

## تعیین ضریب زبری لوله‌های موجدار زهکشی برای شرایط واقعی جریان

صلاح کوچک‌زاده<sup>۱</sup> و فرشته باقری<sup>۲</sup>  
۱، ۲، دانشیار و کارشناس آبیاری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران  
تاریخ پذیرش مقاله ۸۲/۲/۱۰

### چکیده

ضریب زبری لوله‌های موجدار با منافذ جانبی که در مراجع ارائه می‌شود (ضریب زبری اسمی) معمولاً برای جریان یکنواخت کاملاً متلاطم و از نظر هیدرولیکی زبر صادق است. در حالی که جریان در داخل لوله‌ها از نوع متغیر مکانی و متلاطم زبر یا بینابین می‌باشد. در جریان متغیر مکانی نحوه ورود جت‌های کوچک آب از منافذ جدار لوله به درون لوله علاوه بر برهم زدن توزیع یکنواخت سرعت در مقاطع عرضی به صورت عامل بازدارنده جریان نیز عمل می‌نماید. عامل اول ضرورت کاربرد ضریب تصحیح توزیع سرعت را، در روابط حاکم ایجاب می‌کند. عامل دوم هم می‌تواند ضریب زبری اسمی لوله را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد. در این تحقیق عوامل یاد شده با ایجاد یک مجموعه آزمایشگاهی بررسی شد. همچنین با استفاده از روابط حاکم بر جریان متغیر مکانی با افزایش بده در لوله‌ها، پروفیل‌های محاسبه شده و مشاهده شده سطح آب مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ضرایب زبری اسمی لوله‌ها و فرض توزیع یکنواخت سرعت در مقاطع عرضی به پروفیل‌هایی منجر می‌شود که اختلاف قابل ملاحظه‌ای با مشاهدات آزمایشگاهی دارد. اما با تعدیل ضریب زبری و به کار بردن ضریب تصحیح توزیع سرعت انطباق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی حاصل می‌شود. در نتیجه براساس ضرایب محاسبه شده زبری و تصحیح اندازه حرکت مقادیر متوسط پیشنهاد شد.

### واژه‌های کلیدی: لوله‌های موجدار، جریان متغیر مکانی، ضریب زبری، ضریب تصحیح اندازه حرکت

#### مقدمه

که در این رابطه  $n_0 = \text{ضریب زبری مانینگ برای لوله پر}$ ؛  
 $n = \text{ضریب زبری مانینگ برای لوله غیر پر}$ ؛  $y = \text{عمق جریان در مقطع دایره‌ای}$ ؛ و  $d_0 = \text{قطر لوله می‌باشد}$ . از آنجا که رابطه فوق براساس داده‌های محدودی به دست آمده است تاکید شده است که این رابطه ضرورتاً یک فرمول عام را نشان نمی‌دهد. اگر  $Q_0$  و  $Q$  به ترتیب نشان دهنده بده جریان مقطع پر و غیر پر باشند، و  $V_0$  و  $V$  هم به ترتیب نمادهای سرعت جریان در مقطع پر و غیر پر باشند، در این صورت به دلیل تغییرات ضریب زبری با عمق، بده نسبی،  $(Q/Q_0)$ ، و سرعت نسبی،  $(V/V_0)$ ، به صورت تابعی از عمق نسبی،  $(y/d_0)$ ، بیان می‌شود.

با استفاده از فرمول مانینگ برای تعیین بده جریان،

شواهد متعددی وجود دارد که نشان می‌دهد ضریب زبری در یک مقطع دایره‌ای نه تنها ثابت نیست و با تغییرات عمق در مقطع تغییر می‌کند بلکه در لوله‌های نیمه پر ضریب زبری بیش از زمانی است که جریان در لوله به صورت پر می‌باشد (۱۰). بر اساس انطباق چند جمله‌ای توانی به داده‌های محققین قبلی که برای لوله‌های سفالی زهکشی و لوله‌های فاضلاب جمع‌آوری شده‌اند، منحنی تغییرات زبری نسبی در مقاطع دایره‌ای به صورت زیر ارائه شده است (۱۰):

$$\frac{n}{n_0} = 0.9987 + 3.4616(y/d_0) - 14.7108(y/d_0)^2 + 27.2574(y/d_0)^3 - 23.4963(y/d_0)^4 + 7.4909(y/d_0)^5 \quad (1)$$

پروفیل سطح آب در جریان متغیر مکانی ماندگار با افزایش بده در یک مجرای غیر منشوری با در نظر گرفتن ضریب تصحیح اندازه حرکت و افت جریان گردابی به صورت زیر در می آید (۶)

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - (2\beta + K_e) \frac{Qq_*}{gA^2} + (\beta + K_e) \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{q_* V_x}{gA}}{1 - (\beta + K_e) \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial y}} \quad (2)$$

که در آن  $y$  = عمق جریان؛  $x$  = فاصله از یک مبنای معین؛  $S_0$  = شیب بستر؛  $S_f$  = شیب خط انرژی؛  $Q$  = بده در فاصله معین  $x$ ؛  $A$  = سطح مقطع جریان در فاصله معین  $x$ ؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $q_*$  = بده واحد طول مجرا؛  $\beta$  = ضریب تصحیح اندازه حرکت؛  $K_e$  = ضریب مربوط به تغییرات تدریجی در سطح مقطع است و بدون بعد است؛ و  $V_x$  = مؤلفه سرعت آب ورودی به مجرا در جهت  $x$ .

استخراج معادله (۲) بر اساس فرضیات زیر استوار شده است:  
(۱) جریان به صورت یک بعدی در نظر گرفته شده است. (۲) شتاب قائم قابل اغماض است و توزیع فشار در مقطع جریان هیدرواستاتیک می باشد. (۳) شیب کف کانال نسبتاً کم است. (۴) فرمولهای متداول مقاومت (از قبیل مانینگ و سزلی) در جریانهای یکنواخت در این نوع جریان نیز صادق هستند بنابراین برای محاسبه افت اصطکاکی از این فرمولها استفاده می شود. (۵) تأثیر ورود هوا در آب قابل صرف نظر کردن است. به عبارت دیگر جرم مخصوص آب ثابت در نظر گرفته می شود. (۶) جریان ورودی، به صورت یکنواخت در طول کانال صورت می گیرد. (۷) جریان دائمی است.

این معادله که نشان دهنده تغییرات عمق نسبت به فاصله می باشد دارای حل تحلیلی نیست و برای حل آن باید از روشهای عددی استفاده نمود. اما پیش از پرداختن به روشهای حل، فرم مناسب آن برای مقاطع دایره ای که در این تحقیق به کار می رود، ارائه می شود.

#### معادله دینامیکی برای مقطع دایره ای

اگر چه لوله های موجدار دارای مقطع منشوری هستند اما در این مقاله به منظور دستیابی به فرم کامل معادله حاکم، ابتدا معادله دینامیکی جامع جریان متغیر مکانی با افزایش بده در مقاطع دایره ای غیر منشوری ارائه می شود. معادله به دست آمده قابل کاربرد در مقاطع منشوری و غیر منشوری خواهد بود. باتوجه به شکل ۱ پارامترهای مختلف یک مقطع دایره ای از

ماکزیم بده نسبی با مشتق گرفتن از بده نسبی نسبت به عمق نسبی و مساوی صفر قرار دادن آن به دست می آید. این امر نشان می دهد که ماکزیم بده نسبی در  $y/d_0 = 0.97$  اتفاق می افتد. به همین ترتیب اگر از سرعت نسبی نسبت به عمق نسبی مشتق گرفته شود و مساوی صفر قرار داده شود ماکزیم  $V/V_0 = 0.94$  به دست می آید. اگر ضریب زبری ثابت می بود سرعت نسبی برای لوله پر و لوله نیمه پر سرعت نسبی یکسانی به دست می آمد (یعنی  $V/V_0 = 1.0$ ) در حالی که اگر تغییرات ضریب زبری با عمق نسبی در نظر گرفته شود، برای لوله نیمه پر نسبت فوق برابر  $0.8$  خواهد بود (۱۰).

صرفنظر از تغییرات ضریب زبری با عمق نسبی در مقاطع دایره ای، مطالعات اولیه این تحقیق نشان داد که ضریب زبری اسمی ثابتی که برای لوله های موجدار زهکشی منظور می شود به دلایل مختلف، ضریب مناسبی نمی باشد. به همین علت مطالعه حاضر صورت گرفت تا بر اساس شرایط واقعی جریان در لوله های موجدار نسبت به تعیین ضریب زبری مناسب اقدام شود. از آنجا که جریان در این لوله ها از نوع متغیر مکانی با سطح آزاد می باشد ابتدا نسبت به ارائه روابط حاکم بر آن اقدام کرده، پس از آن با مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج عددی که به ازای مقادیر اسمی ضرایب محاسبه شده اند میزان تفاوت را تعیین می کنیم. این تحقیق بر آن است که نشان دهد مقادیر واقعی ضرایب یاد شده از مقادیر اسمی تفاوت قابل توجهی دارند و عدم ملحوظ نمودن این تفاوتها در طراحی ها می تواند نتایج نامطلوبی داشته باشد.

### مواد و روشها

#### معادله حاکم بر جریان متغیر مکانی با افزایش بده در مقاطع دایره ای

پس از پیشنهاد نخستین شکل معادله حاکم بر جریان های متغیر مکانی،  $SVF^1$ ، با افزایش بده در مجاری روباز (۵)، محققین مختلف نسبت به ارائه صورت های کامل تری از معادله حاکم و بهبود روش های مختلف حل اقدام کرده اند (۱، ۲، ۳، ۶، ۷، ۹). با بکاربردن اصل بقای اندازه حرکت، معادله دینامیکی

تعیین می‌کند، یعنی:

$$S_o = \frac{gn^2 P}{(\beta + K_e) TR^{1/3}} + \frac{(2\beta + K_e)}{(\beta + K_e) T} \left[ (\beta + K_e) \frac{q_*^2 T}{gx} \right]^{1/3} - \frac{S_d}{T} \left( \frac{2A}{d_x} - y \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (۴)$$

زمانی مقطع بحرانی در انتهای پایین دست قرار می‌گیرد که شیب کف واقعی مجرا از مقدار  $S_o$  حاصل از معادله (۴) به ازای  $x=L$  کمتر باشد. در غیر اینصورت محل مقطع کنترل در فاصله بین انتهای بالادست و پایین دست مجرا رخ می‌دهد. حل معادله (۴) برای  $x$  به معادله (۵) منجر می‌شود که نشان دهنده موقعیت مقطع کنترل می‌باشد و باید با آزمون و خطا حل شود.

$$x = \frac{(2\beta + K_e)^3 q_*^2}{g(\beta + K_e)^2 T^2 \left( S_o - \frac{gn^2 P}{(\beta + K_e) TR^{1/3}} + \frac{S_d}{T} \left( \frac{2A}{d_x} - y \sin \frac{\theta}{2} \right) \right)^3} \quad (۵)$$

#### مراحل تعیین موقعیت مقطع کنترل

برای تعیین موقعیت مقطع کنترل باید مراحل زیر دنبال شود: (۱) ابتدا یک عمق بحرانی فرض می‌شود. این عمق را می‌توان، عمق بحرانی انتهای پایین دست به ازای کل بده تخلیه شده در نظر گرفت؛ (۲) با عمق یاد شده، پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مورد نیاز معادله (۵) شامل  $T$ ،  $A$ ،  $P$ ، و  $R$  محاسبه می‌شوند؛ (۳)  $x$ ، موقعیت مقطع کنترل، از معادله (۵) محاسبه می‌شود؛ (۴) بده مربوط به مقطع به این ترتیب تعیین می‌شود  $(Q = q_* x)$ ؛ (۵) عمق بحرانی برای بده محاسبه شده در مرحله (۴) تعیین می‌گردد؛ (۶) اگر عمق بحرانی محاسبه شده با عمق بحرانی مفروض برای دقت مورد نظر مساوی گردد،  $x$  نشان دهنده محل مقطع کنترل خواهد بود. در غیر اینصورت برای عمق بحرانی مرحله (۱) عدد دیگری انتخاب و مراحل عینا تکرار می‌شود. عمق بحرانی در هر مقطع از مساوی قرار دادن عدد فرود برابر واحد و حل معادله حاصل به روش عددی به دست می‌آید.

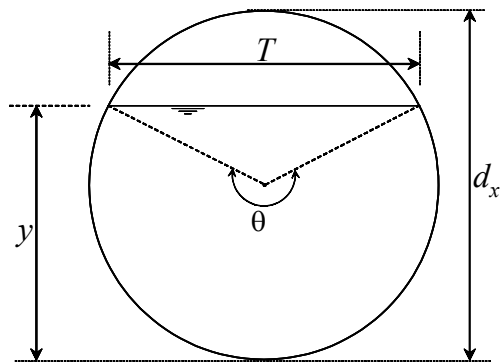
#### محاسبه پروفیل سطح آب

روش‌های عددی مختلفی برای انتگرال گیری از معادله دیفرانسیل جریان‌های متغیر مکانی با افزایش بده وجود دارد، در این مقاله از روش عددی نیوتن-رافسون استفاده خواهد شد.

#### حل معادله حاکم به روش نیوتن-رافسون

در جریان زیر بحرانی مقطع کنترل در پایین دست و در

قبیل، زاویه مرکزی،  $\theta$ ، محیط خیس شده،  $p$ ، مساحت سطح مقطع جریان،  $A$ ، عرض مجرا در سطح آزاد آب،  $T$ ، به ترتیب به کمک روابط  $P = \frac{\theta}{2} d_x$ ،  $\theta = 2\pi - 2\cos^{-1} \left( \frac{2y}{d_x} - 1 \right)$ ،  $A(x, \theta) = \frac{1}{8}(\theta - \sin \theta) d_x^2$  و قطر در مقطعی به فاصله معین  $x$  از رابطه  $d_x = d_u + S_d x$  به دست می‌آیند. در روابط فوق  $S_d$  = شیب تغییرات قطر در امتداد جریان؛  $d_u$  = قطر در بالادست لوله می‌باشد.



شکل ۱- پارامترهای هندسی مقطع دایره‌ای

برای ارائه معادله مربوط به مقطع دایره‌ای باید جملات  $\partial A / \partial x$  و  $\partial A / \partial y$  تعیین شده و در معادله (۲) جایگزین شوند. که مقادیر آنها به ترتیب برابر با  $\frac{\partial A(x, \theta)}{\partial x} = \frac{2S_d}{d_x} A - y S_d \sin \frac{\theta}{2}$  و  $\frac{\partial A(x, \theta)}{\partial y} = T$  می‌باشد و با جایگذاری آنها در معادله (۲) و ناچیز فرض کردن  $V_x$ ، معادله دینامیکی جریانهای متغیر مکانی با افزایش بده برای مقاطع دایره‌ای غیرمنشوری به دست می‌آید:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f - (2\beta + K_e) \frac{Q q_*}{g A^2} + (\beta + K_e) \frac{Q^2}{g A^3} \times S_d \left( \frac{2A}{d_x} - y \sin \frac{\theta}{2} \right)}{1 - (\beta + K_e) \frac{Q^2 T}{g A^3}} \quad (۳)$$

#### تعیین موقعیت مقطع کنترل و مشخصات هیدرولیکی آن

برای تعیین مشخصات مقطع کنترل و موقعیت آن در طول مجرا باید حالت خاصی را در نظر بگیریم که در آن صورت کسر معادله (۳) مساوی صفر شود. در این حالت مخرج آن نیز باید برابر صفر شود تا امکان برقراری جریان متغیر میسر باشد (۴). بنابراین همزمان با مساوی قرار دادن صورت و مخرج کسر برابر صفر به رابطه‌ای می‌رسیم که موقعیت و عمق مقطع کنترل را

$$\left[ \frac{T_j}{A_j^3} + \frac{2 \cotg \frac{\theta_j}{2} y_j}{A_j^3} - \frac{3T_j^2 y_j}{A_j^4} \right] - \frac{(\beta + K_e) Q_{j+1}^2 T_{j+1}}{2g A_{j+1}^3} + \frac{\Delta x (2\beta + K_e) q_e Q_j}{g} \times$$

$$\left[ \frac{T_j}{A_j^3} \right] + \frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d Q_j^2}{g d_j} \left[ \frac{-2T_j}{A_j^3} \right] - \frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d Q_j^2}{2g} \times$$

$$\left[ \frac{\sin \frac{\theta_j}{2}}{A_j^3} - \frac{3T_j y_j \sin \frac{\theta_j}{2}}{A_j^4} + \frac{2y_j \cotg \frac{\theta_j}{2}}{d_j A_j^3} \right] - \frac{\Delta x n^2 Q_j^2}{2A_j^{20/3}} \times$$

$$\left[ \frac{\frac{8}{3} P_j^{1/3} A_j^{10/3}}{\sin \frac{\theta_j}{2}} - \frac{10}{3} P_j^{4/3} A_j^{7/3} T_j \right] \quad (\lambda)$$

**جریان فوق بحرانی**

برای جریان فوق بحرانی هم با استفاده از تقریب تفاضل محدود برای شیب سطح آب، به کار بردن مقادیر متوسط عبارات یعنی مقادیر مربوط به مقطع معلوم J-1 و مقطع مجهول J-1 مرتب کردن جملات و تفکیک آنها بر اساس مقادیر مقطع معلوم و مقطع مجهول معادله حاکم به صورت زیر در می آید:

$$g(y_j) = -y_j - \frac{(\beta + K_e) y_{j-1}}{2g} \left( \frac{Q_{j-1}^2 T_{j-1}}{A_{j-1}^3} \right) + \frac{(\beta + K_e)}{2g} \left( \frac{Q_j^2 T_j y_j}{A_j^3} \right) + \frac{(\beta + K_e)}{2g} \times$$

$$\frac{Q_{j-1}^2 T_{j-1} y_{j-1}}{A_{j-1}^3} - \frac{\Delta x (2\beta + K_e) q_e Q_j}{2g A_j^2} + \frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d Q_j^2}{g d_j A_j^2} - \frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d}{2g} \times$$

$$\frac{Q_j^2 y_j \sin \frac{\theta_j}{2}}{A_j^3} - \frac{\Delta x n^2 Q_j^2 P_j^{4/3}}{2 A_j^{10/3}} + K' = 0 \quad (9)$$

که در آن K' برابر است با:

$$K' = y_{j-1} - \frac{(\beta + K_e) Q_{j-1}^2 T_{j-1} y_{j-1}}{2g A_{j-1}^3} - \frac{\Delta x (2\beta + K_e) q_e Q_{j-1}}{2g A_{j-1}^2} +$$

$$+ \frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d Q_{j-1}^2}{g d_{j-1} A_{j-1}^2} - \frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d Q_{j-1}^2 y_{j-1} \sin \frac{\theta_{j-1}}{2}}{2g A_{j-1}^3} +$$

$$S_o \Delta x - \frac{\Delta x n^2}{2} \left( \frac{Q_{j-1}^2 P_{j-1}^{4/3}}{A_{j-1}^{10/3}} \right) \quad (10)$$

مشتق تابع g(y<sub>j</sub>) با توجه به مقادیر T<sub>j</sub> = dA<sub>j</sub>/dy<sub>j</sub>،

$$\text{به } \frac{d\theta_j}{dy_j} = \frac{4}{d_x \sin \frac{\theta_j}{2}}, \quad \frac{dP_j}{dy_j} = \frac{2}{\sin \frac{\theta_j}{2}}, \quad \frac{dT_j}{dy_j} = 2 \cotg \frac{\theta_j}{2}$$

صورت زیر در می آید:

جریان فوق بحرانی مقطع کنترل در بالادست جریان می باشد. برای محاسبه پروفیل سطح آب محاسبات از جایی که عمق جریان معلوم باشد شروع می شود. بنابراین در جریان زیر بحرانی محاسبات از مقطع کنترل در پایین دست شروع شده و در جهت بالادست ادامه می یابد. اما در جریان فوق بحرانی محاسبات از مقطع کنترل در بالادست شروع شده و به طرف پایین دست ادامه می یابد.

برای حل معادله دینامیکی به روش نیوتن-رافسون، ابتدا باید آن را به فرم تفاضلی برای جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی نوشت.

**جریان زیر بحرانی**

با استفاده از تقریب تفاضل محدود برای شیب سطح آب، به کار بردن مقادیر متوسط عبارات یعنی مقادیر مربوط به مقطع معلوم J+1 و مقطع مجهول J-1 مرتب کردن جملات و تفکیک آنها بر اساس مقادیر مقطع معلوم و مقطع مجهول، معادله حاکم به صورت زیر در می آید:

$$f(y_j) = y_j + \frac{(\beta + K_e) y_{j+1}}{2g} \left( \frac{Q_j^2 T_j}{A_j^3} \right) - \frac{(\beta + K_e)}{2g} \left( \frac{Q_{j+1}^2 T_{j+1} y_{j+1}}{A_{j+1}^3} \right) - \frac{(\beta + K_e)}{2g} \times$$

$$\frac{Q_{j+1}^2 T_{j+1} y_{j+1}}{A_{j+1}^3} - \frac{\Delta x (2\beta + K_e) q_e Q_j}{2g A_j^2} + \frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d Q_j^2}{g d_j A_j^2} -$$

$$\frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d Q_j^2 y_j \sin \frac{\theta_j}{2}}{2g A_j^3} - \frac{\Delta x n^2 Q_j^2 P_j^{4/3}}{2 A_j^{10/3}} + K = 0 \quad (6)$$

که در آن مقدار K برابر است با:

$$K = -y_{j+1} + \frac{(\beta + K_e) Q_{j+1}^2 T_{j+1} y_{j+1}}{2g A_{j+1}^3} - \frac{\Delta x (2\beta + K_e) q_e Q_{j+1}}{2g A_{j+1}^2} +$$

$$\frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d Q_{j+1}^2}{g d_{j+1} A_{j+1}^2} - \frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d Q_{j+1}^2 y_{j+1} \sin \frac{\theta_{j+1}}{2}}{2g A_{j+1}^3} +$$

$$S_o \Delta x - \frac{\Delta x n^2}{2} \left( \frac{Q_{j+1}^2 P_{j+1}^{4/3}}{A_{j+1}^{10/3}} \right) \quad (7)$$

و مشتق تابع f(y<sub>j</sub>) با توجه به مقادیر T<sub>j</sub> = dT<sub>j</sub>/dy<sub>j</sub> = 2 cotg θ<sub>j</sub>/2

$$\text{به } \frac{d\theta}{dy_j} = \frac{4}{d_x \sin \frac{\theta_j}{2}}, \quad \frac{d\theta}{dy_j} = \frac{2}{\sin \frac{\theta_j}{2}}, \quad \frac{dP_j}{dy_j} = \frac{1}{2} d_x, \quad \frac{dA_j}{dy_j} = T_j$$

صورت معادله (۸) در می آید.

$$f'(y_j) = 1 + \frac{(\beta + K_e) y_{j+1} Q_j^2}{2g} \left[ \frac{2 \cotg \frac{\theta_j}{2}}{A_j^3} - \frac{3T_j^2}{A_j^4} \right] - \frac{(\beta + K_e) Q_j^2}{2g} \times$$

طول ۶ متر، عرض ۲۰ سانتیمتر و ارتفاع ۴۰ سانتیمتر می‌باشد و بر روی سکوی فلزی مستقر شده است. آب از یک مخزن ورودی واقع در بالادست فلوم پس از کاهش تلاطم به آرامی وارد کانال می‌شود. آب خروجی از پایین دست کانال به داخل مخزنی که مجهز به یک سرریز مثلثی بازویه رأس ۵۳ درجه است می‌ریزد و پس از عبور از روی سرریز مثلثی به مخزن ذخیره منتقل می‌شود. پمپ سیستم، آب را از مخزن ذخیره به داخل مخزن ورودی به فلوم پمپاژ می‌کند و به این ترتیب سیکل گردش آب کامل می‌شود.

در کف فلوم و در طول آن از پایین دست به بالادست سوراخ‌هایی به فواصل ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۳۰۰، ۳۰۰، ۳۰۰، ۱۲۰۰، ۹۰۰ و ۸۴۵ میلی‌متر تعبیه شده است که به کمک آنها امکان قرائت هد پیزومتریک میسر می‌شود. هیمنطور به منظور انجام آزمایشها علاوه بر کالیبراسیون سرریز مثلثی، برخی تغییرات در فلوم شامل نصب لوله‌های زهکش و حذف دریچه پایین دست آن ایجاد شد.

#### کالیبراسیون سرریز مثلثی

پیش از ایجاد تغییرات در فلوم، به منظور تعیین ضریب جریان سرریز مثلثی، اقدام به کالیبره کردن آن شد. کالیبراسیون به کمک اندازه‌گیری سرعت در کانال توسط میکرومولینه‌ای از تولیدات شرکت NIXON، صورت گرفت. رابطه سرریز مثلثی یادشده به صورت:

$$Q = 0.006371H^{2.5} \quad (12)$$

بدست آمده است. که در آن:  $Q = (l/s)$ ؛ و  $H =$  ارتفاع آب روی سرریز (cm). به این ترتیب با قرائت عمق آب روی سرریز مثلثی، به کمک رابطه (۱۲) بده تعیین می‌شود.

#### آماده سازی لوله ها و نصب آنها در کانال

در این پژوهش از لوله‌های موجدار متداول در طرح‌های زهکشی، با قطرهای ۱۱۵ و ۱۸۲ میلی‌متر استفاده شد. طول تمام لوله‌ها یکسان و برابر ۵/۷۱۵ متر بود. پیش از نصب هر لوله در کانال ابتدا تعداد ۱۲ مانومتر در کف آن نصب گردید طوری که بتوان لوله‌های پلاستیکی رابط را از بیرون کانال به محل مانومترها وصل کرد. سپس انتهای بالادست لوله مسدود شد تا ورود آب به داخل آن فقط از طریق شکاف‌های محیطی تعبیه شده در جدار لوله امکان پذیر باشد. لوله‌ها به این ترتیب آماده

$$g'(y_j) = -1 - \frac{(\beta + K_e)y_{j-1}Q_j^2}{2g} \left[ \frac{2 \cotg \frac{\theta_j}{2}}{A_j^3} - \frac{3T_j^2}{A_j^4} \right] + \frac{(\beta + K_e)Q_j^2}{2g} \times \left[ \frac{T_j}{A_j^3} + \frac{2 \cotg \frac{\theta_j}{2} y_j}{A_j^3} - \frac{3T_j^2 y_j}{A_j^4} \right] + \frac{(\beta + K_e)Q_{j-1}^2 T_{j-1}}{2g A_{j-1}^3} + \frac{\Delta x (2\beta + K_e) q_e Q_j}{g} \times \left[ \frac{T_j}{A_j^3} \right] + \frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d Q_j^2}{g d_j} \left[ \frac{-2T_j}{A_j^3} \right] - \frac{\Delta x (\beta + K_e) S_d Q_j^2}{2g} \left[ \frac{\sin \frac{\theta_j}{2}}{A_j^3} - \frac{3T_j y_j \sin \frac{\theta_j}{2}}{A_j^4} + \frac{2 \cotg \frac{\theta_j}{2} y_j}{d_j A_j^3} \right] - \frac{\Delta x n^2 Q_j^2}{2A_j^{20/3}} \times \left[ \frac{8}{3} P_j^{1/3} A_j^{10/3} - \frac{10}{3} P_j^{4/3} A_j^{7/3} T_j \right] \quad (11)$$

در این صورت بر اساس فرمول نیوتن-رافسون، عمق مفروض

جدید،  $y_{ass}$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(y_{ass})^{n+1} = y_{ass}^{(n)} - \frac{F(y_{ass}^{(n)})}{F'(y_{ass}^{(n)})}$$

#### مدل ریاضی

به منظور مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی با نتایج پروفیل‌های محاسبه شده ضروری بود که معادله حاکم بر جریان متغیر مکانی به روش عددی حل شود. به همین منظور بر اساس روابط ارائه شده در بخش قبلی مدلی تنظیم گردید که پروفیل سطح آب را در یک مجرای دایره‌ای تعیین می‌کند. برای تدوین این مدل از زبان Visual Fortran 6.5 استفاده شد.

#### مدل فیزیکی

به منظور دستیابی به داده‌های آزمایشگاهی مدلی در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران ساخته شد که در آن لوله‌های موجدار در داخل فلومی با جریان گردشی نصب می‌شود. شرح تفصیلی تجهیزات آزمایشگاهی به قرار زیر است.

#### تجهیزات آزمایشگاهی

مجموعه تجهیزات آزمایشگاهی که در این تحقیق به کار رفته است مطابق شکل ۲ از فلوم مستطیلی، مخزن ورودی به فلوم، دریچه قابل تنظیم پایین دست، مخزن اندازه‌گیری، مخزن ذخیره، و پمپ تشکیل شده است. فلوم مستطیلی شیشه‌ای به

محدوده آن هم بین ۰/۱ تا حدود ۱۶/۵ لیتر بر ثانیه بود. پس از نصب هر لوله ابتدا شیب تنظیم می‌شد و سپس حداقل بده مورد نظر وارد کانال می‌گردید، بعد از حصول اطمینان از پایداری جریان که باثبات رقوم سطح آب در مانومترها و بر روی سرریز مثلثی کنترل می‌شد، به قرائت مانومترهای متصل به لوله و کانال اقدام می‌شد. به این ترتیب پروفیل سطح آب درون لوله برای هر بده ثبت می‌شد. سپس با افزایش بده و تکرار مراحل فوق برداشت بعدی صورت می‌گرفت. پس از انجام برداشتها برای بده حداکثر، شیب طولی تغییر داده می‌شد و مجدداً برداشتها برای شیب جدید صورت می‌گرفت.

### نتایج

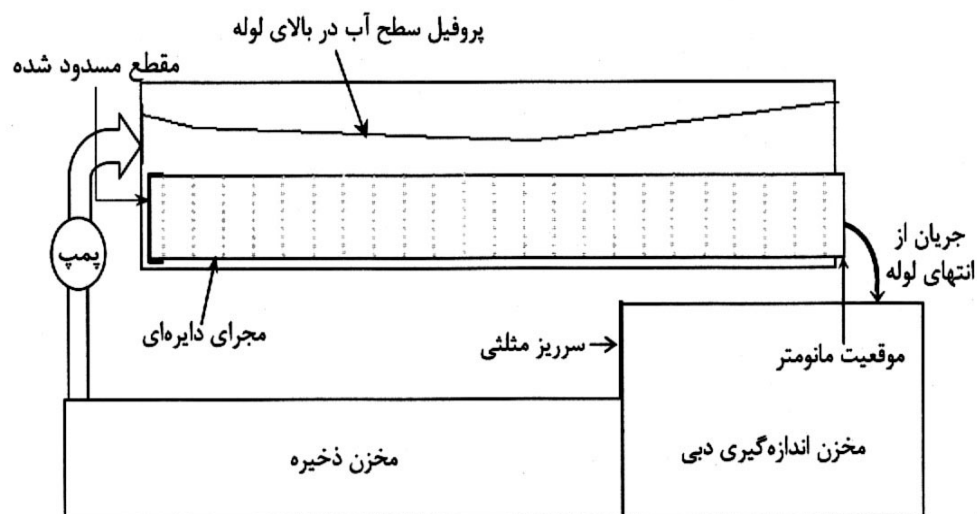
#### مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی با نتایج روش SVF

نتایج آزمایشگاهی برداشت شده در یک صفحه گسترده ثبت گردید و پروفیل سطح آب برای هر برداشت رسم شد. سپس برنامه SVF برای  $\beta=I$  و  $n$  اسمی متداول ( $n=0.014$ ) برای لوله‌های موجدار) برای شرایط آزمایشگاهی (از نظر قطر، بده، طول و شیب لوله) اجرا و پروفیل سطح آب براساس روش پیشنهادی نیوتن-رافسون رسم گردید. نمونه‌ای از نمودارهای پروفیل سطح آب مشاهده شده و محاسبه شده برای لوله‌های موجدار در شکل ۳ ارائه شده است.

استقرار در داخل کانال می‌شد. هر لوله طوری در کانال نصب می‌شد تا فاصله کف آن از بستر کانال مقداری ثابت باشد و شیب کف لوله مطابق با شیب طولی کف کانال باشد. برای مسدود نمودن انتهای پایین دست کانال طوری که خروج آب فقط از لوله امکان‌پذیر باشد از یک صفحه فیبر شیشه استفاده شد. ابتدا سوراخی به قطر لوله مورد آزمایش در صفحه فیبر شیشه‌ای تعبیه گردید و در انتهای پایین دست لوله و کانال نصب و آب‌بندی شد. پس از نصب این صفحه و آب‌بندی محل اتصال مانومترهای کف لوله به کف کانال، سیستم آماده بهره‌برداری می‌شد. به این ترتیب با راه‌اندازی پمپ، آب از مخزن بالادست وارد کانال شده و فقط از طریق سوراخهای موجود در جدار لوله به درون آن نفوذ می‌کرد و از انتهای باز پایین دست خارج می‌شد.

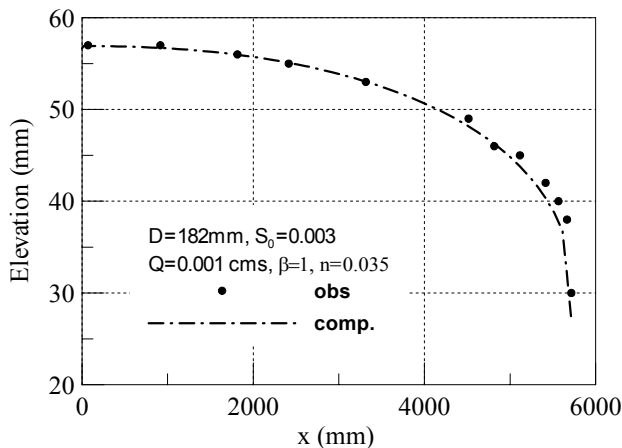
#### چگونگی انجام آزمایشها و برداشت داده‌ها

پس از نصب هر لوله در کانال، آزمایشها برای محدوده‌ای از شیب طولی صفر تا ۲/۵٪ انجام گردید. تدابیر متعددی برای کنترل شیب و اطمینان از ایجاد شیب‌های مورد نظر صورت گرفت که به دلیل اختصار از ذکر آنها خودداری می‌شود. با راه‌اندازی پمپ به کمک شیرهای لوله رانش و لوله کنارگذر، تنظیم بده، در محدوده وسیعی امکان‌پذیر می‌شد. آزمایش برای تمامی لوله‌ها از بده کم به زیاد صورت گرفت و



شکل ۲- نمای تجهیزات آزمایشگاهی به کار رفته در این تحقیق

مطلوب را ایجاد می‌نماید میسر شد. شکل ۴ که برای لوله‌های موجدار ترسیم شده است نشان می‌دهد که با تغییر ضریب زبری انطباق مطلوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی قابل حصول است.

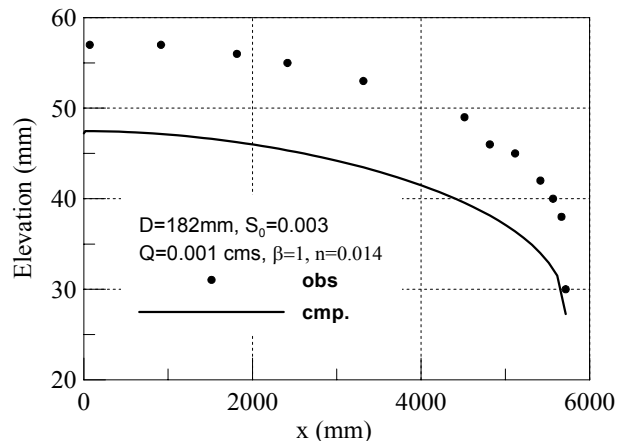


شکل ۴- مقایسه پروفیل سطح آب مشاهده شده و محاسبه شده براساس فرض  $\beta=1$  و  $n$  مناسب برای لوله‌های موجدار

با اجرای مدل برای تمامی برداشته‌ها، ضرایب زبری که انطباق مناسب ایجاد می‌کنند به دست آمد. قابل ذکر است که در این حالت ضریب تصحیح اندازه حرکت برابر واحد در نظر گرفته شده است. بررسی نتایج به دست آمده که در نمودارهای  $A2$  و  $B2$  شکل ۸ ترسیم شده است، نشان می‌دهد که تغییرات ضریب زبری مانینگ برای لوله‌های موجدار در محدوده  $0.027-0.037$  واقع می‌باشد.

اما اساساً در این نوع جریان توزیع سرعت در مقطع عرضی یکنواخت نیست و ضریب تصحیح اندازه حرکت نمی‌تواند برابر واحد باشد. از این رو با بکار بردن ضرایب زبری اسمی متداول و منسوب کردن تمام اختلاف پروفیل‌های مشاهده شده و محاسبه شده به ضریب تصحیح اندازه حرکت، مجدداً با استفاده از روش معکوس نسبت به تعیین ضرایب  $\beta$  که انطباق مناسب بین پروفیل‌ها را ایجاد می‌کند، اقدام گردید. شکل ۵ که برای لوله‌های موجدار به عنوان نمونه ارائه شده است، چگونگی انطباق پروفیل‌ها را با استفاده از  $\beta$  مناسب نشان می‌دهد. این امر باز هم با تکمیل مدل و اجرای آن برای حالت یاد شده صورت گرفت. در این حالت نیز نتایج ارائه شده در نمودارهای  $A3$  و  $B3$  شکل

مقایسه مجموعه شکل‌های مربوط که برای شیپها و قطرهای مختلف رسم شده است، نشان می‌دهد که پروفیل‌های محاسبه شده غالباً پایین‌تر از پروفیل‌های مشاهده شده قرار می‌گیرند (نمودارهای  $A1$  و  $B1$  شکل ۸ مربوط به لوله‌های موجدار). یادآوری می‌شود که این محاسبات با فرض توزیع یکنواخت سرعت در مقطع عرضی ( $\beta=1$ ) و به کار بردن ضرایب زبری اسمی متداول، صورت گرفته است.



شکل ۳- مقایسه پروفیل‌های سطح آب مشاهده شده و محاسبه شده براساس ضریب زبری اسمی و  $\beta=1$  در یک لوله موجدار

اما نحوه ورود آب به لوله که از طریق منافذ تعبیه شده در جدار لوله صورت می‌گیرد، پذیرش دو فرض فوق را مورد سوال قرار می‌دهد. زیرا که ورود جریان آب از این منافذ به درون لوله تقریباً عمود بر جهت جریان اصلی می‌باشد که هم می‌تواند اثر قابل توجهی بر توزیع یکنواخت سرعت در مقطع عرضی بگذارد و هم به دلیل ایجاد مقاومت در مقابل جریان، ضریب زبری ظاهری لوله را، به طور محسوس افزایش دهد. از این رو امکان انطباق پروفیل‌های مشاهده شده و محاسبه شده به روش معکوس باید بررسی شود.

#### تخمین ضریب زبری و تعیین اثر تفکیکی $n$ و $\beta$

در معادله حاکم بر جریان متغیر مکانی ضرایب زبری و تصحیح اندازه حرکت می‌توانند مستقیماً تحت تاثیر نحوه ورود آب از منافذ جدار لوله قرار گیرند. از این رو با تعدیل ضرایب یاد شده امکان انطباق پروفیل مشاهده شده و محاسبه شده بررسی گردید. با اصلاح مدل کامپیوتری بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، امکان تعیین ضرایب زبری مناسب که انطباق

در روابط فوق  $\theta$  = زاویه مرکزی سطح آزاد آب به رادیان؛  $y$  = عمق جریان در هر مقطع از لوله؛  $d$  = قطر لوله در هر مقطع؛  $p$  = محیط خیس شده؛  $A$  = سطح مقطع جریان؛  $R$  = شعاع هیدرولیکی. حال با تقریب شیب سطح آب به جای شیب خط انرژی در هر مقطع، اطلاعات لازم برای تعیین  $v^*$  فراهم می‌شود. به این ترتیب امکان محاسبه ضریب زبری شزی (و یا  $n$  مانینگ) در هر مقطع از طول لوله میسر می‌شود. شکل ۶ نمونه‌ای از تغییرات ضریب زبری مانینگ محاسبه شده به روش فوق را برای یکی از برداشته‌ها نشان می‌دهد. در این شکل علاوه بر تغییرات ضریب زبری، پروفیل سطح آب مشاهده شده نیز ترسیم شده است.

با پذیرش این ضرائب نسبت به تعیین  $\beta$  ای که بهترین انطباق را بین داده‌های آزمایشگاهی و محاسبه شده به وجود می‌آورد، اقدام شد. شکل ۷ نمونه‌ای از منحنی‌های یاد شده برای یک برداشت را نشان می‌دهد. این شکل انطباق مطلوب دو پروفیل را به خوبی نشان می‌دهد. بررسی ضرائب زبری مانینگ محاسبه شده بر اساس روش فوق (در نمودارهای  $A4$  و  $B4$  شکل ۸ ترسیم شده است) نشان می‌دهد که می‌توان ضرائب متوسط  $n=0.024$  را به لوله‌های موجدار منسوب کرد.

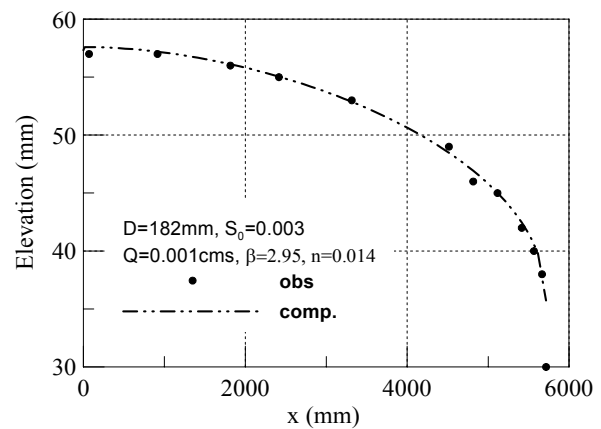
#### – طبقه بندی جریان

انواع سه گانه جریان-صاف، انتقالی و کاملاً زبر به کمک عدد رینولدزی که با استفاده از سرعت برشی محاسبه می‌شود، قابل تمایز هستند. جریان منطقه انتقال حدوداً با دامنه  $100 < \frac{v^* k_s}{\nu} < 4$  تعیین می‌شود<sup>۲</sup>. حد تحتانی، پایان منطقه صاف و حد فوقانی، شروع منطقه کاملاً زبر را تعیین می‌کند. برای طبقه بندی جریان براساس معیار فوق، باید ضریب زبری مطلق مؤثر،  $k_s$ ، مشخص باشد. اما مقادیر  $k_s$  برای لوله‌های یاد شده گزارش نشده است. بنابراین برای طبقه بندی جریان باید از روش دیگری بهره گرفت. ثابت می‌شود که اگر رابطه زیر در یک جریان برقرار باشد، جریان متلاطم کاملاً زبر برقرار خواهد بود (۴).

$$n^6 \sqrt{RS_f} \geq 1.9 \times 10^{-13}$$

در این معادله  $R$  شعاع هیدرولیکی برحسب فوت است و  $S_f$  شیب خط انرژی است.

۸ نشان می‌دهد که تغییرات ضریب  $\beta$  برای لوله‌های موجدار در دامنه ۱.۸-۲.۹۵ قرار می‌گیرد.



شکل ۵- مقایسه پروفیل‌های مشاهده شده با به کار بردن  $n$  اسمی و منسوب نمودن تمام اختلاف به  $\beta$ ، برای یک لوله موجدار

تعیین ضرائب افت ( $f$  داریسی ویسیاخ،  $C$  ضریب شزی و یا  $n$  مانینگ) در حالت کلی (جریان‌هایی که از نظر هیدرولیکی صاف، کاملاً زبر یا بینابین هستند) به کمک عدد رینولدز و با در اختیار داشتن زبری نسبی امکان‌پذیر است. از آنجا که زبری مطلق مؤثر در این لوله‌ها تعیین نشده است، امکان ارائه ضرائب افت به شکل فوق میسر نمی‌باشد. به همین دلیل باید به دنبال روشی بود که بتواند ضریب زبری را بدون نیاز به مقدار زبری مطلق مؤثر،  $k_s$ ، برآورد نماید.

می‌دانیم که رابطه بین نسبت سرعت برشی،  $v^* = \sqrt{gRS_f}$  و ضرائب شزی و داریسی ویسیاخ به صورت زیر ارائه شده است (۴).

$$\frac{V}{v^*} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \sqrt{f}$$

حال با داشتن سرعت برشی و سرعت جریان در هر مقطع می‌توان ضرائب مقاومت را تخمین زد. عمق جریان در طول لوله و در هر برداشت معلوم است. سطح مقطع، محیط خیس شده، و شعاع هیدرولیکی را می‌توان به کمک روابط زیر تعیین کرد:

$$\theta = 2\pi - 2 \cos^{-1} \left( \frac{2y}{d} - 1 \right)$$

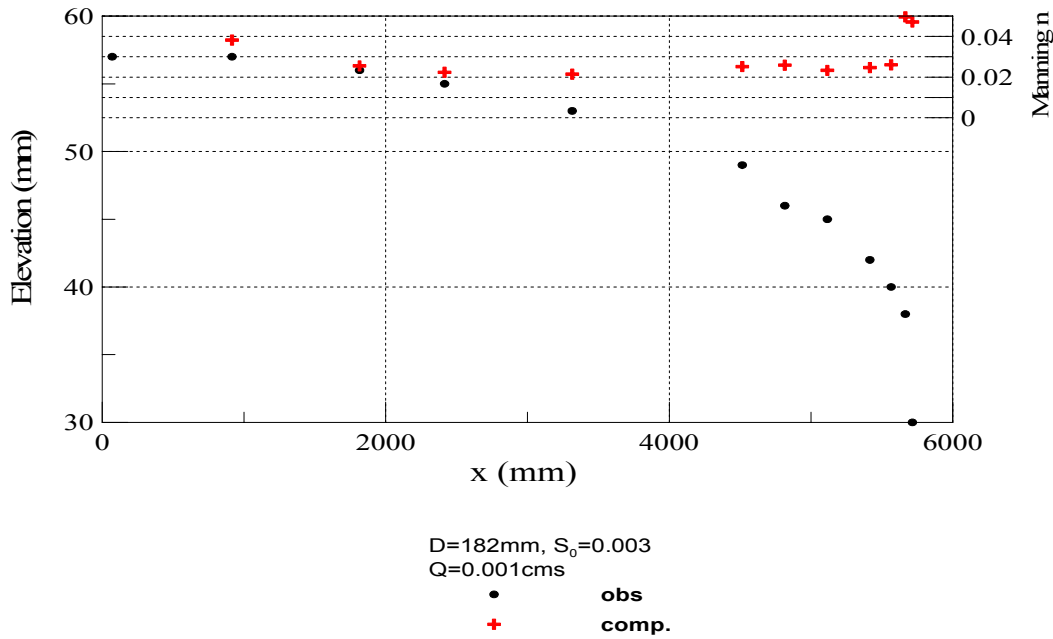
$$p = \frac{1}{2} \theta d$$

$$A = \frac{1}{8} (\theta - \sin \theta) d^2$$

$$R = \frac{A}{p}$$

۲ حد فوقانی در مراجع مختلف بین ۷۰ تا ۱۰۰ ذکر شده است.



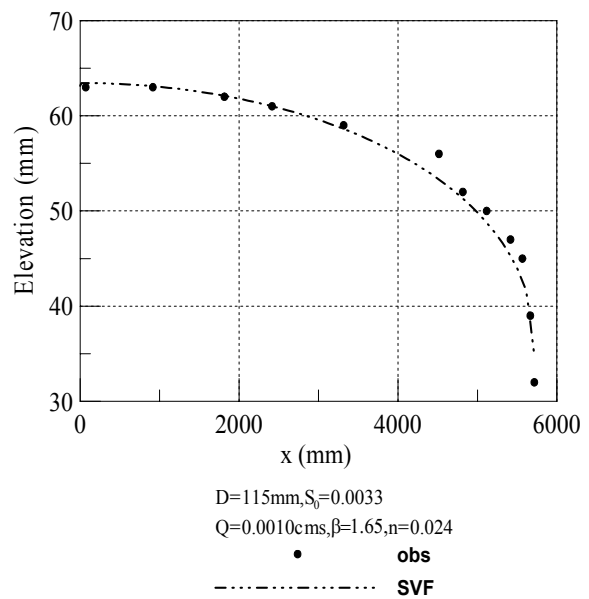


شکل ۶ - تغییرات ضریب زبری مانینگ در طول لوله برای یکی از برداشتها در لوله موجدار

محدوده متلاطم بینابینی است. اما با اعمال ضریب زبری اسمی، جریان در منطقه انتقالی قرار می‌گیرد.

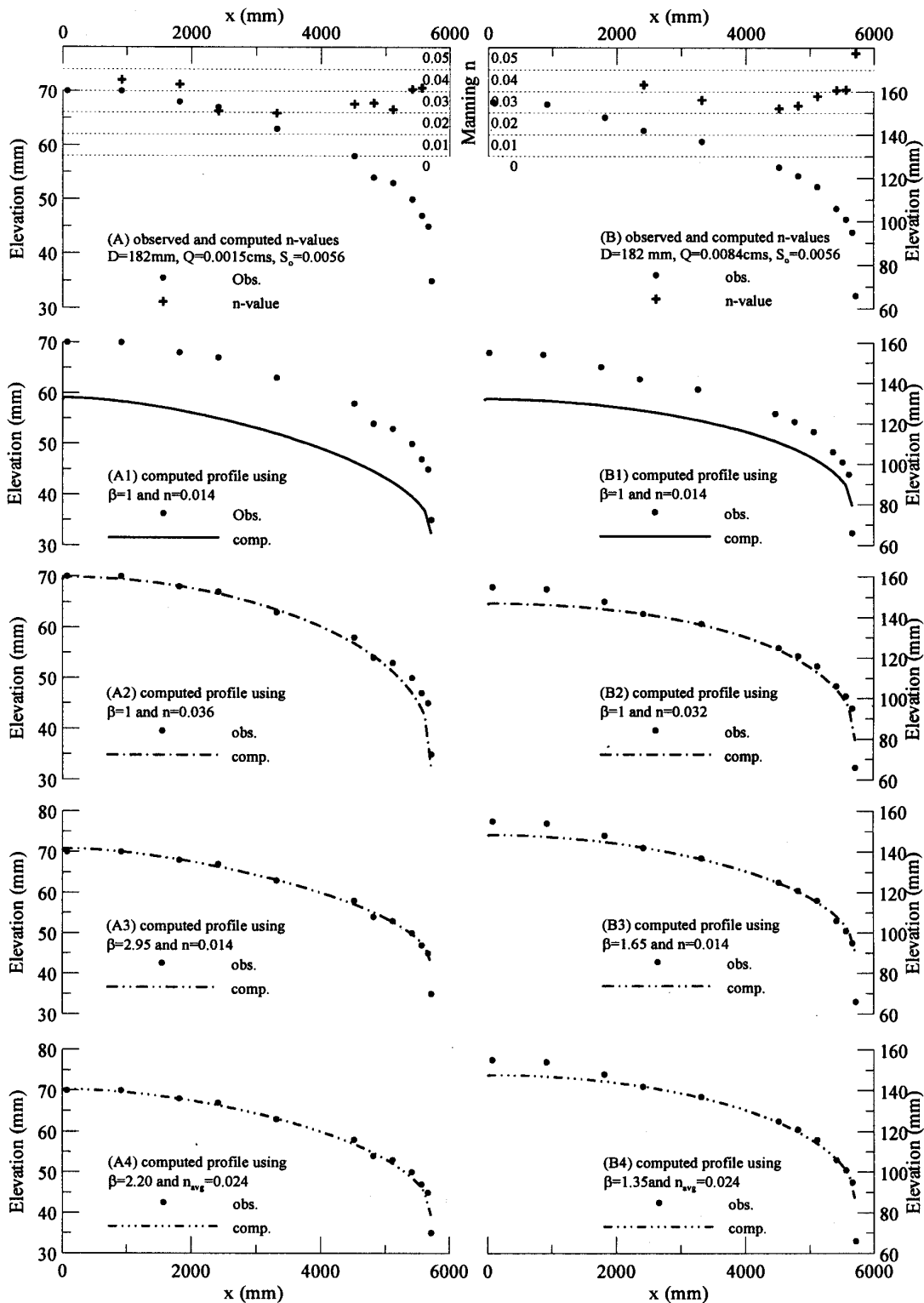
**نتیجه گیری**

ثبت نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که جریان در لوله‌ها با سطح آزاد می‌باشد. پروفیل سطح آب محاسبه شده به روش جریان متغیر مکانی با سطح آزاد بر اساس ضرائب زبری اسمی متداول و فرض ضریب تصحیح اندازه حرکت واحد، غالباً پایین تر از پروفیل‌های مشاهده شده بود. ضرائب زبری و تصحیح اندازه حرکت تنها عواملی بودند که در انطباق پروفیل‌های یاد شده می‌توانستند نقش عمده‌ای داشته باشند. زیرا با توجه به شرایط آزمایش، فرض‌های انجام شده در استخراج معادلات جریان متغیر مکانی صادق بودند. به عبارت دیگر نحوه ورود جریان به داخل لوله هم می‌توانست در افزایش مقاومت ظاهری نقش داشته باشد و هم بر عدم یکنواختی توزیع سرعت در مقطع عرضی موثر باشد. از این رو تعیین آثار تفکیکی این دو پارامتر از اهمیت زیادی برخوردار است. از آنجا که ارتفاع زبری معادل لوله‌ها گزارش نشده است، با تخمین ضریب زبری در هر بده و متوسط گیری از نتایج، ضریب زبری 0.024 برای لوله‌های موجدار پیشنهاد شد. همچنین با اعمال ضریب زبری یاد شده مقادیر ضریب تصحیح اندازه حرکتی که انطباق مطلوبی بین پروفیل‌های مشاهده شده و محاسبه شده به وجود می‌آورد، به دست آمد.



شکل ۷- مقایسه پروفیل‌های مشاهده شده و محاسبه شده با اعمال ضرائب زبری و تصحیح اندازه حرکت پیشنهادی برای یکی از برداشتها لوله موجدار

برای بررسی جریان در لوله‌های مورد آزمایش در هر مقطع یکبار نامعادله فوق برای  $n$  اسمی متداول و باردیگر برای  $n$  متوسط حل شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در صورت بکار بردن  $n$  متوسط پیشنهادی اغلب مقاطع، دارای جریان کاملاً زبر هستند. و در مقاطع بالادست لوله نوع جریان تقریباً در انتهای



شکل ۸- نتایج مقایسه پروفیل‌های محاسبه شده و مشاهده شده در حالت‌های مختلف برای لوله موجدار

### سپاسگزاری

هزینه‌های تحقیق این پروژه در قالب قرارداد پژوهشی شماره ش پ/۳۴۴/۸۰ با معاونت امور پژوهشی سازمان مدیریت منابع آب ایران، انجام شده است که بدین وسیله از ایشان تشکر و قدردانی می‌شود.

این تحقیق در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه آبیاری دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران انجام شده است. بخشی از

## REFERENCES

## مراجع مورد استفاده

۱. کوچک‌زاده، ص. ۱۳۶۷. حل عددی معادلهٔ پروفیل سطح آب در کانالهای سرریز جانبی با مقاطع اختیاری، مجلهٔ آب، شمارهٔ ۸.
2. Chow, V. T. 1959. Open Channel Hydraulics. Mc Graw-Hill. New York.
3. Chow, V. T. 1969. Spatially Varied Flow Equations. Water Resources Research, Vol. 5: 1124-1128.
4. Henderson, F. M. 1966. Open Channel Flow. Mac Millan Pub. Co. New York.
5. Hinds, J. 1926. Side channel Spillway. Trans ASCE, Vol. 89:881-927.
6. Kouchakzadeh, S. and Vatankhah, A.R. (2002) Spatially varied flow in non-prismatic channels I: Dynamic equation, Journal of Irrigation and Drainage, International commission on Irrigation and Drainage (ICID), Vol. 51(1) pp.41-50.
7. Mc Cool ,D. K. , W. R. Gwinn, W. G. Ree and J. E. Garton. 1966. Spatially varied Flow in Vegetated Channel Trans. ,ASAE, Vol. 9, (3): 440-444.
8. Subramanya, K. 1989. Flow in Open Channel ,First Revised Edition, Tata McGraw-Hill, New Delhi
9. Yen, B.C. and Wenzel, H.G.Jr. 1970. Dynamic Equations for Steady Spatially Varied Flow. J. of Hydr. Div., Vol. 96. HY3: 801-814.
10. Zaghoul, N.A. 1998. Flow Simulation in Circular Pipes with Variable roughness using SWMM-EXTRAN model. J. of Hydra. Engrg. Vol. 124, No. 1:73-76.

## **Determination of Roughness Coefficient for Corrugated Drainage Pipes Based on Real Flow Conditions**

**S. KOUCHAKZADEH<sup>1</sup> AND F. BAGHERI<sup>2</sup>**

**1, 2, Associate Professor and Irrigation Engineer, Faculty of Agriculture,  
University of Tehran, Karaj, Iran**

**Accepted April. 30, 2002**

### **SUMMARY**

The roughness coefficient of the corrugated drainage pipes (the nominal coefficient) that is found in the literature is applicable for uniform hydraulically rough turbulent flow. While, the flow condition in these pipes is turbulent spatially varied flow but either hydraulically rough or in the transition region. In spatially varied flow, tiny jets enter the pipe normal to the main flow direction and penetrate into the main stream which in turn drastically affect the velocity distribution across the channel and hinder the flow movement in the main flow direction. The first effect necessitates the application of the momentum correction factor, while the second one increases the nominal friction coefficient of the pipe. In this research the influence of the mentioned factors were examined using an experimental setup. Based on the governing equation of the spatially varied flow with increasing discharge in circular pipes the water surface profiles were determined and compared with the observed ones. The comparison indicated that computed profiles, based on assuming uniform velocity distribution and applying the nominal roughness coefficient, differ from that of observed ones. However, modifying the roughness coefficient and momentum correction factor produced good agreements between them. Consequently, based on the computed roughness coefficient and momentum correction factor, average values for the mentioned coefficients were proposed.

**Key words:** Corrugated pipes, Spatially varied flow, Resistance coefficient, Momentum correction factor.