



ماهوی توابعی از زمان و عمق می‌باشند، مرتبط کرد، آنگاه می‌توان به مدل‌هایی فیزیک مینا و منطبق بر رفتار واقعی دست یافت. واژه‌های کلیدی: فرسایش بستر چسبنده، تحکیم، مدل پارتنیادس، مدل گوینداراجو، مدل ویتروپ - ون کیسترن، عامل‌های فیزیکی و مکانیکی،

مقدمه

غلظت رسوبات چسبنده و افزایش گل آلودگی در بدنه آب سطحی تاثیر قابل توجهی روی نمایانه‌های کیفی آب گذاشته و باعث کاهش فعالیت زیستی و تاثیر منفی روی زنجیره غذایی می‌گردد. از طرف دیگر، طبیعت الکترومغناطیسی رسوبات، باعث چسبندگی شدید فلزات سنگین به ذرات رس یا لخته‌ها می‌گردد و پدیده انتقال و انتشار رسوبات معلق چسبنده منجر به پخش و انتقال آنها می‌شود. غلظت رسوبات معلق چسبنده در یک محیط آبی، اگر چه متاثر از منابع تولید و تخلیه مواد سواحل رودخانه‌ای و تولیدات مهم زیستی می‌باشد ولی در این پژوهش روی رسوباتی تاکید شده که تحت تاثیر هیدرولیک جریان می‌باشند و در اثر تغییر شرایط هیدرولیکی از خود واکنش نشان می‌دهند. رسوبات معلق که منشا تولید آنها سطح حوزه آبخیز می‌باشد چندان تحت تاثیر شرایط هیدرولیکی جریان نبوده و در معرض تغییرات شدید نمی‌باشند در صورتی که رسوبات معلق رودخانه که دارای منشا رودخانه‌ای می‌باشند در اثر سیلاب تغییرات ناگهانی شدیدی را به دلیل فرسایش تجربه می‌نمایند [۱]. لذا پدیده‌های فرسایش و رسوب‌گذاری رسوبات چسبنده با منشا رودخانه‌ای از مهمترین فرایندها در مدل‌سازی کیفیت آب می‌باشند.

فرسایش رسوبات چسبنده یکی از موارد مطالعاتی عمده انتقال رسوبات ریز دانه می‌باشد. آزمایشهای مربوط به این پدیده شامل آزمایشهای فلوم آزمایشگاهی، آزمایشهای فلوم در محل و مشاهدات میدانی از ۵۰ سال پیش، از زمانی که اینشتین شاگردش پارتنیادس^۳ را تشویق به مطالعه رفتار بستر چسبنده نمود، آغاز شد. فرمول فرسایش پارتنیادس [۲] و [۳] ساده شده آن موسوم به آریاتورای^۴ - پارتنیادس [۴] هنوز به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵، ۶، ۷]. بعد از پارتنیادس، پژوهش‌های آزمایشگاهی زیادی در حوزه رسوبات چسبنده انجام شده است.

ارزیابی آزمایشگاهی مدل‌های معتبر برآورد نرخ فرسایش بستر چسبنده

حسام فولادفر^۱، محمود شفاعی بجستان^۲ و منوچهر فتحی مقدم^۳
تاریخ دریافت: ۹۱/۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۱۹

چکیده

در راستای مدل سازی بلند مدت کیفیت آب، فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری رسوبات چسبنده حایز اهمیت زیادی می‌باشد. مدل‌های قدیمی و فرآیند محور برآورد نرخ و روند فرسایش بستر چسبنده که از آنها به طور گسترده استفاده می‌شود، کارایی قابل قبولی ندارند. به منظور ارزیابی این مدل‌ها و شناخت دقیق تر سازوکار فرسایش بستر چسبنده، مدل پارتنیادس به عنوان پر استفاده‌ترین و مدل‌های گوینداراجو و ویتروپ - ون کیسترن به عنوان جدیدترین مدل‌ها مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند. نمونه‌برداری آب و رسوب مورد آزمایش از بستر مخزن سد سفید رود انجام شده است. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که علیرغم پیش‌بینی مدل پارتنیادس، فرسایش به‌شدت به دوره تحکیم حساس می‌باشد و روند تغییرات نرخ فرسایش صعودی نبوده و دارای یک روند نمایی نقصانی می‌باشد. علاوه بر آن مقدار زیاد نرخ برآورد شده آن به میزان دو تا هفت برابر مقدار واقعی اندازه‌گیری می‌باشد. مدل گوینداراجو به دوره تحکیم حساس است روند تغییرات پیش‌بینی شده آنها با نتایج آزمایشها مغایرت داشته و مقدار برآورد شده آنها نیز اختلاف زیادی به میزان سه تا هفت برابر مقدار اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. بر خلاف دو مدل قبلی، برآورد مدل ویتروپ - ون کیسترن پنج برابر کمتر از مشاهدات است و لیکن به لحاظ تشابه رفتاری مشابه مدل‌های قبلی می‌باشد. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که با گذشت زمان چه در کوتاه مدت و چه در بلند مدت (تحکیم) از میزان نرخ فرسایش کاسته می‌شود. لذا چنانچه بتوان عامل‌های فرسایش را به گونه‌ای با عامل‌های مکانیکی و فیزیکی مانند مقاومت برشی، چگالی خشک، چسبندگی، غلظت ژله‌ای و سرعت اختلاط که به‌طور

۱- هیئت علمی موسسه تحقیقات آب، دانشجوی دکترای سازه‌های آبی دانشگاه

شهید چمران اهواز، h_fouladfar@yahoo.com

۲ - استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز،

3 - Partheniades

4 - Ariathurai

پارچر و مهتا [۸] مدلی ارایه نموده اند که شکل نمایی داشته و فرسایش خالص بستر نرم و تا حدودی تحکیم یافته را تشریح می‌نماید.

ون کیسترن [۹] مدلی توسعه داده که نرخ فرسایش را در حالت تعادل بین اختلاط و نرمی بستر می‌دهد. این مدل تورم بستر را در نظر می‌گیرد. مدل ون کیسترن فقط برای لایه رسوبی چسبنده یکنواخت با چگالی خشک یکنواخت تعریف شده است. گویندراجو و همکاران [۱۰] مدلی ارایه نموده اند که در آن تنش برشی بحرانی تابعی از چگالی خشک بستر در نظر گرفته شده است. جونز و لیک [۱۱] یک مدل عمومی چند لایه توسعه داده‌اند. سن فورد و همکاران [۱۲] سعی نمودند که تغییرات پیوسته عمقی متغیرهای فرسایش را با استفاده از تحلیل گسترده نتایج آزمایشهای فرسایش در یک فلوم حلقوی تعیین نمایند. آنها سعی کردند که این پروفیل‌های پیوسته را بدون شناخت ویژگی‌های بستر به صورت تابعی از عمق بازسازی نمایند. لیک و همکاران [۱۳] رابطه‌ای بین نرخ فرسایش و ویژگی‌های مختلف رسوب با کمک آزمون‌های آزمایشگاهی و میدانی با سدفلوم^۱ استخراج نموده‌اند.

بر اساس آخرین پژوهش‌های به عمل آمده توسط ویتروپ-ون کیسترن در آزمایشگاه دلفت هیدرولیکس [۵]، فرسایش سطحی زمانی اتفاق می‌افتد که بستر در حالت بحرانی و یا زیر آن قرار داشته باشد. به عبارت دیگر، قبل از اینکه گسیختگی (فرسایش) اتفاق بیفتد، نسبت آب بستر باید افزایش پیدا کند. برای افزایش آب بستر، آب باید وارد بستر شود و در حالت فرسایش سطحی، جریان باید به سطح بستر نفوذ کند. این فرآیند به تورم موسوم است. موقعیت جبهه تورم که با زمان افزایش می‌یابد، تابعی از ویژگی‌های تورمی رسوبات می‌باشد که به صورت یک فرآیند فرسایشی قابل تشریح می‌باشد [۵].

علاوه بر مدل‌های ذکر شده، مدل‌های دیگری نیز وجود دارند که از درجه اعتبار کمتری برخوردار می‌باشند. به طور کلی هنوز یک مدل عمومی برای فرسایش بستر چسبنده شناخته و معرفی نشده و مدل سازی فرسایش هنوز دارای مبانی تجربی می‌باشد.

به طور کلی، مدل‌های فرسایش موجود، نرخ فرسایش را به صورت تابعی از تنش برشی مازاد بستر و چند ضریب تجربی تعریف کرده‌اند. در این مدل‌ها، تنش برشی مازاد بستر به صورت تنش برشی بستر ناشی از جریان یا موج منهای تنش برشی بحرانی که کمتر از آن فرسایشی اتفاق نمی‌افتد، تعریف می‌شود. ضرایب تجربی نیز از طریق برازش مدل‌ها با آزمایشهای کوتاه مدت فرسایش تعیین می‌شوند [۸].

تازگی‌ها این سوال به طور جدی مطرح شده است که آیا رویکردها و فرمول‌های جاری برای مسایل کیفیت آب که تغییرات فصلی غلظت رسوبات اهمیت پیدا می‌کند، از دقت کافی برخوردار می‌باشند یا خیر؟

زمانی که هدف این باشد که کیفیت آب مدل‌سازی شود،

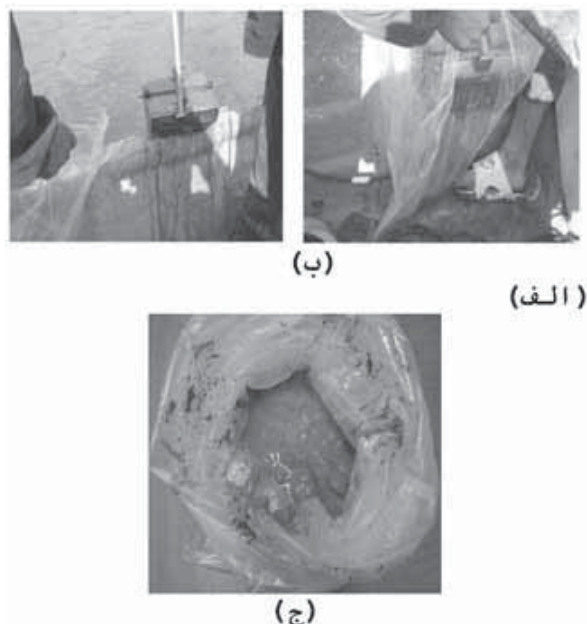
میزان حداکثرها در بار رسوبی معلق از اهمیت زیادی برخوردار می‌شوند. به عبارت دیگر، برای کیفیت آب، حادثه‌های اتفاقی مهمتر می‌باشند. برای پیش‌بینی نتایج حادثه‌های اتفاقی، مدل‌ها باید توازن رسوبی را به صورت واقع بینانه‌تری در نظر بگیرند. متأسفانه مدل‌های موجود فرسایش رسوبات چسبنده نمی‌توانند تبادل رسوبات چسبنده بین بدنه آب سطحی و بستر را شبیه‌سازی نمایند. غالب این فرمول‌ها فاقد توان تبیین فرسایش رسوبات چسبنده در بستر تحکیم یافته در طی وقوع یک سیل و تنشهای برشی شدید بستر می‌باشند [۵ و ۱۴]. هدف این پژوهش، ارزیابی سه مدل معتبر از میان مدل‌های مذکور با کمک نتایج به دست آمده از آزمایش‌های این پژوهش می‌باشد. در این آزمایش‌ها، رفتار فرسایشی رسوب چسبنده تحت شرایط مختلف جریان دایمی در یک فلوم مستقیم با نظام گردشی رسوب مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

مدل‌های مورد بررسی

در این پژوهش سه مدل معتبر که نماینده طیف وسیعی از مدل‌های موجود می‌باشند مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند. مدل آریاتورای^۲ - پارتینادس معروف به مدل پارتینادس به عنوان نماینده مدل‌های پایه‌ای و مدل‌های گویندراجو و ویتروپ-ون کیسترن به عنوان نماینده مدل‌های فرآیند محور و فیزیک مبنا که از جدیدترین مدل‌ها بوده و در اکثر نرم‌افزارهای عددی مانند MIKE11، DELFT3D، CCHE2D، CCHE3D، ECOMSED، MIKE21 استفاده قرار گرفته‌اند [۵].

در مدل پارتینادس نرخ فرسایش بر حسب تابعی از ضریبی غیر فیزیکی موسوم به ضریب نرخ فرسایش و مازاد نسبی تنش برشی، که در واقع معرف احتمال افزایش تنش برشی نسبت به تنش برشی بحرانی می‌باشد، بیان شده است [۲، ۳ و ۴]. در مدل گویندراجو تنش برشی بحرانی فرموله شده و با کمک دو عامل تجربی به عامل فیزیکی چگالی خشک مرتبط شده است و لذا از این جهت گامی جهت بنیادی‌تر کردن رابطه برداشته شده است. اگرچه که عامل فیزیکی چگالی خشک به صورت ذاتی وابسته به زمان و مکان می‌باشد، ولی در این مدل، راجع به این واقعیت بحثی به میان نیامده و مدلی نیز برای آن پیشنهاد نشده است. در مدل، برای ضریب نرخ فرسایش نیز تعریفی جدید و بنیادی ارائه نشده است [۱۰]. مدل ویتروپ-ون کیسترن نسبت به دو مدل قبل، ساختار فیزیکی مناسب‌تری پیدا کرده و از پدیده جبهه تورم بستر ناشی از نفوذ آب، که در واقع اصلی‌ترین علت فرسایش می‌باشد، جهت استخراج رابطه استفاده نموده است. در این مدل عامل‌های فیزیکی و مکانیکی ضریب تحکیم، مقاومت برشی بستر، غلظت حجمی، اندازه لخته و چگالی خشک منظور شده و لذا از استحکام بیشتری برخوردار می‌باشد [۵ و ۹].



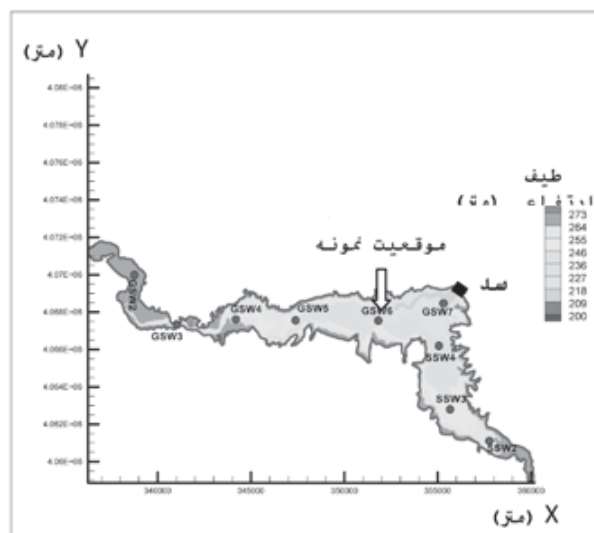
شکل ۲- نحوه نمونه گیری از رسوب بستر مخزن سد سفید رود
(الف) ظرف ویژه نمونه گیری (گراب پاکت) (ب) تخلیه نمونه
به کیسه پلاستیکی (ج) نمونه استحصال شده

با دمای ثابت ۲۰ درجه سلسیوس نگه داری گردید. قبل از انجام آزمایش، رسوبات با الک یک میلیمتری غربال شدند.

در جدول (۱) ویژگی‌های شیمیایی آب مخزن سد در محل نمونه برداری نشان داده شده است. جدول (۲) ویژگی‌های شیمیایی اندازه گیری شده نمونه های رسوبی را نشان می دهد. ترکیب کانی شناسی رسوب توسط روش تفرق اشعه ایکس تعیین شد. این ترکیبات و بعضی ویژگی های کانی ها نظیر چگالی، ظرفیت تبادل یونی و سطح ویژه نمونه های رسوبی در جدول (۳) ارائه شده اند. دانه بندی ذرات نمونه رسوب در شکل (۴) نشان داده شده است. در جدول (۴) نیز ویژگی های فیزیکی و مکانیکی نمونه رسوبی ارائه شده است. جهت اندازه گیری حدود خمیری و روانی و نمایانه خمیری از آزمایش حدود اتربرگ، برای اندازه گیری ضریب تحکیم از آزمایش تحکیم، برای اندازه گیری مقاومت برشی در حالت زهکشی نشده از آزمایش مقاومت برشی تک محوری و برای اندازه گیری اندازه متوسط لخته و غلظت ژله ای از آزمایش استوانه نشست استفاده شده است

تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی این پژوهش شامل سه بخش اصلی است: یک فلوم آزمایشگاهی با امکانات گردش رسوب توسط پمپاژ و تنظیم دبی توسط دستگاه تنظیم فرکانس الکتروموتور نظام پمپاژ. به منظور بهبود و توسعه لایه مرزی و ایجاد تشابه شرایط آزمایشگاهی با شرایط میدانی بستر فلوم در کل طول ۱۲ متری آن توسط ماسه



شکل ۱- محل نمونه برداری آب و رسوب بستر از مخزن سد سفید رود

نمونه گیری میدانی

نمونه رسوبی در خرداد ۱۳۹۰ از بستر مخزن سد سفیدرود جمع آوری شده است. سد سفید رود در ۲۰۰ کیلومتری شمال غربی تهران و ۱۰۰ کیلومتری دریاچه خزر، کمی پایین تر از شهر منجیل و در محل تلاقی دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود واقع شده است. نمونه های آب و رسوب از محل الحاق رودخانه قزل اوزن و مخزن سد برداشت شده و مختصات جغرافیایی آن عبارتست از: $X = 352820$ و $Y = 4068000$ موقعیت ایستگاه برداشت آب و نمونه های رسوبی در شکل (۱) نشان داده شده است.

در ساعت ۱۰ صبح، نمونه گیری با اندازه گیری های نیم رخ های قائم هدایت الکتریکی، غلظت، درجه حرارت، نسبت اکسیژن، توانمندی اکسیداسیون و اسیدیته آب آغاز شد. از آنجایی که لایه بندی وجود نداشته است، مقادیر متوسط در عمق ارائه شده اند. عمق آب محلی در طی اندازه گیری ها ۱۰ متر بوده و همه اندازه گیری ها با ادوات و ابزار آزمایشگاه کیفی منابع آب موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شده است.

رسوب بستر توسط یک ظرف ویژه ۱ و از ۱۰ سانتیمتری فوقانی لایه رسوبی نمونه گیری انجام شد. از این طریق ۲۰۰ کیلوگرم رسوب برداشت گردید. شکل (۲) نحوه نمونه گیری از رسوب و شکل (۳) نمونه ای از رسوبات اخذ شده را نشان می دهند. ۱۰۰ بشکه ۲۰ لیتری آب نیز توسط عمل پمپاژ از وسط عمق جمع آوری گردید.

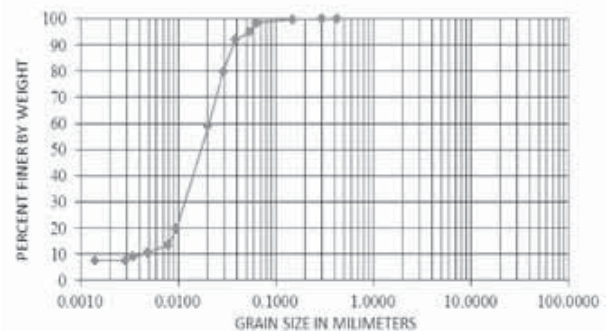
در نیمه روز نمونه گیری ها به اتمام رسید و نمونه های آب و رسوب با یک ماشین یخچال دار با دمای ۴ درجه سلسیوس به آزمایشگاه منتقل شدند. رسوب در یخچال آزمایشگاه در دمایی بین ۴ و ۸ درجه سلسیوس و آب نیز در یک اتاق با هوای کنترل شده و

شسته پوشانده شده است. شکل (۴) بازه مشاهداتی انتخاب شده از فلوم را که در ثلث انتهایی آن واقع شده است نشان می‌دهد. یک مخزن اختلاط رسوب با امکانات ایجاد یک مخلوط رسوب به‌طور کامل همگن با غلظتی معین توسط یک همزن و تخلیه رسوبات به درون فلوم آزمایشگاهی از طریق پمپاژ این مخزن بعد از اختلاط کامل آب و رسوب در اندازه تعیین شده، رسوب تهیه شده را از طریق پمپاژ، به درون فلوم تخلیه می‌نماید.

جدول ۱- ویژگی‌های آب مخزن در موقعیت و در طی نمونه‌گیری

۰/۷۵	هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتیمتر)
۰	نسبت اکسیژن (کیلوگرم بر متر مکعب)
-۳۰۰	ظرفیت اکسیداسیون (mV)
۰/۹۵	نسبت مواد آلی (درصد وزنی)
۰/۲۲	سدیم (meq/100 gds)
۰/۵۳	پتاسیم (meq/100 gds)
۳/۳	منیزیم (meq/100 gds)
۲/۳۷	کلسیم (meq/100 gds)
۳۲	آهن (گرم بر کیلوگرم)
۲۲	ظرفیت تبادل یونی
۳۱	نسبت خشک (درصد)
۱۱۸/۵	سطح ویژه (متر مربع بر گرم)

نسبت خشک : وزن خشک به وزن کل، gds: گرم رسوب خشک



شکل ۳- دانه بندی رسوبات بستر

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی نمونه رسوب

۰/۹	هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتیمتر)
۰/۱۶	غلظت مواد محلول (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲۲/۵	درجه حرارت (درجه سلسیوس)
۰/۰۰۷۲	نسبت اکسیژن (کیلوگرم بر متر مکعب)
۷۹	نسبت اکسیژن (در صد وزنی)
۱۳۰+	پتانسیل اکسیداسیون (mV)
۷/۸	pH (آب)

جدول ۳- ترکیب و ویژگی‌های کانی شناسی نمونه رسوب

نوع کانی	درصد	چگالی	ظرفیت سطح ویژه	وزنی (%)	(کیلوگرم بر متر مکعب)	یونی	بر گرم
کلریت Chlorite	۱۰	۲۶۰۰-۲۹۰۰	-	-	-	-	-
ایلایت Illite	۲۵	۲۶۰۰-۲۸۶۰	۴۰	۸۰	-	-	-
کائولینیت Kaolinite	۱۵	۲۶۱۰-۲۶۴۰	۳-۸	۱۳-۲۶	-	-	-
کوارتز Quartz	۳۵	۲۶۵۰	-	-	-	-	-
کلسیت Calcite	۹	۲۷۲۰	-	-	-	-	-
دولومیت Dolomite	۵	۲۸۵۰	-	-	-	-	-
مواد آلی	کمتر	-	-	-	-	-	-
Organic matter	از ۱	-	-	-	-	-	-

جدول ۴- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه رسوبی

۲۸	حد خمیری PL (%)
۳۴	حد روانی LL (%)
۶	شاخص خمیری PI (%)
۴۸۰۰۰	مقاومت برشی در حالت زهکشی نشده Cu (Pa)
1.1×10^{-6}	ضریب تحکیم $C_v (m^2 / sec.)$
۱۰۰	اندازه متوسط لخته $d_{50,f} (\mu m)$
۰/۸	غلظت ژله‌ای $\phi_{gel} (m^3 / m^3)$

شکل (۵) نمایی از مخزن ۱/۲ متر مکعبی اختلاط رسوب را نشان می‌دهد.

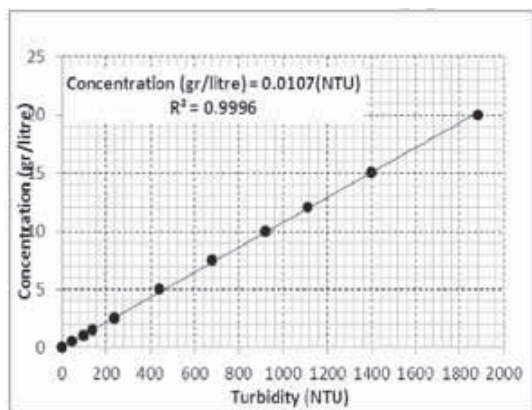
یک دستگاه اندازه‌گیری مستقیم کدورت جهت اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق. شکل (۶) دستگاه کدورت سنج مورد استفاده و شکل (۷) منحنی واسنجی این دستگاه را برای غلظت رسوبات معلق مورد آزمایش نشان می‌دهد.

روش آزمایش

به منظور انجام آزمایش‌های فرسایش روی نمونه‌های رسوبی لازم است در ابتدا نسبت به آماده سازی بستر برای دوره‌های تحکیم مختلف اقدام نمود. بعد از آماده‌سازی بستر برای هر دوره تحکیم، نوبت به انجام آزمایش‌های فرسایش برای دوره‌های مختلف تحکیم می‌رسد.

کارهای آماده‌سازی بستر

مراحل مختلف آماده‌سازی بستر به صورت زیر می‌باشد:
الف) ایجاد رسوبات معلق به‌طور کامل یکنواخت با غلظت ۵۰ گرم در لیتر با کمک مخزن اختلاط رسوب



شکل (۷) - منحنی واسنجی دستگاه کدورت سنج



شکل ۸ - نحوه ایجاد رسوب معلق در مخزن اختلاط

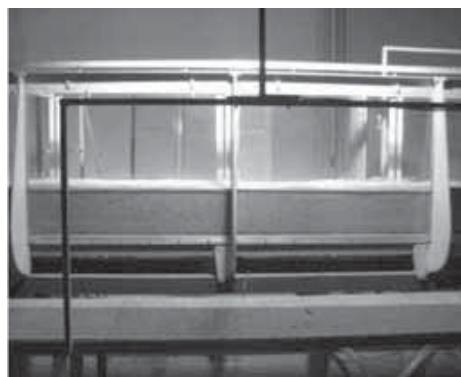


شکل ۹ - ایجاد باران رسوبی

ز) فرصت رسوب گذاری و تحکیم رسوبات به میزان دوره تحکیم مورد نظر جهت آزمایش های فرسایش اشکال (۸) لغایت (۱۰) مراحل آماده سازی را نشان می دهد.

آزمایش های مربوط به دوره تحکیم یک روزه

روش کار در این مرحله بدین صورت است که بعد از آماده سازی بستر به گونه ای که در قسمت قبل تشریح شد، از طریق مشاهده، زمان آغاز رسوب گذاری رسوبات معلق تعیین و



شکل ۴ - بازه مشاهداتی به طول دو متر، بلندای ۶۰ سانتیمتر و عرض ۴۵ سانتیمتر

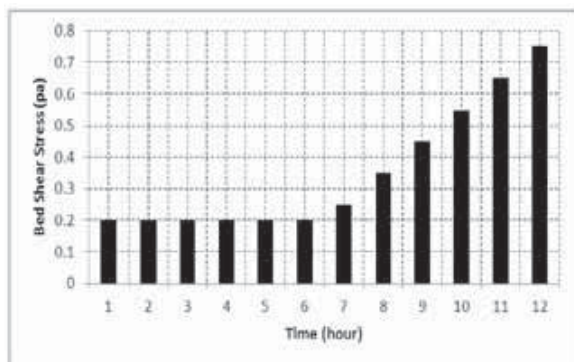


شکل ۵ - دستگاه اختلاط آب و رسوب



شکل ۶ - کدورت سنج مدل ۱۶۰ Analite جهت اندازه گیری غلظت رسوبات معلق

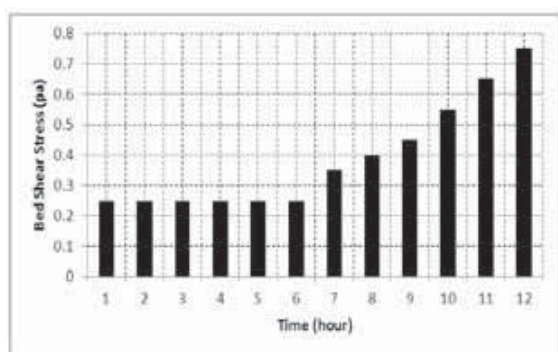
ب) تعبیه آب بند در فلوم و در دو طرف بازه مشاهداتی به منظور خشک نگه داشتن بازه مشاهداتی در دوره پر کردن فلوم
ج) پر کردن فلوم آزمایشگاهی تا ارتفاع ۳۰ سانتیمتر روی بستر زیرین ماسه ای از آب نمونه های برداشت شده از مخزن سد
د) تعبیه صفحه پخش رسوب روی بازه مشاهداتی
ه) پمپاژ و انتقال رسوبات معلق از مخزن به بازه مشاهداتی از طریق ایجاد باران رسوبی
و) تعیین زمان شروع رسوب گذاری از طریق مشاهده



شکل ۱۲- تنش برشی اعمال شده در آزمایش مربوط به تحکیم یک روزه



شکل ۱۳- وضعیت بستر در دوره تحکیم هفت روزه (قبل از شروع آزمایش فرسایش، عمق آب ۲۴/۵ سانتیمتر، ارتفاع بستر ۵/۵ سانتیمتر)



شکل ۱۴- تنش برشی اعمال شده در آزمایش مربوط به تحکیم هفت روزه

تحکیم داده می‌شود. شکل (۱۳) نمائی از بستر تحکیم یافته را به مدت هفت روز نشان می‌دهد. مشابه آزمایش‌های قبلی، بعد از آماده شدن و تحکیم بستر آزمایش‌های فرسایش پلکانی برای سرعتها و تنشهای برشی مندرج در شکل (۱۴) انجام می‌شود.

نتایج و بحث

داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های مربوط به دوره تحکیم یک



شکل ۱۰- آغاز رسوب‌گذاری در مخلوط آب و رسوب با غلظت ۵۰ گرم در لیتر

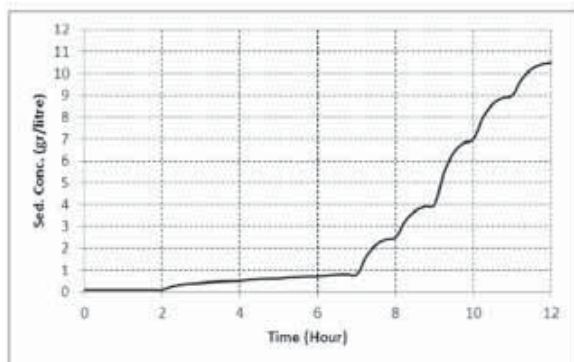


شکل ۱۱- وضعیت بستر در دوره تحکیم یک روزه (قبل از شروع آزمایش فرسایش، عمق آب ۲۴ سانتیمتر، ارتفاع بستر شش سانتیمتر)

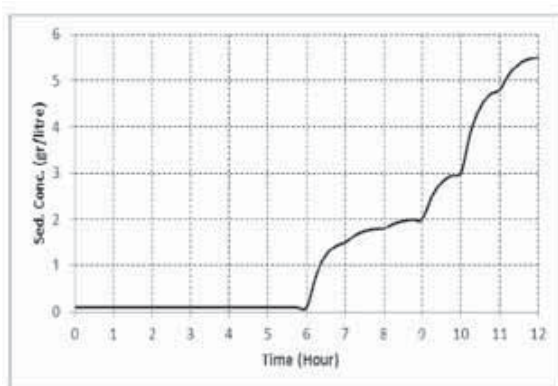
از آن زمان به مدت ۲۴ ساعت به رسوبات فرصت رسوب‌گذاری و تحکیم داده می‌شود. شکل (۱۱) وضعیت بستر را بعد از ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. بعد از گذشت ۲۴ ساعت درپچه‌های آب بند برداشته می‌شوند. سپس با استفاده از دستگاه تنظیم فرکانس موتور پمپ که قبلاً واسنجی شده، سرعت و تنش برشی به طور پلکانی به صورتی که در شکل (۱۲) نشان داده شده، افزایش می‌یابد. بدین ترتیب رسوبات بستر در معرض فرسایش سطحی قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری غلظت توسط کدورت‌سنج واسنجی شده نیز در پایین دست بازه مشاهداتی با فاصله زمانی ۱۵ دقیقه اندازه‌گیری می‌شود.

۲-۴-۳- آزمایش‌های مربوط به دوره تحکیم هفت روزه

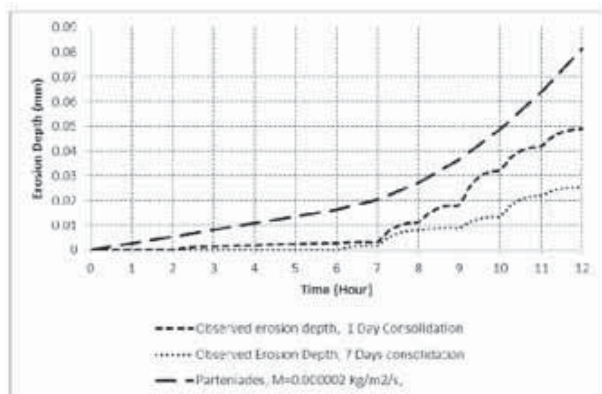
متعاقب اتمام آزمایش‌های مربوط به دوره تحکیم ۲۴ ساعته، رسوبات باقی مانده در بستر از فلوم خارج شده و فلوم تحت شستشوی کامل قرار می‌گیرد تا شرایط قبل از آزمایش ایجاد شود. دوباره با کمک مخزن اختلاط رسوبات معلق یکنواخت با غلظت ۵۰ گرم در لیتر تولید شده و مراحل آماده سازی بستر مشابه آزمایشهای قبلی اجرا می‌شود. در این سری از آزمایش‌ها به جای ۲۴ ساعت، مدت ۱۶۸ ساعت (هفت روز) به رسوبات مهلت رسوب‌گذاری و



شکل ۱۵- غلظت رسوبات در آزمایش تحکیم یک روزه



شکل ۱۶- غلظت رسوبات معلق در آزمایش مربوط به تحکیم هفت روزه



شکل ۱۷- مقایسه نتایج آزمایش‌ها برای دوره‌های تحکیم یک و هفت روزه و مدل پارتنیادس برای $n=1$ و $\tau_{cr}=0/1 \text{ pacal}$ کمترین مقدار M

کلی در مدل پارتنیادس، هیچ وابستگی زمانی لحاظ نمی‌شود، لذا نتایج محاسبات این مدل برای دوره تحکیم یک روزه و هفت روزه تفاوتی ندارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که داده‌های آزمایش‌ها با یک نرخ فرسایش پایین، تمایل به موقعیت تعادلی ساکن دارند، در صورتی که مدل پارتنیادس به هیچ وجه تمایلی به ایجاد موقعیت

روژه و هفت روزه به ترتیب در اشکال (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است.

ارزیابی مدل پارتنیادس

مدل فرسایش آریاتورای- پارتنیادس [۲، ۳ و ۴] معروف به فرمول پارتنیادس به صورت رابطه (۱) تعریف شده است. این مدل برای بستر تحکیم یافته تاحدودی متراکم و با ویژگی‌های یکسان، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد،

$$E = M \left(\frac{\tau_b - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \right)^n H \left(\frac{\tau_b - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این فرمول، E نرخ فرسایش بر حسب $\text{Kg/m}^2/\text{s}$ ، ضریب نرخ فرسایش بر حسب $\text{Kg/m}^2/\text{s}$ ، τ_b تنش برشی بستر، بر حسب N/m^2 ، τ_{cr} تنش برشی بحرانی، N/m^2 ، n نمائی است که معمولاً معادل یک یا دو در نظر گرفته می‌شود و H تابع پلکانی می‌باشد.

این مدل بیان می‌کند که از زمانی که تنش برشی بستر از مقدار بحرانی τ_{cr} بیشتر شود فرسایش آغاز می‌شود. زمانی که گذر از این آستانه اتفاق بیفتد، نرخ فرسایش به طور خطی با تنش برشی مازاد $\tau_b - \tau_{cr}$ افزایش می‌یابد. مدل پارتنیادس به ضریب فرسایش M حساس می‌باشد. تغییری اندک در مقدار این ضریب بازخورد قابل توجهی در نرخ فرسایش به همراه دارد. در ادبیات فنی مطالب زیادی درباره این ضریب گفته نشده و رابطه‌ای نظری برای آن معرفی نشده است. این ضریب به طور معمول به صورت تجربی تعیین شود و مقدار آن از 10^{-6} تا $10^{-2} \text{ Kg/m}^2/\text{s}$ تغییرات دارد [۱۵].

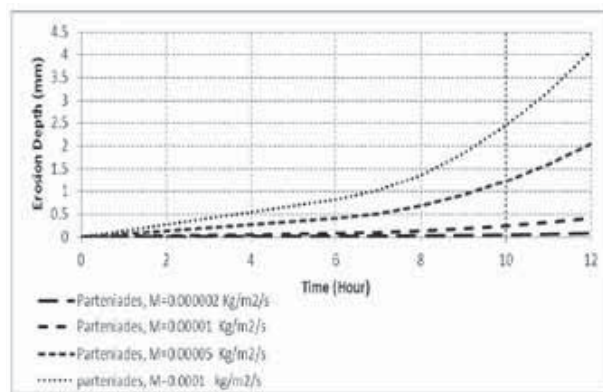
در شکل (۱۷) نتایج آزمایش‌ها برای دوره‌های تحکیم یک روزه و هفت روزه با مدل پارتنیادس با ضریب نرخ فرسایش معادل 2×10^{-6} کیلوگرم بر مترمربع بر ثانیه، تنش برشی بحرانی معادل $0/1$ پاسکال و n مساوی یک مقایسه شده است. در شکل (۱۸) نتایج خود مدل پارتنیادس را برای شرایط ذکر شده ولیکن برای ضرایب مختلف نرخ فرسایش نشان داده شده است. از نظر مقدار عمق فرسایش، مدل پارتنیادس مقداری معادل $1/5$ تا $3/5$ برابر مقدار واقعی را برآورد می‌نماید. ملاحظه می‌شود که مدل به ضریب نرخ فرسایش نیز حساس می‌باشد.

در شکل (۱۹) دوباره نتایج آزمایش‌ها با مدل پارتنیادس ولیکن با اختصاص ضریب نرخ فرسایش معادل 2×10^{-6} کیلوگرم بر مترمربع بر ثانیه، n معادل دو و تنش برشی بحرانی معادل $0/1$ پاسکال مقایسه شده است. شکل (۲۰) نیز نتایج خود مدل را برای شرایط پیش گفته ولی با ضرایب مختلف نرخ فرسایش نشان می‌دهد. از نظر مقدار عمق فرسایش نیز، مدل پارتنیادس در این شرایط، مقداری معادل 4 تا 7 برابر مقدار واقعی را برآورد می‌نماید. ملاحظه می‌شود که مدل به ضریب نرخ فرسایش نیز بسیار حساس می‌باشد. به طور

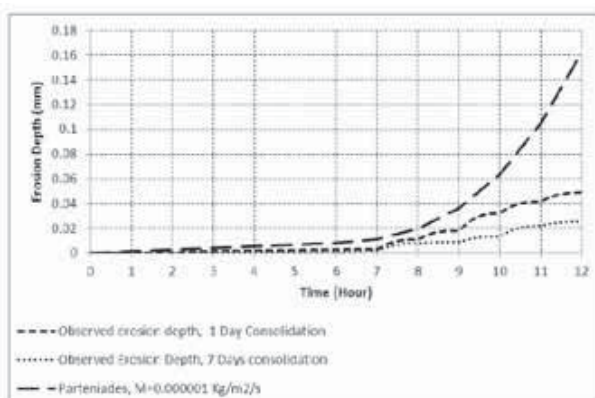
$$1 - H(x) = \begin{cases} 0 & x < 1 \\ x & x \geq 1 \end{cases}$$

تعادلی ندارد.

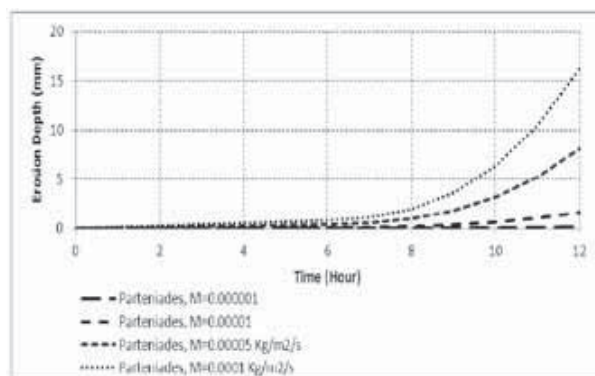
مدل فوق متغیرهایی دارد که با استفاده از تجربیات آزمایشگاهی، آزمایشهای در محل و یا داده‌های مشاهداتی بزرگ مقیاس به صورت تجربی برآورد می‌شوند. هر چند که تفسیر این داده‌ها اغلب ذهنی می‌باشند و نتایج این تفاسیر اغلب مختص پیکره‌بندی فیزیکی و



شکل ۱۸ - مقایسه نتایج مدل پارتنیادس با $n=1$ برای مقادیر مختلف M و مقدار ثابت $\tau_{cr}=0/1\text{Pacal}$



شکل ۱۹ - مقایسه نتایج آزمایش‌ها برای دوره‌های تحکیم یک و هفت روزه و مدل پارتنیادس برای $n=2$ و $\tau_{cr}=0/1\text{Pacal}$ و کمترین مقدار M



شکل ۲۰ - مقایسه نتایج مدل پارتنیادس با $n=2$ برای مقادیر مختلف M و مقدار ثابت $\tau_{cr}=0/1\text{Pacal}$

پیشینه زمانی روش بکار برده شده می‌باشد. برای مثال، بعضی پژوهشگران τ_{cr} را تنش می‌دانند که توسط آن (کمترین) آغاز حرکت اتفاق می‌افتد، بعضی دیگر آن را تنش می‌دانند که توسط آن در ابتدا فرسایش قابل ملاحظه‌ای اتفاق می‌افتد. بعضی دیگر نیز این تنش را نتیجه برون‌یابی داده‌های نرخ فرسایش در مقابل تنش در نرخ فرسایش صفر می‌دانند. به طور مشابه، متغیر M را نیز در یک تنش برشی اعمال شده معین، می‌توان به طرق زیادی تعریف کرد. بعضی آن را به صورت نرخ فرسایش اولیه بعد از اعمال یک تنش جدید تعریف می‌نمایند، بعضی آن را به صورت نرخ فرسایش بعد از گذشت مقداری از دوره بازخورد اولیه می‌دانند و برخی دیگر نیز آن را به صورت نرخ فرسایش متوسط در طی دوره اعمال تنش تعریف می‌نمایند. این تفاوت در تعریف‌ها، حتی زمانی که آزمایش‌ها با رسوبات یکسانی نیز انجام شود، به تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای بین متغیرهای استخراج شده منجر می‌شود. عدم توافق عمومی روی تشریح مبانی ریاضی و نبود اجماع بر سر روش تعیین متغیرهای تجربی، ناشی از عدم درک صحیح از فیزیک پدیده می‌باشد. [۵]

ارزیابی مدل گوینداراجو و همکاران

گوینداراجو و همکاران [۱۰] فرمول زیر را پیشنهاد کرده‌اند:

$$E = M \left(\frac{\tau_b - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \right) \quad \text{with} \quad \tau_{cr} = \alpha \rho_d \beta \quad (2)$$

در این فرمول، ρ_d چگالی خشک و α و β ضرائب تجربی به دست آمده از تجربیات آزمایشگاهی می‌باشند. بر اساس پیشنهاد اون^۱ [۱۶]: $\alpha = 6.85 \times 10^{-6}$ و $\beta = 2.4$ و بر پایه پیشنهاد تورن - پارسون^۲ [۱۷]: $\alpha = 8.42 \times 10^{-6}$ و $\beta = 2.28$.

در این مدل برای تنش برشی بحرانی رابطه‌ای فیزیکی در نظر گرفته شده و به چگالی خشک مرتبط شده است ولی در آن ضریب فرسایش مبهم M ، هنوز وجود دارد. به طور کلی، اگرچه که تعداد ضرائب از دو به سه افزایش یافته، اما تنش برشی بحرانی به صورت تابعی از ویژگی بنیانی‌تری از بستر یعنی چگالی خشک بیان شده است.

لازم به ذکر است که بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، چگالی خشک متوسط بستر با دوره تحکیم یک روزه معادل ۶۷ کیلوگرم بر متر مکعب و با دوره تحکیم هفت روزه معادل ۷۴ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نتایج آزمایش‌ها برای دوره‌های تحکیم یک روزه و هفت روزه با مدل گوینداراجو با ضریب نرخ فرسایش معادل 10^{-5} کیلوگرم بر مترمربع بر ثانیه، ضرائب پیشنهادی اون و تورن - پارسون مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که در مدل گوینداراجو، وابستگی زمانی لحاظ می‌شود و بر خلاف مدل پارتنیادس، نتایج محاسبات این مدل برای دوره تحکیم

1 - Owen

2 - Thorn & Parson

یک روزه و هفت روزه با هم متفاوت است. و لیکن، شکلها نشان می دهند که مدل گوینداراجو نیز مشابه مدل پارتیادس، ابتدا تمایلی به ایجاد موقعیت تعادلی ندارد. برآوردهای سه برابری عمق فرسایش با ضرایب اون و هفت برابری با ضراب تورن نیز قابل تامل می باشد. در شکل (۲۳) نتایج مدل گوینداراجو برای دوره تحکیم یک روزه و لیکن برای ضرایب مختلف پیشنهادی نشان داده شده است. در شکل (۲۴) نیز نتایج مدل برای دوره تحکیم هفت روزه با ضرایب مختلف پیشنهادی نشان داده شده است. از دو شکل مذکور می توان نتیجه گرفت که مدل با ضرایب اون نتایج مناسب تری ارایه می نماید. هر چند که این مدل نیز مانند مدل پارتیادس، به دلیل نداشتن انعطاف و دقت کافی به طور کلی از منظر این پژوهش از دقت و صحت کافی برخوردار نمی باشد.

۳-۳- ارزیابی مدل وینترورپ - ون کیسترن

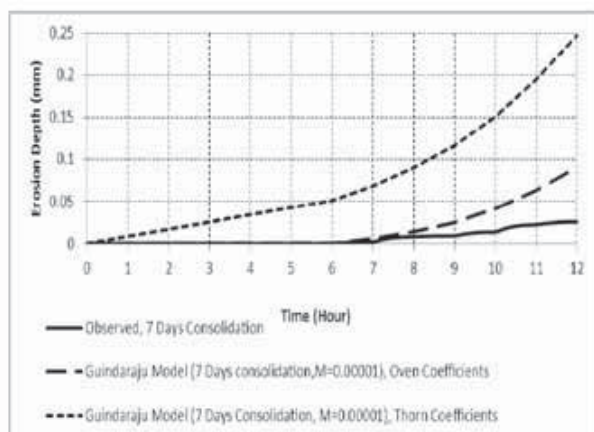
وینترورپ - ون کیسترن [۵ و ۷] مدلی را برای فرسایش سطحی و با در نظر گرفتن تورم رسوب بستر به صورت زیر استخراج کردند:

$$E = M(\tau_b - \tau_{cr})\rho_{dry} \quad \text{رابطه (۳)}$$

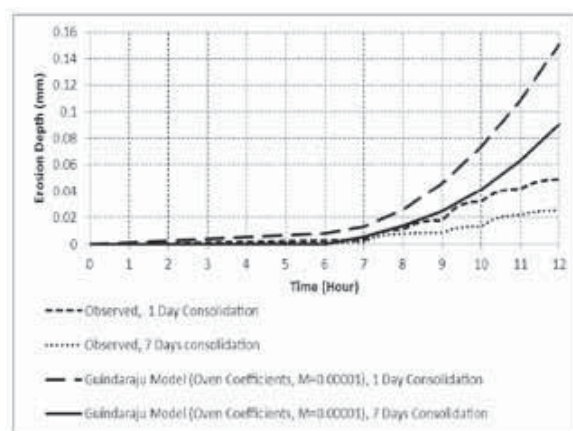
که در آن

$$M = \frac{(c_v \times \phi_s)}{(10 \times d_{50f} \times c_u)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

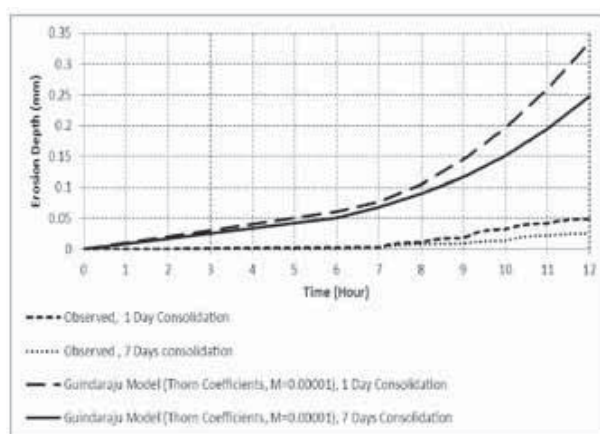
در این روابط، c_v ضریب تحکیم و یا ضریب استهلاک فشار آب منفذی ϕ_s غلظت حجمی در حالت ژله ای، d_{50f} اندازه ذرات رسوب لخته شده c_u مقاومت برشی زهکشی نشده بستر و P نمایانه خمیری رسوبات می باشد. این عامل های فیزیکی و مکانیکی رسوبات بستر اندازه گیری و برآورد شده اند و نتایج در قسمت مواد و روش ها در جدول (۴) نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، در این رابطه برای عامل ضریب نرخ فرسایش رابطه ای بر مبنای تورم



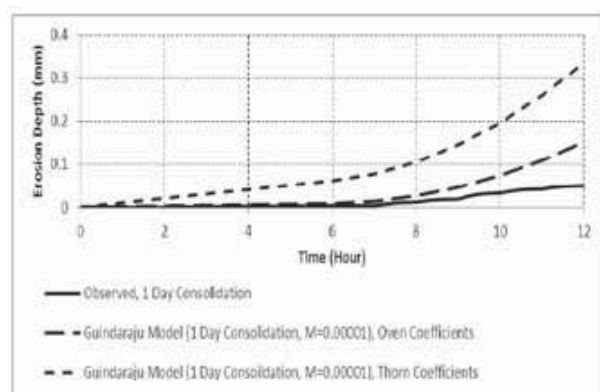
شکل ۲۴ - مقایسه نتایج مدل گوینداراجو برای ضرایب پیشنهادی مختلف و دوره تحکیم هفت روزه



شکل ۲۱- مقایسه نتایج آزمایش ها با نتایج مدل گوینداراجو برای دوره های تحکیم یک و هفت روزه با ضرایب پیشنهادی اون [۱۶]



شکل ۲۲- مقایسه نتایج آزمایش ها با نتایج مدل گوینداراجو برای دوره های تحکیم یک و هفت روزه با ضرایب پیشنهادی تورن و پارسون [۱۷]



شکل ۲۳ - مقایسه نتایج مدل گوینداراجو برای ضرایب پیشنهادی مختلف و دوره تحکیم یک روزه

بستر پیشنهاد شده است و می‌توان گفت که از دو مدل قبلی کامل‌تر بوده و از مبنای فیزیکی و بنیادی قوی‌تری بهره‌مند می‌باشد. برای تنش برشی بحرانی نیز پیشنهاد شده که از رابطه اسمردون و بیزلی [۱۸] استفاده شود که به دلیل استفاده این رابطه از نمایانه خمیری برای رودخانه‌ای ویژه و برگرفته از نتایج آزمایشگاهی محدود، به طور کلی قابل کاربرد نمی‌باشد.

نتایج آزمایش‌ها و نتایج مدل در شکل‌های (۲۵) و (۲۶) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که بر خلاف دو مدل قبلی عمق فرسایش محاسبه شده کمتر از مشاهدات است و لیکن به لحاظ تشابه رفتاری مشابه مدل‌های قبلی می‌باشد.

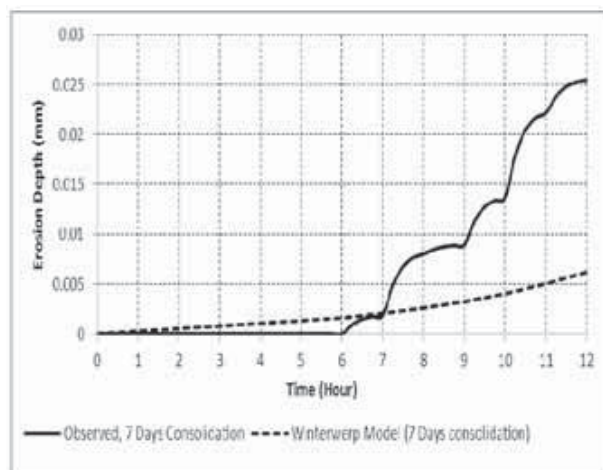
نتیجه‌گیری و پیشنهادات

سه مدل فرسایش بستر چسبنده مشتمل بر مدل‌های پارتیادس، گویندراجو و ویتروپ-ون کیسترن در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

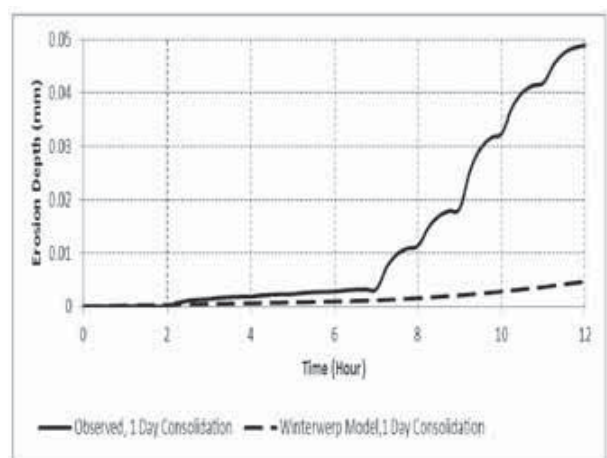
آزمایش‌ها روی آب و رسوبات بستر مخزن سد سفید رود و در یک فلوم مستقیم مجهز به دستگاه اختلاط رسوب، سامانه گردشی رسوب و تنظیم دبی انجام شده است. به منظور انجام آزمایش‌های فرسایش روی نمونه‌های رسوبی در ابتدا نسبت به آماده‌سازی بستر برای دوره‌های تحکیم یک روزه و هفت روزه اقدام شده و بعد از آماده‌سازی بستر برای هر دوره تحکیم، آزمایش‌های فرسایش برای دوره‌های مختلف تحکیم انجام شده‌اند. برای ارزیابی اثر تحکیم بر مقاومت فرسایشی، بستر پس از تحکیم یک روزه و هفت روزه در معرض یک سری متوالی از تنش‌های برشی بستر با افزایش پلکانی قرار گرفته و با کمک دستگاه کدورت‌سنج واسنجی شده نیز، به‌طور مرتب غلظت رسوبات معلق ورودی اندازه‌گیری شده است. مشاهده شده که بلافاصله بعد از افزایش پلکانی تنش برشی بستر، غلظت

رسوبات معلق و یا نرخ فرسایش خیلی زیاد است ولی بعد از مدتی کوتاه غلظت رسوبات به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. این رفتار را می‌توان به طور تقریب با یک تابع استهلاکی نمایی با مقیاس زمانی باتقريب یک ساعت تشریح کرد. مدت زمان آزمایش‌ها برای هر دوره تحکیم دوازده ساعت بوده است.

در مدل پارتیادس، گذشت زمان تأثیری در نتایج نداشته و نتایج مدل برای دوره تحکیم یک روزه و هفت روزه تفاوتی ندارد. علاوه بر آن، علیرغم اینکه این مدل برای بسترهای تحکیم یافته توصیه شده، مقادیر محاسبه شده نرخ فرسایش بر خلاف انتظار بسیار بیشتر از نرخ فرسایش مشاهده شده حتی برای دوره تحکیم یک روزه می‌باشد. در این مدل هیچ تمایلی به نیل به یک موقعیت تعادلی نیست. به عبارتی دیگر تا زمانی که ضخامت عمق بستر اجازه دهد، کماکان نرخ فرسایش سیر صعودی خود را تا زمان رسیدن به سنگ کف، طی خواهد کرد. در صورتی که مشاهدات خلاف این روند را نشان می‌دهند و بیانگر این واقعیت می‌باشد که نرخ و یا عمق فرسایش حالت تعادلی داشته و ممکن است با گذشت زمان به نقطه‌ای رسید که به رغم حضور تنش برشی، نرخ افزایش عمق فرسایش بسیار کند شود. برای رفع این نقیصه، اخیراً رویکردی موسوم به فرسایش بالقوه به مدل پارتیادس ضمیمه شده است [۵] با این رویکرد، نرخ فرسایش را می‌توان در یک مرحله معین از فرسایش به صفر نزدیک نمود. بنابراین، خطوط تیز ناگهان به خطوط افقی تمایل پیدا می‌نمایند. این کار برآورد دست پائینی را از فرسایش بعد از یک دوره زمانی طولانی ارائه می‌دهد، در صورتی که در آزمایش‌های فرسایش، نرخ فرسایش در دوره طولانی صفر نمی‌شود. در این مدل، ضریب نرخ فرسایش و تنش برشی بحرانی عامل‌های مبهم و نامشخصی بوده و دارای مفهوم فیزیکی نمی‌باشند و به عامل‌های فیزیکی نیز به نحوی مرتبط نشده‌اند.



شکل ۲۶- مقایسه مشاهدات با مدل ویتروپ-ون کیسترن برای دوره تحکیم هفت روزه



شکل ۲۵- مقایسه مشاهدات با مدل ویتروپ-ون کیسترن برای دوره تحکیم یک روزه

deposition of cohesive soils in salt Water, Ph.D thesis, University of California, Berkeley

3- Partheniades, E, 1965, Erosion and deposition of cohesive soils, Journal of the Hydraulics Divisions, Proceedings of the ASCE, vol. 91, no, HY1, January, pp.105-139

4- Ariathurai, C.R.1974, A finite element model for sediment transport in estuaries, Ph.d thesis, University of California, Davis

5- Winterwerp, J.C. and Van Kesteren, W.G.M., 2009. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment. Elsevier, Developments in sedimentology

6- Umesh C. Kothiyari and Rajesh K. Jain., 2010. Erosion characteristics of cohesive sediment mixtures, River Flow 2010-Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (eds)- ISBN 978-3-939230-00-7

7- Ahmad, M.F., Dong, P., Mamat, M., Wan Nik, W.B., Mohd, M.H. 2011, The Critical Shear stresses for Sand and Mud Mixture, Applied Mathematical Sciences, Vol. 5, 53-71

8- Mehta, A. J., E. J. Hayter, R. B. Krone, & A. M. Teeter, 1989. Cohesive sediment transport. I: Process Description. J. Hydr. Eng., 115(8), 1076-1093. Report 25, Rijkswaterstaat & WL| Delft Hydraulics

9- Van Kesteren, W.G.M., J.M. Cornelisse and C. Kuijper, 1997, DYNASTAR BED MODEL: bed strength, liquefaction and erosion, Rijkswaterstaat and WLdelft hydraulics, Cohesive Sediments, Report No 55.

10- Govindaraju, R.S., S. Ramireddygar, P. Shresta, L. Roig, 1999. Continuum bed model for estuarine sediments based on non- linear consolidation theory. Journal of Hydraulic Engineering, March 1999, 300-3041.

11- Jones, C. and W. Lick, may 2001. SEDZLJ sediment transport model. Department of mechanical and environmental engineering, University of California.

12- Sanford, L.P., J.P., Y. Maa, 2001. A unified erosion formulation for fine sediments. Marine Geology , 9-2

13- Lick, W., J. McNeil, 2001. Effects of sediment bulk properties on erosion rates. The Science of the

مقایسه مشاهدات و نتایج مدل گوینداراجو نشان داده که رفتار و مقدار عمق و یا نرخ فرسایش به دست آمده از مدل مشابه مدل پارتینیادس غیر واقعی بوده است. هر چند که مدل با توجه به وابستگی به عامل فیزیکی چگالی خشک، از قابلیت تفکیک نتایج برای دوره‌های مختلف تحکیم برخوردار شده است.

مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی و مدل وینترورپ- ون کسترن نشان داده که بر خلاف دو مدل قبلی مقادیر به دست آمده کمتر از مقادیر مشاهده‌ای است و لیکن به مشاهدات نزدیکتر است و تفاوت‌های مقداری شاید به دلیل دقت در اندازه‌گیری عامل فیزیکی و مکانیکی این مدل باشد. این مدل نیز مانند مدل گوینداراجو دارای قابلیت تفکیک برای دوره‌های مختلف تحکیم می‌باشد و لیکن به لحاظ رفتاری، مشابه دو مدل قبل، رفتاری مغایر با رفتار واقعی دارد. دلیل این امر نیز تعریف نشدن تغییرات مکانی و زمانی برای عامل‌های فیزیکی و مکانیکی منظور شده به ویژه عامل چگالی خشک می‌باشد.

جمع‌بندی اینکه، هیچیک از مدل‌های مذکور که به طور گسترده‌ای از آنها استفاده می‌شود، پاسخگوی نیازهای مدل‌های کیفیت آب نمی‌باشند و قادر به شبیه‌سازی تغییرات زمانی گل آلودگی و حداکثر فلاکس‌های رسوبی نیستند و نه تنها از نظر مقدار بلکه به لحاظ رفتاری نیز با مشاهدات آزمایشگاهی تفاوت‌های قابل توجهی دارند. علت این موضوع هم نداشتن ساختار فیزیکی مناسب و منظور نکردن زیر مدل‌های تکمیلی برای اعمال تغییرات این عامل‌ها نسبت به زمان در کوتاه مدت و بلند مدت و همچنین نسبت به عمق می‌باشد.

با توجه به نتایج آزمایش‌های این پژوهش، چنانچه بتوان تنش برشی بحرانی را به صورتی نظام‌مند تعریف نمود و آن را به نحوی به مقاومت برشی بستر مرتبط کرد، تاثیر زمان و عمق بر فرسایش شبیه‌سازی خواهد شد. چرا که مقاومت برشی به صورت تابعی از عامل فیزیکی چگالی خشک قابل تعریف است که نسبت به عمق و زمان تغییراتی قابل پیش‌بینی دارد و ممکن است بتوان از رابطه تحکیم به راهکارهایی برای فرموله کردن این عامل دست یافت. قابل ذکر است که مقاومت برشی به چسبندگی و رشد مکانی و زمانی آن نیز ارتباط دارد که هنوز سازوکار تغییرات آن به خوبی شناخته نشده است. عامل‌های فیزیکی مربوط به فرسایش گل روان مانند غلظت ژله‌ای و سرعت اختلاط و عدد ریچاردسون را نیز می‌توان با تمهیداتی جایگزین ضریب نرخ فرسایش نمود. به منظور واقعی‌تر کردن توزیع تنش برشی جریان در نزدیکی بستر نیز باید در پی تابعی ساده احتمالاتی بود که ضمن داشتن حداقل ضرایب تجربی بتواند مقدار واقعی تر از تنش‌های بزرگتر از تنش برشی بحرانی را ارائه نماید.

منابع

1- Shafai Bajestan, M., 1387, Basic Theory and Practice of Hydraulics of Sediment Transport, Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian)

2- Partheniades, E, 1962, A study of erosion and

17- Thorn, M.F.C., Parsons, J.G., 1980. Erosion and cohesive sediments. Conf. on Utilization of Tidal Power, Halifax, Canada Dept. Energy, Mines and Resources, 36 p. in estuaries: an engineering guide. Proc. Third Int. Symp. Dredging Technology, Bordeaux, 5-7 March 1980, pp. 349-358.

18- Smerdon, E.T., and Beasley, R.P. (1961). Critical tractive forces in cohesive soils, Agricultural Engineering, 42(1), pp 26-29

Total Environment 266 (2001), 41-48.

14- Winterwerp, J.C. and Van Kesteren, W.G.M., Van Prooijen, B., Jacobs, W., 2012, A conceptual framework for shear flow-induced erosion of soft cohesive sediment beds, Journal of geophysical research, Vol. 117, c10020.

15- Winterwerp, J.C. 1989. Flow induced erosion of cohesive beds. Cohesive sediments series report 25, Rijkswaterstaat & WL| Delft Hydraulics

16- Owen, M.W., and Odd, N.V.M., 1970, A mathematical model of a tidal barrier on siltation in an estuary: International. Conf. on Utilization of Tidal Power, Halifax, Canada Dept. Energy, Mines and Resources, 36 P.