دوفصلنامه علمی- پژوهشی مرمت و معماری ایران
سال چهارم، شماره هشتم، پاییز و زمستان ۱۳۹۳

دریافت مقاله: ۹۳/۵/۱۱
پذیرش مقاله: ۹۳/۱۰/۲۷

معرفی شیوه‌ای نوین در ساخت و ساز دیجیتال فرم‌های آزاد در معماری براساس فن‌آوری واقعیت افزوده*

عباسعلی ایزدی* علیرضا فاضل** رامتین خلعتبری*** سارا آکوچکیان****

چکیده

با گسترش روزافزون فن‌آوری‌های نوین و تکنیک‌های ساخت و ساز دیجیتال، گرایش معماران به استفاده از مصالح و ابزارهای نوین برای حل مشکلات طراحی و ساخت، بیشتر شده است. ربات‌ها ساخت طرح‌های پیچیده‌ای را برای معماران فراهم آورده‌اند که در گذشته به علت پیچیدگی بسیار، اجرای آنان امکان‌پذیر نبوده است؛ اما همچنان مشکلات زیادی در استفاده از آن‌ها و سایر شیوه‌های مشابه در فرایند ساخت و ساز وجود دارد که بهره‌گیری از آنان را در پروژه‌ها با مشکل مواجه می‌کند. مسائلی ازقبیل گرانی تولید، نیاز به تجهیزات پیشرفته و نیروی متخصص، باعث شده است که استفاده از این‌گونه ابزارها در برخی پروژه‌ها توجیه‌پذیر نباشد. این امر، شاهد مناسبی بر ضرورت انجام پژوهش در شیوه‌های ساده‌تر و ارزان‌تر ساخت و ساز دیجیتال است. در مقاله پیش‌رو، روش نوینی پیشنهاد می‌گردد که با به‌کارگیری فن‌آوری واقعیت افزوده، می‌تواند به سادگی و بدون نیاز به نیروی متخصص، امکان ساخت فرم‌های آزاد را با هندسه پیچیده فراهم آورد. ارائه روش پیشنهادی در قالب مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی عددی است. در پایان، دو نمونه موردی ساخته‌شده با استفاده از این روش به منظور تأیید درستی شیوه پیشنهادی، مطالعه شده است.

کلیدواژگان: ساخت و ساز دیجیتال، واقعیت افزوده، واقعیت مجازی، ساخت و ساز به وسیله ربات، فرم‌های آزاد.

---

* مقاله پیش‌رو، برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد علیرضا فاضل باعنوان "فرم‌یابی و بهینه‌سازی سازه‌های پوسته‌ای شبکه‌ای براساس الگوریتم تکاملی ژنتیک"، به راهنمایی دکتر عباسعلی ایزدی در دانشگاه تهران است.

** استادیار، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران.
*** کارشناس‌ارشد تکنولوژی معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران. fazel_alireza@ut.ac.ir
**** کارشناس‌ارشد تکنولوژی معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران.
***** دانشجوی کارشناسی‌ارشد انرژی و معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران.

مقدمه

فرم‌های آزاد،[1] به فرم‌های سه بعدی اطلاق می‌شوند که تعریف ساده ریاضی نداشته و از فرم‌های گسترش‌ناپذیر ساخته می‌شوند. به طور کلی از نظر نحوه ساخت، با دو راستا یا بدون راستای آزاد تعریف می‌گردند (Fontana et al,1999). این فرم‌ها، به علت پویایی و آزادی بسیار، همواره مورد توجه معماران قرار گرفته‌اند. بااین‌همه، ساخت و ساز این‌گونه فرم‌ها در دنیای واقعی به علت هندسه پیچیده آنان، چندان ساده نیست. درواقع، مهم‌ترین چالش پیش روی طراحان در این زمینه، طراحی و ساخت فرم‌های آزاد با استفاده از مصالح مد نظر آنان است (Afify et al, 2007).

پیدایش تکنیک‌های گوناگون ساخت و ساز دیجیتال در دهه ۱۹۵۰میلادی، مانند تکنیک‌های ساخت و ساز با کمک رایانه‌ها[2] (CAD-CAM)، بهره‌گیری از ربات‌ها در معماری دهه ۱۹۸۰میلادی و گسترش آن‌ها تا به امروز، سبب شده است تا ساخت و ساز فرم‌های آزاد برای معماران امری امکان‌پذیر گردد. اما همچنان استفاده از این تکنیک‌ها در ساخت و ساز، امری نوپا تلقی شده و به علت استفاده از ابزار پیچیده و پرهزینه مانند ربات‌ها، ماشین آلات برشگر لیزری و نظیر آن‌ها، فراگیر نیستند (Bonwetsch et al, 2006). بنابر آنچه بیان شد، در مقاله حاضر شیوه‌ای نوین برای ساخت و ساز فرم‌های آزاد در معماری براساس فناوری واقعیت افزوده[3] پیشنهاد می‌گردد که با استفاده از ابزارآلات ساده و کم‌هزینه و بدون نیاز به نیروی متخصص می‌تواند در ساخت و ساز این‌گونه فرم‌ها در دنیای واقعی به کار رود. درادامه، پرسش‌ها، پیشینه و روش پژوهش بیان شده و سپس، به مباحث مرتبط و زمینه‌ساز در زمینه‌های ساخت دیجیتال و فناوری واقعیت افزوده اشاره شده است. در پایان، روش پیشنهادی معرفی و نتایج حاصل در قالب دو نمونه موردی مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته است.

پرسش تحقیق

استفاده از فن‌آوری‌های نوین در ساخت و ساز همواره با چالش‌هایی روبرو بوده است. معماران در سال‌های اخیر به فن‌آوری‌های نوین مانند ربات‌ها و چاپگرهای سه‌بعدی[4] توجه کرده‌اند اما هزینه بالای تولید و نیز محدودیت‌های این سیستم‌ها باعث شده است که بهره‌گیری از آن‌ها بسیار محدود و اغلب در سطح آزمایشگاهی باشد. این پژوهش به دنبال پاسخ‌گوئی به دو پرسش در زمینه ساخت و ساز فرم‌های آزاد است:

- چگونه می‌توان ارتباط میان دنیای حقیقی و مجازی را به صورت در لحظه به گونه‌ای که برای ساخت یک فرم مجازی در دنیای حقیقی، لزوم وجود نمونه فیزیکی به عنوان قالب و ... برای ساخت یک فرم آزاد از میان برداشته شود، برای کاربر ایجاد کرد.
- نحوه ارزیابی دقت و کنترل فرایند انجام کار و چگونگی بیان آن در محیط رایانه است به چه صورت است. درواقع، چگونه می‌توان موقعیت هر قطعه را در فضای حقیقی مشخص و قطعه را در جای درست خود قرار داد بدون آنکه از ابزارهای پیچیده استفاده شود.

پیشینه پژوهش

نخستین تکنیک‌های ساخت و ساز دیجیتال در دهه ۱۹۲۰ میلادی و در صنایع به کار گرفته شدند. کارخانه ماشین‌سازی فورد که به دلیل ورود به عرصه شخصی‌سازی انبوه، از ابزارهای صنعتی تولید استفاده کرد، نمونه‌ای از این تکنیک‌هاست (Niemeijer, 2011). از جمله اولین افرادی که از رویکرد صنعتی در معماری بهره گرفته‌اند می‌توان به *لوکوربوزیه*[5]، *فولر*[6] و *فاستر*[7] اشاره نمود. لوکوربوزیه معتقد است «تقریباً هر دوره‌ای که در معماری به وجود آمده به تحقیقات در ساخت و ساز در صنعت مرتبط است» (Corbusier, 1986). وی با بیان خانه ماشینی برای زندگی است،[8] قرابت معماری و صنعت را بیان می‌کند. همچنین در بسیاری از پروژه‌های خود از تکنیک‌های صنعتی‌سازی، پیش ساخته‌سازی و تولید انبوه که در صنایع از آن‌ها استفاده شده، بهره جسته است (قبادیان، ۱۳۸۵).

ابزارهای ساخت دیجیتال مانند دستگاه‌های CNC درحین جنگ جهانی دوم، برای تولید قطعات ماشین‌های جنگی تولید شدند و رفته رفته به دیگر صنایع نیز راه پیدا کردند (Noble, 1984). تحقیقاتی که در سال ۱۹۶۰ میلادی در زمینه هوش مصنوعی انجام شد، زبانی را برای کنترل خودکار ماشین‌ها به وجود آورد که باعث پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌های جدید در صنعت و معماری گردید (Liu, 2009). مانند پژوهش‌های انجام‌شده توسط مرکز صنعتی ربات در ژاپن[9] (JIRA)در سال ۱۹۸۶ میلادی که اولین ایده کاربرد ربات‌ها را در دیوار چینی نشان می‌دهد (Hasegawa, 1986). در همین راستا، بخش‌های معماری دیجیتال نیز در دانشگاه‌های مطرح دنیا مانند ETH، MITو Harvard تأسیس شده است که در زمینه ساخت و ساز دیجیتال، فعالیت‌های بسیاری را انجام داده‌اند. از آن جمله می‌توان به:

- پروژه دیوار چینی دیجیتال، دانشگاه ETH (Gramazio et al, The Programmed Wall, 2006)،
- مواد جدید در ساخت و ساز دیجیتال، دانشگاه ETH (Kohler et al, 2008)،

- ربات‌های پرنده در معماری، دانشگاه ETH (Gramazio et al, Flight Assembled Architecture, 2011-2012)
- گروه پژوهش سازه‌های ماسیونری، دانشگاه MIT (MIT Masonry Research Group, 2011)،
- بخش ساخت و ساز به وسیله ربات، دانشگاه هاروارد (Rocker, 2009)

اشاره نمود که همگی در مسیر یافتن راه‌های بهتر و ساده‌تر برای پدیدآوردن فرم‌های پیچیده، توسط ابزارهای نوین حرکت می‌کنند.

روش پژوهش

در پژوهش حاضر، روشی نوین برای ساخت و ساز دیجیتال پیشنهاد شده که ایده اولیه آن براساس شناخت و درگیری ذهنی مؤلف با امکانات و امتیازات سیستم‌های ساخت دیجیتال و پردازش رایانه‌ای شکل گرفته است. روش گردآوری اطلاعات نظری و مباحث مرتبط در این پژوهش، مطالعه کتابخانه ای بوده است و ارائه روش پیشنهادی، به صورت مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی عددی انجام گرفته و نتیجه آن، با استفاده از فرایند کنترل دیجیتال ارزیابی شده است. درنهایت حاصل کار، ارائه تکنیکی جدید به شکل کمک ابزاری برای ساخت فرم‌های آزاد در ساخت و ساز دیجیتال است (تصویر ۱). مدل‌سازی روش پیشنهادی، تحت زبان برنامه‌نویسی پراسسینگ[۱۰] و با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی سه بعدی راینو[۱۱] و افزونه گرس هاپر[۱۲] صورت پذیرفته است. درنهایت، در قالب شبیه‌سازی فیزیکی نمونه‌های ساخته شده به دست نگارندگان، ارزیابی شدند.

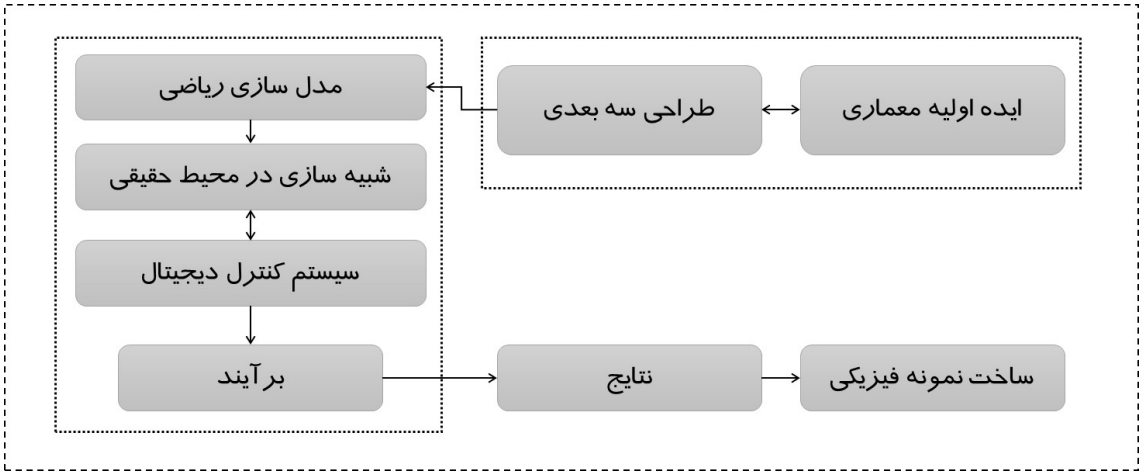
مباحث مرتبط و زمینه‌ساز

در این بخش، نخست به اختصار به مباحث مرتبط و زمینه‌ساز برای ورود به مبحث روش پیشنهادی ارائه شده است که شامل تعریف فرم‌های آزاد، معرفی و دسته‌بندی ابزارآلات ساخت دیجیتال، مفاهیم حقیقت مجازی و واقعیت افزوده است. سپس به ترتیب هریک از آن‌ها بررسی شده است.

فرم‌های آزاد

در تعریف فرم‌های آزاد این‌گونه بیان می‌گردد، در صورتی که تعریف ساده ریاضی برای ترسیم فرم مد نظر وجود نداشته باشد به آن فرم، فرم آزاد گفته می‌شود که متشکل از فرم‌های گسترش ناپذیر است. این فرم‌ها به طور عمده یا دارای دو راستای آزاد یا بدون راستای آزاد تعریف می‌گردند (Nyirenda et al, 2006). در تعریف راستای آزاد، می‌توان ورق کاغذی را تصور کرد که با مواج‌شدن به فرم آزاد درآمده است. در این نمونه، دو ضلع عمود برهم لبه کاغذ، دو راستای آزاد فرم را تشکیل می‌دهند. منحنی‌های لبه، در فرم‌های آزادِ بدون راستا، وجود ندارند و برای تعریف ریاضی این فرم‌های پیچیده، از توابع پایه بی‌اسپیلاین[۱۳] و سطوح نربز[۱۴] استفاده می‌گردد.

روش‌های گوناگونی برای ساخت فرم‌های آزاد وجود دارد که بسته به میزان پیچیدگی فرم، می‌توان آن‌ها را برای خلق فرم، در محیط حقیقی به کار برد. در صورتی که میزان پیچیدگی فرم کم باشد به حالتی که بتوان آن را به یک یا چند الگوی تکرارشدنی در کل فرم تبدیل کرد، می‌توان از روش‌های سنتی ساخت و ساز، مانند شابلون‌های دستی، ریسمان‌کشی و مانند آن‌ها برای ساخت فرم مد نظر استفاده کرد. اما زمانی که میزان پیچیدگی در فرم به حدی باشد که انجام آن با روش‌های بیان‌شده توجیه یا امکان‌پذیر نباشد، بایستی از تکنیک‌های ساخت و ساز دیجیتال بهره جست. به کمک این روش‌ها، می‌توان فرم‌هایی با هندسه ساختاری بسیار پیچیده را پدیدآورد. پیش از ارائه روش پیشنهادی مد نظر در این مقاله، لازم است تعریف و شناخت مفاهیمی در زمینه ساخت و ساز دیجیتال و کاربرد رایانه‌ها در معماری انجام شود که درادامه، آورده خواهد شد.



تصویر ۱. مکانیسم نتیجه‌گیری و روش تحقیق (نگارندگان)

ساخت و ساز دیجیتال

به پروسه به‌کارگیری ماشین‌ها در ساخت اشیا که توسط رایانه کنترل می‌شوند، اطلاق می‌شود (Jacobs, 2013). طراحی‌های انجام‌شده به وسیله رایانه‌ها تنها به نمایش صرف آن‌ها روی نمایشگر خلاصه نمی‌شوند. تکنیک‌های ساخت و ساز دیجیتال این امکان را فراهم آورده‌اند که ساختارهای دیجیتال طراحی‌شده بتوانند به نمونه‌های فیزیکی تبدیل شوند؛ این امر، امکان ساخت فرم‌هایی را فراهم می‌آورد که ساخت آن‌ها با دیگر روش‌های متداول میسر نسیت. تقسیم‌بندی‌های گوناگونی از کاربرد رایانه‌ها در صنعت وجود دارد اما به طور کلی دو روش اصلی برای ساخت و ساز دیجیتال در معماری بیشتر از دیگر روش‌ها بیان شده است: روش کاهشی و افزایشی.

در روش کاهشی، نمونه فیزیکی مد نظر از طریق فرایند کاستن از یک شیء بزرگ‌تر به وسیله مته‌ها، تیغه‌ها و پرتوهای لیزری به دست می‌آید. در این روش، از ابزارهایی مانند دستگاه‌های CNC[۱۵]، برشگرهای لیزری[۱۶] و ونیلی[۱۷] برای تولید قطعات مربوط استفاده می‌شود. در روش افزایشی، با روی هم قرارگیری لایه‌های متعدد از مواد، شیء ساخته می‌شود. این مواد می‌توانند جامد مانند آجر یا خمیری شکل باشند. چاپگرهای سه بعدی از دستگاه‌های متداولی هستند که در این روش کاربرد دارند (تصویرهای ۲و۳).

اگرچه فن‌آوری این روش‌ها روزبه‌روز درحال پیشرفت است، در روش افزایشی، محدودیت انتخاب مصالح وجود دارد. بیشتر چاپگرهای سه بعدی تنها قادر هستند از مواد پلاستیکی، سرامیکی و کامپوزیتی برای ساخت فرم‌های فیزیکی استفاده کنند (Dunn, 2012). همچنین، این روش نسبت به روش کاهشی بسیار گران‌قیمت بوده و اغلب برای ساخت نمونه‌های کوچک کاربرد دارد. برخلاف روش افزایشی، در روش کاهشی می‌توان از مواد و مصالح متنوعی برای ساخت بهره گرفت. برشگرهای لیزری می‌توانند موادی همچون چوب، چرم، پلاستیک و مقوا را برش دهند. همین امر باعث توسعه بیشتر ابزارآلات این دسته نسبت به روش افزایشی شده و با صنعتی‌سازی روش‌های تولید، هزینه‌های تولید قطعات مورد نیاز به میزان مطلوبی رسیده است. در جدول ۱، انواع روش‌های ساخت و ساز دیجیتال آورده شده است.

ساخت و ساز به وسیله ربات‌ها

پس از تحقیق‌های صورت گرفته در دهه ۶۰ میلادی در زمینه ربات‌ها و هوش مصنوعی، گرایش‌های جدیدی در استفاده از ربات‌ها به جای انسان در صنعت به وجود آمد. ربات‌ها می‌توانستند در شرایطی که انسان قادر به انجام کار نیست، فعالیت کنند و خطاهای محتمل را کاهش دهند (Budny, 1996). امروزه، کاربرد ربات‌ها در تمامی صنایع گسترده شده و امکانات بسیاری را برای صنعت‌گران فراهم آورده است. در معماری نیز استفاده از ربات‌ها چه در مرحله تولید و چه نصب و راه‌اندازی به معماران کمک می‌کند تا بتوانند ایده‌های خود را به نمونه‌های فیزیکی تبدیل کنند.

ربات‌ها در مقایسه با دیگر ابزارهای ساخت و ساز دیجیتال مانند ماشین‌آلات CNC، امکانات بیشتری را در زمینه ساخت و ساز در محل[۱۹] فراهم می‌آورند (Miller, 2010). اولین مزیت آن‌ها، انعطاف‌پذیر بودن است که می‌توانند با انواع مصالح در محل سایت کار کنند. داشتن هوش مصنوعی بالاتر نسبت به دیگر سیستم‌های ساخت و ساز دیجیتال، این امکان را فراهم آورده که پروسه طراحی، ساده‌تر و سریع‌تر انجام شود. درنهایت یکی دیگر از مزایای ربات‌ها، قابلیت حمل و توانایی کار در محل سایت و شرایط آب و هوایی گوناگون است که آنان را نسبت به دیگر روش‌ها متمایز می‌کند (Spiller, 2009). به طور کلی، انواع ربات‌هایی را که در زمینه ساخت و ساز معماری کاربرد دارند، می‌توان در جدول ۲ مشاهده کرد.

اگرچه ربات‌ها نسبت به دیگر ابزار ساخت و ساز دیجیتال امکانات و سرعت بیشتری را برای کاربران فراهم می‌آورند، مسائلی مانند هزینه بسیار بالا و نیاز به نیروی متخصص و

تصویر ۲. دیجیتال چینی دیوار آجری به وسیله ربات ۶ محوره در دانشگاه ETH (روش افزایشی)، (robotspodcast.com)

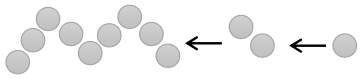
تصویر ۳. چاپگر سه بعدی (dezeen.com)

تجهیزات زیاد و گران‌قیمت و سختی در جابجایی، چالش‌هایی را برای استفاده از آنان به وجود آورده است. به گونه‌ای که بیشتر در محیط‌های دانشگاهی یا کارگاه‌های صنعتی استفاده می‌شوند و کمتر از قابلیت ساخت در محل از آن‌ها بهره گرفته شده است. این امر لزوم بررسی روش‌های جایگزین ساده و ارزان‌تر از ربات‌ها در معماری را روشن می‌سازد. روش پیشنهادی ارائه شده در این مقاله، شاخه‌ای از تکنیک‌های ساخت دیجیتال به روش افزایشی است که امکان ساخت فرم‌های آزاد را با استفاده از تکنیک واقعیت افزوده فراهم می‌کند که درادامه بررسی خواهند شد.

واقعیت مجازی

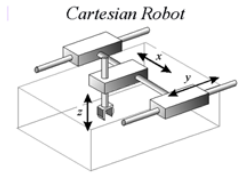
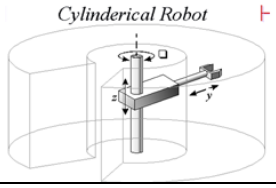
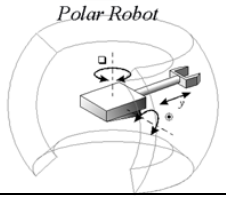
به فرمی از فن‌آوری در رایانه اطلاق می‌شود که در آن، محیط براساس داده‌های واقعی یا ازپیش طراحی‌شده به صورت مجازی در رایانه ساخته شده و کاربر می‌تواند به صورت زنده و هم‌زمان با محیط در ارتباط باشد. همچنین، اطلاعات را از راه‌های مختلف دیداری، شنیداری، لمسی و ... به رایانه منتقل و با محیط ساخته‌شده ارتباط یابد (Whyte ,2004). تاکنون از این فن‌آوری در زمینه‌های بسیاری از جمله معماری، بازی‌های رایانه‌ای، نظامی و آموزشی استفاده شده است. در این شیوه، تمامی محیط به صورت مصنوعی در محیط رایانه ساخته‌شده و برای کاربر توسط صفحات نمایشگر به نمایش در می‌آید.

جدول ۱. تکنیک‌های ساخت و ساز دیجیتال

	روش	ابزارها	مصالح	شماتیک ساخت
روش‌های ساخت و ساز دیجیتال	افزایشی	چاپگر سه بعدی	خمیر پلاستیک، سرامیک و کامپوزیت	
		چاپگر دو بعدی	کاغذ، مقوا	
	کاهشی	ماشین CNC	فلزات، پلاستیک، چوب، شیشه و کامپوزیت	
		برشگر لیزری	فلزات، پلاستیک، چوب، کاغذ و مقوا	
		برشگر ونیلی	ونیل، پلاستیک	
		ربات صنعتی	فلزات، پلاستیک، چوب، شیشه، کامپوزیت	
	فرم‌دهی	پرس برک[۱۸]	فلزات، شیشه	

(نگارندگان)

جدول ۲. انواع ربات‌های پرکاربرد در ساخت و ساز دیجیتال

نوع ربات	محدوده کاربرد	محدوده حرکت	نمای شماتیک
محیط کاری منطبق بر مختصات دکارتی	دستگاه‌های برش افقی، معمولاً قابلیت جابجایی ندارند	حرکت ریلی در راستای محورهای مختصات دکارتی، بدون چرخش	
محیط کاری استوانه‌ای	قابلیت جابجایی و ساخت در محل	چرخش در حول یکی از محورهای مختصات	
محیط کاری کُروی	قابلیت جابجایی و ساخت در محل، انجام برش‌های غیر عمود بر صفحه	دَوران عمودی نسبت به محور مرکزی	

نگارندگان بر اساس (گلابچی، معماری دیجیتال ۱۳۹۱؛ prime.jsc.nasa.gov)

واقعیت افزوده

به مفهوم واقعیت مجازی مرتبط است. در واقعیت مجازی، تلاش برای خلق یک دنیای مصنوعی است که کاربر می‌تواند به وسیله صدا، تصویر و دیگر اشکال با این سیستم ارتباط مستقیم داشته باشد. واقعیت افزوده، امکانی را فراهم می‌آورد که به جای خلق کامل یک محیط مصنوع، یک مکمل در دنیای واقعی ارائه کند (Höllerer et al, 2004). به طور خلاصه می‌توان واقعیت افزوده را ترکیب اشیای مجازی در فضایی حقیقی دانست (تصویر ۴). در تعریفی که *آزوما*[۲۰] ارائه داده، شاخصه‌های واقعیت افزوده در سه مورد بیان شده است (Azuma, 1997):

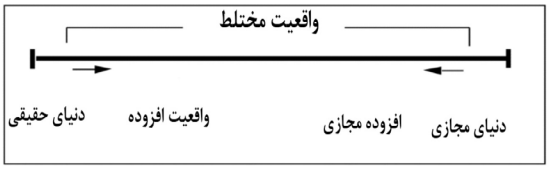
- تلفیق تصاویر مجازی در یک فضای حقیقی،
- تعامل هم‌زمان در فضایی حقیقی،
- ثبت سه بعدی داده‌های دیجیتال در فضایی حقیقی.

این تکنیک در علوم رایانه بسیار کاربرد دارد. برای نمونه، در بازی‌های فوتبال، نمایش خط آفساید یا دایره فاصله دیواره دفاعی روی تصویر زنده بازی، از کاربردهای این فناوری است. وسایلی که برای پدیدآوردن فضای واقعیت افزوده نیاز است، عبارت‌اند از: دوربین دیجیتال، نشانه، پردازشگر و نمایشگر. دوربین دیجیتال به وسیله کابل یا به صورت بی‌سیم به پردازشگر (رایانه) متصل شده و تصویر زنده‌ای از محل را که نشانه در آن قرار دارد، به نمایشگر ارسال می‌کند. مقصود از نشانه، نقطه‌ای در فضای حقیقی است که به عنوان مرکز مختصات فضای مجازی عمل می‌کند. این نقطه، پیونددهنده فضای مجازی و حقیقی است و معمولاً به شکل مربعی سیاه رنگ که روی کاغذ چاپ می‌گردد، تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، نقطه نشانه شامل تصویری دو بعدی است که ابعاد و جهت قرارگیری آن در رایانه، به کمک دوربین هرلحظه خوانده شده و پرسپکتیو و مقیاس رؤیت جسم مجازی براساس آن، تنظیم می‌گردد (تصویرهای ۵ و ۶).

معرفی روش پیشنهادی ساخت و ساز دیجیتال

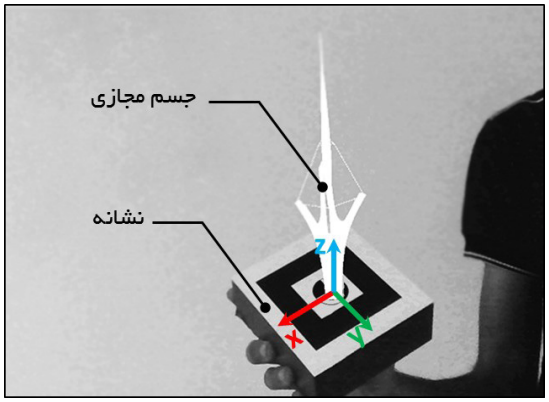
روش پیشنهادی، این امکان را فراهم می‌آورد تا افراد غیر متخصص و حتی کارگران ساده ساختمان نیز بتوانند با آموزش جزئی، فرم‌های پیچیده‌ای را بسازند که امکان ساخت آن‌ها جز به کمک ربات‌ها یا صرف وقت، هزینه و نیروی متخصص، میسر نیست. در این روش نیازی به شابلون‌های دستی، قالب‌ها و دیگر وسایل ساخت و ساز سنتی برای ساخت فرم‌های آزاد نبوده و به جای آن از شابلون دیجیتال که نگارندگان پیشنهاد داده‌اند، استفاده می‌شود (تصویر ۷).

این روش، حاصل ترکیب دنیای حقیقی، محل انجام پروژه، و مجازی، فرم مد نظر به صورت سه بعدی، است به گونه‌ای که اطلاعات مورد نیاز برای ساخت فرم به صورت زنده توسط دوربین به نمایشگر ارسال و در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. این اطلاعات شامل خطوط راهنمایی است که براساس محل قرارگیری نشانه و مکان قرارگیری اجزای تشکیل‌دهنده، فرم مد نظر را برای کاربر با استفاده از واقعیت افزوده، به نمایش



تصویر ۴. واقعیت مجازی و افزوده (Azuma, 1997)

تصویر ۵. وسایل استفاده‌شده برای واقعیت افزوده؛ مشاهده تصویر مجازی براساس نشانه در نمایشگر (www.shelf3d.com)



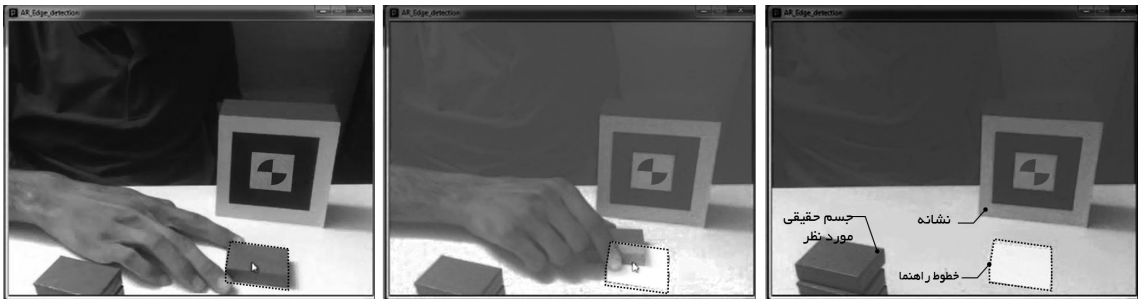
تصویر ۶. نشانه و جسم مجازی در واقعیت افزوده؛ مشاهده‌شده در صفحه نمایشگر (نگارندگان)

درمی‌آورد و براساس این خطوط راهنما، خواهد توانست اشیا را در محل پیش‌بینی‌شده و بدون نیاز به ابزار پیچیده، قرار دهد. به بیان دیگر، این روش را شابلونی دیجیتال در اختیار ما قرار داده است. مکان نشانه در محل، ثابت در نظر گرفته می‌شود و در هر لحظه، بایستی نشانه در کادر دوربین دیده شود تا مرکز مختصات حقیقی و مجازی براساس آن، تعیین شوند. دوربین برخلاف نشانه، می‌تواند مکان متغیری داشته باشد. بنابراین می‌توان آن را در محیط حرکت داد که براین اساس، پرسپکتیو مجازی و حقیقی در هر لحظه خوانده شده و تنظیم می‌گردد (تصویر ۸). تصویر پردازش‌شده، می‌تواند از طریق یک نمایشگر همچون تلفن‌های همراه هوشمند، تبلت‌ها یا نمایشگرهایی که روی سر قرار می‌گیرند مانند عینک گوگل[۲۱]، برای کاربر به صورت زنده به نمایش درآید. مزیت این نوع وسائل، دارا بودن هم‌زمان دوربین دیجیتال، پردازشگر و نمایشگر در قالب وسیله‌ایست که می‌تواند حمل و نقل و استفاده آن را به مراتب ساده‌تر کند. در تصویر ۹، فرایند دیجیتال چینی آجر با استفاده از روش پیشنهادی نگارندگان شبیه‌سازی شده است.

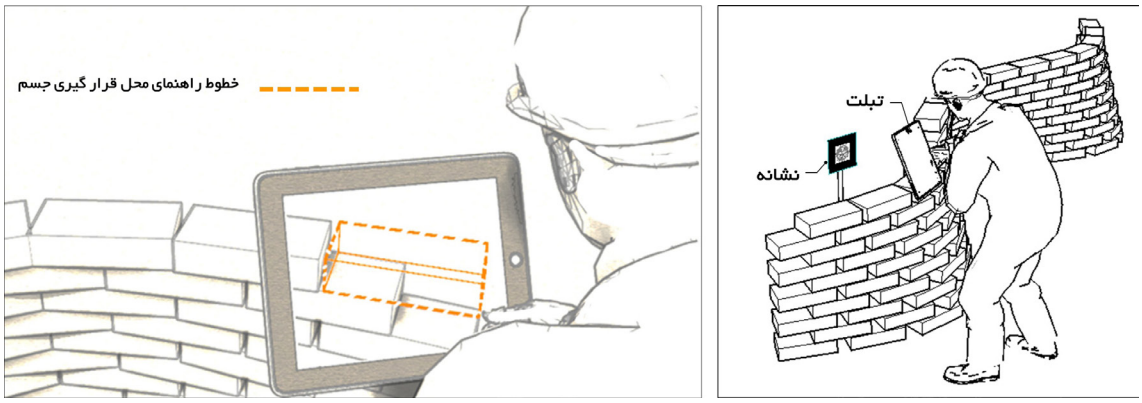
فرایند کنترل صحت انجام کار

به منظور کنترل عملکرد فرایند، دو سیستم کنترلی برای تعیین محل قرارگیری اشیا در نظر گرفته شده است. در

تصویر ۷. معرفی شماتیک روش پیشنهادی (نگارندگان)



تصویر ۸. نحوه قرارگیری جسم حقیقی در مکان مقرر به کمک خطوط به نمایش درآمده در صفحه نمایشگر
(الف): شروع فرایند (ب): مکان‌یابی جسم حقیقی (مواد ساختمانی) در مکان مشخص‌شده به کمک خطوط راهنما (ج): قرارگرفتن جسم حقیقی (مواد ساختمانی) در وضعیت نهایی (نگارندگان)



تصویر ۹. شبیه‌سازی فرایند دیجیتال چینی آجر به روش پیشنهادی با استفاده از تبلت و نشانه در محل کارگاه (نگارندگان)

سیستم اول؛ کنترل را خود فرد از طریق کنترل بینایی انجام می‌دهد به طوری که با مشخص‌ساختن خطوط محیطی شیء و جداسازی آن از محیط پیرامون، کاربر به راحتی خواهد توانست مکان دقیق اشیا را تشخیص دهد (تصویر ۱۰). سیستم کنترلی دوم؛ براساس فن‌آوری تشخیص لبه[۲۲] عمل می‌کند. از این فن‌آوری بیشتر برای تشخیص چهره در علوم رایانه استفاده می‌شود. این روش به کاربر در تشخیص‌دادن اینکه تا چه اندازه کار خود را به درستی انجام داده است، کمک می‌کند. با استفاده از یک ماتریس ۳×۳، مقادیر اندازه رنگی هر پیکسل در تصویر که به طیف سیاه و سفید تبدیل‌شده است، تعیین و با مقایسه پیکسل‌های یادشده، لبه‌های جسم حقیقی در هر لحظه تشخیص داده می‌شوند (روابط ۱ و ۲).

$$V = \left| \frac{\sum_i^n \left[\sum_j^m f_{ij} \cdot d_{ij} \right]}{F} \right|$$

رابطه ۱ (Domhan, ۲۰۱۰)

$$K = \begin{bmatrix} -۱ & -۱ & -۱ \\ -۱ & ۸ & -۱ \\ -۱ & -۱ & -۱ \end{bmatrix}$$

رابطه ۲ (ماتریس کرنل) (نگارندگان براساس (Domhan, 2010))

f_{ij} : ضریب پیچیدگی در نقطه i و j براساس ماتریس کرنل

d_{ij} : مقدار عددی پیکسل نظیر f_{ij} در نقطه i و j

F : جمع ضرایب در ماتریس کرنل (۱ در صورتی که مجموع صفر باشد)

V : مقدار عددی پیکسل خروجی

با مقایسه فاصله بین لبه‌های شیء حقیقی و مجازی، می‌توان متغیر دقت انجام کار "D" را تعریف کرد. در اینجا از لگاریتم این عدد، به عنوان میزان دقت و حساسیت استفاده شده است. شایان یادآوری است، دقت در طی آزمایش‌های به‌عمل‌آمده برابر ۰/۲ میلی‌متر بوده است (فاضل, ۱۳۹۲).

$$D\ average = \frac{\sum_{i=۰}^{n} \frac{y_i - y'_i}{x_i - x'_i}}{n}$$

رابطه ۳ (فاضل, ۱۳۹۲)

$D\ average$: میانگین فاصله میان نقاط جسم حقیقی و مجازی

(x_i, y_i) : نقاط محیطی جسم حقیقی

(x'_i, y'_i) : نقاط محیطی جسم مجازی

الگوریتم اجرای پروژه در محیط زبان برنامه‌نویسی پراسسینگ[۲۳]، انجام‌شده که شامل سه قسمت اصلی است (تصویر ۱۱):

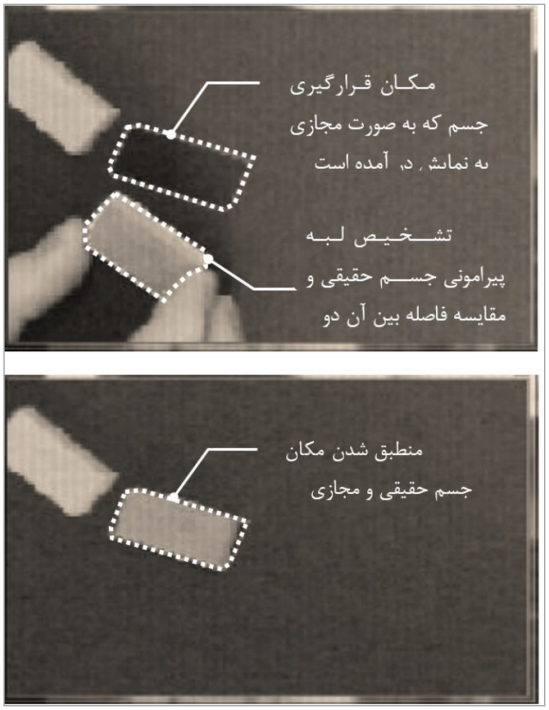
۱. نخست، نمونه سه بعدی از پروژه در نرم‌افزارهای سه بعدی مدلینگ مانند اتوکد،[۲۴] راینو، تری‌دی مکس[۲۵] یا دیگر نرم‌افزارها ساخته شده و طرح اولیه آن آماده می‌گردد.

۲. سپس اطلاعات مورد نیاز برای ساخت قطعات، به دستگاه‌های برش CNC یا دیگر ابزارهای تولید قطعات فرستاده شده و قطعات برای ساخت آماده می‌گردند. این اطلاعات همچنین، از طریق رایانه پردازش می‌شود تا آنچه نیاز است برای انجام فرایند آماده گردد.

۳. در مرحله نهایی که در محل ساخت پروژه صورت می‌گیرد، تصویری حقیقی به صورت زنده، از محل پروژه توسط یک دوربین دیجیتال ضبط و به رایانه ارسال می‌شود. در رایانه با پردازش‌های انجام‌شده توسط برنامه نوشته‌شده، مختصات حقیقی اجسام به صورت مجازی برای کاربر به نمایش درآمده و وی می‌تواند با کمک از این ابزار، محل دقیق اجسام یا دیگر پارامترهای تعیین‌شده را در فضای حقیقی دنبال کند.

معرفی نمونه‌های موردی

به منظور بررسی و کنترل روش پیشنهادی، دو نمونه فیزیکی را نگارندگان طراحی و ساختند. در انتخاب هر دو نمونه، تلاش برآن بوده تا از فرم‌های آزادی در طراحی استفاده گردد که تنها به وسیله ربات‌ها قابلیت اجرا داشته باشند و انجام آنان با شابلون‌های دستی توجیه‌پذیر نباشد. بدین ترتیب در نمونه اول، ساخت یک دیوار آجری با فرم آزاد و در نمونه دوم، ایده اولیه یک برج انتخاب شد. یکی از مشکلات دیوارهایی با مصالح بنایی، مقاومت کم دربرابر نیروهای عمود بر صفحه در آنان است.

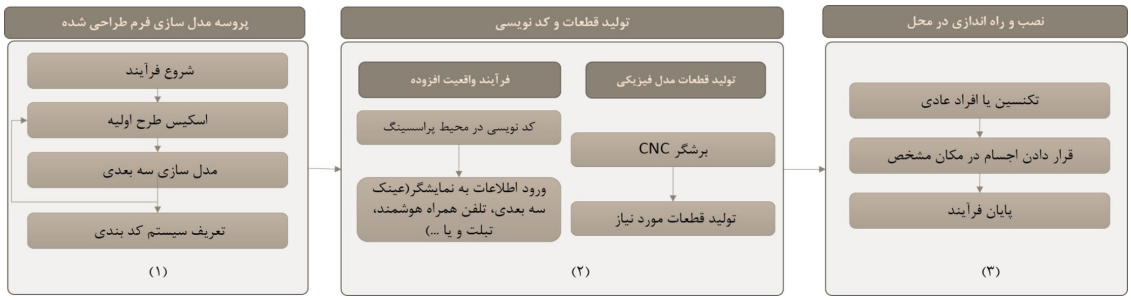


تصویر ۱۰. به‌کارگیری سیستم‌های کنترلی، مقایسه فاصله شیء حقیقی و مجازی (نگارندگان)

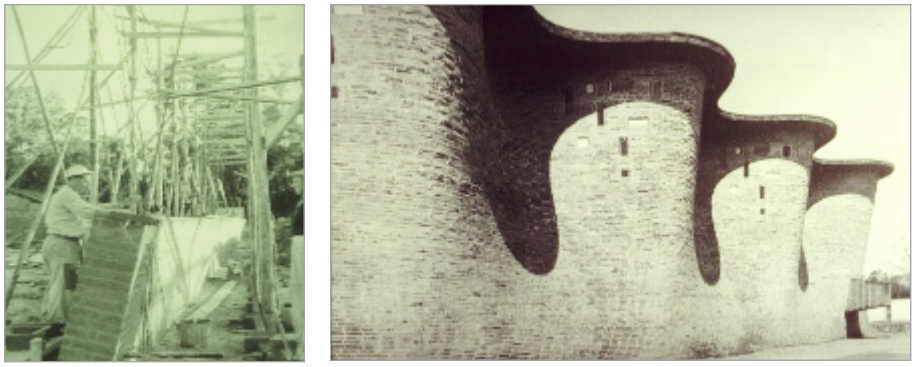
این مهم با ایجاد انحنا در سطح دیوار، علاوه‌بر زیبایی بصری، باعث افزایش مقاومت دیوار دربرابر این نیروها می‌گردد.لادیو دیسته،[۲۶] سال ۱۹۵۶ م.، نمونه‌ای از این نوع دیوار را در طرح کلیسای کریستو اوبررو[۲۷] در اروگوئه با استفاده از نیروی کار ارزان قیمت ساخته است. وی از مزیت یادشده برای تحمل بارهای خارج از صفحه دیوار بهره جسته است (گلابچی, استاتیک کاربردی برای دانشجویان معماری و مهندسی عمران, ۱۳۸۹).

نمونه شماره ۱: دیوار چینی با فرم آزاد

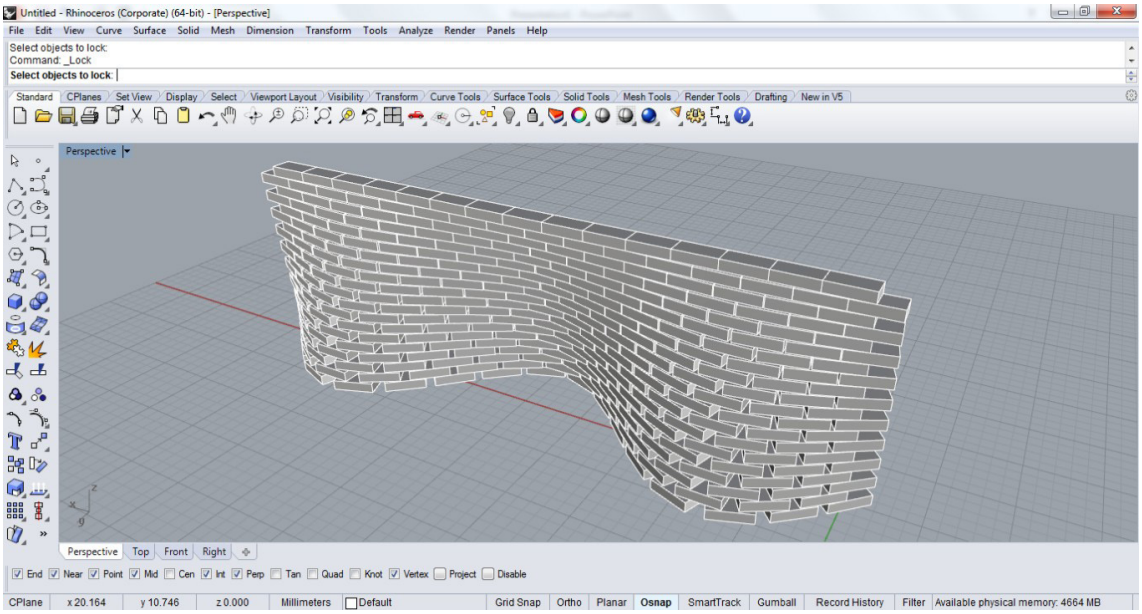
در نمونه شماره ۱، یک دیوار آجری با فرم آزاد برای ساخت انتخاب شد. این نمونه به دلیل پیچیدگی در فرم و ساخت، می‌تواند قابلیت‌های روش پیشنهادی را روشن سازد. همچنین مشابه این نمونه، در کارگاه ساخت و ساز دیجیتال بخش معماری دانشگاه هاروارد[۲۸] توسط ربات انجام شده است که می‌تواند الگوی مطلوبی برای مقایسه میان این دو روش باشد.



تصویر ۱۱. الگوریتم انجام مراحل روش پیشنهادی (نگارندگان)



تصویر ۱۲. کلیسای کریستو اوبررو و قالب‌بندی برای ساخت دیوارها (www.johankure.com)



تصویر ۱۳. مدل‌سازی اولیه در نرم افزار Rhino (نگارندگان)

مصالح استفاده‌شده در این نمونه، قطعاتی چوبی هستند که در ابعاد آجر برش داده شده‌اند.

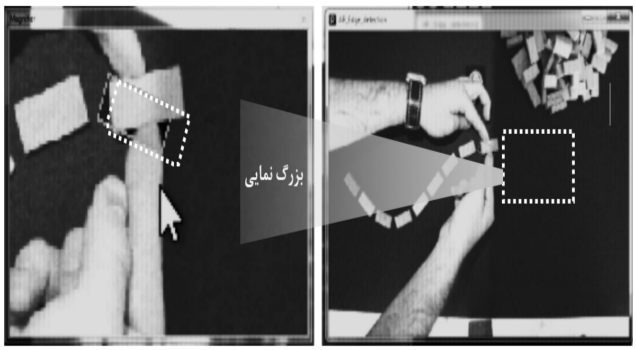
برای ساخت این نمونه، دوربین روی یک شاسی قرار داده و مکان آن ثابت در نظر گرفته شده است. نقطه نشانه در وسط تصویر قرار دارد و به عنوان مرکز مختصات نمونه فیزیکی و مجازی عمل می‌کند. در این پروژه، تعداد ۳۲۰ آجر چوبی در ۲۰ ردیف در مدت زمان ۲:۳۰ چیده شده است به گونه‌ای که در هر مقطع افقی در ترازهای مختلف، ارتفاعی منحنی تشکیل می‌دهد که نسبت به لایه‌های بالا و پائین خود منحصر به فرد است و از یک منحنی سینوسی شکل در لایه اول پائینی به سمت یک خط صاف در لایه آخر بالایی، میل می‌کند. این امر، لزوم به‌کارگیری تکنیک ساخت دیجیتال را در این پروژه

توجیه می‌کند. در مقایسه با نمونه ساخته‌شده در دانشگاه هاروارد، تفاوت چشم‌گیری در قیمت ابزار استفاده‌شده، وجود دارد. برای ساخت نمونه کارگاه دیجیتال دانشگاه هاروارد، از ربات‌های شش محوره صنعتی استفاده شده است (تصویر ۱۵).

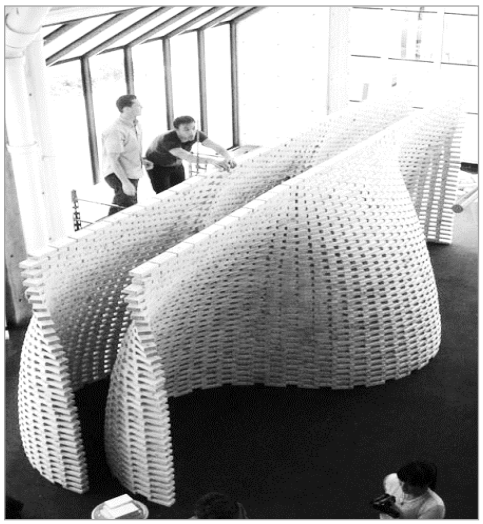
این ربات‌ها نیاز به نیروی متخصص و شرایط ویژه نصب و راه‌اندازی دارند. این در صورتی است که در شیوه پیشنهادی نگارندگان، تنها از یک دوربین و پردازشگر استفاده‌شده و نتیجه‌ای مشابه به دست آمده است (تصویر ۱۶).

نمونه شماره ۲: ایده اولیه یک برج

همانند نمونه نخست، در این نمونه نیز سعی شده است فرمی طراحی شود که بتوان آن را با نمونه‌های ساخته‌شده توسط ربات‌ها مقایسه نمود. نمونه دوم؛ ایده اولیه یک برج ۳۰ طبقه است که طبقات حول محور ارتفاع، عمل چرخش را انجام می‌دهند. نمونه‌های مشابه آن را *گرامازیو* و *کولر*[۲۹] در دانشگاه ETH توسط ربات ساخته است. تغییر زاویه و جهت در هر لایه، سبب شده تا ساخت آن بدون استفاده از ابزار دیجیتال بسیار سخت و هزینه‌بر جلوه کند. در این نمونه بر خلاف نمونه گذشته، مکان دوربین متغیر در نظر گرفته شده است و براساس بهترین زاویه دید، کاربر توانسته مکان دوربین را در هر لحظه تغییر دهد. این نمونه شامل ۱۶۰ آجر چوبی در ۴۰ لایه با مکان و زاویه‌ای منحصر به فرد است که در مدت زمان ۳۰ دقیقه، چیده شده‌اند.



تصویر ۱۴. تمرین نحوه قرارگیری قطعات و کنترل صحت انجام پروژه (نگارندگان)



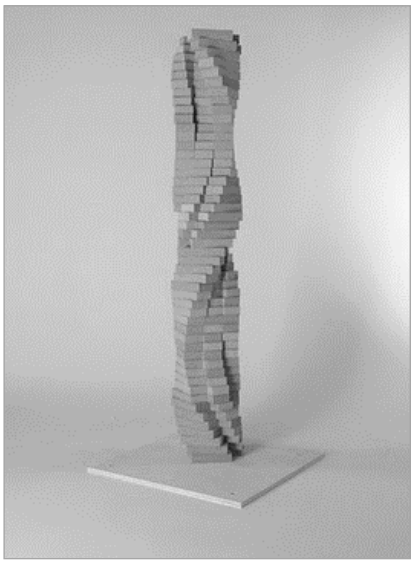
تصویر ۱۵. نمونه ساخته‌شده توسط ربات شش محوره صنعتی در دانشگاه هاروارد (www.dezeen.com)

تصویر ۱۶. نمونه ساخته‌شده با شیوه پیشنهادی نگارندگان در دانشگاه تهران (نگارندگان)

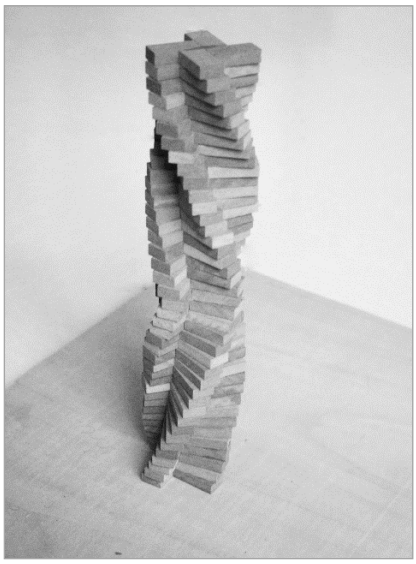
بحث

پژوهش حاضر، با معرفی سیستمی نوین در ساخت و ساز دیجیتال و بهره‌گیری از فن‌آوری واقعیت افزوده، روشی را در ساخت و ساز دیجیتال ارائه می‌نمایدکه هزینه ساخت و ساز را نسبت به دیگر روش‌های متداول، کاهش چشم‌گیری می‌دهد. یکی از زمینه‌های کاربردی روش پیشنهادی، ساخت دیوارها با فرم‌های آزاد است. این فرم‌ها باوجود انحنا در فرم خود، علاوه‌بر زمینه‌های زیبایی‌شناسی، می‌توانند در زمینه ایستایی و سازه نیز بسیار مؤثر عمل کرده و در معماری، کاربرد فراوان داشته باشند. مطالب جدول ۳، مقایسه پارامترهای دخیل در ساخت این فرم‌ها با سیستم‌های موجود و روش پیشنهادی نگارندگان برای انجام پروژه‌ای یکسان، ساخت یک دیوار با طول ۵ متر در ۵۰ لایه آجری، است. باید بیان نمود، متغیرهای ارزیابی‌شده در جدول یادشده مانند زمان و دقت اجرا، برگرفته از اطلاعات شرکت‌های سازنده در دسامبر سال ۲۰۱۳ م. همچون (kuka, 2013) و (Stäubli , 2013) همچنین، مصاحبه‌های انجام‌شده با کارشناسان این حوزه است. در بررسی میزان هزینه، می‌توان به دو نوع هزینه: ابزارآلات و انجام کار اشاره نمود که به صورت مستقل آورده شده است.

همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود، استفاده از ابزارآلات ساده و نیز عدم نیاز به نیروی متخصص، باعث شده است سیستم پیشنهادی از منظر هزینه ابزار، بیش از



تصویر ۱۷. نمونه ساخته‌شده توسط ربات در دانشگاه ETH (Kohler & Gramazio, 2008)



تصویر ۱۸. نمونه ساخته‌شدهٔ نگارندگان با شیوه پیشنهادی در دانشگاه تهران (نگارندگان)

جدول ۳. مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با سایر روش‌های مرسوم

نوع سیستم	ابزار مورد نیاز	هزینه ابزار	زمان اجرا	دقت اجرا	نیروی اجرا	توانایی اجرای فرم‌های پیچیده
ربات	ربات صنعتی ۶ محوره- رایانه	بیش از ۱۰ هزار دلار	کمتر از ۴ ساعت	بسیار زیاد (بستگی به نوع ابزار، کمتر از چند دهم میلی‌متر)	ربات	دارد
ابزار نقشه‌برداری	دوربین نقشه برداری- رایانه	بیش از ۲ هزار دلار	۵ تا ۶ ساعت	بسیار زیاد (بستگی به نوع ابزار، تا چند دهم میلی‌متر)	چند فرد متخصص	دارد
شابلون دستی	ابزار متداول ساخت به روش سنتی	کمتر از پانصد دلار	بیش از ۸ ساعت	خوب (بسته به مهارت فرد سازنده، کمتر از یک سانتی‌متر)	چند فرد	ــــــ
روش پیشنهادی (شابلون دیجیتال)	دوربین دیجیتال، رایانه، نشانه	کمتر از پانصد دلار	۵ تا ۶ ساعت	زیاد (بستگی به نوع ابزار، کمتر از ۱ میلی‌متر)	کارگر ساده با آموزش جزئی	دارد

(نگارندگان)[۲۲]

۹۵% نسبت به روش ساخت توسط ربات، ۷۵% نسبت به ساخت توسط تجهیزات نقشه‌برداری کاهش هزینه را به دنبال داشته باشد و در حدود قیمتی ساخت به شیوه‌های مرسوم و سنتی قرارگیرد. از منظر زمان تولید اگر چه نوع ابزار بسیار تأثیرگذار است اما زمان به دست آمده در طی آزمایش‌ها، در بازه مطلوبی در ساخت و ساز قرار دارد.

نتیجه‌گیری

پیشرفت روزافزون علوم رایانه و صنعت سبب شده است تا بشر روزبه‌روز ابزارآلات متعددی برای انجام کارهای خود تولید کند. با پیدایش رایانه‌ها در دهه ۰۶ م.، دریچه‌ای نوین به سوی معماران گشوده شد. ابزار جدید، این امکان را برای معمار فراهم می‌کرد که بتوانند فرایند طراحی و اجرای پروژه خود را آسان سازند. گرایش معماران به فرایندهای ساخت و ساز دیجیتال، به علت کاهش هزینه تولید، بالابردن دقت و امکان شخصی‌سازی انبوه، رو به افزایش است. ابزارهایی مانند دستگاه‌های برش لیزری، ربات‌ها و دیگر انواع ابزار ساخت و ساز دیجیتال به معماران امکان خلق فرم‌هایی را می‌دهد که در گذشته امکان‌پذیر یا توجیه‌پذیر نبوده‌اند. اما همچنان مشکلات زیادی بر سر راه استفاده از این ابزارآلات وجود دارد. مشکلاتی از قبیل گرانی ابزارآلات، پیچیدگی استفاده و نیاز به نیروی متخصص باعث شده است که استفاده از این‌گونه ابزارها در برخی پروژه‌ها توجیه‌پذیر نباشد و این امر، لزوم انجام پژوهش در شیوه‌های ساده‌تر و ارزان‌تر ساخت دیجیتال مشخص می‌نماید.

در این پژوهش، روش نوینی برای ساخت و ساز فرم‌های آزاد در معماری براساس تکنیک واقعیت افزوده، ارائه شد که می‌تواند با ساده‌سازی فرایند انجام پروژه در عین حفظ دقت، امکان به‌کارگیری کاربران غیر متخصص با آموزش جزئی را برای خلق فرم‌های پیچیده فراهم کند. همچنین، سبکی ابزارآلات ساخت و سهولت حمل این ابزار باعث می‌شود، در مقایسه با ربات‌ها بتوانند در محل پروژه به راحتی از آن‌ها استفاده کرد. سیستم کدبندی پیشنهادی در قالب محیط کدنویسی پراسسینگ، با استفاده از ابزار و تکنیک‌های واقعیت افزوده، امکان تشخیص و کنترل مختصات سه بعدی را در فضا بدون به‌کارگیری ابزار پیچیده به کاربر می‌دهد. به‌کارگیری این روش در پروژه‌های مشابه، می‌تواند هزینه اولیه قطعات را تا نود و پنج درصد نسبت به سیستم‌های بازوی رباتیک و هفتاد و پنج درصد نسبت به سیستم‌های نقشه‌برداری، کاهش دهد.

پی‌نوشت

1. Free Forms
2. Computer Aided Design & Computer Aided Manufacturing
3. Augmented Reality
4. 3D Printers
5. Le Corbusier
6. Buckminster Fuller
7. Norman Foster
8. A house is a machine for living
9. Japanese Industrial Robot Association
10. Processing Scripting Language
11. Rhino
12. Grasshopper
13. B-Spline Basis Function
14. NURBS Surfaces
15. Computer Numerical Control
16. Laser Cutters
17. Vinyl Cutters

18. Press Brake: ابزاری برای برر و فرم دهی قطعات با استفاده از نیروی پرس هیدرولیک.
19. On-site fabrication
20. Ronald Azuma.
21. Google Glass
22. Edge Detection
23. Processing scripting language: (Fry et al, 2013)
زبان برنامه نویسی که برای هنرمندان در دانشگاه ام‌آی‌تی در سال ۱۰۰۲ بوجود آمد
24. AutoCAD
25. 3D Max
26. Eladio Dieste
27. Cristo Obrero church in Atlantida:
معمار پروژه با استفاده از سیستم قالب بندی، از فرم های آزاد در ساخت دیواره ها و سقف های بنا بهره برده است.
28. School of Design at Harvard University
29. Gramzio & Kohler

۳۰. این مقایسه براساس حدود قیمتی در دسامبر سال ۲۰۱۳ م. به دست آمده است.

منابع و مآخذ

- فاضل، علیرضا (۱۳۹۲). **فرم‌یابی و بهینه‌سازی سازه‌های پوسته‌ای شبکه‌ای با فرم آزاد**، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، تکنولوژی معماری، تهران: دانشگاه تهران.
- قبادیان، وحید (۱۳۸۵). **مبانی و مفاهیم در معماری معاصر غرب**، چاپ پنجم، تهران: دفتر پژوهش‌های فرهنگی.
- گلابچی، محمود (۱۳۸۹). **استاتیک کاربردی برای دانشجویان معماری و مهندسی عمران**، تهران: دانشگاه تهران.
- گلابچی، محمود؛ اندجی گرمارودی، علی؛ باستانی، حسین (۱۳۹۱). **معماری دیجیتال**، تهران: دانشگاه تهران.

- Abelson, H., Sussman, G. & Sussman, J. (1996). **Structure and interpretation of computer program.** Massachusetts, Cambridge: MIT Press.
- Afify, H. & Elghaffar, Z. (2007). **Advanced digital manufacturing techniques (CAM) in architecture**. Egypt: Menoufia University Press.
- Azuma, R. (1997). A survey of augmented reality**. Teleoperators and Virtual Environments** 6(4):
- Bonwetsch, T., Gramazio, F. & Kohler, M. (2006). The informed wall: applying additive digital fabrication techniques on architecture. Louisville, 2006: Synthetic Landscapes, Proceedings of the 25th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture.
- Budny, E. (1996). **Automation in construction**. Warsaw: Elsevier Science.
- Corbusier, L. (1986). **Towards a new architecture.** New York: Dover Publications.
- Domhan, T. (2010). **Augmented reality on android smartphones**. Stuttgart: Department of Information Technology, Duale Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart.
- Dunn, N. (2012). **Digital fabrication in architecture**. London: Laurence King Publishing LTD.
- Fontana, M., Giannini, F. & Meirana, M. (1999). **A Free form feature taxonomy.** The Eurographics Association and Blackwell Publishers.
- Fry, B. & Reas, C. (2013). Processing Language. http://processing.org/people (access date September 10, 2013).
- Gramazio, F. & Kohler, M. (2006). The programmed wall. Zurich [Online] ETH Zurich Departement Architecture Available at: http://www.dfab.arch.ethz.ch/web/e/lehre/81.html (access date: September 2009).

- Gramazio, F. & Kohler, M. (2011-2012). **Flight assembled architecture**. ETH Zurich: FRAC Centre Orléans.
- Hasegawa, Y. (1986). Robotization of reinforced concrete building construction in Japan. Marseilles: Paper presented at the CAD and Robotics in Architecture and Construction.
- Höllerer, T. & Feiner, S. (2004). **Telegeoinformatics: Location-based computing and service.** Taylor & Francis.
- Jacobs, J. (2013). Algorithmic craft: The synthesis of computational design, digital fabrication and hand craft. MS Thesis in Media Arts and Sciences: MIT Press.
- Kipper, G. & Rampolla, J. (2013). **Augmented reality: An emerging technologies guide to AR.** London: Elsevier.
- Kohler, M. & Gramazio, F. (2008.). Manufactoring Material Effects Rethinking Design and Making Architecture. New York: In Kolarevic, B. & Klinger, K.
- kuka. (2013). kuka. http://www.kuka-robotics.com/en (access date: December 16, 2013)
- Liu, Y. (2009). **Robotic design construction: Digital fabrication starategies for freeform masonry casting and mobile assembly**. Master of Science in Architecture Studies, MIT Press.
- Miller, A. (2010). **Digital fabrication: Superseding hand crafted techniques**. Manchester: Manchester School of Architecture, University of Manchester Press.
- MIT Masonry Research Group. (2011). **A project of the MIT masonry research group with Professor John Ochsendorf and ODB structural engineering consultants**. USA: MIT Press.
- Niemeijer, R. A. (2011). A user-oriented approach for mass customization. Technische Universiteit Eindhoven Press, 10-24.
- Noble, D. (1984). **Forces of production: A social history of industrial automation**. New York: Knopf.
- Nyirenda, P., Mulbagal, M. & Bronsvoort, W. (2006). Definition of freeform surface feature classes. **Computer-Aided Design and Applications,** Vol. 3, Iss. 5.
- Oloufa, A. (1993). Modeling and simulation of construction operations. **Automation in Construction**: 351-359.
- Rocker, I. (2009). **On the Bri(n)ck' at graduate school of design**. Cambridge, MA: Harvard University, Graduate School of Design.
- Spiller, N. (2009). Digital architecture now: A global survey of emerging talent. United Kingdom: Thames & Hudson.
- Stäubli . (2013). Stäubli robots. http://www.staubli.co.uk/en/robotics (access date: Decemper 16, 2013)
- Whyte , J. (2004). **Virtual reality and the built environment**. UK: Architectural Press.

Maremat & Me'mari-e Iran
Vol.4,No.8, Fall & Winter 2014-2015

Received: 2014/8/2
Accepted: 2015/1/17

Introducing a new Approach in Digital Fabrication based on Augmented Reality Technology in Architecture

Abbasali Izadi* Alireza Fazel Ramtin Khal'atbari*** Sara Akuchikian******

Abstract

By introducing new digital fabrication techniques and robotic fabrication in the 20th century, architects were encouraged to use innovative materials and novel tools to solve the problems not only in design but also in construction. Robots allow architects to design a more complex machining process for on-site fabricating work but they are very costly and complicated as well.

Because of rapid development and adoption of Augmented Reality (AR) applications, there are numerous opportunities for integrating AR and improving conventional methods used in various fields such as architecture, engineering, construction and facility management. This paper demonstrates a new method of digital fabrication based on "Augmented Reality" which can reduce construction cost using simple utilities (such as digital camera, monitor and processor) as well as providing the opportunity of constructing free-form surfaces. All codes are developed in "Processing" scripting language and the form is developed in "Grasshopper", a graphical algorithm editor integrated with "Rhino's" 3-D modeling tools. Finally, the efficiency of this method is studied in two examples.

Keywords: digital fabrication, augmented reality, virtual reality, robotic construction, free form design

* Assistant professor, School of Architecture, University of Tehran
** MA in Architectural Technology, School of Architecture, University of Tehran
*** MA in Architectural Technology, School of Architecture, University of Tehran
**** MA Student of Low Energy Architecture, School of Architecture, University of Tehran