

## بررسی مقاومت فشاری و الکتریکی سطحی بتن در آزمون‌های با اشکال و ابعاد مختلف

منوچهر سلمانی ۱، علی پوراربابی ۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران (سازه)، دانشگاه آزاد اسلامی سیستان

بلوچستان واحد زاهدان

۲- هیئت علمی دانشگاه سیستان واحد زابل و استاد دانشکده مهندسی سیستان و دانشگاه آزاد

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (Times New Roman ۱۰ pt)

### چکیده

موضوع: مقاومت الکتریکی بتن یکی از اصلی‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده شروع و انتشار خوردگی آرماتور است. به‌طور کلی مقاومت الکتریکی بتن عمدتاً به نسبت  $w/c$  (اتصال منافذ)، حجم و نوع سیمان، دما و رطوبت بستگی دارد. هدف: در این تحقیق، اثر شکل آزمون، سن و رده‌های بتنی مختلف در اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن با استفاده از الکتروود چهار نقطه‌ای و نر بررسی شده است. دلیل استفاده از این روش کم‌هزینه‌تر بودن و سریع و راحت بودن این آزمایش است. روش تحقیق: در این تحقیق پس از آماده‌سازی و تهیه آزمون‌ها از دستگاه و نر برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و از دستگاه جک بتن شکن استفاده گردید. چهار رده بتنی مختلف  $C_{21}$ ،  $C_{24}$ ،  $C_{28}$  و  $C_{32}$  در چهار شکل متفاوت و در سه رده سنی مورد آزمایش قرار گرفتند. تعداد آزمون‌های مربوط به هر کدام از موارد سه آزمون بود. دستاورد تحقیق: براساس نتایج حاصل از تحقیق می‌توان گفت که با بالا رفتن رده بتن، میزان مقاومت فشاری و الکتریکی افزایش می‌یابد و رابطه مستقیمی بین افزایش رده بتن و افزایش مقاومت الکتریکی و فشاری وجود دارد. همچنین این رابطه مستقیم بین افزایش سن آزمون‌ها با افزایش مقاومت الکتریکی و فشاری وجود دارد و با افزایش سن، میزان مقاومت بتن افزایش می‌یابد؛ اما تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به مقاومت فشاری بیشتر بوده است. همچنین مشاهده گردید که با افزایش حجم آزمون‌ها میزان مقاومت الکتریکی کاهش یافت. نتیجه‌گیری: روش مورد استفاده برای تعیین مقاومت الکتریکی و هندسه نمونه مورد آزمایش بر نتایج بدست آمده تأثیرگذار است.

کلمات کلیدی: مقاومت الکتریکی، مقاومت فشاری، دستگاه و نر، چهار نقطه‌ای، رده بتن.



یازدهمین کنفرانس ملی بتن  
۱۴،۱۵،۱۶ مهرماه ۱۳۹۸  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



## Investigation of Compressive and Electrical Resistance of Concrete Surface in Specimens of Different Shapes and Dimensions

Manouchehr Salmani <sup>۱</sup>, Ali Purarababi <sup>۲</sup>

1- Master of Science in Civil Engineering, Islamic Azad University of Sistan and Baluchestan, Zahedan Branch

2- Faculty of Sistan University of Zabol Branch and Professor of Sistan University of Engineering and Zahedan Azad University

### ABSTRACT

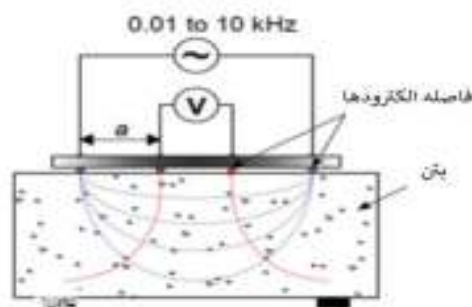
Subject: Concrete electrical resistance is one of the main parameters controlling the initiation and propagation of corrosion of reinforcement. In general, the electrical resistance of the concrete mainly depends on the  $w/c$  ratio, the volume and type of cement, the temperature and the humidity. Objective: In this study, the effect of different shapes, ages and grades of concrete on electrical resistivity measurement of concrete by using Werner Four Point Electrode was investigated. The reason for using this method is that it is less expensive and faster and more convenient. Materials and Methods: In this study, after preparation and preparation of samples, Werner device was used to measure electrical resistance and a concrete breaker jack was used. Four different concrete grades  $C21$ ,  $C24$ ,  $C28$  and  $C32$  were tested in four different shapes and in three age categories. The number of samples was corresponding to each of the three samples. Research Outcome: Based on the results of the research, it can be said that as the concrete grade increases, the amount of compressive and electrical resistance increases and there is a direct relationship between increasing concrete grade and increasing electrical and compressive strength. There is also a direct relationship between the aging of the specimens with increasing electrical and compressive strength and with increasing age, the concrete strength increases, but the electrical resistivity changes are greater than the compressive strength. It was also observed that as the sample size increased, the amount of electrical resistance decreased. Conclusion: Therefore, it can be concluded that electrical resistance measurement is a reliable way to evaluate amateur corrosion.

## ۱. مقدمه

در حال حاضر در اکثر کشورهای جهان، بتن به دلیل قیمت مناسب و در دسترس بودن مصالح برای ساخت پل‌ها، سدها، خطوط حمل و نقل، سازه‌های دریایی و بسیاری موارد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این شرایط دوام بتن از پارامترهای قابل توجه است [۱]. هم‌زمان با پیشرفت سریع و رشد فزاینده تکنولوژی از یک سو و دستیابی به نوآوری‌های جدید در زمینه تکنولوژی بتن از سوی دیگر و همچنین نیاز فوق‌العاده به بتن زمینه را برای تولید بتن‌هایی با مقاومت بالا میسر ساخته است. در بیشتر موارد نگاه به بتن، مانند نگاه به ماده‌ای مقاوم در برابر نیروهای فشاری و الکتریکی است. با اینکه مقاومت فشاری و یا مقاومت الکتریکی تنها مشخصه‌های اصلی یک بتن نیستند، اما به‌طور معمول برای نشان دادن کیفیت بتن، مقاومت بتن مهم‌ترین عامل نشان‌دهنده است. میزان مقاومتی که بتن می‌تواند تحمل کند، مستقیماً در ارتباط با خمیر سیمان سخت شده است. در مطالعاتی که صورت گرفته است ذکر گردیده که اگرچه مقاومت میزان دوام بتن در برابر تغییر شکل را نشان نمی‌دهد، اما به‌طور فزاینده‌ای در ارتباط با نسبت آب به سیمان است [۲]. در بتن‌های با کارایی بالا، مشخصات مکانیکی و دوام بسیار عالی هستند و دارای مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، مقاومت کششی، چسبندگی و تغییر شکل بسیار بالایی هستند [۳]. دوام بتن به دلیل توانایی مقاومت در برابر عمل هوازگی، حمله شیمیایی، سایش و یا هر فرایند خراب شدن دیگر برای حفظ فرم، کیفیت و قابلیت سرویس اصلی در هنگام قرار گرفتن در معرض محیط خشن، کاهش می‌یابد. تا حد زیادی پذیرفته شده است که دوام بتن به مقاومت بتن در برابر نفوذ رسانه‌های تهاجمی وابسته است. این رسانه ممکن است در حالت مایع یا گازی موجود باشد و ممکن است توسط مکانیسم‌های مختلفی از جمله نفوذ، پراش، جذب، مکش مویرگی و ترکیب مواردی که اخیراً ذکر شد انتقال یابد [۴]. مقاومت فشاری و الکتریکی که در سطح بتن وجود دارند، تأثیر بسیار زیادی بر روی مقاومت بتن دارند و خود به عوامل متعددی وابسته هستند. میزان مقاومت الکتریکی بتن به پارامترهای متعددی وابسته است که از آن جمله می‌توان به نفوذپذیری و حرکت یون‌ها در منافذ بتن به‌ویژه منافذ موئینه اشاره کرد. این منافذ در بتن به‌طور تصادفی پخش می‌شوند و اندازه‌های متفاوتی دارند و به‌طور نا منظم با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. در روند خوردگی بر سطح میلگرد دو منطقه آندی و کاتدی به وجود می‌آید که دارای اختلاف پتانسیل هستند. انتقال یون‌های هیدروکسیل از کاتد به آند تحت تأثیر مقاومت ویژه الکتریکی بتن صورت می‌گیرد. هر چه مقاومت ویژه الکتریکی بتن بیشتر باشد از شدت خوردگی کاسته می‌شود؛ به عبارت دیگر خوردگی نسبت مستقیم با جریان بین آند و کاتد داشته و با مقاومت الکتریکی نسبت عکس دارد [۵]. در این تحقیق از آنجا که ورود کلرید و خوردگی آرماتور به‌عنوان فرایندهای اصلی فرسایش بتن گزارش شده است، تمرکز بر روی مقاومت الکتریکی سطح بتن و ارتباط این فرایندها با مقاومت الکتریکی بتن است. مقاومت الکتریکی بتن یکی از اصلی‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده شروع و انتشار خوردگی آرماتور است [۶]. در طی چند دهه گذشته، توجه زیادی به تحقیق و توسعه تکنیک‌های اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به‌عنوان یک روش غیر مخرب برای ارزیابی دوام سازه‌های بتنی شده است. به‌طور معمول، برنامه‌های کنترل کیفیت فقط مقاومت فشاری را بر اساس آزمون‌هایی که در سایت ایجاد می‌شوند، آزمایش می‌کنند. معمولاً هیچ مقدار کمی از مقاومت فشاری موجود درجا وجود ندارد. با توجه به شاخص‌های دوام، مقاومت الکتریکی بندرت در آزمون‌ها اندازه‌گیری می‌شود [۷].

روش‌های کارگاهی اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بسیار ساده هستند. ولی در عین حال به علت وجود منابع متعدد خطا، کسب نتایج صحیح دشوار است. روش چهار الکترودی رایج‌ترین روش اندازه‌گیری کارگاهی است که در ابتدا به‌وسیله ونر در سال ۱۹۱۶ برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی زمین ابداع شده است. بعدها این روش به‌وسیله استراتفول در سال ۱۹۶۸ و نایش و همکاران در سال ۱۹۹۰ برای استفاده در سازه‌های بتنی گسترش داده شد. در این روش جریان متناوب کوچکی (معمولاً دارای فرکانس ۵۰ تا ۱۰۰۰ هرتز) بین الکترودهای خارجی اعمال می‌شود و اختلاف پتانسیل بین الکترودهای داخلی اندازه‌گیری می‌شود فاصله الکترودها در روش ونر برابر است. در این روش امکان بروز خطاهایی از جمله: ۱- محدودیت‌های

هندسی، ۲- سطح تماس، ۳- ناهمگنی بتن، ۴- لایه‌های سطحی که مقاومت الکتریکی متفاوتی نسبت به توده‌ی بتن دارند، است. ابعاد سازه‌ی بتنی در مقایسه با فاصله الکترودها، بر اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی تأثیر دارد و در سازه‌های با ابعاد نسبی بزرگ‌تر، نتایج دقیق‌تر حاصل می‌شود. توصیه شده است که فاصله بین الکترودها، کم‌تر از  $\frac{1}{4}$  کمینه ابعاد مقطع بتنی باشد. معمولاً فاصله‌ی ۵۰ میلی‌متری بین الکترودها برای قرائتی دقیق در بیشتر سازه‌های بتنی کافی است. تماس بین الکترودها و بتن باید به خوبی برقرار باشد که این مثلاً با استفاده از ژل‌های هادی که به هنگام فشار تخلیه می‌شوند، یا استفاده از عمل کرد فنی در الکترودها به همراه اسفنج مرطوب تأمین می‌شود. ناهمگنی بتن نیز در ۳ حالت باعث بروز خطا می‌شود؛ حضور سنگ‌دانه‌ها و وجود لایه‌های سطحی با مقاومت الکتریکی متفاوت از توده بتن. خطای به وجود آمده در اثر حضور سنگ‌دانه‌ها با افزایش فاصله‌ی بین الکترودها، کاهش می‌یابد. اگر فاصله‌ی داخلی بین الکترودها از  $\frac{1}{5}$  برابر بیشینه اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها بیشتر باشد، خطای اندازه‌گیری از ۵ درصد کم‌تر خواهد بود. همچنین در شرایط اختلاف مقاومت سطحی و توده‌ی بتن (مانند کربناته شدن سطح یا رطوبت بیشتر آن) خطا در صورتی قابل توجه است که مقاومت الکتریکی لایه‌های سطحی کمتر از توده بتن باشد [۸]. در شکل ۱ می‌توان نمای شماتیک روش چهار الکترودی در اندازه‌گیری مقاومت را مشاهده کرد.



شکل ۱: روش چهار الکترودی در اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

در مورد اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی تحقیقاتی صورت پذیرفته است. آدرسا و همکارش در سال ۲۰۱۷، به ارتباط بین مقاومت الکتریکی بتن و ویژگی‌های خاص دوام آن پرداختند. این ویژگی‌های دوام شامل نفوذپذیری کلر و خوردگی تقویت شده است، زیرا این تأثیر عمده بر روند تخریب بتن دارد [۹]. پیلوار و همکاران در سال ۱۳۹۶ روشی جدید برای سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید ارائه دادند که شامل اشباع سازی آزمون‌ها توسط محلول ۵ NaCl مول، قبل از اندازه‌گیری رسانایی آن‌ها می‌باشد. با اشباع کردن آزمون‌ها توسط محلول با رسانایی بالا، رسانایی‌های آزمون‌های مختلف بتنی متناسب با ساختار منافذ آن‌ها می‌شود [۱۰]. شکرچی و همکاران به بررسی تأثیر هندسه آزمون و روش انجام آزمایش بر نتایج مقاومت الکتریکی بتن پرداختند. در این تحقیق از دو روش ۲ نقطه‌ای و ۴ نقطه‌ای استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش نسبت آب به سیمان مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. جهت قالب‌گیری تأثیر چندانی بر مقاومت الکتریکی آزمون ندارد. میزان مقاومت الکتریکی در روش ۲ نقطه‌ای به شکل آزمون ارتباطی ندارد. طول آزمون تأثیری بر مقاومت الکتریکی ندارد. میزان مقاومت الکتریکی ۴ نقطه‌ای با مساحت سطح مقطع عمود بر جریان عبوری توسط الکترودهای دستگاه مرتبط است و با افزایش مساحت این مقدار کاهش می‌یابد [۱۱]. تدین و همکاران به مقایسه مقاومت ویژه الکتریکی بتن اندازه‌گیری شده با روش حجمی و هدایت الکتریکی پرداختند. براساس نتایجی که حاصل شد، دو روش مکور در اندازگیری مقاومت ویژه الکتریکی دارای همبستگی خوبی بودند [۱۲].

براساس مطالب ذکر شده هدف این تحقیق متمرکز بر اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به‌عنوان پارامتری مهم در بتن به کمک دستگاه ونر است. از این‌رو در ادامه روش تحقیق ذکر می‌گردد.

## ۲. مواد و روش تحقیق

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن یکی از روش‌های غیر مخرب، بسیار کارآمد و ارزان برای ارزیابی خوردگی و نیز نفوذ یون کلراید در بتن است. سهولت یا سختی عبور جریان الکتریکی از بتن اشباع می‌تواند نشانه‌ای از نفوذپذیری آن در برابر آب و به‌ویژه انتشار و مهاجرت یونی (به‌ویژه یون کلرید) باشد مخصوصاً اگر با آب نمک اشباع گردد. لازم به ذکر است اشباع کردن بتن در آب یا آب نمک با غلظت‌های معین، به شدت بر مقاومت الکتریکی بتن اثر می‌گذارد و وجود نمک محلول در منافذ بتن، مقاومت الکتریکی آن را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. روش هندسی -Resipod Method Geometric: استاندارد ۱۱- ۹۵ TP AASHTO به هندسه خاص آزمونه و حداکثر اندازه سنگدانه ۲۵mm محدود شده است. Geometric Resipod مطابق با آخرین تغییرات این استاندارد طراحی شده است. در این ابزار فاصله پراب‌ها متغیر است و می‌تواند مطابق با سایز سنگدانه تغییر نماید. بسته Resistivity Bulk-Resipod تمام ابزارهای لازم برای انجام این روش از آزمایش را برای آزمونه استوانه‌ای با قطر ۱۰۰mm فراهم می‌نماید.

آزمایش‌ها به کمک دستگاه و نر انجام می‌گردد. این دستگاه، یک دستگاه دستی و قابل حمل برای اندازه‌گیری دقیق مقاومت الکتریکی بتن با استفاده از روش و نر چهار الکترودی است. این دستگاه از یک پروب چهار اتصالی (مجهز به پین‌های فنی از جنس فولاد ضد زنگ) و نیز یک بخش پردازش تشکیل می‌گردد. فاصله بیشتر میان الکترودها در مواد ناهمگن مانند بتن نتایج دقیق‌تری را به دست می‌دهد. در یک بدنه فلزی آب بندی شده و مقاوم به شرایط محیطی جای دارد که آن را برای کاربردهای میدانی و آزمایشگاهی مناسب می‌سازد. برای تهیه مصالح مصرفی برای ساخت آزمونه بتنی ابتدا ماسه دو بار شسته تهیه گردید. در مرحله بعد به تهیه شن بادامی طبیعی از بستر رودخانه لار زاهدان پرداخته شد. برای بررسی تأثیر ابعاد و شکل بر میزان مقاومت الکتریکی از آزمونه‌هایی با شکل و ابعاد مختلف استفاده گردید. در جدول شماره ۱ شکل و ابعاد قالب‌های مورد استفاده ذکر گردیده است.

جدول ۱: شکل و ابعاد نمونه‌های مورد بررسی

ابعاد	شکل
۱۵*۱۵*۱۵	مکعبی
۲۰*۲۰*۲۰	مکعبی
۱۰*۲۰	استوانه‌ای
۱۵*۳۰	استوانه‌ای

علاوه بر این از چهار رده بتنی مختلف C<sub>۲۱</sub>، C<sub>۲۴</sub>، C<sub>۲۸</sub> و C<sub>۳۲</sub> استفاده گردید. هر آزمونه در سه سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مورد بررسی قرار گرفت. تعداد آزمونه‌ها در هر سن برابر سه نمونه بود. از این‌رو شکست ۱۴۴ آزمونه بتنی در شرایط آزمایشگاهی بررسی گردید. برای عمل‌آوری آزمونه‌ها، آن‌ها را در حوضچه قرار می‌دهند. برای انجام آزمایش مقاومت الکتریکی همان‌طور که گفته شد از دستگاه و نر استفاده می‌شود. آزمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای در سن مورد نظر ۷\_۲۸ و ۹۰ از حوضچه خارج کرده و در اختیار دستگاه و نر قرار می‌گیرند. فرکانس دستگاه روی ۱۰۰ تنظیم می‌گردد. قطرهای آزمونه‌ها را به کمک مارکر رسم می‌گردند. سپس اندازه‌های موردنیاز یادداشت می‌شود. مقدار مقاومت الکتریکی طبق رابطه ۱ به دست می‌آید [۱۱]. در شکل ۲ می‌توان حوضچه عمل‌آوری آزمونه‌ها را مشاهده کرد. همچنین در اشکال ۳ و ۴ می‌توان نمایی از قرارگیری آزمونه‌های مختلف را طی آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری مشاهده کرد.



شکل ۲: حوضچه عمل آوری آزمونه‌ها



شکل ۳: آزمون مکعبی ۲۰ در ۲۰ و استوانه‌ای ۳۰ در ۱۵ تحت آزمایش مقاومت الکتریکی



شکل ۴: آزمون استوانه‌ای ۳۰ در ۱۵ و مکعبی ۲۰ در ۲۰ تحت آزمایش مقاومت فشاری



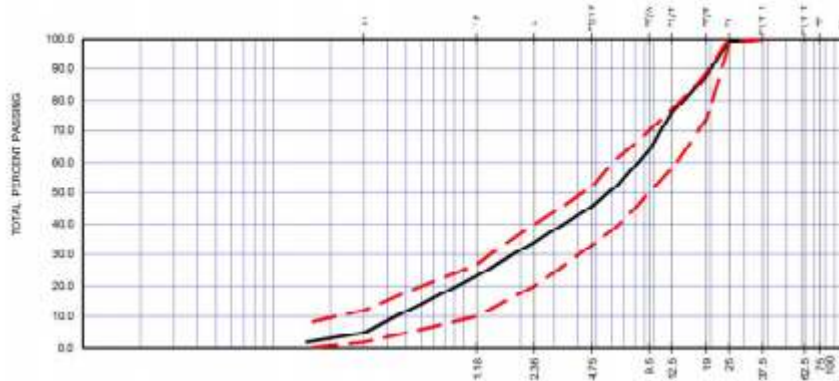
(۱)

$$\rho = Z \frac{A}{L}$$

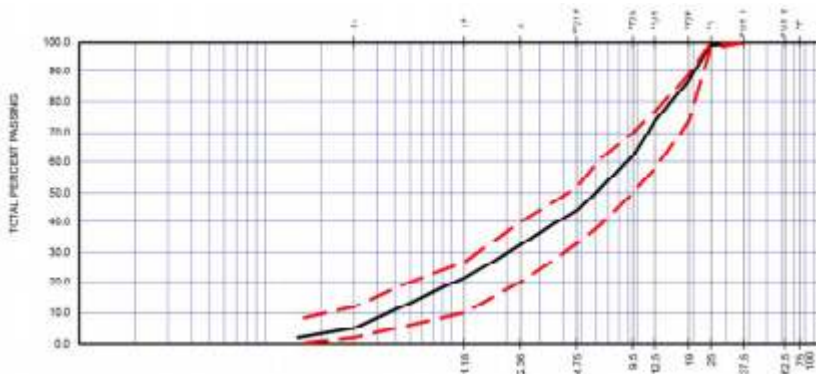
در این رابطه  $\rho$  مقاومت الکتریکی بتن،  $Z$  مقاومت ظاهری بتن،  $A$  سطح مقطع آزمون و  $L$  طول آزمون است

### ۳. یافته‌های تحقیق

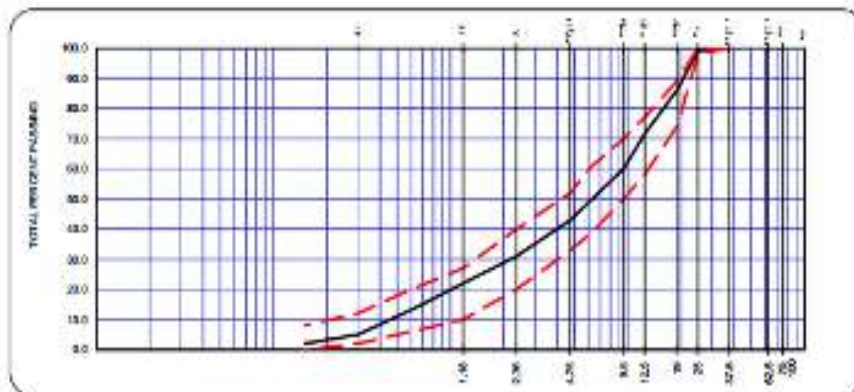
در شکل‌های ۵ تا ۸، منحنی اختلاط مصالح سنگی برای رده‌های بتن  $C_{21}$  و  $C_{24}$ ،  $C_{28}$  و  $C_{32}$  ارائه شده است.



شکل ۵: منحنی اختلاط مصالح سنگی برای رده  $C_{21}$



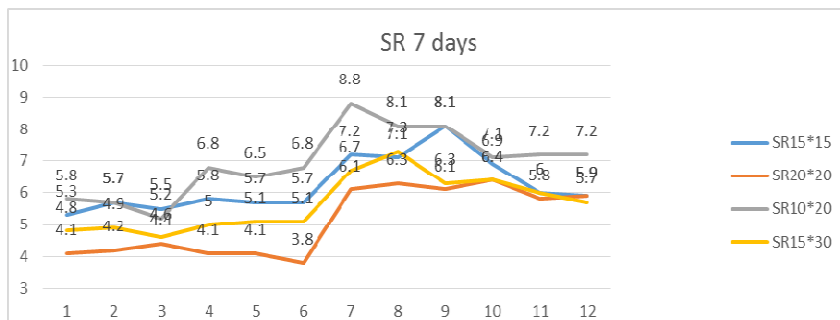
شکل ۶: منحنی اختلاط مصالح سنگی برای رده  $C_{24}$



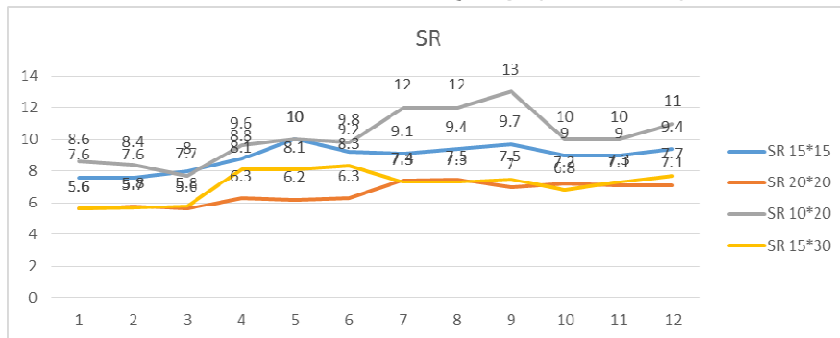




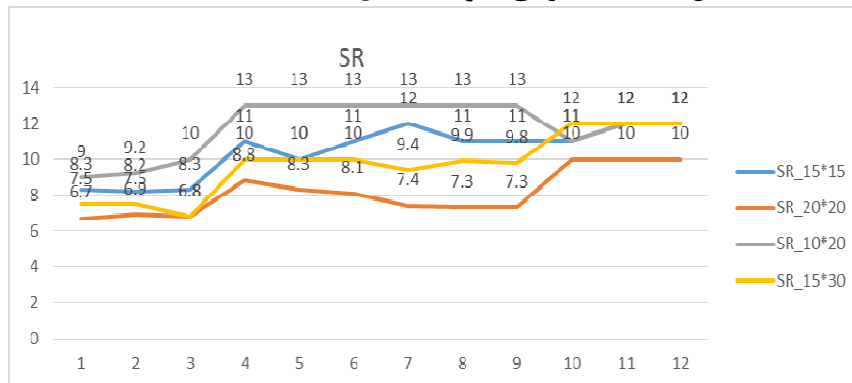
رفتار خازنی نیز نشان می‌دهد. علت رفتار خازنی بتن این‌گونه توجیه می‌شود که با اعمال جریان الکتریکی به بتن، ذرات داخل بتن پلاریزه می‌شوند. پلاریزاسیون ذرات سبب می‌شوند قطعه بتنی همانند یک خازن رفتار کرده و مقاومت خازنی ظاهر شود؛ به عبارت دیگر ذرات داخل بتن همانند یک ماده دی‌الکتریک رفتار می‌کنند [۱۶]. آزمایش‌های مقاومت الکتریکی به کمک دستگاه و نر انجام گرفت و مقاومت‌های موردنظر یادداشت گردید. نتایج حاصل‌شده در مورد تأثیر اشکال مختلف بر روی مقاومت الکتریکی را می‌توان برای دوره ۷ روزه در شکل ۹، مقاومت الکتریکی اشکال مختلف در دوره ۲۸ روزه را در شکل ۱۰ و مقاومت الکتریکی اشکال مختلف در دوره ۹۰ روزه را در شکل ۱۱ مشاهده کرد.



شکل ۹: مقاومت الکتریکی آزمون‌ها با اشکال مختلف در دوره ۷ روزه



شکل ۱۰: مقاومت الکتریکی آزمون‌ها با اشکال مختلف در دوره ۲۸ روزه

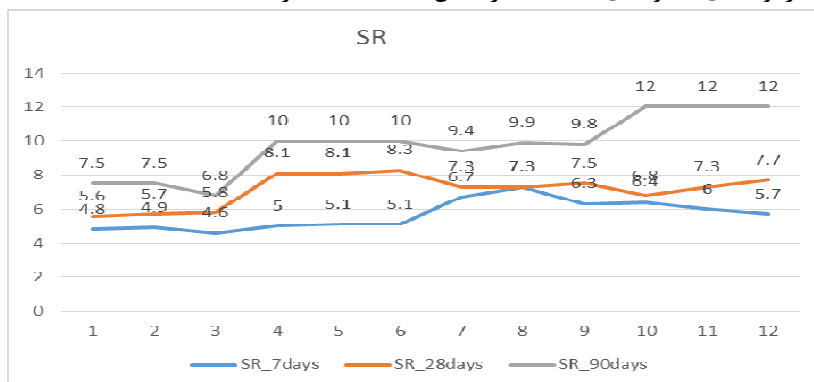


شکل ۱۱: مقاومت الکتریکی آزمون‌ها با اشکال مختلف در دوره ۹۰ روزه

براساس اشکال بالا می‌توان گفت که مقاومت الکتریکی در نمونه‌های استوانه‌ای مقاومت الکتریکی بیشتر از نمونه‌های مکعبی است. دلیل این امر را می‌توان چنین تفسیر کرد که در نمونه‌های مکعبی مساحت سطح مقطع عمود بر جریان خروجی از الکترودهای دستگاه مقاومت الکتریکی بیشتر است و همین امر سبب کمتر بودن مقاومت الکتریکی در نمونه‌های مکعبی نسبت به نمونه‌های استوانه‌ای است. نمونه‌های مکعبی با ابعاد کوچک‌تر، دارای مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به نمونه‌های

مکعبی دارای ابعاد بزرگتر هستند که این نکته در نمونه‌های استوانه‌ای هم صادق است. با افزایش حجم نمونه‌ها میزان مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد.

برای بررسی تأثیر سن آزمونه‌ها بر روی مقاومت الکتریکی نیز نمودارهای مربوط رسم گردید. به‌طور مثال می‌توان تأثیر سنین مختلف را بر روی آزمونه‌های استوانه‌ای  $30 \times 15$  در شکل ۱۲ مشاهده کرد.



شکل ۱۲: مقاومت الکتریکی آزمونه استوانه‌ای  $30 \times 15$  در سنین مختلف

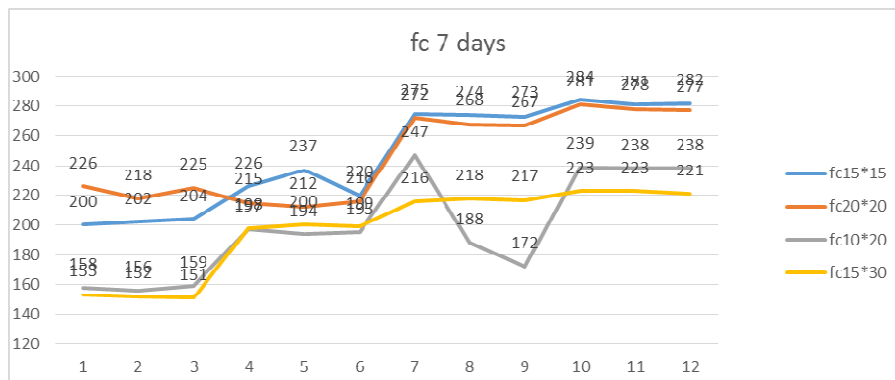
براساس شکل ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سن، میزان مقاومت الکتریکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش مقاومت را می‌توان بر شدن حفره‌های درون نمونه‌ها دانست.

بر اساس نتایج مقاومت الکتریکی آزمونه‌ها مشخص شده است که مقاومت الکتریکی بتن به‌طور کلی با افزایش سن آزمونه‌ها روندی افزایشی داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش رده بتن، مقاومت الکتریکی آزمونه‌ها افزایش داشته است. روند افزایش مقاومت الکتریکی، در بتن رده  $C24$  بیشتر از بتن رده  $C21$  و به همین ترتیب مقاومت الکتریکی رده  $C32$  بیشتر از سایر رده‌ها است. آزمونه‌های مکعبی با ابعاد کوچک‌تر، دارای مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به آزمونه‌های مکعبی دارای ابعاد بزرگ‌تر هستند که این نکته در آزمونه‌های استوانه‌ای هم صادق است. به‌طور میانگین، در آزمونه‌های مکعبی  $15 \times 15$  بین سنین ۷ تا ۹۰ روز حدود ۴۵٪ افزایش مقاومت الکتریکی برای بتن رده  $C21$ ، ۸۹٪ برای بتن رده  $C24$ ، ۹۲٪ برای بتن رده  $C28$  و ۹۱٪ برای بتن  $C32$  ایجاد شده است. می‌توان گفت که بهترین رده بتنی رده بتن  $C28$  می‌باشد. از طرفی با افزایش حجم آزمونه‌ها میزان مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد.

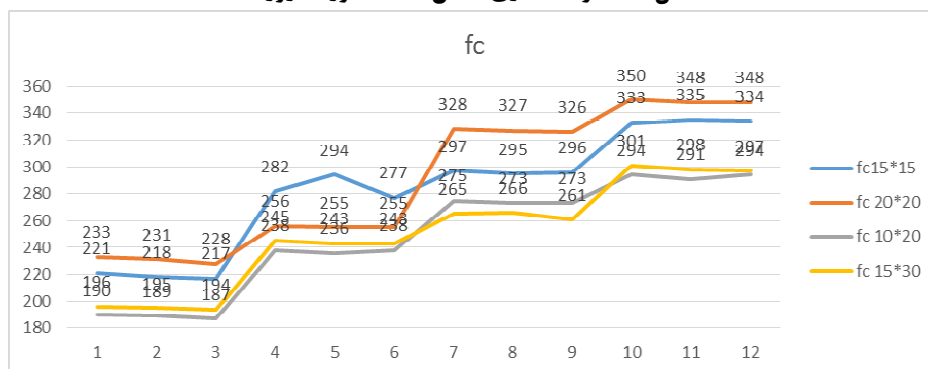
## ۲-۳ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

رایج‌ترین آزمایش در میان همه آزمایش‌های بتن سخت شده، آزمایش مقاومت فشاری می‌باشد. دلیل این امر تا حدی ساده بودن انجام آن می‌باشد و تا حدی به این برمی‌گردد که بسیاری از مشخصه‌های مورد نظر بتن از نظر کیفی با مقاومت ارتباط دارند؛ اما دلیل این امر عمدتاً اهمیت ذاتی مقاومت فشاری بتن در طراحی سازه می‌باشد. بر اساس بند ۹-۵-۱-۳ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان در صورت استفاده از آزمونه‌های مکعبی، باید مقاومت آن‌ها به مقاومت نظیر آزمونه‌های استوانه‌ای تبدیل شود. برای تبدیل مقاومت آزمونه‌های غیراستاندارد به استاندارد، از ضرایبی مطابق آیین‌نامه استفاده می‌شود. در همه آیین‌نامه‌های موجود دنیا، انجام آزمایش بر روی دو آزمونه در سن مقرر مربوط به تعریف مقاومت مشخصه کفایت می‌کند. متوسط نتیجه مقاومت این دو آزمونه، نتیجه مقاومتی آن نوبت آزمونه‌برداری (مقاومت آزمونه) را به دست می‌دهد؛ که این میانگین به‌عنوان مقاومت بتن در آن نوبت آزمونه‌برداری گزارش می‌شود و پس از آن مراجعه به تک‌تک نتایج آزمونه‌ها کار صحیحی تلقی نمی‌گردد. برای استانداردسازی نتایج، برای استوانه‌ای ۱۰ در ۲۰، ضریب ۰.۲۰۱ در مقادیر ضرب خواهد شد و

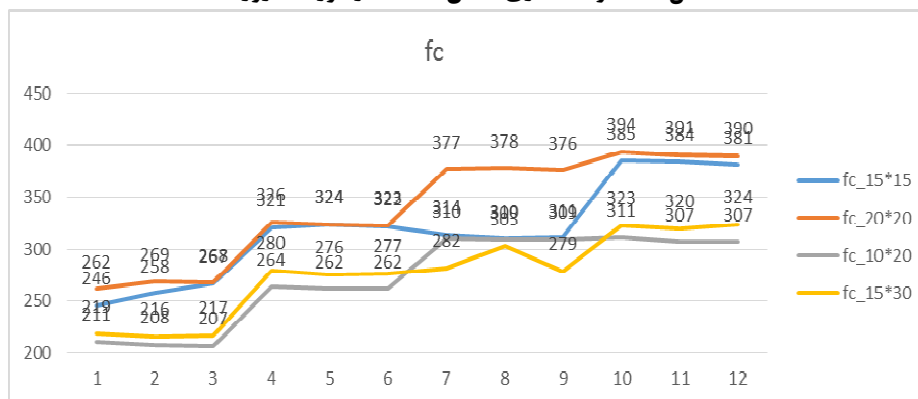
برای مابقی آزمون‌ها ضریب ۱ اعمال می‌شوند. در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ می‌توان تغییرات مقاومت فشاری اشکال مختلف را در دوره ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مشاهده کرد.



شکل ۱۳: مقاومت فشاری اشکال مختلف دوره ۷ روزه

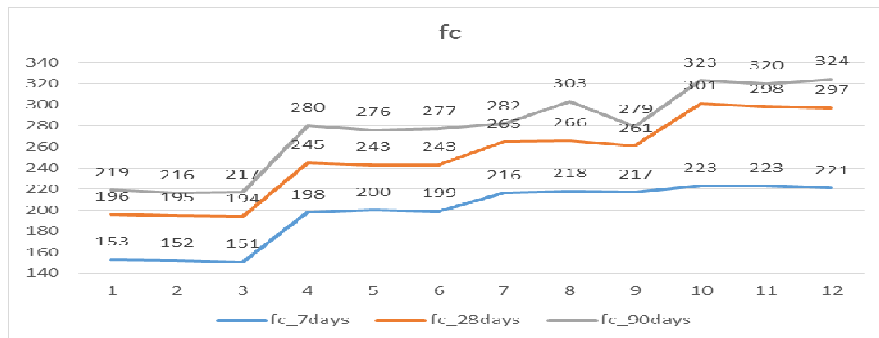


شکل ۱۴: مقاومت فشاری اشکال مختلف در دوره ۲۸ روزه



شکل ۱۵: مقاومت فشاری اشکال مختلف در دوره ۹۰ روزه

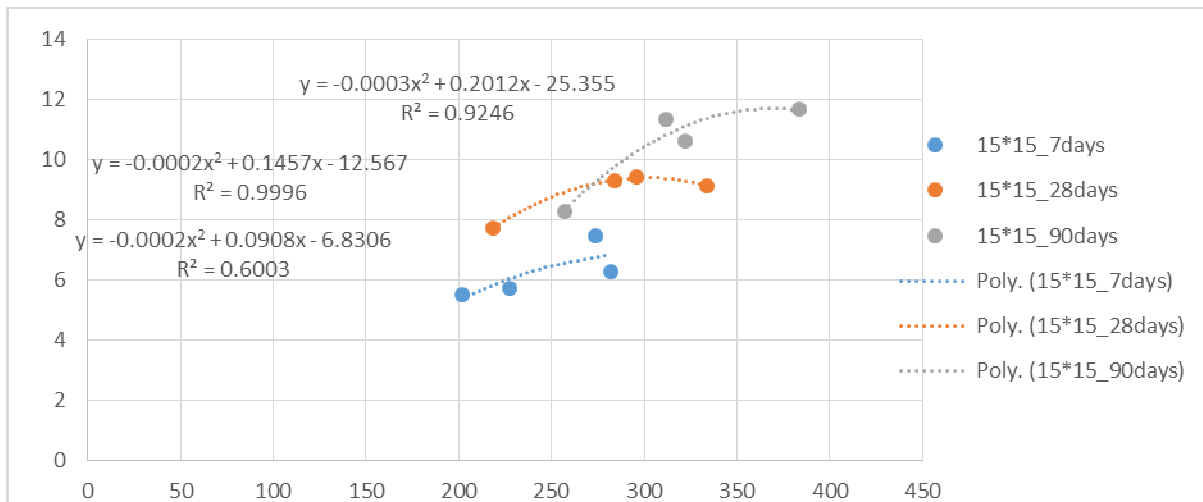
افزایش حجم نمونه‌ها سبب افزایش مقاومت فشاری می‌گردد. به‌گونه‌ای که مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۲۱\*۲۱ بیشتر از سایر نمونه‌های مکعبی شکل است. پس از آن بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های مکعبی ۱۵\*۱۵ است. نمونه‌های مکعبی در سن‌های مختلف دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های استوانه‌ای هستند. حتی هر چقدر افزایش حجم در نمونه‌های مکعبی رخ دهد، باز هم مقاومت فشاری آن بیشتر از حالت استوانه‌ای است. برای بررسی سن آزمون‌ها و تأثیر آن بر مقاومت فشاری نیز نمودار تغییرات مقاومت فشاری آزمون‌های استوانه‌ای ۱۵\*۳۰ در دوره‌های سنی مختلف رسم گردید (شکل ۱۶).



شکل ۱۶: مقاومت فشاری آزمون استوانه‌ای ۳۰\*۱۵ در سنین مختلف

### ۳-۳ بررسی همبستگی بین مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری

به منظور بررسی همبستگی بین مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری از ضریب همبستگی  $R^2$  استفاده می‌شود.  $R^2$  اندازه‌گیری آماری نزدیک داده‌ها به خط رگرسیون برازش شده می‌باشد. ضریب تعیین همیشه بین ۰ و ۱۰۰٪ است. ۰٪ نشان می‌دهد که مدل هیچ یک از تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین نمی‌کند. ۱۰۰٪ نشان می‌دهد که مدل همه تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین می‌کند. در شکل ۱۷ می‌توان میزان همبستگی بین مقاومت فشاری و الکتریکی را برای نمونه مکعبی ۱۵\*۱۵\*۱۵ مشاهده کرد. محور افقی این نمودار مقاومت فشاری و محور عمودی آن مقاومت الکتریکی است.



شکل ۱۷: میزان همبستگی بین مقاومت فشاری و الکتریکی برای نمونه مکعبی ۱۵\*۱۵\*۱۵

بر اساس شکل ۱۷ می‌توان مشاهده کرد که در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز میزان همبستگی بین مقاومت فشاری و الکتریکی برای نمونه مکعبی ۱۵\*۱۵\*۱۵ قابل قبول است. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش مقاومت الکتریکی میزان مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. میزان ضریب همبستگی نشان‌دهنده همبستگی خوب بین دو روش مقاومت فشاری و ۴ الکترودی است.

### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مقاومت فشاری و الکتریکی سطحی بتن در آزمون‌های با اشکال و ابعاد مختلف با انجام آزمایشات بر روی آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای در دو اندازه مختلف و بر روی چهار رده بتن ۲۱، ۲۴، ۲۸ و ۳۲ C مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمون‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بررسی شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که به‌طور کلی مقاومت فشاری و الکتریکی بتن با افزایش سن آزمون‌ها روندی افزایشی داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش رده بتن، مقاومت

فشاری و الکتریکی بتن افزایش داشته است. آزمون‌های با ابعاد کوچک تر، دارای مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به آزمون‌های دارای ابعاد بزرگ تر هستند. تغییرات مقاومت فشاری در مقابل تغییرات مقاومت الکتریکی کمتر و روند یکنواخت‌تری دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در اندازه و شکل آزمون‌ها سبب تغییرات بزرگ‌تر در مقاومت الکتریکی می‌گردد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش حجم آزمون‌ها میزان مقاومت الکتریکی و فشاری کاهش می‌یابد. افزایش رده بتن نیز، موجب افزایش مقاومت الکتریکی و به تبع آن، کاهش احتمال خوردگی میلگردها را در پی دارد.

## ۵. مراجع

- [۱] JH, B., & SG, M. (۱۹۹۶). Testing of concrete in structures.
- [۲] Ahmad, Shamsad, Ibrahim Hakeem, and Mohammed Maslehuddin. (۲۰۱۴). "Development of UHPC mixtures utilizing natural and industrial waste materials as partial replacements of silica fume and sand." *The Scientific World Journal* ۲۰۱۴.
- [۳] Vaitkevičius, Vitoldas, and Evaldas Šerelis. (۲۰۱۴). "Influence of silica fume on ultrahigh performance concrete." *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, ۳۷-۴۲.
- [۴] Mehta, P. Kumar, and Paulo JM Monteiro. (۲۰۰۶). *concrete: microstructure, properties, and materials*. No. Sirsi) i۹۷۸۰۰۷۱۴۶۲۸۹۱.
- [۵] Gehre M, Kluth T, Lipponen A, Jin B, Seppänen A, Kaipio JP, et al. "Sparsity construction in electrical impedance tomography: an experimental evaluation", *J Comput Appl Math*, ۲۳۶(۸), pp 2126-36, 2012.
- [۶] Bertolini, L., et al. (۲۰۰۴). *Corrosion of steel in concrete. Prevention, Diagnosis, Repair*. Wiley-VCH, pp 392.
- [۷] Ferreira, R. M., & Jalali, S. (۲۰۰۶). Quality control based on electrical resistivity measurements.
- [۸] Burchler, D., Elsener, B., Bohni, H. (۲۰۰۹). "Electrical resistivity and dielectric properties of hardened cement paste and mortar. In Page, C.L. et al Proc". ۴th Int. Symp. On Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. Society of Chemical Industry.
- [۹] Azarsa, P., & Gupta, R. (۲۰۱۷). "Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review". *Advances in Materials Science and Engineering*, ۲۰۱۷.
- [۱۰] پیلوار، ار؛ رضانیانپور ع.؛ و رجایی ح. (۱۳۹۶). "آزمایش رسانایی الکتریکی اصلاح شده برای سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید"، فصلنامه مهندسی عمران فردوسی، (۲) ۳۰، صص ۳۱۲-۳۰۲.
- [۱۱] شکرچی‌زاده، م.، افتخار، م.، لشگری، م.، الشرعی، ع. (۱۳۹۲). تأثیر هندسه آزمون و روش انجام آزمایش بر نتایج مقاومت الکتریکی بتن، پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران.
- [۱۲] تدین، م.، خانزادی، م.، ملکی، م.، ذهبی، س. (۱۳۹۳). مقایسه مقاومت ویژه الکتریکی بتن اندازه‌گیری شده با روش حجمی و هدایت الکتریکی، ششمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران.
- [۱۳] ACI ۲۱۱.۲-۹۸, "Standard Practice for Selecting Proportion for Structural Lightweight Concrete," American Concrete Institute.





یازدهمین کنفرانس ملی بتن  
۱۴،۱۵،۱۶ مهرماه ۱۳۹۸  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



- [۱۴] AASHTO Designation: T ۳۵۸ (۲۰۱۵). “Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [۱۵] ASTM C۱۷۶۰. (۲۰۱۲). “Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete”, American society for Testing and Materials.
- [۱۶] Ghodousi, P., “Effects of corrosion on the Bond and strength of Reinforced concrete Beams”, ph.d Thesis, Leeds University, ۱۹۹۲.