

بررسی آستانه نهشته شدن و حرکت دانه‌های رسوبی در مجاری باز جدار صلب

میرجعفر صادق صفری¹، میرعلی محمدی² و گل‌عذار گیلانی زاده دیزج³

تاریخ دریافت: 90/12/03 تاریخ پذیرش 91/09/21

¹ دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی استانبول

² دانشیار مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه ارومیه

³ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی نانو، دانشگاه صنعتی استانبول

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.jafar.safari@gmail.com

چکیده

مجاری باز جدار صلب در انتقال آب سامانه‌های زهکش سطحی، فاضلاب و سایر موارد کاربردهای زیادی دارند. به منظور طراحی بهینه و اقتصادی مقطع آنها، بررسی حرکت دانه‌های رسوبی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی آستانه نهشته شدن و آستانه حرکت رسوبات در مجاری باز صلب استفاده شده است. با به کارگیری روش سرعت بحرانی، روابط جدیدی برای آستانه نهشته شدن در کانال‌های با مقاطع دایره‌ای، مستطیلی و U شکل و همچنین رابطه جدیدی برای آستانه حرکت رسوبات در کانال با کف V شکل ارائه گردید. این روابط با روابط موجود برای آستانه حرکت رسوبات در مجاری باز صلب و متحرک مقایسه شده است. این تحقیق تفاوت بین دو پدیده آستانه نهشته شدن و آستانه حرکت ذرات رسوبی در کانال‌ها را مشخص می‌کند. در اینجا، تأثیر شکل مقطع کانال بر آستانه نهشته شدن و آستانه حرکت رسوبات در کانال‌های صلب نیز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط یکسان، روابط آستانه نهشته شدن در بین سه نوع مجرای باز صلب با شکل مقطع‌های مستطیلی، دایره‌ای و U شکل، کانال مستطیلی به کمترین سرعت بحرانی و کانال U شکل به بیشترین سرعت بحرانی نیاز دارند. این نتیجه تأثیر شکل مقطع کانال را برای آستانه نهشته شدن رسوبات در این نوع مقاطع کانال‌ها بیان می‌کند. به دلیل کمبود داده‌های در دسترس، نتایج این تحقیق به منظور توسعه مدل‌های عددی در مجاری باز صلب می‌تواند مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: آستانه حرکت، آستانه نهشته شدن، دانه رسوبی، سرعت بحرانی، شکل مقطع کانال، مجاری باز صلب

Investigation on Incipient Deposition and Incipient Motion of Sediment Particles in Rigid Boundary Channels

MJS Safari^{1*}, M Mohammadi² and G Gilanizadehdizaj³

Received: 22 February 2012 Accepted: 11 December 2012

¹Ph.D Student, Faculty of Civil Eng., Istanbul Technical Univ., Turkey

²Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Urmia Univ., Iran

³M.Sc. Student of Nano Sci. Istanbul Technical Univ., Turkey

*Corresponding Author Email: m.jafar.safari@gmail.com

Abstract

Rigid boundary channels are widely used as water conveyors in surface drainage, sewers and other systems. In order to do optimum and economic design, consideration of the movement of sediment particles is quite important. In this research, experimental data of incipient deposition and incipient motion of sediment particles are used. Applying critical velocity approach, new equations for incipient deposition of sediment particles in rigid boundary channels having circular, rectangular and U-shaped cross sections and also a new incipient motion equation for a V-shaped cross section are presented. These equations are compared with available equations given by critical velocity approach for incipient motion of sediment particles in rigid and loose boundary channels. The present research reveals the difference between incipient deposition and incipient motion, indeed. Herein, the effect of cross sectional shape on incipient deposition and incipient motion of sediment particles in rigid boundary channels are also considered. Analysis of the results using the established equations for incipient deposition of the sediment particles in channels with different cross section shapes shows that rectangular channels require a lower critical velocity and U-shaped channels need a higher amount. This result clearly states the effect of cross sectional shape on incipient deposition for sediment particles in rigid boundary channels. Because of the lack of available data, the present analysis can be usefull for developing numerical models in rigid boundary channels.

Keywords: Critical velocity, Cross sectional shape, Incipient deposition, Incipient motion, Rigid boundary, Sediment particle.

مقدمه

عامل مهم در طراحی مجاری باز صلب، ایجاد حداقل سرعت لازم برای جلوگیری از نهشته شدن رسوبات است که سبب بروز مشکلات در این نوع کانال‌ها می‌شوند. بنابراین، معیار طراحی مقطع در مجاری باز صلب بر دو اساس: (الف) حداقل تنش برشی و (ب) حداقل سرعت جریان می‌باشد که بیشتر حداقل سرعت مد نظر بوده است. تحقیقات آزمایشگاهی و صحرایی در سال‌های اخیر پیچیدگی انتقال رسوب در این نوع کانال‌ها را نشان داده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که فقط با یک مقدار واحد حداقل سرعت و یا تنش برشی شرایط خودشویی¹ تعریف نمی‌شود (باتلر و همکاران، 1996). در عمل لازم است از نهشته شدن رسوبات موجود در کانال جلوگیری شود که این امر به عوامل مختلفی بستگی دارد که عبارتند از: اندازه و ابعاد هندسی کانال (تأثیر شکل مقطع)، زبری جداره کانال، عمق نسبی جریان، اندازه و چگالی رسوبات، درجه چسبندگی بین ذرات و بار رسوبی یا غلظت رسوبات. در اثر کاهش حالت تلاطمی جریان سرعت جریان نیز کاهش می‌یابد در نتیجه میزان رسوبات نگه داشته شده در حالت معلق نیز کاهش می‌یابد. وضعیت نهشته شدن، آستانه حرکت و انتقال ذرات رسوبی در لوله‌ها و مجاری صلب متفاوت از شرایط در مجاری آبرفتی است. مجاری باز صلب دارای سطح مقطع تعریف شده‌ای هستند. انتقال رسوب در مجاری باز صلب، مخصوصاً در مجاری جمع آوری آب‌های سطحی و فاضلاب‌روها یکی از معیارهای مهم طراحی تشخیص داده شده است. یکی از مهمترین مسائل انتخاب چنین معیاری، اجتناب از خطر نهشته شدن دائمی رسوبات است. کانال‌های ساخته شده، مثل کانال‌های جمع آوری و زهکشی آب‌های سطحی و سیستم فاضلاب‌رو و یا کانال‌های دیگر که برای آگیری استفاده می‌شوند مانند مجاری پوششی بتنی، فولادی و یا PVC،

جزو مجاری باز صلب به شمار می‌آیند. آنچه که مسلم است، در مورد کانال‌ها با جداره یا بستر صلب، نرخ انتقال با مشخصات جریان در بستر متحرک همسان نیست. تعیین سرعت بحرانی جریان یکی از مهمترین پارامترها در پدیده انتقال رسوبات است. بر اساس تحقیقات انجمن مهندسين عمران آمریکا، سرعت جریان در شرایط آستانه حرکت و در شرایط آستانه نهشته شدن ذرات رسوبی در مدل‌های انتقال، یکسان در نظر گرفته می‌شود که موضوع دقیقی نمی‌تواند باشد (بی‌نام، 1966). مدل‌های انتقال رسوب در مجاری باز صلب بر پایه یکی از دو روش سرعت بحرانی و یا تنش برشی بحرانی معرفی شده‌اند که در این مقاله به دلیل سادگی از روش سرعت بحرانی استفاده می‌شود. بررسی تفاوت بین آستانه نهشته شدن و آستانه حرکت ذرات رسوبی و همچنین بررسی تأثیر شکل سطح مقطع کانال در این پدیده‌ها اهداف این تحقیق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آستانه حرکت رسوبات در کانال‌های با جداره متحرک در بررسی آستانه حرکت رسوبات پارامترهای مختلفی باید در نظر گرفته شوند از قبیل: تنش برشی، سرعت بحرانی، شکل سطح مقطع، سرعت سقوط ذرات، اندازه ذرات و وضعیت جداره یا بستر. زمانی که مقدار نیروی رو به بالای بستر و سرعت سقوط ذرات به نسبت معینی برسند، ذرات می‌توانند تحت تأثیر نیروهای تلاطمی بلند کننده جریان از بستر جدا شوند. تنش برشی مطلق جداره در پدیده آستانه حرکت ذرات رسوبی پارامتر مهمی می‌باشد. نیروی کششی و زبری بستر نیز عامل‌های مهمی در برآورد آستانه حرکت ذرات به روش تنش برشی می‌باشند. روش‌های بنیادی زیر برای آستانه حرکت ذرات در کانال‌ها با بستر متحرک می‌توانند کاربرد داشته باشند.

¹ Self-cleansing

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = a \left(\frac{d}{R} \right)^{1/6} \quad [1]$$

که در آن، V_c سرعت بحرانی جریان، d متوسط قطر ذرات رسوبی، g شتاب ثقل، s چگالی نسبی ذرات، R شعاع هیدرولیکی و ضریب a از جدول 1 بدست می‌آید.

روش سرعت بحرانی

ترکیب معیار شیلدز (1936) با معادله استریکلر برای ضریب مانینگ ($n=0.04d^{1/6}$) که در آن d قطر متوسط دانه‌ها و بر حسب میلی‌متر می‌باشد، رابطه زیر را بدست می‌دهد.

جدول 1- معادلات جدید با ضریب a در معادله 1.

شماره معادله	ضریب a	$t_c^* = t_0 / rgd(s-1)$	$Re^* = u_* d / n$
[2]	1/89	0/056	$Re^* > 400$ (متلاطم کامل)
[3]	1/38	0/030	$Re^* \cong 10$

اکرز و وایت (1973)، برای ذرات بزرگتر از $2/4mm$ رابطه زیر را برای کانال‌ها با جداره متحرک پیشنهاد کردند.

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 0.96 \log \left(\frac{Y_0}{d} \right) + 1.04 \quad [7]$$

گارده و رانگا راجو (1985)، آستانه حرکت ذرات را بر روی بستر زیر و با جداره متحرک مطالعه نموده و رابطه زیر را پیشنهاد کردند:

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 0.5 \log \left(\frac{Y_0}{d} \right) + 1.63 \quad [8]$$

روش تنش برشی بحرانی

در مشخص کردن شرایط آستانه حرکت، موازنه میان لایه رسوبات ساکن بستر تحت اصطکاک کششی جریان روش رایجی می‌باشد. شیلدز (1936)، اولین کسی بود که از سرعت اصطکاکی استفاده کرد. او یک پارامتر فیزیکی را که بر انتقال رسوبات تأثیر دارد، به شکل رابطه زیر ارائه داد.

$$t_c^* = \frac{t_c}{rg(s-1)d} = F(Re^*) = F\left(\frac{u_* d}{n}\right) \quad [9]$$

در جدول 1، Re^* عدد رینولدز برشی ذرات، $u_* (= \sqrt{t_0 / r})$ سرعت برشی جریان، v لزجت دینامیکی آب، t_c^* میانگین تنش برشی بی بعد و $t_0 = rg.R.S$ تنش برشی جداره و S شیب طولی کانال می‌باشد.

استراب (1953)، برای کانال‌های عریض با جداره متحرک رابطه زیر را پیشنهاد کرد:

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 1.49 \left(\frac{d}{Y_0} \right)^{-1/6} \quad [4]$$

که در آن Y_0 عمق جریان می‌باشد.

نیل (1968)، برای شرایط $29/1 < d(mm)$

$6/2 < s < 2/54$ ، $1/31 < s < 2/54$ ، $0/28 < V(m/s) < 1/33$ و $1/31 < s < 2/54$ ، نمودار طراحی برای کانال‌ها با جداره متحرک برای رسوبات ماسه‌ای درشت دانه و یکنواخت ارائه و رابطه زیر را پیشنهاد کرد:

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 1.58 \left(\frac{d}{Y_0} \right)^{-0.10} \quad [5]$$

بوگاردی (1968)، رابطه زیر را پیشنهاد کرد:

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 1.70 \left(\frac{d}{Y_0} \right)^{-0.095} \quad [6]$$

آستانه حرکت رسوبات در کانال‌های با جداره صلب تعیین آستانه حرکت رسوبات در کانال‌های با جداره صلب نه تنها در مطالعه انتقال رسوبات با اهمیت می‌باشد، بلکه در طراحی سازه‌های هیدرولیکی با جداره صلب نیز موضوع مهمی است. اغلب مهندسان یکی از دو روش اساسی سرعت بحرانی و یا تنش برشی بحرانی را برای طراحی این نوع کانال‌ها استفاده می‌کنند.

روش سرعت بحرانی

کراون (1953)، وضعیت آستانه حرکت در حالت لوله نیمه پر را مطالعه کرد که برای اطمینان از عدم نهشته شدن رسوبات رابطه زیر را پیشنهاد نمود.

$$\frac{Q}{D^2 \sqrt{(s-1)gd}} \geq 2.5 \quad [11]$$

که در آن Q دبی حجمی آب و D قطر لوله می‌باشد. این معادله می‌تواند برای یک لوله با جریان پر به صورت زیر بازنویسی شود.

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} \geq 3.18 \quad [12]$$

نواک و نالوری (1975 و 1984)، یک سری تحقیقات گسترده‌ای در فلوم‌های با سطح مقطع مستطیلی و دایره‌ای انجام دادند و رابطه زیر را پیشنهاد کردند.

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = a \left(\frac{d}{R} \right)^b \quad [13]$$

که در آن a و b به ترتیب ضریب و توان هستند و به بستر و مشخصات ذرات رسوبی بستگی دارند. نواک و نالوری (1984)، رابطه زیر را جهت پیش بینی آستانه حرکت رسوبات، بر اساس رابطه (13) و بر پایه کارهای آزمایشگاهی خود در کانال‌های دایره‌ای و مستطیلی با جداره صلب و برای رسوبات غیر چسبنده با اندازه‌های مختلف ارائه دادند.

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 0.50 \left(\frac{d}{R} \right)^{-0.40} \quad [14]$$

شیلدز (1936) آزمایشات خود را در دو کانال مستطیلی انجام داد. او سپس تنش برشی بی بعد بحرانی را برای حالت جریان با دبی رسوبات صفر تعریف کرد. این رابطه به صورت معادلات 2 و 3 ارائه شدند که به رابطه 1 وابسته هستند (مایرل 1988). یالین (1992)، ترکیبی متفاوت از پارامترهای بی بعد اولیه ارائه شده توسط شیلدز (1936) را پیشنهاد داد، که با آن سرعت برشی جریان حذف و فقط پارامترهای سیال و رسوب باقی می‌مانند. به عبارتی یالین نمودار شیلدز (1936) را به فرم زیر اصلاح نمود که به آن نمودار شیلدز-یالین نیز می‌گویند (یالین 1972).

$$\frac{t_0}{rg(s-1)d} = F(D_{gr}) = F \left[\frac{(s-1)gd^3}{n^2} \right]^{1/3} \quad [10]$$

که در آن D_{gr} اندازه بی بعد ذرات رسوبی است. مزیت کار یالین (1972) در ارزیابی تنش برشی بحرانی بر اساس کار غیر تکراری آن است.

روش نیروی بالا برنده¹

حرکت اولیه ذرات زمانی رخ می‌دهد که نیروی بالا برنده جریان از وزن غوطه وری ذرات بیشتر شود. ونونی (1975)، در تحقیقات خود چنین بیان کرد که در کارهای اولیه در آستانه حرکت ذرات فقط تنش برشی در نظر گرفته شده و نیروی رو به بالای مؤثر بر ذرات کاملاً نادیده گرفته شده است، در حالی که هر دو تحقیقات نظری و آزمایشگاهی این امر را نشان دادند. طرز عمل نیروها روی یک ذره در بستر فقط به صورت کششی ملاحظه شد و نیروی رو به بالا به وضوح پدیدار نشد. شاید این به دلیل مشکل بودن آنالیز و دخیل بودن تأثیر هم زمان سرعت و نیروی رو به بالا باشد. برخلاف انتظار، این روش چندان مورد استفاده مهندسين طراح هیدرولیک قرار نگرفته است.

¹ Lift force

آزمایشات لاولس (1992)

لاولس (1992)، تحقیقاتی در مورد انتقال رسوبات در کانال‌های با جداره صلب انجام داد. آزمایشات ایشان بر اساس آستانه نهشته شدن ذرات رسوبی در کانال‌های با جداره صلب و با در نظر گرفتن شکل‌های گوناگون سطح مقطع کانال، شامل سه سری آزمایشات انجام شد. آزمایش اول برای بررسی مقاومت جریان در کانال انجام یافت و دو سری آزمایش دیگر نیز جهت بررسی آستانه نهشته شدن ذرات رسوبی انجام پذیرفت که داده‌های آزمایشگاهی آن، در این تحقیق تحلیل شده‌اند. آزمایشات سری دوم در کانالی با شکل مقاطع دایره‌ای و مستطیلی دارای بستر صاف و صلب و سری سوم آزمایشات در یک کانال زبر صلب با مقطع U شکل انجام پذیرفت. در کانال‌های با سطح مقطع دایره‌ای و مستطیلی، سطح مقطع هر دو کانال تقریباً معادل 60 cm^2 بوده است. دو اندازه ذرات شن در این آزمایشات به کار برده شد که برای ذرات ریز قطر متوسط ذرات برابر $0/45 \text{ mm}$ و برای ذرات درشت دانه قطر متوسط ذرات $1/3 \text{ mm}$ بوده است و هر دو نوع ذرات دارای دانه‌بندی یکنواخت بوده است. در کانال U نوع سوم رسوبات از جنس گرانیتی و نیز گوشه تیز با قطر متوسط 6 mm و چگالی نسبی $2/7$ استفاده شده است. در این آزمایشات ابتدا رسوبات تهیه و مقادیر شیب کانال و دبی جریان برای حالتی که هیچ گونه نهشته شدن روی ندهد تنظیم گردید و سپس با کاهش تدریجی شیب شرایط آستانه نهشته شدن رسوبات بدست آمد.

آزمایشات محمدی (2005)

این آزمایشات در شرایط جریان یکنواخت، در یک فلوم به طول 15 m با دیواره‌های صلب و شیشه‌ای به عرض 460 mm و عمق 380 mm انجام یافت. دو نوع کانال با کف V شکل در داخل فلوم موجود ساخته شد. اولی کانال CIS به عرض 300 mm و طول $13/5 \text{ m}$ با سطح مقطع به عرض 278 mm و عمق 76 mm و دومی

الزعیمی (1991)، کار آزمایشگاهی خود را در یک کانال دایره‌ای شکل با جداره صاف و صلب و با استفاده از ذرات رسوبی غیر چسبنده با اندازه‌های مختلف، انجام داد و رابطه زیر را برای پیش بینی آستانه حرکت رسوبات پیشنهاد کرد.

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 0.75 \left(\frac{d}{R} \right)^{-0.34} \quad [15]$$

ابغانی و همکاران (1999)، تحقیقاتی در زمینه آستانه حرکت رسوبات در کانال مستطیلی با جداره صلب انجام دادند. این تحقیق در کانال مستطیلی با بستر رسوبی نهشته شده انجام یافت. ایشان بر اساس روابط 14 و 15 رابطه زیر را پیشنهاد کرد.

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 1.07 \left(\frac{d}{R} \right)^{-0.23} \quad [16]$$

روش تنش برشی بحرانی

ایین و ورما (1953)، حرکت ذرات جدا شده در طول یک بستر کانال پوشانیده شده با شن یکنواخت را مطالعه کردند و رابطه تجربی زیر را بر اساس تنش برشی پیشنهاد کردند.

$$\frac{1.5t_0}{rg(s-1)^{1/2}k_s} = \frac{11.6d}{d'} = F(\text{Re}^*) \quad [17]$$

که در آن ρ جرم مخصوص آب، d' ضخامت لایه رسوبی روی بستر و k_s ضریب زبری ذرات شن می‌باشد.

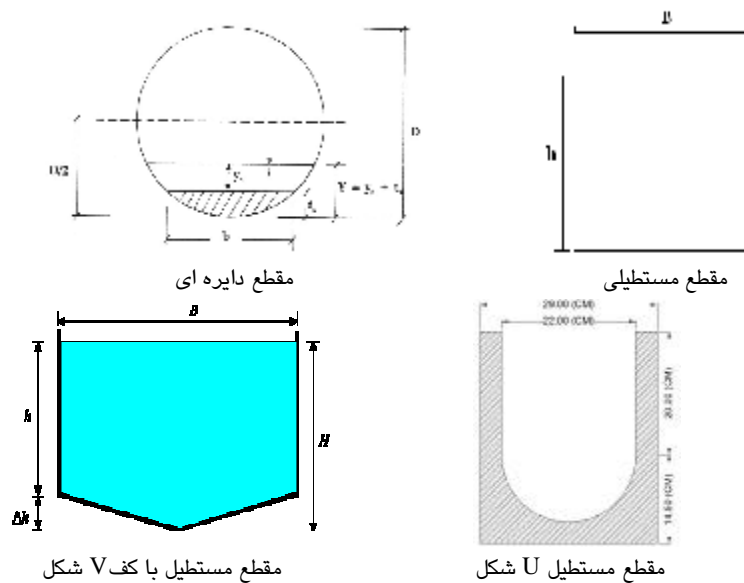
محمدی (2005)، تحقیقاتی در زمینه آستانه حرکت رسوبات در کانال‌های با جداره صلب بر اساس روش تنش برشی بحرانی انجام داد که این آزمایشات در دو نوع کانال با شکل مستطیل با کف V انجام پذیرفت. رابطه ساده‌ای ما بین دو پارامتر Re^* و تنش برشی بحرانی بی‌بعد t_c^* بهترین توضیح این پدیده است که برای ذرات شنی معادله 18 و برای ذرات سنگریزه‌ای معادله 19 به صورت زیر بیان شدند.

$$t_c^* = 7E - 05 \text{Re}_*^2 \quad d_{50} = 0.87 \text{mm} \quad [18]$$

$$t_c^* = 1E - 07 \text{Re}_*^2 \quad d_{50} = 7.72 \text{mm} \quad [19]$$

حرکت ذرات برای شیب‌های طولی 1، 2، 4، 5، 6، 9 و 16 در هزار آزمایش شد. برای هر شیب بستر ثابت، یک دبی با حالت جریان یکنواخت تعریف شد. حرکت ذرات بصورت بصری و بوسیله اندازه‌گیری مطالعه شد. زمانی که شرایط آستانه حرکت روی می داد، دبی بحرانی و شیب ثبت می‌شد.

کانالی به طول $14/5 m$ و از ورق PVC ساخته شده بود. شکل 1 سطح مقطع کانال‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. جهت تخمین آستانه حرکت رسوبات سری‌های مختلف آزمایش‌ها انجام شد. دو نوع ذرات رسوبی در این آزمایشات استفاده شد. قطر متوسط دانه‌ها به ترتیب برای ذرات ماسه‌ای، $d_{50} = 0/87 mm$ و برای ذرات شنی، $d_{50} = 7/72 mm$ بوده است. آستانه



شکل 1- سطح مقطع کانال‌ها با جداره صلب مورد استفاده.

جداره صلب با شکل مقطع‌های دایره‌ای، مستطیلی و U شکل بر اساس روش سرعت بحرانی، به صورت زیر پیشنهاد می‌شوند.

الف) رابطه آستانه نهشته شدن رسوبات در مجاری باز صلب با سطح مقطع دایره‌ای:

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 0.62 \left(\frac{d}{R} \right)^{-0.64}, R^2 = 0.98 \quad [21]$$

ب) رابطه آستانه نهشته شدن رسوبات در مجاری باز صلب با سطح مقطع مستطیلی:

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 0.48 \left(\frac{d}{R} \right)^{-0.70}, R^2 = 0.85 \quad [22]$$

نتایج و بحث

روابط آستانه حرکت ذرات رسوبی، بر اساس روش سرعت بحرانی که توسط نواک و نالوری (1984)، الزعیمی (1991) و ابغانی (1999) مورد استفاده قرار گرفته است، به شکل کلی زیر در می‌آید.

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = f\left(\frac{d}{R}\right) = a\left(\frac{d}{R}\right)^b \quad [20]$$

با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی لاولس (1992)، روابط آستانه نهشته شدن رسوبات در کانال‌های با

در جدول 2 مقادیر ضرایب a و b در روابط مقاطع مختلف کانال‌های با جداره صلب به همراه درصد همبستگی آنها در شرایط آستانه نهشته شدن و آستانه حرکت رسوبات خلاصه شده است. مطابق این جدول، درصد همبستگی بالای روابط 21 تا 24 نشان می‌دهد که شکل سطح مقطع کانال، تأثیر بسزایی در آستانه نهشته شدن رسوبات در کانال‌های با جداره صلب دارد. از مقایسه مقادیر ضرایب a و b ملاحظه می‌شود که در شرایط آستانه نهشته شدن رسوبات مقادیر ضرایب a و b به ترتیب برای کانال‌های با مقطع مستطیلی، دایره‌ای و U شکل افزایش می‌یابد.

ج) رابطه آستانه نهشته شدن رسوبات در مجاری باز صلب با سطح مقطع U شکل:

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 0.92 \left(\frac{d}{R} \right)^{-0.55}, R^2 = 0.95 \quad [23]$$

در نتیجه تحلیل داده‌های آزمایشگاهی محمدی (2005)، رابطه آستانه حرکت رسوبات در کانال با جداره صلب و با کف V شکل بر اساس روش سرعت بحرانی، به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

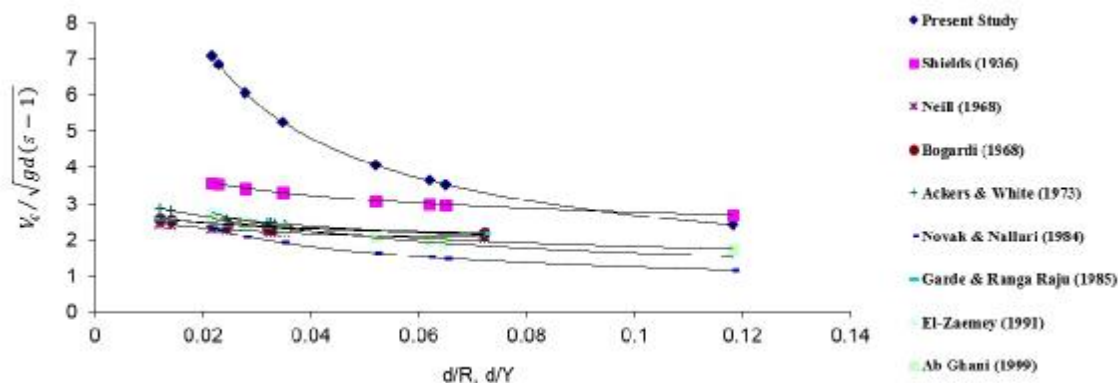
$$\frac{V_c}{\sqrt{gd(s-1)}} = 0.68 \left(\frac{d}{R} \right)^{-0.41}, R^2 = 0.91 \quad [24]$$

جدول 2- ضرایب a و b در روابط مقاطع مختلف کانال‌ها.

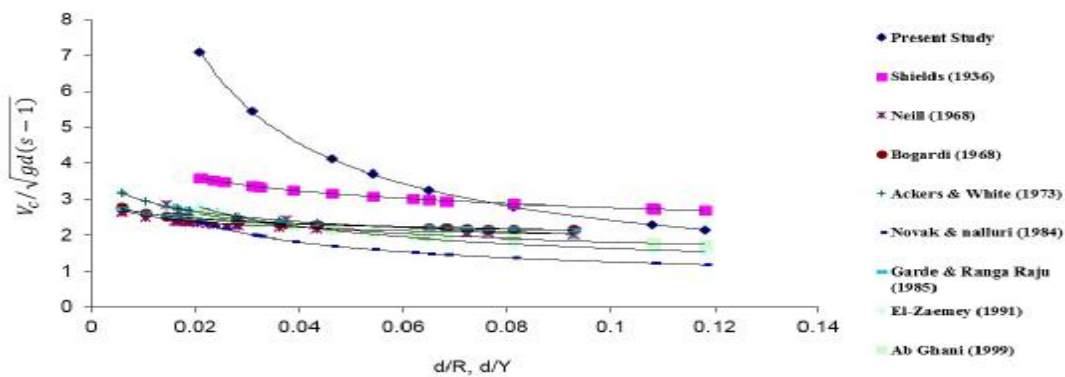
R^2	B	a	شکل کانال و نوع بررسی
85%	0.48	-0.70	مقطع مستطیلی، آستانه نهشته شدن
98%	0.62	-0.64	مقطع دایره‌ای، آستانه نهشته شدن
95%	0.92	-0.55	مقطع U شکل، آستانه نهشته شدن
91%	0.68	-0.41	مقطع با کف V شکل، آستانه حرکت

آستانه حرکت در کانال‌های با جداره متحرک معادلات شیلدز (1936)، نیل (1968)، بوگاردی (1968)، اکرز و وایت (1973)، گارده و رانگا راجو (1985) مقایسه شده‌اند.

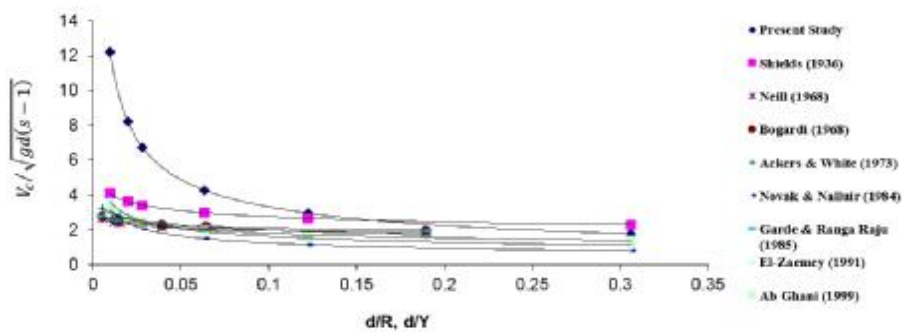
این نتیجه نیز تأثیر شکل مقطع کانال روی آستانه نهشته شدن رسوبات را مشخص می‌نماید. روابط 21 تا 24 در شکل‌های 2 تا 5، با روابط آستانه حرکت رسوبات در کانال‌های با جداره صلب روابط نواک و نالوری (1984)، الزعیمی (1991) و ابغانی (1999) و روابط



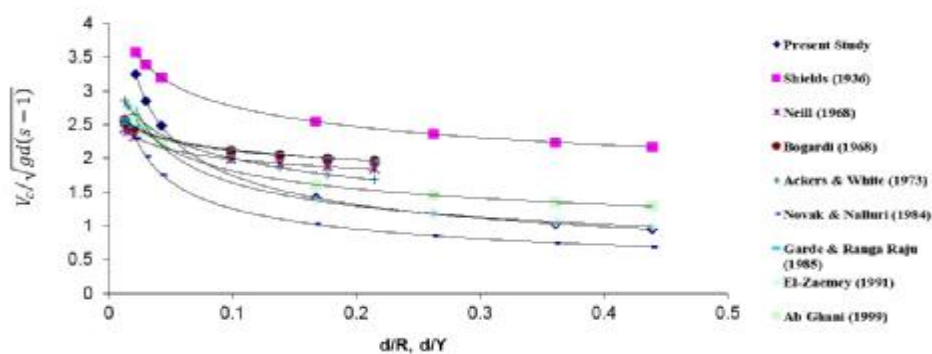
شکل 2- مقایسه رابطه 21 با روابط آستانه حرکت رسوبات در کانال‌های با جداره صلب و متحرک.



شکل 3- مقایسه رابطه 22 با روابط آستانه حرکت رسوب در کانال‌های با جداره صلب و متحرک.



شکل 4- مقایسه رابطه 23 با روابط آستانه حرکت رسوب در کانال‌های با جداره صلب و متحرک.



شکل 5- مقایسه رابطه 24 با روابط آستانه حرکت رسوب در کانال‌های با جداره صلب و متحرک.

رسوب در کانال‌های با جداره صلب قرار می‌گیرند. این امر نشان می‌دهد که مقدار سرعت بحرانی برای آستانه نهشته شدن رسوبات بیش از مقدار سرعت جریان در

از بررسی شکل‌های 2 تا 4 ملاحظه می‌شود، نمودار روابط آستانه نهشته شدن رسوب در کانال با جداره صلب بالاتر از نمودارهای معادلات آستانه حرکت

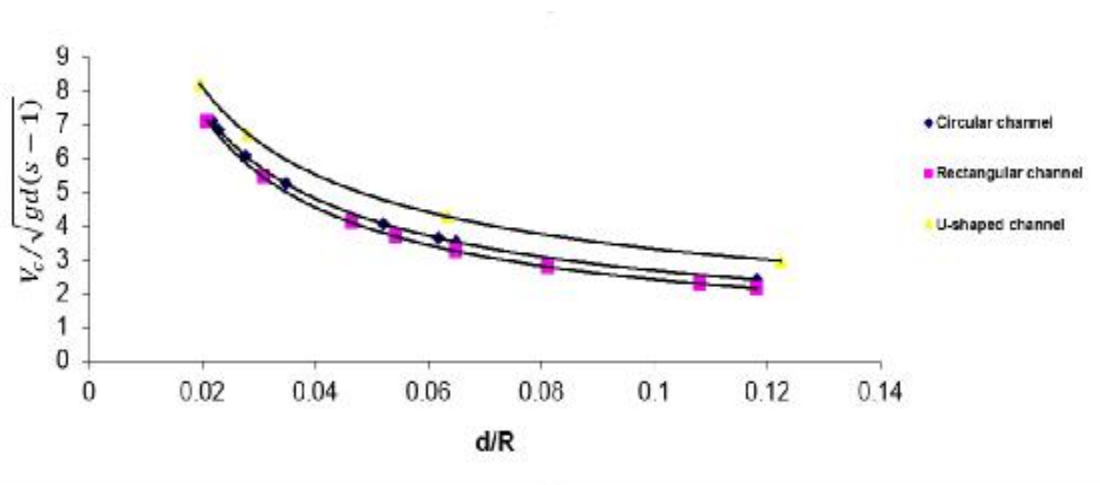
0/8 سرعت بحرانی بیشتری را پیش‌بینی می‌کند. به طور کلی مقایسه روابط آستانه حرکت ذرات در کانال‌های با جداره صلب نشان می‌دهد که رابطه نواک و نالوری (1984) مقدار سرعت بحرانی کمتری را نسبت به بقیه روابط پیش‌بینی می‌کند.

نمودارهای روابط آستانه حرکت رسوبات در کانال‌های با جداره صلب در پایین نمودارهای روابط آستانه حرکت با جداره متحرک قرار دارند. بنابراین روابط آستانه حرکت در کانال‌های با جداره متحرک مقدار سرعت بحرانی بیشتری را نسبت به روابط آستانه حرکت در کانال با جداره صلب پیش‌بینی می‌کنند. همچنین روابط آستانه حرکت در کانال‌های با جداره متحرک برای مقادیر کوچک d/R و d/Y سرعت بحرانی بیشتری را پیش‌بینی می‌کنند. در مقایسه روابط آستانه حرکت در کانال‌های با جداره صلب، رابطه شیلدنز (1936) بیشترین مقدار و رابطه نواک و نالوری (1984) کمترین مقدار سرعت بحرانی را پیش‌بینی می‌کنند.

در شکل 6 روابط آستانه نهشته شدن رسوبات در کانال‌های با جداره صلب، با سطح مقطع‌های دایره‌ای، مستطیلی و U شکل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. براساس معیارهای طراحی، کانالی که با حداقل سرعت به شرایط آستانه نهشته شدن و یا آستانه حرکت برسد و یا به عبارت دیگر به مقدار سرعت بحرانی کمتری نیاز داشته باشد، کانال بهینه و اقتصادی می‌باشد. با مقایسه روابط آستانه نهشته شدن سه نوع کانال با جداره صلب و شکل سطح مقطع‌های دایره‌ای (رابطه 21)، مستطیلی (رابطه 22) و U شکل (رابطه 23) در شکل 6، می‌توان مشاهده نمود که کانال مستطیلی در بین سه کانال ذکر شده به کمترین سرعت بحرانی و کانال U شکل به بیشترین سرعت بحرانی برای رسیدن به شرایط آستانه نهشته شدن رسوبات نیاز دارند. این نتیجه به وضوح تأثیر شکل مقطع کانال برای بررسی در شرایط یکسان در آستانه نهشته شدن رسوبات را بیان می‌کند.

شرایط آستانه حرکت برای شرایط همسان می‌باشد. این نتیجه بیانگر این واقعیت است که سرعت آستانه نهشته شدن با سرعت آستانه حرکت یکسان نمی‌باشد. مقدار سرعت بحرانی در آستانه نهشته شدن به مراتب بیشتر از سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی می‌باشد. این امر شاید به این دلیل است که معمولاً در آزمایشات آستانه حرکت، آزمایشات از سرعت پایین شروع شده و با افزایش تدریجی سرعت به سرعت بحرانی می‌رسند، ولی در آزمایش آستانه نهشته شدن، آزمایشات از سرعت بالا و در شرایطی که هیچ ذره رسوبی ته نشین نمی‌شود شروع شده و با کاهش تدریجی سرعت، به سرعت بحرانی می‌رسند. بنابراین به نظر می‌رسد، در طراحی کانال‌های تمیز و با بستر فاقد رسوب برای مثال کانال‌های انتقال آب، کانال‌های جمع‌آوری آبهای سطحی شهرها و کانال‌های فاضلابرو جدید، بهتر است از معیار آستانه نهشته شدن رسوبات استفاده شود. در مقایسه روابط آستانه حرکت در کانال با جداره صلب رابطه ابغانی و همکاران (1999) بیشترین مقدار و رابطه نواک و نالوری (1984) کمترین مقدار سرعت بحرانی را پیش‌بینی می‌کنند. لازم به ذکر است که مقدار سرعت در شرایط آستانه نهشته شدن در کانال با جداره صلب برای مقادیر کوچکتر d/R بزرگتر از مقدار سرعت آستانه حرکت می‌باشد که با افزایش مقدار d/R اختلاف کمتر شده و سرعت آستانه نهشته شدن تقریباً نزدیک سرعت آستانه حرکت می‌شود.

همان طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود، نزدیکترین رابطه به رابطه 24، رابطه الزعیمی (1991) است. این رابطه برای مقادیر d/R کوچکتر از 0/25، مقدار سرعت بحرانی کمتر و برای مقادیر d/R بزرگتر از 0/25، سرعت بحرانی بیشتری را پیش‌بینی می‌کند ولی این اختلاف اندک می‌باشد. پس از رابطه الزعیمی (1991)، نزدیکترین رابطه به رابطه 24، رابطه ابغانی و همکاران (1999) می‌باشد. این رابطه برای مقادیر d/R کوچکتر از 0/08 سرعت بحرانی کمتر و برای مقادیر d/R بزرگتر از



شکل 6- مقایسه معادلات آستانه نهشته شدن در کانال‌های با سطح مقطع دایره‌ای، مستطیلی و U شکل.

مقدار سرعت بحرانی برای آستانه نهشته شدن رسوبات بیشتر از مقدار سرعت آستانه حرکت در شرایط یکسان می‌باشد. برای ذرات رسوبی ریزدانه سرعت آستانه حرکت و سرعت آستانه نهشته شدن دارای اختلاف زیاد بوده ولی برای ذرات رسوبی درشت‌دانه این اختلاف در کانال با جداره صلب اندک است.

در طراحی کانال‌هایی که بستر رسوبی وجود ندارد، مانند انواع کانال‌های انتقال آب، به نظر می‌رسد طراحی بر اساس معیار سرعت آستانه نهشته شدن بهتر از معیار سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی باشد.

با مقایسه روابط آستانه نهشته شدن سه نوع کانال با جداره صلب با شکل مقطع‌های دایره‌ای، مستطیلی و U شکل، کانال مستطیلی در بین سه کانال ذکر شده به کمترین سرعت بحرانی و کانال U شکل به بیشترین سرعت بحرانی نیاز دارند. این نتیجه تأثیر شکل مقطع کانال در شرایط آستانه نهشته شدن رسوبات را نشان می‌دهد.

روابط آستانه حرکت رسوبات در کانال‌های با جداره متحرک، سرعت بحرانی بیشتری را نسبت به روابط آستانه حرکت در کانال با جداره صلب پیش‌بینی می‌کنند. همچنین برای مقادیر d/R و d/Y کوچک، این

نتیجه‌گیری کلی

با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود، بررسی مقایسه‌ای سرعت بحرانی لازم برای وقوع شرایط آستانه حرکت و آستانه نهشته شدن ذرات رسوبی در کانال‌های با جداره صلب در مقاطع مختلف انجام پذیرفت. بر اساس آنچه که در متن مقاله بیان گردید، خلاصه‌ای از نتایج حاصل به شرح زیر ارائه می‌شود:

در این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی در دسترس برای کانال‌های با جداره صلب شامل: مقاطع مستطیلی، دایره‌ای، مستطیلی با کف U شکل و مستطیلی با کف V شکل، جهت بررسی سرعت بحرانی جریان در شرایط آستانه حرکت و آستانه نهشته شدن ذرات رسوبی استفاده گردید.

بررسی روابط آستانه حرکت و آستانه نهشته شدن ذرات رسوبی نشان می‌دهد که شکل مقطع کانال یکی از عوامل مؤثر در سرعت بحرانی ذرات می‌باشد. همچنین ضریب تعیین بالای معادلات 21 تا 24 نشان می‌دهد که شکل سطح مقطع کانال تأثیر بسزایی در آستانه نهشته شدن و آستانه حرکت ذرات رسوبی دارد.

اختلاف بیشتر است. در کانال‌های با جداره صلب معادله ابغانی و همکاران (1999) بیشترین و معادله نواک و نالوری (1984) کمترین مقدار سرعت بحرانی را پیش‌بینی می‌کنند.

منابع مورد استفاده

- صفری محص، 1390. انتقال رسوب در کانال‌ها با جداره ثابت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه.
- Ab Ghani A, Salem AM, Abdullah R, Yahaya AS, & Zakaria NA, 1999. Incipient motion of sediment particles over loose deposited beds in a rigid rectangular channel. In Proceedings the Eighth International Conference on Urban Storm Drainage.
- Ackers P and White WR 1973. Sediment transport: new approach and analysis. Journal of the Hydraulic Division 99 (HY11): 204-254.
- Anonymous, 1966. Sediment transportation mechanics: Incipient of motion. Proceedings, ASCE Journal of the Hydraulic Division 92 (2): 291-314.
- Bogardi JL, 1968. Incipient sediment motion in terms of critical mean velocity. Acta Technical Academiae Scientiarum Hungarica, Budapest 62 (1-2): 1-24.
- Butler D, May RWP, and Ackers JC 1996. Sediment transport in sewers. Pt. 1: background. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Maritime and Energy 118(2): 103-112.
- Craven JP, 1953. The transportation of sand in part-full pipe flows. Proc. Of the Fifth Hydraulics Conference, Bulletin 34, State University of Iowa Studies in Engineering, Iowa State University, Iowa.
- El-Zaemey AKS, 1991. Sediment transport over deposited beds in sewers. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Newcastle Upon Tyne, England.
- Garde RJ and Rnga Raju K G 1985. Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems. Wiley Eastern Limited, New Delhi, India.
- Loveless JH, 1992. Sediment transport in rigid boundary channels with particular reference to the condition of incipient deposition. PhD Thesis, University of London.
- Mayerle R, 1988. Sediment transport in rigid boundary channels. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Newcastle Upon Tyne, England.
- Mohammadi M, 2005. The initiation of sediment motion in fixed bed channels. Iranian Journal of Science & Technology 29 (3): 365-372.
- Neill CR, 1968. A re-examination of the beginning of movement for coarse granular bed materials. Report INT 68, Hydraulics Research Station, Wallingford, England.
- Novak P and Nalluri C, 1975. Sediment transport in smooth fixed bed channels. Journal of the Hydraulics Division 101(9): 1139-1154.
- Novak P and Nalluri C, 1984. Incipient motion of sediment particles over fixed beds. Journal of Hydraulic Research 22(3): 181-197.
- Shields A. 1936. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. Preussischen Research Institute of Hydraulic Engineering, Berlin, Germany, Issue 26.
- Straub Lorenz G, 1953. Dredge fill closure of Missouri River at Fort Randall pp: 61-73. In Proceedings of Sminnesota International Hydraulic Convention, University of Minnesota, USA.
- Vanoni VA, 1975. Sedimentation Engineering. ASCE, USA.
- Yalin MS, 1972. Mechanics of Sediment Transport. Pergamon Press, New York.
- Yalin MS, 1992. River Mechanics. Pergamon Press, Oxford, UK.