مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۴، صص. ۱۰۱-۱۰۹، (پژوهشی)

Original Article

شناخت عامل‌های اکولوژیکی تطبیق‌پذیر و بهره‌گیری از آن در ساختارهای معماری

علی احمدیان* **(دانشجوی دکتری)**
دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

شبنم صالحی (دانشجوی دکتری)
دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران غرب، ایران
دانشکده هنر و معماری، دانشگاه کالیفرنیا، لس‌آنجلس

روزبه نقشینه (استادیار)
مرکز تحقیقات اقتصاد خلاق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران غرب، ایران

درک معماری به عنوان اکولوژی سیستم‌های تعاملی، گرایش‌های ثابت و محدود گذشته را به سمت ساخت محیط‌هایی پویا و تطبیق‌پذیر با شرایط جدید تبدیل می‌کند. در این چارچوب، محیط در پی ساخت سناریو تعامل است تا روابط بین اجزاء را فعال کند. در پژوهش حاضر، به طراحی سیستمی پرداخته شده است که می‌تواند در آینده جایگزین شیوه‌های فعلی برنامه‌ریزی ساخت واحدهای ساختمانی شود. نتیجه این پژوهش، شبیه‌سازی یک سیستم خودمونتاژ سلولی است که می‌تواند در صورت لزوم تولید کند و در صورت نیاز ساختار خود را بازسازی نماید. در مدل پیشنهادی از یک سیستم کنترلی دو سطحی (میکرو و ماکرو) استفاده شده تا تعاملات بین اجزاء و محیط رشدشان از سوی دیگر به درستی و در راستای رسیدن به اهداف طرح و تعادل کل سیستم تنظیم شود. در انتها، نتایج شبیه‌سازی درمقیاس‌های مختلف با نرم‌افزار گرسهاپر نمایش داده شده است. با توسعه‌ی این مدل می‌توان گام مهمی در توسعه‌ی ماشین شبیه‌ساز ساخت سامانه‌ی خودمونتاژ سلولی بر اساس پیکربندی‌های متوالی و پر تعداد برداشت.

واژگان کلیدی: اکولوژی‌های تطبیق پذیر، انتشار تجمعی محدود، خودمونتاژی، ساخت برگشت‌پذیر، معماری زنده.

a_ahmadian@sbu.ac.ir
shabnamsalehi@g.ucla.edu
roozbeh.naghshineh@polimi.it

۱. مقدمه

امروزه، تقاطع اطلاعات و زندگی و ماده، حاکی از پیچیدگی‌هایی است که احتمال وجود سنتزی عمیق‌تر را نشان می‌دهد. در چنین شرایطی، این معماری است که باید پاسخی ریشه‌ای به چالش‌های اجتماعی و فرهنگی جدید و روند پرشتاب شهرنشینی بدهد.[۱] چالش اصلی در یک سامانه‌ی متابولیسم شهری در ظرفیت آن شهر به تعامل، دریافت و ارسال اطلاعات در نقاط با مقیاس‌ها و اجزای مختلف شهر (زیرساخت، ساختمان‌ها، فضاهای عمومی، شرایط محیطی، جریان‌ها و شریان‌های شهری) نهفته است.[۱] این بحث به مفاهیم اساسی در رابطه با اهمیت سیستم‌های همزیستی سازمان‌دهنده بر اساس داده‌های زمان واقعی[۱] است که می‌تواند بیشتر با زبان سیستم‌های پاسخگو و سامانه‌های متابولیک بیان شود. به عبارت دیگر، جایی که تصمیمات کوچک می‌تواند منجر به تأثیرات بزرگی در مقیاس شهر ایجاد کند. شهر پس از آن مانند موجودات زنده رفتار می‌کند.[۱]

پژوهش حاضر بر مبنای یک شاخه از معماری زنده است که با الهام از منطق تشکیل و رشد الگوهای موجود در طبیعت، به مطالعه و طراحی سامانه‌های اکولوژیکی قابل تطبیق با محیط پیرامون خود می‌پردازد. این پژوهش به دنبال پاسخ به پرسش‌های زیر است:

الف) مولفه‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی یک معماری زنده چیست؟

ب) این مولفه‌ها چگونه در ایجاد یک مکانیسم پویا و به دنبال آن سیستمی زنده مشارکت می‌کنند؟

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۱/۳، اصلاحیه ۱۴۰۲/۱/۱۸، پذیرش ۱۴۰۲/۱/۲۸.

استناد به این مقاله:
احمدیان، علی، صالحی، شبنم، و نقشینه، روزبه، ۱۴۰۲. شناخت عامل‌های اکولوژیکی تطبیق‌پذیر و بهره‌گیری از آن در ساختارهای معماری. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۴)، صص. ۱۰۱-۱۰۹. DOI:10.24200/J30.2023.61722.3192

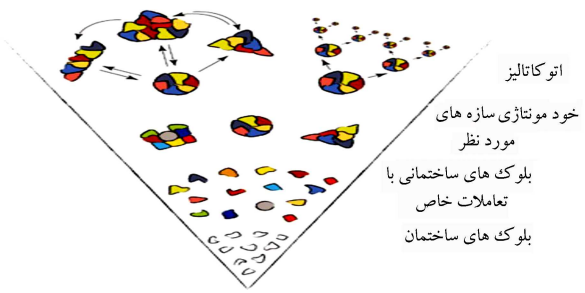
ج) قابلیت حرکت و پویایی این سیستم‌ها چگونه در مقیاس‌های مختلف معماری استفاده می‌شود؟

در همین راستا، ابتدا به تجربیات بهره‌گیری از ساختار ارگانیسم‌های زنده‌ی موجود در طبیعت به منظورکاربردشان در سامانه‌های ساخت دست بشر اشاره شده است که در سالیان اخیر به لطف پیشرفت‌های فنّاوری در حوزه‌های رایانش معماری و ساخت رایانشی به سرعت در حال رشد و تکامل است. در ادامه، پس از معرفی الگوریتم‌های به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها، به طراحی چند نمونه در مقیاس‌های مختلف پرداخته شده است. در پژوهش لِدار و همکارانش، تحقق چنین رویکردهایی به‌صورت ساخت فیزیکی نیز بررسی شده است.[۲]

۱.۱. خودمونتاژی

خودمونتاژی به تنظیمات خودبه‌خودی واحدهای یک ساختار برای تشکیل ساختاری بزرگتر از طریق تعاملات محلی اشاره دارد. این فرایند از طریق کدهای اطلاعاتی (مانند شکل، خواص سطحی، بار، خواص قطبی، دو قطبی مغناطیسی، جرم و غیره) در اجزاء منحصر به فرد امکان‌پذیر است.[۳] موارد اشاره شده، ویژگی‌هایی هستند که مسیر تعامل واحدهای سازنده را تعیین می‌کنند. چهار ویژگی اساسی که مشخصه‌ی پروسه‌های خودمونتاژ طبیعی است، عبارتند از: ذرات تشکیل‌دهنده‌ی ساختار، نیروهای اتصال، محیط و نیروی محرکه‌ی مورد نیاز. ذرات ساختاری[۲]، واحدهای سازنده یک سیستم خودمونتاژ می‌باشند. نیروهای اتصال نیز نیروهایی‌اند که ذرات را کنار یکدیگر نگه می‌دارد (نمونه‌هایی از چنین نیروهایی عبارتند از: مویرگی، الکترومغناطیسی و پیوندهای شیمیایی). محیط، بستر این فرایند است. این ذرات، در یک محیط تعبیه شده و این محیط برای عملکرد نیروهای اتصال بسیار مهم است. از طریق دستکاری این محیط، نیروهای اتصال و نحوه‌ی قرارگیری ذرات را می‌توان تغییر داد. در نهایت، نیروی محرکه، آن نیرویی است که سیستم را به حرکت در می‌آورد.[۳و۴] چهار مولفه‌ای که در سیستم‌های خود مونتاژ طبیعی به کار می‌روند، در سیستم‌های مهندسی نیز استفاده می‌شوند. دو نوع اصلی آن، خودمونتاژی ایستا و پویا هستند. سیستم‌های استاتیک در فرایندهای خودمونتاژ، سیستم‌هایی هستند که رسیدن به تعادل جهانی[۳] یا محلی[۴] را بدون آزاد کردن انرژی انجام می‌دهند. سیستم‌های دینامیک، گونه‌ی دیگری از این سیستم‌ها هستند که از طریق آزاد کردن انرژی[۳] پایدار باقی می‌مانند.[۵]

به نظر می‌رسد ویژگی‌هایی که از مواد پیشرفته‌ی آینده انتظار می‌رود، در سیستم‌های بیولوژیکی یافت می‌شوند. این مواد بیولوژیکی بسیار کاربردی هستند و این امر از تعاملات بسیار خاصی که در سطح میکروسکوپی شکل می‌گیرد منتج شده است و از طریق واکنش‌های مکانیکی، مکانیزم‌های بازخوردی و پردازش اطلاعات سلسله‌مراتبی به رفتار ماکروسکوپی منتقل می‌شود.[۶] طراحی با الهام از زیست‌شناسی، یک پارادایم قدرتمند برای تولید مواد پیشرفته است که متکی بر طراحی پایین به بالا[۵] از بلوک‌های ساختاری در تعامل دقیق برنامه‌ریزی شده است (شکل ۱). بلوک‌های ساختاری، بدون محرک خارجی به یک ماده‌ی کاربردی مونتاژ می‌شوند و در محلی قرار می‌گیرند که ناشی از نوسانات حرارتی، کاتالیزورها یا انرژی‌های خارجی اعمال شده است. چالش طراحی مواد مصنوعی با ویژگی‌های پیچیده، متکی بر پژوهش‌های میان رشته‌ای است. تحقیقات مرتبط در دانشگاه هاروارد نشان داده است که چگونه یک ماده مصنوعی می‌تواند یکی از ویژگی‌های اساسی مواد بیولوژیکی یعنی توانایی ساختن ساختارهای پیچیده به‌صورت خود به خودی را نمایش دهد.[۶و۷] استراتژی برای طراحی ساختارهای پیچیده‌ی دلخواه،



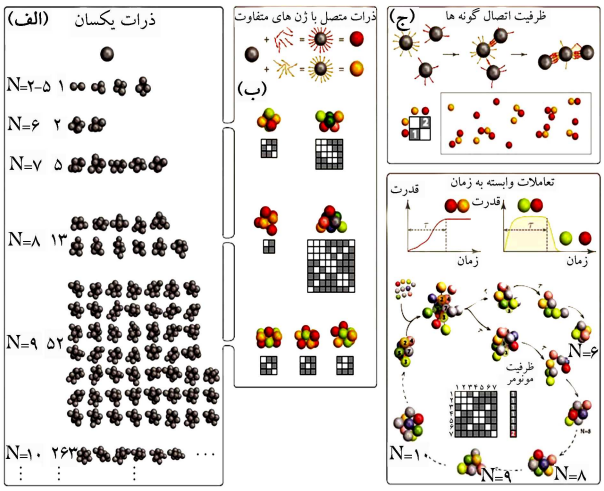
شکل ۱. بلوک‌های مختلف تشکیل دهنده یک ساختار طراحی شده‌اند تا به شیوه‌های خاصی تعامل داشته باشند (منبع: زرواچیچ، ۲۰۱۶).

تعامل ویژه‌ای میان بلوک‌های ساختمانی را می‌طلبد تا ساختار مورد نظر را به لحاظ سطح انرژی مطلوب فراهم کند. مطمئن‌ترین راه انجام این کار این است که هر ذره در ساختار هدف خود متفاوت باشد و با تعامل میان ذرات انتخاب شده به شکل‌گیری نوعی از پیکربندی محلی که مورد نظر است منجر شود. تعاملات بین ذرات مختلف به‌صورت یک ماتریس روابط کدگذاری می‌شوند که مشخص‌کننده‌ی انرژی متقابل بین هر جفت ذره است.[۷]

اسکایلر تیبتس در دانشگاه ام آی تی در سال ۲۰۱۰ مدلی را با عنوان (منطق ماده ۶)[۶] معرفی کرد که سیستمی از ماژول‌های غیرفعال با منطق دیجیتالی ـ مکانیکی برای ساخت و ساز ساختارهای بزرگ‌مقیاس خودمونتاژی بود. وی با ارائه یک ماژول مکانیکی که منطق دیجیتال NAND را به عنوان ابزاری موثر برای رمزگذاری توالی‌های مونتاژ محلی و جهانی در نظر می‌گیرد، سیستم خود را معرفی می‌کند.[۵] او استدلال کرد که اگر ما بخواهیم ساختارهای پیچیده‌تر از امروز بسازیم، پس باید اطلاعات مونتاژ جداگانه (گسسته)[۷] را به‌طور مستقیک به مواد خود منتقل کنیم تا بتوانیم ساختار موفقیت‌آمیزی از ساختارهای پیچیده را هدایت کنیم.[۵] همچنین، در آزمایش‌های دیگری امکان پیاده‌سازی چنین روابطی میان اجزای یک ساختار با استفاده از رباتیک نرم نیز مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است.[۵]

در پژوهشی دیگر که توسط مایروپولوس در سال ۲۰۱۵ صورت گرفته است، پروسه‌ای از سیستم‌های خودمونتاژ با عنوان (سلول اِم)[۸] معرفی شده است. مایروپولوس بیان می‌کند که این سامانه بر اساس یک واحد مونتاژ به نام (سلول اِم) شکل می‌گیرد که خود از دو جزء تشکیل شده است که عبارتند از: یک بلوک و یک غشاء (که در آن یک بلوک تعبیه شده است). در طی مراحل مونتاژ، غشاء به عنوان محیط مونتاژ برای بلوک‌ها عمل می‌کند. هنگامی که پروسه به اتمام می‌رسد، بلوک‌ها به صورت شبکه‌های فضایی ساخته شده‌اند.[۸]

سپس، غشاء این شبکه را احاطه کرده و در نتیجه یک شی جامد به نام اِم[۹] ایجاد می‌کند. اِم، محصول این پروژه است. این یک شی پویا است که می‌تواند به راحتی اصلاح گردد، گسترش یابد یا برچیده شود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند کاربردهای مهمی در ساخت سازه‌ها در موقعیت‌های خاص و در زمینه ساخت سریع[۱۰] داشته باشد.[۸] در سال‌های اخیر دیرشیس و همکارانش در دانشگاه اشتوتگارت مطالعات متعددی پیرامون شکل‌گیری خودبه‌خودی مواد گرانولی در ساختارهای معماری انجام داده‌اند.[۹] این پژوهش‌ها در سطح خرد نیازمند فهم دقیق ارتباطات بین ذرات است. در شکل ۲ قسمت‌های مختلف یک نمونه از فرایندهای خودتکرارکنندگی کلوئیدی که توسط زرواچیچ در مقاله خود پیرامون خودتکراری ذرات کلوئیدی[۱۱] که در سال ۲۰۱۷ ترسیم شده، نشان داده شده است.[۷] در قسمت الف، ذرات یکسان با محدوده‌ی جذب کوتاه‌برد می‌توانند خوشه‌های مختلفی با خواص سفت و سخت از تعداد مختلف N تشکیل دهند. تعداد آن‌ها به سرعت با N (ستون دوم اعداد) رشد

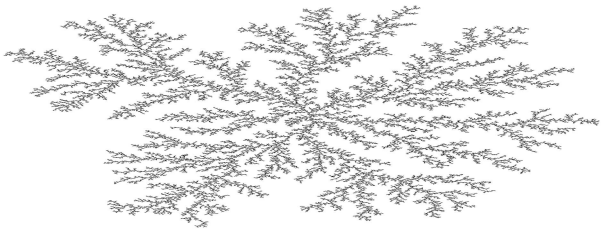


شکل ۲. الف تا ج) نمایش نحوه‌ی تعامل ذرات کلوئیدی در یک سامانه‌ی خودتکرارکننده (منبع: زرواچیچ، ۲۰۱۷).

می‌کند. این خوشه‌ها حالت‌های پایه یک سیستم با ذراتی به تعداد N هستند و در آزمایش‌های خودمونتاژی مشاهده می‌شوند. در قسمت ب، انواع نیروهای مختلف که ترکیبات متفاوتی از ذرات را ایجاد می‌کنند (ردیف بالا)، نشان داده شده است. انتخاب هر یک از این رویکردها تعیین می‌کند که آیا تعاملات از نوع جاذبه یا دافعه هستند (سه ردیف پایین). هر گونه از هندسه‌های خوشه‌ای، اگر گونه‌ی ذرات انتخابی آن مناسب باشد، می‌تواند یک حالت پایه منحصر به فرد خودمونتاژی از تعداد ذرات N ایجاد کند. در شکل ۲ قسمت ب، یک ماتریس با مجموعه‌ای از تعاملات متقاطع بین گونه‌ها نشان داده شده است که در آن جاذبه‌ها با رنگ خاکستری و دافعه‌ها با رنگ سفید (ردیف دوم) مشخص شده‌اند. ترکیبات حداکثری برای دو خوشه N برابر با ۶، هشت ضلعی و یک چند وجهی (ردیف سوم) می‌باشد. قابلیت‌های طراحی چیدمان‌ها به هندسه خوشه وابسته است. در N برابر با ۸، خوشه‌ی سمت چپ دارای حداقل تنوع ارتباطی تنها با دو گونه است. خوشه‌ی سمت راست فقط دو حرف دارد، هر یک با حداکثر اندازه‌ی ۸ (ردیف چهارم) می‌باشند. در N برابر با ۹، این عدد حداقل ۳ است و سه هندسه‌ی متفاوت وجود دارد که دارای چنین شکلی می‌باشند (ردیف بالا) برای هر یک از تعاملات جزئی بین ذرات (زرد و قرمز)، ظرفیت متناظر (دفع یا جذب) می‌تواند برقرار شود (ماتریس را ببینید). برای مثال، نیروی میان ذرات می‌تواند با استفاده از ماتریس‌های روابطی که میان آن‌ها تعریف می‌شود (ردیف بالا)، با روش‌های مختلف کنترل شود. مقدار این ظرفیت، پوشش ممکن را در ساختارها محدود می‌کند و امکان کنترل واکنش‌ها را به‌صورت فله‌ای می‌دهد (ردیف پایین). ردیف بالا، دو نوع متفاوت از تعاملات وابسته به زمان را نشان می‌دهد. واکنش‌های قالب نیازمند هر دو تعاملی هستند که یکی با زمان تقویت می‌شود (سمت چپ) و دیگری با زمان (راست) ضعیف می‌شود. نمودار انتهایی نشان‌دهنده‌ی یک چرخه‌ی کاتالیزوری شامل خوشه‌ی کروی در N برابر با ۷ و با تعداد ذرات دانه‌ای است که دارای ماتریس تعامل مشخص شده و ظرفیت‌های متناسب با مونومرها (مرکز) است. رفتار کاتالیزوری پیچیده، از جمله خودتکراری، نتیجه‌ی حاصل از ذراتی با غلظت ۲ (ذرات ۷ دانه‌ای) و تنوع در مقیاس زمانی τ تقویت‌کننده و تضعیف‌کننده است.[۷]

۲.۱. ساختارهای تجمعی[۱۲]

روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی فرایندهای انتشار ذرات شیمیایی و فیزیکی در



شکل ۳. یک نمونه‌ی کلاسیک از یک ساختار تجمعی دوبعدی با ضریب چسبندگی صفر و شامل ۳۰۰۰۰ ذره (بروک، ۲۰۰۴).

محیط انتشارشان توسط رایانه وجود دارد. شاید رایج‌ترین آن‌ها، شروع با یک تصویر سفید با یک پیکسل سیاه در مرکز باشد. نقاط جدید در مرزها معرفی می‌شوند و به‌طور تصادفی (حرکت براونی) راه می‌روند تا آنقدر نزدیک شوند که به پیکسل سیاه موجود بچسبند.[۱۰] یک مثال معمول از این مورد در شکل ۳ نشان داده شده است. اگر نقطه‌ای در طول راه رفتن تصادفی خود به لبه‌ی تصویر نزدیک شود، دو استراتژی وجود خواهد داشت. نقطه یا از لبه پرش می‌کند یا تصویر به‌صورت حلقوی محدود می‌شود (نقطه‌ای که از لبه‌ی چپ خارج می‌شود، از سمت راست وارد می‌شود و نقطه‌ای که از لبه‌ی سمت راست خارج می‌شود، در سمت چپ وارد می‌شود. به طور مشابه برای بالا و پایین نیز این فرایند تکرار می‌شود). به‌طور کلی، نقاط جدید را می‌توان در هر نقطه از ناحیه‌ی تصویر، نه فقط در اطراف مرز، بدون هیچ تفاوت بصری قابل توجهی نشان داد.[۱۰] آراندا و لش در سال ۲۰۰۶ و با پروژه‌ای به نام گروتو پاویون[۱۳] و با استفاده از الگوریتمی مشابه به ارائه پروتوتایپ‌هایی سریالی از واحدهای تکرارشونده پرداختند. ساختارهای ارائه شده بر مبنای روش تایل‌بندی دنزر[۱۴] و هندسه‌های ورونوی[۱۵] شکل گرفته بودند. گروتو پاویون شامل ۴ مدول پایه بود که با چسبیدن به یکدیگر به‌صورت‌های مختلف، فرم‌های سه‌بعدی تولید می‌کردند. این پاویون بر اساس زمان تکامل نمی‌یافت بلکه پاویون هر زمان که پروسه تولید سلول‌ها متوقف می‌شد، کامل می‌گردید.[۱۱]

۳.۱. مونتاژ گسسته[۱۶]

به عنوان بخشی از تحقیقات امروزین پیرامون شیوه‌های طراحی دیجیتال، توجه تحقیقات معماری به سوی مجموعه‌های گسسته از اجزای مدولار جلب شده است. این امر با ظهور ایده‌هایی در رابطه با طراحی ترکیبی[۱۲]، مونتاژ گسسته[۱۳] و اتصال برگشت‌پذیر[۱۴] همزمان همراه بوده است. در سال‌های اخیر پیشنهادات مختلفی برای طراحی به وسیله مجموعه‌های گسسته ارائه شده است. تیبتس، چارچوبی برای نمایش مونتاژ بلوک‌های هوشمندی که توانایی پیکربندی دوباره در پاسخ به محیط خود را داشتند ارائه کرد.[۵] جوناس (۲۰۱۴)، استراتژی خاصی برای ساخت به روش مونتاژ گسسته از عناصر هندسی گسسته موجود را ارائه کرد که مانند فرایندهای تولید تجمعی بود. روسی و تسمان، با توجه به نیاز طراحانی که از دانش برنامه‌نویسی خوبی بهره نمی‌برند، چارچوبی بر پایه‌ی قوانینی تعریف شده به منظور تولید طرح‌هایی مبتنی بر مونتاژ تکرارشونده‌ی واحدها با اتصالات گسسته در محیط گرسهاپر ارائه نمودند.[۱۴] لو و همکاران، با معرفی سیستمی مبتنی بر فنّاوری واقعیت افزوده، روشی را ارائه دادند که با تکرار یک الگوریتم مونتاژ به‌صورت شبیه‌سازی شده امکان کنترل جانمایی قالب‌های بلوک‌های بتنی را تا رسیدن به محصول دلخواه به کاربران می‌دهد.[۱۵]

رتسین و همکارانش، نمونه‌هایی ساخته شده به روش اجزای گسسته را معرفی و ارائه کردند.[۱۶] این پژوهش بر مبنای دو پروژه‌ای انجام شده که روش‌های طراحی برای محاسبات گسسته و ساخت افزایشی را مورد بررسی قرار می‌دهند. اولین پروژه،

(ب) (الف)

شکل ۴. الف) مدل ساخته شده INT و ب) CurVoxels.

CurVoxels و دومین پروژه INT نام دارد (شکل ۴). آن‌ها چارچوب طراحی و ساخت گسسته‌ی خود را با تحقیق پیرامون مواد به اصطلاح دیجیتال یعنی موادی که از لحاظ فیزیکی دیجیتال هستند، هماهنگ می‌کند.[۱۷]

هر دو پروژه روش‌های طراحی و ساختی را ارائه می‌دهند که نیازی به هیچگونه فرایند پسامنطقی‌سازی[۱۷] ندارند. این پژوهش استدلال می‌کند که در مقایسه با چاپ سه بعدی، تولید گسسته رباتیک فرصت‌های بیشتری را از لحاظ سرعت، چندمادگی و برگشت‌پذیری ارائه می‌دهد.[۱۶] روش‌های پیشنهاد شده نشان می‌دهد که چگونه استراتژی‌های گسسته می‌توانند اشکال پیچیده، سازگار و ساختارمند ایجاد کنند. علاوه بر این، با حرکت دادن محاسبات به فضای فیزیکی، تولید گسسته می‌تواند شکاف قابل مشاهده بین شبیه‌سازی و ساخت را با پلی به یکدیگر متصل کند. این شکاف نتیجه‌ی یک فرایند دو مرحله‌ای است که معمولا با استراتژی‌های طراحی محاسباتی همراه است که در آن طراحی برای اولین بار به‌صورت دیجیتال توسعه داده شد و پس از آن برای ساخت به کار گرفته شد.

۲. متدولوژی

در طول عمر پژوهش‌های بیونیک، فرایند و روش‌شناسی الگوبرداری از طبیعت بر پایه‌ی دو نوع روش مبتنی بر راهکار[۱۸] و روش مبتنی بر مسأله[۱۹] تثبیت شده است. همچنین طراحی در این دو حوزه تحت دو عنوان «رویکرد مسأله محور» و «رویکرد راه‌حل محور» شناخته می‌شود. طراحی مسأله محور، نگرشی است که در آن طراحان برای حل مسائل به طبیعت نگاه می‌کنند. در این رویکرد، طراحان ابتدا مسائل را مشخص می‌کنند و سپس زیست‌شناسان این مسائل را با ارگانیسم‌هایی که موارد مشابه را حل کرده‌اند، تطبیق می‌دهند. این نگرش به‌طور موثری با تشخیص اهداف ابتدایی و پارامترهای طراحی توسط طراحان هدایت می‌شود. طراحی راه حل محور، رویکردی است که در آن معلومات زیست‌شناسی بر طراحی انسان تأثیر می‌گذارد. در این رویکرد، فرایند طراحی در ابتدا وابسته به افرادی است که بیشتر دارای دانش زیست‌شناسی هستند تا دانش طراحی.[۱۸] این افراد راه‌حل‌های زیستی را شناسایی می‌کنند و سپس طراحان از این راه‌حل‌ها برای حل مسائل طراحی استفاده می‌کنند.

۱.۲. تئوری سیستم‌ها و جایگاه سیستم بیولوژیکی

تئوری انتخاب طبیعی که برای توصیف منطق تکامل بیولوژیکی به کار می‌رود، قابل تعمیم به هر نوع سیستم دیگری نیز می‌باشد. کافی است تا سیستم در حالت دگرگونی و تحت فشار انتخابی موجود در طبیعت در نظر گرفته شود. در این صورت، تنها بخشی از سیستم قادر به حفظ پیکره‌ی خود خواهد بود که متناسب یا تطبیق‌یافته با محیط باشد.[۱۹] یک تعریف شهودی و زبانی از خودسازمان‌دهندگی که توسط دپرسر در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است، عبارت است از: سیستم‌هایی که به نظر می‌رسد خود را بدون هدایت خارجی و دستکاری یا کنترل بیرونی سازماندهی می‌کنند. «سازمان» مربوط به افزایش ساختارها یا نظم رفتار سیستم است.

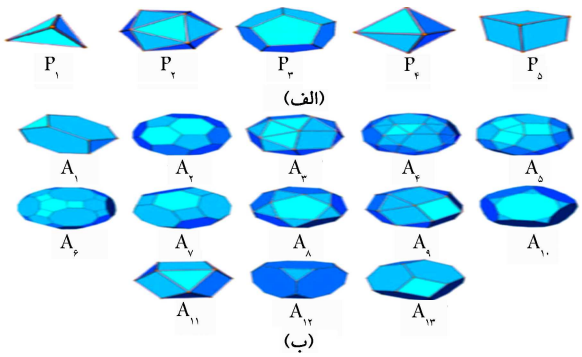
طبق گفته فرانسیس هلیگن، ایمرجنت[۲۰] یک کانسپت کلاسیک تعریف مسأله است که قوانین کلی در سطح بالا را معرفی می‌کند و نمی‌تواند در زیربخش و یا اعضا تعریف شود. این خصوصیت غیر قابل تقلیل را ایمرجنت نام‌گذاری می‌کنند. تا سال ۱۹۸۹، تئوری قابل قبولی بیان نشده بود که بتواند خواص ایمرجنت را تعریف کند. این مفهوم یک روش معتبر برای ایمرجنت دینامیکی توسط مدل‌های توسعه یافته‌ی کنونی (خودسازمانده) می‌باشد. خصوصیت این مدل در خودبه‌خودی بودن آن است. یکی دیگر از خصوصیات اساسی ایمرجنت در تئوری سیستم‌ها، سلسله‌مراتبی یا چند سطحی بودن آن است.[۱۹] تا به امروز یک الگوی منطقی که بخواهد خواص خودسازمان‌دهندگی را توضیح دهد، در دو سطح میکرو و ماکرو تعریف شده است. سطح میکرو، جایی که بسیاری از بلوک‌های ساختاری از عناصر در تعاملند (مقیاس محلی). سطح ماکرو، که فعل و انفعالات را منحصر به الگوهای کلی سازماندهی می‌کند (مقیاس جهانی). اما برای اینکه نحوه‌ی توزیع و رشد یک سیستم خودسازمانده را که به محیط خود واکنش نشان می‌دهد و خود را با شرایط آن تطبیق می‌دهد به دقت نشان داده شود، لازم است به تأثیر و چگونگی کارکرد دو سطح میکرو و ماکرو در پژوهش حاضر پرداخته شود.[۱۹]

۲.۲. سازماندهی در دو سطح

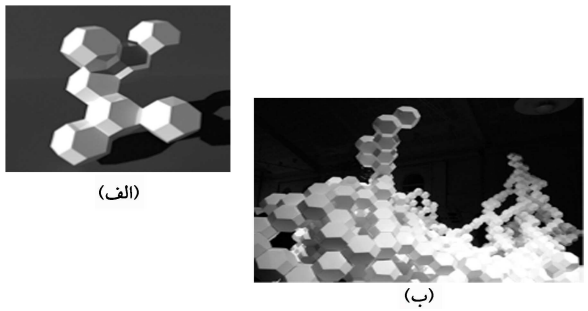
با توجه به نکات ذکر شده، شیوه‌ی به کارگرفته شده در تحقیق پیش رو نه تنها از فرایندهای پایین به بالا (مانند تجربه‌های پیشین در زمینه‌های مرتبط) استفاده کرده است، بلکه از فرایندی دستوری و بالا به پایین نیز بهره برده است. این رویکرد از هر دو راهکار برای رسیدن به پایداری سیستم بهره برده است. این شیوه در سامانه‌های پربازده طبیعی نیز وجود دارد و شیوه‌ای است که بنا به واکنش‌ها و سنتزهای میان اجزای سیستم، از راهکار بهینه‌تر جهت پایداری سیستم و وقوع نتیجه‌ی متعالی استفاده می‌کند. این رویکرد، رویکردی ۲ سطحی است که در مقیاس برهمکنش ذرات تشکیل‌دهنده‌ی خود بیشتر فرایندی پایین به بالا را طی می‌کند و در هنگام نظم‌دهی کلی به سامانه از طریق ماتریس خارج سلولی از فرایندی بالا به پایین پیروی می‌کند. تمام تصمیم‌گیری‌ها با توجه به هسته‌ی کنترلی سیستم (QS Core)[۲۰] در مقیاس‌های مختلف اجرا می‌شوند. این شیوه با ارسال کدهای ژنتیکی از هسته‌ی مذکور به سطوح زیرین سامانه در دو سطح به وقوع می‌پیوندد: یکی در تعاملات واحد به واحد[۲۱] و دیگری در ارتباط ماتریس با واحدها[۲۲] (در بخش بعد به جایگاه QS در سیستم مورد نظر بیشتر پرداخته شده است). در طی پروسه‌ی مونتاژ، ماتریس‌های خارج سلولی نقش محیطی را ایفا می‌کنند که سلول‌های منفرد به عنوان بلوک‌های ساختمانی مونتاژشونده در حال تعامل با یکدیگر و با محیط مورد نظر هستند. این مسأله، امکان مونتاژی موازی و در سطح عمومی را به‌صورت خودکار و با امکان تصحیح خطاها به سیستم خواهد داد.[۸]

۳.۲. بسته‌بندی متراکم[۲۳]

به مجموعه‌ای از عناصری که با یکدیگر هم‌پوشانی ندارند (ذرات)، بسته‌بندی می‌گویند. تراکم این بسته‌بندی به‌عنوان کسری از فضای تحت پوشش ذرات تعریف شده است. بسته‌بندی ذرات متراکم به عنوان مدل‌های مناسبی برای ساختارهای حالت مایع، شیشه‌ای و کریستالی، مواد گرانول و مواد ناهمگن شناخته شده است.[۲۱] تراکم



شکل ۵. الف) احجام افلاطونی و ب) احجام اقلیدسی (منبع: تورکواتو، ۲۰۰۹).



شکل ۶. الف و ب) نشان می‌دهد که چگونه چند وجهی‌های یکسان می‌توانند از طریق همه‌ی ۱۴ وجه خود اتصال پیدا کنند (لارسن، ۲۰۱۲).

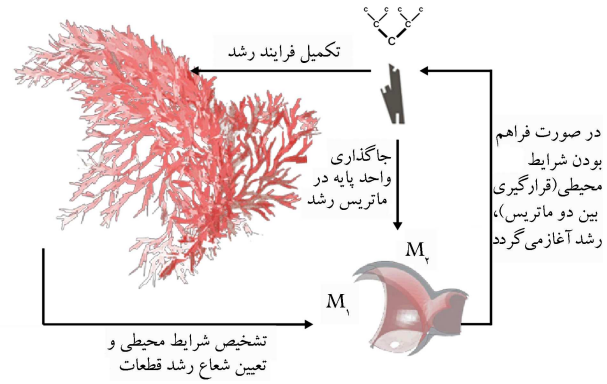
بسته‌بندی‌های ذرات را می‌توان در دو دسته‌ی احجام افلاطونی و اقلیدسی بررسی کرد.

احجام افلاطونی، چندوجهی‌های محدبی هستند که تمامی وجوه آن با یکدیگر یکسان است. در رابطه با این احجام، تنها مکعب (P۴) قابلیت تایل کردن فضا را دارد. احجام اقلیدسی، چندوجهی‌های محدبی هستند که وجوه همرس در راس‌های آن‌ها، دو یا بیشتر از دو نوع هستند. در رابطه با این احجام، تنها چهارده وجهی برش‌خورده (P۱۳) است که فضا را تایل می‌کند (شکل ۵).[۲۱]

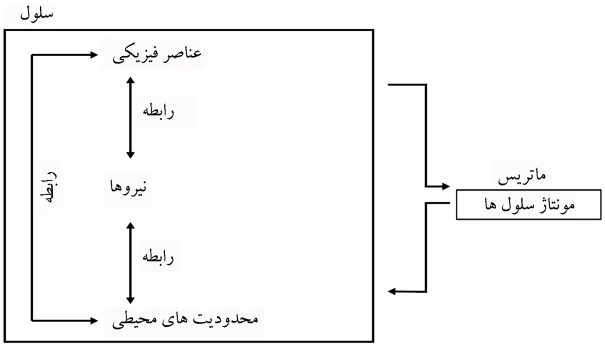
سیستمی که پروسه رشد در آن شکل می‌گیرد، الگوریتم مولدی است که مدل‌سازی انتشار تجمعی محدود[۲۴] و پارامترهای محیطی را برای شبیه‌سازی محصول نهایی با یکدیگر ترکیب می‌کند.[۲۲] در هر دو مدل‌سازی رایانه‌ای و فیزیکی، نمونه‌ها بر اساس یک سلول شاخص که یک ۱۴ وجهی برش خورده[۲۵] است، سازمان یافته‌اند. این سلول‌ها به واسطه هندسه‌ی خاصشان می‌توانند از طریق تمامی ۱۴ وجه به یکدیگر متصل شوند. اصول بسته‌بندی سلولی به این معنا است که اجزاء در یک ساختار شبکه‌ای فضایی قرار می‌گیرند. این امر باعث می‌شود که قطعات همیشه می‌توانند به‌طور دقیق به یکدیگر متصل شوند (شکل ۶). در اصل، سیستم به‌عنوان یک شبکه‌ی مربع به همان اندازه سخت است، اما جهت‌های رشد مورب، تنوع هندسی بیشتری را به نحوه چیدمان‌ها اضافه می‌کند.[۲۲]

۳. پیاده‌سازی منطق الگوریتم

قدم اول در راستای رسیدن به مقصود این پروژه، شناخت دقیق مکانیسم عملکردی کنترل‌کننده‌ی دو سطح تشکیل‌دهنده‌ی ساختار مورد انتظار است که به‌صورت موازی انجام می‌پذیرد. در همین راستا، نیاز به پیاده‌سازی منطق الگوریتم کنترلی در قالب



شکل ۷. پیاده‌سازی ارتباط ماتریس و عناصر پایه (منبع: کردکیس، ۲۰۱۷).



شکل ۸. دیاگرام نشان‌دهنده ارتباط محیط با عناصر تشکیل دهنده ساختار نهایی (منبع: کردکیس، ۲۰۱۷).

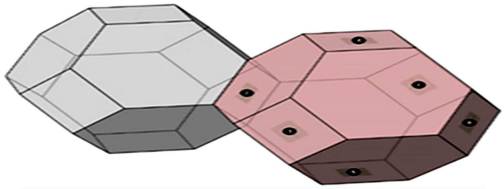
یک رابط است که در دو مرحله رونویسی شود: الف) کنترلگر ارتباطی سلول ـ سلول و ب) کنترلگر ارتباطی سلول ـ ماتریس.

این مبحث نیازمند شناخت دقیق مکانیسم هسته‌ی کنترل‌گر سامانه‌ی هدف (کوارم سنسینگ[۲۶]) جهت کنترل و ساخت بیوفیلم خارجی یک نوع سلول اولیه مشخص دارد تا بتوان رفتارهای بیولوژیکی آن‌ها را با توابع جبری به‌صورت یک الگوریتم منطقی پیاده‌سازی کرد و به یک رابط اولیه رسید.[۲۰] این یک محیط شبیه‌سازی اولیه است که با وارد نمودن هر عضو شروع به پیاده‌سازی منطق اشاره شده بر روی آن نموده تا به خروجی تعریف شده برسد. در مرحله‌ی دوم، برای عضوهای ورودی ویژگی‌هایی تعریف می‌شود (از لحاظ هندسی، خواص فیزیکی ماده و غیره) تا الگوریتم با در نظرگرفتن این ورودی‌ها، شروع به پیاده‌سازی کند.[۲۰] مطابق با شکل ۷، به منظور تقسیم‌بندی فضای سه‌بعدی برای ایجاد محیط رشد (وکسلایزیشن[۲۷]) از پلاگین فاکس در نرم‌افزار گرسهاپر استفاده شده است.[۳]

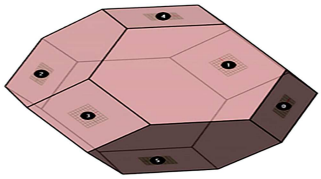
از آنجا که پژوهش پیش رو بر اساس شرایط محیطی (فشار، دما و غیره)، محدودیت‌ها و پتانسیل‌های موجود در محیطی است که اجزاء و عناصر دخیل در فرایند رشد را تحت تأثیر قرار می‌دهند، چگونگی شکل‌گیری و در نهایت تأثیر این محیط بر اجزاء طرح از اهمیت بالایی برخوردار است. این روابط در دیاگرام شکل ۸ نمایش داده شده است.

۴. شبیه‌سازی یک سامانه‌ی خودمونتاژ شونده در مقیاس‌های مختلف

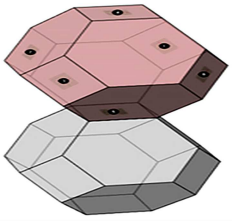
در این مرحله، با توجه به نتایج به دست آمده از بخش‌های قبلی، شبیه‌سازی‌هایی



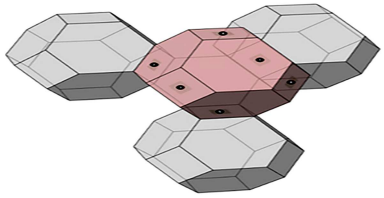
الف) تصویر یک مدول پایه و امکان رشد آن از وجه شماره ی ۲؛



پ) تصویر یک مدول پایه و شماره ی وجه هایی که امکان رشد از آن ها وجود ندارد؛



ب) تصویر یک مدول پایه و امکان رشد آن از وجه شماره ی ۵؛



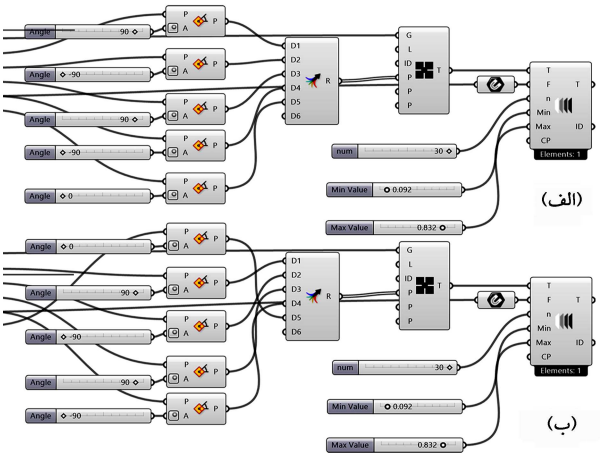
ت) مرحله اول رشد با ۴ عضو.

شکل ۹. الف ـ ت) رشد از وجوه مختلف ۱۴ وجهی.

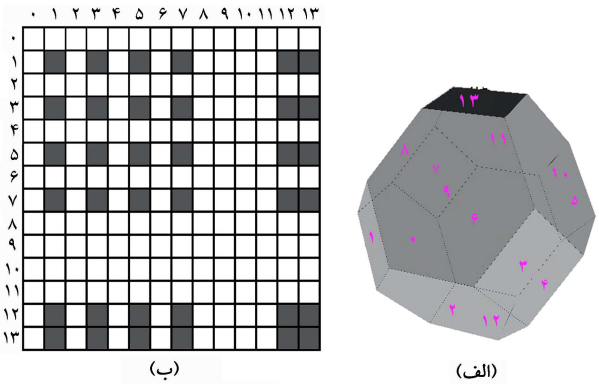
متناسب با هدف پژوهش، یعنی پاسخگویی به نیازهای معمارانه و ساخت سامانه‌های هوشمند اکولوژیکی برای سازماندهی فضا و عناصر تشکیل‌دهنده‌ی آن، طراحی شده‌اند. برای ساخت محصول نهایی که متشکل از رشد قطعات پایه و ماتریس رشد است، با ساده‌سازی عناصر محیطی، ماتریس رشد از غشایی دو پوسته و متناسب با فرم نهایی دلخواه طراحی شده است. بدین منظور، باید ارتباط منطقی قطعات با یکدیگر و با محیط رشد، یعنی جایی که تعاملات و برهمکنش‌های اجزاء در آن رخ می‌دهد، به خوبی بررسی و تعیین گردد.

همان‌گونه که در بخش‌های قبل نشان داده شد، برای اینکه در نهایت و در پایان فرایند برهمکنش‌ها محصولی پایدار ایجاد شود، نیاز به بررسی تعاملات بین اجزاء (میکرو) و همچنین ارتباط آن‌ها با محیط پیرامونی (ماکرو) خواهد بود. در سطح میکرو، بایستی تعیین شود که هر جزء چگونه امکان ارتباط و اتصال با دیگر اجزاء را پیدا می‌کند. در این راستا، پس از تعیین یک (یا چند) مدول پایه برای شرکت در فرآیند رشد، سطوح و نقاطی را که می‌بایست هر جزء امکان اتصال با اجزاء دیگر را از آن طریق فراهم کند، مشخص و طراحی می‌گردد. این تنظیمات هر بار در چرخه‌ی رشد تکرار شده و در هر مرحله، ارتباط اجزاء با یکدیگر را امکان‌سنجی می‌کند تا در صورت فراهم بودن محیط رشد، به تولید و افزایش مدول‌ها برای تامین محصول نهایی منجر شود. در تصاویر (شکل‌های ۹ الف تا ۹ ت) که در نرم‌افزار راینو و با استفاده از پلاگین گرسهاپر تولید شده است، امکان رشد مدولی پایه به شکل ۱۴ وجهی از ۶ وجه مربع شکل آن مورد بررسی قرار گرفته است. این فرایند مانند آنچه در شکل ۷ نمایش داده شده است، در محیطی تعریف شده صورت می‌پذیرد. به همین دلیل، بعضی وجوه امکان اتصال واحدهای بعدی را نمی‌دهند، زیرا فرایند رشد در خارج از محیط تعریف شده‌ی اولیه (فیلد[۲۸]) امکان‌پذیر نخواهد بود. با برقراری امکان رشد برای همه‌ی وجوه تا زمانی که رشد در فیلد مربوطه برقرار است، چرخه‌ی رشد ادامه می‌یابد. تغییرات صورت گرفته در چرخش صفحاتی که امکان رشد را داشته‌اند، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در بررسی‌های بالا، چگونگی ارتباط واحدهای منفرد با یکدیگر و همچنین ویژگی‌ها و خواص هریک از واحدها به‌صورت مجزا بر ادامه‌ی فرایند رشد بررسی شده است. در قسمت بعد، نحوه‌ی اثرگذاری محیط تعریف شده بر فرایند رشد تعیین می‌گردد.

به منظور کنترل روابط مابین سلولی و تعیین جهت رشد مدول‌ها در هر فرایند

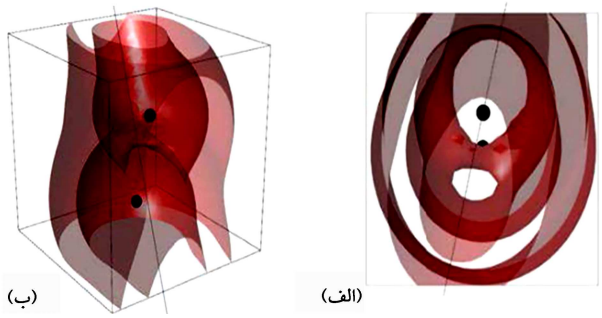


شکل ۱۰. میزان چرخش صفحات نسبت به حالت اولیه: الف) قبل از چرخش و ب) بعد از چرخش.



شکل ۱۱. الف) یک ۱۴ وجهی و ب) ماتریس روابط آن.

مطلوب رشد، بایستی ماتریس روابط وجوه هر سلول با دیگر سلول‌ها را تنظیم کرد. در شکل ۱۱ قسمت ب، ماتریس روابط به گونه‌ای تنظیم شده تا تمامی چهار وجهی‌ها (مربع‌ها) در یک ۱۴ وجهی برش خورده امکان اتصال به یکدیگر را داشته باشند.



شکل ۱۲. ایجاد محیط رشد برای ساخت یک صندلی (الف: نمای بالا).

۱.۴. بسط یک سیستم اکولوژیکی تطبیق‌پذیر در مقیاس‌های مختلف ساخت

در این بخش، با توجه به مبانی و ملزومات پیش گفته، به بررسی قابلیت استفاده از الگوریتم‌های رشد خودبه‌خودی و انطباق آن با شرایط و مقیاس‌های مختلف ساخت پرداخته شده است. شبیه‌سازی با استفاده از یک مدول پایه و گسترش و رشد آن در محیطی معین آغاز می‌گردد. در شبیه‌سازی‌ها، با استفاده از تشکیل یک فیلد که امکان رشد را در سراسر مجموعه‌ی نقاط تعیین شده فراهم می‌کند، شبیه‌سازی آغاز می‌گردد. با شروع فرایند، رشد مدول‌ها از یک موقعیت اولیه[۲۹] و سپس با افزایش چرخه‌های تکرار[۳۰] در این فرایند، بر تراکم مدول‌ها در محیط رشد افزوده می‌گردد تا فرایند کامل شود.

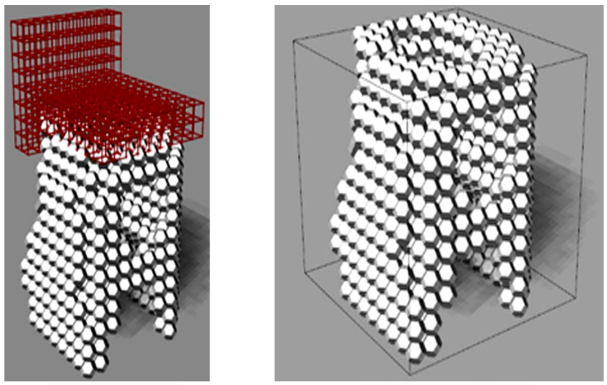
۱.۱.۴. مقیاس S

در ابتدا، با اعمال شرایط محیطی برای ساخت محصولی در مقیاس یک صندلی، توانایی الگوریتم مورد نظر بررسی شده است. در شکل ۱۲، محیط رشدی که با اعمال مقادیری نیرو برای نقاط جذب و دفع به ایجاد فیلد مناسب برای تشکیل محصولی نظیر صندلی لازم است، نمایش داده شده است. جعبه‌ی محیطی که مدول‌ها در آن امکان رشد خواهند کرد، مکعبی به ضلع ۵۰ سانتی‌متر است. حال فرآیند رشد با قرارگرفتن اولین مدول در محیط رشد آغاز می‌گردد.

در این قسمت، طبق معیارهایی که در بخش‌های گذشته به دست آمده و با توجه به اصول بسته‌بندی متراکم، از مدولی با هندسه ۱۴ وجهی استفاده شده است. ابعاد این مدول با توجه به مقیاس انتخابی در این مرحله ۵ سانتی‌متر است. در نهایت، می‌توان سطحی مسطح بر روی مدول‌های پایه برای نشستن مناسب روی این محصول در نظر گرفت که این مورد نیز در ایجاد محیط رشد ابتدایی به لحاظ ایستایی مناسب لحاظ شده است (شکل ۱۳). در این نمونه، از ۵۴۶ چهارده وجهی برای رسیدن به شکل نهایی استفاده شده است.

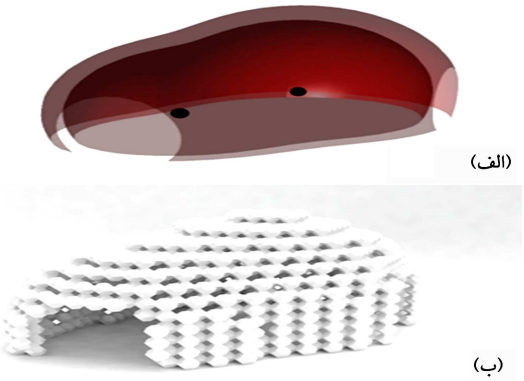
۲.۱.۴. مقیاس M

در این بخش، با افزایش مقیاس شبیه‌سازی به تولید محصولی در ابعاد یک سرپناه پرداخته شده است. در اینجا نیز ابتدا باید محیط رشد با توجه به نیازهای فرمی و کاربری مورد نظر ایجاد شود. سپس، فرایند رشد مدول‌ها با قرارگیری اولین مدول در فیلد مورد نظر آغاز می‌شود. در این نمونه، با مدول پایه به ابعاد ۲۶ سانتی‌متر و به تعداد ۹۳۸ مدول که در چرخه‌ی تکرار ۳۲ام تشکیل شده‌اند، سازه نهایی شکل گرفته است (شکل ۱۴ قسمت الف و ب). بیشتر پژوهش‌هایی که در این مقیاس انجام شده‌اند نیز در پی کشف پتانسیل‌های جدیدی در خلق فضاهای معماری با استفاده از فنّاوری‌های نوین ساخت و ساز هستند. به‌طور مثال، موسسه‌ی طراحی رایانشی دانشگاه اشتوتگارت در ساخت پاویون تحقیقاتی خود[۳۱]، ویژگی‌های مواد



الف) رشد مدول ها؛ ب) مدل نهایی.

شکل ۱۳. ساخت در مقیاس S : الف) رشد مدول‌ها و ب) مدل نهایی.

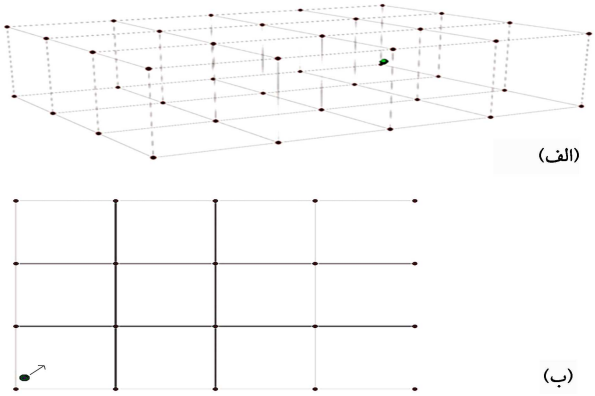


شکل ۱۴. ایجاد محیط رشد مدول‌ها برای ساخت سرپناه.

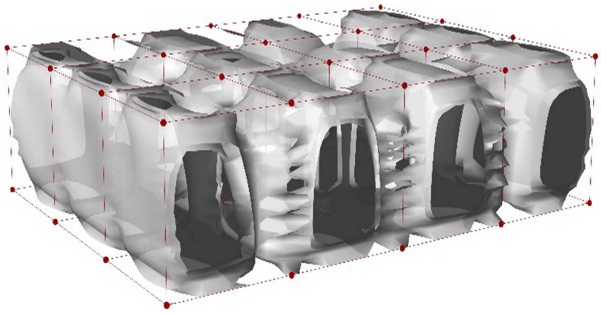
دانه‌بندی را دقت‌سنجی کرده‌اند و به موازات ساخت مقیاس ماکرو، مدل‌سازی اجزای گسسته[۳۲] را به کارگرفتند تا حرکات ذرات و نیروهای وارده در ساختار ستون نمایش داده شود تا در انتها، ساختارهایی عمودی (مثل یک ستون) را فرم دهند.[۲۴و۲۵]

۳.۱.۴. مقیاس L

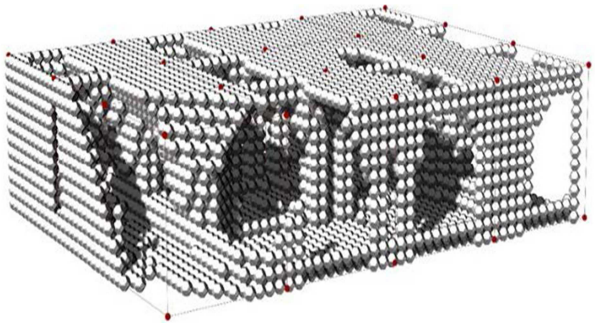
در مرحله‌ی بعدی، با توجه به مساحت بزرگتری که یک کاربری اشغال می‌کند، از یکی دیگر از قابلیت‌های الگوریتم مورد استفاده پروژه، یعنی استفاده از مدول‌های پایه برای پوشش سازه‌ای اولیه استفاده شده است. در اینجا، سامانه‌ی الگوریتمیک بسط داده شده با تشخیص عناصر سازه‌ای موجود، پوشش و پرکردن فضای اطراف آن‌ها را برای ایجاد فضای معماری مطلوب آغاز می‌کند. در این فرایند، ابتدا سازه‌ای تیر و ستونی با توجه به مساحت فضای یک رستوران تعبیه می‌شود و در مرحله بعد، الگوریتم شروع به رشد مدول‌ها در فیلد تعریف شده برای رسیدن به هدف پروژه می‌کند. در این مرحله، با توجه به سازه‌ای که ابعاد پلان آن ۱۸ در ۲۴ متر بوده و ارتفاعی ۶ متری داشته است، مدول پایه‌ی پروژه (۱۴ وجهی برش خورده) با طول ضلع ۱۸ سانتی‌متر در نقطه‌ی شروع فرایند رشد قرارگرفته است. پس از تشخیص سازه‌ی اولیه توسط الگوریتم، فیلد مناسب برای پوشش عناصر سازه‌ای موجود به دست آمده و فرایند پرکردن این فیلد با مدول پایه آغاز شده است (شکل ۱۵ قسمت الف و ب). همان‌طورکه در شکل ۱۶ نشان داده شده است، شبکه‌ای از تیر و ستون‌ها، مدول پایه را دربرگرفته‌اند و شرایط آغاز فرایند تکثیر مدول‌ها را برای الگوریتم دیکته می‌کنند. در شکل ۱۷ محیط رشد مدول‌های سازنده نمایش داده شده است که به واسطه تشخیص شبکه‌ی سازه‌ای اولیه شکل گرفته است. شکل ۱۸ نیز مدل نهایی سازه را پس از رشد مدول‌های ۱۴ وجهی نمایش می‌دهد.



شکل ۱۵. الف) شبکه‌ی ۳ بعدی سازه‌ی اولیه و ب) موقعیت مدول پایه.



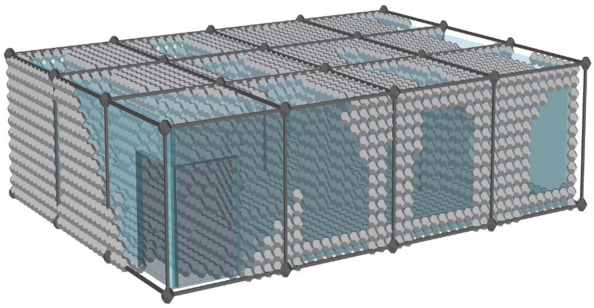
شکل ۱۶. ایجاد محیط رشد حول شبکه‌ی سازه موجود.



شکل ۱۷. مدل نهایی از رشد مدول‌ها پس از پوشش سازه.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به هزینه‌های بالای ساخت و ساز مرسوم و آلودگی‌های محیط زیستی ناشی از آن‌ها، طراحی یک سامانه‌ی خودمونتاژکننده‌ی واحدهای متوالی و پرتعداد می‌تواند مسیری جدید در ساخت ساختمان‌های مورد نیاز بشر باشد. در پژوهش حاضر، با انواع روش‌ها و یافته‌های مرتبط با سامانه‌های تطبیق‌پذیر که می‌توانند به



شکل ۱۸. مدل نهایی از رشد مدول‌ها با پوشش شیشه جهت تامین فضای معماری مدنظر.

ساخت محیط‌هایی زنده و پاسخگو در مقیاس‌های مختلف بیانجامند، پرداخته شده است. در فرایند تحقیق، سعی شده است تا به سه سوال ابتدایی در مورد چیستی یک سامانه‌ی معماری زنده و چگونگی کاربرد آن پاسخ داده شود:

الف) درک معماری به عنوان اکولوژی سیستم‌های تعاملی، گرایش‌های ثابت و محدود گذشته را به سمت ساخت محیط‌هایی پویا و تطبیق‌پذیر با شرایط جدید تبدیل می‌کند. محیط در این چارچوب در پی ساخت سناریو تعامل است تا روابط بین اجزاء (سلول‌های پایه) را فعال کند.

ب) در ادامه، با مروری بر مفاهیم پایه‌ای مورد نیاز در این حوزه نظیر خودمونتاژی، ساختارهای تجمعی و مونتاژگسسته به برخی از تجربیات موفق پیرامون ساخت مکانیسم‌های کنترلی سامانه‌هایی متشکل از اجزای متعدد و در مقیاس‌های گوناگون اشاره شده است. سپس، به منظور یافتن ساختاری پایدار در این گونه سامانه‌های مبتنی بر بنیان‌های بیولوژیکی، ابتدا سعی شده شیوه‌ای جدید و مبتنی بر رویکردی دو سطحی (میکرو و ماکرو) برای تنظیم پارامترهای موثر بر شکل نهایی سازه‌ی مورد نظر تبیین شود. سپس، با معرفی هسته‌ی هوشمند کنترل‌کننده‌ی سامانه، یعنی کواروم سنسینگ، نقش موثر آن در شکل‌گیری و پاسخگویی همزمان به تغییرات محیطی تبیین شده است. در نهایت، از همان ویژگی‌ها در طراحی الگوریتم تولیدکننده واحدهای سازنده‌ی سامانه‌ی مذکور کمک گرفته شده است. رسیدن به پارامترهای موثر در طراحی دقیق هسته‌ی کنترلی QS نیاز به آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های دقیق‌تری است که با توجه به نتایج آن‌ها و در ادامه‌ی این پژوهش بتوان گام‌های بعدی را در راستای توسعه‌ی ماشین شبیه‌ساز یک سامانه‌ی خودمونتاژ ساخت و ساز بر اساس پیکربندی‌های متوالی و پر تعداد برداشت و از آن مبتنی بر تغییرات شرایط محیطی استفاده کرد.

ج) در انتها، با استفاده از سامانه‌ی اشاره شده، با ایجاد محدودیت در محیط رشد سلول‌های ساختمانی، سازه‌هایی در سه مقیاس کوچک (صندلی)، میانی (سرپناه) و بزرگ در محیط نرم‌افزار گرسهاپر شبیه‌سازی شده است.

پانوشت‌ها

1. Real-Time
2. Building-Blocks
3. Global
4. Local
5. Bottom-up
6. Logic Matter
7. Discrete
8. M-Cell
9. M-Object
10. Rapid Prototyping

11. Self-Replicating Colloidal Clusters
12. Aggregation Structures
13. Grotto Pavilion
14. Danzer
15. Voronoi
16. Discrete Assembly
17. Post-Rationalization
18. Bottom-up
19. Top-down
20. Emergent
21. Cell to Cell
22. Matrix to Cell
23. Dense Packing
24. Diffusion Limited Aggregation (DLA)
25. Truncated Octahedron
26. Quorum Sensing (QS)
27. Voxelization
28. Field
29. Initial State
30. Iteration
31. ICD Aggregation Pavilion 2015
32. DEM

منابع (References)

1. Spyropoulos, T., 2013. Constructing adaptive ecologies: Towards a behavioral model for architecture. *SAJ-Serbian Architectural Journal, 5(2)*, pp.160-169. http://dx.doi.org/10.5937/SAJ1302160S.
2. Ledar, S., Weber, R., Vasey, L., Yablonina, M. and Menges, A., 2020. Voxelcrete: Distributed voxelized adaptive formwork. eCAADe. http://dx.doi.org/10.52842/conf.ecaade.2020.2.433.
3. Whitesides, G.M. and Grzybowski, B., 2002. Self-assembly at all scales. Science, 295(5564), pp.2418-2421. http://dx.doi.org/10.52842/conf.ecaade.2020.2.433.
4. Pelesko, J.A., 2007. Self Assembly: The Science of Things That Put Themselves Together. Chapman and Hall/CRC. https://doi.org/10.1201/9781584886884.
5. Tibbits, S.J., 2010. Logic Matter: Digital Logic as Heuristics for Physical Self-Guided-Assembly. (Doctoral Dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
6. Zeravcic, Z. and Brenner, M.P., 2017. Spontaneous emergence of catalytic cycles with colloidal spheres. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114(17)*, pp.4342-4347. https://doi.org/10.1073/pnas.1611959114.
7. Zeravcic, Z., 2017. How specific interactions drive the complex organisation of building blocks. *Archit. Design, 87*, pp.22-27. https://doi.org/10.1002/ad.2191.
8. Mairopoulos, D., 2015. M-Cell Assembly. (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
9. Dierichs, K. and Menges, A., 2015. Granular morphologies - programming material behaviour with designed aggregates. *Architectural Design, 85(5)*, Wiley, London, pp.86-91. (ISBN 978-11118878378). https://doi.org/10.1002/ad.1959.
10. Bourke, P., 2004. DLA-diffusion limited aggregation.
11. Kachri, G., 2009. Parasitic ecologies: Extending space through diffusion-limited aggregation models. (Doctoral dissertation, UCL (University College London)).
12. Sanchez, J., 2016. Combinatorial Design: Non-Parametric Computational Design Strategies. Acadia.
13. Retsin, G., 2016. Discrete assembly and digital materials in architecture. *Proceedings of the 34th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe ecaade.*
14. Rossi, A. and Tessmann, O., 2017. Collaborative assembly of digital materials. Acadia.
15. Lu, X., Meng, Z., Rodriguez, A. and Pantic, I., 2022. Reusable augmented concrete system: Accessible method for formwork manufacturing through holographic guidance. eCAADe. http://dx.doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.1.371.
16. Gilles, G.R., Jimenez, M. and Soler, V., 2017. Discrete computation for additive manufacturing fabricate. http://dx.doi.org/10.2307/j.ctt1n7qkg7.28.
17. Gershenfeld, N., Carney, M., Jenett, B., Calisch, S. and Wilson, S., 2015. Microfabrication with digital materials: Robotic assembly. Architectural Design, 85(5), pp.122-127. http://dx.doi.org/10.1002/ad.1964.
18. Zhao, L., Chen, W., Ma, J. and Yang, Y., 2008. Structural bionic design and experimental verification of a machine tool column. *Journal of Bionic Engineering, 5*, pp.46-52. DOI:10.1016/s1672-6529(08)60071-2.
19. Heylighen, F., 1989. Self-organization, emergence and the architecture of complexity. *In Proceedings of the 1st European Conference on System Science (Vol. 18, pp. 23-32). Paris: AFCET.*
20. Tabari, S., Hassan, M., Kalantari, S. and Ahmadi, N., 2017. Biofilm-inspired Formation of Artificial Adaptive Structures., eCAADe. http://dx.doi.org/10.52842/conf.ecaade.2017.2.303.
21. Torquato, S. and Jiao, Y., 2009. Dense packings of the Platonic and Archimedean solids. *Nature, 460(7257)*, pp.876-879.
22. Larsen, N.M., 2012. Generative algorithmic techniques for architectural design. Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy Aarhus School of Architecture (2012).
23. https://gkirdeikis.wordpress.com/portfolio/research-name-placeholder-i
24. Dierichs, K. and Menges, A., 2017. Granular construction: Designed particles for macro-scale architectural structures. *Archit. Design, 87*, pp.88-93. DOI:10.1002/ad.2200.
25. Koleva, D., Ozdemir, E., Tsiokou, V. and Dierichs, K., 2021. Designing Matter: Autonomously Shape-changing Granular Materials in Architecture. Acadia.