



بررسی غلظت تعادلی رسوبات چسبنده در تنش‌های برشی مختلف با استفاده از فلوم دوار

میلاذ خواستار بروجنی^۱، حسین صمدی^۲، کاظم اسماعیلی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی آب و رئیس مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد

۳- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

Khastar1365@yahoo.com

خلاصه

این تحقیق در فلوم دوار آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد و با استفاده از رسوبات مخزن سد خاکی پیر بلوط انجام پذیرفت. در این مطالعه خصوصیات ته‌نشینی رسوبات برای سه تنش برشی با غلظت اولیه متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد غلظت رسوبات معلق با گذشت زمان کاهش می‌یابد و این کاهش تا رسیدن به یک مقدار یکنواخت ادامه دارد. نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه $(\frac{C_{eq}}{C_0})$ برای غلظت‌های مختلف تقریباً یکسان است. در این پژوهش برای تنش برشی $\frac{N}{m^2}$ ۰/۱۳ نسبت $\frac{C_{eq}}{C_0}$ برای غلظت‌های اولیه ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر به ترتیب ۰/۳۴۳، ۰/۳۱۳ و ۰/۳۴۳ بدست آمد. همین نتایج برای تنش برشی $\frac{N}{m^2}$ ۰/۳۲ به ترتیب ۰/۶۷۸، ۰/۶۰۱ و ۰/۶۸۰ و برای تنش برشی $\frac{N}{m^2}$ ۰/۶۵ به ترتیب ۰/۸۶۱، ۰/۸۸۰ و ۰/۸۵۸ بدست آمد. براساس یافته‌های این تحقیق، تنش برشی آستانه شروع ته‌نشینی برابر $\frac{N}{m^2}$ ۱/۰۱ بدست می‌آید.

کلمات کلیدی: نرخ ته‌نشینی، غلظت تعادلی، تنش برشی بستر، سرعت سنج صوتی

۱. مقدمه

رسوبات چسبنده شامل مواد آلی و غیر آلی و آب می‌باشد. مواد آلی شامل موجودات زنده و غیره زنده از قبیل باکتری‌ها، موجودات آبزی (جلبک‌ها، قارچ‌ها) و مواد ته‌نشینی می‌باشد. قسمت غیر آلی رسوبات را کوارتز، مینرال‌های رسی، کلسیت (سنگ آهک بلوری)، هیدروکسید (OH)، سیلیکات‌ها و دیگر مواد تشکیل می‌دهد (دانکرز، ۲۰۰۲). ذرات ریز (مینرال‌های رسی) مهم‌ترین عامل در چسبندگی رسوبات ریزدانه می‌باشند، اگرچه مواد ارگانیک نیز می‌توانند در چسبندگی رسوبات ریزدانه تاثیر گذار باشند (تورف و همکاران، ۲۰۰۳). رسوبات چسبنده تمایل به انتقال به صورت توده‌ای (فلوک) و جمعی دارند. این توده‌ها یک قالب پیچیده از یک اجتماع ریز (میکروبی) می‌باشد که دارای رفتار مختص به خود و فعل و انفعالات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژی است. واکنش پذیری و حفره‌های نسبتاً زیاد آن‌ها برای جذب و پراکنده کردن آلاینده‌های ستون آب مهم می‌باشد (میلبورن و کریشناپان، ۲۰۰۱).

ته‌نشینی رسوبات زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی کف کمتر از تنش برشی بحرانی باشد. فقط توده‌هایی که دارای نیروی کافی جهت مقابله در برابر تنش‌های قوی در نزدیکی بستر را دارند، ته‌نشین خواهند شد. معمولاً تنش برشی که کل رسوبات معلق ته‌نشین شوند، به عنوان تنش برشی بحرانی برای ته‌نشینی تعریف می‌گردد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶، میلبورن و کریشناپان، ۲۰۰۱). به طور کلی دو نوع ته‌نشینی کامل و جزئی، برای رسوب چسبنده تعریف می‌شود. وقتی که تنش برشی کف (τ) کوچک‌تر از تنش برشی بحرانی است، ته‌نشینی کامل $(\tau_{d,full})$ ، صورت می‌گیرد و تمام ذرات رسوبی و توده‌ها ته‌نشین می‌شوند. رابطه زیر موسوم به رابطه ته‌نشینی کرون (۱۹۶۲) می‌باشد که به عنوان یکی از روابط پایه برای محاسبه نرخ ته‌نشینی است و در بیشتر مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$Q_d = P_d \omega c, \text{ for } \tau \leq \tau_{d,full} \quad (1)$$

Q_d : دبی رسوب ته نشینی، P_d : احتمال ته نشینی رسوب

متغیر P_d احتمالی از چسبیدن ذرات به بستر هستند که همراه با جریان جابه جا نمی شوند. بخشی از این رسوبات چسبیده در ناحیه نزدیک بستر نمی تواند در برابر تنش برشی بزرگ در ناحیه مشترک آب و بستر مقاومت کند و به سمت بالا حرکت کرده و به صورت معلق در می آید. احتمال ته نشینی از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$P_d = \frac{1-\tau}{\tau_{d,full}}, \text{ for } \tau \leq \tau_{d,full} \quad (2)$$

τ : تنش برشی کف، $\tau_{d,full}$: تنش برشی کامل برای ته نشینی کامل

۲. مواد و روش ها

جهت انجام تحقیق حاضر، رسوبات از بستر خشک مخزن سد خاکی پیر بلوط تهیه شد. سد پیر بلوط در ۲۰ کیلومتری جنوب غرب شهر کرد و با مختصات جغرافیایی $x=4713116$, $y=3586402$ واقع شده است. به منظور تحقیق در زمینه رسوبات چسبیده، بافت خاک نمونه رسوب برداشت شده، اصلاح شد. بر این اساس ابتدا رسوبات را در آب حل و توسط همزن برقی مخلوط نموده و سپس از الک دارای اندازه روزنه 0.075 میلی متر (الک شماره ۲۰۰) عبور داده و پس از خشک کردن در آون، در آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفت. رسوبات اصلاح شده مورد استفاده شامل $63/2$ درصد رس و $36/8$ درصد سیلت بود.

۱-۲ فلوم آزمایشگاهی

فلوم دوار موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهر کرد از ورق گالوانیزه با پنجره های پلکسی گلس با عرض 30 و ارتفاع 47 سانتی متر ساخته شده است. قطر داخلی، خارجی و متوسط این فلوم به ترتیب $1/3$ ، $1/9$ و $1/6$ متر می باشد. درپوشی از جنس پلکسی گلس با قطر $1/6$ متر در داخل فلوم طراحی شده که از دیواره های فلوم دو سانتی متر فاصله دارد. به منظور سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب، 16 عدد شیر نمونه گیری در چهار موقعیت مختلف فلوم و در فواصل $5/3$ ، $10/5$ ، $18/3$ و 25 سانتی متر از کف تعبیه شده است. شکل (۱) فلوم دوار دانشگاه شهر کرد را نشان می دهد.



شکل (۱): فلوم دوار دانشگاه شهر کرد



فلوم دارای دو الکتروموتور مجزا برای چرخش فلوم و درپوش می باشد که قابلیت حرکت در جهت های مختلف و خلاف یکدیگر را فراهم نموده است. چرخش فلوم با استفاده از یک الکتروموتور با توان ۱/۵ کیلووات و حداکثر سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و یک گیربکس افقی به عمودی انجام می پذیرد. با استفاده از زنجیر فولادی و چرخ دنده، نیروی گیربکس به حرکت دورانی فلوم تبدیل می شود. برای چرخاندن درپوش از یک الکتروموتور با توان ۰/۳۷ کیلووات و حداکثر سرعت ۱۳۴۰ دور بر دقیقه و یک گیربکس افقی به عمودی استفاده شده است. درپوش پلکسی گلس به یک قطعه منشوری شکل (با قاعده مربع) که در مرکز خود توسط یک شفت به گیربکس بالا متصل شده است به حرکت در می آید. درپوش توانایی قرار گرفتن در موقعیت های مختلف نسبت به فلوم را دارد و در مواقع پر کردن و یا تخلیه کردن فلوم می تواند به طور کامل از فلوم جدا شود.

۲-۲ سرعت سنج صوتی (ADV)

در تحقیق حاضر از دستگاه ADV مدل Vectrino+ ساخت شرکت Nortek نروژ استفاده شده است. این دستگاه سرعت آب را بر اساس پدیده داپلر اندازه گیری می کند. دستگاه شامل چهار گیرنده و یک فرستنده است که در هنگام اندازه گیری سرعت حتما باید در داخل آب قرار داشته باشند. همچنین دستگاه دارای سنسور دما (در کنار سنسور فرستنده) برای اندازه گیری خودکار دمای آب می باشد. به منظور استفاده از سرعت سنج ابزاری تهیه شد که قابلیت حرکت دستگاه را در عرض و عمق فلوم فراهم می نماید.

از آنجا که سرعت برای هر نقطه از میانگین گیری تعداد زیادی سرعت بدست می آید، خطای اندازه گیری ها را کاهش می دهد. در تحقیق حاضر اندازه گیری ها با فرکانس ۲۰۰ Hz و در ۱ دقیقه صورت گرفته است، بنابراین سرعت متوسط نقطه ای (u, v, w) از میانگین $12000 = 60 \times 200$ سرعت لحظه ای برای هر نقطه به صورت زیر محاسبه می شود.

$$u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (3)$$

در اینجا N برابر با ۱۲۰۰۰ می باشد.

۳-۲ طراحی آزمایش ها

آزمایش ها در سه غلظت ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر، تحت سه تنش برشی ۰/۱۳، ۰/۳۲ و ۰/۶۵ نیوتن بر مترمربع (مجموع دور فلوم و درپوش به ترتیب ۲/۴، ۴/۲ و ۶/۲ دور) انجام پذیرفت. در ابتدای کار با استفاده از سرعت سنج صوتی (ADV) توزیع سرعت عمودی و توزیع تنش برشی اندازه گیری شد و براین اساس روابط بین پارامترهای هیدرولیکی و سرعت چرخش فلوم به دست آمد و مشخص شد که برای عمق ۲۰ سانتی متر (عمق آزمایش) در صورتی که نسبت دور درپوش به فلوم $(\frac{N_f}{N_r})$ ، ۱/۱ باشد، توزیع تنش برشی در عرض فلوم یکنواخت خواهد بود. سپس محلول رسوب با غلظت های اولیه مورد نظر به روش وزنی تهیه و تا ارتفاع ۲۰ سانتی متر در فلوم ریخته شد. برای کامل مخلوط شدن آب رسوب، فلوم و درپوش را با بیشترین سرعت (مجموع دور فلوم و درپوش ۳۱ دور بر دقیقه)، که تنش برشی برابر با $\frac{N}{m^2}$ ایجاد می کند، در جهت مخالف به مدت ۳۰ دقیقه به چرخش در آمد. بر اساس کارهای کروون (۱۹۶۳)، در تنش برشی $\frac{N}{m^2}$ ، ۲/۲ هیچ فلوکی در مقابل تنش برشی جریان مقاومت نکرده و تمام ذرات از یکدیگر مجزا خواهند شد (به نقل از صمدی، ۱۳۸۹). کریشناپان (۲۰۰۶)، کتی و همکاران (۲۰۰۳)، اسکافیل و کریشناپان (۱۹۹۸) و... در تحقیقات خود پیرامون رسوبات ریزدانه با استفاده از فلوم دوار دریافتند که با چرخش فلوم و درپوش با بیشترین سرعت (حداکثر تنش برشی) زمان ۲۰ دقیقه برای معلق شدن کامل رسوبات کافی است. پس از اتمام این زمان سرعت چرخش فلوم و درپوش تا رسیدن به سرعت مورد نظر آزمایش کاهش یافت و هر آزمایش ۲۴۰ دقیقه به طول انجامید. در یک ساعت اول هر ۱۵ دقیقه یکبار و بعد از آن هر ۳۰ دقیقه یکبار نمونه گیری شد. در هر زمان از سه عمق ۵/۵، ۱۰/۳ و ۱۸/۳ نمونه گیری بعمل آمد و بعد از خشک کردن نمونه ها در آون، غلظت به روش وزنی محاسبه شد.

۳. بحث و نتیجه گیری

۱-۳ پارامترهای هیدرولیکی

برای محاسبه سرعت متوسط جریان، اندازه گیری سرعت در پنج مقطع عمودی انجام شد. اولین مقطع در پنج سانتی متری از دیوار داخلی است و با همین فاصله نسبت به سمت دیواره خارجی حرکت داده شد. بر اساس تحلیل نتایج رابطه زیر بین مجموع دور فلوم و درپوش و سرعت متوسط جریان به دست آمد.

$$V = 0.2085 \ln(x) - 0.0556 \quad R^2 = 0.98 \quad (4)$$

در رابطه فوق V : سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، ω : مجموع سرعت چرخشی فلوم و درپوش (دور بر دقیقه)

در تعیین تنش برشی از کواریانس سرعت های لحظه ای استفاده شد و تنش برشی در این آزمایش به دست آمد و رابطه بین مجموع دور فلوم و درپوش و تنش برشی کف بدست آمد.

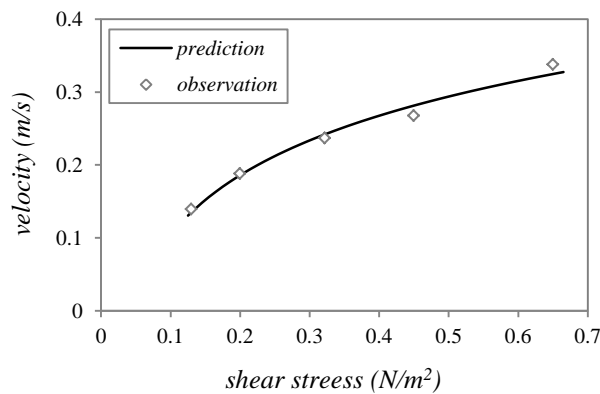
$$\tau = 0.0256 \omega^{1.7715} \quad R^2 = 0.99 \quad (5)$$

در رابطه فوق τ : تنش برشی متوسط جریان (N/m^2)، ω : مجموع سرعت چرخشی فلوم و درپوش (دور بر دقیقه)

رابطه بین سرعت متوسط جریان و تنش برشی به صورت زیر برقرار می باشد.

$$\tau = 0.1217 \ln(V) + 0.3919 \quad R^2 = 0.99 \quad (6)$$

در شکل زیر رابطه بین تنش برشی جریان و سرعت متوسط ترسیم شده است.

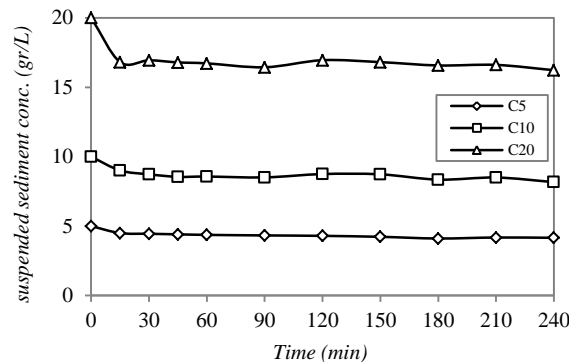


شکل (۲): رابطه بین تنش برشی و سرعت متوسط جریان

۲-۳ ته نشینی رسوبات چسبنده

شکل زیر رفتار ته نشینی رسوبات در تنش برشی ۰/۶۵ با غلظت اولیه متفاوت را نشان می دهد. می توان مشاهده کرد که برای هر سه حالت، در ۱۵ دقیقه از شروع آزمایش، غلظت رسوبات معلق دارای یک افت ناگهانی است و سپس به صورت تدریجی کاهش می یابد. کاهش غلظت رسوبات معلق تا رسیدن به یک حالت یکنواخت ادامه دارد. غلظت در حالت یکنواخت تابعی از تنش برشی بستر می باشد. لازم به ذکر است که برای دیگر تنش های برشی نیز نتایج مشابه حاصل شد.

به بیان دیگر فرآیند ته نشینی ذرات ریزدانه، تحت تنش برشی مخصوص تابعی از میزان رسوبات در ابتدای آزمایش است و برای تنش برشی بزرگ مقدار کمی از رسوبات می توانند ته نشین شوند.



شکل (۳): تغییرات زمانی غلظت رسوبات معلق در غلظت‌های مختلف ($\tau = 0.65 \frac{N}{m^2}$)

از شکل فوق مشخص است که غلظت تعادلی رسوبات معلق تابعی از غلظت اولیه آن‌ها است. این موضوع یکی از تفاوت‌های بارز در رفتار رسوبات چسبنده نسبت به رسوبات غیر چسبنده است. در رسوبات غیر چسبنده، غلظت تعادلی فقط تابعی از تنش برشی بستر است و غلظت اولیه رسوبات بی‌تاثیر است. نظریه وابسته بودن غلظت یکنواخت به غلظت اولیه در رسوبات چسبنده را پارتندیس و کندلی (۱۹۹۶) ارائه دادند. پارتندیس و همکاران (۱۹۶۸) استدلال کردند که در فرآیند ته نشینی رسوبات چسبنده، فقط فلوکوله‌هایی که مقاومت کافی در برابر تنش برشی بزرگ در نزدیکی بستر را دارند می‌توانند ته نشین شوند و فلوک‌های ضعیف‌تر در ناحیه تنش برشی بستر شکسته شده و به صورت معلق باقی می‌مانند. با توجه به استدلال فوق می‌توان نتیجه گرفت که فقط برخی از رسوبات می‌توانند به صورت توده‌های مقاوم باشند، از این رو مقدار باقی مانده تابعی از مقدار رسوبات در ابتدای آزمایش است. در نمونه با غلظت اولیه زیاد مقدار مواد توده‌ای سست بیشتر است، در نتیجه مقدار غلظت تعادلی نیز بیشتر می‌باشد. لازم به ذکر است که در تنش‌های برشی دیگر نیز نتایج یکسان بدست آمد.

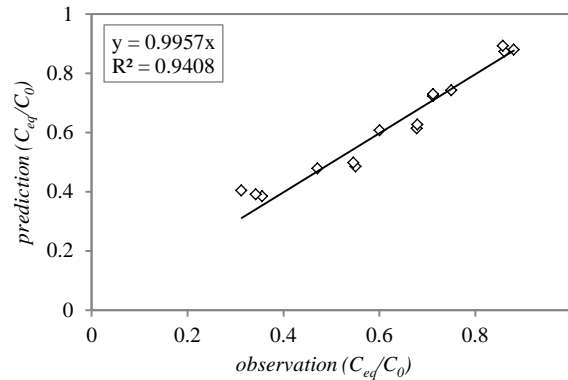
در این آزمایش‌ها مشخص شد که نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه رسوبات ($\frac{C_{eq}}{C_0}$)، تقریباً برابر است. این نسبت برای غلظت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر به ترتیب ۰/۷۱۳، ۰/۷۱۳ و ۰/۷۵۱ به دست آمد. همین نتایج برای تنش برشی $0.32 \frac{N}{m^2}$ به ترتیب ۰/۶۷۸، ۰/۶۰۱ و ۰/۶۸۰ برای تنش برشی $0.65 \frac{N}{m^2}$ به ترتیب ۰/۸۶۱، ۰/۸۸ و ۰/۸۵۸ به دست آمد. این اعداد نشانگر این است که مقدار ته نشینی برای هر غلظت در تنش‌های ۰/۱۳، ۰/۳۲ و ۰/۶۵ نیوتن بر متر مربع به ترتیب ۰/۶۶، ۰/۳۵ و ۰/۱۳ غلظت اولیه آن می‌باشد.

پس از بررسی‌های داده‌های آزمایشگاهی دو رابطه برای تعیین نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه تهیه شد. این نسبت در رابطه اول بر اساس دو متغیر تنش برشی و غلظت اولیه رسوبات برقرار گردید.

$$\frac{C_{eq}}{C_0} = 1.08 \tau^{0.516} + 0.0013C \quad R^2 = 0.94 \quad (7)$$

در رابطه فوق τ : تنش برشی ($\frac{N}{m^2}$) و C : غلظت اولیه رسوبات معلق (گرم بر لیتر)

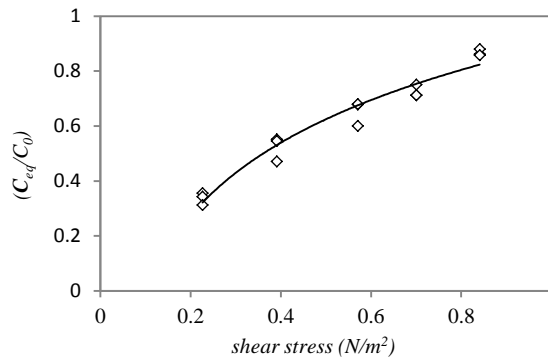
شکل زیر رابطه بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده از رابطه فوق را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود همبستگی بین داده‌ها مناسب است و خطای متوسط بین نتایج ۰/۶۱ بدست آمد.



شکل (۴): رابطه بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج محاسباتی

رابطه (۸) مقدار $\frac{C_{eq}}{C_0}$ را بر اساس تنش برشی بستر نشان می دهد. مقدار خطای متوسط داده های محاسباتی ۴/۳٪ بدست آمد.

$$\frac{C_{eq}}{C_0} = 0.382 \ln(\tau) + 1.0058 \quad R^2 = 0.97 \quad (۸)$$



شکل (۵): رابطه بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج محاسباتی

بر اساس تحلیل تنش های برشی و روابط فوق مقدار تنش برشی آستانه ته نشینی ($\frac{C_{eq}}{C_0} = 1$)، $1/0.1$ نیوتن بر متر مربع بدست آمد.

۴. نتیجه گیری

- به طور کلی بر اساس پژوهش انجام شده نتایج زیر را می توان بیان نمود.
- ۱- در بررسی روند ته نشینی رسوبات چسبنده مشخص شد که در ۱۵ دقیقه ابتدایی غلظت رسوبات معلق دارای یک افت ناگهانی می باشد و سپس به صورت تدریجی تا رسیدن به یک حالت تعادلی کاهش می یابد.
 - ۲- در این تحقیق مشخص شد که نسبت غلظت تعادلی رسوبات به غلظت اولیه برای هر تنش برشی، ثابت است. در بیان دیگر مقدار ته نشینی برای غلظت های مختلف در یک تنش برشی یکسان، تقریباً برابر است.
 - ۳- تنش برشی آستانه برای رسوبات ریزدانه سد پیر بلوط $1/0.1$ نیوتن بر متر مربع بدست آمد.
 - ۴- پس از بررسی های داده های آزمایشگاهی رابطه $\frac{C_{eq}}{C_0} = 1.08 \tau^{0.516} + 0.0013C$ برای تعیین نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه بدست آمد.



- 1- Milburn, D., Krishnappan, B.G. (2001). "Modelling erosion and deposition of cohesive sediment from Hay River, Northwest Territories, Canada", Paper presented at the 13th Northern Res. Basins/Workshop, Aug. 19-24.
- 2- Huang, J., Hilldate, R.C., Greiman, B.P. (2006). "*Erosion and sedimentation manual*". U.S. Department of the interior. United States Bureau of Reclamation.
- ۳- صمدی بروجنی، حسین، مهدی نادری، روح الله فتاحی. (۱۳۸۹)، "بررسی آستانه ته نشینی رسوبات چسبنده معلق با استفاده از مدل آزمایشگاهی فلوم دایره‌ای"، مجله پژوهش آب ایران، دانشگاه شهرکرد، سال چهارم، شماره ۷، بهار و تابستان ۱۳۸۹، صفحات ۷۵ تا ۸۲.
- 4- Krishnappan, B.G. (2006). "Cohesive sediment transport studies using a rotating circular flume", The 7th Int. Conf. on Hydroscience and Engineering (ICHE), Sep10-13, Philadelphia, USA.
- 5- Haralampides, K., McCorquodale, A., Krishnappan, B. G. (2003). "Deposition properties of fine sediment", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE). 129:230-234.
- 6- Skafel, M.G., Krishnappan, B.G. (1998). "a Laboratory investigating of depositional characteristics of mud from an Inland Harbour using a rotating circular flume". Water, Air, and Soil Pollution, 112:1-19.