



مینیم سازی وزن سازه‌های دو بعدی با استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها (ESO) بر مبنای قید تنش

علیرضاستوده¹، حامد ایزدی قدوسی²، حمید ذبیحی فرزقی³
گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد- صندوق پستی 91775-1111

چکیده

یکی از روشهایی که اخیراً برای بهینه‌سازی سازه‌ها پیشنهاد شده روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها (Evolutionary Structural Optimizaion) (ESO) می‌باشد. اساس روش ESO بر این مبنا است که در یک فرآیند تکاملی مواد ناکارآمد از سازه حذف می‌شوند. این فرآیند شامل انتخاب پارامترهایی از قبیل نسبت حذف اولیه (RR₀) و نرخ تکامل (ER) می‌باشد. در این مقاله کارایی این روش در مینیم سازی وزن سازه‌های دو بعدی بر مبنای قید تنش نشان داده می‌شود. همچنین تأثیر انتخاب متفاوت پارامتر نسبت حذف اولیه و نرخ تکامل در شکل بهینه سازه‌های دو بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در کلیه مثالها معیار حذف المان، تنش وان میزز (von Mises) در هر المان می‌باشد. در این تحقیق یک کد اجزاء محدود جهت بهینه‌سازی نوشته شده است که دقت آن با مقایسه با نتایج موجود و شرایط مرزی مختلف به اثبات رسیده است.

واژه‌های کلیدی: طراحی بهین- روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها- روش اجزاء محدود- تنش وان میزز

مقدمه

روشهای بهینه‌سازی عموماً احتیاج به تعریف تابع هدف و تابع قید دارند که پس از حل ریاضی به جواب بهینه نزدیک می‌شوند. اخیراً روشهای جدیدی توسعه داده شده‌اند که در آنها احتیاج به تابع هدف و تابع قید نمی‌باشد. از جمله این روشها، طراحی بهینی است که براساس توجه به عالم طبیعت صورت می‌گیرد. نتایج تحقیقات ماتیک (Matthck) و بارخ (Burkhw) [1] نشان داد که می‌توان برای رسیدن به یک حالت بهینه برای سازه‌ها تحت شرایط خاص از رشد بیولوژیکی درخت استفاده کرد. پیشرفت تکنولوژی رایانه این امکان را برای محققان فراهم آورده تا محاسبات ریاضی را با روشهای چرخه‌ای نسبتاً ساده‌تر و در مدت زمان معقول‌تری انجام دهند. تحلیل سازه‌ها با ترکیب روشهای بهینه‌سازی و روشهای عددی مانند روش اجزای محدود یا روش مرز محدود، سریع‌تر و کاراتر شده‌اند. توسعه روش همگن‌سازی (homogenization) به وسیله بندسکیو (Bendsqe) [2] پیشرفت مهمی در بهینه‌سازی سازه‌ها بود. این روش قادر است همزمان دو کار را انجام دهد یعنی هم پیکره سازه (Topology) و هم ریزساختارهای ماده تشکیل دهنده سازه را مشخص کند. این کار با مینیم کردن نرمی سازه (Compliance) با

استفاده از برنامه‌ریزی درجه دو با فرض اینکه در هر المان چگالی ماده به عنوان متغیر طراحی باشد انجام می‌شود. در سال 1992 روش جدیدی برای بهینه‌سازی سازه‌ها بوسیله استیون (Steven) و زی (Xie) [3-4] ارائه گردید که بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها یا ESO نامیده شد. اساس این روش حذف تدریجی المانهای کم تنش از دامنه ماکزیم اولیه سازه در یک فرآیند تکاملی است. محصول نهایی این روش سازه‌ای با توزیع تنش یکنواخت‌تر و وزن کمتر نسبت به حالت اولیه می‌باشد. گامهای اولیه برای اثبات کارایی روش ESO با تحلیل مسائل کلاسیک دارای یک بارگذاری مشخص، صورت گرفت. پس از اثبات کارایی این روش، استیون (Steven) و زی (Xie) از آن در مسائل دارای چند بارگذاری [5] و در مسائل دینامیک [6] استفاده کردند. چو (Chu) و همکاران [7] از قید سختی به عنوان معیار بهینگی در روش ESO استفاده کردند. کابرد روش ESO در مسائل کمانش به وسیله مانیکاراج (Manickarajah) و همکاران مطالعه شد [8]. فرکانس طبیعی به وسیله زاو (Zhao) و همکاران [9] مورد بررسی قرار گرفت.

استخراج معادلات اجزاء محدود

المان مورد استفاده در این مسئله مشابه [10] بصورت یک المان صفحه‌ای چهار گره‌ای ایزوپارامتریک به ضخامت h در نظر گرفته شده است. در این نوع المان هر گره دارای دو درجه آزادی شامل دو تغییر مکان در راستای افقی x و قائم y است. موقعیت مکانی X و Y نقاط داخل هر المان، طبق رابطه‌های زیر به موقعیت مکانی گره‌های چهارگوشه المان، x_i و y_i ، ربط داده می‌شود.

$$X = \sum_{i=1}^4 \psi_i x_i \quad (2)$$

$$Y = \sum_{i=1}^4 \psi_i y_i$$

در روابط بالا ψ_i ها توابع شکل گره‌ها می‌باشند. هر چهار تابع شکل در قالب ماتریسی بصورت زیر ارائه می‌شود که ماتریس شکل نامیده می‌شود.

$$\Psi = \begin{bmatrix} \psi_1 & \psi_2 & \psi_3 & \psi_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \psi_1 & \psi_2 & \psi_3 & \psi_4 \end{bmatrix}$$

از ضرب ماتریس شکل در بردار جابه‌جایی گره‌ها بردار توابع جابه‌جایی نقاط داخل المان مشخص می‌شود. یعنی،

$$\mathbf{U}^e = \boldsymbol{\Psi} \mathbf{u}^e \quad (4)$$

که در رابطه (4)، \mathbf{u}^e و \mathbf{U}^e به ترتیب در زیر داده شده‌اند.

(5)

$$\mathbf{u}^e = \{u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4\}^T$$

و

(6)

$$\mathbf{U}^e = [\mathbf{U} \quad \mathbf{V}]^T$$

u_i و v_i ها مقادیر جابه‌جایی گره‌ای، \mathbf{U} و \mathbf{V} توابع جابه‌جایی در داخل المان هستند. استفاده از حرف e بعنوان شاخص بمنظور تاکید بر تفاوت این مقادیر در هر یک از المانها بوده است. برای انتقال دستگاه مختصات $x-y$ به دستگاه مختصات المان مبنا یعنی $\xi-\eta$ از ماتریس ژاکوبین که بصورت زیر است، استفاده می‌شود.

در رابطه بالا \mathbf{f}^e بردار بار المان می‌باشد. با انجام عملیات بر هم نهی معادلات مربوط به همه المانهای سازه، دستگاه معادلات نهایی بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\mathbf{Ku} = \mathbf{F} \quad (15)$$

\mathbf{K} ماتریس سختی کل سازه، \mathbf{u} و \mathbf{F} به ترتیب بردار جابه‌جایی و بار کلیه گره‌های سازه در جهات x و y می‌باشند. با حل این دستگاه معادلات خطی می‌توان بردار مجهولات \mathbf{u} را بدست آورد.

الگوریتم بهینه‌سازی مساله

معیار و مبنایی معتبر برای آنکه سازه به لحاظ طراحی دچار مشکل شود، تنش بیش از اندازه است. عکس آن، معیار معتبر برای حذف مواد ناکارآمد از سازه کم بودن تنش آنها است. بطور ایده‌آل تنش در قسمتهای مختلف سازه باید نزدیک به حد مجاز مشخص شده باشد تا بهترین بهره‌وری از مصالح سازه به عمل آید. در روش ESO که بر مبنای قید تنش استوار است، به موادی که تنش آنها از درصد تعیین شده‌ای کمتر هستند، مواد ناکارآمد گویند. این مواد می‌بایست از سازه حذف گردند. با حذف مواد ناکارآمد از سازه، میزان تنش در مدل‌های جدید یکنواخت‌تر و یک شکل‌تر خواهد شد. در ابتدا ابعادی از مصالح که برای طراحی شکل بهینه سازه به مقدار کافی وسیع و بزرگ هستند المان‌بندی می‌شود. در مرحله بعد بارها و شرایط مرزی را به سازه اعمال کرده و به کمک یک برنامه المان محدود تحلیل تنش سازه انجام می‌شود. در هر المان به کمک یکی از معیارهای موجود می‌توان اثر تنش در کلیه جهات را در غالب یک تنش معادل در نظر گرفت. به عنوان مثال معیار تنش وان میزب یکی از پرکاربردترین روشها در تعیین تنش معادل مواد همسانگرد تلقی می‌شود که در این مقاله از آن استفاده شده است. برای مسائل تنش صفحه‌ای، تنش وان میزب از رابطه (16) تعیین می‌گردد:

$$\sigma^{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (16)$$

σ_x و σ_y به ترتیب تنشهای عمودی در جهات x و y و τ_{xy} تنش برشی در صفحه x - y است. میزان تنش وان میزب در هر المان با بیشترین تنش وان میزب در کل سازه مقایسه شده و در نهایت طبق رابطه (17) المان‌هایی که مقدار تنش آنها از درصد مشخص شده‌ای از بیشترین میزان تنش در کل سازه کمتر باشند، حذف می‌گردند.

$$\sigma_e^{vm} < (RR_i) \sigma_{max}^{vm} \quad (17)$$

σ_{max}^{vm} تنش وان میزب در هر المان، RR بیشترین تنش وان میزب در کل سازه، RR نسبت حذف و زیرنویس i معرف تعداد تکرارهای برنامه است. زمانی که تنش وان میزب در المانها از میزان تعیین شده کمتر

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

با استفاده از معکوس ماتریس ژاکوبین می‌توان مشتقات مرتبه اول تابع شکل نسبت به مختصات x و y را به مختصات مبنا انتقال داد. یعنی می‌توان نوشت:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_i^e}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi_i^e}{\partial y} \end{Bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_i^e}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \psi_i^e}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

با تعریف ماتریس عملگرهای دیفرانسیلی به شکل معادله (9) و ضرب آن در ماتریس تابع شکل، ماتریس جدیدی به نام \mathbf{B} تعریف می‌شود.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{T} \boldsymbol{\psi} \quad (10)$$

در مسائل تنش صفحه‌ای ماتریس خواص یک ماده همسانگرد به شکل زیر ارائه می‌شود [11].

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{\nu E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

در رابطه فوق E و ν به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می‌باشند. با جایگذاری روابط (7)، (10) و (11) در معادلات حرکت یک سازه مکانیکی در حالت تنش صفحه‌ای و استفاده از روش باقیمانده‌های وزن‌دار تضعیف شده مانند مرجع [10] معادلات حرکتی بصورت رابطه ماتریسی زیر قابل ارائه می‌گردد:

$$\mathbf{K}^e \mathbf{u}^e = \mathbf{f}^e \quad (12)$$

که در رابطه بالا ماتریس \mathbf{K}^e بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$\mathbf{K}^e = h \int_{\Omega} \mathbf{B}^{eT} \mathbf{C} \mathbf{B}^e dx dy = h \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \mathbf{B}^{eT} \mathbf{C} \mathbf{B}^e |\mathbf{J}| d\xi d\eta \quad (13)$$

در این رابطه h ضخامت المان و $|\mathbf{J}|$ دترمینان ماتریس ژاکوبین می‌باشد. بردار بار المان از حاصلضرب ترانژاده ماتریس توابع شکل در بردار مولفه‌های بار در جهت x و y با انتگرال‌گیری بر روی مرز المان بدست می‌آید.

$$\mathbf{f}^e = h \int_{\Gamma^e} \boldsymbol{\psi}^T \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix} ds \quad (14)$$

نتیجه اساس روش ESO بوده زیرا هدف این روش یکپارچه سازی تنش در کل سازه می باشد. ایده آل ترین نتیجه در روش ESO برابر شدن تنش در کلیه المانهاست که این امر تنها در بهینه سازی بعضی سازه ها امکان پذیر است. در شکل (4) کاهش حجم نسبی سازه بازای افزایش نسبت حذف مورد بررسی قرار گرفته شده است. شکل نمودار حاکی از کاهش حجم چشمگیر پس از طی چند مرحله بهینه سازی است. از عوامل تاثیر گذار در مدل بهینه نهایی در روش ESO انتخاب مناسب دو پارامتر نسبت حذف اولیه و نرخ تکامل می باشد که در ادامه اثرات انتخاب آنها بررسی شده است. اگر بجای انتخاب $RR_0 = 0/5\%$ در مثال 1 به ترتیب از $RR_0 = 2\%$ و $RR_0 = 4/5\%$ استفاده شود به مدلهای بهینه شکل (5) خواهد رسید. مشاهده می شود با انتخاب $RR_0 = 2\%$ مدل بهینه تفاوتی چندان با مدل بهینه در $RR_0 = 0/5\%$ نخواهد کرد و ممکن است در تعداد محدودی از المانها این تفاوت وجود داشته باشد که چندان محسوس نیست. اما با انتخاب $RR_0 = 4/5\%$ مدل بهینه کاملاً متفاوت است. با توجه به نتایج بدست آمده از برنامه ESO2007 و سایر مراجع [3]، [4] و [12] می بایست مقدار مناسب RR_0 در بازه اعداد $0/5\%$ الی 1% انتخاب شود تا نتایج قابل قبولی بدست آید. در شکل (6) اثرات تغییر پارامتر نرخ تکامل (ER) بر نتایج شکل بهینه سازه مورد بررسی قرار گرفته شده است. با مشاهده این مدلها مشخص می شود انتخاب ER در مدل بهینه بسیار موثر است و لذا بر عهده کاربر بوده تا برنامه خود را به ازای چند مقدار مختلف ER آزمایش کرده و سپس نتایج را مقایسه نموده و در نهایت شکل بهینه را انتخاب کند. اما آنچه از نتایج این مقاله و مراجع دیگر [12] حاکی است مقادیر 1% و $0/5\%$ جوابهای مناسبی را به طراح خواهد داد.

مثال 2- صفحه با تکیه گاه گیردار در شکل (7) صفحه ای مستطیلی با مشخصات زیر بررسی شده که نتایج بهینه سازی آن با مرجع [12] در جدول (2) مقایسه شده است. عرض صفحه 10 متر، طول 24 متر و ضخامت $0/001$ متر می باشد. نیروی $P = -1000$ نیوتون در وسط ضلع سمت راست و در جهت پایین اعمال می شود. ضلع سمت چپ توسط تکیه گاه گیردار (clamped support) کاملاً مهار شده است. جنس صفحه از ماده ای با خواص مدول الاستیسیته شامل $E = 200$ GPa و ضریب پواسون $\nu = 0/3$ می باشد. در حل اجزاء محدود از المانهای مربعی خطی استفاده شده و مش با دانسیته 25×60 المان استفاده شده است. RR_0 و ER در نظر گرفته شده 1% است.

جدول 2- مقایسه مدل بهینه شکل (7) با مرجع

	Vol (m ³)	$\sigma_{min} / \sigma_{max}$	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)
مدل اولیه	0/24	0/0003	0/8603	0/0003

نباشد، چرخه حذف المان خاتمه می یابد. در این مرحله پارامتری به نام نرخ تکامل به نسبت حذف اضافه می گردد.

$$RR_{i+1} = RR_i + ER$$

ER نرخ تکامل می باشد. مجدداً با افزایش نسبت حذف، تحلیل تنش سازه و سپس حذف المان شروع شده و تا پایداری مجدد ادامه می یابد. این روند تکامل تا دستیابی به شکل بهینه سازه ادامه خواهد یافت.

نتایج عددی:

به منظور نشان دادن توانایی روش ESO، یک کد کامپیوتری در نرم افزار Matlab به نام ESO2007 نوشته شده است که این برنامه با لینک شدن به نرم افزار Ansys حل اجزاء محدود سازه را انجام داده و سپس المانهایی که تنش آنها از حد مورد نظر کمتر باشند را از سازه حذف خواهد کرد. این فرآیند تا نتیجه گیری نهایی ادامه خواهد یافت.

مثال 1: صفحه با تکیه گاه ساده

در شکل (1) صفحه مستطیلی با ابعاد نشان داده شده و ضخامت $0/1$ متر مشخص شده است. جنس مصالح صفحه شامل $E = 200$ GPa و $\nu = 0/3$ می باشد. تکیه گاههای سازه از نوع مفصلی و بار متمرکز F، هزار نیوتن است. در حل اجزاء محدود از المانهای مربعی خطی استفاده شده و دانسیته مش 50×25 المان می باشد. RR_0 و ER در نظر گرفته شده $0/5\%$ است. نتایج بهینه سازی شکل (1) با مرجع [12] در جدول (1) مقایسه شده است.

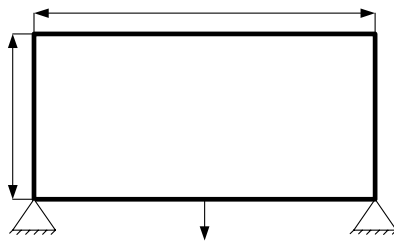
جدول 1- مقایسه مدل بهینه شکل (1) با مرجع

	Vol (m ³)	$\sigma_{min} / \sigma_{max}$	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)
مدل اولیه	5	0/0004	33/4805	0/0130
مدل بهینه مرجع [12]	1/192	0/1522	38/7176	5/8918
مدل بهینه توسط کد ESO2007	1/181	0/1452	38/7345	5/6241

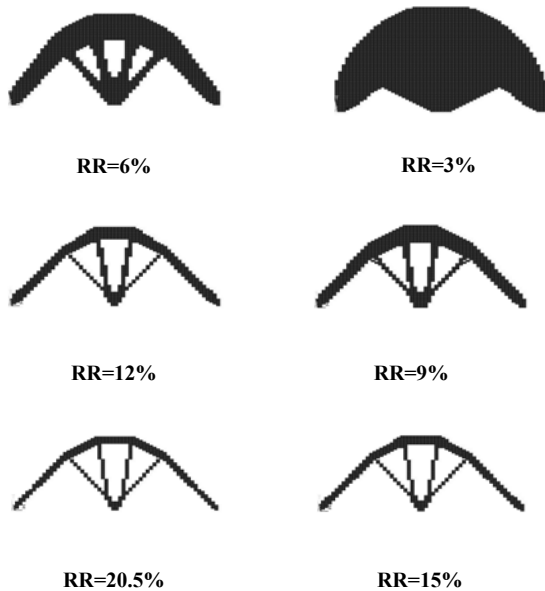
با توجه به جدول (1)، با یک مقدار تغییر حجم تقریباً یکسان جوابهای کد نوشته شده در مورد تنشهای ماکزیمم و مینیمم کاملاً با نتایج مرجع [12] همخوانی دارد. در شکل (2) فرآیند بهینه سازی تکاملی سازه شکل (1) بازای پارامترهای حذف مختلف مشاهده می شود. با افزایش نسبت حذف بتدریج از حجم سازه کاسته شده بطوریکه در نهایت در $RR = 20/5\%$ به شکل بهینه خواهد رسید. حذف هر تعداد المان از این مرحله به بعد باعث گسست سازه خواهد شد. در شکل (3) تغییرات تنش وان میزز کمینه، بیشینه و متوسط بازای نسبتهای حذف مختلف نمایش داده می شود. از نکاتی که در شکل (3) حائز اهمیت است می توان به افزایش تنش متوسط در کل سازه اشاره کرد. این

مدل بهینه مرجع [12]	0/0237	0/4913	1/1472	0/5636
مدل بهینه توسط کد ESO2007	0/0228	0/4923	1/1402	0/5613

بوده و برخلاف تکنیکهای بهینه‌سازی دیگر نیازی به تابع هدف، متغیرهای طراحی و تابع قید نداشته بلکه اساس آن بر مبنای حذف تدریجی مصالح ناکارآمد از سازه است. دو پارامتر مهم در این روش نرخ تکامل (ER) و نسبت حذف اولیه (RR_0) هستند که مقادیر آنها در جواب نهایی تعیین کننده است. در بهینه‌سازی بعضی از سازه‌ها اگر مقدار این پارامترها زیاد وارد شوند ممکن است برنامه جواب غلط داده و طراح را گمراه کند. در این روش برخلاف بسیاری از روشهای دیگر بهینه‌سازی که بر پایه تحلیل اجزای محدود بنا شده‌اند نیازی به مشیندی مجدد در هر گام طراحی نیست و همان مدل اولیه در تمام مراحل استفاده می‌شود. در این تحقیق یک کد کامپیوتری با کوپل نرم افزارهای [7] Matlab و [9] Ansys نوشته شده است که توانایی حل بهینه سازه‌های دو بعدی را بصورت کارآمد و سیستماتیک دارد. دقت کد مورد نظر با مقایسه با جوابهای موجود تائید شده است.



شکل 1- صفحه‌ای با دو تکیه‌گاه مفصلی (simply support)



شکل 2- روند بهینه‌سازی شکل (1) به ازای مقادیر مختلف RR

در این مثال نیز با توجه به نتایج حاصل شده در جدول (2) همخوانی بسیار نزدیکی بین مدل بهینه بدست آمده از کد نوشته شده و مرجع [12] وجود دارد. نتایج بدست آمده در یک فرآیند تکاملی در شکل (8) به ازای مقادیر مختلف RR نشان داده شده است.

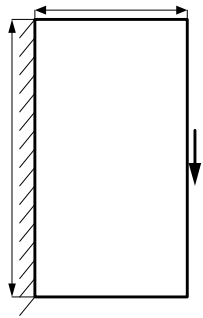
مسیر تکاملی مشاهده شده در شکل (8) در $RR=26\%$ به حالت پایدار خواهد رسید. از این مرحله به بعد با افزایش پارامتر نسبت حذف، یا هیچگونه المانی از سازه جدا نخواهد شد و یا المانهایی از سازه حذف می‌شوند که پیوستگی مدل بهینه را از بین خواهند برد. در شکل (9) تغییرات تنش ماکزیمم، مینیمم و متوسط بازای نسبت‌های حذف مختلف RR نشان داده می‌شود. با توجه به شکل (9) مشاهده می‌شود این مدل بهینه جزء یکی از حالت‌های استثنایی است که تنش مینیمم، ماکزیمم و متوسط در نهایت به طور قابل توجهی به یکدیگر نزدیک می‌شوند و بهترین حالت ممکنه که یکپارچه شدن تنش در کلیه المانهاست بوجود می‌آید. در بعضی از قسمت‌های نمودار پخش ناگهانی بوجود آمده که منشاء آن حذف تعداد زیادی از المانها در یک چرخه از برنامه است. در شکل (10) کاهش حجم نسبی سازه بازای افزایش نسبت حذف مورد بررسی قرار گرفته شده است. شکل نمودار حاکی از کاهش حجم چشمگیر پس از طی چند مرحله بهینه سازی است.

مثال 3- صفحه با بار گسترده

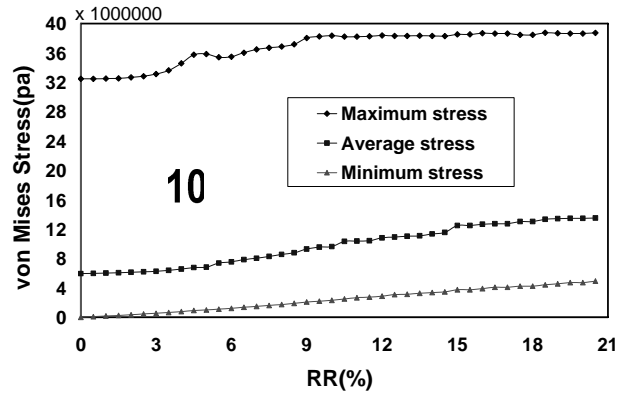
در شکل (7) عرض صفحه 5 متر، طول 16 متر و ضخامت 0/001 متر می‌باشد. نیروی گسترده $P=100$ نیوتن بر متر در سرتاسر ضلع بالای صفحه اعمال شده و ضلع پایین صفحه در چهار ناحیه توسط تکیه‌گاه گیردار (clamped support) مهار شده است. جنس صفحه از ماده‌ای با خواص مدول الاستیسیته $E=200GPa$ و ضریب پواسون $\nu=0/3$ طراحی شده است. در حل اجزاء محدود از المانهای مربعی خطی با دانسیته مش $50*25$ المان استفاده شده است. RR_0 و ER در نظر گرفته شده $0/5\%$ است. نتایج اجرای کد ESO2007 در شکل (11) بیانگر اتمام مراحل بهینه‌سازی در $RR=25.5\%$ می‌باشد که شکل سازه همانطور که انتظار می‌رفت با توجه به شرایط مرزی موجود مانند سازه‌ای همچون پل شکل گرفته است.

نتیجه‌گیری

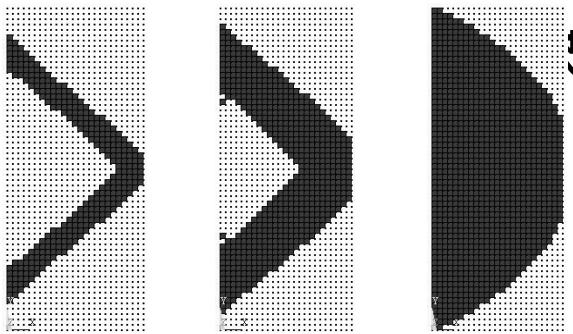
روش ESO یکی از کارآمدترین روشهای بهینه‌سازی است که با حداقل پیچیدگی ریاضی و به کمک یک چرخه تکاملی و با استفاده از روش اجزای محدود می‌توان به نتایج قابل قبولی دست یافت. این روش درمقابل انواع قیدها مانند تنش، کمناش، سختی، جابه‌جایی و فرکانس انعطاف پذیر



شکل 7- صفحه ای با تکیه گاه گیردار (clamped support)



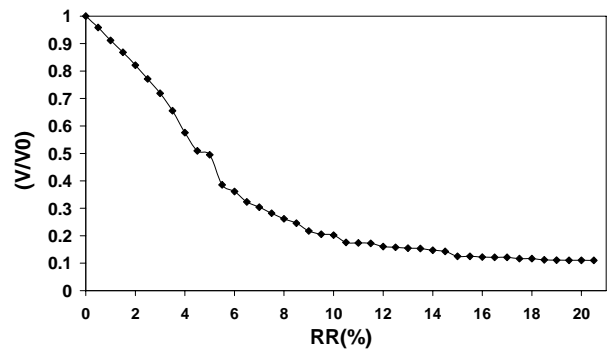
شکل 3- روند تکاملی تنش وان میزز (1) به ازای مقادیر مختلف RR



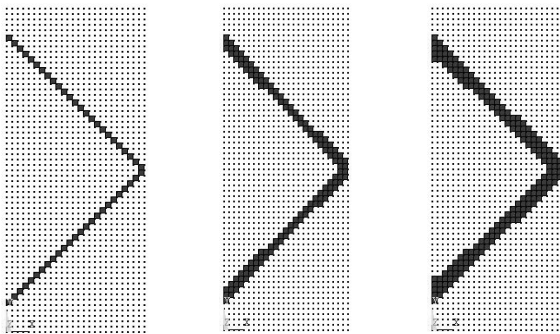
RR=12%

RR=6%

RR=3%



شکل 4- روند تکاملی کاهش حجم (1) به ازای مقادیر مختلف RR

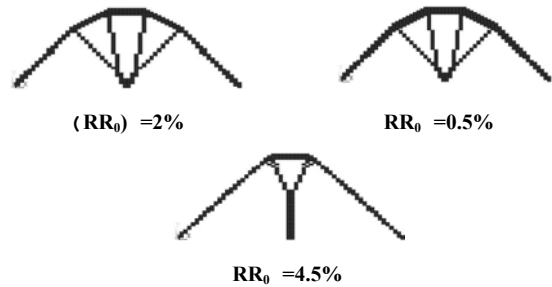


RR=26%

RR=21%

RR=18%

شکل 8- روند بهینه سازی شکل (7) به ازای مقادیر مختلف RR

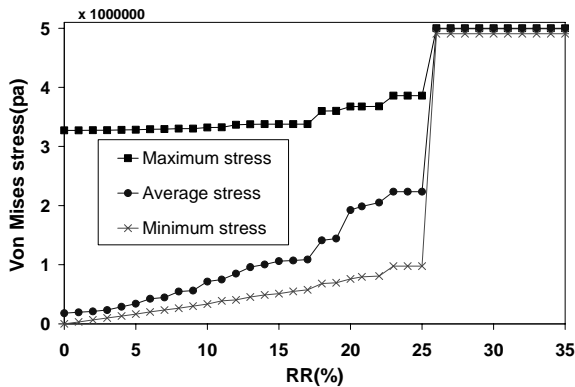


$(RR_0) = 2\%$

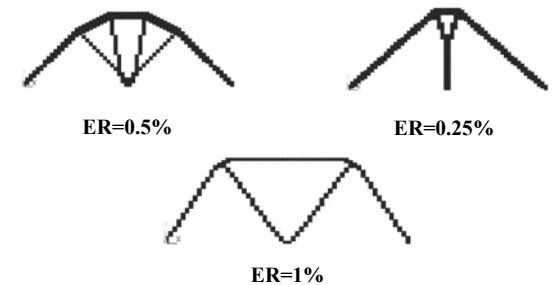
$RR_0 = 0.5\%$

$RR_0 = 4.5\%$

شکل 5- مدل بهینه شکل (1) به ازای مقادیر مختلف RR_0



شکل 9- روند تکاملی تنش وان میزز (7) به ازای مقادیر مختلف RR



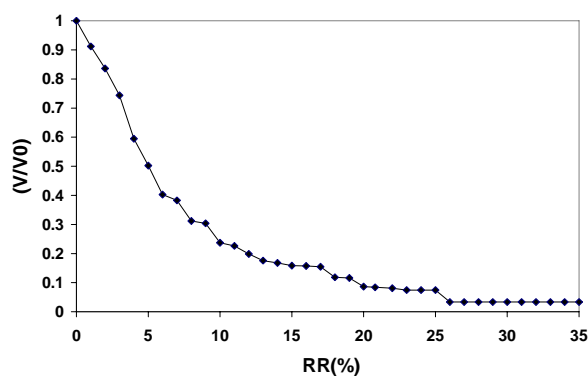
ER=0.5%

ER=0.25%

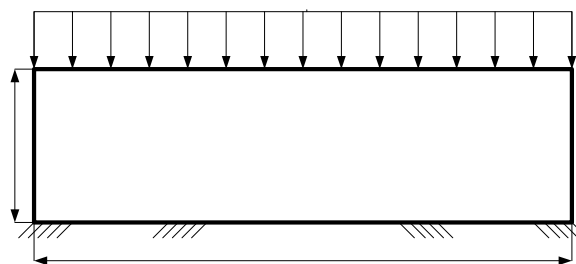
ER=1%

شکل 6- مدل بهینه شکل (1) به ازای مقادیر مختلف ER

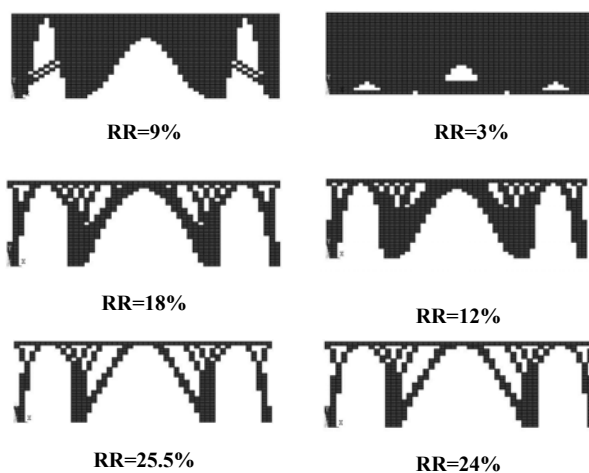
- 6- Steven G.P., Xie Y.M., Evolutionary structural optimization applied to problem in structural dynamics, *3rd world congress Computational mechanics*, China, Japan, paper H2-2, 1994.
- 7- Chu D.N., Xie Y.M., Hina A., Steven G.P., Evolutionary structural optimization for problem with stiffness constraints, *Finite element analysis and design*, v.21, 1996, pp.239-251.
- 8- Manickarajah D., Xie Y.M., Steven G.P., A simple method for the optimization of columns, frames and plates against buckling, In: Kitipornchai S, Hancock GJ, Rotterdam. Brookfield: A. A. Balkema Publishers, 1995, pp. 175-80.
- 9- Zhao C., Steven G.P., Xie Y.M., Evolutionary natural frequency optimization of thin plate bending vibration problems, *Struct. Optim.*, v. 11, 1996, pp 244-251.
- 10- J. N. Reddy, *An introduction to the finite element method*, Second edition, McGraw-Hill, Inc, 1993.
- 11- Beer, F. P., and Johnston, E. R, *Mechanics of Material*, Mc Graw-Hill, 1925.
- 12- Xie Y.M., Steven G.P., *Evolutionary structural optimization*, Springer, 1997.



شکل 10- روند تکاملی کاهش حجم به ازای مقادیر مختلف RR



شکل 11- صفحه ای با بار گسترده



شکل 12- مدل بهینه شکل (11) به ازای مقادیر مختلف RR

مراجع

- 1- C. Mattheck and S. Burkhardt., A new method of structural shape optimization based on biological growth, *Int. J. Fatigue*, v.12, n. 3, 1990, pp.185-190.
- 2- Bendsq, M.P. Kikuchi, N., Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng*, v. 71, 1988, pp 197-224.
- 3- Xie Y.M., Steven G.P., A simple evolutionary procedure for structural optimization, *computer & structures*, v..49, n. 5, 1993, pp.885-896.
- 4- Steven G.P., Xie Y.M., Evolutionary structural optimization with FEA, *Computational mechanics*, v.1, 1993, pp.27-34.
- 5- Xie Y.M., Steven G.P., Optimal design of multiple load case structures using an evolutionary procedure, *Engineering computations*, v.11, 1994, pp.295-302.