dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45893

ارائه یک مدل خودشویی برای کانال‌ها با مقطع ذوزنقه

میر جعفر صادق صفری[1]، میر علی محمدی[2]

۱- دکترای مهندسی عمران- هیدرولیک و منابع آب، دانشکده فنی دانشگاه ارومیه
۲- دانشیار مهندسی عمران- هیدرولیک و مکانیک رودخانه، دانشکده فنی دانشگاه ارومیه
(نویسنده مسئول) m.mohammadi@urmia.ac.ir

(دریافت ۹٤/۹/۱۷ پذیرش ۹۵/۳/۲۸)

چکیده

بررسی قابلیت انتقال رسوب کانال، یکی از عوامل مهم در طراحی سیستم‌های دفع فاضلاب و زهکشی آبهای سطحی شهری است. کاهش ظرفیت هیدرولیکی جریان در نتیجه ته‌نشینی ذرات رسوبی مشکلات عدیده‌ای را ایجاد می‌کند. طراحی کانال بر اساس معیار خودشویی، ته‌نشینی رسوب در جریان را به حداقل رسانده و از کاهش ظرفیت هیدرولیکی جریان جلوگیری می‌کند. بررسی ادبیات پیشینه موضوع نشان می‌دهد که مدل خودشویی برای کانال ذوزنقه‌ای پیشنهاد نشده است. در این تحقیق آزمایش‌ها برای بررسی شرایط خودشویی عدم ته‌نشینی با بستر تمیز در یک کانال با مقطع ذوزنقه‌ای انجام شد. آزمایش‌ها با استفاده از چهار اندازه ذره رسوبی و در شیب‌ها و دبی‌های مختلف انجام شد. بر پایه داده‌های آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن پارامترهای جریان، سیال، رسوب و کانال، یک مدل خودشویی بار بستر برای کانال ذوزنقه‌ای پیشنهاد شد. مدل ارائه شده در این تحقیق با مدل‌های متناظر در پیشینه موضوع بر اساس دو شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا و درصد میانگین مطلق خطا بر روی داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده برای کانال ذوزنقه‌ای مقایسه شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، شکل سطح مقطع کانال عاملی مؤثر برای تعیین سرعت خودشویی کانال است. به‌دلیل اینکه شکل مقطع کانال بر روی مقاومت جریان تأثیر می‌گذارد، مدل‌هایی که پارامتر ضریب اصطکاک کانال را به‌عنوان متغیر مستقل استفاده کرده‌اند، دارای قابلیت محاسباتی بهتری می‌باشند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل‌های خودشویی ارائه شده برای کانال‌های دایره‌ای و مستطیلی به هنگام کاربرد در کانال ذوزنقه‌ای خطایی نزدیک به ۱۵ درصد دارند. مدل ارائه شده در این تحقیق برای طراحی کانال‌های با جداره صلب با شکل سطح مقطع ذوزنقه‌ای توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بار بستر، سطح مقطع، انتقال رسوب، خودشویی، کانال ذوزنقه‌ای

۱- مقدمه

بررسی قابلیت حمل رسوب، یکی از موارد مهم طراحی کانال در مهندسی هیدرولیک است. سیستم‌های فاضلاب، کانال‌های آبیاری، کانال‌های جمع‌آوری آبهای سطحی شهر و کانال‌های وابسته به سد جزو کانال‌ها با جداره صلب به‌شمار می‌آیند. طراحی این کانال‌ها باید طوری انجام شود که جریان توانایی حمل رسوب را داشته باشد و از ته‌نشینی رسوب جلوگیری شود. ته‌نشینی رسوب در کانال‌ها موجب پدید آمدن عوامل نامطلوب زیادی می‌شود. مهم‌ترین عامل نامطلوب ایجاد شده توسط ته‌نشینی رسوب، کاهش ظرفیت هیدرولیکی کانال است. ته‌نشینی ذرات رسوبی موجب تغییر در شکل سطح مقطع کانال می‌شود و در نتیجه، زبری جداره، توزیع سرعت و تنش‌برشی در کانال تغییر خواهد کرد. پخش آلودگی نیز عامل نامطلوب دیگری در نتیجه ته‌نشینی رسوب است که نیاز به طراحی کانال با در نظر گرفتن پدیده حمل رسوب را با اهمیت نشان می‌دهد.

معیار طراحی کانال با در نظر گرفتن پدیده حمل رسوب، بر اساس معیار خودشویی می‌باشد. کانالی قابلیت خودشویی را خواهد داشت که توانایی حمل رسوب را تا جایی داشته باشد که یک تعادل بین بار رسوبی در حال حرکت و ته‌نشین شده ایجاد کند (Butler et al. 1996; 2003).

به زبان ساده‌تر، کانال باید یک ظرفیت هیدرولیکی را دارا باشد که ذرات رسوبی موجود در کف کانال وارد جریان شده و یا اینکه

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45893

ذرات رسوبی در حال حرکت در جریان ته‌نشین نشوند. با در نظر گرفتن این تعریف، مدل‌های خودشویی موجود را می‌توان به دو گروه اصلی ۱) حرکت ذرات رسوبی موجود در بستر و ۲) عدم ته‌نشینی تقسیم نمود. مدل‌هایی که حرکت ذرات رسوبی در بستر را ایجاد می‌کنند شامل مدل‌های "آستانه حرکت" و "شستگی" می‌باشند (Safari et al. 2011; 2013; Novak & Nalluri 1984; Mohammadi 2005; Bong et al. 2013; Camp 1946).

گروه اصلی دوم یعنی عدم ته‌نشینی را می‌توان به سه زیرگروه "عدم ته‌نشینی با بستر تمیز"، "عدم ته‌نشینی با بستر ته‌نشین شده" و "آستانه ته‌نشینی" تقسیم نمود. عدم ته‌نشینی با بستر تمیز عبارت است از مدلی که مقدار حداقل سرعت و یا تنش‌برشی جریان که هیچ ذره رسوبی ته‌نشین نشود را بدهد. این مدل‌ها برای بار معلق و یا بار بستر ارائه شده‌اند (Macke 1982; Arora et al. 1984; Mayerle et al. 1991; Ab Ghani 1993; May 1993; 1996; Ota & Nalluri 2003; Vongvisessomjai et al. 2010).

در مدل‌های عدم ته‌نشینی با بستر ته‌نشین شده کانال طوری طراحی می‌شود که اجازه ته‌نشینی رسوب به مقدار ۱تا ۲ درصد قطر کانال دایره‌ای داده می‌شود (Butler et al. 2003; Nalluri & Ab Ghani 1996).

این مدل‌ها فقط برای بار بستر ارائه شده‌اند (Nalluri & Ab Ghani 1996; Nalluri et al. 1994).

مدل‌های موجود فقط برای کانال با مقطع دایره‌ای و مستطیلی ارائه شده و برای سایر سطح مقطع کانال‌ها مدل خودشویی موجود نمی‌باشد. طراحی کانال بر اساس معیار عدم ته‌نشینی با بستر ته‌نشین شده نیاز به دقت عمل زیادی دارد، چون جریان به حالت بحرانی نزدیک می‌باشد. معیار آستانه ته‌نشینی اولین بار در سال ۱۹۹۲ ارائه شد (Loveless 1992). آستانه ته‌نشینی عبارت است از شرایطی که ذرات رسوبی در حال حرکت در داخل جریان، شروع به ته‌نشینی می‌کنند. ذرات رسوبی ته‌نشین شده، لایه ته‌نشین شده در کف کانال ایجاد نکرده و به‌صورت بار بستر در کف کانال حرکت می‌کنند. صفری و همکاران این مفهوم را گسترش داده و مدل‌های آستانه ته‌نشینی برای طراحی کانال ارائه کردند (Safari et al. 2014; 2015).

برای سیستم‌های فاضلاب به‌طور متداول از سطح مقطع دایره‌ای استفاده می‌کنند. ولی از کانال‌های غیر دایره‌ای نیز می‌توان برای طراحی کانال‌های فاضلاب و همچنین سیستم‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی شهری استفاده کرد (Butler & Davis 2004). در طراحی کانال‌های فاضلاب با شکل سطح مقطع‌های مختلف می‌توان به شکل‌های مستطیلی، ذوزنقه‌ای، U-شکل، بیضی، تخم‌مرغی، نعل اسبی و کانال‌های با سطح مقطع مرکب اشاره کرد (Butler & Davis 2004). در روش‌های قدیمی برای طراحی کانال‌های غیر دایره‌ای، استفاده از مقدار چهار برابر شعاع هیدرولیکی به جای قطر کانال دایره‌ای در مدل‌های طراحی، پیشنهاد شده است. ولی به‌دلیل تفاوت توزیع سرعت و توزیع تنش برشی جداره در کانال‌ها با شکل سطح مقطع‌های مختلف، استفاده از این روش صحیح نیست (Novak & Nalluri 1984; Safari et al. 2015).

در این مطالعه آزمایشگاهی، شرایط جریان در حالت عدم ته‌نشینی با بستر تمیز برای بار بستر بررسی شد. از آنجا که براساس تحقیقات انجام یافته مدل خودشویی برای کانال با مقطع ذوزنقه‌ای موجود نمی‌باشد، در این تحقیق آزمایش‌ها در یک کانال ذوزنقه‌ای انجام شد. این پژوهش با هدف ارائه یک مدل خودشویی عدم ته‌نشینی با بستر تمیز برای بار بستر، کاربردی برای کانال با مقطع ذوزنقه‌ای انجام شد.

۱-۱- خودشویی بر اساس معیار عدم ته‌نشینی

در این معیار طراحی برای در حرکت نگه داشتن ذرات رسوبی، حداقل سرعت یا تنش برشی جریان جهت ایجاد شرایط عدم ته‌نشینی استفاده می‌شود. در روش‌های سنتی یک مقدار مشخص سرعت جریان و یا تنش برشی بر اساس تجربه و بدون در نظر گرفتن عوامل مؤثر حرکت رسوب در جریان استفاده می‌شد (Vongvisessomjai et al. 2010; Nalluri & Abshani 1996; GIRIA 1986; Mayerie 1988).

کاربرد روش حداقل سرعت طراحی شایع‌تر از حداقل تنش برشی است. سرعت طراحی در محدوده ۰/۳ تا ۱ متر بر ثانیه گزارش شده است. سرعت طراحی بر اساس کشور و همچنین نوع سیستم فاضلاب (سطحی، خانگی، ترکیبی) تغییر می‌کند. روش طراحی بر اساس سرعت، بیشتر در کشور آمریکا و کشورهای اروپایی مثل فرانسه، آلمان و انگلستان استفاده شده است. در این روش عوامل تأثیرگذاری نظیر نوع و مقدار رسوب، اندازه و شکل

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45893

مقطع کانال در نظر گرفته نشده است. روش تنش برشی نیز در کشورهایی نظیر آمریکا، انگلستان، نروژ، آلمان و سوئد در محدوده ۱ تا ۱۲/۶ نیوتن بر مترمربع به‌کار برده شده است. روش تنش برشی نیز ایرادات ذکر شده در روش سرعت را داراست. پس از دهه نود میلادی به جای استفاده از یک مقدار مشخص برای طراحی کانال، مدل‌های خودشویی با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در جریان سیال و رسوب پیشنهاد شده‌اند. این مدل‌ها به روش‌های طراحی بر اساس عدم ته‌نشینی با بستر ته‌نشین شده و عدم ته‌نشینی با بستر تمیز تقسیم شده‌اند (Vongvisessomjai et al. 2010). صفری و همکاران مفهوم آستانه ته‌نشینی را برای طراحی کانال جهت خودشویی بر اساس معیار عدم ته‌نشینی ارائه کردند (Safari et al. 2014; 2015). در این تحقیق شرایط عدم ته‌نشینی با بستر تمیز بررسی شده است. مثال‌هایی از تحقیقات انجام شده در زمینه معیار عدم ته‌نشینی با بستر تمیز در ادامه بیان شده است.

شرایط خودشویی بر اساس معیار عدم ته‌نشینی با بستر تمیز برای بار بستر در پژوهشی بررسی و آزمایش‌ها در کانال مستطیلی با عرض بستر ۳۱۱ و ۴۶۲ میلی‌متر با استفاده از ذرات رسوبی ماسه و شن در محدوده ۰/۵ تا ۸/۷۴ میلی‌متر انجام شد و مدل زیر برای کانال با مقطع مستطیلی پیشنهاد شد (Mayerle et al. 1991; 1988).

$$\frac{V_n}{\sqrt{gd(s-1)}} = 5.45C_v^{0.15}D_{gr}^{-0.11}\left(\frac{d}{R}\right)^{-0.43} \qquad (۱)$$

که در آن

V_n سرعت خودشویی، g شتاب ثقلی زمین، d اندازه میانه ذرات رسوبی، s نسبت چگالی رسوب به سیال، C_v غلظت حجمی رسوب در سیال، R شعاع هیدرولیکی و D_{gr} اندازه بی‌بعد ذرات رسوبی است که از معادله زیر محاسبه می‌شود

$$D_{gr} = \left(\frac{(s-1)gd^3}{\nu^2}\right)^{1/3} \qquad (۲)$$

که در آن

ν لزجت دینامیکی سیال است. طرف چپ معادله (۱)، $(V_n/\sqrt{gd(s-1)})$ عدد فرود ذره رسوبی و در طرف راست معادله (d/R) اندازه نسبی ذره رسوبی است. ابغانی آزمایش‌های خود را در کانال‌ها با مقطع دایره‌ای در سه اندازه متفاوت با قطرهای ۱۵۴، ۳۰۵ و ۴۵۰ میلی‌متر جهت بررسی شرایط خودشویی بر اساس معیار عدم ته‌نشینی با بستر تمیز برای بار بستر با استفاده از ذرات رسوبی ماسه و شن در محدوده ۰/۷۲ تا ۸/۳۰ میلی‌متر انجام داد و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، مدل زیر را برای کانال با مقطع دایره‌ای با بستر تمیز ارائه کرد [۱۲].

$$\frac{V_n}{\sqrt{gd(s-1)}} = 3.08C_v^{0.21}D_{gr}^{-0.09}\left(\frac{R}{d}\right)^{0.53}\lambda^{-0.21} \qquad (۳)$$

که در آن λ ضریب اصطکاک کانال است که از معادله دارسی- ویسباخ به شکل زیر محاسبه می‌شود

$$\lambda = \frac{8gRS}{V_n^2} \qquad (۴)$$

که در آن S شیب کف کانال می‌باشد. در پژوهشی شرایط خودشویی بر اساس معیار عدم ته‌نشینی با بستر تمیز برای بار بستر، در دو کانال دایره‌ای با قطرهای ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر با استفاده از ذرات رسوبی در محدوده ۰/۲۰ تا ۰/۴۳ میلی‌متر بررسی شده و معادله زیر برای بار بستر پیشنهاد شده است (Vongvisessomjai et al. 2010).

$$\frac{V_n}{\sqrt{gd(s-1)}} = 4.31C_v^{0.226}\left(\frac{d}{R}\right)^{-0.616} \qquad (۵)$$

همان‌طور که مشاهده شد، مدل‌های خودشویی بر اساس تحلیل ابعادی و با استفاده از پارامترهای بی‌بعد ارائه شده‌اند. در اغلب موارد، پارامترهای عدد فرود ذره، غلظت حجمی رسوب و اندازه نسبی رسوب استفاده شده‌اند. در مدل ابغانی پارامتر مقاومت جریان یعنی ضریب اصطکاک کانال نیز در نظر گرفته شده است (Ab Ghani 1993). مدل‌های ارئه شده اغلب برای کانال‌های دایره‌ای و در مواردی برای کانال‌های مستطیلی ارائه شده است. بررسی پیشینه موضوع نشان می‌دهد که مدل خودشویی برای کانال با مقطع ذوزنقه‌ای ارائه نشده است.

۲- روش کار

در این تحقیق آزمایش‌ها با هدف بررسی شرایط جریان و تعیین

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45893

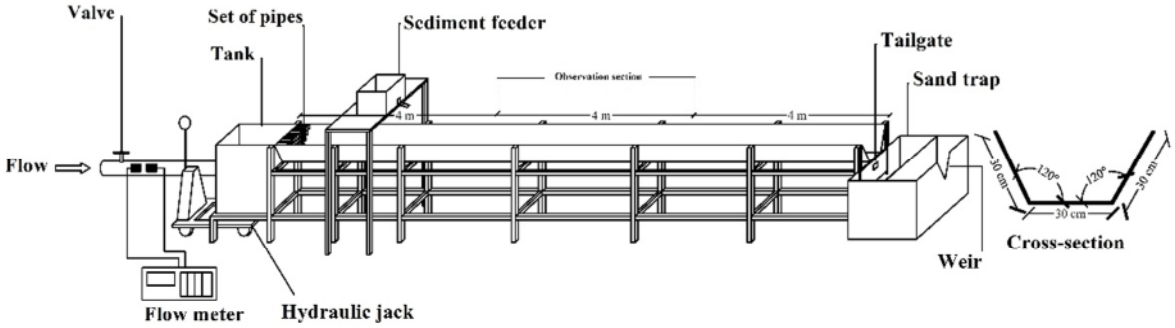

Fig.1. A lab flume and channel cross section

شکل۱- فلوم آزمایشگاهی و سطح مقطع کانال

حداقل سرعت در وضعیت خودشویی بر اساس معیار عدم ته‌نشینی با بستر تمیز انجام یافت. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی استانبول و در یک کانال روباز با شکل سطح مقطع ذوزنقه‌ای انجام شد (Safari 2016) (شکل ۱). طول کانال ۱۲ متر، طول هر ضلع سطح مقطع آن ۳۰۰ میلی‌متر و زاویه خارجی اضلاع جانبی آن ۶۰ درجه بود. آب مورد استفاده در آزمایش از یک مخزن تعبیه شده در بالادست کانال و از شبکه آب آزمایشگاه تغذیه می‌شد. جریان یکنواخت با کنترل دریچه در پایین‌دست کانال ایجاد شد. دبی کانال با یک جریان‌سنج دیجیتال اندازه‌گیری شد. ذرات رسوبی با استفاده از یک مخزن تغذیه‌کننده لرزان که در بالادست کانال تعبیه شده بود، به داخل کانال ریخته می‌شد. چهار نوع رسوب با اندازه میانه ۰/۱۵، ۰/۵۸، ۱/۰۸ و ۱/۵۲ میلی‌متر استفاده شدند. در آزمایش‌ها، ابتدا شیب کانال تنظیم و سپس اندازه‌گیری و مشاهدات برای هر کدام از چهار اندازه رسوب انجام شد. در آغاز آزمایش، شرایط جریان به گونه‌ای تنظیم شد که قابلیت حمل ذرات رسوبی را به‌طور کامل داشته و هیچ ذره رسوبی ته‌نشین نشود. برای نیل به این هدف، شیب و دبی جریان تنظیم شد. با کاهش دبی جریان، وضعیت عدم ته‌نشینی تدریجاً به وضعیت ته‌نشینی تغییر پیدا کرد. در حالت ته‌نشینی، ذرات رسوبی در قسمت‌هایی از کف کانال شروع به انباشته شدن کردند. در این شرایط سرعت جریان به اندازه‌ای بود که ذرات رسوبی ته‌نشین شوند. به این ترتیب حداقل سرعت جریان به‌منظور نگه داشتن رسوب در حال حرکت، اندازه‌گیری شد. اگر سرعت جریان به‌صورت مداوم کمتر شود، مقدار ذرات رسوبی انباشته شده در کف کانال نیز تدریجاً افزایش پیدا می‌کنند.

۳- نتایج و بحث

در پدیده انتقال رسوب، عوامل مؤثر جریان، سیال، رسوب و کانال حائز اهمیت می‌باشند. با توجه به مدل‌های خودشویی ذکر شده، پارامترهای سرعت جریان (V_n)، شعاع هیدرولیکی (R) و شتاب ثقلی (g) به‌عنوان عوامل جریان؛ پارامترهای لزجت دینامیکی (ν) و چگالی سیال (ρ) به‌عنوان عوامل سیال؛ چگالی رسوب (ρ_s) و اندازه میانه ذرات رسوبی (d) و غلظت حجمی رسوب در سیال (C_v) به‌عنوان عوامل رسوب و ضریب اصطکاک کانال (λ) را به‌عنوان عامل کانال می‌توان انتخاب کرد. با در نظر گرفتن پارامترهای ذکر شده می‌توان نوشت

$$f(V_n, R, g, \nu, \rho, \rho s, d, C_v, \lambda)=0 \qquad (۶)$$

در معادله بالا می‌توان به جای ρ_s از $\Delta\rho = (\rho_s - \rho)$ استفاده نمود. همچنین، برای بهتر نشان دادن اهمیت اندازه رسوب می‌توان پارامتر اندازه بی‌بعد ذره رسوبی (Dgr) را به معادله بالا اضافه نمود. از آنجایی که ν لزجت دینامیکی سیال در معادله Dgr به‌کار رفته است، می‌توان ν را از معادله ۶ حذف نمود. در نتیجه معادله ۶ به شکل زیر تغییر می‌کند

$$f(V_n, R, g, \rho, \Delta\rho, d, C_v, \lambda, D_{gr})=0 \qquad (۷)$$

با استفاده از تئوری پی بوکینگهام[1] و انتخاب پارامترهای V_n، d و ρ به‌عنوان متغیرهای تکرارشونده، معادله ۸ به‌دست می‌آید

[1] Buckingham π

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45893

$$\frac{V_n}{\sqrt{gd(s-1)}} = f\left(C_v, D_{gr}, \frac{d}{R}, \lambda\right) \quad (۸)$$

علاوه بر پارامترهای بی‌بعد λ ، C، D_{gr} با به کار بردن تحلیل ابعادی به روش تئوری پی بوکینگهام عدد فرود ذره $(V_n / \sqrt{gd(s-1)})$ و اندازه نسبی ذره (d/R) نیز به دست می‌آیند. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انجام یافته در این تحقیق، معادله زیر به‌عنوان یک مدل خودشویی برای کانال با مقطع ذوزنقه‌ای بر اساس معیار عدم ته‌نشینی با بستر تمیز برای بار بستر ارائه می‌شود

$$\frac{V_n}{\sqrt{gd(s-1)}} = 1.28 C_v^{0.14} D_{gr}^{-0.11} \left(\frac{d}{R}\right)^{-0.42} \lambda^{-0.1} \quad (۹)$$
$$R^2 = 0.97$$

کارایی مدل پیشنهادی با معادلات ۱، ۳ و ۵ بر روی داده‌های آزمایشگاهی، بررسی شد (Mayerle et al. 1991; Ab Ghani 1993; Vongvisessomjai et al. 2010).

به این منظور دو شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) به‌کار برده شد. RMSE اختلاف بین سرعت مشاهداتی و محاسباتی را نشان می‌دهد و از معادله زیر به‌دست می‌آید

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (V_{n\,i}^{m} - V_{n\,i}^{c})^2}{n}} \quad (۱۰)$$

که در آن

V_n^m سرعت مشاهداتی در آزمایش‌ها، V_n^c سرعت محاسباتی توسط مدل و n تعداد داده‌ها است. MAPE دقت مدل را بر حسب درصد نشان می‌دهد و از معادله زیر محاسبه می‌شود

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{V_{n\,i}^{c} - V_{n\,i}^{m}}{V_{n\,i}^{m}} \right| \times 100 \quad (۱۱)$$

در جدول ۱ مقادیر محاسبه شده RMSE و MAPE برای معادلات ۹ ، ۱، ۳ و ۵ داده شده است. نتایج به‌دست آمده از جدول ۱ نشان می‌دهد که معادله ۹ قابلیت محاسبه بهتری نسبت به دیگر معادلات را داراست. مقادیر RMSE و MAPE معادله ۹ به‌ترتیب برابر با ۰/۰۴۳ متر بر ثانیه و ۶/۹۵ درصد است. به‌دلیل این که معادله ۹ بر پایه داده‌های آزمایشگاهی کانال با مقطع ذوزنقه‌ای ایجاد شده است، نتایج به‌دست آمده منطقی به‌نظر می‌رسد. معادله خودشویی پیشنهاد شده توسط مایرل و همکاران کارایی نسبتاً قابل قبولی برای پیش‌بینی سرعت جریان در شرایط خودشویی بر اساس معیار عدم ته‌نشینی با بستر تمیز را دارا است (Mayerle et al. 1991).

ولی مقدار خطای نزدیک به ۱۵ درصد احتمال ایجاد شرایط نامطلوب ته‌نشینی را ممکن است فراهم کند. معادله ۱ برای کانال‌ها با جداره صلب با شکل سطح مقطع مستطیلی ارائه شده و کاربرد آن در مقاطع ذوزنقه‌ای توصیه نمی‌شود. معادله پیشنهاد شده توسط ابغانی کارایی بهتری نسبت به معادلات ۱ و ۵ داراست (Ab Ghani 1993). دلیل این موضوع می‌تواند وجود پارامتر مقاومت جریان در معادله ابغانی باشد. یکی از اثرهای شکل سطح مقطع کانال، تغییر در مقاومت جریان است. به همین خاطر معادله ۳ که برای کانال‌های دایره‌ای پیشنهاد شده، قابلیت محاسباتی بهتری نسبت به معادله ۵ داراست. معادله پیشنهاد شده توسط ونگویس سومجای پایین‌ترین کارایی را در بین مدل‌ها داشت (Vongvisessomjai et al. 2010). این معادله ۵ برای کانال‌های دایره‌ای ارائه شده و قابلیت محاسباتی ضعیف‌تری را برای سرعت خودشویی در کانال‌ها با مقطع ذوزنقه‌ای دارد.

جدول ۱- کارایی مدل‌های خودشویی بر روی داده‌های کانال ذوزنقه‌ای بر اساس RMSE و MAPE

Table 1. Efficiency of self-cleansing models as applied to the data from channels with trapezoidal sections based on RMSE and MAPE

Reference	Cross-section	RMSE (m/s)	MAPE (%)
(Mayerle et al. 1991)	Rectangular	0.097	14.86
(Ab Ghani 1993)	Circular	0.090	13.11
(Vongvisessamjai et al. 2010)	Circular	0.108	14.93
Present study	Trapezoidal	0.043	6.95

در شکل‌های ۲ تا ۵ به‌ترتیب مقادیر سرعت جریان مشاهداتی در آزمایش‌ها و مقادیر محاسباتی به‌دست آمده از معادلات ۱، ۳، ۵ و ۹ با یگدیگر مقایسه شده‌اند. شکل ۲ نشان می‌دهد که سرعت‌های محاسباتی معادله ۱ پیشنهاد شده توسط مایرل و همکاران نسبت به

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45893

دیگر مدل‌ها دارای پراکندگی بیشتری است (Mayerle et al. 1991). اگرچه در تعدادی از داده‌ها سرعت جریان مشاهداتی تقریباً منطبق بر سرعت جریان محاسباتی است، ولی قسمتی از داده‌ها بالای خط نیمساز و قسمتی دیگر در پایین آن قرار گرفته‌اند. شکل‌های ۳ و ۴ کارایی معادله ۳ و ۵ برای کانال‌ها با مقطع دایره‌ای ارائه شده‌اند را نشان می‌دهد. شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهند که تعداد اندکی از داده‌های کانال با مقطع ذوزنقه‌ای در زیر و یا روی خط نیمساز قرار گرفته و تعداد قابل ملاحظه‌ای از داده‌ها بالای خط نیمساز قرار گرفته‌اند. این نتیجه نشان دهنده این است که مدل‌های ابغانی و ونگویس سومجای سرعت بیشتری را برای کانال‌های ذوزنقه‌ای پیش‌بینی می‌کنند (Ab Ghani 1993; Vongvisessomjai et al. 2010).

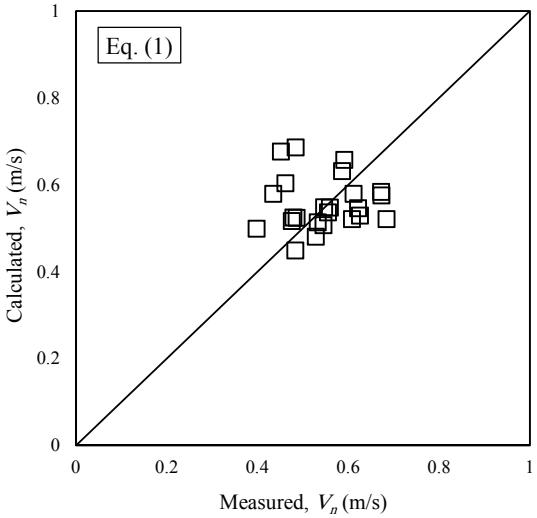

Fig. 2. Comparison of observed self-cleansing flow rates and those calculated by Mayerle et al's equation (Mayerle et al. 1991)

شکل ۲- مقایسه سرعت جریان خودشویی مشاهداتی و محاسباتی توسط معادله ۱ (Mayerle et al. 1991)

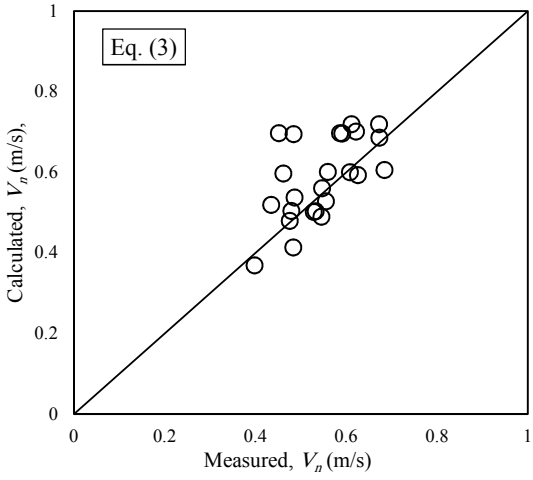

Fig. 3. Comparison of observed and calculated self-cleansing flow rates by equation 3 (Ab Ghani 1993)

شکل ۳- مقایسه سرعت جریان خودشویی مشاهداتی و محاسباتی توسط معادله ۳ (Ab Ghani 1993)

بنابراین مدل‌های خودشویی ارائه شده برای کانال‌های دایره‌ای برای طراحی کانال‌های ذوزنقه‌ای توصیه نمی‌شوند. ولی همانطور که از شکل ۵ پیداست، تقریباً مقادیر مشاهداتی سرعت جریان در آزمایش‌ها با مقادیر متقابل محاسبه شده توسط معادله ۹ نزدیک بوده و تعداد قابل ملاحظه‌ای از داده‌ها نزدیک خط نیمساز مبدأ مختصات می‌باشند.

همان‌طور که قبلاً توسط ابغانی و صفری و همکاران گزارش شده است، اندازه و شکل سطح مقطع کانال عامل مهمی برای طراحی کانال می‌باشد (Mayerle et al. 1991; Ab Ghani 1993; Safari et al. 2015).

ارزیابی مدل‌های خودشویی نشان می‌دهد که اگر چه کارایی مدل‌های موجود نیز نسبتاً قابل قبول به‌نظر می‌رسد، ولی هر مدل

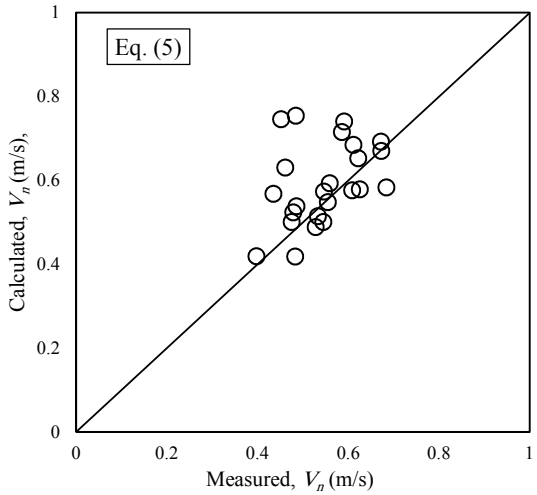

Fig. 4. Comparison of observed self-cleansing flow rates and those calculated by Vongvisessomjai et al.'s equation 5 (Vongvisessomjai 2010)

شکل ۴- مقایسه سرعت جریان خودشویی مشاهداتی و محاسباتی توسط معادله ۵ (Vongvisessomjai 2010)

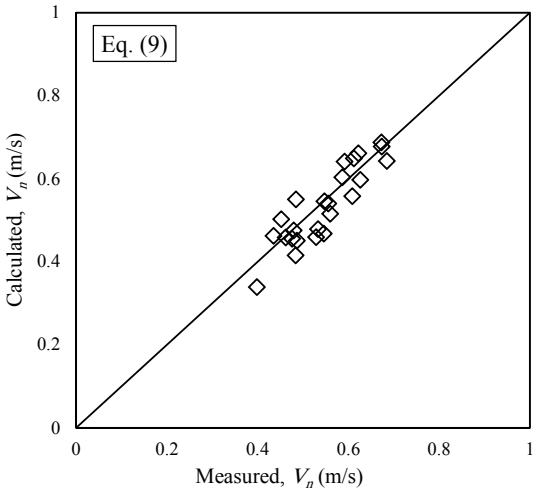

Fig. 5. Comparison of observed and calculated self-cleansing flow rates by equation 9

شکل ۵- مقایسه سرعت جریان خودشویی مشاهداتی و محاسباتی توسط معادله ۹

بهترین کارایی را در موردی خواهد داشت که بر پایه کانال با سطح مقطع مشخص ایجاد شده است. دلیل پایین بودن کارایی مدل‌های ارائه شده برای کانال‌های مستطیلی و دایره‌ای در طراحی کانال‌های ذوزنقه‌ای تفاوت در شکل سطح مقطع کانال می‌باشد. توزیع سرعت و تنش برشی در جداره هر کانال متفاوت است. در نتیجه سرعت میانگین جریان در شرایط عدم ته‌نشینی رسوب در هر کانال نیز متفاوت خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک مدل خودشویی عدم ته‌نشینی با بستر تمیز برای بار بستر و کاربردی برای کانال با مقطع ذوزنقه‌ای پیشنهاد شد. مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن پارامترهای سرعت جریان، شعاع هیدرولیکی و شتاب ثقلی به‌عنوان عوامل جریان؛ پارامترهای لزجت دینامیکی و چگالی سیال به‌عنوان عوامل سیال؛ چگالی و اندازه میانه ذرات رسوبی و غلظت حجمی رسوب در سیال به‌عنوان عوامل رسوب و ضریب اصطکاک کانال به‌عنوان عامل کانال؛ بنا شده است. ارزیابی مدل و مقایسه آن با مدل‌های موجود نشان داد که مدل‌های خودشویی ارائه شده برای کانال‌های دایره‌ای و مستطیلی به هنگام کاربرد در کانال ذوزنقه‌ای خطایی نزدیک به ۱۵ درصد دارند. به همین دلیل مدل‌های موجود در پیشینه موضوع برای کانال‌ها با سطح مقطع دایره‌ای و مستطیلی کاربرد داشته و برای کانال با مقطع ذوزنقه‌ای توصیه نمی‌شوند. مدل ارائه شده در این تحقیق برای طراحی کانال‌های با جداره صلب با شکل سطح مقطع ذوزنقه‌ای می‌تواند استفاده شود.

References

Ab Ghani, A., 1993, "Sediment transport in sewers", PhD Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, UK.

Arora, A. K., Ranga Raju, K. G. & Garde, R. J., 1984, "Criterion for deposition of sediment transported in rigid boundary channels", *Channels and channel control structures*., Springer Berlin Heidelberg, 413-424.

Butler, D., May, R. W. P. & Ackers, J. C., 1996, "Sediment transport in sewers. Pt. 2: Design", *Proc. Instit. Civ. Eng*., 118(2), 113-120.

Bong, C. H. J., Lau, T. L. & Ab Ghani, A., 2013, "Verification of equations for incipient motion studies for a rigid rectangular channel", *Water Science and Technology*, 67(2), 395-403.

Butler, D. & Davies, J., 2004, *Urban drainage*, CRC Press, Boca Raton.

Butler, D., May, R. & Ackers, J., 2003, "Self-cleansing sewer design based on sediment transport principles", *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(4), 276-282.

Camp, T. R., 1946, "Design of sewers to facilitate flow", *Sewage Work Journal*, 18(1), 3-16.

CIRIA, 1986, *Sediment movement in combined sewerage and storm-water drainage systems. Phase 1. Project report*, London: CIRIA research project No. 336.

Loveless J. H., 1992, "Sediment transport in rigid boundary channels with particular reference to the condition of incipient deposition", PhD Thesis, University of London.

Macke, E., 1982, "About sedimentation at low concentrations in partly filled pipes", PhD Thesis, Technical University of Braunschweig, Germany.

May, R. W. P., Ackers, J. C., Butler, D. & John, S., 1996, "Development of design methodology for self-cleansing sewers", *Water Science and Technology*, 33(9), 195-205.

May, R.W.P., 1993, *Sediment transport in pipes and sewers with deposited beds*, Technical Report, Hydraulic Research Ltd., Report SR 320, Wallingford, UK.

Mayerle, R., 1988, "Sediment transport in rigid boundary channels", PhD Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, UK.

Mayerle, R., Nalluri, C. & Novak, P., 1991, "Sediment transport in rigid bed conveyances" *Journal of Hydraulic Research*, 29(4), 475-495.

Mohammadi, M., 2005, "The initiation of sediment motion in fixed bed channels", *Iranian Journal of Science and Technology*, 29(B3), 365-372.

Nalluri, C. & Ab Ghani, A., 1996, "Design options for self-cleansing storm sewers", *Water Science and Technology*, 33(9), 215-220.

Nalluri, C., Ab Ghani, A. & El-Zaemey, A. K. S., 1994, "Sediment transport over deposited beds in sewers", *Water Science and Technology*, 29(1-2), 125-133.

Novak, P. & Nalluri, C., 1984, "Incipient motion of sediment particles over fixed beds", *Journal of Hydraulic Research*, 22(3), 181-197.

Ota, J. J. & Nalluri, C. 2003, "Urban storm sewer design: Approach in consideration of sediments", *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(4), 291-297.

Safari, M. J. S., 2016, "Self-cleansing drainage system design by incipient motion and incipient deposition-based models", PhD Thesis, Istanbul Technical University, Turkey.

Safari, M. J. S., Aksoy, H. & Mohammadi, M., 2015, "Incipient deposition of sediment in rigid boundary open channels", *Environmental Fluid Mechanics*, 15(5), 1053-1068.

Safari, M. J. S., Mohammadi, M. & Gilanizadehdizaj, G., 2013, "Investigation on incipient deposition and incipient motion of sediment particles in rigid boundary channels", *Water and Soil Science*, 23(3), 13-25.

Safari, M. J. S., Mohammadi, M. & Gilanizadehdizaj, G., 2014, "On the effect of cross sectional shape on incipient motion and deposition of sediments in fixed bed channels", *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(1), 75-81.

Safari, M. J. S., Mohammadi, M. & Manafpour, M., 2011, "Incipient motion and deposition of sediment in rigid boundary channels", *Proceedings 15th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles*, Wroclaw, Poland, 63-75.

Vongvisessomjai, N., Tingsanchali, T. & Babel, M. S., 2010, "Non-deposition design criteria for sewers with part-full flow", *Urban Water Journal*, 7(1), 61-77.