

بررسی آزمایشگاهی آستانه حرکت رسوب بر بستر زبر و تأثیر دما بر نمودار شیلدز

مهدی دستورانی^{۱*} و فاطمه شیرزادی^۲

چکیده

حرکت اولیه رسوبات بستر یک مؤلفه مهم برای تحقیقات مختلف از قبیل طراحی آبراهه‌های پایدار، مدیریت رودخانه، انتقال رسوب و جلوگیری از رسوب‌گذاری است. شروع حرکت ذرات رسوبی را اصطلاحاً آستانه حرکت و شرایطی که در آن ذرات در آستانه حرکت قرار می‌گیرند را شرایط آستانه یا بحرانی گویند. در جریان‌های با سرعت پایین، ذرات بستر هیچ‌گونه حرکتی نداشته و در محل خود ثابت هستند، اما با افزایش سرعت جریان ذرات بستر شروع به حرکت می‌کنند. این حرکت ابتدا به‌صورت بالا و پایین آمدن ذره بدون انتقال است، اما به تدریج حرکت ذرات به طرف پایین دست شروع می‌شود. به نظر می‌رسد که نمودار شیلدز نقطه مرجع همه تحقیقات انجام‌شده در زمینه انتقال رسوب باشد. به دلیل آن که در زمینه تأثیر دما بر نمودار شیلدز تحقیقاتی انجام نشده است، پژوهش حاضر با هدف بررسی آزمایشگاهی آستانه حرکت رسوب با استفاده از تأثیر دما بر پارامتر شیلدز و تنش برشی در یک مدل آزمایشگاهی با سه شیب ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۵، در چهار دمای ۸، ۱۲، ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد و سه دبی انجام گرفت. در این پژوهش با استفاده از مدل فیزیکی و تجزیه و تحلیل آنالیز ابعادی شرایط آستانه حرکت در کانال‌های روباز با مقطع مستطیلی بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش زبری نسبی (ds/y) بدون در نظر گرفتن متغیر دما، عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) کاهش می‌یابد و اثرگذاری شیب بر این دو پارامتر محسوس نیست. همچنین در شرایط شیب و زبری نسبی (ds/y) ثابت، با افزایش دما، از مقدار پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) کاسته می‌شود. تغییرات عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) نسبت به دما، روند صعودی دارد و با افزایش دما، به عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) افزوده می‌شود؛ علاوه بر این، تغییرات پارامتر زبری نسبی (ds/y) نسبت به دما، با روندی نزولی همراه است و با افزایش دما، پارامتر زبری نسبی (ds/y) کاهش می‌یابد. افزون بر این با افزایش شیب، پارامتر پایداری ذره کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آستانه حرکت، پایداری ذره، زبری نسبی، شیب.

ارجاع: دستورانی م. و شیرزادی ف. ۱۴۰۲. بررسی آزمایشگاهی آستانه حرکت رسوب بر بستر زبر و تأثیر دما بر نمودار شیلدز. مجله پژوهش آب ایران. ۵۱: ۳۹-۳۱. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2023.14396.2530>

۱- دانشجویان گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

۲- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.

* نویسنده مسئول: mdatourani@birjand.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶

مقدمه

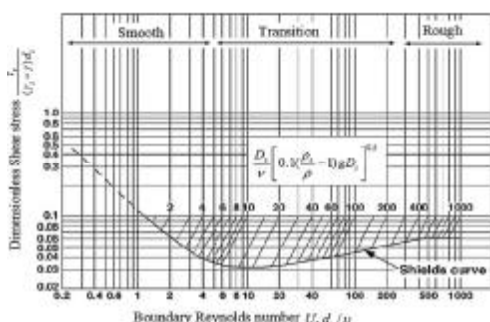
شرایط آستانه حرکت ذرات رسوبی زمانی اتفاق خواهد افتاد که نیروها به حد بحرانی خود رسیده و جریان به اندازه کافی برای حرکت ذره رسوبی نیروی مثبت ایجاد کند. به دلیل پدیده تصادفی حرکت رسوب در طول یک بستر آبرفتی، تعیین دقیق شرایط جریان که در آن یک ذره رسوب به حرکت در خواهد آمد دشوار است. تهنشینی رسوب در کانالها موجب پدید آمدن عوامل نامطلوب زیادی از جمله، تغییر شکل سطح مقطع کانال، تغییر زبری، تغییر توزیع سرعت و تنش برشی و در نتیجه کاهش ظرفیت هیدرولیکی کانال می شود (نوری و امینی، ۱۳۹۸). حرکت اولیه رسوب، آغاز فرایند آبستستگی در جریانهای طبیعی است. آستانه رسوب شرایطی است که در آن نیروهای بی ثبات کننده با نیروهای تثبیت کننده برابری می کنند و ذره رسوب در آستانه تجربه حرکت اولیه است. دو پارامتر آستانه رسوب متداول، پارامتر شیلدز و عدد متحرک، توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامتر شیلدز توسط شیلدز (۱۹۳۶) معرفی شد و بعداً توسط دیگر محققان مورد مطالعه قرار گرفت (گوا، ۲۰۲۰؛ شاه محمدی و همکاران، ۲۰۲۱). در صورتی که شرایط اولیه جریان فراهم باشد و ذره رسوب را در جریان به حرکت در آورد، دومین شرط آن است که ذرات رسوبی تهنشین شده در کف کانال، از کف کانال خارج و به جریان آب منتقل شود. معیار حرکت اولیه به عنوان معیارهای حرکت رسوب بستر در نظر گرفته می شود که می تواند به عنوان حداقل معیار طراحی برای جلوگیری از رسوب در نظر گرفته شود (شیخ خوزانی و همکاران، ۲۰۲۰). شیلدز اولین شخصی بود که مطالعات بنیادی برای یافتن رابطه ای در مورد آستانه حرکت ذرات انجام داد. وی بر این باور بود که توصیف تئوری نیروهای وارد بر یک ذره رسوبی بسیار مشکل است؛ از این رو، در سال ۱۹۳۶ تحلیل ابعادی را به منظور بررسی آستانه حرکت به کار برد و نمودار مشهورش را برای آستانه حرکت ارائه کرد. نمودار شیلدز توسط گاورز در سال ۱۹۸۷ ارائه و در شکل ۱ نشان داده شده است.

ایرادهای اساسی به نمودار شیلدز وارد است، از جمله اینکه متغیرهای وابسته، هم در محور طولها و هم در محور عرضها ظاهر می شوند. تنش برشی بحرانی می تواند به وزن و زاویه استقرار ذره مربوط باشد، که خود به شکل و

اندازه ذره وابسته هستند (ایللجی و ژو، ۲۰۰۸). تعدادی از محققان علم هیدرولیک رسوب، به جای استفاده از تنش برشی، سرعت جریان را به عنوان مهم ترین عامل در فرموله کردن آستانه حرکت به کار برده اند. روابطی که پیشنهاد شده است، عمدتاً بر مبنای تجزیه و تحلیل آنالیز ابعادی و استفاده از داده های تجربی بوده است. شفاهی بجستان (۱۹۹۹) نشان داده است که شکل عمده معادلات را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{V_T}{[g(G_S - 1)d_s]^{0.5}} = a \left(\frac{D}{d_s}\right)^m \quad (1)$$

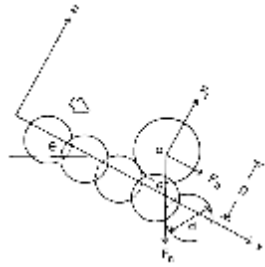
که در معادله (۱)، V_T = سرعت آستانه حرکت؛ G_S = چگالی رسوب؛ d_s = اندازه ذرات رسوب؛ g = شتاب ثقل؛ D = عمق جریان و a و m ضرایبی هستند که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی با شرایط جریان آزاد به دست می آیند.



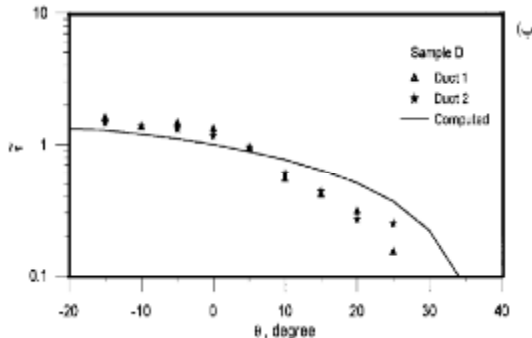
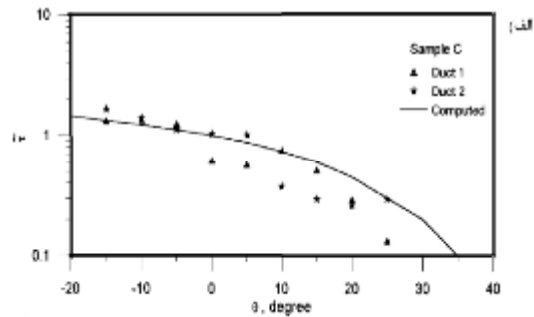
شکل ۱- نمودار شیلدز (گاورز، ۱۹۸۷)

محققان مختلف سعی بر تخمین کمی ویژگی های رودخانه های کوهستانی اعم از توزیع مکانی دبی جریان، قدر جریان، هندسه کانال پایین دست، ریخت شناسی کانال و آستانه حرکت رسوبات آنها را داشته اند (سوئی و همکاران، ۲۰۱۰). دی و دینف (۲۰۰۰) به بررسی آستانه حرکت ذرات رسوبی در مجاری شیب دار با شیب مثبت و منفی پرداختند. این محققان با بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی و استفاده از رسوبات با زاویه ایستایی مختلف به این نتیجه رسیدند که هرچه مقدار جبری شیب بیشتر باشد، تنش برشی بحرانی نیز کمتر می شود (شکل ۲ و ۳). همچنین دی (۲۰۰۳) وضعیت آستانه حرکت را برای یک ذره واقع بر بستر شیب دار طولی و عرضی (شکل ۴) بررسی کرد.

لمپ و همکاران (۲۰۱۰) با تجزیه و تحلیل داده های بسیار زیادی که در شرایط آزمایشگاهی و میدانی جمع آوری شده بودند، نموداری را ارائه کردند که طبق آن با افزایش

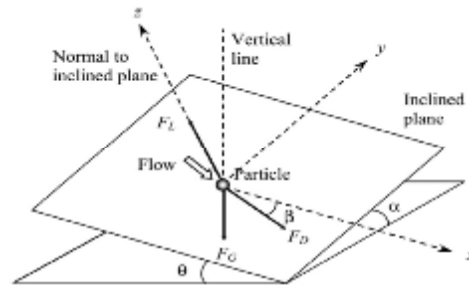


شکل ۲- نیروهای وارد بر یک ذره رسوب بر سطح شیب‌دار

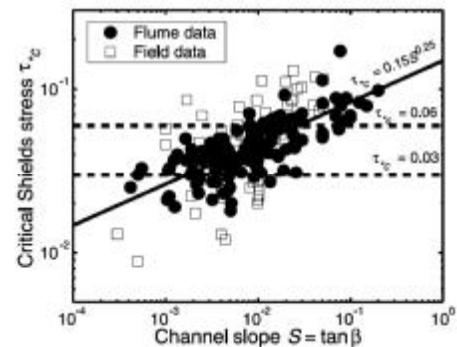
(ب) $\varphi = 37^\circ$ (ف) $\varphi = 35^\circ$

شکل ۳- تغییرات نسبت تنش برشی بر حسب شیب کف

محسوس نیست و هر دو از یک روند مشابه پیروی می‌کنند. از طرفی درباره داده‌های میدانی، معمولاً فرم‌های بستر و طیف وسیعی از ذرات با زاویه اصطکاک متفاوت حضور دارند؛ درحالی‌که در شرایط آزمایشگاهی معمولاً اثر فرم‌های بستر در نظر گرفته نمی‌شود و ذرات مورد استفاده عمدتاً یکنواخت هستند؛ بنابراین عوامل اول و دوم یعنی فرم‌های بستر و زاویه اصطکاک داخلی برای توجیه رابطه بین شیب بستر و تنش برشی بحرانی نمی‌تواند چندان اهمیتی داشته باشد. مطالعات بسیاری نشان می‌دهد که افزایش میزان رس در خاک، به دلیل افزایش نیروهای بین ذره‌ای درون خاک، باعث افزایش تنش برشی بحرانی و در نتیجه افزایش مقاومت خاک در مقابل فرسایش می‌شود (جین و کوتیاری، ۲۰۰۸). افزایش مقاومت در برابر فرسایش، در اثر کاهش فاصله بین ذرات و افزایش تماس بین آن‌ها و در نتیجه تقویت پیوندهای بین ذره‌ای صورت می‌گیرد؛ البته نوع کانی رس، خواص شیمیایی سیال منفذی و سیال فرسایش‌دهنده، چگالی خاک، طول عمر خاک و دما سطح مؤثر در برابر جریان در ذرات درشت‌دانه بیشتر است و در نتیجه نیروی بیشتری به آن‌ها وارد می‌شود.



شکل ۴- نیروهای وارد بر یک ذره برای بستر شیب‌دار



شکل ۵- تغییرات تنش برشی بحرانی بر حسب شیب کف کانال

با دقت در شکل ۵ که در آن داده‌های میدانی و داده‌های آزمایشگاهی در کنار یکدیگر ترسیم شده‌اند، مشاهده می‌شود که اختلاف در نتایج بین این دو نوع داده چندان

آنالیز ابعادی

برای رسیدن به اهداف این پژوهش، ابتدا لازم است رابطه کلی برای تعیین شرایط آستانه حرکت استخراج شود، در نتیجه از آنالیز ابعادی استفاده می‌شود. از پارامتر سرعت در آنالیز استفاده می‌شود؛ بنابراین چنانچه V_T جریان در آستانه حرکت در مجاری بسته باشد، می‌توان معادله را به صورت ذیل نوشت:

$$f = (V_T, \rho, \rho_s - \rho, y, b, d_s, S, g, \mu, T) \quad (2)$$

V_T = سرعت آستانه حرکت ذره رسوب، ρ = جرم واحد حجم آب، $\rho_s - \rho$ = جرم واحد حجم مستغرق ذره، چگالی ویژه رسوب، y = عمق آب، مخصوص آب، b = عرض کانال که در این پژوهش مقدار آن ثابت فرض شده است، d_s قطر اندازه متوسط رسوب، S = شیب کانال، g = شتاب ثقل زمین، μ = ضریب دینامیکی آب و T = دما است. معادله (۳) را می‌توان به رابطه بدون بُعد به صورت زیر تبدیل کرد.

$$\frac{V_T}{\sqrt{g(G_S - 1)d_s}} = f_2\left(\frac{d_s}{y}, S, R_e, T\right) \quad (3)$$

در معادله (۳)، G_S = چگالی نسبی ذرات رسوبی؛ $\frac{d_s}{y}$ = نسبت اندازه ذره به بُعد عمق جریان که بیشتر به زبری نسبی معروف است، S = شیب کانال؛ R_e = عدد رینولدز ذره است. پارامتر بی‌بُعد $\frac{V_T}{\sqrt{g(G_S - 1)d_s}}$ به عدد پایداری ذره در آستانه حرکت معروف است و در این پژوهش با SN_1 نشان داده می‌شود. در این صورت معادله (۳) به معادله (۴) تبدیل می‌شود.

$$\frac{V_T}{\sqrt{g(G_S - 1)d_s}} = f_2\left(\frac{d_s}{y}, S, T\right) \quad (4)$$

در آبراهه‌های فرسایش‌پذیر مجموعه‌ای از نیروهای هیدرودینامیکی به ذرات رسوب موجود در بستر آبراهه وارد می‌شود. با افزایش سرعت جریان، مقدار این نیروها نیز به تدریج افزایش می‌یابد. چنانچه نیروهای هیدرودینامیکی از یک مقدار بحرانی بیشتر شوند، ذرات رسوب شروع به حرکت می‌کنند. شروع حرکت ذرات رسوبی را اصطلاحاً آستانه حرکت و شرایطی که در آن ذرات در آستانه حرکت قرار می‌گیرند را شرایط آستانه یا بحرانی گویند. به نظر می‌رسد که نمودار شیلدز نقطه مرجع همه تحقیقات انجام‌شده در زمینه انتقال رسوب باشد. هرچند تلاش‌های اندکی نیز قبل از شیلدز صورت گرفته بود، اما عمدتاً بر مبنای فرمول‌های تجربی بودند و

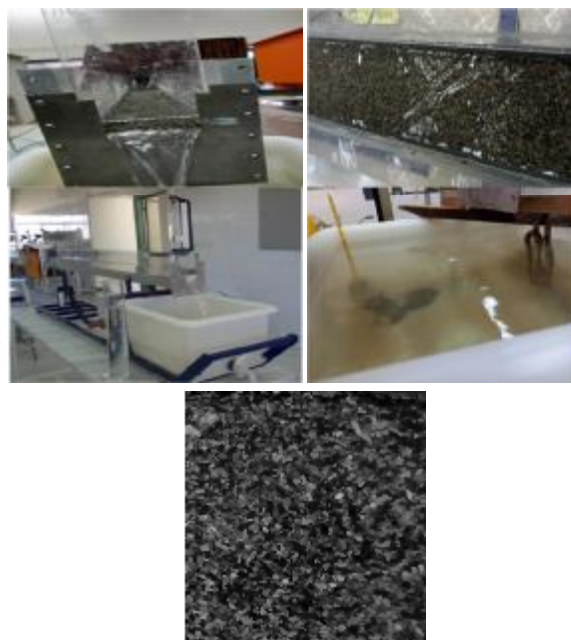
قابلیت چندانی در کاربردهای عملی نداشتند. مطالعات زیادی در ادامه تحقیقات شیلدز انجام شد و نمودار ارائه‌شده توسط شیلدز به‌طور وسیعی در مسائل عملی نیز به کار گرفته شد. باوجود این کاربرد وسیع، برخی مطالعات حاکی از محدودیت‌هایی در استفاده از نمودار شیلدز است. به همین دلیل، مطالعات زیادی برای بهبود و اصلاح نمودار شیلدز توسط محققان مختلف صورت گرفت، اما پژوهشی در خصوص بررسی آستانه حرکت با استفاده از تأثیر دما بر نمودار شیلدز صورت نگرفته است، به همین دلیل پژوهش حاضر با هدف بررسی آزمایشگاهی آستانه حرکت با استفاده از تأثیر دما بر پارامتر شیلدز و تنش برشی در دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند، در یک مدل آزمایشگاهی با سه شیب ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و در چهار دمای ۸، ۱۲، ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد و در سه دبی ۲، ۲/۲ و ۲/۴ متر مکعب بر ثانیه انجام شد.

مواد و روش‌ها

معادله (۱) یک رابطه کلی بدون بُعد برای شرایط آستانه حرکت است. برای برقراری یک رابطه خاص نیاز به داده‌های آزمایشگاهی است؛ از این رو یک مدل آزمایشگاهی از یک کانال با مقطع مستطیلی روباز تهیه شد. مدل شامل سیستم جریان رفت و برگشتی آب است. بدین صورت پس از عبور آب از کانال و داخل شدن آن به مخزن دوباره توسط یک پمپ آب به ورودی کانال پمپاژ شده و از آنجا به درون کانال هدایت می‌شود. قبل از ورود جریان آب به کانال تنظیم دبی توسط یک شیر تنظیم دبی که در مسیر جریان واقع شده، کنترل می‌شود. مقطع اصلی مدل آزمایشگاهی، کانالی با سطح مقطع ۸ سانتی‌متر در ۸ سانتی‌متر و طول معادل ۱۶۰ سانتی‌متر و از جنس پلکسی گلاس به ضخامت ۱ سانتی‌متر است. مدل آزمایشگاهی از یک صفحه فلزی بسیار نازک که به صورت کشویی در داخل این مقطع قرار می‌گیرد، ساخته شده است. پس از قرارگیری صفحه فلزی، رسوب بر روی آن داخل مقطع جایگزین می‌شود. هدف از انجام این کار تسهیل در جایگذاری مصالح در کف کانال است. آب از پمپ به قسمت ورودی مدل آزمایشگاهی منتقل می‌شود. مقدار جریان ورودی آب، قبل از وارد شدن به مدل از طریق شیر تنظیم دبی جریان کنترل می‌شود. در انتهای کانال نیز سرریز مستطیلی شکل برای اندازه‌گیری جریان

پایین دست فلوم حرکت می‌کند به عنوان آستانه حرکت ذره، در نظر گرفته شده است. بعد از ثبت شرایط آستانه حرکت، بار دیگر آزمایش را ادامه داده و وضعیت حرکت رسوب مورد بررسی قرار گرفت. در حین آزمایش برای اطمینان از ثابت ماندن شرایط، چندین مرتبه مقدار دبی مدل و سطح آب بالادست کنترل می‌شود. از تقسیم میزان دبی - که منجر به آستانه حرکت شد - بر مقطع جریان، سرعت بحرانی یا همان سرعت آستانه حرکت تعیین می‌شود. برای یافتن سرعت آستانه حرکت یک نمونه رسوب در یک شیب مشخص کانال، هر آزمایش چندین مرتبه تکرار و از نتایج میان‌گیری می‌شود. پس از اتمام آزمایش رسوب باقی‌مانده بر صفحه فلزی خارج می‌شود. رسوباتی را نیز که وارد مخزن شده است، پس از جمع‌آوری، خشک و برای انجام آزمایشات مرحله بعد استفاده می‌شوند. پس از اتمام هر آزمایش، شیب کانال تغییر پیدا می‌کند تا مقطع اصلی در شیب دیگری قرار گیرد. آنگاه همه مراحل که در بالا ذکر شد، مجدداً تکرار می‌شود. آزمایشات در سه شیب $0/05$ ، $0/01$ و $0/05$ ، چهار دمای ۸، ۱۲، ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد و سه دبی ۲، $2/2$ و $2/4$ مترمکعب بر ثانیه واحد انجام شدند و به منظور گرم و سرد کردن آب به ترتیب از یک المنت و یخ استفاده شد. شکل ۶ نمایی از مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

نصب شد. آب پس از عبور از سرریز وارد مخزن می‌شود. مصالح مورد استفاده در این آزمایش‌ها از نوع رسوبات غیرچسبنده و یکنواخت بودند، مصالح به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. مصالح طبیعی که در پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند، از مصالح موجود در آزمایشگاه بود. مواد رسوبی در کانال آزمایشگاهی، در سه شیب متفاوت $0/05$ ، $0/01$ و $0/15$ مورد آزمایش قرار گرفتند. قبل از انجام هر مرحله آزمایش، ابتدا مقطع اصلی مدل در زاویه یا شیب مورد نظر قرار گرفته و مواد رسوبی به ضخامت حدود ۱ سانتی‌متر بر صفحه کشویی قرار داده می‌شدند و سپس صفحه کشویی در درون کانال جایگذاری می‌شد. پس از آماده‌شدن مدل، شیر قطع و وصل جریان به آرامی باز شده و با شیر تنظیم، دبی آن کنترل می‌شود و آب آرام وارد کانال آزمایشگاهی می‌شود. به وسیله شیر تنظیم دبی جریان، جریان آب به آرامی زیاد شده، سپس شرایط تا مدتی پایدار باقی می‌ماند و در این مدت فاصله زمانی سطح آب خروجی کنترل شده و اشل سرریز قرائت می‌شود. سپس بعد از آنکه شرایط تا مدتی ثابت باقی بماند، مقدار جریان ورودی کمی زیاد شده و مراحل که در قبل ذکر شد، تکرار می‌شود تا آنکه شرایط شروع حرکت ذرات رسوب مشاهده شود. در تحقیق حاضر، ملاک آستانه حرکت ذره، شروع حرکت بدون توقف ذرات که در مدل به حرکت درآمده و در طول فلوم به طرف



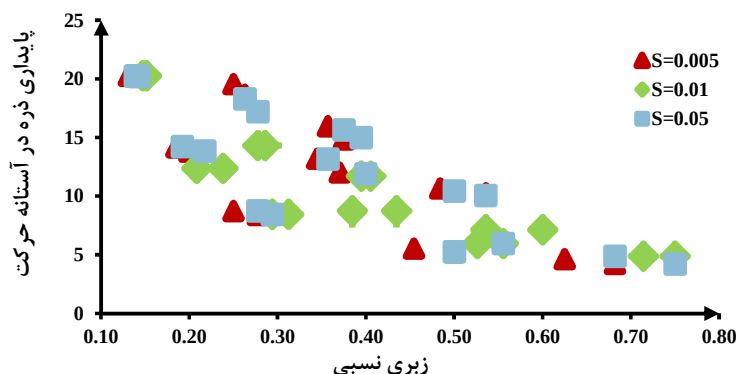
شکل ۶- نمایی از مصالح دانه‌بندی و مدل آزمایشگاهی

نتایج و بحث

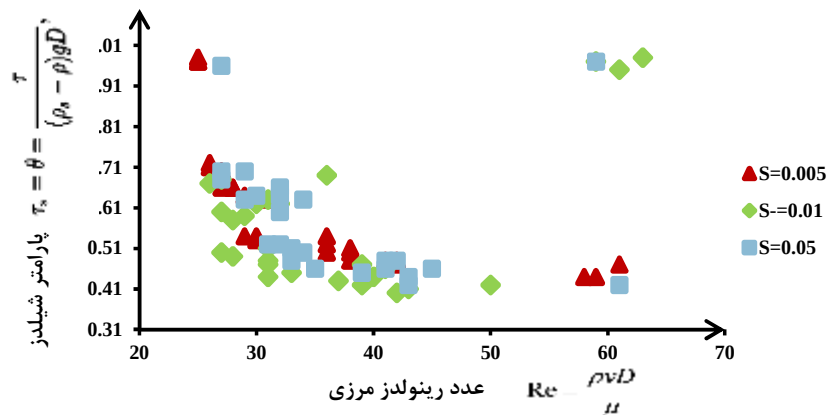
تأثیر شیب بر آستانه حرکت ذرات

از نتایج و آزمایش‌هایی که با هدف بررسی تأثیر دما در محیط آزمایشگاهی بر نمودار شیلدز انجام گرفت، نمودار شکل ۷ به دست آمد. شکل ۷ پارامتر پایداری ذره (SN) را در مقابل پارامتر زبری نسبی (ds/y) در شیب‌های متفاوت ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش پایداری ذره، زبری نسبی کاهش یافته که این روند برای هر سه شیب مشابه است. یکی از مهم‌ترین دلایل این وضعیت، پدیده آرمورینگ یا سپری شدن است که درخصوص انتقال رسوبات غیریکنواخت، احتمال وقوع آن وجود دارد و به همین دلیل امکان محافظت رسوبات با اندازه کوچک‌تر توسط رسوبات با اندازه بزرگ‌تر وجود دارد که در مواقعی باعث می‌شود رسوبات با اندازه کوچک‌تر، دیرتر از رسوبات با اندازه بزرگ‌تر در آستانه حرکت قرار گیرند؛ به عبارتی، پارامتر پایداری (SN) کوچک‌تری داشته باشند. افزون‌براین،

نمودارها در هر سه شیب با یکدیگر همپوشانی دارند و اثرگذاری شیب بستر محسوس نیست. رژیم جریان در سه شیب ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ زیر بحرانی بوده است و ملایم بودن شیب‌ها می‌تواند دلیلی برای نامحسوس بودن تأثیر شیب باشد. در شکل ۸ تا حدودی می‌توان تأثیر شیب را در نتایج مشاهده کرد. این شکل با توجه به نتایج حاصل از آزمایشات پارامتر شیلدز و عدد رینولدز برشی ترسیم شده است. با مقایسه شکل ۱ و شکل ۸ مشاهده می‌شود اختلاف زیادی بین نتایج این تحقیق و دیاگرام شیلدز وجود دارد که می‌توان از دلایل اصلی آن به تعریف آستانه حرکت، تفاوت محور دو پژوهش (مطالعات شیلدز براساس محور تنش برشی و پژوهش حاضر براساس محور سرعت بحرانی انجام شده است)، متفاوت بودن شرایط جریان و شرایط آزمایش و همچنین استفاده از مصالح طبیعی اشاره کرد. نتایج پژوهش با پژوهش خزیمه‌نژاد و بجستانی (۲۰۱۰) به دلیل شیب یکسان، مطابقت دارد.



شکل ۷- تغییرات عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN_1) در پارامتر زبری نسبی ($\frac{ds}{y}$) در شیب‌های ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۰۵

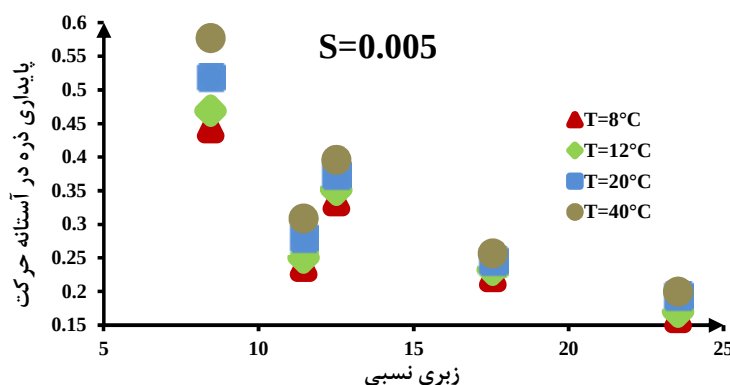


شکل ۸- پارامتر شیلدز در مقابل عدد رینولدز مرزی برای مقایسه با دیاگرام شیلدز

تأثیر دمای آب بر آستانه حرکت ذرات

در شکل ۹، تغییرات عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) نسبت به زبری نسبی (ds/y) در شیب ۰/۰۵ و در دماهای ۸، ۱۲، ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است.

باتوجه به شکل ۹، تغییرات عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) نسبت به پارامتر زبری نسبی (ds/y) در شیب ۰/۰۵ و به‌طور کلی نزولی است. دما و عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) رابطه مستقیم دارند و در شرایط



شکل ۹- تغییرات عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN₁) نسبت به پارامتر زبری نسبی (ds/y) در شیب ۰/۰۵ و در دماهای ۸، ۱۲، ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد

نسبت به دما، روندی نزولی دارد و با افزایش دما، زبری نسبی (ds/y) کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

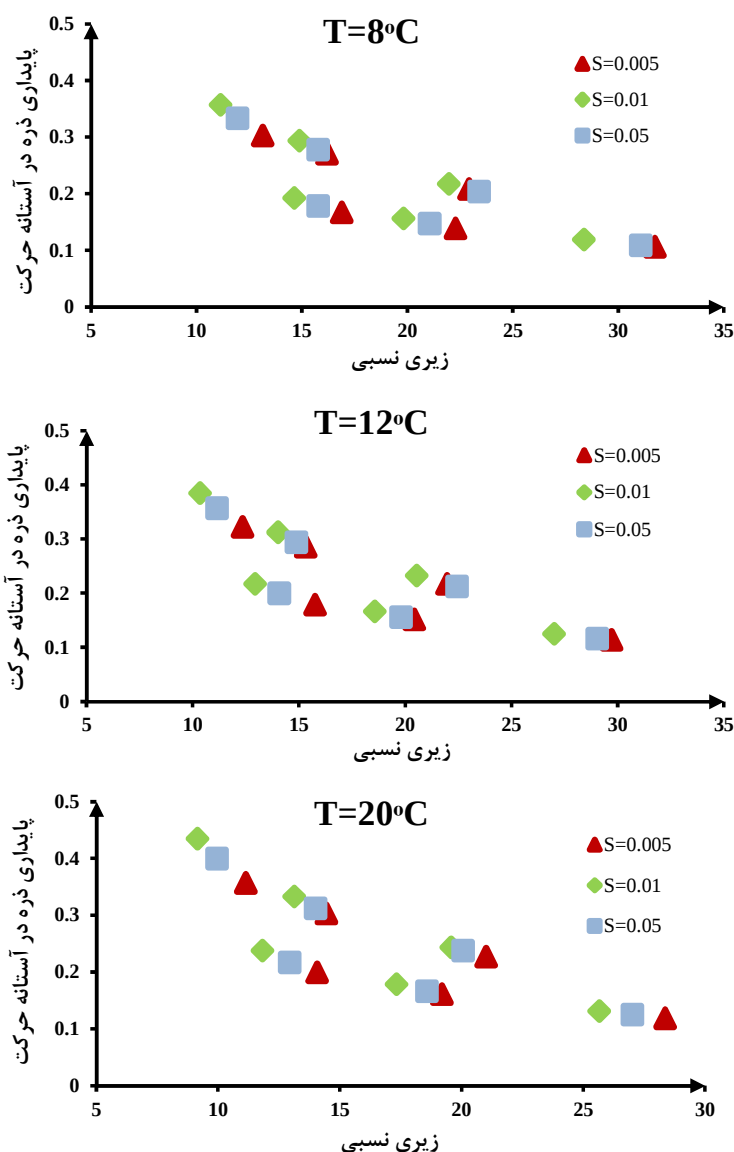
پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر دمای محیط آزمایشگاهی بر نمودار شیلدر در شیب‌های ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ انجام شده است. نتایج نشان داد با افزایش زبری نسبی (ds/y) بدون در نظر گرفتن متغیر دما، عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) کاهش می‌یابد و اثرگذاری شیب بر این دو پارامتر محسوس نیست. همچنین در شرایط شیب و زبری نسبی (ds/y) ثابت، با افزایش دما، از مقدار پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) کاسته می‌شود. افزایش عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) در شرایط زبری نسبی (ds/y) برابر با ۸/۴۴ از ۰/۴۴ در دمای ۸ درجه سانتی‌گراد به ۰/۵۷ در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، نشان‌دهنده این موضوع است. در دمای ۸ درجه سانتی‌گراد و شیب ۰/۰۱، با افزایش زبری نسبی (ds/y) از ۱۱/۱۴ به ۲۸/۳۶، عدد پایداری ذره در آستانه

شکل ۱۰ تغییرات عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) نسبت به زبری نسبی (ds/y) در شیب‌های ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۵ و در دماهای ۸، ۱۲، ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

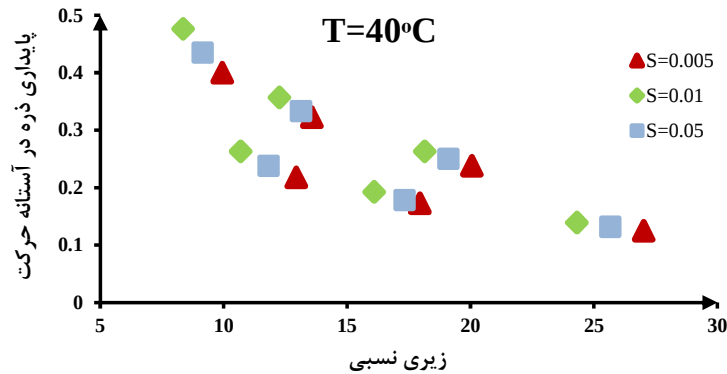
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر ۴ دما با افزایش زبری نسبی (ds/y)، عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) کاهش می‌یابد. در دمای ۸ درجه سانتی‌گراد و شیب ۰/۰۱، با افزایش زبری نسبی (ds/y) از ۱۱/۱۴ به ۲۸/۳۶، عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) از ۰/۳۶ به ۰/۱۲ کاهش پیدا می‌کند. همچنین در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و شیب ۰/۰۱، با افزایش پارامتر زبری نسبی (ds/y) از ۸/۳۶ به ۲۴/۳۱، به مقدار ۰/۳۴ از عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) کاسته می‌شود. این روند در دماهای ۱۲ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد نیز قابل مشاهده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، تغییرات عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) نسبت به دما، روند صعودی دارد و با افزایش دما، به عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) افزوده می‌شود؛ علاوه بر این، تغییرات زبری نسبی (ds/y)

می‌توان نتیجه پژوهش را به فصل‌های متفاوت در سال تعمیم داد، به‌طوری‌که در فصل‌های گرم سال نسبت به فصل‌های سرد سال آستانه حرکت رسوبات و رسوب‌گذاری در رودخانه‌های فصلی و دائمی نسبت به فصل‌های سرد سال کمتر خواهد بود. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج سایر پژوهش‌های صورت‌گرفته اختلاف بسیار کمی دارد. از دلایل اصلی این اختلافات تعاریف متفاوت آستانه حرکت در بین محققان، متفاوت بودن شرایط جریان و شرایط آزمایش است.

حرکت (SN) از ۰/۳۶ به ۰/۱۲ کاهش پیدا می‌کند. همچنین در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و شیب ۰/۰۱، با افزایش پارامتر زبری نسبی (ds/y) از ۸/۳۶ به ۲۴/۳۱، به مقدار ۰/۳۴ از عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) کاسته می‌شود. تغییرات عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) نسبت به دما، روند صعودی دارد و با افزایش دما، به عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN) افزوده می‌شود؛ علاوه‌براین، تغییرات پارامتر زبری نسبی (ds/y) نسبت به دما، با روندی نزولی همراه است و با افزایش دما، پارامتر زبری نسبی (ds/y) کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰- تغییرات عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN_1) نسبت به پارامتر زبری نسبی ($\frac{ds}{y}$) در شیب‌های ۰/۰۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ در دماهای ۸، ۱۲ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد



ادامه شکل ۱۰- تغییرات عدد پایداری ذره در آستانه حرکت (SN₁) نسبت به پارامتر زبری نسبی ($\frac{d_s}{y}$) در شیب‌های ۰/۰۵ و ۰/۰۱ و ۰/۰۰۵ در دما ۴۰ درجه سانتی‌گراد

incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? Journal of Geophys. Res. 113: 1-20.

9. Shafaei Bajestan M. 1999. Hydraulic deposition. Shahid Chamran University of Ahvaz Publications, Second Edition.
10. Shahmohammadi R. Afzalimehr H. and Sui J. 2021. Assessment of Critical Shear Stress and Threshold Velocity in Shallow Flow with Sand Particles. Water 13(7):994.
11. Sheikh Khozani Z. Sadegh Safari M. Danandeh Mehr A. and Melini Wan Mohtar W. 2020. An ensemble genetic programming approach to develop incipient sediment motion models in rectangular channels. Journal of Hydrology. 584: 124753.
12. Sui J. Wang J. He Y. and Krol F. 2010. Velocity profiles and incipient motion of frazil particles under ice cover. International Journal of Sediment Research. 25(1): 39-51.

تقدیر و تشکر

این مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه بیرجند با شماره ابلاغ ۱۳۹۸/۵/۲۵۷۴۸ مورخه ۱۳۹۸/۱۱/۶ می‌باشد از این‌رو نویسندگان مقاله از دانشگاه بیرجند کمال تشکر را دارند.

منابع

۱. نوری ا. و امینی ر. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی عددی معیارهای آستانه حرکت ذرات رسوب با رویکرد اویلری- لاگرانژی. تحقیقات آب و خاک ایران. ۱۰: ۵.
2. Dey S. 2003. Threshold of sediment motion on combined transverse and longitudinal sloping beds. Journal of Hydraul. Res. 41(4): 405-415.
3. Dey S. and Debnath K. 2000. Influence of stream-wise bed slope on sediment threshold under stream flow. Journal of Irrig. and Drain. Eng. 126(4): 255-263.
4. Guo, J. 2020. Empirical model for Shields diagram and its applications. J Hydraul Eng. 146(6): 04020038.
5. Ileleji K. E. & Zhou B. 2008. The angle of repose of bulk corn stover particles. Powder Technol. 187: 110-118.
6. Jain R. and Kothyari U. 2008. Detachment and Transport of Clay-Sand-Gravel Mixtures by Channel Flow. River Flow Conference Proceedings, Izmir, Turkey, Sep. 3-5.
7. Khuzimeh Nejad. H. and Shafaei Bajestani. M. 2010. Investigation of threshold conditions for non-cohesive sediments in open canals with gentle slope and rectangular cross-section Quarterly Journal of Irrigation and Water Engineering. 2(1).
8. Lamb M. P. Dietrich W. E. and Venditti J. G. 2010. Is the critical Shields stress for

