

## مطالعه آزمایشگاهی رابطه بده و عمق لبریزی در مقاطع دایره‌ای با جریان متغیر مکانی

### صلاح کوچکزاده و عاطفه پرورش ریزی

گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۱/۵/۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۲/۵/۱۲

### چکیده

جریان در مقطع لبریز مجاری روباز، یک جریان خودواسنجی شده است؛ به طوری که می‌توان با اندازه‌گیری عمق، مقدار بده خروجی از مقطع را تعیین کرد. این موضوع در جریان‌هایی که بده در طول کانال ثابت است، برای مجاری با هندسه مقطع مختلف و رژیم جریان زیربحرانی یا فوق‌بحرانی، مورد مطالعه گسترده قرار گرفته است. اما در مورد رابطه بده و عمق لبریزی در مجاری با جریان متغیر مکانی تاکنون مطلبی منتشر نشده است. در مقایسه با جریان با بده ثابت، ارائه مدل تحلیلی برای یافتن رابطه بده و عمق لبریزی در این نوع جریان، به دلیل نامشخص بودن برخی از عوامل مؤثر، مانند شکل توزیع فشار در طول کانال دشوار است. در این تحقیق، با ایجاد یک مجموعه آزمایشگاهی، این رابطه در جریان متغیر مکانی با افزایش بده برای مقطع دایره‌ای شکل مورد بررسی قرار گرفته است. برای شیب‌های ملایم و مقطع دایره‌ای با قطرهای متفاوت، نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اعماق لبریزی اندازه‌گیری شده،  $e$  و بحرانی محاسبه شده،  $e_c$  در این نوع جریان به هم نزدیکتر هستند تا در جریان با بده ثابت. این در حالی است که نتیجه اندازه‌گیری‌ها همچنان توزیع غیر هیدروستاتیک فشار در مقطع لبریزی را تأیید می‌کند. بر اساس نتیجه بدست آمده که به ویژگی جریان متغیر مکانی باز می‌گردد، می‌توان ارتباط بین بده اندازه‌گیری شده و بده محاسبه شده را تحلیل کرد. بر این مبنا، معادله‌ای برای برآورد عمق بحرانی به کمک عمق لبریزی پیشنهاد گردید که به وسیله آن امکان تعیین بده با دقت مطلوب میسر شد.

**واژه‌های کلیدی:** نسبت لبریزی، جریان متغیر مکانی، اندازه‌گیری بده، جریان زیربحرانی، توزیع فشار

### مقدمه

وارد کردن فرضیات و تقریب‌هایی، از مبانی اولیه هیدرولیک سود جسته‌اند. در این مطالعات، نتایج آزمایشگاهی اغلب به نتایج کاربردی منجر شده‌اند، اما بسط معادلات حاکم و شکل ریاضی مسئله با پیچیدگی‌هایی همراه است. به طور کلی می‌توان ۳ عامل را در معادلات حاکم بر مسئله وارد کرد: هندسه کانال، رژیم

قریب نیم قرن است که مسئله جریان از روی لبریز کانال به دلیل جنبه‌های کاربردی و همین‌طور دربرداشتن مفاهیم اصولی هیدرولیک مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. حل عددی مطالعات هیدرودینامیک جریان در لبریز، به دلیل شرایط مرزی غیر خطی و پیچیده آن، هنوز میسر نشده است. به همین علت تمامی تحلیل‌ها با



لبریز در کانال مستطیلی به‌کار برد. وی با در نظر گرفتن انحناهای خطوط جریان در لبریز و با آزمون توزیع‌های مختلف فشار، به ضرایب تجربی توزیع فشار دست یافت. مارشی (۱۹۹۳)، جریان دوبعدی روی لبریز را با استفاده از تئوری امواج مخروطی حل کرد و دی (۱۹۹۸) یک مدل تحلیلی برای کانالهای دایره‌ای شکل با جدار صاف ارائه کرد که بر مبنای معادله مومتم با تقریب بوزینسک پایه‌ریزی شده بود. این مدل نیاز به تخمین ضریب تجربی فشار در مقطع لبریزی را حذف کرد و نتایج آن تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی راجاراتنام و مورالیدر (۱۹۶۴) و اسمیت (۱۹۶۲) نشان داد.

تاکنون بررسیها برای حالتی انجام شده‌اند که بده جریان در طول کانال ثابت است. در جریان با بده ثابت ممکن است که در بازه‌ای مانند بالادست لبریز کانال، میزان عمق آب تابعی از فاصله باشد (برخی از محققین مانند دی آن را جریان شبه یکنواخت<sup>۵</sup> نامیده‌اند)؛ و یا اینکه در طول یک بازه میزان عمق ثابت باشد (جریان یکنواخت). در این تحقیق رابطه بده و عمق لبریزی زمانی که جریان متغیر مکانی با افزایش بده در یک مقطع دایره‌ای حاکم است، مورد مطالعه قرار گرفته است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی این تحقیق با نتایج محققین دیگر و همچنین با ستاده‌های مدل تحلیلی دی (۱۹۹۸) که برای جریان با بده ثابت ارائه شده است، نشان داد که این دو نوع جریان شرایط متفاوتی در مقطع لبریزی دارند و استفاده از نسبت لبریزی متعارف برای برآورد بده زمانی که جریان متغیر مکانی در لوله جریان دارد با خطای قابل توجهی همراه است. از این رو برای تعیین بده جریان در مقطع دایره‌ای هنگامی که جریان متغیر مکانی در لوله جاری است مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفت که نتایج آن در این مقاله منعکس شده است.

جریان (فوق بحرانی یا زیربحرانی بودن جریان) و ثابت یا متغیر بودن بده در طول کانال.

رابطه بده و عمق لبریزی برای مقاطع با شکل هندسه متفاوت با روشهای مختلف به دست آمده است و در برخی از این روش‌ها به تأثیر رژیم جریان نیز توجه شده است. ولی تاکنون تحلیل یا داده‌های آزمایشگاهی در مورد این رابطه در جریان‌های با بده متغیر مکانی<sup>۱</sup> منتشر نشده است. راوس (۱۹۳۶) نسبت عمق لبریزی به عمق بحرانی، یا نسبت لبریزی در یک کانال مستطیلی با بده ثابت و شیب ملایم را برابر با  $0.715$  بدست آورد. پس از انتشار یافته‌های راوس مطالعات فراوانی برای تعیین دقیق‌تر این نسبت انجام گرفت که بررسیهای اسمیت (۱۹۶۲)، و راجاراتنام و مورالیدر (۱۹۶۴ و ۱۹۶۸) از گسترده‌ترین آنها به شمار می‌روند. یاگر (۱۹۴۸) معادلات مومتم و انرژی را با استفاده از تقریب بوزینسک<sup>۲</sup> برای محاسبه نسبت لبریزی به کاربرد. راجاراتنام و مورالیدر (۱۹۶۴) به کمک نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که در مقاطع مختلف کانالها نسبت لبریزی در رژیم زیر بحرانی تقریباً مقداری ثابت است؛ اما در رژیم فوق بحرانی با افزایش نسبت شیب طولی کانال به شیب بحرانی،  $S/S_c$ ، نسبت لبریزی به شدت افزایش می‌یابد. راوس (۱۹۴۳) و علی و سیکز (۱۹۷۲) با کمک نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که نسبت لبریزی در رژیمهای فوق بحرانی، به مقدار عدد فرود در بالادست بستگی دارد. در این رژیم، خطوط جریان در لبریز کانال تقریباً موازی‌اند و فشار از توزیع یدروستاتیک پیروی می‌کند. علی و سیکز (۱۹۷۲) معادله مومتم، تئوری چرخش آزاد<sup>۳</sup> و همینطور روش تخفیف<sup>۴</sup>، ارائه شده توسط مارکلند (۱۹۶۵)، را برای جریان‌های فوق بحرانی بکار بردند و در هر سه روش تأثیر عدد فرود بالادست بر میزان عمق لبریزی را تأیید کردند. هیگر (۱۹۸۳) معادلات مومتم و انرژی را برای مطالعه جریان



- 1-Spatially vari flow
- 2-Boussinesq Approximation
- 3-Free vortex theory
- 4-Relaxation Method

تغییرات تدریجی سطح مقطع؛  $Q$ ، بده در هر مقطع؛  $q^*$ ، تغییرات بده در طول لوله؛  $A$ ، سطح مقطع جریان در هر مقطع؛  $V_x$ ، مولفه سرعت جریان ورودی در جهت جریان و  $y$ ، عمق آب در مجرا است. با در نظر گرفتن شکل ۱ که پارامترهای شکل مقطع دایره‌ای را نشان می‌دهد، معادله [۱] برای این مقاطع به صورت زیر در می‌آید (کوچک زاده، ۱۳۸۱):

[۲]

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f - (2\beta + k_e) \frac{Qq^*}{gA^2} + (\beta + k_e) \frac{Q^2}{gA^3} S_o \left( \frac{2A}{d_x} - y \sin \frac{\theta}{2} \right)}{1 - (\beta + k_e) \frac{Q^2 T}{gA^3}}$$

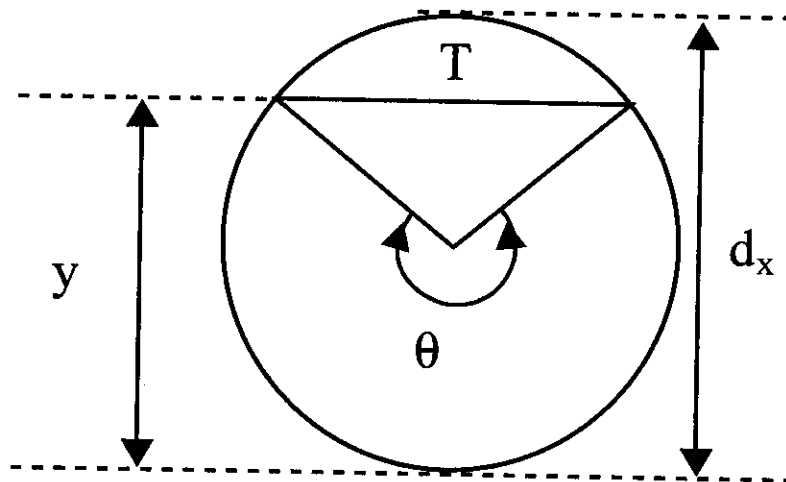
که در آن  $d_x$  قطر در مقطعی به فاصله  $x$  از بالادست؛  $S_o$ ، نسبت تغییرات قطر به طول مجرا؛  $A$ ، سطح مقطع جریان و  $T$  عرض سطح آزاد آب است.

## مواد و روشها

روابط حاکم بر جریان متغیر مکانی در مقطع دایره‌ای: از آنجا که بررسی شرایط جریان متغیر مکانی در مقطع لبریزی و در جاری دایره‌ای مدنظر است، ضروری است که به معادلات حاکم بر این جریان و کاربرد آنها در این تحقیق اشاره شود. اولین مطالعات در مورد جریان متغیر مکانی توسط هندز (۱۹۲۶) صورت گرفت که منجر به ارائه معادله حاکم بر این نوع جریان شد. سپس محققین مختلفی مطالعات را ادامه داده و به فرم کاملتری از معادلات حاکم دست یافتند. کوچک‌زاده و وطن‌خواه (۲۰۰۲)، معادله [۱] را برای جریان متغیر مکانی با افزایش بده در کانال غیرمنشوری ارائه کردند:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f - (2\beta + k_e) \frac{Qq^*}{gA^2} + (\beta + k_e) \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{q \cdot V_x}{gA}}{1 - (\beta + k_e) \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial y}} \quad [1]$$

که در آن  $S_o$ ، شیب کانال؛  $S_f$ ، شیب خط انرژی؛  $\beta$ ، ضریب تصحیح اندازه حرکت؛  $k_e$ ، ضریب مربوط به



شکل ۱- مشخصات هندسی و جریان در مقطع دایره‌ای

همزمان مساوی صفر قرار داد و نتایج را ساده کرد (هندرسون، ۱۹۶۶)، تا معادله [۳] بدست آید (کوچک‌زاده، ۱۳۸۱) که در آن  $x$ ، موقعیت وقوع عمق بحرانی نسبت به انتهای بالادست کانال؛  $P$ ، محیط خیس شده و  $\Pi$  ضریب زبری مانینگ است.

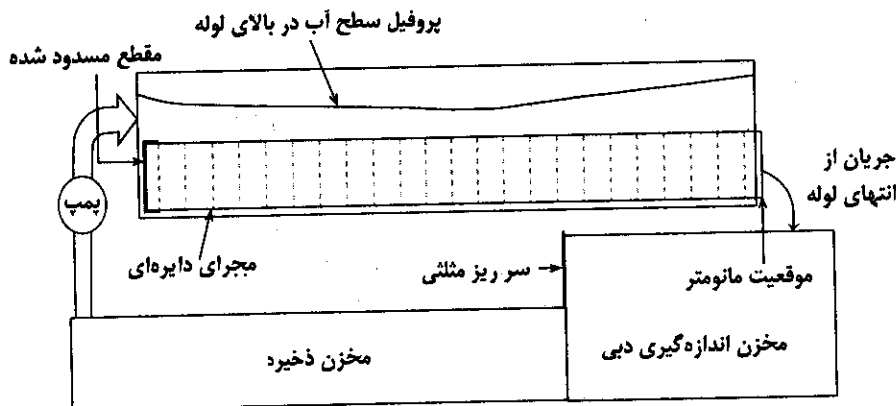
در این مطالعه به دلیل منشوری بودن مجرا،  $S_o$  برابر صفر است و مقادیر  $\beta$  و  $k_e$  به ترتیب برابر یک و صفر در نظر گرفته شده‌اند. مقدار  $S_f$  بر اساس معادله مقاومت جریان مانینگ جایگزین می‌شود.

برای یافتن موقعیت مقطع کنترل، جایی که عدد فرود برابر با واحد است، باید صورت و مخرج معادله [۲] را

۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر با جریان گردش آب استفاده شد. به‌منظور ایجاد جریان متغیر مکانی با افزایش بده در مقطع دایره‌ای، سه لوله با قطرهای ۹۰، ۱۱۸ و ۱۵۰ میلی‌متر به کار رفت که طول هر لوله ۵/۷ متر بود. این لوله‌ها مطابق شکل ۲ در داخل فلوم نصب شدند. قبل از استقرار لوله در فلوم ابتدا محل نصب مانومترها بر کف لوله آماده گردید سپس در کف کانال و درست در محل مانومترهای لوله سوراخهایی ایجاد شد که شیلنگهای رابط از این سوراخها عبور می‌کرد. پس از نصب لوله در فلوم و اتصال شیلنگ‌های مانومترها و آییندی کردن اطراف آن لوله در محل خود مستقر گردید.

$$x = \frac{(2B+k_c)^3 q^2}{g(B+k_c)^2 T^2 \left[ S_0 - \frac{gn^2P}{(B+k_c)TR^{1/3}} + \frac{S_0}{T} \left( \frac{2A}{gx} - y \sin \frac{\theta}{2} \right) \right]^3}$$

به‌منظور تعیین مقدار و موقعیت عمق بحرانی در مجاری دایره‌ای با جریان متغیر مکانی، یک برنامه کامپیوتری تدوین گردید که معادلات فوق را با روش عددی نیوتن - رافسون حل می‌کند. برای اطمینان از وقوع یا عدم وقوع عمق بحرانی در انتهای پایین دست در مجاری با جریان متغیر مکانی، استفاده از این برنامه ضروری است. تجهیزات و مشاهدات آزمایشگاهی: در راه‌اندازی مجموعه آزمایشگاهی از یک فلوم به طول ۶ متر، عرض



شکل ۲- نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی



رأس ۵۳ درجه مجهز بود که امکان اندازه‌گیری بده را فراهم می‌کرد. در هر آزمایش با شیب طولی و قطر مقطع مشخص، مقادیر عمق در مقطع لبریزی،  $y_e$ ، عمق مانومتری در مجاورت مقطع لبریزی،  $y_m$  و بده خروجی از انتهای پایین دست لوله،  $Q_1$  اندازه‌گیری شدند. علاوه بر ثبت  $y_m$  در نقطه لبریزی، مقدار ارتفاع پیزومتریک تا چند نقطه در بالادست مقطع لبریزی نیز ثبت شد. جدول ۱ محدوده بده، شیب طولی و قطر لوله‌های بکار رفته در این مطالعه را نشان می‌دهد.

در طول هر لوله و در پیرامون آن سوراخهایی با قطر ۳/۵ میلی‌متر ایجاد شد و انتهای لوله که در مجاورت ورود آب به فلوم قرار داشت مسدود گردید. این کار باعث می‌شود که آب فقط از سوراخهای پیرامون لوله و در اثر ارتفاع آب موجود در فلوم، به درون لوله راه یابد. آزمایشات به این ترتیب صورت گرفت که برای هر شیب طولی مشخص، بده‌های ورودی به سیستم به کمک شیرهای نصب شده بر روی لوله رانش پمپ تنظیم می‌شد. آب به داخل فلوم وارد شده و از انتهای پایین دست لوله به درون مخزن اندازه‌گیری ریزش می‌کرد. مخزن اندازه‌گیری به سرریز مثلی و اسنجی شده با زاویه

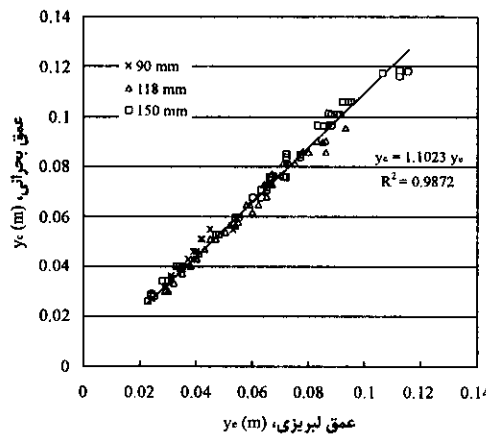
جدول ۱- محدوده بده‌های اندازه‌گیری شده در شیبه‌ها و قطرهای مختلف.

شیب	محدوده بده‌ها (لیتر بر ثانیه)		قطر (میلی‌متر)
	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۴۵	
۹۰	۰/۷-۴/۰	۱/۰-۳/۳	---
۱۱۸	۱/۰-۱۱/۳	۱/۰-۱۲/۰	۲/۲-۱۰/۷
۱۵۰	۱/۰-۱۶/۵	۱/۰-۱۶/۲	۱/۵-۱۶/۰

### بحث و تحلیل داده‌ها

کل بده ورودی به لوله، از مقطع لبریزی در انتهای پایین دست لوله خارج می‌شود و این بده توسط سرریز مثلی اندازه‌گیری می‌شود. با معلوم بودن بده، محاسبه مقدار عمق بحرانی امکان پذیر است. بدین ترتیب امکان مقایسه عمق بحرانی محاسبه شده در هر آزمایش،  $y_c$  با عمق مشاهده شده در مقطع لبریز،  $y_e$  وجود دارد. اجرای مدل رایانه‌ای برای تعیین موقعیت مقطع کنترل و مقدار

عمق آن در محدوده قطر و شیبه‌های طولی بکار رفته در تحقیق، نشان داد که تمامی شیبه‌ها ملایم هستند و رژیم جریان در طول لوله‌ها زیربحرانی است. اعماق بحرانی محاسبه شده در برابر اعماق لبریزی اندازه‌گیری شده در شکل ۳ ترسیم شده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که در لوله‌های حامل جریان متغیرمکانی با شیبه‌های طولی ملایم، مقادیر اعماق بحرانی و اعماق لبریزی به هم نزدیکند.



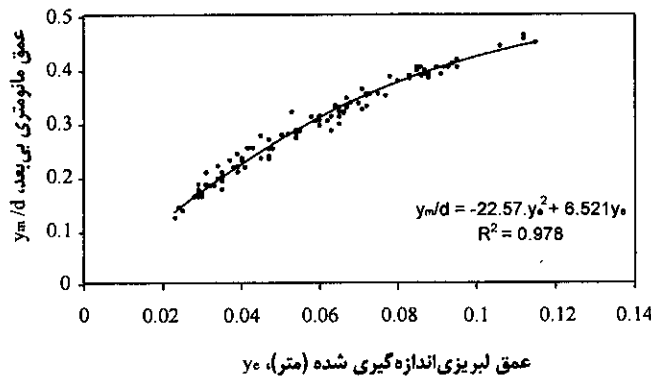
شکل ۳- رابطه عمق لبریزی اندازه‌گیری شده و عمق بحرانی در کلیه آزمایش‌ها.

این نتیجه در حالی به دست می‌آید که شاهد اختلاف مقادیر  $y_e$  و  $y_m$  در برداشت‌های آزمایشگاهی هستیم و می‌توان درصد زیادی از این تفاوت را به غیرهیدروستاتیک بودن توزیع فشار در مقطع لبریزی نسبت داد. به عبارت دیگر انتظار می‌رود که محل تشکیل عمق بحرانی در بالادست مقطع لبریزی باشد. شکل ۴ مقادیر بی‌بعد  $y_m/d$  را نشان می‌دهد که در مقابل  $y_e$  رسم شده‌اند که در آن  $d$  قطر مجرای دایره‌ای است.

اگر تساوی  $y_e$  با  $y_m$  را به عنوان نشانه وجود توزیع هیدروستاتیک فشار بپذیریم، شکل ۴ میزان انحراف توزیع فشار از توزیع فشار هیدروستاتیک و به عبارت دیگر تفاوت  $y_e$  و  $y_m$  در مقطع لبریزی را نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود میزان این انحراف تابعی از بده و قطر لوله است و از یک رابطه درجه دو تبعیت می‌کند. بنظر می‌رسد که علاوه بر شرایط هیدرولیکی و هندسی از قبیل انحنای خطوط جریان در مجاورت لبریز،



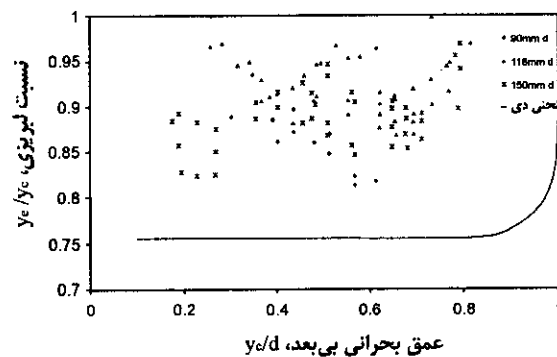
توزیع غیرهیدروستاتیک فشار، شکل سطح مقطع و شیب طولی، ویژگی‌های جریان متغیرمکانی در تشکیل عمق بحرانی در محل لبریزی، نقش غالب دارند، از این رو مقایسه‌ای با مدل تحلیلی دی (۱۹۹۸) صورت گرفته است که نتایج آن در شکل ۵ آمده است.



شکل ۴- ارتباط عمق مانومتری بی‌بعد و عمق لبریزی در تعیین وضعیت توزیع فشار.

مطالعات دیگر، مقطعی با توزیع هیدروستاتیک فشار، همان مقطع تشکیل عمق بحرانی در نظر گرفته شده است. ستاده‌های آزمایشگاهی این تحقیق بصورت نقاط منفرد در شکل ۵ ارائه شده‌اند تا با روند موجود در تحلیل دی مقایسه شوند. چنانکه مشاهده می‌شود نسبت لبریزی متفاوتی برای این داده‌ها حاصل شده است (بین ۰/۸ تا ۱). این در حالی است که طبق گزارش دی، داده‌های راجارانتام و مورالیدر (۱۹۶۴) و اسمیت (۱۹۶۲) تا نسبت  $y_c/d = 0.82$  تطابق خوبی را با این روش تحلیلی نشان می‌دهند.

منحنی شکل ۵ که با خط پر ترسیم شده است، رابطه نسبت لبریزی و عمق بحرانی را در کانالهای دایره‌ای با بده ثابت و شیب ملایم در مدل تحلیلی دی نشان می‌دهد. این منحنی براساس معادله مومتم با تقریب بوزینسک به‌دست آمده است. در این حل تحلیلی توزیع فشار در نقطه لبریزی با توجه به انحنای خطوط جریان و با ضریب ثابت  $-g/y_c$  تصحیح شده است. همچنین در کاربرد معادله مومتم، حجم کنترل از یک سو به مقطع لبریزی و از سوی دیگر به مقطعی با توزیع فشار هیدروستاتیک محدود می‌شود. در فرضیات دی و همین‌طور بسیاری از



شکل ۵- برداشتهای آزمایشگاهی در مقابل مدل تحلیلی دی برای مجاری دایره‌ای با بده ثابت.

فشاری در معادله مومتم برای جریان متغیر مکانی متأثر از ویژگی این جریان است و در مقطع لبریزی و همین‌طور در مقاطع دیگر در طول کانال روش مناسبی برای برآورد

عدم تطابق داده‌های آزمایشگاهی مربوط به جریان متغیر مکانی با روش دی و احتمالاً روشهای دیگر با فرض بده ثابت، به چند عامل باز می‌گردد: جمله نیروی



شده و در مقابل بده اندازه‌گیری شده در شکل ۶ ترسیم شده گردید. در این شکل خط تطابق کامل و خطوط خطای  $\pm 10\%$  درصد نیز وجود دارند. همانطور که مشاهده می‌شود قسمت اعظم داده‌ها در محدوده خطای یاد شده قرار گرفته است. برای تسهیل محاسبات به‌جای استفاده از روابط فوق، می‌توان از معادله زیر

[۵]

$$Q = 0.9573\sqrt{gd^5} \left( (y_c/d)^{-11.764} - 1 \right)^{-0.1667}$$

که معادله منحنی برازش شده به گراف تعیین عمق بحرانی، که در کتابهای استاندارد مانند هندرسون (۱۹۶۶) قابل دسترسی است، استفاده کرد. طبیعی است که استفاده از این معادله خود نسبت به معادله [۴] حدود ۴٪ خطا همراه خواهد داشت که باعث افزایش خطای برآورد بده خواهد شد.

آن ارائه نشده است. همچنین ضریب تصحیح اندازه حرکت در محاسبات این نوع جریان موثر است. اما به دلیل عدم وجود اطلاع کافی در مورد مقادیر واقعی آن در معادله اندازه حرکت برابر با واحد در نظر گرفته می‌شود. از این رو شناخت و اعمال این ضریب می‌تواند از اهمیت زیادی برخوردار باشد.

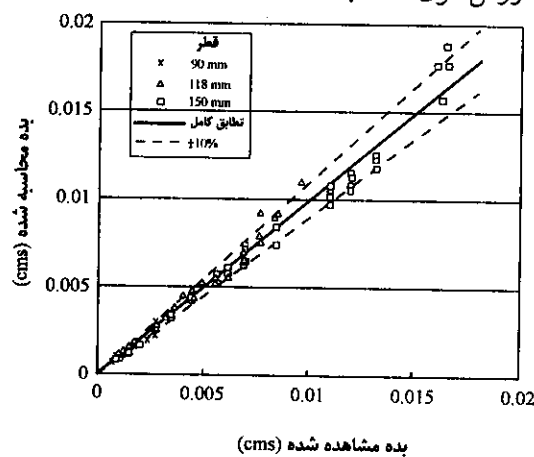
با توجه به دامنه داده‌ها و تجمع آنها حول خط  $y_c = 1.1y_e$  که در شکل ۳ ارائه شد، بنظر می‌رسد که برای تخمین بده می‌توان از معادله خط مزبور و رابطه بده و عمق بحرانی تئوریک استفاده کرد، یعنی رابطه:

$$Q = \sqrt{gA^3/T} \quad [۴]$$

که برای مقاطع دایره‌ای پارامترهای آن عبارت هستند از:

$$T = d \sin(\theta/2) \quad \text{و} \quad A = 0.125(\theta - \sin\theta)d^2$$

بدین ترتیب سطح مقطع و عرض مجرا در سطح آب به ازای عمق بحرانی (یا  $1.1y_b$ ) محاسبه و سپس به تعیین بده از رابطه فوق می‌پردازیم. برای اعماق لبریزی اندازه‌گیری شده در این تحقیق بده به‌روش فوق محاسبه



شکل ۶- بده اندازه‌گیری شده در برابر بده محاسبه شده به کمک معادله [۴]

و با افزایش بده و قطر مجرا انحراف از توزیع فشار هیدروستاتیک بیشتر می‌شود. اگر چه این نتیجه تشکیل عمق بحرانی را در بالادست مقطع لبریزی، جایی که توزیع فشار هیدروستاتیک باشد، دیکته می‌کند اما نتایج حاصل از مقایسه عمق لبریزی اندازه‌گیری شده در جریان

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه ارتباط عمق لبریزی با عمق بحرانی در جریان متغیر مکانی در مجاری دایره‌ای بصورت آزمایشگاهی بررسی شد. اندازه‌گیری عمق پیژومتریک و مقایسه آن با عمق اندازه‌گیری شده در مقطع لبریزی نشان داد که توزیع فشار در این مقطع غیر هیدروستاتیک است



به این ترتیب نتایج نشان داد که مقادیر برآورد شده در محدوده  $\pm 10\%$  درصد قرار می‌گیرند.

### سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران در قالب قرار داد پژوهشی شماره ۷۱۱/۳/۹۴۳ به انجام رسیده است. بدینوسیله از معاون پژوهشی محترم دانشگاه و شورای پژوهشی آن سپاسگزاری می‌کنیم. همچنین از همکاری صمیمانه خانم مهندس فرشته باقری در کار آزمایشگاهی، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

متغیر مکانی و عمق بحرانی محاسبه شده نشان داد که این دو عمق به هم نزدیک‌اند.

مشاهدات این تحقیق نشان داد که ویژگیهای جریان متغیر مکانی در بازه‌ای که به مقطع لبریزی منتهی می‌شود متفاوت از جریان با بده ثابت در آن بازه است. ستاده‌های آزمایشگاهی این تحقیق، با یک مدل تحلیلی برای مقاطع دایره‌ای با بده ثابت و شیب ملایم نیز مقایسه شد تا مقدار این تفاوت مشخص شود. بر اساس رابطه عمق بحرانی و عمق لبریزی در این نوع جریان، پیشنهاد شد که پس از تعیین عمق بحرانی برای محاسبه بده خروجی کل از مجری از رابطه بده و عمق بحرانی متداول استفاده شود.

### منابع

۱. کوچکزاده، ص. ۱۳۸۱. ضوابط طراحی زهکشها براساس معادله حاکم بر جریان متغیر مکانی و مقایسه آن با روشهای متداول. گزارش نهایی طرح پژوهشی شماره. ش پ/۳۴۴/۸۰ معاونت امور پژوهشی سازمان مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو. ۹۹ صفحه.
2. Ali, K. H. M., and A. Sykes. 1972. Free-vortex theory applied to free overfall. J. Hydr. Div., ASCE. 98(5): 973-979.
3. Dey, S. 1998. End depth in circular channel. J. Irrig and Drain. Engrg. ASCE. 124(8): 856-863.
4. Hager, H.W. 1983. Hydraulics of the plane overfall. J. Hydr. Engrg., ASCE. 109(12): 1683-1697.
5. Henderson, F.M. 1966. Open channel flow, McMillan Book Co., New York, N.Y. Pp: 1-552.
6. Hinds J. 1926. Side channel spillway. Trans ASCE, 89: 881-927.
7. Jaeger, C. 1948. Hauteur d'eau à l'extrémité d'un long déversoir. La Houille Blanche, Paris, France. 3(6): 518-523.
8. Kouchakzadeh., S., and A.R. Vatankhah Mohammad-abadi. 2002. Spatially varied flow in non-prismatic channel. I: dynamic equation. J. Irrig. And Drain. ICID. John Wiley and Sons LTD. 51: 41-50.
9. Marchi, E. 1993. On the free overfall. J. Hydr. Res., IAHR, The Netherlands. 31(6): 777-790.
10. Markland, E. 1965. Calculation of flow at a free overfall by relaxation method. Proc., Inst. Civ. Engrs., London, U.K. 31(May): 71-78.
11. Rajaratnam, N., and D. Muralidhar. 1964. End depth for circular channel. J. Hydr. Div., ASCE. 90(2): 99-119.
12. Rajaratnam, N., and D. Muralidhar. 1968. Characteristics of the rectangular free overfall. J. Hydr. Res., IAHR, the Netherlands. 6(3): 233-258.
13. Rouse, H. 1936. Discharge characteristics of the free overfall. Civ. Engrg., ASCE. 6(4): 257-260.
14. Rouse, H. 1943. Discussion of 'Energy loss at the base of a free overfall' by W.L. Moore. Trans., ASCE. 108: 1383-1387.
15. Smith, C.D. 1962. Brink depth for a circular channel. J. Hydr. Div., ASCE. 88(6): 125-134.





## **Experimental study of end depth-discharge relationship in circular sections carrying spatially varied flows**

**S. Kouchakzadeh and A. Parvaresh**

Irrigation and Reclamation. Dept. University of Tehran, Iran.

---

---

### **Abstract**

Since the flow at free overfall is self-calibrated, it has been extensively studied and used for flow measurement by many researchers. Previous investigations were done for different channel geometry, super and subcritical regime, with no lateral inflow along the channel, i.e. there is no variation in the discharge along the channel length. This research was conducted to investigate the discharge-end depth relationship in circular pipes carrying spatially varied flow with increasing discharge. Comparison between manometer reading and direct end depth measurements confirmed the deviation of the pressure distribution from the hydrostatic one. At the brink, nonetheless the data indicated that the end depth ratio in such flow condition is closer to unity than that of constant discharge. Consequently, based on the compiled data a relationship was proposed, which facilitates discharge measurement with reasonable accuracy.

**Keywords:** End depth ratio; spatially varied flow; Discharge measurement; Subcritical flow; Pressure distribution