نشریهٔ علمی باغ نظر، ۱۹(۱۱۶)، ۵-۲۲ / بهمن ۱۴۰۱
DOI: 10.22034/BAGH.2022.327468.5119

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Development of Algorithmic Applications in Architecture: A Review and Analysis of L-Systems
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

توسعهٔ کاربردهای الگوریتمیک در معماری
مرور و تحلیلی بر سیستم‌های L*

لیلا نوری[۱]، کتایون تقی‌زاده آذری[۲]**، متین علاقمندان[۳]

۱. پژوهشگر دکتری فناوری معماری، دانشکدهٔ معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران.
۲. دانشیار دانشکدهٔ معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران.
۳. استادیار دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

چکیده

بیان مسئله: سیستم‌های L یکی از الگوریتم‌های محاسبهٔ فرایند خودسازمانده «رشد حساس به محیط» گیاهان و یکی از پنج روش اصلی مولد هستند که با توجه به ساختار و زمینهٔ اصلی کاربرد، پتانسیل‌های زیادی در معماری نوید می‌دهند، اما در عین حال، نمونه‌های به‌کارگیری آنها در معماری اندک بوده و هنوز به‌میزان کافی توسعه نیافته‌اند. لذا توسعهٔ آنها مستلزم مطالعه‌ای مروری جامعی است که ضمن بررسی در زمینهٔ اصلی و شناسایی پتانسیل‌های محتمل، مروری بر پیشینهٔ کاربردهای آن در معماری و همچنین در سایر زمینه‌ها از جمله شهرسازی، مهندسی سازه، هوافضا و غیره کرده و ضمن تقسیم‌بندی و مقایسهٔ این کاربردها، با این دیدگاه پیشنهاداتی جهت توسعه ارائه کند.

هدف پژوهش: هدف از این پژوهش بررسی جامع سیستم‌های L و شناسایی کاربردها و پتانسیل‌های آن در معماری است.

روش پژوهش: این مقالهٔ مروری، به‌روش توصیفی-تحلیلی بوده و گردآوری داده‌ها در آن به‌صورت اسنادی است. اسناد استفاده‌شده در این مقاله شامل انواع مقالات، کتاب‌ها، پایان‌نامه‌ها و مسابقات معماری معتبری است که تمام یا بخشی از آنها به پژوهش درمورد کاربردهای معماری و سایر کاربردهای مرتبط سیستم‌های L می‌پردازد که از حدود سال ۲۰۰۰ م. به‌بعد انتشار یافته‌اند.

نتیجه‌گیری: با بررسی الگوریتم در زمینهٔ گیاه‌شناسی، مشاهده می‌شود پنج کانسپت اصلی سیستم‌های L عبارتند از: توسعه، انتزاع، خودمتشابهی، پیچیدگی درعین سادگی و توپولوژی؛ که در این میان کانسپت توسعه در معماری کاربرد بیشتری داشته، درحالی که سایر کانسپت‌ها کمتر موردتوجه بوده است. در این زمینه رصد کاربردها در حوزه‌های دیگر و متدلوژی‌های به‌کارگرفته الهام‌بخش خواهد بود که در بخش سوم با بررسی جامع، ضمن تقسیم‌بندی کاربردهای مختلف، به مرور آن پرداخته شده است. روند تحقیقات در کاربرد معماری سیستم‌های L شناسایی و دلایل کاهش آن در سال‌های اخیر و پیشنهاداتی در راستای توسعه بیان می‌شود. تحلیل‌های دیگری نیز از جمله اعتبار علمی اسناد، انواع کاربردها، روش‌های استفاده از سیستم L و مرحلهٔ استفاده از آن در طراحی نیز ارائه شده است.

واژگان کلیدی: *سیستم‌های L، خودمتشابهی، توپولوژی، انتزاع، توسعه، معماری الگوریتمیک.*

مقدمه و بیان مسئله

با ظهور رایانه‌ها و شناسایی الگوریتم‌های ساختارهای طبیعی در قرن گذشته، این الگوریتم‌ها وارد حوزه‌های دیگر علوم شدند. در این میان رویکردهای محاسباتی در زیست‌شناسی ارتباط ویژه‌ای برای طراحی معماری به‌کمک رایانه داشتند، زیرا از دستورزبان‌های مولد[۱] برای توسعهٔ فرم استفاده می‌کردند (Marinčić, 2019). سیستم‌های L که در سال ۱۹۶۸ م. معرفی شدند، یکی از الگوریتم‌های محاسبهٔ فرایند خودسازمانده «رشد» حساس به محیط گیاهان و یکی از پنج روش اصلی مولد هستند

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری «لیلا نوری» با عنوان «توسعهٔ متدلوژی های نوین طراحی رایانشی در معماری بر اساس سیستم‌های خودسازمانده» است که به راهنمایی دکتر «کتایون تقی‌زاده آذری» و مشاورهٔ دکتر «متین علاقمندان» در دانشکدهٔ معماری دانشگاه تهران در حال انجام است.

** نویسنده مسئول: ktaghiza@ut.ac.ir، ۰۹۱۲۲۱۵۶۴۶۱

(Mountstephens & Teo, 2020). این سیستم‌ها علاوه بر ایجاد ساختارهای شاخه‌ای که مشهورترین پتانسیل آنها است، دارای کانسپت‌هایی در ساختار هستند که می‌تواند مورد توجه معماران قرار گرفته و راه‌حل‌های جدیدی را برای سؤالات طراحی ارائه کند. باتوجه به اینکه تاکنون مطالعهٔ مروری جامعی در مورد سیستم‌های L در معماری انجام نگرفته، این مطالعه به‌بررسی این سیستم‌ها پرداخته و در مقاله‌ای مروری سعی در ارائهٔ یک نمای کلی از پیشینه، کانسپت‌ها، تقسیم‌بندی کاربردها و معرفی پتانسیل‌های آن در معماری و تحلیل آنها دارد.

اولین قدم برای کشف پتانسیل‌های این الگوریتم در معماری، بررسی آن در زمینهٔ اصلی یعنی زیست‌شناسی رشد گیاهان است. لذا بخش دوم این مقاله، به معرفی این الگوریتم می‌پردازد. در بخش سوم کاربردهای معماری و کاربردهای توسعه‌یافته در سایر حوزه‌هایی که قابلیت توسعه در معماری را نیز دارند تقسیم‌بندی و مرور شده و در جدولی دسته‌بندی و مقایسه می‌شود. در بخش چهارم مفاهیم کاربردی سیستم‌های L در معماری استخراج و داده‌های مربوط به بخش کاربردها تحلیل و بررسی می‌شود. در پایان، مطالب جمع‌بندی، نکات اساسی استخراج و پیشنهاداتی جهت تحقیقات آینده ارائه می‌شود. این مقاله به‌دنبال پاسخ به این سؤال است که کاربردهای سیستم‌های L در معماری چیست، چه پتانسیل‌هایی برای آن در معماری می‌توان متصور بود و چگونه می‌توان آن را توسعه داد؟ سه فرضیه بر این پژوهش حاکم است، نخست اینکه سیستم‌های L پتانسیل‌های زیادی جهت استفاده در معماری و طراحی دارند، دوم، با تحلیل الگوریتم در زمینهٔ اصلی و دید مفهومی به آن می‌توان به توسعهٔ این کاربردها کمک کرد و سوم، مرور و بررسی کاربرد این الگوریتم‌ها در سایر زمینه‌ها منجر به توسعهٔ کاربردهای آن در معماری می‌شود.

روش تحقیق و متدلوژی جست‌وجو

این مقاله توصیفی-تحلیلی بوده و روش گردآوری داده‌ها به‌صورت اسنادی است. جست‌وجو در معرفی سیستم‌های L شامل مقالات پژوهشی و مروری و در بخش کاربردها شامل انواع مقالات پژوهشی، پایان‌نامه‌ها و همچنین مسابقات معماری معتبر بوده‌است. اصلی‌ترین کلیدواژه‌ها شامل طراحی مولد، سیستم‌های L، تولید محتوای رویه‌ای، فراکتال‌ها، الگوهای رشد، مورفوژنسیس شاخه‌ای و چندین کلیدواژهٔ دیگر است. محدودیت زمانی برای جست‌وجو از سال ۲۰۰۰ م. به بعد در نظر گرفته شد. اسناد زیادی که حاوی کلیدواژه‌های مورد نظر بودند یافت شد، ولی بیشتر این اسناد مروری بر سیستم‌های L و معدود مطالعات صورت‌گرفته بودند که این موارد از منابع این مقاله حذف شد. در کاربردهای سیستم‌های L در سایر حوزه‌ها به چندین نمونه جهت اشاره بسنده شده ولی به‌علت محدودبودن کاربردهای این سیستم‌ها در معماری تاکنون، تقریباً به تمامی آنها در این مطالعه اشاره شده است.

سیستم‌های L

مدل‌سازی سیستم‌های بیولوژیکی در حال رشد و با ساختار خودمتشابه، مانند گیاهان پیچیدگی‌های زیادی از جمله تغییر اجزای ارگانیسم و تغییر روابط همسایگی آن دارد. آریستید لیندنمیر[۲]، به این منظور دستورزبان سیستم‌های L را پیشنهاد کرده و سپس جهت شبیه‌سازی ساختارهای پیچیده‌تر از جمله ساختارهای درختان، برگ‌ها، غنچه‌ها و غیره توسعه داد (Prusinkiewicz, Cieslak, Ferraro & Hanan, 2018).

سیستم‌های L شامل دو قسمت هستند: یک فرایند مولد و یک فرایند تفسیری. فرایند مولد یک سیستم L شامل سه بخش اصلی است:

V (الفبا): مجموعه‌ای از نمادهاست که شامل اجزایی است که می‌توانند جابه‌جا شوند و یا نمی‌توانند جابه‌جا شوند (همان). یک نماد در سیستم L به‌عنوان هر واحد ساختاری مجزا که هنگام رشد گیاه تکرار می‌شود مانند شاخه‌ها، برگ‌ها، جوانه‌ها و غیره، تعریف می‌شود.

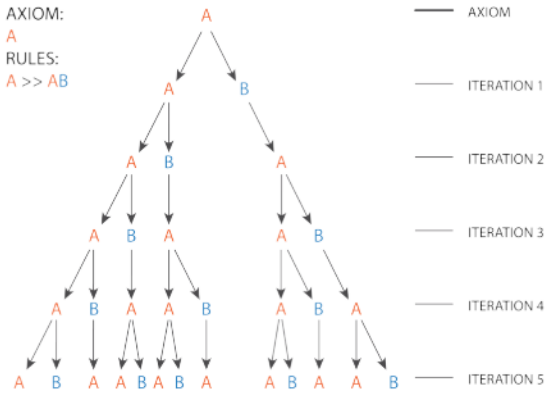
ω(آغاز، قاعدهٔ کلی یا آغازگر[۳]): رشته‌ایN کاراکتر و متغیر از مجموعهٔ V است که وضعیت اولیهٔ سیستم را تعریف می‌کند.

P: مجموعه‌ای از قوانین تولید[۴] است که روشی که مدول‌ها می‌توانند جایگزین شوند را تعریف می‌کنند. یک تولید از دو بخش تشکیل شده است، بخش سمت چپ: مدولی که باید جایگزین شود و بخش سمت راست: مدولی که جانشین می‌شود (Mikkelsen, 2020).

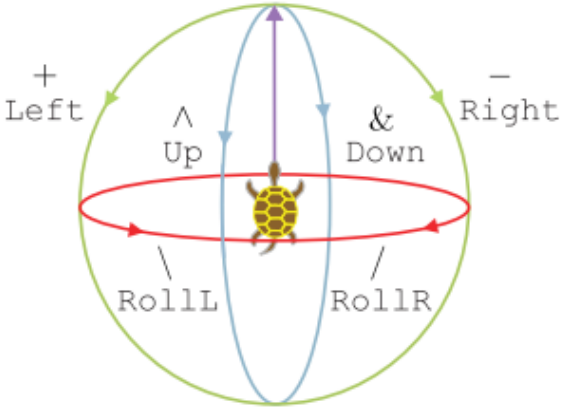
مفهوم اصلی فرایند مولد، بازنویسی[۵] است، که در آن حروف تشکیل‌دهنده و رشتهٔ اولیه به‌صورت موازی توسط حروف جدید طبق قوانین از پیش تعیین‌شده جایگزین می‌شوند. این فرایند بازنویسی رشته معمولاً چندبار تکرار می‌شود (Prusinkiewicz et al., 2018). یکی از مهم‌ترین پتانسیل‌های این سیستم‌ها، توانایی ایجاد پیچیدگی با داده‌های اندک است، زیرا یک آغازگر و چند قانون تولید، تنها داده‌های ورودی آن هستند.

تا این قسمت، سیستم‌های L تنها ساختاری درختی از داده هستند، بدون نمود ظاهری و بدون هندسه (تصویر ۱). در بخش دوم، حروف نسل آخر رشته‌ها تفسیر می‌شوند. یعنی می‌توان تفسیر تصویری رشته‌ها را به‌عنوان فرم‌های هندسی بررسی کرد (همان).

لذا ترجمان‌های مختلف از سیستم‌های L به‌عنوان یک



تصویر ۱. سیستم‌های L در مرحلهٔ نخست تنها ساختاری از داده هستند. مأخذ: Österlund, 2013.



نماد در زبان L+C	نماد	دستور لاک پشت
F	F	یک پاره خط ترسیم کن
f	f	بدون ترسیم پاره خط حرکت کن
Left/Right	+ | -	چرخش به راست/چپ
Up/Down	^ | &	خم‌شدن به راست/چپ
RollL/RollR	/ | \	گردش به سمت بالا/پایین
SB/EB	] | [	شروع/پایان شاخه
SetWidth	#	تنظیم ضخامت خط
SetColor	,	تنظیم رنگ خط

تصویر ۲. چرخش لاک‌پشت در سه‌بعد و دستورهای اصلی گرافیک لاک‌پشتی. مأخذ: Österlund, 2013.

مرحلهٔ پسافرایندی پیشنهاد شده است (Mishra &) Mishra, 2007). یکی از این تفسیرهای هندسی، گرافیک لاک‌پشتی[۶] است. مفهوم کلی این روش به این صورت است که یک لاک‌پشت خیالی در یک فضای دوبعدی یا سه‌بعدی قادر به حرکت در جهت‌های مختلف بوده، می‌تواند در زوایای مختلف بچرخد و همچنین به مختصات قبلی خود بازگشته و مجدداً به حرکت و چرخش ادامه دهد (تصویر ۲)، (Prusinkiewicz et al., 2018).

بنابراین سیستم‌های L دو وظیفهٔ اصلی را انجام می‌دهند: نمایش (بسته‌بندی) اطلاعات در نمادها و تفسیر آن نمادها به‌عنوان الگوهای رشد (Alfaris, 2009). رشته‌های تولیدشده توسط سیستم‌های L را می‌توان به‌عنوان نقشه‌های توپولوژیکی، یعنی روابط همسایگی و الگوی اتصال بین سلول‌ها یا ماژول‌های بزرگتر گیاه تفسیر کرد (ibid.).

مشهورترین توانایی سیستم‌های L قابلیت آنها در توسعهٔ ساختارهای شاخه‌ای است (Lane, 2015). با این حال، سیستم‌های L نباید فقط به‌عنوان مولد اجسام هندسی درخت‌مانند تعریف شوند. رویکرد توپولوژیکی برای توسعهٔ مدل‌سازی، که در سیستم‌های L ذاتی است، الهام‌بخش تحقیق و ایجاد روش‌های عملی برای مدل‌سازی ساختارهای در حال رشد و حجمی است (ibid.) و بنابراین با توجه به انتزاع و استعارهٔ موجود در ساختار سیستم L، می‌توان با روش‌های جدیدتر از قابلیت‌های آن بهره برد (Prusinkiewicz et al., 2018).

• انواع سیستم‌های L

سیستم‌های L می‌توانند قطعی یا غیرقطعی و تصادفی[۷] (با اضافه‌کردن توابع توزیع احتمال و غیره)، بدون زمینه یا حساس به زمینه[۸] (وابستگی رشد پارامترها به مدول‌های قبل و بعد)، و پارامتریک (اضافه‌کردن پارامترهای عددی و شروط به ساختار) یا غیرپارامتریک[۹] باشند که هریک کاربردهای خاصی دارند (Mishra & Mishra, 2007).

• سیستم‌های L در مدل‌سازی گیاهان

در مدل‌سازی گیاهان با سیستم‌های L می‌توان در چند سطح عمل کرد: ۱) سلولی، ۲) اجزای سطح بالاتر گیاه مانند برگ‌ها و جوانه‌ها، ۳) ساختار کلی گیاه و اصطلاحاً معماری گیاه و ۴) در جوامع گیاهان و فعل و انفعالات ناشی از رقابت برای نور، فضا و غیره.

یکی از پتانسیل‌های مهم سیستم‌های L، توانایی آنها در مدل‌سازی تأثیرات محیطی است. در این مدل‌ها نقش مورفوژنتیکی کلیدی در رشد گیاهان را به خودسازماندهی ناشی از رقابت بین شاخه‌ها برای فضا، نور اعم از نور، گرانش و غیره اختصاص می‌دهند (Runions & Prusinkiewicz, 2012). محققان سیستم‌های L را به‌گونه‌ای توسعه دادند که برای شبیه‌سازی تعاملات بین یک گیاه و محیط مناسب باشد که حتی هرس‌کردن و تأثیر فصول مختلف را نیز می‌تواند مدل‌سازی کند (Taylor-Hell, 2005). می‌توان یک گیاه را مدل کرده و تأثیرات محیطی را به‌صورت رندم به آن اعمال کردن تا گیاهان با ظواهر مختلف ایجاد شود (Prusinkiewicz et al., 2018).

گاهی اوقات فرایند مدل‌سازی به‌طور معکوس انجام می‌گیرد. مسئلهٔ یافتن سیستم L از یک نوعِ داده‌شده برای مجموعه‌ای

از مشاهدات، «مسئلهٔ استنباط[10]» برای آن نوع نامیده می‌شود. در واقع مسئلهٔ استنباط سیستم L، یافتن یک سیستم L برای شبیه‌سازی یک گیاه معین است (McQuillan, Bernard & Prusinkiewicz, 2018).

برای شبیه‌سازی دقیق این فرایندها به‌دلیل محدودیت‌های ذاتی در فرمالیسم سیستم‌های L، افزونه‌ها و ترکیب‌های مختلفی از سیستم‌های L پیشنهاد شده است. بهترین راهکارهایی که تاکنون پیشنهاد شده ترکیب سیستم‌های L با زبان‌های برنامه‌نویسی مانند Java، C/C++ و Python است (Prusinkiewicz et al., 2018). عمدهٔ این ترکیبات در جهت افزایش سرعت و کاهش حجم داده‌ها، ساده‌ترکردن برنامه‌نویسی‌ها و امکان مدل‌سازی ساختارهای پیچیده‌تر (Taylor-Hell, 2005) انجام شده است.

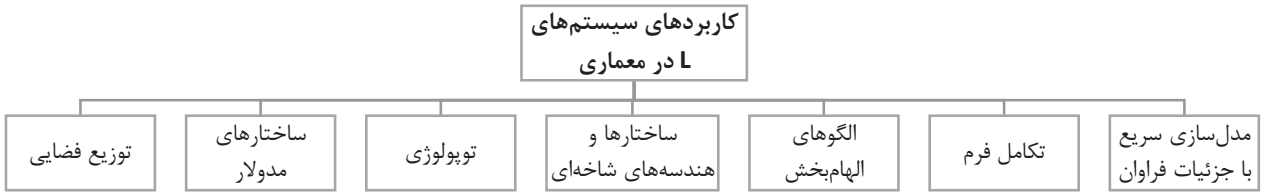
مهم‌ترین ترکیب سیستم‌های L با الگوریتم‌های تکاملی از جمله الگوریتم ژنتیک به‌منظور تکامل ساختارها براساس معیارها و توابع برازش[11] است. مدل‌های ریاضی سیستم‌های L مولد هستند و بنابراین مکمل آنها انواع روش‌های ارزیابی و بهینه‌یابی است. در استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک به‌منظور تکامل سیستم‌های L معمولاً مدل پایه‌ای از سیستم‌های L در نظر گرفته و سپس معیارهای ارزیابی آن تعیین می‌شود و ساختار با عملگرهای ژنتیک مانند جهش و ترکیب یا تقاطع[12] شروع به تکامل می‌کند. عملگرهای ژنتیک را می‌توان روی بذر، قوانین، تعداد تکرار و تفسیر لاک‌پشتی اعمال کرد که هریک می‌تواند نتایج متفاوتی را ایجاد کند (Mishra & Mishra, 2007).

سیستم‌های L در معماری

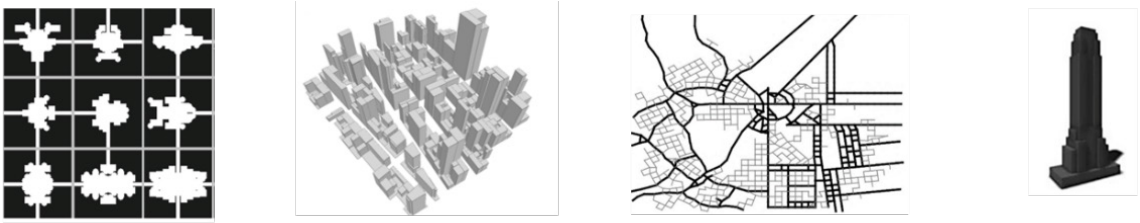
سیستم‌های L دارای کاربردهای متعدد در زمینه‌های مختلف هستند. در این مقاله با بررسی جامع مقالات و اسناد معتبر، کاربردهای سیستم‌های L در معماری و یا سایر حوزه‌هایی که اشاره به آنها می‌تواند موجب توسعهٔ متدلوژی در معماری شود، در ۷ بخش تقسیم‌بندی (تصویر ۳) و پس از معرفی هر یک از آنها، نمونه‌های مربوطه در جدولی جهت مقایسه ارائه شده است.

مدل‌سازی سریع با جزئیات فراوان: مدل‌سازی سریع با جزئیات فراوان یا مدل‌سازی و تولید محتوای رویه‌ای[13] از کاربردهای مهمی است که از قابلیت تولید ساختارهای پیچیده با پارامترهای اندک این الگوریتم استفاده کرده و در شهرسازی و بازی‌های رایانه‌ای به‌خوبی توسعه یافته است. ابزارهای مدل‌سازی رویه‌ای اطلاعات پایه را با توجه به یک الگوریتم خاص گسترش داده و به‌طور خودکار صرفاً با رعایت یک مجموعهٔ کوچک قوانین، مدل‌های سه‌بعدی پیچیده را از یک بذر ورودی تولید می‌کنند (Coelho, Sousa & Ferreira, 2020). در صنعت بازی به‌دلیل نیاز به مقدار زیادی محتوا با کیفیت بالا، سطح قابل قبولی از کنترل، حجم اندک و تنوع در ساختارهای ایجادشده (Risi & Togelius, 2020)، به تازگی از این روش استفاده شده است. به‌عنوان مثال آنتونیوک و همکاران از سیستم‌های L توسعه‌یافته به‌منظور ایجاد فضاهایی برای بازی رایانه‌ای با هدف تنوع (با رعایت ویژگی‌های دیگری مانند تقارن، و لزوم وجود دو فضای کوچک و بزرگ و...) استفاده کردند (Antoniuk, Hoser, & Strzęciwilk, 2019)، (تصویر ۳).

در شهرسازی و باستان‌شناسی در سال‌های اخیر، از سیستم‌های L به منظور مدل‌سازی سریع و با حجم اندکِ فضاهای شهری و یا ایجاد سبک‌های مختلف معماری شهری (Wonka, Aliaga, Müller & Vanegas, 2011) و تولید نماهای شهری استفاده شده که به‌شدت در حال توسعه است. کاهش شدید داده‌های ورودی و خودمتشابهی ویژگی‌هایی از سیستم‌های



تصویر ۳. تقسیم‌بندی کاربردهای سیستم‌های L در معماری. مأخذ: نگارندگان.



تولید سریع نماهای ساختمانی | تولید شبکه های ارتباطی | مدلسازی سریع فضاهای شهرسازی | تولید فضاها در صنعت بازی

تصویر ۴. کاربرد سیستم‌های L در مدل‌سازی سریع با جزئیات فراوان در حوزه‌های مختلف. مأخذ: نگارندگان.

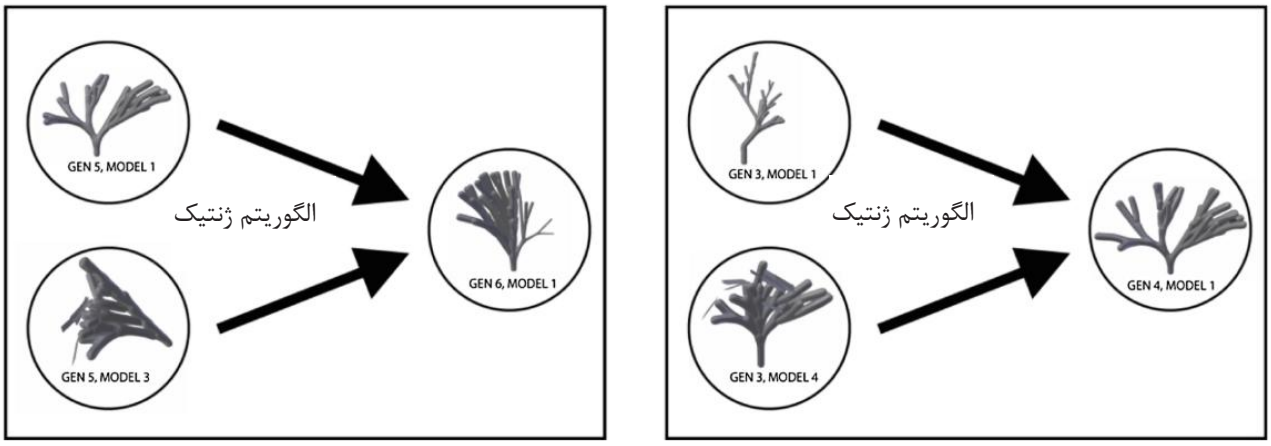
L هستند که در این کاربرد اهمیت دارند و در معماری می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. همچنین سیستم‌های L در روش‌های جدید مدل‌سازی شبکه‌های جاده‌ای و راه‌های ارتباطی هم کاربرد دارند که هدف اصلی آن توسعه و رشد الگوریتمیکِ تعاملی است که با ویژگی‌های یک صحنه و محیط ورودی تطابق پیدا می‌کند (تصویر ۴). می‌توان از این رویکرد در ایجاد کانسپت‌های معماری مبتنی بر مسیرهای حرکتی حساس به محیط الهام گرفت.

در معدود مواردی نیز در معماری جهت مدل‌سازی فرم‌های پیچیده (Lorenzo-Eiroa, 2013) از تکنیک‌های رویه‌ای مبتنی بر سیستم‌های L استفاده شده که سند معتبری از آن یافت نشد، اما در کارهای دانشجویی یافت می‌شود که در این مقاله به آن پرداخته نشده است.

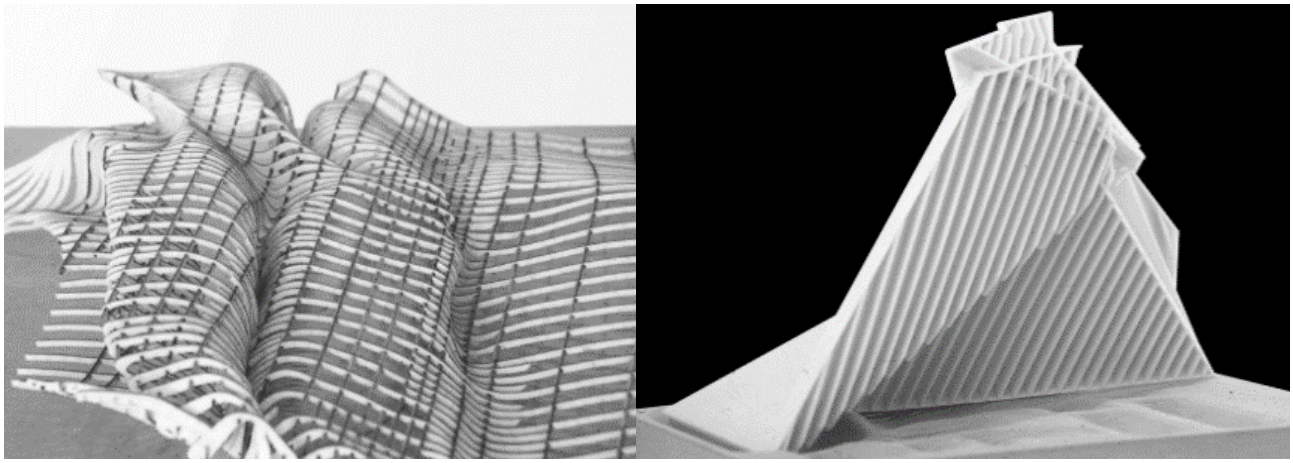
تکامل فرم: جهت تکامل فرم در معماری می‌توان از ترکیب سیستم‌های L با الگوریتم‌های تکاملی استفاده کرد. چنین سیستمی امکان دو نوع تکامل را فراهم می‌کند. انتخاب تعاملی، بر اساس درک انسان، به کاربر اجازه می‌دهد تا تکامل شبیه‌سازی شده را به سمت اشکال ترجیحی و معیارهای ذهنی و زیبایی‌شناختی (McDermott et al., 2012) هدایت کند. در روش دیگر، تکامل خودکار با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک با تابع برازش واضح مدنظر و با روابط ریاضی تعریف‌شده (برای معیارهای عینی)، شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین از طریق یک فرایند مکررِ انتخاب توسط کاربر و عملگرهای ژنتیک توسط کامپیوتر، فرم‌های حاصل را می‌توان بهینه کرد (Goos & Hartmanis, 2004).

ترکیب سیستم های L و الگوریتم ژنتیک در معماری از دههٔ ۹۰ م. پیشنهاد شده و معدود کارهای انجام‌شده در حوزه‌های مختلف طراحی، طراحی صنعتی، هوافضا و غیره عبارتند از: کوتس و همکاران او در راستای طراحی عملکردی در معماری و معرفی روش‌های تکامل تک‌هدفه (Coates, Broughton & Jackson, 1999)، کوتس و همکاران در موسسهٔ CECA جهت توسعهٔ فرم معماری با ترکیب سیستم‌های L، الگوریتم ژنتیک و هوش ازدحامی (جهت تعریف تابع برازش) (Coates, Appels & Simon, 2001)، جکسون در توسعهٔ ساختارهای شبه‌معماری و بررسی تکامل تعاملی و ترجیحات ذهنی کاربران، روش‌های چندهدفه و همچنین پیشنهاد رویکرد هم‌تکاملی (Jackson, 2002)، هارنبی و پولاک در هوافضا جهت بررسی مزایای کدنویسی با گرامرهای مولد برای طراحی تکاملی، تانگ در توسعهٔ رویکرد هم‌تکاملی (Tang, 2005)، پوپوویچی به منظور تکامل خانواده‌ای از طرح‌ها برای رسیدن به پاسخ مطلوب (Popovici, 2005)، ناراهارا در معماری جهت بررسی هندسه‌های سه‌بعدی تصادفی با استفاده از سیستم‌های L پارامتریک با تفسیر لاک‌پشتی و سپس ارزیابی این ساختارها با کمک روش‌های چندهدفه و توابع وزن‌داده‌شده (Narahara, 2010)، کیپتیا و همکاران در مهندسی به‌منظور بررسی چارچوب ترکیبی بین الگوریتم ژنتیک تعاملی و سیستم L و تعریف ترجیحات کاربر در ایجاد ساختارهای سه‌بعدی (Kiptiah Binti Ariffin, Hadi & Phon-Amnuaisuk, 2017)، (تصویر ۵) و سالری که در بخشی از پژوهش خود به قابلیت ترکیب این دو الگوریتم و ایجاد احجام کاربردی در معماری اشاره کرده است (Saleri, 2020). باید توجه کرد که این بخش از کاربردها علی‌رغم پتانسیل بالا، محصول قابل‌توجهی در معماری تولید نکرده و بیشتر متمرکز بر بررسی توانایی این سیستم‌ها در تولید احجام هندسی بوده است. لذا پژوهش‌های صورت‌گرفته در آن در مراحل اولیه بوده و نیازمند مطالعات بیشتری است.

تکامل گرامری[۱۴] نیز که یک تکنیک برنامه‌نویسی ژنتیک



تصویر ۵. سیستم ترکیبی والدهای موردنظر را برای تولید فرزندان جدید به‌کار می‌گیرد. مأخذ: Kiptiah Binti Ariffinet al., 2017.



تصویر ۶. سطوح تولیدشده با ابزار GENR8 که با مفهوم سیستم‌های L ابداع شده است مأخذ: Ryan, O'Neill & Collins 2018.

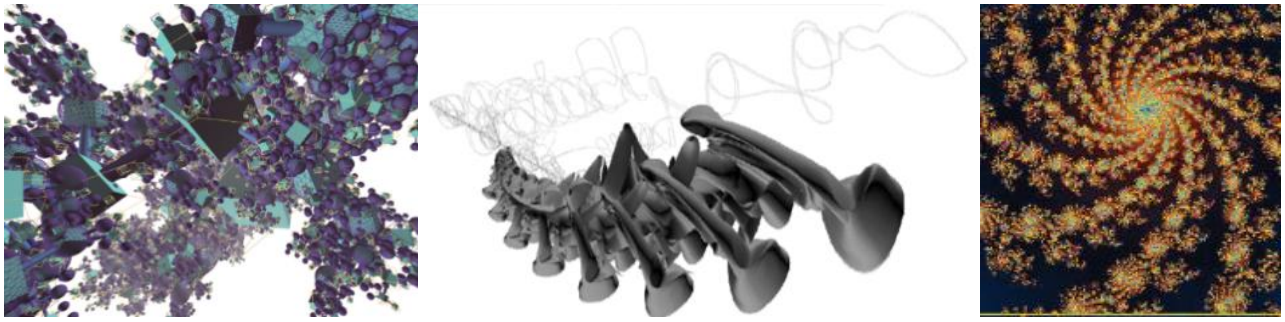
است، در ترکیب با سیستم‌های L به‌کار رفته و مهم‌ترین حاصل آن در معماری، ابزار تولید سطح Genr 8 است که در آن سطوح دیجیتالی سه‌بعدی با کیفیت ارگانیک در پاسخ به یک محیط شبیه‌سازی‌شده که واکنش به تأثیرات محیطی مانند جاذبه و نور خورشید را تقلید می‌کند، رشد می‌کنند (تصویر ۶)، (Ryan, O'Neill & Collins, 2018).

الگوها: الگوهایی که سیستم‌های L ایجاد می‌کنند نیز می‌توانند الهام‌بخش معماری باشد و این سیستم‌ها یک ابزار بسیار جالب برای هنر مولد و الگوهای انتزاعی هستند (Romero & Machado, 2008). این سیستم‌ها می‌توانند از الگوهایی با یک هندسهٔ ساده در اولین تکرار شروع شده و با هر بازگشت پیچیده‌تر شوند. یکی از این الگوها که نتیجه ساختار بازگشتیِ و خودمتشابه الگوریتم هستند، فرکتال‌ها هستند و تقریباً تمامی طرح‌های فرکتالی را می‌توان با سیستم‌های L ترسیم کرد (Shiffman, 2012). رویکرد دیگر، اعمال عملگرهای سادهٔ هندسی بر الگوهای ایجادشده توسط سیستم‌های L است (تصویر ۷).

ساختارها و هندسه‌های شاخه‌ای: ساختارهای شاخه‌ای تولیدشده با سیستم‌های L می‌تواند حساس به محیط یا غیرحساس به محیط باشد (تصویر ۸) که بیشترین نمونه‌های کاربرد سیستم‌های L در معماری و همچنین سایر حوزه‌ها را شامل می‌شود. در معماریِ ساختارهای شاخه‌ای با سیستم‌های L در حال حاضر پلاگین‌هایی از جمله پلاگین خرگوش[۱۵] و آرمی‌انت[۱۶] منتشر شده که هریک قابلیت‌های مختلفی دارند ولی نیازمند توسعه برای اهداف بیشتری هستند.

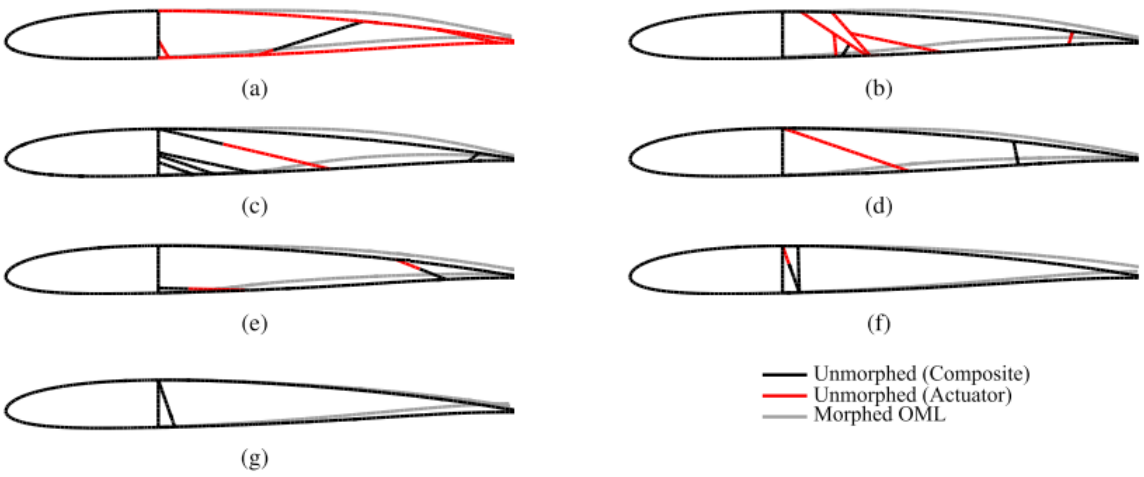
تنظیم روابط اجزا: توپولوژی با توجه به تعریف ریاضی آن، مطالعهٔ خصوصیات ذاتی و کیفی فرم‌های هندسی است که به‌طور معمول تحت تأثیر تغییر اندازه یا شکل قرار نمی‌گیرند. تحولات توپولوژیک، قبل از هر چیز، بر ساختار رابطه‌ای و بنابراین، شکل(های) حاصل تأثیر می‌گذارد. سیستم‌های L که در بطن خود دارای مفاهیم توپولوژیکی هستند، می‌توانند در تنظیم روابط اجزا کارآمد باشند. به‌عنوان مثال تنظیم روابط اجزا را می‌توان به‌صورت انتزاعی در تنظیم ارتباطات بین فضاهای پلان، هدایت و تنظیم توزیع گرما و یا بهینه‌سازی توپولوژی ساختار سازه‌ای استفاده کرد. سیستم‌های L در سال‌های اخیر به خصوص در حوزهٔ بهینه‌سازی توپولوژی در مهندسی هوافضا استفاده شده است. بهینه‌سازی توپولوژی در مهندسی سازه و مکانیک به معنای یافتن توزیع یا طرح مطلوب مواد در یک حوزهٔ معین با رعایت محدودیت‌ها و شرایط مرزی به منظور حداکثر رساندن عملکرد سیستم است (Kobayashi, 2010). از این جمله می‌توان به کوبایاشی و همکاران در بهینه‌سازی مکانیزم فلپینگ و ساختار بال هواپیما (Kobayashi, Pedro, & Hude, 2010). ختان و همکاران در بهینه‌سازی توپولوژی خرپاها در مهندسی سازه (Khetan, Lohan & Allison, 2015)، هارتل و همکاران در طراحی ساختارهای سازه‌ای تغییرشکل یابنده خرپایی(Hartl, Reich & Beran, 2016)، رسالهٔ دکتری کیارنی از دانشگاه هاوایی در سال ۲۰۱۵ در بهینه‌سازی ساختار بال هواپیما (Kobayashi, Pedro, & Hude, 2010)، و پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد میکلسون از دانشگاه تگزاس در سال ۲۰۲۰، در طراحی طرح‌بندی توپولوژیکی سازه‌ای اولیه در طراحی مقطع تیغهٔ روتور هلی‌کوپتر اشاره کرد (Mikkelsen, 2020)، (تصویر ۹).

بهینه‌یابی توپولوژی ساختارهای معماری بسیار کاربردی بوده و رویکردها و روش‌های مختلفی برای آن وجود دارد که همچنان در حال توسعه است. با توجه به مطالب ارائه‌شده در این قسمت، از متدلوژی‌های جدید به‌کارگیری سیستم‌های L در بهینه‌یابی توپولوژی نیز می‌توان در توسعهٔ رویکردهای جدید آن در معماری الهام گرفت.



تصویر ۷. کاربرد سیستم‌های L در ایجاد الگوها (از راست به چپ): هنرتعاملی- ایجاد ساختارهای هندسی با عملگرهای سادهٔ هندسی- فرکتال‌ها. مأخذ: Shiffman, 2012.

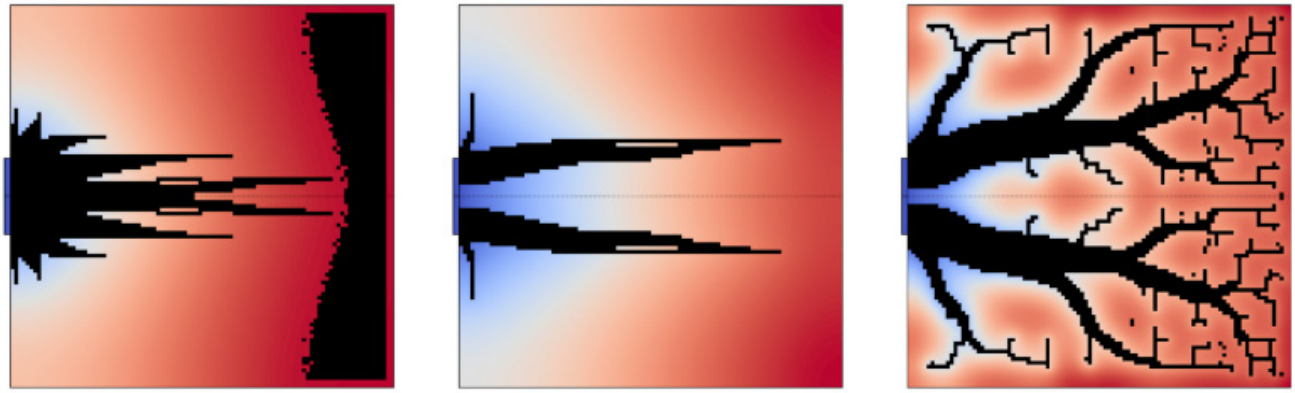
تصویر ۸. نمونه‌ای از کاربرد ساختارهای شاخه‌ای سیستم‌های L درمعماری. مأخذ:www. Morphocode.com .



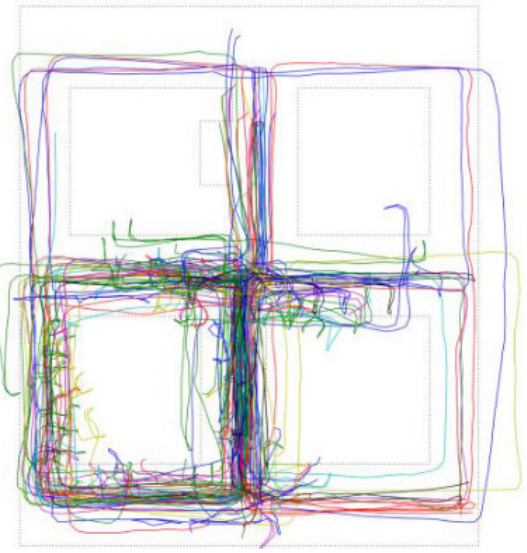
تصویر ۹. به‌کارگیری سیستم‌های L در طراحی طرح‌بندی توپولوژیکی. مأخذ:www. Morphocode.com .

توپولوژی را می‌توان در هدایت و توزیع گرما نیز تعریف کرد. به‌عنوان مثال ایکونن و Ikonen, Marck, S´obester) (& Keane, 2018 سیستم‌های L پارامتریک را برای بهینه‌سازی توپولوژی چندهدفهٔ هدایت گرما با هدف به حداقل‌رساندن متوسط یا حداکثر دما جهت توزیع مقدار محدودی از مواد با رسانایی بالا به‌کار بردند (تصویر ۱۰). چنین کاربردی را می‌توان در توسعهٔ سیستم‌های گرمایش و سرمایش بهینه و کانسپت‌های معماری مبتنی بر آن در فضاهای وسیع به‌کار گرفت و از رویکردهای مبتنی بر سیستم‌های L که اخیراً در این حوزه توسعه یافته‌اند استفاده کرد.

یکی دیگر از مصادیق تنظیم روابط اجزا، در مدل‌سازی فضاهای ساختمان است که در شهرسازی و گرافیک جهت استفاده از داده‌های موجود و استنباط سیستم L و در نهایت مدل‌سازی (Peter, 2017) و بازتولید فضاها به‌کار گرفته شده است. به‌عنوان مثال در مقاله‌ای در جهت مستندسازی



تصویر ۱۰. طراحی توزیع گرما با سیستم‌های L پارامتریک. مأخذ: Ikonen et al., 2018.



تصویر ۱۱. مسیر عبوری کاربران با استفاده از داده‌های سنسورها که با استنباط سیستم L پلان آن بازطراحی شده است. مأخذ: Becker et al., 2013.

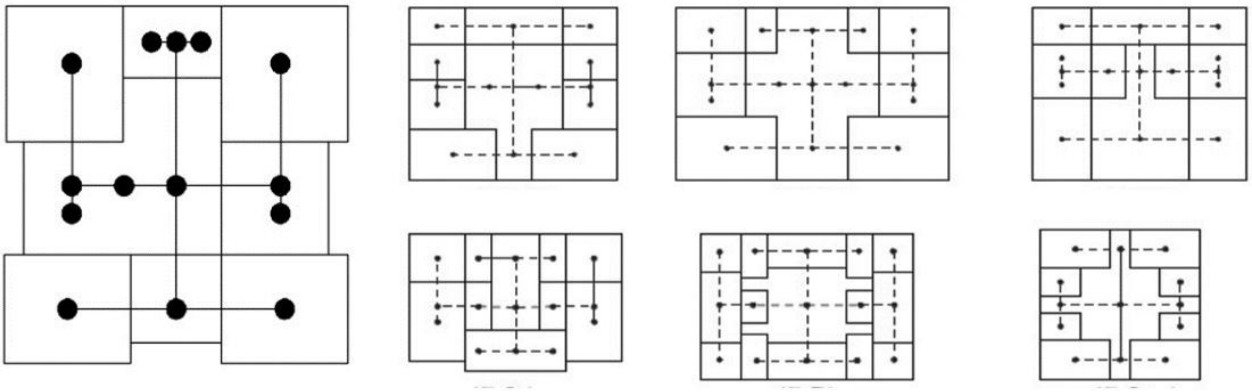
وضعیت داخلی ساختمان و تهیهٔ نقشه‌های «چون‌ساخت» برای ساختمان‌های بزرگ و عمومی که دارای قوانین سطح بالاتری مانند تقارن و تکرار هستند، استفاده شده است (Peter, 2017). در مقاله‌ای دیگر که توسط بکر و همکاران در سال ۲۰۱۳ چاپ شده، با ترکیب مفاهیم سیستم‌های L و دستورزبان اسپلیت به مدل‌سازی خودکار فضاهای ارتباطی (راهروها) داخلی ساختمان‌ها از داده‌های سنسورها می‌پردازد (تصویر ۱۱)، (Becker, Peter, Fritsch, Philipp, Baier & Dibak, 2013). چنین ایده‌ای را می‌توان در یافتن خانواده‌ای از طرح‌ها استفاده کرد. به این معنا که پس از خروجی‌گرفتن از داده‌های سنسورها در یک ساختمان با کاربری خاص، انواع احتمالات برای ایجاد پلان‌های داخلی بر مبنای رفتار کاربران را بررسی و سؤال طراحی را «بهینه‌کردن چنین پلانی براساس مسیرهای عبوری کاربران» توصیف کرد. بر این اساس سیستم‌های L مورد نظر را استنباط و ساختارهایی مشابه را ایجاد کرده و درنهایت براساس اهداف طراحی، طرح‌های برتر را انتخاب کرد.

در مقالهٔ دیگری که فرناندو و دراگ مولر ارائه کردند از مفهوم توپولوژی در طراحی پلان استفاده و بیان شده که می‌توان فراتر از دوره و سبک، ساختمان‌ها را با تمرکز بر ساختار زیرین آنها (یعنی توپولوژی) گروه‌بندی کرد. آنها از سیستم‌های L برای نمایش مورفولوژی یک طرح‌بندی فضایی در شبکه‌ای سلولی به‌صورت استعاری استفاده کردند و سیستم‌های GL را ابداع کردند (تصویر ۱۲)، (Fernando & Drogemuller, 2015). این نمونه، تنها کاربردی از این کانسپت است که اختصاصاً در معماری انجام یافته و قابلیت توسعهٔ زیادی دارد. به‌عنوان مثال، می‌توان واحدهای ساختاری سازندهٔ پلان ساختمان را یک واحد از سطح در نظر گرفت و روابط و توپولوژی را برای این واحد سازنده تعریف کرد که نتایج جالب‌توجهی در پلان ایجاد کند.

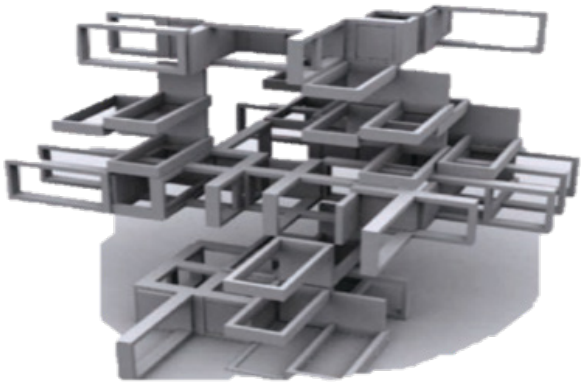
همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های این کاربرد با سیستم‌های L در معماری نیز اندک، ولی در سایر رشته‌ها توسعهٔ بیشتری داشته است.

ساختارهای مدولار: یکی دیگر از کاربردهای سیستم‌های L به‌دلیل ساختار آن، به‌کارگیری در ساختارهای مدولار است. الفبای سیستم‌های L در رشد ساختار الگوریتم تکثیر و در نتیجه در کل ساختار تکرار می‌شوند و از این جهت الگوریتمی مناسب ساختارهای مدولار هستند. معدود نمونه‌هایی از ساختارهای مدولار تولیدشده توسط سیستم‌های L وجود دارد که می‌توان آنها را در کارهای هانسمیر و برخی کارهای دانشجویی مشاهده کرد (تصویر ۱۲)؛ (Петрушевски, Деветаковић & Митровић, 2010; (Gorgora.de, 2011; Kniemeyer, Barczik, Hemmerling & Kurth, 2008; Kahn, 2008).

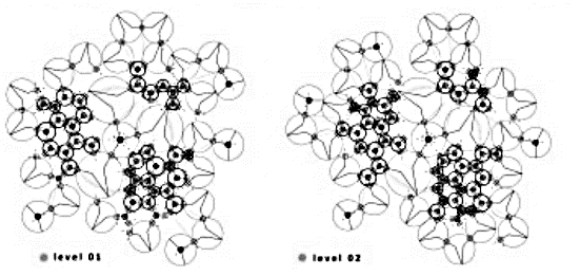
توزیع فضایی: آخرین کاربرد مشاهده‌شده برای سیستم‌های L، استفاده از آنها در توزیع فضایی حساس به



تصویر ۱۲. تنها پژوهشی که اختصاصاً در طراحی معماری به موضوع توپولوژی پرداخته است. در این سیستم می‌توان پلان‌های با توپولوژی و ارتباطات مشابه را در کسری از زمان تولید کرده و گسترش داد. مأخذ: Fernando & Drogemuller, 2015.



تصویر ۱۳. یک نمونه کار دانشجویی در روسیه که مقاله‌ای از آن به‌چاپ رسیده است. مأخذ: Петрушевски et al., 2010.



تصویر ۱۴. توزیع واحدهای مسکونی با استفاده از سیستم‌های L حساس به محیط مأخذ: Bessa, 2009.

محیط است که نمونه‌های آن نیز اندک است. به‌عنوان مثال بِسا پاسخ‌های فوتوتروپیک مثبت فرایند مولد را برای توزیع واحدهای مسکونی به‌پیش برد (تصویر ۱۴) (Bessa, 2009). در مورد دیگر، از سیستم‌های L به‌عنوان ابزار طراحی مولد سازمانی برای طراحی طرح جامع پردیس دانشگاهی در یک منطقه صنعتی متروک استفاده شده است (Diniz, 2012). در جدول ۱، مقالات و اسناد علمی مربوط به این کاربردها ارائه شده است. در این جدول که حاصل مطالعهٔ دقیق کاربردهای سیستم‌های L در حوزه‌های مختلف و متدلوژی مورد استفاده در آن است، تلاش شده مهم‌ترین نکات مربوطه خلاصه و مقایسه شود.

بحث و تحلیل، یافته‌ها

استفاده از مفاهیم ریاضی و منطقی مدرن یک چالش منحصربه‌فرد در همهٔ زمینه‌های طراحی است. سیستم‌های L قطعاً یکی از این مفاهیم هستند که از لحاظ نظری کاملاً تعریف‌شده‌اند. در این مقاله ساختار الگوریتم در زمینهٔ اصلی مورد بررسی قرار گرفته و کانسپت‌ها، مفاهیم و پتانسیل‌های آن از مقالات تخصصی رشد گیاهان استخراج شد. بنابر مطالب بنابر مطالب بخش های قبلی و با مطالعهٔ دقیقی که در این پژوهش روی منابع اصلی سیستم‌های L صورت گرفت، کانسپت‌ها و پتانسیل‌های سیستم‌های L در معماری را می‌توان در جدول ۲ خلاصه کرد، هریک از کانسپت‌ها، پتانسیل‌های مختلفی ایجاد می‌کنند که برخی از آنها در معماری توسعه‌یافته و برخی توسعه نیافته‌اند و لازم است با درنظر گرفتن این مفاهیم در راستای توسعهٔ آن قدم برداشت. در جدول ۱، اسناد علمی مورد استفاده در این پژوهش که کاربردهای سیستم‌های L بر اساس آنها تعیین شده، ارائه شده است. در این جدول اسناد علمی مذکور به‌ترتیب سال مرتب شده و در آنها نوع مرجع، حوزهٔ کاری، هدف اصلی، کاربرد سیستم L، روش به‌کارگرفته‌شده، کانسپت سیستم L که مورد تأکید بوده و مرحلهٔ استفاده از آن در طراحی بیان شده است. نحوهٔ تشخیص کانسپت‌های استفاده‌شده در این مقالات بر اساس استنباط از متدلوژی سند مورد نظر و یا ذکر صریح در متن آن است. تقریباً تمامی اسناد استفاده‌شده به‌جز برخی موارد «ساختارهای شاخه‌ای» پژوهشی هستند، اما دربرخی موارد کاربرد سیستم L تنها بخشی از سند مورد نظر است نه موضوع اصلی. همچنین در این مقاله، اسناد کاربردهای سیستم‌های L در سایر رشته‌ها تنها جهت

جدول ۱. تقسیم‌بندی، مقایسه و آنالیز کاربردهای سیستم‌های L در معماری و سایر رشته‌های مرتبط. مأخذ: نگارندگان.

مرجع	نوع مرجع	حوزه	هدف اصلی	کاربرد	روش سیستم L	مفاهیم	مرحله
(Coates et al., 1999)	فصل کتاب	معماری	تعریف متدلوژی ترکیبی با سیستم L در تکامل فرم	تکامل فرم	ترکیب الگوریتم ژنتیک با سیستم L ساده	انتزاع/توسعه	کانسپت
(Coates et al., 2001)	مقالهٔ کنفرانسی	معماری	توسعهٔ متدلوژی ترکیبی با سیستم L	تکامل فرم	ترکیب سیستم L، الگوریتم ژنتیک و هوش ازدحامی	انتزاع/توسعه	کانسپت
(Parish & Müller, 2001)	مقالهٔ کنفرانسی	شهرسازی	توسعهٔ متدلوژی ترکیبی سیستم L جهت مدل‌سازی فضای شهری	مدل‌سازی سریع با جزئیات فراوان	سیستم L توسعه‌یافته (پیشنهادشده توسط نویسندگان)	توسعه/خودمتشابهی/توپولوژی/ پیچیدگی‌درعین‌سادگی	مدل‌سازی
(Hornby & Pollack, 2001) (Hornby, 2004)	کنفرانسی و ژورنالی	هوافضا	بررسی مزایای ترکیب گرامرهای مولد در طراحی تکاملی	تکامل فرم	ترکیب الگوریتم ژنتیک با سیستم L	توسعه/توپولوژی/انتزاع	کانسپت
(Jackson, 2002)	فصل کتاب	معماری	بررسی پتانسیل ترکیب سیستم L و الگوریتم ژنتیک	تکامل فرم	ترکیب الگوریتم ژنتیک با سیستم L	انتزاع/توسعه	کانسپت
(Dollens, 2005)	کتاب	معماری	توسعهٔ ساختارهای شاخه‌ای در معماری ارگانیک	ساختارهای شاخه‌ای	سیستم L حساس به محیط	توسعه/خودمتشابهی	کانسپت
Landreneau, Ozener, Pak,) (Akleman & Keyser , 2006	فصل کتاب	معماری	تولید طرح‌های معماری در پلتفورم تعاملی	الگوهای الهام‌بخش	اعمال عملگرهای هندسی روی الگوها و فراکتال‌ها	خودمتشابهی/توسعه	کانسپت
(Marvie, Perret , Perret, 2005)	مقالهٔ ژورنالی	شهرسازی	مدل‌سازی انواع سبک‌های ساختمانی در فضای شهری	مدل‌سازی سریع با جزئیات فراوان	سیستم L اصلاح‌شده	توسعه/خودمتشابهی/توپولوژی/ پیچیدگی‌درعین‌سادگی	مدل‌سازی
(Popovici, 2005)	سند دانشگاهی	کامپیوتر- طراحی	تکامل خانواده‌ای از طرح‌ها برای رسیدن به پاسخ مطلوب	تکامل فرم	سیستم L پارامتریک با گرافیک لاک‌پشتی در ترکیب با الگوریتم ژنتیک	توسعه/توپولوژی/انتزاع	کانسپت
(Tang, 2005)	مقالهٔ کنفرانسی	معماری	پژوهش در رویکرد هم‌تکاملی	تکامل فرم	ترکیب سیستم L و الگوریتم ژنتیک	انتزاع/توسعه	کانسپت
(Hensel & Menges, 2006)	مقالهٔ ژورنالی	معماری	ترکیب طراحی دیجیتال و مواد (ایجاد ساختارهای شاخه‌ای حساس به محیط)	ساختارهای شاخه‌ای	سیستم L حساس به محیط با تعیین محدوده پارامترها به کمک آزمایش و رشد	توسعه/خودمتشابهی/توپولوژی	مدل‌سازی
(Hensel, 2006)	مقالهٔ ژورنالی	معماری	توصیف پتانسیل‌های سیستم L	-	توصیف مفهومی	توسعه/خودمتشابهی/توپولوژی	-
(Menges, 2006)	مقالهٔ ژورنالی	معماری	پلی مورفیسم (ترکیب سازه، مصالح و فرم)	تکامل فرم	ایجاد سطوح رشدیابنده با نیروهای خارجی و ترکیب با روش ساخت (جنر۸)	انتزاع/توسعه	مدل‌سازی و ساخت
Coelho, Bessa , Sousa &) (Ferreira, 2007	مقالهٔ ژورنالی	شهرسازی	توسعهٔ روش‌های مدل‌سازی نما و کاهش باگ‌های مدل‌سازی	مدل‌سازی سریع با جزئیات فراوان	سیستم Geospatial L	توسعه/ خودمتشابهی/توپولوژی پیچیدگی‌درعین‌سادگی	مدل‌سازی
Hemberg &) (Hemberg, 2001) O'Reilly &) O'Reilly, 2004 Byrne,) (Hemberg, 2007 Hemberg, Brabazon, O'Neill Byrne, Hemberg &) (2012 Hemberg, et) (O'Neill 2011 (al., 2007	کتاب/ مقاله ژورنالی/پایان‌نامه MIT/کنفرانسی	معماری	توسعهٔ نرم‌افزار شبیه‌سازی تأثیرات محیطی جهت رشد سطوح	تکامل فرم	ترکیب سیستم L با الگوریتم ژنتیک (تکامل گرامری)	توپولوژی/انتزاع/توسعه	کانسپت
(Pan, 2007)	مسابقه evolo	معماری	سازهٔ درختی ساختمان بلند	ساختارهای شاخه‌ای	سیستم L ساده	توسعه	کانسپت
(Ei-Khaldi, 2007)	ارشد/MIT	معماری	بررسی نحوهٔ ترکیب ۷ الگوریتم مولد در طراحی معماری	ساختارهای شاخه‌ای	سیستم L ساده	توسعه/انتزاع	کانسپت
(O'Neill & Brabazon, 2008)	مقالهٔ کنفرانسی	گرافیک- رایانه	طراحی لوگو	تکامل فرم	ترکیب سیستم L و الگوریتم ژنتیک	توپولوژی/توسعه/انتزاع	کانسپت
(Romero & Machado, 2008)	کتاب	رایانه-هنر	نقاشی مجازی دوبعدی و سه‌بعدی	الگوهای الهام‌بخش	ترکیب سیستم L و هوش ازدحامی	انتزاع/خودمتشابهی/توسعه	طرح نهایی
(Kahn, 2008)	ارشد/ دانشگاه سینسیناتی	معماری	ساختمان بلند با سازهٔ شاخه‌ای	ساختارهای شاخه‌ای	الهام از سیستم L در رشد ستون با متدلوژی ترکیبی	توسعه	مدل‌سازی
(Kniemeyer et al., 2008)	فصل کتاب	معماری	ایجاد ترسیمات و احجام معماری	ساختارهای مدولار	گرامر رشد رابطه‌ای و نرم‌افزار grogra	توسعه/خودمتشابهی	کانسپت
(ydroponic-garden, 2009)	مسابقهٔ طراحی	معماری	طراحی باغ پایدار با سازهٔ شاخه‌ای	ساختارهای شاخه‌ای	سیستم L ساده	توسعه	مدل‌سازی
(Menges, 2009)	مسابقهٔ طراحی	معماری	سازهٔ شاخه‌ای ساختمان کتابخانه	ساختارهای شاخه‌ای	سیستم L حساس به محیط	توسعه/خودمتشابهی	مدل‌سازی
(Bessa, 2009)	مقاله ژورنالی	معماری	توزیع واحدهای مسکونی	توزیع فضایی	سیستم L حساس به محیط	توسعه/انتزاع	کانسپت
(Jones. 2012)	مسابقهٔ طراحی	معماری	طراحی ستون شاخه‌ای رستوران	ساختارهای شاخه‌ای	سیستم L ساده	توسعه/خودمتشابهی	طراحی
(Arponen et al., 2009)	فصل کتاب	معماری	ارائهٔ دیدگاهی جایگزین در معماری فنلاند با روش‌های الگوریتمیک	ساختارهای شاخه‌ای	سیستم L با ساختار شاخه‌ای	توسعه/خودمتشابهی	کانسپت
(Narahara, 2010)	رسالهٔ دکتری/هاروارد	معماری	ارائهٔ متدلوژی معماری نوظهوری	تکامل فرم	ترکیب سیستم L پارامتریک با الگوریتم‌های ژنتیک و ارزیابی ساختارها با روش چندهدفه و توابع وزنی	توسعه/انتزاع/خودمتشابهی	کانسپت
(Kobayashi, 2010)	مقالهٔ ژورنالی	مهندسی مکانیک	بهینه‌سازی مکانیزم فلپینگ و ساختار بال هواپیما	تنظیم روابط اجزا	الهام از فرایند تقسیم سلولی با سیستم L و ترکیب با الگوریتم تکاملی و بهینه‌یابی با روش چندهدفه	توپولوژی/ پیچیدگی‌درعین‌سادگی	طراحی دقیق
(Gu, Singh & Merrick, 2010)	مقالهٔ کنفرانسی	معماری	ارائهٔ چارچوب محاسباتی برای ادغام تکنیک‌های طراحی مولد	تکامل فرم	استفاده از خروجی سیستم L در ورودی سایر الگوریتم‌ها و برعکس	توسعه/خودمتشابهی/انتزاع/توپولوژی	کانسپت
(Петрушевски et al., 2010)	نامشخص	معماری	ارائهٔ ترسیم هندسی با سیستم L	ساختارهای مدولار	ایجاد ابزار برای مدل‌سازی پارامتریک با سیستم L	خودمتشابهی	کانسپت
(Hanafin, Datta & Rolfe, 2011)	مقالهٔ کنفرانسی	معماری	بررسی ساختارهای شاخه‌ای نما	ساختارهای شاخه‌ای	سیستم L ساده با تفسیر لاک‌پشتی	توسعه	مدل‌سازی
(Diniz, 2012)	مقالهٔ کنفرانسی	معماری	طراحی طرح‌جامع	توزیع فضایی	سیستم L حساس به محیط	توسعه/انتزاع	کانسپت
(Becker et al., 2013)	مقالهٔ کنفرانسی	فناوری اطلاعات	مدل‌سازی اتوماتیک فضاهای ارتباطی ساختمان از داده‌های سنسورها	تنظیم روابط اجزا	ترکیب سیستم L و دستورزبان اسپلیت	توپولوژی/انتزاع	طراحی دقیق
(Nordin, Hopf , & Motte , 2013)	مقالهٔ کنفرانسی	طراحی صنعتی	طراحی اشیا پیچیده با الگوریتم مولد	ساختارهای شاخه‌ای	ایجاد ساختارهای شاخه‌ای در ترکیب با الگوریتم ژنتیک با معیارهای برازش خاص	توسعه/خودمتشابهی	کانسپت
(Jormedal, 2013)	پایان‌نامه ارشد/ دانشگاه لینشوپینگ	فناوری اطلاعات	مدل‌سازی رویه‌ای شبکه‌های جاده‌ای	مدل‌سازی سریع با جزئیات فراوان	سیستم L پارامتریک	توپولوژی/خودمتشابهی/ پیچیدگی‌درعین‌سادگی	مدل‌سازی

ادامهٔ جدول ۱.

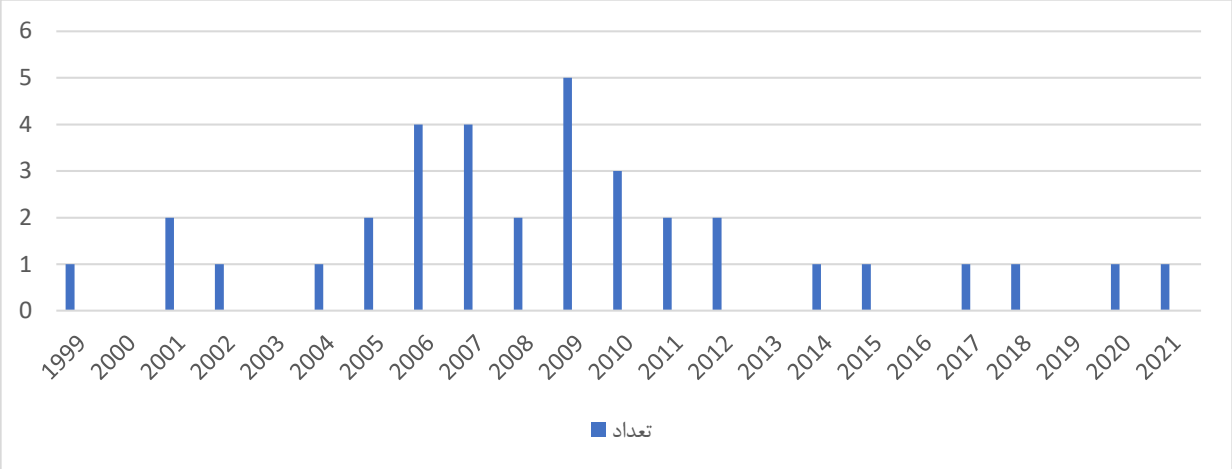
مرجع	نوع مرجع	حوزه	هدف اصلی	کاربرد	روش سیستم L	مفاهیم	مرحله
(Chu, 2014)	فصل کتاب	معماری	ایجاد خانواده‌ای از سطوح توپولوژیکی	الگوهای الهام‌بخش	اعمال عملگرهای ساده‌هندسی روی الگوها	توسعه	کانسپت
(Kearney, 2015)	رسالهٔ دکتری /دانشگاه هاوایی	مکانیک و هوافضا	بهینه‌سازی ساختار بال هواپیما	تنظیم روابط اجزا	ترکیب نگاشت سیستم L، الگوریتم ژنتیک و ساختارهای سلولی	توپولوژی/ پیچیدگی‌درعین‌سادگی	کانسپت
(Khetan et al., 2015)	مقالهٔ ژورنالی	مهندسی سازه	بهینه‌سازی توپولوژی خرپاها	تنظیم روابط اجزا	نگاشت سیستم L و الگوریتم ژنتیک	توپولوژی	کانسپت
Fernando & Drogemuller,) (2015	رسالهٔ دکتری/دانشگاه کوئینزلند	معماری	استفاده از مفهوم توپولوژی در طراحی پلان	تنظیم روابط اجزا	سیستم L تغییریافته-سیستم‌های GL	توپولوژی/انتزاع/توسعه	کانسپت
(Hartl et al., 2016)	مقالهٔ کنفرانسی	هوافضا	طراحی ساختارهای سازه‌ای تغییرشکل‌یابندهٔ خرپایی	تنظیم روابط اجزا	سیستم L و برنامه‌نویسی ژنتیک	توپولوژی/پیچیدگی‌درعین‌سادگی/توسعه	کانسپت
(Kiptiah et al., 2017)	مقالهٔ کنفرانسی	مهندسی- رایانه	تسهیل مدل‌سازی احجام سه‌بعدی با کنترل بالا روی حجم	تکامل فرم	سیستم L و الگوریتم‌های ژنتیک	انتزاع/توسعه	مدل‌سازی
Soltanzadeh & Masnavi,) (2017	مقالهٔ کنفرانسی	معماری	استفاده از ساختارهای درختی برای طراحی ستون فضاهای بزرگ	ساختارهای شاخه‌ای	سیستم‌های L ساده و الگوریتم ژنتیک	توسعه/خودمتشابهی	طراحی دقیق
(Ikonen et al., 2018)	مقالهٔ ژورنالی	مهندسی و طراحی	بهینه‌سازی توپولوژی چندهدفهٔ هدایت گرما با هدف به حداقل رساندن حداکثر دما	تنظیم روابط اجزا	سیستم L پارامتریک و الگوریتم ژنتیک	توپولوژی/پیچیدگی‌درعین‌سادگی	کانسپت
(Alnobani, 2018)	پایان‌نامهٔ ارشد/ دانشگاه CMU	معماری	چارچوب طراحی هندسی انطباق‌پذیر	تنظیم روابط اجزا	سیستم L ساده با متدلوژی ترکیبی	انتزاع/توسعه/توپولوژی	کانسپت
(Antoniuk et al., 2019)	مقالهٔ ژورنالی	بازی‌های رایانه‌ای	ایجاد پلان متنوع با حجم اندک در بازی رایانه‌ای	مدل‌سازی سریع با جزئیات فراوان	سیستم L اصلاح‌شده	توسعه/خودمتشابهی/توپولوژی/انتزاع	طراحی دقیق
(Mikkelsen, 2020)	پایان‌نامهٔ ارشد/ دانشگاه تگزاس	مهندسی هوافضا	طراحی طرح‌بندی توپولوژیکی سازه‌ای مقطع روتور هلی‌کوپتر	تنظیم روابط اجزا	سیستم L پارامتریک و الگوریتم SPIDRS	توپولوژی/ پیچیدگی‌درعین‌سادگی	کانسپت
(Saleri, 2020)	فصل کتاب	معماری	مطالعهٔ الگوریتم‌های مولد و رویکردهای تکاملی	تکامل فرم	ترکیب سیستم L و الگوریتم ژنتیک	انتزاع	-
Sharp, Blay, Kholodova &) (Correa 2021	مقالهٔ کنفرانسی	معماری	طراحی نما با الهام از مبانی حرکتی گیاهان	ساختارهای شاخه‌ای	استفاده از سیستم L به‌عنوان نقطه شروعی در توزیع ساختار کابلی نما	توسعه/ انتزاع	کانسپت

جدول ۲. کانسپت‌ها و پتانسیل‌های سیستم‌های L در معماری. مأخذ: نگارندگان.

پیچیدگی در عین سادگی	توپولوژی	خودمتشابهی	انتزاع	توسعه
فرم‌های نوظهوری	تعریف روابط اجزای سیستم	الگوهای فرکتالی	انعطاف‌پذیری در تفسیر و تولید انواع هندسه	فرایندهای رشد و فرم‌های نوظهوری
شبیه‌سازی خودسازماندهی	فرایندهای دینامیک (با افزایش اجزا و روابط)	ساختارهای مدولار	ترکیب با سایر الگوریتم‌ها و متدلوژی‌های ترکیبی	فرایندهای دینامیک (با افزایش اجزا و روابط)
کاهش ورودی‌ها و کنترل بالا روی خروجی‌ها	شبیه‌سازی تأثیرات ترکیبی و ارتباطات آنها	الگوهای با تناسبات طلایی	تأثیرات محیطی	ترکیب با الگوریتم‌های تکاملی و تکامل ساختارها
تولید ساختار پیچیده با حجم دادهٔ اندک	شبیه‌سازی تأثیرات محیطی		ساختارهای رندم، حساس به زمینه، زمان، محیط	انجام فرایند به‌صورت معکوس
توصیف فشردهٔ حجم			ترکیب با الگوریتم‌های تکاملی و تکامل ساختارها	

آشنایی با هدف و روش ارائه شده است. بنابراین تحلیل عددی بر تعداد مقالات سایر حوزه‌ها صورت نمی‌گیرد، اما در سایر تحلیل‌ها از این اطلاعات استفاده شده است. توزیع مستندات علمی مورداستفاده در این مقاله با «کاربرد معماری» که از حدود سال ۲۰۰۰ بررسی شده و تعداد آنها ۳۵ عدد است، بر اساس زمان انتشار به صورت تصویر ۱۵ است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ تحقیقات زیادی در این خصوص در معماری صورت گرفته که عمدتاً در مدرسه معماری AA لندن و دانشگاه MIT و در نتیجه در سایر دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی بوده است. در این فاصله افزونهٔ Genr 8 که ابزار مفهومی قوی برای شبیه‌سازی رشد سطوح در معماری بود، ابداع شد. پروژه‌های دانشجویی با تمرکز بر این سیستم‌ها نیز در این سال‌ها



تصویر ۱۵. توزیع مستندات علمی کاربرد سیستم های L در معماری بر اساس زمان انتشار. مأخذ: نگارندگان.

به‌وفور یافت می‌شد که در این مطالعه به آنها پرداخته نشده است. به‌تدریج از شتاب این پژوهش‌ها در معماری کاسته شد، اما توسعهٔ سیستم‌های L با متدلوژی‌های ترکیبی در سایر رشته‌ها به خصوص هوافضا، مهندسی، فناوری اطلاعات، بازی‌های رایانه‌ای و شهرسازی و غیره با تمرکز بر سایر پتانسیل‌های سیستم های L با سرعت ادامه یافت.

به‌نظر می‌رسد کاهش میزان پژوهش‌های سیستم‌های L در معماری دو علت اصلی دارد. نخست آنکه این سیستم‌ها ریشه در بیولوژی داشته و مقالات به‌روزِ مربوط به آنها وارد فاز محاسبات ریاضی پیچیده و متدلوژی‌های ترکیبی شده و ممکن است معماران در استفاده از آنها، بدون داشتن مدل فکری صحیح در مجموعه‌ای از فرمول‌های ریاضی، با عدم رسیدن به نتایج مطلوب سردرگم شوند. در حالی که با مدل فکری صحیح و درک مفهومی کافی، این الگوریتم مانند ابزاری است که به‌کارگیری آنها بسیار ساده و در عین حال نتایج آن (اعم از فرم‌ها یا فرایندها) بسیار پیچیده خواهد بود، همان چیزی که معمار معاصر به دنبال آن است و در این مقاله با این دیدگاه به آن پرداخته شده است.

علت دوم را می‌توان عدم بررسی جامع و رصد سایر پیشرفت‌های صورت‌گرفته و کاربردها و متدلوژی‌های آن در حوزه‌های دیگر برشمرد. لذا نیاز به مقالات و پژوهش‌هایی که با دیدگاه مفهومی و جامع‌تری این سیستم‌ها را بررسی کرده و پتانسیل‌های آنها را در مجموعه‌ای که برای معماران قابل‌درک باشد بیان کنند، احساس می‌شود که هدف اصلی این مقاله بوده است.

همکاری مؤثر بین سه تخصص مهندس رایانه، زیست‌شناس و معمار دیجیتال در این حوزه مسئله‌ای است که باید مورد توجه قرار گیرد. وجود مهندس رایانه در ساده‌سازی الگوریتم‌ها و مفاهیم آن و کدنویسی فرایند، زیست‌شناس در صحیح‌بودن مدل مفهومی و معمار دیجیتال در ترکیب این ایده‌ها و تعریف کاربرد و حل مسائل در معماری ضروری است. افزونهٔ Genr 8 که در زمان خود پیشرفت چشمگیری محسوب می‌شد، نتیجهٔ چنین همکاری مؤثری میان معماران و مهندسان رایانه بوده است.

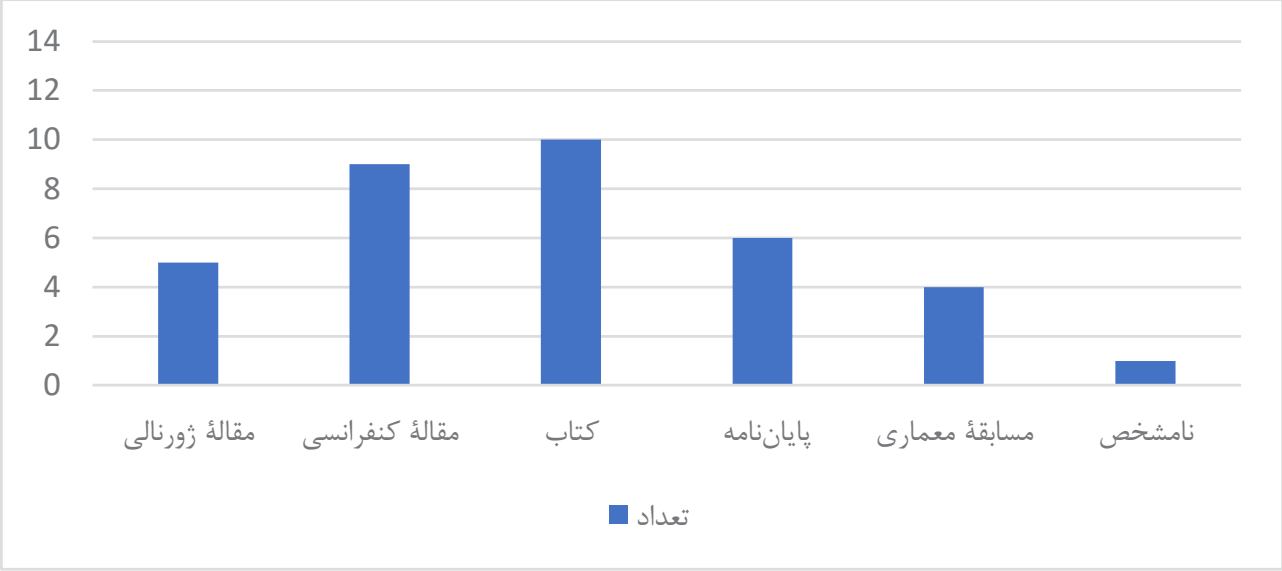
در تصویر ۱۶ اسناد ارائه‌شده در جدول ۱ بر اساس نوع توزیع شده‌اند.

از میان این موارد، مقالات موردنظر در مجلات و کنفرانس‌های معتبر چاپ و ارائه شده، پایان‌نامه‌ها و تز دکتری مربوط به دانشگاه‌های با رتبه‌بندی بالا هستند و کتاب‌ها توسط ناشران معتبر چاپ شده‌اند که نشان از اهمیت موضوع است.

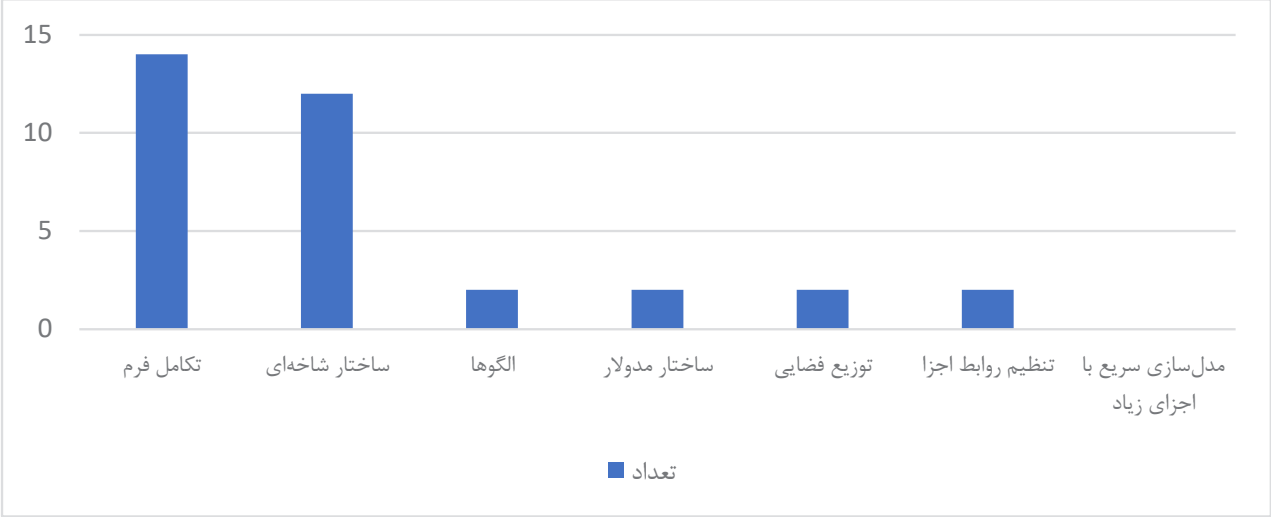
پراکندگی اسناد مطالعه‌شده بر اساس نوع کاربرد در سیستم‌های L به‌صورت تصویر ۱۷ است.

بیشترین کاربردهای سیستم‌های L که از آنها اسناد علمی منتشر شده، در تکامل فرم قرار دارد، ولی نتایج در این قسمت هنوز به میزان مناسبی کاربردی نیست و لزوم تحقیقات بیشتر روی انواع ترکیبات سیستم‌های L با الگوریتم‌های تکاملی احساس می‌شود و می‌تواند موضوع تحقیقات آتی باشد. در رتبهٔ دوم، ساختارهای شاخه‌ای قرار دارد، زیرا معروف‌ترین خصوصیت این سیستم‌ها در ایجاد ساختارهای شاخه‌ای است، ولی درعین‌حال در تحقیقات دانشجویی موارد متعددی مشاهده می‌شود. سایر کاربردها چون توزیع فضایی، ساختار مدولار و الگوها نیز دارای اسناد منتشرشدهٔ اندکی هستند، ولی در آثار دانشجویی به وفور یافت می‌شوند. در بخش مدل‌سازی سریع با اجزای فراوان نمونه‌ای در معماری مشاهده نشد.

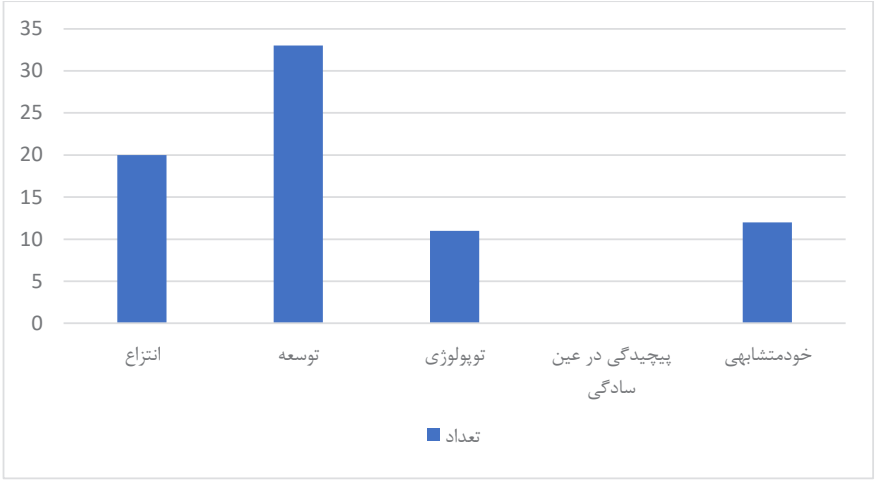
محققان در توسعهٔ کاربردهای این الگوریتم به مفهوم توسعه توجه داشته و بیشتر روی ایجاد ساختارهای پیچیدهٔ شبیه به رشد کار کرده‌اند (تصویر ۱۸). خودمتشابهی در اسناد علمی



تصویر ۱۶. توزیع مستندات علمی کاربرد سیستم‌های L براساس نوع. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۱۷. توزیع مستندات علمی کاربرد سیستم‌های L براساس نوع کاربرد. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۱۸. توزیع مفاهیم به‌کاررفته در مستندات علمی کاربرد سیستم‌های L در معماری. مأخذ: نگارندگان.

منتشرشده کمتر بوده ولی در آثار دانشجویی به‌وفور مشاهده می‌شود. درحالی‌که در کاربردهای غیرمعماری سیستم‌های L، بیشترین تأکید روی مفهوم توپولوژی و تنظیم روابط اجزا، پیچیدگی در عین سادگی و همچنین انتزاع بوده که در سال‌های اخیر توسعه یافته است، موضوعاتی که لازم است در معماری بیشتر مورد توجه قرار گیرد. زیرا:

مفهوم توپولوژی: طراحی در بطن خود دارای مفاهیم پیچیدهٔ توپولوژیکی است، به‌عنوان مثال، در طراحی پلان، آنچه که اهمیت دارد روابط صحیح میان فضاهای مختلف است که با تغییر هندسه نباید تحت‌تأثیر قرار گیرد و سیستم‌های L به‌خوبی چنین مفهومی را در ساختار خود داشته و با به‌کارگیری آنها می‌توان در اتوماسیون طراحی و ایجاد گزینه‌های طراحی کارهای زیادی انجام داد که تنها یک نمونه از چنین تحقیقی یافت شد.

مفهوم پیچیدگی در عین سادگی: طرح‌های پارامتریک با افزایش داده‌هایی از جمله ورودی‌ها و متغیرها ممکن است دچار پیچیدگی زیادی شده که علاوه بر کاهش سرعت پردازش، کنترل آنها نیز دشوار خواهد شد و بنابراین برخی فرصت‌های دست‌یابی به گزینه‌های طراحی از خواهد رفت، لذا پتانسیل سیستم‌های L در توصیف فشردهٔ حجم، کاهش حجم داده‌ها و در عین حال حفظ پیچیدگی باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

مفهوم انتزاع: «نمادها در سیستم‌های L می‌توانند نمایندهٔ هر چیزی باشند»؛ با چنین بیان استعاری، امکان تعریف مسائل مختلف و ارائهٔ تفاسیر هندسی متنوع فراهم بوده و بنابراین امکانات زیادی در اختیار طراحان قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال نمادهای آن می‌تواند شامل واحدهای ساختاری پلان، واحدهای سازندهٔ فرم، واحدهای تکرارشونده در نماها و غیره باشند.

در خصوص کاربرد سیستم L در تکامل فرم، ترکیب سیستم‌های L با الگوریتم‌های تکاملی ایدهٔ بسیار خوبی بوده که متدلوژی آن به‌درستی پیشنهاد شده ولی هنوز در ابتدای مراحل خود بوده و نیازمند آزمایش و بررسی تأثیر اعمال عملگرها در بخش‌های مختلف فرمالیسم سیستم‌های L برای ایجاد ساختارهای منطبق با معیارهای برازش است. در کاربرد این سیستم‌ها باید به این نکته توجه کرد که تقریباً تمام روش‌های استفاده‌شده از متدلوژی‌های ترکیبی و تلاش جهت ارتقاء قابلیت‌های سیستم‌های L بوده و سیستم‌های L خالص تقریباً تنها در ایجاد فرم‌های شاخه‌ای به‌کار می‌روند. همچنین بیشتر موارد به‌کارگیری آن در کانسپت و مراحل اولیه طراحی بوده، و تنها موارد اندکی در مرحلهٔ مدل‌سازی و معدود مواردی در طراحی دقیق استفاده شده است. بنابراین پتانسیل اصلی این سیستم‌ها در مرحلهٔ کانسپتِ معماری است ولی در طراحی دقیق نیز می‌توان از آنها استفاده کرد. به‌علاوه مشاهده می‌شود که تقریباً تمامی نمونه کاربردهای غیرمعماری ارائه‌شده در منابع معتبر منتشر شده و تحقیقات روبه‌رشدی در این حوزه‌ها در سیستم‌های L مشاهده می‌شود که با رصد متدلوژی‌های جدید آنها، می‌توان کاربردهای معماری را نیز توسعه داد.

نتیجه‌گیری

این مقاله پس از بررسی سیستم‌های L در زمینهٔ اصلی، کاربردها و پتانسیل‌های آن در معماری که از حدود سال ۲۰۰۰ توسعه یافته‌اند را به‌منظور شناسایی رویکردها و روندهای مهم تقسیم‌بندی و مرور می‌کند. در این راستا، با مطالعهٔ دقیق سیستم‌های L در منابع اصلی، کانسپت‌های اصلی الگوریتم سیستم L استخراج، و پتانسیل‌های محتمل آن ارائه شده است. سپس در مطالعه‌ای مروری، کاربردهای سیستم‌های L در معماری و سایر حوزه‌هایی که پتانسیل به‌کارگیری در معماری را دارند، بررسی و در ۷ بخش تقسیم‌بندی و به‌طور مختصر توصیف شدند. هدف از چنین مطالعهٔ وسیعی، رصد کاربردهای این الگوریتم در سایر حوزه‌ها به‌منظور الهام‌گرفتن از آن جهت توسعه در معماری بوده است. انواع اسناد مرورشده در این بخش، بر اساس نوع مرجع، حوزهٔ کاری، هدف اصلی، کاربرد سیستم L، روش به‌کارگرفته شده، مفاهیم سیستم L که مورد تأکید بوده و مرحلهٔ استفاده از آن در طراحی مقایسه و بررسی شده است. اسناد علمی مورد بررسی قرار گرفته و اهمیت موضوع بر این اساس بیان شده، روند تحقیقات مشخص و دلایل کاهش آنها معرفی، و پیشنهاداتی جهت توسعهٔ کاربردها بیان شده است.

مشاهده می‌شود که برخی از کاربردها در معماری وجود نداشته یا توسعهٔ چندانی نداشته‌اند که می‌توان با مرور مقالات مربوط به رشتهٔ مورد نظر، آن را در معماری توسعه داد. به‌عنوان مثال درکاربرد «مدل‌سازی سریع با جزئیات فراوان» در معماری مطالعه‌ای یافت نشد، اما با الهام از سایر روش‌های به‌کارگرفته شده، می‌توان در طراحی پلان یا مسیرهای حرکتی و یا ایجاد احجام پیچیده استفاده کرد. «تکامل فرم» در این روش هنوز در معماری در مراحل اولیه قرار دارد که با الهام از سایر حوزه‌ها، در ایجاد فرم‌های هندسی مختلف با اهداف تعیین‌شدهٔ طراحی می‌توان از آنها استفاده کرد و ایجاد پلاگین‌ها و ابزارهای جدید در این بخش می‌تواند موردتوجه قرار گیرد. «الگوها»ی ایجادشده با این سیستم‌ها، به خصوص الگوهای فرکتالی در معماری مورد توجه بوده ولی در ترکیب با سایر الگوریتم‌ها می‌تواند نتایج جالب‌تری را به‌همراه داشته باشد. در معماریِ «ساختارهای

شاخه‌ای» با سیستم‌های L در حال حاضر پلاگین‌هایی منتشر شده که نیازمند توسعه برای اهداف مختلف هستند. توسعهٔ کاربرد «تنظیم روابط اجزا» نیز در معماری اندک بوده ولی نمونه‌های موجود اهمیت زیادی دارند. بهینه‌یابی توپولوژی ساختار سازه‌ای، توسعهٔ سیستم‌های گرمایش و سرمایش در فضاهای مختلف، مدل‌سازی فضاهای ارتباطی پلان و از همه مهم‌تر تنظیم روابط پلان با استفاده از این الگوریتم مهم‌ترین مواردی است که قابلیت توسعه در معماری دارد. ساختارهای مدولار و توزیع فضایی نیز در طراحی اهمیت دارند که نیازمند ایجاد روش‌های جدید هستند.

در نهایت، به‌نظر می‌رسد استفاده از سیستم‌های L در نقطهٔ آغاز تحقیقات کاربردی در معماری بیومیمتیک است: این الگوریتم‌ها در معماری به‌اندازهٔ کافی آزمایش نشده، چندان که باید به آن پرداخته نشده و از پتانسیل‌های آن بهره گرفته نشده است. با دیدگاه مفهومی به این سیستم‌ها و رصد متدلوژی‌ها و کاربردهای آن در سایر رشته‌ها، می‌توان به توسعهٔ کاربردهای آن در معماری کمک کرد. برخی از زمینه‌هایی که باید موضوع تحقیقات جامع آینده قرار گیرند عبارت‌اند از:

- ترکیب انواع سیستم‌های L با الگوریتم‌های ژنتیک و تأثیر اعمال انواع عملگرهای ژنتیک بر بخش‌های مختلف ساختار؛
- تحلیل الگوهای سیستم‌های L در طراحی معماری و نحوهٔ به‌کارگیری آنها؛
- تحلیل تأثیرات محیطی در ایجاد فرم‌های مبتنی بر سیستم‌های L در معماری و بررسی وابستگی‌های پارامترهای فرم در اثر نیروهای محیطی؛
- توسعهٔ تفسیر جدید هندسی برای سیستم‌های L جهت کاربرد در معماری؛
- مقایسهٔ الگوهای رشد سیستم‌های L گیاهان مختلف در ایجاد کانسپت معماری؛
- توسعهٔ متدلوژی یکپارچهٔ مفهومی برای شبیه‌سازی تأثیرات محیطی در معماری بر اساس رشد.

پی‌نوشت‌ها

۱. generative
۲. Aristid Lindenmeyer
۳. axiom
۴. production rule
۵. rewriting
۶. turtle graphics
۷. non-deterministic or stochastic L-system
۸. context-free or context sensitive
۹. parametric and non-parametric
۱۰. inference problem
۱۱. fitness function
۱۲. crossover
۱۳. procedural content generation
۱۴. grammatical evolution
۱۵. rabbit
۱۶. ARMy Ant

فهرست منابع

• Alfaris, A. (2009). *Emergence Through Conflict The Multi-Disciplinary Design System (MDDS)*. (Unpublished P.hD thesis). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.

• Alnobani, A. A. F. (2018). *Architectural Narratives Framework for Geometry Adaptation through Representations of Voxels and Tetra-Meshes*. (Unpuplished Master's Thesis). Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA.

• Antoniuk, I., Hoser, P., & Strzęciwilk, D. (2019). L-system Application to Procedural Generation of Room Shapes for 3D Dungeon Creation in Computer Games. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, (889), 375–386.

• Arponen, E., Haggrén, E., Herneoja, A., Hinkka, E., Honkanen, H., Kanninen, M., Kosonen, S., Logrén, S., Lundén, E., Metso, O., Parkkali, M., Rautiainen, V., Tanska, T., Väisänen, A., & Österlund, T. (2009). *Generate - From algorithm to structure.* Oulun yliopisto: University of Oulu.

• Becker, S., Peter, M., Fritsch, D., Philipp, D., Baier, P., & Dibak, C. (2013). Combined Grammar for the Modeling of Building Interiors. ISPRS Annals of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-4/W1, 1–6.

• Bessa, M. (2009). Algorithmic design. *Architectural Design,* 79(1), 120–123.

• Byrne, J., Hemberg, E., Brabazon, A., & O'Neill, M. (2012). *A Local Search Interface for Interactive Evolutionary Architectural Design.* In: Proceedings of the International Conference on Evolutionary and Biologically Inspired Music and Art (Evo-MUSART'2012). pp. 23–34.Springer, Berlin, Heidelberg

• Byrne, J., Hemberg, E., & O'Neill, M. (2011). Interactive operators for evolutionary architectural design. *Proceedings of the 13th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation*, 43–44.

• Chu, K. S. (2014). *Karl Chu X Phylum project records.* Retrieved Jan 10, 2022, from https://www.cca.qc.ca/en/archives/440077/karl-chu-x-phylum-project-records.

• Coates, P., Broughton, T., & Jackson, H. (1999). *Exploring 3D design worlds using Lindenmeyer systems and Genetic Programming.* Evolutionary Design Using Computers. San Francisco, California.

• Coates, P. S., Appels, T., Simon, C. & Derix, C. (2001).

Current work at CECA Three projects : Dust, Plates & Blobs, Proceedings of the 4th Generative Art Conference (GA).

• Coelho, A., Bessa M., Sousa A. A., F. Ferreira (2007). Expeditious modelling of virtual urban environments with geospatial L-systems. *Computer Graph Forum*, 26 (4), 769–782.

• Coelho, A., Sousa, A., & Ferreira, F. N. (2020). *Procedural modeling for cultural heritage.* Book Section.In Visual Computing for Cultural Heritage, edited by F. Liarokapis, A.Voulodimos, N. Doulamis, and A. Doulamis, pp. 63–81. Springer Series on Cultural Computing. Springer,

• Cham.Diniz, N. (2012). P*rocess-Driven concepts. 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*. Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Hong Kong.

• Dollens, D. (2005). *Digital Botanic Architecture. Art and Architecture in Digital Social-Contemporary City and Genetic City Conference*. Barcelona: Retrieved Jan 3, 2022, from: http://www.artyarqdigital.com/fileadmin/user_upload/PDF/Publicaciones_Jornada_ II/18-Jornadas_II._DennisDollens.pdf.

• Ei-Khaldi, M. (2007). *Mapping Boundaries of Generative Systems for Design Synthesis.* Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA..

• Fernando, R., & Drogemuller, R. (2015). *Recapitulation in generating spatial layouts.* Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA: Emerging Experiences in the Past, Present and Future of Digital Architecture, Daegu , Korea.

• Goos, G., & Hartmanis, J. (2004). *Applications of Evolutionalry Computing: Lecture notes in computer science. In Lecture Notes in Computer Science* (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) V. 106. Springer-Verlag.

• Gorgora.de. (2011). *Relational Growth Grammars, In Applications of Graph Transformations with Industrial Relevance" Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Department Ecoinformatics, Biometrics and Forest Growth.* Göttingen: Georg-August University of Göttingen.

• Gu, N., Singh, V., & Merrick, K. (2010). *A framework to integrate generative design techniques for enhancing design automation.* New Frontiers: Proceedings of the 15th International Conference on Computer-Aided Architectural Design in Asia (CAADRIA). Hong Kong: Association of Computer-Aided Architectural Design Research in Aisa (CAADRIA), pp. 127–136.

• Hanafin, S., Datta, S., & Rolfe, B. (2011). *TREE FAÇADES Generative Modelling with an Axial Branch Rewriting System.* CAADRIA: Emerging Experiences in the Past, Present and Future of Digital Architecture, Daegu , Korea.

• Hartl, D. J., Reich, G. W., & Beran, P. S. (2016). *Additive Topological Optimization of Muscular-Skeletal Structures via Genetic L-System Programming.* 24th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference, San Diego, California, USA.

• Hemberg, M. (2001). *GENR8 - A Design Tool for Surface Generation.* Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA. Cambridge: MIT.

• Hemberg, M., O'Reilly, U.-M., Menges, A., Jonas, K., Goncalves, M. da C., & Fuchs, S. R. (2007). *Exploring generative growth and evolutionary computation in architectural design*. In: Machado, P., Morelo, J.J. (eds.) Art of Artificial Evolution, Springer,Heidelberg.

• Hemberg, M., & O'Reilly, U. M. (2004). Extending Grammatical Evolution to Evolve Digital Surfaces with Genr8. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, (3003), 299–308.

• Hensel, M. (2006). Computing Self-Organisation: Environmentally Sensitive Growth Modelling. *Architectural Design*, 76(2), 12–17.

• Hensel, M., & Menges, A. (2006). Material and digital design synthesis. *Architectural Design,* 76(2), 88–95.

• Hornby, G. S., & Pollack, J. B. (2001). The advantages of generative grammatical encodings for physical design. Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, *ICEC*, (1), 600–607.

• Hornby, G. S. (2004). Functional scalability through generative representations: The evolution of table designs. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(4), 569–587.

• Ikonen, T. J., Marck, G., Sóbester, A., & Keane, A. J. (2018). Topology optimization of conductive heat transfer problems using parametric L-systems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 58(5), 1899–1916.

• Jackson, H. (2002). Toward a Symbiotic Coevolutionary Approach to Architecture. In D. W. C. Peter J. Bentley (Eds.), *Creative evolutionary systems.* Burlington: Morgan Kaufmann.

• Jones, M. (2012). Retrieved 3 Jan, 2022, from https://meganjonesdesign.wordpress.com/

• Jormedal, M. (2013). *Procedural generation of road networks using L-systems [Linköpings universitet].* Retrieved 3 Jan, 2022, from http://www.vehicular.isy.liu.se/Publications/MSc/09_EX_4227_JL.pdf.

• Kobayashi, M. H, Pedro, H. T. C., Hude, C. & (2009). *Topology optimization using Map L-Systems. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons*

Forum and Aerospace Exposition, January. https://doi.org/10.2514/6.2009-1357

• Kahn, S. (2008). *Thinking Outside The Grid: Structural Design Through Multi-parametric Growth and Self-Adaptive Analysis.* Cincinnati: University of Cincinnat.

• Kearney, A. C. (2015). *Multi-objective optimization of aerostructures inspired by nature.* Hawai: university of Hawai.

• Khetan, A., Lohan, D. J., & Allison, J. T. (2015). Managing variable-dimension structural optimization problems using generative algorithms. *Structural and Multidisciplinary Optimization,* 52(4), 695–715.

• Kiptiah Binti Ariffin, M., Hadi, S., & Phon-Amnuaisuk, S. (2017). *Evolving 3D models using interactive genetic algorithms and L-systems.* In Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)", 10607 LNAI(i), 485–493.

• Kniemeyer, O., Barczik, G., Hemmerling, R., & Kurth, W. (2008). *Relational Growth Grammars – A Parallel Graph Transformation Approach with Applications in Biology and Architecture.* In Sch¨urr, A., Nagl, M., and Z¨undorf, A., editors, Applications of Graph Transformations with Industrial Relevance, volume 5088 of Lecture Notes in Computer Science, pages 152–167. Springer Berlin Heidelberg.

• Kobayashi, M. H. (2010). On a biologically inspired topology optimization method. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(3), 787–802.

• Landreneau, E., Ozener, O. O., Pak, B., Akleman, E., & Keyser, J. (2006). Interactive Rule-Based Design. Book Section, In J. P. van Leeuwen & H. J. P. Timmermans (eds.), *Innovations in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*. Springer, Printed in the Netherlands.

• Lane, B. (2015). *Cell complexes: The structure of space and the mathematics of modularity.* Alberta: University of Calgary.

• Lorenzo-Eiroa, P. (2013). *Architecture in Formation*. London & New York: Routledge.

• Marinčić, N. (2019). An overview architecture and computation. In N. Marinčić (Ed.), *Computational Models in Architecture.* Birkhäuse: De Gruyter.

• Marvie, J. E., Perret, J., & Bouatouch, K. (2005). The FL-system: A functional L-system for procedural geometric modeling. *Visual Computer*, 21(5), 329–339.

• McDermott, J., Swafford, J. M., Hemberg, M., Byrne, J., Hemberg, E., Fenton, M., McNally, C., Shotton, E., & O'Neill, M. (2012). String-rewriting grammars for evolutionary architectural design. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 39(4), 713–731.

• McQuillan, I., Bernard, J., & Prusinkiewicz, P. (2018). Algorithms for inferring context-sensitive L-systems. Book Section, *In "Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*", 117–130.

• Menges, A. (2006). Polymorphism. *Architectural Design*, (76), 78–87.

• Menges, A. (2009). *New Czech National Library in Prague.* Retrieved Jan 3, 2022, from http://www.achimmenges.net/?p=4452.

• Mikkelsen, M. K. (2020). *Applications of parameterized l-systems for preliminary structural design and optimization. (*Unpublished P.hD Thesis). A&M University, Texas, USA.

• Mishra, J., & Mishra, S. (2007). *L-systems Fractals.* In Elsevier, Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam. The Netherlands.

• Mountstephens, J., & Teo, J. (2020). Progress and challenges in generative product design: A review of systems. *Computers*, 9(4), 1–23.

• Narahara, T. (2010). *Self-organizing Computation A Framework for Generative Approaches to Architectural Design.* Massachusetts: Harvard University.

• Nordin, A., Hopf, A., & Motte, D. (2013). *Generative design systems for the industrial design of functional mass producible natural-mathematical forms.* Retrieved Jan 3, 2022, from http://lup.lub.lu.se/record/4113641/file/4113677.pdf

• O'Neill, M. & Brabazon, A. (2008). *Evolving a logo design using Lindenmayer systems, Postscript & Grammatical Evolution.* 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC.

• O'Reilly, U. M., & Hemberg, M. (2007). Integrating generative growth and evolutionary computation for form exploration. *Genetic Programming and Evolvable Machines,* 8(2), 163–186.

• Österlund, T. (2013). Design possibilities of emergent algorithms for adaptive lighting system. *Nordic Journal of Architectural Research,* (1), 159–184.

• Pan, Y. C. (2007). *Inverted Skyscraper Typology.* Retrieved Jan 2, 2022 from https://www.evolo.us/inverted-skyscraper-typology/

• Parish, Y. I. H., & Müller, P. (2001). Procedural modeling of cities. Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - *SIGGRAPH '01*, (6), 301–308.

• Peter, M. (2017). Modelling of indoor environments using lindenmayer systems. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, *XLII-2/W7(2W7)*, 385–390.

• Popovici, E. (2005). Evolving Families of Designs Using L-Systems. *Department of Computer Science George*

Mason University Technical Report Series (Issue GMU-CS-TR-2005-8).

• Prusinkiewicz, P., Cieslak, M., Ferraro, P., & Hanan, J. (2018). Modeling Plant Development with L-Systems. In R. J. Morris (Ed.), *Mathematical Modelling in Plant Biology*.Switzerland: Springer..

• Risi, S., & Togelius, J. (2020). Increasing generality in machine learning through procedural content generation. *Nature Machine Intelligence*, 2(8), 428–436.

• Romero, J. J., & Machado, P. (2008). The Art of Artificial Evolution. In J. Romero & P. Machado (Eds.), *Springer-Verlag Berlin Heidelberg.* Berlin: Springer.

• Runions, A., & Prusinkiewicz, P. (2012). Computational models of plant development and form. *New Phytologist,* 193(3), 549–569.

• Ryan, C., O'Neill, M., & Collins, J. J. (2018). *Handbook of grammatical evolution.* Berlin: Springer.

• Saleri, R. (2020). *The Fatal Birth of Architecture: The Obligation of Order.* Retrieved Jan 3, 2022, from http://www.springer.com/series/15179

• Sharp, A., Blay, G., Kholodova, J., & Correa, D. (2021). *An Autonomous Bio-Inspired Shading Façade System based on Plant Movement Principles*. Towards a New, Configurable Architecture - Proceedings of the 39th ECAADe Novi Sad. Serbia.

• Shiffman, D. (2012). *The Nature of Code.* Retrieved Jan 3, 2022, from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119546665.ch2

• Soltanzadeh, A. & Masnavi, M. R. (2017). *Inspiration from dendriform structures for the design of the column and roof to cover large openings using the Linden Meyer system*. 4th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Tehran, Iran.

• Tang, P. (2005). *Co-generative 3D Form : The Framework of Co-generative Design System.* Proceedings of the 10th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia, New Delhi, India

• Taylor-Hell, J. (2005). *Incorporating biomechanics into architectural tree models.* Processing of 18th Brazilian Symposium of Computer Graphic and Image, Natal, RN, Brazil.

• Wonka, P., Aliaga, D., Müller, P., & Vanegas, C. (2011). *Modeling 3D urban spaces using procedural and simulation-based techniques.* SIGGRAPH '11: ACM SIGGRAPH 2011 Courses, SIGGRAPH'11.

• *Ydroponic-garden* (2009). Retrieved Jan 3, 2022, from https://www.worldarchitecturenews.com/article/1500277/hydroponic-garden

• Петрушевски, Љ., Деветаковић, М., Митровић, Б., & Дабић, М. (2010). *Development and Application of Explorative Tools in the Field of Architectural.* Geometry: L-Systems.

COPYRIGHTS
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Bagh-e Nazar Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نحوهٔ ارجاع به این مقاله:
نوری، لیلا؛ تقی‌زاده آذری، کتایون و علاقمندان، متین. (۱۴۰۱). توسعهٔ کاربردهای الگوریتمیک در معماری: مرور و تحلیلی بر سیستم‌های L. *باغ نظر*، ۱۹(۱۱۶)، ۵-۲۲.

DOI:10.22034/BAGH.2022.327468.5119
URL: http://www.bagh-sj.com/article_160085.html