

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر شیب کف معکوس بر سرعت آستانه حرکت رسوبات غیر چسبنده

حسین خزیمه نژاد<sup>1\*</sup>، محمدحسین نجفی مود<sup>2</sup>، رسول مظلوم شهرکی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 93/06/02 تاریخ پذیرش: 94/06/23

<sup>1,2</sup> استادیاران گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

<sup>3</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه بیرجند

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [Hkhozeymeh@Birjand.ac.ir](mailto:Hkhozeymeh@Birjand.ac.ir)

### چکیده

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص تعیین سرعت آستانه حرکت رسوبات در مجاری روباز با شیب مثبت انجام شده است و روابط یا نمودارهایی در این زمینه ارائه شده است، اما تحقیقی در خصوص سرعت آستانه حرکت در مجاری روباز دارای شیب معکوس انجام نشده و به همین دلیل، تحقیق حاضر صورت گرفت. در آزمایش‌های این تحقیق 9 نمونه رسوب غیرچسبنده غیریکنواخت با اندازه ذرات و انحراف هندسی مختلف در سه شیب معکوس 0/0005، 0/001 و 0/002 مورد بررسی قرار گرفتند. بنا به نتایج به دست آمده، پارامتر پایداری ذره با شیب معکوس کف کانال رابطه مستقیمی دارد به نحوی که با افزایش شیب معکوس کف کانال از 0/0005 به 0/002 برای رسوبات با اندازه‌های مختلف، پارامتر پایداری ذره به طور متوسط 52 درصد افزایش می‌یابد. همچنین پارامتر پایداری ذره با پارامتر اندازه ذره رابطه معکوس دارد به طوری که با افزایش پارامتر اندازه ذره از حدود 0/12 به 0/35 در شیب‌های معکوس مختلف، پارامتر پایداری ذره به طور متوسط 22 درصد کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده، پارامتر بی‌بعد پایداری ذره با انحراف معیار هندسی رسوبات رابطه مستقیم دارد. در نتیجه با افزایش انحراف معیار هندسی از 2/1 به 3/5 برای شیب‌های معکوس و اندازه‌های مختلف، پارامتر پایداری ذره به طور متوسط 7 درصد افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: رسوبات غیریکنواخت، سرعت آستانه حرکت، شیب معکوس، مجاری روباز، مدل آزمایشگاهی

## Laboratory Investigation of Adverse bed slope Effect on Incipient Motion of Non-cohesive sediment

H Khozaymehnezhad<sup>1\*</sup>, MH Najafi mood<sup>2</sup>, R Mazloom Shahraki<sup>3</sup>

Received: 24 August 2014

Accepted: 17 September 2015

<sup>1,2</sup>- Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Univ. of Birjand, Iran

<sup>3</sup>- M.Sc. of Irrigation and Drainage., Univ. of Birjand, Birjand, Iran

\* Corresponding Author, Email: [Hkhozaymeh@Birjand.ac.ir](mailto:Hkhozaymeh@Birjand.ac.ir)

### Abstract

So far, many studies have been carried out to determine the conditions of incipient motion of sediment in open channels with positive slope and many relationships and graphs have been presented. But no any research has been done on incipient motion of the sediments on adverse slope of open channel and therefore, this study was conducted. In the experiments of this study, 9 types of non-cohesive and non-uniform sediments have been tested with different particle sizes and geometric standard deviation, on the bed adverse slopes of 0.0005, 0.001 and 0.002. According to the results, the stability parameter was directly related to the adverse slope of the channel. By increasing the adverse slope of the channel from 0.0005 to 0.002 for different particle sizes of sediments, the stability parameter was increased 52 percent on average. Also the particle size parameters showed inverse relation with the stability parameter. Thus, by increasing the particle size parameter from 0.12 to 0.35 for different adverse slopes, stability parameter was decreased 22 percent on average. According to the result, the stability parameter was directly related to the geometric standard deviation of the sediment particles. Consequently with increasing geometric standard deviation from 2.1 to 3.5 for different particle sizes of the sediment and channel slope, stability parameter was increased 7 percent on average.

**Keywords:** Adverse slope, Incipient motion velocity, Laboratory model, Non-uniform sediments, Open channel

اهمیت است. رسوبات ته‌نشین شده در سازه‌های انتقال آب دو نوع‌اند، نوع اول شامل رسوبات درشت‌دانه و غیرچسبنده است که ماسه و ذرات درشت‌تر از آن را در برمی‌گیرد و نوع دوم شامل رسوبات ریزدانه بوده که این رسوبات عمدتاً از نوع رسوبات چسبنده می‌باشند (پارتنی‌تاز 1965). فرسایش و انتقال رسوبات به

### مقدمه

موضوع رسوب، انتقال آن و مشکلات ناشی از وجود آن در سازه‌های آبی موضوعی است که سال‌ها مورد مطالعه مهندسیین و ریخت‌شناسان رودخانه بوده است. لحظه شروع حرکت ذره که اصطلاحاً به آن آستانه حرکت می‌گویند برای مهندسان هیدرولیک حائز

آستانه 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 ذره معرفی نمود. شیلدنز مطالعاتش در زمینه آستانه حرکت را بر مبنای تنش برشی بحرانی انجام و نمودار کاربردی خود را در این زمینه ارائه داد (شفاعی بجستان 1387). این نمودار توسط گاورز<sup>2</sup> اصلاح گردید (یانگ 1996). در ادامه دانشمندان دیگری مانند گسلر<sup>3</sup>، مانتز<sup>4</sup>، یالین و کاراهان<sup>5</sup> بر مبنای تنش برشی، تحقیقاتی را انجام و تغییراتی را در دیگرام شیلدنز انجام دادند (پافیتیز 2001). هریسانتو و هارتمان (1998) تحقیقی را بر روی تخمین تنش برشی بحرانی بر اساس دبی بحرانی متناظر با آن انجام دادند. نتایج نشان داد با وجود تعاریف مختلفی که از آستانه حرکت رسوبات غیرچسبنده در بین محققان مختلف وجود دارد ولی نتایج، تفاوت زیادی با همدیگر ندارند، البته در مورد خاک‌های چسبنده تعریف آستانه حرکت تفاوت قابل ملاحظه‌ای در نتایج می‌گذارد. جهانشاهی و همکاران (1389) در راستای ایرادی که در نمودار شیلدنز وجود داشت، تحقیقی را در زمینه آستانه 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 ذره<sup>6</sup> و پارامتر اندازه ذره سعی در تشریح سرعت برشی بحرانی جهت آغاز حرکت رسوب گردید. رسولیان فر و افضلی‌مهر (1385) اثر مؤلفه‌های آشفتگی بر شروع حرکت ذرات رسوب را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، داده‌های سرعت آب در سه جهت، توسط سرعت‌سنج ADV

خصوصیات مواد بستر، وابستگی قابل ملاحظه‌ای دارد. باین حال هنوز محققان موفق به تعیین ارتباط دقیق بین پارامترهای هندسی ذرات رسوب و سرعت بحرانی حرکت رسوبات یا همان سرعت آستانه حرکت نشده‌اند. اختلاف اصلی در پارامترهای انتقال رسوب، بین ذرات معلق و غیرمعلق (بار بستر) هست. حرکت بار بستر به سه صورت جهش، غلطش و لغزش صورت گرفته و از این طریق بر ته‌نشینی (نهشته شدن) رسوبات غلبه می‌کند (بگنولد 1973). بررسی‌های انجام شده بر روی بار بستر و انتقال ذرات رسوبی درشت یکنواخت غیرچسبنده، نشان می‌دهد که ذرات رسوبی خود نیز باعث فرسایش ذرات دیگر می‌شوند (چپسون و همکاران 1997). رسوبات چسبنده عمدتاً به صورت معلق و بخشی از آن نیز به صورت بار شسته درون جریان حمل شده و کمتر به صورت بار بستر جابجا می‌شوند. درحالی‌که بخش قابل توجهی از رسوبات غیرچسبنده درون کانال‌ها به صورت بار بستر جابجا می‌شوند و اطلاع از نحوه‌ی حرکت و میزان آن، همواره برای مهندسان و طراحان سازه‌های آبی به‌ویژه کانال‌ها حائز اهمیت بوده است.

شرایط هیدرولیکی لحظه آستانه حرکت ذرات معمولاً با تنش برشی بحرانی (تنش برشی جریان در آستانه حرکت) یا سرعت بحرانی تعریف می‌شود (شفاعی-بجستان 1387). به دلیل پیچیده بودن پدیده آستانه حرکت ذرات رسوبی، پیدا کردن شرایط هیدرولیکی در لحظه شروع حرکت رسوبات، تقریباً به انجام آزمایش‌های فیزیکی و کارهای آزمایشگاهی بستگی دارد. هیلستروم (1935) تحلیل جامعی بر روی داده‌های به‌دست آمده از حرکت مصالح یکنواخت به انجام رساند. به علت مشکل بودن اندازه‌گیری سرعت کف آبراهه که عامل مستقیم حرکت رسوب است، مطالعه وی بر اساس سرعت متوسط جریان صورت گرفت (یانگ 1996). شیلدنز<sup>1</sup> با انجام مطالعات بنیادی، اولین معیار علمی

2 - Govers

3 - Gessler

4 - Mantz

5 - Yalin and Karahan

6 - Stability number

1 - Shields

داده‌های تجربی بوده است. شفافی بجزستان (1387) نشان داد که شکل عمده این روابط را می‌توان به صورت رابطه 1 نوشت.

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

که در آن  $V_T$  سرعت آستانه حرکت،  $G_s$  چگالی رسوب،  $d_s$  اندازه ذرات رسوب،  $g$  شتاب ثقل،  $D$  عمق جریان،  $a$  و  $m$  ضرایبی هستند که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی در شرایط جریان آزاد به دست می‌آید. جدول 1 ضرایب به دست آمده توسط برخی از محققان را نشان می‌دهد.

جدول 1- ضرایب  $a$  و  $m$  در رابطه 1 (شفافی بجزستان 1387).

توضیحات	$m$	$a$	محقق
بستر کانال	0/167	1/49	استراب (1953)
بستر کانال	0/1	1/58	نیل (1968)
بستر کانال	0/095	1/70	بوگاردی (1968)
$ds/D < 0.1$ بستر کانال	0	2/2	شفافی بجزستان (1990)
$ds/D > 0.1$ بستر کانال	0/25	1/237	
بستر مجاری بسته مستطیلی	0/4	0/287	نالوری و قانی (1996)
بستر مجاری بسته دایره‌ای	0/47	0/125	می (2003)

مستطیلی در شیب‌های مختلف کف کانال را مورد بررسی قرار دادند و حاصل آن تحقیق، استخراج یک نمودار کاربردی بود. نظری و حیدری (1388) با استفاده از مدل آزمایشگاهی، آستانه حرکت ذرات رسوبی یکنواخت را مورد بررسی قرار دادند، بنا به نتایج آن‌ها، شروع حرکت ذرات رسوبی نه تنها به اندازه ذرات رسوب وابسته بوده بلکه به نسبت عمق جریان به قطر ذرات نیز بستگی دارد. در زمینه بررسی سرعت آستانه حرکت رسوبات غیریکنواخت مطالعات اندکی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات

Doppler در یک فلوم آزمایشگاهی با بستر شنی برداشت گردید. همچنین نقش مؤلفه‌های مختلف تانسور تنش رینولدزی روی آستانه حرکت ذرات رسوب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تنش برشی  $\tau = \rho u'w'$  و  $u'$  و  $w'$  مؤلفه‌های نوسانی سرعت در راستای جریان و عمود بر راستای جریان در جهت عمق، مهم‌ترین پارامتر در بررسی آستانه حرکت ذرات درشت‌دانه بستر هست.

اما تعدادی از دانشمندان علم هیدرولیک رسوب، به جای استفاده از تنش برشی، سرعت جریان را به عنوان مهم‌ترین فاکتور، در رابطه‌مند کردن پدیده آستانه حرکت مورد استفاده قرار داده‌اند. روابطی که پیشنهاد گردیده، عمدتاً بر مبنای تحلیل ابعادی و استفاده از

خزیمه‌نژاد و شفافی بجزستان (1389-الف) با استفاده از تحلیل ابعادی و مدل آزمایشگاهی، شرایط هیدرولیکی در لحظه آستانه حرکت ذرات رسوبی را در مقاطع تحت فشار مربعی شکل با شیب معکوس مورد بررسی قرار دادند. نتایج به صورت منحنی‌هایی ارائه گردید که با به کار بردن این منحنی‌ها، می‌توان سرعت آستانه حرکت را در مقاطع تحت فشار مربعی به دست آورد. خزیمه‌نژاد و شفافی بجزستان (1389-ب) با استفاده از مدل فیزیکی و تحلیل ابعادی شرایط آستانه حرکت رسوبات یکنواخت در کانال‌های روباز با مقطع

پارامترهای معرفی شده، در رابطه 3 نشان داده شده‌اند.

$$f_1(V_T, y, g, d_{50}, s_g, S, r, r_s - r, m) = 0 \quad [3]$$

با استفاده از تحلیل ابعادی و روش باکینگهام، رابطه 3 به رابطه 4 تبدیل می‌شود.

$$SN = \frac{V_T}{[g(G_s - 1)d_{50}]^{0.5}} = f_2(d_{50}/y, S, Re, s_g) \quad [4]$$

در رابطه 4 SN پارامتر پایداری ذره (سرعت بی‌بعد آستانه حرکت جریان) که در بعضی از منابع عدد فرود ذره نیز معرفی شده است،  $d_{50}/y$  پارامتر اندازه ذره، و Re عدد رینولدز ذره هست که به صورت رابطه 5 معرفی می‌شود.

$$(Re = V_T d_{50} / \nu) \quad [5]$$

با توجه به اینکه در آزمایش‌های این تحقیق عدد رینولدز جریان بسیار بزرگتر از حد بستر زیر هست، بنابراین می‌توان از تأثیر آن صرف نظر نمود. در جدول 2 متغیرهای مورد بررسی به همراه دامنه تغییرات آن‌ها نشان داده شده است.

جدول 2- متغیرهای مورد بررسی و دامنه تغییرات آن‌ها در تحقیق حاضر.

متغیر	مقادیر
$d_{50}$	2، 2/8 و 4/5 میلی‌متر
$s_g$	2/1، 2/8 و 3/5
S	0/0005، 0/001 و 0/002

ب) تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایش‌ها برای رسیدن به اهداف این مطالعه یعنی پیدا کردن رابطه‌ای خاص و یا نمودارهایی در خصوص تعیین سرعت آستانه حرکت رسوبات غیرچسبنده در مجاری دارای شیب معکوس، آزمایش‌هایی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند انجام گردید. مدل آزمایشگاهی، کانالی از جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت 1 سانتی‌متر بود. این کانال که دارای طول

اگیازارف<sup>7</sup>، وانگ<sup>8</sup> و میچالیک<sup>9</sup> اشاره نمود. محققانی که در این زمینه کار نموده‌اند، عمدتاً بر اساس تنش برشی بحرانی مطالعات خود را پیش برده و رابطه یا نمودار جدیدی ارائه نداده بلکه با استفاده از دیاگرام شیلدن روابط اصلاح شده‌ای را پیشنهاد نموده‌اند (شفاعی- بچستان 1387). بررسی منابع نشان می‌دهد که تحقیقات در خصوص تعیین سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی در مجاری روباز، محدود به شیب‌های مثبت بوده و تاکنون تحقیقی در زمینه تعیین سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی غیرچسبنده در شیب‌های معکوس انجام نشده است. در تحقیق حاضر تأثیر اندازه متوسط و انحراف معیار هندسی اندازه ذرات رسوب بر سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی تحت شیب‌های معکوس مجرا با بهره‌گیری از مدل آزمایشگاهی و استفاده از روش سرعت بحرانی مورد بررسی قرار گرفت و نمودارهایی در این زمینه ارائه گردید.

## مواد و روش‌ها

### الف) تحلیل ابعادی

سرعت آستانه حرکت ذرات رسوب غیرچسبنده در یک مجرای دارای شیب معکوس به پارامترهای متعددی بستگی دارد که عبارت‌اند از:

سرعت آستانه حرکت جریان در کانال  $V_T$ ، عمق جریان  $y$ ، شتاب ثقل  $g$ ، قطر متوسط ذرات  $d_{50}$ ، انحراف معیار هندسی  $s_g$  (که با استفاده از رابطه 2 معرفی می‌شود)، شیب معکوس کف کانال  $S$ ، خصوصیات مربوط به سیال: جرم واحد حجم سیال  $\rho$ ، لزجت دینامیکی  $m$  و جرم واحد حجم مستغرق ذره  $\rho_s - \rho$ .

$$s_g = (d_{84} / d_{16})^{0.5} \quad [2]$$

7 - Egiazaroff

8 - Wang

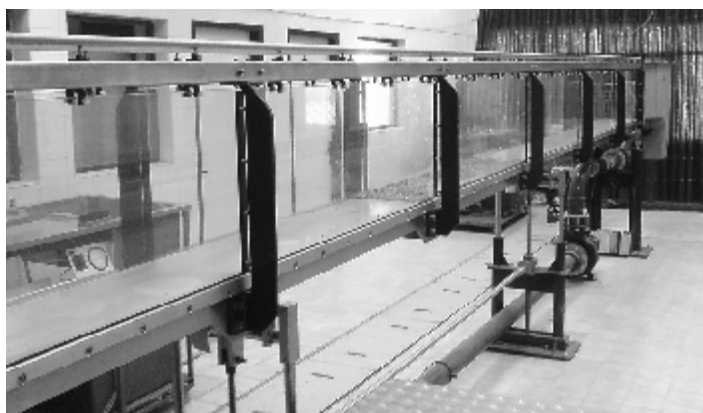
9 - Michalik

متحرک انتهایی کانال بالا آورده شد، علاوه بر این برای پیشگیری از ورود رسوبات به داخل منبع آب از یک قاب فلزی توری در انتهای کانال استفاده شد. نوع رسوبات مورد آزمایش از نوع غیرچسبنده (ماسه‌ی شکسته) بودند، برای تهیه رسوبات با دانه‌بندی‌های متفاوت از روش الک استفاده و منحنی دانه‌بندی هر یک از نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش‌ها ترسیم شد. در شکل 1 نمایی از کانال، مقطع آزمایش و نحوه اندازه‌گیری عمق جریان نشان داده شده است. به دلیل اینکه عمق آب از پارامترهای مؤثر بر آستانه حرکت ذرات رسوبی است، در تمامی آزمایش‌ها سرریز متحرک انتهایی به گونه‌ای تنظیم شد که سطح آب در کانال در تمامی آزمایش‌ها تقریباً ثابت و فاقد تلاطم باشد. عمق جریان در سه قسمت ابتدایی، میانی و انتهایی مقطع رسوبی اندازه‌گیری و متوسط‌گیری شد.

10 متر، عرض 30 سانتی‌متر و ارتفاع 50 سانتی‌متر هست، مجهز به سیستم بازچرخانی آب بوده، به طوری که آب از طریق پمپ به بخش ورودی کانال پمپاژ شده و از آنجا به درون کانال هدایت می‌شود. برای آرام کردن جریان ورودی در ابتدای کانال از صفحات مشبک و توری استفاده شد. شیب این کانال از طریق جک تعبیه شده در بخش انتهایی کانال، تنظیم می‌شود، همچنین دبی ورودی به کانال از طریق دبی‌سنج الکترومغناطیس اندازه‌گیری می‌شود. برای جلوگیری از تأثیر جریان بالادست و پایین‌دست، رسوبات مورد آزمایش در دو متر میانی کانال قرار گرفتند. 4 متر فاصله از ابتدای کانال، اطمینان کافی برای توسعه کامل جریان را فراهم می‌ساخت. در ابتدای هر آزمایش برای کنترل عمق آب در یک محدوده مشخص و جلوگیری از تأثیر نیروی وزن آب روی حرکت رسوبات، سرریز



(ب)



(الف)

شکل 1- کانال آزمایشگاهی الف) نمای کلی ب) مقطع آزمایشی و اندازه‌گیری عمق جریان.

بستر نشود، وارد کانال می‌شود. به تدریج که سطح آب در کانال بالا آمد، دبی جریان تدریجاً افزایش یافته و بر سرعت جریان تا رسیدن به سرعت آستانه حرکت ذرات افزوده می‌شود. در این تحقیق شروع حرکت ذرات ادامه بی‌وقفه حرکت ذرات به عنوان معیار آستانه حرکت تعیین و برای کلیه آزمایش‌ها مدنظر قرار گرفت. افزایش سرعت جریان آب از دو طریق امکان‌پذیر است، از طریق

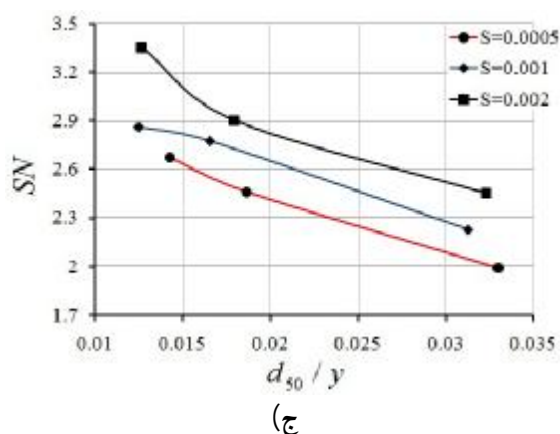
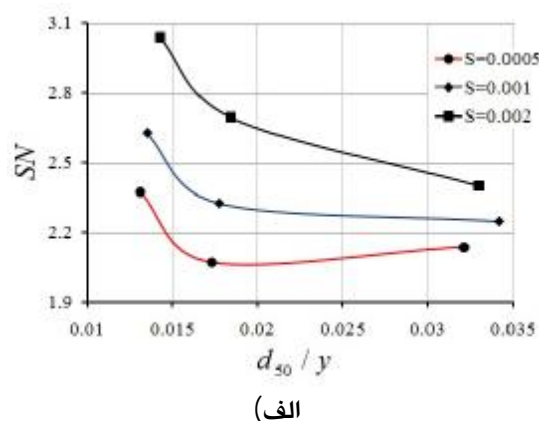
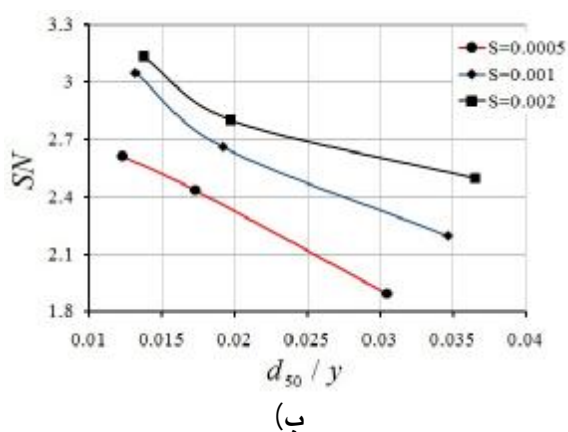
نحوه انجام آزمایش‌ها بدین صورت بود که شیب معکوس کف کانال روی عدد موردنظر تنظیم و رسوبات در کف کانال پهن می‌شدند، ارتفاع رسوبات بار بستر در کانال بنا بر نظر اینیشتن 2 برابر مقدار  $d_{50}$  رسوبات هست (شفاعی بجستان 1387). سرریز متحرک انتهایی کانال بالا آورده شده و با روشن شدن پمپ، آب به آرامی به گونه‌ای که باعث فرسایش مصالح

نمونه رسوب در یک شیب معکوس مشخص کف کانال، هر آزمایش چندین مرتبه تکرار و از نتایج متوسط‌گیری شد. آزمایش‌ها برای 9 نمونه رسوب با اندازه ذرات و ضریب یکنواختی مختلف در سه شیب معکوس کف کانال انجام و سرعت آستانه حرکت تعیین گردید.

### نتایج و بحث

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و رابطه 4 اشکال 2 و 3 ترسیم شدند. در شکل 2 پارامترهای بی‌بعد پایداری ذره و اندازه ذره در برابر هم برای شیب معکوس کانال و مقادیر انحراف معیار هندسی مختلف نشان داده شده‌اند.

افزایش دبی و همچنین از طریق پایین آوردن سطح آب به‌وسیله سرریز متحرک انتهای کانال، این افزایش به‌کمک دو روش مذکور به‌گونه‌ای صورت گرفت که عمق آب در کلیه آزمایش‌ها تقریباً یکسان باشد. با افزایش تدریجی دبی و افزایش سرعت، رسوبات کف کانال ابتدا حرکات نوسانی و منقطع را شروع کرده ولی در مسیر جریان حرکت نمی‌کردند با افزایش سرعت، به‌تدریج رسوبات شروع به حرکت بدون وقفه در راستای جریان می‌کردند و همان‌طور که اشاره گردید این لحظه به‌عنوان لحظه آستانه حرکت رسوب در نظر گرفته شد. از تقسیم میزان دبی که منجر به آستانه حرکت گردید بر مقطع جریان، سرعت بحرانی یا همان سرعت آستانه حرکت تعیین شد. برای یافتن سرعت آستانه حرکت یک

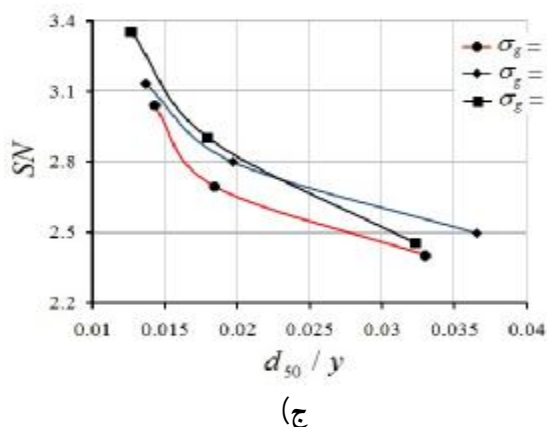
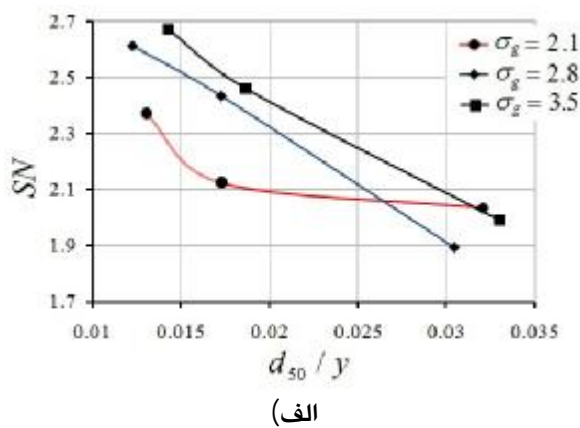
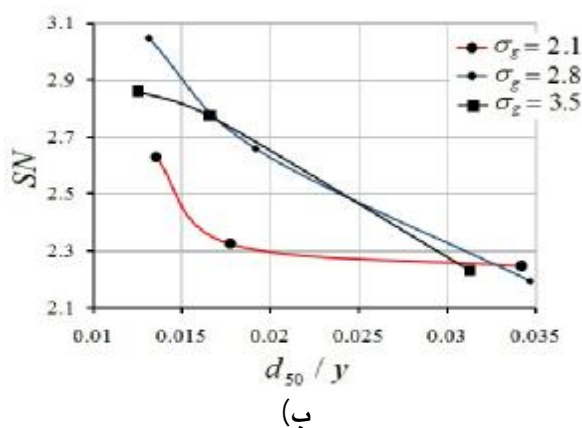


شکل 2- پارامتر پایداری ذره در مقابل پارامتر اندازه ذره برای رسوبات با

$$s_g = 2.1 \text{ (الف)} \quad s_g = 2.8 \text{ (ب)} \quad s_g = 3.5 \text{ (ج)}$$

بررسی نمودارها نشان می‌دهد با افزایش شیب معکوس کف کانال از 0/0005 به 0/002 برای رسوبات با اندازه‌های مختلف، پارامتر پایداری ذرات به‌طور متوسط 52 درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش پارامتر بی‌بعد اندازه ذره از حدود 0/12 به 0/35 در شیب‌های معکوس مختلف کف کانال، پارامتر پایداری ذره به‌طور متوسط 22 درصد کاهش می‌یابد. برای مقایسه تأثیر انحراف معیار هندسی بر سرعت آستانه حرکت ذرات رسوب شکل 3 ترسیم شده است.

مطابق شکل 2 پارامتر پایداری ذره با افزایش پارامتر اندازه ذره کاهش می‌یابد و این روند برای شیب‌های معکوس مختلف کف کانال وضعیت کاملاً یکسانی دارد. همچنین با افزایش شیب معکوس کانال، پارامتر پایداری ذره افزایش می‌یابد و این روند برای هر سه مقدار انحراف معیار هندسی کاملاً یکسان است و این نشان می‌دهد که افزایش شیب معکوس کف کانال، سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی را افزایش داده و رسوبات در سرعت بیشتری به حرکت در می‌آیند. به‌طور کلی



شکل 3- پارامتر پایداری ذره در مقابل اندازه ذره برای رسوبات با  $\sigma_g$  متفاوت تحت شیب معکوس الف) 0/0005 ب) 0/001 ج) 0/002 .

گفت با افزایش مقدار انحراف معیار هندسی و به عبارتی افزایش غیریکنواختی نمونه رسوب، سرعت آستانه حرکت نمونه ذرات رسوبی با اندازه متوسط یکسان در آن افزایش یافته است و این وضعیت تقریباً برای تمامی شیب‌های معکوس تکرار شده است. یکی از دلایل اصلی

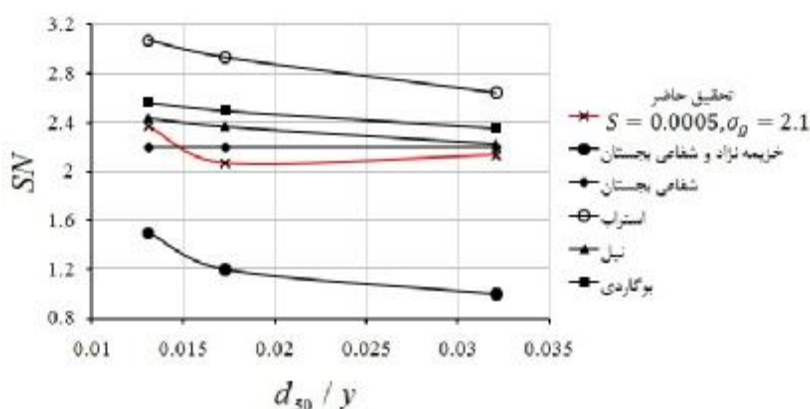
مطابق شکل 3 افزایش انحراف معیار هندسی از مقدار 2/1 به 2/8 باعث افزایش پارامتر پایداری ذره شده است اما با افزایش انحراف معیار هندسی از 2/8 به 3/5 به‌استثنای شکل 3-الف نمی‌توان به روند مشخصی اشاره نمود. البته با بررسی شکل 3 به‌طور کلی می‌توان



بودن به شرایط سایر تحقیقات، رسوبات با انحراف معیار هندسی 2/1 که در مقایسه با سایر نمونه‌های رسوب، یکنواخت‌تر بوده در وضعیت کمترین شیب معکوس کف کانال در تحقیق حاضر که برابر 0/0005 بود مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی شکل نشان‌دهنده نزدیکی نتایج هست. البته نتایج تحقیق خزیمه‌نژاد و شفافی بجزستان (1389-ب) با سایر تحقیقات تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای دارد که یکی از دلایل آن، استفاده از رسوبات مصنوعی دارای چگالی کمتر از 2/65 بوده است. به‌طورکلی از دلایل اصلی اختلاف در تحقیقات آستانه این است که تعاریف متفاوتی برای آستانه حرکت در بین محققین وجود دارد ضمن این‌که متفاوت بودن شرایط جریان و شرایط آزمایش نیز از دیگر دلایل اختلاف هست.

آن، پدیده لایه محافظ یا سپری شدن هست که در آن رسوبات درشت‌دانه مانند یک لایه سپری، رسوبات ریزدانه را در برابر فرسایش و انتقال، محافظت می‌کنند. به‌طورکلی نتایج نشان می‌دهد با افزایش انحراف معیار هندسی رسوبات، از 2/1 به 3/5 برای شیب‌های معکوس و اندازه‌های مختلف، پارامتر پایداری ذره به‌طور متوسط 7 درصد افزایش می‌یابد.

در شکل 4 نتایج تحقیق حاضر با نتایج سایر محققان مورد مقایسه قرار گرفت. محور عمودی مربوط به پارامتر بی‌بعد پایداری ذره و محور افقی مربوط به پارامتر بی‌بعد اندازه ذره هست که قبلاً در تحلیل ابعادی استخراج شده بودند. با توجه به اینکه تحقیقات صورت گرفته در خصوص سرعت آستانه حرکت، عموماً تحت شرایط جریان یکنواخت و دانه‌بندی یکنواخت در مجاری دارای شیب مثبت بوده است، بنابراین برای نزدیک‌تر



شکل 4- مقایسه نتایج تحقیق حاضر و نتایج سایر محققان.

به‌نحوی‌که با افزایش شیب معکوس کف کانال از 0/0005 به 0/002 برای رسوبات با اندازه‌های مختلف، پارامتر پایداری ذرات به‌طور متوسط 52 درصد افزایش یافت، همچنین با افزایش پارامتر بی‌بعد اندازه ذره، پارامتر پایداری ذره کاهش می‌یابد به‌طوری‌که با افزایش این پارامتر از حدود 0/12 به 0/35 در شیب‌های معکوس مختلف، پارامتر پایداری ذره به‌طور متوسط 22 درصد دچار کاهش گردید. همچنین با افزایش

### نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای شیب معکوس کف کانال، اندازه ذره و انحراف معیار هندسی رسوبات بر پارامتر پایداری ذره (سرعت بی‌بعد آستانه حرکت ذرات رسوب) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش شیب معکوس کف کانال، پارامتر پایداری ذره افزایش می‌یابد به‌عبارتی رسوبات با سرعت بیشتری از جریان در آستانه حرکت قرار می‌گیرند

بیشتری در آستانه حرکت قرار می‌گیرند که یکی از دلایل اصلی، لایه محافظ (لایه سپری) است که توسط ذرات با اندازه بزرگتر شکل گرفته و رسوبات با اندازه-های کوچک‌تر را در برابر شروع حرکت و انتقال رسوبات محافظت می‌کنند.

انحراف معیار هندسی رسوبات، پارامتر پایداری ذره افزایش پیدا می‌کند، به طوری که با افزایش انحراف معیار هندسی از 2/1 به 3/5 برای شیب‌های معکوس و اندازه-های مختلف، پارامتر پایداری ذره به طور متوسط 7 درصد افزایش یافت. در حقیقت هر چه توزیع اندازه ذرات غیریکنواخت‌تر شود رسوبات در سرعت جریان

#### منابع مورد استفاده

- جهانشاهی م، ثابتی ا و قمشی م، 1389. بررسی آستانه حرکت ذرات رسوب بر اساس سرعت سقوط ذرات. دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامع منابع آب، 9 و 10 بهمن، کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- خزیمه‌نژاد ح و شفاعی بجستان م، 1389-الف. معیار آستانه حرکت ذرات رسوبی در مجاری بسته با مقطع مربع شکل. مجله علمی- پژوهشی علوم و مهندسی آبیاری، جلد 33، شماره 2، صفحه‌های 51 تا 61.
- خزیمه‌نژاد ح و شفاعی بجستان م، 1389-ب. بررسی شرایط آستانه حرکت رسوبات غیرچسبنده در کانال‌های روباز دارای شیب ملایم و مقطع مستطیلی. مهندسی آبیاری و آب، سال 1، شماره 2، صفحه‌های 13 تا 23.
- رسولیان فر پ و افضل مهر ح، 1385. اثر مؤلفه‌های آشفتگی جریان در شروع حرکت ذرات رسوب، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، 24 تا 26 بهمن، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- شفاعی بجستان م، 1387. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. ویرایش دوم. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- نظری ا و حیدری م، 1388. آستانه حرکت رسوبات یکنواخت. هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، 24 و 25 آذر، تهران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- Bagnold RA, 1973. The nature of saltation and "bed load" transport in water. Proceedings of the Royal Society London, England, series A 332: 473-504.
- Chrissanthou V and Hartmann S, 1998. Measurement of critical shear stress in sewer. Journal of Water Research 32(7): 2035-2040.
- Jepsen R, Roberts J and Lick W, 1997. Effects of bulk density on sediment erosion rates. Water, Air and Soil Pollution 99: 21-31.
- Paphitis D, 2001. Sediment movement under unidirectional flows; an assessment of empirical threshold curves. Coastal Engineering 43: 227-245.
- Partheniathes E, 1965. Erosion and deposition of cohesive soils. Journal of Hydraulic Division, Proc ASCE 91: 105-137.
- Yang CT, 1996. Sediment Transport: Theory and Practice. McGraw-Hill, New York, NY.