



# Experimental Study of Impact Strength in Ordinary Concrete under High Temperature, Along with Validation by SEM and XRD

M. H. Mansour Ghanaei\*

\*Ph.D. in Civil, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran.

(Received: 18/12/2021, Revised: 16/07/2022, Accepted: 18/09/2022, Published: 21/04/2023)

DOR: 20.1001.1.20086849.1402.14.1.1.1

## ABSTRACT

*Increasing the resistance and resistance of structures against the forces caused by various accidents, has always been considered by design engineers. In recent decades, the creation of defensive conditions in structures of great importance and very high impact against loads is an integral part of structural designs. In this laboratory research, a mixing plan was made of ordinary concrete containing Portland cement type 2 with a grade of 500 kg/m<sup>3</sup>. Impact strength test of falling weight in concrete was performed on concrete samples at 90-day curing age at 21, 300 and 600 °C. In order to further evaluate and validate the results, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) spectroscopy tests were performed on concrete samples at 90 days of processing age. The results of the tests of this research were evaluated and compared with the results of the research of others. Heat application in concrete samples had a significant effect on the results. In this regard, in the drop weight test, the absorbed energy increased from 269.7214 (at 21 °C) to 41.5956 (at 600 °C) and decreased It had 76.92 percent and the flexibility index increased from 2.3 (at 21 degrees Celsius) to 2.5 (at 600 °C) and improved by 69.8 percent. At the end of this study, the results of SEM and XRD analysis at 21 °C and high temperature, while coordinating with each other, overlapped with the results of other tests in this article.*

**Keywords:** Ordinary Portland Cement Concrete (OPCC), Impact Resistance, Drop Weight Test, Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffraction (XRD)

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

© Authors



\* Corresponding Author Email: Mhm.Ghanaei@iauc.ac.ir



نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال چهاردهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، (پیاپی ۵۳): صص ۱۰-۱


علمی - پژوهشی

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۸۰۳۰-۲۹۸۰



## مطالعه آزمایشگاهی مقاومت ضربه‌ای در بتن معمولی تحت

### حرارت بالا، به همراه صحت‌سنجی توسط SEM و XRD

محمدحسین منصورقناعی 

DOR: 20.1001.1.20086849.1402.14.1.1.1

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

#### چکیده

افزایش مقاومت و مقابله سازه‌ها در برابر نیروهای وارده ناشی از حوادث گوناگون، همواره مورد توجه مهندسين طراح بوده است. در دهه های اخیر، ایجاد شرایط پدافندی در سازه‌های با اهمیت زیاد و خیلی زیاد در برابر بارهای ضربه‌ای جزء لاینفک در طراحی‌های سازه‌ای است. در این پژوهش آزمایشگاهی یک طرح اختلاط از بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند نوع ۲ با عیار ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ساخته شد. آزمون مقاومت ضربه‌ای از نوع وزنه افتان در بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه تحت دمای ۲۱، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت. در ادامه به منظور بررسی بیشتر و صحت‌سنجی نتایج حاصله، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه، بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمون‌های این تحقیق ضمن ارزیابی با یکدیگر، با نتایج حاصل از تحقیقات سایرین، مورد مقایسه قرار گرفت. اعمال حرارت در نمونه‌های بتنی تاثیر قابل توجهی بر روی نتایج حاصله داشت، در این راستا در آزمون وزنه افتان، انرژی جذب شده از ۲۶۹/۷۲۱۴ (در دمای ۲۱ درجه سلسیوس) به ۴۱/۴۹۵۶ (در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس) ژول رسید و افت ۷۶/۹۲ درصدی را دارا شد و شاخص انعطاف‌پذیری از ۲/۳ (در دمای ۲۱ درجه سلسیوس) به ۲/۵ (در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس) ژول رسید و بهبود ۸/۶۹ درصدی را به خود اختصاص داد. در پایان این تحقیق، نتایج حاصل از آزمون‌های SEM و XRD در دمای ۲۱ درجه سلسیوس و تحت حرارت بالا، ضمن هماهنگی با یکدیگر، در همپوشانی با نتایج حاصل از سایر آزمون‌های این مقاله قرار گرفتند.

**کلید واژه‌ها:** بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی، مقاومت ضربه‌ای، آزمون وزنه افتان، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD).



## ۱- مقدمه

مقابله با بروز هرگونه حوادث خصمانه و مخرب غیرمسلحانه که موجب کاهش آسیب به نیروی انسانی، سازه‌ها، زیرساخت‌ها، تجهیزات، تاسیسات و شریان‌های کشور گردد، پدافند غیرعامل نامیده می‌شود. راهکارهای مقابله با اینگونه آسیب‌ها در علم مهندسی عمران، ایجاد استحکام در تاسیسات و سازه‌های مختلف می‌باشد. بروز نیروهای ضربه‌ای عمده‌ترین نوع حوادث در ایجاد خسارت غیرعامل در سازه‌ها شناخته می‌شود. بهبود خواص مکانیکی در بتن به‌عنوان عمده‌ترین مصالح کاربردی در سازه‌ها، نقش بسزایی در افزایش استحکام و پدافند غیرعامل در سازه‌ها دارد. سیمان پرتلند نوعی سیمان هیدرولیکی است که به‌طور عمده شامل  $CaO$ ،  $SiO_2$ ،  $Al_2O_3$  و  $Fe_2O_3$  است، این اکسیدها عمدتاً به‌صورت پیوند یافته در بتن وجود دارند [۱]. در خمیر بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند، ژل C-S-H از گروه‌های سیلیکونی تشکیل شده است [۲]. این ژل، حجم بالایی (بین ۵۰ الی ۶۰ درصد) از خمیر سیمان پرتلند را تشکیل می‌دهد و عامل اصلی ایجاد استحکام در بتن سخت شده است. با مصرف بالای عیار سیمان در بتن، حجم تولیدی این ژل در مخلوط بتن افزایش می‌یابد، در نتیجه بهبود استحکام را در بتن به دنبال دارد. مدل‌های زیادی برای توصیف ساختمان دقیق C-S-H بیان شده است. بر اساس مدل پاورز-بروناور این ساختار به‌صورت لایه‌های با سطح زیاد است، مساحت سطح ویژه C-S-H حدود ۱۰۰ تا ۷۰۰ متر مربع بر گرم پیشنهاد شده است [۳]. مقاومت این ساختار به نیروهای واندروالس نسبت داده می‌شود. در مدل فلدمن-سردا ساختار C-S-H به‌صورت یک سری لایه‌های غیرمنظم، که تصادفی برای ایجاد فضاهای بین لایه‌ها با اندازه‌ها و شکل‌های گوناگون به ابعاد ۵ تا ۲۵ آنگستروم در کنار هم قرار گرفتند، نمایش داده می‌شود [۳]. تحقیقات نشان داده است که با افزایش عیار سیمان از ۲۷۵ تا ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در بتن معمولی، چگالی بتن افزایش می‌یابد [۴]. با افزایش چگالی در بتن، میزان خواص مکانیکی در بتن بهبود خواهد یافت. با افزایش عیار سیمان در بتن و پایین نگه داشتن نسبت آب به سیمان می‌توان خصوصیات مکانیکی را در بتن افزایش داد و ضعف کارایی بتن در این شرایط با افزودن فوق‌روان‌ساز قابل جبران است [۵]. علیرغم بهبود مزایای مکانیکی در مصرف عیار بالای

سیمان، معضلات زیست محیطی ناشی از تولید سیمان نباید نادیده گرفته شود. در این راستا تحقیقات نشان می‌دهد که کارخانه‌ها تولیدکننده سیمان مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل دی‌اکسیدکربن وارد شده به جو کره زمین می‌باشند [۶]. آزمون مقاومت ضربه‌ای در بتن یکی از روش‌های متداول در برآورد میزان مقاومت بتن در برابر بارهای ضربه‌ای است. بارهای ضربه‌ای به‌لحاظ سرعت برخورد به دو گروه ضربه با سرعت کم و ضربه با سرعت بالا تقسیم‌بندی می‌گردند. مقاومت در برابر ضربه را می‌توان توسط چند نوع از آزمون مورد بررسی قرار داد از جمله آنها، آزمون انفجار، آزمون ضربه پرتابه، آزمون ضربه پاندولی و آزمون ضربه سقوط وزنه را می‌توان نام برد. آزمون ضربه‌ای از نوع وزنه افتان از جمله آزمون‌های با سرعت پرتابه کم شناخته می‌شود. اعمال حرارت بالا در بتن، همواره آثار مخربی را در بخش ریزساختار و کلان ساختار آن به دنبال دارد. تاثیر افزایش دما بر روی خمیر سخت شده سیمان هیدراته، بستگی به عوامل مختلفی از جمله درجه هیدراتاسیون و حالت رطوبتی خمیر سیمان دارد، خمیر سیمان خوب هیدراته شده و اشباع شده دارای مقادیر زیادی از آب موئینه و آب آزاد مازاد بر آب‌های سطحی است. متلاشی شدن ساختار بتن وقتی اتفاق می‌افتد که سرعت افزایش فشار گاز بخار در داخل مصالح، بیش از سرعت کاهش فشار ناشی از آزاد شدن بخار داخل جو باشد، زمانیکه دما به ۳۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد، آب بین لایه‌ای در ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) موسوم به ژل توبرموآیتی و نیز مقدار آبی که به‌صورت شیمیایی ترکیب یافته و حاصل C-S-H و H و هیدرات‌های سولفوآلومینات است، از بین می‌رود، آنگیزی بعدی خمیر سیمان به‌علت تجزیه هیدرواکسیدکلسیم (آهک هیدراته با فرمول شیمیایی  $Ca(OH)_2$ )، در محدوده دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس آغاز می‌گردد اما برای تجزیه کامل C-S-H به دمایی در حدود ۹۰۰ درجه سلسیوس احتیاج است [۷]. هرگز گزارش داد که ساختار C-S-H در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس تجزیه و در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس تخریب شده است [۸]. تحقیقات نشان داده است که با افزایش دما و به تبع آن افزایش ترک در سطح نمونه، بتن به حالت کریستالی یا توخالی شدن در می‌آید و در برابر ضربه بسیار شکننده می‌شود [۹]. ترکیب شیمیایی و ساختار فیزیکی بتن در معرض دمای زیاد، به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کند. هنگامی که آتش به‌وسیله آب خاموش

به‌منظور ساخت طرح اختلاط در تحقیق پیش‌رو از آب شرب شهر لاهیجان می‌باشد، این آب دارای PH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و چگالی  $1000 \text{ kg/m}^3$  است. بر اساس بند ۹-۴-۱۰-۹ و ۹-۴-۱۰-۹-۳ ویرایش چهارم آیین‌نامه مقررات ملی ساختمان ایران، آبی که قابل آشامیدن است، مزه و بوی مشخصی ندارد و تمیز و صاف است را می‌توان بدون آزمون در بتن استفاده کرد، مگر آنکه سوابق قبلی نشان دهنده‌ی نامناسب بودن این آب برای بتن باشد [۱۰]. منحنی دانه‌بندی سنگدانه مصرفی مطابق شکل (۱) در محدوده استاندارد ASTM C33 می‌باشد. سنگدانه‌های مصرفی، تأمین شده از کارخانه‌های شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده و به لحاظ حذف ناخالصی‌های آلی، پاک شده است، برخی از خصوصیات ریزدانه و درشت دانه مصرفی در این تحقیق بر اساس جدول (۳) تعیین گردیده است. دانه‌بندی ایده‌آل سنگدانه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا سنگدانه‌ها با بیشترین چگالی، با حداقل میزان منافذ، مقرون به صرفه‌ترین مصالح مصرفی در ساخت بتن هستند که در صورت کیفیت مناسب به حداقل مقدار خمیر سیمان نیاز خواهند داشت [۷]. ابروان‌کننده مصرفی در این تحقیق از نسل چهارم بر پایه پلی‌کربوکسیلات نرمال بوده و محصولی از شرکت دوروچم خاورمیانه با نام تجاری Flowcem R700 است، این ماده جهت جبران ضعف کارایی و حفظ روانی ترکیب ملات با توجه به مصرف عیار بالای سیمان پرتلند در بتن استفاده می‌گردد. برخی از مشخصات ابروان‌کننده پلی‌کربوکسیلات نرمال به شرح جدول (۴) ارائه گردیده است.

می‌شود، هیدرواکسیدکلسیم به اکسیدکلسیم تبدیل می‌گردد که این تبدیل باعث ایجاد ترک خوردگی و تخریب بتن می‌شود، بنابر این دمای زیاد در شکل ترک خوردگی سطحی و پوسته انداختن بتن تاثیرگذار است [۳]. این ترک‌ها نقش بسزایی در افت مقاومت بتن در برابر بارهای ضربه‌ای خواهند داشت. به‌کارگیری از تصاویر میکروسکوپ الکترونیسی (SEM) و طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD)، راهکاری موثر برای ارزیابی ریزساختاری و میزان تغییرات شیمیایی در ساختار ماتریس سیمان سخت‌شده است. با بررسی نتایج حاصل از این آزمون‌ها می‌توان به درک مطلوبی از عملکرد بتن در آزمون مقاومت ضربه‌ای از نوع وزنه افتان در دمای اتاق و حرارت بالا داشت. بررسی مقاومت ضربه‌ای، ریزساختاری و شیمیایی در بتن معمولی با عیار بالا (۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) از سیمان پرتلند در دمای اتاق و تحت حرارت بالا، به‌عنوان طرحی نوآورانه در این مقاله مطرح می‌گردد که می‌تواند به‌منظور استفاده از آن در سازه‌هایی با نیاز به مقاومت ضربه‌ای بالا، به کار گرفته شود.

## ۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

در این پژوهش، از سیمان پرتلند نوع ۲ با مشخصات شیمیایی و فیزیکی مطابق با جداول (۱) و (۲) استفاده گردید. این سیمان محصول شرکت صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان) و تحت استاندارد En 197-1 تولید گردیده است. آب مصرف شده

جدول (۱): مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند نوع II

L.O.I	C <sub>3</sub> A	I.R	Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	Cao	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cl
MAX 1/5	۵/۵-۷/۵	MAX 0/7	MAX 0.6	۲-۲/۳	۱/۴۵Max	-	۳/۵-۳/۸	۴/۵-۴/۸	۲۲-۲۱	Max 0/003

جدول (۲): مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی سیمان پرتلند نوع II

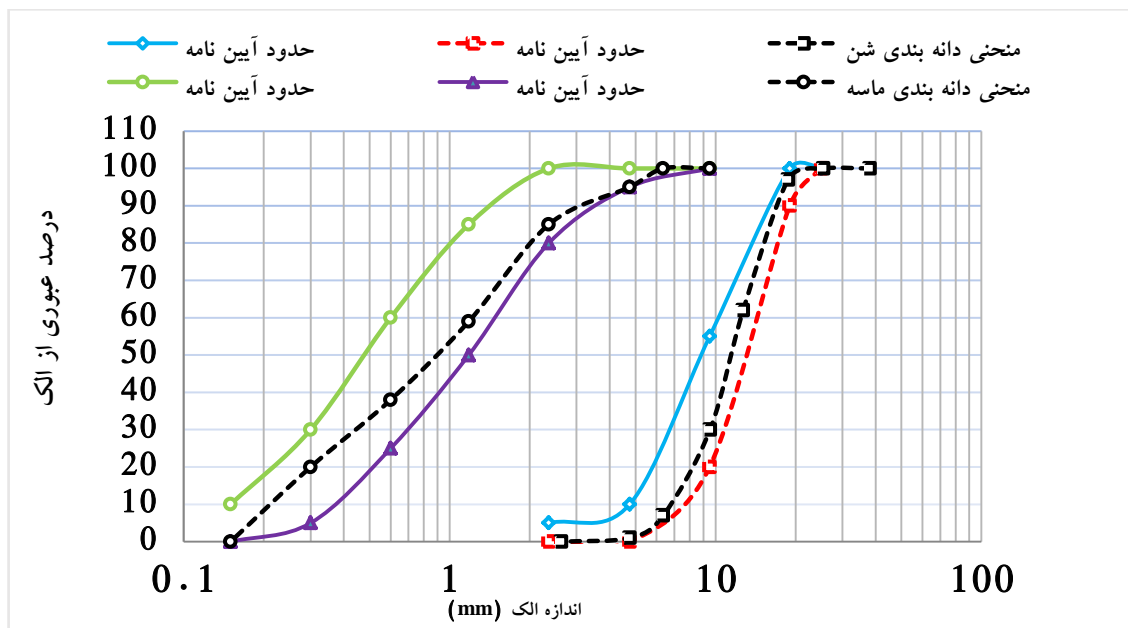
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	سطح مخصوص ( $\text{Cm}^2/\text{gr}$ )	گیرش اولیه (min)	گیرش ثانویه (min)
۲۳۵۰	۳۲۰۰-۳۰۰۰	۱۱۵ <	۱۲۰ <

جدول (۳): مشخصات سنگدانه‌ها

مصالح دانه‌ای بتن	حداقل قطر (mm)	حداکثر قطر (mm)	مدول نرمی (mm)	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	درصد جذب آب
شن	۴/۷۵ (mm)	۱۹	۲/۸۵	۲۷۵۰	۲/۲
ماسه	۷۵ ( $\mu\text{m}$ )	۴/۷۵	۲/۸۵	۲۶۵۰	۲/۹

جدول (۴): مشخصات ابروان‌کننده پلی‌کربوکسیلات نرمال

فرمول شیمیایی	حالت فیزیکی	رنگ	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	استاندارد صرف	PH	میزان یون کلر	نقطه اشتعال
پلی‌کربوکسیلات نرمال	مایع	قهوه	۱۱۰۰	ASTM C494	حدود ۷	ندارد	ندارد



شکل (۱): منحنی دانه‌بندی شن و ماسه

## ۲-۲- طرح اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه

در این پژوهش آزمایشگاهی برای ساخت بتن معمولی از طرح اختلاط تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89 استفاده گردید. در این راستا طرح اختلاط نمونه‌های بتنی در این پژوهش براساس جدول (۵) تهیه و تنظیم شد. به‌منظور ساخت نمونه‌های بتنی، در ابتدا مصالح خشک (سنگدانه و سیمان)، به داخل دستگاه مخلوط‌کن در حال گردش ریخته شدند و فرایند ترکیب به مدت ۲ دقیقه به‌طول انجامید، سپس آب و ابروان‌کننده به مخلوط اضافه گردید و ترکیب مصالح ۲ دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد. در پایان، مخلوط بتن تهیه شده در قالب‌های از پیش روغن‌کاری شده در سه مرحله ریخته شد و در هر مرحله، بتن با ۲۵ ضربه میله متراکم گردید. پس از سپری شدن ۲۴ ساعت اولیه از زمان بتن‌ریزی در محیط خشک و دمای اتاق (۲۱ درجه سلسیوس)، نمونه‌ها از قالب جداسازی شدند و تا زمان انجام آزمون در داخل آب شرب در دمای اتاق نگهداری شدند.

## ۳-۲- روش‌های آزمون و استانداردها

آزمون XRD در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت بالا، توسط دستگاه طیف‌سنج پراش اشعه ایکس با مدل Philips PW1730 انجام گرفت. در این راستا نمونه‌های خرد شده بر گرفته از مرکز نمونه بتنی در داخل دستگاه قرار داده شد و طی انجام آزمون، نمودار پراش کریستال‌های بتن تهیه گردید. داده‌های حاصل از تفرق اشعه ایکس، به‌صورت شدت فوتون بر حسب زاویه دتکتور  $2\theta$  است که به‌صورت لیستی از محل پیک و شدت آنها بر روی گراف‌ها آورده می‌شود. آزمون SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت بالا، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل FEI Quanta200 انجام گرفت، در این راستا نمونه بتنی خرد شده در دستگاه قرار داده شد و تصاویر با بزرگ‌نمایی مورد نظر ضبط و در ادامه مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفت. قبل از انجام آزمون‌های تحت حرارت بالا که در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه انجام شد.

جدول (۵): مشخصات طرح اختلاط بتن

درصد W/C	چگالی مخلوط بتن ( $\text{kg/m}^3$ )	شرایط عمل‌آوری پس از قالب برداری	مصالح مصرفی					
			ابروان‌کننده	ماسه	شن	آب	سیمان	
۴۵	۲۴۹۷	در آب	۷	۷۶۵	۱۰۰۰	۲۲۵	۵۰۰	$\text{kg/m}^3$
			۰/۰۰۲۸	۳۰/۶۳	۴۰/۰۴	۹/۰۱	۲۰/۰۲	%

شکست ( $N_2$ ) نمونه بتنی در دمای ۲۱ درجه سلسیوس به ترتیب به تعداد ۱۰ و ۲۳ (با اختلاف ۱/۳ برابری) ضربه به‌دست آمد و حداقل این ضربات در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب به تعداد ۲ و ۵ (با اختلاف ۱/۵ برابری) ضربه کسب گردید. افزایش تعداد ضربات در بروز ترک اولیه و شکست نمونه بتنی، نشان از مقاومت بالای نمونه در برابر بار ضربه‌ای می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که میزان عمق نفوذ پرتابه در بتن‌های با مقاومت بالاتر، کمتر می‌گردد [۱۲]. اغلب نتایج حاصل از بار ضربه‌ای از نوع وزنه افتان در بروز ترک اولیه و شکست نمونه بتنی، در سایر تحقیقات دارای پراکندگی هستند، این امر به‌دلیل ماهیت بارگذاری ضربه‌ای، ناهمگنی‌های موجود در بتن، وجود معیارهای چشمی برای تعیین گسیختگی و بارگذاری نقطه‌ای آزمایش است [۱۵-۱۳]. نتایج در این تحقیق نشانگر این موضوع است که افزایش حرارت در نمونه‌های بتنی موجب افت نتایج حاصله شده است. تحقیقات نشان داده است که مقاومت بتن در مواجهه با حرارت، به‌ترکیب شیمیایی مواد تشکیل‌دهنده بتن و همچنین دما و نحوه عمل‌آوری بتن بستگی دارد [۱۶]. کاهش مقاومت عمدتاً به تجزیه هیدروکسیدکلسیم نسبت داده می‌شود و این پدیده معمولاً در محدوده دمایی بین ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد [۱۷، ۱۸]. حرارت تا دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس موجب تبخیر آب از حفرات و فضاهای مویینه در ساختار بتن می‌گردد و تخلخل در بتن را تشدید می‌کند، در دمای فراتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس به‌علت خروج آب از ساختارهای بتن و شروع فرآیند هیدراتاسیون، بر اثر خشک شدن ناشی از تبخیر آب، نمونه دچار انقباض شده و در نمونه بتنی ترک ایجاد می‌شود. هنگامیکه فشار بخار به حداکثر خود می‌رسد، ساختار متراکم بتن با نفوذپذیری کم، قادر به کنترل تنش‌های حرارتی نبوده و این امر موجب بروز ترک‌های حرارتی بر روی سطح نمونه به علت انقباض می‌شود، در بتن به این موضوع پدیده " اثر بخار " می‌گویند [۱۹]. یکی از مزیت‌های انجام آزمون وزنه افتان در بتن، تعیین میزان انرژی شکست ( $E$ ) نمونه‌ها است، انرژی شکست یکی از مهمترین شاخصه‌های مکانیک شکست است، بالا بودن انرژی شکست نشانه مقاومت نمونه‌ها در برابر پخش شدگی ترک است، همچنین تحمل نمونه در برابر بارگذاری به انرژی شکست آن نمونه بستگی دارد. در این پژوهش آزمایشگاهی، میزان انرژی جذب شده نهایی ( $E_2-E_1$ ) در نمونه‌های بتنی در نمودار شکل (۲) نشان داده شده

براساس استاندارد ISO834، نمونه‌های بتنی به مدت ۱ ساعت در کوره تحت دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند، سپس نمونه‌ها به‌مدت ۱ ساعت دیگر در کوره خاموش باقی ماندند تا تحت تاثیر شُک دمایی قرار نگیرند، پس از خروج نمونه‌ها از کوره، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند تا به تعادل دمایی برسند. استفاده از این استاندارد در سایر تحقیقات پیرامون آزمون‌های تحت حرارت بالا در بتن، گزارش شده است [۱۱].

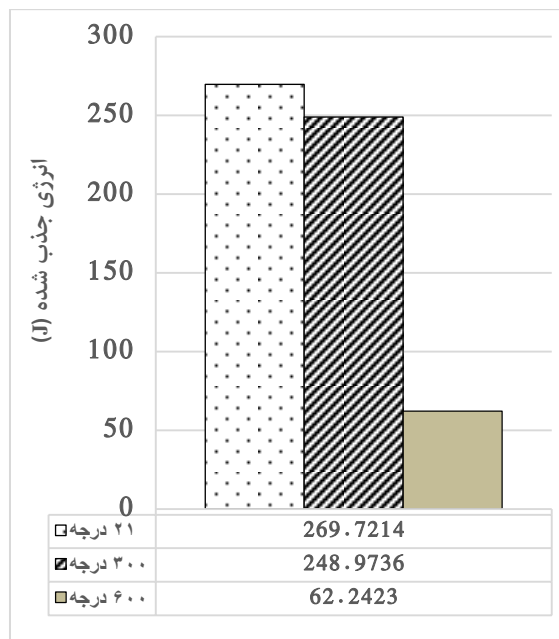
در این پژوهش آزمایشگاهی، آزمون مقاومت ضربه‌ای از نوع وزنه افتان در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه بر اساس استاندارد ACI 544-2R بر روی نمونه‌های استوانه‌ای از بتن در دمای ۲۱، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس انجام پذیرفت. این آزمون در رسته بررسی خواص مکانیکی بتن قرار دارد و معیار خوبی برای سنجش مقاومت در سازه‌های در معرض بارهای ضربه‌ای می‌باشد. مطابق با استاندارد ذکر شده در این آزمون، وزن چکش ۴/۵۴ کیلوگرم و ارتفاع سقوط وزنه ۴۵/۷ سانتی متر و اندازه گوی فلزی به قطر ۶/۳۵ سانتی متر است. برای انجام آزمایش، نمونه‌های دیسکی پس از گذشت سن عمل‌آوری و طی فرآیند حرارتی تعیین شده، در داخل دستگاه ضربه درست در زیر وزنه افتان به‌نحوی قرار گرفتند که گوی فلزی دقیقاً در مرکز نمونه قرار گیرد، سپس تعداد ضرباتی که به‌صورت هماهنگ برای بروز اولین ترک ( $N_1$ ) و گسیختگی نهایی ( $N_2$ ) توسط شمارنده‌ای که در قسمت فوقانی دستگاه تعبیه شده است ثبت می‌گردد. انرژی شکست برای بروز اولین ترک ( $E_1$ ) و گسیختگی نهایی ( $E_2$ ) بر حسب ژول از طریق رابطه ۱ محاسبه گردید. در این رابطه:  $N$ : تعداد ضربات برای ایجاد ترک،  $W$ : وزن چکش و  $H$ : ارتفاع سقوط وزنه، است.

$$E_n = N \times W \times H \quad (1)$$

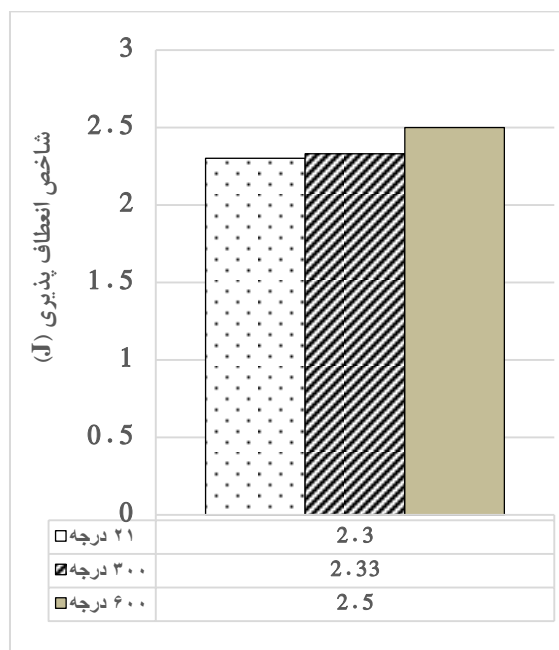
### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

#### ۳-۱- نتایج آزمون مقاومت ضربه وزنه‌افتان

نتایج حاصل از آزمون مقاومت ضربه‌ای از نوع وزنه افتان در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه تحت دمای ۲۱، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در جدول (۶) نشان داده شده است. پیرو این نتایج، حداکثر تعداد ضربات مورد نیاز برای بروز ترک اولیه ( $N_1$ ) و



شکل (۲): انرژی جذب شده در آزمون وزنه افتان



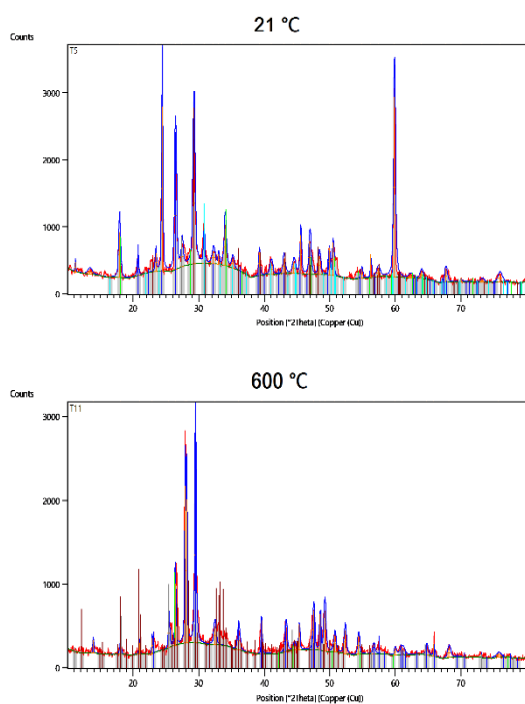
شکل (۳): شاخص انعطاف پذیری در آزمون وزنه افتان

است. در این راستا، بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد در میزان انرژی جذب شده نمونه‌ها در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به میزان ۲۶۹/۷۲۱۴ و ۶۲/۲۴۳۴ ژول به دست آمده است که افت ۷۶/۹۲ درصدی (در دمای ۶۰۰ نسبت به دمای ۲۱ درجه سلسیوس) را نشان می‌دهد. مقدار شاخص انعطاف‌پذیری ( $E_2/E_1$ ) نمونه‌ها در نمودار شکل (۳) به نمایش درآمده است. شاخص انعطاف‌پذیری بتن معیاری مناسب برای تعیین توان تغییر شکل در بتن شناخته می‌شود. در این مقاله، بهترین عملکرد انعطاف‌پذیری نمونه‌های بتنی در برابر دماهای ۲۱، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، متعلق به دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس است که بهبود ۷/۲۹ درصدی نسبت به دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس و بهبود ۷/۳۹ درصدی نسبت به دمای ۲۱ درجه سلسیوس را به خود اختصاص داده است. آزمون وزنه افتان در این تحقیق در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه بر روی بتن انجام پذیرفته است، لذا با توجه به سپری شدن مدت زمان زیاد از سن عمل‌آوری، بخش اعظمی از فرایند هیدراتاسیون در بتن انجام شده است و ذرات سیمانی از قبیل هیدرواکسیدکلسیم که در فرایند شیمیایی مشارکت نکرده‌اند، به حداقل حجم خود رسیده‌اند. نتایج حاصل از فرایند در نتایج XRD و SEM در اشکال ۴ و ۵ مشهود است. تحت این شرایط، حجم بالایی از ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده (C-S-H) تولید می‌گردد که از طریق پر کردن منافذ، حفرات، ترک‌ها و ایجاد پیوند در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) در حدفاصل خمیر و سنگدانه‌ها، به افزایش مقاومت بتن در برابر بارهای ضربه‌ای کمک می‌کنند. ژل C-S-H بخش اعظمی از حجم خمیر در بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند را تشکیل می‌دهد، سیلیکات آلومنیوم-کلسیم هیدراته (C-A-S-H)، هیدرواکسیدکلسیم ( $Ca(OH)_2$ ) ناشی از ترکیب اکسیدکلسیم و آب و ذرات هیدراته نشده به ترتیب سایر حجم خمیر سیمان را به خود اختصاص می‌دهند.

جدول (۶): نتایج آزمون مقاومت ضربه‌ای وزنه‌افتان

شاخص انعطاف‌پذیری (j)	انرژی جذب شده (j)	انرژی ضربه شکست نمونه (j)	انرژی ضربه ترک اولیه (j)	تفاضل تعداد ضربات	تعداد ضربات شکست نمونه	تعداد ضربات ترک اولیه	دما (درجه سلسیوس)
$E_2/E_1$	$E_2-E_1$	$E_2$	$E_1$	$N_2-N_1$	$N_2$	$N_1$	
۲/۳	۲۶۹/۷۲۱۴	۴۷۷/۱۹۹۴	۲۰۷/۴۷۸	۱۳	۲۳	۱۰	۲۱
۲/۳۳	۲۴۸/۹۷۳۶	۴۳۵/۷۰۳۸	۱۸۶/۷۳۰۲	۱۲	۲۱	۹	۳۰۰
۲/۵	۶۲/۲۴۳۴	۱۰۳/۷۳۹	۴۱/۴۹۵۶	۳	۵	۲	۶۰۰

ساخت بتن، فرایند واکنش شیمیایی (هیدراتاسیون) بین مواد سیمانی و آب آغاز می‌گردد، سرعت و میزان تشکیل ژل هیدراته سیلیکات کلسیم (C-S-H) که محصول نهایی حاصل از ترکیب شیمیایی است عمدتاً به خصوصیات و نسبت‌های مواد سیمانی و آب بستگی دارد.



شکل (۴): نتایج آنالیز XRD

### ۳-۳- نتایج آنالیز SEM

نتیجه حاصل از آزمون SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در مقیاس ۲۰ میکرومتر در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در شکل (۵) به‌نمایش در آمده است. براساس این تصاویر، ریزساختار بتن در تمامی طرح‌های اختلاط را می‌توان در سه فاز اساسی به شرح ذیل خلاصه نمود:

۱- فاز اول شامل محصولات هیدراتاسیون شامل ژل‌های هیدراته که در تصاویر عمدتاً به رنگ تیره هستند می‌باشد، این ژل‌ها پس از تشکیل و در ترکیب با سایر اجزا بتن، عامل اصلی در تقویت ریزساختار بتن به واسطه پر کردن منافذ و حفرات، همچنین بهبود پیوند در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) و بین لایه‌ای (در خود ژل‌های هیدراته) شناخته می‌شوند.

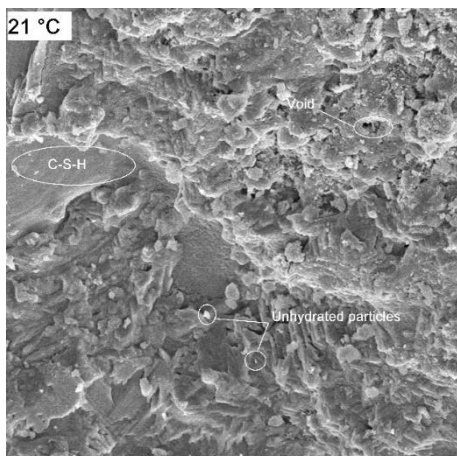
۲- فاز دوم شامل بلورهای واکنش نکرده‌ای هستند که در نتیجه ناخالصی‌های موجود در مواد اولیه و یا ذرات واکنش نکرده در

### ۲-۳- نتایج آنالیز XRD

در این پژوهش آزمایشگاهی، طیف‌سنجی پراش اشعه- ایکس (XRD) به‌منظور مطالعه و آنالیز ساختار بلورین مواد و بررسی اندازه دانه‌ها و ذرات در بتن مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز XRD در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در شکل (۴) به نمایش در آمده است. براساس این نتایج مشاهده می‌گردد که در دمای ۲۱ درجه سلسیوس، ترکیبات آلومینیوم فسفات با حداکثر ارتفاع قله ۲۶۷۰ در زاویه ۵۹/۸۵ درجه و بعد از آن هیدرواکسید کلسیم با حداکثر ارتفاع قله ۲۴۵۲ در زاویه ۲۴/۴۱ درجه، اکسید تیتانیم با حداکثر ارتفاع قله ۱۷۹۴ در زاویه ۲۹/۲۴ درجه، کلسیت با حداکثر ارتفاع قله ۱۶۰۰ در زاویه ۲۶/۴۵ درجه و دولومیت با حداکثر ارتفاع قله ۶۷۱ در زاویه ۱۷/۹۲ درجه، دارای بیشترین پراکندگی هستند. حضور هیدرواکسید کلسیم با بیشترین پراکندگی در طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس نشانه این موضوع است که بخش عمده‌ای از این ماده هیدراته شده نتوانسته است در فرایند شیمیایی مشارکت کامل داشته باشد و این موضوع می‌تواند ناشی از مصرف بالای عیار سیمان در بتن باشد که سرعت بسپارش را بالا برده و فرصت را برای مشارکت شیمیایی برخی از مواد سیمانی نداده است. پس از خروج برخی از عناصر در فرایند کلسیناسیون در دمای بالا، ترکیباتی مانند کربنات کلسیم منگنز با حداکثر ارتفاع قله ۲۰۹۲ در زاویه ۲۹/۴۷ درجه، کربن با حداکثر ارتفاع قله ۱۸۶۵ در زاویه ۲۷/۹ درجه، سیلیکات آلومینیوم منگنز آهن پتاسیم هیدراته با حداکثر ارتفاع قله ۱۷۱۲ در زاویه ۲۸/۱۳ درجه و سیلیکات آلومینیوم کلسیم هیدراته با حداکثر ارتفاع قله ۷۲۶ و در زاویه ۲۶/۴۲ درجه، دارای بیشترین پراکندگی هستند. اعمال حرارت بالا از ارتفاع قله‌ها ناشی از حضور ترکیبات کاسته است، در این راستا اختلاف اوج قله در نمودار گراف XRD در دمای ۲۱ درجه سلسیوس (با ارتفاع ۲۰۹۲)، نسبت به دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس (با ارتفاع ۲۶۷۰)، ۲۱/۶۴ درصد می‌باشد. در دمای بالا ژل CH تبدیل به کلسیم کربنات‌هایی مانند Calcite نمی‌گردد و همان‌طور که از نتایج جدول مشخص است در دمای بالا، CH ناپدید شده و در واقع به Carbon و C-A تبدیل شده است که علت اصلی ضعف بتن در دمای بالا می‌باشد [۲۰، ۲۱]. تحقیقات نشان داده است که پس از ترکیب مصالح مصرفی در تهیه و



تخریب را در ریزساختار بتن به دنبال خواهد داشت. در شکل (۶)، افزایش حجم و میزان حفرات را می‌توان به خروج آب تحت حرارت از حفرات مویینه در ریزساختار بتن نسبت داد، همچنین این مقدار با افزایش نسبت آب به سیمان در تهیه طرح اختلاط بتن، می‌تواند افزایش یابد و به تخلخل و ترد شدن ساختار بتن کمک کند. براساس تصاویر SEM، ساختار شش ضلعی پرتلندیت در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس تغییر ظاهر می‌دهد و همچنین نانوساختار C-S-H تجزیه می‌شود [۲۲]. یکی از راهکارهای مقابله با آثار ترد شدن بتن تحت حرارت استفاده از الیاف های مختلف در بتن است که این امر منجر به بهبود مقاومت ضربه‌ای در بتن نیز می‌گردد. در این راستا تحقیقات نشان داده است که افزودن الیاف فولادی یکی از موثرترین روش‌ها برای بهبود خاصیت ترد بودن بتن می‌باشد [۲۳].



شکل (۵): نتایج آنالیز XRD

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایشگاهی، میزان مقاومت ضربه‌ای از نوع وزنه افتان در سن ۹۰ روزه در دمای ۲۱، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، در بتن معمولی با عیار سیمان ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب مورد آزمون قرار گرفت. نتایج حاصله براساس آزمون‌های XRD و SEM مورد ارزیابی قرار گرفت. اهم نتایج حاصل از این تحقیق آزمایشگاهی به شرح ذیل ارائه می‌گردد. (۱) اعمال حرارت به نمونه‌های بتنی موجب افت نتایج حاصله در آزمون مقاومت ضربه‌ای از نوع وزنه افتان گردید.

فرایند هیدراتاسیون تشکیل شده‌اند و در تصاویر عمدتاً به رنگ سفید می‌باشند.

۳- فاز سوم شامل نحوه پیوندهای خمیر سیمان با سنگدانه در ناحیه انتقال بین‌سطحی، همچنین نحوه پیوندهای بین لایه‌ای در ساختار ژل‌های هیدراته شده می‌باشند.

در بخش ریزساختار بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند، سیلیکات‌کلسیم‌هیدراته (C-S-H) موسوم به ژل توبرمورایتی<sup>۱</sup> به مقدار ۵۰ الی ۶۰ درصد، هیدرواکسیدکلسیم (Ca(OH)<sub>2</sub>) یا پرتلندایت<sup>۲</sup> به مقدار ۲۰ الی ۲۵ درصد و سیلیکات آلومینیوم کلسیم‌هیدراته (C-A-S-H) یا ژل اترینگایت<sup>۳</sup> به مقدار ۱۵ الی ۲۰ درصد حجم خمیر سیمان را تشکیل می‌دهند، مابقی حجم نیز متعلق به دانه‌های کلینکری هیدراته نشده است [۷]. تحقیقات نشان داده است که در قسمت توده خمیر سیمان پرتلند، یون‌هایی مانند کلسیم، سولفات و هیدرواکسید و آلومینات که از طریق هوزی (حل) شدن به سیلیکات‌کلسیم و آلومینات‌کلسیم ناشی شده با هم ترکیب می‌شوند و تشکیل ژل اترینگایت و هیدرواکسیدکلسیم می‌دهند، بدین مفهوم که در اثر واکنش کلسیم‌آلومینات با کلسیم‌سولفات، اترینگایت ایجاد می‌شود و با پیشرفت در مرحله هیدراسیون، بلورهای ضعیف C-S-H و نسل دوم کریستال‌ها که از هیدرواکسیدکلسیم و ژل اترینگایت شکل گرفته است شروع به پر کردن فضاهای خالی در شبکه اترینگایت و هیدرواکسیدکلسیم می‌کنند و با این عملیات تراکم و سختی و مقاومت ITZ (ناحیه انتقال بین سطحی) بتن زیاد می‌گردد [۴].

اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس) در نمونه بتنی، ریزساختار بتن را تحت تاثیر قرار داده است، با توجه به تصویر SEM در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، ایجاد ساختار درختی، وجود منافذ مویینه متعدد ناشی از تبخیر آب بین فضاهای مویینه در ژل سیلیکات‌کلسیم‌هیدراته (C-S-H) و کاهش میزان ژل-C-S-H (در نواحی تیره رنگ) در نمونه بتنی مشهود است که مبین ضعف در ریزساختار بتن پس از اعمال حرارت است. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که ژل C-S-H در ریزساختار بتن حاوی سیمان پرتلند، از دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به بعد، بیشترین

<sup>1</sup> Tobermorite Gel (C-S-H)

<sup>2</sup> Portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>)

<sup>3</sup> Ettringite Gel (C-A-S-H)

اکسیدتیتانیوم، کلسیت و دولومیت بیشترین پراکندگی را در بتن دارند. اما اعمال حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس موجب افت ارتفاع قله‌ها در گراف حاصله شده است. در این راستا اکثر قله‌های بزرگ در نواحی ۲۶ تا ۲۹ درجه اتفاق افتاده است و ترکیباتی مانند کربنات کلسیم منگنز، کربن، سیلیکات آلومینیوم منگنز آهن فسفات هیدراته و سیلیکات آلومینیوم کلسیم هیدراته دارای بیشترین پراکندگی هستند.

(۷) در SEM، در دمای ۲۱ درجه سلسیوس، ساختار درختی، حفرات و ذرات هیدراته نشده در حداقل مقدار خود دیده می‌شود، اما پس از اعمال حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس به نمونه بتنی به حجم و تعداد این مقادیر افزوده شده است. از طرفی اعمال حرارت به نمونه بتنی، آثار مخربی بر ژل هیدراته شده C-S-H وارد کرده و گسستگی ساختار در این ژل‌ها مشهود است.

(۸) در پایان این تحقیق، نتایج حاصل از آزمون‌های SEM و XRD در دمای اتاق و تحت حرارت بالا، ضمن هماهنگی با یکدیگر، در همپوشانی با نتایج حاصل از سایر آزمون‌ها قرار گرفتند.

(۲) میزان انرژی جذب شده در آزمون وزنه افتان از ۲۶۹/۷۲۱۴ (در دمای ۲۱ درجه سلسیوس) ژول به ۶۲/۲۴۳۴ (در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس) ژول رسید که افت ۷۶/۹۲ درصدی را دارا شد. (۳) میزان شاخص انعطاف‌پذیری در آزمون وزنه افتان از ۲/۳ (در دمای ۲۱ درجه سلسیوس) ژول به ۲/۵ (در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس) ژول رسید و بهبود ۸/۶۹ درصدی را به خود اختصاص داد.

(۴) در آزمون وزنه افتان، انرژی لازم جهت بروز ترک اولیه در نمونه‌های بتنی در دماهای ۲۱، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب به میزان ۲۰۷/۴۷۸، ۱۸۶/۷۳۰۲ و ۴۱/۴۹۵۶ ژول کسب گردید.

(۵) در آزمون وزنه افتان، انرژی لازم جهت بروز ترک نهایی در نمونه‌های بتنی در دماهای ۲۱، ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب به میزان ۴۷۷/۱۹۹۴، ۴۳۵/۷۰۳۸ و ۱۰۳/۷۳۹ ژول کسب گردید.

(۶) در آزمون XRD، در دمای ۲۱ درجه سلسیوس، اکثر قله‌های بزرگ در نواحی ۱۶ تا ۲۹ و همچنین ۶۰ درجه اتفاق افتاده است و ترکیبات آلومینیوم فسفات و بعد از آن هیدرواکسید کلسیم،

## ۵- مراجع

- [7] P. K. Mehta and P. J. M Monteiro, "Concrete: Micro-structure, properties and materials," (3th Ed. (, Mc Graw-Hill, New York.
- [8] K. Hertz, "Concrete strength for fire safety design," Magazine of Concrete Research, 57(8), pp. 445-453, 2005.
- [9] M. Gholhaki and G. Pachideh, "Assessing Effect of Temperature Rise on the Concrete Containing Recycled Metal Spring and Its Comparison with Ordinary Fibres," Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE), vol. 6, no. 2, pp. 141-156, 2019.
- [10] Ministry of Roads and Urban Development, Theme 9 of the National Building Regulations Design and Execution of Reinforced Concrete Buildings (4 Edition), Tehran, Iran: Iran Development Publishing, 2013.
- [11] D. L. Kong, and J. G. Sanjayan, "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete," Cement and concrete research, 40(2), pp. 334-339, 2010.
- [12] M. H. Zhanga, V. P. W. Shimb, G. Lua, C. W. Chewa, "Resistance of high-strength concrete to projectile impact," International Journal of Impact Engineering 31, pp. 825-841, 2005.
- [1] E. Gartner, "Industrially interesting approaches to "low-CO2" cements," Cement and Concrete research, vol. 34, no. 9, pp. 1489-1498, 2004.
- [2] H. Du, S. Du, and X. Liu, "Durability performances of concrete with nano-silica," Construction and building materials, 73, pp. 705-712, 2014.
- [3] H. F. Taylor, "Cement chemistry," Thomas Telford, 1977.
- [4] R. Bahramloo and S. Gohari. "Investigating the effect of cement and air entrained admixture (AEA) on the capillary water absorption in concrete lining of water conveyance canals," Concrete Research, 12, 4, pp. 123-133, 2019. doi: 10.22124/jcr.2019.12654.1344
- [5] M. Tadaion, H. Honarmand, and M. Kalhori, "Impact of Plasticizers on The Quality of Concrete and The Reduction of the Cement Content," Concrete Research, 3, 2, pp. 49-57, 2010
- [6] A. Nosrati, Y. Zandi, M. Shariati, K. Khademi, M. Aliabad, A. Marto, & M. Khorami, "Portland cement structure and its major oxides and fineness," Smart structures and systems, 22(2), pp. 425-432. 2022.

- [19] Hu, S.-g., et al., Preparation and properties of geopolymer-lightweight aggregate refractory concrete. *Journal of Central South University of Technology*, 16(6): p. 914-918, 2009.
- [20] A. M. Rashad, "The effect of polypropylene, polyvinyl-alcohol, carbon and glass fibres on geopolymers properties," *Materials Science and Technology*, vol. 35, no. 2, pp. 127-146, 2019.
- [21] M. S. Morsy, Y. A. Al-Salloum, A. Husain, and S. H. Alsayed, "Behavior of blended cement mortars containing nano-metakaolin at elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 900-905, 2012.
- [22] M. Amiri and M. Aryanpoor, "The Effects of High Temperatures on Concrete Performance based on Nanostructural Changes in Calcium Silicate Hydrate (C-S-H)," *Concrete Research*, 12, 4, pp. 69-80, 2019.
- [23] M. Khazaei, H. Khodarahmi, M. Amini Mazraeno, A. Ghoreishvandi, "Experimental Study of Steel Fibers in Improving Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete," *Passive Defense Quarterly*, 4, 3, pp. 45-55, 2014.
- [13] American Concrete Institute (ACI) -544.2R Committee report on Fiber Reinforced Concrete, 1999.
- [14] B. Ashour, "Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete", *International Journal of impact engineering*, vol. 32, pp. 1907-1920, 2006.
- [15] S. Hwang, Sheu, "Strength properties of nylon and polypropylene-fiber-reinforced concretes", *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1546- 1550, 2005.
- [16] I. Türkmen, et al, "Fire resistance of geopolymer concrete produced from Ferrochrome slag by alkali activation method," in 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), IEEE, 2013.
- [17] D.P Bentz, "Fibers, percolation, and spalling of high-performance concrete," *Materials Journal*, 97(3), pp. 351-359, 2000.
- [18] B. Zhang, and N. Bicanic, "Residual fracture toughness of normal-and high-strength gravel concrete after heating to 600 C," *Materials Journal*, 99(3), pp. 217-226, 2002.