

## یادداشت تحقیقاتی

# ارزیابی احتمالاتی تاثیر پارامترهای خوردگی از نوع یکنواخت بر پیوستگی بین بتن و میلگرد

سید عباس حسینی<sup>۱\*</sup>

۱- استادیار، دانشکده صنعت و معدن چرام، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران.

a.hosseini@yu.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۸/۱۲/۰۳

تاریخ دریافت ۹۸/۱۱/۰۸

## چکیده

خوردگی میلگردها در سازه‌های بتن آرمه دارای آثار مخربی است که مجموع این آثار موجب تقلیل مقاومت و کاهش دوام این نوع سازه‌ها می‌شود. یکی از مهمترین آثار خوردگی میلگرد، کاهش پیوستگی بین بتن و میلگرد است که در شرایط بحرانی موجب کاهش شدید مقاومت بتن و همچنین تغییر مود شکست سازه بتن مسلح می‌شود. به دلیل غیرهمگن بودن و همچنین متفاوت بودن خواص بتن‌های مختلف، مدل‌های آزمایشگاهی و تحلیلی ارائه شده برای تخمین میزان چسبندگی بتن و میلگرد برای مقادیر مختلف خوردگی دارای تفاوت‌های زیادی هستند. در این مقاله با گردآوری تعداد زیادی از نتایج آزمایشگاهی موجود، چند مدل جدید با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای موثر ارائه شده است. برای بدست آوردن این مدل‌ها نتایج آزمایشگاهی بر اساس قطر میلگرد دسته‌بندی شده‌اند و برای هر قطر میلگرد یک رابطه ارائه شده است. با توجه به اینکه مدل‌های ارائه شده بر مبنای درصد کاهش سطح میلگرد در طی فرآیند خوردگی هستند، در این پژوهش اثر عدم قطعیت در شدت جریان خوردگی و قطر میلگرد به صورت کمی را بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، کاهش پیوستگی در خلال دوره گسترش خوردگی به صورت تابع نمایی است و اثر عدم قطعیت چگالی جریان خوردگی بیشتر از عدم قطعیت قطر میلگرد است. اثر عدم قطعیت‌ها در ضریب تغییرات نتایج بیشتر از اثر آن بر مقدار میانگین نتایج است. مقدار کاهش برای میلگردهای به قطر کوچکتر، کمتر از میلگردهای بزرگتر بدست آمده است به گونه‌ای که برای میلگردهای به قطر ۱۰ و ۱۶ میلی‌متر در خوردگی ۱۵ درصد، نسبت پیوستگی به پیوستگی اولیه به ترتیب برابر با ۰/۴۶ و ۰/۲۸ بوده است.

**کلیدواژه‌ها:** خوردگی میلگرد، کاهش پیوستگی، مدل احتمالاتی، نفوذ یون کلر، دوام بتن.

## ۱- مقدمه

اثر اختلاف تنش بین بتن و میلگرد) ایجاد می‌شود. سازوکارهای اصلی موثر در انتقال نیروها از میلگرد به بتن، شامل سازوکارهای چسبندگی<sup>۱</sup>، اصطکاک<sup>۲</sup> و پیوستگی مهاری<sup>۳</sup> هستند. در میلگردهای آجدار، پیوستگی مهاری که ناشی از قفل و بست

مقاومت پیوستگی به تنش‌های برشی اطلاق می‌شود که در سطح تماس میلگرد و بتن به منظور برقراری تعادل نیروها (در

3 Anchorage Bond

1 Adhesion  
2 Friction

موقعیت قرارگیری میلگردها گزارش نشد [7]. بر اساس نتایج ارائه شده توسط رودریگز و همکاران، آیین نامه دوام اروپا مقادیر مقاومت پیوستگی برای میلگرد خورده شده را با ضریب اطمینان ۹۵ درصد به صورت رابطه‌ای بر اساس درصد خوردگی ارائه داد [8].

تانگ<sup>۸</sup> به بررسی اثر محل قرارگیری میلگرد در مقاومت پیوستگی پرداخت و از میلگردهای به قطر ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر که دارای پوشش بتنی بین یک تا ۳ برابر قطر میلگردها بودند استفاده کرد [9]. بر اساس نتایج گزارش شده توسط تانگ در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصد خوردگی، کاهش شدید مقاومت پیوستگی به وجود آمده است و نتایج دارای پراکندگی زیاد گزارش شد. کوکیا و همکاران<sup>۹</sup> با ایجاد خوردگی تسریع شده تا ۶ درصد در میلگردهای به قطر ۱۲ میلی‌متر که در مرکز نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر قرار گرفته بود، نشان دادند که یک مقدار جزئی خوردگی که تقریباً بین ۰/۵ تا ۰/۶ درصد قرار دارد موجب افزایش مقاومت پیوستگی بین ۵۰ تا ۶۰ درصد نسبت به پیوستگی اولیه می‌شود و در خوردگی برابر با ۱/۵ درصد مقاومت پیوستگی به حدود ۴۰ درصد مقاومت پیوستگی اولیه می‌رسد [10].

ژو و همکاران<sup>۷</sup> بر اساس نتایج تجربی به این نتیجه رسیدند که مقاومت نهایی پیوستگی تا زمانی که خوردگی موجب کاهش ۴ درصد از وزن میلگرد شود، افزایش پیدا می‌کند و سپس در محدوده ۴ تا ۶ درصد خوردگی کاهش شدیدی در مقدار مقاومت نهایی پیوستگی ایجاد می‌شود [11]. کابرا<sup>۸</sup> بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش بیرون کشیدن میلگرد برای سیمان پرتلند معمولی رابطه‌ای را بر اساس درصد خوردگی میلگرد برای مقاومت پیوستگی نهایی میلگرد خورده شده (T<sub>bu</sub>) ارائه داد [12]. رابطه مشابهی نیز بر مبنای درصد خوردگی توسط لین و ژائو<sup>۹</sup> ارائه شد [13]. استنیش و همکاران<sup>۱۰</sup> بر اساس آزمایش تیر خمشی رابطه‌ای را برای مقاومت پیوستگی ارائه دادند که تاثیر مقاومت فشاری بتن نیز در آن اعمال شده است [14]. چانگ و همکاران<sup>۱۱</sup> بر اساس آزمایش خمشی تیر، ضریبی برای مقاومت

مکانیکی بین بتن و آج‌های میلگرد است مهمترین نقش را در مقاومت پیوستگی دارد. مقاومت فشاری بتن، قطر میلگرد، شکل آج‌ها، ضخامت پوشش بتن، طول گیرایی میلگرد، خاموت‌ها، فاصله بین میلگردها، دما و خوردگی مهمترین عواملی هستند که در مقدار مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد موثر هستند [1]. خوردگی میلگرد در سازه‌های بتن مسلح به عنوان یکی از مهمترین عوامل کاهش مقاومت شناخته می‌شود [2]. خوردگی میلگرد موجب کاهش سطح مقطع میلگرد، کاهش پیوستگی و ایجاد ترک و پوسته شدن بتن می‌شود (شکل ۱) [3]. عوامل مهاجم محیطی می‌توانند به دلیل آثار مخربی که بر ساختار بتن مسلح دارند موجب به مخاطره افتادن مقاومت پیوستگی شوند. خوردگی میلگردها که بیشتر به دلیل کربناته شدن یا نفوذ یون کلر اتفاق می‌افتد از مهمترین دلایل کاهش پیوستگی در طول عمر بهره‌برداری سازه‌های بتنی است [4]. خوردگی باعث تولید موادی می‌شود که دارای حجمی بیشتر از مواد مصرف شده در فرآیند خوردگی هستند؛ این افزایش حجم که متناسب با درجه خوردگی می‌تواند تا ۶/۵ برابر حجم آهن مصرف شده در فرآیند خوردگی برسد، و باعث تغییرات مقاومت پیوستگی و همچنین ظهور ترک‌ها شود [5].

محاسبه رابطه بین شدت خوردگی میلگردها و مقدار مقاومت پیوستگی باقیمانده به منظور ارزیابی مقاومت سازه‌های موجود و همچنین ارائه برنامه‌های تعمیر و نگهداری از اهمیت زیادی برخوردار است. آلسیمانی و همکاران با ایجاد خوردگی القا شده در میلگردها با استفاده از چگالی جریان ۲۰۰۰ میکروآمپر بر سانتیمتر مربع گزارش دادند که چگونگی شکافت نمونه‌ها تحت تاثیر درصد خوردگی قرار دارد و مقدار مقاومت پیوستگی برای میلگردهای با خوردگی تقریباً یکسان دارای پراکندگی زیاد است [6]. رودریگز و همکاران<sup>۴</sup> به بررسی آثار خوردگی میلگرد با قطر ۱۶ میلی‌متر که درون نمونه‌های بتنی به ابعاد ۳۰ سانتی‌متر قرار گرفته بود، پرداختند و گزارش دادند که استفاده از خاموت‌ها به طرز چشمگیری موجب بهبود مقاومت پیوستگی در میلگردهای خورده شده می‌شود و همچنین تفاوت چندانی برای

8 Cabrera

9 Lin &amp; Zhao

10 Stanish et al.

11 Chung et al.

4 Rodriguez et al.

5 Tang

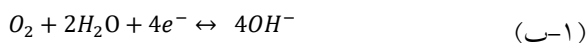
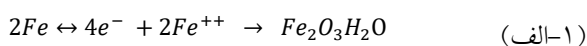
6 Coccia et al.

7 Zhu et al.

## ۲- خوردگی میلگرد

محیط بتن دارای خاصیت قلیایی بالایی است (pH=13) که موجب محافظت از میلگرد در برابر خوردگی می‌شود. در صورت کاهش خاصیت قلیایی بتن، در حضور رطوبت و اکسیژن، خوردگی میلگرد آغاز می‌شود. کربناته شدن و نفوذ یون کلر مهمترین دلایل از بین رفتن لایه قلیایی محافظ اطراف میلگرد است.

خوردگی یکنواخت بیشتر به دلیل کربناته شدن بتن اتفاق می‌افتد. کربناسیون بتن به دلیل واکنش دی اکسید کربن جو با پرتلندیت (Ca(OH)<sub>2</sub>) موجود در بتن اتفاق می‌افتد. انجام این واکنش در حضور رطوبت موجب کاهش pH بتن می‌شود. از آنجا که این پدیده دارای جبهه مشخص پیش رونده است با استفاده از معرف‌های بازی یا اسیدی می‌توان عمقی از بتن که کربناته شده است را ارزیابی کرد [18]. با افزایش عمق نفوذ دی اکسید کربن و کاهش قلیائیت بتن، در صورت وجود اکسیژن و آب کافی در اطراف میلگرد، خوردگی میلگرد آغاز می‌شود [19]. با شروع خوردگی میلگرد، همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است قسمتی از میلگرد به صورت آند و بخشی از آن به همراه بتن نقش کاتد را ایفا کرده و فرآیند خوردگی در آند آغاز می‌شود. روابط مربوط به خوردگی در رابطه (۱) آورده شده است [20]:



در بخش آند، خوردگی میلگرد آغاز و به همراه آن از سطح مقطع میلگرد کاسته می‌شود. در صورت متمرکز شدن خوردگی در نقاط مشخص به نتیجه به دست آمده، خوردگی حفره‌ای<sup>۱۵</sup> گفته می‌شود. با گسترش ناحیه آند و یا به هم متصل شدن نقاط خورده شده و توزیع خوردگی در سطح میلگرد، خوردگی یکنواخت ایجاد می‌شود. در شکل (۱) نمونه‌ای از خوردگی یکنواخت نشان داده شده است.

پیوستگی میلگرد خورده شده به مقاومت پیوستگی اولیه بر اساس درصد میلگرد خورده شده ارائه نمودند [1].

بر مبنای نتایج آزمایش‌های انجام گرفته برای بررسی اثر خوردگی میلگرد بر مقدار مقاومت پیوستگی، مدل‌های تجربی زیادی برای برآورد مقاومت پیوستگی در طی دوره گسترش خوردگی ارائه شده است [15]. در بیشتر این مدل‌ها برای پیش بینی مقاومت پیوستگی در خلال دوره خوردگی، اثر همه عوامل تنها از طریق مقدار کاهش سطح مقطع میلگرد در روابط وارد شده است. نتایج و مدل‌های بدست آمده بسته به شرایط آزمایش و چگونگی تهیه نمونه‌ها دارای تفاوت هستند.

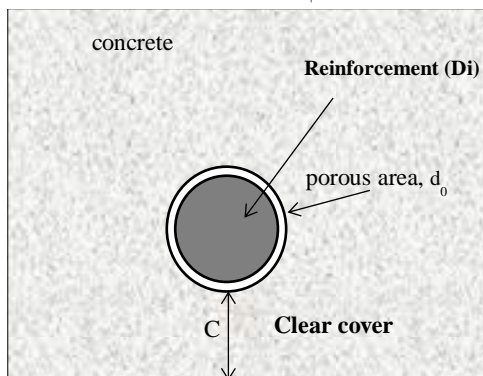
علاوه بر مدل‌های تجربی برخی مدل‌های تحلیلی نیز از سوی برخی پژوهشگران ارائه شده است. لاندِرگن<sup>۱۲</sup> یک مدل سه بعدی اجزاء محدود به نام دیانا<sup>۱۳</sup> برای اثر خوردگی بر مقاومت پیوستگی ارائه داد. در این مدل، کاهش ضریب اصطکاک بین بتن و میلگرد خورده شده در نظر گرفته شده است [16]. ونگ و لیو<sup>۱۴</sup> یک مدل تحلیلی برای مقاومت پیوستگی میلگرد خورده شده قبل و بعد از ایجاد ترک ارائه دادند [17].

مدل‌های ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف حتی برای مدل‌هایی با فرضیات اولیه یکسان دارای تفاوت‌های اساسی در مقدار مقاومت پیوستگی پیش‌بینی شده است که موجب عدم اطمینان در انتخاب مدل و نتایج به دست آمده می‌شود. در این مقاله با جمع آوری نتایج آزمایش‌های انجام شده روی چگونگی کاهش پیوستگی ناشی از خوردگی که توسط پژوهشگران مختلف انجام گرفته است، مدل‌های جدیدی بر اساس قطر میلگرد ارائه شده است. در این پژوهش از نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است که فرضیه اولیه یکسانی داشته اند؛ به عنوان مثال نمونه‌های بتنی دارای ابعاد یکسانی بوده‌اند، بتن استفاده شده در رده بتن معمولی قرار داشته و همچنین در نمونه‌ها از خاموت استفاده نشده است. در مدل‌های ارائه شده، اثر عدم قطعیت پارامترهای موثر از قبیل؛ شدت خوردگی و قطر میلگرد بررسی شده است.

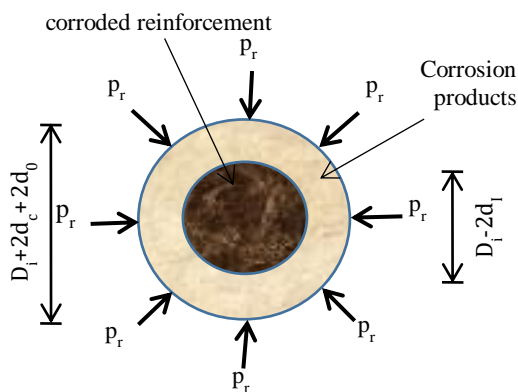
این ناحیه متخلخل پر نشده است، فشاری به بتن اطراف ناشی از اضافه حجم مواد خورده شده وارد نمی‌شود، ولی به محض پر شدن این ناحیه، بتن اطراف میلگرد مانع اضافه حجم آزادانه مواد شده، و یک فشار شعاعی ( $p_r$ ) به بتن اطراف میلگرد وارد می‌شود. بر اثر فشار شعاعی ایجاد شده، بتن اطراف میلگرد به اندازه  $d_c$  متراکم می‌شود. وضعیت فضای اشغال شده توسط مواد خورده شده و میلگرد به همراه فشار شعاعی اطراف میلگرد در شکل (۳ ب) نشان داده شده است. فشار شعاعی ایجاد شده به میلگرد و مواد خورده شده نیز وارد می‌شود و با ادامه فرآیند خوردگی به مقدار این فشار افزوده شده، و بر مقدار مقاومت پیوستگی اثر می‌گذارد. در خلال مراحل بعدی به دلیل رخداد ترک‌ها چگونگی گسترش خوردگی بر مقاومت پیوستگی تغییر خواهد کرد.

شکل ۳. وضعیت فضای اطراف میلگرد و تنش‌های ناشی از افزایش

حجم مواد خورده شده



(الف) قبل از خوردگی (Before corrosion initiation)



(ب) بعد از شروع خوردگی (After corrosion initiation)

Fig. 3 The state of the space around the rebar and the stresses caused by the increased volume of the corroded material

شکل ۱. خوردگی یکنواخت در میلگرد (منطقه ماهشهر)



Fig. 1 Uniform corrosion in reinforcement (Bandar-e Mahshahr.)

به دلیل قطبی شدن میلگرد و اختلاف پتانسیل الکتریکی به وجود آمده، جریان الکتریکی در میلگرد ایجاد می‌شود که با تقسیم مقدار این جریان بر سطح مقطع میلگرد چگالی جریان خودگی ( $i_{cor}$ ) بدست می‌آید. چگالی جریان خوردگی یکی از مهمترین پارامترها در بررسی میزان خوردگی و مدل عمر سازه است، این پارامتر معرف مقدار جرم مصرف شده میلگرد در فرآیند خوردگی است (شکل ۲).

شکل ۲. فرآیند خوردگی در میلگرد

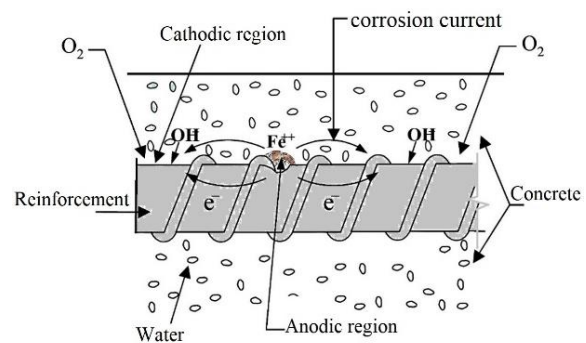


Fig. 2. Corrosion process in steel reinforcement

### ۳- اثر خوردگی بر مقاومت پیوستگی

در شکل (۳ - الف) وضعیت اولیه یک میلگرد و فضای اطراف آن نشان داده شده است که این فضا شامل محدوده متخلخل نزدیک به میلگرد و پوشش بتنی روی آن است. ضخامت ناحیه متخلخل ( $d_0$ ) با حجم کل خلل و فرج بتن رابطه دارد [21]. با شروع خوردگی از قطر میلگرد کاسته شده و مواد ناشی از خوردگی روی میلگرد انباشته می‌شوند و ابتدا ناحیه متخلخل از مواد خورده شده پر می‌شود و به تدریج متراکم شده، تا زمانی که

## ۳- مواد و روش‌ها

## ۳-۱- مدل‌های کاهش مقاومت پیوستگی

برای ارزیابی آزمایشگاهی اثر خوردگی بر مقاومت پیوستگی معمولاً ابتدا با استفاده از روش‌های تسریع شده مانند قراردادن نمونه‌های بتنی شامل میلگرد در محلول آب نمک و ایجاد جریان الکتریکی، در میلگرد خوردگی القا شده ایجاد میشود، و سپس با استفاده از آزمایش کشش مستقیم یا آزمایش خمشی، مقدار چسبندگی بین بتن و میلگرد اندازه گیری می‌شود [22]. در جدول (۱) برخی از مهمترین آزمایش‌های انجام گرفته در خلال دو دهه اخیر نشان داده شده است. مقاومت فشاری بتن‌های استفاده شده در این جدول در رده بتن معمولی قرار دارد. با توجه به اینکه محصور شدگی ناشی از وجود خاموت‌ها بر نتایج موثر است، نتایج ارائه شده در این جدول برای نمونه‌های فاقد خاموت هست. همانگونه که مشخص است در آزمایش‌های بیشتر از میلگردهای قطر پایین (بین ۱۰ تا ۱۶) استفاده شده است و دلیل این امر این بوده است که در این آزمایش‌ها از نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری استفاده شده است و با افزایش قطر میلگرد نتایج مقاومت پیوستگی تحت تاثیر ضخامت کم کاور بتنی قرار خواهد گرفت. در شکل (۳-الف) وضعیت قرارگیری میلگرد در نمونه‌ها نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص است برای آزمایش‌های ارائه شده در جدول (۱) ضخامت کاور بتنی برای میلگردهای به قطر ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۷، ۵/۷۵، ۴/۸۵ و ۴/۱۸ است.

نتایج نشان داده شده در جدول (۱) برای هر قطر میلگرد از منابع مختلف استخراج شده و روی یک نمودار رسم شده‌اند. در شکل‌های (۴ تا ۷) مقادیر مختلف مقاومت پیوستگی نسبت به درصد خوردگی برای میلگردهای به قطر ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر نشان داده شده است. پراکندگی مقادیر پیوستگی نسبت به درصد خوردگی از این شکل‌ها کاملاً مشخص است. محور قائم در این نمودارها بیانگر نسبت مقاومت پیوستگی باقیمانده

میلگرد خورده شده ( $\tau(t)$ ) به مقاومت پیوستگی اولیه ( $\tau_0$ ) است که به صورت ( $R$ ) نشان داده شده است. محور افقی درصد خوردگی میلگرد ( $X_p$ ) است که به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$X_p = \frac{\Delta m}{m_0} \times 100 = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه،  $m_0$  و  $\Delta m$  به ترتیب جرم اولیه و تغییرات جرم،  $A_0$  و  $\Delta A$  به ترتیب سطح مقطع اولیه و تغییرات سطح مقطع میلگرد در خلال فرآیند خوردگی است. از این شکل‌ها مشخص است که در محدوده‌های خوردگی اولیه بیشتر نتایج، مقدار پیوستگی بیشتر از پیوستگی اولیه نشان داده‌اند که نشانگر افزایش مقاومت پیوستگی قبل از ایجاد ترک‌های اولیه است. در بیشتر آزمایش‌های انجام گرفته از آزمایش کشش مستقیم روی میلگردهای که در وسط نمونه بتنی قرار گرفته است استفاده شده، بنابراین همانگونه که مشخص است برای میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر به دلیل زیاد بودن کاور بتنی روی میلگرد و عدم رخداد شکافت نمونه بتنی در باربری نهایی، پراکندگی کمتری در نتایج محققین وجود دارد. از مقایسه نتایج پژوهشگران همچنین مشخص است که با افزایش قطر میلگرد شروع کاهش مقاومت پیوستگی در درصد خوردگی کمتری اتفاق افتاده است؛ به عنوان نمونه برای میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر شکل (۴) مشاهده می‌شود که تا خوردگی ۶ درصد همچنان برخی نتایج، افزایش مقاومت پیوستگی نسبت به مقادیر اولیه را نشان می‌دهند ولی برای میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر شکل (۷) این آستانه کم و بیش معادل ۱/۵ درصد خوردگی است. در بیشتر مراجع مقدار ۱/۵ درصد خوردگی برای همه میلگردها به عنوان آستانه کاهش مقاومت پیوستگی در نظر گرفته شده است [11, 25]. با توجه به اینکه در مدل‌های تحلیلی که بر اساس روابط اجزا محدود توسط پژوهشگران ارائه شده است، چگونگی کاهش مقاومت پیوستگی به صورت تابع نمایی گزارش شده است؛ برای ارائه مدل‌های کاهش مقاومت پیوستگی بر اساس نتایج آزمایشگاهی از برازش منحنی نمایی در شکل‌ها استفاده شده است. منحنی‌های کاهش پیوستگی به صورت نمایی با رابطه  $R = a \times \exp(b(X_p - 1.5))$  برازش می‌شوند. ضرایب مجهول  $a$  و  $b$  با استفاده از نرم

شکل ۴ نسبت مقاومت پیوستگی بر اساس درصد خوردگی برای میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر

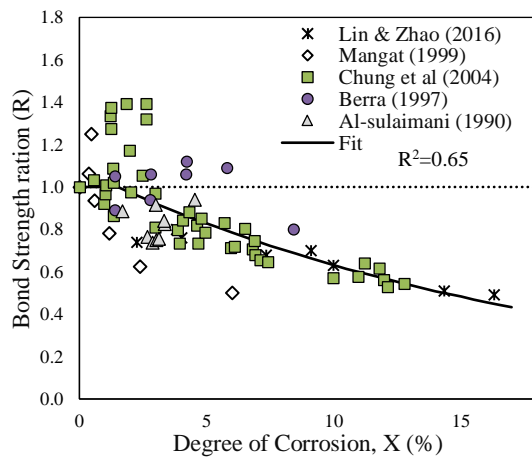


Fig. 4. Bond ratio based on corrosion degree for Φ10

شکل ۵. نسبت مقاومت پیوستگی به درصد خوردگی برای میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر

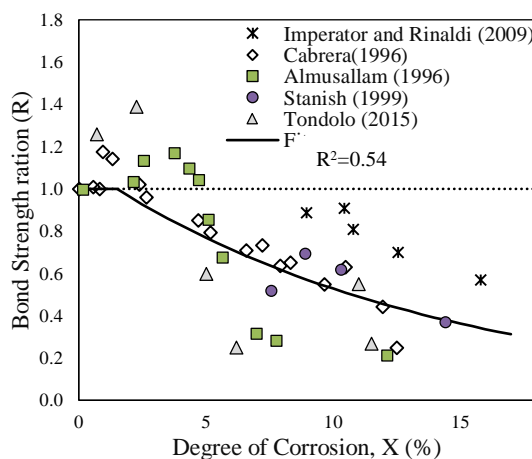


Fig. 5. Bond ratio based on corrosion degree for Φ12

روابط بدست آمده برای نسبت مقاومت پیوستگی به منظور مقایسه در شکل ۸ رسم شده است، همانطور که از این شکل مشخص است برای یک درصد خوردگی یکسان مقدار کاهش مقاومت پیوستگی برای میلگردهای با قطر بزرگتر بیشتر می‌باشد، به عنوان نمونه در درصد خوردگی ۱۰ درصد، مقدار مقاومت پیوستگی باقیمانده میلگردهای به قطر ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر نسبت به مقاومت پیوستگی اولیه به ترتیب برابر با ۰/۶۲، ۰/۵۲، ۰/۴۸ و ۰/۴۲ بدست آمده است.

افزار متلب و روش کمترین مربعات محاسبه می‌شوند. در واقع با توجه به اینکه نسبت مقاومت پیوستگی در مبدأ برابر با یک می‌باشد ضریب a برای همه نمودارها برابر با یک بدست می‌آید. روابط بدست آمده برای نسبت مقاومت پیوستگی (R) بر مبنای درصد خوردگی ( $X_p$ ) برای هر قطر میلگرد به صورت زیر بدست آمده است:

$$R(X_p) = e^{-0.054(X_p-1.5)} \quad \Phi 10 \quad (3-f)$$

$$R(X_p) = e^{-0.075(X_p-1.5)} \quad \Phi 12 \quad (3-b)$$

$$R(X_p) = e^{-0.084(X_p-1.5)} \quad \Phi 14 \quad (3-c)$$

$$R(X_p) = e^{-0.10(X_p-1.5)} \quad \Phi 16 \quad (3-d)$$

در این روابط، آستانه شروع کاهش مقاومت پیوستگی برای همه میلگردها ۱/۵ درصد در نظر گرفته شده است که همان‌گونه که قبلاً تشریح شد برای میلگردهای به قطر کوچکتر یعنی ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر به صورت محافظه کارانه و برای اطمینان است.

جدول ۱. محدوده خوردگی و قطر میلگرد استفاده شده در پژوهش

های آزمایشگاهی منابع		
Corrosion Degree (%)	Bar Diameter (mm)	Reference
20	10	Lin and Zhao[13]
4.85	10	Mansoor and Zhang[26]
5.0	10	Mangat and Elgarf[27]
11.0	10	Chung et al. [28]
9.0	10	Berra[29]
7.8	10	Al- Sulaimani et al.[6]
16.1	12	Abosrra et al.[30]
3.88	12	Imperator and Rinaldi[31]
12.46	12	Cabrera [12]
20.75	12	Almusallam et al.[32]
15	12	Stanish et al.[14]
25	12	Tondolo[33]
13.7	14	Wang et al.[34]
18.75	14	Yalciner et al.[35]
2.2	14	Chung et al. [1]
9.0	14	Fang et al. [25]
30.0	14	Lee et al.[36]
20.0	16	Castel et al.[37]
3.77	16	Rodriguez et al.[7]
20.0	16	Blomfors et al.[38]
10.44	16	Zhao et al.[39]

Table 1. Corrosion range and rebar diameter used in experimental Research from literature.

تغییرات مقاومت پیوستگی برای مقادیر مختلف نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد (c/D) در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است برای درصد خوردگی یکسان، با افزایش نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد، مقدار نسبت مقاومت پیوستگی افزایش یافته است؛ به عنوان نمونه در درصد خوردگی ۱۰ درصد، برای c/D برابر با ۴/۱۹ و ۷/۰ مقدار مقاومت پیوستگی به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۶۳ بدست آمده است. دلیل این امر به تاخیر افتادن ترک‌های بیرونی به دلیل بزرگتر بودن پوشش بتنی و همچنین آثار محصور کنندگی ناشی از این پوشش حتی بعد از رخداد ترک است.

شکل ۹. اثر نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد بر مقاومت پیوستگی

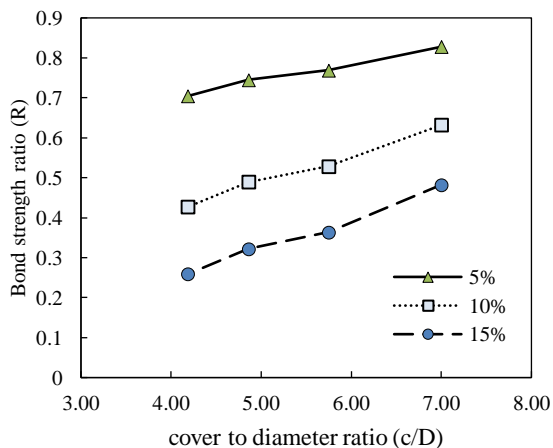


Fig. 9. Influence of the cover to diameter ratio on the bond strength ratio

### ۳-۲- اثر شدت جریان خوردگی بر مقاومت پیوستگی

در روابط (۳)، نسبت کاهش مقاومت پیوستگی بر مبنای درصد خوردگی بیان شده است و از طرف دیگر، درصد خوردگی میلگرد از نسبت سطح کاسته شده میلگرد به سطح اولیه محاسبه می‌شود رابطه ۲ مشخص است و چگونگی کاهش سطح مقطع میلگرد خود تابع شدت جریان خوردگی (i<sub>cor</sub>) است. با توجه به اینکه اندازه‌گیری شدت جریان خوردگی در ساختمان‌های موجود نسبت به برآورد درصد خوردگی امکانپذیرتر است؛ بنابراین استفاده از پارامتر شدت جریان خوردگی برای ارزیابی مقاومت پیوستگی، عدم قطعیت کمتری در نتایج ایجاد خواهد کرد. در ادامه اثر مقادیر مختلف شدت جریان خوردگی و عدم قطعیت موجود در آن بر نسبت مقاومت پیوستگی و

شکل ۶. نسبت مقاومت پیوستگی به درصد خوردگی برای میلگرد به قطر ۱۴ میلی‌متر

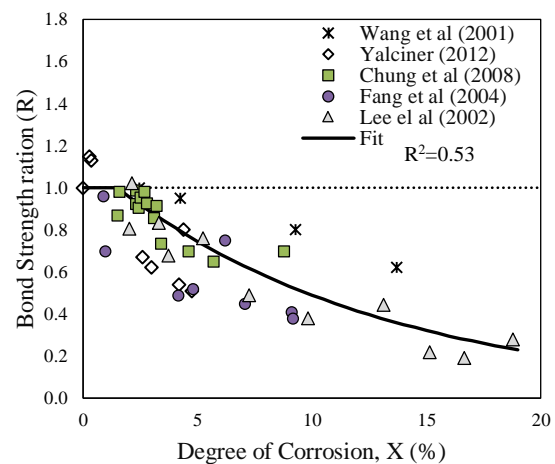


Fig. 6. Bond ratio based on corrosion degree for Φ14

شکل ۷. نسبت مقاومت پیوستگی به درصد خوردگی برای میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر

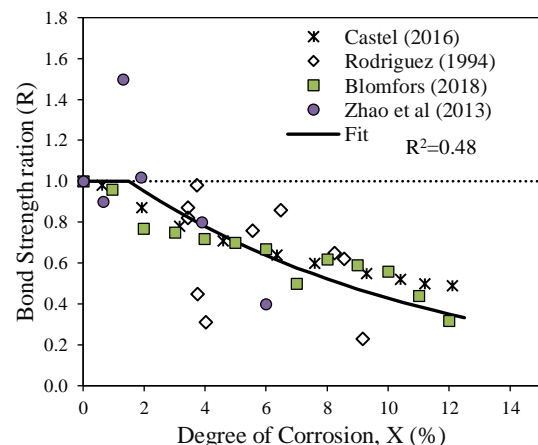


Fig. 7. Bond ratio based on corrosion degree for Φ16

شکل ۸. مدل‌های کاهش مقاومت پیوستگی برای میلگردهای مختلف

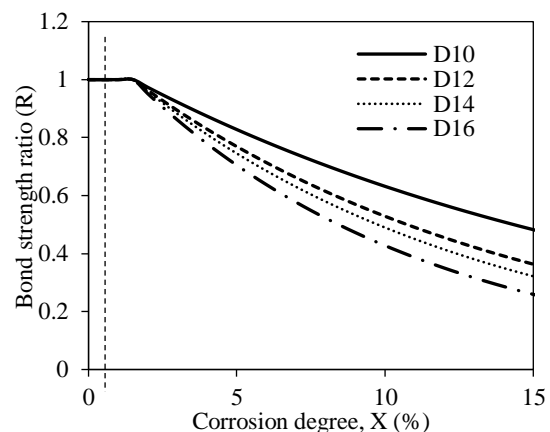


Fig. 8. Bond reduction models for different reinforcement diameters

نهایت با استفاده از روابط (۳) میانگین نسبت مقاومت پیوستگی به همراه ضریب تغییرات نسبت مقاومت پیوستگی محاسبه می شود.

شکل ۱۰. درصد خوردگی در خلال زمان گسترش خوردگی

$$(\Phi_{10}, i_{cor} = 1)$$

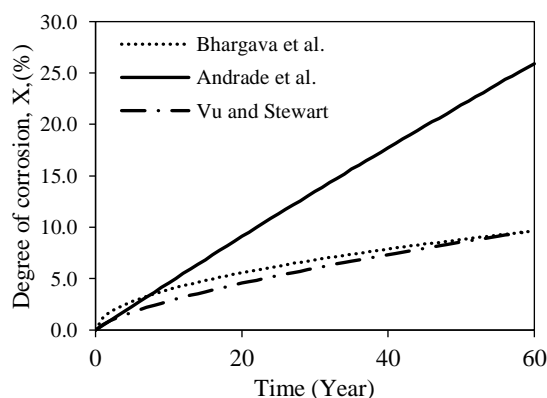


Fig. 10. Corrosion degree during corrosion propagation time ( $\Phi_{10}, i_{cor} = 1$ )

در شکل (۱۱) مقادیر میانگین درصد خوردگی بدست آمده از مدل های کاهش سطح مقطع جدول (۲) برای میلگردهای مختلف نشان داده شده است. همان گونه که از این شکل مشخص است، درصد خوردگی برای میلگردهای با قطر کوچکتر، بیشتر است به گونه ای که برای طرح نشان داده شده در شکل (۱۱)، بعد از گذشت ۶۰ سال از آغاز خوردگی، میزان خوردگی برای میلگردهای به قطر ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی متر به ترتیب ۳۶، ۳۰، ۲۶ و ۲۳ درصد بدست آمده است.

شکل ۱۱. میانگین درصد خوردگی برای میلگردهای مختلف برای

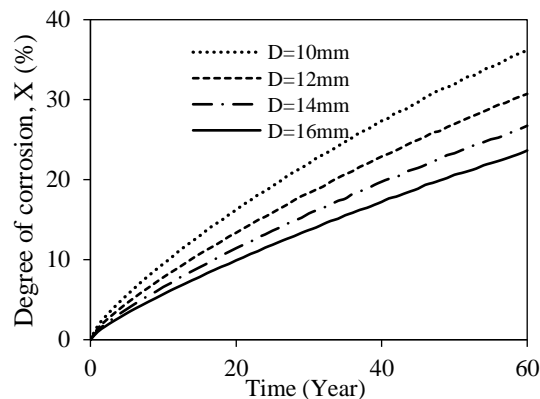


Fig. 11. The Average of corrosion degree for different bar diameter ( $i_{cor} = 3\mu A/cm^2$ )

خواص تصادفی نسبت مقاومت پیوستگی مورد بررسی قرار گرفته است.

برای بررسی اثر چگونگی کاهش سطح مقطع میلگرد بر مقاومت پیوستگی، در جدول (۲)، سه مدل مهم پیش بینی سطح باقیمانده میلگرد آورده شده است [40-42]. همان گونه که در این جدول مشخص است سطح میلگرد در هر زمان ( $A_s(t)$ ) بر اساس گذشت زمان از آغاز خوردگی ( $t$ ) و شدت جریان خوردگی ( $i_{cor}$ ) بیان شده است. همان گونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است مقادیر بدست آمده از این مدل ها متفاوت است؛ بنابراین از میانگین این سه مدل برای محاسبه سطح باقیمانده میلگرد در این پژوهش استفاده شده است.

جدول ۲. مدل های کاهش سطح مقطع میلگرد ناشی از خوردگی

Reference	Model
Bhargava et al. [41]	$A_s(t) = A_{s0} - 0.3083\sqrt{D_0 i_{COR} t}$
Andrade et al. [40]	$A_s(t) = n\pi(D_0 - 0.232i_{COR}t)^2/4$
Vu & Stewart [42]	$A_s(t) = n\pi(D_0 - 0.282i_{COR}(1)t^{0.7})^2/4$

Table 2. Models of prediction for cross-sectional area of the reinforcement due to corrosion

با توجه به اینکه در پژوهش آزمایشگاهی استفاده شده در مدل های ارائه شده، کمترین و بیشترین چگالی جریان خوردگی برابر با ۱ و ۳ میکروآمپر بر سانتی متر مربع بوده است، در این پژوهش از این مقادیر برای کمترین و بیشترین مقدار میانگین شدت جریان خوردگی استفاده شده است [26-39]. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت شدت جریان خوردگی از ضریب تغییرات (CV) برابر با ۱/۳ و ۰/۳ به عنوان حدود پایین و بالای عدم قطعیت و همچنین تابع چگالی احتمال نرمال استفاده شده است [41]. ضریب تغییرات قطر میلگرد برابر با ۰/۰۵ و تابع چگالی احتمال آن نرمال فرض می شود [43]. برای مدل سازی آثار این متغیرها در مدل های کاهش مقاومت پیوستگی، در هر لحظه ( $t$ )، تعداد  $n=10000$  مقدار تصادفی برای شدت جریان و قطر مورد نظر (بر اساس خواص تصادفی بیان شده) تولید می شود، سپس با استفاده از این مقادیر، میانگین سطح میلگرد باقیمانده با استفاده از مدل های جدول (۲) محاسبه شده و با استفاده از رابطه ۲ مقدار درصد خوردگی تعیین می شود و در



مقاومت پیوستگی کمتری می‌شوند؛ در مجموع کاهش مقاومت پیوستگی میلگردها یکسان شده است.

در شکل (۱۴)، ضریب تغییرات نسبت مقاومت پیوستگی نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشخص است، با گذشت زمان ضریب تغییرات افزایش یافته و مقدار آن برای میلگردهای با قطر کوچکتر، کمتر از میلگردهای بزرگتر است. با توجه به ثابت ماندن ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی و قطر میلگرد، به دلیل اینکه مقدار میانگین مقاومت پیوستگی دچار کاهش می‌شود، ضریب تغییرات مقاومت پیوستگی افزایش می‌یابد. در شکل (۱۵) هیستوگرام و تابع چگالی احتمال متناظر با آن برای میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر نشان داده شده است. شکل هیستوگرام‌ها بیانگر تغییرات ناچیز انحراف استاندارد مقدار مقاومت پیوستگی با گذشت زمان است و به تبع آن وابستگی کامل ضریب تغییرات به مقدار میانگین را نشان می‌دهد.

شکل ۱۳. میانگین نسبت مقاومت پیوستگی برای میلگردهای مختلف

$$i_{cor} = 3\mu A/cm^2 \text{ برای}$$

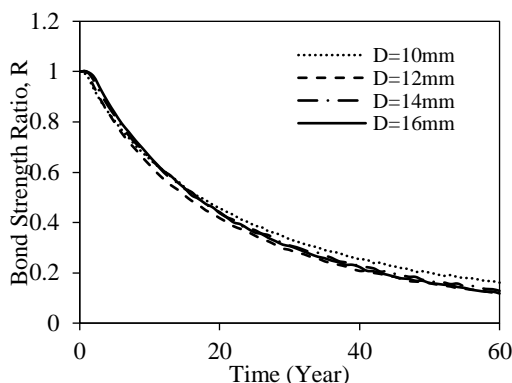


Fig. 13. The Average of bond ratio for different bar diameter ( $i_{cor} = 3\mu A/cm^2$ )

شکل ۱۴. ضریب تغییرات نسبت مقاومت پیوستگی برای میلگردهای مختلف برای  $i_{cor} = 3\mu A/cm^2$

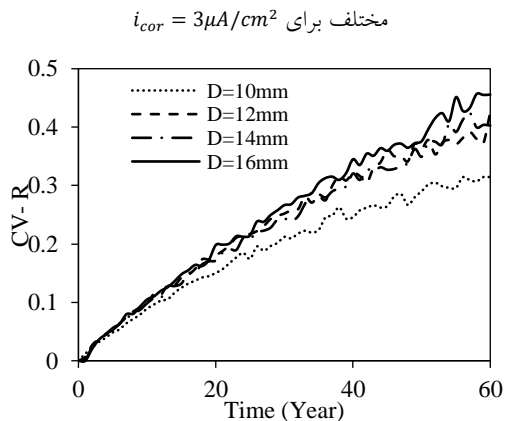


Fig. 14. The coefficient of variation of bond ratio for different bar diameter ( $i_{cor} = 3\mu A/cm^2$ )

دلیل افزایش درصد خوردگی با کاهش قطر میلگرد برای شدت جریان یکسان، کاهش یکسان جرم در میلگردهاست که بر اساس رابطه (۲) منجر به بزرگتر بودن درصد خوردگی برای میلگردهای با قطر کمتر می‌شود. به دلیل اینکه رابطه کاهش مقاومت پیوستگی بر اساس درصد خوردگی بیان شده است این تغییر بر اساس قطر بر مقاومت پیوستگی میلگردهای مختلف هم اثر گذار خواهد بود.

در شکل (۱۲)، ضریب تغییرات درصد خوردگی نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشخص است مقدار ضریب تغییرات در بازه ۰/۱۵ تا ۰/۱۹ متغیر است و برای میلگردهای با قطر کوچکتر، این مقدار کمتر بدست آمده است. کمتر شدن ضریب تغییرات درصد خوردگی به دلیل بزرگتر بودن مقدار میانگین درصد خوردگی میلگرد با قطر کوچکتر است.

شکل ۱۲. درصد خوردگی برای میلگردهای مختلف برای  $i_{cor} =$

$$3\mu A/cm^2$$

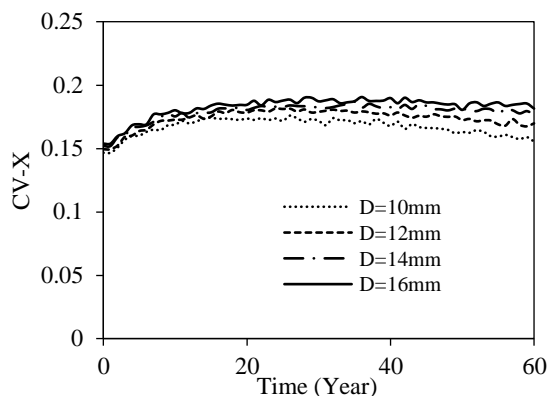


Fig. 12. The coefficient of variation of corrosion degree for different bar diameter ( $i_{cor} = 3\mu A/cm^2$ )

در ادامه، نسبت تغییرات مقاومت پیوستگی در خلال زمان خوردگی برای سناریوهای مختلف شدت جریان خوردگی بررسی شده است. در شکل (۱۳)، نسبت مقاومت پیوستگی برای شدت جریان خوردگی ۳ میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشخص است در گذر زمان، نسبت مقاومت پیوستگی برای همه میلگردها، یکسان بدست آمده است. با وجودی که طبق شکل (۱۱)، درصد خوردگی در میلگردهای با قطر کوچکتر، بیشتر است ولی به دلیل اینکه طبق نتایج تجربی روابط (۳) و شکل (۸)، میلگردهای کوچکتر برای مقدار یکسان درصد خوردگی، دچار کاهش

اثر عدم قطعیت قطر میلگرد بر میزان مقاومت پیوستگی در طی دوره گسترش خوردگی در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است افزایش ضریب تغییرات قطر میلگرد (Vd) به صورت جزئی باعث کاهش مقدار میانگین کاهش مقاومت پیوستگی و از طرف دیگر موجب افزایش عدم قطعیت در مقاومت پیوستگی می شود. نتیجه حاصله بیانگر غیر محافظه کارانه بودن مقاومت مقاومت پیوستگی باقی مانده میلگرد در صورت افزایش عدم قطعیت قطر میلگرد است.

شکل ۱۶. اثر خواص تصادفی شدت جریان بر میانگین نسبت مقاومت

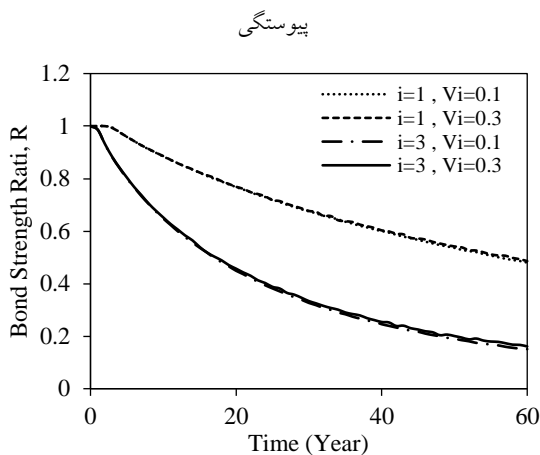


Fig. 16. The effect of probabilistic properties of corrosion current density on the average of the bond strength ratio

شکل ۱۷. اثر خواص تصادفی شدت جریان بر ضریب تغییرات نسبت

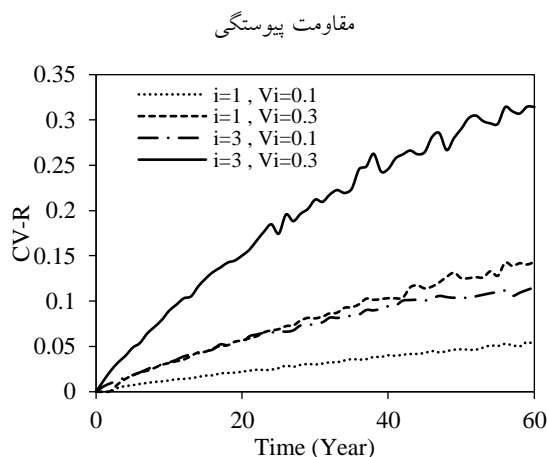


Fig. 17. The effect of probabilistic properties of corrosion current density on the coefficient of variation of the bond strength ratio

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله با جمع آوری نتایج آزمایش های انجام گرفته روی اثر خوردگی بر مقاومت پیوستگی، مدل های جدیدی برای

اثر عدم قطعیت چگالی جریان خوردگی بر مقادیر میانگین و ضریب تغییرات مقاومت پیوستگی (CV-R) در شکل های (۱۶ و ۱۷) نشان داده شده است. همان گونه که از این شکل ها مشخص است، با افزایش ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی (CV-i) از ۰/۱ به ۰/۳ در مقدار میانگین مقاومت پیوستگی تغییری ایجاد نشده است ولی این امر موجب افزایش ضریب تغییرات مقاومت پیوستگی شده؛ به گونه ای که برای چگالی جریان خوردگی ۱ میکروآمپر بر سانتی متر مربع در سال ۶۰ ام بعد از آغاز خوردگی، ضریب تغییرات از ۰/۰۵ به ۰/۱۴ افزایش یافته و برای چگالی جریان خوردگی ۳ میکروآمپر بر سانتی متر مربع از ۰/۱۱ به ۰/۳۲ افزایش یافته است که برای هر دو حالت یک افزایش سه برابری را متناسب با افزایش ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی نشان می دهد.

شکل ۱۵. هیستوگرام و تابع چگالی احتمال برای میلگرد به قطر ۱۲

تحت اثر چگالی جریان خوردگی ۳ میکروآمپر با ضریب تغییرات ۰/۳

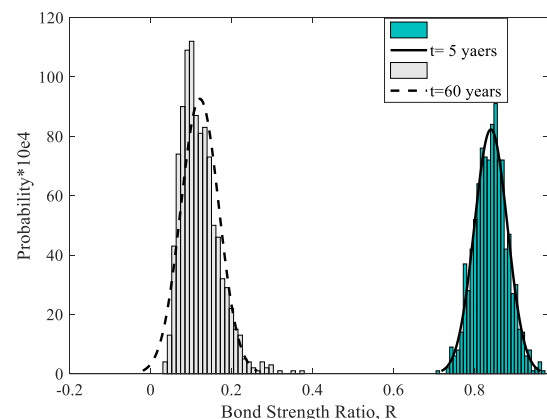


Fig. 15. Histogram and the probability distribution function for  $\Phi 12$ ,  $i_{cor} = 3\mu A/cm^2$  CV-i=0.3

از شکل (۱۷) مشخص است برای حالتی که ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی یکسان است با افزایش شدت جریان خوردگی، ضریب تغییرات مقاومت پیوستگی نیز افزایش می یابد؛ از این رو مشخص است که عدم قطعیت در مقاومت پیوستگی علاوه بر اینکه به ضریب تغییرات چگالی جریان خوردگی وابسته است به مقدار میانگین آن نیز وابسته می باشد و برای حالتی که مقدار میانگین چگالی جریان خوردگی بیشتر است، عدم قطعیت در مقاومت پیوستگی نیز بیشتر است.

steel and different types of concrete. *Procedia engineering*, 190, 243-247.

[4] Kwon S.J., Na U. J., Park S. S. & Jung S. H. 2009 Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion. *Structural Safety*, 31(1), 75-83.

[5] Hájková K., Smilauer V., Jendele L. & Cervenka J. 2018 Prediction of reinforcement corrosion due to chloride ingress and its effects on serviceability. *Engineering Structures*, 174, 768-777.

[6] Al-Sulaimani G., Kaleemullah M., & Basunbul I. A. 1990 Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. *Structural Journal*, 87(2), 220-231.

[7] Rodriguez J., Ortega L., & Casal J. 1994 Corrosion of reinforcing bars and service life of reinforced concrete structures: corrosion and bond deterioration. *International conference on concrete across borders*, Odense, Denmark

[8] Lindvall A. 1998 Duracrete-probabilistic performance based durability design of concrete structures. 2nd Int. PhD. Symposium in civil engineering. Goteborg, Sweden.

[9] Tang D. 2007 Influence of chloride-induced corrosion cracks on the strength of reinforced concrete, Ms. C. thesis in Environmental and Chemical Engineering, RMIT University.

[10] Coccia S., Imperatore S. & Rinaldi Z. 2016 Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete. *Materials and structures*, 49(1-2), 537-551.

[11] Zhu W., Dai J. G. & Poon C. S. 2018 Prediction of the bond strength between non-uniformly corroded steel reinforcement and deteriorated concrete. *Construction and Building Materials*, 187, 1267-1276

[12] Cabrera J. 1996 Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion. *Cement and concrete composites*, 18(1), 47-59.

[13] Lin H. & Zhao Y. 2016 Effects of confinements on the bond strength between concrete and corroded steel bars. *Construction and Building Materials*, 118, 127-138.

[14] Stanish K., Hooton R. & Pantazopoulou S. 1999 Corrosion Effects on Bond Strength in Reinforced Concrete. *Structural Journal*, 96(6), 915-921.

[15] Bhargava K., Ghosh A. K., Mori Y. & Ramanujam S. 2007 Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete—Analytical and empirical models. *Nuclear Engineering and Design*, 237(11), 1140-1157.

[16] Lundgren K. 2002 Modelling the effect of corrosion on bond in reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, 54(3), 165-173.

[17] Wang X. & Liu X. 2004 Modeling bond strength of corroded reinforcement without stirrups. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1331-1339.

[18] Revert A. B., Weerdt K. D., Hornbostel K., Geiker M. R. 2018 Carbonation-induced corrosion: Investigation of the corrosion onset, *Construction and Building Materials*, 162, 847-856.

[19] Zhou Y., Gencturk B., William K., Attar A., 2014 Carbonation-Induced and Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete Structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9), 421-438.

قطرهای مختلف میلگرد ارائه شد. برای مدل‌های بدست آمده، اثر خواص تصادفی شدت جریان خوردگی و قطر میلگرد بررسی، و نتایج زیر به دست آمد:

۱- بر اساس درون‌یابی نتایج آزمایشگاهی، میلگردهای با قطر کوچکتر در درصد‌های یکسان خوردگی نسبت به میلگردهای بزرگتر دچار کاهش مقاومت پیوستگی کمتری می‌شوند که این امر به دلیل وجود پوشش بتنی بزرگتر و تاخیر در ترک‌های ناشی از خوردگی است.

۲- درون‌یابی نتایج نشان می‌دهد که عدم قطعیت مدل پیش بینی کننده مقاومت پیوستگی باقیمانده برای میلگردهای کوچکتر، کمتر است. دلیل این امر تاثیرگذاری نسبت پوشش بتنی به قطر میلگرد با بزرگتر شدن قطر میلگرد است.

۳- وقتی شدت جریان خوردگی یکسانی درون میلگردها القا می‌شود، به دلیل اینکه جرم یکسانی از میلگردها دچار خوردگی می‌شوند، درصد خوردگی میلگردهای کوچکتر، بیشتر از میلگردهای بزرگتر است.

۴- کمتر بودن کاهش مقاومت پیوستگی در درصد خوردگی یکسان و بیشتر بودن درصد خوردگی میلگردهای کوچکتر در شدت جریان یکسان موجب می‌شود که در مجموع همه میلگردها در شرایط جریان خوردگی یکسان دارای مقاومت پیوستگی تقریباً یکسانی باشند.

۵- انحراف استاندارد مقاومت پیوستگی باقیمانده میلگردها در دوران گسترش خوردگی تقریباً ثابت است و ضریب تغییرات مقاومت پیوستگی وابسته به میانگین مقاومت پیوستگی است بنابراین با گذشت زمان ضریب تغییرات مقاومت پیوستگی افزایش می‌یابد.

## References

## ۵- مراجع

- [1] Chung L., Cho S. H., Kim J. H. J. & Yi S. T. 2004 Correction factor suggestion for ACI development length provisions based on flexural testing of RC slabs with various levels of corroded reinforcing bars. *Engineering structures*, 2004. 26(8), 1013-1026.
- [2] Keshtegar B., 2017 Parametric Study of Pitting Corroded Steel Bars for Reinforcement Concrete Beams using Statistical Analysis. *Modares Civil Engineering journal*, 17(2), 235-246. (in Persian).
- [3] Bilek V., Bonczkova S., Hurta J., Pytlík D. & Mrovec M. 2017 Bond strength between reinforcing

- concrete cover, strength and corrosion level. *Cement and Concrete Research*, 42(5), 643-655.
- [36] Lee H. S., Noguchi T. & Tomosawa F. 2002 Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1313-1318.
- [37] Castel A., François R. & Arliguie G. 2000 Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams—Part 2: Bond and notch effects. *Materials and Structures*, 33(9), 545-551.
- [38] Blomfors M., et al. 2018 Engineering bond model for corroded reinforcement. *Engineering Structures*, 156, 394-410.
- [39] Zhao Y., et al. 2013 Bond behaviour of normal/recycled concrete and corroded steel bars. *Construction and building materials*, 48, 348-359.
- [40] Andrade C., Sarria J. & Alonso C. 1996 Corrosion Rate Field Monitoring of Post – Tensioned Tendons in Contact with Chlorides. *Durability of Building Materials and Components*, 2, 959–967.
- [41] Bhargava K., et al. 2007 Ultimate flexural and shear capacity of concrete beams with corroded reinforcement. *Structural Engineering and Mechanics – An International Journal*, 27(3), 347–363.
- [42] Vu K. A. & Stewart M. G. 2005 Predicting the likelihood and extent of reinforced concrete corrosion-induced cracking. *Journal of structural engineering*, 131(11), 1681-1689.
- [43] Nowak A. S. & Collins K. R. 2012 *Reliability of structures*. CRC Press.
- [20] Higgins C., et al. 2003 Shear capacity assessment of corrosion-damaged reinforced concrete beams. Oregon. Dept. of Transportation. Research Unit. USA.
- [21] Liu T. & Weyers R. 1998 Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 28(3), 365-379.
- [22] Al-Shannag M. J. & Charif A. 2017 Bond behavior of steel bars embedded in concretes made with natural lightweight aggregates. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 29(4), 365-372.
- [23] Amleh L. & Mirza S. 1999 Corrosion influence on bond between steel and concrete. *Structural Journal*, 96(3), 415-423.
- [24] Lin H., et al. 2019 State-of-the-art review on the bond properties of corroded reinforcing steel bar. *Construction and Building Materials*, 213, 216-233.
- [25] Fang C., et al. 2004 Corrosion influence on bond in reinforced concrete. *Cement and concrete research*, 34(11), 2159-2167.
- [26] Mansoor Y. A. & Zhang Z. Q. 2013 The reinforcement bond strength behavior under different corrosion condition. *Res J Appl Sci Eng Technol*, 5, 2346-2353.
- [27] Mangat P. & Elgarf M. 1999 Bond characteristics of corroding reinforcement in concrete beams. *Materials and structures*, 32(2), 89-97.
- [28] Chung L., Kim J.-H. J. & Yi S. T. 2008 Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars. *Cement and concrete composites*, 30(7), 603-611.
- [29] Berra M., Castellani A. & Coronelli D. 1997 Bond in reinforced concrete and corrosion of bars. in *Proceedings of the seventh international conference on structural faults and repair*. Edinburgh, United Kingdom.
- [30] Abosrra L., Ashour A. & Youseffi M. 2011 Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3915-3925.
- [31] Imperatore S. & Rinaldi Z. 2009 Mechanical behavior of corroded rebars and influence on the structural response of R/C elements. *Proceedings of concrete repair, rehabilitation and retrofitting II*. CRC Press, London, 489-495.
- [32] Almusallam A. A., Al-Gahtani A. S. & Aziz A. R. 1996 Effect of reinforcement corrosion on bond strength. *Construction and building materials*, 10(2), 123-129.
- [33] Tondolo F. 2015 Bond behaviour with reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 93, 926-932.
- [34] Wang X. G., et al. 2011 Bond strength of corroded steel bars in reinforced concrete structural elements strengthened with CFRP sheets. *Cement and Concrete Composites*, 33(4), 513-519.
- [35] Yalciner H., Eren O. & Sensoy S. 2012 An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of

# Probabilistic evaluation of the effect of uniform corrosion parameters on the bond strength between concrete and reinforcement

Seyed Abbas Hosseini<sup>1\*</sup>

1- Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Choram, Iran.

\*a.hosseini@yu.ac.ir

## Abstract

Reinforcement corrosion in concrete structures is considered as one of the main important issues that degrade the durability of RC structures. The concrete environment has a high alkali content ( $\text{pH} = 13$ ) which protects the steel reinforcement against corrosion. Corrosion of steel rebar begins in case of reduced alkalinity of the concrete environment in the presence of moisture and oxygen. One of the most important effects of reinforcement corrosion is to reduce the bond between concrete and rebar. Chloride and carbonation induced corrosion caused a reduction in reinforcement cross-sectional area, reduction in bond strength, cracking and lamination of concrete cover. Corrosion produces materials that contain more volumes than the materials used in the corrosion process, and this increase in volume causes changes in the bond strength as well as the appearance of cracks. Bond strength enables the force transfer from reinforcing steel bar into concrete and guarantees the composite manner of reinforced concrete structures. The main mechanisms affecting the transfer of forces between rebar and concrete include adhesion, friction, and anchorage bonding. In ribbed bars, the anchorage bond caused by mechanical locking between the concrete and the rebar ribs plays the most important role in bond strength. Many empirical models have been developed to estimate bond strength during the corrosion propagation period. The experimental results are different depending on the test conditions and how to prepare the samples. Models presented by different researchers, even for the same basic assumptions, have fundamental differences in the predicted bond strength, which causes uncertainty in the choice of model and results. In this paper by regression of existing empirical results, some different models are presented for each bar diameter. This study uses laboratory results that have the same initial assumptions; for example, concrete samples having the same dimensions and compressive strength. The reinforcement diameter and corrosion current density are two basic variables in bond degradation models that have been considered for investigation of uncertainty in proposed models. Based on the results, the bond reduction during the corrosion propagation is exponential and the effect of the uncertainty of the corrosion current density is greater than the bar diameter. The effect of uncertainties on the coefficient of variation of the results is more than the effect on the mean. The bond reduction for the smaller diameter bars was lower than the larger bars such that for 10 and 16 mm diameters at 15% corrosion, the bond to primary bond ratio was 0.46 and 0.28, respectively. The regression of existing experimental results shows that the uncertainty of the residual bond prediction model is lower for smaller bars. This is due to the effect of the ratio of concrete cover to rebar diameter as the rebar diameter increases. When the same corrosion current is induced inside the bars, because the same mass of the bars is corroded, the corrosion rate of the smaller bars is greater than the larger bars. The standard deviation of the residual bond strength during the corrosion expansion period is almost constant. The coefficient of variation of the bond strength depends on the average bond strength, so this parameter increases over time.

**Key Words:** Reinforcement corrosion, bond reduction, probabilistic model, chloride ingress, concrete durability