

# بررسی آزمایشگاهی تنش برشی آستانه شروع فرسایش رسوبات چسبنده ته‌نشین شده با زمان‌های مختلف تحکیم

حسین صمدی بروجنی<sup>۱</sup>، نیما اکبری<sup>۲\*</sup> و بهزاد قربانی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار گروه مهندسی آب و رئیس مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد

۲- نویسنده مسئول، دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه شهرکرد و دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد

[nima.akbari@stu-mail.um.ac.ir](mailto:nima.akbari@stu-mail.um.ac.ir)

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۹۱/۷/۹ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۶

## چکیده

رسوبات چسبنده پس از ته‌نشینی در مخازن سدها، حوضچه‌های رسوبگیر و کانال‌ها، به مرور تحکیم یافته و برای تخلیه هیدرولیکی آنها لازم است سرعت و تنش برشی آستانه فرسایش این نوع رسوبات معلوم باشد. در این تحقیق با استفاده از فلوم دوار آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد، این موضوع مورد بررسی قرار گرفت. رسوبات ریزدانه مورد استفاده در آزمایش‌ها از بستر مخزن سد خاکی پیر بلوط واقع در یکی از سرشاخه‌های حوضه کارون شمالی در استان چهارمحال و بختیاری جمع‌آوری و آزمایش‌های فیزیکی- شیمیایی بر روی آنها انجام گرفت. پنج آزمایش تعیین آستانه فرسایش بر روی رسوبات با مدت زمان تحکیم پنج هفته، سه هفته، دو هفته، یک هفته و سه روز انجام و تنش برشی آستانه فرسایش رسوبات در این آزمایش‌ها توسط دستگاه سرعت سنج ADV اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که تنش برشی آستانه فرسایش این نوع رسوبات با مدت زمان تحکیم آنها رابطه لگاریتمی دارد، این مقدار برای رسوبات سطحی از ۰/۱۲ نیوتن بر مترمربع برای تحکیم سه روزه تا ۰/۱۴ نیوتن بر مترمربع برای رسوبات با تحکیم پنج هفته‌ای تغییر می‌کند، برای رسوبات زیرسطحی این مقدار ۰/۴۴ نیوتن بر مترمربع برای تحکیم سه روزه تا ۰/۶۹ نیوتن بر مترمربع برای رسوبات با تحکیم پنج هفته‌ای به دست آمد. همچنین روابطی برای تعیین سرعت جریان در آستانه فرسایش بر حسب جرم مخصوص و نسبت پوکی رسوبات تعیین شد.

کلید واژه‌ها: رسوبات چسبنده، فلوم دوار، آستانه فرسایش، سرعت سنج ADV.

## Experimental Study of Erosion Threshold Shear Stress of Deposited Cohesive Sediments with Different Self-Weight Consolidation

H. Samadi-Boroujeni<sup>1</sup>, N. Akbari<sup>2\*</sup> and B. Ghorbani<sup>3</sup>

1- Associate Professor, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2- Graduated student Sharekord Univesity and Ph.D. Student of Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

3- Associate Professor, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Received:30 Sep.2012 Accepted:24 Feb. 2013

## Abstract

Cohesive sediments are gradually consolidated after settling in dam reservoirs, settling ponds and channels. For hydraulic flushing of the sediments it's necessary that the erosion threshold velocity and shear stress of these types of sediments to be known. In this study, by using the annular flume in Shahrekord University, this subject was investigated. Fine sediments used in the experiments, were collected from the reservoir bed of Pirbaloot earthfill dam located in north Karun basin, in Chaharmahal and Bakhtiari province. By conducting physicochemical tests the sediments properties were obtained. Five experiments to determine the erosion threshold of cohesive sediments with consolidation of five weeks, three weeks, two weeks, one week and three days was performed and velocity and shear stress of erosion threshold of sediments was measured by the ADV velocimeter. Results showed that erosion threshold of these sediments have a logarithmic relationship with the sediment consolidation time. The amount of

erosion threshold shear stress of sediments for surface sediments were obtained in a range of 0.12 to 0.14 N/m<sup>2</sup> for sediment with difference age of self-weight consolidation. These values for subsurface sediments were obtained at 0.44 and 0.69 N/m<sup>2</sup>, respectively.

**Key words:** Cohesive sediments, Annular flume, Erosion threshold, ADV Velocimeter

### مقدمه

جریان در لحظه آستانه حرکت رسوبات را به ترتیب، تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی جریان می‌گویند. در یک مجرای باز که جریان متلاطم برقرار است، منطقه جریان از سه قسمت متلاطم، بینابینی و لایه مرزی آرام تشکیل شده است. جریان در قسمت لایه مرزی آرام می‌باشد و ذرات سیال در لایه‌هایی به صورت صاف و یکنواخت حرکت می‌کنند. با افزایش ضخامت لایه مرزی، ناپایداری لایه افزایش یافته و نهایتاً به لایه متلاطم جریان تبدیل می‌شود که در آن ذرات سیال در مسیرهای تصادفی حرکت می‌کنند. وقتی که لایه مرزی به لایه متلاطم تبدیل شد، هنوز لایه بسیار نازکی در مجاورت مرز وجود دارد که حرکت جریان در آن آرام است و مقدار و اثر تنش برشی کف به ضخامت این لایه بستگی دارد (۲). محققین معادله زیر را برای بیان تنش برشی لحظه‌ای به دست آورده‌اند (۴).

$$\tau_o = \mu \frac{V_o}{\sqrt{\pi vt}} \quad (2)$$

در این معادله  $V_o$ : سرعت در ناحیه متلاطم جریان نزدیک زیر لایه آرام،  $t$ : زمان و  $\mu$  و  $v$ : به ترتیب لزجت دینامیکی و سینماتیکی سیال می‌باشند. معادله (۲) برای حالت  $0 \leq t \leq T$  معتبر است که در آن  $T$ : پیروید رشد زیر لایه آرام است. بنابراین مطابق این تئوری، مقدار تنش برشی در هر نقطه از بستر از یک مقدار بی‌نهایت در لحظه  $t=0$  تا یک مقدار حداقل  $\mu \frac{V_o}{\sqrt{\pi vt}}$  در لحظه  $t=T$  متغیر است. مقدار متوسط این تنش برابر  $\gamma RS$  می‌باشد (۶ و ۱۰). اگر  $V_o$  در مدت زمان فرایند ایجاد و شکستن زیر لایه آرام ثابت باشد تغییرات  $\tau_o$  بر اساس معادله (۲) به صورت متناوب خواهد بود. اما  $V_o$  سرعتی از ناحیه متلاطم جریان است که به صورت تصادفی در تغییر است. در نتیجه  $\tau_o$  تغییراتی به صورت تصادفی باید داشته باشد. بنابراین برای فرسایش یک ذره رس دو شرط لازم است: یکی شکستن زیر لایه آرام<sup>۱</sup> که به صورت تصادفی اتفاق می‌افتد و دیگر اینکه نیروهای هیدرولیکی اعمال شده بر ذرات بر نیروهای مقاوم بین ذرات غالب شوند. در صورتی که چنین اتفاقی بیفتد ذرات رس فرسایش می‌یابند که بسته به قدرت جریان اندازه ذرات فرسایش یافته می‌تواند از ذرات نامرئی شروع شده و تا قطعاتی چند سانتی متری برسد. پدیده فرسایش این رسوبات به پارامترهایی چون اندازه ذرات، نسبت پراکندگی رس‌ها، درصد رس، حدود اتربرگ،

رسوبات چسبنده به رسوباتی اطلاق می‌شوند که اندازه‌های کوچک (در حد چند میکرون) داشته و دارای خاصیت چسبندگی باشند. خاصیت چسبندگی این رسوبات ناشی از نیروهای الکتروشمیایی بین ذرات و نوع کانی‌های تشکیل دهنده آنها می‌باشد. این نیروها که نیروهای غالب بین ذرات بوده، از لحاظ مقدار از نیروی وزن ذرات بزرگ‌تر می‌باشند و ضمناً با بسیاری از عوامل محیطی رسوبات و ترکیبات آنها مرتبط هستند. همین مسأله سبب پیچیدگی در بررسی پدیده‌های هیدرولیکی مربوط به رسوبات چسبنده، از جمله آستانه حرکت ذرات شده است (۹).

از شایع‌ترین معضلات وجود رسوبات چسبنده، ورود آنها به شبکه‌های آبیاری و مخازن سدها است. این رسوبات پس از ته‌نشینی به مرور تحکیم یافته و در صورت اقدام برای تخلیه هیدرولیکی آنها، در برابر شسته شدن مقاومت نشان می‌دهند. لذا اولین مسأله این است که آستانه فرسایش این نوع رسوبات معلوم باشد. بر خلاف رسوبات غیرچسبنده که برای شرایط آستانه حرکت آنها روابط زیادی ارائه شده (نظیر دیاگرام شیلدز)، تحقیقات در این زمینه برای رسوبات ریزدانه چسبنده بسیار محدود بوده است. دلیل آن دخالت ماهیت شیمیایی ذرات در فرآیند حرکت و ته‌نشینی، که خود با بسیاری از عوامل فیزیکی- شیمیایی و بیولوژیکی آب و رسوبات مرتبط است، می‌باشد. یک ذره رسوبی واقع در بستر که در معرض جریان آب قرار دارد تحت تأثیر دو دسته نیرو می‌باشد:

۱- نیروهای هیدرولیکی که ناشی از جریان آب بوده و به عنوان نیروی محرک یا مخرب عمل می‌کنند.  
۲- نیروهای مقاوم که در رسوبات چسبنده به طور عمده شامل نیروهای جاذبه و الکتروشمیایی بین ذرات و در رسوبات غیر چسبنده ناشی از وزن ذرات می‌باشد.  
نیروهای هیدرولیکی وارد بر یک ذره خود به دو نیروی کششی در جهت جریان و نیروهای بالا برنده عمود بر جریان تقسیم می‌شوند. تنش برشی جریان ( $\tau_o$ ) برابر مجموع نیروهای کششی وارد بر ذرات رس می‌باشد یعنی:

$$\tau_o = \sum_{i=1}^N F_i \quad (1)$$

که در آن  $N$ : تعداد ذرات رسوبی (در واحد سطح بستر) و  $F_i$ : نیروی کششی وارد بر ذرات می‌باشد (۱۰). فرسایش ذرات موقعی اتفاق می‌افتد که نیروی محرک وارد بر ذرات بر نیروهای مقاوم بین ذرات غلبه کند. لحظه‌ای که ذرات شروع به حرکت می‌کنند را اصطلاحاً آستانه حرکت ذرات می‌گویند. تنش برشی و سرعت

مقاومت برشی و کششی رسوبات، درصد رطوبت، مقدار نمک، درجه حرارت محیط رسوبات، نسبت جذب سدیم (SAR) و ظرفیت تبادل یونی (CEC) بستگی دارد (۴ و ۱۱).

قمشی و وجدانی با انجام آزمایش‌های فیزیکی- شیمیایی و هیدرولیکی روی رسوبات ریزدانه جمع آوری شده از بستر کانال‌های آبیاری شش منطقه خوزستان شامل دشت اوان، هندیجان، ویس، شادگان، خلف آباد و وسیله که دارای رسوبات چسبنده بودند نشان دادند که فرسایش رسوبات چسبنده به صورت تصادفی و مطابق با تئوری فرسایش اینشتن و هون لی، هنگام شکستن زیر لایه آرام و غلبه نیروهای هیدرولیکی محرک بر نیروهای مقاوم اتفاق می‌افتد و مقادیر تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات این کانال‌ها بین ۰/۹۶ تا ۲/۳۰ نیوتن بر مترمربع برای منطقه هندیجان متغیر است (۳).

## مواد و روش‌ها

### رسوب مورد آزمایش

برای اجرای تحقیق حاضر، رسوبات ریزدانه از بستر خشک مخزن سد خاکی پیر بلوط واقع در حومه شهرکرد در استان چهارمحال و بختیاری برداشت شد. رسوبات برداشت شده از بستر مخزن مذکور پس از خشک شدن، کوبیده و خرد شدند. همچنین سنجش جرم مخصوص رسوبات مورد استفاده با روش پیکنومتر انجام شد. جهت سنجش در این آزمایش از ترازوی دیجیتال دارای دقت یک ده هزارم گرم استفاده گردید که جرم مخصوص ذرات جامد موجود در رسوب مورد استفاده برابر ۲/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد (۲). ضمناً به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی رسوب، آزمایش هیدرومتری در سه تکرار انجام گرفت که نتیجه آن در شکل (۱) ارائه شده است. بر اساس آزمایش مشخص شد نمونه رسوب شامل ۹۵ درصد رس، ۴/۲۷ درصد سیلت و ۰/۷۳ درصد ماسه می‌باشد. آزمایش دیگری که بر روی رسوبات انجام گرفت، آزمایش حد روانی بود که با روش کاساگرانده این مقدار برابر ۴۸ درصد به دست آمد. این رقم متناسب با ویژگی رس کائولینیت می‌باشد.

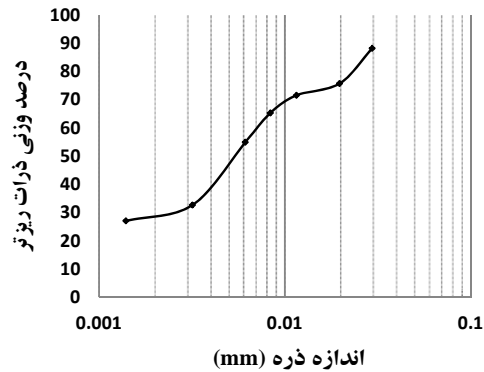
### تعیین غلظت و نسبت پوکی رسوب ته‌نشین شده

چون در این تحقیق از فلوم دوار استفاده شد و لازم بود رسوبات چسبنده برای مدت مشخصی در بستر فلوم دوار تحکیم شوند، لذا قبل از شروع آزمایش‌های اصلی، لازم بود خصوصیات فیزیکی رسوبات ته‌نشین شده در مدت زمان‌های مختلف تعیین شود. بدین منظور آزمایش‌هایی در سه لوله ایستاده به قطر شش سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر مجهز به نمونه‌گیر، انجام گرفت. بدین منظور مخلوط آب و رسوب با غلظت‌های اولیه مشخص در این لوله‌ها ریخته شد. غلظت‌های اولیه رسوب در لوله‌ها برابر ۴۴۷، ۳۰۳ و ۲۵۹ گرم بر لیتر بود و زمان ماندگاری رسوب در این لوله‌ها برای انجام تحکیم به ترتیب برابر پنج هفته، دو هفته، یک هفته و سه روز بود. پس از سپری شدن زمان مذکور، از عمق‌های مختلف رسوب، نمونه‌گیری انجام شد و با روش خشک کردن و توزین، غلظت رسوب به دست آمد. این غلظت همان جرم مخصوص خشک رسوبات بوده که توزیع عمقی آن در شکل (۲) نشان داده شده است. البته با توجه به این نکته که در طول زمان مقدار رسوب موجود در مدل ثابت باقی می‌ماند با استفاده از نسبت ارتفاع رسوب در هر زمان دلخواه به ارتفاع اولیه رسوب (در لحظه شروع آزمایش) متوسط جرم مخصوص ظاهری رسوب با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (۱۲، ۱۳).

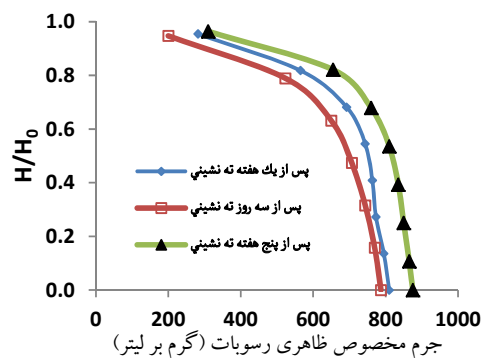
تحقیقات انجام شده توسط وان دم تمپلی (۱۹۷۲)، پیرس و همکاران (۱۹۷۰)، ویسر (۱۹۷۰)، لایلی و اسمردون (۱۹۶۵)، اسمردون و بیسلی (۱۹۶۱) و دان (۱۹۵۹) نشان داد که تنش برشی بحرانی رسوبات چسبنده نسبت معکوس با قطر ذرات داشته و متناسب با  $d^{-1}$  تا  $d^{-4/3}$  بوده، که  $d$  قطر ذرات می‌باشد (۷). پارتیاداس (۱۹۶۵) به منظور تعیین تنش برشی بحرانی حرکت رسوبات، رابطه بین میزان فرسایش رسوبات و تنش برشی جریان را به دست آورد که میزان فرسایش رسوبات را با اندازه گیری میزان غلظت مواد رسوبی معلق فرسایش یافته، در طول مدت آزمایش تعیین کرد. پارتیاداس (۱۹۶۵) سرعت بحرانی رسوبات چسبنده مورد آزمایش را ۰/۸ فوت بر ثانیه و تنش برشی بحرانی این رسوبات را ۰/۲۳ پوند بر فوت‌مربع به دست آورد (۴).

میرت خولاوا (۱۹۸۸) با استفاده از تحقیقی که بر روی پدیده فرسایش رسوبات چسبنده انجام داد، نشان داد که فرسایش رسوبات چسبنده در چند مرحله اتفاق می‌افتد: بدین ترتیب که ابتدا ذراتی به صورت پراکنده و به دنبال آن توده‌های کوچکی از کف جدا شده و با جریان شسته می‌شوند، این عمل منجر به ایجاد بستری زبرتر نسبت به حالت اولیه می‌شود که به موجب آن تکان‌های ناشی از نیروی کششی و بالا برنده افزایش می‌یابد، در نتیجه پیوند بین توده‌های رسوب بستر به تدریج سست شده تا حدی که این توده‌ها به صورت آبی از بستر کنده شده و پس از معلق شدن و از هم پاشیدن به صورت ذرات ریزی توسط جریان حمل می‌شوند و سیکل‌های بعدی را طی می‌کنند (۸).

تعیین حد متوسطی به عنوان آستانه حرکت ذرات از آن جهت حائز اهمیت است که چنانچه شرایط هیدرولیکی در این لحظه معلوم و مشخص باشد، می‌توان از آن در حل مسائلی نظیر طراحی کانال‌های خاکی پایدار (طرح کانال بدون فرسایش)، یافتن الگوی مناسب برای طراحی کانال‌های آبیاری بتنی جهت به حداقل رساندن رسوبگذاری و محاسبه مقدار رسوب حمل شده توسط جریان در رودخانه‌ها استفاده کرد (۱). بر همین اساس تحقیق حاضر با هدف بررسی پدیده فرسایش رسوبات چسبنده و تعیین شرایط



شکل ۱- دانه بندی رسوبات مورد آزمایش



شکل ۲- جرم مخصوص ظاهری رسوبات در مقابل ارتفاع نسبی رسوب در زمانها مختلف تحکیم

جدول ۱- جرم مخصوص رسوبات ته نشین شده

جرم مخصوص ظاهری خشک (g/cm <sup>3</sup> )			عمق نسبت به
تحکیم دو هفته	تحکیم یک هفته	تحکیم سه روزه	سطح رسوب (سانتی متر)
۰/۳۱۰	۰/۲۸۲	۰/۲۰۰	*
۰/۵۹۵	۰/۵۶۵	۰/۵۲۳	۳
۰/۷۱۳	۰/۶۹۲	۰/۶۵۰	۶
۰/۷۷۴	۰/۷۴۳	۰/۷۰۷	۹
۰/۸۱۰	۰/۷۶۳	۰/۷۴۳	۱۲

\* رسوبات سطحی

در نهایت براساس نتایج آزمایشها، مقدار جرم مخصوص ظاهری خشک رسوبات، برای مدت زمانهای مختلف تحکیم و در عمقهای مختلف نسبت به سطح رسوبات بصورت جدول (۱) به دست آمد. شایان ذکر است برای رسوبات با مدت زمان تحکیم دو تا پنج هفته، جرم مخصوص رسوبات در عمقهای مختلف ثابت به دست آمد.

$$C_t = \frac{C_o}{(H_f/H_o)} \quad (۳)$$

که در آن  $C_t$ : میانگین غلظت رسوبات در زمان  $t$  در طول آزمایش و  $C_o$ : غلظت اولیه رسوبات می باشد (یا غلظت مخلوط آب و رسوب در ابتدای آزمایش)،  $H_o$ : ارتفاع اولیه مخلوط آب و  $H_f$ : ارتفاع سطح مشترک آب و رسوب پس از گذشت زمان  $t$  می باشد.



شکل ۳- نمایشی از فلوم دوار دانشگاه شهر کرد

زاویه‌ای ۱۳۴۰ دور بر دقیقه برای ایجاد جریان نصب شد. هر یک از این دو موتور به طور جداگانه مجهز به دستگاه اینورتر تنظیم کننده دور موتور بودند. دستگاه اینورتر تنظیم کننده دور موتور پایین، مدل Is 600-2002s و دستگاه اینورتر تنظیم کننده دور موتور بالا، مدل Is 600-2001s تک فاز به سه فاز، با توان ۱/۵ کیلو وات، مدل Is 600-2002s و دستگاه اینورتر تنظیم کننده دور موتور بالا، مدل Is 600-2001s تک فاز به سه فاز، با توان ۰/۷۵ کیلو وات، مدل Is 600-2001s بود و این امکان به وجود آمد که سرعت چرخش فلوم از صفر تا ۲۵/۵ دور بر دقیقه و سرعت چرخش رینگ بالا از صفر تا حداکثر ۴۷ دور بر دقیقه قابل تنظیم باشد. برای سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب نیز ۱۶ عدد شیر نمونه گیری در چهار ردیف و در ارتفاع‌های ۵/۳، ۱۰/۵، ۱۸/۳ و ۲۵ سانتی‌متر از کف فلوم تعبیه شد.

#### آزمایش‌های تعیین آستانه و غلظت رسوبات معلق

پس از خشک کردن و کوبیدن رسوبات، عمل اختلاط آب و رسوب در یک مخزن با استفاده از یک همزن انجام شد. این امر باعث گردید فلوک‌ها (که مجموعه‌ای از ذرات رسی به هم چسبیده هستند) شکسته شود. سپس مخلوط آب و رسوب در داخل فلوم ریخته شد و تا ارتفاع مورد نظر (۱۵ سانتی‌متر)، درون فلوم آب اضافه شد. سپس فلوم و رینگ در جهت مخالف در مدت دو ساعت (طبق نظر مهتا و پارتیاداس، ۱۹۷۳) چرخانده شد تا کلیه فلوک‌ها در مخلوط آب و رسوب شکسته شود (۹). پس از ثابت نگه داشتن فلوم و رینگ و ته‌نشینی رسوبات، اجازه داده شد تا در شرایط سکون

با آگاهی از جرم مخصوص ظاهری خشک رسوبات، نسبت پوکی رسوبات با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (۱۲، ۱۳):

$$e = \frac{\rho_w \cdot G_s}{\rho_s} - 1 \quad (4)$$

که در آن  $\rho_w$  و  $\rho_s$ : به ترتیب جرم مخصوص خشک رسوبات و وزن مخصوص آب می‌باشند و  $G_s$ : جرم مخصوص ذرات جامد خاک می‌باشد.

#### فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده

در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد یک فلوم دوار با قطر خارجی ۱/۹ متر و مقطع مستطیلی به عرض کف ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۷ متر ساخته شد که تصویر آن در شکل (۳) نشان داده شده است. فلوم ساخته شده از ورق فولادی گالوانیزه است که بر روی شاسی دایره‌ای از جنس فولاد نصب شده و از طریق یک شافت عمودی و یک سیستم چرخ دنده و زنجیر به یک گیربکس (با نسبت دور خروجی به ورودی برابر ۱ به ۳۰) و یک موتور الکتریکی سه فاز ۱/۵ کیلو وات و حداکثر سرعت زاویه‌ای ۱۴۰۰ دور بر دقیقه متصل است. همچنین در قسمت بالا یک رینگ افقی (از جنس فلکسی گلاس به ضخامت پنج میلی‌متر که دارای پره‌هایی به ضخامت دو میلی‌متر و ارتفاع سه سانتی‌متر می‌باشد) متصل به یک موتور الکتریکی سه فاز با توان ۰/۳۷ کیلو وات و حداکثر سرعت

پره‌ها با آب)، سرعت متوسط محاسبه می‌شود. بر اساس این نتایج، معادله (۶) بین دور فلوم و سرعت متوسط جریان به دست آمد:

$$\bar{V} = 0/0601 \Omega + 0/0078 \quad (۶)$$

که در آن  $\Omega$ : دور رینگ (دور بر دقیقه) و  $\bar{V}$ : متوسط سرعت جریان (متر بر ثانیه) است. همچنین دستگاه مقادیر تنش برشی جریان را اندازه‌گیری می‌کند. بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌ها رابطه زیر بین دور فلوم و پارامتر تنش برشی جریان در بستر به دست آمد:

$$\tau_b = -0/0027\Omega^2 + 0/1271\Omega - 0/4706 \quad (۷)$$

$$R^2 = 0/9578$$

که در آن  $\tau_b$ : تنش برشی جریان در بستر (نیوتن بر مترمربع) است. این رابطه برای تنش برشی محدوده آزمایش دارای دقت بالایی است. همچنین با داشتن متوسط سرعت جریان، اعداد رینولدز و فرود برای شرایط موجود محاسبه و رژیم جریان مطابق جدول (۲) تعیین گردید. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شد، با افزایش عمق از سطح با توجه به غلظت و تراکم بیشتر رسوبات همان‌طور که انتظار می‌رود نسبت تخلخل رسوبات کاهش می‌یابد.

#### ب) تغییرات غلظت رسوبات معلق

پس از به آستانه رسیدن رسوبات، در فواصل زمانی هر ۱۵ دقیقه، از رسوبات فرسایش یافته و معلق در جریان آب موجود در فلوم نمونه برداری انجام شد و غلظت رسوب در سه تکرار تعیین شد. تغییرات زمانی غلظت رسوب برای پنج آزمایش انجام شده در مقابل زمان و تنش برشی اعمال شده در هر آزمایش در شکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با گذشت زمان از شروع آزمایش‌ها و افزایش تنش برشی در هر آزمایش، غلظت رسوبات معلق افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که هرچه زمان تحکیم رسوبات در فلوم افزایش یافته است در تنش‌های برشی برابر مقدار غلظت رسوبات معلق کاهش یافته است که بدین معنی است که با افزایش زمان تحکیم و تحت تنش‌های برشی یکسان از مقدار فرسایش رسوبات کاسته می‌شود.

#### ج) تعیین آستانه فرسایش رسوبات ته‌نشین شده

در حین انجام آزمایش، آستانه فرسایش رسوبات چسبیده ته‌نشین شده لحظه‌ای است که رسوبات شروع به فرسایش نماید. بین محققان مختلف هنوز توافق یکسانی برای تعریف لحظه آستانه فرسایش رسوبات حاصل نشده است. برخی محققین معتقدند شروع حرکت اولین رسوبات ممکن است به خاطر تغییر تنش موضعی جریان باشد و برای اطمینان باید تعداد کافی رسوبات دچار فرسایش شوند. در این تحقیق نیز همین رویه استفاده شد و لحظه‌ای به عنوان آستانه شروع فرسایش در نظر گرفته شد که لایه‌ای از

و در مدت زمان مورد نظر رسوبات ته‌نشین شده در فلوم تحکیم یابند.

پس از طی مدت زمان تحکیم مورد نظر، آزمایش‌های بررسی تنش برشی آستانه فرسایش رسوبات بستر با روشن کردن موتور رینگ بالا، آغاز شد. در ابتدا از سرعت چرخش پائین رینگ استفاده شد و به مرور با استفاده از تنظیم کننده دور (اینورتور) بر سرعت چرخش رینگ اضافه شد تا اینکه طبق مشاهدات عینی، ذرات رسوب بستر شروع به فرسایش نمودند. از این به بعد، آزمایش‌های با تنش‌های برشی مختلف ادامه یافت و در هر تنش برشی که زمان آن ۹۰ دقیقه بود، ضمن اندازه‌گیری سرعت چرخش رینگ، غلظت رسوبات معلق شده در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه تعیین شد. غلظت رسوبات معلق با روش خشک کردن و وزن کردن اندازه‌گیری شد. در این تحقیق در مجموع پنج دسته آزمایش تعیین آستانه حرکت رسوبات ته‌نشین شده با مدت زمان‌های تحکیم پنج هفته، سه هفته، دو هفته، یک هفته و سه روز انجام شد.

#### اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی جریان در فلوم دوار

برای اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی جریان در فلوم دوار، نظیر سرعت و تنش برشی در فلوم دوار از دستگاه سرعت‌سنج ADV مدل Vectrino<sup>+</sup> ساخت شرکت Nortek نروژ استفاده شد. ADVها نسل جدید سرعت‌سنج‌های سه بعدی هستند که به علت ساختار کابلی امکان اندازه‌گیری با زوایای مختلف را برای کاربر فراهم می‌کند. در این تحقیق با استفاده از دستگاه مذکور سرعت و تنش برشی جریان در سه بعد و در اعماق ۳/۵، ۷ و ۸/۵ سانتی‌متری نسبت به کف فلوم، در آستانه حرکت رسوبات و پنج دور منتخب چرخش رینگ اندازه‌گیری شد.

#### نتایج و بحث

##### الف) مشخصات هیدرولیکی جریان

از جمله مهم‌ترین مشخصات هیدرولیکی جریان، سرعت و تنش برشی است. اندازه‌گیری سرعت در سه عمق مختلف انجام شد و برای محاسبه سرعت متوسط جریان از روش میانگین وزنی از معادله زیر استفاده شد:

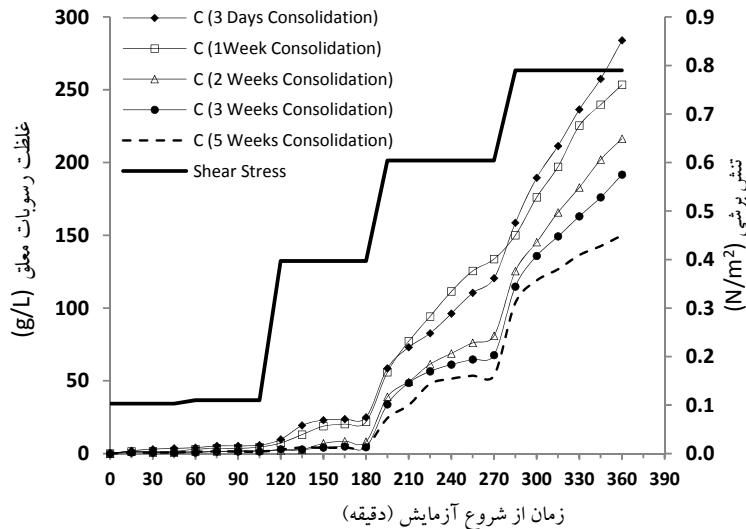
$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^5 \left( \frac{V_i + V_{i-1}}{2} \right) d_i}{\sum_{i=1}^5 d_i} \quad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^5 d_i = 15 \text{ (cm)}$$

در رابطه بالا، با در نظر گرفتن  $V_0$  یعنی سرعت در بستر برابر صفر،  $V_1$ ،  $V_2$  و  $V_3$ ، سرعت‌های اندازه‌گیری شده در ارتفاع‌های ۳/۵، ۷ و ۸/۵ سانتی‌متر از بستر و  $V_4$  و  $V_5$ ، مساوی هم و برابر سرعت خطی چرخش رینگ، (در ۲/۵ سانتی‌متر عمق درگیری

جدول ۲- سرعت متوسط، عدد فرود و رینولدز و رژیم جریان در سرعت‌های مختلف چرخش رینگ

دور رینگ (دور بر دقیقه)	سرعت خطی چرخش رینگ (سانتی‌متر بر ثانیه)	سرعت متوسط (متر بر ثانیه)	عدد فرود	عدد رینولدز	رژیم جریان
۴/۵۳	۳۸	۰/۲۸	۰/۲۳	۲۱۲۴۳	زیر بحرانی - آشفته
۶/۲۱	۵۲	۰/۳۸	۰/۳۱	۲۸۷۵۷	زیر بحرانی - آشفته
۷/۹۶	۶۶/۷	۰/۴۹	۰/۴۱	۳۷۴۲۹	زیر بحرانی - آشفته
۱۰/۶۵	۸۹/۲	۰/۶۵	۰/۵۴	۴۹۶۲۵	زیر بحرانی - آشفته
۱۴/۶۳	۱۲۲/۶	۰/۸۸	۰/۷۳	۶۷۳۸۱	زیر بحرانی - آشفته



شکل ۴- تغییرات رسوب معلق در برابر زمان و تنش‌های برشی اعمال شده برای پنج آزمایش

مواردی که در هر مرحله روند فرسایش متوقف شده و منحنی به صورت افقی در آمد، آستانه‌های دیگری برای فرسایش استخراج گردید که نتایج حاصله در جدول (۳) ارائه شده و تغییرات آنها در نمودار شکل (۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است مقادیر مربوط به دوره اول، مربوط به رسوبات سطحی است و مقادیر مربوط به دوره های دوم و سوم مربوط به رسوبات زیرسطحی (پس از اینکه لایه سطحی فرسایش یافت) می‌باشد. همچنین بر روی داده‌های شکل (۵) منحنی‌های مختلف برازش داده شد و مشخص شد بهترین رابطه از نوع نمائی بود که به صورت زیر به دست آمد:

$$\tau_c = 1/971 \rho_s^{1/922} , R^2 = 0/765 \quad (۸)$$

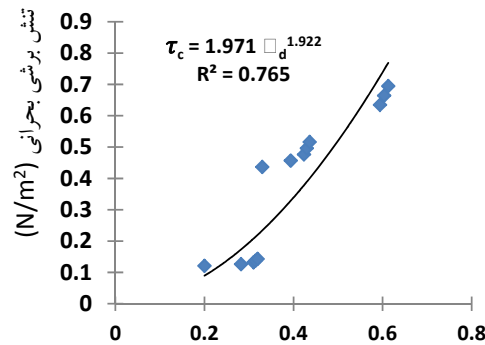
که در آن  $\tau_c$ : تنش برشی آستانه فرسایش برحسب پاسکال و  $\rho_s$  جرم مخصوص ظاهری خشک رسوبات برحسب گرم بر سانتیمترمکعب می‌باشد.

رسوبات دچار فرسایش شد و کدورت آب در حد ملموس افزایش پیدا کرد. در این لحظه دور چرخش رینگ اندازه‌گیری و به عنوان آستانه شروع فرسایش در نظر گرفته شد. بر اساس معادله (۷) دور چرخش رینگ اندازه‌گیری شده به تنش برشی تبدیل و نتیجه به دست آمده به عنوان تنش برشی آستانه شروع فرسایش در نظر گرفته شد. البته برای اطمینان بیشتر از این نتایج، براساس آزمایش‌های انجام شده، منحنی تغییرات غلظت مواد معلق و تنش برشی جریان ترسیم گردید (شکل ۴) و براساس این نمودار نتایج اولیه کنترل شد به گونه‌ای که در تنش برشی بیشتر از تنش برشی شروع فرسایش، مشخص گردید که مقدار قابل توجهی از رسوبات بستر فرسایش یافته است. نکته مهم دیگر این است که در هر مرحله افزایش تنش برشی، لایه سطحی رسوبات فرسایش یافته و وقتی به لایه‌های زیرین می‌رسید که دارای تراکم بیشتری بودند، روند فرسایش متوقف می‌گردید. در مرحله بعدی با افزایش تنش برشی جریان مجدداً روند فرسایش آغاز می‌گردید که این امر در نمودار شکل (۴) مشهود است. لذا براساس داده‌های موجود، در

جدول ۳- تنش برشی آستانه فرسایش بر حسب جرم مخصوص خشک رسوبات

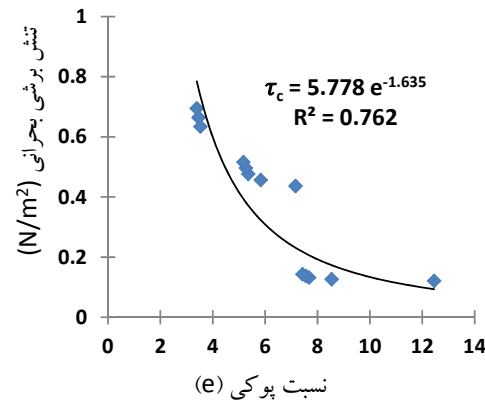
دوره سوم		دوره دوم		دوره اول		زمان تحکیم
$\tau_c$	$\rho_s$	$\tau_c$	$\rho_s$	$\tau_c$	$\rho_s$	
N/A	N/A	۰/۴۴	۰/۳۳۰	۰/۱۲	۰/۲۰۰	سه روز
N/A	N/A	۰/۴۶	۰/۳۹۴	۰/۱۳	۰/۲۸۲	یک هفته
۰/۶۳	۰/۵۹۴	۰/۴۸	۰/۴۲۳	۰/۱۳	۰/۳۱۰	دو هفته
۰/۶۶	۰/۶۰۴	۰/۵۰	۰/۴۳۰	۰/۱۴	۰/۳۱۵	سه هفته
۰/۶۹	۰/۶۱۳	۰/۵۲	۰/۴۳۶	۰/۱۴	۰/۳۱۹	پنج هفته

$\rho_s$ : بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب و  $\tau_c$ : بر حسب نیوتن بر متر مربع



جرم مخصوص خشک رسوبات (گرم بر سانتی متر مکعب)

شکل ۵- نمودار تنش برشی آستانه فرسایش در مقابل دانسیته خشک رسوبات



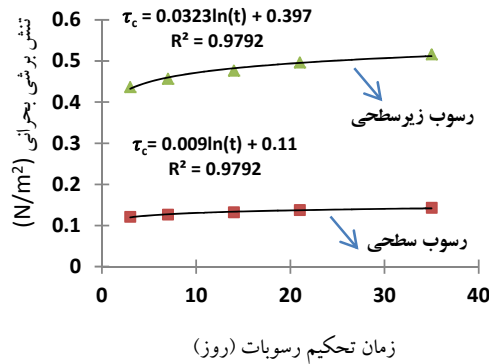
شکل ۶- نمودار تنش برشی آستانه فرسایش در مقابل نسبت پوکی رسوبات

$$\tau_c = 5/778 e^{-1.635} \quad , \quad R^2 = 0/762 \quad (9)$$

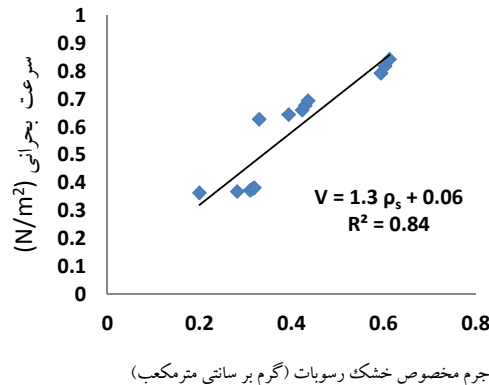
رابطه تنش برشی آستانه فرسایش رسوبات با مدت زمانی که تحکیم یافته‌اند بررسی شد و نمودار شکل (۷) برای دو حالت رسوبات سطحی و رسوبات زیر سطحی (در عمق یک سانتی متری زیر سطح رسوب) ترسیم شد. براین اساس ملاحظه می‌شود تنش برشی آستانه فرسایش با لگاریتم عمر رسوب‌گذاری و تحکیم رسوبات رابطه مستقیم دارد.

کو و فانگ<sup>(۱۹۹۱)</sup> نیز رابطه نمائی بین تنش برشی آستانه ته‌نشینی و جرم مخصوص رسوبات به دست آوردند (۵). ولی آنها نمای معادله را برابر پنج گزارش کردند که با نتیجه به دست آمده در این مطالعه اختلاف دارد (۵). همچنین نمودار تغییرات تنش برشی آستانه فرسایش بر حسب نسبت پوکی رسوبات در شکل (۶) ترسیم شد. براین اساس رابطه زیر به دست آمد:

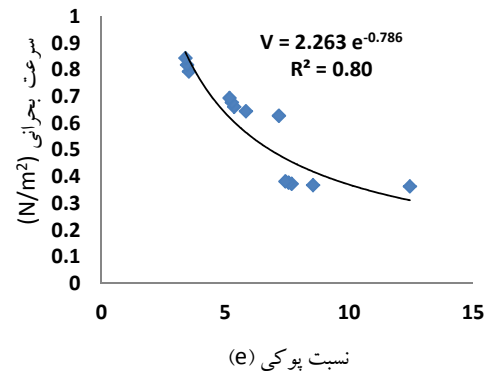




شکل ۷- نمودار تنش برشی آستانه فرسایش نسبت به زمان تحکیم رسوبات برای رسوبات سطحی و زیر سطحی



شکل ۸- نمودار سرعت آستانه فرسایش در مقابل جرم مخصوص خشک رسوبات



شکل ۹- نمودار سرعت آستانه فرسایش در مقابل نسبت پوکی رسوبات

$$V = 1/3\rho_s + 0/06 \quad , \quad R^2 = 0/84 \quad (10)$$

$$V = 2/263 e^{-0/786} \quad , \quad R^2 = 0/80 \quad (11)$$

که در آن  $V$ : سرعت آستانه فرسایش برحسب متر بر ثانیه،  $\rho_s$ : جرم مخصوص ظاهری خشک رسوبات برحسب گرم بر سانتیمترمکعب و  $e$ : نسبت تخلخل رسوبات می‌باشد.

آستانه فرسایش رسوبات چسبنده را می‌توان علاوه بر تنش برشی، بر حسب سرعت جریان نشان داد. لذا برای آزمایش‌های انجام شده، سرعت جریان در شرایط آستانه فرسایش به دست آمد (از رابطه ۶) و بر این اساس نمودار شکل‌های (۸) و (۹) ترسیم شد. با برآزش دادن انواع روابط بر روی داده‌های این دو شکل، روابط زیر به بیشترین ضریب رگرسیون به دست آمد:

در نهایت می‌توان بر اساس یافته‌های این تحقیق، نتایج زیر را به طور خلاصه بیان نمود:

- مشاهده شد که جرم مخصوص رسوبات چسبنده که تحت وزن خود تحکیم می‌شوند، نسبت به عمق‌های مختلف از رابطه غیر خطی نمائی تبعیت می‌کند و مقاومت رسوبات در عمق بیشتر نسبت به فرسایش بیشتر می‌شود.
- نتایج نشان داد که تنش برشی آستانه فرسایش با لگاریتم عمر رسوب‌گذاری و تحکیم رسوبات رابطه مستقیم دارد.
- برای یک رسوب چسبنده با مدت زمان تحکیم مشخص، نمی‌توان یک آستانه فرسایش واحد تعریف کرد زیرا جرم مخصوص رسوبات با عمق افزایش می‌یابد. لذا لازم است برای هر عمق یک آستانه جداگانه در نظر گرفت.
- تنش برشی آستانه رسوبات سطحی برای مدت‌های مختلف تحکیم تقریباً یکسان به دست آمد و اختلاف چشمگیری بین آنها مشاهده نشد ولی برای رسوبات در عمق‌های بیشتر، اختلاف آستانه فرسایش بیشتر می‌شود.
- رابطه تنش برشی آستانه فرسایش و جرم مخصوص ظاهری رسوبات نمائی بدست آمد، این رابطه برای نسبت پوکی رسوبات نیز به طور مشابه به دست آمد.
- رابطه سرعت آستانه فرسایش با جرم مخصوص ظاهری رسوبات خطی به دست آمد ولی بین سرعت آستانه فرسایش و نسبت پوکی رابطه نمائی برقرار است.

نتایج نشان می‌دهد رابطه بین سرعت آستانه فرسایش و جرم مخصوص رسوبات خطی و با نسبت پوکی رابطه نمائی دارد.

### نتیجه‌گیری

با استفاده از روابط و نتایج به دست آمده می‌توان برای رسوبات چسبنده که مشابه رسوبات چسبنده مورد استفاده در این تحقیق باشد، آستانه تنش برشی فرسایش و همچنین آستانه سرعت فرسایش را بر اساس جرم مخصوص ظاهری خشک رسوبات و یا نسبت تخلخل، برآورد نمود. این مقادیر در مدل‌های انتقال رسوب نقش اساسی و مبنائی دارد. نکته مهم آن است که برای یک رسوب با مدت زمان تحکیم مشخص، نمی‌توان یک آستانه فرسایش واحد تعریف کرد و لازم است برای هر عمق یک آستانه جداگانه در نظر گرفت. به طور مثال در مورد رسوبات چسبنده با مدت زمان تحکیم دو هفته، مقدار آستانه تنش برشی فرسایش از  $0/13$  نیوتن بر مترمربع برای رسوبات سطحی تا  $1/31$  نیوتن بر مترمربع برای رسوبات در عمق  $12$  سانتی‌متری تغییر می‌کند و مقدار سرعت جریان متناظر این دو حالت نیز به ترتیب برابر  $0/46$  و  $1/11$  متر بر ثانیه به دست می‌آید. بنابراین در برنامه‌ریزی انجام عملیات رسوبشویی رسوبات چسبنده، لازم است عمق مورد نظر فرسایش رسوبات تعیین شود و سپس جرم مخصوص ظاهری رسوبات یا نسبت تخلخل آنها (به عنوان پارامترهای اصلی نشان دهنده درجه تحکیم رسوبات) به دست آید و براین اساس حد تنش برشی آستانه فرسایش و یا سرعت جریان در آستانه فرسایش تعیین گردد.

### منابع

- ۱- اکبری، ن. ۱۳۹۰. آستانه فرسایش رسوبات چسبنده ته‌نشین شده با استفاده از مدل فلوم دوار. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهرکرد، دانشکده کشاورزی. گروه مهندسی آب.
- ۲- خواستار بروجنی، م.، صمدی بروجنی، ح. اسماعیلی، ک. ۱۳۹۰. تاثیر پساب شهری بر سرعت و تنش برشی غیر رسوبگذار رسوبات چسبنده. مجله هیدرولیک، ۴۳ (۴): ۳۳-۴۳.
- ۳- قمشی، م. و وجدانی، ن. ۱۳۸۵. بررسی آزمایشگاهی تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات چسبنده شش کانال آبیاری در استان خوزستان. مجله علمی کشاورزی، ۲۹ (۴): ۴۵-۵۶.
- ۴- شفاعی بجستان، م. ۱۳۷۳. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره ۱۶۴، چاپ اول.
- 5- Cao, Sh. and D. Fang. 1991. Hydrodynamic behavior of cohesive sediments in turbulent flow. Proceedings of 7th Symposium on Coastal and Ocean Management (Long Beach, USA), pp. 712- 721.
- 6- Eineston, H. A. and H. Li. 1999. Shear transmission from a turbulent flow to its viscous boundary sublayer. Mimeographed Notes, University of California, Berkeley, Calif, pp. 225- 238.
- 7- Hamm, L. and C. Migniot. 1993. Elements of cohesive sediment deposition, consolidation and erosion. In: Abbott, M. B. and Price, W. A. (eds.) Coastal Estuarial and Harbour Engineers Reference Book, London: Chapman and Hall, pp. 93- 106.

- 8- Ostube, K. 1988. Critical shear stress of cohesive bottom sediment. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 14(10): 1241- 1256.
- 9- Partheniades, E. 2009. *Cohesive sediments in open channels*. Butterworth-Heinemann Publications, Burlington, USA.
- 10- Partheniades, E. 1965. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 91: 105-137.
- 11- Raudkivi, A. J. 1998. *Loose boundary hydraulic*. Balkema, A. A. publishing Co.Inc, Rotterdam, pp. 220-265.
- 12- Samadi-Boroujeni, H., Fathi-oghaddam, M. and M. Shafaie-Bajestan. 2009. Investigation on bulk density of deposited sediments in Dez reservoir. *Journal of Trend in Applied Sciences Research*, 4(3): 148-157.
- 13- Samadi-Boroujeni, H., Fathi-Moghaddam, M., Shafaie-Bajestan, M., and H. Mohammad Vali Saman. 2008. Modelling of sedimentation and self-weight consolidation of cohesive sediments, *Sediment and Ecohydraulics Intercoh 2005*. 9: 1665-191.