نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۹، شماره ۳، سال ۱۳۹۶، صفحات ۵۶۵ تا ۵۷۶
DOI: 10.22060/ceej.2016.692

ارزیابی پایداری زیست-محیطی در ساخت صنعتی (نمونه موردی: روش اجرایی بتن پیش‌ساخته)

ایرج محمودزاده کنی*[۱]، سیروان لاهورپور[۲]، جواد گودینی[۳]

[۱] دانشکده مهندسی عمران، پردیس فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] دانشکده هنر و معماری، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران
[۳] دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

چکیده: بررسی‌های مختلف حاکی از آن است که مصرف فزاینده منابع اولیه (یعنی مواد و انرژی) به‌انضمام تولید آلاینده‌های محیطی (مخصوصا دی‌اکسید کربن)، زیست-محیط انسان را به مخاطره جدی کشانده است. ارتباط مستقیم چالش‌های یاد شده با فعالیت‌های ساختمانی، ضرورت کاربست روش‌های پایدار در حوزه ساخت را آشکار ساخته است. به‌عبارت دیگر در انتخاب روش‌های ساخت، می‌بایست به معیار پایداری زیست-محیطی آن‌ها توجه ویژه نمود. در عرصه ساختمانی، استفاده از روش‌های ساخت صنعتی به‌دلیل مزایای زیست-محیطی خود به‌مثابه یک فرضیه خودنمایی می‌کند. علی‌رغم اهمیت فوق‌العاده این مطلب، آزمون کمّی چنین فرضیه‌ای کمتر دغدغه پژوهشگران قبلی بوده است. در این راستا، مقاله حاضر به ارزیابی زیست-محیطی یکی از روش‌های ساخت صنعتی پرداخته تا معین سازد که آیا صنعتی شدن ساخت می‌تواند به کاهش مشکلات زیست-محیطی کمک نماید. بدین منظور، تحقیق حاضر به ارزیابی کمّی منابع اولیه (اعم از انرژی و مصالح مورد نیاز) و آلاینده کربنی انتشار یافته در دو شیوه اجرایی صنعتی (بتن پیش‌ساخته) و سنتی (بتن درجا) معطوف شده است. در کلامی دقیق‌تر، تحقیق حاضر براساس سیستم ارزیابی چرخه حیات به سنجش و مقایسه کمّی پیامدهای محیطی در مراحل مختلف ساخت یعنی از مرحله استخراج مواد اولیه تا پایان عملیات اجرایی پرداخته است. یافته‌های تحقیق مؤید آن است که بهره‌گیری از سیستم بتنی پیش‌ساخته در مقایسه با سیستم بتن درجا به کاهش منابع مصرفی و انتشار کمتر آلاینده کربنی در مرحله اجرا منجر می‌شود اما در مرحله تولید بتن مسلح وضعیت کاملاً برعکس است. به‌عبارت دیگر پایداری زیست-محیطی روش بتن پیش‌ساخته (در محدوده تحقیق حاضر)، تنها در مرحله اجرا تأئید شد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۰ اسفند ۱۳۹۳
بازنگری: ۲ تیر ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۲ مرداد ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۵ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:
پایداری زیست-محیطی
ساخت صنعتی
سیستم‌های ساخت
ارزیابی چرخه حیات
پیش‌ساختگی

۱- مقدمه

رشد فزاینده استخراج منابع اولیه و تولید آلاینده‌های محیطی دو چالش اساسی انسان معاصر به شمار می‌آید. میزان مصرف منابع طبیعی درسال ۲۰۰۵ از مرز ۶۰ میلیارد تن فراتر رفته است و برآورد می‌شود در سال ۲۰۳۰ رقم به ۱۰۰ میلیارد تن درسال افزایش یابد [۱]. در الگوی متداول کنونی، رشد اقتصادی رابطه مستقیمی با میزان مصرف منابع اولیه از یک سو و میزان ضایعات تولیدی از سوی دیگر دارد. به عبارت دیگر رشد اقتصادی بیشتر، نیازمند مصرف بیشتر منابع و تولید بیشتر ضایعات است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان تولید ضایعات کشورهای درحال‌توسعه ۲۰-۱۰ درصد کشورهای توسعه یافته است. بدیهی است با رشد اقتصادی این کشورها، میزان تولید ضایعات به‌مراتب افزایش خواهد یافت [۲]. صنعت ساختمان یکی از حوزه‌هایی است که رابطه مستقیم با چالش‌های یاد شده دارد. در حدود ۵۰ درصد از مواد اولیه استخراج شده به فراورده‌های ساختمانی تبدیل می‌شود [۳]. به‌علاوه، این صنعت مصرف کننده ۴۰ درصد منابع انرژی جهان می‌باشد. هم‌چنین تولید ۳۶ درصد از دی‌اکسیدکربن جهان وابسته به فعالیت‌های عمرانی است [۴]. این وضعیت مؤید ناکارامدی شیوه‌های رفتاری انسان معاصر بوده و انسان را به جستجوی روش‌های پایدار سوق داده است. توسعه پایدار گسترده‌ترین رویکرد جهانی است که در دهه‌های اخیر به مثابه معیاری در سنجش سلامت اعمال و افکار انسان مطرح بوده است. این رویکرد با سه معیار پایداری زیست-محیطی، پایداری اجتماعی و پایداری اقتصادی، به راهنمایی مطمئن در توسعه انسانی تبدیل شده است. در نتیجه معیارهای پایداری، ابزاری مناسب در مقایسه، سنجش و انتخاب روش‌های کارامد محسوب می‌شوند. در حقیقت مطلوبیت کلیه شیوه‌های عملی (خواه در حوزه ساخت و خواه در دیگر حوزه‌ها)، مقید به برآورده نمودن معیارهای پایداری است.

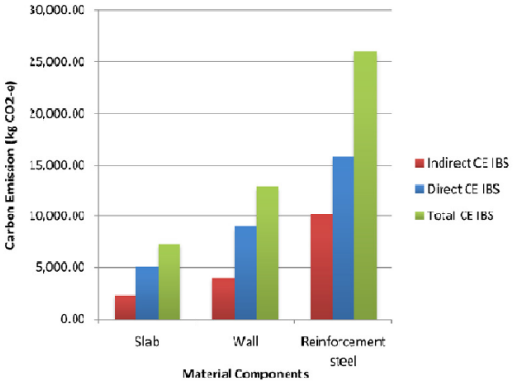
۲- چارچوب و پیشینه تحقیق

تأکید بر روش‌های ساختمانی پایدار به‌مثابه یک راه‌حل جهانی در مواجهه با چالش‌های فوق ضرورتی تردیدناپذیر است. با این‌حال انتخاب

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: imkani@ut.ac.ir

روش‌های پایدار خود مسأله‌ای دیگر فراروی معماران و مهندسان نهاده است و آن این‌که کدام روش‌ها را می‌توان پایدار دانست. این چالش با ورود روش‌های ساخت صنعتی به وضعیتی حاد بدل گشته است. گفتنی است، روش‌های نوین ساختمانی از جمله سیستم‌های پانل سه‌بعدی[1]، قاب فولادی نورد سرد[2]، بتنی پیش‌ساخته و دیگر موارد، به صورت فزاینده‌ای در معماری کشورمان خودنمایی می‌کند. این روش‌ها نمودی از فراگیری ساخت صنعتی[3] در آینده کشور است. منابع علمی یا تبلیغاتی، فارغ از محاسبات دقیق زیست–محیطی، واژه پایداری را در کنار چنین روش‌هایی مطرح می‌کنند. این وضعیت به زایش سوالی حیاتی در ذهن منجر می‌شود: ساخت صنعتی در قیاس با ساخت متعارف تا چه میزان به ارتقای پایداری زیست–محیطی کمک می‌کند؟

تحقیقات صورت گرفته در راستای انتخاب روش‌های پایدار با رویکردهای متفاوتی همراه بوده است. برخی از تحقیقات، ماهیتی تاریخی داشته، به بررسی تاریخی گرایشات یا پروژه‌های پایدار پرداخته‌اند [۵]. تاریخ‌گرایی به عنوان مهم‌ترین ویژگی این تحقیقات، مانعی بزرگ در تحلیل، مقایسه و گزینش روش پایدار محسوب می‌شود. طیف دیگری از تحقیقات به مبانی، اصول یا راهکارهای پایداری می‌پردازد [۶]. پژوهش‌های این دسته اساساً با هدف مقایسه و گزینش روش‌های پایدار صورت نگرفته‌اند؛ بلکه تنها به ارائه شاخص‌های پایداری می‌پردازند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که طیف عمده تحقیقات پایداری، به ارائه مصادیق ساخت پایدار پرداخته است. تحقیقات این دسته نیز رویکردی توصیفی داشته و معیاری در سنجش پایدار بودن روش‌های اتخاذ شده ترسیم نمی‌کند. به عبارت خلاصه، تحقیقات پیشین عمدتاً با رویکردهای تاریخی، کیفی، توصیفی و یا پایه‌ای همراه بوده، به همین دلیل سنجش کارامدی روش‌ها به صورت عینی در آن‌ها مشخص نمی‌شود. علاوه بر این، تحقیقات انجام شده با رویکردهای فوق عمدتاً به هر سه جنبه زیست–محیطی، اجتماعی و اقتصادی پایداری اختصاص یافته و ناخواسته با یک نگاه کل‌گرایانه‌ای همراه شده‌اند. خلاءهای پژوهشی در عرصه ارزیابی زیست–محیطی روش‌های ساختمانی تنها به اینجا ختم نمی‌شود بلکه می‌توان آن‌ها را در حیطه‌های جزئی‌تر نیز مشاهده نمود. به‌عنوان مثال، تحقیقاتی که در خصوص اثرات زیست–محیطی ساختمان‌ها انجام گرفته، بیشتر به مبحث بهره‌برداری آن‌ها معطوف شده و از مبحث روش‌های ساختمانی غافل بوده‌اند. این رویکرد را می‌توان در تحقیقات متعددی که به مصرف انرژی و انتشار آلودگی در ساختمان پرداخته‌اند، به‌وضوح مشاهده نمود [۷و ۸ و ۹]. گفتنی است، در این تحقیقات تاثیرات مراحل ساخت به صورت کلی بررسی شده است. به‌عبارت دیگر، در این تحقیقات تاثیرات زیست–محیطی عملیات ساخت به صورت درصدی از کل عملیات تولید محاسبه گردیده است. علی‌رغم این مطلب، در سال‌های اخیر مراحل ساخت به‌عنوان یک عامل تاثیرگذار مورد توجه تعدادی از محققان قرار گرفته است [۱۰ و ۱۱]. این تحقیقات، به مقایسه زیست– محیطی روش‌های نوین ساخت با روش‌های متداول پرداخته‌اند. در تحقیق عمر و دیگران [۱۱] که به مقایسه میزان انتشار دی‌اکسیدکربن دو سیستم اجرا، (ساختمان بتنی با دیوارهای پیش‌ساخته و سیستم معمول دیوارهای بتنی درجا) معطوف شده است، میزان کاهش تولید دی‌اکسیدکربن با بهره‌گیری از سیستم پیش‌ساخته، معادل ۲۶/۲۷ درصد بوده است (شکل ۱). در تحقیقی دیگر آیی و دیگران [۱۲] به بررسی تاثیرات زیست–محیطی استفاده از مدول‌های ساختمانی با قابلیت استفاده مجدد پرداخته و اظهار داشته است که این سیستم‌های پیش‌ساخته با فریم‌های فولادی در کاهش میزان مصرف مواد فولادی تا میزان ۷۸ درصد موثر خواهد بود



شکل ۱: مقایسه کربن مصرفی روش ساخت در ساختمان بتنی پیش ساخته(IBS) و روش معمول(Conventional) [۱۱]

Fig. 1. comparison the carbon emission of conventional and industrial buildings construction methods [11]

تحقیق حاضر می‌کوشد تا با ارائه یک رویکرد کمّی به ارزیابی روش‌های پایدار ساختمانی بپردازد. این رویه سبب می‌شود تا نتایج عینی بوده و مقایسه تسهیل یابد. این نکته نخستین نوآوری تحقیق حاضر نسبت به عمده تحقیقات پیشین محسوب می‌شود. از سوی دیگر، به منظور بالا رفتن دقت عمل در مقایسه و پرهیز از کلی‌گویی، دامنه تحقیق به مقایسه دو شیوه ساخت بتن درجا و بتن پیش‌ساخته محدود شده است. به همین دلیل سوال کلی فوق، این‌گونه تصحیح و تدقیق یافت: آیا شیوه اجرایی بتن پیش‌ساخته در قیاس با بتن درجا به ارتقای پایداری زیست–محیطی کمک می‌کند؟ محدود شدن تحقیق به این دو شیوه اجرایی و نیز محدود شدن ارزیابی پایداری به جنبه زیست–محیطی آن، دومین نوآوری تحقیق حاضر تلقی می‌شود. گفتنی است سوق دادن مسیر تحقیق به سمت روش اجرای بتنی، ریشه در ویژگی‌های بااهمیت این مصالح دارد. بتن از پرکاربردترین فرآورده‌های ساختمانی است

1 3D panel
2 Light Steel Frame
3 در اینجا ساخت صنعتی به گونه‌ای از روش‌های ساختمانی اطلاق می‌شود که مبتنی بر روش‌های طراحی و اجرای صنعتی شکل گرفته باشد

که تاثیر عمده‌ای بر شرایط محیطی دارد. بتن به شکل‌ها و روش‌های مختلفی نظیر سیستم‌های درجا و پیش‌ساخته استفاده می‌شود. تولید و به‌کارگیری این ماده نیازمند بهره‌گیری از منابع بسیار بوده و با تاثیرات منفی زیست-محیطی توأم است. گفتنی است، تولید هر کیلوگرم کلینکر[1] پرتلند (ماده اصلی سیمان) موجب انتشار حدود یک کیلوگرم دی‌اکسیدکربن به محیط می‌شود [۱۳]. در این شرایط اتخاذ شیوه اجرایی مناسب یک ضرورت به‌شمار می‌آید.

۳- روش تحقیق

همان‌گونه که در مطالب پیشین اشاره شد، تحقیق حاضر بر مبنای رویکردی کمّی استوار است. بدین منظور برای ارزیابی پایداری زیست-محیطیِ روش‌های اجرایی فوق، به سنجش دو پارامتر انرژی مورد نیاز و دی‌اکسیدکربن انتشار یافته اقدام می‌شود. این اندازه‌گیری در مدلی با عنوان ارزیابی چرخه حیات صورت می‌پذیرد. ارزیابی چرخه حیات(LCA)[2]، به‌مثابه ابزاری مناسب در سنجش تاثیرات محیطی ساختمان، نگاهی بلندمدت به ساختمان دارد. براساس تعریف SETAC[3]، ارزیابی چرخه حیات یک روش برای تعیین میزان تاثیرات محیطی فعالیت‌هاست که با محاسبه ماده و انرژی استفاده شده از یک‌سو و از سوی دیگر با سنجش ضایعات انتشار یافته به محیط، فرصت‌هایی را که به ارتقای شرایط زیست-محیطی کمک می‌کند شناسایی و ارزش‌گذاری می‌نماید. در این ابزار، ساختمان ماهیتی پیوسته داشته و شامل مراحل مختلف اعم از تولید و حمل مصالح، ساخت، بهره‌برداری، تعمیر و تخریب است. بنابراین در این روش، میزان اثرات زیست-محیطی می‌بایست در کلیه مراحل حیات محاسبه شود [۱۴]. به طور کلی دو روش مختلف برای ارزیابی زیست-محیطی چرخه حیات وجود دارد. این روش‌ها با عناوین فرآیند مبنا[4] و اقتصاد آورده-بازده[5] نام‌گذاری شده‌اند. ارزیابی پروژه‌های ساختمانی عمدتاً بر روش فرآیند مبنا استوار است [۱۵]. در این روش متناسب با فرآیند اجرایی پروژه، بخش‌های مختلفی برای چرخه حیات آن تعریف می‌شود. سپس مواد درونداد و برونداد آن‌ها شناسایی و محاسبه شده تا میزان آثار زیست-محیطی برای هر یک از بخش‌ها معین گردد [۱۶]. ارزیابی چرخه حیات به کار رفته در این تحقیق، مطابق با استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰ در قالب چهار مرحله‌ی تعریف اهداف و محدوده[6]، تحلیل فهرست موجودی[7]، ارزیابی تأثیرات[8] و تفسیر[9] انجام شده است [۱۵].

در مرحله تعریف اهداف و محدوده، نخست تولیدات و عملیاتی که باید ارزیابی شوند تعریف می‌شود؛ سپس واحد عملکردی انتخاب شده و سطح لازم برای ارزیابی آن‌ها معین می‌گردد [۱۷]. گفتنی است در تحقیق حاضر، محدوده ارزیابی چرخه حیات برای هر دو سیستم ساخت به اجزای سازه‌ای ساختمان محدود شده و دیگر اجزای غیر سازه‌ای مانند مصالح لازم برای اجرای دیوارها، بازشوها و دیگر موارد در این بررسی لحاظ نشده‌اند. در یک ارزیابی چرخه حیات کامل و ایده‌آل، (گهواره تا گور[10])، مراحلی که در ارزیابی چرخه حیات سیستم‌های سازه‌ای مطرح هستند به‌ترتیب عبارتند از استخراج مواد خام، تولید مصالح، عملیات اجرایی، بهره‌برداری و پایان عمر. در تحقیق حاضر که تمرکز آن بر مقایسه و شناسایی تفاوت‌های دو روش اجرایی است، محدوده تحقیق به استخراج مواد خام اولیه، تولید مصالح لازم و عملیات ساختمانی محدود گردیده است (شکل‌های ۲و۳).

مرحله تحلیل فهرست موجودی شامل تهیه لیستی از مواد، انرژی لازم و آلودگی‌های انتشار یافته به هوا، زمین و آب بوده که مرتبط با تولید محصول، فرآیند عملیات و یا تدارک یک سرویس است [۱۸]. در این مرحله اقلام اولیه[11] و محصول[12] که به فرآیند وارد و یا از آن خارج می‌شوند، معین می‌گردند. برآورد میزان آلودگی یک فرآیند یا یک محصول ممکن است برحسب مکان پروژه، نوع تجهیزات و بهره‌وری آن‌ها، منابع انرژی مورد استفاده و غیره نتایج مختلفی به بارآورد؛ به همین دلیل در تحقیق حاضر، معمول‌ترین و پراستفاده‌ترین ابزارها و روش‌ها، مبنای محاسبه قرار گرفته است.

گفتنی است در تحقیق حاضر برای مرحله برداشت مواد اولیه از معدن و انتقال مصالح به کارخانه‌های تولید مصالح ساختمانی، مبنای محاسبات مقادیری است که از منابع معتبر استخراج شده‌اند. متناسب با پیش‌فرض‌های تحقیق، مقادیر متناسب با این پیش فرض‌ها انتخاب شده است و بر اساس آن نتایج این مرحله برآورد شده است. از سوی دیگر، برای هر دو روش ساخت ابتدا کلیه عملیات مرحله تولید بتن مطابق با عیار و مشخصات سازه‌ای لازم تعریف شده است و عملیات به ترتیب از استخراج مواد اولیه و فرآیند فرآوری تا تولید سیمان پرتلند، ریزدانه و درشت‌دانه و حمل به ایستگاه بتن شناسایی و تعریف شده‌اند. برای برآورد انرژی مصرفی تهیه و حمل مواد اولیه بتن مانند شن و ماسه، سیمان و افزودنی‌های لازم (نظیر فوق‌روان‌کننده[13]، کاهنده آب[14] و دیگر موارد) از یک نرم‌افزار صفحه گسترده به نام B-PATH[15] بهره گرفته شده است. این عملیات شامل عملیات حفاری و استخراج مواد اولیه از معادن، فرآوری و جابه‌جایی مواد و حمل به کارخانه‌های فرآوری و انجام فرآیند تولید محصول است.

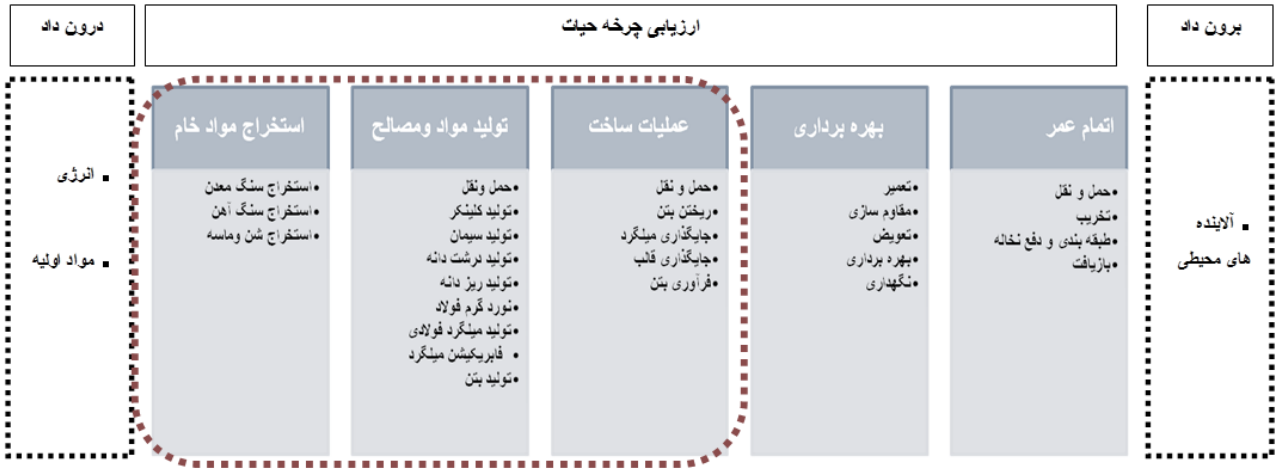
برای برآورد انرژی مصرفی در ایستگاه‌های تولید بتن در حالت بتن

1 Clinker
2 Life Cycle Assessment
3 Society of Environmental Toxicology and Chemistry
4 Process-Based
5 Economic Input-Output
6 Goal and Scope Definition
7 Inventory Analysis
8 Impact Assessment
9 Interpretation
10 Cradle to Gate
11 Input
12 Output
13 Super-Plasticizer
14 Water Reducer
15 The Berkeley Lab Building Materials Pathways: این نرم‌افزار توسط آزمایشگاه ملی لارنس برکلی (Lawrence Berkeley) طراحی و توسعه یافته است [20].

آماده (با مقاومت ۲۸ روزه ۳۵ مگاپاسکال) و هم‌چنین برای استفاده در المان‌های پیش‌ساخته در کارگاه‌های پیش‌ساختگی (با مقاومت ۲۸ روزه ۵۰ مگاپاسکال)، داده های استخراج شده از تحقیقات کارگاه‌های بتن مبنا قرار گرفته اند[۱۸]. برای روش بتن درجا فرض بر این است که بتن در ایستگاه بتن تولید شده و توسط مخلوط کننده به کارگاه ساختمانی حمل می‌شود ولی برای سیستم پیش‌ساخته فرض بر این است که ایستگاه بتن در کارگاه ساخت قطعات بتنی پیش‌ساخته مستقر بوده و مصالح اولیه برای تولید بتن به این مکان منتقل می‌شوند. در کارگاه‌های بتن پیش‌ساخته تفاوت‌هایی از نظر نحوه نگهداری و عمل‌آوری بتن وجود دارد. سیستم انتخاب شده شامل استفاده از بخار برای عمل‌آوری قطعات بتنی است. براساس اطلاعات استخراجی از منبع ذکر شده میزان انرژی مصرفی بر مبنای یک واحد متر مکعب حجم بتن به قرار جدول شماره ۱ است.

حجم بتن مصرفی در هر سیستم یکی از عوامل تاثیرگذار بر مقادیر انرژی و میزان آلاینده‌هاست. مقدار این بتن مصرفی برحسب ابعاد سازه‌های پیش‌فرض تعیین می‌شود. عملیات کارگاهی نیز براساس برنامه زمان‌بندی (WBD[1]) تهیه شده برای روش‌های اجرایی دوگانه، قابل شناسایی است. برای مشخص نمودن نوع عملیات و تجهیزات مورد نیاز آن‌ها، از یک برگه اطلاعاتی[2] به نام RS-MEANS بهره گرفته شده که کارایی مناسب در برآورد هزینه ساخت دارد. این نرم‌افزار شامل لیستی از عملیات‌های ساختمانی بوده که با کدهای مشخصی تعریف شده‌اند. هر کد معرّف ویژگی‌های اجرایی آن عملکرد نظیر گروه ساختمانی مورد نیاز، هزینه، میزان بهره‌وری گروه اجرایی برای یک نفر-ساعت و موارد دیگر است [۱۹]. با معین ساختن کدهای مذکور، نرم‌افزار صفحه گسترده به‌صورت هوشمند، میزان ساعات کاری هر تجهیز را محاسبه می‌نماید. این نرم‌افزار، محاسبه میزان انرژی مصرفی و آلودگی انتشار یافته را با تکیه بر فرمول‌هایی که از مدارک آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده [۱۷] استخراج شده‌اند، انجام می‌دهد. هم‌چنین نوع ماشین‌آلات از طریق داده‌های موجود در نرم‌افزار شناسایی شده و مشخصات آن از طریق جدولی که شامل این مشخصات است تطبیق داده می‌شود (جدول ۲).

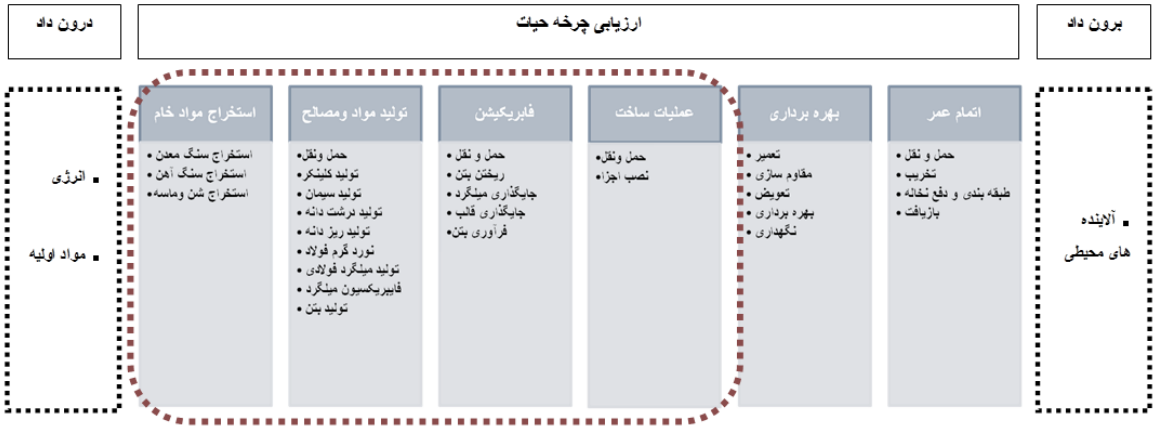
جابه‌جایی‌ها برای عملیات ساخت شامل حمل تجهیزات و ماشین‌آلات کارگاهی به‌انضمام حمل مصالح است. برای برآورد انرژی مصرفی و آلاینده انتشار یافته به محیط در عملیات جابه‌جایی مصالح، ابتدا مسافت‌های طی شده توسط کامیون‌ها محاسبه می‌شوند. برای برآورد این مسافت، می‌بایست حجم کامیون‌ها، وزن تجهیزات و ماشین‌آلات، مسافت و میزان تکرار مسیر برای بازگشت شناسایی شوند (معادله ۱).



شکل ۲: محدوده ارزیابی زیست- محیطی برای سیستم بتن درجا [۱۰]

Fig. 2. scope of environmental assessment for in-situ concrete method [10]

1 work breakdown structure
2 Data Sheet



شکل ۳: محدوده ارزیابی زیست-محیطی در سیستم اجرایی بتن پیش‌ساخته [۱۰,۱۸,۱۹]

Fig. 3, scope of environmental assessment for pre-cast concrete method [10,18,19]

جدول ۱: نمایش نوع سوخت و ماشین آلات مورد استفاده در ایستگاه بتن پیش‌ساخته و انرژی مصرفی مربوطه [۱۸]

Table 1. types of machinery, equipment and fuel consumption with relevant energy consumption at concrete plant [18]

نوع انرژی مصرفی	تجهیزات	انرژ ی مصرفی بر اساس حجم بتن kj/m^3
بنزین	وسایل حمل و نقل سبک، بالابر،...	۳۲۴۷۰
دیزل	وسایل حمل و نقل سبک، بالابر، جرثقیل و ..	۹۲۵۵۰
نفت سیاه	دیگ بخار صنعتی برای فرآوری بتن، وسایل حمل و نقل سبک، بالابر، جرثقیل و ..	۱۴۸۷۱۰
نفت سفید	گرمکن قابل حمل	۷۵۰
گاز طبیعی	دیگ بخار صنعتی برای فرآوری بتن، گرمایش	۳۴۹۴۴۰
گاز مایع	دیگ بخار صنعتی برای فرآوری بتن، دستگاه جوشکاری، بالابر	۵۷۸۹۰
الکتریسیته	از طریق نیروگاه	۱۳۷۱۱۰

برای محاسبه مسافت طی شده در تجهیزات متحرک نیز از معادله ۲ استفاده می‌شود. با معین شدن میزان مسافت طی شده، حال می‌توان میزان مصرف سوخت کامیون‌ها را محاسبه نمود. میزان مصرف سوخت تابع مسافت طی شده و بهره‌وری سوخت است که از معادله ۳ محاسبه می‌گردد. شایان ذکر است، برای محاسبه انرژی مصرفی و میزان دی‌اکسیدکربن انتشار یافته به محیط که ناشی از انتقال و جابه‌جایی مواد و تجهیزات می باشد، می‌توان از معادلات شماره ۴ و ۵ بهره جست. برای شناسایی جزئیات ماشین‌آلات مورد نیاز پروژه نظیر گنجایش، توان اسب بخار، وزن و دیگر موارد، از اطلاعات کارخانه‌های تولید کننده بهره گرفته شده است. پیش‌فرض‌های مرتبط با ماشین آلات برای انجام عملیات مذکور در نرم افزار صفحه گسترده تنظیم شده است.

این اطلاعات در صفحه اول نرم‌افزار صفحه گسترده توسط کاربر وارد می‌شود و نرم‌افزار به صورت هوشمند اطلاعات مرتبط را از جدول‌های تعبیه شده که دیگر خصوصیات مرتبط با مدل و بهره‌وری ماشین‌آلات را شامل می‌شود، انتخاب کرده و در محاسبات لحاظ می‌نماید. برخی عملیات مانند جابه‌جایی کارکنان، برق مصرفی در سایت پروژه برای دفاتر، روشنایی و دیگر تجهیزات غیرمستقیم در هر دو روش ساخت، یکسان فرض شده، لذا در محاسبات لحاظ نشده‌اند. گفتنی است، انرژی مورد نیاز برای مصالحی که در عملیات اجرایی مصرف می‌شوند (نظیر قالب‌های بتن‌ریزی، پیچ‌ها و موارد دیگر) به‌همراه انرژی مواد اولیه در برآورد منظور گردیده است.

معادله ۱: نحوه محاسبه مسافت طی شده توسط ماشین‌آلات حمل کننده تجهیزات، [۱۷]

$$D=EW/TC*OW(+1RF)$$

D=کل مسافت طی شده
EW = وزن تجهیزات
TC = ظرفیت کامیون
OW = مسافت یک طرفه
RF = میزان تکرار (۱-۰)

معادله ۲: نحوه محاسبه مسافت طی شده برای تجهیزاتی که توسط موتور محرکه خود ماشین حرکت می‌کنند [۱۷].

$$D = trips * OW(1 + RF)$$

D = کل مسافت طی شده
trips = تعداد دفعات رفتن به سایت
OW = مسافت یک طرفه
RF = میزان تکرار

معادله ۳: نحوه محاسبه میزان سوخت مصرفی توسط ماشین‌آلات [۱۷].

$$Gal = D/FE$$

D = کل مسافت طی شده
Gal = میزان سوخت مصرفی
FE = بهره وری سوخت کامیون

معادله ۴: نحوه محاسبه انرژی مصرفی [۱۷].

$$Energy\ Consumption = (BSFC\ lb/hp\text{-}hr) * (۱۹,۳۰۰\ Btu/lb) * (۱,۰۵۵,۰۵۶\ J/Btu) / (۱۰^{۶} * ۱\ J/MJ)$$

معادله ۵: نحوه محاسبه دی‌اکسیدکربن تولیدی [۱۷].

$$CO_2\ Emission\ Rate = (BSFC\ lb/hp\text{-}hr) * (۱/۷,۰۹۹ lb/gal) * (۲,۷۷۰\ gC/gal\ Diesel\ Fuel) * (۱۲/۴۴\ gCO_2/gC)$$

در مرحله سوم یعنی ارزیابی تاثیرها، نتایج حاصل از مصرف منابع و هم‌چنین مقادیر حاصل از آلودگی تولید شده، به‌عنوان شاخصه‌های تاثیرگذار محیطی محاسبه و سپس دسته‌بندی می‌شوند تا با قرارگیری آن‌ها در دسته‌بندی‌های معین و مشخص، در صورت نیاز امکان اندازه‌گیری و بررسی بیشتر فراهم آید [۱۲]. در این بخش بر اساس اهداف تحقیق، نتایج حاصله در دو دسته‌بندی یعنی انرژی مصرفی و آلودگی‌های ناشی از انتشار دی‌اکسیدکربن ارزیابی و دسته‌بندی می‌شوند. برای تفسیر نهایی، یافته‌ها در قالب جداول و نمودارهای گرافیکی به نمایش درمی‌آیند و در دو حالت مقایسه می‌شوند. ابتدا میزان انرژی مصرفی و دی‌اکسیدکربن انتشار یافته برای دو ساختمان مقایسه می‌شوند و در نمودارهای بعدی این مقایسه برای هر مترمکعب از هر سیستم ساختمانی انجام می‌پذیرد.

۴- نمونه‌های تحقیق

مقایسه سیستم‌های اجرایی بتن درجا و بتنی پیش‌ساخته در عناصر سازه‌ای یک ساختمان اداری مفروض صورت پذیرفته است. این ساختمان با ابعاد ۲۱ متر در ۲۱ متر و در پنج طبقه طراحی شده است. دو ساختمان در محیط نرم‌افزار ریویت[۱]، مدل شده‌اند و اطلاعات لازم برای ارزیابی انرژی و میزان آلاینده‌ها از آن‌ها استخراج می‌شود (جدول ۳). طراحی سازه‌ای سیستم ساختمانی بتن درجا براساس کدها و استانداردهای ACI 318-11 شکل گرفته است. در طراحی اسکلت با عناصر پیش‌ساخته از هفتمین نسخه PCI Design Handbook استفاده شده است که کدهای ACI 318-05; ASCE 7-05; IBC ۲۰۰۶ را به عنوان مرجع لحاظ می‌نماید. داده‌های مستخرج از محیط نرم‌افزار BIM (با ایجاد تعاریف لازم در نرم‌افزار) به‌شکل اعداد و ارقام است. این داده‌ها برای سیستم بتن درجا، شامل حجم مصالح اصلی اعم از بتن و فولاد است؛ حال آن‌که در سیستم پیش‌ساخته علاوه بر حجم مصالح، تعداد و موقعیت آن‌ها در ساختمان نیز مشخص می‌شود. این اطلاعات به نرم‌افزار طراحی شده در محیط Microsoft Excel وارد و با انجام تغییراتی نظیر تبدیل واحدها و دیگر موارد در محاسبات اعمال می‌شوند. روند طراحی در محیط BIM به این صورت است که به‌منظور انتقال داده‌ها به قطعات، برای هر یک از اجزای یک خانواده[۲] تعریف شده است که اطلاعات مربوط به ویژگی، نوع بتن مورد استفاده و موارد دیگر در آن وجود دارد. همراه این خانواده‌ها یک جدول مشخصات وجود دارد، که علاوه بر تعریف خصوصیات و مشخصات ذکر شده، امکان تعریف راهنما فراهم است. راهنما به صفحه‌ای حاوی اطلاعات طبقه‌بندی شده مرتبط است که این اطلاعات بر اساس تقسیم‌بندی‌های استاندارد مرتبط با عملیات ساختمانی دسته‌بندی شده‌اند. این دسته‌بندی‌های استاندارد منطبق با طبقه‌بندی‌های صورت گرفته توسط موسسه شاخصه‌های ساخت (CSI[۳]) است که به‌همین علت به فرمت CSI شهرت دارد. دسته‌بندی‌های مختلف کدهای CSI شامل یک لیست پیشرفته از بخش‌ها، شماره قسمت‌ها و هم‌چنین عناوین مرتبط با آن است که هر یک شامل اطلاعات لازم در مورد نیازمندی‌های ساخت برای امکانات و عملیات اجرایی مرتبط است [۲۰]. نحوه تعریف کد به این صورت است که برای هر مصالح انتخابی در هر

1 Revit: این نرم‌افزار از مجموعه نرم‌افزارهای محیط BIM محسوب می‌شود.
2 Family: در نرم افزار ریویت، خانواده به اجزایی گفته می‌شود که برای ساخت نمونه استفاده می‌شوند (مانند دیوارها، پنجره ها، پله ها، درها و ...). هر خانواده می‌تواند پذیرای حالت‌های مختلفی برحسب تغییر ابعاد و غیره باشد. از ویژگی‌های آن می‌توان به این نکته توجه کرد که هر تغییری در یک نوع خانواده حاصل می‌شود در کل پروژه اعمال خواهد شد.
3 Construction Specifications Institute

سیستم یک کد مرتبط از لیست CSI اختصاص داده می‌شود. این کد شامل یک عدد ۱۲ رقمی تعریف کننده ویژگی‌های عملیات در مرحله اجرا و دیگر خصوصیات فیزیکی برای این مصالح است. این کد تعریف شده برای هر قطعه، به عنوان مثال ستون سه متری بتنی طبقه دوم، توسط نرم‌افزار صفحه گسترده طراحی شده، قابلیت تشخیص خواهد داشت (شکل ۴).

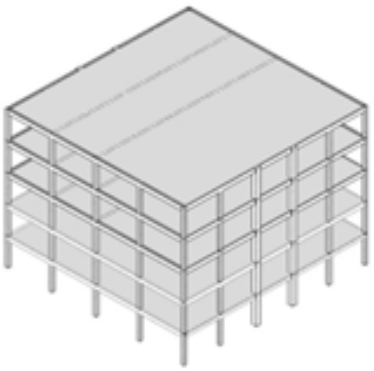
جدول ۲: مشخصات ساختمانی مدل‌های مورد مقایسه [۱۷]

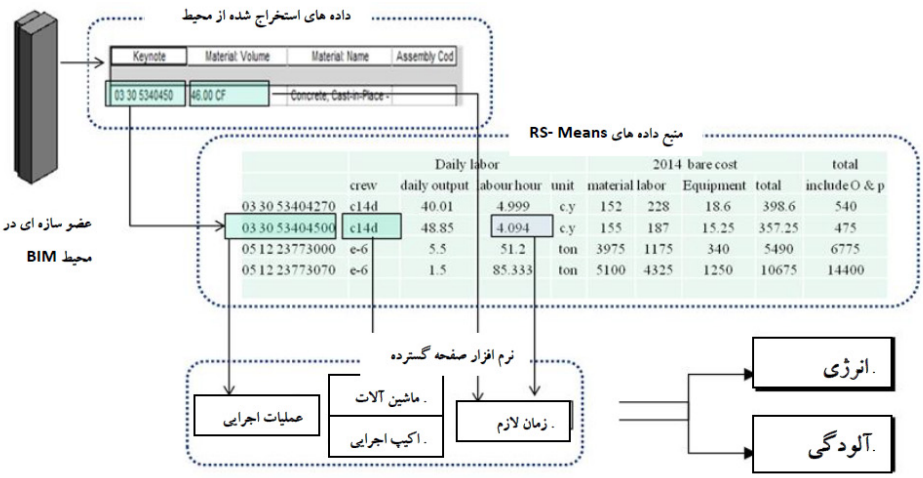
Table 2. specification of construction methods [17]

مصالح	تجهیزات	منبع انرژی	توان (دیزل: اسب بخار، بنزین: اسب بخار، الکتریسیته: وات)
بتن	تراک میکسر	دیزل	۴۲۵
	پمپ	دیزل	۲۵۰
	ویبراتور	بنزین	۶
کارهای مختلف	جرثقیل	دیزل	۴۵۰
	فورک لیفت	دیزل	۱۲۵
قالب	کمپرسور هوا	دیزل	۱۴۰
	اره برقی	الکتریسیته	۱۲۶۰
فولاد	جرثقیل	دیزل	۴۵۰
	خم کننده میلگرد	الکتریسیته	۱۲۰۰
	دستگاه جوش	الکتریسیته	۲۲۰۰

جدول ۳: مقایسه مشخصات کلی دو سیستم سازه‌ای

Table 3. comparison of structural system specifications

	سیستم اسکلت بتنی با بتن درجا	سیستم اسکلت بتنی با قطعات پیش‌ساخته
		
نوع سقف	دال یک طرفه ضخامت ۱۶ cm	۱۲ cm- hallow core elements
حجم بتن مصرفی	۶۷۷ M3	۵۶۸ M3
حجم میلگرد مصرفی	۸۰۵۰۲ kg	۸۹۲۷۰ kg
مقطع تیرها	مستطیل	L شکل در کناره‌ها و مقطع Tشکل در تیرهای میانی
حمل و نقل	۸۰ کیلومتر (ایستگاه بتن و سایت پروژه)	۸۰ کیلومتر (کارگاه قطعات پیش‌ساخته و سایت پروژه)



شکل ۴: مدل استخراج داده‌ها

Fig. 4. data extraction method

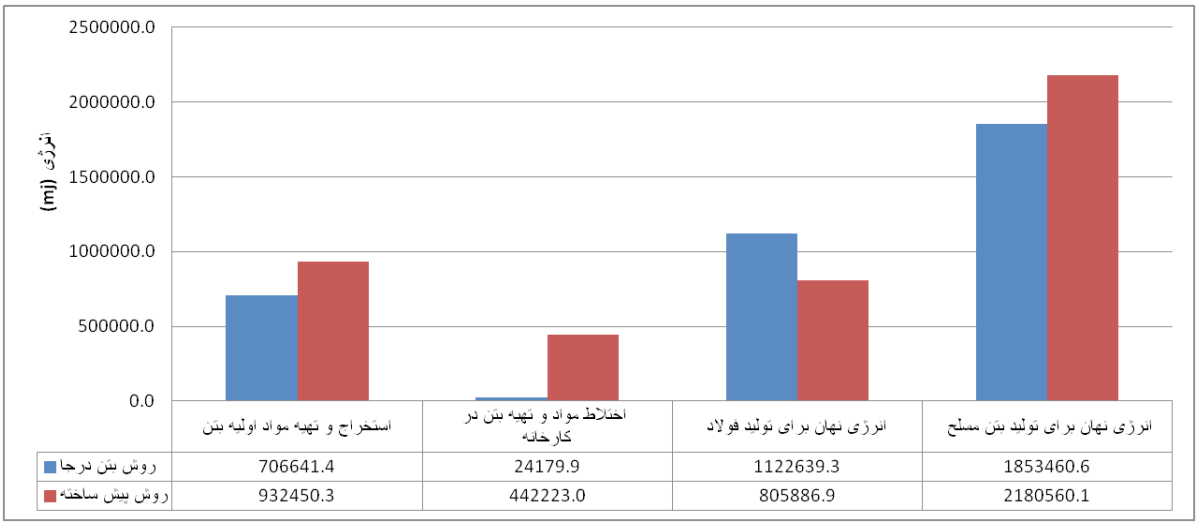
۵- نتایج و بحث

انرژی مورد نیاز برای روش‌های اجرایی مذکور شامل انرژی نهان[1] بتن مسلح و انرژی مصرفی برای تحقق عملیات اجرایی است که در قالب مراحل جداگانه ارزیابی شده است. در محاسبه انرژی نهان برای تولید بتن مسلح، فرایند به سه مرحله تقسیم شده است: الف) استخراج و تهیه مواد اولیه بتن با لحاظ عملیات حمل‌ونقل مربوطه؛ ب) اختلاط مواد و تهیه بتن در کارخانه؛ ج) انرژی مورد نیاز برای تولید فولاد مصرفی (شکل ۵). انرژی مورد نیاز برای تحقق عملیات اجرایی نیز در مراحل سه‌گانه زیر ارزیابی شده است: الف) حمل‌ونقل ماشین‌آلات و تجهیزات به کارگاه پروژه؛ ب) انتقال مواد و مصالح به کارگاه پروژه؛ ج) تکمیل عملیات اجرایی در کارگاه پروژه (شکل ۷). گفتنی است برای محاسبه انتشار آلاینده کربنی در دو روش صنعتی (پیش‌ساخته) و متعارف (بتن درجا)، نیز از مراحل مذکور استفاده شده که نتایج آن‌ها در قالب شکل های۶ و ۷ نمایش یافته است.

شکل ۵ (یا همان نمودار انرژی نهان تولید بتن مسلح) نشان می‌دهد که بیشترین میزان انرژی مصرف شده برای تولید بتن مسلح در روش درجا، مربوط به تولید فولاد مسلح‌کننده آن است. این مقدار معادل ۶۰ درصد از کل انرژی مصرفی بوده که نشان‌دهنده تاثیر بالقوه کاهش فولاد در ارتقای پایداری زیست–محیطی بتن مسلح است. انرژی مورد نیاز برای تهیه مواد اولیه بتن در روش درجا با مصرف ۳۸ درصد از کل انرژی، دومین مصرف کننده انرژی محسوب می‌شود (این مقدار معادل ۱/۲ گیگاژول بر متر مکعب است که با نتایج روش محاسبه‌ای که در تحقیق Marceau et al بدست آمده، متناسب است). همچنین، عملیات اختلاط مواد اولیه در کارخانه‌های تولید بتن کمتر از ۲ درصد انرژی مصرفی کل را به خود اختصاص داده و در رتبه سوم مصرف قرار گرفته است. یافته‌های مندرج در شکل ۵ مؤید آن است که در تولید بتن مسلح قطعات پیش‌ساخته بیشترین حجم انرژی، برای تولید مواد اولیه بتن مصرف می‌شود که دلیل عمده آن مقدار زیاد سیمان جهت تولید بتن با عیار بالا است. این مقدار حدود ۴۲ درصد از کل انرژی مورد نیاز در مرحله تولید بتن مسلح است. تهیه فولاد لازم برای مسلح نمودن قطعات بتنی پیش‌ساخته با مصرف ۳۶ درصد از کل انرژی عامل ثانوی و تاثیرگذار در محاسبه است. همچنین، عملیات لازم برای اختلاط و فرآوری بتن در کارخانه‌های پیش‌ساختگی که حدود ۲۲ درصد از کل انرژی نهان را به خود اختصاص داده است عامل نهایی تاثیرگذار در این روش است. مقایسه مجموع انرژی نهان مورد نیاز در دو روش اجرا معین می‌سازد که انرژی نهان لازم برای تهیه و تدارک بتن در روش پیش‌ساختگی، حدود ۱۷ درصد بیشتر از مقدار مصرفی برای تولید بتن درجا است و عوامل اصلی در این اختلاف، عیار بالای سیمان مصرفی در بتن پیش‌ساخته بانضمام عملیات گرمایش و تولید بخار لازم برای فرآوری بتن در کارخانه‌های پیش‌ساختگی است. این اختلاف به‌قدری است که کاهش مصرف بتن در قطعات پیش‌ساخته به میزان ۴ درصد و اختلاف انرژی مصرفی برای عملیات کارخانه‌ای حدود ۴۲ گیگاژول نسبت به روش درجا جبران‌کننده فاصله موجود نیست.

شکل ۶، که به مقایسه میزان دی‌اکسیدکربن انتشار یافته در محیط می‌پردازد، وضعیتی مشابه با انرژی نهان تولید بتن مسلح نشان می‌دهد. به صورت کلی عملیاتی که انرژی بیشتری مصرف می‌کنند، آلاینده بیشتری نیز به محیط ساطع می‌کنند. با این‌حال رابطه مستقیم و یکسانی میان این مقادیر یافت نمی‌شود. به عنوان مثال اگرچه تولید مواد اولیه در روش بتن پیش‌ساخته حدودا ۱۷ درصد انرژی بیشتری مصرف می‌نماید، اما حدود ۳۰ درصد دی‌اکسیدکربن بیشتری به محیط منتشر می‌کند.

1 Embodied energy

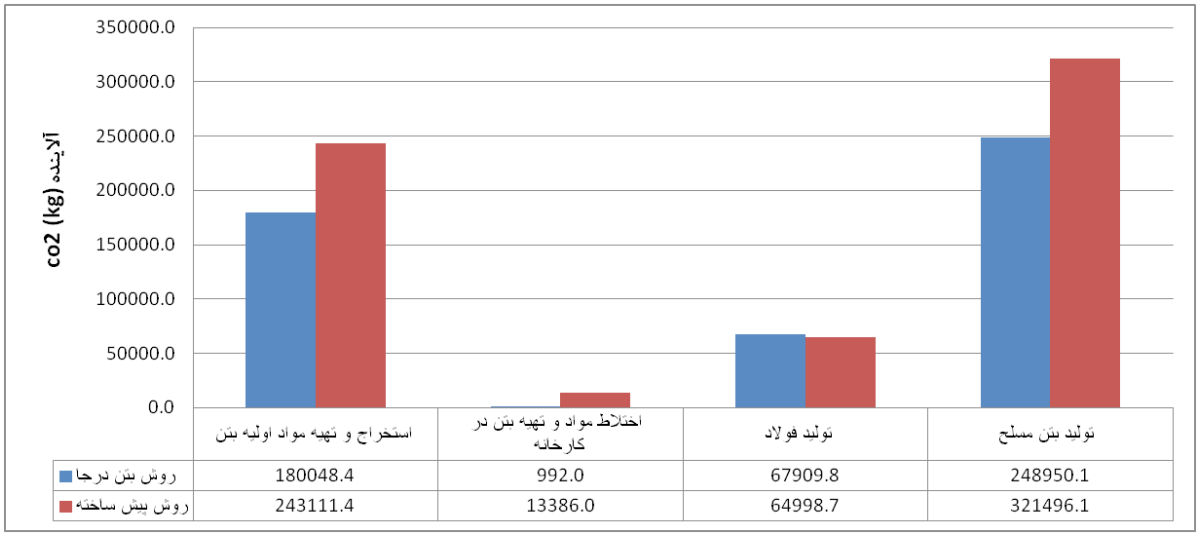


	استخراج و تهیه مواد اولیه بتن	اختلاط مواد و تهیه بتن در کارخانه	انرژی نهان برای تولید فولاد	انرژی نهان برای تولید بتن مسلح
روش بتن درجا	706641.4	24179.9	1122639.3	1853460.6
روش پیش ساخته	932450.3	442223.0	805886.9	2180560.1

شکل ۵: مقایسه میزان انرژی نهان برای تولید بتن مسلح در دو سیستم ساختمانی پیش‌ساخته و درجا

Fig. 5. comparison of inherent energy for in-situ and pre-cast concrete construction methods

در بررسی انرژی‌های مورد نیاز برای تحقق عملیات اجرایی دو روش (شکل ۷)، یافته‌ها نشان می‌دهند که روش بتن درجا در مجموع حدود ۱۵ درصد انرژی بیشتری مصرف می‌کند. عامل تعیین کننده میزان انرژی مصرفی برای دو روش اجرایی مذکور، فعالیت‌های تکمیلی در محل کارگاه (یا همان سایت) پروژه است که شامل ریختن بتن به‌همراه عمل‌آوری آن برای روش درجا و نصب یا برپایی برای روش پیش‌ساخته است.

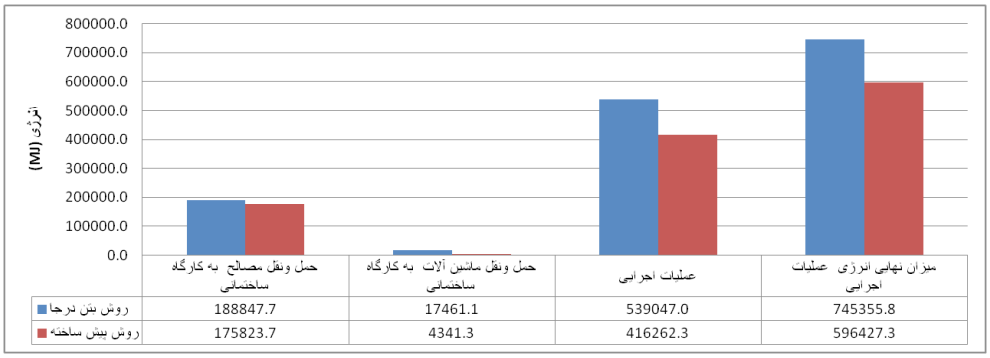


	استخراج و تهیه مواد اولیه بتن	اختلاط مواد و تهیه بتن در کارخانه	تولید فولاد	تولید بتن مسلح
روش بتن درجا	180048.4	992.0	67909.8	248950.1
روش پیش ساخته	243111.4	13386.0	64998.7	321496.1

شکل ۶: مقایسه دی‌اکسیدکربن تولید شده در مرحله تولید بتن مسلح برای دو سیستم ساختمانی پیش‌ساخته و درجا

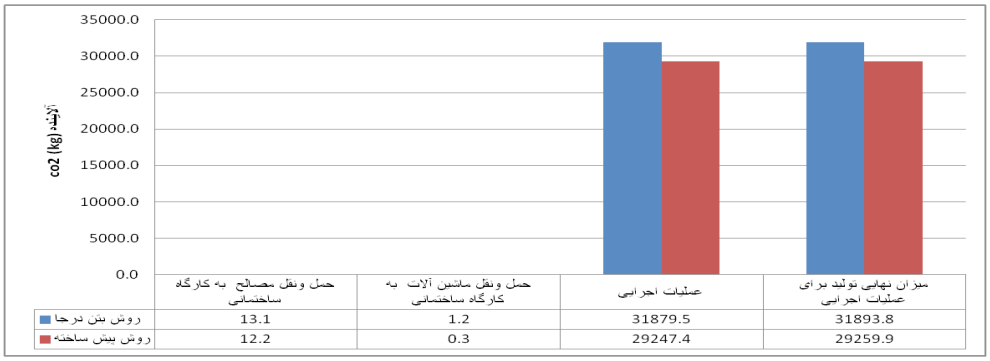
Fig. 6. comparison of carbon emission at concrete production phase for in-situ and pre-cast methods

گفتنی است میزان انرژی مورد نیاز در فعالیت‌های کارگاهی برای روش درجا حدود ۷۲ درصد و برای روش پیش‌ساخته حدود ۶۴ درصد کل انرژی مصرفی است. این تفاوت ریشه در کاهش حجم فعالیت‌های کارگاهی برای روش‌های پیش‌ساخته است. چرا که در روش پیش‌ساخته بسیاری از فعالیت‌های مورد نیاز نظیر عمل‌آوری بتن در کارخانه‌های پیش‌ساخته انجام می‌شود که مقدار آن در مرحله تولید لحاظ شده است. علاوه بر این در دیگر مراحل اجرایی نیز مصرف انرژی روش پیش‌ساخته کم‌تر از روش درجاست. در روش بتن درجا، به علت افزایش حجم مصالح انتقال یافته به کارگاه، این مرحله با مصرف انرژی بیشتری نسبت به روش بتن پیش‌ساخته همراه است (حدود ۷ درصد). هم‌چنین در روش بتن درجا چون نیاز به حمل‌ونقل ماشین‌آلات بیشتری به محل کارگاه است این عملیات مصرف‌کننده انرژی بیشتری نسبت به روش پیش‌ساخته است (حدود سه برابر). شکل ۸ که میزان دی‌اکسیدکربن انتشار یافته را برای عملیات اجرایی نمایش می‌دهد، مشخص می‌سازد که روش بتن درجا ۹ درصد آلودگی بیشتری منتشر می‌کند. قسمت عمده این مقدار برای هر دو روش در تکمیل عملیات اجرایی ایجاد می‌شود. در عملیات انتقال مصالح به محیط کارگاه اگرچه مقدار انرژی مصرفی برای هر دو سیستم قابل توجه بود، اما از لحاظ انتشار دی‌اکسیدکربن به محیط هر دو روش مقدار کمی را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به اختلاف حجم مصالح مصرفی در دو روش، میزان انرژی مصرفی و آلاینده کربنی منتشر شده به‌ازای یک مترمکعب تولید و اجرای بتن، مقیاسی واضح از ارزیابی پایداری زیست–محیطی ارائه می‌دهد (شکل ۹ و ۱۰). مقایسه این نمودارها معرف آن است که به‌ازای یک مترمکعب تولید و اجرای بتن میزان انرژی مصرفی برای روش پیش‌ساخته حدود ۱۱% بیشتر از روش متعارف درجا است. در حالی‌که این مقدار برای کربن انتشار یافته به محیط کمی بیش از دو برابر روش بتن درجا است (حدود ۲۳%). نتایج نشان می‌دهد که مصرف کمتر مواد ساختمانی در روش پیش‌ساخته و میزان کمتر انرژی لازم و کربن منتشر شده در مراحل اجرا، جبران انرژی نهان این روش و کربن منتشر شده متناظر در مراحل اولیه تولید را نمی‌کند و با احتساب مجموع نتایج از مرحله استخراج مواد اولیه تا اتمام ساخت از لحاظ زیست–محیطی نسبت به روش بتن درجا برتری ندارد. به عبارت دیگر پایداری زیست–محیطی روش صنعتی بتن پیش‌ساخته در مرحله تولید کمتر از مقادیر عددی آن در روش متعارف است. با این‌حال در مرحله اجرا، شیوه صنعتی از لحاظ زیست–محیطی پایدارتر از روش متعارف بوده به نحوی که فارغ از انرژی نهان مصالح، پایداری روش صنعتی را در مقیاس پروژه تأئید می‌کند.



شکل ۷: مقایسه انرژی مصرف شده برای تحقق عملیات اجرایی در دو سیستم ساختمانی پیش‌ساخته و درجا

Fig. 7. comparison of energy consumption of on-site activities for in-situ and pre-cast methods

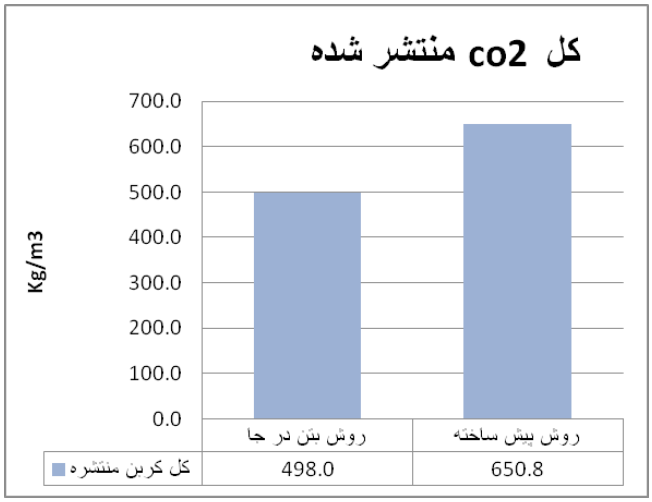


شکل ۸ : مقایسه دی‌اکسیدکربن تولید شده برای تحقق عملیات اجرایی در دو سیستم ساختمانی پیش‌ساخته و درجا

Fig. 8. comparison of carbon emission of on-site activities for in-situ and pre-cast methods

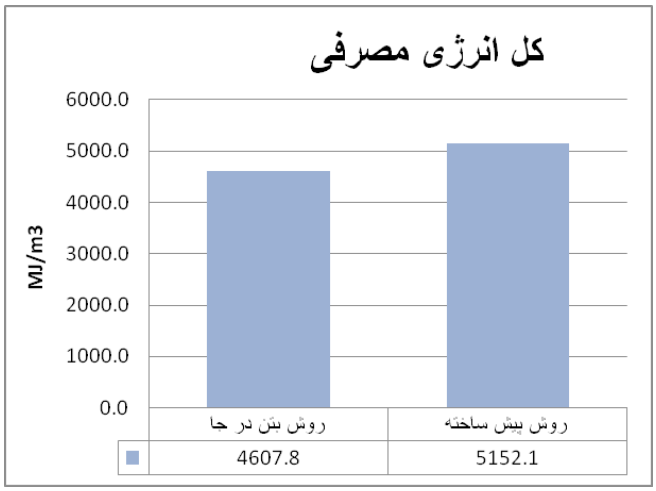
۶- نتیجه‌گیری

نتایج برآمده از آزمون نشان می‌دهد که بهره‌گیری از روش اجرای صنعتی (یعنی پیش‌ساختگی بتنی) در مقیاس پروژه تشریح شده تحقیق حاضر، تنها در مرحله اجرا به تحقق آرمان‌های پایداری زیست-محیطی کمک می‌کند. به عبارت دیگر، مقایسه روش صنعتی بتن پیش‌ساخته با روش متعارف، نشان می‌دهد که در مرحله تولید بتن، روش متعارف نسبت به روش صنعتی هم انرژی کم‌تری مصرف می‌کند و هم با تولید آلاینده کربنی کمتری همراه است. با این‌وجود در مرحله اجرا، روش پیش‌ساختگی از نقطه نظر پایداری زیست-محیطی بهتر عمل می‌کند. گفتنی است تأثیر نتایج به‌دست آمده در مرحله تولید بیشتر از مرحله اجرا است. به همین دلیل در مجموع دو مرحله تولید و اجرای بتن، میزان انرژی مصرفی و آلاینده انتشار یافته برای روش صنعتیِ فوق بیش از روش متعارف است. با این تفاسیر فرضیه پایداری زیست-محیطی روش اجرایی صنعتی یعنی بتن پیش‌ساخته در مرحله تولید بتن منتفی و در مرحله اجرا برقرار است. این مطلب مؤید آن است که پایداری زیست-محیطی روش‌های اجرایی مختلف را نمی‌توان تنها در یک یا چند مرحله از چرخه حیات بررسی نمود. بدیهی است با افزایش دیگر مراحل چرخه حیات اعم از دوران بهره‌برداری و موارد دیگر، امکان برتری یا ضعف روش بتن پیش‌ساخته در مقابل روش متعارف درجا وجود دارد. علاوه بر این، مقیاس پروژه نیز می‌تواند عامل دیگری در نتایج این مقایسه تلقی گردد. گفتنی است فارغ از مبحث انرژی و آلاینده کربنی، مباحث دیگری نظیر کیفیت اجرا، سرعت، هزینه، نیروی اجرایی، ویژگی‌های اجتماعی می‌تواند در مقایسه پایداری روش‌های صنعتی و سنتی مدنظر قرار گیرد که نیازمند تحقیقات آتی است.



شکل ۹: مقایسه کل دی اکسید کربن منتشر شده به ازای یک متر مکعب بتن

Fig. 9. comparison total energy consumption of in-situ and pre-cast concrete construction methods for one cubic meter of concrete



شکل ۱۰: مقایسه کل انرژی صرف شده به ازای یک متر مکعب بتن

Fig. 10. comparison total carbon emission of in-situ and pre-cast concrete construction methods for one cubic meter of concrete

مراجع

[1] Stefan Giljum et al. SERI (Sustainable Europe Research Institute), Austria and Global 2000 (Friends of the Earth Austria), Overconsumption? Our use of the world's natural resources, 2009,

[2] UNEP (United Nations Environmental Programme), Waste and Climate Change: Global trends and strategy framework, 2010

[3] European Working Group for Sustainable Construction, "Sustainable construction final report", website: http://www.europa.eu.int/comm/enterprise/construction/index.htm., 2001

[4] Nässén, J. et al., "Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input–output analysis." Energy, vol. 32, no. 9, pp. 1593–1602., 2007

[5] Steele, James, Architecture Today, Phaidon press, 1997

[6] Kim, Jong-Jin, Sustainable Architecture Module: Introduction to Sustainable Design, Published by National Pollution Prevention Center for Higher Education, 1998

[7] Björklund, T. et al., "LCA of building frame structures: Environmental impact over the life cycle of concrete and steel frames." Technical Environmental Planning, Chalmers University of Technology, 1996

[8] Jönsson, Å. et al., "LCA of concrete and steel building frames." The International Journal of Life Cycle Assessment, 3(4), 216–224., 1998

[9] Johnson, T. W. "Comparison of environmental impacts of steel and concrete as building materials using the life cycle assessment method.", Dept. of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2006

[10] Guggemos, A., and Horvath, A. "Comparison of environmental effects of steel-and concrete-framed buildings." Journal of Infrastructure Systems, Volume 11 Issue 2, 2005

[11] Omar, W. et al., "Assessment of the embodied carbon in precast concrete wall panels using a hybrid life cycle assessment approach in Malaysia." Sustainable Cities and Society, 10, pp. 101-111, 2014

[12] Aye, Lu, et al. "Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. " Energy and Buildings, 47, pp. 159-168., 2012

[13] Nielsen, C. V., "Carbon footprint of concrete building seen in the life cycle perspective." Proc. Of NRMCA 2008 concrete Technology Forum, Silver Spring, MD, 2008

[14] Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)." Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice, Based on a Workshop at Sesimbra.", Portugal, March 31–April 3, 1993

[15] Georgia Institute of Technology, "AIA Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice." Washington DC: American Institute of Architects, 2010

[16] Curran MA, editor. "Environmental life-cycle assessment". New York: McGraw-Hill, 1996

[17] UNEP, "Evaluation of Environmental Impacts in Life Marceau, Medgar L. et al.,"Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete. ", SN3011, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, PCA, 2007

[18] Means, R. S., Building construction cost data, R. S. Means Company, Inc., Kingston, Mass., 2012

[19] Charette, R. P., & Marshall, H. E. UNIFORMAT II elemental classification for building specifications, cost estimating, and cost analysis. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology., 1999

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

I. Mahmmod Zadeh Kani, S. Lahour Pour, J. Godini, "Environmental Sustainability Assessment of Industrial Construction Technologies (Case Study: In-situ and Precast Concrete Construction Methods)", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(3) (2017) 565-576.

DOI: 10.22060/ceej.2016.692