



بررسی طرح اختلاط بهینه بتن با هدف کاهش آلاینده‌های زیست محیطی

سید مهدی کاهانی میری^۱، حسین عفتی^۲، منصور قلعه نوی^۳، محمدامین حامدی راد^۴، سید جواد وزیری^۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

۲- کارشناس ارشد، عضو سازمان نظام مهندسی ساختمان استان خراسان رضوی

۳- دانشیار، دپارتمان مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران دانشکده فنی شهید منتظری مشهد

۵- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران دانشکده فنی شهید منتظری مشهد

Sm.kahani67@gmail.com

خلاصه

یکی از درخواست‌های دوست داران محیط زیست، ساخت بتن با حداقل آلاینده‌های زیست محیطی بوده که بتن سبز (بتن سازگار با محیط زیست)، نام داشته و در حال حاضر در کشورهای توسعه یافته، بسیار رونق دارد. در مطالعه حاضر پس از بررسی انواع عوامل مؤثر در ساخت بتن با شاخص آلاینده‌گی کم، تعداد ۱۵ آزمایش با طرح اختلاط‌های متفاوت، بررسی شد و سپس استفاده از طرح اختلاطی که از نظر شاخص آلاینده‌گی، مقاومت فشاری و اقتصاد طرح، مفید به نظر می‌رسید، ارائه گردیده است. نتایج حاصل از آزمایشات فوق نشان می‌دهد، با کاهش مقدار سیمان که شاخص آلاینده‌گی بالایی داشته و افزایش پودر سنگ به جای آن و همچنین استفاده بیشتر از مصالح سنگی درشت دانه (بادامی) که خمیر سیمان کمتری مصرف می‌کند، نتایج مطلوب‌تری در کاهش آلاینده‌ها حاصل خواهد شد. شایان ذکر است، میزان کم و یا اضافه نمودن مصالح ذکر شده بسیار حساس به مقاومت فشاری بتن بوده؛ در نتیجه نباید اثرات آن در مقاومت بتن نادیده گرفته شود.

کلمات کلیدی: بتن، سیمان، آلاینده‌های زیست محیطی، مقاومت فشاری، اقتصاد طرح.

۱. مقدمه

با توجه به معضلات زیست محیطی فراوان مانند نازک شدن لایه اوزن، امروزه، نیاز به کاهش آلاینده‌های زیست محیطی در تولید و ارائه خدمات انواع صنایع مختلف، احساس می‌شود. توجهات جهانی نیز در سال‌های اخیر با رشد چشمگیری روبه فزونی است؛ به نحوی که کنوانسیون‌های بین‌المللی زیادی تشکیل شده و منجر به تصویب و تدوین اعلامیه‌های جهانی در این مورد شده است. یکی از مهم‌ترین این کنوانسیون‌ها که در سال ۱۹۹۴ به تصویب و تأیید ۱۷۹ کشور جهان رسید، کنوانسیون ریو نام دارد. این کنوانسیون برای پایداری توسعه جوامع انسانی ایجاد می‌نماید که:

- حداقل دخالت در منابع طبیعی زمین به عمل آید؛
- مواد آلاینده کمتری وارد آب، هوا و خاک گردد؛
- انرژی منابع طبیعی بالاخص منابع تجدیدناپذیر، با حداکثر صرفه‌جویی ممکن استفاده شود.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ عضو سازمان نظام مهندسی ساختمان استان خراسان رضوی

^۳ عضو هیئت علمی گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

^۴ دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران دانشکده فنی شهید منتظری مشهد

^۵ دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران دانشکده فنی شهید منتظری مشهد



با توجه به تأیید این کنوانسیون توسط ایران، رعایت معیارهای این اعلامیه جهانی در تمام مراحل بهره‌گیری، نگهداری، بهسازی و تخریب، الزامی به نظر می‌رسد [۱]. طبق آمار حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد تولید گازهای گلخانه‌ای و ۴۰ تا ۵۰ درصد زباله‌ها و نخالات تولید شده در جهان به صورت مستقیم یا غیر مستقیم، به صنعت ساختمان مربوط می‌شود [۲]. آلاینده‌های زیست محیطی در صنعت عمران نیز که یکی از مهم‌ترین صنایع را به خود اختصاص داده مورد توجه قرار گرفته؛ چرا که استفاده از انواع مصالح با حداقل شاخص آلاینده‌گی، الزامیست. در کشور ما با توجه به میزان تولید و مصرف سیمان (حدود ۴۵ میلیون تن در سال) و با فرض مصرف متوسط ۳۰۰ کیلوگرم سیمان در مترمکعب بتن، تولید بتن بالغ بر ۱۵۰ میلیون مترمکعب در سال و مصرف سرانه بالغ بر دو مترمکعب برآورد می‌شود که از متوسط مصرف سرانه در جهان زیاده‌تر است [۳]. بنابراین، بررسی اثرات زیست محیطی این حجم بالای تولید، مفید به نظر می‌رسد. بدین منظور صادقی روش و خراسانی (۱۳۸۸)، آثار گرد و غبار ناشی از صنایع سیمان را بر تنوع و تراکم پوشش گیاهی، بررسی کردند. مطالعه موردی آن‌ها که در کارخانه سیمان آبیگ گرفته بود نشان داد، بین تنوع و تراکم پوشش گیاهی با رسوب ذرات گرد و غبار خروجی از دودکش‌های کارخانه، یک همبستگی معکوس برقرار است. بدین صورت که هر قدر از منبع انتشار ذرات دورتر می‌شویم میزان رسوب ذرات کاهش و تنوع و تراکم پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. همچنین در اطراف کارخانه که میزان رسوب ذرات بیشتر و تنوع گونه‌ها کمتر می‌شد، تعدادی از گونه‌های مقاوم مثل ورک و درمنه، جایگزین شده بودند [۴]. صبوری و همکاران (۱۳۹۳)، نقش مصرف نانوسیلیس را در عملکرد زیست محیطی و اقتصادی بتن بررسی کردند. آن‌ها تأثیر این مواد را در بتن مثبت ارزیابی کرده؛ اما به دلیل ماهیت کمتر شناخته شده علم نانو مواد، قطعیت این بررسی را نپذیرفتند [۵].

۲. تأثیر مصالح موجود در بتن در تولید آلاینده‌گی‌های زیست محیطی

۲-۱. مواد سیمانی

سیمان و انواع مواد سیمانی موجود در بتن همانند میکروسیلیس، از جمله مواد به کار رفته در بتن بوده که تأثیر بسیار زیادی در تولید انواع آلاینده‌گی‌های زیست محیطی از قبیل تولید گاز CO₂ (دی اکسید کربن) دارند. به طور کلی ۷ درصد کل دی اکسید کربن تولید شده در جو را صنعت سیمان به خود اختصاص می‌دهد. به ازای هر تن کلینکر سیمان، یک تن دی اکسید کربن و سه کیلوگرم اکسید نیتروژن، تولید می‌شود. از دیگر معایب تولید سیمان می‌توان به مصرف انرژی بالای این صنعت اشاره نمود. برای تولید هر تن سیمان به طور متوسط ۴ گیگا ژول انرژی مورد نیاز است که در بخش‌های مختلف الکتریکی، گرم کردن و حمل و نقل، مصرف شده و معادل مصرف ۱۳۱ مترمکعب گاز طبیعی است [۶]. استخراج مواد خام نظیر سنگ آهک و سنگ رس نیز برای تولید سیمان و همچنین زغال سنگ برای تأمین سوخت، موجب تشدید جنگل‌زدایی و از بین رفتن لایه رویی خاک‌ها می‌شود [۳]. بنابراین استفاده کمتر از مواد سیمانی به منظور کاهش آلاینده‌ها، مفید به نظر می‌رسد. لازم به ذکر است، کاهش این مواد می‌تواند اثرات قابل توجهی در مقاومت بتن داشته باشد که نباید نادیده گرفته شود. می‌توان گفت درصد بسیار بالای مطالعات در ارتباط با آلاینده‌های زیست محیطی ناشی از تولید بتن، به سیمان برمی‌گردد. برای مثال؛ بوداق پور و جدیدی (۲۰۰۹)، بررسی‌هایی جهت کنترل و تخمین آلاینده‌های خروجی از صنعت تولید سیمان در شهر بزرگ تهران و اطراف آن، انجام دادند. آن‌ها پس از تخمین آلاینده‌ها در شهر و حومه آن توسط نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی، راهکارهایی برای کاهش آلاینده‌ها از جمله استفاده از فیلترهای خشک و چسبان را پیشنهاد دادند که به طور قابل ملاحظه‌ای ذرات ریز جامد خروجی از کارخانجات سیمان را کاهش می‌دهد [۷]. Priyanka و همکاران (۲۰۱۳) نیز، تأثیر آلودگی هوا ناشی از سیمان را در سلامتی مردمان شهر مایه‌ها هند، بررسی کردند. آن‌ها حداکثر ریزمواد باقیمانده از کارخانجات سیمان همانند دی اکسید سولفور و اکسید نیتروژن را در طول ماه‌های زمستان، تعادل آن‌ها را در تابستان و حداقل این مواد را در فصول بارانی، مشاهده کردند [۸]. Ramesh و همکاران (۲۰۱۴) هم اثر گرد و غبار خروجی از صنعت سیمان را بر روی گیاهان سبز، بررسی کرده و به تأثیر بسیار بالای این مواد در نابودی گیاهان، پی بردند [۹]. در یکی دیگر از جدیدترین بررسی‌ها Scrivener (۲۰۱۴)، برای کاهش آلاینده‌های ناشی از سیمان تلاش‌هایی در جهت تغییر ترکیبات سیمان، انجام داد. نتایج آزمایشات او نشان داد، جایگزین نمودن مقداری از کلینکر سیمان با انواع سولفیدهای فلزی می‌تواند به کاهش گاز CO₂ تولید شده از سیمان، کمک کند [۱۰].



۲-۲. مصالح سنگی

با توجه به اینکه حدود ۸۰ درصد حجم بتن را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند، میزان مصرف این مواد با احتساب مصرف سالانه ۶۵ میلیون مترمکعب بتن با چگالی ۲/۶۵، به ۱۳۷۸۰۰۰۰۰ تن خواهد رسید [۱]. در عملیات استخراج، تولید و حمل این مقدار عظیم مصالح، انرژی قابل ملاحظه‌ای صرف می‌گردد و به نوبه خود بر اکولوژی مناطق جنگلی و بستر رودخانه‌ها اثر می‌گذارد [۳]. استفاده از محصولات جانبی سایر صنایع مانند سرباره کوره آهن‌گدازی و یا ماسه‌های حاصل از لایروبی حوضچه‌ای، علاوه بر صرفه جویی اقتصادی، باعث کاهش اثرات زیست محیطی نیز می‌شود [۱].

۲-۳. افزودنی‌های روان کننده

استفاده از انواع مواد افزودنی شامل روان کننده‌ها و فوق روان کننده‌ها، به دلیل کاهش نسبت آب به سیمان، باعث افزایش مقاومت و پایداری بتن می‌گردد. این مواد که به صورت آلی تولید می‌شوند، تنها در ابتدای اختلاط باعث تولید گازهای فرار شده و پس از مدتی اثرات آن‌ها از بین می‌رود؛ لذا اثرات تخریبی زیست محیطی قابل توجهی از آن‌ها گزارش نشده است [۱].

۳. مواد و روش‌ها

بررسی‌های فوق نشان می‌دهد، مهم‌ترین عوارض زیست محیطی صنعت بتن، مربوط به تولید سیمان است. از این رو کاهش عیار سیمان و افزایش دوام دو موضوع اساسی است که از جمله سرفصل‌های مبحث بتن و توسعه پایدار تلقی می‌گردد [۱۱]. می‌توان گفت، یکی از بهترین روش‌ها در خصوص بهبود خواص بتن از دیدگاه زیست محیطی، یافتن جایگزین‌های مناسب برای سیمان مصرفی در بتن است. دستیابی به یک بتن با شاخص آلایندگی کم و لحاظ نمودن اثرات مقاومت، آزمایش‌های بسیاری را می‌طلبد. بدیهی است با تغییر هر یک از پارامترهای دخیل در آزمایش و ثابت نگه‌داشتن بقیه پارامترها، می‌توان اثر پارامتر مورد نظر را در کسب نتایج بررسی کرد. در این مطالعه که هدف اصلی آن دستیابی به طرح اختلاطی است که شاخص آلایندگی کمتری در مقایسه با انواع بتن‌های مورد استفاده در صنعت عمران داشته؛ تعداد ۱۵ آزمایش با طرح اختلاط‌های متفاوت بررسی شده است. از جمله مهم‌ترین تغییراتی که در هر آزمایش صورت می‌گرفت می‌توان به تغییر در میزان مواد سیمانی، نحوه اختلاط، نوع دانه‌بندی، نسبت آب به سیمان و هم چنین درصد اختلاط، اشاره نمود. شایان ذکر است برخی از تغییرات فوق همانند تغییر در نسبت آب به سیمان، صرفاً به دلیل لحاظ نمودن اثرات مقاومت بوده و شاخص آلایندگی در آن مدنظر نیست؛ چراکه از اثرات مقاومت برای دستیابی به بتن با آلایندگی کم، نمی‌توان صرف‌نظر نمود.

نحوه اختلاط در این بررسی بر اساس استاندارد ASTM C109 صورت گرفته است. در این دستورالعمل آمده است؛ ابتدا قسمتی از آب به همراه مواد جامد دیگر به مخلوط‌کن اضافه شود؛ سپس افزودنی مایع به همراه آب به آن اضافه گردد. در صورت وجود افزودنی‌های جامد، این افزودنی‌ها باید با سایر مواد جامد بتن به درون مخلوط‌کن ریخته شوند. اگر از دو یا چند افزودنی جامد استفاده گردد افزودن آن‌ها به مخلوط می‌بایست در مراحل مجزا صورت پذیرد [۱۲].

طرح اختلاط بتن جهت تعیین نسبت‌های اختلاط در ابتدا بر اساس روش ملی طرح مخلوط صورت گرفته است. بر این اساس پس از دانه‌بندی مصالح و با مشخص بودن مقادیر چگالی و جذب آب هر یک از مصالح، با تعیین درصد حجمی هریک از سنگ‌دانه‌ها نسبت به یک مترمکعب بتن، منحنی دانه‌بندی، رسم گردید. در نهایت با مقایسه منحنی به دست آمده با منحنی‌های فولر تامسون، نسبت‌های اختلاط طرح به دست آمده است. به نظر می‌رسد استفاده از روش طرح اختلاط فوق در برخی آزمایشات، نیاز به اصلاح داشته باشد. این امر به دلیل مشاهده اختلاط نامناسب در حین انجام برخی آزمایش‌ها، احساس شد. سرانجام طرح اختلاط‌های مورد استفاده در ۱۵ آزمایش، مطابق جدول ۱ به دست آمده است.

جدول ۱- طرح اختلاط‌های به کار رفته در یک مترمکعب بتن (kg)

شماره طرح	سیمان	میکروسیلیس	نسبت آب به مواد سیمانی	آ.ا	افزودنی	ماسه معمولی	شن نخودی	شن بادامی	پودر سنگ
1	340.00	60.00	0.35	140.00	6.00	834.00	834.00	0.00	189.00
2	340.00	60.00	0.35	140.00	6.00	1112.00	630.00	0.00	113.00
3	340.00	60.00	0.36	144.00	6.00	1106.00	627.00	0.00	113.00
4	340.00	60.00	0.32	128.00	8.00	959.00	828.00	0.00	96.00
5	340.00	60.00	0.40	160.00	10.00	1075.00	609.00	0.00	110.00
6	270.00	30.00	0.38	114.00	3.00	972.00	952.00	0.00	103.00
7	270.00	30.00	0.36	108.00	4.50	917.00	917.00	0.00	208.00
8	270.00	30.00	0.36	108.00	4.50	917.00	407.00	509.00	208.00
9	270.00	30.00	0.36	108.00	4.50	815.00	204.00	713.00	311.00
10	270.00	30.00	0.36	108.00	4.50	959.00	204.00	713.00	145.00
11	270.00	30.00	0.36	108.00	4.50	939.00	937.00	0.00	145.00
12	270.00	30.00	0.365	109.50	4.50	915.00	203.00	671.00	249.00
13	270.00	30.00	0.365	109.50	4.50	915.00	203.00	651.00	269.00
14	270.00	30.00	0.37	111.00	3.00	997.00	207.00	621.00	207.00
15	270.00	30.00	0.36	108.00	4.50	899.00	204.00	713.00	208.00

۴. صحت سنجی نتایج

پس از انجام آزمایشات فوق، به منظور ارزیابی نتایج به دلیل وجود خطاهای موجود در نمونه‌گیری، تعداد ۴ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰ میلی متر برای هر طرح انتخاب شده است. در این آزمایش‌ها مقاومت ۷ روزه نمونه‌ها مدنظر قرار گرفته و پس از ۷ روز عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت نمونه‌ها ارزیابی شده است. سرانجام مقاومت فشاری ۷ روزه هر طرح با میانگین‌گیری از ۴ نمونه در هر طرح حاصل شده است. لازم به ذکر است در میانگین‌گیری نمونه‌ها، از برخی نمونه‌ها که انحراف زیادی در مقایسه با دیگر نمونه‌های مشابه داشتند به دلیل خطاهای نمونه‌گیری صرف‌نظر شده و میانگین‌گیری در نمونه‌های باقیمانده انجام گرفته است. شکل ۱ چند نمونه از قالب‌های مورد استفاده در این بررسی و شکل ۲ انواع نمونه‌های حاصل از بررسی فوق را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمونه‌های آزمایش



شکل ۱- قالب‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰ میلی متر



برای مقایسه نتایج حاصل از طرح‌ها، از آیین‌نامه موجود در اولین دوره مسابقات ملی بتن سبز، کمک گرفته شده است [۱۳]. در این آیین‌نامه شاخص آلاینده‌گی با رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$IF = \frac{1}{100} (e_1 C + e_2 SP + e_3 CP + e_4 NP + e_5 IP1 + e_6 IP2 + e_7 PCC) \quad (1)$$

در این رابطه IF شاخص آلاینده‌گی زیست محیطی و بقیه پارامترها از جدول ۲ به دست می‌آیند.

جدول ۲- معرفی پارامترهای رابطه شاخص آلاینده‌گی

ضرایب e_i		مصالح (kg/m^3)	
1.00	e_1	C	سیمان
0.85	e_2	SP	روان‌کننده یا فوق روان‌کننده
0.50	e_3	CP	پوزولان طبیعی فرآوری شده
0.25	e_4	NP	پوزولان طبیعی
0.12	e_5	IP1	پوزولان مصنوعی صنعتی (با نیاز به آسیاب کردن)
0.06	e_6	IP2	پوزولان مصنوعی صنعتی (بدون نیاز به آسیاب کردن)
0.12	e_7	PCC	پودر سنگ آهک

همچنین این آیین‌نامه رابطه محاسبه فاکتور هزینه برای یک مترمکعب بتن را طبق رابطه ۲ پیشنهاد نموده است.

$$p_c = \frac{1}{100} (a_1 C + a_2 SP + a_3 G + a_4 S + a_5 E + \sum a_6 PZ) \quad (2)$$

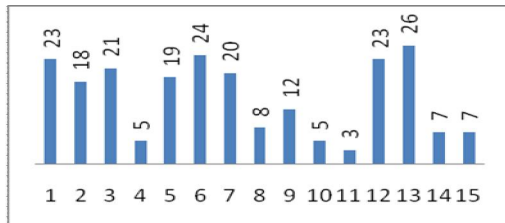
در این رابطه نیز p_c ، بیانگر فاکتور هزینه برای یک مترمکعب بتن بوده و بقیه پارامترها از جدول ۳ به دست می‌آیند.

جدول ۳- معرفی پارامترهای رابطه فاکتور هزینه

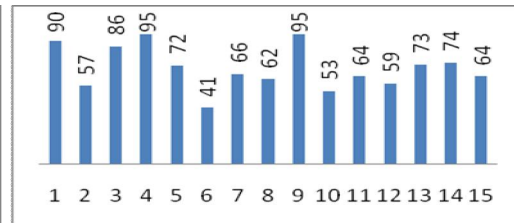
ضرایب a_i		مصالح (kg/m^3)	
1.00	a_1	C	مقدار سیمان
x_1	a_2	SP	مقدار انواع روان‌کننده‌ها
0.07	a_3	G	مقدار درشت‌دانه
0.13	a_4	S	مقدار ماسه معمولی
0.67	a_5	E	مقدار پودر سنگ آهک
4.20	a_6	PZ	مقدار دوده سیلیسی
1.35	a_6	PZ	مقدار زئولیت
x_2	a_6	PZ	سایر مواد و پوزولان‌ها



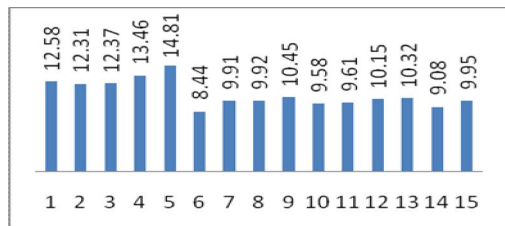
در جدول فوق، مقادیر α_1 و α_2 با توجه به نوع روان‌کننده و نوع مواد پوزولانی، تعیین می‌شود. در بررسی حاضر که از فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده شده، مقدار α_1 طبق آیین‌نامه برابر با ۶۳ و با توجه به اینکه از مواد پوزولانی استفاده نشده است، مقدار α_2 برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. مقادیر شاخص آلاینده‌گی و فاکتور هزینه در هر طرح و نتایج حاصل از نمونه‌ها که شامل مقاومت فشاری و اسلامپ می‌شود، در اشکال ۳ تا ۶ نشان داده شده است.



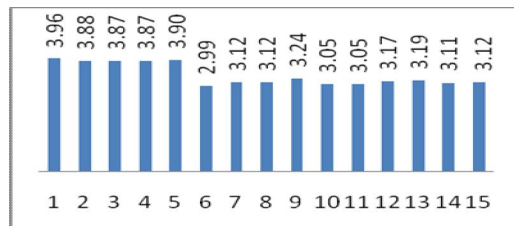
شکل ۴: مقدار اسلامپ (cm)



شکل ۳: مقاومت فشاری ۷ روزه (Mpa)



شکل ۶: فاکتور هزینه



شکل ۵: شاخص آلاینده‌گی

۵. تحلیل نتایج

نتایج حاصل از آزمایشات فوق نشان می‌دهند در طرح‌های ۱ تا ۵ که در آن از مواد سیمانی با عیار بالا (۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب بتن) استفاده شده است، شاخص آلاینده‌گی افزایش یافته و این عیار بالا، لزوماً باعث افزایش مقاومت فشاری نشده است (طرح ۲). شاید به نظر آید استفاده از طرح ۶ به دلیل تولید کمترین شاخص آلاینده‌گی مفید باشد؛ اما این طرح نیز مقاومت فشاری لازم را ارضاء نمی‌نماید. در بین طرح‌های فوق، طرح ۹ بسیار قابل توجه است. استفاده از این طرح علاوه بر اینکه شاخص آلاینده‌گی قابل قبولی تولید می‌کند، از نظر مقاومت فشاری و اقتصاد طرح نیز بسیار مفید به نظر می‌رسد. با مشاهده طرح اختلاط به کار رفته در این طرح، می‌توان گفت، از جمله مهمترین عواملی که باعث نتایج مطلوب این طرح شده، استفاده بهینه از مصالح سنگی درشت‌دانه (بادامی) و پودر سنگ می‌باشد. به نظر می‌رسد در این طرح، پودر سنگ کمبود سیمان مصرفی را جبران کرده و در مقابل، مصالح درشت‌دانه به خمیر سیمان کمتری نیاز دارند. توجه شود که افزایش و یا کاهش مصالح بادامی و پودر سنگ از مقدار مورد نظر، مقاومت فشاری را به شدت تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. طرح ۱۰ افزایش بیش از حد مقدار بادامی را نسبت به پودر سنگ نشان می‌دهد که باعث کاهش بسیار زیاد مقاومت فشاری، شده است. همچنین کاهش بیش از حد مقدار بادامی نسبت به پودر سنگ در طرح ۱۱، کاهش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.

۶. نتیجه‌گیری

بررسی فوق نشان می‌دهد، مهم‌ترین عوارض زیست محیطی صنعت بتن، مربوط به تولید سیمان است. به همین دلیل یکی از بهترین روش‌ها در خصوص بهبود خواص بتن از دیدگاه زیست محیطی، یافتن جایگزین‌های مناسب برای سیمان مصرفی در بتن است. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های این



بررسی نشان می‌دهد، دستیابی به طرح اختلاطی که در آن اثرات آلاینده در مصالح، مقاومت فشاری و اقتصاد طرح، قابل قبول باشد؛ امکان‌پذیر است. این مهم می‌تواند با استفاده بهینه از مصالح سنگی درشت‌دانه (بادامی) و پودر سنگ، به دست آید (طرح ۹). به نظر می‌رسد، پودر سنگ، کمبود سیمان مصرفی را جبران کرده و در مقابل، مصالح درشت‌دانه به خمیر سیمان کمتری نیاز دارند. ناگفته نماند، افزایش و یا کاهش مصالح بادامی و پودر سنگ از مقدار بهینه، مقاومت فشاری را به شدت تحت تأثیر خود قرار می‌دهد.

۷. مراجع

۱. دلنواز، م.؛ میرزا حسینی، م.ر. و جان ثناری، ح. (۱۳۸۵)، "بررسی اثرات زیست محیطی صنعت بتن در ایران"، سیزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان.
 ۲. قالیبافیان، م. (۱۳۸۲)، "بتن و محیط زیست"، فصلنامه انجمن بتن ایران، سال سوم، شماره ۱۱.
 ۳. شکرچی زاده، م. و میرزایی، م. (۱۳۸۷)، "آینده آموزش مهندسی بتن و سیمان با نگرش به محیط زیست"، کنفرانس آموزش مهندسی در ۱۴۰۴، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
 ۴. صادقی روش، م. ح. و خراسانی، ن. (۱۳۸۸)، "بررسی آثار گرد و غبار ناشی از صنایع سیمان بر تنوع و تراکم پوشش گیاهی"، نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره دهم، شماره یک.
 ۵. صبور، م. ر.؛ یکه لری، م. و نیکروان، م. (۱۳۹۳)، "بررسی نقش مصرف نانوسیلیس در بتن بر عملکرد زیست محیطی و اقتصادی آن"، نشریه مهندسی عمران فردوسی، سال بیست و پنجم، شماره دو.
6. Canada's Second Report on Climate Changes, (1997), Environment Canada.
7. Boudaghpour, S. and Jadidi, A. (2009), "Investigation of the effect of outlet pollutants of cement production industries around Tehran and approaches to control and eliminate pollutants", International Journal of Physical Sciences Vol. 4 (9), pp. 486-495.
8. Priyanka, R. ; RM, M. and Sarita, P. (2013), " Quantifying the Cement Air Pollution related Human Health diseases in Maihar city, MP, India" International Science Congress Association.
9. Ramesh, V. ; Ahmed John, S. and Koperuncholan, M. (2014), "Impact of cement industries dust on selective green plants: a case study in Ariyalur industrial zone" International Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences, 4(1), 152-158.
10. Scrivener, K. L. (2014), "Options for the future of cement" The Indian Concrete Journal, Vol. 88, Issue 7, pp. 11-21.
۱۱. علی حوری، م. ح. و شریفی، م. ب. (۱۳۹۱)، "پیش‌بینی تقاضای آب با شبکه‌های عصبی مصنوعی"، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، جلد چهارم، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران، ۲۱-۱۹ اردیبهشت، ۲۰۳-۱۹۵.
 ۱۲. پیدایش، م. (۱۳۸۴)، "بتن و تعامل آن با محیط زیست"، دومین کنفرانس بین‌المللی بتن و توسعه.
13. ASTM C109, (1995), "Test for compressive strength of cements mortars", (04.01).
۱۴. آیین‌نامه بتن سبز، (۱۳۹۳)، "اولین دوره مسابقات ملی بتن سبز"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.