

بهینه سازی سازه های فضاکار بادر نظر گرفتن احتمال خرابی اعضا و گره ها به کمک الگوریتم وراثتی اصلاح شده

محمدرضا قاسمی*^۱ و محمدرضا مستخدمین حسینی^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی - دانشگاه سیستان و بلوچستان زاهدان

^۲ مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

(تاریخ دریافت ۸۵/۴/۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۱۲/۱۴، تاریخ تصویب ۸۷/۲/۲۹)

چکیده

در این تحقیق هدف بهینه سازی وزن سازه های فضاکار با استفاده از نظریه قابلیت اعتماد می باشد. با توجه به اینکه در عمل، خرابی سازه علاوه بر این که از ناحیه عضو رخ می دهد ممکن است از محل گره ها نیز به وقوع بپیوندد بنابراین علاوه بر احتمال خرابی اعضا، احتمال خرابی گره ها نیز در فرآیند بهینه یابی وزن سازه های خرابی و فضاکار منظور شده و فرمول بندی دیگری جهت آن ارائه گردیده است. منظور از خرابی گره این است که تغییر مکان گره در یک راستا، از تغییر مکان مجاز گره در آن راستا تجاوز نماید. در فرآیند بهینه یابی، اثر پارامترهای مختلف احتمال اندیشانه نظیر بارگذاری، تنش تسلیم، مدول الاستیسیته و سطح مقطع اعضای سازه نیز در نظر گرفته شده است. البته در مثال های عددی انجام یافته در این تحقیق فرض شده است که تمامی متغیرهای احتمال اندیشانه از نظر آماری مستقل از یک دیگر بوده و دارای تابع توزیع نرمال باشند. هم چنین در این تحقیق، جهت بهینه یابی از الگوریتم وراثتی اصلاح شده استفاده گردیده است. از آن جا که محاسبات روش وراثتی در هر مرحله بر زیر مجموعه ای از دامنه تابع انجام می شود، احتمال هم گرایی آن در بهینه کلی تابع هدف افزایش یافته و از هم گرایی موضعی جلوگیری می نماید. هم چنین استقلال محاسبات این الگوریتم از مشتق تابع هدف و قیود حاکم، باعث سازگاری آن با توابع گسسته می گردد. تحقیق اخیر نشان می دهد که با افزایش احتمال خرابی مجاز اعضا، گره ها و یا کل سازه، وزن بهینه سازه کاهش می یابد، اما با افزایش ضرایب پراکنندگی بار و یا تنش تسلیم، وزن بهینه سازه نیز افزایش خواهد یافت.

واژه های کلیدی: احتمال خرابی عضو و گره - بهینه سازی - سازه های فضاکار - الگوریتم وراثتی اصلاح شده

مقدمه

اعتماد، احتمال خرابی می تواند به صورت تابع هدف یا بخشی از آن و یا به عنوان محدودیت مورد استفاده قرار گیرد [۳ و ۴]. در ادامه، فرمول بندی مورد استفاده در این تحقیق بیان گردیده است.

فرمول بندی ریاضی تابع هدف و قیود

در این تحقیق هدف بررسی حالت های زیر می باشد که فرمول بندی آنها را به صورت زیر بیان می نماییم:

الف- کمینه سازی وزن تحت محدودیت احتمال خرابی اعضا و گره های سازه

کمینه کنید:

$$W(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) \quad (1)$$

به گونه ای که:

$$P_{f_i} \leq P_{fa}, \quad i=1, n \quad (2)$$

$$P_{f_k} \leq P_{fa}, \quad k=1, m$$

$$\bar{X}'_i \leq \bar{X}_i \leq \bar{X}''_i, \quad i=1, n$$

در روابط فوق \bar{X}_i مقدار میانگین متغیر طراحی (به عبارت

برخلاف آنچه که غالباً تصور می شود، بسیاری از کمیت ها نظیر بارگذاری و مقاومت اعضای یک سازه کمیت های یقین اندیشانه نبوده (یعنی کمیت هایی کاملاً ناشناخته اند) که اصطلاحاً می توان به آن ها عنوان متغیرهای احتمال اندیشانه اختصاص داد. به واسطه این عدم قطعیت ها در پارامترهای سازه ای، هیچ سازه ای را نمی توان کاملاً ایمن در نظر گرفت، بلکه هر سازه دارای احتمال خرابی مشخص غیر صفر می باشد. بنابراین در طراحی سازه ها باید این عدم قطعیت ها را منظور نموده و سازه ها را به گونه ای طراحی نماییم که احتمال خرابی آنها کاهش یابد. با توجه به اینکه افزایش ایمنی یا کاهش احتمال خرابی همیشه از نظر یک مهندس حائز اهمیت می باشد ولیکن چه بسا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نباشد لذا برای لحاظ نمودن این دو مهم یافتن سطح بهینه یک طراحی ممکن است از ویژگی خاصی برخوردار باشد. اساساً هدف اصلی نظریه قابلیت اعتماد سیستم های سازه ای، طرح بهینه براساس مفهوم قابلیت اعتماد است. در فرآیند بهینه یابی براساس نظریه قابلیت

اندیشانه باشند. به این ترتیب حاشیه ایمنی نیز متغیر احتمال اندیشانه بوده و احتمال خرابی عضو i ام به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$P_{f_i} = P[M_i \leq 0] \quad (5)$$

و قابلیت اعتماد عضو i ام برابر است با: $1 - P_{f_i}$
جهت محاسبه احتمال خرابی هر عضو از رابطه زیر استفاده می گردد:

$$P_{f_i} = \Phi(-\bar{M}_i / \sigma_{M_i}) \quad (6)$$

در رابطه فوق تابع Φ ، تابع توزیع احتمال نرمال استاندارد بوده و \bar{M}_i و σ_{M_i} به ترتیب میانگین و انحراف معیار (جذر واریانس) حاشیه ایمنی عضو i ام می باشند که به صورت زیر محاسبه می گردند:

$$\bar{M}_i = \bar{C}_{yi} A_i - \sum_{j=1}^l B_{ij}(A_i) \bar{L}_j \quad (7)$$

$$\sigma_{M_i}^2 = \sigma_{C_{yi}}^2 A_i^2 + \sum_{j=1}^l B_{ij}^2(A_i) \sigma_{L_j}^2 \quad (8)$$

$$= (\bar{C}_{yi} CV_{C_{yi}} A_i)^2 + \sum_{j=1}^l \{B_{ij}(A_i) \bar{L}_j CV_{L_j}\}^2$$

که در روابط فوق \bar{C}_{yi} و \bar{L}_j به ترتیب میانگین تنش تسلیم و بار بوده و $\sigma_{C_{yi}}^2$ و $\sigma_{L_j}^2$ به ترتیب واریانس تنش تسلیم و بار بوده. هم چنین $CV_{C_{yi}}$ و CV_{L_j} به ترتیب ضرایب پراکندگی متغیرهای احتمال اندیشانه تنش تسلیم و بار می باشد [۱، ۲].

احتمال خرابی گره

فرمول بندی دیگری که در ادامه ارائه می گردد، حاشیه ایمنی تغییر مکان گره ها است.

در یک سازه خرپایی متشکل از n عضو که l بار بر آن اعمال شده است، اگر Y_k تغییر مکان مجاز گره k ام در راستای مورد نظر باشد، حاشیه ایمنی گره k ام، یعنی M_k با استفاده از روش های ماتریسی به صورت زیر بیان می گردد:

$$M_k = Y_k - \sum_{j=1}^l D_{kj} L_j \quad (9)$$

که در آن D_{kj} ضریب بار تغییر مکان گره k ام در اثر بار وارده L_j و l تعداد کل بارهای وارده می باشد. در این جا وضعیتی بررسی می شود که در آن تنش های مجاز C_{yi} و بارهای وارده L_j متغیرهای احتمال اندیشانه باشند. به این ترتیب حاشیه ایمنی نیز متغیر احتمال اندیشانه بوده و

دیگر سطح مقطع عضو (P_{f_k}, P_{f_i}) مقادیر احتمال خرابی موجود عضو i ام و گره k ام، $P_{f_{ak}}, P_{f_{ai}}$ مقادیر احتمال خرابی مجاز عضو i ام و گره k ام می باشند. n و m نیز

به ترتیب تعداد اعضاء و گره های سازه و \bar{X}_i^l, \bar{X}_i^m به

ترتیب کرانه های تحتانی و فوقانی \bar{X}_i می باشد.

ب- کمینه سازی وزن تحت محدودیت احتمال خرابی سیستم سازه
کمینه کنید:

$$W(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n)$$

به گونه ای که:

$$P_f \leq P_{fa} \quad (3)$$

$$\bar{X}_i^l \leq \bar{X}_i \leq \bar{X}_i^m, i=1, n$$

در روابط فوق P_f احتمال خرابی موجود کل سازه و P_{fa} احتمال خرابی مجاز کل سازه می باشد.

محاسبه احتمال خرابی اعضاء و گره ها

در بهینه یابی بر اساس نظریه قابلیت اعتماد، محدودیت های احتمال خرابی اعضاء و احتمال خرابی گره ها که در روابط بالا به آنها اشاره شده است، جزء قیود بهینه سازی می باشند که در ادامه به بررسی آنها خواهیم پرداخت. در این قسمت فرض می شود که پیکربندی سازه و وضعیت بارهای وارده به همراه طبیعت آماری آنها معلوم و سطح مقاطع اعضاء، متغیرهای طراحی باشند.

احتمال خرابی عضو

یک سازه خرپایی متشکل از n عضو که به تعداد l بار بر آن اعمال گردیده، مورد نظر می باشد. اگر A_i ($i=1,2,\dots,n$) سطح مقطع عرضی عضو i ام و L_j ($j=1,2,\dots,l$) مقدار j امین بار وارد بر سازه باشد. حاشیه ایمنی عضو i ام، یعنی M_i با استفاده از روش های ماتریسی به صورت زیر بیان می گردد:

$$M_i = C_{yi} A_i - \sum_{j=1}^l B_{ij}(A_i) L_j \quad (4)$$

که در آن C_{yi} تنش مجاز عضو i ام، $B_{ij}(A_i)$ ضریب بار عضو i ام در اثر بار وارده L_j می باشد.

در این جا وضعیتی بررسی می شود که در آن تنش های مجاز C_{yi} و بارهای وارده L_j متغیرهای احتمال

الگوریتم وراثتی در بهینه یابی براساس نظریه قابلیت اعتماد

تابع هدف

تابع هدف در این تحقیق وزن سازه می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$W = \gamma \sum_{i=1}^n A_i L_i \quad (15)$$

L_i, A_i به ترتیب سطح مقطع و طول عضو i ام، γ وزن مخصوص مصالح و n تعداد اعضا می باشد. در این تحقیق هدف به حداقل رساندن W است.

مقطع عرضی اعضا

مقاطع اعضا از نوع متغیرهای طراحی نیمه گسسته می باشند. تعداد متغیرهای مسئله برابر تعداد اعضای مستقل سازه بوده و در صورت گروه بندی اعضا، هر گروه به عنوان یک متغیر طراحی در نظر گرفته می شود. در حالت متغیرهای طراحی گسسته، طول زیر رشته مربوط به مقطع عرضی اعضا، وابسته به تعداد متغیرهای انتخاب شده است به طوری که اگر بتوان مقطع عرضی عضو i ام را از بین $N_{Section}$ متغیر (پروفیل) انتخاب نمود آنگاه طول زیررشته (ژن) مربوط به سطح مقطع عضو i ام (L_i) از رابطه (۱۶) محاسبه می گردد و سپس زیررشته های مربوط به مقطع عرضی عضو i ام به کمک رابطه (۱۷) به عددی در مبنای ده و بدون علامت $I_{Section}$ رمزگشایی می گردد:

$$2^{L_i} \geq N_{Section} \quad (16)$$

$$I_{Section} = \sum_{j=1}^{L_i} 2^{(L_i-j)} H_j + 1 \quad (17)$$

که در روابط فوق H_j مقدار عددی بیت j ام است که مقدار آن صفر یا یک می باشد. پس از رمزگشایی، با ایجاد تناظر یک به یک از $I_{Section}$ به مجموعه پروفیل های استاندارد، مشخصات مقطع عرضی هر عضو تعیین می گردد. در مورد متغیرهای طراحی نیمه گسسته نیز تنها تعداد تقسیمات در بازه مورد نظر برابر با $N_{Section}$ متغیر در نظر گرفته می شود. [۸]

قیود مسئله

در این تحقیق قیود مسئله براساس روابط ۲ و ۳ محاسبه می گردد.

احتمال خرابی گره k ام به صورت زیر محاسبه می گردد (منظور از خرابی گره این است که مقدار تغییر مکان گره در یک راستا از تغییر مکان مجاز گره در آن راستا تجاوز نماید).

$$P_{f_k} = P[M_k \leq 0] \quad (10)$$

قابلیت اعتماد گره k ام برابر است با: $1 - P_{f_k}$
جهت محاسبه احتمال خرابی گره از رابطه زیر استفاده می گردد:

$$P_{f_k} = \Phi(-\bar{M}_k / \sigma_{M_k}) \quad (11)$$

در رابطه فوق تابع Φ تابع توزیع احتمال نرمال استاندارد است. هم چنین \bar{M}_k و σ_{M_k} به ترتیب میانگین و انحراف معیار (جذر واریانس) حاشیه ایمنی گره k ام می باشند که به صورت زیر محاسبه می گردند:

$$\bar{M}_k = Y_k - \sum_{j=1}^l D_{kj} \bar{L}_j \quad (12)$$

$$\sigma_{M_k}^2 = \sum_{j=1}^l D_{kj}^2 \sigma_{L_j}^2 = \sum_{j=1}^l \{D_{kj} \bar{L}_j CV_{L_j}\}^2 \quad (13)$$

افزایش تعداد متغیرهای احتمال اندیشانه

در روابط فوق تنها بارگذاری سازه و تنش تسلیم مصالح متغیر احتمال اندیشانه فرض شده بود، حال اگر علاوه بر تنش تسلیم و بار وارد بر سازه مدول الاستیسیته و سطح مقطع نیز به عنوان متغیرهای احتمال اندیشانه در نظر گرفته شوند، فرمول بندی مربوط به احتمال خرابی گره تغییر نموده لیکن احتمال خرابی اعضا به صورت زیر تغییر می یابد:

$$\sigma_{M_i}^2 = \sigma_{C_{yi}}^2 \sigma_{A_i}^2 + CV_E^2 CV_{A_i}^2 \sum_{j=1}^l B_{ij} (A_i)^2 \sigma_{L_j}^2 = (\bar{C}_{yi} CV_{C_{yi}} A_i)^2 + CV_E^2 CV_{A_i}^2 \sum_{j=1}^l \{B_{ij} (A_i) \bar{L}_j CV_{L_j}\}^2 \quad (14)$$

در روابط فوق CV_A و CV_E به ترتیب ضرایب پراکندگی متغیرهای احتمال اندیشانه مدول الاستیسیته و سطح مقطع می باشند. لازم به توضیح است که با توجه به نحوه تنظیم الگوریتم برنامه نویسی که مقادیر سطح مقطع و مدول الاستیسیته را در محاسبه سختی اعضا در نظر گرفته است، در فرمول بندی فوق تنها ضرایب پراکندگی آنها اعمال گردیده. لذا بدیهی است، با تغییر روند برنامه نویسی، فرمول بندی فوق (رابطه ۱۴) نیز تغییر می نماید.

تابع هدف اصلاح شده

شده در بخش های قبل به بهینه سازی سازه های زیر
بپردازیم.

۱- خرپای معین ۱۳ میله ای

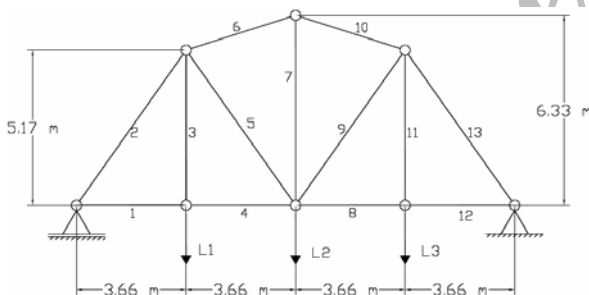
۲- گنبد خرپایی ۲۴ عضوی

۳- گنبد ۱۳۲ عضوی

هدف در کلیه مثال ها کمینه کردن وزن سازه بوده و متغیرهای طراحی که در فرآیند بهینه سازی تغییر می نمایند، سطح مقاطع اعضای سازه می باشند. در کلیه مثال ها، بهینه یابی تنها با متغیرهای نیمه گسسته انجام شده است. هم چنین نتایج حاصل از مثال یک، با مرجع مقایسه گردیده و مثال های دیگر به عنوان مدل جدید معرفی گردیده اند. در مثال دوم اثر پارامترهای مختلف احتمال اندیشانه را در بهینه یابی بررسی نموده و در مثال های دوم و سوم، محدودیت احتمال خرابی تغییر مکان را نیز به محدودیت های دیگر اضافه نموده و می توان اثر آن را در بهینه یابی سازه های فضاکار مشاهده نمود.

خرپای معین ۱۳ میله ای

خرپای فولادی مورد نظر که در شکل (۱) نشان داده شده، از مرجع [۲] انتخاب گردیده است.



شکل ۱: خرپای معین ۱۳ عضوی.

بارهای احتمال اندیشانه L_1, L_2, L_3 بر این سازه اثر می نماید. ابعاد هندسی سازه یقین اندیشانه می باشد. بارگذاری و تنش تسلیم اعضای سازه متغیرهای احتمال اندیشانه دارای توزیع نرمال بوده و از نظر آماری مستقل از یکدیگر می باشند.

فرض می گردد که میانگین و ضریب پراکندگی تنش تسلیم تمامی اعضاء، به ترتیب برابر 36 ksi و 0.12 و میانگین و ضریب پراکندگی تمامی بارهای موثر بر سازه به ترتیب برابر با 15 kips و 0.16 باشد. هم چنین مقاومت فشاری و کششی اعضاء یکسان در نظر گرفته می شود. وزن

با توجه به این که الگوریتم وراثتی برای بهینه سازی مسائل نامقید کاربرد دارد لذا برای تبدیل تابع مقید به نامقید، از روش تابع جریمه خارجی استفاده می گردد [۵]. برای این منظور ابتدا ضریب نقض محدودیت کل سازه (M) از روابط (۱۸-الف) و (پ) به شکل زیر محاسبه می شود:

$$M_1 = \sum_{i=1}^n \max\left(\frac{P_{f_i}}{P_{f_{ai}}} - 1, 0\right) \quad (18\text{-الف})$$

$$M_2 = \max\left(\frac{P_f}{P_{fa}} - 1, 0\right) \quad (18\text{-ب})$$

$$M_3 = \sum_{j=1}^m \max\left(\frac{P_{f_k}}{P_{f_{ak}}} - 1, 0\right) \quad (18\text{-پ})$$

$$M = M_1 + M_3 \quad \text{یا} \quad M = M_2 \quad (19)$$

سپس با به کارگیری روش تابع جریمه خارجی، تابع هدف اصلاح شده به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$G_i = W(1 + R_p M) \quad (20)$$

که در آن G_i تابع هدف اصلاح شده (وزن اصلاح شده) کروموزوم (فرد) i ام و R_p ضریب تابع جریمه مطابق رابطه زیر بوده که در آن V شمارنده نسلها و R_1 ضریب تابع جریمه در نسل اول (مقداری ثابت بوده و با توجه به شرایط مسئله، توسط کاربر انتخاب می گردد) می باشد [۶].

$$R_p = R_1 [1 - 0.2(V - 1)] \leq 4R_1 \quad (21)$$

تابع برازندگی

الگوریتم وراثتی برای بهینه سازی مسائل کاربرد دارد لذا برای تبدیل کمینه سازی تابع هدف به بیشینه سازی از تابع برازندگی استفاده می گردد که در این تحقیق مطابق مرجع [۵] عمل می شود:

$$F_i = G_{\max} + G_{\min} - G_i \quad (22)$$

که در آن، F_i تابع برازندگی طرح i ام، G_{\max} و G_{\min} به ترتیب بزرگ ترین و کوچک ترین مقدار تابع هدف اصلاح شده می باشند. بنابراین بعد از محاسبه تابع برازندگی، شرط های هم گرایی بررسی شده و در صورت برآورده شدن، الگوریتم وراثتی پایان می پذیرد و در غیر این صورت عملگرهای الگوریتم وراثتی (انتخاب، جفت گیری، پیوند، جهش و انتخاب نخبه گرا) برای ایجاد نسل بعد وارد عمل می گردند [۷].

کاربرد

در این بخش قصد داریم تا با استفاده از مطالب بیان

تسلیم وزن بهینه سازه تحت محدودیت خرابی اعضاء، که مقدار مجاز برای آن، $10^{-7} \times 7/7$ در نظر گرفته شده است، محاسبه گردیده و در شکل (۲) رسم شده است. این نمودار بیانگر این مطلب است که با افزایش هر یک از مقادیر ضرایب پراکندگی بار و تنش تسلیم و یا واریانسهای آنها، مقدار بهینه وزن سازه افزایش می یابد. مرجع [۲] نیز صحت این مطلب را با روش بهینه یابی دیگری تأیید می نماید. بدیهی است این مقادیر با تغییر احتمال خرابی مجاز اعضاء، تغییر می کنند. با درون یابی این نمودار می توان به ازای هر مقدار از ضرایب پراکندگی بار و تنش تسلیم، وزن بهینه متناظر با آن را محاسبه نمود. هم چنین شکل (۳) تاریخچه تعداد نسل ها بر حسب وزن سازه را به ازای احتمال خرابی مجاز 10^{-5} برای کل سازه و مقادیر $0/3$ و $0/1$ به ترتیب برای ضرایب پراکندگی بار و تنش تسلیم نشان می دهد. همان طور که این نمودار نشان می دهد، این سازه بعد از ۳۰ نسل به وزن بهینه خود یعنی 990 lbs رسیده است. به ازای مقادیر مختلف احتمال خرابی مجاز برای اعضاء، وزن بهینه سازه محاسبه شده و شکل (۴) رسم شده است. این نمودار بیانگر این مطلب است که با افزایش احتمال خرابی مجاز اعضاء، وزن بهینه سازه کاهش می یابد. با روندی مشابه با افزایش احتمال خرابی مجازگره ها و یا کل سازه وزن بهینه سازه نیز کاهش خواهد یافت.

مخصوص مصالح $(\text{lbs}/\text{in}^3) 0/2836$ می باشد. گروه بندی اعضای سازه در جدول (۱) نشان داده شده است.

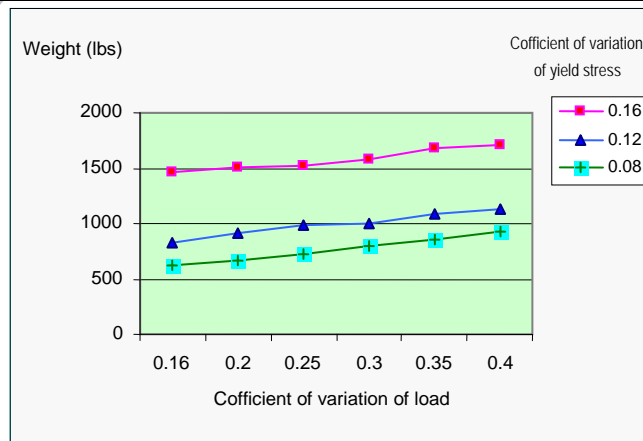
جدول ۱: گروه بندی اعضاء.

| گروه | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ |
|------|------|------|------|-----|-----|------|---|
| عضو | ۱،۱۲ | ۲،۱۳ | ۳،۱۱ | ۴،۸ | ۵،۹ | ۱۰،۶ | ۷ |

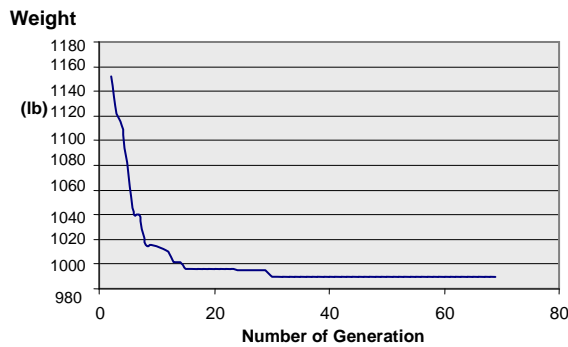
احتمال خرابی مجاز برای تمام اعضاء، یکسان و احتمال خرابی مجاز سیستم برابر مجموع آنها فرض می گردد. با فرض احتمال خرابی مجاز $10^{-7} \times 7/7$ برای هر عضو، احتمال خرابی مجاز برای کل سازه 10^{-5} می باشد. در این مثال از متغیرهای طراحی نیمه گسسته استفاده شده است. دامنه تغییرات اندازه سطح مقاطع بین دو عدد 2 و $0/1$ اینچ مربع در نظر گرفته شده است. طول کروموزوم طراحی برای این روش ۱۲ منظور گردیده است. مقدار بهینه وزن سازه تحت محدودیت احتمال خرابی کل سازه برابر 800 lbs محاسبه شده است، مقدار بهینه وزن در مرجع [۲] برابر 809 lbs محاسبه شده است. در جدول (۲) مقادیر سطح مقاطع بهینه جهت مقایسه بیان شده است. مثال اخیر، صحت و دقت تحقیق اخیر و نرم افزار نوشته شده را نشان می دهد. هم چنین مقدار بهینه وزن سازه تحت محدودیت احتمال خرابی اعضاء نیز محاسبه شده و مقادیر جهت مقایسه با مقادیر قبلی در جدول (۲) ارائه گردیده است. به ازای مقادیر مختلف ضرایب پراکندگی بار و تنش

جدول ۲: مقادیر بهینه (واحد سطح مقطع in^2 می باشد).

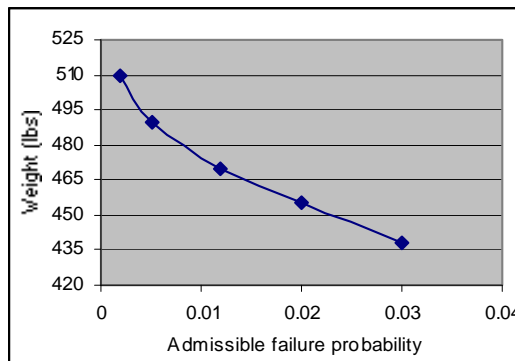
| شماره گروه | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | وزن (lbs) |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| مرجع [۲] محدودیت کل سازه | ۱،۱۵۶ | ۱،۸۸۹ | ۱،۱۶۷ | ۱،۱۵۵ | ۰،۳۵۲ | ۱،۳۰۲ | ۰،۸۰۹ | ۸۰۹ |
| (تحقیق اخیر) محدودیت کل سازه | ۱،۱۶۸ | ۱،۸۵۵ | ۱،۱۶۸ | ۱،۱۵۳ | ۰،۳۵۲ | ۱،۱۱۷ | ۰،۸۱۲ | ۸۰۰ |
| (تحقیق اخیر) محدودیت اعضاء | ۱،۰۶۰ | ۱،۹۵۰ | ۱،۱۴۴ | ۱،۱۲۶ | ۰،۳۴۶ | ۱،۱۰۹ | ۰،۷۸۶ | ۷۹۷ |



شکل ۲: منحنی تغییرات وزن بر حسب ضرایب پراکندگی



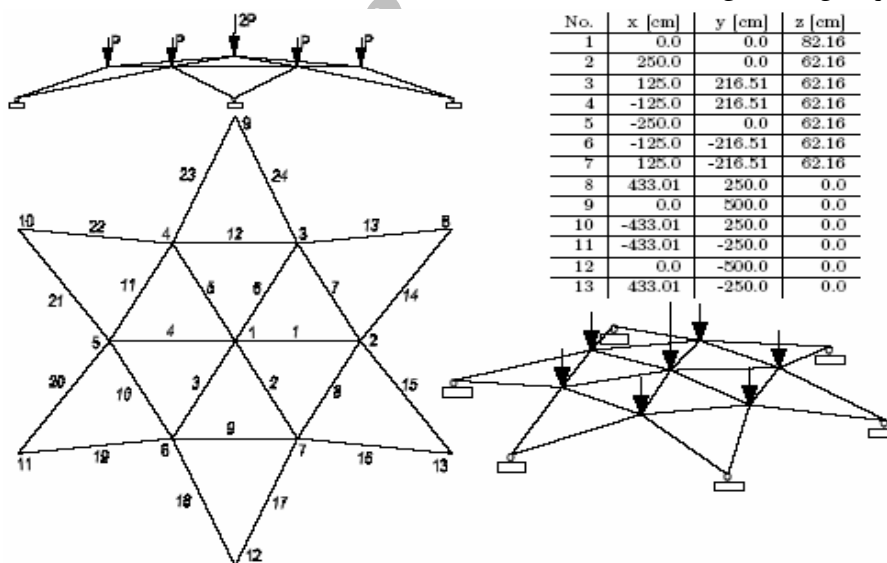
شکل ۳: تاریخچه تعداد نسلها بر حسب وزن سازه.



شکل ۴: تغییرات وزن بر حسب احتمال خرابی مجاز.

گنبد خرابایی ۲۴ عضوی

خرپای مورد نظر در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: خرابای سه بعدی.

جدول ۳: خصوصیات متغیرهای احتمال اندیشانه.

| متغیر احتمال اندیشانه | میانگین | ضریب پراکندگی |
|-----------------------|--|---------------|
| تنش تسلیم | ۲۱ kn/cm^2 | ۰,۰۴۷۶ |
| بارهای وارده | $p = ۲۰ \text{ kn}$ | ۰,۱۵ |
| مدول الاستیسیته | ۲۱۰۰۰ kn/cm^2 | ۰,۰۵ |
| سطح مقطع | $0.1 \leq x \leq 20 \text{ cm}^2$ متغیر طراحی نیمه گسسته | ۰,۰۵ |

وزن سازه تحت محدودیت احتمال خرابی اعضا و احتمال خرابی گره مرکزی در راستای قائم محاسبه گردیده است. مقادیر بهینه وزن و سطح مقطع اعضا در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵: مقادیر بهینه.

| شماره گروه | ۱ | ۲ | ۳ | وزن (نیوتن) |
|------------|------|------|------|-------------|
| مقطع بهینه | ۴/۱۴ | ۰/۴۱ | ۳/۲۸ | ۱۵۶۴ |

گنبد ۱۳۲ عضوی

این مثال به بهینه سازی گنبد ۱۳۲ عضوی نشان داده شده در شکل (۶) پرداخته و وزن بهینه سازه را تحت شش حالت مختلف محدودیت سازه بررسی می نماید. در این مسئله تنش تسلیم و بارهای وارده متغیرهای احتمال اندیشانه دارای تابع چگالی احتمال نرمال بوده که از نظر آماری مستقل از هم می باشند و خصوصیات آماری آنها در جدول (۶) ارائه گردیده است ضمن این که بار گسترده یکنواخت (kg/m^2) ۲۰۰ بر سطح سازه وارد می شود. در این مثال، متغیرهای طراحی (سطح مقاطع اعضا) از نوع نیمه گسسته فرض شده و طول کروموزوم طراحی برای این روش ۱۲ منظور گردیده است.

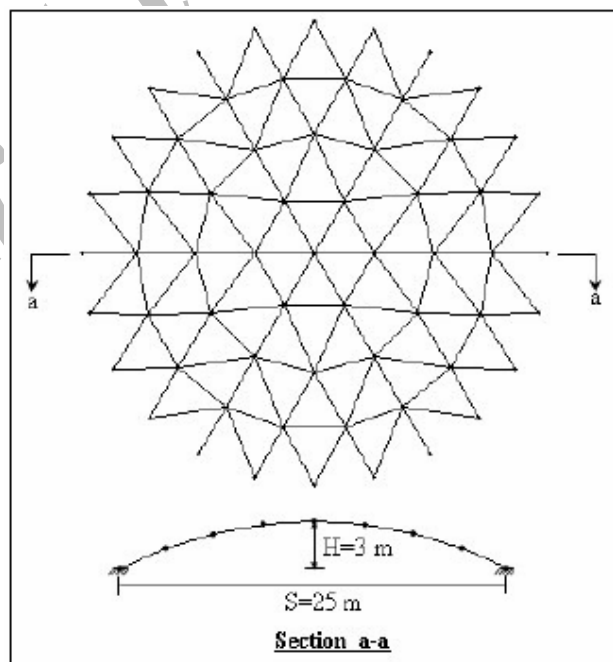
در این مثال علاوه بر تنش تسلیم و بارهای وارده بر سازه، مدول الاستیسیته و سطح مقطع مصالح نیز به عنوان متغیرهای احتمال اندیشانه در نظر گرفته شده است که همگی دارای تابع چگالی احتمال نرمال بوده و از لحاظ آماری مستقل از یک دیگر می باشند. هم چنین علاوه بر احتمال خرابی اعضا، احتمال خرابی گره مرکزی در راستای قائم نیز جزو قیود مسأله می باشد. در جدول (۳) خصوصیات متغیرهای احتمال اندیشانه و گروه بندی اعضا در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴: گروه بندی اعضا.

| گروه | ۱ | ۲ | ۳ |
|------|--------|---------|----------|
| اعضا | ۱ تا ۶ | ۷ تا ۱۲ | ۱۳ تا ۲۴ |

احتمال خرابی مجاز اعضا و گره مرکزی در راستای قائم 10^{-4} و تغییر مکان مجاز گره مرکزی در راستای قائم $3/5 \text{ cm}$ می باشد. هم چنین احتمال خرابی مجاز کل سازه برابر مجموع احتمال خرابی مجاز اعضا، یعنی $2/4 \times 10^{-3}$ بوده و وزن مخصوص مصالح نیز $1/8 \times 10^{-5} \text{ kn/cm}^3$ می باشد.

در این مثال، متغیرهای طراحی (سطح مقاطع اعضا) از نوع نیمه گسسته فرض شده و طول کروموزوم طراحی برای این روش ۱۰ منظور گردیده است. مقدار بهینه



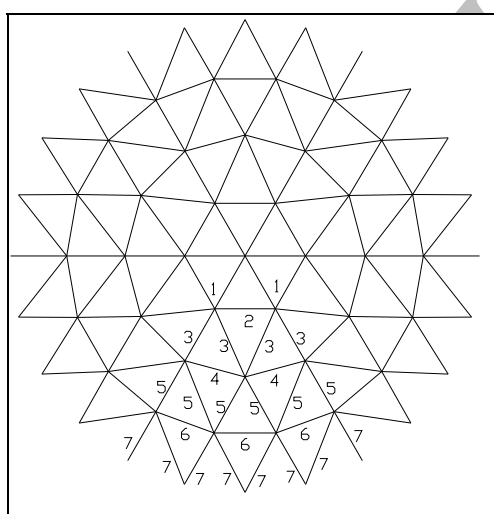
شکل ۶: گنبد ۱۳۲ عضوی.

عنوان یک متغیر در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن سازه، اعضای گنبد به هفت گروه مستقل تقسیم شده‌اند. در شکل (۷) این گروه بندی نشان داده شده است. جرم بهینه کل سازه تحت محدودیت حالت (۱) 1432 kg ، تحت محدودیت حالت (۲) 1489 kg ، تحت محدودیت حالت (۳) 1424 kg ، تحت محدودیت حالت (۴) 1345 kg ، تحت محدودیت حالت (۵) 1568 kg و تحت محدودیت حالت (۶) 1396 kg محاسبه گردیده است. این محدودیت ها در جدول (۷) ارائه و مقادیر بهینه سطح مقطع اعضا در جدول (۸) درج شده است.

جدول ۶: ویژگیهای متغیرهای احتمال اندیشانه.

| متغیر احتمال اندیشانه | میانگین | ضریب پراکندگی |
|----------------------------------|---------|---------------|
| تنش تسلیم (kg/cm^2) | ۲۴۰۰ | ۰/۴ |
| بارهای وارده (kg/m^2) | ۲۰۰ | ۰/۶ |

احتمال خرابی مجاز هر عضو $7/57 \times 10^{-8}$ و احتمال خرابی مجاز هر گره $2/52 \times 10^{-8}$ می باشد. تغییر مکان مجاز گره ها 20 (cm) در نظر گرفته شده است. جهت بهینه سازی سطح مقطع اعضای گنبد فضاکار، هر یک از اعضای قطری بین مدارها و اعضای موجود در هر مدار به صورت جداگانه گروه بندی و به



شکل ۷: گروه بندی اعضا.

جدول ۷: حالت‌های مختلف محدودیت سازه.

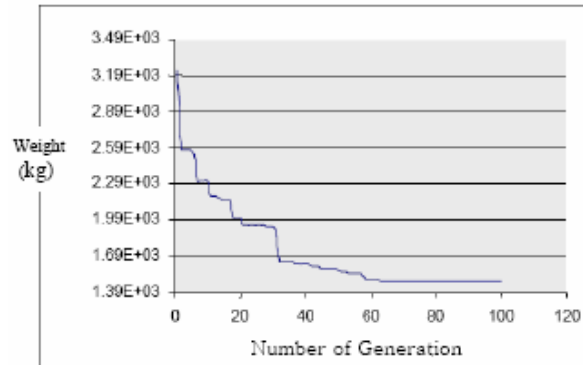
| حالت | شرح |
|------|--|
| ۱ | قیود: احتمال خرابی تمام اعضا |
| ۲ | قیود: احتمال خرابی تمام گره ها |
| ۳ | قید: احتمال خرابی کل سازه (مجموع احتمال خرابی اعضا فرض شود) |
| ۴ | قید: احتمال خرابی کل سازه (مجموع احتمال خرابی گره ها فرض شود) |
| ۵ | قید: احتمال خرابی کل سازه (مجموع احتمال خرابی اعضا و گره ها فرض شود) |
| ۶ | دو قید: مجموع احتمال خرابی اعضا و مجموع احتمال خرابی گره ها |

جدول ۸: مقادیر بهینه.

| حالت | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | جرم (kg) |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------|
| حالت ۱ | ۳,۵۶ | ۵,۲۳ | ۳,۷۵ | ۲,۵۸ | ۳,۸۳ | ۲,۶۶ | ۴,۱۵ | ۱۴۳۲ |
| حالت ۲ | ۷,۶۱ | ۵,۱۵ | ۴,۱۸ | ۴,۵۳ | ۴,۲۲ | ۳,۹۱ | ۲,۶۶ | ۱۴۸۹ |
| حالت ۳ | ۵,۱۵ | ۲,۸۲ | ۴,۰۷ | ۵,۰۷ | ۳,۸۳ | ۲,۶۸ | ۳,۴۱ | ۱۴۲۴ |
| حالت ۴ | ۶,۲۵ | ۵,۱ | ۳,۳۴ | ۵,۰۷ | ۳,۸۴ | ۲,۹۴ | ۲,۵۸ | ۱۳۴۵ |
| حالت ۵ | ۶,۹۴ | ۲,۹۸ | ۵,۰۸ | ۵,۰۷ | ۳,۶۱ | ۳,۹۹ | ۳,۵۲ | ۱۵۶۸ |
| حالت ۶ | ۶,۲۶ | ۳,۵۷ | ۳,۹۳ | ۳,۲۱ | ۴,۰۲ | ۲,۹۲ | ۳,۲۱ | ۱۳۹۶ |

- مجاز اعضاء، تفاوت چندانی نخواهد داشت، البته این اختلاف در سازه های با اعضاء بیشتر افزایش می یابد.
- در حالت بهینه سازی یقین اندیشانه، طی فرآیند بهینه سازی مقدار مشخصی برای وزن بهینه بدست می آید ولی در حالت احتمال اندیشانه اگر ضرایب پراکندگی بار و تنش تسلیم کوچک اختیار شود، وزن بهینه نیز مقداری کوچک و اگر مقادیر بزرگ در نظر گرفته شود، وزن بهینه نیز مقدار بزرگی بدست خواهد آمد.
 - با توجه به اینکه تاکنون از احتمال خرابی گره ها در مسائل بهینه سازی بر اساس نظریه قابلیت اعتماد استفاده نشده بود، در نظر گرفتن این نوع احتمال خرابی، حل مسائل بهینه سازی بر اساس نظریه قابلیت اعتماد را در تطابق بیشتر با مسائل اجرایی و دقت بالاتر انجام می دهد.
 - چنان چه به بررسی نتایج عددی این تحقیق پرداخته و مقادیر آن را با مرجع مقایسه نماییم، نقش الگوریتم وراثتی به عنوان یک روش بهینه سازی هوشمند، کاملاً آشکار می گردد.

شکل (۸) تاریخچه تعداد نسل ها بر حسب وزن سازه را در حالت شماره ۵ نشان می دهد. با توجه به این نمودار، این سازه بعد از ۶۴ نسل به وزن بهینه خود یعنی 1568 kg رسیده است.



شکل ۸: تاریخچه تعداد نسلها بر حسب وزن سازه.

نتایج

- تحقیق اخیر نشان می دهد که با افزایش احتمال خرابی مجاز اعضاء و یا کل سازه وزن بهینه سازه کاهش یافته، اما با افزایش ضرایب پراکندگی بار و یا تنش تسلیم وزن بهینه سازه افزایش می یابد.
- وزن بهینه سازه، چه تحت محدودیت احتمال خرابی مجاز کل سازه قرار گیرد و چه تحت محدودیت احتمال خرابی

مراجع

- 1 - Nowak, A. S. and Collins, K. R. (2000). *Reliability of Structures*, McGraw-Hill International Edition.
- 2 - Kaveh, A. and Kalatjari, V. R. (1994). *Theory of Reliability and Application in Structure Engineering*, University of Science and Technology.
- 3 - Padmanabhan, D. (2003). *Reliability-Optimization for Multidisciplinary System Design*, PhD Thesis, Aerospace and Mechanical Engineering Department, Notre Dame, Indiana.
- 4 - Tsompanakis, Y. and Papadrakakis, M. (2004). "Large-scale reliability-based structural optimization." *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 26, No. 6, PP. 429-440.
- 5 - Ghasemi, M. R. (2000). "Minimum weight design of space trusses under multiple loading using parallel Genetic algorithms." *Fifth International Conference on Civil Engineering*, Mashhad, PP. 73-89
- 6 - Chen, C. J. (1997). "Improvements of simple genetic algorithm in structure design." *Inter. J. Number. Meth. Engng.*, Vol. 40, No.40, PP.1323-1334.
- 7 - Rajeev, S. and Krishnamoorthy, C. S. (1992). "Discrete optimization of structures using genetic algorithms." *J. Struct. Engng ASCE*, Vol. 118, No. 5, PP. 1233-1250.
- 8 - Ghasemi, M. R., Ghalehnavi, M. and Mostakhdemin Hoseini, M. R. (2006). "Optimization of truss structures based of theory of reliability with genetic algorithm." *7th International Congress in Civil Engineering*, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.