



دانشگاه شاهرود

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب گرایش سازه‌های آبی

آستانه فرسایش رسوبات چسبنده ته‌نشین شده با استفاده از مدل فلوم دوار

اساتید راهنما:

دکتر حسین صمدی بروجنی

دکتر بهزاد قربانی

پژوهشگر:

نیما اکبری

دی ماه ۱۳۹۰

چکیده

رسوبات چسبنده پس از ته نشینی در مخازن سدها، حوضچه‌های رسوبگیر و کانال‌ها به مرور تحکیم یافته و در صورت اقدام برای تخلیه هیدرولیکی آنها، در برابر شسته شدن مقاومت نشان می‌دهند که باعث ایجاد مشکلات و تحمیل هزینه‌های زیادی جهت لایروبی و کنترل آنها می‌شود. لذا اولین مسئله اینست که آستانه فرسایش این نوع رسوبات معلوم باشد. در تحقیق حاضر از فلوم دوار مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد به قطر $1/9$ متر استفاده شد. در این تحقیق از رسوبات بستر سد خاکی کوچک پیر بلوط استان چهار محال و بختیاری که دارای 95 درصد رس $4/27$ درصد سیلت و $0/73$ درصد ماسه بود استفاده گردید. برای شروع آزمایشات پس از ریختن رسوبات با غلظت مشخص در فلوم، ابتدا رینگ و فلوم به منظور مخلوط شدن کامل رسوبات با آب و خرد شدن فلوک‌ها به مدت دو ساعت با سرعت بالا و در خلاف جهت هم به حرکت درآمدند. سپس با ثابت نگه داشتن فلوم به رسوبات اجازه ته‌نشینی و تحکیم داده شد و پس از طی مدت زمان‌های تحکیم پنج هفته، سه هفته، دو هفته، یک هفته و سه روزه، با انتخاب پنج سرعت چرخش رینگ $4/45$ ، $6/21$ ، $7/97$ ، $10/65$ و $14/62$ بر حسب دور بر دقیقه، آزمایش‌های تعیین آستانه فرسایش انجام شد. برای بدست آوردن غلظت رسوبات و نرخ فرسایش رسوبات چسبنده به فاصله زمانی 15 دقیقه از شروع آزمایش‌ها از طریق شیرهای نمونه برداری موجود در ارتفاع $18/3$ سانتی‌متر از بستر فلوم نمونه‌گیری به عمل آمده و غلظت نمونه‌ها با روش نمونه‌گیری و توزین اندازه‌گیری شد. سرعت و تنش برشی جریان توسط دستگاه سرعت سنج ADV اندازه‌گیری گردید. با استفاده از داده‌های بدست آمده، روابطی بین سرعت گردش رینگ با تنش برشی بستر و سرعت متوسط جریان بدست آمد. همچنین تنش برشی بحرانی برای تعیین آستانه فرسایش و ثابت نرخ فرسایش رسوبات چسبنده بر اساس مدت زمان تحکیم محاسبه شد.

کلمات کلیدی: رسوبات چسبنده، فلوم دوار، سرعت سنج ADV، آستانه فرسایش، نرخ فرسایش

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۸	فصل اول
۸-۱-۱	مقدمه
۱۰-۲-۱	اهداف مطالعه
۱۰-۳-۱	اهمیت پژوهش حاضر
۱۱-۴-۱	فرضیات تحقیق
۱۱-۵-۱	روش انجام تحقیق
۱۱-۶-۱	ساختار پایان نامه
۱۲	فصل دوم
۱۳-۱-۲	رسوبات چسبنده
۱۳-۱-۲-۱	دانه بندی ذرات رسوب چسبنده
۱۴-۲-۱-۲	کانی‌های رس (Clay Minerals)
۱۶-۲-۲	فرآیندهای موثر بر انتقال رسوبات چسبنده
۱۶-۲-۲-۱	فلوکوله شدن رسوبات چسبنده
۱۷-۲-۲-۲	ته‌نشینی رسوبات چسبنده
۱۸-۳-۲-۲	تحکیم رسوبات چسبنده ته‌نشین شده
۲۲-۳-۲	فرسایش بستر
۲۲-۱-۳-۲	آستانه حرکت
۲۵-۲-۳-۲	عوامل فیزیکی موثر بر فرسایش پذیری بسترهای چسبنده
۲۵-۳-۳-۲	عوامل شیمیایی و بیولوژیکی موثر بر فرسایش پذیری بسترهای چسبنده
۲۷-۴-۳-۲	روش‌های تجربی برای تعیین پارامترهای فرسایش
۲۷-۱-۴-۳-۲	سیلندر چرخشی
۲۷-۲-۴-۳-۲	فلوم مستقیم
۲۸-۳-۴-۳-۲	روش‌های آزمایش درجا

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲۸	۲-۳-۴-فلوم دوار.....
۳۱	۲-۳-۵- تنش برشی بحرانی و فرمول‌های نرخ فرسایش.....
۳۵	فصل سوم
۳۵	۳-۱- مواد مورد استفاده.....
۳۵	۳-۱-۱- رسوبات مورد استفاده در آزمایش.....
۳۷	۳-۲- تجهیزات آزمایشگاهی.....
۳۷	۳-۲-۱- فلوم دوار.....
۳۷	۳-۲-۱-۱- اجزای ساختمانی و جانبی فلوم دوار آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهر کرد.....
۴۳	۳-۲-۱-۲- کالیبره کردن دور دستگاه.....
۴۵	۳-۲-۱-۳- تعیین ضریب زبری مانینگ در فلوم.....
۴۵	۳-۲-۲- دستگاه سرعت‌سنج (Acoustic Doppler Velocimeter) ADV.....
۴۸	۳-۲-۳- لوازم سنجش غلظت.....
۵۰	۳-۲-۴- معرفی آزمایش‌های انجام گرفته.....
۵۰	۳-۲-۴-۱- آزمایش دانه بندی و سنجش وزن مخصوص ذرات رسوبی.....
۵۲	۳-۲-۴-۲- طرح ریزی آزمایش‌های تعیین آستانه فرسایش و نرخ فرسایش.....
۵۵	۳-۲-۴-۳- آزمایش تعیین غلظت رسوب در عمق‌های مختلف از بستر.....
۵۶	۳-۲-۴-۴- آزمایش‌های سنجش سرعت و تنش برشی.....
۵۸	فصل چهارم
۵۸	۴-۱- پارامترهای هیدرولیکی.....
۵۸	۴-۱-۱- تنش برشی.....
۶۰	۴-۱-۲- سرعت جریان در فلوم.....
۶۱	۴-۱-۲-۱- سرعت متوسط.....
۶۳	۴-۱-۲-۲- پروفیل سرعت.....

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۲-۴- بررسی تحکیم رسوبات	۶۴
۱-۲-۴- تعیین غلظت رسوب در عمق‌های مختلف از بستر.....	۶۴
۲-۲-۴- تعیین نسبت تخلخل اولیه و نسبت تخلخل در عمق‌های مختلف از بستر.....	۶۶
۳-۴- تغییرات غلظت رسوب معلق نسبت به زمان	۶۹
۴-۴- تعیین آستانه فرسایش رسوبات چسبنده.....	۷۲
۱-۴-۴- رابطه تنش برشی در آستانه فرسایش با نسبت تخلخل رسوبات چسبنده.....	۷۲
۲-۴-۴- رابطه سرعت آستانه فرسایش و نسبت تخلخل.....	۷۳
۳-۴-۴- رابطه عدد فرود جریان در آستانه فرسایش و نسبت تخلخل.....	۷۳
۴-۴-۴- رابطه تنش برشی آستانه فرسایش با زمان تحکیم رسوبات.....	۷۴
۵-۴- تعیین عمق فرسایش یافته بستر رسوبات چسبنده در هر زمان.....	۷۵
۶-۴- محاسبه نرخ فرسایش.....	۷۵
۷-۴- بررسی ثابت نرخ فرسایش سطحی.....	۷۹
۸-۴- نتیجه‌گیری تحقیق.....	۸۰
۹-۴- پیشنهادات.....	۸۰
منابع.....	۸۱

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان جدول

- جدول ۱-۲ مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل توسط نیکولسون و اوکانر (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶)..... ۲۲
- جدول ۲-۲ مشخصات برخی فلوم‌های دوار مورد استفاده قرار گرفته و نام محقق..... ۲۹
- جدول ۳-۲ مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل عددی نیکولسون و کونور (۱۹۸۶)..... ۳۲
- جدول ۱-۳ مشخصات اجزای فلوم دوار ساخته شده در دانشگاه شهرکرد جهت انجام این تحقیق..... ۳۸
- جدول ۲-۳ جدول کالیبره عدد اینورتر با سرعت گردش رینگ بالا..... ۴۴
- جدول ۳-۳ وسایل مورد نیاز جهت سنجش غلظت نمونه‌های گرفته شده..... ۴۹
- جدول ۴-۳ غلظت‌های رسوب معلق (گرم بر لیتر) در طول آزمایش شماره ۱ (پنج هفته)..... ۵۳
- جدول ۵-۳ غلظت‌های رسوب معلق (گرم بر لیتر) در طول آزمایش شماره ۲ (سه هفته)..... ۵۴
- جدول ۶-۳ غلظت‌های رسوب معلق (گرم بر لیتر) در طول آزمایش شماره ۳ (دو هفته)..... ۵۴
- جدول ۷-۳ غلظت‌های رسوب معلق (گرم بر لیتر) در طول آزمایش شماره ۴ (یک هفته)..... ۵۵
- جدول ۸-۳ غلظت‌های رسوب معلق (گرم بر لیتر) در طول آزمایش شماره ۵ (سه روز)..... ۵۵
- جدول ۹-۳ تغییرات غلظت رسوب در عمق‌های مختلف برای نمونه‌های با زمان تحکیم دو هفته، یک هفته و سه روزه..... ۵۶
- جدول ۱-۴ نتایج سنجش تنش برشی (نیوتن بر مترمربع) توسط ADV..... ۵۹
- جدول ۲-۴ نتایج سنجش سرعت (سانتی‌متر بر ثانیه) توسط ADV..... ۶۰
- جدول ۳-۴ سرعت متوسط با توجه به دور رینگ و (دور بر دقیقه) و سرعت خطی چرخش رینگ (سانتیمتر بر ثانیه)..... ۶۱
- جدول ۴-۴ مقادیر عدد فرود و رینولدز جریان در سرعت‌های مختلف چرخش رینگ و فلوم..... ۶۳
- جدول ۵-۴ سرعت‌ها و تنش‌های برشی آستانه فرسایش رسوبات..... ۷۲
- جدول ۶-۴ مقادیر ثابت نرخ فرسایش سطحی برای آزمایش‌های با زمان‌های تحکیم مختلف..... ۸۰

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان شکل

- شکل ۱-۲ فاکتور فلوکوله شدن در مقابل اندازه ذرات پایه (چین و وان، ۱۹۹۸)..... ۱۳
- شکل ۲-۲ دیاگرام ساختمان کاتولینیت لایه‌ای (شن، ۱۹۷۳)..... ۱۵
- شکل ۳-۲ دیاگرام ساختمان لایه‌ای رس کلرایت (شن، ۱۹۷۳)..... ۱۵
- شکل ۴-۲ دیاگرام ساختمان لایه‌ای مونت‌موریلونیت (شن، ۱۹۷۳)..... ۱۶
- شکل ۵-۲ تغییرات نرخ تحکیم رسوبات چسبنده (موریس و فان، ۱۹۹۸)..... ۱۹
- شکل ۶-۲ ته‌نشینی ایده‌آل رسوبات معلق در یک حوضچه آرامش (یانگ، ۱۹۸۴)..... ۲۰
- شکل ۷-۲ فرآیند ایده‌آل رسوب‌گذاری- تحکیم..... ۲۱
- شکل ۸-۲ دیاگرام شیلدز (به نقل از شفاعی‌بجستانی، ۱۳۷۳)..... ۲۳
- شکل ۹-۲ نمایی شماتیک از یک کانال دوار با درپوش و موتور محرک بالا و پایین..... ۳۰
- شکل ۱-۳ موقعیت تقریبی محل برداشت رسوبات در حومه شهر کرد..... ۳۶
- شکل ۲-۳ نمودار دانه بندی رسوبات مورد آزمایش..... ۳۶
- شکل ۳-۳ نمایی از فلوم دوار..... ۳۹
- شکل ۴-۳ نمایی از موتور و گیربکس و تجهیزات انتقال نیرو جهت چرخاندن فلوم..... ۳۹
- شکل ۵-۳ نمایی از موتور، گیربکس بالا، اسکلت نگهدارنده غلاف شفت و سیستم انتقال نیرو به رینگ بالا..... ۴۰
- شکل ۶-۳ نمایی از رینگ و بازوی نگهدارنده..... ۴۱
- شکل ۷-۳ دستگاه اینورتر جهت تنظیم جهت و سرعت کار موتورها..... ۴۲
- شکل ۸-۳ نمایی از دستگاه اینورتر و UPS..... ۴۲
- شکل ۹-۳ نمایی از شیرهای مورد استفاده جهت نمونه‌گیری از مواد معلق درون فلوم..... ۴۳
- شکل ۱۰-۳ نمایی از دو مجرای تخلیه آب ورسوب تعبیه شده زیر فلوم..... ۴۳
- شکل ۱۱-۳ نمودار رابطه بین عدد صفحه اینورتر و سرعت خطی گردش رینگ بالا..... ۴۵
- شکل ۱۲-۳ نمایی کلی از دستگاه ADV مدل Vectrino+..... ۴۶
- شکل ۱۳-۳ نمایی از مبدل‌های (فرستنده و گیرنده‌های) دستگاه Vectrino+ (راهنمای سرعت سنج VECTRINO، ۲۰۰۴)..... ۴۷
- شکل ۱۴-۳ محل قرارگیری S.V از فرستنده مرکزی (راهنمای سرعت سنج Vectrino+، ۲۰۰۴)..... ۴۸

فهرست شکل ها

صفحه

عنوان شکل

- شکل ۳-۱۵ مزور، کیف و آبپاش مورد استفاده در سنجش حجم..... ۴۹
- شکل ۳-۱۶ ظروف شماره گذاری شده و ترازوی دیجیتال..... ۴۹
- شکل ۳-۱۷ سنجش جرم پیکنومتر حاوی نمونه با ترازوی دیجیتال دارای دقت ۰/۰۰۰۱ گرم..... ۵۰
- شکل ۳-۱۸ نمودار سه تکرار آزمایش دانه بندی (با مواد جدا کننده)..... ۵۲
- شکل ۳-۱۹ دستگاه ADV نصب شده روی شاسی در وسط دستگاه..... ۵۷
- شکل ۴-۱ نمودارهای تغییرات تنش با ارتفاع از بستر..... ۵۹
- شکل ۴-۲ نمودار رابطه سرعت چرخش رینگ با تنش برشی بستر فلوم..... ۶۰
- شکل ۴-۳ پارامترهای مورد استفاده جهت محاسبه پروفیل سرعت..... ۶۱
- شکل ۴-۴ رابطه سرعت چرخش رینگ با سرعت متوسط جریان..... ۶۲
- شکل ۴-۵ رابطه سرعت چرخش رینگ با عدد فرود..... ۶۳
- شکل ۴-۶ پروفیل سرعت نسبی در مقابل ارتفاع نسبی از بستر..... ۶۴
- شکل ۴-۷ غلظت رسوب در مقابل ارتفاع نسبی برای زمان تحکیم دو هفته..... ۶۵
- شکل ۴-۸ غلظت رسوب در مقابل ارتفاع نسبی برای زمان تحکیم یک هفته..... ۶۵
- شکل ۴-۹ غلظت رسوب در مقابل ارتفاع نسبی برای زمان تحکیم سه روز..... ۶۵
- شکل ۴-۱۰ غلظت رسوب در مقابل ارتفاع نسبی برای هر سه آزمایش..... ۶۶
- شکل ۴-۱۱ نسبت تخلخل در مقابل ارتفاع نسبی برای تحکیم دو هفته‌ای..... ۶۷
- شکل ۴-۱۲ نسبت تخلخل در مقابل ارتفاع نسبی برای تحکیم یک هفته‌ای..... ۶۷
- شکل ۴-۱۳ نسبت تخلخل در مقابل ارتفاع نسبی برای تحکیم سه روزه..... ۶۸
- شکل ۴-۱۴ نمودار روند ته‌نشینی رسوبات و فازهای رسوب‌گذاری - تحکیم..... ۶۸
- شکل ۴-۱۵ تغییرات غلظت رسوب معلق در مقابل زمان و تنش‌های برشی اعمال شده برای تحکیم پنج هفته‌ای..... ۶۹
- شکل ۴-۱۶ تغییرات غلظت رسوب معلق در مقابل زمان و تنش‌های برشی اعمال شده برای تحکیم سه هفته‌ای..... ۶۹
- شکل ۴-۱۷ تغییرات غلظت رسوب معلق در مقابل زمان و تنش‌های برشی اعمال شده برای تحکیم دو هفته‌ای..... ۷۰
- شکل ۴-۱۸ تغییرات غلظت رسوب معلق در مقابل زمان و تنش‌های برشی اعمال شده برای تحکیم یک هفته‌ای..... ۷۰

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان شکل

- شکل ۴-۱۹ تغییرات زمانی غلظت رسوب معلق در مقابل زمان و تنش‌های برشی اعمال شده برای تحکیم سه روزه..... ۷۱
- شکل ۴-۲۰ تغییرات غلظت رسوب معلق در مقابل زمان و تنش‌های برشی اعمال شده برای هر پنج آزمایش..... ۷۱
- شکل ۴-۲۱ نمودار تنش برشی آستانه در مقابل نسبت تخلخل..... ۷۳
- شکل ۴-۲۲ نمودار سرعت جریان آستانه در مقابل نسبت تخلخل..... ۷۳
- شکل ۴-۲۳ نمودار عدد فرود در آستانه فرسایش در مقابل نسبت تخلخل..... ۷۴
- شکل ۴-۲۴ نمودار تنش برشی آستانه فرسایش در مقابل زمان تحکیم رسوبات..... ۷۴
- شکل ۴-۲۵ تغییرات عمق فرسایش نسبت به زمان..... ۷۵
- شکل ۴-۲۶ تغییرات نرخ فرسایش رسوبات در مقابل زمان و تنش برشی اعمال شده با زمان تحکیم پنج هفته..... ۷۶
- شکل ۴-۲۷ تغییرات نرخ فرسایش رسوبات در مقابل زمان و تنش برشی اعمال شده با زمان تحکیم سه هفته..... ۷۷
- شکل ۴-۲۸ تغییرات نرخ فرسایش رسوبات در مقابل زمان و تنش برشی اعمال شده با زمان تحکیم دو هفته..... ۷۷
- شکل ۴-۲۹ تغییرات نرخ فرسایش رسوبات در مقابل زمان و تنش برشی اعمال شده با زمان تحکیم یک هفته..... ۷۸
- شکل ۴-۳۰ تغییرات نرخ فرسایش رسوبات در مقابل زمان و تنش برشی اعمال شده با زمان تحکیم سه روز..... ۷۸
- شکل ۴-۳۱ تغییرات نرخ فرسایش با مقدار بدون بعد تنش برشی..... ۷۹

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

رواناب سطحی و جریان آب در رودخانه‌ها همواره توأم با فرسایش خاک و حمل مواد رسوبی است، این مواد در هر جا که موقعیت ایجاد کند ته‌نشین می‌شوند. فرسایش فرآیندی است که طی آن ذرات خاک از بستر خود جدا شده و به کمک یک عامل انتقال دهنده به مکانی دیگر حمل می‌شوند. به عنوان پی‌آمدی از بارندگی و آب شدن برف‌ها ذرات خاک موجود در سطح یک حوزه آبخیز می‌توانند فرسایش یافته و به واسطه فرآیند فرسایش ورقه‌ای، شیاری یا خندقی انتقال یابند. هنگامیکه فرسایش صورت گرفت ذرات خاک درون سیستم رودخانه انتقال یافته و نهایتاً در مخازن دریاچه‌ها و یا دریا ته‌نشین می‌شوند. مطالعه فرسایش سطحی، انتقال رسوب و آبشستگی و ته‌نشینی برای مهندسين و زمین‌شناسان در طی قرن‌ها با توجه به اهمیت آنها مورد توجه خاص بوده است. اکثر تمدن‌های باستانی به دلیل تأمین آب به منظور آبیاری و کشتیرانی در کنار رودخانه‌ها شکل می‌گرفت. تمام رودخانه‌ها به دلیل فرسایش سطحی از حوضه آبخیز و فرسایش سواحل رودخانه‌ها رسوبات را با خود حمل می‌کنند. دانش ما از تعادل دینامیکی میان منبع رسوب بالادست و ظرفیت انتقال رسوب یک رودخانه برای موفقیت طراحی، اجرا و نگهداری در مهندسی رودخانه دارای اهمیت است. رسوبات چسبنده عموماً دارای اندازه‌ای کوچکتر از $2 \mu m$ (رس) می‌باشند (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶) و دارای خاصیت چسبندگی هستند. عمده تفاوت میان رسوبات چسبنده و درشت‌دانه در قابلیت آن‌ها برای شکل گرفتن تحت تأثیر نیروهای جاذبه بین دانه‌ای، کلوخه شدن، چگالی و مقاوت بسیار متفاوت از اجزای اصلی آن‌ها می‌باشد. به طور کلی در

مباحث مهندسی رس و لای هر دو رسوبات چسبنده به شمار می‌روند (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶). سیلت‌ها مرکب از ذرات کوارتز و سایر مینرال‌ها هستند که مقاومت زیادی نسبت به هوازگی از خود نشان می‌دهند. رس‌ها از ذرات بسیار ریز و پولک مانند میکا، کائولینیت و مونت موریلونیت تشکیل یافته‌اند که قسمت اعظم آن‌ها به ذرات کلوییدی تبدیل یافته‌اند (رحیمی، ۱۳۷۱). رسوبات چسبنده مشتمل بر مواد ارگانیک و غیر ارگانیک می‌شوند (هایتر، ۱۹۸۳). دانه‌های رسوبات چسبنده در مجموع دارای سطحی صاف یا سوزنی شکل و سطح مخصوص زیاد هستند. بنابراین مقدار کل نیروهای سطحی در مقایسه با وزن غوطه‌وری ذره غالب می‌شود. اجزاء پراکنده چنان سرعت ته‌نشینی پایینی دارند که کوچک‌ترین ذره آن‌ها می‌تواند برای یک مدت طولانی معلق بماند. در حقیقت مقدار ناچیزی هم زدن برای نگه داشتن درشت‌ترین ذره آن‌ها در تعلیق کافی است. وقتی تحت شرایط معین نیروهای جاذبه از دافعه فراتر می‌روند ذراتی که به هم برخورد می‌کنند به هم می‌چسبند و تشکیل توده‌هایی را می‌دهند که به عنوان فلوک (Floc) شناخته می‌شوند. اندازه و سرعت ته‌نشینی این فلوک‌ها بسیار بیشتر از ذرات مجزا می‌باشد، لذا ته‌نشینی این نوع رسوبات سریع اتفاق بیافتد. این پدیده به عنوان فلوکولاسیون (Flocculation) شناخته می‌شود. خواص فیزیکی و شیمیایی آب و رسوب و اندرکنش (Interaction) آن‌ها موجب شدت یا ضعف این فرآیند می‌شود.

فلوکوله شدن ذرات پدیده‌ای بسیار پیچیده است و هنوز به طور دقیق قانونمند نشده است. این خاصیت، باعث ته‌نشینی رسوبات بسیار ریز در شرایط هیدرولیکی مشخص می‌شود. این شرایط هیدرولیکی قادر به معلق نگاه داشتن ذرات مذکور در حالت مجزا از یکدیگر می‌باشد. فلوکوله شدن ذرات باعث به هم چسبیدن ذرات و تشکیل فلوک‌های بزرگ می‌شود به شکلی که این فلوک‌ها قادر به ته‌نشینی می‌شوند.

عوامل مؤثر بر پدیده فلوکوله شدن ذرات رس را می‌توان به دو گروه که گروه اول مربوط به خصوصیات خود ذرات رس بوده و گروه دوم که مربوط به خصوصیات سیال است تقسیم کرد. از جمله خصوصیات رس که در فرآیند فلوکوله شدن نقش دارد، عبارت از نوع کانی‌های رسی، ظرفیت کاتیون‌های تبادل ذرات، اندازه ذرات و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها می‌باشد. همچنین خصوصیات سیال که در فلوکوله شدن ذرات نقش مهمی دارند عبارتند از خصوصیات هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان سیال و خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن که با انجام آزمایشات و اندازه‌گیری، می‌توان این خصوصیات را شناخت. فلوک‌ها به دلیل این‌که از تجمع چندین ذره رس به وجود آمده‌اند، دارای دوام و استحکام زیادی نبوده و در صورت برخورد با یکدیگر ممکن است شکسته شده و از هم جدا شوند. این استحکام به میزان نیروی چسبندگی بین ذرات و فشردگی آن‌ها بستگی دارد (به نقل از صمدی بروجنی، ۲۰۰۴).

فلوک‌ها در مسیر حرکت خود به ذرات دیگر چسبیده و تشکیل فلوک‌های بزرگتر می‌دهند. پس از اینکه به حد کافی بزرگ شدند ته‌نشین شده و یا ممکن است هنگام برخورد با بستر شکسته شده و به چند فلوک کوچک تقسیم شوند که در این صورت مجدداً به حالت تعلیق در می‌آیند. علاوه بر آن ممکن است دو ذره یا فلوک نیز به هم برخورد کرده و تغییر اندازه دهند که شامل حالت‌های مختلفی است. به طور مثال ممکن است یکی از فلوک‌ها به دو تکه تقسیم شده و یکی از آن‌ها به فلوک دیگر چسبیده و باعث بزرگتر شدن آن شود.

۱-۲- اهداف مطالعه

هدف از تحقیق حاضر تعیین آستانه فرسایش و همچنین نرخ فرسایش رسوبات چسبنده جمع آوری شده از یکی از بندهای خاکی استان تحت شرایط متفاوت به لحاظ سرعت جریان و نتیجتاً تنش برشی در بستر می باشد. این تحقیق با استفاده از یک فلوم دوار که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد وجود دارد انجام پذیرفت.

۱-۳- اهمیت پژوهش حاضر

موضوع ته‌نشینی رسوبات چسبنده در کانال‌های آبیاری، سواحل کشتیرانی و مخازن سدها همواره مورد توجه محققان بوده، چراکه این پدیده هزینه‌ها و مشکلات زیادی در پی داشته است. متأسفانه تاکنون معیارهای طراحی نیز نتوانسته‌اند به طور کامل با این پدیده مقابله کنند و رسوبات ریزدانه چسبنده حتی در کانال‌هایی ته‌نشین میشوند که معیارها و استانداردهای موجود در طراحی آن‌ها رعایت شده است. در مخازن سدها نیز رسوبات ریزدانه چسبنده ته‌نشین شده و راندمان تله اندازی را به صد درصد نزدیک کرده‌اند. این مسأله علاوه بر کاهش عمر مفید مخازن باعث شده زلالی آب رهاشده از مخازن، اکولوژی (Ecology) و مورفولوژی (Morphology) رودخانه پایین دست را به هم بزند. در سواحل و بنادر ته‌نشینی رسوبات چسبنده موجب شده هزینه لایروبی به شدت افزایش یابد و در بسیاری از موارد عملاً مبارزه با این پدیده غیر ممکن شده است (صمدی بروجنی، ۲۰۰۴). وجود رسوبات چسبنده در بسیاری از آبراهه‌ها به صورت یک معضل بوده و به شکلی جدی با کیفیت آب مرتبط می‌باشد. بسیاری از آلودگی‌ها مانند فلزات سنگین، آفت کشها و کودهای شیمیایی در وهله اول جذب سطح رسوبات چسبنده می‌شوند. رسوبات چسبنده برای مواد سمی نقش حامل را دارند و به شکلی جدی، کیفیت آب به حمل این رسوبات وابسته است. سموم می‌توانند هم به صورت سطحی جذب رسوبات شوند و هم به صورت محلول در آب باشند (فاز جذب شده و فاز محلول). جذب به صورت چسبیدن مواد سمی از حالت محلول به ذرات رسوب معلق تعریف می‌شود. سموم جذب شده بعد از ته‌نشینی رسوبات چسبنده در بستر رودخانه، می‌توانند از ستون آب حذف شوند اما ممکن است بر اثر فرسایش رسوبات بستر، دوباره به ستون آب بازگشته و در آب حل شوند. علاوه بر آلودگی‌های جذب شده به این رسوبات، خود رسوبات بسیاری از مواقع برای کیفیت آب معضلی جدی هستند. کدر بودن آب به علت وجود ذرات رسوب می‌تواند عبور نور خورشید را محدودتر کرده و دسترسی به مواد غذایی را کاهش دهند. بنابراین بر زندگی آبزیان تأثیر منفی بگذارد. همچنین کدر بودن، هزینه تصفیه آب را نیز افزایش خواهد داد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

از شایع‌ترین معضلات وجود رسوبات چسبنده ورود آن‌ها به شبکه‌های آبیاری می باشد، که از مهم‌ترین عوارض آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- در نتیجه ته‌نشینی مواد رسوبی در کانال‌ها، ظرفیت کانال کم می‌شود.

۲- قطع آب برای لایروبی کانال‌ها باعث قطع جریان آب به طرف مزارع می‌شود.

۳- هزینه لایروبی کانال‌ها بسیار گران تمام می‌شود.

همچنین ته‌نشینی رسوبات در مخازن سدها تبعاتی در پی دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- کاهش حجم مفید مخزن و در نتیجه کوتاه شدن عمر سدها.

۲- ورود رسوبات به تجهیزات هیدرومکانیک دریچه‌ها و توربین‌ها.

۳- اثرات زیست محیطی رسوب‌گذاری در مخازن.

۴- کاهش بار رسوبی پایین دست و تبعات آن بر اکولوژی و مورفولوژی رودخانه پایین دست. لذا تخلیه رسوبات از مخازن سدها یکی از راهکارهای مدیریت رسوب است. از طرفی این رسوبات پس از ته نشینی به مرور تحکیم یافته و در صورت اقدام برای تخلیه هیدرولیکی آن‌ها، در برابر شسته شدن مقاومت نشان می‌دهند. لذا در انجام عملیات رسوب‌شوئی هیدرولیکی مخازن اولین مسئله این است که آستانه فرسایش این نوع رسوبات معلوم باشد که در این تحقیق به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است.

۴-۱- فرضیات تحقیق

در این تحقیق فرض بر این است که رابطه مشخصی بین فرسایش رسوبات چسبنده و میزان تحکیم یافتگی رسوبات چسبنده وجود ندارد.

۵-۱- روش انجام تحقیق

برای انجام این تحقیق از یک فلوم دوار استفاده شد که دارای قطر خارجی ۱/۹ متر و مقطع عرضی آن مستطیلی با عرض ۳۰ سانتی‌متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر است. این فلوم دوار دارای محوری است که توسط یک الکترو موتور با سرعت قابل تنظیم می‌چرخد و لذا فلوم را نیز می‌چرخاند. لذا آزمایش‌های مورد نیاز در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد.

۶-۱- 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 فلوکوله شدن، ته نشینی و به ویژه تحکیم و فرسایش رسوبات چسبنده پرداخته شده است. در فصل سوم به توصیف مشخصات مدل آزمایشگاهی، نحوه کار با مدل، مواد آزمایش، شرح آزمایش‌ها، زمان انجام آن‌ها و چگونگی برداشت نتایج حاصل در طول آزمایش‌ها پرداخته شده. در فصل چهارم با بحث بر روی نتایج سنجش غلظت رسوب در زمان‌های مشخص و پارامترهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده، تغییرات غلظت رسوب، آستانه فرسایش و نرخ فرسایش رسوبات چسبنده ته نشین شده از طریق نمودارها و جداول حاصله، بررسی شده است. 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

بررسی منابع و تئوری مسأله

مقدمه

رسوبات چسبنده به رسوباتی اطلاق می‌شود که اندازه‌ای کوچک (در حد چند میکرون) داشته و دارای خاصیت چسبندگی باشند. معمولاً مینرال‌های رسی دارای چنین خاصیتی هستند. این خاصیت، موجب می‌شود ذرات رسوب، در حالت معلق بودن، به یکدیگر چسبیده و تشکیل توده‌های بزرگتر یا فلوک بدهند. به این عمل اصطلاحاً فلوکوله شدن می‌گویند. خواص فیزیکی و شیمیایی آب و رسوب و اندرکنش آن‌ها موجب شدت یا ضعف این فرآیند می‌شود (به نقل از صمدی بروجنی، ۲۰۰۴). وزن یک ذره رسوب چسبنده کوچک، به اندازه‌ای نیست که باعث ته‌نشینی آن در زمان معلق بودن گردد زیرا هرگونه آشفتگی و یا نوسان در آشفتگی جریان، بر وزن ذره غالب خواهد شد. همچنین ممکن است ذرات به وسیله تنش حاصل از آشفتگی شکسته شوند ولی خاصیت چسبندگی این گونه رسوبات باعث به هم چسبیدن تعدادی ذره رسوب شده و فلوک‌هایی به وجود می‌آید که از نظر اندازه و وزن در شرایط ته‌نشینی قرار می‌گیرند. خصوصیات ساختمانی (اندازه، چگالی و شکل) توده حاصل از به هم چسبیدن ذرات، سرعت ته‌نشینی را مشخص می‌کند. نرخ مؤثر ته‌نشینی، عبارت از حاصل ضرب سرعت سقوط ذره در فاکتور ممانعت از ته‌نشینی می‌باشد که کاهش سرعت به علت ممانعت دیگر ذرات را نشان می‌دهد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

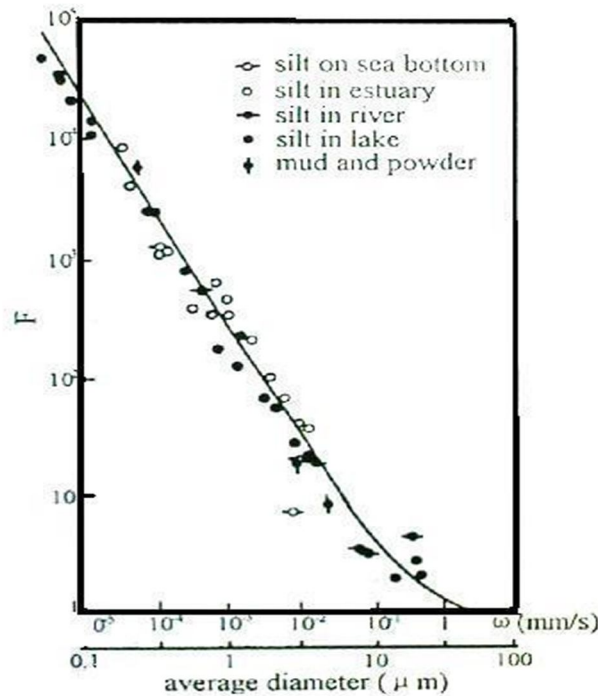
۱-۲- رسوبات چسبنده

۱-۱-۲- دانه بندی ذرات رسوب چسبنده

مایگنویت (۱۹۶۱) بعد از تجربیات طولانی بر روی رسوب گذاری در مناطق ساحلی عنوان می کند که ذرات سیلت با اندازه کمتر از ۰/۰۳ میلی متر نیز فلوکوله می شوند همچنین تأکید می کند که سیلت به شکل واضحی خاصیت فلوکوله شدن از خود نشان می دهد. وی همچنین فاکتور فلوکوله شدن را به شکل رابطه، تعریف نمود (به نقل از چین و وان، ۱۹۹۸).

$$F = \frac{W_{F50}}{W_{D50}} \quad ۱-۲$$

که در آن W_{F50} و W_{D50} به ترتیب، سرعت سقوط برای اندازه های متوسط فلوک و ذرات اولیه رسوب در مخلوط آب و رسوب می باشند. وی بر اساس مطالعات خود شکل زیر را ارائه نمود. این شکل نشان می دهد با عمل فلوکوله شدن، سرعت سقوط فلوک ها می تواند هزار یا ده هزار برابر ذرات منفرد نیز بشود.



شکل ۱-۲ فاکتور فلوکوله شدن در مقابل اندازه ذرات پایه (چین و وان، ۱۹۹۸)

بر این اساس، تأثیر فلوکوله شدن بر روی ذرات بزرگتر، کمتر خواهد بود. اگر اندازه ذرات از ۰/۰۳ میلی متر بزرگتر باشد، فلوکوله شدن هیچ تأثیری نخواهد داشت. اگر اندازه ذرات بین یک صدم تا سه صدم میلی متر باشد، تأثیر فلوکوله شدن بسیار کم خواهد بود. بدین ترتیب، قطر یک صدم میلی متر اندازه آستانه وقوع فلوکوله شدن و بروز هر گونه تأثیری خواهد بود (به نقل از چین و وان ۱۹۹۸). هرچه ذره ریزتر باشد، فاکتور فلوکوله شدن نیز بزرگتر خواهد بود و بدین ترتیب سرعت سقوط فلوک ها نیز نسبت به ذرات اولیه بزرگتر خواهد بود. ضمن اینکه دامنه تغییرات سرعت سقوط ذرات

چسبنده فلوکوله شده نسبت به دامنه تغییرات سرعت سقوط ذرات پایه (ذرات جدا از هم) بسیار کمتر می‌باشد. همچنین مایگنویت دریافت که در مخلوط معلق دارای ذرات سیلت به همراه فلوک‌های تشکیل یافته، سرعت سقوط فلوک‌ها از ذرات مستقل بوده و در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۶ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد.

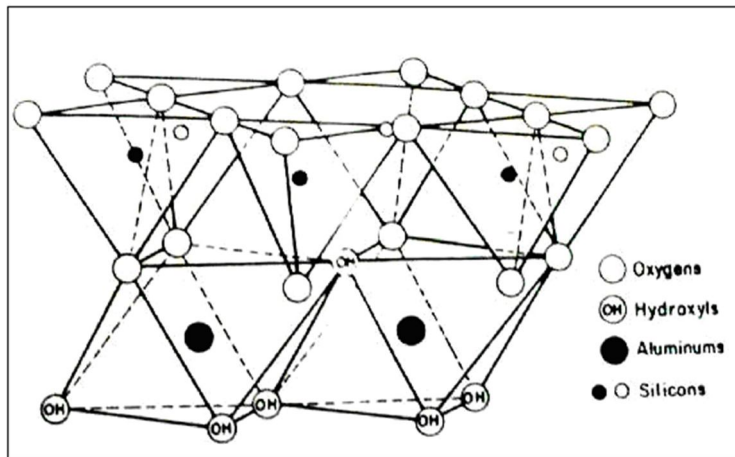
خاصیت فولکوله شدن، موجب ته‌نشینی رسوبات بسیار ریز در شرایط هیدرولیکی مشخص می‌شود. این شرایط هیدرولیکی قادر به معلق نگاه داشتن ذرات معلق جدا از هم می‌باشد. در واقع فلوکوله شدن ذرات، باعث به هم چسبیدن ذرات و تشکیل فلوک‌های بزرگ می‌شود که این فلوک‌ها قادر به ته‌نشینی می‌شوند. در حقیقت خصوصیات چسبندگی سیلت به دلیل وجود رس نمایان می‌شود ولی به طور کلی در مباحث مهندسی، رس و لای هر دو رسوبات چسبنده به شمار می‌آیند (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶). به ندرت پیش می‌آید که خاکی به شکل کامل از رس تشکیل شده باشد. اغلب ماسه ریز و سیلت قسمت‌های مهمی از یک خاک را تشکیل می‌دهند. در خاک‌های دارای بیش از تقریباً ده درصد رس، ذرات رس خصوصیات خاک را کنترل می‌کنند (راودکیوی، ۱۹۹۸).

۲-۱-۲- کانی‌های رس (Clay Minerals)

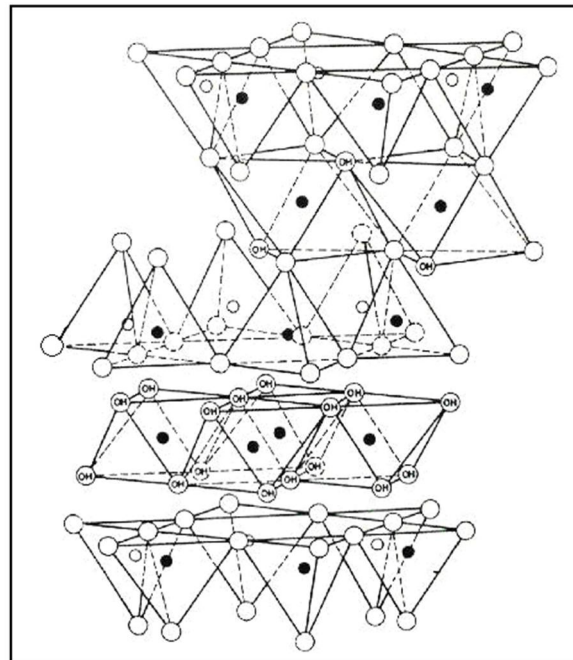
بیشتر خاک‌های چسبنده در گروه سیلیکات‌های لایه‌ای قرار می‌گیرند. ساختمان کریستالی آن‌ها به صورت پولکی شکل است. از خصوصیات بارز آن‌ها بالا بودن نسبت سطح به حجم و همچنین دارا بودن ظرفیت الکتریکی می‌باشد. مهم‌ترین کانی‌های رس عبارت از مونت‌موریلونیت، کائولینیت و کلرایت می‌باشد، که رس‌های مونت‌موریلونیت و کلرایت از گروه رس‌های دو به یک (دو لایه سیلیس و یک لایه آلومین) و کائولینیت از گروه رس‌های یک‌به‌یک (یک لایه سیلیس و یک لایه آلومین) می‌باشد.

ساختمان کائولینیت ترکیبی از یک لایه تتراهیدرال سیلیکات ساده و یک لایه اوکتاهیدرال آلومینیم ساده می‌باشد و فرمول کلی آن $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$ می‌باشد که در شکل نشان داده شده است. واحدهای ساختمانی این کانی از نظر الکتریکی در حالت تعادل می‌باشند به طوری که آنالیز تعداد زیادی از نمونه‌های رس کائولینیت نشان داده است ظرفیت تبادل کاتیونی آن در مقایسه با سایر خاک‌های رسی کمتر است. ظرفیت تبادل کاتیونی این خاک بین ۳ تا ۱۵ میلی‌اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک است (بای‌بوردی، ۱۳۷۹). اتصال بین لایه‌های کائولینیت هیدروژن است که اگرچه نسبت به تتراهیدرال اتصال سست‌تری ایجاد می‌کند ولی در مقایسه با بعضی مینرال‌های رس به‌طور قابل توجهی قوی‌تر است.

ساختمان رس کلرایت، به طور متناوب از لایه‌های میکا (Mika) و بروسایت (Brucite) تشکیل شده و مطابق شکل می‌باشد. این لایه‌ها به طور موازی به همدیگر متصل شده و در جهت عمودی، بر روی هم انباشته می‌شوند که به صورت بنیادی، دارای ساختمان متورق هستند. گروه‌بندی این کانی‌ها، بستگی به جانشینی لایه‌های بروسایت و موقعیت تتراهیدرال‌ها و اوکتاهیدرال‌ها دارد (به نقل از صمدی بروجنی، ۲۰۰۴).



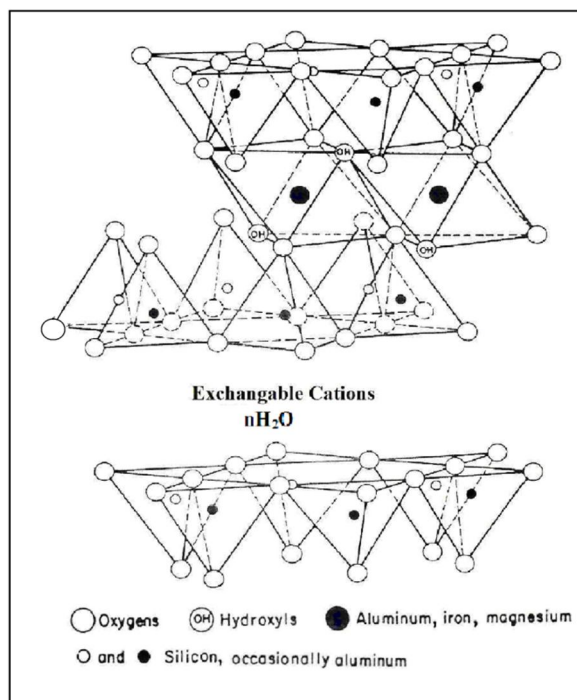
شکل ۲-۲ دیاگرام ساختمان کائولینیت لایه‌ای (شن، ۱۹۷۳)



شکل ۳-۲ دیاگرام ساختمان لایه‌ای رس کلرایت (شن، ۱۹۷۳)

ساختمان مونتموریلونیت به صورت لایه‌ای بوده به طوری که از سه لایه موازی تشکیل شده که در لایه وسط اکتاهیدرال آلومینیم و در دو طرف آن، تتراهیدرال سیلیکات وجود دارد. فرمول کلی آن $(OH)_4Si_8Al_4O_{20}$ می‌باشد (بایوردی، ۱۳۷۹). لایه‌ها مطابق شکل به هم متصل می‌شوند. شبکه‌ای بودن اتصال بین گروه‌های چندلایه‌ای و وجود O^- در محل اتصال باعث سست شدن پیوند بین این گروه‌ها شده، لذا این نوع رس دارای خاصیت تورق می‌باشد. از طرفی، ظرفیت تبادل کاتیونی این نوع رس بالا است و در صورت وجود کاتیون‌های محلول از قبیل آلومینیوم و منیزیم، ساختمان

آن از نظر الکتروشیمیایی خنثی می‌شود. به هر حال این نوع رس تمایل به شارژ منفی داشته و در صورت وجود یون آلومینیوم و منیزیم، این یون‌ها در داخل ساختمان جای داده می‌شوند. یکی از خواص شیمیایی مهم ذرات رس که در فلوکوله شدن مؤثر است، ظرفیت تبادل کاتیونی آن‌ها می‌باشد. اگرچه با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، فلوکوله شدن ذرات رسی با شدت بیشتری انجام می‌شود ولی این فرآیند ممکن است تحت تأثیر کیفیت شیمیایی سیال پیرامون تغییر یابد. به هر حال، میزان فلوکوله شدن ذرات رسی بستگی به یون‌های باردار ذرات نیز دارد و هرچه ذره رسی بار الکتریکی کمتری داشته باشد، جاذبه بین ذرات کمتر می‌شود.



شکل ۲-۴ دیاگرام ساختمان لایه‌ای مونت‌موریلونیت (شن، ۱۹۷۳)

۲-۲-۲- فرآیندهای موثر بر انتقال رسوبات چسبنده

عمده فرآیندهای فیزیکی که انتقال رسوبات چسبنده را در یک آبراهه تحت تأثیر قرار می‌دهند، عبارتند از فلوکوله شدن، ته‌نشینی، تحکیم و فرسایش. نحوه فلوکوله شدن، تأثیری اساسی بر روی اندازه فلوک‌ها، ته‌نشینی و مقاومت آن‌ها و بنابراین سایر فرآیندهای انتقال رسوبات چسبنده دارد (ژو و همکاران، ۲۰۰۶). فلوکوله شدن فرآیندی مختص رسوبات چسبنده بوده که شدت آن می‌تواند تحت تأثیر شرایط و وضعیت جریان نیز قرار بگیرد.

۲-۲-۱- فلوکوله شدن رسوبات چسبنده

رسوبات چسبنده در هنگام تعلیق در یک سیال جاری به یکدیگر برخورد کرده، توده شده و شکل بزرگتری را که دارای چگالی کمتری است به وجود می‌آورند. این فرآیند، به شکل جدی به نوع رسوبات، نوع و غلظت یون‌ها در آب و

شرایط جریان وابسته است (مهتا و همکاران، ۱۹۸۹). پوشش‌های فلزی یا ارگانیک روی ذرات، ممکن است میل ذرات رسوب ریزدانه در جذب یکدیگر را تحت‌تأثیر قرار دهند (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).
فلوکولاسیون باعث افزایش وزن فلوک‌ها و در نتیجه خروج آب منفذی شده و در سرعت بخشیدن به تحکیم و شدت آن موثر است (پارتیادیس، ۲۰۰۹)

۲-۲-۲- ته‌نشینی رسوبات چسبنده

زمانی که تنش برشی کف، کمتر از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی است، ته‌نشینی اتفاق خواهد افتاد. فقط توده‌های شکل گرفته که دارای نیروی کافی جهت مقاومت در مقابل تنش‌های فوق‌العاده قوی در منطقه نزدیک بستر هستند، ته‌نشین شده و به بستر خواهند چسبید. مهتا و پارتیادیس (۱۹۷۳)، مطالعاتی آزمایشگاهی بر روی رفتار رسوبات چسبنده که منجر به ته‌نشینی آنها می‌شود انجام داده و دریافتند که ته‌نشینی به وسیله تنش برشی بستر، فرایندهای حاصل از آشفتگی جریان در ناحیه نزدیک بستر، سرعت ته‌نشینی، نوع رسوبات، عمق جریان، غلظت رسوبات معلق و محتوای یونی سیال، کنترل می‌شود.

دو نوع ته‌نشینی می‌توان در نظر گرفت (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

۱- ته‌نشینی کامل: زمانی که تنش برشی بستر، کوچکتر از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل است، در نهایت تمامی ذرات رسوب و توده‌های حاصل از به هم چسبیدن آنها ته‌نشین می‌شوند.
فرمول نرخ ته‌نشینی کرون (۱۹۶۲) بدین شکل است.

$$Q_d = P_d w C \quad \tau \leq \tau_{d,full} \quad 2-2$$

Q_d ، نرخ ته‌نشینی رسوبات چسبنده است که در سیستم متریک بر اساس کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه عنوان می‌شود، w سرعت ته‌نشینی ذره بر اساس متر بر ثانیه، C ، غلظت رسوب معلق بر اساس کیلوگرم بر متر مربع و P_d احتمال ته‌نشینی است که در واقع احتمال چسبیدن فلوک‌ها به بستر و دوباره به حرکت در نیامدن آنها در مقابل تنش‌های برشی وارده بر بستر می‌باشد. τ ، تنش برشی بستر و $\tau_{d,full}$ تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل که در زیر این تنش تمام ذرات ته‌نشین می‌شوند و معمولاً بر اساس نیوتون بر متر مربع عنوان می‌شود. در واقع مقداری از رسوبات ته‌نشین شونده در نزدیک ناحیه بستر نخواهند توانست در مقابل تنش برشی بزرگ موجود در مرز آب و رسوب مقاومت کرده و شکسته شده و دوباره به حالت معلق در خواهند آمد. رابطه احتمال ته‌نشینی کرون (۱۹۶۲)، بدین شکل است (به نقل از هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,full}} \quad 3-2$$

آزمایش‌های زیادی انجام شده تا مقدار تنش برشی بحرانی را برای ته‌نشینی کامل معین کند. در این آزمایش‌ها اعدادی بین ۰/۰۶ تا ۱/۱ نیوتون بر مترمربع بر اساس نوع رسوب و غلظت آن بدست آمد (کرون ۱۹۶۲، مهتا و پارتیادیس ۱۹۷۵).

۲- ته‌نشینی جزئی (ته‌نشینی غیر کامل): هنگامی اتفاق خواهد افتاد که تنش برشی کف بزرگتر از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی کامل بوده ولی کوچکتر از تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی جزئی است. در این محدوده از تنش‌های برشی، ذرات توده شده نسبتاً قوی ته‌نشین شده و توده‌های نسبتاً ضعیف در مخلوط سوسپانسیون باقی می‌مانند.
فرمول نرخ ته‌نشینی جزئی بدین شکل می‌باشد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

$$Q_d = P_d w(C - C_{eq}) \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad ۴-۲$$

در این رابطه، C_{eq} غلظت تعادلی رسوبات است بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است. غلظت تعادلی رسوبات غلظت توده‌های ذرات یا همان فلوک‌های نسبتاً ضعیف است که انسجام چندانی نداشته و قبل از رسیدن به بستر می‌شکنند و یا پس از ته‌نشین شدن، بی‌درنگ از بستر کنده خواهند شد.

احتمال ته‌نشینی جزئی به وسیله فرمول زیر به دست می‌آید (به نقل از هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,part}} \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad ۵-۲$$

$$P_d = 0 \quad \tau > \tau_{d,part} \quad ۶-۲$$

طبق رابطه (۲-۳۰) اگر تنش برشی از تنش برشی بحرانی ته‌نشینی بزرگتر باشد، مقدار P_d منفی خواهد بود. اما در این حالت طبق رابطه (۲-۳۱)، مقدار P_d یا احتمال ته‌نشینی باقی ماندن فلوک در بستر یعنی شکسته نشدن و جدا نشدن فلوک از بستر، برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در واقع در این تنش‌ها فلوک‌ها در ناحیه نزدیک بستر شکسته شده و قطعات آنها پراکنده شده یا خود فلوک موفق به چسبیدن به بستر نخواهد شد و همراه جریان دوباره به حرکت در می‌آید. مقدار $\tau_{d,part}$ ، به غلظت رسوبات معلق و شرایط جریان در نزدیک بستر وابسته است (نگوین و همکاران، ۲۰۰۷).

۲-۲-۳- تحکیم رسوبات چسبنده ته‌نشین شده

تحکیم یکی دیگر از پدیده‌های مهم در انتقال رسوبات چسبنده است. اگر آشفتگی جریان قابل چشم پوشی باشد، رسوبات معلق در سیال ته‌نشین می‌شوند. ذرات ته‌نشین شده یک بستر رسوبی از خاک اشباع را بر کف ستون سیال تشکیل می‌دهند. پس از تشکیل این بستر رسوبی فاز تحکیم آغاز می‌شود و رسوب ته‌نشین شده متراکم می‌شود. در ارزیابی رسوب‌گذاری در حوضچه‌های آرامش، عملکرد ته‌نشینی ذرات روی هم رفته به عنوان یک فرآیند شناسایی می‌شود که می‌تواند نشان‌گر مراحل مختلف فرآیند ته‌نشینی باشد و عبارتند از:

الف- سقوط آزاد و ته‌نشینی ممانعت شده ذرات جدا از هم.

ب- ته‌نشینی ممانعت شده ذرات جدا از هم هنگامی که برهم‌کنش فیزیکی با ذرات مجاور رخ می‌دهد.

ج- تحکیم تحت وزن خود یا فرو نشست وقتی که تنش‌های موثر و فشارهای منفذی تثبیت شده است.

خصوصیات رفتاری رسوب هنگامی که متراکم می‌شود تغییر می‌کند و اصطلاحات مورد استفاده برای توصیف رسوبات چسبنده بر مبنای وزن مخصوص ظاهری تغییر می‌کند (یانگ و وانگ، ۱۹۹۶).

لین و لاهنز (۱۹۸۴) عنوان کردند که تحکیم تحت وزن خود رسوبات، زمانی که سطح مشترک آب و رسوب در ستون ته‌نشینی شکل می‌گیرد آغاز می‌شود. در این زمان ذرات درون یک شبکه سه بعدی انعطاف پذیر گیر می‌افتند و یک غلظت بحرانی C_c ، حاصل می‌شود. مطالعات قبلی (صمدی، ۲۰۰۵ و گیبسون، ۱۹۵۸) نشان داده که رسوبات چسبنده همیشه مستغرق پس از گذشت حدود یک ماه از زمان ته‌نشینی به فاز تحکیم رسیده و از آن به بعد ادامه روند تحکیم بسیار کند خواهد بود.

همیشه دو نوع تحکیم مدنظر است، تحکیم اولیه و تحکیم ثانویه (مهتا و همکاران، ۱۹۸۹). تحکیم اولیه به علت وزن خود رسوبات است. همان‌طور که ته‌نشینی برای مواد به وقوع می‌پیوندد. تحکیم اولیه هم اتفاق خواهد افتاد. زمانی که وزن خود ذرات بیش از نیروی منفذی است که درخلل و فرج ذرات اتفاق می‌افتد تحکیم اولیه هم به وقوع خواهد پیوست. در این مرحله وزن خود ذرات، آب منفذی را به بیرون رانده و ذرات را مجبور به نزدیکتر شدن به هم می‌کند.