

تأثیر ضایعات پودر مرمر و میکروسیلیس در عملکرد مکانیکی، زیست محیطی و اقتصادی بتن

منصور قلعه نوی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد

مهرا لاله رخشانی مهر* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه الزهراء، تهران

علی خدابخشیان (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۱/۴، ص. ۲۳۳-۲۴۰، پژوهشی)

پژوهش حاضر یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی خصوصیات مکانیکی ۱۶ طرح اختلاط بتن حاوی پودر مرمر (۵، ۱۰، ۲۰ درصد) و میکروسیلیس (۰، ۵، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد) است، که جایگزین بخشی از سیمان شده‌اند. نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و برابر با ۰/۴۵ بوده است. آزمایش‌های اسلامپ، وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول کشسانی به منظور ارزیابی خصوصیات بتن انجام شده است. در نهایت، تمامی طرح‌های اختلاط از دیدگاه‌های زیست محیطی، اقتصادی و مکانیکی بررسی و مشخص شد که خواص مکانیکی بتن حاوی پودر مرمر، برای نسبت‌های جایگزینی بیش از ۱۰٪ تمایل به کاهش دارند. نتایج رضایت بخشی برای نسبت‌های جایگزینی پودر مرمر تا ۱۰٪ به دست آمده است. در خصوص استفاده از میکروسیلیس مشاهده شد که کاستی‌هایی که در مقایسه با بتن شاهد در خواص مکانیکی بتن حاوی پودر مرمر به وجود آمده است، جبران می‌کند. مقایسه‌ی طرح‌های اختلاط بتن از دیدگاه‌های مختلف نشان داده است که طرح اختلاط بهینه، زمانی ایجاد می‌شود که پودر مرمر و میکروسیلیس به طور همزمان استفاده شوند.

واژگان کلیدی: ضایعات سنگ مرمر، میکروسیلیس، مکانیکی، زیست محیطی و اقتصادی، بتن.

۱. مقدمه

افزایش مصرف منابع طبیعی تجدیدناپذیر خطری اجتناب‌ناپذیر برای نسل‌های آینده است. راه‌های مختلفی برای کاهش مصرف منابع ارزشمند اخیر وجود دارد که یکی از آنها، استفاده از ضایعات تولید شده در صنایع مختلف است. استفاده از ضایعات در صنعت، نه فقط سبب کاهش آلودگی در محیط زیست می‌شود، بلکه موجب کاهش مصرف منابع طبیعی، هزینه‌های دفع ضایعات و تولیدات صنعتی نیز می‌شود. از طرفی، دفع و به کارگیری صحیح ضایعات، به حفظ سلامت اجتماعی و بشری نیز کمک می‌کند.

تاکنون در صنایع مختلف، از جمله صنعت ساختمان، گام‌هایی در جهت استفاده از ضایعات برداشته شده است. برای تولید بتن، که یکی از پر مصرف‌ترین مواد بر روی کره‌ی زمین است، بسیاری از منابع طبیعی آلوده و میزان قابل توجهی از گازهای گلخانه‌یی به هوا منتشر می‌شود. ایران به عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان سنگ

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۸/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۲/۱۶، پذیرش ۱۴۰۰/۲/۴

DOI:10.24200/J30.2021.56505.2834

ghalehnovi@ferdowsi.um.ac.ir
m.rakshanimehr@alzahra.ac.ir
khodabakhshian.ali@mail.um.ac.ir

در جهان، حجم قابل توجهی از ضایعات سنگ را تولید می‌کند. با توجه به این‌که وجود ضایعات سنگ در اطراف کارخانه‌های سنگ و محیط شهری سبب آلودگی زمین‌های اطراف می‌شوند و برای انسان نیز خطرآفرین هستند، کارخانه‌ها موظف به دور کردن ضایعات اشاره شده از اطراف کارخانه و محیط شهری هستند، که این امر مستلزم صرف هزینه است. یکی از معادن و کارخانه‌هایی که حجم قابل توجهی از ضایعات را به صورت لاشه سنگ و پودر سنگ تولید می‌کنند، معادن و کارخانه‌های سنگ مرمر هستند؛ که با توجه به این‌که پتانسیل مناسبی برای استفاده از پودر مرمر تولید شده وجود ندارد، این ضایعات پودری در فضاهای باز اطراف کارخانه‌ها و با طبیعت پیرامون ما انباشته و سبب آلودگی محیط زیست می‌شوند. مقدار ضایعات سنگ مرمر به ۸۰ تا ۹۰ درصد سنگ استخراج شده از معدن می‌رسد.^[۱] بنابراین بسیار مهم است که راهی برای مصرف ضایعات اشاره شده و کاهش پیامدهای زیست محیطی پیدا شود.

از نقطه نظر فیزیکی، حضور پودر مرمر در خمیر سیمان سخت شده، نقش پرکننده را ایفا می‌کند و تخلخل خمیر را کاهش می‌دهد. پودر مرمر، ماده‌ی خنثی یا شبه خنثی

دوام بتن را بهبود بخشید.^[۱۰] مطابق با پژوهش آرل^۳ (۲۰۱۶)، جایگزینی ۵ تا ۱۰ درصد سیمان با پودر مرمر، علاوه بر این که خصوصیات مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد، از انتشار گاز دی‌اکسید کربن حاصل از تولید سیمان تا ۱۲٪ می‌کاهد.^[۱۱] دیلباس^۴ و همکاران (۲۰۱۴)، تأثیر استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی بتن به همراه میکروسیلیس را در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن مطالعه کردند و نشان دادند که استفاده از میکروسیلیس، عملکرد بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی را بهبود می‌بخشد.^[۱۲] اونوگولوچی^۵ و پنسار (۲۰۱۴)، برای جبران افت خصوصیات مکانیکی بتن ناشی از جایگزینی خرده‌لاستیک با بخشی از ریزدانه، از ۱۵٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان استفاده کردند و با استفاده از آن، نه فقط کاهش مقاومت‌های فشاری و کششی و مدول کشسانی را جبران کردند، بلکه مقاومت‌های فشاری و کششی نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد خرده‌لاستیک را به ترتیب تا ۳۰ و ۳۴ درصد افزایش دادند.^[۱۳] مهتا و آشیش (۲۰۲۰)، هم تأثیر استفاده از میکروسیلیس و ضایعات شیشه در خصوصیات مکانیکی و دوام بتن را بررسی کردند و گزارش دادند که درصد بهینه‌ی جایگزینی میکروسیلیس با سیمان برای بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن ۱۰ تا ۱۵ درصد است.^[۱۴] مظلوم و همکاران (۲۰۰۴) برای ساخت بتن توانمند، میکروسیلیس (۶، ۱۰ و ۱۵ درصد) را جایگزین بخشی از سیمان کردند و نشان دادند که افزایش جایگزینی میکروسیلیس مقاومت فشاری را تا سن ۹۰ روز به طور قابل توجهی افزایش داده است؛ ولی در سن ۳۶۵ روز، مقاومت نمونه‌های حاوی میکروسیلیس با بتن شاهد تقریباً برابر شده است.^[۱۵] شلکه^۶ و همکاران (۲۰۱۲)، تأثیر پودر مرمر (۰، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد) و میکروسیلیس (۰ و ۸ درصد) را به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در مقاومت فشاری بتن ۷ و ۲۸ روزه بررسی کردند و مقاومت فشاری تمامی ترکیب‌های حاوی پودر مرمر را به طور قابل توجهی کمتر از بتن معمولی گزارش دادند؛ به جز نمونه‌ی حاوی ۸٪ میکروسیلیس و ۸٪ پودر مرمر، که افزایش مقاومتی در حدود ۳٪ نسبت به بتن معمولی داشته است.^[۷] امین و همکاران (۲۰۱۴)، نیز تأثیر جایگزینی سیمان با ۳۰٪ پودر مرمر را به همراه ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس بررسی کردند و ترکیب‌های مذکور، مقاومت بتن را به ترتیب تا ۶۰ و ۴۷ درصد در سن ۹۰ روز کاهش داده‌اند.^[۸] همچنین ژانگ و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر جایگزینی سیمان با ضایعات پودر مرمر و میکروسیلیس را در خصوصیات مکانیکی و دوام بتن سلولار بررسی کردند و گزارش دادند که خواص مکانیکی و دوام بهینه‌ی بتن سلولار در مخلوط‌های حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس و ۵ تا ۲۰ درصد ضایعات پودر مرمر حاصل شده است.^[۱۶] بایراکتار^۷ و همکاران (۲۰۱۹)، تأثیر درجه حرارت بالا (تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) و جایگزینی بخشی از سیمان با ضایعات پودر مرمر و میکروسیلیس را در خصوصیات مکانیکی ملات سیمانی بررسی کردند و دریافته‌اند که می‌توان از ضایعات پودر مرمر و میکروسیلیس به عنوان مواد افزودنی پوزولانی در ملات‌های سیمانی، به تنهایی و با هم استفاده کردند. همچنین ایشان معتقدند که از ترکیب‌های سیمانی مذکور می‌توان در ساختمان‌هایی که احتمال زیاد آتش‌سوزی تا مقادیر دمایی خاصی وجود دارد، استفاده کرد.^[۱۷]

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی و تحلیل‌های زیست‌محیطی و

اقتصادی

۱.۲. مواد و مصالح مصرفی

سنگ‌دانه‌های مصرف شده از نوع شکسته و از محل تأمین‌کنندگان مصالح سنگی

است. فعل و انفعال‌های شیمیایی پودر مرمر بین کربنات کلسیم (اصلی‌ترین ماده‌ی معدنی بلوری پودر مرمر) و خمیر سیمان رخ می‌دهد، که با واکنش بین هیدروآلومینات کلسیم و یون‌های کربناته منجر به تشکیل کربوآلومینات‌های کلسیم می‌شوند و هیدرات‌های کربوآلومینات‌های کلسیم مقاومت فشاری را افزایش می‌دهند.^[۱] حضور کربنات کلسیم به هیدراسیون تری‌کلسیم سیلیکات شتاب می‌دهد.^[۲] یکی از متداول‌ترین افزودنی‌ها، میکروسیلیس است، که برای ساخت بتن مقاومت بالا استفاده می‌شود. میکروسیلیس محصولی فرعی است که به عنوان پوزولان استفاده می‌شود، که نتیجه‌ی احیاء کوارتز بسیار خالص با زغال سنگ کوره‌ی قوس الکتریکی در ساخت آلیاژ فرورسیلیس یا سیلیسیم است. حضور میکروسیلیس در بتن، ناحیه‌ی بین سطحی ضعیف را با تقویت پیوند خمیر سیمان و سنگ‌دانه و تشکیل یک ساختار بسیار ریز با تخلخل کمتر و همگن‌تر در منطقه‌ی بین سطحی از بین می‌برد.^[۵] مقایسه‌ی بین خمیر سیمان بدون پودر و خمیرهای سیمانی حاوی پودر مرمر نشان داده است که تفاوتی میان نمونه‌های مذکور خصوصاً از نظر محتوای هیدروکسید کلسیم وجود ندارد.^[۶] سیلیکای موجود در میکروسیلیس می‌تواند با هیدروکسید کلسیم واکنش دهد و هیدرات‌های کلسیم سیلیکات را، که مسئولیت افزایش مقاومت را دارند، به وجود آورند.^[۳]

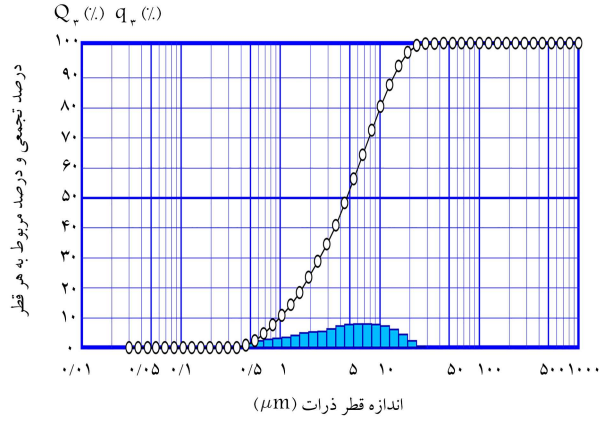
نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده است که استفاده از پودر مرمر به عنوان جایگزین بخشی از سیمان می‌تواند منجر به افت خصوصیات مکانیکی و دوام بتن شود. در پژوهش حاضر، به دو منظور از میکروسیلیس استفاده شده است: (۱) برطرف کردن معایب و کاستی‌های به وجود آمده در بتن حاوی پودر مرمر نسبت به بتن معمولی و (۲) افزایش میزان جایگزینی سیمان با ضایعات و میکروسیلیس تا جایی که عملکرد و خصوصیات بتن حفظ شود.

تاکنون پژوهشگران بسیاری از پودر مرمر و میکروسیلیس به عنوان مواد پرکننده‌ی خنثی و پوزولان در بتن استفاده کرده‌اند.^[۷] اما بررسی دقیقی برای بهینه‌سازی استفاده‌ی هم‌زمان از دو ماده‌ی پودر مرمر و میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید بتن با حفظ خصوصیات مکانیکی و توجه به جنبه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی آن انجام نشده است. در پژوهش حاضر، آثار استفاده از درصد‌های مختلف پودر مرمر و میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در عملکرد مکانیکی، زیست‌محیطی و اقتصادی بتن بررسی شده است. بخشی از نوآوری پژوهش حاضر در جامع بودن ترکیب‌های انتخابی جهت جایگزینی با سیمان نهان است؛ چرا که با توجه به تفاوت موجود در دانه‌بندی ذرات پودر مرمر، میکروسیلیس و سیمان، درصد‌های مختلف جایگزینی می‌توانند آثار متفاوتی را در پُر کردن خلل و فرج و ظرفیت مکانیکی و دوام بتن داشته باشند.

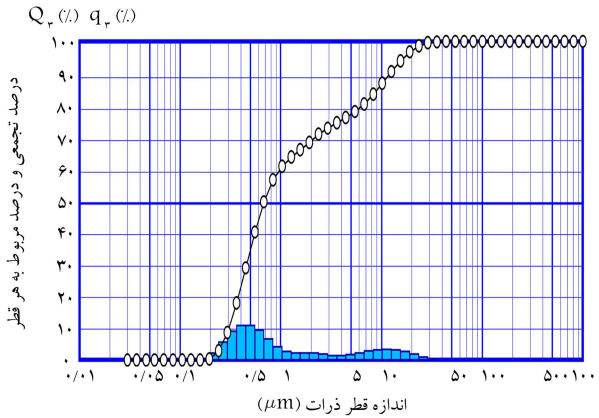
پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که استفاده از ضایعات پودر مرمر به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید بتن امکان‌پذیر است. ارگان^۱ (۲۰۱۱) نشان داد که می‌توان با حفظ خصوصیات مکانیکی بتن، پودر مرمر و دیاتومیت را به ترتیب تا ۵ و ۱۰ درصد به طور جداگانه و هم‌زمان جایگزین بخشی از سیمان کرد.^[۳] برخی پژوهشگران نیز تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با پودر مرمر در خصوصیات مکانیکی و دوام بتن را بررسی کردند و گزارش دادند که جایگزینی سیمان با پودر مرمر تا ۱۰٪، تأثیر قابل توجهی در خصوصیات مکانیکی و دوام بتن ندارد؛ اما با افزایش درصد‌های جایگزینی، بیشتر از ۱۰٪، خصوصیات مکانیکی و دوام بتن کاهش می‌یابد.^[۹] سینگ^۲ و همکاران (۲۰۱۹)، تأثیر جایگزینی ضایعات پودر مرمر با سیمان را در خصوصیات بتن تا سن ۳۶۰ روز بررسی کردند و نشان دادند که می‌توان پودر مرمر را تا ۱۵٪ جایگزین سیمان کرد و خصوصیات مکانیکی و

جدول ۱. مشخصات درشت دانه و ریزدانه.

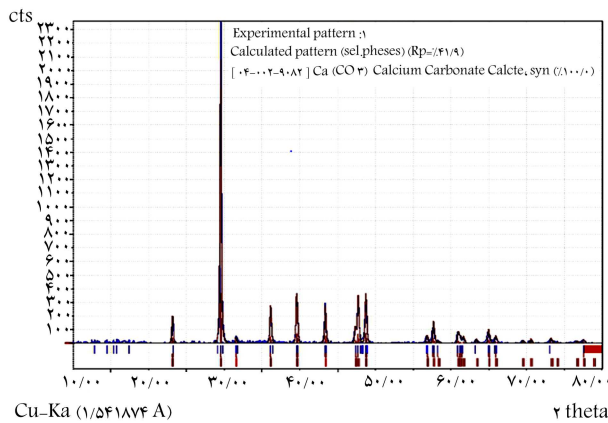
نوع سنگ دانه	چگالی نسبی (SSD)	وزن مخصوص خشک (kg/m ³)	رطوبت نسبی (%)	رطوبت SSD (%)	مدول نرمی
درشت دانه	۲/۶۸	۱۶۲۰	≈ ۰	۰/۴۵	-
ریزدانه	۲/۶۵	۱۶۵۰	≈ ۰	۰۵	۲/۸۶



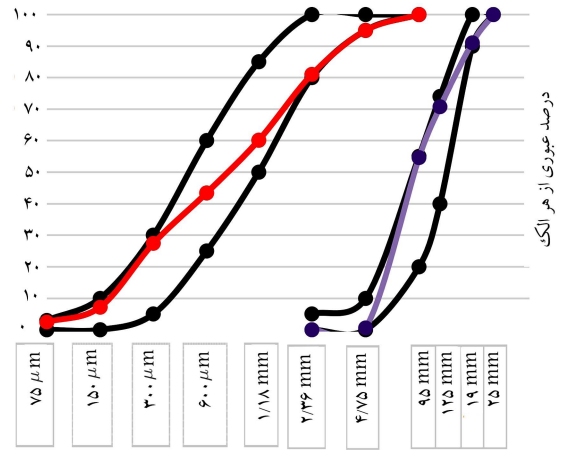
شکل ۳. نمودار دانه بندی ذرات پودر مرمر.



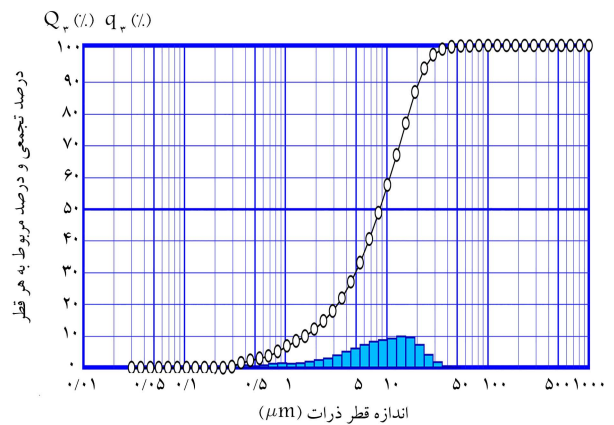
شکل ۴. نمودار دانه بندی ذرات میکروسیلیس.



شکل ۵. XRD پودر مرمر.



شکل ۱. نمودار دانه بندی مصالح سنگی.



شکل ۲. نمودار دانه بندی ذرات سیمان.

جاده‌ی کلات (حومه‌ی شهر مشهد) تأمین شده است. دانه بندی و مشخصات آنها مطابق با استانداردهای ASTM C ۱۳۶^[۱۸]، ASTM C ۲۷۸^[۱۹] و ASTM ۱۲۷^[۲۰]، C^[۲۰] به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است.

بیشینه‌ی اندازه‌ی اسمی درشت دانه‌ی مصرفی ۱۹ میلی‌متر بوده است. سیمان پرتلند نوع II مصرفی از کارخانه‌ی سیمان مشهد، میکروسیلیس از شرکت فروسیلیس ایران واقع در سمنان و پودر مرمر از ضایعات سنگ‌بری بهبودی واقع در ابتدای جاده‌ی شاندیز (سنگ مرمر سنگ‌بری بهبودی از معدن سنگ مرمر کارده واقع در ۳۶ کیلومتری شمال مشهد استخراج می‌شود) تهیه و از فوق روان‌کننده بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات‌تر برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. نمودار دانه بندی سیمان، میکروسیلیس و پودر مرمر در شکل‌های ۲ الی ۴ مشاهده می‌شود. مشخصات شیمیایی، فیزیکی و دانه بندی سیمان، میکروسیلیس و پودر مرمر در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. همچنین نتایج آنالیز XRD پودر مرمر در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

۲.۲. مشخصات طرح‌های اختلاط

طراحی طرح اختلاط بتن در پژوهش حاضر با استفاده از روش حجمی استاندارد ACI-۲۱۱-۲^[۲۱] انجام شده است. ترکیب مخلوط‌های ساخته شده در جدول

جدول ۲. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان، میکروسیلیس و پودر مرمر.

مشخصات فیزیکی و شیمیایی	سیمان	میکروسیلیس	پودر مرمر
SiO ₂ (%)	۲۱/۶۳	۹۵-۹۰	۰/۱۲
Al ₂ O ₃ (%)	۴/۲۷	۰/۶-۱/۲	۰/۰۹
Fe ₂ O ₃ (%)	۳/۴۵	۰/۳-۱/۳	۰/۲۱
TiO ₂ (%)	-	-	ندارد
CaO(%)	۶۳۲۵	۰/۵-۱/۵	۵۵/۶۴
MgO(%)	۲/۷۷	۰/۵-۲	۰/۰۸
Na ₂ O(%)	-	۰/۳-۰/۵	۰/۰۱
MnO(%)	-	۰/۰۲-۰/۰۷	-
K ₂ O(%)	-	۰/۲-۰/۵	ندارد
C(%)	-	۰/۲-۰/۴	-
C ₂ A(%)	۵/۴۸	-	-
C ₂ S(%)	۵۴	-	-
C ₃ S(%)	۲۳	-	-
SO ₃ (%)	۲/۰۲	-	-
P ₂ O ₅ (%)	-	۰/۰۴	-
LOI(%)	۱/۵	۰/۴-۳	۴۳/۷۶
رطوبت (%)	-	۰/۰۱-۰/۴	-
pH	-	۶/۸-۸	-
جرم مخصوص (g/cm ³)	۳/۲	۱/۹	۲/۵
سطح مخصوص (m ² /gr)	-	۲۰-۲۵	-
چگالی حجمی (kg/m ³)	-	۳۰۰-۵۰۰	-
مقاومت فشاری (kgf/cm ²)	-	-	۵۵۰
نقطه ذوب (°C)	-	۱۲۳۰	-
شکل	-	کروی	-
ساختار	-	آمورف	-

جدول ۳. مشخصات دانه بندی سیمان، میکروسیلیس و پودر مرمر.

مقدار ذرات	قطر ذرات (میکرومتر)		
	سیمان	میکروسیلیس	پودر مرمر
٪۱۰	۱/۵۸۳	۰/۳۰۵	۰/۹۹۱
٪۵۰	۸/۶۶۸	۰/۶۷۸	۴/۷۴۷
٪۸۷	۲۹/۸۵۰	۱۰/۲۶۲	۱۲/۸۶۶
میانگین	۸/۶۶۸	۰/۶۸۷	۴/۷۴۷

۴ ارائه شده است. ساخت نمونه‌ها، شامل ماتریسی از درصدهای مختلف وزنی ضایعات پودر مرمر (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد) و میکروسیلیس (۰، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد) است، که در هر سری درصدهای وزنی مختلف ضایعات پودر مرمر و میکروسیلیس جایگزین سیمان شده است. حجم تغییر یافته ناشی از جایگزینی وزنی پودر مرمر و میکروسیلیس به جای سیمان از طریق تغییر حجم ریزدانه و نسبت به طرح اختلاط شاهد جبران شده است. همچنین در تمامی طرح‌ها برای ثابت نگه داشتن اسلامپ در بازه ۱۰ ± ۸۰ میلی‌متر، مقدار فوق روان‌کننده تغییر داده شده است. در جدول ۵، توضیحات علائم اختصاری طرح‌های اختلاط ارائه شده است.

۳.۲. آزمایش‌های انجام شده

بیشتر آزمایش‌ها مطابق با استانداردهای BS و ASTM انجام شده است، که در بخش حاضر به آنها اشاره شده است. در تمامی موارد، نمونه‌گیری‌ها بر طبق استانداردهای ASTM C۱۷۲ [۲۱] و BS EN ۱۲۳۹۰ انجام و در تمامی آزمایش‌ها، نتایج بر اساس میانگین نتیجه‌ی آزمایش بر روی ۳ نمونه گزارش شده است. استانداردهای استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها عبارت‌اند از:

- اسلامپ: ASTM C۱۴۳ [۲۲].
- وزن مخصوص بتن تازه: ASTM C۱۳۸ [۲۳].
- مقاومت فشاری: BS EN ۱۲۳۹۰-۱-۲-۳ [۲۷-۲۵].
- مقاومت کششی: ASTM C ۴۹۶ [۲۸].
- مدول کشسانی: ASTM C۴۶۹ [۲۹].

۳. تحلیل زیست‌محیطی نمونه‌ها

میزان پتانسیل گرمایش جهانی، میزان پتانسیل اسیدی شدن و میزان پتانسیل تقلیلی سوخت‌های فسیلی برای تولید نمونه‌ها به عنوان شاخص‌های زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است. همچنین برای ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی، تمامی شاخص‌ها تا مرحله‌ی ساخت بتن و بدون در نظرگیری حمل و نقل محاسبه شده است.

در راستای کمی کردن پدیده‌ی گرمایش جهانی، سازمان حفاظت از محیط زیست امریکا (US.EPA) معیاری به عنوان توانایی گرمایش جهانی (GWP) تعریف کرده است، که طبق آن توانایی یک ماده در گرمایش جهانی عبارت است از مقدار گاز گلخانه‌یی وارد شده به محیط زیست در طول چرخه‌ی عمر آن ماده، این تعریف به صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

$$\text{شاخص} = \sum m_i \times GWP_i \quad (1)$$

که در آن، i تعداد جریان‌ها در تولید ماده، m_i جرم جریان تولیدی بر حسب گرم، و GWP_i گرم دی‌اکسید کربن معادل با توانایی یکسان در گرمایش زمین در یک دوره‌ی عمر ۱۰۰ ساله. مقادیر GWP_i در جدول ۶ ارائه شده است. [۳۰]

گازهای گلخانه‌یی گوناگونی وجود دارند که نقش در اسیدی شدن محیط زیست دارند و بهترین راه برای اندازه‌گیری میزان مداخله‌ی آنها، تعیین وزن پتانسیل هر کدام از گازهای گلخانه‌یی در اسیدی کردن محیط زیست است. وزن و میزان اثر هر کدام از گازها در اسیدی کردن محیط زیست بر مبنای میزان اثر گوگرد دی‌اکسید در اسیدی کردن محیط زیست معادل‌سازی می‌شود. شاخص اسیدی‌شدن به صورت رابطه‌ی ۲ بیان می‌شود.

$$\text{شاخص اسیدی شدن} = \sum m_i \times AP_i \quad (2)$$

که در آن، i تعداد جریان‌ها در تولید ماده، m_i جرم جریان تولیدی بر حسب گرم و AP_i گرم گوگرد دی‌اکسید معادل با توانایی یکسان در اسیدی کردن. مقادیر AP_i در جدول ۷ ارائه شده است. [۳۰]

برای کمی کردن اثر پتانسیل تقلیل سوخت‌های فسیلی نیز مقدار انرژی لازم برای بازسازی ۱ کیلوگرم از هر یک از انواع سوخت‌های فسیلی به عنوان (FP) در نظر

جدول ۴. علامت‌های اختصاری

شماره	طرح اختلاط	سیمان (kg/m ^۳)	آب (kg/m ^۳)	فوق روان‌کننده (kg/m ^۳)	میکروسیلیس (kg/m ^۳)	پودر مرمر (kg/m ^۳)	درشت‌دانه (kg/m ^۳)	ریزدانه (kg/m ^۳)	اسلامپ (میلی‌متر)
۱	O	۴۰۰	۱۸۰	۱/۳	۰	۰	۱۰۰۰	۷۹۳	۸۵
۲	M۵	۳۸۰	۱۸۰	۱/۳	۰	۲۰	۱۰۰۰	۷۸۶	۸۵
۳	M۱۰	۳۶۰	۱۸۰	۱/۳۵	۰	۴۰	۱۰۰۰	۷۷۸	۹۰
۴	M۲۰	۳۲۰	۱۸۰	۱/۳۵	۰	۸۰	۱۰۰۰	۷۶۳	۷۵
۵	SF۲/۵	۳۹۰	۱۸۰	۱/۴۵	۱۰	۰	۱۰۰۰	۷۸۹	۸۰
۶	SF۲/۵M۵	۳۷۰	۱۸۰	۱/۴۵	۱۰	۲۰	۱۰۰۰	۷۸۲	۹۰
۷	SF۲/۵M۱۰	۳۵۰	۱۸۰	۱/۴۲۵	۱۰	۴۰	۱۰۰۰	۷۷۴	۹۰
۸	SF۲/۵M۲۰	۳۱۰	۱۸۰	۱/۴۲۵	۱۰	۸۰	۱۰۰۰	۷۵۹	۸۵
۹	SF۵	۳۸۰	۱۸۰	۱/۴۵	۲۰	۰	۱۰۰۰	۷۸۶	۹۰
۱۰	SF۵M۵	۳۶۰	۱۸۰	۱/۴۵	۲۰	۲۰	۱۰۰۰	۷۷۸	۸۰
۱۱	S۵FM۱۰	۳۴۰	۱۸۰	۱/۴۷۵	۲۰	۴۰	۱۰۰۰	۷۷۱	۹۰
۱۲	SF۵M۲۰	۳۰۰	۱۸۰	۱/۴۷۵	۲۰	۸۰	۱۰۰۰	۷۵۶	۹۰
۱۳	SF۱۰	۳۶۰	۱۸۰	۱/۶	۴۰	۰	۱۰۰۰	۷۷۸	۸۵
۱۴	SF۱۰M۵	۳۴۰	۱۸۰	۱/۷	۴۰	۲۰	۱۰۰۰	۷۷۱	۹۰
۱۵	SF۱۰M۱۰	۳۲۰	۱۸۰	۱/۷	۴۰	۴۰	۱۰۰۰	۷۶۳	۸۵
۱۶	SF۱۰M۲۰	۲۸۰	۱۸۰	۱/۸۲۵	۴۰	۸۰	۱۰۰۰	۷۴۸	۸۰

جدول ۵. توضیحات علائم اختصاری.

علائم اختصاری در طرح‌های اختلاط	توضیحات	مثال
OC	طرح اختلاط شاهد	طرح اختلاط بدون میکروسیلیس و پودر سنگ مرمر
SF _x	طرح اختلاط حاوی X درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان	SF۵: طرح اختلاط حاوی ۵٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان
M _Y	طرح اختلاط حاوی Y درصد پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان	M۵: طرح اختلاط حاوی ۵٪ پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان
SF _x M _Y	طرح اختلاط حاوی X درصد میکروسیلیس و Y درصد پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان	SF۵M۱۰: طرح اختلاط حاوی ۵٪ میکروسیلیس و ۱۰٪ درصد پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان

جدول ۶. مقادیر GWP_i [۳۰]

جریان	CO _۲ معادل (GWPi)
CO _۲	۱
CH _۴	۲۳
N _۲ O	۲۹۶

جدول ۷. مقادیر AP_i [۳۰]

جریان	CO _۲ معادل (GWPi)
SO _۲	۱/۰۰
NO	۱/۰۷
NO _۲	۰/۷۰
NH _۳	۱/۸۸
HCl	۰/۸۸
HF	۱/۶۰

گرفته شده است. شاخص پتانسیل تقلیل سوخت‌های فسیلی به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود:

$$\text{شاخص پتانسیل تقلیل سوخت‌های فسیلی} = \sum c_i \times FP_i \quad (۳)$$

که در آن، C_i میزان سوخت مصرفی جریان i بر حسب کیلوگرم و FP_i مقدار انرژی

جدول ۸. پتانسیل مصرف سوخت فسیلی FP_i [۳۰]

جریان	(FP_i)
زغال سنگ	۰/۲۵
نفت خام	۶/۱۲
گاز طبیعی	۷/۸۰

جدول ۹. میزان پتانسیل گرمایش جهانی و پتانسیل اسیدی شدن برای تولید و آماده‌سازی اجزاء مختلف بتن.

تولید (کیلوگرم)	میزان انتشار به هوا (کیلوگرم)	AP_i	GWP_i
سیمان	۰/۸۸۵	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۰۰۲
سنگ‌دانه‌ها	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲
آب	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۰۰۴۵
فوق روان‌کننده	۱/۱۱	۰/۰۰۴۸۱	۰/۰۰۴۸۱

لازم برای بازسازی سوخت i بر حسب مگاژول بر کیلوگرم است. مقادیر FP_i در جدول ۸ ارائه شده است.

در پژوهش حاضر، میزان پتانسیل گرمایش جهانی، پتانسیل اسیدی شدن و پتانسیل تقلیل سوخت‌های فسیلی برای تولید و آماده‌سازی هر یک از اجزاء بتن با استفاده از اطلاعات گذشته به صورت جداگانه محاسبه شده است. [۳۱-۳۵] لازم به ذکر است که با توجه به عدم وجود داده‌های مورد نیاز برای محاسبه‌ی آثار زیست‌محیطی، برای گسترش شاخص‌ها از داده‌ها و اطلاعات مربوط به گزارش‌های مشابه استفاده شده است. در بعضی موارد، میانگین اطلاعات چندین گزارش و در بعضی، بدترین سناریو استفاده شده است. آب، ماسه، شن و افزودنی‌ها حدود ۹۰٪ وزن بتن را تشکیل می‌دهند. فرایند استخراج و شکستن سنگ‌دانه‌ها، ترکیب مواد در کارخانه و حمل بتن به محل بتن‌ریزی نیاز به انرژی بسیار اندکی دارد و بنابراین مقادیر بسیار کمی دی‌اکسیدکربن در طی این مراحل به اتمسفر منتشر خواهد شد. میزان قابل توجه انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از ساخت بتن، ارتباط مستقیمی با میزان سیمان ترکیب دارد. [۳۶] با این حال، میزان دی‌اکسیدکربن مربوط به فرایندهای تهیه و تولید سنگ‌دانه‌ها و افزودنی‌ها نیز با استفاده از اطلاعات گزارش‌های موجود در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که اثر تولید میکروسیلیس و پودر مرمر در محاسبات لحاظ نشده است؛ چرا که دو ماده‌ی مذکور به گونه‌ی ضایعات تلقی می‌شوند و برای تولید آنها گاز گلخانه‌ی بی‌هوا انتشار نمی‌یابد و انرژی نیز مصرف نمی‌شود. [۳۰، ۳۲، ۳۹] در نهایت با استفاده از داده‌های جدول‌های ۹ و ۱۰ و شاخص‌های گرمایش جهانی، اسیدی شدن و تقلیل سوخت‌های فسیلی، شاخص‌های ۴ تا ۶ گسترش یافته است. مقادیر جدول‌های ۹ و ۱۰ با استفاده از گزارش‌ها، اعلامیه‌های زیست‌محیطی مواد U(EDP) و مطالعات پیشین به دست آمده‌اند.

$$GWP_i = (0/885 \times C_i) + (0/0032 \times A_i) + (0/0025 \times W_i) + (1/11 \times SP_i) \quad (4)$$

$$AP_i = (0/0053 \times C_i) + (0/00002 \times A_i) + (0/0045 \times W_i) + (0/0045 \times SP_i) \quad (5)$$

جدول ۱۰. میزان پتانسیل تقلیل سوخت‌های فسیلی برای تولید و آماده‌سازی اجزاء مختلف بتن.

تولید (کیلوگرم)	انرژی (مگاژول)	زغال سنگ	نفت خام	گاز طبیعی	FP_i
سیمان	۳/۳۷	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۵۳	۱/۴۹	۰/۰۰۰۶۳
سنگ‌دانه‌ها	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱
آب	-	-	-	-	۰/۰۱
فوق روان‌کننده	۱/۷	۳/۲	۸/۲	۸۳/۹۷	۰/۰۱

$$FP_i = (1/49 \times C_i) + (0/00063 \times A_i) + (0/00002 \times W_i) + (83/97 \times SP_i) \quad (6)$$

که در آن، GWP_i پتانسیل گرمایش جهانی طرح اختلاط i ام (کیلوگرم دی‌اکسیدکربن معادل)؛ AP_i پتانسیل اسیدی شدن طرح اختلاط i ام (کیلوگرم گوگرد دی‌اکسید معادل)؛ FP_i پتانسیل تقلیل سوخت‌های فسیلی طرح اختلاط i ام (مگاژول انرژی معادل)؛ C_i میزان سیمان طرح اختلاط i ام (kg/m^3)؛ SP_i میزان فوق روان‌کننده‌ی طرح اختلاط i ام (kg/m^3)؛ W_i میزان آب طرح اختلاط i ام (kg/m^3)؛ A_i میزان سنگ‌دانه‌ی طرح اختلاط i ام (kg/m^3).

با توجه به اهمیت زیاد هر ۳ پارامتر، ضریب هر سه‌ی آنها، ۱ در نظر گرفته شده و پس از نرمال کردن هر یک از شاخص‌ها، شاخص زیست‌محیطی تلفیقی برای هر یک از طرح‌ها با استفاده از رابطه‌ی ۷ محاسبه شده است.

$$EnvScore_i = \sum_{k=1}^p IAScore_{ik} \quad (7)$$

که در آن، $EnvScore_j$ امتیاز عملکرد زیست‌محیطی برای محصول (طرح اختلاط) i ام؛ P تعداد رده‌های تأثیر زیست‌محیطی (در پژوهش حاضر، سه رده‌ی گرمایش زمین، اسیدی شدن و تقلیل سوخت فسیلی در نظر گرفته شده است) و $IAScore_{ik}$ امتیاز نرمال و وزن‌دهی شده برای محصول (طرح اختلاط) i ام در رده‌ی زیست‌محیطی k ام، که مطابق رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود:

$$IAScore_{ik} = \frac{IA_{ik} \times IV_{wtk}}{\max\{IA_{1k}, IA_{2k}, \dots, IA_{mk}\}} \times 100 \quad (8)$$

که در آن، IV_{wtk} وزن اهمیتی رده‌ی k ام؛ m تعداد محصولات (طرح‌های اختلاط)؛ IA_{ik} امتیاز خام رده‌ی تأثیر زیست‌محیطی k برای محصول (طرح اختلاط) i ام، و $IA_{1k} = GWP_i$ ؛ $IA_{2k} = AP_i$ ؛ $IA_{3k} = FP_i$.

۴. تحلیل اقتصادی نمونه‌ها

به منظور آنالیز اقتصادی هر یک از طرح‌های اختلاط، هزینه‌ی مصالح استفاده شده با استفاده از گزارش‌های فروشندگان و شرکت‌های تولیدکننده به صورتی که در جدول ۱۱ ارائه شده است، استفاده شد. از آنجایی که پودر مرمر استفاده شده در پژوهش حاضر، نوعی ضایعات است و هیچ بهایی ندارد، هزینه‌ی برای تولید آن در نظر گرفته نشده است.

با استفاده از اطلاعات جدول ۱۱، شاخص امتیاز عملکرد اقتصادی طرح

جدول ۱۱. هزینه‌ی مصالح و مواد استفاده شده در ساخت نمونه‌ها.

ماده (کیلوگرم)	قیمت (ریال)
سیمان	۱۵۰۰
میکروسیلیس	۱۰۰۰۰
فوق روان‌کننده	۶۷۰۰۰
سنگ‌دانه	۱۵۰
آب	۵

اختلاف i ام مطابق رابطه‌ی ۹ گسترش یافته است:

$$Cost_i = (1 \times C_i) + (6/67 \times SF_i) + (0/0034 \times W_i) + (0/1 \times A_i) + (45 \times SP_i) \quad (9)$$

که در آن، $Cost_i$ امتیاز عملکرد اقتصادی طرح اختلاف i ام؛ C_i میزان سیمان طرح اختلاف i ام (kg/m^3)؛ SF_i میزان میکروسیلیس طرح اختلاف i ام (kg/m^3)؛ SP_i میزان فوق روان‌کننده‌ی طرح اختلاف i ام (kg/m^3)؛ W_i میزان آب طرح اختلاف i ام (kg/m^3)؛ و A_i میزان سنگ‌دانه‌ی طرح اختلاف i ام (kg/m^3) برای هر یک از طرح‌های اختلاف، شاخص اقتصادی محاسبه و در قسمت تحلیل و بررسی نتایج، تحلیل شده است.

۶. تحلیل و بررسی نتایج

۱.۶. اسلامپ

نتایج آزمایش اسلامپ در جدول ۳ ارائه شده است. با افزایش میزان جایگزینی پودر مرمر و میکروسیلیس با سیمان، اسلامپ بتن کاهش یافته است؛ که برای جبران آن، اسلامپ و حفظ اسلامپ مخلوط‌ها در بازه‌ی 10 ± 80 مورد نظر، میزان فوق روان‌کننده به مقدار اندکی متناسب با میزان افزایش جایگزینی افزایش یافته است. تأثیر میکروسیلیس در مقایسه با پودر مرمر در کاهش اسلامپ بتن چشمگیرتر بوده است. این کاهش اسلامپ در مخلوط‌های حاوی پودر مرمر و میکروسیلیس به دلیل ریزتر بودن ذرات پودر مرمر و میکروسیلیس در مقایسه با سیمان و کاهش فضای خالی در مخلوط‌های بتن است. سطح مخصوص بزرگ پودر مرمر و میکروسیلیس کارایی بتن را کاهش می‌دهد. همان‌طور که آزمایش‌های دانه‌بندی نشان می‌دهند، به طور میانگین ذرات پودر مرمر و میکروسیلیس به ترتیب ۲ و ۱۱ برابر ریزتر از ذرات سیمان هستند. بیشترین مقدار فوق روان‌کننده برای نمونه استفاده شده است. برخی پژوهش‌های پیشین^[۲۷، ۲۸] نیز نتایجی مشابه با نتایج مطالعه‌ی حاضر در خصوص تأثیر میکروسیلیس و پودر مرمر در روانی بتن را گزارش داده‌اند.

۲.۶. وزن مخصوص

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، وزن مخصوص بتن تا ۵٪ جایگزینی سیمان با پودر مرمر افزایش یافته است. علت این افزایش وزن مخصوص را می‌توان به پراکندگی بهتر ذرات ریز پودر مرمر و سیمان در مخلوط بتن و پُر شدن خلل و فرج و متراکم‌تر شدن مخلوط نسبت داد. اما برای درصد‌های جایگزینی پودر مرمر بیشتر از ۵٪ این روند تغییر کرده و رو به کاهش بوده است. علت این کاهش وزن مخصوص، وزن مخصوص کمتر پودر مرمر در مقایسه با سیمان است.

افزایش جایگزینی میکروسیلیس با سیمان تغییر چشمگیری در وزن مخصوص مخلوط‌ها نسبت به بتن شاهد ایجاد نکرده است. میکروسیلیس نیز همانند پودر مرمر می‌تواند نقش یک پُرکننده را در بتن ایفا کند و خلل و فرج بسیار ریز بتن را، که ذرات سیمان قادر به پُر کردن آنها نیستند، پُر کند. به‌طور کلی جایگزینی‌های پودر مرمر و میکروسیلیس با سیمان، تأثیر قابل توجهی در وزن مخصوص بتن نداشته و بیشینه‌ی میزان اختلاف بین وزن مخصوص بتن شاهد و سایر مخلوط‌ها در حدود ۱/۵٪ بوده است. رودریگز و همکاران (۲۰۱۵)^[۱]، به نتایجی مشابه با نتایج آزمایش مذکور در خصوص وزن مخصوص نمونه‌های بتنی حاوی پودر مرمر دست یافته‌اند.

۳.۶. مقاومت فشاری

در شکل ۷، نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۸۰ روزه مشاهده می‌شود. از هر نمونه، ۳ آزمون در هر سن آزمایش و میانگین آنها ثبت شد. نتایج آزمایش نشان دادند که با افزایش درصد جایگزینی پودر مرمر، مقاومت فشاری کاهش یافته است. جایگزینی ۵٪ پودر مرمر، مقاومت فشاری را در حدود ۴٪ افزایش داده است، که علت آن را می‌توان با خاصیت پُرکنندگی پودر مرمر و ایجاد هسته‌یی مناسب برای تسریع هیدراسیون توضیح داد. مقاومت فشاری نمونه‌های $M10$ و $M20$ به ترتیب در حدود ۳ و ۱۳ درصد در مقایسه با بتن شاهد، به دلیل کاهش

۵. شاخص تلفیقی زیست‌محیطی، اقتصادی و مکانیکی

در نهایت برای ارزیابی هم‌زمان هر یک از طرح‌های اختلاف از دیدگاه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و مکانیکی (مقاومت فشاری ۲۸ روزه به عنوان شاخص مکانیکی استفاده شد)، شاخص ECM_i گسترش یافته است. لیبیات^[۲۰] (۲۰۰۷)، بیان کرده است که وزن شاخص اقتصادی و زیست‌محیطی در کشورهای در حال توسعه یکسان است. از طرفی در محاسبه‌ی عملکرد بتن، مقاومت فشاری یکی از مهم‌ترین معیارهاست. در نتیجه، ضریب اهمیت هر سه پارامتر، عدد ۱ در نظر گرفته شد، تا هر یک از پارامترها سهم برابری را در نتیجه‌ی نهایی داشته باشند. اما با توجه به موقعیت مکانی و زمانی می‌توان ضرایب اهمیت متفاوتی را برای هر یک از پارامترها در نظر گرفت.

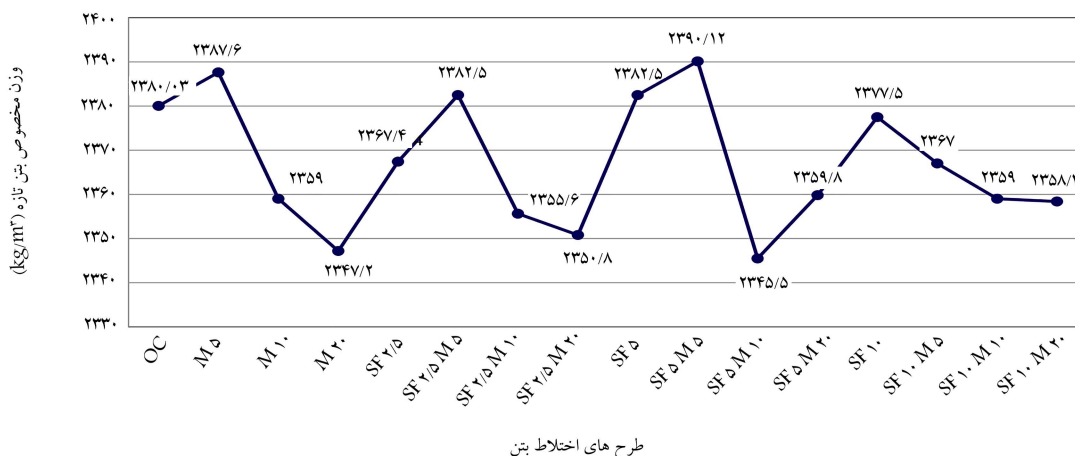
$$ECM_i = \frac{Mec_{in}}{EnvScore_{in} + Cost_{in}} \quad (10)$$

$$EnvScore_{in} = \frac{EnvScore_i}{MAX \{EnvScore_1, EnvScore_2, \dots, EnvScore_m\}} \quad (11)$$

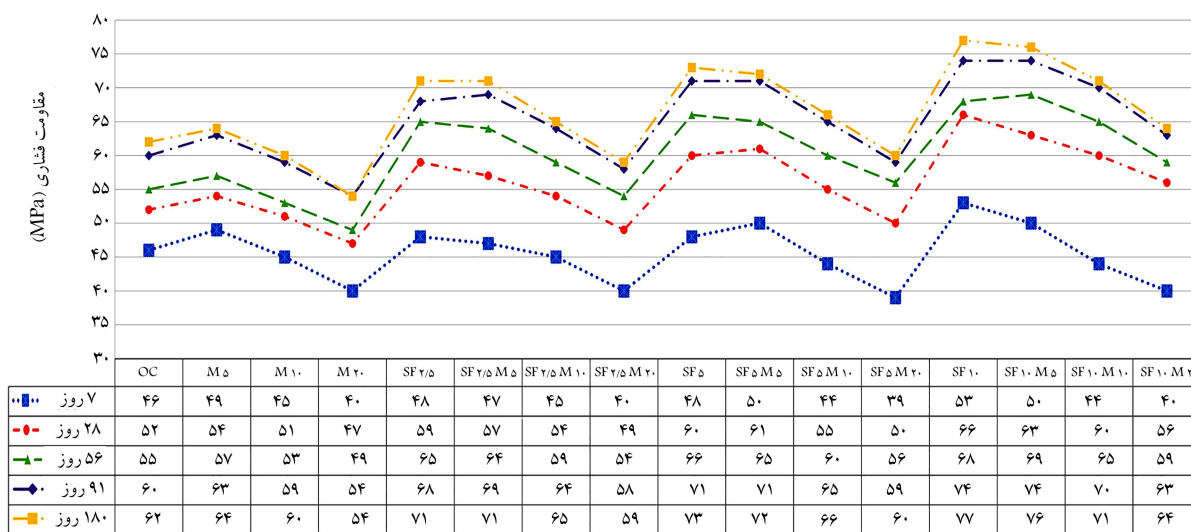
$$Cost_{in} = \frac{Cost_i}{MAX \{Cost_{11}, Cost_{12}, \dots, Cost_{1m}\}} \quad (12)$$

$$Mec_{in} = \frac{Mec_i}{MAX \{Mec_1, Mec_2, \dots, Mec_m\}} \quad (13)$$

که در آنها، ECM_i شاخص تلفیقی پارامترهای اقتصادی، زیست‌محیطی و مکانیکی طرح اختلاف i ام؛ $EnvScore_{in}$ امتیاز عملکرد زیست‌محیطی نرمال شده‌ی طرح اختلاف i ام؛ $Cost_{in}$ امتیاز عملکرد اقتصادی نرمال شده‌ی طرح اختلاف i ام؛ Mec_{in} مقاومت فشاری ۲۸ روزه نرمال شده‌ی طرح اختلاف i ام و m تعداد طرح‌های اختلاف.



شکل ۶. وزن مخصوص بتن تازه.



شکل ۷. مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۸۰ روزه.

کرده‌اند. در این حالت میزان افزایش مقاومت به میزان هیدراسیون کلینکر، فعالیت پوزولانی میکروسیلیس و پُرکنندگی پودر مرمر و میکروسیلیس بستگی دارد.

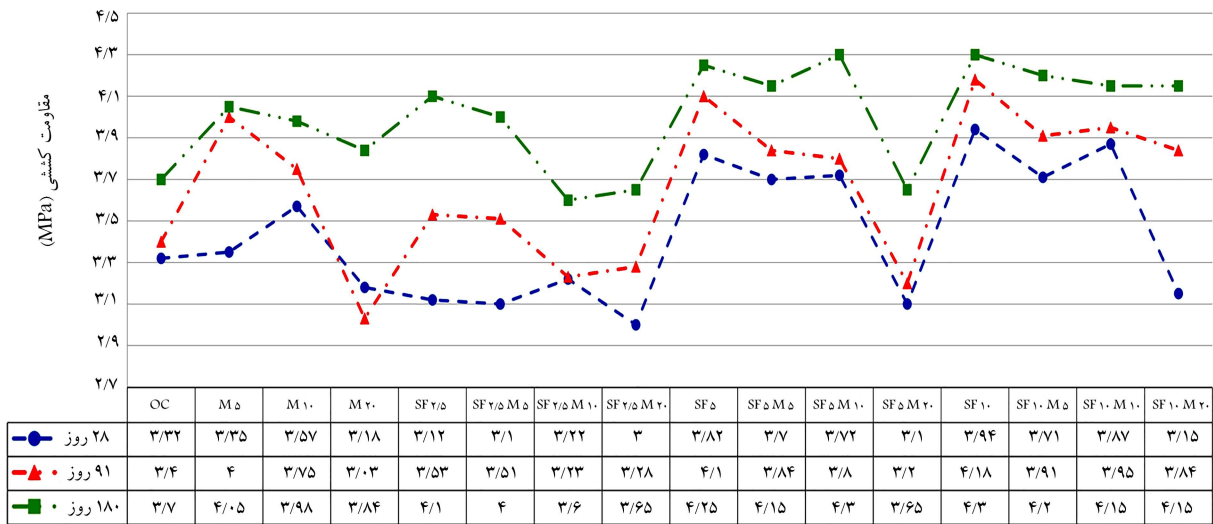
۴.۶. مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی به روش برزیلی انجام شده است، که در آن مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌یی 100×200 میلی‌متری تمامی طرح‌های اختلاط در سنین ۲۸، ۹۱ و ۱۸۰ روزه آزمایش و بررسی شدند و نتایج آنها در شکل ۸ مشاهده می‌شود. مقاومت کششی نمونه‌ی حاوی ۲/۵٪ میکروسیلیس در سنین اولیه، رشد کمی داشته است؛ ولی با افزایش سن، به ۱/۱۱ برابر مقاومت نمونه‌ی شاهد رسیده است. مقاومت کششی نمونه‌های ۱۸۰ روزه حاوی ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس، افزایش قابل توجهی در مقایسه با نمونه‌ی شاهد در حدود ۱۶٪ داشته‌اند. دیلباس و همکاران (۲۰۱۴)^[۱۲] به روندی مشابه برای رشد مقاومت کششی، با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس در سن ۲۸ روزه دست یافته‌اند.

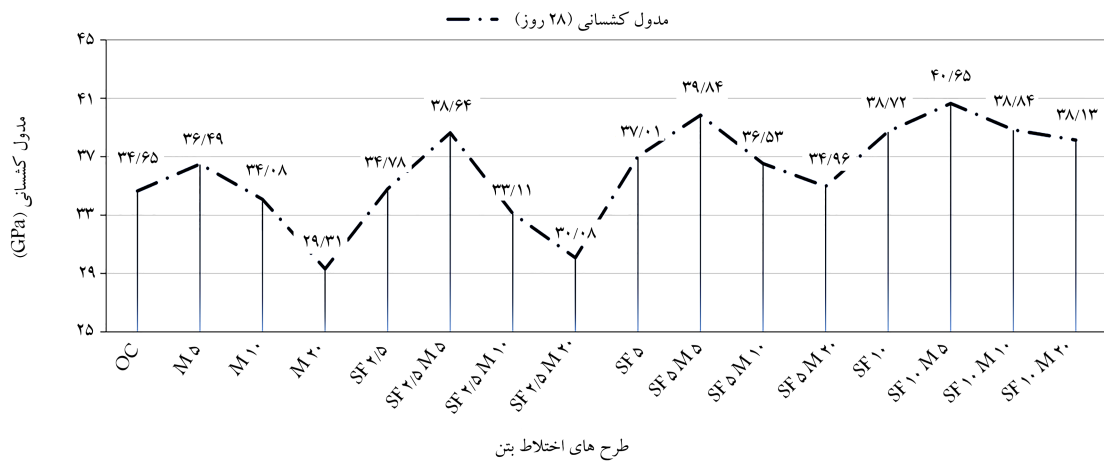
مواد سیمانی (تری‌کلسیم سیلیکات و دی‌کلسیم سیلیکات که عمدتاً مسئول افزایش مقاومت بتن هستند)، کاهش یافته است. برخی پژوهش‌های پیشین^[۴] نیز نتایجی مشابه با نتایج پژوهش حاضر را در خصوص تأثیر پودر مرمر در مقاومت فشاری بتن گزارش داده‌اند.

میزان افزایش مقاومت بتن حاوی میکروسیلیس به میزان جایگزینی آن با سیمان و سن بتن بستگی دارد. مقاومت فشاری نمونه‌های SF 2/5، SF 5، و SF 10 به ترتیب در حدود ۱۵، ۱۸ و ۲۴ درصد به دلیل آثار پوزولانی و پُرکنندگی میکروسیلیس افزایش یافته است. مشابه چنین افزایش مقاومتی را برخی پژوهش‌های پیشین^[۱۲، ۱۳، ۱۵] گزارش داده‌اند.

به‌طور کلی استفاده از میکروسیلیس در بتن حاوی پودر مرمر، مقاومت بتن حاوی پودر مرمر را افزایش داده است. در میان نمونه‌های حاوی پودر مرمر و میکروسیلیس، نمونه‌ی SF 10 M5 با ۲۳٪ افزایش مقاومت، بیشترین مقاومت را کسب کرده است. نمونه‌های بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس و ۵ تا ۲۰ درصد پودر مرمر، بیشترین افزایش مقاومت را نشان داده و نمونه‌های حاوی ۲/۵ تا ۵ درصد میکروسیلیس و ۱۰ تا ۲۰ درصد پودر مرمر نیز مقاومت قابل قبولی را در مقایسه با بتن شاهد کسب



شکل ۸. مقاومت کششی در سنین ۲۸، ۹۱ و ۱۸۰ روزه. طرح های اختلاط بتن



شکل ۹. مدول کشسانی در سن ۲۸ روزه. طرح های اختلاط بتن

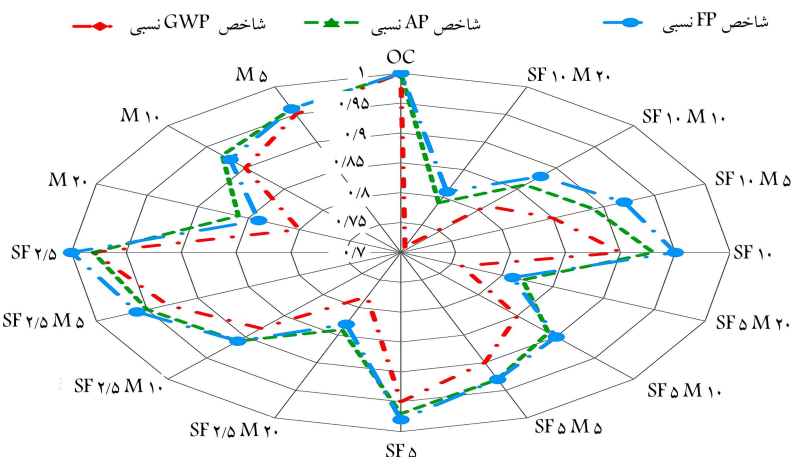
۵.۶. مدول کشسانی

در آزمایش کنونی، مدول کشسانی نمونه های استوانه ای 150×300 میلی متری تمامی طرح های اختلاط در سن ۲۸ روزه، آزمایش و بررسی شدند، که نتایج آنها در شکل ۹ مشاهده می شود. نمونه های حاوی ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد میکروسیلیس به ترتیب به مدول کشسانی ۱، ۱/۰۷ و ۱/۱۲ برابر مدول نمونه شاهد رسیده اند. مظلوم و همکاران (۲۰۰۴)^[۱۵] نتایجی مشابه در خصوص افزایش مدول کشسانی حاصل از افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس را گزارش داده اند. با جایگزینی ۵٪ پودر مرمر، مدول کشسانی ۵٪ افزایش یافته است. در مقایسه با بتن شاهد، کاهش مدول کشسانی نمونه های حاوی ۱۰٪ پودر مرمر ناچیز بوده است؛ اما با ۲۰٪ جایگزینی پودر مرمر، مدول کشسانی ۱۵٪ کاهش یافت. رودریگز و همکاران (۲۰۱۵)^[۱] به نتایجی مشابه با نتایج آزمایش اخیر در خصوص مدول کشسانی نمونه های بتنی حاوی ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد پودر مرمر جایگزین سیمان دست یافته اند.

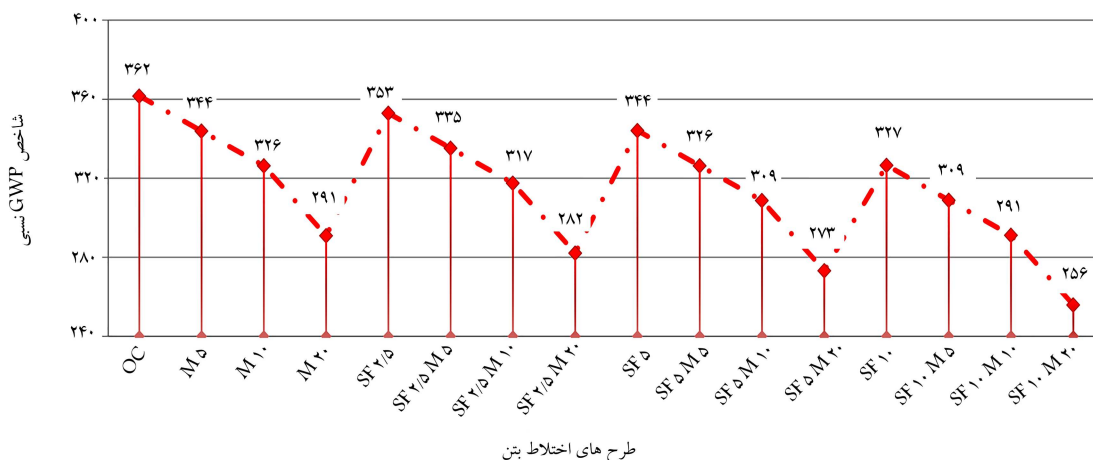
جایگزینی ۲۵٪ میکروسیلیس در نمونه های حاوی پودر مرمر، مدول کشسانی

مقاومت کششی برای جایگزینی سیمان با پودر مرمر تا ۱۰٪ افزایش و برای ۲۰٪ جایگزینی مقاومت کششی کاهش یافته است. در سن ۱۸۰ روزه، نمونه های حاوی پودر مرمر به مقاومت کششی بهتری در مقایسه با نمونه شاهد رسیده اند. علیابندو و همکاران (۲۰۱۴)^[۶] به نتایجی مشابه برای مقاومت کششی نمونه های حاوی درصد های مختلف پودر مرمر تا ۱۵٪ جایگزینی سیمان رسیده اند.

در سنین بالا، نمونه های حاوی پودر مرمر (به ویژه ۵٪ و ۲۰٪ میکروسیلیس به مقاومت کششی قابل قبولی در مقایسه با نمونه شاهد رسیده اند. همچنین نمونه های حاوی ۵٪ میکروسیلیس و ۱۰٪ پودر مرمر تا ۱/۱۶ برابر مقاومت کششی نمونه شاهد رشد مقاومت داشته اند. مقاومت کششی نمونه های حاوی ۲۰٪ پودر مرمر و ۱۰٪ میکروسیلیس در مقایسه با نمونه شاهد با افزایش سن و فعالیت پوزولانی میکروسیلیس از ۹۵/۰ برابر در سن ۲۸ روزه به ۱/۱۲ برابر در سن ۱۸۰ روزه رسیده است. نمونه های حاوی ۵ و ۱۰ درصد جایگزینی پودر مرمر و ۱۰٪ جایگزینی میکروسیلیس در تمامی سنین، رشد قابل توجهی در حدود ۱/۱۶ برابر نمونه شاهد داشته اند.



شکل ۱۰. مقادیر نسبی شاخص‌های AP، GWP و FP.



شکل ۱۱. مقادیر شاخص پتانسیل گرمایش جهانی (GWP).

است، که مقدار شاخص‌های AP، GWP و FP آن به ترتیب ۰/۷۹، ۰/۷۹ و ۰/۸۱ برابر مقدار شاخص‌های طرح اختلاط شاهد است.

۲.۶.۶. ارزیابی اقتصادی

در بخش حاضر، به ارزیابی هزینه‌های تولید هر کدام از طرح‌های اختلاط پرداخته شده است. در شکل ۱۴، شاخص هزینه‌های تولید تمامی طرح‌های اختلاط نسبت به بتن شاهد مشاهده می‌شود، که مطابق آن با افزایش درصد جایگزینی پودر مرمر و میکروسیلیس، هزینه‌ی تولید بتن به ترتیب تا ۱۲٪ کاهش و ۲۷٪ افزایش یافته است. علت آن است که برای تولید پودر مرمر به عنوان یک ضایعات، هزینه‌ی صرف نمی‌شود؛ اما برای تولید میکروسیلیس، هزینه‌ی در حدود ۵ برابر هزینه‌ی تولید سیمان صرف می‌شود. جالب توجه است که در گذشته، میکروسیلیس نیز به عنوان یک پسماند ضایعاتی، بها و ارزشی نداشته و قبل از اواسط دهه‌ی ۷۰ میلادی، میکروسیلیس به اتمسفر تخلیه می‌شده است.

۳.۶.۶. شاخص‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و مکانیکی نرمال شده و

ECM

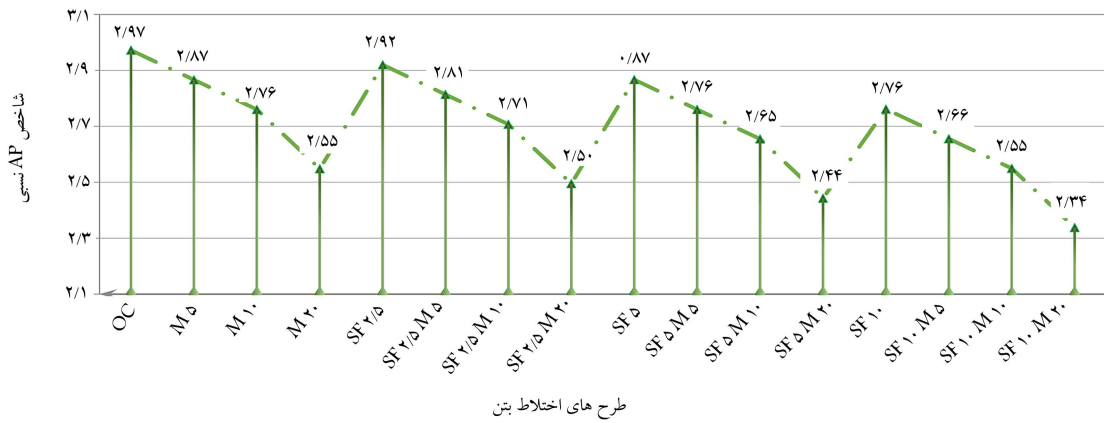
در شکل ۱۵، شاخص‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و مکانیکی نرمال شده مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که شاخص زیست‌محیطی نرمال شده، از نرمال‌سازی حاصل جمع شاخص‌های AP، GWP و FP نرمال شده به دست آمده است.

نمونه‌ی حاوی ۵٪ پودر مرمر را ۱۲٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش داده و نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد، پودر مرمر را اندکی بهبود بخشیده‌اند. جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس، تأثیر قابل توجهی در افزایش مدول نمونه‌های حاوی پودر مرمر داشته‌اند؛ به طوری که مدول نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد پودر مرمر را به ترتیب تا ۱۷/۱، ۱۲/۱ و ۱/۱ برابر نمونه‌ی شاهد افزایش داده‌اند.

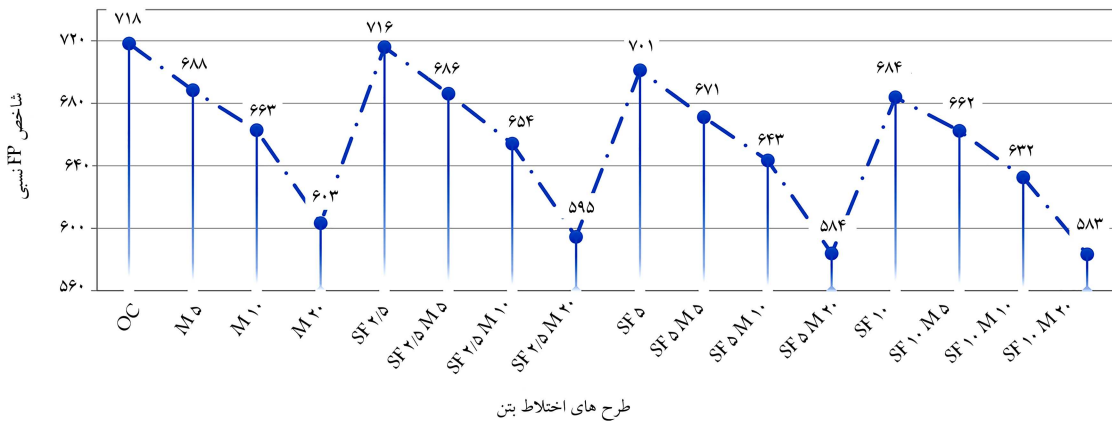
۶.۶. ارزیابی زیست‌محیطی، اقتصادی و مکانیکی

۱.۶.۶. ارزیابی زیست‌محیطی

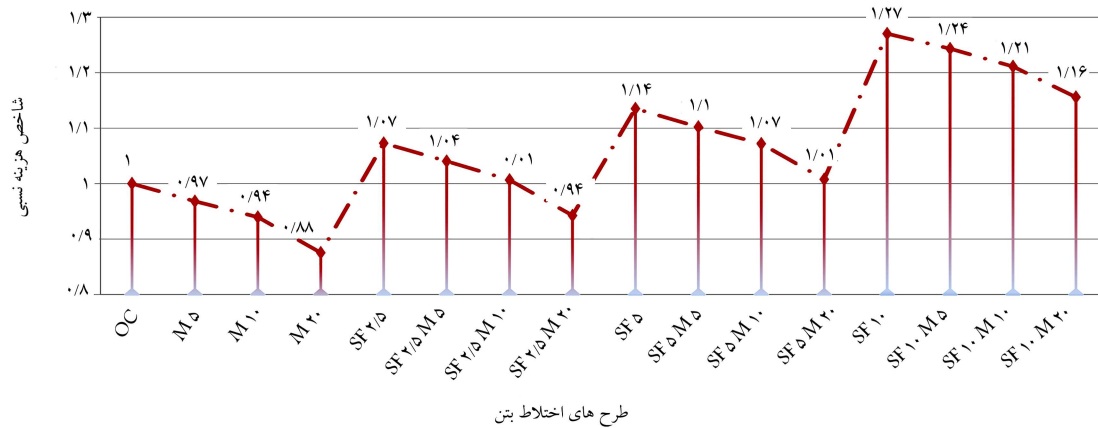
برای ارزیابی شاخص زیست‌محیطی، طرح‌های اختلاط از تلفیق ارزیابی ۳ شاخص پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)، پتانسیل اسیدی شدن (AP) و پتانسیل تقلیل سوخت‌های فسیلی (FP) استفاده شده است. در شکل ۱۰، مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های AP، GWP و FP هر کدام از طرح‌های اختلاط نسبت به مقادیر نمونه‌ی شاهد مشاهده می‌شود. شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ نیز مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های AP، GWP و FP هر کدام از طرح‌های اختلاط را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش درصد جایگزینی پودر مرمر و میکروسیلیس با سیمان، مقدار شاخص‌های AP، GWP و FP کاهش یافته‌اند. کمترین مقدار به دست آمده برای شاخص‌های مذکور متعلق به طرح اختلاط SF10M20 بوده



شکل ۱۲. مقادیر شاخص پتانسیل اسیدی شدن (AP).



شکل ۱۳. مقادیر شاخص پتانسیل تقلیل سوخت های فسیلی (FP).

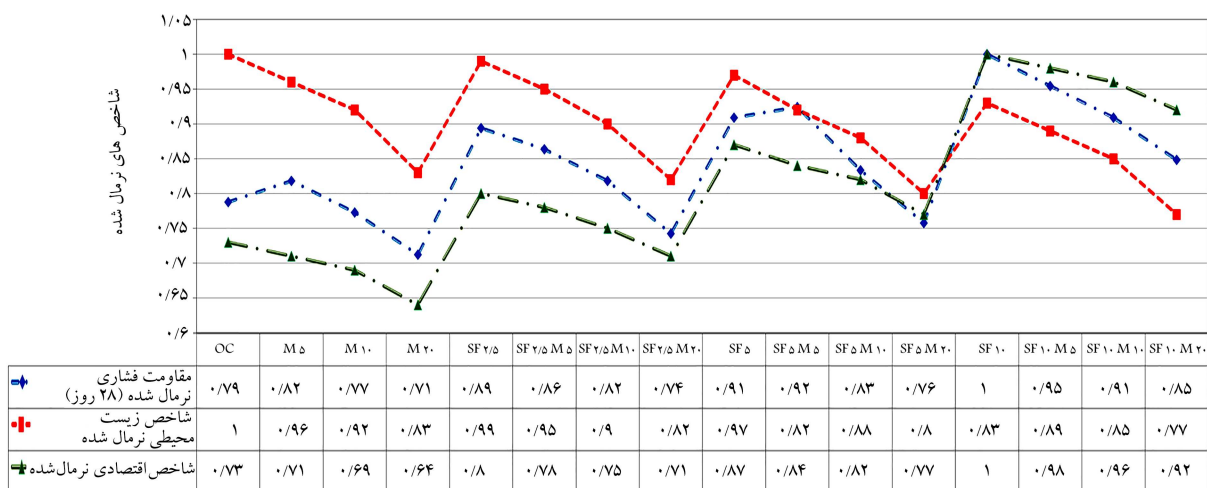


شکل ۱۴. مقادیر نسبی شاخص هزینه.

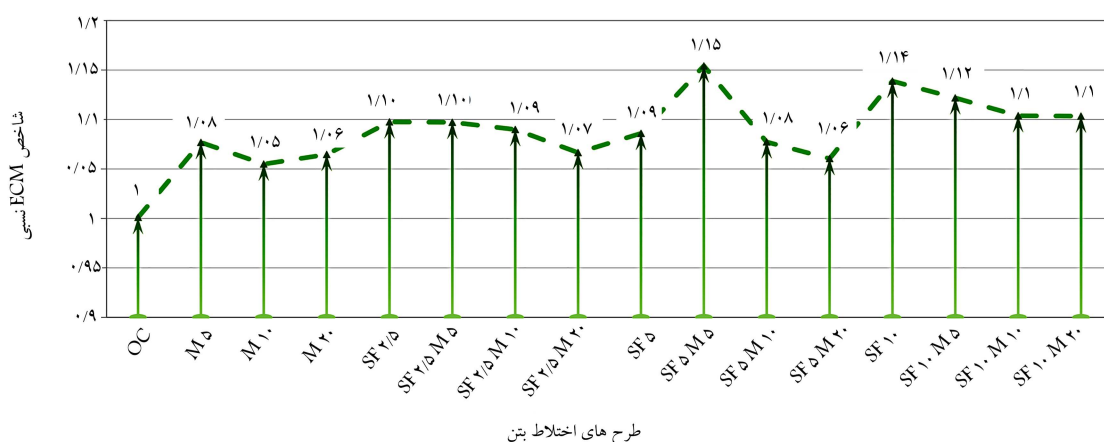
روندی را که شاخص زیست محیطی طی می کند، در مقایسه با روند دو شاخص دیگر کمی متفاوت است. به گونه ای که با افزایش درصد جایگزینی پودر مرمر و میکروسیلیس، روندی نزولی را طی می کنند. علت این روند آن است که با افزایش درصد جایگزینی پودر مرمر و میکروسیلیس با سیمان، مقدار سیمان مصرفی در طرح های اختلاط کاهش می یابد و به دنبال آن میزان انتشار گازهای گلخانه ای و مصرف انرژی نیز کاهش می یابد.

پس از نرمال سازی شاخص های زیست محیطی، اقتصادی و مکانیکی به ارزیابی

با توجه به شکل ۱۵ می توان مشاهده کرد که شاخص های اقتصادی و مکانیکی روندی مشابه و نزدیک به یکدیگر را طی کرده اند؛ به گونه ای که با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس، روندی صعودی و با افزایش درصد جایگزینی پودر مرمر، روندی نزولی را طی کرده اند. علت روند ذکر شده آن است که با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس با سیمان، مقدار هزینه و عموماً مقاومت طرح های اختلاط افزایش می یابد و با افزایش درصد جایگزینی سیمان با پودر مرمر، مقدار هزینه و عموماً مقاومت طرح های اختلاط کاهش می یابد.



شکل ۱۵. مقادیر شاخص های زیست محیطی، اقتصادی و مکانیکی نرمال شده. طرح های اختلاط بتن



شکل ۱۶. مقادیر شاخص ECM نسبی. طرح های اختلاط بتن

مختلف، جایگزین بخشی از سیمان شده اند. با توجه به آزمایش ها و تحلیل های انجام شده می توان به صورت خلاصه، این نتایج را بیان کرد:

۱) اسلامپ: برای حفظ اسلامپ و روانی طرح های اختلاط در بازه 10 ± 80 میلی متر از فوق روان کننده استفاده شده است. با افزایش درصد جایگزینی پودر مرمر و میکروسیلیس، اسلامپ بتن اندکی کاهش یافت، که کاهش مذکور با اندکی افزایش در مقدار فوق روان کننده جبران شد.

۲) وزن مخصوص: جایگزینی درصد های مختلف پودر مرمر و میکروسیلیس با سیمان، تأثیر قابل توجهی در وزن مخصوص نداشته است. بیشینه میزان تغییرات ایجاد شده در وزن مخصوص طرح های اختلاط نسبت به بتن شاهد $1/5\%$ بوده است جایگزینی 5% سیمان با پودر مرمر، وزن مخصوص بتن را به دلیل پراکندگی بهتر ذرات پودر مرمر و سیمان در خلل و فرج بتن افزایش داده است.

۳) مقاومت فشاری: جایگزینی 10% میکروسیلیس با سیمان، مقاومت فشاری را تا 24% افزایش داد. جایگزینی سیمان با پودر مرمر تا 5% ، مقاومت فشاری را 4% افزایش داد؛ اما درصد های بالای جایگزینی پودر مرمر، مقاومت فشاری را تا 13% کاهش داده است. نمونه های حاوی ترکیبی از 10% میکروسیلیس به همراه درصد های مختلف پودر مرمر ($SF10My$) مقاومت فشاری بیشتری

شاخص ECM برای هر کدام از طرح های اختلاط پرداخته شده است. در شکل ۱۶ مقادیر به دست آمده برای شاخص ECM هر کدام از طرح های اختلاط نسبت به شاخص ECM نمونه ی شاهد مشاهده می شود. همان طور که گفته شد، شاخص ECM هر کدام از طرح های اختلاط را به طور هم مان از دیدگاه های زیست محیطی، اقتصادی و مکانیکی ارزیابی می کند. بنابراین شاخص ECM می تواند معیار مناسبی برای شناسایی طرح های اختلاط بهینه باشد. با مقایسه ی مقادیر به دست آمده برای شاخص ECM تمامی طرح های اختلاط می توان گفت که تمامی طرح های اختلاط پژوهش حاضر، عملکرد تلفیقی (زیست محیطی، اقتصادی و مکانیکی) بهتری را در مقایسه با نمونه ی شاهد داشته اند. با توجه به شکل ۱۶ می توان گفت که به طور کلی نمونه های $SF5M5$ و $SF10My$ عملکرد تلفیقی بهتری را نسبت به سایر نمونه ها داشته اند.

۷. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، از میکروسیلیس به عنوان یک ماده ی افزودنی پوزولانی و از ضایعات پودر مرمر به عنوان ماده ی پرکننده در مخلوط بتن استفاده و در درصد های

جایگزینی میکروسیلیس، روندی صعودی و با افزایش درصد جایگزینی پودر مرمر، روندی نزولی داشته‌اند.

۷) **شاخص ECM:** برای ارزیابی کلی طرح‌های اختلاط، شاخص‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و مکانیکی به‌طور هم‌زمان و تلفیقی در قالب شاخص ECM لحاظ شده است. مقادیر به دست آمده برای شاخص ECM طرح‌های اختلاط نشان داد که تمامی طرح‌های اختلاط در مقایسه با طرح اختلاط شاهد، عملکرد تلفیقی بهتری را (بین ۵ تا ۱۵ درصد) داشته‌اند. نمونه‌های حاوی ترکیبی از ۱۰٪ میکروسیلیس و درصد‌های مختلف پودر مرمر و نمونه‌های حاوی ترکیبی از ۵٪ میکروسیلیس و ۵٪ پودر مرمر (SF^{۱۰}My و SF^۵M^۵)، عملکرد تلفیقی بهتری را نسبت به سایر نمونه‌ها داشتند.

۸) به طور کلی می‌توان گفت که جایگزینی سیمان با پودر مرمر تا ۱۰٪، آثار رضایت‌بخشی را در خصوصیات مکانیکی و دوام بتن داشته است. در بسیاری از موارد جایگزینی ۵٪ پودر مرمر منجر به بهبود خصوصیات بتن شده است. اما برای درصد‌های جایگزینی بیش از ۱۰٪ مشاهده شد که خصوصیات مکانیکی و دوام بتن، روندی نزولی را پیش می‌گیرند. در خصوص استفاده و تأثیر میکروسیلیس نیز می‌توان گفت که خصوصیات مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشیده و جایگزینی درصد‌های اندک آن با سیمان توانسته است کاستی‌های به وجود آمده در اثر جایگزینی سیمان با پودر مرمر را به خوبی جبران کند. تقریباً می‌توان گفت که در پژوهش حاضر، تمامی حالت‌های ترکیبی درصد‌های مختلف پودر مرمر و میکروسیلیس، عملکرد بهتری را در مقایسه با نمونه‌های شاهد داشته‌اند.

را در مقایسه با نمونه‌های شاهد، در تمامی سنین کسب کردند. نمونه‌های حاوی ترکیبی از ۲/۵ تا ۵ درصد میکروسیلیس به همراه ۱۰ تا ۲۰ درصد پودر مرمر، به مقاومت‌های قابل قبولی در سنین بالا رسیدند.

۴) **مقاومت کششی:** نمونه‌های حاوی ۱۰٪ جایگزینی میکروسیلیس با سیمان، مقاومت کششی بیشتری در مقایسه با نمونه‌های شاهد داشتند. همچنین نمونه‌های حاوی جایگزینی سیمان با پودر مرمر تا ۱۰٪، مقاومت کششی بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های شاهد نشان دادند. در تمامی سنین، نمونه‌های حاوی ترکیبی از ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس به همراه درصد‌های مختلف پودر مرمر (SF^۵My و SF^{۱۰}My) مقاومت کششی بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های شاهد داشتند.

۵) **مدول کشسانی:** مدول کشسانی تمامی نمونه‌ها به جز نمونه‌های حاوی ترکیبی از صفر و ۲/۵ درصد میکروسیلیس به همراه ۱۰ و ۲۰ درصد پودر مرمر (M^{۱۰}، M^{۲۰}، SF^{۲/۵}M^{۱۰} و SF^{۲/۵}M^{۲۰})، بیشتر از مدول کشسانی نمونه‌های شاهد بود. با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس با سیمان، مدول کشسانی افزایش یافته است. همچنین مشاهده شد که ۵٪ جایگزینی سیمان با پودر مرمر، مدول کشسانی را اندکی افزایش داده است.

۶) **شاخص‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و مکانیکی:** مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های زیست‌محیطی (GWP، AP و FP) طرح اختلاط شاهد بیشتر از سایر طرح‌های اختلاط بوده است. شاخص‌های اقتصادی و مکانیکی روندی مشابه و نزدیک به یکدیگر را طی کرده‌اند؛ به گونه‌ای که با افزایش درصد

پانویس‌ها

1. Ergün
2. Singh
3. Arel
4. Dilbas
5. Onuaguluchi
6. Shelke
7. Bayraktar
8. Lippiatt

منابع (References)

1. Rodrigues, R., De Brito, J. and Sardinha, M. "Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge", *Construction and Building Materials*, **77**, pp. 349-356 (2015).
2. Uysal, M. and Yilmaz, K. "Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Composites*, **33**(7), pp. 771-776 (2011).
3. Ergün, A. "Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete", *Construction and Building Materials*, **25**(2), pp. 806-812 (2011).

4. Kurdowski, W. "Cement and concrete chemistry", *Springer Science & Business* (2014).
5. Siddique, R. "Utilization of silica fume in concrete: review of hardened properties", *Resources, Conservation and Recycling*, **55**(11), pp. 923-932 (2011).
6. Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, M. and Auda, E.M. "Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete", *Construction and Building Materials*, **50**, pp. 28-41 (2014).
7. Shelke, V.M., P. Pawde, and R. Shrivastava. "Effect of marble powder with and without silica fume on mechanical properties of concrete", *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, **1.1**, pp. 40-45 (2012).
8. Amin, H., Khalid, A.R. and Alam, A. "Use of silica fume and marble dust as partial binding material in concrete", *1st international conference on emerging trends in engineering, management and sciences (ICETEMS-2014)*, Peshawar, Pakistan (2014).
9. Rana, A., Kalla, P. and Csetenyi, L.J. "Sustainable use of marble slurry in concrete", *Journal of Cleaner Production*, **94**, pp. 304-311 (2015).
10. Singh, M., Srivastava, A. and Bhunia, D. "Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry", *Construction and Building Materials*, **198**, pp. 553-569 (2019).

11. Arel, H.Ş. “Recyclability of waste marble in concrete production”, *Journal of Cleaner Production*, **131**, pp. 179-188 (2016).
12. Dilbas, Hasan, Mesut Şimşek, and Çakir, Ö. “An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume”, *Construction and Building Materials*, **61**, pp. 50-59 (2014).
13. Onuaguluchi, Obinna, and Daman K. Panesar. “Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume”, *Journal of Cleaner Production*, **82**, pp. 125-131 (2014).
14. Mehta, A. and Ashish, D.K. “Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review”, *Journal of Building Engineering*, **29**, 100888 (2020).
15. Mazloom, M., Ramezani-pour, A.A. and Brooks, J.J. “Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete”, *Cement and Concrete Composites*, **26**(4), pp. 347-357 (2004).
16. Zhang, Sh., Cao, K., Wang, Ch. and et al. “Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete”, *Construction and Building Materials*, **241**, 117980 (2020).
17. Bayraktar, O.Y., Citoglu, G.S., Belgin, C.M. and et al. “Investigation of the mechanical properties of marble dust and silica fume substituted portland cement samples under high temperature effect”, *Fresenius Environmental Bulletin*, **28**(5), pp. 3865-3875 (2019).
18. ASTM C136 / C136M-14, “Standard test Method for sieve analysis of fine and coarse aggregates”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2014).
19. ASTM C128-15, “Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2015).
20. ASTM C127-12, “Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2012).
21. A.C. 211.1. “Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete”, *American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA*, (1991).
22. ASTM C172/ C172M-14a, “Standard practice for sampling freshly mixed concrete, ASTM international”, *West Conshohocken, PA* (2014).
23. ASTM C143 / C143M-15a, “Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2015).
24. ASTM C138 / C138M-16a, “Standard test method for density (Unit Weight), Yield, and air content (gravimetric) of concrete”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2016).
25. BS EN 12390-1, “Testing hardened concrete: shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds”, *British Standards Institution* (2000).
26. BS EN 12390-2, “Testing hardened concrete: Making and curing specimens for strength tests”, *British Standards Institution* (2000).
27. BS EN 12390-3, “Testing hardened concrete: Compressive strength of test specimens”, *British Standards Institution* (2009).
28. ASTM C496 / C496M-11, “Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2011).
29. ASTM C469 / C469M-14, “Standard test method for static modulus of elasticity and poisson’s ratio of concrete in compression”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2014).
30. Lippiatt, B. “BEESRG 4.0: Building for environmental and economic sustainability technical manual and user guide”, *NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2007).
31. Josa, A., Aguado, A., Heino, A. and et al. “Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU”, *Cement and Concrete Research*, **34**(8), pp. 1313-1320 (2004).
32. Nisbet, M., Van Geem, M.G., Gajda, J. and et al “Environmental life cycle inventory of Portland cement and concrete”, *World Cement*, **28**(4), p.3 (1997).
33. Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M. and et al. “Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete”, *Waste Management*, **30**(11), pp. 2255-2264 (2010).
34. Chiaia, B., Fantilli, A.P., Guerini, A. and et al. “Eco-mechanical index for structural concrete”, *Construction and Building Materials*, bf 67(part C), pp. 386-392 (2014).
35. Huang, Y. “Life cycle assessment of use of recycled materials in asphalt pavement”, *Ph.D. Thesis, Newcastle University* (2007).
36. Kawai, K., Sugiyama, T., Kobayashi, K. and et al. “Inventory data and case studies for environmental performance evaluation of concrete structure construction”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **3**(3), pp. 435-456 (2005).
37. Stengel, T. and Schießl. “Life cycle assessment (LCA) of ultra high performance concrete (UHPC) structures”, *Eco-efficient Construction and Building Materials*, Woodhead Publishing, pp. 528-564 (2014).
38. Valinejad Shoubi, M., Barough, A.Sh. and Amirsoleimani, O. “Assessment of the roles of various cement replacements in achieving the sustainable and high performance concrete”, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, **6**(1), p. 68 (2013).
39. Crossin, E. “Comparative life cycle assessment of concrete blends”, *RMIT University*, Melbourne, Australia (2012).
40. Korre, A. and Durucan, S. “EVA 025 – final report : aggregates industry life cycle assessment model : modelling tools and case studies life cycle assessment of aggregates report”, *Waste and Resources Action Programme*, Oxon (2009).
41. Santero, Ni., Loijos, A. and Ochsendorf, J. “Greenhouse gas emissions reduction opportunities for concrete pavements”, *Journal of Industrial Ecology*, **17**(6), pp. 859-868 (2013).

42. Huntzinger, D.N. and Eatmon, Th.D. "A life-cycle assessment of portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies", *Journal of Cleaner Production*, **17**(7), pp. 668-675 (2009).
43. Habert, G., Denarié, E., Šajna, A. and et al. "Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using ultra high performance fibre reinforced concretes", *Cement and Concrete Composites*, **38**, pp. 1-11 (2013).
44. Jungbluth, N. "Comparison of the environmental impact of drinking water vs. bottled mineral water", *Manuscript for the SGWA information bulleting and GWA*, Uster (2006).
45. Sauer, B., Schivley, G., Molen, A. and et al. "Life cycle assessment of drinking water systems: bottle water, tap water, and home/office delivery water", *Oregon Department of Environmental Quality* (2009).
46. National Ready Mixed Concrete Association, "Concrete CO2 Fact Sheet", *CIP 35-Testing Compressive Strength of Concrete*, pp. 9-10 (2008).
47. Khayat, K.H. and Aitcin, P.-C. "Silica fume: A unique supplementary cementitious material", *Mineral Admixtures in Cement and Concrete*, **4**, pp. 227-265 (1993).
48. Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Kocabağ, M.E. and et al. "Fresh and hardened characteristics of self-compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash", *Construction and Building Materials*, **37**, pp. 160-170 (2012).