# بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت سایشی وفرسایشی بتن غلتکی

حسین میرمحمدصادقی* و حبیب‌اله بیات**
مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی اصفهان
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۸۲/۵/۴ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۱۰/۶)

**چکیده** – توسعه استفاده از بتن غلتکی بدون پوشش در سازه های هیدرولیکی مهم ایجاب می کند که عوامل مؤثر بر مقاومت سایشی آن ، به ویژه در بخش سرریز بررسی شود. در این مقاله، ضمن تحلیلی بر مشاهدات آزمایشگاهی از چگونگی وقوع پدیدهٔ سایش و فرسایش که در برخورد مالشی جریانهای دو فازی با سرعت زیاد به وجود می آید به معرفی معیارهای لازم برای نشان دادن مقاومت سایشی و فرسایشی بتن غلتکی در اثر پارامترهای مختلف از قبیل دانه بندی، نسبت مصالح سنگی، جنس و شکل سطح سنگدانه ها، انرژی تراکمی (که این عوامل می‌تواند به تنهایی با پارامتر "شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط " معرفی شود)، سن نمونه و نسبت عیار سیمان و ... هم می پردازد. به گواه مراجع و مآخذ، اگر چه بیشتر تحقیقات انجام شده تاکنون، بر ویژگیهای سایشی بتن های معمولی که اغلب نیز با رویه های بسیار صاف و صیقلی ساخته می شوند انجام شده، ولی در این مقاله به معرفی تحلیل پدیده سایشی و فرسایش و تحقیقات انجام شده در زمینه تعیین مقاومت سایشی و فرسایشی بتن غلتکی و کاربرد آنها در پژوهشهای جدید با بهره گیری از دستگاه سنجش مقاومت سایشی و فرسایشی بتن با جریان فورانی چند فازی اهتمام دارد و با تجزیه و تحلیلهای تک و چند متغیره نتایج حاصل ، گرافها و روابطی کاربردی برای مقدار سایش و فرسایش بر حسب پارامترهای فوق الذکر ارائه شده است.

**واژگان کلیدی :** بتن غلتکی، مقاومت سایشی و فرسایشی، شعاع هیدرولیکی

# Investigation ofParameters Affecting Abrasion Resistance of R.C.C.

**H. M. M. Sadeghi and H. Bayat**
Isfahan High Education and Research Institute
Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology

**Abstract:** ***The use of roller compacted concrete (R.C.C) without conventional cover in important hydraulic structures is investigated through laboratory observation of abrasion phenomena sujected to high velocity flow and floating particles. The main parameters affecting abrasion and erosion resistance of R.C.C. studied in the present study include: "Mixed Hydraulic***

---

* - دانشجوی دکترا ** - دانشیار

***Mean Radius" (which collectively represents several different parameters such as shape, type of surface, fine and coarse aggregate ratio, mixture irregularity, and energy of compaction), water cement ratio, and age of R.C.C. samples. It should be noted that most references in this filed concentrate on conventional concrete abrasion with often soft surfaces. In the present study, however, research findings on abrasion-erosion resistance of R.C.C. and their applications in new investigations will be investigated using a new test device called "Evaluation of Concrete Resistance" designed by H. Bayat. The device works with several phase flows. Single and multivariate analyses of the results, graphs, and empirical relations are used to determine abrasion and erosion resistance in terms of the above parameters. It is expected that in future only one parameter, namely, the Mixture Hydraulic Mean Radius", will suffice for evaluating R.C.C. abrasion resistance.***

**Keywords:** ***R.C.C.,Erosion and Abrasion Resistance, Hydraulic Mean Radius***

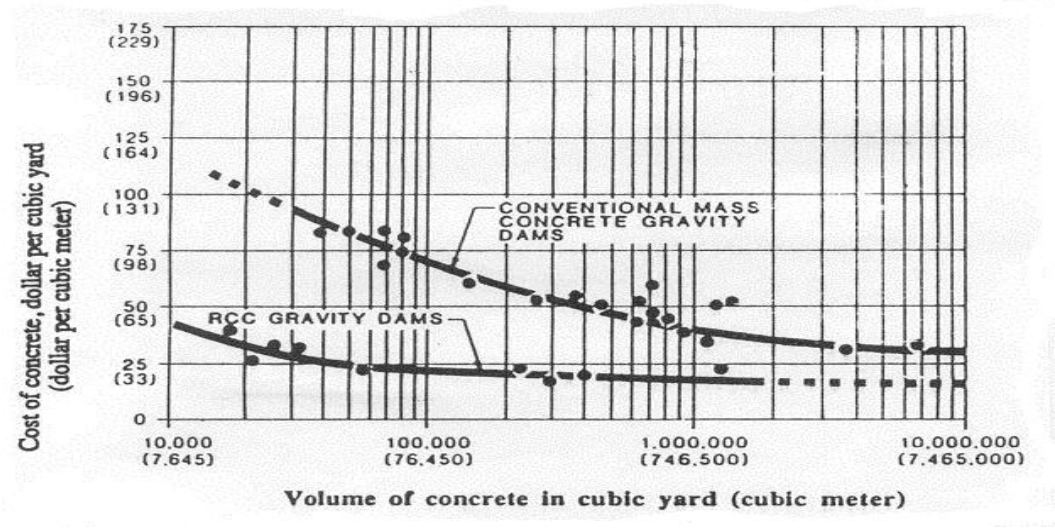
## فهرست علائم

| | |
|---|---|
| a کوچکترین بعد سنگدانه برحسب میلیمتر | $S_{solid}$ سطح سنگدانه برحسب میلیمتر مربع |
| $A_{vs}$ سطح مخصوص حجمی سنگدانه برحسب میلیمتر | $S_{void}$ سطح خلل و فرج بین دانه‌ها در واحد حجم مخلوط |
| b قطر کره معادل یا بعد متوسط سنگدانه‌برحسب میلیمتر | بر حسب میلیمتر مربع |
| c بزرگترین بعد سنگدانه برحسب میلیمتر | $S_p$ مقاومت فشاری برحسب کیلوگرم برسانتیمتر مربع |
| $C_e$ مقدار سیمان برحسب کیلوگرم در متر معکب | t سن نمونه برحسب روز |
| e نسبت پوکی | V حجم دانه کروی برحسب میلیمتر مربع |
| $L_w$ جرم از دست رفته در اثر سایش برحسب گرم | $V_{solid}$ حجم سنگدانه برحسب میلیمتر مکعب |
| m شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط بر حسب میلیمتر | $V_{void}$ حجم خلل و فرج بین دانه‌ها در واحد حجم مخلوط |
| $r_c$ ضریب شکل | بر حسب میلیمتر مکعب |
| $R_{rough}$ ضریب زبری سطح سنگدانه | $x_1$ الی $x_5$ = متغیرهای مجازی نشاندهنده تأثیر دانه‌بندی‌ها با |
| $R_{oblate}$ ضریب کرویت سنگدانه | ضرایب یکنواختی به ترتیب ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ و Cu=۵ |
| S سطح سنگدانه یا سنگدانه‌ها برحسب میلیمتر مربع | |

## ۱- مقدمه

بتن غلتکی که به اختصار .R.C.C نامیده می‌شود، روشی جدید درساخت سدهای وزنی و دیگر سازه‌های بتنی حجیم است. مطابق تعریف کمیسیون جهانی سدهای بزرگ، .R.C.C نوعی بتن با اسلامپ صفر بوده که مانند لایه‌های خاکریز، می‌تواند متراکم شود. به طورکلی خواص بتن غلتکی سخت شده بستگی به دانه‌بندی، جنس و شکل سنگدانه‌ها مواد سیمانی، نحوهٔ ساخت مخلوط، درصد تراکم و کنترل اجرا دارد. مزیت این روش ساخت بتن، هزینهٔ کمتر از انواع دیگر بتن و سرعت اجرایی بسیار زیاد آن بوده و در عین حال دارای خواص مکانیکی مورد نیاز بتن معمولی نیز هست. [۱-۲]

در آغاز پیدایش این فناوری نوین، بتن غلتکی تنها در زیرسازی فرودگاهها و جاده‌ها به کار برده می‌شد. ولی بعداً با توجه به خواص مناسب و مفید آن در اجرای سدها نیز به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفت. به طوری که این روش ساخت بتن از نظر اقتصادی در رقابت با خاکریزها و از نظر کیفیت دارای خواص بتن معمولی است. شکل (۱) نشان می‌دهد [۳] که اصولاً سدهای بتن غلتکی ارزانتر از سدهای بتنی متعارف اند. در کاربریهای قدیمیتر، سطوح خارجی بتن غلتکی را همواره با لایه ای از بتن متعارف در مقابل عوامل محیطی و مخرب حفاظت می کردند. لیکن ضرورتهای کاهش هزینه های اجرایی، در سالهای اخیر به حذف پوشش یاد شده انجامیده و در نتیجه بحث مقاومت سایشی و فرسایشی بتن کوبیده را مطرح ساخته است. به همین دلیل است که نکتهٔ قابل تأمل و مهم در کاربری




**شکل ۱ – مقایسه هزینهٔ ساخت بتن غلتکی و بتن معمولی[۳]**

بتن غلتکی درسرریزهای سدها، رفتار مقاومت سایشی آن است، که بایستی با بررسی و مطالعهٔ کلیه عوامل مؤثر در آن بـه تنـویر آن نائل آمد.

در این مقاله سعی بـرآن اسـت بـا تبیـین ایـن عوامـل و درجـهٔ اهمیت هریک و به صورتی کـاهش تعـداد پارامترهـا و عوامـل موثر در یـک یـا چنـد عامـل، بـه بررسـی مقاومـت سایشـی و فرسایشی پرداخته شود.

## ۲- مروری بر آخرین دستاوردهای علمی و تجربی موجود

### ۲-۱-تحقیقات موسسه مهندسی اشنابل [ ٤ ]

هنـگ مهندسـی ارتـش ایـالات متحـده آمریکـا[۱] تحقیقـات و بررسیهایی را در رابطه با پـروژه هـای مشـخص اجرایـی بـرای تعیین مقاومت سایشی و فرسایشی بتن غلتکی به انجام رسـانده است.نهاد مذکور سد زینتل کـانیون[۲] را بـا ارتفـاع ۳۹ متـر و بـا شیب سرریز ۰/۸ افقی به ۱ قائم به صورت وزنی و با .R.C.C برای اولین بار در آمریکا ساخته است. ده سـال بعـد و توسـط همان هنگ مهندسی، سد ویلوکریک[۳] برهمان اساس طراحـی و اجرا شد. به عنوان قسمتی از کارهای طراحی این سـدها، بـرای بررسـی و مشـاهده اثـرات سـرعت زیـاد جریـان آب بـر روی .R.C.C با مقاومت فشاری حـدود ۱٤۰ کیلـوگرم بـر سـانتیمتر مربع، آزمایشهایی را اجرا کرده اند که ویژگیهایی به شـرح ذیـل داشته است.

بدین منظور شش پانل ۱/۵۰ × ۰/۵۳ متری از .R.C.C بـا سـطح صاف و زبر ساخته شده به طوری که این .R.C.C دارای حـدود ۱۲۰ کیلـوگرم بـر متـر مکعـب سـیمان و مقاومـت فشـاری آن حدودا" برابر ۱٤۰ کیلوگرم بـر سـانتیمتر مربـع بـود و سـرعت جریان آب بین ۲۳ تا ۲٦ متر برثانیـه و بلنـدای مـوثر جریـان بین ٤۱ تا ۳۰ متر تغییر داده می شد.

برای دال با سطح صـاف پـس از ۳۷ دقیقـه در حالـت حـداکثر سرعت (۲٦ متر بر ثانیه) دانه های ریز سنگی نمایان شده و پس از ٦۳ ساعت این حالت برای بیشتر از هشتاد درصد سـطح اول اتفاق افتاد و بعضا" دانه های سنگی نیز از دال خارج شدند.

برای دال با سطح زبر با اینکه سرعت کمتر بود (۲۳ متر برثانیـه) فرسایش و تخریب و سایش بیشتری اتفاق افتـاد. در هـر حـال عمق فرسایش پس از ٦۳/۵ ساعت حدودا" به طور متوسـط ۱۹ میلیمتر بود و حداکثر آن به طور موردی بـرای سـوراخهایی بـه عمق ۲۹ میلیمتر بوده است.

آزمایشهای سایشی دیگری نیز توسط یـک آبفشـان[٤] ۲۰۰ × ۲۵ میلیمتری متمرکز بـر روی نمونـه هـای مکعبـی ۳۰۰ میلیمتـری

R.C.C. که نسبت به افق پنج درجه مایل بوده، انجام گرفت. سرعت آب در محل برخورد با نمونه ها برابر۹/۱ تا ۱۰/٦ متر بر ثانیه گزارش شده است. در این نمونه ها از سنگ دانه های شکسته با حداکثر اندازه ۷۵ میلیمتری استفاده شده و دارای حدود ۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان ، ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب خاکستر بادی و نسبت وزنی آب به سیمان برابر ۰/۷ و به طوری که از هر دو نمونه بتن غلتکی ، یک نمونه دارای سطح صاف و صیقلی و یک نمونه دارای سطح زبر بود.

نتایج این آزمایشها نشان داد که سایش و فرسایش کمی پس از گذشت ١٤ ساعت جریان مداوم اتفاق افتاده است و مشاهدات چشمی نیز نشان داد که مواد تخریب و مورد سایش و فرسایش و حمل شده از ذرات ریز و سست نمونه ها بوده و عناصر اصلی تخلیه نشده است.از مطالعات و بررسیهای انجام شده تاکنون می توان به نتایج ذیل به طور خلاصه برای تعیین عوامل موثر بر مقاومت سایشی بتن غلتکی اشاره کرد[۵-۸ ].

- هرچه نسبت آب به سیمان کمتر باشد مقاومت فشاری و سایشی بیشتر خواهد بود.
- هر چه انرژی تراکمی بیشتر باشد مقدار آب بهینه مورد نیاز کمتر خواهد بود.
- هر چه مقدار سیمان بیشتر باشد مقاومت فشاری و سایشی بیشتر خواهد بود.
- هر چه مقدار آب از مقدار بهینه کمتر یا بیشتر شود مقاومت فشاری و سایشی کمتر خواهد بود.
- معمولاً مواد افزودنی تاثیر فوق العاده ای در مقاومت فشاری و سایشی بتن ندارد.
- هرچه مقاومت فشاری و سایشی سنگدانه ها بیشتر باشد متناسباً مقاومت فشاری و سایشی بتن غلتکی نیز بیشتر خواهد بود.
- هرچه مقاومت فشاری بیشتر باشد متناسباً مقاومت سایشی نیز افزایش خواهد یافت.
- اگرچه مقاومت فشاری بتن غلتکی کمتر از بتن معمولی است برای نسبت آب به سیمان برابر مقاومت سایشی آن برابرحتی بیشتر از بتن معمولی است.
- هرچه سطح بتن غلتکی صافتر باشد دارای مقاومت سایشی بیشتری نسبت به سطوح زبر خواهد بود.

### ۲-۲-تحقیقات راسل و همکاران [۹-۱۰]

آقای راسل و همکاران (١٩٩٤) برای تعیین مقاومت سایشی تحت آب بتن معمولی P.C.C.، بتن غلتکی R.C.C. و خاک سیمان S.C. و مقایسه آنها، چهار مخلوط از هریک از مصالح یاد شده را مورد آزمایش قرار دادند . نتایج مشاهدات ایشان به صورت جدول (۱) نشان داده شده است. کلیه آزمایشات بر روی نمونه های ۲۸ روزه و عمل آوری شده در شرایط مرطوب بوده است. برای نمونه های P.C.C. و R.C.C. مقدار کاهش جرم هر ۱۲ ساعت در حین ۷۲ ساعت آزمایش اندازه گیری شده است. به علت اینکه مخلوط خاک سیمان مقاومت نسبتاً کمی دارد و با سرعت بیشتری تخریب می شود، بنابراین در هر دو ساعت یکبار اندازه گیری کاهش جرم انجام شده است.

### ۲-۳- تحقیقات سابین و هنسن [ ۱۱-١٤] (ارزیابی و تعیین شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط)

آقای سابین و هنسن (١٩٩٤) اثرات شکل و زبری سطح سنگدانه بر " شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط " در محیطهای متخلخل متشکل از مخلوط سنگدانه های شکسته را مورد بررسی قرار دادند.

مفهوم شعاع هیدرولیکی متوسط در جریان هیدرولیکی بین دانه‌ای بسیار مفید واقع شده به طوری که در رفتار جریانهای هیدرولیکی غیر دارسی اغلب کاربرد دارد.اساسی‌ترین تعریف شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط برابر است با :

$$m=V_{void} / S_{void} \qquad (۱)$$

$V_{void}$، $S_{void}$ حجم و سطح خلل و فرج بین دانه ها در واحد حجم مخلوط و در واقع مقدار m نشان دهنده قطر متوسط یک لوله مجازی برای عبور جریان است. محاسبات m با استفاده از معادله (۱) فقط در صورتی امکانپذیر است که از اثرات تماس بین دانه ها صرف نظر شود. درحالی که این فرض برای مخلوط

**جدول۱ - مقایسه مقاومت سایشی بتن های P.C.C. ، R.C.C. و S.C. [۹ -۱۰]**

| | بتن معمولی | | | | بتن غلطکی کوبیده | | | | بتن خاک سیمان | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| شماره مخلوط | ۱ | ۲ | ۳ | ٤ | ٥ | ٦ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ |
| بزرگترین اندازه دانه mm | ۱۹ | ۱۹ | ۲٥ | ۲٥ | ۲٥ | ۲٥ | ۲٥ | ۲٥ | | | | |
| مقدار سیمان $kg/m^3$ یا ٪ | ۲۹۲ | ٤۱٦ | ۲۸٤ | ٤۱٦ | ۲۰۷ | ۲٦٦ | ۳۲٥ | ۳۸٤ | ٦ | ۸ | ۱۰ | ۱۲ |
| درصدپوزولان جایگزین سیمان | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| نسبت آب به سیمان | ۰/٦۱ | ۰/٤۳ | ۰/٦۳ | ۰/٤۳ | ۰/٥٦ | ۰/٤۹ | ۰/۳٥۷ | ۰/۳۰۲ | – | – | – | – |
| درصد رطوبت | – | – | – | – | ٦/٥ | ۷/۰ | ٦/٤ | ٦/۳ | ۸/۳ | ۸/۳ | ۸/۳ | ۸/۳ |
| نسبت ماسه به کل دانه ها | ۰/٤٦ | ۰/٤۳ | ۰/٤٤ | ۰/٤۱ | ۰/٤۰ | ۰/٤۰ | ۰/٤۰ | ۰/٤۰ | – | – | – | – |
| کارائی cm | ۳/۲ | ٦/۳ | ۷/۰ | ۷/٦ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | – | – | – | – |
| درصد هوا | ۲/٤ | ۲/٤ | ۲/۲ | ۲/۰ | – | – | – | – | – | – | – | – |
| درصد پوکی متوسط | – | – | – | – | ٥/۸ | ۲/۲ | ٤/٥ | ۳/۹ | – | – | – | – |
| درصد کاهش آب | ۲/٥ | ۲/٥ | ۲/٥ | ۲/٥ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | – | – | – | – |
| وزن واحد حجم $kg/m^3$ | ۲۲۸۸ | ۲۳۰۹ | ۲۲۹۰ | ۲۳۱۹ | ۲۲۷۲ | ۲۳٤٤ | ۲۳۱٤ | ۲۳۳٦ | ۲۰٦٤ | ۲۰۷٥ | ۲۰۸٥ | ۲۰۸۲ |
| مقاومت فشاری ۷ روزه $kg/cm^2$ | ۲۱۱ | ٤۱۱ | ۱۹۹ | ۳۸٥ | ۷۰ | ۱۳۰ | ۱۸٤ | ۲٥٥ | ٤۰ | ٥٥ | ۸۳ | ۹۰ |
| مقاومت فشاری ۲۸ روزه $kg/cm^2$ | ۳۲۳ | ٥۰۸ | ۳۱۱ | ٥۳٤ | ۱۰۷ | ۲۱٤ | ۲۷۷ | ۳٥۰ | ٦۱ | ۹۸ | ۱۱۲ | ۱۲۸ |
| درصد کاهش وزن معادل ۷۲ ساعته | ۸/۷ | ٦/۰ | ۸/۷ | ٦/۸ | ۱۰/۱ | ٥/۲ | ٥/٤ | ٦/٤ | ۹٦/٥ | ٥۹/۰ | ۳٦/۳ | ۳۲/۰ |
| کاهش حجم معادل ۷۲ ساعته $cc/cm^2$ | ۱/۰ | ۰/۷ | ۱/۰ | ۰/۷ | ۱/۱ | ۰/٦ | ۰/٦ | ۰/۷ | ۸/۰ | ٦/۷ | ٤/۱ | ۳/۷ |

سنگدانه های شکسته صادق نیست. برای حل این مشکل می‌توان از $A_{vs}$ سطح مخصوص حجمی که برای یک سنگدانه تکی به صورت زیر تعریف می شود، استفاده کرد.

$$A_{vs} = S_{solid} / V_{solid} \qquad (۲)$$

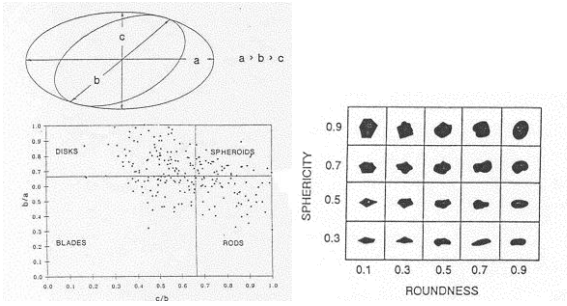
معادله (۲) می تواند برای یک گروه سنگدانه نیز به طور متوسط کاربرد داشته باشد . بنابراین می توان با کاربرد نسبت پوکی e مخلوط به معادله (۳) دست یافت .

$$m = V_{void} / A_{vs} \; V_{solid} = e / A_{vs} \qquad (۳)$$

باید توجه داشت سنگدانه ها به ندرت در وضعیت مشابهی درکنار هم قرار می گیرند بنابراین معادله (۳) می تواند برای چنین حالتهایی به راحتی مورد استفاده قرار گیرد. محاسبه $A_{vs}$ و همچین m فقط برای شرایطی از سنگدانه ها ممکن است که آنها شکل منظم هندسی داشته باشند. درحالی که سنگدانه های واقعی در طبیعت دارای شکلهای نامنظم هندسی بوده و باحالت فرض شده متفاوت است. به همین دلیل لازم است یک ضریب شکل $\Phi$ نسبت به حالت استاندارد تعریف شود، به طوری که درحالت دانه های کاملا" کروی این ضریب برابر یک و برای بقیه شکلها این ضریب بزرگتر از یک خواهد بود.

$$\Phi = S^3 / 36\pi V \qquad (٤)$$

چنانچه کره به عنوان شکل یک سنگدانه مدل در نظر گرفته




**شکل ۲ – اشکال چهارگانه سنگ دانه و تعیین زبری آن به صورت کیفی،زینگ ۱۹۳۵**

شود، یک ضریب شکل به صورت نسبت $A_{vs}$ دانه واقعی به $A_{vs}$ کره معادل و تقریبا" هم حجم دانه، قابل تعریف است، با اینکه این ضریب ممکن است یگانه نباشد ولی می تواند به طور عملی در نظر گرفته شود.

برای دانه واقعی با سه قطر عمود برهم a>b>c مطابق شکل (۲) ضریب شکل $r_c$ را می‌توان به صورت معادله (۵ ) تعریف کرد.

$A_{vs}=r_c\, A_{vs}(b$ (برای دانه واقعی) ( برای کره معادل با قطر b) (۵)

درحالی که برای یک محیط متخلخل و اشکال غیر کروی با در نظر گرفتن معادلات قبلی، معادله (٦) به دست می آید:

$$m=eb/6r_c \qquad (٦)$$

گارگا [١٤] ضریب شکل $r_c$ را نتیجه حاصلضرب دو ضریب زبری سطح $R_{rough}$ و ضریب کرویت $R_{oblate}$ در نظرگرفت و به کمک نمودار زینگ[١٥]،کرامین و پتی جان[١٦] محاسبه آن را به طرق مختلف تحلیلی و آزمایشگاهی انجام داد.

$$r_c = R_{oblate} \cdot R_{rough} \qquad (٧)$$

$$R_{oblate} = S/\Pi ac \qquad (٨)$$

ارزیابی و بررسی و تعیین تابع S کار ساده ای نبوده و نیاز به یک فرایند طولانی و پیوسته محاسباتی دارد. با استفاده از نمودار زینگ که اشکال مختلف سنگدانه را به چهار گروه یا دسته شامل: پولکی شکلهای دایروی[٦]، پولکی شکلهای مستطیلی[٧]، میله ای شکلها[٨] و کروی شکلها[٩] تقسیم بندی کرده و همچنین با کاربرد گرافها و نمودارهای مختلف، ضریبهای کرویت و زبری سطح سنگدانه را می توان محاسبه کرد.

$$S_1 = \frac{\pi ab}{2} + \frac{\pi c}{2}\sqrt{(a^2+b^2)/2} \qquad (٩)$$

$$S_2 = \frac{\pi bc}{2} + \frac{\pi a}{2}\sqrt{(b^2+c^2)/2} \qquad (١٠)$$

$$S_3 = \pi[(a+b+c)/3]^2 \qquad (١١)$$

$$S_4 = (S_1+S_2)/2 \qquad (١٢)$$

$$S_5 = (S_1+S_2+S_3)/3 \qquad (١٣)$$

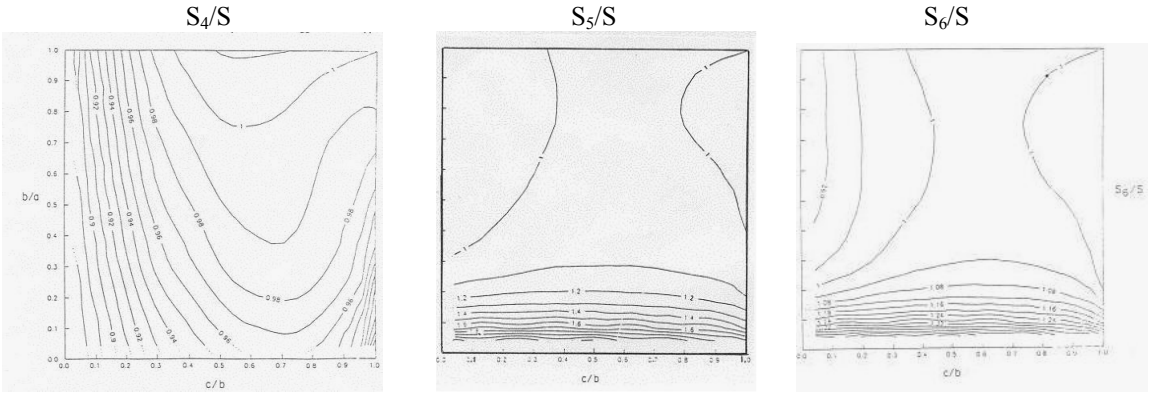
$$S_6 = (S_4+S_5)/2 \qquad (١٤)$$

بنابراین $R_{oblate}$ را می توان با تقریب خوب، با استفاده از معادله (۸) و جایگزینی یکی از $S_4$ ، $S_5$ و$S_6$ به جای S در آن محاسبه کرد. البته باید خاطر نشان کرد که بهترین مقدار برای S همان $S_6$ است که با اطلاعات داده شده توسط گارگاو زینگ بیشترین تطابق را دارد، شکل (۳).

## ۳-جایگاه پژوهش فعلی

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

نسبت قابل قبول در مخلوط برای .R.C.C در چنین سازه هایی به سختی تعیین می شود. لیکن موضوع بسیار مهم روشهای آزمایشی تعیین مقاومت .R.C.C در برابر فرسایش است. بیشتر آزمایشهای انجام شده تا به حال دربارهٔ اندازه گیری خاصیت




**شکل ۳- خطوط هم مقدار برای $S/S_6$,$S/S_5$,$S/S_4$**

مقاومت سایشی فرسایشی بتن بوده و مراحل سایش و فرسایش به طور مصنوعی شبیه سازی شده است. مانند آزمایشهای تعیین مقاومت سایش با صفحات چرخشی سایش[۱۰] که شرایط طبیعی محیط را منعکس نمی کند و بنابراین نتایج به دست آمده از این روشها نمی تواند براساس تحلیلهای مقایسه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد و کاربرد کافی را داشته باشد [۱۷- ۱۸].

سوالات مختلفی درباره شبیه سازی فرسایشی سایشی بتن در آزمایشگاه توسط محققان ارائه شده است. آنان چنین بیان کرده‌اند که نتیجه آزمایشات تعیین مقاومت سایشی و فرسایشی به چگونگی تأثیرات محیط بستگی دارد. همچنین اهمیت تأثیر شاخصهای تکنیکی برنسبت مصالح در مخلوط، چگونگی تراکم و ساخت بتنی را که در معرض سایش و فرسایش قرار دارد توسط تی. سی. لیو [۱۹] و آ. نانینی [۲۰] ارائه شده است. تاکنون هیچ تحلیل مقایسه ای درباره اهمیت مادهٔ مخصوص یا شاخصهای محیطی بر روی فرایند سایش و فرسایش .R.C.C براثر سنگ ریزه ها و مواد معلق همراه با جریان آب صورت نگرفته است. هدف تحقیقات فعلی نه تنها به منظور شبیه سازی شرایط سایش و فرسایش طبیعی بتن کوبیده غلطکی بلکه یافتن روابطی است که قادر به پیش بینی پیشرفت سایش و فرسایش سازهٔ .R.C.C براساس نسبتهای مخلوط، پارامترهای مؤثر در ساخت وشرایط هیدرولیکی حرکات سنگریزه های همراه جریان آب است. بیشتر دستگاههایی که برای آزمایش کردن مقاومت سایشی فرسایشی بتن طراحی شده اند و به منظور شبیه سازی مکانیزمهایی مانند دستگاه آب و ماسه فشان[۱۱] همراه با اصطکاک خشک یا تر به کار برده می شوندتعداد بسیار کمی از تحقیقات در شرایط مشابه با تأثیرات طبیعی محیط و با استفاده از وسایلی که قادرند فرایندهای سایشی فرسایشی بتن با استفاده از مخلوط سنگ ریزه و آب را شبیه سازی کنند انجام شده است. به طور کلی بیشتر اوقات از مخلوط سنگ ریزه ماسه و آب به عنوان عامل فرسایش دهنده استفاده می شود. این مخلوط بر روی سطح بتن با فشار و سرعت معین و سطحی محدود پخش می شود[۲۱- ۲۳].

سایش و فرسایش یک فرایند پیچیده است و در یک محیط مقاومت سایشی فرسایشی مخلوط .R.C.C به فرایند سایشی و فرسایشی موادی که تحت تأثیر عمل سایش و فرسایش قرار می‌گیرند بستگی دارد. هنگام بررسی و ارزیابی آزمایشهای مختلف فقط نتایج نمونه هایی را که براساس مکانیزمهای چندگانه تشابه سایشی فرسایشی داشته اند را می توان با هم مقایسه کرد.این مکانیزمها توسط چهار پارامتر اساسی خارجی سختی، ، اندازه ، سرعت و زاویه برخورد دانه های مورد استفاده در مخلوط و آب و ماسه فشان مشخص می شوند که با تغییر کردن یکی از این پارامترهای چهارگانه، مکانیزم سایشی فرسایشی دچار تغییر می شود. بنابراین بررسی مقایسه ای نتایج آزمایش امکانپذیر نیست. معمولاً این روش آزمایش باعث کم شدن پیوستگی دانه های بتن غلتکی نسبت به روشهای دیگری

است که با مکانیزمهای سایشی و فرسایشی متفاوتی شبیه سازی شده اند. برای مثال آزمایش صفحه سایشی است که مقاومت سایشی به دست آمده از آن بیشتر از حالتی است که در معرض فرایند سایشی فرسایشی توسط آب وماسه فشان قرار گیرد. چون دراین حالت مقاومت بسیار کمی از خود نشان می دهد. بنابراین شبیه سازی فرایند سایش و فرسایش آزمایشگاهی در شرایط مشابه با تأثیرات طبیعی محیط قادر به تشخیص کامل مقاومت بتن در مقابل سایش و فرسایش می باشد[٢٤- ٢٥].

## ۴- برنامه ریزی و نتایج آزمایشها

آنچه که در چارچوب این پژوهش انجام شد متکی بر وجود دستگاه سنجش مقاومت سایشی بتن با استفاده از جریانهای چند فازی(آب و ماسه وهوا... ) از یک سو و استفاده از نرم افزارهای پیشرفته‌ای چون $S^+$ جهت نظریه تحلیل عمومی شبکه عصبی از سوی دیگر بود. پارامترهایی که به عنوان متغیر مورد بررسی قرار گرفت عبارت بودند از:

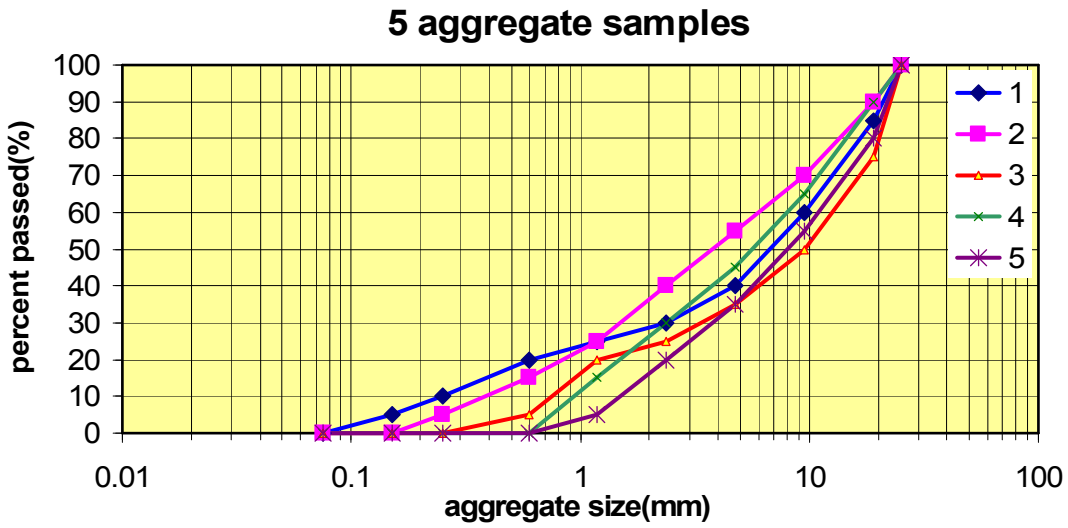
پارامتر طرح اختلاط خود متشکل از زیر مجموعه هایی از آزمایشهای به هم مرتبط است که طی آن اثرات دانه بندی مصالح سنگی به صورت دو عامل متغیر مستقل نسبت اختلاط ماسه و شن و همچنین تعیین ضریب یکنواختی مخلوط با توجه به بزرگترین اندازه دانه ها و تأثیرات متقابل آنها بر یکدیگر، تعیین مقدار آب مورد نیاز بتن به صورت نسبت آب به سیمان و همچنین تعیین رطوبت بهینه برای حصول تراکم بیشینه، تعیین مقدار مواد سیمانی در بتن و در نظر گرفتن نقش شکل دانه های مصالح سنگی مانند گردگوشه (رودخانه ای) یا شکسته بودن دانه ها و همچنین تعیین منشاء، طبیعت و جنس مصالح سنگی از قبیل آذرین، متامورفیک و رسوبی مشخص می شود.

سپس با اتکا به روشهای مختلف تراکم با استفاده از لرزاننده‌های آزمایشگاهی برای حصول دانسیته بیشینه به شرط شکسته نشدن دانه ها با اثبات از طرق بررسیهای ماکروسکوپی نمونه ها تحت آزمایشهای تراکم قرار می گیرند

شایان ذکر است که اگر قرار بود از کلیه متغیرهای فوق الذکر در یک مجموعهٔ مشاهداتی به صورت ترکیب کامل استفاده شود، تعداد نمونه های لازم با رعایت سه تکرار در هر نمونه بالغ بر $۳\times۱۰^{۲۵}$ عدد بود که عملاً امکان اجرای آن وجود نداشت. به همین دلیل ناگزیر آزمایشها را فازبندی (مرحله بندی) کرده و براساس نتایج به دست آمده از بهینه سازیهای هر مرحله، برای مرحله بعدی برنامه ریزی شد، لذا چنین آرایشی از آزمایشهای جهت دار توانست کارهای اجرایی را در مدت زمان معقول سامان دهی کند، لیکن حجم کارهای تحلیلی بعدی را به شدت افزایش داده به طوری که بهره گیری 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 شد 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 و لذا در اینجا به بررسی تأثیرات شکل دانه ها، دانه بندی، مقدار سیمان، مقاومت فشاری و زمان عمل آوری (سن نمونه) بر مقاومت سایشی پرداخته شد.نکته مهم که نباید از نظر دور داشت استفاده از مصالح منطقه ای برای اجرای R.C.C است و لذا افزودن مواد مضاف یا سنگد انه های مخصوص در عمل غیر منطقی به نظر می رسد.

بدین صورت برای در نظر گرفتن اثرات شکل دانه ها از دو نمونه رودخانه ای که دارای سنگدانه های با سطح صاف و ساییده شده و شکسته که دارای سنگدانه های با سطح زبر و با پستی و بلندی است ، استفاده شد لیکن ازنظر جنس هر دو نمونه رودخانه ای و شکسته دارای منشاء مشترک سنگهای آهکی و لذا قابل مقایسه از نظر جنس و قابل ارزیابی از نظر شکل سطح دانه ها خواهند بود. بدین ترتیب در این آزمایشات از یک نوع جنس سنگدانه ولی با دو نوع شکل سطح استفاده به عمل آمد.برای در نظر گرفتن تاثیرات دانه بندی مانند نسبت مقدار شن به ماسه ، بزرگترین اندازه دانه ها مقدار دانه های




**شکل ٤ – منحنیهای پنجگانه دانه بندی**

ریزتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر ، ضریب یکنواختی (نسبت بزرگترین اندازه ٦۰ درصد کوچکترین دانه ها به بزرگترین اندازه ده درصدکوچکترین دانه ها) پنج منحنی دانه بندی با مشخصات و شرایط مطابق شکل شماره (٤) انتخاب شد. همان طوری که در شکل (٤) مشاهده می شود بزرگترین اندازه دانه ها برای هر پنج نمونه برابر ۲۵/٤ میلیمتر است. بدین معنی که تاثیرات پارامتر بزرگترین اندازه دانه ها در این آزمایشات نیز در نظر گرفته نمی‌شود. اندازه ضریب یکنواختی برای منحنیهای دانه بندی از شماره یک تا پنج به ترتیب برابر ٤۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ و ۵ است

برای بررسی تأثیرات دانه بندی و تراکم نمونه که شامل چندین گروه پارامترهای مهم است از پارامتر شعاع هیدرولیکی متوسط در مخلوط های سنگدانه ای که توسط سابین و هانسن [۱۱] معرفی شده است، نیز استفاده شد. این پارامتر به علت ملحوظ کردن جمیع اثرات پارامترها مانند تراکم ، دانسیته ، تخلخل ، شکل و سطح دانه ها، دانه بندی، نسبت درشت به ریز دانه....بسیار مفید و کاربردی است.

براین اساس به طور خلاصه در برنامه ریزی جامع آزمایشات از دو نوع مصالح رودخانه ای و شکسته و از پنج نوع منحنی دانه بندی متفاوت با بزرگترین اندازه دانه های ثابت و با ضرایب یکنواختی به ترتیب برابر ٤۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ و ۵ نیز برای سه مقدار سیمان ۱۰۰ ، ۱۲۵ و ۱۵۰ کیلوگرم در متر مکعب و برای سه سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روزگی در نظر گرفته شد.بنابراین مقدار کل نمونه های مورد آزمایش مطابق جزییات ارائه شده در ذیل، برابر ۲۷۰ شد.

تعداد نوع شکل سطح سنگدانه=۲

تعداد منحنی دانه بندی= ۵

تعداد سن عمل آوری نمونه ها = ۳

تعداد مقادیر سیمان= ۳

تعداد تکرار پذیری =۳

تعداد کل نمونه ها=۲۷۰=۳×۳×۳×۵×۲

بدین ترتیب از هر نوع منحنی دانه بندی و مقدار سیمان تعداد نُه نمونه ساخته شد شکل (۵). برای ساختن مخلوط با دانه بندی مورد نظر به مقدار مناسب از هر دپو توزین و مخلوط کرده به طوری که وزن کل مخلوط برابر ده کیلوگرم شود. سپس مقادیر مشخص سیمان از نوع معمولی (۱۰۰ ، ۱۲۵ و ۱۵۰ کیلوگرم در متر مکعب ) و مقدار لازم آب ( نسبت آب به سیمان برابر ۰/۵ ازآزمایشات تعیین رطوبت بهینه حاصل شده بود) نیز به آن اضافه شد و مخلوط در قالبهای ۲۰×۲۰×۲۰ سانتیمتر ریخته می شود. حدودا" ٦ تا ۷ سانتیمتر از ارتفاع قالب خالی می‌ماند. بنابراین 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 می گیرد.برای به دست آوردن دانسیته حداکثر رطوبت بهینه متناظر با تراکم بیشینه به مدت ۲ دقیقه پس از آزمایشات متعدد که با تغییر دادن سه پارامتر زمان ارتعاش، سربار و نسبت آب به سیمان انجام شد و برای حداکثر تراکم نسبت آب به سیمان ۰/۵ حاصل شده است. معمولا" ارتفاع نمونه ها پس از تراکم به ۱۱/۸ سانتیمتر می رسد.شکل (٦) باید توجه داشت که افزایش مقدار سیمان باعث افزایش حجم نمونه نمی شود. دلیل این موضوع پرشدن فضای خلل و فرج بین سنگدانه ها توسط سیمان است. نمونه‌ها پس از ٢٤ ساعت از قالب خارج و در داخل آب قرار داده می شود. و در سن های ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه‌گی و تحت آزمایش آب و ماسه فشان با زاویه برخورد برابر ۵ درجه، سرعت برخورد برابر٦/٢٥ متر برثانیه، دبی وزنی ماسه برابر۲۵۰۰ گرم در دقیقه ، دبی آب برابر ۱۰ لیتر در دقیقه، دبی وزن مخلوط آب وماسه برابر ۱۲۵۰۰ گرم در دقیقه، سطح برخورد برابر ۱۰ سانتیمتر مربع به مدت دو دقیقه قرار می گیرد، شکلهای (۷) و(۸). و برای اندازه گیری مقدار جرم سائیده شده و مورد فرسایش نیز از توزین ماسه استانداردمعادل حجم آن استفاده شد.شکل (۹). .برای اندازه گیری و تعیین مقاومت سایشی فرسایشی می توان از شیشه به عنوان مرجع استفاده کرد و مقدار سایش شیشه را برای همان شرایط اندا زه گیری کرد و با استفاده از آن مقاومت سایشی و فرسایشی هر نمونه ارزیابی شود. بدین منظور این آزمایش در چندین بار صورت گرفت و مقدار جرم ساییده شده برای هر دو دقیقه برابر ۰/۳ گرم اندازه گیری شد.

برای اندازه گیری مقاومت فشاری، نمونه بین دو فک (صفحات فولادی) دستگاه فک فشاری اتوماتیک قرار گرفته و با سرعت ثابت با افزایش بار برابر kg/Sec ٦٨٠ نمونه تحت بار فشاری حداکثر شکسته می شود. شکل (۱۰)

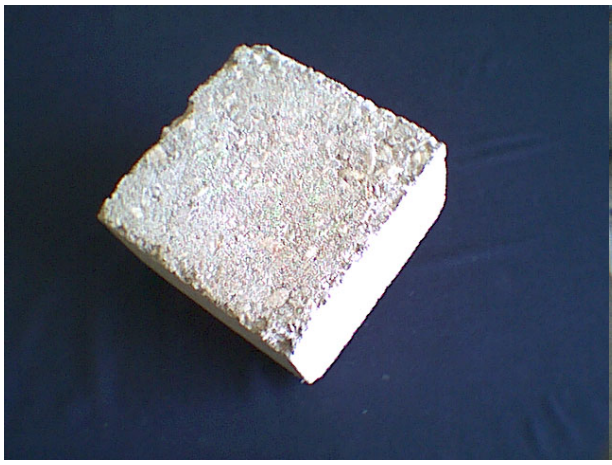
## ۵ – تجزیه و تحلیل آزمایشات

از آنجا که روش تحقیق انتخابی در این تحقیق 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 یا SPSS در حال حاضر متداول بوده و تحلیلهای گسترده چند متغیره معمولاً با کمک این نرم افزارها انجام می شود. در این نوع محاسبات نوع رابطه بین منابع اصلی مورد نظر که در این پژوهش میزان سایش و فرسایش است و بعنوان مقدار جرم از دست رفته نمونه هاست با متغیرهای آزموده شده همچون مقدار سیمان، سن نمونه، مقدار ضریب یکنواختی (نوع منحنی دانه بندی) ، شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط و مقاومت فشاری تعیین می شود. معمولاً نتایج این نوع تحلیل منجر به معادلاتی می‌شود که با بهره گیری از این معادلات می توان در طراحیها و یا در شرایط کاربری تمام مقیاس[۱۲] بدون ضرورت انجام کارهای آزمایشگاهی، براوردی از میزان سایش و فرسایش به دست آورد. اگر چه این هدف در کارهای مشاوره ای (طراحی) از اهمیت زیادی برخوردار است ، لیکن برای تصمیم گیری در مورد انتخاب مصالح و روش عمل آوری .R.C.C کافی نیست. به همین دلیل در این بخش ابتدا با روش رگراسیون تک متغیره حدود تاثیر هریک از متغیرها برمیزان 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.

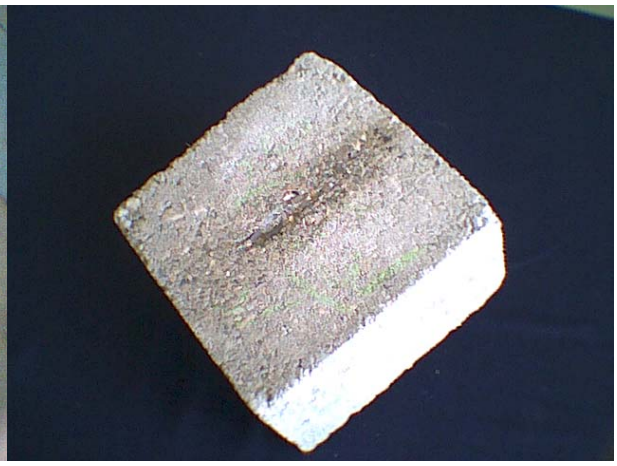
### ۵-۱- تجزیه و تحلیلهای تک متغیره

در این محاسبات از توابع مختلف خطی و نمایی، توانی، کسری و لگاریتمی در آغاز بهره گیری به عمل آورده و با کمک معیار هم بستگی $R^2$ نتایج مربوطه با هم مقایسه شده اند در نهایت تصمیم گرفته شد که از رابطه هم بستگی خطی در میان معادلات برازش شده بر داده های آزمایشگاهی استفاده شود. در این روش تحلیل در اغلب موارد معیار هم بستگی بیشینه است. لیکن به علت ضرورت رعایت یکنواختی در بین نتایج در برخی

شکل ۵–دسته های نه تایی نمونه های R.C.C



شکل ٦–نمونه R.C.C ساییده نشده



شکل ۷–نمونه R.C.C ساییده شده

شکل ۸– دستگاه آب و ماسه فشان

شکل ۹– طریقه تعیین جرم ساییده شده

شکل ۱۰–دستگاه تعیین مقاومت فشاری

دیگر از موارد که ضریب هم بستگی نسبت به دیگر توابع ممکن بیشینه نشده باشد ، اجباراً از همان رابطه سازگار کمک گرفته شده است.

نکته حائز اهمیت در این تحلیل مقادیر سایش و فرسایش به عنوان تابع اصلی در مقابل متغیرهاست. از آنجا که نمونه های ساخته شده از .R.C.C سایش و فرسایش اندکی داشته اند و معمولاً مقادیر اندازه گیری شده درصد بسیار کوچکی از وزن نمونه را تشکیل داده اند. لذا تفسیر منحنیهای برازش شده نیاز به تامل بیشتری دارد. به دیگر سخن، مشاهده منحنیهای برازش شده در مقیاس انتخابی در ترسیم، می تواند فقط نشان دهنده خطهای[13] آزمایشگاهی باشد. لیکن باید یاداور شد که سمت و سوی و موقعیت عددی خطهای به دست آمده از این تحلیلها، به نحوی بیانگر نوعی هم بستگی است. که این امر در حقیقت یکی از اهداف اصلی پژوهش حاضر است.

قبل از شروع محاسبات، مشاهدات و نتایج حاصل از آزمایشات را در قالب سی جدول به عنوان داده های ورودی به نرم افزار معرفی شد. پنج متغیراصلی 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 آزمایشها سایش و فرسایش مقدار وزن یا جرم از دست رفته در این جداول ارائه و مرتب شده اند با بهره‌گیری از این جداول ابتدا به ترسیم و برازش ساده یک متغیر نسبت به عامل جرم از دست رفته اقدام شد به طوری که متغیرهای زمان( سن نمونه) ، مقدار سیمان و نوع شکل سطح سنگدانه هر بار به عنوان پارامتر ثابت برای تغییرات بقیه عوامل در نظر گرفته شد. بدین ترتیب شکلهای (۱۱) تا (۱٦) برای ارائه تغییرات مقدار جرم از دست رفته نسبت به زمان (سن نمونه) با مقدار سیمان ثابت همچنین برای هر منحنی دانه بندی تهیه و ترسیم شدند. به همین ترتیب شکلهای (۱۷) تا (۲۲) ارائه دهنده تغییرات مقدار جرم از دست رفته نسبت به مقدار سیمان با در نظر گرفتن زمان ثابت (سن نمونه ثابت ) برای هر منحنی دانه بندی است. با توجه به اهمیت نتایج حاصل از مقاومت فشاری برای نمونه های بتنی ، در شکلهای (۲۳) تا (۳٤) منحنی تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به زمان (سن نمونه) و یا مقدار سیمان ارائه شده است. منحنی تغییرات مقدار جرم از دست رفته نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکلهای (۳۵) تا (۳۷) ارائه شده است.و درنهایت برای مقایسه و ارزیابی نتایج برای هر منحنی دانه بندی و ملاحظات اثرات ناشی از تغییر مقدار سیمان و زمان (سن نمونه) در شکلهای (۳۸) تا (٤۷) منحنی تغییرات مقدار جرم از دست رفته ناشی از سایش و فرسایش نسبت به زمان یا مقدار سیمان برای هر منحنی دانه بندی به طور ثابت ارائه شده است.

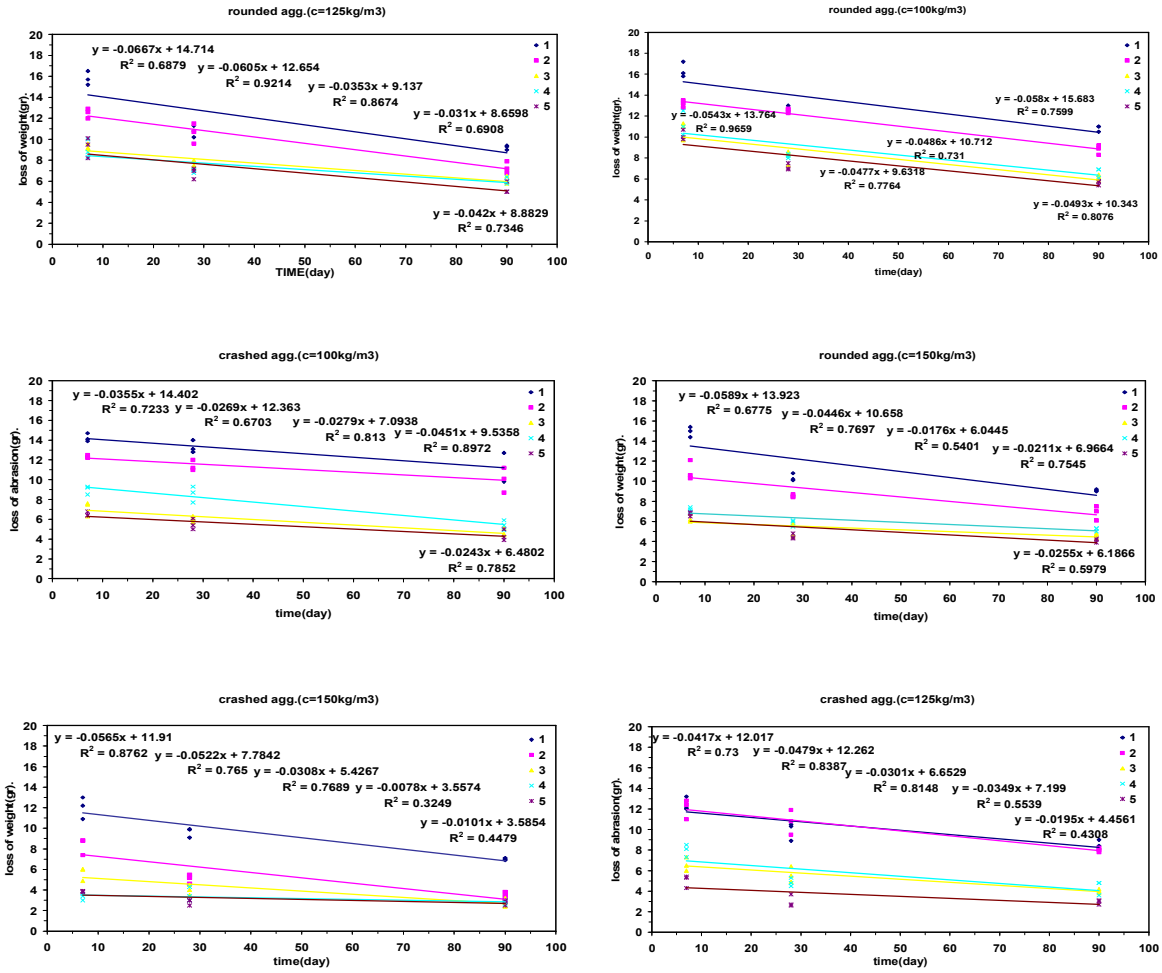
چنانچه نتایج گرافها، منحنیها ، خطهای حاصل در اشکال مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد، نکته قابل تامل سازگاری نسبتاً خوب بین نتایج است. برای گروه گرافهای حاصل از مقدار جرم از دست رفته $L_\omega$ نسبت به زمان (سن نمونه ) t، مقدار سیمان $C_e$ و مقاومت فشاری $S_p$ مورد ارزیابی قرار گیرد معادله (۱۵) الی (۱۷) به دست می‌آید:

$$L_\omega=a_t t+b_t \qquad -۰/۰۵< a_t <-۰/۰۲ \qquad ۵\leq b_t \leq ۱۵ \qquad (۱۵)$$

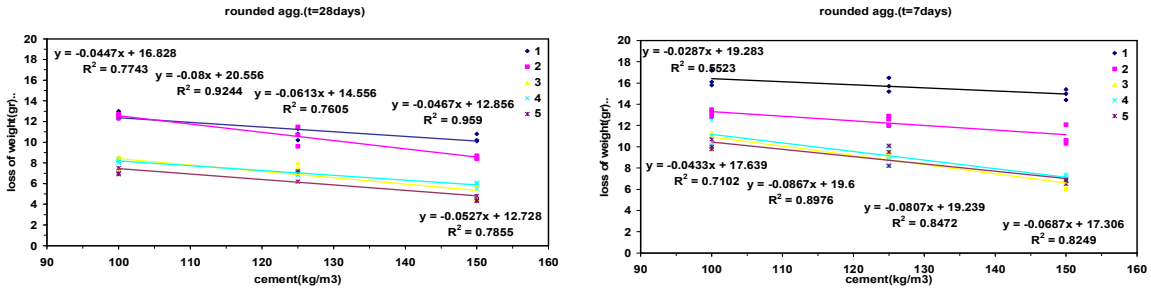
$$L_\omega=a_c C_e+b_c \qquad -۰/۰۸\leq a_c \leq -۰/۳ \qquad ۱۰\leq b_c \leq ۲۰ \qquad (۱٦)$$

$$L_\omega=a_{src} S_p+b_{src} \qquad -۰/۱۳< a_{src} <-۰/۰٦ \qquad ۱۲< b_{src} <۲۲ \qquad (۱۷)$$

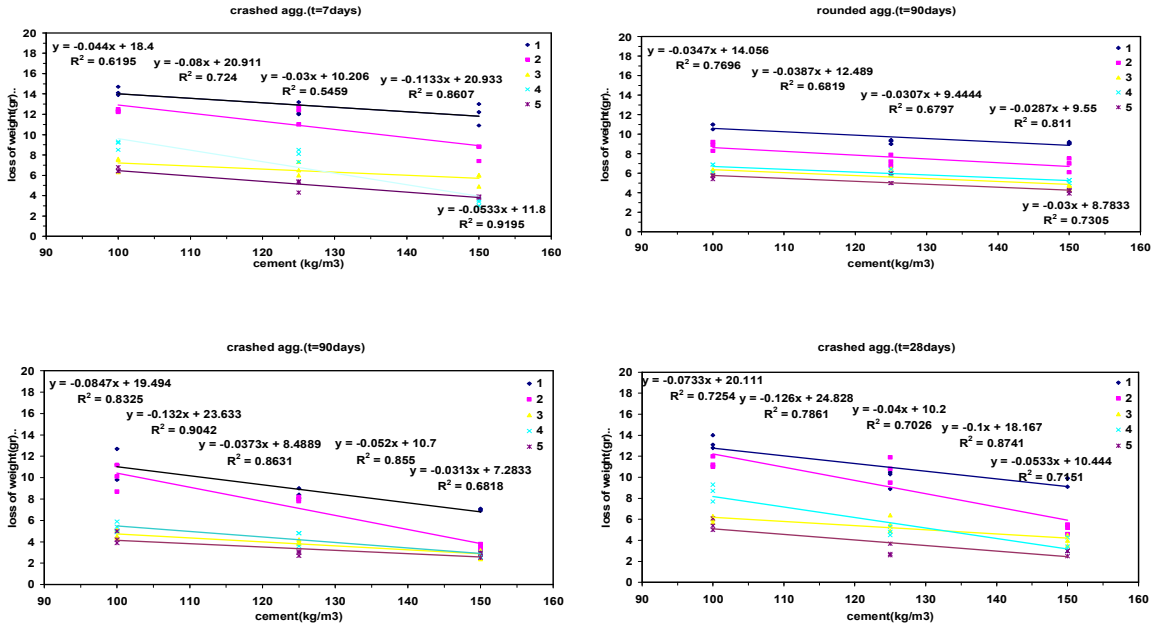
که $a_t$ $b_t$ $a_c$ $b_c$ $a_{src}$ $b_{src}$ ضرایب ثابت اند و بستگی شدید به نوع دانه بندی دارند . ولی باید اذعان داشت که پراکندگی نقاط نشان دهنده این مسئله مهم است که عوامل و پارامترهای دیگری نیز دراین راستا می بایست در نظر گرفته شوند بدین لحاظ باید به دنبال کاربرد رگراسیون چند متغیره و اعمال چندین پارامتر به طور توام در تغییرات مقدار جرم از دست رفته $L_\omega$ نسبت به مقاومت فشاری $S_p$ بوده که در بخشهای آتی به آن به طور مفصل پرداخته شده است.



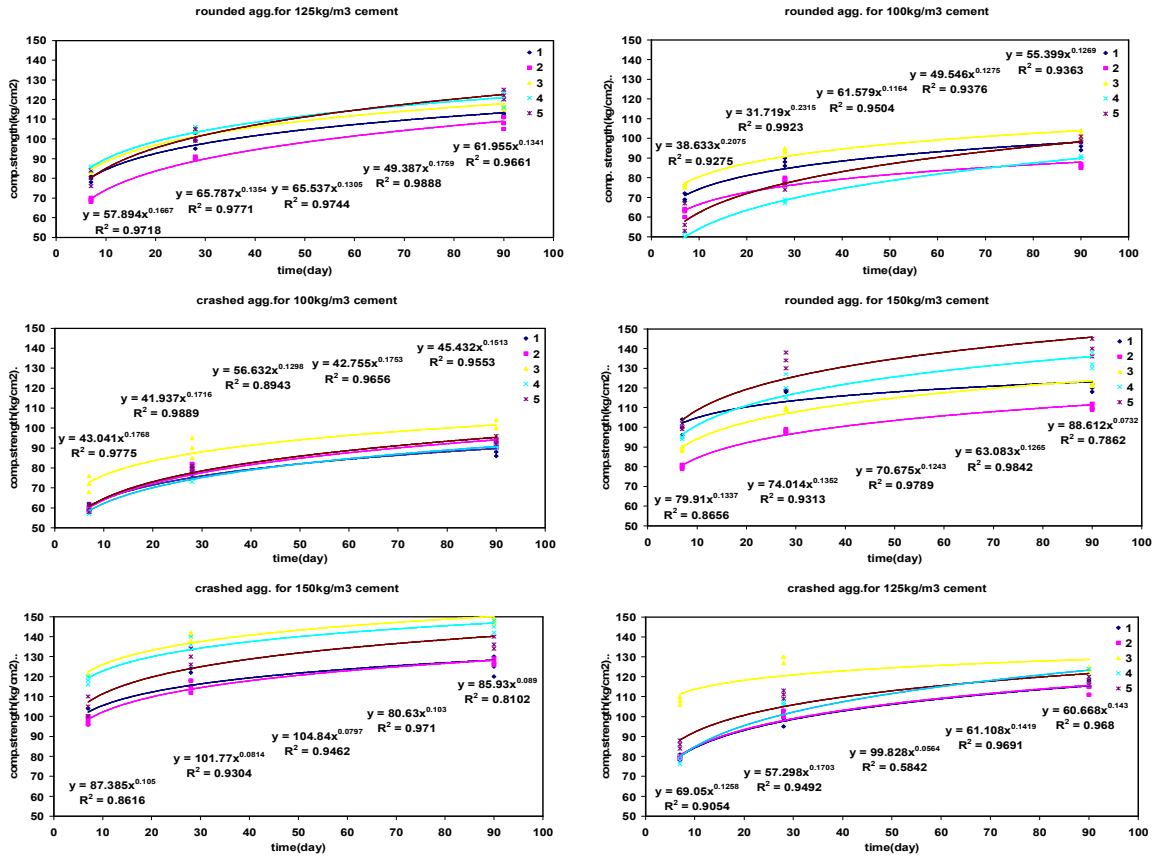

**شکلهای ۱۱تا ۱٦- تغییرات نزولی مقدار کاهش وزن نمونه های با دانه بندی های مختلف نسبت به زمان (سن نمونه)**



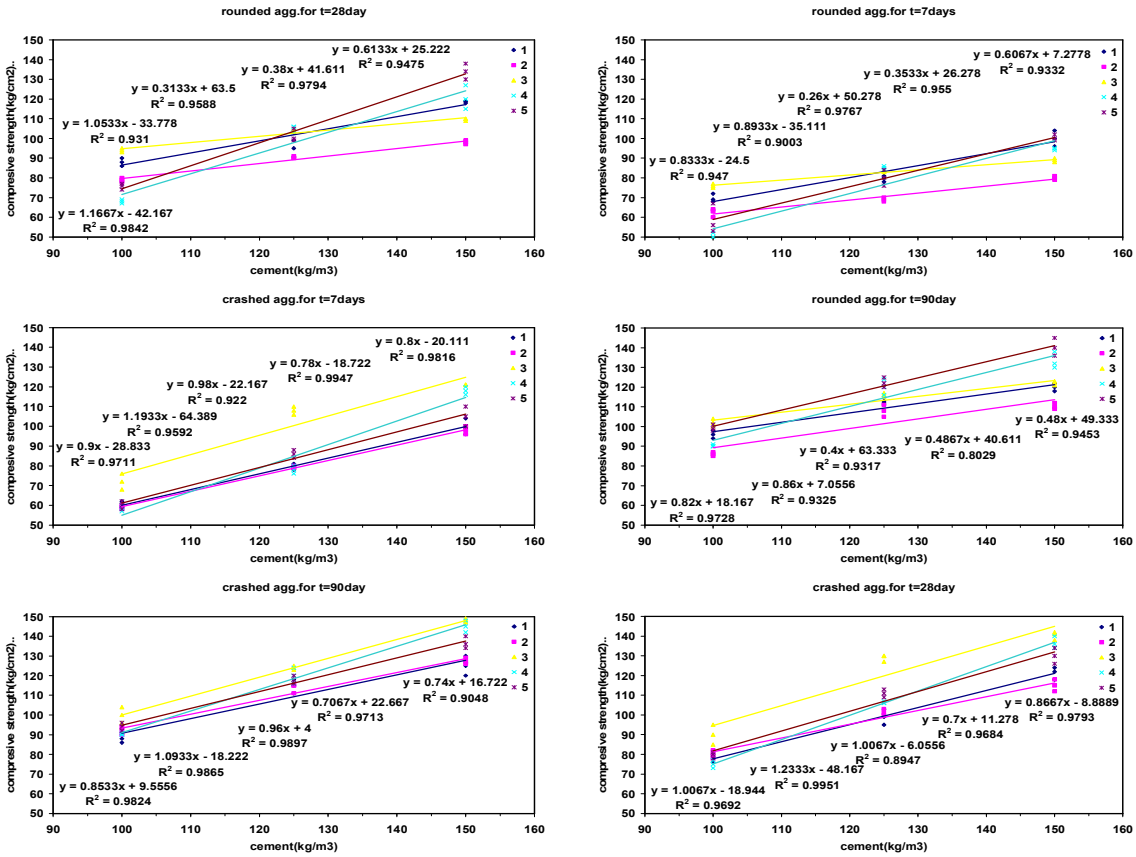

**شکلهای ۱۷و ۱۸- تغییرات نزولی مقدار کاهش وزن نمونه های با دانه بندی های مختلف نسبت به مقدار سیمان**



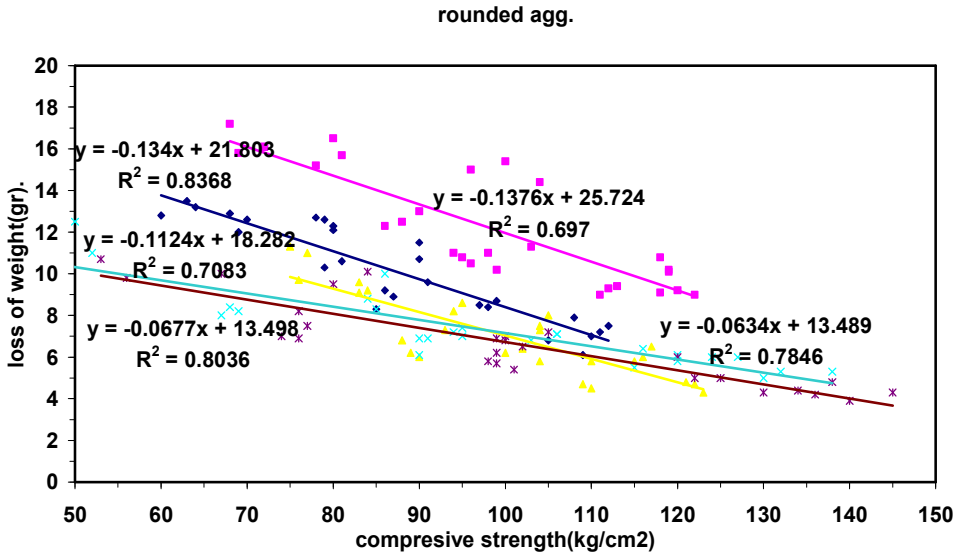

**شکلهای ۱۹تا ۲۲- تغییرات نزولی مقدار کاهش وزن نمونه های با دانه بندی های مختلف نسبت به مقدار سیمان**

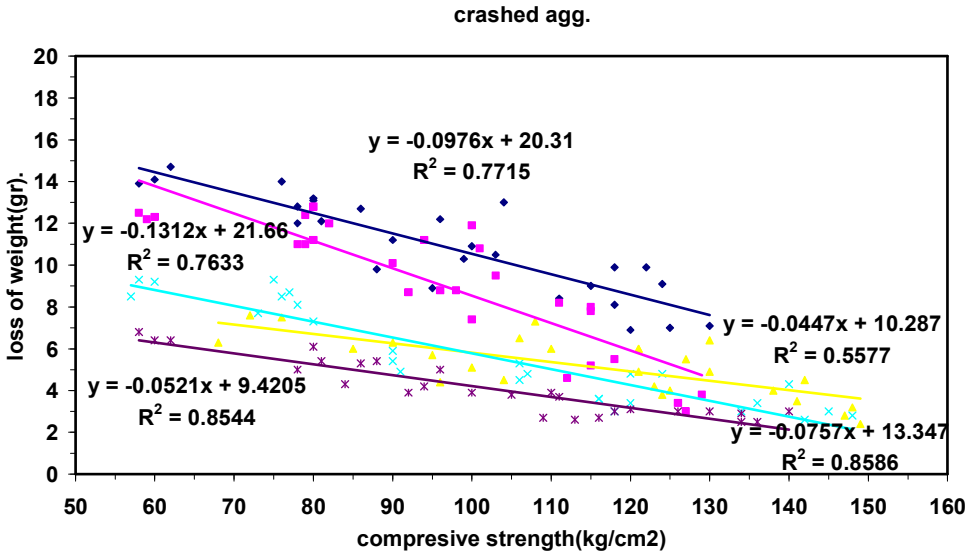


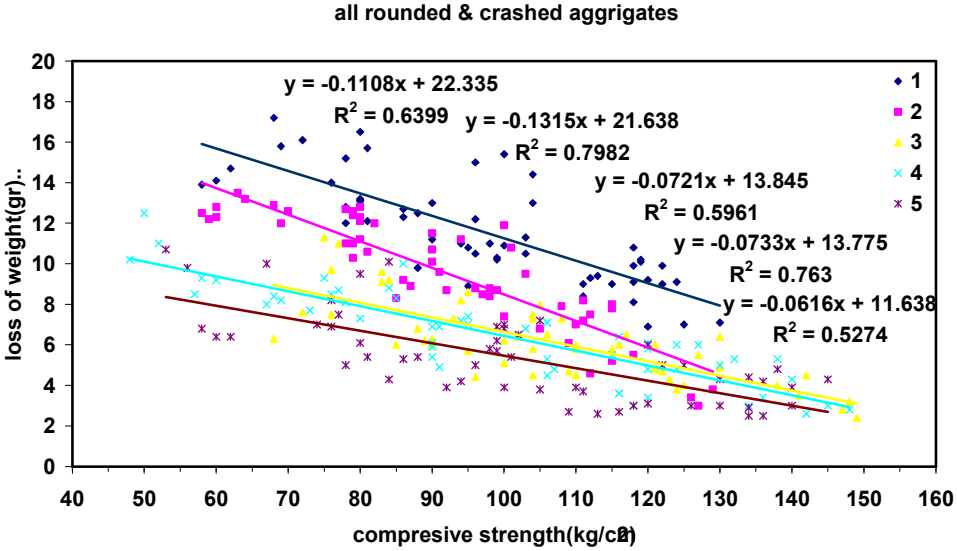

**شکلهای ۲۳ تا ۲۸- منحنی تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به زمان (سن نمونه)**



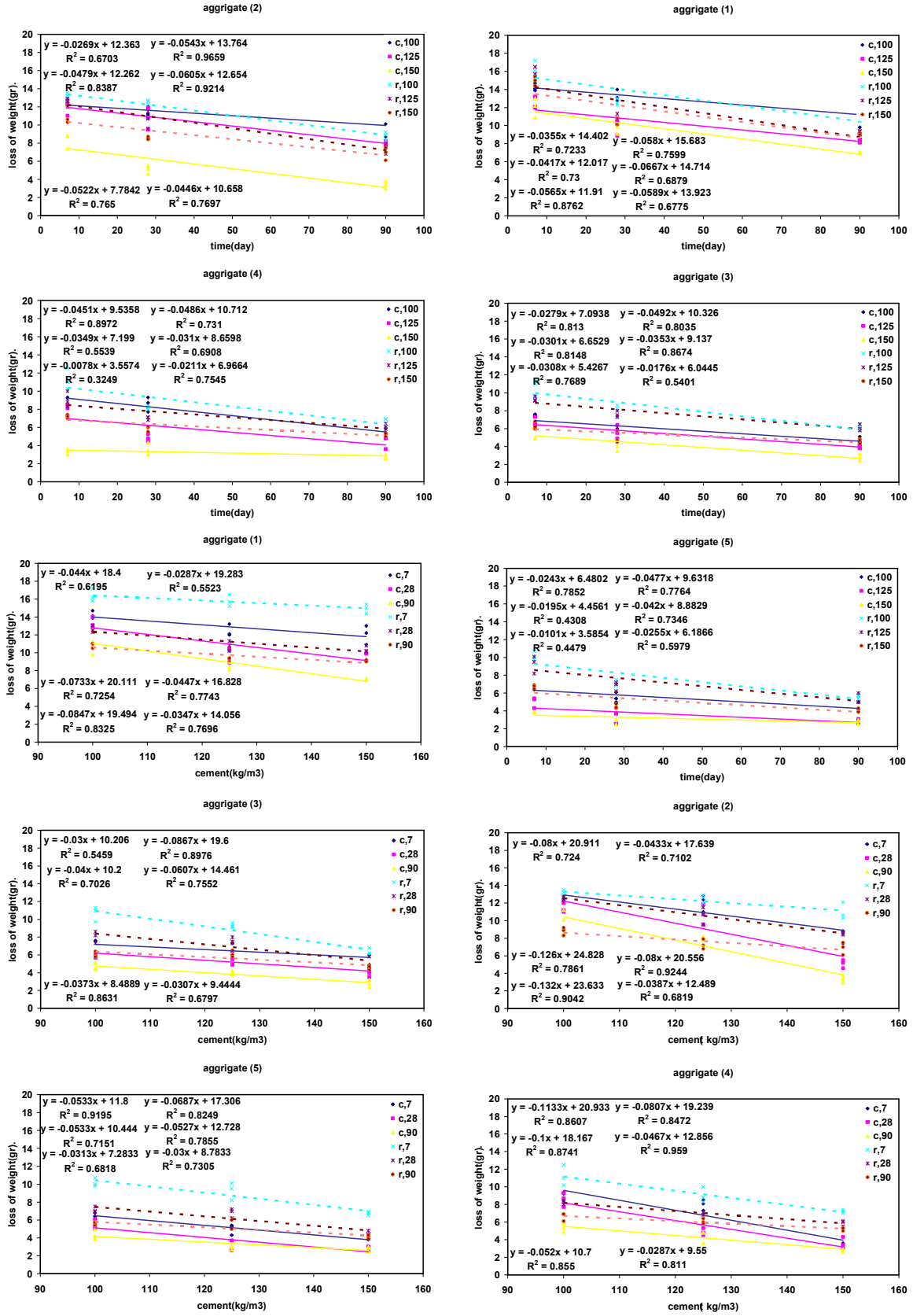

**شکلهای ۲۹ تا ۳٤- منحنی تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به مقدار سیمان**




شکلهای۳۵ تا ۳۷- تغییرات نزولی مقدار کاهش وزن نمونه ها ناشی از سایش و فرسایش نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌ها




**اشکال ۳۸ تا ۴۷- تغییرات نزولی مقدار کاهش وزن نمونه ها ناشی از سایش و فرسایش نسبت به زمان یا مقدار سیمان برای هر منحنی با دانه بندی به طور ثابت**

در بررسی پارامترهای زمان t (سن نمونه) و مقدار سیمان $C_e$ نسبت به مقدار جرم از دست رفته $L_\omega$ از روش دیگری بهره گیری شد بدین ترتیب که در هر شکل تنها برای یک منحنی دانه بندی این منحنیهای تغییرات ارائه گردید که در نوع خود نیز بسیار جالب است و نتایج حاصل و مقایسه نشان دهنده سازگاری شدید نتایج برای یک نوع دانه بندی است. با بررسی و ارزیابی شکلهای (۳۸) تا(٤٧) به راحتی می توان یک رابطه کلی در هر قسمت درجهت اطمینان ارائه کرد.

$$L_\omega = -۰/۰۳t + ۱۵ \qquad (۱۸)$$

$$L_\omega = -۰/۰٤C_e + ۲۰ \qquad (۱۹)$$

**۵-۲-تحلیلهای آماری چند متغیره**

اهمیت این نوع تحلیلها در پژوهشهای آزمایشگاهی که با هدف دستیابی به مفاهیم علمی نهفته در مشاهدات فیزیکی انجام می‌شود، موجب شده است تا نرم افزارهایی توانمند متعددی به صورت تجارتی در اختیار باشد. یکی از بهنگامترین ابزار محاسباتی در این راستا ، نرم افزار $S^+$ است که با اتکا به آن، تحلیلهای آماری چند متغیره این پژوهش صورت گرفته است. به علت تنوع پارامتر مؤثر در مقاومت سایشی ، علی رغم تلاشی که برای محدود سازی آنها به موارد مطرح در عملیات اجرایی صورت گرفت، که برای آنها داده های آزمایشگاهی جمع آوری شده است ، لازم دیده شد تا در آغاز با یک تجزیه واریانس ، متغیرهای کم تاثیری که به طور معنی داری باعث افزایش و یا کاهش مقاومت سایشی نمی شوند را پیدا و حذف کرد. به‌همین منظور ماتریسهایی از مشاهدات مربوط به هریک از عوامل براساس نظریه متغیرهای مجازی تدوین کرده و به طورحذفی پارامترها را ارزیابی شدند.متغیر های مجازی$X_{١٤}$به صورت صفر و یک برای پنج نوع دانه بندی و نوع شکل سنگدانه (شکسته یا رودخانه ای ) در نظر گرفته شده است به این ترتیب که منحنی دانه بندی شماره پنج با $C_u$= ۵ به عنوان مبنا و شاهد مقایسه ای برای بقیه دانه بندی ها در نظر گرفته شد. به طوریکه $X_{٤}$ و $X_{٣}$ و $X_{٢}$ و $X_{١}$ در معادلات نشان دهنده تاثیر گذاری دانه بندی مربوط نسبت به دانه بندی شاهد است همچنین q برای تعیین نوع شکل سنگدانه بوده و چنانچه صفر به معنای سنگدانه رودخانه ای و چنانچه یک به معنای سنگدانه شکسته است. به عنوان مثال در بررسی تاثیر پارامتر دانه بندی که با شاخص ضریب یکنواختی مورد توجه بوده ، سطرهای ماتریس تشکیل داده شده برحسب مقادیر $C_u$ 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 صفرند.مزیت بزرگ این تلقی آماری از عوامل مؤثر ، کشف ویژگی تک تک عوامل مشاهداتی است. به طوری که در یکی از حالات از بین چهار مقدار مختلف $C_u$ آزمایش شده که به ترتیب ، $X_{١}$ الی $X_{٤}$ بعنوان متغیرهای مجازی به مدل معرفی شده اند، اثرات $X_{٣}$ معنی دار نبوده و دیگر موارد معنی دار شده اند . به دیگر سخن مصالح دانه ای با $C_u$ =۲۰ در بین انواع مختلف مصالح مورد آزمایش نتوانسته است تاثیری بیشتری از منحنی دانه بندی شماره پنج با $C_u$=۵ به عنوان مبنا و شاهد مقایسه برمقاومت سایشی باقی بگذارد. در نتیجه ضمن آگاهی از مؤثر بودن دیگر مقادیر آزمایش شده از ضریب یکنواختی ، بر مقاومت سایشی ، بایستی معادله چند متغیره ای را ارائه کردکه بی اثری $X_{٣}$ را نشان داده و تاثیر$X_{١}$، $X_{٢}$، $X_{٤}$ نسبت به $X_{٥}$ را در نظر گیرد.

متغیرهای کیفی هم در این روش تحلیل قابل در نظر گیری در مدل بوده اند. متغیر گردگوشه و یا شکسته بودن سنگدانه ها که ناشی از منشاءاستحصال آنها (رودخانه ای یا سنگ شکن) یکی از مواردی بوده است که با کمک فن متغیرهای مجازی به مدل معرفی شد. در این راستا پارامتری چون q تعریف شده که به مفهوم گرد گوشه بودن یا نبودن مصالح است. در حالت یک که معنی گردگوشه نبودن است لزوماً آن دسته از مشاهدات که مربوط به مصالح شکسته اند، در معادله نهایی گنجانیده می‌شود

و در حالت صفر ، مشاهدات مربوط به مصالح رودخانه ای لحاظ می شود.

تحلیل آماری به عمل آمده به علت برخورداری از یک منطق علمی قوی، استفاده کنندگان آتی از نتایج این تحقیق را قادر می سازد تا متناسب با واقعیتهای کارگاهی و اجرایی ازیکی از اشکال معادلات حاصل، استفاده به عمل آورند. معادلات مذکور با توجه به حضور متغیرهای مجازی به ٦٥ معادله تبدیل می شود که هریک با در نظر گیری از بین متغیرهای موجود درهمان شکل از معادله مقدار وزن از دست رفته را به عنوان تابعی از پارامترهایی با تاثیر معنی دار، مشخص می کند.چند معادله عمومی به دست آمده از تحلیل مورد بحث به شرح زیر است.

$$L_\omega = ۱۱/۵۱٤۳+۰/۱۷۰۸C_u+۸/۱٥٦۱m-۰/۰۱۷۰t -۰/۰٦۳۹\ S_p \qquad (۲۰)$$

$$L_\omega = b_۰+b_۱X_۱+b_۲X_۱+b_۲X_۲+b_۳X_۳+b_٤X_٤+b_٥\ m+b_٦\ t + b_۷\ C_e+b_۸\ S_p+b_۹\ (X_۲\ m)+b_{۱۰}\ (X_۳m)+ b_{۱۱}\ (X_۱\ t)+b_{۱۲}\ (X_۲\ t)+b_{۱۳}(X_۲C_e)+ b_{۱٤}(X_۱S_p) \qquad (۲۱)$$

$$L_\omega = b_۰+b_۱X_۱+b_۲X_۲+b_۳X_۳+b_٤X_٤+b_٥\ m+b_٦\ t+ b_۷C_e+b_۸\ S_p +b_۹\ (X_۲\ m)+b_{۱۰}\ (X_۳\ m) +b_{۱۱}\ (X_۱\ t)+b_{۱۲}\ (X_۲\ t) + b_{۱۳}(X_۲C_e) \qquad (۲۲)$$

$$L_\omega =b_۰+b_۱X_۱+b_۲X_۲+b_۳X_۳+b_٤X_٤+b_٥\ m+b_٦\ t+ b_۷\ C_e +b_۸\ S_p +b_۹q+b_{۱۰}(X_۳\ m)+b_{۱۱}(X_۱\ t) +b_{۱۲}(X_۲\ t)+b_{۱۳}(qm) +b_{۱٤}q(\ C_e) +b_{۱٥}(qX_۱)+b_{۱٦}(qX_۲) +b_{۱۷}(qX_۳)+ b_{۱۷}\ (qX_٤\ ) \qquad (۲۳)$$

## ٦- نتیجه‌گیری

به منظور حصول اطمینان از صحت آزمایشها، از نتایجی که محققان درگذشته بر روی انواع نمونه های بتنی به دست آورده و تقریباً به صورت ثابت و محکم مورد تایید همگان است استفاده شده است. لذا در شکلهای (۲۳) الی (۳٤) که منحنی تغییرات صعودی مقاومت فشاری نسبت به زمان (سن نمونه) برای دانه بندی های مختلف و مقادیر سیمان ترسیم شده است این اشکال به وضوح نشان دهنده افزایش مقاومت فشاری با افزایش سن بتن و همچنین افزایش مقدار سیمان است. بنابراین از اولین نتایجی که می توان درباره آن قضاوت کرد تایید مشابهت رفتار نمونه های .R.C.C با بتن معمولی در خصوص رابطه مقاومت فشاری با سن بتن و مقدار سیمان است. از طرف دیگر تائید ضمنی کارها و عملیات آزمایشگاهی و کارگاهی انجام شده نیز هست.

### ٦-۱- تاثیر مقاومت فشاری بر مقاومت سایشی

از آنجا که موضوع اصلی این پژوهش یعنی عوامل مؤثر بر مقاومت سایشی می‌باشد. در ابتدا منحنی تغییرات مقدار کاهش وزن نمونه ها در مقابل مقاومت فشاری در شکل (۳٥) برای سنگدانه های رودخانه ای و (۳٦) برای سنگدانه های شکسته و (۳۷) برای سنگدانه های رودخانه ای و شکسته مورد بررسی قرار می گیرد. به طور آشکار و واضح برای صد در صد نتایج حاصل از آزمایشات و نمونه ها با افزایش مقاومت فشاری مقدار کاهش وزن نمونه در اثر سایش و فرسایش کاهش می‌یابد ولی تاثیر انواع منحنی دانه بندی و شکل و زبری سطح دانه‌ها نیز بسیار قابل توجه است که بررسی این اثرات به طور جداگانه ضرورت می یابد . در این صورت چنانچه به ارزیابی منحنیهای به دست آمده برای هر نمونه دانه بندی و نوع شکل سطح سنگدانه ها پرداخته شود در جهت اطمینان می‌توان به معادله ساده تری دست یافت.

$$L_\omega=-۰/۰۷S_p+۲۰ \qquad (۲٤)$$

که در آن $S_p$ مقاومت فشاری .R.C.C برحسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و $L_\omega$ مقدار جرم از دست رفته برحسب گرم است. ( $L_\omega$ قابل تبدیل به مقاومت سایشی در مقایسه با مقدار جرم از دست رفته در شرایط یکسان برای شیشه است ) حداقل مقاومت فشاری .R.C.C در معادله (۲٤) برابر ٥۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است.

### ٦-٢- تاثیر مقدار سیمان و سن .R.C.C

در این راستا رابطه دو پارامتر زمان (سن نمونه )و مقدار سیمان نسبت به مقدار جرم از دست رفته با توجه به شکلهای (١١) تا (٢٢) و (٣٨) تا (٤٧) که با معیارهای همبستگی بالا به دست آمده اند چنانچه مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد به نتیجه بسیار آشکاری که هرچه مقدار سیمان زیادتر باشد و هرچه زمان (سن نمونه ) بالاتر باشد مقدار جرم از دست رفته کمتر است می رسیم. معادلات (١٨) و (١٩) به خوبی نشان دهنده این موضوع برای سن نمونه و مقدار سیمان است.

### ٦-٣- تاثیر پارامتر شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط بر مقاومت سایشی

نتایج تاثیر این پارامتر بر مقدار کاهش وزن نمونه های .R.C.C در اثر سایش و فرسایش معادلات (٢٠) و (٢٣) ارائه شده است . باید توجه داشت که مقدار m شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط چون به مشخصات فیزیکی دانه ها ، ترتیب قرار گرفتن آنها و زبری و شکل سطح دانه ها و تراکم آنها بستگی دارد در سنهای مختلف و همچنین تا حدودی نیز برای مقادیر مختلف سیمان یکسان است. به طوری که تغییرات آن بستگی به تغییرات دانه بندی ، تراکم و ... دارد . بنابراین همان طور که در معادلات مذکور نیز مشاهده می شود با در نظر گرفتن پارامترهای ثابت به طور پله ای تغییر می‌کند و ضرورت تحلیل با پارامترهای مؤثر دیگر به طور توام با آن به نظر می رسد. لیکن چنانچه به ارزیابی پارامتر m در چنین شرایطی پرداخته شود این نتیجه ساده حاصل می شود که هر چه m بزرگتر باشد مقدار کاهش جرم نمونه .R.C.C در اثر سایش و فرسایش کمتر خواهد بود.از طرف دیگر با توجه به اهمیت ویژه شکل و زبری سطح سنگدانه ها در پارامتر m به طور متوسط و درجهت اطمینان معادله (٢٥) برای سنگدانه های رودخانه ای و (٢٦) برای سنگدانه های شکسته ارائه می شود.

$$L_{\omega} = -٤٠m + ٢٠ \qquad (٢٥)$$

$$L_{\omega} = -٨٠m + ٣٥ \qquad (٢٦)$$

که در آن m شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط بر حسب میلیمتر و $L_{\omega}$ مقدار کاهش وزن نمونه .R.C.C برحسب گرم است. از تلفیق یافته های مرتبط با شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط با مشاهدات انجام شده پیرامون مقاومت سایشی .R.C.C و بتن متعارف جمع بندی شده 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 اند را می توان تنها با پارامتر شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط ارزیابی کرد. یعنی نزدیک به بیش از ده عامل مهم که هر یک تاثیر فوق‌العاده بر مقاومت سایشی و ... دارد و تاثیر هر یک بر عامل دیگر نیز عامل جدیدی را به وجود می آورد، حذف و تنها یک 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 می دهد.

با در نظر گرفتن شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط به عنوان مهمترین عامل در مقاومت سایشی و در کنار آن از عوامل مقدار و نوع سیمان، جنس سنگدانه، سطح و سن بتن می توان نام برد ولی باید اذعان داشت که اثرات این عوامل بر مقاومت سایشی تقریباً در گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که ازاین پس برای هر نمونه بتن در آزمایشگاه در ابتدا شعاع هیدرولیکی متوسط مخلوط m مشخص و آزمایشات براساس تعیین این مقدار برنامه ریزی شود که این خود تحول عمده ای در به سامان وحداقل رساندن آزمایشات برای تعیین مقاومت سایشی انواع بتن خواهد بود.

### ٦-٤- تاثیر توأمان پارامترهای مؤثر بر مقاومت سایشی (نتیجه‌گیری کلی)

با توجه به مجموعه معادله (٢٠) تا (٢٣)که در قسمت (٢-٥) از تحلیل چند متغیره حاصل شده است می توان تاثیر هر یک از پارامتر ها را ارزیابی کرد.با در نظر گرفتن حداقل ها و حداکثرها در این ٦٥ معادله که از جا گذاری متغیرهای مجازی حاصل شده, درجهت اطمینان برای مقاومت سایشی به چندین

معادله ذیل دست خواهیم یافت که به طور کلی پوشاننده تمامی ان معادلات اند.

برای .R.C.C با سنگدانه های شکسته بادقت حداکثر

$$L_\omega = \alpha - \beta t + ۲۸۳ m - ۰/۲۴۵ C_e - ۰/۰۵۲ S_p \qquad (۲۷)$$

$$-۲۲ < \alpha < ۳۴$$

$$۰/۰۱۲ < \beta < ۰/۰۵۶$$

برای .R.C.C با سنگدانه های رودخانه ای بادقت حداکثر

$$L_\omega = \alpha - \beta t + \gamma m - ۰/۲۴۵ C_e - ۰/۰۵۲ S_p \qquad (۲۸)$$

$$۰ < \alpha < ۳۴$$

$$۰/۰۱۲ < \beta < ۰/۰۵۶$$

$$۳۸ < \gamma < ۶۸$$

برای .R.C.C در حالت کلی

$$L_\omega = ۱۱/۵ + ۰/۱۷ C_u + ۸/۲ m - ۰/۰۱۷ t - ۰/۰۶۴۰ S_p \qquad (۲۹)$$

## واژه‌نامه

1. US Army, Corps of Engineers
2. zintel Canyon Dam
3. willow Creek Dam
4. water Jet
5. test method for abrasion resistance of concrete standard
6. disk
7. blade
8. roller
9. spheriod
10. abrasive disk
11. sand and water blasting
12. prototype
13. trend
14. dummy variables

## مراجع


1. ACI Committee Report 210R – 93 , Erosion of Concrete in Hydraulic Structures , 1993.
2. ETL 1110-2-343-93 " Structural Design using the R.C.C. Construction Process," , 1993.
3. Logie , CV., "Economic Consideration in Selection of a R.C.C. Dam,"*Proceedings of ASCE Symposium*, R.C.C. ,May 1985.
4. Schnabel Eng. 2001, " Laboratory Tests and Field Studies on Erosion and Abrasion Resistance of Soil – Cement and Roller – Compacted Concrete" PCA , R. & D. Serial. No. 2436, 2001.
5. AGRA Earth & Environment , AZ, "Report on Reata Pass Abrasion Testing," August 1998.
6. Hansen, K.D., "Erosion Resistance of Roller – Compacted Concrete," Presented at 1996 Spring Convention , American Concrete Institute , Denver , CO , March 1996.
7. Hansen, K.D. and Lynch , J.B., " Controlling Floods in the Desert With Soil – Cement *Proceeding Second CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology* , Las Vegas , NV , June 1995.
8. Holand, T.C., " Abrasion Erosion Update," *Concrete Structures Repair and Rehabilitation*, Information Exchange Bulletin Vol. C- 83 – 1 , August 1983.
9. Omoregie, F.A., Gutshow , R.A and Russell , M.L., "Cement – Hardened Materials for Abrasion – Erosion in Hydrauic Structures," *Concrete International* , July 1994.
10. Portland Cement Association , Pacifice Southwest Region , "Resistance of Soil – Cement to Erosion by Longitudinal Flow of Water and Debris ," April 1979.
11. Sabin, G.C. W., and Hansen, D., "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, March 1994.
12. McCorquodalc, J. A., Hannoura, A. A., and Naser , M.S., " Hydraulic Conductivity of Rockfill," *Journal of Hydraulic Research,* Vol.16, 1978.
13. Wilkins J.K ., "The Flow of Water Throgh Rocfill and Its Application to the Design of Dams," Proceedings , Second *Australian – New Zealand Confence on Soil Mechanics and Foundation Engincering,* 1956.
14. Garga, V.K., Townsend R., and Hansen, D., "A Method for Determining the Surface Area of Quarricd Rocks ," *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 14, No. 1, 1991.
15. Zingg T., " Beitrag zur Schotteranlyse," *Petrographische Mitteilungen*, Vol. 15, 1935
16. Krumbein W.C. and Pettijohn, F .J., " Manual of Sedimentary Petrography, D. Appletion," New York , 1938.

17. Schrader, E. and Stefanakos, J., “Roller Compacted Concrete Cavitation & Erosion Resistance, ”*Proceeding of Internatonal Symposium on Roler Compacted Concrete Dams. Santander* , Spain October , 1995.
18. Corps of Eng “Test Results of Roller Compacted Concrete Mixtures” ; Rio Salado Project: U.S.Army Corps of Engineers Los Angeles District (unpublished ), October 1999.
19. Tony C. Liu “ Abrasion Resistance of Concrete, ”*ACI Journal* , Sep – Oct 1981 , pp. 341 – 350.
20. Nanni A. , “Abrasion Resistance of Roller Compacted Concrete,” *ACI Materials Journal*, Nov.-Dec. 1989.
21. Misra, A.and Finnie I. , “On the Size Effect in Abrasive and Erosive Wear,” *Wear* 65, 1981.
22. Hansen, K.D., and Rein hardt, W.G., “Roller Compacted Concrete Dams” , McGraw – Hill inc New York, 1991.
23. ACI Committee 207 .5R ,“ Roller Compacted Mass Concrete,” *ACI Materials Journal,* (Sept-Oct) 1988.
24. ASTM C 418 – 90 “ Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting,” .
25. ASTM C1138-89 “Standard Test Metod for Abrasion Resistance of concrete (under water Method)”.