



Scour Resistance Simulation of Stone Materials
Using Hydraulic Modeling
Case Study: Plunge Pool of the Karoon-III
Dam

G. A. Barani¹, Z. Kamalipoor Azad²
and M. A. Torbati³

Abstract

The main goal of physical hydraulic modelling of plunge pools as energy dissipators at the toe of reservoir dams is the assessment of their performance efficiency. There is a limitation of using non-cohesive material at steep slopes. Accordingly a suitable combination of cohesive and non-cohesive materials should be selected to simulate the scouring resistance characteristics in the plunge pool against complicated turbulent flow in a hydraulic model. In this study, the relative ability of rock to resist scouring in the plunge pool of Karoon-III dam on the Karoon River in south eastern Iran was simulated using a physical model. Eighty-six experiments in four series were carried out in a flume with an effective length of 10 meters with different combination of cohesive and non-cohesive materials, with uniform flow in different velocities. The threshold velocity of scouring was subsequently determined for each combination. Cement was eliminated from the test due to its high scour resistance and was replaced by bentonite clay. Experiments were then continued to determine a suitable fraction of clay bentonite in the combination. The erosive power of water was calculated using three methods: measured flow profiles, flow normal depths, and the Standard Step method. The Erodability Indices were determined by the Annandale method for each method. These Indices were used to determine the suitable class of bentonite clay for different parts of the Karoon-III dam plunge pool.

Keywords: Hydraulic Model, The Plunge Pool of the Karoon-III Dam, Erodability Index, The Scour Threshold

شبیه سازی مقاومت فرسایشی مصالح سنگی با استفاده
از مدل هیدرولیکی
مطالعه موردی: حوضچه استغراق سد کارون ۳

غلامعباس بارانی^۱، زهرا کمالی پور آزاد^۲
و محمدعلی تربتی^۳

چکیده

بررسی عملکرد حوضچه‌های استغراق در پایین دست سد‌ها (شبیه سازی فرایند آبستنجی) به عنوان سازه‌های مستهلک کننده انرژی از جمله اهداف مهم در ساخت مدل‌های هیدرولیکی آنها می‌باشد. به دلیل محدودیت‌هایی که در به کارگیری مصالح دانه‌ای غیر چسبنده در شبیه‌های تند وجود دارد، انتخاب نسبت مناسبی از مخلوط مصالح چسبنده و غیر چسبنده که بتواند خواص مقاومتی سنگ‌های حوضچه استغراق را در برابر الگوهای پیچیده جریانهای آشفته در مدل شبیه سازی نماید، ضروری می‌باشد. در این مطالعه شبیه سازی مقاومت فرسایشی مصالح سنگی حوضچه استغراق در پایاب سد کارون ۳ مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور هشتاد و شش آزمایش در چهار سری با نسبت های مختلف از مصالح چسبنده و غیر چسبنده در یک فلوم با طول موثر ۱۰ متر انجام شده‌است. در این فلوم مخلوط مصالح با نسبت‌های متفاوت، تحت تاثیر جریانهای یکنواخت با سرعت‌های مختلف قرار گرفتند. سرعت آستانه آبستنجی در هر یک از نسبت ها تعیین گردید. سیمان به دلیل سخت شدگی شدید و مقاومت در برابر فرسایش از مخلوط مصالح حذف شده و به جای آن رس بنتونیت جایگزین شد. آزمایشها برای بدست آوردن میزان مناسب رس بنتونیت در مخلوط ادامه یافت. پروفیل جریان در فلوم اندازه گیری شد. توان فرساینده جریان برای مخلوط مصالح مختلف با استفاده از سه روش پروفیل اندازه گیری شده جریان، عمق نرمال محاسبه شده جریان و روش گام به گام استاندارد محاسبه گردید و شاخص فرسایش پذیری آنها با استفاده از روش آناندل تعیین شد. با بکارگیری شاخص های فرسایش پذیری به دست آمده کلاس مناسب رس بنتونیت نظیر قسمتهای مختلف حوضچه استغراق سد کارون ۳ تعیین گردید.

کلمات کلیدی: مدل هیدرولیکی، حوضچه استغراق سد کارون ۳، شاخص فرسایش پذیری، آستانه آبستنجی

تاریخ دریافت مقاله: ۲۰ تیر ۱۳۸۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۴ اردیبهشت ۱۳۸۷

1- Professor, Civil Engineering Dept., Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, Email: gab@mail.uk.ac.ir
2- M.S. in Hydraulic Structures, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, Email: azadvash@yahoo.com
3- hydraulic structure Dept., Water Research Center, Tehran, Iran, Email: torbati@wrc-ir.com

۱- استاد بخش عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲- کارشناس ارشد سازه هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۳- بخش سازه‌های هیدرولیکی، مرکز تحقیقات آب

۱- مقدمه

استفاده از مخلوط مصالح چسبنده و غیر چسبنده به منظور شبیه‌سازی فرایند آبخستگی در مدل‌های هیدرولیکی حوضچه‌های استغراق از دیر باز مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته‌است.

در سال ۱۹۶۲ برای مطالعه مدل سرریز سد Kariba، در آزمایشگاه هیدرولیک Sogreah کشور فرانسه مواد چسبنده متفاوتی نظیر: رس، سیمان، گریس و واکس پارافین مورد بررسی قرار گرفت. یک نکته مشترک در همه آزمایش‌ها این بود که خصوصیات چسبندگی مخلوط با زمان تغییر می‌کرد، در نهایت برای بستر سنگی Gneiss در این سد مخلوط متراکم شده ماسه (۷۱٪)، رس (۲۱٪) و آب (۸٪) انتخاب شد. همچنین به منظور شبیه‌سازی درجه فرسایش پذیری بستر سنگی حوضچه استغراق پروژه Magat در فیلیپین، دو نوع مخلوط ساخته شد تا تمامی محدوده فرسایش‌پذیر را مدل نماید. یکی از آنها در سرعت ۷ متر بر ثانیه و دیگری در سرعت ۴/۵ متر بر ثانیه فرسایش یافت. مخلوط مورد استفاده شامل: خرده سنگ، رس و پودر گچ بود. میزان پودر گچ چنان تنظیم شد تا سرعت مناسب آستانه فرسایش در یک فلوم ساده بدست آید. انتخاب این سرعت بر مبنای اطلاعات بدست آمده از محققین روسی بوده که در نهایت، سرعت فرسایش را به مقاومت فشاری سنگ مربوط می‌کنند (Khatsura, 1992).

در سال ۱۹۶۷ در آزمایشگاه هیدرولیک غرب کانادا، مخلوط ماسه و سیمان در مطالعات مدل هیدرولیکی حوضچه استغراق نیروگاه آبی Kettel Rapids با مقیاس ۱:۱۰۰ استفاده شد. اما در نهایت مخلوط مناسبی تشخیص داده نشد زیرا مخلوط ماسه و سیمان با گذشت زمان سفت می‌شد. در سال ۱۹۸۰ بمنظور مطالعه مدل فیزیکی حوضچه استغراق نیروگاه آبی Lime Stone مخلوط بنتونیت و خرده سنگ مورد استفاده قرار گرفت، مخلوط مورد استفاده در این مطالعات مشتمل بر یک واحد بنتونیت به ۱۰ واحد شن گرد (۹۰٪) ریزتر از الک ۵ میلی متر، ۷۵٪ ریزتر از الک ۴ میلی متر، ۲۵٪ ریزتر از الک ۳ میلی‌متر و ۱۰٪ ریزتر از الک ۲ میلی متر) بود. حفره آبکند با عمقی مشابه وضعیت استفاده از مصالح غیر چسبنده بدست آمد، ضمن آنکه امکان استفاده از شیبهای کناری تند را فراهم نمود و مشخص شد که این مخلوط نتایج سازگاری می‌دهد و بستر سنگی گرانیتهی همگن در نمونه واقعی را به خوبی شبیه سازی می‌کند (Khatsura, 1992).

Johnson (1977) مصالح چسبنده را در شبیه سازی فرایند آبخستگی در مدل‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار داد. در

آزمایش‌های وی، رس، سیمان، مخلوطی از سیمان و خاک اره، گریس و واکس پارافین به عنوان مواد چسبنده مورد استفاده قرار گرفتند. هدف وی پیدا کردن یک ماده چسبنده ضعیف بود، که مشخصات آن با زمان تغییر نکند. نتیجه نهایی بدست آمده، مخلوطی شامل یک حجم مشخص شن یکنواخت دانه بندی شده، ۳۰٪ رس چینی و ۱۰٪ آب بود که بر اساس یک روش استاندارد کوبیده شود. ایشان در طرح دیگری، محدوده وسیعی از سنگ ضعیف بستر پایاب را در مدل فیزیکی شبیه سازی نمود بطوری که مصالح انتخاب شده توانستند روی شیب‌های تند تا ارتفاع ۵۰ سانتیمتری در مدل ایستا بمانند و با یک جریان برشی موضعی با سرعت ۰/۷ تا ۱ متر بر ثانیه حفره آبکند در آن ایجاد شود. مخلوط مصالح بدست آمده شامل شن شکسته (تمیز و خشک ۲ تا ۳ میلیمتری)، آب، سیمان و پودر گچ بود. امکان استفاده از رس نیز در آزمایش وجود داشت اما برتری سیمان به رس این است که در مجاری انتقال آب آزمایشگاه هیدرولیک حتی اگر مقادیر زیادی از آن استفاده شود، تولید رسوب نمی‌نماید. در هر صورت مقاومت مخلوط به هنگام غرقاب شدن، بوسیله رس یا سیمان تضمین می‌شود. لازم به توضیح است که یخ زدگی موجب تغییر شکل و تخریب مخلوط حاوی سیمان می‌گردد، در حالی که مخلوط حاوی گچ و رس در اثر تغییر شکل تخریب نمی‌شود. در این آزمایش‌ها مقاومت سنگهای بستر و دیواره‌های مدل در برابر آبخستگی بوسیله تغییر اندازه شن بدست آمد (Johnson, 1977).

در سال ۱۹۹۲، در آزمایشگاه Pune هندوستان (CWPRS) به منظور بررسی فرسایش در حوضچه استغراق پایاب پرتاب کننده جامی شکل سد Chamera مخلوط ماسه و بنتونیت برای بازسازی بستر رودخانه و سواحل شیبدار آن که از جنس سنگ Phyllite بوده، استفاده شد. مخلوط نهایی مشتمل بر ۶ واحد (حجمی) ماسه و یک واحد پودر بنتونیت بوده است و عمق حفره آبکند برابر با عمقی گردید که با مصالح متحرک دانه‌ای (غیر چسبنده) بدست آمده بود (Khatsura, 1992).

در سال ۱۹۹۳، در آزمایشگاه هیدرولیک Niagara Falls کانادا، مدل هیدرولیکی جامع سد کارون ۳ با مقیاس ۱:۹۰ مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌های آبخستگی حوضچه استغراق با بستر متحرک در دو مرحله با مصالح چسبنده و غیر چسبنده دانه‌ای انجام شد. در مرحله اول از مصالح دانه‌ای (خرده سنگ آهک) با ابعاد: $d_{50}=5.6\text{mm}$ به منظور شبیه سازی آبخستگی بستر حوضچه استغراق و در مرحله دوم از مصالح چسبنده مخلوط با مصالح دانه‌ای برای شبیه سازی شیب‌های تند دیواره‌های حوضچه استغراق در مدل استفاده شد. مخلوط چسبنده متشکل از آب، ماسه، سنگریزه، شن و بنتونیت بوده که طی یک سری از آزمایش‌ها با سعی و خطا درصد

غیرمتداول برای محاسبه آبهستگی موضعی در پایین دست حوضچه‌های آرامش بدون در نظر گرفتن عمق نرمال پایاب و بر اساس داده‌های جریان با سرعت زیاد ارائه داد.

(Schleiss 2002) ضمن تجزیه و تحلیل مفهوم فیزیکی آبهستگی، روش‌های مختلف از فرمول‌های تجربی ساده تا مدل‌های پیچیده را برای برآورد آبهستگی ارائه داد.

در این مطالعه هدف تعیین نسبت مناسبی از مخلوط مصالح چسبنده و غیرچسبنده است که طبق معیار آناندل (Anandale 1995 & 2002a) بتواند خصوصیات مقاومتی سنگهای متشکله در کف و دیواره‌های حوضچه استغراق سد کارون ۳ را مدل و شبیه سازی نماید. در این راستا، مدل هیدرولیکی محدوده‌ای از حوضچه استغراق سد کارون ۳ مورد بررسی قرار گرفت. این مدل هیدرولیکی با مقیاس ۱:۷۰ محدوده ای از حوضچه استغراق سد کارون ۳ به طول ۱۵۰ متر از بالادست محل برخورد دورترین جت پرتابی در نمونه اصلی را شامل می‌شود. انتخاب مقیاس ۱:۷۰ در آزمایشهای فلوم، به منظور تعمیم و تفسیر نتایج آن با نتایج مدل سه بعدی حوضچه استغراق با بستر متحرک بوده است. به منظور تعیین نسبت مناسب مخلوط مصالح چسبنده و غیر چسبنده که خواص مقاومتی سنگهای متشکله کف و دیواره‌های این حوضچه استغراق را در برابر جریانهای آشفته تأمین نماید؛ چهار سری آزمایش با مخلوط مصالح مختلف چسبنده و غیر چسبنده در یک فلوم آزمایشگاهی انجام شده است.

۲ - تئوری حاکم بر فرسایش پذیری

روشهای مختلفی برای پیش‌بینی آبهستگی وجود دارد که به طور خلاصه می‌توان این روشها را به مطالعات مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی، مدل‌های کامپیوتری و روشهای تجربی تقسیم کرد.

روش شاخص فرسایش‌پذیری که برای پیش‌بینی آبهستگی در هر گونه مصالح خاکی از سنگ تا خاکهای دانه‌ای چسبنده و غیرچسبنده به کار می‌رود؛ یک روش نیمه تجربی است که توسط آناندل در سال ۱۹۹۵ ارائه گردید. در این روش آستانه فرسایش‌پذیری از طریق رسم شاخص فرسایش‌پذیری برای انواع مختلف خاک و سنگ در مقابل توان جریان حاصل می‌شود. برای هر نمونه از مصالح با استفاده از این آستانه می‌توان امکان یا عدم امکان آبهستگی را پیش‌بینی نمود. شاخص فرسایش‌پذیری (K) از حاصلضرب ۴ پارامتر مطابق رابطه (۱) حاصل می‌شود.

$$K = M_s K_b K_d J_s \quad (1)$$

حجمی آنها تعیین شد. نسبت مخلوط بگونه‌ای که بتواند ضمن پایدار ماندن روی دیواره‌های شیب‌دار حوضچه استغراق در حالت غرقابی، تحت تاثیر تنش‌های برشی بزرگ فرسایش یابد بدست آمد. این مخلوط با نسبت حجمی ۱۹/۷٪ آب، ۴۲/۸٪ شن، ۲۰٪ ماسه، ۷/۵٪ بتنویت و ۱۰٪ خرده سنگ بود. (Mahab Ghods 1993)

(Yafei, et al. 2001) مراحل آبهستگی در یک حوضچه استغراق با بستر سست و مصالح یکنواخت را در اثر یک جریان دو بعدی شبیه سازی عددی نمود. برای حل میدان جریان از یک مدل سه بعدی اجزاء محدود با بکارگیری مدل اغتشاشی k-ε استفاده شد. نتایج بدست آمده از مدل عددی مطابقت خوبی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها نشان داد.

(Mazurek, et al. 2001) با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یک روش برای برآورد آبهستگی در خاکهای چسبنده تحت اثر جریان‌های آشفته و گردابی معرفی نمود.

(Annandale 2002 b) از مقایسه توان موجود جریان رودخانه برای آبهستگی، با توان مورد نیاز جریان رودخانه برای آبهستگی مواد تشکیل دهنده بستر (حداقل توان جریان رودخانه برای شروع آبهستگی)، عمق آبهستگی را تعیین نمود.

(Annandale 2002 c) توانایی نسبی سنگ به مقاومت در برابر فرسایش را تابعی از قدرت مواد دست نخورده، اندازه سنگ، تنش برشی بین قطعات سنگی مجزا و شکل آنها معرفی نمود. یک شاخص ژئومکانیکی بنام شاخص فرسایش‌پذیری که توانایی نسبی سنگ در مقاومت در برابر فرسایش را تعیین کند، معرفی نمود.

(Attari, et al. 2002) چهار مدل فیزیکی حوضچه استغراق بدون پوشش در پایین دست سد های بزرگ ایران را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که مدل‌های فیزیکی در مقایسه با فرمولهای تجربی عمق آبهستگی را بیشتر برآورد می‌نماید. بهر حال، عمق آبهستگی مشاهده شده در پروتوتیپ کارون ۱ مطابقت خوبی با فرمول تجربی نشان داد.

(Lopardo, et al. 2002) با استفاده از نتایج اندازه‌گیری دیگران از آبهستگی موضعی حاصل از جریان‌های با سرعت زیاد، ابتدا یک معادله بسیار ساده را برای برآورد آبهستگی موضعی حاصل از جریان‌های پرتابی از روی سرریز سدها مورد استفاده قرار داد، سپس چگونگی برآورد عمق آبهستگی روی بستر سنگی رودخانه در پایین دست حوضچه آرامش را پیشنهاد نمود. در نهایت یک روش

که در آن:

K : شاخص فرسایش پذیری (یک عدد بدون بعد)

M_s : پارامتر مقاومتی سنگ در حالت سالم

K_b : پارامتر اندازه قطعات

K_d : پارامتر مقاومت برشی

s : عدد ساختار نسبی زمین (پارامتر جهت گیری نسبی)

این شاخص که برای تعیین مقاومت مصالح در برابر فرسایش به کار می رود بر معیار حفاری (Kirsten (1982) که برای توصیف سنگ به کار می رود و بر مبنای تعیین توان مورد نیاز تجهیزات برای حرکت در خاک و شکافتن مصالحی که در معرض آنها قرار گرفته اند، استوار می باشد و با تخمین انرژی فرساینده آب بدست می آید (Anandale, 1995).

اندازه نسبی توان فرساینده جریان آب بوسیله توان جریان که معرف میزان اتلاف انرژی جریان می باشد تعیین می شود. این پارامتر به دلیل رابطه نزدیک آن با شدت آسفتگی و نوسانات فشار مورد استفاده قرار می گیرد. (Yang (1973) با انجام آزمایشهای خود اثبات نمود که میزان اتلاف انرژی به ازای واحد حجم جریان آب در یک کانال باز و به عبارتی توان جریان (P) برابر است با:

$$P = \gamma Q \Delta E \quad (2)$$

که در آن:

P : توان جریان $\left(\frac{KW}{m^2} \right)$; γ : وزن واحد حجم آب، Q : دبی جریان در واحد عرض کانال و ΔE : افت انرژی ایجاد شده بر حسب ارتفاع بازای واحد طول جریان $\left(\frac{m}{m} \right)$ می باشد. در واقع اناندل توانست رابطه ای بین مقاوت مصالح (که وی این مقاومت را با شاخص فرسایش پذیری، K ، نشان داده است) و توانایی جریان در فرسایش مصالح (توان جریان، P) برقرار نماید. بدین صورت که $P = f(K)$ می باشد. در هر آزمایش پس از تعیین توان فرساینده جریان، با استفاده از منحنی $(k-p)$ برای آستانه فرسایش پذیری، شاخص نظیر تعیین می گردد (Anandale, 1995).

میزان اتلاف انرژی در نتیجه توان فرساینده جریان به سه طریق و به شرح زیر قابل محاسبه می باشد:

در حالت اول توان فرساینده جریان با استفاده از عمقهای قرائت شده جریان و معادله ۲ محاسبه می شود. پارامترهای مورد نیاز شامل پیرامون مرطوب، شعاع هیدرولیکی و سرعت جریان می باشند که با استفاده از عمقهای قرائت شده جریان محاسبه می گردند. با توجه به مغشوش بودن جریان، ضریب تصحیح انرژی جنبشی برابر ۱/۱ در نظر گرفته می شود. در جائیکه اختلاف شیب انرژی و شیب بستر حائز

اهمیت است شیب خط انرژی با استفاده از مدل جریان غیریکنواخت محاسبه شده و در نتیجه میزان انرژی در هر مقطع به دست می آید. با بکارگیری میانگین دو شیب متوالی خط انرژی در رابطه ۲، توان فرساینده جریان در مدل حاصل می گردد. این توان با توجه به مقیاس مدل به توان فرساینده جریان در پروتوتایپ تبدیل می گردد.

در حالت دوم برای تعیین پروفیل جریان فوق بحرانی متغیر تدریجی توان فرساینده جریان بر اساس عمقهای محاسبه شده از روش گام به گام استاندارد قابل محاسبه می باشد. در این حالت می توان کلیه افتهای موضعی ناشی از جدایی جریان را نیز در محاسبات منظور نمود. در نیمرخهای فوق بحرانی جریان، محاسبات از بالادست (مقطع ۱) به پایین دست (مقطع ۲) صورت می گیرد و طبق رابطه انرژی می توان نوشت:

$$Z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_e \quad (3)$$

که در آن:

V_2 سرعت جریان در پایین دست، h_e افت موضعی (برای فلوهمای منشوری از این افت صرف نظر می شود) و h_f افت در طول مسیر می باشد که از رابطه زیر بدست می آید:

$$h_f = \bar{s}_f \times \Delta x = \frac{(s_{f1} + s_{f2})}{2} \Delta x \quad (4)$$

و مقدار s_f از معادله مانینگ بشرح زیر قابل محاسبه است.

$$s_f = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} \quad (5)$$

از آنجایی که مجموع Z و y با h نشان داده می شود، بنابراین معادله ۳ بصورت زیر تبدیل می گردد:

$$h_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (6)$$

$$H_1 = H_2 + h_f \quad (7)$$

تعیین h_2 نیاز به سعی و خطا دارد و برای افزایش سرعت همگرایی در هر مرحله سعی و خطا می توان، تفاوت طرفین رابطه ۷ را به سمت صفر میل داد.

در نهایت میزان اتلاف انرژی (توان فرساینده جریان) براساس عمقهای نرمال حاصل از معادله مانینگ قابل محاسبه می باشد. در این حالت با استفاده از معادله مانینگ عمق نرمال نظیر هر دبی، بخصوص در مواردی که شیب خط انرژی منفی بوده و یا مقطعی که در آن فرسایش اتفاق افتاده و امکان قرائت عمق میسر نمی باشد محاسبه می گردد، تا بتوان مقایسه ای از روند تغییرات انجام داد. برای محاسبه عمق نرمال ابتدا در هر مقطع ضریب زبری معادل برای

مصالح کف و دو دیواره تعیین می شود و ضریب زبری معادل برای مقاطع مرکب (Ne) طبق رابطه هورتن (سرعت متوسط کل جریان بر مبنای زبری معادل، برابر با سرعت متوسط در هر یک از اجزا مقاطع است)، بشرح زیر قابل محاسبه می باشد (ابریشمی ۱۳۷۲).

$$Ne = \frac{\sum n_i^{3/2} P_i^{2/3}}{P^{2/3}} \quad (8)$$

که در آن:

n_i ضریب زبری مانینگ در مقطع i ، P_i پیرامون مرطوب در آن مقطع و P پیرامون مرطوب در مقطع مرکب می باشد.

سپس با استفاده از رابطه ۹ عمق نرمال در هر مقطع متناسب با شیب آن محاسبه می شود.

$$Y_n = B \times (1.155 \times C + 2/3 C^{0.547}) \quad (9)$$

که در آن C رابطه تجربی و به شرح زیر است:

$$C = \frac{N_e \times Q}{S^{0.5} \times B^{8/3}} \quad (10)$$

بطوری که B عرض فلوم و S شیب در هر مقطع است.

۳- ارزیابی شاخص فرسایش پذیری در محل حوضچه استغراق سد کارون ۳

با توجه به اطلاعات بدست آمده از ارزیابی ها و مطالعات فرسایش پذیری حوضچه استغراق سد کارون ۳ و در ادامه مطالعات زمین شناسی منطقه، محاسبات مربوط به تعیین پارامترهای مورد نیاز در تعیین شاخص فرسایش پذیری نیز انجام یافت. در این قسمت تنها به ارائه نتایج نهایی و عدد شاخص فرسایش پذیری اکتفا می شود (Mahab Ghods, 2000).

مشخصات کلی حوضچه استغراق سد کارون ۳ بدین شرح می باشد: موقعیت در پایاب بدنه سد، طول حوضچه ۴۰۰ متر، رقوم بستر ۶۵۷ متر، عرض حداقل در کف ۳۵ متر و عرض حداکثر در رقوم ۷۲۰ متر برابر ۷۵ متر می باشد. جنس سازندهای سنگی کف و دیواره های حوضچه اغلب سنگ آهک و سنگ مارن است. مقادیر شاخص فرسایش پذیری (K) در بخش های مختلف درون حوضچه بشرح زیر ارزیابی گردیده است (شکل ۱).

- دربخش 4a3 ناحیه بالادست حوضچه استغراق مقدار K برابر ۴۱۰ تا ۵۳۰ است
- دربخش 4a4 L ناحیه میانی حوضچه استغراق مقدار K برابر ۱۰۳ تا ۱۲۰ است
- دربخش 4a4 U ناحیه پائین دست حوضچه استغراق مقدار K برابر ۲۰۱ تا ۲۴۶ است

- در سنگهای هوازده و متخلخل (به لحاظ ساختاری آشفته) نزدیک سد مقدار K برابر ۱۴۹ تا ۱۶۳ می باشد

۴- معرفی مدل و شرح آزمایش ها

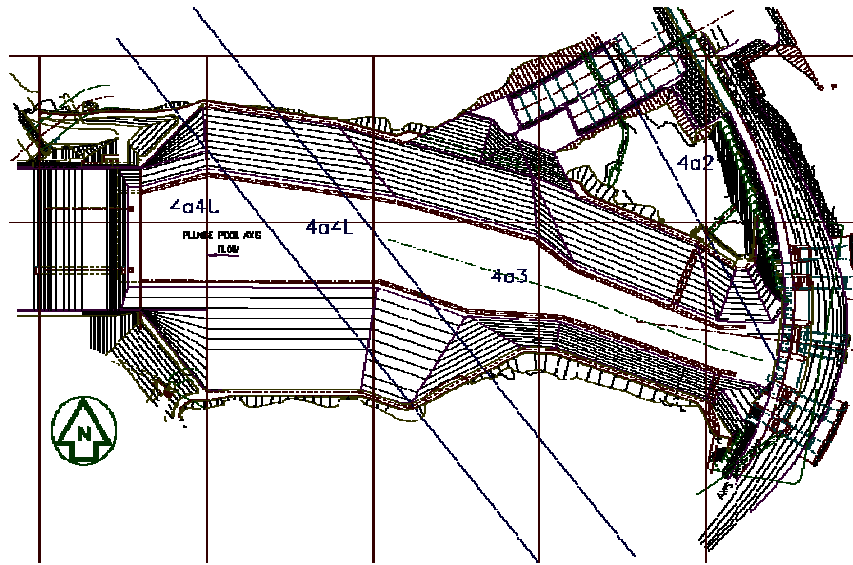
۴-۱- مشخصات فلوم

برای انجام آزمایشها، مدل هیدرولیکی سد کارون ۳ با مقیاس ۱:۷۰ واقع در آزمایشگاه هیدرولیک شماره ۲ مرکز تحقیقات آب (وابسته به وزارت نیرو) مورد استفاده قرار گرفت. این مدل شامل یک فلوم به طول مفید ۱۰ متر و عرض مفید ۰/۲۴۵ متر است که پس از تخلیه مصالح در آن شیب متوسط کف آن ۰/۰۲۵ می باشد. فلوم با استفاده از پروفیل های فولادی ساخته شده است و دارای یک دیواره شیشه ای با ضریب مانینگ ۰/۰۰۹ است که برای مشاهده جریان از آن استفاده می شود. دیواره دیگر چوبی است و دارای ضریب مانینگ ۰/۰۱۱ است. ضریب زبری کف نیز با توجه به نوع مصالح کف (بتن) تعیین می شود. دبی فلوم توسط یک پمپ به ظرفیت اسمی ۲۵۰ لیتر بر ثانیه تامین می گردد و اندازه گیری آن با استفاده از فلومتر و یک سرریز مثلثی با زاویه راس ۹۰ درجه واقع در بالادست فلوم انجام می گیرد. برای افزایش دقت در اندازه گیری ها و جلوگیری از خطای ناشی از تلاطم جریان آب، در ورودی فلوم از صفحه مشبک آرام کننده جریان استفاده شده، طول فلوم به ۱۰ قسمت مساوی تقسیم گردید و شاخص های اندازه گیری رقوم در مقاطع ۵، ۶، ۷ و ۸ ثابت شد و در بین این مقاطع از مقاطع کمکی ۵A و ۶A و ۷A استفاده گردید (شکل ۲).

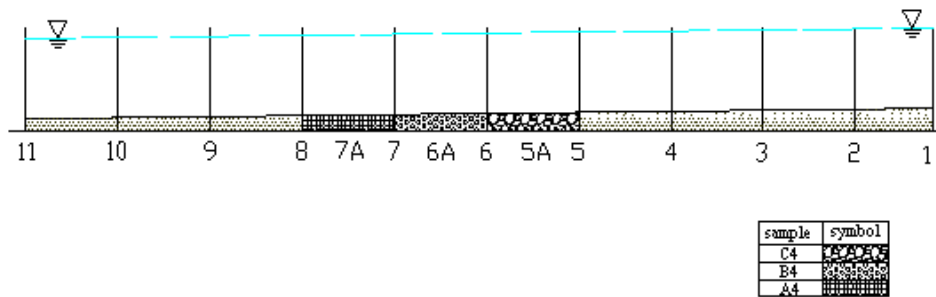
۴-۲- شرح آزمایش ها

برای تعیین نسبت مناسب مخلوط مصالح چسبنده و غیر چسبنده که بتواند مقاومت سنگهای محل پروژه را شبیه سازی کند چهار سری آزمایش در فلوم انجام پذیرفت. در تمام آزمایشها و در کلیه بازه ها بجز بازه های محدود به مقاطع ۵، ۶، ۷ و ۸، ملات شن و سیمان با حداکثر قطر سنگدانه ۷mm پوشش داده شد. مصالح با نسبت های مختلف در یک بتن ساز با ظرفیت ۵۰۰ لیتر در مدت ۵ دقیقه کاملاً مخلوط گردید. سپس مخلوط در فلوم تخلیه شد و شیب کف ۰/۰۲۵ روی مصالح پیاده گردید. در مجموع ۸۶ آزمایش انجام شد، مدت زمان هر آزمایش ۱۵ و در مواردی تا ۳۰ دقیقه بوده است.

در آزمایشهای سری اول از سیمان به عنوان ماده چسبنده استفاده شد و برای تهیه نمونه ها، مصالح بر اساس واحد حجم (یک سطل ۴ لیتری) مورد استفاده قرار گرفتند. میزان مصالح بکار رفته در دو نمونه از مخلوط، در جدول ۱ داده شده است.



شکل ۱- تقسیم بندی حوضچه استغراق کارون ۳ برای مقادیر شاخص فرسایش پذیری (Mahab Ghods, 2000)



شکل ۲- نحوه قرار گیری سه نمونه از مخلوط تهیه شده در آزمایشهای مرحله چهارم در فلوم

در این سری از آزمایشها که با دبی ۴۰lit/s تا ۱۳۰lit/s انجام شد؛ هیچگونه آبستگی در سطح بتن مشاهده نشد.

جدول ۲- نسبت مصالح بکاررفته در نمونه های مخلوط آزمایشهای سری دوم (بر حسب واحد حجم)

نوع مصالح نمونه	شن	ماسه	بتنویت	سیمان	آب
A ₂	۷	۱/۳	۰/۷	۰/۱	۱
B ₂	۷	۱/۳	۰/۷	۰/۱۲	۱
C ₂	۷	۱/۳	۰/۷	۰/۱۴	۱

از آنجا که مقاومت فرسایشی در مخلوطهای آزمایشهای سری اول و دوم می تواند بدلیل وجود سیمان باشد، لذا سیمان را می توان با میزان دلخواه رس جایگزین کرد. بنابراین در آزمایشهای سری سوم، سیمان از مخلوط مصالح حذف و بجای آن رس بتنویت جایگزین گردید. سه نمونه مخلوط مطابق جدول ۳ تهیه شد و در تهیه آنها از واحد جرمی بر حسب کیلوگرم استفاده شد. آزمایشها با دبیهای ۴۰lit/s

جدول ۱- نسبت مصالح بکار رفته در دو نمونه از مخلوط آزمایشهای سری اول (بر حسب واحد حجم)

نوع مصالح نمونه	شن	ماسه	سیمان	آب
A ₁	۱۵	۳	۰/۲	۳
B ₁	۱۵	۳	۰/۴	۳

در آزمایشهای سری دوم، بتنویت نیز به مخلوط اضافه گردید. سه نمونه مخلوط با همان معیار حجمی آزمایشهای سری اول ساخته شد (جدول ۲). این سه مخلوط در سه بازه بین مقاطع ۵، ۶، ۷ و ۸ قرار گرفت و آزمایشها برای دبیهای ۴۰lit/s تا ۱۳۰lit/s ادامه یافت. در نهایت هیچگونه آبستگی در مصالح مشاهده نگردید.

به مقطع ۷ اتفاق افتاد. لذا آب شستگی در پایین دست بیشتر به دلیل وقوع پرش هیدرولیکی است. آبشستگی در بالادست بسیار جزئی و خفیف بوده و در دبی ۱۱۰lit/s به صورت سطحی ایجاد شده است.

تا ۱۳۰lit/s انجام پذیرفت. در همان ابتدا در دبی ۴۰lit/s در مقطع ۶ آبشستگی با حرکت سطحی مصالح آغاز گردید. و در نهایت در دبی ۱۳۰lit/s سه مخلوط بطور کامل شسته شدند.

جدول ۴- نسبت مصالح بکار رفته در مخلوط ها در

آزمایشهای مرحله چهارم (kg)

نوع مصالح نمونه	شن	ماسه	بتونیت	آب	کلاس
A ₄	۴۷/۲	۹/۵	۴/۷	۱۰/۷	۷/۵
B ₄	۴۷/۲	۹/۵	۶/۳	۱۰/۷	۱۰
C ₄	۴۷/۲	۹/۵	۷/۹	۱۰/۷	۱۲/۵
D ₄	۴۷/۲	۹/۵	۵/۴	۱۰/۷	۸/۵
E ₄	۴۷/۲	۹/۵	۷/۲	۱۰/۷	۱۱/۵

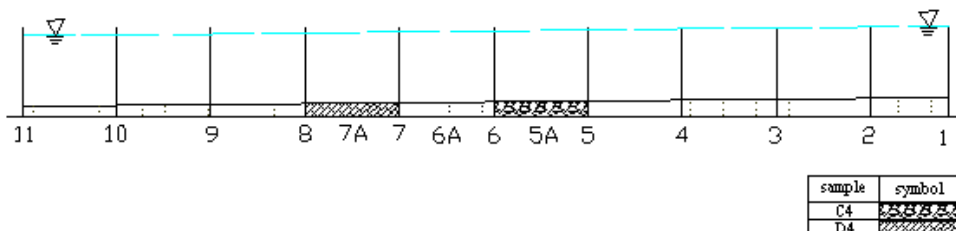
در مرحله دوم از آزمایشهای سری چهارم، مقاومت نمونه‌ها به فرسایش در گروههای دوتایی در فلوم مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا در بازه‌های منتهی به مقاطع ۶ و ۸ به ترتیب مخلوطهای B₄ و A₄ قرار داده شد. مخلوط A₄ در دبی ۴۰lit/s و مخلوط B₄ در دبی ۸۰lit/s شسته شد. در تکرار دیگر، آزمایش‌ها با مخلوطهای C₄ و D₄ به ترتیب در بازه‌های فوق‌الذکر انجام پذیرفت (شکل ۳). آزمایشها از دبی ۴۰lit/s شروع شده تا دبی ۱۳۰lit/s ادامه یافت. در نمونه D₄، در دبی ۶۵lit/s آبشستگی سطحی در بازه ۸ و در نمونه C₄ در دبی ۱۲۰lit/s آبشستگی در مقطع ۶ مشاهده شد. آزمایش‌ها دوباره تکرار گردید. زمان آزمایش در دبی‌های بحرانی (مطابق با نتایج آزمایش‌های قبلی این سری) به ۳۰ تا ۳۵ دقیقه افزایش یافت. در نمونه D₄، در دبی ۶۰lit/s فرسایش مختصر سطحی همراه با ایجاد حفرات بسیار کوچک رویت شد. در دبی ۶۵lit/s آبشستگی سطحی منجر به ایجاد حفره‌هایی به قطر تقریبی ۲ تا ۳ سانتی‌متر در این نمونه شد. در پایان زمان آزمایش که ۳۵ دقیقه به طول انجامید آبشستگی ممتد در نمونه D₄ به وجود آمد. در دبی ۱۲۰lit/s، در بازه مربوط به نمونه D₄ پرش هیدرولیکی رخ داد. همچنین در دبی ۱۳۰lit/s آبشستگی مصالح در نمونه C₄ آغاز و به سرعت گسترش یافت.

جدول ۳- نسبت مصالح بکار رفته در نمونه های مخلوط

آزمایش های سری سوم (kg)

نوع مصالح نمونه	شن	ماسه	بتونیت	آب
A ₃	۵۱/۳	۱۰/۳	۶/۸	۱۱/۶
B ₃	۴۹/۲	۹/۸	۹/۸	۱۱/۲
C ₃	۴۷/۲	۹/۵	۹/۵	۱۰/۷

در سری نهایی، مخلوط‌ها با نسبت‌های مندرج در جدول ۴ تهیه گردید و آزمایشها انجام شد. دسته‌بندی مخلوطها در کلاس‌های مختلف بر اساس میزان بتونیت موجود در هر نمونه می‌باشد. آزمایشهای این سری، در مرحله اول با اجرای سه نمونه مخلوطهای A₄، B₄ و C₄ در سه بازه از فلوم به ترتیب بین مقاطع ۵ الی ۸ انجام پذیرفت. مصالح بر اساس نسبت وزنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نحوه قرارگیری مخلوطها در فلوم در شکل ۲ بطور شماتیک داده شده است. در این مرحله از آزمایشها، در دبی ۴۰lit/s، پس از ۱۵ دقیقه از شروع آزمایش فرسایش در بازه ۸ شروع شد و پس از ۲۷ دقیقه فرسایش شدیدی در نمونه A₄ اتفاق افتاد. در پایان این آزمایش پرش هیدرولیکی در انتهای نمونه A₄ در بازه ۸ آغاز گردید و با حرکت به سمت بالادست توسعه یافت. با افزایش دبی روند فرسایش به علت وجود پرش هیدرولیکی تشدید شده و زمان هر آزمایش به ۱۵ دقیقه کاهش یافت. در دبی ۶۰lit/s پرش هیدرولیکی به انتهای نمونه B₄ در مقطع ۷ انتقال یافته و چون بازه منتهی به مقطع ۸ کاملاً شسته شده بود؛ بر شدت فرسایش افزوده گردید. بدلیل ناپایداری بازه منتهی به مقطع ۸ آزمایش در دبی ۷۰lit/s متوقف گردید. انتهای مقطع ۷ ترمیم شد، بازه ۸ با آجر پر گردید و سپس آزمایش‌ها با دبی های ۷۰lit/s و بیشتر ادامه یافت. در دبی ۸۰lit/s آبشستگی شدید بود و به همین منوال فرسایش بازه ۷ ادامه یافت، بطوری که در دبی ۱۰۰lit/s پرش هیدرولیکی در بازه منتهی



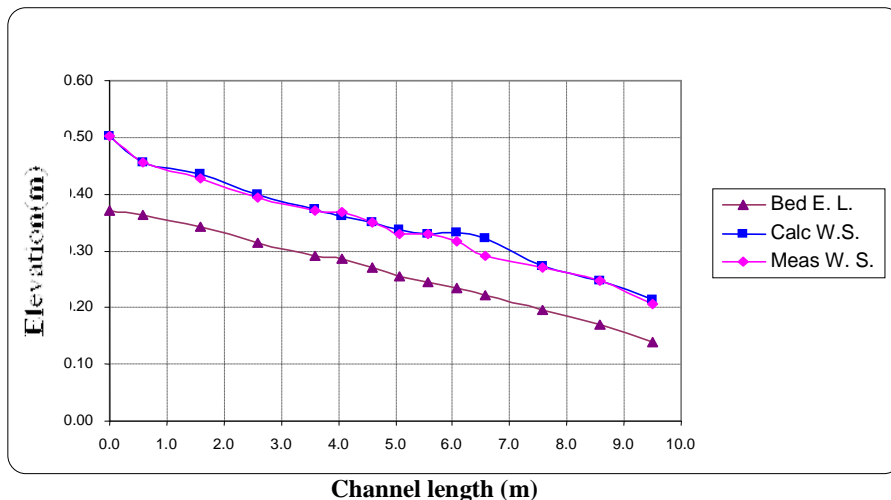
شکل ۳- نحوه قرار گیری دو نمونه از مخلوط تهیه شده در آزمایشهای مرحله چهارم در فلوم

در مرحله سوم از آزمایشهای سری چهارم، نمونه‌ها به طور منفرد در سه متر از طول فلوم قرار گرفته و آزمایش‌ها به طور مجزا انجام پذیرفت. در این سری از آزمایشها نمونه های A4، B4، C4، E4 و D4 مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به مشاهدات به عمل آمده در هر آزمایش، دبی آستانه حرکت ذرات تعیین گردید. توان فرساینده جریان با سه روش (استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، محاسبات مربوط به عمق نرمال و محاسبه پروفیل جریان به روش گام به گام استاندارد) محاسبه شد و شاخص فرسایش پذیری این مصالح با استفاده از روش آناندل تعیین گردید. از مقایسه نتایج حاصل از این سه روش که همپوشانی قابل قبولی دارند، شاخص فرسایش پذیری برای هر مخلوط از مصالح تعیین گردید.

آزمایش نمونه A4

آزمایش این نمونه با دبی‌های ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ لیتر در ثانیه انجام شد. با توجه به نحوه حرکت رسوبات و میزان فرسایش ایجاد شده، دبی ۳۰ lit/s برای این نمونه به عنوان دبی آستانه فرسایش

پذیری تعیین گردید و در این دبی پروفیل طولی جریان اندازه گیری شد. پس از تعیین توان فرساینده جریان در مدل و تعمیم آن به توان فرساینده پروتوتیپ، با توجه به مقیاس مدل شاخص فرسایش پذیری با استفاده از گراف آستانه حرکت آناندل (k-p) تعیین گردید. لازم به توضیح است که چنانچه پروفیل اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه شیب معکوس داشته باشد در محاسبات مذکور این مقاطع حذف می‌گردد. همچنین با استفاده از معادله مانینگ (معادله ۹) پروفیل نرمال جریان برای دبی آستانه فرسایش پذیری محاسبه گردید. شکل ۴ به‌طور جامع رقوم کف فلوم، پروفیل اندازه‌گیری شده و محاسبه شده جریان برای دبی آستانه حرکت نمونه A4 را در هر مقطع نشان می‌دهد. سپس از روش گام به گام استاندارد برای تعیین پروفیل جریان فوق بحرانی متغیر تدریجی استفاده شد. میانگین شاخص فرسایش پذیری بدست آمده از این روش ۳۴ است. همچنین میانگین شاخص فرسایش پذیری بدست آمده از روشهای عمق نرمال و مشاهدات آزمایشگاهی بترتیب برابر ۴۱ و ۴۵ است (جدول ۵).



شکل ۴- رقوم کف فلوم (Bed E.L.)، پروفیل اندازه‌گیری شده (Meas W.S.) و محاسبه شده (Calc W.S.) جریان در مدل برای دبی ۳۰ lit/s و در نمونه A4

جدول ۵- نتایج مربوط به میانگین شاخص فرسایش پذیری بدست آمده از سه روش آزمایشگاهی، عمق نرمال و گام به گام استاندارد

نمونه	کلاس بندی رس	دبی‌های آزمایش lit/s	سرعت آستانه حرکت m/s	دبی آستانه حرکت Lit/s	توان جریان KW/m ²	میانگین شاخص فرسایش پذیری		
						آزمایشگاهی	عمق نرمال	روش گام به گام استاندارد
A ₄	۷/۵	۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰	۱/۵۵	۳۰	۱۶	۴۵	۴۱	۳۴
D ₄	۸/۵	۴۰، ۴۵، ۵۰، ۶۰، ۷۰	۱/۸۸	۶۵	۳۶	۱۳۷	۱۲۰	۹۴
B ₄	۱۰	۶۵، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰	۱/۹۷	۹۵	۵۰	۲۳۵	۱۸۵	۱۵۲
E ₄	۱۱/۵	۹۵، ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۲۰	۲/۱۶	۱۲۰	۷۱	۳۱۰	۲۹۸	۲۱۳

آزمایش نمونه D₄

آزمایش این نمونه با دبی ۴۰ lit/s شروع شده و تا دبی ۷۰ lit/s ادامه یافت. در نزدیکی دبی آستانه حرکت افزایش دبی با نرخ ۵ lit/s صورت پذیرفت. برای این نمونه دبی ۶۵ lit/s به عنوان دبی آستانه فرسایش پذیری تعیین گردید. برای این دبی، پروفیل جریان اندازه گیری شد و با استفاده از معادله ۹ و روش گام به گام استاندارد نیز محاسبه گردید. میانگین شاخص فرسایش پذیری بدست آمده از روش گام به گام استاندارد برابر ۹۴، از روش عمق نرمال برابر ۱۲۰ و از داده های آزمایشگاهی برابر ۱۳۷ می باشد، (جدول ۵).

آزمایش نمونه B₄

آزمایش این نمونه با دبی ۶۰ lit/s شروع شده و تا دبی ۱۰۰ lit/s ادامه یافت. دبی ۹۵ lit/s برای این نمونه از مخلوط به عنوان دبی آستانه فرسایش پذیری تعیین گردید. برای این دبی، پروفیل جریان اندازه گیری شد و با استفاده از معادله ۹ و روش گام به گام استاندارد نیز محاسبه گردید. میانگین شاخص فرسایش پذیری بدست آمده از داده های آزمایشگاهی برابر ۲۳۵، از روش گام به گام استاندارد برابر ۱۵۲ و از روش عمق نرمال برابر ۱۸۵ می باشد، (جدول ۵).

آزمایش نمونه E₄

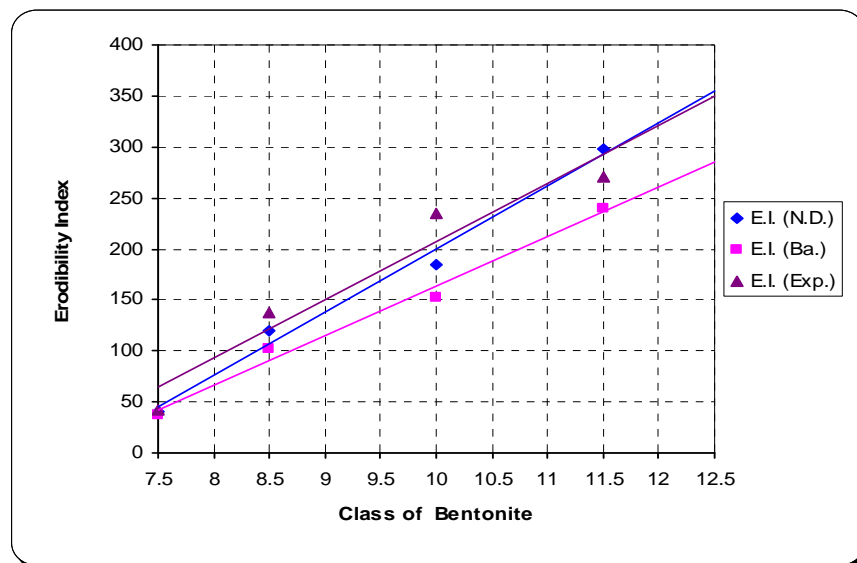
آزمایش این نمونه با دبی ۹۰ lit/s شروع شده و تا دبی ۱۲۵ lit/s ادامه یافت. دبی ۱۲۰ lit/s برای این نمونه به عنوان دبی آستانه فرسایش پذیری تعیین گردید. میانگین شاخص فرسایش پذیری از داده های آزمایشگاهی ۳۱۰، از روش گام به گام استاندارد ۲۱۳ و از روش عمق نرمال ۲۹۸ بدست آمده است، (جدول ۵).

آزمایش نمونه C₄

آزمایش این نمونه با دبی ۱۰۰ lit/s شروع شد. دبی ۱۲۰ lit/s آغاز فرسایش مختصر در این نمونه بوده است که در مقطع 6A رویت گردید. در دبی ۱۳۰ lit/s مقطع 5A نیز دچار فرسایش مختصر گردیده و در مقطع 6A پس از ۱۵ دقیقه از عبور جریان با این دبی حفرات کوچک آبستگي دیده شد. به دلیل محدودیت در تامین دبی بیشتر امکان بررسی و تصمیم گیری در مورد این نمونه میسر نشد لذا آزمایش متوقف گردید و از ارائه نتایج آن صرف نظر شد. شاخص فرسایش پذیری بدست آمده با استفاده از سه روش عمق نرمال، گام به گام استاندارد و اندازه گیری های آزمایشگاهی در برابر درصد بنتونیت موجود در مخلوط (کلاس بنتونیت) در شکل ۵ داده شده است.

۵ - نتیجه گیری

به منظور دستیابی به نسبت مناسبی از مخلوط مصالح چسبنده و غیرچسبنده که بتواند خصوصیات مقاومتی سنگهای محل پروژه کارون ۳ را شبیه سازی نماید، هشتاد و شش آزمایش با نسبت های مختلف از مخلوط مصالح چسبنده و غیرچسبنده انجام پذیرفت. ابتدا با روش سعی خطا نوع مواد چسبنده تعیین گردید. سیمان به این دلیل که خصوصیات متفاوتی در طول زمان از خود نشان می دهد و بخاطر سخت شدگی شدید آن در برخورد با آب و مقاومت در برابر فرسایش، ماده چسبنده نامناسبی شناخته شد و از مخلوط مصالح حذف گردید و به جای آن رس بنتونیت جایگزین شد.



شکل ۵ - شاخص فرسایش پذیری بدست آمده در برابر کلاس بنتونیت در مصالح با استفاده از روش عمق نرمال (N.D.)، روش گام به گام استاندارد (Ba.) و روش آزمایشگاهی (Exp.)

- Annandale, G.W. (2002b) "Quantification of the relative ability of rock to resist scour", *International Workshop on Rock scour*, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Annandale, G.W. (2002c) "Quantification of extent of scour using the erodibility index method", *International Workshop on Rock Scour*, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Attari, j. , Arefi, F. and Golzari, F. (2002), "A review on physical models of scour holes below large dams in Iran", *International Workshop on Rock Scour*, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Johnson, G. (1977), "Use of weakly cohesive material for scale model scour studies in flood spillway design", *17th IAHR*, Baden Baden, Germany.
- Khatsura, R.M. (1992), "State of art on construction, prediction, and analysis of scour in rocky beds downstream of ski jump spillways", *CWPRS*, Pune. India.
- Lopardo, R.A. , Lopardo M.C. and Casado J.M. (2002), "Local rock scour downstream larg dams", *International Workshop on Rock Scour*, EPFL, Lausanne.
- Mahab Ghods Acres general partnership, (1993), "Karoon III development project: Complementary Comprehensive Hydraulic Model study Report.", *Niagara falls*. Ontario.
- Mahab Ghods Acres general partnership, (2000), "Karoon III development project: Assessment of Erodibility Index in Karoon III plug pool.", *Niagara falls*. Ontario.
- Mazurek, K.A. , Rajaratnam, N. and Sego D.C., (2001) "Scour of cohesive soil by submerged circular turbulent impinging jets", *J. of Hyd. Eng.* , ASCE vol . 127, No.7,.
- Schleiss, A.J. (2002), "Scour evaluation in space and time –the challenge of dam designers", *International Workshop on Rock Scour*, EPFL, Lausanne.
- Yafei, J.A., Tadanori Kitamura and Wang Sam S.Y. (2001), "Simulation of scour process in plunging pool of loose bed-material", *J. of Hyd. Eng.*, ASCE vol . 127, No.3.
- Yang, C.T. (1973), "Incipient motion and sediment transport", *J. of the Hydraulics division*, ASCE vol. 99, No. HY10, Proceedings paper 10067, pp. 1679-1704.

آزمایش‌ها برای بدست آوردن میزان مناسب رس ادامه یافت؛ اساس شبیه‌سازی، روش شاخص فرسایش‌پذیری اناندل بوده و چندین گزینه از مخلوط مصالح که میزان شن، ماسه و آب در آنها ثابت و تنها تفاوت آنها در میزان رس بوده، مورد آزمایش قرار گرفت. پروفیل جریان در فلوم اندازه‌گیری شده و با استفاده از این پروفیل و همچنین پروفیل نرمال جریان و روش گام به گام استاندارد شاخص فرسایش‌پذیری برای مخلوط مصالح با نسبت‌های مختلف رس بتونیت محاسبه گردید. تغییرات شاخص فرسایش‌پذیری بدست آمده از سه روش در برابر میزان رس بتونیت استفاده شده در مخلوط‌ها در شکل ۵ معرفی گردید. در این شکل همبستگی مناسبی در روند شاخص فرسایش‌پذیری مصالح و میزان ماده چسبیده (بتونیت) به کار رفته دیده می‌شود. با استفاده از این منحنی می‌توان با توجه به شاخص فرسایش‌پذیری مورد انتظار، کلاس بتونیت را بدست آورد. با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی در محل پروژه کارون ۳، و نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها برای حوضچه استغراق در ناحیه بالادست (4a3)، بتونیت با کلاس ۱۲/۵ نظیر شاخص فرسایش‌پذیری محدوده ۴۱۰-۵۳۰، برای ناحیه میانی (4a4L)، بتونیت با کلاس ۸/۲۵ نظیر شاخص فرسایش‌پذیری محدوده ۱۰۳-۱۲۰ و در نهایت برای ناحیه پایاب (4a4U)، بتونیت با کلاس ۹/۲۵ نظیر شاخص فرسایش‌پذیری محدوده ۲۰۱-۲۴۶ انتخاب گردید.

۶- تشکر

بدینوسیله از مرکز تحقیقات آب (وابسته به وزارت نیرو) به دلیل راهنمایی‌های کاربردی و در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷- مراجع

- ابریشمی، جلیل و حسینی، سید محمود، (۱۳۷۲)، "هیدرولیک کانال‌های باز"، نشر مشهد.
- Annandale, G.W. (1995), "Erodibility", *journal of hydraulic research*, Vol.33, No.4, pp. 471-494.
- Annandale, G.W. (2002a), "The Erodibility Index method: An overview", *International Workshop on Rock scour*, EPFL, Lausanne, Switzerland, September 25-28, 2002 (a).