تکنولوژی چاپ سه بعدی؛

آینده ساخت و ساز پایدار

معاونت بررسی‌های اقتصادی
اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی تهران

تهیه و تنظیم: **فاطمه علیزاده آغ‌اسمعیلی**

معاونت بررسی‌های اقتصادی

اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی تهران

مرداد ۱۴۰۳

از طریق پست الکترونیکی زیر می‌توانید پیشنهادها و نظرات اصلاحی خود را به واحد مربوطه منعکس نمایید:

economic_research@tccim.ir

استفاده از مطالب این گزارش با ذکر منبع بلامانع است.

فهرست مطالب

خلاصه مدیریتی..... ۴

مقدمه..... ۵

۱. نقش چاپ سه بعدی در انقلاب صنعتی چهارم..... ۶

۲. ساخت افزایشی یا چاپ سه بعدی..... ۶

۲-۱. نگاهی بر تاریخچه چاپ سه بعدی..... ۸

۳.چاپ سه بعدی در ساخت‌وساز..... ۹

۳-۱. ساختمان‌های پایدار..... ۱۰

۳-۲. چاپ سه بعدی برای ساخت‌وساز پایدار..... ۱۱

۳-۲-۱. کاهش ضایعات و اثرات زیست‌محیطی..... ۱۲

۳-۲-۲. افزایش سرعت و کارایی ساخت..... ۱۲

۳-۲-۳. بهبود ایمنی..... ۱۳

۳-۲-۴. کاهش هزینه..... ۱۳

۳-۲-۵. رفع کمبود مسکن..... ۱۳

۳-۲-۶. کنترل آلودگی..... ۱۴

۳-۲-۷. ساخت قطعات پیچیده و کارآمد از نظر زیست‌محیطی..... ۱۴

۳-۲-۸. بهینه‌سازی انرژی (کاهش مصرف انرژی)..... ۱۴

۳-۳. چالش‌های چاپ سه بعدی برای ساخت و ساز..... ۱۵

۳-۴. توسعه فناوری چاپ سه بعدی و چشم انداز آینده..... ۱۵

۴. جمع‌بندی و ارائه پیشنهاد..... ۱۶

۵. منابع..... ۱۹

خلاصه مدیریتی

بهره‌مندی از فناوری‌های نوین را می‌توان یکی از مهم‌ترین عوامل تسریع حرکت کشورها به سوی رشد و توسعه در حوزه اقتصاد به‌ویژه بخش صنعت برشمرد. توسعه پایدار به‌عنوان رویکردی همه جانبه صنعت را مانند دیگر صنایع تحت تاثیر قرار داده است. این تاثیر در صنعت ساخت به‌عنوان یک صنعت با میزان فعالیت بسیار بالا بیش از پیش مشهود است. بدین منظور صنعت ساخت برای دستیابی به توسعه پایدار از فناوری‌های نوین به‌عنوان ابزاری برای تحقق ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی پایدار بهره می‌برد. نمونه‌سازی سریع[1] و تولید سریع جزو فناوری‌های جدید در این زمینه است. فناوری مزبور تلفیقی از دانش نمونه‌سازی و رایانه است، که ضمن سرعت بخشیدن به فرآیند طراحی و افزایش دقت، موجب کاهش زمان، هزینه، انرژی و ضایعات در ساخت نمونه‌ها خواهد شد. این فناوری در حال حاضر به یکی از سریع‌ترین فناوری‌های در حال رشد تبدیل شده و در بسیاری از زمینه‌های صنعتی در زندگی روزمره بشر از جمله عرصه ساخت‌وساز و ساختمان نفوذ کرده است. بشر همواره سعی می‌کند در جستجوی راه‌های ساده‌تری برای ادامه زندگی و ارتقای کیفیت زندگی باشد و در این راستا فناوری‌هایی خلق می‌شود که مسیر پیشرفت را هموارتر و سریع‌تر می‌سازد. این امر در صنعت ساخت‌وساز نیز وجود دارد و جهان طی سال‌های اخیر تحولات جدیدی را در این عرصه تجربه کرده است. یکی از مهم‌ترین تحولات در عصر کنونی به‌کارگیری پرینترهای سه بعدی در فرآیند ساخت‌وساز است که می‌تواند بهره‌وری این بخش را بهبود بخشد. تکنیک‌های چاپ سه بعدی، نسبت به تکنیک‌های سنتی ساخت ساختمان‌ها، می‌تواند به‌عنوان فرآیند سازگار با محیط‌زیست و ساخت‌وساز پایدار مورد توجه قرار گیرد و امکانات تقریبا نامحدودی برای تحقق پیچیدگی هندسی فراهم آورد. مهم‌ترین بحث در ساخت‌وساز میزان بهینه‌سازی انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی است. دستاوردهای فعلی در زمینه چاپ سه بعدی، پتانسیل کاهش هزینه‌ها، نیاز به نیروی انسانی کمتر، حفظ محیط‌زیست، کاهش ضایعات مواد، کاهش انتشار CO_2 و صرفه‌جویی در مصرف انرژی را داراست. در حال حاضر به‌کارگیری تکنولوژی مزبور در ساخت‌وساز نوپا بوده و محدودیت‌های زیادی دارد. اما از زمان ظهور این تکنولوژی صنعت ساخت با سرعت زیادی روند رشد و توسعه را طی نموده است. همچنین در جامعه جهانی انتظار و امید زیادی درخصوص آینده ساختمان‌های چاپ شده سه بعدی وجود دارد. به گزارش مجمع جهانی اقتصاد ۲۰۲۳، پایبندی به پایداری و استفاده از فناوری‌های مدرن مانند چاپ سه بعدی می‌تواند شرایط محیطی و اقتصادی صنعت ساخت و ساز را بهبود بخشیده و دردستیابی به اهداف توسعه پایدار کمک نماید. لذا بسیاری از کشورها برای همگام بودن با علم روز دنیا و تحقق توسعه پایدار، به‌کارگیری این فناوری را در دستور کار خود قرار داده‌اند. هدف این گزارش ارائه یک تحلیل جامع از نقش مهم چاپ سه بعدی در دستیابی به این اهداف است.

[1] Rapid Prototyping

مقدمه

باتوجه به پیشرفت فناوری و مطرح شدن چاپگرهای سه بعدی این سوال پیش می‌آید که استفاده از این فناوری‌ها تا چه اندازه برای پیشرفت در ساخت‌وساز لازم است؟ در این مقاله به معرفی ویژگی‌های چاپگرهای سه بعدی که می‌تواند آینده صنعت ساخت‌وساز در آینده نزدیک را متحول کنند، توضیح داده شده و برخی از مزایای این تکنولوژی از جمله کاهش هزینه و زمان، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، کاهش مصرف انرژی و ... مطرح شده است. اهمیت بررسی این موضوع باتوجه روند شتابان تکنولوژی در عصر انقلاب صنعتی چهارم و به‌کارگیری این فناوری در جایی مثل ایران که منطقه زلزله‌خیز است، دوچندان می‌شود. می‌توان گفت ساخت خانه با چاپگرهای سه بعدی که سرعت ساخت را بالا می‌برد برای ما حیاتی است؛ چراکه به کمک آن می‌توان به سرعت برای مردم زلزله‌زده و مناطق محروم با هزینه کم، مصرف انرژی پایین و با حداقل میزان گازهای گلخانه‌ای تولید شده، محل اسکان تهیه کرد.

۱. نقش چاپ سه بعدی در انقلاب صنعتی چهارم

چاپ سه بعدی یکی از پیشرفت‌های فناوری در حال ظهور در انقلاب صنعتی چهارم است که در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. قبل از پرداختن به تعریف آن، مروری کوتاه بر نقش این فناوری در انقلاب صنعتی چهارم ارائه شده است.

جهان وارد یک انقلاب جدید شده است، کلاوس شواب[۲] و مجمع جهانی اقتصاد[۳] در داووس[۴] سوئیس، فرا رسیدن انقلاب صنعتی چهارم را در ژانویه ۲۰۱۶ اعلام کردند. شرکت کنندگان داووس این انقلاب را به‌عنوان یک پیشرفت تکنولوژیکی با روند سریع توصیف کردند. (فهمی‌هانا[۵]، ۲۰۱۹). انقلاب صنعتی چهارم بر اساس انقلاب دیجیتال ساخته شده است، اما مسیر آن با ترکیبی از فناوری‌ها مشخص می‌شود به‌طوریکه مرز بین حوزه‌های فیزیکی، دیجیتال و بیولوژیکی را کم‌رنگ می‌کند. یکی از نوآوری‌های مهمی که در این تغییر مسیر نقش اساسی دارد، تحولات در هوش مصنوعی، رباتیک، بیوتکنولوژی، اینترنت اشیا، چاپ سه بعدی و فناوری‌های دیگر است. علیرغم تعدد فناوری‌های نوظهور، به گفته دیون ویسلر[۶]، مدیر عامل سابق شرکت HP، چهارمین انقلاب صنعتی، به‌واسطه چاپ سه بعدی و دیجیتالی شدن هدایت می‌شود. ایشان تأیید می‌کنند که پیوند جهان فیزیکی با دنیای دیجیتال و ترکیب آن‌ها به روشی منحصربه‌فرد از طریق چاپ سه بعدی، تنها با لمس یک دکمه رقم می‌خورد. چاپ سه بعدی یکی از مهم‌ترین فناوری‌هایی است که مسیر این انقلاب را کنترل می‌کند. به‌عبارتی چاپ سه بعدی یکی از فناوری‌هایی است که انقلاب صنعتی چهارم را همراه با بازنویسی قوانین بخش صنعتی و اتوماسیون صنعت به پیش می‌برد که با پیوند و ادغام دنیای فیزیکی و دیجیتالی مشخص می‌شود.

۲. ساخت افزایشی یا چاپ سه بعدی

فناوری ساخت افزایشی[۷] که به‌طور معمول با نام تجاری چاپ سه‌بعدی شناخته می‌شود، در عصر حاضر یک تکنولوژی نوظهور در زمینه ساخت و تولید قطعات و اجسام به‌حساب می‌آید. اولین چاپگر سه بعدی کاربردی توسط چارلز هال[۸] در سال ۱۹۸۴ توسعه داده شد. در آغاز، این فناوری بسیار گران و برای اکثر مصرف کنندگان دور از دسترس بود. اما با شروع قرن بیست‌ویکم، قیمت‌ها به شدت کاهش یافت و این امکان را فراهم آورد تا

[2] Klaus Schwab
[3] World Economic Forum
[4] Davos
[5] Fahmy Hanna
[6] Dion Weisler
[7] Additive Manufacturing
[8] Charles W. Hull

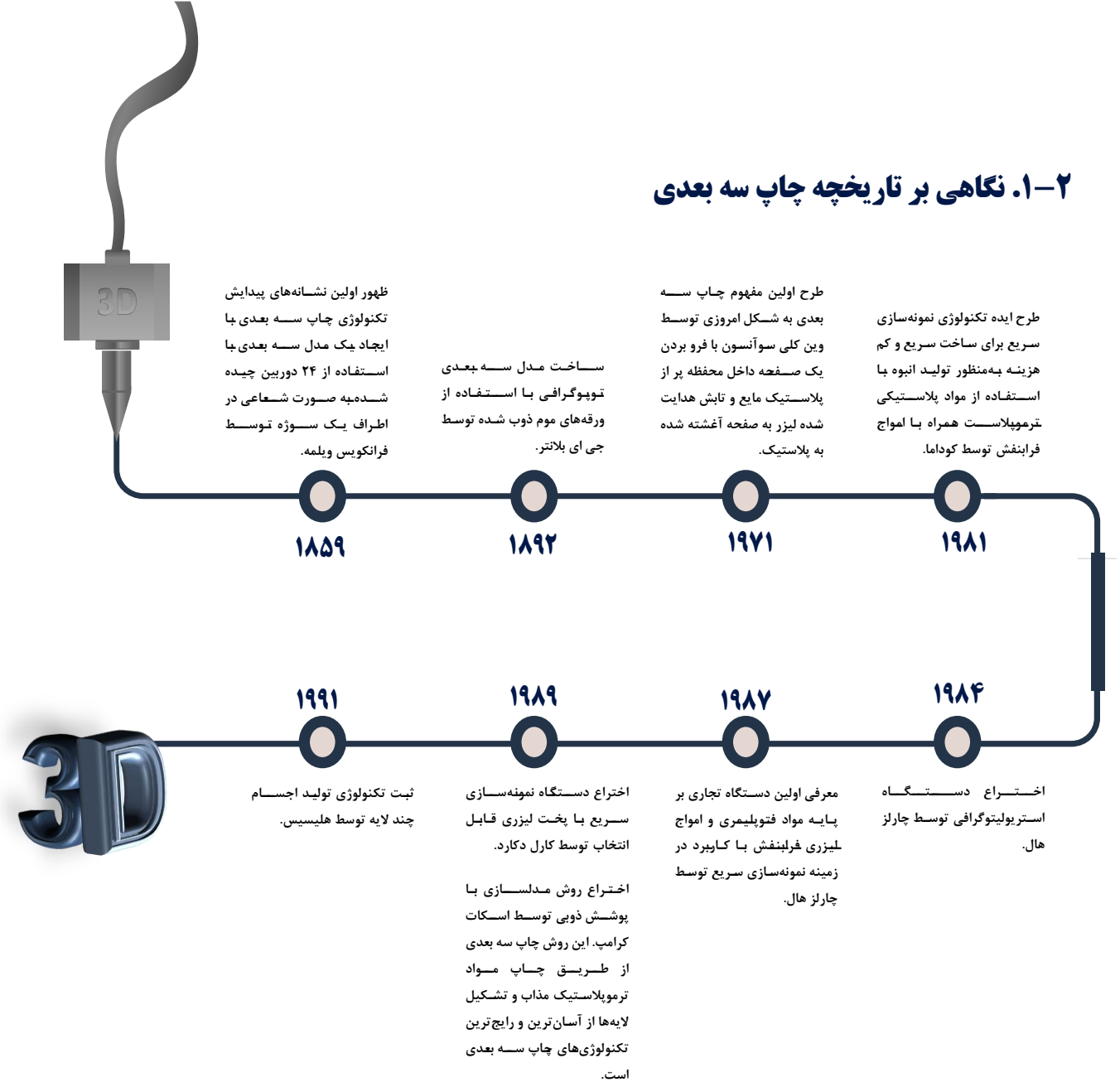
چاپگرهای سه بعدی در صنایع متعدد نفوذ کنند (بازلی و همکاران[9]، ۲۰۲۳). فرآیند چاپ سه بعدی شامل استفاده از مدل‌های دیجیتالی برای ایجاد اشیاء فیزیکی سه بعدی با قرار دادن مواد در لایه‌های نازک بر روی یکدیگر است تا زمانی که کل شیء ایجاد شود (تبسم و میر[10]، ۲۰۲۳) در تعریفی دیگر چاپ سه بعدی، فرآیندی است که بر اساس روش افزودنی، با قرارگیری پی‌درپی لایه‌ها روی یکدیگر در یک سطح مقطع دو بعدی، اشیایی سه بعدی ساخته می‌شوند. این فناوری، تولید دیجیتالی است که قابلیت انتقال قطعات طراحی شده رایانه‌ای از دنیای مجازی به دنیای فیزیکی را به‌وسیله پرینترهای سه بعدی دارد. چاپ سه بعدی اغلب به‌عنوان یک افزونه تولید، شناخته شده و از موادی مانند پلاستیک، کامپوزیت، یا مواد زیست‌محیطی برای ایجاد اشیایی که به لحاظ شکل، اندازه، استحکام و رنگ متفاوت هستند، استفاده می‌نماید. فناوری چاپ سه بعدی بدین صورت است که مواد مصرفی به‌عنوان ورودی به دستگاه داده می‌شود تا حاصل کار که محصول مورد نظر است، ساخته شود. این پرینترها در زمان کار کردن نیازی به اتصال به رایانه ندارند و فایل‌ها را از طریق حافظه دستگاه می‌سازند.

شیوه ساخت قطعات در این نوع فناوری با سایر روش‌های ساخت قطعه‌سازی فرق اساسی دارد. در این روش همانطور که پیش‌تر بیان شد، قطعات با روی هم گذاشته شدن مواد ساخته می‌شوند. اما اساس کار روش‌های قطعه‌سازی، تغییر شکل و بریدن قطعات است. از چاپ سه بعدی برای مدل‌سازی‌های اولیه و همچنین ساخت کالای نهایی استفاده می‌شود، نمونه‌سازی اولیه برای اطمینان از تولید صحیح قطعات و کاربرد درست به عنوان مهم‌ترین کاربرد این فناوری مطرح است.

در حال حاضر، در فرآیند طراحی و ساخت، چاپ سه بعدی به تدریج تبدیل به یک فناوری ضروری شده است. ساخت ساختمان ها با روش چاپ سه بعدی تأثیر قابل توجهی بر زمان، هزینه، ایمنی شغلی و بازارهای اقتصادی خواهد داشت که در این گزارش به آن اشاره شده است.

[9] Bazli et al
[10] Tabassum and Mir

۲–۱. نگاهی بر تاریخچه چاپ سه بعدی



پس از سال ۱۹۹۱، دانشمندان بسیاری برای توسعه این فناوری تلاش نمودند، به‌طوریکه در سال ۱۹۹۹ موسسه ویک فارست[11]، توانست به اولین چاپ سه بعدی عضو بدن انسان دست یابد. از آن سال به بعد این تکنولوژی در صنایع بسیاری مانند اتومبیل‌سازی، هواپیما، پزشکی، صنایع غذایی، دندان‌پزشکی و ساختمان پیشرفت چشمگیری داشته است. نکته قابل توجه این است که ایده استفاده از پرینترهای سه بعدی در ساخت خانه، در سال ۲۰۰۶ توسط دکتر بهرخ خوشنویس استاد ایرانی دانشگاه کالیفرنیای جنوبی در آمریکا مطرح شد. همچنین در سال

[11] Wake Forrest Institute

۲۰۱۲ ایشان طرح استفاده از تکنولوژی کانتور کرفتینگ[۱۲] را که اساس آن بر پایه ساخت ساختمان به‌صورت خودکار می‌باشد، ارائه نمود.

۳.چاپ سه بعدی در ساخت‌وساز

امروزه صنعت ساختمان یکی از عوامل توسعه اقتصادی کشورهاست. بخش ساخت‌وساز سهم قابل توجهی از تولید ناخالص داخلی دارد. در اکثر کشورها، ۵ تا ۷ درصد از کل تولید ناخالص داخلی را تشکیل می‌دهد (تاری و همکاران[۱۳]، ۲۰۲۳). به دلیل فقدان نوآوری در فرآیندهای ساخت‌وساز، صنعت ساختمان برای چندین دهه به نیروی کار وابسته بوده است. ساخت‌و ساز ساختمان، یک صنعت با فناوری پایین محسوب می‌شود و در مقایسه با سایر بخش‌هایی که کارایی را افزایش می‌دهند تقریباً راکد مانده است. این صنعت از چالش‌هایی مانند مصرف انرژی بالا، سرعت کم ساخت‌وساز و فناوری‌های قدیمی رنج می‌برد (پسوا و همکاران[۱۴]، ۲۰۲۱). به طور سنتی، ساخت یک ساختمان یا زیرساخت شامل مراحل متعددی از جمله طراحی، تهیه مواد و مونتاژ است که این فرآیند زمان‌بر بوده و صنعت ساخت‌وساز با تأخیر، هزینه‌های بیش از حد و ریسک های مرتبط با ایمنی مواجه نموده است (سینگ و همکاران[۱۵]، ۲۰۱۹). بر اساس آمار منتشر شده توسط موسسه دیده بان جهانی[۱۶]، مشخص شده است که بخش ساختمان مسئول ۴۰ درصد آلودگی آب آشامیدنی و ۲۳ درصد آلودگی هوا است که ارقام نگران کننده‌ای هستند. تخمین زده می‌شود که جمعیت شهری ۶۸ درصد از جمعیت جهان را تا سال ۲۰۵۰ تشکیل می‌دهد، بنابراین با ادامه این روند، تأثیر زیست محیطی این صنعت بسیار نگران‌کننده خواهد بود (خان و همکاران[۱۷]، ۲۰۲۱). صنعت ساختمان مدت‌هاست که به‌عنوان یک بخش پرمصرف منابع شناخته شده است و همانطور که بیان شد، اثرات منفی قابل توجهی بر محیط‌زیست دارد. به عنوان مثال، ساختمان‌ها ۴۰ درصد از کل انرژی، ۵۰ درصد از مواد خام و ۱۲ درصد از آب آشامیدنی را مصرف می‌کنند و ۳۰ درصد CO_2 و ۳۰ درصد زباله را تولید می‌کنند. این موضوع در شکل ۱ نشان داده شده است. این آمار نگران کننده از بخش ساختمان، نیازمند بررسی یک رویکرد ساخت‌وساز جایگزین است که اثرات زیست محیطی فرآیند ساخت‌وساز و هزینه‌های انرژی جاری را کاهش دهد.

---

[۱۲] در این روش، از روبات و پرینتر استفاده می‌شود. با استفاده از این شیوه می‌توان با یک چهارم هزینه ساخت به روش سنتی در یک روز یک واحد مسکونی ساخت. این شیوه ساخت در تحقیقات فضایی، دریایی و سامانه‌های نظامی کاربرد دارد. هدف کانتور کرافتینگ ساخت خانه‌های سفارشی در یک زمان کوتاه مدت یک روزه است. تفاوت کانتور کرافتینگ با روش‌های دیگر در ابعاد است. پروژه‌هایی که با کانتور کرفتینگ ساخته می‌شوند دارای ابعاد بزرگتری هستند.

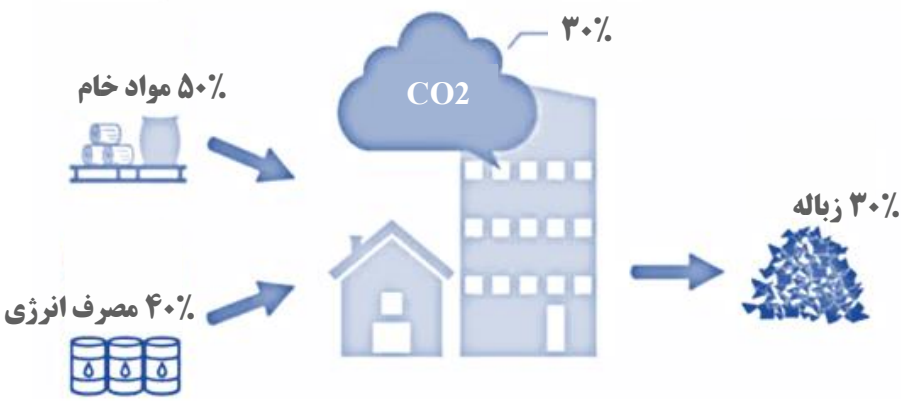
[13] Tari et al

[14] Pessoa et al

[15] Singh et al

[16] World Watch Institute

[17] Khan et al



شکل ۱. مصرف ساختمان‌ها و انتشار کربن

به گزارش مجمع جهانی اقتصاد در سال ۲۰۲۳، فناوری‌های مدرن می‌توانند به بهبود کارایی و کاهش اثرات منفی زیست محیطی در پروژه‌های ساختمانی کمک کنند. پیشرفت‌های اخیر در چاپ سه بعدی فرصت‌های جدیدی را برای ساخت‌وساز سریع تر، دقیق‌تر و پایدارتر فراهم کرده است. اگرچه چاپ سه بعدی هنوز در زمینه ساخت‌وساز نسبتاً جدید است، اما نویدبخش توسعه پایدار است. در حال حاضر، چاپ سه بعدی به آرامی اما به تدریج به عنوان یک ابزار ضروری برای تمام جنبه‌های فرآیندهای طراحی و ساخت ظاهر شده است. قبل از پرداختن به نقش چاپ سه بعدی در توسعه فرآیند ساخت‌وساز و پایدارتر کردن آن در دستیابی به اهداف جهانی برای صرفه جویی در مصرف انرژی و کاهش انتشار کربن، تعریف مفهوم ساختمان پایدار و معیارهای دستیابی به آن ضروری است. این امر به ویژه در کشورهای در حال توسعه جایی که فرآیند ساخت‌وساز منجر به اتلاف انرژی، آب و مواد زائد ناشی از ساخت و ساز می شود، اهمیت دارد.

۳-۱. ساختمان‌های پایدار

هدف از ساخت‌وساز پایدار برآوردن نیاز فوری به زیرساخت، مسکن و فضاهای کاری ضمن حفظ توانایی نسل‌های آینده برای برآوردن نیازهای خود است. این هدف شامل استفاده کارآمد از منابع به نفع جامعه جهانی و محیط‌زیست و تضمین تعادل بین نیازهای فعلی و رفاه نسل‌های آینده است. پایداری یک اصل اساسی در ساختمان است که به دنبال دستیابی به تعادل بین ملاحظات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی است. در ادامه سه رکن اصلی پایداری بررسی شده است:

۱. پایداری محیطی؛ ساختمان‌های پایدار برای به حداقل رساندن ضایعات، صرفه‌جویی در انرژی، آب و کاهش انتشار کربن طی ساخت‌وساز و در طول عمر آن در نظر گرفته شده است.

۲. پایداری اقتصادی؛ هدف ساختمان‌های پایدار، دستیابی به صرفه‌جویی در هزینه‌ی هر مرحله ساخت‌وساز اولیه و هم در دراز مدت است. برنامه‌ریزی دقیق در این زمینه نیاز به تغییرات عمده در آینده را از بین برده و هزینه‌های انرژی، آب و نگهداری را کاهش می‌دهد.

۳. پایداری اجتماعی؛ در ساختمان‌های پایدار از اقدامات ایمنی برای اطمینان از رفاه ساکنان استفاده می‌شود. که شامل ویژگی‌های امنیتی مانند فرصت‌های شغلی جدید، پارادایم تغییر شغل، ایمنی در محیط کار و ... است که به طور موثر احساس ایمنی کلی را برای ساکنان افزایش می‌دهد. این ساختمان‌ها با ویژگی انعطاف‌پذیری و راحتی، نیازهای افراد مختلف مانند کودکان و افراد با تحرک محدود را در نظر می‌گیرد.

۳-۲. چاپ سه بعدی برای ساخت و ساز پایدار

چاپ سه بعدی که به آن تولید افزودنی نیز گفته می‌شود، به‌عنوان یک فناوری تولید پایدار و سازگار با محیط‌زیست، پیشرفت‌های چشمگیری را پشت سر گذاشته و مزایای بسیاری از جمله صرفه‌جویی در انرژی و مواد، توانایی طراحی و ساخت آزادانه اشیاء، قابلیت ایجاد ساختارهای چند ماده‌ای در یک قطعه و پتانسیل تولید غیرمتمرکز را ارائه می‌دهد (ماتوس ناسیمنتو[18]، ۲۰۲۲). پذیرش فناوری چاپ سه بعدی در ساخت‌وساز نمایانگر افزایش پایداری است. یکی از مزیت‌های کلیدی به‌کارگیری این فناوری، توانایی ساخت ساختمان‌هایی با اشکال پیچیده و گسترده است که به معماران آزاد خلاقیت بیشتری می‌دهد و بر محدودیت‌های تحمیل شده در روش‌های ساخت‌وساز سنتی غلبه می‌کند. با این حال، برای اینکه چاپ سه بعدی واقعاً معماری را متحول کند، اولویت دادن به پایداری در انتخاب مصالح و رویکرد کلی ساختمان و حصول اطمینان از ملاحظات زیست محیطی در توسعه این فناوری بسیار مهم است (کیم و همکاران[19]،۲۰۲۰). مزایای قابل توجه زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی، چاپ سه بعدی را به یک راه حل قانع‌کننده تبدیل کرده است. در ادامه به مزایای استفاده از این فناوری در ساخت وساز پایدار اشاره شده است:

[18] Mattos Nascimento
[19] Kim et al

۳-۲-۱. کاهش ضایعات و اثرات زیست محیطی

تحقیقات نشان داده است که استفاده از فناوری چاپ سه بعدی می‌تواند به کاهش اثرات زیست محیطی صنعت ساخت‌وساز کمک کند. از نظر پایداری محیطی، این فناوری با کاهش مصرف مواد و انرژی و امکان استفاده از مواد تجدیدپذیر و بازیافتی، می‌تواند پایداری زیست محیطی پروژه‌های ساختمانی را افزایش دهد. به عنوان مثال، برخی از مواد مورد استفاده در چاپ سه بعدی شامل پلیمرهای زیستی و مواد بازیافتی است که اثرات زیست محیطی را به حداقل می‌رساند (مجمع جهانی اقتصاد، ۲۰۲۳). یکی از مهمترین مزایای چاپ سه بعدی در صنعت ساختمان کاهش ضایعات مواد است. در ساخت و ساز سنتی، زباله‌های قابل توجهی به دلیل بریدگی‌ها و تغییرات غیرمنتظره تولید می‌شود، اما در چاپ سه بعدی، به عنوان یک فرآیند افزودنی، مقدار دقیق مواد مورد نیاز برای ساخت یک سازه مشخص بوده و از تولید زباله اضافی جلوگیری می‌شود. این ویژگی می تواند به کاهش مصرف منابع طبیعی و به حداقل رساندن آلودگی محیط زیست کمک کند. این امر به ویژه در پروژه‌های بزرگ که میزان ضایعات قابل توجهی دارد و با توجه به دو برابر شدن پیش بینی زباله‌های ساختمانی تا سال ۲۰۲۵ اهمیت دارد.

۳-۲-۲. افزایش سرعت و کارایی ساخت

از منظر اجتماعی، چاپ سه بعدی می‌تواند نیاز به نیروی کار ماهر را کاهش دهد و فرصت‌های شغلی جدیدی در زمینه‌های مرتبط با فناوری چاپ سه بعدی ایجاد کند. این ویژگی می‌تواند هزینه‌های نیروی کار را کاهش داده و کارایی را در پروژه‌های ساختمانی افزایش دهد. این افزایش کارایی به دلیل توانایی چاپ سه بعدی برای ایجاد قطعات پیچیده و یکپارچه در کمترین زمان ممکن است. به عنوان مثال، ساخت یک ساختمان با استفاده از چاپ سه بعدی می‌تواند در چند روز تکمیل شود، در حالی که ساخت و ساز سنتی ممکن است ماه ها طول بکشد. علاوه بر این، امکان تغییرات سریع در طراحی و تولید را فراهم کرده و اطمینان حاصل می‌کند که پروژه‌ها با دقت بیشتری اجرا می‌شوند. این ویژگی به ویژه در پروژه‌هایی که نیاز به تغییرات سریع و انعطاف پذیری بالا دارند مفید است. تحقیقات نشان داده است که چاپ سه بعدی می‌تواند زمان ساخت و ساز را تا ۶۰ درصد کاهش دهد (حنیفی[۲۰]، ۲۰۲۴).

[20] Hanifi

۳-۲-۳. بهبود ایمنی

همراه با پایداری اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی، جنبه ایمنی نیز اکوسیستم کلی پایدار را توسعه می دهد. فناوری چاپ سه بعدی می تواند بسیاری از وظایف خطرناک و پرخطر را از نیروی انسانی به روبات ها و ماشین‌ها منتقل کند. این تغییر می تواند میزان خطرات را کاهش و ایمنی محل کار را افزایش دهد. به عنوان مثال، در پروژه های ساختمانی بزرگ که نیاز به کار در ارتفاع یا مواد خطرناک دارند، استفاده از روبات های چاپ سه بعدی می تواند خطرات تهدید کننده زندگی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. بر اساس گزارش‌های اداره ایمنی و بهداشت حرفه‌ای[۲۱]، کاهش مشارکت انسان در فرآیندهای پرخطر می تواند به طور چشمگیری حوادث محل کار را کاهش دهد. علاوه بر این، مشارکت کمتر انسان به معنای مشکلات بهداشتی کمتر و بهبود شرایط کاری است. از طرفی این فناوری، با ایجاد فرصت‌های شغلی و کاهش خطر تصادفات و تلفات در سایت‌های ساختمانی به پایداری اجتماعی کمک می‌کند.

۳-۲-۴. کاهش هزینه

چاپ سه بعدی می‌تواند هزینه‌های کلی پروژه را کاهش دهد. این کاهش هزینه ناشی از کاهش ضایعات، نیاز کمتر به نیروی کار و ساخت‌وساز سریع‌تر است. علاوه بر این، استفاده از مواد ارزان‌تر و بازیافتی نیز می‌تواند به کاهش هزینه‌های مواد کمک کند. در نهایت این کاهش هزینه‌ها می‌تواند رقابت‌پذیری شرکت‌ها را افزایش داده و مشتریان بیشتری را جذب کند. به‌عنوان مثال، کاهش هزینه نیروی کار در پروژه‌های چاپ سه بعدی می‌تواند به ویژه در مناطقی با دستمزد بالا قابل توجه باشد. علاوه بر این، استفاده از مواد محلی و قابل بازیافت نیز می‌تواند به کاهش هزینه‌ها کمک کند. با کاهش هزینه‌های نیروی کار و مواد و به حداقل رساندن هزینه‌های حمل‌ونقل، فناوری چاپ سه بعدی پروژه‌های ساختمانی را از نظر اقتصادی، پایدار می‌کند که برای افراد کم درآمد مقرون به صرفه است. این فناوری با کاهش هزینه ها، سرعت بخشیدن به روند ساخت و ساز و بهبود کیفیت نهایی پروژه‌ها می‌تواند نقش بسزایی در آینده صنعت ساختمان داشته باشد. بر اساس تحقیقات انجام شده، چاپ سه بعدی می‌تواند هزینه‌های نیروی کار را تا ۸۰ درصد کاهش دهد (حنیفی، ۲۰۲۴). این مزیت می‌تواند بهره‌وری را افزایش داده و هزینه‌های کلی پروژه را کاهش دهد.

۳-۲-۵. رفع کمبود مسکن

از منظر پایداری اجتماعی، چاپ سه بعدی می‌تواند به ساخت مسکن ارزان‌تر و در دسترس تر برای جوامع کم درآمد، به ویژه در کشورهایی که با بحران مسکن مواجه هستند، اهمیت دارد. البته این مزیت در کشورهای توسعه‌یافته نیز کاربرد دارد به‌عنوان مثال؛ ایالات متحده آمریکا در پایان سال ۲۰۲۰ تقریباً با ۴ میلیون واحد،

[21] Occupational Safety and Health Administration

کمبود مسکن مواجه شده بود که طبق گفته وزارت مسکن و شهرسازی ایالات متحده آمریکا، چاپ سه بعدی می‌تواند به کاهش بسیاری از چالش‌های پیش‌روی صنعت ساخت‌وساز و حل بحران کمبود مسکن در کشور کمک شایان توجهی نماید (مجمع جهانی اقتصاد، ۲۰۲۳). همچنین دوبی قصد دارد تا سال ۲۰۳۰، یک چهارم ساختمان‌های خود را به به‌کارگیری این فناوری احداث کند.

۳-۲-۶. کنترل آلودگی

طی ساخت ساختمان با استفاده از چاپ سه بعدی، مواد سمی کمتری تولید می‌شود. تولید افزودنی‌های فلزی دارای مزایای اقتصادی قابل توجهی نسبت به فرآیندهای معمولی است. در تولید سنتی، جابجایی مواد خام به یک مرکز تولیدی و محصولات نهایی نیازمند انرژی و سیستم حمل‌ونقل بیشتری برای مجموعه هاست که باعث آلودگی هوا می‌شود. اما چاپ سه بعدی تعداد اتصالات در زنجیره تامین را به شدت کاهش داده و با ساده‌سازی فرآیند تولید منجر به کاهش آلودگی هوا می‌شود. طی سال‌های آینده، چاپ سه بعدی بدون شک میلیون‌ها جابجایی قطعات را حذف خواهد کرد. از طرفی در این روش زباله تولید شده بسیار کم است زیرا این یک فرآیند افزایشی است که در آن مواد با یک الگوی دقیق روی خود لایه لایه می‌شوند. به‌عبارتی چاپ سه بعدی هیچ‌گونه محصول جانبی مضری تولید نکرده و این اطمینان را می‌دهد که کیفیت هوا و آب به هیچ وجه تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد.

۳-۲-۷. ساخت قطعات پیچیده و کارآمد از نظر زیست‌محیطی

فناوری ساخت افزودنی در حال حاضر محصولات پیچیده و کارآمدی را ارائه می‌دهد که با روش‌های مرسوم سنتی یا فرآیندهای قالب‌گیری غیرممکن است. تولید افزودنی محصول را بدون هیچ گونه ابزار یا خط مونتاژ افزایش می‌دهد تا نیازهای مستقیم مصرف کننده را به‌شیوه‌ای بهتری برآورده کند. قابلیت بازیافت قطعات، استفاده موثر از انرژی و زنجیره تامین کوتاهتر ردپای محیطی کمتری ایجاد می‌کند و این یکی از مهم‌ترین مزایای به‌کارگیری این فناوری در ساخت‌وساز است.

۳-۲-۸. بهینه‌سازی انرژی (کاهش مصرف انرژی)

«کارایی انرژی ساختمان» فرآیندی است که هدف آن کاهش سطح مصرف انرژی به حداقل ممکن و در عین حال دستیابی به یک محیط راحت است. عمل بهینه‌سازی انرژی منجر به صرفه جویی در مقدار قابل توجهی از انرژی مصرف شده می‌شود. مصرف انرژی قبل، حین و بعد از هر فرآیند ساخت‌وساز یک نگرانی اولیه جهانی است (الخادی و هاتوقای[۲۲]، ۲۰۲۰). همانطور که جهان به سمت راه‌حل‌های سبز، پایدار و کارآمدتر در انرژی پیش می‌رود، چاپ سه بعدی تکنیک ساختمان سبز را در مقایسه با تکنیک های ساختمانی مرسوم ارائه داده و فرآیندهای انرژی‌بر را

[22] Alkhalidi and Hatuqay

حذف می‌کند. طراحی ساختمان و عناصر آن تاثیر عمده‌ای بر میزان مصرف انرژی محیط ساخته شده دارد. بنابراین در مرحله طراحی باید دقت ویژه‌ای به عمل آید تا ساختمان‌هایی با تقاضای انرژی کمتر و مطابق با شرایط اقلیمی ایجاد شود. اگر ساختمان‌ها به طور مناسب طراحی شوند، می‌توانند ضمن تامین راحتی و آسایش برای مردم ساکن در محیط ساخته شده منجر به مصرف بهینه انرژی شوند، که انعطاف‌پذیری چاپ سه بعدی در اجرا به طراحان این فرصت را می دهد، از طرفی این فناوری منجر به تولید ساختمان سفارشی شده برای مصرف‌کننده می‌شود. با نزدیک‌تر شدن امکانات تولیدی به مصرف‌کنندگان، فرآیندهای تولید انعطاف‌پذیرتر، پاسخگوتر و با کیفیت کنترل می‌شود و در عین حال نیاز به حمل‌ونقل بالا کاهش یافته و در نتیجه در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌شود.

۳–۳. چالش‌های چاپ سه بعدی برای ساخت و ساز

استفاده از چاپ سه بعدی در صنعت ساخت و ساز با وجود مزایای بی شماری که دارد با چالش‌هایی همراه است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، هزینه اولیه بالای دستیابی به تجهیزات چاپ سه بعدی است. این دستگاه‌ها معمولاً بسیار گران هستند و نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجهی دارند. علاوه بر هزینه‌های اولیه، محدودیت‌های مواد نیز در فرآیند چاپ سه بعدی وجود دارد. مواد مورد استفاده باید دارای ویژگی‌های خاصی باشند تا امکان چاپ و ساخت سازه‌های بادوام و پایدار را فراهم کنند. چالش عمده دیگر مسائل مربوط به استانداردها و مقررات است. بسیاری از شرکت های ساختمانی هنوز برای سرمایه گذاری بر روی این فناوری های نوظهور مردد هستند، اما به مرور زمان با کاهش هزینه تجهیزات، این مسائل به تدریج حل خواهد شد. نیاز به ایجاد و توسعه استانداردها و مقررات جدید برای استفاده از چاپ سه بعدی در ساخت‌وساز وجود دارد. علاوه بر این، خطاهای بالقوه در فرآیند چاپ می‌تواند منجر به مشکلات جدی شود و نظارت دقیق بر پروژه را ضروری نماید. اگرچه در تولید ساختمان توسط چاپ سه بعدی به نیروی انسانی کمتری نیاز است، اما نیروی کار فعال در این زمینه می‌بایست از علم، آگاهی و تجربه کافی برخوردار باشند.

۳–۴. توسعه فناوری چاپ سه بعدی و چشم انداز آینده

با وجود آنکه بسیاری از ساختمان‌های ساخته شده با فناوری چاپ سه بعدی در سراسر جهان، مورد توجه بسیاری از جوامع قرار گرفته است، اما این فناوری همچنان در مرحله توسعه می‌باشد و انتظار بر این است طی سال‌های آینده مورد استقبال گسترده‌ای قرار گیرد. تحقیقات نشان‌دهنده آن است که ترکیب فناوری چاپ سه بعدی با مواد جدید مانند ژئوپلیمرها می‌تواند پایداری را افزایش و هزینه‌های تولید را کاهش دهد. ژئوپلیمرها به دلیل

ویسکوزیته[۲۳] کمتر در مقایسه با بتن سنتی، قابلیت پمپاژ و اکستروژن بهتری را ارائه می‌دهند، اما برای جلوگیری از تغییر شکل و حفظ شکل دقیق لایه ها، نیاز به تنظیم دقیق پارامترهای رئولوژیکی دارند. استفاده از آن می‌تواند در آینده نزدیک روند رو به رشدی داشته باشد.

توسعه سکوهای رباتیک برای چاپ سه بعدی نیز یک حوزه تحقیقاتی قابل توجه است که می‌تواند دقت را افزایش داده و خطاهای انسانی را کاهش دهد. با پیشرفت فناوری‌های هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و داده‌کاوی، امکان خودکارسازی کامل فرآیندهای ساخت‌وساز با چاپ سه بعدی محقق خواهد شد. علاوه بر این، پیشرفت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری در طراحی و مدیریت پروژه‌های چاپ سه بعدی می‌تواند کارایی را بهبود بخشیده و هزینه‌های پروژه را کاهش دهد. علیرغم توسعه قابل توجه فناوری چاپ سه بعدی، تحقیقات بیشتری برای بهبود کیفیت و عملکرد مواد چاپی، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و تدوین استانداردها و مقررات مناسب مورد نیاز است. انتظار بر این است که تحقیقات و پیشرفت‌های تکنولوژی منجر به رسیدگی به این چالش‌ها شده و پذیرش فناوری چاپ سه بعدی در صنعت ساخت و ساز را تسریع بخشد. به‌عنوان مثال، توسعه مواد سازگار با محیط‌زیست و تکنیک‌های چاپ نوآورانه می‌تواند پایداری را افزایش داده و اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهد.

۴. جمع‌بندی و ارائه پیشنهاد

فناوری چاپ سه بعدی پتانسیل بسیار زیادی برای رسیدگی به چالش‌های پایداری که بخش ساختمان و ساخت‌وساز مدرن با آن مواجه است دارد و فرصت‌های هیجان‌انگیزی را برای طراحی‌های نوآورانه ارائه می‌دهد. این فناوری متحول‌کننده آماده است تا آینده صنعت ساختمان و ساخت‌وساز را شکل دهد. اجرای فعلی چاپ سه بعدی در صنعت ساخت‌وساز مزایای متعددی از جمله مقرون به صرفه بودن، انعطاف‌پذیری در شرایط آب‌وهوایی شدید، کاهش ضایعات مواد، انتشار CO_2 و مصرف انرژی را ارائه می‌دهد. ایمنی حوزه دیگری است که در آن چاپ سه بعدی می‌تواند با کاهش تلفات در محل، امکان انجام کارهای خطرناک و تسریع در ساخت‌وساز ساختمان با دقت توسط چاپگر را فراهم آورد. در مناطق محروم و کم درآمد، که میلیون‌ها نفر بدون سرپناه باقی می‌مانند، چاپ سه‌بعدی پتانسیل ساخت سریع مسکن دائمی، ارائه خدمات ضروری و بارقه‌ای امید را به نیازمندان دارد.

علیرغم چشم‌اندازهای امیدوارکننده، تحقیقات زیادی برای رسیدگی به چالش‌های موجود در این حوزه مانند پایداری مکانیکی و ساختاری، طول عمر مواد و مواردی از این دست مورد نیاز است. در حالی که فناوری چاپ سه بعدی نوید فوق العاده‌ای دارد، اما هنوز در مراحل اولیه توسعه خود در صنعت ساخت و ساز است. با تلاشی

[۲۳] گِران‌رَوی یا ویسکُزیته عبارت است از مقاومت یک سیال در برابر اعمال تنش برشی. به تعریفی دیگر، مقاومت اصطکاکی یک مایع یا گاز را در برابر شارش یا لغزیدن لایه‌ها، هنگامی که تحت تنش برشی قرار گیرد گِران‌رَوی می‌گویند

هماهنگ برای پرداختن به این مسائل، چاپ سه بعدی می‌تواند با پتانسیل خود در ایجاد انقلابی نوین در شیوه‌های ساخت‌وساز، هدف پایداری را تحقق بخشد.

دستورالعمل‌ها و توصیه‌های آینده

الف. توصیه‌هایی برای سیاستگذاران:

- تقویت همکاری بین سیاست‌گذاران، محققان و متخصصان صنعت برای توسعه دستورالعمل‌ها و مقررات جامع برای چاپ سه بعدی در ساخت‌وساز ساختمان‌های پایدار: این همکاری باید دربرگیرنده کارشناسان در معماری، مهندسی، علم مواد و پایداری محیطی نیز باشد.
- ایجاد انگیزه برای پذیرش: طراحی مشوق‌های مالی و چارچوب‌های نظارتی که پذیرش فناوری چاپ سه‌بعدی در شیوه‌های ساختمانی پایدار را ترویج می‌کند می‌تواند شامل مزایای مالیاتی، کمک‌های بلاعوض و فرآیندهای ساده‌سازی مجوز برای پروژه‌هایی باشد که از تکنیک‌های چاپ سه بعدی استفاده می‌کنند.
- ایجاد استانداردها: پشتیبانی از توسعه استانداردهای صنعتی برای چاپ سه بعدی در ساخت و ساز برای تضمین ایمنی، کیفیت و عملکرد محیطی موثر است. این استانداردها باید جنبه‌هایی مانند انتخاب مواد، یکپارچگی ساختاری، بهره‌وری انرژی و کاهش ضایعات را مورد توجه قرار دهند.
- حمایت مالی و تحقیقاتی شامل اختصاص بودجه و منابع برای ابتکارات تحقیق و توسعه با تمرکز بر پیشرفت فناوری چاپ سه بعدی برای شیوه‌های ساختمانی پایدار: این پشتیبانی می‌تواند به رفع چالش‌های فنی، کشف مواد جدید و بهینه‌سازی فرآیندهای چاپ کمک کند.
- پشتیبانی از تبادل دانش، فناوری و مهارت بین نهادهای تحقیقاتی و صنعتی داخل و خارج کشور
- ایجاد یک مرکز نوآوری انقلاب صنعتی که بخشی از آن به نمونه‌سازی کاربردهای چاپ سه بعدی در صنعت ساخت‌وساز اختصاص یافته باشد.

ب. توصیه‌هایی برای متخصصان صنعت:

- همکاری و اشتراک دانش: شامل همکاری بین متخصصان صنعت، محققان و سیاست‌گذاران برای به اشتراک گذاشتن دانش، بهترین شیوه‌ها و تقویت درس‌های آموخته شده. این دانش را می‌توان از طریق کنفرانس‌ها، کارگاه‌ها و انجمن‌های صنعتی متمرکز بر چاپ سه بعدی و شیوه‌های ساختمان پایدار به دست آورد.

- سرمایه‌گذاری در آموزش: سرمایه گذاری در برنامه‌ها و ابتکارات آموزشی به ایجاد نیروی کار ماهر که قادر به استفاده و پیشرفت فناوری چاپ سه بعدی در ساخت‌وساز پایدار باشد، کمک می‌کند. که شامل آموزش طراحی، بهره برداری و نگهداری سیستم های چاپ سه بعدی است.
- پروژه‌ها و نمایش‌های آزمایشی: تشویق متخصصان صنعت برای آغاز پروژه‌های آزمایشی که قابلیت و مزایای چاپ سه‌بعدی در ساخت‌وساز ساختمان‌های پایدار را به نمایش بگذارد. این پروژه‌ها می‌تواند به‌عنوان نمونه‌های واقعی عمل کنند و در راستای غلبه بر شک و تردید یا مقاومت در برابر فناوری‌های جدید کمک کنند.
- همکاری با دانشگاه: همکاری با مؤسسات دانشگاهی برای استفاده از قابلیت‌ها و تخصص‌های تحقیقاتی آن‌ها از جمله مشارکت در پروژه‌های مشترک، حمایت از ابتکارات تحقیقاتی و ارائه بینش‌های صنعتی برای حمایت از توسعه کاربردهای عملی و پایدار چاپ سه بعدی در ساخت و ساز لازم است.

با اجرای این توصیه‌ها، سیاست‌گذاران، محققان و متخصصان صنعت می‌توانند به طور جمعی پذیرش فناوری چاپ سه‌بعدی در ساخت و ساز ساختمان‌های پایدار را افزایش دهند. این همکاری راه را برای شیوه‌های ساخت‌وساز سازگارتر با محیط‌زیست، مقرون به صرفه‌تر و خلاقانه‌تر هموار می‌کند.

۵. منابع

1. Tabassum, T., & Mir, A. A. (2023). A review of 3d printing technology-the future of sustainable construction. Materials Today: Proceedings.
2. ADEEB FAHMY HANNA, H. A. L. A. (2019). 3D printing technology in construction industry on-site: Analysis of the implications. JES. Journal of Engineering Sciences, 47(3), 426-450.
3. Singh, R., Sodhi, A. K., & Bhanot, N. (2019). Investigation on the potential use of EAF dust and RSA for sustainable concrete production. In Recycled Waste Materials: Proceedings of EGRWSE 2018 (pp. 127-135). Springer Singapore.
4. Tari, M. K., Faraji, A. R., Aslani, A., & Zahedi, R. (2023). Energy simulation and life cycle assessment of a 3D printable building. Cleaner Materials, 7, 100168.
5. Pessoa, S., Guimarães, A. S., Lucas, S. S., & Simões, N. (2021). 3D printing in the construction industry-A systematic review of the thermal performance in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141, 110794.
6. Khan, S. A., 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.
7. de Mattos Nascimento, D. L., Mury Nepomuceno, R., Caiado, R. G. G., Maqueira, J. M., Moyano-Fuentes, J., & Garza-Reyes, J. A. (2022). A sustainable circular 3D printing model for recycling metal scrap in the automotive industry. Journal of Manufacturing Technology Management, 33(5), 876-892.
8. Kim, H. S., Hong, S. G., Yang, J., Ju, Y., Ok, J., Kwon, S. J., ... & Kim, J. (2020). 3D-Printed interfacial devices for biocatalytic CO2 conversion at gas-liquid interface. Journal of CO2 Utilization, 38, 291-298.
9. Alkhalidi, A., & Hatuqay, D. (2020). Energy efficient 3D printed buildings: Material and techniques selection worldwide study. Journal of Building Engineering, 30, 101286.