

## بررسی دوام بتن سبک سازه‌های حاوی زئولیت در محیط سولفات منیزیم

محسن عمرانی<sup>۱</sup>، شمس بصیرت<sup>۲</sup>، بابک بهفروز<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
- ۲- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
- ۳- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی، گروه عمران، واحد دهقان، دانشگاه آزاد اسلامی، دهقان، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (basirat.sh@pci.iaun.ac.ir)

### چکیده

بتن به دلیل مزایای متعددی که دارد به عنوان اصلی‌ترین مصالح ساختمانی در قرن گذشته و حال حاضر برای ساخت و ساز مورد استفاده قرار گرفته است. چگالی کمتر بتن سبک نسبت به بتن معمولی راه حلی مناسب برای کاهش مشکلات ناشی از وزن زیاد سازه‌های بتنی معرفی شده است. مصرف زئولیت با توجه به تأثیر مثبتی که روی مقاومت فشاری بتن می‌گذارد و همچنین باعث بهبود عملکرد بتن در محیط سولفات می‌شود، به عنوان جایگزین قسمتی از سیمان در طرح اختلاط بتن سبک استفاده شده است. در این مقاله به بررسی دوام بتن سبک با افزودنی زئولیت به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سیمان، به مدت ۹۰ و ۱۲۰ روز در محیط سولفات منیزیم ۱۰ درصد از طریق مطالعه آزمایشگاهی پرداخته شده است. با بررسی تغییرات مقاومت فشاری و وزن مخصوص و نتایج حاصل مشاهده شد که مصرف زئولیت به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد باعث بهبود عملکرد بتن سبک نسبت به طرح شاهد در محیط سولفات منیزیم می‌گردد. مقدار بهینه زئولیت مصرفی در محیط سولفات به مدت ۹۰ و ۱۲۰ روز برابر با ۱۵ درصد وزنی سیمان می‌باشد.

کلمات کلیدی: بتن سبک سازه‌ای، زئولیت، سولفات منیزیم، مقاومت فشاری، دوام بتن.

### ۱- مقدمه

رویکرد به بتن‌های ویژه از دهه هفتاد میلادی رو به افزایش بوده و حوزه استفاده بتن‌های با مقاومت بالا و توانمند خصوصاً در کشورهای پیشرفته با توجه به نیازهای صنعت ساختمان رو به گسترش است. استفاده از بتن سبک در ساخت سازه‌های مختلف مانند عرشه‌ی پل‌های با دهانه بلند، سقف ساختمان‌های بلندمرتبه، سکوها‌ی شناور، قطعات پیش‌ساخته بتنی و موارد نظیر آن کاربرد گسترده‌ای یافته است [۱]. بر اساس آیین‌نامه‌ی مؤسسه بتن آمریکا (ACI 213R-03) بتن سبک سازه‌ای ضمن دارا بودن چگالی کمتر از ۱۹۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری بیش از ۱۷ مگا پاسکال دارد [۲]. با بررسی سازه‌های بتنی در معرض آب دریا در جزیره قشم و شناخت عوامل خوردگی، مشاهده شده است که اسیدها و املاح (نظیر کلرایدها، سولفات‌ها و نیترات‌ها) و گازها (نظیر اکسیژن، دی‌اکسید گوگرد) و هیدروکربن‌ها از عوامل اصلی خوردگی بتن می‌باشند [۳]. از شایع‌ترین عوامل شیمیایی مخرب بتن، حمله سولفات می‌باشد. سولفات‌ها از دو طریق درونی و بیرونی بتن را مورد حمله قرار می‌دهند. حمله درونی با گسترش وجود سولفات در سیمان، سنگ‌دانه‌ها، آب و افزودنی‌های معدنی همراه می‌باشد. حمله بیرونی سولفات ناشی از فعل و انفعال سولفات موجود در آب و خاک مجاور بتن می‌باشد. معمولاً حمله سولفات موجب زوال بتن با اثر انبساط آن همراه می‌شود [۴]. سولفات‌های کلسیم، منیزیم و سدیم فراوان‌ترین نوع سولفات موجود در محیط هستند. انواعی از کاتیون‌ها مانند سدیم، منیزیم، کلسیم و نظایر آن در فرایند تنزل کیفیت بتن تأثیرگذار هستند که تأثیر منیزیم در فرایند تخریب بتن بیش از سایر کاتیون‌هاست [۵].

ژئولیت طبیعی، نوعی از ماده معدنی سیلیس آلومین هیدراته است، که به منظور بالا بردن مشخصات مکانیکی و دوام بتن به کار گرفته می‌شود. با توجه به انواع مختلف ژئولیت‌ها، بررسی مشخصات شیمیایی و فیزیکی ژئولیت مصرفی از اهمیت زیادی برخوردار است و تأثیر هر نوع از ژئولیت‌های مصرفی در بتن می‌تواند متفاوت باشد [۶].

Canpolat و همکاران با بررسی جایگزینی ژئولیت، خاکستر بادی و زغال سنگ به جای سیمان نشان دادند که با مصرف ۱۵ درصد ژئولیت، مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است. در سن ۷ روزه با مصرف ۱۵ درصد و بیشتر ژئولیت باعث کاهش مقاومت فشاری شده است [۷]. Valipour و همکاران با مقایسه پوزولان‌هایی مانند ژئولیت، میکروسیلیس و متاکائولن، اثر این مواد را بر روی دوام بتن بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد بتن‌های دارای میکروسیلیس و متاکائولن از ژئولیت فعال‌تر بوده اما بتن دارای ژئولیت دارای دوام بهتری است [۸]. Ranjbar و همکاران نشان دادند مصرف میکروسیلیس و ژئولیت باعث افزایش مصرف روان کننده‌ها در بتن خواهد شد. با مصرف میکروسیلیس ۱۵ درصد و ژئولیت ۱۰ درصد وزن جایگزین سیمان، بیشترین افزایش مقاومت فشاری نسبت به طرح فاقد افزودنی حاصل شده است [۹].

Farshadfar و Behfarnia به بررسی اثرات افزودنی‌های پوزولانی و الیاف پلی‌پروپیلن بر دوام بتن خودتراکم در مواجهه با حمله سولفات منیزیم پرداختند. آن‌ها با اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایش در محیط آب معمولی نتیجه گرفتند که مخلوط‌های بتن حاوی میکروسیلیس، متاکائولن و ژئولیت به ترتیب بیشترین مقاومت فشاری را نسبت به بتن خود تراکم معمولی را دارند. همچنین پس از قرار دادن نمونه‌های آزمایش در محیط سولفات منیزیم، دریافتند که برخلاف اثر منفی میکروسیلیس، متاکائولن و ژئولیت اثرات مثبتی بر دوام بتن خود تراکم در مقابل حمله سولفات منیزیم نشان می‌دهند [۱۰]. رضایی با بررسی اثر میان مدت و کوتاه مدت ژئولیت بر مقاومت فشاری و کششی نشان داد که بیشترین مقدار رشد مقاومت فشاری بتن با مصرف ۱۵ درصد ژئولیت از سن ۳ تا ۵۶ روزه و کمترین مقدار مربوط به ۳ درصد ژئولیت از سن ۳ تا ۵۶ روزه حاصل گردیده است. بیشترین افزایش مقاومت فشاری برای ژئولیت مصرفی به میزان ۲۰ درصد بین سنین ۵۶ تا ۹۰ روز می‌باشد. همچنین در این بررسی نشان داده شده که ژئولیت تأثیری بر مقاومت کششی نداشته است [۱۱].

Markiv و همکاران به بررسی و مقایسه بتن‌های حاوی ژئولیت و بتن‌های فاقد ژئولیت پرداختند. نتایج نشان داد که بتن دارای ژئولیت برای دستیابی به روانی مورد نظر دارای مصرف فوق روان کننده بیشتری بوده و مقاومت فشاری تا سن ۹۰ روزه نسبت به بتن فاقد ژئولیت کمتر بوده اما در سن ۱۸۰ روزه مقاومت بیشتری را نسبت به بتن فاقد ژئولیت داشته است [۱۲]. با توجه به مطالعات گذشته، تأثیر ژئولیت بر روی دوام بتن سبک در محیط سولفات منیزیم در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر استفاده از درصد‌های مختلف ژئولیت در طرح اختلاط بتن به عنوان جایگزین قسمتی از سیمان مصرفی و قرار دادن نمونه‌های تهیه شده در محیط سولفات در این مطالعه بررسی شده است. تغییر مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها با توجه به درصد ژئولیت مصرفی در طرح اختلاط در این مقاله ارائه شده و بهترین درصد مصرف افزودنی در طرح اختلاط برای مشاهده کمترین کاهش در مقاومت نمونه‌های مورد مطالعه استخراج شده است. معیار سنجش مقاومت فشاری طرح شاهده می‌باشد که در آن از مواد افزودنی استفاده نشده است.

## ۲- مشخصات مواد و مصالح

مواد سیمانی به کار رفته در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه اردستان اصفهان و ژئولیت معدن افتر سمنان می‌باشد. همچنین مصالح سنگی به کار رفته در این تحقیق شامل ماسه رودخانه‌ای شرکت قدس نجف آباد و سبک دانه لیکا محصول شرکت لیکای شهر ساوه می‌باشد.

لیکا به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد اعم از وزن کم، هدایت حرارتی پائین، افت صوتی مناسب، مقاومت در برابر آتش، دوام و پایداری شیمیایی یکی از پر مصرف‌ترین سبک‌دانه‌ها بوده که از جنس خاک رس منبسط شده می‌باشد [۱۳].

دانه بندی سنگدانه‌های ماسه مطابق با استاندارد ASTM C33 و سبک دانه‌های لیکا مطابق با استاندارد ASTM C330 صورت پذیرفت. دانه‌بندی ماسه و لیکا به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. درصد جذب آب سنگدانه‌های ماسه و سبک دانه‌های لیکای مصرفی به ترتیب ۱/۵ و ۵ درصد به دست آمد. میزان رطوبت سطحی ماسه‌ی استفاده شده در این تحقیق ۵/۵۹ درصد بوده است.

ابر روان کننده، کاهنده‌های آب ممتازی‌اند که به بتن با نسبت آب به سیمان پایین تا معمولی اضافه می‌شوند تا بتن روان و کارا تولید شود. در این تحقیق از ابر روان کننده Power flow-WD که بر پایه پلی کربوکسیلات اثر، تهیه و تولید شده استفاده گردیده است. این ماده با قدرت کاهندگی شدید آب بتن و ایجاد روانی ایده آل، جهت ساخت بتن‌های توانمند مورد استفاده قرار می‌گیرد. آب مصرفی در این تحقیق، از آب شرب شهر نجف آباد می‌باشد.

جدول ۱- دانه‌بندی ماسه

محدوده مجاز درصد عبوری تجمعی طبق ASTM C33	درصد عبوری تجمعی	اندازه‌ی الک	
		اندازه (mm)	شماره
۹۷-۱۰۰	۱۰۰	۴/۷۶	۴
۸۵-۱۰۰	۹۹/۶۴۶	۲/۳۶	۸
۵۳-۸۷	۸۰/۲۷	۱/۱۸	۱۶
۲۸-۶۵	۴۲/۶۶۶	۰/۶	۳۰
۱۰-۳۴	۱۰/۷۰۶	۰/۳	۵۰
۳-۱۷	۵/۵۴۸	۰/۱۵	۱۰۰
۰-۳	۰	۰/۰۷۵	۲۰۰

جدول ۲- دانه‌بندی لیکا

محدوده مجاز درصد عبوری تجمعی طبق ASTM C330	درصد عبوری تجمعی از الک	اندازه‌ی الک (میلی‌متر)
۱۰۰	۱۰۰	۱۲/۵۰
۸۰-۱۰۰	۸۰	۹/۵۰
۵-۴۰	۵	۴/۷۵
۰-۲۰	۰	۲/۳۶

### ۳- روش کار تجربی

مشخصات طرح اختلاط و مقادیر هر یک از مواد مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است. طرح اختلاط مورد نظر با استفاده از کار تجربی انجام شده در گذشته [۱۴] و با سعی و خطا در آزمایشگاه به دست آمده است. در طرح اختلاط مورد استفاده از ژئولیت با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان استفاده شده است. برای بررسی تأثیر ژئولیت بر روی دوام بتن سبک، یک طرح اختلاط نیز فاقد ژئولیت آورده شده است. غلظت ۱۰ درصدی محلول سولفات منیزیم نیز بر مبنای مطالعه‌های گذشته انتخاب شده است.

جدول ۳- مقادیر مصالح مورد استفاده بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب

آب	ابر روان کننده	پودر سنگ	لیکا	ماسه	ژئولیت	سیمان	W/C	نوع مخلوط	علامت اختصاری
۲۰۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	-	۴۹۵	۰/۴۵	سیمان	C
۲۰۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۲۴/۷۵	۴۷۰/۲۵	۰/۴۵	سیمان + ۵٪ ژئولیت	CZ5
۲۰۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۴۹/۵	۴۴۵/۵	۰/۴۵	سیمان + ۱۰٪ ژئولیت	CZ10
۲۰۸	۳/۵	۱۶۵	۲۳۴	۵۵۴	۷۴/۲۵	۴۲۰/۷۵	۰/۴۵	سیمان + ۱۵٪ ژئولیت	CZ15

### ۱.۳ ساخت نمونه‌ها

مصالح با ویژگی‌های مورد نظر طبق آنچه در ASTM C192 آمده، با هم مخلوط شدند. برای سنجش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن سبک در سنین ۱۱۸ و ۱۴۸ روز و با وجود ۴ طرح اختلاط برای هر طرح اختلاط و هر سن، ۳ نمونه به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده است.

برای ساخت نمونه‌های قرار گرفته شده در محیط سولفات منیزیم ابتدا ۲۸ روز در محیط حاوی آب خالص و سپس به مدت ۹۰ و ۱۲۰ روز، در حوضچه پلاستیکی حاوی محلول سولفات منیزیم قرار گرفتند.

بنابراین ۱۲ نمونه برای سن ۱۱۸ روز و ۱۲ نمونه برای سن ۱۴۸ روز در محیط آب خالص و همچنین برای بررسی دوام بتن سبک ۱۲ نمونه به مدت ۹۰ روز و ۱۲ نمونه به مدت ۱۲۰ روز در محیط سولفات منیزیم ساخته شد.

برای به حداقل رساندن خطای انسانی در اندازه گیری پارامترهای فوق، میانگین متغیرهای مورد نظر از اندازه گیری سه نمونه هر طرح اختلاط انجام شد.

### ۴- نتایج

#### ۵- مقاومت فشاری

در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره نیرو در یک جهت به نمونه بتنی وارد می‌شود و تحت فشار تک محوره، ترک‌های تقریباً موازی جهت بار وارد بر نمونه وارد می‌شود. شکستن و تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C495/495M انجام شد [۱۵].

میزان مقاومت فشاری با سنین و طرح اختلاط مشخص و با توجه به نوع محیط در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین میزان تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در محیط سولفات منیزیم نسبت به نمونه هم طرح و هم سن خود در محیط آب معمولی در جدول ۵ ارائه شده است. نمودارهای روند تغییرات مقاومت فشاری بر حسب درصد در شکل های ۱ و ۲ ارائه شده است.

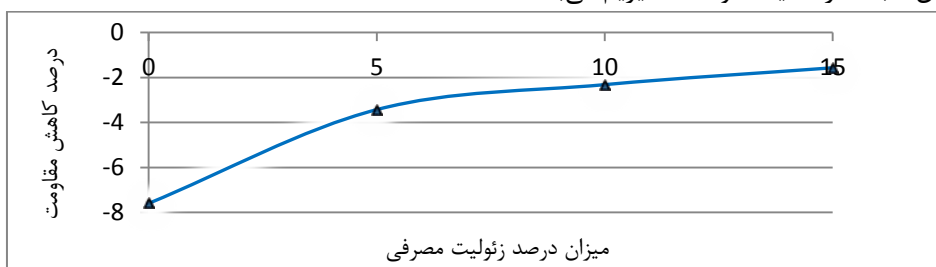
جدول ۴- نتایج مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط حاوی زئولیت

مقاومت فشاری (MPa)				شناسه طرح اختلاط
۱۱۸ روزه (سولفات منیزیم)	۱۴۸ روزه (سولفات منیزیم)	۱۴۸ روزه	۱۱۸ روزه	
۲۹/۱	۲۸/۶	۳۲/۱	۳۱/۵	C
۳۷/۹۵	۳۶/۷	۴۱	۳۹/۳	CZ5
۳۹/۱۷	۳۸	۴۱/۶	۴۰/۱	CZ10
۳۷/۶	۳۷/۱	۳۹/۴	۳۸/۲	CZ15

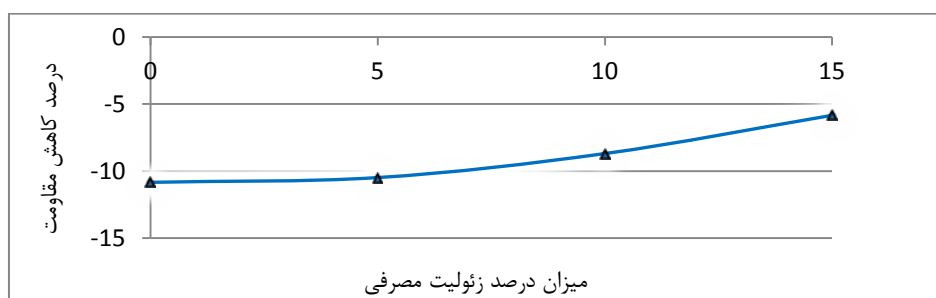
جدول ۵- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های در محیط سولفات منیزیم نسبت به محیط آب معمولی هم سن و هم طرح خود

میزان تغییرات مقاومت فشاری بر حسب درصد		شناسه طرح اختلاط
۹۰ روز در محلول سولفات منیزیم	۱۲۰ روز در محلول سولفات منیزیم	
-۷/۶	-۱۰/۸۲	C
-۳/۴۳	-۱۰/۴۸	CZ5
-۲/۳۲	-۸/۶۹	CZ10
-۱/۵۷	-۵/۸۴	CZ15

در نمودار روند تغییر مقاومت فشاری بر حسب درصد در شکل‌های ۱ و ۲ در گروه طرح‌های حاوی زئولیت می‌توان مشاهده نمود که نمونه‌های ۹۰ و ۱۲۰ روز در محیط سولفات منیزیم رفتار تقریباً مشابهی دارند. در هر دو منحنی مشاهده می‌شود که زئولیت باعث بهبود عملکرد بتن سبک در محیط سولفات منیزیم نسبت به بتن سبک شاهد می‌شود؛ به گونه‌ای که با افزایش زئولیت مصرفی تا ۱۵ درصد در محیط سولفات، دوام بتن سبک بهبود می‌یابد. برای طرح‌های CZ5، CZ10 و CZ15، اختلاف درصد تغییر مقاومت فشاری در محیط سولفات منیزیم به مدت ۹۰ روز نسبت به طرح شاهد به ترتیب برابر با ۴/۱۹، ۵/۳ و ۶/۰۵ درصد و به مدت ۱۲۰ روز برابر با ۰/۳۴، ۲/۱۳ و ۴/۹۸ درصد می‌باشد که نشان دهنده تأثیر مثبت زئولیت بر روی مقاومت فشاری بتن سبک در محیط سولفات منیزیم می‌باشد.



شکل ۱- نمودار روند تغییر مقاومت فشاری طرح‌های حاوی زئولیت در محیط سولفات منیزیم به مدت ۹۰ روز بر حسب درصد



شکل ۲- نمودار روند تغییر مقاومت فشاری طرح‌های حاوی زئولیت در محیط سولفات منیزیم به مدت ۱۲۰ روز بر حسب درصد

با توجه به جدول شماره ۵ مشاهده می‌شود طرح‌های CZ5، CZ10 و CZ15 در سن ۱۱۸ روزه (۹۰ روز در محیط سولفات منیزیم) به ترتیب با کاهش مقاومت ۳/۴، ۲/۳ و ۱/۵۷ درصد و در سن ۱۴۸ روزه (۱۲۰ روز در محیط سولفات منیزیم) به ترتیب با کاهش مقاومت ۱۰/۴۸، ۸/۷ و ۵/۸ درصد نسبت به نمونه‌های هم طرح و هم سن خود در محیط آب معمولی همراه بوده است.

با توجه به نتایج، با افزایش زئولیت در نمونه بتن سبک در مواجهه با سولفات منیزیم ۱۰ درصد، مقاومت فشاری بتن سبک افزایش می‌یابد؛ بنابراین طرح CZ15 از لحاظ دوام در برابر سولفات منیزیم به عنوان طرح بهینه انتخاب گردید.

### ۲.۴ کاهش وزن مخصوص

برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها، پس از بیرون آوردن آن‌ها از داخل محلول، به مدت ۲۴ ساعت در داخل گرم کن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و سپس وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد. درصد کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها بر اساس رابطه شماره ۱ محاسبه گردید.

$$R = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)،  $W_1$  وزن نمونه‌ی خشک قبل از قرارگیری در محلول سولفات منیزیم،  $W_2$  وزن نمونه‌ی خشک بعد از قرارگیری در محلول و  $R$  درصد کاهش وزن مخصوص نمونه است. میزان کاهش وزن مخصوص بتن‌های هر طرح اختلاط واقع در داخل هر محلول، از میانگین میزان کاهش جرم ۳ نمونه از آن طرح اختلاط به دست آمد. وزن مخصوص نمونه‌های بتن سبک ساخته شده حاوی ژئولیت در محیط آب معمولی و همین‌طور سولفات منیزیم ۱۰ درصد در سنین ۱۱۸ و ۱۴۸ روز در جدول ۶ و ۷ آورده شده است. همچنین نمودارهای روند تغییرات وزن مخصوص بر حسب درصد در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۶- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های در محیط سولفات منیزیم نسبت به محیط آب معمولی در سن ۱۱۸ روز و هم طرح خود

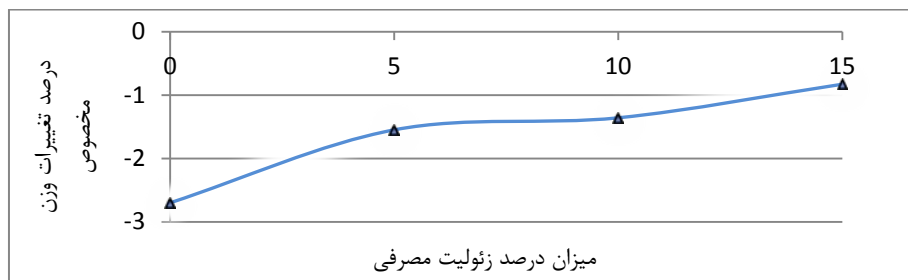
درصد تغییرات وزن مخصوص	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )		شناسه طرح اختلاط
	۹۰ روز در محلول سولفات منیزیم	۱۱۸ روزه	
-۲/۷	۱۹۰۳	۱۹۵۶	<b>C</b>
-۱/۵۵	۱۹۰۶	۱۹۳۶	<b>CZ5</b>
-۱/۳۶	۱۸۸۲	۱۹۰۸	<b>CZ10</b>
-۰/۸۳	۱۷۹۲	۱۸۰۷	<b>CZ15</b>

جدول ۷- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های در محیط سولفات منیزیم نسبت به محیط آب معمولی در سن ۱۴۸ روز و هم طرح خود

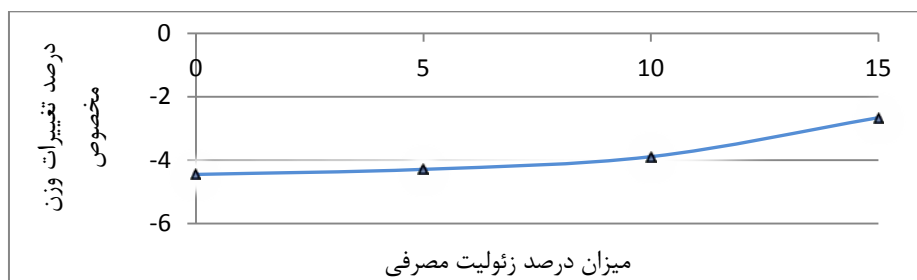
درصد تغییرات وزن مخصوص	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )		شناسه طرح اختلاط
	۱۲۰ روز در محلول سولفات منیزیم	۱۴۸ روزه	
-۴/۴۵	۱۸۶۹	۱۹۵۶	<b>C</b>
-۴/۲۹	۱۸۵۳	۱۹۳۶	<b>CZ5</b>
-۳/۸۹	۱۸۳۴	۱۹۰۸	<b>CZ10</b>
-۲/۶۶	۱۷۵۹	۱۸۰۷	<b>CZ15</b>

با توجه به نتایج جدول‌های تغییرات وزن مخصوص شماره ۶ و ۷ مشاهده می‌شود طرح‌های CZ5، CZ10 و CZ15 در سن ۱۱۸ روزه (۹۰ روز در اسید) به ترتیب با کاهش وزن مخصوص ۱/۵۵، ۱/۳۶ و ۰/۸۳ درصد و در سن ۱۴۸ روزه (۱۲۰ در اسید) به ترتیب با کاهش وزن مخصوص ۴/۲۹، ۳/۸۹ و ۲/۶۶ درصد نسبت به نمونه‌های هم سن خود در محیط آب معمولی همراه بوده است. کاهش وزن مخصوص با کاهش مقاومت فشاری در محیط سولفات منیزیم رابطه مستقیم دارد؛ به گونه‌ای که با روند صعودی کاهش وزن مخصوص، مقاومت فشاری نیز کاهش می‌یابد.

در نمودار روند تغییر وزن مخصوص بر حسب درصد در شکل‌های ۳ و ۴ گروه طرح‌های حاوی ژئولیت می‌توان مشاهده نمود که نمونه‌های ۹۰ و ۱۲۰ روز در محیط سولفات منیزیم رفتار تقریباً مشابهی دارند. در هر دو منحنی فوق مشاهده می‌شود که ژئولیت تأثیر مثبت در محیط سولفات منیزیم بر روی دوام بتن در برابر کاهش مقاومت فشاری و کاهش وزن مخصوص نمونه‌های بتن سبک نسبت به بتن سبک شاهد می‌گذارد؛ به گونه‌ای که با افزایش ژئولیت مصرفی تا ۱۵ درصد در محیط سولفات منیزیم، دوام بتن در برابر کاهش وزن مخصوص بهبود می‌یابد.



شکل ۳- نمودار روند تغییر وزن مخصوص طرح‌های حاوی ژئولیت در معرض سولفات منیزیم به مدت ۹۰ روز بر حسب درصد



شکل ۴- نمودار روند تغییر وزن مخصوص طرح‌های حاوی ژئولیت در معرض سولفات منیزیم به مدت ۱۲۰ روز بر حسب درصد

با توجه به نتایج، با افزایش درصد ژئولیت تا ۱۵ درصد در نمونه بتن سبک در مواجهه با سولفات منیزیم ۱۰ درصد، باعث بهبود دوام بتن در برابر تهاجم سولفات منیزیم می‌شود. رفتار تأثیر ژئولیت بر روی دوام و کاهش وزن مخصوص بتن سبک در برابر محیط سولفات منیزیم با رفتار تأثیر ژئولیت بر روی مقاومت فشاری در محیط آب معمولی منطبق نمی‌باشد به گونه‌ای که طرح CZ15 بهترین طرح از نظر دوام بهتر و کاهش وزن مخصوص کمتر در محیط سولفات منیزیم می‌باشد و طرح CZ10 بیشترین افزایش مقاومت نسبت به طرح شاهد را بین طرح‌های حاوی ژئولیت در محیط آب معمولی دارد.

#### ۶- نتیجه گیری

- با توجه به نتایج جدول شماره ۴، مقاومت‌های بدست آمده نمونه‌های ۱۱۸ و ۱۴۸ روزه در محیط آب معمولی؛ هر سه طرح اختلاط بتن سبک حاوی ژئولیت به مقدار ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزین سیمان، مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد در سنین ۱۱۸ و ۱۴۸ روز افزایش یافته است. بیشترین افزایش مقاومت فشاری کسب شده نسبت به طرح شاهد مربوط به طرح حاوی ۱۰ درصد ژئولیت در سنین ۱۱۸ و ۱۴۸ روز می‌باشد. طرح CZ10 به عنوان طرح بهینه در این گروه انتخاب گردید.
- در محیط سولفات منیزیم؛ با افزایش ژئولیت مصرفی جایگزین سیمان در محیط سولفات منیزیم باعث دوام بهتر از نظر کاهش مقاومت و کاهش وزن مخصوص نسبت به طرح شاهد می‌شود. هر سه طرح حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ژئولیت نسبت به طرح شاهد با کاهش مقاومت و کاهش وزن مخصوص کمتر همراه بوده است که نشان دهنده تأثیر مثبت ژئولیت در بتن سبک در مواجهه با سولفات منیزیم می‌باشد. طرح CZ15 به عنوان طرح بهینه نسبت به سایر طرح‌های حاوی ژئولیت و طرح شاهد در محیط سولفات انتخاب گردید.

#### ۷- قدردانی

با توجه به انجام آزمایش‌های این پژوهش در دانشگاه آزاد نجف آباد، نویسندگان این مقاله از دانشگاه نام برده بابت فراهم کردن امکانات انجام آزمایش کمال سپاسگزاری را دارند.



## ۸- مراجع

- [1] شکرچی زاده، م. و علی لیبر، ن. و جلیلی، م. (۱۳۹۵). "راهنمای کاربردی بتن سبک دانه سازه‌ای". چاپ اول، انتشارات علم و ادب، تهران.
- [2] ACI Committee 213. (2014). "Guide for Structural Lightweight-aggregate Concrete". American Concrete Institute.
- [3] خسرو زاده، ش. (۱۳۹۳). "بررسی سازه‌های عمرانی در خلیج فارس". بررسی موردی جزیره قشم، پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، انجمن علمی دانشجویی عمران دانشگاه ارومیه، ارومیه.
- [4] Tian, B., Cohen, M.D. (2000). "Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?". Cement and concrete research, Vol. 30, pp. 117-123.
- [5] Nehdi, M., Pardhan, M., Koshowski, S. (2004). "Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements". Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 2103-2112.
- [6] Mumpton, F.A. (1977). "Mineralogy and geology of natural zeolites". Washington DC: Mineralogical Society of America, Vol. 4, p. 233.
- [7] Canpolat, F., Yilmaz, K., Kose, M.M., Sumer, M., Yardusev, M.A. (2004). "Use of Zeolite, Coal Bottom Ash and Fly Ash as Replacement Materials in Cement production". Cement and Concrete Research, Vol. 34 (5), pp. 731-735.
- [8] Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S. (2013). "Comparing a Natural Pozzolan, Zeolite, to Metakaolin and Silica Fume in Term of Their Effect on the Durability characteristics of Concrete". Construction and Building Materials, Vol. 41, pp. 879-888.
- [9] Ranjbar M.M., Madandoust, R., Mousavi, S.Y. (2013). "Combined Effect of Silica Fume and Zeolite on the Fresh and Hardened Properties of Self Compacted Concrete". Concrete Research, Vol. 6 (1), pp. 53-71.
- [10] Behfarnia, K., Farshadfar, O. (2013). "The effects of pozzolanic binders and polypropylene fibers on durability of SCC to magnesium sulfate attack". Construction and Building Materials, Vol. 38, pp. 64-71, 2013.
- [11] رضایی، ع.، رهگذر، ر. (۱۳۹۴). "اثر کوتاه مدت و بلند مدت زئولیت بر مقاومت فشاری و کششی بتن نیمه سبک با استفاده از مصالح محلی استان سیستان بلوچستان". همایش ملی استفاده از فناوری ها و تکنولوژی های نوین طراحی، محاسبه و اجرا در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه.
- [12] Markiv, T., Sobol, K., Franus, M., Franus, W. (2016). "Mechanical and Durability Properties of Concretes Incorporating Natural Zeolite". Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 16 (4), pp. 554-556.
- [13] محمدی تهرانی، ف. (۱۳۷۷). "راهنمای جامع لیکا". شرکت لیکا، تهران.
- [14] Sajedi, F., Shafigh, P. (2012). "High Strength Lightweight Concrete Using Leca, Silica Fume, and Limestone". Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 37, pp. 1885-1893.
- [15] ASTM C495/C495M-12. (2012). "Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete". ASTM International, West Conshohocken, PA.