

ترجمه انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
A Systematic Review of Life Cycle Assessment in 3D Printing
Concrete: An Analytical Investigation of Methods, Processes, and
Assessment Tools in Architecture and Construction
در همین شماره مجله به چاپ رسیده است.

مقاله پژوهشی

مروری جامع بر چارچوب ارزیابی چرخه حیات چاپ سه‌بعدی بتن: روش‌ها، فرایند و ابزار*

امیربهادر برادران^۱، کتایون تقی‌زاده^{۱*}

۱. گروه فناوری معماری، دانشکده معماری، دانشکده‌های زیبا، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

چکیده

بیان مسئله: چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی صنعت ساختمان، ضرورت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین را بیش از پیش نمایان ساخته است. در این میان، چاپ سه‌بعدی بتن به‌عنوان رویکردی نوپدید، ظرفیت قابل‌توجهی در کاهش ضایعات، صرفه‌جویی زمانی و بهبود بهره‌وری دارد. مطالعات پیشگامانه متعددی با روش‌شناسی‌ها و مطالعات موردی به این مسائل پرداخته‌اند اما همچنان کمبود چارچوب تحلیلی میان آنها، به چشم می‌خورد.

هدف پژوهش: بررسی و دستیابی به چارچوبی که به روشنی روش، فرایند و ابزار مؤثر در حوزه دانش ارزیابی چرخه حیات در بحث چاپ سه‌بعدی را معین کند.

روش پژوهش: این پژوهش با روش استدلال منطقی-تحلیلی و مرور نظام‌مند بر ادبیات پژوهش و بررسی کتابخانه‌ای، به بررسی چارچوب‌های ارزیابی چرخه حیات و شناسایی عوامل کلیدی در این حوزه پرداخته است. **نتیجه‌گیری:** نتایج نشان می‌دهد که مصالح بتنی به‌ویژه سیمان، بیشترین سهم را در انتشار دی‌اکسیدکربن دارند و حدود ۵۲ درصد از کل اثرات زیست‌محیطی را به خود اختصاص می‌دهد. در مقابل، جایگزینی مصالح بازیافتی به‌ویژه در بخش سنگدانه‌ها، بسته به نسبت مصرف، می‌تواند ۲۴ تا ۴۷ درصد از این اثرات را کاهش دهد. از منظر اقتصادی نیز این فناوری پتانسیل صرفه‌جویی تا حدود ۷۸ درصد را دارا است. با وجود این مزایا، تنوع در واحد عملکرد، حدود سیستم و محدودیت داده‌های مقیاس صنعتی، مانع از مقایسه مستقیم نتایج می‌شود. براین‌اساس، استانداردسازی روش‌شناسی ارزیابی چرخه حیات و توسعه مطالعات تجربی در مقیاس واقعی، پیش‌شرط بهره‌گیری پایدار از چاپ سه‌بعدی بتن در معماری و شهرسازی آینده است.

واژگان کلیدی: چاپ سه‌بعدی بتن، ارزیابی چرخه حیات، کربن، مصالح بازیافتی، بهینه‌سازی مخلوط بتن.

مقدمه و بیان مسئله

بخش ساختمان یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان منابع طبیعی و تولیدکنندگان ضایعات ساختمانی در جهان است؛ به‌گونه‌ای که حدود ۵۰ درصد از منابع مصرفی به این صنعت اختصاص دارد (Javed et al., 2025). هم‌زمان با رشد شهرنشینی و افزایش تقاضای مسکن، پیش‌بینی می‌شود سطح زیربنای جهانی طی چهار دهه آینده به بیش از ۲۳۰ میلیارد مترمربع برسد (Kuzmenko et al., 2019). در حال حاضر صنعت ساختمان

بیش از ۴۰ درصد از مصرف انرژی، ۳۸ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای، بیش از ۴۰ درصد از مصرف شن و ماسه و سهم قابل‌توجهی از مصرف آب و تولید پسماند را به خود اختصاص داده است (Agusti-Juan & Habert, 2017; Huang et al., 2024; Yuet al., 2024; Zhuang et al., 2025; Llorente-García et al., 2025; Sakthibala et al., 2025). در این میان، مصالح پایه سیمانی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع انتشار کربن در صنعت ساختمان‌سازی شناخته می‌شوند (Kumar et al., 2025). صنعت ساختمان باید هر چه سریع‌تر گام‌های خود را در حوزه کاهش ردپای کربنی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف بی‌رویه انرژی، جهت رسیدن به پایداری زیست‌محیطی در جهان بردارد (Mosly, 2025). همچنین در

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری «امیربهادر برادران» با عنوان «ارزیابی میزان انتشار کربن در دو نوع ساخت رایج و چاپ سه‌بعدی با استفاده از مصالح بتنی در بناهای کوچک مقیاس در شهر تهران» است که به راهنمایی دکتر «کتایون تقی‌زاده» در سال ۱۴۰۵ در دانشکده معماری، دانشکده‌های زیبا، دانشگاه تهران انجام شده است.
** نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۲۱۵۶۴۶۱، ut.ac.ir@ktaghizad

دسته‌بندی واحد عملکردی^۲ (International ..., 2022)، مصالح، بستر تحلیل ارزیابی چرخه حیات، گام ارزیابی چرخه حیات و شاخص‌های زیست‌محیطی ارزیابی چرخه حیات، بررسی کرد (جدول ۱ و تصویر ۱).

بررسی مطالعات جدول ۱ نشان می‌دهد که در حوزه مصالح، تمرکز عمده پژوهش‌ها بر کاهش سهم سیمان و جایگزینی بخشی از مواد اولیه با ترکیبات جایگزین و بازیافتی بوده است. در این راستا، کاشانی و انگو (Kashani & Ngo, 2018) نشان دادند که استفاده از مصالح جایگزین در چاپ سه‌بعدی نیازمند بهینه‌سازی هم‌زمان پارامترهای رئولوژیکی، جریان‌یافتگی، زمان گیرش و دوام نهایی محصول است. همچنین نرلا و همکاران (Nerella et al., 2016) با معرفی ترکیبی شامل جایگزینی جزئی سیمان با خاکستر بادی و میکروسلیکا گزارش کردند که این ترکیب تقریباً در تمامی شاخص‌های زیست‌محیطی عملکرد مطلوب‌تری نسبت به بتن‌های متداول دارد. در همین راستا، اللفی و گادو (El-Alfi & Gado, 2016) نیز به دلیل پتانسیل بالای بتن بر پایه سیمان سولفوآلومینات کلسیم مبتنی بر کائولینیت، این ماده را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف انرژی و تولید سیمان معرفی کردند. از منظر توسعه طرح اختلاط و قابلیت چاپ، مارکین و همکاران (Markin et al., 2021) امکان استفاده از فوم بتن با چگالی ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب را در فرایند چاپ سه‌بعدی ارزیابی کردند، درحالی‌که لانگ و همکاران (Long et al., 2021) قابلیت چاپ مخلوط‌های سیمان رس‌کلسینه‌شده را بررسی و بر نقش توزیع ذرات و تراکم بسته‌بندی در بهبود رفتار چاپ تأکید کردند. از سوی دیگر، پاسلو و همکاران (Passuello et al., 2017) نشان دادند که تولید سیلیکات و خاکستر بادی، حمل‌ونقل ماسه و سیلیکات، و مصرف انرژی چاپگر از عوامل اثرگذار بر پیامدهای زیست‌محیطی هستند؛ به‌گونه‌ای که کاهش محتوای سیلیکات و جایگزینی فعال‌کننده‌های قلیایی مشتق از پسماند، مانند خاکستر پوسته برنج، می‌تواند به کاهش محسوس اثرات زیست‌محیطی منجر شود. در مجموع، تحلیل مطالعات پیشین نشان می‌دهد که کاهش نسبت سیمان، استفاده از مواد سیمانی مکمل، بهره‌گیری از سنگدانه‌ها و افزودنی‌های بازیافتی و هم‌زمان بهینه‌سازی پارامترهای چاپ، از مهم‌ترین راهبردهای مطرح در بهبود عملکرد زیست‌محیطی و فنی چاپ سه‌بعدی بتن محسوب می‌شوند؛ با این حال، ناهمگونی در تعریف واحد عملکردی، حدود سیستم و روش‌های تحلیل، همچنان مقایسه مستقیم نتایج میان پژوهش‌ها را با محدودیت مواجه ساخته است.

مبانی نظری

ارزیابی چرخه حیات نه صرفاً یک ابزار محاسباتی، بلکه چارچوبی تحلیلی برای هدایت تصمیم‌های طراحی، انتخاب مصالح و

ایران، براساس گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی^۱، روند مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن همچنان بالاتر از میانگین جهانی ارزیابی می‌شود (Ritchie & Rosado, 2025; IEA, 2025). در پاسخ به این چالش‌ها، توسعه فناوری‌های نوین ساخت با هدف کاهش مصرف منابع، ضایعات و ردپای کربنی، به یکی از اولویت‌های اصلی صنعت ساختمان تبدیل شده است. در این میان، فناوری چاپ سه‌بعدی به‌عنوان یکی از رویکردهای نوظهور ساخت دیجیتال، به‌دلیل حذف قالب‌بندی، کاهش پرت مصالح، افزایش آزادی طراحی و بهبود بهره‌وری، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است (Hassan et al., 2024; Banihashemi et al., 2025). مطالعات نشان داده‌اند که این فناوری می‌تواند در پروژه‌های مقیاس بزرگ، به کاهش مصرف انرژی و انتشار کلی تا حدود پنج درصد منجر شود (Kuzmenko et al., 2019). به‌منظور کاربردهای ساختمانی، هر دو مقیاس کوچک و بزرگ ساخت افزودنی توجه و بحث شده است (Agegn et al., 2026). بنابراین پژوهش در حوزه فناوری چاپ سه‌بعدی با مقیاس بزرگ، پتانسیل‌ها و کاربردهای این فناوری را در حوزه ساختمان آشکار می‌کند (Hasani & Dorafshan, 2024). با وجود این مزایا، ارزیابی دقیق عملکرد زیست‌محیطی این فناوری بدون بهره‌گیری از مفهوم ارزیابی چرخه حیات^۲ امکان‌پذیر نیست. ارزیابی چرخه حیات، به‌عنوان چارچوبی نظام‌مند برای سنجش اثرات زیست‌محیطی از استخراج مواد اولیه تا پایان عمر، امکان مقایسه علمی فناوری‌های ساخت را فراهم می‌کند. اگرچه مطالعات متعددی به بررسی قابلیت‌های زیست‌محیطی چاپ سه‌بعدی بتن پرداخته‌اند، همچنان فقدان چارچوبی تحلیلی و منسجم برای مقایسه روش‌ها، فرایندها و ابزارهای مورد استفاده در این حوزه مشهود است (Asprone et al., 2018; De Schutter et al., 2018; Valencia-Barba et al., 2021). از این‌رو، این پژوهش با تمرکز بر تلفیق دانش ارزیابی چرخه حیات و فناوری چاپ سه‌بعدی بتن، در پی شناسایی و تبیین چارچوبی تحلیلی برای روش، فرایند و ابزارهای مؤثر در ارزیابی زیست‌محیطی این فناوری در حوزه معماری و ساختمان است.

پیشینه پژوهش

چاپ سه‌بعدی در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری داشته و توانسته است با توجه به ویژگی‌هایی از جمله سرعت، دقت، کاهش هزینه، کاهش ضایعات و کاهش آسیب‌های نیروی کار، جایگاه خود را در حوزه معماری و ساختمان به‌عنوان یک فناوری نوظهور تثبیت کند. اما همچنان حیاتی است تا از منظر عملکردهای زیست‌محیطی نیز مورد سنجش قرار گیرد تا بتوان به اصول پایداری در این حوزه دست یافت. بدین منظور در ادامه سعی بر این است تا پژوهش‌هایی که در سال‌های اخیر به ارزیابی چرخه حیات فناوری چاپ سه‌بعدی بتن پرداخته‌اند را در

جدول ۱. مروری بر ارزیابی چرخه حیات چاپ سه‌بعدی بتن. مأخذ: نگارندگان.

منبع	واحد عملکردی	ارزیابی چرخه حیات	مصارف	ابزار تحلیل	شاخص‌ها
Yao et al. (2019)	دیوار	گهواره تا دروازه	پودر ژئوپلیمر، سرباره، خاکستر بادی، ماسه، سیلیکات به‌عنوان بایندر، آب، افزودنی	CMLCA	GWP ⁴ ; ODP ⁵ ; AP ⁶ ; EP ⁷ ; HTP ⁸ ; FAETP ⁹ ; TETP ¹⁰ ; POCP ¹¹ ; ADP ¹²
Abu-Ennab et al. (2022)	ساختمان کامل	گهواره تا دروازه	بتن سیمانی سولفوالومینات کلسیم بر پایه کائولینیت، آب، ماسه، فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر، رس کائولین به‌عنوان بایندر	GaBi	GWP; AP; EP
Agusti-Juan et al. (2017)	دیوار (تصویر ۱)	گهواره تا دروازه	سیمان، سیلیکافوم، آب، سنگدانه تا ۴ میلی‌متر، فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر	Sima Pro	GWP; ODP; AP; EP; HTP; FAETP; TETP; ADP; WD ¹³
Muñoz et al., (2021)	ستون	گهواره تا دروازه	بتن با عیار ۴۰۰ و عیار ۷۰۰	Sima Pro	GWP
Mohammad et al. (2020)	دیوار باربر	گهواره تا دروازه	بتن سازه‌ای، میلگرد، بتن ساختمانی، ملات، پلای‌وود، سیمان، خاکستر بادی، میکروسیلیکا، پرلیت، آب، میکروالیاف، فوق روان‌کننده، زودگیر	GaBi	GWP; AP; EP; POCP; ADP
Alhumayani et al. (2020)	دیوار باربر خارجی (تصویر ۲)	گهواره تا دروازه (پیش از ساخت)	سیمان، خاکستر بادی، سیلیکافوم، شن/ماسه، آب، فوق روان‌کننده، الیاف، کاه، بلوک سیمانی، قالب چوبی، ملات مسلح با میلگرد	Sima Pro	GWP; ODP; EP; HTP; ADP; LU ¹⁴
Abdalla et al. (2021)	دیوار خارجی	گهواره تا دروازه (پیش از ساخت)	خاکستر بادی، میکروسیلیکا، فوق روان‌کننده، افزودنی تنظیم‌کننده ویسکوزیته، سیمان، سنگدانه نرم، آب، فولاد، سنگدانه درشت، چوب	Sima Pro	GWP; ODP; AP; EP; HTP; FAETP; MAETP ¹⁵ ; TETP; POCP; ADP; LU; WD
Kuzmenko et al. (2019)	دیوار (تصویر ۳)	گهواره تا دروازه	سیمان، سیلیکافوم، ماسه، آب، فوق روان‌کننده، زودگیر	—	GWP; ODP; AP; EP; HTP; FAETP; MAETP; TETP; POCP; ADP; LU; WD
Sambucci et al. (2023)	حجم یک مترمکعبی	گهواره تا دروازه	پسماند لاستیک، سیمان، آب، ماسه، سیلیکافوم، پلی‌کربوکسیلات اتر، اکسید کلسیم	Sima Pro	GWP
Wang et al. (2014)	حمام (تصویر ۴)	گهواره تا دروازه	سیمان، خاکستر بادی، سیلیکافوم، ماسه	—	GWP; ODP; AP; EP; HTP; ADP; LU
Ye et al. (2024)	ساختمان کامل	گهواره تا دروازه (پیش از ساخت)	سیمان، خاکستر بادی، سیلیکافوم، سنگدانه ریز، سنگدانه درشت، آب، خاکستر کوره، لاستیک خردشده، پودر سنگ‌آهک، روان‌کننده	Sima Pro	GWP; ODP; AP; EP; POCP
Elias (2021)	ساختمان کامل	گهواره تا دروازه	سیمان، خاکستر بادی، سیلیکافوم، ماسه، آب، الیاف	Sima Pro	GWP; FTA ¹⁶ ; FTOX ¹⁷ ; FEP ¹⁸ ; MEP ¹⁹ ; TEP ²⁰ ; CE ²¹ ; IR ²² ; NCE ²³ ; ODP; POCP; RE ²⁴ ; DW ²⁵ ; FF ²⁶ ; LU; MM ²⁷
Rossi et al. (2024)	یک مترمربع	—	سیمان، آب، ماسه، رس، آهک، الیاف پلی‌پروپیلن	Sima Pro	GHG ²⁸
Mantha et al. (2024)	یک مترمکعب	گهواره تا ساخت	خاکستر بادی، میکروسیلیکا، روان‌کننده، پرلیت، میکروالیاف، زودگیر، سیمان، آب	OneClickLCA	GWP
Roux et al. (2023)	یک شش ضلعی	گهواره تا گهواره	ماسه، سیمان، سیلیکافوم، آب، زودگیر، روان‌کننده	Brightway2 tool	GWP; FTA; FTOX; FEP; MEP; TEP; CE; IR; NCE; ODP; POCP; RE; DW; FF; LU; MM
Han et al. (2021)	یک ساختمان	گهواره تا ساخت	سیمان، آب، سنگدانه بازیافتی، سنگدانه طبیعی، ماسه، افزودنی	-	GWP; AP; PP ²⁹ ; EP

مواد تا پایان حیات ساختمان، امکان مقایسه سناریوهای فناوری و طراحی را فراهم می‌کند. این چارچوب، مبتنی بر اصول تدوین‌شده استانداردهای ISO ۱۴۰۴۴/۱۴۰۴۰ (International ..., 2022)،

سیاست‌گذاری ساخت در راستای پایداری محیطی است. در ادبیات جدید، ارزیابی چرخه حیات به‌عنوان رویکردی سیستمی‌گر تعریف می‌شود که با سنجش اثرات زیست‌محیطی از استخراج



تصویر ۱. ۱. نمونه دیوار مسلح چاپ سه‌بعدی شده. مأخذ: Alim-Khan et al., 2021 / ۲. الف دیوار چاپ سه‌بعدی بتنی، ب دیوار چاپ سه‌بعدی کاهگل. مأخذ: Alhumayani et al., 2020 / ۳. سیستم دیوار با مقطع سینوسی. مأخذ: Kuzmenko et al., 2019 / ۴. الف حمام پیش ساخته با قالب فولادی، ب حمام چاپ سه‌بعدی بتنی. مأخذ: Wang et al., 2014.

Civilica و ScienceDirect، Google Scholar، Noormags انجام شده است. دوره زمانی مورد بررسی برای انتشار مقالات بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ بوده و آخرین جستجو در بازه زمانی ۶ ماه تا یکسال گذشته انجام شده است. ترکیبی از کلیدواژه‌های به کاررفته جهت جستجو عبارتند از: ارزیابی چرخه حیات، محیط زیست، پایداری، چاپ سه‌بعدی بتن و مصالح بتنی. همچنین از عملگرهای بولی (and, or, not) و جستجوی عبارات دقیق ("") جهت افزایش دقت نتایج استفاده شده است. در فرایند گزینش مقالات نتایج اولیه جستجو تعداد ۱۵۰ مقاله را نشان داد. پس از حذف موارد تکراری و بررسی عنوان‌ها و چکیده‌ها، تعداد ۸۰ مقاله برای ارزیابی کامل تمام متن انتخاب شدند. این مقالات ابتدا با دو معیار تأیید زبان (انگلیسی-فارسی) و سال انتشار (۱۰ سال اخیر)، و سپس در گام بعد، با چهار معیار تأیید اصلی از جمله: ۱. بررسی ارزیابی چرخه حیات، ۲. پرداختن به فناوری چاپ سه‌بعدی، ۳. به کارگیری و بررسی مصالح بتنی و ۴. پرداختن به حوزه معماری و ساختمان بررسی شده‌اند. معیارهای حذف در این فرایند نیز شامل مواردی از جمله: ۱. مقالات با اشاره غیر مستقیم یا حاشیه‌ای با چاپ سه‌بعدی بتن ۲. عدم اشاره یا استفاده از چارچوب روش‌شناسی ارزیابی چرخه حیات و ۳. مقالاتی که مواد بتنی یا فناوری چاپ سه‌بعدی در آنها بررسی نشده باشد. در نهایت براساس معیارهای ورود و حذف بیان شده، شانزده مقاله با اشاره مستقیم به موضوع ارزیابی چرخه حیات چاپ سه‌بعدی بتن انتخاب شدند (تصویر ۲).

یافته‌های پژوهش

براساس یافته‌های حاصل از مطالعات در پنج پارامتر واحد عملکردی، مرحله ارزیابی چرخه حیات، مصالح (طرح اختلاط)، ابزار تحلیل و شاخص‌های زیست‌محیطی ارزیابی چرخه حیات می‌توان ابزار، فرایند و روش ارزیابی چرخه حیات چاپ سه‌بعدی بتن را به صورت زیر بررسی کرد. این امر کمک می‌کند تا مسیر حرکت و فاکتورهای ارزیابی برای انجام پژوهش‌های آتی مشخص شود و نقشه راهی برای پژوهشگران و فعالان حوزه ارزیابی چرخه حیات و چاپ سه‌بعدی بتن باشد.

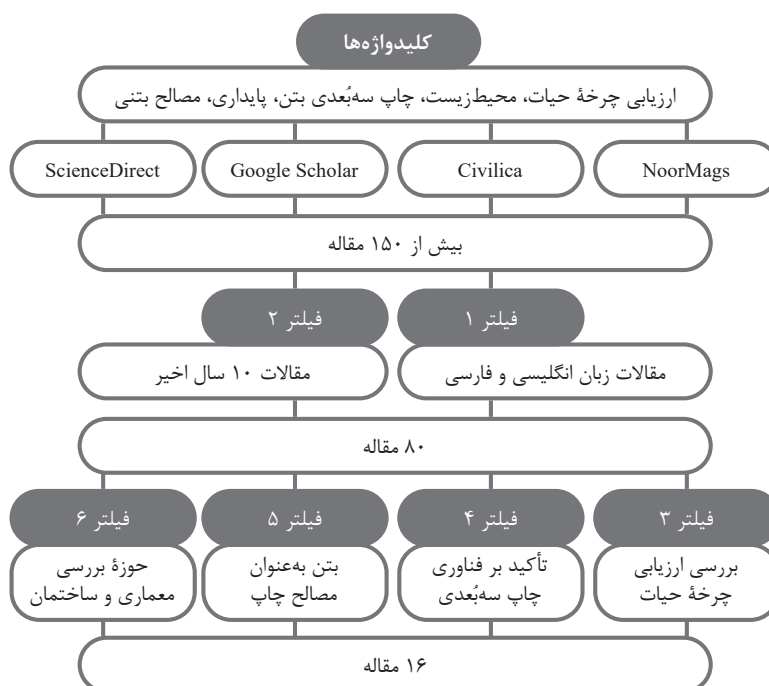
• واحد عملکردی

واحد عملکردی یک جنبه کلیدی در ارزیابی چرخه حیات به جهت

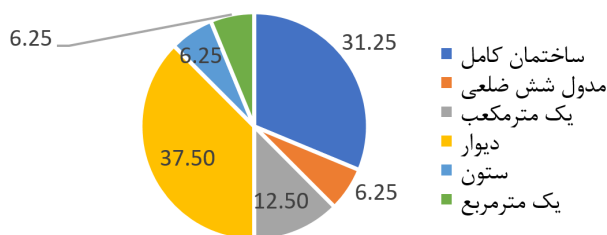
در حوزه ساخت دیجیتال به‌ویژه اهمیت مضاعفی یافته است؛ زیرا فناوری‌های نوظهور مانند چاپ سه‌بعدی بتن، مرز میان طراحی، تولید و اجرا را از میان برداشته است و نیازمند ارزیابی یکپارچه فرایند هستند. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که در این فناوری، سهم اصلی اثرات زیست‌محیطی همچنان به تولید سیمان و انرژی فرایند اختصاص دارد، اما در مقابل، حذف قالب‌بندی، کاهش پرت مصالح و امکان بهینه‌سازی هندسی می‌تواند به کاهش چشمگیر انتشار کربن منجر شود (Roux et al., 2023; Sambucci et al., 2023; Rossi et al., 2024). بنابراین، ارزیابی چرخه حیات در این حوزه به‌عنوان بنیان نظری تحلیل کارایی واقعی فناوری و نه صرفاً سنجش کمی انتشار تلقی می‌شود. از نگاه معماری دیجیتال، چاپ سه‌بعدی بتن بیانگر گذار از الگوی ساخت مبتنی بر استانداردسازی صنعتی به الگوی ساخت مبتنی بر داده و الگوریتم است؛ گذاری که پیامدهای آن در مصرف منابع، اقتصاد پروژه و منطق طراحی نمایان می‌شود. مطالعات جدید نشان داده‌اند که هم‌زمانی طراحی پارامتریک، بهینه‌سازی توپولوژیک و تولید افزایشی می‌تواند مصرف مصالح را کاهش دهد و شدت کربن تجسم یافته را در مقیاس ساختمان کم کند، به‌ویژه زمانی که در طرح اختلاط از مواد جایگزین یا بازیافتی استفاده شود (Ye et al., 2024; Mantha et al., 2024; Agegn et al., 2026). براین اساس، مبانی نظری در این پژوهش بیان می‌دارد که کارایی زیست‌محیطی چاپ سه‌بعدی بتن نه ویژگی ذاتی فناوری، بلکه حاصل تعامل میان تعریف واحد عملکردی، حدود سیستم، انتخاب مصالح و مدل‌سازی چرخه حیات است. این دیدگاه، ضرورت تدوین چارچوب تحلیلی منسجم برای ارزیابی این فناوری در معماری را توجیه می‌کند.

روش پژوهش

روش این پژوهش، روش استدلال منطقی-تحلیلی با گردآوری مطالب به صورت کتابخانه‌ای و مرور نظام‌مند ادبیات پژوهش انجام شده تا مطالعات موجود پیرامون ارزیابی چرخه حیات و چاپ سه‌بعدی بتن را تحلیل و مقایسه کند. چارچوب روش‌شناسی بر اصول شفافیت، قابلیت بازتولید، و همسویی با دستورالعمل‌های بین‌المللی PRISMA^۳ استوار است. راهبرد جستجو در این پژوهش براساس جستجوی منابع در پایگاه‌های معتبر علمی از جمله Scopus، Web of Science،



تصویر ۲. ساختار روش پژوهش جهت استخراج معیارها و بنیان پیشینه پژوهش. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۳. پراکندگی نوع واحد عملکردی در پژوهش‌ها. مأخذ: نگارندگان.

براساس استاندارد EN 15978 و EN 15804 می‌توان مراحل را به‌ترتیب پیش‌رو شامل: ۱. گهواره تا دروازه: تولید مواد (A۳-A۴)، ۲. گهواره تا ساخت: شیوه‌های ساختمان‌سازی (A۴-A۵)، ۳. گهواره تا مرگ: به‌رمبرداری از ساختمان (B۱-BY)، پایان عمر ساختمان (C۱-C۴)، ۴. گهواره تا گهواره: هرگونه مزایا یا بارهایی که فراتر از چرخه حیات ساختمان رخ می‌دهد (D)، ترسیم کرد. این فرایند برای یک پروسه ساختمان‌سازی از لحظه تولید مصالح تا امکان بازیافت و یا تخریب تمام اجزای ساختمان به کار می‌رود. در بررسی‌های انجام‌شده در این حوزه براساس مرحله ارزیابی چرخه حیات در ارتباط با چاپ سه‌بعدی بتن می‌توان دریافت که، حدود ۷۵ درصد از پژوهش‌ها فرایند ارزیابی چرخه حیات خود را تا پایان مرحله A۳، حدود ۱۲/۵ درصد تا پایان مرحله A۵ و تنها ۶/۲۵ درصد به بررسی کامل مراحل از A۱ تا D پرداخته است. بنابراین در حوزه چاپ سه‌بعدی بتن با توجه محدودیت‌ها و چالش‌های بدیع‌بودن این فناوری در تولید و بررسی نمونه، عمده پژوهش‌ها همچنان کار خود را تا پایان گام آغازین این تحلیل پیش می‌برند. همان‌طور که از آمار مشخص است عمده پژوهش‌ها در حوزه ارزیابی

تحلیل و مقایسه اثرات زیست‌محیطی محصولات یا فرایندهای مختلف است. این واحد ممکن است یک بخش یا کل ساختمان را بررسی کند که مزیت آن در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی مربوط به کل فرایند تولید اجزای ساختمانی، از جمله استخراج مواد اولیه، حمل‌ونقل و برپاسازی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در اکثر پژوهش‌ها در حوزه واحد عملکردی در گام اول حدود ۳۷/۵ درصد از پژوهشگران برای سنجش عملکرد از یک دیوار به‌عنوان نمونه‌ای برای تعمیم به کل پژوهش خود از واحد عملکردی بهره جستند. در مراتب بعدی بررسی یک ساختمان کامل ۳۱/۲۵ درصد، یک مترمکعب از مصالح مصرفی ۱۲/۵ درصد، یک مترمربع، ستون و مدول‌سازی به‌طور مشترک ۶/۲۵ درصد به‌عنوان واحد عملکردی به کار گرفته شده‌اند (تصویر ۳). البته باید توجه داشت که نوع واحد عملکردی وابسته به موضوع و محدوده پژوهش متفاوت است و براساس معیارها و جزئیات مورد نیاز بررسی در یک پژوهش تعریف می‌شود. در نمونه‌های بررسی‌شده، دیوار بیشترین میزان بررسی را شامل شده زیرا هدف اصلی پژوهش رسیدن به عملکرد مصالحی خاص با فناوری چاپ سه‌بعدی بتن بوده ولی مورد دوم که بررسی ساختمان کامل را شامل شده، هدف بررسی تمام جزئیات ساخت یک بنا و ویژگی‌های رفتاری آن بوده است. در این مسیر هر چه پروژه به سمت ساختمان کامل در فرایند ارزیابی چرخه حیات پیش رود نیازمند جزئیات و داده‌های بیشتری هست تا امکان بررسی فراهم شود. البته باید بیان داشت که این کار موجب رسیدن به نتایجی جامع‌تر و دقیق‌تر خواهد شد.

• مرحله ارزیابی چرخه حیات

در بُعد مراحل ارزیابی چرخه حیات در یک پروسه ساختمانی

تحلیل‌های انجام‌شده شاید بتوان ترکیبی حاصل از خاکستر بادی، میکروسیلیکا، روان‌کننده، پرلیت، میکروالیاف، زودگیر، سیمان و آب را به‌عنوان یک ترکیب با مقاومت و سرعت عمل آوری بالا و همچنین دسترسی آسان به ترکیبات معرفی و عنوان کرد.

• شاخص‌های ارزیابی چرخه حیات

در ارزیابی چرخه حیات چاپ سبُعدی بتن نمی‌توان به گستره و تنوع مصالح در صنعت ساختمان‌سازی و چاپ سبُعدی و تأثیر آنها بر شاخص‌های زیستمحیطی ارزیابی چرخه حیات بی‌توجه بود که در زمینه معماری و صنعت ساختمان نیز برخی از این شاخص‌ها در اولویت بالاتری قرار می‌گیرند. پژوهش‌های بررسی‌شده در این حوزه طبق **تصویر ۵** شاخص‌هایی را در حوزه ارزیابی چرخه حیات چاپ سبُعدی بتن بررسی کردند که می‌توان از میان آنها و براساس فراوانی تحلیل آنها شاخص‌های حیاتی را در این حوزه تفکیک و شناسایی کرد. این شاخص‌ها در دستبندی‌ها و گونه‌های مختلف تحلیل می‌شوند. براساس **تصویر ۵**، می‌توان عنوان کرد که شاخص‌های پتانسیل گرمایش جهانی، پتانسیل اسیدی‌سازی، پتانسیل اوتروفیکاسیون، پتانسیل تخریب لایه اوزون، فرسودگی شبکه آبرسانی، پتانسیل ایجاد اکسیدان‌های فتوشیمیایی (آلاینده‌های جو)، کاربری زمین و پتانسیل سمیت انسانی به چشم می‌خورد. این شاخص‌ها اهمیت زیادی در ارزیابی تأثیرات زیستمحیطی دارند و به نظر می‌رسد که معیارهای تغییرات اقلیمی، آلودگی و کاهش منابع طبیعی در این ارزیابی‌ها برجسته باشند. در میان شاخص‌های نامبرده چهار شاخص پتانسیل گرمایش جهانی، پتانسیل اسیدی‌سازی، پتانسیل اوتروفیکاسیون، پتانسیل تخریب لایه اوزون در دسته شاخص‌های جامعی قرار دارند که می‌توان براساس آنها شاخص‌های دیگر را نیز مشخص کرد.

• ابزارهای تحلیل ارزیابی چرخه حیات

به‌منظور ارزیابی و بررسی این شاخص‌ها نیز ابزارهای مختلفی وجود

چرخه حیات تمرکز خود را بر گام‌های A1 تا A5 یعنی مرحله گهواره تا ساخت قرار داده‌اند. اصلی‌ترین عامل در این حوزه طبق بررسی‌ها، فناوری چاپ سبُعدی بتن است. به‌واسطه نوظهور بودن این فناوری و عدم گذشت بازه زمانی استاندارد ۳۰ تا ۵۰ سال از ساخت در هیچ‌یک از نمونه‌ها، دانش عملی از مرحله بهره‌برداری بسیار پایین و مراحل تخریب و بازیافت احتمالی نیز به‌طور تقریبی وجود ندارد. بنابراین فقط با شبیه‌سازی امکان سنجش عملکرد گام‌های دیگر ارزیابی چرخه حیات میسر خواهد بود که تأیید این امر را نیز می‌توان براساس آمار مشاهده کرد.

• مصالح (طرح اختلاط)

یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین بحث‌ها در حوزه چاپ سبُعدی بتن وابسته به مصالح مصرفی و طرح اختلاط است. زیرا بتن و مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده آن می‌تواند در بحث زیستمحیطی و همچنین خصوصیات و ویژگی‌های مورد نیاز برای چاپ سبُعدی از جمله قابلیت چاپ، رئولوژی، اکستروپذیری، زمان چاپ، امکان پمپاژ شدن، ساخت و دیگر فاکتورهای تأثیرگذار در چاپ نقش اساسی ایفا کند. با توجه به تحلیل مقالات حوزه چاپ سبُعدی بتن به‌طور کلی فراوانی استفاده از مواد جهت رسیدن به طرح اختلاط و ترکیب مناسب بتن چاپ سبُعدی را می‌توان در **تصویر ۴** مشاهده کرد. این تصویر گویای نوع مصالح مورد استفاده در یک طرح اختلاط مناسب و کاربردی است برای بهره‌گیری از ترکیبی نهایی که مقاوم، سبک و پایدار باشد. باید توجه کرد استفاده از مصالح و ترکیبات خاص مانند بتن ژئوپلیمر، بتن سیمانی سولفوآلومینات کلسیم بر پایه کائولینیت یا ترکیبات خاصی که در همه‌جا به راحتی در دسترس نیست دغدغه‌هایی در زمینه هزینه، عمل‌آوری، پیچیدگی در ترکیبات و موارد مشابه را دارا است. برآیند موارد ذکر شده باید در کنار اهمیت چالش زیستمحیطی از مرحله تولید تا بهره‌برداری ترکیب بتن نیز مدنظر قرار گیرد. بنابراین با فاکتورهای عنوان‌شده و



تصویر ۴. پراکندگی میزان به‌کارگیری مصالح در تولید بتن چاپ سبُعدی. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۵. پراکندگی تحلیل شاخص‌های ارزیابی چرخه حیات. مأخذ: نگارندگان.

اغلب پژوهش‌ها بر مراحل اولیه چرخه حیات، به‌ویژه A1-A3 و A1-A5، موجب شده است بررسی مراحل بهره‌برداری، پایان عمر، بازیافت و منافع فراتر از چرخه عمر همچنان کمتر مورد توجه قرار گیرد؛ درحالی‌که این مراحل برای تحلیل بلندمدت عملکرد زیست‌محیطی ضروری‌اند. در ادامه، نتایج نشان می‌دهد که تنوع جغرافیایی، نوع شبکه انرژی و سهم منابع تجدیدپذیر یا غیرتجدیدپذیر نیز می‌توانند بر نتایج ارزیابی چرخه حیات اثرگذار باشند و اعتبارسنجی یافته‌ها در شرایط منطقه‌ای متفاوت را ضروری سازند. در مجموع، ترکیب فناوری چاپ سه‌بعدی بتن با مصالح کم‌کربن، مواد بازیافتی و ترکیبات مهندسی‌شده، به‌ویژه سامانه‌های مبتنی بر کلسیم اصلاح‌شده، می‌تواند مسیر مؤثری برای کاهش انتشار کربن، مصرف انرژی و ضایعات ساختمانی فراهم کند و جایگاه این فناوری را به‌عنوان رویکردی قابل اتکا در توسعه ساختمان‌سازی پایدار تقویت کند.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه ارزیابی چرخه حیات فناوری چاپ سه‌بعدی بتن نشان می‌دهد که پنج پارامتر یا فاکتور اصلی برای پیشبرد این هدف شامل واحد عملکردی، مرحله ارزیابی چرخه حیات، مصالح (طرح اختلاط)، ابزار تحلیل و شاخص‌های زیست‌محیطی ارزیابی چرخه حیات نقشی کلیدی در این زمینه ایفا می‌کنند. هر یک از این پارامترها نیز خود زیرمجموعه‌هایی دارند که میزان پیشبرد و بررسی کار در آنها حائز اهمیت است. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام‌شده در مورد هر یک از این پارامترها در **جدول ۲** نشان داده شده است.

نتایج نشان داد که مصالح سیمانی همچنان مهم‌ترین منبع اثرات زیست‌محیطی در سامانه‌های چاپ سه‌بعدی محسوب می‌شوند و بهینه‌سازی طرح اختلاط، استفاده از مواد جایگزین و کاهش مصرف مصالح از مؤثرترین راهکارهای کاهش انتشار کربن به شمار می‌روند. همچنین تحلیل مطالعات نشان داد که با وجود ظرفیت بالای چاپ سه‌بعدی بتن در کاهش ضایعات، حذف قالب‌بندی، بهینه‌سازی هندسی و ارتقای بهره‌وری ساخت، ناهمگونی در واحدهای عملکردی، حدود سیستم، ابزارهای تحلیل

دارد که در حوزه ارزیابی چرخه حیات به کار می‌روند اما نرم‌افزار سیماپرو بیش از بقیه نرم‌افزارها در این مطالعات استفاده شده‌اند و پس از آن گابی و وان‌کلیکال‌سی‌ای به کار رفته‌اند. اگرچه انتخاب نرم‌افزار وابسته به نوع پژوهش، معیارهای ارزیابی و دسترسی به داده‌ها می‌تواند انتخاب شود. هر یک از این نرم‌افزارهای محاسباتی با توجه به ابزار و استانداردهایی که در اختیار دارند می‌توانند حوزه تخصصی و عملکردی متناسب با خود را بهتر و دقیق‌تر پاسخ دهند. البته بررسی دقیق همراه با جزئیات از ابزارهای تحلیل حوزه ارزیابی چرخه حیات نیازمند پژوهشی مستقل جهت بررسی همه جوانب و ابعاد مؤثر در این حوزه است تا بتوان نمونه مناسب برای حوزه معماری و ساختمان را معرفی کرد.

بحث

تحلیل مطالعات نشان می‌دهد که در ارزیابی چرخه حیات چاپ سه‌بعدی بتن، مصالح سیمانی همچنان عامل غالب در شکل‌گیری اثرات زیست‌محیطی هستند؛ به‌گونه‌ای که کاهش نسبت سیمان و اصلاح طرح اختلاط در برخی پژوهش‌ها توانسته است اثرات زیست‌محیطی را تا حدود ۹۰ درصد کاهش دهد. همچنین در پروژه‌های مقیاس بزرگ، بتن همچنان سهم غالب در کربن تجسم‌یافته را به خود اختصاص می‌دهد و حدود ۵۲ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن چرخه حیات را شامل می‌شود. از این‌رو، هم‌زمانی اصلاح ترکیب مصالح با راهکارهایی نظیر بهینه‌سازی هندسی، کاهش ضخامت مقاطع و مدیریت مصرف مصالح، از مهم‌ترین اهرم‌های فنی برای بهبود عملکرد زیست‌محیطی این فناوری محسوب می‌شود. از سوی دیگر، بررسی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های موجود، نبود شفافیت کافی در داده‌های ورودی، مسیر تحلیل و نحوه گزارش‌دهی نتایج است؛ موضوعی که ضرورت استفاده از چارچوب‌های استاندارد مبتنی بر ISO 14040/44، EN 15978 و EN 15804 را بیش از پیش نمایان می‌سازد. علاوه‌براین، بخش عمده مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی یا نمونه‌های ماژولار انجام شده و کمبود ارزیابی‌های مبتنی بر پروژه‌های واقعی و صنعتی، قابلیت تعمیم نتایج را محدود کرده است. همچنین تمرکز

جدول ۲. نتایج حاصل از پارامترهای کلیدی ارزیابی چرخه حیات فناوری چاپ سه‌بعدی بتن. مأخذ: نگارندگان.

ردیف	پارامتر	میزان	نتایج
۱	واحد عملکردی	۳۷/۵	یک دیوار
۲	مرحله ارزیابی چرخه حیات	۷۵	مرحله A3 یا گهواره تا دروازه
۳	مصالح (طرح اختلاط)	بیش از ۷۰	خاکستر بادی، میکروسیلیکا، روان‌کننده، پرلیت، میکروالیاف، زودگیر، سیمان و آب به‌عنوان یک ترکیب با مقاومت و سرعت عمل‌آوری بالا
۴	ابزار تحلیل	۵۰	نرم‌افزار سیماپرو بیشترین محبوبیت
۵	شاخص‌های زیست‌محیطی	بیش از ۷۰	پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)، پتانسیل اسیدی‌سازی (AP)، پتانسیل اوتروفیکاسیون (EP)، پتانسیل تخریب لایه اوزون (ODP)

۲۷. Mineral and Metals (مواد معدنی و فلزات)
 ۲۸. Greenhouse Gas (گازهای گلخانه‌ای)
 ۲۹. Photochemical Pollution (آلودگی فتوشیمیایی)
 ۳۰. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

فهرست منابع

- Abdalla, H., Fattah, K.P., Abdallah, M., & Tamimi, A.K. (2021). Environmental Footprint and Economics of a Full-Scale 3D-Printed House. *Sustainability*, 13, 11978. <https://doi.org/10.3390/su132111978>
- Abu-Ennab, L., Dixit, M.K., Birgisson, B., & Pradeep Kumar, P. (2022). Comparative life cycle assessment of large-scale 3D printing utilizing kaolinite-based calcium sulfoaluminate cement concrete and conventional construction. *Cleaner Environmental Systems*, 5, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2022.100078>
- Agegn, A.A., Regassa, Y., Angassa, K., & Mekonnen, K.N. (2026). Systematic review on 3D printing concrete technology: breakthroughs and challenges. *Discover Civil Engineering*, 3(9). https://doi.org/10.1007/s442902025-00399-?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- Agustí-Juan, I., & Habert, G. (2017). Environmental design guidelines for digital fabrication. *Journal Cleaner Production*, 142, 2780–2791. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.190>
- Agustí-Juan, I., Muller, F., Hack, N., Wangler, T.P., & Habert, G. (2017). Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall. *Journal of Cleaner Production*, 154, 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.002>
- Alhumayani, H., Gomaa, M., Soebarto, V., Jabi, W. (2020). Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: a comparative study between cob and concrete. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122463>
- Alim-Khan, S., Koç, M., & Al-Ghamdi, S.G. (2021). Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: A systematic review for built environmental applications. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127027>
- Asprone, D., Auricchio, F., Menna, C., & Mercuri, V. (2018). 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Construction and Building Materials*, 165, 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018>
- Banihashemi, S., Akbarnezhad, A., Sheikhhoshkar, M., Bril El Haouzi, H., & Rolfe, B. (2025). 3D printing in construction: sustainable technology for building industry. *Progress in Additive Manufacturing*, 10, 11729–11762. <https://doi.org/10.1007/s4096401314-025-y>
- De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Habert, G., & Agustí-Juan, I. (2018). Vision of 3D printing with concrete-technical, economic, and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*, 112, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>

و کیفیت داده‌های ورودی، همچنان مقایسه مستقیم و تعمیم نتایج پژوهش‌های موجود را با محدودیت مواجه ساخته است. افزون‌براین، تمرکز بخش عمده مطالعات بر مراحل اولیه چرخه حیات و کمبود داده‌های مبتنی بر پروژه‌های واقعی، از مهم‌ترین شکاف‌های دانشی این حوزه محسوب می‌شود. براین اساس، توسعه چارچوب‌های استاندارد ارزیابی مبتنی بر استانداردهای ISO، ایجاد پایگاه‌های داده تخصصی برای مصالح و فرایندهای ساخت دیجیتال، و گسترش مطالعات در مقیاس صنعتی و در شرایط اقلیمی و جغرافیایی متنوع، می‌تواند مسیر توسعه دقیق‌تر و قابل‌تکاتر این فناوری را در راستای ساختمان‌سازی پایدار فراهم سازد.

اعلام عدم تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی برای ایشان وجود نداشته است.

پی‌نوشت‌ها

- International Energy Agency .1
- Life Cycle Assessment .2
- یک واحد عملکردی در استاندارد بین‌المللی ارزیابی چرخه حیات ایزو ۴۴/۱۴۰۴۰ به‌عنوان «عملکرد کمی یک سیستم محصول برای استفاده به‌عنوان یک واحد مرجع» تعریف شده است.
- Global Warming Potential (پتانسیل گرمایش جهانی) .4
- Ozone Depletion Potential (پتانسیل تخریب لایه اوزون) .5
- Acidification Potential (پتانسیل اسیدی‌سازی) .6
- Eutrophication Potential (پتانسیل اوتروفیکاسیون) .7
- Human Toxicity Potential (پتانسیل سمیت‌زدایی انسانی) .8
- Freshwater Aquatic Eco Toxicity Potential (پتانسیل سمیت زیست‌محیطی آب شیرین) .9
- Terrestrial Ecotoxicity Potential (پتانسیل سمیت زیست‌محیطی زمین) .10
- Photochemical Oxidant Creation Potential (پتانسیل ایجاد اکسیدان‌های فتوشیمیایی) .11
- Abiotic Depletion Resources (استفاده از منابع غیرزیستی) .12
- Water Depletion (کاهش منابع آبی) .13
- Land Use (استفاده از زمین) .14
- Marine Aquatic Ecotoxicity Potential (پتانسیل سمیت زیست‌محیطی دریایی) .15
- Freshwater and Terrestrial Acidification (اسیدی‌شدن آب شیرین و خاک) .16
- Freshwater Ecotoxicity (سمیت زیست‌محیطی آب شیرین) .17
- Freshwater Eutrophication (اوتروفیکاسیون آب شیرین) .18
- Marine Eutrophication (اوتروفیکاسیون دریایی) .19
- Terrestrial Eutrophication (اوتروفیکاسیون خاک) .20
- Carcinogenic Effects (اثرات سرطان‌زایی) .21
- Ionizing Radiation (تابش یون‌ساز) .22
- Non-Carcinogenic Effects (اثرات غیرسرطان‌زایی) .23
- Respiratory Effects, Inorganics (اثرات تنفسی ناشی از مواد معدنی) .24
- Dissipated Water (آب هدررفته) .25
- Fossil Fuels (سوخت‌های فسیلی) .26

- El-Alfi, E.A., & Gado, R.A. (2016). Preparation of calcium sulfoaluminate-belite cement from marble sludge waste. *Construction & Building Materials*, 113, 764–772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.103>
- Elias, A. (2021). Cradle to gate life cycle assessment (LCA) of 3D printing houses. *Journal of Earth Science and Engineering*, 9, 13–19. <https://doi.org/10.172655812159-X/2021.01.003>
- Han, Y., Yang, Z., Ding, T., & Xiao, J. (2021). Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123884. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123884>
- Hasani, A., & Dorafshan, S. (2024). Transforming construction? Evaluation of the state of structural 3D printing concrete in research and practice. *Construction and Building Materials*, 438, 137027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137027>
- Hassan, H., Rodriguez-Ubinas, E., Al Tamimi, A., Trepce, E., Mansouri, A., & Almehairbi, K. (2024). Towards innovative and sustainable buildings: A comprehensive review of 3D printing in construction. *Automation in Construction*, 163, 105417. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105417>
- Huang, W., Shuai, C., Xiang, P., Chen, X., Zhao, B., & Sun, J. (2024). Assessing the consumption-based water use of global construction sectors and its impact to the local water shortage. *Water Resources Management*, 38, 6063–6078. <https://doi.org/10.1007/s112693024-03944>
- IEA (International Energy Agency) (2025). *What are the main sources of CO2 emissions in Iran?* Iea. Retrieved from <https://www.iea.org/countries/Iran/emissions>
- International Organization for Standardization. (2006). *Environmental management -Life cycle assessment- Principles and framework* (ISO Standard No. 14040:2006). <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- Javed, M.H., Ahmad, A., Rehan, M., Farooq, M., Farhan, M., Raza, M.A., & Nizami, A.S. (2025). Advancing circular economy through optimized construction and demolition waste management under life cycle approach. *Sustainability*, 17(11), 4882. <https://doi.org/10.3390/su17114882>
- Kashani, A., & Ngo, T. (2018). Optimisation of mixture properties for 3D printing of geopolymer concrete. In *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)* (pp. 259–266). International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC). <https://doi.org/10.22260/ISARC20180037/>
- Kumar, A., Kumar, P., Gogineni, A., Ahmed, M., & Chen, W. (2025). Evolution of cementitious binders: overview of History, environmental Impacts, and emerging Low-Carbon alternatives. *Buildings*, 15(21), 3811. <https://doi.org/10.3390/buildings15213811>
- Kuzmenko, K., Gaudillière, N., Feraille, A., Dirrenberger, J., & Baverel, O. (2019). Assessing the environmental viability of 3D concrete printing technology. In *Design Modelling Symposium Berlin* (pp. 517–528). Springer International Publishing.
- Llorente-García, J. E., Caparrós-Pérez, D., & Alba-Rodríguez, M. D. (2025). Sustainable criteria within the construction industry. In P. Mercader-Moyano & P. Porras-Pereira (Eds.), *Life cycle analysis based on nanoparticles applied to the construction industry* (pp. 3–25). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007-4-79115-978-3-031/>
- Long, W.J., Lin, C., Tao, J.L., Ye, T.H., & Fang, Y. (2021). Printability and particle packing of 3D-printable limestone calcined clay cement composites. *Construction & Building Materials*, 282, 122647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122647>
- Mantha, B. R. K., Sati, A., Hosny, F., Abdallah, M., & Abu Dabous, S. (2024). A generic 3D printing life cycle assessment (LCA) framework for AEC applications. In *Proceedings of the 41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)* (pp. 1263–1271). *International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. <https://doi.org/10.22260/ISARC20240163/>
- Markin, V., Krause, M., Otto, J., Schrofl, C., & Mechtcherine, V. (2021). 3D-printing with foam concrete: from material design and testing to application and sustainability. *Journal of Building & Engineering*, 43, 102870. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102870>
- Mohammad, M., Masad, E., & Al-Ghamdi, S.G. (2020). 3D printing concrete sustainability: a comparative life cycle assessment of four construction method scenarios. *Journal of Building Engineering*, 10, 245. <https://doi.org/10.3390/buildings10120245>
- Mosly, I. (2025). Carbon footprint of global construction industries: A cross-country analysis of emissions, drivers, and the Construction Carbon Sustainability Index (1990–2023). *Sustainability*, 17(20), 9274. <https://doi.org/10.3390/su17209274>
- Muñoz, I., Alonso-Madrid, J., Menéndez-Muñiz, M., Uhart, M., Canou, J., Martin, C., Fabritius, M., Calvo, L., Poudelet, L., Cardona, R., Lombois-Burger, H., Vlasopoulos, N., Bouyssou, C., Dirrenberger, J., Papacharalampopoulos, A., & Stavropoulos, P. (2021). Life cycle assessment of integrated additive-subtractive concrete 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 2149–2159. <https://doi.org/10.1007/s001700020-06487->
- Nerella, V.N., Krause, M., Nather, M., & Mechtcherine, V. (2016). Studying printability of fresh concrete for formwork-free concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D). *25th Conference on Rheology of Building Materials, Regensburg, Germany*. https://www.researchgate.net/publication/296817129_Studying_printability_of_fresh_concrete_for_formwork_free_Concrete_on-site_3D_Printing_technology_CONPrint3D
- Passuello, A., Rodríguez, E. D., Hirt, E., Longhi, M., Bernal, S. A., Provis, J. L., & Kirchheim, A. P. (2017). Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. *Journal of Cleaner Production*, 166, 680–689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.007>
- Ritchie, H., & Rosado, P. (2025). *CO2 and Greenhouse Gas Emissions*. Our Worldin Data. Retrieved from <https://ourworldindata.org/profile/co2/iran>

- Rossi, C., Reitemeyer, F., Heidrich, O., Rybski, D. (2024). Comparison of embodied carbon of 3D-printed vs. conventionally built houses. *Urban Findings*, 1–6, <https://doi.org/10.32866001/c.89707>
- Roux, C., Kuzmenko, K., Roussel, N., Mesnil, R., & Feraille, A. (2023). Life cycle assessment of a concrete 3D printing process. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28, 1–15, <https://doi.org/10.1007/s113673022--02111->
- Sakthibala, R. K., Vasanthi, P., Hariharasudhan, C., & Partheeban, P. (2025). A critical review on recycling and reuse of construction and demolition waste materials. *Cleaner Waste Systems*, 12, 100375. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100375>–
- Sambucci, M., Biblioteca, I., & Valente, M. (2023). Life cycle assessment (LCA) of 3D concrete printing and casting processes for cementitious materials incorporating ground waste tire rubber. *Recycling*, 8(1), 15. <https://doi.org/10.3390/recycling8010015>
- Valencia-Barba, Y. E., Gómez-Soberón, J. M., Gómez-Soberón, M. C., & Rojas-Valencia, M. N. (2021). Life cycle assessment of interior partition walls: Comparison between functionality requirements and best environmental performance. *Journal of Building Engineering*, 44, 102978. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102978>
- Wang, Q., Mitsumura, N., Chen, Q., Sarkar, A., Kurokawa, H., Sekiguchi, K., & Sugiyama, K. (2014). Investigation of condensation reaction during phenol liquefaction of waste woody materials. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 9(5), 658–668. <https://doi.org/10.2495/SDP-V9-N5668-658->
- Yao, Y., Hu, M., Di Maio, F., & Cucurachi, S. (2020). Life cycle assessment of 3D printing geo-polymer concrete: an ex-ante study. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 116–127. <https://doi.org/10.1111/jiec.12930>
- Ye, J., Zhuang, Z., Teng, F., Yu, J., Zhang, D., & Weng, Y. (2024). Comparative environmental assessment of 3D concrete printing with engineered cementitious composites. *Virtual and Physical Prototyping*, 19(1), e2369249. <https://doi.org/10.108017452759.20/24.2369249>
- Yu, Z., Nurdiawati, A., Kanwal, Q., Al-Humaiqani, M.M., & Al-Ghamdi, S.G. (2024). Assessing and mitigating environmental impacts of construction materials: Insights from environmental product declarations. *Journal of Building Engineering*, 98, 110929. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110929>
- Zhuang, S., Liu, Q., Sun, K., Lutter, S., Chen, R., & Liu, G. (2025). Tracking five decades of global sand and gravel stocks and flows in 184 countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 222, 108460. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108460>

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Bagh-e Nazar Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



نحوه ارجاع به این مقاله:

برادران، امیربهادر و تقی‌زاده، کتابون. (۱۴۰۵). مروری جامع بر چارچوب ارزیابی چرخه حیات چاپ سه‌بعدی بتن: روش‌ها، فرایندها و ابزار. *باغ نظر*, ۲۳ (۱۵۸), ۴۱–۵۰.

DOI: [10.22034/bagh.2026.577258.5998](https://doi.org/10.22034/bagh.2026.577258.5998)

URL: https://bagh-sj.com/article_244772.html

