

بررسی عملکرد روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها در بهینه‌سازی ساختار سازه‌های الاستوپلاستیک

معصومه خواجهویی قرایی^۱، محمدحسین ابوالبشری^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۲/۰۶	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۲۷	
واژگان کلیدی: بهینه‌سازی ساختاری، ESO، الاستوپلاستیک، سختی، تنش معادل.	روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی به طراحان جهت انتخاب بهترین پیکربندی سازه‌ها کمک زیادی می‌کنند. تا کنون پژوهش‌های زیادی در زمینه بهینه‌سازی سازه‌های با رفتار خطی و در ناحیه الاستیک و همچنین سازه‌هایی با رفتار غیرخطی به کمک روش‌های مختلف بهینه‌سازی انجام شده است. در سال ۱۹۹۲ روش جدیدی برای بهینه‌سازی سازه‌ها به وسیله ژای و استیون ارائه گردید که بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها (ESO) نامیده شد. پایه این روش حذف تدریجی المان‌های کم تنش یا غیرضروری از دامنه ماکزیمم اولیه سازه در یک فرایند تکاملی است. این روش به تدریج جهت بهینه‌سازی انواع سازه‌ها بکار برده شد و کارایی و توانایی آن با روش‌های مختلف به اثبات رسید. در این پژوهش فرایند بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها در حالت الاستوپلاستیک با دو معیار سختی و تنش با دو روش مختلف جهت حذف ماده از سازه انجام می‌شود و این دو روش با هم مقایسه می‌گردند. برای اثبات صحت و کارایی روش بهینه‌سازی تکاملی در حالت الاستوپلاستیک، بهینه‌سازی چند سازه در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک انجام شده و نتایج به دست آمده با طرح‌های بهین پیشنهاد شده با یکی از روش‌های معیار بهینگی مقایسه می‌شوند، و در نهایت معادل بودن دو معیار سختی و تنش معادل در فرآیند بهینه‌سازی تکاملی در هر دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک نشان داده می‌شود.

۱- مقدمه

بهینه‌سازی ساختاری ابزاری است که به طراح در انتخاب ساختارهای اولیه سازه کمک می‌کند. هدف بهینه‌سازی ساختاری حذف یا بازتوزیع ماده در دامنه اولیه سازه و رسیدن به یک ساختار بهینه می‌باشد. این روش، یک روش چرخه‌ای بوده، معمولاً همراه با تاریخچه‌ای از ساختارهای

میانی می‌باشد که آن‌ها نیز در فرآیند طراحی قابل استفاده می‌باشند.

در یک تقسیم‌بندی بسیار کلی فنون بهینه‌سازی به دو دسته تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از روش‌های غیرمستقیم یا معیار بهینگی و روش‌های مستقیم یا جست و جو. معیارهای بهینگی عبارت‌اند از شرایطی که یک تابع

*. پست الکترونیک نویسنده مسئول: abolbash@um.ac.ir

۱. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استاد، گروه مکانیک، مرکز پژوهشی مهندسی تولید ناب، دانشگاه فردوسی

مشهد

دو مقاله جداگانه از روش الگوریتم ژنتیکی برای بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌ها، لوه و چوهه [۹] از روش ایمنی مصنوعی، لوه و لین [۱۰] و کاوه و همکاران [۱۱] از روش کلونی مورچگان، لوه و همکاران [۱۲] از روش گروه ذرات، کلاهان و همکاران [۱۳] و شیم و منوچهری [۱۴] از روش تبرید تدریجی برای بهینه‌سازی شکل و توپولوژی سازه‌ها استفاده کردند. حاج عبداللهی [۱۵] عملگرهای الگوریتم ژنتیک را با بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها ترکیب کرده و شکل جدیدی از الگوریتم که GESO نامیده می‌شود پیشنهاد دادند. در واقع روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک در پیدا کردن جواب‌های کلی اصلاح شده است. آن‌ها نشان دادند که کارایی GESO در بهینه‌سازی توپولوژی نسبت به روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها افزایش قابل توجهی می‌یابد.

در سال ۱۹۹۲ روش جدیدی توسط ژای و استیون [۱۶-۱۸] ارائه گردید که بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها^۴ نامیده شد. پایه این روش حذف تدریجی المان‌های کم تنش یا غیرضروری از دامنه‌ی ماکزیمم اولیه سازه بود. از آن زمان تا کنون کاربردهای روش ESO به شدت افزایش یافته است. این روش در گروه روش حذف نرم/سخت از روش‌های بهینه‌سازی قرار می‌گیرند. پس از اثبات کارایی و دقت روش توسط ژای و استیون [۱۹-۱۶] و هینتون و سینز [۲۰]، از آن در مسائل بیشتری استفاده شد. ژای و استیون در مسایل دارای چند بارگذاری [۲۱] و در مسایل دینامیک [۲۲]، از روش ESO استفاده کردند. پس از آن، روش ESO در طراحی کامپوزیت‌ها توسط ریسلر و استیون [۲۳] و طراحی قطعات تعمیری هواپیما توسط استیون و همکاران [۲۴] استفاده شد. سپس چاو و همکاران [۲۵] از قید سختی به عنوان معیار بهینگی در روش ESO استفاده کردند. با گذشت زمان، کاربرد ESO در مسایل کمانش توسط مانیکاراجا و همکاران [۲۶]، مرزهای متحرک^۵ توسط استیون و همکاران [۲۷]، جابجایی فرکانس طبیعی توسط

باید در نقطه مینیمم خودش برآورده سازد. فنون مینیمم‌یابی که جوابی برای شرایط بهینگی پیدا می‌کنند اغلب روش‌های غیرمستقیم خوانده می‌شوند. فنون مستقیم یا جستجو بر پایه فلسفه دیگری استوارند. معمولاً طراحی اولیه‌ای که حدس اولیه و برای شروع است معیار بهینگی را برآورده نمی‌کند و آن‌ها به مرور بهبود می‌یابند تا شرایط برآورده شوند [۱].

توسعه و گسترش روش‌های بهینه‌سازی سازه‌ها منجر به معرفی روش‌ها و نظریه‌های مختلفی برای یافتن ساختار بهین شده است. تاکنون چهار الگوریتم اصلی برای بهینه‌سازی ساختاری سازه‌ها ارائه شده‌اند [۲] که عبارت‌اند از: روش حذف نرم/سخت، روش همگن‌سازی، دیدگاه سازه مبنای^۲ و روش حباب^۳. سه روش آخر همگی دارای تابع هدف، متغیرهای طراحی و قیود بوده، مساله‌ی بهینه‌سازی را با استفاده از روش‌هایی مانند برنامه‌ریزی ترتیبی درجه دو حل می‌کنند. این سه روش نسبتاً پیچیده می‌باشند، ولی برخلاف آن‌ها روش حذف نرم/سخت بر اصول بسیار ساده‌ای استوار است.

الگوریتم‌های فراکتشافی به دلیل پیاده‌سازی آسان و فراهم آوردن جواب نزدیک‌تر به بهینه کلی و بی‌نیازی از محاسبه گرادیان مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در بهینه‌سازی سازه‌ها و اخیراً در یافتن توپولوژی بهینه قرار گرفته است. سیگموند و مایوت [۳] یک دسته‌بندی از روش‌های مختلف بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌ها ارائه داده است. سیگموند [۴] در یک مقاله مروری مزایا و معایب روش‌های غیر مبتنی بر گرادیان (از جمله روش‌های فراکتشافی و بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها) در بهینه‌سازی توپولوژی را به طور خلاصه بیان کرده است. کاسیکی و همکاران [۵] از روش الگوریتم ژنتیکی دو فازی برای بهینه‌سازی همزمان اندازه و توپولوژی قاب‌های فضاکار فولادی استفاده کردند. جکیلا و همکاران [۶] نیز از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌ها استفاده کردند. بالاموراکان و همکاران [۷] و [۸] در

Evolutionary Structural Optimization (ESO)^۴
Moving boundaries^۵

Soft kill/hard kill method^۱
Ground structure approach^۲
Bubble method^۳

علاوه بر اثبات کارایی روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها برای سازه‌هایی با رفتار الاستوپلاستیک، بهتر بودن روش جدید در فرایند حذف المان نسبت به روش کلاسیک بر طبق هر دو معیار تنش و سختی و همچنین معادل بودن دو معیار سختی و تنش در حالت الاستیک و الاستوپلاستیک نشان داده می‌شود.

۲- مواد الاستوپلاستیک

روابط کامل تنش-کرنش، تغییر شکل الاستیک و پلاستیک را توضیح می‌دهند. در این جا آثار زمان و دما لحاظ نشده، اما سختی ناشی از کار در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده که ماده همسانگرد بوده و اثر باشینگر ناچیز است.

۲-۱- جابه‌جایی سطح تسلیم

از آنجا که منحنی سختی مواد پس از اولین تسلیم افزایش می‌یابد اگر نیروهای اعمالی افزایش پیدا نکنند، تغییر شکل متوقف می‌شود. برای این منظور دو مدل متفاوت برای مدلسازی سخت شونده‌گی (سختی) به کار می‌رود [۳۷].

۲-۱-۱- سخت شونده‌گی همسانگرد

اگر با افزایش سختی استوانه‌ی تسلیم حول قطر فضا (نرمال بر صفحه اکتاهدرال) به صورت متقارن منبسط شود، مدل تحت عنوان کار سختی همسانگرد شناخته می‌شود. عامل اصلی در معرفی میزان سخت شونده‌گی یک ماده‌ی همسانگرد اندازه‌ی تنش تسلیم می‌باشد. در این حالت پارامتر سخت شونده‌گی که در حالت کلی با α نمایش داده می‌شود، می‌تواند کرنش پلاستیک $\bar{\epsilon}^p$ یا کار پلاستیک (W^p) به حساب آید. به طور مثال در حالت کلی برای معیار ون میزز می‌توان نوشت [۳۷]:

$$F = J_2 - \frac{1}{3} \sigma_y^2(\alpha) \quad (1)$$

که در آن J_2 تنش انحرافی، σ_y تنش تسلیم و F تابع است. با جایگذاری $\alpha = \bar{\epsilon}^p = \int d\bar{\epsilon}^p$ داریم:

ژائو و همکاران [۲۸ و ۲۹] و رفتار غیرخطی سازه با روش ESO توسط کوثرین [۳۰] و با روش بهینه‌سازی تکاملی دو جهتی^۱ (BESO) توسط هانگ [۳۱] مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. روش ESO می‌تواند با جستجو در فضای طراحی هم به مینیمم‌های محلی و هم به مینیمم مطلق دست یابد [۲]، ولی به دلیل ویژگی تکاملی آن، هنگام برخورد به یک نقطه مینیمم محلی توقف نخواهد کرد؛ بلکه برای رسیدن به پاسخ بهتر فرایند را ادامه می‌دهد [۱۹]. روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها از اصولی بسیار ساده و درعین حال پایدار پیروی می‌کند. مقدار ماده حذفی با دو پارامتر کنترل می‌شود. یکی نسبت حذف^۲ (RR) است که برای میرا کردن و به تأخیر انداختن فرآیند حذف المان به کار می‌رود و با مقادیر کوچکی شروع می‌شود و دیگری نرخ تکاملی^۳ (ER) که باعث رشد آرام نسبت حذف می‌شود تا بدین وسیله اطمینان حاصل شود که تنها تعداد اندکی المان در هر تکرار حذف می‌شوند و دامنه طراحی حاصل از هر چرخه تفاوت بسیار زیادی نسبت به چرخه پیشین ندارد. در سال ۲۰۰۶ هانگ و همکاران [۳۲] روشی جدید برای فرایند حذف و اضافه کردن المان در روش بهینه‌سازی تکاملی دو جهتی پیشنهاد کردند و فرایند حذف و اضافه کردن المان را با یک پارامتر سیگنالی که نسبت حجم یا وزن حذفی^۴ (RRV) نام داشت انجام دادند.

روش‌های بهینه‌سازی مختلفی برای مسایل غیرخطی مورد توجه قرار گرفته است. بهینه‌سازی توپولوژی با هندسه‌ی غیرخطی توسط نوس و همکاران [۳۳] برای ماکزیمم کردن بار کمانشی بحرانی انجام شد. همچنین، طراحی خرپاهایی با ماده‌ی غیرخطی توسط تیلور و لگو [۳۴] و تیلور [۳۵]، بهینه‌سازی توپولوژی با ماده‌ی غیرخطی توسط یاگ و کیکوچی [۳۶] انجام شد.

در این مقاله فرایند حذف المان با هر دو روش کلاسیک و جدید (پیشنهاد شده توسط هانگ و همکاران [۳۲])، برای سازه‌ای با رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک انجام می‌شود و

^۲ Evolution rate
^۴ Removal ratio of volume

^۱ Bidirectional Evolutionary Structural Optimization
^۲ Rejection ratio

نظر گرفته می‌شود، یعنی $d\vec{\alpha} = (\vec{\sigma} - \vec{\alpha})d\xi$ در حالت کلی افزایش تدریجی تنش موجب توسعه‌ی بردار $\vec{\alpha}$ به صورت برداری با مؤلفه‌های هیدرواستاتیکی و انحرافی خواهد شد. حال آنکه در مدل پراگر بردار $\vec{\alpha}$ صرفاً یک تنش انحرافی است.

۳- معرفی معیارهای تنش معادل ون‌میزز و سختی

۳-۱- مسأله‌ی بهینه‌سازی در حالت تنش

معادل ون‌میزز

همان‌طور که یکی از نشانه‌های خطر شکست سازه تنش یا کرنش بیش از حد می‌باشد، برعکس، یکی از نشانه‌های وجود ماده‌ی زیادی در سازه تنش یا کرنش خیلی کم است. در حالت ایده‌آل تنش در تمام قسمت‌های سازه باید به سطح تنش مجاز نزدیک باشد، که این مفهوم منجر به حذف قسمت‌هایی از سازه که تنش خیلی پایینی دارند می‌شود. بدین ترتیب با حذف تدریجی مواد تنش پایین، طرحی با تنش یکنواخت به دست می‌آید.

عدد حساسیت i آلمین المان که با α_s^i نشان داده می‌شود به صورت تنش معادل ون‌میزز آن المان تقسیم بر ماکزیمم تنش معادل ون‌میزز موجود در سازه می‌باشد. بنابراین داریم:

$$\alpha_s^i = \frac{\sigma_{vn}^i}{\sigma_{vn}^{\max}} \quad (7)$$

اگر المانی معادله (۸) را برآورده کند از دامنه طراحی سازه حذف می‌گردد.

$$\alpha_s^i \leq RR \quad (8)$$

که در آن RR نسبت حذف است و کاربرد آن میرا کردن و یا به تأخیر انداختن فرآیند حذف المان می‌باشد. این نسبت با مقادیر کوچکی شروع شده، به آرامی رشد می‌کند تا بدین وسیله اطمینان ایجاد شود که تنها تعداد اندکی المان در هر تکرار حذف می‌شوند و دامنه طراحی حاصل از هر تکرار تفاوت بسیار زیادی نسبت به تکرار پیشین نخواهد داشت.

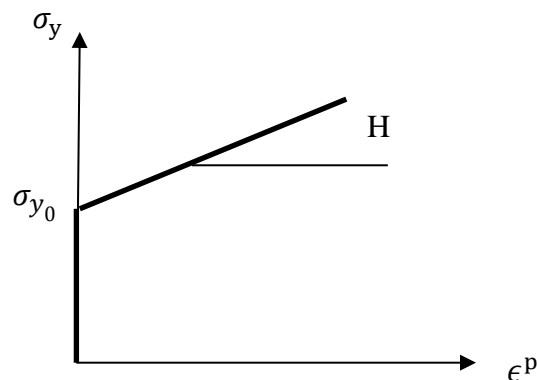
$$J_2 = \frac{1}{3} \sigma_y^2 (\bar{\epsilon}^p) \quad (2)$$

و با جایگذاری $\alpha = W^p = \int \vec{\sigma} : d\vec{\epsilon}^p$ داریم:

$$J_2 = \frac{1}{3} \sigma_y^2 (W^p) \quad (3)$$

با توجه به شکل (۱) در حالت کار سختی می‌توان نوشت:

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y0}^2 + 2HW^p \quad (4)$$



شکل ۱- منحنی $\sigma_y - \epsilon^p$

بنابراین در حالت کارسختی همسانگرد معیار تسلیم به صورت زیر قابل ارائه است [۳۷]:

$$J_2 = \frac{1}{3} (\sigma_{y0}^2 + 2HW^p) \quad (5)$$

۲-۱-۲- مدل سخت شونده‌ی پویا

مدلی از سخت شونده‌گی که اثر باشینگر را در نظر می‌گیرد، مدل پویا یا متحرک نامیده می‌شود. تا کنون مدل‌های سخت شونده‌گی پویای متفاوتی معرفی شده است که مدل‌های پراگر و زیگلر دو مدل مرسوم در این حوزه می‌باشند. در معیار پراگر افزایش تنش موجب جابه‌جا شدن استوانه‌ی تسلیم عمود بر صفحه‌ی π در سوی کرنش پلاستیک می‌شود. به عبارت دیگر در این مدل $d\vec{\alpha}$ با $d\vec{\epsilon}^p$ متناسب است. جابه‌جایی کل سطح تسلیم در فضای تنش‌های اصلی با بردار $d\vec{\alpha}$ نمایش داده می‌شود. بدین ترتیب در مدل پراگر می‌توان نوشت [۳۷]:

$$d\vec{\alpha} = C d\vec{\epsilon}^p = C \frac{\partial F}{\partial \sigma} d\lambda \quad (6)$$

که در آن $d\lambda$ ثابت تناسب لحظه‌ای و غیرمنفی است. اما بر اساس مدل زیگلر بردار $d\vec{\alpha}$ متناسب با تفاضل $\vec{\alpha}$ و $\vec{\sigma}$ در

که N تعداد کل گره‌های متصل به المان می‌باشد. بدین ترتیب عدد حساسیت متعادل شده برای کل المان‌های سازه به دست می‌آید. المان‌های سازه در یک چرخه وقتی حذف می‌شوند که نامساوی (۱۳) برآورده شود.

$$\alpha_e^* \leq \alpha_{th}^V, \quad (13)$$

که در این رابطه α_{th}^V عدد حساسیت آستانه برای فرآیند حذف می‌باشد و به کمک نسبت حذف حجمی (RRV) در هر چرخه به دست می‌آید. مثلاً اگر در یک چرخه سازه شامل ۱۰۰۰ المان باشد و عدد حساسیت متعادل شده‌ی این المان‌ها به صورت $\alpha_1^* > \alpha_2^* > \dots > \alpha_{1000}^*$ باشد و طراح بخواهد طرحی با ۰.۸ حجم فعلی ($RRV_i = 0.8$) به دست آورد آنگاه $\alpha_{th}^V = \alpha_{800}^*$ ، چرخه‌ی تحلیل اجزا محدود و فرآیند حذف المان تا جایی که حل همگرا شود و هیچ المانی از سازه حذف نشود با نسبت حذف مشابه ادامه پیدا می‌کند. سپس یک نرخ تکاملی^۲ (ER) به نسبت حذف حجمی اضافه می‌شود.

$$RRV_{i+1} = RRV_i + ER, \quad i = 1, 2, \dots \quad (14)$$

با افزایش نسبت حذف حجمی، چرخه‌ی المان محدود و فرآیند حذف المان تا وقتی یک طرح بهین دیگر به دست آید ادامه پیدا می‌کند. فرآیند ESO وقتی متوقف می‌شود که هم معیار همگرایی و هم حجم مورد نظر به دست آید [۳۹].

۲-۳- مسأله‌ی بهینه‌سازی مبتنی بر صلبیت سازی

سختی یکی از عوامل مهمی است که در طراحی سازه‌هایی مانند پل‌ها و ساختمان‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. بیشتر سازه‌ها باید آن قدر سخت باشند به طوری که ماکزیمم تغییر شکل آن‌ها از حدی بیشتر نباشد. در تحلیل اجزای محدود رفتار استاتیکی یک سازه با معادله تعادل زیر انجام می‌شود.

$$KU = P, \quad (15)$$

که K معرف ماتریس سختی فراگیر^۳، U بردار تغییر مکان گره‌ها و P بردار نیروهای اعمالی روی گره‌ها می‌باشد.

$$RR = a_0 + a_1 \times SS + a_2 \times SS^2 + \dots \quad (9)$$

که $0 \leq RR \leq 1$ و در آن: a_0, a_1, \dots : ضرایب مثبتی که از تجربه کار با ESO به دست می‌آیند و SS شمارنده حالت پایدار^۱ (عدد صحیحی که $0 < SS < \infty$) است.

در اجرای روش ESO برای حالتی که فرآیند حذف المان با پارامتر نسبت حذفی حجم انجام می‌شود در به دست آوردن عدد حساسیت از الگوی شطرنجی که توسط لی و همکاران [۳۸] معرفی شد استفاده می‌شود و عدد حساسیت آستانه برای حذف المان در هر مرحله به کمک پارامتر نسبت حذفی حجم به دست می‌آید. در حالتی که از معیار تنش معادل استفاده شود عدد حساسیت هر المان به صورت تنش معادل ون‌میزز آن المان تقسیم بر حجم آن به شکل رابطه (۱۰) در نظر گرفته می‌شود.

$$\alpha_i = \frac{\sigma_{m_i}}{V_i} \quad (10)$$

با به کار بردن الگوی شطرنجی، عدد حساسیت هر گره به صورت میانگین عدد حساسیت المان‌های متصل به آن گره طبق رابطه‌ی (۱۱) تعریف می‌شود.

$$\hat{\alpha}_k = \frac{\sum_{i=1}^m V_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^m V_i} \quad (11)$$

که در این رابطه $\hat{\alpha}_k$ عدد حساسیت گره‌ی k ام، m معرف تعداد کل المان‌های متصل به این گره، α_i ها عدد حساسیت المان‌ها که در رابطه‌ی (۱۰) تعریف شده و V_i ها هم حجم این المان‌ها می‌باشند. سپس عدد حساسیت متعادل شده‌ی هر المان با میانگین‌گیری از عدد حساسیت گره‌های متصل به آن المان طبق رابطه‌ی (۱۲) به دست می‌آید.

$$\alpha_e^* = \frac{\sum_{n=1}^N \hat{\alpha}_n}{N} \quad (12)$$

^۳ Global

^۱ Steady state Number
^۲ Evolutionary rate

$$\alpha_i = \frac{\frac{1}{2} \{u^i\}^T [k_i] \{u^i\}}{V_i} \quad (21)$$

عدد حساسیت گره‌ها و سپس عدد حساسیت متعادل شده‌ی هر المان برای استفاده از الگوی شطرنجی مانند روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند.

۴- روش ESO کلاسیک

مراحل اجرای روش ESO کلاسیک یعنی برای حالتی که فرآیند حذف المان با پارامتر نسبت حذف انجام می‌شود به شرح زیر است [۲].

(۱) ایجاد تقسیم‌بندی اجزای محدودی که تمام دامنه طراحی سازه را پوشش دهد.
(۲) اعمال تمامی قیود مرزی سینماتیک، نیروها، مواد، خواص المان‌ها و ...

(۳) تعیین معیار مورد استفاده برای بهینه‌سازی سازه.

(۴) تحلیل اجزای محدود استاتیک سازه که توسط ANSYS [۴۱] انجام می‌شود.

(۵) تعیین المان‌هایی که در معادله‌ی (۸) صدق می‌کنند. اگر المانی این معادله را برآورده کند از دامنه طراحی سازه حذف می‌گردد.

(۶) اگر در یک تکرار هیچ المانی در دامنه طراحی معادله (۸) را برآورده نسازد، یک حالت پایدار و بهینه محلی حاصل شده است. در این حالت به منظور ادامه فرآیند بهینه‌سازی، یک واحد به شمارنده حالت پایدار (SS) اضافه شده و مرحله‌ی ۶ دوباره تکرار می‌گردد.

(۷) مراحل (۴) تا (۶) تا زمانی که شاخص عملکرد^۱ که در بخش ۵ معرفی خواهد گردید به مقدار مینیمم خود برسد و یا مقادیر تنش‌ها در بازه ۲۰٪ تنش میانگین قرار بگیرند و یا به عنوان مثال ۵۰٪ حجم اولیه دامنه طراحی باقی بماند (معیارهای پایان روش ESO) تکرار می‌شوند. نمودار جریان‌ی شکل (۱) خلاصه روش ESO کلاسیک را نشان می‌دهد.

انرژی کرنشی سازه که به صورت رابطه‌ی (۱۶) می‌باشد،

$$c = \frac{1}{2} P^T U = \frac{1}{2} P^T K^{-1} P \quad (16)$$

معرف کامپلیانس سازه است. مشاهده می‌شود که ماکزیمم سازی سختی معادل با مینیمم سازی کامپلیانس می‌باشد. با فرض اینکه هیچ تغییری در بردار نیرو ایجاد نمی‌شود، اگر i امین المان از سازه حذف شود معادله‌ی تعادل (۱۵) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$(K - k^i)(U + \Delta U) = P \quad (17)$$

که k^i ماتریس سختی i امین المان و ΔU معرف تغییر در بردار جابه‌جایی می‌باشد. با کم کردن معادله‌ی (۱۷) از (۱۵) و صرف‌نظر کردن از جملات مرتبه بالاتر، تغییر در بردار جابه‌جایی را می‌توان به صورت زیر به دست آورد.

$$\Delta U = K^{-1} k^i U. \quad (18)$$

با جایگزینی معادله‌ی (۱۸) در معادله‌ی (۱۶) داریم:

$$c = \frac{1}{2} P^T \Delta U = \frac{1}{2} P^T K^{-1} k^i U = \frac{1}{2} U^T k^i U = \frac{1}{2} u_e^T k_e^i u_e \quad (19)$$

که k_e^i ماتریس سختی i امین المان و u_e معرف بردار جابه‌جایی المان می‌باشد [۴۰].

پس عدد حساسیت سختی i امین المان را می‌توان به صورت زیر نوشت.

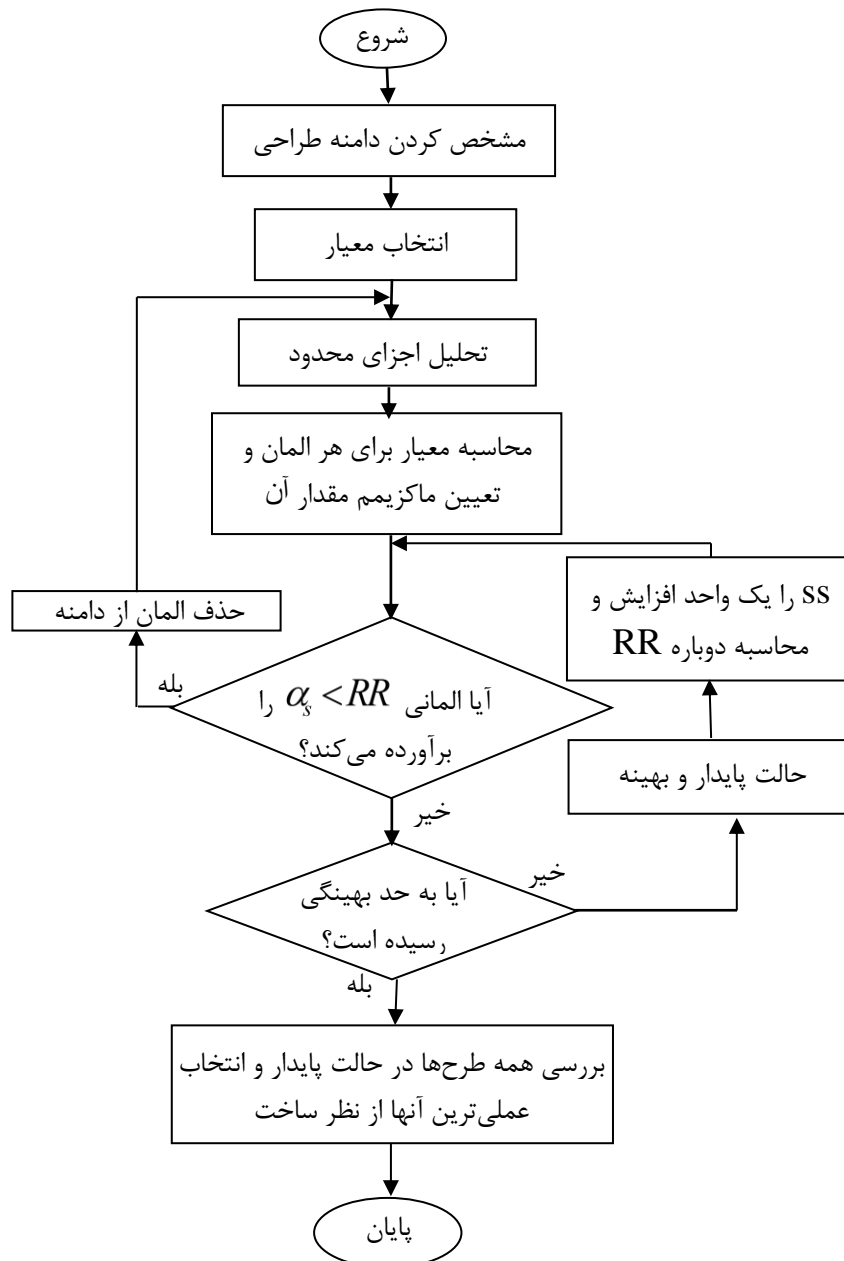
$$\alpha_s^i = \frac{\frac{1}{2} u_e^T k_e^i u_e}{(\frac{1}{2} u_e^T k_e u_e)_{\max}} \quad (20)$$

که مقدار α_s^i معرف تغییر در مقدار کامپلیانس، به دلیل حذف المان i ام می‌باشد. پس برای رسیدن به طرحی با سختی یکنواخت، المان‌هایی که کمترین مقدار سختی را دارند باید از سازه حذف شوند.

اگر المانی معادله (۸) را برآورده کند از دامنه طراحی سازه حذف می‌گردد.

برای حالتی که فرآیند حذف المان با پارامتر نسبت حذفی حجم انجام می‌شود بر طبق معیار سختی عدد حساسیت هر المان به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

¹ Performance Index



شکل ۱ نمودار جریان‌ی روش ESO کلاسیک

نیاز به یک شاخص ریاضی دارند تا با مقایسه مقدار آن در بین طراحی‌های موجود بتوان ساختار بهینه را شناسایی نمود. به همین دلیل روش ESO به عددی به عنوان شاخص عملکرد (PI) نیاز دارد که بتواند در تشخیص اینکه یک سازه چقدر به بهینه نزدیک است مفید باشد. در بهترین حالت، یک شاخص عملکرد باید توانایی مقایسه پاسخ‌های گوناگون یک مسئله خاص را داشته باشد. بدین طریق که با انتخاب سازه‌ای با بهترین مقدار PI، سازه‌ی بهینه در بین

۵- شاخص عملکرد

روش‌های بهینه‌سازی فراوانی وجود دارند که یک مهندس می‌تواند از آن‌ها برای طراحی یک سازه استفاده نماید. یکی از مشکل‌ترین و درعین‌حال بااهمیت‌ترین کارها برای یک مهندس این است که اولاً روش مفیدی را برای بهینه‌سازی انتخاب کند و ثانیاً تصمیم بگیرد که آیا سازه حاصل از آن روش بهترین سازه برای شرایط نیرویی و تکیه‌گاهی موجود می‌باشد یا خیر. به همین دلیل همه روش‌های بهینه‌سازی

توسط مایوت و همکاران [۴۲] به روش تطبیقی که یکی از روش‌های معیار بهینگی می‌باشد انجام شد، ولی به دلیل پیچیده بودن روش‌های معیار بهینگی، انجام این فرایند بهینه‌سازی مخصوصاً در حالت الاستوپلاستیک با معادلات ریاضی بسیار پیچیده‌ای همراه بود. در اینجا عمل بهینه‌سازی در دو حالت مختلف، یکی با هدف یکنواخت سازی تنش (معیار تنش معادل)، و دیگری با هدف ماکزیمم سازی سختی (معیار سختی) انجام می‌شود. عمل بهینه‌سازی افزون بر روش ESO کلاسیک، با روش ESO جدید هم انجام می‌شود و بهتر و کارا تر بودن روش جدید نسبت به روش کلاسیک نشان داده می‌شود. برای تحلیل اجزای محدود سازه از نرم‌افزار ANSYS 5.4 و برای کد بهینه‌سازی (بخش ۲ و شکل ۱) از محیط Matlab 6.5 [۴۳] استفاده شده است. المان استفاده شده برای تحلیل اجزای محدود در هر دو مثال Plane42 در نظر گرفته شده است. محاسبات این مطالعه با کامپیوتر Intel® Core™ i7 CPU 920@2.67GHz انجام شده است.

۱-۶- مثال ۱

دامنه اولیه‌ی طراحی سازه به صورت یک صفحه با سه تکیه‌گاه گیردار در پایین و یک بار گسترده‌ی 283.5 KN/m موضعی در بالای صفحه است که ابعاد آن بر حسب متر در شکل (۲) نشان داده شده است. به دلیل تقارن برای تحلیل اجزای محدود آن تنها نیمی از آن در نظر گرفته می‌شود. طول نامی^۱ سازه برای محاسبه مقدار شاخص عملکرد در معیار تنش معادل $L=10^m$ می‌باشد. در تحلیل سازه دو ماده با مدول الاستیک و ضریب پواسون یکسان ولی تنش تسلیم متفاوت در نظر گرفته شده و خواص این دو ماده در جدول ۱ نشان داده شده است. از این به بعد ماده‌ای با خواص ماده ۱ را با ماده در حالت الاستیک و ماده‌ای با خواص ماده ۲ را با ماده در حالت الاستوپلاستیک می‌شناسیم. حجم هدف در تمام حالات و معیارها ۳۰٪ حجم اولیه می‌باشد.

ساختارهای موجود مشخص می‌گردد. بنابراین شاخص عملکرد انتخابی برای هر معیار بهینه‌سازی باید به تابع هدف مربوط باشد، و برای معیار سختی و تنش متفاوت است.

۵-۱- معیار تنش

در این حالت شاخص عملکرد به صورت (۲۲) بیان می‌شود که یک کمیت بی بعد است [۲]، طرحی که شاخص عملکرد آن مینیمم است به عنوان طرح نهایی بهینه پذیرفته می‌شود.

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{vm_i} V_i}{PL} \quad (22)$$

که L طول نامی سازه و P نیروی اعمالی به سازه است. بدین طریق که با انتخاب سازه‌ای با کوچک‌ترین مقدار PI ، سازه بهینه در بین ساختارهای موجود مشخص می‌گردد [۲]. شاخص عملکرد در این معیار یک کمیت بدون بعد می‌باشد.

۵-۲- معیار سختی

با توجه به اینکه هدف از مساله‌ی بهینه‌سازی در این حالت ماکزیمم کردن سختی است، شاخص عملکرد به صورت سختی بر واحد حجم در نظر گرفته و به صورت رابطه (۲۳) نشان داده می‌شود. واحد آن $N^{-1}mm^{-4}$ می‌باشد.

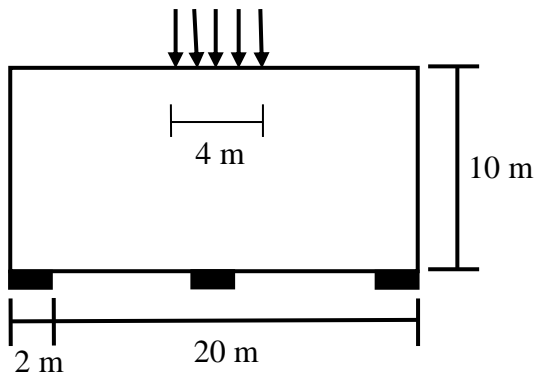
$$PI = \frac{1}{CV} \quad (23)$$

که C و V به ترتیب معرف کامپلیانس و حجم طرح بهینه می‌باشند. بنابراین در بین طرح‌هایی با حجم یکسان، طرحی با بالاترین سختی بالاترین شاخص عملکرد را دارد.

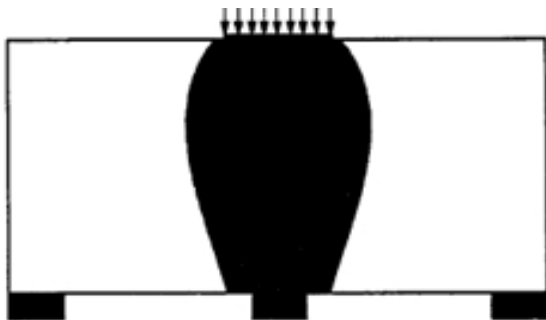
۶- مثال‌ها

برای اثبات کارایی و دقت روش ESO در حالت الاستوپلاستیک، دو صفحه با فرض تنش صفحه‌ای در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک با شرایط تکیه‌گاهی مختلف بهینه‌سازی می‌شوند. عمل بهینه‌سازی بر روی این صفحات با این شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری در سال ۱۹۹۸

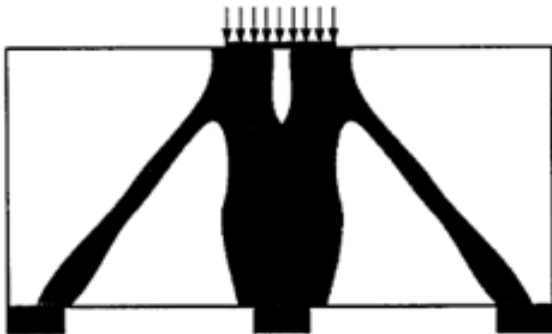
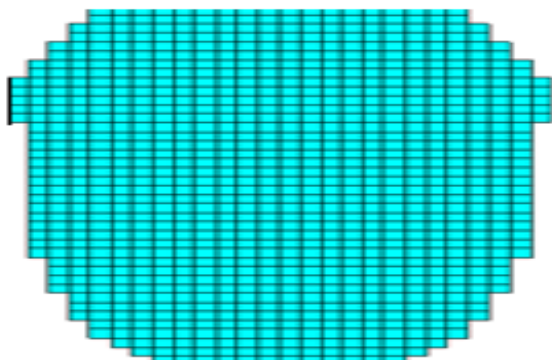
^۱ Nominal Distance



شکل ۲ - سازه اولیه مثال ۱



الف - طرح بهینه در حالت الاستیک

ب- طرح بهینه در حالت الاستوپلاستیک
شکل ۳ نتایج بهینه‌سازی به روش تطبیقی [۴۲]

الف- معیار تنش معادل ون میزز

شکل (۳) نتایج به دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی این صفحه به روش تطبیقی در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص مواد مثال ۱ و ۲

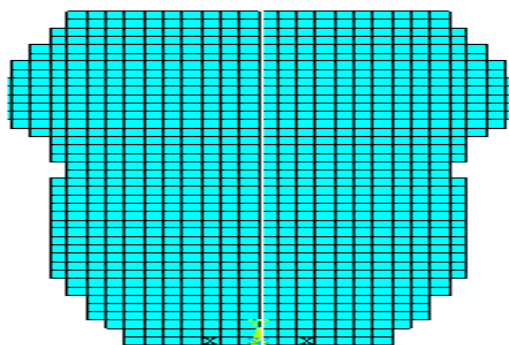
	ماده ۱	ماده ۲
مدول الاستیک (E) [N/m ²]	3E+7	3E+7
ضریب پواسون (ν)	0	0
تنش تسلیم (σ _y) [N/m ²]	1000E+3	240E+3
مدول مماسی [N/m ²](E')	3E+7	0.1E+3

در شکل‌های (۴) و (۵) نتایج طرح بهینه به دست آمده به ترتیب برای حالت‌های الاستیک و الاستوپلاستیک به روش ESO کلاسیک یعنی ESO که فرآیند حذف المان با نسبت حذف انجام می‌شود نشان داده شده است. مقدار ضرایب ثابت معادله (۹) برای هر دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک و با هر دو معیار سختی و تنش به صورت زیر انتخاب شدند.

$$a_0 = a_2 = a_3 = 0, a_1 = 0.01$$

در شکل‌های (۶) و (۷) هم نتایج به دست آمده با روش ESO جدید که در آن فرآیند حذف المان با نسبت حجمی انجام می‌شود به ترتیب برای حالت الاستیک و الاستوپلاستیک در دو معیار سختی و تنش معادل نشان داده شده است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۳ تا ۷ می‌بینیم که نتایج در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک با هم فرق دارند، شکل بهین در حالت الاستیک به صورت یک ستون صاف است در حالی که در حالت الاستوپلاستیک بارها توسط هر سه تکیه‌گاه تحمل می‌شوند که این باعث کم شدن تمرکز تنش در تکیه‌گاه‌ها می‌شود. همچنین دیده می‌شود که شکل‌های بهین در هر دو روش ESO (کلاسیک و جدید) از لحاظ ظاهری شبیه هم هستند.

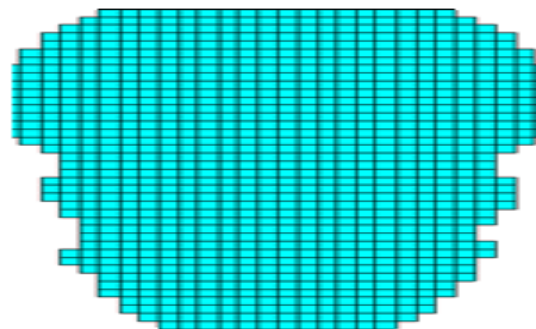
در سال ۱۹۹۸ لی و همکاران [۴۴] ثابت کردند که در فرآیند بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها در حالتی که رفتار ماده الاستیک باشد معیار حذف تنش معادل ون میزز و سختی معادل‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی این سازه، معادل بودن در حالت الاستوپلاستیک هم دیده می‌شود.



ب- معیار سختی

شکل ۶- شکل‌های بهین در حالت الاستیک به روش ESO

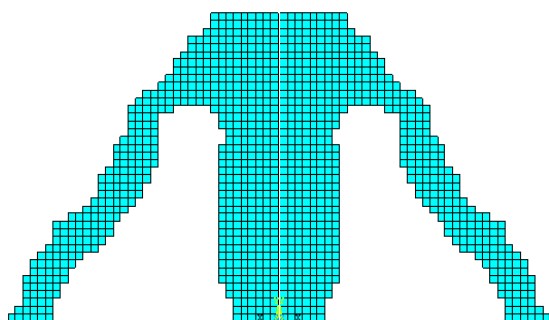
$$\frac{V}{V_0} = 0.3 \text{ جدید}$$



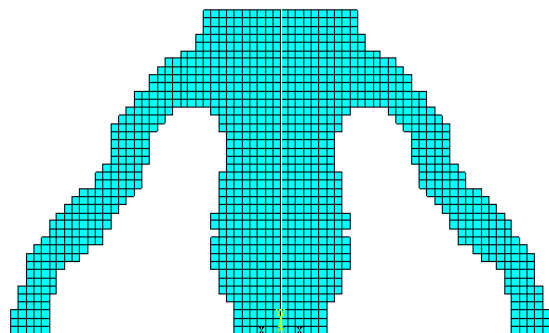
ب- معیار سختی

شکل ۴- شکل‌های بهین در حالت الاستیک به روش ESO

$$\frac{V}{V_0} = 0.3 \text{ کلاسیک}$$



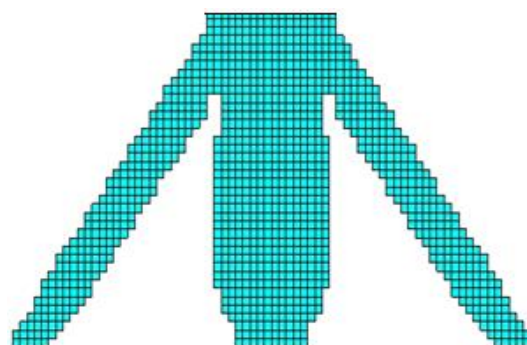
الف- معیار تنش معادل ون میزز



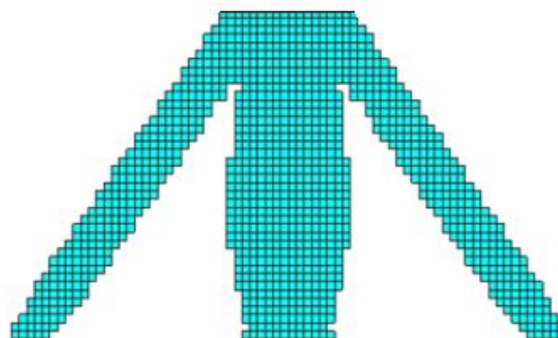
ب- معیار سختی

شکل ۷- شکل‌های بهین در حالت الاستوپلاستیک به روش

$$\frac{V}{V_0} = 0.3 \text{ جدید ESO}$$



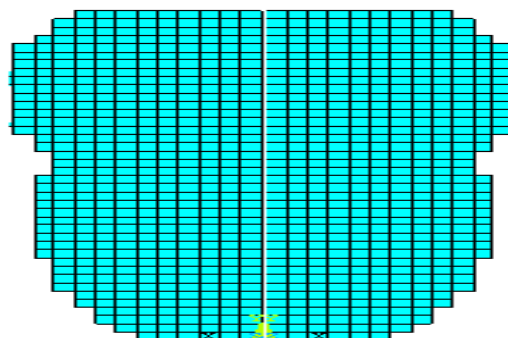
الف- معیار تنش معادل ون میزز



ب- معیار سختی

شکل ۵- شکل‌های بهین در حالت الاستوپلاستیک به روش

$$\frac{V}{V_0} = 0.3 \text{ کلاسیک ESO}$$



الف- معیار تنش معادل ون میزز

در جدول‌های ۲ و ۳ نتایج مربوط به این فرآیندهای بهینه‌سازی آورده شده، مقدار ماکزیمم و مینیمم تنش معادل ون میزز و انرژی کرنشی و درصد یکنواختی این مقادیر در ساختارهای بهین به دست آمده با هم مقایسه شده‌اند. l و l_0 به ترتیب این نسبت‌ها در حالت بهینه و اولیه می‌باشند.

نتایج نشان می‌دهند که درصد افزایش این نسبت‌ها در هر دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک برای هر دو معیار سختی و تنش معادل تقریباً برابرند و اختلاف خیلی کم آن‌ها مخصوصاً در حالت الاستوپلاستیک ناشی از خطاهای

که این مقدار در بهینه‌سازی سازه‌های بزرگ و واقعی می‌تواند خیلی قابل توجه باشد.

۲-۶-۲- مثال ۲

دامنه طراحی و ابعاد اولیه‌ی این سازه در شکل (۸) بر حسب متر نشان داده شده است. سازه دارای دو تکیه‌گاه موضعی گیردار در دو طرف ضلع پایینی و یک بار گسترده‌ی موضعی در وسط این ضلع می‌باشد. نیروی 250 KN/m بر سازه وارد می‌شود. به دلیل تقارن تنها نیمی از سازه تحلیل شده و طول نامی سازه برای محاسبه مقدار شاخص عملکرد $L = 10$ متر می‌باشد. خواص ماده در کل ساختار یکسان و همان خواص مثال ۱ می‌باشند.

شکل (۹) نتایج به دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی به روش تطبیقی در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک را نشان می‌دهد. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نتایج طرح بهین به دست آمده به ترتیب برای حالت‌های الاستیک و الاستوپلاستیک به روش ESO کلاسیک یعنی ESO که فرآیند حذف المان با نسبت حذف انجام می‌شود نشان داده شده است. مقدار ضرایب ثابت معادله (۹) برای هر دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک و با هر دو معیار سختی و تنش به صورت زیر انتخاب می‌شوند:

$$a_0 = a_2 = a_3 = 0, a_1 = 0.01$$

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی این سازه با روش جدید به ترتیب برای حالت الاستیک و الاستوپلاستیک در دو معیار سختی و تنش معادل نشان داده شده است.

با مقایسه‌ی شکل‌های ۹ تا ۱۳ می‌بینیم که برخلاف مثال ۱ طرح‌های بهین در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک تقریباً شبیه هم هستند. همچنین دیده می‌شود که شکل‌های بهین در هر دو روش ESO (کلاسیک و جدید) و در هر دو معیار از لحاظ ظاهری شبیه هم هستند و معادل بودن دو معیار سختی و تنش معادل در فرآیند تکاملی سازه‌ها در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک نیز مشاهده می‌شود.

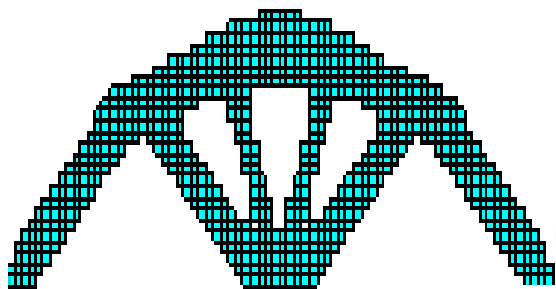
عدد می‌باشد. در سازه‌ی اولیه مقدار ماکزیمم و مینیمم تنش معادل ون‌میز (جدول ۲) در حالت الاستیک به ترتیب 0.3896×10^{-4} و 0.5214×10^{-4} مگاپاسکال و در حالت الاستوپلاستیک به ترتیب 0.24 و 0.6556×10^{-4} مگاپاسکال می‌باشد به طوری که نسبت مینیمم تنش به ماکزیمم تنش در هر دو حالت از مرتبه‌ی 10^{-3} است، وقتی که سازه بهینه می‌شود این نسبت در حالت الاستیک و در تمام حالات از مرتبه‌ی 10^{-1} و در حالت الاستوپلاستیک و در دو معیار سختی و تنش به ترتیب از مرتبه‌ی صفر و 10^{-1} می‌شوند، به طوری که درصد افزایش این نسبت در همه‌ی حالات و معیارها ۹۹ درصد است.

همچنین با توجه به جدول ۳ می‌بینیم که در سازه‌ی اولیه مقدار ماکزیمم و مینیمم انرژی کرنشی در حالت الاستیک به ترتیب 0.1888×10^3 و 0.1×10^{-4} نیوتن-متر و در حالت الاستوپلاستیک به ترتیب 0.3852×10^3 و 0.1×10^{-4} نیوتن-متر می‌باشد به طوری که نسبت مینیمم انرژی به ماکزیمم مقدار آن در هر دو حالت از مرتبه‌ی 10^{-7} است، وقتی که سازه بهینه می‌شود این نسبت در حالت الاستیک و در تمام حالات از مرتبه‌ی 10^{-1} و در حالت الاستوپلاستیک و در دو معیار سختی و تنش به ترتیب از مرتبه‌ی صفر و 10^{-1} می‌شود، این نسبت در تمام حالت‌ها و معیارها ۹۹ درصد افزایش داشته که به معنی درصد بالای یکنواختی سختی در سازه نسبت به حالت اولیه می‌باشد.

در جدول ۴ مقادیر شاخص عملکرد و زمان لازم برای انجام فرآیند بهینه‌سازی تا رسیدن به حجم مورد نظر برای حالت‌های الاستیک و الاستوپلاستیک آورده شده است. با توجه به این جدول می‌بینیم که مقدار شاخص عملکرد در روش جدید در معیار تنش معادل از روش کلاسیک کمتر و در معیار سختی بیشتر است و زمان لازم برای انجام فرآیند بهینه‌سازی در روش جدید خیلی کمتر از روش کلاسیک می‌باشد.

مثلاً در حالت الاستوپلاستیک و معیار سختی مقدار شاخص عملکرد و زمان در روش جدید به ترتیب 0.303×10^{-3} و ۹ دقیقه و در روش کلاسیک به ترتیب 0.2147×10^{-3} و ۱۲۰ دقیقه است یعنی زمان لازم برای انجام این فرآیند در روش جدید حدود ۱۳ مرتبه کمتر است

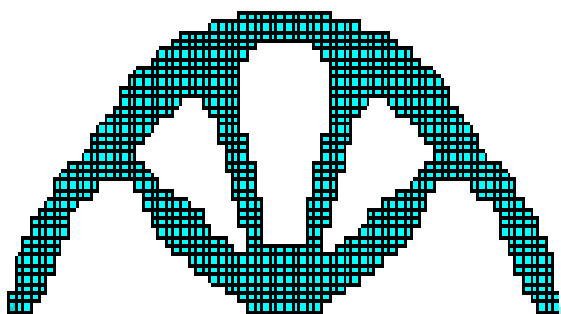
در جدول‌های ۵ و ۶ به ترتیب مقدار ماکزیمم و مینیمم تنش معادل ون‌میزز و انرژی کرنشی و درصد یکنواختی این مقادیر در ساختارهای بهین به دست آمده با هم مقایسه شده‌اند. که l و l_0 به ترتیب این نسبت‌ها در حالت بهینه و اولیه می‌باشند.



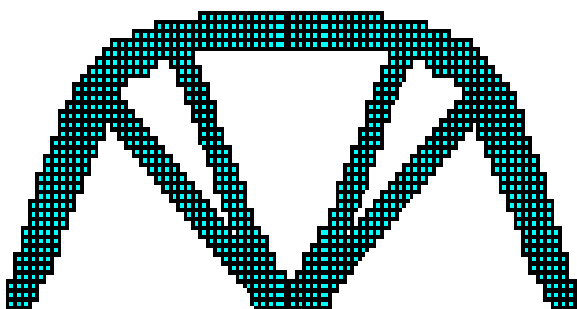
ب- معیار سختی

شکل ۱۰- شکل‌های بهین در حالت الاستیک به روش ESO

$$\frac{v}{v_0} = 0.3 \text{ کلاسیک}$$



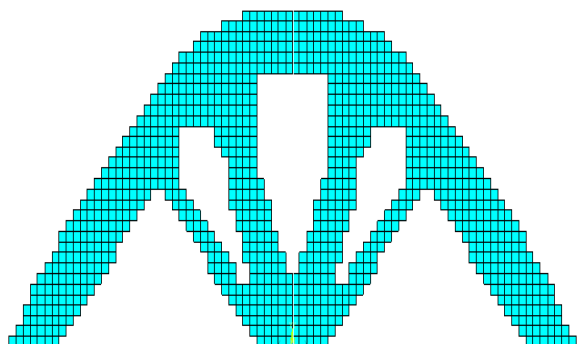
الف- معیار تنش معادل ون‌میزز



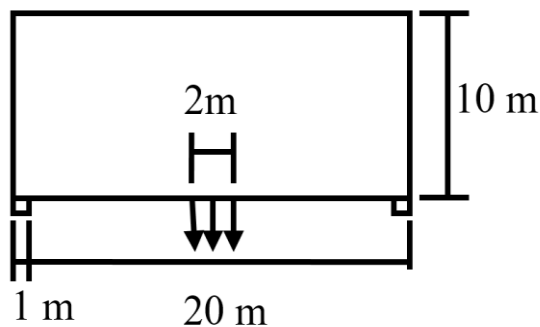
ب- معیار سختی

شکل ۱۱- شکل‌های بهین در حالت الاستوپلاستیک به روش

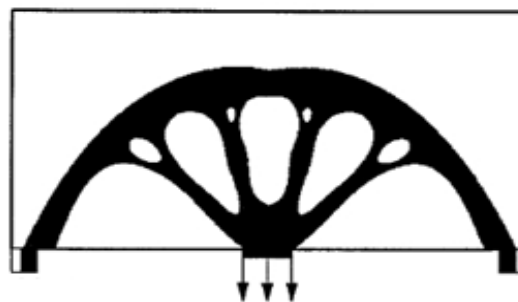
$$\frac{v}{v_0} = 0.3 \text{ ESO کلاسیک}$$



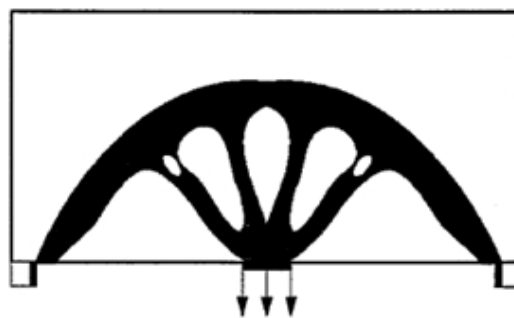
الف- معیار تنش معادل ون‌میزز



شکل ۸ سازه اولیه مثال ۲

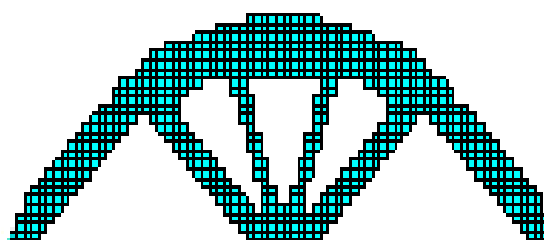


الف- طرح بهین در حالت الاستیک



ب- طرح بهین در حالت الاستوپلاستیک

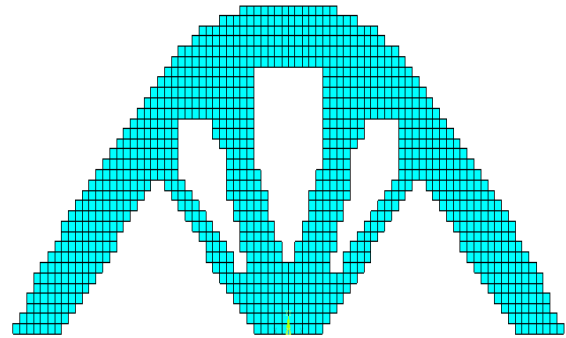
شکل ۹ نتایج بهینه‌سازی مثال ۲ به روش تطبیقی [۴۲]



الف- معیار تنش معادل ون‌میزز

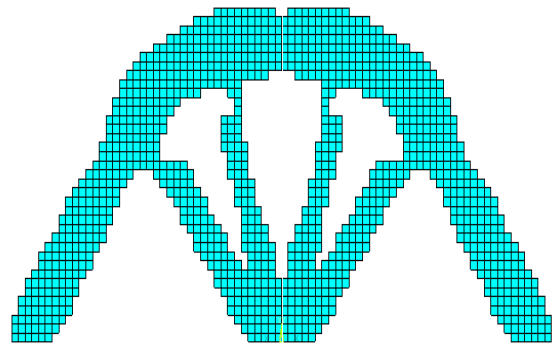
حالت از مرتبه‌ی ۰/۰۰۱ است. وقتی که سازه بهین می‌شود این نسبت در حالت الاستیک و در تمام حالات از مرتبه‌ی صفر و در حالت الاستوپلاستیک و در هر دو معیار سختی و تنش از مرتبه‌ی ۰/۱ می‌شوند، به طوری که درصد افزایش این نسبت در حالت الاستیک در همه‌ی حالات و معیارها ۹۹ و در حالت الاستوپلاستیک و معیار تنش و سختی به ترتیب ۹۷ و ۹۸ درصد است و نشان‌دهنده‌ی یکنواختی تنش در سازه‌های بهین می‌باشد. همچنین با توجه به جدول (۶) می‌بینیم که در سازه‌ی اولیه مقدار ماکزیمم و مینیمم انرژی کرنشی در حالت الاستیک به ترتیب $۰/۳۱۲۷ \times ۱۰^۳$ و $۰/۳ \times ۱۰^{-۴}$ نیوتن-متر و در حالت الاستوپلاستیک به ترتیب $۰/۸۸ \times ۱۰^۲$ و $۰/۴ \times ۱۰^{-۴}$ نیوتن-متر می‌باشد به طوری که نسبت مینیمم انرژی به ماکزیمم مقدار آن در هر دو حالت از مرتبه‌ی $۱۰^{-۷}$ است. وقتی که سازه بهین می‌شود این نسبت در حالت الاستیک و معیار تنش از مرتبه‌ی $۱۰^{-۲}$ و در معیار سختی از مرتبه‌ی ۰/۱ و در حالت الاستوپلاستیک و هر دو معیار سختی و تنش از مرتبه‌ی $۱۰^{-۴}$ می‌شود، و این نسبت در تمام حالت‌ها و معیارها ۹۹ درصد افزایش دارد.

در جدول (۷) مقادیر شاخص عملکرد و زمان لازم برای انجام فرآیند بهینه‌سازی تا رسیدن به حجم مورد نظر برای حالت‌های الاستیک و الاستوپلاستیک آورده شده است. با توجه جدول (۷) مشاهده می‌شود که در اینجا هم مقدار شاخص عملکرد در روش جدید در معیار تنش معادل از روش کلاسیک کمتر و در معیار سختی بیشتر است و زمان لازم برای انجام فرآیند بهینه‌سازی در روش جدید خیلی کمتر از روش کلاسیک می‌باشد. مثلاً در حالت الاستیک و معیار سختی مقدار شاخص عملکرد و زمان در روش جدید به ترتیب $۰/۹۴۰۷ \times ۱۰^{-۳}$ و ۱۳ دقیقه و در روش کلاسیک به ترتیب $۰/۸۶۱۲ \times ۱۰^{-۳}$ و ۱۰۴ دقیقه است یعنی زمان لازم برای انجام این فرآیند در روش جدید حدود ۸ مرتبه کمتر است که این می‌تواند در بهینه‌سازی سازه‌های بزرگ حائز اهمیت باشد.

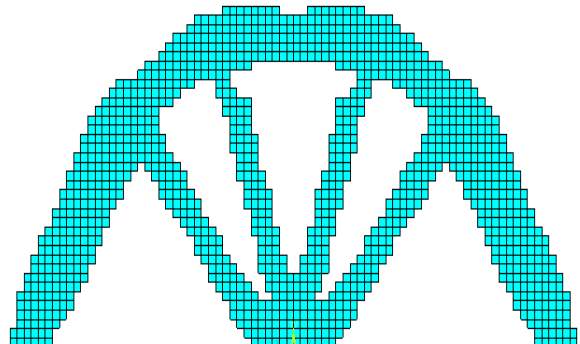


ب- معیار سختی

شکل ۱۲- شکل‌های بهینه سازه مثال ۲ در حالت الاستیک به روش ESO جدید $\frac{V}{V_0} = 0.3$



الف- معیار تنش معادل ون میزز



ب- معیار سختی

شکل ۱۳ شکل‌های بهین سازه مثال ۲ در حالت الاستوپلاستیک به روش ESO جدید $\frac{V}{V_0} = 0.3$

در اینجا هم نتایج نشان می‌دهند که درصد افزایش این نسبت‌ها در هر دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک برای هر دو معیار سختی و تنش معادل تقریباً برابرند. طبق جدول (۵) در سازه‌ی اولیه مقدار ماکزیمم و مینیمم تنش معادل ون میزز در حالت الاستیک به ترتیب ۰/۴۹۱ و $۰/۱۷۴۹ \times ۱۰^{-۳}$ مگاپاسکال و در حالت الاستوپلاستیک به ترتیب ۰/۲۴ و $۰/۲۰۲۸ \times ۱۰^{-۳}$ مگاپاسکال می‌باشد به طوری که نسبت مینیمم تنش به ماکزیمم تنش در هر دو

جدول ۲- ماکزیمم و مینیمم تنش معادل ون‌میزز و نسبت‌های آن‌ها در حالت اولیه و بهین در حالت الاستیک و الاستوپلاستیک

$\frac{l-l_0}{l} \times 100$	مینیمم تنش ماکزیمم تنش	مینیمم تنش [MPa]	ماکزیمم تنش [MPa]	تنش معادل ون‌میزز در سازه		
حالت الاستیک						
---	0.1348E-3	0.5214E-4	0.3869E+0	طرح اولیه		
99	0.3779E-1	0.2910E-1	0.7701E+0	روش جدید	معیار تنش	طرح بهین
99	0.3508E-1	0.2932E-1	0.8359E+0	روش کلاسیک		
99	0.4371E-1	0.2995E-1	0.6853E+0	روش جدید	معیار سختی	
99	0.4363E-1	0.3036E-1	0.6959E+0	روش کلاسیک		
حالت الاستوپلاستیک						
---	0.2730E-3	0.6556E-4	0.24E+0	طرح اولیه		
99	0.8342E-1	0.2002E-1	0.24E+0	روش جدید	معیار تنش	طرح بهین
99	0.8730E-1	0.2094E-1	0.24E+0	روش کلاسیک		
99	0.1478E+0	0.3548E-1	0.24E+0	روش جدید	معیار سختی	
99	0.1936E+0	0.4647E-1	0.24E+0	روش کلاسیک		

جدول ۳- ماکزیمم و مینیمم انرژی کرنشی و نسبت‌های آن‌ها در حالت اولیه و بهین در حالت الاستیک و الاستوپلاستیک

$\frac{l-l_0}{l} \times 100$	مینیمم انرژی ماکزیمم انرژی	مینیمم انرژی [N.m]	ماکزیمم انرژی [N.m]	انرژی کرنشی در سازه		
حالت الاستیک						
---	0.5298E-7	0.1000E-4	0.1888E+3	طرح اولیه		
99	0.3038E-2	0.1493E+1	0.4915E+3	روش جدید	معیار تنش	طرح بهین
99	0.2880E-2	0.1559E+1	0.5413E+3	روش کلاسیک		
99	0.2849E-2	0.1342E+1	0.4710E+3	روش جدید	معیار سختی	
99	0.3075E-2	0.1568E+1	0.5100E+3	روش کلاسیک		
حالت الاستوپلاستیک						
----	0.2596E-7	0.1000E-4	0.3852E+3	طرح اولیه		
99	0.2784E-2	0.4995E+1	0.1794E+4	روش جدید	معیار تنش	طرح بهین
99	0.2790E-2	0.5259E+1	0.1881E+4	روش کلاسیک		
99	0.6123E-3	0.6913E+0	0.1129E+4	روش جدید	معیار سختی	
99	0.5871E-3	0.7136E+0	0.1216E+4	روش کلاسیک		

جدول ۴- مقایسه زمان و شاخص عملکرد در دو روش و دو معیار برای دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک

زمان [min]	شاخص عملکرد			
7	0.2018E+1	روش جدید	معیار تنش	حالت الاستیک
61	0.3002E+1	روش کلاسیک		
13	0.9407E-3	روش جدید	معیار سختی	
120	0.7509E-3	روش کلاسیک		
7	0.3230E+1	روش جدید	معیار تنش	حالت الاستوپلاستیک
91	0.4077E+1	روش کلاسیک		
9	0.3031E-3	روش جدید	معیار سختی	
120	0.2147E-3	روش کلاسیک		

جدول ۵- ماکزیمم و مینیمم تنش معادل ون میزز و نسبت‌های آن‌ها در حالت اولیه و بهین در حالت الاستیک و الاستوپلاستیک

$\frac{l-l_0}{l} \times 100$	مینیمم تنش ماکزیمم تنش	مینیمم تنش [MPa]	ماکزیمم تنش [MPa]	تنش معادل ون میزز در سازه		
حالت الاستیک						
---	0.3561E-3	0.1749E-3	0.4911E+0	طرح اولیه		
99	0.1172E+0	0.1045E+0	0.8913E+0	روش جدید	معیار تنش	طرح بهین
99	0.1346E+0	0.1235E+0	0.9175E+0	روش کلاسیک		
99	0.1256E+0	0.1154E+0	0.9185E+0	روش جدید	معیار سختی	
99	0.1283E+0	0.1189E+0	0.9262E+0	روش کلاسیک		
حالت الاستوپلاستیک						
---	0.8445 E-3	0.2028E-3	0.2401E+0	طرح اولیه		
97	0.3230E-1	0.7752E-2	0.2400E+0	روش جدید	معیار تنش	طرح بهین
97	0.3290E-1	0.7895E-2	0.2400E+0	روش کلاسیک		
98	0.3577E-1	0.8585E-2	0.2400E+0	روش جدید	معیار سختی	
98	0.3505E-1	0.8412E-2	0.2400E+0	روش کلاسیک		

جدول ۶- ماکزیمم و مینییم انرژی کرنشی و نسبت‌های آن‌ها در حالت اولیه و بهین در حالت الاستیک و الاستوپلاستیک

$\frac{l-l_0}{l} \times 100$	مینییم انرژی ماکزیمم انرژی	مینییم انرژی [N.m]	ماکزیمم انرژی [N.m]	انرژی کرنشی در سازه			
حالت الاستیک							
---	0.9594E-7	0.3000E-4	0.3127E+3	طرح اولیه			
99	0.2474E-2	0.2650E+1	0.1071E+4	روش جدید	معیار تنش	طرح بهین	
99	0.2586E-2	0.2795E+1	0.1081E+4	روش کلاسیک			
99	0.1293E-1	0.1356E+2	0.1049E+4	روش جدید	معیار سختی		
99	0.1384E-1	0.1464E+2	0.1058E+4	روش کلاسیک			
حالت الاستوپلاستیک							
---	0.4542E-7	0.4000E-4	0.8808E+3	طرح اولیه			
99	0.3607E-4	0.4145E-1	0.1149E+4	روش جدید	معیار تنش	طرح بهین	
99	0.3684E-4	0.4244E-1	0.1152E+4	روش کلاسیک			
99	0.4851E-4	0.5040E-1	0.1039E+4	روش جدید	معیار سختی		
99	0.5484E-4	0.5742E-1	0.1047E+4	روش کلاسیک			

جدول ۷- مقایسه زمان و شاخص عملکرد در دو روش و دو معیار برای دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک

زمان [min]	شاخص عملکرد				
7	0.2018E+1	روش جدید	معیار تنش	حالت الاستیک	
60	0.2319E+1	روش کلاسیک			
13	0.9407E-3	روش جدید	معیار سختی		
104	0.8612E-3	روش کلاسیک			
7	0.3230E+1	روش جدید	معیار تنش		حالت الاستوپلاستیک
63	0.4526E+1	روش کلاسیک			
9	0.3031E-3	روش جدید	معیار سختی		
90	0.2913E-3	روش کلاسیک			

بهینه‌سازی به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و کارایی آن نسبت به روش کلاسیک بهتر شده است. در روش جدید برای فرایند حذف و اضافه کردن المان با یک پارامتر سیگنالی که نسبت حجم یا وزن حذفی نام دارد انجام می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی چند سازه، معادل بودن دو معیار سختی و تنش معادل در روش ESO در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک نتیجه گرفته می‌شود.

۷- نتایج

نتایج حاصل علاوه بر اثبات کارایی روش ESO، نشان داد که این روش ابزار بسیار مفید و قابل اعتمادی برای بهینه‌سازی سازه‌های مکانیکی می‌باشد و با استفاده از این روش می‌توان خیلی ساده‌تر به نتایجی مشابه نتایج روش‌های معیار بهینگی رسید. با اعمال تغییراتی در الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی کلاسیک، زمان لازم برای انجام فرآیند

۸- مراجع

- [01] J. S. Arora,(2004), Introduction to optimum design (2nd Ed.), Elsevier
- [02] O. M. Querin,(1997), Evolutionary Structural Optimisation: Stress Based Formulation and Implementation, PhD Thesis, Department of Aeronautical Engineering, University of Sydney, Sydney, Australia
- [03] O. Sigmund, K. Maute,(2013), “Topology optimization approaches”, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 48, No. 6, pp. 1031-1055
- [04] O. Sigmund, (2011), “On the usefulness of non-gradient approaches in topology optimization”, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 43, No. 5, pp. 589-596
- [05] M. Kociecki, H. Adeli,(2014), “Two-phase genetic algorithm for topology optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex curvatures”, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 32, No. 0, pp. 218-227
- [06] M. J. Jakiela, C. Chapman, J. Duda, A. Adewuya, K. Saitou,(2000), “Continuum structural topology design with genetic algorithms”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 186, No. 2-4, pp. 339-356
- [07] R. Balamurugan, C. Ramakrishnan, N. Swaminathan,(2011), “A two phase approach based on skeleton convergence and geometric variables for topology optimization using genetic algorithm”, Structural and multidisciplinary optimization, Vol. 43, No. 3, pp. 381-404
- [08] R. Balamurugan, C. V. Ramakrishnan, N. Singh,(2008), “Performance evaluation of a two stage adaptive genetic algorithm (TSAGA) in structural topology optimization”, Applied Soft Computing, Vol. 8, No. 4, pp. 1607-1624
- [09] G.-C. Luh, C.-H. Chueh,(2009), “Multi-modal topological optimization of structure using immune algorithm”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 193, No. 36-38, pp. 4035-4055
- [10] G.-C. Luh, C.-Y. Lin,(2009), “Structural topology optimization using ant colony optimization algorithm”, Applied Soft Computing, Vol. 9, No. 4, pp. 1343-1353
- [11] A. Kaveh, B. Hassani, S. Shojaee, S. M. Tavakkoli,(2008), “Structural topology optimization using ant colony methodology”, Engineering Structures, Vol. 30, pp. 2559-2565
- [12] G.-C. Luh, C.-Y. Lin, Y.-S. Lin,(2011), “A binary particle swarm optimization for continuum structural topology optimization”, Applied Soft Computing, Vol. 11, No. 2, pp. 2833-2844
- [13] F. Kolahan, M. H. Abolbashari, S. Mohitzadeh,(2008), “Simulated Annealing Application for Structural Optimization”, International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering, Vol. 1, No. 4, pp. 186-189

- [14] P. Y. Shim, S. Manoochehri,(1997), "Generating Optimal Configurations in Structural Design Using Simultaed Annealing", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 40, No. 6, pp. 1053-1069
- [۱۵] ف. حاج عبداللهی اودرجی،(۱۳۸۹)، بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک (GESO)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد
- [16] G. Steven, Y. Xie,(1993), "Evolutionary structural optimization with FEA", Computational mechanics, Vol. 1, pp. 27-34
- [17] Y. M. Xie, G. P. Steven,(1992), "Shape and layout optimization via an evolutionary procedure", Proceeding of International Conference on Computational Engineering Scienc, Hong Kong, pp. 421
- [18] Y. M. Xie, G. P. Steven,(1993), "A simple evolutionary procedure for structural optimization", Computers & Structures, Vol. 49, No. 5, pp. 885-896
- [19] Y. M. Xie, G. P. Steven, (1997),Basic evolutionary structural optimization: Springer
- [20] E. Hinton, J. Sienz,(1995), "Fully stressed topology design of structures using an evolutionary procedure", Engineering Computations, Vol. 12, pp. 229-244
- [21] Y. M. Xie, G. P. Steven,(1994), "Optimal design of multiple load case structures using an evolutionary procedure", Engineering Computations, Vol. 11, No. 4, pp. 295 - 302
- [22] Y. M. Xie, G. P. Steven,(1996), "Evolutionary structural optimization for dynamic problems", Computers and Structures, Vol. 58, No. 6, pp. 1067-1073
- [23] A. Rispler, G. Steven,(1995), "Shape optimisation of metallic inserts in composite bolted joints", Second Pacific International Conference on Aerospace and Technology; Sixth Australian Aeronautical Conference, Barton, A.C.T: Institution of Engineers, Australia, pp. 225-229
- [24] G. P. Steven, O. M. Querin, Y. M. Xie,(1995), "Analysis of Aircraft Patch Repairs Using Evolutionary Structural Optimisation", International Aerospace Congress; Second Pacific International Conference on Aerospace and Technology; Sixth Australian Aeronautical Conference. Barton, A.C.T., Institution of Engineers, Australia, pp. 683-688
- [25] D. Chu, Y. Xie, A. Hira, G. Steven,(1996), "Evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 21, No. 4, pp. 239-251
- [26] D. Manickarajah, Y. M. Xie, G. P. Steven,(1995), A simple method for the optimization of columns, frames and plates against buckling, in Structural Stability and Design, A.A Balkema Publishers, Rotterdam, pp. 175-180
- [27] G. P. Steven, O. M. Querin, Y. M. Xie,(1995), "Multiple Constraint Environments for Evolutionary Structural Optimisation", Proceeding of the First World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Goslar, Germany, May 28 - June 2., pp. 213-218
- [28] C. Zhao, G. P. Steven, Y. M. Xie, "Evolutionary natural frequency optimization of thin plate bending vibration problems", Struct Multidisc Optim, Vol. 11, pp. 244-251
- [29] C. B. Zhao, G. P. Steven, Y. M. Xie,(1997), "Evolutionary optimization of maximizing the difference between two natural frequencies of a vibrating structure", Structural Optimization, Vol. 13, pp. 148-154
- [30] O. M. Querin, G. P. Steven, Y. M. Xie,(1996), "Topology optimisation of structures with material and geometric non-linearities", Multidisciplinary Analysis Optimization Conferences in: 6th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Eds.: American Institute of Aeronautics and Astronautics
- [31] X. Huang, Y. M. Xie,(2007), "Bidirectional Evolutionary Topology Optimization for Structures with Geometrical and Material Nonlinearities", AIAA JOURNAL, Vol. 45, No. 1, pp. 308-313
- [32] X. Huang, Y. M. Xie, M. C. Burry,(2006), "A new algorithm for Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization", JSME International Journal, Series C, Vol. 49, No. 4, pp. 1091-1099

- [33] M. M. Neves, H. Rodrigues, J. M. Guedes,(1995), “Generalized topology design of structures with a buckling load criterion”, *Structural optimization*, Vol. 10, No. 2, pp. 71-78
- [34] J. E. Taylor, J. Logo,(1993), “Analysis and Design of Elastic/Softening Truss Structures Based on a Mixed-Form Extremum Principle”, *NATO ASI Series in: G. I. N. Rozvany, Optimization of Large Structural Systems*, Eds., pp. 683-695
- [35] J. E. Taylor,(1993), “Truss Topology Design for Elastic/Softening Materials”, *NATO ASI Series in: M. Bendsøe, C. M. Soares, Eds., Topology Design of Structures*, pp. 451-467
- [36] K. Yuge, N. Kikuchi,(1995), “Optimization of a frame structure subjected to a plastic deformation”, *Structural optimization*, Vol. 10, No. 3-4, pp. 197-208
- [37] S. Huang,(1995), *Continuum theory of plasticity: John Wiley & Sons* .
- [38] Q. Li, G. P. Steven, Y. M. Xie,(2001), “A simple checkerboard suppression algorithm for evolutionary structural optimization”, *Struct Multidisc Optim*, Vol. 22, pp. 230–239
- [39] M. H. Abolbashari, M. Khajooei-Gharaei,(2011), “An improved evolutionary structural optimization method for continuum structures of elastic and elasto-plastic bodies”, *International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (CMAE)*, India, New Delhi, pp. 435-439
- [40] M. H. Abolbashari, M. Khajooei-Gharaei, H. R. Ghaffarianjam, M. R. Mahpeykar,(2010), “Topology optimization of continuum structures with elasto-plastic behavior using evolutionary structural optimization based on stress and stiffness criteria”, *6th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 6*, Perth, Australia
- [41] ANSYS(R), Swanson Analysis System, Inc .
- [42] K. Maute, S. Schwarz, E. Ramm,(1998), “Adaptive topology optimization of elastoplastic structures”, *Structural Optimization*, Vol. 15, pp. 81-91
- [43] MATLAB,(2002), The MathWorks, Inc .
- [44] Q. Li, G. P. Steven, Y. M. Xie,(1999), “On equivalence between stress criterion and stiffness criterion in evolutionary structural optimization”, *Structural Optimization*, Vol. 18, pp. 67-73