

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و پنجم، شماره دو، اردیبهشت ماه ۱۴۰۲ (۳۹-۲۷)

ارزیابی مقدار کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای CO₂ در محیط زیست با جایگزینی پوزولان معدنی محلی به عنوان بخشی از سیمان در بتن با رویکرد کاهش آلاینده‌گی

مجتبی رنگریزان^۱

رحمت مدندوست^۲

رضا محبوب^{۳*}

reza.mahjoub@iau.ac.ir

مهدی رفتاری^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۲۴

چکیده

زمینه و هدف: گرمایش جو کره زمین عمدتاً به دلیل آلودگی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و غالباً دی‌اکسیدکربن (CO₂) می‌باشد. کاهش گازهای گلخانه‌ای و تجزیه و تحلیل و نظارت بر محیط‌زیست یکی از دغدغه‌های بشر امروزی است. کارخانه‌های سیمان تولیدکنندگان عمده گازهای گلخانه‌ای هستند. هدف اصلی این پژوهش، یافتن ماده‌ای با خاصیت سیمانی (پوزولان) و قابل جایگزینی در قسمتی از سیمان بتن با مد نظر قرار دادن کاهش مصرف سیمان و کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای CO₂ می‌باشد. پوزولان معدنی محلی مورد پژوهش، دارای خواص مشابه پوزولان‌های مشهور جهان بوده و استانداردهای مربوط را داراست.

روش بررسی: به منظور یافتن طرح بهینه جایگزینی پوزولان معدنی محلی با بخشی از سیمان، در تابستان سال ۱۴۰۰، طرح اختلاط با چهار گونه ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی مورد مطالعه قرار گرفت و تاثیر آن بر مقاومت فشاری بتن و مقدار انتشار گاز گلخانه‌ای CO₂ و توانایی آن در کاهش مقدار آلاینده‌گی زیست محیطی در مقایسه با بتن سیمانی معمولی مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد بهترین میزان جایگزینی این پوزولان به سیمان در بتن، ۱۵ درصد وزنی است و باعث افزایش ۲/۴ درصدی مقاومت می‌شود. همچنین این پوزولان نسبت به بتن سیمانی معمولی ۱۵/۲۰ کیلوگرم در هر مترمکعب CO₂ کمتری منتشر می‌نماید که این مقدار مشابه سایر پوزولانهای پُرکاربرد می‌باشد.

بحث و نتیجه گیری: با توجه به اثرات مطلوب در تقویت ساختار و کاهش مصرف سیمان در بتن، پوزولان مورد پژوهش را می‌توان به عنوان ماده‌ی کاهنده سیمان و دوستدار محیط‌زیست معرفی نمود.

واژه‌های کلیدی: گازهای گلخانه‌ای، انتشار CO₂، پوزولان معدنی محلی، پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)، بتن سبز.

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

۲- استاد، مدعو گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران. * (مسئول مکاتبات)

CO₂ emissions reduction by using local mineral pozzolan as part of cement in concrete with a pollution reduction approach

Mojtaba Rangrazian¹

Rahmat Madandoust²

Reza Mahjoub^{3*}

reza.mahjoub@iau.ac.ir

Mehdi Raftari³

Admission Date: January 18, 2023

Date Received: May 14, 2022

Abstract

Background and Objective: Global warming is caused by the emission of greenhouse gases, mainly (CO₂). Reducing greenhouse gases and monitoring the environment are important goals of today's mankind. Cement factories are the main producers of greenhouse gases. The main goal of this research is to find a material with cement properties (pozzolan) that can be replaced in a part of concrete cement with the aim of reducing cement consumption and reducing CO₂ greenhouse gas emissions. The local mineral pozzolan under research has similar properties to world-famous pozzolans and has the relevant standards.

Material and Methodology: To find the optimal amount of pozzolan in the concrete, In Sep. 2021, four cases of 5, 10, 15 and 20% by weight was studied and its effect on concrete compressive strength and CO₂ emissions and its ability to reduce pollution Environmental was evaluated in comparison with conventional cement concrete.

Findings: Experiments showed that the best amount of replacement of this pozzolan to cement in concrete is 15% by weight and increases the strength by 2.4%. Also, this pozzolan emits less CO₂ than normal cement concrete equal to 15.20 kg/m³.

Discussion and Conclusion: Considering the favorable effects of this pozzolan in strengthening the structure and reducing the consumption of cement in concrete, it can be introduced as a cement-reducing and environmentally friendly material.

Keywords: Greenhouse gases, CO₂ emissions, Local mineral pozzolans, Global warming potential (GWP), Green concrete.

1- PhD candidate in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran.

2- Full Professor, Visiting Professor, Department of Civil Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran. **(Correspondence Author)*

مقدمه

بسیاری از دانشمندان معتقدند که دلیل افزایش دمای سطح زمین در یکصد سال گذشته و شتاب گرفتن آن در دو دهه اخیر، انتشار گازهای گلخانه‌ای^۱ حاصل از فعالیت‌های بشری است (۱). وجود بیش از مقدار متناسب برخی گازها در جو زمین مانند تله عمل می‌کنند، بدین صورت که انرژی را به دام انداخته و زمین را گرم می‌کنند. به عبارت دیگر در این فرآیند، گازهای گلخانه‌ای جذب می‌شوند به طوری که عملکرد آنها مانند سطح گلخانه شده و به جای انتقال بخشی از انرژی به خارج از جو، برعکس عمل می‌کنند و انرژی را به جو زمین برمی‌گردانند. به همین دلیل به آنها گازهای گلخانه‌ای می‌گویند. مقدار بیش از حد گازهای گلخانه‌ای می‌تواند باعث شود دما از کنترل خارج شده و عواقب ناخوشایندی به همراه داشته باشد (۲، ۳). عدم مدیریت و توجه کافی به انتشار گازهای گلخانه‌ای که باعث تغییرات آب و هوایی، ذوب یخ‌های دریای قطب شمال، تغییر ضخامت یخ‌های دریای قطب جنوب، رفتار یخ‌های خشک (از جمله یخچال‌ها و غیره)، خشکسالی، تغییرات مهاجرت پرندگان، تغییرات اکولوژیکی، زوال پستانداران، تغییر تنوع زیستی گیاهان، بالا آمدن سطح آب دریاها و اسیدی شدن اقیانوس‌ها و... همه موارد فوق حیات انسان را بر روی زمین تهدید می‌کند (۴).

مطالعات نشان داده است که CO₂ حدود ۷۶٪، CH₄ حدود ۱۳٪، N₂O حدود ۳٪، SO₂ حدود ۷٪، CFC، HCFC حدود ۱٪ از گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهند (۲، ۵). CO₂ از نظر انتشار گازهای گلخانه‌ای رتبه اول را در جهان دارد (۲). حجم بالای انتشار این گاز به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی است. کارخانه‌های سیمان، نیروگاه‌هایی که با سوخت‌های فسیلی برق تولید می‌کنند، حمل و نقل و سایر صنایعی که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند باعث انتشار این گازهای گلخانه‌ای می‌شوند. بر اساس برآوردها، انتشار CO₂ ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی ۳۹۲ میلیارد مگاتن و

کارخانه‌های سیمان با ۱۱۳ میلیارد مگاتن، دومین تولید کننده و انتشار دهنده گاز گلخانه‌ای CO₂ هستند (۶، ۷). مرحله پردازش و پیمایش مواد خام جهت تولید سیمان به انرژی زیادی نیاز دارد و گازهای گلخانه‌ای زیادی را منتشر می‌کند. یک کوره با پیش گرم کردن حدود ۵ گیگاژول انرژی به ازای هر تن کلینکر مصرف می‌کند. از طرفی اگر کوره با مصرف سوخت (پیش گرمایش) گرم شود، این میزان به ۳/۳ گیگاژول در هر تن کلینکر کاهش می‌یابد (کلینکر دانه‌های حرارت دیده‌ای است، که معمولاً ۳-۲۵ میلی‌متر قطر) دارند و از حرارت دادن به سنگ آهک و آلومینیوم سیلیکات (خاک رس) در طی مرحله کوره سیمان به وجود می‌آیند. به عبارت دیگر می‌توان گفت که تولید هر تن کلینکر به ۵/۶۱ کیلووات ساعت برق نیاز دارد. میزان تولید CO₂ در هر تن سیمان به کلینکر سیمان بستگی دارد. این نسبت معمولاً از ۰/۵ تا ۰/۹۵ متغیر است. برای فرآیند انتشار CO₂ ناشی از تولید سیمان (فرآیند تولید کلینکر) برای اجرای فرآیند کلسینه کردن مواد در هر تن تولید کلینکر ۰/۱۳۶ مگاتن کربن تولید می‌شود (۷، ۸). از آنجایی که بتن به مقدار زیادی توسط جامعه مصرف می‌شود، تولید سیمان مقادیر قابل توجهی از انرژی و منابع طبیعی را مصرف می‌نماید. با توجه به اینکه سیمان یکی از اصلی‌ترین و پرکاربردترین اجزای ساختمان بتنی است، هدف از این پژوهش، یافتن راه حلی برای کاهش مصرف سیمان در سازه بتنی که یکی از موثرترین راه‌ها برای کاهش اثرات کربن در محیط زیست به ویژه کاهش CO₂ و گرم شدن کره زمین می‌باشد. این کار با جایگزینی بخشی از سیمان با پُرکننده سیمانی (پوزولان معدنی محلی) راه حلی مقرون به صرفه و بسیار مناسب است و نیاز به تولید سیمان بیشتر را کاهش داده و انتشار گاز گلخانه‌ای ناشی از تولید بتن را نیز کاهش خواهد داد.

پیشینه پژوهش

برای کاهش مصرف سیمان در بتن، با رویکرد کاهش انتشار CO₂ راهبردهای متعددی معرفی شده است که کاربردترین آنها از منظر زیست محیطی بهره‌گیری پرکننده‌های سیمانی مانند پوزولان‌های طبیعی است (۱۱). رنجبر و مدندوست دریافتند که افزودن زئولیت طبیعی (NZ) مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی را بهبود می‌بخشد (۱۲). نی و همکاران همچنین بیان داشتند که استفاده از خاکستر بادی^۲ (FA) به طور قابل توجهی مقاومت بتن در برابر حمله سولفات بدون کاهش مقاومت بهبود بخشیده است (۱۳). طی مطالعات گوکچه و همکاران سیلیکا فوم^۳ (SF) توانایی پرکردن ذرات بین سیمان پرتلند معمولی را دارد و این کار را بهتر از مواد ریزدانه در بتن انجام می‌دهد و جایگزین مناسبی برای بخشی از سیمان در بتن می‌توانند باشند (۱۴). سونگ و همکاران نیز یافتند که بتن‌های حاوی سرباره کوره‌های فولادی (Slag) - سرباره کوره آهن‌گدازی

(GGBFS) - در دراز مدت دوام بهتری از خود نشان می‌دهند و همچنین مقاومت به خوردگی بالاتری از خود نشان می‌دهند (۱۵). در بسیاری از موارد، افزودن جایگزین‌های سیمان، موفقیت آمیز بوده است که تا حد زیادی به واکنش شیمیایی ماده جایگزین سیمان بستگی دارد.

روش بررسی

طرح آزمایش

پوزولان طبیعی مورد استفاده در آزمایش، از دامنه‌های کوهستان آسیاب از توابع شهرستان املش در استان گیلان، در تابستان سال ۱۴۰۱، برداشت شده است. این پوزولان خاکستر آتشفشانی ریزدانه بوده و با مقایسه مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن با سایر پوزولانهای پُرکاربرد دنیا و همچنین سیمان، پُرکننده و چسباننده مناسبی برای جایگزینی بخشی از سیمان در بتن و تولید بتن دوستدار طبیعت خواهد بود. مقادیر جدول ۱ از آزمایشگاه شیمی - فیزیک کارخانه سیمان دیلمان اخذ و با پوزولان سیلیکا فوم^۳ SF و خاکستر بادی^۲ FA مقایسه شده است.

-
- 1- Natural Zeolite
 - 2- Fly Ash
 - 3- Silica Fume
 - 4- Ground Granulated Blast Furnace Slag

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی سیمان و پوزولان آسیابر

Table 1. Chemical composition and physical properties of cement and Asiabar Pozzolan

| ترکیبات شیمیایی (%) | سیمان | پوزولان معدنی محلی | SF(۹) | FA(۱۰) |
|--------------------------------|-------|--------------------|-------|--------|
| SiO ₂ | ۲۲/۹۲ | ۶۸/۹۸ | ۹۶/۸۵ | ۵۶/۷۳ |
| Al ₂ O ₃ | ۷/۴۱ | ۱۴/۹۲ | ۱/۸۸ | ۱۹/۳۰ |
| Fe ₂ O ₃ | ۳/۰۸ | ۱/۹۳ | ۰/۵ | ۶/۵۸ |
| CaO | ۵۷/۵۱ | ۳/۳۴ | ۰/۲۵ | ۵/۵۴ |
| MgO | ۴/۱۳ | ۲/۸۲ | ۰ | ۲/۹۸ |
| SO ₃ | ۱/۷۷ | ۰/۵۷ | ۰ | ۱/۱۲ |
| K ₂ O | ۰/۶۲ | ۱/۰۷ | ۲/۴۱ | ۱/۸۴ |
| Na ₂ O | ۰/۳۱ | ۲/۴۴ | ۰/۳۹ | ۰/۳۱ |
| وزن مخصوص | ۳/۱۲ | ۲/۲۴ | ۲/۲۷ | ۲/۵۰ |
| سطح مخصوص (m ² /g) | ۰/۳۷ | ۱/۲۳ | ۱۶/۴۶ | ۰/۳۹ |
| اندازه ذره (μm) | ۹/۳۴ | ۳/۳۰ | ۰/۱۴ | ۸/۷۲ |

جدول ۲- جزئیات ترکیب بتن حاوی پوزولان آسیابر

Table 2. Details of concrete containing Asiabar

| Group. ID | Mixture. ID | سیمان (Kg/m ³) | Asiabar Pozzolan | | آب (Kg/m ³) | فوق روان کننده (Kg/m ³) | w/B | ماسه (Kg/m ³) | شن (Kg/m ³) | وزن بتن (Kg/m ³) |
|-----------|-------------|----------------------------|------------------|-------|-------------------------|-------------------------------------|-----|---------------------------|-------------------------|------------------------------|
| | | | (%) | (Kg) | | | | | | |
| ۱G | PCC | ۴۲۹/۶ | - | - | ۲۱۵ | - | ۰/۵ | ۷۲۸/۴ | ۷۲۸/۴ | ۲۱۰۱/۴ |
| ۲G | G2APoz0.5 | ۴۰۸/۱ | ۵ | ۲۱/۴۸ | ۲۱۵ | ۴/۳ | ۰/۵ | ۷۲۸/۴ | ۷۲۸/۴ | |
| ۲G | G2APoz1.0 | ۳۸۶/۶ | ۱۰ | ۴۲/۹۶ | ۲۱۵ | ۴/۳ | ۰/۵ | ۷۲۸/۴ | ۷۲۸/۴ | |
| ۲G | G2APoz1.5 | ۳۶۵/۲ | ۱۵ | ۶۴/۴۴ | ۲۱۵ | ۴/۳ | ۰/۵ | ۷۲۸/۴ | ۷۲۸/۴ | ۲۱۰۱/۴ |
| ۲G | G2APoz2.0 | ۳۴۳/۷ | ۲۰ | ۸۵/۹۲ | ۲۱۵ | ۴/۳ | ۰/۵ | ۷۲۸/۴ | ۷۲۸/۴ | |

مقایسات از بتن سیمانی معمولی^۲ ساخته شد. ابتدا مقاومت فشاری نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و پس از تایید تاثیر مثبت پوزولان بر مقاومت فشاری^۳، نمونه با مقاومت فشاری

برنامه‌های آزمایشگاهی این تحقیق با آزمایش بر روی یک نوع طرح اختلاط و چهار دوز^۱ مختلف پوزولان انجام شد. مقدار ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی پوزولان معدنی محلی به جای سیمان در بتن استفاده گردید. دو نمونه بتنی جهت انجام

2- Plain Cement Concrete (PCC)
3- Compressive Strength

1- Dose

می‌کند. این موضوع در مطالعات علوی نیا و همکاران تذکر داده شده است (۱۷). ابتدا سنگدانه های ریز و درشت ۳۰ ثانیه با سرعت اختلاط معمولی همگن شدند. پس از آن نیمی از مقدار آب طرح اختلاط به آن اضافه می شود و به مدت ۱ دقیقه مخلوط کردن را ادامه می یابد. به مخلوط ۱ دقیقه استراحت داده تا سنگدانه ها، آب داخل میکسر را تا حدودی جذب نمایند. سپس سیمان و پوزولان آسیاب را در دوزهای از پیش تعریف شده مطابق جدول ۲ در حالی که قبلاً به صورت خشک و به مدت دو دقیقه با یکدیگر مخلوط شده بود را به مخلوط داخل میکسر اضافه کرده و یک دقیقه دیگر مخلوط می‌شود. آب باقی مانده را به همراه فوق روان کننده درحالی که مخلوط در دستگاه در حال اختلاط است اضافه نموده پس از سه دقیقه اختلاط، دو دقیقه به مخلوط استراحت داده و مجدداً دو دقیقه دیگر اختلاط ادامه می یابد. این دو دقیقه برای پخش شدن کامل فوق روان کننده در مخلوط ضروری است (۱۲).

بالاتر شناسایی و به عنوان مقدار بهینه وزنی افزودن پوزولان، جهت جایگزینی سیمان پذیرفته شد. سپس مطالعات با رویکرد ارزیابی مقدار تاثیر این پوزولان بر مقدار کاهندگی CO₂ در مقایسه با بتن سیمانی معمولی انجام شد. جدول ۱ ترکیبات شیمیایی رایج سیمان پرتلند مورد استفاده و پوزولانهای طبیعی آسیاب را به همراه دو پوزولان پُرکاربرد دیگر فهرست می‌کند. حداقل ترکیب قابل قبول $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ طبق استاندارد ASTM C618 برای پوزولانهای طبیعی ۷۰ درصد کل است که پوزولان معدنی محلی آسیابمقداری معادل ۸۵/۸۳ درصد را داراست و قابل قبول است (۱۶).

طرح و نسبت مخلوط

در این طرح اختلاط برای اطمینان از اینکه ماتریس به درستی کار کند، باید چگالی و توزیع مناسب ذرات کنترل شود. نباید فراموش کرد که ذرات کوچکتر در حین ساخت ماتریس جمع می‌شوند که شکستن قطعات را پس از عمل آوری را آسان تر

جدول ۳- میزان توسعه مقاومت فشاری در ۲۱ روز

Table 3. The rate compressive strength development in 21 days

| روزهای عمل آوری | پوزولان معدنی محلی | سیلیکا فوم (۱۸) | خاکستر بادی (۱۸) |
|-------------------|--------------------|-----------------|------------------|
| ۷ روز | ۲۴/۱۲ | ۷۳ | ۴۹ |
| ۲۸ روز | ۳۸/۱۵ | ۹۸ | ۶۸ |
| نرخ افزایش مقاومت | %۵۸/۱۷ | %۳۲/۲۵ | %۳۸/۷۸ |

نتایج

مقاومت فشاری

خواص پوزولان آسیاب در جدول ۱، اندازه ذرات پوزولان آسیاب کوچکتر از اندازه ذرات سیمان است در نتیجه راحت تر و بهتر از ذرات سیمان بین سنگدانه ها قرار می‌گیرند. با پرکردن فضای بین سنگدانه ها، آب مویینگی را از بین سنگدانه ها خارج می‌کنند. به این ترتیب نمونه‌های منسجم بیشتری تولید می‌کنند و تخلخل را کاهش می‌دهند. همچنین با آزاد شدن آب مویینگی بین سنگدانه ها، این آب در عملیات هیدراتاسیون شرکت می‌کند. به این ترتیب می‌تواند از انقباض جلوگیری کرده و به مقاومت فشاری بهتری بوجود آورد. همچنین نباید فراموش کرد که پوزولان آسیاب که دارای سه برابر دی اکسید سیلیسیم بیشتری در مقایسه با سیمان است، که باعث افزایش

مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های ساخته شده توسط جک هیدرولیک بتن شکن Analog compression machine طبق استاندارد ASTM C39 اندازه‌گیری شد. نتایج انجام تست مقاومت فشاری بر روی نمونه ها در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، طرح اختلاط با نمونه حاوی ۱۵ درصد وزنی پوزولان به جای سیمان نتایج موفق تری داشته و مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های دیگر نشان داده است. مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۵ درصد وزنی پوزولان آسیاب به جای سیمان، در طرح اختلاط G1، افزایش مقاومت ۲/۴ درصدی نسبت به نمونه سیمانی معمولی دارد. با توجه به

دلیل فعالیت های پوزولانی خوب پوزولان آسیاب باشد. این موارد نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.

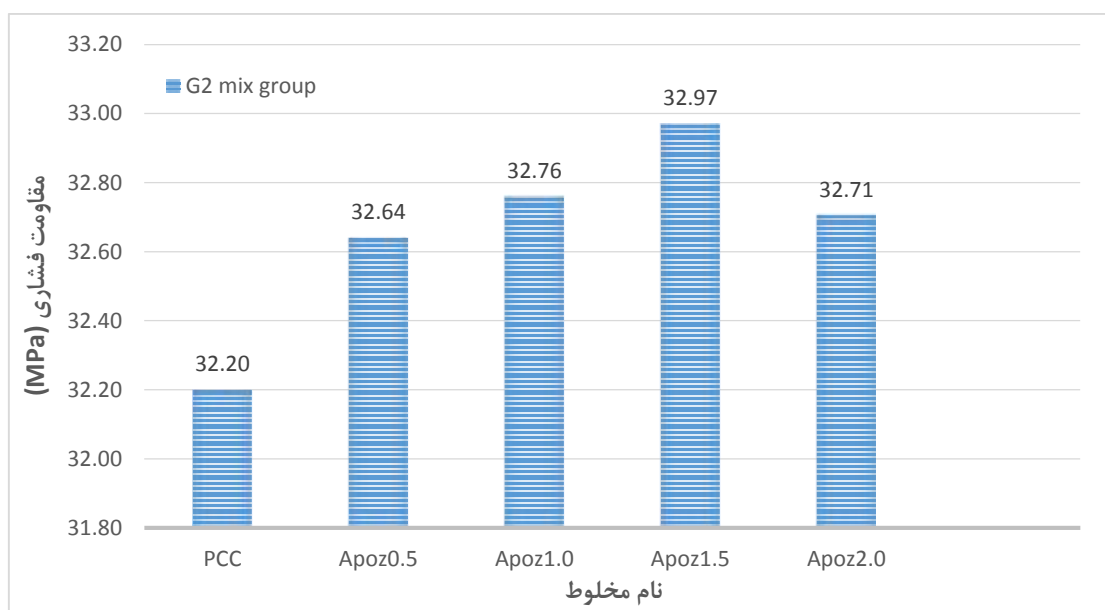
ارزیابی تاثیر پارامترهای مخلوط بتن بر محیط زیست

تقاضا برای مصرف بتن در جامعه بسیار زیاد است. طبق مطالعات انجام شده، مصرف بتن پس از مصرف آب به عنوان بیشترین تقاضا برای مصرف توسط انسان شناخته شده است (۱۹). تولید سیمان نیز منبع تولید CO₂ است و طبق آمار ۷ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهد (۲۰). بر اساس پیش بینی ها، جمعیت جهان از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۵۰ حدود ۵۱ درصد افزایش خواهد یافت (۲۱). با توجه به تقاضای بتن، یافتن موادی که بتواند با بهبود خواص بتن مصرف سیمان را کاهش دهد بسیار ضروری و برای محیط‌زیست مفید است.

خاصیت چسبندگی بین ذرات سنگدانه می‌شود. موارد در نتایج قابل مشاهده است.

مقایسه نتایج با بتن های پوزولانی دیگر

همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، در شرایط مشابه و جایگزینی ۱۵ درصد وزنی پوزولان به جای سیمان در نمونه بتن، پوزولان‌های معدنی محلی مقاومت اولیه کمتری در ۷ و ۲۸ روز عمل آوری نسبت به بتن های پوزولانی حاوی سیلیکا فوم و خاکستر بادی دارند. اما میزان افزایش مقاومت فشاری در ۲۱ روز یعنی نرخ رشد مقاومت فشاری از ۷ روز عمل آوری تا ۲۸ روزگی، در پوزولان معدنی محلی آسیاب بیشتر از دو پوزولان مشهور دیگر است. این افزایش قدرت می‌تواند به



شکل ۱- مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

Figure 1. Compressive Strength (MPa)

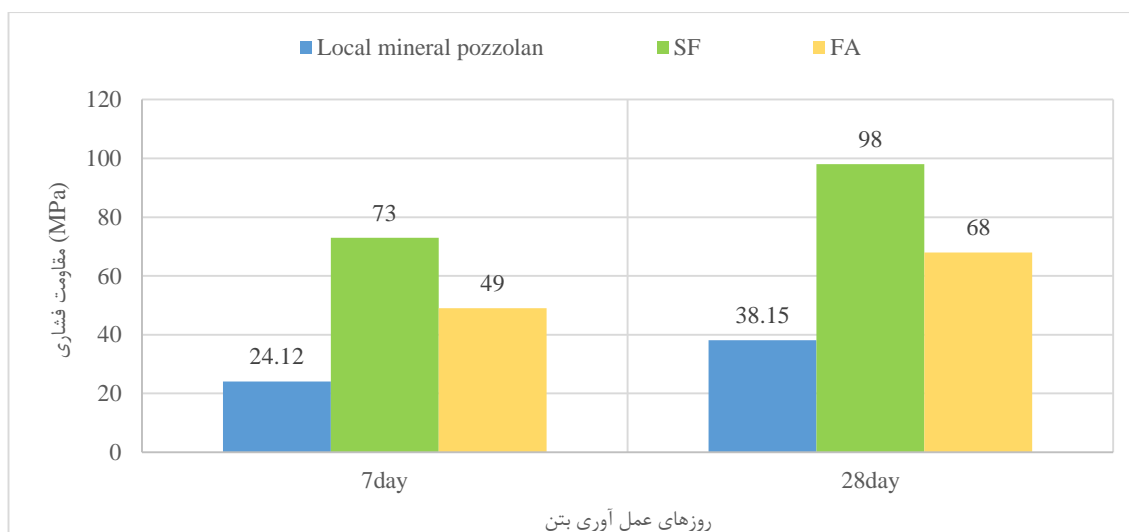
پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) اثرات گرمایش جهانی انتشار گازهای گلخانه‌ای را که در چرخه عمر یک محصول یا سیستم در یک زمان خاص در آینده رخ می‌دهد را نشان می‌دهد. این فاکتور برای امکان مقایسه اثرات گرمایش جهانی گازهای مختلف ایجاد شد. به طور خاص، این معیاری است که

گازهای گلخانه‌ای (GHG) مانند لایه ای عمل می‌کنند که زمین را عایق می‌کند. گازهای گلخانه‌ای مختلف می‌توانند اثرات متفاوتی بر گرم شدن زمین داشته باشند. دو روش کلیدی که این گازها با یکدیگر متفاوت هستند، توانایی آنها در جذب انرژی "بازده تابشی" آنها و مدت زمان ماندن آنها در جو که به عنوان "طول عمر" آنها نیز شناخته می‌شود، است.

مجموع انتشار CO₂ از هر بخش از مواد خام، تولید بتن تازه، حمل و نقل و مجموع کلی هر سه بخش آنها را نشان می‌دهد. مجموع CO₂ منتشر شده از هر جزء بتن در ردیف‌های گروه در جدول ۶ برابر با مقدار CO₂ منتشر شده از مواد خام مخلوط بتن در جدول ۴ است.

CO₂، طبق تعریف، دارای GWP به مقدار واحد و بدون در نظر گرفتن دوره زمانی است، زیرا گازی است که به عنوان مرجع استفاده می‌شود. CO₂ برای مدت طولانی در سیستم آب و هوایی باقی می‌ماند. انتشار CO₂ باعث افزایش غلظت CO₂ در جو می‌شود که هزاران سال ادامه خواهد داشت.

نشان می‌دهد انتشار یک تن گاز در یک دوره زمانی معین، نسبت به انتشار یک تن دی اکسید کربن (CO₂) چه مقدار انرژی جذب می‌کند. هر چه GWP بزرگتر باشد، یک گاز معین در مقایسه با CO₂ در آن بازه زمانی بیشتر زمین را گرم می‌کند. دوره زمانی معمولاً برای GWP ها ۱۰۰ سال است. GWP ها واحد اندازه گیری مشترکی را ارائه می‌دهند که اجازه می‌دهد تا تخمین های انتشار گازهای مختلف را بتوان بر اساس آن اندازه گیری کرد. GWP یک معیار مناسب برای سیاستگذاران برای مقایسه اثرات اقلیمی نسبی دو انتشار مختلف طبق مطالعات قبلی، ضریب انتشار CO₂ برای تولید بتن ۰/۰۰۸ (Kg CO₂/Kg) است (۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵). جدول ۸



شکل ۲- افزایش میزان نرخ مقاومت

Figure 2. Increase the rate of strength

جدول ۴- ضریب انتشار CO₂ از هر قسمت از مخلوط بتن. (KgCO₂/Kg)

Table 4. CO₂ emission coefficient from each part of the concrete mix. (KgCO₂ / Kg)

| پتانسیل گرمایش جهانی GWP | سیمان (۲۶) | پوزولان معدنی محلی (۲۷) | آب (۲۲) | فوق روان کننده (۲۸) | ماسه (۲۲) | شن (۲۶) |
|--------------------------|------------|-------------------------|----------|---------------------|-----------|---------|
| (KgCO ₂ /Kg) | ۰/۸۴ | ۰/۰۱۶ | ۰/۰۰۰۱۹۶ | ۰/۹۴۴ | ۰/۰۰۲۶ | ۰/۰۰۴۳ |

عوامل انتشار CO₂ از مواد و حمل و نقل

بمنظور محاسبه مقدار CO₂ منتشر شده از تولید بتن گروه G1 از جدول ۶، به عنوان مثال، در خصوص سیمان، مقدار ضریب GWP سیمان از جدول ۴ در مقدار سیمان نمونه بتنی

جدول ۴ ضریب انتشار CO₂ از هر قسمت از مخلوط بتن (GWP) و جدول ۵ مسافت حمل مصالح و مواد خام بتن را تا محل آزمایش نشان می‌دهد.

بتن از مجموع ردیف های مواد خام و تولید بتن تازه و حمل و نقل مواد خام مطابق جدول ۸ حاصل می‌شود.

همانگونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود مقدار انتشار آلاینده CO₂ در بخش مواد خام درپوزولان معدنی آسیاب نسبت به بتن سیمانی معمولی ۱۶/۹ درصد و در بخش حمل و نقل ۸/۹ درصد کاهش داشته است.

همچنین در شکل ۴ نشان داده شده است: افزودن ۱۵ درصد وزنی پوزولان معدنی جایگزین سیمان به بتن می‌تواند انتشار CO₂ را تا ۱۵/۲۰ درصد به ازای هر متر مکعب بتن تولیدی کاهش دهد که این مقدار با مطالعات بانک و همکاران ایشان در سه پوزولان سیلیکا فوم (SF) خاکستر بادی (FA)، سرباره کوره آهن گدازی (GGBS) تطابق دارد (۲۴).

پوزولان معدنی محلی آسیاب یک پوزولان مطلوب با کارایی موثر با مشخصات پوزولانهای پُر کاربرد در دنیا می‌باشد و برای جلوگیری از انتشار بیشتر CO₂ از صنایع سیمان و تولید بتن دوستدار محیط‌زیست کاربردی است.

که قبلاً جزییات آن در جدول ۲ ردیف G1 آمده است ضرب می‌شود:

$$۴۲۹/۶ \times ۰/۸۴ = ۳۶۰/۸۶$$

با توجه به ضریب ذکر شده جهت تولید بتن تازه، انتشار CO₂ از تولید بتن تازه با ضرب وزن بتن از ستون آخر جدول ۲ در ضریب انتشار مربوط به آن (۰/۰۰۸) محاسبه می‌شود:

$$۲۱۰۱/۴ \times ۰/۰۰۸ = ۱۶/۸۱$$

همچنین مطابق بررسی و مطالعات قبلی، حمل و نقل با کامیون دیزلی ۱۰ تن به ازای هر تن-کیلومتر، ۰/۱۲۲ کیلوگرم CO₂ در هر کیلومتر تولید می‌کند (۲۹). جدول ۷ مجموع CO₂ منتشر شده ناشی از حمل مصالح KgCO₂ جهت ردیف G1 در جدول ۸ را شرح می‌دهد.

گاز CO₂ منتشر شده برای هر گروه بتن، از مجموع CO₂ منتشر شده در اثر حمل در هر جزء مخلوط بتن به دست می‌آید. همچنین مجموع آلودگی منتشر شده ناشی از ساخت

جدول ۵- مسافت حمل مصالح (کیلومتر)

Table 5. Material transport distance (Km)

| شن | ماسه | فوق روان کننده | آب | پوزولان معدنی محلی | سیمان | مسافت |
|--------|-------|----------------|-----|--------------------|-------|--------------------|
| رودبار | انزلی | تهران | رشت | سیاهکل | همدان | تا محل پروژه (رشت) |
| ۸۸ | ۴۱ | ۳۲۰ | ۰ | ۱۲۵ | ۵۲۸ | (Km) |

جدول ۶- CO₂ تولید شده از هر کدام از اجزای بتن به تفکیک (کیلوگرم بر هر متر مکعب)

Table 6. CO₂ emission from each part of concrete separately (kg/m³)

| Group ID. | نام مخلوط | سیمان | پوزولان معدنی محلی | آب | فوق روان کننده | ماسه | شن | مجموع CO ₂ منتشر شده از مواد خام بتن |
|-----------|--------------------|--------|--------------------|-------|----------------|-------|------|---|
| G1 | بتن سیمانی معمولی | ۳۶۰/۸۶ | ۰ | ۰/۰۴۲ | ۴/۰۶ | ۱/۸۹۳ | ۳/۱۳ | ۳۶۹/۹۹ |
| G2 | پوزولان معدنی محلی | ۳۰۶/۷۷ | ۱/۰۳۱ | ۰/۰۴۲ | ۴/۰۶ | ۱/۸۹۳ | ۳/۱۳ | ۳۱۶/۹۳ |

بحث و نتیجه گیری

• افزودن بیش از ۱۵ درصد وزنی پوزولان معدنی محلی، مقاومت فشاری را کاهش می دهد و مقدار ۱۵ درصد وزنی جایگزین سیمان در بتن، مقدار بهینه می باشد.

• ارزیابی اثر کاهش CO₂ در کلیه نمونه های بتنی ساخته شده با پوزولان معدنی محلی و مقایسه آن با بتن سیمانی ساده نشان داد که جایگزینی ۱۵ درصد وزنی این پوزولان معدنی محلی با سیمان می تواند انتشار CO₂ را تا ۱۵/۲۰ درصد کاهش دهد.

• توانایی پوزولان معدنی محلی آسیاب در کاهش انتشار گاز گلخانه ای CO₂ در مقایسه با پوزولانهای هم ارز پُر کاربرد در دنیا در یک بازه قرار دارد که این مقدار، تاییدی است بر کاربردی بودن آن در تولید بتن های سبز با نگرش بر حفاظت از محیط زیست.

در این تحقیق پوزولان های معدنی محلی آسیاب با دوزهای مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی در یک طرح اختلاط مخلوط شده و مقاومت فشاری مقدار کاهش آلاینده ای آن در انتشار گاز گلخانه ای CO₂ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به شرح زیر است:

• همان گونه که جدول ۱ نشان داده شد اندازه ذرات پوزولان معدنی محلی آسیاب حدوداً ۳ برابر کوچکتر از اندازه سیمان است که این امر باعث می شود این ذرات به راحتی در حفرات مابین سنگدانه ها قرار گرفته و ضمن پر کردن منافذ، مقاومت بتن را افزایش دهد.

• آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های ساخته شده نشان داد که ۱۵ درصد وزنی پوزولان جایگزین سیمان در بتن بهترین نتیجه را داشته است. این جایگزینی مقاومت فشاری را حدود ۲/۴ درصد نسبت به نمونه سیمانی معمولی افزایش داد.

جدول ۷-مجموع CO₂ منتشر شده ناشی از حمل مصالح جهت ردیف G1 (کیلوگرم دی اکسید کربن)Table 7. Total CO₂ emitted from transportation of materials in G1 row (KgCO₂)

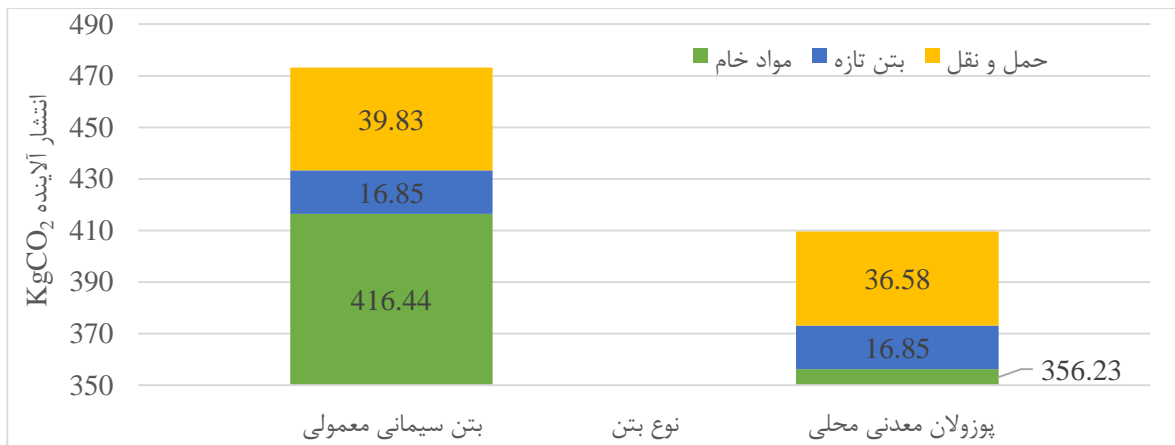
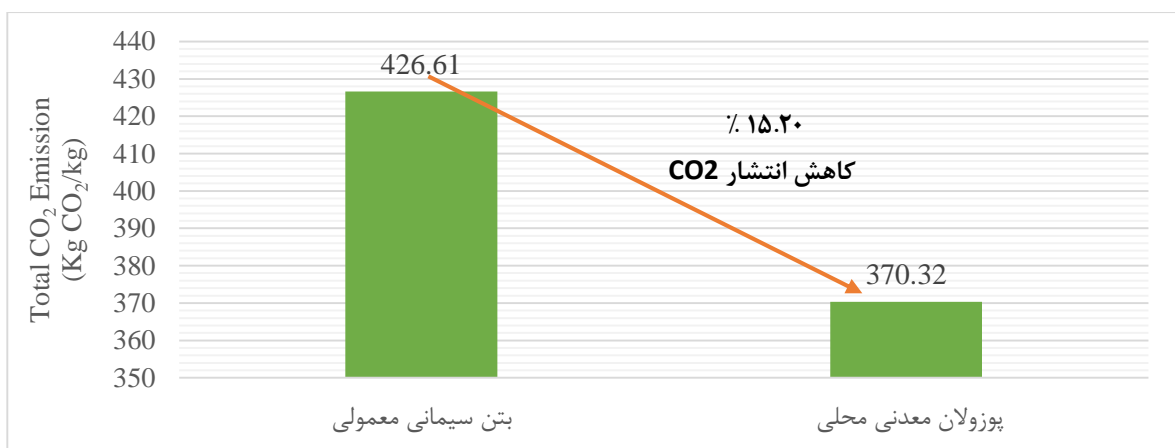
| مواد خام | سیمان | پوزولان معدنی محلی | آب | فوق روان کننده | ماسه | شن | مجموع CO ₂ منتشر شده ناشی از حمل مصالح KgCO ₂ |
|---|--------|--------------------|-------|----------------|-------|-------|---|
| مقدار مواد خام (T) | ۰/۴۲۹۶ | ۰ | ۲۱۵ | ۰/۰۰۴۳ | ۰/۷۲۸ | ۰/۷۲۸ | |
| مسافت (Km) | ۵۳۸ | ۱۲۵ | ۰ | ۳۲۰ | ۴۱ | ۸۸ | |
| انتشار CO ₂ به ازای هر تن کیلومتر (KgCO ₂) | ۰/۱۲۲ | ۰/۱۲۲ | ۰/۱۲۲ | ۰/۱۲۲ | ۰/۱۲۲ | ۰/۱۲۲ | |
| مجموع | ۲۸/۲۰ | ۰ | ۰ | ۰/۱۶۷ | ۳/۶۴ | ۷/۸۱ | ۳۹/۸۱ |

جدول ۸- مجموع CO₂ منتشر شده (کیلوگرم بر هر متر مکعب)Table 8. Total CO₂ emissions (kg/m³)

| Group ID. | Mix ID. | CO ₂ مواد خام | CO ₂ Fresh concrete production | CO ₂ Transportation | CO ₂ Total pollution |
|-----------|--------------------|-----------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------------|
| G1 | بتن سیمانی معمولی | ۳۶۹/۹۹ | ۱۶/۸۱ | ۳۹/۸۱ | ۴۲۶/۶۱ |
| G2 | پوزولان معدنی محلی | ۳۱۶/۹۳ | ۱۶/۸۱ | ۳۶/۵۸ | ۳۷۰/۳۲ |

زیست‌محیطی شرکت‌ها برای دینفعان تاثیرگذارترین مضمون کیفیت حسابرسی سبز براساس ارزیابی شورای گزارشگری مالی انگلستان می‌باشد. باتوجه به نتیجه کسب شده می‌توان مدل سلسله مراتبی را به ترتیب زیر ارائه نمود.

با تعیین قدرت نفوذ و قدرت وابستگی، برای تشکیل ماتریس مخروطی می‌بایست مجموعه‌ی خروجی؛ ورودی و عناصر مشترک را برای تعیین تاثیرگذارترین اولویت‌های مضامین گزاره‌ای تشکیل داد. نتایج نشان داد، ارزیابی سطح ریسک‌های

شکل ۳- مقدار انتشار CO₂ بر حسب اجزای تشکیل دهنده بتنFigure 3. CO₂ emissions in terms of concrete componentsشکل ۴- کاهش انتشار CO₂ در بتن حاوی پوزولان در مقایسه با بتن سیمانی معمولیFigure 4. CO₂ emission reduction in concrete containing pozzolans compared to Plain cement concrete

8. Princiotta F. Global Climate Change , The Technology Challenge. Springer Dordrecht Heidelberg. 2011;38.
9. Venkat G.N. CK, Ahmed E., NagendraBabu V. Comparative study on mechanical properties and quality of concrete by part replacement of cement with silica fume, metakaolin and GGBS by using M–Sand as fine aggregate. Materials Today: Proceedings. 2021;43.
10. Liu G. FMVA, Brouwers H. J. H. . Waste glass as binder in alkali activated slag–fly ash mortars. Materials and Structures. 2019;52.
11. Cobîrzan N. BAA, Moşonyi E. Investigation of the natural pozzolans for usage in cement industry. Procedia Technol. 2015;19:506-11.
12. Ranjbar M.K. MR, Mousavi Y., Yosefi S. Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete. Construction and Building Materials. 2013;47:806-13.
13. Nie CZ. Q. ZC, Shu X., He Q., Huang B. Chemical, Mechanical, and Durability Properties of Concrete with Local Mineral Admixtures under Sulfate Environment in Northwest China. materials. 2014;7.(5)
14. Gökçe H. HD, Ramyar K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete. Construction and Building Materials. 2019;194:1-11.
15. Song H .SV. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview. Journal of Hazardous Materials. 2006;138(2):226-33.
16. ASTM. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined

References

1. Root T. L TPJ, Hall K, Schneider S, Rosenzweig C, Pounds A., Fingerprints of global warming on wild animals and plants. nature. 2003;421:57-60.
2. Stocker T.F. QD, Plattner G., Tignor M., Allen S. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. The Physical Science Basis. 2013(Cambridge University Press):1535PP.
3. A. AO. Greenhouse gas emission inventory and quantifying regional compatible mitigation plans-horizon 2030 (case study: Guilan province, Iran). Iranian Journal of Health and Environment. 2022;15(1):121-36.
4. Kweku D BO, Maxwell A, Ato Desmond K,Danso K, Oti-Mensah E, Quachie A, Adormaa B. Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. Journal of Scientific Research & Reports. 2018;17. (6)
5. Hallsdóttir B.S. KR, Gudmundsson J. National Inventory Report 2007 - ICELAND National Inventory Report Iceland 2007 Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2007.
6. Rahimpour M.R. FM, Makarem M.A. Advances in Carbon Capture : Methods, Technologies and Applications. 1st Edition ed. Kelvin O.Yoro MOD, editor: Elsevier Science, 2020; 2020. 570 p.
7. Worrell E. PL, Martin N., Hendriks C.,Meida L. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. Annu Rev Energy Environ. 2001;26:303-29.

24. Yang K-H. JY-B, Cho M-S., Tae S-H. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2015;103:1-10.
25. Kelechi S.E. AM, Mohammed A., Obianyio I.I., Ibrahim Y.E. Equivalent CO₂ Emission and Cost Analysis of Green Self-Compacting Rubberized Concrete. *Sustainability*. 2022;14:137.
26. Habert G. DE, Šajna A., Rossi P. Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes. *Cement & Concrete Composites*. 2013;38:1-11.
27. Seo Y. KSM. Estimation of materials-induced CO₂ emission from road construction in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;26:625-31.
28. Müller H.S. HM, Vogel M. Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime. *Construction and Building Materials*. 2014;67:321-37.
29. Kawai K. ST, Kobayashi K., Sano S. Inventory Data and Case Studies for Environmental Performance Evaluation of Concrete Structure Construction. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2005;3(3):435-56.
- Natural Pozzolan for Use in Concrete. C618 2014.
17. Alavi Nia A. HM, Nili M., Afrough Sabet V. An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete. *International Journal of Impact Engineering*. 2012;46:62-73.
18. Mohamed O.A. N, O.F. Compressive strength and stability of sustainable self-consolidating concrete containing fly ash, silica fume, and GGBS. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2017;11:406-11.
19. Adesina A. Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. *Environmental Challenges*. 2020;1.
20. Miller S.A. HG, Myers R.J., Harvey J.T. Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. *One Earth*. 2021;4(10):1398-411.
21. P.K. M. Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concr Int*. 2002;24:23-8.
22. Kim S.W. JSJ, Kang D.H., Ahn K.L., Yun H.D. Mechanical Properties and Eco-Efficiency of Steel Fiber Reinforced Alkali-Activated Slag Concrete. *Materials*. 2015;8:7309-21.
23. Yang K.-H. SJ-K, Song K.-I. Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2015;39:265-72.