

سرعت برخورد سطح آب، بستگی دارد. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در برآورد عمر مفید سدهای انحرافی و سدهای اصلاحی بتنی در مقابل سیلاب‌های واریزه‌ای استفاده شود. واژه‌های کلیدی: سدهای انحرافی، جریان واریزه‌ای، تخریب حوضچه آرامش، ضربه دانه‌ی رسوب و سدهای اصلاحی

رابطه‌ی تجربی برای تعیین تخریب ناشی از ضربه‌ی رسوب بر حوضچه‌های آرامش

محمدابراهیم بنی‌حیب^۱ و مسیح الهی^۲

تاریخ دریافت: ۸۷/۸/۲۸ تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۱/۲۱

مقدمه

جریان واریزه‌ای به جریان‌های با غلظت بالای رسوبی گفته می‌شود که بیش از ۵۰ درصد وزنی رسوبات آن، شامل شن، قلوه سنگ و سنگ باشد. عبور رسوبات سیلاب‌های واریزه‌ای از روی سرریز سدها موجب تخریب سرریز و حوضچه‌ی آرامش سدها می‌شود. از آن جمله می‌توان به تخریب حوضچه‌ی آرامش سد انحرافی گرمسار در استان سمنان و سد انحرافی روزبهان در استان فارس اشاره نمود. لازم است با بررسی آزمایشگاهی مقاومت بتن حوضچه‌ی آرامش سدها در مقابل ضربات رسوبات مشخص و رابطه‌ی برای تعیین میزان تخریب ناشی از ضربات دانه‌های رسوب بتن تعیین شود. گزارش‌هایی از خسارت عبور سیلاب واریزه‌ای از روی سدهای کشورهای گوناگون، شامل ایران (سد انحرافی روزبهان)، هندوستان، (سد ایچاری^۳ و سد مانری^۴ در مناطق کوهستانی هیمالیا)، سوئیس و فرانسه (در مناطق کوهستانی آلپ)، به وسیله‌ی بنی‌حیب [۳]، بارگوا [۴] و موریس [۷] ارایه شده است. در سدهای یاد شده، خوردگی‌ها و حفره‌هایی روی سرریز و حوضچه‌ی آرامش مشاهده شده است، که علت همه‌ی این خوردگی‌ها را عبور شن، ماسه و قلوه سنگ دانسته‌اند و برای حل این مشکل از راهکارهایی نظیر استفاده از صفحات فلزی و نبشی برای لبه‌های تیز جام غلطان و دندانه‌های آن در سد ایچاری، روکش فلزی با مهارهای فلزی روی بتن سرریز و حوضچه در سد مانری، بتن با مقاومت بالا و رزین‌های اپوکسی در چین، نصب بلوک‌های گرانیتی و پوشش حوضچه آرامش باریل راه آهن در سوئیس و چوب بلوط و صنوبر به عنوان پوشش حفاظتی در فرانسه استفاده شده است. هیچ‌کدام در سوئیس همین شکل سایش را داشته‌اند و شرکت ملی رن روی مواد گوناگون آزمایش مقاومت ضربه و سایش انجام داده است [۸].

بارگوا [۴] و موریس [۷] خسارت وارده به سرریز و حوضچه‌ی

چکیده

این مقاله رابطه‌ی تجربی برای تعیین درصد خوردگی بتن حوضچه‌های آرامش سدهای انحرافی و اصلاحی بر اثر ضربه رسوبات جریان واریزه را بررسی می‌کند. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که در آزمایش‌های پژوهش‌های گذشته، مخلوطی از اثر ضربه و سایش آزمایش گردیده و رابطه‌ی تجربی نیز برای اثر ضربه و یا سایش ارایه نشده است و همچنین قطر دانه‌های رسوب نیز در حد قطرهای رسوب متداول در جریان‌های واریزه‌ای نبوده و یا ضربات دانه‌های رسوب روی حوضچه‌ی خالی از آب بررسی شده است، بنابراین در این پژوهش، رابطه‌ی تجربی پیشنهاد شده است که اثر ضربه‌ی رسوبات درشت دانه‌ی جریان واریزه‌ای روی دال‌های بتنی حوضچه‌های آرامش با وجود عمق پایاب را تعیین می‌کند. در این پژوهش، ابتدا تحلیل ابعادی صورت گرفته و سپس ۱۳۵ نمونه‌ی بتنی آزمایش شده است. آزمایش روی نمونه‌های بتنی با سه عیار سیمان و پنج عمق گوناگون آب پایاب و به سه قطر مختلف رسوب واریزه‌ای انجام شده و خوردگی ناشی از ضربات متوالی دانه‌ی رسوب اندازه‌گیری و ثبت شده است. سپس همبستگی یک متغیره و چند متغیره برای تخمین درصد خوردگی حوضچه در اثر ضربات رسوب بررسی و در نهایت بر اساس میانگین مربعات خطاهای هر یک از روابط تجربی، رابطه‌ی توانی چند متغیره پیشنهاد شده است. بررسی همبستگی بین عامل‌های بی بعد نشان می‌دهد که درصد خوردگی حوضچه‌ی آرامش با انرژی پتانسیل دانه‌های رسوب و نسبت سرعت برخورد دانه‌ی رسوب به بتن حوضچه‌ی آرامش به

۱- نویسنده مسئول و استادیار گره مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان

دانشگاه تهران Banihabib@ut.ac.ir

۲- دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان

دانشگاه تهران

3- Maneri

4- Ichari

است. لذا هدف از این پژوهش بررسی اثر تخریبی ضربه‌ی رسوبات بر روی حوضچه‌ی آرامش و ارایه‌ی رابطه‌ی تجربی برای تخمین تخریب بتن حوضچه‌ی آرامش با وجود عمق پایاب‌های گوناگون آب می‌باشد و اثر ضربه‌ی رسوبات بر روی دال بتنی حوضچه‌ی آرامش در عمق‌های گوناگون آب بررسی شده و روابط تجربی گوناگون نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

مواد

آزمایش ضربه روی ۱۳۵ نمونه انجام گرفت که شامل طرح اختلاط نمونه‌های بتنی بر اساس ۱۱/۱ ACI ۱۲ بوده و ویژگی‌های مصالح مورد استفاده در هر مخلوط بتنی و وزن آن‌ها در جدول‌های (۱) تا (۳) ارایه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشخص شده، نسبت آب به سیمان بتن مورد استفاده ۰/۵ بوده و در ساخت بتن از شن و ماسه‌ی رودخانه استفاده شده است. نمونه‌ها دارای سه عیار سیمان ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم در متر مکعب بوده و از هر مخلوط بتنی یاد شده در جدول‌های (۱) تا (۳) تعداد ۴۵ نمونه تهیه شد. روش ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی بدین ترتیب بوده است که ابتدا مصالح یاد شده در هر یک از جدول‌های (۱) تا (۳) به وسیله‌ی مخلوط‌کن آزمایشگاهی مخلوط شده و سپس از هر کدام ۴۵ نمونه برداشت گردید. قالب‌های نمونه‌ها یکسان بوده و استوانه‌ای به ارتفاع ۴۰ میلی‌متر و قطر ۱۴۱ میلی‌متر می‌باشند، لذا ابعاد نمونه‌های بتنی مورد آزمایش یکسان است. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا پایان روز بیست و هشتم در آب قرار داده شدند. برای آزمایش ضربه از ۳ نوع گلوله‌ی کرومی شکل با جنس کروم استیل استفاده شده که قطر و وزن آن‌ها در جدول (۴) آمده است. سایر وسایل مورد استفاده در آزمایش عبارتند از:

- ترازوی رقومی با دقت ۰/۰۱ گرم

- خط کش و متر فلزی

- دستگاه آزمایش شامل مخزن آب به‌مراه لوله هادی جهت برخورد گلوله‌ها به وسط نمونه‌های بتنی

آرامش سدهای مخزنی و برق‌آبی در اثر عبور رسوبات درشت دانه را در نقاط گوناگون دنیا گزارش نموده‌اند. گزارش‌ها و مقاله‌های یادشده بیانگر ضرورت پژوهش در زمینه‌ی اثر تخریبی عبور سیلاب و اریزه‌ای از روی سرریز و حوضچه‌ی آرامش سدها می‌باشد.

لیو [۶] عامل خوردگی سرریز و حوضچه‌ی آرامش سدها را به دو دلیل سایش و ضربه‌ی رسوبات بر سطح آن‌ها عنوان کرد. استانداردهای تدوین شده برای آزمایش اثر رسوبات بر روی بتن، بیش‌تر بر روی اثر سایشی رسوبات و نه اثر ضربه‌ی رسوبات پرداخته است. در آخرین استاندارد ارایه شده [۹ و ۱۰] از سوی انجمن امریکایی آزمایش مصالح، بر کیفی بودن نتایج آزمایش تاکید شده است. در پژوهشی که لیو [۶] انجام داد، جریان جت حاوی ماسه بر روی قطعه بتنی پاشیده می‌شود و اثر جریان جت فوق‌الذکر روی انواع بتن‌های ساخته شده با درصد آب به سیمان گوناگون مورد بحث قرار داد. در پژوهش یاد شده اثر سایش و ضربه‌ی رسوبات ریز دانه‌ی ماسه‌ای ترکیب شده و اثر تخریبی ضربه به تفکیک بررسی نگردیده و نوع پژوهش بر روی مقایسه‌ی اثر سایش و ضربه روی بتن با درصد‌های گوناگون آب به سیمان متمرکز شده است. هورسیزاک [۵] در پژوهشی دیگر، با آزمایش سایش رسوبات روی نمونه‌های بتنی، خوردگی بتن را با مقدار سایش مرتبط دانسته است. این پژوهش نشان می‌دهد که درصد سایش نمونه‌های بتنی با کار انجام شده در جرم واحد نمونه‌های بتنی در ارتباط است. بررسی آزمایش‌های پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی اثر تخریبی رسوبات درشت دانه سیلاب و اریزه‌ای بر روی حوضچه‌های آرامش نشان می‌دهد که اولاً در آزمایش‌های یاد شده ساز و کار تخریبی مخلوطی از سایش و ضربه بررسی شده که سهم سایش عمده بوده، ولی مقدار آن نامشخص است. همچنین اندازه‌ی رسوبات مورد استفاده (۸- mm32) نیز در مقایسه با رسوبات درشت دانه‌ی جریان و اریزه‌ای گزارش شده [۲ و ۵] که حدوداً 300-500 mm می‌باشد، کوچک است. در همین راستا بنی حبیب [۲] پژوهشی انجام داد که در آن اثر تخریبی ضربه‌ی رسوب بر حوضچه‌ی آرامش سدهای انحرافی بررسی شد و رابطه‌ای بین درصد خوردگی با انرژی پتانسیل رسوبات جریان و اریزه‌ای بدست آمد، اما در این پژوهش اثر وجود آب در پایاب حوضچه آرامش بررسی نشده و رابطه‌ای ارائه نشده

جدول ۱ - جرم و ویژگی‌های مصالح مورد استفاده در ساخت بتن با عیار ۳۵۰

ردیف	مصالح مورد استفاده	جرم (Kg)
۱	شن رودخانه‌ای با دانه بندی ۲۰ - ۵ میلی متر	۴۹/۶
۲	ماسه‌ی رودخانه‌ای با قطر و دانه بندی بین صفر تا ۵ میلی متر	۴۲/۴۵
۳	سیمان	۱۷/۵
۴	آب	۸/۷۵

ردیف	مصالح مورد استفاده	جرم (Kg)
۱	شن رودخانه ای با دانه بندی ۲۰-۵ میلی متر	۴۰/۸۷۲
۲	ماسه ی رودخانه ای با قطر و دانه بندی بین صفر تا ۵ میلی متر	۳۴/۸۰۹
۳	سیمان	۱۶/۴
۴	آب	۸/۲

جدول ۳- جرم و ویژگی های مصالح مورد استفاده در ساخت بتن با عیار ۴۵۰

ردیف	مصالح مورد استفاده	جرم (Kg)
۱	شن رودخانه ای با دانه بندی ۲۰-۵ میلی متر	۲۰/۴۳۶
۲	ماسه ی رودخانه ای با قطر و دانه بندی بین صفر تا ۵ میلی متر	۱۷/۴۰۵
۳	سیمان	۹/۲۲۵
۴	آب	۴/۶۱۳

جدول ۴- ویژگی های گوی های بکار رفته در آزمایش

ردیف	نوع گوی	وزن گوی (gr)	قطر گوی (cm)
۱	کوچک	۵۳۳/۸۷	۵/۰۸
۲	متوسط	۱۱۹۹/۹	۶۰/۵
۳	بزرگ	۲۲۹۷/۵	۸/۲۵

روش آزمایش

نمونه ی بتنی و تبدیل آن به چند بخش ادامه می یافت. برای استخراج رابطه و راست آزمایی آن از هر نوع آزمایش سه سری انجام شد، بنابراین با در نظر گرفتن ۵ عمق آب و سه عیار سیمان تعداد نمونه ها از هر نوع مخلوط ۴۵ عدد بود که بر روی هر نمونه تعدادی آزمایش ضربه تا شکست نمونه انجام شد.



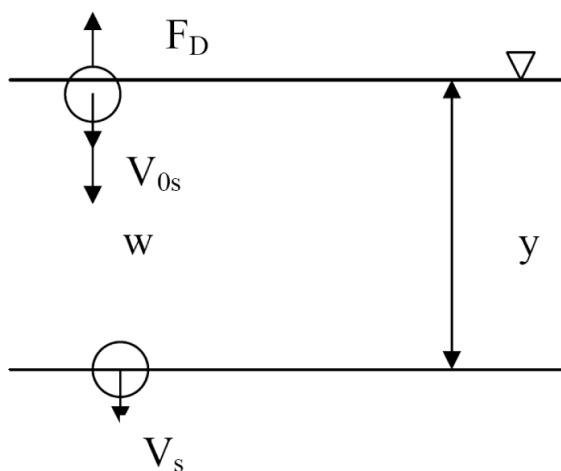
شکل ۱ - دستگاه مورد استفاده برای آزمایش

پرسش اصلی پژوهش بررسی امکان وجود رابطه ی تجربی بین درصد تخریب بتن حوضچه آرامش با انرژی پتانسیل رسوبات و اریزه ای ضربه زنده است، بنابراین دستگاه آزمایش شامل مخزن آب به ابعاد $۰/۶ \times ۰/۸ \times ۱/۶$ و لوله هادی مطابق شکل ۱ ساخته شده است. روش آزمایش بدین صورت بود که نمونه ی بتن زیر لوله ی هادی و هم مرکز با آن قرار می گرفت و در واقع مخزن در آزمایش به عنوان مدل حوضچه ی آرامش استفاده شده و رسوب ضربه زنده به وسیله ی گوی فلزی مدل شده است. علت استفاده از گوی فلزی به جای سنگ، عدم تغییر وزن و شکل گوی فلزی در طول آزمایش بوده است. در هر آزمایش گوی فلزی از فاصله ی $۱/۵$ متری با سرعت اولیه ی صفر به سمت بتن رها می شد. نمونه ها در ۵ عمق پایاب صفر، ۸، ۲۰، ۳۲ و ۴۰ سانتی متر قرار داشت. زمانی که عمق آب روی نمونه صفر بود، وزن نمونه ی بتنی پیش و پس از هر ضربه با ترازوی رقومی اندازه گیری می شد، ولی زمانی که نمونه در آب قرار داشت، عمل وزن نمودن نمونه ها به وسیله ی ترازوی رقومی پس از هر ۳ ضربه، یک بار انجام می شد. بر اساس شکل (۲)، ضربات و اندازه گیری وزن تا شکست

روابط یک متغیره‌ی مورد بررسی عبارتند از: خطی، توانی، لگاریتمی و چند جمله‌ای درجه‌ی ۲ و ۳ و روابط چند متغیره عبارتند از: خطی و توانی.

نتایج و بحث

با توجه به تجزیه و تحلیل ابعادی انجام شده می‌توان عامل‌های بی بعد موثر بر نسبت خوردگی بتن را شامل E^* ، P^* ، Y^* و عیار سیمان دانست. از آن جا که در عمل در سدها ضربات سنگ‌ها به کف حوضچه‌ی آرامش در شرایطی صورت می‌گیرد که در محل ضربه عمقی معادل عمق اولیه‌ی پرش در حوضچه‌ی آرامش وجود دارد، لازم است اثر وجود آب بر اساس تئوری‌های موجود تحلیل و محدوده‌ی دقت روابط تجربی بدست آمده روشن گردد. بدین منظور برای تحلیل مدل شکل ۳ بکار برده شده است.



شکل ۳- شمایک مدل مورد استفاده برای تحلیل وجود

عمق آب در محل ضربه

در این شکل V_s سرعت برخورد دانه‌ی رسوب به بتن و V_{0s} سرعت رسوب هنگام ورود به سطح آب است. میانگین سرعت سنگ در آب از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$V = \frac{V_{0s} + V_s}{2} \quad (6)$$

رسوب با سرعت V نیروی مقاومی در مقابل حرکت ایجاد خواهد کرد. که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$V = \frac{1}{2} C_D A_p V^2 \quad (7)$$

که در این رابطه F_D نیروی مقاوم، C_D ضریب شکل، A سطح مقطع سنگ و ρ جرم مخصوص آن می‌باشد. از تعادل دینامیکی نیروهای وزن، مقاوم و قانون دوم نیوتن پس از ساده کردن رابطه، می‌توان نوشت [۲]:



شکل ۲- نمونه‌ی بتنی هنگام قطع آزمایش ضربه

روش تحلیل

بمنظور بحث روی نتایج و بررسی روابط تجربی بین میزان تخریب نمونه‌های بتنی و انرژی پتانسیل ضربه، ابتدا نسبت خوردگی به صورت زیر تعریف شد:

$$A^* = \frac{\text{وزن اولیه بتن} - \text{وزن بتن بعد از ضربه } n \text{ ام}}{\text{وزن اولیه بتن}} \quad (1)$$

که در آن A^* نسبت خوردگی بتن پس از ضربه n ام به نمونه‌ی بتنی مورد نظر است. از آن جا که این نسبت خوردگی ناشی از ضربه‌ی اول تا n ام بوده است، انرژی پتانسیل تجمعی که صرف ضربه زدن و تولید این خوردگی را داشته، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E = \sum_{i=1}^n W_{si} H_i \quad (2)$$

که در این رابطه H_i ارتفاع رهاسازی گوی و W_{si} وزن گوی در ضربه‌ی i می‌باشد. افزون بر انرژی تجمعی E ، عمق آب در مخزن y و ارتفاع سقوط گوی p بر روی نسبت خوردگی A^* موثرند، بنابراین با تحلیل ابعادی پارامتری بعد از بدست آمدن.

$$E^* = \frac{E}{W_0 \times D} = \frac{\sum W_{si} H_i}{W_0 \times D} \quad (3)$$

$$P^* = \frac{P}{D} \quad (4)$$

$$Y^* = \frac{y}{D} \quad (5)$$

که در روابط بالا P ارتفاع سقوط، D قطر رسوب، W_0 وزن نمونه‌ی اولیه و y عمق آب است. برای تحلیل و بررسی روی داده‌ها در هر عیار، داده به ۳ دسته به صورت کاملاً تصادفی دسته بندی شد که سری اول برای تحلیل و استخراج روابط و سری دوم و سری سوم برای راست آزمایی روابط بدست آمده از سری اول بکار گرفته شد.

$$C = \frac{V_s}{V_{0s}} = \frac{-0.056 \frac{y}{D} \pm \sqrt{(0.056 \frac{y}{D})^2 - [(1 + 0.056 \frac{y}{D})(0.056 \frac{y}{D} - 1) - \frac{(y/D)/(p/D)}{(1 - (y/D)/(p/D))}]}}{1 + 0.056 \frac{y}{D}}$$

بتن حوضچه‌ی آرامش به سرعت برخورد سطح آب (C) به عنوان یک پارامتر بی بعد استفاده گردیده، این پارامتر بی بعد تابع پارامترهای Y_* , P_* می‌باشد، بنابراین این پارامتر، بی بعد به جای پارامترهای بی بعد Y_* , P_* استفاده شد و با استفاده از این پارامتر بی بعد انرژی بی بعد برخورد به صورت زیر اصلاح گردید و پارامتر E_{*m} جدید به نام انرژی بی بعد اصلاح شده به صورت زیر تعریف گردید:

$$E_{*m} = E_* C \quad (۹)$$

با داشتن مقادیر بی بعد C , Y_* , P_* , E_{*m} , E_* سه سری روابط تجربی زیر به وسیله‌ی نرم افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفت:

- رابطه‌ی یک متغیره‌ی خطی، توانی، لگاریتمی، چند جمله‌ای درجه‌ی دوم و سوم بین نسبت خوردگی و انرژی بی بعد اصلاح شده
- رابطه‌ی چند متغیره‌ی خطی بین نسبت خوردگی و پارامتر بی بعد E_* , P_* , Y_*
- رابطه‌ی چند متغیره‌ی خطی و توانی بین نسبت خوردگی و پارامتر بی بعد E_* , C

در بررسی خطای روابط بالا از میانگین قدر مطلق خطای نسبی MARE با تعریف زیر استفاده شد:

$$MARE = \frac{\sum_{i=1}^n |A_o - A_c| / A_o}{n} \quad (۱۰)$$

که در این رابطه A_o و A_c به ترتیب خوردگی مشاهده‌ای و محاسباتی و n تعداد داده‌های هر سری می‌باشد. میانگین قدر مطلق خطای نسبی برای داده‌های سری اول و دوم و سوم محاسبه شد. داده‌های سری اول مبنای استخراج روابط بوده و داده‌های سری دوم و سوم برای مقایسه‌ی نتایج تعیین A_* با روابط مورد بررسی با این سری داده‌ها استفاده شد تا بتوان با این مقایسه روابط استخراج شده را راست آزمایی نمود.

بررسی روابط یک متغیره

روابط یک متغیره، زیر بر مبنای داده‌های سری اول استخراج و نتایج تعیین A_* با روابط استخراج شده با داده‌های سری اول و دوم و سوم بر اساس میانگین خطای نسبی بررسی شد:

$$A_* = aE_{*m} + b \quad (۱۱)$$

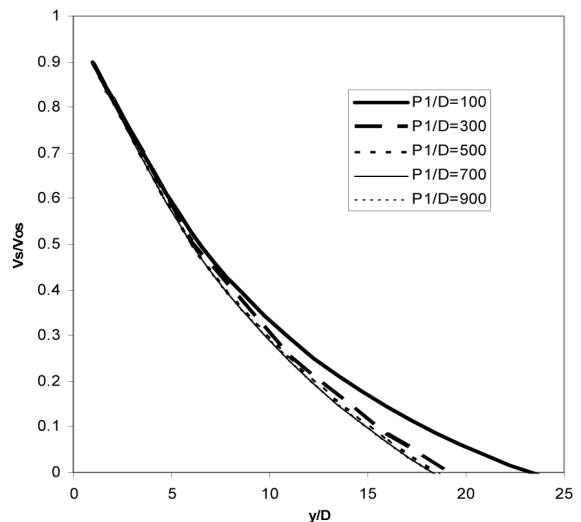
$$A_* = aE_{*m}^b \quad (۱۲)$$

$$A_* = a \ln(E_{*m}) + b \quad (۱۳)$$

$$A_* = aE_{*m}^2 + bE_{*m} + c \quad (۱۴)$$

$$A_* = aE_{*m}^2 + bE_{*m} + cE_{*m} + d \quad (۱۵)$$

که در این رابطه، y عمق آب در حوضچه، D قطر سنگ، V_{0s} و V_s به ترتیب سرعت سنگ هنگام ورود به آب و ضربه به کف بند حوضچه‌ی آرامش می‌باشد. این رابطه به صورت دسته منحنی در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل، P_1 ارتفاع سرریز سد است. این شکل نشان می‌دهد که در صورتی که عمق بی بعد Y_* کوچک تر از یک باشد، یعنی عمق جریان از قطر دانه‌ی رسوب کم تر باشد، اثر کاهش عمق آب بر سرعت برخورد با کف بند حوضچه کم تر از ۱۰ درصد خواهد بود. عمق آب در حوضچه‌ی آرامش سدها به چند برابر قطر رسوب می‌رسد، لذا لازم است در تحلیل اثر ضربه‌ی رسوب عمق جریان در نظر گرفته شود و در این پژوهش عمق‌های گوناگون آب بر روی نمونه‌های بتنی هنگام برخورد گوی در نظر گرفته شده است. با توجه به مطالب یاد شده، همبستگی بین عامل‌های بی بعد موثر در خوردگی ناشی از ضربه بررسی شد. برای بررسی این روابط از نرم افزار SPSS بهره گرفته شد، تا بهترین فرمول که بیانگر اثر ضربه‌ی رسوبات و اریزه‌ای بر حوضچه‌ی آرامش است، استخراج شود.



شکل ۴- بررسی نسبت سرعت قبل و بعد از ورود به آب نسبت به عمق نسبی اولیه پرش در حوضچه آرامش

همان گونه که پیش تر بیان شد پارامترهای موثر را می‌توان شامل E_* , P_* , Y_* و عیار سیمان دانست، لذا مقدار ضرایب هر کدام از معادله‌ها با توجه به مقدار عیار تغییر می‌کند و برای عیارهای گوناگون سیمان روابط جداگانه‌ای استخراج شد. بمنظور کاهش تعداد پارامترهای بی بعد، از نسبت سرعت برخورد دانه رسوب به

بررسی روابط چند متغیره‌ی خطی و توانی بین نسبت خوردگی و پارامترهای E_* و C

با استفاده از نرم افزار SPSS رابطه‌ی چند متغیره بین نسبت خوردگی بتن در اثر ضربه‌ی رسوب و پارامترهای بی بعد C ، E_* برای داده‌های سری اول استخراج و میانگین خطای نسبی روابط استخراج شده با داده‌های سری اول، دوم و سوم در جدول‌های (۱۱) و (۱۲) مقایسه شد. روابط چند متغیره‌ی یاد شده عبارتند از:

$$A_* = a + bC + dE_* \quad (17)$$

$$A_* = aC^b E_*^d \quad (18)$$

مقایسه‌ی مقادیر خطای نسبی این روابط با روابط ۱۲ تا ۱۶ نشان می‌دهد که رابطه‌ی ۱۸ خطایی کم تر با داده‌های مبنا و داده‌های راست آزمایی (سری دوم و سوم) داشته و می‌تواند به عنوان بهترین رابطه بین روابط مورد بررسی جهت تعیین نسبت خوردگی بتن با ضریبات رسوب مورد استفاده قرار گیرد. پارامترهای این رابطه برای عیار گوناگون بتن، متفاوت بوده و این موضوع بیانگر موثر بودن عیار سیمان بر مقاومت در مقابل خوردگی ناشی از ضربه‌ی رسوب است.

عامل‌های روابط ۱۱ تا ۱۵ و MARE داده‌های مبنا و داده‌های راست آزمایی به ترتیب در جدول‌های (۵) تا (۹) ارایه شده است. مقایسه‌ی جدول یاد شده نشان می‌دهد که خطای رابطه‌ی توانی یک متغیره با داده‌های مبنای استخراج شده نشان می‌دهد که خطای رابطه‌ی توانی یک متغیره با داده‌های مبنا و داده‌های راست آزمایی کم تر از روابط یک متغیره‌ی خطی، لگاریتمی و چند جمله‌ای توان ۲ و ۳ می‌باشد.

بررسی رابطه‌ی چند متغیره‌ی خطی بر اساس پارامترهای بی بعد E_* ، P_* و Y_*

با استفاده از نرم افزار SPSS رابطه‌ی چند متغیره بین نسبت خوردگی بتن در اثر ضربه و پارامتر بی بعد انرژی بی بعد، عمق و ارتفاع سقوط بی بعد برای داده‌های سری اول استخراج گردیده و میانگین خطای نسبی رابطه‌ی استخراج شده با داده‌های مبنا، داده‌های سری دوم و سوم برآورد شد. رابطه‌ی استخراج شده به صورت زیر بوده و پارامترها و میانگین خطای نسبی رابطه با داده‌های سه سری یاد شده در جدول (۱۰) ارایه شده است:

$$A_* = a + bY_* + cP_* + dE_* \quad (16)$$

مقایسه‌ی میانگین قدر مطلق خطای نسبی در جدول یاد شده با جدول (۶) حاکی از آن است که رابطه‌ی چند متغیره‌ی خطی خطایی بیش تر نسبت به رابطه‌ی یک متغیره‌ی توانی (رابطه‌ی ۱۳) دارد و

جدول ۵- عامل‌ها و میانگین قدر مطلق خطای نسبی رابطه‌ی $A_* = a E_{*m} + b$

عیار	a	b	MARE (۱)	MARE (۲)	MARE (۳)
۳۵۰	3×10^{-5}	-۰/۰۰۱	۱/۱۰۴۵	۱/۲۳۲۴	۱/۰۴۹۴
۴۰۰	3×10^{-5}	.	۱/۷۸۶۸	۱/۷۰۷۴	۱/۴۳۰۶
۴۵۰	6×10^{-5}	-۰/۰۰۱	۲/۲۱۲۶	۲/۰۸۱۵	۱/۹۲۶۸

جدول ۶- عامل‌ها و میانگین قدر مطلق خطای نسبی رابطه‌ی $A_* = a E_{*m}^b$

عیار	a	b	MARE (۱)	MARE (۲)	MARE (۳)
۳۵۰	9×10^{-6}	۱/۱۵۲۱	۰/۶۱۵۱	۰/۹۱۴۰	۰/۴۸۳۶
۴۰۰	4×10^{-6}	۱/۳۲۱۰	۰/۷۴۶۱	۰/۷۴۳۴	۰/۶۹۴۷
۴۵۰	3×10^{-6}	۱/۳۵۹۲	۰/۳۷۰۲	۰/۳۲۷۵	۰/۳۸۲۶

جدول ۷- عامل‌ها و میانگین قدر مطلق خطای نسبی رابطه‌ی $A_* = a \ln(E_{*m}) + b$

عیار	a	b	MARE (۱)	MARE (۲)	MARE (۳)
۳۵۰	۰/۰۰۲۶	-۰/۰۰۸۵	۲/۰۷۸۱	۲/۴۲۴۹	۲/۳۲۳۰
۴۰۰	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۸	۴/۰۱۶۲	۳/۷۲۴۲	۳/۵۶۸۴
۴۵۰	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۶	۱/۵۹۴۹	۱/۵۳۹۶	۱/۰۹۶۲

عیار	a	b	c	MARE (۱)	MARE (۲)	MARE (۳)
۳۵۰	9×10^{-8}	3×10^{-8}	۰/۰۰۰۵	۰/۹۱۱۶	۱/۰۳۴۷	۰/۷۸۳۰
۴۰۰	7×10^{-8}	2×10^{-5}	-5×10^{-5}	۱/۱۱۶۰	۱/۱۰۹۴	۰/۹۵۶۴
۴۵۰	6×10^{-8}	-4×10^{-5}	۰	۳/۹۲۰۸	۳/۷۶۰۴	۰/۵۲۱۱

جدول ۹- عامل ها و میانگین قدر مطلق خطای نسبی رابطه ی $A_* = aE_{*m}^3 + bE_{*m}^2 + cE_{*m} + d$

عیار	a	b	c	d	R	MARE (۱)	MARE (۲)	MARE (۳)
۳۵۰	5×10^{-10}	6×10^{-8}	7×10^{-6}	۰/۰۰۰۴	۰/۸۵۷۸	۰/۸۸۰۷	۱/۰۳۶۷	۰/۷۴۷۲
۴۰۰	-1×10^{-10}	1×10^{-7}	1×10^{-5}	۰	۰/۸۵۷۸	۰/۷۸۳۰	۰/۷۹۱۲	۰/۷۱۸۰
۴۵۰	5×10^{-9}	6×10^{-7}	4×10^{-5}	۰	۰/۸۸۲	۴/۹۲۴۲	۴/۳۴۲۵	۴/۴۱۲۴

جدول ۱۰- عامل ها و میانگین قدر مطلق خطای نسبی MARE رابطه ی $A_* = a + b[\frac{Y}{D}] + c[\frac{Y}{D}] + dE_{*m}$

عیار	a	b	c	d	MARE (۱)	MARE (۲)	MARE (۳)
۳۵۰	-۰/۰۰۱	9×10^{-5}	-۰/۰۰۱	$2/5 \times 10^{-5}$	۱/۴۱۸۶	۱/۲۴۹۳	۱/۳۶۹۹
۴۰۰	-۰/۰۰۱	-5×10^{-5}	$-7/8 \times 10^{-5}$	$2/5 \times 10^{-5}$	۱/۴۰۶۲	۱/۳۹۰۹	۱/۲۵۷۰
۴۵۰	۰	۰	-4×10^{-5}	$2/1 \times 10^{-5}$	۱/۰۹۱۴	۰/۹۲۲۷	۱/۰۳۵۳

جدول ۱۱- عوامل و میانگین قدر مطلق خطای نسبی رابطه ی $A_* = a + bC + dE_{*m}$

عیار	a	b	d	MARE (۱)	MARE (۲)	MARE (۳)
۳۵۰	-۳/۴۶۵	۲/۹۵۳	۰/۰۰۵	۱۲۶۷/۳۱۲	۹۷۴/۴۹۸۴	۱۱۸۶/۹۵۶
۴۰۰	-۳/۴۲۹	۳/۴۲۹	۰/۰۰۵	۱۵۹۳/۵۴۵	۱۵۴۱/۸۶۴	۱۵۱۸/۰۱۱
۴۵۰	-۴/۱۰۱	۳/۴۲۵	۰/۰۰۶	۱۶۱۸/۶۸	۶۲۰/۶۸	۷۵۷/۸۸

جدول ۱۲- عامل ها و میانگین قدر مطلق خطای نسبی رابطه ی $A_* = aC^bE_{*m}^d$

عیار	a	b	d	MARE (۱)	MARE (۲)	MARE (۳)
۳۵۰	-۵/۴۴۵	-۱/۳۴۸	۱/۲۶۷	۰/۴۲۱۵	۰/۵۴۹۱	۰/۳۵۱۱
۴۰۰	-۵/۵۴۸	-۱/۳۶	۱/۳۰۷	۰/۵۳۷۵	۰/۵۵۷۹	۰/۵۶۵۰
۴۵۰	-۵/۶۱۷	-۱/۳۰۹	۱/۳۲۰	۰/۳۴۳۷	۰/۳۳۸۳	۰/۳۵۵۶

می باشد.

- از بین روابط مورد بررسی رابطه ی توانی چند متغیره بین نسبت خوردگی بتن و انرژی بی بعد و نسبت سرعت برخورد دانه ی رسوب به بتن حوضچه ی آرامش به سرعت برخورد سطح آب کم ترین خطای متوسط نسبی را داشته و پارامترهای رابطه ی توانی چند متغیره تابعی از عیار سیمان است.

نتیجه گیری

در این پژوهش که بر مبنای انجام آزمایش های ضربه ی رسوب و ارزیابی روی نمونه های بتنی مستغرق و تحلیل روابط تجربی موجود بین نتایج آزمایش انجام شده، نتایج زیر بدست آمد:
- میزان خوردگی بتن در اثر ضربه های دانه های رسوب تابعی از انرژی بی بعد و نسبت سرعت برخورد دانه ی رسوب به بتن حوضچه ی آرامش به سرعت برخورد سطح آب و عیار سیمان بتن

5- Horszczaruk, E. 2004. The model of abrasive wear of concrete in hydraulic structures. Wear 256 (2004) ELSEVIER , pp 787-796.

6- Liu, y.w., yen, T. and Hsu, T. 2006. Abrasion erosion of concrete by water-borne sand. Cement and Concrete Research ELSEVIER No 36 pp 1814-1820.

7- Morris, G. and Fan, J. 1997. Reservoir sedimentation handbook Mc Graw -Hill.

8- Schnable Engineering Associate, Inc. 2001. Laboratory Tests and Field studies on Erosion and Abrasion Resistance of soil cement and Roller-Compacted concrete - Results of Riterature Review PCAR & D No2436.

9- The American Society for testing and Materials , Standard Test Method for Abrasion Resistance of concrete or Mortar surface by the Rotating-cutter Method, ASTM Designation C944 , Philadephia, 1999.

10- The American Society for Testing and Materials, standard Test Method for Abrasion Resistance of concrete (under water Method), ASTM Designation C1138, Philadephia, 1999.

تقدیر و تشکر

از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران، مدیریت پردیس ابوریحان و مدیریت گروه آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان که امکان پژوهش و ارایه ی این مقاله را فراهم نموده اند، سپاسگزاری می شود.

منابع

۱- بنی حبیب، م. ا. ۱۳۷۶. عامل طغیان رودخانه ای با غلظت بالای رسوب، مجموعه مقالات چهارمین سمینار مهندسی رودخانه، اهواز.

۲- بنی حبیب، م. ا. و ایرانپور، م. ۱۳۸۶. بررسی آزمایشگاهی ضربه های دانه های رسوب بر حوضچه آرامش سدها، مجموعه مقالات سومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

3- Banihabib, M.E., Shantia, H. and Ghotbi, Sh. 2002. Measures for problems of hydraulic Structures in rivers transporting Deloris flow. Procc. of International Conference on Fluvial Hydraulics. Sept. 2002. Louvain- La - Neuve, Belgium.

4- Bhargava, D.N., Narair, L. Tiagai, S.S. and Gupta, P.P. 1987. Sedimentation problems at low dams in the Himalayas. Water power & Dam Construction.