ارائۀ الگوریتمی برای فرآیند فرم یابی هندسی سطوح غشایی فرم آزاد به روش رایانشی توسط نرم افزار راینو و پلاگین گرس هاپر و افزونۀ کانگورو [۱]

صبا پورصوتی: کارشناس ارشد معماری دانشگاه هنر اسلامی تبریز
s.poursoti@tabriziau.ac.ir
فرزین حق پرست[۲]: دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه هنر اسلامی تبریز
f.haghparast@tabriziau.ac.ir
فرهاد احمدنژاد: استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه هنر اسلامی تبریز
f.ahmadnejad@tabriziau.ac.ir

چکیده

سازه های غشایی به سبب ویژگی هایی همچون قابلیت حمل و نقل، سهولت در برپایی و برچیدن و همچنین سبک بودن، از دیرباز مورد استفادۀ بسیاری از مردم به ویژه عشایر بوده است. امروزه نیز به سبب وزن کم و قابلیت بالای این سازه ها در خلق فرم های بدیع، زیبا و متنوع توجه بسیاری از طراحان و معماران به این سازه ها بیش از پیش جلب شده است. با پیدایش کامپیوترها و پیشرفت در روش های محاسباتی، در زمینه فرم یابی سازه های غشایی پژوهش های گسترده‌ای صورت گرفته است. از آنجایی که هندسه سطوح غشایی فرم آزاد توسط روابط ریاضی پیچیده تعریف می شوند، فرم یابی این سطوح نیز فرآیندی پیچیده و زمان‌بر می باشد. هدف این پژوهش، بررسی انواع روش‌ها و فرآیند فرم یابی سازه های غشایی فرم آزاد و ارائۀ الگویی برای این فرآیند می باشد. برای این منظور، با مطالعۀ منابع کتابخانه ای، انواع سازه های غشایی و روش‌های فرم‌یابی آن ها و نرم افزارهای مورد استفاده در این حوزه مورد بررسی قرارگرفت. درنهایت، با فرم یابی یک سطح غشایی به روش رایانشی توسط نرم افزار راینو و پلاگین گرس هاپر و افزونۀ کانگورو الگوریتمی برای نحوۀ انجام فرآیند طراحی و فرم‌یابی هندسی این نوع سازه‌ها ارائه گردید. الگوریتم ارائه شده طراح را قادر می‌سازد تا بتواند هرنوع سازۀ غشایی با فرم آزاد را طراحی و فرم‌یابی کند.

واژه‌های کلیدی: فرم‌یابی ، فرم‌یابی رایانشی، سطوح غشایی، فرم آزاد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱- این مقاله برگرفته از پایان نامۀ کارشناسی ارشد نگارندۀ اول با عنوان « فرم یابی هندسی و بهینه سازی معماری سطوح غشایی فرم آزاد » است که با راهنمایی نگارندۀ دوم و سوم در دانشگاه هنراسلامی تبریز انجام شده است.

۲- نویسندۀ مسئول

مقدمه

سازه های غشایی به عنوان یکی از پرکاربردترین و در عین حال جذاب ترین سازه‌ها، از دیرباز مورد توجه طراحان و معماران قرار داشت. در زمان‌های قدیم از چادرها به عنوان سرپناه های موقت استفاده می‌شد. با گذشت زمان استفاده از این سازه‌ها گسترش یافت و انواع مختلفی از آن‌ها طراحی و ساخته شد. غشاها از جمله سازه های فرم فعال می‌باشند بدین معنی که تشکیل فرم آن‌ها ارتباط تنگاتنگی با نیروهای وارده بر آن‌ها دارد. از این رو با گذشت زمان معماران متعددی به مطالعه بر روی روش های فرم یابی این سازه ها پرداختند. سطوح غشایی فرم آزاد از روابط هندسی ساده ای تبعیت نمی‌کنند بنابراین هندسهٔ آن‌ها بایستی توسط روابط ریاضی پیچیده ای تعریف شوند. این امر فرآیند فرم یابی این سطوح را بسیار دشوار می‌کند. با ورود انواع کامپیوترهای پیشرفته امکان انجام محاسبات پیچیده برای فرم یابی سازه های غشایی فرم آزاد مهیا شد.

هدف اصلی این پژوهش، ارائهٔ یک الگوریتم برای فرم یابی هندسی سازه های غشایی فرم آزاد به روش رایانشی توسط نرم افزار راینو و پلاگین گرس هاپر و افزونهٔ کانگورو می‌باشد که بتوان از آن در طراحی هر نوع سازهٔ غشایی فرم آزاد استفاده کرد. در جهت محقق کردن این هدف در ابتدا پیشینهٔ پژوهش های انجام شده در زمینهٔ فرم یابی سازه های غشایی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. سپس، مبانی نظری تحقیق شامل غشاها، معماری با فرم آزاد و فرم یابی به صورت اجمالی بیان گردید. در ادامه، در قسمت یافته های پژوهش با انجام فرم یابی برای یک سطح غشایی توسط نرم افزار راینو و پلاگین گرس هاپر و افزونهٔ کانگورو، فرآیند فرم یابی هندسی برای سطوح غشایی به تفصیل بیان گردید. در پایان، یافته‌های پژوهش مورد تحلیل، بررسی و ارزیابی واقع شده و نتایج بدست آمده منجر به ارائهٔ یک الگوریتم برای معرفی فرآیند طراحی و فرم یابی هندسی سازه های غشایی فرم آزاد گردید.

روش تحقیق

در این پژوهش در ابتدا به جمع آوری اطلاعات از منابع کتابخانه ای و اینترنتی و مطالعهٔ منابع بدست آمده، و بررسی نمونه‌های موردی پرداخته شده است. سپس با بهره گیری از نرم افزار راینو مدل سه بعدی سطوح به دست آمده و فرآیند فرم‌یابی هندسی با تعریف شرایط مرزی و نیروهای وارده با استفاده از پلاگین گرس‌هاپر و افزونهٔ کانگوروی آن به صورت پارامتریک انجام گرفته است. در نهایت، با تجزیه و تحلیل تمامی داده ها، الگوریتمی برای مراحل فرآیند فرم یابی انواع سازه های غشایی فرم آزاد ارائه گردیده است.

پیشینهٔ تحقیق

پیش از پیدایش کامپیوترها، معماران و مهندسان سازه در طراحی سطوح مختلف مانند غشاها و پوسته‌ها از روش‌های تجربی برای مدل‌سازی فیزیکی و فرم‌یابی استفاده می‌کردند.به تدریج با ظهور کامپیوترها و انجام محاسبات پیچیده توسط ابزارهای کامپیوتری این امکان به وجود آمد تا طراحان بتوانند محاسبات مربوط به سطوح فرم آزاد با روابط ریاضی پیچیده را انجام داده و سطوح بسیار متنوعی خلق نمایند. در ادامه به بررسی چند نمونه از مهم ترین پژوهش ها و مطالعات صورت گرفته در زمینهٔ فرم‌یابی و نیز فرم یابی انواع سازه‌های غشایی از گذشته تا کنون می‌پردازیم.

آنتونیو گائودی[۱] از پیشگامان فرم یابی در سال ۱۸۸۳ می باشد که از مدل آویزان برای طراحی سازه‌های قوسی خود استفاده می کرد. اساس فرم‌یابی در روش مدل آویزان بر پایهٔ فرم یک سری منحنی‌های طنابی است که تحت بارهای وارده(اغلب وزن خود) در تنش کششی خالص به تعادل رسیده‌اند. سطح بدست آمده توسط چنین فرمی نیروها را تحت کشش خالص(در سازه‌های غشایی) و با وارونه کردن فرم، تحت فشار خالص(در سازه‌های قوسی) تحمل می‌کنند(Bechthold,2008).

فرای اتو[۲] از دیگر پیشگامان عرصهٔ فرم‌یابی نشان داد روش فیلم صابونی می‌تواند به عنوان یک روش تجربی برای فرم‌یابی سازه‌های غشایی کششی مورد استفاده قرار گیرد. او به همراه همکارانش در انستیتو سازه‌های سبک وزن در اشتوتگارت آلمان برای طراحی چادر در پروژهٔ پاویون رقص[۳] در نمایشگاه باغ فدرال[۴] در کلن[۵] سال ۱۹۵۷ در آلمان از روش فیلم صابونی بهره برده‌است(Bechthold,2008:65))

هاینس آیسلر[۶] مهندس سوئیسی در سال ۱۹۵۵ با آویزان کردن پارچه‌های خیس در شب‌های سرد زمستان و جمع آوری پارچه‌های سفت پس از یخ زدن فرم‌های جذابی تولید کرده و مورد آنالیز قرار می‌داد. وی با معکوس کردن این فرم‌ها به طراحی سازه‌های فشاری می‌پرداخت(گلابچی و تقی زاده، ۱۳۹۳: ۲۰).

بلتزینگر[۷] به همراه همکارانش در سال ۲۰۰۵ در مقاله‌ای با عنوان "روش‌های کامپیوتری برای فرم‌یابی و بهینه‌سازی پوسته‌ها و غشاها"، به ارائهٔ یک سری روش‌های عددی جهت شبیه‌سازی تجربیات فیزیکی برای مدل‌سازی غشاها و پوسته‌های فرم‌آزاد در زمینهٔ فیلم‌های صابونی و مدل آویخته پرداخته‌اند(Bletzinger et al.:2005).

ایسائیاس ویزوتو[۸] در سال 2010 در مقاله‌ای به صورت کاملاً مفصل به بررسی پیشینه و معرفی روش‌های فرم‌یابی کامپیوتری و معرفی پارامترهای اساسی و روابط ریاضی بین آن‌ها پرداخته و با ذکر چند مثال روند فرم‌یابی و آنالیز سازه‌ای با استفاده از نرم افزار انسیس[۹] را بیان کرده‌است (Vizotto:2010)

اریکا هنریسون[۱۰] در سال ۲۰۱۵ در پژوهشی در ابتدا از روش فرم‌یابی لختی پویا با استفاده از نرم‌افزار اسمارت فرم[۱۱] برای طراحی غشای بخشی از نمای یک استادیوم بهره گرفته‌است. سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب[۱۲] افزونهٔ کاربردی جدیدی جهت طراحی غشا در نرم‌افزار اسمارت‌فرم ایجاد کرده‌است(Henrysson:2015).

۱- Antoni Gaudí
۲- Frei Otto
۳- The Dancing Pavilion
۴- Federal Garden Exhibition
۵- Cologne
۶- Heinz Isler
۷- Bletzinger
۸- Isaias Vizotto
۹- Ansys
۱۰- Erica Henrysson
۱۱- SMART Form
۱۲- MATLAB

در پژوهشی توسط علی داوری نجف آبادی در سال ۱۳۹۵به منظور بررسی شکل اولیهٔ سازه‌های چادری بر اساس روش تراکم نیروها، برنامه‌ای در محیط نرم‌افزار متلب تدوین شده است تا در حد امکان بستری برای انجام مطالعات آینده در زمینهٔ طراحی فرم اولیه، آنالیز و اجرای این سازه ها فراهم شود(داوری نجف آبادی، ۱۳۹۵).

فرزانه سادات حسینی در پژوهش خود در سال۱۳۹۵ ابتدا انواع سازه‌های غشایی و ویژگی‌های سازه‌ای آن‌ها را بررسی کرده و سپس انواع روش‌های فرم‌یابی را ارائه و درنهایت از روش فرم‌یابی لختی پویا در طراحی انیستیتو سازه‌های سبک وزن خود استفاده کرده‌است(حسینی، ۱۳۹۵).

ساناز ضرغامی در سال ۱۳۹۷ پژوهشی در رابطه با فرم‌یابی سازه‌های چادری انجام داده‌است. هدف این پژوهش طراحی و فرم‌یابی یک سازهٔ چادری به‌عنوان پوشش برای حیاط مرکزی کاروانسرای پیام بوده‌است که در آن با تأکید بر حفظ بنای قدیمی و منظور داشتن مفاهیمی چون رقص سماع و ... کانسپت اولیه اتخاذ و روند طراحی با یک سری آنالیزهای انرژی برای سایبان طراحی شده ادامه یافته‌است(ضرغامی، ۱۳۹۷).

دوتا[۱] و همکارش در سال ۲۰۱۹ در مقاله ای به بیان و بررسی چالش های موجود در زمینهٔ طراحی و فرم‌یابی سازه های غشایی و رفتار این سازه ها در مواجهه با نیروها طبیعی و نیرو های طراحی پرداخت و پیشنهاداتی جهت تجزیه و تحلیل سازه ها ارائه کرد(Dutta et al.:2019).

شریف[۲] و همکارانش در سال ۲۰۲۱ مقاله ای با عنوان " معماری پارچه‌های پایدار: تاریخ و چشم اندازها " ارائه کردند. آن‌ها در این مقاله به بررسی انواع سازه های پارچه ای از دیرباز تا کنون و ویژگی ها و مصالح آن‌ها پرداخته اند. هدف اصلی از این مطالعات ارائه پیشنهاداتی برای استفاده از این سازه‌ها در قالب سازه‌هایی پایدار برای رفع نیاز بشر امروزی در شرایط متفاوت همچون شیوع کرونا و نیاز به سازه‌های موقت برای بیماران کرونایی و سایر نیازها می‌باشد (Shareef et al.:2021))

لاتکا[۳] و همکارش در سال ۲۰۲۱ به فرم‌یابی سازهٔ غشایی برای یک پاویون با هدف موقت بودن، کم هزینه بودن و دوست دار طبیعت پرداختند. برای فرم‌یابی این پاویون از نرم‌افزار راینو و پلاگین گرس‌هاپر آن و افزونهٔ کیوی تری دی[۴] آن استفاده شده است (Łaٍ tka et al.:2021).

۱- مبانی نظری تحقیق

۱-۱- غشا

غشاها ورقهٔ نازکی از مواد هستند که به واسطهٔ همین نازکی و عدم صلبیت ناشی از آن، تنها تنش کششی را در سطح خود تولید می‌کنند و در مقابل فشار، خمش و یا برش مقاومت چندانی ندارند. با وجود اینکه غشاها سازه‌های مقاوم دو بعدی هستند، به دلیل ضخامت کم آن‌ها در مقایسه با گستردگی سطحشان نمی‌توانند تنش های صفحه ای خمش و برش قابل توجهی ایجاد کنند. بنابراین برای تأمین مقاومت سازه تمهیداتی همچون پیش تنیدگی و استفاده از اعضای تکیه گاهی سخت برای مقاومت در برابر فشار و خمش بایستی اندیشیده شود (سالوادوری، 1907: ۲۱۵).

۱-۲- معماری با فرم آزاد

فرم آزاد عموماً به فرم‌های رهاشده از اجبار هندسی اطلاق می‌شود اما این بدین معنی نیست که از هیچ نظم هندسی تبعیت نکند زیرا نظم هندسی در تمامی فرم‌های موجود در طبیعت مشاهده می‌شود (گلابچی و تقی زاده، ۱۳۹۳: ۱۰۸-۱۰۷). در واقع تعریف ریاضی ساده ای برای ترسیم فرم در فرم‌های آزاد وجود ندارد. چنین فرم‌هایی عمدتاً دارای دو یا صفر راستای آزاد بوده و از فرم‌های گسترش ناپذیر تشکیل می‌شوند. برای تعریف منحنی‌های پیچیدهٔ بدون راستا از توابع پایهٔ بی اسپیلاین[۵] و سطوح نربز[۶] استفاده می‌شود. (ایزدی و دیگران، ۱۳۹۳: ۶۳). در طراحی فرم کلی یک سازهٔ فرم آزاد ممکن است فرم به لحاظ هندسی از قوانین خاص هندسی تبعیت نکند ولی مطمئناً به نظم سازه ای پایبند بوده و طبق منطق سازه ای مشخصی شکل گرفته است (گلابچی و تقی زاده، ۱۳۹۳: ۱۰۹-۱۰۸).

۱-۳- فرم یابی

ایدهٔ تبعیت فرم از نیرو مرتبط با سازه‌هایی است که بارهایشان را مستقیماً از طریق نیروهای محوری یا درون صفحه ای منتقل می کنند. در اینگونه موارد و در صورتی که خمشی رخ ندهد، فرم به وسیلهٔ نیروها شکل می گیرد و بالعکس. این اشکال با فرم فعال، از ابتدا شناخته شده نیستند و بنابراین به یک پروسهٔ فرم‌یابی نیازمندند(حسینی، ۱۳۹۵: ۱۴). فرم یابی در واقع یک فرآیند رو به جلو است که در آن پارامترها مستقیماً برای یافتن یک هندسهٔ بهینهٔ برای سازه ای است که تحت بارگذاری در تعادل استاتیکی باشد(Adriaenssens,2014:2). روش های متعددی برای فرم یابی وجود دارند که مهم ترین آن ها روش های فرم یابی غیر عددی (روش تجربی) و روش فرم‌یابی رایانشی با انواع تکنیک‌های محاسباتی می‌باشند.

۱-۳-۱- روش‌های فرم‌یابی غیرعددی

پیش از پیشرفت امکانات کامپیوتری برای فرم‌یابی و مدل‌سازی سطوح مختلف مانند غشاها و پوسته ها، اغلب از روش های تجربی برای مدل‌سازی فیزیکی و فرم‌یابی استفاده می شد. چند نمونه از روش های تجربی متداول مورد استفاده طراحان در فرم‌یابی سطوحی همچون پوسته ای یا غشایی عبارتند از : مدل تعادل فیزیکی[۷](Bechthold, 2008:65)، مدل فیلم صابونی[۸](Huntington,2013:63) ، مدل سیم نرم و گیره های کابلی کوچک[۹] (Drew, 2008:37) و مدل آویخته[۱۰] (Collins, 1963:80).

۱- Dutta
۲- Shareef
۳- Łaٍ tka
۴- Kiwi3D
۵- B-Spline Basis Function
۶- NURBS Surfaces
۷- Physical Equilibrium Model
۸- Soap Film
۹- Tulle and wire models
۱۰- Hanging Model

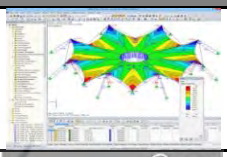
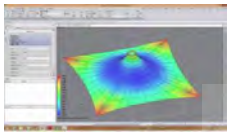
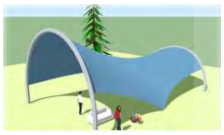
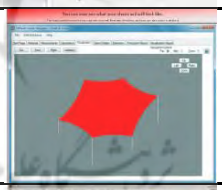
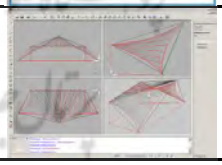
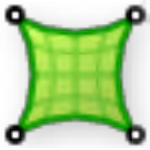
۲-۳-۱- روش های فرم‌یابی رایانشی

امروزه با پیدایش کامپیوتر و انواع نرم افزارهای پیشرفته، می‌توان با دقت و سرعت بالا و نیز سهولت بیشتر به فرم یابی انواع سازه های غشایی پرداخت. فرم یابی رایانشی برای سازه های غشایی، در واقع رفتار فیزیکی مدل های فرم یابی شده را شبیه سازی می کنند با این تفاوت که امکان بررسی و کشف انواع گزینه ها در زمان کوتاه (در مقایسه با مدل های فیزیکی) را به کاربر می‌دهد(Bechthold, 2008:73). طرح دهکدهٔ المپیک مونیخ، اوج هنر طراحی سازه های کششی بر مبنای مدل‌سازی فیزیکی را به نمایش گذاشت، ضمن این‌که پلی به سوی عصر نوین "فرم‌یابی"و "تحلیل" کامپیوتری ایجاد کرد(هانینگتون، ۲۰۰۴: ۱۳۱). پس از آن بهبود فناوری محاسباتی سرعت گرفت تا اینکه در اواسط دههٔ ۸۰ میلادی، مهندسان ورودی بیشتر داده ها را به صورت خودکار درآوردند و می توانستند به سرعت نقشه‌هایی را تولید کنند که هندسهٔ سازه و تغییر شکل های آن را تحت بارگذاری نشان می دادند(هانینگتون، ۲۰۰۴: ۱۳۳). لازم به ذکر است استفاده از روش های کامپیوتری نیازمند دانش و درک قوی از مباحث مرتبط با تعادل سازه ای و ریاضیات و الگوریتم ها می باشد(Bechthold, 2008:73). چند نمونه از مهم ترین تکنیک‌های محاسباتی و عددی[۱] که در فرم‌یابی و آنالیز کامپیوتری از آن‌ها استفاده می شود عبارتند از: روش چگالی نیرو [۲]،روش لختی پویا [۳] و روش المان محدود[۴] از میان این روش ها، روش های چگالی نیرو و لختی پویا به طور گسترده‌تری مورد پذیرش و استفاده برای فرم‌یابی سازه های غشایی واقع گشته اند. روش المان محدود نیز مورد استفاده هست با این تفاوت که اغلب برای شبیه‌سازی رفتار سازه‌ای غشا با اعمال بارها از آن استفاده می شود(Bechthold, 2008:73).

۱-۲-۳-۱- نرم افزارهای موجود برای فرم یابی انواع سازه های غشایی

نرم افزارهای متعددی برای فرم یابی سازه های غشایی وجود دارد. چند نمونه از این نرم افزارها در جدول ۱ ذکر شده است(حسینی۱۳۹۵: ۸۵-۹۰).

جدول ۱- انواع نرم افزارهای مورد استفاده در فرم یابی سازه های غشایی(مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰)

نام نرم افزار	تصویری از محیط نرم افزار	نام نرم افزار	تصویری از محیط نرم افزار
Easy		K3-Tent	
Oasys GSA		Ferrari Sketch	
Form finder		Rhinoceros	
Meliar MPanel		Grasshopper& Kangaroo	
ixForten		Smart Form	

در میان این نرم افزارها، نرم افزار راینو و پلاگین گرس‌هاپر و افزونهٔ کانگورو در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته شده است که از جمله نرم‌افزارهای پرکاربرد در حوزه معماری در فرم یابی سطوح غشایی فرم آزاد می باشد.کانگورو یک افزونه برای گرس‌هاپر می باشد که در سال ۲۰۱۱ توسط دنیل پایکر[۵] برنامه نویسی شده و به مجموعهٔ افزونه های پلاگین گرس‌هاپر افزوده شده است .این افزونه رفتار فیزیکی را مستقیماً در محیط مدل سازی سه بعدی شبیه سازی می‌کند. در ضمن به هنگام راه اندازی[۶] موتور فیزیکی در نرم افزار این امکان برای کاربر فراهم می‌آید تا بتواند تعاملی لحظه به لحظه و به صورت زنده با فرآیند فرم یابی سازه برقرار نماید (Piker,2011).

۱- Numerical
۲- Force density method
۳- Dynamic relaxation technique
۴- Finite element methods
۵- Daniel Piker
۶- run

۲- یافته های تحقیق

به دنبال مطالعه و بررسی سازه های غشایی و انواع روش های فرم یابی، فرآیند فرم یابی سازه های غشایی فرم آزاد در دو بخش عمدۀ طراحی اولیه و نیز فرم یابی هندسی به تفکیک مورد بررسی واقع گردید و برای هرکدام از آن ها مراحلی معرفی گردید.

۲-۱- طراحی اولیه

بخش طراحی اولیه در قالب سه مرحله تعریف شد که عبارتند از:

- کانسپت و ایده
- الزامات معماری
- الزامات سازه ای

۲-۱-۱- کانسپت و ایده

در فرآیند طراحی یک اثر معماری، معمولا طراح(مهندس معمار) آنچه در ذهن خود دارد در قالب یک ماکت حجمی یا اسکیس و یا مدل سه بعدی کامپیوتری ارائه می دهد. البته این فرآیند ارتباط مستقیمی با نوع سازۀ انتخابی دارد. اگر سازۀ مورد نظر جزو سازه‌های فرم فعال همچون سازه‌های غشایی باشد دو حالت پیش رو داریم:

۱ -فرم اولیۀ طرح از قبل مشخص است و در قالب ماکت حجمی یا اسکیس و یا مدل سه بعدی کامپیوتری ارائه می شود.

۲- در طراحی سازه های غشایی، در اغلب موارد پروسه فرم یابی فرم حاصله را به طراح دیکته می کند و طراح تنها یک سری پارامتر هندسی از ایده ها و کانسپت های اولیه و الزامات معماری و سازه ای را مشخص می کند. در این مرحله طراح تمامی ایده ها و الزامات مورد نیاز را به صورت پارامترهای هندسی تعریف می کند. الزاماتی که اغلب کیفی هستند، همچون زیبایی شناسی، تا حد امکان به پارامترهایی هندسی ترجمه شده و به صورت کمی به همراه سایر داده های کمی وارد فرآیند فرم یابی می‌شوند.

۲-۱-۲- الزامات معماری

الزامات و نیازهای معماری طرح کاملا بررسی و لیستی از مهم ترین موارد برای اعمال در فرآیند فرم یابی استخراج می گردد. از جمله مهم‌ترین الزامات معماری که در طراحی و فرم یابی سازه های غشایی فرم آزاد بایستی مدنظر قرار گیرند می توان به مواردی همچون زیبایی شناسی، مسائل اقلیمی، هزینه، مصالح، میزان انرژی مصرفی، آکوستیک، نور و روشنایی، استانداردها و ضوابط مربوط به کاربری ها، مسائل اجرایی، تناسبات مقیاس و الگوی برش اشاره کرد.

۲-۱-۳- الزامات سازه ای

الزامات سازه ای طرح نیز با کمک مهندس سازه کاملا مورد بررسی قرار گرفته می شود و لیستی از مهم ترین موارد برای اعمال در فرآیند فرم یابی استخراج می گردد. از مهمترین الزامات سازه ای که در طراحی و فرم یابی سازه های غشایی فرم آزاد بایستی مدنظر قرار بگیرند عبارتند از: نوع سازه، شرایط تکیه گاهی، نیروهای وارده، ایستایی و تعادل استاتیکی، پایداری و دوام و مصالح.

۲-۲- فرم یابی هندسی

با بررسی انواع روش های فرم یابی و با تأکید بر روش فرم یابی رایانشی توسط نرم افزار راینو و پلاگین گرس هاپر و افزونۀ کانگورو، بخش فرم یابی هندسی در قالب هفت مرحله تعریف شد که عبارتد از:

۱. انتخاب روش فرم یابی
۲. تعیین پارامترهای هندسی و شرایط مرزی و محدوده[۱]
۳. مدل‌سازی هندسی
٤. مش بندی
٥. مشخص کردن نقاط تکیه گاهی[۲]
٦. مشخص کردن نیروها
۷. انجام فرم یابی

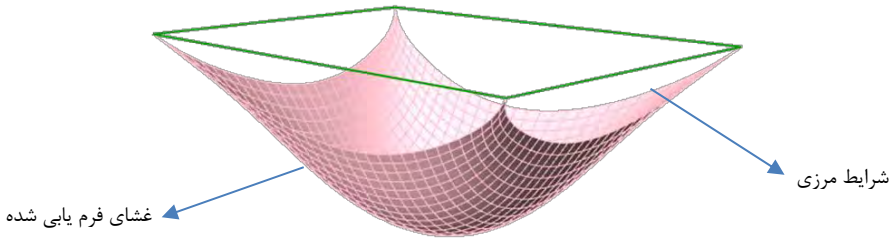
۲-۲-۱- انتخاب روش فرم یابی

برحسب شرایط تعریف شده برای طراحی سطح غشایی فرم آزاد مورد نظر، روش و نرم افزار مناسب برای فرم یابی انتخاب می‌گردد که در این پژوهش فرم یابی به روش رایانشی می باشد. برای مدل‌سازی سه بعدی از محیط نرم افزار راینو6 و پلاگین گرس‌هاپر آن و برای فرم یابی از افزونۀ کانگورو در پلاگین گرس‌هاپر استفاده شده است که فرآیند فرم یابی در آن به صورت غیرخطی[۳]و محاسبات آن بر مبنای روش عددی لختی پویا[۴]انجام می‌گیرد.

۲-۲-۲- تعیین پارامترهای هندسی و شرایط مرزی و محدوده

در فرآیند فرم یابی یک سطح غشایی در ابتدا براساس داده های بدست آمده از کانسپت ها و الزامات معماری و سازه ای، یک سری پارامترهای هندسی استخراج می شود. سپس بر اساس پارمترهای هندسی استخراج شده، شرایط مرزی و محدوده ای که قرار است سطح غشایی در آن طراحی شود تعریف می‌گردد. به عنوان مثال برای فرم یابی یک سطح غشایی مشابه شکل ۲ نیاز به یک محدودۀ مستطیلی شکل با ابعاد و اندازه های مورد نظر داریم.

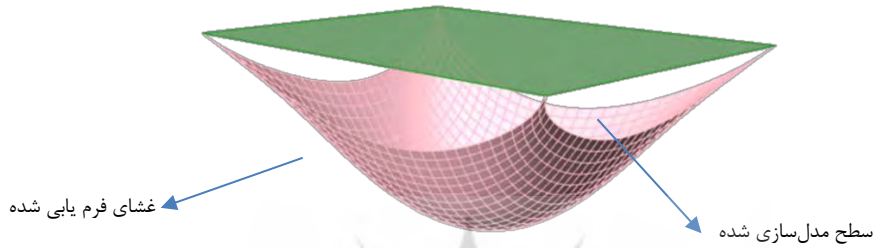
۱- boundary
۲- AnchorPoints
۳- Non-linear
۴- Dynamic Relaxation



شکل ۱- شرایط مرزی و محدودهٔ مستطیل شکل اولیه برای طراحی غشا(مأخذ: نگارندگان،۱۴۰۰)

۳-۲-۲- مدل‌سازی هندسی

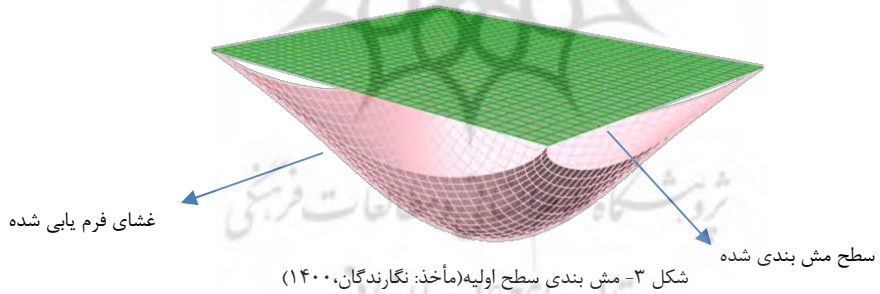
شرایط مرزی و تکیه گاه ها و سطح اولیه که قرار است فرآیند فرم یابی بر روی آن اعمال شود در یک نرم افزار سه بعدی در قالب نقطه، خط، سطح و حجم مدل‌سازی هندسی می شود. برای مدل سازی محدودهٔ مستطیلی شکل۲ در محیط نرم افزار راینو یک مستطیل[1] برای مرز پیرامونی و یک صفحهٔ مسطح[2] داخل آن ترسیم گردید. البته امکان ترسیم این اشکال به صورت پارامتریک در نرم افزار گرس‌هاپر نیز وجود داشت اما برای سهولت در ترسیم و کاهش زمان، مدل‌سازی هندسی آن ها در محیط راینو صورت گرفته سپس به محیط گرس‌هاپر انتقال داده شد تا بقیه مراحل به صورت پارامتریک در این محیط ادامه یابد.



شکل ۲- سطح اولیهٔ مدل‌سازی شده برای طراحی غشا(مأخذ: نگارندگان،۱۴۰۰)

۴-۲-۲- مش بندی

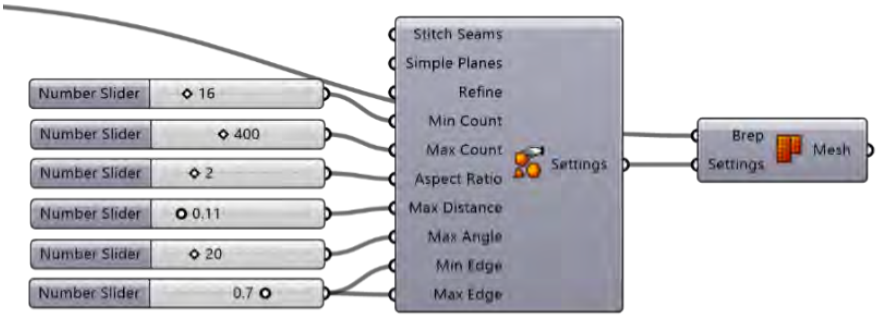
از آنجایی که مش ها قابلیت ذخیرهٔ اطلاعات در نقاط[3] خود را دارند، گزینهٔ مناسبی برای شبیه سازی تار و پودهای پارچه می باشند. بنابراین، پس از انتقال سطح اولیهٔ طراحی شده در نرم افزار راینو به محیط گرس هاپر، توسط یک کامپونت[4] مانند Mesh Brep برای آن یک مش تعریف شد(شکل ۳) و با استفاده از کامپونتی مانند Mesh Settings تنظیمات مورد نیاز بر روی آن اعمال گردید تا به یک مش بندی یکپارچه دست یابیم زیرا با افزایش تقسیمات مش بندی ها، سطحی نرم تر و نزدیک به واقعیت خواهیم داشت.



شکل ۳- مش بندی سطح اولیه(مأخذ: نگارندگان،۱۴۰۰)

در مش بندی یک سری نکات بایستی مد نظر قرار گیرد و ویرایش های لازم در طراحی سطوح پیچیده تر انجام گیرد تا به یک مش بندی یکپارچه دست یابیم. فرآیند تعریف مش برای سطح مدل‌سازی شده در هر دو محیط راینو و گرس‌هاپر قابل اجرا می‌باشد. مزیت محیط گرس‌هاپر این است که امکان نگارش الگوریتم‌هایی توسط افزونه های متعدد در پلاگین گرس‌هاپر از جمله: افزونه های ویوربرد[5] مش پلاس[6] ان جی ان[7] به صورت پارامتریک برای ایجاد و ویرایش مش بندی در این محیط وجود دارد که موجب سهولت در دست یابی به یک مش بندی یکپارچه مخصوصاً در سطوح پیچیده‌تر می‌شود. در شکل ۴ الگوریتم نگارش شده در نرم افزار گرس‌هاپر برای مش بندی در فرآیند فرم یابی سطح غشایی فرم آزاد مشاهده می‌شود.

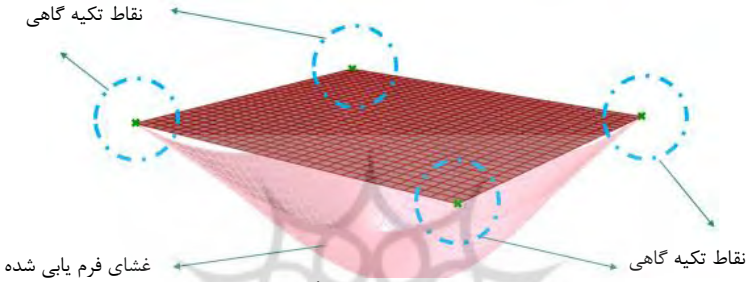
۱- Rectangle
۲- Planar Surface
۳ Nodes
۴ Component
۵ Weaverbird
۶ Mesh+
۷ nGeon



شکل ۴- الگوریتم نگارش شده برای مش بندی(مأخذ:نگارنده)

۵-۲-۲- مشخص کردن نقاط تکیه گاهی

در این مرحله نوع و وضعیت تکیه گاه های سطح طراحی شده تعیین می شود و در قالب نقطه برای تکیه گاه های نقطه ای مانند دکل ها و خط برای تکیه گاه‌های خطی مانند قاب ها تعریف می‌گردد. بدین ترتیب نقاط گوشه های مستطیل را به عنوان لنگر برای موتور فیزیکی تعریف کردیم(شکل۵). نقاط تکیه گاهی یا نقاط لنگرگاهی در یک مکان مشخص[۱] در حین فرم یابی (تحت هر نیرویی برآن‌ها) بدون هیچ تغییر مکانی در جای خود ثابت و بدون حرکت باقی می مانند.



شکل ۵- نقاط تکیه گاهی مشخص شده (مأخذ: نگارندگان، ۱۴۰۰)

۶-۲-۲- مشخص کردن نیروها

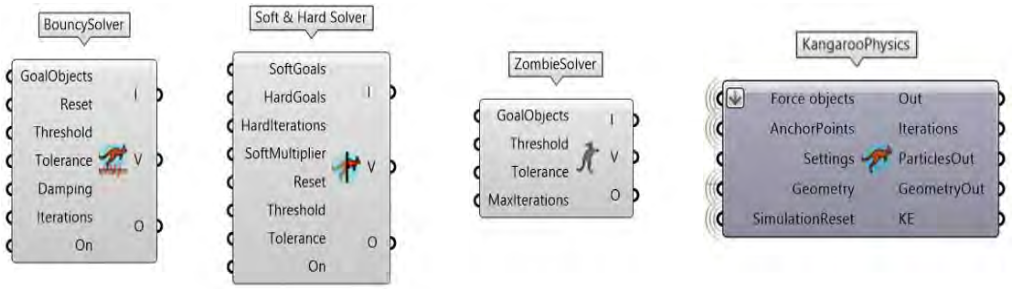
در این مرحله نیروهای فیزیکی وارد بر سطح غشایی تعیین شده و با استفاده از قابلیت های نرم افزار موردنظر شبیه سازی شده و به سطح مش بندی شده اعمال می گردد. به واسطهٔ این نیروها می‌توان نیروهای وارد بر نقطه ها و خط های روی مش ها را کنترل کرد. به عنوان مثال درجه سختی غشای طراحی شده و میزان کشیدگی تار و پود پارچه در قالب کنترل میزان تغییر طول خطوط بین نقاط مش ها تعیین می‌گردد.

در این پژوهش در افزونهٔ کانگورو موتور فیزیک کانگورو تحت عنوانSolver برای شبیه سازی نیروهای فیزیکی در محیط گرس‌هاپر ساخته شده و مؤلفه هایی تحت عنوان Force Objects جهت اعمال نیرو به مش طراحی شده ایجاد می‌شود. به واسطهٔ این نیروها می توان نیروهای وارد بر نقطه ها و خط های روی مش ها را کنترل کرد. در شکل۶ چند نمونه از نیروهایی که در افزونهٔ کانگورو در قالب کامپوننت هایی وجود دارد و می‌توان بر سازه اعمال کرد نشان داده شده است. مانند: نیروی جهت دار (Unary force)، نیروی باد (Wind)، نیروی فنر مانند (Springs From Line)، نیروی فشاری (Pressure)، نیروی کششی فیلم صابون (Soap Film) و بسیاری موارد دیگر.

شکل ۶- چند نمونه از نیروهای قابل اعمال بر سازه ها در افزونهٔ کانگورو (مأخذ: نگارندگان،۱۴۰۰)

۱- Location

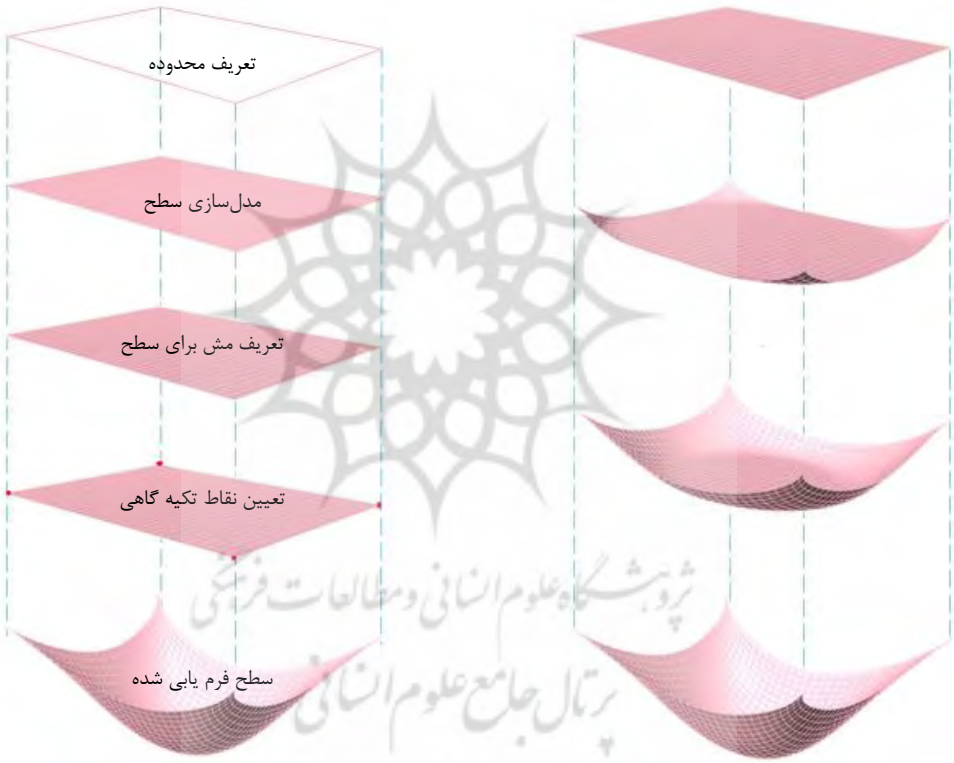
در شکل۷ چند نمونه از موتورهای فیزیکی موجود در افزونهٔ کانگورو نشان داده شده است که می‌توان به کمک هر کدام از آن‌ها به شبیه سازی و اعمال نیروها بر روی سازه پرداخت.



شکل ۷- چند نمونه از موتورهای فیزیک (Solver) در افزونهٔ کانگورو (مأخذ: نگارندگان،۱۴۰۰)

۷-۲-۲- انجام فرم‌یابی

در نهایت فرآیند فرم‌یابی با راه اندازی[۱] موتور فیزیک آغاز می‌شود. مش‌بندی‌ها شروع به ریلکس شدن کرده و پس از رسیدن به حالت ثبات و تعادل استاتیکی، یک سطح کمینهٔ در حال تعادل که تمامی پارامترهای هندسی مورد نظر در آن اعمال شده است، بدست می‌آید. در شکل ۸ الف نحوهٔ شکل گیری فرم سطح غشایی از سطح مستطیلی به سطح منحنی در فرآیند فرم یابی نشان داده شده است. در شکل۸ ب پنج مرحلهٔ اصلی از هفت مرحلهٔ ارائه شده برای فرم یابی یک سطح غشایی فرم آزاد نشان داده شده است.



(ب) (الف)

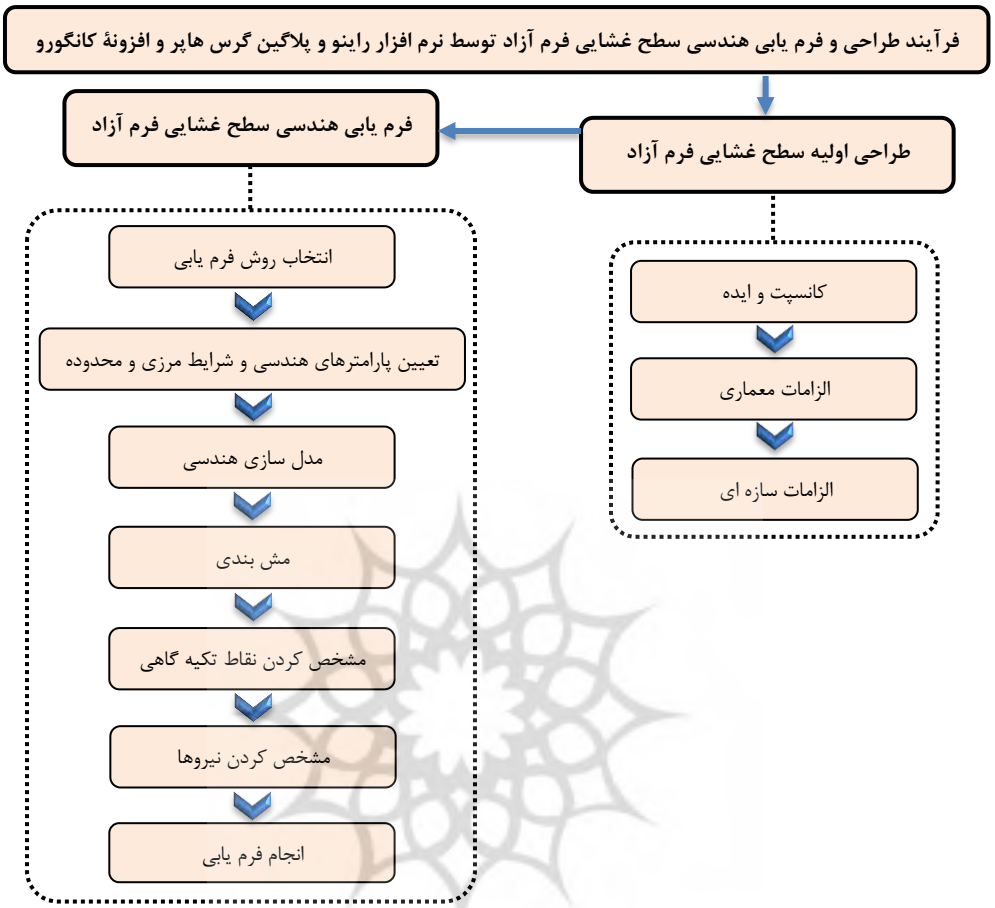
شکل ۸- الف: نحوهٔ شکل گیری فرم سطح غشایی از سطح مستطیلی به سطح منحنی در فرآیند فرم یابی سطح غشایی
ب: پنج مرحلهٔ اصلی ارائه شده برای فرم یابی یک سطح غشایی فرم آزاد (مأخذ: نگارندگان،۱۴۰۰)

۳- بحث و نتیجه‌گیری

سازه های غشایی به دلیل وزن کم و ظاهر جذاب، با وجود محاسبات و اجرای پیچیدهٔ آن‌ها، امروزه، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و طراحان قرار گرفته و پژوهش های متعددی در زمینه سازه های غشایی انجام گرفته است. هدف اصلی این پژوهش، ارائه یک روند برای فرم یابی هندسی سازه های غشایی فرم آزاد می‌باشد که بتوان از آن در طراحی هر نوع سازهٔ غشایی استفاده کرد. در جهت محقق کردن این هدف در ابتدا پیشینهٔ پژوهش های انجام شده در زمینه فرم یابی سازه های غشایی و مفاهیم پایه مرتبط به طور کامل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در ادامه مفهوم فرم یابی و انواع روش ها و نرم افزارهای فرم یابی سازه های غشایی علی الخصوص افزونهٔ کانگورو در پلاگین گرس‌هاپر که در این پژوهش مورد استفاده واقع شده است، به تفصیل مطالعه و بررسی گردید.

۱- run

در نهایت با بررسی مراحل فرم یابی یک سطح غشایی فرم آزاد الگوریتمی به عنوان راهنما برای طراحی و فرم یابی هندسی سطوح غشایی فرم آزاد ارائه گردید. بدین ترتیب که سه مرحله اصلی کانسپت و ایده، الزامات معماری و الزامات سازه ای برای بخش طراحی ارائه شد. فرم یابی هندسی سازه های غشایی فرم آزاد نیز در هفت مرحله شامل انتخاب روش فرم یابی، تعیین پارامترهای هندسی و شرایط مرزی و محدوده، مدل سازی هندسی، مش بندی، تکیه گاه ها، نیرو ها و انجام فرم یابی با تمامی جزئیات معرفی شد. با استفاده از الگوریتم ارائه شده در این پژوهش ، براساس نیازهای طراحی هرگونه سازهٔ غشایی فرم آزاد را می‌توان فرم یابی کرد. الگوریتم نهایی ارائه شده برای فرآیند فرم‌یابی هندسی سازه‌های غشایی فرم‌آزاد برای این پژوهش در شکل ۹ ارائه شده‌است.



شکل ۹- الگوریتم نهایی ارائه شده برای فرآیند فرم‌یابی سازه‌های غشایی فرم‌آزاد برای این پژوهش(مأخذ:نگارندگان، ۱۴۰۰)

مراجع

۱. ایزدی، عباسعلی، علیرضا فاضل، رامین خلعتبری و سارا آکوچکیان. ۱۳۹۳. " معرفی شیوه ای نوین در ساخت و ساز دیجیتال فرم های آزاد در معماری براساس فن آوری واقعیت افزوده ". دوفصلنامه علمی-پژوهشی مرمت و معماری ایران. سال ۴. شماره ۸. صفحات ۶۱-۷۴.

۲. حسینی، فرزانه سادات. ۱۳۹۵. "فرم یابی به کمک نیروهای فیزیکی وارد بر سازه به کمک روش لختی پویا(طراحی انستیتو سازه های سبک وزن) ". پایاننامه ارشد دانشگاه تهران، تهران.

۳. داوری نجف آبادی، علی. ۱۳۹۵. " بررسی روش‌های یافتن فرم اولیه ی طراحی و الگوهای بررشی در سازه های چادری". پایاننامه ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان.

٤. سالوادوری، ماریو. ۱۹۰۷. "سازه در معماری". مترجم: محمود گلابچی. تهران. انتشارات دانشگاه تهران.

٥. ضرغامی، ساناز. ۱۳۹۷. " طراحی پوشش پاسخگو به محیط برای حیاط مرکزی کاروانسرای پیام ". پایاننامه ارشد دانشگاه هنراسلامی تبریز. تبریز.

٦. گلابچی، محمود، کتایون تقی زاده و محمدرضا گلابچی. ۱۳۹۳. "پوسته ها و سازه های ورق تاشده". تهران. انتشارات دانشگاه تهران.

۷. هانتینگتون، کریگ. ۲۰۰۴ ."سازه های پارچه ای کششی". مترجم: محمود گلابچی، محمدرضا مجاهدی و الهام سرکرده ئی. تهران. انتشارات دانشگاه تهران.

8. Adriaenssens, Sigrid., et al. 2014. Shell structures for architecture: form finding and optimization, London and New York, Routledge.
9. Bechthold, Martin. 2009. "Innovative Surface Structures, Technologies and Applications". London. Taylor & Francis.
10. Bletzinger, Kai-Uw, et al. 2005. "Computational methods for form finding and optimization of shells and membranes". Computer methods in applied mechanics and engineering. Volume 194, Issues 30–33. Pages 3438-3452.
11. Collins, George. R. 1963. "Antonio Gaudi: structure and form." MIT Press. Volume 8. Pages 63-90.
12. Drew, P. 2008. "New tent architecture". London. Thames & Hudson.
13. Dutta, Subhrajit and Siddhartha Ghosh. 2019. "Analysis and design of tensile membrane structures: Challenges and recommendations. "Practice Periodical on Structural Design and Construction. Volume 24. Issue 3, August.
14. Henriksson, Victoria. and Mariam Hult. 2015. "Rationalizing freeform architecture-Surface discretization and multi-objective optimization". Chalmers University of Technology,Department of Applied Mechanics (Master thesis).

15. Huntington, C. G. 2013. "Tensile fabric structures: design, analysis, and construction". ?. American Society of Civil Engineers.
16. Łątka, Jerzy F. and Michał Święciak. 2021. "The Obverse/Reverse Pavilion: An Example of a Form-Finding Design of Temporary, Low-Cost, and Eco-Friendly Structure."Buildings. Volume 11. Page 226.
17. Shareef Al-Azzawi, Rana Alaa and Hoda A. S. Al-Alwan. 2021. "Sustainable textile architecture: history and prospects". 4th International Conference on Engineering Sciences (ICES 2020). IOP Publishing Ltd
18. Vizotto, I. 2010. "Computational generation of free-form shells in architectural design and civil engineering". Automation in Construction. Volume 19. Issue 8. December 2010. Pages 1087-1105

منابع نرم افزاری

19. 1. Robert McNeel and Associates, Rhinoceros, 2013.
20. 2. Robert McNeel & Associates, Grasshopper, 2009.
21. 3. Daniel Piker, Kangaroo, 2011.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی