IJCAUS
International Journal of Civil, Architecture and Urban Studies (IJCAUS)
مجله بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی
https://ijcaus.ir
دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۱۱

نقش فناوری در شکل‌دهی به شیوه‌های معماری مدرن: نوآوری‌ها در طراحی و ساخت

مریم شفیع زاده

مدیریت پروژه وساخت، دانشگاه دیلمان لاهیجان

shafizadem@ymail.com

چکیده

در دهه دوم قرن بیست و یکم، همگرایی فناوری‌های دیجیتال، مواد پیشرفته و روش‌های محاسباتی، تحولی بنیادین در شیوه‌های معماری مدرن ایجاد کرده است. این مقاله مروری با هدف تحلیل نقش چندوجهی فناوری در شکل‌دهی به فرآیندهای طراحی و ساخت در معماری معاصر، با تأکید بر نوآوری‌های سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶، نگاشته شده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که تحولات فناورانه در سه حوزه اصلی قابل دسته‌بندی است: **تحول در فرآیندهای طراحی** شامل طراحی پارامتریک، هوش مصنوعی مولد و "کدینگ ویبی" (Coding Vibe) که به طراحان امکان خلق ابزارهای سفارشی و تحلیل بلادرنگ را می‌دهد؛ **تحول در فرآیندهای ساخت** شامل تولید افزایشی (چاپ سه‌بعدی بتن و فلز)، ساخت رباتیک و واقعیت افزوده که مرزهای تحقق‌پذیری هندسه‌های پیچیده را جابجا کرده است؛ و **ظهور مواد و پارادایم‌های نوین ساختمانی** مانند معماری زیستی-ترکیبی (Architecture Biohybrid) با استفاده از مواد زنده و رویکردهای مبتنی بر اقتصاد چرخشی. بررسی منابع معتبر حاکی از آن است که این فناوری‌ها اگرچه افق‌های بی‌سابقه‌ای برای خلاقیت و کارایی گشوده‌اند، اما چالش‌های مهمی نیز در حوزه‌های نظارتی، مالکیت فکری داده‌ها، مسئولیت‌پذیری حرفه‌ای و یکپارچگی با فرآیندهای سنتی ساخت ایجاد کرده‌اند. چارچوب‌های نوین "تحویل محاسباتی" (Computational Delivery) تلاش می‌کنند با پیوند دادن قصد طراحانه با الزامات نهادی و قابلیت ساخت، این شکاف را پر کنند. نتیجه‌گیری مقاله بر لزوم بازتعریف نقش معمار به عنوان هماهنگ‌کننده فرآیندهای دیجیتال، سواد داده‌ای و پذیرش رویکردهای بین‌رشته‌ای برای هدایت این تحول تأکید دارد.

کلمات کلیدی: معماری دیجیتال، طراحی پارامتریک، هوش مصنوعی در معماری، ساخت افزایشی، واقعیت افزوده

IJCAUS
International Journal of Civil, Architecture and Urban Studies (IJCAUS)
مجله بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی
https://ijcaus.ir
دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۱۱

۱. مقدمه

معماری همواره آیینه تمام‌نمای فناوری عصر خود بوده است. از طاق‌های رومی و کلیساهای گوتیک تا آسمان‌خراش‌های فولادی و شیشه‌ای، هر دوره تاریخی شاهد ظهور مصالح و روش‌های ساخت جدیدی بوده که امکانات بی‌سابقه‌ای را در اختیار معماران قرار داده است. با این حال، سرعت و مقیاس تحولات فناورانه در دهه جاری میلادی (۲۰۲۰-۲۰۲۶) بی‌سابقه بوده و به باور بسیاری از صاحب‌نظران، ما در آستانه یک "نقطه عطف" (Point Tipping) در طراحی و ساخت محیط ساخته‌شده قرار داریم (Gensler, ۲۰۲۵). هم‌افزایی میان محاسبات پیشرفته، هوش مصنوعی، رباتیک و علم مواد، پارادایم جدیدی را رقم زده که در آن دیگر طراحی و ساخت فرآیندهایی خطی و مجزا نیستند، بلکه در یک چرخه یکپارچه و بازخوردی در هم تنیده می‌شوند.

این تحولات از دو سو حائز اهمیت هستند. از یک سو، ابزارهای نوین طراحی مانند مدل‌سازی پارامتریک و الگوریتم‌های مولد، مرزهای خلاقیت را گسترش داده و به معماران امکان می‌دهند تا فرم‌ها و ساختارهایی را خلق کنند که پیش از این به دلیل پیچیدگی محاسباتی یا عدم امکان ساخت، غیرقابل تصور بودند (Stals et al., ۲۰۲۱). از سوی دیگر، فناوری‌های ساخت پیشرفته مانند چاپ سه‌بعدی در مقیاس ساختمانی و مونتاژ رباتیک، در حال تبدیل کردن این فرم‌های پیچیده به واقعیت هستند و افق‌های تازه‌ای را در بهینه‌سازی مصرف مصالح، کاهش ضایعات و افزایش سرعت ساخت گشوده‌اند (Lyu et al., ۲۰۲۶).

پرسش اساسی که این مقاله به دنبال پاسخ به آن است، این است که **فناوری‌های نوین چگونه فرآیندهای طراحی و ساخت را در معماری مدرن دگرگون ساخته‌اند و پیامدهای این دگرگونی برای حرفه معماری و محیط ساخته‌شده چیست؟** برای پاسخ به این پرسش، مقاله در پنج بخش اصلی سازماندهی شده است. پس از مقدمه، مروری بر مبانی نظری و تکامل تاریخی فناوری‌های معماری ارائه می‌شود. بخش سوم و چهارم که هسته اصلی مقاله را تشکیل می‌دهند، به ترتیب به تحلیل عمیق نوآوری‌ها در فرآیندهای طراحی (طراحی پارامتریک، هوش مصنوعی، مدل‌های محاسباتی) و نوآوری‌ها در فرآیندهای ساخت (تولید افزایشی، رباتیک، واقعیت افزوده) می‌پردازند. در ادامه، مواد و پارادایم‌های نوین ساختمانی مانند معماری زیستی و اقتصاد چرخشی بررسی می‌شوند. بخش ششم به چالش‌ها و محدودیت‌های پیش روی این فناوری‌ها اختصاص دارد و نهایتاً در بخش نتیجه‌گیری، یافته‌ها جمع‌بندی شده و چشم‌انداز آینده ترسیم می‌گردد.

۲. مبانی نظری: از طراحی به کمک کامپیوتر تا هوش محاسباتی

برای درک عمق تحول کنونی، لازم است نگاهی گذرا به تکامل فناوری‌های دیجیتال در معماری داشته باشیم.

۱.۲. از CAD تا BIM: دیجیتالی شدن ابزارها

ورود رایانه به فرآیند طراحی معماری از دهه ۱۹۶۰ با سیستم‌های طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) آغاز شد. این سیستم‌ها عمدتاً جایگزینی برای تخته رسم بودند و فرآیند ترسیم را سرعت بخشیدند، اما تغییری در ماهیت طراحی ایجاد نکردند. نسل بعدی، یعنی مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در دهه ۲۰۰۰، گامی فراتر نهاد و با ایجاد یک پایگاه داده مشترک از تمام اجزای ساختمان، هماهنگی بین رشته‌های مختلف و مدیریت چرخه حیات پروژه را ممکن ساخت (Eastman et al., ۲۰۱۱). BIM اگرچه تحولی بزرگ بود، اما عمدتاً بر روی "نمایش" اطلاعات و هماهنگی متمرکز بود تا "تولید" فرم.

۲.۲. طراحی محاسباتی و پارادایم پارامتریک

مرحله بعدی، ظهور طراحی محاسباتی (Design Computational) و به طور خاص طراحی پارامتریک بود. در طراحی پارامتریک، معمار به جای ترسیم خطوط ثابت، "روابط" و "قواعدی" را تعریف می‌کند که فرم بر اساس آنها و در پاسخ به تغییر پارامترهای ورودی (مانند زاویه تابش نور، بارهای سازه‌ای، یا هزینه) به طور خودکار بازتولید می‌شود (Schnabel, ۲۰۰۷). این رویکرد، طراحی را از حالت ایستا به فرآیندی پویا و پاسخگو تبدیل کرد و معمار را در جایگاه "طراح سیستم‌های طراحی" قرار داد. پلتفرم‌هایی مانند Grasshopper برای Rhino، این رویکرد را به جریان اصلی معماری وارد کردند. با این حال، چالش اصلی در طراحی پارامتریک، منحنی یادگیری تند آن و نیاز به دانش برنامه‌نویسی بود که دسترسی را برای بسیاری از طراحان محدود می‌کرد (Agirbas, ۲۰۱۸).

۳.۲. هوش مصنوعی به عنوان هم‌آفرین

جدیدترین و شاید بنیادی‌ترین تحول، ورود هوش مصنوعی (AI) به عرصه طراحی است. هوش مصنوعی، به ویژه از طریق مدل‌های مولد (Models Generative)، این قابلیت را دارد که نه تنها پارامترها را تغییر دهد، بلکه خود به خلق گزینه‌های طراحی بر اساس مجموعه داده‌های عظیم از طرح‌های پیشین و قواعد یادگرفته‌شده بپردازد (Gensler, ۲۰۲۵). بر این اساس، رابطه طراح و ابزار از رابطه کاربر و ابزار، به رابطه "هم‌آفرینی" (Co-creation) تغییر یافته است؛ جایی که هوش مصنوعی نقش یک شریک خلاق را ایفا کرده و با پیشنهاد گزینه‌های غیرمنتظره، قوه تخیل طراح را تحریک می‌کند. NCARB در گزارش چشم‌انداز ۲۰۲۶ خود، از هوش مصنوعی به عنوان عاملی یاد می‌کند که فعالانه در حال تغییر نقش معمار است و آنان را در موقعیت "تأیید، تصویب یا اتکا به خروجی‌های این ابزارها" قرار می‌دهد (NCARB, ۲۰۲۶). جدول ۱ این تحول را در یک نگاه نشان می‌دهد.

جدول ۱: تکامل ابزارهای دیجیتال در معماری و تغییر نقش معمار

نقش معمار	ماهیت تعامل	ابزار اصلی	دوره
نقشه‌کش/طراح دستی	ابزار ترسیم (Tool Drafting)	CAD	۱۹۶۰–۲۰۰۰
هماهنگ‌کننده اطلاعات	پایگاه داده (Database)	BIM	۲۰۰۰–۲۰۱۰
برنامه‌نویس فرم (Form-Finder)	سیستم طراحی (System Design)	طراحی پارامتریک	۲۰۱۰–۲۰۲۰
هدایت‌گر و تأییدکننده (Curator/Validator)	شریک خلاق (Partner Creative)	هوش مصنوعی مولد	۲۰۲۰–۲۰۲۶

۳. نوآوری‌ها در فرآیندهای طراحی

۱.۳. دموکراتیزه شدن طراحی پارامتریک

یکی از موانع اصلی بر سر راه فراگیری طراحی پارامتریک، پیچیدگی فنی و نیاز به تخصص برنامه‌نویسی بود. نوآوری‌های اخیر در جهت "دموکراتیزه کردن" این ابزارها گام برداشته‌اند. نمونه بارز این تلاش، پلتفرم "اتو" (Otto) است که یک محیط طراحی پارامتریک دوبعدی مبتنی بر وب را ارائه می‌دهد (Yalcin et al., ۲۰۲۶). ویژگی منحصربه‌فرد اتو، رابط چندوجهی (Multi-modal) آن است که به کاربران امکان می‌دهد بین ویرایش مبتنی بر بلوک‌های بصری (مناسب برای مبتدیان) و کدنویسی متنی (مناسب برای کاربران پیشرفته) جابجا شوند و این دو حالت به صورت دوسویه با یکدیگر همگام هستند.

این رویکرد، یادگیری مفاهیم پارامتریک را برای دانشجویان و طراحان تازه‌کار به شدت تسهیل کرده است. آزمایش پایلوت این پلتفرم با گروه کوچکی از دانشجویان کارگاهی (FabLab) نشان داد که پس از تنها ۱۵-۲۰ دقیقه آشنایی اولیه، شرکت‌کنندگان توانستند مدل‌های پارامتریک ساده و قابل ساخت خلق کنند (Yalcin et al., ۲۰۲۶). این دستاوردها نشان‌دهنده حرکتی به سمت ابزارهایی است که به جای تحمیل یک شیوه تعامل خاص، خود را با سطح دانش و ترجیح کاربر تطبیق می‌دهند.

۲.۳. ظهور "کدینگ ویبی" (Coding Vibe) و ساخت ابزار سفارشی

شاید هیجان‌انگیزترین روند در سال ۲۰۲۶، پدیده "کدینگ ویبی" باشد. این مفهوم که توسط فعالان حوزه فناوری‌های طراحی مطرح شده، به معنای استفاده از هوش مصنوعی (از طریق دستورات زبان طبیعی) برای نوشتن کد و ساخت ابزارهای نرم‌افزاری کوچک و سفارشی در عرض چند دقیقه یا چند ساعت است (Mullins, ۲۰۲۶). برای یک معمار، این بدان معناست که به جای جستجوی یک پلاگین آماده (و احتمالاً گران‌قیمت) برای حل یک مسئله مشخص طراحی (مثلاً تحلیل سایه‌اندازی یک نمای لوووردار در فصول مختلف)، می‌تواند به سادگی از یک دستیار هوش مصنوعی بخواهد که آن ابزار را برایش بنویسد.

مولینز (Mullins, ۲۰۲۶) از استانتک این روند را چنین توصیف می‌کند: "این به شما یک دید اجمالی از آینده محاسبات می‌دهد، جایی که دستورات از طریق زبان طبیعی صادر می‌شوند، نه با کلیک کردن روی دکمه‌ها." این قابلیت، قدرت یک تیم کوچک توسعه نرم‌افزار را در اختیار هر طراح قرار می‌دهد و امکان نمونه‌سازی سریع (Rapid Prototyping) ایده‌های دیجیتال را فراهم می‌آورد. اگرچه این ابزارها هنوز در مقیاس پروژه‌های بزرگ مقیاس‌پذیر نیستند، اما ارزش اصلی آنها در توانمندسازی طراحان برای حل مسائل روزمره و افزایش سرعت ایده‌پردازی است.

۳.۳. تحلیل بلادرنگ و شبیه‌سازی عملکردی

یکی دیگر از حوزه‌های تأثیرگذار هوش مصنوعی، تسریع و تسهیل فرآیندهای تحلیل و شبیه‌سازی است. در روش‌های سنتی، تحلیل عملکرد انرژی ساختمان فرآیندی زمان‌بر بود؛ معمار مدل را به متخصص انرژی تحویل می‌داد و هفته‌ها بعد نتیجه را دریافت می‌کرد. اما امروزه، با کمک ابزارهای هوش مصنوعی، معماران می‌توانند به زبان طبیعی از نرم‌افزار بپرسند: "بهینه‌ترین جهت‌گیری برای ساختمان

اداری من در این سایت برای بیشینه‌سازی نور روز و کمینه‌سازی مصرف انرژی چیست؟" و ظرف چند دقیقه پاسخ را دریافت کنند (Mullins, ۲۰۲۶).

این "تحلیل بلادرنگ" (Real-time Analysis) تحولی شگرف در فرآیند طراحی ایجاد کرده است. بازخورد فانی عملکردی به معمار اجازه می‌دهد تا در همان مراحل اولیه طراحی، تصمیمات خود را بر اساس شواهد (Evidence-based Design) اصلاح کند. نتیجه نهایی، ساختمان‌هایی با عملکرد انرژی بالاتر است، زیرا هزینه و زمان تحلیل به شدت کاهش یافته و در نتیجه، امکان انجام آن برای پروژه‌های بیشتری (حتی آنهایی که بودجه محدودی برای مشاوره تخصصی دارند) فراهم می‌شود.

۴. نوآوری‌ها در فرآیندهای ساخت

اگر نوآوری‌های طراحی به ما امکان می‌دهند "هر چیزی را تصور کنیم"، نوآوری‌های ساخت به ما امکان می‌دهند "هر چیزی را بسازیم". در سال‌های اخیر، شکاف بین طراحی محاسباتی و ساخت فیزیکی به سرعت در حال پر شدن است.

۱.۴. تولید افزایشی (Additive Manufacturing) در مقیاس ساختمانی

چاپ سه‌بعدی که پیش از این عمدتاً برای ساخت ماکت و اشیای کوچک استفاده می‌شد، اکنون به مقیاس ساختمانی وارد شده است. چاپ سه‌بعدی بتن (۳D Printing Concrete) یکی از پیشتازان این حوزه است. پروژه "اوروبروس" (OUROBORUS) در دانشگاه شیان جیائوتنگ-لیورپول نمونه‌ای شاخص از به کارگیری این فناوری در یک بستر آموزشی و پژوهشی است (Li, & Rian ۲۰۲۶). در این پروژه، دانشجویان دوره کارشناسی طی ۱۰ هفته، یک سازه هندسی پیچیده با الهام از نماد اژدهای چینی را با استفاده از چاپ سه‌بعدی بتن طراحی و ساخته‌اند.

این پروژه نشان می‌دهد که چگونه فناوری‌های دیجیتال می‌توانند به بازتعریف رابطه بین فرم، ماده و ساختار منجر شوند. دانشجویان با مدل‌سازی پارامتریک، هندسه‌های خمیده فراکتال را طراحی و مسیرهای پیوسته نازل (Continuous Toolpaths) را برای چاپ بهینه برنامه‌ریزی کردند (Li, & Rian ۲۰۲۶). چالش‌هایی مانند کالیبراسیون مخلوط بتن، محدودیت‌های ساخت و عملکرد سازه‌ای، بخشی از فرآیند یادگیری مبتنی بر ساخت (Learning-by-Making) بود. همکاری با یک شرکت تخصصی برای تولید نهایی، پل ارتباطی بین دانشگاه و صنعت را نیز برقرار کرد.

۲.۴. ادغام رباتیک و واقعیت افزوده در فرآیند ساخت

رباتیک و واقعیت افزوده (AR) نیز در حال تغییر چهره کارگاه‌های ساخت هستند. رویکرد "طراحی-تا-تولید" (Design-to-Production) که در کارگاه‌های INDEXLAB پلی‌تکنیک میلان دنبال می‌شود، نمونه‌ای از این ادغام است (INDEXLAB, ۲۰۲۶). در کارگاه "متابند" (METABEND)، شرکت‌کنندگان با اصول برنامه‌نویسی الگوریتمی برای طراحی نماهای ارگانیک با هندسه‌های دوگانه-خمیده (Double-curvature) آشنا می‌شوند. سپس، این هندسه‌های پیچیده با استفاده از افزونه واقعیت افزوده "فولوگرام" (Fologram) به فرآیند ساخت منتقل می‌شوند. واقعیت افزوده، کارگران را در خم کردن دقیق ورق‌های فلزی راهنمایی کرده و مونتاژ پانل‌ها را با دقت بالا ممکن می‌سازد.

این روش، مزایای دوگانه‌ای دارد: از یک سو، آزادی بیان بالایی را برای طراحان فراهم می‌کند و از سوی دیگر، با کاهش خطا و افزایش دقت، فرآیند ساخت را کارآمدتر و هزینه‌های مربوط به هندسه‌های پیچیده را کاهش می‌دهد (INDEXLAB, ۲۰۲۶).

۳.۴. چارچوب‌های تحویل محاسباتی (Computational Delivery Frameworks)

با افزایش پیچیدگی پروژه‌های دیجیتال، نیاز به چارچوب‌هایی که فرآیند را از "قصد الگوریتمی تا مونتاژ پاسخگو" مدیریت کنند، بیش از پیش احساس می‌شود. لیو و همکاران (Lyu et al., ۲۰۲۶) در مقاله خود با عنوان "از قصد الگوریتمی تا مونتاژ پاسخگو"، یک **چارچوب تحویل محاسباتی (CDF)** را پیشنهاد می‌دهند. این چارچوب سه مرحله اصلی دارد:

۱. **رمزگذاری قصد (Encoding Intent)**: چگونگی تبدیل قصد طراح به پارامترها و الگوریتم‌ها از طریق راهبردهای شکل‌یابی (Form-finding)، بهینه‌سازی چندهدفه و عاملیت مشترک انسان-کامپیوتر.
۲. **بررسی تحقق‌پذیری (Negotiation Fabrication)**: چگونگی تطبیق این الگوریتم‌ها با محدودیت‌های واقعی ساخت (تلرانس، رفتار ماده، منطق مونتاژ) در فرآیندهای افزایشی، کاهشی و هیبرید-رباتیک.
۳. **اعتبارسنجی نهادی (Validation Institutional)**: چگونگی تأیید نهایی سیستم ساخته‌شده از نظر مقررات، دوام، قابلیت نگهداری و بیمه‌پذیری.

این چارچوب تلاش می‌کند تا شکاف بین نوآوری دیجیتال و الزامات حقوقی و حرفه‌ای صنعت ساخت را پر کند و به معماری دیجیتال کمک کند تا از پروژه‌های نمایشی و آکادمیک به پروژه‌های تجاری و مقیاس بزرگ راه یابد.

۵. مواد نوین و پارادایم‌های جدید ساختمانی

۱.۵. معماری زیستی-ترکیبی (Biohybrid Architecture)

شاید آینده‌نگرانه‌ترین حوزه تحقیقاتی، معماری زیستی-ترکیبی باشد. این رویکرد به دنبال استفاده از ارگانیسم‌های زنده (مانند قارچ‌ها، باکتری‌ها و گیاهان) به عنوان بخشی از مصالح ساختمانی است. پروژه‌هایی مانند "FUNGAR" و "flora robotica" در اروپا در حال بررسی این امکان هستند که چگونه می‌توان "بخش‌هایی از ساختمان‌ها را رشد داد" (Ayres, ۲۰۲۵).

فیلیپ آیرس، معمار و محقق در آکادمی سلطنتی دانمارک، معتقد است که مصالح زنده می‌توانند مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی مانند ترسیب کربن و افزایش تنوع زیستی به همراه داشته باشند و حتی قابلیت‌های خودترمیمی (Self-repair) داشته باشند (Ayres, ۲۰۲۵). هرچند این مواد هنوز برای جایگزینی بتن و فولاد در عناصر سازه‌ای اصلی آماده نیستند، اما می‌توانند در لایه‌های غیرسازه‌ای، عایق‌ها و پوسته ساختمان‌ها به کار گرفته شوند و گامی به سوی اقتصاد چرخشی و کاهش وابستگی به مصالح پرانرژی بردارند.

۲.۵. مسئولیت‌پذیری در قبال منابع و مصالح بومی

گزارش چشم‌انداز NCARB (۲۰۲۶) بر بحران قریب‌الوقوع مصالح در صنعت ساخت تأکید دارد؛ بحرانی که ناشی از سه عامل اصلی کمیابی، نوسانات قیمت و اثرات زیست‌محیطی است. در پاسخ به این چالش، فناوری نه تنها به دنبال مصالح جدید، بلکه به دنبال استفاده هوشمندانه‌تر از مصالح موجود و بومی است. طراحی محاسباتی این امکان را فراهم می‌کند که با آنالیز و بهینه‌سازی، مصرف مصالح به حداقل ممکن برسد و از مصالح کم‌انرژی و تجدیدپذیر محلی به بهترین شکل استفاده شود (NCARB, ۲۰۲۶).

۶. چالش‌ها و محدودیت‌ها

همگرایی فناوری و معماری با وجود تمام نویدبخشی‌ها، با چالش‌های جدی نیز همراه است.

- **چالش‌های نهادی و نظارتی:** سرعت تحول فناوری از سرعت به‌روزرسانی مقررات و قوانین ساختمانی پیشی گرفته است. حوزه‌هایی مانند معماری فضایی (Architecture Space) که در گزارش NCARB (۲۰۲۶) به آن اشاره شده، نمونه‌ای از یک حوزه کاملاً بدون نظارت است که اگرچه امکان آزمایش سریع را فراهم می‌کند، اما می‌تواند خطراتی برای ایمنی عمومی ایجاد کند که در نهایت به معماری زمینی نیز سرایت خواهد کرد.
- **مالکیت و استانداردسازی داده‌ها:** داده‌ها به عنوان ماده خام عصر دیجیتال، به یک دارایی کلیدی تبدیل شده‌اند. بسیاری از شرکت‌های معماری با انبوهی از داده‌های ناسازگار و سازمان‌نیافته مواجه هستند که استفاده از آنها را برای تحلیل عمیق یا آموزش مدل‌های هوش مصنوعی دشوار می‌سازد (Mullins, ۲۰۲۶). علاوه بر این، شرایط استفاده از خدمات (Terms of Service) برخی شرکت‌های نرم‌افزاری، ادعای مالکیت بر داده‌هایی را مطرح می‌کند که از طریق پلتفرم آن‌ها جریان می‌یابد، که می‌تواند برای طراحان "فاجعه‌بار" باشد و توانایی آن‌ها را برای آموزش مدل‌های هوش مصنوعی مبتنی بر طرح‌های خودشان محدود کند (Mullins, ۲۰۲۶).
- **مسئولیت حرفه‌ای و اخلاقی:** با ورود هوش مصنوعی به فرآیند طراحی، پرسش‌های جدیدی درباره مسئولیت مطرح می‌شود. اگر یک ابزار هوش مصنوعی طرحی ارائه دهد که بعدها به دلیل نقص عملکردی باعث خسارت شود، مسئولیت نهایی بر عهده کیست؟ طراح انسانی که خروجی را تأیید کرده، یا توسعه‌دهنده نرم‌افزار؟ NCARB (۲۰۲۶) از ناظران حرفه‌ای می‌خواهد که در مورد یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی در فرآیند معماری، اقدامات پیشگیرانه انجام دهند.
- **مهارت‌های جدید برای معماران:** تحول فناوری، نیازمند تغییر در نظام آموزش و کسب مهارت‌های جدید است. سواد داده‌ای، کنجکاوی فناورانه و راحتی کار با هوش مصنوعی به همان اندازه مهارت‌های سنتی طراحی اهمیت یافته‌اند (Gensler, ۲۰۲۵). نظام‌های صدور پروانه حرفه‌ای نیز باید برای ارزیابی شایستگی معماران در این زمینه‌های جدید، بازتعریف شوند (NCARB, ۲۰۲۶).

۷. بحث

تحلیل ارائه‌شده در این مقاله نشان می‌دهد که فناوری صرفاً ابزاری در خدمت معماری نیست، بلکه عاملی است که در حال بازتعریف بنیادین این حرفه است. تحول از CAD به BIM و سپس به طراحی محاسباتی و هوش مصنوعی، یک مسیر تکاملی ساده نبوده، بلکه هر گام به معنای تغییر در رابطه انسان و ماشین و جابجایی مرزهای خلاقیت و کنترل بوده است.

یافته‌ها حاکی از آن است که نوآوری‌های کنونی در سه حوزه طراحی، ساخت و مواد در حال همگرایی هستند. "کدینگ ویبی" و ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی، فرآیند طراحی را دموکراتیک‌تر و داده‌محورتر می‌کنند. هم‌زمان، فناوری‌هایی مانند چاپ سه‌بعدی بتن و مونتاژ راهنمایی‌شده با واقعیت افزوده، امکان تحقق این طرح‌های پیچیده را با دقت و کارایی بیشتر فراهم می‌آورند. چارچوب‌هایی مانند "تحویل محاسباتی" در تلاش هستند تا این دو حوزه را به هم پیوند زده و فرآیندی یکپارچه از "قصد تا تحویل" ایجاد کنند (Lyu et al., ۲۰۲۶).

با این حال، این مسیر با موانع قابل توجهی نیز همراه است. مهم‌ترین آنها، **شکاف بین نوآوری و نهاد** است. سرعت پیشرفت فناوری به مراتب از توانایی نهادهای حرفه‌ای، حقوقی و نظارتی برای تطبیق با آن بیشتر است. این شکاف خود را در قالب مسائل مالکیت داده‌ها، عدم قطعیت در مورد مسئولیت حرفه‌ای در قبال تصمیمات هوش مصنوعی، و ناتوانی مقررات موجود در مواجهه با مصالح و روش‌های ساخت کاملاً جدید نشان می‌دهد.

نکته مهم دیگر، **تغییر نقش معمار** است. معمار از یک "پدیدآورنده" (Author) فرم‌های ثابت، به یک "تألیف‌کننده" (Orchestrator) فرآیندهای دیجیتال تبدیل می‌شود. او باید بتواند تیم‌های چندرشته‌ای از متخصصان داده، برنامه‌نویسان و مهندسان رباتیک را هدایت کند، خروجی‌های مدل‌های مولد را اعتبارسنجی نماید، و مفاهیم پیچیده فناورانه را به زبان قابل فهم برای کارفرمایان و نهادهای نظارتی ترجمه کند. این تغییر نقش، نیازمند بازنگری اساسی در برنامه‌های درسی و نظام‌های ارزشیابی حرفه‌ای است.

۸. نتیجه‌گیری

پرسش اصلی این مقاله، نقش فناوری در شکل‌دهی به شیوه‌های معماری مدرن بود. مرور منابع معتبر و به‌روز نشان می‌دهد که ما در میانه یک تحول پارادایمی قرار داریم که در آن طراحی و ساخت به یک چرخه یکپارچه دیجیتال تبدیل شده‌اند. مهم‌ترین دستاوردهای این تحول عبارتند از:

۱. **دموکراتیزه شدن طراحی محاسباتی:** ابزارهای چندوجهی و هوش مصنوعی مولد، مفاهیم پیشرفته طراحی را برای طیف وسیع‌تری از طراحان قابل دسترس ساخته و امکان خلق ابزارهای سفارشی را برای همگان فراهم کرده‌اند.
۲. **تسریع و تعمیق تحلیل عملکردی:** تحلیل بلادرنگ مبتنی بر هوش مصنوعی، طراحی مبتنی بر شواهد را تسهیل کرده و به خلق ساختمان‌های با کارایی بالاتر منجر می‌شود.
۳. **واقعیت‌بخشی به پیچیدگی:** فناوری‌های ساخت پیشرفته (چاپ سه‌بعدی، رباتیک، واقعیت افزوده) مرزهای تحقق‌پذیری را جابجا کرده و امکان ساخت فرم‌هایی را فراهم آورده‌اند که تا همین اواخر غیرقابل ساخت به نظر می‌رسیدند.
٤. **گشایش افق‌های جدید مادی:** تحقیقات در حوزه معماری زیستی-ترکیبی و مصالح هوشمند، چشم‌اندازی از ساختمان‌هایی با قابلیت‌های خودترمیمی، ترسیب کربن و تعامل با محیط زیست را ترسیم می‌کند.

با این حال، عبور موفقیت‌آمیز از این مسیر، مستلزم توجه هم‌زمان به **نوآوری فناورانه** و **تکامل نهادی** است. تدوین چارچوب‌های حقوقی و نظارتی جدید، ایجاد استانداردهای داده‌ای شفاف، بازتعریف مسئولیت‌های حرفه‌ای، و اصلاح نظام آموزشی برای تربیت معماران آشنا با زبان کد و داده، از الزامات این دوره انتقالی است.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که فناوری نه به عنوان یک هدف، بلکه به عنوان بستری برای تحقق چشم‌اندازی بلندپروازانه‌تر از معماری در خدمت انسان و محیط زیست عمل می‌کند. آینده از آن معمارانی است که بتوانند با خلاقیت انسانی خود از این ابزارهای قدرتمند بهره گرفته و در عین حال، بر فرآیندهای پیچیده دیجیتال، اشراف انسانی و اخلاقی خود را حفظ کنند.

۹. منابع

۱. Agirbas, A) .۲۰۱۸ .(The Use of Metaphors as a Parametric Design Teaching Model :A Case Study .*Design and Technology Education :An International Journal,* ۲۳)۱(, ۴۰–۵۴.

۲. Ayres, P) .۲۰۲۵, December ۲۹ .(Bio-architecture – a return to nature .In A .King, *From living buildings to multitasking home robots, here's how science is reimagining ۲۰۲۶*. European Commission Horizon Magazine.

۳. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K) .۲۰۱۱ .(*BIM Handbook :A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*) ۲nd ed .(.Wiley.

۴. Gensler) .۲۰۲۵, December ۳ .(*Gensler's ۲۰۲۶ Design Forecast :AI, Agility, and Adaptation Redefine the Future of Cities* [Press release].

۵. INDEXLAB) .۲۰۲۶ .(*METABEND .Corso di Programmazione Parametrica e Realtà Aumentata per Facciate Non-Standard* [Workshop description] .Politecnico di Milano.

۶. Lyu, R., Zhao, J., & Chen, G) .۲۰۲۶ .(From Algorithmic Intent to Accountable Assembly : A Computational Delivery Framework for Digital Architecture .*E3S Web of Conferences, ۶۸۳*, ۰۱۰۱۲.

۷. Mullins, B) .۲۰۲۶, February ۱۹ .(*۲۰۲٦ AEC trends :AI in architecture with vibe coding and real-time analysis* .Stantec Ideas.

۸. NCARB) .۲۰۲۶, January ۲۰ .(*Insights From NCARB's ۲۰۲۶ Future Trends Report* .National Council of Architectural Registration Boards.

۹. Rian, I .M., & Li, Y) .۲۰۲۶, January ۱۳ .(*From mythological imagery to digital construction : architecture undergraduates explore ۳D concrete printing* [University news] .Xi'an Jiaotong-Liverpool University.

۱۰. Schnabel, M .A) .۲۰۰۷ .(Parametric Designing in Architecture .In A .Dong, A .V .Moere, & J .S .Gero) Eds(., *Computer-Aided Architectural Design Futures) CAADFutures (۲۰۰۷* .Springer.

۱۱. Stals, A., Jancart, S., & Elsen, C) .۲۰۲۱ .(Parametric modeling tools in small architectural offices :Towards an adapted design process model .*Design Studies, ۷۲*, ۱۰۰۹۷۸.

۱۲. Yalcin, S., Dayangac, E., Bener, M., Ureten, I., & Cecen, D) .۲۰۲۶, February ۱۸ .(Otto :A Multi-Modal Platform for Accessible Parametric Design .In *Adjunct Proceedings of the ۱۰th ACM Symposium on Computational Fabrication* .ACM.

۱۳. Goldstein, J., & Brink, E) .۲۰۲۶, January ۱۹ .(Future-Fitting Cities :Inside Gensler's ۲۰۲۶ Design Forecast [Interview] .In R .Nieminen) Host(, *I Hear Design* .I+S Design.

۱۴. Bond University) .۲۰۲۶ .(*ARCH۱۱-۱۰۵ :Digital Fabrication Lab* [Course description].

۱۵. Dayangaç, E., Bener, M., & Yalçın, S) .۲۰۲۵ .(Parametrix :A Novel Approach to Teaching Parametric Design in KIT and Digital Fabrication Education .In *Constructionism Conference Proceedings, Vol* .۸, ۵۰۳–۵۰۶.

۱۶. McElroy, L., & Huang, L) .۲۰۲۳ .(PotScript :A Visual Grammar for Sculpting with Functions .In *Proceedings of the ۸th ACM Symposium on Computational Fabrication*.

۱۷. Peek, N., & Gershenfeld, N) .۲۰۱۸ .(Mods :Browser-Based Rapid Prototyping Workflow Composition .In *Proceedings of ACADIA ۲۰۱۸*.

۱۸. Stemasov, E., Demharter, S., Rädler, M., Gugenheimer, J., & Rukzio, E) .۲۰۲۴ .(pARam : Leveraging Parametric Design in Extended Reality to Support the Personalization of Artifacts for Personal Fabrication .In *CHI '24 :Proceedings of the ۲۰۲۴ CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*.

۱۹. Park, K., Lempert, C., Abdullah, M., Katakura, S., Shigeyama, J., Roumen, T., & Baudisch, P) .۲۰۲۲ .(FoolProofJoint :Reducing Assembly Errors of Laser Cut ۳D Models by Means of Custom Joint Patterns .In *CHI '22 :Proceedings of the ۲۰۲۲ CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*.

۲۰. Seff, A., Ovadia, Y., Zhou, W., & Adams, R .P) .۲۰۲۰ .(SketchGraphs :A Large-Scale Dataset for Modeling Relational Geometry in Computer-Aided Design .*arXiv preprint*, arXiv:۲۰۰۷.۰۸۵۰۶.

۲۱. Sola-Guirado, R .R., Guerrero-Vacas, G., & Rodríguez-Alabanda, Ó) .۲۰۲۲ .(Teaching CAD/CAM/CAE Tools with Project-Based Learning in Virtual Distance Education . *Education and Information Technologies,* ۲۷)۴(, ۵۰۵۱–۵۰۷۳.

۲۲. Nuryanto, A., Pardjono, Ngadiyono, Y., & Ahmad Widodo, S .F) .۲۰۲۵ .(Implementation of Project-Based Learning in CAD Education to Support Machine Design Drawing Skills .In *Proceedings of the ۸th International Conference on Education Innovation (ICEI ۲۰۲۴)*, Atlantis Press, ۱۴۳۴–۱۴۴۸.

۲۳. Cuttle Team) .۲۰۲۵ .(*Cuttle* .Retrieved September ۲۰, ۲۰۲۵, from https://cuttle.xyz/

۲۴. Hempel, B., Lubin, J., & Chugh, R) ۲۰۱۹. (Sketch-n-sketch: Output-Directed Programming for SVG. In *Proceedings of the ۳۲nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ۲۸۱–۲۹۲.

۲۵. McElroy, L., Bolsée, Q., Peek, N., & Gershenfeld, N) ۲۰۲۲. (SVG-PCB: A Web-Based Bidirectional Electronics Board Editor. In *Proceedings of the ۷th Annual ACM Symposium on Computational Fabrication*.