# بررسی آزمایشگاهی اتصالات دال-ستون در دال‌های تخت بتن آرمه دارای تحت خوردگی تسریع شده

**حمیدرضا سمیعی[1*]، علی خیرالدین [2]، محمد کاظم شربتدار [3]**

۱- فارغ التحصیل دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، hamidreza-samiee@semnan.ac.ir

۲- استاد ممتاز، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، Kheyroddin@semnan.ac.ir

۳- استاد ، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، msharbatdar@semnan.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT

**چکیده**

دال تخت بتن آرمه، به دلیل مزایا فراوان کاربرد گسترده‌ای در ساخت و سازهای مدرن یافته‌است. اما، عدم وجود تیر در این سیستم‌ها، پتانسیل شکست برش دوطرفه در اتصالات و فروپاشی پیشرونده را افزایش می دهد. این پژوهش به بررسی تأثیر خوردگی بر آرماتورها و اثرات پایدار آن بر رفتار دال تخت بتن‌آرمه (RC) می‌پردازد. در این راستا، هفت نمونه اتصال دال- ستون در مقیاس آزمایشگاهی ساخته و مورد آزمایش قرارگرفتند. برنامه آزمایشات در دو مرحله ۱. فرایند خوردگی تسریع شده؛ ۲. آزمایش مقاومت برش دو طرفه انجام گرفته است. نتایج نشان داد که افزایش نسبت آرماتور های خمشی ظرفیت برش دو طرفه را در نمونه‌ها با نسبت آرماتور کم، متوسط و زیاد به ترتیب از ۲۳۴ به ۲۷۲ و ۳۲۱ کیلو نیوتن افزایش می دهد، اما خوردگی ظرفیت برش دوطرفه را به ترتیب ۴۲، ۱۶ و ۵ درصد کاهش داد. خوردگی نیز، الگوهای ترک‌خوردگی را از حالت شعاعی به حالت موازی با لبه ستون تغییر می دهد و همچنین حالت‌های شکست را از خمشی به خمشی- برشی و یا به برش دوطرفه تغییر می دهد. در ادامه، در مقایسه نتایج تجربی با چهار آیین نامه طراحی ACI 318-19، CSA 23.3-14، Eurocode 2 و BS 8110-97 مشخص شد، که پیش بینی های ارایه شده برای نمونه های خورده شده غیر قابل اطمینان می باشد. این تحقیق پتانسیل قابل توجهی برای شناخت نقاط ضعف طراحی موجود در مقابل اثرات مضر خوردگی بر اتصالات دال -ستون را دارد و می تواند مقدمه ای برای مقاوم سازی اتصلات خورده شده باشد.

**کلمات کلیدی**

**دال تخت بتن آرمه، نسبت آرماتور خمشی، خوردگی تسریع شده، مقاومت برش دو طرفه، ظرفیت تغییر شکل.**

## ۱- مقدمه

سیستم سازه‌ای دال بتن آرمه[1] به دلیل دهانه‌های بزرگ، ضخامت کم، قالب بندی آسان و چیدمان انعطاف‌پذیر به‌طور گسترده‌ای در ساختمان‌های بلند مرتبه و پارکینگ‌های طبقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، اتصالات دال-ستون در برابر شکست ترد برش دوطرفه[2] آسیب‌پذیر هستند که معمولاً با بارگذاری بیش از حد مجاز، انفجار، آتش‌سوزی یا خوردگی آرماتورها تحت شرایط محیطی نامساعد آغاز می‌شود. این نوع شکست به‌صورت یک مکانیسم موضعی در نزدیکی تکیه گاه رخ می دهد که با تشکیل یک عنصر ناقص مخروطی شکل مشخص می‌شود و منجر به افت ناگهانی در ظرفیت برش دوطرفه می‌گردد و ممکن است منجر به فروپاشی تدریجی شود [۱].

در یک سیستم سازه‌ای دال تخت، دال به‌صورت مستقیم بر روی ستون‌ها بدون استفاده از تیرها قرار می گیرد. در سیستم‌های سنتی، چهار روش اصلی اجرا وجود دارد: دال‌های ساده، دال‌های دارای پانل[3]، دال‌های دارای کتیبه سرستون[4] و دال‌های با ساختار ترکیبی. استفاده از سرستون‌ها یا پانل‌در نواحی اتصالات، رایج‌ترین روش برای افزایش ظرفیت برش دوطرفه اتصالات دال- ستون است. این روش‌ها به‌طور مؤثری طول دهانه را کاهش می‌دهند و منجر به کاهش لنگرها در دال و افزایش ظرفیت لنگر تکیه گاهی آن می‌شوند [۲]. با این حال، بسیاری از مهندسان به‌دلیل اثرات منفی سرستون‌ها و پانل‌ها بر عملکرد کلی سازه، ترجیح می‌دهند از دال‌های ساده استفاده کنند. بنابراین، از دهه ۱۹۵۰، استفاده از دال‌های بدون کتیبه سرستون به‌طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار گرفته اند [۳].

با توجه به اینکه دال تخت بتن آرمه یک عنصر سازه‌ای دوطرفه است و بارهای طبقه را به‌طور مستقیم به ستون‌ها منتقل می‌کند و به تیرها یا تیرچه های انتقال بار نیازی ندارد، از نظر جانبی انعطاف‌پذیر بوده و عملکرد خوبی در سازه‌ها دارد. علاوه بر این، عدم وجود تیرهای توزیع‌کننده بار منجر به ایجاد تنش‌های برشی و نرمال نسبتاً متمرکز در اتصالات دال-ستون می‌شود که در نهایت می تواند منجر به شکست برشی دوطرفه گردد. این نوع شکست به‌عنوان یک شکست ترد در نظر گرفته می‌شود و تهدید جدی برای ایمنی سازه محسوب می‌شود [۴]، که این موضوع تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه رفتار برش دوطرفه آنها، چه قبل و چه بعد از شکست، به دنبال داشته است.

چندین مدل نظری برای مقاومت اتصالات دال-ستون در برابر شکست برش دوطرفه توسعه یافته است. کینونن و همکاران[5] [۵] یک معیار شکست مبتنی بر انحنای دال پیشنهاد کردند که از طریق یک رابطه دو خطی لنگر-انحنا محاسبه می‌شود. این تحقیق تأثیر قابل توجه نسبت آرماتور خمشی بر رفتار دال بتن آرمه را نشان می‌دهد. تحقیقات نشان می‌دهد که تغییر نسبت‌های آرماتور خمشی (پایین، متوسط، بالا) منجر به حالت های شکست متفاوتی همچون شکست خمشی، خمشی-برشی و برش دوطرفه می‌شود. دیوید و همکاران[6] [۶] و نیلسن[7] [۷] مدل‌های مبتنی بر نظریه پلاستیسیته پیشنهاد کرده‌اند. الکساندر و همکاران[8] [۸] مدل بازوی فشاری مورب را برای اتصالات دال-ستون معرفی کردند. یوهانسن[9] [۹] و بازانت و همکاران[10] [۱۰] معادلات طراحی را بر اساس روش خط تسلیم و مکانیک شکست توسعه دادند. رویز و همکاران[11] [۱۱] یک مدل نظری جدید برای بررسی مقاومت و انعطاف‌پذیری دال‌ها با آرماتور برشی با استفاده از نظریه ترک برشی بحرانی ایجاد کردند. پارک و همکاران[12] [۱۲] و همچنین چوئی و همکاران[13] [۱۳] یک مدل مقاومت برشی مبتنی بر کرنش توسعه دادند تا مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح باریک را پیش‌بینی کنند. این مدل مقاومت برشی بر اساس معیارهای شکست مصالح بتن تعریف می‌شود، که در آن تعامل بین ظرفیت برشی و تنش عمودی ناشی از تغییر شکل خمشی، همراه با تأثیر آسیب خمشی بر ارزیابی مقاومت برشی تیر مورد توجه قرار می‌گیرد. شبستانی و همکاران[14] [۱۴] یک بررسی آزمایشگاهی و عددی از دال‌های دوطرفه با پیکربندی‌های مختلف بازشو انجام داده و بر روی رفتار سازه‌ای و مشخصات

[1] Reinforced concrete slab
[2] Two-way shear
[3] Drop panel
[4] Column capital
[5] Kinnunen et.al.
[6] David et.al.
[7] Nielsen
[8] Alexander et.al.
[9] Johansen
[10] Bazant et.al.
[11] Ruiz et.al.
[12] Park et.al.
[13] Choi et.al.
[14] Shabestani et al.

ACCEPTED MANUSCRIPT

عملکردی این دال‌ها تمرکز کردند. دیاو و همکاران[1] [۱۵, ۱۶] مکانیسم‌ها و مشخصات عملکردی اتصالات دال- ستون را تحت بارهای محوری، با و بدون خروج از مرکزیت، پس از شکست برش دوطرفه بررسی کردند. علاوه بر این، سروری و همکاران[2] [۱۷] تحقیقات تجربی در مورد رفتار دال‌های تخت پس از شکست برشی دوطرفه انجام داده و به‌دنبال آن چندین مکانیسم جایگزین برای اتصالات دال تخت پیشنهاد کردند. تحقیقات آنها تأثیر آرماتورهای یکپارچگی[3]، آرماتورهای فشاری، آرماتورهای برشی، آرماتورهای خرپایی[4]، آرماتورهای خم‌شده[5]، قطر آرماتورهای کششی و ضخامت پوشش بتنی را بر پاسخ پس از شکست برش دوطرفه اتصالات دال- ستون مورد بررسی قرار دادند. وانگ و همکاران[6] [۱۸] یک مطالعه عددی متمرکز بر ظرفیت توزیع نیرو در دال‌های تخت پس از شکست برشی دوطرفه انجام دادند و به‌طور خاص به مقاومت در برابر این حالت شکست پرداختند.

با توجه به ماهیت فاجعه‌بار شکست برش دوطرفه، پژوهشگران روش های مختلفی را برای کاهش این مشکل بررسی کرده‌اند. روش‌های سنتی برای افزایش مقاومت برشی دوطرفه شامل افزایش عمق دال، استفاده از پانل‌های و کتیبه های سرستون [۱۹]، میله‌های برشی[7]، پیچ‌های برشی[8] یا استفاده از کلاهک برشی[9] پس از نصب، بزرگ کردن مقطع ستون با بتن یا فولاد سازه‌ای [۲۰]، به‌کارگیری صفحات گوشه[10] دار و اسکلت‌های[11] فولادی و همچنین روش‌های پیش‌تنیدگی[۳, ۲۱] است. اگرچه این تکنیک‌ها در عمل مؤثر هستند، اما محدودیت‌هایی مانند حساسیت به خوردگی، وزن بالا و دشواری‌های نصب [۲۲] دارند.

پیشرفت‌در تولید مصالح نوین منجر به توسعه روش‌های جدید تقویت برش دوطرفه برای دال‌های تخت شده است. پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف[12](FRP) که به صورت چسبانده شده روی سطح خارجی[13] (EBR) به صورت ورق[14] یا لمینت[15] [۲۳] و یا به شکل آرماتور با استفاده از روش نزدیک به سطح[16] (NSM) [۲۴, ۲۵] یا با استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با الیاف با عملکرد بالا[17] (HPFRCC) [۲۶-۲۸]، به عنوان جایگزینی اجرایی برای تکنیک‌های موجود و رفع محدودیت های آن ها ارائه شده اند.

خوردگی آرماتورها چالش‌های قابل توجهی برای دوام سازه‌های بتنی آرمه در طول عمر سرویس[18] ایجاد می‌کند، به ویژه در محیط‌های خشن[19] مانند مکان‌های فراساحلی[20]، پارکینگ‌های در معرض نمک‌های ناشی از یخ زدایی[21] و سازه‌هایی در خلیج فارس که در یک جو شور قرار دارند [۲۹]. سازه‌های مذکور به‌دلیل خوردگی آسیب جدی می‌بینند و نیازمند تعمیرات پرهزینه یا حتی تخریب هستند [۳۰, ۳۱]. عوامل خورنده در حضور رطوبت می‌توانند از طریق ترک‌های خمشی و جمع‌شدگی[22] نفوذ کرده و به آرماتورها برسند و سرعت خوردگی را افزایش دهند [۳۲].

خوردگی آرماتورهای مدفون در بتن یک فرآیند الکتروشیمیایی است که به‌دلیل تشکیل سلول‌های خوردگی موضعی رخ می‌دهد. محلول درون مخلوط بتن به‌عنوان الکترولیت عمل می‌کند، که با هیدروکسیدهای کلسیم، پتاسیم و سدیم حاصل از هیدراسیون سیمان اشباع شده است. محیط قلیایی ایجادشده توسط این هیدروکسیدها، به شکل‌گیری یک لایه اکسیدی محافظ (لایه غیرفعال[23]) روی سطح فولاد منجر می شود و به این ترتیب زنگ‌زدگی را مهار می‌کند [۳۳]. با این حال، ورود یون‌های کلر به بتن می‌تواند قلیاییت محیط را کاهش داده و آن را به سمت اسیدی شدن سوق دهد. این کاهش pH می‌تواند به تخریب لایه غیرفعال و آغاز روند خورندگی منجر شود [۳۴].

تشکیل محصولات خوردگی (زنگ[24]) منجر به تولید تنش‌های انبساطی درون مخلوط بتن اطراف آرماتور ها می‌شود که باعث ایجاد ترک‌های کششی می‌گردد [۳۵]. پیشرفت این ترک‌ها ورود بیشتر مواد خورنده به سطح فولاد را تسهیل کرده و فرآیند خوردگی را

[1] Diao et al.
[2] Sarvari et.al.
[3] integrity reinforcement
[4] truss reinforcement
[5] bent-up bars
[6] Wang et.al.
[7] Shear bars
[8] Shear bolts
[9] Shear caps
[10] Steel angle plates
[11] Steel skeletons
[12] Fiber-Reinforced Polymers (FRP)
[13] Externally Bonded Reinforcement (EBR)
[14] Sheet
[15] Laminate
[16] Near-Surface Mounted (NSM)
[17] High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC)
[18] Service life
[19] Harsh environments
[20] Offshore locations
[21] Deicing salts
[22] Flexural and shrinkage cracks
[23] Passive layer
[24] Rust

ACCEPTED MANUSCRIPT

تسریع می‌کند. عواقب نهایی این وضعیت شامل ترک‌خوردگی و پوسته‌پوسته شدن بتن[1]، کاهش مقاومت پیوستگی[2] [۳۰, ۳۶-۳۸] و کاهش سطح مقطع آرماتور [۲۹, ۳۹] است که تأثیر منفی بر مکانیسم شکست برش دوطرفه و رفتار کلی سازه، از جمله انعطاف‌پذیری و مقاومت تسلیم [۴۰, ۴۱] دارد. در نتیجه، پیش‌بینی مقاومت برش دوطرفه اتصالات دال-ستون به‌طور فزاینده‌ای غیرقابل اطمینان می‌شود [۴۲-۴۶]. علیرغم آزمایش‌های گسترده خوردگی، تحقیقات مشخصی که به‌طور خاص به بررسی مقاومت و حالت های شکست اتصالات دال-ستون بتن آرمه دچار خوردگی پرداخته باشند، هنوز محدود باقی مانده است.

خوردگی طبیعی یک فرآیند بسیار کند و زمانبر می باشد. بنابراین، برای تسریع در تحقیقات مربوط به خوردگی، تکنیک‌های آزمایش تسریع‌شده، مانند آزمون جریان القایی[3](IC)، که برای شبیه‌سازی شرایط طبیعی و درک چگونگی تأثیر قرارگیری در معرض عوامل محیطی بر دوام بتن حیاتی هستند، به‌کار گرفته می‌شوند. این تکنیک‌ها شامل جریان القایی ولتاژ ثابت[4] (CV) ، نفوذ یون کلر[5] (CID) و محیط‌های اقلیمی مصنوعی[6] (ACE) می‌شوند. این روش‌ها با ارائه یک مسیر الکترولیتی، خوردگی را شبیه‌سازی کرده و سطح خوردگی از طریق جریان برق مستقیم اعمال‌شده بر روی آرماتورها کنترل می‌شود. معمولاً افت جرم[7] آرماتورهای خورده شده با استفاده از قانون فارادی[8] تعیین می‌شود [۴۷-۴۹].

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- طراحی نمونه ها

در این مطالعه، هفت نمونه آزمایشی اتصال دال- ستون بتن آرمه با طراحی یکسان توسعه یافته‌اند تا تأثیر خوردگی آرماتورهای خمشی بر مقاومت برش دوطرفه دال های تخت براساس آیین نامه ACI 318-19 [۵۰] مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۱ ابعاد دال ها و جزئیات آرماتورها را نشان می‌دهد، در حالی که جدول ۱ خلاصه‌ای از ویژگی‌های کلیدی نمونه‌ها را ارائه می‌دهد.

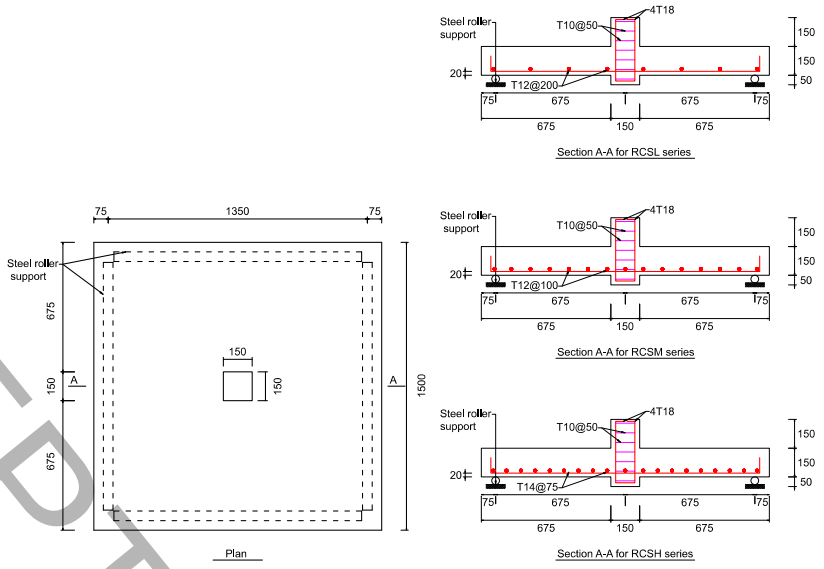
**جدول ۱: نحوه نام گذاری و مشخصات نمونه ها**

| گروه | نمونه ها | ارتفاع موثر (mm) | مقاومت فشاری (MPa) | شبکه آرماتور خمشی (mm) | نسبت آرماتور خمشی (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| CS | CS | - | ۳۲ | - | - |
| RCSL | RCSL<br>RCSL-C | ۱۱۲ | ۳۲ | T12@200 | ۰/۴۰ |
| RCSM | RCSM<br>RCSM-C | ۱۱۲ | ۳۲ | T12@100 | ۰/۷۵ |
| RCSH | RCSH<br>RCSH-C | ۱۰۹ | ۳۲ | T14@75 | ۱/۳۰ |

CS : دال بتنی بدون آرماتور، RCSL، RCSM، RCSH: بترتیب دال بتن آرمه با درصد آرماتور خمشی کم، متوسط و زیاد و C- : نماد خوردگی تسریع شده می باشد.
$d_o$: ارتفاع موثر، $f'_c$: مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه ای، p: نسبت آرماتور خمشی.

[1] Spalling
[2] Bond strength
[3] Impressed Current (IC)
[4] Constant Voltage (CV)
[5] Chloride Ion Diffusion (CID)
[6] Artificial Climate Environments (ACE)
[7] Mass loss
[8] Faraday's law

ACCEPTED MANUSCRIPT




**شکل ۱: ابعاد و جزییات آرماتوربندی نمونه ها برای گروه های RCSL، RCSM و RCSH**

هر نمونه دارای ابعاد ۱۵۰۰×۱۵۰۰×۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت پوشش بتن ۲۰ میلی‌متربوده، و تنها از یک شبکه آرماتور خمشی در ناحیه کششی استفاده شده است. بر اساس نسبت آرماتورهای خمشی، نمونه‌ها در چهار دسته‌بندی شامل گروه‌های CS ، RCSL، RCSM، و RCSH قرار گرفتند. گروه CS فاقد آرماتورهای خمشی می باشد، در حالی که گروه‌های RCSL ، RCSM، و RCSH به ترتیب با نسبت آرماتورهای خمشی ۰/۴۰، ۰/۷۵، و ۱/۳۰ درصدی طراحی شدند. هر نمونه شامل یک ستونچه[1] مربعی با مساحت ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر می باشد که به اندازه ۱۵۰ میلی‌متر در بالای سطح و ۵۰ میلی‌متر در زیر سطح امتداد یافته است. ستونچه‌ها شامل چهار آرماتور با قطر ۱۸ میلی‌متر و آرماتورهای عرضی با قطر۱۰ میلی‌متر با فاصله۵۰ میلی‌متر بوده و ضخامت پوشش بتنی روی آرماتور های عرضی ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. گروه‌های RCSL و RCSM به ترتیب با آرماتورهایی با قطر۱۲ میلی‌متر و با شبکه هایی به فاصله ۲۰۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و عمق موثر[2] ($d_0$) برابر با ۱۱۲ میلی‌متر، تقویت شده‌اند، و در گروه RCSH از آرماتورهایی با قطر ۱۴ میلی‌متر و با شبکه ای به فاصله ۷۵ میلی‌متر و عمق موثر ۱۰۹ میلی‌متر استفاده شده است. نمایه $d_0$ فاصله بین مرکز لایه آرماتورهای خمشی و سطح بتن در ناحیه فشاری است. در هر گروه، یک نمونه به عنوان نمونه کنترل در نظر گرفته شد و یک نمونه نیز تحت فرآیند خوردگی تسریع شده قرار گرفت.

برای دستیابی به خوردگی مطابق با شرایط محیطی طبیعی، تمامی نمونه‌ها همزمان در قالب‌های چوبی آماده شده، بتن ریزی شدند، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است. فرآیند عمل آوری از نمونه‌ها از یک روز پس از بتن ریزی با آب‌پاشی به مدت یک هفته و سپس ۲۸ روز نگهداری در دمای اتاق آغاز شد. پس از آن، نمونه‌ها به مدت ۱۸۰ روز در معرض شرایط خورنده قرار گرفتند؛ پس از انجام آزمون، نمونه‌هایی از آرماتورهای خورده شده برای ارزیابی خواص آنها از داخل بتن خارج شد. البته قابل ذکر می باشد که به دلیل محصولات خوردگی و جریان القایی، امکان نصب کرنش‌سنج بر روی آرماتورهای خمشی در نمونه‌های خورده شده وجود نداشت [۵۱].

### ۲-۲- مصالح

جدول ۲ طرح اختلاط یک متر مکعب بتن مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد. سیمان مورد استفاده سیمان پرتلند معمولی بر پایه استاندارد ASTM C150 [۵۲] بود، و آب مورد استفاده برای اختلاط و عمل آوری بتن نیز بر اساس ASTM C1602 [۵۳] با pH بین ۵/۵ و ۸/۵ تعیین شد. مقاومت فشاری هدف‌گذاری شده و نسبت آب به سیمان (w/c) بر اساس پیشنهادات

[1] Column stub

[2] Effective depth

ACCEPTED MANUSCRIPT

استاندارد انجمن بتن آمریکا[1] (ACI) در مورد اعضای افقی بتنی که در معرض یخزدگی و ذوب مجدّد قرار دارند و به طور مکرر در معرض آب و مواد یخزدا هستند (طبقه‌بندی شده به عنوان کلاسF3 ) [۵۰]، انتخاب شدند.







**شکل ۲: آرماتور بندی، قالب بندی و عمل آوری نمونه ها**

[1] American Concrete Institute (ACI)

ACCEPTED MANUSCRIPT

**جدول ۲: طرح اختلاط بتن برای یک متر مکعب بتن**

| سیمان(kg) | (w/c) | آب(L) | C/F | C.A. (kg) | F.A. (kg) | حداکثر اندازه سنگدانه (mm) | چگالی بتن ($kg/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۳۰۰ | ۰/۴ | ۱۲۰ | ۱/۳ | ۱۰۸۳ | ۸۳۳ | ۱۰ | ۲۳۰۰ |

w/c: نسبت آب به سیمان، F.A.[1]: مصالح ریزدانه، C.A.[2]: مصالح درشت دانه، C/F[3]: نسبت مصالح درشت دانه به ریز دانه.

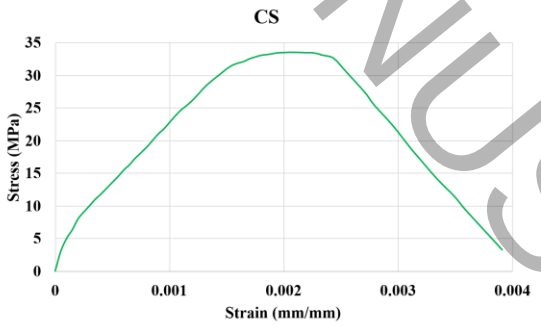
بر این اساس، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، حداقل ۳۰ مگاپاسکال تعیین شد و نسبت w/c حداکثر ۰/۴ بود. شن و ماسه با حداکثر اندازه ۱۰ میلی‌متر به عنوان مصالح درشت دانه و ریز دانه مورد استفاده قرار گرفتند. مخلوط بتن آماده برای ساخت همزمان تمامی نمونه‌ها به کار رفت. علاوه بر این، سه نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر از همان مخلوط گرفته شدند و سپس به مدت ۲۸ روز در داخل مخزن آب غوطه‌ور شدند تا خواص آن‌ها ارزیابی شود. مقاومت فشاری ۲۸ روزه این نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۳۲/۰، ۳۱/۹ و ۳۰/۹ مگاپاسکال ثبت شد.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، برای استفاده در تحلیل و ارزیابی خواص بتن، از جمله مدول الاستیسیته و رفتار فشاری-کششی، نمونه هایی از بتن گروه CS هسته‌گیر شدند.



**شکل ۳: آماده سازی برای تست تنش-کرنش**

منحنی تنش – کرنش حاصله از آزمایش نمودار تنش- کرنش فشاری در شکل۴ نشان داده شده است. در ادامه، نتایج مربوط به مدول الاستیسیته و مقادیر تنش و کرنش نهایی و حداکثر، به تفکیک در جدول ۳ ارائه شده است.




**شکل ۴: منحنی تنش-کرنش نمونه CS**

[1] Fine aggregate
[2] Coarse-to-Fine aggregate
[3] Coarse aggregate

ACCEPTED MANUSCRIPT

**جدول ۳: مشخصات و خصوصیات نمونه هسته گیری شده**

| نمونه | قطر (mm) | ارتفاع (mm) | Type | تنش (MPa) | کرنش (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| CS | ۹۰ | ۱۶۱ | انتهای ناحیه خطی | ۱۰,۷۷ | ۰/۰۰۳۹ |
| | | | بار حداکثر | ۳۳,۳۶ | ۰/۰۲۱۰ |
| | | | بار نهایی | ۳۲,۶۰ | ۰/۲۴۶۰ |

نکته قابل توجه این است که با داشتن مقاومت فشاری $f'_c$برابر ۳۲ مگاپاسکال، مقدار مدول الاستیسیته بر اساس معادله ۱، مطابق با استاندارد ACI 318-19 [۵۰]، حدود ۲۷۴۸۰ مگاپاسکال برآورد گردید؛ این مقدار با مقدار به‌دست‌آمده از نمودار تنش–کرنش که حدود ۲۷۶۱۵ مگاپاسکال است، از نظر عددی هم‌خوانی نسبتاً نزدیکی دارد.

$$E_0 = 0.043\,\rho_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \qquad (۱)$$

در معادله ۱، $E_0$ نمایانگر مدول الاستیسیته، $\rho_c$ چگالی بتن، و $f'_c$ مقاومت فشاری بتن می باشند.

آرماتورهای مورد استفاده در این مطالعه همه در گروه میلگرد ها درجه ۴۰۰[1] مگاپاسکال قرار دارند. برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی اولیه آرماتورهای ، از جمله مقاومت نهایی و استحکام کششی، سه نمونه از هر گروه انتخاب شد و مورد آزمایش قرار گرفتند. اندازه‌گیری تنش و کرنش در طولی به اندازه ۱۰ برابر قطر میلگرد ($۱۰d_b$) انجام شد، که $d_b$ معرف قطر میلگردمی باشد. خواص میل‌گردهای تقویتی در جدول ۴ خلاصه شده است.

**جدول ۴: مشخصات و خصوصیات میلگرد های خورده نشده**

| نمونه | قطر اسمی (mm) | مقاومت فشاری متوسط (MPa) | کرنش متوسط (mm/mm) |
|---|---|---|---|
| T12 | ۱۲ | ۴۷۷ | ۰/۰۰۲۳ |
| T14 | ۱۴ | ۴۸۳ | ۰/۰۰۲۳ |

قبل انجام از آزمایش خوردگی، متوسط استحکام کششی نمونه‌های T12 و T14 به ترتیب برابر با ۴۷۷ و ۴۸۳ مگاپاسکال ثبت شد. همچنین، میانگین کرنش رسیدن به استحکام کششی در حدود ۰/۰۰۲۳ برای هر دو نوع میلگرد اندازه‌گیری شد.

**۳-۲- آزمایش خوردگی تسریع شده**

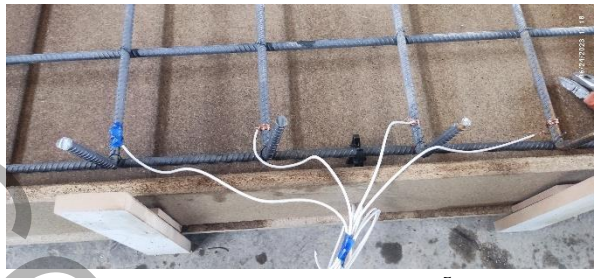
مطالعه حاضر برای کاهش زمان آزمایش، از روش خوردگی تسریع‌شده با استفاده از روش جریان القایی بهره برده است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، این فرآیند با استفاده از منبع تغذیه جریان مستقیم[2] (DC) با قابلیت کنترل انجام شده است.

[1] Grade 400 MPa

[2] Direct Current (DC)

ACCEPTED MANUSCRIPT





**الف: منبع تغذیه جریان مستقیم** **ب: آماده سازی نمونه ها قبل از بتن ریزی**

**شکل ۵: فرایند ایجاد خوردگی در میلگرد ها**

مطالعات پیشین [۴۳, ۴۴, ۴۹, ۵۴] نشان می‌دهند که تنها ناحیه ای از بتن که در فاصله حداکثر ۱,۵ برابر عمق موثر از لبه ستون قرار دارد، می‌توانند به‌طور موثری در مقابل نیروهای برش دوطرفه مقاومت کنند. بنابراین، برای افزایش کارایی و کاهش زمان و هزینه، خوردگی به منطقه ای به ابعاد ۸۰۰×۸۰۰ میلی‌متر در اطراف مرکز ستون محدود شد، که اندکی نیزاز ناحیه بحرانی بیشتر است.

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، یک مخزن مربعی به ابعاد ۸۰۰ میلی‌متر حاوی محلول نمک (NaCl) با غلظت جرمی ۵٪، در روی سطح نمونه‌ها قرار گرفته است. محلول هر هفته به علت تبخیر آب تجدید می‌شد تا شوری[1] محلول ثابت بماند. یک صفحهٔ استیل ضد زنگ در داخل محلول غوطه‌ور شده و به‌عنوان کاتد و آرماتورهای خمشی که در خوردگی قرار داشتند توسط به صورت موازی به قطب آند منبع تغذیه متصل شدند.

برای تضمین یکنواختی شرایط محیطی، از یک منبع تغذیه‌ی DC با ۱۰ خروجی با توانایی تامین حداکثر جریان ۵ آمپر طراحی شد. این مقدار جریان، مطابق با چگالی جریان[2] ۲۰۰$\mu A/cm^2$ بوده تا از ایجاد ترک‌خوردگی یا کشش بیش‌ازحد بر اثر خوردگی جلوگیری کند [۵۵]. چگالی جریان، با تقسیم جریان بر سطح مقطع آرماتور خمشی، تعریف می‌شود (طبق معادله ۲). بنابراین، منبع تغذیه به نحوی تنظیم شد تا حداکثر جریان ثابت ۵ آمپر را برای هر نمونه تامین کند. بعنوان مثال، برای نمونه، در گروه RCSH که شامل ۱۸ اتصال به آرماتورهای خمشی به قطر ۱۴ میلی‌متر و طول ۸۰۰ میلی‌متر است، جریان مورد نیاز حدود ۱/۳ آمپر برآورد می شود. نمونه‌ها به مدت ۹۳ روز تحت جریان ثابت قرار گرفتند تا سطح خوردگی مورد انتظار ایجاد شود.

در ادامه، تعدادی نمونه از آرماتورهای خمشی خورده‌شده بریده و برداشته شدند و میزان کاهش جرم میلگردها پس از حذف مواد حاصل از خوردگی، با انجام عملیات‌های مکانیکی و شیمیایی بر اساس استاندارد ASTM G1-03 [۵۶] اندازه‌گیری گردید. شدت واقعی خوردگی با استفاده از معادله ۳ محاسبه شد و با میزان کاهش جرم نظری که بر پایه قانون فارادی تعیین شده، همان‌طور که در معادله ۴ نشان داده شده است، مقایسه شد.

$$i = {I}/{\pi dL} \quad (۲)$$

در معادله فوق، $i$ نشان‌دهنده چگالی جریان، $I$ جریان برحسب آمپر، $d$ و $L$ قطر و طول آرماتور در ناحیه‌ی خورده‌شده می باشند.

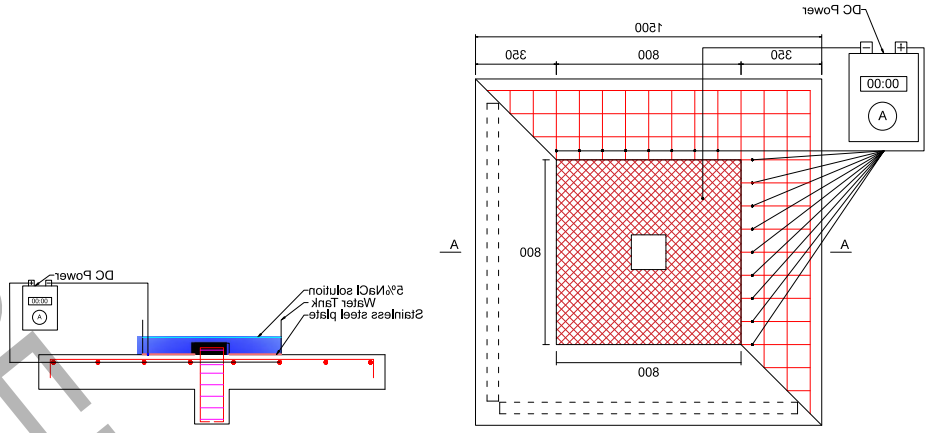
$$\eta = \frac{\Delta m}{m_i} \times 100\% = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100\% \quad (۳)$$

که $\eta$ درصد کاهش جرم را نشان می‌دهد، $\Delta m$ مقدار کاهش جرم، $m_i$ و $m_f$ نیز به‌ترتیب جرم میلگرد ها قبل و بعد از خوردگی را نشان می‌دهند.

[1] Salinity

[2] Current density

ACCEPTED MANUSCRIPT




**الف: نمای شماتیک** **ب: مقطع A-A**



**پ: تصویر فرایند خوردگی**

**شکل ۶: روش خوردگی تسریع شده**

$$\Delta m = {MIt}/{zF_a} \quad (۴)$$

در معادله ۴، $t$ زمان خوردگی بر حسب ثانیه، $\Delta m$ جرم فولاد زنگ‌زده شده، $M$ وزن اتمی فلز است که برای آهن، ۵۶ گرم گزارش شده است، $I$ جریان برحسب آمپر، $z$ بار یونی ( برای آهن، ۲)، و $F_a$ ثابت فارادی است که برابر با ۹۶۵۰۰ آمپر برثانیه می‌باشد. میزان پیش‌بینی‌شده‌ی خوردگی پس از ۹۳ روز در جدول ۵ ارائه شده است.

**جدول ۵: پیش بینی خوردگی بعد از ۳ ماه بر اساس قانون فارادی**

| نمونه | قطر اسمی (mm) | طول (cm) | حداکثر چگالی جریان ($\mu A/cm^2$) | جریان (A) | جرم اولیه (gr/cm) | افت جرم (gr) | $\eta_a$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T12 | ۱۲ | ۸۰ | ۲۰۰ | ۰/۰۶ | ۸/۸۸ | ۱۴۰ | ۲۰ |
| T14 | ۱۴ | ۸۰ | ۲۰۰ | ۰/۰۷ | ۱۲/۰۸ | ۱۶۴ | ۱۷ |

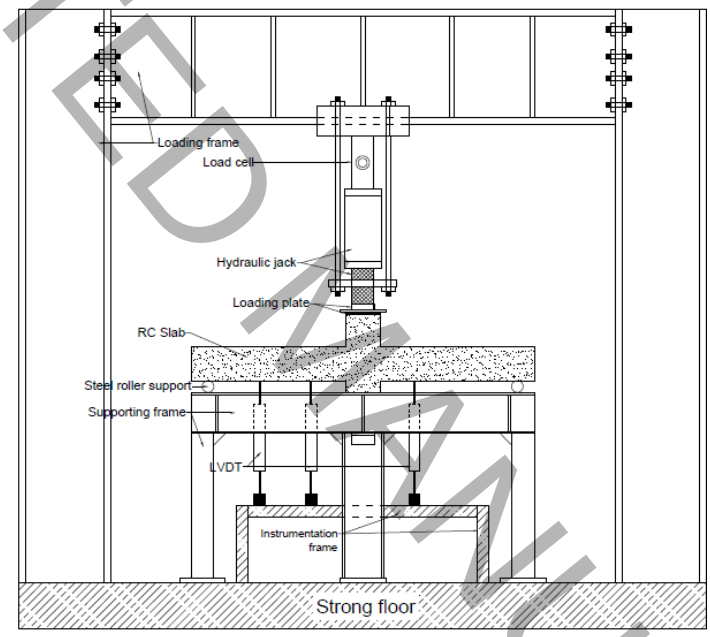
$\eta_a$: خوردگی مورد انتظار براساس قانون فارادی.

ACCEPTED MANUSCRIPT

### ۴-۲- آماده‌سازی تجهیزات آزمایش و ابزار اندازه‌گیری

پس از اتمام آزمایش خوردگی تسریع‌شده، تمامی نمونه‌ها تحت بار متمرکز در روی ستونچه قرار گرفتند تا ظرفیت برش دوطرفه با استفاده از روش بارگذاری شبه‌استاتیک[۱] ارزیابی شود. نمونه‌ها بر روی یک قاب فلزی که به زمین سخت متصل بود، قرار گرفتند و چهار غلتک فولادی[۲] به عنوان تکیه‌گاه‌ها برای چهار ضلع نمونه قرار داده شده بود. این کار برای شبیه‌سازی تکیه‌گاه‌های ساده در اطراف نمونه انجام شد، و این امکان را فراهم می‌کرد که گوشه‌ها هنگام بارگذاری بالا بیایند.

همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن برای اعمال بار متمرکز بر روی ستونچه استفاده شد. بار به تدریج و مرحله به مرحله با قدرت ۱۰ کیلونیوتن افزایش یافت. پیش از آزمایش، سطوح نمونه‌ها با لاتکس[۳] پوشانده شد تا دنبال کردن مسیر ترک‌های ناشی از بارگذاری در حین فرآیند آزمایش آسان‌تر انجام شود. در طول آزمایش، نیروی اعمال‌شده توسط یک سلول بار[۴] که در قسمت بالای جک هیدرولیکی قرار داشت، پایش می‌شد. همچنین، تغییر مکان نمونه‌ها با استفاده از مجموعه‌ای جابجایی سنج خطی[۵] که در نقاط بحرانی، L1 تا L6 ، نصب شده بودند، اندازه‌گیری شدند، همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است. علاوه بر این، سیستم ضبط داده[۶] برای ثبت داده‌ها در هر مرحله بارگذاری مورد استفاده قرار گرفت. روش جابجایی-کنترل به منظور حفظ حالت شبه‌استاتیک در فرآیند بارگذاری اتخاذ شد.




**الف: نمای شماتیک**

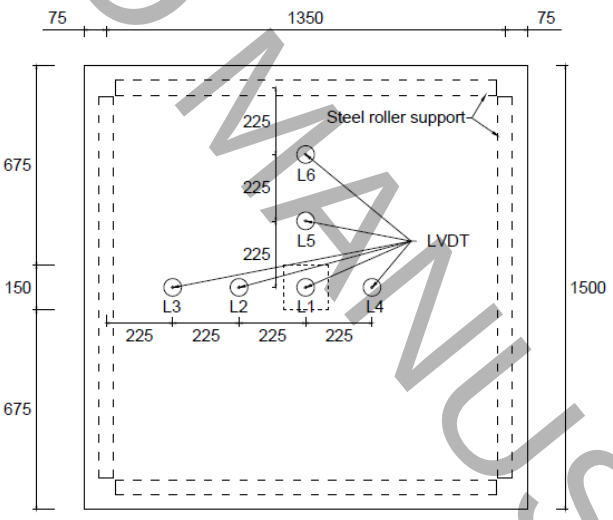
[1] Quasi-static loading method
[2] Steel rollers support
[3] Latex
[4] Load cell
[5] Linear Variable Differential Transducer (LVDT)
[6] Data logger

ACCEPTED MANUSCRIPT



**ب: تصویر**

**شکل ۷: تجهیزات آزمایش و ابزار اندازه‌گیری**




**شکل ۸: محل قرارگیری تغییر مکان سنج ها**

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- خوردگی

شکل ۹ تصاویری از تجمع قابل‌توجه محصولات خوردگی را که طی فرآیند خوردگی تسریع شده روی سطح دال که در ناحیه خوردگی ایجاد شده را نشان می دهد. در اکثر موارد، بیشترین خوردگی در اطراف ستونچه مشاهده شد. این پدیده ناشی از اثر توام بروز ترک های اولیه و تجمع مواد خوردگی حول آرماتور های زنگ‌زده که بترتیب احتمال نفوذ محلول خورنده را به داخل بتن افزایش می دهد و منجر به تشدید فرایند خوردگی در این ناحیه می شود که باعث توسعه و باز شدن ترک های فوق می شود، می باشد. در مقابل،

ACCEPTED MANUSCRIPT

آرماتور های سالم و بتن اطراف ناحبه خوردگی نقش محصور کنندگی را ایفا کرده و منجر به کاهش قابل توجه بروز ترک در نواحی دورتر از ستونچه می گردد.



**الف: قبل از تمیز کاری**

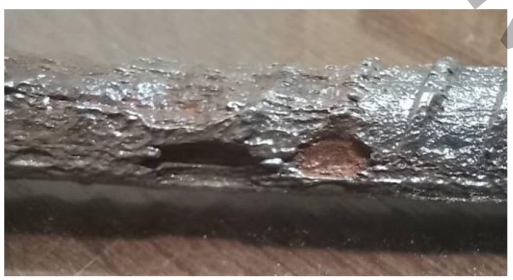


**ب: بعد از تمیز کاری**

**شکل ۹: تصاویر محصولات خوردگی در نمونه های مورد آزمایش**

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، میلگردهایی به طول تقریب ۱۵۰ میلی متر در ناحیه خوردگی پس از انجام آزمون بارگذاری، از نمونه‌ها استخراج شدند. سپس بر اساس استاندارد ASTM G1-03 [۵۶] از لحاظ مکانیکی و شیمیایی تمیز و وزن‌کشی شدند. سرانجام، میزان واقعی خوردگی بر اساس معادله ۲ اندازه‌گیری شد. جدول ۶ خلاصه‌ای از شدت خوردگی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بیشترین شدت خوردگی در گروه خارج شده از نمونه RCSL-C اتفاق افتاد. همچنین، شدت خوردگی در گروه مربوط به نمونه‌های RCSL-C و RCSM-C فراتر از پیش‌بینی‌های اولیه بود، در حالی در مورد نمونه RCSH-C خوردگی شدت کمتری نسبت به پیش بینی داشت. این تفاوت را می‌توان به تراکم بیشتر آرماتورهای خمشی در ناحیه خوردگی نسبت داد که باعث محصور شدگی بیشتر بتن، کاهش ترک‌های ریز سطحی و در نتیجه محدود کردن نفوذ محلول خورنده به داخل بتن شده است و در نهایت کاهش میزان خوردگی را به دنبال داشته است.





**شکل ۱۰: تصاویر میلگرد های خارج شده و تمیز شده برای تعیین میزان خوردگی**

**جدول ۶: خلاصه شدت خوردگی در میلگرد های استخراج شده از نمونه های مورد آزمایش**

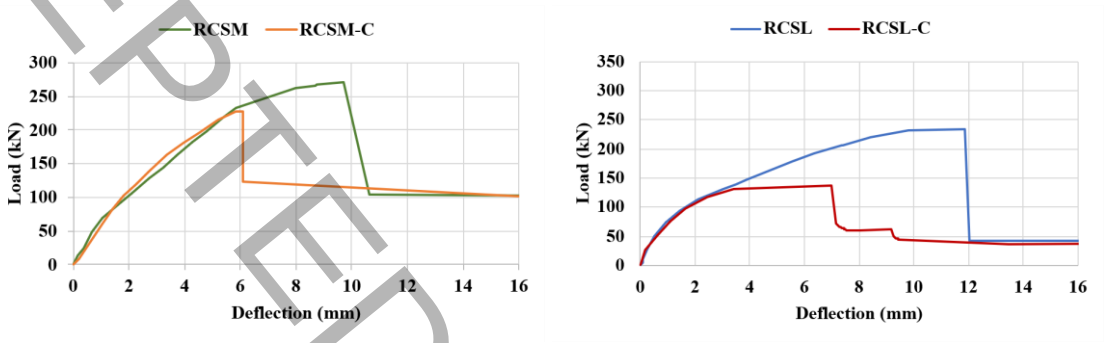
| نمونه | نوع | قطر اسمی(mm) | فاصله بین میلگردها | $\bar{\eta}$ (%) | $\eta_{max}$(%) |
|---|---|---|---|---|---|
| RCSL-C | T12 | ۱۲ | @ ۲۰۰ | ۲۰/۲ | ۲۱/۲ |
| RCSM-C | T12 | ۱۲ | @ ۱۰۰ | ۱۹/۹ | ۲۱/۷ |
| RCSH-C | T14 | ۱۴ | @ ۷۵ | ۱۱/۷ | ۱۳/۳ |

$\bar{\eta}$ و $\eta_{max}$ میانگین و حداکثر شدت خوردگی را در نمونه های استخراج شده نشان می دهند.

ACCEPTED MANUSCRIPT

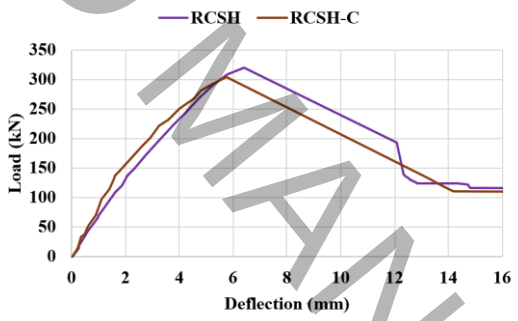
### ۳-۲- سختی

شکل ۱۱ مقایسه‌ای از منحنی‌های بار- تغییر شکل را در نمونه‌های مورد آزمایش را ارائه می‌دهد. مقادیر تغییر شکل از طریق LVDT نصب شده در مرکز ستونچه استخراج شده است. به طور کلی، تفاوت قابل‌توجهی میان سختی قبل از ترک خوردگی و بعد از ترک‌خوردگی تا زمان تسلیم آرماتور خمشی و یا شکست برشی دوطرفه در نمونه‌های بدون خوردگی و خورده شده مشاهده نشد. علاوه بر این، نتایج آزمایش‌ها که بر اساس منحنی‌های بار- تغییر شکل در جدول ۷ ارائه شده، نشان می‌دهند که بار مربوط به با شدگی ترک‌های اولیه در گروه های RCSL-C، RCSM-C و RCSH-C نسبت به بروز اولین ترک در نمونه‌های کنترل، به ترتیب کاهش قابل‌توجهی معادل ۴۵، ۱۳ و ۳/۵ درصد رانشان می دهد. از سوی دیگر، افزایش نسبت آرماتورهای خمشی، تأثیر اندکی در افزایش سختی قبل از ترک‌خوردگی را نشان می‌دهد.

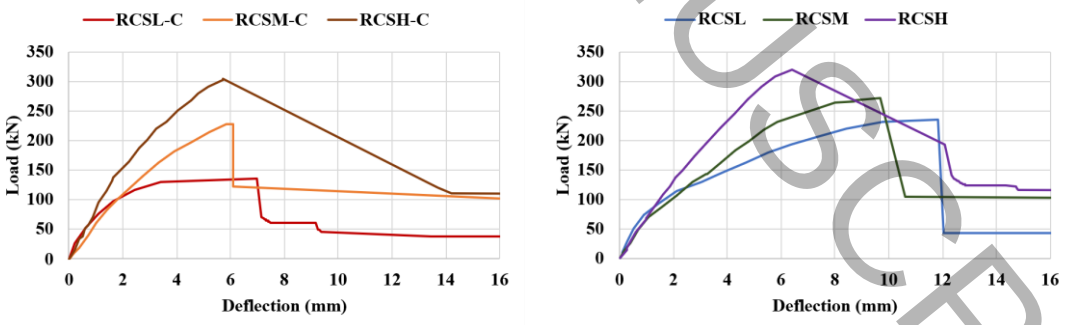



الف: نمونه های گروه RCSL

ب: نمونه های گروه RCSM




پ: نمونه های گروه RCSH




ت: نمونه های گروه خورده نشده

ث: نمونه های گروه دارای خوردگی

شکل ۱۱: منحنی بار- تغییر شکل نمونه ها

ACCEPTED MANUSCRIPT

**جدول ۷: خلاصه نتایج آزمایشات**

| نمونه | $\Delta_{cr}$ (mm) | $V_{cr}$ (kN) | $\Delta_y$ (mm) | $V_y$ (kN) | $\Delta_u$ (mm) | $V_u$ (kN) | شعاع مخروط (mm) | شاخص شکل پذیری ($\Delta_u/\Delta_y$) | تاب آوری (kN.mm) | چقرمگی (kN.mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RCSL | ۰,۵۲ | ۵۱ | ۲,۱ | ۱۱۳ | ۱۱,۸۵ | ۲۳۴ | ۳,۷۳ $d_0$ | ۵,۶۴ | ۱۵۰ | ۴۴۶۲ |
| RCSL-C | ۰,۲ | ۲۸ | ۱,۶۶ | ۹۷ | ۶,۹۷ | ۱۳۶ | ۱,۳۲ $d_0$ | ۴,۲۰ | ۹۷ | ۲۰۳۲ |
| RCSM | ۱,۴۴ | ۷۰ | ۵,۳۳ | ۲۳۲ | ۹,۷۰ | ۲۷۲ | ۴,۹۰ $d_0$ | ۱,۸۲ | ۷۶۹ | ۶۶۷۲ |
| RCSM-C | ۲,۳ | ۶۱ | ۳,۹۳ | ۱۸۱ | ۵,۸۵ | ۲۲۸ | ۱,۴۲ $d_0$ | ۱,۴۹ | ۳۹۸ | ۵۴۶۷ |
| RCSH | ۲,۳۵ | ۱۶۰ | ۵,۷۷ | ۳۰۷ | ۶,۴۱ | ۳۲۱ | *۱,۹۲* $d_0$ | ۱,۱۱ | ۹۸۳ | ۸۷۷۱ |
| RCSH-C | ۱,۸ | ۱۴۵ | ۴,۰۳ | ۲۵۰ | ۵,۷۳ | ۳۰۴ | ۱,۶۹ $d_0$ | ۱,۴۲ | ۵۸۱,۳ | ۸۸۶۳ |

($V_{cr}$، $\Delta_{cr}$)، ($\Delta_y$، $V_y$) و ($\Delta_u$، $V_u$) به ترتیب نیرو و تغییر شکل متناظر با بروز اولین ترک، جاری شدن اولین آرماتور خمشی و شکست برشی دوطرفه می باشند.

با این حال، سختی تا ظهور اولین ترک، تغییر چندانی ندارد ولی پس از ظهور ترک های اولیه شاهد افزایش قابل‌توجهی آن هستیم. این رفتار را می‌توان به ویژگی‌های شکننده‌تر نمونه‌هایی نسبت داد که نسبت آرماتور خمشی بالاتری دارند. علاوه بر این، نیروی لازم برای شروع یا گسترش ترک‌ها، با افزایش مقادیر نسبت آرماتور خمشی، در هر دو گروه بدون خوردگی و خورده شده، افزایش می‌یابد. با این حال، نرخ این افزایش در نمونه‌های خورده شده به‌طور قابل‌توجهی بالاتر است؛ به‌طوری که این سختی تقریبا در نمونه‌های RCSHیکسان می‌باشند.

**۳-۳- مقاومت برش دوطرفه و ظرفیت تغییر شکل**

همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده است، حداکثر مقاومت برشی دوطرفه در نمونه‌هایRCSL ، RCSM، RCSH-،RCSL-C،C RCSM-C وRCSH-C به ترتیب برابر با ۲۳۴، ۲۷۲، ۳۲۱، ۱۳۶، ۲۲۸ و ۳۰۴ کیلو نیوتن ثبت شده است. افزایش نسبت آرماتور خمشی رابطه مستقیم با بهبود مقاومت برشی دوطرفه را در تمامی نمونه‌ها دارد. در مقابل، نمونه‌های خورده‌شده کاهش قابل‌توجهی در مقاومت برشی نسبت به نمونه‌های کنترل نشان داده‌اند، به طوری که این کاهش‌ها برای نمونه‌هایRCSL-C، RCSM-C، RCSH-Cبه ترتیب ۴۲، ۱۶ و ۵ درصد است. این نتایج نشانگر اثرات منفی خوردگی بر مقاومت برش دوطرفه است که با افزایش نسبت آرماتورخمشی، به طور قابل‌توجهی اثر مذکور بر ظرفیت برش دوطرفه کاهش می یابد.

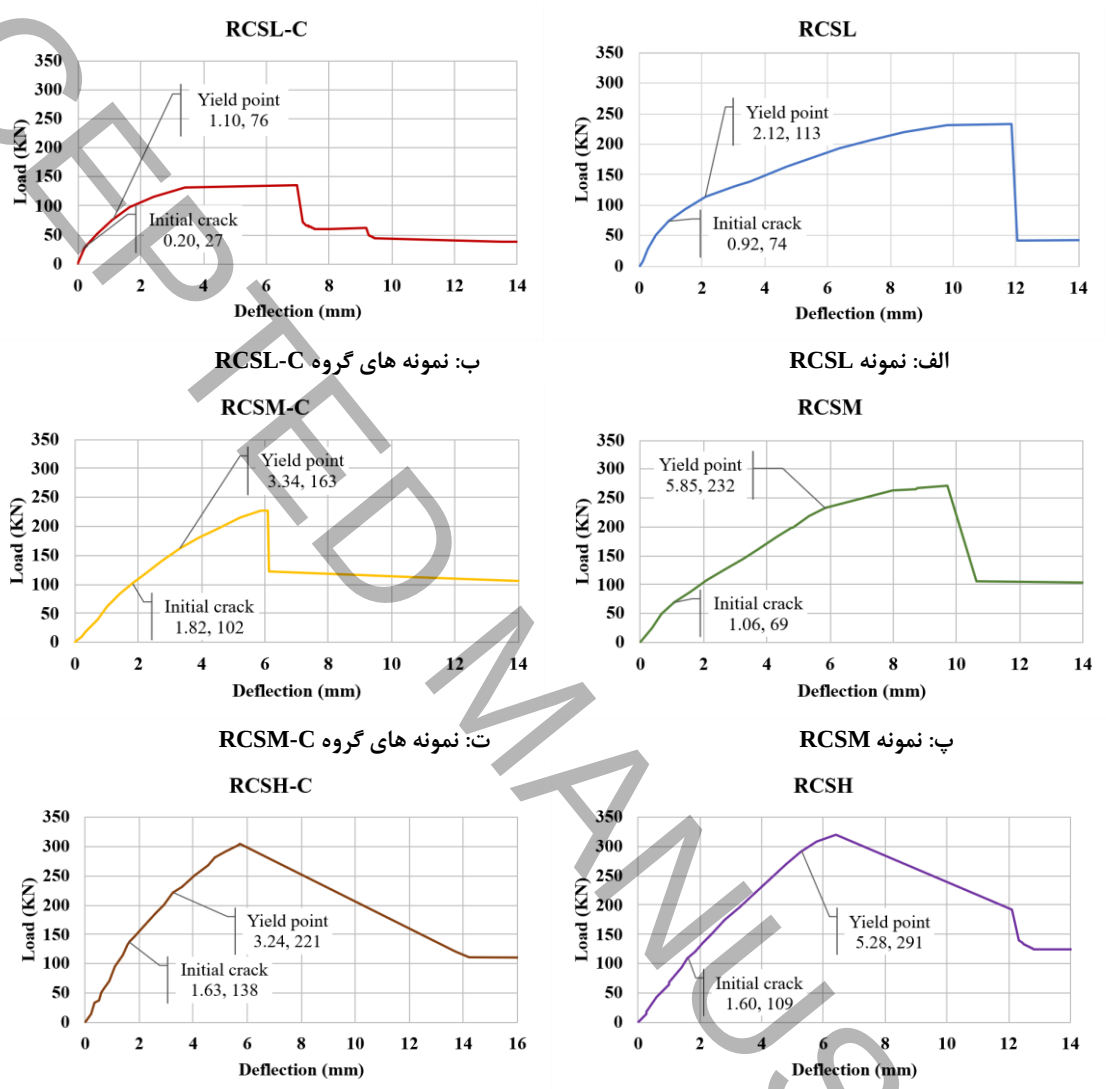
همچنین، جدول ۷ ظرفیت تغییر شکل، حداکثر تغییر شکل در شکست برش دوطرفه، بر اساس معیارهای مادتاکی و همکاران [۵۷]، را نشان می‌دهد. ظرفیت تغییر شکل در گروه های RCSL-C، RCSM-C و RCSH-C نسبت به نمونه‌های کنترل به ترتیب معادل ۴۱/۲، ۳۹/۷ و ۱۰/۶ درصدی کاهش را نشان می دهد. علاوه بر این، با افزایش نسبت آرماتور خمشی، ظرفیت تغییر شکل در تمامی نمونه‌ها کاهش می‌یابد؛ در حالی که نمونه‌های خورده‌شده، نسبت به نمونه‌های بدون خوردگی، کاهش کمی در این ظرفیت نشان می‌دهند که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

**۴-۳- شاخص شکل پذیری و جذب انرژی**

شاخص انعطاف‌پذیری نشان‌دهنده توانایی مصالح برای تغییر شکل پلاستیک است و به عنوان نسبت تغییر شکل در حداکثر نیرو قابل تحمل به نیرویی که در آن آرماتورهای خمشی اولیه شروع به تغییر شکل پلاستیک می‌کنند، تعریف می‌گردد. به دلیل وجود محصولات خوردگی و جریان القایی، امکان نصب کرنش سنج بر روی آرماتورهای خمشی در نمونه‌های خورده‌شده مقدور نبود. بنابراین، نقطه تسلیم به نحوی مشخص شد که در آن منحنی نیروی- تغییر شکل پس از ترک‌خوردگی، کاهش قابل‌توجهی در سختی را نشان می‌دهد (شکل ۱۲) ، همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که، شاخص انعطاف‌پذیری در نمونه های RCSL-C و RCSM-C در مقایسه با نمونه‌های کنترل به ترتیب ۲۶ و ۱۸ درصد کاهش یافته است. برعکس، به دلیل

ACCEPTED MANUSCRIPT

کاهش سطح مقطع آرماتورهای خمشی و در نتیجه، امکان تحمل تنش بیشتر قبل از شکست، نمونه RCSH-C افزایش ۲۸ درصدی را در شاخص انعطاف‌پذیری نسبت به نمونه‌های کنترل نشان می‌دهد. همچنین، با افزایش نسبت آرماتورهای خمشی، شاخص انعطاف‌پذیری در هر دو گروه با و بدون خوردگی کاهش می‌یابد، که این روند در نمونه های گروه RCSL و RCSM به وضوح مشاهده می‌شود.




ب: نمونه های گروه RCSL-C

الف: نمونه RCSL

ت: نمونه های گروه RCSM-C

پ: نمونه RCSM

ج: نمونه های گروه RCSH-C

ث: نمونه RCSH

**شکل ۱۲: روش تعیین نقطه ترک خوردگی اولیه و نقطه تسلیم روی منحنی‌های بار-انحراف برای نمونه‌ها**

### ۳-۵- الگوی گسترش ترک و مود شکست

شکل ۱۲ الگوهای ترک در لحظه شکست را نشان می‌دهد. در شکست‌های مشاهده‌شده، مکانیزم‌های مختلف ترک‌خوردگی و توسعه آنها قابل تمییز هستند. در نمونه‌های RCSL وRCSM ، فرآیند توسعه ترک به‌صورت شعاعی از لبه ستون شروع شده و به‌ویژه در گوشه‌ها برجسته است. با افزایش بار، ترک‌های مماسی پیرامون محیط ستون ظاهر شده. هنگامی که ترک‌های جدید با ترک‌های شکل‌گرفته قبلی همسو می‌شوند پیش از آن‌که خطوط تسلیم خمشی قابل توجهی پدید آید، شکست به صورت خمشی یا خمشی-برشی رخ داد. مخروط‌های ناقص نیز در فواصل تقریباً $۳٫۷d_0$ و $۴٫۹d_0$ از لبه تشکیل شدند. برای نمونه‌های RCSL-C وRCSM-

ACCEPTED MANUSCRIPT

C، فرآیند توسعه ترک و مکانیزم شکست همانند نمونه های کنترل پیش رفت ولی ترک‌های مماسی در فواصل نزدیک تری نسبت به لبه ستون ایجاد شدند. این موضوع باعث شد که مخروط ناقص در فواصل $1,3d_0$و $1,4d_0$ از لبه مشاهده شود. در مقابل، نمونه های RCSH و RCSH-C بیشترین شدت ترک را نشان دادند. ترک های ابتدا موازی و در فواصل حدود $2d_0$ و $1,7d_0$ با لبه ستون امتداد یافتند. در نهایت شکست زمانی رخ داد می‌دهد که ترک برشی نهایی با ترک های مذکور همسو شده که منجر به شکست برشی دوطرفه شد.



ب: RCSL-C



الف: RCSL



ت: RCSM-C



الف: RCSL



ج: RCSH-C



الف: RCSL

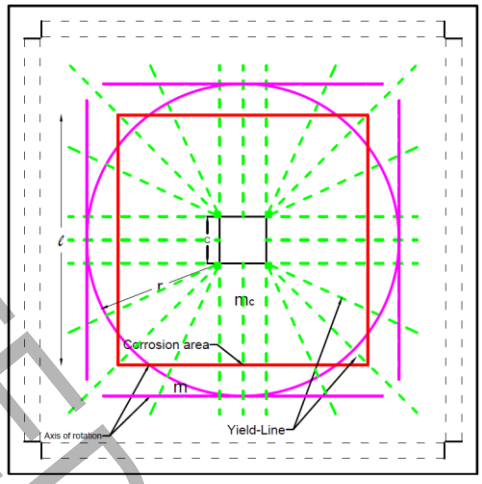
**شکل ۱۳: الگوی گسترش ترک در نمونه های**

روش خطوط تسلیم[1]، ظرفیت خمشی($P_{flex}$) را برای دال تخت پیش‌بینی می‌کند و نحوه شکست دال را بر اساس نسبت $V_u/P_{flex}$ تعیین می‌کند، که $V_u$ حداکثر نیروی قابل تحمل نمونه آزمایشگاهی است. این روش با فرض بر اینکه اتصال بین میلگردها و بتن کاملاً محکم بوده و در نظر گرفتن سطح مقطع اصلی میلگردها، بدون در نظر گرفتن کاهش احتمالی در سطح مقطع به علت خوردگی، صورت گرفته است [۵۸, ۵۹]. اگر نسبت $V_u/P_{flex}$ کمتر از ۱/۰ باشد، شکست برش دوطرفه و شکننده رخ داده است؛ یعنی دال قبل

[1] yield-line method

ACCEPTED MANUSCRIPT

از رسیدن به ظرفیت خمشی، شکست را تجربه می‌کند و در آرماتور های خمشی هیچ‌گونه تسلیمی رخ نمی‌دهد. همچنین، در منحنی نیرو- تغییر شکل سختی قبل و بعد از ترک‌خوردگی را می توان به وسیله دو خط مستقیم مشخص کرد. برعکس، اگر نسبت $V_u/P_{flex}$ بیشتر یا مساوی ۱/۰ باشد، شکست خمشی- برشی یا خمشی می باشد که با یک خط تقریبا افقی در منحنی نیرو- تغییر شکل، که نشانگر شروع تسلیم در آرماتور های خمشی است، مشخص می‌شود و رفتار شکل پذیر را نشان می‌دهد [۶۰]. شکل ۱۳، الگوی تیپیک خطوط تسلیم دال را نشان می‌دهد.




**شکل ۱۴: الگوی خطوط تسلیم دال جهت ارزیابی مقاومت خمشی نمونه ها**

خلاصه ظرفیت خمشی پیش‌بینی‌شده توسط روش خطوط تسلیم برای نمونه‌ها در جدول ۹ خلاصه شده است. کاهش نسبت آرماتور خمشی با کاهش قابلیت تغییر شکل‌پذیری در هر دو گروه نمونه‌های با و بدون خوردگی رابطه مستقیم دارد. نمونه‌های خورده‌شده نسبت به نمونه‌های کنترل، تغییر قابل‌توجهی در مود شکست را نشان می‌دهند؛ در نمونه‌های گروه RCSL و RCSM، شکست از حالت خمشی به شکست خمشی- برشی تغییر پیدا می‌کند. در حالیکه، در گروه RCSH ، نوع شکست تغییری نمی‌کند. علاوه بر این، افزایش نسبت آرماتور خمشی در تمام نمونه‌های حالت شکست را از خمشی به برشی دوطرفه تغییر می‌دهد. در حالی که خوردگی، تغییر حالت شکست را در نمونه‌هایی با نسبت آرماتور خمشی کمتر، تحت تأثیر بیشتری قرار می‌دهد.

**۳-۶- مقایسه با آیین نامه های معتبر**

در این مطالعه، صحت و قابلیت اطمینان پیش‌بینی مقاومت برش دوطرفه در اتصالات دال- ستون با توجه به شرایط خوردگی و عدم خوردگی، بر اساس آیین نامه های ACI 318-19 [۵۰]،CSA 23.3-14 [۵۸]، Eurocode 2 [۶۱]و BS 8110-97 [۶۲] مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۸ مقاومت برش دوطرفه بر اساس آیین نامه های مشخص شده را نشان می‌دهد. قابل توجه است که آیین نامه‌های ACI 318-19 [۵۰] و CSA 23.3-14 [۵۸]، نسبت آرماتور خمشی را در پیش بینی ظرفیت برش دو طرفه دال ها نادیده گرفته‌اند، در حالی که BS 8110-9 [۶۲] و Eurocode 2 [۶۱] این نسبت را در نظر می‌گیرند. در نمونه‌های بدون خوردگی، برآوردهای مقاومت برشی دوطرفه بر اساس ACI 318-19 [۵۰] وCSA 23.3-14 [۵۸] در نسبت کم آرماتور خمشی از دقت مناسبی برخوردار است، اما با افزایش این نسبت، به طور فزاینده‌ای محافظه‌کارانه می‌شوند. در مقابل، آیین نامه های Eurocode 2 [۶۱] و BS 8110-97 [۶۲] با توجه به منظور کردن اثر آرماتور خمشی به شکل مؤثری نقش نسبت آرماتور خمشی را در محاسبات در نظر می‌گیرند. در نمونه‌های خورده‌شده، برآوردهای مقاومت برش دوطرفه اغلب با استانداردهای تعیین‌شده مطابقت ندارند و نتایج غیر محافظه‌کارانه‌ای به دست می‌آید. بنابراین، در ارزیابی مقاومت، ضروری است که تاثیر میلگردهای خمشی را مورد توجه قرار داد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

**جدول ۸: مقایسه ظرفیت برش دو طرف نمونه های آزمایشگاهی با آیین نامه های معتبر**

| Eurocode 2 (kN) | | BS 8110-97 (kN) | | CSA 23.3-14 (kN) | | ACI 318-19 (kN) | | $V_u$ (kN) | نمونه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $V_u/V_{code}$ | $V_{code}$ | $V_u/V_{code}$ | $V_{code}$ | $V_u/V_{code}$ | $V_{code}$ | $V_u/V_{code}$ | $V_{code}$ | | |
| ۱,۱۶ | ۲۰۲ | ۱,۰۷ | ۲۱۹ | ۰,۹۳ | ۲۵۲ | ۱,۰۶ | ۲۲۱ | ۲۳٤ | RCSL |
| ۰,٦۷ | ۲۰۲ | ۰,٦۲ | ۲۱۹ | ۰,۵٤ | ۲۵۲ | ۰,٦۲ | ۲۲۱ | ۱۳٦ | RCSL-C |
| ۱,۰۹ | ۲٤۹ | ۱,۰۱ | ۲۷۰ | ۱,۰۸ | ۲۵۲ | ۱,۲۳ | ۲۲۱ | ۲۷۲ | RCSM |
| ۰,۹۲ | ۲٤۹ | ۰,۸٤ | ۲۱۰ | ۰,۹ | ۲۵۲ | ۱,۰۳ | ۲۲۱ | ۲۲۸ | RCSM-C |
| ۱,۱۱ | ۲۹۰ | ۱,۰۱ | ۳۱۷ | ۱,۳۲ | ۲٤۳ | ۱,۵۱ | ۲۱۳ | ۳۲۱ | RCSH |
| ۱,۰۵ | ۲۹۰ | ۰,۹٦ | ۳۱۷ | ۱,۲۵ | ۲٤۳ | ۱,٤۳ | ۲۱۳ | ۳۰٤ | RCSH-C |
| ۱,۰ | | ۰,۹۲ | | ۱,۰ | | ۱,۱۵ | | | Average |
| ۰,۱۷ | | ۰,۱۵ | | ۰,۲٦ | | ۰,۲۹ | | | SD |
| ۰,۱۷ | | ۰,۱٦ | | ۰,۲٦ | | ۰,۲٦ | | | COV |

$V_u$ و $V_{code}$ به ترتیب ظرفیت برش دو طرفه نمونه آزمایشگاهی و پیش بینی شده توسط آیین نامه مربوطه می باشد؛ Average، SD و COV بترتیب میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات می باشند.

**جدول ۹: خلاصه نتایج روش خط تسلیم و مقایسه با نتایج نمونه های آزمایشگاهی و آیین نامه های معتبر**

| Experimental (kN) | | Eurocode 2 (kN) | | BS 8110-97 (kN) | | CSA 23.3-14 (kN) | | ACI 318-19 (kN) | | $P_{flex}$ (kN) | نمونه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $V_u/V_{code}$ | $V_{code}$ | $V_u/V_{code}$ | $V_{code}$ | $V_u/V_{code}$ | $V_{code}$ | $V_u/V_{code}$ | $V_{code}$ | $V_u/V_{code}$ | $V_{code}$ | | |
| ۱/۵۹ | ۲۳٤ | ۱/۳۷ | ۲۰۲ | ۱/٤۹ | ۲۱۹ | ۱/۷۱ | ۲۵۲ | ۱/۵۰ | ۲۲۱ | ۱٤۷ | RCSL |
| ۱/۰۵ | ۱۳٦ | ۱/۵۵ | ۲۰۲ | ۱/٦۸ | ۲۱۹ | ۱/۹٤ | ۲۵۲ | ۱/۷۰ | ۲۲۱ | ۱۳۰ | RCSL-C |
| ۱/۰۳ | ۲۷۲ | ۰/۹٤ | ۲٤۹ | ۱/۰۲ | ۲۷۰ | ۰/۹۵ | ۲۵۲ | ۰/۸۳ | ۲۲۱ | ۲٦۵ | RCSM |
| ۰/۹۷ | ۲۲۸ | ۱/۰٦ | ۲٤۹ | ۱/۱٤ | ۲۱۰ | ۱/۰۷ | ۲۵۲ | ۰/۹٤ | ۲۲۱ | ۲۳٦ | RCSM-C |
| ۰/۷۹ | ۳۲۱ | ۰/۷۱ | ۲۹۰ | ۰/۷۸ | ۳۱۷ | ۰/٦۰ | ۲٤۳ | ۰/۵۲ | ۲۱۳ | ٤۰۸ | RCSH |
| ۰/۷۳ | ۳۰٤ | ۰/۷۰ | ۲۹۰ | ۰/۷۷ | ۳۱۷ | ۰/۵۹ | ۲٤۳ | ۰/۵۱ | ۲۱۳ | ٤۱۵ | RCSH-C |
| ۰/۹۱ | | ۱/۰٦ | | ۱/۱۵ | | ۱/۱٤ | | ۱/۰۰ | | | Average |
| ۰/۱۳ | | ۰/۳۲ | | ۱/۳٤ | | ۰/۵۲ | | ۰/٤٦ | | | SD |
| ۰/۱٤ | | ۰/۳۰ | | ۰/۳۰ | | ۰/٤۵ | | ۰/٤٦ | | | COV |

$P_{flex}$، $V_u$ و $V_{code}$ به ترتیب ظرفیت خمشی بر اساس روش خط تسلیم، ظرفیت برش دو طرفه نمونه آزمایشگاهی و پیش بینی شده توسط آیین نامه مربوطه می باشد؛ Average، SD و COV بترتیب میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات می باشند.

## ۴- نتیجه گیری و پیشنهادات

با بررسی نتایج آزمایش روی هفت دال مسطح تحت بارگذاری محوری و اثرات نسبت آرماتور خمشی و خوردگی تسریع‌شده، نتایج زیر حاصل شد:

- **سختی اولیه** عمدتاً تابع خواص بتن است؛ از جمله درگیری و قفل‌شدن سنگدانه‌ها و عملکرد داول‌ها. با آغاز ترک‌زایی، بار بیش‌تر به آرماتور خمشی منتقل می‌شود و بنابراین نقش آرماتور در تعیین سختی افزایش می‌یابد. افزایش نسبت آرماتور تا پیش از رسیدن آرماتور به نقطه تسلیم تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در سختی ایجاد نکرد؛ با این حال پس از تسلیم، به‌خصوص در نمونه‌های خورده‌شده و با توجه به کاهش جرم و سطح مقطع آرماتور خمشی، افزایش قابل‌توجهی در سختی مشاهده شد.
- **تأثیر خوردگی بر ظرفیت و رفتار سازه‌ای** قابل‌توجه است. خوردگی به‌طور چشمگیری ظرفیت برشی دوطرفه و مقادیر انحراف را کاهش می‌دهد. کاهش‌ها در نمونه‌های خورده‌شده نسبت به نمونه‌های بدون خوردگی به‌صورت معناداری متفاوت

ACCEPTED MANUSCRIPT

بوده‌اند (به‌عنوان مثال کاهش‌های قابل‌توجه در RCSL-C نسبت به RCSM-C وRCSH-C ) زیرا خوردگی با کاهش سطح مقطع میلگرد ها منجر به کاهش مقاومت برش دوطرفه دال می‌شود، و این تغییرات با کاهش نسبت آرماتورخمشی ودر نتیجه افزایش احتمال خوردگی تشدید می‌شود به نحوی که مقاومت برش دو طرفه در گروه نمونه ها با نسبت آرماتور خمشی کم، متوسط و زیاد به ترتیب ۴۲، ۱۶ و ۵ درصد کاهش را نشان داد. علت اینکه نمونه‌های دارای نسبت آرماتور بالاتر نسبت به خوردگی مقاوم‌تر بوده‌اند این است که افزایش چگالی آرماتور و درنتیجه بهبود محصورشدگی بتن، کندشدن گسترش ترک و کاهش سرعت خوردگی است.

- **الگوهای ترک** تحت تأثیر هم‌زمان نسبت آرماتور و خوردگی تغییر می‌کنند؛ افزایش چگالی آرماتور به بهبود توزیع ترک و حفظ محصور شدگی منجر می‌شود، درحالی‌که خوردگی موجب تمرکز ترک‌ها و کاهش ظرفیت جذب انرژی و تاب‌آوری می‌گردد. الگوهای ترک و حالت‌های شکست به‌وضوح تحت تأثیر نوع نمونه و فاصله تشکیل ترک‌ها از لبه قرار دارند. نمونه‌های با شدت ترک بالا ( RCSHوRCSH-C ) تمایل به شکست برشی دوطرفه دارند، در حالی که نمونه‌های با ترک مماسی اولیه نزدیک لبه (RCSL-C، RCSM-C) غالباً به شکست‌های خمشی یا ترکیبی منجر می‌شوند
- **تغییر در مکانیزم شکست**، نشان‌دهندهِ اثر ترکیبی نسبت آرماتور و خوردگی بر الگوی شکست است. قبل از خوردگی، نسبت‌های محاسبه‌شده برای RCSM،RCSL و RCSH به ترتیب ۱,۵۹، ۱,۰۳ و ۰,۷۹ بودند که پس از خوردگی به ترتیب به ۱,۰۵، ۰,۹۷ و ۰,۷۳ تغییر یافتند. این تغییرات نشان می‌دهد که در نمونه‌هایی با نسبت آرماتور پایین‌تر، خوردگی منجر به آسیب گسترده‌تر می‌شود و احتمال رسیدن آرماتور به تسلیم کامل پیش از شکست افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که در نمونه‌های با نسبت آرماتور بالاتر، شکست معمولاً قبل از تسلیم کامل آرماتور رخ می‌دهد.
- **جذب انرژی و شکل‌پذیری** با افزایش نسبت آرماتور خمشی بهبود می‌یابد به نحوی که شاخص شکل پذیری و چقرمگی برای گروه نمونه ها با نسبت آرماتور خمشی کم و متوسط به ترتیب ۲۵، ۱۸ درصد و ۵۴، ۱۷ درصد کاهش و تاب آوری ۳۵، ۴۸ درصد افزایش رانشان می دهند. با این حال، خوردگی تأثیر منفی قابل‌توجهی بر جذب انرژی در نمونه‌هایی با نسبت آرماتور کم تا متوسط دارد که عمدتاً به دلیل کاهش سطح مقطع و کاهش استحکام تسلیم آرماتور رخ می‌دهد. در نمونه‌هایی با نسبت آرماتور بالا، اثرات خوردگی محدودتر بوده و خواص مکانیکی کل کمتر تحت تأثیر قرار گرفته‌اند به نحوی که شاخص شکل پذیری و چقرمگی و تاب آوری در رابطه با گروه نمونه با نسبت آرماتور خمشی زیاد ۲۷، ۱ و ۵۵ درصد افزایش یافته است. البته قابل ذکر می باشد که چقرمگی و شاخص شکل پذیری پارامتر مهمی در رفتار خمشی دال های تخت و مقاومت بعد برش دو طرفه می باشند که با توجه به بررسی مقاومت برش دو طرفه در دال ها در این مقاله تمرکز کمتری بر دو پارامتر مذکور شده است.

- مقایسه برآوردهای مقاومت برش دو طرفه بر اساس آیین نامه های معتبر (ACI ، CSA، BS وEurocode 2 ) با نمونه های آزمایشگاهی بر نیاز به مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر تأکید دارد. از این رو احساس می شود که تحقیقاتی با پیشنهاد ضرایب اصلاحی که بتواند اثر نسبت‌های آرماتور و اثرات خوردگی بر آرماتور و بتن را لحاظ بکند، نیاز می باشد.

- تحلیل اثر نسبت آرماتور یکسان و شرایط خوردگی متنوع.

- تحلیل عمق ترک ها و زاویه گسترش آن ها.

ACCEPTED MANUSCRIPT

**مراجع**


[۱]M.A. Erberik, A.S. Elnashai, Fragility analysis of flat-slab structures, Engineering Structures, 26(7) (2004) 937-948.

[۲]Guide for Design of Slab-Column Connections in Monolithic Concrete Structures, Reported by Joint ACI-ASCE Committee 352.(۲۰۱۱) ,

[۳]L. Zhou, Y. Huang, B. Chen, Punching shear behavior of slab–column connections embedded with steel skeletons, in: Structures, Elsevier, 2021, pp. 2879-2892.

[٤]E.M. Matzke, R.D. Lequesne, G.J. Parra-Montesinos, C.K. Shield, Behavior of biaxially loaded slab-column connections with shear studs, in, American Concrete Institute, 2015.

[٥]S. Kinnunen, H.S.E. Nylander, Punching of concrete slabs without shear reinforcement, (No Title) , .(۱۹٦۰)

[٦]D.Z. Yankelevsky, O. Leibowitz, Punching shear in concrete slabs, International Journal of Mechanical Sciences, 41(1) (1999) 1-15.

[۷]M.P. Nielsen, L.C. Hoang, Limit analysis and concrete plasticity, CRC press, 2016.

[۸]S.B. Alexander, S.H. Simmonds, Ultimate strength of slab-column connections, Structural Journal, 84(3) (1987) 255-261.

[۹]K.W. Johansen, Yield-line theory, (No Title).(۱۹٦۲) ,

[۱۰]Z.P. Bažant, Z. Cao, Size effect in punching shear failure of slabs, ACI Structural Journal, 84(1) (1987) 44-53.

[۱۱]M. Fernández Ruiz, A. Muttoni, Applications of the critical shear crack theory to punching of R/C slabs with transverse reinforcement, ACI Structural Journal, 106(4) (2009) 485-494.

[۱۲]H.-G. Park, K.-K. Choi, L. Chung, Strain-based strength model for direct punching shear of interior slab–column connections, Engineering Structures, 33(3) (2011) 1062-1073.

[۱۳]K.-K. Choi, P. Hong-Gun, J.K. Wight, Unified shear strength model for reinforced concrete beams-Part I: Development, ACI Structural Journal, 104(2) (2007) 142.

[۱٤]Y. Shabestani, A. Kargaran, A. Kheyroddin, Experimental and Numerical Investigation of RC Two-Way Slabs with Middle, Side and Corner Openings, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 46(6) (2022) 4383-4393.

[۱٥]M. Diao, Y. Li, H. Guan ,X. Lu, H. Xue, Z. Hao, Post-punching mechanisms of slab–column joints under upward and downward punching actions, Magazine of Concrete Research, 73(6) (2021) 302-314.

[۱٦]M. Diao, Y. Li, H. Guan, Z. Yang, B.P. Gilbert, J. Wang, Pre-and post-punching performances of eccentrically loaded slab-column joints with in-plane restraints, Engineering Structures, 248 (2021) 113249.

[۱۷]S. Sarvari, M.R. Esfahani, An experimental study on post-punching behavior of flat slabs, in: Structures, Elsevier, 2020, pp. 89.۹۰۲-٤

[۱۸]Y.-H. Weng, K. Qian, F. Fu, Q. Fang, Numerical investigation on load redistribution capacity of flat slab substructures to resist progressive collapse, Journal of building engineering, 29 (2020) 101109.

[۱۹]Z. Jiao, Y. Li, H. Guan, M. Diao, Z .Yang, J. Wang, Y. Li, Pre-and post-punching failure performances of flat slab-column joints with drop panels and shear studs, Engineering Failure Analysis, 140 (2022) 106604.


ACCEPTED MANUSCRIPT

[٢٠]M. Lapi, A.P. Ramos, M. Orlando, Flat slab strengthening techniques against punching-shear, Engineering Structures, 180 (2019) 160-180.
[٢١]H. Taresh, M. Yatim, M. Azmi, Punching shear behaviour of interior slab-column connections strengthened by steel angle plates, Engineering Structures, 238 (2021) 112246.
[٢٢]A. H Abdel-Kareem, Punching strengthening of concrete slab-column connections using near surface mounted (NSM) carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bars, Journal of Engineering Research and Reports, 9(2) (2020) 1-14.
[٢٣]A. Kheyroddin, Z. Madah, M. Arab Hasanabade ,Strengthening of One-Way Slabs Using Composite Laminates of HPFRCC Including Synthetic Fibers PPS, Mechanics of Advanced Composite Structures, 9(1) (2022) 185-197.
[٢٤]P. Behzard, M.K. Sharbatdar, A. Kheyroddin, Strengthening of existing RC two-way slabs using new combined FRP fabric/rod technique, Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 3(2) (2015) 30-44.
[٢٥]P. Behzard, M.K. Sharbatdar, A. Kheyroddin, Different NSM FRP technique for strengthening of RC two-way slabs with low clear cover thickness, Scientia Iranica, 23(2) (2016) 520-534.
[٢٦]M.A. Abbaszadeh, M.K. Sharbatdar, A. Kheyroddin, Performance of two-way RC slabs retrofitted by different configurations of high performance fibre reinforced cementitous composite strips, The Open Civil Engineering Journal, 11(1.(٢٠١٧) (
[٢٧]M.M. Fallah, M. Sharbatdar, A. Kheyroddin, Experimental strengthening of the two-way reinforced concrete slabs with high performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC) prefabricated sheets, Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 7(4) (2019) 1-17.
[٢٨]M. Sabbaghian, A. Kheyroddin, Flexural strengthening of RC one way slabs with high-performance fiber-reinforced cementitious composite laminates using steel and GFRP bar, Engineering Structures, 221 .١١١١٠٦ (٢٠٢٠)
[٢٩]J.P. Broomfield, Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair, Crc Press, 2023.
[٣٠]H. Lin, Y. Zhao, P. Feng, H. Ye, J. Ozbolt, C. Jiang, J.-Q. Yang, State-of-the-art review on the bond properties of corroded reinforcing steel bar, Construction and Building Materials, 213 (2019) 216-233.
[٣١]B. Hou, X. Li, X. Ma, C. Du, D. Zhang, M. Zheng, W. Xu, D. Lu, F. Ma, The cost of corrosion in China, npj Materials Degradation, 1(1) (2017) 4.
[٣٢]M.E. Said, A.A. Hussein, Structural behavior of two-way slabs with large corroded area, Engineering Structures, 199 (2019) 109556.
[٣٣]A. Surahyo, L. Surahyo, Luby, Concrete construction, Springer, 2019.
[٣٤]A. Al-Sibahy, M. Sabhan, Corrosion effects on the bond behaviour of steel bars in self-compacting concrete, Construction and Building Materials, 250 (2020) 118568.
[٣٥]H. Aoude, W.D. Cook, D. Mitchell, Effects of simulated corrosion and delamination on response of two-way slabs, Journal of structural Engineering, 140.٠٤٠١٣٠٢٣ (٢٠١٤) (١)
[٣٦]A. Sirico, O. Palii, B. Belletti, P. Bernardi, M. Pappalardo, J. Sanchez, P. Plaza, C. Medina, Bond performance assessment of uncorroded and corroded reinforced recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials, 470.١٣٩٩٥١ (٢٠٢٥)

ACCEPTED MANUSCRIPT

[٣٧]Y.-B. Zhang, S.-S. Zheng, J.-M. Ji, Y. Zheng, B. Wang, Bond performance of coupling corrosion of main reinforcement and stirrups in concrete under reversed cyclic loading, Structures, 71 (2025) 107978.
[٣٨]H.T. Bui, K.H. Tan, Multi-peak nonuniform model of rust distribution and corrosion-induced concrete cracking in reinforced concrete slabs, Cement and Concrete Composites, 140 (2023) 105087.
[٣٩]H.T. Bui, K. Maekawa, K.H. Tan, Microcell and macrocell corrosion of steel bars in reinforced concrete slabs under different corrosive environments and cathode/anode configurations, Cement and Concrete Composites, 138 (2023) 104989.
[٤٠]L. Hou, B. Zhou, S. Guo, F. Aslani, D. Chen, Corrosion behavior and flexural performance of reinforced concrete/ultrahigh toughness cementitious composite (RC/UHTCC) beams under sustained loading and shrinkage cracking, Construction and Building Materials, 198 (2019) 278-287.
[٤١]Z. Yang, J. Ma, B. Li, Investigating the impact of corrosion on behavior and failure modes of reinforced concrete slabs: An experimental and analytical study, Engineering Structures, 321 (2024) 118983.
[٤٢]K. Qian, X.-Y. Jiang, Y.-H. Weng, L. Zhang, Punching Shear Behavior of Rebar Corroded Slab-Column Connection after CFRP Strengthening, Journal of Building Engineering, (2026) 116842.
[٤٣]K. Qian, J.-S. Li, T. Huang, Y.-H. Weng, X.-F. Deng, Punching shear strength of corroded reinforced concrete slab-column connections, Journal of Building Engineering, 45 (2022) 103489.
[٤٤]K .Qian, J.-G. Liu, X.-H. Yu, Y.-H. Weng, Experimental and numerical investigation of punching shear capacity of corroded reinforced concrete slab-column connections, in: Structures, Elsevier, 2022, pp. 1548-1557.
[٤٥]J.-G. Qin, W.-W. Zhang, T. Huang, K .Qian, X.-F. Deng, Effect of steel reinforcement corrosion on progressive collapse resistant of beam-slab structure with interior column failure, Engineering Structures, 312 (2024) 118257.
[٤٦]K. Qian, Y.-H. Weng, S.-L. Liang, F. Fu, Punching shear behavior and corrosion resistance of composite slab-column connections reinforced by BFRP and steel rebar, Engineering Structures, 304 (2024) 117589.
[٤٧]S. Altoubat, M. Maalej, F. Shaikh, Laboratory simulation of corrosion damage in reinforced concrete, International Journal of Concrete Structures and Materials, 10 (2016) 383-391.
[٤٨]W. Feng, A. Tarakbay, S. Ali Memon, W. Tang, H. Cui, Methods of accelerating chloride-induced corrosion in steel-reinforced concrete: A comparative review, Construction and Building Materials, 289 (2021) 123165.
[٤٩]M.E. Said, A.A. Hussein, Induced corrosion techniques for two-way slabs, Journal of Performance of Constructed Facilities, 33(3) (2019) 04019026.
[٥٠]Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19 : (an ACI standard ; Commentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-19), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019.
[٥١]H. Samiee, A. Kheyroddin, M.K. Sharbatdar, Performance Evaluation of Deteriorated Reinforced Concrete Flat Slab-Column Connections: An Experimental Study, Journal of Building Engineering, (2025) 114122.
[٥٢]Standard Specification for Portland Cement," ASTM International., 2000.
[٥٣]Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete, ASTM International., 2022.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[٥٤]Y.-H. Weng, F. Fu, K. Qian, Punching shear resistance of corroded slab–column connections subjected to eccentric load, Journal of Structural Engineering, 149(1) (2023) 04022219.
[٥٥]T.A. El Maaddawy, K.A. Soudki, Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete, Journal of materials in civil engineering, 15(1) (2003) 41-47.
[٥٦]ASTM G1-03, "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens," ASTM International., in, 2003.
[٥٧]T. El Maaddawy, K. Soudki, T. Topper, Long-term performance of corrosion-damaged reinforced concrete beams, ACI Structural Journal, 102(5) (2005) 649.
[٥٨]CSA A23.3-14, Design of concrete structures: Mississauga, Ont.: Canadian Standards Association , .(٢٠٠٤)
[٥٩]H. Lee, T. Noguchi, F. Tomosawa, FEM analysis for structural performance of deteriorated RC structures due to rebar corrosion, in: Proceedings of the second international conference on concrete under severe conditions, Tromsø Norway, 1998, pp. 327-336.
[٦٠]S. Teng, K. Chanthabouala, D.T.Y. Lim, R. Hidayat, Punching shear strength of slabs and influence of low reinforcement ratio.(٢٠١٨) ,
[٦١]Eurocode 2: Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings, in, British Standards Institution London, UK, 2004.
[٦٢]Structural use of concrete, Part 1, Code of practice for design and construction, BS 8110: Part 1 , .(١٩٨٥)

ACCEPTED MANUSCRIPT