

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی آب گرایش سازه های آبی

عنوان پایان نامه
بررسی آستانه ی حرکت رسوبات غیرچسبنده ی حاوی مواد ریزدانه

استادان راهنما:
دکتر حسین صمدی بروجنی
دکتر روح اله فتاحی نافچی

استاد مشاور:
دکتر مهدی اسدی

پژوهشگر:
افسون منصوری اسکی

اسفند ماه ۱۳۹۲



پایان نامه خانم افسون منصوری اسکی جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب گرایش سازه‌های آبی با عنوان : بررسی آستانه‌ی حرکت رسوبات غیرچسبنده‌ی حاوی مواد ریزدانه در تاریخ ۱۳۹۲/۱۲/۱۴ با حضور هیأت داوران زیر بررسی و با نمره ۱۹/۱۸ مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. استادان راهنمای پایان نامه
.....
دکتر حسین صمدی بروجنی (دانشیار)
.....
دکتر روح اله فتاحی نافچی (استادیار)
۲. استاد مشاور پایان نامه
.....
دکتر مهدی اسدی (استادیار)
۳. استادان داور پایان نامه
.....
دکتر بهزاد قربانی (دانشیار)
.....
دکتر افشین هنربخش (استادیار)

دکتر سید حسن طباطبایی
معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی
دانشکده کشاورزی

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

تقدیم بہ

پدر و مادر مہربانم

و خانوادہ می عزیزم

چکیده

ته‌نشینی رسوب در سازه‌های انتقال آب باعث کاهش سطح مقطع جریان و ظرفیت تخلیه دبی عبوری از مجرای می‌شود؛ تعیین آستانه حرکت رسوب در طراحی کانال‌های آبیاری و انتقال رسوب در رودخانه‌های طبیعی ضروری می‌باشد، روش‌ها و قوانین زیادی برای تخمین آستانه‌ی حرکت رسوبات غیرچسبنده ارائه شده است؛ برای رسوبات غیرچسبنده حاوی رسوبات ریزدانه روش‌های مذکور برای تعیین آستانه حرکت مناسب نمی‌باشند. در این تحقیق آستانه‌ی حرکت رسوبات غیرچسبنده‌ی حاوی رسوبات ریزدانه در فلوم مستطیلی با طول ۱۲ متر و عرض و عمق ۴۰ سانتی‌متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد اندازه‌گیری گردید. بدین منظور چهار نمونه رسوب برای انجام آزمایش آستانه حرکت در سه دبی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ لیتر بر ثانیه تهیه شد، یکی از آنها رسوبات غیرچسبنده است که در این آزمایشات به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد، و سه نوع دیگر ترکیبی از ۱۰٪، ۲۵٪ و ۵۰٪ رسوبات چسبنده همراه با رسوبات غیر چسبنده است. و در هر دبی، شیب فلوم به منظور ایجاد جریان یکنواخت و برقراری شرایط آستانه حرکت تغییر داده شد و داده‌ها توسط سرعت سنج ADV در سه مقطع در طول کانال جمع‌آوری گردید؛ در این آزمایش‌ها روش‌های مختلف برای ارزیابی تنش برشی به کار گرفته شد، نتایج نشان داد که با نادیده گرفتن چسبندگی در روش‌های قبل مانند شیلدز، گسler و ... در درصدهای بالای رسوب ریزدانه، تنش برشی بحرانی حدود ۷۰٪ کمتر تخمین زده شد.

لذا بر اساس این نتایج پیشنهاد می‌شود روش‌ها و نمودارهای مرسوم برای تعیین آستانه‌ی حرکت در شرایط اختلاط رسوبات غیرچسبنده و چسبنده مورد بازنگری قرار گیرد.

کلمات کلیدی: آستانه حرکت، تنش برشی بحرانی، پارامتر شیلدز، رسوبات غیرچسبنده، رسوبات چسبنده

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۸	فصل اول
۸	مقدمه
۹	۱-۱- اهداف مطالعه
۹	۲-۱- فرضیات تحقیق
۹	۳-۱- روش انجام تحقیق
۹	۴-۱- ساختار پایان نامه
۱۰	فصل دوم
۱۰	تئوری مسأله و بررسی منابع
۱۰	۱-۲- مقدمه
۱۰	۲-۲- رسوبات غیر چسبنده و چسبنده
۱۲	۳-۲- مطالعات انجام شده روی آستانه حرکت رسوبات غیر چسبنده
۱۲	۱-۳-۲- آستانه حرکت و نمودار شیلدز
۱۴	۲-۳-۲-۱-۱- اصلاحات نمودار شیلدز
۲۰	۲-۳-۲- محاسبه آستانه حرکت با استفاده از تنش برشی بحرانی
۲۴	۳-۳-۲- بررسی مطالعات موردی روی آستانه حرکت رسوبات غیر چسبنده
۲۷	۴-۳-۲- روابط آستانه حرکت بر مبنای سرعت بحرانی
۳۳	۴-۲- مطالعات انجام شده روی آستانه حرکت رسوبات چسبنده
۳۷	۵-۲- مطالعات انجام شده روی آستانه حرکت رسوبات مخلوط
۳۸	فصل سوم
۳۸	مواد و روش ها
۳۸	۱-۳- محل و زمان اجرای طرح
۳۹	۲-۳- رسوبات مورد استفاده در آزمایشات

تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده	۳-۳	۳۹
فلوم مستطیلی	۱-۳-۳	۳۹
ابزار اندازه گیری دبی	۲-۳-۳	۴۱
دستگاه سرعت سنج (Acoustic Doppler Velocimeter) ADV	۳-۳-۳	۴۲
ترازوی آزمایشگاهی	۴-۳-۳	۴۵
خشک کن برقی (آون)	۵-۳-۳	۴۵
روش انجام آزمایشات	۴-۳	۴۵
دانه بندی رسوبات مورد استفاده در آزمایش	۱-۴-۳	۴۵
تعیین جرم مخصوص خشک خاک در محیط طبیعی	۲-۴-۳	۵۰
آماده سازی بستر و نحوه ی داده برداری	۳-۴-۳	۵۰
نحوه برداشت نیمرخ های سرعت	۴-۴-۳	۵۱
برنامه آزمایشات	۵-۳	۵۲
فصل چهارم		۵۴
نتایج و بحث		۵۴
۱- پارامترهای هیدرولیکی	۴-۱	۵۴
۱-۱- تنش برشی	۴-۱-۱	۵۴
۱-۱-۱- محاسبه تنش برشی بستر از روش توزیع سرعت	۴-۱-۱-۱	۵۵
۲- محاسبه تنش برشی بستر با استفاده از داده های ADV	۴-۱-۱-۲	۵۵
۳- نتایج بدست آمده تنش برشی بحرانی از داده های ADV	۴-۱-۱-۳	۵۶
۲-۱- نتایج آزمایشگاهی مربوط به رسوبات غیر چسبنده (نمونه شاهد)	۴-۱-۲	۵۸
۳-۱- نتایج آزمایشگاهی رسوبات غیر چسبنده حاوی مواد ریزدانه چسبنده	۴-۱-۳	۶۲
۱-۳- بررسی و مقایسه نتایج تأثیر رسوبات ریزدانه بر تنش برشی آستانه حرکت	۴-۱-۳-۱	۶۲

۶۵	..... ۴-۱-۳-۲- نسبت افزایش پارامتر بحرانی شیلدز
۶۸	..... ۴-۱-۳-۳- بررسی تنش برشی بحرانی آستانه حرکت
۷۰	..... ۴-۱-۳-۴- بررسی دقت معیارهای آستانه حرکت
۷۳	..... ۴-۱-۳-۵- استخراج رابطه برای محاسبه تنش برشی بحرانی
۷۳	..... ۴-۱-۴- بررسی سرعت جریان
۷۵	..... فصل پنجم
۷۵	..... نتیجه گیری و پیشنهادات
۷۵	..... ۵-۱- نتیجه گیری
۷۶	..... ۵-۲- پیشنهادات
۷۷	..... منابع

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

شکل ۱-۲	نمودار شیلدز برای تعیین تنش برشی بحرانی	۱۳
شکل ۲-۲	نمودار اصلاح شده ی شیلدز توسط گسler (۱۹۷۱)	۱۶
شکل ۳-۲	نمودار اصلاح شده ی شیلدز (گاورز، ۱۹۸۷)	۱۷
شکل ۴-۲	نمودار اصلاح شده شیلدز توسط میلر و همکاران (۱۹۷۷)	۱۸
شکل ۵-۲	نسخه ی اصلاح شده ی نمودار شیلدز با جایگزینی کمیت سرعت برشی (u^*) و قطر ذرات (D) هم ارز شده در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد (میلر و همکاران، ۱۹۷۷)	۱۹
شکل ۶-۲	نمودار اصلاح شده ی شیلدز توسط پارکر و همکاران (۲۰۰۳)	۲۰
شکل ۷-۲	معیارهای فرسایش- ته نشینی برای ذرات یکنواخت (هیلمستروم، ۱۹۳۵)	۲۱
شکل ۸-۲	وضعیت ذره در آستانه حرکت بر مبنای تئوری وایت	۲۱
شکل ۹-۲	نمودار قطر متوسط ذرات در مقابل تنش برشی بحرانی	۲۳
شکل ۱۰-۲	نمودار پارامتر شیلدز به عنوان تابعی از شیب برای اندازه های مختلف ذرات	۲۵
شکل ۱۱-۲	تابع بحرانی حرکت در مقابل عدد رینولدز ذره برای مقادیر مختلف Rb/ds	۲۶
شکل ۱۲-۲	تأیید معیارهای آستانه حرکت یانگ	۲۷
شکل ۱۳-۲	تابع حرکت ذرات در مقابل عدد رینولدز ذره (نواک و نالوری-۱۹۷۵)	۲۹
شکل ۱۴-۲	کمیت $V_{CC}/(gd_s(s-1))^{0.5}$ در مقابل d_s/R (نواک و نالوری-۱۹۸۴)	۳۰
شکل ۱۵-۲	نمودار Re^* در مقابل τ^* و مقادیر ثابت d_s/k (نواک و نالوری-۱۹۸۴)	۳۱
شکل ۱۶-۲	نمودار d_s/k در مقابل $(V_{CC})_r/(V_{CC})_s$ (نواک و نالوری-۱۹۸۴)	۳۱
شکل ۱-۳	نمایی کلی از فلوم مستطیلی	۴۰
شکل ۲-۳	نمایی از ورودی فلوم	۴۰
شکل ۳-۳	نمایی از مقطع مستطیلی و دریچه انتهایی فلوم	۴۱
شکل ۴-۳	نمای کلی از دستگاه Vectrino+	۴۲
شکل ۵-۳	نمایی از مبدل‌های (فرستنده و گیرنده‌های) دستگاه vectrino+	۴۳

- شکل ۳-۶- محل قرارگیری S.V از فرستنده مرکزی (راهنمای سرعت سنج +VECTRINO، ۲۰۰۴)..... ۴۴
- شکل ۳-۷- دستگاه مختصات اندازه گیری سرعت در جهات مختلف نسبت به دستگاه ADV..... ۴۴
- شکل ۳-۸- نمودار دانه بندی رسوبات درشت دانه ۴۶
- شکل ۳-۹- نمایی از انجام آزمایش هیدرومتری ۴۷
- شکل ۳-۱۰- نمودار دانه بندی رسوبات حاوی ۱۰٪ ریزدانه ۴۸
- شکل ۳-۱۱- نمودار دانه بندی رسوبات حاوی ۲۵٪ ریزدانه ۴۸
- شکل ۳-۱۲- نمودار دانه بندی رسوبات حاوی ۵۰٪ ریزدانه ۴۹
- شکل ۳-۱۳- موقعیت مقاطع اندازه گیری در طول فلوم ۵۱
- شکل ۳-۱۴- موقعیت نقاط اندازه گیری سرعت در مقطع فلوم ۵۱
- شکل ۴-۱- داده های تنش برشی مقطع B3 آزمایش Q1C1 ۵۶
- شکل ۴-۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی ذرات غیرچسبنده با نمودار شیلدز ۵۹
- شکل ۴-۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نمودار شیلدز همراه با معیارهای متفاوت تعریف آستانه حرکت ۵۹
- شکل ۴-۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی ذرات غیرچسبنده با نمودار گسلر ۶۰
- شکل ۴-۵- مقایسه نتایج رسوبات غیر چسبنده با معیار یانگ ۶۱
- شکل ۴-۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی نمونه شاهد با نمودار آستانه حرکت پارکر ۶۱
- شکل ۴-۷- مقایسه کلی نتایج آزمایشگاهی با نمودار شیلدز ۶۲
- شکل ۴-۸- مقایسه کلی نتایج آزمایشگاهی با نمودار گسلر ۶۳
- شکل ۴-۹- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با معیار یانگ ۶۳
- شکل ۴-۱۰- مقایسه نتایج این تحقیق با نمودار بیان شده جولین (۱۹۹۸) ۶۴
- شکل ۴-۱۱- مقایسه کلی نتایج آزمایشگاهی با نمودار پارکر ۶۵
- شکل ۴-۱۲- نمودار پارامتر شیلدز در مقابل درصد رس ۶۶
- شکل ۴-۱۳- نمودار قدرت جریان در برابر پارامتر شیلدز ۶۷

- شکل ۴-۱۴- نمودار قطرمتوسط ذرات در مقابل سرعت برشی بحرانی ۶۷
- شکل ۴-۱۵- نمودار اصلاح شده شیلدز توسط میلر و همکاران (۱۹۷۷) ۶۸
- شکل ۴-۱۶- نمودار درصد رس در مقابل تنش برشی بحرانی ۶۹
- شکل ۴-۱۷- نمودار دبی در مقابل تنش برشی بحرانی ۶۹
- شکل ۴-۱۸- مقایسه پروفیل عرضی سرعت رسوبات با درصدهای متفاوت ریزدانه ۷۴

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول ۱-۲	حدود اندازه ذرات برای دسته بندی ترکیبات خاک (طاحونی، ۱۳۷۶)	۱۱
جدول ۲-۲	مقادیر ثابت a و m در معادله (۲-۴۳)	۳۲
جدول ۱-۳	محدوده ی ابعاد ذرات رسوبات غیر چسبنده	۳۹
جدول ۲-۳	خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سری خاک رسوبات چسبنده	۳۹
جدول ۳-۳	جدول بافت سری خاک رسوبات چسبنده	۳۹
جدول ۴-۳	مشخصات ترازوی مورد استفاده در آزمایش ها	۴۵
جدول ۳-۵	مشخصات هندسی رسوبات به کار رفته در آزمایش	۴۹
جدول ۳-۶	پارامترهای هندسی طبقه بندی کیفیت خاک	۴۹
جدول ۳-۷	نتایج تعیین جرم مخصوص طبیعی خاک	۵۰
جدول ۳-۸	مشخصات کلی آزمایشات مورد نظر در تحقیق حاضر	۵۳
جدول ۱-۴	نتایج سنجش تنش برشی برای رسوبات حاوی ۲۵٪ ریزدانه و دبی ۰/۰۱ مترمکعب بر ثانیه برای آزمایش Q1C2	۵۷
جدول ۲-۴	نتایج عدد رینولدز برشی و پارامتر شیلدز بحرانی برای نمونه شاهد	۵۷
جدول ۳-۴	نتایج عدد رینولدز برشی و پارامتر شیلدز بحرانی برای نمونه رسوبات حاوی ۱۰٪ ریزدانه	۵۸
جدول ۴-۴	نتایج عدد رینولدز برشی و پارامتر شیلدز بحرانی برای نمونه رسوبات حاوی ۲۵٪ ریزدانه	۵۸
جدول ۵-۴	نتایج عدد رینولدز برشی و پارامتر شیلدز بحرانی برای نمونه رسوبات حاوی ۵۰٪ ریزدانه	۵۸
جدول ۶-۴	بررسی دقت معیارهای آستانه حرکت شیلدز و گسler	۷۰
جدول ۷-۴	بررسی دقت معیار آستانه حرکت پارکر	۷۱
جدول ۸-۴	بررسی دقت معیار بانگ	۷۲
جدول ۹-۴	محاسبه ضرائب ثابت معادله (۴-۱۳) برای دبی های مختلف	۷۳

فصل اول

مقدمه

مفهوم آستانه‌ی حرکت یکی از مهمترین و پیچیده‌ترین موضوعات انتقال رسوبات در تئوری و عمل می‌باشد، در طراحی کانال‌های خاکی یکی از مهم‌ترین مسائل، پیشگیری از فرسایش بستر و جداره‌های کانال می‌باشد. در رودخانه‌ها نیز تغییرات مورفولوژی رودخانه به فرسایش بستر و کناره وابسته است، بنابراین مطالعات در این زمینه بدون تعیین آستانه‌ی حرکت امکان‌پذیر نیست. یکی از مشکلات اساسی انتقال رسوب پیش‌بینی قدرت جریان‌ی است که رسوب در آن شروع به حرکت می‌کند، این شرایط برای آستانه حرکت با عناوین تنش برشی بحرانی یا تنش برشی آستانه بیان می‌شود و با τ_{oc} نشان داده می‌شود، و به دو صورت مختلف یعنی تعیین کمترین تنش برشی مورد نیاز برای حرکت ذرات رسوب و یا تعیین بزرگترین قطر ذره که می‌تواند توسط تنش برشی اعمال شده به حرکت درآید مورد بررسی قرار می‌گیرد، برای تعیین شرایط هیدرولیکی آستانه‌ی حرکت رسوبات درشت‌دانه، روابط تجربی مختلفی توسط محققین ارائه شده است که نمودار شیلدز معروفترین آنها می‌باشد، علی‌رغم اینکه محققان دیگر بعد از شیلدز برخی از کاستی‌های موجود در این نمودار را گزارش کرده‌اند (یالین و کاراهان، ۱۹۷۹) هنوز هم به طور گسترده‌ای در پیش‌بینی آستانه حرکت مورد استفاده قرار می‌گیرند و پس از نزدیک به هشت

دهه هنوز نتایج او اغلب مطرح بوده است، اما تحقیقات در این زمینه برای رسوبات ریزدانه‌ی چسبنده، به دلیل ماهیت شیمیایی ذرات، بسیار محدود بوده است. همچنین تحقیقات در زمینه‌ی آستانه‌ی حرکت رسوبات غیرچسبنده‌ی حاوی مواد ریزدانه‌ی چسبنده نیز بسیار محدود انجام شده است. با توجه به اینکه در بسیاری از کانال‌ها و رودخانه‌ها، رسوبات غیرچسبنده با رسوبات ریزدانه چسبنده همراه هستند، انجام تحقیقات در زمینه‌ی آستانه‌ی حرکت این ترکیب از رسوبات ضروری است و موضوع اصلی این تحقیق می‌باشد.

۱-۱- اهداف مطالعه

هدف از تحقیق حاضر بررسی تنش برشی در بسترهای پوشیده از رسوبات غیرچسبنده حاوی مواد ریزدانه و بررسی اثر آن بر آستانه‌ی حرکت و مقایسه‌ی آن با نمودار شیلدز و سایر روش‌های موجود می‌باشد.

۱-۲- فرضیات تحقیق

در این تحقیق فرض بر این است که با وجود رسوبات ریزدانه به همراه رسوبات غیرچسبنده در بستر، آستانه‌ی حرکت را می‌توان با روش‌ها و معادلات ارائه شده برای بسترهای متشکل از رسوبات غیرچسبنده، تعیین کرد.

۱-۳- روش انجام تحقیق

در این تحقیق با انجام آزمایشات در فلوم مستطیلی با طول ۱۲ متر و عرض و عمق ۴۰ سانتیمتر مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد، آستانه‌ی حرکت مخلوط رسوبات درشت‌دانه و ریزدانه مورد بررسی قرار گرفته و ضمن ارزیابی روش‌های مختلف موجود، بهترین روش ارائه و پیشنهاد گردیده است.

۱-۴- ساختار پایان نامه

این پایان نامه متشکل از چهار فصل است که پس از بیان یک مقدمه مختصر، در فصل دوم به بررسی منابع و معرفی کارهای انجام شده در زمینه آستانه حرکت رسوبات غیر چسبنده، رسوبات چسبنده و رسوبات مخلوط پرداخته شده است. فصل سوم حاوی مطالبی در توصیف مشخصات مدل آزمایشگاهی، نحوه‌ی کار با مدل، مواد آزمایش، شرح آزمایش‌ها، زمان انجام آن‌ها و چگونگی برداشت نتایج حاصل در طول آزمایش‌ها می‌باشد. در فصل چهارم با بحث بر روی نتایج تنش برشی بستر و سرعت جریان اندازه گیری شده، آستانه حرکت رسوبات غیر چسبنده با مقادیر متفاوت رسوب ریز دانه (۰٪ ، ۱۰٪ ، ۲۵٪ و ۵۰٪) از طریق رسم نمودارها و بررسی جداول حاصله از این داده‌ها ، به دست می‌آید. بر اساس تحلیل‌های انجام شده در فصل چهارم، نتایج نهایی و تعدادی پیشنهاد مرتبط با موضوعات طرح شده در انتهای فصل ارائه شده است.

فصل دوم

تئوری مسأله و بررسی منابع

۲-۱- مقدمه

اندازه‌ی دانه‌های تشکیل دهنده‌ی خاک در دامنه‌ی وسیعی متغیر است، بر حسب اندازه‌ی دانه‌ها، خاک‌ها معمولاً شن، ماسه، لای، رس و یا ترکیبی از آنها نامیده می‌شوند، بنابراین رسوبات غیرچسبنده و چسبنده توسط اندازه‌ی میانگین ذراتشان مشخص می‌شوند، برای تشریح خاک‌ها، سازمان‌های مختلف حدود جداکننده‌ی اندازه‌ی دانه‌های خاک را پیشنهاد می‌کنند.

۲-۲- رسوبات غیرچسبنده و چسبنده

در مقایسه با رسوبات چسبنده، در بین ذرات مجاور هم، در رسوبات غیر چسبنده نیروهای قابل توجهی وجود ندارد. این موضوع ذات آستانه‌ی حرکت رسوبات غیر چسبنده را معین می‌کند که شامل:

(۱) چرخش، لغزش یا هر دو؛

جدول ۱-۲- حدود اندازه ذرات برای دسته‌بندی ترکیبات خاک (طاحونی، ۱۳۷۶)

اندازه‌ی دانه‌ها (mm)				
رس	لای	ماسه	شن	نام سازمان
< ۰/۰۰۲	۰/۰۰۲ تا ۰/۰۶	۰/۰۶ تا ۲	> ۲	انستیتو تکنولوژی ماساچوست (MIT)
< ۰/۰۰۲	۰/۰۰۲ تا ۰/۰۵	۰/۰۵ تا ۲	> ۲	سازمان کشاورزی امریکا (USDA)
< ۰/۰۰۲	۰/۰۰۲ تا ۰/۰۷۵	۰/۰۷۵ تا ۲	۲ تا ۷۶/۲	انجمن ادارات راه و ترابری امریکا (AASHTO)
ریزدانه‌ها (رس ولای) < ۰/۰۷۵	۰/۰۷۵ تا ۴/۷۵	۴/۷۵ تا ۷۶/۲	سیستم طبقه‌بندی متحد (ISSS)	

۲) جهش یا برخورد ذرات؛

۳) معلق شدن بر طبق اندازه‌ی ذرات رسوب و شرایط جریان می‌باشد (ون راین، ۱۹۸۴).

در مورد رسوبات غیرچسبنده قوانین پذیرفته شده‌ی زیادی در مورد آستانه‌ی حرکت وجود دارد که مشهورترین آن توسط شیلدز ارائه شد که در این تئوری، نمودار شیلدز حالت اولیه‌ی حرکت رسوبات که ممکن است شامل چرخش، لغزش یا هر دو حالت باشد بیان می‌کند، برای حالت جهش ذرات نیازمند یافتن اطلاعات مفصلی از نیروهای وارد بر ذرات رسوب در همهی لحظات جهش می‌باشیم.

رسوبات چسبنده رسوباتی هستند که بین ذرات آنها پیوند و چسبندگی وجود داشته باشد، چنانچه ۸۰ تا ۹۰ درصد رسوبات از ۰/۰۷۵ میلی‌متر (الک شماره ۲۰۰) کمتر باشند وجود ۵ تا ۱۰ درصد رس در نمونه کافی است تا به این رسوبات، چسبنده اطلاق شود؛ رسوبات چسبنده به طور طبیعی شامل سیلت و رس می‌باشند، این ذرات معمولاً شکل صفحه‌ای تخت یا سوزنی دارند و سطح مخصوص ویژه‌ی بالایشان به عنوان شدت مساحت سطح به حجم تعریف می‌شوند (پارتنیادیس، ۲۰۰۷). این مشخصه سبب می‌شود برای جذب سطحی یون‌ها، پتانسیل بالایی داشته باشند که به دو صورت نیروهای سطحی جاذبه یا دافعه را به وجود می‌آورند. معمولاً نیروهای سطحی بر ذرات پشت سر هم رسوبات چسبنده چیره شده و بر وزن مستغرق ذرات که ناچیز می‌باشد تأثیر می‌گذارند (رادکیوی، ۱۹۸۴).

به علت کوچکی اندازه‌ی ذرات، رسوبات چسبنده به راحتی درون آب معلق می‌شوند و با بعضی از فرآیندهای شیمیایی که درون آب رخ می‌دهد این ذرات معلق، فولکوله می‌شوند، ساختار چسبنده‌ی این فولکوله‌ها کاملاً با رسوبات غیرچسبنده متفاوت است. در انتها ذرات منفرد غیرچسبنده، به دلیل عدم وجود نیروهای متقابل آرام می‌شوند در حالی که رسوبات چسبنده که اخیراً ته‌نشین شدند و تصور می‌شود که از هم جدا گردند به صورت لبه به لبه یا لبه به سطح پیوستگی به هم متصل می‌مانند. در تجمع رسوبات چسبنده، فولکوله‌ها به طور قوی‌تری از طریق پیوستگی صفحه به صفحه به هم متصل هستند که چسبندگی زیاد در نزدیکی مرز رسوبات را معنی می‌دهد (پارتنیادیس، ۲۰۰۷).

۲-۳- مطالعات انجام شده روی آستانه حرکت رسوبات غیر چسبنده

۲-۳-۱- آستانه حرکت و نمودار شیلدز

درکانالی که بستر آن از مواد رسوبی تشکیل شده باشد، در جریان‌های کم، ذرات بستر هیچ گونه حرکتی نداشته و در محل خود ثابت می‌باشند با افزایش تدریجی شرایط جریان مثل افزایش تنش برشی و یا سرعت جریان، ذرات بستر شروع به حرکت خواهند کرد که این حرکت ابتدا به صورت بالا و پایین آمدن ذره بدون انتقال می‌باشد؛ و با افزایش بیشتر شرایط جریان، ذرات به طرف پایین دست شروع به حرکت خواهند کرد. لحظه‌ای را که ذرات شروع به حرکت می‌کنند اصطلاحاً آستانه‌ی حرکت می‌نامند.

برای آستانه حرکت ذرات رسوب سه تئوری مختلف وجود دارد: اولین تئوری به کار بردن آنالیز بی‌بعد در هنگام شروع حرکت ذره رسوب است که می‌توان به مطالعات شیلدز (۱۹۳۶) در این زمینه اشاره کرد، دومین تئوری بر اساس تحلیل مشتقات حاصل از تعادل نیروهای وارده بر یک دانه‌ی رسوب روی سطح بستر می‌باشد که توسط براهام (به نقل از استلزر ۱۹۸۱) بررسی گردید، سومین مورد استفاده از قطر معادل رسوب می‌باشد که توسط گوگس و دفنه (۲۰۰۵) ارائه شد. نظر به اینکه شروع حرکت ذرات شامل کمیت‌های قابل اندازه‌گیری و غیرقابل اندازه‌گیری است، آنالیز بی‌بعد یک روش مناسب برای تشریح روابط موجود بین این کمیت‌ها است و در این تحقیق مورد استفاده می‌باشد.

شرایط آستانه‌ی حرکت نیازمند داشتن مرزهای محدود برای انتقال مواد بستر است؛ علی‌رغم اطلاعات زیادی که از تحقیقات روی آستانه حرکت رسوب بدست آمده، اما به دلیل عدم توافق صاحب‌نظران در مورد مفهوم آستانه حرکت، هنوز راه حل مشخصی برای تعیین دقیق آستانه حرکت ارائه نشده است. رادکی‌وی (۱۹۶۷) بیان داشت که اولین تحقیقات در مورد شرایط بحرانی حرکت رسوبات، توسط براهام در سال ۱۷۵۳ انجام شد و نتایج آن به صورت معادله (۱-۲) ارائه شد:

$$V = K \cdot W^{1/6} \quad 1-2$$

که در آن W وزن ذره، K ثابت تجربی و V سرعت جریان سیال برای اینکه ذرات رسوب شروع به حرکت کنند. همچنین بوفینگتون (۱۹۹۹) اظهار داشت که شیلدز (۱۹۳۶) اولین شخصی است که به طور اصولی، تنش برشی آستانه‌ی حرکت را توصیف کرد. او پس از انجام آزمایش‌های متعدد، متوجه شد که شروع حرکت ذرات رسوب به اندازه‌ی ذره، D_s ، لزجت مایع، μ ، وزن مخصوص مایع، ρ ، وزن مخصوص ذره، γ_s و تنش برشی جریان در آستانه‌ی حرکت ذره، τ_c ، بستگی دارد. (شفاعی بجزستان، ۱۳۷۳)

به این ترتیب می‌توان نوشت:

$$F_1(\tau_c, \rho, \mu, D_s, \gamma_s, g) = 0 \quad 2-2$$

رابطه (۲-۲) با استفاده از آنالیز ابعادی و تئوری باکینگهام به رابطه بدون بعد (۳-۲) تبدیل می‌شود:

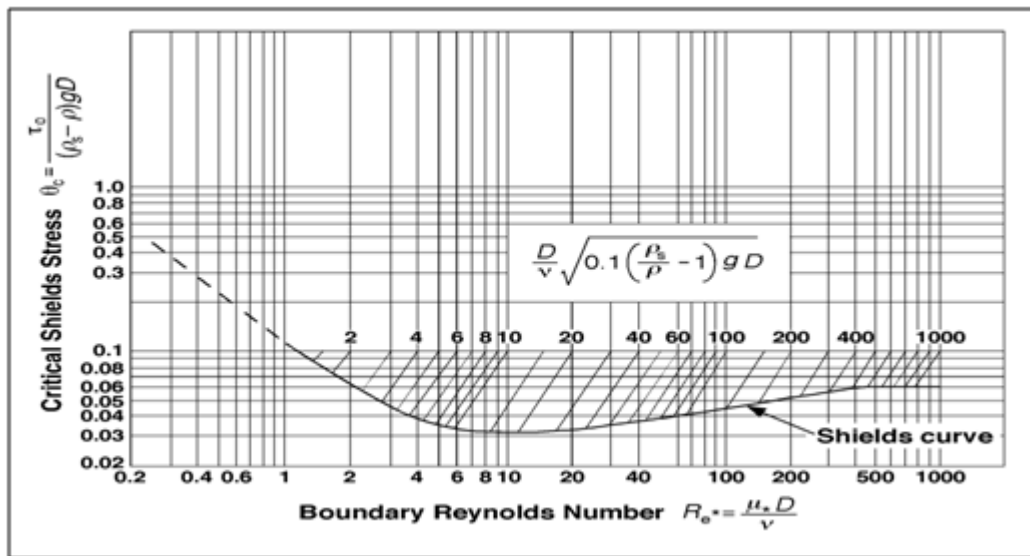
$$f_2 \left(\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) D_s}, \frac{u_* D_s}{\nu} \right) = 0 \quad ۳-۲$$

و یا :

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) D_s} = f_3 \left(\frac{u_* D_s}{\nu} \right) \quad ۴-۲$$

پارامتر بی بعد $\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) D_s}$ را معمولاً با θ_c نشان داده و آن را پارامتر بحرانی شیلدز (Parameter Critical Shields) می‌نامند و $\frac{u_* D_s}{\nu}$ را عدد رینولدز مرزی (Boundary Reynolds Number) می‌نامند، u_* سرعت برشی بحرانی است.

شکل ۱-۲ پارامتر شیلدز در مقابل رینولدز مرزی را نشان می‌دهد، این نمودار به نمودار شیلدز معروف است. در حقیقت خط رسم شده از نقاط آزمایش نشان دهنده شرایط هیدرولیکی جریان در لحظه شروع حرکت ذره می‌باشد، اگر شرایط طوری باشد که محل تلاقی $\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) D_s}$ و $\frac{u_* D_s}{\nu}$ بالای خط قرار گیرد یعنی ذرات بستر در حرکت هستند و چنانچه محل تلاقی پایین خط باشد بیان‌گر این است که ذرات حرکتی ندارند.



شکل ۱-۲- نمودار شیلدز برای تعیین تنش برشی بحرانی

با توجه به شکل جریان را به سه قسمت می‌توان تقسیم نمود:

منطقه جریان با بستر صاف یعنی وقتی $R_* < 5$ باشد، در این صورت پارامتر شیلدز تابعی از عدد رینولدز مرزی است.

منطقه بینابین، موقعی که $5 < R_* < 250$

منطقه جریان با بستر زبر که $250 < R_*$ که در این منطقه نیروی لزجت تأثیری روی حرکت ذرات ندارد و پارامتر شیلدز عدد ثابتی به شرح معادله (۲-۵) است :

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) D_s} = 0.056$$

۵-۲

در رودخانه‌ها و کانال‌های طبیعی معمولاً عدد رینولدز مرزی به حدی می‌باشد که بیانگر شرایط بستر زبر است و در نتیجه مطابق نمودار شیلدز، تحت این شرایط پارامتر شیلدز بحرانی، θ_c ، برابر عدد ثابتی می‌باشد، این عدد ثابت توسط شیلدز برابر ۰/۰۵۶ محاسبه گردید، هر چند دانشمندان پس از شیلدز، صحت مطالعات وی را تأیید کرده‌اند ولی همه آن‌ها در رابطه با عدد ثابت ۰/۰۵۶ اتفاق نظر ندارند. تعدادی از دانشمندان از جمله میر-پیتر و مولر (Meyer-Peter and Muller) و گسler (Gessler) عدد ۰/۰۴۷ را به دست آورده‌اند. یکی از دلایل این اختلاف، تعریف آستانه حرکت ذرات رسوب می‌باشد که در بین همه محققان یکسان نبوده است، البته تأثیر شرایط جریان به دلیل وجود تلاطم و همچنین شرایط آزمایش نیز می‌تواند تأثیر مستقیمی بر این تعریف داشته باشد (به نقل از شفاعی بجستان، ۱۳۷۳).

برای تعیین تنش برشی در آستانه حرکت نیاز به استفاده از نمودار شیلدز می‌باشد، از این رو معادلاتی بر این نمودارها برازش داده شد که به شرح زیر است:

چنانچه عدد ذره به صورت $D_* = \left[\frac{g(G_s - 1)}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} D_{50}$ و عبارت شیلدز به صورت $\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho) g D_{50}}$ تعریف شود، نمودار شیلدز را می‌توان به معادلات (۲-۶) تا (۲-۱۰) تبدیل کرد: (شفاعی بجستان، ۱۳۷۳)

$$1 < D_* \leq 4 \quad \theta_c = 0.24 D_*^{-1} \quad ۶-۲$$

$$1 < D_* \leq 10 \quad \theta_c = 0.14 D_*^{+0.64} \quad ۷-۲$$

$$10 < D_* \leq 20 \quad \theta_c = 0.04 D_*^{-0.1} \quad ۸-۲$$

$$20 < D_* \leq 250 \quad \theta_c = 0.013 D_*^{+0.29} \quad ۹-۲$$

$$D_* > 250 \quad \theta_c = 0.056 \quad ۱۰-۲$$

۲-۳-۱-۱-اصلاحات نمودار شیلدز

از آنجا که از نمودار شیلدز نمی‌توان به طور مستقیم مقدار تنش بحرانی را یافت، مقدار این تنش با استفاده از پارامتر ذره d_* به طور غیر مستقیم از معادله (۲-۱۱) محاسبه می‌گردد.