****

مجله علمی – پژوهشی

مهندسی عمران مدرس

دوره بیست و یکم، شماره 1، سال1400

**بررسی عددي تأثیر خوردگی آرماتورهای عرضی بر کاهش مقاومت فشاری المان­های بتن مسلح**

**علی گوهررخی1\*، جمال احمدی2، محسنعلی شایانفر3، کیارش ناصراسدی2، محمد قانونی بقاء4**

1- دانش آموخته دکتری سازه گروه عمران دانشگاه زنجان

2- استادیار گروه عمران دانشگاه زنجان

3- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

4- استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

**\*goharrokhi.ali@znu.ac.ir**

تاریخ دریافت: تاریخ پذیرش:

**چکیده**

با افزایش عمر سازه­ها خوردگی آرماتور در اعضای بتن مسلح به عنوان یک مشکل مهم در محیط­های مستعد خوردگی درآمده است. از طرفی خوردگی آرماتورهای عرضی باتوجه به پوشش بتنی و قطر کمتر، زودتر از آرماتورهای طولی شروع می­شود. این امر باعث کاهش محصورشدگی و در نتیجه کاهش ظرفیت تغییرشکل و شکل­پذیری سازه می­شود. بنابراین، ارزیابی سازه­های بتن مسلح خورده­شده موجود به موضوع تحقیقاتی مورد علاقه بسیاری از پژوهشگران در زمینه مطالعات سازه تبدیل شده است. در این مقاله به بررسی کاهش مقاومت المانهای بتن مسلح با آرماتور عرضی خورده شده پرداخته شده است. در ابتدا مدل عددی نمونه­ها با استفاده از نرم­افزار اجزای محدود ساخته شده و با نتایج آزمایشکاهی درستی‌آزمایی می‌شود. در مرحله بعد مدل­های بیشتری با در نظر گرفتن اثر پارامتر مقاومت مشخصه بتن ساخته شده و مقاومت فشاری کاهش یافته بتن محصور شده ارزیابی شده است. نتایج حاکی از آن است که در اثر خوردگی آرماتورهای دورپیچ، مقاومت محصورشدگی ناشی از آنها کاهش می­یابد ولی این کاهش در درجات خوردگی بالاتر کمتر است. همچنین در اثر خوردگی آرماتورهای عرضی از نوع خاموت، مقاومت محصورشدگی ناشی از آنها کاهش می­یابد ولی این کاهش بسته به فاصله خاموت­ها و درجه خوردگی متفاوت است.

**واژگان کلیدی:** دورپیچ، خاموت، خوردگی، محصورشدگی، مقاومت فشاری.

1. **مقدمه**

خوردگی آرماتور یک واکنش الکتروشیمیایی طبیعی در سازه­های بتن مسلح است. این واکنش در معرض شرایط محیطی مستعد، از جمله نمک­های یخ­زدا، آب دریا، دی‌اکسید کربن، دی­اکسید گوگرد و غیره تشدید می­شود. کلرید ناشی از نمک (NaCl)، به عنوان یک کاتالیزور در فرآیند خورگی، می­تواند آثار قابل­توجهی بر میلگرد بگذارد. به دلیل اینکه میلگرد ضروری­ترین جزء در بتن مسلح است، خوردگی آرماتور در سازه­های بتن مسلح موجود، نگرانی­های زیادی را در مورد ایمنی، مقاومت و عملکرد لرزه­ای در میان پژوهشگران، مهندسان و همچنین ساکنین آنها ایجاد کرده است. افزایش حجم محصولات خوردگی باعث ترک­خوردگی پوشش بتنی و در نتیجه کاهش سطح مقطع مؤثر بتن می­شود [1].

در ارزیابی­های مهندسی و همچنین مطالعات آزمایشگاهی بر بتن مسلح خورده شده، پژوهشگران دریافتند که آرماتورهای عرضی تحت آسیب­های شدیدتری نسبت به آرماتورهای طولی قرار دارند [2-4]. بدلیل پوشش بتنی نسبتا کمتر، یون کلر و دیگر عناصر شیمیایی راحت­تر به آرماتورهای عرضی می­رسند. به علاوه، قطر آرماتورهای عرضی کمتر از آرماتورهای طولی بوده و بنابراین، نسبت به خوردگی آسیب­پذیرتر هستند. بنابراین، خوردگی در آرماتورهای عرضی زودتر شروع شده و همچنین سطح خوردگی در آنها بیشتر است.

خوردگی آرماتورهای عرضی محصورشدگی را بطور جدی تضعیف کرده و بنابراین مقاومت را کاهش می­دهد. با این وجود، تاکنون اغلب مطالعات آزمایشگاهی و مدلسازی عددی بر آثار خوردگی آرماتورهای طولی در رفتار اعضای بتن مسلح متمرکز شده است و خوردگی آرماتورهای عرضی کمتر دیده شده است. به همین دلیل، عدم قطعیتی بر اینکه خوردگی شدید آرماتورهای عرضی چگونه بر مقاومت و رفتار اعضای بتن مسلح اثر خواهد گذاشت، وجود دارد.

با استفاده از شبيه‌سازي عددي و با بكارگيري نرم افزارهاي رايج اجزا محدود، مطالعاتی با هدف بررسي آثار خوردگي آرماتور در بتن، انجام گرفته است. به عنوان نمونه، Berra و همكاران با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS اثر خوردگي بر کاهش چسبندگي بين بتن و آرماتور را در سطوح مختلف خوردگی بررسی کردند [5]. همچنين Lundgren با استفاده از نرم افزار اجزا محدود DIANA به تحليل ترك­خوردگي ناشی از خوردگي و آزمايش بيرون كشيدن آرماتورهای خورده شده، پرداخت [6]. علاوه بر اين‌ها Saether و Sand هم يك تير، تحت اثر خوردگي آرماتور را با استفاده از نرم افزار DIANA مدل سازي نموده و نتايجي مشابه با نمونه مورد آزمايش به دست آوردند [7]. شایانفر و قانونی بقا نیز 3 ستون مستطیلی بتن‌آرمه، در حالت بدون وجود خوردگی و با وجود خوردگی به روش تحلیل المان محدود غیرخطی و با استفاده از یک المان بسیار پیشرفته آنالیز و سپس نتایج را بررسی و مقایسه کردند [8]. همچنین شایانفر و همکاران با استفاده از مطالعه موردی قاب دو بعدی، رفتار لرزه ای اعضا و کل سازه، تحت سناریوهای مختلف خوردگی را مقایسه کردند [9].

در اين پژوهش ابتدا به چگونگی مدلسازی بتن مسلح و همچنین آثار خوردگی بر آن در نرم­افزار اجزا محدود ABAQUS پرداخته می­شود. سپس مدل­های عددی تهیه شده و نتایج با نمونه­هاي آزمايشگاهي مقايسه می‌شوند. پس از تاييد درستی مدل، با استفاده از مدل عددی و روابط تحلیلی که برای خوردگی بتن پیشنهاد شده، تاثیر پارامترهای پوشش بتن، قطر میلگرد، افزایش محصولات خوردگی و مقاومت بتن روی مقاومت فشاری بتن مسلح محصور­شده مورد بررسی قرار گرفته است.

1. **مدلسازی بتن مسلح**

بتن بنابر طبیعتش ماده­ای با رفتار پیچیده است و حتی در سطوح تنش پایین هم رفتار کاملا غیر خطی دارد. دلایل اصلی پاسخ غیر خطی بتن را علاوه بر غیر خطی بودن خود ماده می­توان در آثار محیطی، ترک خوردگی، سخت شدگی دو محوره و نرم شدن کرنش­ها خلاصه نمود.

در نرم­افزار آباکوس برای در نظر گرفتن خرابی و همچنین تعریف رفتار غیرخطی بتن، از سه روش مدل ترک پخشی[[1]](#footnote-1)، مدل ترک شکننده[[2]](#footnote-2) و مدل پلاستیسیته آسیب­دیده[[3]](#footnote-3) استفاده می­شود. مدل پلاستیسیته آسیب دیده، تنها مدلی است که در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی قابل استفاده است و بدلیل نرخ همگرایی بالای آن از این مدل استفاده شده است. در مدل پلاستیسیته آسیب دیده بتن دو فرض اصلی ترک­خوردگی کششی و خردشدن فشاری در سازوکار خستگی در نظر گرفته می­شود [10]. در ترک­خوردگی کششی در اثر کشش تک محوره، منحنی تنش- کرنش تا نقطه تنش خرابی $σ\_{to}$ به صورت خطی تغییر می­کند که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن همراه است. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی­ها به صورت ترک­های قابل مشاهده درمی‌آیند که به صورت منحنی نرم­شوندگی در فضای تنش- کرنش نمایش داده می­شود. در خرد شدن فشاری بتن، تحت فشار تک­محوره، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری شدگی $σ\_{co}$ به صورت الاستیک خواهد بود و رفتار در ناحیه پلاستیک عموماً به صورت منحنی سخت‌شوندگی بیان می­شود که در نهایت با رسیدن به نقطه­ای تنش نهایی $σ\_{cu}$ منحنی­ها به صورت منحنی نرم‌شوندگی در می­آید [10]. این مدل معرفی شده با وجود سادگی نسبی ویژگی‌های اصلی بتن را ارضا می‌نماید. پارامترهای مورد استفاده این مدل، که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته، در جدول (1) آمده است.

**جدول 1.** مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدلسازی بتن

|  |  |
| --- | --- |
| Value | Parameter |
| 0.2 | elastic modulus ($ν$) |
| 23500 MPa | Modulus of elasticity ($E\_{0}$) |
| 0.01 | Viscosity Parameter $(μ$) |
| 0.667 | $$k\_{C}$$ |
| 1.16 | $$\frac{f\_{b0}}{f\_{c0}}$$ |
| 0.1 | Eccentricity (e) |
| 35 | Dilation angle ($ψ)$ |

**Table1.** Parameters for concrete modeling

در نرم­افزار آباکوس، منحنی­های تنش- کرنش مختلفی برای مدلسازی رفتار فولاد وجود دارد. در این پژوهش (براساس آئین­نامه­ها مانند EN1992-1-1) [11] برای مدلسازی آرماتور مدل دو خطی الاستیک- کاملا پلاستیک[[4]](#footnote-4) مطابق شکل (1) در نظر گرفته شده است. در اين مدل رفتاري، رفتار مصالح در ابتدا به طور كامـل الاسـتيك بـوده و پـس از رسيدن به تسلیم، كاملاً پلاستيک می­شود.

**شکل 1.** منحنی تنش کرنش فولاد



**Fig. 1.** Stress-strain curve of steel

در این پژوهش مدول الاستیسیته[[5]](#footnote-5) و ضریب پواسون[[6]](#footnote-6) فولاد به ترتیب  و ، و تنش تسلیم[[7]](#footnote-7) آن براساس مقادیر مشخص شده در پژوهش­های آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است.

1. **مدلسازی اعضای بتن مسلح با آرماتور خورده شده**

اثر خوردگی آرماتورها بر رفتار سازه­های بتن مسلح را می­توان به از بین رفتن آرماتور و همچنین از بین رفتن پیوستگی بین بتن و فولاد نسبت داد. پژوهشگران مختلفی به بررسی چگونگی شبیه­سازی عددی بتن مسلح خورده شده با نرم­افزارهای گوناگون اجزاء محدود پرداخته­اند. در این پژوهش، از نرم­افزار آباکوس که یک نرم­افزار مرسوم در مدلسازی اجزاء محدود غیرخطی است، استفاده شده است. این نرم­افزار، در بررسی مسائل مربوط به رفتار پلاستیک و همچنین بعنوان یک حل­کننده با گام­های افزایشی خودکار بسیار مشهور و کاربردی است. در این بخش به بررسی فرضیات و روش­های مربوط به مدلسازی بتن مسلح خورده شده پرداخته خواهد شد.

**ترک­خوردگی ناشی از خوردگی**

نرم­افزار آباکوس دو نوع مدل برای مدلسازی بتن دارد: مدل پلاستیسیته آسیب دیده (damaged plasticity model) و مدل ترک پخشی (smeared cracking model). هر دو این مدل­ها با مشخص کردن داده­های مورد نیاز می­توانند منحنی تنش کرنش را توصیف کنند. چون مدل پلاستیسیته آسیب دیده به لحاظ نرخ همگرایی نسبت به مدل ترک پخشی بهتر است، در مدلسازی بتن ترک­خورده از این مدل استفاده می­شود. نرم­شدگی پوشش بتنی براثر ترک­خوردگی ناشی از خوردگی بوسیله ضرایب نرم­شدگی و منحنی تنش کرنش اصلاح شده بتن شبیه‌سازی می­شود. ضرایب اصلاح مختلفی برای در نظر گرفتن کاهش سختی بتن ترک­خورده پیشنهاد شده است. او[[8]](#footnote-8) و همکاران [12]، برای در نظر گرفتن اثر نرم­شدگی (کاهش سختی) بتن ترک­خورده، یک ضریب بصورت زیر پیشنهاد داده­اند:

|  |  |
| --- | --- |
| $$ζ=\frac{0.9}{\sqrt{1+600ε\_{r}}}$$ | (1) |

که ɛr کرنش کششی بتن پوشش است. همچنین رابطه تنش کرنش زیر مربوط به زمانی است که پوشش بتنی ترک­خورده باشد.

|  |  |
| --- | --- |
| $$σ=\left\{\begin{array}{c}ζ\acute{f\_{c}}\left(2\left(\frac{ε}{ζε\_{0}}\right)-\left(\frac{ε}{ζε\_{0}}\right)^{2}\right) ε<ζε\_{0}\\ζ\acute{f\_{c}}\left(1-\left(\frac{\frac{ε}{ζε\_{0}}-1}{\frac{2}{ζ}-1}\right)^{2}\right) ε\geq ζε\_{0}\end{array}\right.$$ | (2) |

که ɛ0 کرنش بتن متناظر با تنش حداکثر بتن می­باشد.

**هندسه و مقاومت میلگرد خورده شده**

لی[[9]](#footnote-9) و همکاران [13] گزارش دادند که براثر خوردگی، مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی و ضریب الاستیسیته فولاد کاهش می­یابد. براین اساس، به وسیله تحلیل رگرسیون، معادلات خطی برای محاسبه پارامترهای مکانیکی میلگرد خورده شده، جدول (2)، ارائه شده است. در نتیجه، با استفاده از مدل مصالح فولادی با پلاستیسیته در نرم­افزار آباکوس، تنش و کرنش غیرخطی متناظر با آن تعیین می‌شود.

**جدول 2.** مشخصات مکانیکی آرماتور خورده شده [14]

|  |  |
| --- | --- |
| Equation for Mechanical Properties | Mechanical Properties Parameters |
| $$σ\_{cy}=\left(1-1. 98\left(Δc/100\right)\right)σ\_{y}$$ | Yield Strength |
| $$σ\_{cu}=\left(1-1. 57\left(Δc/100\right)\right)σ\_{u}$$ | Ultimate Strength |
| $$E\_{cs}=\left(1-1. 15\left(Δc/100\right)\right)E\_{s}$$ | Elastic Modulus |
| $$δ\_{c}=\left(1-2. 59\left(Δc/100\right)\right)δ$$ | Elongation |

**Table 2.** Mechanical properties of corroded reinforcement [14]

**شکل 2.** از بین رفتن مقاومت آرماتور خورده شده [14]



**Fig. 2.** Strength degradation of corroded rebar [14]

که Δc سطح خوردگی برحسب درصد است. در مطالعات آزمایشگاهی، سطح خوردگی با درصد کاهش وزن میلگرد نسبت به وزن اولیه تعیین می­شود. همچنین در شکل (2) ضریب کاهش برای هریک از پارامترهای آرماتور خورده شده آمده است.

در این پژوهش، با توجه به اینکه آرماتورهای عرضی دچار لغزش نمی­شوند، برای تعریف اندرکنش بین بتن و فولاد از دستور embedded regions استفاده شده است. این دستور درجات آزادی المان­های فولادی را به درجات آزادی المان­های بتن اطراف آن مقید کرده و از هرگونه حرکت آرماتور در داخل بتن جلوگیری می­کند.

1. **جزئیات نمونه­های مدلسازی شده و درستی‌آزمایی**

برای درستی‌آزمایی مدلسازی، از دو مطالعه آزمایشگاهی که در آن کاهش مقاومت فشاری ناشی از محصورشدگی سازه­هاي بتن مسلح با درجات مختلف خوردگي آرماتورهای عرضی ارزیابی شده است، استفاده می­شود [15,16]. در این مطالعات، دو گروه از نمونه­های بتنی مسلح برای بررسی اثر خوردگی آرماتورهای عرضی، تحت سطوح مختلف خوردگی در نظر گرفته شده است.

گروه اول شامل نمونه­های مکعب مستطیلی با مقطع مربعی به ضلع 200 میلی­متر و ارتفاع 320 میلی­متر هستند. 4 آرماتور طولی به قطر 12 میلی­متر در گوشه­ها و آرماتورهای عرضی نیز به قطر 6 میلی­متر و در فواصل (S) 140 و 70 میلی­متر استفاده شده است. همچنین در دو انتهای نمونه­ها خاموت­هایی به قطر 8 میلی­متر برای جلوگیری از شکست زودهنگام در نواحی تحت بارگذاری قرار داده شد [11,12]. (شکل3-الف و جدول3)

گروه دوم شامل نمونه­های استوانه­ای با قطر 150 میلی­متر و ارتفاع 300 میلی­متر می­باشد. در این نمونه­ها از آرماتورهایی به قطر 6 میلی­متر به عنوان دورپیچ با گامهای (S) 25 و 50 میلی­متر استفاده شده است [10]. (شکل3-ب و جدول4)

**شکل 3. جزئیات نمونه­های آزمایشگاهی**

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **ب) گروه دوم (استوانه­ای)** | **الف) گروه اول (مکعب مستطیلی)** |

**Fig. 3.** Details of Experimental speciments

**جدول3.** مشخصات نمونه­های مکعب مستطیلی

|  |  |
| --- | --- |
| Stirrup diameter (S) | Name |
| 140 | M |
| 70 | N |
| واحدها: mm |

**Table 3.** Specifications of prism specimens

**جدول 4.** مشخصات نمونه­های استوانه­ای

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Core diameter (dc) | Spiral pitch (S) | Name |
| 100 | 50 | A |
| 100 | 25 | B |
| 50 | 50 | C |
| 50 | 25 | D |
| واحدها: mm |

**Table 4.** Specifications of cylindrical specimens

برای درستی‌آزمایی مدل ساخته شده و همچنین خروجی­های نرم افزار، مقایسه­ای بین مقاومت فشاری محصورشده بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و نمونه‌های مدلسازی شده صورت گرفت. متغیرها عبارتند از: درصد خوردگی، شکل مقطع، قطر و فاصله آرماتورهای عرضی که در شکل­های (4 و 5) آمده است. همانطور که در این شکل­ها مشخص است، مدل ساخته شده هماهنگی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

در شکل (6) وضعیت نمونه­ها در پایان آزمایش و مدل اجزای محدود نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، مدل اجزای محدود ساخته شده به خوبی وضعیت نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

**شکل 4:** درستی‌آزمایی نمونه­های مکعب مستطیلی

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

**Fig. 4.** Verification of prism specimens

**شکل 5:** ‌درستی‌آزمایی نمونه­های استوانه­ای

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

**Fig. 5.** Verification of cylindrical specimens

**شکل 6.** مقایسه نمونه­ها در پایان آزمایش و مدل اجزای محدود

|  |  |
| --- | --- |
| E:\my paper\picture\1\DSC04072.JPG |  |
|  | E:\my paper\untitled.jpg |

**Fig. 6.** Comparison at the end of the experiment and the finite element model

1. **بررسی عددی اثر خوردگی آرماتورهای عرضی**

پس از اطمینان از درستی مدل، نمونه­های عددی دیگری با استفاده از نرم‌افزار ساخته شد و تاثیر خوردگی آرماتورهای عرضی بر مقاومت محصورشدگی (*fcc*) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه مقدار مقاومت فشاری بتن (*fc*) برای نمونه­های آزمایشگاهی و مدل ساخته شده جهت سنجی 30 MPa بوده است، در این بخش مقاومت­های 25 MPa، 35 MPa و 40 MPa برای مقاومت فشاری بتن در نظر گرفته شدند. نتایج بر حسب درجه خوردگی (*Cw*) و مقاومت محصورشدگی (*fcc*) در شکل­های (7 و 8) آمده است.

**شکل 7.** تأثیر مقاومت فشاری (*fc*) بر نمونه­های استوانه­ای

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

**Fig. 8.** The effect of compressive strength (fc) on cylindrical specimens

**شکل 8.** تأثیر مقاومت فشاری (*fc*) بر نمونه­های مکعب مستطیلی

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

**Fig. 7.** The effect of compressive strength (fc) on prism specimens

براساس شکل(7)، برای نمونه­های مکعب مستطیلی، در ابتدا خوردگی آرماتورهای عرضی اثر چندانی بر مقاومت بتن محصور شده نداشته و شیب نمودارها برای نمونه­های با *fc* مختلف ناچیز است. اما با افزایش درجه خوردگی، شیب افزایش یافته و اثر خوردگی قابل توجه است. این امر در شدت خوردگی حدود 3 درصد رخ می­دهد. این پدیده را می­توان ناشی از این دانست که در درجات خوردگی کمتر، کاهش بیشتری در پیوستگی بین فولاد و بتن رخ می­دهد.

همان‌گونه که در شکل (8) مشاهده می­شود، برای نمونه­های استوانه­ای، در ابتدا اثر خوردگی بر مقاومت بتن محصور شده برای نمونه­های با *fc* مختلف تقریباً یکسان بوده و شیب نمودارها برابر است. اما با افزایش شدت خوردگی، نمودارها همگرا شده و تقریبا مقاومت ثابت می­شود. این امر در درجه خوردگی حدود 2 درصد رخ می­دهد. همچنین در ابتدا شیب نمودارها زیاد و سپس کم می­شود؛ بدین معنا که در درجات خوردگی بالاتر، اثر خوردگی بر کاهش مقاومت کمتر است. این پدیده را می‌توان ناشی از این دانست که در درجات خوردگی بالاتر، اثر محصورشدگی ناشی از آرماتورها کمتر شده و بیشتر مقاومت فشاری ناشی از مقاومت بتن (*fc*) است.

با مقایسه شکل (7) با شکل (8) که به ترتیب مربوط به نمونه­های مکعب مستطیلی با آرماتورهای عرضی به شکل خاموت و نمونه­های استوانه­ای با آرماتورهای عرضی به شکل دورپیچ هستند، این نکته قابل توجه است که در درجات خوردگی پایین خوردگی دورپیچ­ها به مراتب بیشتر از خوردگی خاموت­ها بر کاهش مقاومت محصورشدگی اثرگذار است (شیب نمودارها بیشتر هستند). این امر را می­توان ناشی از این دانست که دورپیچ­ها به مراتب مقاومت فشاری را بر اثر محصورشدگی بیشتر از خاموت­ها افزایش می­دهند؛ در نتیجه مقاومت فشاری نمونه­های محصورشده با دورپیچ به از بین رفتن آرماتورهای عرضی (از جمله خوردگی) حساس­تر هستند.

در شکل­های (9 و 10) مقایسه­ای براساس نسبت فاصله آرماتورهای عرضی به پوشش بتنی ($\frac{S}{cover}$) انجام شده است. همان‌گونه که در شکل (10)، مربوط به نمونه‌های استوانه­ای با دورپیچ، مشاهده می­شود با افزایش مقاومت محصورشدگی (*fcc*) شیب اولیه نمودار افزایش می­یابد. بدین معنا که هنگامی که محصورشدگی ایجاد شده توسط دورپیچ­ها بیشتر افزایش می­یابد، به خوردگی حساس­تر شده و افت مقاومت ناشی از آن بیشتر می­شود. این امر را می­توان ناشی از حجم بیشتر آرماتورها (درصد حجمی بیشتر آرماتورها) دانست. همچنین در نمونه­های با $\frac{S}{cover}$ برابر (B و C)، با ضخامت پوشش بتنی و فاصله دورپیچ کمتر، آسیب­پذیری بیشتری نسبت به خوردگی دیده می­شود. این پدیده به دلیل نزدیکی آرماتورها به سطح و تاثیر زودتر و بیشتر یون کلر بر آنها است. نکته قابل توجه در این نمودارها این است که در خوردگی حدود 2 درصد مقدار مقاومت محصورشدگی (*fcc*) برای تمامی نمونه­ها تقریبا یکسان است.

**شکل 9.** تأثیر فاصله آرماتورهای عرضی به پوشش بتنی ($\frac{S}{cover}$) در نمونه­های استوانه­ای

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

**Fig. 9.** The effect of spiral pitch to the concrete cover ($\frac{S}{cover}$) in cylindrical specimens

**شکل 10.** تأثیر فاصله آرماتورهای عرضی به پوشش بتنی ($\frac{S}{cover}$) در نمونه­های مکعب مستطیلی

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

**Fig. 10.** The effect of spacing of stirrups to the concrete cover ($\frac{S}{cover}$) in prism specimens

همان‌گونه که در شکل (10)، مربوط به نمونه­های مکعب مستطیلی با خاموت، مشاهده می­شود در ابتدا خوردگی خاموت­ها اثر چندانی بر مقاومت بتن محصور شده نداشته و شیب نمودارها برای نمونه­های با *نسبت* $\frac{S}{cover}$مختلف ناچیز است. اما با افزایش درجه خوردگی، شیب افزایش یافته و اثر خوردگی قابل توجه است. همچنین در نمونه­هایی که نسبت $\frac{S}{cover}$ کمتر است، کاهش مقاومت ناشی از خوردگی زودتر رخ می­دهد.

1. **نتیجه‌گیری**

در این مقاله، کاهش مقاومت فشاری بتن مسلح به دلیل خوردگی آرماتورهای عرضی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و براساس مدلسازی عددی بررسی شد. به این منظور، چندین نمونه استوانه­ای مسلح شده با نسبت دورپیچ­های مختلف و نمونه مکعب مستطیل مسلح شده با آرماتورهای طولی ثابت ولی آرماتورهای عرضی با فاصله مختلف و نیز تحت درجات خوردگی مختلف برای تعیین مقاومت فشاری نهایی بتن مسلح آزمایش شدند. همچنین در بررسی عددی اثر مقاومت فشاری بتن (*fc*) نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

با توجه به آزمایش‌های انجام شده و ارزیابی عددی، در نمونه­های مسلح شده با آرماتور عرضی دورپیچ روند کاهشی مقاومت محصورشدگی تا خوردگی حدود 2 درصد بیشتر است. ولی پس از آن، اثر خوردگی بر کاهش مقاومت کمتر است. از طرفی در شدت خوردگی بالاتر برای مقاومت فشاری بتن (*fc*) مختلف، مقاومت محصورشدگی یکسان است. همچنین در نمونه­های با ضخامت پوشش بتنی کمتر، آسیب­پذیری بیشتری نسبت به خوردگی دیده شد.

در نمونه­های مسلح شده با آرماتور طولی و خاموت، در درجات خوردگی کمتر (حدود 3 درصد)، در نمونه‌های با قطر خاموت بزرگتر تغییر چندانی در مقاومت فشاری محصورشدگی مشاهده نشد. ولی با افزایش درجه خوردگی، حساسیت بیشتری نسبت به خوردگی نشان دادند. این امر برای نمونه­های با مقاومت فشاری بتن (*fc*) مختلف مشاهده شد. همچنین در نمونه‌هایی که نسبت $\frac{S}{cover}$ (فاصله خاموت­ها به پوشش بتنی) بیشتر است، کاهش مقاومت ناشی از خوردگی زودتر رخ می­دهد.

بطور کلی می­توان نتیجه گرفت که در اثر خوردگی آرماتورهای دورپیچ، مقاومت محصورشدگی ناشی از آنها کاهش می­یابد ولی این کاهش در درجات خوردگی بالاتر کمتر است. همچنین در اثر خوردگی آرماتورهای عرضی از نوع خاموت، مقاومت محصورشدگی ناشی از آنها کاهش می­یابد ولی این کاهش بسته به فاصله خاموت­ها و درجه خوردگی متفاوت است. وقتی فاصله خاموت­ها بیشتر است، کاهش مقاومت ناشی از خوردگی زودتر رخ می­دهد.

1. **مراجع**
2. M. Ghanooni-Bagha, M.A. Shayanfar, A.A. Shirzadi-Javid, H. Ziaadiny., (2016), “Corrosion-induced reduction in compressive strength of self-compacting concretes containing mineral admixtures”, Construction and Building Materials, 113, 221–228.
3. Li, C. Q. and S. T. Yang, Prediction of concrete crack width under combined reinforcement corrosion and applied load. Journal of Engineering Mechanics, 137(11), pp. 722-731, 2011.
4. Ma, Y., Che, Y. & Gong, J., Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading. Construction and Building Materials, 29, pp. 548-556, 2012.
5. Wang, X. H. & Liang, F. Y., Performance of RC columns with partial length corrosion. Nuclear Engineering and Design, 238(12), pp. 3194-3202, 2008.
6. M. Berra, A. Castellani, D. Coronelli, S. Zanni, G. Zhang, Steel–concrete bond deterioration due to corrosion: finite-element analysis for different confinement levels, Magazine of Concrete Research, 55(3) (2003) 237-247.
7. Lundgren, K., Bond between ribbed bars and concrete. Part 1: Modified model, Magazine of Concrete Research, (2005).
8. I. Saether, B. Sand, FEM simulations of reinforced concrete beams attacked by corrosion, 2012.
9. Shayanfar, M.A., Ghanooni-Bagha, M. Study of the corrosion effects of reinforcement in loading of reinforced concrete columns of bridges with limited non-linear element method. Sharif Journal Civil Engineering(2012). (in persian)
10. Shayanfar, M.A., Savoj, H.A., Ghanooni-Bagha, M., Kahrom, A. The effects of corrosion on seismic performance of reinforced concrete moment frames. Journal of Structural and Construction Engineering(2018). (in persian)
11. Abaqus Analysis Users Manual. 2016. Dassault Systemes Simulia Corp. Providence, RI.
12. EN 1992-1-1. 2004. Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 225 pp.
13. Ou, Y. C., Fan, H. D. & Nguyen, N. D., Long‐term seismic performance of reinforced concrete bridges under steel reinforcement corrosion due to chloride attack. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 42(14), pp. 2113-2127, 2013.
14. Lee, H. S., Noguchi, T. & Tomosawa, F., Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion. Cement and Concrete research, 32(8), pp. 1313-1318, 2002.
15. Zhang G, Li B. The corrosion of stirrups and its effect on the seismic fragility of a corroded reinforced concrete (RC) column. Risk Anal 2014;47:331–42.
16. Goharrokhi, A., Ahmadi, J., Shayanfar, M.A. *et al.* Effect of transverse reinforcement corrosion on compressive strength reduction of stirrup-confined concrete: an experimental study. *Sādhanā* **45,**49 (2020).
17. Ahmadi, J., Shayanfar, M.A., Ghanooni-Bagha, M. *et al.* An Experimental Investigation into the Effect of Transverse Reinforcement Corrosion on Compressive Strength Reduction in Spirally Confined Concrete. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng* (2020).
18. S.P. Tastani, S.J. Pantazopoulou, D. Zdoumba, V. Plakantaras, E. Akritidis, Limitations of FRP jacketing in confining old-type reinforced concrete members in axial compression, J. Compos. Constr. 10 (1) (2006) 13–25.
19. Tastani, S., and Pantazopoulou, S. \_2004\_. “Experimental evaluation of FRP jackets in upgrading RC corroded columns with substandard detailing.” Eng. Struct., 26\_6\_, 817–829.
20. Huang L, Xun X, Yan L, Zhu D. Compressive behavior of concrete confined with GFRP tubes and steel spirals. Polymers 2015;7(5): 851-875.

**A Numerical Investigation into the Effect of Transverse Reinforcement Corrosion on Compressive Strength Reduction of Reinforcement Concrete Elements**

**Ali Goharrokhi1\*, Jamal Ahmadi2, Mohsen Ali Shayanfar3, Kiarash Nasserasadi2, Mohammad Ghanooni-Bagha4**

1.PhD Graduate, Department of Civil Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

2.Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

3.Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

4.Assistant Professor, Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\***goharrokhi.ali@znu.ac.ir**

**Abstract**

As service years increase, the corrosion of steel rebar stands out as a major problem for existing reinforced concrete (RC) structures in corrosion-inducing environment. The mechanism of steel corrosion in concrete is an electro chemical process, which is often accelerated by the ingress of aggressive chemicals, for example chloride ion. The accumulation of corrosion products on steel rebar is able to generate circular stress which could result in cover cracking. Corrosion of steel rebar will degrade the physical appearance and reduce its original cross section. Corrosion often appears to be non-uniform and localized. Corrosion damaged RC elements displayed smaller yield strength, ductility, energy dissipation capacity, etc. Corrosion level of stirrup tends to be higher than longitudinal rebar due to smaller diameter and less cover protection. Stirrup corrosion decreased confinement behaviour on concrete, thus exacerbating the degeneration of the deformation capacity and the ductility of the RC structures. The corrosion of reinforcement steel bars (rebar) is a natural electrochemical reaction RC structures have to face with. It is exacerbated by exposure to corrosion-inducing environment factors, including de-icing salt, marine salty water, carbon dioxide, sulfur dioxide, etc. The chloride from salt (NaCl) could make hazardously chemical attack on steel bar by acting as an efficient catalyst in the corrosion process. The corrosion of steel bar in the existing reinforced concrete structure has raised great concern over its safety and seismic performance among practising engineers, researchers and residents, etc., because steel bar is the most essential element in RC. Corrosion reduces the effective cross-section area of longitudinal and transverse rebars.

Due to a small concrete cover of transverse rebars compared with longitudinal rebars, the corrosion of them becomes earlier and more severe, leading to cracks in concrete, a decrease of confinement, an intensification of reduction in deformation capacity and ductility of reinforced concrete structures. For this purpose, an experimental investigation is carried out on reinforced concrete specimens include spiral and stirrup and the variables include the corrosion percentage, rebar diameter, transverse rebar pitch, and confined core diameter. Results demonstrate that the high degree corrosion has a fewer significant effect on the reduction in confinement strength, and smaller-sized transverse reinforcements are less sensitive to corrosion.

**Keywords**: Chloride Attack, Spiral, Stirrup, Compressive Capacity, Confined Concrete Strength.

1. . Smeared cracking [↑](#footnote-ref-1)
2. Brittle cracking [↑](#footnote-ref-2)
3. Concrete damage plasticity [↑](#footnote-ref-3)
4. elastic–perfectly plastic [↑](#footnote-ref-4)
5. Modulus of elasticity [↑](#footnote-ref-5)
6. Poisson’s ratio [↑](#footnote-ref-6)
7. Yield stress [↑](#footnote-ref-7)
8. Ou [↑](#footnote-ref-8)
9. Lee [↑](#footnote-ref-9)