مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره هفدهم، شماره ۱، سال ۱۳۹۶

بهینه‌سازی توپولوژی و شکل سازه‌های پیوسته غیرخطی با روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها

یاسر علوی‌نیا[۱] و محمدحسین ابوالبشری*[۲]

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استاد، گروه مکانیک، مرکز پژوهشی مهندسی تولید ناب، دانشگاه فردوسی مشهد

* abolbash@um.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹٤/۰۵/۰۲] تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۳/۱۹]

چکیده-

روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی قادرند طرح‌هایی را با بهترین طرح سازه برای عملکردهای سازه‌ای پیدا کنند. یکی از این روش‌ها، بهینه‌سازی تکاملی سازه‌هاست. بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها[۱] به معنای حذف مواد ناکارآمد از سازه است به گونه‌ای که نتایج به دست آمده در هر مرحله به سمت طرح بهینه پیش می‌روند. بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با راهبرد دو جهتی[۲] شکل بهبودیافته‌ی روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها است که علاوه بر حذف المان، قابلیت اضافه کردن المان را هم دارد. تاکنون فرایند حذف و اضافه کردن المان با روش‌های مختلف و برای انواع معیارهای بهینه‌سازی انجام‌شده است. در این پژوهش مسئله بهینه‌سازی با معیار سفتی برای سازه‌های غیرخطی هندسی، غیرخطی وابسته به ماده انجام‌شده است. برای اثبات درستی و کارایی الگوریتم، عمل بهینه‌سازی روی چند سازه در دو حالت خطی و غیرخطی انجام‌شده و نتیجه‌های به دست آمده با طرح‌های بهینه پیشنهادشده با استفاده از روش‌های دیگر مقایسه شده است. شکل بهینه در دو حالت خطی و غیرخطی به طور محسوسی متفاوت و برای تحلیل غیرخطی نامتقارن به دست می‌آید. زمان اجرای برنامه در حالات غیرخطی بیشتر از حالت خطی است ولی با تحلیل غیرخطی سازه‌ها یک طرح بهینه با سفتی بیشتر به دست می‌آید. در ادامه به تحلیل خطی و غیرخطی در بهینه‌سازی شکل سازه‌ها پرداخته‌شده است. هدف پیدا کردن بهترین شکل حفره است به گونه‌ای که تنش بیشینه به کمترین مقدار خود برسد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها توانایی خوبی در بهینه‌سازی شکل حفره‌ها در سازه‌های غیرخطی دارد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها، تحلیل غیرخطی، بهینه‌سازی شکل، بیشینه سازی سفتی.

۱- مقدمه

نخستین بار موضوع بهینه‌سازی برای تعیین مقدارهای بیشینه و کمینه مطلق یک تابع پیوسته مطرح شد. با گذشت زمان مهندسان علاقه‌مند شدند که از این مفهوم نوین به منظور یافتن بهترین پاسخ در مسائل مهندسی استفاده کنند. آن‌ها موفق شدند اصول بهینه‌سازی را با یافته‌های تحلیلی جدید خود ترکیب کرده، از آن‌ها برای بهینه‌سازی سازه‌ها استفاده کنند.

در سال ۱۹۰٤ میشل[۳] توانست اصول بنیادین تئوری خود را موسوم به «تئوری چیدمان بهینه[٤]» معرفی کند [1]. به موازات تئوری چیدمان بهینه، بهینه‌سازی محاسباتی مسائل سازه‌ای نیز توسعه پیدا کرد [2]. هرچند که این روش‌ها برای مسائل کوچک و ساده مناسب بودند، ولی مسائلی که به وسیله

1. Evolutionary Structural Optimization(ESO)
2. Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO)
3. Michel
4. Optimal layout theory

Archive of SID
www.SID.ir

روش‌های سنتی حل شده‌اند، پاسخ‌های استانداردی برای مقایسه نتیجه‌ها با روش‌های دیگر بهینه‌سازی فراهم آورده‌اند.

دانشمندان بسیاری در صد سال گذشته در موضوع بهینه‌سازی سازه‌ها مطالعه کرده‌اند که مهم‌ترین این پژوهش‌ها به وسیله همپ[1] [2]، رزوانی[2] [1] و متک[3] [3] انجام‌شده است. به عنوان نمونه متک در سال ۱۹۸٦ توانست روش جدیدی را در بهینه‌سازی سازه‌های مکانیکی ارائه کند. در این روش که به نام روش رشد بیولوژیکی مشهور شد و در سال ۱۹۹٤ به روش رشد سازگار بیولوژیکی تغییر نام یافت [4] از رفتار طبیعت و به ویژه درختان الهام گرفته شد. امروزه روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده است، زیرا فن مزبور بسیار ساده و کارا است. بهینه‌سازی تکاملی سازه با استفاده از معیار تنش اولین بار به وسیله‌ی استیون و زی [5] ارائه شد. بعدها روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با معیار تغییر مکان و سفتی به وسیله‌ی چو و همکاران [٦] نشان داده شد. اعداد حساسیت بر اساس روابط کمانش به وسیله‌ی مانیکارجاح و همکاران [7] و فرکانس طبیعی به وسیله‌ی زاو و همکاران [8] برای روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها به کار گرفته شدند. پس از اثبات کارایی روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها؛ از این روش در مسائلی شامل چند بارگذاری [9] و مسائل دینامیکی[10] استفاده شد. افزون بر این عمر خستگی به عنوان معیاری برای حذف مواد به عنوان قید یا تابع هدف با استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها به وسیله‌ی هایبا [11] مطالعه شد. پس از آن بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با راهبردهای افزودنی[4] به وسیله‌ی زی و همکاران معرفی شد [12].

بهینه‌سازی تکاملی دو جهتی سازه‌ها شکل توسعه‌یافته روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌های سنتی است که از افزودن جزء نیز در کنار حذف جزء استفاده می‌کند. به عبارت دیگر این روش به صورت اضافه کردن جزءهای مؤثر و کارا و حذف جزءهای ناکارا در ساختار کمینه سازه است. ژای و استیون قدرت روش بهینه‌سازی تکاملی دو جهتی سازه‌ها را در حل مسائلی با قیود تنش، کرنش، تغییر مکان و فرکانس اثبات کرده‌اند [13]. با توجه به اهمیتی که بحث غیرخطی بودن در فرآیند بهینه‌سازی دارد به این بحث در روش‌های بهینه‌سازی مختلفی توجه شده است. بهینه‌سازی توپولوژی با هندسه غیرخطی به وسیله‌ی نوص و همکاران [14] برای بیشینه کردن بار کمانشی بحرانی انجام شد. طراحی خرپاهایی با ماده‌ی غیرخطی به وسیله‌ی تیلور و لگو [15] و تیلور [16]، بهینه‌سازی توپولوژی با ماده‌ی غیرخطی به وسیله‌ی یاگ و کیکیوچی [17] انجام شد. به حداقل رساندن مناطق پلاستیکی در جابه‌جایی به وسیله‌ی تادئوس و کاس [18] به عنوان یک معیار بهینه‌سازی با استفاده از توزیع الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی سازه‌های غیرخطی صورت گرفت. زی و هانگ [19] برای بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های دوره‌ای از روش بهینه‌سازی ساختاری تکاملی دو جهته استفاده کردند. هر چند روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها از روش‌های قدیمی است و از سال ۱۹۹۳ اولین پژوهش‌ها در این زمینه منتشر شد ولی تا کنون صدها مقاله در زمینه بهینه‌سازی سازه‌ها و سیستم‌ها با استفاده از این روش و راهبرد دوجهتی آن چاپ شده و این پژوهش نیز در زمینه توسعه این روش و توانمندی آن در حل مسائل غیرخطی است.

۲- بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها

روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها بین روش‌های ابتکاری و روش‌های گرادیان قرار می‌گیرند. این بدان معناست که بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها می‌تواند با جستجو در فضای طراحی هم به کمینه‌های محلی و هم به کمینه مطلق دست یابد [20]. ولی به دلیل ویژگی تکاملی آن، بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها هنگام برخورد به کمینه محلی توقف نخواهد کرد، بلکه به جستجوی خود برای رسیدن به پاسخ بهتر ادامه می‌دهد. نخستین بار کوئرین [20] در پژوهش‌های خود، درستی ریاضی روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها را به عنوان یک روش منطقی بهینه‌سازی سازه‌ها به اثبات رساند.

1. Hemp
2. Rozvany
3. Mattheck
4. Additive Evolutionary Structural Optimization (AESO)

Archive of SID
www.SID.ir

۲-۱ الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها

روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها از اصولی بسیار ساده و پایدار[1] پیروی می‌کند. مراحل اجرای روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها به شرح زیر است [20]:

۱- ایجاد تقسیم‌بندی اجزای محدودی که تمام دامنه طراحی سازه را پوشش دهد.

۲- اعمال تمامی قیود مرزی سینماتیک، نیروها، مواد و خواص جزءها.

۳- تعیین معیار مورد استفاده برای بهینه‌سازی سازه، به عنوان نمونه تنش وان میسز.

٤- تعیین عامل محرک[2] بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها، مقدار بیشینه یا میانگین تنش وان میسز در دامنه طراحی.

۵- تحلیل اجزای محدود استاتیک سازه.

٦- اعمال نامساوی بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها، معادله ۱ و تعیین جزءهایی که در آن صدق می‌کنند. اگر جزئی این معادله را برآورده کند از دامنه طراحی سازه حذف می‌شود.

$$\sigma_e \le RR.\sigma_{v_{max}} \qquad (۱)$$

که در آن σ_e مقدار تنش وان میسز یا هر معیار انتخاب‌شده دیگری در جزء، $\sigma_{v_{max}}$ مقدار بیشینه تنش وان میسز یا هر معیار انتخاب‌شده دیگری در کل سازه و RR نسبت حذف[3]، که کاربرد آن میرا کردن و یا به تأخیر انداختن فرآیند حذف جزء است، می‌باشند. این نسبت با مقدارهای کوچکی شروع‌شده، به آرامی رشد می‌کند تا بدین وسیله اطمینان ایجاد شود که تنها تعداد اندکی جزء در هر تکرار حذف می‌شوند و دامنه طراحی حاصل از هر تکرار تفاوت بسیار زیادی نسبت به تکرار پیشین ندارد.

۲-۲- بهینه‌سازی تکاملی دو جهتی سازه‌ها

یکی از ایراداتی که به روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌های سنتی وارد می‌شود این است که در این روش اگر جزئی حذف شود، قابلیت بازگشت دوباره به ساختار سازه را نخواهد داشت. درحالی‌که ممکن است به جزء حذف‌شده در مراحل بعد دوباره نیازمند باشد. به منظور برطرف نمودن این اشکال، روش جدیدی به نام بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با راهبرد دو جهتی[4] ارائه شد. در این روش اجازه داده می‌شود که جزءهای حذف‌شده در صورت نیاز به ساختار سازه بازگردند. بهینه‌سازی تکاملی سازه‌های دو جهتی همچنین می‌تواند به منظور بررسی اینکه آیا بهینه‌سازی تکاملی سازه‌های سنتی جزءها را پیش از موعد از سازه حذف می‌کند نیز به کار گرفته شود.

۳- کاربرد بهینه‌سازی تکاملی دو جهتی سازه‌ها در تحلیل سازه‌های غیرخطی

در ادامه برای اثبات کارایی و توانایی روش‌های بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها و بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با راهبرد دو جهتی در حل مسائل بهینه‌سازی، این روش به چند سازه نمونه در حالت الاستیک خطی و حالت‌های غیرخطی هندسی و غیرخطی مادی با معیار سفتی اعمال شده و با نتیجه‌های به دست آمده از پژوهش‌های مختلف مقایسه شده است. در نمونه‌های زیر هدف، بیشینه سازی سفتی سازه است و حجم سازه به عنوان قید در نظر گرفته شده است به گونه‌ای که با رسیدن حجم سازه به مقدار تعیین‌شده (مثلاً ۵۰ درصد حجم اولیه) برنامه متوقف می‌شود. از نرم‌افزار انسیس ۱۲/۱ برای تحلیل اجزاء محدود سازه‌ها و از محیط نرم‌افزار متلب[5] برای برنامه‌نویسی بهینه‌سازی سازه‌ها استفاده‌شده است.

۳-۱- تحلیل سازه غیرخطی هندسی

این نمونه بهینه‌سازی سفتی یک تیر یک سر گیردار بوهل [21] تحت بار متمرکز است (شکل ۱). در این نمونه از سازه‌ای با ابعاد طول ۱ متر عرض ۰/۲۵ متر و ضخامت ۰/۱ متر استفاده شده است. یک طرف تیر کاملاً مقید شده و طرف دیگر آن آزاد است و بار ٦۰ کیلو نیوتنی را تحمل می‌کند.

1. Robust
2. Driving parameter
3. Rejection Ratio
4. Bidirectional ESO
5 . MATLAB

Archive of SID
www.SID.ir

شکل (۱) حوزه طراحی، شرایط مرزی و بارگذاری تیر یک سر گیردار

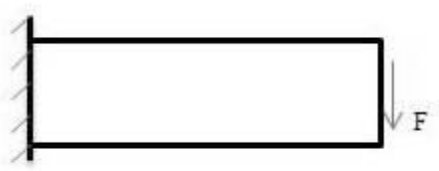

Fig. 1. Design domain, boundary condition, and loading for cantilever beam

فرض شده است جزءها فقط می‌توانند از ۵۰٪ حوزه طراحی حذف شوند. تعداد جزءها در راستای طول تیر ۱۰۰ و در راستای عرض تیر ۳۰ جزء است. همچنین از جزءهای چهارگوش ٤٩[1] برای تحلیل تیر استفاده‌شده است. مقدارهای مدول الاستیسیته خطی و ضریب پواسون به ترتیب ۳ گیگاپاسکال و ۰/٤ در نظر گرفته شده است. ماده الاستیک خطی و عامل‌های بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با راهبرد دو جهتی به ترتیب عبارت‌اند از ٪۱ =ER و ٪۱ = AR_{max}، خطا ٪۱ لحاظ شده است. شرایط غیرخطی هندسی سازه بدین صورت تعیین‌شده است که برای نیروی ٦۰ کیلونیوتنی تعداد ۱۰ زیر بازه در نظر گرفته شده است و زمان در پایان بارگذاری اول 10^{-7} ثانیه و زمان در پایان بارگذاری دوم ۱/۵ ثانیه تعیین‌شده است. برای اطمینان از اینکه در هر تکرار تعداد محدودی جزء اضافه می‌شوند، AR_{max}، نسبت اضافه حجمی بیشینه[2] تعریف می‌شود.

اگر این نمونه با استفاده از تحلیل جزء محدود خطی انجام گیرد شکل بهینه وابسته به شدت بارگذاری نخواهد بود. ابتدا بهینه‌سازی توپولوژی تیر با استفاده از تحلیل جزء محدود خطی برای پیدا کردن طرح بهینه خطی انجام‌شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود توپولوژی طرح بهینه خطی متقارن است (شکل ۲). تغییر مکان سازه در شکل (۳) طرح بهینه خطی را نشان می‌دهد.

شکل (۲) توپولوژی بهینه تحلیل خطی

Fig. 2. Optimum topology using linear analysis

شکل (۳) تغییر مکان سازه در طرح بهینه خطی

Fig. 3. Optimum design displacement using linear analysis

طرح بهینه غیرخطی به دست آمده از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با راهبرد دو جهتی با استفاده از تحلیل جزء محدود غیرخطی هندسی در شکل (٤) نشان داده‌شده است. همان گونه که در شکل‌های (۲ و ٤) مشاهده می‌شود طرح‌های بهینه با استفاده از تحلیل خطی و غیرخطی کاملاً متفاوت است. با استفاده از تحلیل جزء محدود غیرخطی هندسی، سازه بهینه غیر متقارن شده است. شکل (۷) تغییر مکان سازه در طرح بهینه غیرخطی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشهود است توپولوژی‌های بهینه برای سازه‌هایی که تحت تغییر شکل زیاد است به شدت بارگذاری بسیار وابسته است.

شکل (٤) طرح بهینه غیرخطی

Fig. 4. Optimum design using nonlinear analysis

شکل (۵) تغییر مکان سازه در طرح بهینه غیرخطی

Fig. 5. Displacement of the optimum structure using nonlinear analysis

برای پیدا کردن اینکه کدام طرح بهتر است کار مکمل با استفاده از تحلیل جزء محدود برای هر دو حالت طرح‌های خطی و غیرخطی محاسبه شده است. نتیجه‌ها در جدول (۱) نشان داده‌شده است. در جدول (۱) همچنین نتایج به دست آمده از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با راهبرد دو جهتی با روش مواد جامد ایزوتروپیک با تابع جریمه برای چگالی‌های متوسط[3] مقایسه شده است. نکته‌ای که کاملاً بارز است این است که طرح‌های روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با راهبرد

1 . quad 49

2. Prescribed maximum volume addition ratio

3. Solid Isotropic Material with Penalization for intermediate densities(SIMP)

Archive of SID
www.SID.ir

دو جهتی کار مکمل کمتری دارند اگرچه توپولوژی بهینه در این دو روش بسیار مشابه است.

جدول (۱) مقایسه کار مکمل

	Complementry work (kJ)
Linearly designed using Bi-directional evolutionary structural optimization	2.175
Nonlinearly designed using Bi-directional evolutionary structural optimization	2.170
Nonlinearly designed using SIMP [20]	2.331

Table 1. Comparison of complementary work

۳-۲- تحلیل غیرخطی وابسته به ماده

در این نمونه بهینه‌سازی سفتی صفحه‌ای که در شکل (٦) نشان داده‌شده در نظر گرفته شده است. ابعاد صفحه مورد مطالعه ۲×۲×۰/۰۱ متر و بار ۲۰ کیلو نیوتونی در صفحه و به مرکز صفحه اعمال شده است.

شکل (٦) حوزه طراحی، شرایط مرزی و بارگذاری صفحه برای سازه غیرخطی مادی

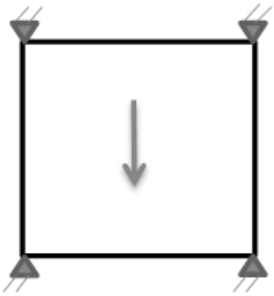

Fig. 6. Design domain, boundary condition, and loading for plate with material nonlinearity

مدل دارای ویژگی‌های الاستیک–پلاستیک دراکر–پراگر[1] با زاویه شکست ٤٠ درجه و زاویه تأخیر ٤٠ درجه است و همچنین دارای تنش تسلیم ٤٠ مگاپاسکال و مدول یانگ ۲۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ است. فرض شده است فقط ۲۰٪ حجم سازه در طرح پایانی باقی بماند. تعداد جزءها در طول و عرض صفحه ٤٠ جزء در نظر گرفته شده است. برای عامل‌های بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با راهبرد دو جهتی مقدارهای ER و AR_{max}، ۲٪

1 . Drucker-Prager

انتخاب شده است. برای نشان دادن اختلاف بین طرح خطی و طرح الاستوپلاستیک، ابتدا مسئله با استفاده از تحلیل جزء محدود خطی حل شده است و نتیجه‌های طرح بهینه در شکل (۷) نشان داده شده است. از آنجایی که ماده دارای ویژگی‌های خطی است هندسه بهینه به دست آمده همان‌گونه که در شکل (۹) نشان می‌دهد از خود رفتار خطی نشان می‌دهد.

شکل (۷) شکل بهینه حاصل از تحلیل خطی

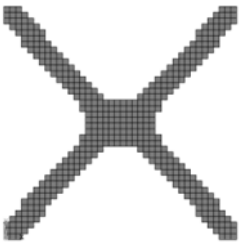

Fig. 7. Optimum shape using linear analysis

زمانی که این مسئله با استفاده از تحلیل جزء محدود غیرخطی وابسته به ماده تحلیل‌شده است، همان‌گونه که در شکل (۸) نشان داده‌شده است توپولوژی بهینه متفاوتی به دست آمده است.

شکل (۸) شکل بهینه تحلیل غیرخطی

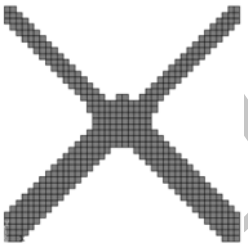

Fig. 8. Optimum shape using nonlinear analysis

زمانی که تحلیل جزء محدود برای هر دو حالت طرح‌های خطی و غیرخطی به کار گرفته شد، مقدار کار مکمل و انحراف نهایی به ترتیب ۱۱,۳۳ ژول و ۰/۹٤ میلی‌متر برای طرح خطی و مقدارهای ٦/۹۵ ژول و ۰/۷۸ میلی‌متر برای طرح غیرخطی به دست آمد که این مسئله نشان می‌دهد که طرح غیرخطی بسیار محکم‌تر و سفت‌تر از طرح خطی است. تغییرات کار مکمل و حجم سازه را در تحلیل غیرخطی در طول فرایند نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود مقدار کار مکمل در مقدار ثابت ٦/۹۵ ژول همگرا شده است همچنین حجم توپولوژی از مقدار ۱ مترمکعب به مقدار ۰/۲۰ مترمکعب کاهش پیداکرده و در تکرارهای پایانی در این مقدار

Archive of SID
www.SID.ir

همگرا شده است که کاهش ۸۰ درصدی حجم سازه را نشان می‌دهد. تغییر مکان سازه در طرح بهینه غیرخطی را شکل (۱۲) نشان می‌دهد.

٤- کاربرد تحلیل غیرخطی در بهینه‌سازی شکل سازه‌ها

در این بخش دو نمونه با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها تحلیل شده و دقت و کارایی روش آن برای مسائل غیرخطی نشان داده شده است. با نوشتن برنامه به زبان برنامه‌نویسی پارامتریک نرم‌افزار انسیس[1] مدل‌سازی، تحلیل جزء محدود و بهینه‌سازی سازه انجام شده است. از منحنی اسپلاین[2] برای مدل‌سازی مرز قسمت مطالعه استفاده شده است. هدف به دست آوردن شکل بهینه سازه است با حذف تمرکز تنش به گونه‌ای که فاکتور تمرکز تنش کمترین مقدار خود را داشته باشد. الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها پیاده‌سازی شده و روی سازه‌های مختلفی همچون صفحات سوراخ دار و انواع فیلت‌ها اعمال‌شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد این الگوریتم‌ها تا حد زیادی می‌توانند اهداف ما در بهینه‌سازی شکل سازه‌ها ازجمله یکنواختی تنش و نیز کاهش مواد مصرفی را برآورده سازند.

٤-١- الگوریتم به کار گرفته‌شده

تنش در تمام قسمت‌های سازه باید یکنواخت باشد. این مفهوم به معیاری برای اصلاح شکل هندسی منجر می‌شود. رویکرد اصلی روش حذف مواد ناکارآمد از سازه در یک فرایند تکاملی است. با حذف تدریجی مصالح ناکارآمد سازه‌ای با توزیع یکنواخت تنش به وجود می‌آید. روش استفاده در این پژوهش مشابه رویکرد بهینه‌سازی تکاملی سازه‌هاست با این تفاوت که به جای حذف جزءهای ناکارآمد از سازه، نقاط کلیدی روی مرز سازه در نظر گرفته شده و الگوریتم تعریف شده نقاط کلیدی را روی مرز سازه جابه‌جا می‌کند. چگونگی حرکت نقاط کلیدی در مرز سازه را شکل (۹) برای سازه‌های مختلف نشان می‌دهد که P_i نقطه کلیدی و d_i مقدار مسافتی است که نقاط کلیدی بر روی مرز سازه حرکت می‌کنند.

شکل (۹) چگونگی تغییر مکان نقاط کلیدی روی مرز سازه

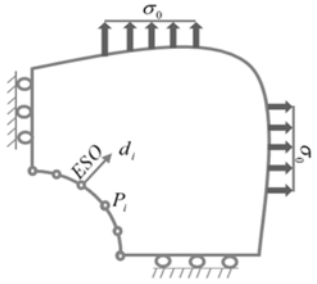

Fig. 9. Key points displacements along the structural boundary

برای روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها مقدار d_i با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$d_i = C\left|\frac{\sigma_{max} - \sigma_i}{\sigma_{max}}\right| \qquad (۲)$$

که σ_{max} بیشینه تنش در مرز مطالعه شده و σ_i مقدارهای تنش در هر یک از نقاط کلیدی است. در این معادله C مقدار ثابتی بین ۰/۰۰۱- و ۰/۰۰۰۱ دارد. معادله ۲ نشان می‌دهد مقدار تغییر مکان نقاط کلیدی مرتبط با اختلاف تنش هر نقطه کلیدی با تنش بیشینه است. مشهود است که مقدار بزرگ‌تر C تغییر مکان بیشتر نقاط کلیدی را سبب می‌شود. باید توجه شود که C با دقت انتخاب شود. افزایش بیش از اندازه آن باعث افزایش تنش بیشینه در تکرار بعدی خواهد شد و در نتیجه واگرایی فرایند بهینه‌سازی را سبب می‌شود.

رویکرد اصلی روش بهینه‌سازی شامل مراحل زیر است:

۱. ایجاد مدل هندسی و شبکه‌بندی مدل
۲. تعین عامل‌های غیرخطی مادی مانند تنش تسلیم، غیرخطی هندسی مانند تعداد زیر بازه نیرو و زمان اعمال نیرو
۳. تحلیل اجزای محدود و به دست آوردن تنش در مرز سازه مطالعه شده
٤. مقایسه تنش در نقاط کلیدی با تنش بیشینه در مرز سوراخ
٥. تغییر مکان نقاط کنترلی مورد نظر طبق رابطه ٤
٦. همگرایی بهینه‌سازی: در این مرحله عامل Cv که معیاری برای یکنواختی و بهبود تنش محسوب می‌شود، به صورت معادله زیر تعریف می‌شود.

$$Cv = \left|\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}}\right| \qquad (۳)$$

1. ANSYS Parametric Design Language
2 . Spline Curve

Archive of SID
www.SID.ir

که در این معادله σ_{max} و σ_{min} مقدارهای تنش‌های بیشینه و کمینه در تمام مرز مطالعه شده است.

۷. اگر مقدار $Cv_i - Cv_{i-1} > 0$ باشد، مقدار C در عدد ۰/۹۵ ضرب می‌شود. این مرحله برای بازیابی تغییر مکان نقاط کلیدی در صورت واگرایی است.

تکرار فرایند ۲ تا ۷ تا در نهایت مقدار همگرایی Cv_i از دقت بهینه‌سازی کمتر شود.

۲-۴- بهینه‌سازی غیرخطی صفحه مربعی با سوراخ دایروی

سازه مورد مطالعه یک صفحه مربعی دو بعدی دارای سوراخ مرکزی دایروی که از دو طرف تحت بارگذاری نامتقارن قرار دارد در نظر گرفته شده است. صفحه مربعی با طول ضلع ۴۰۰ میلی‌متر و ضخامت ثابت ٤ میلی‌متر و سوراخ دایروی به قطر ٤۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به سبب تقارن یک چهارم صفحه مدل‌سازی شده است. شکل‌های (۱۰ و ۱۱) مدل‌سازی و شبکه‌بندی صفحه مربعی را نشان می‌دهد.

شکل (۱۰) صفحه سوراخ دار تحت تنش دو محوره

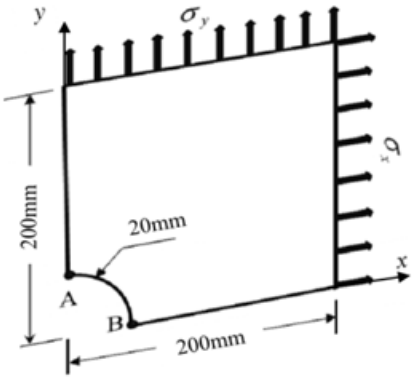

Fig. 10. Plate with a circular hole under 2D stresses

شکل (۱۱) مدل جزء محدود صفحه مربعی با سوراخ دایروی

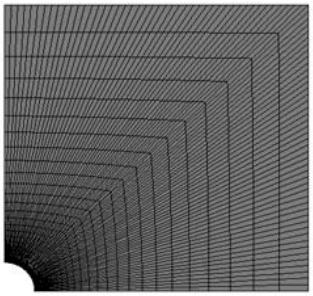

Fig. 11. Finite element model of the plate with a circular hole

مدول یانگ و ضریب پواسون به ترتیب ۲۱۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. عامل‌های تحلیل غیرخطی مانند تنش تسلیم ۱۰۰ مگاپاسکال و مدول برشی ۰/۲ برابر مدول یانگ انتخاب شده است. شکل (۱۲) نمودار تنش-کرنش سازه مطالعه شده را نشان می‌دهد. عامل‌های غیرخطی هندسی شامل زمان در پایان بارگذاری اول 10^{-7} و زمان در پایان بارگذاری دوم ۱/۵ و تعداد زیر بازه ۱۰ در نظر گرفته شده است.

شکل (۱۳) نمودار تنش و کرنش ماده

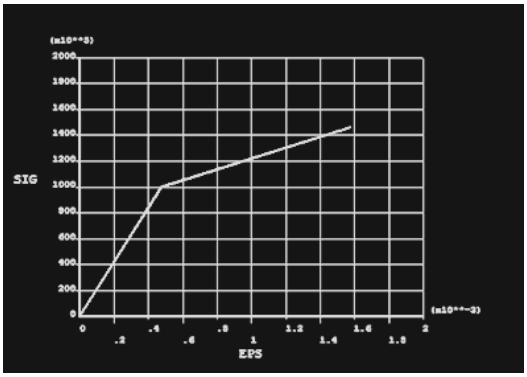

Fig. 12. Stress-strain diagram of the material

تنش بیشینه در سوراخ اولیه ۱٦۱ مگاپاسکال است. بر مبنای الگوریتم به کار گرفته شده در این مقاله از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها برای بهینه‌سازی شکل سوراخ استفاده شده است. در شکل (۱۳) توزیع تنش وان میسز با استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها و استفاده از تحلیل غیرخطی نشان داده‌شده است که تنش بیشینه از مقدار ۱٦۱ مگاپاسکال به مقدار ۱۱۵ مگاپاسکال کاهش یافته است. در شکل (۱٤) توزیع نرمال تنش بیشینه در حالت اولیه و بهینه در مرز سوراخ نشان داده‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تنش در مرز سازه در مقدار ۱۱۵ مگاپاسکال ثابت شده و توزیع تنش در مرز سازه کاملاً یکنواخت شده است. جدول (۲) مقایسه نتیجه‌های به دست آمده با استفاده از تحلیل خطی و غیرخطی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان کاهش تنش بیشینه با استفاده از روش رشد بیولوژیکی [1]٪۳۹ و با استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها، ۲۸٪ است که در این روش از تحلیل غیرخطی استفاده‌شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

شکل (۲۳) توزیع تنش وان میسز در سوراخ بهینه با استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها و تحلیل غیرخطی

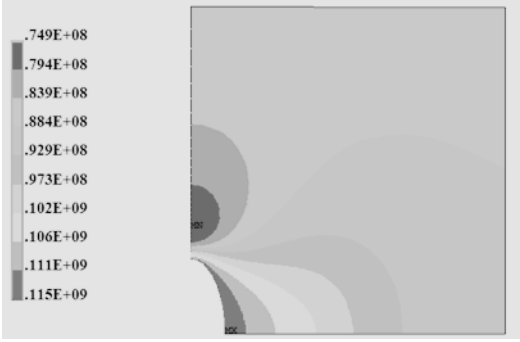

Fig. 13. von Mises stress distribution over the optimized hole using evolutionary structural optimization and nonlinear analysis

شکل (۱٤) توزیع نرمال تنش در سازه در حالت اولیه و بهینه

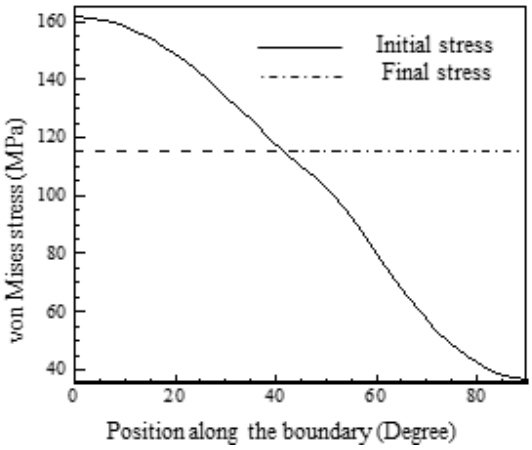

Fig. 14. Normalized stress distribution in initial and optimum structure

جدول(۲) مقایسه نتیجه‌های به دست آمده در تحلیل خطی و غیرخطی

روش رشد بیولوژیکی [۲۲]	تحلیل خطی (MPa)	تحلیل غیرخطی (MPa)	
۲۵٦	۲۵٦	۱٦۱	**تنش وان میسز در حالت اولیه**
۱۵۵	۱۵۳	۱۱۵	**تنش وان میسز در حالت بهینه**
٪۳۹	٪٤۰	٪۲۸	درصد کاهش تنش

Table (2) Comparison of the linear and nonlinear analysis

۵- نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها در حالت‌های غیرخطی هندسی، غیرخطی مادی (الاستوپلاستیک) و ترکیب این دو است. مقدار کار انجام شده به عنوان تابع هدف مورد بحث قرارگرفته و سفتی سازه به عنوان فاکتور بهینه‌سازی انتخاب‌شده است. کارایی روش‌های بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها و بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با راهبرد دو جهتی با به کار بردن آن‌ها روی چند مسئله بهینه‌سازی ثابت‌شده و نتایج به دست آمده با نتایج به دست آمده با روش مواد جامد ایزوتروپیک با تابع جریمه برای چگالی‌های متوسط و روش‌های بهینه‌سازی دیگر مقایسه شده است. همچنین در این پژوهش تحلیل غیرخطی با روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها در بهینه‌سازی شکل سازه‌ها نیز استفاده شد. در این مطالعه به جای حذف و اضافه کردن جزء ها، نقاط کلیدی روی مرز سازه تعریف‌شده و عملیات بهینه‌سازی روی این نقاط انجام می‌شود. در بهینه‌سازی شکل با استفاده از بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها مواد به قسمت‌هایی از مرز سازه که تنش بالایی دارند اضافه می‌شود و از قسمت‌هایی از مرز سازه که تنش پایینی دارند و یا به عبارتی ناکارآمد هستند حذف می‌شود. یافته‌های این پژوهش عبارت‌اند از:

۱) استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها با راهبرد دو جهتی در تحلیل غیرخطی سازه‌ها نشان می‌دهد این روش یک روش کارا و مؤثر برای رسیدن به ساختار بهینه است و از آنجا که معیار در این پژوهش سفتی سازه است در تحلیل غیرخطی نسبت به تحلیل خطی طرح بهینه با سفتی بیشتر به دست می‌آید.

۲) به کار بردن بهینه‌سازی شکل با روش بهینه‌سازی تکاملی سازه‌ها منجر به یکنواخت شدن تنش در مرز سازه شده در نتیجه با حذف تمرکز تنش در مرز باعث افزایش کارآمدی سازه شده و باعث بهبود رفتار سازه تحت بارگذاری‌های مختلف خواهد شد.

۳) استفاده از بهینه‌سازی شکل در تحلیل غیرخطی مرز سازه نشان می‌دهد سوراخ‌های دایروی و لوزی به سمت بیضی میل می‌کند.

٤) از آن جایی که مقدار مواد مصرفی از فاکتورهای مؤثر در هزینه‌های تولیدی است کاربرد این الگوریتم‌ها در سازه‌های مختلف نشان می‌دهد که می‌توان حجم سازه‌ها را به مقدار

Archive of SID
www.SID.ir

زیادی کاهش داد به گونه‌ای که عملکرد سازه قابل‌قبول باشد.

۵) در تحلیل غیرخطی نسبت به حالت خطی زمان حل مدل اجزاء محدود افزایش می‌یابد.

۶) نتیجه‌های عددی نشان می‌دهد که طرح‌های بهینه به دست آمده از تحلیل‌های غیرخطی هندسی و مادی و ترکیب آن‌ها هر یک به نوبه خود می‌تواند منجر به افزایش راندمان سازه شود.

۶- مراجع RERERENCES

1. Rozvany, G.I.N., *Topological optimization of grillages: Past controversies and new directions.* International Journal of Mechanical Sciences, 1994. **36**(6): p. 495-512.
2. Hemp, W.S., *Optimum structures.* Oxford university press, 1973.
3. Mattheck, C., S. Burkhardt, and D. Erb, *Shape Optimization of Engineering Components by Adaptive Biological Growth*, in *Engineering Optimization in Design Processes*, H. Eschenauer, C. Mattheck, and N. Olhoff, Editors. 1991, Springer Berlin Heidelberg. p. 15-24.
4. Mattheck, C. and S. Burkhardt, *A new method of structural shape optimization based on biological growth.* International Journal of Fatigue, 1990. **12**(3): p. 185-190.
5. Xie, Y.M. and G.P. Steven, *A simple evolutionary procedure for structural optimization.* Computers & Structures, 1993. **49**(5): p. 885-896.
6. Chu, D.N., et al., *Evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints.* Finite Elements in Analysis and Design, 1996. **21**(4): p. 239-251.
7. Manickarajah, D., Y.M. Xie, and G.P. Steven, *Simple method for the optimization of columns, frames and plates against buckling.* in: S.Kitipornchai, G.J. Hancock, M.A. Bradford (Eds.), Structural Stability and Design, A.A. Balkema Publishers, Rotterman, Brookfield, , 1995: p. 80-175.
8. Zhao, C., G.P. Steven, and Y.M. Xie, *Evolutionary natural frequency optimization of thin plate bending vibration problems.* Structural optimization, 1996. **11**(3-4): p. 244-251.
9. Xie, Y.M. and G.P. Steven, *Optimal design of multiple load cae structures using an evolutionary procedure.* Engineering Computations, 1994. **11**: p. 295-302.
10. Xie, Y.M. and G.P. Steven, *Evolutionary structural optimization for dynamic problems.* Computers & Structures, 1996. **58**(6): p. 1067-1073.
11. Haiba, M., et al., *Evolutionary structural optimisation of dynamically loaded components in consideration of fatigue life.* Advances in Engineering Software, 2005. **36**(1): p. 49-57.
12. Querin, O.M., G.P. Steven, and Y.M. Xie, *Evolutionary structural optimisation using an additive algorithm.* Finite Elements in Analysis and Design, 2000. **34**(3–4): p. 291-308.
13. Young, V., *Bi-directional evolutionary structural optimization (BESO): 2-D & 3-D.* BSc dissertation, department of Aeronautical engineering, university of Sydney, Australia, 1997.
14. Neves, M.M., H. Rodrigues, and J.M. Guedes, *Generalized topology design of structures with a buckling load criterion.* Structural optimization, 1995. **10**(2): p. 71-78.
15. Taylor, J.E. and J. Logo, *Analysis and Design of Elastic/Softening Truss Structures Based on a Mixed-Form Extremum Principle*, in *Optimization of Large Structural Systems*, G.I.N. Rozvany, Editor. 1993, Springer Netherlands. p. 683-695.
16. Taylor, J.E., *Truss Topology Design for Elastic/Softening Materials*, in *Topology Design of Structures*, M.P. Bendsøe and C.M. Soares, Editors. 1993, Springer Netherlands. p. 451-467.
17. Yuge, K. and N. Kikuchi, *Optimization of a frame structure subjected to a plastic deformation.* Structural optimization, 1995. **10**(3-4): p. 197-208.
18. Burczyński, T. and W. Kus, *Distributed evolutionary algorithms in shape optimization of nonlinear structures*, in *Parallel Processing and Applied Mathematics*. 2001, Springer. p. 477-484.
19. Huang, X. and Y.M. Xie, *Optimal design of periodic structures using evolutionary topology optimization.* Structural and Multidisciplinary Optimization, 2008.
20. Querin, O.M., *Evolutionary structural optimization: stress based formulation & implementation.* PhD Dissertation,Department of Aeronautical Engineering, University of Sydney, Australia, 1997.
21. Buhl, T., C.B.W. Pedersen, and O. Sigmund, *Stiffness design of geometrically nonlinear structures using topology optimization.* Structural and Multidisciplinary Optimization, 2000. **19**(2): p. 93-104.
22. Jazayeri, S.M.H. and M.H. Abolbashari, *Development of Robust Optimization Algorithms Based on Adaptive Biological Growth Method.* JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, 2014: p. 25(2): p. 17-30.

Archive of SID

www.SID.ir

Optimization of form and topology of Nonlinear Continuous Structures Using Evolutionary Structural Optimization (ESO)

Yasser Alavinia[1], Mohammad Hossein Abolbashari [2*]

1. MS.c., Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran,
2. Prof., Department of Mechanical Engineering, Lean Production Engineering Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

abolbash@um.ac.ir

Abstract:

Evolutionary structural optimization (ESO) is based on the simple concept of systematically removing inefficient elements from the structure after each finite element analysis, so that the obtained design is gradually evolved to an optimum. The bidirectional evolutionary structural optimization (BESO) method is a new version of the ESO method in which simultaneous removing and adding elements is allowed. The procedures of removing and adding elements are performed using various criteria. Due to the importance of nonlinear structural analysis, in this study the BESO approach is used. The nonlinearity is assumed for the geometry, material, and for both geometry and material. In the first example, the BESO is applied to maximize the stiffness of a cantilever beam with a time dependent loading. The complementary work for the optimized shapes are compared. It is concluded that using BESO results in a more optimized shape. Optimized shapes for this case were obtained from linear and nonlinear analysis using BESO, and nonlinear analysis using Solid Isotropic Material, with Penalization for intermediate densities (SIMP). In the next example, BESO is applied to optimize the stiffness of a plate with the material nonlinearity. The results show that the nonlinear analysis leads to a much stiffer design. In the third example, a cantilever beam with both material and geometry nonlinearity is considered. The beam is also to be optimized for stiffness. The optimized shapes are compared for linear and nonlinear analysis against the SIMP. The nonlinear analysis with BESO also results in a stiffer design.

Furthermore, the effectiveness of ESO is proved by applying them to some shape optimization problems. The aim is to find the best circular hole so that it possesses a lower stress concentration factor. Design boundary has been set with some control points, and optimization process is only applied to these points. A square plate with a circular hole at its center is optimized for minimizing the stress concentration. The obtained results for linear and nonlinear analysis using ESO are compared with the results obtained using the biological growth method. It is concluded that using ESO, the maximum stress concentration around the boundary of the hole can be significantly decreased with linear analysis and the ESO is a powerful alternative for the biological growth method. Results show that ESO has a superior capability for shape optimization of holes in nonlinear structures, and in this case maximum stress is reduced by 28%.

Keywords: Evolutionary Structural Optimization, Nonlinear Analysis, Shape optimization, Stiffness Maximization.

Archive of SID

www.SID.ir