فرهنگ و زیست فناوری معماری

نشریه علمی فرهنگ و زیست‌فناوری معماری

زمستان ۱۴۰۲، سال ۳، پیاپی ۱۱

طراحی سازه‌های شاخه‌ای با مولد بیولوژیکی بیومیمتکیس و برنامه‌های CAD و FE

زمان دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۱، زمان پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۷، زمان انتشار: ۱۴۰۲/۹/۲۲

دکتر رجینا بوکل- استاد گروه معماری و طراحی محیطی، دانشگاه دلفت، هلند.

مهدی کمری‌بیدگریه[۱] - کارشناس ارشد معماری و عضو اندیشکده بایونیک و فناوری، تهران، ایران.

احسان محمدخانی - کارشناس ارشد معماری و عضو اندیشکده بایونیک و فناوری، تهران، ایران.

چکیده

در مهندسی معماری و ساخت‌وساز، تعداد زیادی از اتصالات و ستون‌های شاخه‌ای در سازه‌هایی وجود دارد که در معرض بارهای استاتیک و پویا قرار دارند. صنعت هیچ راه‌حل برای مقرون به صرفه‌ای برای تولید ستون‌های شاخه‌ای زیبا و مکانیکی پایدار ندارد. در این مقاله به ارائه روشی پرداخته می‌شود که با استفاده از فناوری‌های سه‌بعدی و لیزری است. روش تحقیق که به ساخت و بازسازی این سازه‌های پیچیده شاخه‌ای کمک می‌کند با استفاده از برنامه‌های CAD و FE و بصورت تحلیل مورفولوژیک معماری است. یافته‌ها نشان داده است که نه تنها می‌توان به درک بهتری از مورفولوژی (ریخت‌شناسی) این سازه‌ها پرداخت، بلکه می‌توان به انتقال سازه‌های بیومیمتیک از طبیعت به طراحی‌های معماری هم کمک کرد. در حال حاضر یک هندسه بیومیمتیکی می‌تواند به شکل صنعتی تولید شود که شاخه‌های FRP که با توجه به خواص مکانیکی مختلف قابل تنظیم هستند، با بتن پر شوند و بنابراین می‌توان به همه خواص مکانیکی مورد نیاز کاربرد و تولید مقرون به صرفه در صنعت ساختمان دست یافت.

واژگان کلیدی: سازه‌های شاخه‌ای، برنامه‌های CAD و FE، شاخه‌های FRP.

[۱] نویسنده مسئول مکاتبات، شماره تماس: ۰۹۱۲۲۷۸۳۱۲۱، رایانامه: Kamari-mehdi@yahoo.com

۱- مقدمه و بیان مساله

«بایومیمتیکس» پیوند بین معماری و زیست‌شناسی و نقاط شروع برای زیست‌تقلید در معماری در طراحی پروژه‌هاست؛ جایی‌که نوآوری در معماری مورد نیازاست، به‌ویژه در مواردی نظیر این‌ها: طراحی معماری برای محیط‌های جدید؛ راه‌حل‌های مربوط به چالش‌های جدید می بایست بروز شوند که بر مبنای مدل‌های ارائه شده توسط طبیعت و یا بررسی سنت‌های ساختمانی بهینه شده و سازگار شده می باشند. در مهندسی معماری و ساخت‌وساز، تعداد زیادی از اتصالات و ستون‌های شاخه‌ای در سازه‌هایی وجود دارد که در معرض بارهای استاتیک و پویا قرار دارند. ساخت بسیاری از این سازه‌های پیچیده هم پرهزینه و هم وقت‌گیر است. در پروژه تحقیقاتی (SPP1420)، برای طراحی سازه از گیاهان گل‌دار تک‌لپه‌ای مثل درخت اژدها الهام گرفته شده بود. این گیاهان به عنوان یک «مولد بیولوژیکی» انتخاب شده بودند چراکه ساختار درونی آن‌ها شامل بافت‌های نرمی است که نمایانگر کامپوزیت تقویت شده طبیعی است. این فرم‌های ابتدایی و ساده در موسسات مهندسی مختلف ساخته شده‌اند تا از آن‌ها به عنوان عناصر ساختاری در سازه‌های سبک وزن استفاده شود. در این پروژه تحقیقاتی، از آن‌ها به‌عنوان اولین بدنه FRP استفاده شد. در پروژه‌های تحقیقاتی قبلی، راه‌حلی مناسب برای معایب موجود بدست نیامده است. بنابراین هدف اصلی این پروژه، استفاده از ستون‌های زنجیره‌ای بیومیمتیک جدید با بیشترین بهره‌وری و کمترین معایب است. پایه و اساس دستیابی به ستون‌های شاخه‌ای بیومیمتیکی موردنظر، یافتن «مفهوم زیستی مولد در گیاهان» است. بنابراین گیاهانی سبک‌وزن با قابلیت تحمل بارهای سنگین انتخاب شدند. پیش‌شرط پیاده‌سازی فنی در معماری، درک کامل نسبت به سازوکارهای پایه‌ای است که سبب انعطاف‌پذیری ستون‌های انشعابی و ظرفیت بالا تحمل بار آن‌ها می‌شود. این به نوبه خود می تواند به عنوان نقطه شروع برای درک مکانیکی مفصل ارگانیسم‌های زیستی در طرح ساختارهای شاخه‌ای باشد. این کار با استفاده از شبیه‌سازی مدل‌ها با روش FE و با توجه به مفاهیم مولد زیستی انجام می‌شود. در این پروژه، مواد جدید، سازه‌های جدید و روش‌های ساخت جدید با الهام از طبیعت توسعه یافته و ترکیب شده‌اند. تا به امروز، ساخت ستون‌های شاخه‌ای نیازمند چارچوب‌های پیچیده و گران برای بتن یا فولاد بود. مفهوم جدید شامل یک ستون شاخه‌ای سبک وزن براساس FRP است که به‌عنوان چارچوب بیرونی برای ساخت بتن و و همچنین یک عنصر مخرب برای خنثی‌کردن نیروهای چرخشی عمل می‌کند. از اواسط دهه ۱۹۹۰، FRP ها برای تثبیت ستون‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال استفاده از بتن FRP برای طرح‌های شاخه‌ای هنوز مورد بررسی کامل قرار نگرفته است. فن‌آوری‌های جدید برای ساخت ساختارهای توخالی شاخه‌ای استفاده می‌شود و در آن‌ها فیبرها عمدتاً در جهت حلقه و جهت طولی قرار می‌گیرند.

۲- روش‌شناسی و پیشینه تحقیق

روش تحقیق توصیفی و تحلیلی است که برای به‌دست آوردن یک تحلیل دقیق از آناتومی پیوندی اتصال شاخه‌ای سه‌بعدی، روش‌های پیچیده تصویربرداری استفاده شده است که بسیار مهم هستند (مانند: ۱. بخش‌بندی بافت‌شناسی و ۲. بازسازی سه بعدی تصاویر میکروسکوپی یا غیرتخریب) (Haushahn و همکاران، ۲۰۱۴). هر دو روش دارای مزایا و معایب است: بخش بندی سریال هیستولوژیک زمان‌بر و مخرب است اما با وضوح بالا به سطح سلول و تبعیض قابل اعتماد انواع بافت و سلول‌های مختلف با روش‌های رنگ‌آمیزی پیشرفته است.

۳- ادبیات تحقیق

۳-۱ بیومیمتیکس

بر طبق (بررسی) «ورنر ناچیتگال»، اصطلاح آلمانی *Bionik* در اصل از واژه انگلیسی *bionics* می‌آید که توسط سرگرد نیروی هوایی ایالات متحده «جی. ای. استیل» در کنفرانسی با عنوان «*سمپوزیوم بیونیکس: نمونه اولیه‌های زنده- کلیه فناوری جدید*» در سال ۱۹۶۰، به‌صورت فرضی به‌عنوان ترکیب واژه‌های «بیولوژی» یا الکترونیکس ابداع شد. در آلمان، اصطلاح *Bionik* یک تفسیر مجدد بسیار رسا در سیلاب‌های (هجاهای) اول و آخر کلمات بیولوژی *biology* و تکنیک *Technology* پیدا کرده است. اصطلاح بیونیک امروزه تعریف مختصری دارد: رباتیک و جایگزینی یا ارتقا ماده زنده بافت، بخش‌های بدن و ارگان‌های (اندام) با نسخه‌های مکانیکی در دینای انگلیسی‌زبان، اصطلاح بیومیمتیک *biomimmetics* به‌عنوان معادله (واژه) آلمانی Bionik ظاهر شده و به‌طور رایج استفاده می‌شود. اتو اشمیت این اصطلاح را در دهه ۱۹۵۰ ابداع کرد. از آنجا که بخش *mimetic* نشان دهنده تقلید طبیعت است. این اصطلاح بحث انگیز است؛ اخیراً bioinspiration (الهام از طبیعت) غالباً در همان زمینه به کار رفته است، اما به‌نظر می‌رسد برای غالب شدن، زیادی کلی باشد. راه حل دیگر برای ادامه بحث واژه شناسی استفاده از اصطلاح bionic در انگلیسی می‌باشد. در ذیل، سه اصطلاح bionics، bionic و biomimmeticd به شکل مترادف به کار می‌روند. «زیست‌شناسی فنی» یعنی درک طبیعت با کمک فناوری. بیونیک یعنی یادگیری طبیعت در راستای فناوری. هیچ یک از چشم اندازها جزئی و ناچیز نیست. آن‌ها آگاهانه از مرزهای رشته‌ای (وابسته به رشته) فراتر رفتند و مستثنی کردن و رد دانش را در بر نمی‌گیرند. آن‌ها عقیده دارند ادغام بیولوژی و تکنولوژی باید اساسی باشد، اما نسبت به عجیب و غریبی‌های روش شناختی مربوطه‌شان و حدود ربط به یک دیدگاه جامع هشیارند. «زیست‌شناسی‌فنی» (*Technical biology*) به عدم پوشش بخش کوچکی از قلمرو ناشناخته اختصاص داده می‌شوند. این یک وظیفه شهروندی و فرهنگی مستقل مثل همه پژوهش های علمی پایه‌ای است. بیونیک نتایج را دربرمی‌گیرد و آن‌ها را سودمند تحویل می‌دهد. این یک الزام عملی روزگار ماست. به نقل از »ماکس پلانک» کاربرد باید مقدم بر داشتن باشد. ورنر ناچیتگال رشته‌های bionic

و Technical biology را به‌عنوان نقاط متقابل (همپار) معرفی می‌کند: «زیست شناسی فنی *Technical biology* ... فرآیندهای طبیعت را در پرتو تحلیل‌ها و روش های توصیفی فیزیک و فناوری بررسی و تشریح می‌کند؛ لذا پژوهش‌های پایه‌ای است، یک وظیفه تمدن و فرهنگ» (محمودی نژاد و گلابچی، ۱۴۰۱، ص ۱۲۳).

۳-۲ بهینه‌سازی بایونیکی

بارها گفته می‌شوند که طبیعت همه چیز را بهینه می‌سازد و بیونیک بر اساس یک پژوهش ثابت برای بهینه‌های خاص است. مفهوم بهینه در طبیعت و اینکه چگونه می‌تواند به همان مفهوم در کسب و کار یا فناوری تشبیه شود یا تفاوت داشته باشد- موضع تحقیق بنیادی است. گفته «ورنر ناچیتگال» بحث در مورد تفاوت‌های بنیادی بین بهینه‌سازی در طبیعت و در محیط‌های فنی را معرفی می‌کند. در هر دو این حوزه‌ها، معمولاً می‌توان از طریق محاسبات ریاضی بهینه سازی به بهینه‌ها رسید؛ در بیولوژی (زیست‌شناسی)، پیچیدگی عوامل تأثیر گذار و معیارهای بهینه‌سازی معمولاً برای فرمول بندی یک تابع (کارکرد) عینی قطعی بسیار عالی است. برخلاف زیست‌شناسی، بهینه‌سازی ساختارهای فناورانه را می‌توان انجام داد (حل کرد)، امروزه همچنین با کمک ابزارهای طراحی مبتنی بر استراتژی تکاملی، همان‌طور که در مثال بهینه‌سازی خرپای قاب بندی شده معلق ارائه می‌شود.

۳-۳ واژگان وابسته

اصطلاحات دیگری که در اشتراک با بیونیک واقع می‌شوند:

- **بیومیمیکری؛** توسط یک گروه از ایالات متحده و فردی بنام «جانین بنیوس» ابداع شد که در مورد استفاده از نبوغ طبیعت برای توسعه نوآوری می‌باشد: روش کلی (کل‌گرا) شامل طراحی اکولوژیک و نیز علاقه به نوآوری فناورانه.
- **الهام زیستی (الهام از طبیعت)؛** کلی‌ترین عبارت (اصطلاح) برای طراحی الهام گرفته از مدل‌های طبیعی شامل تمام سطوح انتزاعی و همچنین تفسیرهای کامل شکل‌شناختی است.
- **مورفولوژی زیستی (شکل شناسی زیستی)؛** عبارتست از علم ساخت و سازمان‌دهی چیزهای زنده و عناصر آن‌ها – ارگان‌ها (اندام)، بافت و سلول‌ها.
- **مورفولوژی (شکل شناسی) ساختاری؛** به طراحی کارکردی در فناوری و آناتومی کارکردی در زیست شناسی برمی‌گردد.
- **میکرومورفولوژی (شکل‌شناسی میکروسکوپی)؛** فرم چیزهای (اهداف) میکروسکوپی را بررسی و توصیف می‌کند و خزانه (کشف) فرم‌های کارکردی را نمایش می‌دهد.
- **بیومکانیک؛** عبارتست از به‌کارگیری قوانین فیزیکی مکانیک برای بررسی چیزهای طبیعی.

- **بیوفیزیک؛** موضوعات زیستی (بیولوژیک) را با اصطلاحات و روش‌های فیزیک بررسی و توصیف می‌کند.
- **بیوتکنولوژی (زیست‌فناوری)؛** موضوعات بیولوژیک (زیست شناختی) را با استفاده از روش‌های فنی کندوکاو می‌کند. اخیراً این مفهوم به‌سوی فناوری‌های با استفاده از ارگانیسم‌ها برای اهداف تولید در بیوشیمی، مثلاً آنزیم‌ها، داروها و مواد دارویی جابجا شده است. بیوتکنولوژی همچنین به ارگانیسم‌های اصلاح شده به‌صورت ژنتیکی مربوط می‌شود.

۳-۴ گیاهان به‌عنوان مدل

گیاهان به‌عنوان مدل‌های الگوبرداری به کار رفته‌اند از زمانی که انسان شروع به استفاده از فناوری کرد. برای معماری، گیاهان اهمیت ویژه‌ای دارند چون مسائل مشترک با خانه‌ها را به اشتراک می‌گذارند: بیشتر آن‌ها در یک مکان می‌مانند و به شرایط محیطی محلی وابسته هستند. درختان و خانه‌ها اندازه مشابهی دارند و در معرض اثرات مشابه نیروهای طبیعی قرار دارند. مقایسه مشهور بین یک تیغه (پهنای برگ) چمن و یک برج بعداً بیان خواهد شد. گیاهان به‌عنوان مدل‌ها و بیومکانیک گیاهان قبلاً در قرن ۱۹ توسط گیاه شناس سوئیسی «سیمون شوئندنر» بررسی شده بود. «در مورد رشد و فرم» در سال ۱۹۴۲ چاپ شد. آن کتاب در مورد این پرسش بود که فرم در ارگانیسم‌ها چطور توسعه می‌یابد و رادیو لاریان‌ها و چند جانور و گیاه بالاتر به‌عنوان مثال بررسی کرد. آن هنوز به‌عنوان مرجع (کتاب قانون) برای توسعه فرم و ساختار ارگانیسم‌های زنده نسبت داده می‌شود و خیلی از کارهای بعدی به یافته‌های تامپسون رجوع می‌کند. «تامپسون» موضوعاتی نظیر مدار(بزرگی)، رشد و مقیاس را مورد بحث قرار داد و شکل‌های طبیعی را برحسب ریاضیات و هندسه بررسی کرد کار او هنوز منبع الهام‌بخشی است که بواسطه رشته زیست‌شناسی ریاضی که تشکیل الگوی فضایی زمانی در زیست‌شناسی را ررسی می‌کند، به جلو برده می‌شود (گروبر، ۱۳۹۹، ص ۳۴۲).

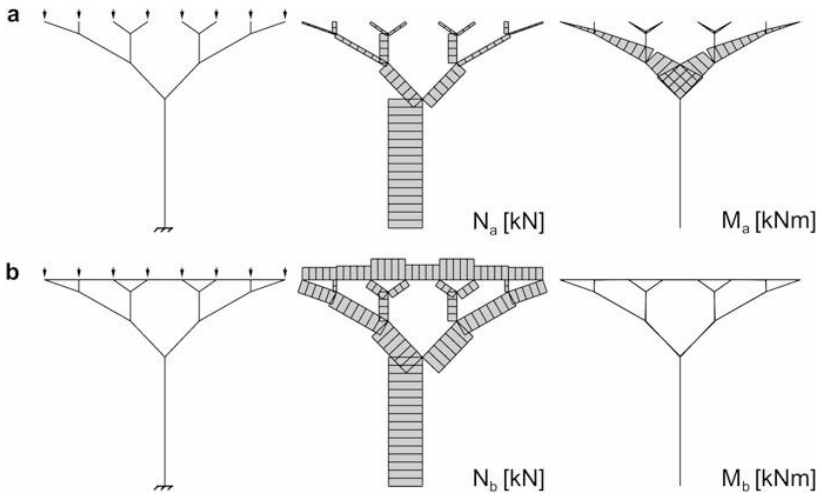
۳-۵ ساختارهای شاخه‌ای در معماری و زیست‌شناسی

هدف تجزیه و تحلیل کمی و کیفی انشعابات در گیاهان، رسیدن به درکی از رفتارهای مولدهای بیولوژیکی و عملکرد اساسی برای پیاده‌سازی فنی در معماری است. دانشی عمیق در رابطه با عملکرد انشعابات گیاهی منجر به پیشرفت‌هایی در بخش طراحی ستون‌های شاخه‌ای بخصوص در ساخت-وسازها خواهد شد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل کمی و شبیه‌سازی انشعابات گیاهان به یافتن پاسخی برای سوالات بیومکانیکی حل‌نشده، کمک خواهد کرد. ستون‌های شاخه‌ای در گیاهان و معماری در معرض چالش‌ها و محدودیت‌های مختلفی قرار دارند. توانایی رشد و انطباق در طول رشد، تفاوت اصلی بین گیاهان و سازه‌های ساختمانی است. اگر چه فرایند رشد قابل انتقال به ساختارهای ساختمان نیست، آرایش بافت‌ها و اصول کاربردی می‌تواند برای پیاده‌سازی فنی خلاصه

شود. علاوه بر ثبات مکانیکی، تغذیه و تامین آب و تولید مثل برای گیاهان ضروری است (Kull & Herbig 1987) که می‌توان از سه مورد ذکر شده درطی اولین فرایند انتقال زیستی چشم-پوشی کرد. در ساخت و ساز ساختمان، نه تنها بارهای خارجی بزرگ باید حمل شوند، بلکه انحراف و ارتعاش نیز باید کاهش یابد و دوام باید تضمین شود. قابلیت اطمینان، استحکام، بازدهی هزینه و ظاهر زیبایی‌شناختی جزو بعضی از معیارهای طراحی اصلی و اغلب متناقض بشمار می‌روند. به رغم شباهت چشمی تغایرهایی در شکل‌های رشد گیاه شاخه‌های درختی و ستون‌های شاخه‌ای وجود داشته که در شکل زیر نشان داده شده است.

تصویر ۱. گیاه شاخه‌های درختی و ستون‌های شاخه‌ای در معماری؛
ماخذ: Zimmermann MH, Tomlinson PB 1970

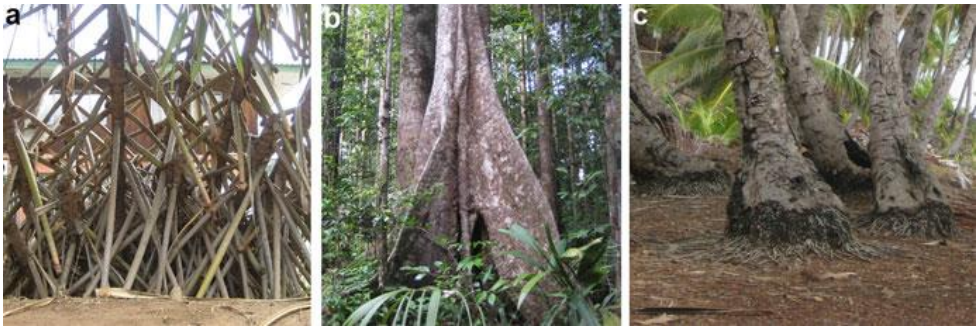
در شکل زیر، تفاوت‌های اساسی در شرایط بارگذاری و انتقال بار در مقایسه با درختان و سایر ساختارهای منشعب شده بیولوژیکی را به نمایش گذاشته است. در ساختار خرپا مصنوعی، بار اغلب از طریق نیروهای عادی منتقل می‌شود.



تصویر ۲. تحلیل سازه‌ای شاخه‌ای در معماری؛ ماخذ: Zimmermann MH, Tomlinson PB 1970

هندسه را می‌توان از طریق مدل‌هایی از نظر فیزیکی تعیین کرد، اما پایداری ساختاری (یعنی خم شدن اعضای آن) بر طراحی تاثیر می‌گذارد. بارهای خارجی عمودی (برف، باد و وزن خود سقف

یا پل) به صورت افقی از طریق خم ساختار افقی (یعنی عرشه سقف یا پل) توزیع شده و به ستون‌ها تمیل شده اند. لحظات خمشی در اعضا، در مورد اخیر بسیار کوچک است و بنابراین در طرح‌های طرح‌ریزی که توزیع نیروهای داخلی را نشان می‌دهند مشخص نیستند. در مقابل، خم شدن، نوع غالب بار در شاخ‌های درخت‌های بیولوژیکی است. بارهای پویا و استاتیک مانند باد و برف در هر دو ساختار عمل می‌کنند. با این حال، درختان قادر به کاهش بارگذاری با تغییرات آشکار و ساده کردن شاخه‌ها، شاخه‌ها و برگ‌ها (انعطاف‌پذیری کنترل شده هستند. به دلیل الزامات کارآیی، این اصول را نمی توان برای ساختارهای ساختمانی اعمال کرد و یا تنها به حد محدودی اجازه داده شد.



تصویر ۳. ریشه‌های مختلف مورفولوژی در نهان‌دانه‌های درختی؛ ماخذ: آرشیو نگارندگان.

این ملاحظات نشان می‌دهد که اگرچه بسیاری از ستون‌های شاخه‌ای در معماری به لحاظ چشمی شبیه انشعابات در گیاهان هستند، سازگاری با بارهای استاتیک و پویا کاملاً متفاوت است. تجزیه و تحلیل بنیادی سازگاری بار در انشعابات گیاهان برای انتقال بیوموژن به ساختارهای شاخه‌ای برای صنعت ساختمان ضروری است. پروژه فعلی تمرکز ویژه‌ای بر سازگاری با شرایط بارگیری در ساختارگیاهان شاخه‌ای دارد؛ به‌عنوان مثال، از طریق (۱) تشکیل ریشه‌ها، (۲) توسعه یک معماری شاخه‌ای خاص بار و (۳) اجتناب از شکاف: (۱) سیستم ریشه‌های گسترده و شاخه‌ای گیاهان.

۳-۶ تحلیل سازه‌ای درختان

گیاهان لنگرگاه را در زمین نصب می‌کند و به شدت با مقاومت در برابر بارهای تنش‌های استاتیک و دینامیک که عمدتاً به دلیل وزن خود و باد می‌شود، سازگار است. پتانسیل چنین الگوهای نقش بیولوژیک برای انتقال به سیستم‌های لنگرگاه در ساخت‌وساز ساختمان هنوز به‌صورت جزئی مورد بررسی قرار نگرفته است. علاوه بر این، مشخص کردن انواع ریشه‌ها مانند ریشه‌های پا بلند، ریشه-های پشتیبان یا ریشه‌های نابجا و سازگاری مورفولوژیکی را با خاک‌های مختلف با خواص مکانیکی مختلف نشان می‌دهند، مانند زیرزمینی گل‌آلود یا آبی (Kadereit et al 2014). چنین تشکل‌هایی تحلیل کمی خواهند شد، خلاصه و اجرا در ساختارهای بنیادی برای حمایت از ساختارهای فنی بزرگ مانند آسیاب بادی خواهند بود که بر روی انواع زیرزمین پایدار و ناپایدار ساخته می‌شوند. رشد ثانویه منجر به افزایش وزن ساقه‌ها، ریشه‌ها و شاخه‌ها می‌شود و به همین‌ترتیب نیز به طور بالقوه تنش‌های برشی در شاخه‌های ساقه یا ضمیمه‌های ریشه‌های ساقه می‌انجامد. تنش‌های برشی

بحرانی توسط شکل انطباق انحنای ویژه در منطقه ضمیمه شاخه ساقه کاهش می‌یابد. توسعه انحنای بهینه شده شکل با استفاده از فرایندهای رشد ثانویه سازگار، یعنی تجمع خاص مواد چوب در مناطق استرس بالا و اجتناب از افزایش حداکثر فشارهای بحرانی در ناحیه‌های شکاف‌پذیر انجام می‌شود (Metheck 1998). یک مثال دیگر از سازگاری ساختاری، شکل گیری فرورفتگی‌ها در اتصالات شاخه ساقه در ستون‌های کاکتی (Schwager et al, 2013) و گیاهان درختی تک لپه‌ای است.

شبیه‌سازی FE بر اساس اشکال ساده شده و با توجه به سازگاری ساختاری مولدهای مفهومی بیولوژیکی نشان می‌دهد که افزایش فشار شکاف به‌وضوح توسط این سازگاری‌ها کاهش می‌یابد (Schwager et al.، ۲۰۱۳). انتقال فنی از کاهش بحرانی شکاف به ساختارهای سبک وزنی توسعه یافته بیوممتیک، اجازه تحمل بار با ظرفیت بالا را می‌دهد.

۳-۷ ژنراتور بیولوژیکی

گیاهان نشان‌دهنده تنوع وسیعی از مورفولوژی‌های شاخه‌ای هستند که در سطوح مختلف سلسله-مراتبی به محدودیت‌های عمده فیزیولوژیکی، اقلیمی و مکانیکی می‌پردازند. شناسایی ژنراتور مفهوم امیدوارکننده بیولوژیکی برای بهینه‌سازی ساختارهای ساختمانی شاخه در مهندسی عمران نیاز به انتخاب دقیق و تجزیه و تحلیل دقیق کمی از ساختارهای بیولوژیکی دارد. تا به حال، تحقیقات بیومیمتیک در ارتباط با انشعابات گیاهان عمدتاً بر عملکرد مورفولوژی و بیومکانیک گیاهان تک‌لپه درختی و ستونی برای پیاده‌سازی فنی عناصر ساختاری سبک وزن در صنایع خودروسازی، هوا و فضا و تجهیزات ورزشی تمرکز کرده‌اند (Schwager et al.، ۲۰۱۰، ۲۳۰۱۳). این تمرکز به‌طور عمدی بعنوان گیاهان تک لپه‌ای درختی انتخاب شده‌اند که نشان‌دهنده آرایش داخلی تقویت شده با فیبر و توسعه ستونی شاخه‌های توخالی و در عین‌حال سبک وزن که نمونه‌ای عالی برای راه‌حل‌های هوشمند در طبیعت هستند، می‌باشند. بنابراین، هر دو گروه از گیاهان به‌طور دقیق از نظر جزییات توانایی مورد بررسی قرار گرفتند تا بتوانند به عنوان ژنراتورهای مفهومی برای پیاده سازی در شاخه-های تقویت شده فیبری بافت زیستی توخالی استفاده

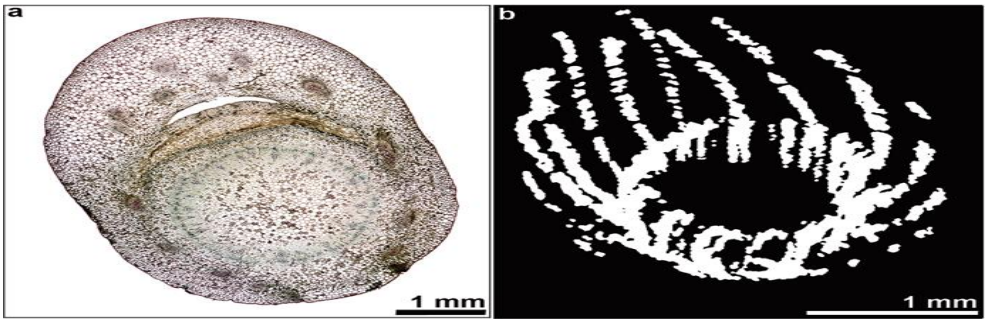
شوند. در پروژه تحقیقاتی درحال انجام، غربالگری برای ژنراتورهای مفهومی بیولوژیکی برای انتخاب گیاهان دوتایی (به غیر از کاکتی ستونی) برای پیاده‌سازی در معماری و مهندسی ساخت و ساز گسترش یافته است (Gola 2014؛ Kadereit et al 2014). با وجود این‌که بارهای غالب بر روی گیاهان کاملاً متفاوت از آن‌هایی هستند که بر ساختار فنی نگهدارنده سقف عمل می‌کنند، شکل شاخه بسیار شبیه ستون پشتیبانی شاخه در معماری است.

مورفولوژی شبیه‌سازی شفلرا آربوریکولا به عنوان اولین مولد مفهوم برای تجزیه و تحلیل کمی و کیفی جزئی انتخاب شده است. تقسیم‌بندی عمدتاً توسط قطعات جدا شده چوب است که به صورت دور از مبدا ادغام می‌شوند. این بخش‌های چوب دارشامل دسته‌های آوندهای چوبی است که از

ساقه اصلی به شاخه جانبی گسترش می‌یابد (Tomlinson et al 2005). این ترتیب اجازه می‌دهد تا انتزاع شفلرا به ساختارهای شاخه‌ای که از یک ستون مرکزی ظاهر می‌شوند و ستون‌های تحمل بار را تشکیل دهند که یک سازگاری بالا را با شرایط بار مختلف می‌رسانند.

۴- بیان یافته‌های تحقیق

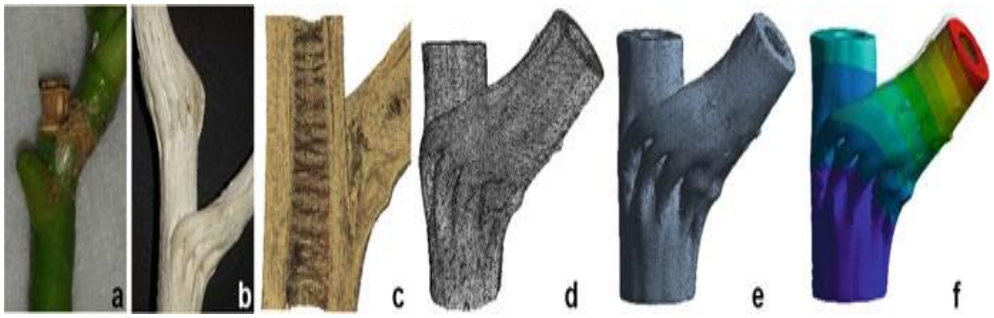
تصاویر فیلتر شده از فیلترهای دسته‌های آوندی را می‌توان از طریق یک فرایند ویرایش تصویر در یک راستا قرار داد که اجازه مشاهده روند و ترتیب فیبرهای تکِ چوبی شده را می‌دهد. این نوع تحلیل به درک زمینه‌های ساختاری از عملکرد مکانیکی و فیزیولوژیکی سیستم آوندی در منطقه پیوندی شاخه ساقه کمک می‌کند. وضوح بالا برای درک عمیق از انشعابات گیاهی و یک انتزاع علمی درست به‌عنوان پایه‌ای برای پیاده‌سازی بعدی در ساختارهای فنی ضروری است. مکمل سیگنال نوری و روش بازسازی، CT اسکن یک روش سریع و غیرمخرب است که در حال حاضر اجازه می‌دهد تا تجسم آرایش سه بعدی مواد فیبردار مشخص شود. در مقایسه با تجزیه و تحلیل نوری، تعداد بسیار بیشتری از لایه‌های تصویر را می‌توان در زمان کوتاه جمع‌آوری کرد که منجر به بازسازی حجم تصفیه شده بیشتری از شکل بیرونی و ساختار داخلی می‌شود. با این‌حال، تنها نمونه‌های کوچکی که خشک شده اند به‌علت محدودیت‌های فعلی در فضای اتاق اندازه‌گیری و به دلیل ضرورت اجتناب از خشک کردن مصنوعات که می‌تواند در مواد زنده در طول CT اسکن باشند. علاوه براین، اختلاف قیمتی خاص با مقدار چگالی، که اساس تصاویر CT است، کنتراست کمتر و پس زمینه بیشتر را در رنگ‌آمیزی رنگ دیفرانسیل مورد استفاده برای بخش‌های بافت‌شناسی نشان می‌دهد. با وجود این معایب، تصویربرداری CT یک روش ارزشمند برای تجسم فرم بیرونی و ترتیب داخلی ساختارهای فیبردار است.



تصویر ۴. تصویربرداری CT از ساختار فیبردار درخت؛ ماخذ: نگارندگان.

در پروژه‌های جاری، تجسم شاخه‌های پیوستگی شاخه ساقه با CT اسکن با تمرکز بیشتر بر تقسیم محاسباتی انواع مختلف بافت و استفاده از مش‌های سطح اسکن شده به‌عنوان یک ورودی هندسی برای شبیه‌سازی FE استفاده می‌شود. انتقال تعداد زیادی از ساختارهای بیولوژیکی به مدل‌های هندسی متمایز به عنوان پایه ی برای شبیه‌سازی، انتزاع و پیاده‌سازی در برنامه های کاربردی، نیازمند توسعه یک روش محاسباتی استاندارد است که قادر است اطلاعات هندسی را از یک مجموعه داده

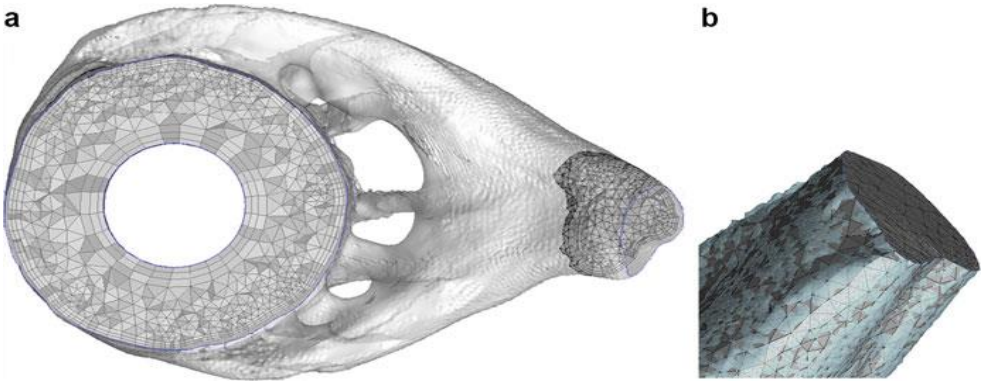
سه‌بعدی تصویری به شبکه‌های سطحی تبدیل کند. این یکی از تمرکزات اصلی در تحقیقات در حال انجام است. علاوه بر این، تنوع شکل‌های مختلف در شکل‌های مختلف شاخه‌ای رشد گیاهان که یافت شده است، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و کاتالوگ شکلی از ساختارهای شاخه‌ای گیاهان می‌توان درست کرد. طبقه‌بندی شامل داده‌های مربوط به مورفولوژی و روابط غالب نسبی شکل‌های مختلف شاخه است. این در نهایت اجازه می‌دهد تا انتخاب آماده از یک شکل مناسب در مرحله برنامه‌ریزی ستون شاخه‌ای فنی و برای ایجاد سیستم طبقه بندی جدید برای تأثیر در گیاه-شناسی شود.



تصویر ۵. مدل‌سازی و شبیه‌سازی در بیومیمتیک.

فرایند اصلی از مدل نقش بیولوژیکی به شبیه سازی FE در شکل بالا نشان داده شده است. این فرایند به دنبال جریان کاری است که در پروژه تحقیقاتی SPP1420 انجام شده که در آن روشی مشابه روش ILK صورت گرفت که برای اولین‌بار هم توسط همین شخص انجام شده بود. در ابتدا شاخه‌های گیاه تزیین و خشک شده بود و سپس تصاویر دیجیتالی توسط اسکن لیزری یا CT انجام شد. پتانسیل‌ها و چالش‌های هر دو روش تصویربرداری برای تحقیقات بیومیمتیک مورد مطالعه و مقایسه انجام گرفته است. با استفاده از چندین اسکن لیزری، ابری سه‌بعدی از هندسه بیرونی گیاه تولید شد. با استفاده از این ابر می‌توان حتی بدون داشتن اطلاعات، یک مش چند بعدی از ساختار داخلی آن هم تولید کرد. شدت باقی‌مانده از اشعه X و زاویه انحراف آن‌ها در CT مورد بررسی قرار می‌گیرد. این به تجسم توزیع داخلی مواد در نمونه کمک می‌کند. با ترتیب بخش‌ها یک تصویر دیجیتالی سه‌بعدی با رزولوشن 6m ایجاد می‌شود. هر وکسل که نشان‌دهنده یک گره شبکه است، دارای جزیی خاکستری و موقعیت متمایز است. یک جزء خاکستری سبک، به صورت کیفی با مواد با چگالی بالا ارتباط دارد و بنابراین قسمت‌های چوبی متراکم با قدرت بالقوه را نشان می‌دهد. با این‌حال، اندازه گیری چگالی ماده و یا قدرت مواد چوب تنها براساس تفاوت میان اجزای خاکستری ممکن نیست. مش سطحی تولید شده توسط اسکن لیزر یا CT در قالب STL درست شده و وارد برنامه CAD می‌شود. این کار برای تجدیدنظر دستی و کاهش میزان داده‌ها صورت می‌گیرد. برای حصول اطمینان در قسمت‌های مشخص شده عمود بر ساقه و شاخه، نمونه‌های گیاهی عمدتاً برش داده می‌شوند. در اسکن لیزری، انسدادهای مختلف می‌توانند با استفاده از هندسه‌های پیچیده گیاهان

ایجاد شوند. این انسدادها باید به شکل دستی حذف شوند. قسمت‌های توخالی گیاه هم باید به شکل دستی حذف شوند چراکه اسکن‌های لیزری قادر به شناسایی این قسمت‌ها نیستند.



تصویر ۶. روی سطح مش تولید شده توسط داده‌های CT، شکاف‌هایی در ساختارهای داخلی به‌وجود می‌آید که برای اطمینان از وجود مش مناسب، حذف می‌شوند.

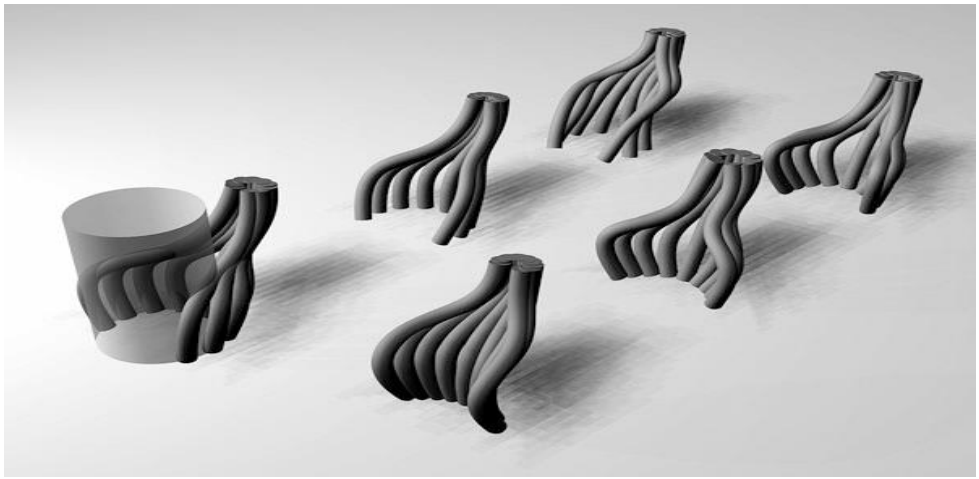
رویکردهای تحلیل به شرح زیر است:

۱. رویکرد اول بر اساس شبیه‌سازی پویای سیال با حجم مش و بدون اطلاع از ساختار درونی آغاز می‌شود. به‌طور معمول این مش‌ها از داده‌های اسکن لیزر به‌وجود می‌آیند. یک جریان آرام از ساقه به سمت شاخه‌ها شبیه‌سازی شده است. جهت‌گیری بردار سرعت به عنوان برآوردی برای ترتیب خواص مواد ناهمسان گرد است.

۲. رویکرد دوم اطلاعات خود را درباره مواد داخلی ناهمسان‌گرد، مستقیما از تصاویر سه بعدی CT دریافت می‌کند. در تجزیه و تحلیل تصویر، مقادیر مختلف خاکستری که کمی با تراکم مواد ارتباط دارد، بر اساس عنصر حجمی رتبه بندی می‌شوند. در هر قسمت، جهت بین وکسل‌های با تراکم یکسان، جمعآوری شده و با استفاده از یک تانسور جهت گیری، نشان داده می‌شود.

۲-۴ انتزاع

یک مطالعه پارامتری به منظور درک سازگاری‌های مورفولوژیکی در گیاه انتزاع اصول کاربردی آن باید انجام گیرد.



تصویر ۷. تعدادی از تغییرات پارامتری باید مورد ارزیابی قرار بگیرند و برای بررسی میزان سازگاری مدل‌های بیولوژیکی، بارگذاری‌های مکانیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۳-۴ پیاده‌سازی فنی در سازه‌های شاخه‌ای فیبری

نشـــریـه علمی فرهنـگ و زیست فناوری معماری، سال ۳، شماره ۱۱

FRPها برای اجزای فنی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در آن خواص مکانیکی انیزوتروپ مورد نیاز است. علاوه بر ویژگی‌های مکانیکی همه‌کاره، FRPها مزایای مختلف هم دارند. در اجزای اصلی، انتخاب فرآیند نساجی برای تولید FRP بستگی به جهت‌گیری فیبری مورد نیاز است. برای استفاده حداکثری از مواد، فیبرها باید بر اساس مسیرهای بارگذاری تنظیم شوند. با توجه به ساخت سازه‌های فیبری سه‌بعدی، نوارها نمایانگر فرآیند نساجی مناسب هستند. در حال حاضر می توان از دو روش معمول برای تولید ستون‌های شاخه‌ای با یک ریشه اصلی و دو شاخه استفاده کرد.

- اولین روش برای ساخت اتصالات Y شامل دو مرحله برش است. در مرحله اول، ساقه اصلی و یک شاخه بافته می‌شوند. در مرحله دوم، شاخه دوم و دوباره ساقه اصلی بافته می‌شوند.
- روش دوم توسط دستگاه‌های مختلف بافت انجام می‌شود. در اینجا نخ‌های حامل می‌توانند در طول فرآیند جایگاه خود را تغییر داده از نقطه انشعاب دو مرکز بافت تشکیل دهند. بنابراین ریشه اصلی و دو شاخه می‌توانند در یک مرحله و با یک لایه فیبری بافته شوند (درهم پیچیده شوند). روش‌های دیگری هم برای انجام این فرآیند در یک مرحله وجود دارد. انتخاب فرآیند مناسب برای تولید انشعاب دقیق، نازمند انجام تحقیقاتی در موسسه تکستایل تکنولوژی بوده است. برای برنامه‌های کاربردی در نظر گرفته شده، این فرایندها محدود به استفاده به عنوان اتصالات Y هستند.

۵. نتیجه‌گیری و جمعبندی

صنعت دارای راه‌حل برای ستون شاخه‌ای زیبایی و مکانیکی پایدار و در عین‌حال مقرون به صرفه نیست. این موضوع باید با توسعه ساختارهای شاخه‌ای الهام گرفته از طبیعت مثل الهام از گیاه شفلراآربوریکلا باشد. شبیه‌سازی شاخه‌ای گیاه شفلراآربوریکلا و اجرای انتزاعی از اصول کاربردی آن اهداف اصلی مطالعات ارائه شده است. بر اساس این تجزیه و تحلیل‌ها است که می‌توان به توسعه یک هندسه مبتنی بر بیومیمتیک پرداخت. روش‌های تولید نوآورانه و خودکار ممکن است منجر به گزینه‌های جدید طراحی در معماری شود. گسترش فضای طراحی الهام بخش توسعه سازه‌های قمختلف با پیچیدگی‌های نامنظم به عنوان هسته‌های ساختمانی یا ساختارهای مختلف پشتیبانی می‌شوند.

(*) اعلام عدم تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است. (تعارض منافع به حالتی گفته می‌شود که منافع شخصی مادی یا غیرمادی نویسنده یا نویسندگان با نتایج پژوهش در تعارض باشد و این موضوع بر روند انجام پژوهش یا اعلام صادقانهٔ نتایج تأثیر بگذارد).

۶- منابع و ماخذ

۱. گروبر، یورگ (۱۳۹۹) معماری بیومتیکس، ترجمه هادی محمودی نژاد، تهران: انشارات هله.

۲. محمودی‌نژاد، هادی و محمود گلابچی (۱۴۰۱) معماری بایومیمکری و بایوفیلی، تهران: انتشارات دانشگاه پارس.

3. Bilisik K (2013) Three-dimensional braiding for composites: a review. Text Res J 83:1414–1436.
4. Davol A, Burgueño R, Seible F (2001) Flexural behavior of circular concrete filled FRP shells. J Struct Eng 127:810–817. doi:10.1061/(asce)0733-9445(2001)127:7(810)
5. Eid R, Roy N, Paultre P (2009) Normal- and high-strength concrete circular elements wrapped with FRP composites. J Compos Constr 13:113–124. doi:10.1061/(asce)1090-0268(2009)13:2(113)
6. Fazeli M, Kern M, Hoffman G et al (2016) Development of three-dimensional profiled woven fabric on narrow fabric looms. Text Res J 86(12):1328–1340. doi:10.1177/0040517515606361
7. Gola E (2014) Dichotomous branching: the plant form and integrity upon the apical meristem bifurcation. Front Plant Sci 5:263. doi:10.3389/fpls.2014.00263
8. Hallé F, Oldeman R, Tomlinson PB (1978) Tropical trees and forests. Springer, Berlin/Heidelberg
9. Haushahn T, Schwager H, Neinhuis C et al (2012) Plant ramifications inspire branched lightweight composites. Bioinspired Biomim Nanobiomater 1:77–81. doi:10.1680/bbn.11.00011

10. Haushahn T, Speck T, Masselter T (2014) Branching morphology of decapitated arborescent monocotyledons with secondary growth. Am J Bot 101:754–763. doi:10.3732/ajb.1300448
11. Hesse L, Masselter T, Leupold J et al (2016) Magnetic resonance imaging reveals functional anatomy and biomechanics of a living dragon tree. Sci Rep 6:32685. doi:10.1038/srep32685
12. Hufenbach W, Böhm R, Thieme M et al (2011a) Polypropylene/glass fibre 3Dtextile reinforced composites for automotive applications. Mater Des 32:1468–1476. doi:10.1016/j.matdes.2010.08.049
13. Hufenbach W, Gruhl A, Lepper M et al (2013) Verfahren für die Fertigung komplexer Faserverbund-Hohlstrukturen. Lightw Des 2:44–48
14. Hufenbach W, Gude M, Cichy F et al (2011b) Simulation of branched biological structures for bionic inspired fibre-reinforced components. Kompozyty/Composites 11:304–309
15. Iwamoto A, Matsumura Y, Ohba H et al (2005) Development and structure of trichotomous branching in *Edgeworthia chrysantha* (Thymelaeaceae). Am J Bot 92:1350–1358.
16. Kadereit J, Körner C, Kost B et al (2014) Strasburger. Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften (37.Auflage). Springer Spektrum, Berlin/Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-54435-4
17. Kull U, Herbig A (1987) Pflanzen als natürliche Konstruktionen – oder das Prinzip Leichtbau. Arcus 1:11–16
18. Kupfer H (1973) Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 229:1–131
19. Kwan A, Dong C, Ho J (2015) Axial and lateral stress–strain model for FRP confined concrete. Eng Struct 99:285–295. doi:10.1016/j.engstruct.2015.04.046
20. Kyosev Y (2015) Braiding technology for textiles. Elsevier/Woodhead Publishing Limited, Cambridge
21. Lam L, Teng J (2003) Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete. Constr Build Mater 17:471–489. doi:10.1016/s0950-0618(03)00045-x
22. Masselter T, Hesse L, Leupold J et al (2015) Using MRI for analyzing the anatomy and biomechanics of monocotyledons. In: The 8th plant biomechanics conference. Nagoya University, Nagoya, Japan, pp 230–234
23. Mattheck C (1998) Design in nature. Springer, Berlin/Heidelberg
24. Milwich M, Speck T, Speck O et al (2008) The role of plant stems in providing solutions for innovative textiles in composites. In: Ellison MS, Abbot AG (eds) Biologically inspired textiles. Blackwell, New York/London, pp 168–192
25. Mirmiran A, Shahawy M (1996) A new concrete-filled hollow FRP composite column. Compo Part B 27:263–268. doi:10.1016/1359-8368(95)00019-4
26. Mountasir A, Hoffmann G, Cherif C et al (2015b) Competitive manufacturing of 3D thermoplastic composite panels based on multi-layered woven structures for lightweight engineering. Compos Struct 133:415–424
27. Mountasir A, LöserM, Hoffmann G et al (2015a) 3D woven near-net-shape preforms for composite
28. Otto F (1982) Natürliche Konstruktionen. Dt. Verl.-Anst, Stuttgart
29. Xiao Y, Wu H (2000) Compressive behavior of concrete confined by carbon fibre composite jackets. J Mater Civ Eng 12:139–146. doi:10.1061/(asce)0899-1561(2000)12:2(139)

30. Yip J, Ng S-P (2008) Study of three-dimensional spacer fabrics: physical and mechanical properties. J Mater Process Technol 206:359–364. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.12.073
31. Zimmermann MH, Tomlinson PB (1970) The vascular system in the axis of Dracaena fragrans (Agavaceae) 2. Distribution and development of secondary vascular tissue. J Arnold Arboretum

چکـــیده لاتین

Regina Bokel –*professor, Delft University of Technology, Holland*

Mehdi Kamari Bidkorpe- *MSc in architecture and member of bionic and technology think-tank, Tehran, Iran*

Ehsan MohamadKhani- *MSc in architecture and member of bionic and technology think-tank, Tehran, Iran*

Design of branch structures with biomimetic biological generator and CAD and FE programs

Abstract

In architectural and construction engineering, there are a large number of connections and branch columns in structures that are exposed to static and dynamic loads. The industry has no cost-effective solutions for producing beautiful and mechanically stable branch columns. This article presents a method that uses three-dimensional and laser technologies. The research method that helps in the construction and reconstruction of these complex branched structures is by using CAD and FE programs and in the form of architectural morphological analysis. The findings have shown that it is not only possible to better understand the morphology of these structures, but it is also possible to help transfer biomimetic structures from nature to architectural designs. Currently, a biomimetic geometry can be produced in an industrial form, where the FRP branches, which can be adjusted according to different mechanical properties, are filled with concrete, and therefore, all the required mechanical properties can be used and produced economically. Achieved savings in the construction industry.

Keywords: *branch structures, CAD and FE programs, FRP branches.*

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the BOTHIGHA Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License.

نحوه ارجاع به مقاله:

کمری بیدکرپه، مهدی. بوکل، رجینا. محمدخانی، احسان (۱۴۰۲) **طراحی سازه‌های شاخه‌ای با مولد بیولوژیکی بیومیمتکیس و برنامه‌های CAD و FE**. ۳(۱۱)، ۱-۱۶.

DOI: 10.52547/ijba.12.1.1

DOR: 20.1001.1.28212398.1402.6.1.1.1

URL: www.ijba.ir/fa/downloadpaper.php?pid=149&rid=18&p=A