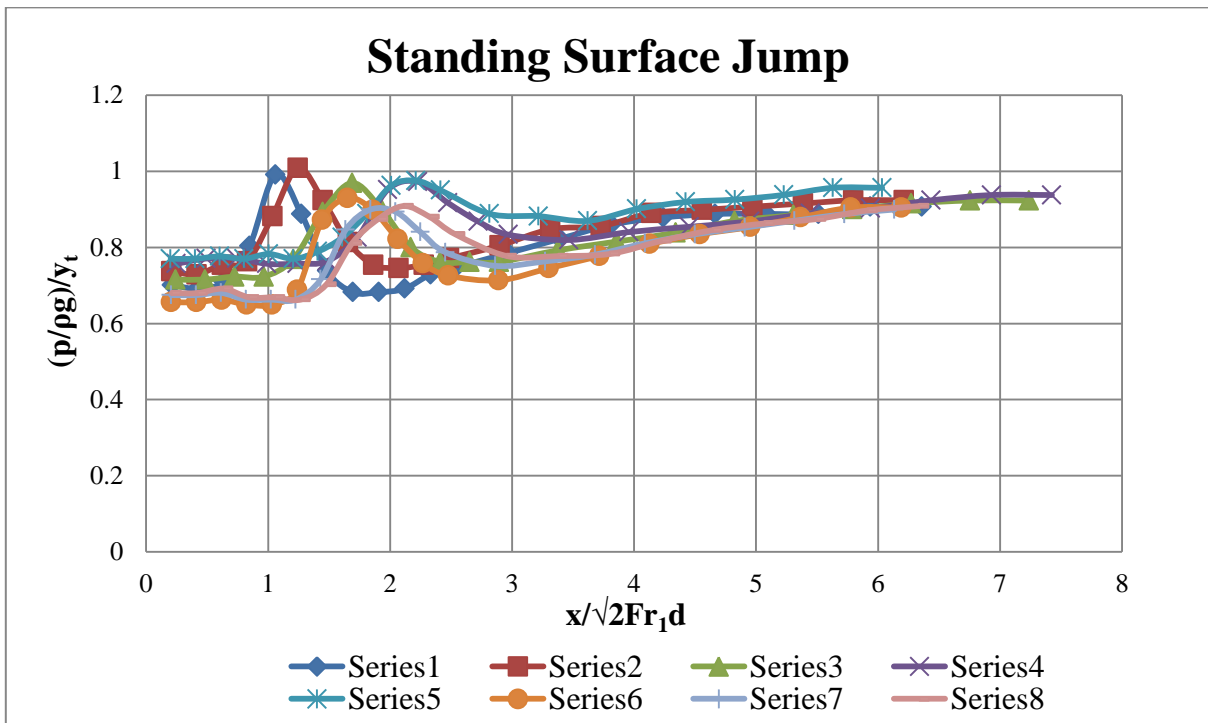
Διάγραμμα 5.19 Απλή πτώση (Υποκρίσιμη ροή).



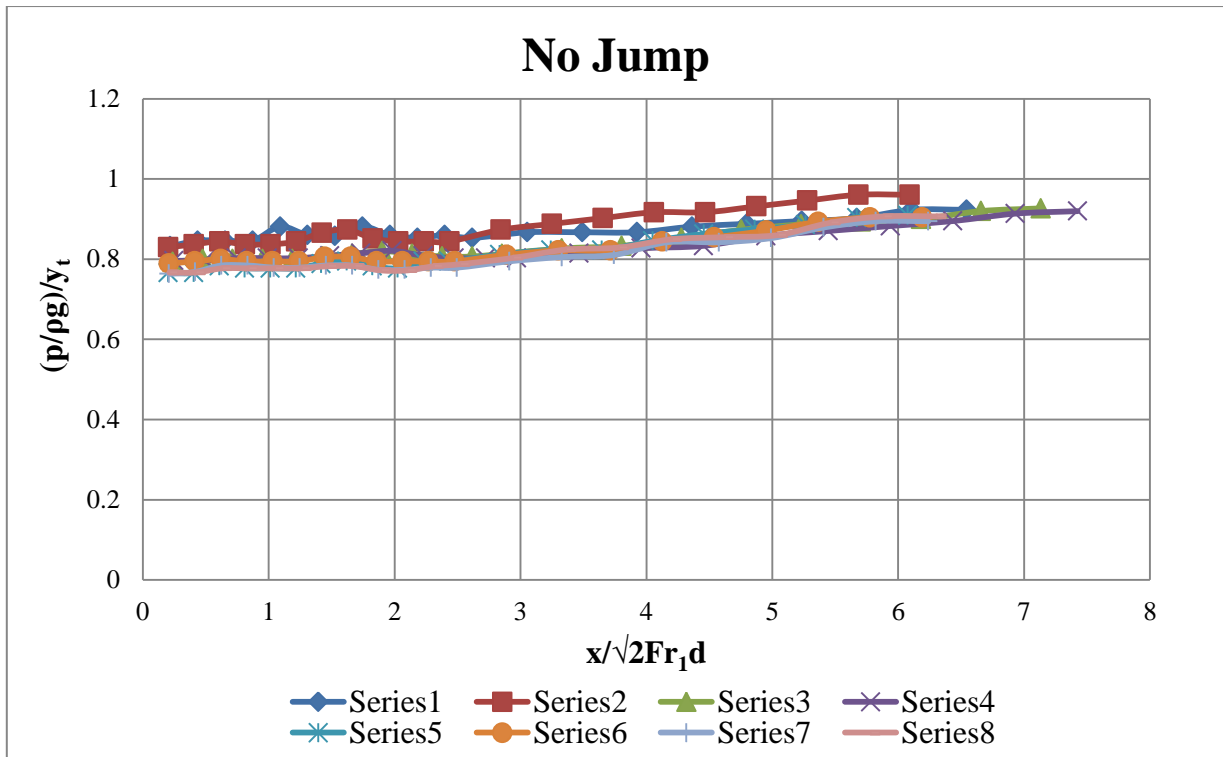
Διάγραμμα 5.20 Minimum B Jump (Υποκρίσιμη ροή).



Διάγραμμα 5.21 Submerged Jump (Υποκρίσιμη ροή).

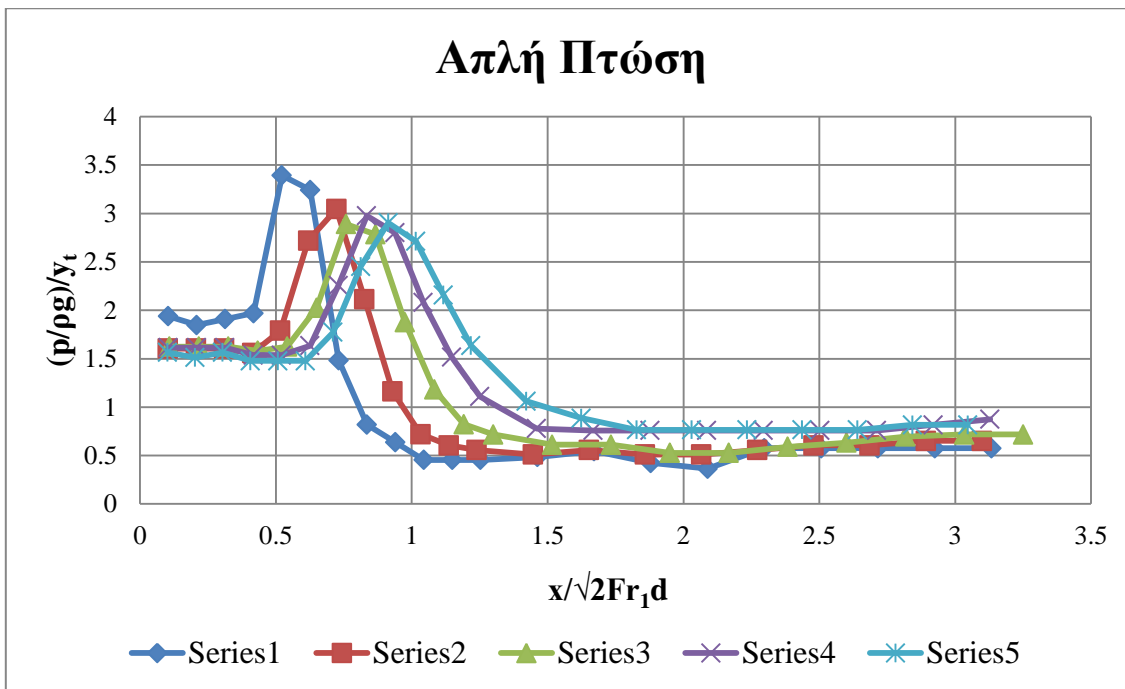


Διάγραμμα 5.22 Standing Surface Jump (Υποκρίσιμη ροή).

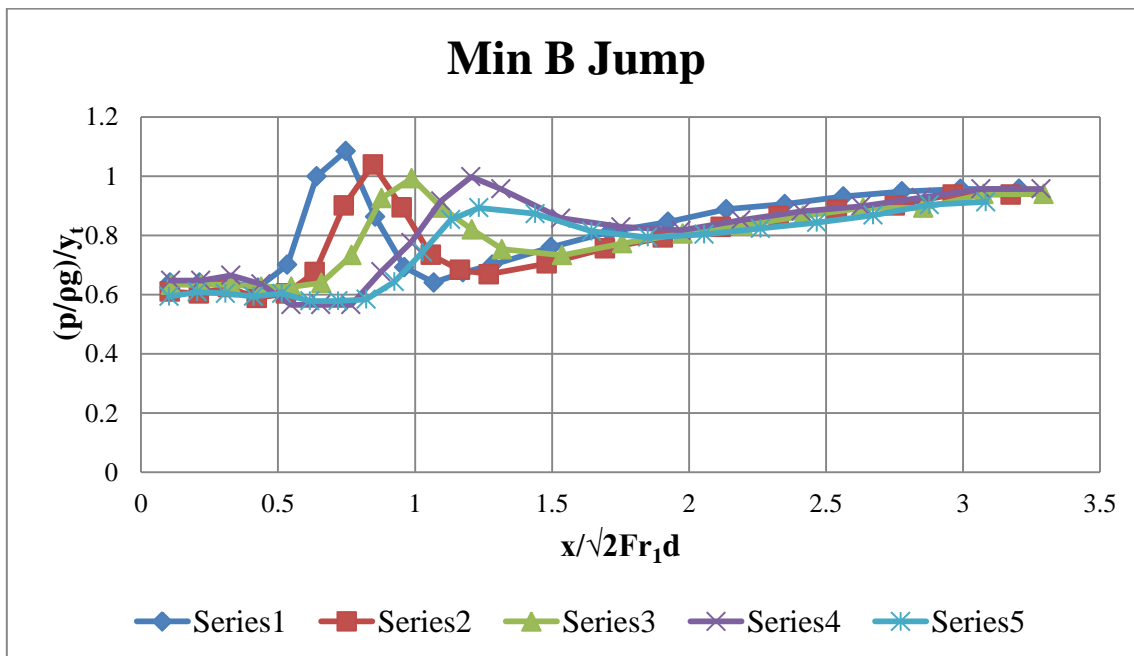


Διάγραμμα 5.23 No Jump (Υποκρίσιμη ροή).

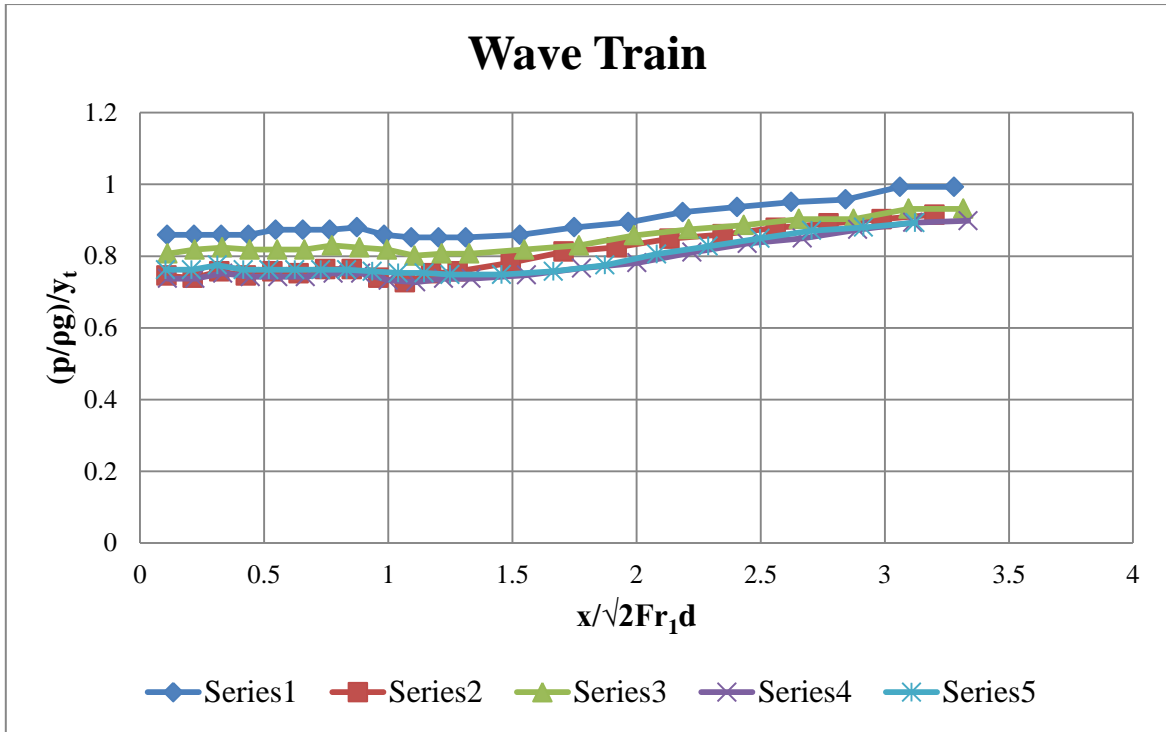
Υπερκρίσιμη Ροή:



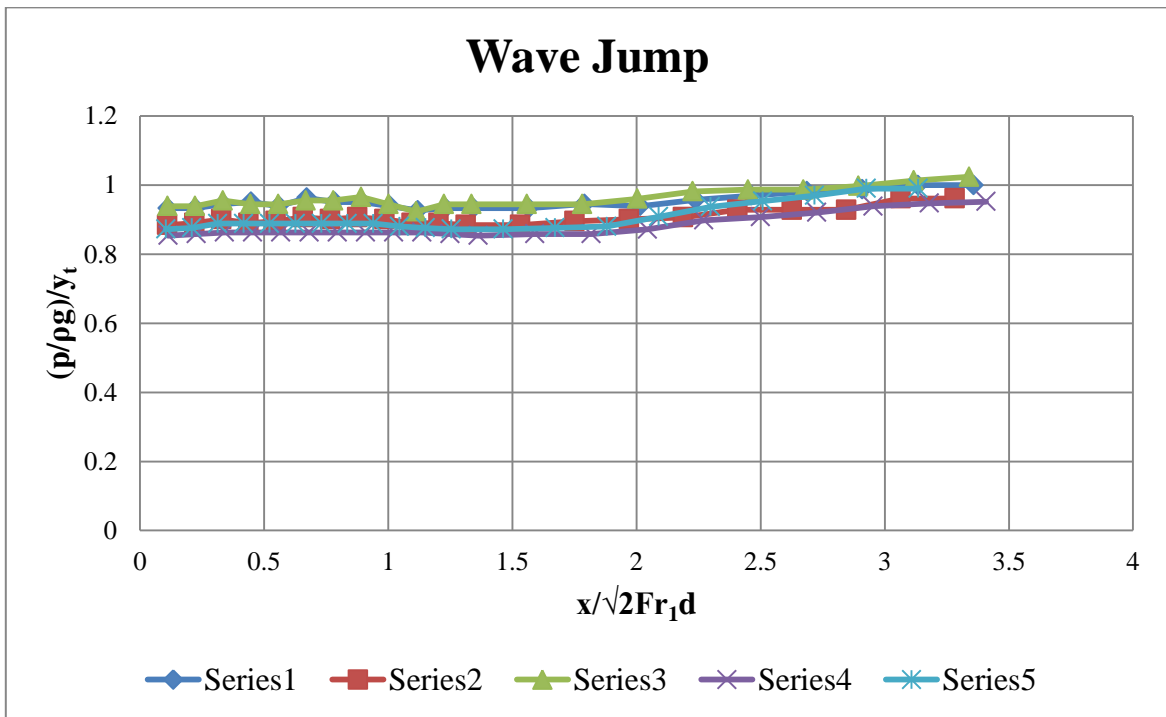
Διάγραμμα 5.24 Απλή πτώση (Υπερκρίσιμη ροή.)



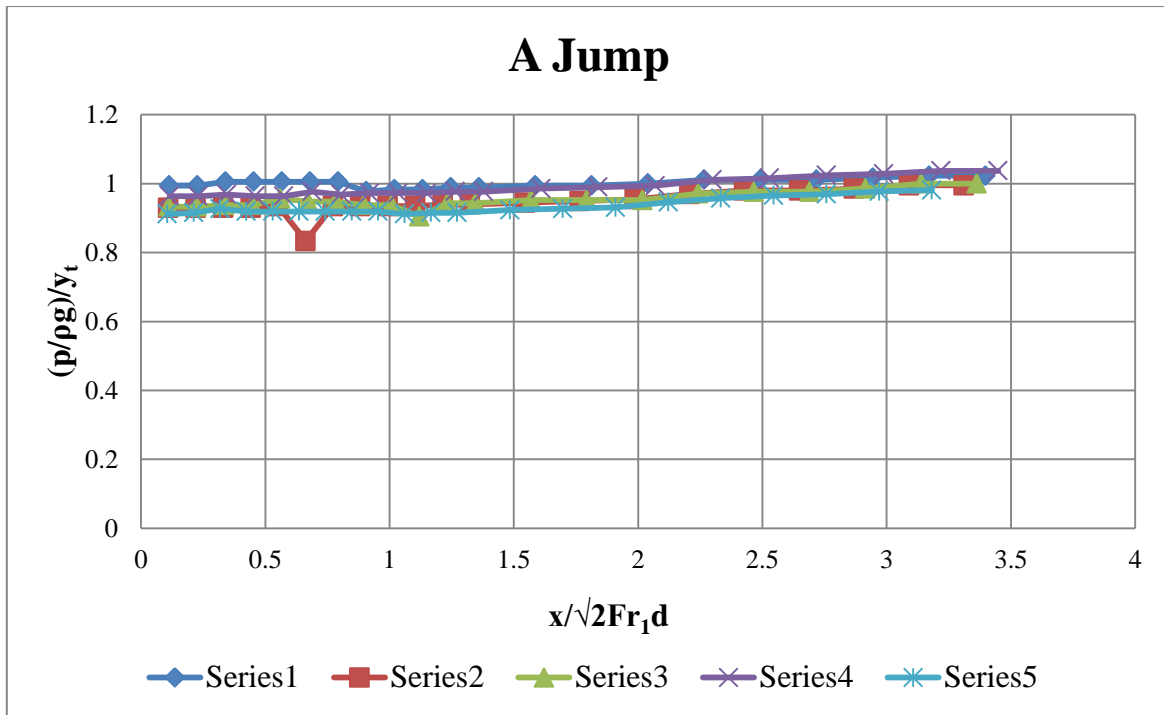
Διάγραμμα 5.25 Minimum B Jump (Υπερκρίσιμη ροή).



Διάγραμμα 5.26 Wave Train (Υπερκρίσιμη ροή).



Διάγραμμα 5.27 Wave Jump (Υπερκρίσιμη ροή).

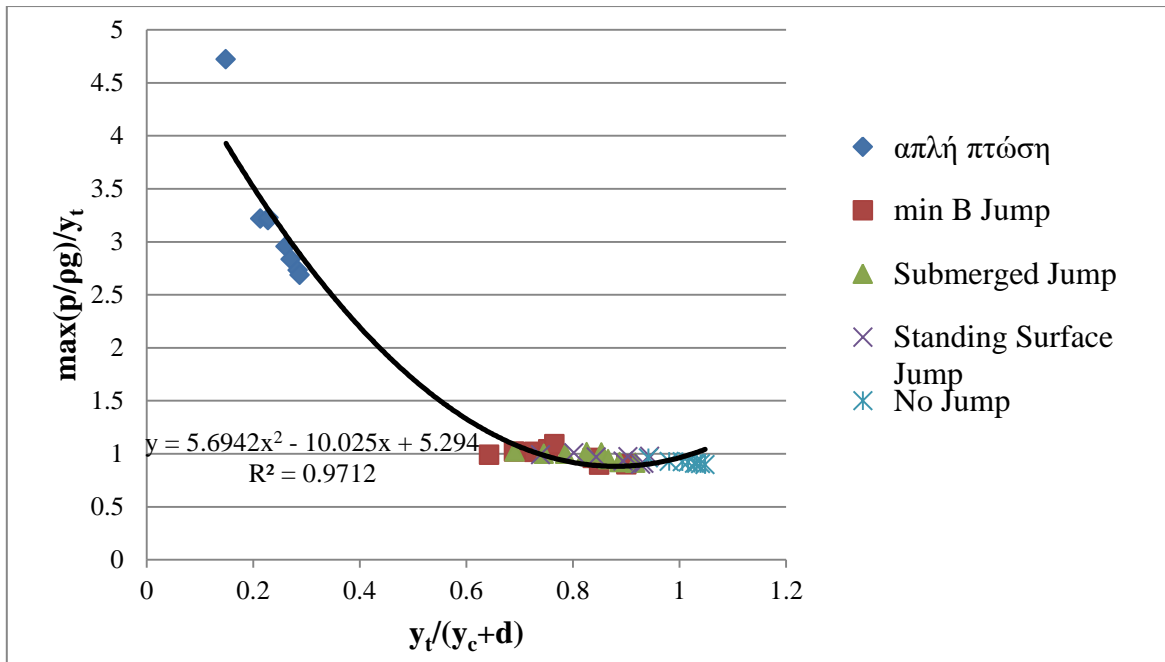


Διάγραμμα 5.28 A Jump (Υπερκρίσιμη ροή).

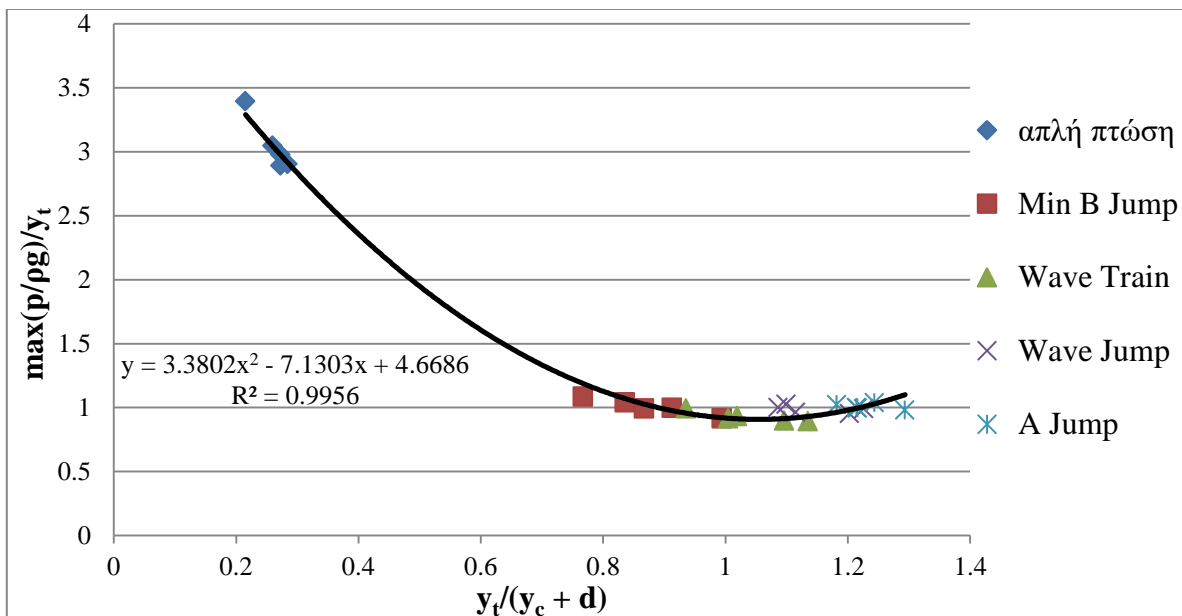
5.6.2 Συσχέτιση του $\max(p/\rho g)/y_t$ με τον $y_t/(y_c+d)$

Στο διάγραμμα αυτό βλέπουμε τη μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης πίεσης στον αγωγό σε συνάρτηση με το αδιάστατο βάθος κατάντη του καταβαθμού. Εδώ παρατηρούμε δύο διακριτές ομάδες αποτελεσμάτων. Η πρώτη αφορά απλή πτώση όπου το βάθος ροής κατάντη είναι μικρότερο από το 40% του αθροίσματος κρίσιμου βάθους και το ύψος καταβαθμού και ο λόγος της μέγιστης πίεσης πυθμένα με το βάθος ροής είναι πάντα μεγαλύτερος του 2.5. Η δεύτερη αφορά τα υπόλοιπα προφίλ, όπου το βάθος ροής είναι μεγαλύτερο του 60% του y_c+d και ο λόγος της μέγιστης πίεσης με το αντίστοιχο βάθος είναι ίσος, ή πλησίον της μονάδας. Επιπλέον από την συσχέτιση προκύπτει ότι τα αποτελέσματα προσπίπτουν στις εξής καμπύλες:

- (i) $\max(p/\rho g)/y_t = 5.69442[y_t/(y_c+d)]^2 - 10.025y_t/(y_c+d) + 5.294$ με συντελεστή $R^2=0.9712$ για υποκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού και
- (ii) $\max(p/\rho g)/y_t = 3.3802[y_t/(y_c+d)]^2 - 7.1303y_t/(y_c+d) + 4.6686$ με συντελεστή $R^2=0.9956$ για υπερκρίσιμη ροή ανάντη του καταβαθμού.



Διάγραμμα 5.29 Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης πίεσης στον αγωγό συναρτήσει του αδιάστατου βάθους ροής κατάντη (Υποκρίσιμη ροή).



Διάγραμμα 5.30 Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης πίεσης στον αγωγό συναρτήσει του αδιάστατου βάθους ροής κατάντη (Υπερκρίσιμη ροή).

5.7 Απώλειες ενέργειας

5.7.1 Συσχέτιση του H_1/H_2 και $y_t/(y_c+d)$

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα γίνεται μία πολύ βασική συσχέτιση μεγεθών, όπου συσχετίζουμε το λόγο των υψών ενέργειας ανάντη και κατάντη του καταβαθμού με το αδιάστατο βάθος ροής στα κατάντη με τη μορφή $y_t/(y_c+d)$, όπου περιέχονται τα βασικά μεγέθη της ροής μας.

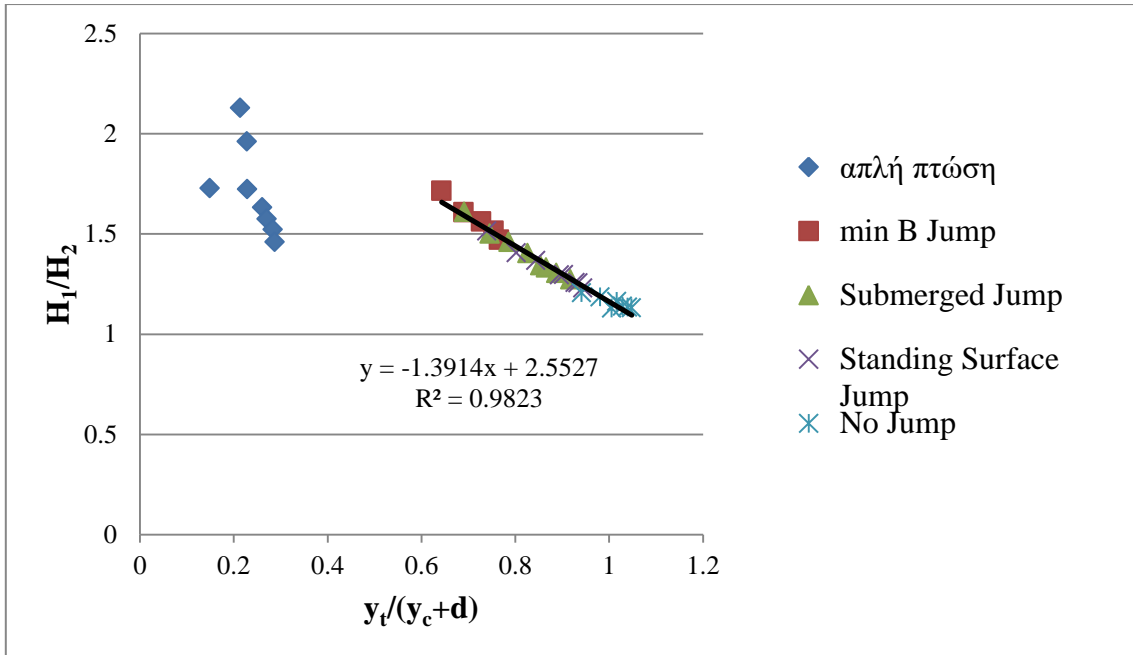
Ερμηνεύοντας το συγκεκριμένο διάγραμμα, μπορούμε να αντλήσουμε σημαντικά συμπεράσματα. Αρχικά παρατηρούμε ότι η μείωση του λόγου H_1/H_2 εμφανίζεται παράλληλα με την αύξηση του λόγου $y_t/(y_c+d)$. Στη συγκεκριμένη πειραματική εγκατάσταση, όπου το ύψος του καταβαθμού είναι σταθερό, συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της παροχής προκαλεί αύξηση των απωλειών ενέργειας. Αντιθέτως, αυξάνοντας το βάθος ροής κατάντη παρατηρούμε μείωση των απωλειών ενέργειας. Όπως αναφερθήκαμε και στην εισαγωγή, βασική λειτουργία των καταβαθμών είναι η καταστροφή ενέργειας σε ανοιχτούς αγωγούς, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο. Συμπεραίνουμε λοιπόν από το δικό μας διάγραμμα, ότι για μεγαλύτερη καταστροφή ενέργειας χρειαζόμαστε μεγάλες παροχές και μικρά βάθη ροής κατάντη.

Όπως ήταν αναμενόμενο και όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η καμπύλη του λόγου ύψους ενέργειας ανάντη και κατάντη του καταβαθμού είναι ασυμπτωτική στη μονάδα.

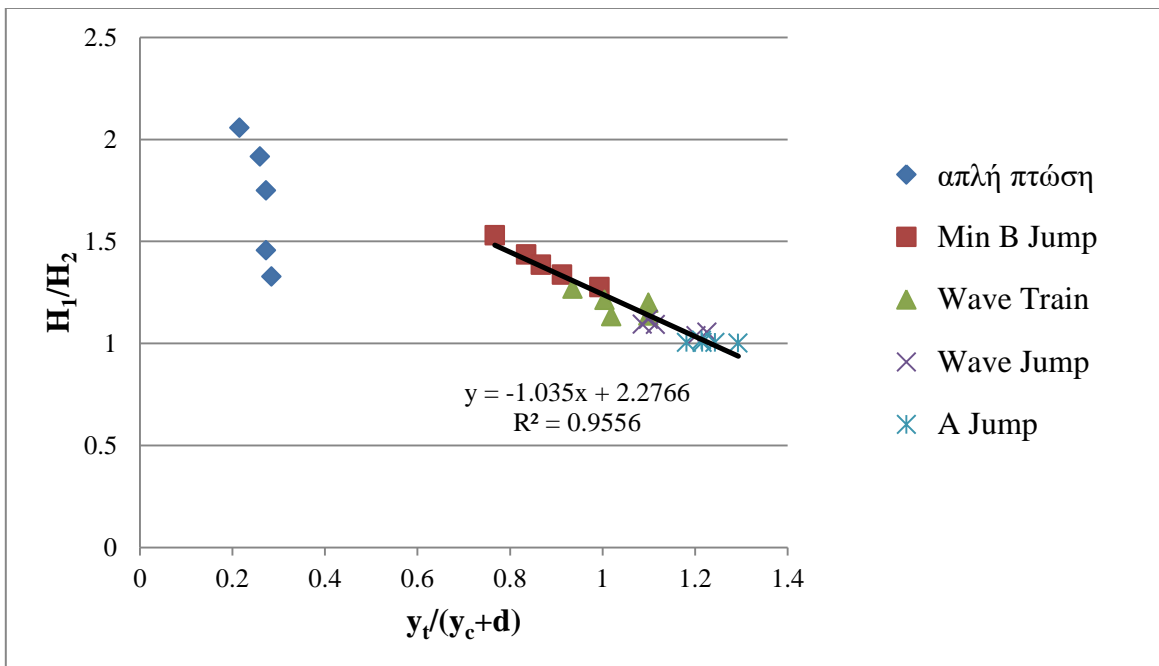
Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι για μικρές παροχές με μεγάλο βάθος ροής κατάντη μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε τις όποιες απώλειες ενέργειας της ροής, ενώ ανώτατο όριο του διαγράμματος μπορεί να θεωρηθεί η τιμή 2.2. Σε ευνοϊκές συνθήκες, οπότε, η ενέργεια κατάντη μπορεί να φτάσει να είναι στο 1/2 της αρχικής ενέργειας. Το εύρος του όρου $y_t/(y_c+d)$ είναι μεγάλο, από 0.2-1.1.

Αγνοώντας τα αποτελέσματα για το προφίλ της απλής πτώσης, για τους υπόλοιπους τύπους ροής προκύπτουν οι εξισώσεις

- (i) $H_1/H_2 = -1.3914(y_t/(y_c + d)) + 2.5527$ με συντελεστή $R^2 = 0.9823$ για υποκρίσιμη ροή ανάντη και
- (ii) $H_1/H_2 = -1.035(y_t/(y_c + d)) + 2.2766$ με συντελεστή $R^2 = 0.9556$ για υπερκρίσιμη ροή ανάντη.



Διάγραμμα 5.31 Λόγος του ύψους ενέργειας ανάντη και κατόντη του καταβαθμού σαν συνάρτηση του αδιάστατου βάθους ροής κατόντη $y_t/(y_c + d)$ (Υποκρίσιμη ροή).



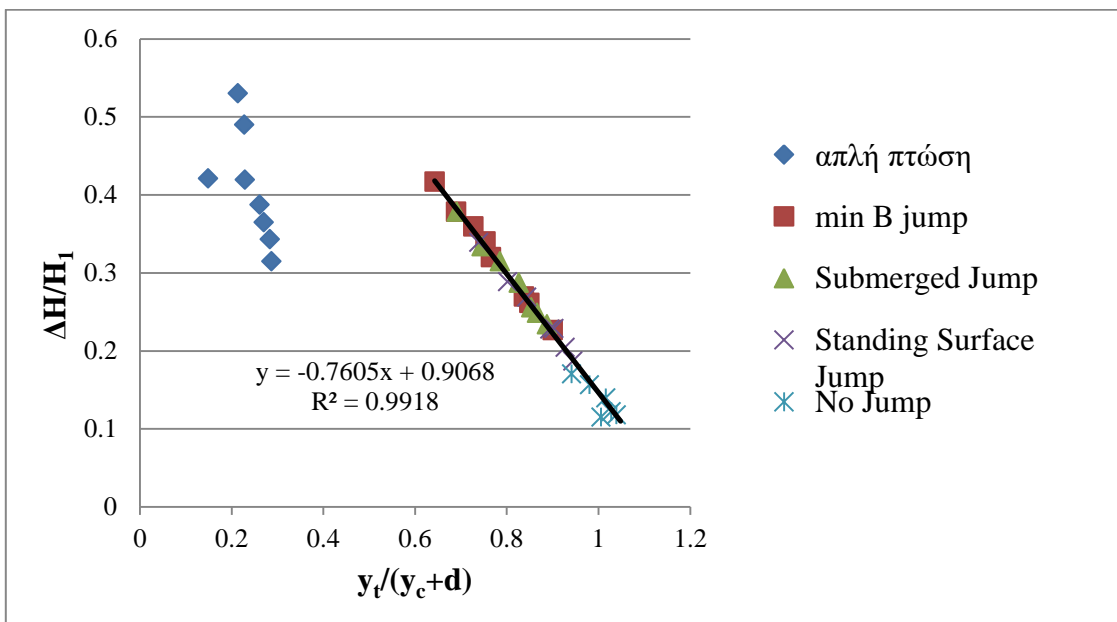
Διάγραμμα 5.32 Λόγος του ύψους ενέργειας ανάντη και κατόντη του καταβαθμού σαν συνάρτηση του αδιάστατου βάθους ροής κατόντη $y_t/(y_c + d)$ (Υπερκρίσιμη ροή).

5.7.2 Συσχέτιση των $\Delta H/H_1$ και $y_t/(y_c+d)$

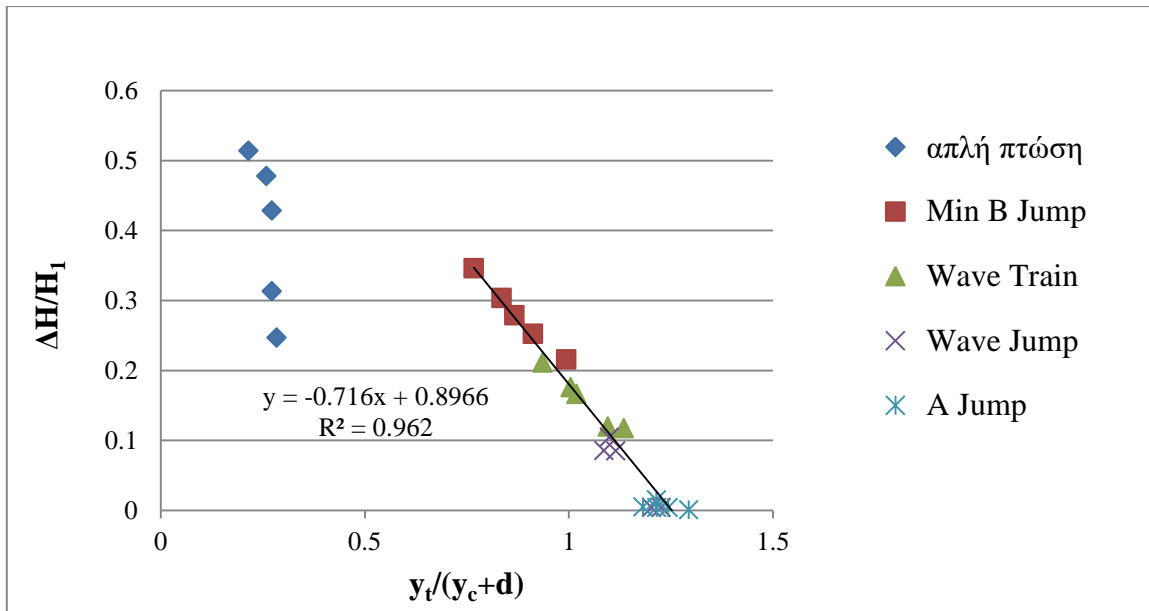
Η απώλεια ενέργειας υπολογίστηκε από τη μονοδιάστατη εξίσωση ενέργειας $\Delta H = H_1 - H_2 = d + y_1 + V_1^2 / 2g - y_2 - V_2^2 / 2g$, θεωρώντας ότι η κατανομή της ταχύτητας στον όγκο αναφοράς είναι ομοιόμορφη. Εδώ γίνεται η συσχέτιση του λόγου των απωλειών ενέργειας προς το ύψος ενέργειας ανάντη, με το λόγο που περιέχει τα βασικά μεγέθη της ροής μας, δηλαδή το βάθος κατάντη, την παροχή και το ύψος του καταβαθμού. Τόσο για υποκρίσιμη όσο και για υπερκρίσιμη ροή ανάντη παρατηρούμε, με εξαίρεση την απλή πτώση, μία γραμμική μεταβολή των δύο λόγων. Συγκεκριμένα, με την αύξηση του κατάντη βάθους ο λόγος των απωλειών ενέργειας τείνει να μηδενιστεί, ιδιαίτερα στην υπερκρίσιμη ροή για το προφίλ A Jump οι απώλειες ενέργειας είναι σχεδόν μηδενικές σε σχέση με την ανάντη ενέργεια της ροής.

Αντίστοιχα, αγνοώντας το προφίλ της απλή πτώσης, προκύπτουν από τη συσχέτιση οι εξισώσεις

- (i) $\Delta H/H_1 = -0.7605 y_t/(y_c + d) + 0.9068$ με συντελεστή $R^2 = 0.9918$ για υποκρίσιμη ροή ανάντη και
- (ii) $\Delta H/H_1 = -0.716 y_t/(y_c + d) + 0.98966$ με συντελεστή $R^2 = 0.962$ για υπερκρίσιμη ροή ανάντη



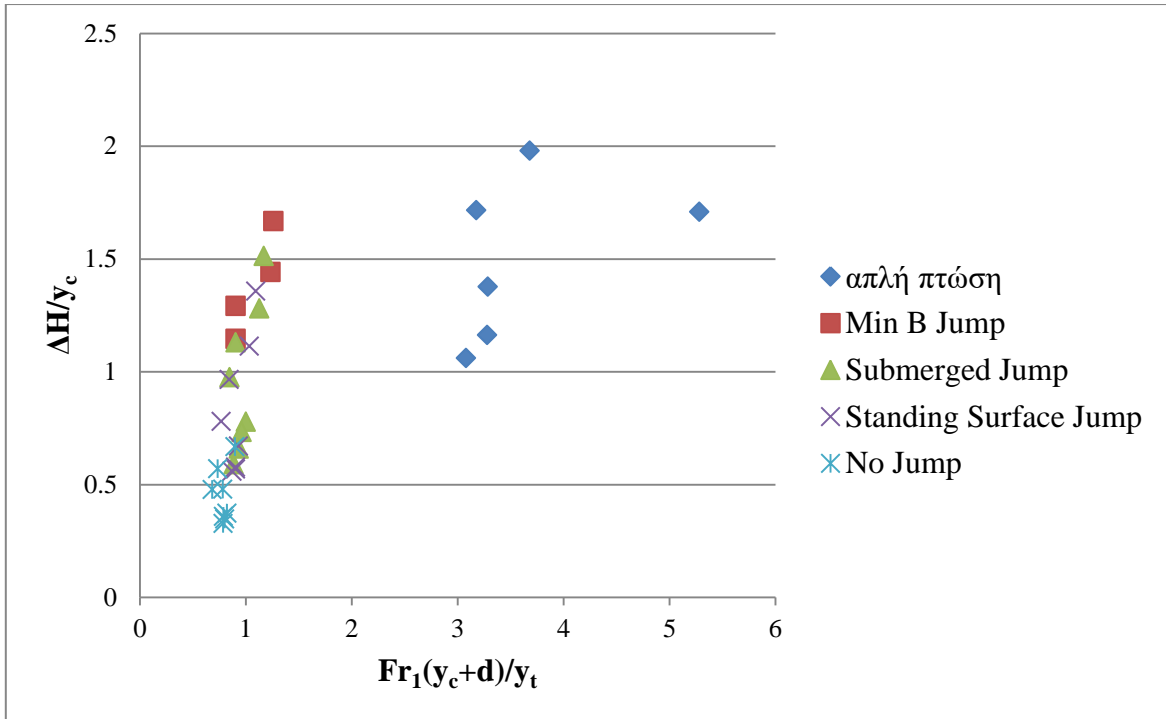
Διάγραμμα 5.33 Λόγος των απωλειών ενέργειας προς το ύψος ενέργειας ανάντη, σαν συνάρτηση του αδιάστατου βάθους ροής κατάντη $y_t/(y_c + d)$ (Υποκρίσιμη ροή).



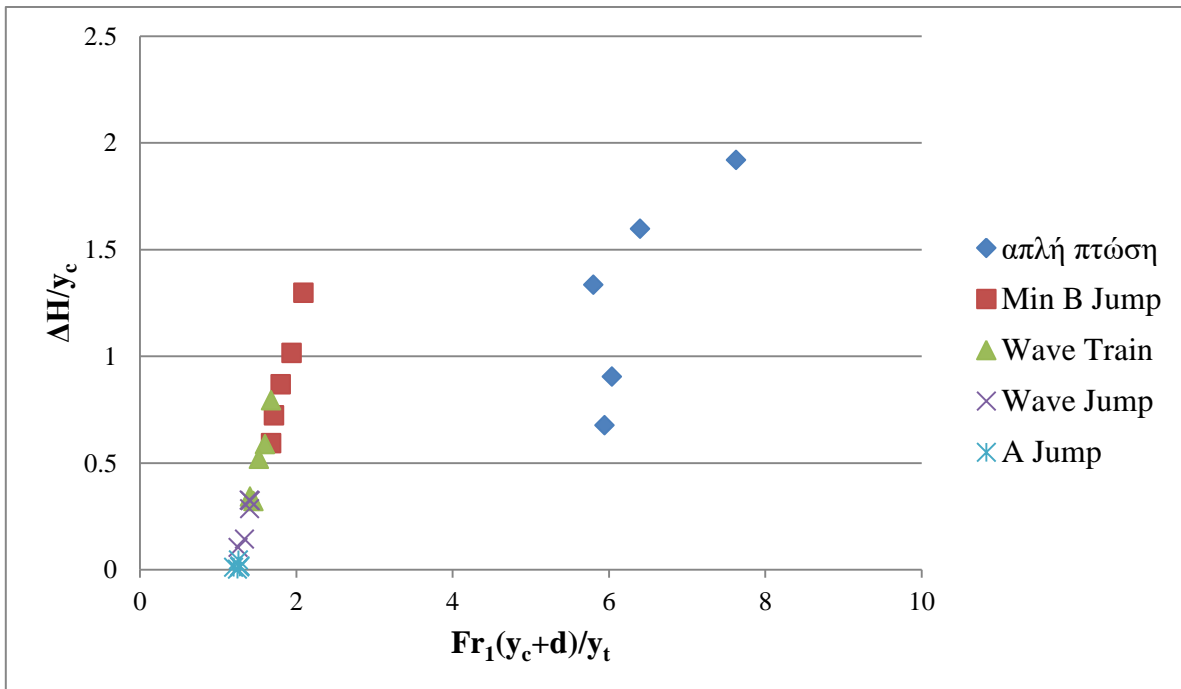
Διάγραμμα 5.34 Λόγος των απωλειών ενέργειας προς το ύψος ενέργειας ανάντη, σαν συνάρτηση του αδιάστατου βάθους ροής κατάντη $y_t/(y_c + d)$ (Υπερκρίσιμη ροή).

5.7.3 Συσχέτιση του $\Delta H/y_c$ με τον $Fr_1(y_c + d)/y_t$

Στο διάγραμμα αυτό η απώλεια ενέργειας κανονικοποιείται με το κρίσιμο βάθος ροής. Ο άλλος άξονας του διαγράμματος είναι το κανονικοποιημένο μήκος $Fr_1((y_c + d)) / y_t$. Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα απωλειών, παρατηρούμε ότι η απώλεια ενέργειας τείνει στο μηδέν όταν το άλμα έχει μεταφερθεί ανάντη του καταβαθμού, ενώ η μέγιστη τιμή που παρουσιάζεται στην απλή πτώση δεν ξεπερνάει το 2.



Διάγραμμα 5.35 Μεταβολή της αδιάστατης απώλειας ενέργειας $\Delta H/y_c$, συναρτήσει του αδιάστατου μήκους $Fr_1(y_c+d)/y_t$ (Υποκρίσιμη ροή).



Διάγραμμα 5.36 Μεταβολή της αδιάστατης απώλειας ενέργειας $\Delta H/y_c$, συναρτήσει του αδιάστατου μήκους $Fr_1(y_c+d)/y_t$ (Υπερκρίσιμη ροή).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μπορέσαμε να διευρύνουμε τη γνώση στην ταχέως μεταβαλλόμενη ροή σε βυθισμένο καταβαθμό. Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα του πειράματός μας επιβεβαίωσαν τον διαχωρισμό σε πέντε διακριτούς τύπους ροής, τόσο για υποκρίσιμη όσο και για υπερκρίσιμη ροή ανάντη. Από τα διαγράμματα 5.1, 5.2 και τη συσχέτιση των λόγων d/y_c και y_l/y_c μας δίνεται η δυνατότητα, με αυτά τα στοιχεία, να αναγνωρίσουμε το προφίλ ελεύθερης επιφάνειας που εμφανίζεται στην περιοχή του καταβαθμού, για καταβαθμό ύψους 10.3 cm.

Παράλληλα, αντλήσαμε πληροφορίες για την επιρροή χαρακτηριστικών μεγεθών της ροής όπως το βάθος ροής κατάντη, η παροχή, το ύψος του καταβαθμού και ο αριθμός Froude στην μετάβαση της ροής μεταξύ των προφίλ για ορθογωνικό οριζόντιο αγωγό. Από τη συσχέτιση της παραγράφου 5.4.3 προέκυψαν δύο πεπλεγμένες εξισώσεις, για υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή ανάντη, μέσω των οποίων για δεδομένα βάθη ροής ανάντη και κατάντη και δεδομένη παροχή μπορεί να γίνει υπολογισμός του ύψους του καταβαθμού.

Βασικό αποτέλεσμα της ανάλυσης αυτής είναι η ικανότητα να καθορίσουμε της συνθήκες της ροής ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία υποπίεσεων στο μέτωπο του καταβαθμού και η υδάτινη φλέβα να παραμείνει επιφανειακή σε όλο το μήκος του αγωγού, ελέγχοντας το κατάντη βάθος της ροής. Στα διαγράμματα 5.9-5.18 και 5.19-5.29 παρουσιάζεται η κατανομή πιέσεων τόσο στο μέτωπο του καταβαθμού όσο και στον πυθμένα του αγωγού κατάντη αυτού, για υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή στα ανάντη. Η κατανομή αυτή είναι κύριας σημασίας για τη μελέτη και την κατασκευή τεχνητών καταβαθμών.

Από τη συσχέτιση απωλειών ενέργειας με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής, όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.31-5.36, αντλούμε δεδομένα για τη δυνατότητα καταστροφής ενέργειας με τη

διαμόρφωση εγκάρσιου καταβαθμού σε ανοιχτό αγωγό. Για την ακρίβεια, στα πειράματά μας η μέγιστη απώλεια ενέργειας μπορεί να φτάσει το μισό της ανάντη ενέργειας για υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή. Από τα διαγράμματα μας φαίνεται ότι η μέγιστη καταστροφή ενέργειας εμφανίζεται στο προφίλ ροής *min B jump*. Χρησιμοποιώντας τις αναλυτικές εξισώσεις και με δεδομένα την παροχή, το ανάντη βάθος και το επιθυμητό ποσοστό απωλειών ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί το κατάντη βάθος ροής σε λεκάνες ηρεμής.

Συνολικά, τα διαγράμματα που αφορούν τις απώλειες ενέργειας του αγωγού και τα διαγράμματα πιέσεων στο μέτωπο του καταβαθμού, μπορούν να φανούν χρήσιμα στο σχεδιασμό λεκανών ηρεμής με καταβαθμό.

7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Λιάτης, Δ. & Παπανικολάου, Π., 1978. *Πτώση μη αεριζόμενης φλέβας σε ορθογωνική διώρυγα*. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
2. Ματζιούνης, Π., 2004. *Συνθήκες υποκρίσιμης και υπερκρίσιμης ανάντη ροής σε βυθισμένο αναβαθμό*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
3. Παπανικολάου, Π., 2014. *Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπο πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια*, Διδακτικές Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
4. Ρετσίνης, Ε., 2022. *Βυθισμένος καταβαθμός σε ορθογωνική διώρυγα με υπερκρίσιμη ροή ανάντη*. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
5. Armenio V., Toscano P., & Fiorotto V., 2000. *On the effects of a negative step in pressure fluctuations at the bottom of a hydraulic jump*. J. Hydr. Res., IAHR, **38**, (NO. 5), 359-368.
6. Chamani, M.R., & Beirami, M.K., 2002. *Flow characteristics at drops*. J. Hydr. Engrg., ASCE, **128**, (NO. 8), 788-791.
7. Chanson, H., 1996. *Prediction of the transition nappe / skimming flow on a stepped channel*. J. Hydr. Res., IAHR, **34**, (NO. 3), 421-429.
8. Chanson, H., 2004. *Drag reduction in skimming flow on stepped spillways by aeration*. J. Hydr. Res., IAHR, **42**, (NO. 3), 316-322.
9. Chow, V.T., 1959. *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill.
10. French, R.H., 1985. *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill.
11. Henderson, F.M., 1966. *Open channel flow*. Macmillan.
12. Mossa, M., 1999. *On the oscillating characteristics of hydraulic jumps*. J. Hydr. Res., IAHR, **37**, (NO. 4), 541-558.
13. Mossa M., Petrillo A., & Chanson H., 2003. *Tailwater level effects on flow conditions at an abrupt drop*. J. Hydr. Res., IAHR, **41**, (NO. 1), 39-51.
14. Moore, W.L., 1941. *Energy loss at the base of a free overfall*. Trans., ASCE, **108**, 1343-1360.

15. Negm, A.A.M., 1996. *Hydraulic jumps at positive and negative steps on sloping floors*. J. Hydr. Res., IAHR, **34**, (NO. 3), 409-420.
16. Ohtsu, I., & Yasuda, Y., 1991. *Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop*. J. Hydr. Res., IAHR, **29**, (NO. 3), 309-328.
17. Pagliara, S., 1999. *Impinging jet and surface flow regimes at drop*. J. Hydr. Res., IAHR, **37**, (NO. 3), 421-424.
18. Rajaratnam, N., & Chamani, M.R., 1995. *Energy loss at drops*. J. Hydr. Res., IAHR, **33**, (NO. 3), 373-384.
19. Retsinis, E. & Papanicolaou, P., 2022. *Supercritical Flow Over a Submerged Negative Step*. Hydrology 9, 74.
20. Wu, S., & Rajaratnam, N., 1996. *Submerged flow regimes of rectangular sharp-crested weirs*. J. Hydr. Engrg., ASCE, **122**, (NO. 7), 412-414.
21. Wu, S., & Rajaratnam, N., 1998. *Impinging jet and surface flow regimes at drop*. J. Hydr. Res., IAHR, **36**, (NO. 1), 69-74.