Archive of SID

نشریهٔ علمی باغ نظر، ۱۸(۹۷)، ۶۳-۷۸ / تیر ۱۴۰۰
DOI: 10.22034/bagh.2021.244143.4635

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Analyzing and Modeling the Computational Vascular Structure in Plants' Leaves as a structural building envelope and a Comparative Comparison with Common Structures
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

تحلیل و مدل‌سازی رایانشی ساختار آوندی برگ گیاهان به‌مثابهٔ پوشش سازه‌ای و مقایسهٔ تطبیقی آن با سازه‌های متداول*

مرتضی خرسندنیکو[۱]، سعید حقیر[۲]**، محمدرضا متینی[۳]

۱. پژوهشگر دکتری معماری، دانشکدهٔ معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران.
۲. دکتری تاریخ و فلسفهٔ هنر، گرایش معماری، دانشیار دانشکدهٔ معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران.
۳. دکتری معماری، استادیار دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱

چکیده

بیان مسئله: ساختارهای طبیعی، طی قرون متمادی، برای رسیدن به راه‌حل‌های قابل قبول در برابر عوامل خارجی توسعه یافته‌اند. در جریان این فرایند فقط کاراترین فرم‌های طبیعی در طی میلیون‌ها سال باقی مانده‌اند. یکی از این ساختارهای طبیعی ساختار آوندی برگ گیاهان است که در مقالهٔ حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. بدون شک ساختار گیاهان از اصولی مشابه با اصول مهندسی ساخت بشر، اما با عملکردی بسیار ظریف‌تر و پیچیده‌تر، پیروی می‌کند. این پیچیدگی تا آنجایی است که درک ساختار و رفتار این عناصر طبیعی بعضاً غیرممکن می‌شود. اما امروزه با استفاده از توانایی تحلیل و مدل‌سازی کامپیوتری می‌توان ساختارهای پیچیدهٔ طبیعی را درک کرد و به ساده‌سازی و استخراج ساختار الگوریتمیک آن‌ها پرداخت. این پژوهش به تحلیل رایانشی ساختارهای آوندی برگ گیاهان، به‌منظور دست‌یابی به یک افزونه (پلاگین)، برای طراحی پوشش‌های سازه‌ای برگرفته از طبیعت، می‌پردازد. در این راستا پژوهش حاضر براساس پایداری سازه‌ای موجود در برگ‌ها، در پی یافتن پاسخی برای این سؤالات است که: ۱) آیا ساختار آوندی برگ برای یک سازهٔ انسان‌ساز در مقیاس بزرگ قابلیت استفاده دارد و در مقایسه با سازه‌های متداول شرایط مطلوب‌تری را ایجاد خواهد کرد؟ و ۲) آیا سازهٔ طراحی‌شده بر مبنای ساختار آوندی برگ گیاه توان باربری بیشتری نسبت به سازه‌های متداول دارد؟

هدف پژوهش: این پژوهش به دنبال طراحی یک سازهٔ متفاوت با الهام از ساختارهای آوندی برگ‌گیاهان است که به بهبود عملکرد سازه‌ای در جهت افزایش توان باربری سازه‌ای کمک خواهد کرد؛ همچنین، دستیابی به جذابیت بصری در سیستم‌های تیر و ستونی از طریق دورشدن از ساختارهای متعامد نیز هدف دیگری است که در این پژوهش دنبال خواهد شد.

روش پژوهش: این تحقیق توصیفی-تحلیلی است و گردآوری اطلاعات و تحلیل و تلفیق آن‌ها به روش اسنادی انجام شده است.

نتیجه‌گیری: افزونهٔ طراحی‌شده با استفاده از ساختار آوندی گیاهی کاربران را قادر می‌سازد با تغییر پارامترهای تعبیه‌شده در آن طیف گسترده‌ای از ساختارهای پوششی با ابعاد مختلف تولید کنند. این توانایی برای اعمال تغییرات، به معمار اجازه می‌دهد فرم‌های پیچیده‌تری ایجاد کند که بدون استفاده از این افزونه به دلیل پیچیدگی زیاد در شکل یا ساختار طرح، امکان‌پذیر نخواهد بود.

واژگان کلیدی: *الگوریتم رشد، طراحی رایانشی، ساختار آوند گیاهی، افزونه، ساختارهای باز و بسته.*

* این مقاله برگرفته از رسالهٔ دکتری «مرتضی خرسندنیکو» با عنوان «معماری بایواینتراکتیو، تحلیل رایانشی و ترجمهٔ ساختارهای طبیعی به معماری تعاملی» است که به راهنمایی دکتر «سعید حقیر» و دکتر «محمدرضا متینی» در دانشکدهٔ معماری دانشگاه تهران در حال انجام است.

** نویسنده مسئول: saeed.haghir@ut.ac.ir ، ۰۹۱۲۴۴۳۴۹۲۷

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه و بیان مسئله

از زمانی که انسانِ نخستین غار را به‌عنوان مسکن خویش برگزید تا امروز که به‌تدریج به سمت زندگی در خانه‌های هوشمند پیش می‌رود به طبیعت اطرافش به‌عنوان منبع الهام بی‌پایان نگریسته است. بشر با نزدیک‌ترکردن عملکردش به طبیعت ضمانت بیشتری برای بقای خود فراهم آورده است، زیرا ساختارهای طبیعی، طی قرون متمادی، برای رسیدن به راه‌حل‌های قابل قبول در برابر عوامل خارجی توسعه یافته‌اند. در جریان این فرایند، کاراترین و قوی‌ترین فرم‌های طبیعی در طی میلیون‌ها سال باقی مانده‌اند. گیاهان، به‌عنوان عنصر طبیعی، در طول تاریخ منبع الهام معماران بسیاری بوده‌اند. بدون شک ساختار گیاهان اصولی مشابه با اصول مهندسی انسان‌ساخت، اما با عملکردی ظریف‌تر و پیچیده‌تر، دارند. این پیچیدگی تا آنجایی است که درک ساختار و رفتار این عنصر طبیعی بعضاً پیچیده و مشکل می‌شود، اما امروزه با استفاده از توانایی تحلیل و مدل‌سازی رایانه‌ای می‌توان ساختارهای پیچیدهٔ طبیعی را درک کرد و به ساده‌سازی و استخراج ساختار الگوریتمیک آن‌ها پرداخت. استخراج داده‌های الگوریتمی ساختارهای طبیعی توسط نرم‌افزارهای کامپیوتری و تبدیل آن به افزونه‌های قابل دسترس همگانی از آن رو ضرورت دارد که مدیریت تغییرپذیری، مسئله‌ای اساسی در هنگام ساخت و تکامل سیستم‌های نرم‌افزاری است که امکان گسترش، پیکربندی، شخصی‌سازی و انطباق این سیستم‌ها را با نیازهای مخاطب فراهم می‌کند.

در این میان، ساختارهای آوندی در برگ‌ها که هم به‌عنوان مسیر گردش مواد مغذی گیاه و هم به‌عنوان عامل سازه‌ای به کار می‌روند، می‌تواند موضوع پژوهش مناسبی برای امکان‌سنجی سازه‌ای این ساختارها به‌عنوان پوشش‌های سازه‌ای مصنوع باشد. بنابراین در این پژوهش پس از جمع‌آوری مبانی نظری و بررسی و معرفی کارهای پیشین، ساختار آوندی موجود در برگ گیاهان، به‌مثابهٔ پوشش سازه‌ای برای تولید یک مدل تغییرپذیر، در محیط برنامه‌نویسی C# به داده‌های رایانه‌ای تبدیل شده است. با محاسبه و استدلال در مورد تفاوت بین مدل‌های پیشین به‌کارگرفته‌شده در معماری، روش نوین معرفی‌شده در این مقاله افزونه‌ای است که در محیط «گرس‌هاپر»[1] تولید شده است تا بر اساس الگوریتم آوندهای گیاهی، به‌مثابهٔ یک سیستم تیر و ستون، با الگوهای باز و بسته در پوشش انواع سطوح، یاری‌رسان معماران باشد. در نهایت مدل به‌دست‌آمده با استفاده از روش آنالیز اجزای محدود و توسط افزونهٔ «کارامبا»[2] با سایر سازه‌های متداول به مقایسه گذاشته شده است.

همچنین این پژوهش به دنبال دستیابی به جذابیت بصری در سیستم‌های تیر و ستونی، از طریق دورشدن از ساختارهای متعامد، و نیز ساماندهی فضایی برای استفادهٔ کاراتر کاربران در جهت نزدیکی به طبیعت است. در واقع هدف از این تحقیق طراحی یک سازهٔ متمایز، با الهام از ساختارهای آوندی برگ گیاهان، در جهت تعامل بیشتر انسان با طبیعت، و نیز بهبود عملکرد سازه‌ای در جهت افزایش توان باربری سازه‌ای است. حال، با توجه به پایداری سازه‌ای موجود در برگ‌ها، این سؤال ایجاد می‌شود که آیا ساختاری که برگ از آن تبعیت می‌کند، برای یک سازهٔ انسان‌ساز در مقیاس بزرگ قابلیت استفاده دارد و در مقایسه با سازه‌های متداول شرایط بهتری خواهد داشت؟ از سویی دیگر، آیا سازهٔ طراحی‌شده بر مبنای ساختار آوندی برگ گیاه توان باربری بیشتری نسبت به سازه‌های متداول دارد؟

پیشینهٔ پژوهش

بهره‌مندی از الگوواره‌های طبیعی و قوانین و نظام مسلط بر آن‌ها پیشینه‌ای بسیار طولانی داشته و در گذر زمان به بهبود و اصلاح خود پرداخته است. با نگاهی تخصصی‌تر به موضوع، از آنجا که تحقیق حاضر بر مبنای مدل‌سازی رایانه‌ای ساختارهای آوندی موجود در برگ گیاهان شکل گرفته است، در جدول ۱ به برخی از این تئوری‌ها اشاره می‌شود.

برخی از مدل‌های یادشده منجر به الگوهای باز و برخی منجر به الگوهای بسته می‌شوند. از این مدل‌های یادشده و مدل‌های ترکیبی دیگر به‌عنوان پایهٔ شروع مدل‌سازی‌های پیشرفته استفاده شده و در مقالات زیادی با رویکردهای متفاوت به حل مسائل گوناگون پرداخته شده است. «کریستوفر کلمت» در مقاله‌ای تحت عنوان «مدل‌سازی بر پایهٔ رشد در سازه‌های فشاری» با بررسی مدل ارائه‌شده در دانشگاه «کلگری» به بررسی ساختار آوندی برگ گیاه «ویکتوریا اس. پی. پی.» پرداخته شده و با شبیه‌سازی این سیستم آوندی و مقایسهٔ آن با سیستم دال بتنی این نتیجه حاصل شده است که سیستم آوندی توانایی باربری بیشتر و تغییر شکل کمتری نسبت به ساختار دال بتنی دارد (Klemmt, 2014).

www.SID.ir

Archive of SID

«سابری گوکمن» از ساختار آوندی برگ گیاهان برای طراحی نمای یک ساختمان استفاده کرده است. این شبیه‌سازی شکلی طبق نظر نویسنده این مزیت را دارد که دست معماران را برای دست‌یابی به ساختارهای متنوع از نظر شکلی و فرمی باز می‌گذارد و معماران می‌توانند قبل از ساخت بی‌نهایت فرم طبیعی را آزمایش کنند و از بین آنها دست به انتخاب بزنند و از این طریق به ساختاری پویا دست یابند (Gokmen, 2013).

«مارتین تامکه» و همکاران معتقدند که سازه‌های برگرفته از رشد گیاهان، تطبیق‌پذیری بیشتری با نیروهای وارده دارند. آن‌ها در تحقیقی عملی به پژوهش در ارتباط با ساختار عملکردی گیاهان پرداخته‌اند. ساختار حاصله همانند گیاه قادر به درک و انطباق پویا نسبت به محیط است و حتی مانند این ساختار طبیعی با استفاده از مواد هوشمند و شبیه‌سازی‌های دقیق رایانه‌ای قادر به رشد است. ساختار مورد نظر تامکه در آینده می‌تواند جایگزین ساختارهای ثابت سنتی شود (Tamke, Stasuik & Thomsen, 2013).

علاوه بر مقالاتی که در بالا اشاره شد موضوعات دیگری نیز با الهام از ساختارهای گیاهی مورد توجه محققین قرار داشته است. برای مثال، پایداری (Pawlyn, 2011)، ایجاد محیط و مصالح سازگار (Hensel, Menges & Weinstock, 2006)، بهینه‌سازی و بهره‌وری سازه‌ای (Waggoner & Kestner, 2010; Li, Wang & Gandomi, 2011)، تحقیق روی مواد برای مهندسی سازه (Barthelat, 2007) و بسیاری موارد دیگر از این جمله‌اند.

جدول ۱. مدل‌های کامپیوتری رشد. مأخذ: نگارندگان، بر مبنای (Dimitrov & Zucker, 2006; Sachs, 2003; Fujita & Mochizuki, 2006; Raven, 2019; Kenrick & Crane, 1997; Rodkaew, Siripant, Lursinsap & Chongstitvatana, 2002).

عنوان مدل	شرح
Meinhardt model	در این مدل آکسین در بخشی از برگ تولید می‌شود و به سمت رگبرگ‌ها انتشار می‌یابد و توسط رگبرگ‌ها از سیستم حذف می‌شود. پراکندگی و تمرکز آکسین رگبرگ‌های جدید را به سمت مناطقی که در آن تراکم رگبرگ‌ها کمتر است هدایت می‌کند.
Mitchison model	این مدل بر این پایه استوار است که پارامتر انتقال به خود جریان بستگی دارد. زنجیرهٔ بازخوردی منتج از خصوصیات انتقال و جریان، منجر به تولید کانال‌هایی با جریان زیاد بین منبع آکسین و رگبرگ‌های موجود می‌شود و این کانال‌ها به رگبرگ‌های جدید تبدیل می‌شوند.
Dimitrov model	در این مدل رگبرگ‌ها براساس انتشار آکسین به سمت یک منبع حداکثری جریان می‌یابند.
Vasculature formation	در این مدل، که توسط گوتلیب ارائه شده است، رشد برگ موجب ایجاد فاصله بین رگبرگ‌های موجود می‌شود و به منابع جدید آکسین اجازه می‌دهد که در این فضاهای خالی به‌وجودآمده قرار بگیرند. رگبرگ‌های جدید با اتصال این منابع به نزدیک‌ترین رگبرگ موجود یا در برخی مدل‌ها با همهٔ رگبرگ‌هایی که در فاصلهٔ مشخصی قرار دارند شکل می‌گیرند.
Rodkaew model	این مدل با تعدادی ذره که در برگ پخش شده شروع می‌شود. این اجزا به سمت یک فضای خالی در قسمت پایین برگ حرکت می‌کنند و در طی این مسیر به سمت یکدیگر جذب می‌شوند و اگر فاصلهٔ آنها از یک حد تعیین‌شده کمتر شود به یکدیگر می‌پیوندند.
Peter H. Raven model	الگوریتم ارائه‌شده توسط «پیتر راون» نیز، مانند مدل پیشین، با یک سری ذره که در برگ پخش شده شروع می‌شود. این اجزا به سمت یک فضای خالی در قسمت پایین برگ حرکت می‌کنند و طی این مسیر به سمت یکدیگر جذب می‌شوند و اگر فاصلهٔ آنها از یک حد تعیین شده کمتر شود به یکدیگر می‌پیوندند. الگوی رگبرگی از مسیر حرکت آن ذرات شکل می‌گیرد. برخی از این الگوهای ارائه‌شده منجر به ایجاد الگوهای باز و برخی موجب ایجاد الگوهای بسته می‌شوند.
Peter Crane	در مدل بایومکانیکی شکل‌گیری الگوهای رگبرگی ارائه‌شده توسط «پیتر کرین» و همکاران رشد برگ نقش مهمی دارد. این مدل شباهتی فرضی را بین شکل‌گیری الگوی رگبرگی با ترک‌هایی که هنگام کشیده‌شدن مصالح ایجاد می‌شود در نظر می‌گیرد. اگرچه پدیدآورندگان آن از مدل‌های فیزیکی برای آزمودن مدل خود استفاده می‌کند، می‌توان از مدل‌های ارائه‌شده توسط نرم‌افزار نیز برای توضیح این مدل استفاده کرد.

www.SID.ir

Archive of SID

تحقیقات مطرح‌شده دارای نقاط ضعفی هم هستند؛ مثلاً، از یک سو می‌توان به عدم قرارگیری آن‌ها در حوزهٔ معماری و پرداختن صِرف به الگوریتم موجود در ساختار آوندی برگ گیاه اَشاره کرد و از سوی دیگر این نقطه ضعف را مطرح ساخت که موضوعاتی که در حوزهٔ معماری مطرح شده قابلیت استفادهٔ همگانی و توسعه توسط کاربران عادی را نداشته است. برای رفع این نیاز و قابلیت دردسترس‌بودن این الگوریتم‌ها توسط محققین معماری و استفادهٔ آسان از آن‌ها، با بررسی کارهای پیشین در زمینهٔ آوندهای موجود در برگ گیاهان و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C# در محیط گرس‌هاپر به طراحی افزونه‌ای پرداخته شده است که به طراحان و معماران این امکان را می‌دهد که پوشش‌های متنوعی را با توجه به ابعاد و اندازهٔ دلخواه و نیز تراکم مورد نظر براساس میزان بارگذاری ایجاد کنند. استفاده از این افزونه بسیار ساده است و قابلیت توسعه توسط کاربران را نیز دارد.

مبانی نظری

هر آنچه در طبیعت وجود دارد، در طی ادوار گوناگون، پیوسته به‌دنبال انطباق با محیط، بقا، رشد، تکثیر، پایداری و بهینه‌سازی خود بوده است (Benyus, 1997). از آنجا که حیات انسان جزئی از همین طبیعت است، وی همواره به دنبال جواب سؤالات خود در طبیعت بوده است و با رشد علم و به‌ویژه رایانه، گسترهٔ حوزهٔ بهره‌مندی از طبیعت و جوابگویی به سؤالات خود را روزبه‌روز وسیع‌تر کرده است (Park & Lee, 2016). افزایش کیفیت بصری و سازه‌ای پوشش‌های مصنوع همواره یکی از دغدغه‌های اصلی معماران بوده و خوشبختانه طبیعت در این زمینه بسیار غنی است و مثال‌های بسیاری را در پیش چشم بشر قرار داده که لازم است با دقت آن‌ها را بررسی و آنچه را مناسب است استخراج کرد. آوندهای گیاهی یکی از بی‌شمار مثال‌های موجود در طبیعت است که نقش سازه‌ای پررنگی در ساختار برگ ایفا می‌کنند. همان‌طور که گفته شد، در این پژوهش با استخراج ساختار الگوریتمی موجود در آوند برگ گیاهان به طراحی افزونه‌ای پرداخته شده است تا معماران با بهره‌گیری از آن‌ها، ساختارهای خود را با تغییر پارامترهای موجود در افزونه مقاوم‌تر کنند.

• ساختارآوندها در برگ گیاهان

آوندها نقشی حیاتی در حمل مواد مغذی و نیز نقش سازه‌ای و زیبایی‌شناختی در گیاه دارند. چنان‌که گفته شد تمرکز این پژوهش بر روی آوندهای موجود در برگ گیاه است. به‌منظور درک این ساختار، در مقالهٔ پیش رو از بین تئوری‌های موجود، از تئوری «کانال‌بندی» استفاده شده که مبنای آن حرکت هورمون گیاهی آکسین است (Sachs, 2003; Sieburth, 1999) و نسبت به تئوری‌های دیگر از اعتبار بیشتری برخوردار است. در ادامه به شرح مختصری از این تئوری پرداخته می‌شود.

• روند رشد در برگ و تئوری کانال‌بندی

رشد برگ و توسعهٔ سیستم آوندی آن در دو فاز مشخص اتفاق می‌افتد: فاز ابتدایی رشد سلولی است و فاز دوم توسعهٔ سلولی است. آوندهای (رگبرگ‌های) اولیه که ضخیم‌تر هستند در مرحلهٔ رشد سلولی و آوندهای ثانویه که دارای ضخامت کمتری هستند در مرحلهٔ توسعهٔ سلولی و توسط هورمونی به نام آکسین در داخل برگ گیاه توسعه می‌یابند (Sack & Scoffoni, 2013; Blonder, et al., 2018).

الگوی آوندی به نوع و شکل گیاه بستگی دارد. برگ‌های گیاهان تک‌لپه‌ای معمولاً دارای آوندهای اصلی تقریباً موازی هستند که با شکل کشیده و برگ‌های عریض گیاه مطابقت دارند (Sack & Scoffoni, 2013). گیاهان دولپه‌ای با برگ‌های صاف اغلب دارای آوندهایی با آرایش متقارن نسبت به یک آوند اصلی هستند که از قسمت پایهٔ برگ منشعب می‌شوند و تا بالای برگ امتداد می‌یابند. گیاهان دولپه‌ای با برگ‌های انگشتی اغلب دارای چند آوند اصلی هستند که آوندهای فرعی به صورت شعاعی از آنها منشعب می‌شوند (Runions et al., 2005) (تصویر ۱).

این آوندها (رگبرگ‌ها) ممکن است دارای انتهای آزاد باشند که در این صورت یک الگوی باز ایجاد می‌کنند و یا ممکن است به یکدیگر پیوسته باشند و یک الگوی بستهٔ زنجیرمانند را تشکیل بدهند (Aloni, Schwalm, Langhans & Ullrich, 2003).

• تئوری کانال‌بندی

پذیرفته‌ترین تئوری در ارتباط با شکل‌گیری الگوی‌های رگبرگی (آوندی) تئوری «کانال‌بندی» است که توسط «زاکس» ارائه‌شده است (Sachs, 2003). بر طبق این فرضیه الگوی رگبرگ‌ها توسط یک سیگنال که در طول برگ انتشار می‌یابد آغاز می‌شود و در رگبرگ‌های بعدی به یکدیگر می‌پیوندند. بخشی از این سیگنال دارای یک هورمون گیاهی به نام «آکسین» است (Sieburth, 1999). آکسین از برگ سرچشمه

www.SID.ir

Archive of SID

تصویر ۱. به ترتیب از چپ به راست آرایش آوندی در برگ‌های تک‌لپه، دولپه و دولپهٔ انگشتی. مأخذ: www.pinterest.com

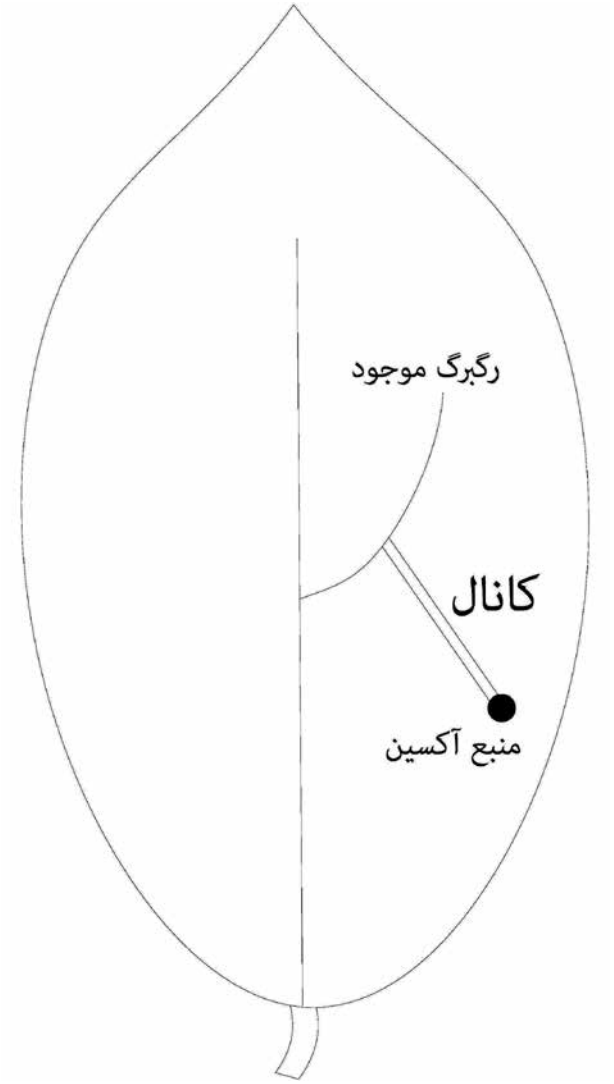
می‌گیرد و به سمت رگبرگ‌های موجود حرکت می‌کند و توسط این رگبرگ‌ها به ساقه و پایین گیاه منتقل می‌شود. در طی این جریان آکسین به مسیرهای کوچکتری کانال‌بندی می‌شود، همانند اتفاقی که در بستر رودخانه می‌افتد. در طی حرکت آکسین رگبرگ‌های جدید از طریق این کانال‌ها شکل می‌گیرد. شواهد تجربی نشان می‌دهد که منابع آکسین گسسته هستند. فرضیهٔ کانال‌بندی به‌علت سختی اندازه‌گیری مقدار تمرکز آکسین محدودیت‌های خود را نیز دارد (Gokmen, 2013) (تصویر ۲).

• تولید الگووارهٔ برگ

همان‌طور که گفته شد آوندها (رگبرگ‌ها) دارای دو الگوی باز و بسته هستند که در اینجا به توضیح هر دو الگو و نحوهٔ شکل‌گیری سیستم‌های آوندی باز و بسته پرداخته می‌شود.

- الگوهای آوندی (رگبرگی) باز

در تشکیل الگوی باز ابتدا محل قرارگیری منابع آکسین حائز اهمیت است. منابع آکسین در محل‌هایی دورتر از «محدودهٔ میرایی» مجموعهٔ گره‌ها و مجموعهٔ منابع قرار می‌گیرند. محدودهٔ میرایی جایی است که اگر گره‌ها به آن وارد شوند، منابع آکسین در آن ناحیه از بین می‌روند. محل قرارگیری منابع به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود. بدین صورت که مجموعه‌ای تصادفی از نقاط به‌عنوان منابع در دامنهٔ مورد نظر پخش و این نقاط جدید از نظر محدودهٔ میرایی نسبت به دیگر منابع و گره‌ها بررسی می‌شوند و اگر از فاصلهٔ مورد نظر عبور نکرده باشند به‌عنوان عضو جدید پذیرفته می‌شوند و



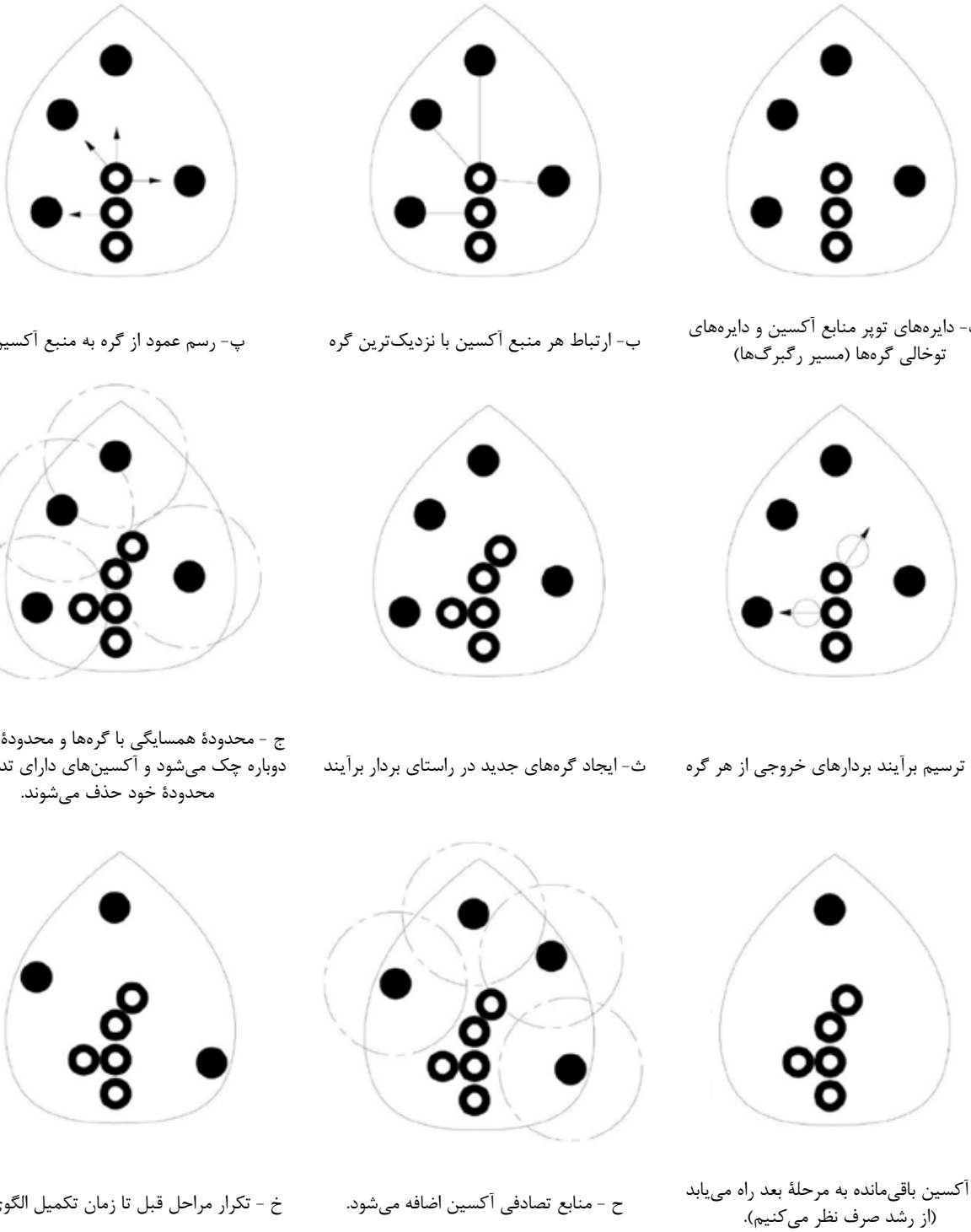
تصویر ۲. تصویری گرافیکی از تئوری کانال‌بندی. مأخذ: نگارندگان.

www.SID.ir

Archive of SID

در غیر این صورت حذف خواهند شد. منابع موجود تا زمانی که به نزدیکی رگبرگ‌های تولیدشده نرسند (محدودهٔ میرایی را رد نکنند) در بازی خواهند بود. این روند به‌صورت خلاصه در تصویر ۳ مشاهده می‌شود (Runions et al., 2005).

مهم‌ترین مؤلفه در تراکم ساختارهای رگبرگی تعیین محدودهٔ میرایی است که با کم‌کردن میزان آن تراکم در ساختارهای آوندی افزایش می‌یابد و آوندهای بیشتری ایجاد و به تبع آن پایداری ساختار برگ بیشتر می‌شود. پارامتر دیگر مؤثر در تراکم آوندها تعداد منابع آکسینی



الف- دایره‌های توپر منابع آکسین و دایره‌های توخالی گره‌ها (مسیر رگبرگ‌ها)

ب- ارتباط هر منبع آکسین با نزدیک‌ترین گره

پ- رسم عمود از گره به منبع آکسین

ت- ترسیم برآیند بردارهای خروجی از هر گره

ث- ایجاد گره‌های جدید در راستای بردار برآیند

ج - محدودهٔ همسایگی با گره‌ها و محدودهٔ میرایی دوباره چک می‌شود و آکسین‌های دارای تداخل در محدودهٔ خود حذف می‌شوند.

چ- آکسین باقی‌مانده به مرحلهٔ بعد راه می‌یابد (از رشد صرف نظر می‌کنیم).

ح - منابع تصادفی آکسین اضافه می‌شود.

خ - تکرار مراحل قبل تا زمان تکمیل الگوی برگ

تصویر ۳. روند تکمیل الگوی آوندی برگ توسط گره‌ها و منابع آکسین. مأخذ: Runions et al., 2005.

www.SID.ir

Archive of SID

است که به‌صورت تصادفی به بستر اضافه می‌شوند و با افزایش این منابع و کاهش محدودهٔ میرایی باز هم تراکم افزایش خواهد یافت.

- الگوهای آوندی (رگبرگی) بسته

الگوهای رگبرگی بسته، همان الگوریتم مورد استفاده در الگوهای باز هستند. با این تفاوت که ممکن است بیش از یک رگبرگ به سمت یک منبع مشترک رشد کند. چنین پدیده‌ای زمانی در طبیعت اتفاق می‌افتد که چند رگبرگ به یک منبع نزدیک باشند و هم‌زمان به اندازهٔ کافی از یکدیگر دور باشند. این مفهوم را می‌توان با الگوی «همسایگی مرتبط» فرمول بندی کرد (Runions, 2008).

اگر نقطه‌ای مانند n به منبع (نقطهٔ s) نزدیک‌تر باشد تا به نقطهٔ دیگری مانند v، در این صورت نقطهٔ n همسایگی مرتبط نقطهٔ s محسوب می‌شود؛ ولی اگر نقطه‌ای مانند u به v نزدیک‌تر باشد تا به s، در این صورت نقطهٔ u همسایگی مرتبط نقطهٔ s نیست (ibid.). این مفهوم در تصویر ۴ مشخص شده است.

همان‌طور که گفته شد، این پژوهش، با نظر به تحقیقات انجام‌شده در دانشگاه کلگری درباره الگوهای باز و بسته و تئوری کانال‌بندی، با استفاده از محیط نرم‌افزاری C# و افزونهٔ گرس‌هاپر در محیط راینو[۳]، به طراحی افزونه‌ای نائل شده است که به کاربران معماری اجازه می‌دهد الگوریتم‌های آوندی موجود در برگ گیاهان را به‌راحتی شبیه‌سازی و از نظر میزان باربری با سازه‌های متداول مقایسه کنند. جهت ساده‌سازی و حصول نتیجهٔ بهتر، طرح اولیه ثابت فرض می‌شود. در حقیقت فرض بر آن است که افزایش آکسین‌ها و گره‌ها در رشد برگ مؤثر نیست و تنها به تکمیل و استحکام بستر می‌افزاید؛ در ادامه به شرح این پلاگین پرداخته شده است.

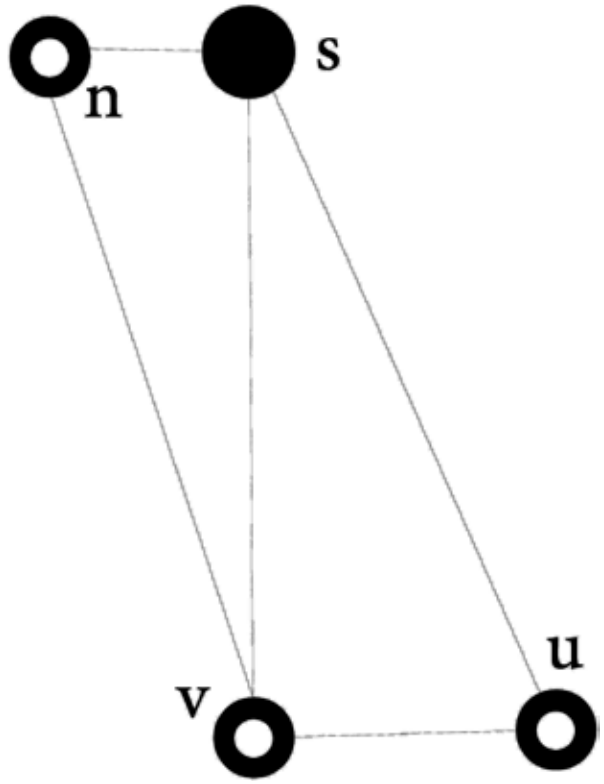
• شرح افزونه

هر سامانهٔ نرم‌افزاری شامل سه فاز تعریف، توسعه و نگهداری است. فاز تعریف، پاسخ به سؤالاتی است که انتظارات از این سامانه را تعریف می‌کند. بدین صورت که این سامانه قرار است از چه کاربری چه اطلاعاتی را دریافت کند و چه عملیاتی بر روی این اطلاعات انجام شود و چه خروجی‌ای به کاربر ارائه دهد. در فاز توسعه، طراحی و برنامه‌نویسی نرم‌افزار انجام می‌شود که در این قسمت باید الگوریتم و زبان مناسب برنامه‌نویسی به کار گرفته شود و در نهایت، فاز نگهداری است که عموماً بعد از تجاری‌شدن سامانه مطرح می‌شود و باید شرایطی از قبیل تطبیق‌پذیری نرم‌افزار و نیز توسعهٔ آتی آن مورد توجه قرارگیرد.

از آنجایی که موضوع این پژوهش تا قبل از تجاری‌شدن این نرم‌افزار را شامل می‌شود، بنابراین صرفاً به فازهای تعریف و توسعهٔ این سامانه پرداخته خواهد شد.

برای دست‌یابی به هدف مورد نظر باید محدوده‌ای از حیطه‌های مورد مداخله و مجموعه‌ای از ورودی‌ها و خروجی‌ها تعیین‌شود. دقت این مؤلفه‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که در گام اول با تقریب بسیار زیادی به نتایج مورد انتظار نزدیک باشد و در گام بعد به‌گونه‌ای نباشد که سامانه را به حدی کُند و آهسته کند که عملاً برای مخاطب غیرکاربردی شود. بدین معنی که پیچیدگی و تعدد مؤلفه‌ها به‌گونه‌ای باشد که اولاً کاربر خود نتواند بدون نیاز به این سامانه پاسخ را حدس بزند و از طرفی تعدد این مؤلفه‌ها به‌گونه‌ای نباشد که کاربر را دچار سردرگمی کند. روش و الگوریتم حاکم بر سامانه را نیز باید به‌دقت مورد کنکاش قرارداد و، با درک درستی از الگوریتم، با انتزاع آن مکانیزم به حوزهٔ معماری وارد شد. این پژوهش، با توجه به بررسی ساختار آوندهای گیاهی و درک پیچیدگی‌های آن، سعی در ساده‌سازی و گرافیکی‌کردن این ساختار دارد و با توجه به این موضوع، ورودی‌ها و خروجی‌هایی را در نظر گرفته که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود (تصویر ۵ و ۶).

۱. شکل اولیهٔ سقف هیچ محدودیتی از نظر ابعاد و فرم



تصویر ۴. همسایگی مرتبط در سیستم آوندی بسته. مأخذ: نگارندگان.

www.SID.ir

Archive of SID

ندارد و براساس نیاز طراح تعیین می‌شود و به‌عنوان ورودی افزونه مطرح می‌شود (ن. ک. تصویر ۵-الف و ۶-الف).

۲. تعداد منابع آکسین توسط کاربر تعیین می‌شود. هرچه میزان بار وارده بر سازه بیشتر باشد تعداد آکسین‌های بیشتری انتخاب می‌شود. تعداد بیشتر منابع آکسین ساختار آوندی متراکم‌تر و تعداد اعضای بیشتری را نتیجه می‌دهد که البته این به نوبهٔ خود فرایند پردازش را در رایانه سنگین‌تر می‌کند. ذکر این نکته ضرروی است که در این افزونه منابع آکسین در یک مرحله به سیستم اضافه می‌شوند (ن. ک. تصویر ۵-ب و ۶-ب).

۳. نحوهٔ قرارگیری منابع آکسین، با توجه به مدل پیشنهادی ارائه‌شده در دانشگاه کلگری، به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. با تغییر عدد ورودی، نحوهٔ قرارگیری منابع آکسین تغییر می‌کند. نرم‌افزار گرس‌هاپر با تغییر عدد ورودی، خود ساختار تصادفی تولید می‌کند (ن. ک. تصور ۵-ج و ۶-ج).

۴. با تنظیم ورودی‌های خواسته‌شده، خروجی آکسین‌ها به‌عنوان ورودی آکسین در افزونهٔ نهایی استفاده می‌شود (ن. ک. تصویر ۵-د).

۵. تعدد و محل قرارگیری تکیه‌گاه که توسط کاربر تعیین شده است، می‌تواند یک تکیه‌گاه یا بیشتر باشد. در واقع تکیه‌گاه نقطهٔ شروع آوندهاست و چون در محیط سه‌بعدی و به‌عنوان سازه عمل می‌کند، محل قرارگیری آن را بیرون از سقف و بر روی زمین انتخاب می‌کنیم (ن. ک. تصویر ۵-د و ۶-د).

۶. محدودهٔ میرایی مورد اشاره در مبانی نظری توسط کاربر تعیین می‌شود. هرچه میزان بار متحمل در سقف بیشتر باشد، عدد کوچکتری برای محدودهٔ میرایی انتخاب می‌شود. واضح است که عدد کوچک‌تر در محدودهٔ میرایی به معنای سازهٔ متراکم‌تر محسوب می‌شود (ن. ک. تصویر ۵-و و ۶-و).

۷. تعیین باز و بسته بودن سیستم آوندی نیز در این بخش تعیین می‌شود. انتخاب عدد صفر به معنای سیستم باز و عدد یک به معنای انتخاب سیستم آوندی بسته است (ن. ک. تصویر ۵-ز).

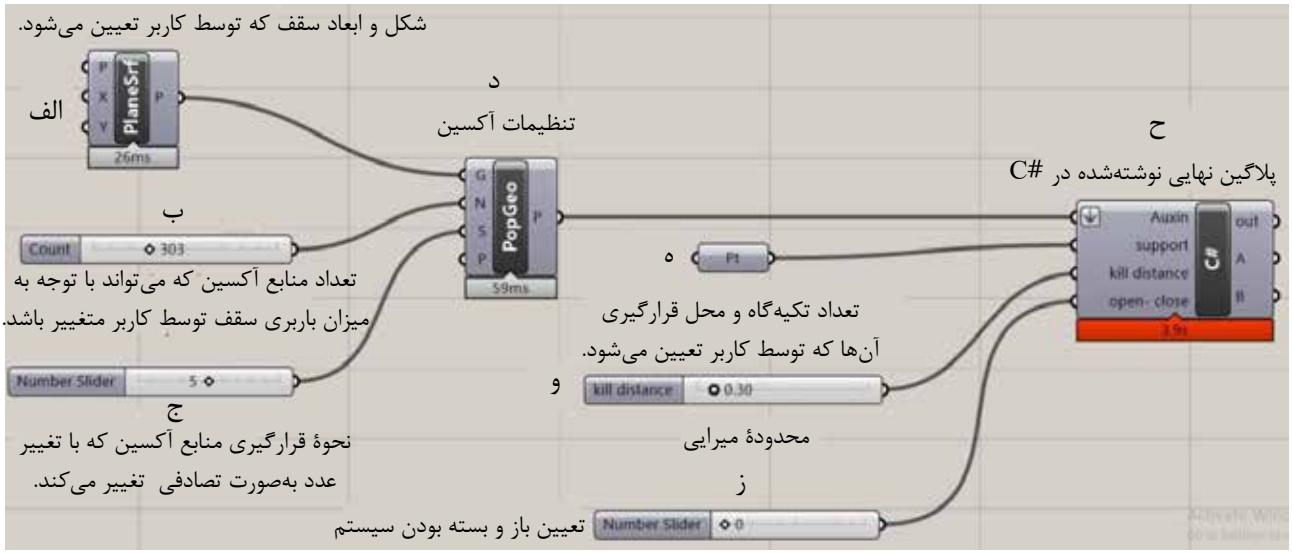
۸. با تکمیل ورودی‌ها در افزونهٔ نهایی، سیستم شروع به ایجاد سیستم آوندی موجود در برگ گیاه می‌کند که می‌توان آن را در محیط نرم‌افزار راینو مشاهده کرد (ن. ک. تصویر ۵-ح).

تصویر ۷ روند شکل‌گیری سازهٔ به‌دست‌آمده از افزونه را در دو بعد با یک گرهٔ اولیه و سپس در سه بعد با چهار گرهٔ اولیه (۴ تکیه‌گاه) و براساس سیستم باز نشان می‌دهد.

از آنجایی که سازهٔ پیشنهادی آوندی، یک سیستم تیر و ستون است که تیرها در آن نه به صورت مستقیم، بلکه بر مبنای الگوریتم موجود در ساختار آوندی برگ گیاه شکل‌گرفته‌اند، ابتدا سازهٔ آوندی با یک تکیه‌گاه با یک سیستم طره‌ای تیر و ستون شعاعی مقایسه خواهد شد و سپس برای نشان‌دادن عدم محدودیت در افزونهٔ طراحی‌شده و مهم‌تر از آن برای بهینه‌کردن طراحی آوندی، سیستم‌های باز و بسته با دو سیستم تیر و ستون مورب و نیز سیستم دال بتنی نیز با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

روش تحقیق

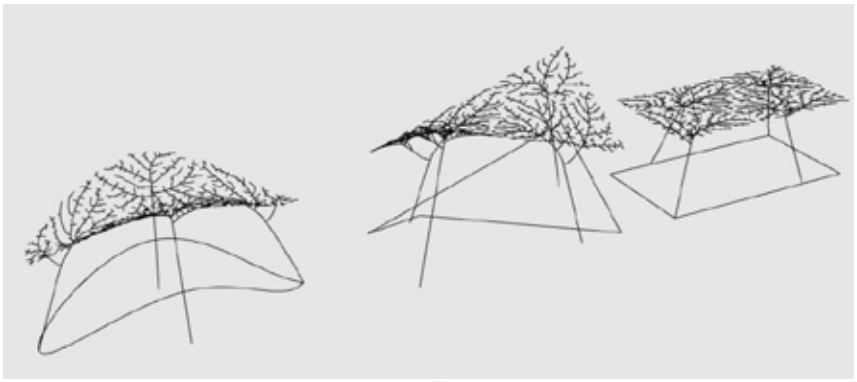
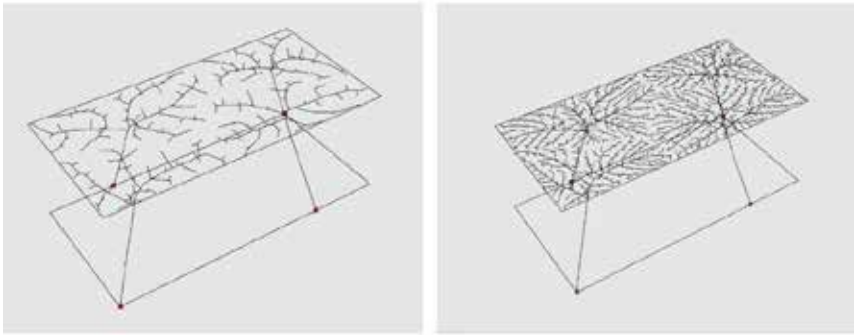
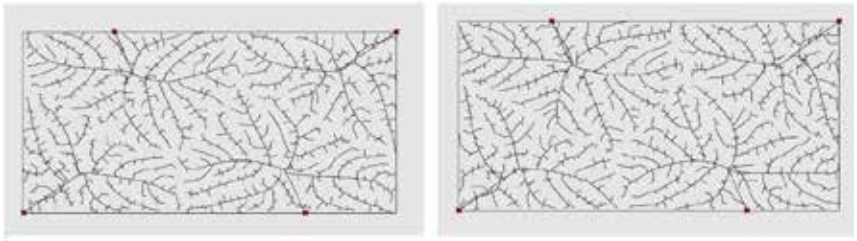
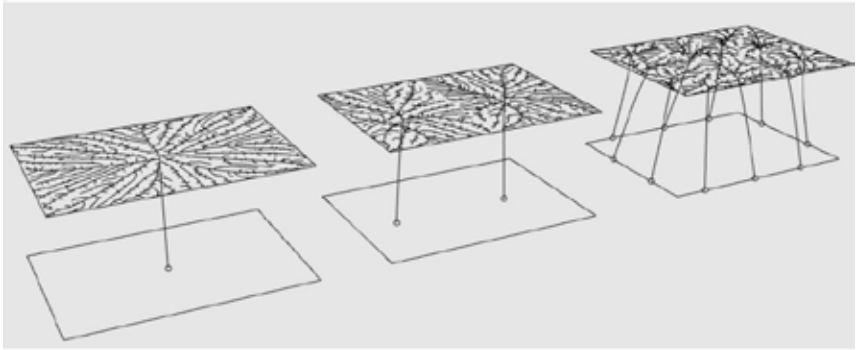
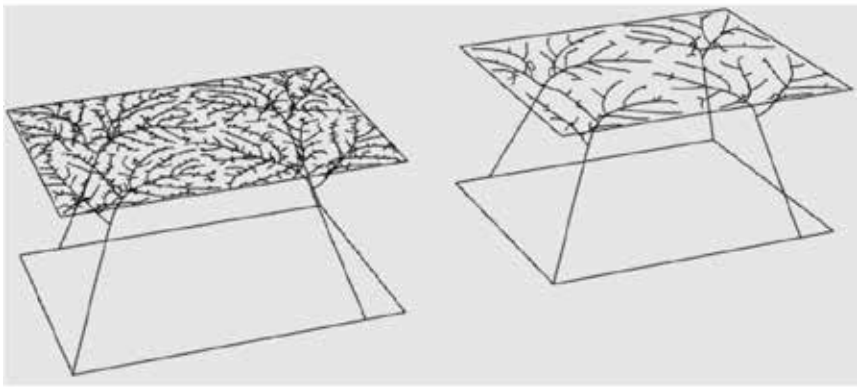
در این پژوهش ابتدا جهت جمع‌آوری اطلاعات از مستندات کتابخانه‌ای بهره گرفته شده است. سپس این اطلاعات به



تصویر ۵. پلاگین طراحی‌شده براساس الگوهای آوندی باز و بسته. مأخذ: نگارندگان.

www.SID.ir

Archive of SID

	الف- شکل اولیهٔ سقف که توسط کاربر تعیین می‌شود و هیچ محدودیتی از نظر ابعاد و شکل ندارد.
	ب- تعداد منابع آکسین که توسط کاربر تعیین می‌شود و بر روی تراکم آوندی (سازه‌ای) تأثیر می‌گذارد. تعداد آکسین به‌ترتیب از چپ به راست ۲۵۰ و ۱۰۰۰
	ج- نحوهٔ قرارگیری منابع آکسین که با تغییر عدد تصادفی در افزونه تغییر می‌کند. عدد تصادفی به‌ترتیب از چپ به راست ۱ و ۲ و ۱۰ تکیه‌گاه
	د- تعداد تکیه‌گاه که توسط کاربر تعیین می‌شود. به‌ترتیب از چپ به راست ۱ و ۲ و و ۱۰ تکیه‌گاه
	و- محدودهٔ میرایی به‌ترتیب از چپ به راست ۰,۲ و ۰,۸

تصویر ۶. تأثیر تغییر پارامترها در سازه. مأخذ: نگارندگان.

www.SID.ir

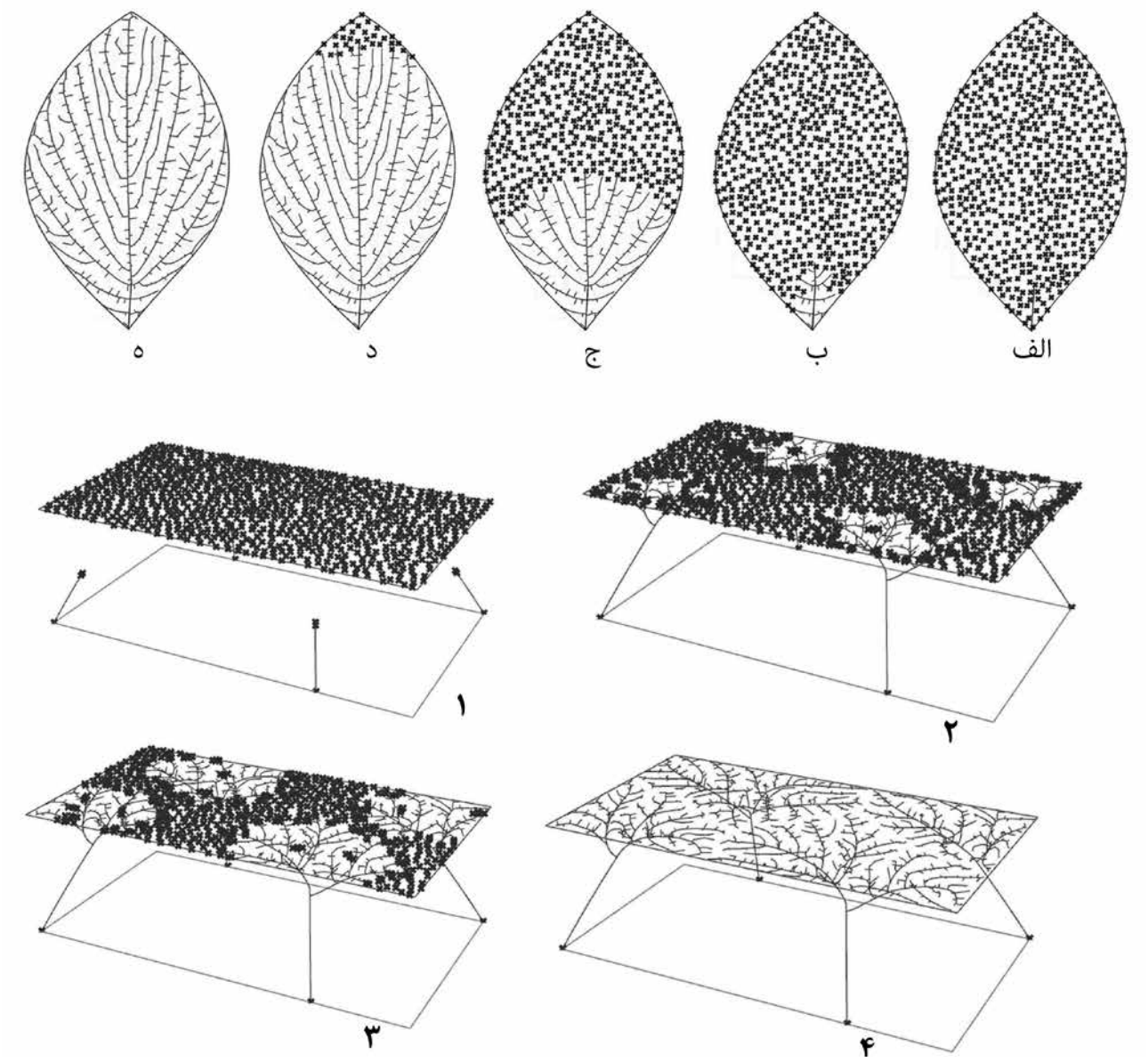
Archive of SID

روش توصیفی-تحلیلی مقایسه و بررسی شده‌اند. در گام بعد با استفاده از اطلاعات مستخرج از بخش پژوهش به طراحی افزونه‌ای در محیط گرس‌هاپر پرداخته شده است. ابزار پژوهش، محیط گرس‌هاپر در نرم‌افزار راینو بوده و برای برنامه‌نویسی از زبان C# بهره گرفته شده است تا سامانه‌ای جهت کمک به طراحان ایجاد شود که براساس الگوریتم آوندهای گیاهی برای فرم‌یابی و پوشش انواع سطوح یاری‌رسان باشد. در نهایت، پس از شبیه‌سازی پیکربندی نهایی، به‌منظور بهبود رفتار سازه‌ایِ سیستمِ به‌دست‌آمده از افزونهٔ مذکور، مقایسهٔ تطبیقی اینِ سیستمِ با سیستم‌های متداول از طریق افزونهٔ کارامبا صورت گرفته است.

بحث

• مقایسهٔ سازه‌های آوندی با دیگر سازه‌ها با استفاده از افزونهٔ طراحی‌شده

از آنجا که سازهٔ آوندی یک نوع سازهٔ تیر و ستون محسوب می‌شود که تیرهای آن از الگوریتم موجود در آوندهای گیاهی تبعیت می‌کنند، در ابتدا سازهٔ به‌دست‌آمده از افزونه با الگوی باز با یک سازهٔ تیر و ستون طره‌ای شعاعی از نظر تغییر شکل بیشینه مقایسه می‌شود. در این مقایسه مؤلفه‌های شکل مقطع، جنس سازه، ابعاد تیرها و تعداد و نوع تکیه‌گاه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است (تصویر ۸). نتایج مقایسه و مؤلفه‌های ثابت و غیرثابت در این مقایسه در جدول ۲ آورده شده است.



تصویر ۷. ردیف بالا، شبیه‌سازی دو بعدی رشد آوندی و دو ردیف بعدی، رشد آوندی در سه بعد برمبنای پراکندگی منابع آکسین. مأخذ: نگارندگان.

www.SID.ir

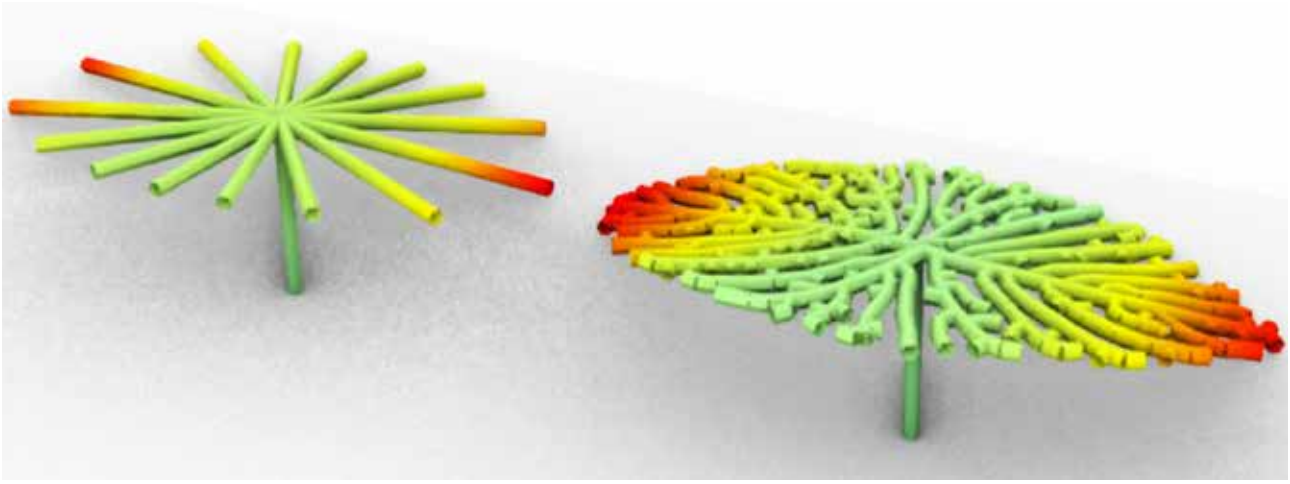
Archive of SID

این مقایسه نشان می‌دهد که سازهٔ تیر و ستون شعاعی با تکیه‌گاه صلب با درنظرگرفتن مؤلفه‌های ثابت اشاره‌شده، تغییر شکل کمتری را نسبت به سازهٔ آوندی حاصل از الگوریتم برگ تجربه خواهد کرد. بنابراین برای دست‌یابی به سازهٔ مقاوم‌تر با توان باربری بیشتر باید به دستکاری مؤلفه‌های موجود در افزونه پرداخته شود. می‌توان این مقایسه را با تعدد تکیه‌گاه‌ها و با سازه‌های متداول دیگر نیز انجام داد تا با میزان تغییر مؤلفه‌ها شاهد بهبود رفتار سازه‌ای آوندی بود.

• مقایسهٔ تطبیقی سازه‌های آوندی باز و بسته با سیستم تیر و ستون مورب و نیز دال بتنی

در این مقایسه مؤلفه‌های جنس، شکل و ابعاد مقطع در سه سازهٔ تیر و ستون مورب، آوندی باز و آوندی بسته به‌علت هم‌خانواده بودن، ثابت فرض شده و علاوه بر مقایسهٔ آن‌ها با یکدیگر، به مقایسه با سازهٔ دال بتنی نیز ــ که از سازه‌های متداول مورد استفاده است ــ پرداخته شده است تا بتوان با اطلاعات بیشتری که از این مقایسه به دست می‌آید به تغییر مؤلفه‌های سازهٔ آوندی پرداخت و به نتایج مطلوب‌تری رسید. زیرا با کسب اطلاعات مشخصی از سازه‌های متداول، می‌توان از آن‌ها به‌عنوان معیار مناسبی برای هرچه بهینه‌ترکردن سازه‌های آوندی بهره برد. حال برای مقایسه، ابتدا مطابق تصویر ۹، به شرح روند طراحی سازه‌های مورد نظر توسط افزونه پرداخته می‌شود.

- در ابتدا محدودهٔ سقف به‌صورت یک مستطیل ۱۰×۷ و چهار گوشهٔ آن بر روی زمین به‌عنوان نقاط شروع



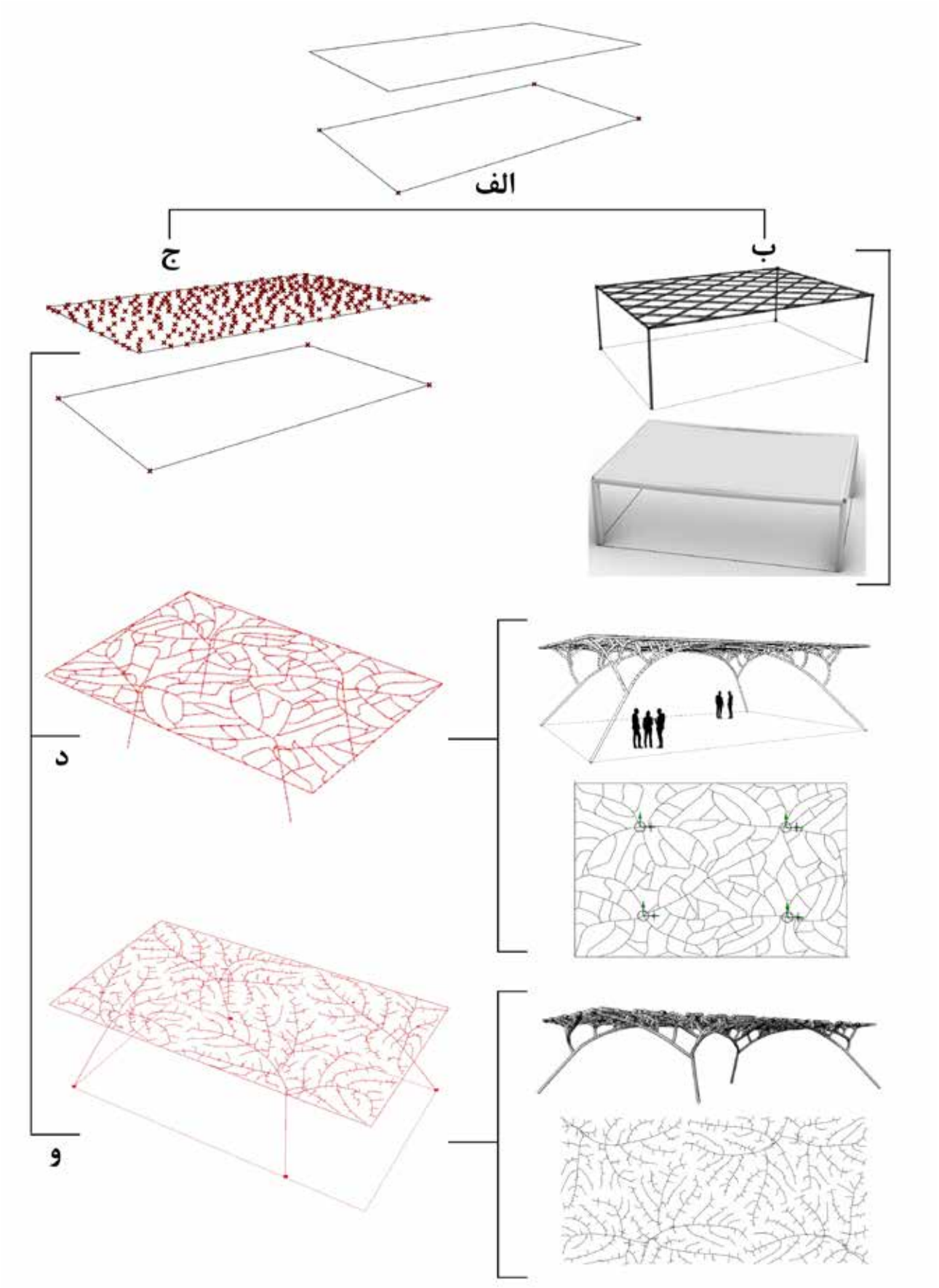
تصویر ۸. از چپ به راست، سازهٔ طره‌ای شعاعی و سازهٔ طره‌ای آوندی. مأخذ: نگارندگان.

جدول ۲. مقایسهٔ دو سازهٔ آوندی طره‌ای و تیر شعاعی طره‌ای. مأخذ: نگارندگان.

مؤلفه	سازهٔ تیر آوندی طره‌ای	سازهٔ تیر شعاعی طره‌ای
شکل مقطع	لوله	لوله
اندازهٔ مقطع	۲۰ سانتی‌متر	۲۰ سانتی‌متر
مادهٔ سازنده	فولاد	فولاد
بارگذاری	نیروی وزن + بارگستردهٔ یکنواخت	نیروی وزن + بارگستردهٔ یکنواخت
تعداد اعضا	۴۹۲	۱۶
تعداد تکیه‌گاه	۱	۱
نوع تکیه‌گاه	گیردار	گیردار
تغییر شکل بیشینه (سانتی‌متر)	۳،۲۶	۱،۵۸
میزان نیروی وزن وارد برجسم	۲۹،۸۴	۱۳،۵۷

www.SID.ir

Archive of SID



تصویر ۹. روند شکل‌گیری سازه. مأخذ: نگارندگان.

www.SID.ir

Archive of SID

تکیه‌گاه‌ها در نظر گرفته می‌شود. ارتفاع سقف نیز برای همهٔ سازه‌ها ۳ متر در نظر گرفته شده است (تصویر ۹-الف).

- با ابعاد مطرح‌شده، دو سقف تیر مورب و دال بتنی طراحی می‌شود (تصویر ۹-ب).

- نقاط پیش‌فرض (محل قرارگیری منابع آکسین) برای دو سیستم آوندی باز و بسته بر روی سقف ایجاد می‌شود. همان‌طور که توضیح داده شد، تعداد این نقاط توسط کاربر تعیین می‌شود. هرچه تعداد نقاط انتخابی بیشتر باشد، سازه متراکم‌تر و توان باربری آن بیشتر خواهد بود و از طرفی از نظر وزنی سنگین‌تر و فرایند پردازش آن توسط رایانه نیز طولانی‌تر خواهد شد. در این مثال عدد آکسین ۸۵۰ انتخاب می‌شود (تصویر ۹-ج).

- همان‌طورکه مطرح شد، در این مثال چهار نقطهٔ تکیه‌گاهی برای سازه در نظر گرفته می‌شود. تعداد و محل قرارگیری این نقاط به‌عنوان شروع فرایند گره‌های آوندی توسط کاربر تعیین می‌شود. لازم به ذکر است هنگامی که انشعابات آوندی به صفحهٔ دو بعدی تعریف‌شده به‌عنوان سقف رسیدند، مسیر خود را در فضای دوبعدی سقف ادامه خواهند داد. همچنین با تغییر مؤلفهٔ مربوط به تعیین الگوی باز و بسته، دو ساختار بسته (تصویر ۹-د) و باز (تصویر ۹-و) ایجاد خواهد شد.

انشعابات تا زمانی ادامه می‌یابد که کلیهٔ نقاط مشخص‌شده در سقف در شکل‌گیری شبکهٔ رگبرگی شرکت کنند.

• آنالیز سازهٔ پیشنهادی

در این مقایسه مواردی از قبیل تغییر شکل بیشینه، تعداد اعضا و میزان بار اعمال‌شده بر هر سازه مورد مقایسه بوده و این قیاس توسط افزونهٔ کارامبا در محیط گرس‌هاپر صورت گرفته است و نتایج در جدول ۳ نمایش داده شده‌اند.

نتیجهٔ تغییر شکل اعضا در چهار نمونهٔ بررسی‌شده در تصویر ۱۰ نشان داده شده است. در طیف رنگی درج‌شده، رنگ آبی نمایانگر کمترین میزان تغییر شکل و رنگ قرمز نشان‌دهندهٔ بیشترین تغییر شکل است.

• نتایج مقایسهٔ سازه‌ای

از نظر تغییر شکل بیشینه، با توجه به محدودهٔ میرایی، تعداد آکسین و نیز تکیه‌گاه مشخص‌شده، سازهٔ آوندی بسته تغییر شکل کمتری را نسبت به دیگر سازه‌ها تجربه خواهد کرد. با این وجود سیستم آوندی بسته و نیز باز اجرای سخت‌تری نسبت به سیستم متداول تیر مورب و نیز دال بتنی دارند. پس از سیستم بسته، سازهٔ آوندی

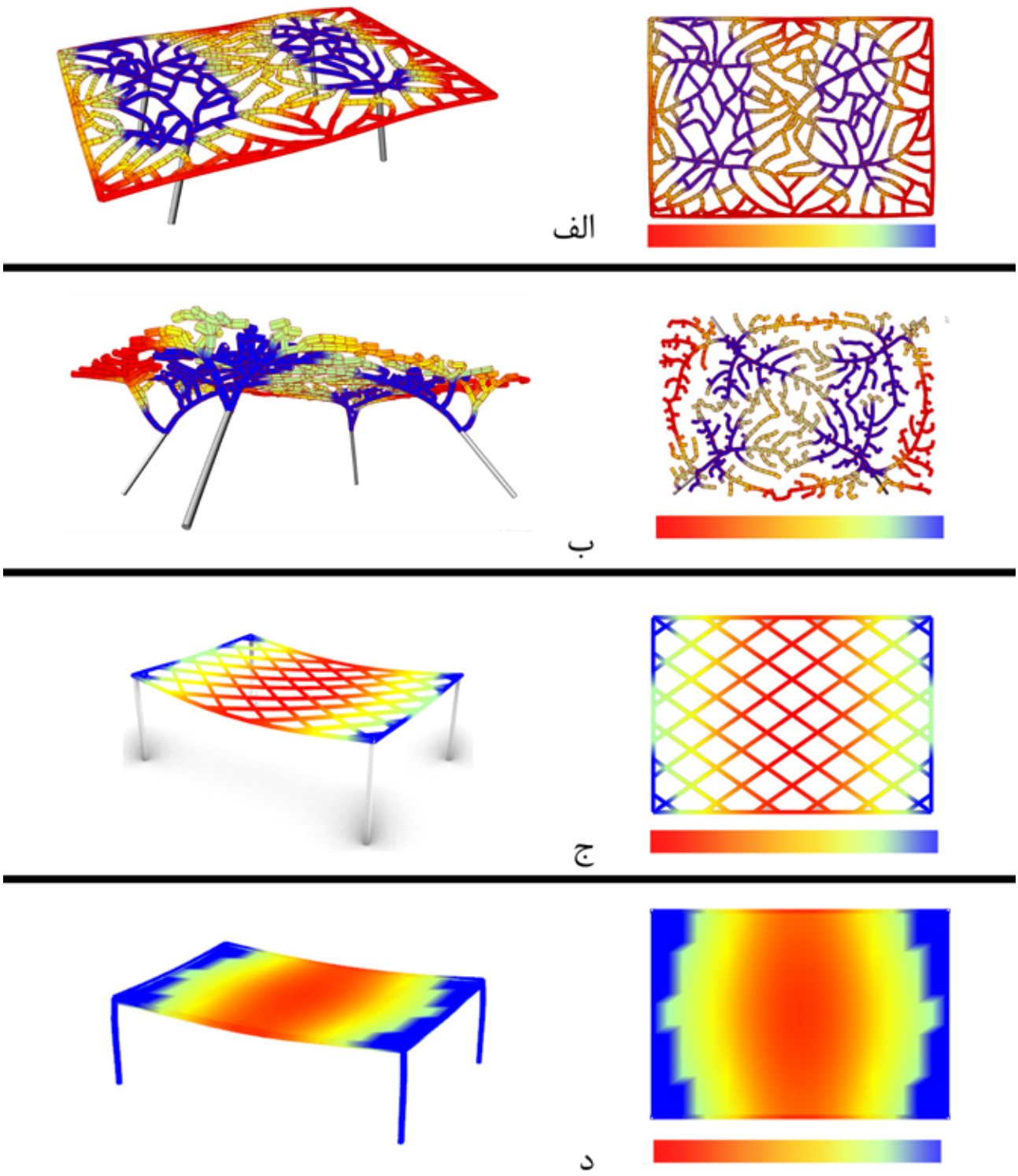
جدول ۳. مقایسهٔ سازه‌های آوندی بسته، باز، تیر مورب و دال بتنی. مأخذ: نگارندگان.

مؤلفه	سازهٔ آوندی بسته	سازهٔ آوندی باز	سازهٔ تیر مورب	دال بتنی
شکل مقطع	لوله	لوله	لوله	دال مسطح
اندازه مقطع	۱۵ سانتی‌متر	۱۵ سانتی‌متر	۱۵ سانتی‌متر	۱۵ سانتی‌متر
مادهٔ سازنده	فولاد	فولاد	فولاد	بتن
بارگذاری	نیروی وزن + بار گستردهٔ یکنواخت	نیروی وزن + بار گستردهٔ یکنواخت	نیروی وزن + بار گستردهٔ یکنواخت	نیروی وزن + بار گستردهٔ یکنواخت
تعداد اعضا	۱۱۴۶	۸۸۲	۱۶۶	۴
تعداد تکیه‌گاه	۴	۴	۴	۴
نوع تکیه‌گاه	گیردار	گیردار	گیردار	گیردار
تعداد منابع آکسین	۸۵۰	۸۵۰	۰	۰
محدودهٔ میرایی	۰,۲	۰,۲	۰	۰
تغییر شکل بیشینه (سانتی‌متر)	۰,۳۷	۰,۹۵	۲,۶۴	۴,۲
میزان نیروی وزن وارد بر جسم (کیلونیوتن)	۳۵,۴۴	۳۲,۰۴	۲۴,۳۹	۲۷۰

www.SID.ir

Archive of SID باغ نظر

باز و سپس سازهٔ تیر مورب تغییر شکل کمتری را تجربه خواهند کرد. سازهٔ دال بتنی به‌علت سنگینی زیاد تغییر شکل بیشتری را با شرایط ذکرشده تجربه خواهد کرد. شایان ذکر است که همهٔ اعداد به‌دست‌آمده در جدول ۳ را می‌توان با تغییر مؤلفه‌ها تغییر داد تا به ساختار مناسب‌تری دست یافت. همچنین می‌توان این مقایسه را با سازه‌های بیشتری انجام داد تا معیار مناسب‌تری برای بهینه‌ترشدن سازهٔ آوندی به دست آید.



تصویر ۱۰. به ترتیب از بالا به پایین، تغییر شکل در اعضای سازهٔ آوندی بسته، باز، تیر مورب و دال بتنی. مأخذ: نگارندگان.

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری و کارهای آینده

افزونهٔ طراحی‌شده با استفاده از ساختار آوندی گیاهی کاربران را قادر می‌سازد با تغییر مؤلفه‌های تعبیه‌شده در آن طیف گسترده‌ای از ساختارهای پوششی با ابعاد مختلف تولید کنند. این توانایی برای اعمال تغییرات به معمار اجازه می‌دهد فرم‌های پیچیده‌ای ایجاد کند که بدون استفاده از این افزونه، به‌دلیل پیچیدگی زیاد در شکل یا ساختار طرح، امکان‌پذیر نخواهد بود. این افزونه به کاربران فرصت استفاده از الگوریتم‌های شبیه‌سازی‌شدهٔ دیجیتال به‌عنوان الگوی نقش‌ونگاری، سازه‌ای و نیز به‌عنوان پوسته‌های ساختمانی را می‌دهد، زیرا ساختارهای حاصل، با بهره‌گیری از ساختارهای طبیعی، می‌توانند علاوه بر زیبایی ذاتی موجود در طبیعت از نظر سازه‌ای نیز ساختارهایی با قدرت باربری و استحکام بیشتر ایجاد کنند. همچنین افزونهٔ طراحی‌شده به صورت منبع باز (open source) در نظر گرفته شده است تا محققین دیگر بتوانند در پژوهش‌های آتی به تکمیل و بهسازی آن در زمینه‌های زیر بپردازند:

الف) امکان توسعه‌پذیری سازه با فرض قابلیت رشد در شبیه‌سازی که در این پژوهش درنظر گرفته نشده است.

ب) تعیین میزان تراکم بیشتر سازه‌ای در قسمت‌های خاص و مشخصی از سقف که بار بیشتری اعمال می‌شود.

ج) استفاده از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه به‌منظور قابلیت وزن‌دهی به اهداف مختلف.

د) درنظرگرفتن جنس و وزن سازه در افزونه.

ه) ارتباط افزونه با آیین‌نامه‌های ساختمانی.

اعلام عدم تعارض منافع

نویسندگان مقالهٔ حاضر اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است.

پی‌نوشت

۱. Grasshopper
۲. Karamba3D
۳. Rhinoceros 3D

فهرست منابع

• Aloni, R., Schwalm, K., Langhans, M. & Ullrich, C. (2003). Gradual shifts in sites of free auxin-production during leaf-primordium development and their role in vascular differentiation and leaf morphogenesis in Arabidopsis. *Planta*, 216(5), 841–853. doi: 10.1007/s00425-002-0937-8

• Barthelat, F. (2007). Biomimetics for next generation materials. *Phil. Trans. R. Soc. A*., 365(1861), 2907-2919. doi: 10.1098/rsta.2007.0006

• Benyus, J. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: HarperCollins.

• Blonder, B., Salinas, N., Patrick Bentley, L., Shenkin, A., Chambi Porroa, P. O., Valdez Tejeira, Y., …, Malhi, Y. (2018). Structural and defensive roles of angiosperm leaf venation network reticulation across an Andes–Amazon elevation gradient. *Journal of Ecology*, 106(4), 1683-1699. doi: 10.1111/1365-2745.12945

• Dimitrov, P. & Zucker, S. P. (2006). A constant production hypothesis guides leaf venation patterning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(24), 9363–9368. doi: 10.1073/pnas.0603559103

• Fujita, H. & Mochizuki, A. (2006). The origin of the diversity of leaf venation pattern. *Journal of Developmental Dynamics*, 235(10), 2710–2721. doi: 10.1002/dvdy.20908

• Gokmen, S. (2013). A morphogenetic approach for performative building envelope systems using leaf venetian pattern. *31st eCAADe Conference Proceedings-Computation and Performance (Vol. 1: Performative and Interactive Architecture)* (pp. 407-506).

• Hensel, M., Menges, A. & Weinstock, M. (Eds.) (2006). *Techniques and Technologies in Morphogenetic Design* (Architectural Design Book/Magazine, Vol. 76, Band 2). London: Wiley-Academy Press.

• Kenrick, P. & Crane, P. (1997). The origin and early evolution of plants on land. *Nature*, (389), 33–39. doi: https://doi.org/10.1038/37918

• Klemmt, C. (2014). Compression based growth modelling. *ACADIA* 14 (pp. 565-572). Retrieved from: http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia14_565.content.pdf

• Li, W., Wang, G. G. & Gandomi, A. H. (2021). A Survey of Learning-Based Intelligent Optimization Algorithms. Arch Computat Methods Eng https://doi.org/10.1007/s11831-021-09562-1

• Park, K. & Lee, D. (2016). A study on the nature inspiration design of eco-friendly spatial buildings. *Journal of the Residential Environment Institute of Korea*, 13(5), 1-29.

• Pawlyn, M. (2011). *Biomimicry in Architecture*. London: Riba Publishing.

• Raven, P. H. (2019). Future Directions in Plant Population Biology. In O. T. Solbrig, S. Jain, G. B. Johnson, and P. H. Raven (Eds.), *Topics in Plant Population Biology* (pp. 461–481). New York: Columbia University Press.

• Rodkaew, Y., Siripant, S., Lursinsap, C. & Chongstitvatana,

www.SID.ir

P. (2002). An algorithm for generating vein images for realistic modeling of a leaf. *Proceedings of the International Conference on Computational Mathematics and Modeling* (Vol. 9) (pp. 1–9).

• Runions, A., Fuhrer, M., Lane, B., Federl, P., Lagan, R. & Prusinkiewicz, P. (2005). Modeling and visualization of leaf venation patterns. *Journal of ACM Transactions on Graphics*, 24(3), 702-711. doi: 10.1145/1073204.1073251

• Runions, A. (2008). Modelling Biological Patterns Using the Space Colonization Algorithms. Unpublished Ph.D. dissertation. Calgary Univ., Alberta, Canada.

• Sachs, T. (2003). Collective specification of cellular development. *BioEssays*, 25(9), 897–903. doi: 10.1002/bies.10328

• Sack, L. & Scoffoni, C. (2013). Leaf venation: structure, function, development, evolution, ecology and applications in the past, present and future. *Journal of New Phytologist*, 198(4), 983-1000.

• Sieburth, L. E. (1999). Auxin is required for leaf vein pattern in Arabidopsis. *Journal of Plant Physiology*, 121(4), 1179–1190. doi: 10.1104/pp.121.4.1179

• Tamke, M., Stasuik, D. & Thomsen, M. (2013). The Rise-Material behaviour in Generative Design. *ACADIA* 13 (pp. 379-388). Retrieved from: http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/S how?acadia13_379

• Waggoner, M. & Kestner, D. (2010). Biomimicry and Structural Design: Past, Present, and Future. *Proceedings of the 2010 Structures Congress* (pp. 2852-2863). doi: 10.1061/41130(369)258

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:

خرسندنیکو، مرتضی، حقیر، سعید و متینی، محمدرضا. (۱۴۰۰). تحلیل و مدل‌سازی رایانشی ساختار آوندی برگ گیاهان به‌مثابهٔ پوشش سازه‌ای و مقایسهٔ تطبیقی آن با سازه‌های متداول. *باغ نظر*، ۱۸(۹۷)، ۶۳-۷۸.

DOI: 10.22034/bagh.2021.244143.4635
URL: http://www.bagh-sj.com/article_122453.html

www.SID.ir