



بهبود سفتی ماشین فرز با استفاده از بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی و توزیع ضخامت دیواره ستون

عزیز شکری، جواد اکبری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۱۶
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۰۴
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۹-۱۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۸

کلمات کلیدی:

خیز استاتیکی
پدیده تشدید
بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌ها
بهینه‌سازی توزیع ضخامت
تحلیل حساسیت

خلاصه: خیز استاتیکی مجموعه ماشین ابزار در اثر نیروهای بالای ماشین کاری و به تبع آن جابه‌جایی سر ابزار مهم‌ترین عامل کاهش دقت ابعادی قطعه کار می‌باشد. همچنین انطباق محدوده فرکانس کاری با فرکانس‌های طبیعی موجب پدیده نامطلوب تشدید و ابزار لرزه می‌شود. کاهش انرژی کرنشی ستون و به تبع آن کاهش جابه‌جایی سر ابزار و افزایش فرکانس طبیعی اول ماشین فرز عمودی، با توجه به انتخاب محدوده فرکانس کاری زیر فرکانس اول، تغییرات مطلوبی است که با بهینه‌سازی توزیع ضخامت دیواره ستون و آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی متصل به آن میسر است. در این مقاله روشی مستقیم مبتنی بر تحلیل حساسیت، برای بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌های متصل به سازه‌های صفحه‌ای و پوسته‌ای ارائه شده است که در هر مرحله از بهینه‌سازی، با ایجاد حلقه ارتباط بین نرم‌افزارهای متلب و آباکوس و بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده توسط حلگر اجزاء محدود آباکوس، تقویت‌کننده‌هایی که بیشترین تأثیر را در بهینه‌سازی تابع هدف دارند به فضای طراحی افزوده می‌شوند. پس از بهینه‌سازی توزیع ضخامت دیواره ستون با استفاده از ابزار بهینه‌سازی اندازه نرم‌افزار آباکوس، از روش ارائه‌شده برای بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی متصل به دیواره ستون استفاده شد. نهایتاً بدون افزایش وزن ستون، بیشینه جابه‌جایی ماشین فرز ۶/۹ درصد کاهش و فرکانس طبیعی اول آن ۱۶/۵ درصد افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

بیشتر شود حاشیه امنیت بیشتر می‌شود برای مثال، اگر محدوده فرکانس کاری زیر فرکانس اول باشد افزایش فرکانس طبیعی اول ماشین ابزار این امکان را فراهم می‌کند تا فرایند برش در دور اسپیندل بالاتری انجام شود؛ بنابراین، بدون شک سفتی و فرکانس طبیعی سازه یکی از اولویت‌ها در طراحی ماشین‌ابزارهای فوق دقیق و فوق سریع است که در این زمینه هدف اصلی افزایش سفتی و افزایش محدوده فرکانس کاری می‌باشد، به گونه‌ای که وزن اجزاء کاهش یابد یا ثابت بماند. تقویت‌کننده‌های داخلی از اجزای رایج در سازه ماشین‌ابزارها هستند که برای افزایش سفتی سازه به کار برده می‌شوند. معمولاً در ماشین‌های موجود استفاده از شکل‌هایی چون تیغه‌های متعام افقی و عمودی # و تیغه‌های ضربدری × رایج است که ممکن است بهترین راه‌حل برای تحقق الزامات سفتی، در سازه ماشین‌ابزارهای فوق دقیق و فوق سریع نباشند و آرایش نوآورانه چیدمان تقویت‌کننده‌ها بتواند موجب افزایش چشمگیری در سفتی سازه ماشین‌ابزارها شود؛ بنابراین

در دهه‌های اخیر تقاضا برای قطعات فوق دقیق به شدت افزایش یافته است و ماشین‌کاری یکی از مهم‌ترین فرایندهای تولید این قطعات است. نیروی مکانیکی تولید شده در فرایند برش توسط ابزار به سازه ماشین‌ابزار منتقل می‌شود، تنش‌های ایجاد شده در اثر این نیروی مکانیکی بسیار کمتر از آن است که قسمتی از سازه در خطر تسلیم یا شکست خستگی قرار گیرد و وظیفه اصلی سازه ماشین‌ابزارها مقاومت مؤثر در برابر این نیروی مکانیکی است تا اجزای مختلف تحت این نیرو بیش از اندازه جابه‌جا نشوند؛ بنابراین سفتی استاتیکی بالای سازه ماشین‌ابزار می‌تواند منجر به مقاومت بهتر در برابر جابه‌جایی و افزایش دقت قطعات تولیدی شود. علاوه بر این انطباق محدوده فرکانس کاری با فرکانس‌های طبیعی می‌تواند منجر به پدیده نامطلوب تشدید شود بنابراین هرچه فاصله فرکانس‌های طبیعی با محدود کاری

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: akbari@sharif.edu



چگونگی تعیین آرایش چیدمان تقویت‌کننده‌ها به یک مسأله مهم برای طراحان ماشین‌های ابزار تبدیل شده است.

برای حل مسأله طراحی چیدمان و آرایش تقویت‌کننده‌ها تلاش‌های زیادی به‌خصوص توسط روش‌های بهینه‌سازی هندسی انجام گرفته است. کیکوچی^۱ و بندسو^۲ روش بهینه‌سازی هندسی با استفاده از همگن‌سازی^۳ را معرفی کردند این روش شامل محاسبه توزیع بهینه در فضای یک ماده ناهمسانگرد^۴ است که با معرفی یک اینفیموم (بزرگ‌ترین کران پایین) از توزیع متناوب سوراخ‌های کوچک در ماده همگن^۵ و همسانگرد^۶ داده‌شده، تشکیل می‌شود؛ که ساختار حاصل ملزم به تحمل بارهای داده‌شده و همچنین برآورده کردن سایر نیازهای طراحی است [۱]. بر اساس روش بهینه‌سازی هندسی مبتنی بر همگن‌سازی، مطالعات بسیاری توسط محققین بعدی در زمینه بهینه‌سازی هندسه صفحه تقویت‌شده انجام شد. برای مثال کیکوچی و دیاز^۷ روشی برای یافتن شکل و هندسه سازه‌ها جهت بیشینه کردن فرکانس طبیعی ارائه کردند بدین منظور مسأله تقویت یک سازه دوبعدی را با استفاده از مقدار ماده مقرر، حل کردند [۲]. ژبو^۸ و لاو^۹ برای بهینه‌سازی طرح چیدمان تقویت‌کننده‌ها در سازه‌های پوسته‌ای و صفحه‌ای سه‌بعدی، با در نظر گرفتن جهت‌گیری و موقعیت تقویت‌کننده‌ها و با در نظر گرفتن سفتی استاتیکی و فرکانس طبیعی به عنوان تابع هدف روشی سامانمند معرفی کردند [۳ و ۴]. الهف^{۱۰} و کرگ^{۱۱} در مقاله خود به بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌های صفحه‌ای و دیسکی همراه با انواع تیغه‌های تقویت‌کننده داخلی، تحت بارگذاری استاتیکی یا ارتعاشات آزاد پرداختند [۵]. می‌توان گفت که بیشترین تلاش‌ها در زمینه بهینه‌سازی هندسی سازه‌های صفحه‌ای و پوسته‌ای در سال‌های گذشته با استفاده از روش بهینه‌سازی هندسی مبتنی بر همگن‌سازی انجام شده است. اما در کنار آن روش چگالی

- 1 Kikuchi
- 2 Bendsoe
- 3 Homogenization
- 4 Anisotropic
- 5 Homogeneous
- 6 Isotropic
- 7 Diaz
- 8 Gea
- 9 Lou
- 10 Olhoff
- 11 Krog

نیز وجود دارد که توسط چانگ^{۱۲} و یانگ^{۱۳} ارائه شد و بارها توسط محققان برای بهینه‌سازی هندسی مورد استفاده قرار گرفت در این روش چگالی (تراکم یا انباشتگی) ماده، به عنوان متغیر طراحی انتخاب می‌شود [۶]. علاوه بر این استیون^{۱۴} و ژی^{۱۵} روشی موسوم به بهینه‌سازی ساختاری تکاملی^{۱۶} برای طراحی شکل و هندسه سازه‌ها معرفی کردند در طول فرایند تکاملی قسمت‌هایی از ماده که تنش کمتری تحمل می‌کنند به تدریج از ناحیه طراحی حذف می‌شوند و موادی که وجود آن‌ها برای سازه بحرانی‌تر است در ناحیه طراحی باقی می‌ماند [۷]. روش بهینه‌سازی تکاملی تنها قادر به حذف مواد ناکارآمد از فضای طراحی است و نمی‌تواند در صورت نیاز به فضای طراحی ماده اضافه کند. برای رفع این نقص استیون و کورین^{۱۷} روش بهینه‌سازی ساختاری تکاملی دوطرفه را ارائه کردند که قادر به حذف و اضافه کردن مواد در فضای طراحی است [۸].

در تمام پژوهش‌های قبل مسأله طراحی چیدمان تقویت‌کننده‌ها به مسأله توزیع مطلوب ماده تبدیل شده است، این روش‌ها به دنبال یافتن قسمت‌های از ماده هستند که با وجود حذف آن‌ها، قسمت‌های باقیمانده ماده همچنان الزامات مکانیکی سازه را رعایت کنند. در واقع قسمت‌هایی از ماده که در خصوصیات مکانیکی سازه نقش کمتری دارند از فضای طراحی حذف می‌شوند و ماده باقی‌مانده به‌عنوان طرح اولیه تقویت‌کننده‌ها و نه طرح نهایی محسوب می‌شود. از آنجاکه نتایج این روش‌ها برای طرح تقویت‌کننده‌ها مبهم است و جایگاه و جهت تقویت‌کننده‌ها به‌طور واضح مشخص نیست و به‌خصوص در سازه‌های سه‌بعدی و مواردی که مقدار تقویت‌کننده‌ها بسیار زیاد است، استفاده از این روش‌ها برای تعیین آرایش نهایی تقویت‌کننده‌ها نیازمند پس پردازش است. لذا برای رسیدن به طرح مناسب برای چیدمان تقویت‌کننده‌ها، لازم است با تفکری معکوس روشی توسعه داد که بهینه‌سازی با معیار کاهش ماده را شکست دهد. بدین منظور نخستین بار دینگ^{۱۸} و یامازاکی^{۱۹} با الهام از نظام شاخه‌ای در طبیعت و با معرفی مدل درخت شاخه‌ای در حال رشد، روشی مستقیم

- 12 Chuang
- 13 Yang
- 14 Steven
- 15 Xie
- 16 Evolutionary Structural Optimization Method (ESO)
- 17 Querin
- 18 Ding
- 19 Yamazaki

۲- در مراحل ابتدایی بهینه‌سازی تنها تقویت‌کننده‌هایی می‌توانند در صفحه رشد کنند که نزدیک نقطه جوانه‌زنی باشند و شاید افزودن تقویت‌کننده به قسمت‌هایی از سازه بتواند تأثیر بیشتری بر خواص مکانیکی سازه داشته باشد که به علت فاصله از نقاط جوانه‌زنی نمی‌توانند در رقابت رشد شرکت کنند.

۳- الگوریتم ارائه شده در این مقالات منجر به شکل‌های پیچیده می‌شود که عملیات ساخت را مشکل می‌سازد.

لذا در این مقاله روشی با معیار افزایش ماده پیشنهاد شد که هیچ‌گونه نیازی به تعیین نقطه آغاز برای اضافه شدن تقویت‌کننده‌ها ندارد. علاوه بر این، با تعریف مفهوم رشد گروهی تقویت‌کننده‌ها از ایجاد پیچ‌وخم‌های بیش‌ازحد در طرح تقویت‌کننده‌ها ممانعت شد که این امر منجر به تسهیل عملیات ساخت می‌شود. این روش در قسمت دوم مقاله همراه با حل یک مثال ساده به تفصیل بیان شده است و در قسمت سوم از روش ارائه شده برای بازطراحی تقویت‌کننده‌های داخلی ستون یک ماشین فرز عمودی استفاده شده است.

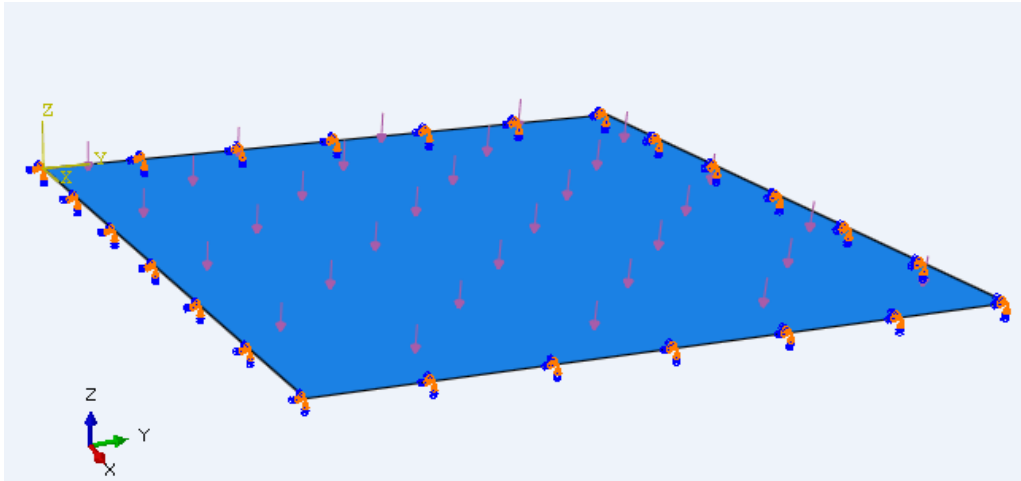
۲- روش بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌های متصل به صفحه یا پوسته

هدف این پژوهش ارائه روشی سامانمند برای رشد بهینه تقویت‌کننده‌ها در سازه‌های پوسته‌ای است. برای توضیح بهتر روش ارائه شده از حل یک مثال بسیار ساده استفاده شده است. صفحه مربعی به ضلع ۱۰۰ میلی‌متر و با ضخامت ۵ میلی‌متر که تمام درجات آزادی هر چهار ضلع آن بسته شده است و تحت بارگذاری استاتیکی یکنواخت فشاری همانند شکل ۱ قرار گرفته، مفروض است. هدف یافتن بهترین چیدمان برای تقویت‌کننده‌هایی به ضخامت ۵ و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر است به طوری که بیشترین بهبود را در سفتی صفحه داشته باشد. مرحله اول روش، مدل‌سازی با استفاده از المان‌های مناسب است. از آنجاکه در صفحه یا پوسته ضخامت در مقایسه با طول و عرض بسیار کوچک‌تر است، در این روش برای گسسته‌سازی صفحه‌ها یا پوسته‌ها از المان‌های پوسته چهار گرهی استفاده شده است. ابعاد سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها در مقایسه با طول آن‌ها بسیار کوچک‌تر است و با توجه به اینکه اگر نسبت ابعاد سطح مقطع به طول تقویت‌کننده‌ها از ۱/۸ کوچک‌تر باشد استفاده از تئوری تیر انعطاف‌پذیر برشی (تیموشنکو) منجر به نتایج مفید می‌شود [۱۴]، برای گسسته

برای بهینه‌سازی هندسی، برای تولید طرح الگوی تقویت‌کننده‌ها در سازه‌های صفحه‌ای پیشنهاد کردند [۹]. تکنیک رشد با رشد تقویت‌کننده‌های کوچک زمینه در اطراف نقاط جوانه‌زنی تعیین شده آغاز می‌شود و با رعایت قوانین رشد و انشعاب مانند درختان، گسترش می‌یابد. در مدل درخت شاخه‌ای در حال رشد برخلاف روش‌های قبلی، معیار افزایش تقویت‌کننده‌ها بر روی ساختارهای پوسته‌ای است. لی^۱ و همکاران مدل ارائه شده توسط دینگ را توسعه دادند [۱۰ و ۱۱]. لی با این نقد که الگوریتم رشد ارائه شده توسط دینگ تنها برای رشد تقویت‌کننده‌ها در یک ناحیه مانند یک صفحه دوبعدی با تکیه‌گاه ساده مناسب است و در صورت استفاده برای یک سازه سه‌بعدی متشکل از چند صفحه، الزاماً به طرح بهینه کلی منجر نمی‌شود، برای حل این مشکل مفهوم بهینه‌سازی کلی را به الگوریتم رشد اضافه کرد که روش جدید قابلیت رشد تقویت‌کننده‌ها، در چند گروه و ناحیه جداگانه را دارد بدین ترتیب که در هر گام بهینه‌سازی، ابتدا سهم هر گروه از افزایش ماده مشخص می‌شود و سپس الگوریتم رشد در هر گروه به صورت جداگانه انجام می‌شود. لی و همکاران در کار بعدی خود با استفاده از این روش برای کمینه کردن انرژی کرنشی کل سازه و بیشینه کردن فرکانس طبیعی اول هم‌زمان با کاهش وزن، به بهینه‌سازی هندسی ستون ماشین سنگ‌زنی پرداختند [۱۲]. یان^۲ و همکاران برای یافتن چیدمان تقویت‌کننده‌ها در داخل تخت ماشین سنگ‌زنی، با هدف کمینه کردن بزرگ‌ترین جابه‌جایی، الگوریتم رشد تطبیقی را توسعه دادند [۱۳]. نتایج ارائه شده در مقالات فوق‌الذکر گویای آن است که استفاده از الگوریتم رشد تطبیقی برای طراحی چیدمان تقویت‌کننده‌ها از نظر خواص مکانیکی سازه کارایی لازم را دارد و دست‌کم در مقایسه با روش‌های بهینه‌سازی با معیار کاهش مواد، منجر به طرح مشخص برای چیدمان تقویت‌کننده‌ها می‌شود. اما در مدل رشد تطبیقی محدودیت‌هایی وجود دارد که در زیر بدان اشاره شده است.

۱- وابستگی چیدمان تقویت‌کننده‌ها به تعداد و جایگاه نقاط جوانه‌زنی که می‌توان گفت با تغییر در تعداد یا جایگاه هر یک از نقطه‌های جوانه‌زنی چیدمان تقویت‌کننده‌ها تغییر می‌کند و به نظر می‌رسد استفاده از این روش برای تعیین طرح چیدمان تقویت‌کننده‌ها نیازمند ارائه روشی برای تعیین نقاط جوانه‌زنی است.

1 Li
2 Yan



شکل ۱: صفحه مربعی، بستر رشد تقویت کننده‌ها
Fig.1. Square plate, substrate for stiffeners growth

حساسیت انرژی کرنشی و فرکانس‌های طبیعی آورده شده است.

$$\frac{dE}{dh} = \frac{\partial E}{\partial h} + \frac{dE}{du} \frac{\partial u}{\partial h} \quad (1)$$

$$\frac{d\lambda}{dh} = \varphi^T \left(\frac{dk}{dh} - \lambda \frac{dM}{dh} \right) \varphi \quad (2)$$

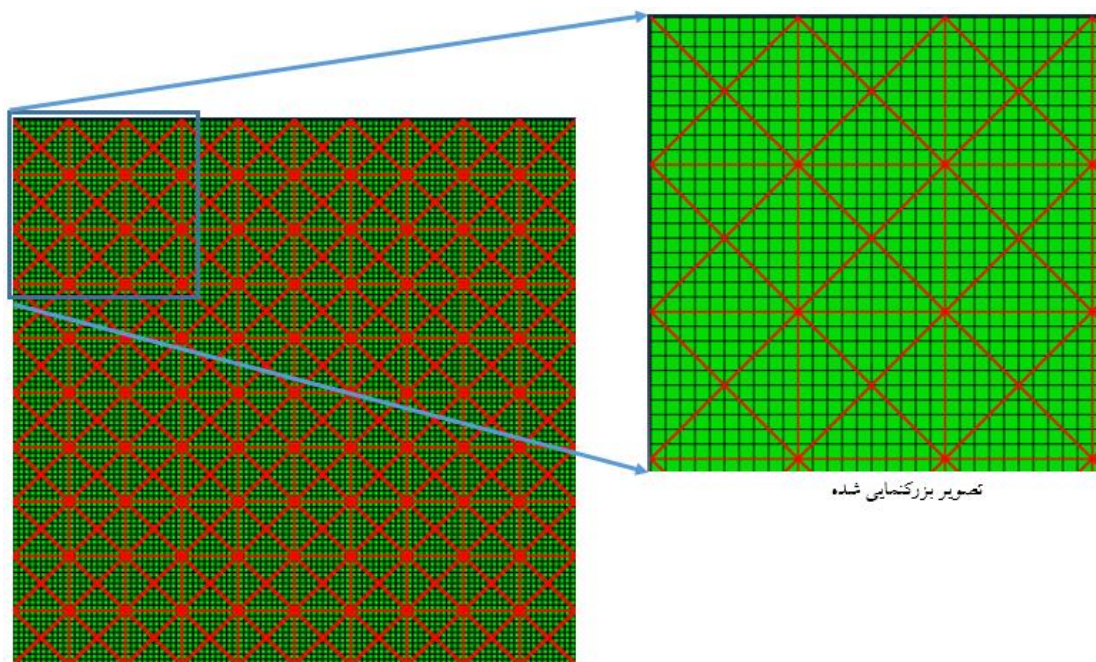
که در رابطه (۱)، E انرژی کرنشی کل پوسته، h ارتفاع سطح مقطع المان تیر و u بردار جابه‌جایی گرهی است و همچنین در رابطه (۲)، φ بردار مقادیر ویژه، K ماتریس سختی، M ماتریس جرم و λ مقدار ویژه و برابر با مربع فرکانس طبیعی است.

سپس المان‌های تیر با معیار حساسیت تابع هدف به تغییر ارتفاع سطح مقطع آن‌ها وارد رقابت برای رشد می‌شوند. در این مثال هدف یافتن بهترین چیدمان تقویت کننده‌ها برای کمینه کردن انرژی کرنشی کل صفحه است، بنابراین انرژی کرنشی کل، تابع هدف و ارتفاع هر یک از المان‌های تیر، پارامتر متغیر است و از رابطه (۱) استفاده می‌شود. برای ممانعت از ایجاد پیچ‌وخم‌های بیش‌ازاندازه در طرح حاصل، در این روش تقویت کننده‌ها به صورت گروهی از المان‌های بهم‌پیوسته وارد رقابت رشد می‌شوند. در این مثال هر کدام از این گروه‌ها شامل المان‌هایی می‌شوند که از یک ضلع صفحه طراحی با زاویه ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه خارج می‌شوند و با المان‌هایی که در همان راستا به آن‌ها وصل هستند ادامه پیدا می‌کنند و یک مسیر را ادامه می‌دهند تا به ضلع دیگر برسند (هر ضلع مجاور یا مقابل). البته برای حل هر مثال دیگر با استفاده از این روش می‌توان گروه‌ها را به صورت متنوع‌تری تعریف کرد، در این مثال ساده‌ترین مسیرها برای رشد تقویت کننده‌ها

سازی تقویت کننده‌ها از المان‌های تیر تیموشنکو دو گرهی در فضا با میانبایی خطی استفاده شده است. در شکل ۲ المان‌های پوسته با رنگ سبز و مرز آن‌ها با رنگ سیاه و همچنین المان‌های تیر با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. در سازه‌های صنعتی تقویت کننده‌ها با روش ریخته‌گری و به صورت یکپارچه با پوسته تولید می‌شوند و یا بر روی پوسته جوش داده می‌شوند، از این رو برای اتصال المان‌های پوسته به المان‌های تیر از قید تایی^۱ استفاده شده است. این نوع اتصال مانع از هرگونه حرکت نسبی بین المان‌های تیر و پوسته می‌شود. در شروع فرایند المان‌های تیر ابتدا تمام فضای طراحی را پوشش می‌دهند، اما به دلیل آنکه این المان‌ها سطح مقطع بسیار ناچیزی دارند در حل مسأله تأثیری ندارند، در واقع ارتفاع المان‌های تیر بسیار کوچک هست و عرض سطح مقطع، مقدار ثابتی (در این مثال عرض ۵ و ارتفاع ۰/۰۰۱ میلی‌متر است) دارد. با توجه به مقدار ثابت عرض سطح مقطع تقویت کننده‌ها باید بین المان‌های تیر فاصله‌ای را در نظر گرفت تا تقویت کننده‌ها بهم تداخل نداشته باشند این فاصله می‌تواند ۲ تا ۴ برابر عرض سطح مقطع تقویت کننده‌ها انتخاب شود.

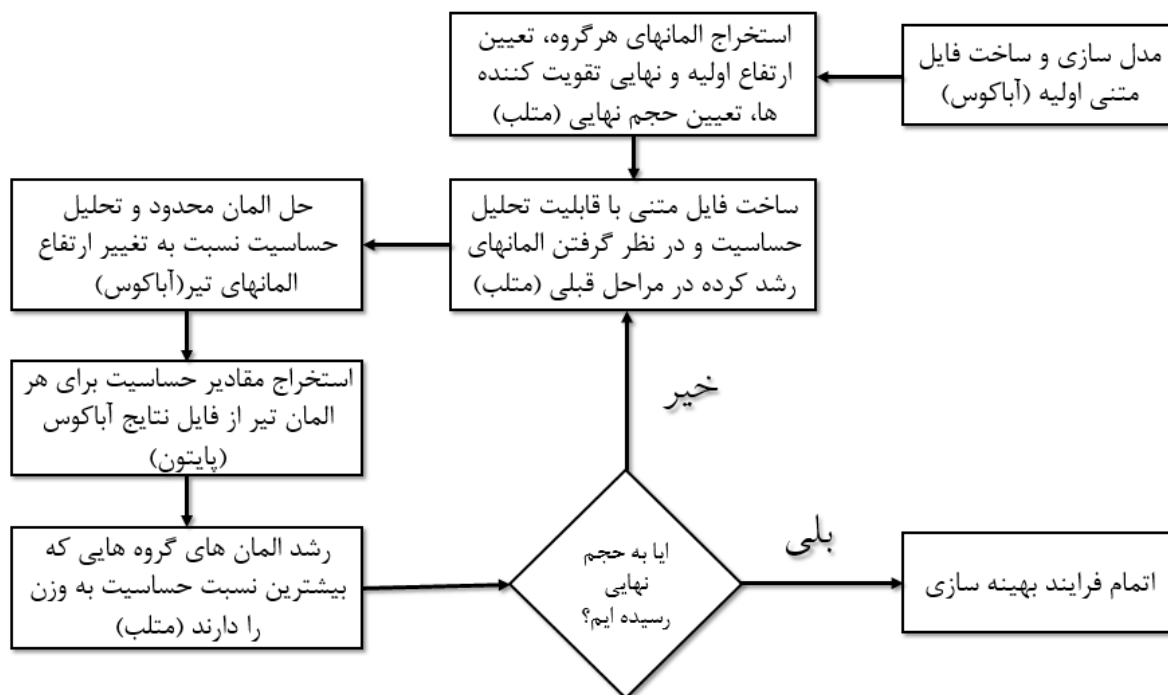
پس از اعمال بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی حل اجزاء محدود انجام می‌شود و حساسیت تابع هدف به تغییر ارتفاع سطح مقطع هر یک از المان‌های تیر، توسط حلگر آباکوس محاسبه می‌شود. تابع هدف می‌تواند انرژی کرنشی، فرکانس‌های طبیعی سازه، تنش‌های ایجاد شده و یا جابه‌جایی‌های گرهی باشد که در اینجا روابط محاسبه

1 Tie constraints



شکل ۲: تجزیه صفحه به المان‌های پوسته چهار گره‌ی و المان‌های تیر معرف تقویت‌کننده‌هاست

Fig. 2. Plate discretization into 4-node shell elements and the beam elements introducing the stiffeners

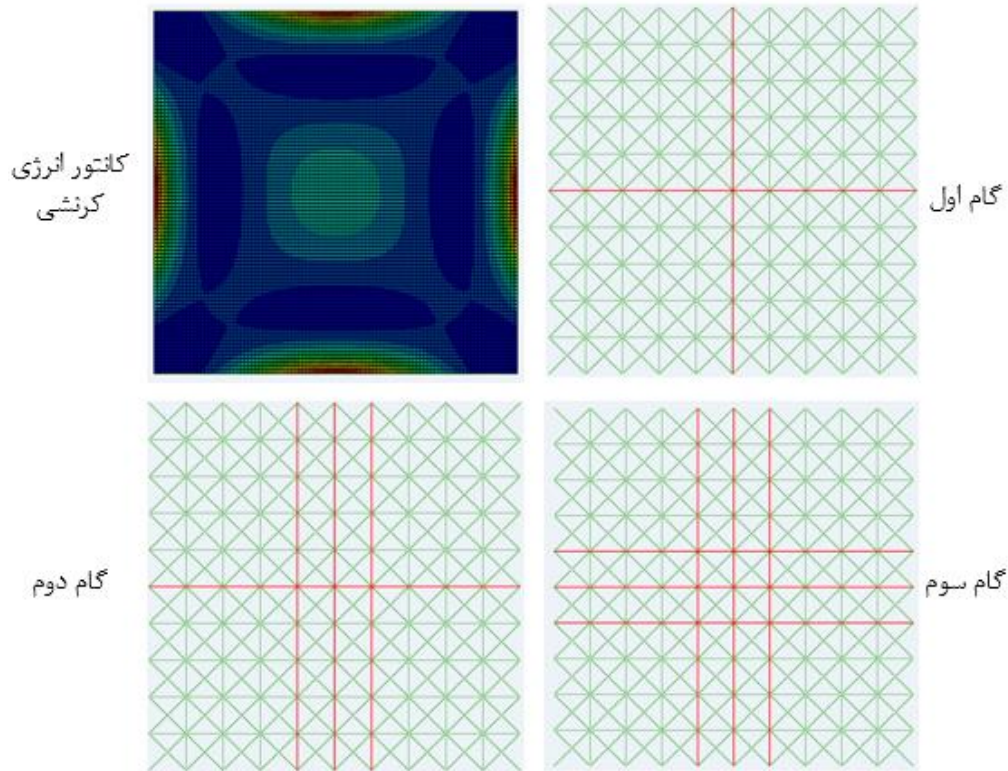


شکل ۳: الگوریتم روش بهینه‌سازی چیدمان تقویت‌کننده‌ها

Fig. 3. Flowchart of the optimization method for stiffeners layout

می‌رسد سپس المان‌هایی که در گام نخست طراحی رشد کرده‌اند از رقابت خارج می‌شوند. این تغییرات در مدل توسط کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب ایجاد می‌شود و مدل جدید برای تحلیل به آباکوس ارسال می‌شود و دوباره حل اجزاء محدود انجام شده و مراحل

انتخاب شده‌اند. بدین ترتیب مقادیر حساسیت المان‌های هر گروه با یکدیگر جمع می‌شوند و گروه‌ها یا مسیرهایی که بیشترین مقدار نسبت حساسیت به وزن را دارند رشد می‌کنند و ارتفاع سطح مقطع آن‌ها به مقدار مطلوب تقویت‌کننده‌ها (در این مثال ۱۰ میلی‌متر)



شکل ۴: نحوه اضافه شدن تقویت‌کننده‌ها به صفحه با تکیه‌گاه گیردار
 Fig.4. Method of adding the stiffeners to the clamped plate

است. همان‌طور که از شکل پیداست در این شرایط بارگذاری، با وجود اینکه انرژی کرنشی در المان‌های وسط صفحه بیشتر از نواحی دیگر است، روش بهینه‌سازی، تقویت‌کننده‌ها را در قسمت‌های گوشه اضافه می‌کند. لذا برای بررسی صحت نتیجه، همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، طرح حاصل از بهینه‌سازی، با طرح ضربدری شکل که تقویت‌کننده‌ها بیشترین پوشش را روی نواحی با انرژی کرنشی بالا دارند مقایسه شده است.

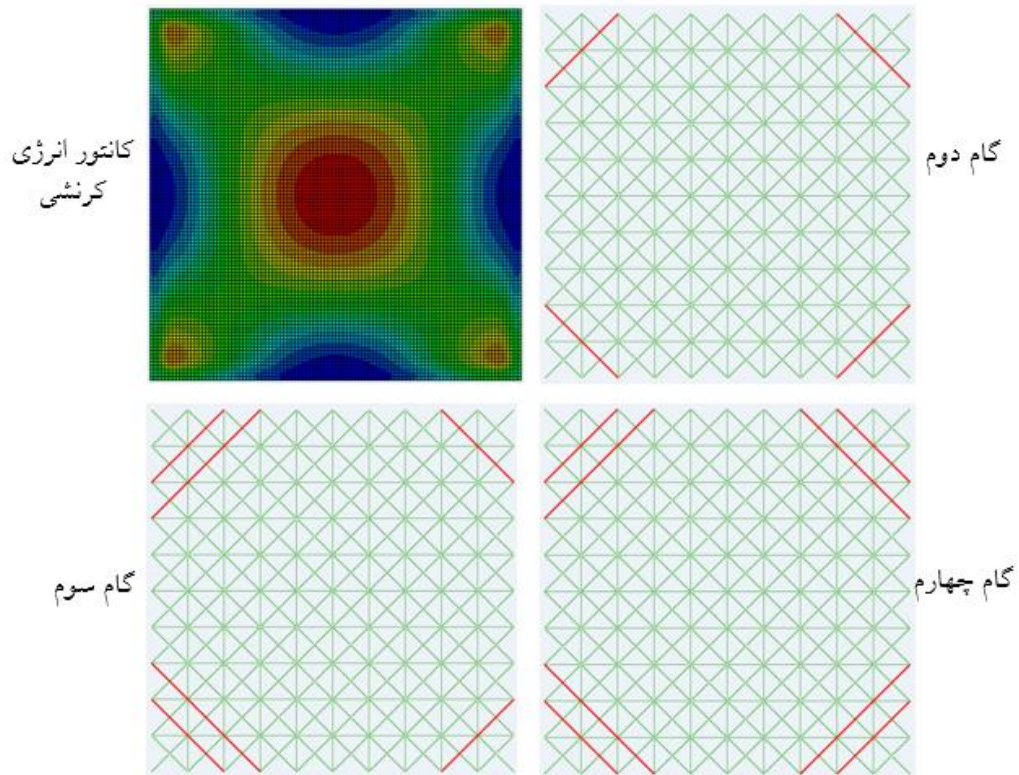
همان‌طور که از شکل مشخص است طرح حاصل از بهینه‌سازی در مقایسه با طرح ضربدری شکل که از نظر وزن دقیقاً شرایط یکسان دارند از لحاظ جابجایی و همچنین انرژی کرنشی المان‌ها شرایط بهتری دارد به‌گونه‌ای که بیشینه جابجایی در طرح بهینه ۲۶۵ میکرومتر و بیشینه انرژی کرنشی تقریباً $0/08$ میلی‌ژول است درحالی‌که بیشینه جابجایی در طرح ضربدری شکل ۲۶۷ میکرومتر و بیشینه انرژی کرنشی تقریباً $0/3$ میلی‌ژول است؛ بنابراین سفتی طرح بهینه از طرح ضربدری شکل بیشتر است. هدف از ارائه این مثال و مقایسه، بیان این نکته است که افزودن تقویت‌کننده‌ها به نواحی که المان‌ها بیشترین مقدار انرژی کرنشی (تابع هدف بهینه‌سازی) را دارند، لزوماً منجر

تکرار می‌شود، زمانی که مقدار حجم المان‌های رشد کرده به مقدار تعیین شده برسد فرایند بهینه‌سازی تمام می‌شود. شکل ۳ به صورت شماتیک الگوریتم بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

۱-۲- نتیجه بهینه‌سازی در دو حالت تکیه‌گاهی

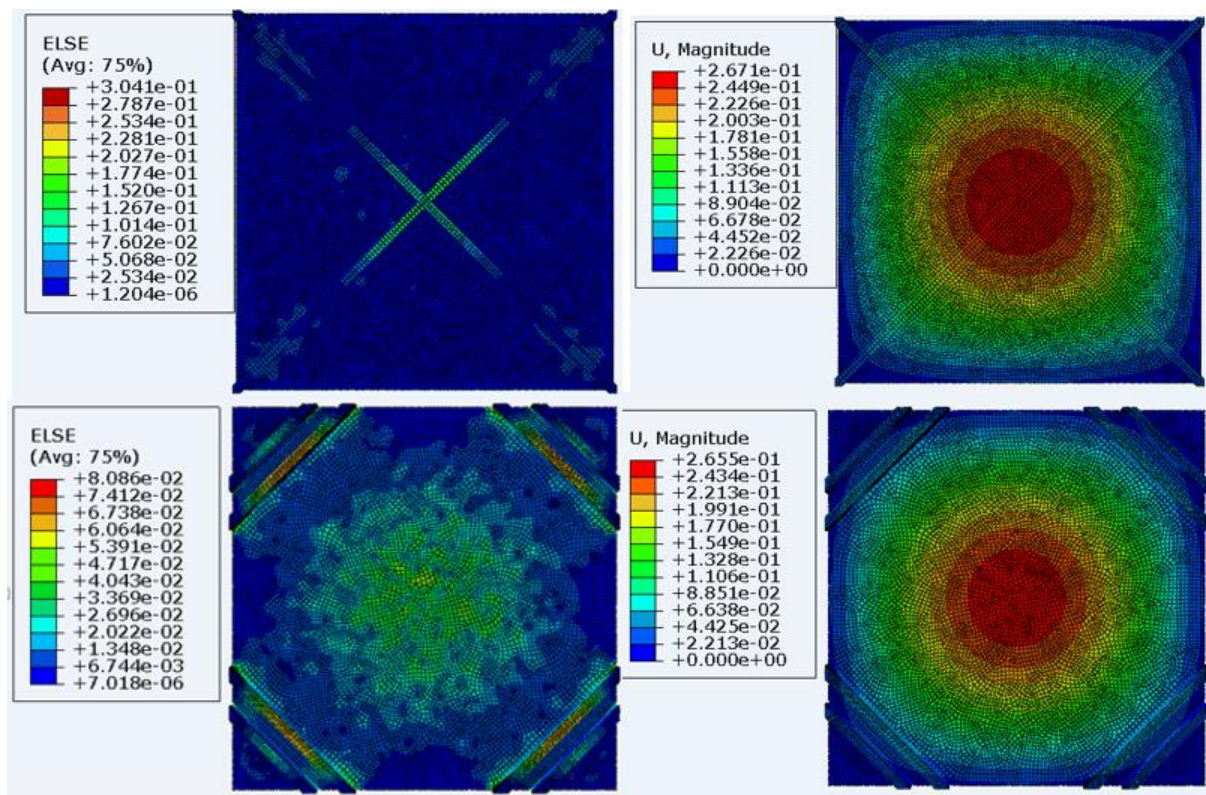
شکل ۴ شمارگر انرژی کرنشی صفحه را تحت بارگذاری نشان داده شده در شکل ۱، همراه با سه مرحله از بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌های متصل به صفحه نشان می‌دهد. خطوط قرمز رنگ نشانگر تقویت‌کننده‌های رشد کرده و خطوط سبز نشانگر مسیرهایی اند که تقویت‌کننده‌ها می‌توانند در آن‌ها رشد کنند. همان‌طور که از شکل مشخص است روش بهینه‌سازی، تقویت‌کننده‌ها را در موقعیت‌هایی از صفحه قرار داده است که المان‌های آن‌ها بیشترین انرژی کرنشی را دارند.

در این قسمت با تغییر تکیه‌گاه گیردار به تکیه‌گاه ساده عکس‌العمل روش به تغییر شرایط تکیه‌گاهی بررسی شده است. شکل ۵ شمارگر انرژی کرنشی را تحت شرایط بارگذاری نشان داده شده در شکل ۱، ولی با تکیه‌گاه ساده، همراه با سه مرحله از بهینه‌سازی نشان داده



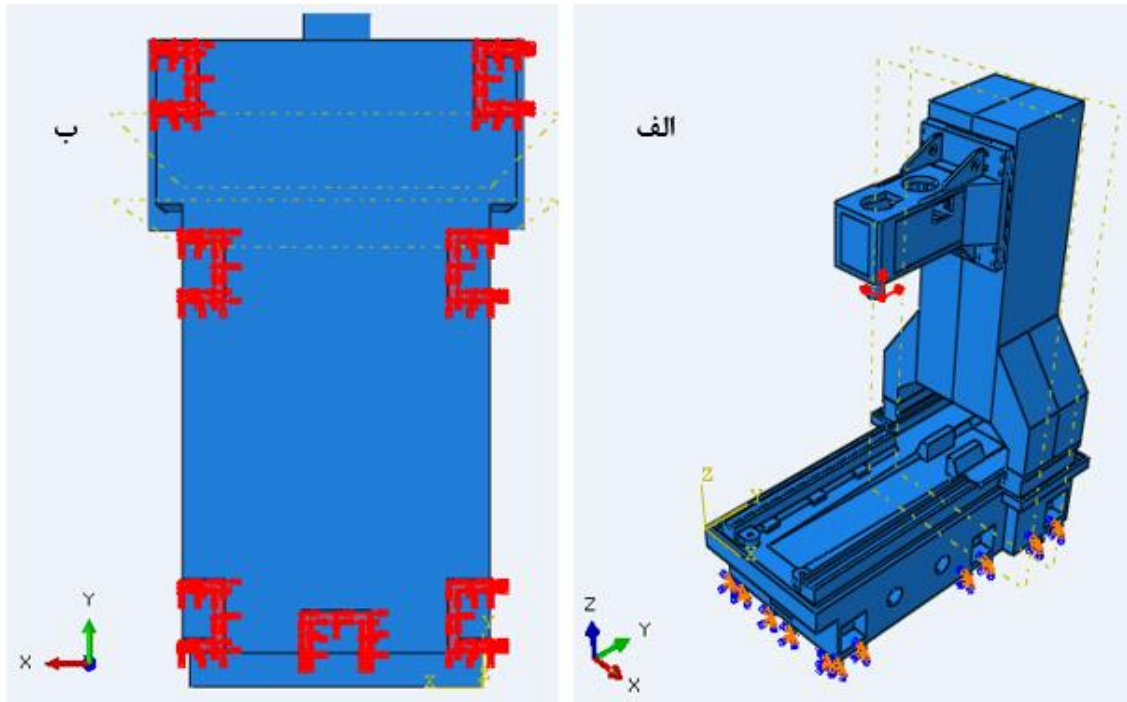
شکل ۵: نحوه اضافه شدن تقویت کننده‌ها به صفحه با تکیه‌گاه ساده

Fig. 5. Method of adding the stiffeners to plain supported plate



شکل ۶: مقایسه بین طرح بهینه با طرح ضربدری شکل

Fig. 6. Comparison between optimal designs with cross-shaped design



شکل ۷: الف) مدل اولیه ایجاد شده و شرایط بارگذاری، ب) شرایط تکیه‌گاهی

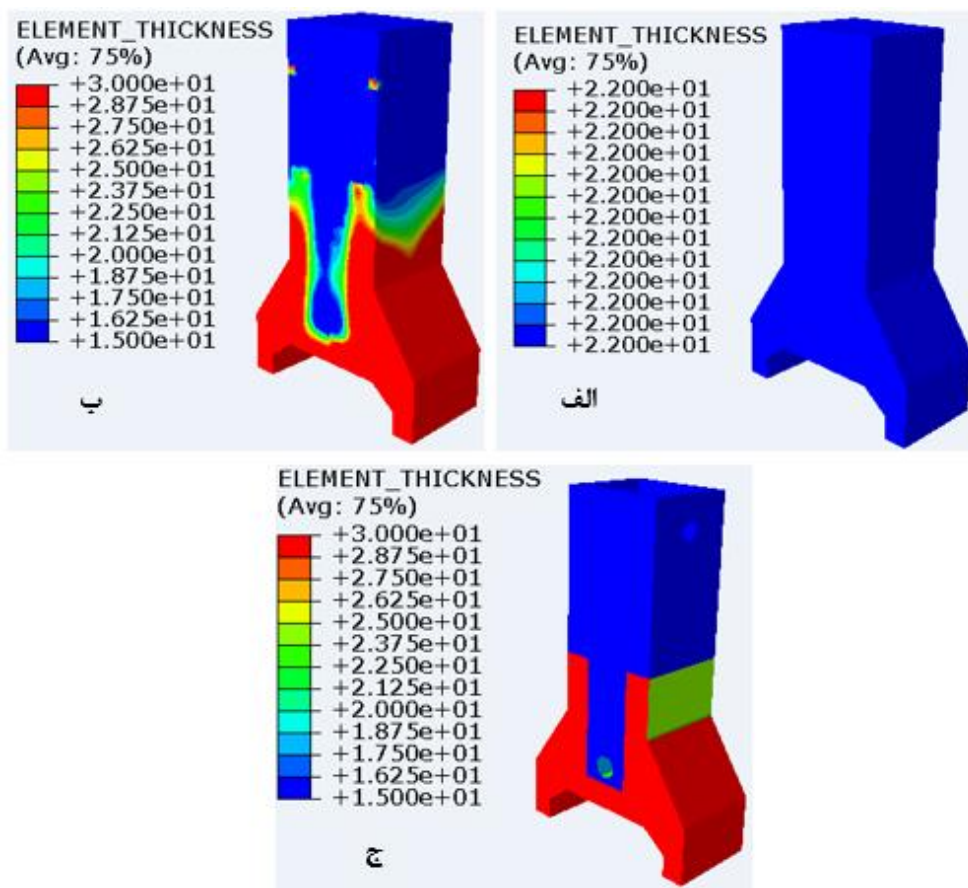
Fig.7. a) The created primary model and the loading conditions, b) boundary conditions

دیگر افزایش سفتی استاتیکی و با توجه به انتخاب محدوده فرکانس کاری زیر فرکانس طبیعی اول، افزایش فرکانس طبیعی اول یا به عبارت دیگر افزایش سفتی دینامیکی می‌باشد. با استفاده از نرم‌افزار cut pro که بر مبنای نوعی روش نیمه تجربی^۱ نیروها را مدل‌سازی می‌کند در فرایند خشن کاری با یک ابزار کف تراش در شرایط کار با ابزار ۸ تیغه به قطر ۸۰ میلی‌متر، سرعت برشی ۹۰ متر بر دقیقه، عمق برشی ۲ میلی‌متر، پیشروی ۰/۳ میلی‌متر به ازای هر دندانه، قطعه کار از جنس فولاد کم آلیاژ C 4732 و پیشروی ابزار در جهت X ، نیروهای Y ، X و Z بر 5900 ، 3805 و -6750 نیوتون به ترتیب در راستای X ، Y و Z بر ابزار وارد می‌شود [۱۵] که تحلیل استاتیکی و بهینه‌سازی‌ها برای افزایش سفتی استاتیکی در شرایط اعمال این نیروها انجام می‌شود. شکل ۷ (الف) بستر، ستون، کلگی و ابزار سرهم‌بندی شده را نشان می‌دهد که جهت نیروهای ماشین‌کاری محاسبه شده نیز با فلش‌های قرمز مشخص شده‌اند. در تمام بهینه‌سازی‌ها با اینکه تغییرات تنها در هندسه ستون ایجاد می‌شود اما مدل‌سازی مانند شکل شامل دیگر اجزاء نیز می‌باشد. هفت پایه بستر توسط هفت پیچ به کف محیط کارگاه متصل می‌شود که در مدل‌سازی، قسمت‌های کف پایه بستر به

به بهترین آرایش تقویت‌کننده‌ها نمی‌شود و می‌بایست با استفاده از تحلیل حساسیت تأثیر افزودن تقویت‌کننده‌ها بررسی و بهترین آرایش تقویت‌کننده‌ها انتخاب شود. لازم به ذکر است مقایسه هم با استفاده از المان‌های پوسته و تیر و هم با استفاده از المان‌های ساختاری هشت گرهی انجام شده است و در هر دو حالت سفتی در طرح حاصل از بهینه‌سازی بیشتر از طرح ضربدری شکل است؛ اما از آنجاکه استفاده از المان‌های ساختاری سه‌بعدی، حالت عمومی‌تری برای مدل‌سازی دارد و نیز برای نمایان بودن طرح تقویت‌کننده‌ها، در این قسمت تنها نتایج حل اجزاء محدود با استفاده از این المان‌ها، در شکل ۶ نشان داده شده است.

۳- بازطراحی ستون یک ماشین فرز عمودی

در این قسمت مقاله هدف بازطراحی ستون یک ماشین فرز عمودی به منظور بهبود عملکرد کل مجموعه ماشین‌ابزار می‌باشد. این بازطراحی، شامل تغییر در توزیع ضخامت دیواره ستون و همچنین تغییر در آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی متصل به دیواره ستون است. منظور از بهبود عملکرد، کاهش انرژی کرنشی کل ستون و به تبع آن کاهش خیز سر ابزار در اثر نیروی ماشین‌کاری یا به عبارت



شکل ۸: مراحل بهینه‌سازی، الف) ستون اولیه با ضخامت یکنواخت، ب) بهینه‌سازی اولیه، ج) بهینه‌سازی ضخامت بعد از خوشه‌بندی

Fig. 8. Optimization steps, a) original column with uniform thickness, b) primary optimization, c) optimization of thickness after clustering

عنوان تکیه‌گاه درگیر که تمام درجات آزادی آن بسته شده انتخاب می‌شود. شکل ۷ (ب) نما از کف بستر را نشان می‌دهد که هفت پایه آن به عنوان تکیه‌گاه گیردار با رنگ قرمز مشخص شده است. در عمل کلاگی نسبت به ستون در راستای Z جابه‌جا می‌شود اما در تحلیل و بهینه‌سازی استاتیکی و فرکانسی کلاگی در بالاترین موقعیت به عنوان بحرانی‌ترین وضعیت که بیشترین خمش‌ها به ستون وارد می‌شود قرار دارد.

۳-۱- بهینه‌سازی توزیع ضخامت دیواره ستون

با استفاده از ماژول بهینه‌سازی اندازه نرم‌افزار آباکوس بهینه‌سازی توزیع ضخامت پوسته دیواره ستون انجام شده است برای استفاده از این قابلیت نرم‌افزار می‌بایست ستون با المان‌های پوسته چهار گرهی مدل شود. ستون موجود از جنس چدن خاکستری با مدول الاستیسیته ۱۱۵ گیگا پاسکال، ضریب پواسون ۰/۲۵ و چگالی ۷۸۰۰

کیلوگرم بر مترمکعب است که در ابتدا دارای ضخامت یکنواخت ۲۲ میلی‌متر است با انجام تحلیل استاتیکی و فرکانسی، جابه‌جایی بیشینه ۲۱۶ میکرومتر و فرکانس طبیعی اول ۵۰/۳ هرتز محاسبه شد. با توجه به اینکه در نرم‌افزار آباکوس امکان بهینه‌سازی دو هدفه وجود ندارد یکی از توابع هدف یعنی فرکانس طبیعی اول به صورت قید وارد مسأله می‌شود؛ بنابراین افزایش فرکانس اول به بیشتر از ۶۰ هرتز به عنوان قید اول، عدم افزایش وزن سازه به عنوان قید دوم و کاهش انرژی کرنشی کل به عنوان تابع هدف وارد مسأله بهینه‌سازی می‌شود. همچنین ضخامت سازه می‌تواند در بازه ۱۵ تا ۳۰ میلی‌متر تغییر کند. با توجه به این نکته که با تغییر جهت پیشروی میز متحرک در راستای X علامت نیرو در این راستا عوض می‌شود برای تحقق سفتی بیشینه در دو حالت پیشروی، ستون نهایی باید نسبت به صفحه YZ متقارن باشد. نتیجه اولیه بهینه‌سازی ضخامت در شکل ۸ (ب) نشان داده شده است که با استفاده از این نتیجه، ستون خوشه‌بندی شده

جدول ۱: تغییر در بیشینه جابه‌جایی و فرکانس طبیعی اول بعد از بهینه‌سازی توزیع ضخامت

Table 1. Variation in maximum displacement and first natural frequency after optimization of thickness distribution

ستون	وزن ستون، کیلوگرم	بیشینه جابه‌جایی، میکرومتر	فرکانس طبیعی اول، هرتز
توزیع ضخامت یکنواخت	۶۶۳	۲۴۱	۵۱/۹
توزیع ضخامت بهینه	۶۶۱/۳	۲۴۶	۵۹/۷
تغییر (%)	-۰	۲	۱۵

و سوراخ‌هایی نیز برای دسترسی به داخل ستون و همچنین تسهیل حمل‌ونقل در قسمت‌های غیر بحرانی ستون ایجاد گردید. پس از اعمال این تغییرات سازه دوباره تحت همان شرایط بهینه‌سازی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۸ (ج) نشان داده شده است در ستون حاصل از بهینه‌سازی در قسمت‌های پایین‌تر ضخامت بیشترین مقدار ممکن یعنی ۳۰ میلی‌متر و قسمت‌های بالاتر کمترین مقدار ممکن یعنی ۱۵ میلی‌متر است و قسمت‌های دیگر ضخامتی بین این دو مقدار دارند.

در فرایند بهینه‌سازی، مدل‌سازی ستون با المان‌های پوسته انجام شده است اما برای بررسی تأثیر بهینه‌سازی، ستون اولیه با ضخامت یکنواخت ۲۲ میلی‌متر و ستون با توزیع ضخامت بهینه با المان‌های هرمی ۱۰ گرهی مدل‌سازی و مقایسه شده‌اند که جدول ۱ نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد.

با توزیع ضخامت جدید وزن سازه تقریباً ثابت می‌ماند، فرکانس طبیعی اول ماشین فرز از ۵۱/۹ هرتز به ۵۹/۷ هرتز افزایش یافته و جابه‌جایی بیشینه از ۲۴۱ میکرومتر به ۲۴۶ میکرومتر افزایش می‌یابد. در مقابل اثر مثبت افزایش فرکانس از اثر منفی افزایش جابه‌جایی صرف‌نظر شد و ستون با توزیع ضخامت جدید جایگزین ستون با ضخامت یکنواخت شد. در مراحل بعدی، هدف یافتن بهترین آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی در ستون با توزیع ضخامت جدید می‌باشد.

۲-۳- بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی ستون

برای بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی ستون ماشین فرز، مدل ایجاد شده و شرایط بارگذاری و تکیه‌گاهی در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین مسأله بهینه‌سازی نیز به صورت رابطه (۳)

تعریف شده است.

$$\begin{cases} F \min \\ W \leq W_U \end{cases} \quad (3)$$

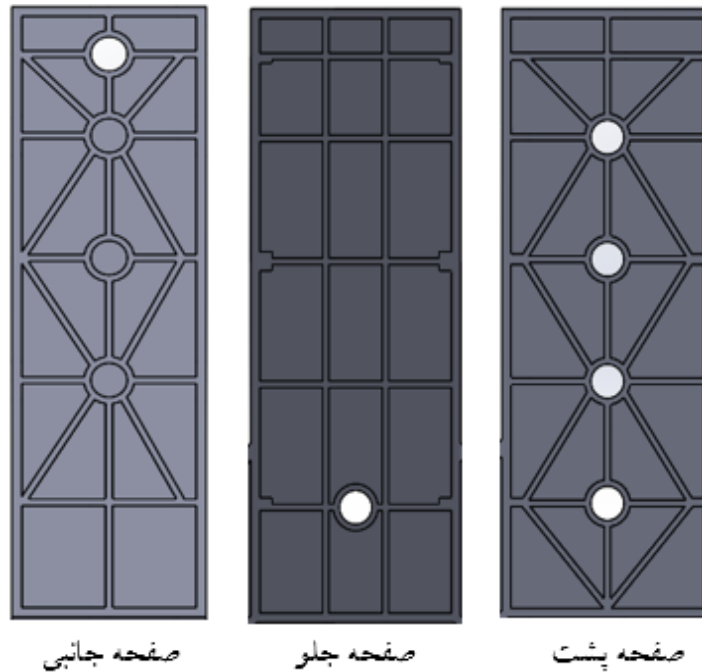
$$F = w_1 f_1 + w_2 f_2 \quad (4)$$

که F تابع هدف و طبق رابطه (۴) ترکیبی از انرژی کرنشی کل ستون و معکوس فرکانس طبیعی اول است. همچنین W وزن تقویت‌کننده‌هایی است که به ستون خالی اضافه می‌شود که نباید از وزن تقویت‌کننده‌های اولیه ستون، W_U بیشتر باشد. f_1 انرژی کرنشی کل المان‌های ستون و f_2 معکوس فرکانس طبیعی اول مجموعه ماشین‌ابزار است. w_1 و w_2 ضرایب وزن هستند که می‌توانند بسته به هدف طراح متفاوت باشند ولی مقدار آن‌ها بایستی مابین ۰ و ۱ باشد و مجموع آن‌ها نیز باید ۱ باشد که در اینجا برای بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی ستون ماشین فرز عمودی مقدار هر دو ضریب برابر با ۰/۵ انتخاب شده است. رویکرد یافتن هندسه‌ای است که تابع هدف کمینه شود و درعین حال قید وزن مشخص شده رعایت شود.

در ستون اولیه موجود سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها ۱۵×۳۰ میلی‌متر و آرایش آن‌ها همان‌گونه که در شکل ۹ نشان داده شده در صفحه جلو به صورت متعامد # و در صفحه پشتی و دو صفحه جانبی ترکیبی از \times و $+$ است.

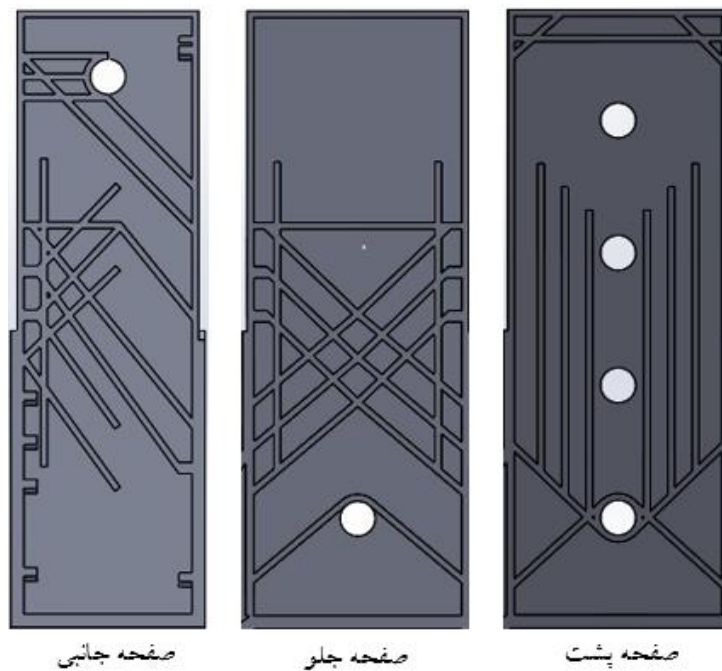
نتایج حاصل از بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی ستون در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در این قسمت با استفاده از مدل‌سازی، تحلیل و مقایسه نتایج بین سه حالت ستون بدون تقویت‌کننده، ستون با تقویت‌کننده‌های اولیه و ستون با تقویت‌کننده‌های بهینه، تأثیر فرایند بهینه‌سازی در کاهش بیشینه جابه‌جایی و افزایش فرکانس طبیعی اول بررسی



شکل ۹: آرایش تقویت‌کننده‌ها در ستون اولیه موجود

Fig.9. Stiffeners layout in the original column



شکل ۱۰: نتایج بهینه‌سازی برای تقویت‌کننده‌های داخلی ستون

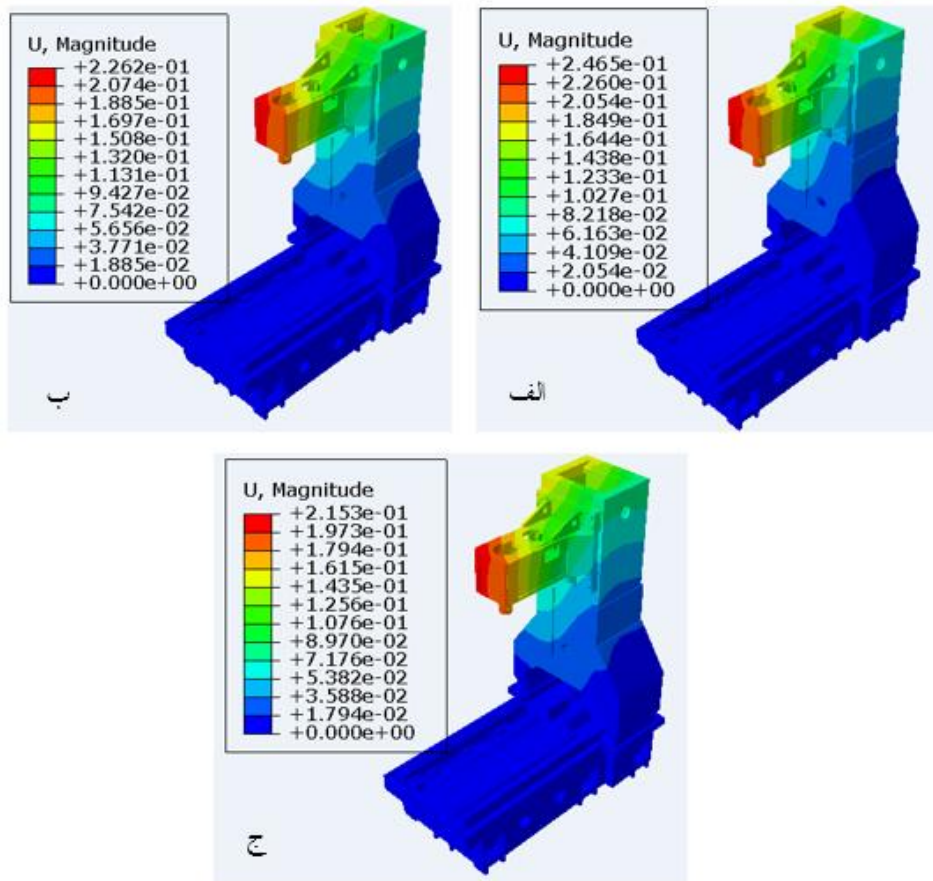
Fig. 10. Optimization results for internal stiffeners of column

ارائه شده مربوط به این مدل‌سازی هستند. شکل ۱۱ شمارگرهای جابه‌جایی را برای سه حالت ستون بدون تقویت‌کننده، ستون با تقویت‌کننده‌های اولیه و ستون با تقویت‌کننده‌ها با آرایش بهینه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است بیشینه

شده است. لازم به ذکر است چون در فرایند بهینه‌سازی دیواره ستون با المان‌های پوسته و تقویت‌کننده‌ها با المان‌های تیر مدل شده‌اند، برای اعتبارسنجی نتایج از المان‌های هرمی ۱۰ گرهی برای مدل‌سازی دیواره و تقویت‌کننده‌ها استفاده شده است و نتایج

درصدی وزن ستون و کاهش ۸/۱ درصدی بیشینه جابه‌جایی در سازه می‌شود درحالی‌که افزودن تقویت‌کننده‌ها با آرایش حاصل از بهینه‌سازی موجب افزایش ۱۱/۵ درصدی وزن ستون و کاهش ۱۲/۶ درصدی بیشینه جابه‌جایی سازه ماشین‌ابزار می‌شود. به عبارت دیگر، اگر هدف از افزودن تقویت‌کننده‌ها کاهش بیشینه جابه‌جایی باشد، می‌توان گفت که استفاده از طرح حاصل از روش ارائه شده موجب

جابه‌جایی در حالت بدون تقویت‌کننده ۲۴۶ میکرومتر است که افزودن تقویت‌کننده‌های اولیه موجب کاهش بیشینه جابه‌جایی به ۲۲۶ میکرومتر می‌شود درحالی‌که افزودن تقویت‌کننده‌ها با آرایش حاصل از بهینه‌سازی موجب کاهش بیشینه جابه‌جایی تا عدد ۲۱۵ میکرومتر می‌شود همان‌گونه که در جدول ۲ مشخص شده است افزودن تقویت‌کننده‌های قبلی به ستون موجب افزایش ۱۱/۸



شکل ۱۱: شمارگرهای جابه‌جایی: الف) ستون بدون تقویت‌کننده، ب) ستون با تقویت‌کننده‌های اولیه، ج) ستون با تقویت‌کننده‌های بهینه

Fig. 11. Displacement cantors, a) column without stiffeners, b) column with original stiffeners, c) column with optimal stiffeners

جدول ۲: مقایسه مشخصه‌های مکانیکی بعد از بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌ها

Table 2. Comparison of the mechanical properties after optimization of the stiffeners layout

وضعیت ستون	وزن ستون، کیلوگرم	بیشینه جابه‌جایی، میکرومتر	کاهش بیشینه جابه‌جایی (%)	فرکانس طبیعی اول، هرتز
بدون تقویت‌کننده	۶۶۱/۳	۲۴۶	-	۵۹/۷
تقویت‌کننده‌های اولیه	۷۳۹/۳	۲۲۶	۸/۱	۵۷/۹
تقویت‌کننده‌های بهینه	۷۳۷/۵	۲۱۵	۱۲/۶	۵۸/۵

۳-۳- مشخصه‌های مکانیکی ماشین فرز قبل و بعد از بهینه‌سازی

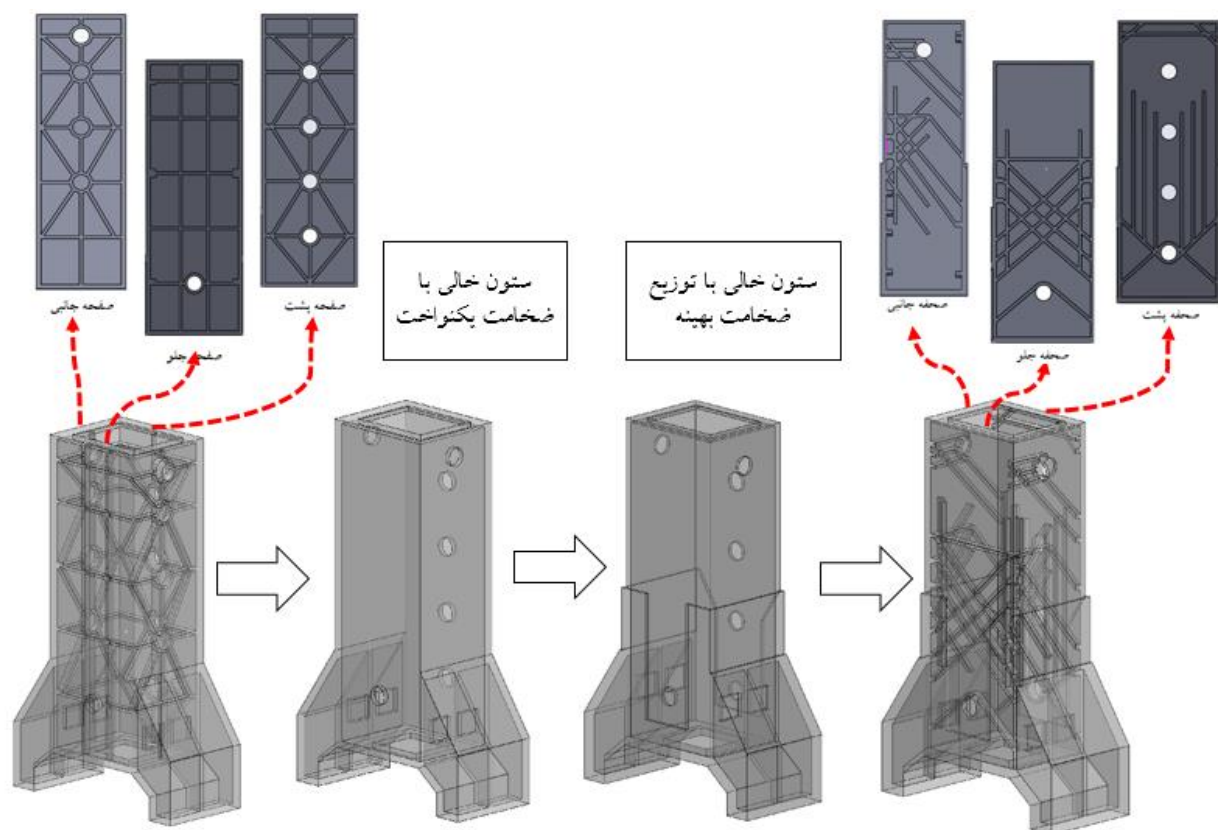
ستون

در این قسمت به صورت هم‌زمان تأثیر بهینه‌سازی توزیع ضخامت دیواره ستون و بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی ستون، بر مشخصه‌های مکانیکی ماشین فرز بررسی شده است. شکل ۱۲ مراحل کلی تبدیل ستون اولیه به ستون بهینه را نشان می‌دهد و جدول ۳ بیشینه جابه‌جایی و فرکانس طبیعی اول را برای ماشین فرز قبل و بعد از بهینه‌سازی ستون نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در جدول مشخص شده است با بهینه‌سازی توزیع ضخامت دیواره و سپس یافتن بهترین آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی در ستون با توزیع ضخامت بهینه، بدون آنکه وزن ستون بیشتر شود بیشینه جابه‌جایی ماشین فرز به میزان $6/9$ درصد کاهش و فرکانس طبیعی اول آن به میزان $16/5$ درصد افزایش می‌یابد که با بررسی جداگانه نتایج قسمت‌های مربوط به دو مرحله بهینه‌سازی مشخص می‌شود که سهم بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌ها در کاهش بیشینه جابه‌جایی محسوس‌تر از بهینه‌سازی توزیع ضخامت است درحالی‌که

افزایش ۵۳ درصدی این کاهش نسبت به طرح اولیه می‌شود؛ اما در رابطه با هدف دیگر بهینه‌سازی یعنی فرکانس طبیعی اول، همان‌گونه که در جدول مشخص شده است افزودن تقویت‌کننده‌ها موجب کاهش فرکانس طبیعی اول می‌شود درحالی‌که هدف افزایش این پارامتر است.

در این مورد تقویت‌کننده‌هایی که کمترین کاهش را در مقدار فرکانس طبیعی اول داشته باشند به سازه افزوده می‌شوند. مشاهده می‌شود که مقدار فرکانس طبیعی اول ماشین‌ابزار در حالت تقویت ستون با تقویت‌کننده‌های حاصل از روش بهینه‌سازی ارائه شده نسبت به تقویت‌کننده‌های اولیه حدود ۱ درصد بیشتر است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت افزودن تقویت‌کننده‌ها در کنار آنکه موجب کاهش جابه‌جایی می‌شود موجب کاهش فرکانس طبیعی اول نیز می‌شود. درواقع یک اثر مثبت در کنار یک اثر منفی، استفاده از تقویت‌کننده‌های حاصل از بهینه‌سازی با روش ارائه شده موجب افزایش اثر مثبت و کاهش اثر منفی در مقایسه با تقویت‌کننده‌های اولیه می‌شود.



شکل ۱۲: مراحل تبدیل ستون اولیه به ستون بهینه

Fig.12. Steps of converting the original column to the optimal column

جدول ۳: مقایسه مشخصه‌های مکانیکی ماشین ابزار قبل و بعد از بهینه‌سازی ستون

Table 3. Comparison of machine tool mechanical properties before and after column optimization

فرکانس اول، هرتز	بیشینه جابه‌جایی، میکرومتر	وزن، کیلوگرم	ستون
۵۰/۲	۲۳۱	۷۴۰/۹	اولیه
۵۸/۵	۲۱۵	۷۳۷/۵	بهینه
۱۶/۵	-۶/۹	-۰/۵	تغییر (%)

مشخصه‌های مکانیکی ماشین بهبود یافت.

۴- با توجه به این نکته که در فرایند بهینه‌سازی، ستون با المان‌های پوسته و تقویت‌کننده‌ها با المان‌های تیر مدل‌سازی می‌شوند برای بررسی کارآمدی روش‌های بهینه‌سازی به‌ویژه روش بهینه‌سازی تقویت‌کننده‌ها که در این مقاله برای نخستین بار معرفی شده است، برای مقایسه بین طرح‌های حاصل از بهینه‌سازی و طرح‌های اولیه از المان‌های حجمی برای مدل‌سازی استفاده شد که نتایج مقایسه‌ها نشان‌دهنده بهبود خواص مکانیکی مدنظر بعد از بهینه‌سازی است؛ بنابراین روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده، حداقل از نظر تحلیل اجزاء محدود اعتبار و کارایی لازم را دارند.

مراجع

- [1] M.P. Bendse, N. Kikuchi, Generating optimal topologies in structural design using a homogenisation method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71(2) (1988) 197--224.
- [2] A.R. Daaz, N. Kikuchi, Solutions to shape and topology eigenvalue optimization problems using a homogenization method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 35(7) (1992) 1487-1502.
- [3] J.H. Luo, H.C. Gea, Optimal bead orientation of 3D shell/plate structures, *Finite Elements in Analysis and Design*, 31(1) (1998) 55--71.
- [4] J.H.L. Gea, C. H, A systematic topology optimization approach for optimal stiffener design, *Structural Optimization*, 288 (1998) 280--288.
- [5] L.A. Krog, N. Olhoff, Optimum topology and reinforcement design of disk and plate structures with

سه‌م بهینه‌سازی توزیع ضخامت در افزایش فرکانس طبیعی اول محسوس‌تر از بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌ها است.

۴- نتیجه‌گیری

۱- برای بهینه‌سازی آرایش تقویت‌کننده‌های متصل به سازه‌های صفحه‌ای و پوسته‌ای روشی مبتنی بر حساسیت توابع هدف به افزودن تقویت‌کننده‌ها ارائه شد. استفاده از این روش برخلاف روش‌های همگن‌سازی نیاز به مرحله پس پردازش برای تعیین آرایش تقویت‌کننده‌ها ندارد و روش مستقیماً منجر به طرح نهایی تقویت‌کننده‌ها می‌شود، همچنین برخلاف روش الگوریتم رشد تطبیقی این روش نیاز به تعیین نقطه آغاز برای شروع رشد تقویت‌کننده‌ها ندارد و از ابتدای فرایند بهینه‌سازی تمام تقویت‌کننده‌ها در رقابت رشد شرکت می‌کنند و تأثیر گذارترین تقویت‌کننده‌ها به سازه افزوده می‌شوند.

۲- پس از بهینه‌سازی توزیع ضخامت دیواره ستون یک ماشین فرز عمودی با استفاده از ابزار بهینه‌سازی اندازه نرم‌افزار آباکوس، از روش ارائه شده برای یافتن بهترین آرایش تقویت‌کننده‌های داخلی این ستون استفاده شد. مشخص شد که در مقایسه با تقویت‌کننده‌های اولیه، افزودن تقویت‌کننده‌های حاصل از روش ارائه شده به ستون، از نظر مقاومت در برابر جابه‌جایی و فرکانس طبیعی اول منجر به شرایط بهتری برای مجموعه ماشین فرز می‌شود.

۳- نهایتاً ستون جدید با توزیع ضخامت و آرایش تقویت‌کننده‌های بهینه در مقایسه با ستون با ضخامت یکنواخت و آرایش تقویت‌کننده‌های اولیه مشخصه‌های مکانیکی بهتری دارد و با وجود کاهش تقریباً ۰/۵ درصدی وزن ستون بیشینه جابه‌جایی مجموعه ماشین فرز ۶/۹ درصد کاهش و فرکانس طبیعی اول آن به میزان ۱۶/۵ درصد افزایش می‌یابد؛ بنابراین با تغییرات جزئی در ستون و بدون آنکه نیازی به تغییر در سایر اجزاء ماشین ایجاد شود

- Materials and Technology, 135(2) (2013) 021012.
- [11] B. Li, J. Hong, S. Yan, Z. Liu, Multidiscipline topology optimization of stiffened plate/shell structures inspired by growth mechanisms of leaf veins in nature, *Mathematical Problems in Engineering*, 2013 (2013).
- [12] B. Li, J. Hong, Z. Liu, Stiffness design of machine tool structures by a biologically inspired topology optimization method, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 84 (2014) 33-44.
- [13] S. Yan, B. Li, J. Hong, Bionic design and verification of high-precision machine tool structures, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1) (2015) 73-85.
- [14] Abaqus, Choosing a beam element, in: 29.3.3 (Ed.), *Abaqus Analysis User's Guide*, USA, 2014.
- [15] H. Zamani, Design, Static and Dynamic Analysis of Crossbeam of a Gantry Milling Machine, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2013 (In Persian).
- multiple stiffness and eigenfrequency objectives, *Computers and Structures*, 72(4) (1999) 535-563.
- [6] R.J. Yang, C.H. Chuang, Optimal topology design using linear programming, *Computers & Structures*, 52(2) (1994) 265-275.
- [7] Y.M. Xie, G.P. Steven, A Simple Approach To Structural Optimization, *Computers & Structures*, 49(5) (1994) 885--896.
- [8] O.M. Querin, G.P. Steven, Y.M. Xie, Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm, *Engineering Computations*, 15(8) (1998) 1031-1048.
- [9] X. Ding, K. Yamazaki, Stiffener layout design for plate structures by growing and branching tree model (application to vibration-proof design), *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(1-2) (2004) 99-110.
- [10] B. Li, J. Hong, Z. Wang, Z. Liu, An Innovative Layout Design Methodology for Stiffened Plate/Shell Structures by Material Increasing Criterion, *Journal of Engineering*

