اثرات خوردگی بر رفتار پیوستگی و مقاومت قطعات کششی بتن‌آرمه

محسنعلی شایانفر[۱]، منصور قلعه‌نوی[۲]
۱. استادیار گروه مهندسی سازه، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

چکیده:
اثر خوردگی میلگردهای داخل بتن بر مقاومت کششی سازه‌های بتن‌مسلح از مباحث مهم در بهره‌برداری این نوع سازه‌ها در مناطق با شرایط خورندگی بالا می‌باشد. در این مقاله به بررسی اثرات خوردگی بر رفتار پیوستگی، الگوی ترک، پیش‌بینی فاصله ترک‌ها و مقاومت کششی قطعات بتن‌مسلح پرداخته می‌شود. برای بررسی موارد مذکور یک برنامه آزمایشگاهی شامل تعداد زیادی نمونه استوانه‌ای بتن‌مسلح با پوشش‌های بتنی و درصدهای متفاوت فولاد، تحت تاثیر مراحل مختلف خوردگی تنظیم شده است. نمونه‌ها در داخل یک ظرف محتوی آب و نمک (محلول ۵٪ نمک) قرار داده شده و از دستگاه منبع تغذیه برای تولید خوردگی استفاده شده است. رفتار نمونه‌ها برای هر تراز خوردگی از طریق آزمایش کششی بررسی شده است.
برای هر کدام از نمونه‌ها تغییرات مقاومت کششی کل نمونه برحسب کرنش متوسط نمونه تعیین شده و رفتار عضو در نواحی مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است. فاصله متوسط ترک‌ها و حداکثر تنش پیوستگی بوجود آمده برای هر تراز خوردگی نیز مورد بررسی قرار گرفته و روابطی برای آن‌ها پیشنهاد شده است.
مهمترین متغیرهای بکار رفته در این تحقیق، تراز خوردگی(C_w)، ضخامت بتن محافظ(c)، قطر میلگرد(d)، نسبت فولاد (ρ) و نسبت‌های c/d و d/ρ می‌باشند.

کلید واژه‌ها: قطعه بتن‌آرمه کششی، تراز خوردگی، مقاومت پیوستگی، فاصله متوسط ترک‌ها

CD6-005

دومین کنفرانس بین‌المللی
بتن و توسعه
۱۰-۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۴، تهران، ایران

اثرات خوردگی بر رفتار پیوستگی و مقاومت قطعات کششی بتن‌آرمه

محسنعلی شایانفر[۱]، منصور قلعه‌نوی[۲]
۱. استادیار گروه مهندسی سازه، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

چکیده:

اثر خوردگی میلگردهای داخل بتن بر مقاومت کششی سازه‌های بتن‌مسلح از مباحث مهم در بهره‌برداری این نوع سازه‌ها در مناطق با شرایط خورندگی بالا می‌باشد. در این مقاله به بررسی اثرات خوردگی بر رفتار پیوستگی، الگوی ترک، پیش‌بینی فاصله ترک‌ها و مقاومت کششی قطعات بتن‌مسلح پرداخته می‌شود. برای بررسی موارد مذکور یک برنامه آزمایشگاهی شامل تعداد زیادی نمونه استوانه‌ای بتن‌مسلح با پوشش‌های بتنی و درصدهای متفاوت فولاد، تحت تاثیر مراحل مختلف خوردگی تنظیم شده است. نمونه‌ها در داخل یک ظرف محتوی آب و نمک (محلول ۵٪ نمک) قرار داده شده و از دستگاه منبع تغذیه برای تولید خوردگی استفاده شده است. رفتار نمونه‌ها برای هر تراز خوردگی از طریق آزمایش کششی بررسی شده است.

برای هر کدام از نمونه‌ها تغییرات مقاومت کششی کل نمونه برحسب کرنش متوسط نمونه تعیین شده و رفتار عضو در نواحی مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است. فاصله متوسط ترک‌ها و حداکثر تنش پیوستگی بوجود آمده برای هر تراز خوردگی نیز مورد بررسی قرار گرفته و روابطی برای آن‌ها پیشنهاد شده است.

مهمترین متغیرهای بکار رفته در این تحقیق، تراز خوردگی(C_w)، ضخامت بتن محافظ(c)، قطر میلگرد(d)، نسبت فولاد (ρ) و نسبت‌های c/d و d/ρ می‌باشند.

کلید واژه‌ها: قطعه بتن‌آرمه کششی، تراز خوردگی، مقاومت پیوستگی، فاصله متوسط ترک‌ها

مقدمه

از مباحث جدی مطرح در بهره‌برداری از سازه‌های بتن مسلح در مناطق ساحلی کشور و بسیاری از مناطق دیگر جهان، تاثیر شدید شرایط محیطی این مناطق بر خوردگی میلگردهای داخل بتن و در نتیجه انهدام زودرس و تدریجی آن‌ها می‌باشد. خوردگی شدید و خرابی ناشی از آن در تعداد بسیار زیادی از سازه‌های بتن مسلح ساخته شده در مناطق با شرایط خورندگی بالا، تنهاچند سال پس از ساخت آنها مشهود است. تاکنون اکثر پژوهشگران، دلایل خوردگی و همچنین راه‌حل جهت کاهش میزان و شدت خوردگی در شرایط بسیار خورنده مناطق ساحلی، گرم و مرطوب را مورد بررسی قرار داده و کمتر به اثرات سازه‌ای آن پرداخته اند. در این تحقیق در ادامه پژوهش‌های قبلی اثرات خوردگی بر روی رفتار پیوستگی-لغزش بصورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعدادی از کارهای انجام یافته در این زمینه توسط دیگر پژوهشگران بشرح زیر است:

Amleh,Mirza(1999), Amleh(2000), Behzadi Nejad Ahwazi,Amleh,Mirza(2001), Lee, Noguchi,Tomosawa(2002), Al-Sulaimani, Kaleemullah, Basunbal, Rasheeduzzafar (1990) , Auyeung,Balaguru,Chung(2000)

در این تحقیق تعداد قابل توجهی نمونه بتن مسلح با پوشش‌های بتنی و درصدهای متفاوت فولاد تحت تاثیر مراحل مختلف خوردگی قرار گرفته و رفتار نمونه‌ها از طریق انجام آزمایش کششی بررسی می‌شود.

تهیه و آماده کردن نمونه‌ها

در این تحقیق یک برنامه آزمایشگاهی برای بررسی اثرات خوردگی بر رفتار پیوستگی، الگوی ترک‌ها و پیش بینی فاصله ترک‌ها در قطعات کششی بتن‌آرمه تنظیم شده است. مشخصات مقاومتی بتن و میلگردهای بکار رفته در آزمایش به ترتیب در جداول (۱) و (۲) درج شده است. بطور کلی ۷ تیپ نمونه استوانه‌ای بتن مسلح ساخته شد. ۲ تیپ نمونه با اندازه میلگرد ۱۲ و قطرهای بتن ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و ۳ تیپ نمونه با اندازه میلگرد ۱۸ و قطرهای بتن ۶۰،۱۰۰و۱۵۰ میلی‌متر و ۲ تیپ نمونه با اندازه میلگرد ۲۵ و قطرهای بتن ۱۰۰و۱۵۰ میلی‌متر ساخته شدند که مشخصات کلی آن‌ها در جدول (۳) آمده است.

تعداد کل نمونه‌ها ۵۸ عدد بوده که از هر تیپ ۲ نمونه (جمعا ۱۴ عدد) بدون خوردگی به عنوان نمونه‌های کنترلی آزمایش شده و تعداد ۴۴ نمونه باقیمانده تحت تاثیر مراحل مختلف خوردگی قرار گرفته و سپس آزمایش کششی بر روی آن‌ها انجام گرفت.

برای قالب گرفتن نمونه‌ها از لوله‌های پولیکا به طول ۵۰۰ میلی‌متر استفاده شد. بتن ساخته شده در دستگاه میکسر (با رده مقاومتی c۲۶) را بصورت لایه لایه در داخل قالب‌ها ریخته و سپس عمل تراکم بتن توسط میز ویبره انجام گرفت. پس از ۲۴ ساعت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها بمدت ۲۸ روز بصورت مرطوب در درجه حرارت معمولی نگهداری شدند.

برنامه خوردگی تسریع شده

برای آماده کردن نمونه‌ها جهت اعمال خوردگی، ابتدا قسمت‌های نمایان میلگرد و سطح انتهایی بتن را رنگ اپوکسی زده و سپس برای محافظت بیشتر میلگرد در مقابل خوردگی، یک دور نوار تفلون و یک دور نوار برق روی آن پوشانیده شد.

جدول ۱- مشخصات بتن c۲۶

fc(MPa)	E_c(MPa)	ft(MPa)
۲۶	۲۴۴۰۰	۱/۶۲

جدول ۲- مشخصات مکانیکی میلگردها

Es (Mpa)	fy (MPa)	d (mm)
۲۰۵۰۰۰	۵۱۵	۱۲
۲۰۰۰۰۰	۳۵۰	۱۸
۲۰۲۰۰۰	۳۶۹	۲۵

جدول ۳- مشخصات کلی نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح

ردیف	نام نمونه	قطر میلگرد d(mm)	قطر بتن D(mm)	کاور بتن c(mm)	درصد میلگرد ρ	c/d	d/ρ
۱	S12-60	۱۲	۶۰	۲۴	۰/۰۴	۲	۳۰۰
۲	S12-100	۱۲	۱۰۰	۴۴	۰/۰۱۴۴	۳/۶۷	۸۳۳/۳
۳	S18-60	۱۸	۶۰	۲۱	۰/۰۹	۱/۱۶۷	۲۰۰
۴	S18-100	۱۸	۱۰۰	۴۱	۰/۰۳۲۴	۲/۲۷۸	۵۵۵/۶
۵	S18-150	۱۸	۱۵۰	۶۶	۰/۰۱۴۴	۳/۶۷	۱۲۵۰
۶	S25-100	۲۵	۱۰۰	۳۷/۵	۰/۰۶۲۵	۱/۵	۴۰۰
۷	S25-150	۲۵	۱۵۰	۶۲/۵	۰/۰۲۷۸	۲/۵	۹۰۰

نمونه‌ها در داخل یک وان از جنس فایبرگلاس محتوی آب و نمک (محلول ۵٪ نمک)قرار داده شد. از دستگاه منبع تغذیه با خروجی ۲۴ ولت و ۸ آمپر برای تولید خوردگی استفاده شد. سیم مثبت به سر میلگردها (آند) و سیم منفی به تور فلزی (کاتد) که روی سطح بتنی نمونه‌ها پهن شده، اتصال داده شد. (شکل۱) جزئیات مربوطه را نشان می‌دهد. با روشن شدن دستگاه، جریان مستقیم از میان نمونه‌ها عبور کرده و الکترون‌های جدا شده از میله خورده شده، جذب تور فلزی (کاتد)می‌شوند. درصد خوردگی با توجه به مدت زمان اعمال خوردگی و میزان جریان با استفاده از قانون فارادی بدست می‌آید:

$$\Delta m = \frac{55.847 \times t \times I}{2 \times 96487} \quad (1)$$

$$C_w = \frac{\Delta m}{m_i} \times 100 \quad (2)$$

در روابط فوق Δ_m جرم از دست رفته برحسب گرم، t زمان برحسب ثانیه و I میزان جریان خروجی دستگاه بر حسب آمپر می‌باشند. m_i جرم اولیه میلگردهای داخل بتن و C_w درصد خوردگی می‌باشد. البته معمولا از روابط فوق برای تعیین مدت زمان اعمال خوردگی با توجه به درصد خوردگی مورد نظر استفاده می‌شود. مقدار دقیق درصد خوردگی را می‌توان پس از اتمام آزمایشات کششی با بدست آوردن جرم نهایی میلگردها بدست آورد:

شکل ۱- جزئیات اعمال خوردگی

$$C_w = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \qquad (۳)$$

در رابطه فوق m_f جرم نهایی میلگرد پس از تمیزکردن و برس زدن می‌باشد.

آزمایشات کششی نمونه‌های بتن مسلح

بطور کلی ۵۸ نمونه استوانه‌ای بتن مسلح تحت آزمایش کششی قرار گرفت. تعداد ۱۴ نمونه بدون خوردگی به عنوان نمونه‌های کنترلی آزمایش شدند و تعداد۴۴ نمونه پس از اعمال درصدهای مختلف خوردگی تحت آزمایش کششی قرار گرفتند. جزئیات مربوط به آزمایش کششی نمونه‌های بتن مسلح در شکل شماره (۲)نشان داده شده است. برای هر کدام از نمونه‌ها میزان نیروی کششی و تغییرشکل محوری در هر لحظه بر روی دستگاه دیتالاگر ثبت شد. نیروی مربوط به اولین ترک عرضی، دومین ترک عرضی و ... و در آخر نیروی جاری شدن میلگرد یادداشت شد. پس از ورود به ناحیه خمیری تغییر شکل، آزمایش را متوقف کرده و تعداد ترک‌های عرضی، حداقل و حداکثر فاصله ترک‌ها ثبت شد که این مقادیر در جدول (۴) ملاحظه می‌شود. شکل (۳) تعدادی از نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد. در پایان بتن را خرد کرده و وزن میلگرد را پس از تمیز کردن و برس زدن، با دقت زیاد بدست آورده و مقدار دقیق درصد خوردگی (C_w)را با استفاده از رابطه(۳)تعیین کرده که این مقادیر در جدول (۴) درج گردیده است.

بررسی ترازهای مهم خوردگی

هنگامی که نمونه بتن مسلح داخل ظرف محتوی محلول نمک قرار دارد و جریان مستقیم برق توسط منبع تغذیه برقرار می‌شود، تولیدات خوردگی میلگرد باعث انبساط حجمی نمونه بتن مسلح شده و فشار شعاعی ناشی از آن باعث تنش‌های کششی حلقوی می‌شود. حاصل این فرآیند، ترک‌های طولی ظاهر شده روی سطح خارجی نمونه بتنی می‌باشد. ظاهر شدن اولین ترک طولی بعنوان اولین تراز خوردگی تعریف شده و درصد خوردگی مربوط به آن را با پارامتر C_{cr} بیان می‌کنیم. تا این تراز خوردگی، پیوستگی بین بتن و فولاد بطور کامل برقرار می‌باشد. البته در ترازی کمتر از این حد، پیوستگی نسبت به حالت عادی بیشتر شده و در نتیجه تنش پیوستگی حداکثر مقدار خود را پیدا می‌کند. این تراز را با C_o نشان می‌دهیم. آخرین تراز خوردگی را که پس از آزمایش کششی در نمونه هیچ‌گونه ترک عرضی بوجود نمی‌آید، تراز خوردگی نهایی نامیده و با پارامتر C_u بیان میکنیم. در این تراز حداقل پیوستگی بین بتن و فولاد برقرار بوده و در نتیجه تنش پیوستگی حداقل مقدار را

شکل ۲- جزئیات آزمایش کششی

شکل ۳- تعدادی از نمونه‌های آزمایش شده

داشته و به صفر میل می‌کند. با توجه به تعاریف فوق، از تحلیل عددی نتایج تجربی بدست آمده، موارد زیر ملاحظه می‌شود:

۱- برای نمونه‌ها با قطر میلگرد(d) یکسان: هرچه قطر بتن (یا پوشش بتنی c) کوچکتر باشد، درصد خوردگی کمتری باعث بوجود آمدن اولین ترک طولی می‌شود. همچنین با اعمال درصد خوردگی کمتر، مقاومت پیوستگی بین فولاد و بتن از بین می‌رود.

۲- برای نمونه‌ها با قطر بتن یکسان : هرچه قطر میلگرد بزرگتر باشد، با اعمال درصد خوردگی کمتری، اولین ترک طولی بوجود آمده و مقاومت پیوستگی نیز از بین می‌رود(زیرا سطح جانبی میلگرد بیشتر است).

با توجه به ملاحظات فوق، تغییرات ترازهای خوردگی متناسب با نسبت c/d (c=ضخامت بتن محافظ و d=قطر میلگرد) می‌باشد. براساس نتایج بدست آمده و استفاده از روش کمترین مربعات، روابط زیر بدست می‌آیند:

$$C_{cr} = 1.5c/d \qquad (۴)$$

$$C_u = 9c/d \qquad (۵)$$

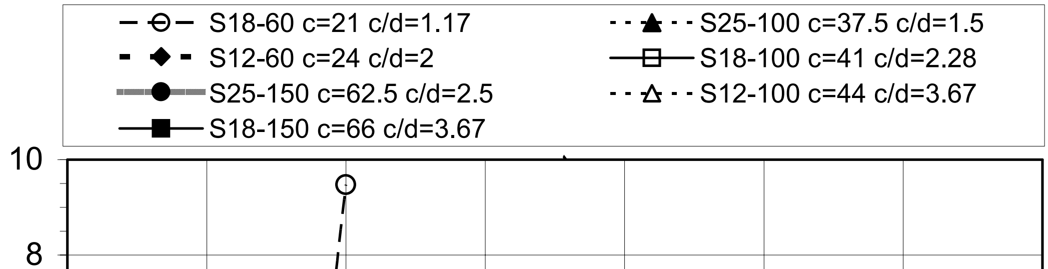
در روابط فوق C_{cr} تراز خوردگی مربوط به اولین ترک طولی بوده و C_u تراز خوردگی نهایی می‌باشد.

بررسی فاصله متوسط ترک‌ها

با معلوم بودن طول نمونه برابر ۵۰۰ میلی‌متر و تعداد ترک‌های عرضی(N_{cr})، فاصله متوسط ترک‌ها(S_m) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S_m = 500/(N_{cr}+1) \qquad (۶)$$

از تحلیل عددی نتایج ملاحظه می‌شود که برای هر نمونه با افزایش درصد خوردگی، تعداد ترک‌های عرضی ناشی از اعمال بار محوری کششی کمتر شده و در نتیجه فاصله متوسط ترک‌ها بیشتر می‌شود. برای هر تیپ نمونه، در یک درصد خوردگی خاصی هیچ گونه ترک عرضی بوجود نیامده که در این تحقیق آن را درصد خوردگی نهایی (C_u)می‌نامیم.



شکل۴- تغییرات Sm/Smo نسبت به Cw برای تمام نمونه ها

در شکل(۴) تغییرات S_m / S_{mo} نسبت به درصد خوردگی(C_w)برای تمام نمونه ها ترسیم شده است. S_m فاصله متوسط ترک برای نمونه با درصد خوردگی C_w بوده و S_{mo} فاصله متوسط ترک برای نمونه بدون اعمال خوردگی می‌باشد. با ملاحظه شکل‌ها می‌توان موارد زیر را عنوان نمود:

۱- برای نمونه‌ها با قطر میلگرد یکسان: هرچه قطر بتن (یا پوشش بتنی c)کمتر باشد، تغییرات نسبت فاصله ترک(S_m / S_{mo}) زیاد بوده و برای پوشش‌های بتنی زیاد تغییرات مذکور کم می‌باشد.

۲- برای نمونه‌ها با قطر بتن یکسان: به ازای یک درصد خوردگی مشخص، هرچه قطر میلگرد بزرگتر باشد، نسبت S_m / S_{mo} نیز بزرگتر می‌باشد.

با استفاده از ملاحظات فوق می‌توان نسبت فاصله ترک S_m / S_{mo} را تابعی از نسبت‌های C_w / C_u و c / d در نظرگرفت. در این تحقیق براساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده و استفاده از روش کمترین مربعات، رابطه زیر برای تعیین فاصله متوسط ترک‌ها پیشنهاد می‌شود:

$$\frac{S_m}{S_{mo}} = 1.533 - 0.3\frac{c}{d} + 4.2\left(\frac{C_w}{C_u}\right)^2 \qquad S_m = 2.35c \qquad (۷)$$

اثر خوردگی بر مقاومت پیوستگی

با استفاده از رابطه تعادل در طول نصف فاصله ترک $a = S_m / 2$ برای نمونه بتن مسلح تحت اثر نیروی کششی، مقدار متوسط تنش پیوستگی بصورت زیر بدست می‌آید:

$$f_{bu} = f_t A_c / \pi da$$ (۸)

بنابراین تنش پیوستگی متناسب با معکوس رابطه فاصله ترک می‌باشد:

$$f_{bu} \propto \frac{1}{S_m}$$ (۹)

لذا برای یک نمونه می‌توان رابطه زیر را برای دو حالت با خوردگی و بدون خوردگی برقرار ساخت:

$$f_{bu} / f_{buo} = S_{mo} / S_m$$ (۱۰)

در رابطه فوق f_{buo} و S_{mo} به ترتیب تنش پیوستگی و فاصله ترک در حالت بدون خوردگی می‌باشند. با معلوم بودن فاصله متوسط ترک‌ها(S_m) برای هر نمونه مقدار تنش پیوستگی(f_{bu}) برای درصدهای مختلف خوردگی محاسبه شده است. در شکل (۵) نمودار f_{bu} / f_{buo} برحسب C_w برای تمام نمونه‌ها نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در ابتدا مقاومت پیوستگی اندکی افزایش یافته و پس از تراز خوردگی مربوط به اولین ترک طولی(C_{cr})، با افزایش درصد خوردگی مقدار تنش پیوستگی کاهش می‌یابد. نسبت f_{bu} / f_{buo} را نیز می‌توان همانند نسبت S_m / S_{mo} بصورت تابعی از نسبت‌های C_w / C_u و c / d در نظر گرفت. با استفاده از روش کمترین مربعات، رابطه زیر برای تعیین مقاومت پیوستگی پیشنهاد می‌شود:

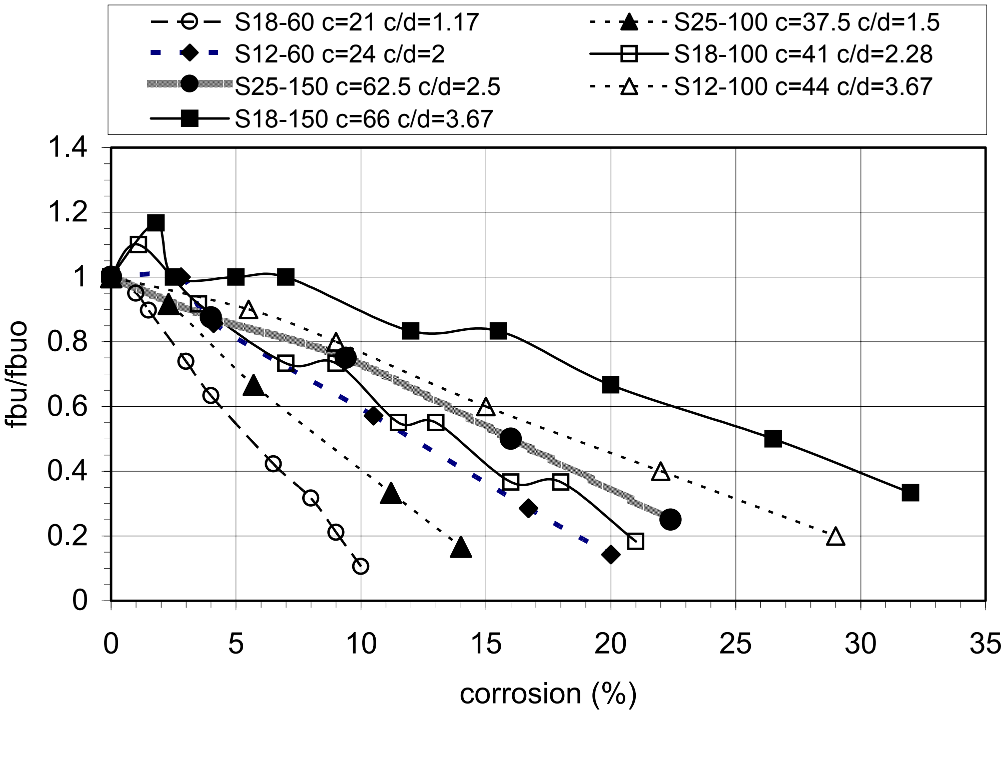
$$\frac{f_{bu}}{f_{buo}} = 0.932 + 0.044\frac{c}{d} - 0.823\frac{C_w}{C_u}$$ (۱۱)

در رابطه فوق f_{buo} تنش پیوستگی در حالت بدون خوردگی می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_{bu} = 0.4\left(\frac{c}{d}\right)\sqrt{f_c}$$ (۱۲)

اثر خوردگی بر سطح مقطع فولاد

در آزمایش کششی نمونه‌ها، نیروی اعمالی تا مرحله جاری شدن میلگرد ادامه یافته و نیروی جاری‌شدن هر نمونه(T_y) ثبت شده است. با فرض اینکه تنش حد تسلیم فولاد برای هر تیپ نمونه یکسان بوده و در حین عملیات خوردگی تغییری نکرده باشد، رابطه زیر را می‌توان بین نیرو و سطح مقطع در حالت بدون خوردگی و با خوردگی برقرار کرد:



شکل۵- تغییرات fbu/fbuo نسبت به Cw برای تمام نمونه ها

$$T_{yo} / A_{so} = T_y / A_s \qquad (۱۳)$$

در این رابطه T_{yo} و A_{so} به ترتیب نیروی جاری شدن و سطح مقطع فولاد در حالت بدون خوردگی و T_y و A_s به ترتیب نیروی جاری شدن و سطح مقطع معادل فولاد در حالت با خوردگی می‌باشند.

میزان کاهش سطح مقطع برای هر درصد خوردگی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر بدست آورد:

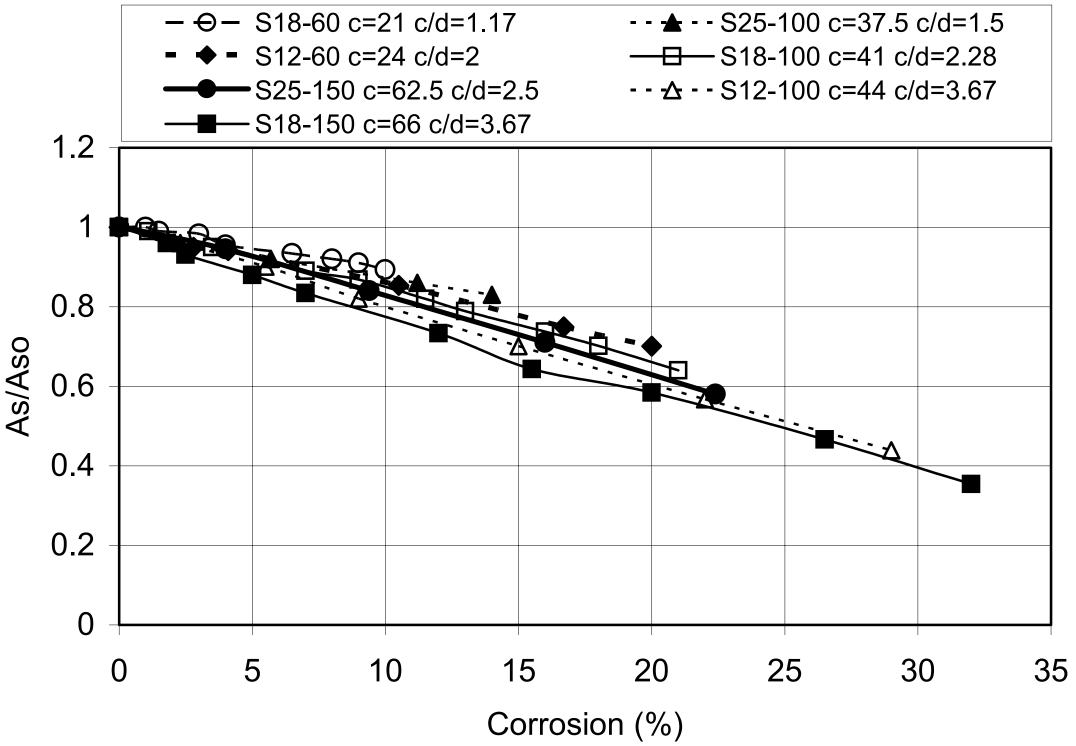
$$A_s loss = \frac{A_{so} - A_s}{A_{so}} \times 100 \qquad (۱۴)$$

نمودار تغییرات درصد کاهش سطح مقطع نسبت به درصد خوردگی برای تمام نمونه‌ها در شکل(۶)نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود درصد کاهش سطح مقطع نسبت به درصد خوردگی، عدد بزرگتری را نشان می‌دهدکه علت آن متمرکز شدن خوردگی در بعضی نقاط در طول میلگرد خورده شده می‌باشد. این تمرکز خوردگی به‌دلیل ناهمگن بودن بتن احاطه کننده فولاد که مسیر جریان خوردگی می‌باشدو همچنین به خاطر احتمال یکنواخت نبودن محلول نمک بوجود می‌آید. این پدیده توسط پژوهشگران دیگر نظیر Behzadi ,Amleh(۱۹۹۹) نیز گزارش شده است. با توجه به نتایج بدست آمده و استفاده از روش کمترین مربعات، رابطه زیر برای تعیین سطح مقطع معادل فولاد پیشنهاد می‌شود:

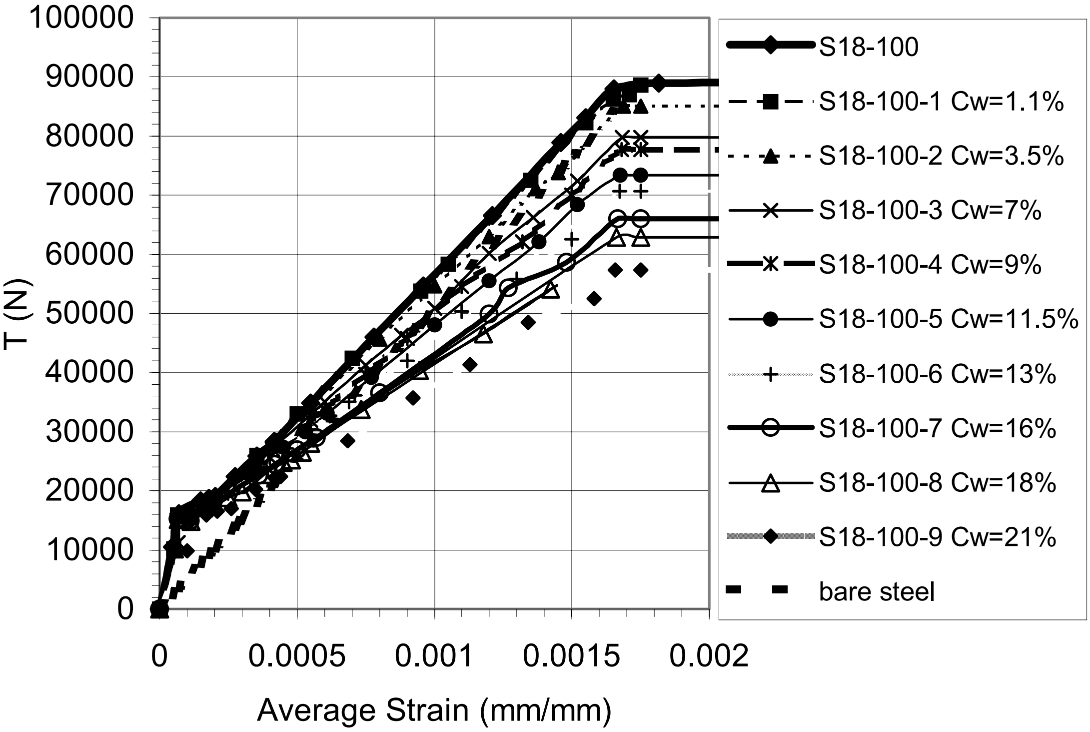
$$\frac{A_s}{A_{so}} = 1.2 - 0.08\frac{c}{d} - 0.35\frac{C_w}{C_u} \qquad (۱۵)$$

منحنی‌های مقاومت کل نمونه بتن مسلح

تمام نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح پس از اعمال مراحل مختلف خوردگی تحت آزمایش کششی قرار گرفتند. جزئیات آزمایش در شکل (۲) ملاحظه می‌شود.



شکل۶- تغییرات As/Aso نسبت به Cw برای تمام نمونه ها



شکل۷- اثر خوردگی بر روی منحنی مقاومت کل برای نمونه S18-100

منحنی تغییرات نیروی کششی کل نمونه برحسب کرنش متوسط میلگرد در شکل‌های(۶-۹)الی(۶-۱۲) نشان داده شده است. بررسی منحنی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش درصد خوردگی، شیب نمودار مقاومت و همچنین نیروی حدتسلیم نمونه کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به کاهش تنش‌پیوستگی و سطح مقطع فولاد برای درصدهای خوردگی بالاتر نسبت داد. کاهش تنش پیوستگی باعث می‌شود نیروی سهم بتن کمتر شده و در نتیجه سختی کل نمونه کاهش یافته که خود باعث کاهش شیب نمودار مقاومت می‌شود. کاهش سطح مقطع فولاد برای درصدهای خوردگی بالاتر باعث می‌شود تا نمونه تحت تاثیر نیروی کمتری به حدجاری شدن برسد.

بررسی نتایج تجربی نشان می‌دهد که در ناحیه ترک‌های متوالی، نمونه‌های با درصد خوردگی بالاتر تعداد ترک کمتری داشته ولی تغییر شکل مربوط به این ناحیه بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر تغییر شکل‌های بیشتری لازم است تا ترک‌های عرضی بوجود آیند. کاهش تنش‌پیوستگی در نمونه‌های با درصد خوردگی بالا باعث می‌شود تا در طول بیشتری از نمونه و همچنین در تغییر شکل بیشتری، نیروی فولاد به بتن منتقل شود.

بررسی شکل(۸) نشان می‌دهد که برای نمونه‌های با پوشش بتنی متفاوت تحت تاثیر درصد خوردگی یکسان، با بزرگ شدن پوشش بتنی، مقاومت کل نمونه نیز بزرگتر شده و فقط در حالت نهایی این مقدار کمتر می‌شود. کاهش مقاومت در لحظه جاری شدن بدلیل خوردگی موضعی بیشتر در نمونه‌های با پوشش بتنی بزرگتر می‌باشد، چرا که هرچه قطر بتن بزرگتر باشد، احتمال عدم یکنواختی بتن و در نتیجه نفوذ جریان خوردگی از بعضی نقاط بیشتر می‌شود.

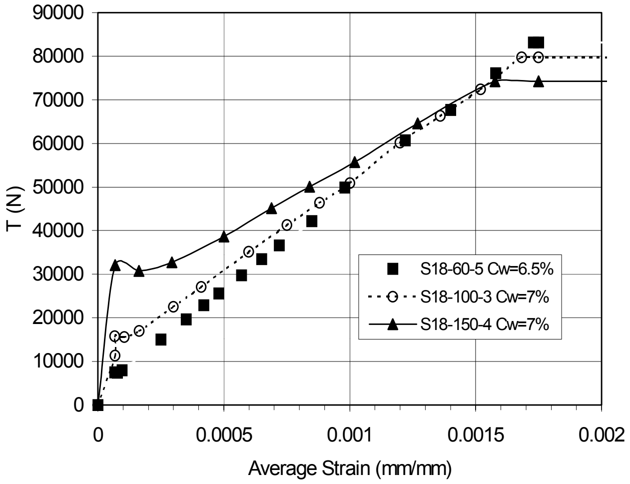
در شکل (۹)مقایسه نتایج بدست آمده برای نمونه‌های با قطر بتن یکسان تحت تاثیر درصد خوردگی یکسان نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نمونه‌هایی که دارای قطر میلگرد بزرگتری (درصد فولاد بیشتر) می‌باشند، مقاومت کلی بیشتری از خود نشان می‌دهند. بررسی ناحیه ترک‌های متوالی نشان می‌دهد که برای نمونه با درصد فولاد کمتر، طول این ناحیه بیشتر بوده که این امر بدلیل شکل‌پذیری بیشتر این نمونه‌ها می‌باشد.

بررسی منحنی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش درصد خوردگی مقاومت کششی سهم بتن کاهش می‌یابد. برای درصد خوردگی‌های بالا، مقاومت کششی سهم بتن به مقاومت کششی بتن ساده (بتن غیرمسلح) نزدیک می‌شود. همچنین ملاحظه

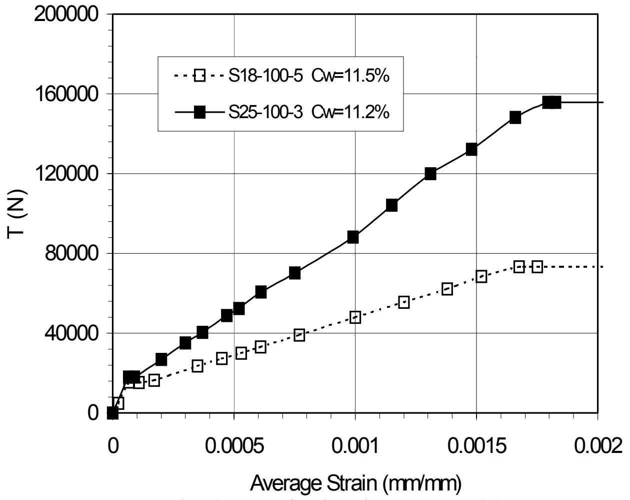
می‌شود که برای هر حالت، مقدار مقاومت کششی سهم بتن از یک حدکرنشی به بعد صفر می‌باشد. در صورتی که این حد کرنش را ε_{cw} نامگذاری کنیم، با استفاده از نتایج تجربی بدست آمده و روش جذر مجموع مربعات رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\varepsilon_{cw}}{\varepsilon_y} = 0.907 - 0.757\frac{C_w}{C_u} + 0.0087\frac{c}{d} \qquad (۱۶)$$

از رابطه فوق می‌توان در مدل سختی‌کششی استفاده نمود.



شکل۸- نمونه‌های با پوشش بتنی متفاوت
تحت تاثیر درصدخوردگی یکسان



شکل۹- نمونه‌های با قطر بتن یکسان
تحت تاثیر درصد خوردگی یکسان

خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای بررسی اثرات خوردگی بر رفتار پیوستگی، یک برنامه آزمایشگاهی شامل تعداد زیادی نمونه بتن‌مسلح با پوشش‌های بتنی و درصدهای متفاوت فولاد، تحت تاثیر مراحل مختلف خوردگی تنظیم شد. نمونه‌ها در داخل یک ظرف محتوی آب و نمک (محلول ۵٪ نمک) قرار داده شده و از دستگاه منبع تغذیه برای تولید خوردگی استفاده گردید. روابطی برای اولین تراز خوردگی (ظاهر شدن اولین ترک طولی) و آخرین تراز خوردگی (حداقل پیوستگی بین بتن و فولاد) ارائه شد. رفتار نمونه‌ها برای هر تراز خوردگی از طریق آزمایش کششی بررسی شده و براساس نتایج آزمایشگاهی، روابطی برای تعیین فاصله متوسط ترک‌ها، مقاومت پیوستگی و سطح مقطع معادل فولاد پیشنهاد شد.

قدردانی: از حمایت مالی، تجهیزاتی و پرسنلی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن به ویژه بخش‌های بتن و سازه در انجام قسمت آزمایشگاهی این پروژه صمیمانه سپاسگزاری و قدردانی می‌گردد.

مرجع‌ها

1. Amleh,L., Mirza, M.S. “Corrosion Influence on Bond Between Steel and Concrete”, ACI Structural Journal, 1999, V.96, No.3, May-June, pp. 415-423.

2. Amleh,L. “Bond Deterioration of Reinforcing Steel in Concrete due to Corrosion”, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University Montreal, Canada, 2000.
3. Behzadi,Nejad,B. ,Amleh L., Mirza, M.S. “Effect of Corrosion on Bond Strength of Reinforcing Bars in Concrete”, Ist International Conference on Concete & Development. 2001,
4. Lee,H. “Evaluation of the Bond Properties between Concrete and Reinforcement as Afunction of the Degree of Reinforcement Corrosion”, Cement and Concrete Researeh, 2002, V.32, No.8, pp.1313-1318.
5. Almusullam, Abdullah. “Effect of degree of Corrosion on the Properties of Reinforcing Steel Bars”, Construction and Building Materials, 2001, V.15, No.8, 361-368.