نشریهٔ علمی باغ نظر، ۲۱(۱۳۴)، ۳۷-۴۴ / مرداد ۱۴۰۳
DOI: 10.22034/BAGH.2024.429271.5549

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Digital Form-finding of Tree-like Structures Based on Wet Threads Experiment
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

فرم‌یابی دیجیتال سازه‌های درختی براساس آزمایش رشته‌های خیس

مونا علی‌بابای لواسانی[1*]، محمدرضا متینی[2]، سعید خاقانی[3]

۱. کارشناس ارشد تکنولوژی معماری، گروه معماری، دانشکدهٔ معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران.
۲. دانشیار معماری، گروه معماری، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران.
۳. استادیار معماری، گروه معماری، دانشکدهٔ معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا،دانشگاه تهران ، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

چکیده

بیان مسئله: بیان مسئله: فرم‌یابی براساس خودسازماندهی اجزا در طبیعت مدت‌ها مورد توجه بوده است. این فرم‌ها که براساس بهترین نحوهٔ انتقال نیروها شکل می‌گیرند، با حداقل مصالح قابل ساخت بوده‌اند و نیز سبک هستند. در گذشته برای پی‌بردن به نحوهٔ این خودسازماندهی، مدل‌های فیزیکی مبنای طراحی و محاسبه قرار می‌گرفت. اما فرایند ساخت این مدل‌ها، اندازه‌گیری و تعمیم آن به مقیاس واقعی کار زمان‌بر و پرزحمت است. به‌خصوص اگر ساختار موردنظر، ساختاری پیچیده، چون سازه‌های درختی باشد. امروزه با اعمال منطق طبیعت در شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، می‌توان مدل‌هایی دیجیتال ساخت که فرایند فرم‌یابی و تعمیم آن به مقیاس نهایی، با صرف زمان و انرژی کمتر ممکن شود.

هدف پژوهش: هدف این پژوهش ارائهٔ ابزاری دیجیتال برگرفته از طراحی الگوریتمی، جهت فرم‌یابی دیجیتال سازه‌های درختی براساس آزمایش فیزیکی رشته‌های خیس است.

روش پژوهش: این پژوهش ابتدا از طریق مطالعهٔ منابع و مقالات علمی موجود در این زمینه شکل گرفته و سپس نتایج حاصل با استفاده از ابزارهای رایانه‌ای به طراحی ابزاری دیجیتال منجر شده است.

نتیجه‌گیری: استفاده از طراحی الگوریتمی حاصل از مدل رشته‌های خیس، می‌تواند ابزاری ساده برای طراحی بهینهٔ ساختارهای درختی در اختیار طراحان قرار دهد. به این‌صورت، نه‌تنها نتیجهٔ طراحی، بلکه فرایند طراحی نیز بهینه خواهد بود. یکی از چالش‌های اصلی در فرم‌یابی فیزیکی، برداشت مدل و تهیهٔ نقشه‌های ساخت بوده است. با انتقال این فرایند به دنیای دیجیتال، اندازه‌گیری فرم حاصل بسیار ساده‌تر و در زمان کمتری انجام خواهد شد. در نتیجه ساخت‌پذیری این فرم‌ها افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: *خودسازماندهی، فرم‌یابی دیجیتال، طراحی الگوریتمی، سازه‌های درختی.*

مقدمه

مدت‌هاست که معماران برای یافتن بهترین راه سازماندهی معماری خود، به فرایند فرم‌گیری اشکال در طبیعت می‌نگرند (Pathak, 2019). فرم‌های طبیعی حاصل فرایند تکاملی قرارگرفتن اجزا در آرایش درست هستند (Otto & Rasch, 2001). اما این ساختارهای طبیعی پیچیده، حاصل فرایندهای پیچیده نبوده و نتیجهٔ سازماندهی الگوها در شرایط مناسب است (Isaacs, 2008). برهمین‌اساس، فرای اتو[1] (۱۹۲۵-۲۰۱۴)، معمار آلمانی با ساخت مدل‌هایی فیزیکی، سازه‌هایی بسیار سبک و با کارایی بالا فرم‌یابی می‌کرد (Spuybroek, 2005). یکی از این مدل‌ها، مدل رشته‌های خیس بود. در این مدل، رشته‌های مهارشده بین تکیه‌گاه‌ها بر اثر کشش سطحی آب به‌هم می‌چسبند تا شبکه‌ای بهینه شکل گیرد و می‌توان از آن در فرم‌یابی ساختارهای درختی استفاده کرد (Otto & Rasch, 2001). هرچند فرم‌یابی به وسیلهٔ این مدل‌ها ساده است، اما اندازه‌گیری و تعمیم آن به مقیاس ۱:۱ بسیار پیچیده است (Kilian, 2004). حال اگر این آزمایش یا مدل فیزیکی در رایانه شبیه‌سازی شود، اندازه‌گیری و تهیهٔ الگوهای ساخت فرم نیز به مراتب ساده‌تر خواهد شد.

پرسش‌های پژوهش

پرسش اصلی این پژوهش این است که «چطور با استفاده از الگوریتم‌های طراحی می‌توان فرایند شکل‌گیری ساختارهای شاخه‌ای یا درختی حاصل از آزمایش رشته‌های خیس را در رایانه شبیه‌سازی کرد؟» مطالعات زیادی بر روی مدل‌های

*نویسنده مسئول: ۰۹۱۰۲۰۱۹۶۲۷، mona.lavasani.92@gmail.com

فیزیکی، نقش آنها در طراحی و محاسبهٔ فرم‌های معماری و ساخت مدل‌هایی دیجیتالی برمبنای منطق مدل‌های فیزیکی انجام شده است. اما تمرکز این پژوهش بر روی مدل فیزیکی رشته‌های خیس فرای اتو است که جهت بهینه‌یابی فرم سازه‌های درختی مورداستفاده قرار می‌گرفت. اما چند سؤال فرعی نیز در وجود دارد:

۱- فرایند مدل فیزیکی رشته‌های خیس، چگونه منجر به پیدایش ساختارهای شاخه‌ای یا درختی بهینه می‌شوند؟

۲- برای شبیه‌سازی این مدل فیزیکی در رایانه و طراحی الگوریتم مناسب، از چه مدل‌های ریاضیاتی می‌توان الگوبرداری کرد؟

روش پژوهش

این پژوهش دو بخش دارد: بخش اول که به مطالعه و بررسی مقالات و متون منتشرشده در این حوزه پرداخته و سپس به بررسی الگوریتم‌های موجود و امکان تعمیم آن به الگوریتمی جهت شبیه‌سازی فرایند آزمایش رشته‌های خیس در رایانه می‌پردازد و بخش دوم که شامل نوشتن الگوریتم پیشنهادی در افزونهٔ گرسهاپر[۲]، نرم افزار راینو[۳] و سنجش دقت و کارایی الگوریتم در یافتن فرم‌های شاخه‌ای یا درختی است.

مبانی نظری و پیشینهٔ تحقیق

• طراحی بیومیمتیک[۴]

طبیعت یک پایگاه داده‌ای از استراتژی‌های تطبیق‌پذیر است که می‌توان از آن در حل مسائل بهره برد «بیومیمیکری»[۵] یا «طراحی بیومیمتیک» از نظر لغوی به‌معنای تقلید از طبیعت است. اما در این پژوهش، منظور طراحی براساس نحوهٔ پاسخگویی طبیعت است (Pathak, 2019). شکل‌گیری فرم در طبیعت براساس یک فرایند است که باید آن را به‌صورت تصویری متحرک درنظر گرفت، نه تصویری ثابت و آنی. با مطالعهٔ این فرایند است که نوع فناوری طبیعت برای سازماندهی خود مشخص می‌شود (Otto & Rasch, 2001). الهام از طبیعت برای طراحی بهینه، می‌تواند به معماران کمک کند تا در مراحل اولیهٔ طراحی، تصمیمات منطقی‌تری بگیرند و هندسه‌های غیرضروری را حذف کنند. ساختارهای طبیعی و ساخته‌های انسان، هر دو تحت‌تأثیر قوانین ریاضی و براساس تحلیل نیروهای فیزیکی و کاهش هندسه‌های اضافه شکل گرفتند. این رویکرد می‌تواند به زیبایی‌شناسی و کارایی فرم‌یابی در معماری کمک کند (Dixit et al., 2020).

• خودسازماندهی[۶]

سیستم‌های خودسازمان‌دهنده، سیستم‌های پویایی هستند که ساختار اجزای خود را در تعامل باهم، و به‌منظور رسیدن به ساختاری پایدار تغییر می‌دهند (Banzhaf, 2003). کانت فیلسوف قرن ۱۸، اولین کسی بود که این پدیده را تعریف کرد. او گفت که در یک اورگانیزم، هر یک از اجزا وجود خود را به ویژگی‌ها و عملکرد اجزای دیگر که کل سیستم را شکل می‌دهند، مدیون است (Karsenti, 2008). از مثال‌های طبیعی این الگو می‌توان به شنای گروهی ماهی‌ها، حرکت ستونی از مورچه‌ها، نحوهٔ شکل‌گیری تپهٔ موریانه یا الگو رشدگلسنگ (Camazine et al., 2020) و از نمونه‌های ساخت بشر به شبکهٔ ترافیک شهری و اینترنت اشاره کرد (Banzhaf, 2009).

• فرم‌یابی فیزیکی

فرم یک سازه در عملکرد سازه‌ایی آن مؤثر است. قبل از عصر رایانه، طراحی فرم‌های پیچیده براساس ساخت مدل‌های فیزیکی انجام می‌شد که آرایش بهینهٔ انتقال نیروها را نمایش می‌داد (Isaacs, 2008). نیروها در چنین فرم‌هایی خالص و به‌صورت محوری (تنش‌های تماماً کششی یا تماماً فشاری) بوده و به‌دلیل حذف تنش‌های خمشی، مصرف مصالح و نهایتاً بار مردهٔ ساختار به حداقل می‌رسد. پس می‌توان گفت: « فرم پیرو نیروها است» (Veenendaal & Block, 2012). نیروی شکل‌دهنده در این مدل‌ها وزن مواد و نیروی جاذبه بود. مدل زنجیره‌های معلق[۷] آنتونیو گائودی[۸]، پوسته‌های نازک فلیکس کاندلا[۹]، مدل‌های یخی هاینز ایسلر[۱۰]، مدل‌های فیلم صابون سرگیو ماسمچی[۱۱] و شبکه‌های کابلی فرای اتو مثال‌هایی از این مدل‌هاست. پیشینهٔ این مدل‌ها به مدل زنجیروارهٔ رابرت هوک[۱۲] باز می‌گردد (Li et al., 2017).

• ماشین محاسبهٔ آنالوگ

اساس این مدل‌ها مفهومی به نام « محاسبات تصویری»[۱۳] است، که در ۱۵۸۶ توسط سیمون استیونز[۱۴] بیان شد. مدل دوبعدی او به‌صورت تصویری و بی‌نیاز از محاسبات پیچیده، می‌توانست تعادل نیروها را بررسی کند (Block et al., 2006). مدل‌های فرم‌یابی فیزیکی، مدل‌های سه‌بعدی بودند که جهت محاسبات سازه‌ایی استفاده می‌شدند تا دیگر به محاسبات ریاضی نیازی نباشد. اما طرح نهایی ساخت نیز باید با مطالعه و اندازه‌گیری دقیق همین مدل‌ها ترسیم می‌شد. ولی برداشت دقیق این مدل‌ها جهت ارائهٔ نقشه ساده و بدون خطا نبود. ایسلر و اتو هر دو راهکارهایی جهت رفع این مشکل ارائه دادند. ایسلر یک شبکهٔ سه‌بعدی برای برداشت مختصات نقاط تشکیل‌دهندهٔ مدل طراحی کرد. بعد از فرم‌یابی و اندازه‌گیری نیروها در هر نقطه، مختصات تک‌تک این نقاط باید به دقت برداشت می‌شدکه به گفتهٔ خود ایسلر کاری بس طاقت‌فرسا بود. اما اتو راهکار سریع‌تر و دقیق‌تری ارائه داد که آن عکس‌برداری از جهات مختلف مدل بود (تصویر ۱). با کنار هم قراردادن این عکس‌ها، به‌سرعت مدلی دقیق و قابل‌اندازه‌گیری چندین‌باره به‌دست می‌آمد (Whitehead, 2016). اتو، که روش پیداکردن فرم بهینه، از طریق مدل‌سازی فرایند شکل‌گیری آن، را «رایانه‌ای آنالوگ» نامید (Fabricius, 2016)، در سال ۱۹۷۰، استانداردی برای مقایسهٔ مدل‌ها با نام « بیک»[۱۵] معرفی کرد.

معیار بیک از مقایسهٔ ارتباط بین سه عامل فرم، نیرو و جرم مشتق می‌شد. به‌این‌ترتیب او توانست معیاری کمی برای اندازه‌گیری دقیق سازه‌های سبک ارائه دهد (Spuybroek, 2005). اما در این روش نیز زمان، هزینه ، نیروی کار و حتی فضای زیادی جهت ساخت مدل لازم بود، که این امر روش طراحی را از حالت بهینه خارج می‌کرد. علاوه‌بر آن کوچک‌ترین خطا در مدل، باعث بروز خطایی چند ده بار بزرگ‌تر در مقیاس واقعی می‌شد و بر عملکرد سازه‌ایی فرم تأثیر مخربی می‌گذاشت (Kilian, 2004).

• سازه‌های درختی

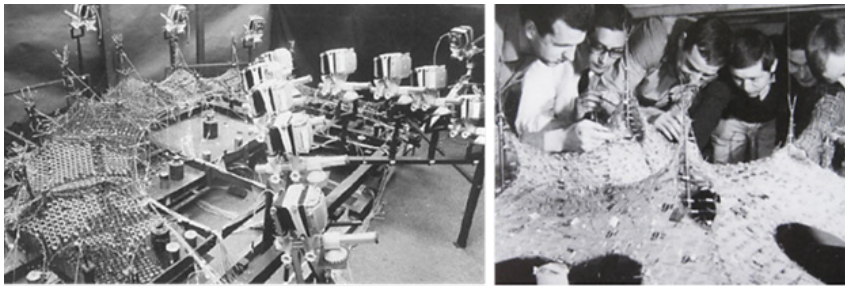
فرم پیچیدهٔ درختان که در پاسخ به نیازهای سازه‌ای و زیستی درخت شکل گرفته، از زمان قرون وسطی، در طاق‌های دندانه‌دار و نیز طاق‌های بادبزنی معماری گوتیک، چون کلیسا کالج کینگزکمبریج[۱۶]، پدیدار شد و در قرن نوزدهم و در دورهٔ «هنر نو»[۱۷]، در ساختمان گراند پالاس[۱۸]،پاریس به اوج خود رسید. چرا که مهندسان آن زمان در استفاده از چدن به مهارت رسیده بودند (Md Rian & Sassone, 2014). فرم درختان از نظر رفتار مکانیکی آن دو ویژگی بارز دارد: اول به‌دلیل انتقال بار سلسله‌مراتبی، قطر شاخه‌ها با میزان باری که متحمل می‌شوند تناسب دارد و دوم طول و زاویهٔ شاخه‌های درخت، بستگی مستقیم به نیروی وزن آنها دارد. پس شاخه‌های بلند یا افقی که در اثر نیروی جاذبه دچار خمش و شکست می‌شود، مطلوب این سیستم نیست (Mattheck, 1991). علاوه‌بر این‌ها شاخه‌های نازک درخت می‌تواند به‌عنوان تعدیل‌کننده[۱۹]، نیروهای جانبی وزش باد، جریان آب یا حتی زلزله را مهار کند (Kovacic et al., 2018). اما مهم‌ترین ویژگی ساختارهای درختی مسیرهای کوتاه انتقال نیرو از محل اعمال بار به تکیه‌گاه‌هاست و همین ویژگی اساس کار آزمایش‌های فرای اتو در زمینهٔ فرم‌یابی سازه‌های درختی بود. در اوایل ۱۹۹۰ او و گروهش در موسسهٔ سازه‌های سبک اشتوتگارت، تحقیقاتی در زمینهٔ «سیستم‌های مسیر بهینه»[۲۰] را شروع کردند و چندین مدل برای طراحی سازهٔ درختی ساختند: مدل معلق (برگرفته از مدل گائودی)، مدل رشته‌های خشک و مدل رشته‌های خیس (Ahmeti, 2007).

• شبکه‌های کوتاه‌ترین مسیر

شبکه‌های کوتاه‌ترین مسیر بیانگر کوتاه‌ترین اتصالات بین مجموعه‌ای از گره‌ها هستند. در طبیعت دلتای رودخانه‌ها، صاعقه و حتی برگ درختان نمونه‌هایی از این شبکه‌ها هستند. اما فرای اتو چندین روش برای یافتن این شبکه‌های بهینه داشت که یکی از آنها استفاده از فیلم صابون بود. او دو صفحهٔ شفاف را به‌وسیلهٔ استوان‌هایی کوتاه، که هر استوانه معرف موقعیت آن گره در صفحه بود، به یکدیگر متصل می‌کرد و با فرو بردن این مجموعه در مخلوط آب و صابون، فیلم صابون مسیری را انتخاب می‌کرد که با کمترین صرف انرژی شکل گیرد. به‌این‌ترتیب، کوتاه‌ترین مسیر ممکن بین گره‌ها نمایان می‌شد. در آزمایشی دیگر، او از سوزن‌های آهنربایی، ذرات آهن و نیروی مغناطیسی بین آنها برای شبیه‌سازی نحوهٔ گسترش شهرها استفاده کرد (Burkhardt, 2016). این الگوهای دوبعدی، در یافتن مسیرهای بهینهٔ شهری و الگوهای ترافیکی کاربرد داشت. اما آزمایش رشته‌های خیس توانست الگویی سه‌بعدی از مسیرهای بهینه ارائه دهد.

• آزمایش رشته‌های خیس

در این آزمایش ابتدا نقاط تکیه‌گاهی یا گره‌ها مشخص شده و بین آنها رشته‌هایی از نخ بسته می‌شود که طول هر کدام از رشته‌ها معادل هشت درصد بیشتر از فاصلهٔ مستقیم بین گره‌ها است. پس رشته‌ها کاملاً کشیده نبوده و خیز دارند. البته این خیز یا ازدیاد طول به‌دلایلی می‌تواند از این عدد مقداری کمتر یا بیشتر باشد و همین عامل به رشته‌ها انطعاف و امکان حرکت می‌دهد. در مرحلهٔ بعد سیستم، به‌آرامی، در محلولی از آب و صابون یا آب و نشاسته فرو برده می‌شود و بیرون می‌آید. نیروی کشش سطحی محلول موجب چسبیدن رشته‌های نخ به یکدیگر شده و آرایشی بهینه پدیدار می‌شود. از آنجاکه مسیرها در تمام جهات وجود دارند، ادغام‌ها و چسبیدن رشته‌ها نیز محدود به یک جهت نیست (Spuybroek, 2005). اما وجه تمایز آزمایش رشته‌های خیس و دو آزمایش دیگر اتو (مدل معلق و رشته‌های خشک)، در بهینه‌یابی ساختارهای درختی، امکان بهینه‌یابی طول شاخه‌ها است. طول شاخه‌ها در مدل معلق از پیش تعیین می‌شد و در مدل رشته‌های خشک در حین آزمایش با جابه‌جایی بست‌ها توسط فرد قابل‌تنظیم بود (تصویر ۲). در واقع حاصل این دو آزمایش بهینه‌یابی زوایای شاخه‌ها و نه طول‌های آنها بوده است. آزمایش رشته‌های خیس مشابه آزمایش فیلم صابون می‌تواند مسیرها را در هم ادغام کند، تا مجموعه‌ای از مسیرهای کوتاه به‌دست آید.



تصویر ۱. روند محاسبه و برداشت طرح غرفهٔ آلمان در نمایشگاه مونترال ۱۹۶۷، توسط تیم فرای اتو. مأخذ: Whitehead, 2016.

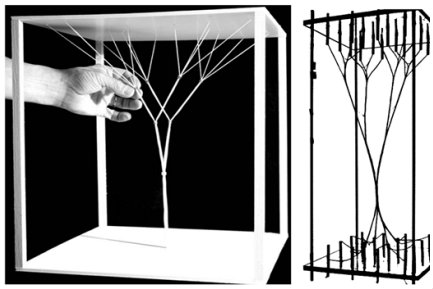
بحث

• فرم‌یابی دیجیتال

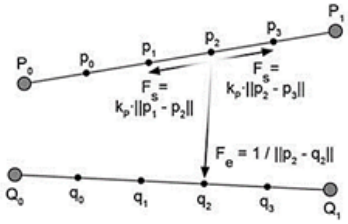
در همان دانشگاه اشتوتگارت، در انستیتو مکانیک سازه‌ایی، برنامه‌هایی رایانه‌ای نیز برای طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های درختی، تهیه شد. اما هیچکدام نمی‌توانست نتایج آزمایش رشته‌های خیس را شبیه سازی کند (Von Buelow, 2007). چرا که الگوریتم‌های ریاضی مبنای کار آن برنامه‌ها بود و نیروهای داخلی شکل‌دهندهٔ ساختار در برنامه لحاظ نشده بود.

• پیداکردن الگوریتم مناسب

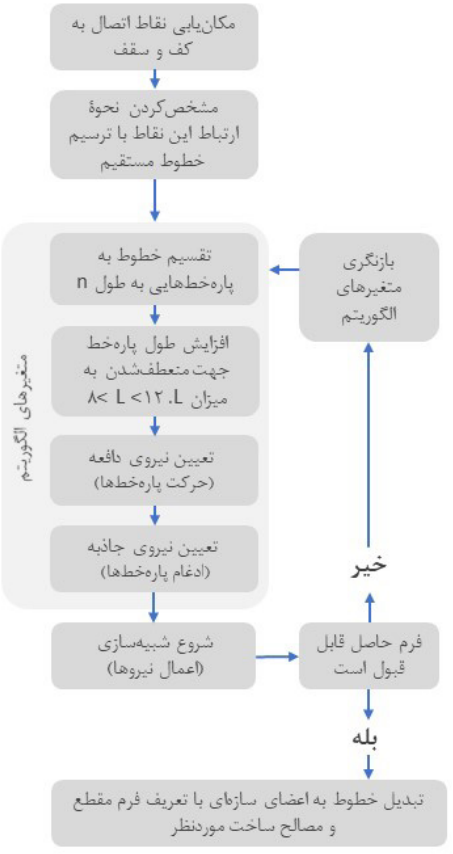
سازوکار برنامه‌های رایانه‌ای براساس الگوریتم‌ها است. پس اولین قدم در طراحی ابزار دیجیتال طراحی الگوریتم آن است. برخلاف الگوریتم‌های ریاضی که براساس فرمول‌های ریاضیاتی هستند و خروجی آنی دارند، الگوریتم‌های فیزیکی براساس رفتار مواد و قوانین فیزیک کار می‌کنند و توان شبیه‌سازی یک فرایند را دارند (Lopes et al., 2014). در علم نمایش داده‌ها[۲۱]، الگوریتم‌هایی با عملکردی مشابه آزمایش رشته‌های خیس وجود دارد. در این علم گراف‌ها که متشکل از خط و گره هستند برای بیان تصویری مجموعه‌ای از داده‌ها و نحوهٔ ارتباطشان با هم، استفاده می‌شوند. اما اگر تعداد گره‌ها و خطوط زیاد باشد، دیگر تشخیص گره‌ها و نحوهٔ ارتباط آنها کار ساده‌ای نیست و در چنین حالتی تصویری درهم ریخته وجود دارد که گویا نیست. راه‌حل این مشکل در تبدیل خطوط صاف شبکه به خطوط منحنی است (Holten & Van Wijk, 2009)، همچون رشته‌های نخی در ظرف آب که به یکدیگر می‌چسبند تا پیچیدگی سیستم حل شود و ساختار بهینه‌ای شکل گیرد. علم نمایش داده‌ها از سه الگوریتم استفاده می‌کند: الگوریتم هندسه‌محور انحنادادن به خطوط(GBEB)[۲۲] (Cui et al., 2008)، سیستم سلسله‌مراتبی انحنادادن به خطوط(HEB)[۲۳] (Holten, 2006) یا انحنادادن به خطوط با نیرو(FDEB)[۲۴]. دو الگوریتم اول، الگوریتم‌های ریاضی هستند، اما الگوریتم FDEB به‌دلیل حضور نیروها ، فیزیکی محسوب می‌شود. در این الگوریتم هر کدام از خطوط مستقیم بین گره‌ها به چندین قسمت تقسیم می‌شود، این تقسیمات سیستم را به اجزای کوچک‌تری تبدیل می‌کند، تا انعطاف لازم برای پاسخ‌گویی به نیروهای اعمالی فراهم شود (تصویر ۳). در واقع خطوط اولیه در این روش به شکل فنر درنظر گرفته می‌شود. رفتار فنرمانند با افزایش طول پاره‌خط‌های تشکیل‌دهندهٔ هر خط محقق می‌شود. برای تغییرات طول هر پاره‌خط دو عامل وجود دارد، اول نیرویی که بین گره‌ها و نقاط حاصل از تقسیم‌بندی، دافعه ایجاد کند و طول پاره‌خط‌ها را افزایش دهد و دوم ضریبی که میزان صلبیت فنر و درواقع میزان تغییر طول را کنترل کند. پس از این مرحله نیاز است پاره‌خط‌هایی که حال به‌واسطهٔ رفتار فنرمانند طول بیشتری پیدا کردند، به سمت پاره‌خط‌های متناظر در خطوط همسایگی خود جذب و در هم ذوب شوند، تا خطوط



تصویر ۲. راست: مدل رشته‌های خیس، چپ: مدل رشته‌های خشک. مأخذ: Von Buelow, 2007.



تصویر ۳. تقسیم خطوط مستقیم به چندین قسمت. نقاط به‌دست‌آمده همان اجزای تشکیل‌دهندهٔ سیستم هستند. Fs: نیروی دافعه بین نقاط در هر خط، Fe: نیروی جاذبه بین نقاط متناظر در یک دستهٔ خطوط، Kp: ضریبی است که میزان صلبیت خطوط را در تبدیل‌شدن به فنر کنترل می‌کند. مأخذ: Holten & Van Wijk, 2009.



تصویر ۴. نمودار روند جریان فرم‌یابی براساس الگوریتم رشته‌های خیس. مأخذ: نگارندگان.

بهینهٔ مطلوب شکل گیرد. روند کلی فرم‌یابی ساختارهای درختی بر این‌اساس را می‌توان به‌طور ساده در (تصویر ۴) مشاهده کرد.

• طراحی ابزار دیجیتال

نحوهٔ رفتار سیستم در مدل رشته‌های خیس بسیار مشابه الگوریتم FDEB است. پس می‌توان آن را اساس الگوریتم شبیه‌سازی

آزمایش رشته‌های خیس قرار داد. مراحل طراحی الگوریتم مدل رشته‌های خیس در افزونهٔ گرسهاپر به‌ترتیب زیر است:

- بخش اول: گراف اولیه که شامل نقاط تکیه‌گاهی و خطوط صافی که بیانگر نحوهٔ ارتباط این نقاط با یکدیگر هستند.
- بخش دوم: تقسیم‌بندی خطوط صاف به پاره‌خط‌های کوتاه‌تر، که می‌تواند براساس تعداد تقسیمات یا طول تقسیمات باشد.

بهتر است این تقسیم‌بندی براساس طول پاره‌خط‌های حاصل، انجام شود، چرا که اگر خطوط هم‌اندازه نباشند، خطوط کوتاه‌تر پاره‌خط‌های بسیار کوچک‌تری به نسبت خطوط بلندتر خواهد داشت و این ممکن است در برخی مسائل باعث بروز خطا در جواب شود.

- بخش سوم: پس از تقسیم‌بندی و تولید پاره‌خط‌های جدید، نوبت به تبدیل کردن خطوط به فنر می‌رسد، که این کار با افزایش طول پاره‌خط‌های جدید و با اعمال نیروی دافعه از نقاط حاصل از تقسیم انجام می‌شود. این افزایش طول بین ۸ تا ۱۲ درصد طول اصلی پاره‌خط‌ها می‌تواند متغیر بوده و این تغییر مقدار بر روی فرم نهایی تأثیرگذار است.
- بخش چهارم: بعد از تبدیل خطوط به فنر، باید نیروی لازم برای جذب پاره‌خط‌ها به یکدیگر را تولید کرد. این نیرو بین تک‌تک نقاط حاصل از تقسیم‌بندی مرحلهٔ دو، به‌صورت متناظر اعمال خواهد شد. کنترل شدت این نیرو مهم است، چرا که با تغییر آن نتایج مختلفی به‌دست می‌آید.
- بخش پنجم: در این بخش، موتور فیزیکی شبیه‌سازی کانگورو[۲۵]، علاوه‌بر نیروهای سیستم، که همان نیروی دافعه بین فنرها و نیز نیروی جاذبه است، نقاط تکیه‌گاهی و هندسهٔ کلی سیستم را به‌عنوان ورودی می‌پذیرد. با انجام شبیه‌سازی به‌صورت تصویری متحرک، نتیجهٔ نهایی بعد از چند ثانیه نمایان می‌شود. الگوریتم و مراحل مختلف آن در تصاویر ۵ و ۶ قابل‌مشاهده است.

• بررسی پاسخگویی ابزار دیجیتال

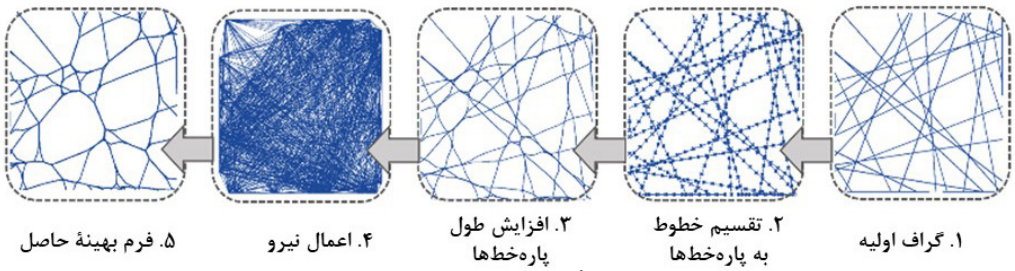
قبل از طراحی ساختار درختی به‌وسیلهٔ این الگوریتم، از آن برای فرم‌یابی و بهینه‌یابی دو مثال (دوبعدی و سه‌بعدی) استفاده شد تا صحت عملکرد و جوابگویی آن اثبات شود.

- مسئلهٔ اشتاینر[۲۶]

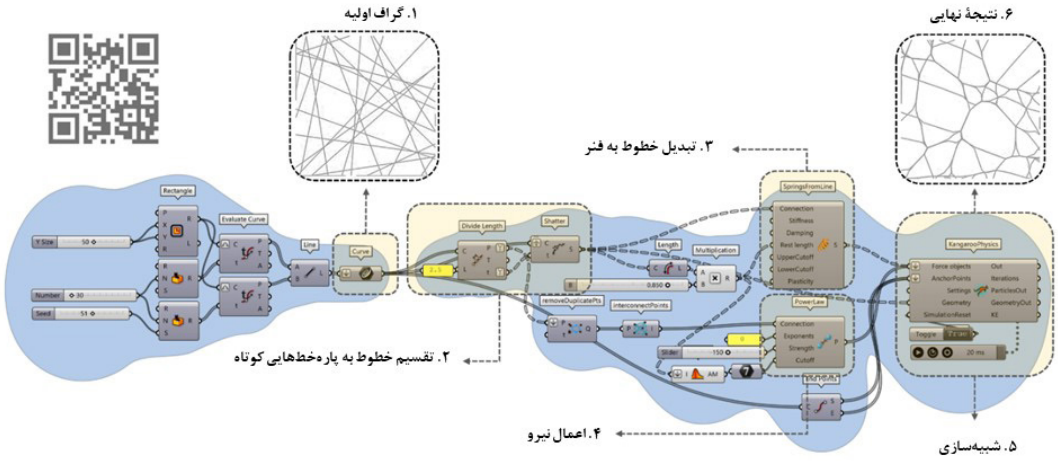
الگوریتم ریاضی اشتاینر، برای پیداکردن مسیری بهینه بین چندین نقطه، مثل مسیر تردد بهینه در یک سایت شهری، استفاده می‌شود. این مسیر بهینه هیچ‌کدام از خطوط اولیه نیست، بلکه خطی منحنی و جدید خواهد بود. الگوریتم اشتاینر را می‌توان به وسیلهٔ حباب صابون و دو صفحهٔ شفاف که در چند نقطه به هم متصل شده، نیز اثبات کرد (Lopes et al., 2014). همانطور که در تصویر ۷ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از مدل حباب صابون و الگوریتم رشته‌های خیس یکسان است. اما این یک مثال دوبعدی است و باید پاسخگویی الگوریتم در مثال سه‌بعدی نیز امتحان شود.

- ستون‌های درختی (تاق‌های دندانه‌دار) گوتیک

طاق‌های دندانه‌داری که سقف سالن کلیسا وستمینیستر[۲۷] را نگه داشته‌اند نیز نوعی از ستون‌های درختی هستند. پس تلاش شد تا این طاق‌ها نیز به وسیلهٔ الگوریتم رشته‌های خیس، فرم‌یابی شود، تا صحت پاسخگویی این الگوریتم در سه بُعد نیز آزموده شود (تصویر ۸).



تصویر ۵. نمایش تغییر فرم در هر یک از مراحل الگوریتم رشته‌های خیس. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۶. الگوریتم رشته‌های خیس در افزونهٔ گرسهاپر، به‌همراه بارکد نمایش شبیه سازی. مأخذ: نگارندگان.

- فرم‌یابی دیجیتال سازه‌های درختی

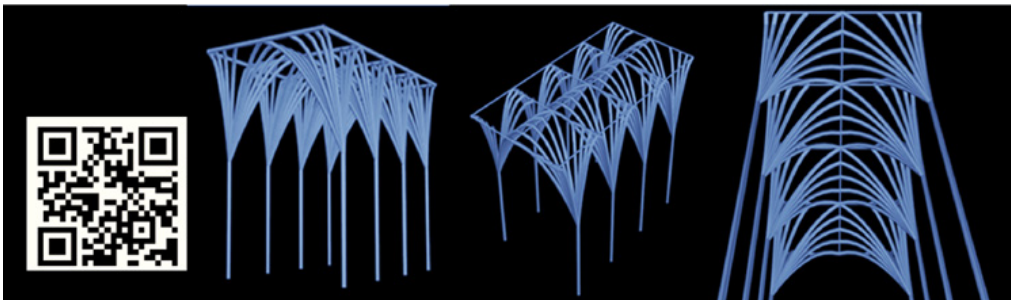
ستون‌های درختی با گسترده‌کردن شاخه‌های خود در تمام سقف بار را به‌طور متوازن‌تری به پایه‌ها منتقل می‌کنند و به‌همین‌خاطر ابعاد ظریف‌تری دارند. اما باید تقسیم‌بندی درستی برای نحوهٔ ارتباط نقاط اتصال سقف به هر یک از تکیه‌گاه‌ها انجام شود. به‌علاوه، محل اتصال شاخه‌ها به سقف نیز اهمیت بالایی دارد. در این طرح چهار نقطهٔ تکیه‌گاهی روی زمین مفروض شد و سقف نیز به چهار بخش تقسیم شد که در هر کدام ۱۰ نقطهٔ اتصال به‌صورت تصادفی درنظر گرفته شد، که بعد به‌وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک مکان درست آنها در هر بخش بهینه‌یابی شد. حال با ترسیم خطوط بین نقاط هر یک از قسمت‌های سقف به نقطهٔ تکیه‌گاهی متناظرش، چهار دسته خطوط مستقیم شکل می‌گیرد که فضای زیادی را اشغال کردند. پس نوبت به بهینه‌سازی آرایش این خطوط به‌وسیلهٔ الگوریتم مذکور است (تصویر ۹). به‌این‌ترتیب در عرض چند ثانیه فرمی پیچیده که قابل‌پیش‌بینی قبلی نیست ظاهر می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد در این الگوریتم، متغیرهایی چون میزان افزایش طول پاره‌خط‌ها پس از تقسیم‌بندی خطوط و شدت نیروی جاذبه‌ای که برحسب فاصله، بین نقاط متناظر اعمال می‌شود، در بهینه‌یابی این قبیل از سازه‌ها نقش مهمی دارد. اما متاسفانه در این پژوهش ارتباطی مشخص برای تنظیم درست این ضریب در الگوریتم یافت نشد. اما اگر بتوان سرعت شبیه‌سازی رایانه را با طراحی الگوریتمی بهینه‌تر افزایش داد، می‌توان با استفاده از بهینه‌یابی چند هدفه این مقادیر را نیز بسته به هر طرح (تصویر ۱۰) بهینه کرد و به تبع آن فرم‌های خالص‌تر و بهینه‌تری فرم‌یابی کرد. چرا که به‌طور مثال اگر میزان نیرو جاذبه بین نقاط، که موجب ادغام خطوط می‌شود کم باشد، تنش‌های خمشی جدی در سازه پدیدار می‌شود. زیادبودن این نیرو نیز منجر به افقی‌تر شدن شاخه‌ها و بروز رفتار خمشی و تیر مانند در ساختار خواهد شد. لازم به ذکر است که الگوریتم مذکور صرفاً توان بهینه‌یابی امتداد درست ساختارهای درختی را دارد و قطر و تغییر قطر اعضای سازه‌ای در این مرحله قابل‌فرم‌یابی نیست و این‌ها موضوع پژوهش‌های بعدی می‌تواند باشد.

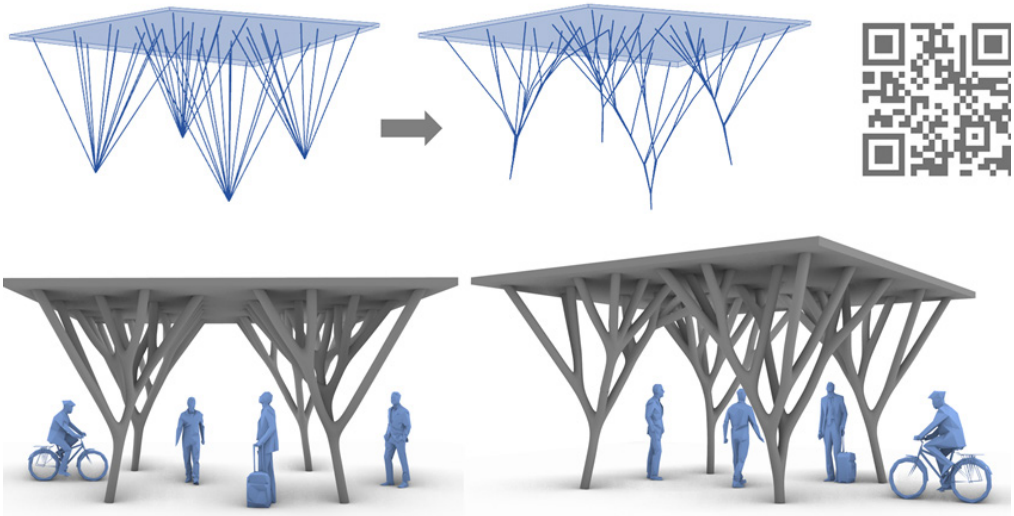
نتیجه‌گیری

در الگوریتم رشته‌های خیس، نیروها اجزای سیستم را برای

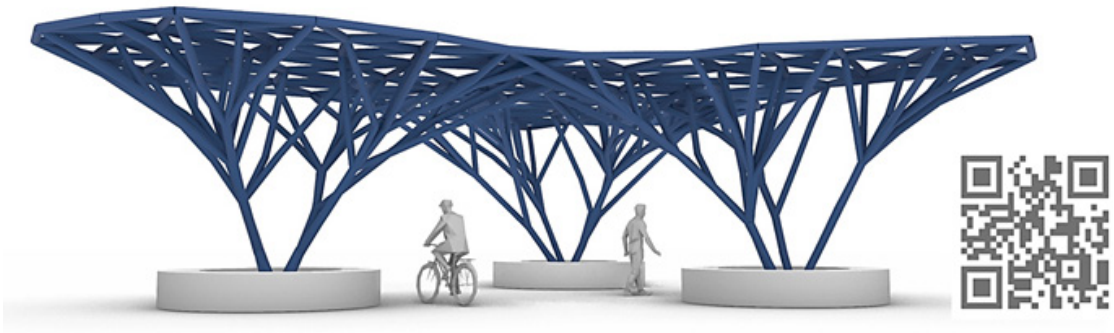
تصویر ۷. از چپ: تمام مسیرهای مستقیم ممکن، مسیر بهینه به کمک فرم‌یابی فیزیکی رشته‌های خیس در گرسهاپر و بارکد شبیه‌سازی آن. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۸. فرم‌یابی تاق‌های دندانه‌دار کلیسا وستمینیستر به وسیلهٔ الگوریتم رشته‌های خیس در گرسهاپر، به‌همراه بارکد شبیه‌سازی. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۹. فرم‌یابی سازهٔ درختی با استفاده از فرم‌یابی دیجیتال بر پایهٔ مدل رشته‌های خیس، به همراه بارکد شبیه‌سازی. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۱۰. فرم دیگری از سازهٔ درختی که به‌وسیله این الگوریتم طراحی شده است، به‌همراه بارکد شبیه‌سازی. مأخذ نگارندگان.

رسیدن به حداقل آشفتگی و حداقل مصرف مادهٔ بهینه می‌کنند. این ویژگی در فرم‌یابی ساختارهای درختی به‌خصوص انواع پیچیده آن می‌تواند بسیار مفید واقع شود. استفاده از این الگوریتم‌ها در روند طراحی، رایانه را به یک آزمایشگاه مجازی تبدیل می‌کند. آزمایشگاهی که سرعت انجام آزمایش‌های آن بیشتر از نوع حقیقی بوده و هزینه و زمان کمتری از طراح طلب می‌کند. هرچند ابزار دیجیتال معرفی‌شده در این پژوهش محدودیت‌هایی دارد و ممکن است نیروها در فرم‌های درختی حاصل از این الگوریتم خالص نباشند یا ضخامت المان‌های سازه‌ایی از این طریق مشخص نشود، ولی می‌تواند فرایند طراحی ساختارهای پیچیدهٔ درختی را تسهیل کند.

پی‌نوشت‌ها

۱۱. Frei Otto
۲. Grasshopper
۳. Rhino
۴. Biomimetic
۵. Biomimicry
۶. Self-Organization
۷. Hanging Chain
۸. Antoni Gaudí, 1852-1926
۹. Felix Candela, 1910-1997
۱۰. Heinz Isler, 1926-2009
۱۱. Sergio Musmeci, 1926-1981
۱۲. Robert Hooke, 1635-1703
۱۳. Graphic Statics
۱۴. Simon Stevin's, 1548-1602
۱۵. Bic Standard
۱۶. Chapel of King's College, Cambridge, 1531
۱۷. Art Nouveau, 1890-1920
۱۸. Grand Palais, Paris, 1900
۱۹. damper
۲۰. Optimized Path Systems
۲۱. Data visualization
۲۲. Geometry-Based Edge Bundling: GBEB
۲۳. Hierarchical Edge Bundles: HEB
۲۴. Force-Directed Edge Bundling: FDEB
۲۵. Kangaroo
۲۶. Steiner
۲۷. Westminster Abbey

فهرست منابع

• Ahmeti, F. (2007). *Efficiency of Lightweight Structural Forms: The Case of Tree-like Structures-A comparative Structural Analysis* (Unpublished master's thesis in Science). Building Science & Technology, Vienna University of Technology, Austria. https://papers.cumincad.org/data/works/att/bsct_ahmeti.content.pdf .16.

• Banzhaf, W. (2003). Self-Organizing Systems. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Academic Press. 590.

• Banzhaf, W. (2009). Self-organizing Systems. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springe, 8040–8050.

• Block, P., DeJong, M. & Ochsendorf, J. (2006). As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches. *Nexus Network Journal, 8*(2), 13–24. https://doi.org/10.1007/s00004-006-0015-9

• Von Buelow, P. (2007). A Geometric Comparison Of Branching Structures In Tension And Compression Versus Minimal Paths. *IASS Conference: International Association of Shell and Spatial Structures*, Venice, Italy. https://www.academia.edu/6725876/A.

• Burkhardt, B. (2016). Natural structures - the research of Frei Otto in natural sciences. *International Journal of Space Structures, 31*(1), 9. https://doi.org/10.1177/0266351116642060

• Camazine, S., Deneubourg, J.-L., Franks, N. R., Sneyd, J., Theraula, G. & Bonabeau, E., (2020). *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton University Press.

• Cui, W., Zhou, H., Qu, H., Chung Wong, P. & Li, X. (2008). Geometry-Based Edge Clustering for Graph Visualization: IEEE. *Transaction on Visualization and Computer Graphics, 14*(6), 84-1277. http://.doi.org/10.1109/TVCG.2008.135

• Dixit, S., Stefańska, A. & Musiuk, A. (2020). Architectural form finding in arboreal supporting structure optimisation. *Ain Shams Engineering-Journal, 12*(2), 2321-2329. doi:https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.022.

• Fabricius, D. (2016). Architecture before architecture: Frei Otto's 'Deep History'. *The Journal of Architecture, 21*(8), 1253-1273. https://doi.org/10.1080/13602365.2016.1254667

• Holten, D. (2006). Hierarchical Edge Bundles: Visualization of Adjacency Relations in Hierarchical Data. *The 11th Eurographics/ IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, 15*(5), 741-748. http://dx.doi.org/10.1109/TVCG.2006.147

• Holten, D. & van Wijk, J.J. (2009). Force-Directed Edge Bundling for Graph Visualization. *The 11th Eurographics/ IEEE-VGTC*

Symposium on Visualization, 28(3), 983-990. https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2009.01450.x

• Isaacs, A.J. (2008). *Self-Organizational Architecture: Design Through Form-Finding Methods* (Unpublished master thesis's in Architecture). The Academic Faculty, Georgia Institute of Technology.

• Karsenti, E. (2008). Self-organization in cell biology: a brief history. *Nature Reviews Molecular Cell Biology, 9*(3), 255-262. https://doi.org/10.1038/nrm2357

• Kilian, A. (2004). Linking Hanging Chain Models to Fabrication: *The 24th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*. ACADIA. https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2004.110

• Kovacic, I., Miodrag, Z. & Dragi, R. (2018). Sympodial tree-like structures: from small to large amplitude vibrations. *Bioinspiration & Biomimetics, 13*(2), 026002–026002. https://doi.org/10.1088/1748-3190/aa9d1c

• Li, Q., Su, Y., Wu, Y., Borgart, A. & Rots, J. G. (2017). Form-finding of shell structures generated from physical models. *International Journal of Space Structures*, *32*(3), 11–33. https://doi.org/10.1177/0266351117696577.

• Lopes, J.V., Paio, A.C. & Sousa, J.P. (2014). Parametric Urban Models Based on Frei Otto's Generative Form-Finding Processes. *Proceedings of the 19th Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*, 595-604. https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2014.595

• Mattheck, G. C. (1991). *Trees: The Mechanical Design*. Springer-Verlag. https://books.google.com/books/about/Trees.html?id=i8PqCAAAQBAJ

• Md Rian, I., & Sassone, M. (2014). Tree-inspired dendriforms and fractal-like branching structures in architecture: A brief historical overview. *Frontiers of Architectural Research, 3*(3), 298–323. https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.03.006

• Otto, F. & Bodo, R. (2001). *Finding form: towards an architecture of the minimal*. Edition Axel Menges.

• Pathak, SH. (2019). Biomimicry: (Innovation Inspired by Nature). *International Journal of New Technology and Research, 5*(6). https://doi.org/10.31871/ijntr.5.6.17

• Spuybroek, L. (2005). The Structure of Vagueness. *Textile, 3*(1), 6-19. https://doi.org/10.2752/147597505778052620

• Veenendaal, D. & Block, P. (2012). An overview and comparison of structural form finding methods for general networks. *International Journal of Solids and Structures*, *49*(15), 3741-3753. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.08.008

• Whitehead, R. (2016). Model Behavior: The Evolving Use of Physical Prototypes in Structural Shell Design, 1959-1974. In R. Corser & Sh. Haar (eds.), *Shaping new knoeledges*. ACSA , 114. https://www.acsa-arch.org/chapter/model-behavior-the-evolvinguse-of-physical-prototypes-instructural-shell-design-1959-1974/

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:
علی‌بابای لواسانی، مونا؛ متینی، محمدرضا و خاقانی، سعید. (۱۴۰۳). فرم‌یابی دیجیتال سازه‌های درختی براساس آزمایش رشته‌های خیس. *باغ نظر*، ۲۱ (۱۳۴)، ۳۷-۴۴.

DOI: 10.22034/BAGH.2024.429271.5549
URL: https://www.bagh-sj.com/article_198609.html