

ارزیابی اثرات زیست محیطی چرخه عمر بتن خودتراکم دارای قابلیت اجرایی در سدهای ساخته- شده با بتن سنگریزه‌ای

کد G

فریبرز هدایتی نیا^۱، محمد دنناز^۲، سید شهاب امامزاده^۳

۱- دانشجوی کارشناس ارشد عمران، دانشگاه خوارزمی تهران hedayat910farib@gmail.com

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی تهران delnavaz@khu.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی تهران shemamzadeh@khu.ac.ir

delnavaz@khu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق چرخه عمر، خواص رئولوژی و مقاومت فشاری بتن خودتراکم (SCC^۱) به کاررفته در بتن سنگریزه‌ای در نسبت‌های مخلوط مختلف حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان ماده مکمل سیمان با دو نسبت وزنی آب به مواد سیمانی ۰/۳۶ و ۰/۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. روش کار در این تحقیق به دو بخش تقسیم شد که در بخش نخست با انجام آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده، پارامترهای کارایی و روانی بتن خودتراکم از قبیل قابلیت پرمکندگی، قابلیت عبور و پایداری در برابر جداسازی و پارامتر مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه اندازه‌گیری شد. در بخش دوم با استفاده از ابزار LCA^۲، چرخه عمر بتن خودتراکم ساخته‌شده با نسبت‌های مخلوط مختلف ارزیابی شد و میزان افزایش پتانسیل گرمایش جهانی (GWP^۳) تعیین گردید. نتایج نشان داد که با افزایش میزان جایگزینی سیمان پرتلند با سرباره کوره آهن‌گدازی از ۲۰ به ۴۰ و ۵۰ درصد در ساخت بتن خودتراکم به کاررفته در بتن سنگ-ریزه‌ای، میزان تولید GWP به ترتیب به میزان ۱۵/۵، ۳۱/۱ و ۳۹ درصد کاهش خواهد یافت. استفاده از فناوری بتن سنگریزه‌ای و بتن خودتراکم با طرح اختلاط‌های ارائه‌شده در این تحقیق در ساخت سد بتنی، منجر به کاهش ۷۳ درصدی GWP ناشی از فاز تولید مصالح خواهد شد.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، بتن سنگریزه‌ای، ارزیابی چرخه عمر، GWP، سرباره کوره آهن‌گدازی.

^۱ Self-Compacting Concrete

^۲ Life Cycle Assessment

^۳ Global Warming Potential

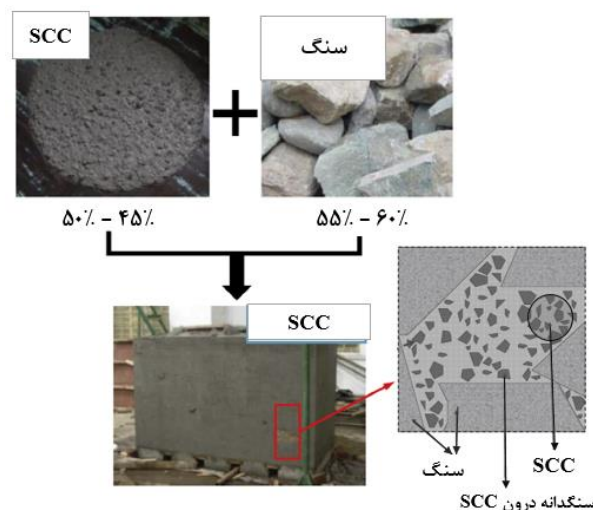
۱. مقدمه

رشد اقتصادی، عدالت اجتماعی و حفاظت از محیط زیست سه هدف اساسی توسعه پایدار هستند که کشورهای جهان تحت اجلاس های مختلف، متعهد به تحقق آن ها شده اند [۱]. از نظر زیست محیطی انتشار گاز CO₂ ناشی از کارخانه های تولید سیمان یکی از موضوعات اصلی توسعه پایدار در مواجهه با صنعت بتن است. در یک مطالعه انجام شده صنعت ساخت و ساز به عنوان یکی از هفت فناوری امیدبخش برای سرمایه گذاری انتخاب شد و در بخش مصالح ساخت و ساز تنها فرصت بزرگ برای کاهش میزان CO₂، کاهش مصرف سیمان یا استفاده از سیمان کم کربن معرفی شد. انتشار سالیانه CO₂ ناشی از تولید سیمان در جهان تقریباً بالغ بر ۲/۳ میلیارد تن است که این مقدار نزدیک به ۷ درصد CO₂ تولید شده ناشی از کل سوخت های فسیلی در جهان است. اگر ۵۰ درصد سیمان پرتلند به وسیله یک ماده ی سیمانی کم کربن جایگزین شود کاهش ۱ میلیارد تنی در تولید CO₂ می تواند حاصل شود [۲].

کاهش میزان مصرف سیمان پرتلند (OPC) یا جایگزین کردند آن با دیگر مواد مکمل سیمان (SCMs) مانند خاکستر بادی، پودر سنگ، دوده سیلیسی، سرباره کوره آهن گدازی در سدهای بتنی به عنوان سازه های هیدرولیکی نیازمند به بتن ریزی حجیم هم از نظر زیست محیطی و هم از نظر کاهش تولید حرارت می تواند مفید واقع شود. بالا رفتن حرارت در سدهای بتنی ناشی از هیدراتاسیون منتج به ترک خوردگی بتن در هنگام سرد شدن می شوند که ترک های موازی با محور سد می توانند پایداری سد را به مخاطره بی اندازند [۳]. از راه حل های موجود برای رسیدن به توسعه پایدار می توان به محدود کردن مصرف منابع تجدید ناپذیر و به حداقل رساندن ضایعات و انتشارات مرتبط با آن اشاره نمود که در این خصوص استفاده از مواد مکمل سیمان در بتن، منافع زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی فراوانی را برای هدف توسعه پایدار به ارمغان می آورد [۴]. استفاده از مواد جایگزین سیمان در بتن یا یک سیمان دیگر می تواند خسارت های اقتصادی، زیست محیطی و فنی ناشی از تولید سیمان پرتلند را جبران کند. اکثر این مواد ضایعات ناشی از دیگر صنایع هستند بنابراین بکار بردن آن ها به عنوان یک ماده سیمانی کمک شایانی به محیط زیست محسوب می شود مخصوصاً زمانی که بدانیم این مواد باعث بهبود سازه ها در آینده می شوند. با توجه به اینکه مواد مکمل سیمان متفاوت هستند بنابراین اثرات آن ها بر روی سیمان و بتن نیز متفاوت خواهد بود. بنابراین بهترین راه برای کسب نتایج مطلوب استفاده از نسبت های مخلوط مختلف در انجام آزمایش های بتن تازه و سخت شده است. هر چند در برخی آیین نامه های محلی استفاده از مواد مکمل سیمانی محدود شده است ولی هنوز نیاز به انجام مطالعات بیشتر در این زمینه احساس می شود هر چند که استفاده از آیین نامه های تدوین شده می تواند در این زمینه راهگشا باشد [۵].

سازمان نقشه برداری و زمین شناسی ایالات متحده (USGS) در سال ۲۰۱۷ میزان تولید سیمان پرتلند در جهان را برابر ۴۱۲۸ میلیون تن گزارش کرده که در آن کشور ایران با تولید حدود ۱/۳۶ درصد سیمان جهان یعنی ۵۶ میلیون تن، مقام یازدهم را به خود اختصاص داده است [۶]. بنابراین اگر مصرف ۴۱۲۸ میلیون تن سیمان را در تولید بتن معمولی با نسبت های مخلوط ۱۵۰ kg/m³ سیمان، ۱۷۵ kg/m³ آب و ۱۸۰۰ kg/m³ سنگ دانه در نظر بگیریم آنگاه برای تولید این میزان بتن در جهان، حدود ۲۱/۲ میلیارد تن سنگ دانه و ۲/۱ میلیارد تن آب مورد نیاز است که در مجموع منجر به تولید ۲۷/۴ میلیارد تن بتن خواهد شد که این میزان تولید بتن برای کشور ایران حدود ۳۷۳ میلیون تن در سال خواهد بود. بنابراین با توجه به این میزان بتن تولیدی و جمعیت جهان در سال ۲۰۱۷ که طبق گزارش اداره آمار ایالات متحده برابر ۷/۵ میلیارد نفر برآورد شده است می توان نتیجه گرفت که سالیانه در جهان به ازای هر شخص حدود ۳/۷ تن بتن تولید می شود. بنابراین با توجه به جمعیت کشور ایران که طبق مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۷ برابر ۸۱/۵ میلیون نفر گزارش شده است می توان گفت که در کشور ایران سالیانه به ازای هر شخص ۴/۶ تن بتن تولید می شود. بنابراین نرخ مصرف بتن در ایران حدود ۱/۲۴ برابر نرخ مصرف آن در جهان است. با در نظر گرفتن نرخ بالای مصرف بتن به عنوان یک محصول، بررسی آن از جنبه های زیست محیطی، اقتصادی و انرژی، بسیار حائز اهمیت است.

کاهش مصرف سیمان یکی از راه کارهای مناسب در بهبود وضعیت تولید بتن از نظر زیست محیطی، اقتصادی و انرژی است. از طرفی کم کردن میزان سیمان در نسبت های اختلاط بتن باعث ایجاد ضعف در خصوصیات مکانیکی و رئولوژیکی (کارایی و روانی) آن می شود. بنابراین استفاده از مواد مکمل سیمان که تأثیر نامطلوبی بر خصوصیات مکانیکی و رئولوژی بتن نداشته باشد، می تواند مفید می تواند علاوه بر داشتن صرفه اقتصادی منجر به کاهش پارامترهای نامطلوب زیست محیطی نیز شود. از جمله بتن ریزی های حجیم که سهم قابل توجهی از مصرف بتن را به خود اختصاص داده اند می توان به بتن ریزی در سدهای بتنی اشاره نمود. بنابراین ارائه راهکارهایی مانند استفاده از مواد مکمل سیمانی در جهت کاهش میزان مصرف سیمان در ساخت سدهای بتنی، کمک زیادی به کاهش تولید پارامترهای زیان بار زیست محیطی خواهد نمود. کشور چین در سال های اخیر برای اجرای بتن ریزی حجیم در ساخت سدهای بتنی از فناوری جدیدی بنام بتن سنگ ریزه ای استفاده کرده است. در بتن سنگ ریزه ای از سنگ به جای سنگدانه استفاده شده و فضای خالی بین سنگ ها که حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد است با بتن خود تراکم پر می شود در نتیجه مصرف سیمان به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته و به تبع آن حرارت تولیدی در بدنه سد و بار آلودگی زیست محیطی نیز دچار افت خواهند شد. عیار سیمان مصرفی در این بتن ها برای طرح های اجرا شده در کشور چین و برای رده مقاومتی C15 بین ۸۰ تا ۹۰ کیلوگرم در مترمکعب بوده است که این مقدار با توجه به عیار سیمان مصرفی در دیگر انواع بتن های مصرفی در قسمت های مختلف سدهای بتنی مانند بتن غلتکی، مقدار مناسبی محسوب می شود و این موضوع با توجه به مزیت هایی این نوع بتن شامل صرفه جویی در نیروی کار، صرفه جویی در مصالح خام، کاهش هزینه و کاهش بار آلودگی زیست محیطی پررنگ تر می شود [۷]. شکل ۱ ساختار بتن سنگ ریزه ای را که به طور عمده برای استفاده در سازه های عظیم توسعه یافته است را نشان می دهد که نقش سنگ ها در آن به عنوان سنگدانه و نقش بتن خود تراکم به عنوان خمیر ماتریس بتن در نظر گرفته می شود [۳].



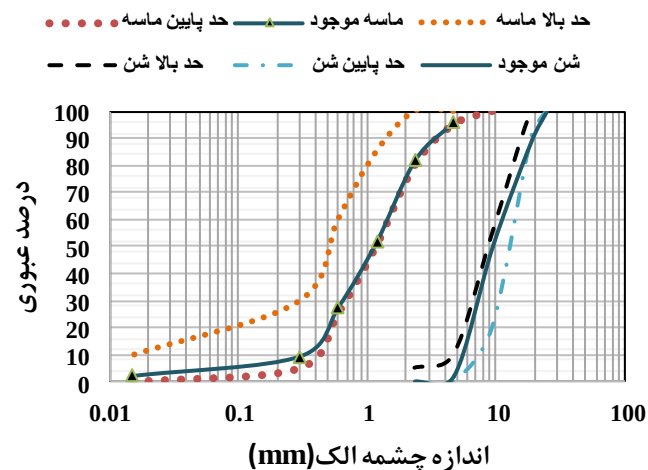
شکل ۱- ساختار و بخش های تشکیل دهنده بتن سنگ ریزه ای [Yuatao et al., 2015]

اگرچه کسب مقاومت در بتن حاوی سرباره کوره آهن گدازی نسبت به بتن معمولی کندتر است ولی مقاومت بلندمدت آن بیشتر است و این به نسبت های اختلاط و شرایط عمل آوری بستگی دارد. معمولاً کارایی این نوع بتن بیشتر از نوع معمولی بوده و میزان جایگزینی سرباره به جای سیمان ۵۰ درصد وزنی توصیه می شود و بهتر است دمای عمل آوری برابر ۲۰ درجه سانتی گراد باشد [۱]. با افزایش استفاده از سرباره به عنوان ماده مکمل سیمان در بتن خود تراکم با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۶ به اندازه ۳۰ تا ۷۰ درصد وزن سیمان پرتلند، مقدار روانی و قابلیت پرمکنندگی اندازه گیری شده در آزمایش جریان اسلامپ تا میزان ۲۱ درصد افزایش یافته است [۸].

۲. مواد و روش تحقیق

۲-۱. مواد

شن مصرفی از نوع شکسته با وزن مخصوص ظاهری SSD برابر 2620 kg/m^3 و درصد جذب آب $1/19$ و حداکثر اندازه 19 mm و ماسه مصرفی از نوع طبیعی با مدول نرمی $3/32$ و وزن مخصوص ظاهری SSD برابر 2600 kg/m^3 و درصد جذب آب 3 ، هر دو از معادن شهرستان اسدآباد، انتخاب شدند که نمودار دانه‌بندی آن‌ها با توجه به محدوده‌هایی که استاندارد ASTM C 33-03 برای شن و ماسه تعیین کرده در شکل ۲ ارائه شده است. مطابق با استاندارد ASTM C 33-03 مدول نرمی مناسب برای ماسه جهت مصرف در بتن حدود $2/3$ تا $3/1$ است. بنابراین با توجه به بالا بودن مدول نرمی ماسه مورد استفاده در این تحقیق و همچنین جهت برآورده شدن خواص رئولوژی مناسب بتن خودتراکم، در همه طرح مخلوط‌ها از مقدار 100 kg/m^3 پودر سنگ ساوه با ساختار شیمیایی CaCO_3 به عنوان فیلر خنثی استفاده شد.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی شن و ماسه با توجه به محدودیت‌های ASTM C 33-03

سیمان مورد استفاده در این پژوهش سیمان تیپ II شرکت سیمان هگمتان استان همدان است که الزامات ASTM C 150-04 در آن رعایت شده و درصد ترکیبات شیمیایی سیمان تیپ II هگمتان در جدول ۱ ارائه شده است. میزان ریزی سیمان به روش بلین برابر $2910 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و زمان گیرش اولیه و نهایی آن به ترتیب برابر ۱۵۴ و ۱۹۵ دقیقه بوده و مقاومت فشاری آن در سن ۲۸ روز برابر با $41/1 \text{ MPa}$ محاسبه شده است. چگالی ظاهری سیمان برابر 3150 kg/m^3 محاسبه شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان تیپ ۲ هگمتانه (درصد وزن سیمان)

ترکیب	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	C_3A	L.O.I
درصد	۲۱/۲۷	۴/۹۵	۴/۰۳	۶۲/۹۵	۱/۵۵	۲/۲۶	۰/۴۹	۰/۶۵	۶/۳	۲/۱۱
ترکیب	C_4AF	C_3A	C_2S	C_3S						
درصد	۱۲/۲۶	۶/۳	۳۰/۵۶	۴۰/۳۵						

سربراه مورد استفاده در این تحقیق از کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه شده است که در آن سربراه تولید شده به صورت سریع و به کمک جت آب سرد شده است و به اندازه دانه های سیمان نرم شده است. درصد ترکیبات شیمیایی سربراه ذوب آهن اصفهان در جدول ۲ ارائه شده است. سربراه آسیاب شده کارخانه ذوب آهن اصفهان در این تحقیق طبق استاندارد ASTM C188-89 دارای چگالی ظاهری برابر 2900 kg/cm^3 است و مقدار نرمی آن مطابق با ISIRI-389 برابر $3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$ محاسبه شد.

جدول ۲- آنالیز شیمیایی سربراه ذوب آهن اصفهان

ترکیب شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
درصد وزن (%)	۳۶/۱۲	۱۱	۱/۱	۳۷/۵	۸/۵	۰/۳۷	۰/۶۵	۱

در این تحقیق از یک فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات که ویژگی های آن در جدول ۳ ارائه شده، استفاده شد. محدوده مصرفی فوق روان کننده بین ۰/۲ تا ۱/۴ وزن سیمان است که در این تحقیق مقدار مصرف آن برابر ۱/۲ درصد وزن سیمان لحاظ شد.

جدول ۳- ویژگی های فوق روان کننده

مشخصات	ساختار
مایع	ظاهر
۱/۰۸ تا ۱/۱۰۸ در 20°C	وزن مخصوص (gr/cm^3)
قهوه ای روشن	رنگ
آروماتیک	بو
۶/۶	PH
وجود ندارد	یون کلر
۴۵	درصد جامد

۲-۲. روند آزمایشگاهی

۲-۲-۱. نسبت های اختلاط و شیوه ساخت و نمونه گیری

مقدار بتن ساخته شده برای هر طرح اختلاط در این تحقیق برابر ۲۵ لیتر در نظر گرفته شد. در این تحقیق نمونه ها به صورت مکعبی و با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ و در آزمایشگاه مکانیک خاک و بتن دانشگاه خوارزمی تهران ساخته شدند. شیوه ساخت بتن درون میکسر به این صورت انجام شد که ابتدا کل درشت دانه و ۳۰ درصد آب اختلاط درون مخلوط کن ریخته و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط گردید سپس مواد پودری شامل OPC و سربراه به مدت ۱ دقیقه به مخلوط کن اضافه شد، در گام بعد ریزدانه شامل ماسه و پودرسنگ نیز اضافه و برای ۲ دقیقه مخلوط گردید در نهایت فوق روان کننده برای مدت ۱ دقیقه به مخلوط اضافه شد. در این تحقیق ۸ طرح اختلاط شامل طرح های شاهد و طرح های دربردارنده ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سربراه به عنوان SCMs برای دو حالت $W/C=0.36, 0.4$ ارائه شد که در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴- نسبت های مخلوط بتن خودتراکم

افزودنی	شن	ماسه	پودر سنگ	سرباره	سیمان	W/C	مشخصه طرح
Kg/m ³							
۶	۶۳۷	۹۶۰	۱۰۰	۰	۵۰۰	۰/۳۶	S _{0-0.36}
۶	۶۳۰	۹۶۰	۱۰۰	۱۰۰	۴۰۰	۰/۳۶	S _{20-0.36}
۶	۶۲۳	۹۶۰	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۰/۳۶	S _{40-0.36}
۶	۶۲۰	۹۶۰	۱۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۰/۳۶	S _{50-0.36}
۶	۵۹۹	۹۴۷	۱۰۰	۰	۵۰۰	۰/۴	S _{0-0.4}
۶	۵۹۲	۹۴۷	۱۰۰	۱۰۰	۴۰۰	۰/۴	S _{20-0.4}
۶	۵۸۵	۹۴۷	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۰/۴	S _{40-0.4}
۶	۵۸۲	۹۴۷	۱۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۰/۴	S _{50-0.4}

۲-۲-۳. آزمایش های SCC و نحوه عمل آوری

آزمایش های بتن تازه انجام گرفته (شکل ۳) در این تحقیق مطابق با استانداردهای BS EN 12350 بوده و شامل آزمایش های اسلامپ، اسلامپ در T₅₀ cm، قیف V شکل، جعبه L شکل، الک جداسازی و حلقه J است که جهت تعیین پارامترهای روانی و کارایی نسبت های مخلوط مختلف SCC شامل قابلیت عبور، قابلیت پرمختندگی، لزجت جریان و پایداری در برابر جداسازی، انجام شده است. طبق استاندارد BS EN 12390-1:2000، قالب های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانت بعد از اضافه کردن آب باز شده و نمونه ها تا زمان ۲۷ روز در مخزن عمل آوری با دمای ۲۰ ± ۲ درجه سلسیوس نگهداری شدند. اندازه گیری مقاومت فشاری نمونه ها مطابق با BS EN 12390-3:2000 و با اعمال نرخ ثابت تنش ۰/۲ MPa/s انجام گرفت.



شکل ۳-آزمایش های بتن تازه

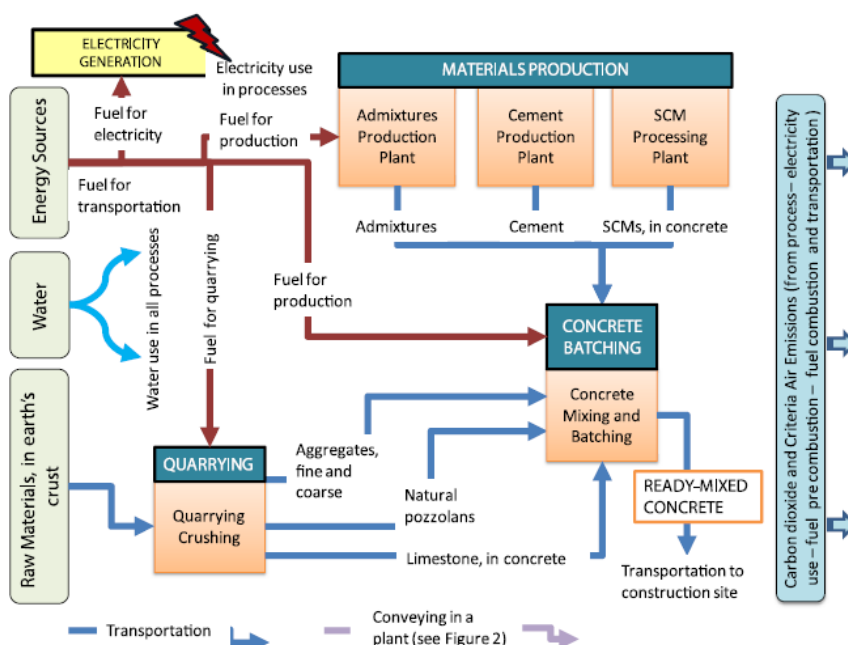
۲-۲-۳. متدولوژی LCA

به مراحل پیوسته و متوالی یک محصول از لحظه استخراج مواد خام از طبیعت تا بازیافت و دفع نهایی چرخه عمر آن محصول گفته می شود. LCA به بررسی اثرات زیست محیطی ایجاد شده در سراسر چرخه عمر محصول می پردازد و دارای چهار مرحله اصلی شامل ۱. دامنه و هدف ۲. LCI ۳. LCIA و

۴. تحلیل و تفسیر نتایج است [۹]. در این تحقیق با انجام LCA برای SCC مقدار GWP تولید شده توسط طرح اختلاط‌های مختلف در طول پرخه عمر آن‌ها محاسبه گردید.

۲-۳-۱. LCA طرح اختلاط‌های SCC حاوی سرباره

به منظور انجام LCA طرح اختلاط‌های ارائه شده در این تحقیق از Green Concrete LCA tool (شکل ۴) که یک نرم افزار اکسل پایه است و برای تحلیل اثرات زیست محیطی تولید بتن و مواد تشکیل دهنده آن شامل سیمان، سنگ دانه، افزودنی و SCMs توسعه یافته است، استفاده شد. این ابزار که توسط دانشگاه برکلی طراحی شده نه تنها یک پایگاه داده قراردادی از منابع (مصالح، انرژی و آب) و برخی انتشارها از کارخانه‌های تولید بتن که تنها اثرات مستقیم مانند انتشار گازهای خروجی در حین حمل مصالح بتن و یا تولید الکتریسیته را در نظر می‌گیرد، است بلکه در این ابزار اثرات زنجیره تأمین در فرآیند تولید بتن و مصالح تشکیل دهنده آن نیز ارزیابی می‌شود [۱۰].



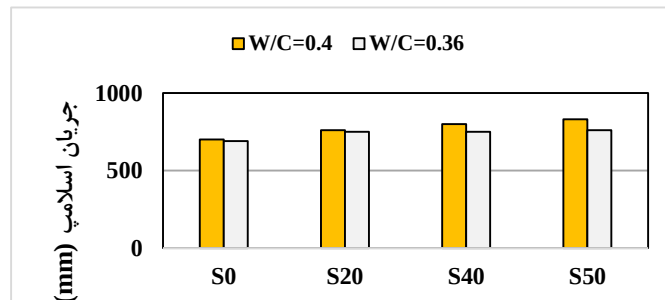
شکل ۴- دامنه و شرایط مرزی Cradle to Gate در فرآیند تولید بتن [Gursel, Horvath, 2012]

۳. نتایج و بحث

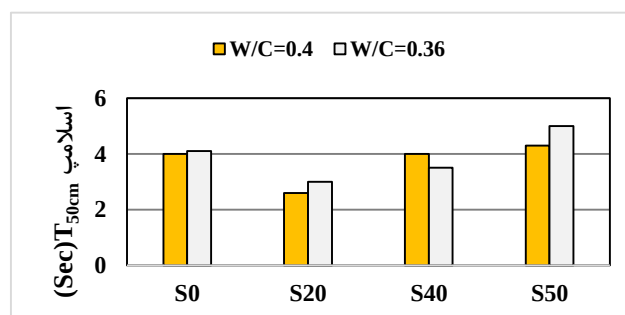
۳-۱. خواص رئولوژی طرح اختلاط‌های SCC

نتایج آزمایش اسلامپ و اسلامپ در T_{50cm} که در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است نشان می‌دهد که جریان اسلامپ برای همه طرح‌های ارائه شده در این مطالعه به جز میزان اسلامپ طرح S50-0.4، طبق جدول ۶ در محدوده استاندارد Eurocode [۱۱] قرار دارد. برای طرح‌هایی که در آن‌ها OPC به ترتیب با ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره جایگزین شده است، اندازه جریان اسلامپ نسبت به طرح شاهد به ترتیب ۶۰، ۶۰ و ۷۰ میلی متر افزایش یافته است. بنابراین با افزایش درصد جایگزینی سرباره با OPC از ۲۰ به ۴۰ و ۵۰ درصد، روانی و قابلیت پرمکنندگی SCC به ترتیب به مقدار ۸/۷، ۸/۷ و ۱۰ درصد نسبت به طرح شاهد افزایش داشته است. در تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۱۲ چنین نتیجه شد که مقدار روانی بتن نسبت به طرح شاهد در محاسبات آزمایش اسلامپ برای طرح‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد سرباره با $W/C=0.33$ به ترتیب به اندازه ۲، ۶ و ۵ درصد افزایش یافته است [۱۲]. مقدار اسلامپ در T_{50cm} در طرح-

های حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره با $W/C=0.36$ نسبت به طرح شاهد به ترتیب دچار افتی معادل ۱/۱ و ۰/۶ ثانیه شده ولی برای طرح حاوی ۵۰ درصد سرباره مقدار آن معادل ۰/۹ ثانیه افزایش یافته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که قابلیت پرکنندگی در طرح های حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره به ترتیب به مقدار ۲۷ و ۱۵ درصد افزایش و در طرح حاوی ۵۰ درصد سرباره به مقدار ۲۲ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش داشته است. استفاده از سرباره به عنوان SCMs به اندازه ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد وزن OPC، باعث افزایش اندازه جریان اسلامپ نسبت به طرح شاهد به ترتیب به اندازه ۵، ۱۹، ۲۲ و ۲۵/۴ درصد شده است [۱۳].



شکل ۵- جریان اسلامپ برای طرح شاهد و طرح های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد GBFS برای $W/C=0.36, 0.4$



شکل ۶- اسلامپ در T_{50cm} برای طرح شاهد و طرح های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد GBFS برای $W/C=0.36, 0.4$

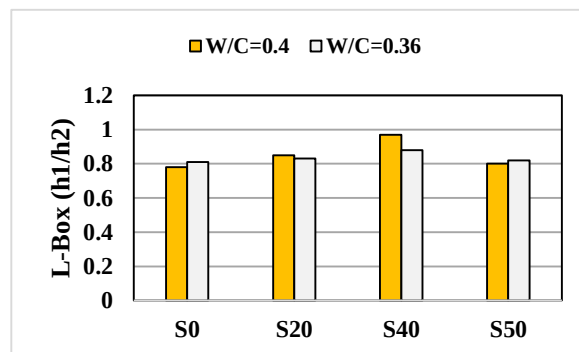
جدول ۶- نوع آزمایش های تعیین خواص رئولوژی بتن خودتراکم و حد مجاز آنها طبق Eurocode [Han et al., 2017]

خصوصیات	نوع آزمایش	حد مجاز طبق Eurocode
قابلیت پرکنندگی	جریان اسلامپ	۶۵۰-۸۰۰ mm
	جریان اسلامپ در T_{50}	۲-۵ s
	قیف V شکل	۸-۱۲ s
	جعبه U	$H_2-H_1 \leq 30$ mm
قابلیت عبور	حلقه J	۰-۱۰ mm
	جعبه L شکل	$H_2/H_1 = 0.8-1$
قابلیت جداسازی	الک جداسازی	$\leq 15\%$

نتایج آزمایش های L-Box (بیانگر قابلیت عبور بتن خودتراکم از میان تنگ شدگی ها بدون رخ دادن مسدودشدگی)، V-Funnel (شاخصی از میزان لزجت و قابلیت پرکنندگی SCC)، الک جداسازی (نشان دهنده پایداری SCC در برابر جداسازی) و J-Ring (نشان دهنده قابلیت عبور SCC از میان

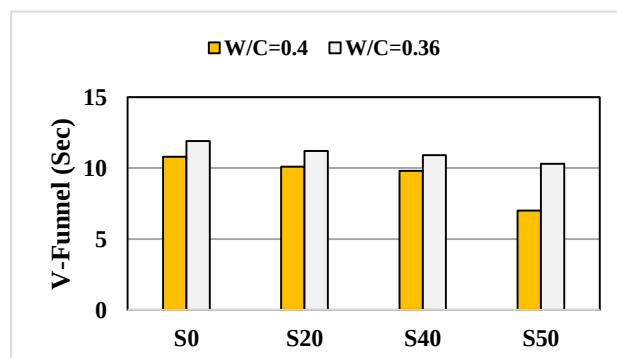
موانع) برای دو حالت $W/C=0.36, 0.4$ به ترتیب در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ و ۱۰ ارائه شده است. نتایج آزمایش‌ها برای همه طرح‌ها به‌جز نتایج L-Funnel، V-Funnel و J-Ring به‌ترتیب برای طرح‌های $S0-0.4, S50-0.36, S0-0.4, S50-0.4$ در محدوده استاندارد Eurocode قرار دارد.

در حالت $W/C=0.36$ با افزایش جایگزینی OPC از ۲۰ به ۴۰ و ۵۰ درصد بوسیله سرباره، اختلاف ارتفاع اندازه‌گیری شده در آزمایش L-box نسبت به طرح شاهد به ترتیب دچار افزایش ۲، ۷ و ۱ درصدی است بنابراین قابلیت عبور SCC به ترتیب به میزان ۲/۵، ۸/۶ و ۱/۲ درصد نسبت به طرح شاهد افزایش داشته است. تحقیقات Usal و همکاران نشان داد که قابلیت عبور در آزمایش جعبه L شکل برای طرح‌های حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره به ترتیب ۸ و ۱۶/۵ درصد افزایش داشته است [۱۲]. برای طرح‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره با $W/C=0.4$ نسبت به نمونه شاهد میزان اختلاف ارتفاع اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر ۷، ۱۹ و ۲ درصد است بنابراین می‌توان گفت که قابلیت عبور به ترتیب به میزان ۹، ۲۴ و ۲/۶ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است.



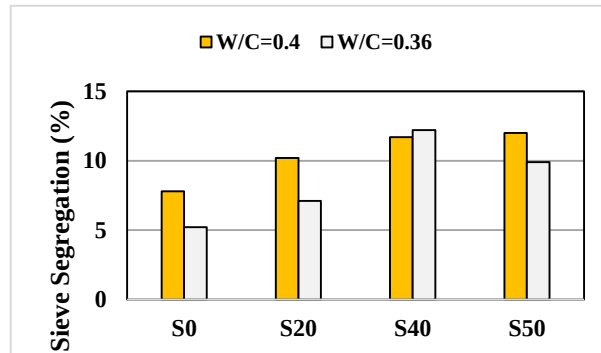
شکل ۷- نتایج آزمایش L-Box برای طرح شاهد و طرح‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره برای $W/C=0.36, 0.4$

با افزایش درصد جایگزینی OPC توسط سرباره از ۲۰ به ۴۰ و ۵۰ در حالت $W/C=0.36$ ، زمان تخلیه قیف V شکل به ترتیب ۷/۰، ۱ و ۱/۳ ثانیه کاهش یافته است بنابراین می‌توان گفت که قابلیت پرکنندگی نسبت به طرح شاهد به ترتیب به میزان ۶/۸، ۴/۱۳ درصد افزایش یافته است. نتیجه یک تحقیق نشان داد که استفاده از سرباره به‌اندازه ۱۰ و ۱۵ درصد وزن OPC، زمان تخلیه قیف V شکل را به ترتیب ۱ و ۳ ثانیه کاهش داده و در نتیجه باعث افزایش قابلیت پرکنندگی SCC به ترتیب به میزان ۱۵ و ۴۳ درصد افزایش خواهد شد [۱۳]. با افزایش درصد جایگزینی OPC از ۲۰ به ۴۰ و ۶۰ توسط سرباره و برای حالت $W/C=0.33$ ، قابلیت پرکنندگی SCC نیز به ترتیب به مقدار ۱۸، ۹ و ۳۹ درصد افزایش خواهد داشت [۱۲].



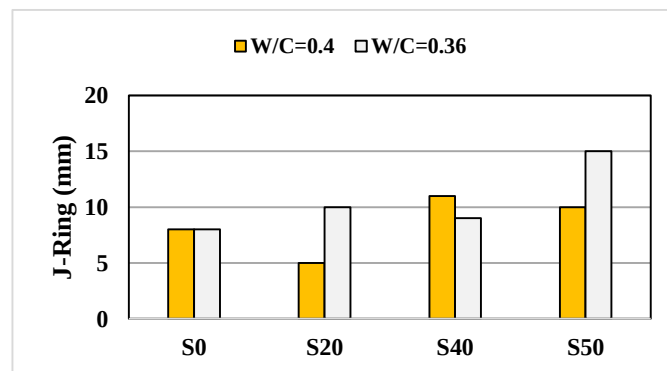
شکل ۸- زمان جریان V-Funnel برای طرح شاهد و طرح‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره برای $W/C=0.36, 0.4$

در طرح‌های با $W/C=0.4$ که OPC در آن‌ها با ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره جایگزین شده، درصد افت پایداری SCC در برابر جداسازی نسبت به طرح شاهد به ترتیب برابر ۲/۴، ۳/۹ و ۴/۲ به دست آمد. Boukendakdji و همکاران در میزان افت پایداری بتن خودتراکم در برابر جداسازی برای طرح‌هایی حاوی سرباره به اندازه ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد را به ترتیب برابر ۲، ۴، ۱۳ و ۱۹ درصد محاسبه نمودند [۱۳].



شکل ۹- نتایج آزمایش الک جداسازی برای طرح شاهد و طرح‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره برای $W/C=0.36, 0.4$

در حالت $W/C=0.4$ افزایش مقدار اختلاف ارتفاع در آزمایش حلقه J برای طرح‌های با مقدار جایگزینی ۴۰ و ۵۰ درصدی سرباره به عنوان SCMs، نسبت به طرح شاهد به ترتیب برابر ۳ و ۲ میلی‌متر و افت مقدار اختلاف ارتفاع به اندازه ۳ میلی‌متر برای طرح با جایگزینی ۲۰ درصدی سرباره، به دست آمد. بنابراین قابلیت عبور در طرح‌های حاوی ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره به ترتیب به اندازه ۷۳/۵ و ۲۵ درصد کاهش یافته حال آنکه در طرح با میزان سرباره ۲۰ درصد این توانایی به اندازه ۷/۳ درصد افزایش یافته است. نتایج تحقیقات Boukendakdji و همکاران نشان داد که جایگزینی کردن ۱۰ و ۱۵ درصد وزن OPC با سرباره قابلیت عبور SCC را به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد افزایش می‌دهد [۱۳].

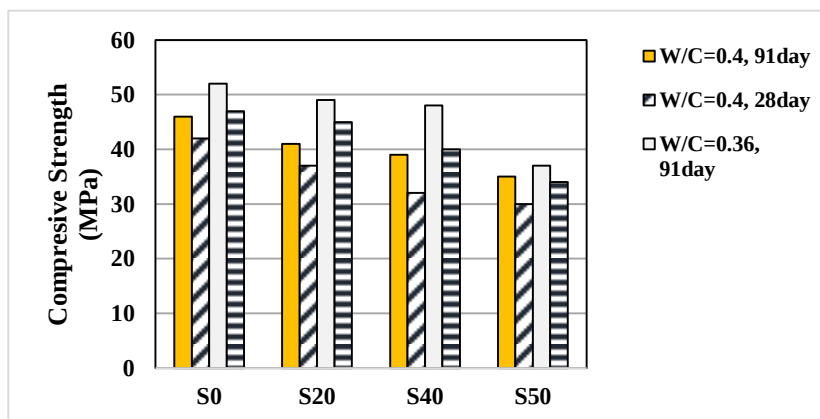


شکل ۱۰- نتایج آزمایش J-Ring برای طرح شاهد و طرح‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره برای $W/C=0.36, 0.4$

۲-۳. مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۱ روزه طرح‌های اجرا شده در این تحقیق برای $W/C=0.36, 0.4$ در شکل ۱۲ ارائه شده است. برای طرح‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره با هر دو نسبت آب به مواد سیمانی، مقاومت فشاری در همه موارد افت داشته و مقدار این افت برای سن ۲۸ روزه با $W/C=0.4$ نسبت به طرح شاهد به ترتیب برابر ۲/۴، ۱۵ و ۲۷/۵ درصد و برای سن ۹۱ روزه به ترتیب برابر ۶، ۸ و ۲۹ درصد، محاسبه شد. Boukendakdji با استفاده از سرباره به مقدار ۱۵ درصد جایگزینی OPC در SCC نتیجه گرفت که مقدار افت مقاومت ۲۸ و ۹۱ روزه آن نسبت به طرح شاهد به ترتیب برابر ۱۱ و ۵ درصد است که این مقدار افت برای استفاده از ۲۰ درصد سرباره در

تحقیق حاضر به ترتیب برابر ۱۲ و ۱۰ درصد محاسبه شد [۱۳]. نتایج تحقیقات Usal و همکاران نشان داد که با جایگزینی ۶۰ درصد وزن OPC با سرباره برای $W/C=0.33$ و عیار سیمان $kg/m^3 550$ ، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به اندازه ۶ درصد کاهش یافته است [۱۲].

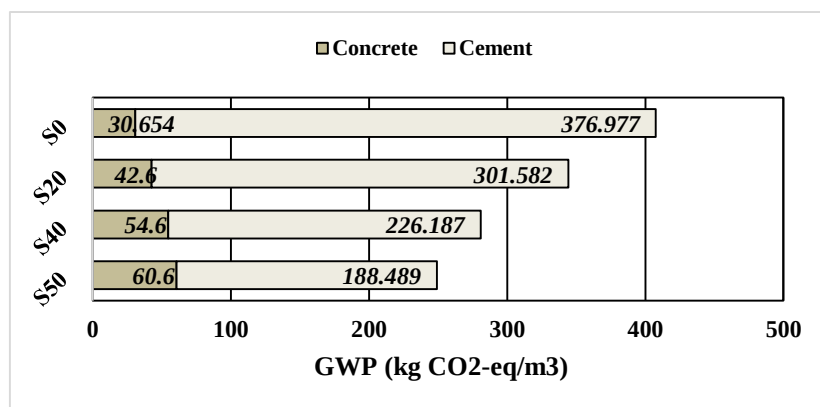


شکل ۱۱- مقاومت فشاری طرح شاهد و طرح‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره در سنین ۲۸ و ۹۱ روز و برای $W/C=0.36, 0.4$

۳-۳. ارزیابی اثرات زیست‌محیطی

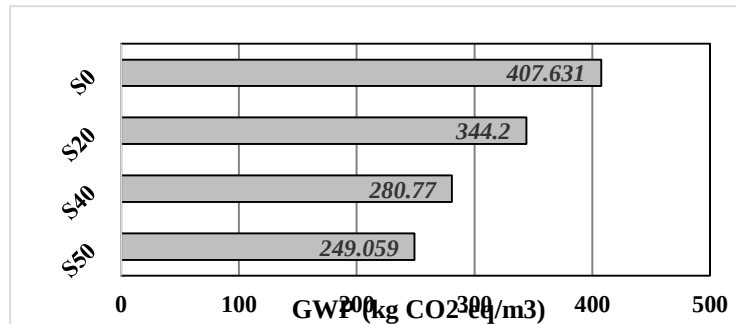
GWP پارامتری است که در مجموعه فرآیندهایی تولید SCC در این پژوهش مورد محاسبه قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه هر کیلوگرم آب تقریباً $kg 0.0025 CO_2$ تولید می‌کند [۱۴]. بنابراین سهم آب در تولید پارامترهای زیست‌محیطی ناچیز بوده و تحلیل‌های زیست‌محیطی در این پژوهش تنها در حالت $W/C=0.36$ انجام پذیرفته است.

مقدار GWP بر اساس $kg CO_2-eq$ ناشی از فرآیند تولید سیمان و فرآیند ساخت بتن جهت تولید $1 m^3$ بتن خودتراکم، برای طرح‌های این تحقیق در شکل ۱۲ ارائه شده است. طی تحقیقات انجام گرفته توسط Turk و همکاران چنین نتیجه شد که به ازای تولید $1 kg$ سیمان پرتلند $kg CO_2-eq 0.83$ در جو منتشر خواهد شد [۱۴]. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که $kg CO_2-eq$ تولیدشده ناشی از تولید $1 kg$ سیمان پرتلند تیپ II برابر $kg 0.75$ است. Hinggs میزان انتشار CO_2-eq برای تولید ۱ تن سیمان پرتلند را معادل $kg 950$ به‌دست آورد [۱۵].



شکل ۱۲- GWP تولیدشده ناشی از فرآیندهای تولید سیمان و بتن برای طرح شاهد و طرح‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره

میزان تولید GWP برای طرح‌های مختلف به ازای تولید SCC 1 m^3 در شکل ۱۳ نشان داده شده است. درصد کاهش GWP در طرح‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره به ترتیب برابر ۱۵/۵، ۳۱/۱ و ۳۹ به دست آمده است. طبق تحقیقات انجام شده توسط Nazari و Sanjayan مقدار GWP ناشی از ۱ کیلوگرم سیمان پرتلند و سرباره به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۱۴۳ کیلوگرم معادل CO_2 است [۱۶].



شکل ۱۳- GWP فرآیند تولید بتن برای طرح شاهد و طرح‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد سرباره

۳-۴. مقایسه GWP ناشی از ساخت سد بتنی با بتن معمولی و سنگریزه ای

طرح اختلاط‌های ارائه شده در این تحقیق با نتایج کار لیو و همکاران که در سال ۲۰۱۳ با انتخاب سد بتنی استان شانکسی (Shanxi) کشور چین با حجم بدنه ۴۰۶۹۸ مترمکعب به عنوان یک مطالعه موردی، مقایسه ای بین استفاده از بتن معمولی و بتن سنگریزه ای از نظر میزان تولید GWP در فاز تولید مصالح انجام داده بودند [۱۷] در جدول ۷ مقایسه شده است. با توجه به نتایج جداول ۷ می توان گفت که مقدار کاهش GWP در ساخت سد بتنی با بتن سنگریزه ای با طرح اختلاط Liu و همکاران نسبت به اجرای سد بتنی با بتن معمولی در فاز تولید مصالح ۷۲/۲٪ محاسبه شده و این میزان کاهش برای طرح S50 این تحقیق که الزامات یک بتن خودتراکم با کارایی بالا را برآورده کرده برابر ۷۲/۷٪ به دست آمده است. بنابراین طرح به اندازه ۵/۵٪ بیشتر تولید GWP را کاهش داده است. همچنین با در نظر گرفتن مقدار $\text{CO}_2\text{-eq}$ تولید شده برای طرح Liu و طرح S50 که به ترتیب برابر ۳۸۵۲ و ۳۷۸۳/۴ به دست آمدند، چنین نتیجه می شود که میزان $\text{CO}_2\text{-eq}$ تولید شده در طرح S50 نسبت به طرح Liu حدود ۲ درصد کاهش داشته است. بنابراین و با توجه به این نتیجه گیری Liu و همکاران که استفاده از فناوری بتن سنگریزه ای منجر به کاهش ۷۲ درصدی GWP در فاز تولید مصالح شده است می توان نتیجه گرفت با استفاده از طرح S50 در ساخت سد بتنی با استفاده از فناوری بتن سنگریزه ای میزان تولید GWP به اندازه ۷۳ درصد در فاز تولید مصالح کاهش خواهد داشت.

جدول ۷- مقایسه میزان تولید GWP ($\text{kg CO}_2\text{-eq}$) در ساخت سد بتنی با بتن ریزی معمولی و سنگریزه ای

منبع	تحقیق اخیر	Liu 2013	بتن معمولی	مصالح
Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC 2006)	۳۰۶۹/۶	۳۱۵۷/۴	۱۳۲۶۱	سیمان
ELCD (2009) Sand EPA (2000)	۳۰/۲	۲۵/۲	۶۷/۸	ماسه
ELCD (2009) Crushed Stone	۱۱۴/۸	۱۸۴/۶	۵۳۸/۶	شن
UKQAA (2010)	۱۷۸	۸/۹۳	۰	سرباره
ELCD(2009)	۱۳۴/۶	۱۳۴/۶	۰	سنگ
Formaldehyde data as surrogate for super plasticizer (2001)	۲۵۶/۴	۲۵۶/۴	۰	فوق روان کننده
	۳۷۸۳/۴	۳۸۵۲	۱۳۸۶۷/۳	مجموع

۴. نتیجه گیری

- ✓ استفاده از سرباره تا میزان ۳۰ درصد وزن OPC به عنوان SCMs در اجرای طرح اختلاط های این پژوهش، الزامات مورد نیاز استانداردها برای ساخت بتن سنگ ریزه های را تأمین کرده و حدود مقاومت فشاری در سنین ۹۱ و ۲۸ روز برای این طرح ها بین ۳۰ تا ۵۲ مگاپاسکال است.
- ✓ با افزایش میزان جایگزینی OPC با سرباره از ۲۰ به ۴۰ و ۵۰ درصد در ساخت SCC، میزان تولید GWP به ترتیب به میزان ۱۵/۵، ۳۱/۱ و ۳۹ درصد کاهش یافته است.
- ✓ میزان $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ تولید شده ناشی از تولید kg ۱ سیمان پرتلند تیپ II برابر kg ۰/۷۵۰ است.

۵. منابع

- [1] Samad, S. and A. Shah, *Role of binary cement including Supplementary Cementitious Material (SCM), in production of environmentally sustainable concrete: A critical review*. International Journal of Sustainable Built Environment, 2017.
- [2] Celik, K., et al., *Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder*. Cement and Concrete Composites, 2015. **56**: p. 59-72.
- [3] Xie, Y., et al., *Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC)*. Cement and Concrete Composites, 2015. **55**: p. 223-231.
- [4] Gursel, A.P., H. Maryman, and C. Ostertag, *A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of "green" concrete mixes with rice husk ash*. Journal of Cleaner Production, 2016. **112**: p. 823-836.
- [5] Owaid, H.M., R.B. Hamid, and M.R. Taha, *A review of sustainable supplementary cementitious materials as an alternative to all-Portland cement mortar and concrete*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2012. **6**(9): p. 287-303.
- [6] USGS, *Cement – Mineral Commodity Summaries*. In: *Cement statistics and information - annual publications*. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2017.
- [7] An, X., et al., *Rock-filled concrete, the new norm of SCC in hydraulic engineering in China*. Cement and Concrete Composites, 2014. **54**: p. 89-99.
- [8] Almuwbbber, O., et al., *The influence of variation in cement characteristics on workability and strength of SCC with fly ash and slag additions*. Construction and Building Materials, 2018. **160**: p. 258-267.
- [9] ISO, E., *14040: 2006. Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework*. European Committee for Standardization, 2006.
- [10] Gursel, A.P., *Life-Cycle Assessment of Concrete: Decision-Support Tool and Case Study Application*. 2014, UC Berkeley.
- [11] Han, B., L. Zhang, and J. Ou, *Smart and multifunctional concrete toward sustainable infrastructures*. 2017: Springer.
- [12] Uysal, M., K. Yilmaz, and M. Ipek, *The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 2012. **27**(1): p. 263-270.
- [13] Boukendakdji, O., et al., *Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(7): p. 2593-2598.
- [14] Turk, J., et al., *Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA*. Waste management, 2015. **45**: p. 194-205.
- [15] Higgins, D. *Sustainable concrete: How can additions contribute*. in *Proceedings of the Institute of Concrete Technology Annual Technical Symposium*. Institute of Concrete Technology Camberley, UK. 2006.
- [16] Nazari, A. and J.G. Sanjayan, *Handbook of Low Carbon Concrete*. 2016: Butterworth-Heinemann.

- [17] Liu, C., Ahn, C.R., A, X. and Lee, S., 2013. Life-cycle assessment of concrete dam *Concrete construction: comparison of environmental impact of rock-filled and conventional concrete*. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(12), p.A4013009.