

## مدلی برای تخمین مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای بتن مسلح با میلگردهای وصله‌دار خورده شده با در نظر گرفتن $c/d_b$ \*

یاسر مودی<sup>(۱)</sup> محمدرضا سهرابی<sup>(۲)</sup> سید روح‌الله موسوی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** خوردگی ناحیه وصله موجب تغییر مقاومت پیوستگی می‌شود. نسبت مقاومت پیوستگی در حالت خورده شده به مقدار مقاومت پیوستگی متناظر آن در شرایط عدم وجود خوردگی، مقاومت پیوستگی نسبی نامیده می‌شود. نتایج مقاومت پیوستگی نسبی در آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی (Pullout)، میلگرد درگیر در بتن (Tension stiffening) و تیرها با میلگردهای وصله‌شده (Beams with lap spliced bars) متفاوت است. در مطالعات گذشته نشان داده شد نتایج آزمایش میلگرد درگیر در بتن به نتایج آزمایش تیرها با میلگردهای وصله‌شده شباهت بیشتری دارد. در این مطالعه با استفاده از آزمایش‌های میلگرد درگیر در بتن، مدلی برای تعیین مقاومت پیوستگی نسبی میلگردهای خورده شده در شاخه نزولی ارائه شده است. در نهایت با بهینه کردن این مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، از این مدل برای تعیین مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار با میلگردهای خورده شده استفاده می‌شود. مطالعه حاضر نشان می‌دهد استفاده از مدل پیشنهادی نتایج بهتری ارائه می‌دهد. به طوری که استفاده از این مدل برای تخمین مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار باعث کاهش ۱۶ درصدی خطای کلی نسبت به مدل شیهاتا می‌شود.

**واژه‌های کلیدی** بتن مسلح، خوردگی، مقاومت پیوستگی، تیر وصله‌دار.

### A Proposed Model for Estimating the Relative Bond Strength of RC Beam with Corroded Lap Spliced Steel Bars, considering $c/d_b$

Yaser Moodi Mohamad Reza Sohrabi Seyed roohallah Mousavi

**Abstract** Corrosion of lap spliced region causes the bond strength to change. The ratio of the bond strength in the corrosion state to the value of its corresponding in the absence of corrosion is called the relative bond strength. The results of the relative bond strength are different in Pullout test, Tension stiffening test and Beams with lap spliced bars test. The results of the Tension stiffening test in the literature is more similar to those of Beams with lap spliced bars. In this study, a model has been proposed using tension stiffening tests, for determining the relative bond strength of corroded steel bars in the descending branch. Finally, this model has been optimized using genetic algorithm for determining the relative bond strength of RC Beam with corroded lap spliced steel bars. The current study shows that using the proposed model will lead to the better result. The use of proposed model for the estimating the relative bond strength of RC beam with corroded lap spliced steel bars, leads to about 16 percent reduction in total error compared with Shihata model.

**Key Words** Reinforce concrete, Corrosion, Bond strength, Lap spliced.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۳/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱۲/۱۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری عمران-سازه، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

(۲) دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

(۳) نویسنده مسئول: دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

Email: s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir

## مقدمه

خوردگی مسلح کننده فولادی یکی از مسائل مهمی است که در عملکرد طولانی مدت سازه های بتن مسلح اثر می گذارد [1]. شکل گیری محصولات خوردگی شامل حجم قابل توجهی است؛ یعنی حجم محصولات خوردگی از میلگرد اصلی بیشتر است. این محصولات باعث ایجاد تنش های کششی در بتن اطراف میلگرد می شود. این تنش های کششی ممکن است باعث ترک خوردن یا پوسته پوسته شدن پوشش بتن و کاهش مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن شود [2-3]. مطالعات گذشته نشان داده است که خوردگی میلگرد اثر قابل توجهی بر روی مقاومت پیوستگی نهایی بین میلگرد و بتن دارد، به طوری که در خوردگی های کم ممکن است مقاومت های پیوستگی افزایش یابد، اما خوردگی های شدید میلگرد باعث کاهش قابل توجه مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن می شود [3-7].

در این مطالعه ابتدا به معرفی برخی از آزمایش های تعیین مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن پرداخته می شود. با مقایسه این آزمایش ها با یکدیگر نشان داده می شود که آزمایش های میلگرد درگیر در بتن با آزمایش های تیرهای وصله دار تطابق بیشتری دارند؛ بنابراین، با استفاده از آزمایش های میلگرد درگیر در بتن رابطه ای تجربی برای تعیین کاهش مقاومت پیوستگی ناشی از خوردگی ارائه می گردد. در این رابطه اثر پوشش بتن به قطر میلگرد ( $c/d_b$ ) در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه آزمایش های محدودی برای تعیین اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی تیرهای وصله دار ارائه شده است، رابطه ارائه شده برای تعیین مقاومت پیوستگی تیرهای وصله دار تحت خوردگی کالیبره می شود. نتایج نشان می دهد مدل ارائه شده برای تعیین مقاومت پیوستگی تیرهای وصله دار تحت خوردگی در همبستگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

آزمایش های تعیین مقاومت پیوستگی  
آزمایش بیرون کشیدگی (Pullout)

این آزمایش قدیمی ترین، ساده ترین و ارزان ترین روش برای تعیین تنش پیوستگی بین بتن و آرماتور است. همان طور که در شکل (۱) مشاهده می شود، در این آزمایش آرماتور در یک نمونه بتنی به شکل استوانه یا مکعب قرار داده شده و سپس در حالی که بتن در جای خود ثابت است، آرماتور به بیرون کشیده می شود.

مطالعات زیادی در زمینه اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور با استفاده از این آزمایش انجام شده است. از جمله مطالعاتی که با استفاده از این آزمایش اثر خوردگی را بر روی مقاومت پیوستگی بررسی کرده اند، می توان مطالعات السلیمانی و همکاران [3]، لاو و همکاران [5]، توندلو [6]، ژانگ و همکاران [7]، لی و همکاران [8]، یالسنیر و همکاران [9] و ژانگ و همکاران [10] را نام برد.

با استفاده از این آزمایش می توان نمودار تنش پیوستگی-لغزش را برای میلگردها رسم نمود؛ اما باید دقت شود در این آزمایش بتن تحت فشار است و میلگرد کشیده می شود در صورتی که در سازه واقعی بتن و میلگرد با هم تحت کشش یا فشار می باشند؛ بنابراین، آزمایش بیرون کشیدگی نماینده رفتار پیوستگی بتن و فولاد در تیرها نیست. همچنین، این آزمایش تنش پیوستگی را بیشتر از تنش پیوستگی واقعی در یک تیر نشان می دهد. لذا استفاده از این آزمایش برای اهداف طراحی مناسب نیست [۱۱].



شکل ۱ آزمایش بیرون کشیدگی [9]

### آزمایش میلگرد در گیر در بتن

در این آزمایش، یک میلگرد درگیر شده در یک استوانه بتنی از دو طرف تحت نیروی کششی قرار می‌گیرد. با ازدیاد نیرو، ترک‌های کششی در بتن ایجاد می‌شود. با رسیدن ترک به سطح میلگرد، تنش پیوستگی در امتداد ترک صفر شده و بین دو ترک متوالی از میلگرد به بتن توسعه می‌یابد. شکل (۲) شماتیکی از آزمایش میلگرد درگیر در بتن را نشان می‌دهد.

از جمله مطالعاتی که با استفاده از این آزمایش اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی را بررسی کرده‌اند، می‌توان به مطالعات شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]، آمله و میرزا [12]، دای و همکاران [13]، آریانتو و شینوهرا [14] و کیم و همکاران [15] اشاره کرد.

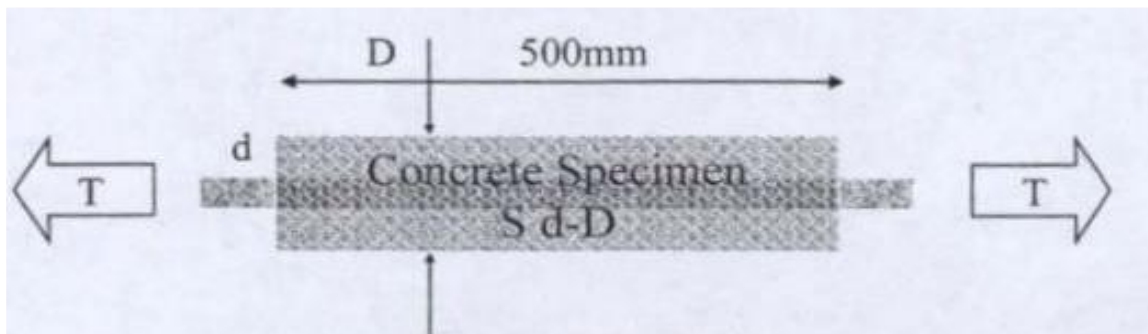
با استفاده از این آزمایش نمودار تنش پیوستگی -

لغزش رسم نمی‌شود؛ اما با توجه به اینکه در این آزمایش بتن تحت کشش است، این آزمایش شباهت بیشتری به رفتار میلگرد در یک تیر بتنی دارد [۱۱].

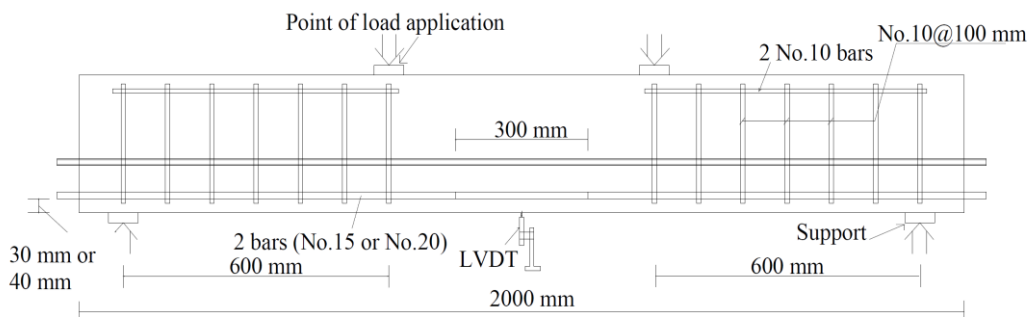
### آزمایش تیر وصله‌دار

با استفاده از این آزمایش می‌توان به‌طور واقع‌بینانه برآورده نمود. همچنین به‌منظور تعیین مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد برای اهداف طراحی، می‌توان از این آزمایش استفاده کرد.

مطالعات کمی با استفاده از این آزمایش برای بررسی اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی انجام شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه شیها تا [16] اشاره کرد.

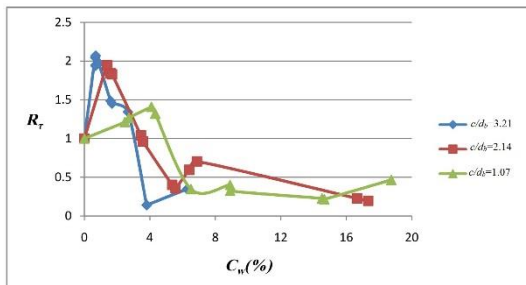


شکل ۲ آزمایش میلگرد درگیر در بتن [4]

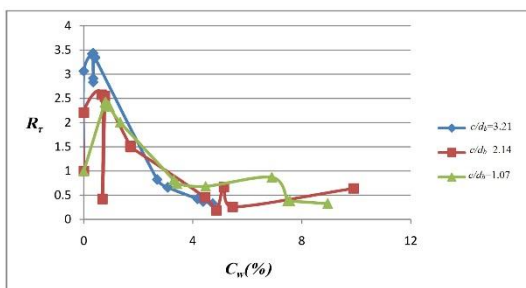


شکل ۳ آزمایش پیوستگی تیر واقعی با وصله [16]

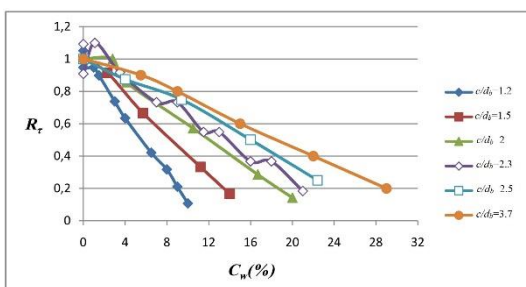
با  $c/d_b$  های ۱/۲، ۱/۵، ۲، ۲/۳، ۲/۵ و ۳/۷ است. مقاومت نسبی این نمونه‌ها در مقابل درصد خوردگی برای  $c/d_b$  های مختلف در شکل (۴-ج) نشان داده شده است.



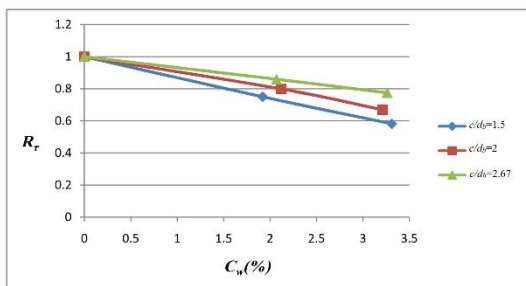
الف) آزمایش بیرون کشیدگی [9] w/c=0.75



ب) آزمایش بیرون کشیدگی [9] w/c=0.4



ج) آزمایش میلگرد درگیر در بتن [4]



د) آزمایش تیرهای وصله‌دار [16]

شکل ۴ اثر  $c/d_b$  بر روی مقاومت پیوستگی میلگردهای خورده‌شده

### اثر $c/d_b$ بر روی مقاومت پیوستگی میلگردهای خورده شده با بتن

مطالعات کمی در مورد اثر نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد ( $c/d_b$ ) بر روی مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد خورده شده انجام شده است. در میان مطالعات ذکر شده در بخش ۲، مطالعات شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]، یالسنیر و همکاران [9] و شیها تا [16]، اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی نسبی ( $R_\tau$ ) بین میلگرد و بتن با  $c/d_b$  های مختلف تحت آزمایش‌های گوناگون را بررسی کرده‌اند. مقاومت پیوستگی نسبی ( $R_\tau$ ) به صورت نسبت مقاومت پیوستگی نمونه خورده شده ( $\tau_{uc}$ ) به مقاومت پیوستگی نمونه خورده نشده متناظر با آن ( $\tau_{u0}$ ) تعریف می‌شود:

$$R_\tau = \frac{\tau_{uc}}{\tau_{u0}} \quad (1)$$

در سال ۲۰۱۲، یالسنیر و همکاران [9]، با استفاده از آزمایش بیرون کشیدگی اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی را بررسی کردند. بررسی آنها شامل ۹۰ نمونه با  $c/d_b$  های ۱/۰۷، ۲/۱۴ و ۳/۲۱ تحت درصدهای خوردگی مختلف بود. مقاومت پیوستگی نسبی این نمونه‌ها برای بتن با مقاومت فشاری ۲۳ و ۵۱ مگاپاسگال با  $c/d_b$  های مختلف در مقابل درصد خوردگی میلگرد ( $C_w(\%)$ ) به ترتیب در شکل‌های (۴-الف و ب) نشان داده شده است.  $C_w(\%)$  مقدار خوردگی میلگرد است که به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$C_w = \frac{\bar{m}_0 l - m_c}{\bar{m}_0 l} \quad (2)$$

که در آن  $\bar{m}_0$  وزن واحد طول میلگرد خورده نشده،  $l$  طول میلگرد خورده شده و  $m_c$  وزن میلگرد بعد از خورده شدن است.

در سال ۲۰۰۷، شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]، اثر  $c/d_b$  را بر روی مقاومت پیوستگی با استفاده از نمونه‌های میلگرد درگیر در بتن تحت خوردگی بررسی کردند. این مطالعه شامل ۵۸ نمونه است که ۱۴ نمونه آنها به‌عنوان نمونه کنترل و ۴۴ نمونه دیگر تحت مراحل مختلف خوردگی

## مدل‌های ارائه شده برای تخمین مقاومت

## پیوستگی نسبی

همان‌طور که در بخش ۱ ذکر شد، مقاومت پیوستگی با افزایش خوردگی ابتدا افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به خوردگی بحرانی ( $C_{cr}$ ) کاهش می‌یابد. سطح خوردگی بحرانی که بعد از آن مقاومت پیوستگی شروع به کاهش می‌کند، به مقدار خوردگی لازم برای ترک خوردن پوشش بتن مربوط می‌شود. این سطح خوردگی بحرانی در تحقیقات گذشته در محدوده ۰/۸۴ تا ۲ درصد ذکر شده است که در جدول (۱) آورده شده است.

مدل‌های کاهش مقاومت پیوستگی ارائه شده توسط محققان قبلی در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در بیشتر مدل‌های ارائه شده اثر  $c/d_b$  در نظر گرفته نشده است.

در مدل شایان‌فر و قلعه‌نوی [4] اثر  $c/d_b$  در نظر گرفته شده است. در آزمایش میلگرد درگیر در بتن بعد از بارگذاری ترک‌های عرضی بر روی نمونه ایجاد می‌شود. بر اساس فاصله ترک‌های عرضی مقاومت پیوستگی محاسبه می‌شود. در این مدل  $C_{II}$  مقدار خوردگی است که بعد از بارگذاری هیچ ترک عرضی در نمونه ایجاد نشود. به عبارت دیگر، فراتر از این خوردگی مقاومت پیوستگی به حداقل مقدار خود و نزدیک صفر رسیده است.

در سال ۲۰۱۱، شیپاتا [16] اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی ۹ تیر بتن مسلح وصله‌دار را بررسی کرد. در این مطالعه، تیرها دارای مقطع  $200 \times 300$  میلی‌متر با  $c/d_b$  های ۱/۵، ۲ و ۲/۶۷ بودند و تحت خوردگی‌های ۰، ۲/۵، ۵ درصد قرار گرفتند. مقاومت پیوستگی نسبی این نمونه‌ها در مقابل درصد خوردگی برای  $c/d_b$  های مختلف در شکل (۴-د) نشان داده شده است.

با مشاهده شکل (۴) همان‌طور که قبلاً ذکر شد در خوردگی‌های کم مقاومت پیوستگی افزایش می‌یابد و در درصدهای خوردگی بالا مقاومت پیوستگی کاهش می‌یابد. همچنین، شکل‌های (۴-ج و د) نشان می‌دهند با افزایش  $c/d_b$ ، شیب منحنی در قسمت نزولی کاهش می‌یابد؛ اما از شکل‌های (۴-الف و ب) که با استفاده از آزمایش بیرون کشیدگی به دست آمده است، نمی‌توان به چنین نتیجه‌ای دست پیدا کرد؛ بنابراین همان‌طوری که در بخش قبل ذکر شد نتایج مقاومت پیوستگی آزمایش میلگرد درگیر در بتن به نتایج تیرهای وصله‌دار شباهت بیشتری دارد.

بنابراین در این مطالعه از نتایج آزمایش میلگرد درگیر در بتن برای مدل‌سازی اثر  $c/d_b$  بر روی مقاومت پیوستگی نسبی میلگردهای خورده شده استفاده شده است.

جدول ۱ مدل‌های مقاومت پیوستگی نسبی و خوردگی بحرانی

مرجع	رابطه	$C_{cr}(\%)$
بارگاوا و همکاران [17]	$R_t = e^{-0.117(C_w - 1.5\%)}$	۱/۵
کابرا [18]	$R_t = 1 - 0.056C_w$	۰/۸۴
لی و همکاران [8]	$R_t = e^{-0.0561C_w}$	-
چانگ و همکاران [19]	$R_t = 0.116 \left(\frac{C_w}{100}\right)^{-0.55}$	۲
شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]	$R_t = 0.932 + 0.044 \frac{c}{d_b} - 0.823 \frac{C_w}{C_{II}}$	-

۳۰	۲/۳	۹/۰	۳/۵۱	۰/۷۳
۳۱	۲/۳	۱۱/۵	۲/۶۳	۰/۵۵
۳۲	۲/۳	۱۳/۰	۲/۶۳	۰/۵۵
۳۳	۲/۳	۱۶/۰	۱/۷۶	۰/۳۷
۳۴	۲/۳	۱۸/۰	۱/۷۶	۰/۳۷
۳۵	۲/۳	۲۱/۰	۰/۸۸	۰/۱۸
۳۶	۳/۷	۰/۰	۵/۹۸	۱/۰۰
۳۷	۳/۷	۰/۰	۵/۹۸	۱/۰۰
۳۸	۳/۷	۱/۸	۶/۹۸	۱/۱۷
۳۹	۳/۷	۲/۵	۵/۹۸	۱/۰۰
۴۰	۳/۷	۵/۰	۵/۹۸	۱/۰۰
۴۱	۳/۷	۷/۰	۵/۹۸	۱/۰۰
۴۲	۳/۷	۱۲/۰	۴/۹۸	۰/۸۳
۴۳	۳/۷	۱۵/۵	۴/۹۸	۰/۸۳
۴۴	۳/۷	۲۰/۰	۳/۹۹	۰/۶۷
۴۵	۳/۷	۲۶/۵	۲/۹۹	۰/۵۰
۴۶	۳/۷	۳۲/۰	۱/۹۹	۰/۳۳
۴۷	۱/۵	۰/۰	۳/۶۶	۱/۰۰
۴۸	۱/۵	۰/۰	۳/۶۶	۱/۰۰
۴۹	۱/۵	۲/۳	۳/۳۵	۰/۹۲
۵۰	۱/۵	۵/۷	۲/۴۴	۰/۶۷
۵۱	۱/۵	۱۱/۲	۱/۲۲	۰/۳۳
۵۲	۱/۵	۱۴/۰	۰/۶۱	۰/۱۷
۵۳	۲/۵	۰/۰	۵/۶۷	۱/۰۰
۵۴	۲/۵	۰/۰	۵/۶۷	۱/۰۰
۵۵	۲/۵	۴/۰	۴/۹۶	۰/۸۷
۵۶	۲/۵	۹/۴	۴/۲۵	۰/۷۵
۵۷	۲/۵	۱۶/۰	۲/۸۴	۰/۵۰
۵۸	۲/۵	۲۲/۴	۱/۴۲	۰/۲۵

مدل پیشنهادی

در این بخش با استفاده از نتایج نمونه‌های میلگرد درگیر در بتن ارائه شده توسط شایان‌فر و قلعه‌نوی [4] که در جدول (۲) آورده شده، به ارائه مدلی برای تخمین کاهش مقاومت پیوستگی ناشی از خوردگی پرداخته شده است.

جدول ۲ اطلاعات نمونه‌های میلگرد درگیر در بتن [4]

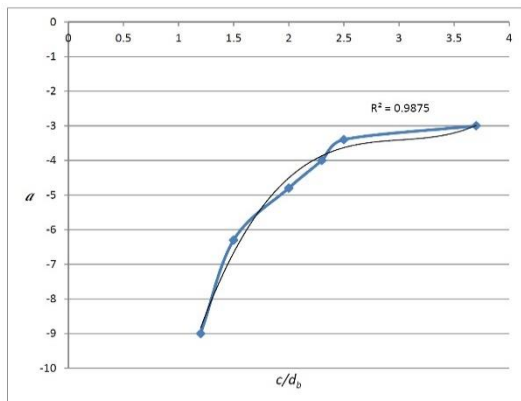
شماره نمونه	c/d <sub>b</sub>	C <sub>w</sub> (%)	τ <sub>uc</sub>	R <sub>c</sub>
۱	۲	۰/۰	۳/۲۹	۱/۰۰
۲	۲	۰/۰	۳/۲۹	۱/۰۰
۳	۲	۲/۸	۳/۲۹	۱/۰۰
۴	۲	۴/۱	۲/۸۲	۰/۸۶
۵	۲	۱۰/۵	۱/۸۸	۰/۵۷
۶	۲	۱۶/۷	۰/۹۴	۰/۲۹
۷	۲	۲۰/۰	۰/۴۷	۰/۱۴
۸	۳/۷	۰/۰	۶/۶۵	۱/۰۰
۹	۳/۷	۰/۰	۶/۶۵	۱/۰۰
۱۰	۳/۷	۵/۵	۵/۹۹	۰/۹
۱۱	۳/۷	۹/۰	۵/۳۲	۰/۸۰
۱۲	۳/۷	۱۵/۰	۳/۹۹	۰/۶۰
۱۳	۳/۷	۲۲/۰	۲/۶۶	۰/۴۰
۱۴	۳/۷	۲۹/۰	۱/۳۳	۰/۲۰
۱۵	۱/۲	۰/۰	۲/۹۵	۱/۰۵
۱۶	۱/۲	۰/۰	۲/۶۶	۰/۹۵
۱۷	۱/۲	۱/۰	۲/۶۶	۰/۹۵
۱۸	۱/۲	۱/۵	۲/۵۲	۰/۹۰
۱۹	۱/۲	۳/۰	۲/۰۷	۰/۷۴
۲۰	۱/۲	۴/۰	۱/۷۸	۰/۶۳
۲۱	۱/۲	۶/۵	۱/۱۸	۰/۴۲
۲۲	۱/۲	۸/۰	۰/۸۹	۰/۳۱
۲۳	۱/۲	۹/۰	۰/۵۹	۰/۲۱
۲۴	۱/۲	۱۰/۰	۰/۳۰	۰/۱۱
۲۵	۲/۳	۰/۰	۵/۲۳	۱/۰۹
۲۶	۲/۳	۰/۰	۴/۳۵	۰/۹۱
۲۷	۲/۳	۱/۱	۵/۲۷	۱/۱۰
۲۸	۲/۳	۳/۵	۴/۳۹	۰/۹۲
۲۹	۲/۳	۷/۰	۳/۵۱	۰/۷۳

در این مدل اثر c/d<sub>b</sub> در نظر گرفته شده است. برای این هدف، معادله بهترین منحنی برازش شده (با نرم‌افزار اکسل) در شاخه نزولی برای c/d<sub>b</sub> های مختلف به دست آورده شده است. در همه این منحنی‌ها بهترین منحنی برازش شده به صورت خطی (درجه اول) است. a شیب این خط‌های برازش شده برای هر c/d<sub>b</sub> است. شکل (۵)

شکل (۶) نشان می‌دهد رابطه بین  $c/d_b$  و  $a$  به صورت منحنی درجه سه است. در شکل (۶) منحنی برازش شده رسم شده و مقدار  $R^2$  آن آورده شده است. رابطه بین  $c/d_b$  و  $a$  به صورت زیر است:

$$a = 0.845 \left(\frac{c}{d_b}\right)^3 - 7.646 \left(\frac{c}{d_b}\right)^2 + 23.25 \left(\frac{c}{d_b}\right) - 27.2 \quad (۳)$$

با مقایسه خوردگی بحرانی در  $c/d_b$  های مختلف مشاهده می‌شود، رابطه خاصی بین خوردگی بحرانی و  $c/d_b$  وجود ندارد.

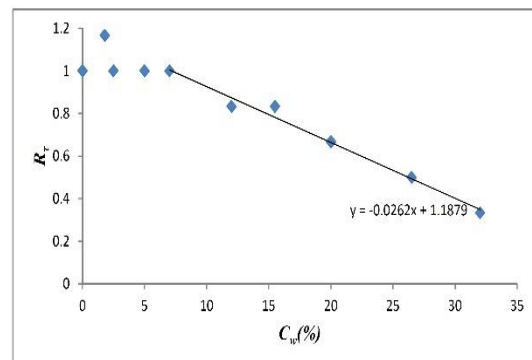


شکل ۶ اثر  $c/d_b$  بر روی شیب منحنی قسمت نزولی

بنابراین، مقدار خوردگی بحرانی با استفاده از میانگین‌گیری خوردگی بحرانی برای مقادیر مختلف  $c/d_b$  محاسبه می‌شود. این مقدار برابر ۱/۲ درصد است که در محدوده‌ای که محققان قبلی ذکر کرده‌اند و در جدول (۱) نشان داده شده، قرار گرفته است.

با جایگذاری معادله خط در شاخه نزولی منحنی مقاومت پیوستگی نسبی و در نظر نگرفتن افزایش مقاومت پیوستگی در خوردگی‌های کمتر از خوردگی‌های بحرانی، رابطه مقاومت پیوستگی نسبی به صورت رابطه (۴) خلاصه می‌شود:

نمونه‌ای از نحوه محاسبه  $a$  برای  $c/d_b=۳/۷$  را نشان می‌دهد.  $R^2$  ضریب همبستگی معادلات خط با نتایج آزمایشگاهی است که در جدول (۳) برای هر دسته  $c/d_b$  آورده شده است. خوردگی بحرانی ( $C_{cr}$ ) مقدار خوردگی است که در خوردگی‌های بزرگ‌تر از آن مقاومت پیوستگی کاهش می‌یابد. برای به دست آوردن مقدار خوردگی بحرانی، در معادله خط به دست آمده برای هر  $c/d_b$ ، مقدار مقاومت پیوستگی نسبی را برابر یک قرار داده و مقدار خوردگی متناظر با آن محاسبه می‌شود.



شکل ۵ خط برازش شده برای  $c/d_b=۳/۷$

در جدول (۳) مقادیر  $a$ ،  $C_{cr}$  و  $R^2$  آورده شده است. جدول (۳) نشان می‌دهد با افزایش  $c/d_b$  شیب منحنی (a) کاهش می‌یابد. برای یافتن رابطه بین آنها مقادیر  $c/d_b$  در مقابل  $a$  در شکل (۶) رسم شده است.

جدول ۳ پارامترهای معادلات خط برازش داده شده

$c/d_b$	$a$	$C_{cr}(\%)$	$R^2$
۱/۲	-۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۹۹۷
۱/۵	-۰/۰۶۳	۰/۷۴	۰/۹۹۸
۲	-۰/۰۴۸	۱/۸۹	۰/۹۹۳
۲/۳	-۰/۰۴	۱/۲۷	۰/۹۷۷
۲/۵	-۰/۰۳۴	۱/۱۷	۰/۹۸۹
۳/۷	-۰/۰۳	۲/۰۶	۰/۹۹۹

دهنده مقاومت نسبی آزمایشگاهی و نتایج مقاومت نسبی مدل‌های تئوری است.

برای ارزیابی مدل علاوه بر نمونه‌های ارائه شده در مدل‌سازی نمونه‌های ارائه شده توسط آمله و میرزا [12] نیز استفاده شده است. آمله و میرزا [12] در سال ۱۹۹۹، مطالعه‌ای در مورد اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی با استفاده از آزمایش میلگرد درگیر در بتن انجام دادند. مطالعه آنها شامل ۸ نمونه به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر است.

شاخص‌های آماری برای نمونه‌های موجود در مدل‌سازی و نمونه‌های آمله و میرزا [12] محاسبه شد. این اطلاعات در جدول (۴) ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های دیگر، با توجه به نتایج آماری دارای خطای کمتری است. به طوری که خطای کلی ( $e_{tot}$ ) در مدل پیشنهادی نسبت به مدل شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]، بارگاوا و همکاران [17]، کابرا [18]، لی و همکاران [8] و چانگ و همکاران [19] به ترتیب ۱۸، ۷۰، ۷۷، ۵۵ و ۶۴ درصد کاهش یافته است. شکل (۷) عملکرد مدل پیشنهادی و مدل‌های ارائه شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی مدل پیشنهادی نسبت به دیگر مدل‌ها بزرگ‌تر است. نتایج نشان می‌دهد مدل پیشنهادی دارای خطای کمتری است.

$$R_t = \begin{cases} 1C_w \leq 1.2 \\ 1 + [0.845(\frac{C}{d_b})^3 - 7.646(\frac{C}{d_b})^2] \\ +23.25(\frac{C}{d_b}) - 27.2](C_w - 1.2) & C_w > 1.2 \end{cases} \quad (4)$$

### ارزیابی مدل پیشنهادی مقاومت پیوستگی نسبی

به منظور ارزیابی و مقایسه مدل پیشنهادی با دیگر مدل‌ها از شاخص‌های استفاده شد. این شاخص‌های آماری عبارت‌اند از: ۱- میانگین مربع، ۲- متوسط قدر مطلق خطا، ۳- انحراف معیار و ۴- خطای کلی که به ترتیب با روابط (۵) تا (۸) تعیین می‌شوند:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (\frac{Theo_i - Expe_i}{Expe_i})^2}{N} \quad (5)$$

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^N |\frac{Theo_i - Expe_i}{Expe_i}|}{N} \quad (6)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\frac{Theo_i - Theo_{avg}}{Expe_i - Expe_{avg}})^2}{N-1}} \quad (7)$$

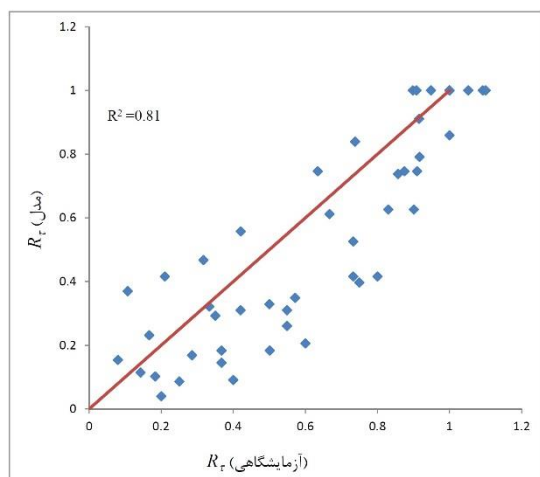
$$e_{tot} = 100 * \frac{\sum_{i=1}^N |Expe_i - Theo_i|}{\sum_{i=1}^N |Expe_i|} \quad (8)$$

در رابطه‌های فوق،  $Expe_i$  و  $Theo_i$  به ترتیب نشان

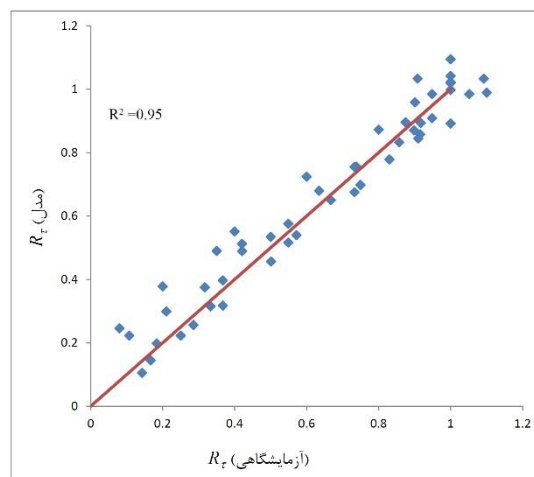
جدول ۴ شاخص‌های آماری در مدل‌های مختلف

	MSE	AAE	SD	$e_{tot}$
شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]	۳/۰۱	۱۱/۴۱	۱۷/۱۲	۸/۱۴
بارگاوا و همکاران [17]	۸۹/۲۴	۵۲/۴۸	۹۰/۲۵	۲۲/۰۳
کابرا [18]	۴۱۴۱/۳۶	۱۴۸/۳۶	۶۵۱/۷۹	۲۸/۷۱
لی و همکاران [8]	۷/۷۱	۱۸/۵۸	۲۷/۴۴	۱۴/۶۷
چانگ و همکاران [19]	۱۳/۰۹	۲۶/۱۳	۳۵/۴۳	۱۸/۷۰
مدل پیشنهادی	۲/۷۱	۹/۷۴	۱۶/۰۹	۶/۶۵

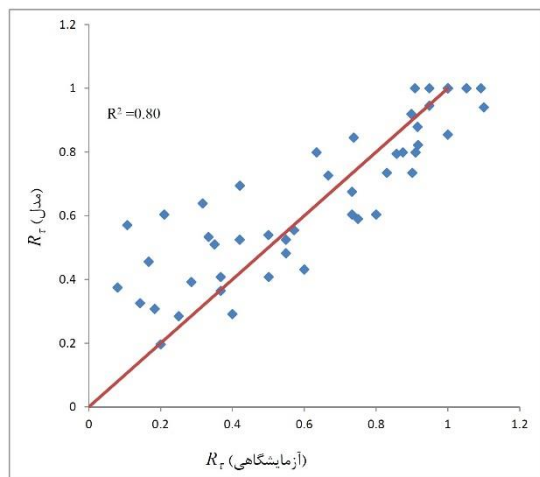




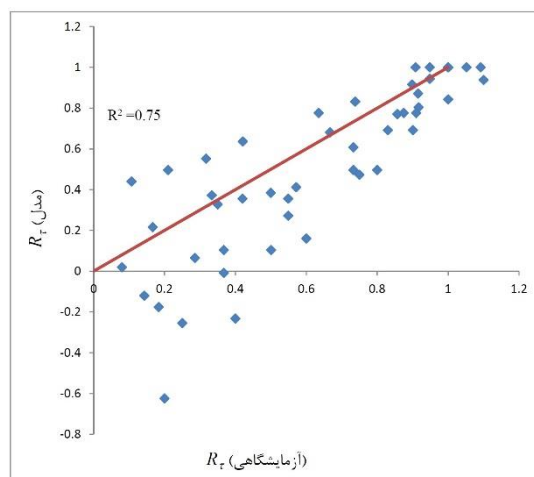
(ب) بارگاوا و همکاران [17]



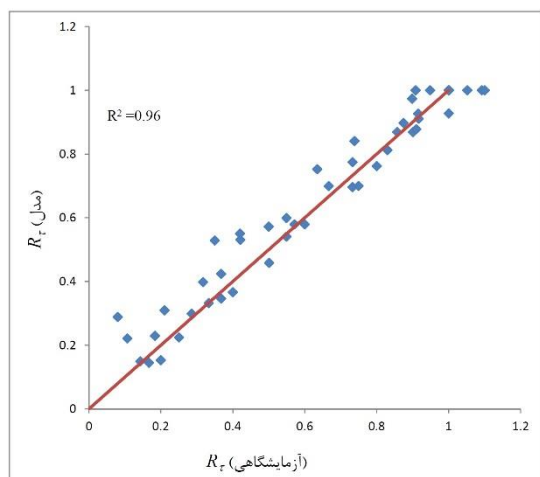
(الف) مدل شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]



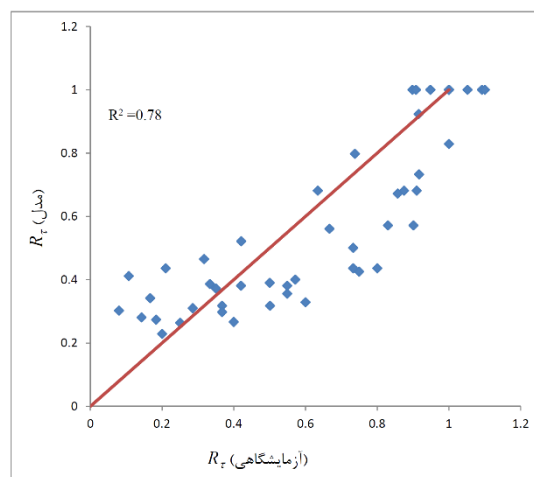
(د) لی و همکاران [8]



(ج) کابرا [18]



(و) مدل پیشنهادی



(ه) چانگ و همکاران [19]

شکل ۷ مقایسه‌ی بین نتایج آزمایشگاهی و مقاومت پیوستگی نسبی تخمین زده شده

**مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار**

در این بخش از مدل پیشنهادی ارائه شده در بخش قبل برای تخمین مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار استفاده می‌شود و نتایج مدل پیشنهادی با نتایج مدل شیپاتا [16] مقایسه می‌شود.

همان‌طور که در بخش ۲ ذکر شد مطالعه کمی بر روی مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار انجام شده است. از جمله مطالعاتی که بر روی این نوع آزمایش انجام شده است مطالعه شیپاتا [16] است. اطلاعات مربوط به آزمایش‌های شیپاتا [16] در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵ اطلاعات نمونه‌های آزمایش‌های شیپاتا [16]

شماره نمونه	c/d <sub>b</sub>	C <sub>w</sub> (%)	ε <sub>uc</sub>	R <sub>T</sub>
۱	۱/۵	۰/۰۰	۴/۲۸	۱/۰۰
۲	۱/۵	۱/۹۲	۳/۲۱	۰/۷۵
۳	۱/۵	۳/۳۱	۲/۴۹	۰/۵۸
۴	۲/۰	۰/۰۰	۴/۰۲	۱/۰۰
۵	۲/۰	۲/۱۲	۳/۲۱	۰/۸۰
۶	۲/۰	۳/۲۱	۲/۶۹	۰/۶۷
۷	۲/۵	۰/۰۰	۴/۲۶	۱/۰۰
۸	۲/۵	۲/۰۷	۳/۶۶	۰/۸۶
۹	۲/۵	۳/۲۶	۳/۳۰	۰/۷۷

ضریب α را می‌توان با کمک بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک محاسبه کرد، به طوری که مقدار خطای کلی (ε<sub>tot</sub>) که با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود، به حداقل مقدار خود برسد. با انجام بهینه‌سازی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی شیپاتا [16]، با جمعیت اولیه ۲۰۰، پس از ۲۰ تکرار و در نظر گرفتن محدوده α بین صفر تا ده، مقدار α برابر ۳ حاصل شد. این نشان می‌دهد شیب شاخه نزولی منحنی مقاومت پیوستگی نسبی برای تیر با میلگردهای وصله‌دار خورده شده بیشتر از شیب منحنی نمونه‌های میلگرد درگیر در بتن است.

شیپاتا [16] رابطه (۱۰) را برای مقاومت نسبی پیوستگی تیرهای وصله‌دار ارائه داد:

$$R_T = 1 - 0.1C_w \quad (10)$$

برای مقایسه مدل پیشنهادی و مدل شیپاتا [16] شاخص‌های آماری برای هر دو مدل محاسبه شد و در جدول (۶) ارائه شد.

جدول ۶ شاخص‌های آماری در مدل‌های مختلف

	ε <sub>tot</sub>	MSE	AAE	SD
شیپاتا [16]	۴/۴۸	۰/۵۸	۵/۱۴	۸/۰۴
مدل پیشنهادی	۳/۷۷	۰/۳۵	۳/۸۹	۴/۹۵

همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود مدل پیشنهادی مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار را بهتر تخمین می‌زند. به طوری که استفاده از مدل پیشنهادی باعث کاهش ۱۶ درصدی خطای کلی نسبت به مدل شیپاتا [16] می‌شود. همچنین، ضریب همبستگی برای مدل شیپاتا [16] ۰/۸۶ و برای مدل پیشنهادی ۰/۹۲ است؛ که این ضریب هم نشان دهنده عملکرد بهتر مدل پیشنهادی است.

**نتایج**

در این تحقیق مطالعه‌ای بر روی تحقیقات آزمایشگاهی گذشته در زمینه مقاومت پیوستگی بین میلگردهای

برای استفاده از مدل پیشنهادی برای مقاومت نسبی پیوستگی تیرهای وصله‌دار نیاز است مدل پیشنهادی با نتایج آزمایش‌های شیپاتا [16] کالیبره شود؛ بنابراین باید شیب منحنی در شاخه نزولی با استفاده از ضریب α کالیبره شود. ضریب α به صورت زیر در مدل در نظر گرفته می‌شود:

$$R_T = \begin{cases} 1C_w \leq 1.2 \\ 1 + \alpha[0.845(\frac{c}{d_b})^3 - 7.646(\frac{c}{d_b})^2] \\ +23.25(\frac{c}{d}) - 27.2](C_w - 1.2) & C_w > 1.2 \end{cases} \quad (9)$$

مشاهده می‌شود مقاومت پیوستگی نسبی آزمایش‌های میلگرد درگیر در بتن شباهت بیشتری با آزمایش‌های تیرهای وصله‌دار واقعی دارد.

۳. مدل پیشنهادی در این مطالعه، مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار را نسبت به مدل شیپاتا بهتر تخمین می‌زند. به طوری که استفاده از این مدل باعث کاهش ۱۶ درصدی خطای کلی نسبت به مدل شیپاتا [16] می‌شود.

خورده شده و بتن انجام شد. در ادامه مقایسه‌ای بین آزمایش‌های مختلف برای تعیین مقاومت پیوستگی انجام گرفت و نهایتاً مدلی برای تعیین مقاومت پیوستگی تیرهای وصله‌دار ارائه شد. بر اساس این بررسی‌ها نتایج زیر به دست آمده است:

۱. نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد اثر قابل توجهی بر روی مقاومت پیوستگی میلگردهای خورده شده در سطح‌های خوردگی یکسان دارد.

۲. با بررسی انجام گرفته بر روی نوع آزمایش‌ها،

## مراجع

1. Duan, A., Dai, J.G. and Jin, W.L., "Probabilistic approach for durability design of concrete structures in marine environments", *ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 1-8, (2014).
2. Cairns, J., Du, Y. and Law, D.W., "Structural performance of corrosion-damaged concrete beams", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 60, No. 5, pp. 359-370, (2008).
3. Al Sulaimani, G.J., Kaleemullah, M., Basunbul, I.A. and Rasheeduzzafar, "Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members", *ACI, Structural Journal*, vol. 87, No. 2, pp. 220-231, (1990).
4. Shayanfar, M.A. and Ghalehovi, M., "Corrosion effects on tension stiffening behavior Reinforced Concrete", *Computers and Concrete*, vol. 4, No. 5, pp. 403-424, (2007).
5. Law, M.W., Tang, D., Molyneaux, T.K.C. and Gravina, R., "Impact of crack width on bond: confined and unconfined rebar", *Materials and Structures*, Vol. 44, No. 7, pp. 1287-1296, (2011).
6. Tondolo, F., "Bond behaviour with reinforcement corrosion", *Construction and Building Materials*, Vol. 93, pp. 926-932, (2015).
7. Zhang, X., Liang, X., Wang, Z., Huang, H. and Zhou, H., "An Experimental Study on Effect of Steel Corrosion on the Bond-Slip Performance of Reinforced Concrete", *5<sup>th</sup> International Conference on Durability of Concrete Structures*, (2016).
8. Lee, H.S., Noguchi, T. and Tomosawa, F., "Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, No. 3, pp. 1313-1318, (2002).
9. Yalciner, H., Eren, O. and Sensoy, S., "An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level", *Cement and Concrete Research*, vol. 42, No. 5, pp. 643-655, (2012).

10. Zhang, W.P., Chen, H. and Gu, X.L., "Bond behaviour between corroded steel bars and concrete under different strain rates", *Magazine of Concrete Research*, vol. 68, No. 7, pp. 364-378, (2016).  
۱۱. مستوفی نژاد، د.، سازه‌های بتن آرمه (جلد دوم)، اصفهان، انتشارات ارکان دانش، (۱۳۸۸).
12. Amleh, L. and Mirza, S., "Corrosion Influence on Bond between Steel and Concrete", *ACI, Structural Journal*, vol. 96, No. 3, pp. 415-423, (1999).
13. Dai, J., Kato, E., Iwanami, M. and Yokota, "Cracking and tension stiffening behavior of corroded RC members", *Report of the port and airport research institute*, vol. 46, No. 2, pp. 1-24, (2007).
14. Aryanto, A. and Shinohara, Y., "Bond Behavior between Steel and Concrete in Low Level Corrosion of Reinforcing Steel", 15 WCEE, (2012).
15. Kim, H.R., Choi, W.C., Yoon, S.C. and Noguchi, T., "Evaluation of Bond Properties of Reinforced Concrete with Corroded Reinforcement by Uniaxial Tension Testing", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 10, No. 3, pp. 43-52, (2016).
16. Shihata, A., "CFRP strengthening of RC beam with corroded lap spliced steel bars", Master of Applied Science Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Canada, (2011).
17. Bhargava, K., Ghosh, A.K., Mori, Y., Ramanujam, S., "Suggested Empirical Models for Corrosion-Induced Bond Degradation in Reinforced Concrete", *Journal of Structural Engineering*, vol. 134, No. 2, 2008, pp. 221-230.
18. Cabrera, J.G., "Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion", *Cement and Concrete Composite*, vol. 18, No. 1, 1996, pp. 47-59.
19. Chung, L., Kim, J.J. and Yi, S., "Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars", *Cement and Concrete Composite*, vol. 30, No. 7, 2008, pp. 603-611.