مکانیسم هندسی تبدیل سازه‌های فضاکار تک‌لایه به سیستم بستاروند متناظر

یاسر شهبازی*، دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز،y.shahbazi@tabriziau.ac.ir

محمدرضا چناقلو، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز. mrchenaghlou@sut.ac.ir

پریسا صادقی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری، p.sadeghi@tabriziau.ac.ir

چکیده

در یک سازه‌ی بستاروند تیرهای با طول کم به‌صورت متقابل به یکدیگر الحاق شده و دهانه بزرگی را بدون نیاز به تکیه‌گاه میانی پوشش می‌دهند. این سازه زیرمجموعه‌ی سازه‌های فضاکار بوده که به دلیل کاربست اتصالات غیر متمرکز، نیاز به اتصالات پیچیده را مرتفع می‌سازد. بااین‌حال پیچیدگی‌های طراحی و مدل‌سازی این نوع سازه، امکان استفاده گسترده از آن را از بین برده است. رویکردهای مختلفی برای استفاده از این سازه وجود دارد که یکی از رایج‌ترین آن‌ها استفاده از تک مدول به‌عنوان سازه‌ی اصلی می‌باشد. هدف این پژوهش ارائه روشی ساده و کارآمد برای طراحی این سازه با استفاده از الگوریتم نویسی در افزونه گرس‌هاپر برای دهانه‌های مختلف و تعداد المان‌های متنوع می‌باشد. برای انجام این پژوهش ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای صورت گرفته و پس از استخراج روش‌های طراحی این سازه، مدل‌سازی و الگوریتم نویسی آن انجام‌گرفته است. جهت تبدیل سازه‌ی فضاکار به سازه‌ی بستاروند متناظر از سه روش انتقال، چرخش و انتقال پیشرفته استفاده می‌شود. در این پژوهش، مدل‌سازی پارامتریک سازه‌های بستاروند و نحوه‌ی تبدیل سازه فضاکار تک‌لایه به سازه‌ی بستاروند متناظر به روش چرخش بر اساس معادلات حاکم در نرم‌افزار راینو و افزونه‌ی گرس‌هاپر انجام گرفته و در نهایت نتیجه این پژوهش به صورت الگوریتمی ارائه شده که با مشخص کردن چهار متغیر شعاع بیرونی، سطح مقطع اولیه تیر، زاویه چرخش و تعداد المان‌های سازه فرم نهایی سازه با توجه به نیاز طرح را ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سازه بستاروند، سازه فضاکار، مدل‌سازی پارامتریک، گرس‌هاپر.

مقدمه

سازه‌های بستاروند، رسیپروکال[1] یا نکسورید را می‌توان به‌عنوان یک سیستم سازه‌ای تعریف کرد که از المان‌های خطی صلب تشکیل‌شده و تک‌تک اعضا در مقایسه با دهانه کلی کوچک‌ترند. برای تشکیل این سازه حداقل به سه المان نیاز است که یکدیگر به به‌صورت متقابل حمایت کنند و این المان‌ها درون یک حلقه یا چندضلعی محاط شوند(,Pugnale & Sassone2014). در طول تاریخ این سازه همواره مورد توجه بوده و به‌منظور پوشاندن دهانه‌های بزرگ بدون تکیه‌گاه میانی توسط تیرهای کوتاه مورد استفاده قرارگرفته و عمدتاً به عنوان پوشش سقف کاربرد داشته است(,Baverel & Larsen2011). این سازه عضوی از مجموعه سازه‌های فضاکار بوده ولی برخلاف سازه‌های فضاکار که عمدتاً نیروهای را از طریق کشش و فشار منتقل می‌کنند این سازه‌ها از خمش و برش نیز برای انتقال نیرو استفاده می‌کند.(,Danz2015) یکی از روش‌های طراحی این سازه‌ها انتخاب یک سازه فضاکار تک‌لایه به عنوان الگوی اولیه و ایجاد تغییر در المان‌ها و شرایط قرارگیری آن‌ها نسبت به هم برای ایجاد یک سازه بستاروند است. این سازه‌ها به دو صورت مورد استفاده قرار می‌گیرند، روش اول استفاده از یک مدول به عنوان سازه اصلی و روش دوم استفاده از گسترش یک مدول در جهات مختلف برای پوشش دهانه موردنظر است. این سیستم به علت زیبایی بصری ، سبکی سازه، سادگی و سهولت اجرا، تنوع در الگوهای ساخت و عدم نیاز به اتصالات پیچیده بسیار کارآمد بوده و موجب علاقه‌مندی معماران برای استفاده گسترده از این سازه شده است همچنین از مزایای استفاده از این سازه می‌توان به عدم نیاز به اتصالات پیچیده اشاره کرد(,Baverel & Larsen2011).

به دلیل همبستگی غیر سلسله‌مراتبی المان‌های متعدد در این سازه، شکل نهایی آن به عوامل مختلفی بستگی دارد که ازجمله آن‌ها می‌توان به طول اعضا، تعداد اعضا، شعاع داخلی و خارجی و شیب تیرها اشاره کرد (,Parigi2016). تغییر هر یک از این عوامل موجب تغییر سایر عوامل و در نهایت تغییر شکل نهایی سازه می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت یکی از اصلی ترین چالش‌های پیش روی استفاده از این سازه طراحی و مدل‌سازی آن است. هدف اصلی این پژوهش، ارائه روش‌هایی برای ایجاد سازه بستاروند با استفاده از سازه فضاکار تک لایه به عنوان الگوی اولیه می‌باشد. باورل سه روش برای انجام این کار ارائه داده است؛ روش انتقال، روش چرخش و روش انتقال پیشرفته. پژوهش پیش رو در پی یافتن این سوال است که آیا می‌توان الگورتیمی ارائه کرد که یک گره ساده را به سیستم بستاروند متناظر با آن تبدیل کند؟ و در طی این مسیر روشی ساده برای طراحی و مدل‌سازی سازه‌های بستاروند المانی به‌صورت الگوریتمیک ارائه می‌شود.

در این مقاله، ضمن معرفی ویژگی سازه‌های بستاروند و روش‌های تبدیل یک هندسه ساده به بستاروند، متغیرهای تأثیرگذار بر هندسه نهایی یک سازه بستاروند مورد بررسی قرارداده و الگوریتم مدل‌سازی آن ارائه می‌شود. این مدل‌سازی توسط نرم‌افزار راینو[2] و افزونه گرس‌هاپر[3] انجام گرفته و در نهایت الگوریتمی ارائه شده که قابلیت تولید سازه بستاروند با تعداد المان‌ها و ویژگی‌های هندسی متنوع را داراست.

پیشینه موضوع:

سازه‌های بستاروند دارای قدمت تاریخی بوده و در طول تاریخ به شکل‌های مختلف، توسط اقوام در سراسر جهان مورد استفاده قرارگرفته است. پژوهش‌های علمی بر روی سازه‌های بستاروند از اواخر قرن بیستم آغاز شده است. عنوان "رسیپروکال فریم" اولین بار توسط طراح انگلیسی گراهام براون و در سال 1980 مطرح‌شده است. اولین پژوهش جامع بر روی این سازه‌ها توسط الگا پوپویچ لارسن در سال 1996 انجام شد که در آن ضمن معرفی این سازه، اصول اولیه طراحی و پارامترهای هندسی تأثیرگذار بر شکل نهایی این سازه مطرح شد. (,Popovic1996). در سال 2000 الیور باورل در پایان‌نامه دکتری خود هندسه شبکه‌های سه‌بعدی سازه‌های بستاروند را مورد بررسی قرار داده و فرم‌یابی آن را با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام داده است(,O. L. Baverel2000). دوث و باورل در سال 2009 رفتار گنبدهای بستاروند و ساختارهای مثلثی متداول را مقایسه کرده (,Douthe & Baverel2009)و با استفاده از روش لختی پویا، چگونگی طراحی این سازه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند(,O. Baverel & Pugnale2014). پاریگی در پژوهشی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف بر توزیع نیرو و رفتار سازه‌ای مرتبط با سازه‌های دوبعدی و سه‌بعدی را مورد بررسی قرار داده است(,Parigi & Kirkegaard2014).

در این پژوهش ضمن مطالعه روش‌های طراحی و مدلسازی این سازه و نیز بررسی عوامل تاثیرگذار بر هندسه نهایی آن، روش طراحی ارائه شده توسط باورل الگوریتم نویسی شده و در مرحله بعدی معادلات معرفی شده توسط لارسن برای الگوریتم اولیه تعریف می‌شود. در الگوریتم نهایی چهار متغیر تعریف شده که ضمن تغییر هرکدام فرم حاصل قابلیت ساخت خواهد داشت.

روش تحقیق:

در این پژوهش ضمن انجام مطالعات کتابخانه‌ای و با استفاده از نرم افزار راینو و افزونه گرسهاپر، مدلسازی و طراحی الگوریتم این سازه انجام شده و در طی این روند ابتدا چند ضلعی اولیه، مرکز چرخش و زاویه چرخش و محور چرخش المان ها مشخص شده و الگوریتم ابتدایی برای تولید سازه‌های بستاروند به دست آمده و در مرحله دوم از این پژوهش معادلات به دست آمده از منابع و مقالات به الگوریتم اضافه شده و همه متغیرها به صورت پارامتریک بهم مرتبط شده اند.

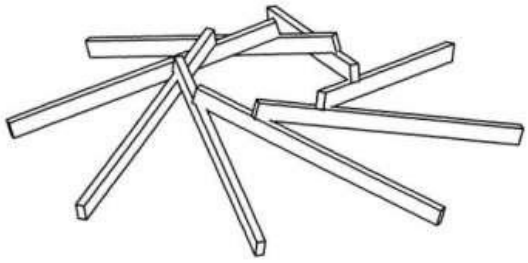
ادبیات موضوع

سازه‌های بستاروند، رسیپروکال یا نکسورید (نکسور به معنای تک المان) سازه‌های سه‌بعدی و زیرمجموعه سازه‌های فضاکار هستند که اعضای آن‌ها تیرهای صلب کوتاه بوده که با تیکه بر یکدیگر قابلیت پوشش دهانه‌های بزرگ را دارند. این سازه جزو سازه‌های مدولار بوده و از ترکیب حداقل سه المان تشکیل می‌شود که المان‌ها به‌صورت متقابل المان دیگری را حمایت می‌کنند و توسط المان سوم حمایت می‌شوند. با توجه به شکل 1 از کنار هم قرارگیری المان‌ها "فن" تشکیل

---

[1] Reciprocal
[2] Rhino
[3] Grasshopper

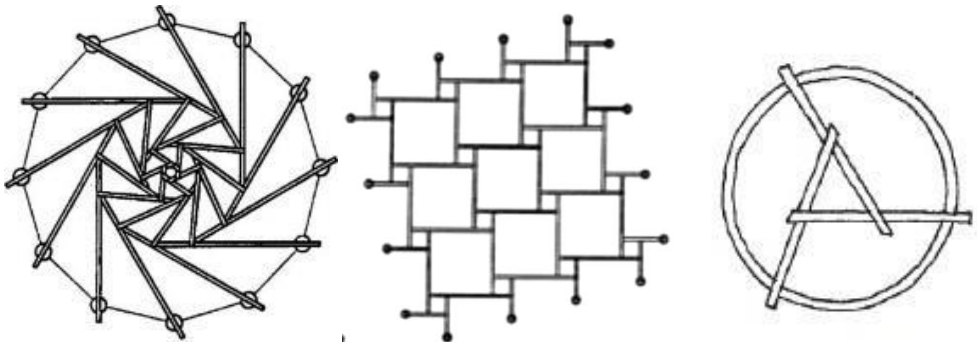
می‌شود که کوچک‌ترین عضو سازنده این مجموعه می‌باشد(,2007Larsen). فرم نهایی این سازه‌ها به هندسه اعضا و تکنولوژی اتصالاتشان وابسته است(,2017Gherardini & Leali).



شکل 1: یک فن سازه بستاروند با المان خطی (,2007Larsen)

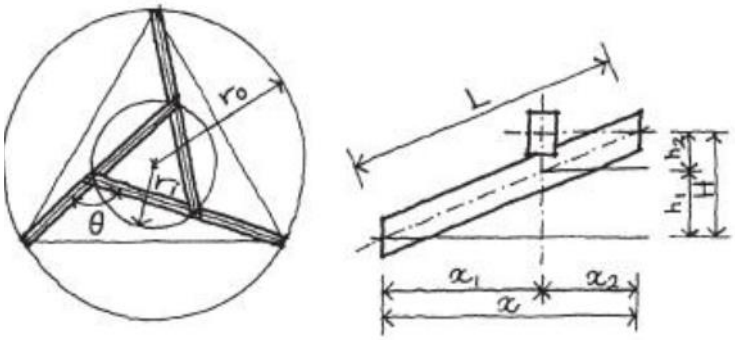
با توجه به انواع هندسه قرارگیری فن‌ها و المان‌ها در کنار یکدیگر کلیت این سازه به سه دسته تقسیم می‌شود (شکل 2):

- مدول پایه: کل سازه از یک مدول تشکیل‌شده‌است.
- مدول مضاعف: سازه از گسترش مدول‌ها در کنار یکدیگر تشکیل می‌شود.
- مدول پیچیده: از قرارگیری یک مدول ساده در مرکز و گسترش آن با چندین تک مدول متفاوت به وجود می‌آید.



شکل2 : به ترتیب از راست به چپ مدول پایه، مدول مضاعف و مدول پیچیده(,2007Larsen).

فرم نهایی این سازه به پارامترهای مختلفی ازجمله تعداد اعضا، شعاع داخلی و خارجی، ابعاد و هندسه المان‌ها بستگی دارد (شکل 3). علاوه بر این سلسله‌مراتب و جهت قرارگیری المان‌ها نیز بر فرم نهایی تأثیرگذار است. با توجه به شکل 4 درصورتی‌که همه المان‌ها ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد روی یکدیگر قرار گیرند فرم خاص تک انحنایی و گنبدی شکل بوده و در غیر این صورت فرم حاصل فرم آزاد خواهد بود(Douthe & ,2009Baverel). نیروهای درون اعضا برای یک‌بار متقارن در همه عضوها با برابر بوده و در تکیه‌گاه‌ها نیروی رانش به وجود می‌آید که یک حلقه کششی قادر است این نیروی رانش به بیرون را مهار کند(,2007Larsen). سازه بستاروند درواقع یک سازه سه‌بعدی با هندسه پیچیده بوده و برای طراحی و مدل‌سازی آن، درک ساختار و پارامترهای تأثیرگذار اهمیت فراوانی دارد. پارامترها و معادلات مختلفی برای طراحی و توسعه یک فن تعریف‌شده که این پارامترها به‌صورت غیر سلسله‌مراتبی بر روی یکدیگر تأثیر می‌گذارند. این پارامترها عبارت‌اند از :



شکل 3 :پارامترهای تأثیرگذار بر هندسه سازه بستاروند با المان خطی(,2007Larsen).

- شعاع خارجی (ro)

$$\theta = \frac{360}{n}$$

$$x_2 = 2r_i \sin\frac{\theta}{2}$$

$$x_1 = \left[r_0^2 - \left[r_i \cos\frac{\theta}{2}\right]^2\right]^{\frac{1}{2}} - \frac{x_2}{2}$$

معادله شماره 1

$$x = x_1 + x_2$$

$$h_1 = H\frac{x_1}{x}$$

$$h_2 = H - h_1$$

$$L = (x^2 + h^2)^{\frac{1}{2}}$$

- شعاع داخلی چشمه ایجادشده (ri)

معادله شماره 2

- طول تیر (L)
- تعداد تیر (n)

معادله شماره 3

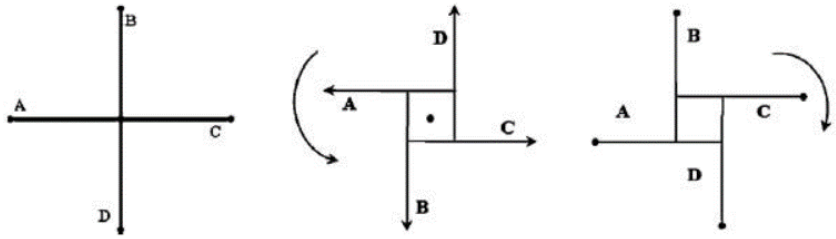
- ارتفاع عمودی (H)
- ارتفاع از محور تیرها در محل تقاطع (h2)

معادله شماره 4

معادله شماره 5

معادله شماره 6

معادله شماره 7

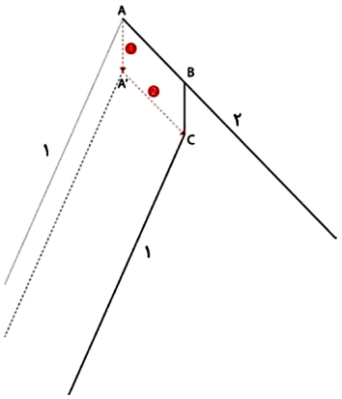


شکل 4: جهت چرخش مدول ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد(,Douthe & Baverel2009).

مواد و روش

به دلیل وابستگی و تأثیرگذاری هرکدام از پارامترهای موجود در این سازه، طراحی و پیش‌بینی فرم نهایی آن را به موضوعی چالش‌برانگیز تبدیل کرده است. باورل سه روش انتقال، چرخش و انتقال پیشرفته را برای تبدیل یک قاب استاندارد یا یک سازه فضاکار تک لایه به یک قاب بستاروند ارائه کرده است. در این پژوهش ضمن معرفی روش‌های معرفی‌شده توسط باورل برای تبدیل یک الگوی ساده به یک سازه بستاروند، الگوریتم روش چرخش توسط نرم‌افزار راینو و افزونه گرسهاپر مدل‌سازی شده است. در گام دوم این پژوهش معادلات مطرح‌شده توسط لارسن به الگوریتم موجود اضافه‌شده است.

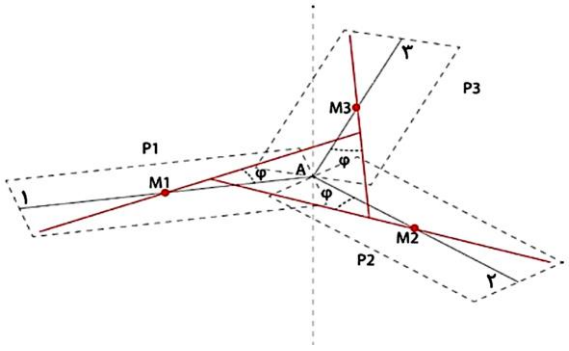
- **روش انتقال**[1]: با توجه به شکل 5 خروج از مرکز المان‌ها به‌وسیله انتقال یک المان به‌موازات المان دیگر به وجود می‌آید. المان‌های 1 و 2 در نقطه A متقاطع می‌باشند. نقطه A` به‌وسیله انتقال نقطه A روی بردار نرمال دو المان تشکیل می‌شود. نقطه C از طریق انتقال المان 1 به‌موازات المان 2 به دست می‌آید. پاره‌خط AB طول درگیری را تعریف می‌کند درحالی‌که پاره‌خط BC میزان خروج از مرکزیت المان‌ها را مشخص می‌کند. (Anastas, Rhode-Barbarigos, & Adriaenssens, 2016)



شکل 5: روش انتقال(,.Anastas et al**2016**)

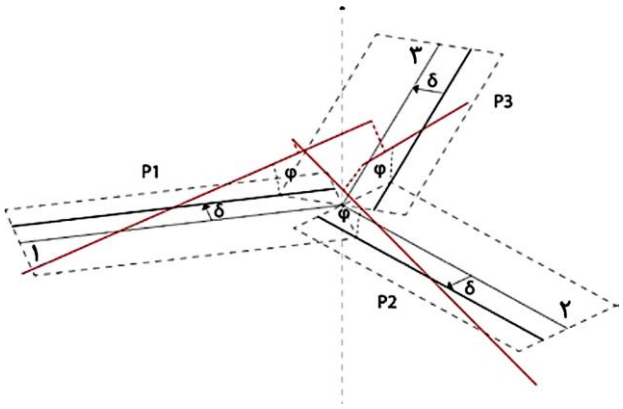
[1] The translation method

- **روش چرخش**[1]: این روش بر اساس چرخش المان‌ها حول مرکز المان می‌باشد. المان‌های 1 و 2 و 3 در نقطه A با یکدیگر متقاطع در نظر گرفته‌شده‌اند. درصورتی‌که هر سه المان حول نقطه مرکزی خود با زاویه φ و در جهت یکسان (ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد) بچرخند یک فن سه‌تایی بستاروند ایجاد خواهد شد(,.Anastas et al2016)(شکل 6).



شکل **6:** روش چرخش(,.Anastas et al**2016**).

- **روش انتقال پیشرفته**[2]: در این روش، با توجه به شکل 7 هر المان در مرحله اول به میزان δ در صفحه خود و عمود بر خطوط مرکزی در یک‌جهت (ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد) جابه‌جاشده سپس هر المان حول نقطه مرکزی خود در جهت عمود بر صفحه خطوط متقاطع ابتدایی، با زاویه φ می‌چرخند(,.Anastas et al2016).



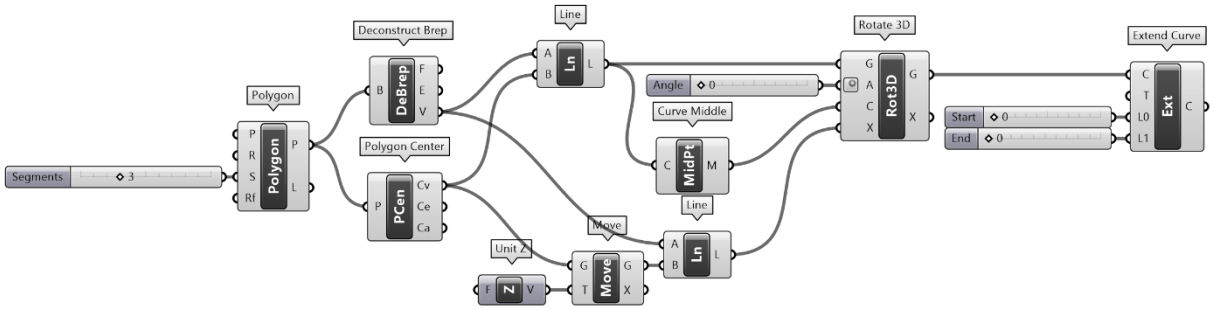
شکل 7: روش انتقال پیشرفته(,.Anastas et al**2016**).

یافته‌ها

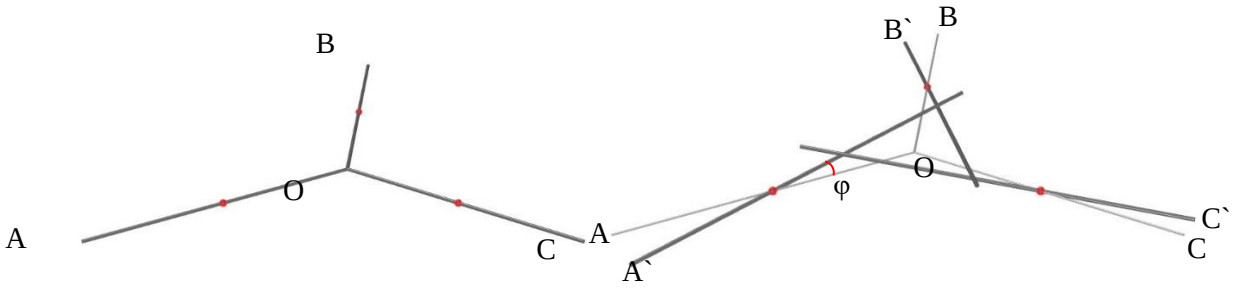
با توجه به روش‌های ارائه‌شده و نیز مطالعات پیشین صورت گرفته روش چرخش، روش مناسب‌تری بوده که بیشتر موردتوجه طراحان قرارگرفته بنابراین در این پژوهش نیز از روش چرخش استفاده می‌شود. مطابق شکل 8 الگوریتم مدل‌سازی این روش با استفاده از یک چندضلعی آغاز شده در مرحله بعد گوشه‌های چندضلعی توسط یک خط با مرکز شکل وصل شده است. با توجه به شکل 9 این خطوط که در یک نقطه O همگرا هستند به مرکزیت نقاط موجود، در یک‌جهت (ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد) به مقدار φ دوران داده‌شده و سپس المان‌ها تا جایی امتداد داده می‌شوند که با المان‌های مجاور همپوشانی داشته باشند.

[1] The rotation method

The extended translation method[2]

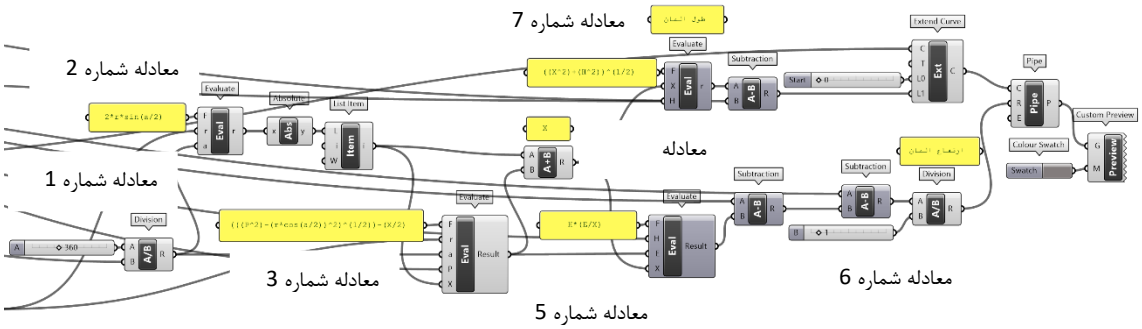


شکل 8: الگوریتم تبدیل سه تیر همگرا به سیستم بستاروند (نگارندگان).



شکل 9: شکل سمت راست نشان‌دهنده سه تیر همگرا و شکل سمت راست تبدیل‌شده به سیستم بستاروند (نگارندگان).

با توجه به الگوریتم نشان داده‌شده در شکل 8، در صورت اعمال تغییر زاویه یا تعداد المان‌ها روی شکل اولیه، میزان امتداد و سطح مقطع تیر باید جداگانه مورد تغییر و تطبیق قرار گیرند؛ بنابراین در ادامه برای تکامل الگوریتم اولیه از معادلات مطرح‌شده در شکل 3 استفاده‌شده است. در این الگوریتم شعاع بیرونی، سطح مقطع اولیه تیر، زاویه چرخش و تعداد المان‌های سازه متغیر بوده و با تغییر هرکدام از این پارامترها با توجه به معادلات تعریف‌شده در الگوریتم شکل 10، میزان امتداد موردنیاز برای همپوشانی، ارتفاع المان‌ها و ارتفاع نهایی سازه تعیین می‌شود. نتایج این الگوریتم برای المان‌های سه تا6 ضلعی در شکل 11 نشان داده شده است.



شکل 10: افزودن معادلات به الگوریتم اولیه (نگارندگان).

شکل 11: مدل‌سازی فن سه تا شش‌ضلعی (نگارندگان).

با توجه به شکل 10 معادله شماره 2 معرف اندازه چشمه داخلی، معادله شماره 3 نشان‌دهنده اندازه نقطه اتکای المان مجاور تا نقطه اتکای همان المان بر روی تکیه‌گاه بوده و معادله شماره 5 فاصله بین محور تار خنثی دو المان کنار هم را نشان می‌دهد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت نصف این مقدار ارتفاع المان‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. معادله شماره 6 نشان‌دهنده فاصله تار خنثی در نقطه تقاطع دو المان و بر روی تکیه‌گاه بوده و معادله 7 طول نهایی تیر را مشخص می‌کند.

تحلیل یافته‌ها

همانگونه که پیش از این ذکر شد چهار متغیر برای این الگوریتم تعریف شده که شامل زاویه المان‌ها نسبت به یکدیگر، ارتفاع المان‌ها، اندازه چشمه خارجی سازه و تعداد المان‌ها بوده است. در ادامه پژوهش به ترتیب تغییر هر کدام از متغییرها و تاثیر آن به شکل کلی سازه و تاثیر آن بر هندسه نهایی سازه مورد بررسی قرار داده می‌شود. با توجه به شکل 10 معادله شماره 2 معرف اندازه چشمه داخلی سازه بوده که با توجه به روابط می‌توان گفت با کاهش زاویه چرخش، چشمه داخلی سازه کوچک‌تر شده و ارتفاع سازه افزایش می‌یابد، با ایجاد تغییر در زاویه الگوریتم و کاهش اندازه چشمه داخلی با توجه به شکل شماره 12 ارتفاع سازه بدون تغییر در ارتفاع المان‌های افزایش می‌یابد.

شکل 12: کاهش اندازه چشمه داخلی موجب افزایش ارتفاع کلی سازه می‌شود(نگارندگان).

با توجه به معادله شماره 5 مرتبط با شکل 3، افزایش ارتفاع المان‌های بدون ایجاد تغییر در سایر متغییرها در نهایت موجب افزایش ارتفاع سازه می‌شود. با توجه به شکل شماره 13، افزایش ارتفاع المان‌ها در این الگورتم و ثابت نگه داشتن سایر متغیرها موجب افزایش ارتفاع کلی سازه می‌شود. تغییر در اندازه چشمه خارجی سازه در نهایت منجر به تغییر شکل نهایی سازه می‌شود. تغییر در تعداد المان‌ها نیز موجب تغییر در ساختار کلی سازه خواهد شد. حداقل تعداد المان مورد نیاز برای تشکیل این سازه سه عدد تعریف شده و برای حداکثر تعداد المان‌ها محدودیتی تعریف نشده‌است.

شکل 13: افزایش ارتفاع المان موجب افزایش ارتفاع کلی سازه می‌شود (نگارندگان).

در نهایت می‌توان گفت این الگوریتم قابلیت تولید سازه‌های بستاروند متنوع از نظر تعداد و ابعاد المان‌ها را دارد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت سازه‌های تولید شده توسط این الگوریتم با توجه به نیاز طرح از نظر ابعاد المان، زوایای المان‌ها و اندازه چشمه خارجی انعطاف‌پذیری قابل قبولی داشته و برای بسیاری از حالات طراحی این سازه قابل استفاده است. این الگوریتم روشی سریع و کارآمد برای طراحان در استفاده از سازه‌های بستاروند می‌باشد.

نتیجه‌گیری:

سیستم بستاروند یا نکسورید را می‌توان به عنوان روشی عملی و قابل‌اجرا برای کاهش پیچیدگی موجود در سازه‌های فضاکار معمول استفاده کرد. این ساده‌سازی فناورانه، محدودیت‌های طراحی و مدل‌سازی و نیز پیچیدگی غیر سلسله‌مراتبی پارامترهای تأثیرگذار بر این سیستم ازجمله طول درگیری، فاصله از تار خنثی و زاویه را به همراه دارد؛ بنابراین برای رفع این محدودیت‌ها، مدل‌سازی این سازه نیازمند محاسبات پیچیده بوده تا بتوان پارامترهای مرتبط آن را به‌صورت هم‌زمان هماهنگ سازد. از این‌رو هدف این پژوهش ارائه یک الگوریتم با در نظرگیری تمامی محاسبات و معادلات مرتبط با این سیستم برای تبدیل یک قاب استاندارد به سیستم بستاروند بوده است. مدلسازی با نرم افزار راینو و افزونه گرس‌هاپر و با استفاده از روش چرخش برای تولید سیستم بستاروند انجام شده‌است. با در نظرگیری معادلات برای هماهنگی همزمان پارامترهای مختلف این سازه با یکدیگر الگوریتمی طراحی شده که در آن زاویه چرخش، تعداد المان‌ها، ارتفاع اولیه تیرها و شعاع بیرونی داده‌های وارد شده به الگوریتم بوده و خروجی الگوریتم یک مدول بستاروند با ابعاد مناسب تیر و فاصله متناسب تارهای خنثی می‌باشد.

فهرست منابع

Anastas, Y., Rhode-Barbarigos, L., & Adriaenssens, S. (2016). Design-to-construction workflow for cell-based pattern reciprocal free-form structures. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 57(2), .159-176

Baverel, O & ,.Larsen, O. P. (2011). A review of woven structures with focus on reciprocal systems-nexorades. *International Journal of Space Structures*, 26(4), .281-288

Baverel, O & ,.Pugnale, A. (2014). Reciprocal systems based on planar elements: morphology and design explorations. *Nexus Network Journal*, 16(1), .179-189

Baverel, O. L. (2000). *Nexorades: A family of interwoven space structures*: University of Surrey (United Kingdom).

Danz, C. (2015). *Re-Frame: form-finding within the constraints of mutually supporting assemblies* .

Douthe, C., & Baverel, O. (2009). Design of nexorades or reciprocal frame systems with the dynamic relaxation method. *Computers & Structures*, 87(21-22), .1296-1307

Gherardini, F., & Leali, F. (2017). Reciprocal frames in temporary structures: An aesthetical and parametric investigation. *Nexus Network Journal*, 19(3), .741-762

Larsen, O. P. (2007). *Reciprocal frame architecture*: Routledge.

Parigi, D. (2016). Advances in design and fabrication of free-forn reciprocal structures. *Structures and Architecture: Beyond their Limits, CRC Pres*, .290-297

Parigi, D., & Kirkegaard, P. H. (2014). Design and fabrication of free-form reciprocal structures. *Nexus Network Journal*, 16(1), .69-87

Popovic, O. (1996). *Reciprocal frame structures.* University of Nottingham .

Pugnale, A., & Sassone, M. (2014). Structural reciprocity: critical overview and promising research/design issues. *Nexus Network Journal*, 16(1), .9-35