



بررسی تأثیر تغییرات نیروهای ثقلی و جانبی در هندسه بهینه گنبد‌های فضاکار یک لایه

قادر باقری^۱، حمید شعبان زاده^۲

۱- کارشناس ارشد سازه، گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

۲- کارشناس ارشد سازه، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

Bagheri_gh12@yahoo.com

خلاصه

وزن سازه‌ها وابسته به مقاطعی است که با توجه به نیروهای وارد بر سازه، برای اعضا آن طرح می‌شوند. با توجه به اینکه در گنبد‌ها مقدار و چگونگی نیروهای وارده وابسته به هندسه گنبد می‌باشند، انتخاب مقدار مناسب برای ارتفاع گنبد در کاهش سطح مقطع اعضا و در نتیجه کاهش وزن سازه تأثیر زیادی دارد. در این مقاله تأثیر تغییرات نیروهای ثقلی و جانبی بر ارتفاع بهینه گنبد و تأثیر تغییرات ارتفاع گنبد بر مقاطع اعضا و وزن سازه، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده به صورت نمودارهایی ارائه شده‌اند. برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک (GA) که یکی از تکامل‌یافته‌ترین روش‌های بهینه‌سازی بوده و مناسب‌ترین روش برای بهینه‌سازی سازه‌ها با متغیرهای گسسته می‌باشد، استفاده شده است.

کلمات کلیدی: گنبد فضاکار یک لایه، ارتفاع بهینه، نیروهای ثقلی، نیروی جانبی، الگوریتم ژنتیک

مقدمه

گنبد‌های فضاکار از جمله سازه‌هایی می‌باشند که شکل هندسی آنها بر میزان بارهای وارده و چگونگی توزیع آنها تأثیرگذار می‌باشد، لذا انتخاب ارتفاع مناسب برای گنبد‌ها در کاهش مقدار نیروهای وارده و در نتیجه کاهش سطح مقطع اعضا و وزن کل سازه مؤثر می‌باشد. با توجه به اینکه تغییر ارتفاع گنبد تأثیر متفاوتی بر توزیع بارهای ثقلی و بارهای جانبی داشته و همچنین شدت بارهای ثقلی و جانبی نیز در میزان ارتفاع بهینه تأثیرگذار می‌باشد، تعیین مقدار مناسبی برای ارتفاع گنبد در دهانه‌ها و بارگذاری‌های مختلف می‌تواند در کاهش وزن سازه و در نتیجه اقتصادی شدن طرح مؤثر بوده و نتایج حاصل می‌تواند از نظر کاربردی نیز مورد استفاده طراحان قرار گیرد.

در زمینه بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک (GA) یکی از تکامل‌یافته‌ترین روش‌های بهینه‌سازی بوده و مناسب‌ترین روش برای بهینه‌سازی سازه‌ها با متغیرهای گسسته می‌باشد که در این تحقیق از این روش برای بهینه‌سازی گنبد‌های فضاکار استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی الهام گرفته شده از طبیعت می‌باشد که بر پایه رقابت موجودات زنده برای تصاحب منابع طبیعی محدود استوار است. برتری موجودات پیروز، مدیون ویژگی‌های فردی آنان است. تولید مثل چنین موجوداتی سبب تکثیر این ژنها و در نتیجه تولید فرزندان شایسته خواهد شد. با انجام متوالی انتخاب بهترین اعضا و تولید مثل آنها، کل جمعیت به سوی سازش بیشتر با محیط سوق خواهد یافت. الگوریتم ژنتیک با مدل‌سازی ریاضی چرخه طبیعی فوق، بهینه توابع مقید ریاضی را محاسبه می‌نماید [۶-۱].

۲- روند بهینه‌سازی

تابع هدف در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی، وزن سازه می‌باشد که هدف حداقل کردن آن همزمان با اقلان قیود حاکم بر طرح می‌باشد. ضوابط طراحی اعضای سازه‌های فضاکار به عنوان قیود مسأله بهینه‌سازی بوده و به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول قیودهای

^۱ مدرس گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

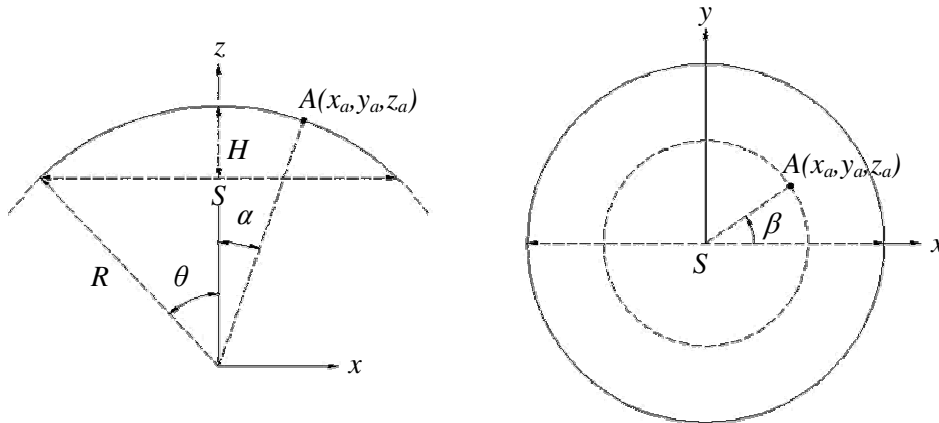
^۲ عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان



مربوط به اعضا می‌باشند که در این مقاله دو قید تنش و لاغری برای اعضا در نظر گرفته شده است. دسته دوم قیدهای مربوط به گره‌ها می‌باشند که برای محدود کردن تغییر مکان گره‌ها قید تغییر مکان در نظر گرفته شده است.

متغیرهای در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی، شامل متغیرهای مربوط به اعضای سازه یعنی سطح مقطع اعضا و متغیر مربوط به شکل سازه یعنی نسبت ارتفاع به دهانه گنبد می‌باشد. در مورد متغیر نسبت ارتفاع به دهانه (h/S)، برای تبدیل مختصات گره‌ها در h/S های مختلف روابطی استخراج شده که در ادامه آورده شده است. لازم به ذکر است که گنبد‌های مورد بررسی در این تحقیق دارای انحنا کروی بوده و روابط استخراج شده، برای گنبد کروی می‌باشد.

همانطور که می‌دانیم دو پارامتر مشخص کننده یک قطاع از قوس کروی، شعاع (R) و زاویه قطاع می‌باشد (θ) می‌باشد، که در شکل (۱) نشان داده شده و روابط مربوط به محاسبه آنها در زیر آورده شده است.



شکل ۱: پارامترهای یک قطاع از کره

$$R = \frac{S}{2 \sin(\theta)} \quad (1)$$

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(2 \frac{h}{S} \right) \quad (2)$$

اگر نقطه‌ای مانند نقطه A با مختصات (x_a, y_a, z_a) بر روی این قطاع از کره را در نظر بگیریم (شکل (۱))، مختصات این نقطه با پارامترهای شعاع و زاویه، از روابط (۳)، (۴) و (۵) قابل محاسبه است.

$$x_a = R \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) \quad (3)$$

$$y_a = R \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \quad (4)$$

$$z_a = R \cdot \cos(\alpha) \quad (5)$$

با توجه به رابطه (۳) مقدار α که مشخص کننده زاویه خط گذرنده از نقطه A و مرکز قوس با محور z می‌باشد را می‌توان محاسبه کرد.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{z_a}{R} \right) \quad (6)$$

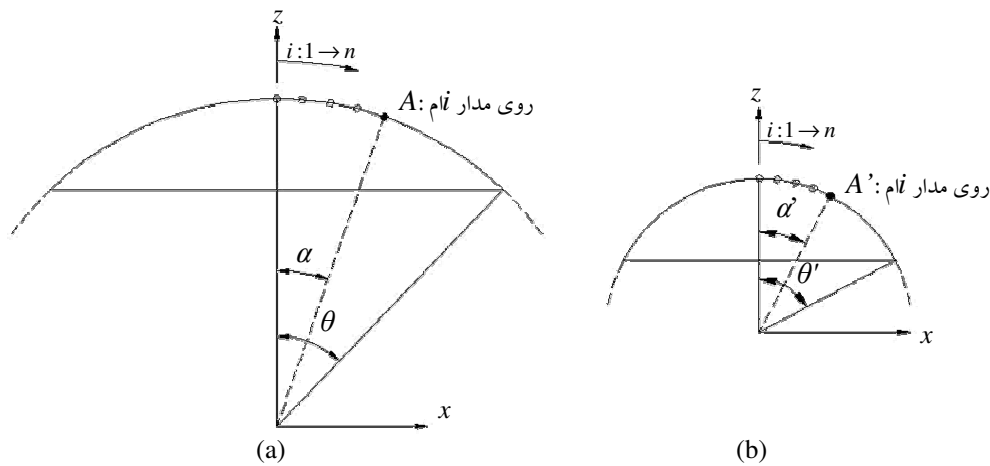
همچنین با استفاده از روابط (۴) و (۵) می‌توان β را که بیان کننده زاویه قرارگیری تصویر نقطه A در صفحه xy از محور x می‌باشد را محاسبه نمود، که رابطه آن عبارت است از:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{y_a}{x_a} \right) \quad (7)$$

با استفاده از روابط فوق، با داشتن مختصات دکارتی نقطه‌ای در روی قطاع کروی، می‌توان موقعیت آنرا با محاسبه α و β برای آن نقطه، نشان داد. حال موقعیت نقطه A بعد از تغییر نسبت h/S را به طریق زیر بدست آورد. در گنبد‌های فضاکار اگر تعداد تقسیمات مداری را n و

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

تعداد تقسیمات نصف‌النهاری را با m نشان دهیم، زاویه بین دو مدار m نشان دهیم، زاویه بین دو مدار n باشد. با توجه به شکل (۲)، با تغییر h به h' و S به S' ، پارامترهای نقاط مورد نظر در شکل (۲- a) و (۲- b) یعنی A و A' ، به صورت زیر می‌باشد.



شکل ۲: تغییرات مختصات نقطه A در نما، با تغییر ارتفاع و دهانه قطاع کروی

$$\alpha - i \cdot \Delta\theta = \frac{i}{n} \theta \quad (8)$$

$$\alpha' - i \cdot \Delta\theta' = \frac{i}{n} \theta' \quad (9)$$

با تقسیم طرفین رابطه (۸) به طرفین رابطه (۹)، نسبت α و α' بدست می‌آید.

$$\frac{\alpha}{\alpha'} = \frac{\theta}{\theta'} \quad (10)$$

برای محاسبه رابطه تغییرات نقطه A در صفحه xy نیز مانند روش بیان شده عمل می‌کنیم. با تقسیم گنبد به m نصف‌النهار زاویه بین دو

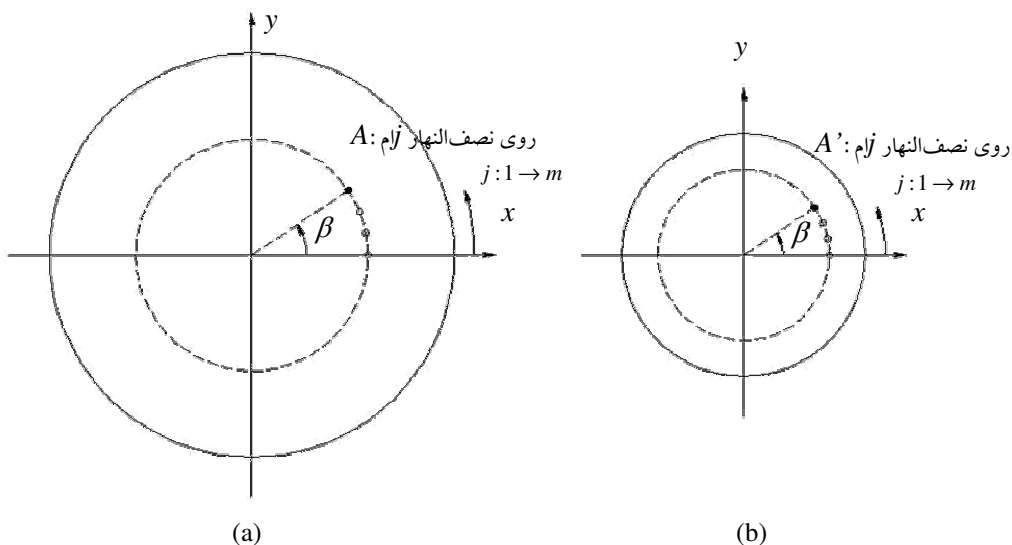
نصف‌النهار برابر $\Delta\gamma = \frac{360}{m}$ می‌باشد، لذا با توجه به شکل (۳) مقادیر زاویه β در شکل (۳-a) و β' در شکل (۳-b)، با روابط بیان شده در زیر بدست می‌آید.

$$\beta = j \cdot \Delta\gamma = \frac{j}{m} (360) \quad (11)$$

$$\beta' = j \cdot \Delta\gamma' = \frac{j}{m} (360) \quad (12)$$

با تقسیم رابطه (۱۲) به رابطه (۱۱)، رابطه تغییرات نقطه A در صفحه xy بدست می‌آید.

$$\beta' = \beta \quad (13)$$



شکل ۳: تغییرات مختصات نقطه A در پلان، با تغییر ارتفاع و دهانه قطاع کروی



حال با استفاده از روابط بدست آمده، می‌توان مختصات نقطه A بعد از تبدیل نسبت h/S به h/S' (مختصات نقطه) را محاسبه کرد. روند این محاسبات به صورت زیر می‌باشد:

۱. برای گنبد زمینه با داشتن h و S و با استفاده از روابط (۱) و (۲)، R و θ محاسبه می‌شود.
۲. برای گنبد تبدیل‌یافته نیز با داشتن h' و S' و با استفاده از روابط (۱) و (۲)، R' و θ' محاسبه می‌شود.
۳. با استفاده از روابط (۶) و (۷)، α و β را برای نقطه $A(x_a, y_a, z_a)$ محاسبه می‌کنیم.
۴. با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۳)، α' و β' را بدست می‌آوریم.
۵. با داشتن α' ، β' و R' و با استفاده از روابط (۳)، (۴) و (۵)، مختصات دکارتی جدید برای نقطه $A' = (x_{a'}, y_{a'}, z_{a'})$ (نقطه A در گنبد تبدیل‌یافته) بدست می‌آوریم.

در روند فوق مراحل ۳ تا ۵ را برای همه نقاط موجود تکرار می‌کنیم. بعد از مشخص شدن کامل مشخصات هندسی سازه، مراحل بارگذاری و آنالیز سازه انجام شده و سایر عملگرهای الگوریتم ژنتیک اعمال می‌شود. مراحل بهینه‌سازی فوق به صورت یک برنامه کامپیوتری در محیط *Visual Fortran* آماده شده است.

مطالعات عددی

در این قسمت ابتدا تأثیر تغییرات نیروها بر هندسه و وزن سازه به تنهایی مورد بررسی قرار گرفته و سپس اثر ترکیبی آنها بررسی شده است. با توجه به اینکه آیین نامه ۵۱۹ ایران در زمینه سقف‌های قوسی شکل نسبتاً ضعیف می‌باشد [۷]، برای تعیین بار باد در این تحقیق از آیین‌نامه *ANSI* استفاده شده است [۸].

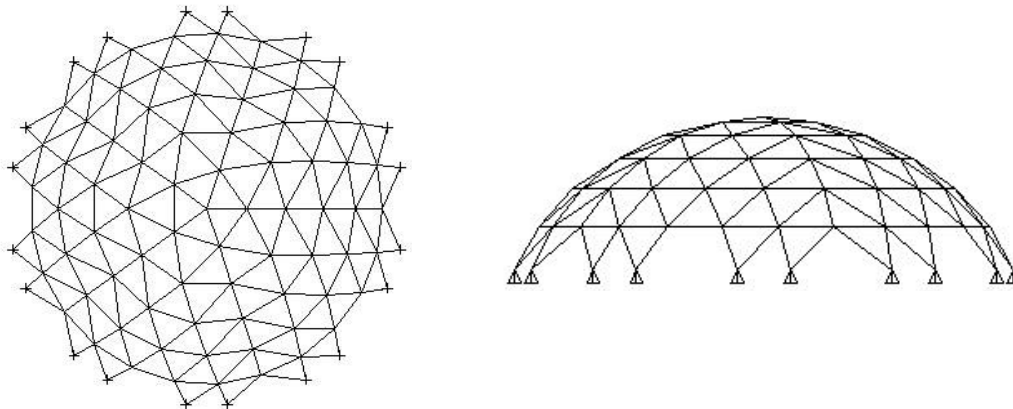
برای این منظور سازه برای حالت‌های مختلف مورد بررسی، در نسبت‌های مختلف h/S از ۰/۱ تا ۰/۵ با تغییرات ۰/۰۵ بهینه شده و وزن سازه بهینه محاسبه می‌شود. و تغییرات وزن بهینه در h/S ‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بدون بعد و قابل استفاده کردن نتایج حاصل، درصد اختلاف وزن بهینه سازه در حالت‌های مختلف نسبت به وزن بهینه در h/S بهینه، با رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$PWD_i = \frac{W_i - W_{opt}}{W_{opt}} \times 100 \quad (14)$$

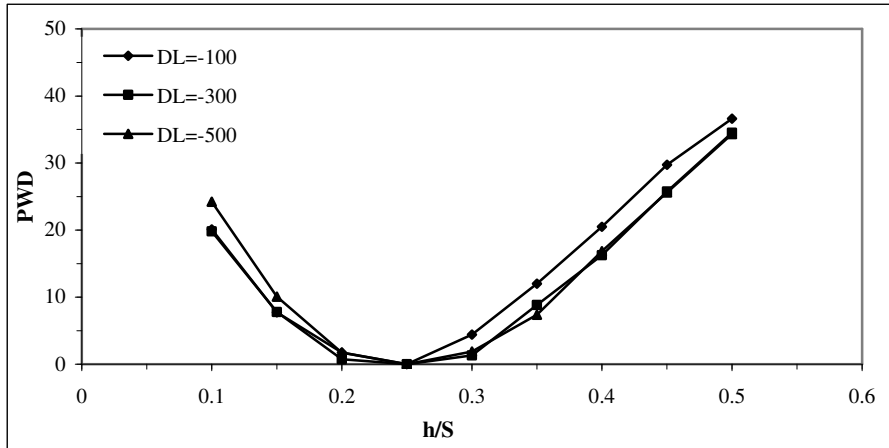
در این رابطه PWD درصد اختلاف وزن در حالت‌های مختلف نسبت به وزن بهینه می‌باشد. W وزن سازه بهینه شده برای هر بارگذاری و W_{opt} وزن بهینه سازه در h/S بهینه برای هر بارگذاری می‌باشد.

گنبدهای یک‌لایه دارای شکل‌های مختلفی می‌باشند، با مقایسه شکل‌های مختلف گنبدهای یک‌لایه، از میان شکل‌های مختلف، گنبدهای دارای فرم مثلثی شکل با طول اعضای تقریباً یکسان (گنبدهای ژئودزیک) دارای بیشترین صلبیت بوده و در برابر بارهای سنگین نیز دارای جابجایی‌های بسیار کمی در گره‌ها می‌باشند. این گنبدها به دلیل داشتن اعضای با طول تقریباً یکسان و شکل خاص خود براحتی برای دهانه‌های بزرگ قابل گسترش بوده و در میان شکل‌های مختلف گنبدهای فضاکار از جمله سازه‌های پرکاربرد می‌باشند. در این قسمت نتایج حاصل از بهینه‌سازی یک گنبد فضاکار یک‌لایه ۲۴۰ عضوی با ۹۶ گره آورده شده است. این گنبد دارای دهانه ۳۰ متر بوده و تیپ‌بندی اعضا به مقدار حداکثر در نظر گرفته شده که با توجه به تقارن‌های موجود برابر ۲۸ می‌باشد، (شکل (۴)).

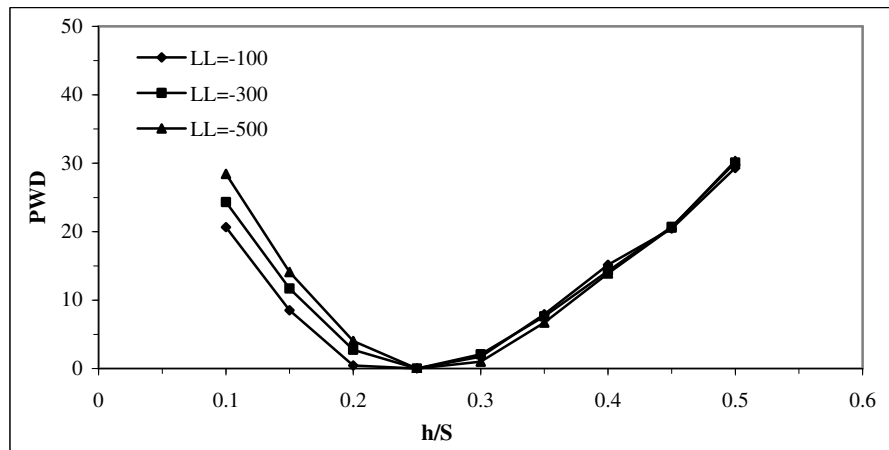
در این بررسی تغییرات بارهای مرده و زنده، در دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول بار باد صفر در نظر گرفته شده و بارهای مرده و زنده برابر ۱۰۰-، ۳۰۰- و ۵۰۰- کیلوگرم بر مترمربع انتخاب شده‌اند. تغییرات پارامتر PWD در h/S ‌های مختلف به صورت نمودار در شکل (۵) برای تغییرات بار مرده و شکل (۶) برای تغییرات بار زنده آمده است.



شکل ۴: گنبد یک‌لایه ۲۴۰ عضوی مورد بررسی

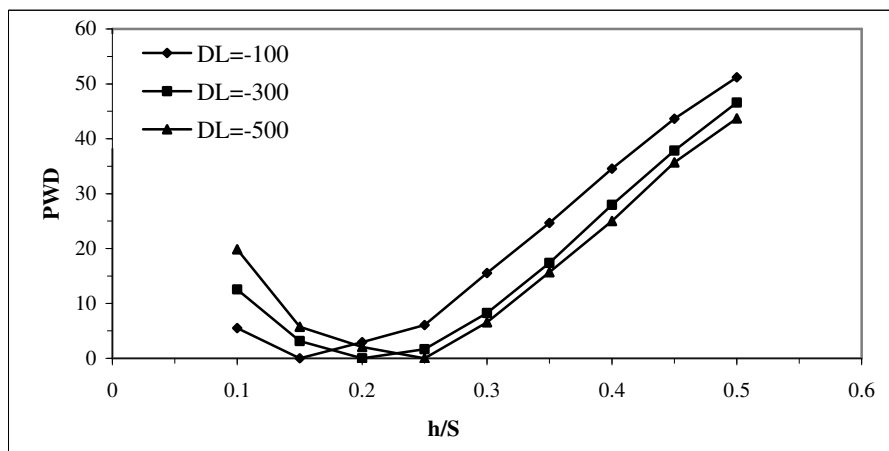


شکل ۵: نمودار h/S - PWD برای بارهای مرده مختلف

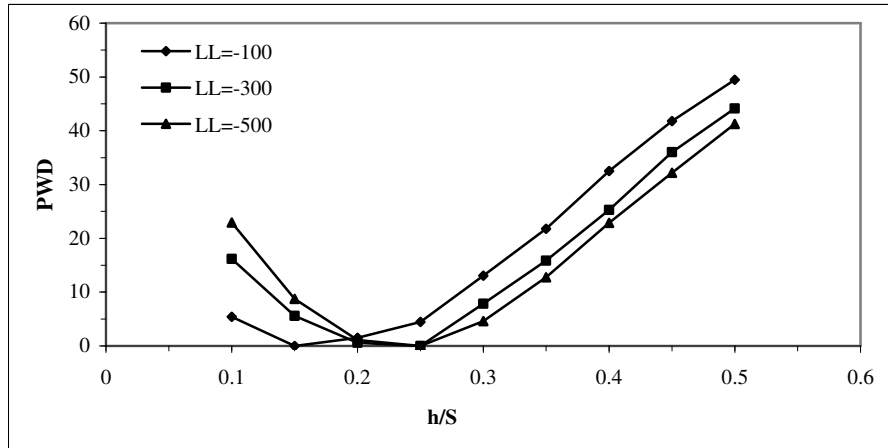


شکل ۶: نمودار h/S - PWD برای بارهای زنده مختلف

در حالت دوم بررسیهای فوق همراه با بار باد صورت گرفته است. نمودارهای مربوط به تغییرات بارهای مرده و زنده به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.

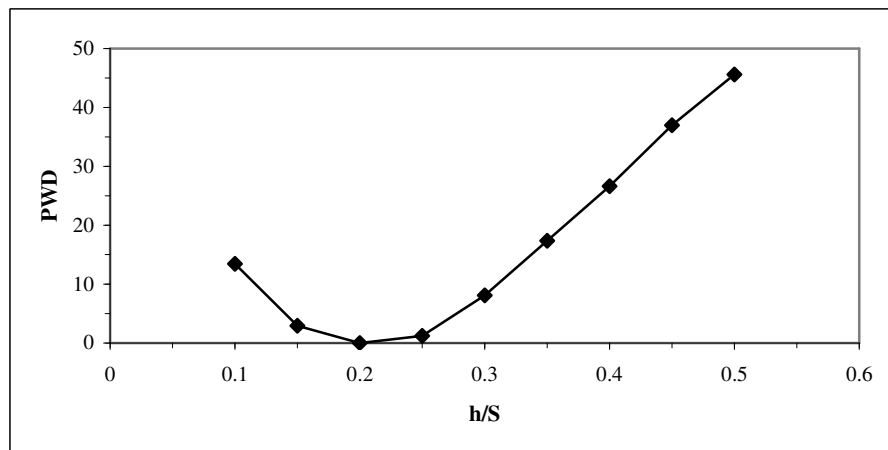


شکل ۷: نمودار h/S - PWD برای بارهای مرده مختلف



شکل ۸: نمودار h/S - PWD برای بارهای زنده مختلف

بعد از بررسی تغییرات بارهای مرده و زنده برای h/S های مختلف، سازه مورد نظر تحت بارهای مرده و زنده و باد متعارف یعنی بار مرده ۱۰۰- کیلوگرم بر متر مربع، بار زنده ۱۵۰- کیلوگرم بر مترمربع و بار باد مربوط به منطقه C آیین‌نامه AISC برای h/S های مختلف بهینه شده است، (شکل (۹)).



شکل ۹: نمودار h/S - PWD برای ترکیب بارها

نتیجه‌گیری

افزایش ارتفاع گنبد باعث افزایش سختی سازه می‌شود، همچنین این افزایش باعث زیاد شدن مقدار بارهای وارده، به خصوص بار باد می‌گردد. لذا مقدار و ترکیب بارها در مقدار بهینه تأثیرگذار می‌باشند. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، تغییرات بار مرده، تأثیری در مقدار h/S بهینه نداشته و این مقدار برای هر سه حالت برابر ۰/۲۵ می‌باشد. در این حالت در بازه ۰/۱۵ و ۰/۳۵ برای h/S ، اختلاف وزن بهینه سازه از حالت h/S بهینه کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. با توجه به نمودار شکل (۶)، افزایش بار زنده باعث افزایش مقدار نسبت h/S می‌شود. مقدار h/S بهینه برای بار زنده ۱۰۰- کیلوگرم بر مترمربع برابر ۰/۲ بوده و برای سایر بارها، برابر ۰/۲۵ می‌باشد. با توجه به اینکه افزایش ارتفاع گنبد باعث افزایش بار باد می‌گردد، لذا وجود بار باد باعث کاهش مقدار نسبت h/S گنبد می‌شود. در این حالت با افزایش مقدار بار مرده و زنده و در نتیجه افزایش تأثیر آن، مقدار نسبت h/S افزایش می‌یابد ولی این مقادیر کمتر از مقادیر مربوط به حالت قبلی که بار باد وجود نداشت، می‌باشد، شکل‌های (۷) و (۸). به طور کلی با توجه نتایج بدست آمده، در شرایطی که بار ثقلی نسبت به بار باد تعیین‌کننده‌تر باشد، مقدار h/S بهینه بین ۰/۲ و ۰/۳ حاصل می‌شود. این مقدار برای مناطقی که بار باد تعیین‌کننده می‌باشد، کمتر از حالت قبل بوده و بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ پیشنهاد می‌شود.



مراجع

[۱] سلاجقه، ج. و باقری، ق.، "بهینه‌سازی ارتفاع و ضخامت گنبدهای فضاکار با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، پروژه کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۴.

[2] Osaki, M., "Genetic algorithm for topology optimization of trusses", *Comput. & Struct.*, Vol. 57, No.2, pp. 219-225, 1995.

[۳] سلاجقه، ج. و باقری، ق.، "بهینه‌سازی گنبدهای یک‌لایه و دولایه با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، ششمین کنفرانس بین‌المللی سیستمهای هوشمند CIS2004، دانشگاه شهید باهنر کرمان، آذر ۱۳۸۳.

[4] Rajeev, S., and Krishnamoorthy, C. S., "Discrete optimization of structures using genetic algorithms", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.118, No. 5, pp. 1233-1250, 1992.

[۵] سلاجقه، ج. و باقری، ق.، "طرح بهینه گنبدهای فضاکار دولایه با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، دومین کنگره ملی مهندسی عمران 2NCCE، دانشگاه علم و صنعت ایران، اردیبهشت ۱۳۸۴.

[6] Wu, S.J. and Chow, P.T., "Integrated Discrete and Configuration Optimization of Trusses Using Genetic Algorithm", *Comput. & Struct.*, Vol. 55, No.4, pp. 695-702, 1995.

[۷] آیین‌نامه حداقل بار وارده بر ساختمانها و ابنیه فنی، وزارت مسکن و شهرسازی، ۱۳۷۹

[۸] مستوفی‌نژاد، داوود و فضیلی، مهدی، "بارگذاری و سیستمهای باربر"، نشر ارکان