

Experimental investigation on the flexural behavior of prestressed concrete beams under the influence of accelerated corrosion

Pouya Hassanvand¹, Freydoon Rezaie^{2*}

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ABSTRACT

One of the early deterioration factors of reinforced concrete structures is the corrosion of its steels, and in structures with greater sensitivity, such as prestressed structures, where steel elements, including prestressed tendons, play a much larger role in supporting the structure, the importance of this issue increases. In this research, an experimental evaluation of the flexural behavior of prestressed concrete beams under the influence of corrosion. To this end, four prestressed concrete beams with a rectangular cross-section (150 mm × 300 mm) and a length of 2 m were fabricated. The method for causing corrosion in specimens was accelerated by using constant electric current in prestressing tendons and in a pool containing 5% sodium chloride electrolyte solution. One prestressed concrete beam without corrosion was considered as a control specimen, and in the other three studied beams, corrosion occurred at three levels of 5, 10 and 15%. After exposure corrosion, the specimens were subjected to four-point bending test in order to check the structural behavior. The results indicated that the corrosion created at different levels reduced the bearing capacity and other behavioral characteristics of the specimen under study, including the amount of energy absorption, effective hardness and midspan displacement. Increase of the corrosion level, increases the decreasing trend of the studied parameters. At the highest level of corrosion (15% level), the values of the parameters of bearing capacity, absorbed energy, effective hardness, and midspan deflection decreased by 24%, 34%, 37%, and 19%, respectively. Also, the investigations showed that there is a non-uniform distribution of corrosion caused by the accelerated method along the prestressing cables and difference between the actual and calculated corrosion rates based on the Faraday's law.

ARTICLE INFO

Receive Date: 06 January 2023

Revise Date: 14 February 2023

Accept Date: 19 February 2023

Keywords:

Prestressed concrete beam

Flexural behavior

Corrosion

Bearing capacity

Structural behavior

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.379599.3005>

*Corresponding author: Freydoon Rezaie.

Email address: frezaie@basu.ac.ir

مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار خمشی تیرهای بتنی پیش‌تنیده تحت تاثیر خوردگی تسریع شده

پویا حسنوندا^۱، فریدون رضایی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

یکی از عوامل خرابی زودرس سازه‌های بتن آرمه، خوردگی فولادهای آن است و این موضوع به‌ویژه در سازه‌های با حساسیت بالاتر همچون سازه‌های پیش‌تنیده که فولادهای پیش‌تنیدگی، نقش به‌مراتب مهم‌تری را در باربری سازه ایفا می‌کنند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در این پژوهش یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به‌منظور ارزیابی رفتار خمشی تیرهای بتنی پیش‌تنیده تحت تاثیر خوردگی صورت گرفت و برای این منظور ۴ نمونه تیر بتنی پیش‌تنیده پیش‌کشیده با مقطع مستطیلی به ابعاد 150×300 میلی‌متر و طول ۲ متر ساخته شد. روش ایجاد خوردگی در تیرهای بتنی پیش‌تنیده به‌صورت تسریع شده با استفاده از جریان الکتریکی ثابت در کابل‌های پیش‌تنیدگی و در یک استخر حاوی محلول الکترولیت ۵ درصد آب‌نمک بود. یک تیر بتنی پیش‌تنیده بدون خوردگی و به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد و در سه تیر مورد مطالعه دیگر خوردگی در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ایجاد شد. بعد از ایجاد خوردگی، نمونه‌ها جهت بررسی رفتار سازه‌ای تحت آزمایش بارگذاری خمشی به روش چهارنقطه‌ای قرار گرفتند. نتایج نشان داد که خوردگی باعث کاهش ظرفیت باربری و سایر مشخصات رفتاری نمونه مورد مطالعه از جمله میزان جذب انرژی، سختی موثر و خیز وسط دهانه می‌شود. با افزایش سطح خوردگی، روند کاهش پارامترهای مورد بررسی افزایش می‌یابد. در بالاترین سطح خوردگی (سطح ۱۵ درصد) مقادیر پارامترهای ظرفیت باربری، انرژی جذب شده، سختی موثر و خیز وسط دهانه به ترتیب ۲۴، ۳۴، ۳۷ و ۱۹ درصد کاهش یافتند. همچنین بررسی‌ها نشان داد، توزیع خوردگی ایجاد شده به روش تسریع شده در طول کابل‌های پیش‌تنیدگی غیر یکنواخت است و بین میزان خوردگی ایجاد شده عملی و محاسباتی بر مبنای قانون فارادی تفاوت وجود دارد.

کلمات کلیدی: تیر بتنی پیش‌تنیده، رفتار خمشی، خوردگی، ظرفیت باربری، رفتار سازه‌ای.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.379599.3005	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.379599.3005	۱۴۰۲/۰۹/۳۰	۱۴۰۱/۱۱/۳۰	۱۴۰۱/۱۱/۳۰	۱۴۰۱/۱۱/۲۵	۱۴۰۱/۱۰/۱۶
				* نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				فریدون رضایی frezaie@basu.ac.ir		

۱- مقدمه

آسیب‌های ناشی از خوردگی در آرماتورهای فولادی عامل اصلی تخریب سازه‌های بتن آرمه (RC) است که به طور جدی ایمنی و دوام ساختمان‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱-۵]. خوردگی، فولاد را به زنگ تبدیل می‌کند و حجم محصولات خوردگی ۲ تا ۶ برابر فولاد است [۶]. این انبساط حجمی بر بتن اطراف آرماتور تنش‌های کششی وارد می‌کند و آن را تضعیف می‌کند [۶-۸]. تشکیل زنگ، آج آرماتور را تحت تاثیر قرار می‌دهد، و همراه با ضعیف شدن بتن اطراف، هم مقاومت پیوستگی و هم مقاومت آرماتورها را کاهش می‌دهد [۹-۱۳]. در نتیجه، سختی، مقاومت و ظرفیت تغییرشکل اعضای بتن آرمه کاهش می‌یابد و ایمنی و قابلیت سرویس‌دهی سازه مختل می‌شود [۱۴، ۱۵]. در سازه‌های بتنی پیش‌تنیده، خطرات بالقوه خوردگی شدیدتر از سازه‌های بتن آرمه معمولی است [۱۶]. کابل‌های پیش‌تندگی فولادی مدفون در عناصر پیش‌تنیده نیز از خطر خوردگی مستثنی نیستند. در المان‌های پیش‌تنیده، ترکیب اعمال تنش و کاهش سطح مقطع فولادهای پیش‌تندگی در اثر خوردگی می‌تواند خطر شکست ترد المان را افزایش دهد [۱۷]. نتایج آزمایش‌های استاتیکی که قبلاً انجام شده است، کاهش قابل توجهی در تغییرشکل و ظرفیت باربری و همچنین حالت شکست ترد تیرهای بتنی پیش‌تنیده خوردگی یافته را نشان داده است [۱۸-۲۳]. همچنین با افزایش درجه خوردگی در فولاد پیش‌تندگی، پارامترهای رفتاری سازه شامل بار ترک خوردگی، بار تسلیم و بار نهایی کاهش می‌یابد [۲۴]. تحقیقات بسیار زیادی به منظور درک بهتر سازوکار خرابی بتن نظیر واکنش‌های قلیایی-سنگدانه، یخ زدن و آب شدن و به‌ویژه خوردگی فولاد در بتن انجام شده است. از اهم تحقیقات صورت گرفته تا امروز در خصوص پدیده خوردگی در سازه‌های بتنی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

در تحقیقی که بر روی رفتار تیرهای بتنی پیش‌تنیده تحت اثر خوردگی انجام شد و تیرهای مورد مطالعه تحت تاثیر خوردگی تسریع شده به وسیله‌ی جریان الکتریکی قرار گرفتند، نتایج نشان داد که تیر نیمه پیش‌تنیده با مقاومت فشاری بالاتر نسبت به تیر بتنی نیمه پیش‌تنیده با مقاومت فشاری بتن پایین‌تر در برابر خوردگی مقاومت بیشتری دارد [۲۵]. در مطالعه‌ی دیگر که به صورت آزمایشگاهی و عددی بر روی فولادهای پیش‌تندگی پل‌ها انجام شد، معادلاتی برای کاهش سطح مقطع کابل پیش‌تنیده پل‌ها ناشی از خوردگی ارائه شد [۲۶]. همچنین هیروکی تامای و همکاران یک مطالعه آزمایشگاهی در مورد رفتار تیرهای بتن آرمه خورده شده در معرض بارهای ضربه‌ای انجام دادند و در این مطالعه، نمونه‌های تیر RC با درجات مختلف خوردگی آرماتور تحت آزمایش‌های شبه استاتیکی و بار ضربه‌ای با وزنه افتان قرار گرفتند. نتایج نشان داد که برای درجات خوردگی بالاتر از ۱۰ درصد، مقاومت ضربه به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و حالت شکست شکننده‌تر می‌شود. شکنندگی را می‌توان حداقل تا حدی به برهم کنش‌های بین ترک خوردگی خمشی ناشی از بارگذاری و آسیب‌های قبلی مرتبط با فرآیند خوردگی نسبت داد [۲۷]. یک مطالعه آزمایشگاهی در خصوص رفتار سازه‌های تیرهای بتنی دارای میلگردهای آجدار و صاف خورده شده به وسیله رابطه بین آسیب ناشی از خوردگی و مکانیزم شکست تحت بار خمشی سه نقطه‌ای انجام شده است و نتایج اندازه‌گیری آسیب خوردگی نشان می‌دهد که عرض ترک ناشی از خوردگی شاخص خوبی برای سطح خوردگی است. علاوه بر این، نتایج آزمایش‌های خمشی تاثیر برهم‌کنش بین کاهش پیوستگی و توزیع افت سطح مقطع را بر رفتار خمشی نشان می‌دهد [۲۸]. در یک تحقیق که توسط فاتن تقی و همکاران در مورد تاثیر خوردگی بر مقاومت برشی تیرهای بتنی الیافی (SFRC) به صورت آزمایشگاهی انجام شد، نتایج آزمایش نشان داد که افزودن الیاف باعث بهبود ظرفیت برشی و کاهش شروع و انتشار ترک به دلیل خوردگی، حالت شکست و انحراف می‌شود. همچنین، حالت شکست از شکست برشی شکننده به شکست خمشی شکل‌پذیر برای تیرهای SFRC تغییر یافت [۲۹]. پیپ و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد تیرهای بتنی دچار خوردگی پرداختند و نتایج تحقیق آنها نشان داد که خوردگی به‌طور قابل توجهی ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه‌های بتن آرمه را در محیط‌های کلرید کاهش می‌دهد [۳۰].

گسترده‌ی استفاده از سازه‌های بتن مسلح در زیرساخت‌ها و حتی ساختمان‌های معمولی، لزوم توجه به بررسی‌های بیشتر در زمینه خرابی‌های مرتبط با المان‌های بتنی را روشن می‌سازد. علی‌رغم عملکرد مطلوب بتن در بسیاری از سازه‌ها، خوردگی آرماتور در سه دهه گذشته مهم‌ترین مسئله دوام بتن در محیط‌های شدید و حتی متوسط بوده است. خوردگی فولاد فقط در سازه‌های بتنی، سالانه به‌طور متوسط هزینه‌ای در حدود نیم درصد تولید ناخالص ملی را در بر دارد که در ایران در حال حاضر بیش از ۲ میلیارد دلار برآورد می‌گردد که

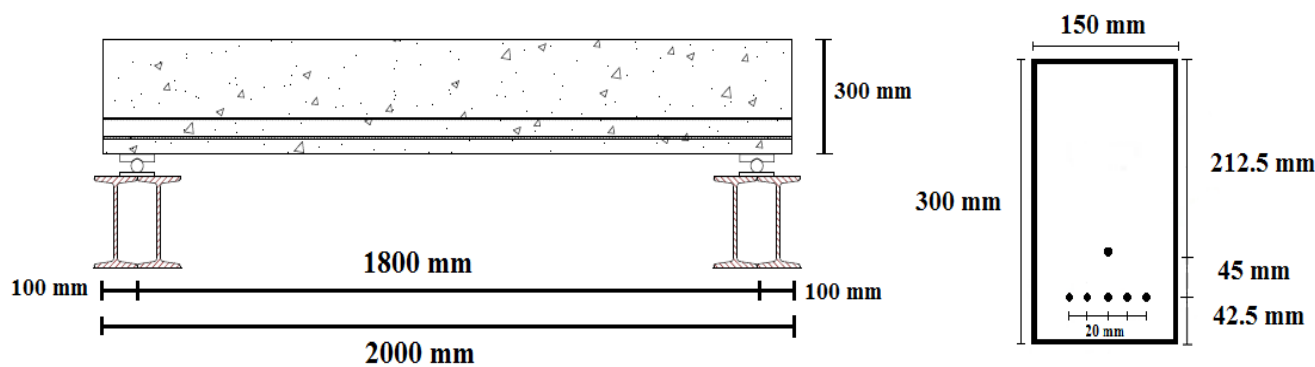
خود نشان از اهمیت بررسی این موضوع برای کاهش هزینه‌های ناشی از خوردگی است. با لحاظ این امر می‌توان این مطالعه را گامی لازم در جهت بررسی رفتار تیرهای بتنی پیش‌تنیده که ممکن است در محیط‌های دارای شرایط ایجاد خوردگی قرار گیرند، دانست. با وجود اینکه در گذشته مطالعات مشابهی در مورد اثر خوردگی بر فولادهای پیش‌تنیدی تیرهای بتنی پیش‌تنیده انجام شده ولی تا کنون مطالعه‌ای در خصوص اثر درجات مختلف خوردگی بر رفتار خمشی تیر بتنی پیش‌تنیده و بررسی پارامترهای رفتار سازه‌ای از جمله سختی موثر، شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی صورت نگرفته است. لذا در این پژوهش، یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی رفتار خمشی در تیرهای بتنی پیش‌تنیده در معرض خوردگی تسریع شده انجام می‌شود. به منظور تحقق اهداف پژوهش، چهار تیر بتنی پیش‌تنیده که ۳ مورد از آن‌ها به روش تسریع شده با استفاده از جریان الکتریکی تحت خوردگی قرار گرفت، ساخته شد. پس از قرار گرفتن در معرض سه سطح خوردگی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، نمونه‌ها تحت آزمایش بار خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. پس از انجام آزمایش بر روی نمونه‌ها و ثبت داده‌ها و رفتار تیرهای پیش‌تنیده تحت تاثیر خوردگی، نتایج آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات هندسی و جزئیات نمونه‌ها

در این تحقیق ۴ نمونه تیر بتنی به صورت پیش‌تنیده‌ی پیش‌کشیده در یک سیستم خط طولی ساخته شد و در ۳ تیر از تیرهای مورد مطالعه، خوردگی در سه سطح مختلف به روش تسریع شده با استفاده از جریان الکتریکی ایجاد شد. طول هر یک از تیرهای بتنی ۲ متر با دهانه خالص ۱/۸ متر و ابعاد مقطع عرضی با ارتفاع ۳۰۰ و عرض ۱۵۰ میلی‌متر بود. ابعاد هندسی و مشخصات مقطع تیر بتنی پیش‌تنیده مورد مطالعه در پژوهش در شکل (۱) نمایش داده شده است.

به منظور ایجاد پیش‌تنیدی در نمونه‌ها از فولادهای پیش‌تنیدی از نوع سیم پیش‌تنیدی (وایر) استفاده شد. تعداد ۶ عدد وایر در تیرهای بتنی پیش‌تنیده مطابق با آرایش نشان داده شده در شکل (۱) مورد استفاده قرار گرفت. پوشش بتنی مطابق ضوابط آیین‌نامه ACI 318-19 [۳۱]، ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.



شکل ۱: ابعاد هندسی و مقطع عرضی تیر مورد مطالعه

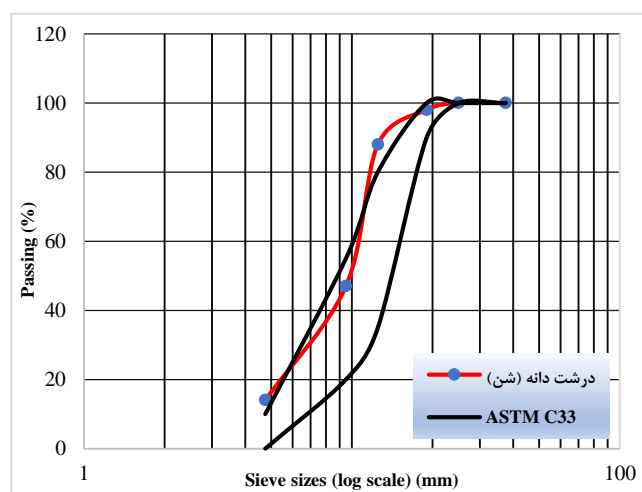
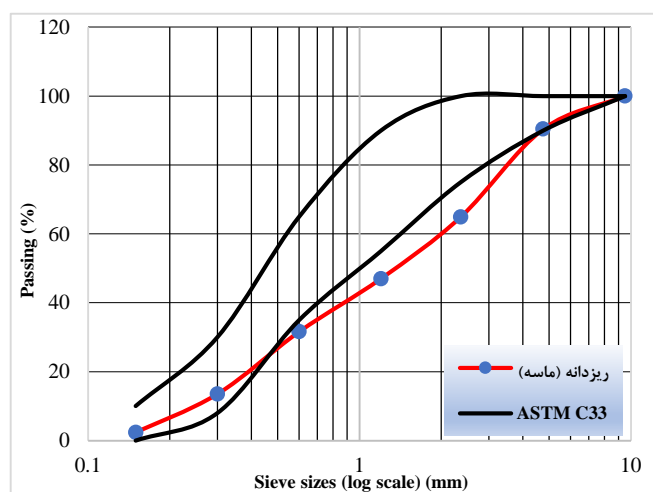
به منظور تفکیک، نمونه شاهد و بدون خوردگی با پسوند C0، نمونه دارای خوردگی سطح یک ۵ درصد با پسوند C5، نمونه با خوردگی سطح دو ۱۰ درصد با پسوند C10، نمونه با خوردگی سطح سه ۱۵ درصد با پسوند C15 نام‌گذاری شد. حرف B مخفف کلمه Beam به معنی تیر و حرف C مخفف کلمه Corrosion انتخاب گردید. دسته‌بندی و نام‌گذاری تیرهای مورد مطالعه بر اساس توضیحات فوق در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: دسته‌بندی و نام‌گذاری تیرهای پیش‌تندیده پیش‌کشیده

نام نمونه	ابعاد (mm)	سطح خوردگی
B-C0	۲۰۰۰×۳۰۰×۱۵۰	شاهد (فاقد خوردگی)
B-C5	۲۰۰۰×۳۰۰×۱۵۰	سطح یک، ۵ درصد
B-C10	۲۰۰۰×۳۰۰×۱۵۰	سطح دو، ۱۰ درصد
B-C15	۲۰۰۰×۳۰۰×۱۵۰	سطح سه، ۱۵ درصد

۲-۲- مشخصات مصالح مصرفی

سنگ‌دانه مصرفی در ساخت نمونه‌ها شامل درشت دانه (شن) و ریزدانه (ماسه) از معادن شرکت شن و ماسه نوید غرب واقع در منطقه تهران دشت شهرستان ساوجبلاغ تهیه شد. ریزدانه مورد استفاده در این پژوهش از نوع کوهی شکسته شسته شده با مدول نرمی ۲/۳۹ و ارزش ماسه‌ای ۸۵ درصد و جرم مخصوص 2530 kg/m^3 در محدوده زیر الک نمره ۴ (با قطر روزنه $4/75$ میلی‌متر) بود. درشت دانه مورد استفاده، شن شکسته کوهی عاری از ذرات غیرمجاز رس، لای و مواد زیان‌آور با حداکثر اندازه دانه‌های ۱۹ میلی‌متر و هم‌چنین جرم مخصوص 2610 kg/m^3 بود. نمودار دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی در ساخت نمونه‌های مورد استفاده در شکل (۲) نمایش داده شده است. نسبت ماسه به شن در مخلوط بتن تقریباً برابر $0/66$ در نظر گرفته شد.



شکل ۲: نمودار دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده

در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۲ آبیگ قزوین با جرم مخصوص 3120 kg/m^3 مطابق با استاندارد ACTM C150 [۳۲]، برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. آب مورد استفاده در ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها از آب شرب شهر اشتهارد در استان البرز بود. به‌منظور کنترل روانی بتن ساخته شده، از فوق روان‌کننده‌ای از نسل سوم بر پایه تکنولوژی پلی‌کربوکسیلات اتر با نام تجاری DEZOBUILD D-40 و جرم مخصوص 1040 kg/m^3 استفاده شد. مقدار مورد مقدار مصرف فوق روان‌کننده، بنابر توصیه شرکت سازنده و مطابق استاندارد ASTM C494 [۳۳]، یک درصد وزن سیمان در نظر گرفته شد. روش استفاده نیز بدین صورت بود که فوق روان‌کننده هم‌زمان با آب اختلاط به داخل میکسر بچینگ اضافه گردید.

برای ایجاد پیش تنیدگی در پژوهش حاضر که از نوع پیش کشیده بود، از فولاد رده ۲۵۰ و از نوع WA با قطر ۵ میلی متر و مطابق استاندارد ACTM A42 [۳۴]، استفاده شد. فولاد مصرفی در ساخت وایرها از نوع فولاد با مقاومت بالا با مقاومت کششی نهایی برابر MPa ۱۷۲۵ بود. مشخصات وایر مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی فولاد پیش تنیدگی (وایر)

قطر	سطح مقطع	وزن واحد طول	مدول الاستیسیته	مقاومت کششی	کمینه افزایش طول
(mm)	(mm ²)	(kN/m)	(MPa)	(MPa)	
۵	۱۹/۶	۰/۰۰۱۵۳۱	۱۹۶۵۰۰	۱۷۲۵	۳/۵ درصد برای طول ۶۰۰ میلی متر

۳-۲- طرح مخلوط بتن

بتن مورد استفاده در ساخت تیرها توسط یکی از تولیدکنندگان تیرچه بتنی پیش تنیده با سیستم تولید به روش پیوسته خط تولید در کارخانه‌ای در شهرستان اشتهارد استان البرز، تامین شده است. به منظور دستیابی به مقاومت هدف انتخاب شده، چندین طرح مخلوط برای بتن طراحی گردید و در نهایت طرح مخلوط نهایی برای ساخت بتن نمونه‌ها به روش حجمی مطابق جدول (۳) انتخاب گردید. نسبت آب به سیمان در تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر ۰/۳۸ در نظر گرفته شد. مشخصات مکانیکی بتن مورد استفاده در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۳: طرح مخلوط بتن مصرفی برای حجم یک متر مکعب

شن	ماسه	سیمان	آب	نسبت آب به سیمان	فوق روان کننده
(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)		(kg/m ³)
۱۰۶۵	۷۰۵	۴۵۰	۱۷۱	۰/۳۸	۴/۵

جدول ۴: مشخصات مکانیکی بتن مورد استفاده

مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای	مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای (تست برزیلی)	مدول الاستیسیته
(MPa)	(MPa)	(MPa)
۳۸/۸	۳/۹	۲۹۳۰۰

۴-۲- روش ساخت و عمل آوری تیرهای پیش کشیده

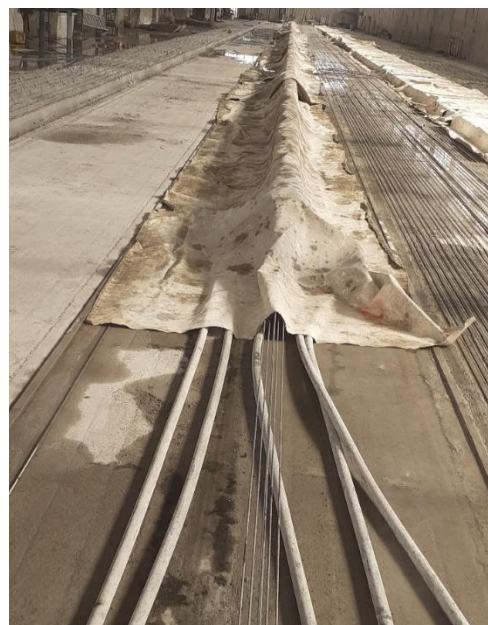
ساخت تیرهای بتنی پیش کشیده در کارخانه بتن پیش تنیده ایرانیان واقع در شهرک صنعتی اشتهارد استان البرز صورت گرفت. اختلاط و ساخت بتن توسط دستگاه مرکزی تهیه بتن این کارخانه انجام شد که با توجه به اندازه گیری دقیق وزن سیمان و ماسه و سنگ دانه و همین طور میزان آب توسط لوازم اندازه گیری دیجیتال دستگاه، مخلوطی با دقت بسیار بالا بدست می‌آید که مهم ترین اصل در ساخت بتن

می باشد. در طول یکی از خطوط تولید کارخانه، روی سطح خط تولید قالب فلزی با ابعاد متناسب با ابعاد نمونه‌ها و به طول تعداد نمونه‌های مورد نیاز قرار و قالب‌بندی مطابق شکل (۳) صورت گرفت. وایرها مطابق شکل (۱) و طبق آرایش در نظر گرفته شده، قبل از بتن‌ریزی به وسیله اسپیسرهای مناسب در داخل قالب‌های فلزی جانمایی و قرار داده شدند و در دو انتها با روش مهار مکانیکی، مهار و سپس به وسیله جک هیدرولیکی برقی مطابق شکل (۳) تا مقدار مجاز محاسبه شده حدود $23/7 \text{ kN}$ در هر وایر کشیده شدند. اتلاف تنش در تاندون‌های پیش‌تنیدگی و افت نیروی جک منظور نشده است. معمولاً اتلاف کلی حدود ۲۰ درصد است که انتظار می‌رود نیروی پیش‌تنیدگی موثر حدود ۱۹ کیلو نیوتن باشد. اندازه‌گیری میزان اتلاف هدف تحقیق نبوده است. در هر وایر پس از کشیده شدن توسط جک همانطور که در شکل (۳) نیز مشهود است، حدود ۶۲۰ میلی‌متر از دیاد طول در طول خط طویل ایجاد گردید.



شکل ۳: قالب‌بندی، جانمایی و کشیدن وایرها به وسیله جک هیدرولیکی برقی

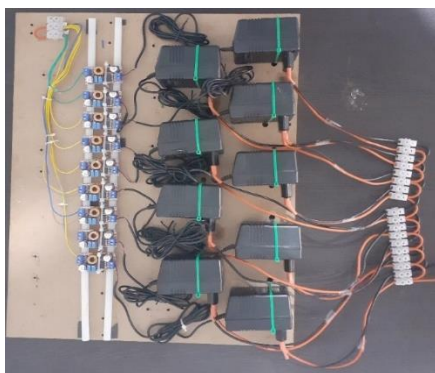
به منظور عمل‌آوری تیرهای بتنی پیش‌تنیده، پس از بتن‌ریزی و بعد از گذشت زمان ۴۸ ساعت و برداشتن قالب‌های فلزی کناری، از روش عمل‌آوری با بخار آب استفاده شد. بدین صورت که پس از بتن‌ریزی تیرها، مجموعه‌ای به نام لحاف بخار آب مطابق تصاویر ارائه شده در شکل (۴) بر روی تیرها پهن می‌شود که این سیستم مجهز به خطوط شبکه‌ای لوله‌های منفذدار بخار آب است. در این سیستم تیرها بصورت تدریجی به دمای نهایی ۷۰ درجه سانتی‌گراد رسیدند و تحت این دما تا زمان مشخصی در زیر لحاف بخار آب قرار گرفتند و سپس مجدداً دما به صورت تدریجی نزول کرده و کم‌کم سرد تا به دمای محیط رسید. تیرهای پیش‌تنیده بعد از اتمام زمان ۲۴ ساعت عمل‌آوری با بخار آب و قطع وایرها توسط سیستم برش کارخانه، آماده گردیدند.



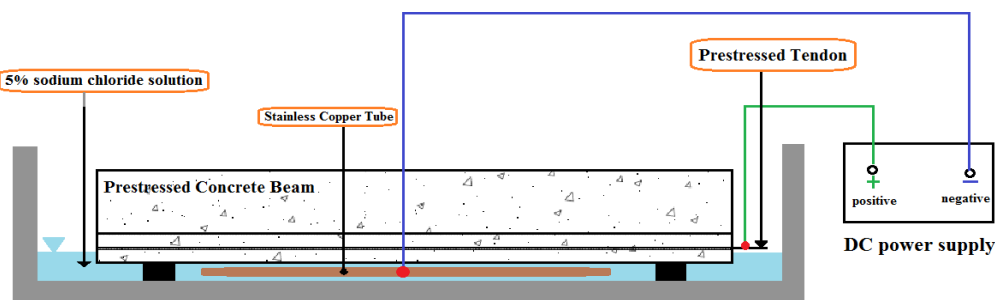
شکل ۴: خط تولید طولی و عمل آوری تیرهای پیش کشیده با روش لحاف بخار آب

۵-۲- نحوه ایجاد خوردگی تسریع شده

به منظور ایجاد خوردگی در نمونه‌های مورد مطالعه از روش تسریع شده با استفاده از جریان الکتریکی استفاده شد. تسریع در خوردگی با عمل الکتروشیمیایی و به وسیله اعمال شدت جریان ثابت بین آند (فولاد پیش‌تنیدگی) و لوله ضدزنگ (لوله مسی) به عنوان کاتد، که در خارج از نمونه قرار داشت، به دست آمد. پس از قرار دادن تیرهای بتنی پیش‌تنیده و لوله ضدزنگ (بدون تماس با هم) در محلول پنج درصد آب‌نمک (۵ درصد وزنی آب، نمک استفاده شد) مطابق شکل (۵) و ایجاد یک شدت جریان الکتریکی ثابت بین فولاد پیش‌تنیدگی و لوله مسی ضد زنگ توسط یک منبع تغذیه مطابق شکل (۶)، عمل خوردگی آغاز گردید. جریان الکتریکی با چگالی $150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ برای هر یک از نمونه‌ها اعمال و جهت ایجاد این جریان، ولتاژ منبع تغذیه در محدوده زیر ۱۲ ولت کنترل گردید. چگالی جریان الکتریکی اعمالی به منظور ایجاد خوردگی تسریع شده در بیشتر مطالعات اخیر معمولاً در محدوده $500-100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ انتخاب می‌شود [۳۵]. روش ایجاد خوردگی تسریع شده بر اساس روش ارائه شده در تحقیق آقای Weiping Zhang و همکاران است [۳۶]. شکل (۷) جزییات مدار الکتریکی برای اعمال خوردگی تسریع شده در آزمایشگاه را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. برای دستیابی به درجات مختلفی از خوردگی وایرها در تیرها، مدت زمان‌های مختلف جریان تحت تاثیر قانون فارادی محاسبه و اعمال شد.



شکل ۵: تیرهای بتنی پیش کشیده تحت عمل خوردگی تسریع شده شکل ۶: منبع تغذیه ساخته شده جهت اعمال جریان ثابت



شکل ۷: شماتیک کلی ایجاد خوردگی تسریع شده با استفاده از جریان الکتریکی

زمان مورد نیاز برای رسیدن به سطوح خوردگی مورد نظر با توجه به قانون فارادی و مطابق رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$\Delta W = \frac{I t A_m}{Z F} \quad (1)$$

که در رابطه شماره (۱)، ΔW وزن از دست رفته بر حسب گرم، I شدت جریان اعمالی بر حسب آمپر، t زمان از هنگام شروع خوردگی بر حسب ثانیه، A_m جرم اتمی فلز (برای فولاد برابر ۵۵/۸ گرم)، Z ظرفیت فلز (برابر با ۲)، و F ثابت فارادی (برابر ۹۶۵۵۹ کولمب) است.

پس از شکست نمونه‌ها، وضعیت فولادهای پیش‌تنیدگی از نظر وزن باقیمانده مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج حاصل از رابطه فارادی کنترل گردید. درصد خوردگی نمونه‌ها پس از وزن مجدد از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$CL = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (2)$$

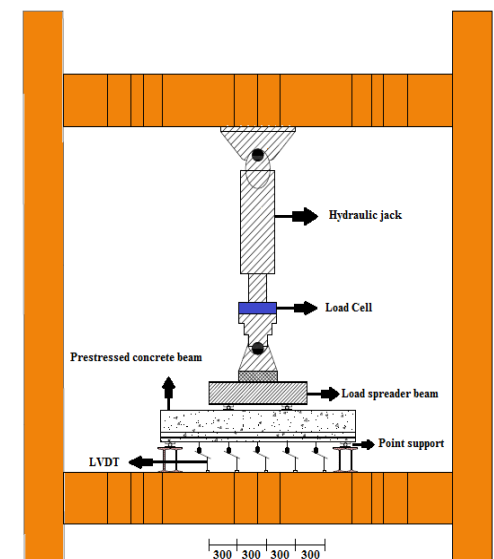
که در رابطه شماره (۲)، CL درصد خوردگی آزمایشگاهی، W_i وزن اولیه فولادهای پیش‌تنیدگی قبل از خوردگی، و W_f وزن فولادهای پیش‌تنیدگی پس از تمیز کردن سطح از محصولات خوردگی می‌باشد.

۲-۶- تجهیزات آزمایشگاهی و ابزار دقیق مورد استفاده

تمام تیرها در یک چیدمان مشابه و تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای آزمایش شدند. تکیه‌گاه تیرها به صورت ساده و روی تکیه‌گاه قرار گرفتند. بارگذاری به صورت یکنواخت در حالت کنترل‌شونده توسط جابجایی با سرعت ۰/۰۱ میلی‌متر بر ثانیه اعمال شد. بار توسط جک هیدرولیکی و سپس از طریق تیر فولادی پخش‌کننده به نمونه و سپس به تکیه‌گاه تیرهای پیش‌کشیده (برای به دست آوردن خمش چهار نقطه) منتقل شد. تصویری از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در شکل (۹) ارائه شده است. بارگذاری تا گسیختگی کامل نمونه‌ها ادامه یافت. تغییر مکان سنجه‌ها (LVDT) برای اندازه‌گیری جابجایی عمودی در نقاط مختلف قسمت تحتانی تیر نصب گردید. مقدار بار وارده به نمونه توسط یک لودسل (Load Cell) اندازه‌گیری شد. ظرفیت جک مورد استفاده در این آزمایش ۵۰۰ کیلو نیوتن بود. LVDT ها در مکان‌های خاصی (در فواصل یک ششم دهانه خالص) در امتداد طول تیر قرار گرفتند تا انحنای تیر را در طول آزمایش ثبت نمایند. ترک‌های ایجاد شده و مسیرهای رشد آنها بر روی سطح نمونه مشخص شد و نیروی ایجادکننده هر ترک در کنار آن ثبت شد. شماتیک تیر و چیدمان بارگذاری در شکل (۸) ارائه شده است.



شکل ۹: آزمایش خمش چهار نقطه‌ای



شکل ۸: شماتیک و چیدمان آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- صحت‌سنجی رابطه مبتنی بر قانون فارادی و کنترل میزان خوردگی نمونه‌ها

پس از انجام آزمایش خمش چهار نقطه‌ای روی تیرها و اتمام عملیات آزمایشگاهی، به منظور کنترل رابطه فارادی و مقایسه میزان خوردگی بر مبنای رابطه فارادی و خوردگی واقعی ایجاد شده در عمل، همانطور که در شکل (۱۰) نمایش داده شده است، بتن نمونه‌ها توسط چکش برقی تخریب بتن (هیلتی) تخریب شد و فولادهای پیش‌تنیدگی جدا و پس از شستشو و تمیز کردن سطح از محصولات خوردگی با محلول اسیدی، وزن کشی گردید. با توجه به محل قرارگیری وایرها میزان خوردگی ایجاد شده در وایرها متفاوت بود. وایرهای نزدیک به جداره‌های کناری، خوردگی بیشتری نسبت به وایرهای داخلی داشتند. همچنین میزان خوردگی در ابتدا و انتهای وایرها نسبت به قسمت‌های میانی بیشتر بود. شکل (۱۱) نمونه‌ای از فولادهای پیش‌تنیدگی دچار خوردگی شده بعد از تخریب بتن و بیرون کشیدن آن‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود بین نتایج میزان خوردگی محاسبه شده توسط رابطه تئوری مبتنی بر قانون فارادی و میزان خوردگی واقعی ایجاد شده با استفاده از وزن کشی تفاوت تا ۳ درصد وجود داشت.

جدول ۵: مقایسه میزان خوردگی تئوری و عملی ایجاد شده در سطوح مختلف خوردگی تسریع شده

سطح خوردگی	وزن اولیه فولادهای پیش‌تنیدگی (gr)	وزن فولادهای پیش‌تنیدگی پس از اعمال خوردگی تسریع شده (gr)	خوردگی تجربی (%)	خوردگی از رابطه فارادی (%)	اختلاف تئوری با آزمایش (%)
یک	۱۵۳۱	۱۴۷۲	۳/۸۵	۵	۱/۱۵
دو	۱۵۳۱	۱۳۹۸	۸/۶۸	۱۰	۱/۳۲
سه	۱۵۳۱	۱۳۴۰	۱۲/۴۷	۱۵	۲/۵۳



شکل ۱۰: تخریب بتن نمونه‌ها بعد از آزمایش با چکش برقی تخریب بتن (هیلتی) و بیرون کشیدن فولادهای پیش تنیدگی



شکل ۱۱: محصولات خوردگی ایجاد شده روی فولادهای پیش تنیدگی و سطوح زیرین و جانبی تیرهای پیش تنیده

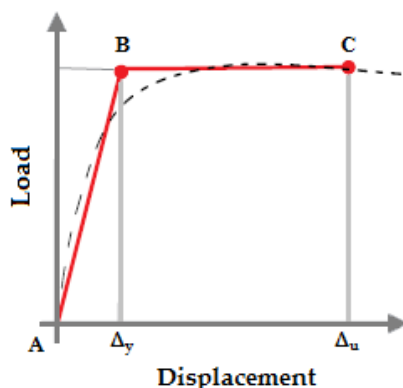
۲-۳- نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای روی نمونه‌ها

نمودارهای نیرو-تغییرمکان بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی برای هر تیر پیش تنیده برای بیان مشخصات رفتاری آن‌ها، بر اساس روش ارائه شده توسط پائولی و پریستلی ایده آل سازی و به منحنی دوخطی معادل تبدیل گردید. ایده آل سازی نمودار دوخطی معادل بر اساس این که سطح محصور بین بالا و پایین منحنی نیرو-تغییرمکان و نمودار دوخطی معادل با یکدیگر برابر باشد، صورت گرفت. با این کار در واقع مساحت زیر منحنی نیرو-تغییرمکان و نمودار دوخطی معادل با هم برابر می‌شود. همچنین سختی سازه بعد از تسلیم (شیب ثانویه منحنی دوخطی) صفر می‌باشد. با استفاده از این منحنی دوخطی معادل شده، مشخصات رفتاری تیرها شامل سختی موثر و شکل پذیری محاسبه شد. سختی موثر نمونه آزمایشگاهی برابر با سختی سکانت نقطه تسلیم نمونه در منحنی نیرو-تغییرمکان می‌باشد.

به عبارت دیگر سختی موثر که طبق تعریف عبارت است از میزان مقاومت یک جسم در برابر تغییر مکان، برابر است با شیب خطی که مبدا را به نقطه ۷۵ درصد ماکزیمم نیرو در روی منحنی نیرو-تغییر مکان وصل می‌نماید [۳۷].

شکل پذیری μ که طبق تعریف قابلیت تحمل تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی در بخشی یا تمام طول المان سازه‌ای بدون افت قابل ملاحظه در مقاومت می‌باشد، طبق رابطه (۳) با محاسبه نسبت تغییر مکان نهایی Δ_u به تغییر مکان تسلیم Δ_y از نمودار دوخطی معادل شده به دست می‌آید.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3)$$



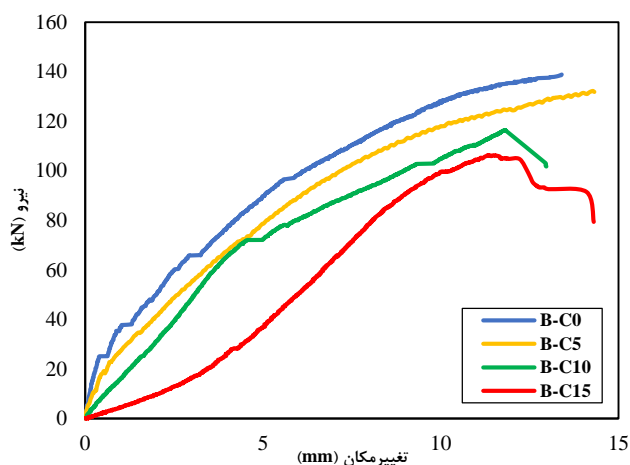
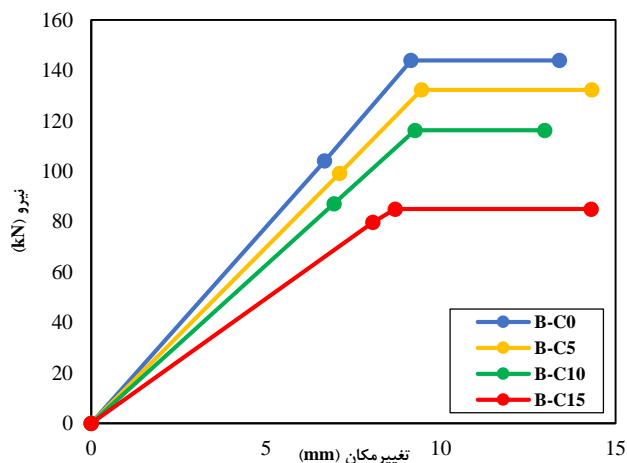
شکل ۱۲: ایده آل سازی منحنی نیرو-تغییر مکان با یک نمودار دوخطی معادل.

تغییر مکان نهایی و تغییر مکان تسلیم، تغییر مکان متناظر با نقطه انتهای خط اول و ابتدای خط دوم در نمودار دوخطی معادل و تغییر مکان نهایی، شده است، تغییر مکان متناظر با نقطه انتهای خط دوم در نمودار دوخطی معادل و تغییر مکان نهایی، تغییر مکان متناظر با نقطه انتهای خط دوم در نمودار دوخطی معادل است.

همچنین با استفاده از نتایج ثبت شده توسط ۵ تغییر مکان سنج قرار گرفته زیر نمونه، برای هر تیر نیمرخ طولی خیز نهایی در یک بار ثابت به عنوان بار مرجع که در اینجا معادل ۹۰ درصد ظرفیت باربری در نظر گرفته شد، ترسیم گردید.

۱-۲-۳- نمودارهای نیرو-تغییر مکان

نمودارهای نیرو-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌ها در شکل (۱۳) و نمودارهای دوخطی معادل آن‌ها نیز در شکل (۱۴) جهت مقایسه ارائه شده است.



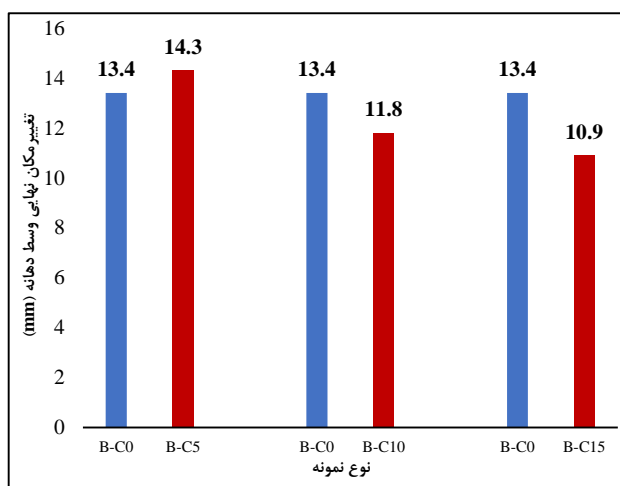
شکل ۱۳: نمودارهای نیرو-تغییر مکان وسط دهانه تیرها

شکل ۱۴: نمودارهای دوخطی معادل منحنی‌های نیرو-تغییر مکان

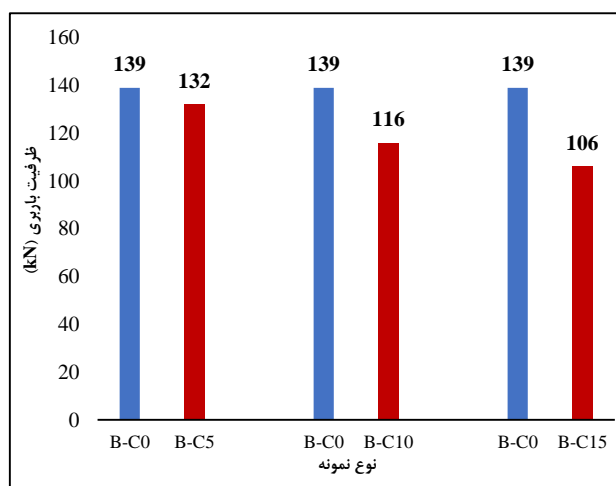
باتوجه به نمودارهای شکل (۱۳) و نتایج ارائه شده در جدول (۶) می‌توان نتیجه گرفت خوردگی ایجاد شده در فولادهای پیش‌تنیدگی باعث کاهش ظرفیت باربری تیر می‌شود. در واقع با ایجاد خوردگی سطح مقطع وایرها کاهش پیدا می‌کند و این کاهش، موجب ضعف مقاومت مکانیکی وایر و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری تیر می‌شود. ظرفیت باربری تیر در خوردگی ۱۵ درصد دچار بیشترین میزان کاهش برابر ۲۴ درصد گردید. در خصوص تغییر مکان نهایی تیر در خوردگی سطح ۵ درصد شاهد افزایش در حالی که در خوردگی سطوح ۱۰ و ۱۵ درصد این پارامتر کاهش پیدا کرد. افزایش در خوردگی ۵ درصد، برابر ۰/۹ میلی‌متر و ناچیز بود و این افزایش را می‌توان ناشی از خطای در حین ساخت نمونه دانست. بیشترین میزان کاهش در پارامتر تغییر مکان نهایی تیر در خوردگی ۱۵ درصد به میزان ۱۹ درصد بود. علاوه بر این، با کاهش ظرفیت باربری و تغییر مکان نهایی نمونه‌ها به دلیل خوردگی ایجاد شده، سطح تشکیل شده زیر نمودار نیرو-تغییر مکان کاهش و در نتیجه پارامتر میزان انرژی جذب شده توسط تیر که برابر مساحت زیر نمودار نیرو-تغییر مکان است، کاهش می‌یابد. انرژی جذب شده توسط تیر در خوردگی ۱۵ درصد دچار بیشترین میزان کاهش برابر ۳۴ درصد گردید.

با افزایش سطوح خوردگی، زوال و کاهش سطح مقطع بیشتری در وایرها و محصولات خوردگی بیشتر روی بدنه تیر مشاهده گردید که نتیجه آن کاهش بیشتر ظرفیت باربری و تغییر مکان نهایی و همچنین سطح زیر نمودار شکل گرفته بر اساس آن‌هاست، بنابراین بین افزایش سطوح خوردگی و ظرفیت باربری کاهش یافته یا انرژی جذب شده کاهش یافته رابطه مستقیم وجود دارد. نمودار میله‌ای جهت مقایسه و بررسی تاثیر خوردگی در سطوح مختلف بر ظرفیت باربری، میزان جذب انرژی و جابجایی نهایی وسط دهانه تیر شاهد در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) ارائه شده است.

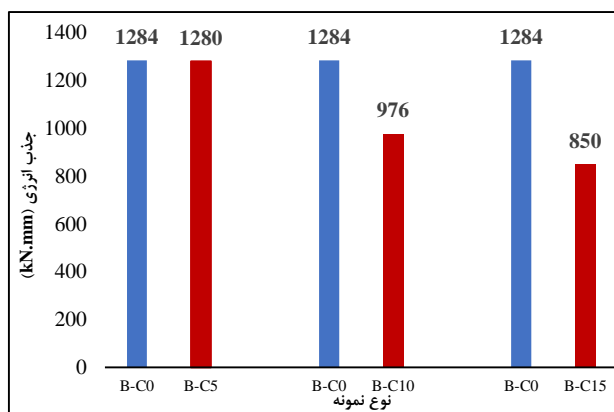
در رابطه با سختی موثر تیر، در اثر خوردگی در سطوح مختلف ظرفیت باربری تیر کاهش پیدا کرد که در نتیجه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان و نمودارهای دوخطی معادل ارائه شده در شکل (۱۴) افت پیدا کردند که این افت، شیب خط واصل بین مبدا و نقطه معادل ۷۵ درصد ماکزیمم نیرو در نمودار دوخطی معادل که برابر سختی موثر تیر است را کاهش می‌دهد. با افزایش سطح خوردگی سختی موثر کاهش یافته بیشتر می‌شود و در خوردگی ۱۵ درصد بیشترین کاهش به میزان ۳۷ درصد در تیر مشاهده گردید. طبق تعریف شکل‌پذیری تیر برابر با نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان تسلیم می‌باشد که بر اساس نمودارهای دو خطی معادل ارائه شده در شکل (۱۴) در خوردگی ۱۰ درصد این پارامتر کاهش و در خوردگی ۵ و ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. نمودار میله‌ای جهت مقایسه و بررسی تاثیر خوردگی در سطوح مختلف بر سختی موثر و شکل‌پذیری تیر شاهد در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) ارائه شده است.



شکل ۱۶: نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان نهایی تیرها

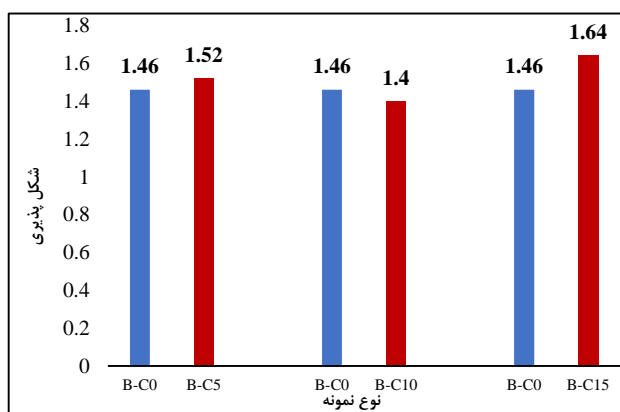


شکل ۱۵: نمودار مقایسه‌ای ظرفیت باربری تیرها

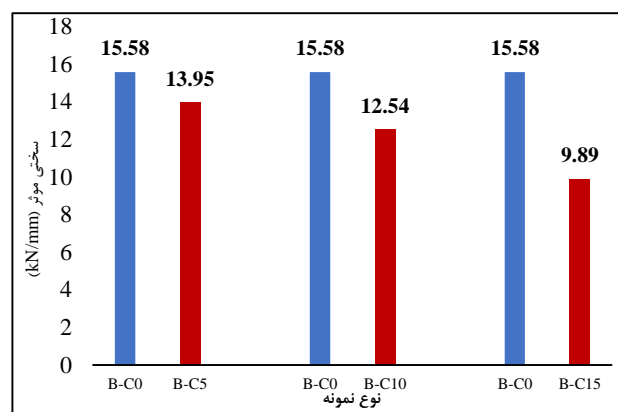


شکل ۱۷: نمودار مقایسه‌ای انرژی جذب شده تیرها

تیرهای B-C5، B-C10 و B-C15 نسبت به تیر B-C0 به ترتیب دچار ۵، ۷ و ۲۴ درصد کاهش در ظرفیت باربری در اثر خوردگی در سطوح مختلف شدند. پارامتر تغییرمکان نهایی وسط دهانه در تیر B-C5 نسبت به تیر B-C0، ۷ درصد افزایش پیدا کرد، در حالی که این پارامتر در تیرهای B-C10 و B-C15 نسبت به تیر B-C0، به ترتیب تقریباً ۱۲ و ۱۹ درصد کاهش پیدا کردند. انرژی جذب شده توسط تیر B-C5 در مقایسه با B-C0 تقریباً به مقدار خیلی ناچیز کاهش پیدا کرد اما تیرهای B-C10 و B-C15 نسبت به تیر B-C0، به ترتیب دچار ۲۴ و ۳۴ درصد کاهش شدند.

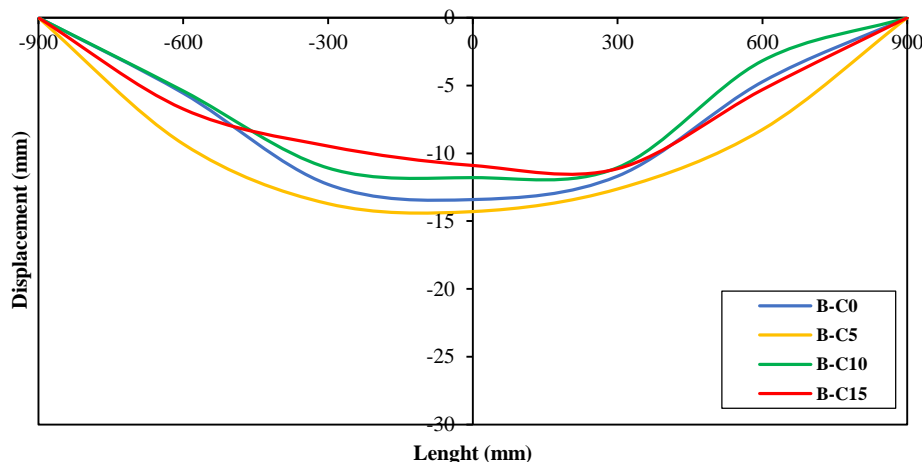


شکل ۱۹: نمودار مقایسه‌ای شکل پذیری تیرها



شکل ۱۸: نمودار مقایسه‌ای سختی موثر تیرها

تیرهای B-C5، B-C10 و B-C15 نسبت به تیر B-C0 به ترتیب دچار ۱۰، ۲۰ و ۳۷ درصد کاهش در سختی موثر در اثر خوردگی در سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد شدند. پارامتر شکل پذیری در تیر B-C10 نسبت به تیر B-C0 تقریباً ۴ درصد کاهش پیدا کرد و این در حالی است که شکل پذیری تیرهای B-C5 و B-C10 نسبت به تیر B-C0، به ترتیب دچار ۴ و ۱۲ درصد افزایش شدند. نمودارهای نیمرخ طولی خیز نمونه‌های مورد مطالعه جهت مقایسه در شکل (۲۰) ارائه شده است.



شکل ۲۰: نمودار نیمرخ‌های طولی خیز تیرها

نمودارهای نیمرخ طولی خیز تیرهای مورد مطالعه غیر متقارن و خیز نیمه‌ای که شکست تیر در آن اتفاق افتاد نسبت به نیمه‌دیگر تیر بیشتر می‌باشد. در سطح خوردگی ۵ درصد خیز تیر افزایش پیدا کرد که میزان این افزایش کم و همانطور که گفته شد ممکن است به دلیل خطای در هنگام ساخت نمونه اتفاق افتاده باشد، در صورتی که در سطوح خوردگی ۱۰ و ۱۵ درصد خیز تیر کاهش پیدا کرد.

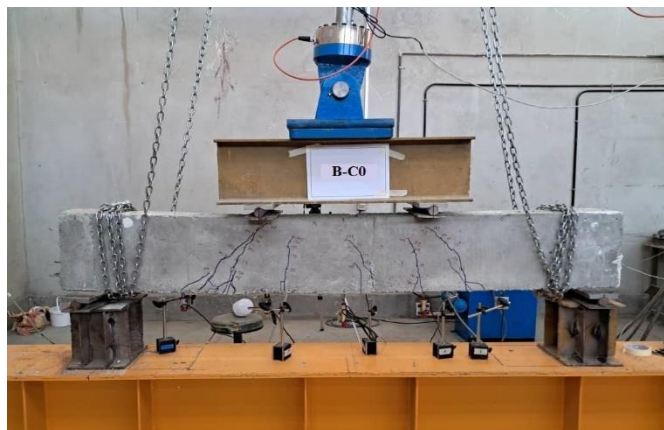
جدول ۶: خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده روی تیرها

نام تیر	بار ترک خوردگی	تغییر مکان وسط دهانه متناسب با بار ترک خوردگی	ظرفیت باربری	تغییر مکان وسط دهانه متناسب با ظرفیت باربری	نسبت بار ترک خوردگی به ظرفیت باربری	شکل پذیری	سختی موثر	جذب انرژی
	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	P_{cr}/P_u	μ	K_{eff} (kN/mm)	E (kN.mm)
B-C0	۸۹	۴/۹۷	۱۳۹	۱۳/۴	۰/۶۴	۱/۴۶	۱۵/۵۸	۱۲۸۴
B-C5	۷۵	۴/۵۵	۱۳۲	۱۴/۳	۰/۵۶۸	۱/۵۲	۱۳/۹۵	۱۲۸۰
B-C10	۷۰	۴/۳۶	۱۱۶	۱۱/۸	۰/۶۰۳	۱/۴۰	۱۲/۵۴	۹۷۶
B-C15	۴۵	۵/۲۲	۱۰۶	۱۰/۹	۰/۴۲۴	۱/۶۴	۹/۸۹	۸۵۰

۳-۳- مود شکست و الگوی ترک در تیرها

در شکل (۲۱) مود شکست و همچنین توزیع ترک‌ها در تیرها نشان داده شده است. روند شروع ترک خوردگی در تیرها به این صورت بود که در باری معادل تقریباً ۰/۴۲ تا ۰/۶۳ ظرفیت باربری برای تیرهای با سطوح مختلف خوردگی، اولین ترک به صورت خمشی در حوالی وسط دهانه از زیر تیر شروع و به سمت بالا گسترش پیدا کرد. با افزایش میزان بار وارده چند ترک خمشی دیگر در همان محدوده ایجاد شد ضمن اینکه ترک‌های برشی در نزدیکی تکیه‌گاه مشاهده گردید. ترک‌های خمشی ایجاد شده در نمونه در ارتفاع ناحیه کششی امتداد یافتند و پس از رسیدن به ناحیه فشاری تیر بسته شدند. با افزایش بار وارده به نمونه، ترک‌های برشی بیشتری در دو سمت تیر ایجاد شد و پس از رسیدن به حداکثر مقدار قابل تحمل توسط تیر، عرض ترک‌ها رفته رفته بیشتر و در نهایت باعث شکست تیر شد. همان طوری که در شکل (۲۰) مشخص است، ترک منجر به شکست تیر در محدوده‌ای بین تکیه‌گاه و وسط دهانه ایجاد و نوع شکست در همه‌ی نمونه‌ها به صورت مود شکست خمشی-برشی است. مشاهدات حین آزمایش، حاکی از عدم پیوستگی و ترک خوردگی افقی در راستای ردیف فولادهای پیش‌تیندگی به دلیل خوردگی و محصولات ایجاد شده ناشی از آن در این محل است و با افزایش سطح خوردگی مقاومت پیوستگی به شدت کاهش و عرض دهانه ترک در تیرهای B-C5، B-C10 و B-C15 به ترتیب افزایش یافت. همچنین با افزایش سطوح

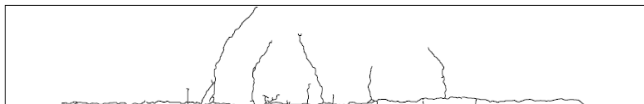
خوردگی، شروع ترک خوردگی زودتر اتفاق افتاد و به همین دلیل توزیع و رشد ترک بیشتری در نمونه‌های تحت اثر خوردگی در سطوح بالاتر مشاهده شد.



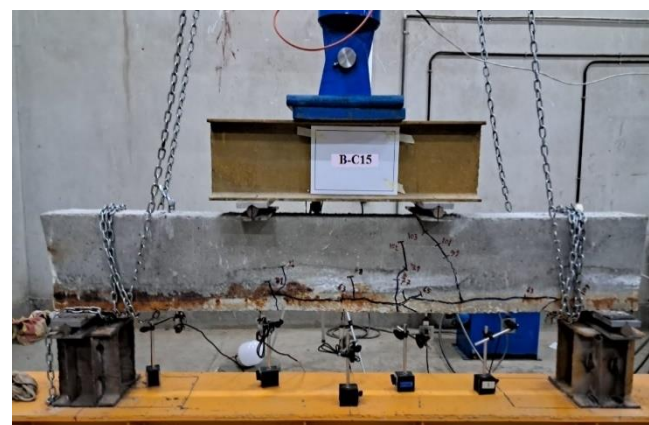
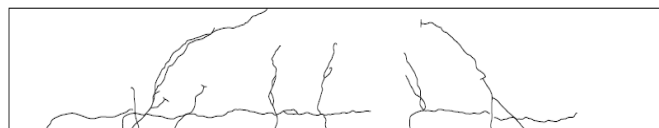
B-C0



B-C5



B-C10



B-C15



شکل ۲۱: مود شکست و الگوی ترک تیرها

۴- نتیجه گیری

در پژوهش صورت گرفته به منظور بررسی رفتار خمشی تیرهای بتنی پیش‌تنیده تحت اثر خوردگی تعداد ۴ عدد تیر بتنی پیش‌تنیده با ابعاد مفروض ساخته شد و ۳ عدد از آن‌ها در معرض خوردگی تسریع شده در سطوح مختلف به روش اعمال جریان الکتریکی قرار گرفت. پس از اتمام دوره ایجاد خوردگی، همه تیرها تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌ای قرار گرفتند. پس از انجام آزمایش‌ها و ثبت

نتایج آزمایشگاهی، پارامترهایی مانند ظرفیت باربری، بار ترک خوردگی، خیز وسط دهانه تیر، نحوه رشد ترکها، میزان جذب انرژی تیرها، شکل پذیری و سختی موثر برای هر تیر تعیین و با هم مقایسه و تاثیر خوردگی در سطوح مختلف مشخص گردید.

با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، مهم ترین نتیجه های حاصل از این پژوهش به صورت زیر بیان می گردد:

۱- رابطه مبتنی بر قانون فارادی در بحث ایجاد خوردگی به روش تسریع شده با جریان الکتریکی کنترل گردید و مشاهده گردید بین میزان خوردگی حاصل از رابطه تئوری مبتنی بر قانون فارادی و میزان ایجاد شده واقعی، اختلاف حدود ۱ الی ۳ درصدی در سطوح مختلف خوردگی وجود دارد و بین افزایش سطح خوردگی و این میزان اختلاف رابطه مستقیم وجود دارد.

۲- با توجه به محل قرارگیری وایرها میزان خوردگی ایجاد شده در طول آنها متفاوت است. وایرهای نزدیک به جداره های کناری خوردگی بیشتری نسبت به وایرهای داخلی داشتند. همچنین میزان خوردگی در ابتدا و انتهای وایرها نسبت به قسمت های میانی بیشتر بود.

۳- خوردگی باعث کاهش مقادیر پارامترهای مورد بررسی در رفتار سازه های آنها شامل ظرفیت باربری، میزان انرژی جذب شده، سختی موثر، شکل پذیری و تغییر مکان وسط دهانه می شود و افزایش سطوح خوردگی، منجر به کاهش بیشتر این مقادیر می شود.

۴- با ترسیم نمودار نیمرخ طولی خیز تیرها مشاهده گردید که اکثر این نمودارها نسبت به وسط دهانه غیرممتقارن و خیز تیر در نیمه ای که شکست در آن اتفاق می افتد نسبت به نیمه دیگر بیشتر است. همچنین با افزایش سطوح خوردگی، مقدار خیز نهایی تیر کاهش یافت.

۵- نحوه ترک خوردگی تیرها بدین صورت بود که با شروع اعمال بار بر نمونه ها در باری معادل تقریباً ۰/۴۲ تا ۰/۶۳ ظرفیت باربری برای تیرهای با سطوح مختلف خوردگی اولین ترک ایجاد و با افزایش میزان بار وارده تا مقدار ظرفیت باربری تیرها، در نهایت شکست تیر به صورت مود خمشی-برشی و در محدوده ای بین تکیه گاه و وسط دهانه اتفاق افتاد. افزایش سطوح خوردگی باعث ایجاد ترک افقی پیوستگی در تراز قرارگیری فولادهای پیش تنیدگی شد.

۶- خوردگی باعث کاهش میزان بار ترک خوردگی تیرها شد و با افزایش سطوح خوردگی نسبت بار ترک خوردگی به ظرفیت باربری در تیرها کاهش یافت.

با توجه به اینکه مطالعه مذکور بر روی تاثیر خوردگی فولادهای پیش تنیدگی مدفون در تیرهای بتنی پیش تنیده بر رفتار سازه ای این المانها متمرکز شده است، در تحقیقات آینده می توان روش های مقاوم سازی این المانها از جمله استفاده از صفحات FRP یا استفاده از الیاف های مختلف در طرح مخلوط بتن برای جبران ظرفیت از دست رفته ناشی از پدیده خوردگی را بررسی کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند از شرکت صنایع بتن پیش تنیده ایران و مهندس احمدی مدیرعامل آن برای حمایت مالی و کمک به تولید نمونه های مورد مطالعه در این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

مراجع

- [1] Azad, A.K., Ahmad, S., & Azher, S.A. (2007). Residual strength of corrosion-damaged reinforced concrete beams. *ACI Materials Journal*, 104(1), 40-47.
- [2] Lachemi, M., Al-Bayati, N., Sahmaran, M., & Anil. O. (2014). The effect of corrosion on shear behavior of reinforced self-consolidating concrete beams. *Engineering Structures*, 79, 1-12.
- [3] Campione, G., Cannella, F., & Cavaleri, L. (2017). Shear and flexural strength prediction of corroded R.C. beams. *Construction and Building Material*, 149, 395-405.

- [4] Fang, C., Lundgren, K., Plos, M., & Gylltoft, K. (2006). Bond behavior of corroded reinforcing steel bars in concrete. *Cement and Concrete Research*, 36, 1931-1938.
- [5] Zhao, Y., Xu, X., Wang, Y., & Dong, J. (2020). Characteristics of pitting corrosion in an existing reinforced concrete beam exposed to marine environment. *Construction and Building Material*, 234, 117392.
- [6] Liu, Y., & Weyers, R.E. (1998). Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures. *ACI Materials Journal*, 96(6), 675-681.
- [7] Andrade, C., Alonso, C., & Molina, F.J. (1993). Cover cracking as a function of rebars corrosion: Part 1—Experimental test. *Materials and Structures*, 26(8), 453-464.
- [8] Williamson, S.J., & Clark, L.A. (2000). Pressure required to cause cover cracking of concrete due to reinforcement corrosion. *Magazine of Concrete Research*, 52(6), 455-467.
- [9] Al-Sulaimani, G.J., Kaleemullah, M., Basunbul, I.A., & Rasheeduzzafar. (1990). Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. *ACI Structural Journal*, 87(2), 220-230.
- [10] Amleh, L., & Mirza, A. (1999). Corrosion influence on bond between steel and concrete. *ACI Structural Journal*, 96(3), 415-423.
- [11] Kivell, A., Palermo, A., & Scott, A. (2011). Effects of bond deterioration due to corrosion in reinforced concrete. In: *Proceedings of ninth Pacific conference on earthquake engineering building an earthquake-resilient society*. Auckland (New Zealand), 14–16.
- [12] Kivell, A., Palermo, A., & Scott, A. (2015). Complete model of corrosion-degraded cyclic bond performance in reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*, 141(9), 04014222.
- [13] Sajedi, S., & Huang, Q. (2015). Probabilistic prediction model for average bond strength at steel–concrete interface considering corrosion effect. *Engineering Structures*, 99, 120-131.
- [14] Meda, A., Mostosi, S., Rinaldi, Z., & Riva, P. (2014). Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns. *Engineering Structures*, 76, 112-123.
- [15] Yu, L., François, R., Dang, V.H., L'Hostis, V., & Gagné, R. (2015). Structural performance of RC beams damaged by natural corrosion under sustained loading in a chloride environment. *Engineering Structures*, 96, 30-40.
- [16] Khaloo, A. (2017). *Design of prestressed concrete structures*. Second edition. Tehran: Publication Center of Sharif University of Technology.
- [17] Kioumarsi, M., Benenato, A.; Ferracuti, B.; Imperatore, S. (2021). Residual flexural capacity of corroded prestressed reinforced concrete beams. *Metals*, 11, 442.
- [18] Coronelli, D., Castel, A., Vu, N.A., & François, R. (2009). Corroded post-tensioned beams with bonded tendons and wire failure. *Engineering Structures*, 31(8), 1687–1697.
- [19] Rinaldi, Z., Imperatore, S., & Valente, C. (2010). Experimental evaluation of the flexural behavior of corroded P/C beams. *Construction and Building Material*, 24(11), 2267–2278.
- [20] Castel, A., François, R., & Coronelli, D. (2012). Response of corroded prestressed beams with bonded strands. *Ice Proceedings Structures and Buildings*, 165(5), 233–244.
- [21] Rogers, R., Wotherspoon, L., Scott, A. N., & Ingham, J. M. (2012). Residual strength assessment and destructive testing of decommissioned concrete bridge beams with corroded pretensioned reinforcement.
- [22] Melchers, R.E., & Pape, T.M. (2013). Performance of 45-year-old corroded prestressed concrete beams. *Proc. Ice Structures and Buildings*, 166(10), 547–559.
- [23] Wang, L., Zhang, X., Zhang, J., Ma, Y., Xiang, Y., & Liu, Y. (2014). Effect of insufficient grouting and strand corrosion on flexural behavior of PC beams. *Construction and Building Material*, 53, 213–224.
- [24] Yu, Q. Q., Gu, X. L.; Zeng, Y. H.; Zhang, W. P. (2022). Flexural behavior of Corrosion-Damaged prestressed concrete beams. *Eng. Struct*, 272, 114985.
- [25] Moawad, M., Mahmoud, M., El-karmoty, H., & El-zanaty, A. (2018). Behavior of corroded bonded partially prestressed concrete beams. *Housing and Building National Research center*, 14(1), 9-21.
- [26] Jeon, C.-H., Le, J.-B., Lon, S., & Shim, C.-S. (2019). Equivalent material model of corroded prestressing steel strand. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2450-2460.
- [27] Tamai, H., Sonoda, Y., & Bolander, J.E. (2020). Impact resistance of RC beams with reinforcement corrosion: Experimental observations. *Engineering Structures*, 263, 120638.
- [28] Nasser, H., Steen, CH.V., Vandewalle, L., & Verstryngge, E. (2021). An experimental assessment of corrosion damage and bending capacity reduction of singly reinforced concrete beams subjected to accelerated corrosion. *Engineering Structures*, 286, 122773.
- [29] Taqi, F.Y., Mashrei, M.A., & Oleiwi, H.M. (2021). Experimental study on the effect of corrosion on shear strength of fibre-reinforced concrete beams. *Structures*, 33, 2317-2333.
- [30] ape, T. M., Melchers, R. E. (2013). Performance of 45-year-old corroded prestressed concrete beams. *Structures and Buildings*, 166, 547-559.

- [31] ACI 318-19. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. Reported by ACI Committee 318, ACI Standard.
- [32] ASTM Standard C150-07. (2012). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM.
- [33] ASTM Standard C494/C494M-17. (2020). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM.
- [34] ASTM Standard A421/A421M-21. (2021). *Standard Specification for Stress-Relieved Steel Wire for Prestressed Concrete*, ASTM.
- [35] Maaddawy, T.E., & Soudki, Kh.A. (2003). Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1), 41-47.
- [36] Zhang, W., Liu, X.; Gu, X. (2016). Fatigue behavior of corroded prestressed concrete beams. *Construction and Building Materials*, 106, 198-208.
- [37] Paulay, T., Priestly, M.J.N. *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, 1st Edition.; Publisher by wiley-interscience, New York, 1992.