

## بررسی آزمایشگاهی سرعت آستانه‌ی حرکت رسوبات غیرچسبنده‌ی غیریکنواخت در فلوم‌های مستطیلی تحت شیب‌های مثبت و معکوس

حسین خزیمه‌نژاد<sup>۱</sup>، محمد حسین نجفی مود<sup>۲</sup>، رسول مظلوم شهرکی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۳۰

### چکیده

لحظه‌ای را که ذرات رسوبی در مسیر جریان شروع به حرکت می‌کنند، اصطلاحاً آستانه‌ی حرکت رسوبات می‌نامند. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص تعیین سرعت آستانه‌ی حرکت رسوبات غیرچسبنده‌ی یکنواخت در کانال‌های روباز با شیب مثبت انجام شده و روابط یا نمودارهایی در این زمینه ارائه شده است، اما مطالعات در خصوص رسوبات غیرچسبنده‌ی غیریکنواخت به ویژه در شیب معکوس بسیار اندک می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل ابعادی، شرایط آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی غیرچسبنده‌ی غیریکنواخت بررسی گردید. در این آزمایش‌ها ۹ نمونه رسوب غیرچسبنده‌ی غیریکنواخت با اندازه و ضریب یکنواختی مختلف در سه شیب مثبت ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۲ و سه شیب معکوس ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۲ مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش شیب مثبت، پارامتر پایداری ذره کاهش و با افزایش شیب معکوس پارامتر پایداری ذره افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد با افزایش پارامتر اندازه ذره پارامتر پایداری ذره کاهش و با افزایش ضریب یکنواختی رسوبات، پارامتر پایداری ذره، افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: رسوب غیرچسبنده‌ی غیریکنواخت، سرعت آستانه‌ی حرکت، شیب مثبت و معکوس، فلوم مستطیلی.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، ۰۹۱۵۱۶۳۹۸۴۳@birjand.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، ۰۹۱۵۱۶۱۵۴۱۹@birjand.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران\_ شهرکرد، شهر کیان، خیابان باهنر  
Rasoulshahraki3@yahoo.com • ۰۹۳۶۲۴۶۳۶۹۸

## مقدمه

لحظه‌ای را که ذرات رسوب در یک کانال شروع به حرکت می‌کنند، اصطلاحاً آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب می‌نامند. شرایط هیدرولیکی لحظه‌ی آستانه‌ی حرکت ذرات معمولاً با تنش برشی بحرانی (تنش برشی جریان در آستانه‌ی حرکت) یا سرعت بحرانی تعریف می‌شود (شفاعی‌بجستان، ۱۳۸۷). به دلیل پیچیده‌بودن پدیده‌ی آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی، پیدا کردن شرایط هیدرولیکی در لحظه‌ی شروع حرکت رسوبات، تقریباً وابسته به انجام آزمایش‌های فیزیکی و کارهای آزمایشگاهی می‌باشد. هیلستروم (۱۹۳۵) تحلیل جامعی بر روی داده‌های بدست آمده از حرکت مصالح یکنواخت را به انجام رساند. به علت مشکل بودن اندازه‌گیری سرعت کف آبراهه که عامل مستقیم حرکت رسوب است، مطالعه‌ی وی بر اساس سرعت متوسط جریان صورت گرفت (یانگ، ۱۹۹۶). شیلدز (۱۹۳۶) با انجام مطالعات بنیادی، اولین معیار علمی آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی را ارائه کرد. وی با ترسیم دبی جریان در مقابل دبی رسوب، شرایط جریان را برای حالتی که میزان انتقال رسوب کم باشد، پیدا و آن را به عنوان حد شروع حرکت معرفی نمود. شیلدز مطالعات خود در زمینه‌ی آستانه‌ی حرکت را بر مبنای تنش برشی بحرانی انجام داد و نموداری کاربردی در این زمینه ارائه داد (شفاعی‌بجستان، ۱۳۸۷). این نمودار، بعدها توسط گاورز (۱۹۸۷) اصلاح گردید (یانگ، ۱۹۹۶). بعدها دانشمندان دیگری مانند گسler (۱۹۶۵)، مانتز (۱۹۷۵)، یالین و کاراهان (۱۹۷۷) بر مبنای تنش برشی، تحقیقاتی را انجام و تغییراتی را در دیاگرام شیلدز انجام دادند (پافیتیز، ۲۰۰۱). جهانشاهی و همکاران (۱۳۸۹) در راستای ایراداتی که در نمودار شیلدز وجود داشت، تحقیقی را در زمینه‌ی آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب بر اساس سرعت سقوط ذرات انجام دادند. در تحقیق ایشان، عملکرد روش‌های مختلف پیش‌بینی شروع حرکت ذرات در بسترهای هموار، مورد ارزیابی قرار گرفت. در

تحقیق مذکور با ارائه رابطه‌ای ساده بر مبنای پارامتر پایداری و اندازه‌ی بی‌بعد ذره سعی در تشریح سرعت برشی بحرانی جهت آغاز حرکت رسوب گردید. هریسانتو و هارتمان (۱۹۹۸) تحقیقی را بر روی تخمین تنش برشی بحرانی در مجاری فاضلاب انجام دادند. اساس کار آن‌ها تخمین تنش برشی بحرانی بر اساس دبی بحرانی متناظر با آن بود. نتایج نشان داد با وجود تعاریف مختلفی که از آستانه‌ی حرکت رسوبات غیرچسبنده در بین محققان مختلف وجود دارد ولی نتایج تفاوت زیادی با همدیگر ندارند ولی در مورد خاک‌های چسبنده تعریف آستانه‌ی حرکت تفاوت قابل ملاحظه‌ای در نتایج می‌گذارد. در تحقیق دیگری رسولیان‌فر و افضل‌مهر (۱۳۸۵) اثر مولفه‌های آشفتگی بر شروع حرکت ذرات رسوب را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، داده‌های سرعت آب در سه جهت توسط سرعت‌سنج ADV Doppler در یک فلوم آزمایشگاهی با بستر شنی برداشت گردید. همچنین نقش مولفه‌های مختلف تانسور تنش رینولدز روی آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تنش برشی  $\tau = \rho u'w'$  و  $w$  مؤلفه‌های نوسانی سرعت در راستای جریان و عمود بر راستای جریان در جهت عمق، مهم‌ترین پارامتر در بررسی آستانه‌ی حرکت ذرات درشت‌دانه بستر می‌باشد. براوو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل‌سازی عددی، تحقیقی را در زمینه‌ی آستانه‌ی حرکت بر مبنای تنش برشی بحرانی انجام دادند. نتایج نشان داد که علاوه بر پارامترهایی که در دیاگرام شیلدز به آن‌ها اشاره شده است، شکل، فشردگی و جهت‌گیری ذرات نیز بر آستانه‌ی حرکت آن‌ها موثر بوده و یکی از دلایل مبهم بودن و متفاوت بودن آستانه‌ی حرکت رسوبات از دیدگاه محققین مختلف نیز همین نکته است. وان مواتر (۲۰۱۵) اثر نوسانات آشفتگی و گردابه‌ها را بر آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب مورد مطالعه قرار داد. تحقیق وی بر روی طیف گسترده‌ای از اندازه‌ی ذرات تقریباً کروی با چگالی نسبی ۱/۲ و ۲/۵ انجام شد. نتایج نشان داد که

خزیمه‌نژاد و شفافی بجزستان (۱۳۸۹) با استفاده از تجزیه و تحلیل ابعادی و مدل آزمایشگاهی، شرایط هیدرولیکی در لحظه‌ی آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی را در مقاطع تحت فشار مربعی شکل تحت چهار شیب معکوس ۰، ۸، ۱۶ و ۲۴ درجه مورد بررسی قرار دادند. نتایج به صورت منحنی‌هایی ارائه گردید. با به کار بردن این منحنی‌ها، می‌توان سرعت آستانه‌ی حرکت را در مقاطع تحت فشار مربعی بدست آورد. در تحقیق دیگری خزیمه نژاد و شفافی بجزستان (۱۳۸۹) با استفاده از مدل فیزیکی و تجزیه و تحلیل ابعادی شرایط آستانه‌ی حرکت رسوبات یکنواخت در کانال‌های روباز با مقطع مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ۱۲ نمونه رسوب غیرچسبنده‌ی یکنواخت با ابعاد و چگالی‌های مختلف در سه شیب ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد کانال مورد آزمایش قرار گرفتند و یک نمودار کاربردی استخراج شد. صفری و همکاران (۱۳۹۰) آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی در کانال‌های با مقطع مثلثی دارای جداره‌ی ثابت را مورد بررسی قرار دادند، در این تحقیق که از داده‌های آزمایشگاهی محمدی (۲۰۰۵) استفاده گردید، روابط آستانه‌ی حرکت رسوبات در کانال‌های با جداره‌ی ثابت و متحرک مورد مقایسه قرار گرفت و رابطه‌ی جدیدی برای آستانه‌ی حرکت ذرات در کانال‌های مثلثی شکل بر اساس روش سرعت بحرانی ارائه و با سایر روابط آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی مقایسه گردید. نظری و حیدری (۱۳۸۸) با استفاده از مدل آزمایشگاهی، آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی یکنواخت را مورد بررسی قرار دادند، نتایج ایشان نشان داد، شروع حرکت ذرات رسوبی نه تنها به اندازه‌ی ذرات رسوب وابسته بوده بلکه به نسبت عمق جریان به قطر ذرات نیز بستگی دارد. در زمینه‌ی بررسی سرعت آستانه‌ی حرکت رسوبات غیریکنواخت مطالعات اندکی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات اگیازارف (۱۹۶۵)، وانگ (۱۹۷۷) و میچالیک (۱۹۸۹) اشاره نمود، محققینی که در این زمینه کار نموده‌اند،

نوسانات آشفتگی و گردابه‌ها بر حد جریان با بستر صاف کاملاً تاثیرگذار هستند. همچنین نتایج حاکی از ثابت بودن پارامتر شیلدز در محدوده‌ی جریان با بستر زبر بود.

اما تعدادی از دانشمندان علم هیدرولیک رسوب، به جای استفاده از تنش برشی، سرعت جریان را به عنوان مهم‌ترین فاکتور، در رابطه‌مند کردن پدیده‌ی آستانه‌ی حرکت مورد استفاده قرار داده‌اند. روابطی که پیشنهاد گردیده، عمدتاً بر مبنای تجزیه و تحلیل ابعادی و استفاده از داده‌های تجربی بوده است. شفافی بجزستان (۱۳۸۷) نشان داد که شکل عمده‌ی این روابط را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۱) نوشت.

$$\frac{V_T}{\sqrt{(g(G_s - 1)d_s)}} = a \left( \frac{D}{d_s} \right)^m \quad (1)$$

که در آن  $V_T$  سرعت آستانه‌ی حرکت،  $G_s$  چگالی رسوب،  $d_s$  اندازه‌ی ذرات رسوب،  $g$  شتاب ثقل،  $D$  عمق جریان،  $a$  و  $m$  ضرایبی هستند که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی در شرایط جریان آزاد بدست می‌آید. جدول (۱) ضرایب بدست آمده توسط برخی از محققین را نشان می‌دهد (شفافی بجزستان، ۱۳۸۷).

جدول (۱): ضرایب  $a$  و  $m$  در رابطه‌ی (۱)

توضیحات	$m$	$a$	محقق
بستر کانال	۰/۱۶۷	۱/۴۹	استراب (۱۹۵۳)
بستر کانال	۰/۱	۱/۵۸	نیل (۱۹۶۸)
بستر کانال	۰/۰۹۵	۱/۷۰	بوگاردی (۱۹۶۸)
$ds/D < 0.1$ بستر کانال	۰	۲/۲	شفافی بجزستان (۱۹۹۰)
$ds/D > 0.1$ بستر کانال	۰/۲۵	۱/۲۳۷	
بستر مجاری بسته‌ی مستطیلی	۰/۴	۰/۲۸۷	نالوری و قانی (۱۹۹۶)
بستر مجاری بسته‌ی دایره‌ای	۰/۴۷	۰/۱۲۵	می (۲۰۰۳)

الف) خصوصیات مربوط به جریان: سرعت جریان در فلوم  $V_T$ ، عمق آب در فلوم  $y$   
 ب) خصوصیات مربوط به رسوبات: قطر متوسط ذرات  $d_{50}$ ، ضریب یکنواختی  $C_u$   
 ج) خصوصیات هندسی فلوم: شیب کف  $S$   
 د) خصوصیات مربوط به سیال: جرم واحد حجم سیال  $\rho$ ، لزجت دینامیکی  $\mu$  و جرم واحد حجم مستغرق ذره  $\rho_s - \rho$   
 ه) سایر پارامترها: شتاب ثقل  $g$   
 پارامترهای مذکور در رابطه‌ی (۲) نشان داده شده‌اند:

$$f_1(V_T, y, g, d_{50}, C_u, S, \rho, \rho_s - \rho, \mu) = 0 \quad (2)$$

استفاده از تجزیه و تحلیل ابعادی و رابطه‌ی باکینگهام رابطه‌ی (۲) به رابطه‌ی (۳) تبدیل می‌شود.

$$SN = \frac{V_T}{\sqrt{g(G_s - 1)d_{50}}} = f_2(d_{50}/y, S, Re, C_u) \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)  $SN$  پارامتر پایداری ذره،  $d_{50}/y$  پارامتر اندازه‌ی ذره، و  $Re$  عدد رینولدز می‌باشد. با توجه به اینکه در آزمایش‌های این تحقیق عدد رینولدز جریان بسیار بزرگتر از حد جریان متلاطم بوده بنابراین می‌توان از تاثیر آن صرف‌نظر نمود، در جدول (۲) متغیرهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند به همراه دامنه‌ی تغییر آن‌ها نشان داده شده است.

جدول (۲): متغیرهای مورد بررسی و دامنه‌ی تغییر آن‌ها در تحقیق حاضر

متغیر	مقادیر
$d_{50}$	۲/۸، ۰/۲ و ۴/۵ میلی‌متر
$C_u$	۴/۵ و ۶
$S$	۰/۰۰۲، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۲

عمدتاً بر اساس تنش برشی بحرانی مطالعات خود را پیش برده و رابطه یا نمودار جدیدی ارائه نداده بلکه با استفاده از دیاگرام شیلدز روابط اصلاح شده‌ای را پیشنهاد نموده‌اند (شفاعی‌بجستان، ۱۳۸۷). وانگ و همکاران (۲۰۱۰) روابط مختلف مربوط به پیش‌بینی آستانه‌ی حرکت را برای رسوبات غیرچسبنده‌ی غیریکنواخت مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد پدیده‌ی لایه‌ی محافظ در رسوبات غیریکنواخت تاثیر قابل توجهی بر حرکت ذرات دارد. در این تحقیق مناسب‌ترین رابطه برای آستانه‌ی حرکت رسوبات در بازه وانژیان رودخانه یانگ‌تسه ارائه شد. آگودو و همکاران (۲۰۱۴) نیز تاثیر همجواری ذرات درشت‌تر در کنار ذرات ریزتر را بر آستانه‌ی حرکت ذرات مورد بررسی قرار دادند که نتایج تحقیق آنها نیز تاثیر لایه‌ی محافظ را بر آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب نشان داد.

بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون تحقیقی در خصوص آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب در کانال‌های روباز دارای شیب‌های معکوس انجام نشده است. همچنین در مطالعات اندکی که بر روی ذرات غیریکنواخت انجام شده بیشتر به پدیده‌ی لایه‌ی محافظ پرداخته شده و از بررسی میزان غیریکنواختی بر آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب صحبتی به میان نیامده است، لذا در تحقیق حاضر تاثیر اندازه‌ی متوسط و ضریب یکنواختی ذرات رسوب بر سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی تحت شیب‌های مختلف مثبت و معکوس کف کانال با بهره‌گیری از فلوم آزمایشگاهی و استفاده از روش سرعت بحرانی مورد بررسی قرار گرفت و نمودارهایی در این زمینه ارائه گردید.

## مواد و روش‌ها

سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب غیرچسبنده‌ی غیریکنواخت به پارامترهای متعددی بستگی دارد که عبارتند از:

کامل جریان را فراهم می‌سازد. در ابتدای هر آزمایش برای کنترل عمق آب در یک محدوده مشخص و جلوگیری از تاثیر نیروی وزن آب روی حرکت رسوبات دریاچه‌ای انتهایی فلوم بالا آورده می‌شود، علاوه بر این برای پیشگیری از ورود رسوبات به داخل منبع آب از یک قاب فلزی توری در انتهای فلوم استفاده شد. نوع رسوبات مورد آزمایش از نوع غیرچسبنده (ماسه‌ی شکسته) می‌باشند، برای تهیه‌ی رسوبات با دانه‌بندی‌های متفاوت از روش الک استفاده و منحنی دانه‌بندی هر یک از نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش‌ها ترسیم شد. در شکل (۱) نمایی از فلوم، مقطع آزمایش و نحوه‌ی اندازه‌گیری عمق جریان نشان داده شده است. به دلیل اینکه عمق آب از پارامترهای موثر بر آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی است، در تمامی آزمایش‌ها دریاچه‌ی انتهایی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که سطح آب در فلوم در تمامی آزمایش‌ها تقریباً ثابت و فاقد تلاطم باشد. عمق جریان در سه قسمت ابتدایی، میانی و انتهایی مقطع رسوبی اندازه‌گیری و متوسط‌گیری می‌گردید.

**مدل آزمایشگاهی و نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها**  
برای رسیدن به اهداف این مطالعه یعنی ارائه نمودارهایی در خصوص تعیین سرعت آستانه‌ی حرکت رسوبات غیرچسبنده‌ی غیریکنواخت، آزمایش‌هایی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده‌ی کشاورزی بیرجند انجام گردید. مدل آزمایشگاهی، فلومی از جنس پلکسی‌گلاس شفاف به ضخامت ۱ سانتی‌متر می‌باشد، این فلوم که دارای طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر می‌باشد، مجهز به سیستم بازچرخانی آب بوده، به طوری که آب از طریق پمپ به بخش ورودی فلوم پمپاژ شده و از آنجا به درون فلوم هدایت می‌شود، برای آرام کردن جریان ورودی در ابتدای فلوم از صفحات مشبک و توری استفاده شده است. شیب این فلوم از طریق جک تعبیه شده در بخش انتهایی فلوم، تنظیم می‌شود، همچنین دبی ورودی به فلوم از طریق دبی‌سنج الکترومغناطیس قابلیت کنترل دارد. برای جلوگیری از تاثیر جریان بالادست و پایین‌دست، رسوبات مورد آزمایش در دو متر میانی فلوم قرار گرفتند. ۴ متر فاصله از ابتدای فلوم، اطمینان کافی برای توسعه‌ی



(ب)



(الف)

شکل (۱): فلوم آزمایشگاهی (الف) نمای کلی (ب) مقطع آزمایشی و اندازه‌گیری عمق جریان

اینیشتن ۲ برابر مقدار  $d_{50}$  رسوبات میباشد (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷). دریاچه‌ی انتهایی فلوم بالا آورده و با روشن شدن پمپ، آب به آرامی وارد فلوم می‌شود در

نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها بدین صورت بود که شیب فلوم روی عدد مورد نظر تنظیم و رسوبات در کف فلوم پهن می‌شدند، ارتفاع رسوبات در فلوم بنابر نظر

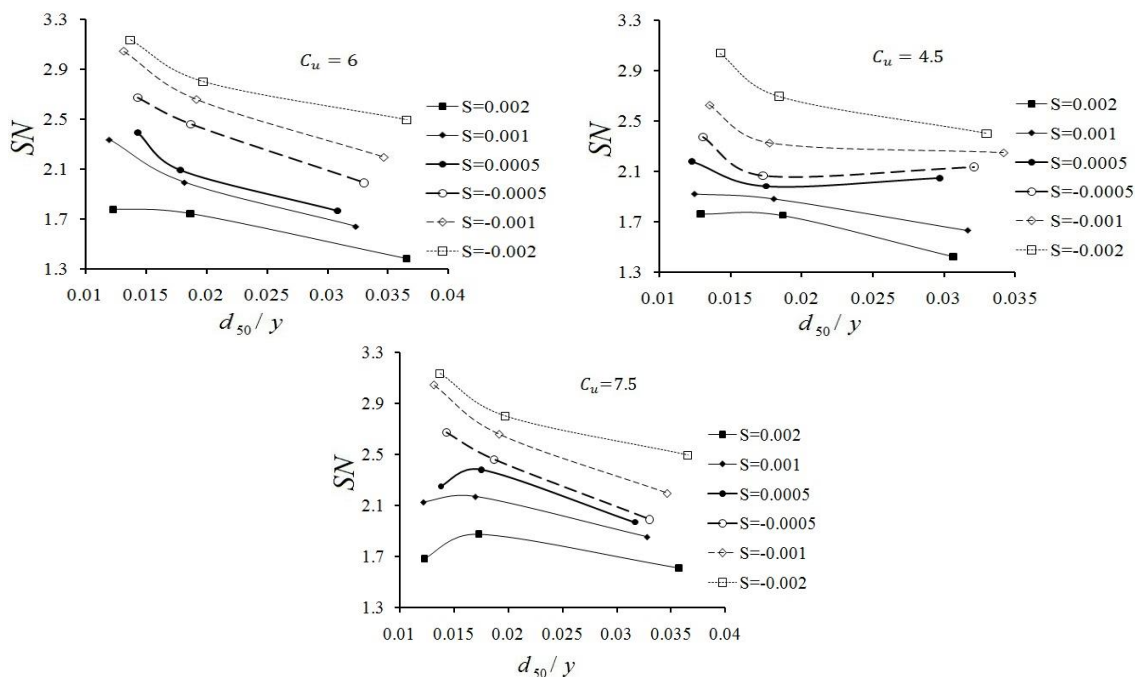
حرکت رسوب در نظر گرفته شد. از تقسیم میزان دبی که منجر به آستانه‌ی حرکت گردید بر مقطع جریان، سرعت بحرانی یا همان سرعت آستانه‌ی حرکت تعیین می‌گردد. برای یافتن سرعت آستانه‌ی حرکت یک نمونه رسوب در یک شیب مشخص فلوم، هر آزمایش چندین مرتبه تکرار و از نتایج متوسط‌گیری می‌گردید. پس از اتمام آزمایش، نمونه‌ی رسوب جمع‌آوری و برای آزمایش بعدی مورد استفاده قرار می‌گرفت. به این ترتیب برای ۹ نمونه رسوب با اندازه و ضریب یکنواختی مختلف در سه شیب مثبت و سه شیب معکوس فلوم، سرعت آستانه‌ی حرکت تعیین گردید.

### نتایج و بحث:

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها و رابطه‌ی (۳) اشکال (۲) و (۳) ترسیم شدند.

در شکل (۲) پارامترهای بی‌بعد پایداری ذره و اندازه‌ی ذره در برابر هم برای شیب فلوم و ضریب یکنواختی مختلف نشان داده شده‌اند.

ابتدای ورود آب به فلوم سرعت جریان باید در حدی باشد که سبب فرسایش ناگهانی رسوبات نشود، بتدریج که سطح آب در فلوم بالا آمد دبی جریان، تدریجاً افزایش یافته و بر سرعت جریان افزوده می‌شود، افزایش سرعت تا رسیدن به سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات در فلوم ادامه دارد، در این تحقیق شروع حرکت ذرات و ادامه بی‌وقفه‌ی حرکت ذرات به عنوان معیار آستانه‌ی حرکت تعیین و برای کلیه‌ی آزمایش‌ها مد نظر قرار گرفت. افزایش سرعت جریان آب از دو طریق امکان‌پذیر است، از طریق افزایش دبی و همچنین از طریق پایین آوردن سطح آب به وسیله‌ی دریچه انتهای فلوم، این افزایش به کمک دو روش مذکور به گونه‌ی صورت گرفت که عمق آب در کلیه‌ی آزمایش‌ها تقریباً یکسان باشد. با افزایش تدریجی دبی و افزایش سرعت، رسوبات کف فلوم ابتدا حرکات نوسانی و منقطع را شروع می‌کنند ولی در مسیر جریان حرکت نمی‌کنند با افزایش سرعت، بتدریج رسوبات شروع به حرکت بدون وقفه در راستای جریان می‌کنند و همان‌طور که اشاره گردید این لحظه به عنوان لحظه‌ی آستانه‌ی



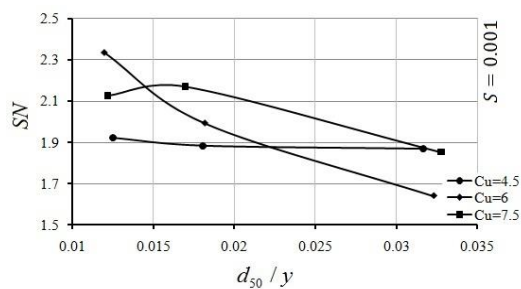
شکل (۲): پارامتر پایداری ذره در مقابل پارامتر اندازه‌ی ذره برای رسوبات با

الف)  $C_u = 4.5$  (ب)  $C_u = 6$  (ج)  $C_u = 7.5$

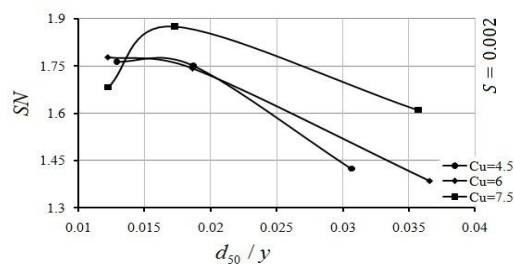
نشان می‌دهد که افزایش شیب مثبت و کاهش شیب معکوس فلوم، سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی را کاهش داده و رسوبات در سرعت کمتری به حرکت در می‌آیند. به طور کلی بررسی نمودارها نشان می‌دهد با افزایش شیب مثبت فلوم از  $0/0005$  به  $0/002$  برای رسوبات با اندازه‌های مختلف، پارامتر پایداری ذرات به طور متوسط ۴۵ درصد کاهش می‌یابد و با افزایش شیب معکوس فلوم از  $0/0005$  به  $0/002$  برای رسوبات با اندازه‌های مختلف، پارامتر پایداری ذرات به طور متوسط ۵۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش پارامتر بی‌بعد اندازه ذره از حدود  $0/12$  به  $0/35$  در شیب‌های مثبت، پارامتر پایداری ذره به طور متوسط ۱۵ درصد کاهش و در شیب‌های معکوس به طور متوسط ۲۲ درصد کاهش می‌یابد.

برای مقایسه تاثیر ضریب یکنواختی بر سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب شکل (۳) ترسیم شده است.

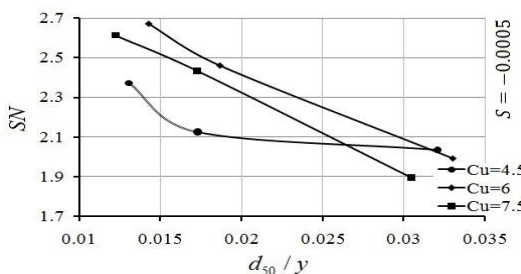
مطابق شکل (۲) پارامتر پایداری ذره با افزایش پارامتر اندازه‌ی ذره به طور متوسط کاهش می‌یابد و این روند برای شیب‌های مختلف تقریباً وضعیت یکسانی دارد. در شکل (۲-ج) برای شیب‌های مثبت فلوم، پارامتر پایداری ذره در برابر پارامتر اندازه‌ی ذره ابتدا روند افزایشی و سپس روند کاهشی دارد و این روند برای شیب‌های مثبت، وضعیت کاملاً یکسانی دارد. از دلایل اصلی آن می‌توان به پدیده‌ی لایه‌ی محافظ اشاره نمود که در آن ذرات درشت‌تر مانند یک سپر ذرات کوچک‌تر را در برابر حرکت، محافظت می‌کنند. در رسوبات با دانه‌بندی یکنواخت‌تر همان‌گونه که در شکل (۲-الف) مشخص است، روند افزایشی و سپس کاهشی پارامتر پایداری ذره در برابر افزایش پارامتر اندازه‌ی ذره تقریباً دیده نمی‌شود. بررسی نمودارها نشان می‌دهد با افزایش شیب مثبت فلوم، پارامتر پایداری ذره کاهش و با افزایش شیب معکوس فلوم، پارامتر پایداری ذره افزایش می‌یابد و این روند برای هر سه ضریب یکنواختی کاملاً یکسان است و این



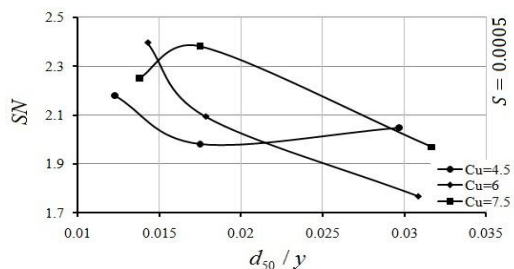
(ب)



(الف)



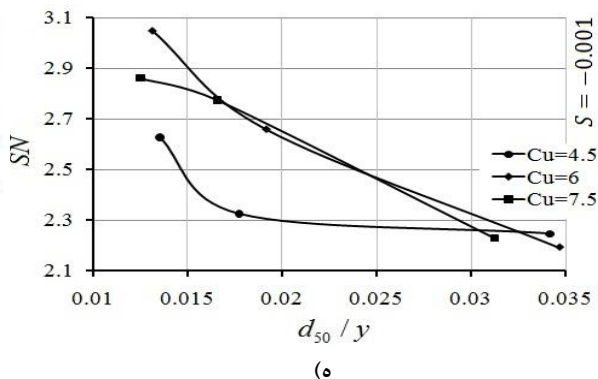
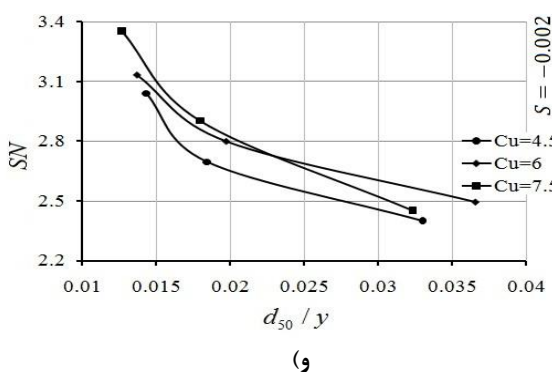
(د)



(ج)

شکل (۳): پارامتر پایداری ذره در مقابل اندازه‌ی ذره برای رسوبات با  $Cu$  متفاوت تحت شیب

(الف)  $0/002$  (ب)  $0/001$  (ج)  $0/0005$  (د)  $-0/0005$  (ه)  $-0/001$



ادامه شکل (۳): پارامتر پایداری ذره در مقابل اندازه‌ی ذره برای رسوبات با Cu متفاوت تحت شیب

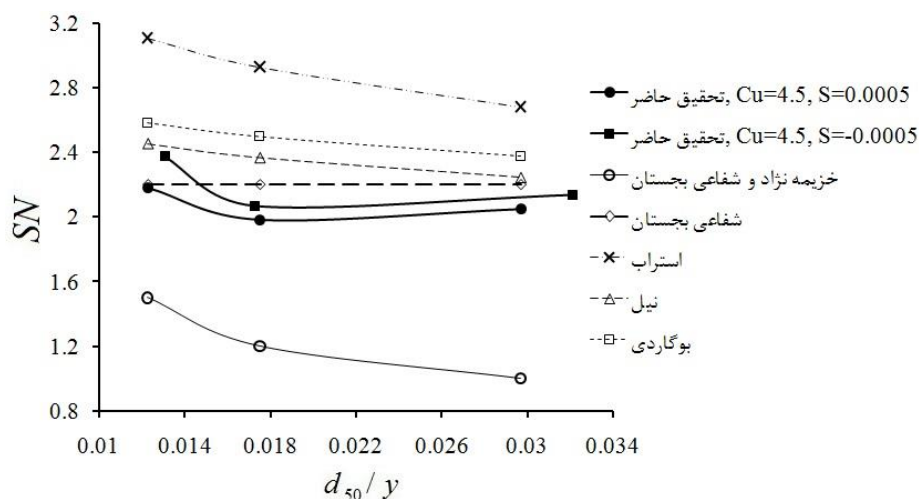
(الف) ۰/۰۰۲ (ب) ۰/۰۰۱ (ج) ۰/۰۰۰۵ (د) -۰/۰۰۵ (ه) -۰/۰۰۱ (و) -۰/۰۰۲

بی‌بعد اندازه‌ی ذره می‌باشد که قبلاً در تحلیل ابعادی استخراج شده بودند. با توجه به اینکه تحقیقات صورت گرفته در خصوص سرعت آستانه‌ی حرکت، عموماً تحت شرایط جریان یکنواخت و دانه‌بندی یکنواخت بوده است، بنابراین برای نزدیک‌تر بودن به شرایط سایر تحقیقات، رسوبات با ضریب دانه‌بندی ۴/۵ که در مقایسه با سایر نمونه‌های رسوب یکنواخت‌تر بوده در وضعیت کمترین شیب فلوم در تحقیق حاضر که برابر ۰/۰۰۰۵ در دو وضعیت شیب مثبت و معکوس بود، مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی شکل (۴) نشان‌دهنده‌ی نزدیکی نتایج می‌باشد. البته نتایج تحقیق خزیمه‌نژاد و شفافی بجستان (۱۳۸۹) با سایر تحقیقات تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد که یکی از دلایل آن، استفاده از رسوبات مصنوعی دارای چگالی کمتر از ۲/۶۵ بوده است. به طور کلی از دلایل اصلی اختلاف در تحقیقات آستانه‌ی این است که تعاریف متفاوتی برای آستانه‌ی حرکت در بین محققین وجود دارد ضمن اینکه متفاوت بودن شرایط جریان و شرایط آزمایش نیز از دیگر دلایل اختلاف می‌باشد.

مطابق شکل (۳) افزایش ضریب یکنواختی باعث افزایش پارامتر پایداری ذره شده است به عبارتی هر چه نمونه‌ی رسوب دانه‌بندی غیریکنواخت‌تری داشته است، سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی با اندازه‌ی یکسان در آن نمونه افزایش یافته است و این وضعیت تقریباً برای تمامی شیب‌ها تکرار شده است. یکی از دلایل اصلی آن، پدیده‌ی لایه‌ی محافظ یا سپری شدن می‌باشد که در آن رسوبات درشت‌دانه مانند یک لایه‌ی سپری، رسوبات ریزدانه را در برابر فرسایش و انتقال، محافظت می‌کنند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۰ و آگودو و همکاران، ۲۰۱۴). به طور کلی نتایج نشان می‌دهد با افزایش ضریب یکنواختی رسوبات، از ۴/۵ به ۷/۵ برای شیب‌های مثبت فلوم و اندازه‌های مختلف رسوبات، پارامتر پایداری ذره به طور متوسط ۶ درصد افزایش می‌یابد و برای شیب‌های معکوس فلوم و اندازه‌های مختلف رسوبات، پارامتر پایداری ذره به طور متوسط ۷ درصد افزایش می‌یابد.

در شکل (۴) نتایج تحقیق حاضر با نتایج سایر محققین مورد مقایسه قرار گرفت. محور عمودی مربوط به پارامتر پایداری ذره و محور افقی مربوط به پارامتر





شکل (۴): مقایسه نتایج تحقیق حاضر و نتایج سایر محققین

ضریب یکنواختی رسوبات، پارامتر پایداری ذره افزایش پیدا می‌کند، به طوری که با افزایش ضریب یکنواختی رسوبات، از  $4/5$  به  $7/5$  برای شیب‌های مثبت فلوم و اندازه‌های مختلف رسوبات، پارامتر پایداری ذره به طور متوسط ۶ درصد افزایش می‌یابد. و برای شیب‌های معکوس فلوم و اندازه‌های مختلف رسوبات، پارامتر پایداری ذره به طور متوسط ۷ درصد افزایش می‌یابد. در حقیقت هر چه توزیع اندازه‌ی ذرات غیریکنواخت‌تر شود رسوبات در سرعت جریان بیشتری در آستانه‌ی حرکت قرار می‌گیرند که یکی از دلایل اصلی، لایه‌ی محافظ (لایه‌ی سپری) است که توسط ذرات با اندازه‌ی بزرگتر شکل گرفته و رسوبات با اندازه‌های کوچکتر را در برابر شروع حرکت و انتقال رسوبات محافظت می‌کنند. مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر با نتایج سایر تحقیقات صورت گرفته در خصوص آستانه‌ی حرکت که بر اساس روش سرعت بحرانی انجام شده‌اند، بسیار نزدیک می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تاثیر پارامترهای شیب کف فلوم، اندازه‌ی ذره و ضریب یکنواختی رسوبات بر پارامتر پایداری ذره (سرعت بی‌بعد آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش شیب مثبت، پارامتر پایداری ذره کاهش و با افزایش شیب معکوس پارامتر پایداری ذره افزایش می‌یابد. به نحوی که با افزایش شیب مثبت فلوم از  $0/0005$  به  $0/002$  برای رسوبات با اندازه‌های مختلف، پارامتر پایداری ذرات به طور متوسط ۴۵ درصد کاهش می‌یابد و با افزایش شیب معکوس فلوم از  $0/0005$  به  $0/002$  برای رسوبات با اندازه‌های مختلف، پارامتر پایداری ذرات به طور متوسط ۵۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش پارامتر اندازه ذره پارامتر پایداری ذره کاهش می‌یابد. به نحوی که با افزایش پارامتر بی‌بعد اندازه ذره از حدود  $0/12$  به  $0/35$  در شیب‌های مثبت، پارامتر پایداری ذره به طور متوسط ۱۵ درصد کاهش و در شیب‌های معکوس به طور متوسط ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش

## منابع

- جهانشاهی، م.، ا. ثابتی و م. قمشی. ۱۳۸۹. بررسی آستانه حرکت ذرات رسوب بر اساس سرعت سقوط ذرات. دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب، کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- خزیمه‌نژاد، ح. و م. شفاعی بجزستان. ۱۳۸۹. معیار آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی در مجاری بسته با مقطع مربع شکل. مجله‌ی علمی - پژوهشی علوم و مهندسی آبیاری، جلد سی و سوم، شماره ۲، ص ۵۱-۶۱.
- خزیمه‌نژاد، ح. و م. شفاعی بجزستان. ۱۳۸۹. بررسی شرایط آستانه حرکت رسوبات غیرچسبنده در کانال‌های روباز دارای شیب ملایم و مقطع مستطیلی. مهندسی آبیاری و آب، سال ۱، شماره ۲، صفحه ۱۳-۲۳.
- رسولیان فر، پ. و ح. افضل‌ی مهر. ۱۳۸۵. اثر مؤلفه‌های آشفتگی جریان در شروع حرکت ذرات رسوب، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، سازمان آب و برق خوزستان، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- شفاعی بجزستان، م. ۱۳۸۷. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ویرایش دوم.
- صفری، م. ج. ص.، م. ع. محمدی، م. منافپور و گ. گیلانی زاده. ۱۳۹۰. آستانه ته نشینی رسوبات در کانال‌ها با جداره ثابت با مقاطع دایره‌ای، مستطیلی و U شکل، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، رشت، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان.
- نظری، ا. و م. م. حیدری. ۱۳۸۸. آستانه حرکت رسوبات یکنواخت، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، انجمن هیدرولیک ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- Agudo, J. R., S. Dasilva, and A. Wierschem. 2014. How do neighbors affect incipient particle motion in laminar shear flow? *Physics of fluids*, 26, 053303.
- Bravo, R., P. Ortiz, and J. L. Perez-Aparicio. 2014. Incipient sediment transport for non-cohesive landforms by the discrete element method (dem). *Applied Mathematical Modelling*, 38(4):1326–1337.
- Grissanthou, V. and S. Hartmann. 1998. Measurement of critical shear stress in sewer. *Journal of water. Res*, 32(7): 2035-2040.
- Paphitis, D. 2001. Sediment movement under unidirectional flows; an assessment of empirical threshold curves. *Coastal Engineering* 43: 227-245.
- Wan Mohtar, W. H. M. 2015. Threshold Criteria for Incipient Grain Motion with Turbulent Fluctuations on a Horizontal Bed. *Sains Malaysiana* 44(1):147–153
- Wang, T., X. Liu, R. Nie and E. Huang. 2010. Comparative Study on the incipient motion conditions of non-uniform non-cohesive sediment. *Journal of hydroelectric engineering*. 29(6): 126-131
- Yang, C. T. 1996. *Sediment transport: Theory and practice*. McGraw-Hill, New York, NY.

## Laboratory Investigation of Incipient Motion Velocity of Non-uniform Non-cohesive Sediments in the Rectangular Flume Under Positive and Reverse Slopes

Khozeymehzhad Hossein<sup>1</sup>, Najafi mood Mohamad Hossein<sup>2</sup>, Mazloom shahraki Rasoul<sup>3</sup>

### Abstract:

It is so called inception motion of sediments when sediment particles begin to move in a flow. So far numerous studies have been performed about the determination of inception motion of uniform non-cohesive sediments in the open channels with the positive slope and relations or graphs in this topic have been presented however, there are a few studies about inception motion of non-uniform non-cohesive sediments in the channels with the negative slope. In this research, conditions of inception motion of non-uniform non-cohesive sediments were investigated by using a laboratory flume and dimensional analysis. The 9 samples of non-uniform non-cohesive sediments with different size and uniformity coefficient at three positive slopes 0/0005, 0/001, 0/002 and three negative slopes, 0.0005, 0.001, 0.002 were examined in this experiment. Results showed that by increasing the positive slope, the stability parameter of particle reduces and by increasing negative slope, the stability parameter of particle increases. Moreover, results showed that by increasing particle size parameter, particle stability parameter reduces and by increasing the uniformity coefficient of sediments, particle stability parameter increases.

**Keywords:** incipient motion velocity, non-uniform non-cohesive sediment, positive and reverse slopes, rectangular flume.

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of water Engineering, University of Birjand, Hkhozeymeh@birjand.ac.ir

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of water Engineering, University of Birjand, Mhnajafi@birjand.ac.ir

<sup>3</sup> Graduate student of Irrigation and Drainage of University of Birjand, Birjand, Iran, rasoulshahraki3@yahoo.com