آنالیز مصالح مختلف در بهبود عملکرد سازه ای پوسته های خم فعال با تحلیل یک نمونه انتخابی از پوسته های مشبک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲ تاریخ پذیریش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸

سحر صادقی[۱] ، مرتضی رهبر[۲]** ، کتایون تقی زاده آذری[۳] ، حسین ذبیحی[۴]

[۱] دانشجوی دکتری تخصصی معماری، گروه معماری، واحد تفرش، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

s_sadeghi7025@yahoo.com

[۲] استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

**نویسنده مسئول: rahbarm@iust.ac.ir

۰۹۱۲۲۱۹۴۳۶۸ -۰۲۱۷۳۲۲۸۲۰۵

تهران، نارمک، دانشگاه علم وصنعت ایران

[۳] دانشیار، گروه معماری، دانشکده معماری، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

ktaghizad@ut.ac.ir

[۴] دانشیار، گروه معماری، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران.

h.zabihi@srbiau.ac.ir

چکیده

سازه های پوسته ای مشبک یکی از انواع سازه های خم فعال است که از شبکه ای از عناصر پیوسته با پوسته های منحنی دوگانه تشکیل شده است. لذا هدف از این مقاله تاثیر مصالح مختلف با انتخاب یک نمونه از پوسته های مشبک در بهبود عملکرد سازه ای آنها میباشد که بدین منظور ابتدا هندسه پوسته انتخابی به کمک برنامه گرسهاپر مدلسازی شده و سپس با استفاده از نرم افزار مدلسازی فیزیک کانگرو و کارامبا در یک مرحله تکرارشونده هم زمان، به تحلیل ملاحظات مکانیکی و هندسی پرداخته شده است. در نمونه منتخب با کمک روش کمی تحلیلی در نرم افزار کارامبا محاسبه تنش ها انجام می شود و سپس با درنظر گرفتن متغیر مصالح با ضخامت و ابعاد یکسان که دارای مقطع مستطیلی است ، به بررسی میزان جابه جایی در تحمل نیروها و تنش های داخلی که به دلیل تغییر وزن سازه به وجود آمده و به طبع آن میزان مدول یانگ به حداقل میانگین خود رسیده مراحل طی شده است .بدین ترتیب به این نتیجه می توان دست یافت که از بین شش خانواده مختلف مصالح نظیر: استیل، چوب، بتن، فولاد، کامپوزیت و پلیمرها بسته به نوع دسترسی و امکانات در هر کشور ، سازه های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و سازه های چوبی بهترین عملکرد سازه ای را برای ساخت پوسته های مشبک دارا می باشند.

کلید واژه ها: مصالح، خم فعال، پوسته مشبک، هندسه، مدلسازی الگوریتمیک.

۱- مقدمه

امروزه طراحی با استفاده از دانش سازه به معنای انتظام نیروها و کار با آنها میسر میگردد و معماری نتیجه تعامل نیروهای گوناگون داخلی و خارجی میباشد که سبب شکل گیری اندازه ها، ضخامت ها و شکل عناصر سازه ای میشود که از مصالح مختلف تشکیل شده و تحت تأثیر دستگاه های گوناگون نیرویی قرار گرفته است و دیدگاه های مختلفی در زمینه ارتباط سازه و معماری بیان شده است. اتو واگنر (۱۹۰۰) عقیده داشت: که معمار اگر در خلق فرم هنری، طراحی را از سازه شروع نکند، طرحی نامشخص و غیرقابل فهم و درنتیجه ناپایدارارائه خواهد نمود. ویتروویوس نیز معماری را اثری معمارانه که واجد سه ویژگی زیبایی، ایستایی و سودمندی میباشد تعریف کرده است. بر پای این تعریف، ایستایی از جمله ارکان معماری وابسته به سازه و ساختار است و قاعدتا ساختار یک ساختمان بر پایه فرمی و کیفیت فضایی است. (Otto 2005؛ Chilton 2000)

سازه های منحنی معماری با سابقه ای کهن درکنار ویژگی های زیبایی شناختی، فواید عملکردی بسیاری از جمله وزن کم، ساخت آسان، پایداری و عملکرد بالای سازه ای را دارا میباشند. روش های فرم یابی آنها در گذشته محدود به روش های فیزیکی و محاسباتی بوده اما خوشبختانه امروزه با پیشرفت کامپیوتر و قابلیت های آن در تولید اشکال پیچیده فرصت های جدیدی را پیشروی معماران قرار داده است. (Pillwein et al, 2020).

سازه‌های پوسته‌ای به عنوان روشی کارآمد برای ساخت ساختمان‌های سازگار با محیط زیست مناسب هستند و نیازمند کار دستی گسترده برای ساخت اشکال منحنی مضاعف در زمان گرانی مصالح نسبت به کار بوده و به عنوان پوسته‌های بتنی یا بنایی در دوره(۱۹۲۵–۱۹۷۵)محبوب بوده اند. توسعه اخیر که در طراحی و تولید دیجیتال که با تمرکز بر کاهش استفاده از مصالح افزایش یافته، میتواند به سازه های پوسته ای مشبک که نوعی از پوسته های دو انحنا هستند و سیستم سازه‌ای آنها به جای یک سطح، شبکه ای از اعضای خطی که اغلب شامل اعضای مستقیم متصل در گره‌ها است، کمک کند.(Steinar Hillersøy Dyvik, 2021)

مهندسان معمار در قرن جدید بر تعادل بین فرم، هزینه و کارایی سازه متمرکز بوده اند و باتوجه به اینکه عناصر مستقیم از نظر عملکرد ساختاری، کارایی کمتری نسبت به عناصر منحنی دارند. پس سازه های پوسته ای مشبک با انحنایی مضاعفی، بهترین عملکرد سازه ای را در برخواهند داشت و پوسته مشبک الاستیک راه حلی برای ترکیب انحنای مضاعف و سهولت نصب و جز سازه های خم فعال به شمار میرود. این سازه ها میتوانند از هر نوع ماده ای نظیر فولاد، آلومینیوم، چوب و کامپوزیت ساخته شده و به طورکلی از عناصر مثلثی یا چهار گوش تشکیل شده اند. به منظور اجتناب از این اتصالات پیچیده، یک فرآیند نصب بسیار خاص با استفاده از قابلیت خمش اجزای باریک ایجاد می شود، بدین صورت که ابتدا دو لایه از تیرهای طولانی پیوسته روی زمین به هم چسبانده و سپس شبکه به دست آمده که فاقد استحکام برشی کافی است، امکان تغییر شکل های بزرگ در فضا را فراهم میکند و این شبکه با خمش به صورت الاستیک تغییر شکل میدهد تا شکل موردنظر به دست آید و در نهایت سخت شود.

۲- پیشینه تحقیق

ایده سازه های پوسته ای شبکه ای اولین بار توسط شان خو برای طراحی نمایشگاه پان روشن در سال ۱۹۸۶ مطرح شد (2020, Pillwein et al) پس از وی فرای اتو مفهوم پوسته‌های شبکه‌ای را توسعه داد و آن‌ها را با روش مدل‌سازی فونیکولار طراحی کرد و از شبکه مشبک مساوی از تیرهای چوبی خم شده به شکل برنامه‌ریزی‌شده استفاده کرد. اوتو در(۱۹۵۰)به پوسته های سبک وزن که میتوانستند با استفاده از اصل هوک و معکوس کردن توری آویزان ساخته شوند، علاقمند شد و در سال(۱۹۷۵) پروژه مانهم مولتیهال را براین اساس طراحی کرد. (Liddell, 2015) کاربری این سازه ها که هنوز نیز پابرجا هستند به صورت موقت است. تنها چند نمونه سازه پوسته ای مشبک با روش خم فعال ساخته شده اند که معروف ترین آنها عبارتند از: موزه داونلند و پاویون ژاپنی برای نمایشگاه هانوفر۲۰۰۰ و کلیسای جامع کرتیل که از شبکه اولیه مسطح ساخته شده است.

طبق گفته لیزا ژاردین، رابرت هوک از این روش برای نشان دادن نحوه عملکرد گنبد سنت پل به کریستوفررن استفاده کرد. روش فرم یابی، روش ساخت و سازی است که با استفاده از یک شبکه مشبک مساوی مربعی از تیرهای چوبی یا میله‌های فولادی نازک که به راحتی به شکل خمیده در می آیند را میتوان با تغییر شکل مربع های شبکه به شکل لوزی به یک سطح منحنی مضاعف قالب ریزی کرد.

در سال(۱۹۶۲) اتو با تعدادی از دانشجویان دانشگاه برکلی، گنبدی آزمایشی را با استفاده از میله های فولادی بر روی چهار نقطه ساخت و بعداً در همان سال او یک سازه چوبی آزمایشی در اسن بر روی پلانی فوق بیضوی ۱۵ × ۱۵ متر نیز ساخت. در سازه دو سالن کوچک پوسته ای مشبک در چادر مونترال اکسپو ۶۷، مش ها در آلمان پیش ساخته شده و به صورت بسته های تاشده به کانادا فرستاده شده و در آنجا باز و نصب شده بودند. شبکه ها با ورق های تخته سه لا نازک پوشیده شده بودند تا محفظه ها را تشکیل دهند. مهندسان برای ساخت سازه ای با استحکام بالا با فقدان دانشی در مورد نحوه عملکرد ساختار شبکه مواجه بودند که برای حل آن بلافاصله در سه جبهه شروع به کار کردند:

الف) بررسی بارهای طراحی

ب) مطالعات روی پوسته و محاسبات دستی روی کمانش پوسته

ج) تست مدل ومحاسبات دستی برای بدست آوردن تقریبی از نیروهای عضو

با پیشرفت علم، محاسبات دستی جای خود را به مدل‌سازی رایانه‌ای داد تا ارزیابی دقیق‌تری از بار کمانشی انجام شود. اولین نمونه سازه های پوسته ای توسط گائودی برای کلیسای کلونیا گوئل طراحی شد. وی از روش برعکس کردن منحنی زنجیرواره برای فرم یابی به روش فیزیکی استفاده کرد. به این صورت که با استفاده از کابل ها و کیسه های شن، وزن کلیسا را با بهره گیری از قانون هوک و منحنی های طنابی کششی که در حالت برعکس نیز در فشاری ترین حالت عمل خواهند کرد، در ابعاد واقعی مدلسازی کرد. (Jiang , 2015)

فیلیکس کاندلا باتوجه به علاقه بسیار زیاد به ارائه ساختار های ریاضی در فرم یابی معماری به عنوان یکی از چهره های سرشناس در به کارگیری پوسته های سهموی هذلولی دارای دو انحنای مضاعف در معماری به حساب می آید. وی در طرح های خود به جای خلق فرم های بی قاعده به سمت فرم هایی میرفت که به بهترین شکل، نیروهای وارده را منتقل کنند.(مور، ۱۳۸۷)

براساس این پیشینه آزمایشگاه ناویر در دهه گذشته با تمرکز بر استفاده از مصالح جدید و گسترش استفاده از متدهای ریاضی، مشغول تحقیق بر سازه های پوسته ای شبکه ای بوده است. آنها نتایج آزمایشاتشان را بر روی دو نمونه اولیه امتحان کردند و با به دست آوردن تجربیاتی، آنها را در سقف پروژه فستیوال سالیدیز اجرا کردند. در این سازه فرم یابی با تکیه بر متدهای محاسباتی و بهره گیری از کامپیوتر صورت گرفت. (Tayeb & Baverel Caron & Du Peloux , 2013)

فرانک گری و زاها حدید نیز با بهره گیری از رایانه به طراحی سازه های پوسته ای پرداختند و روش گری منطبق بر ساخت مدل فیزیکی از حجم و سپس انتقال مدل به رایانه با استفاده از اسکنرهای سه بعدی و سپس بهینه سازی فرم مورد نظر بر اساس پارامترهای مورد نظر است. (تقی زاده، ۱۳۹۲)

در پژوهشی دیگر(Kookalani & Aung، 2023) با وجود مزایای بسیار سازه های مشبک، تنها تعداد بسیار کمی از آنها در سراسر دنیا ساخته شده که دلیل این مسئله پیچیدگی های فرآیند فرم یابی آنهاست. از دیگر ویژگی های این سازه میتوان به وزن سبک، استفاده حداقل از مصالح، ایجاد ساختار دهانه بزرگ، کارایی سازه و ساخت اشکال ارگانیک و همچنین پتانسیل ساخت سریع و مقرون به صرفه بودن اشاره کرد و این سازه ها فضاهایی بدون ستون، حداکثر شفافیت، پایداری و سهولت در ساخت و ساز را دارند. پوسته های مشبک با توجه به پتانسیل معماری و عقلانیت هندسی ذاتی خود، برای ایجاد اشکال پیچیده مناسب هستند و از اینرو خواص پوسته مشبک به پیش تنش معادل شبکه دو بعدی که تغییر شکل داده است بستگی دارد.

در مقاله(Baverel, Douthe & Lefevre, 2015) سازه‌های مشبک الاستیک تقویت شده با الیاف شیشه، سازه های ظریفی هستند که در طراحی آن ها باید به مسئله جلوگیری از کمانش و خمش توجه شود، بدین منظور سازه نباید در معرض جابجایی های بزرگ قرار گیرد و از طرف دیگر سازه های منعطفتر در برابر نیروهای جانبی بهتر عمل میکنند. بنابراین میزان جابه جایی باید در بازه مشخصی محدود شود. به موازات آن گسترش سازه های سبک وزن پلیمرهای مسلح با الیاف از حدود (۱۹۵۰) مطرح شدند. موادی که نسبت منحصر به فردی

از مقاومت با سختی خمشی پایین را ارائه میدادند. این مصالح ابتدا در حوزه هایی مانند مهندسی هوافضا که هزینه طرح ومصالح در آن نقش ثانویه را بازی میکند، مورد توجه قرار گرفتند و پس از آن به حوزه های دیگر از جمله معماری گسترش یافتند. یکی از قدیمی ترین نمونه های بهره گیری از فایبر کربن ها درساختارهای تغییرپذیر خم شونده در صنعت هوافضا مربوط به دیرک ها و لوله های خم شونده در دهه ۶۰ میلادی میشود.

نخستین کاربرد پلیمرهای مسلح با الیاف شیشه، در" خانه آینده" از شرکت شیمیایی مونسانتو (۱۹۵۴) و فوتورو از سارونین درسال(۱۹۶۸) بود که هردو در ظاهر از تکنولوژی سطح بالایی برخوردار بودند، اما هنوز از روشهای دستی برای تولید ورقه های منحنی استفاده می کردند. پروژه گنبد چشم حشره باکمینستر فولر ساخته شده از پلیمر با الیاف شیشه نیز به جایگاهی نسبی در کاربرد معماری دست یافت.

۳- مبانی نظری

بهره گیری از مصالح انعطاف پذیر و الاستیک به جای مصالح سخت یا نرم، قابلیت های جدیدی را برای ساختارهای خم شونده ایجاد میکند که باعث شده این ساختارها با حداقل نیاز یا حتی حذف اعضای لولایی و یا غلتکی به تنهایی بتوانند تغییر فرم داده و بسیاری از حرکت های مختلف را برای سازه ممکن سازند. درواقع این گونه ساختارها نه آنقدر نرم و فرم پذیرند که برای حفظ فرم خود نیاز به سازه های جانبی داشته باشند و نه آنقدر سخت که برای تغییر فرم نیازمند عناصری لولایی یا غلطکی باشند. پوسته های مشبک خم فعال سازه هایی دارای پتانسیل توسعه برای ساخت سازه های آزاد هستند و مزایای متعددی را ارائه می دهند. این پوسته ها از شبکه ای از عناصر پیوسته در سراسر دهانه آن تشکیل شده که توسط اعضای مستقیم به یک تشک دو بعدی مونتاژ میشود که متعاقباً بصورت پوسته منحنی سه بعدی خم شده است. برخلاف پوسته های مشبک ساخته شده از اعضای گسسته، در این پوسته ها عناصر پیوسته را میتوان به راحتی با استفاده از گیره ها یا پیچ و مهره های یکسان متصل کرد و باید نسبت مدول یانگ به ظرفیت خمشی پایینی داشته باشد تا فرآیند تشکیل الاستیک بدون شکستگی را تسهیل کند.

پوسته های مشبک خم فعال میتوانند از دهانه های بزرگ با مقدار کمی مصالح به دلیل عملکرد پوسته استفاده کنند. همچنین آنها را میتوان یک گزینه طراحی پایدار برای دستیابی به سازه های سقفی بزرگ و با کیفیت معماری، به ویژه با چوب محلی به عنوان مصالح انتخابی در نظر گرفت. حتی اگر مزایای پوسته های مشبک خمیده الاستیک آشکار به نظر میرسد، اما تنها تعداد انگشت شماری سازه در مقیاس بزرگ از این نوع ساخته شده که دلیل این امر مشکلات فرآیند طراحی فاقد ابزارهای بصری است.(Mats Ander, 2015)

در بررسی سازه های پوسته ای مشبک، تنش های ناشی از خمش و ناپایداری های الاستیک در نظر گرفته میشوند که این ناپایداری به مدول یانگ بستگی دارد، به طوری که داشتن مدول یانگ پایین یک نقطه ضعف محسوب میشود و همیشه طراح سعی می کند سازه را بر اساس اصول و قاعده محاسبه کند. در طی سالیان گذشته بیشتر سازه های مشبک از چوب ساخته میشدند، زیرا تنها مصالح ساختمانی سنتی بود که تغییر شکل های بزرگ را بدون شکستگی خم میکرد.

امروزه کامپوزیت ها به عنوان یک نمونه مصالح کاربردهایی استثنایی دارند. اگرچه کیفیت خواص مکانیکی آن(چگالی کم، استحکام و مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی) است ولی مدول الاستیک نسبتا پایین آن یک نقطه ضعف در برابر فولاد محسوب میشود. برای استفاده از هر ویژگی مصالح کامپوزیت، باتوجه به مفاهیم ساختاری جدید در روش تجربی و سنتی ساخت پوسته مشبک، لازم است موارد زیررعایت شوند:(Lienhard et al, 2013)

الف- کرنش در حد الاستیک بالا برای اینکه بتوان المان را خم کرد و شکل منحنی به دست آورد.

ب- مدول یانگ بالا برای ایجاد سختی نهایی پوسته مشبک پس از مهاربندی.

ج- استفاده بهینه از ویژگی های مکانیکی مصالح.

د-اتصال ساده بین اجزای سازه.

ه- طراحی بهینه با توجه به کاربرد آن؛

و- هزینه مواد ارزان برای استفاده از اجزای موجود در صنعت.

استفاده از پروفیل های پیوسته تعداد اتصالات به تقاطع پروفیل های دارای جهت متفاوت را کاهش میدهد و دلیل اصلی استفاده از اعضای خمیده الاستیک در فرآیند مونتاژ و نصب سازه های مشبک نهفته است. در این سازه ها، شبکه ابتدائی مسطح به تدریج در زیر خم میشود و با تاثیر نیروهای خارجی بر آن انحنای بیشتری ایجاد میشود تا زمانی که به هندسه سطح مورد نظر دست پیدا کند. سپس لبه های شبکه با تکیه گاه ها یا تیرهای مرزی ثابت شده و مهاربندی مورب جهت حفظ هندسه مطلوب و تامین ظرفیت باربری سازه در صفحه ایجاد میشود. در طول فرآیند نصب هنگامی که عناصر مهاربندی شدند به عنوان یک پوسته با هم کار میکنند. این بدان معنی است که سختی سازه به طور قابل توجهی افزایش مییابد و خم فعال تیرها با سطوح منحنی که هندسه خود را بر روی تغییر شکل الاستیک عناصر مستقیم اولیه به دست می آورد، توصیف میکند.

مطابق جدول ۱ تنش خمشی در عناصر خم شده به مدول یانگ مصالح، ارتفاع مقطع و انحنا بستگی دارد که برای دستیابی به انحنای کافی، ارتفاع سطح مقطع و مدول یانگ باید کوچک باشد که به همین علت، سختی عناصر خمیده الاستیک کم است. سختی الاستیک یک عنصر ساختاری در پوسته مشبک به سطح مقطع، خواص مصالح و سیستم استاتیکی بستگی دارد، اما مستقل از تغییر شکل است و سختی هندسی به سیستم استاتیکی و بارهای وارده بر عناصر سازه بستگی دارد.

در سازه‌های پوسته ای، بارهای خارجی عمدتاً نیروهای محوری را القا میکنند و در حالت ایده‌آل لنگر خمشی بدون یا کمتر در عناصر را ایجاد میکنند. این باعث میشود که ساختار بسیار کارآمدی ایجاد شود و امکان استفاده از مقاطع کوچک را فراهم کند. با این حال، در مورد پوسته‌های شبکه‌ای با میله‌های خمیده فعال، ممان خمشی ممکن است تحت بارهای خارجی افزایش یابد اما از آنجایی که عناصر بین دو گره منحنی هستند، نیروهای فشاری محوری ممان خمشی را افزایش میدهند در حالی که نیروهای کششی محوری ممان خمشی را کاهش میدهند.خمش الاستیک عناصر پوسته مشبک نیز باعث ایجاد نیروهای برشی و محوری میشود، بنابراین سختی الاستیک در حالی که سختی هندسی تغییر میکند، ثابت میماند یا ممکن است آنقدر کوچک باشد که بر رفتار ساختاری تأثیری نداشته باشد یا ممکن است سختی کل را افزایش یا کاهش دهد.(آلپرمن و همکاران، ۲۰۱۲).

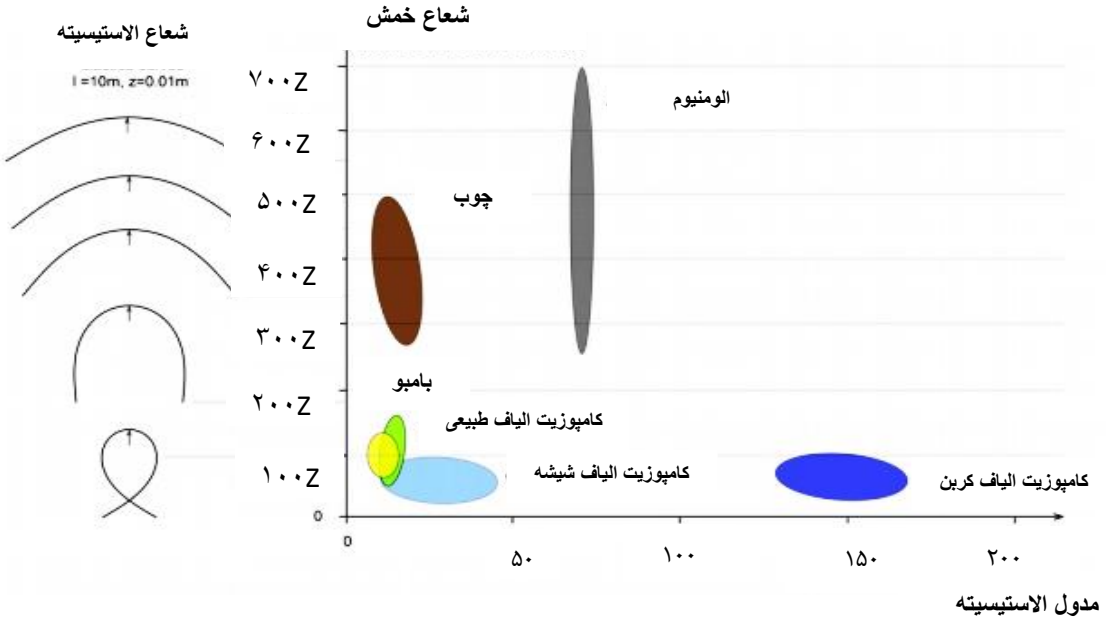
جدول ۱. بررسی سازه ای مصالح (هولگر آلپرمن و کریستف گنگناگل و همکاران، ۲۰۱۴)

مطابق این مطالعه، دسته اول که استراتژی مبتنی بر رفتار است به رویکرد سنتی استادان ماهر که مصالح ساختمانی را بطور مستقیم در محوطه ساخت و ساز خم میکنند، اشاره دارد. دو دسته دیگراستراتژی یک رویکرد علمی تر را توصیف میکنند، تا در آن آزمایش های دستی و تحلیلی از قبل انجام شده را از روند طراحی و ساخت بیشتر آگاهی دهد. در حالی که استراتژی مبتنی بر هندسه مربوط به ایده مجبور کردن یک جسم برای مطابقت با هندسه و درنظر گرفتن هدف خاص بدون در نظر گرفتن خصوصیات ماده است، استراتژی ترکیبی

		تنش خمشی (N/mm2)	مدول الاستیسیته (N/mm^2)	شعاع خمش (m)	تراکم وضخامت (kg/m^3)	نیروی وزن (Nm/g)
چوب	چوب چند لایه	۲۴-۶۰	۱۱/۶۰۰-۱۷/۰۰۰	۲۶۳-۴۸۳z	۳۶۰-۷۰۰	۶۳-۸۵
بامبو	بامبو چند لایه	۱۱۹-۱۸۵ ۱۱۳-۱۲۵	۵/۶۵۰-۱۳/۴۱۰ ۱۰/۵۹۹-۱۲/۱۴۵	۶۷-۷۳z ۸۷-۱۰۷z	۳۳۰-۶۶۰ ۶۰۰	۲۴۹-۳۶۲ ۱۸۹-۲۰۶
کامپوزیت با الیاف طبیعی	فیبر طبیعی - وینیل	۱۰۱-۱۸۰	۱۱/۵۰۰-۱۳/۰۰۰	۶۴-۹۰z	۸۰۰-۱۲۲۱	۱۲۵-۱۴۷
کامپوزیت الیاف شیشه	وینیل/ شیشه	۲۲۴-۵۹۰	۱۲/۵۰۰-۴۱/۰۰۰	۴۶-۶۳z	-۱/۸۰۰ ۲/۱۰۰	۱۲۴-۳۲۹
کامپوزیت با الیاف کربن	فیبر وینیل /کربن اپوکسی	۲/۰۷۰- ۲/۸۰	۱۳۱/۰۰۰- ۱۶۵/۰۰۰	۵۹-۶۴z	۱/۶۰۰	۱/۲۹۴- ۱/۷۵۰
		تنش تسلیم	مدول الاستیسیته (N/mm2)	شعاع خمش (m)	ضخامت تراکم یا (kg/m^3)	نیروی وزن (Nm/g)
آلومینیوم	ENAW-۷۵۴/۷۰۲۰	۱۰۰-۲۸۰	۷۰/۰۰۰	۲۵۰-۷۰۰z	۲۷/۰۰۰	۴-۱۰

یعنی هم مبتنی بر هندسه و هم بر رفتار ماده به هنگام کاوش در یک فضای طراحی قابل دستیابی، دقیقاً این عوامل محدودکننده را در نظر میگیرد. (شلیچر و همکاران ، ۲۰۱۵)

مطابق شکل ۱ مصالح مختلف در سازه های پوسته ای مشبک خم فعال باید نسبت مدول الاستیسیته به مقاومت خمشی کمی داشته تا بتوانند شعاع خمشی کوچکی داشته باشند. در این زمینه کامپوزیت های تقویت شده با الیاف یا الوارهای طبیعی از جنس کتان، بامبو و کامپوزیت های تقویت شده با الیاف شیشه و کربن جز مصالح انتخابی هستند. درنتیجه مدول الاستیسیته و شعاع های مجاز تابعی از ارتفاع مقطع مصالح میباشد. کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن به علت شعاع کوچک و مدول الاستیسیته بالا برای خمش فعال مناسب بوده اما هزینه بالای آن مانع استفاده در مهندسی ساختمان می شود.



شکل ۱. رابطه بین مدول الاستیسیته در شعاع خمش(هولگر آلپرمن و کریستف گنگناگل و همکاران، ۲۰۱۴)

سپس کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه کوچکترین شعاع را دارد و به دنبال آن بامبو و کامپوزیت با الیاف طبیعی قرار دارد که هر دو دارای سختی بسیار کمتری نسبت به کامپوزیت های با الیاف شیشه و کربن هستند. مدول الاستیسیته چوب طبیعی و مهندسی شده با کامپوزیت تقویت شده با الیاف طبیعی از جنس کتان و بامبو قابل مقایسه است اما شعاع های مجاز بیشتری دارند. مانند آلومینیوم که تقریباً به اندازه چوب انحنای مجاز دارد اما سختی بالاتری نیز دارد. هر پنج کامپوزیت تقویت شده با الیاف بسته به نوع و محتوای الیاف و استحکام پیوند بین الیاف طیف وسیعی از خواص را ارائه میدهند. (هولگر آلپرمن و کریستف گنگناگل و همکاران ، ۲۰۱٤)

٤- روش تحقیق

روش گردآوری اطلاعات به صورت نظری و مباحث مرتبط در این پژوهش، مطالعات کتابخانه ای بوده است و ارائه روش پیشنهادی به صورت مدلسازی و شبیه سازی رایانه ای در قالب الگوریتم نویسی در محیط نرم افزار هایی نظیر راینو، گرس هاپر میباشد. در این تحقیق یک مطالعه پارامتریک به کمک آنالیز روش تحقیق کمی و مقادیر واقعی پارامترها از مدلسازی فرم موجود انجام شده و با تجزیه و تحلیل نیروهای خمش و برش و پیچش در نرم افزار کارامبا سعی در انتخاب بهترین مصالح برای ساخت این سازه ها شده است. طراح نیز با انتخاب یک مدل که تحت بار و مقطع یکسان قرار گرفته و آنالیز داده هایش نیز به کمک برنامه کارامبا گردآوری شده، به دنبال حداقل میزان جابه جایی و میزان تنش میباشد تا بتواند در این مدل انتخابی بهترین مصالح را انتخاب کند. درنتیجه با کمک شبیه سازی‌های عددی که ابزار قدرتمندی برای بررسی احتمالات مختلف در بررسی و تحلیل سازه مشبک پوسته الاستیک میباشند، میتوان با یک تقریب عددی از یک نمایش ریاضی به انتخاب بهترین مصالح با کارایی بیشتر سازه ای دست یافت.

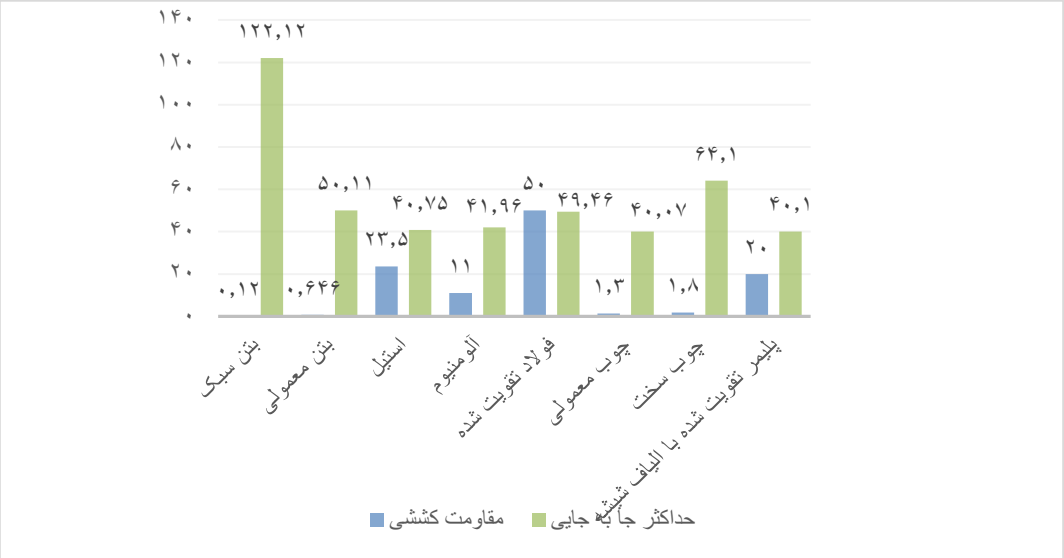
۵- مطالعات و بررسی

مطابق جدول ۲ به کمک برنامه کارامبا به آنالیز داده های یک مدل تحت بار و مقطع یکسان پرداخته تا به کمترین میزان جا به جایی و تنش دست یافته شد. بدین ترتیب در این مدل انتخابی با توجه به شکل ۲ و ۳، ماکزیمم نیروی برشی و خمشی و مدول یانگ در مصالح مختلف محاسبه شده است که این روند نشان میدهد مصالح چوب کمترین میزان تنش و جابه جایی را دارد.

جدول ۲. بررسی و تحلیل مصالح مختلف روی مدل نهایی تحت نیروی یکسان (۰/٤٦ N) و مقطع یکسان برای انتخاب بهترین مصالح با حداقل جابه جایی

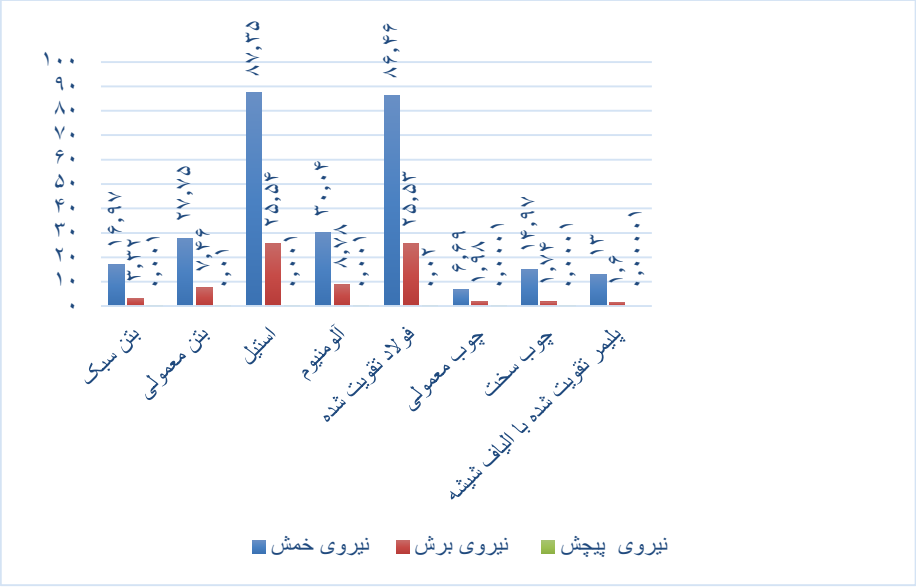
مصالح	استیل	آلومنیوم	فولاد تقویت شده	چوب معمولی	چوب سخت	بتن سبک	بتن معمولی
مقاومت کششی	۲۳/۵۰	۱۱	۵۰	۱/۳	۱/۸	۰/۱۲	۰/۱۶۷
ماکزیمم میانگین نیروی خمشی	۸۷/۳۵	۳۰/۰۴	۸۶/۶۶	۶/۶۹	۶/۴۹	۱۶/۹۷	۲۷/۷۵
ماکزیمم میانگین نیروی برشی	۲۵/۵۴	۸/۷۸	۲۵/۵۳	۱/۹۸	۱/۷۴	۳/۳۲	۷/۴۶
ماکزیمم لنگر پیچشی	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۳۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱
مدول برشی	۸۰۷۶	۲۷۰۰	۱۰۰۰۰	۳۶۰	۴۷۵	۴۵۸/۳۳	۱۲۹۱/۶۷
نیروی ثقل	۶۱۵/۶۶	۲۱۲/۴۴	۶۱۷/۶۶	۴۷/۲۱	۴۴/۸۴	۱۲۱/۹۵	۱۹۶/۷۰
مدول یانگ	۲۱۰۰۰ صلبیت کمتر	۷۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۰۵۰	۹۵۰ صلبیت بیشتر	۱۱۰۰	۳۱۰۰
ماکزیمم جابه جایی	۴۰/۷۵	۴۱/۹۶	۴۲/۳۷	۶۰/۰۷	۶۴/۱۰	۱۲۲/۱۲	۸۰/۱۱
مقطع باضخامت و ابعاد یکسان	قوطی مستطیل	قوطی مستطیل	قوطی مستطیل	قوطی مستطیل	قوطی مستطیل	قوطی مستطیل	قوطی مستطیل

همچنین با انجام فرآیند فرم یابی توسط برنامه الگوریتمیک گرسهاپر، مدل انتخابی میتواند تغییر یابد و هر مدلی که طراح باتوجه به هزینه، امکانات و موقعیت سایت بهینه میباشد را با مصالح مختلف میتواند طراحی و اجرا کرد. پوسته های مشبک الواری، سازه های سبک وزن با انحنای مضاعف هستند که با تغییر شکل یک شبکه تخت چوبی به صورت شکل هدف که منحنی پوسته مانند است، ایجاد می شوند.



شکل۲. بررسی میزان جا به جایی و مقامت کششی مصالح مختلف در یک مدل بهینه خم فعال

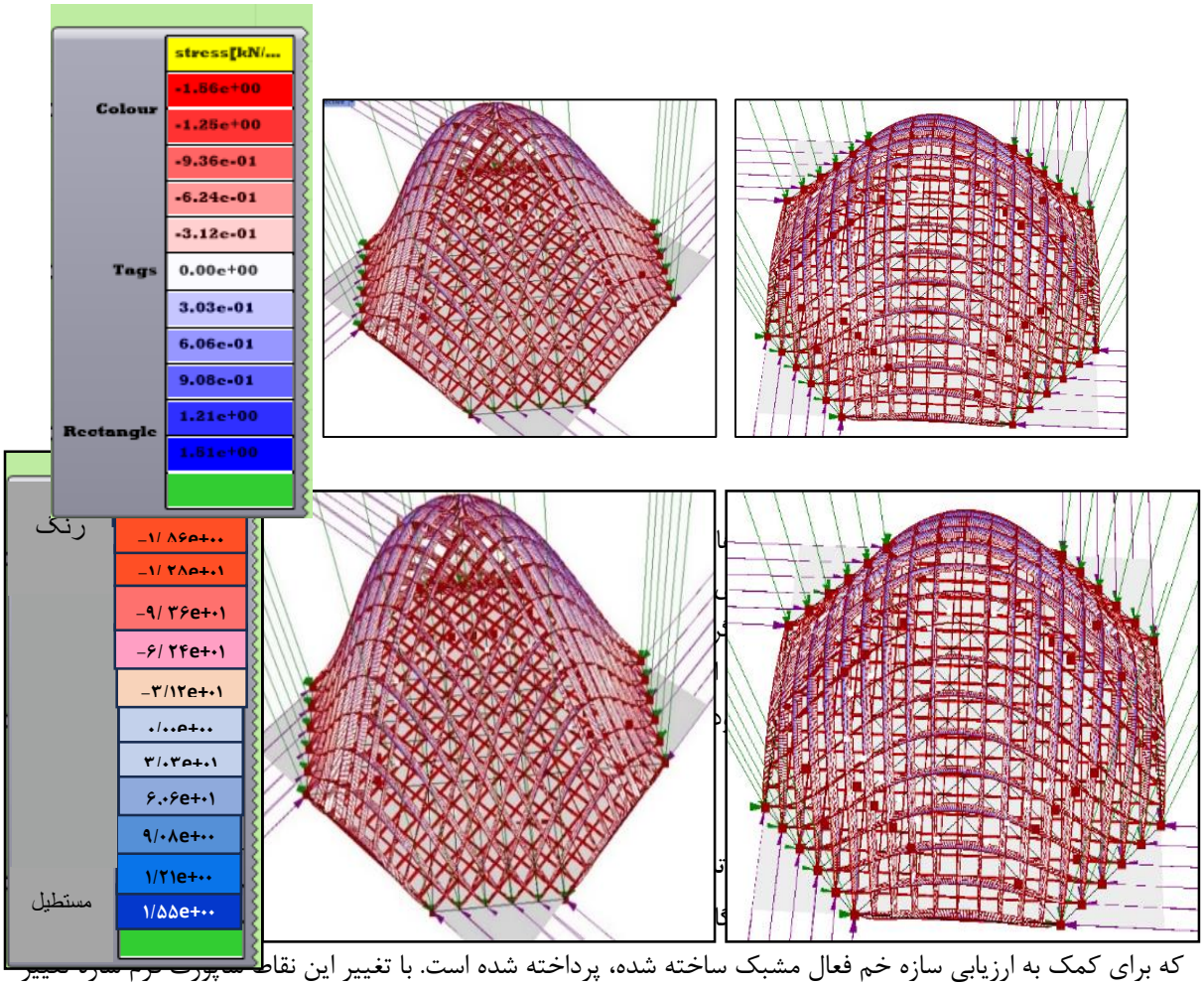
طراح میتواند با تغییر شبکه و تعیین هندسه مرزی و سفتی اعضا، به بهترین تقریب که متناسب با شکل نهایی از پیش تعیین شده است دست یابد، بنابراین میتواند طیف گسترده ای از فرم های ساخته شده را ایجاد کرد. علاوه براین، چوب یک منبع تجدیدپذیر است و مزیت خوبی در ساخت پوسته های سبک وزن مشبک است ولی علی رغم این مزایا، به دلیل تجزیه و تحلیل، طراحی و ساخت بسیار پیچیده پوسته های فعال خمشی، پوسته های چوبی کمی تاکنون ساخته شده است.



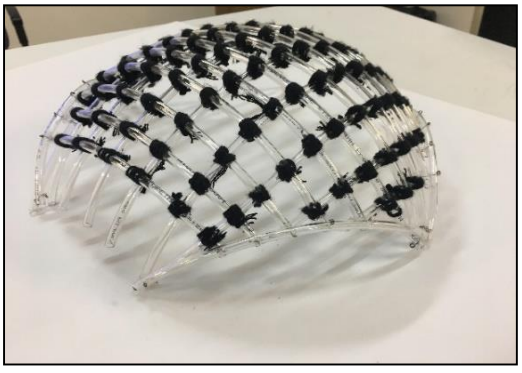
شکل ۳. مقایسه تنش های محوری مصالح مختلف در یک مدل بهینه خم فعال

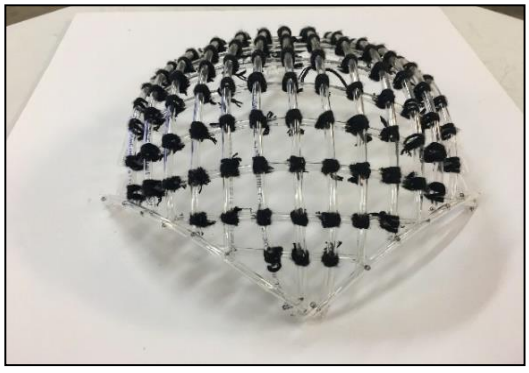
٦- یافته ها

مطابق شکل ۴ محدوده تنش های کششی و فشاری در نمونه منتخب ، به ترتیب با رنگ های آبی و قرمز توسط تحلیل المان محدود مشخص شده است. از تحلیل تنش ها اینگونه استنباط می شود که اکثر بخش های سازه تحت تنش کششی هستند. کلیت کار در بیشتر نرم افزارهای محاسباتی به این صورت است که هندسه، مصالح، شرایط تکیه گاهی، بارها و سایر مشخصات طراحی که به تحلیل سازه مربوط هستند، به عنوان ورودی از کاربر گرفته می شوند و تا زمانی که صورت مسئله با استفاده از این اطلاعات تعریف گردید، کاربر می

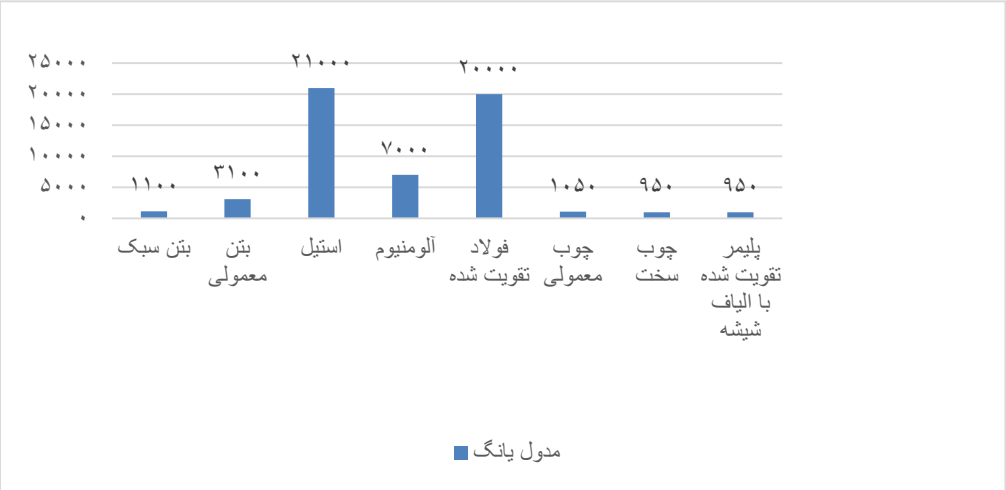


که برای کمک به ارزیابی سازه خم فعال مشبک ساخته شده، پرداخته شده است. با تغییر این نقاط ساپورت نرم سازه تغییر پیدا خواهد کرد و همچنین با افزایش یا کاهش تعداد این نقاط ساپورت می توان میزان مقاومت سازه را در تحمل برابر نیروها را افزایش یا کاهش داد و درجه آزادی سازه با توجه به این نقاط در نظر گرفته می شود. و مدول یانگ در مصالح مختلف مطابق شکل ۶ پرداخته شده است.





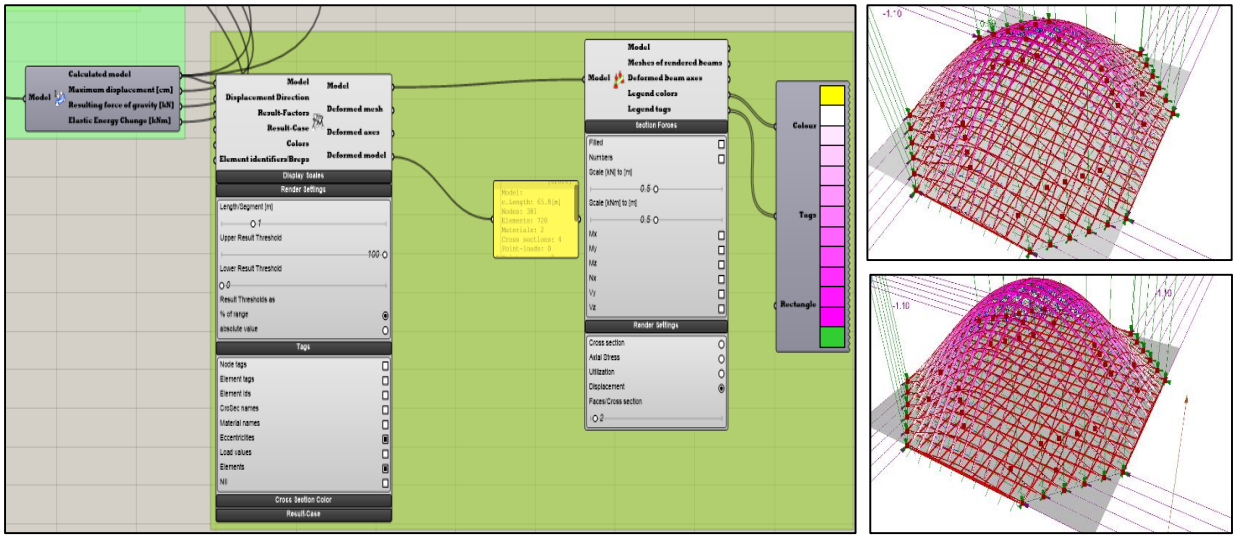
شکل ۵. ساخت مدل فیزیکی سازه خم فعال مشبک با لوله آزمایش



شکل ٦. بررسی مدول یانگ در مصالح مختلف

٦-١- مراحل مدلسازی و شبیه سازی

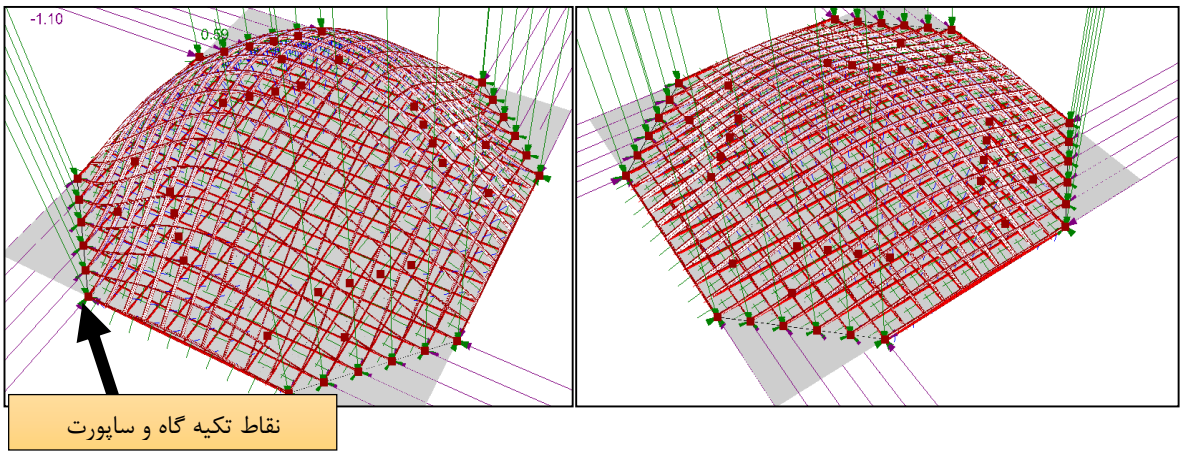
در مرحله مقدماتی به کمک برنامه گرسهاپر با تغییر متغیرهای پارامتریکی نظیر ابعاد، طول دهانه، ارتفاع، شکل هندسی مقطع و شعاع انحنای خمش، فرم یابی برای انتخاب فرم بهینه طبق شکل ۷ انجام شده و سپس در برنامه فیزیک کانگرو که به آنالیز و تحلیل فرم و تعیین نقاط تکیه گاه می پردازد، فرم نهایی بررسی می شود و همچنین در مرحله ساخت تحلیل عددی و تعیین تنش ها، مصالح نهایی به کمک برنامه کارامبا انتخاب شده است.



شکل ۷. تحلیل سازه پوسته ای مشبک در برنامه کارامبا رنگ صورتی پررنگ حداکثر میزان جابه جایی در مصالح انتخابی چوب

٦-٢- ارزیابی نمونه پژوهش در افزونه کارامبا

یک آنالیز المان محدود در افزونه کارامبا دارای سه مرحله است که شامل مرحله پیش ازپردازش، پردازش و پس ازپردازش است. مرحله پیش از پردازش، شامل تبدیل مدل هندسی به مدل سازه ای است که در این مرحله نقاط به گره ها(اتصالات)، خط ها به تیرها و صفحه ها به پوسته ها تبدیل میشود. این افزونه به منظور تحلیل سازه مدنظر به روش ا لمان محدود، اطلاعاتی از جمله معرفی تیرها، محل اتصالات، تکیه گاه ها، نیروهای وارد بر حجم، نوع سطح مقطع اعضا و ابعاد آن ها و همین طور مصالح مورد استفاده را به عنوان ورودی دریافت میکند. به این منظور خطوط شبکه مش مثلثی به عنوان تیرها و محل تلاقی آن ها به عنوان مفاصل معرفی شده است و مشخص کردن نقاط تکیه گاهی در این مرحله ضروری است.



شکل۸ – مدل سازی تحلیل فرم و تنش های سازه پوسته ای مشبک در برنامه کارامبا

با بدست اوردن نقاط تلاقی پوسته با زمین و از آنجایی که حرکت انتقالی و دورانی در همه جهات باید محدود شود. این نقاط به عنوان تکیه گاه های گیردار معرفی شده است. پس از آن، مرحله پردازش قرار دارد که در واقع پس از معرفی جزئیات سازه در مرحله قبل، در این مرحله به محاسبات المان محدود پرداخته و سپس در مرحله پس از پردازش به تفسیر نتایج پرداخته شده است.

در این مرحله کارامبا طبق شکل ۸ اطلاعاتی نظیر وزن، جابجایی گره ها و تنش ها به صورت عددی و گرافیکی در اختیار کاربر قرار میدهد. افزونه کارامبا میزان جابجایی سازه را پس از ارزیابی توسط متد المان محدود به کاربر تحویل میدهد.

کرنش نرمال (**Normal Strain**[16]) = کرنش **ε** [17]		کشیدگی طول= دلتا
E= ضریب کشسانی ماده	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$	**A** = سطح مقطع اولیه
		l = طول

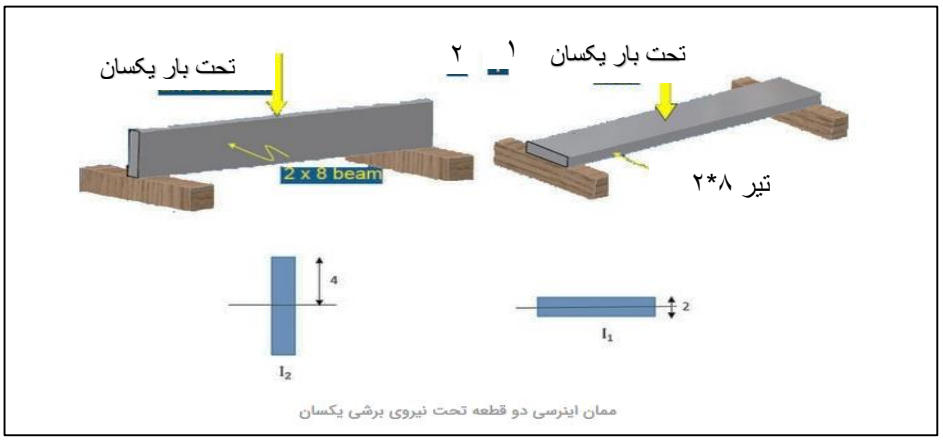
شکل ۹. بررسی ممان اینرسی در دو مقطع تیرتحت نیروی یکسان

$$\varepsilon=\frac{\Delta}{l}$$

$$\sigma=E\varepsilon \rightarrow \sigma=E\frac{\Delta}{l}$$
$$\sigma=F/A \rightarrow F=\sigma.A$$
$$F=E\frac{A}{l}.\Delta$$

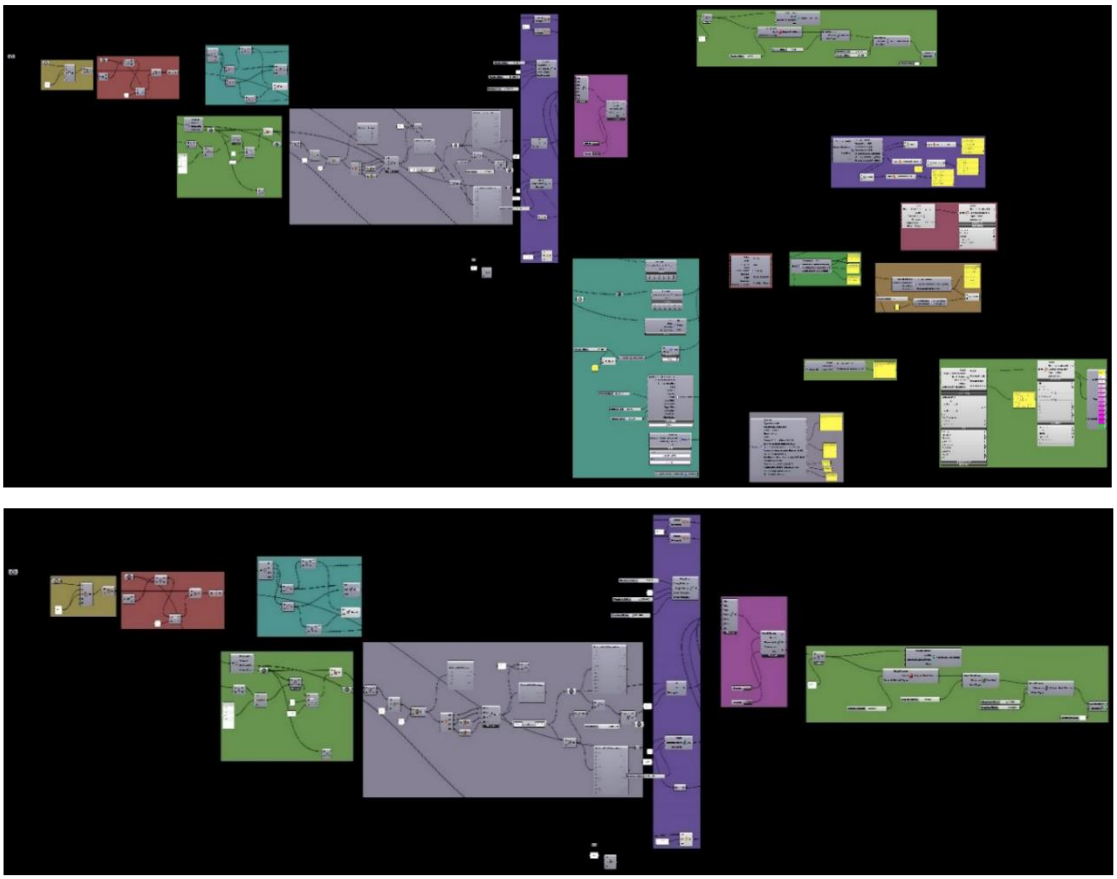
$$[F]=[K].[D]$$

$$K=E\frac{A}{l}$$
$$K_1(x,y)=E\pi(x)^2/y$$
$$x=R_{cs}$$
$$y=L$$



ممان اینرسی دو قطعه تحت نیروی برشی یکسان

براساس فرمول شکل ۹ میزان جابجایی سازه با نیروهای وارده نسبت مستقیم و با میزان سختی سازه نسبت عکس دارد، بنابراین هنگامی که هدف کاهش میزان جابه جایی است باید سختی سازه افزایش یابد. میزان سختی هر المان به جنس آن یعنی نوع مصالح بستگی دارد و تابعی از شعاع سطح مقطع و طول آن می باشد. سختی کل سیستم و در نتیجه جابه جایی کل سازه، به سختی هر المان و توپولوژی سازه یعنی همان سطح مقطع و ممان اینرسی بستگی دارد که در این پژوهش سطح مقطع قوطی مستطیل شکل است.



شکل ۱۰. مدلسازی الگوریتمیک فرم سازه پوسته مشبک در برنامه کارامبا

۷- نتیجه گیری

این تحقیق نشان می دهد که از بین مصالح مورد بررسی، فولاد یا بتن نمی توانند برای سازه های پوسته ای مشبک با خم فعال بهتر از چوب عمل کنند زیرا این مواد به اندازه چوب نمیتوانند تغییر شکل بدهند. همچنین برای انتخاب از بین چهار خانواده مصالح مختلف، ازجمله استیل، چوب، بتن و فولاد باید جنبه های دیگری نیز در نظر گرفته شود که عبارتند از اینکه مواد نباید آنقدر شکننده باشند که به راحتی توسط کارگران در محل جابه جا شوند، در نتیجه سرامیک ها مناسب نیستند. به دلیل محدودیت هزینه، تیتانیوم و کامپوزیت های تقویت شده با الیاف کربن نیز نمی توانند برای کاربری های با پوسته مشبک مناسب باشند. لذا چوب بهترین گزینه است و بعد از چوب، پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه می تواند جایگزین با ارزش تری باشد، زیرا آنها بالاترین حد کرنش الاستیک را دارند (۱٫۵٪ در بهترین حالت برای کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه و ۰٫۵درصد برای چوب) و انحنای بزرگ در آنها مترادف آزادی شکل در سازه است.

مزیت دیگر در کامپوزیت ها مدول یانگ بالاتر نسبت به چوب است (۲۵-۳۰ گیگا پاسکال در مقابل، ۱۰ گیگا پاسکال برای چوب) که این یک مزیت برای ساخت یک ساختار سخت است. علاوه بر این، خواص مکانیکی پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه، مانند کرنش حد الاستیک بالا، استحکام خوب می‌تواند پتانسیل ساختارهای پوسته مشبک را افزایش دهد. این پلیمرها همچنین استرس را به حداقل میرسانند و از شکستگی عناصر تحت تأثیر نیروها جلوگیری میکنند. سازه های پوسته ای مشبک فرصت های متعددی را برای ساخت پوسته های انحنای دوگانه ارائه میدهند و چالش هایی را به ویژه در فرآیند طراحی و ساخت ایجاد می کنند که مناسب هر منطقه و هر کاربری نمی باشد. برای همین باید با توجه به ظرفیت پلیمرها و مواد چوبی، خواص و افزودنی آن ها را بهبود بخشید تا در ساخت سازه های مشبک خم فعال هیچ مسأله ای پیش نیاید.

در این مقاله با بررسی یک هندسه بهینه و معین با کمک افزونه کانگرو مدلسازی و سپس مقایسه خواص مصالح مختلف در افزونه کارامبا، به این نتیجه دست یافت که بار کمانشی پوسته ها به صورت خطی است و بسته به مدول یانگ آنها، میتوان این انتظار را داشت که بار کمانش در پوسته کامپوزیتی ۲/۵ تا ۳ برابر بیشتر از یک پوسته ساخته شده از چوب میباشد که حتی عملکرد بهتری در سازه دارد. همچنین از آنجایی که کامپوزیت ها به صورت صنعتی تولید میشوند، قابلیت اطمینان خواص مکانیکی آنها بسیار بالاتر از مواد طبیعی مانند چوب است که در نهایت، در حالی که تیرهای چوبی باید از چندین تکه چوب به هم چسبیده ساخته شوند، پروفیل‌های کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه را می‌توان به طور پیوسته تا زمانی که لازم باشد، ساخت. علاوه بر این، پلیمر انتخاب شده برای کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه می تواند در برابر خوردگی، اشعه فرابنفش و سایر حملات محیطی مقاومت کند، در حالی که مواد چوبی نیاز به تعمیر و نگهداری دارند. درنتیجه کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه به دلایل انعطاف پذیری، هزینه، سختی و تکرارپذیری انتخاب شده است، همچنین از بین مصالح بررسی شده، چوب سخت و کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه بهترین گزینه در انتخاب مصالح در ساخت سازه های مشبک است که در هر کشور بسته به نوع اقلیم و دسترسی هر کشور، برخی مصالح قابل اجرا میباشد و از دیگر مزیت های این مقاله این است که به کمک افزونه کارامبا و نرم افزار گرسهاپر میتوان با انتخاب نوع مصالح، هرگونه پوسته مشبکی را مدلسازی کرد وتنش ها و بارهایش را محاسبه کرد که این کار باعث اطمینان در انتخاب نوع مصالح میشود.

درنهایت معماران باید برای انتخاب مصالح نهایی تمام متغیرها از جمله مدول یانگ و میزان جابه جایی و تغییر شکل فرم و حداقل میزان تنش و نیرو را در نظر بگیرند تا بتوانند کارآمدترین سازه های موقت مشبک را طراحی کنند که حداقل میزان جابه جایی در تحمل نیروها و تنش های داخلی را داشته باشد.

تاییدیه های اخلاقی:نویسندگان درتهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرارداده اند.

تعارض منافع:تمامی مطالب مذکورتوسط نویسندگان انجام شده وهیچ فرد یا نهادی در آن نقش نداشته است.

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است .

۸- منابع

1) Adriaenssens S, Block P, Veenendaal D, Williams C, Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization: Taylor & Francis; 2014,174-175.
2) Bendsoe M.P, Ben-Tal A & Zowe J, "Optimization methods for truss geometry and topology design". Structural optimization,1994, 7(3): 141-159.
3) Bendsoe M. P & Sigmund O,"Topology optimization: theory, methods, and applications", Springer Science & Business Media, 2013, 258.
4) Block Ph & Veenendaal D, "Shell Structures for Architecture", Sigrid Adriaenssens & Chris Williams, London 2014
5) Bulenda T & Knippers J, "Stability of grid shells. Computers & Structures", 2001,79(12): p. 1161-1174.
6) Celina P, "Past and Future of Grid shell Structures" ,Massachusetts: Massachusetts institute of technology, 2007.
7) Chilton J, "Spatial Mesh Structures", translated by Mahmoud Golabchi, Tehran University Press, 2016, 165-168.(in Persian)
8) Collins M , Cosgrove T, "A Review of the State of the Art of Timber Gridshell Design and Construction" , Department of Civil Engineering and Materials Science, University of Limerick, 2016, 261.
9) Douthe C, Baverel O, Caron J. "Form-finding of a grid shell in composite materials", Journal-International association for shell and Spatial Structures. 2006;150:53.
10) Du Peloux L, Baverel O, Caron J.-F & Tayeb F, "From shape to shell: a design tool to materialize freeform shapes using gridshell structures, 2013, 84.
11) Du Peloux L, Tayeb F, Baverel O, Caron J, 2016, Construction of a Large Composite Gridshell Structure: A Lightweight Structure Made with Pultruded Glass Fibre Reinforced Polymer Tubes, Structural Engineering International 26(2):160-167
12) Eshghi K, Karimi Nasab M, "Analysis of Algorithms and Design of Metaheuristic Methods", Sharif University Publications; 2015, 24-26.(in Persian)
13) Fazel A, "structural design and optimization of grid shell structures based on evolutionary genetic algorithm", University of Tehran, 2012, 192-194.(in Persian)
14) Fritzsche J.C, "Gridshell efficiency optimization". Graduation Thesis,Eindhoven :Technical University Eindhoven. 2013

15) Gengnagel C, Lafuente E, "Structural Application of Biocomposites in highly elastic Structures", Conference Proceedings IABSE - IASS Symposium 2011, Taller Longer, Lighter, London 2011.
16) Gengnagel C, Lafuente E,"Active Bending in Hybrid Structures", Conference Paper · Conference Proceedings IABSE - IASS Symposium Departement of Structural Design and Technology [KET] Faculty of Architecture, University of the Arts Berlin, Taller Longer, Lighter, London 2014.
17) Glover F, "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", Computers and Operations Research, 1986, 13, 533–549.
18) Glover F & Laguna M, "Tabu Search, Kluwer Academic Publishers", 1997.
19) Glover F & Laguna M , "Tabu Search, In Handbook of Applied Optimization", Pardalos P.M & Resende M.G.C., (Eds.), Oxford University Press,2002, 194-208.
20) Golabchi M & Taghizadeh K, "Skins and folded sheet structures". Tehran: First edition, Tehran University Press, 2011, 78-80.(in Persian)
21) Hillersøy Dyvik S, Manum B & Rønnquist A, "Gridshells in Recent Research—A Systematic Mapping Study ".2021, Appl. Sci. 2021, 11(24)
22) JIANG, YANG, 2015. FREE Form finding of grid shell structure, Master of Science in Civil Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign.
23) Kilian A & Ochsendorf J, "Particle-spring systems for structural form finding". Journal-International Association for Shell and Spatial Structures,148: p. 77, 2005.
24) Kinappers J & Shepherd P, "Structural form finding using zero-length springs with dynamic mass". 2011.
25) Kookalani S, aung H , " GFRP Elastic Gridshell Structures: A Review of Methods, Research, Applications, Opportunities, and Challenges" , Journal of Civil Engineering and Materials Application ,2023, 7(2), 71-94.
26) Kuijvenhoven M, "A design method for timber grid shells", Master's thesis, Delft University of technology, 2009.
27) Liddell I, "Frei Otto and the development of gridshells. Case Studies in Structural Engineering" ,2015, 4, 39-49 .
28) Lienhard J, Alpermann H, Gengnagel C and Knippers J, "Active Bending, a Review on structures where bending is used as a self formation process", IASS-APCS Symposium 2012, From Spatial Structures to Space Structures, Seoul 2012.

29) Lionhard J, Alpermann H, Gengnagel C, Knippers J, Active bending, a review on structures where bending is used as a self-formation process. International Journal of Space Structures. 2013;28(3-4):187-96.
30) Lienhard J, "Bending-active structures : form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein", Stuttgart: Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart; 2014.
31) Loukaides E & Seffen K, " Multistable grid and honeycomb shells". International Journal of Solids and Structures, 2015, 59, 46-57 .
32) Merikh Bayat F, "Meta-heuristic optimization algorithms (with applications in electrical engineering)", authored by Dr.; Academic Jihad Publications; 2013, 58-62.(in Persian)
33) Moghtadinejad M, "review of the Parametric architecture design process based on algorithmic design", Modern Civil Research Conference, 2015.
34) Moore F, "Understanding the behavior of structures", (M. Golabchi, translator) Tehran: Tehran University Press, 2007, 213.
35) Paoli C. C. A, "Past and future of grid shell structures. Massachusetts Institute of Technology" ,2007.
36) Pillwein S, Leimer K, Birsak M & Musialski P, "On elastic geodesic grids and their planar to spatial deployment".2020, arXiv preprint arXiv:2007.00201 .
37) Salvadori M, "Structure in Architecture", translator: Golabchi, Tehran: 11th edition, Tehran University Press, 2013, 112-115.(in Persian)
38) Schleicher, Simon. 2015. “Bio-Inspired Compliant Mechanisms for Architectural Design: Transferring Bending and Folding Principles of Plant Leaves to Flexible Kinetic Structures.” PhD Dissertation, University of Stuttgart.
39) Taghizadeh K, "Criticism and introduction of deconstruction architecture (with a review of the works of Zaha Hadid, Peter Eisenman and Frank Gehry)", Tehran University Press, Tehran, 2012, 98-100.(in Persian)
40) Tang G, "Timber gridshells: beyond the drawing board". Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 2013, 166(6), 390-402 .
41) Tibert A & Pellegrino, S, "Review of form-finding methods for tensegrity structures". International Journal of Space Structures,2011, 26(3): 241-256.
42) Topping B, "Shape Optimization of Skeletal Structures: A Review". Journal of Structural Engineering, 1983, 109(8):1933-51.
43) Winslow P, Pellegrino S & Sharma S, "Multi-objective optimization of free-form grid structures". Structural and multidisciplinary optimization, 2010, 40(1-6), 257.

44) Yamani M, Akhwan Kazemzadeh R, "meta-heterobatic optimization algorithms", Academic Jihad, Amirkabir Industrial Unit, Shabak, 2015,132-133.(in Persian)

Investigating the effect of different materials in improving the structural performance of active bending shells by analyzing a selected sample of grid shells [1]

Sahar Sadeghi[1], Morteza Rahbar[2], Katayoun Taghizadeh Azari[3], Hossein Zabihi[4]**

[1] PhD student in Architecture, Department of Architecture, Tafarsh Department, Islamic Azad University, Arak, Iran.

s_sadeghi7025@yahoo.com

[2]Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Science and Technology, Tehran, Iran.

**Correspondence: rahbarm@iust.ac.ir

02173228205- 09122194368

Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran.

[3]Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture, University of Tehran, Tehran, Iran.

ktaghizad@ut.ac.ir

[4] Associate Professor, Department of Architecture, Research Sciences Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

h.zabihi@srbiau.ac.ir

Abstract

[1] The present article is taken from the doctoral thesis of Mrs. Sahar Sadeghi entitled "Explanation of the form-finding components of active bending shells in temporary architectural structures" under the guidance of Dr. Morteza Rahbar and the advice of Dr. Katayoun Taghizadeh Azari and Dr. Hossein Zabihi at the Islamic Azad University, Tafarsh branch. is being done.

Grid shell structures are one of the types of active bending structures, which consist of a network of continuous elements with double curved shells. Therefore, the purpose of this article is the effect of different materials by selecting a sample of mesh shells in improving their structural performance, for this purpose, the geometry of the selected shell was first modeled with the help of Grasshopper program and then using Kangaroo and Karamba physics modeling software in a The repetitive step at the same time, the mechanical and geometric considerations have been analyzed. In the selected sample, with the help of quantitative analytical method in Karamba software, the stresses are calculated, and then, considering the variables of materials with the same thickness and dimensions, which have a rectangular cross-section, to check the amount of displacement in bearing internal forces and stresses that The reason for the change in the weight of the structure has come about, and according to that, the Young's modulus has reached its minimum average, and the steps have been taken. In this way, it can be concluded that among the six different families of materials such as: steel, wood, concrete, steel, composite and polymers depending on the type of access and facilities in each country, polymer structures reinforced with glass fibers and structures Wood has the best structural performance for making grid shells.

Key words: material, structural performance, grid shell, force analysis, algorithmic modeling