

Experimental comparison of effect of Isfahan and Esfarayen slags on Strength-durability properties sulfate-exposed concretes and flexural behavior of RC beams

Mohammad Kazem Sharbatdar

*Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. (Corresponding Author)
msharbatdar@semnan.ac.ir*

Mos̄tafa Babaei

Graduated MS, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Abstract

Presently, diverse forms of industrial waste are being utilized as sustainable mineral materials to substitute a portion of cement in the production of concrete, employing an economically viable approach. This study aims to compare and assess the impact of incorporating two types of slag, sourced from Isfahan Steel Plant and Esfarayen Steel Plant, as substitutes for varying percentages of cement in ordinary concrete. The investigation unfolds in three phases. In the initial phase, concrete samples were created with a specified mixing design, incorporating varying percentages of the two types of slag, and employing water-cement ratios of 0.54 and 0.43. These samples were subjected to compressive strength testing at 28, 56, and 90 days after immersion in a water pool. The second phase involved the production of concrete samples with optimal slag percentages for further analysis. In the third phase, reinforced concrete beams, measuring 1000 × 150 × 150 mm and designed with three distinct mixing configurations, were manufactured to assess the structural performance of concretes containing optimal slag percentages. A four-point bending beam test was conducted to determine the ultimate capacity. Test results revealed that, although the strength of concrete samples containing varying slag percentages at 28 days was lower than that of normal concrete, the strength of samples containing 30% Isfahan slag and 20% Esfarayen slag at 56 and 90 days approached that of normal concrete, achieving the desired level of strength and resistance. Durability tests in the second phase indicated that samples containing slag exhibited greater durability in a sulfate environment compared to normal concrete. Additionally, the ultimate bending capacity of reinforced concrete beams containing 30% Isfahan slag and 30% Esfarayen slag demonstrated a 10% increase and a 3% decrease, respectively, compared to beams without slag.

Keywords: Compressive strength, Durability, Slag, Industrial waste, Sulfate environment, Flexural strength

***Corresponding Author:** Mohammad Kazem Sharbatdar

Sharbatdar, M. K., Babaei, M. Experimental Comparison of Effect of Isfahan and Esfarayen Slags on Strength-Durability Properties Sulfate-Exposed Concretes and Flexural Behavior of RC Beams. Journal of Concrete Structures and Materials, 2023; 8(1): 14-32. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.348758.1278>

2538-5828/ © 2023 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مقایسه آزمایشگاهی تاثیر سرباره‌های ضایعاتی اصفهان و اسفراین بر خواص مقاومتی و دوام بتن در محیط سولفاتی و رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه

محمد کاظم شربتدار

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
msharbatdar@semnan.ac.ir

(نویسنده مسئول)

مصطفی بابایی

دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
Babaeim796@gmail.com

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

امروزه انواع مختلفی از ضایعات صنعتی بعنوان مصالح پایدار معدنی برای جایگزینی بخشی از سیمان در تولید بتن با رویکرد اقتصادی استفاده می‌شوند. هدف اصلی این تحقیق، مقایسه و بررسی تاثیر استفاده از دو نوع سرباره کارخانه ذوب‌آهن اصفهان و کارخانه فولاد اسفراین به عنوان جایگزینی از درصد‌های مختلف سیمان در بتن معمولی بود که در سه فاز انجام شد. نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط و درصد‌های مختلف از دو نوع سرباره با نسبت‌های آب به سیمان برابر ۰/۵۴ و ۰/۴۳ در فاز اول ساخته شدند و پس از قرارگیری در حوضچه آب، در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. در فاز دوم، نمونه‌های بتنی با درصد‌های بهینه سرباره برای سنجش دوام نمونه‌ها ساخته شدند. تیرهای بتن مسلح با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۰۰۰ میلی‌متر با ۳ طرح اختلاط متفاوت در فاز سوم و برای بررسی عملکرد سازه‌ای بتن‌های حاوی درصد‌های بهینه سرباره ساخته و آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای برای بدست‌آوردن ظرفیت نهایی انجام شد. نتایج آزمایشات نشان داد که گرچه مقاومت نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف سرباره در سن ۲۸ روز کمتر از بتن معمولی بود ولی مقاومت نمونه‌های بتنی حاوی ۳۰ درصد سرباره اصفهان و ۲۰ درصد سرباره اسفراین در سن ۵۶ و ۹۰ روز تقریباً برابر بتن معمولی و مقاومت هدف بودند. نتایج آزمایشات دوام در فاز دوم نشان دادند که دوام نمونه‌های حاوی سرباره در محیط سولفاتی بیش از بتن معمولی بود. همچنین ظرفیت نهایی خمشی تیرهای بتن مسلح حاوی ۳۰ درصد سرباره اصفهان و ۳۰ درصد سرباره اسفراین به ترتیب ۱۰ درصد افزایش و ۳ درصد کاهش نسبت به تیر بدون سرباره نشان داد.

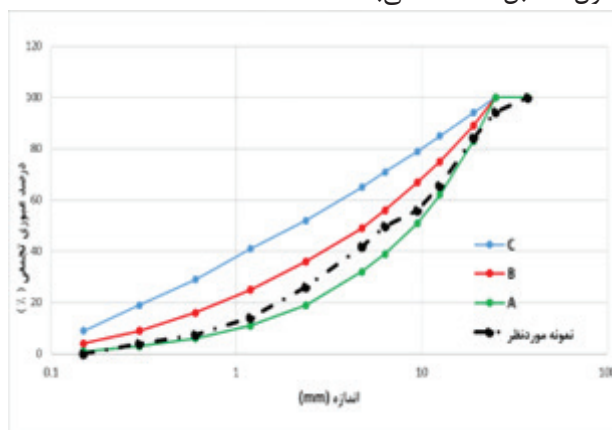
کلمات کلیدی: مقاومت فشاری، دوام، سرباره، ضایعات صنعتی، محیط سولفاتی، مقاومت خمشی

۱. مقدمه

امروزه با پیشرفت علم و تکنولوژی مشخص شده است که تنها توجه به مقاومت بتن به عنوان یک معیار برای طرح بتن برای محیط‌های مختلف و کاربردهای مختلف نمی‌تواند جوابگوی مشکلاتی باشد که در درازمدت در سازه‌های بتنی ایجاد می‌گردد و مسأله دوام بتن در محیط‌های مختلف نیز باید مورد توجه قرار گیرد. مشاهده خرابی‌هایی با عوامل فیزیکی و شیمیایی در بتن در اکثر نقاط جهان و با شدتی بیشتر در کشورهای در حال توسعه، نیاز به طرح بتن‌هایی با ویژگی خاص و با دوام لازم را دوچندان می‌کند. بقایای فرآیند تولید فولاد یکی از موادی است که در این راستا مورد توجه محققان قرار گرفته است. سرباره فولاد یک محصول جانبی از فرآوری آهن به فولاد است که مقدار آن حدود ۱۰-۱۵٪ از تولید فولاد را تشکیل می‌دهد. به خوبی شناخته شده است که تولید فولاد در جهان بسیار زیاد است، بنابراین سرباره فولاد یک پسماند عظیم زباله صنعتی است. سرباره‌های فولادی قابل بازیافت نیستند و علاوه بر آنکه اکسیدهای موجود در سرباره فولادی مشکل ساز بوده و برای محیط زیست خطرناک هستند، کارخانه‌ها هزینه زیادی را برای دفع این مواد پرداخت می‌کنند. همچنین از جمله مزیت‌های استفاده از سرباره در بتن می‌توان به کاهش نیاز آبی بتن، افزایش زمان گیرش، کاهش حرارت هیدراتاسیون، کاهش تخلخل موئینه، بهبود ریزساختار بتن، افزایش مقاومت در برابر حملات شیمیایی و نفوذ عوامل مخرب در بتن اشاره کرد [۱]. سرباره خاصیت شبه سیمانی دارد و علاوه بر خاصیت پوزولانی، می‌تواند رفتار سیمانی نیز بروز دهد. رضانیانپور و همکاران با استفاده از سرباره کوره آهنگدازی و پوزولان طبیعی به عنوان جایگزینی از درصد‌های مختلف سیمان به بررسی عملکرد نمونه‌های بتنی در برابر حمله سولفوریک اسید پرداختند. در این راستا آزمایش‌های مقاومت الکتریکی سطحی، مقاومت فشاری و جذب آب موئینه را انجام دادند. نتایج کلی حاکی از مقاومت بیشتر نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی در برابر حمله سولفوریک اسید نسبت به سایر نمونه‌ها و بهبود عملکرد بتن‌های حاوی سرباره و پوزولان طبیعی با افزایش مقدار جایگزینی می‌باشد [۲]. لیو چونلین و همکاران بر روی امکان‌سنجی ساخت بتن با سرباره فولاد تحقیق انجام دادند و نتیجه گرفتند که استفاده از سنگدانه سرباره‌های در بتن از نظر مقاومت فشاری مطلوب است. هرچند که مقاومت خمشی را نسبت به بتن معمولی اندکی کاهش می‌دهد، اما جمعشده‌گی نسبت به بتن معمولی کمتر می‌شود [۳]. پاولو آوویرا و همکاران در نیجریه اثرات مختلف نسبت آب به سیمان را بر کارایی و استحکام بتن حاوی سرباره فولادی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با جایگزینی ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰٪ سرباره با سنگدانه و در نظر گرفتن نسبت آب به سیمان ۰/۵، ۰/۵۵ و ۰/۶ و با استفاده از نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای به بررسی مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند سرباره فولادی تولید محلی دارای خواص خوبی مانند سنگدانه‌های طبیعی است و با کاهش نسبت w/c می‌توان یک مقاومت سریع را در بتن حاوی سرباره فولاد بدست آورد. همچنین هر دو آزمون فشرده سازی و کشش نتایج قابل ملاحظه‌ای تولید کردند. در نهایت دریافتند می‌توان با جایگزینی ۲۰ و ۶۰ درصد سرباره فولاد به جای سنگدانه طبیعی، بتن‌های معمولی و با استحکام بالا ساخت [۴]. دیوتی و همکاران با آزمایش بر روی سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی دریافتند متوسط مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی ساخته شده با این نوع سرباره در سن ۹۰ روز تا ۵۳ مگاپاسکال افزایش یافته است. آن‌ها این نتیجه‌گیری را به پیوند قوی بین ذرات سیمان و سرباره فولاد کوره قوس الکتریکی و همچنین سطح متخلخل و خشن سرباره فولادی نسبت دادند [۵]. نتینگر و همکاران خواص مکانیکی و مقاومت خوردگی بتن ساخته شده با سرباره کوره بلند را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که این سرباره را می‌توان در بتن استفاده کرد زیرا خواص مکانیکی قابل قبولی را ارائه می‌دهد. همچنین در نمونه‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه‌های شاهد، سرعت خوردگی آرماتورها به مرور زمان کاهش یافته است [۶].



داده شده است. در این تحقیق از آب شرب شهری استفاده شده است. از دو نوع سرباره کوره آهن گدازی فولاد، شامل سرباره کوره بلند از کارخانه ذوب آهن اصفهان و سرباره‌ی کوره قوس الکتریکی از کارخانه فولاد اسفراین در این تحقیق جهت بررسی خواص و مقایسه آن‌ها با یکدیگر استفاده شد. ترکیب شیمیایی سرباره‌های آهن مصرفی اصفهان و اسفراین به ترتیب در جداول ۲ و ۳ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین از میلگردهای به قطر ۶ و ۸ میلی‌متر در تیرهای بتن آرمه در فاز سوم استفاده شده که میلگرد قطر ۸ میلی‌متر بعنوان میلگرد طولی کششی و میلگرد قطر ۶ میلی‌متر هم بعنوان میلگرد طولی فشاری و هم ساخت خاموت‌ها استفاده شد که مشخصات مکانیکی آن‌ها در جدول ۴ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده

جدول ۱- مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان

مقاومت فشاری (kg/cm^2)			زمان گیرش (دقیقه)		بلین	انبساط اتوکلاو) (%)
۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه	نهایی	اولیه		
$315 \leq$	$175 \leq$	$100 \leq$	$360 \geq$	$45 \leq$	$2800 \leq$	$0.8 \geq$

C ₃ A	IR	LoI	SO ₃	Mgo	FeZn ₃	AL ₂ O ₃	Sio ₂	نام مشخصات
$8 \geq$	$0.75 \geq$	$3 \geq$	$3 \geq$	$5 \geq$	$6 \geq$	$6 \geq$	$20 \leq$	مقدار در استاندارد ۳۸۹

جدول ۲- ترکیب شیمیایی سرپاره اصفهان

ردیف	ترکیب شیمیایی	درصد (%)
۱	Cl	۰/۰۰۶
۲	K ₂ O	۰/۶۴
۳	Na ₂ O	۰/۶۸
۴	SO ₃	۲/۰۸
۵	MgO	۸/۶۰
۶	SiO ₂	۳۷/۶۰
۷	Al ₂ O ₃	۹/۶۷
۸	CaO	۴۱/۳۵

جدول ۳- ترکیب شیمیایی سرپاره اسفراین

ردیف	ترکیب شیمیایی	درصد (%)
۱	Cr ₂ O ₃	۰/۲۴
۲	TiO ₂	۰/۶
۳	MnO	۱/۲۴
۴	Fe ₂ O ₃	۳۰/۱
۵	P ₂ O ₅	۰/۰۷۵
۶	MgO	۷/۳
۷	SiO ₂	۱۶/۸
۸	Al ₂ O ₃	۳/۷
۹	CaO	۳۵/۱

جدول ۴- مشخصات مکانیکی کششی میلگرد

قطر میلگرد (mm)	تنش گسیختگی (MPa)	تنش جاری شدن (MPa)

۴۷۰	۶۲۰	۸
۲۴۳	۳۷۵	۶

۲-۲ طرح اختلاطها

به منظور بررسی تاثیر استفاده از درصدهای مختلف دو نوع سرباره‌ی کارخانه ذوب آهن اصفهان و کارخانه فولاد اسفراین و همچنین بدست آوردن درصدهای بهینه استفاده از سرباره در بتن، ۱۴ طرح اختلاط (برای یک متر مکعب بتن) مطابق جدول ۵ با این دو نوع سرباره تهیه و نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 200×100 میلی‌متری مطابق شکل ۳ ساخته شدند. علاوه بر دو نوع متفاوت سرباره اصفهان و اسفراین، بتن‌ها برای دو نوع مقاومت متفاوت حدود ۲۸ و ۳۳ مگاپاسکال (با نسبت آب به سیمان ۰/۵۴ و ۰/۴۳) هم در نظر گرفته شده بودند و سرباره‌ها از صفر تا ۴۰ درصد جایگزین وزن سیمان شدند. کلیه نمونه‌ها ۲۴ ساعت پس از ساخت از قالب خارج و به مدت ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز، جهت به دست آوردن مقاومت اولیه، در حوضچه‌ای حاوی آب شرب و مقداری محلول آهک قرار گرفتند و بعد از آن به محیط‌های از پیش تعیین شده جهت خشک شدن نمونه‌ها انتقال و در نهایت آزمایشات مقاومت فشاری و مقاومت کششی بر روی آن‌ها انجام شدند.

در فاز دوم با توجه به نتایج به دست آمده از ۱۴ طرح اختلاط در فاز اول، شش طرح اختلاط بهینه که شامل طرح اختلاط‌های S1، S1-W2، S1-E2، S2، S2-W2 و S2-E2 بودند برای ساخت نمونه‌های جدید و انجام آزمایش دوام در محیط مخرب سولفاتی انتخاب شدند. در فاز سوم هم برای ساخت ۳ تیر بتن مسلح به ابعاد $150 \times 150 \times 1000$ میلی‌متر، سه طرح اختلاط S1، S1-W2، S1-E1 و S1-E2 که نتایج آن در فاز اول بدست آمده بودند جهت بررسی عملکرد سازه‌های بتن‌های حاوی درصدهای بهینه سرباره انتخاب شدند.

جدول ۷- طرح اختلاط‌های بتن در فاز اول (برای یک متر مکعب)

شن خشک (kg)	ماسه خشک (kg)	مقدار سرباره (kg)	درصد سرباره (%)	سیمان (kg)	آب (kg)		W/C	نام طرح	ردیف
					جذب شده	آزاد			
۹۳۹/۴	۷۶۰/۸	۰	۰	۳۶۸/۲	۳۰/۹	۱۹۸/۸	۰/۵۴	S1	۱
۹۳۹/۴	۷۶۰/۸	۷۳/۶۴	۲۰	۲۹۴/۵۶	۳۰/۹	۱۹۸/۸	۰/۵۴	S1-W1	۲
۹۳۹/۴	۷۶۰/۸	۱۱۰/۴۶	۳۰	۲۵۷/۷۴	۳۰/۹	۱۹۸/۸	۰/۵۴	S1-W2	۳
۹۳۹/۴	۷۶۰/۸	۱۴۷/۲۸	۴۰	۲۲۰/۹۲	۳۰/۹	۱۹۸/۸	۰/۵۴	S1-W3	۴
۹۳۹/۴	۷۶۰/۸	۷۳/۶۴	۲۰	۲۹۴/۵۶	۳۰/۹	۱۹۸/۸	۰/۵۴	S1-E1	۵
۹۳۹/۴	۷۶۰/۸	۱۱۰/۴۶	۳۰	۲۵۷/۷۴	۳۰/۹	۱۹۸/۸	۰/۵۴	S1-E2	۶
۹۳۹/۴	۷۶۰/۸	۱۴۷/۲۸	۴۰	۲۲۰/۹۲	۳۰/۹	۱۹۸/۸	۰/۵۴	S1-E3	۷
۸۶۲/۲	۶۹۸/۲	۰	۰	۴۹۶/۲	۲۸/۴	۲۱۳/۳۵	۰/۴۳	S2	۸
۸۶۲/۲	۶۹۸/۲	۹۹/۲۴	۲۰	۳۹۶/۹۶	۲۸/۴	۲۱۳/۳۵	۰/۴۳	S2-W1	۹
۸۶۲/۲	۶۹۸/۲	۱۴۸/۸۶	۳۰	۳۴۷/۳۴	۲۸/۴	۲۱۳/۳۵	۰/۴۳	S2-W2	۱۰
۸۶۲/۲	۶۹۸/۲	۱۹۸/۴۸	۴۰	۲۹۷/۷۲	۲۸/۴	۲۱۳/۳۵	۰/۴۳	S2-W3	۱۱
۸۶۲/۲	۶۹۸/۲	۹۹/۲۴	۲۰	۳۹۶/۹۶	۲۸/۴	۲۱۳/۳۵	۰/۴۳	S2-E1	۱۲

۸۶۲/۲	۶۹۸/۲	۱۴۸/۸۶	۳۰	۳۴۷/۳۴	۲۸/۴	۲۱۳/۳۵	۰/۴۳	S2-E2	۱۳
۸۶۲/۲	۶۹۸/۲	۱۹۸/۴۸	۴۰	۲۹۷/۷۲	۲۸/۴	۲۱۳/۳۵	۰/۴۳	S2-E3	۱۴

۲-۳ آزمایشات

نمونه‌های ساخته شده استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر در فاز اول، پس از قرارگیری در حوضچه آب و بدست آوردن مقاومت اولیه، تحت آزمایشات مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم شدن طبق استاندارد BS ۱۸۸۱ و ASTM C ۳۹ همانند مطابق شکل ۴ توسط یک دستگاه تمام اتوماتیک تست فشاری ساخت شرکت Toni-technik با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن قرار گرفتند.



الف- آزمایش نمونه فشاری ب- آزمایش نمونه کششی

شکل ۲- آزمایشات مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در فاز اول و دوم

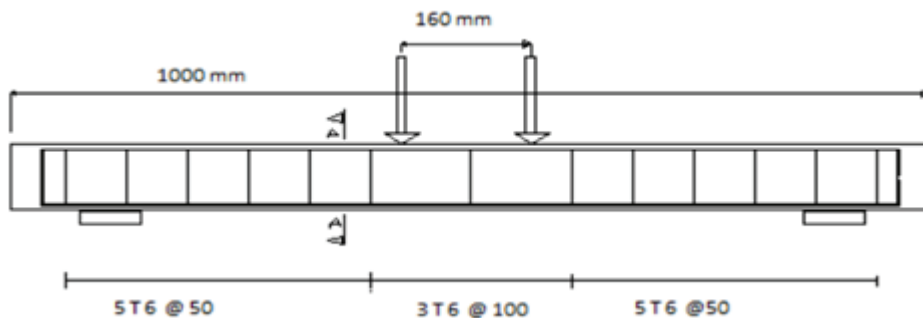
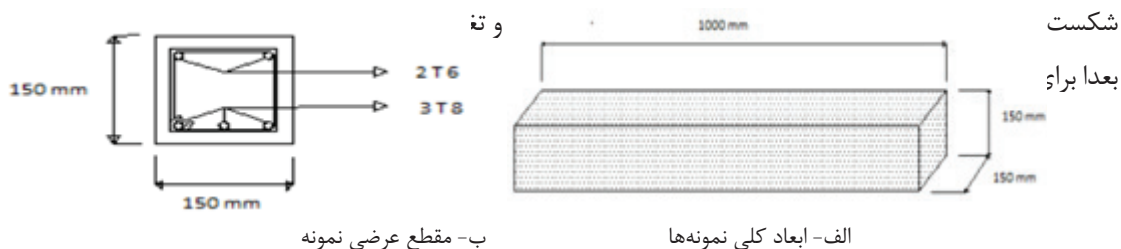
در فاز دوم و برای ارزیابی دوام و مقاومت فشاری بتن‌های در معرض محیط‌های سولفاتی و تاثیر افزودن سرباره به این مقاومت، ۴ نمونه فشاری استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر با هر طرح اختلاط مورد نظر ساخته شدند و نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۸ روز در حوضچه حاوی آب سالم جهت بدست آوردن مقاومت اولیه، قرار گرفتند و پس از طی این زمان، از هر طرح اختلاط ۴ نمونه به بیرون از حوضچه‌ی آب و در محیطی خشک و از پیش تعیین شده انتقال یافتند. پس از خشک شدن کامل نمونه‌ها در مرحله اول، دو نمونه در محیط سالم از آن‌ها (از هر طرح اختلاط دو نمونه) برای آزمایش مقاومت فشاری مورد استفاده قرار گرفتند. پس از طی مراحل فوق جهت آزمایش دوام، تعداد نمونه‌های باقی مانده (از هر طرح اختلاط دو نمونه) در محیط ناسالم به حوضچه‌های آب موجود محلول ۱۰ درصد سولفات منیزیم اضافه شد. جهت بررسی عملکرد دوام نمونه‌های بتنی در فاز دوم، شرایط ناسالم با محیط مخرب خلیج فارس شبیه‌سازی شده است. در این راستا با توجه به محدودیت‌های موجود در آزمایشگاه برای منطبق شدن محیط آزمایش به محیط خلیج فارس، از پودر سولفات منیزیم و دو حوضچه آب و دو پمپ آب مطابق شکل ۵ استفاده شد. برای آماده‌سازی محیط سولفاتی در ابتدا میزان محلول مورد نیاز با توجه حجم حوضچه آب (۲۰ × ۱۰۰ × ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب) محاسبه شد. پس از ساخت محلول ۱۰ درصد سولفات منیزیم آن را به حوضچه آب اضافه شد. مطابق شکل ۵ محیط آزمایش به گونه‌ای آماده گردید تا نمونه‌ها در سیکل‌های تر و خشک متناوب (چرخه‌ای) به مدت ۲ ماه بعد از ۲۸ روز اول در محیط ناسالم سولفاتی عمل‌آوری شوند. مدت زمان چرخه به گونه‌ای تنظیم شد که محلول هر ۱۲ ساعت در طول ۲۴ ساعت شبانه روز جابجا شود. پس از گذشت مدت زمان ۹۰ روز، نمونه‌های قرار داده شده در محیط ناسالم توسط دستگاه جک فشاری آزمایش شدند.

دوم



شکل ۳

در فاز سوم و برای بررسی رفتار خم طول کل ۱۰۰۰ میلی‌متر با سه نوع ط شده‌اند. جهت ساخت تیرهای بتن آرمه از دو میلگرد با قطر ۶ میلی‌متر و با مساحت کل ۵۶/۵۲ میلی‌متر مربع به عنوان میلگرد فشاری و از سه میلگرد با قطر ۸ میلی‌متر و با مساحت کل ۱۵۰/۷۲ میلی‌متر مربع به عنوان میلگردی کششی استفاده شد که کششی برابر ۰/۰۰۶۶ شد. همچنین از میلگرد با قطر ۶ میلی‌متر با فاصله ۵۰ میلی‌متر در دو گوشه تیر به طول ۳۳۳,۳ میلی‌متر (از هر طرف تیر) و ۱۰۰ میلی‌متر در میانه تیر و به طول ۳۳۳,۳ میلی‌متر، به عنوان خاموت استفاده شده است. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری به مدت ۵۶ روز در حوضچه آب سالم، تحت آزمایش خمشی ۴ نقطه‌ای مطابق شکل ۷ قرار گرفتند. جهت مشاهده بهتر و مشخص شدن مراحل ترک برداشتن تیرها در حین آزمایش خمش، آرایش جایگذاری میلگردهای فشاری و کششی و خاموتها بر روی تیر رنگ آمیزی شدند. مطابق شکل ۷، سیستم بارگذاری و تعیین مقاومت خمشی براساس استاندارد 78 ASTM C توسط یک دستگاه تمام اتوماتیک تست خمش ساخت Toni technik با ظرفیت ۲۰۰ KN به صورت ۴ نقطه‌ای صورت گرفته است. قبل از شروع آزمایش باید جایگاه تکیه‌گاه‌ها جهت اعمال نیرو توسط دستگاه تنظیم شوند. در این راستا از یک صفحه‌ی فولادی که شامل ۲ برآمدگی به فاصله ۱۶۰ میلی‌متر بود به عنوان تکیه‌گاه فوقانی دستگاه استفاده شدند تا بار کل P از طرف جک به دو بار ۲/P در هر نقطه تبدیل می‌شود. پس از تنظیم فواصل تکیه‌گاه‌ها به طول خالص ۹۰۰ میلی‌متر و قرار دادن هر یک از تیرها بر روی دو تکیه‌گاه تحتانی، آزمایش با بارگذاری تدریجی تا لحظه می‌گردد که



ج- مقطع طولی نمونه

شکل ۴- جزئیات تیر سازه‌های مورد آزمایش



شکل ۵- مراحل آزمایش مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح

۳- تحلیل نتایج بدست آمده

۳-۱. نتایج آزمایشات مقاومت فشاری و کششی در محیط سالم (فاز اول)

نمونه‌های بتنی استوانه‌ای حاوی دو نوع متفاوت سرباره اصفهان و اسفراین با صفر تا ۴۰ درصد جایگزینی و با دو نوع مقاومت ۲۸ روزه مورد انتظار (۲۸ و ۳۳ مگاپاسکال) به مدت ۹۰ روز در محیط آب شرب معمولی (محیط سالم) عمل‌آوری شدند و در ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج مقاومت‌های فشاری و کششی به ترتیب در دو جدول ۸ و ۹ ارائه شده‌اند.

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای مرجع در دو حالت نسبت W/C برابر ۰/۵۴ و ۰/۴۳ به ترتیب برابر ۲۷/۹۵ و ۳۲/۳۹ مگاپاسکال بودند که خیلی نزدیک به مقاومت‌های مورد انتظار ۲۸ و ۳۳ مگاپاسکال بودند. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی سرباره تقریباً برابر یا کمتر از نمونه‌های مرجع بودند و میزان کاهش مقاومت با افزایش سرباره در سرباره اسفراین بیشتر مشاهده شد. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سرباره اصفهان با افزایش زمان تا ۹۰ روز دارای رشد مثبت بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد نسبت به مقاومت نمونه مرجع بودند و با وجود ۴۰ درصد سرباره، مقاومت ۹۰ روزه نمونه بتنی دارای مقاومت مورد انتظار برای بتن معمولی خواهد شد که نشان دهنده این است که این سرباره با درصد بالا برای سازه‌هایی که بعد از ۹۰ روز مقاومت سازه‌ای مدنظر باشد توصیه می‌شود و از نظر اقتصادی و زیست محیطی هم بسیار ارزشمند است. مطابق جدول ۸، سرباره اسفراین تا ۲۰ درصد جایگزین سیمان می‌تواند گزینه مناسبی باشد و رشدی حدود ۳۰ درصد بعد از ۹۰ روز دارد ولی استفاده از درصدهای بالاتر برای مقاومت فشاری مناسب نیست و باعث کاهش شدید مقاومت می‌شود. ضمناً مقادیر مقاومت فشاری نمونه E۳-S۲ بسیار کم بودند و در جدول ذکر نشدند.

جدول ۸- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای

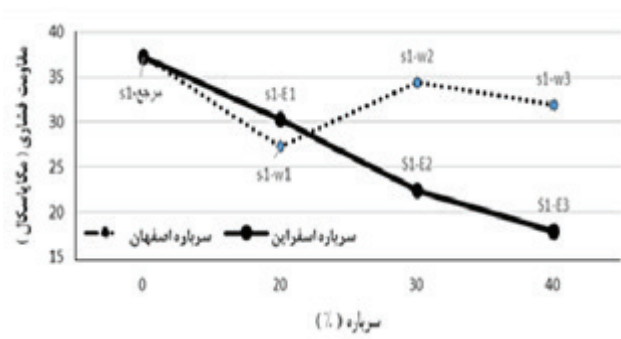
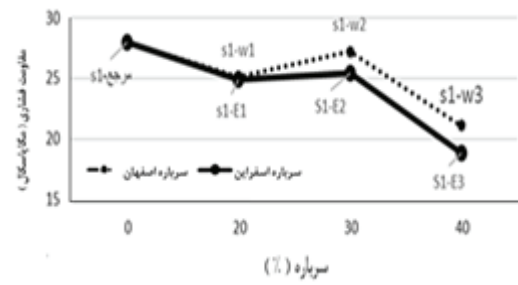
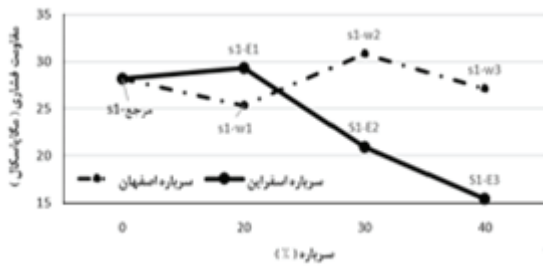
شناسه طرح	درصد سرباره (%)	۲۸ روزه (MPa)	۵۶ روزه (MPa)	۹۰ روزه (MPa)	نسبت مقاومت ۵۶ به ۲۸ روز	نسبت مقاومت ۹۰ به ۲۸ روز
مرجع-S1	۰	۲۷/۹۵	۲۸/۱۷۵	۳۷/۲۹۵	۱/۰۰۹	۱/۳۳۵
S1-W1	۲۰	۲۵/۱۶	۲۵/۳۴	۲۷/۲۸۵	۱/۰۰۸	۱/۰۸۵
S1-W2	۳۰	۲۷/۲۰۵	۳۰/۸۶۵	۳۴/۴۴۵	۱/۱۴	۱/۲۶۷
S1-W3	۴۰	۲۱/۱۲	۲۷/۱۲۵	۳۱/۸۹۵	۱/۴۶۲	۱/۵۲
S1-E1	۲۰	۲۴/۸۸	۲۹/۳۱۵	۳۰/۲۴۵	۱/۱۷۹	۱/۲۲
S1-E2	۳۰	۲۵/۴۰۵	۲۰/۹۴	۲۲/۴۲۵	۰/۸۲۵	۰/۸۹
S1-E3	۴۰	۱۸/۸۲۵	۱۵/۳۸۵	۱۷/۸۴۵	۰/۸۱۸	۰/۹۴۸
مرجع-S2	۰	۳۲/۳۹	۳۶/۱۴	۴۷/۰۸	۱/۱۱۶	۱/۴۵۴
S2-W1	۲۰	۳۱/۹۸	۴۲/۶۴	۳۹/۰۴۵	۱/۳۳۴	۱/۲۲۱
S2-W2	۳۰	۳۱/۹۱	۳۶/۰۱	۳۹/۵۵	۱/۱۲۹	۱/۲۴
S2-W3	۴۰	۱۳/۶۴	۲۱	۳۰/۷۳	۱/۵۴	۲/۲۵۳
S2-E1	۲۰	۳۴/۹۲	۴۱/۲	۴۲	۱/۱۸۱	۱/۲۰۴
S2-E2	۳۰	۱۵/۸۵	۲۸/۳۶۵	۳۰/۳۸	۱/۷۹	۱/۹۱۷

جدول ۹ هم اثربخشی جایگزینی سرباره در مقاومت کششی را نشان می‌دهد که در سرباره اصفهان تا ۴۰ درصد و سرباره اسفراین تا ۳۰ درصد می‌تواند جایگزین خوبی برای بتن معمولی باشند. مقایسه مقاومت‌های فشاری و کششی نمونه‌های حاوی سرباره اصفهان و اسفراین در زمان‌های ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند که در همه موارد سرباره اصفهان دارای اثرپذیری

بیشتر با درصد بالاتر جایگزینی بوده است. ضمناً تاثیر زمان عمل‌آوری از ۲۸ تا ۹۰ روز بر مقاومت‌های فشاری و کششی هم بصورت منحنی‌های رشد در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.

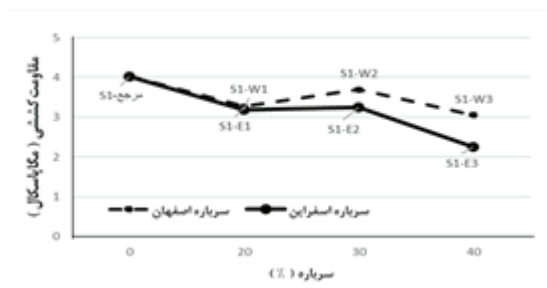
جدول ۹- نتایج آزمایش مقاومت کششی

نسبت مقاومت ۹۰ به ۲۸ روز	نسبت مقاومت ۵۶ به ۲۸ روز	۹۰ روزه (MPa)	۵۶ روزه (MPa)	۲۸ روزه (MPa)	درصد سرباره (%)	شناسه طرح
۱/۵۶	۱/۶۲	۴/۵۱	۴/۰۳	۲/۴۸	۰	مرجع-S1
۱/۶۵	۱/۴۴	۳/۷۶	۳/۲۶	۲/۲۷	۲۰	S1-W1
۰/۹۸	۱/۰۱	۳/۷۱	۳/۶۹	۳/۶۴	۳۰	S1-W2
۱/۹	۱/۷	۳/۴۸	۳/۰۵	۱/۸۳	۴۰	S1-W3
۱/۲۱	۱/۰۷	۳/۵۷	۳/۱۸	۲/۹۵	۲۰	S1-E1
۱/۱۹	۱/۲۶	۳/۳۵	۳/۲۴	۲/۵۸	۳۰	S1-E2
۳/۷۱	۲/۹۷	۲/۸۲	۲/۲۶	۰/۷۶	۴۰	S1-E3
۱/۴۸	۱/۲۸	۵/۲۴	۴/۵۲	۳/۵۳	۰	مرجع-S2
۱/۵۹	۱/۵۴	۴/۴۶	۴/۳۳	۲/۸۳	۲۰	S2-W1
۲/۲	۲/۱۲	۴/۸۶	۴/۷	۲/۲۱	۳۰	S2-W2
۲/۳۳	۲/۶	۳/۹	۳/۸۲	۱/۴۷	۴۰	S2-W3
۱/۳۹	۰/۷۳	۴/۸۲	۲/۴۸	۳/۵۱	۲۰	S2-E1
۱/۳	۰/۸۵	۳/۳۴	۲/۴۶	۲/۵۵	۳۰	S2-E2
۱/۲۱	۱/۰۴	۰/۸	۰/۶۹	۰/۶۶	۴۰	S2-E3

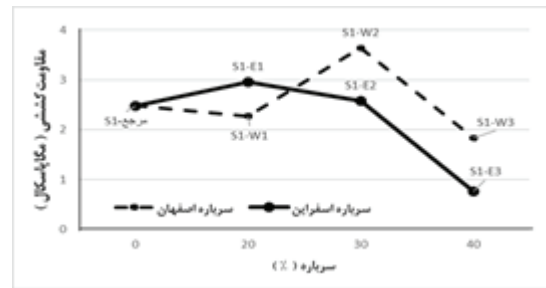


ج- نمونه‌های ۹۰ روزه

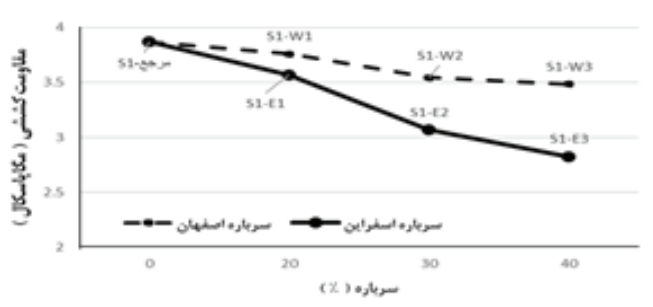
شکل ۶- مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سرباره اصفهان و اسفراین ($f'_c = 28 \text{ MPa}$)



ب- نمونه‌های ۵۶ روز

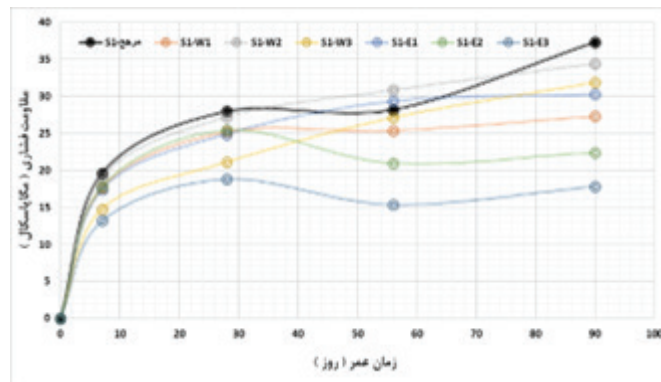


الف- نمونه‌های ۲۸ روزه

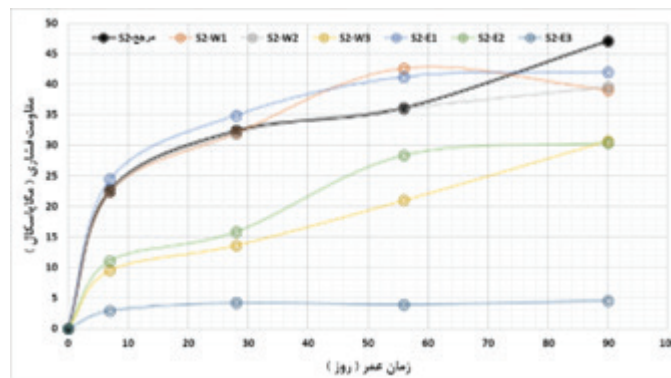


ج- نمونه‌های ۹۰ روزه

شکل ۷- مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های حاوی سرباره اصفهان و اسفراین ($f'_c = 28 \text{ MPa}$)



الف- نمونه‌های استوانه‌ای با $f'_c = 28 \text{ MPa}$



ب- نمونه‌های استوانه‌ای با $f'_c = 33 \text{ MPa}$

شکل ۸- نمودارهای منحنی رشد مقاومت فشاری متناسب با زمان عمر نمونه‌ها

۲-۳. رابطه بین مقاومت فشاری و کششی

مطابق داده‌های مقاومت فشاری و کششی جدولهای ۴-۱۷ و ۴-۱۸ ضریب پیشنهادی رابطه بین مقاومت فشاری و کششی در جدول ۴-۱۹ ارائه شده است. بر اساس آیین نامه ASTM C 496 و ASTM C 78، رابطه (۱) نشان‌دهنده رابطه کلی پیشنهادی بین مقاومت فشاری و سایر مقاومت‌ها است. مقدار برای مقاومت کششی در آیین‌نامه مبحث نهم و آبا برابر ۰/۵۷ می‌باشد.

$$f_t = \alpha \sqrt{f_c} \quad (1)$$

مطابق این رابطه مقاومت فشاری بر حسب (MPa)، مقاومت کششی بر حسب (MPa) و ضریب پیشنهادی می‌باشد.

جدول ۱۰- ضریب پیشنهادی رابطه بین مقاومت فشاری و کششی

نام نمونه	f'_c (MPa)	$\sqrt{f'_c}$ (MPa)	f_t (MPa)	$d = \frac{f_t}{\sqrt{f'_c}}$
مرجع-S1	۲۷/۹۵	۵/۲۸	۲/۴۸	۰/۴۷
S1-W1	۲۵/۱۶	۵/۰۱	۲/۲۷	۰/۴۵
S1-W2	۲۷/۲۱	۵/۲۲	۳/۶۴	۰/۶۹
S1-W3	۲۱/۱۲	۴/۵۹	۱/۸۳	۰/۳۹
S1-E1	۲۴/۸۸	۴/۹۸	۲/۹۵	۰/۵۹
S1-E2	۲۵/۴۱	۵/۰۴	۲/۵۸	۰/۵۱
S1-E3	۱۸/۸۳	۴/۳۴	۰/۷۶	۰/۱۷
مرجع-S2	۳۲/۳۹	۵/۷	۳/۵۳	۰/۶۲
S2-W1	۳۱/۹۸	۵/۶۵	۲/۸۳	۰/۵
S2-W2	۳۱/۹۱	۵/۶۴	۲/۲۱	۰/۳۹
S2-W3	۱۳/۶۴	۳/۷	۱/۴۷	۰/۳۹
S2-E1	۳۴/۹۲	۵/۹	۳/۵۱	۰/۵۹
S2-E2	۱۵/۸۵	۳/۹۸	۲/۵۵	۰/۶۴
S2-E3	۴/۱۹	۲/۰۵	۰/۶۶	۰/۳۲

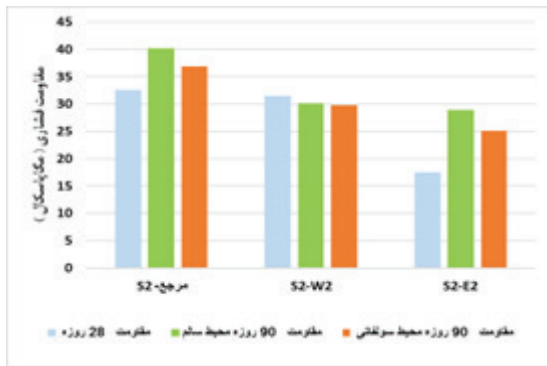
نتایج جدول ۱۰ نشان می‌دهد که ضریب برای نمونه‌های بتنی حاوی ۳۰ درصد سرباره کوره بلند و ۲۰ درصد سرباره کوره قوس الکتریکی با نسبت آب به سیمان ۰/۵۴ به ترتیب ۱۲ و ۲٪ نسبت به ضریب پیشنهادی آبا افزایش یافته است.

۳-۳. نتایج آزمایشات فشاری دوام در محیط ناسالم سولفاتی (فاز دوم)

نمونه‌های بتنی استوانه‌ای در این مرحله پس از ۲۸ روز قرارگیری در آب سالم، به مدت حدود ۲ ماه در محیط ناسالم سولفاتی و بصورت سیکل‌های تر و خشک‌شدن قرار گرفتند. پس از پایان زمان مقرر و بیرون آوردن نمونه‌ها از محیط سولفاتی، تغییراتی بر روی نمونه‌ها مشاهده شد بطوریکه بر روی تمامی نمونه‌ها لکه‌های سفید رنگی شکل گرفته بود و در شکل ظاهری نمونه حاوی ۳۰ درصد سرباره اسفراین (با طرح اختلاط E2-S2) ترک‌ها و ناپیوستگی‌هایی مشاهده شد. نتایج مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های قرار داده شده در محیط ناسالم سولفاتی در مقایسه با نمونه‌های مشابه که در محیط سالم آب شرب قرار گرفتند در جدول ۱۰ ارائه شده‌اند و مقایسه اثر دو نوع سرباره بر مقاومت فشاری ۹۰ روزه در محیط‌های سالم و ناسالم در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند که نمونه‌های حاوی ۳۰ درصد سرباره اصفهان و ۳۰ درصد سرباره اسفراین برای هر دو نسبت آب به سیمان ۰/۵۴ و ۰/۴۳، مقاومتی نزدیک به مقاومت نمونه‌های شاهد داشتند و اثربخشی مناسبی در محیط‌های سولفاتی را از خود نشان دادند. همچنین برای رسیدن به نتایج مطلوب تر باید اولاً زمان طولانی‌تری نمونه‌ها در محیط سولفاتی نگهداشته شوند تا به شرایط واقعی نزدیک‌تر باشند ثانیاً باید از نمونه‌های بیشتری استفاده شود تا نتیجه‌گیری منطقی‌تری بتوان انجام داد.

جدول ۱۰- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط سالم و ناسالم سولفاتی (دوام)

شناسه طرح	درصد سرباره (%)	۲۸ روزه (MPa)	۹۰ روزه محیط سالم (MPa)	۹۰ روزه محیط ناسالم (MPa)	نسبت مقاومت ۹۰ روزه نمونه ناسالم نسبت به نمونه سالم متناظر
مرجع-S1	۰	۲۷/۷۱	۳۵/۱۰	۳۰/۵۷	۰/۸۷
S1-W2	۳۰	۲۷/۲۰	۳۱/۱۱	۳۲/۹۱	۱/۰۶
S1-E2	۳۰	۲۶/۲۰	۲۴/۳۵	۲۶/۲۵	۱/۰۸
مرجع-S2	۰	۳۲/۶	۴۰/۱۵	۳۶/۸۷	۰/۹۲
S2-W2	۳۰	۳۱/۵	۳۰/۱۰	۲۹/۸	۰/۹۹
S2-E2	۳۰	۱۷/۵	۲۸/۸۸	۲۵/۰۶	۰/۸۷



ب- بتن‌ها با مقاومت فشاری مرجع ۳۳ مگاپاسکال



الف- بتن‌ها با مقاومت فشاری مرجع ۲۸ مگاپاسکال

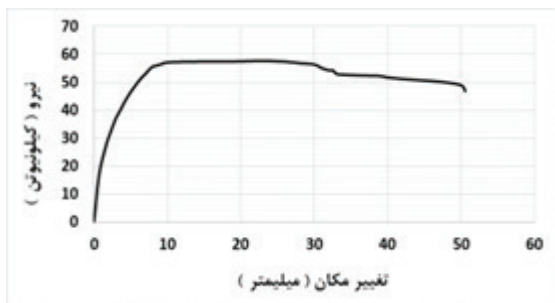
شکل ۹- مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط سالم و ناسالم سولفاتی در سن ۹۰ روز

۳-۴. مشاهدات و نتایج تیرهای خمشی فاز سوم

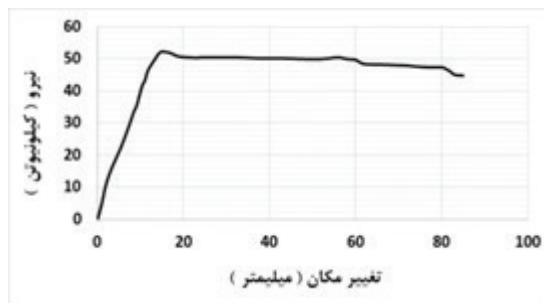
مراحل بارگذاری و شکست سه نمونه تیرهای بتن آرمه با ابعاد و آرماتورهای یکسان و سه نوع بتن متفاوت تحت آزمایش ظرفیت خمشی در شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشد. منحنی نیرو-تغییر مکان هر یک از تیرهای T1، T2 و T3 در شکل ۱۳ قابل مشاهده می‌باشند.



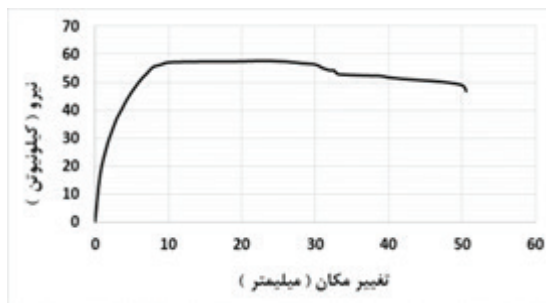
شکل ۱۰- نحوه شکست تیرهای بتن آرمه حاوی سرباره



ب- تیر T2



الف- تیر T1

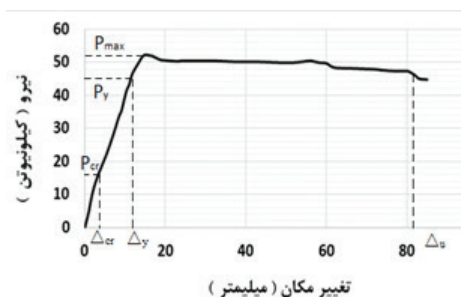


ج- تیر T3

شکل ۱۱- منحنی‌های نیرو-تغییر مکان تیرهای بتن آرمه آزمایش شده

همانطور که در نمونه منحنی بار-تغییر مکان در شکل ۱۴ مشاهده می شود شیب منحنی در در ناحیه اولیه الاستیک یا ترک خوردگی اولیه بصورت یک خط بود که مقدار جابجائی ترک خوردگی Δ_{cr} و مقاومت ترک خوردگی P_{cr} بدست می‌آیند. با افزایش نیرو، تیرها وارد ناحیه پلاستیک و رفتار غیر خطی با روند یکسان میشوند تا به محض رسیدن به نقطه تسلیم (جاری شدن) تغییر شدید در روند منحنی مشاهده می‌شود که مقادیر جابجائی و مقاومت جاری شدن برابر Δ_y و P_y در این حالت بدست می‌آیند. با ادامه روند افزایش نیرو، تیرها در نقطه‌ای توانایی تحمل نیرو را نداشته و به مقاومت نهایی خود میرسند که نقطه ماکزیمم ظرفیت برابر P_{max} است و بعد از آن افت ظرفیت با افزایش جابجائی مشاهده می‌شود که نهایتاً تیرها در جابجائی نهایی Δ_u می‌شکنند و ماکزیمم افت نیرو از P_{max} در محل محاسبه Δ_u برابر ۱۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. همچنین نسبت شکل پذیری برابر نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان جاری شدن می‌باشد.

نتایج آزمایشات خمشی بر روی تیرهای آزمایش شده و مقایسه خلاصه نتایج آزمایشگاهی تیرهای بتن آرمه به ترتیب در جدولهای ۱۱ و ۱۲ قابل مشاهده می‌باشند. در تیر مرجع مقدار بار نهایی برابر ۴۶/۸ کیلو نیوتن، بار ترک خوردگی برابر ۲۶ و بار جاری شدن برابر ۵۲/۳ کیلونیوتن و شکل پذیری برابر ۵/۲۳ می‌باشند.



شکل ۱۲- نمودار خروجی دستگاه آزمایش مقاومت خمشی تیر T1

$$M_{(n. exp)} = P_{max} / 2 \cdot (0.37) = 0.185P_u \text{ (kN.m)}$$

نحوه محاسبه ظرفیت لنگر خمشی اسمی تئوری برای تیر T^۱ بصورت زیر می باشد [۱۵]:

$$h = 150 \text{ mm} \quad d = 115 \text{ mm} \quad f'_c = 27.7 \text{ MPa}$$

$$T = A_s \cdot f_y = 70838 \text{ N} \quad C_c = 0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a = 3531.7 \text{ a}$$

$$T = C_c \quad a = 20 \text{ mm}$$

$$M_{(n. t)} = T \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) = 7.4 \text{ kN.m}$$

مقایسه لنگرهای خمشی اسمی آزمایشگاهی و تئوری در جدول ۱۳ قابل مشاهده می باشد. مقایسه نتایج نشان داد که تیرهای حاوی سرباره نه تنها دارای ظرفیت کمتر نبودند بلکه در مواردی هم بیش از تیر بتن معمولی مرجع دارای ظرفیت بودند ضمن اینکه همه نتایج آزمایشگاهی بین ۲۷ تا ۴۴ درصد ظرفیت بیشتری نسبت به مقادیر تئوری از خود نشان دادند.

جدول ۱۳- مقایسه لنگرهای خمشی اسمی آزمایشگاهی و تئوری

تیر	لنگر خمشی آزمایشگاهی ($M_{(n. exp)}$)	لنگر خمشی تئوری ($M_{(n. t)}$)	M_{exp} / M_t
مرجع-T1	۹/۶۷	۷/۴	۱/۳۰
T2-W2	۱۰/۶۷	۷/۴	۱/۴۴
T3-E2	۹/۴۰	۷/۳۶	۱/۲۷

نتیجه گیری

نمونه‌های بتنی استوانه‌ای و تیرهای خمشی در سه فاز جداگانه ساخته و آزمایش شدند و تاثیر درصدهای مختلف ۲۰ تا ۴۰ درصد دو نوع سرباره اصفهان (سرباره کوره بلند) و اسفراین (سرباره کوره قوس الکتریکی) با دو نوع مقاومت فشاری مورد انتظار در محیط سالم آب شرب و محیط ناسالم سولفاتی در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۰ بر روی مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بررسی شدند که نتایج زیر حاصل این آزمایشات بوده است:

● مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بین ۲۰ تا ۳۰ درصد سرباره اصفهان با توجه به نوع بتن در سن ۲۸ روز افزایش داشتند در حالی که مقاومت فشاری نمونه‌های تا ۲۰ درصد سرباره اسفراین افزایش داشتند و درصدهای بالاتر سرباره باعث کاهش مقاومت فشاری شدند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی هر دو نوع سرباره در سنین ۵۶ و ۹۰ روز نیز نتایج مشابه بدست آمده از آزمایش نمونه‌ها در سن ۲۸ روز را نشان دادند.

● مقاومت کششی نمونه‌های بتنی حاوی تا ۳۰ درصد سرباره اصفهان و یا ۲۰ درصد اسفراین در سن ۲۸ روز از ۷ تا ۳۰٪ افزایش داشتند و مقادیر بیشتر سرباره باعث کاهش این مقاومت شد. ضمناً مقاومت کششی نمونه‌های بتنی حاوی هر دو نوع سرباره در سنین ۵۶ و ۹۰ روز نیز مشابه ۲۸ روز رشد تا ۳۰ درصد سرباره اصفهان و ۲۰ درصد سرباره اسفراین داشتند.

● نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان بالاتر حاوی ۳۰ درصد سرباره اصفهان یا اسفراین دارای مقاومت خوبی در برابر محیط

- [10] Habibi, A., Sharbatdar, M.K. 2016. *Experimental evaluation of mechanical characteristics and durability of concrete specimens under combination of chloride-sulfate environment conditions and sulfate aggregate. Concrete Research Paper. Year 10, number four. (In Persian).*
- [11] Erfanimanesh, A. Sharbatdar, M.K. 2020. *Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer paste, mortar, and concrete containing local zeolite and slag activated by sodium carbonate. Journal of Building Engineering. (In Persian).*
- [12] *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19), 2019, Reported by ACI Committee 318.*