

The Assessment of Bond Strength between Corroded Steel Rebars and Self-Compacting Concrete

Salarvand, Bahare

Civil Engineering Faculty-Department of Engineering- University of Zanjan

*Saeedi Razavi, Behzad**

*Research Assistant professor, Standard Research Institute, Technical and engineering faculty, Construction and mineral Department, Karaj, Iran
bsaidi@standard.ac.ir*

Ahmadi, Jamal

Assistant professor, Faculty-Department of Engineering- University of Zanjan

Abstract

The bonding of steel bars to concrete in a various environments is one of the most significant problems in the durability of concrete structures. There are several different factors such as concrete ages and properties, steel rebars characteristics and environmental condition which affect the bond strength between concrete and embedded steel rebars. Accordingly, in the present study, the bond strength between embedded steel rebars and self-compacting concrete which contain different values of granite and limestone powder as a filler is investigated under accelerated corrosion condition. Besides, the specimens were also preloaded up to 50% of concrete compressive strength to investigate the effect of induced cracks caused by external loading on the chloride ions penetration and corrosion process. According to obtained results from the experiments, the utilization of 15% granite powder has increased the bond strength and decreased corrosion level of concrete specimens. Also, the loading of the specimens has exacerbated corrosion and reduced bond strength considerably.

Keywords: *Self-Compacting Concrete, Bond Strength, Preloading, Corrosion Level, Water Adsorption.*

بررسی مقاومت پیوستگی بین میلگردهای فولادی خورده شده و بتن خودتراکم

دریافت مقاله: ۲۰-۰۷-۱۳۹۸

پذیرش مقاله: ۰۳-۰۹-۱۳۹۸

بهاره سالاروند

دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشگاه زنجان

بهزاد سعیدی رضوی *

استادیار پژوهشی پژوهشگاه استاندارد، پژوهشکده فناوری و مهندسی، گروه پژوهشی ساختمانی و معدنی، کرج، ایران

bsaidi@standard.ac.ir

جمال احمدی

استادیار دانشکده مهندسی-گروه عمران دانشگاه زنجان

چکیده

پیوستگی میلگردهای فولادی به بتن در شرایط محیطی مختلف از مباحث اصلی مربوط به پایایی سازه های بتن مسلح می باشد. عوامل زیادی بر مقاومت پیوستگی بین میلگردها و بتن تاثیر گذار هستند که از جمله مهمترین آنها می توان به سن و ویژگی های بتن، مشخصات میلگرد و شرایط محیطی اشاره کرد. بر این اساس و در تحقیق حاضر به بررسی میزان پیوستگی میلگردهای فولادی به بتن خودتراکم حاوی پودر سنگ گرانیات و آهک در مقادیر مختلف پوشش بتنی بر روی میلگردها تحت شرایط خوردگی تسریع شده پرداخته شده است. همچنین از دو نوع سنگدانه شکسته و گردگوشه در ساخت نمونه ها استفاده شده و جهت بررسی تاثیر ترک های ناشی از بارگذاری خارجی بر انتشار یون کلر و روند خوردگی، نمونه ها تحت پیش بارگذاری قرار داده شده اند. مطابق نتایج بدست آمده از این پژوهش، استفاده از پودر سنگ گرانیات حدود ۱۵ درصد وزنی سیمان باعث افزایش مقاومت پیوستگی و کاهش میزان خوردگی در نمونه های مورد مطالعه شده است. جایگزینی سنگدانه های شکسته بجای گردگوشه عموماً موجب افزایش مقاومت پیوستگی نمونه ها شده است. همچنین بارگذاری نمونه ها تا پنجاه درصد مقاومت نهایی، باعث تشدید خوردگی و کاهش شدید مقاومت پیوستگی گردیده است. واژگان کلیدی: بتن خودتراکم، جذب آب حجمی، مقاومت پیوستگی، پیش بارگذاری، درصد خوردگی.

استفاده از بتن های خودتراکم که در دهه ۱۹۸۰ ابداع و توسعه یافته اند برای بتن ریزی در شرایطی که تراکم بتن دشوار می باشد از جمله راهکارهای مفید و موثر می باشد [۲۰]. بعد از جنگ جهانی در سالهای ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ با توجه به وسعت ویرانی ها نیاز به افزایش سرعت در تولید ساختمان ها احساس شد. عمر مفید کم و مشکلات ناشی از خرابی و افت دوام سازه های بتنی نیز کمک نمود تا محققین به فکر ابداع بتنی کارا، بادوام و اقتصادی تر باشند. اوکامورا از دانشگاه توکیو تراکم بتن را که نقش کلیدی در سهولت اجرا سازه های بتنی داشت به عنوان عاملی مهم و اثرگذار بر دوام و پایداری سازه های بتنی تشخیص داده و بتن با کارایی بسیار بالا که نیاز به تراکم نداشت را پیشنهاد نمود [۳]. کارایی بالا و بهبود قابل توجه پایداری این نوع بتن منجر به اجرای تعداد قابل توجهی از سازه های بتنی با استفاده از بتن خودتراکم در سال های دهه ۱۹۹۰ گردید [۴].

از جمله عوامل مهم در خصوص موفقیت استفاده از بتن خودتراکم در ساخت اعضا و قطعات بتن مسلح اطمینان از حصول پیوستگی کامل بین میلگردهای تقویتی و بتن می باشد. مقاومت پیوستگی میلگردهای فولادی به بتن ناشی از سه مکانیزم چسبندگی شیمیایی، پیوستگی اصطکاکی و پیوستگی برشی (قفل و بست مکانیکی) بین بتن و میلگردهای فولادی است [۵]. هنگامی که میلگردها دچار تغییر شکل محوری می شوند، اولین عامل ایجاد کننده پیوستگی بین میلگرد و بتن، چسبندگی شیمیایی بین سطح میلگردها و بتن چسبیده به آن است که به طور عمده وابسته به جنس و ترکیب شیمیایی بتن و میلگرد است. با افزایش تغییر شکل، تنش پیوستگی برشی در بتن اطراف میلگرد ایجاد می شود که مقدار آن وابسته به نوع و ویژگی های سطحی میلگردها است [۶ و ۷]. با رسیدن تنش پیوستگی به حد مقاومت پیوستگی لغزش موضعی اتفاق می افتد. در بتن های مسلح شده با میلگردها با سطح صاف بسته به میزان مقاومت اصطکاکی، شکست نهایی بصورت لغزش میلگرد به سمت خارج عضو اتفاق می افتد [۸]. این و همکارانش [۹] بر مبنای پژوهشی که بر روی مقاومت پیوستگی میلگردهای با قطر کمتر از ۸ میلیمتر با استفاده از آزمایش تیر^۱ و آزمایش کشش مستقیم میلگردها^۲ انجام دادند مدل اصلاح شده ای برای برآورد مقدار مقاومت پیوستگی این رده از میلگردها پیشنهاد دادند. در این رابطه اصفهانی و رنگان [۱۰] نشان دادند که با افزایش مقاومت بتن، نسبت مقاومت پیوستگی به مقاومت کشش بتن افزایش می یابد. مقاومت پیوستگی بین بتن و فولاد طبیعتاً دینامیک داشته و به غیر از مشخصات فولاد و مشخصات متغیر بتن در طول زمان، تحت تاثیر شرایط محیطی نظیر تهاجم عوامل آسیب رسان به بتن و فولاد و خوردگی میلگردها نیز می باشد.

فرآیند خوردگی میلگردها با چند مکانیزم مختلف بر مقاومت پیوستگی تاثیر می گذارد. با توجه به اینکه عمده انتقال نیرو بین بتن و میلگردها از طریق قفل و بست مکانیکی بین آج های میلگرد و بتن صورت می گیرد، لذا خوردگی شدن میلگردها موجب کاهش ارتفاع آج های میلگرد و پوشیده شدن سطح آنها با محصولات خوردگی شده می گردد. از سوی دیگر فشار انبساطی حاصل از خوردگی موجب شکل گیری و گسترش ترک در بتن شده که در نهایت موجب کاهش مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگردهای فولادی مدفون در آن می شود [۱۱]. علاوه بر کاهش مشخصات مکانیکی، در صورت ترک خوردن پوشش بتن اثر محصورکنندگی بتن از بین رفته و مولفه اصطکاکی مقاومت پیوستگی نیز ناچیز می شود، لذا می توان گفت که ترک خوردن پوشش بتنی نشانگر افت قابل ملاحظه ظرفیت باربری و نزدیک بودن پایان عمر مفید سازه های بتن مسلح می باشد. اکثر تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی بیانگر این مطلب می باشند که ترک خوردن پوشش قبل از کاهش سطح مقطع و پیش از اینکه افت ظرفیت باربری میلگردها تاثیر قابل توجهی در ظرفیت باربری سازه بگذارد، رخ می دهد. بنابراین کاهش سطح مقطع میلگردهای

¹ beam test

² pull out

فولادی به جز در سطوح خوردگی های شدید در مقایسه با دیگر آسیب‌های سازه‌ای ناشی از خوردگی از اهمیت بالایی برخوردار نبوده و کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

در این رابطه در سال ۱۹۹۹ قندهاری و همکاران با اعمال خوردگی تسریع شده در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های استوانه‌ای، ترک خوردگی و کاهش مقاومت پیوستگی در اثر خوردگی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۲]. بر مبنای نتایج به دست آمده از این تحقیق مشاهده شده است که نمونه‌های بتنی با ابعاد کوچک و قطر میلگرد کم در درصد خوردگی های پایین (۰.۷٪) ترک می‌خورند. ولی نمونه با ابعاد بزرگ و قطر میلگرد کم حتی با اعمال خوردگی بیشتر (در این تحقیق ۱۰٪) نیز ترک نخورده و سالم باقی ماندند.

در سال ۲۰۱۲، یالسینر و ارن و همکاران به بررسی آزمایشگاهی مقاومت پیوستگی میلگرد و بتن در سطوح مختلف خوردگی در دو فاز مختلف پرداختند [۱۳]. بر پایه نتایج گزارش شده، مقاومت پیوستگی تمامی نمونه‌های دارای خوردگی کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و در نمونه‌های خورده نشده، مقاومت پیوستگی با افزایش سطح مقاومت بتن و نسبت پوشش به قطر میلگرد افزایش می‌یابد. همچنین منحنی‌های بیرون کشیدگی میلگرد روی نمونه‌های دارای خوردگی بتن با مقاومت بالا، رفتار شکننده‌تری در مقایسه با شرایط خورده نشده داشته و کاهش مقاومت پیوستگی در بتن مقاومت بالا بیش از بتن با رده مقاومتی پایین گزارش شده است.

در سال ۲۰۰۲ کلارک و ویلسون تاثیر نسبت ضخامت پوشش بتنی به قطر میلگرد و همچنین نسبت حداکثر اندازه سنگدانه به قطر میلگرد بر فشار لازم برای ترک خوردن بتن پوششی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۴]. در این مطالعه با ایجاد یک حفره در نمونه و اعمال فشار داخلی توسط پمپ هیدرولیکی شبیه سازی اثر افزایش حجم میلگرد خورده شده برای تعیین فشار لازم برای ترک خوردن بتن پوشش انجام شد. پیش از این موریناگا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی رابطه‌ای تجربی (رابطه ۱) برای پیش بینی فشار لازم برای ترک خوردگی بتن پوششی را ارائه داده بود که در این رابطه فشار لازم تابع مقاومت کششی بتن (f_t) و نسبت ضخامت پوشش به قطر میلگرد (c/d) بود [۱۵].

$$P_{\max} = f_t \cdot (1 + 2 c/d)^{0.85} \quad (1)$$

این در حالی است که بر اساس نتایج آزمایش های کلارک و ویلسون [۱۴] در یک نمونه با هندسه یکسان، مقاومت کششی تاثیر چندانی در فشار انبساطی ندارد. این نتیجه با رابطه ارائه شده توسط موریناگا [۱۵] (رابطه ۱) در تناقض می‌باشد. علت این تناقض استفاده از آزمایش برزلی برای بدست آوردن مقاومت کشش بتن در هر دو آزمایش با مشخصات نمونه‌های متفاوت بیان شده است. در واقع می‌توان چنین بیان نمود که مقاومت کششی معیاری مناسب برای شکست نیست چرا که پروسه شکست در این حالت بجای تسلیم با توسعه ترک صورت می‌گیرد. اگرچه مقاومت کششی در شکل‌گیری ترک موثر می‌باشد ولی تنها زمانی شکست رخ می‌دهد که ترک تا سطح بتن گسترش یابد. بنابراین معیار انرژی شکست معیار مناسبتری برای ترک خوردن پوشش بتنی تحت فشار داخلی می‌باشد [۱۵].

در سال ۲۰۱۴، تاندلو به بررسی آزمایشگاهی مقاومت پیوستگی با سطوح متفاوت خوردگی فولاد پرداخت [۱۶]. نتایج بدست آمده نشان دهنده تاثیر مهم سطح خوردگی و بخصوص نقش مهم خاموت‌ها روی مقاومت پیوستگی و پاسخ کلی پیوستگی - لغزش بوده است.

آنته و همکارانش [۱۷] با استفاده از بررسی های آزمایشگاهی و تحلیل اجزای محدود به بررسی مقاومت پیوستگی بتن های خودتراکم با میلگردهای تقویتی پرداختند. پامید و همکاران [۱۸] به مقایسه مقاومت پیوستگی میلگردهای فولادی TMT در بتن های خودتراکم و معمولی پرداخته‌اند. نتایج بدست آمده از این تحقیق حاکی از

همبستگی بیشتر مقاومت و پیوستگی به مقاومت بتن در بتن‌های معمولی در غیاب با بتن های خودتراکم بوده است.

آیوپ و همکارانش [۱۹] با استفاده از آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد (pull out) به بررسی اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی بتن های خودتراکم تحت خوردگی تسریع شده پرداختند. یافته‌های آنها نشان می‌داد که در بتن‌های خودتراکم رابطه بین مقاومت پیوستگی و مقاومت بتن تحت شرایط با و بدون خوردگی کاملاً متفاوت است. همچنین آنها نشان دادند که شکست در نمونه های تحت اثر خوردگی تسریع شده بصورت شکست ترد می باشد.

در این پژوهش با توجه به تاثیر خوردگی در کاهش مقاومت پیوستگی بین میلگردهای فولادی و بتن و همینطور با توجه به آنکه تغییرات مقاومت پیوستگی ناشی از خوردگی در بتن های خودتراکم کمتر مورد بررسی قرار گرفته، با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی تغییرات مقاومت پیوستگی بین بتن و فولاد در بتن های خودتراکم مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور از آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد برای اندازه‌گیری مقاومت پیوستگی و تغییرات آن در نمونه های بتن خودتراکم در حالت خوردگی تسریع شده استفاده شده است. برای نزدیک تر کردن نتایج به شرایط سرویس دهی سازه ها که در آنها ترک های سازه ای و غیر سازه ای وجود دارد از پیش بارگذاری در برخی نمونه ها جهت ایجاد ریز ترک استفاده شده است. برای ارزیابی حجم ترک های ایجاد شده نیز از آزمون های التراسونیک و جذب حجمی بهره گرفته شده است.

۲- برنامه ریزی انجام مطالعات آزمایشگاهی

در این تحقیق از ۸ طرح مخلوط با دو مقدار متفاوت 500 و 600 Kg/m^3 مجموع سیمان و مواد پودری استفاده شده است. به منظور بررسی تاثیر پودر سنگ آهک (LP) و سنگ گرانیت (GP) و بررسی تاثیر تغییر سنگدانه گردگوشه (طبیعی) به شکسته، از ۱۵ درصد پودر سنگ گرانیت و آهک جایگزین سیمان و ۱۰۰ درصد شن شکسته و هم طبیعی در طرح ها استفاده شده است. سایر پارامترهای تاثیرگذار نظیر حداکثر اندازه سنگدانه، نسبت ماسه به شن، مقدار فوق روان کننده در نسبت های مخلوط ثابت نگه داشته شده است. حداکثر اندازه سنگدانه $12/5$ میلی‌متر، نسبت ماسه به شن $1/5$ و مقدار فوق‌روان‌کننده $0/7$ تا $0/8$ درصد وزنی سیمان می‌باشد.

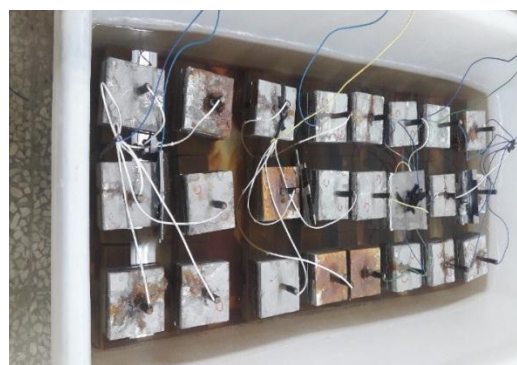
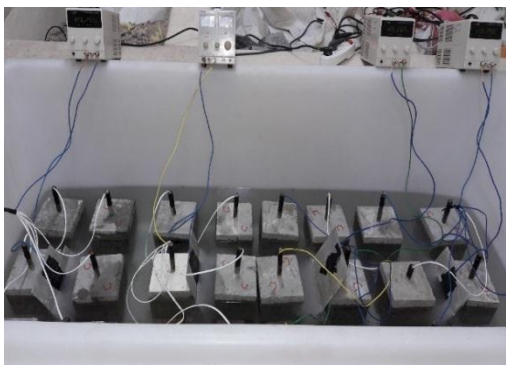
جدول ۱: مقادیر و نسبت های وزنی طرح های مخلوط

| کد طرح | W/C | C (kg/m^3) | LP (kg/m^3) | GP (kg/m^3) | ریزدانه (kg/m^3) | درشت‌دانه (kg/m^3) |
|-------------------|------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| I-600 | 0/36 | 600 | 0 | 0 | 858 | 572 |
| I-600-15%LP | 0/36 | 510 | 90 | 0 | 858 | 572 |
| I-600-15%GP | 0/36 | 510 | 0 | 90 | 858 | 572 |
| II-500 | 0/36 | 500 | 0 | 0 | 990 | 660 |
| II-500-15%LP | 0/36 | 425 | 75 | 0 | 990 | 660 |
| II-500-15%GP | 0/36 | 425 | 0 | 75 | 990 | 660 |
| III-500-Uncrushed | 0/46 | 500 | 100 | 0 | 858 | 572 |
| III-500-crushed | 0/46 | 500 | 100 | 0 | 858 | 572 |

به منظور اندازه گیری تنش تسلیم بتن تازه از آزمایش جریان اسلامپ و همچنین تعیین قابلیت پرکنندگی از قیف وی طبق دستورالعمل EFNARC استفاده شد. همچنین برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۲۰۶ از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتیمتری استفاده شد. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در شرایط اشباع و دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد، از آب خارج شده و پس از خشک شدن در محیط آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گرفتند.

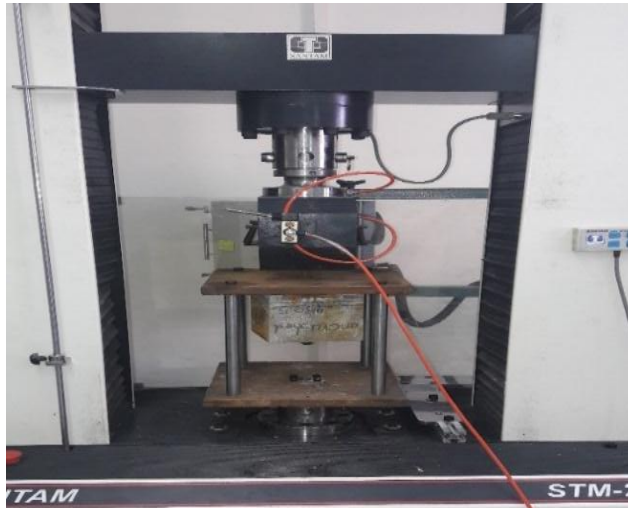
همانگونه که عنوان شد برای ارزیابی مقدار و حجم ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های تحت پیش‌بارگذاری (به میزان $0.5 f_c$) و همچنین مقایسه نسبی مقدار تراکم نمونه‌ها آزمایش‌های جذب آب حجمی و آلتراسونیک انجام شده است. جذب آب نمونه‌های مورد آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C642-97 به صورت درصد وزنی تعیین شده است. همچنین سرعت عبور امواج صوتی در بتن (آزمایش آلتراسونیک) مطابق استاندارد ASTM C 597-0016 انجام پذیرفته است.

برای ایجاد خوردگی تسریع شده نمونه‌ها، بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری، درون ظرف اعمال خوردگی تسریع شده با محلول آب نمک ۵ درصد قرار داده شدند. به منظور ایجاد جریان خوردگی، جریان مستقیم یک و نیم آمپر و ۲۵ ولت به مدت دو هفته به نمونه‌ها اعمال شد. در شکل ۱ نحوه اعمال جریان خوردگی تسریع شده به نمونه‌ها نمایش داده شده است. در این آزمایش میلگردهای مدفون در بتن به عنوان قطب آند و ورقه مسی به عنوان قطب کاتد عمل می‌نماید. لازم به ذکر است که برای اعمال شرایط خوردگی تسریع شده فقط طول میانی میلگردها که درون بتن قرار دارد مد نظر است. بدین منظور و برای جلوگیری از خوردگی بخش پایینی میلگردها که مستقیماً درون آب قرار دارد، این بخش با چسب با پایه پلیمری آب بندی شده است.



شکل ۱: نمونه‌های بتنی تحت آزمایش خوردگی تسریع شده

به منظور محاسبه درصد خوردگی میلگردها، وزن میلگردها قبل و بعد از اعمال خوردگی اندازه گرفته شده و کاهش وزن میلگرد اندازه گیری و ثبت گردیده است. آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد (pull out test) هم برای نمونه‌های خورده شده و هم برای نمونه‌های خورده نشده مطابق با استاندارد ASTM-C234-91a انجام شده است. نمونه‌های مورد مطالعه در دو حالت بدون ترک و ترک خورده که ترک در آن توسط اعمال بار به میزان یک دوم مقاومت فشاری نهایی ($0.5 f_c$) ایجاد شده، مورد آزمایش قرار گرفتند. لازم به ذکر است این نوع ایجاد ترک تا حدی منطبق بر رفتار واقعی اعضای بتنی می‌باشد. ترک‌ها ابتدا از ناحیه کششی مقطع بتنی شروع شده و تا سطح میلگرد و سپس تا تار خنثی ادامه یافته و دور تا دور میلگرد را فرا می‌گیرد. نمونه‌ها به مدت ۷ روز در شرایط اشباع عمل‌آوری شده و تا رسیدن به مقاومت ۲۸ روزه در محیط آزمایشگاه نگه داشته شدند. سپس بخشی از نمونه‌ها به مدت ۱۴ روز در محلول ۵ درصد $NaCl$ و بخشی دیگر به عنوان شاهد در آب معمولی قرار داده شده و آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد از درون بتن بر روی آنها انجام گردید.



شکل ۲: قاب فولادی و نمونه تحت آزمایش کشش مستقیم

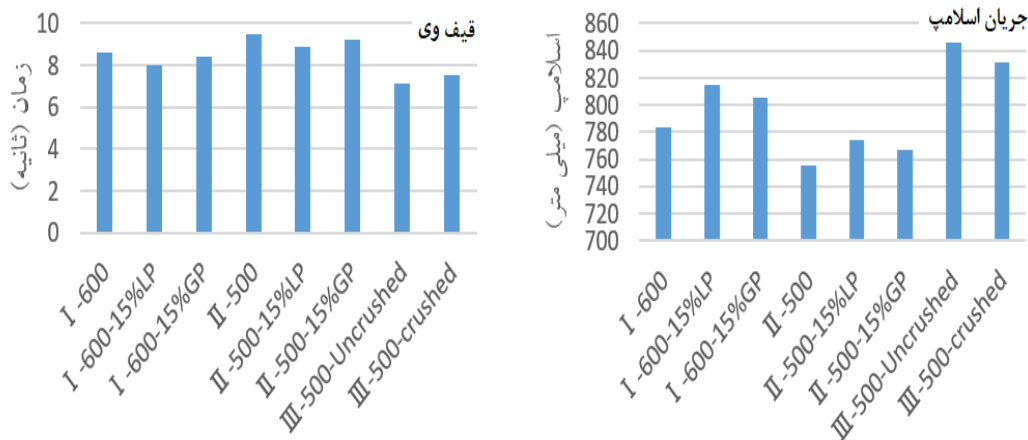
لازم بذکر است که در این مطالعات و بمنظور ارزیابی تاثیر مقدار پوشش بتنی روی میلگردها بر روی مقاومت پیوستگی، نمونه هایی بتنی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ و $15 \times 15 \times 15$ سانتیمتر (با میلگردهای مدفون در مرکز) ساخته و مطابق با شرایط آزمایشگاهی توضیح داده شده، مورد آزمایش قرار گرفته اند.

۳- ارائه نتایج

در این بخش ابتدا نتایج مربوط به ویژگی های روانی بتن تازه شامل نتایج آزمون های جریان اسلامپ و قیف ۷ ارائه شده و سپس ضمن ارائه نتایج مربوط به آزمون های مقاومت فشاری و تعیین حجم ترک ها به بررسی نتایج مقاومت پیوستگی در سطوح مختلف خوردگی فولاد مدفون در بتن پرداخته شده است.

*مشخصات روانی طرح های ساخته شده

با توجه به نتایج آزمایش جریان اسلامپ و قیف وی که در شکل ۳ ارائه شده است، مشاهده می شود که با جایگزینی ۱۵ درصد آهک و پودر سنگ گرانیت، جریان اسلامپ بتن نسبت به بتن شاهد افزایش پیدا کرده است. همچنین بر مبنای نتایج بدست آمده، با جایگزینی شن شکسته به جای شن گردگوشه، قطر جریان اسلامپ بتن کاهش یافته است. با مقایسه نتایج مخلوط های شاهد I و شاهد II مشاهده می شود که با کاهش حجم خمیر سیمان از ۶۰۰ به ۵۰۰ کیلوگرم و افزایش میزان سنگدانه مقدار جریان اسلامپ کاهش و مقادیر زمان تخلیه (قیف وی) افزایش یافته است.

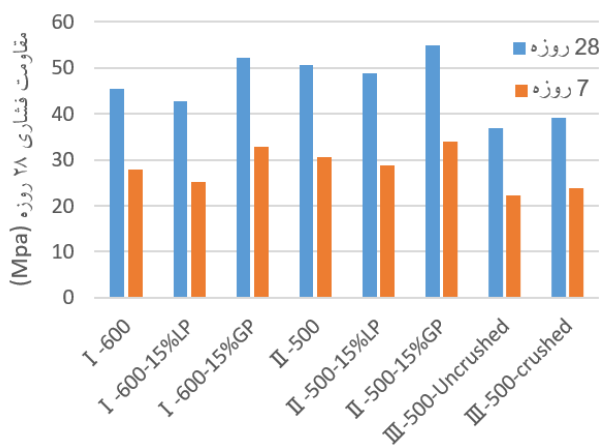


شکل ۳: نتایج مربوط به آزمایش های جریان اسلامپ و قیف وی

کاهش قطر جریان اسلامپ در نمونه های با شن شکسته به معنای افزایش تنش تسلیم و کاهش پرکنندگی است. کاهش مقدار جریان اسلامپ و افزایش زمان تخلیه از قیف وی در نمونه های حاوی حجم خمیر سیمان کمتر نیز بیانگر کاهش روانی و پرکنندگی و افزایش تنش تسلیم می باشد.

* مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده

نتایج مربوط به مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده در شکل شماره ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده (شکل ۴) مشاهده می شود که مقاومت فشاری تمامی نمونه های دارای پودر سنگ آهک احتمالاً بدلیل افزایش تخلخل و کاهش تراکم ریز ساختار از بتن شاهد کمتر است (افزایش جذب آب حجمی نمونه ها و کاهش سرعت امواج آلتراسونیک مطابق نتایج ارائه شده در شکل های ۵ و ۶ دلایلی بر بالاتر بودن تخلخل این نمونه ها می باشد). این در حالی است که مقاومت فشاری نمونه های دارای پودر سنگ گرانیات به دلیل بهبود ریزساختار و متراکم تر شدن آن از بتن شاهد بیشتر شده است. بیشترین مقدار مقاومت فشاری مربوط به مخلوط II-500-15%GP که دارای ۱۵ درصد پودر سنگ گرانیات و عیار سیمان ۵۰۰ می باشد و کمترین مقاومت فشاری مربوط به مخلوط I-600-15%LP بوده است. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده نمونه های با سنگ دانه شکسته (III-500-crushed) دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه های با سنگدانه های گرد گوشه (III-500-Uncrushed) بوده است. با مقایسه مقاومت های فشاری نمونه های شاهد اول (I-600) و شاهد دوم (II-500) با کاهش عیارسیمان از ۶۰۰ به ۵۰۰ باعث افزایش در مقاومت فشاری شده است. لازم بذکر است که در نمونه های ساخته شده مقاومت فشاری مخلوط دارای شن شکسته بیشتر از شن گردگوشه می باشد.

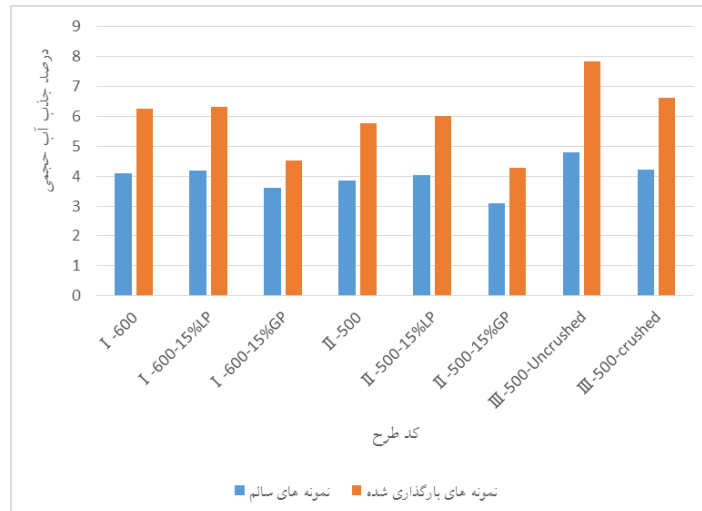


شکل ۴: میانگین نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه

افزایش در مقاومت فشاری نمونه ها با کاهش عیار سیمان، احتمالاً به دلیل کاهش حجم خمیر و در نتیجه کاهش حجم ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه ها بوده است.

* درصد جذب آب حجمی و سرعت عبور موج از نمونه ها

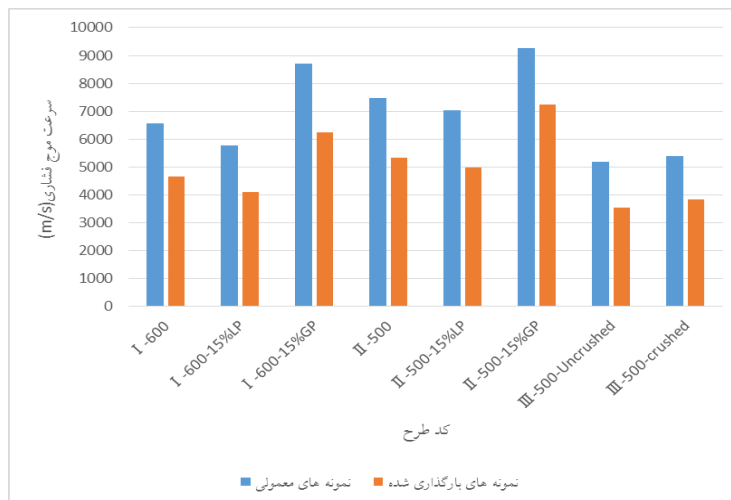
نتایج آزمایش جذب آب حجمی نمونه های سالم و نمونه های بارگذاری شده در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود، با جایگزینی پودر سنگ آهک به مخلوط افزایش در درصد جذب آب مشاهده شده است. در حالیکه با افزودن پودر سنگ گرانیات به مخلوط کاهش در درصد جذب آب مشاهده شده است. همچنین با تغییر سنگدانه ها از گردگوشه به شکسته تراوایی و جذب آب کاهش یافته است. با مقایسه نتایج طرح های شاهد I و شاهد II مشاهده می شود که با کاهش حجم خمیر سیمان از ۶۰۰ به ۵۰۰ کیلوگرم و افزایش میزان سنگدانه، جذب آب کاهش یافته است. جذب آب نمونه های بارگذاری شده ($0.5f_c$) نیز بطور میانگین حدود ۳۸ درصد نسبت به نمونه های سالم افزایش یافته است.



شکل ۵: مقدار درصد جذب آب حجمی در نمونه ها

افزایش درصد جذب آب حجمی در نمونه های حاوی پودر سنگ آهک احتمالاً به دلیل افزایش تخلخل ریز ساختار بتن بوده است. این در حالی است که با افزودن پودر سنگ گرانیت به مخلوط، به علت افزایش تراکم و بهبود ریز ساختار، کاهش قابل ملاحظه ای در درصد جذب آب مشاهده می شود. همچنین کاهش تراوایی و جذب آب با تغییر سنگدانه ها از گردگوشه به شکسته به دلیل بهبود پیوستگی سنگدانه های شکسته با خمیرسیمان (افزایش قفل و بست مکانیکی) می باشد. همانگونه که اشاره شد با کاهش حجم خمیر سیمان از ۶۰۰ به ۵۰۰ کیلوگرم و افزایش میزان سنگدانه، جذب آب کاهش یافته است که این کاهش با توجه به کاهش حجم خمیر سیمان و در نتیجه کاهش حجم منافذ داخل خمیر سیمان هیدراته منطقی به نظر می رسد.

مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۶، با کاهش عیار سیمان از ۶۰۰ به ۵۰۰ افزایش در سرعت پالس صوتی نمونه ها مشاهده شده است. همچنین جایگزینی ۱۵ درصد پودر سنگ گرانیت باعث افزایش سرعت پالس در بتن شده است. این در حالی است که با جایگزینی ۱۵ درصد آهک سرعت پالس نمونه ها نسبت به بتن شاهد کاهش پیدا کرده است. تغییر سنگدانه درشت از شکسته به گردگوشه باعث کاهش سرعت پالس در بتن شده است. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده سرعت پالس در نمونه های ترک خورده (پیش بارگذاری شده) بطور متوسط حدود ۳۰ درصد کمتر از نمونه های سالم بوده است.



شکل ۶: نتایج آزمایش آلتراسونیک انجام شده بر روی نمونه ها

افزایش در سرعت پالس صوتی با کاهش عیار سیمان از ۶۰۰ به ۵۰۰ احتمالاً به دلیل افزایش حجم سنگدانه‌ها و بالاتر بودن سرعت عبور موج در سنگدانه‌ها نسبت به خمیر سیمان هیدراته می‌باشد. همچنین افزایش سرعت پالس در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد پودر سنگ گرانیت را می‌توان با متراکم تر شدن ریزساختار بتن مرتبط دانست. این در حالی است که کاهش سرعت پالس صوتی در نمونه‌های حاوی پودر سنگ آهک به تراکم کمتر ساختار بتن مربوط می‌باشد. لازم به ذکر است که نتایج آزمایش سرعت پالس صوتی نیز نظیر آزمایش جذب آب حجمی نمونه‌ها، شاخص دیگری در تأیید افزایش تخلخل و کاهش چگالی در نمونه‌های بتنی حاوی سنگ آهک نسبت به نمونه‌های ساخته شده با پودر سنگ گرانیت می‌باشد. کاهش سرعت پالس در نمونه‌های ترک خورده (پیش بارگذاری شده) نیز مرتبط با افزایش زمان عبور موج به دلیل بازتاب و شکست این امواج از روی سطوح ترک‌های داخلی است.

*نتایج مربوط به مقاومت پیوستگی و شدت خوردگی نمونه‌ها

در این بخش نتایج مربوط به شدت خوردگی و نتایج مقاومت پیوستگی نمونه‌های ساخته شده تحت تاثیر عوامل و شرایط مختلف ارائه شده است. در جدول شماره ۲ درصد‌های خوردگی میلگردها مربوط به نمونه‌های با و بدون پیش بارگذاری نمایش داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از خوردگی تسریع شده، نمونه‌های دارای ۱۵ درصد پودر سنگ گرانیت کمترین میزان خوردگی را دارند بطوری که کاهش وزن میلگرد نمونه‌های دارای پودر سنگ گرانیت در شرایط خوردگی تسریع شده حدود ۶۷ درصد کمتر از بتن شاهد است. این در حالی است که نمونه‌های دارای ۱۵ درصد آهک بیشترین مقدار خوردگی را دارند. با کاهش حجم خمیر سیمان و کاهش عیار سیمان از ۶۰۰ به ۵۰۰، به علت کاهش نفوذپذیری بتن، میزان نفوذ یون کلر کاهش یافته و درصد خوردگی کمتر شده است. با جایگزینی شن شکسته به جای شن گردگوشه به دلیل پیوستگی بیشتر خمیر سیمان و سنگدانه میزان نفوذ یون کلر کاهش محدودی یافته است. در نمونه‌های بارگذاری شده خوردگی بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون پیش بارگذاری مشاهده شده است.

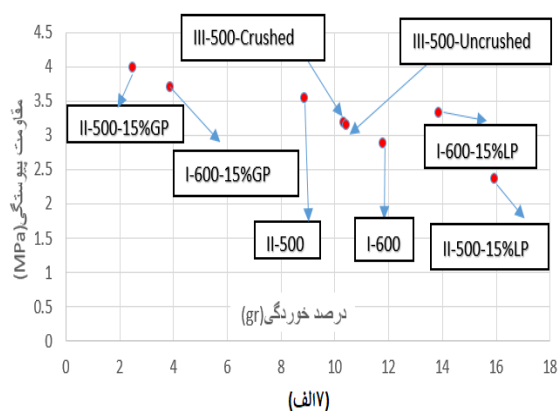
جدول ۲: درصد خوردگی میلگردها در شرایط خوردگی تسریع شده

| III-500- Crushed | III-500- Uncrushed | II-500- 15%LP | II-500- 15%GP | II-500 | I-600- 15%LP | I-600- 15%GP | I-600 | طرح‌های مخلوط |
|---------------------|-----------------------|------------------|------------------|--------|-----------------|-----------------|-------|-------------------|
| 10.3 | 10.4 | 15.9 | 2.5 | 8.9 | 13.9 | 3.9 | 11.8 | با پیش بارگذاری |
| 6.5 | 9.0 | 7.3 | 0.6 | 3.4 | 5.3 | 1.3 | 4.9 | بدون پیش بارگذاری |

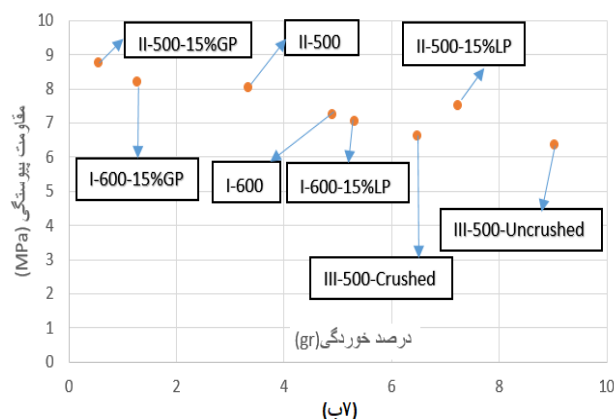
همانگونه که اشاره شد در نمونه‌ها حاوی پودر سنگ بیشترین مقدار خوردگی مشاهده شده است. در این نمونه‌ها به دلیل وجود تخلخل بیشتر، سرعت نفوذ یون کلر افزایش یافته است و درصد خوردگی این نمونه‌ها ۳۰ درصد نسبت به بتن شاهد بیشتر شده است. افزایش شدت خوردگی در نمونه‌های پیش بارگذاری شده، با توجه به نتایج آزمایش‌های جذب حجمی و آلتراسونیک در نمونه‌های ترک خورده که به ترتیب بطور میانگین ۳۸ درصد افزایش و ۳۰ درصد کاهش (بعنوان شاخصی از حجم ترک خوردگی و در نتیجه افزایش نفوذ پذیری) داشته‌اند کاملاً قابل پیش بینی بوده است.

در تصویر ۷ (الف و ب) تغییرات مقاومت پیوستگی با درصد خوردگی در طرح‌های مخلوط مورد مطالعه در این پژوهش در نمونه‌های با و بدون پیش بارگذاری ارائه شده است. همانگونه که از این تصویر مشخص است با افزایش شدت خوردگی مقاومت پیوستگی بین میلگردهای فولادی و بتن بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. همچنین مقاومت پیوستگی در نمونه‌های پیش بارگذاری شده (الف) بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر از نمونه‌های بدون پیش بارگذاری می‌باشد (ب).

مطابق شکل ۷ و در نمونه های تحت اثر خوردگی تسریع شده، در هر دو حالت با و بدون پیش بارگذاری مقاومت پیوستگی نمونه های حاوی پودر سنگ گرانیت بیشتر از نمونه های ساخته شده با پودر سنگ آهک بوده است. همچنین در نمونه های با و بدون پیش بارگذاری با افزایش عیار سیمان در نمونه های ساخته شده با پودر سنگ گرانیت کاهش مقاومت پیوستگی مشاهده می شود. در حالیکه چنین روندی در نمونه های حاوی پودر سنگ آهک وجود نداشته و علیرغم افزایش مقاومت پیوستگی با افزایش عیار سیمان در نمونه های با پیش بارگذاری، در حالت نمونه های بدون پیش بارگذاری با افزایش عیار سیمان، کاهش مقاومت پیوستگی مشاهده شده است. بر اساس نتایج نمایش داده شده در شکل ۷ تغییرات افزایش اندکی در مقدار مقاومت پیوستگی در طرح مخلوط های حاوی سنگ دانه های شکسته نسبت به گرد گوشه به ویژه در شرایط بدون پیش بارگذاری مشاهده شده است.



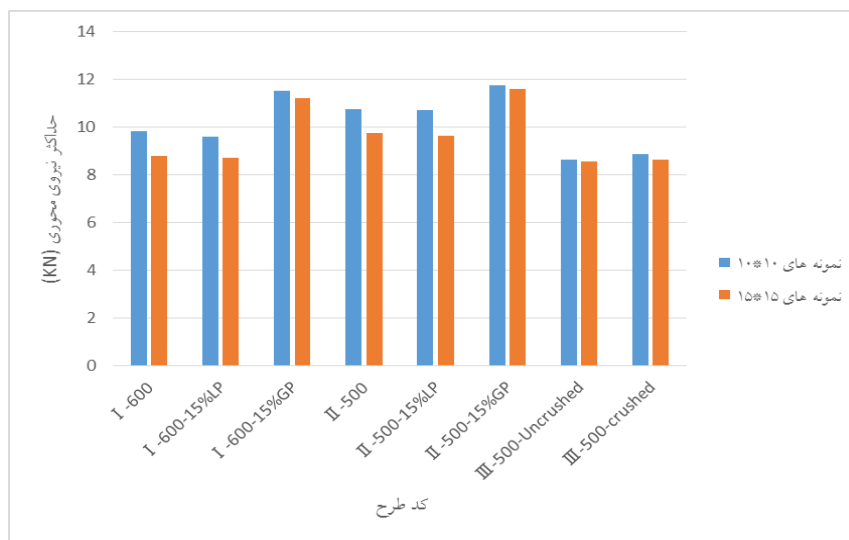
شکل ۴: نمونه های با پیش بارگذاری



شکل ۵: نمونه های بدون پیش بارگذاری

شکل ۷: مقایسه درصد خوردگی و مقاومت پیوستگی نمونه های بارگذاری شده.

در شکل ۸ نتایج آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد برای نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۰ و ۱۵ سانتیمتر نمایش داده شده است. همانگونه که در تصویر ۸ نمایش داده شده است، با کاهش ضخامت پوشش بتن از ۱۵۰ میلی متر به ۱۰۰ میلی متر، به دلیل افزایش درجه همگنی افزایش جزئی در مقاومت پیوستگی برخی نمونه ها مشاهده شده است.

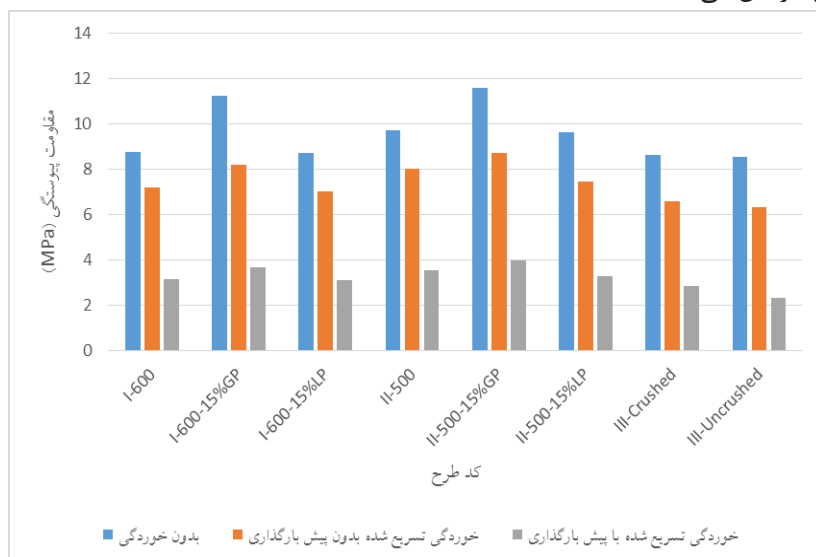


شکل ۸: مقایسه مقاومت پیوستگی نمونه های مکعبی ۱۰ و ۱۵ سانتیمتری بدون خوردگی

همچنین و با توجه به این شکل در نمونه های دارای پودر سنگ گرانیات مقاومت پیوستگی بیشتر و لغزش کمتری نسبت به نمونه های شاهد مشاهده شد که احتمالاً به دلیل مقاومت فشاری بالاتر نمونه های دارای پودر سنگ گرانیات می باشد.

در تصویر ۹ نتایج مربوط به مقاومت پیوستگی نمونه های بدون خوردگی و نمونه های تحت شرایط خوردگی تسریع شده با و بدون پیش بارگذاری نمایش داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده کاهش محسوس و قابل توجهی در مقاومت پیوستگی (بطور متوسط بین ۲۵ تا ۳۰ درصد) در نمونه های دارای خوردگی نسبت به نمونه های سالم مشاهده شده است. همچنین مقاومت پیوستگی نمونه های پیش بارگذاری شده در شرایط خوردگی تسریع شده نسبت به نمونه های بدون بارگذاری کاهش قابل ملاحظه ای داشته است.

با توجه به نتایج آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد در همه طرح ها، با افزایش حجم خمیر سیمان بتن مقاومت پیوستگی کاهش یافته است. همچنین با جایگزینی پودر سنگ آهک به مخلوط، نسبت به بتن شاهد کاهش مقاومت پیوستگی و با جایگزینی پودر سنگ گرانیات به مخلوط، افزایش مقاومت پیوستگی مشاهده شده است. با کاهش حجم خمیر بتن و کاهش عیار سیمان از ۶۰۰ به ۵۰۰، مقاومت پیوستگی افزایش یافته است و با جایگزینی شن شکسته به جای شن گردگوشه به دلیل پیوستگی بیشتر خمیر سیمان و سنگدانه ها (همانگونه که قبلاً اشاره شد) مقاومت پیوستگی افزایش می یابد.

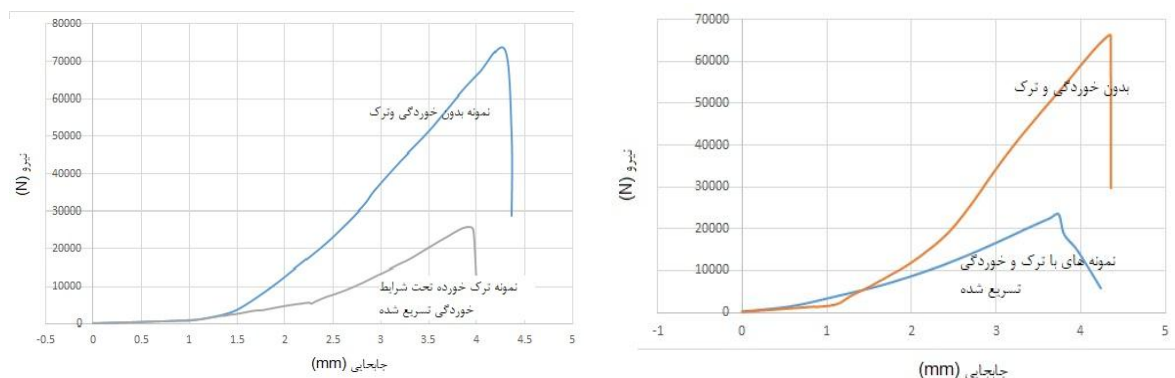


شکل ۹: مقایسه نتایج مقاومت پیوستگی نمونه های سالم و نمونه های خورده شده با و بدون پیش بارگذاری

از جمله دلایل کاهش قابل توجه مقاومت پیوستگی در نمونه های خورده شده، انبساط حجمی ناشی از محصولات خوردگی و در نتیجه کاهش اصطکاک و از بین رفتن لایه محافظ بین میلگرد و بتن می باشد. کاهش قابل توجه مقاومت پیوستگی نمونه های پیش بارگذاری شده در شرایط خوردگی تسریع شده نسبت به نمونه های بدون بارگذاری، علاوه بر کاهش مقاومت فشاری بتن بدلیل گسترش ترک های ناحیه انتقالی به داخل خمیر سیمان هیدراته، می تواند ناشی از افزایش نفوذ یون کلر به دلیل افزایش نفوذ پذیری در حجم بتن و از بین رفتن آج های میلگرد و در نهایت از بین رفتن بیشتر پیوستگی میلگرد و بتن باشد.

همچنین، کاهش مقاومت پیوستگی در نمونه های حاوی پودر سنگ آهک نسبت به بتن شاهد، به علت افزایش نفوذ آب و یون کلر می باشد. در حالیکه در نمونه های ساخته شده با پودر سنگ گرانیات افزایش مقاومت پیوستگی به علت پرکنندگی پودر سنگ گرانیات و افزایش تراکم ذرات با کاهش نفوذ آب و یون کلر مرتبط است.

در شکل ۱۰ منحنی های نیرو-تغییر مکان برای طرح های I-500 و I-600 در حالت های بدون خوردگی، تحت شرایط خوردگی و همینطور تحت شرایط خوردگی با پیش بارگذاری ارائه شده است. همانگونه که از شکل ۱۰ الف و ب مشاهده می شود با اعمال ترک خوردگی و تحت شرایط خوردگی تسریع شده، مقدار مقاومت پیوستگی بین فولاد و بتن بشدت کاهش یافته است.



۱۰الف) نمودار نیرو-تغییر مکان طرح I-500

۱۰ب) نمودار نیرو-تغییر مکان طرح I-600

شکل ۱۰: منحنی های نیرو-تغییر مکان در نمونه های با پیش ترک تحت شرایط خوردگی تسریع شده

با توجه به نتایج آزمایش های جذب حجمی و التراسونیک که بر طبق آن بطور متوسط ۳۰ درصد افزایش نفوذ پذیری در نمونه ها مشاهده شده، افت شدید در مقاومت پیوستگی کاملا قابل پیش بینی بوده است. لازم بذکر است که در شرایط عملی با توجه به وجود ترک های سازه ای و غیر سازه ای در اعضای بتنی سازه های بتن مسلح، در صورت وجود عوامل آسیب رسان نظیر تهاجم یون کلر افست و آسیب دیدگی شدیدتری در مقاومت پیوستگی نسبت به نتایج حاصل از نمونه های استاندارد آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد پیش بینی می باشد.

۴- قدردانی

بدین وسیله از گروه عمران دانشگاه زنجان و آزمایشگاه بتن پژوهشگاه استاندارد که امکانات آزمایشگاهی خود را در اختیار نویسندگان این تحقیق قرار داده اند، صمیمانه تقدیر و تشکر می گردد.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش، با توجه به اهمیت مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگردهای مسلح کننده در تامین ظرفیت باربری سازه های بتن مسلح، تغییرات مقدار مقاومت پیوستگی میلگردهای فولادی با بتن خودتراکم تحت شرایط خوردگی تسریع شده و پیش بارگذاری بررسی شد. براساس نتایج آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد در همه طرح ها، با افزایش حجم خمیر سیمان هیدراته در بتن و کاهش حجم سنگدانه، مقاومت پیوستگی کاهش یافته است. حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد کاهش مقاومت پیوستگی در نمونه های دارای خوردگی مشاهده شده که به دلیل کاهش اصطکاک و از بین رفتن لایه محافظ، از بین رفتن آج های روی سطح میلگردها و کاهش مشخصات مکانیکی بتن بدلیل انبساط محصولات خوردگی می باشد. همچنین، مقاومت پیوستگی نمونه های پیش بارگذاری شده کاهش قابل ملاحظه ای نسبت به نمونه های بدون اعمال بار داشته است که دلیل آن افزایش نفوذ یون کلر به دلیل افزایش حجم و مقدار ترک ها و در نتیجه افزایش شدت خوردگی و در نهایت از بین رفتن پیوستگی میلگرد و بتن می باشد.

با توجه به نتایج بدست آمده، مقاومت پیوستگی تمامی نمونه های دارای پودر سنگ آهک احتمالا بدلیل افزایش میزان تراوایی (با توجه به کاهش سرعت عبور امواج و افزایش جذب آب حجمی)، کمتر از بتن شاهد است ولی مقاومت پیوستگی نمونه های دارای پودر سنگ گرانیت به دلیل بهبود ریزساختار و متراکم تر شدن از بتن شاهد بیشتر بوده است.

- [1] Sathish R., "Study on Self Compacting Concrete – A Review Dinesh A", *International Journal of Engineering and Technical Research*, February, Vol.5(2), pp.384-387, (2016).
- [2] Dinesh.A, Harini.S, Jasmine Jeba.P, Jincy.J, Shagufta J., "Experimental Study on Self Compacting Concrete", *International Journal of Engineering Sciences & Resarch Technology*, March, , Vol. 6 (3), pp.42-50, (2017).
- [3] Peter J. M. Bartos, "Workability of special concrete mixes, *Materials and Structures*", January, Vol. 26(1), pp. 50–52, (1993).
- [۴] Wallevik, O.H., "Self compacting concrete - a rheological approach in International workshop on self compacting concrete", *Japan society of Civil Engineers tokyo*, pp. 136-159, (1999).
- [5] Esfahani, M.R, and kianoush, M.R, "Development/ Splice length of reinforcing bars", *ACI structural Journal*, Vol. 102(1), pp. 22-30, (2005).
- [6] Ferguson, P.M, Turpin, R.D, and Thompson, J.N, "Minimum bar spacing as a function of bond and shear strength", *ACI, structural Journal*, Vol. 50(6), pp.869-887, (1954).
- [7] American concrete institute-committee 440, "Guide for the Design and construction of concrete reinforced with FRP rebars", *ACI 440. IR- 03, ACI, Farmington Hills, MI, USA*, (2003).
- [8] Hossain, K.M.A, and Lachemi, M.2008, *Bond behavior of self-consolidating concrete with with mineral and chemical admixtures*", *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp 608-616, (2009).
- [9] Eliene, P.C, Efigênia, G.F, José, C.C, Conrado, S.R, and Nilton S.M., "Experimental Investigation of Steel-Concrete Bond for Thin Reinforcing Bars", *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol.14, pp. 1932-1951, (2017).
- [10] Esfahani, M.R. and Rangan, B.V, "Bond between normal strength and high- strength concrete and reinforcing bars in splices in beams", *ACI structural Journal*, Vol. 95(3), pp. 272-280, (1998).
- [11] Smith.J.L, Virmani.Y.P, "Materials and methods for corrosion control of reinforced and prestressed concrete structures in new construction", *US Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. 00-081*, (2000).
- [12] Ghandehari M., Zulli M. & Shah S. P., "Influence of corrosion on bond degradation in reinforced concrete", *Fourteenth Engineering Mechanics Conference, Austin, Texas, USA, Austin: ASCE*, (1991).
- [13] Yalciner, H & Eren, O., "An experimental study on the bond strength between reinforcement ars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level", *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, pp. 643–655, (2012).
- [14] S.J. Williamson & L.A. Clark, "Pressure required to cause cover cracking of concrete due to reinforcement corrosion", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 2(6), pp.455-467, (20005).
- [15] S. Morinaga, "Remaining life of reinforced concrete structures after corrosion cracking", *Durability of Building Materials and components*, Vol. 71, pp. 127-136, (1996).
- [16] Tondolo, F., "Bond behavior with reinforcement corrosion", *Construction and Building Materials*, Vol. 93, pp. 926-932, (2015).
- [17] Anette, J., Ingemar, L, Karin L., and Kent, G., "Bond of reinforcement in self-compacting steel-fiber-reinforced concrete", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 64(7), pp. 617-630, (2015).
- [18] Pamidi, M. and Ghouse, V., "Bond Characteristics of TMT Bars in Self Compacting Concrete and Normally Vibrated Concrete", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 6, Issue 3, (2017).
- [19] Ayop, S.S, Emhemed, A. N. K , Jamaluddin, N and Sadikin, A., "The influence of main bar corrosion on bond strength in self-compacting concrete", *Materials Science and Engineering*, V.271, pp. 012-017, (2017).