



شبیه‌سازی سایش بتن غلطکی در سازه‌های هیدرولیکی (با کاربری روش پرتابش آب و ماسه)

• حسین میرمحمدصادقی، عضو هیأت علمی موسسه عالی آموزشی پژوهشی صنعت آب و برق
• حبیب‌اله بیات، عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)

تاریخ دریافت: مهرماه ۱۳۸۲ تاریخ پذیرش: مهرماه ۱۳۸۳

E-mail: s.h.m.m.sadeghi@gmail.com

چکیده

توسعه استفاده از بتن کوبیده بدون پوشش در سازه‌های هیدرولیکی در سالهای اخیر، ایجاب می‌کند که عوامل مؤثر بر مقاومت سایشی آن، به ویژه در بخش سرریز بررسی گردد. در این مقاله، با تحلیلی بر مشاهدات آزمایشگاهی از چگونگی وقوع پدیده سایش که در برخورد مالشی جریان‌های دو فازی با سرعت زیاد به وجود می‌آید و ضمن در نظرگیری اثر پارامترهای مختلفی از قبیل دانه بندی مصالح سنگی، جنس و سطح ویژه سنگدانه‌ها، انرژی تراکمی (که این عوامل می‌تواند با پارامتری بنام شعاع هیدرولیکی متوسط معرفی گردد)، سن نمونه، عیار سیمان در طرح اختلاط و ...، معیارهای لازم برای نشان دادن مقاومت سایشی بتن غلطکی معرفی می‌گردد. برای سادگی انجام مشاهدات و قابلیت تعمیم داده‌ها برای پروژه‌های اجرایی، از دستگاه سنجش مقاومت سایشی و فرسایشی بتن با جریان فورانی چند فازی بهره‌گیری شده است. یافته‌های از تحلیل‌های آماری بر مشاهدات حاکی از آن می‌باشد که: اولاً مقاومت سایشی تابعی خطی از مقاومت فشاری بوده، ثانیاً هرچه شعاع هیدرولیکی سنگدانه‌ها بیشتر باشد، مقاومت سایشی بالاتر خواهد بود و ثالثاً با افزایش سن نمونه و عیار سیمان مقاومت سایشی افزایش معنی‌داری پیدا می‌کند.

کلمات کلیدی: بتن غلطکی، مقاومت سایشی، شعاع هیدرولیکی.

Pajouhesh & Sazandegi No:67 pp: 73-87

Modeling RCC's abrasion in hydraulic structures (Using water - sand blasting Technique)

By: H. M. M. Sadeghi, ASS. Prof. of High Education and Research Institute. H. O. Bayat, Associ. Prof. of Civil Eng. Dept, AUT.

Recent developments in using unprotected roller compacted concrete (RCC) in hydraulic structures necessitates a trough investigation of the parameters affecting its abrasion resistance, particularly within the spillways. This paper covers deterministic aspects of RCC's abrasion resistance by means of the more influencing parameters such as

specimens age, cement content and aggregates gradation, specific surface, compactness – which could be defined by a representative factor that can be called mean hydraulic radius. To ease laboratory observation on abrasion/erosion phenomena and for the sake of generalization, the water-sand blasting technique was employed in this investigation. Findings of a statistical analysis of the experimental data indicate that: A- RCC's abrasion resistance is a direct function of the compressive strength; B- by increasing aggregates' mean hydraulic radius, abrasion resistance can be improved; C- the higher the cement content and age of specimens, the better will be abrasion resistance of RCC.

Key words: RCC, Abrasion resistance, Hydraulic radius

مقدمه

بتن غلطکی که به اختصار R.C.C نامیده می‌شود، روشی جدید در ساخت سدهای وزنی و دیگر سازه‌های بتنی حجیم می‌باشد. مطابق تعریف کمیسیون جهانی سدهای بزرگ، R.C.C نوعی بتن با اسلامپ صفر بوده که مانند لایه‌های خاگریز، می‌تواند متراکم گردد. به‌طور کلی خواص بتن غلطکی سخت شده بستگی به دانه‌بندی، جنس و شکل سنگدانه‌ها، مواد سیمانی، نحوه ساخت مخلوط، درصد تراکم و کنترل اجرا دارد. مزیت این روش ساخت بتن، هزینه کمتر نسبت به دیگر انواع بتن، تولید گرمای اندک و سرعت اجرایی بالای آن است ضمن آنکه خواص مکانیکی بتن معمولی را نیز دارد (۴).

در آغاز پیدایش این فن‌آوری نوین، بتن غلطکی تنها در زیرسازی فرودگاه‌ها و جاده‌ها به کار برده می‌شد. ولی بعداً با توجه به خواص مناسب و مفید آن، در اجرای سدها نیز کم کم مورد استفاده قرار گرفت. هم اکنون این روش ساخت سد بتنی چون از نظر اقتصادی در رقابت با خاگریزها و از نظر کیفیت دارای خواص بتن معمولی می‌باشد شدیداً مورد توجه است. نمودار ۱- نشان می‌دهد که اصولاً سدهای بتن غلطکی ارزانتر از سدهای بتنی متعارف می‌باشند (۳). در کاربری‌های قدیمی تر، سطوح خارجی بتن کوبیده را همواره با لایه‌ای از بتن متعارف در مقابل عوامل محیطی و مخرب حفاظت می‌کردند. لیکن ضرورت‌های کاهش هزینه‌های اجرایی، در سال‌های اخیر به حذف پوشش یاد شده انجامیده و در نتیجه بحث مقاومت سایشی بتن کوبیده را مطرح ساخته است. به همین جهت است که نکته قابل تأمل و مهم در کاربری بتن غلطکی در سرریز سدها، رفتار مقاومت سایشی آن می‌باشد، که در صورت بررسی و مطالعه عوامل اصلی مؤثر در آن، می‌توان به ارتقاء دانش فنی نائل آمد.

این مقاله با بهره‌گیری از یافته‌های یک پژوهش گسترده، سعی بر آن دارد تا با تبیین پارامترهای مؤثر و درجه اهمیت هر یک زمینه‌های مهندسی برای بهبود رفتار سایشی بتن غلطکی معرفی کند.

مروری بر آخرین دست‌آوردهای علمی و تجربی موجود

یافته‌های پژوهشی سال ۲۰۰۱ موسسه مهندسی schabel (۱۸)

گروه مهندسی ارتش ایالات متحده آمریکا تحقیقات و بررسی‌هایی را در رابطه با پروژه‌های مشخص اجرایی جهت تعیین مقاومت سایشی و فرسایشی بتن کوبیده انجام دادند (۸،۲).

نهاد مذکور سد زینتل کانیون^۲ را با ارتفاع ۳۹ متر و با شیب سرریز ۰/۸ افقی به ۱ قائم به صورت وزنی و با R.C.C برای اولین بار در آمریکا ساخت. ده سال بعد و توسط همان گروه مهندسی، سد ویلوکریک^۳ طراحی و اجرا گردید. به عنوان بخشی از دانش طراحی این سدها، مشاهداتی بر اثرات سرعت زیاد جریان آب بر روی R.C.C با مقاومت فشاری حدود ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، آزمایشاتی به شرح مختصر ذیل انجام شد.

بر روی شش پانل $۱/۵۰ \times ۰/۵۳$ متری از R.C.C با طرح اختلاطی متکی به حدود ۱۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب سیمان که پس از عمل آوری مقاومت فشاری برابر ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع داشته و در دو حالت با سطح صاف و یا زبر، جریان آبی با سرعت بین ۲۳ تا ۲۶ متر بر ثانیه متناظر با بلندای (Head) مؤثر بین ۴۱ تا ۳۰ متر عبور داده شده بود. مشاهدات حاکی از آن بوده که برای دال‌های با سطح صاف پس از ۳۷ دقیقه در حالت حداکثر سرعت (۲۶ متر بر ثانیه) دانه‌های ریز سنگی نمایان شده و پس از ۶۳ ساعت این حالت برای بیشتر از هشتاد درصد سطح آن اتفاق افتاد و بعضاً دانه‌های سنگی نیز از دال خارج شدند.

برای دال‌های با سطح زبر با اینکه سرعت کمتر بود (۲۳ متر بر ثانیه) فرسایش و تخریب و سایش بیشتری اتفاق افتاد. عمق فرسایش پس از ۶۳/۵ ساعت حدوداً به‌طور متوسط ۱۹ میلی‌متر بود و حداکثر آن به‌طور مودی در محل سوراخ‌هایی که به‌وجود آمده بوده به عمق ۲۹ میلی‌متر نیز می‌رسیده است.

آزمایش‌های سایشی دیگری نیز توسط یک آبفشان Water Jet ۲۰۰×۲۵ میلی‌متری متمرکز بر روی نمونه‌های مکعبی ۳۰۰ میلی‌متری R.C.C که نسبت به افق پنج درجه زاویه داشت، انجام گرفت. سرعت آب در محل برخورد با نمونه‌ها برابر ۹/۱ تا ۱۰/۶ متر بر ثانیه گزارش شده است. در این نمونه‌ها از سنگ دانه‌های شکسته با حداکثر اندازه ۷۵ میلی‌متری، حدود ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب سیمان، ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب خاکستر بادی و نسبت وزنی آب به سیمان برابر ۰/۷، یک نمونه سطح صاف و صیقلی و یک نمونه سطح زبر استفاده گردید.

نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که سایش تخریبی کمی پس از گذشت ۱۴ ساعت جریان مداوم صورت گرفت و مشاهدات چشمی نیز نشان داد که مواد فرسایشی از ذرات ریز و سست نمونه‌ها بوده و عناصر اصلی تخلیه نشده است.

مصالح یاد شده را مورد آزمایش قرار دادند (۱۵،۱۴). نتایج این مشاهدات در جدول ۱- آمده است. کلیه آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه عمل آوری شده در شرایط مرطوب، انحام شد. برای نمونه‌های بتن معمولی و RCC کاهش جرم نمونه‌ها در بازه‌های زمانی ۱۲ ساعته در طول یک دوره ۷۲ ساعته از آزمایش، اندازه‌گیری شد. از آنجاکه مخلوط خاک-سیمان مقاومت نسبتاً کمی داشته و سریع‌تر تخریب می‌گردد، هر دو ساعت یکبار کاهش جرم نمونه‌های آن اندازه‌گیری شد.

تحقیقات Sabin و Hansen (۱۶) (ارزیابی و تعیین شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط)

ایشان اثرات شکل و زبری سطح سنگدانه بر شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط در محیط‌های متخلخل متشکل از مخلوط سنگدانه‌های شکسته را مورد بررسی قرار دادند (۱۲). مفهوم شعاع هیدرولیکی متوسط در جریان هیدرولیکی بین دانه‌ای بسیار مفید واقع شده به طوری که در رفتار جریان‌های هیدرولیکی غیر داریسی اغلب کاربرد دارد (۱۲، ۲۰). اساسی‌ترین تعریف شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط برابر است با رابطه ۱:

$$m = \frac{V_{Void}}{S_{Void}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

V_{Void} ، S_{Void} به ترتیب، سطح و حجم خلل و فرج بین دانه‌ها در واحد حجم مخلوط می‌باشد. مقدار m نشان‌دهنده قطر متوسط یک لوله مجازی برای عبور جریان از محیط متخلخل می‌باشد. محاسبه m با استفاده

از نتایج حاصل از جریان تند آب بر روی نمونه‌های R.C.C.، نتیجه‌گیری گردید که مصالح مورد آزمایش مقاومت لازمه و کافی در برابر سایش و تخریب را داراست. بنابراین آزمایش‌هایی را با سرعت‌های بسیار بیشتر جریان آب و مدت طولانی‌تر صورت گرفت.

بعدها دستگاهی توسعه داده شد که مقاومت سایشی و فرسایشی مواد مختلف و از جمله انواع بتن را مورد آزمایش قرار داد و اساس علمی $ASTM C 1138$ Standard Test گردید (۱۰). در این دوره از آزمایش‌ها، مقاومت سایشی بتن با تغییرات پارامترها، شامل هفت نوع مختلف از دانه‌بندی، سه نسبت آب به سیمان، شش نمونه سطح متفاوت و سه نمونه بتن (پلیمری، عادی، الیافی) انجام شد و با اتکا به نتایج بدست آمده، توصیه‌های ذیل اعلام گردید.

- استفاده از سخت‌ترین دانه‌ها (حتی المقدور)
- استفاده از حداقل عملی نسبت آب به سیمان
- از بتن الیافی برای این منظور استفاده نشود

شایان ذکر است که مقاومت سایشی بتن پلیمری بسیار زیاد بوده ولی هزینه زیاد آن باید مورد توجه قرار گیرد. همچنین بتن پوشش شده با برخی انواع پلی اورتان‌ها، کمترین سایش را دارد.

تحقیقات Russell و همکاران (۱۴)

در این پژوهش‌ها برای تعیین مقاومت سایشی بتن معمولی، بتن غلطکی و خاک-سیمان و مقایسه آنها با یکدیگر، چهار مخلوط از هر یک از

جدول ۱: مقایسه مقاومت سایشی بتن‌های R.C.C.، P.C.C. و S.C. (۱۴، ۱۵)

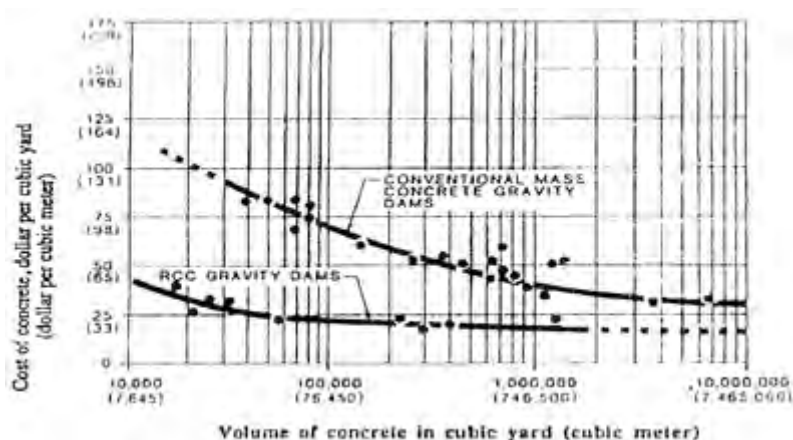
شماره مخلوط	بتن معمولی				بتن غلطکی کوبیده				بتن خاک سیمان			
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
بزرگترین اندازه دانه in	۰/۷۵	۰/۷۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱				
مقدار سیمان lb	۴۹۵	۷۰۵	۴۸۰	۷۰۵	۳۵۰	۴۵۰	۵۵۰	۶۵۰	۶	۸	۱۰	۱۲
درصد پوزولان جایگزین سیمان	۰	۰	۰	۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۰	۰	۰	۰
نسبت آب به سیمان	۰/۶۱	۰/۴۳	۰/۶۳	۰/۴۳	۰/۵۶	۰/۴۹	۰/۳۵۷	۰/۳۰۲	-	-	-	-
درصد رطوبت	-	-	-	-	۶/۵	۷/۰	۶/۴	۶/۳	۸/۳	۸/۳	۸/۳	۸/۳
نسبت ماسه به کل دانه‌ها	۴۶	۴۳	۴۴	۴۱	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	-	-	-	-
کارائی in	۱/۲۵	۲/۵۰	۲/۷۵	۳/۰۰	۰	۰	۰	۰	-	-	-	-
درصد هوا	۲/۴	۲/۴	۲/۲	۲/۰	-	-	-	-	-	-	-	-
درصد پوکی متوسط	-	-	-	-	۵/۸	۲/۲	۴/۵	۳/۹	-	-	-	-
درصد کاهش آب	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۰	۰	۰	۰	-	-	-	-
وزن واحد حجم متوسط lbs ³	۱۴۳/۰	۱۴۴/۳	۱۴۳/۱	۱۴۴/۹	۱۴۲/۰	۱۴۶/۵	۱۴۴/۶	۱۴۶/۰	۱۲۹/۱	۱۲۹/۷	۱۳۰/۳	۱۳۰/۱
مقاومت فشاری ۷ روزه psi	۳۰۲۰	۵۸۷۰	۲۸۳۵	۵۴۹۵	۱۰۰۵	۱۸۵۰	۲۶۲۰	۳۶۴۰	۵۶۵	۷۷۵	۱۱۸۰	۱۲۲۰
مقاومت فشاری ۲۸ روزه psi	۴۶۱۰	۷۲۵۵	۴۴۴۰	۷۶۲۵	۱۵۲۵	۳۰۵۰	۳۹۶۰	۵۰۱۰	۸۷۵	۱۴۰۰	۱۶۰۵	۱۸۳۰
درصد کاهش وزن معادل ۷۲ ساعته	۸/۷	۶/۰	۸/۷	۶/۸	۱۰/۱	۵/۲	۵/۴	۶/۴	۹۶/۵	۵۹/۰	۳۶/۳	۳۲/۰
کاهش حجم ۷۲ ساعته حجم cc/cm ²	۱/۰	۰/۷	۱/۰	۰/۷	۱/۱	۰/۶	۰/۶	۰/۷	۸/۰	۶/۷	۴/۱	۳/۷

$$m = \frac{eb}{6r_c} \quad \text{رابطه (۶)}$$

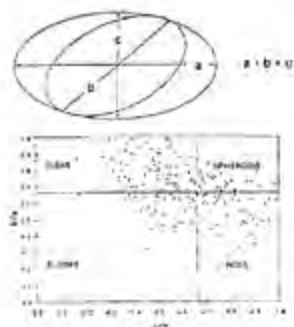
اگر ضریب شکل r_c را نتیجه حاصل ضرب دو ضریب زبری سطح R_{rough} و ضریب کرویت R_{oblite} در نظر گرفته شود (۵) و با اتکا به مشاهدات آزمایشگاهی، می‌توان به منحنی‌هایی دست یافت (۲۱) که محاسبه ضریب شکل را ساده سازد. یعنی رابطه ۷ و ۸:

$$r_c = R_{rough} \cdot R_{oblite} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$R_{oblite} = \frac{S}{\pi ac} \quad \text{رابطه (۸)}$$



شکل ۱- مقایسه هزینه ساخت بتن غلطکی و بتن معمولی (۱۱)



شکل ۲- اشکال چهارگانه سنگ دانه و تعیین زبری آن به صورت کیفی (۲۱)

از رابطه ۱- فقط در صورتی امکان پذیر است که از اثرات تماس بین دانه‌ها صرفه نظر گردد. در حالی که این فرض برای مخلوط سنگدانه‌ها، شکسته صادق نمی‌باشد. جهت حل این مشکل می‌توان از A_{VS} سطح مخصوص حجمی که برای یک سنگدانه منفرد بصورت رابطه ۲- تعریف می‌گردد، استفاده کرد.

رابطه (۲)

$$A_{VS} = \frac{S_{Solid}}{V_{Solid}}$$

رابطه ۲- برای یک گروه سنگدانه نیز به طور متوسط کاربرد دارد. با کاربرد نسبت پوکی e مخلوط، از ادغام رابطه ۱ و ۲ رابطه ۳ را خواهیم داشت:

$$m = \frac{V_{Void}}{A_{VS} V_{Solid}} = \frac{e}{A_{VS}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

باید توجه داشت چون سنگدانه‌ها بندرت در وضعیت مشابهی کنار هم قرار می‌گیرند بنابراین رابطه ۳- فقط برای چنین حالت‌هایی ممکن استفاده شود. لذا محاسبه A_{VS} و از آنجا m ، فقط برای سنگدانه‌های با شکل هندسی منظم قابل قبول است. در حالیکه سنگدانه‌های واقعی در طبیعت دارای شکل‌های نامنظم هندسی بوده و با حالت فرض شده متفاوت می‌باشند. به همین دلیل بایستی یک ضریب شکل ϕ نسبت به حالت استاندارد تعریف شود، که برای دانه‌های کروی ϕ برابر یک و برای بقیه حالت‌ها این ضریب بزرگتر از یک و از رابطه ۴- بدست می‌آید.

$$\phi = \frac{s^3}{36\pi V^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

چنانچه کره به عنوان شکل یک سنگدانه مدل در نظر گرفته شود، یک ضریب شکل به صورت نسبت A_{VS} دانه واقعی به کره معادل و تقریباً هم حجم دانه، قابل تعریف می‌باشد، با اینکه این ضریب ممکن است یگانه نباشد ولی می‌تواند به طور عملی در نظر گرفته شود.

برای دانه واقعی با سه قطر عمود برهم $a > b > c$ مطابق شکل ۲- می‌توان ضریب شکل r_c را با رابطه ۵- تعریف کرد.

رابطه (۵)

(برای کره معادل با قطر b) $A_{VS} = r_c \cdot A_{VS}$ (برای دانه واقعی) اینک برای سنگدانه‌هایی طبیعی با اشکال غیر کروی از قرار دادن تعاریف یاد شده در رابطه ۳-، رابطه ۶- بدست می‌آید:

$$S_6 = (S_4 + S_5) / 2 \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

بنابراین R_{ablate} را می‌توان با تقریب خوب، با استفاده از رابطه ۸- و جایگزینی یکی از توابع شکل s_6 ، s_8 ، s_4 به جای s در آن محاسبه نمود (۵). البته مشاهدات آزمایشگاهی مولفین نشان داده که بهترین تقریب برای s همان s_6 می‌باشد که با اطلاعات داده شده در منابع (۵، ۲۱) بیشترین تطابق را دارا می‌باشد.

نتیجه‌گیری از تحقیقات بر روی مقاومت سایشی فرسایشی RCC

از مطالعات و بررسی‌های انجام شده تاکنون می‌توان به نتایج ذیل به‌طور خلاصه جهت تعیین عوامل موثر بر مقاومت سایشی بتن غلطکی اشاره کرد (۸):

- هر چه انرژی تراکمی بیشتر باشد مقدار آب بهینه مورد نیاز کمتر است.
- هر چه مقدار آب از مقدار بهینه کمتر یا بیشتر گردد مقاومت فشاری و سایشی کمتر است.
- معمولاً مواد افزودنی تاثیر فوق العاده‌ای در مقاومت فشاری و سایشی بتن ندارد.
- هر چه مقاومت فشاری و سایشی سنگدانه‌ها بیشتر باشد با همان نسبت مقاومت فشاری و سایشی بتن غلطکی نیز بیشتر است.
- هر چه مقاومت فشاری بیشتر باشد با همان نسبت مقاومت سایشی نیز افزایش خواهد یافت.
- اگر چه مقاومت فشاری بتن غلطکی کمتر از بتن معمولی است ولی مقاومت سایشی آن برابر حتی بیشتر از بتن معمولی می‌باشد.

ارزیابی، بررسی و تعیین تابع S کار ساده ای نبوده و نیاز به یک پروسه طولانی و پیوسته محاسباتی دارد. با استفاده از دیاگرام زینگ در شکل ۳- که اشکال مختلف سنگدانه را به چهار گروه یا دسته شامل: پولکی شکل‌ها دایروی^۵، پولکی شکل‌های مستطیلی^۶، میله‌ای شکل‌ها^۷ و کروی شکل‌ها^۸ تقسیم بندی کرده، می‌توان میزان تاثیر دو پارامتر کرویت و زبری سطح سنگدانه را در محاسبات وارد کرد. در این صورت توابع شکلی بدست می‌آیند که در روابط ۹ تا ۱۴ دیده می‌شوند:

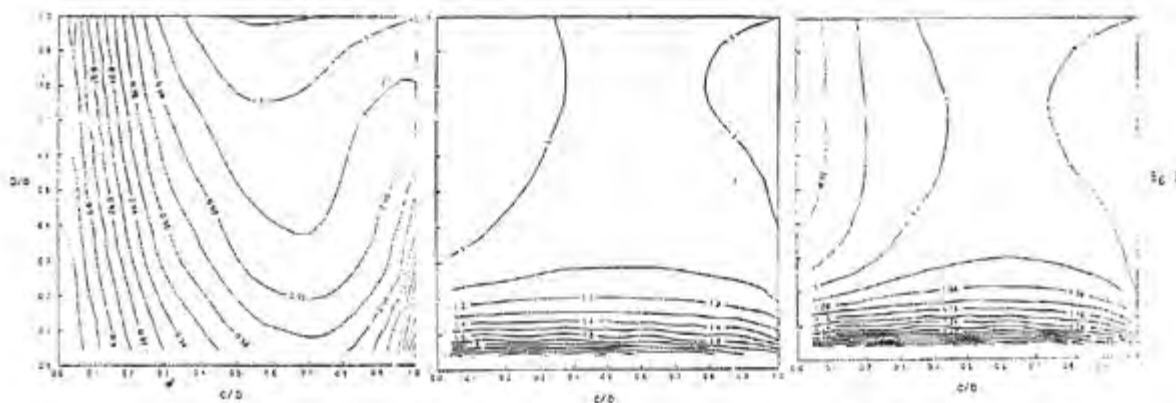
$$S_1 = \frac{\pi ab}{2} + \frac{\pi c}{2} \sqrt{(a^2 + b^2) / 2} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$S_2 = \frac{\pi bc}{2} + \frac{\pi a}{2} \sqrt{(b^2 + c^2) / 2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$S_3 = \pi [(a + b + c) / 3]^2 \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$S_4 = (S_1 + S_2) / 2 \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$S_5 = (S_1 + S_2 + S_3) / 3 \quad \text{رابطه (۱۳)}$$



شکل ۳ - خطوط هم مقدار هم برای $S_1/S_2/S_3/S_4/S_5$

- هر چه سطح بتن غلطکی صافتر باشد دارای مقاومت سایشی بیشتری است.

جایگاه پژوهش فعلی

سایش و فرسایش بتن غلتکی RCC در سازه‌های هیدرولیکی بیشتر بر اثر برخورد سیلت، ماسه، شن و سنگریزه‌های همراه با جریان آب با سرعت زیاد به وجود می‌آید. آسیب دیدگی سازه‌های R.C.C. بر اثر فرایندهای سایشی و فرسایشی بسیار شدید بوده و لذا در نظر گرفتن تأثیر این فرایندها در هنگام طرح اختلاط و ساخت R.C.C. ضرورت دارد.

اگرچه معمولاً طرح اختلاط R.C.C. در چنین سازه‌هایی بطور تجربی تعیین می‌شود، ولیکن موضوع بسیار مهم روش‌های آزمایشی تعیین مقاومت R.C.C. در برابر فرسایش می‌باشد. بیشتر آزمایش‌های انجام شده تا به حال دربارهٔ اندازه‌گیری خاصیت مقاومت سایشی فرسایشی بتن بوده و مراحل سایش و فرسایش به‌طور مصنوعی شبیه سازی شده است. مانند آزمایش‌های تعیین مقاومت سایش به‌وسیله صفحات چرخشی سایش^۹ که شرایط طبیعی محیط را منعکس نمی‌کند. بنابراین نتایج بدست آمده از این روش‌ها نمی‌تواند بر اساس تحلیل‌های مقایسه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد و کاربرد کافی را داشته باشد.

سوالات مختلفی درباره شبیه سازی فرسایشی سایشی بتن در آزمایشگاه توسط پژوهشگران مطرح گردیده که پاسخ در چگونگی تأثیرات محیط بر فرآیند سایش از یکسو و تأثیر شاخص‌های تکنیکی برنسبت مصالح در مخلوط، چگونگی تراکم و ساخت بتنی را که در معرض سایش و فرسایش قرار دارد، از سوی دیگر دانسته شده است (۱۳، ۱۹). تاکنون هیچ تحلیل مقایسه‌ای درباره اهمیت مادهٔ مخصوص یا شاخص‌های محیطی بر روی فرایند سایش و فرسایش R.C.C. بر اثر سنگ ریزه‌ها و مواد معلق همراه با جریان آب صورت نگرفته است. از اینرو هدف تحقیقات فعلی نه تنها شبیه‌سازی شرایط سایش و فرسایش طبیعی بتن کوبیده، بلکه یافتن روابطی است که قادر به پیش بینی چگونگی پیشرفت سایش و فرسایش در R.C.C. به صورت تابعی از نسبت‌های مخلوط، پارامترهای مؤثر در ساخت و شرایط هیدرولیکی حرکات سنگریزه‌های همراه جریان آب می‌باشد. بیشتر دستگاه‌هایی که برای آزمایش کردن مقاومت سایشی فرسایشی بتن طراحی شده‌اند، شرایط سایش روسازی‌ها^{۱۰} را مدل کرده اند (۱۷، ۱۹). ولی در پژوهش حاضر به منظور شبیه‌سازی شرایط مشابه با تأثیرات طبیعی محیط بر روی بتن غلطکی از مکانیزمی مانند دستگاه آب و ماسه فشان^{۱۱} استفاده شده است.

سایش و فرسایش یک فرایند پیچیده است و برای یک طرح اختلاط مفروض، مقاومت سایشی فرسایشی R.C.C. به پتانسیل سایش/ فرسایش‌پذیری مواد تشکیل دهنده آن مخلوط، بستگی دارد. از این‌رو در هنگام بررسی و ارزیابی آزمایش‌های مختلف، فقط نتایج نمونه‌هایی را که تشابه مکانیزم سایشی فرسایشی داشته‌اند را می‌توان با هم مقایسه کرد.

چهار پارامتر مؤثر بر فرایند سایش بتن غلطکی عبارتند از: سختی، اندازه، سرعت و زاویه برخورد دانه‌های مورد استفاده در مخلوط و آب و ماسه فشان که تغییر دادن یکی از این پارامترهای چهارگانه، باعث تغییر مکانیزم سایشی فرسایشی شده، مقایسه‌ای نتایج آزمایش امکان پذیر نمی‌باشد.

شایان ذکرست که این روش آزمایش، باعث کم شدن پیوستگی

سنگدانه‌های بتن کوبیده نسبت به روش‌های دیگر که با مکانیزم‌های سایشی و فرسایشی متفاوتی شبیه سازی شده‌اند می‌گردد. برای مثال نتایج آزمایش صفحه سایشی، مقاومت سایشی بیشتری نسبت به حالتی که نمونه در معرض فرآیند سایشی فرسایشی به‌وسیله آب و ماسه فشان قرار گیرد، خواهد بود. بنابراین شبیه سازی فرآیند سایش و فرسایش آزمایشگاهی در شرایط مشابه با تأثیرات طبیعی محیط قادر به تشخیص کامل مقاومت بتن در مقابل سایش و فرسایش می‌باشد.

برنامه‌ریزی و نتایج آزمایش‌ها

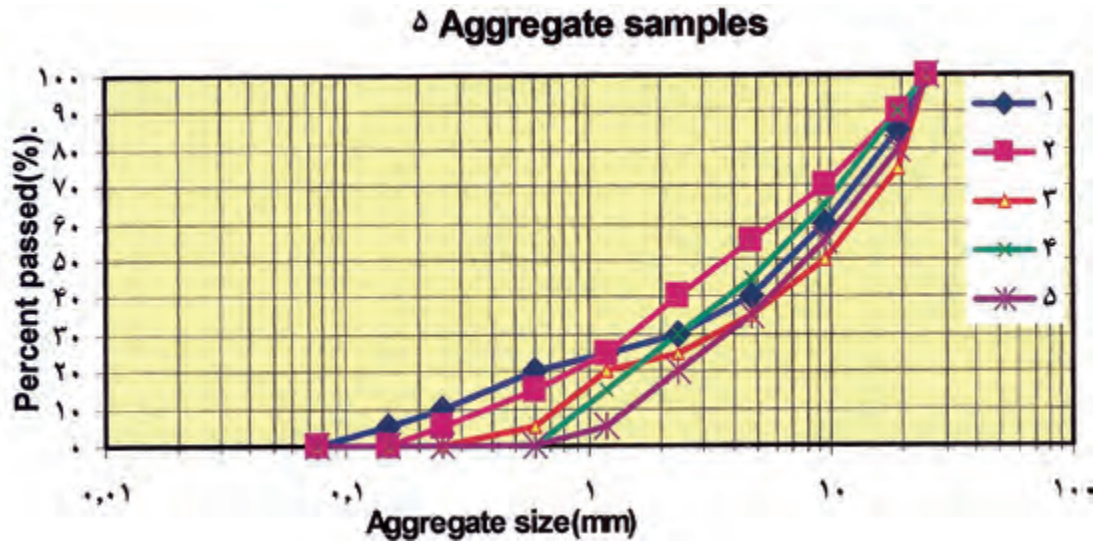
آنچه که در چارچوب این پژوهش انجام شده، متکی بر وجود دستگاه سنسجش مقاومت سایشی بتن با استفاده از جریان‌های چند فازی (۱) از یک سو و نظریه تحلیل عمومی شبکه عصبی از سوی دیگر بوده است. پارامترهایی که به عنوان متغیر مورد بررسی قرار گرفت عبارتند از:

پارامتر طرح اختلاط که خود متشکل از زیر مجموعه‌هایی از آزمایش‌های بهم مرتبط می‌باشد که طی آن اثرات دانه‌بندی مصالح سنگی به صورت دو عامل متغیر مستقل نسبت اختلاط ماسه و شن و همچنین ضریب یکنواختی مخلوط با توجه به بزرگترین اندازه دانه‌ها و تأثیرات متقابل آنها بر یکدیگر، مقدار آب مورد نیاز بتن به صورت نسبت آب به سیمان که انعکاس در تعیین رطوبت بهینه برای حصول تراکم بیشینه دارد، مقدار مواد سیمانی در بتن و نقش شکل دانه‌های مصالح سنگی مانند گرد گوشه (رودخانه‌ای) یا شکسته بودن دانه‌ها و همچنین تعیین منشأ، و جنس مصالح سنگی از قبیل آذرین، متامورفیک و رسوبی مشخص می‌گردد.

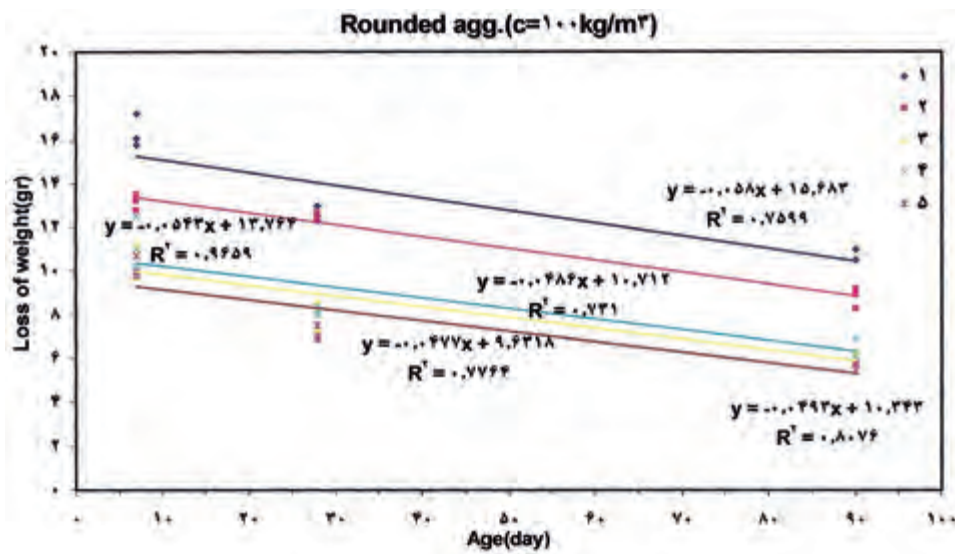
روش تراکم متکی به استفاده از لرزاننده‌های آزمایشگاهی برای ایجاد دانسیته بیشینه به شرط شکسته نشدن دانه‌ها (با اثبات از طرق بررسی‌های ماکروسکوپی نمونه‌ها تحت آزمایش‌های تراکم) بوده است.

شایان ذکر است که اگر قرار بود از کلیه متغیرهای فوق الذکر در یک مجموعهٔ مشاهداتی به صورت ترکیب کامل استفاده شود، تعداد نمونه‌های لازم با رعایت سه تکرار از هر نمونه، بالغ بر 3×10^{25} عدد می‌شد که عملاً امکان اجرای آن به علت محدودیت‌های حاکم، وجود نداشت. به همین جهت ناگزیر آزمایش‌ها فازبندی (مرحله بندی) شده و براساس نتایج بدست آمده از بهینه سازی‌های هر مرحله، برای مرحله بعدی برنامه ریزی شد، با چنین آرایشی از آزمایش‌های جهت‌دار انجام کارهای اجرائی، در مدت زمان مقرر امکان پذیر گردید، لیکن حجم کارهای تحلیلی بعدی را به شدت افزایش داد به طوری که بهره‌گیری از نرم افزارهای پیشرفته‌ای چون S^+ را غیرقابل اجتناب ساخت. بنابراین با کمک چنین تحلیل‌هایی اهمیت پارامترهای مختلف از دیدگاه مقاومت سایشی در مقایسه با یکدیگر آشکار گردید و این امکان فراهم آمد تا در طراحی و کارهای مهندسی به پارامترهایی که واقعاً تأثیر دارند، توجه شود.

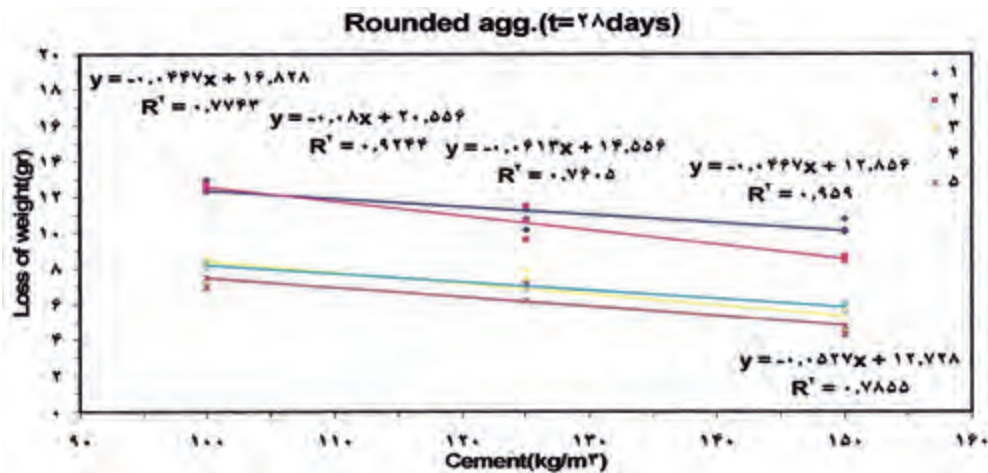
برای برنامه ریزی آزمایش‌ها، اولویت به ۵ متغیر مستقل واقع در زیر پوشش طرح اختلاط و عمل آوری نمونه، داده شد لذا در اینجا به بررسی تأثیرات شکل دانه‌ها، دانه‌بندی، مقدار سیمان، مقاومت فشاری و زمان عمل آوری (سن نمونه) بر مقاومت سایشی پرداخته شده است. بدین صورت که برای در نظر گیری اثرات شکل دانه‌ها از دو نمونه رودخانه‌ای و شکسته که یکی سنگدانه‌های با سطح صاف و سائیده شده و دیگری سنگدانه‌های



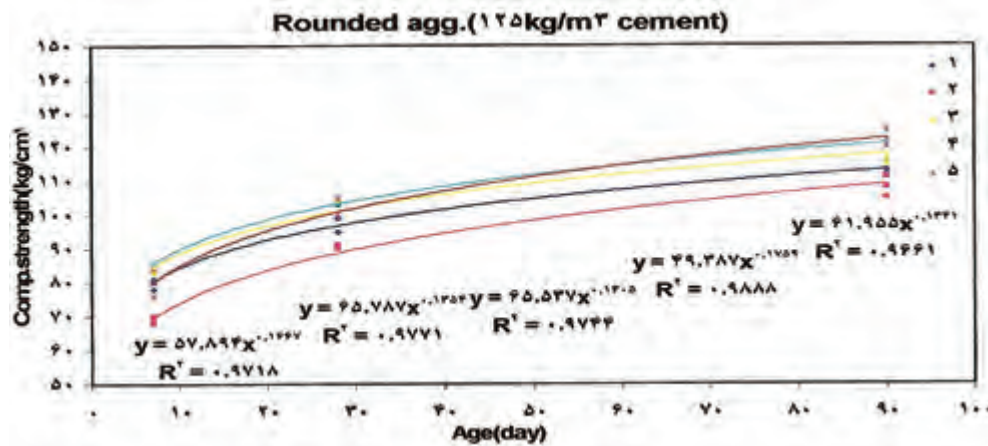
شکل ۴ - منحنی‌های پهن‌گانه دانه‌بندی



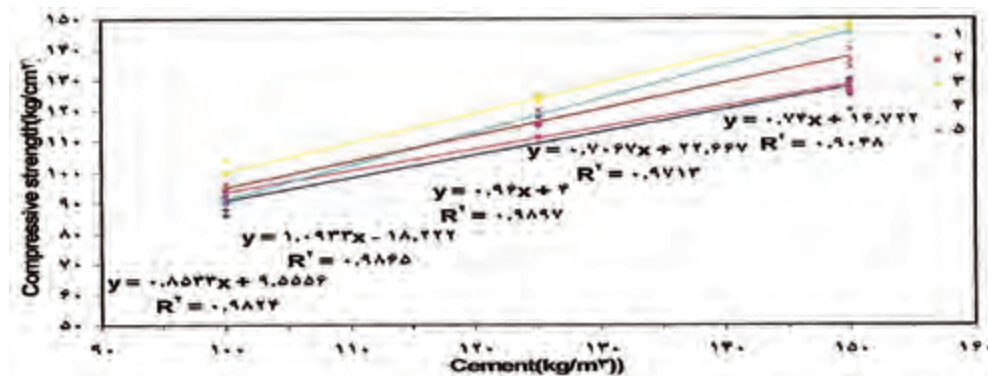
شکل ۵ - تغییرات نزولی مقدار کاهش وزن نمونه‌های رودخانه‌ای با دانه‌بندی‌های مختلف نسبت به سن نمونه برای مقدارسیمان 100 kg/m^3



شکل ۶- تغییرات نزولی مقدار کاهش وزن نمونه های رودخانه ای با دانه بندی های مختلف نسبت به مقدار سیمان برای سن ۲۸ روز



شکل ۷- منحنی تغییرات مقاومت فشاری نمونه های رودخانه ای نسبت به سن نمونه برای مقدار سیمان ۱۲۵ kg/m³



شکل ۸- منحنی تغییرات مقاومت فشاری نمونه های شکسته نسبت به مقدار سیمان برای سن ۹۰ روز

بدین ترتیب از هر نوع منحنی دانه‌بندی و مقدار سیمان تعداد ۹ نمونه ساخته شد. برای ساختن مخلوط با دانه بندی مورد نظر، مقداری کافی از هر دیو برداشت، توزین و مخلوط گردید به طوری که وزن کل مخلوط برابر ۱۰ کیلوگرم شد. سپس مقادیر مشخص شده سیمان (۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ کیلوگرم در متر مکعب) و مقدار لازم آب (نسبت آب به سیمان برابر ۰/۵) از آزمایشها تعیین رطوبت بهینه حاصل شده بود) نیز به آن اضافه گردید و مخلوط در قالبهای ۲۰×۲۰×۲۰ سانتیمتر ریخته شد. در این زمان حدوداً ۶ تا ۷ سانتیمتر از ارتفاع قالب خالی نگه داشته می‌شد. سپس صفحه صلب ۲۰×۲۰ و سربار ۳۰ کیلوگرمی را بر روی نمونه در داخل قالب قرار داده و تحت ارتعاش مشخص به مدت ۲ دقیقه قرار گرفت. معمولاً ارتفاع نمونه‌ها پس از تراکم به ۱۱/۸ سانتیمتر می‌رسد. باید توجه داشت که افزایش مقدار سیمان باعث افزایش حجم نمونه نمی‌شود. که این به علت پرسیدن فضای خلل و فرج بین سنگدانه‌ها بوسیله سیمان می‌باشد.

نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و در داخل آب قرار داده شدند. و در سن‌های ۷، ۲۸ و ۹۰ روز تحت آزمایش آب و ماسه فشان با زاویه برخورد ۵ درجه، سرعت برخورد ۶/۲۵ متر بر ثانیه، دبی وزنی ماسه ۲۵۰۰ گرم در دقیقه، دبی آب ۱۰ لیتر در دقیقه، دبی وزن مخلوط آب و ماسه برابر ۱۲۵۰۰ گرم در دقیقه و سطح برخورد ۱۰ سانتیمتر مربع به مدت دو دقیقه قرار گرفت.

برای اندازه‌گیری مقدار جرم سائیده شده از روش پر کردن حفره ایجاد شده با ماسه استاندارد استفاده شد. به این صورت که در محل فرسایش یافته / سائیده شده، ماسه استاندارد ریخته شده و مقدار اضافی توسط صفحه صلب مخصوص تخلیه و سپس ماسه استاندارد توسط ترازی با دقت یک دهم گرم توزین گردید.

برای اندازه‌گیری و تعیین مقاومت سایشی فرسایشی از شیشه به عنوان مرجع استفاده شد و مقدار سایش شیشه برای همان شرایط اندازه‌گیری و مقاومت سایشی و فرسایشی هر نمونه ارزیابی گردید. بدین منظور این آزمایش در چندین تکرار صورت گرفت و مقدار جرم سائیده شده برای هر دو دقیقه برابر ۰/۳ گرم اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، نمونه بین دو فک (صفحات فولادی) دستگاه فک فشاری اتوماتیک پیشرفته قرار گرفت و با سرعت ثابت با افزایش بار برابر ۶۸۰ kg/sec نمونه تحت بار فشاری حداکثر شکسته شد.

تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها

از آنجا که روش تحقیق انتخابی در این پژوهش متکی به مشاهدات مستقیم آزمایشگاهی بوده است، لذا با کمک روش‌های تجزیه و تحلیل آماری بایستی رابطه بین متغیرهای مورد آزمایش سایش و فرسایش را تعیین کرد. استفاده از نرم افزارهای توانمندی چون S⁺⁺ و SPSS در حال حاضر متداول بوده و تحلیل‌های گسترده چند متغیره معمولاً با کمک این نرم افزارها انجام می‌شود. در این نوع محاسبات نوع رابطه بین پارامتر اصلی مورد نظر که در این پژوهش میزان سایش و فرسایش است و به‌عنوان مقدار جرم از دست رفته نمونه‌ها می‌باشد با متغیرهای آزموده شده همچون مقدار سیمان، سن نمونه، مقدار ضریب یکنواختی (نوع منحنی دانه‌بندی)، شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط و مقاومت فشاری تعیین می‌گردد. معمولاً نتایج این نوع تحلیل منجر به معادلاتی می‌شود که با بهره‌گیری از این

با سطح زبر بودند، استفاده گردید. از نظر جنس هر دو نمونه رودخانه‌ای و شکسته دارای منشاء مشترک سنگهای آهکی بوده، لذا قابل مقایسه از نظر جنس و قابل ارزیابی از نظر شکل سطح دانه‌ها هستند. برای در نظر گرفتن تأثیرات دانه بندی مانند نسبت شن به ماسه، بزرگترین اندازه دانه‌ها، مقدار دانه های ریزتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر، ضریب یکنواختی (نسبت اندازه ۶۰ درصد دانه‌ها به اندازه ده درصد دانه‌ها)، پنج منحنی دانه بندی با مشخصات و شرایط مطابق شکل ۴- انتخاب گردید. همانطوری که در شکل- ۴ مشاهده می‌شود بزرگترین اندازه دانه‌ها برای هر پنج نمونه برابر ۲۵/۴ میلی‌متر می‌باشد. بدین معنی که تأثیرات پارامتر بزرگترین اندازه دانه‌ها نیز در این آزمایش‌ها نیز در نظر گرفته نمی‌شود. اندازه ضریب یکنواختی برای منحنی‌های دانه‌بندی از شماره یک تا پنج به ترتیب برابر ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ و ۵ می‌باشد که بدین ترتیب نمونه (منحنی دانه‌بندی) شماره یک نشان‌دهنده بیشترین مقدار دانه ریز و هر چه به نمونه (منحنی دانه‌بندی) شماره پنج نزدیک شویم مقدار دانه‌ریزها در نمونه کمتر می‌گردد. به طوری که منحنی دانه بندی شماره پنج دارای کمترین مقدار دانه ریز می‌باشد.

برای در نظر گرفتن تأثیر مقدار سیمان یا نسبت آب به سیمان (مقدار آب توسط آزمایش تراکم و برابر رطوبت بهینه تعیین می‌گردد). سه مقدار ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ کیلوگرم در متر مکعب منظور گردید، همچنین لازم به ذکر است که سیمان از نوع I معمولی می‌باشد. بنابراین اثرات نوع سیمان و نسبت آب به سیمان نیز در این آزمایش‌ها در نظر گرفته نشده است.

برای در نظر گرفتن سن عمل آوری جهت تعیین مقاومت سایشی نمونه‌های R.C.C از سه زمان ۷، ۲۸ و ۹۰ روز استفاده گردید. بنابراین تأثیرات سن عمل آوری در این آزمایش‌ها به‌طور کل در نظر گرفته شده است. اگرچه آزمایش‌های مقاومت سایشی و مقاومت فشاری برای سه تکرار برنامه‌ریزی می‌شوند، لیکن در عمل از هر یک از نمونه‌ها برای هر دو آزمایش می‌توان استفاده کرد. بنابراین تعداد نمونه‌ها برای دو نوع اندازه‌گیری مقاومت دو برابر نمی‌شود.

جهت تبیین تأثیرات دانه‌بندی و تراکم نمونه که شامل چندین گروه پارامترهای مهم می‌باشد از شعاع هیدرولیکی متوسط در مخلوط‌های سنگدانه‌ای (۱۶) استفاده گردید. این پارامتر به علت ملحوظ نمودن جميع اثرات پارامترها مانند تراکم، دانسیته، تخلخل، شکل و سطح دانه‌ها، دانه بندی، نسبت درشت به ریز دانه... بسیار مفید و کاربردی می‌باشد.

براین اساس به‌طور خلاصه در برنامه‌ریزی جامع آزمایش‌ها از دو نوع مصالح رودخانه‌ای و شکسته و از پنج نوع منحنی دانه‌بندی متفاوت با بزرگترین اندازه دانه‌های ثابت و با ضرایب یکنواختی به ترتیب برابر ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ و ۵، برای سه مقدار سیمان ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ کیلوگرم در متر مکعب و برای سه سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در نظر گرفته شد. بنابراین تعداد کل نمونه‌های مورد آزمایش مطابق جزئیات ارائه شده در ذیل، برابر ۲۷۰ گردید. یعنی:

۲=تعداد نوع شکل سطح سنگدانه

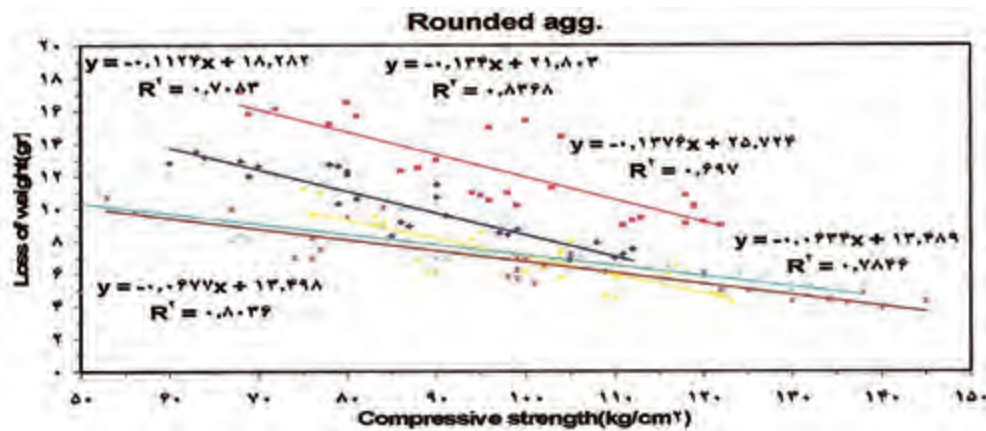
۵=تعداد منحنی دانه بندی

۳ =تعداد سن عمل آوری نمونه‌ها

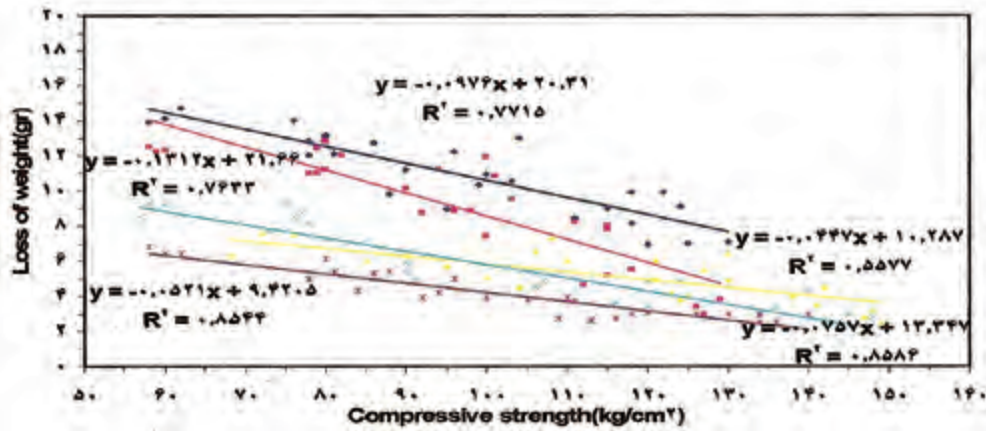
۳=تعداد مقادیر سیمان

۳=تعداد تکرار پذیری

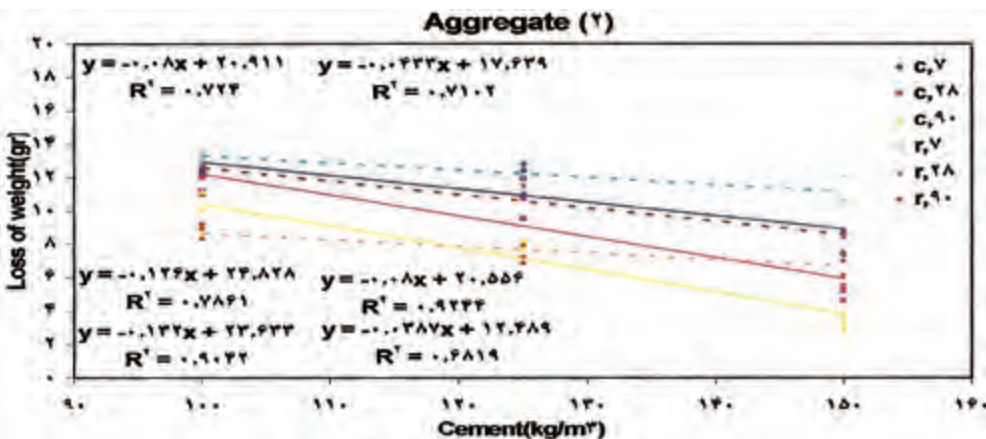
۲۷۰=۲×۵×۳×۳×۳=تعداد کل نمونه‌ها



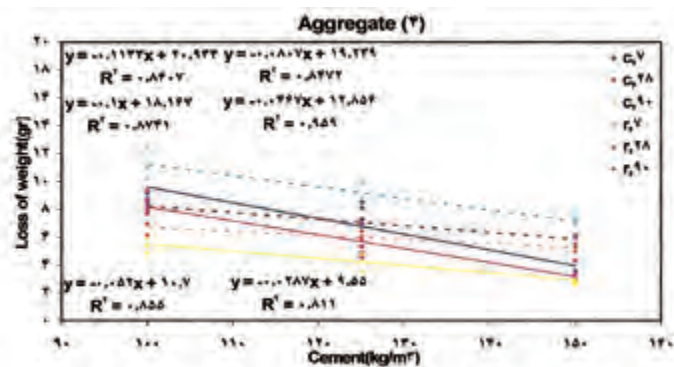
شکل ۹ - تغییرات نزولی مقدار کاهش وزن نمونه‌ها ناشی از فرسایش نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌های رودخانه‌ای زمان (سن نمونه) و نوع دانه بندی دارد



شکل ۱۰ - تغییرات نزولی مقدار کاهش وزن نمونه‌ها ناشی از فرسایش نسبت به مقاومت فشاری نمونه شکسته



شکل ۱۱ - تغییرات نزولی مقدار کاهش وزن نمونه‌های رودخانه‌ای و شکسته ناشی از فرسایش نسبت به زمان برای منحنی دانه بندی ۲ و مقادیر مختلف سیمان



شکل ۱۲- تغییرات نزولی مقدار کاهش وزن نمونه‌ها ناشی از فرسایش نسبت به مقدار سیمان برای منحنی دانه بندی ۴

گرفتن زمان ثابت (سن نمونه ثابت)، منحنی تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به زمان (سن نمونه) و یا مقدار سیمان، منحنی تغییرات مقدار جرم از دست رفته نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌ها و در نهایت منحنی تغییرات مقدار جرم از دست رفته ناشی از فرسایش نسبت به زمان یا مقدار سیمان برای هر منحنی دانه بندی به‌طور ثابت ارائه شده است.

چنانچه نتایج گراف‌های حاصل در شکل‌ها مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد، نکته قابل تامل سازگاری نسبتاً خوب بین نتایج می‌باشد. برای گروه گراف‌های حاصل از مقدار جرم از دست رفته L_w نسبت به زمان (سن نمونه) t معادله کلی یک خط مورد ارزیابی قرار گیرد رابطه -۱۵ بدست می‌آید:

$$L_w = a_t t + b_t \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$-0.05 < a_t < -0.02$$

$$5 \leq b_t \leq 15$$

که a_t و b_t ضرایب ثابت می‌باشند و همانطور که مشاهده می‌شود مقدار آنها بستگی شدید به مقدار سیمان و نوع دانه‌بندی دارد. همچنین برای گروه گراف‌های حاصل از مقدار جرم از دست رفته L_w نسبت

به مقدار سیمان C_c رابطه -۱۶ بدست می‌آید:

$$\text{رابطه (۱۶)}$$

$$L_w = a_c c_c + b_c \quad -0.08 \leq a_c \leq -0.03 \quad 10 \leq b_c \leq 20$$

که a_c و b_c ضرایب ثابت می‌باشد و در این صورت نیز مقدار آنها بستگی شدید به

برای شکل‌های شماره ۹ و ۱۰ که ارائه دهنده منحنی‌های تغییرات مقدار جرم از دست رفته L_w نسبت به مقاومت فشاری S_p به ترتیب برای سنگدانه‌های رودخانه‌ای و شکسته می‌باشد رابطه کلی ۱۷ که پوشاننده مجموعه این گراف‌ها می‌باشد بدست می‌آید:

معادلات می‌توان در طراحی‌ها و یا در شرایط کاربری تمام مقیاس (Prototype) بدون ضرورت انجام کارهای آزمایشگاهی، برآوردی از میزان سایش و فرسایش بدست آورد. اگر چه این هدف در کارهای دفتری از اهمیت زیادی برخوردار است، لیکن برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب مصالح و روش عمل آوری R.C.C کافی نیست. به‌همین جهت در این فصل ابتدا با روش رگرسیون تک متغیره حدود تاثیر هریک از متغیرها بر میزان سایش و فرسایش را ارزیابی کرده و سپس با استفاده از نتایج حاصل برای تک متغیره به تحلیل چند متغیره با روش و الگوریتم مناسب پرداخته شده است.

تجزیه و تحلیل‌های تک متغیره

در این محاسبات از توابع مختلف خطی و نمایی، توانی، کسری و لگاریتمی در آغاز بهره‌گیری به‌عمل آورده و با کمک معیار هم بستگی R^2 نتایج مربوطه با هم مقایسه شده‌اند. در نهایت تصمیم گرفته شد که از رابطه هم بستگی خطی در میان معادلات برازش شده بر داده‌های آزمایشگاهی استفاده شود. در این روش تحلیل در اغلب موارد معیار هم بستگی بیشینه می‌باشد. لیکن به‌علت ضرورت رعایت یکنواختی در بین نتایج در برخی دیگر از موارد که ضریب هم بستگی نسبت به دیگر توابع ممکن بیشینه نشده باشد، اجباراً از همان رابطه سازگار کمک گرفته شده است.

نکنه حائز اهمیت در این تحلیل مقادیر سایش و فرسایش به‌عنوان تابع اصلی در مقابل متغیرها می‌باشد. از آنجا که نمونه‌های ساخته شده از R.C.C سایش و فرسایش اندکی داشته‌اند و معمولاً مقادیر اندازه‌گیری شده درصد بسیار کوچکی از وزن نمونه را تشکیل می‌داد. لذا تفسیر منحنی‌های برازش داده شده نیاز به تامل بیشتری داشت. به دیگر سخن، مشاهده منحنی‌های برازش داده شده در مقیاس انتخابی در ترسیم، می‌تواند فقط نشان دهنده خط‌های آزمایشگاهی باشد. لیکن باید یادآور شد که سمت و سو و موقعیت عددی خط‌های (Trend) بدست آمده از این تحلیل‌ها، بنحوی بیان گر نوعی هم بستگی می‌باشد. که این امر در حقیقت یکی از اهداف اصلی پژوهش حاضر است.

قبل از شروع محاسبات، مشاهدات و نتایج حاصل از آزمایش‌ها در قالب ۳۰ جدول به‌عنوان داده‌های ورودی به نرم افزار معرفی گردید. پنج متغیر اصلی یعنی: زمان، مقدار سیمان، نوع شکل سطح سنگدانه، شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط و ضریب یکنواختی (منحنی دانه بندی) نسبت به عامل اندازه‌گیری شده مستقیم از آزمایش‌های سایش و فرسایش مقدار وزن یا جرم از دست رفته در این جداول ارائه و مرتب شدند. با بهره‌گیری از این جداول ابتدا به ترسیم و برازش ساده یک متغیر نسبت به عامل جرم از دست رفته اقدام گردید به‌طوری‌که متغیرهای زمان (سن نمونه) و مقدار سیمان و نوع شکل سطح سنگدانه هر بار به عنوان پارامتر ثابت برای تغییرات بقیه عوامل در نظر گرفته شد.

بدین ترتیب شکل‌های از شماره ۵ الی ۱۲ به‌طور نمونه از بین حدود ۳۸ گراف جهت ارائه تغییرات مقدار جرم از دست رفته نسبت به زمان (سن نمونه) با مقدار سیمان ثابت، به مقدار سیمان با در نظر

رابطه (۱۷)

تحلیل‌های آماری چند متغیره

اهمیت این نوع تحلیل‌ها در پژوهش‌های آزمایشگاهی که با هدف دستیابی به مفاهیم علمی نهفته در مشاهدات فیزیکی انجام می‌گردد، موجب شده است تا نرم افزارهایی توانمند متعددی بصورت تجارتي در اختیار باشد. یکی از به‌هنگام ترین ابزار محاسباتی در این راستا، نرم افزار S^+ می‌باشد که با اتکا به آن، تحلیل‌های آماری چند متغیره این پژوهش صورت گرفته است. به‌علت تنوع پارامتر مؤثر در مقاومت سایشی، علی‌رغم تلاشی که برای محدود سازی آنها به موارد مطرح در عملیات اجرائی صورت گرفت، لازم دیده شد تا در آغاز با یک تجزیه واریانس، متغیرهای کم تاثیری که به‌طور معنی‌داری باعث افزایش و یا کاهش مقاومت سایشی نمی‌گردند را پیدا و حذف نمود. به‌همین منظور ماتریس‌هایی از مشاهدات مربوط به هریک از عوامل براساس نظریه متغیرهای مجازی تدوین

$$L_{\omega} = a_{src} S_p + b_{src} b_{src} - 0.13 < a_{src} < 0.6 / -0.12 < b_{src} < 22$$

که a_{src} و b_{src} ضرائب ثابت می‌باشند و بستگی شدیدی به نوع دانه‌بندی دارند. ولی باید اذعان داشت که پراکندگی نقاط نشان دهنده این مسئله مهم می‌باشد که عوامل و پارامترهای دیگری نیز در این راستا می‌بایست در نظر گرفته شوند بدین لحاظ می‌باید بدنبال کاربرد رگرسیون چند متغیره و اعمال چندین پارامتر به‌طور توأم در تغییرات مقدار جرم از دست رفته L_{ω} نسبت به مقاومت فشاری S_p بوده که در بخش‌های آتی به‌طور مفصل به آن پرداخته شده است.

$$L_{\omega} = 11/5143 + 0.1708 C_u + 8/15611 m - 0.0170 t - 0.0639 S_p \quad (19)$$

$$L_{\omega} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_6 m + b_7 t + b_8 C_u + b_9 S_p$$

$$- b_{10} (X_1 m) + b_{11} (X_2 m) + b_{12} (X_1 t) + b_{13} (X_2 t) + b_{14} (X_3 C_u) + b_{15} (X_1 S_p) \quad (20)$$

$$L_{\omega} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 m + b_6 t + b_7 C_u + b_8 S_p$$

$$+ b_9 (X_2 m) + b_{10} (X_3 m) + b_{11} (X_1 t) + b_{12} (X_2 t) + b_{13} (X_3 C_u) \quad (21)$$

$$L_{\omega} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 m + b_6 t + b_7 C_u + b_8 S_p + b_9 q + b_{10} (X_2 m) + b_{11} (X_1 t)$$

$$+ b_{12} (X_2 t) + b_{13} (q m) + b_{14} (q C_u) + b_{15} (q X_1) + b_{16} (q X_2) + b_{17} (q X_3) + b_{18} (q X_4) \quad (22)$$

اقدام به ترسیم منحنی‌های تغییرات مقاومت فشاری نسبت به زمان (سن نمونه) برای دانه‌بندی‌های مختلف و مقادیر سیمان و مقایسه آنها با کارهای دیگر پژوهشگران گردید. این منحنی‌ها به وضوح نشان‌دهنده روند مشابهی از افزایش مقاومت فشاری با افزایش سن بتن و همچنین افزایش مقدار سیمان می‌باشد. بنابراین می‌توان قضاوت نمود که مشابهت رفتاری نمونه‌های R.C.C. در این پژوهش با بتن معمولی و با عنایت به رابطه مقاومت فشاری با سن بتن و مقدار سیمان وجود دارد. این تائید اساس دیگر نتیجه‌گیری‌ها و قضاوت‌های ذیل می‌باشد.

تأثیر مقاومت فشاری بر مقاومت سایشی

برای نشان دادن رابطه بین مقاومت سایشی و مقاومت فشاری می‌توان از منحنی‌های تغییرات مقدار کاهش وزن نمونه‌ها در مقابل مقاومت فشاری در شکل-۱۱ برای سنگدانه رودخانه‌ای (۱۶) برای سنگدانه شکسته استفاده کرد. آشکارا در کلیه مشاهدات با افزایش مقاومت فشاری، مقدار کاهش وزن نمونه در اثر سایش و فرسایش کاهش می‌یابد. ولی به علت تاثیر نوع دانه بندی و شکل / زبری سطح دانه‌ها لازم است تا بررسی این پارامترها نیز به‌طور جداگانه مدنظر باشد. در این صورت چنانچه به ارزیابی منحنی‌های بدست آمده جهت هر نمونه دانه‌بندی و نوع شکل سطح سنگدانه‌ها پرداخته شود در جهت اطمینان می‌توان به معادله ساده‌تری دست یافت.

$$L_{\omega} = 7.0 \cdot sp + 2.0 \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

که در آن Sp مقاومت فشاری R.C.C. برحسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و L_{ω} مقدار جرم ازدست رفته برحسب گرم می‌باشد. (L_{ω} قابل تبدیل به مقاومت سایشی در مقایسه با مقدار جرم از دست رفته در شرایط یکسان برای شیشه می‌باشد). حداقل مقاومت فشاری R.C.C. در رابطه (۲۵) برابر ۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌باشد.

تأثیر مقدار سیمان و سن R.C.C.

در این راستا و با استناد به رابطه دو پارامتری زمان (سن نمونه) و مقدار سیمان در مقابل مقدار جرم از دست رفته که از برآش‌های ذریع با معیارهای همبستگی بالا بدست آمده اند، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که هرچه مقدار سیمان زیادتر و هرچه زمان (سن نمونه) بالاتر باشد مقدار جرم از دست رفته کمتر خواهد بود.

تأثیر پارامتر شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط بر مقاومت سایشی

برای چگونگی تأثیر این پارامتر بر مقدار کاهش وزن نمونه‌های R.C.C. در اثر سایش و فرسایش باید توجه داشت که مقدار m شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط چون به مشخصات فیزیکی دانه‌ها، ترتیب قرار گرفتن آنها و زبری و شکل سطح دانه‌ها و تراکم آنها بستگی داشته و مستقل از سن و تا حدودی از مقدار سیمان می‌باشد. ضرورت تحلیل با پارامترهای مؤثر دیگر به‌طور توأم با آن لازم به نظر می‌رسد. چنانچه به ارزیابی پارامتر m در چنین شرایطی پرداخته شود این نتیجه ساده حاصل می‌گردد که هر چه m بزرگتر باشد مقدار کاهش جرم نمونه R.C.C. در اثر سایش و فرسایش کمتر خواهد بود. با توجه

و به‌طورحذفی پارامترها ارزیابی گردید. متغیرهای مجازی Indicator Variable یا Dummy Variable به‌صورت صفر و یک برای پنج نوع دانه بندی و نوع شکل سنگدانه (شکسته یا رودخانه‌ای) در نظر گرفته شد به این ترتیب که منحنی دانه بندی شماره پنج با $C_{II}=5$ به عنوان مبنا و شاهد مقایسه‌ای برای بقیه دانه‌بندی‌ها در نظر گرفته شد. به‌طوری‌که ۴ و X_3 و X_2 و X_1 در معادلات نشان‌دهنده تاثیر گذاری دانه‌بندی مربوط نسبت به دانه‌بندی شاهد می‌باشد همچنین q جهت تعیین نوع شکل سنگدانه بوده و به‌طوری‌که صفر به معنای سنگدانه رودخانه‌ای و یک به معنای سنگدانه شکسته می‌باشد. به‌عنوان مثال در بررسی تأثیر پارامتر دانه‌بندی، که با شاخص ضریب یکنواختی مورد توجه بوده، سطرهای ماتریس تشکیل داده شده برحسب مقادیر C_{II} مشاهده شده بوده و ستونها برحسب متغیرهای مجازی نشان داده شده با X_i ، در نتیجه در هر سطر مفروضی از X_i در ماتریس مورد بحث فقط یک عدد ۱ وجود داشته و بقیه اعداد صفر می‌باشند. مزیت بزرگ این تلقی آماری از عوامل مؤثر، کشف ویژگی تک تک عوامل مشاهداتی می‌باشد. بطوری‌که در یکی از حالات از بین چهار مقدار مختلف C_{II} آزمایش شده که به ترتیب، X_1 الی X_4 بعنوان متغیرهای مجازی به مدل معرفی شده‌اند، اثرات X_p معنی‌دار نبوده و دیگر موارد معنی‌دار شده‌اند. به دیگر سخن مصالح دانه‌ای با $C_{II}=20$ در بین انواع مختلف مصالح مورد آزمایش نتوانسته است تأثیر بیشتری از منحنی دانه بندی شماره پنج با $C_{II}=5$ به عنوان مبنا و شاهد مقایسه بر مقاومت سایشی باقی بگذارد. در نتیجه ضمن آگاهی از مؤثر بودن دیگر مقادیر آزمایش شده ضریب یکنواختی، بر مقاومت سایشی، بایستی معادله چند متغیره‌ای را ارائه کرد که بی اثری X_p را نشان داده و تاثیر X_1, X_2, X_3, X_4 و X را در نظر گیرد.

متغیرهای کیفی هم در این روش تحلیل در مدل منظور شده اند. متغیر گردگوشه و یا شکسته بودن سنگدانه‌ها که ناشی از منشاء استحصال آنها (رودخانه‌ای یا سنگ شکن) یکی از مواردی بوده است که با کمک فن متغیرهای مجازی به مدل معرفی گردید. در این راستا پارامتری چون q تعریف شده که در مفهوم گرد گوشه بودن مصالح است. در حالت یک که معنی گردگوشه نبودن می‌باشد لزوماً آن دسته از مشاهدات که مربوط به مصالح شکسته می‌باشند، در معادله نهایی گنجانیده می‌شوند لیکن در حالت صفر، مشاهدات مربوط به مصالح رودخانه‌ای لحاظ می‌گردد. تحلیل آماری به‌عمل آمده به‌علت برخورداری از یک منطق علمی، استفاده کنندگان آتی از نتایج این تحقیق را قادر می‌سازد تا متناسب با واقعیت‌های کارگاهی و اجرایی از یکی از شکل‌های معادلات حاصل استفاده به‌عمل آورند. معادلات مذکور با توجه به حضور متغیرهای مجازی به ۶۵ معادله تبدیل می‌گردد که هر یک با در نظرگیری یکی از متغیرهای موجود در همان شکل از معادله، مقدار وزن از دست رفته را به‌عنوان تابعی از پارامترهایی با تأثیر معنی‌دار، مشخص می‌کند. چند معادله عمومی حاصل از تحلیل مورد بحث به‌طور نمونه و به شرح زیر از نظر می‌گذرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

برای حصول اطمینان از صحت مشاهدات انجام شده، مقایسه آنها با نتایجی که دیگر محققین در گذشته بر روی انواع نمونه‌های بتنی بدست آورده و مورد تأیید همگان می‌باشد ضرورت داشت. در این راستا

رابطه (۲۸)

$$L_w = 11/5 + 0/17 C_w + 8/2 m - 0/17 t - 0/064 S_p$$

پیشنهادهای

با توجه به یافته‌های پروژه پژوهشی حاضر پیشنهاد می‌گردد پارامترهای ذیل در کارهای پژوهشی آینده به‌طور مستقل یا توأمان مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرند.

الف - تغییر جنس سنگدانه‌ها، ب- تغییر نوع سیمان مصرفی، ج- تغییر نوع مواد مضاف مصرفی، د- تغییر اندازه درشت‌ترین سنگدانه‌ها، ه- تغییر انرژی تراکمی، و- تغییرات زمان سایش، ز- تغییر جنس، شکل و اندازه ذرات ساینده و بالاخره ح- تغییر زاویه برخورد ذرات ساینده

پاورقی‌ها

- 1- Us Army . Corps of Engineers
- 2- Zintel Canyon Dam
- 3- Willow Creek Dam
- 4- Standard Test Methoel for Abrasion Resistance of concrete
- 5- Disk
- 6-Blade
- 7-Roller
- 8-Spheroid
- 9-Abrasive disk
- 10- Paving
- 11- Sand and water blasting

منابع مورد استفاده

- ۱- بیات، حبیب اله، ۱۳۷۹؛ طراحی و ساخت دستگاه سنجش مقاومت سایشی بتن با جریان فورانی چند فازی گزارش نهائی مصوب طرح تحقیقات کاربردی شورای پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- 2- AGRA Earth & Environment, AZ. 1998; Report on reata-pass abrasion testing , Hudson Consultants, NY.
- 3- Corps of Eng .1999; Test results of roller compacted concrete mixtures ; Rio Sal ado Project: US Army Corps of Engineers, Los Angeles District.
- 4- ETL 1110-2-343-93. 1993., Structural design using the R.C.C. construction process.
- 5- Garga V.K., Townsend, R., and Hansen, D., 1991; A method for determining the surface area of Quarried Rocks, ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 14, No. 1.
- 6- Hansen K.D.1996, Erosion resistance of roller – compacted concrete, Presented at 1996 Spring Convention, American

به اهمیت شکل و زبری سطح سنگدانه‌ها در پارامتر m دو رابطه ۲۴- برای سنگدانه‌های رودخانه‌ای و رابطه ۲۵ برای سنگدانه‌های شکسته ارائه می‌گردد.

$$L_w = -40m + 20 \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$L_w = -80m + 35 \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

که در آن m شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط بر حسب میلی‌متر و L_w مقدار کاهش وزن نمونه R.C.C. برحسب گرم می‌باشد. از تلفیق یافته‌های مرتبط با شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط با مشاهدات انجام شده پیرامون مقاومت سایشی R.C.C. و بتن متعارف جمع بندی گردیده است که تعداد زیادی از عواملی که باعث فشردگی هر چه بیشتر مخلوط و به عبارتی دیگر به عوامل مستتر در دانه بندی و تراکم بهینه مرتبط می‌باشند را می‌توان تنها با پارامتر شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط ارزیابی نمود. یعنی نزدیک به بیش از ده عامل مهم که هر یک تاثیر فوق العاده بر مقاومت سایشی دارد و تاثیر هر یک بر عامل دیگر نیز عامل جدیدی را به وجود می‌آورد، حذف و تنها پارامتر شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط مطرح خواهد بود. بدیهی است این دیدگاه در کاربری مصالح یاد شده در سازه‌های هیدرولیکی اعتبار اصلی خود را نشان می‌دهد.

تاثیر توأمان پارامترهای مؤثر بر مقاومت سایشی

با توجه به مجموعه روابط ۱۹ الی ۲۲ که از تحلیل رگرسیون چند متغیره حاصل شده، می‌توان تاثیر توأمان پارامترها را ارزیابی نمود. با در نظر گرفتن حداقل‌ها و حداکثرها در ۶۵ معادله‌ای که از جا گذاری متغیرهای مجازی حاصل شده، معادلات ذیل بدست می‌آید که پوشاننده تمامی آن روابط می‌باشد.

برای R.C.C. ساخته شده از سنگدانه‌های شکسته
رابطه (۲۶)

$$L_w = \alpha - \beta t + 283 m - 0/245 C_w - 0/052 S_p$$

$$-22 < \alpha < 24$$

$$0/012 < \beta < 0/056$$

برای R.C.C. ساخته شده از سنگدانه‌های رودخانه‌ای

$$L_w = \alpha - \beta t + \gamma m - 0/245 C_w - 0/052 S_p \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$0 < \alpha < 24$$

$$0/012 < \beta < 0/056$$

$$28 < \gamma < 38$$

برای R.C.C. در حالت کلی

Concrete Institute, Denver, CO, USA

7- Hansen, K.D. and Lynch, J.B. 1995; Controlling floods in the desert with soil – cement Proceeding Second CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas, NV .

8- Holland T.C., 1983 ; Abrasion erosion update 1983; Concrete Structures Repair and Rehabilitation , Information Exchange Bulletin Vol. C- 83 – 1.

9- Krumbein W.C. and Pettijohn, F .J1938; Manual of sedimentary petrography, D. Appleton, New -York.

10- Liu Tony C. 1980, Maintenance and preservation of concrete structure: Report 3, Abrasion – Erosion Resistance of Concrete, US Army Water Experiment Station, Technical Report C-78 –4

11- Logie C.V. 1985., Economic consideration in selection of a R.C.C. dam. Proceedings of ASCE Symposium on R.C.C.,Denver, Co, USA.

12- McCorquodalc, J. A., Hannoura, A. A., and Naser, M.S., 1978; Hydraulic conductivity of rockfill, Journal of Hydraulic Research, Vol.16,pp: 477-486.

13- Nanni A. 1989 ; Abrasion resistance of roller compacted concrete. ACI Materials Journal, Nov.-Dec. Issue.

14- Omoregie F.A., Gut show, R.A and Russell, M.L.1994; Cement – hardened materials for abrasion – erosion in hydraulic

structures”, Concrete International.

15- Portland Cement Association, Pacifica Southwest Region .1979; Resistance of soil – cement to erosion by longitudinal flow of water and debris.

16- Sabin G.C. W. and Hansen, D. 1994; The effects of particle shape and surface roughness on the hydraulic mean radius of a porous medium consisting of Quarried Rock, Geotechnical Testing Journal, GTJODG, Vol. 17, No. 1,pp: 125-231.

17- Schrader, E. and Stefanakos J.1995; Roller compacted concrete cavitation & erosion resistance. Proceeding of International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Santander, Spain.

18- Schnabel Eng. Associate, Inc. 2001; Laboratory tests and field studies on erosion and abrasion resistance of soil – cement and roller – compacted concrete. PCA R & D Serial No. 2436.

19- Tony C. Liu. 1981; Abrasion resistance of concrete. ACI Journal, Sep – Oct Issue, pp: 341 – 350.

20- Wilkins, J. K .1956; The flow of water through rockfill and its application to the design of dams. Proceedings, Second Australian – New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sydney.

21- Zingg T., 1935; Beitrag zur schotteranalyse, Petrographische Mitteilungen, Vol. 15, No 3, pp 26-43.

