از کلبه اولیه تا همتاسازهای معماری: تأثیر فناوری ساخت افزایشی در فرآیند تکامل معماری

ماهان معتمدی*، سید یحیی اسلامی**

تاریخ دریافت: ۱۰-۰۹-۱۴۰۱، تاریخ پذیرش: ۰۹-۱۲-۱۴۰۱

چکیده

قدمت فناوری به اندازه حیات آدمی است. انسان هنگامی که آموخت چگونه از مواد و مصالح و پدیده‌های طبیعی استفاده کند شروع به ساخت ابزار و سرپناه کرد. جهان کنونی پس از گذشت چندین دوره تأثیرگذار همچون عصر کشاورزی، عصر صنعت و عصر دیجیتال، وارد عرصه اطلاعات می‌شود. این عصر زاییدهٔ هوش مصنوعی و ارتباطات همگانی است که موجب تغییراتی ریشه‌ای در حوزه‌های مختلف انسانی از جمله طراحی و ساخت فضاهای زندگی او شده است. یکی از این تغییرات همگانی شدن فناوری‌های جدید ساخت افزایشی و پیدایش انواع خانه‌های نوین مردمی است. این مقاله با روشی کیفی و تحلیلی و بر پایه استفاده از اسناد و منابع مربوطه، به شرح تحولات فناوری در دهه‌های اخیر پرداخته و جایگاه تازه‌ترین ابزارهای طراحی و ساخت، همچون همتاسازها را در فرایند تکامل معماری بررسی می‌کند. مباحث مطرح شده چشم‌اندازی بر آینده معمار و معماری را ترسیم کرده و پیامدهای احتمالی این تحولات بر ساختار ساختمان‌ها و شهرها را تبیین می‌کند. مستندات موجود نشان می‌دهد که اگر روش‌های جدید طراحی و ساخت، بخصوص همتاسازی در معماری، همه‌گیر شوند، آن‌وقت مسئله طراحی، مباحث مربوط به معماری، شهرسازی و حتی معادلات اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و سیاسی جوامع دچار تغییرات قابل توجهی خواهند شد. لذا استفاده از این فناوری نوین نیازمند نظریه‌پردازی و دوراندیشی‌های هدفمندی است که بتوانند این تیغ دولبه را مهار نمایند.

کلیدواژگان: معماری، ساخت افزایشی، چاپ سه‌بعدی، ساخت دیجیتال، هوش مصنوعی.

* دانشجوی دکتری معماری محاسباتی، دانشگاه ملکه پاریس ، ایل دو فرانس، فرانسه.
گروه طراحی دانشکده پونتس پاریس تک، منطقه پاریس، فرانسه.
** استادیار دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسندهٔ مسئول).
Email: y.islami@ut.ac.ir

مقدمه

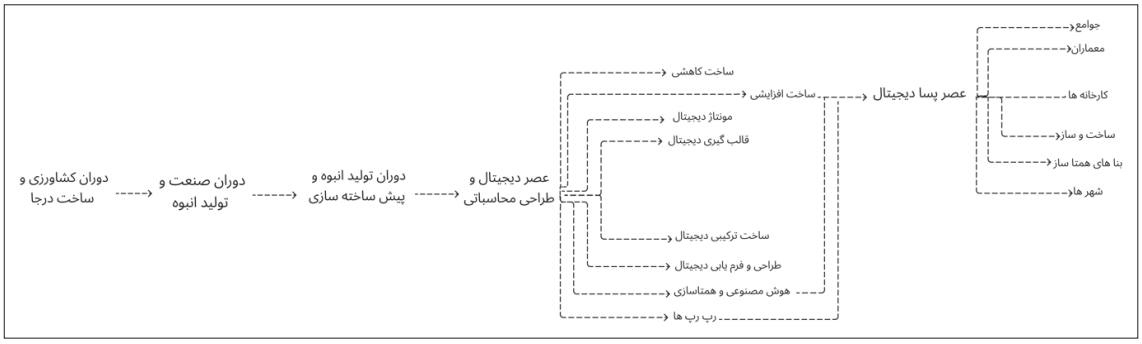
در طول تاریخ تمدن بشری، روند تکامل علم همواره متأثر از عوامل گوناگون بوده است. از دو قرن پیش، مستندسازی و بازخوانی تاریخ علم توانسته است با ثبت و نگارش موفقیت‌های حاصل‌شده، به برنامه‌ریزی، پیش‌بینی و گمانه‌زنی درباره آینده بپردازد. به‌عنوان‌مثال، بسیاری از تحولات اخیر مدیون آینده‌نگری مهندسان، هنرمندان و دانشمندان پیشگامی همچون سانت الیا[1] است که با ترسیم تصاویری از شهرهای آینده، سبک‌ها و رویکردهای جدید معماری و شهرسازی را مشخص کرده‌اند. این فرایند توسط هنرمندان فعال در عرصه سینما و رسانه نیز دنبال شده است. به‌عنوان‌مثال آثاری نظیر فیلم‌های *جنگ ستارگان*[2] (۱۹۸۰)، بلید رانر[3] (۱۹۸۲) و *ادیسه فضایی*[4] (۱۹۸۶) توانسته‌اند در پیش‌بینی وقایع و جهت‌دهی به تخیل و خلاقیت جامعه بسیار تأثیرگذار باشند. چنین آثار هنری نشان می‌دهند که چطور فناوری می‌تواند بر زندگی بشر تأثیر گذارد و به همین دلیل، تا چه حد بررسی گذشته و آینده این پدیده می‌تواند امری ضروری باشد. در این میان، معماری جایگاه بسیار مهمی پیدا می‌کند، چراکه عامل اصلی خلق فضاهای انسانی است و همواره ارتباط نزدیکی با توسعه و پیشرفت فناوری داشته است.

معماری هر دوران، ویژگی‌های فرمی، فضایی و کیفیت‌های زیباشناختی خود را دارد. این ویژگی‌ها با تأثیرپذیری مستقیم از روش‌ها و فناوری‌های ساخت موجود در هر زمان بوده‌اند. می‌تواند ادعا کرد که «معماری پس از قرن بیستم متأثر از فضای عدم قطعیت‌ها و تغییرهاست» (خبازی، ۱۳۹۱) که این خود مستلزم فناوری ساختی است که توان اعمال این تغییرات در مقیاس کلان را داشته باشد. ابزارهای ساخت دیجیتال این توانایی را در اختیار معماران قرار می‌دهند تا با سرعت تغییرات همراه شوند و پاسخ‌های مناسب‌تری برای عصر حاضر تدوین کنند.

این مقاله روند پیشرفت فناوری و تأثیر آن بر فرایند طراحی معماری را پیگیری می‌کند و در این مسیر، به آخرین ابزارهای هوشمند ساخت، مانند سامانه‌های ساخت سه‌بعدی، ازجمله رِپ‌رَپ[5]ها توجه شده است. فرضیه اصلی آن است که با توجه به‌سرعت پیشرفت فناوری ساخت افزایشی و فراگیر شدن آن، در آینده‌ای نه‌چندان دور، تغییرات بنیادی در معماری و دیگر حوزه‌های فرایند تولید فضاهای انسانی به وجود خواهد آمد. سؤال اصلی این تحقیق آن است که با توجه به‌سرعت پیشرفت تکنولوژی ساخت افزایشی و همه‌گیرشدهٔ آن، آینده ساخت‌وساز معماری به کدام سو خواهد رفت و در صورت ادغام قابلیت‌های فناوری ساخت افزایشی با هوش مصنوعی، ساختمان‌های آینده چه خصوصیاتی خواهند داشت و در نهایت نقش معماران به عنوان جهت دهندگان اصلی به فرایند ساخت معماری دستخوش چه تغییراتی خواهد شد؟ اغلب پژوهش‌ها در حوزه ساخت دیجیتال، به‌ویژه ساخت سه‌بعدی در صنعت ساختمان، به مباحث تکنیکی و فنی این موضوع پرداخته‌اند و کمتر به مبانی نظری و بررسی جایگاه این ابزار در تکامل معماری توجه شده است. لذا پژوهش حاضر تأکید بیشتری به تحلیل و تفسیر اطلاعات موجود در این حوزه می‌پردازد تا دورنمایی از آینده این مباحث در معماری و تأثیر نتایج آن بر جامعه و سبک زندگی بشری را ترسیم کند.

روش تحقیق

این مقاله از نوع تحلیلی ـ تاریخی در دو بخش کلی تنظیم شده



تصویر ۱. ساختار مطالب مقاله (تدوین: نگارندگان).

است. بخش اول روند پیشرفت فناوری ساخت را مطرح کرده و به تحلیل تأثیر آن بر معماری و ویژگی‌های زمانه خود می‌پردازد که در آن از روش اسنادی و با اتکا به ابزار جمع‌آوری مطالب بر پایه مطالعات کتابخانه‌ای استفاده شده است. در بخش دوم، با بررسی روند ظهور و پیشرفت چاپگرهای سه‌بعدی، به بررسی آخرین سامانه‌های ساخت سه‌بعدی در صنعت ساختمان و رِپ رَپ‌ها به عنوان پدیده‌ای نوین و تأثیرگذار در معماری پرداخته شده است. در پایان، با تحلیلی از نقاط ضعف و قدرت تکنولوژی ساخت افزایشی به پردازش این اطلاعات جهت تبیین و تفسیر آینده فناوری‌های ساخت و ترسیم دورنمای معماری و مسائل اجتماعی و در نهایت جایگاه طراح و معمار در آینده پرداخته شده است.

تکامل فناوری و معماری در گذر زمان

با نگاهی بر تاریخ تمدن بشر می‌توان دریافت که تحولات معماری در طول زمان ناشی از دگرگونی‌های بینشی انسان و پیشرفت در فناوری بوده است. اما سرعت پیشرفت این دو جریان همواره نسبت‌های متفاوتی را تجربه نموده است. تا پیش از انقلاب صنعتی، سرعت تحولات فناوری پایین‌تر از سرعت دگرگونی‌های بینشی و اندیشه انسان بوده است. اما پس از این سرعت پیشرفت فناوری بوده که از تحولات نظری پیشی می‌گیرد (وفامهر، ۱۳۹۰). به همین دلیل تحقق بسیاری از تحولات در معماری و پیدایش سبک‌هایی مانند دیکانستراکشن[۶] و فولدینگ[۷] که زاییده اندیشه‌های فیلسوفانی مانند ژیل دلوز[۸] و ژاک دریدا[۹] می‌باشد، مدیون پیشرفت فناوری‌های مختلف بوده‌اند.

کوچ‌نشینی، کشاورزی و ساخت درجا[۱۰]

برای درک سیر تکامل معماری در تعامل با فناوری، باید از سرپناه‌ها و کلبه‌های اولیه آغاز نمود. در آن زمان، انسان با استفاده از مواد و مصالح موجود در اطراف خود شروع به ساخت پناهگاه، سرپناه و یا بناهای اولیه‌ای کرد که او را از عوامل محیطی در امان نگه می‌داشت. این فضاهای اولیه با سنگ، خاک، شاخ و برگ گیاهان و یا پوست حیوانات تعریف می‌شدند. پس از تولید ابزارآلات پیشرفته‌تر انسان توانست مواد و مصالح اطراف خود را بهتر مدیریت کند. به‌عنوان‌مثال او توانست درختان را قطع کند و آنها را تبدیل به الوار برای ساخت اسکلت کلبه‌های اولیه کند. البته طبق نظریه دیگر که توسط گادفرید سمپر[۱۱] مطرح شده است، شروع معماری را می‌توان مربوط به تولید بافته‌ها، پارچه‌ها و فرش‌هایی کرد که مسئولیت تشکیل خانه‌های اولیه کوچ‌نشینان را بر عهده داشتند – به‌عبارت‌دیگر فناوری تولید پوسته‌های فضاساز، و نه سازه‌های فضاکار (Isla-mi, 2009).

پس از این دوران اولیه، در عصر کشاورزی یا دوران نوسنگی[۱۲] ، انسان‌ها شروع به کشاورزی و اهلی کردن دام کردند و یکجانشینی و پیدایش روستاها اتفاق افتاد، بدان معنا که انسان شکارچی و متحرک به انسان کشاورز و ساکن تبدیل شد. یکجانشینی نیازمند توسعه بناهای مستحکم‌تری بود (آذرنگ، ۱۳۹۰) و در این دوران تقریباً تمامی جنبه‌های زندگی روزانه انسان، از پخت غذا تا چگونگی ارتباط با همسایگان می‌بایست از نو تعریف می‌شد؛ اما اساسی‌ترین تغییرات مربوط به ساخت خانه بود (فاستر مک‌کارتر، ۱۳۹۰). قابلیت کار با فلزات و آهن از مهم‌ترین عوامل فناوری آن زمان بودند که باعث توسعه روش ساخت در جا شدند (هارتمن، ۱۳۸۰).

انقلاب صنعتی و تولید انبوه

انقلاب صنعتی را می‌توان به سال‌های بین ۱۷۶۰ تا ۱۸۳۰ میلادی نسبت داد. در این دوران، اختراع ابزارهای مختلف تولیدات دستی را به تولیدات ماشینی تبدیل کرد. از جمله تحولات مهم در فناوری آن دوران می‌توان به ماشین بخار که توسط توماس نیو کامن[۱۳] اختراع شد اشاره کرد. انقلاب صنعتی هم‌زمان با توسعه رفاه در جامعه موجب افزایش بی‌سابقه جمعیت شد و بسیاری از آزادی‌های انسان را از وی صلب کرد. تاریکی و سیاهی دوران صنعتی شدن اروپا را می‌توان در نوشته‌های چارلز دیکنز[۱۴] یافت. بااین‌حال به گفتهٔ گادفری آرمیتاژ[۱۵]«انقلاب صنعتی زاییده اختراعات کسانی بود که *نه از نیمه خدایان بودند و نه از قهرمانان، بل نوآورانی سخت‌کوش از تبار انسان، بخت یارانی که هوای موافق را برای رویاندن گیاهان برگزیدند*» (اشتن، ۱۳۸۴). تولید انبوه نیز ریشه در صنعت پارچه انگلستان داشت که تولید و ساخت را در آن دوره متحول کرد. اختراع دستگاه‌هایی چون شاتل پرنده[۱۶] توسط جان کی[۱۷] این امکان را فراهم کرد تا پارچه‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر و به صورت مکانیزه تولید شود (G. Bamber).

معماری مدرن نیز ریشه در انقلاب صنعتی داشت. معماری

مدرن در اواخر قرن نوزدهم ظهور یافت تا توانمندی‌های انقلاب صنعتی را با نگرشی آرمانی نسبت به جامعه منطبق سازد. مدرنیسم در معماری منجر به مطرح شدن دو بحث انقلابی **تولید انبوه** و **پیش‌ساخته‌سازی** در حوزه معماری و ساختمان شد. مبحث تولید انبوه از صنایعی چون خودروسازی نشأت گرفته بود و به‌سرعت به معماری نیز سرایت کرد و اجازه داد تا یک بنا مانند یک محصول کارخانه‌ای، به صورت انبوه و آن هم به شکل قطعات جدا، ساخته و در محل احداث سر هم گردد. لوکوربوزیه در کتاب به سوی معماری جدید، شور و اشتیاق معماری تولید انبوه شده و صنعتی را این‌چنین بیان می‌کند:

«زمان بزرگ فرا رسیده. روحیه‌ای جدید وجود دارد. صنعت ما را همچون سیلی که به مقصد حرکت می‌کند در بر می‌گیرد. صنعت ما را به ابزار جدید و مطابق روز مسلح کرده است. قوانین اقتصادی به‌طور ناگزیر، رفتار و طرز فکر ما را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مشکل خانه مشکل این زمانه است. تولید انبوه بر اساس آنالیز و تجربه است. صنعت باید ساختمان‌ها در مقیاس بزرگ در بر گیرد و تولید اجزای ساختمان‌ها را بر اساس تولید صنعتی و انبوه مقرر سازد. ما باید روحیه انبوه‌سازی را برقرار کنیم؛ روحیه ساخت انبوه ساختمان‌ها را برقرار سازیم؛ روحیه زندگی کردن در ساختمان‌های تولید انبوه شده را رواج دهیم. ما باید در ذهن و قلبمان تمام مفاهیم منسوخ شده در مورد خانه را به فراموشی بسپاریم و به صورت مسئله خانه از نقطه‌نظری اساسی و هدف‌گرا بنگریم. می‌بایست به مفهوم خانه–ماشین برسیم. خانه‌های تولید انبوه شده زیبا و سالم هستند؛ زیبا همانند تمام ابزارهای کاربردی اطرافمان که ما را در زندگی همراهی می‌کنند. این خانه‌ها همچنان زیبا هستند با تمام روح بخشی‌ای که احساسات یک هنرمند می‌تواند به اجزای بی‌روح و خشک و صرفاً کاربردی ببخشد» (Corbusier, 2013).

از تولید انبوه[۱۸] تا پیش‌ساخته‌سازی[۱۹]

شور و شوق معماری برای پیش‌ساخته‌سازی خانه‌ها در سال ۱۹۴۰ شروع شد و این باور به وجود آمد که در سال‌های نه‌چندان دور همه خانه‌ها در خط تولید ساخته خواهند شد و همانند اتومبیل، از کارخانه‌ها به محل نهایی خود انتقال داده خواهند شد. با اینکه این تصور در آن زمان محقق نشد، ولی مفهوم و آرمان خط تولید برای ساختمان، معماران و دیگر دست‌اندرکاران را مجذوب خود کرد. در آن زمان باور بر این بود که قابلیت و ارزش خانه‌های پیش‌ساخته در همه‌گیر بودن آنها است چراکه معماری مدرن گران‌قیمت بود و از مزایای تولیدات صنعتی کمتر بهره می‌برد. چالش برای کاهش قیمت **پیش‌ساخته‌سازی** سبب شد اجزایی با **تولید انبوه** روانه بازار شود تا خانه‌هایی نسبتاً ارزان برای مردم عادی فراهم کند. پیش‌ساخته‌سازی در معماری تأکید بر دانش معماران از تولید، توزیع، بازاریابی، روش‌های ساخت‌وساز و در آخر فناوری سبک و قابل جابه‌جایی بودن داشت و علاقه وافر به بناهای پرمدعا (معماری تجملاتی) را به سخره می‌گرفت. باور بر آن بود که اگر معماری بتواند در تجارت پیش‌ساخته‌سازی موفق باشد، آنگاه می‌تواند تأثیر از بین رفته خود را دوباره احیا کند و تأثیر واقعی بر محیط ساخته شده داشته باشد (Davies, 2005).

عصر دیجیتال و طراحی محاسباتی

دوران اخیر به عصر دیجیتال مشهور است. در این دوران، گذاری از صنعت بر پایه ابزارآلات مکانیکی به صنعت بر پایه ابزار دیجیتال و فناوری کنترل داده‌ها و ارتباطات شکل گرفته است. معماری نیز از این تحولات در امان نبوده است. امروزه، داده‌ها در طراحی معماری و ساخت بناها به‌گونه‌ای متفاوت و بسیار پررنگ‌تر از قبل نقش ایفا می‌کنند. جهان در عصر اطلاعات و ارتباطات، زمان زیادی برای کشف و شهود و حلول خلاقیت در ذهن معمار ندارد و پیشنهادها وی می‌بایست تبدیل به اطلاعاتی قابل اندازه‌گیری و ارزیابی شود. در این فرایند، فناوری پیشرفته، به‌عنوان‌مثال کامپیوتر یا روبات‌ها، در تولید معماری ایفای نقش می‌کنند.

معماری این دوران، داده محور و پارامتریک می‌گردد به‌طوری‌که کوچک‌ترین جزئیات می‌تواند به‌سرعت طراحی و اندازه‌گیری شود. در این دوران، تأکید از روی محصول طراحی شده بر روند طراحی محصول تغییر پیدا می‌کند. تغییر و دگرگونی سریع، که یکی از ویژگی‌های دوران معاصر است، در فرایند طراحی معماری تأثیر گذاشته و پارامترهای متعدد را مدیریت می‌کند. دستگاه‌های ساخت دیجیتال امکان آن را فراهم کرده‌اند تا با دستور گرفتن از کامپیوترها، قطعاتی را با شکل‌های مختلف و به‌طور انبوه تولید کنند. حضور انسان به عنوان کنترل‌کنندهٔ این سیستم‌ها همچنان اجباری است و به هر میزان پارامترها بیشتر باشند این دگرگونی‌ها وسیع‌تر و کنترل و مدیریت آنها سخت‌تر خواهد بود. حتی ساخت به روش

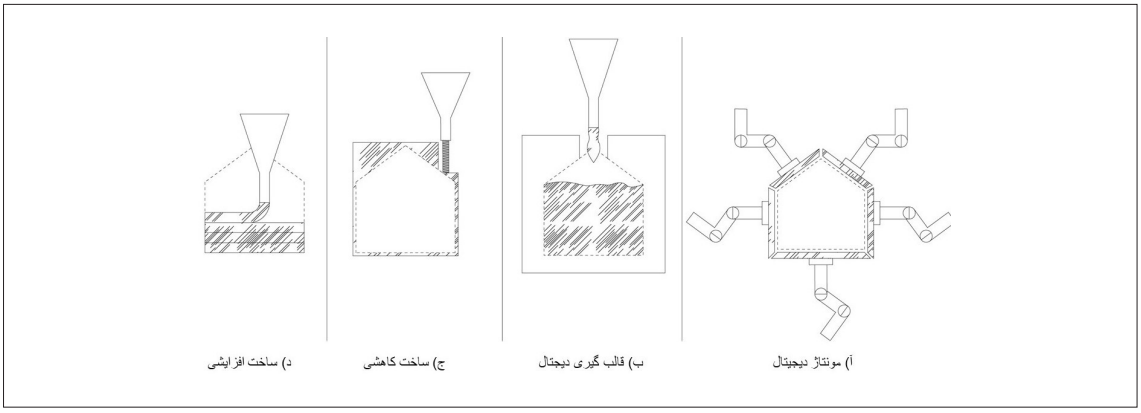
غیر پارامتریک نیز توسط تکنولوژی ساخت دیجیتال توجیه‌پذیر است و موجب کسر تعداد وسیعی از ماشین‌آلات صنعتی و غیر منعطف عصر صنعت و بسیاری از نیروهای انسانی کارگر می‌شود و هم‌زمان با آن دقت و راندمان ساخت‌وساز را چندین برابر افزایش می‌دهند.

روش‌های ساخت دیجیتال

یکی از ویژگی‌ها مهم دوران معاصر تکثر روش‌های جدید ساخت است. روش‌های ساخت دیجیتال را می‌توان به پنج دسته ساخت افزایشی[۲۰]، کاهشی[۲۱]، قالب‌گیری دیجیتال[۲۲]، مونتاژ دیجیتال[۲۳] و ساخت ترکیبی دسته‌بندی کرد. روش **ساخت افزایشی** به روشی گفته می‌شود که در آن سازه با تجمع مصالح ساخته شود؛ به‌طور مثل ساخت یک دیوار گلی توسط مخلوط خاک و آب، ساخت به روش افزایشی است. در ساخت دیجیتال، ساخت افزایشی عمدتاً به ساخت توسط چاپگرهای سه‌بعدی اطلاق می‌شود. چاپگرهای سه‌بعدی قادر هستند تا سازه‌هایی را توسط مواد نیمه‌سیال به صورت لایه‌لایه بسازند. **ساخت کاهشی** به روش حکاکی یا تراشیدن ماده جامد برای ساخت سازه‌ها اطلاق می‌شود. از جمله مثال‌های ساخت کاهشی دیجیتال می‌توان به حکاکی و تراشیدن چوب توسط ماشین‌های سی.ان.سی و یا تراشیدن فوم توسط سیم‌های داغ به وسیله بازوهای رباتیک اشاره کرد. ساخت به روش **قالب‌گیری دیجیتال** به‌نوعی از ساخت گفته می‌شود که در آن سازه‌ها یا اجزای سازنده سازه‌ها توسط قالب‌های دینامیک و یا قالب‌هایی که خود توسط روش‌های دیجیتال ساخته شده‌اند به وجود می‌آیند. از جمله پروژه‌های ساخته شده به این روش می‌توان به ساخت ستون‌های بتنی در مقاله (Lloret-Fritschi et al,. 2022) اشاره کرد. ساخت به روش مونتاژ دیجیتال به روشی گفته می‌شود که در آن اجزای یک سازه توسط ماشین‌های ساخت دیجیتال همچون بازوهای رباتیک مونتاژ شده باشند. سازه‌های پوسته مشبک[۲۴] می‌تواند به این روش ساخته شوند. از نمونه سازه‌های ساخته شده به این روش می‌توان به پروژه ساخت طاق شیشه‌ای توسط دو بازوی رباتیک در مقاله (Bruun et al,. 2021) اشاره داشت. نوع دیگری از ساخت دیجیتال به نام **ساخت ترکیبی** موجود است که در آن سازه توسط ترکیب دو یا چند روش ساخت دیجیتال ساخته شود. به‌طور مثال در ساخت پروژه دیوار مرکب[۲۵] از سه روش ساخت دیجیتال افزایشی و ساخت دیجیتال کاهشی و قالب‌گیری دیجیتال استفاده شده است (Duballet et al. 2020).

از فرم سازی تا فرم یابی[۲۶]

یکی دیگر از ویژگی‌های دوران معاصر این است که ابزارهای جدید، سرعت و دقت فرایند طراحی را بیشتر کرده و درنتیجه امکان انتخاب از گزینه‌های متعدد فراهم شده است. به‌عبارت‌دیگر، پیشرفت‌های حاصل‌شده در حوزه‌های تصویرسازی کامپیوتر[۲۷] و هندسه محاسباتی[۲۸] و پیدایش نرم‌افزارهای طراحی سه‌بعدی و محاسباتی این امکان را فراهم آورده‌اند تا مهندسان و طراحان بتوانند توسط اهداف مشخص پروژه، فرم‌های بهینه[۲۹] را توسط فرایندهای سفارشی شده[۳۰] به صورت اتوماتیک خلق کنند. به‌عنوان‌مثال فرم یابی به روش تراکم نیرو[۳۱] که یک روش



تصویر ۲. روش‌های ساخت دیجیتال (تدوین: نگارندگان).

کلاسیک فرم یابی برای سازه‌های تماماً کششی یا تماماً فشاری است، امروزه توسط محیط‌های نرم‌افزاری کاربرپسند[۳۲] در اختیار طراحان قرار دارد. طراحی سازه‌های فشاری و کششی پیش‌ازاین توسط مهندسانی همچون آنتونی گائودی و فرای اوتو به روش مدل‌سازی فیزیکی توسط شبکه زنجیرهای آویزان شده [۳۳] انجام می‌شد. نرم‌افزارهای طراحی محاسباتی امکان ارتباط مستقیم با سخت‌افزارهای ساخت دیجیتال همچون بازوهای رباتیک و سی.ان.سی‌ها رو فراهم می‌آورند.

از سفارشی‌سازی انبوه تا ساخت جزء محور

فناوری‌های نوین تولید انبوه را به سفارشی‌سازی انبوه ارتقا داده‌اند. **سفارشی‌سازی انبوه**[۳۴] عبارت است از استفاده از تکنولوژی ساخت منعطف بر مبنای کامپیوتر یا به عبارتی، ساخت با دستگاه‌های دیجیتال برای تولید سریع و انبوه کالاهای سفارشی و خصوصی‌سازی شده. این سیستم‌ها هزینه پایین تولید به روش انبوه را با انعطاف‌پذیری خصوصی‌سازی ترکیب کرده و سفارشی‌سازی انبوه را به وجود می‌آورند. به بیانی دیگر سفارشی‌سازی انبوه توانایی تولید انبوه محصولاتی است که برای مشتریان جداگانه طراحی شده اند (Da Silvei-ra, Borenstein, and Fogliatto 2001). سفارشی‌سازی انبوه با فراهم کردن امکان تولید قطعات متشابه با استفاده از دستگاه‌های ساخت دیجیتال ای ایده را مطرح کرد که شاید بتوان معماری را (که در تولید انبوه موفق نبود)، به سمت تولید انبوه سفارشی شده هدایت کرد.

یکی دیگر از دستاوردهای تکامل فناوری ساخت قطعات پیچیده توسط ساخت سریع قطعات ساده ولی متفاوت است. **ساخت جزءمحور**[۳۵] را می‌توان ملهم از ساخت نرم‌افزارها در کامپیوتر دانست[۳۶]. بدین معنا که در دنیای نرم‌افزارها بسیاری از برنامه‌های ترکیبی از تجمیع چندین نرم‌افزار پایه برای ساخت نرم‌افزاری کامل‌تر استفاده می‌شود. به دلیل محدود بودن اندازه دستگاه‌های ساخت دیجیتال، اغلب ساخت دیجیتال در حوزه معماری به روش ساخت جزء محور صورت می‌گیرد. به‌عنوان‌مثال، این روش می‌تواند در ساخت صفحات پیچیده و منحنی که با دستگاه‌های ساخت دیجیتال تولید می‌شوند مورد استفاده قرار گیرد به صورتی که این صفحات توسط نرم‌افزار طراحی به اجزاء کوچک‌تر تقسیم می‌شود و از ترکیب این اجزای ریز که اغلب با اتصالات غیر چسبی و به صورت خشک صورت می‌گیرد، امکان ساخت سازه‌ها و صفحات پیچیده را فراهم می‌آورند. از نقطه‌نظر دیگر این روش از ساخت را می‌توان روش مترقی پیش‌ساخته‌سازی دانست که در عصر دیجیتال صورت می‌گیرد.

ساخت افزایشی و همتاسازها[۳۷]

درباره ساخت افزایشی

هرچند ساخت افزایشی را می‌توان به ساخت دیواری اجری توسط مدول‌های آجر اطلاق کرد (Horvath, 2014)، مفهوم مرسوم آن در تولیدات صنعتی در دههٔ ۱۹۸۰میلادی ظهور پیدا کرد. توسط این روش احجام به صورت لایه‌لایه تولید می‌شوند. قبل از آن روش ساخت کاهشی روش مرسوم تولید اجسام در صنعت بود. در این زمان ساخت افزایشی جز در تولید قطعات الکترونیک و میکروچیپ‌ها، در صنعت‌های دیگر مرسوم نبود. از آن زمان تا کنون بیش از سه هزار ثبت اختراع در زمینه ساخت افزایشی تنها در ایالات متحده به گزارش رسیده است. در اینجا به سه مورد از تأثیرگذارترین آنها اشاره می‌شود.

یکی از اولین نمونه‌های چاپگرهای سه‌بعدی توسط چارلز هال[۳۸] در سال ۱۹۸۴ به ثبت اختراع رسید. این چاپگر از روش استریولیتوگرافی[۳۹] استفاده می‌کرد. در این روش ماده مایع پلیمری توسط نازل به صورت لایه‌ای رسوب‌گذاری می‌شود و سپس تحت تابش نور فرابنفش تبدیل به لایه جامد می‌شود. این روند لایه‌لایه تکرار می‌شود تا حجم مورد نظر ساخته شود. روش دیگری از ساخت افزایشی در دانشگاه تگزاس به نام روش گداز گزینشی[۴۰] اختراع شد. در این روش مواد خام در حالت پودر به صورت لایه‌های صفحه‌ای در صفحه چاپگر رسوب‌گذاری می‌شود و سپس توسط اشعه لیزر از درون نازل چاپگر بر روی قسمت‌های مورد نظر لایه پودری تابیده می‌شود تا لایه جسم جامد از طریق گداختن ماده خام پودری به وجود آید.

در اواخر دههٔ ۱۹۸۰، سی.اس.کرامپ[۴۱] ، مدل‌سازی به روش رسوب‌گذاری مواد مذاب[۴۲] را ابداع کرد و در نهایت در سال ۱۹۹۲ میلادی به ثبت رساند. در روش او، ماده پلاستیکی در نازل چاپگر در درجه حرارت معین به حالت مذاب تبدیل می‌شود و سپس توسط نازل بر روی صفحه کار چاپگر سه‌بعدی رسوب‌گذاری می‌شود؛ سپس در مدت‌زمان کوتاهی پس از تماس با باد تولید شده در داخل چاپگر، به حالت جامد برمی‌گردد و لایه جسم جامد را شکل می‌دهد (Savini and Savini, 2015). تا اوایل سال ۲۰۰۰ تولید چاپگرهای سه‌بعدی هزینه

بالایی داشت و تنها در صنعت برای ساخت مدل‌های آزمایشی مورد استفاده قرار می‌گرفتند. به لطف پروژه ساخت رپ‌رپ در سال ۲۰۰۵، امروزه هزینه ساخت چاپگرهای سه‌بعدی به حداقل میزان خود از آغاز پیدایش چاپگرهای سه‌بعدی رسیده است و تهیه این چاپگرهای سه‌بعدی را برای افراد عادی بسیار امکان‌پذیر کرده است.

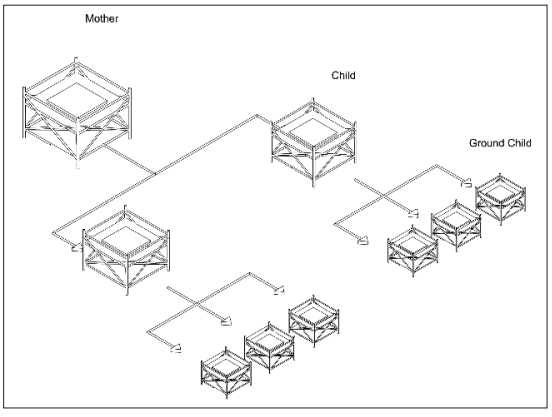
تکنولوژی ساخت افزایشی به‌سرعت در حال گسترش و همگانی شدن است. تا دههٔ گذشته، ساخت افزایشی در بسیاری از صنعت‌ها مانند پزشکی، طراحی صنعتی، خودروسازی، هوافضا و غیره مورد استفاده قرار گرفته بود. برخلاف صنایع ذکر شده، صنعت ساختمان در بهره بردن و بکار گرفتن مزایای ساخت افزایشی بسیار کند عمل کرده است. در معماری تا پیش از دهه قبل، ساخت افزایشی توسط چاپگرهای سه‌بعدی تنها برای ساخت اشیای تزئینی و یا ساخت ماکت به عنوان مکمل مدارک طراحی مورد استفاده قرار گرفته بود. در چند سال اخیر، با ظهور چاپگرهای سه‌بعدی در ابعاد معماری، صنعت ساختمان‌سازی در مرحله گذار از سیستم‌های ساخت سنتی و بازیابی جایگاه خود در میان دیگر صنایع است.

از دههٔ گذشته تا کنون از تکنولوژی‌هایی مانند بازوهای رباتیک[۴۳]، جرثقیل‌های دروازه‌ای[۴۴]، جرثقیل‌های مدور و ربات‌های کابلی[۴۵] در چاپ سه‌بعدی ساختمان‌ها استفاده شده است. حوزه چاپ سه‌بعدی در صنعت ساختمان‌سازی یک حوزه چند رشته‌ای است. از جمله علوم مرتبط در این زمینه می‌توان به معماری، مهندسی مواد، مهندسی مکانیک جامدات و مواد نیمه سیال، مهندسی کامپیوتر و رباتیک اشاره کرد. از نظر مصالح مورد استفاده، سیمان از جمله رایج‌ترین مواد مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی ساختمان‌ها است. تحقیقات در زمینه کنترل خواص مواد سیمانی در فرایند چاپ سه‌بعدی بسیار گسترده است. محققان به صورت گسترده در حال بررسی مواد جدید و جایگزین سیمان در چاپ سه‌بعدی ساختمان‌ها هستند. در چند سال اخیر با الهام از معماری بومی ایران و مناطق کویری محققان روش‌های چاپ سه‌بعدی طاق‌های فشاری گلی بدون نیاز به قالب و سازه‌های نگه‌دارنده را به وجود آورده‌اند. این روش‌ها قابلیت ادغام معماری بومی ایرانی با ساخت دیجیتال تمام‌اتوماتیک را دارد. سه پژوهش (Motamedi, Mesnil, 2020) و (Motamedi, Mesnil, et al., 2020) و (Oval, Baverel 2020) به بررسی امکان چاپ سه‌بعدی سازه‌های گلی به روش طاق‌های ایرانی را پیگیری کرده‌اند.

مفهوم ماشین‌های خودتکثیرشونده (همتاسازها)

همتاسازی یک مفهوم عمومی است که می‌تواند سامانه‌هایی با ماهیت مختلف اعم از سامانه‌های فیزیکی یا تئوریک را با ابعاد میکروسکوپیک و یا ماکروسکوپیک در برگیرد. مفهوم همتاسازی مربوط به وجود مکانیزمی داخلی درون سامانه است که توانایی تولید همتایی مشابه سامانه مادر را داشته باشد. سپس سامانه فرزند تمام قابلیت‌های سامانه مادر ازجمله قابلیت بازتولید مشابه خود را داشته باشد. سامانه همتاساز کمینه‌گرا سامانه‌ای است که جز بازتولید خود، قابلیت دیگری ندارد. سامانه‌های همتاساز پیشرفته‌تر قابلیت‌هایی افزون بر بازتولید سازی دارند. مفهوم همتاسازی در این مقاله مربوط به همتاسازی زندگی مصنوعی[۴۶] است.

در گذشته، ابزارهای انسان‌ساز و ماشین‌ها، کوچک‌ترین شباهتی به موجودات زنده نداشتند و هیچ اشتراکی بین آنها و موجودات زنده نبود. اما به مرور زمان انسان از طبیعت الهام گرفت و ابزارها و ماشین‌ها کم‌کم به صورت ابتدایی از برخی از ویژگی‌های موجودات زنده الگوبرداری کردند. در قرن‌های ۱۷ و ۱۸ میلادی نیز اولین تلاش موفق در زمینه ساخت اتوماتیک دیده شد. برای مثال اردک وکنسون در سال ۱۷۳۹ توسط ژاک وکنسون[۴۷] (۱۷۸۲-۱۷۰۹) ساخته شد. وکنسون با تأثیرپذیری از فلسفه بیومکانیکی دکارت این اردک را ساخت (Giavitto,



تصویر ۳. سامانه‌های همتاساز به تقلید از موجودات طبیعی، در حال زاد و ولد و تکثیر. (مأخذ: نگارندگان)

Jean-louis, 2011). این اردکْ بالغ بر هزار قطعه متحرک داشت و قابلیت خوردن، آشامیدن، مدفوع کردن، صدای اردک را تقلید کردن، اردکان راه رفتن و تکان دادن بال‌های خود را داشت (Mazlish, 1993). این پیشرفت‌ها امکان تخصیص ویژگی‌های موجودات زنده و حتی شاید امکان تولید مثل را به فرم‌های مکانیکی افزایش داد.

ماشین خودتولیدکننده یا همتاساز نوعی از ربات خودمختار است که قابلیت بازتولید خود را توسط مواد خام به‌دست‌آمده از محیط اطراف و به صورت خویش‌فرما دارد. در بحث همتاسازی باید به دو مفهوم مجزای **همانندسازی**[۴۸] و **تولید مثل**[۴۹] توجه داشت. همانندسازی یک عمل آنتوژنتیک است که فرایندی رشدی است و شامل عملگر ژنتیک نیست. این عمل در نهایت منجر به بازتولید نمونه‌ای کاملاً یکسان با نمونه مادر می‌شود. از سوی دیگر تولید مثل یک عمل فیلوژنتیک است که فرایندی تکاملی است و شامل عملگرهای ژنتیک همانند جهش و تقاطع است. این عمل در نهایت منجر به تکامل و تنوع می‌شود. این عمل بسیار پیچیده‌تر از همانندسازی است (Sipper, 2006).

تا کنون مفهوم همتاسازی در دو رشته **همتاسازی سلولی**[۵۰] و **همتاسازی حرکتی**[۵۱] مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. همتاسازی سلولی مربوط به همتاسازی صرفاً اطلاعاتی است. از نمونه‌های همتاسازی سلولی می‌توان به کرم‌ها و ویروس‌های نرم‌افزاری اشاره کرد که قابلیت بازتولید نمونه مشابه خود و تکثیر در فضای اطلاعاتی را دارند. نمونه دیگر همتاسازی سلولی بازی‌های رایانه‌ای هستند که قابلیت تولید دو برنامه را دارند که با هم به نبرد می‌پردازند و در نهایت یک برنامه بر دیگری غالب می‌شود (Plasson, 2011). همتاسازی حرکتی مربوط به همتاسازی در حوزه فیزیکی ـ ماشینی است. این رشته از همتاسازی به بررسی ماشین‌هایی که توانایی ساخت ماشین‌های دیگر مشابه خود را دارند می‌پردازد.

همتاسازی یک مشخصه است، هرچند دیگر یک حوزه منحصربه‌فرد در سیستم‌های زنده نیست. همچنان توسط برخی افراد این مسئله مطرح می‌شود که هیچ ماشینی این قدرت و ویژگی را ندارد که تولید مثل کند؛ حتی در پایین‌ترین سطح ممکن و یا اینکه در مراتب بسیار پایین‌تر جزئی خودترکیب‌کننده هرگز در هیچ درجه‌ای قابل دستیابی نیست؛ برخلاف نظریات آنها همتاسازی به عنوان خصوصیت ساده مکانیکی در سال ۱۹۵۰ به دست آمد. اکنون همتاسازهای خودکار در مقیاس بزرگ که بر پایه قطعاتی مانند لِگو[۵۲] هستند در آزمایشگاه‌ها بکار گرفته شدند. نرم‌افزارهای همتاساز مصنوعی، ابتدا در سال ۱۹۶۰ ظاهر شدند و سپس در دهه‌های بعد به‌سرعت در غالب کرم‌ها، ویروس‌ها و برنامه‌های زندگی مصنوعی در محیط‌های دوستانه و کدگذاری شدهٔ مجازی همانند کامپیوتر و اینترنت تکثیر پیدا کردند.

در حال حاضر فناوری ساخت سخت‌افزارهای همتاساز مصنوعی موجود است. گواه این ادعا طرح‌های پیشنهادی بسیار زیاد مطرح در این قضیه و تعداد اندک از نتایج مطلوب مهندسی به‌دست‌آمده در آزمایشگاه‌ها تا به امروز است. از زمان مطرح‌شدن این موضوع که ماشین‌ها ممکن است روزی همتاسازی کنند حداقل صد سال می‌گذرد. برای مثال گفته می‌شود دکارت[۵۳] (۱۶۵۰-۱۵۹۶) در ابتدا ایده خود را مبنی بر اینکه بدن انسان یک ماشین است با شاگرد سلطنتی خود، شاهزاده سوئدی، کریستیانا[۵۴] در سیصد سال پیش مطرح می‌کند و این سؤال را در ذهن شاهزاده به وجود می‌آورد که چگونه؟ چگونه ماشین‌ها خود را تولید می‌کنند؟ (Frietas, 2004)

ساموئل باتلر[۵۵] (۱۹۰۲-۱۸۳۵) در کتاب *اِروُن*[۵۶] که در سال ۱۸۷۲ چاپ شد در مورد پاسخ این سؤال این‌گونه بحث می‌کند: «مطمئناً اگر ماشینی توانایی تولید ماشین دیگر را به‌طور سیستماتیک داشته باشد، ما به آن سامانه بازتولیدکننده می‌گوییم. در اینجا چندین سؤال مطرح است؛ سامانه بازتولیدکننده اگر برای بازتولید شبه خود نباشد چه می‌تواند باشد؟ و اینکه چه میزان از ماشین‌آلات وجود دارند که به‌طور سیستماتیک توسط ماشین‌های دیگر تولید نشده‌اند؟ آیا این انسان است که آنها را می‌سازد؟ بله؛ ولی این موضوع مطرح است که این حشرات نیستند که بسیاری از گیاهان را بازتولید

تصویر ۴.اردک ژاک وکنسون (مأخذ: http://cerebralboinkfest.blogspot.com/2011/01/duck-poup.html)

می‌کنند و نسل این گیاهان در صورتی که باروری آنها توسط عوامل خارجی غیر از خوشان صورت نگیرد از بین نمی‌رود. آیا کسی هست که بگوید شبدر قرمزرنگ سیستم بازتولیدکننده ندارد! تنها به این علت که فقط و فقط زنبور عسل باید آن را کمک و تشویق به این کار کند قبل از آنکه خودش عملیات بازتولید را انجام دهد؟ قطعاً هیچ‌کس. زنبور، تنها قسمتی از سامانه بازتولید شبدر است» (Buttler, 1932).

در سال ۲۰۰۵، آدریان بویر[۵۷] از دانشگاه بث[۵۸] پروژهٔ ساخت چاپگرهای رپ‌رپ را به منظور تولید چاپگرهای کم‌هزینه شروع کرد. این پروژه بر اساس ایده همتاسازی ماشین‌ها شکل گرفت به صورتی که یک چاپگر رپ‌رپ بتواند اکثر قطعات بکار رفته در خود را تولید کند؛ باقی قطعات بکار رفته در یک رپ‌رپ که آن توانایی تولید آنها را ندارد از قطعات صنعتی مرسوم و استاندارد که در اکثر اماکن قابل خریداری است انتخاب شده‌اند (Jones et al., 2011). این پروژه اکنون موفق شده است تا هزینه یک چاپگر را به دو درصد قیمت گذشته برساند و آن را به‌راحتی در اختیار همگان قرار دهد به‌گونه‌ای که هر فردی می‌تواند یکی از این رِپ‌رَپ‌ها را در خانهٔ خود داشته باشد و زمانی که نیاز به تهیه وسیله‌ای داشت، به جای آنکه آن را از کارخانه‌ها تهیه کند به‌راحتی می‌تواند نقشه سه‌بعدی وسیله سه‌بعدی مورد نظر را همانند موزیک و فیلم از اینترنت دانلود کند و مابقی کارها را به عهده رپ‌رَپ بگذارد؛ در این صورت دیگر هزینه‌ای صرف جابه‌جایی مکانی و خرید وسیله مورد نیاز از فروشگاه‌های مربوطه نمی‌شود و همچنین هر کس می‌تواند یکی از این چاپگرها را توسط خود برای دوست و همسایه خود تولید کند و در اختیار او گذارد تا او نیز از این ربات‌ها بهره‌مند شود.

نتیجه‌گیری: آینده معماری در عصر پسادیجیتال

از دیدگاه ری کورزویل[۵۹] نویسنده آینده‌نگر، دوران تکینگی زمانی است که توانایی کامپیوترها و هوش مصنوعی از توانایی مغز انسان پیشی می‌گیرد و او زمان آن را در کتاب تکینگی نزدیک[۶۰](Kurzweil, 2005) است در سال ۲۰۴۵ پیش‌بینی کرده است. از دیدگاه این مقاله عصر پسادیجیتال به دورانی اطلاق می‌شود که پیش‌بینی می‌شود فناوری ساخت دیجیتال و فناوری اطلاعات به اوج رسیده و تغییرات و دگرگونی‌ها در سیستم حیات بی‌نهایت می‌شوند. از سویی انسان که خود به وجود آورنده این شرایط است دیگر کارایی لازم برای کنترل و مدیریت شرایط و تغییرات دائمی را ندارد و حضور انسان در چرخه تولید و طراحی دیگر کارا نیست. در این عصر تکنولوژی هوش‌های مصنوعی پیشرفت‌های چشم‌گیری خواهند داشت و از طرفی به دلیل سرعت بالاتر انجام امور و حذف خطای انسانی، در چرخه تولید و مدیریت صنعتی جایگزین انسان‌ها می‌شوند. در آغاز ربات‌ها در محیط‌های خطرناک مانند تخریب و نگهداری راکتورهای هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در دهه‌های آینده نیز ربات‌ها برای کمک به اپراتورهای انسانی طراحی خواهند شد ولی به‌تدریج این ربات‌ها هوش مصنوعی پیشرفته‌تری خواهند داشت و جای انسان در معدود کارخانه‌های حیاتی به‌جامانده را خواهند گرفت.

از طرفی انسان عصر دیجیتال دیگر تمایلی به تهیه وسایل مورد نیاز خود از کارخانه‌ها را نخواهد داشت و چاپگرها در هر خانه‌ای یافت خواهند شد، به‌طوری‌که فرد، تولیدکننده وسایل مورد نیاز خود خواهد بود. حتی خانه‌ها به وسیلهٔ ابرچاپگرهایی که توسط افراد عادی و یا هوش مصنوعی هدایت می‌شوند به صورت یکجا پرینت خواهند شد. در این زمان کارخانه‌ها، فقط تولیدکننده مواد اولیه و حیاتی برای رپ‌رَپ‌ها و ابزارهای ساخت دیجیتال و هوش‌های مصنوعی خواهند بود. بنابراین، اگر در دوران کلبه‌ها یا چادرهای اولیه، انسان‌ها خود به ساخت سرپناه و خانه می‌پرداختند، پس از سیری طولانی و با تکامل چندوجهی فناوری و فرایندهای طراحی، در عصر حاضر، انسان‌ها دوباره می‌توانند خانه‌ها و کلبه‌های پیشرفته خود را بسازند. چنین سیری تکاملی به ظهور انواع معماری بومی، سنتی و مردمی خواهد انجامید.

با توجه به چنین تغییرات، جهان کنونی از نظر روابط اقتصادی، اجتماعی و سیاسی نیز تغییر خواهد کرد. نخست می‌توان به پیدایش خانه‌های خود همانندساز اشاره کرد. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، با توسعه و همه‌گیر شدن رِپ‌رَپ‌ها، توانایی تولید توسط افراد عادی بالاتر خواهد رفت و افراد نیاز کمتری به متخصصان، شرکت‌ها و یا دولت‌ها برای تولید کالاهای مورد نیاز حس خواهند کرد. خانه‌ها، ساختمان‌ها و معماری نیز از این قاعده مستثنا نخواهند بود. در این دوران خانه‌ها در خود رِپ‌رَپ‌های زاینده دارند که توسط آنها می‌توانند مشابه خود را تولید کنند و یا قطعات فرسودهٔ خود را دوباره تولید و جایگزین کنند. این بدان معناست که خانه‌ها همانند موجودات طبیعی و زنده توانایی تولید مثل و ترمیم خواهند داشت.

با این نوع تحولات، جایگاه طراحان و معماران تغییر خواهد کرد. در چنین دورانی، طراحان و معماران به طراحی نمونه‌های اولیه برای فروش در اینترنت به مشتریانی خواهند بود که خواهان پرینت سه‌بعدی آن محصولات به عنوان وسایل مورد نیازشان هستند و این موجب بالا رفتن ارزش طرح اولیه نسبت به تولید محصول خواهد شد. تنها هزینه‌ای که مصرف‌کنندگان می‌پردازند مربوطه به طرح اولیه و مواد خام رِپ‌رَپ‌ها و در مواردی جزئی‌تر هزینه انرژی محرک رِپ‌رَپ‌ها خواهد بود. وقتی ساخت خانه (یا ساختمان) یک امر پیشرفته و تخصصی نباشد، امکان ظهور سبک‌ها و انواع ساختمان‌ها میسر خواهد شد. در این شرایط مدیریت و کنترل جریان‌های اطلاعاتی تأثیر بیشتری بر معماری خواهد گذاشت و کنترل و نظارت بر اطلاعات و استفاده قانونی از رِپ‌رَپ‌ها مسئله مهمی خواهد بود تا افراد به صورت غیر مجاز ساخت‌وساز نکرده یا به تولید وسایل غیر مجاز (مانند اسلحه) نپردازند.

پیدایش سبک‌های متعدد و یا به عبارتی بی سبکی از دیگر وقایع پیش روی این دوران است. هنگامی که همگان حق ساخت و اعمال نظر شخصی بر روی وسایل و خانه‌ها به وسیله ابر رِپ‌رَپ‌ها را داشته باشند، کمتر کسی به طراحان و معماران جهت تعیین سبک و یا قوانین طراحی مراجعه خواهد کرد. نتیجه ممکن است تنوع و آشفتگی بصری در سطوح مختلف زندگی بشری باشد. تغییر نظام اقتصادی و رکود کارخانه‌ها از دیگر موارد قابل اشاره است. در این زمان کارخانه‌ها محدودتر فعالیت خواهند داشت. تنها آن‌هایی باقی می‌مانند که به تولید مواد اولیه و قطعات حیاتی برای رِپ‌رَپ‌ها می‌پردازند و یا آن‌هایی که مربوط به مواردی هستند که رِپ‌رَپ‌ها قادر به تولید آنها نیستند و این مسئله منجر به حذف بسیاری از مشاغل خواهد شد. از طرفی هوش مصنوعی و ربات‌ها جای انسان را در اغلب فعالیت‌های صنعتی خواهند گرفت و ساخت‌وسازهای کلان بدون حضور انسان انجام خواهد شد. با گسترش طرح‌ها، بناها و شهرها و خودکفایی افراد در حوزه طراحی و ساخت انواع مصنوعات، به مرور زمان، فرهنگ، هنر، سیاست، اقتصاد و دیگر حوزه‌های انسانی نیز دچار تحولات جدی خواهند شد.

هرچند فناوری ساخت افزایشی ساختمان در دهه اخیر پیشرفت‌های چشمگیری داشته است، اما هنوز فناوری‌ای نوپا است و محدودیت‌های بسیاری دارد. به‌عنوان‌مثال، همچنان هزینه تجهیزات و نیروی کار در این حوزه بالاتر از روش‌های ساخت سنتی است. درضمن، سرعت ساخت به روش افزایشی دیجیتال به دلیل نبود دانش کافی و آزمون‌وخطا، هنوز از سرعت ساخت به روش‌های سنتی پیشی نگرفته است. درضمن، مواد و مصالح مورد استفاده در ساخت افزایشی نقش تعیین‌کننده و حیاتی در موفقیت چاپ یک ساختمان را دارد. به‌عنوان‌مثال نمی‌توان انتظار داشت با استفاده از یک نوع ماده و یک نوع تجهیزات چاپ سه‌بعدی، نتیجه یکسانی در مکان و زمان‌های متفاوت گرفت. به همین دلیل در حال حاضر حضور دائم مهندسین مواد برای کنترل مصالح در شرایط متغیر ساخت ضروری است. هرگاه بحث چاپ سه‌بعدی ساختمان‌ها مطرح می‌شود، تصویری از محل ساخت بدون حضور نیروی انسانی تداعی می‌شود، اما این تصور در حال حاضر صحیح نیست. هرچند تعداد افراد لازم در محل به‌طور قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی کمتر است، همچنان حضور افراد متعدد در محل ساخت افزایشی ساختمان‌ها برای کنترل تجهیزات اعم از تغذیه پمپ، کنترل انتقال مواد جهت عدم اصابت به اجزا، کنترل امنیت نیروهای حاضر در محل و غیره ضروری است.

تصویر ۵. اردک ژاک وکنسون (مأخذ: http://cerebralboinkfest.blogspot.com/2011/01/duck-poup.html)

با این حال، امکان همگانی شدن فناوری‌های ساخت افزایشی موضوع قابل توجهی است و باعث تحولات مهمی در زندگی انسان خواهد شد. در ضمن، با توجه به‌سرعت و پیچیدگی تغییرات در عصر اطلاعات، تحلیل فرایند تکامل فناوری، بررسی ابزارهای طراحی و ساخت نوین همچون همتاسازها، و شناخت تأثیرات واقعی و احتمالی آنها بر فرایند تکامل معماری امری اجتناب‌ناپذیر است. مستندات موجود نشان می‌دهد که اگر روش‌های جدید طراحی و ساخت همه‌گیر شوند، آن‌وقت جایگاه طراح و طراحی، معمار و معماری، شهرسازی و معادلات اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و سیاسی جوامع دچار تغییرات قابل‌توجهی خواهند شد. مباحث مطرح شده چشم‌اندازی بر آینده حوزه معماری را ترسیم کرده و پیامدهای احتمالی این تحولات را تبیین کرده است. اما با توجه به‌سرعت و گستردگی تحولات در دوران معاصر، استفاده مناسب از فناوری‌های نوین نیازمند نظریه‌پردازی و دوراندیشی‌های متعدد و هدفمندی خواهد بود که بتوانند این تیغ دولبه را مهار کنند.

پی‌نوشت‌ها

1. Antonio saint Elia
2. Star Wars
3. Blade Runner
4. Space Odyssey
5. Rep-rap
6. Deconstruction
7. Folding
8. Gilles Deleuze
9. Jacques Derrida
10. In-Situ Construction
11. Gottfried Semper
12. Neolithic
13. Thomas Newcomen
14. Charles Dickens
15. Godfrey Armitage
16. Flying shuttle
17. John Kay
18. Mass production
19. Prefabrication
20. Additive
21. Subtractive
22. Digital casting
23. Digital assembly
24. Grid shells
25. Hybrid-Wall
26. Form-Finding
27. Computer graphics
28. Computational geometry
29. Optimized geometries
30. Customized process
31. Force density method
32. User-friendly interfaces
33. Suspended network chains
34. Mass customization
35. Component-based fabrication
36. Functional programming
37. RepRap (the replicating rapid prototyper)
38. Charles Hull
39. Stereolithography
40. Selective Sintering
41. C.S Crump
42. Fused deposition modeling
43. Robotic Arms
44. Gantry Crane
45. Cable driven robots
46. Artificial life
47. Jacques Vaucanson
48. Self-Replication
49. Self-Reproduction
50. Cellular Replication
51. Kinematic Replication
52. LEGO
53. Descartes
54. Queen Christiana Augusta
55. Samuel Buttler
56. Erewhon
57. Adrien Boyer
58. University of Bath
59. Ray Kurzweil
60. The singularity is near

فهرست منابع

خبازی، زوبین (۱۳۹۱)، *پارادایم معماری الگوریتمیک*، مشهد: کتابکده کسری.

وفامهر، محسن (۱۳۹۰)، *سیری در اندیشه‌های تکنولوژی معماری*، مشهد: دانشگاه امام رضا(ع).

آذرنگ، عبدالحسین (۱۳۹۰)، *تاریخ تمدن*، تهران: کتابدار.

فاستر مک کارتر، سوزان (۱۳۹۰)، *نوسنگی*، ترجمهٔ حجت دارابی، تهران: سمیرا.

هارتمن، گرترود (۱۳۸۰)، *سازندگان دنیای کهن*، ترجمهٔ حسن مرتضوی، تهران: آگاه.

چینگ، فرانسیس دی.کی.؛ یارتسومبک، مارک ام.؛ پراکاش، ویکرامادیتیا (۱۳۸۹)، *تاریخ معماری جهان*، ترجمهٔ محمدرضا افضلی، تهران: یزدا.

اشتن، تامس ساوتکلیف (۱۳۸۴)، *انقلاب صنعتی*، ترجمهٔ احمد تدین، تهران: شرکت انتشارات علمی و فرهنگی.

کرتیس، ویلیام جی. آر. (۱۳۹۳)، *معماری مدرن از ۱۹۰۰*، ترجمهٔ مرتضی گودرزی، تهران: سمت.

R.J. Herrera, R. Garcia-Bertrand, The Agricultural Revolutions, in: Ancestral DNA Hum. Orig. Migr., Elsevier, 2018: pp. 475–509. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804124-6.00013-6.

S.Y. Islami, THE ARCHITECTURE OF SURFACE: the significance of surficial thought and topological metaphors of design, (2009) 312.

E.A. Wrigley, Reconsidering the Industrial Revolution: England and Wales, J. Interdiscip. Hist. 49 (2018) 9–42. https://doi.org/10.1162/jinh_a_01230.

[1] G. Bamber, 'HISTORY OF TECHNOLOGY'. http://www.historyworld.net/wrldhis/PlainTextHistories.asp?groupid=1233&HistoryID=ab11&gtrack=pthc#ixzz4ZpkXsrFG (accessed September. 7, 2022).

L. Corbusier, Towards a New Architecture, Courier Corporation, 2013.

C. Davies, The prefabricated home, Reaktion books, 2005.

E. Lloret-Fritschi, E. Quadranti, F. Scotto, L. Fuhrimann, T. Demoulin, S. Mantellato, L. Unteregger, J. Burger, R.G. Pileggi, F. Gramazio, M. Kohler, R.J. Flatt, Additive Digital Casting: From Lab to Industry, Materials. 15 (2022) 3468. https://doi.org/10.3390/ma15103468.

E.P.G. Bruun, R. Pastrana, V. Paris, A. Beghini, A. Pizzigoni, S. Parascho, S. Adriaenssens, Three cooperative robotic fabrication methods for the scaffold-free construction of a masonry arch, Autom. Constr. 129 (2021) 103803. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103803.

R. Duballet, R. Mesnil, N. Ducoulombier, P. Carneau, L. Demont, M. Motamedi, O. Baverel, J.-F. Caron, J. Dirrenberger, Free deposition printing for space truss structures, in: RILEM Int. Conf. Concr. Digit. Fabr., Springer, 2020: pp. 873–882.

G. Da Silveira, D. Borenstein, F.S. Fogliatto, Mass customization: Literature review and research directions, Int. J. Prod. Econ. 72 (2001) 1–13. https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00079-7.

J. Horvath, A brief history of 3D printing, in: Mastering 3D Print., Springer, 2014: pp. 3–10.

A. Savini, G.G. Savini, A short history of 3D printing, a technological revolution just started, in: 2015 ICOHTECIEEE Int. Hist. High-Technol. Their Socio-Cult. Contexts Conf. HIS CON, 2015: pp. 1–8. https://doi.org/10.1109/HIS CON.2015.7307314.

M. Sipper, Book Review, Artif. Life. 12 (2006) 187–188. https://doi.org/10.1162/106454606775186473.

R. Plasson, Self Replication, in: M. Gargaud, R. Amils, J.C. Quintanilla, H.J. (Jim) Cleaves, W.M. Irvine, D.L. Pinti, M. Viso (Eds.), Encycl. Astrobiol., Springer, Berlin, Heidelberg, 2011: pp. 1498–1500. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4_1422.

R. Jones, P. Haufe, E. Sells, P. Iravani, V. Olliver, C. Palmer, A. Bowyer, RepRap – the replicating rapid prototyper, Robotica. 29 (2011) 177–191. https://doi.org/10.1017/S026357471000069X.

M. Motamedi, R. Mesnil, R. Oval, O. Baverel, Scaffold-free 3D printing of shells: Introduction to patching grammar, Autom. Constr. 139 (2022) 104306.

M. Motamedi, R. Mesnil, R. Oval, M. Charier, O. Baverel, Scaffold-free robotic 3D printing of a double-layer clay shell, in: Proc. IASS Annu. Symp., International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2020: pp. 1–13.

M. Motamedi, R. Oval, P. Carneau, O. Baverel, Supportless 3D Printing of Shells: Adaptation of Ancient Vaulting Techniques to Digital Fabrication, in: C. Gengnagel, O. Baverel, J. Burry, M. Ramsgaard Thomsen, S. Weinzierl (Eds.), Impact Des. Senses, Springer International Publishing, Cham, 2020: pp. 714–726. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29829-6_55.

R. Kurzweil, The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology, Penguin, 2005.

J.-L. Giavitto and A. Spicher, “Morphogenesis: Origins of Patterns and Shapes,” 2011, pp. 315–340.