

## طراحی و شبیه‌سازی سازه گلخانه هشت وجهی مقاوم در برابر بارهای وارده

جلال جوادی مقدم<sup>۱\*</sup>، سعید عزلتی<sup>۲</sup>، قاسم زارعی<sup>۳</sup>، داود مومنی<sup>۴</sup> و فرزاد آزاد شهرکی<sup>۵</sup>

۱، ۳، ۴ و ۵- به ترتیب: استادیار؛ دانشیار؛ و استادیاران موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران  
۲- کارشناس ارشد شرکت آبتین ارگانیک  
تاریخ دریافت: ۹۸/۳/۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۶/۱۲

### چکیده

سازه گلخانه یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در کشت‌های گلخانه‌ای است که افزایش استحکام و کاهش قیمت آن همیشه مورد توجه گلخانه‌سازان بوده است. در این پژوهش، یک گلخانه هشت وجهی طراحی و شبیه‌سازی و با پروفیل مقاوم در برابر بارهای استاندارد ساخته شده است. طراحی و بهینه‌سازی اجزای سازه این گلخانه شامل انتخاب ضخامت حداقل پروفیل‌ها و ستون‌ها و چیدمان خرپاها بر اساس استانداردهای سازه‌ای در شرایط مختلف آب و هوایی کشور بوده است. ابتدا با استفاده از محاسبات دینامیک سیالاتی، اثر نیروهای ناشی از بار باد بر ستون‌های سازه به دست آمد. پس از آن، با توجه به بارهای ذکر شده در استاندارد سازه‌های گلخانه‌ای شامل بار ناشی از باد، برف و آویز، چارچوب اصلی سازه و ستون‌ها، تیرهای افقی و خرپاها طراحی شدند. بر اساس نتایج به دست آمده، ارتفاع نهایی و ارتفاع ستون گلخانه هشت وجهی به ترتیب ۶ و ۴ متر و وزن واحد سطح ۸/۵ کیلوگرم به دست آمد که نسبت به گلخانه‌های رایج موجود در کشور، با حجم مشابه و با وزنی در حدود ۱۰ کیلوگرم در واحد سطح، بسیار مطلوب است. نتیجه مقاومت خوب این سازه گلخانه در برابر بارهای وارده به صورت مجزا و ترکیبی، با شکل‌هایی به نمایش گذاشته شده است.

### واژه‌های کلیدی

بار باد، مدل‌سازی، شبیه‌سازی، تحلیل تنش، دینامیک سیال محاسباتی

### مقدمه

مختلف برای حفاظت از فرآیند کشت خود، گلخانه‌های اولیه را به وجود آوردند و طی زمان، گلخانه‌ها به عنوان محیطی کنترل شده با بهره‌وری بالا برای کشت انواع مختلفی از گیاهان توسعه داده شدند. هم‌اکنون نیز گلخانه‌های بی‌شماری با شکل‌های متفاوت در سطح جهان برای تولید انواع محصولات کشاورزی ساخته و به خدمت گرفته شده‌اند (Ghani et al., 2019).

یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در توسعه و ارتقای گلخانه، سازه آن است که متأثر از شرایط اقلیمی

با پیشرفت فناوری و صنعتی شدن جوامع، هر لحظه گمان می‌رود در آینده‌ای نه چندان دور بتوان مقدار محصولی که از یک مزرعه به دست می‌آید از یک دستگاه کوچک خانگی و در حداقل زمان به دست آورد، به طوری که عملکرد این فناوری از نظر کیفیت و کمیت، حتی بالاتر از عملکرد مزرعه به هنگامی باشد که انسان در آن حضور دارد. شروع این آینده‌نگری را می‌توان با ابداع ایده استفاده از گلخانه‌ها همزمان دانست. در این راستا، جوامع

در آن مطلوب باشد (Teitel *et al.*, 2012). مطالعات، طراحی‌ها و شبیه‌سازی‌های متعددی به منظور ارتقای عملکرد انواع گلخانه در دسترس هست ولی استانداردها بارگذاری گلخانه بر اساس تجربه‌ها و اطلاعات اقلیمی هر منطقه و نیازهای کشاورزی گلخانه‌داران تدوین می‌شود. از این‌رو، کشورهای توسعه‌دهنده صنعت گلخانه‌داری، مطابق با نیازها و شرایط اقلیمی خود، استانداردهای متفاوتی دارند.

ها و همکاران (Ha *et al.*, 2017) با نصب حسگرهای شتاب‌سنج روی قسمت‌های مختلف چارچوب گلخانه، فرکانس ارتعاشی سازه را به دست آوردند و با مدل تهیه شده به کمک المان‌های محدود<sup>۱</sup> تطبیق دادند. این محققان موفق شدند چارچوب سازه را به گونه‌ای بازطراحی کنند تا ارتعاش‌های سازه در اثر بار باد کاهش یابد.

بریاوسولیس و همکاران (Briassoulis *et al.*, 2016) پیشنهاد می‌کنند بارگذاری گلخانه‌ها متناسب با شرایط اقلیمی منطقه، نوع سازه و سیستم تاسیسات گلخانه در نظر گرفته شود. آنها نشان دادند که بار ناشی از یخ‌زدگی برف انباشته روی سقف گلخانه، که با خاموش بودن سیستم تاسیسات گرمایشی در زمستان اتفاق می‌افتد، بسیار قابل توجه است و می‌تواند گلخانه مقاوم در برابر بار باد ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت را فرو ریزد.

تحقیقات هار و کوان (Hur & Kwon, 2017)، نشان می‌دهد بار خستگی ناشی از ارتعاش‌های ایجاد شده در سازه گلخانه در اثر باد می‌تواند به ریزش سازه بینجامد و باید در محاسبه بارگذاری، به ویژه در اقلیم‌های پر باد، بسیار مورد توجه قرار گیرد.

ورما و همکاران (Verma *et al.*, 2015) با استفاده از تحلیل دینامیک سیالات، فشار باد روی سطوح مختلف ستون‌های گلخانه را بررسی کردند و

منطقه است و افزایش استحکام و کاهش قیمت آن همیشه مورد توجه گلخانه‌سازان بوده است. سازه گلخانه باید به نحوی ارتقا یابد که بتواند بارهای پیش‌بینی شده را به خوبی تحمل کند. در ساخت گلخانه، از دو نوع پوشش شیشه‌ای و پلیمری استفاده می‌شود. با توجه به اینکه شیشه ضریب کشسانی پایینی دارد، در طراحی چارچوب نگهدارنده آن نباید اجازه هیچ‌گونه اعوجاج سازه در اثر بارگذاری داده شود و طراحی این گلخانه‌ها بر مبنای صلب بودن سازه خواهد بود. بنابراین، سازه‌های گلخانه‌های شیشه‌ای بر اساس علوم سازه‌های عمرانی طراحی و ساخته می‌شوند (Bronkhorst *et al.*, 2017). از آنجا که ساخت گلخانه‌های شیشه‌ای بسیار پرهزینه است، از این سازه‌ها در کشور ایران به ندرت استقبال می‌شود و تقاضا برای طراحی و احداث گلخانه‌هایی با سازه‌های سبک‌تر و با پوشش‌های پلی‌اتیلن و پلی‌کربنات، بسیار زیاد است (Anon, 2008). در طراحی گلخانه با پوشش‌های انعطاف‌پذیر مانند پلی‌اتیلن، امکان استفاده از خاصیت کشسانی اجزای سازه امکان‌پذیر است و می‌توان طراحی را به گونه‌ای پیش‌برد تا ضمن بهره‌جستن از ویژگی‌های مکانیکی، هزینه مواد و دشواری‌های احداث گلخانه نیز به طور چشمگیر کاهش یابد. کشسانی اجزای سازه این امکان را فراهم می‌آورد که در هنگام وزش بادهای شدید، سازه گلخانه حرکت اعوجاجی داشته باشد. با این رفتار، سازه مانع از تجمع باد در کنار گلخانه می‌شود و اجازه نمی‌دهد که فشار ناشی از جریان باد آن را خراب کند. برای ایجاد چنین عملکردی در سازه گلخانه، پارامترهای ابعادی تیر و ستون‌های به کار رفته در سازه باید به گونه‌ای طراحی شوند که ضمن باصرفه بودن وزن سازه گلخانه، تحمل بار و به ویژه بار ناشی از باد نیز

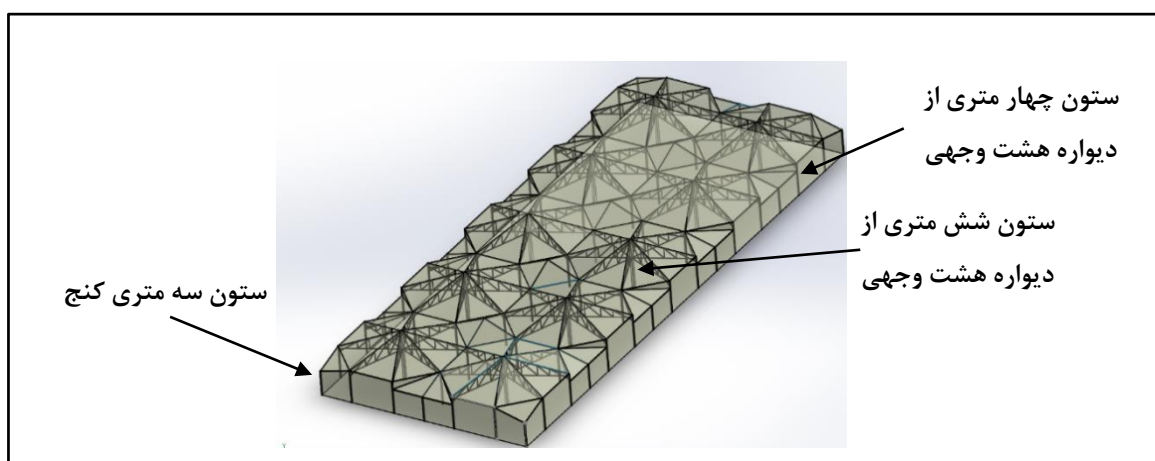
### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، اسکلت فلزی سازه گلخانه هشت‌وجهی چند دهانه (۲×۵ قلو، یعنی دو ردیف سازه هشت‌وجهی در عرض و پنج ردیف در طول) با طول و عرض به ترتیب ۷۵ و ۳۰ متر به گونه‌ای در نظر گرفته شد که هر دهانه از گلخانه حاوی یک ستون مرکزی به ارتفاع ۶ متر باشد (شکل ۱). ارتفاع ستون‌های جانبی ۴ متر در نظر گرفته شده که هر یک در فاصله ۸ متری از ستون مرکزی جانمایی شده است. چیدمان ستون‌های جانبی به گونه‌ای است که از نمای بالای سازه، یک شکل هشت‌وجهی منتظم ایجاد می‌شود.

برای هر یک از چهار کنج انتهایی گلخانه نیز یک ستون ۳ متری قرار داده شده تا با ایجاد شیب مناسب، مقاومت کل سازه در برابر بار باد افزایش یابد. برای تحلیل آثار ناشی از بارگذاری روی انواع سازه گلخانه، لازم است در ابتدا نیرویی که بر اثر جریان باد ایجاد می‌شود مدل‌سازی شود.

گزارش دادند که با توجه به جهت وزش باد و برخورد آن به سطوح ستون مورد نظر، میزان ایجاد فشار متفاوت خواهد بود به طوری که اگر امتداد برخورد باد عمود به رأس ستون هشت‌وجهی باشد، نیروی حاصل از فشار باد روی ستون به حداقل مقدار خود می‌رسد. بررسی مطالعات ها و همکاران (Ha et al., 2017) نشان می‌دهد که گلخانه‌ها تحت تأثیر انواع بارهای استاندارد و غیراستاندارد قرار می‌گیرند که معمولاً برای موفقیت در آزمون استاندارد، وزن فلز به کار رفته به ازای هر مترمربع گلخانه افزایش می‌یابد.

هدف از این مطالعه، معرفی یک سازه گلخانه با شکل هندسی هشت‌وجهی است که نسبت به گلخانه‌های متداول، مانند شیشه‌ای و کمانی، وزن آن به ازای واحد سطح کمتر باشد. کلیه بارگذاری‌ها روی این سازه گلخانه‌ای بر اساس استاندارد سازه و تجهیزات گلخانه‌ای ایران (Anon, 2018) و نیز بررسی مقاومت آن از طریق شبیه‌سازی و تحلیل تنش است.



شکل ۱- نمای سه بعدی از سازه گلخانه هشت‌وجهی با طول، عرض و بیشترین ارتفاع به ترتیب ۷۵، ۳۰ و ۶ متر  
Fig. 1- 3D view of the octagonal greenhouse structure with length, width and maximum height, 75, 30 and 6 respectively

## نیروی ایجاد شده با جریان باد

در تحلیل سیالاتی جریان باد وارد بر سطح گلخانه و به منظور افزایش دقت در محاسبات، از معادله‌های حاکم بر میدان جریان سیال تراکم‌پذیر استفاده شده است (Pepper *et al.*, 2014). برای ساده سازی در محاسبات، با توجه به تغییرات فشار و چگالی طی زمان برای جریان سیال هوا با عدد ماخی کوچکتر از ۰/۳ می‌توان سیال را تراکم‌ناپذیر فرض کرد. هر چند در واقعیت پدیده‌ای به نام تراکم‌ناپذیری سیال وجود ندارد.

میزان ویسکوزیته جریان سیال وابسته به دماست و از این‌رو با استفاده از قوانین ساترلند و یلکو ایکس<sup>۱</sup> بیان شد (Wilcox, 2006). برای تخمین چگالی، سرعت و دمای هوا با تغییرات تکه‌ای و مرحله‌ای فشار از معادله‌های انتگرالی پترف-گلرکین<sup>۲</sup> استفاده شد (William & Brower, 1999). سرانجام با استفاده از معادله‌های ناویر استوکس<sup>۳</sup>، معادله‌های حاکم بر جریان سیال برای مدل‌سازی ایجاد شدند. گفتنی است برای مدل‌سازی حرکت سیال، کلیه پارامترهای لازم و وابسته به اقلیم بر اساس غلظت و فشار هوا در سطح دریای آزاد در نظر گرفته شد.

## محاسبه تنش و کرنش ماده

در استفاده از روش المان محدود برای محاسبه پارامترهای مورد نظر، نیاز خواهد بود ارتباط فیزیکی و فرموله شده اجزای مسئله معلوم باشد. در تحلیل تنش در مواد جامد با استفاده از روش المان محدود با حل‌های عددی مختلف مانند روش عددی زینکویچ و همکاران (Zienkiewicz *et al.*, 2014)، استفاده از تئوری الاستیک خطی جامدات در مباحث

طراحی مقاومتی سازه در برابر بارهای خارجی و همچنین روابط انتقال حرارت و انتقال ابعادی در مباحث تحلیل تنش ناشی از شوک حرارتی ضروری است. در اینجا از معادله‌های سه‌بعدی الاستیک خطی مکانیک جامدات برای تحلیل تنش و کرنش سازه گلخانه هشت‌وجهی به همراه المان محدود استفاده شده است. بدین منظور، تانسورهای تنش و کرنش برای تغییر مکان‌های کوچک، بر اساس متغیرهای مختصات  $x$ ،  $y$  و  $z$  در نظر گرفته (Beheshti, 2017). یادآوری می‌شود، مولفه‌های کرنش از مشتق جزئی مولفه‌های بردار تغییر مکان نسبت به مختصات فضایی به دست می‌آیند (Zingoni, 2010). این موضوع باعث ایجاد چند شرط ریاضی می‌شود که باید مولفه‌های کرنش در آن صدق کنند. این شرایط ریاضی به عنوان معادله‌های سازگاری<sup>۴</sup> معروف هستند. در حقیقت، این معادله‌ها بیان می‌کنند مولفه‌های کرنش از تغییر مکان یک میدان پیوسته ایجاد شده‌اند (Koutromanos., 2018). همان‌طور که می‌دانیم، رابطه بین تنش و کرنش بر اساس قوانین فیزیکی شکل گرفته است به طوری که برای یک ماده با خاصیت الاستیک خطی، تنش و کرنش متناسب با یکدیگرند و ایجادکننده این تناسب، ماتریس سختی ماده است. این ارتباط در رابطه ۱ نشان داده شده است:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (1)$$

که در آن،

$[D]$  = ماتریس سختی ماده. به منظور ساده کردن روابط تنش و کرنش.

1- Sutherland and Wilcox  
3- Navier Stokes  
5- Isotropic

2- Petrov Galerkin  
4- Compatibility Equations

در اینجا مصالح مورد نظر به صورت ایزوتروپ<sup>۵</sup> این فرض می‌توان به صورت رابطه ۲ بازنویسی در نظر گرفته شدند و از این‌رو ماتریس سختی را با

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{E_1E_3D_1} & \frac{\nu_{12}+\nu_{13}\nu_{31}}{E_1E_3D_1} & \frac{\nu_{31}+\nu_{12}\nu_{13}}{E_1E_3D_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{12}+\nu_{13}\nu_{31}}{E_1E_3D_1} & \frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{E_1E_3D_1} & \frac{\nu_{31}+\nu_{12}\nu_{13}}{E_1E_3D_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{31}+\nu_{12}\nu_{13}}{E_1E_3D_1} & \frac{\nu_{31}+\nu_{12}\nu_{13}}{E_1E_3D_1} & \frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{E_1E_3D_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{12} = \frac{E_1}{2(1+\nu_{12})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31} \end{bmatrix} \quad (2)$$

و هموار برای  $u(x,y,z)$  در داخل هر المان  $e$  در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که هر بردار تغییر مکان سه‌بعدی دارای سه مولفه است و برای هر المان می‌توان چند گره متصور بود، برای هر گره نیز سه مولفه تغییر مکان وجود خواهد داشت.

این تغییر مکان المان سه‌بعدی را می‌توان بر اساس تابع شکل نوشت. اوفری و همکاران (Auffray *et al.*, 2013) و کوترومانوس (Koutromanos, 2018) جزئیات محاسبه بردار تغییر مکان جسم را تشریح کرده‌اند. انرژی کل سیستم یعنی تغییر مکان ماده است می‌توان به صورت رابطه ۳ نوشت:

$$\delta W = 0 \rightarrow \iiint_{\Omega} \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} dV + \iiint_{\Omega} (\{\nabla_{\varepsilon} \delta u\})^T - \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV + \iiint_{\Omega} \{\delta \sigma\}^T (\{\nabla_{\varepsilon} u\} - \{\varepsilon\}) dV - \left( \iiint_{\Omega} \{\delta u\}^T \{b\} dV - \iint_{\Gamma_{tx}} \delta u_x t_x dS - \iint_{\Gamma_{ty}} \delta u_y t_y dS - \iint_{\Gamma_{tz}} \delta u_z t_z dS \right) = 0 \quad (3)$$

رابطه ۳ همان معادله تعادل سیستم با فرض ثابت بودن انرژی است (Koutromanos, 2018). یادآوری می‌شود کلیه المان‌های سازه برای تحلیل تنش به صورت هرمی سه‌بعدی در نظر گرفته

که در آن،  $D_1 =$  ثابت عددی که از پارامترهای مکانیکی و مقاومت مصالحی ماده محاسبه می‌شود (Koutromanos., 2018)؛  $\nu =$  ضریب پواسون<sup>۱</sup>؛  $E =$  مدول یانگ<sup>۲</sup>؛ و  $G =$  مدول برشی<sup>۳</sup>.

در مسائل مربوط به تحلیل تنش در مواد و سازه‌ها، نیاز خواهد بود کلیه مختصات به مختصاتی واحد تبدیل شود. این کار با ماتریس‌های انتقال چرخش صورت می‌پذیرد. با استفاده از روابط انتقال ماتریس‌های تنش و کرنش، می‌توان اطلاعات مربوط را از یک مبدا مختصات به مختصات دیگر انتقال داد و تحلیل تنش را برای دیگر اجزای یک سازه نیز ارائه کرد (Koutromanos, 2018). در مش‌های روش المان محدود، یک ناحیه سه‌بعدی به تعداد  $N_e$  جزء المان تقسیم‌بندی و در این حالت یک تخمین تکه‌ای

که در آن،  $b =$  نیروی بدنی<sup>۴</sup>؛  $\Gamma =$  معرف ناحیه اعمال نیرو؛  $V =$  المان حجم؛ و  $S =$  المان سطحی که نیروی کششی  $t_i$  در جهت  $i$  به آن سطح از المان وارد شده.

در جهت شعاعی استفاده کرد و بین دو عضو شعاعی نمی‌توان عضو دیگری قرار داد.

۶- سطح مقطع ستون اصلی، به دلیل ایجاد مشکل سایه‌اندازی در گلخانه، نباید از  $20 \times 20$  سانتی‌متر بزرگ‌تر باشد.

۷- جنس سازه باید از فولادهایی باشد که تنش تسلیم آنها بالاتر از ۶۰۰ مگاپاسکال و مدول ارتجاعی و ضریب پواسون به ترتیب در حدود ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۴ باشد. از این‌رو کلیه گریدهای فولادی ASTM و BS (مانند BS 1504 420C29A) که دقیقاً همان حد تنشی دارند که در طراحی در نظر گرفته شده است) این شرایط را دارند و با توجه به قیمت و قابلیت دسترسی به آنها در بازار می‌توانند استفاده شوند. روکش آن نیز باید از جنس گالوانیزه با ضخامت حداقل یک میلی‌متر باشد.

۸- سقف هر دهانه گلخانه باید حالت هرمی یا دوکی داشته باشد.

۹- امکان ایجاد سطح شیب‌دار در کناره گلخانه پس از ساخت، به منظور کاهش نیروی‌های ناشی از درگ<sup>۱</sup> وجود ندارد (از آنجا که در مناطق بادخیز، کناره گلخانه را شیب می‌دهند تا نیروهای حاصل از مباحث آیرودینامیکی مانند نیروی درگ کاهش پیدا کند).

۱۰- مطابق استاندارد، بار باد برابر با ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت معادل با ۳۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است (Yang et al., 2013; 2004).

۱۱- به دلیل شیب هرم‌های سقف گلخانه هشت‌وجهی، برف سُرخورده در پای هرم جمع خواهد شد.

طراحی گلخانه مورد بررسی به شدت تابع این قیدهاست ضمن اینکه طراحی بهینه آن بسیار پیچیده است. مراحل طراحی این گلخانه

شده‌اند و ضخامت پروفیل‌های سازه نیز در محاسبات المان محدود در نظر گرفته شده تا فرآیند طراحی بدون ساده‌سازی پیش رود. پایه ستون‌های سازه به صورت تکیه گاه‌گیردار در نظر گرفته می‌شود و همان‌طور که در ادامه نشان داده خواهد شد، بارهای وارد شده بر سازه به صورت استاتیکی و به شکل بار گسترده به اجزای مورد نظر اعمال شده‌اند.

### قیدهای طراحی گلخانه هشت‌وجهی

ابتدا باید مشخص شود که با توجه به نیروهایی که روی سازه وارد می‌شوند، هر عضو از سازه متحمل چه تنش حداکثری خواهد بود. همچنین در طراحی سازه، قیدهای حاکم بر شرایط طراحی مهم هستند. توجه به این نکته نیز لازم است که در اینجا نباید قیدهای طراحی مسئله را با قیدهای مورد استفاده در شرایط مرزی یکی دانست. زیرا این دسته از قیدهای طراحی باعث کاهش گزینه‌های انتخابی در شرایط اولیه هر مسئله طراحی می‌شوند. قیدهای طراحی این سازه عبارت‌اند از:

۱- کلیه اعضای سازه تنها مجاز به داشتن سطح مقطعی مربع یا مستطیل شکل هستند.

۲- در طراحی سازه گلخانه، سه مدل ستون کوچک، متوسط و بلند با ارتفاع متفاوت به ترتیب ۳، ۴ و ۶ متر در نظر گرفته شدند.

۳- ستون‌بندی هر دهانه از گلخانه باید به گونه‌ای باشد که در مجموع یک شکل هشت‌وجهی از نمای بالا ایجاد کند.

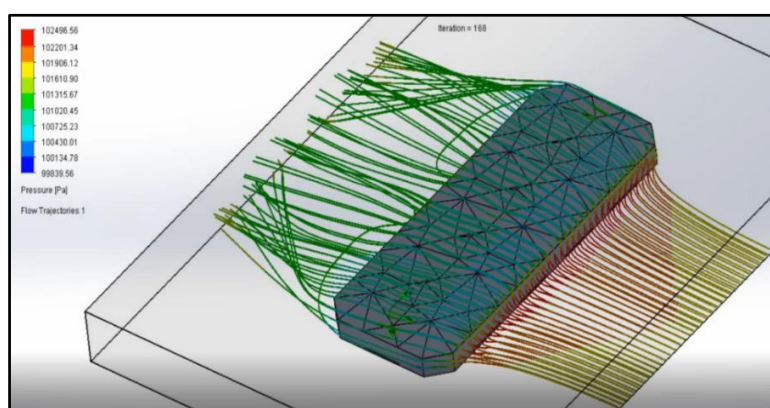
۴- تنها یک ستون به ارتفاع ۶ متر را می‌توان در مرکز هشت‌ضلعی قرار داد و همه ستون‌های تشکیل‌دهنده هشت‌وجهی باید ۴ متری باشند.

۵- برای خرابی سقف، تنها می‌توان از اتصال ستون مرکزی به هریک از ستون‌های دیواره هشت‌وجهی

گلخانه بر اساس بحرانی‌ترین شرایط انجام می‌شود. در این تحقیق برای کلیه طراحی‌ها و محاسبه‌های فنی از نرم‌افزار تجاری سالی‌دورک<sup>۱</sup> ۲۰۱۸ استفاده شد.

در این مرحله، نیروهای حاصل از شبیه‌سازی تونل باد بر گلخانه محاسبه و به دست آمد (شکل ۲). در قسمت بعدی نشان داده خواهد شد که ستون‌ها و تیرهای گلخانه بر اثر وزش باد خارجی و بارهای استاندارد، چه میزان نیرویی را باید تحمل کنند. سپس، با توجه به نیروهای وارد شده، آنالیز تنش برای چارچوب‌های گلخانه صورت خواهد پذیرفت تا محدوده مجاز تنش برای سازه و اعضای آن بررسی شود. سرانجام، در صورت ایجاد تسلیم در قسمتی از سازه گلخانه مورد نظر، اصلاح ستون‌بندی، چیدمان مجدد و طراحی ساختاری اعضای سازه، اجرا می‌شود. به این ترتیب، طرح قابل قبولی که بتواند مانع از تسلیم سازه در مقابل بارهای وارد شده شود به دست خواهد آمد.

بدین صورت بود که ابتدا طرح کلی از گلخانه به صورت سطح خارجی مطابق با قیده‌ها مدل‌سازی شد. اثر آیرودینامیکی این سطح رویه در تونل باد شبیه‌سازی گردید. در مراحل این شبیه‌سازی، ابتدا یک فضای محصور با ابعاد مشخص به عنوان تونل باد ایجاد می‌گردد. ابعاد این فضا به گونه‌ایست که سطوح تونل اثری بر روی جریان آزاد عبوری از روی سطح گلخانه نداشته باشد. جریان هوا از یک طرف تونل وارد و پس از برخورد و عبور از روی سطوح گلخانه از طرف مقابل خارج می‌شود. جهت‌گیری گلخانه به نحوی در نظر گرفته شده که جریان باد عمود بر امتداد محور طولی گلخانه باشد. در این حالت بار ناشی از باد، گلخانه را در جهت عرضی حرکت داده که این جهت نسبت به جهت طولی ناپایدارتر است. باد با سرعت اولیه ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت در تونل باد جریان می‌یابد و به صورت موازی با سطح زمین به دیواره گلخانه برخورد می‌نماید که در این صورت بیشترین فشار ناشی از باد به گلخانه وارد و متعاقب آن، بارگذاری بار باد بر روی سازه



شکل ۲- مدل‌سازی جریان باد برای محاسبه برآیند نیروی وارد به دیواره جانبی گلخانه در حالت جریان ماندگار

Fig. 2- Wind flow modeling to calculate the result of the force applied to the side wall of the greenhouse in the steady state

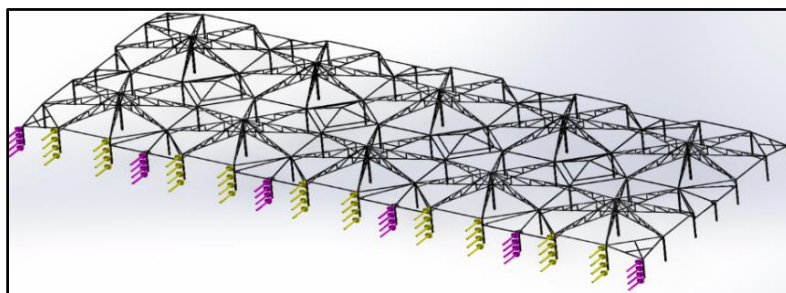
است. همان‌طور که انتظار می‌رود، منطقه پرفشار در این حالت، دیواره مقابل به باد است که فشاری به

با توجه به شکل ۲، منطقه‌ای که با خطوط قرمز نشان داده شده، دارای بیشترین فشار ناشی از باد

در طراحی چارچوب سازه گلخانه هشت‌وجهی، نیروی باد محاسبه شده مطابق شکل ۳ به ستون‌های جانبی سازه گلخانه هشت‌وجهی اعمال می‌شود تا این سازه بر اساس بارگذاری استاندارد، طراحی و تحلیل شود.

در آنالیز تنش، همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیرو به صورت استاتیکی به ستون‌های جانبی و بیرونی سازه وارد می‌شود تا در این حالت مقاومت سازه بر اساس بیشترین شدت بارگذاری ناشی از نیروی باد محاسبه شود (Sun *et al.*, 2019).

اندازه ۱۰۲۴۹۶/۵۶ پاسکال دارد که با توجه به رابطه تبدیل فشار به نیرو می‌توان نیروی وارد ناشی از باد به سازه را به منظور آنالیز تنش محاسبه کرد. مشاهده می‌شود که فشار باد در حین عبور از روی سطح گلخانه به دلیل ایجاد لایه مرزی و تماس با سطح گلخانه و متعاقب آن ایجاد اصطکاک کاهش می‌یابد (خطوط جریان عبوری از روی سقف با رنگ آبی نشان داده شده‌اند). سرانجام اینکه حداقل فشار جریان باد پس از عبور کامل از سطح گلخانه، در پشت آن ایجاد می‌شود و خطوط جریان آن با رنگ سبز در شکل مشخص شده است.



شکل ۳- نمایش نیرو و جهت بار باد اعمالی به سازه گلخانه هشت‌وجهی

Fig. 3- Demonstration of the force and the direction of the wind load applied to the octagonal greenhouse structure

است (Wegst, 1992)، بنابراین، طرح سازه اصلاح شده توانسته است بار حداکثری باد را با ضریب اطمینانی نزدیک به ۲ تحمل کند. همچنین در این حالت، حداکثر خیز در بالای ستون مشرف به باد حدود ۲۳ میلی‌متر شده (شکل ۵) که با توجه به ارتفاع سازه، مقداری است مطلوب (Song *et al.*, 2019).

در مراحل طراحی برای به دست آوردن نتایج گفته شده، ضخامت قوطی اجزای سازه به همراه سطح مقطع آن به نحوی تغییر داده شد تا با افزایش ممان اینرسی جزء مربوط، تنش ایجاد شده در سازه از تنش تسلیم فلز فولادی سازه کمتر شود. انتخاب طرح مناسبی از خریای سقف سازه نیز می‌تواند به

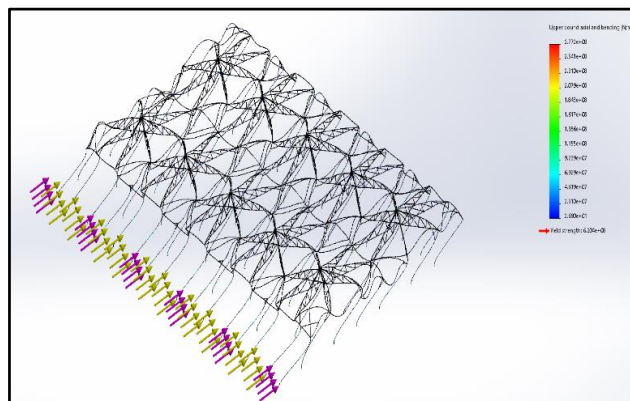
## نتایج و بحث

### مدل‌سازی بار باد

نتایج حاصل از تنش و خیز ایجاد شده در اثر بارگذاری نیروی حاصل از باد، به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در قیدها اشاره شد، نیروی اعمالی بار باد به سازه گلخانه هشت‌وجهی معادل با سرعت باد ۳۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده که مقدار آن برای هر ستون به طور تقریبی حدود ۲۰ کیلونیوتن است. مشاهده می‌شود که نیروی حاصل از بارگذاری بار باد را سازه به خوبی تحمل می‌کند و تنش‌های ایجاد شده در قسمت‌های مختلف سازه کمتر از تنش مجاز مصالح فلزی سازه با مقدار  $10^8 \times 6/204$  نیوتن بر مترمربع

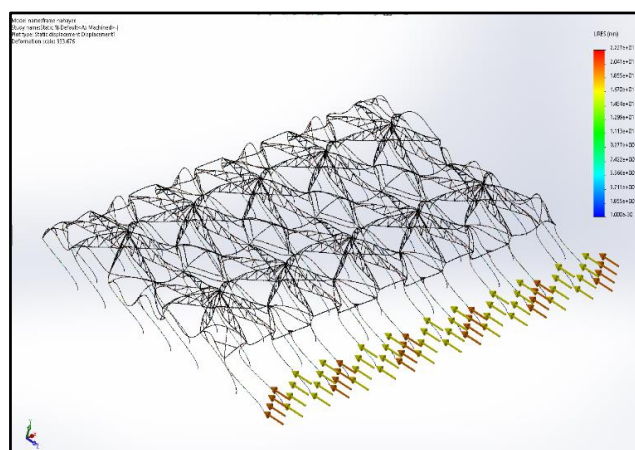


کاهش وزن فلز مصرفی در سازه کمک کند به طوری که خرپا با انتقال و توزیع تنش از نقاط تحت بار به دیگر قسمت‌های سازه، قادر به کاهش اثر بار باد شود (Anon, 2010).



شکل ۴- نتیجه مدل‌سازی تنش ایجاد شده در سازه ناشی از نیروی افقی باد

Fig. 4- The modeling results of the stress created in the structure due to the horizontal wind load



شکل ۵- نتیجه مدل‌سازی خیز ایجاد شده در سازه ناشی از نیروی افقی باد

Fig. 5- The modeling results of the structure created by the horizontal wind load

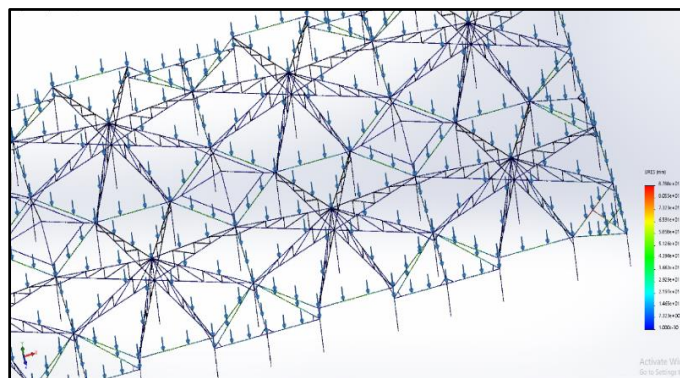
سرخورده جمع می‌شود و به همین دلیل از اثر نیروی برف روی اجزای بالایی هرم می‌توان چشم‌پوشی کرد. تنش ایجاد شده در سازه که در شکل ۷ نشان داده شده است، معرف مقاومت این سازه در مقابل بار برف است.

در اینجا بار ناشی از تجمع برف حدود ۲۵ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است (Anon, 2008) که بدین ترتیب تقریباً به هر جزء اسکلت سقف سازه نیروی شش کیلونیوتن در طول یک متر وارد خواهد شد.

### مدل‌سازی بار برف

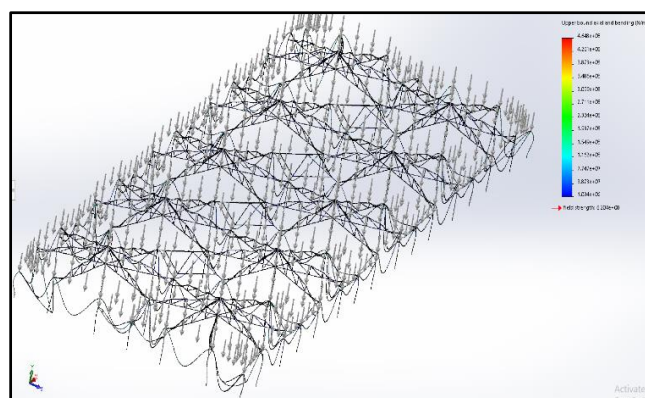
نیروی حاصل از بار برف به طور مستقیم به اجزای خرپای سقف سازه وارد می‌شود و دیگر اجزای سازه یعنی تیر، ستون و خرپاها به صورت نگهدارنده آن را تحمل می‌کنند (شکل ۶)؛ بنابراین، نیروی بار برف بر کل سازه اثر می‌کند که خود را بیشتر به صورت کمانش در ستون‌ها و خمش در تیرها نشان می‌دهد. همان‌طور که در قیدها گفته شد، در هرم کوچک واقع بر وسط اسکلت سقف سازه، به دلیل ریزش و سُرخوردگی برف، در پای هرم برف

ماکزیمم خیز ایجاد شده در سازه بر اساس این توجه به طول تیر خرپا (۸ متر)، این مقدار خیز بارگذاری، حدود ۹۰ میلی‌متر است که در تیر ناچیز و در حد قابل قبول است (Ochoa, 2013; Xu et al., 2017) اسکلت سقف خود را نشان می‌دهد (شکل ۸). با



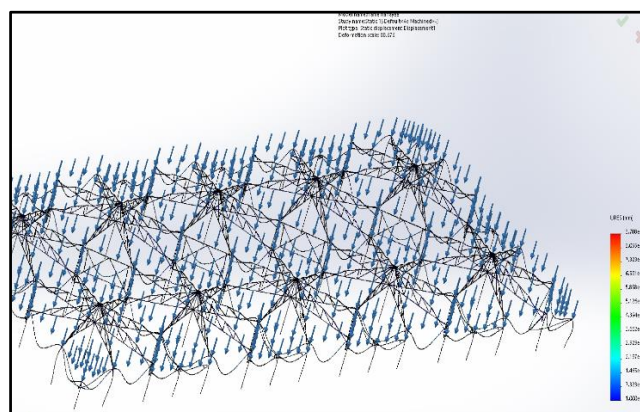
شکل ۶- محل قرارگیری نیروی حاصل از بار برف

Fig. 6- The location of the snow load



شکل ۷- تنش ایجاد شده در سازه گلخانه هشت وجهی ناشی از اعمال بار برف

Fig.7- The stress created in the octagonal greenhouse structure due to snow load



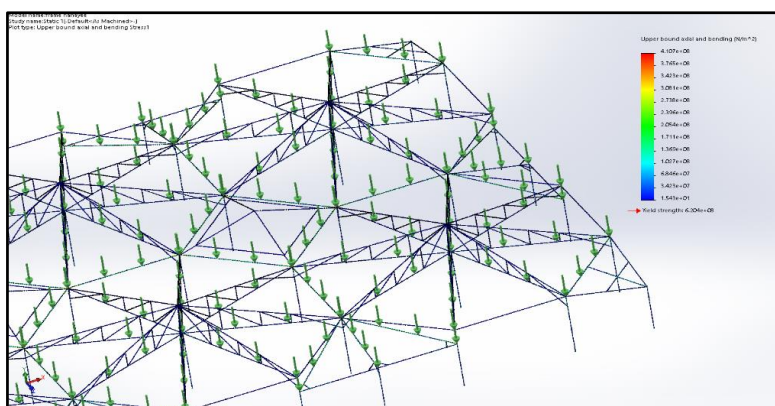
شکل ۸- خیز ایجاد شده در سازه گلخانه هشت وجهی ناشی از اعمال بار برف

Fig. 8- The deflection in the octagonal greenhouse structure due to snow load

### مدل‌سازی بار آویز

موجود در سقف اسکلت وسط سازه، روی همه تیرها نیروی آویز اعمال شده است. نوع اثر این تنش‌ها نیز مانند تنش‌های حاصل از بار برف خود را بیشتر به صورت کمانش در ستون‌ها و خیز در تیرها نشان می‌دهد.

محل اعمال نیروهای حاصل از بار آویز در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، به غیر از تیرهای کناری گلخانه و اجزای هرم کوچک

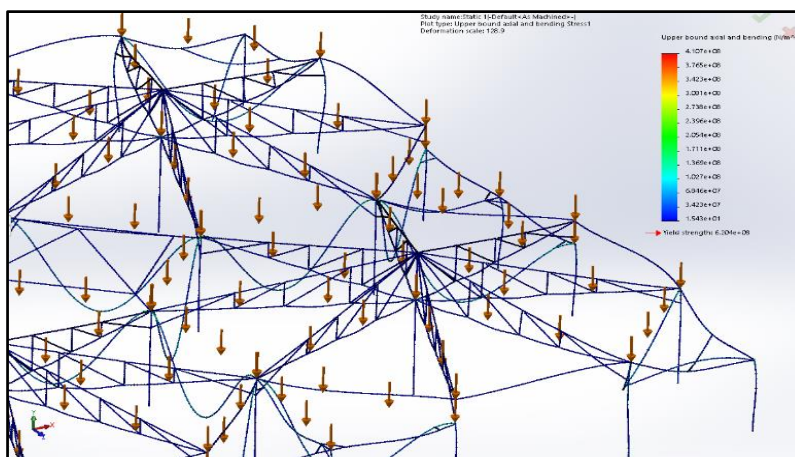


شکل ۹- محل قرارگیری نیروی‌های حاصل از بار آویز در سازه گلخانه هشت‌وجهی

Fig. 9- The location of the Hanged loads in the octagonal greenhouse structure

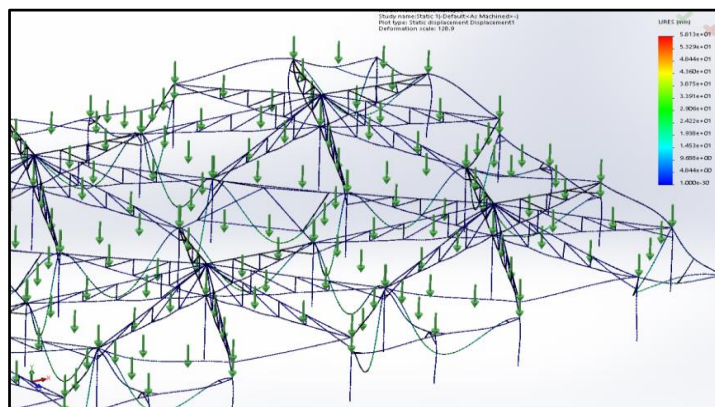
ماکزیمم تنش به وجود آمده کمتر از  $4/2 \times 10^8$  نیوتن بر مترمربع تحمل کند (شکل ۱۰). ۱۱ نیز مشاهده می‌شود که تغییر مکان ناشی از این بارگذاری کمتر از ۶۰ میلی‌متر است که در این مورد نیز طراحی دارای عملکردی قابل قبول است (Ochoa., 2013; Achref et al., 2019).

برای بار آویز، نیروی هفت کیلونیوتن در واحد طول تیر در نظر گرفته شد (Na et al., 2017). این نیرو معادل با ۲۵ کیلوگرم وزن آویز در هر مترمربع است. دیاگرام‌های تنش و خیز ناشی از این بارگذاری به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که سازه می‌تواند بار آویز را با



شکل ۱۰- تنش ایجاد شده در سازه گلخانه هشت‌وجهی بر اثر نیروی‌های حاصل از بار آویز

Fig. 10- The stress created in the octagonal greenhouse structure, resulting due to the hanged loads



شکل ۱۱- خیز ایجاد شده در سازه گلخانه هشت وجهی بر اثر نیروی‌های حاصل از بار آویز

Fig. 11- The deflection created in the structure of the octagonal greenhouse, due to the hanged loads

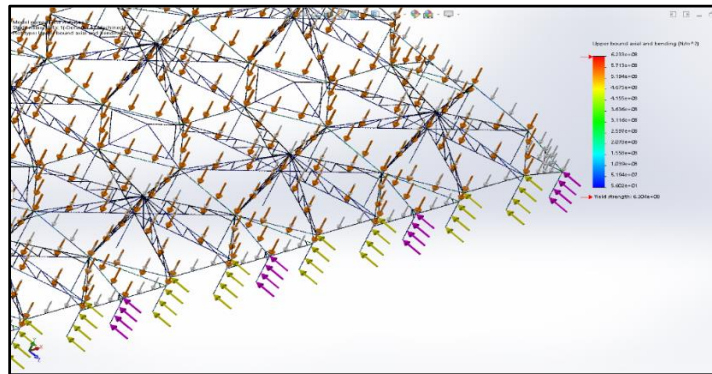
### مدل‌سازی بار ترکیبی

پس از چندین بار تکرار محاسبه و ایجاد تغییر در اجزای این سازه، طراحی به نحوی نهایی شد که سازه گلخانه مورد نظر بتواند ضمن داشتن وزن مناسب در واحد سطح (در مقایسه با گلخانه‌های رایج، بارگذاری‌های استاندارد را نیز به خوبی تحمل کند. در این قسمت، بارگذاری ناشی از ترکیب بارهای سه‌گانه باد (به صورت افقی)، آویز و برف در شکل ۱۲ و نیز تنش و خیز حاصل از اعمال هم‌زمان این سه بار، به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده‌اند. در شکل ۱۲ مشخص است که حداکثر تنش ایجاد شده در سازه کمتر از تنش تسلیم اجزای سازه است و تنش ناشی از بارگذاری ترکیبی، به طور کامل در حالت ایده‌آل و مناسب قرار دارد. همچنین، ماکزیمم تغییر مکان سازه کمتر از ۱۲۰ میلی‌متر است (شکل ۱۴) که در مقایسه با ابعاد سازه، قابل چشم‌پوشی است. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که سازه مذکور قادر است تا در مقابل بارهای استاندارد وارد شده به خوبی مقاومت کند. قرارگیری محل خرپاها در هشت وجه مختلف سازه به دور یک ستون و نحوه اتصال آنها به خرپاهای مجاور، باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش در سازه می‌شود و از طرف

دیگر از بروز اثر تخریبی تمرکز تنش روی اجزای سازه جلوگیری می‌کند. سرانجام، مدل کامل اسکلت نهایی سازه گلخانه هشت‌وجهی با پوشش سقف و دیواره‌های پلی‌کربنات، در شکل ۱ به نمایش گذاشته شده است. گفتنی است که در این طراحی ضخامت نهایی پروفیل‌ها حداکثر ۳ میلی‌متر محاسبه شده است. همچنین، با احتساب ابعاد سطح مقاطع به دست آمده برای ستون‌ها، وزن نهایی سازه در واحد سطح حدود ۸/۵ کیلوگرم محاسبه شد که در مقایسه با سازه‌های کم‌انرژی در سطح زیر بنا و ارتفاع مشابه (Anon, 2018) حدود ۱/۵ کیلوگرم به ازای واحد سطح سبک‌تر است.

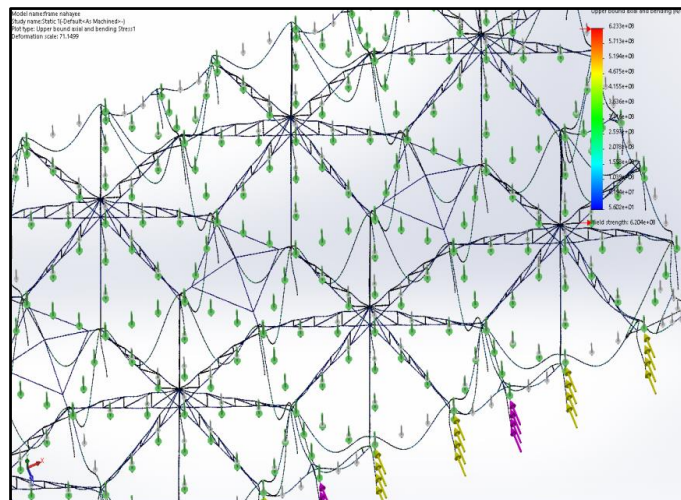
ضخامت پروفیل کلیه ستون‌های اصلی مرکزی ۳ میلی‌متر و ارتفاع آنها ۶ متر است. ستون‌های دیواره هشت‌وجهی همگی ۴ متر ارتفاع دارند. ابعاد پروفیل خرپاها  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ، ستون‌های مرکزی  $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ ، ستون‌های جانبی  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  است و ستون کنج نیز ۳ متر ارتفاع دارد. ابعاد پروفیل قوطی افقی و مایل بین ستون مرکزی با کناری نیز  $60\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  است.

طراحی و شبیه‌سازی سازه گلخانه هشت‌وجهی مقاوم...



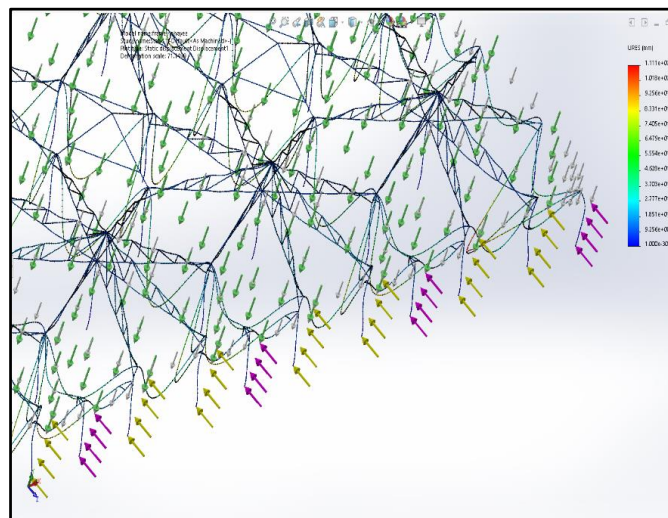
شکل ۱۲- نمایش بارگذاری ترکیبی در سازه گلخانه هشت‌وجهی

Fig. 12- The deflection created in the structure of the octagonal greenhouse, due to the hanged loads



شکل ۱۳- تنش حاصل از بارگذاری ترکیبی در سازه گلخانه هشت‌وجهی

Fig. 13- The deflection created in the structure of the octagonal greenhouse, due to the hanged loads



شکل ۱۴- خیز حاصل از بارگذاری ترکیبی در سازه گلخانه هشت‌وجهی

Fig. 14- Stress results from combined loads on an octagonal greenhouse structure

## نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه در این سازه از پروفیل با مقطع مربع- مستطیل برای ستون‌ها، تیرها و خریاها استفاده می‌شود، از این‌رو این سازه، به ویژه در مقابل بارهای خمشی وارد به ستون‌ها، استحکام قابل قبولی پیدا می‌کند که می‌تواند در مقابل اثر تخریبی بار باد، مستقل از جهت وزش، مقاومت کنند. استفاده از این مدل سازه در مقایسه با سازه‌های گلخانه‌ای متداول مانند گلخانه‌های کم‌مانی و گنبدی با ارتفاع تاج ۶/۵ متر، اقتصادی‌تر است بدین معنا که برای هر مترمربع از آن کمتر از ۸/۵ کیلوگرم فلز به کار برده می‌شود. همچنین، کلیه پروفیل‌ها با ابعاد گفته شده در سازه پیشنهادی در بازار به راحتی در دسترس است. به این نکته باید توجه کرد که مقدار مصالح مصرفی در سازه پیشنهادی متناسب با بار باد ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت است که کاربرد این مدل گلخانه را برای مناطق بادخیز امکان‌پذیر می‌سازد.

بر اساس بارهای استاندارد وارد به سازه گلخانه، اسکلت سازه یک گلخانه هشت‌وجهی با توجه به قیدهای مورد نظر طراحی و مدل‌سازی شد. نتایج تحلیل بارگذاری‌ها نشان دادند که چارچوب سازه، مقاومت بسیار مطلوبی در مقابل بار باد از خود نشان می‌دهد و تنش ماکزیمم ایجاد شده در سازه از حد مجاز تسلیم فلز سازه پایین‌تر است و نیز اینکه حداکثر خیز در بالای ستون مشرف به باد، در مقایسه با ارتفاع سازه، مقداری است مطلوب و نتایج مطلوب تحلیل تنش و تغییر مکان به صورت جداگانه برای بار برف و آویز نیز نشان‌دهنده مقاومت و استحکام قابل قبول سازه است. برای اسکلت سازه گلخانه هشت‌وجهی، بارگذاری ترکیبی حاکی از طراحی قابل قبول و مناسب بود که برای سازه گلخانه هشت‌وجهی مستقل از فونداسیون اجرا شد.

## مراجع

- Achref, H., Foudi, M., & Cherif, B. (2019). Higher buckling and lateral buckling strength of unrestrained and braced thin-walled beams: Analytical, numerical and design approach applications. *Journal of Constructional Steel Research*, 155, 1-19.
- Anon. (2008). The principles and criteria for development of greenhouses: design principles and regulations. President Deputy Strategic Planning and Control of Greenhouses in Iran. *Technical Report*. (in Persian)
- Anon. (2018). Greenhouse structures and equipments, Part 1: greenhouse structures Iranian National Standardization Organization, 15565-1.
- Anon. (2010). Actions on structures. *European Standard*. Eurocode 1. BS EN 1991-1-4:2005.
- Auffray, N., Le Quang, H., & He, Q. C. (2013). Matrix representations for 3D strain-gradient elasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 61(5), 1202-1223.
- Beheshti, A. (2017). Finite element analysis of plane strain solids in strain-gradient elasticity. *Acta Mechanica*, 228(10), 3543-3559.
- Briassoulis, D., Douka, G., Dimakogianni, D., & Vayas, I. (2016). Analysis of the collapse of a greenhouse with vaulted roof. *Biosystems Engineering*, 151, 495- 509.
- Bronkhorst, A. J., Geurts, C. P. W., Bentum, C. A., Knaap, L. P. M., & Pertermann, I. (2017). Wind loads for stability design of large multi-span duo-pitch greenhouses. *Frontiers in Built Environment*, 3, 1-21.

- Ghani, S., Bakochristou, F., Bialy, E. M. A. E., Gamaledin, S. M. A., Rashwan, M. M., Abdelhalim, A. M., & Ismail, S. (2019). Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments- A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(1), 48-70.
- Ha, T., Kim, J., Cho, B. H., Kim, D. J., Jung, J. E., Shin, S. H., & Kim, H. (2017). Finite element model updating of multi-span greenhouses based on ambient vibration measurements. *Biosystems Engineering*, 161, 145-156.
- Hur, D. J., & Kwon, S. (2017). Fatigue analysis of greenhouse structure under wind load and self-weight. *Applied Sciences*, 7(12): 2-11.
- Koutromanos, I. (2018). *Fundamentals of Finite Element Analysis: Linear Finite Element Analysis*. 1<sup>st</sup> Ed. Wiley.
- Na, W. H., Lee, J. W., Rasheed, A., Kwak, C. S., Lee, S. Y., Yoon, Y. C., Lee, H. W. (2017). Calculation of crop loads for structural design of greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 26(4), 301-309.
- Ochoa, J. D. A. (2013). Stability of slender columns on an elastic foundation with generalised end conditions. *Ingeniería e Investigación*, 33(3), 34-40.
- Pepper, D. A., Kassab, A., & Divo, E. (2014). *An Introduction to Finite Element, Boundary Element, and Meshless Methods with Applications to Heat Transfer and Fluid Flow*. New York, NY: ASME Press.
- Song, J., Xu, W., Hu, G., Liang, S., & Tan, J. (2019). Non-Gaussian properties and their effects on extreme values of wind pressure on the roof of long-span structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 184, 106-115.
- Sun, X., Yu, R., & Wu, H. (2019). Investigation on wind tunnel experiments of ridge-valley tensile membrane structures. *Engineering Structure*, 187, 280-298.
- Teitel, M., Montero, J. I. W., & Baeza, E. J. (2012). Greenhouse design: concepts and trends. *Acta Horticulture*, 952, 605-620.
- Verma, S. K., Roy, A. K., Lather, S., & Sood, M. (2015). CFD simulation for wind load on octagonal tall buildings. *SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG – IJCE)*, 239, 129-134.
- Wegst, C. W. (1992). *Key to Steel*. ISBN 3-922599-09-5. 16<sup>th</sup> Ed. Asm Intl.
- Wilcox, D. C. (2006). *Tubulence Modeling for CFD*. 3<sup>rd</sup> Ed. DCW Industries.
- William, B., & Brower, Jr. (1999). *A Primer in Fluid Mechanics Dynamics of Flows in One Space Dimension*. CRC Press.
- Xu, X. J., Wang, X. C., Zheng, M. L., & Ma, Z. (2017). Bending and buckling of nonlocal strain gradient elastic beams. *Composite Structure*, 160, 366-377.
- Yang, Z. Q., Yong, X. Li., Xiao, P. X., Huang, C. R., and Zhang, B. (2013). Wind Loads On Single-Span Plastic Greenhouses And Solar Greenhouses. *Hort Technology*, 5, 622-628.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Fox, D. (2014). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Elsevier Ltd.
- Zingoni, A. (2010). *Advances and Trends in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. CRC Press.

## **Structural Design and Simulation of Octogonal Greenhouse against Different Loads**

**J. Javadi Moghaddam\*, S. Ozlati, Gh. Zarei, D. Momeni and F. Azadshahraki**

\*Corresponding Author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. Email: jalaljavadimoghaddam@gmail.com  
Received: 25 May 2019, Accepted: 3 September 2019

### **Abstract**

Greenhouse structure is one of the most important factors in the greenhouse industry; enhancing its strength and decreasing the cost of its manufacturing have always been among manufacturers consideration. The aims of this study were to design an octagonal greenhouse with square cross-sectional components with enough resistance to standard loads applied by structure stress analysis methods. Design and optimization of this greenhouse involved selecting the minimum thickness of the profiles and columns. In addition, the layout of the trusses is led to minimum weight of structures per square meter. This greenhouse was designed to have nessecary structure standards and could be used in different climate conditions of Iran. In design process, initially the effects of wind load with 120 km/h were determined by using fluid dynamics calculations. Afterward, the main frame of the structure including columns, horizontal beams and trusses, were designed according to wind, snow and pendant loads. The results showed that the wieght of metal to be used to build the structure of greenhouse was less than  $8.5 \text{ Kg/m}^2$  , very lower than that in similar stuctures ( $20 \text{ kg/m}^2$ ).

**Keywords:** Wind Load, Modeling, Simulation, Stress Analisys, Computational Fluid Dynamics