

## تحلیل آبگذری و بازشدگی دریچه‌های قطاعی تحت شرایط جریان آزاد و مستغرق

حسین خلیلی شایان<sup>۱</sup>، جواد فرهودی<sup>۲\*</sup> و علیرضا وطن‌خواه<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ استاد؛ و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۱۸

### چکیده

بخش عمده تحقیقات پیشین مرتبط با دریچه‌های قطاعی، بر ارائه روش‌هایی برای تخمین دبی عبوری از این سازه‌ها متمرکز است و تعیین بازشدگی دریچه‌ها به عنوان سازه‌های تنظیم به منظور عبور دبی خاص، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعه حاضر، معادلاتی نظری برای تعیین صریح دبی عبوری از دریچه‌های قطاعی (مسئله نوع اول) و نیز بازشدگی دریچه (مسئله نوع دوم) با مشخص بودن سایر پارامترها در هر مسئله و به تفکیک شرایط جریان آزاد و مستغرق بر پایه ترکیب معادلات انرژی و مومنتم ارائه می‌کند. در هر مسئله، معیارهایی برای تشخیص شرایط جریان معرفی شده است. به منظور واسنجی و صحت‌سنجی معادلات نظری پیشنهادی، از ۲۶۵۷ سری داده آزمایشگاهی روی سه نوع مختلف دریچه قطاعی استفاده شد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که میانگین قدر مطلق خطای نسبی در تعیین دبی و بازشدگی دریچه‌های قطاعی از روش پیشنهادی به ترتیب ۱/۹۴ و ۲/۶۷ درصد است. همچنین، رویکرد پیشنهادی در تشخیص شرایط جریان، به طور متوسط ۹۹/۶ و ۹۸/۸ درصد از موارد به ترتیب در تعیین دبی و بازشدگی، صحیح عمل شده است. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که با افزایش زاویه انحراف دریچه قطاعی و نیز افزایش نسبت محور به شعاع دریچه تمایل به استغراق، افزایش می‌یابد. همچنین دریچه لاستیکی سخت نیز نسبت به دو نوع دیگر در محدوده بیشتری به صورت آزاد عمل می‌کند.

### واژه‌های کلیدی

اندازه‌گیری، انرژی- مومنتم، تنظیم جریان، دبی

### مقدمه

در خصوص تخمین دبی عبوری از دریچه‌های قطاعی در شرایط مختلف جریان، تا کنون مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است (Metzler, 1948; Toch, 1955; Buyalski, 1983; Clemmens *et al.*, 2003; Wahl, 2005; Shahrokhnia & Javan, 2006; Zahedani *et al.*, 2012; Bijankhan *et al.*, 2013)

تخمین دبی از رویکردهای پیشنهادی متز (Metzler, 1948) و تاک (Toch, 1955) به صورت نمودار است و تنها به‌ازای سه نسبت خاص از ارتفاع محور به شعاع دریچه (معادل ۰/۱، ۰/۵ و ۰/۹) است و در نتیجه تخمین ضریب دبی از این روش برای سایر نسبت‌ها در این محدوده

دریچه‌های قطاعی علاوه بر قابلیت کنترل و تنظیم سطح آب، با مطالعات کافی می‌توانند به‌عنوان سازه اندازه‌گیری جریان با دقت شناخته شده، ارزان و موجود در اغلب شبکه‌های آبیاری به کار روند. از دیدگاه اندازه‌گیری جریان، توسعه روابط دبی-اشل برای تعیین دبی عبوری از دریچه در ارتباط با مشخصات جریان، هندسه سازه و ابعاد کانال الزامی است. از منظر تنظیم سطح آب در بالادست و پایین دست یا عبور دبی مشخص از مقطع سازه به منظور رفع نیاز پایین دست، تعیین بازشدگی دریچه جهت دستیابی به شرایط مطلوب مطرح است.

شناخت شرایط جریان در پایاب دریچه‌های قطاعی، اعم از آزاد و مستغرق، در کاربرد معادلات متناظر تخمین دبی الزامی است. بی‌جن‌خان و همکاران (Bijankhan *et al.*, 2011)، خطای تخمین دبی جریان ناشی از اشتباه در شناخت وضعیت جریان را تا حدود ۳۰۰ درصد گزارش کرده‌اند. این محققان بر اساس رویکرد تقاطع منحنی‌های آبگذری دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق، روشی نوین برای تشخیص وضعیت جریان ارائه داده‌اند. رویکرد پیشنهادی، آستانه استغراق دریچه را بر مبنای یک فرایند آزمون و خطا معرفی می‌کند.

بازشدگی دریچه تنها پارامتر قابل تغییر دریچه‌های قطاعی است به‌منظور تنظیم عبور دبی یا کنترل سطح آب بالادست و پایین‌دست دریچه. از این دیدگاه، تعیین بازشدگی دریچه‌ها به‌زای ترکیبی خاص از دبی، عمق بالادست و عمق پایین‌دست اهمیت‌ی کاربردی دارد. در بیشتر کاربردها لازم است با ایجاد یک بند انحرافی سطح آب جهت انتقال جریان به کانال‌های آبگیر، با یک یا چند دریچه قطاعی، در محدوده خاصی تثبیت شود. در این حالت، هدف عبارت است از تعیین بازشدگی یک یا چند دریچه جهت انتقال دبی مطلوب به کانال آبگیر در شرایطی معین از عمق بالادست و احتمالاً عمق پایاب در شرایط عملکرد مستغرق دریچه‌ها.

وو و راجارتنام (Wu & Rajaratnam, 2015) برای حل صریح یا غیر صریح مسائل چهارگانه عبور جریان مستغرق از دریچه‌های کشوی و نیز برای تشخیص شرایط جریان در هر حالت، روش‌هایی ارائه داده‌اند. در این مقاله، برای تعیین پارامترهای مجهول اعم از دبی و بازشدگی دریچه به‌ترتیب به‌عنوان مسئله اول و مسئله دوم روش‌هایی ارائه و همچنین برای تمایز شرایط جریان اعم از جریان آزاد یا مستغرق در هر مسئله نشان داده شده است. برای واسنجی معادلات پیشنهادی در هر مسئله از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی بویالسکی (Buyalski, 1983) روی سه نوع

نیازمند درون‌یابی خواهد بود که می‌تواند خطای قابل توجهی در تخمین دبی ایجاد کند. روش پیشنهادی بویالسکی (Buyalski, 1983) اگرچه می‌تواند جهت تخمین دبی سه نوع مختلف دریچه قطاعی لاستیکی سخت<sup>۱</sup>، لبه‌تیز<sup>۲</sup> و چوگانی<sup>۳</sup> در شرایط جریان آزاد و مستغرق به کار رود اما نیازمند برداشتن گام‌هایی متعدد و به‌کارگیری مجموعه‌ای پیچیده از معادلات تجربی است. وال (Wahl, 2005) خطای تخمین دبی برای دریچه قطاعی لبه‌تیز از روش پیشنهادی کلمنس و همکاران (Clemmens *et al.*, 2003) را در محدوده بازشدگی‌های زیاد و افت انرژی کم در دو وجه دریچه، تا حدود ۷۰ درصد گزارش کرده است. رویکردهای پیشنهادی کلمنس و همکاران (Clemmens *et al.*, 2003) و وال (Wahl, 2005)، نیازمند استفاده از آزمون و خطا برای تخمین دبی دریچه‌های قطاعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق است. تخمین دبی از روش‌های شاهرخ‌نیا و جوان (Shahrokhnia & Javan, 2006) و زاهدانی و همکاران (Zahedani *et al.*, 2012) در شرایط جریان مستغرق منوط به اندازه‌گیری عمق جریان بلافاصله پس از دریچه است که در کاربردهای صحرائی، به‌دلیل وجود تلاطم قابل توجه جریان پس از دریچه، با مشکلاتی همراه است.

معادلات پیشنهادی بی‌جن‌خان و همکاران (Bijankhan *et al.*, 2013)، به‌رغم تخمین پیوسته دبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق، مدلی تجربی است که ۶ ثابت رگرسیونی موجود در این آن وابسته به نوع دریچه و نسبت‌های خاص ارتفاع محور به شعاع دریچه به‌صورت مجزاست. تعدد ضرایب رگرسیونی در این مدل، وابستگی قابل توجه به داده‌های آزمایشگاهی و فقدان رابطه‌ای معین بین تغییرات پارامترهای این مدل با نسبت ارتفاع محور به شعاع دریچه، می‌تواند در تخمین دبی از این روش برای سایر نسبت‌ها به بروز خطایی قابل توجه بینجامد.

1- Hard Rubber Bar  
3- Music Note

2- Sharp Edge

پایین‌دست (نظیر عرض  $B$ )، مشخصات جریان اعم از عمق بالادست ( $Y_0$ ) و عمق پایاب ( $Y_t$ )، شرایط جریان و مشخصات هندسی دریاچه نظیر شعاع ( $R$ )، ارتفاع محور ( $Y$ )، بازشدگی ( $w$ )، فرم لبه و عرض دریاچه ( $b$ ) است (شکل ۱).

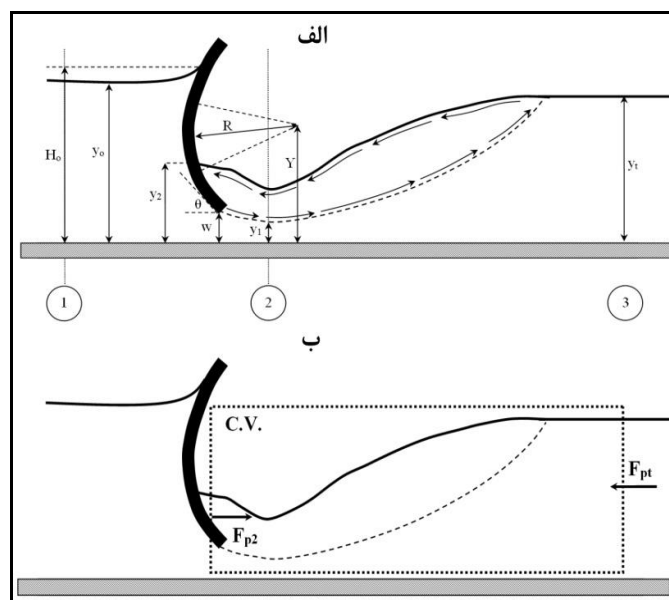
برای ارزیابی و واسنجی روابط پیشنهادی ارائه شده در این تحقیق، مجموعه‌ای گسترده از داده‌های آزمایشگاهی به کار گرفته شد که بویالسکی (Buyalski, 1983) آنها را برداشت کرده است.

دریاچه قطاعی استفاده شده است. در هر دو مسئله ضمن تعیین جواب صحیح بر پایه جواب‌های ریاضی، با بهره‌گیری از داده‌های مشاهداتی، دقت معادلات پیشنهادی نیز ارزیابی شده است.

## مواد و روش‌ها

### تشریح داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده

در حالت کلی، دبی عبوری از دریاچه‌های قطاعی ( $Q$ ) تابعی از مشخصات هندسی کانال‌های بالادست و



شکل ۱- الف) پارامترهای مؤثر بر جریان عبوری از دریاچه قطاعی و ب) حجم کنترل جریان در پایین‌دست دریاچه قطاعی مستغرق

هیدرولیکی) و مستغرق<sup>۳</sup> دنبال شد. جدول ۱ محدوده پارامترهای آزمایشگاهی بی‌بعد مؤثر بر عبور جریان را به تفکیک شرایط جریان و نوع دریاچه قطاعی نشان می‌دهد. در هر حالت، برای تعیین ضرایب واسنجی متناظر بامسائل چهارگانه، ۸۰ درصد از داده‌های آزمایشگاهی، بسته به نوع دریاچه قطاعی، به تصادف انتخاب و به کار گرفته شد. معادلات و ضرایب پیشنهادی نیز سرانجام بر اساس ۲۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی باقیمانده صحت‌سنجی شدند.

بویالسکی (Buyalski, 1983) در مجموع ۲۶۵۷ آزمایش روی سه نوع دریاچه قطاعی با فرم لبه متفاوت دریاچه از نوع لاستیکی سخت، لبه‌تیز و چوگانی اجرا کرد. در تمام آزمایش‌ها، عرض کانال ۷۶۲، عرض دریاچه ۷۱۱ و شعاع محور دریاچه ۷۰۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای هر دریاچه قطاعی، محور دریاچه در سه تراز ارتفاعی مختلف نصب گردید و آزمایش‌ها در شرایط مختلف جریان آزاد<sup>۱</sup>، پرش هیدرولیکی<sup>۲</sup>، (اشاره به شرایط جریان پرش

1- Free  
3- Submerged

2- Jump

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای بی بعد در برداشت‌های آزمایشگاهی بویالسکی (Buyalski, 1983)

$y/w$	$y_0/w$	$F^*$	$\Theta^\circ$	تعداد آزمایش‌ها	$Y/R$	شرایط جریان	نوع دریاچه قطاعی
۰/۱-۶/۸۷	۱/۱۷-۲۵/۸۳	۰/۰-۰۵/۵۵	۷۶-۴۹/۳	۱۴۰		آزاد	لاستیکی سخت
۰/۳-۵۹/۰۸	۱/۱۲-۱۷/۲۸	۰/۰-۸۰/۵۷	۷۶-۴۹/۳	۳۸	۰/۰-۵۸۳/۷۲۸	پرش هیدرولیکی	(دریاچه‌های ۱، ۲ و ۳)
۰/۱۷-۹۶/۷۷	۱/۱۸-۰۳/۰۴	۰/۰-۰۰۴/۵	۹۸-۴۹/۲	۱۶۵۷		مستغرق	
۰/۱۱-۷۲/۳۱	۱/۱۸-۳۱/۱۹	۰/۰-۰۵/۵۱	۷۶-۴۹/۳	۱۵۹		آزاد	لبه تیز (دریاچه‌های ۸، ۹ و ۱۰)
۰/۱۰-۶۶/۸۶	۱/۳-۲۲/۶۰	۰/۰-۲۳/۵۵	۷۶-۴۹/۳	۱۸	۰/۰-۵۸۳/۷۲۸	پرش هیدرولیکی	
۱/۱۴-۰۷/۰۸	۱/۱۸-۰۹/۱۱	۰/۰-۰۲/۳۸	۹۰-۴۹/۰۷	۲۴۲		مستغرق	
۰/۱۱-۷۱/۷۷	۱/۱۶-۳۳/۳۱	۰/۰-۰۵/۵۱	۷۶-۴۹/۳	۱۵۹		آزاد	چوگانی (دریاچه‌های ۴، ۵ و ۶)
۰/۱۰-۶۶/۷۶	۱/۲-۲۷/۷۷	۰/۰-۲۸/۵۳	۶۴-۴۹/۰۳	۷	۰/۰-۵۸۳/۷۲۸	پرش هیدرولیکی	
۱/۱۳-۰۶/۵۳	۱/۱۷-۰۹/۸۵	۰/۰-۰۳/۴۵	۹۰-۴۹/۰۷	۲۳۷		مستغرق	

$$F^* = \frac{Q}{B\sqrt{gy_0^3}}$$

### نتایج و بحث

**مسئله اول - تعیین دبی دریاچه قطاعی به ازای مقادیر مشخص عمق بالادست، عمق پایاب و بازشدگی دریاچه**  
 مطابق شکل ۱-الف شرایطی در نظر گرفته می‌شود که طی آن جریان مستغرق به عنوان یک وضعیت کلی با دبی  $Q$  از کانالی به عرض  $B$  از دریاچه‌ای قطاعی به عرض  $B$ ، شعاع  $R$ ، ارتفاع نصب محور دریاچه نسبت به کف کانال معادل  $Y$  و بازشدگی  $w$  عبور کند. عمق‌های جریان در کانال‌های بالادست و پایین دست به ترتیب برابر  $y_0$  و  $y_t$  در نظر گرفته می‌شود. به واسطه کاربرد معادله انرژی در حد فاصل مقاطع ۱ و ۲ و اگماض از اثر افت انرژی در گام نخست، خواهیم داشت (رابطه ۱):

$$y_0 + \frac{Q^2}{2gB^2y_0^2} = y_2 + \frac{Q^2}{2gB^2\delta^2w^2} \quad (1)$$

که در آن،

$y_2$  = عمق جریان در مقطع ۲ و بلافاصله پس از دریاچه؛ و  $\delta$  = ضریب تنگ‌شدگی. از سوی دیگر، با کاربرد رابطه مومنتم در فاصله مقطع ۲ تا مقطع پایاب، می‌توان نوشت (رابطه ۲):

$$B \frac{y_2^2}{2} + \frac{Q^2}{gB\delta w} = B \frac{y_t^2}{2} + \frac{Q^2}{gBy_t} \quad (2)$$

با تعریف پارامترهای بی بعد به صورت  $\alpha = y_2/y_0$ ،  $a = w/y_0$  و  $\gamma = y_t/y_0$ ، روابط ۱ و ۲ به ترتیب به صورت روابط ۳ و ۴ ساده می‌شوند:

$$1 + \frac{F^2}{2} = \alpha + \frac{F^2}{2\delta^2 a^2} \quad (3)$$

$$\frac{\alpha^2}{2} + \frac{F^2}{\delta a} = \frac{\gamma^2}{2} + \frac{F^2}{\gamma} \quad (4)$$

پارامتر  $F$  را می‌توان از ساده‌سازی رابطه ۳، به صورت رابطه ۵ تعیین کرد:

$$F = k\delta a \sqrt{\frac{2(1-\alpha)}{1-\delta^2 a^2}} \quad (5)$$

در استنتاج رابطه ۵، مجموعه‌ای از فرضیات ساده‌کننده به کار رفته است: ۱- اگماض از تأثیر افت انرژی در مقاطع قبل و بعد از دریاچه، ۲- فرض توزیع فشار استاتیک در

آزمایشگاهی به دست می‌آید.  
از تلفیق روابط ۴ و ۵ و ساده‌سازی نتیجه به دست آمده می‌توان پارامتر  $\alpha$  را به قرار زیر محاسبه کرد (رابطه ۶):

$$\alpha = \frac{1}{2} \left\{ \frac{4k^2 \delta a (\gamma - \delta a)}{\gamma (1 - \delta^2 a^2)} \pm \sqrt{\frac{16k^4 \delta^2 a^2 (\gamma - \delta a)^2}{\gamma^2 (1 - \delta^2 a^2)^2} + 4 \left\{ \gamma^2 + \frac{4k^2 \delta a (\delta a - \gamma)}{\gamma (1 - \delta^2 a^2)} \right\}} \right\} \quad (6)$$

$\alpha$  از یک کوچک‌تر و از صفر بزرگ‌تر است،  $0 < \alpha < 1$ . می‌توان نشان داد (رابطه ۷):

$$\gamma^2 + \frac{4k^2 \delta a (\delta a - \gamma)}{\gamma (1 - \delta^2 a^2)} > \gamma^2 + \frac{4k^2 \delta a (\delta a - \gamma)}{\gamma (1 - \delta^2 a^2)} (1 - \alpha) \quad (7)$$

بر این اساس، عبارت رادیکالی از نظر مقدار از عبارت اول داخل کروشه همواره بزرگ‌تر است و در نتیجه تنها به‌ازای علامت مثبت، مقادیر صحیح و دارای توجیه فیزیکی برای پارامتر  $\alpha$  به دست می‌آید. بنابراین، رابطه نهایی برای تعیین دبی دریچه‌ای قطاعی در شرایط جریان مستغرق به صورت رابطه ۸ خواهد بود:

$$F = k \delta a \sqrt{\frac{2 \left( 1 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{4k^2 \delta a (\gamma - \delta a)}{\gamma (1 - \delta^2 a^2)} + \sqrt{\frac{16k^4 \delta^2 a^2 (\gamma - \delta a)^2}{\gamma^2 (1 - \delta^2 a^2)^2} + 4 \left\{ \gamma^2 + \frac{4k^2 \delta a (\delta a - \gamma)}{\gamma (1 - \delta^2 a^2)} \right\}} \right\}}{1 - \delta^2 a^2}} \right)} \quad (8)$$

تخمین دبی دریچه‌های قطاعی منوط به تعیین ضرایب  $\delta$  و  $k$  خواهد بود. ضریب تنگ‌شدگی دریچه قطاعی دربردارنده مشخصات فیزیکی و هندسی دریچه شامل فرم لبه دریچه و نسبت ارتفاع محور به شعاع دریچه است. بنابراین،  $\delta = f(Y/R, \theta)$  خواهد بود که  $\theta$  در این رابطه بر حسب درجه و برابر  $\theta = \cos^{-1}[(Y-w)/R]$  است. پس، مشخصات فیزیکی دریچه بر آبگذری سازه مؤثر خواهد

مقطع بلافاصله پس از دریچه و ۳- فرض توزیع سرعت یکنواخت در مقاطع ۲ و ۳. به‌منظور توجه به تأثیر مجموعه عوامل فوق، از ضریب تصحیح  $k$  در رابطه ۵ استفاده شد که مقدار آن بر اساس واسنجی از نتایج

تنها یکی از علامت‌های مثبت یا منفی از رابطه ۶ می‌تواند دارای توجیه فیزیکی باشد. با در نظر گرفتن اینکه

وقتی طرفین رابطه ۶ به دو رسانده شود می‌توان نشان داد  $\alpha^2 > 0$  و با توجه به اینکه  $0 < \alpha < 1$ ، از رابطه ۷ خواهیم داشت

$$\gamma^2 + \frac{4k^2 \delta a (\delta a - \gamma)}{\gamma (1 - \delta^2 a^2)} > 0$$

رابطه ۸، دبی بی‌بعد انواع دریچه‌های قطاعی را در شرایط جریان مستغرق بر پایه عمق پایاب نسبی و بازشدگی نسبی دریچه، به صورت عمومی، ارائه می‌دهد. در شرایط جریان آزاد به‌عنوان یک حالت حدی خاص،  $\alpha \rightarrow \delta a$  و در نتیجه (رابطه ۹)،

$$F_f = k \delta a \sqrt{\frac{2(1 - \delta a)}{1 - \delta^2 a^2}} \quad (9)$$

متناظر با نوع دریچه قطعی می‌تواند تخمینی از دبی دریچه به ترتیب در شرایط جریان آزاد و مستغرق به- دست دهد. با تعریف معیار درصد خطای نسبی به فرم (رابطه ۱۰)،

$$RE\% = 100 \times \frac{Q_{exp} - Q_{cal}}{Q_{exp}} \quad (10)$$

شکل‌های ۲- الف، ۲- ب و ۲- ج، بیانگر توزیع درصد خطای نسبی در مقابل عمق پایاب نسبی ( $y_t/y_0$ ) برای سه نوع دریچه قطعی لاستیکی سخت، لبه‌تیز و چوگانی و به تفکیک شرایط جریان است (که در آن،  $Q_{exp}$  و  $Q_{cal}$  به ترتیب مقادیر دبی مشاهداتی و محاسباتی هستند).

بود. با در نظر گرفتن رابطه تغییرات ضریب تنگ‌شدگی دریچه‌های قطعی به صورت رابطه تابعی  $\delta = c_1(Y/R)^{(c_2-c_3/\theta)} + c_4$ ، ضریب  $k$  و ثابت‌های  $c_1, c_2, c_3$  و  $c_4$ ، از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی وابسته به نوع لبه دریچه قطعی به گونه‌ای تعیین شد که حداقل خطای ممکن در تخمین دبی دریچه در شرایط جریان آزاد و مستغرق به دست آید. جالب توجه است که ضریب  $k$  برای تمام دریچه‌های قطعی و تمام شرایط جریان ثابت و برابر ۰/۹۴ به دست آمده است. ثابت‌های معادله تعیین ضریب تنگ‌شدگی مستقل از شرایط جریان اعم از آزاد، مستغرق و بینابینی، تعیین و در جدول ۲ ارائه شده است. کاربرد روابط ۸ و ۹، رابطه پیشنهادی برای ضریب تنگ‌شدگی و مقادیر پیشنهادی در جدول ۲ برای ثابت‌ها

جدول ۲- مقادیر ضرایب تجربی در مسئله اول به تفکیک نوع دریچه قطعی

مسئله	پارامتر مجهول	نوع دریچه قطعی	ثابت‌های هر مسئله
مسئله اول	تعیین دبی	ثابت‌ها	$c_1$
		لاستیکی سخت	$c_2, c_3, c_4, k$
		لبه‌تیز	$c_1, c_2, c_3, c_4, k$
		چوگانی	$c_1, c_2, c_3, c_4, k$

دریچه، تخمین دبی از رابطه پیشنهادی با خطای بیشتری همراه است.

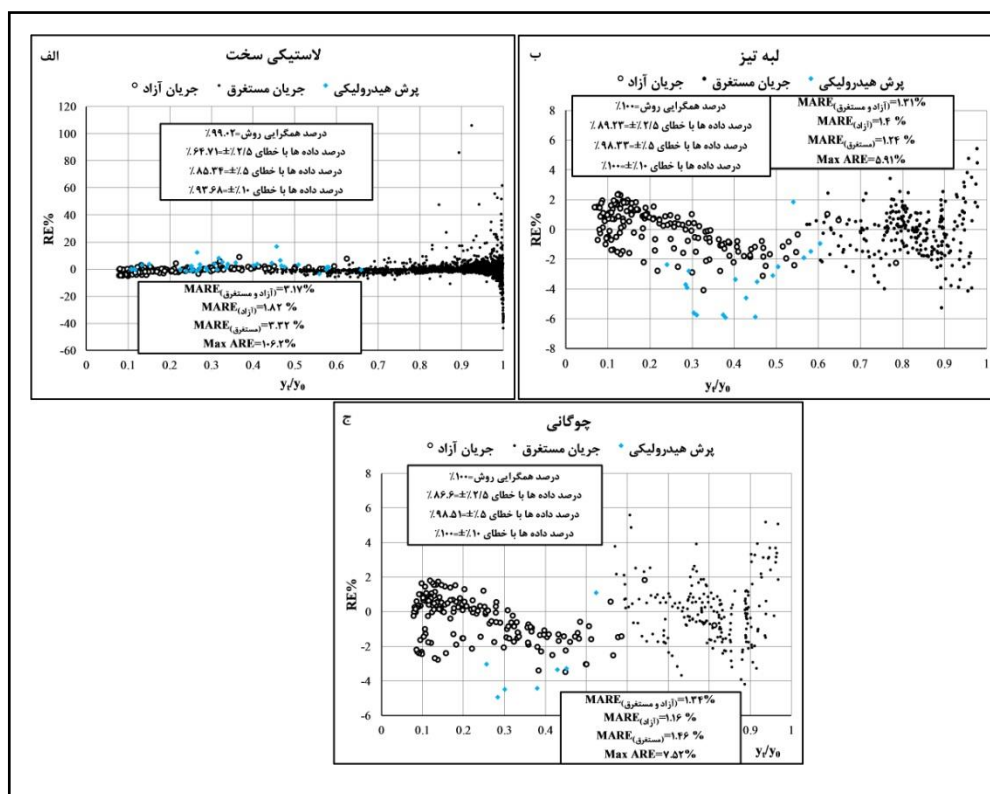
نگاهی دقیق‌تر به جدول ۳ می‌رساند که میزان خطای تخمین دبی در مرحله صحت‌سنجی (بر مبنای آن دسته از داده‌های آزمایشگاهی که قبلاً در تعیین ثابت‌های معادله تنگ‌شدگی به کار نرفته‌اند)، افزایشی قابل توجه نسبت به مرحله واسنجی نیافته که بیانگر وابستگی محدود کارایی روش پیشنهادی به محدوده پایه تولید ضرایب تجربی است. در شرایط جریان آزاد، میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تخمین دبی برای سه دریچه لاستیکی سخت، لبه‌تیز و چوگانی به ترتیب برابر ۱/۴۱، ۱/۴۰ و ۱/۱۶ درصد و در شرایط جریان مستغرق

درصد همگرایی روش پیشنهادی در تخمین دبی در جدول ۳ ارائه شده است. مقصود از همگرایی روش، ارائه جواب‌های معنی‌دار در تخمین دبی از رویکرد پیشنهادی است. جز در سری داده‌های مربوط به دریچه‌های لبه‌تیز و چوگانی، در حدود ۱ درصد از کلیه ترکیب‌های عمق بالادست، عمق پایاب، بازشدگی و هندسه دریچه از سری داده‌های آزمایشگاهی دیده شد که روش پیشنهادی عدد طبیعی برای دبی جریان به دست نمی‌دهد. بخش عمده این حالات در محدوده تبدیل جریان آزاد به مستغرق واقع می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در هر سه دریچه، با افزایش عمق پایاب نسبت به عمق بالادست و کاهش دبی عبوری از

به ترتیب برابر ۳/۲۱، ۱/۲۴ و ۱/۴۶ درصد است. با در نظر گرفتن بخشی از خطای حاصل متأثر از خطاهای سیستماتیک در برداشت‌های آزمایشگاهی، مقادیر خطای مندرج در جدول ۳ به وضوح بیانگر تخمین دقیق دبی جریان در تمام شرایط جریان از روش پیشنهادی است.

جدول ۳- ارزیابی قابلیت رویکرد پیشنهادی در پیش‌بینی وضعیت جریان و تعیین پارامتر مجهول در مسئله اول

مسئله/پارامتر مجهول	نوع در بجه	میانگین قدر مطلق خطای نسبی، درصد (جریان آزاد)			میانگین قدر مطلق خطای نسبی، درصد (جریان مستغرق)			درصد پیش‌بینی صحیح شرایط جریان	بیشینه خطای نسبی، درصد (تمام شرایط جریان)	میانگین قدر مطلق خطای نسبی، درصد
		واستجی	صحت‌سنجی	تمامی داده‌ها	واستجی	صحت‌سنجی	تمامی داده‌ها			
		لاستیکی	سخت	۱/۳۶	۱/۵۸	۱/۴۱	۳/۳۴			
تعیین دبی	لبه تیز	۱/۴۴	۱/۲۸	۱/۴۰	۱/۱۹	۱/۴۷	۱/۲۴	۵/۹۱	۱/۳۱	
چوگانی	چوگانی	۱/۱۴	۱/۲۹	۱/۱۶	۱/۵۱	۱/۲۹	۱/۴۶	۷/۵۲	۱/۳۴	



شکل ۲- درصد خطای تعیین دبی از روش پیشنهادی در مقابل  $y/y_0$  برای در بجه: الف) لاستیکی سخت، ب) لبه تیز و ج) چوگانی

در تمام شرایط جریان و برای هر سه نوع دریچه قطاعی خطای کمتری به دست می‌دهد. همچنین از میان روش‌های پیشنهادی پیشین، مدل نرم‌افزاری WinGate تخمین دقیق‌تری از دبی به دست می‌دهد. روش پیشنهادی شاهرخ‌نیا و جوان (Shahrokhnia & Javan, 2006)، به رغم سادگی در فرم، خطای بیشتری برای هر سه نوع دریچه ارائه می‌دهد. ملاحظه می‌گردد توجه به تأثیر فرم لبه دریچه، سبب افزایش صحت تخمین دبی در رویکرد وال (Wahl, 2005) نسبت به رویکرد کلمنس و همکاران (Clemmens et al., 2003) می‌شود.

در جدول ۴، قابلیت روش‌های مختلف در تخمین دبی بر اساس آماره ریشه میانگین مربعات خطا با تعریف زیر (رابطه ۱۱) مقایسه شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i-exp} - Q_{i-cal})^2}{n}} \quad (11)$$

که در آن،  $n =$  تعداد حالات. دیده می‌شود که رویکرد پیشنهادی

جدول ۴- مقایسه کارایی روش‌های مختلف در تخمین دبی جریان (مسئله اول) به تفکیک شرایط جریان و نوع دریچه قطاعی

نوع دریچه	شرایط جریان	کلمنس و همکاران (Clemmens et al., 2003)	وال (Wahl, 2005)	شاهرخ‌نیا و جوان (Shahrokhnia & Javan, 2006)	بی‌جن‌خان و همکاران (Bijankhan et al., 2013)	WinGate	روش حاضر
لاستیکی	آزاد	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۵۲	۰/۰۱۸۰	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۲۶
سخت	مستغرق	۰/۰۲۱۱	۰/۰۱۵۲	۰/۰۱۲۶	۰/۰۲۵۱	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۵۴
لبه‌تیز	آزاد	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۶۹	۰/۰۲۱۴	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۱۹
	مستغرق	۰/۰۳۵۲	۰/۰۰۹۲	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۱۱	۰/۰۰۳۳
	آزاد	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۳۵	۰/۰۲۳۷	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۱۵
چوگانی	مستغرق	۰/۰۳۹۱	۰/۰۰۹۱	۰/۰۱۵۲	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۴۳

### معیار تشخیص شرایط جریان آزاد و مستغرق

اگر مانند شرایط این تحقیق معادلاتی جداگانه به فرم روابط ۸ و ۹ برای تخمین دبی در شرایط جریان به ترتیب مستغرق و آزاد ارائه شده باشد، پیش‌تر لازم خواهد بود از شرایط جریان اطمینان حاصل شود. بدین منظور، ارائه معیاری جهت شناخت دقیق شرایط جریان مستقل از پارامتر دبی الزامی است. عمق پایاب در شرایط آستانه استغراق ( $y_t^*$ ) به حداکثر عمق جریان در کانال پایین دست گفته می‌شود که به‌ازای مقادیر عمق پایاب کمتر از این حد، آبگذری دریچه مستقل از هندسه کانال و مشخصات جریان در پایین دست است.

پیش‌تر گفته شد که رخداد شرایط آستانه استغراق مربوط به وضعیتی است که عمق جریان در مقطع ۲ و چسبیده به دریچه ( $y_2$ ) معادل با عمق جریان در مقطع تنگ‌شدگی باشد ( $y_2 \rightarrow \delta w$  یا  $\alpha \rightarrow \delta a$ ). با در نظر گرفتن عمق نسبی پایاب در شرایط آستانه استغراق به صورت  $\gamma^* = y_t^*/y_0$  و جایگذاری  $\alpha = \delta a$  در روابط ۳ و ۴ و حذف پارامتر  $F$  از این دو معادله، رابطه‌ای به فرم رابطه ۱۲ برای تعیین  $\gamma^*$  حاصل خواهد شد:

$$(\gamma^*)^3 - p_1 \gamma^* + r_1 = 0 \quad (12-f)$$

که در آن،



$\gamma_3^* < 0$  که دید می‌تواند از موارد فوق  $\sqrt{p_1/3} < \gamma_1^* < \sqrt{p_1}$  است. در نتیجه، رابطه ۱۳-ج از نظر فیزیکی نمی‌تواند ریشه‌ای قابل قبول برای تعیین عمق پایاب نسبی در شرایط آستانه استغراق محسوب گردد. از سوی دیگر،  $\sqrt{p_1/3} > \gamma_c$  و در نتیجه  $\gamma_2^* \leq \gamma_c$  است که ریشه دوم عمق متناظر جریان فوق بحرانی را به دست می‌دهد که با شرایط جریان زیر بحرانی در مقطع پایاب قابل توجیه نیست. بر این اساس  $\sqrt{p_1/3} < \gamma_1^* < \gamma_c$  تنها ریشه قابل قبول جهت تعیین عمق پایاب نسبی در شرایط آستانه استغراق را ارائه می‌دهد. بر این اساس رابطه (۱۳-الف) در ترکیب با ثابت  $k$  و تابع تنگ‌شدگی و ثابت‌های متناظر آن در جدول ۲، می‌تواند جهت تعیین آستانه استغراق و در نتیجه تشخیص شرایط جریان عبوری از سه نوع در بچه قطاعی به کار رود. درصد درستی تشخیص شرایط جریان عبوری از سه نوع در بچه قطاعی، بر مبنای کاربرد رابطه ۱۳-الف و مقایسه آن با مشاهدات آزمایشگاهی کیفی بویالسکی (Buyalski, 1983)، در جدول ۳ نشان داده شده است. از نظر تشخیص شرایط جریان، گفتنی است که رابطه ۱۳-الف در ۹۸/۷۵ درصد حالات (۱۸۱۲ آزمایش) عبور جریان از در بچه نوع لاستیکی سخت، ۱۰۰ درصد حالات (۴۱۹ آزمایش) عبور جریان از در بچه نوع لبه تیز و ۱۰۰ درصد حالات (۴۰۳ آزمایش) عبور جریان از در بچه نوع چوگانی صحیح عمل کرده است که بیانگر قابلیت بالای این رابطه در تمایز شرایط جریان از در بچه‌های قطاعی است. شکل ۳، نمونه پراکنش زوج‌های مرتب  $(y_t/w, y_0/w)$  از داده‌های آزمایشگاهی را نسبت به منحنی آستانه استغراق از رابطه الف-۱۳ و قابلیت آن در تشخیص شرایط جریان عبوری از در بچه قطاعی نوع لاستیکی سخت را به ازای نسبت  $Y/R=0.657$  نشان می‌دهد.

$$p_1 = \frac{4k^2 \delta a (1 - \delta a) - \delta^2 a^2 (\delta^2 a^2 - 1)}{1 - \delta^2 a^2} \quad (۱۲-ب)$$

و

$$r_1 = \frac{4k^2 \delta^2 a^2 (1 - \delta a)}{1 - \delta^2 a^2} \quad (۱۲-ج)$$

با در نظر گرفتن تعریف عمق بحرانی در مقطع پایاب به صورت  $y_c = \sqrt[3]{Q^2 / (gB^5)}$ ، از روابط ۹ و ۱۲-ج می‌توان دریافت  $r_1 = 2\gamma_c^3$  است؛ که  $c = y_c / y_0 \gamma$  خواهد بود. در نتیجه از رابطه ۱۲-الف،  $p_1 = \gamma^{*2} + 2\frac{\gamma_c^3}{\gamma^*}$  است. از سوی دیگر، با توجه به رخداد جریان زیر بحرانی در کانال پایین دست ( $\gamma^* > \gamma_c$ )، همواره تابعی صعودی از  $\gamma^*$  است و حداقل آن به ازای  $\gamma^* = \gamma_c$  حاصل خواهد شد ( $p_1(\min) = 3\gamma_c^2$ ). در نتیجه،  $p_1 > 3\gamma_c^2$  یا  $(r_1/2)^2 > (p_1/3)^3$  است. بر این اساس، با در نظر گرفتن مبین رابطه ۱۲-الف به صورت  $\Delta = (r_1/2)^2 - (p_1/3)^3$ ، همواره خواهیم داشت  $\Delta < 0$ . در نتیجه معادله ۱۲-الف دارای سه ریشه به قرار زیر خواهد بود (روابط ۱۳ الف، ب و ج):

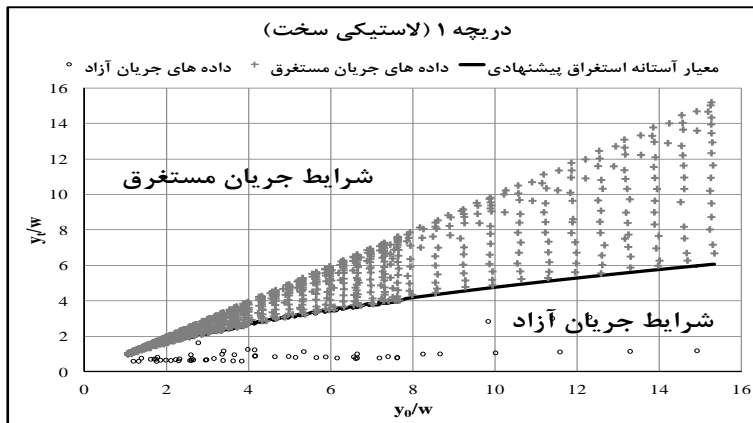
$$\gamma_1^* = 2\sqrt{\frac{p_1}{3}} \cos \frac{\phi}{3} \quad (۱۳-الف)$$

$$\gamma_2^* = -2\sqrt{\frac{p_1}{3}} \cos \left( \frac{\pi + \phi}{3} \right) \quad (۱۳-ب)$$

$$\gamma_3^* = -2\sqrt{\frac{p_1}{3}} \cos \left( \frac{\pi - \phi}{3} \right) \quad (۱۳-ج)$$

که در آنها،

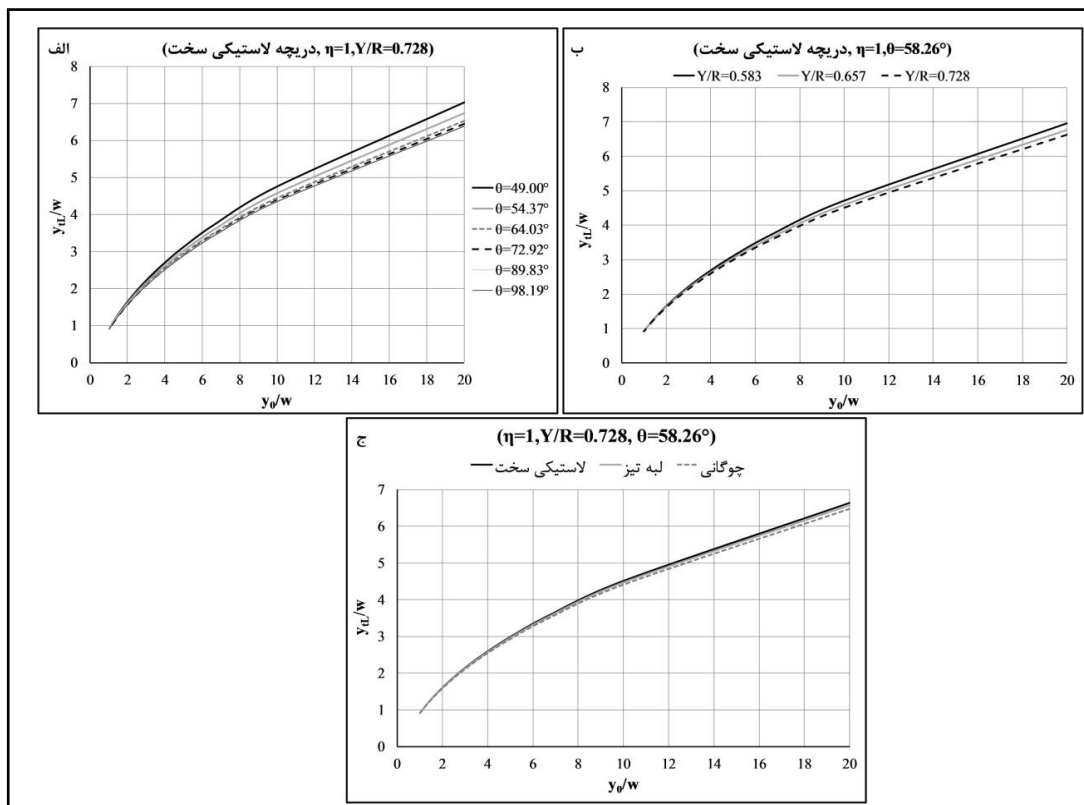
$\phi = \cos^{-1} \left[ -r_1/2 \sqrt{(3/p_1)^3} \right]$  است. با توجه به اینکه  $p_1, r_1 > 0$  و  $\cos \phi < 0$  ( $\pi/2 < \phi < \pi$ ) است، به سهولت می‌توان نشان داد که  $-\sqrt{p_1} < \gamma_3^* < -2\sqrt{p_1/3}$ ،  $0 < \gamma_2^* < \sqrt{p_1/3}$  و



شکل ۳- ارزیابی کارایی رابطه ۱۳-الف در تبیین شرایط آستانه استغراق دریچه قطاعی نوع لاستیکی سخت

به صورت مشابه در نتیجه افزایش ارتفاع نصب دریچه نیز دیده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که عمق پایاب مورد نیاز برای استغراق دریچه قطاعی لاستیکی سخت، نسبت به دو نوع دریچه دیگر، بیشتر است و در نتیجه این دریچه به صورت جزئی در دامنه بیشتری از اعماق پایاب می‌تواند به صورت آزاد عمل کند.

شکل‌های ۴-الف تا ۴-ج به ترتیب بیانگر تأثیر زاویه انحراف (تمایل) دریچه، نسبت ارتفاع نصب محور به شعاع دریچه و فرم لبه دریچه قطاعی بر منحنی آستانه استغراق از رابطه ۱۳-الف است. مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه انحراف دریچه، تمایل به استغراق دریچه افزایش می‌یابد. با این همه، میزان تفاوت در چنین وضعیتی



شکل ۴- تأثیر الف) زاویه انحراف، ب) نسبت ارتفاع نصب محور به شعاع دریچه و ج) فرم لبه دریچه قطاعی، بر منحنی آستانه استغراق دریچه قطاعی از رابطه ۱۳-الف

$$p_4 = \frac{\omega_1^2}{3} \quad (ب-۱۶)$$

$$r_4 = \omega_3 + \frac{2\omega_1^3}{27} \quad (ج-۱۶)$$

با توجه به اینکه  $\cos\phi'' < 0$ ,  $p_4, r_4 > 0$  و در نتیجه  $\pi < \phi'' < \pi/2$  خواهد بود. از این نامساوی به سهولت می‌توان نتیجه گرفت:

$$\frac{\omega_1}{3} < a_3 = -\frac{\omega_1}{3} \left( 1 - 2\cos\frac{\pi - \phi''}{3} \right) < \frac{\sqrt{3}-1}{2} \omega_1 \quad (د-۱۶)$$

با توجه به اینکه  $\omega_1 < 0$ ,  $a_3 < 0$  خواهد بود رابطه ۱۵-ج پاسخی صحیح برای بازشدگی نسبی دریچه ارائه نمی‌دهد. همچنین می‌توان نشان داد:

$$-\frac{2}{3} \omega_1 < a_1 = -\frac{\omega_1}{3} \left( 1 + 2\cos\frac{\phi''}{3} \right) < -\frac{1+\sqrt{3}}{3} \omega_1 \quad (و-۱۶)$$

و

$$-\frac{\omega_1}{3} < a_2 = -\frac{\omega_1}{3} \left( 1 - 2\cos\frac{\pi + \phi''}{3} \right) < -\frac{2}{3} \omega_1 \quad (ه-۱۶)$$

و از سویی  $\omega_1 = -\frac{3}{2} \times \frac{\gamma_c}{\delta}$  است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت  $a_1 > \frac{\gamma_c}{\delta} > \gamma_c$  و در نتیجه  $w > y_c$  است که با شرایط جریان فوق بحرانی به‌عنوان وضعیت غالب در مقطع دریچه تطابق ندارد. در نتیجه، تنها رابطه ۱۵-ب پاسخی صحیح برای تعیین بازشدگی نسبی دریچه قطاعی در شرایط ارائه می‌دهد. همچنین لازم است از صحت فرض اولیه و برقراری جریان آزاد اطمینان حاصل کرد. در این حالت، با در نظر گرفتن مقدار محاسبه شده برای بازشدگی نسبی دریچه  $(a=w/y_0)$ ، استفاده از معادله مومنتم در فاصله پس از دریچه تا مقطع پایاب، رابطه‌ای به فرم زیر (رابطه ۱۷-الف) جهت تعیین عمق پایاب نسبی در شرایط جریان آزاد حاصل می‌شود:

### مسئله دوم - تعیین بازشدگی دریچه

در این مسئله، روشی برای تعیین بازشدگی دریچه‌ای قطاعی ارائه می‌شود که تنها پارامتر قابل مانور دادن این سازه برای تنظیم سطح آب بالادست و پایین دست و عبور دبی مشخصی است. در این حالت، نخست فرض می‌شود دریچه قطاعی در شرایط جریان آزاد عمل می‌کند. در شرایط جریان آزاد، به‌واسطه کاربرد معادله انرژی در فاصله قبل از دریچه و مقطع تنگ‌شدگی پس از دریچه، خواهیم داشت (رابطه ۱۴-الف):

$$a^3 + \omega_1 a^2 + \omega_2 a + \omega_3 = 0 \quad (الف-۱۴)$$

که در آن،

$$\omega_1 = -\frac{1}{\delta} \times \left( 1 + \frac{F^2}{2} \right) \quad (ب-۱۴)$$

$$\omega_2 = 0 \quad (ج-۱۴)$$

$$\omega_3 = \frac{F^2}{2\delta^3} \quad (د-۱۴)$$

رابطه (الف-۱۴) سه ریشه به قرار زیر خواهد داشت:

$$a_1 = -\frac{\omega_1}{3} \left( 1 + 2\cos\frac{\phi''}{3} \right) \quad (الف-۱۵)$$

$$a_2 = -\frac{\omega_1}{3} \left( 1 - 2\cos\frac{\pi + \phi''}{3} \right) \quad (ب-۱۵)$$

$$a_3 = -\frac{\omega_1}{3} \left( 1 - 2\cos\frac{\pi - \phi''}{3} \right) \quad (ج-۱۵)$$

که در آن،

$$\phi'' = \cos^{-1} \left[ -\frac{r_4}{2} \sqrt{\left( \frac{3}{p_4} \right)^3} \right] \quad (الف-۱۶)$$

$$\lambda_3 = -\left\{ \frac{F^2}{\delta^2} + \frac{F^4}{2\delta^2} \right\} \quad (د-۱۹) \quad (\gamma^*)^3 - p''\gamma^* + r'' = 0 \quad (الف-۱۷)$$

که در آن،

$$\lambda_4 = 0 \quad (و-۱۹)$$

$$p'' = \delta^2 a^2 + \frac{2F^2}{\delta a} \quad (ب-۱۷)$$

$$\lambda_5 = \frac{F^4}{4\delta^4} \quad (ه-۱۹)$$

$$r'' = 2F^2 \quad (ج-۱۷)$$

با در نظر گرفتن مبین معادله درجه چهارم فوق ( $\Delta''$ )

به قرار رابطه ۲۰-الف:

$$\Delta'' = \frac{\Delta_1'' - 4\Delta_0''}{-27} \quad (الف-۲۰)$$

که در آن،

$$\Delta_0'' = \lambda_3^2 - 3\lambda_2\lambda_4 + 12\lambda_1\lambda_5 \quad (ب-۲۰)$$

$$\Delta_1'' = 2\lambda_3^3 - 9\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 27\lambda_2^2\lambda_5 + 27\lambda_1\lambda_4^2 - 72\lambda_1\lambda_3\lambda_5 \quad (ج-۲۰)$$

با استفاده از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی بویالسکی (Buyalski, 1983) تحت شرایط مستغرق، مشخص گردید به‌ازای تمام ترکیب‌های برداشت شده از عمق بالادست، دبی، عرض و عمق پایاب،  $\Delta''$  همواره بزرگ‌تر از صفر است ( $\Delta'' > 0$ ). بر این اساس، رابطه ۱۹-الف دارای چهار ریشه به قرار زیر خواهد بود:

$$a_1 = -\frac{\lambda_2}{4\lambda_1} + S' + \frac{1}{2} \sqrt{-4S'^2 - 2p'' - \frac{q''}{S'}} \quad (الف-۲۱)$$

$$a_2 = -\frac{\lambda_2}{4\lambda_1} + S' - \frac{1}{2} \sqrt{-4S'^2 - 2p'' - \frac{q''}{S'}} \quad (ب-۲۱)$$

$$a_3 = -\frac{\lambda_2}{4\lambda_1} - S' + \frac{1}{2} \sqrt{-4S'^2 - 2p'' + \frac{q''}{S'}} \quad (ج-۲۱)$$

$$a_4 = -\frac{\lambda_2}{4\lambda_1} - S' - \frac{1}{2} \sqrt{-4S'^2 - 2p'' + \frac{q''}{S'}} \quad (د-۲۱)$$

به‌طور مشابه با حالات قبل می‌توان نشان داد که ریشه صحیح قابل قبول در این حالت به قرار زیر است:

$$\gamma^* = 2\sqrt{\frac{p''}{3}} \cos \frac{\rho}{3} \quad (الف-۱۸)$$

$$\rho = \cos^{-1} \left[ -\frac{r''}{2} \sqrt{\left( \frac{3}{p''} \right)^3} \right] \quad (ب-۱۸)$$

در این حالت اگر  $\gamma^* \leq \gamma$  باشد، شرایط جریان آزاد و فرض اولیه صحیح بوده است. در این صورت می‌توان بازشدگی نسبی محاسبه شده از رابطه ۱۵-ب را پاسخ صحیح مسئله دانست. اگر حالت  $\gamma^* > \gamma$  برقرار باشد، جریان مستغرق است و برای تعیین بازشدگی مجهول دریچه به‌صورت زیر می‌توان عمل کرد:

در شرایط جریان مستغرق، به واسطه تعیین پارامتر  $\alpha$  از رابطه ۳ و جایگذاری آن در رابطه ۴، یک معادله درجه چهارم بر حسب پارامتر بازشدگی نسبی دریچه ( $a=w/y_0$ )، به فرم زیر (الف-۱۹) حاصل خواهد شد:

$$\lambda_4 a^4 + \lambda_2 a^3 + \lambda_3 a^2 + \lambda_4 a + \lambda_5 = 0 \quad (الف-۱۹)$$

که در آن،

$$\lambda_1 = 1 + \frac{F^4}{4} + F^2 - \gamma^2 - \frac{2F^2}{\gamma} \quad (ب-۱۹)$$

$$\lambda_2 = \frac{2F^2}{\delta} \quad (ج-۱۹)$$

دریاچه بیش از سایر عوامل به فرم لبه دریاچه قطاعی، پارامتر دبی بی‌بعد  $F$  و نسبت  $Y/R$  وابسته است. بر اساس تحلیل داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌ای به فرم  $\delta = \mu_1(Y/R)^{(\mu_2 + \mu_3 \times F)} + \mu_4$  برای تغییرات ضریب تنگ‌شدگی در مسئله دوم پیشنهاد می‌شود. در این رابطه، ثابت‌های  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  و  $\mu_4$  با توجه به نوع دریاچه قطاعی و شرایط جریان از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی به گونه‌ای تعیین خواهد شد که حداقل خطای ممکن در تعیین بازشدگی در مرحله واسنجی رویکرد پیشنهادی نسبت به مقادیر متناظر آزمایشگاهی حاصل شود. جدول ۵ مقادیر پارامترهای مذکور را به تفکیک نوع دریاچه قطاعی و شرایط جریان نشان می‌دهد.

در شکل ۵، تغییرات پارامتر  $a$  از چهار ریشه فوق برای دریاچه نوع لبه‌تیز از حالات آزمایشگاهی در شرایط جریان مستغرق نشان داده شده است. در اینجا می‌بینیم که رابطه ۲۱-د، (ریشه  $a_4$ )، همواره جوابی منفی برای بازشدگی نسبی دریاچه در شرایط جریان مستغرق ارائه می‌کند. از سویی، مقادیر  $a_2$  حاصل از رابطه ۲۱-ب، همواره کوچک‌تر از مقدار حدی  $\frac{F}{\delta\sqrt{2+F^2}}$  است و در نامساوی (۲) صدق نمی‌کند. در نتیجه، روابط ۲۱-د و ۲۱-ب پاسخی صحیح برای تخمین بازشدگی دریاچه ارائه نمی‌دهند. رابطه ۲۱-الف، (ریشه  $a_1$ )، در غالب حالت‌ها، پاسخ صحیح تعیین بازشدگی نسبی دریاچه را ارائه می‌کند. گفتنی است که در حالت‌هایی معدود ریشه  $a_1$  از رابطه ۲۱-الف در شرط (۲) صدق نمی‌کند و تنها رابطه ۲۱-ج و ریشه  $a_3$  شرط (۲) را ارضا می‌کنند. در نتیجه، پس از حصول اطمینان از استغراق جریان لازم است ریشه‌های حاصل از دو رابطه ۲۱-الف و ۲۱-ج محاسبه و ریشه صحیح انتخاب شود که در شرط (۲) صدق می‌کند.

که در آن،

$$p'' = \frac{8\lambda_1\lambda_3 - 3\lambda_2^2}{8\lambda_1^2} \quad (21-9)$$

$$q'' = \frac{\lambda_2^3 - 4\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + 8\lambda_1^2\lambda_4}{8\lambda_1^3} \quad (21-10)$$

$$S' = \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{2}{3} p'' + \frac{2}{3\lambda} \sqrt{\Delta_0''} \cos \frac{\rho'}{3}} \quad (21-11)$$

$$\rho' = \cos^{-1} \left[ \frac{\Delta_1''}{2\sqrt{\Delta_0''}} \right] \quad (21-12)$$

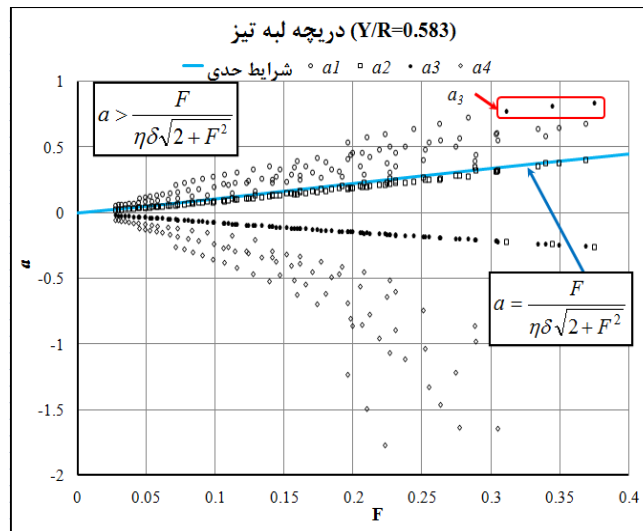
حال لازم است مشخص شود از چهار ریشه گفته شده کدام یک پاسخ صحیح را برای تعیین بازشدگی نسبی دریاچه تحت شرایط جریان مستغرق به دست می‌دهد. برای این منظور لازم است ریشه صحیح در دو شرط زیر صدق کند:

$$(1) \quad 0 < a = w/y_0 < 1 \text{ همواره برقرار باشد.}$$

(۲) از رابطه ۳ و با توجه به شرط  $\alpha > 0$ ، به سهولت

$$a > \frac{F}{\delta\sqrt{2+F^2}}$$

تعیین بازشدگی نیازمند محاسبه ضریب تنگ‌شدگی است. از سویی، رابطه پیشنهادی ارائه شده در مسئله اول برای محاسبه ضریب تنگ‌شدگی، تغییرات ضریب تنگ‌شدگی را وابسته به نسبت  $Y/R$  و زاویه  $\Theta$  ارائه می‌دهد. تعیین زاویه  $\Theta$  نیازمند مشخص بودن بازشدگی دریاچه است که در مسئله دوم مجهول است. در نتیجه، رابطه پیشنهادی در مسئله اول برای تغییرات ضریب تنگ‌شدگی، برای حل صریح مسئله دوم مناسب نیست. با مشخص بودن پارامترهای دبی، عمق پایاب، عمق بالادست و مشخصات هندسی دریاچه (ارتفاع نصب محور و شعاع دریاچه) مشخص گردید که ضریب تنگ‌شدگی



شکل ۵- بررسی انتخاب ریشه صحیح برای تعیین بازشدگی نسبی در مسئله دوم از شرایط آزمایشگاهی در شرایط جریان مستغرق

جدول ۵- ضرایب تجربی در مسئله دوم به تفکیک نوع دریچه قطاعی

مسئله	پارامتر مجهول	نوع دریچه قطاعی	ثابت‌ها	شرایط جریان	ثابت‌های هر مسئله	
			μ1	μ2	μ3	μ4
مسئله دوم	تعیین بازشدگی	لاستیکی سخت	۰/۲۹۳	۰/۴۳۹	۱۵/۵۳۴	۰/۶۲۲
			۰/۱۷۹	۰/۰۴۳	۱۰/۷۹۱	۰/۵۸۷
			۰/۲۱۲	۰/۶۵۵	۹/۲۰۵	۰/۵۹۳
		لبه تیز	۰/۱۴۱	۰/۱۶۶	۱۶/۶۵۰	۰/۶۰۴
			۰/۱۴۹	۰/۱۱۹	۱۱/۴۰۵	۰/۵۹۳
			۰/۰۹۱	-۰/۵۰۱	۲۲/۷۵۶	۰/۶۱۰
		چوگانی				

نمونه‌ای از تغییرات پیوسته بازشدگی نسبی محاسبه شده از روش پیشنهادی در مقابل پارامتر F و عمق پایاب نسبی برای دریچه قطاعی نوع لاستیکی سخت در شرایط جریان آزاد و مستغرق توأم با داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۶-د ارائه شده است. استفاده از چنین نموداری به‌عنوان راهنمایی برای بهره‌بردار دریچه‌های قطاعی، به‌منظور تنظیم بازشدگی دریچه جهت تحویل دبی هدف مورد درخواست پایین‌دست و در شرایط معین از هندسه دریچه و کانال، بسیار سودمند است.

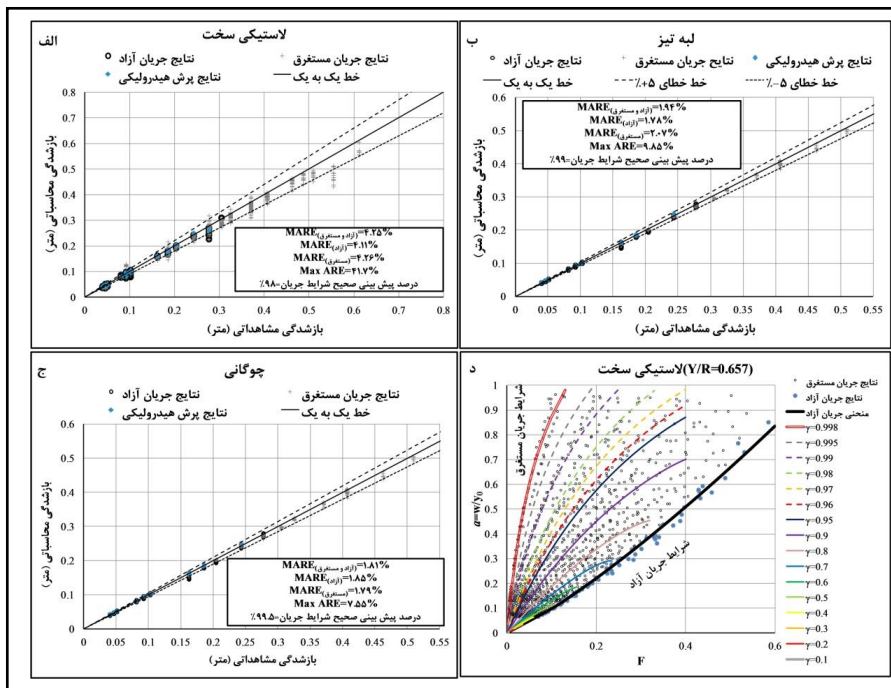
پیوست ۱، الگوریتمی جهت تعیین دبی و بازشدگی و تشخیص شرایط جریان در مسائل ۱ و ۲ بر اساس رویکرد پیشنهادی تحقیق حاضر و معادلات نهایی ارائه می‌دهد.

جدول ۶ و شکل ۶ متوسط قدرمطلق خطای نسبی در محاسبه بازشدگی دریچه‌های قطاعی از رویکرد پیشنهادی را به تفکیک نوع دریچه و شرایط جریان نشان می‌دهند. متوسط قدرمطلق خطای نسبی در محاسبه بازشدگی نسبی از کلیه داده‌های آزمایشگاهی در شرایط جریان آزاد و مستغرق برای سه نوع دریچه قطاعی لاستیکی سخت، لبه تیز و چوگانی به ترتیب معادل ۴/۲۵، ۱/۹۴ و ۱/۸۱ درصد است.

همچنین، مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی در تشخیص وضعیت جریان اعم از جریان آزاد و مستغرق برای سه دریچه قطاعی فوق به ترتیب در ۹۸، ۹۹ و ۹۹/۵ درصد کل حالات صحیح عمل کرده است.

جدول ۶- ارزیابی قابلیت رویکرد پیشنهادی در پیش‌بینی وضعیت جریان و تعیین پارامتر مجهول در مسئله دوم

مستله/پارامتر مجهول	نوع در برجه	میانگین قدرمطلق خطای نسبی، درصد (جریان مستغرق)			میانگین قدرمطلق خطای نسبی، درصد (جریان آزاد)		
		واسنجی	صحت سنجی	تمامی داده‌ها	واسنجی	صحت سنجی	تمامی داده‌ها
		میانگین قدرمطلق خطای نسبی، درصد (تمام شرایط جریان)			میانگین قدرمطلق خطای نسبی، درصد (تمام شرایط جریان)		
مستله	لاستیکی سخت	۴/۳۱	۴/۱۰	۴/۲۶	۴/۱۶	۴۱/۷۱	۹۸
دوم/تعیین	لبه تیز	۱/۹۳	۲/۴۵	۲/۰۷	۱/۹۴	۹/۸۵	۹۹
بازشدگی	چوگانی	۱/۷۶	۱/۹۰	۱/۷۹	۱/۸۱	۷/۵۵	۹۹/۵



شکل ۶- تغییرات بازشدگی محاسبه شده از رویکرد پیشنهادی در مقابل عمق بازشدگی مشاهداتی از داده‌های آزمایشگاهی

در شرایط جریان آزاد و مستغرق برای در برجه قطاعی نوع الف (لاستیکی سخت، ب) لبه تیز و ج) چوگانی،  
 د) نمونه تغییرات بازشدگی نسبی در مقابل پارامتر  $F$  و عمق پایاب نسبی برای در برجه قطاعی نوع لاستیکی سخت

**نتیجه‌گیری**

در هر مسئله علاوه بر تعیین پارامتر مجهول اعم از دبی، عمق بالادست، عمق پایاب یا بازشدگی، معیاری نیز جهت تشخیص شرایط جریان معرفی شد. ملاحظه گردید: در مسئله نخست (تعیین دبی): - در شرایط جریان آزاد، میانگین قدرمطلق خطای نسبی از روش پیشنهادی برای سه در برجه لاستیکی سخت،

در این تحقیق، بر مبنای کاربرد معادله انرژی در فاصله قبل و بعد از در برجه قطاعی و ترکیب آن با معادله مومنتم در فاصله بعد از در برجه تا مقطع پایاب، روش‌هایی نظری جهت تعیین دبی و بازشدگی در برجه‌های قطاعی در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه و بر اساس نتایج آزمایشگاهی واسنجی گردید.

- لبه‌تیز و چوگانی به‌ترتیب ۱/۴۱، ۱/۴۰ و ۱/۱۶ درصد به‌دست آمد.
- در شرایط جریان مستغرق، میانگین قدرمطلق خطای نسبی از روش پیشنهادی برای سه دریچه لاستیکی سخت، لبه‌تیز و چوگانی به‌ترتیب ۳/۲۱، ۱/۲۴ و ۱/۴۶ درصد به‌دست آمد.
- در مسئله نخست، رویکرد پیشنهادی در تشخیص شرایط جریان برای سه دریچه لاستیکی سخت، لبه‌تیز و چوگانی به‌ترتیب در ۹۸/۹۰، ۱۰۰ و ۱۰۰ درصد از حالات صحیح عمل کرده است.
- روش پیشنهادی، نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی پیشین، تخمین دقیق‌تری از دبی را برای هر سه نوع دریچه و تمام شرایط جریان ارائه می‌دهد.
- با افزایش زاویه انحراف لبه دریچه و افزایش نسبت ارتفاع محور به شعاع دریچه، تمایل به استغراق دریچه افزایش می‌یابد.
- دریچه لاستیکی سخت نسبت به دو دریچه دیگر و دریچه لبه‌تیز نسبت به دریچه چوگانی در محدود G بیشتر به صورت آزاد عمل می‌کنند.
- در مسئله دوم (تعیین بازشدگی):
- در شرایط جریان آزاد، میانگین قدرمطلق خطای نسبی از روش پیشنهادی برای سه دریچه لاستیکی سخت، لبه‌تیز و چوگانی به‌ترتیب ۳/۰۳، ۱/۷۸ و ۱/۸۵ درصد به‌دست آمد.
- در شرایط جریان مستغرق، میانگین قدرمطلق خطای نسبی از روش پیشنهادی برای سه دریچه لاستیکی سخت، لبه‌تیز و چوگانی به‌ترتیب ۴/۲۶، ۲/۰۷ و ۱/۷۹ درصد به‌دست آمد.
- در مسئله نخست، رویکرد پیشنهادی در تشخیص شرایط جریان برای سه دریچه لاستیکی سخت، لبه‌تیز و چوگانی به‌ترتیب در ۹۸، ۹۹ و ۹۹/۵ درصد از حالات صحیح عمل کرده است. همچنین در هر مسئله نمودارهای عمومی تغییرات پارامتر وابسته در مقابل پارامترهای مستقل رسم شده است. پیشنهاد می‌شود با اجرای آزمایش‌ها در محدوده‌ای گسترده‌تر از تغییرات Y/R و  $\theta$ ، دامنه کاربرد روابط پیشنهادی توسعه یابد.

### قدردانی

نویسندگان از قطب علمی ارزیابی و بهسازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی دانشگاه تهران در حمایت از اجرای این تحقیق، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنند.

### مراجع

- Bijankhan, M., Kouchakzadeh, S. and Bayat, E. 2011. Distinguishing condition curve for radial gates. Flow Meas. Instrum. 22(5): 500-506.
- Bijankhan, M., Ferro, V. and Kouchakzadeh, S. 2013. New stage-discharge relationships for radial gates. ASCE J. Irrig. Drain. Eng. 139(5): 378-387.
- Buyalski, C. P. 1983. Discharge algorithms for canal radial gates. Research Report REC-ERC-83-9. United States Bureau of Reclamation. Denver. USA.
- Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S. and Replogle, J. A. 2003. Calibration of submerged radial gates. ASCE J. Hydraul. Eng. 129(9): 680-687.
- Metzler, D. E. 1948. A model study of tainter gate operation. M. Sc. Thesis. Iowa State University. Iowa City, IA, USA.



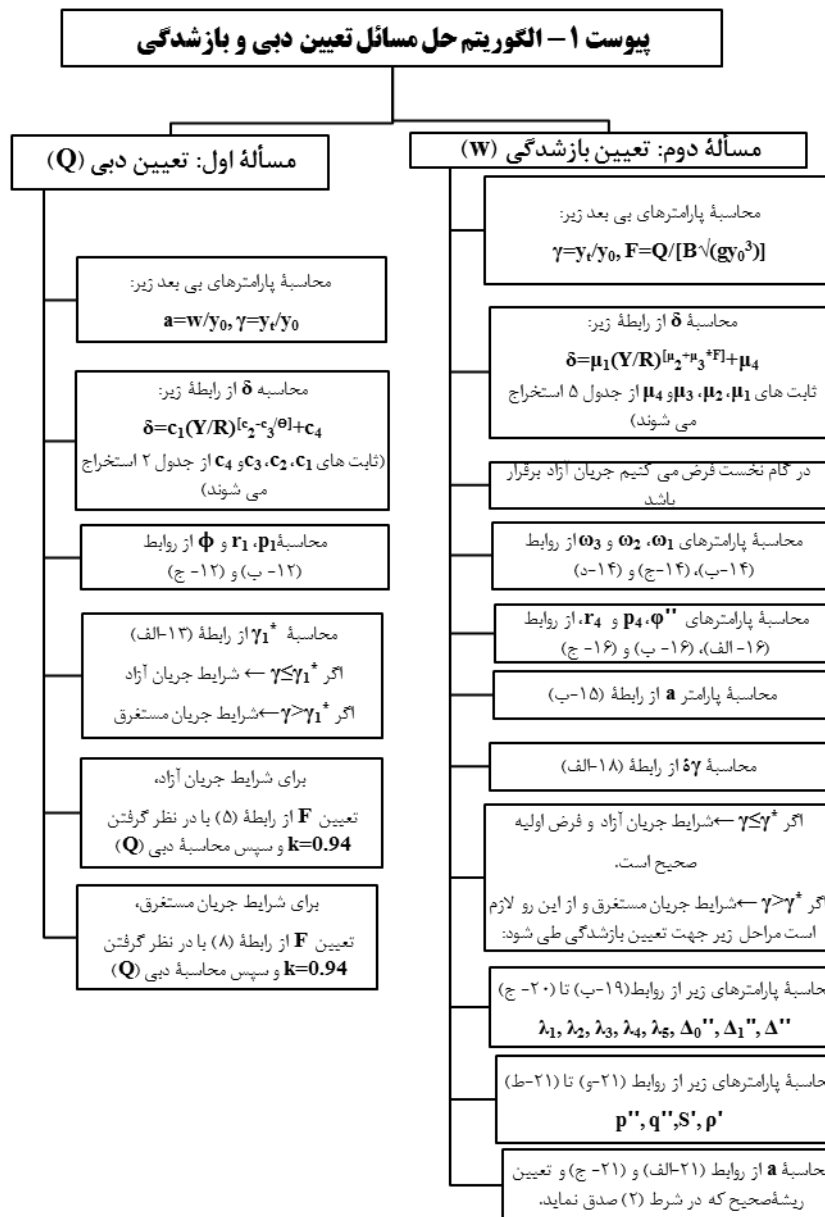
Shahrokhnia, M. A. and Javan, M. 2006. Dimensionless stage–discharge relationship in radial gates. ASCE J. Irrig. Drain. Eng. 132(2):180-184.

Toch, A. 1955. Discharge characteristics of Tainter gates. T. Am. Soc. Civil Eng. 120, 290-300.

Wahl, T. L. 2005. Refined energy correction for calibration of submerged radial gates. ASCE J. Irrig. Drain. Eng. 131(6): 457-466.

Wu, S. and Rajaratnam, N. 2015. Solutions to rectangular sluice gate flow problems. J. Irrig. Drain. Eng. 141(12): 06015003 (1-7).

Zahedani, M. R., Keshavarzi. A., Javan. M. and Shahrokhnia, M. A. 2012. New equation for estimation of radial gate discharge. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Manage. 165(5): 253-263.



## **Analysis of the Discharge and Opening of the Radial Gates under Free and Submerged Flow Condition**

**H. Khalili-Shayan, J. Farhoudi\* and A. Vatankhah**

\*Corresponding Author: Professor, Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran, Alborz, Iran.  
Email: jfarhoudi@ut.ac.ir

Received: 15 March 2017; Accepted: 7 February 2018

### **Abstract**

Most of the previous studies related to radial gates are focused on the estimation of discharge from the gates as a flow measurement structure. However, determination of the gate opening for passing a certain value of the discharge is rarely considered in previous studies as a regulator structure. The present work presents some theoretical equations for explicit estimation of the outflow from the gate (first problem), and gate opening (second problem) for free and submerged flow conditions by combination of Energy and Momentum principles. For any problems, it was developed some criteria to identify flow conditions. These equations were calibrated and validated by means of 2657 experimental records retrieved from research conducted on three types of radial gates. The paper would present an analytical approach to illustrate the reliability of proposed equations for estimation of discharge and the opening of the gate by taking benefits from the mean absolute relative errors which observed to be 1.94% and 2.67, respectively. It was noted that the used criteria conform with 99.6% and 98.8% of all observations at first and second problems, respectively. The results show that the tailwater depth under distinguishing limiting decreases by increasing in the gate lip angle and the ratio of turnnion pin height to the gate arm radius. Also, the hard rubber bar gate tends to operate under free flow condition in a wider range in comparison with two other gates.

**Keywords:** Discharge, Energy-Momentum, Flow Regulation, Measurement