

## A Review of Methods for Assessing Incipient Motion of Sediments and the Factors Affecting it

Sh. Esmailzade<sup>1</sup>, K. Esmaili<sup>2\*</sup>

1,2- PhD student of Water Engineering- water structures & Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

\*(Corresponding author Email: esmaili@um.ac.ir)

Received: 20-04-2016

Accepted: 12-04-2017

## مروری بر روش‌های ارائه شده در تعیین آستانه حرکت ذرات رسوب و عوامل موثر بر آن

شهرام اسماعیل‌زاده<sup>۱</sup>، کاظم اسماعیلی<sup>۲\*</sup>

۱-۲- به ترتیب دانشجوی دکتری مهندسی آب-سازه های آبی و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

\*(نویسنده مسئول، E-Mail: esmaili@um.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۱/۲۳

### Abstract

In erodible channels, a series of hydrodynamic forces are applied on the sediments in the waterways. With the increasing flow rate, the hydrodynamic forces also increase gradually. If hydrodynamic forces go beyond the critical value, the sediment particles begin to move. The onset of the sediment movement is commonly called "Incipient Motion", and the circumstances in which the particles move is referred to as the "Threshold or Critical Condition". The Shields Diagram seems to be the starting point for all research done in the field of sediment transport. Although some efforts were made before the Shields approach, they were mostly based on empirical formulae and did not have much use in practical applications. Many studies were conducted by Shields and the resulting diagram provided by Shields was used widely in practical issues. In spite of the widespread application of Shields Diagram, some studies indicate limitations on its use. One of the problems in the Shields Diagram is that shear stress and shear velocity are considered as independent variables, while these two variables are dependent. Moreover, it does not explicitly specified which method is used to determine the critical shear stress. The effect of the bed slope on the incipient motion is still not clear and researchers have achieved quite different results in this regard.

**Keywords:** Shields Diagram, Incipient motion, Sediment, Erosion.

### چکیده

در آبراهه‌های فرسایش‌پذیر مجموعه‌ای از نیروهای هیدرودینامیکی به ذرات رسوب موجود در بستر آبراهه وارد می‌شوند. با افزایش سرعت جریان، مقدار این نیروها نیز بتدریج 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<sup>۱</sup> و شرایطی که در آن ذرات در آستانه حرکت قرار می‌گیرند را شرایط آستانه یا بحرانی<sup>۲</sup> گویند. به نظر می‌رسد که نمودار شیلدز نقطه مرجع تمامی تحقیقات انجام شده در زمینه انتقال رسوب باشد. هرچند تلاش‌های اندکی نیز قبل از شیلدز صورت گرفته بود اما عمدتاً بر مبنای فرمول‌های تجربی بودند و قابلیت چندان در کاربردهای عملی نداشتند. مطالعات زیادی در ادامه تحقیقات شیلدز انجام شد و نمودار ارائه شده توسط شیلدز بطور وسیعی در مسائل عملی نیز بکار گرفته شد. علیرغم 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 محققین مختلف صورت گرفت. از جمله مشکلات در نمودار شیلدز آن است که تنش برشی و سرعت برشی به صورت متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند در حالی که این دو متغیر مستقل نیستند و به یکدیگر وابسته‌اند یا اینکه به صراحت مشخص نکرده است که از کدام روش برای تعیین تنش برشی بحرانی استفاده کرده است. هنوز نمی‌توان راجع به اثر شیب بستر بر آستانه حرکت به قطعیت صحبت کرد و در این زمینه محققان نتایج کاملاً متفاوتی بدست آورده‌اند. در این تحقیق به بررسی جامعی از تحقیقات صورت گرفته در زمینه آستانه حرکت ذرات رسوبی با تأکید بر نمودار شیلدز و شناسایی محدودیت‌های آن پرداخته شده است.

**واژه‌های کلیدی:** نمودار شیلدز، شروع حرکت ذرات، رسوب، فرسایش.

نیروی برکشنده بحرانی نبوده‌اند. از طرفی بایستی نقش نیروی رانش نیز در نظر گرفته شود.

سرعت بحرانی<sup>۴</sup> جریان آب که می‌تواند به دو صورت سرعت متوسط جریان و یا سرعت در نزدیکی کف تعریف شود، عبارت از مقدار سرعتی است که می‌تواند منجر به حرکت یک ذره با اندازه مشخص شود. با وجود تحقیقات زیاد انجام شده در زمینه سرعت بحرانی، انتقادات بسیاری به این روش وارد است. بطور مثال اغلب این تحقیقات به اندازه ذره و محل اندازه‌گیری سرعت کف اشاره‌ای نکرده‌اند و این سوال تاکنون توسط محققین پاسخ داده نشده است که چه ارتباط متقابلی بین سرعت متوسط بحرانی ( $U_m$ ) و سرعت بحرانی در نزدیکی کف ( $u_{cr}$ ) وجود دارد؟ اینگونه سوالات باعث گردید تا محققین به دنبال پارامترهای مناسب‌تر از قبیل تنش برشی بستر برای تشخیص آستانه حرکت ذرات رسوبی باشند.

### • تعریف آستانه حرکت

تعاریف مختلفی از سوی محققین برای آستانه حرکت ارائه شده است که آنها را می‌توان به چند دسته تقسیم‌بندی کرد (جدول ۱ تا ۴).

برخی محققین نظیر Einstein (۱۹۵۰)، Velikanov (۱۹۵۵)، Yalin (۱۹۶۳) و Ling (۱۹۹۵) نیروی برکشنده را تنها عامل شروع حرکت ذرات دانسته‌اند. هر چند که به نظر می‌رسد نیروی برکشنده نقش انکارناپذیری در شروع حرکت ذرات داشته باشد اما تاکنون درک مناسبی از چگونگی تاثیر نیروی برکشنده بر آستانه حرکت ذرات رسوبی حاصل نشده است و محدود کارهای آزمایشگاهی انجام شده قادر به ارائه روابط مناسب برای تعیین

جدول ۱- تعریف آستانه حرکت بر مبنای نرخ انتقال رسوب

محقق	تعریف ارائه شده	توضیحات
Shields (۱۹۳۶)	در آستانه حرکت نرخ انتقال رسوب برابر صفر است.	-
USWES (۱۹۳۵)	نیروی برشی باعث حرکت عمومی <sup>۲</sup> ذرات بستر شود.	این اصل برای ذرات با اندازه کمتر از ۰/۶ میلی‌متر صادق نیست

جدول ۲- تعریف آستانه حرکت بر مبنای وضعیت ظاهری حرکت ذرات

محقق	تعریف ارائه شده	توضیحات
Kramer (۱۹۳۵)	آستانه حرکت مرحله‌ای است که در آن انتقال کلی انجام شود (مرحله چهارم).	کرامر چهار نوع مختلف از حرکت ذرات رسوب را مشاهده کرد: ۱- حالت بدون انتقال <sup>۵</sup> ، ۲- انتقال ضعیف <sup>۶</sup> ، ۳- انتقال متوسط <sup>۷</sup> ، ۴- انتقال کلی <sup>۸</sup>
Vanoni (۱۹۶۴)	ذرات رسوبی در هر نقطه از بستر هر دو ثانیه یکبار حرکت کنند.	-

جدول ۳- تعریف آستانه حرکت بر مبنای نیروی برکشنده (Lift)

محقق	تعریف/رابطه ارائه شده	توضیحات
Jeffreys (۱۹۲۹)	$(3+\pi^2)U^2 > 9\Delta g r_1$	Jeffreys نیروی رانش (Drag Force) را در محاسبات خود منظور نکرده است. (r شعاع)
Einstein و El-Samni (۱۹۴۹)	$f_L = 0.5 C_L \rho u_{0.35d}^2$	$C_L$ ضریب نیروی برکشنده، $u_{0.35d}$ سرعت جریان در فاصله ۰/۳۵ قطر ذره از کف
Aksoy (۱۹۷۳)	برای شرایط $R^* = 300$ نسبت نیروی برکشنده به رانش را برابر ۰/۱ اندازه‌گیری کرد.	$R^*$ عدد رینولدز ذره
Bagnold (۱۹۷۴)	نسبت نیروی برکشنده به رانش را برای شرایط $R^* = 800$ برابر با ۰/۵ بدست آورد.	-
Samad و Davies (۱۹۷۸)	برای $R^* > 5$ چنانچه مقدار جریان از زیر ذره قابل توجه باشد، نیروی برکشنده منفی خواهد بود ولی برای $R^* < 5$ نیروی برکشنده مثبت است.	-
Brayshaw (۱۹۸۳)	به ازای $R^* = 0.2 \times 10^{-4}$ نسبت نیروی برکشنده به رانش را برابر ۱/۸ بدست آورد.	-

جدول ۴- تعریف آستانه حرکت بر مبنای سرعت بحرانی جریان  $u_{cr}^2 / gd \approx 3.61(\tan \Phi \cos \theta - \sin \theta)$

توضیحات	تعریف/رابطه ارائه شده	محقق
قطر مشخصه ذرات بر حسب میلی‌متر، h عمق جریان، $\Delta=S-1$ و S چگالی نسبی ذرات رسوب	$U_{n} = \log(8.8 h/d) \sqrt{0.54\Delta gd}$	Goncharov (۱۹۶۴)
سرعت بحرانی در نزدیکی کف	$u_{cr}^2 / gd \approx 3.61(\tan \Phi \cos \theta - \sin \theta)$	Carstens (۱۹۶۶)
-	$u_{cr}^2 / \Delta gd = 2(h/d)^{1/3}$	Yalin و Neill (۱۹۶۹)
سرعت برشی $U_c$	$\frac{U_c}{w_{ss}} = \frac{2.5}{\log R_*} + 0.066$ for $0 < R_* < 70$ $\frac{U_c}{w_{ss}} = 2.05$ for $R_* \geq 70$	Yang (۱۹۷۳)

### تعریف آستانه حرکت بر مبنای تنش برشی

از این روابط تجربی، لزجت سیال ( $\nu$ ) را در نظر نگرفته‌اند. همچنین نتایجی که به ازای شرایط یکسان از این روابط بدست می‌آیند بسیار متفاوت هستند. این اختلاف‌ها می‌تواند ناشی از برداشت‌های متفاوت از آستانه حرکت از سوی محققین مختلف باشد. در هر حال، روابط تجربی ارائه شده می‌توانند تخمینی از آستانه حرکت ذرات را تعیین کنند اما به هیچ وجه برای کاربردهای عملی توصیه نمی‌شوند.

• معادلات تجربی تنش برشی برای تعیین آستانه حرکت تلاش‌های زیادی به صورت مطالعات آزمایشگاهی و میدانی برای ایجاد ارتباط بین تنش برشی بحرانی و آستانه حرکت ذرات انجام شده است. با نگاهی به روابط جدول (۵) می‌توان دریافت که هیچکدام

جدول ۵- نتایج تحقیقات محققین در ارتباط با تنش برشی بحرانی

توضیحات	تعریف/رابطه ارائه شده	محقق
تنش برشی بحرانی بر حسب $g/m^2$	$\tau_c = 29\sqrt{(\rho_s - \rho)gd / M}$	Kramer (۱۹۳۵)
M ضریب یکنواختی کرامر	$\tau_c = 0.285\sqrt{\Delta d / M}$	USWES (۱۹۳۵)
قطر مشخصه ذرات بر حسب میلی‌متر	$\tau_c = 166d$	Leliavsky (۱۹۶۶)

دست دوم موجود در کتاب‌های مرجع و مجلات استخراج گردیده‌اند. اعتبارسنجی این گزارش‌ها زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که به این مطلب پی برده شود که داده‌های آزمایشگاهی اصلی شیلدز در طی مباران هوایی جنگ جهانی دوم بطور کامل از بین رفته‌اند. برای بررسی کاستی‌های نمودار شیلدز بایستی شناخت جامعی از نحوه انجام آزمایش‌ها توسط شیلدز بدست آورد. در ادامه به بررسی برخی کاستی‌های نمودار شیلدز اشاره شده است:

### • روش‌های نظری و شبه نظری تعیین تنش برشی بحرانی

#### - نمودار شیلدز

شیلدز نخستین محقق است که به بررسی تحلیلی آستانه حرکت ذرات رسوبی پرداخت. وی با برقراری تعادل بین نیروها و استفاده از اصل تشابه در وضعیت شروع حرکت ذره، در نهایت به رابطه‌ای بین پارامتر بحرانی شیلدز و عدد رینولدز به شکل زیر دست یافت:

$$\Theta_c = f(R_*) \quad (1)$$

#### - نقاط ضعف نمودار شیلدز

هر چند که از شیلدز به عنوان پیشرو در بحث آستانه حرکت نام برده می‌شود و شیلدز زمینه انجام تحقیقات گسترده‌تری را بعد از خود فراهم آورد، اما گزارش‌های ارائه شده توسط محققین پس از وی، مملو از برداشت‌های نادرست و خطاهای فاحش در نمودار شیلدز و نتایج مستخرج از آن می‌باشد. اگرچه علت این سردرگمی‌ها را نمی‌توان با قطعیت بیان کرد اما به نظر می‌رسد عدم دسترسی به داده‌های اصلی آزمایش‌های شیلدز یکی از مهمترین عوامل باشد. عمده اطلاعات ارائه شده در گزارش‌های سایر محققین از منابع

۱. اولین مشکل در نمودار شیلدز آن است که تنش برشی و سرعت برشی به صورت متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند در حالی که این دو متغیر مستقل نیستند و به یکدیگر وابسته‌اند. بر این اساس محققین دیگر، سعی در برطرف نمودن این مشکل داشته‌اند.  
۲. تحقیقات نشان داده است که به ازای  $R_* < 70$  زیر لایه لزج هیچگونه تأثیری بر پروفیل سرعت ندارد؛ به عبارت دیگر با افزایش عدد رینولدز، شرایط جریان تغییر نمی‌کند. اما با نگاهی به نمودار شیلدز می‌توان این نکته را دریافت که به ازای  $R_* < 70$  پارامتر شیلدز وابسته به عدد رینولدز است و این روند تا  $R_* = 500$  هم مشاهده می‌شود.

۳. به صراحت مشخص نکرده است که از کدام روش برای تعیین تنش برشی بحرانی استفاده کرده است.

۴. بیشترین احتمال این است که شیلدز از روش برون‌یابی تانرخ انتقال برابر صفر برای تعیین تنش برشی بحرانی استفاده کرده است که تنها به ازای شرایط آب ساکن، نرخ انتقال برابر صفر را بدست می‌دهند.

۵. هرچند شیلدز تصحیحات مربوط به زبری دیواره را اعمال کرده است اما اثر نیروی رانش ناشی از حضور فرم‌های بستر را در نظر نگرفته است. تحقیقات نشان داده است که حضور فرم‌های بستر با توجه به شکل و ابعاد آنها می‌تواند تا ۹۰ درصد از کل تنش برشی وارده به بستر را کاهش دهد.

۶. هرچند که اکثر محققین گزارش کرده‌اند که رسوبات مورد استفاده توسط شیلدز با دانه‌بندی یکنواخت بوده‌اند و شیلدز هم به این امر

اذعان کرده است، اما واقعیت آن است که رسوبات دارای دانه‌بندی کاملاً یکنواخت نبوده‌اند.

۷. نتایج شیلدز با نتایج محققینی که آنها نیز تأثیر فرم بستر و نیروی رانش ناشی از آن را در نظر نگرفته‌اند مقایسه شده است در حالیکه بهتر بود برای مقایسه نتایج بدست آمده از نتایج محققانی استفاده می‌شد که از دانه‌بندی یکنواخت استفاده کردند و یا برای تعریف آستانه حرکت در آزمایشاتشان تعریفی غیر از مشاهده چشمی داشتند؛ ضمن اینکه به جز Gilbert (۱۹۱۴) بقیه آنها از مشاهده چشمی برای تعریف آستانه حرکت استفاده کرده‌اند و البته آنها از دانه‌بندی مختلط استفاده کرده‌اند.

۸. برای مقادیر کوچک عدد رینولدز ذره، نمودار شیلدز از مقادیر اندازه‌گیری شده انحراف پیدا می‌کند.

جدول ۶- تصحیحات وارد شده در نمودار شیلدز به مرور زمان

محقق	تعریف/رابطه ارائه شده	توضیحات
Rouse (۱۹۳۹)	$Rouse\ Reynolds\ Number = \frac{d\sqrt{0.1(S-1)gd}}{v}$	d: قطر مشخصه ذرات S: چگالی نسبی ذرات رسوب
White (۱۹۴۰)	$\Theta_c = \frac{\pi}{6} p_f T_f \tan \varphi$ : رژیم با سرعت بالا ( $R^* > 3.5$ ) $\Theta_c = \frac{\pi}{6} p_f a_f \tan \varphi$ : رژیم با سرعت پایین ( $R^* < 3.5$ )	$T_f = 4$ و $p_f = 0.4$ $p_f a_f = 0.34$
Iwagaki (۱۹۵۶)	$\Theta_c = \frac{\tan \varphi}{\epsilon_x \mu_s R^*}$	این رابطه کاربرد عملی چندانی ندارد زیرا فرض اولیه تئوری ایواگاکا بر مبنای یک ذره منفرد است در حالیکه در عمل ذرات در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند.
Egiazaroff (۱۹۶۵)	$\Theta_c = \frac{1.33}{C_D [a_r + 5.75 \log(0.63)]}$	نتایج حاصل از این رابطه همخوانی مناسبی با نمودار شیلدز ندارد.
Mantz (۱۹۷۷)	پیشنهاد کرد که برای اطمینان از حصول پایداری ذرات، نمودار شیلدز به صورت یک پوش در نظر گرفته شود.	شکل (۱)
Karahan and Yalin (۱۹۷۹)	با جمع‌آوری داده‌های بسیار زیاد از محققین مختلف، رابطه بین $\Theta_c$ و $R^*$ را به صورت گرافیکی ارائه دادند	نمودار ارائه شده توسط این محققین کمی بالاتر از نمودار شیلدز قرار می‌گیرد (شکل ۱)
Van Rijn (۱۹۸۴)	$\Theta_c (4 \leq D_* \leq 10) = 0.14 / D_*^{0.64}$ $\Theta_c (4 \leq D_* \leq 20) = 0.04 / D_*^{0.1}$ $\Theta_c (20 < D_* \leq 150) = 0.013 D_*^{0.29}$ $\Theta_c (D_* > 150) = 0.055$	D: پارامتر ذره $\Theta_c$ : پارامتر بحرانی شیلدز $D_* = d(\Delta g / v^2)^{1/3}$
Smith و Wiberg (۱۹۸۷)	$\Theta_c = \frac{2}{C_D \alpha_0} \cdot \frac{1}{f^2(z/z_0)} \cdot \frac{\tan \varphi}{1 + (F_L / F_D)_c \tan \varphi}$	$\alpha_0 = A_x d / V$
Soulsby, R.L. and Whitehouse, (۱۹۹۷). R.J.S	$\Theta_c = \frac{0.24}{D_*} + 0.055[1 - \exp(-0.02D_*)]$	-
Julien (۱۹۹۸)	$\Theta_c (D_* \leq 0.3) = 0.5 \tan \varphi$ $\Theta_c (0.3 < D_* \leq 19) = 0.25 \tan \varphi$ $\Theta_c (19 < D_* \leq 150) = 0.013 D_*^{0.4} \tan \varphi$ $\Theta_c (D_* > 150) = 0.06 \tan \varphi$	$\varphi$ : زاویه ایستایی رسوبات

آشفتگی جریان در نزدیکی بستر و موقعیت یک ذره خاص نسبت به ذرات اطراف با اندازه‌های مختلف بستگی دارد. از دیدگاه احتمالاتی به ازای شرایط جریان و رسوب مشخص، هر ذره بطور میانگین ۵۰ درصد شانس برای جابجایی دارد. Gessler (۱۹۷۰) احتمال ثابت ماندن یک ذره خاص را بررسی و مشاهده کرد که این احتمال تا حد زیادی به پارامتر شیلدز و کمتر به عدد رینولدز ذره بستگی دارد. توزیع اندازه ذرات در حال حرکت را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$P(d) = \frac{\int_{d_{\min}}^d (1-q)p_0(d)dd}{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} (1-q)p_0(d)dd} \quad (5)$$

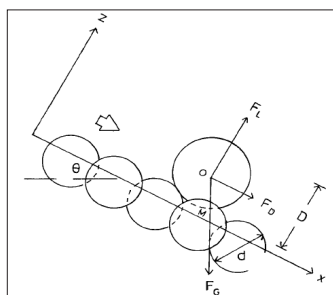
با تشکیل شدن لایه سپر، رسوبات با اندازه کمتر از آنچه که از رابطه (۵) داده شده است از حرکت باز خواهند ماند و بدین ترتیب می‌توان شرایط آستانه حرکت ذرات را مشخص کرد.

### اثر شیب کف بر آستانه حرکت در کانال‌های باز

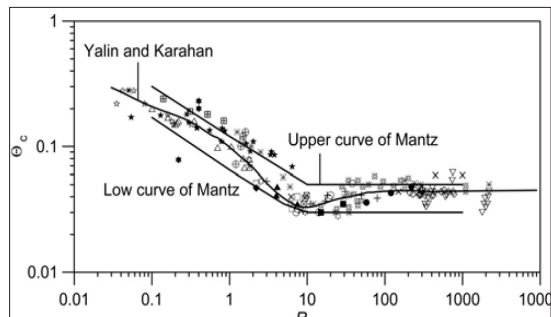
با بررسی نیروهای وارد بر ذره رسوب در کف آبراهه، این مطلب به روشنی درک می‌شود که با افزایش شیب بستر، مولفه نیروی وزن در راستای حرکت ذره بیشتر شده و بنابراین ذره رسوب با سهولت بیشتری شروع به حرکت می‌نماید (شکل ۳)؛ به عبارتی تنش برشی بحرانی کاهش می‌یابد. Van Rijn (۱۹۸۴) رابطه زیر را برای تعیین آستانه حرکت ذرات در مجاری شیب‌دار ارائه کرد. در این رابطه  $\tau_{c\phi}$  تنش برشی بحرانی بر روی شیب و  $k_1$  و  $k_2$  ضرایب تصحیح هستند.

$$\tau_{c\phi} = k_1 k_2 \tau_c \quad (6)$$

Dey و Debnath (۲۰۰۰) به بررسی آستانه حرکت ذرات رسوبی در مجاری شیب‌دار با شیب مثبت و منفی پرداختند. این محققین 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 می‌شود (شکل ۳ و ۴). همچنین Dey (۲۰۰۳) وضعیت آستانه حرکت را برای یک ذره واقع بر بستر شیب‌دار طولی و عرضی (شکل ۵) بررسی کرد.



شکل ۳- نیروهای وارد بر یک ذره رسوب بر روی سطح شیب‌دار (Dey و Debnath, ۲۰۰۰)

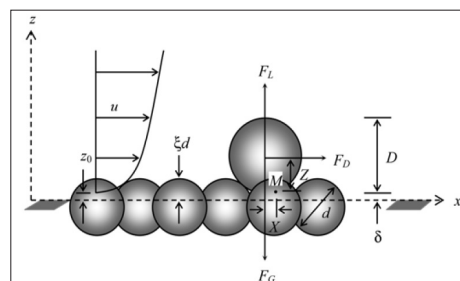


شکل ۱- محاسبه  $\theta_c$  از روش Mantz (۱۹۷۷) و Yalin و Karahan (۱۹۷۹)

### - مدل دی برای بستر افقی

Dey (۱۹۹۹) با برقراری تعادل بین نیروها برای یک ذره ساکن، مدلی را برای تعیین شرایط آستانه حرکت ذرات ارائه کرد. بنابر نظر Dey، یک ذره واقع بر روی ذرات دیگر با توجه به نحوه قرارگیری ذرات در بستر فرسایش‌پذیر، می‌تواند به دو صورت جابجا شود: یا از بین شکاف دو ذره مقابل حرکت کند و یا اینکه از روی برآمدگی یکی از ذرات به سمت جلو جابجا شود. Dey با توجه به شکل (۲) رابطه زیر را بین نیروهای وارد بر ذره نوشت:

$$(F_L - F_G)X + F_D Z = 0 \quad (2)$$



شکل ۲- نیروهای وارد بر یک ذره برای بستر افقی (Dey, ۱۹۹۹)

وی نیروی برکشنده ناشی از اثر مگنوس ( $F_{Lm}$ ) را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$F_{Lm} = C_L \rho D^3 u_m \omega \quad (3)$$

که در این رابطه،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای ذره در حال دوران است و مقدار حداکثر آن برابر  $0.5 \partial u / \partial z$  است. بنابراین رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$F_{Lm} = 0.5 C_L \rho D^3 u_m \frac{\partial u}{\partial z} \quad (4)$$

### آستانه حرکت از دیدگاه احتمالاتی

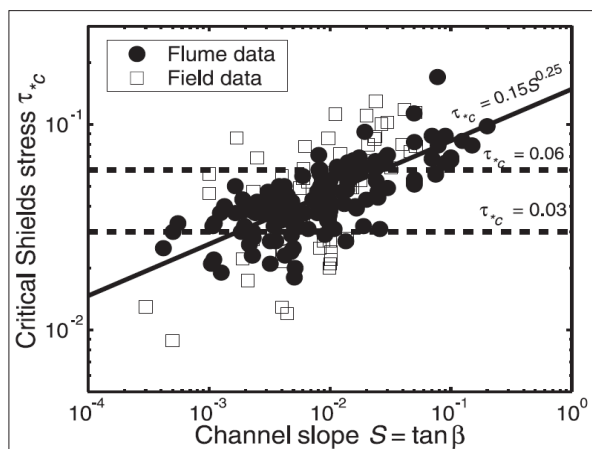
آستانه حرکت در واقع یک پدیده احتمالاتی است و به مشخصه‌های



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.

از طرفی دیگر، ورود هوا به جریان معمولاً در شیب‌های زیاد اتفاق می‌افتد و مانند میزان بیرون‌زدگی ذره از بستر، نمی‌تواند توجیه‌گر پدیده مورد نظر در شیب‌های کم باشد. همچنین ضرایب رانش و برگشده با افزایش شیب افزایش می‌یابند و در تضاد با روند مورد بررسی هستند. بنابراین از میان دلایل احتمالی برای افزایش تنش برشی بحرانی در اثر افزایش شیب، فقط کاهش سرعت‌های موضعی و نوسانات آشفتگی باقی می‌ماند.

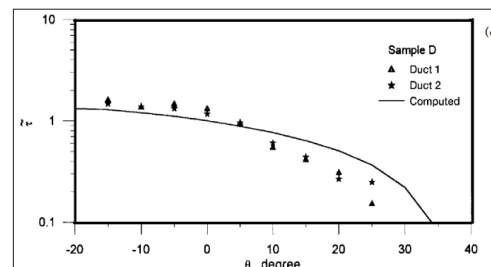
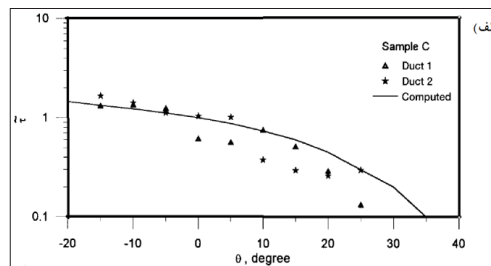
بررسی‌های آزمایشگاهی نیز نشان داده است که به ازای یک تنش برشی ثابت، سرعت موضعی و نوسانات آشفتگی در نزدیکی بستر هر دو با افزایش شیب، کاهش می‌یابند. به نظر می‌رسد این تغییرات در سرعت موضعی و نوسانات آشفتگی در نزدیکی بستر، بدلیل تغییر در اختلاط عمقی و ساختار گردابه‌ها در اثر افزایش زبری نسبی باشد.



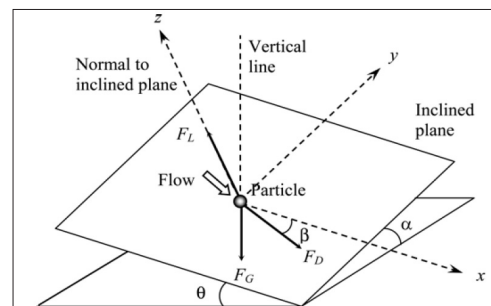
شکل ۶- تغییرات تنش برشی بحرانی بر حسب شیب کف کانال (Lamb و همکاران، ۲۰۰۸)

### آستانه حرکت در رودخانه‌های کوهستانی

نمودار ارائه شده توسط شیلدز برای کانال‌های با بستر صاف ارائه شده است. درحالی‌که آبراهه‌های طبیعی دارای زبری‌ها و فرم‌های بستر متفاوتی هستند. از طرفی دیگر، شکل ذرات در اینگونه مجاری بسیار متغیر است و بر روی فرآیند چرخش ذرات در ابتدای حرکت آنها تأثیرگذار است. سهولت چرخش برای ذرات کروی بسیار زیاد است و با فاصله گرفتن شکل ذره از حالت کروی، حرکت ذره مشکل‌تر



شکل ۴- تغییرات نسبت تنش برشی بر حسب شیب کف (الف) و (ب) ( $\phi = 35^\circ$  و  $\phi = 37^\circ$ ) (Debnath و Dey، ۲۰۰۰)



شکل ۵- نیروهای وارد بر یک ذره برای بستر شیب‌دار (Dey، ۲۰۰۳)

با این وجود Lamb و همکاران (۲۰۰۸) با تجزیه و تحلیل داده‌های بسیار زیادی که در شرایط آزمایشگاهی و میدانی جمع‌آوری شده بودند، نموداری را ارائه کردند که بر طبق آن با افزایش شیب بستر، تنش برشی بحرانی آستانه حرکت ذرات رسوبی افزایش می‌یابد (شکل ۶). به عبارتی دیگر به ازای یک تنش برشی مشخص، ذرات با اندازه یکسان بر روی شیب‌های تند، پایداری بیشتری در برابر حرکت از خود نشان می‌دهند. این یافته‌ها در تضاد با یافته‌های سایر محققین از جمله Lamb و Debnath (۲۰۰۰) است. Lamb و همکاران (۲۰۰۸) درصد برآمدند تا افزایش تنش برشی بحرانی در اثر افزایش شیب بستر را به عواملی همچون شکل‌های بستر، زاویه اصطکاک داخلی، میزان بیرون‌زدگی ذره از بستر، ورود هوا به درون جریان، تغییر نیروی دراگ و تغییر در سرعت‌های موضعی و نوسانات آشفتگی ارتباط دهند.

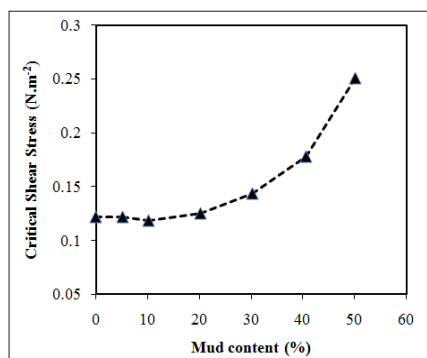
با دقت در شکل (۶) که در آن داده‌های میدانی و داده‌های آزمایشگاهی در کنار یکدیگر ترسیم شده‌اند، مشاهده می‌شود که اختلاف در نتایج بین این دو نوع داده چندان محسوس نیست و هر دو از یک روند مشابه پیروی می‌کنند. از طرفی در مورد داده‌های

## آستانه حرکت در رسوبات چسبنده

علیرغم اینکه خاک‌ها در طبیعت عمدتاً ترکیبی از رسوبات چسبنده و غیرچسبنده هستند، اما بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه آستانه حرکت مربوط به رسوبات غیرچسبنده بوده و تحقیقات چندانی بر روی آستانه حرکت رسوبات چسبنده انجام نگرفته است. یک تفاوت عمده بین رسوبات چسبنده و غیرچسبنده این است که رسوبات غیرچسبنده به صورت ذره به ذره فرسایش می‌یابند اما در رسوبات چسبنده ممکن است قطعاتی از بستر با اندازه‌های مختلف به طور ناگهانی فرسایش یابد.

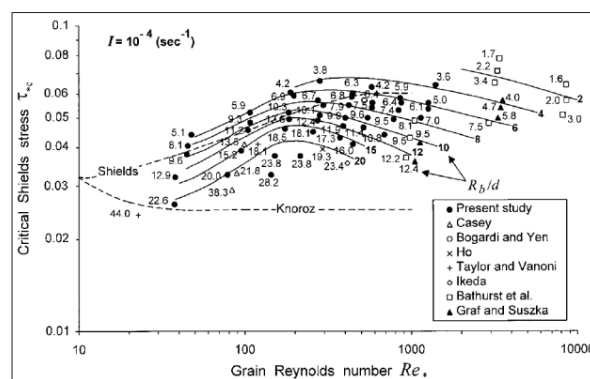
مطالعات بسیاری نشان می‌دهد که افزایش میزان رس در خاک، دلیل افزایش نیروهای بین ذره‌ای درون خاک، باعث افزایش تنش برشی بحرانی و در نتیجه افزایش مقاومت خاک در مقابل فرسایش می‌شود (Yen و Kuti، ۱۹۷۶؛ Kho و همکاران، ۲۰۰۴؛ Jain و Kothyari، ۲۰۰۸).

تحقیقات Mitchener و Torfs (۱۹۹۶) نشان داده است که افزایش چگالی خاک باعث افزایش تنش برشی بحرانی می‌شود. این 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 نیز بر این فرآیند تأثیرگذار هستند (Mitchener و Torfs، ۱۹۹۶؛ Zreik و همکاران، ۱۹۹۸؛ Partheniades، ۲۰۰۷). نتایج آزمایش‌های Mitchener و Torfs (۱۹۹۶) نشان داد که افزودن ماسه به خاک چسبنده و یا برعکس، مقاومت در برابر فرسایش را افزایش و نرخ فرسایش را کاهش می‌دهد؛ بگونه‌ای که افزودن ۳۰٪ خاک چسبنده به ماسه می‌تواند تنش برشی بحرانی را تا ده برابر افزایش دهد. Panagiotopoulos و همکاران (۱۹۹۷) به بررسی تأثیر میزان رس بر آستانه حرکت ماسه ریزدانه پرداختند. این محققین با ارائه شکل (۹) گزارش کرده‌اند که چنانچه میزان مصالح چسبنده از ۳۰ درصد بیشتر شود، افزایش قابل توجهی در میزان تنش برشی بحرانی رخ می‌دهد.

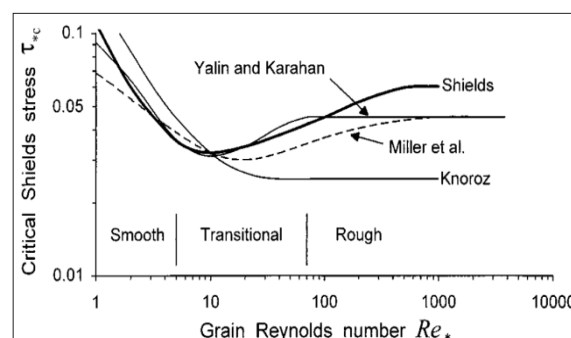


شکل ۹- تغییرات تنش برشی بر حسب میزان مصالح چسبنده (Panagiotopoulos و همکاران، ۱۹۹۷)

می‌شود. شوچنکو و پندر (۲۰۰۰) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر عمق نسبی جریان (نسبت شعاع هیدرولیکی به اندازه ذره) بر آستانه حرکت ذرات درشت‌دانه پرداختند. این محققین با انجام آزمایش‌هایی دریافتند که نه تنها اندازه ذره بلکه عمق نسبی جریان نیز بر شروع حرکت ذرات تأثیرگذار است. آنها نموداری را به صورت شکل (۷) ارائه کردند و آن را نمودار اصلاح شده شیلدز نامیدند. این نمودار تأثیر عمق نسبی را بر روی آستانه حرکت ذرات نشان می‌دهد به گونه‌ای که به ازای یک عدد رینولدز ثابت، با افزایش عمق نسبی، تنش برشی بحرانی کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در این نمودار این است که بر خلاف نمودار شیلدز که به ازای مقادیر بزرگ عدد رینولدز ذره، پارامتر شیلدز به یک مقدار ثابت میل می‌کند، در این نمودار تنش برشی بحرانی همچنان به عدد رینولدز ذره وابسته است (شکل ۸). به ازای یک شعاع هیدرولیکی ثابت، با افزایش اندازه ذره، عمق نسبی کاهش و در نتیجه تنش برشی بحرانی افزایش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذره، مقاومت در برابر جریان افزایش یافته و در نتیجه جریان پتانسیل کمتری برای جابجا کردن ذره رسوب خواهد داشت. البته این محققین ذکر کرده‌اند که تحقیقات بیشتری بویژه برای مقادیر بزرگ عمق نسبی و عدد رینولدز ذره بایستی انجام شود.

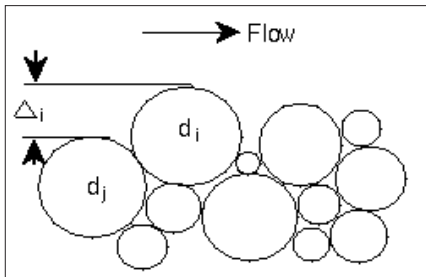


شکل ۷- دیاگرام اصلاح شده شیلدز برای اعماق نسبی مختلف (Pender و Shvidchenko، ۲۰۰۰)



شکل ۸- عدم وابستگی تنش برشی بحرانی به عدد رینولدز ذره برای جریان زبر هیدرولیکی (Pender و Shvidchenko، ۲۰۰۰)

Wu و همکاران (۲۰۰۰) با بررسی تأثیر غیر یکنواختی رسوبات بر فرآیند آستانه حرکت ذرات رسوبی، گزارش کرده‌اند که در مورد بسترهای با دانه‌بندی غیریکنواخت، احتمال به حرکت درآمدن ذرات درشت‌دانه‌تر بیشتر است. توجهی آنها برای این پدیده این است که اولاً ذرات ریزدانه در بین ذرات درشت‌دانه و اصطلاحاً در یک پناهگاه قرار می‌گیرند و ثانیاً سطح موثر در برابر جریان در ذرات درشت‌دانه بیشتر است و بنابراین نیروی بیشتری به آنها وارد می‌شود (شکل ۱۲).

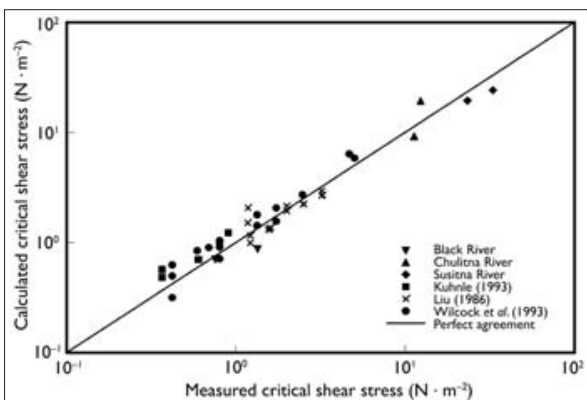


شکل ۱۲- پنهان شدن ذرات ریزدانه در بین ذرات درشت‌دانه در رسوبات با دانه‌بندی غیریکنواخت (Wu و همکاران، ۲۰۰۰)

این محققین با بررسی احتمالاتی همپوشانی ذرات بر یکدیگر، رابطه زیر را برای تعیین تنش برشی بحرانی در رسوبات با دانه‌بندی غیریکنواخت ارائه دادند:

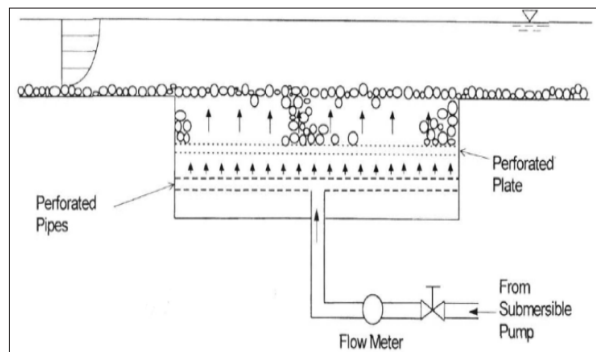
$$\frac{\tau_{ck}}{(\gamma_s - \gamma)dk} = \Theta_c \left( \frac{\rho e k}{\rho h k} \right)^{-m} \quad (9)$$

در این رابطه،  $P_{ek}$  احتمال بی‌پناه ماندن ذره  $k$ ام و  $P_{hk}$  احتمال پنهان شدن ذره می‌باشد. این محققین نتایج تحلیلی خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و انطباق خوبی مشاهده کردند (شکل ۱۳).

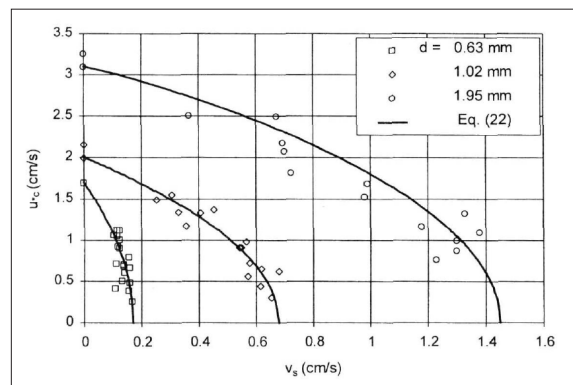


شکل ۱۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی توسط Wu و همکاران (۲۰۰۰)

زمانی که ذره رسوب بر روی یک بستر متخلخل قرار می‌گیرد، علاوه بر نیروهای معمول وارد بر ذرات در بسترهای صلب، تحت تأثیر نیروی هیدرودینامیک ناشی از نشت نیز قرار می‌گیرد. از آنجا که نشت می‌تواند به سمت بالا و یا پایین و یا موازی با جهت جریان اصلی باشد، بنابراین جهت نیروی هیدرودینامیک وارده نیز متفاوت خواهد بود. در هر حال، در این شرایط نمودار شیلدز قابل استفاده خواهد بود. Cheng و Chiew (۱۹۹۹) به بررسی تأثیر نشت رو به بالا بر شرایط بحرانی حرکت ذره رسوب پرداختند. آنها با استفاده از یک مجموعه آزمایشگاهی (شکل ۱۰) و استفاده از شش نوع ذره رسوب با دانه‌بندی یکنواخت، نموداری را ارائه کردند که بر اساس آن با افزایش سرعت جریان نشتی، سرعت بحرانی شروع حرکت ذرات کاهش می‌یابد. در شکل (۱۱)  $u_{*c}$  سرعت برشی بحرانی و  $v_*$  سرعت جریان نشتی رو به بالا می‌باشد.



شکل ۱۰- طرحواره‌ای از سامانه آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر جریان نشتی بر آستانه حرکت (Cheng و Chiew، ۱۹۹۹)



شکل ۱۱- اثر سرعت جریان نشتی بر سرعت برشی بحرانی (Cheng و Chiew، ۱۹۹۹)



- study of bed ripples under water waves. Quart. Rep. 8 and 9, Georgia Institute of Technology, School of Civil Engineering, Atlanta, USA.
- Cheng N.Sh. and Chiew Y.M. 1999. Incipient sediment motion with upward seepage. *Journal of Hydraulic Research*, 37(5): 665-681
- Coleman N.L. 1967. A theoretical and experimental study of drag and lift forces acting on a sphere resting on a hypothetical stream bed. *Proc. 12th IAHR Congr.*, Fort Collins, Colorado, 3: 185-192.
- Davies T.R.H. and Samad M.F.A. 1978. Fluid dynamic lift on a bed particle. *J. Hydraul. Div.*, 104(8): 1171-1182.
- Dey S. 1999. Sediment threshold. *Appl. Math. Modelling*, 23(5): 399-417.
- Dey S. 2003. Threshold of sediment motion on combined transverse and longitudinal sloping beds. *J. Hydraul. Res.*, 41(4): 405-415.
- Dey, S. and Debnath, K. 2000. Influence of stream-wise bed slope on sediment threshold under stream flow. *J. Irrig. and Drain. Eng.*, Vol. 126, No. 4, pp. 255-263.
- Egiazaroff J.V. 1965. Calculation of non-uniform sediment concentrations. *J. Hydraul. Div.*, 91(4): 225-247.
- Einstein H.A. and El-Samni E.A. 1949. Hydrodynamic forces on rough wall. *Rev. Modern Phys.*, 21(3): 520-524.
- Einstein, H.A. 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. *Tech. Bulletin No. 1026*, US Department of Agriculture.
- Gilbert G.K. 1914. Transportation of debris by running water. *Prof. Paper No. 86*, United States Geological Survey, Washington DC, USA.
- Gessler J. 1970. Self-stabilizing tendencies of alluvial channels. *J. Waterways Harbors Div.*, 96(2): 235-249.
- Goncharov V.N. 1964. Dynamics of channel flow. *Israel Programme for Scientific Translation*, Moscow, Russia.
- Iwagaki, Y. 1956. Fundamental study on critical tractive force. *Trans. Jap. Soc. Civ. Eng.*, 41: 1-21.
- Jain R. and Kothiyari U. 2008. Detachment and Transport of Clay-Sand-Gravel Mixtures by Channel Flow. *River Flow Conference Proceedings*, Izmir, Turkey, Sep. 3-5.
- Jeffreys H. 1929. On the transport of sediments in stream. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 25: 272 .
- Julien P.Y. 1998. *Erosion and sedimentation*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kho K., Valentine E. and Glendinning S. 2004. *An Experimental Study of Local Scour around Circular Bridge*

در این تحقیق به بررسی روش‌های مختلف پدیده آستانه حرکت ذرات رسوبی پرداخته شد. بر اساس مبنای ارائه روش‌های موجود، تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای این روش‌ها انجام شد. بر این اساس روش‌های تشخیص آستانه حرکت معرفی و در هر مورد به بررسی معایب و مزایا پرداخته شد. نمودار شیلدز به عنوان کاربردی ترین روش برای تعیین آستانه حرکت به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت و با تشریح روش آزمایش و رسوبات مورد استفاده توسط شیلدز، ایرادات اساسی بر آن مطرح گردید. در هر حال به نظر می‌رسد با وجود این نقایص و ایرادات در نمودار شیلدز، هنوز هم نتوان رقیب جدی برای جایگزینی آن در کاربردهای عملی معرفی کرد. تأثیر عوامل مختلف از جمله شیب بستر، چسبندگی مصالح، جریان نشت رو به بالا و غیریکنواختی ذرات بر تنش برشی بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین بر اساس پارامتر عمق نسبی آستانه حرکت ذرات رسوبی در رودخانه‌های کوهستانی که در آنها زبری بستر قابل توجه است بررسی شد.

## پی‌نوشت

- 1- incipient motion
- 2- threshold or critical condition
- 3- general motion
- 4- competent velocity
- 5- no transport
- 6-weak transport
- 7- medium transport
- 8- general transport

## منابع

- Aksoy S. 1973. Fluid forces acting on a sphere near a solid boundary. *Proc. 15th IAHR Congr.*, Istanbul, Turkey, 1: 217-224.
- Bagnold R.A. 1974. Fluid forces on a body in shear flow; experimental use of stationary flow. *Proc. R. Soc. London A*, 340: 147-171.
- Brayshaw A.C., Frostick L.E. and Reid I. 1983. The hydrodynamics of particle clusters and sediment entrainment in coarse alluvial channels. *Sedimentology*, 30: 137-143.
- Carstens M.R. 1966. *An analytical and experimental*

- ervation Service Cooperative Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, Calif (Cited in Buffington 1999)
- Soulsby R.L. and Whitehouse R.J.S. 1997. Threshold of sediment motion in coastal Environments. Proc. Combined Australasian Coastal Eng. and Port Conf., Christchurch, New Zealand, pp. 149-154.
- USWES. 1935. Study of riverbed material and their use with special reference to the Lower Mississippi River. Paper 17, U.S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. (Cited in Buffington 1999)
- Van Rijn L.C. 1984. Sediment transport, part I: bed-load transport. *J. Hydraul. Eng.*, 110(10): 1431-1456.
- Vanoni V.A. 1964. Measurements of critical shear stress for entraining fine sediments in a boundary layer. Rep. No. KH-R-7, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, Pasadena, Calif.
- Velikanov M.A. 1955. Dynamics of alluvial stream. Vol. 2, State Publishing House of Theoretical and Technical Literature, Russia (in Russian).
- White C.M. 1940. The equilibrium of grains on the bed of a stream. *Phil. Trans. Royal Soc.*, 174A: 322-338.
- Wiberg P.L. and Smith J.D. 1987. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Wat. Resour. Res.*, 23(8): 1471-1480.
- Wu W., Wang S.S.Y. and Jia Y. 2000. Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *J. Hydr. Res.*, IAHR, 38(6): 427-434.
- Yalin M.S. 1963. An expression of bed-load transportation." *J. Hydraul. Div.*, 89(3): 221-250.
- Yalin M.S. and Karahan E. 1979. Inception of sediment transport. *J. Hydraul. Div.*, 105(11): 1433-1443.
- Yang C.T. 1973. Incipient motion and sediment transport. *J. Hydraul. Div.*, 99(10): 1679-1704.
- Zreik D., Krishnappan B., Geramine J., Madsen O. and Ladd C. 1998. Erosional and Mechanical Strengths of Deposited Cohesive Sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(11): 1076-1085.
- Piers in Cohesive Soils. 2nd International Conference on Scour and Erosion, Singapore, November.
- Kramer H. 1935. Sand mixtures and sand movement in fluvial models. *Trans., ASCE*, 100(1909): 798-838.
- Kuti E. and Yen C. 1976. Scouring of Cohesive Soils. *Journal of Hydraulic Research*, 14(3): 195-206.
- Lamb M.P., W.E. Dietrich and Venditti J.G. 2008. Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? *J. Geophys. Res.*, 113: 1-20.
- Leliavsky S. 1966. An introduction to fluvial hydraulics. Dover, New York.
- Ling C.H. 1995. Criteria for incipient motion of spherical sediment particles. *J. Hydraul. Eng.*, 121(6): 472-478.
- Mantz P.A. 1977. Incipient transport of fine grains and flanks by fluids-extended Shields diagram. *J. Hydraul. Div.*, 103(6): 601-615.
- Mitchener H. and Torfs H. 1996. Erosion of Mud/Sand Mixtures. *Coastal Engineering*, (29): 1-25.
- Neill, C. R., and Yalin, S. (1969). "Quantitative definition of beginning of bed movement." *J. Hydr. Div.*, ASCE, 95(1), 585-588.
- Panagiotopoulos I., Voulgaris G. and Collins M. 1997. The Influence of Clay on the Threshold of Movement of Fine Sandy Beds. *Coastal Engineering*, (32): 19-43.
- Partheniades E. 2007. *Engineering Properties and Hydraulic Behavior of Cohesive Sediments*. CRC Press, Taylor and Francis Group, p.338.
- Rouse H. 1939. An analysis of sediment transportation in light of fluid turbulence. Rep. No. SCS-TP-25, Sediment Division, U.S. Dept. of Agr., Soil Conservation Service, Washington, D.C.
- Shvidchenko AB. and Pender G. (2000). Flume study of the effect of relative depth on the incipient motion of coarse uniform sediments. *Water Resource. Res.* 36 (2) 619-628.
- Shields A. 1936. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Hydrodynamics Laboratory Publ. No. 167*, W. P. Ott, and J. C. van Uchelen, trans., U.S. Dept. of Agr., Soil Con-