سی و یکمین همایش سالانه بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران و نهمین همایش صنعت نیروگاهی ایران
، تهران، ۱۹ تا ۲۱اردیبهشت ۱۴۰۲

ISME۲۰۲۳-ICXXXX
۱۳٤٤-ISME

تحلیل عددی بهینه‌سازی توپولوژی با درصد حجم‌های متفاوت روی سازه های شوارتز اولیه وجایرود در محدوده الاستیک

سوسن پورامینائی[۱]، فاطیما دادبخش[۲]، ستارجداری سلامی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد تهران مرکز، تهران، susan.aminaee@gmail.com
[۲]دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد تهران مرکز، تهران، fatimadadbakhsh7@gmail.com
[۳] دانشیار، دانشگاه آزاد تهران مرکز، تهران، sattar.salami@gmail.com

چکیده

در این تحقیق به بررسی فرآیند بهینه‌سازی توپولوژی در ساختار شوارتز اولیه و جایرود به‌منظور بهبود استحکام و چگالی جذب انرژی توسط نرم‌افزار آباکوس و حل گر توسکا پرداخته شده است. پس از انجام بهینه‌سازی با دو تابع هدف حجم و انرژی کرنشی برای تعیین ساختار نهایی با قابلیت جذب انرژی بالا، چند حجم انتخابی کمتر از حجم کل سازه در توپولوژی موردبررسی قرار گرفته شده است و ازآنجایی‌که هدف اصلی انجام این پژوهش رسیدن به ساختار بیومدیکال بهینه ازنظر حجم کم و چگالی جذب انرژی بالا است، برای این منظور چگالی جذب انرژی سازه‌ها با درصد حجم‌های متفاوت را با در نظر گرفتن توابع هدف انرژی کرنشی و حجم بررسی شده است و در نتیجه سازه شوارتز اولیه در حجم ۹۰٪ با چگالی جذب انرژی ۱۵/۱۷۹۰۱ مگاژول بر متر مکعب و سازه جایرود نیز در حجم ۷۰٪ با چگالی جذب انرژی ۵۵/۶۲۲۹۷ مگاژول بر مترمکعب به بهینه‌ترین حالت خود ازنظر حجم و چگالی جذب انرژی رسیده اند. از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به فرآیند بهینه‌سازی از نوع توپولوژی با درصد حجم‌های متفاوت روی سازه شوارتزاولیه و جایرود برای انتخاب حجم نهایی مناسب ازنظر قابلیت جذب انرژی بهتر که تاکنون در تحقیقی انجام‌نشده است اشاره کرد.

واژه های کلیدی

تـی پـی‌ام اس،شـوارتز اولیـه ،جـایرود،نرم‌افزار آبـاکوس و توسـکا ،کتیا،چگالی انرژی جذب‌شده،بهینه‌سازی توپولوژی،حجم بهینه.

مقدمه

ساختار داخلی استخوان پیچیده است و به‌طور مداوم با رشد، تقویت و جذب خود را بازسازی می‌کند اما ازدست‌دادن استخوان‌های بزرگ به‌طورمعمول نیاز به ایمپلنت‌های خاص برای بازگرداندن توانایی و عملکرد ظاهری دارند، موارد جایگزینی علاوه بر خواص مکانیکی ازنظر ظاهری نیز باید بااستخوان‌ها مطابقت داشته باشند. در دنیای امروز ثابت‌شده است که بهینه‌سازی تکنیک مناسبی برای طراحی جایگزین‌های استخوانی است. بهینه‌سازی از دیرباز یکی از موضوع‌های جذاب و مهم صنعت و مراکز پژوهشی بوده است[۱] . انجام بهینه‌سازی مستلزم دقت بالایی است و یکی از حوزه های تحقیقاتی مهندسی است که اخیراً به محبوب‌ترین زیرشاخه مهندسی تبدیل‌شده است. یکی از انواع بهینه‌سازی، بهینه‌سازی توپولوژی می‌باشد. درواقع بهینه‌سازی توپولوژی یک روش ریاضی است که چیدمان مواد را در یک فضای طراحی معین برای مجموعه معینی از بارگذاری ها، شرایط مرزی و محدودیت‌ها باهدف به حداکثر رساندن عملکرد سیستم بهینه می‌کند. یعنی به زبان ساده حجم مواد درون سازه را کم می‌کند تا به کارآمدترین طراحی دست یابد. تابع هدف در این نوع بهینه‌سازی زیبایی یا سهولت ساخت نیست. . یکی از روش‌های قابل‌اتکا و مهم در بهینه‌سازی، بهینه‌سازی با رایانه است که تجلی بهینه‌سازی برای قطعات صنعتی، سازه‌ها و بهینه‌سازی توپولوژی محسوب می‌شود، بهینه‌سازی توپولوژی عبارت است از به دست آوردن هندسه بهینه از یک هندسه اولیه ضمن در نظر گرفتن شرایط مسئله است[۲].

سازه تی پی‌ام اس سطحی است که مساحت آن به حداقل می‌رسد یعنی یک قطعه کوچک دارای کوچک‌ترین مساحت ممکن، تی پی‌ام اس ها مدل‌های سطحی حداقل هستند که در فضای سه‌بعدی ساخته‌شده‌اند و تناوب را در سه جهت مستقل در فضای سه‌بعدی نشان می‌دهند و می‌توانند به‌طور نامحدود در سه جهت بصورت متناوب گسترش یابند[۳]، هرکدام از آن‌ها خواص مکانیکی خود رادارند. یکی از دلایل استفاده از تی پی ام اس ها در جایگزینی‌های درون بدن وجود خواص مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی در آن‌ها است. سازه تی پی ام اس شوارتز اولین بار توسط شوارتز در سال

۱۸۶۵ ارائه شد و این ساختار از سری‌های معمولی تی پی ام اس است و برای نمونه‌سازی داربست‌های بافتی با نسبت سطح به حجم بالا و تخلخل بالا در نظر گرفته می‌شود.
نخستین بار در سال ۲۰۱۹ سطح تی پی ام اس ها برای طراحی داربست‌ها استفاده شدند از ویژگی‌های مهم یک داربست خوب می توان به ساختار کنترل‌شده، مقاومت الکتریکی بالا، داشتن منافذ به‌هم‌پیوسته با اندازه مناسب و ساختار زیست سازگار به‌منظور راحتی با ویژگی‌های زیست‌شناسی و ... اشاره کرد.

داربست مناسب و کارامد داربستی است که دارای استحکام مکانیکی بالا باشد و تخلخل آن در حدی باشد که به مقاومت داربست لطمه وارد نکند، بر اساس مطالعه‌ای شن انجام داده است قدرت نفوذپذیری سیال در شوارتز اولیه نسبت به سایر سطوح حداقل بالاتر است، درنتیجه این سطح برای طراحی داربست‌های بافتی از اندازه ۳ تا ۵ میلی‌متر مناسب است[۴].

براساس مطالعه ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸، اندازه سلول واحد نقش مهمی در عملکرد مکانیکی ساختارهای متخلخل دارد.

ماسکری و همکاران در سال ۲۰۱۵ به این نتیجه رسیدند که افزایش اندازه سلول واحد منجر به کاهش مدول ساختارهای متخلخل می‌شود.

ژائورد و همکاران در سال ۲۰۱۶ تحقیقی را ارائه کردند که به بررسی تاثیراندازه سلول واحد مؤثر بر خواص مکانیکی و جذب انرژی پرداخته است[۵].

طی مقاله ای در سال ۲۰۲۲ که در آن سازه جایرود با طراحی شبکه ای مثلثی و ساختار متخلخل مرکب با جایرودی با همین خصوصیات که از نظر توزیع تنش و میزان تخلخل بالاتر در جهت بهبود خواص مکانیکی ،بهینه شده، مقایسه شدند. نتایج نشان داد که در جایرود بهینه شده به وضوح استحکام، مدول یانگ و جذب انرژی ویژه به طور همزمان افزایش یافته است[۶].

در سال ۲۰۱۹ مقاله ای تحت عنوان طراحی و مدل سازی بهینه ساختارهای سلولی درجه بندی شده جایرود به چاپ رسید از این مقاله مطالب جالب و مفیدی استخراج شد[۷].

از دیگر مطالعاتی که در سال ۲۰۲۰ بر روی سازه های تی پی ام اس صورت گرفته است تاثیر تخلخل و ضخامت پوسته بر روی پاسخ تحت بار فشاری و خواص مکانیکی سازه شوآرتز میباشد.نتایج نشان داده،سازه شوآرتز با ضخامت پوسته بیشتر دارای مدول الاستیک نسبی و مدول یانگ بالاتر و استحکام بیشتری نیز میباشد[۸].

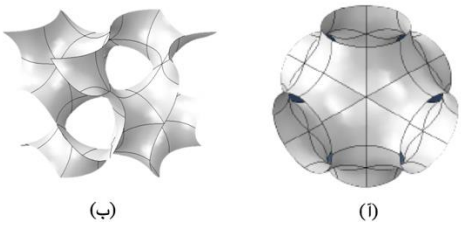
حال در پژوهش ارائه شده به مطالعه بر روی بهینه سازی هندسی دو سازه تی پی ام اس جایرود و شوارتز اولیه در جهت بهبود خواص مکانیکی پرداخته شده است.در واقع این پژوهش چگالی جذب انرژی دو سازه مذکور را وقتی بهینه سازی هندسه بر روی آنها صورت گرفته است را با هم مقایسه کرده است.

روش تحقیق

در ابتدا هندسه هر یک از سازه های تی پی ام اس شوارتز اولیه و جایرود در نرم افزار طراحی مهندسی کتیا طراحی شده است. روابط مربوط به هر یک به ترتیب در زیر آورده شده است:

$$(X,Y,Z)=cos(\lambda x X)+cos(\lambda y Y)+cos(\lambda z Z)\mathcal{F}\rho \quad (۱)$$

$$\sin(\mathbb{X})\cos(\mathbb{Y})+\sin(\mathbb{Y})\cos(\mathbb{Z})+\sin(\mathbb{Z})\cos(\mathbb{X})=0 \quad (۲)$$

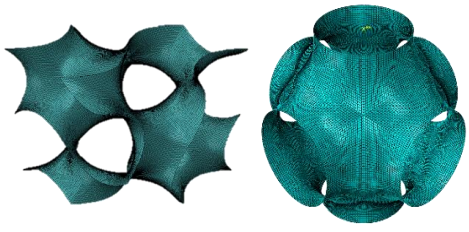


شکل-۱ (آ) سازه شوآرتز اولیه (ب) سازه جایرود

در این تحقیق برای هر یک از سازه های تی پی ام اس شوارتز اولیه و جایرود تمامی مراحل و تجزیه و تحلیل ها به صورت کاملا جداگانه انجام شده است.دو مدل تی پی ام اس را به ضخامت۱ میلی‌متر و ابعاد ۲ در ۲ میلی‌متر توسط نرم‌افزارمتلب کدنویسی شده و نهایتا در نرم افزار طراحی مهندسی کتیا تبدیل به سطح شده است در مرحله بعد فایل های مدلسازی شده در کتیا به محیط نرم‌افزار آباکوس فراخوانده شده اند.آباکوس نرم افزاری برای مدل سازی و تجزیه و تحلیل اجزا و مجموعه های مکانیکی (پیش پردازش) و تجسم نتایج تحلیل اجزا محدود، استفاده میشود، که در سال ۱۹۷۸ ارئه شده است. نام این نرم افزار بر اساس ابزار محاسبه چرتکه است.اساس کار آباکوس با استفاده از روش اجزای محدود میباشد.این نرم افزار از قسمت های متعددی تشکیل شده که به هر قسمت'ماژول نیز گفته میشود[۹, ۱۰] .

روی این دو سازه تحلیل‌هایی انجام داده شد به این صورت که در فضای ماژول قطعه، سازه ها به‌صورت دوبعدی طراحی و مدل سازی شده اند. برای سازه ها المانی به صورت ورقه یا به عبارت دیگر پوسته و از نوع همگن تعریف شده است. سپس در قسمت خواص مکانیکی برای سازه خواص ماده تعریف شده است. خواص ماده الاستیک که شامل مدول یانگ ۱۹۹۳/۲ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ می باشد برای این دو تی پی ام اس تعریف و به آنها نسبت داده شده است، سپس در ماژول گام آباکوس که امکان تعریف شرایط مرزی، زمینه های از پیش مشخص شده و تعاملاتی را که در همان ابتدای تجزیه و تحلیل قابل اجرا هستند ، مشخص شده است.در این قسمت حالت استاتیکی/عمومی به عنوان روش حل انتخاب و دوره زمانی برای هر مرحله همان پیش فرض خود نرم افزار آباکوس قرار داده شده است. بعلاوه اثر هندسی غیر خطی به عنوان وسیله ای برای

مشاهده تغییر شکل بزرگ فعال شده است.در محیط بارگذاری آباکوس، از سمت بالا به سازه ها نیرو وارد می شود. جابجایی به اندازه ۲۵ میلیمتر در جهت خلاف محور عمودی (بار فشاری) اعمال شده است به صورتی که ضلع پایین سازه ثابت در نظر گرفته شده است ، همچنین توزیع بار به صورت یکنواخت انتخاب شده است.اندازه مش ۲ میلی‌متر و المان ۴ گرهی با نقطه انتگرال گیری کاهش یافته را روی آن ها اعمال و تحلیل روی سازه به‌صورت کامل انجام شد. با استفاده از ماژول بصری آباکوس نمودار نیرو و جابجایی هر یک به دست آمده است(هدف از استخراج نمودار نیرو-جابجایی، دستیابی به مساحت زیر این منحنی ها می باشد که بیانگر انرژی جذب شده توسط سازه می باشد). در نهایت سازه وارد مرحله بهینه‌سازی آباکوس شده، در این مرحله با انتخاب بهینه‌سازی توپولوژی روی هر یک از سازه ها پنج بار به صورت مجزا بهینه سازی صورت گرفته است. بهینه سازی بر پایه هندسه برای انتخاب بهینه ترین ساختار انجام گرفته است. بهینه‌سازی توپولوژی درحالی‌که تلاش می‌کند به طراحی بهینه برسد، مواد را از عناصر موجود در منطقه طراحی حذف و اضافه می‌کند[۱۱]. به این صورت که برای هر بار بهینه سازی هندسی دو متغیر به عنوان توابع پاسخ تعریف شدند که شامل انرژی کرنشی و حجم به ترتیب برای توابع هدف و محدودیت بودند.در هر بار بهینه سازی هندسه، حجم به عنوان تابع محدودیت، در پنج درصد متفاوت که شامل ۱۰۰٪،۹۰٪،۸۰٪،۷۰٪،۶۰٪ میباشد ' است. انرژی کرنشی و سایر شرایط در هر پنج بار بهینه سازی' مانند هم بوده و در نهایت نمودارهای نیرو- جابجایی و قابلیت جذب انرژی هر یک از سازه ها مورد مقایسه و بررسی هم قرار گرفته اند.



(ب) (آ)

شکل-۲ مش بندی۲ میلیمتری.(آ) سازه شوآرتز (ب) سازه جایرود

نتایج

مقاله جاری به طور دقیق و ریزبینانه به بررسی و مقایسه چهار پارامتر در دو سازه تی پی ام اس شوارتز اولیه و جایرود قبل و بعد از انجام بهینه سازی هندسه پرداخته است . مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی،بررسی و مقایسه دقیق چگالی جذب انرژی ،بررسی حجم و در نهایت محاسبه و قیاس نرخ رشد چگالی جذب انرژی در هر یک از سازه ها،موارد مورد مطالعه در این پژوهش میباشند.

بررسی مقایسه ای رفتار مکانیکی عددی سازه‌های شوارتز اولیه و جایرود با حجم‌های مختلف به‌صورت نمودار نیرو - جابه‌جایی در شکل ۳ و ۴ رسم شده است که برای شوآرتز اولیه تا ۷۰٪ و برای جایرود تا ۶۰٪ میباشد، همان‌طور که در شکل قابل‌مشاهده است نیرو به واسطه اینکه قسمت‌هایی از سازه در فرآیند بهینه‌سازی حذف‌شده‌اند به‌مراتب کاهش پیداکرده است. یعنی نیرو در حالت اولیه سازه ها(۱۰۰٪) در جابجایی یکسان،بیشترین مقدار را دارد. این عدد برای سازه شوآرتز اولیه ۲۸۰۳۵/۸ نیوتن و برای سازه جایرود ۱۱۶۰۷۰ نیوتن میباشد.بنابراین همان طور که در شکل مشخص شده ،در شرایط یکسان تجزیه و تحلیل، برای دو سازه تی پی ام اس شوآرتز اولیه و جایرود،در جابجایی یکسان،سازه جایرود مقدار نیرو بیشتری را جذب کرده است.

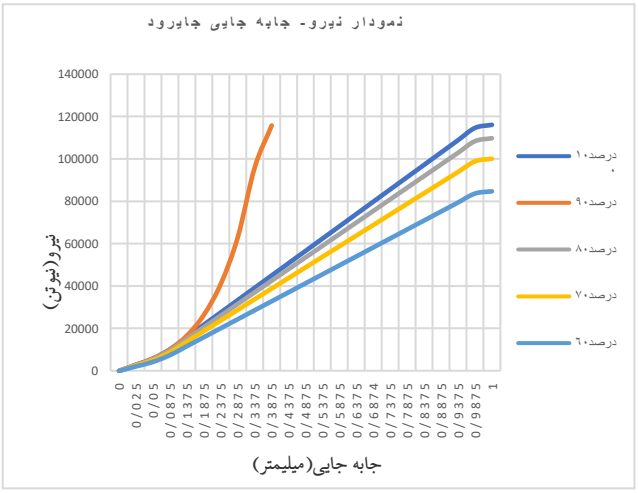
مهمترین هدف این پژوهش مقایسه چگالی جذب انرژی سازه های شوارتز اولیه و جایرود قبل و بعد از انجام بهینه سازی هندسه میباشد. به این معنا که انجام فرآیند بهینه سازی توپولوژی باید باعث افزایش چگالی جذب انرژی سازه شود.همان طور که در جدول ۱ و ۲ مشخص است' برای سازه شوارتز' بهینه سازی توپولوژی در حجم۹۰٪ بیشترین چگالی جذب انرژی را داشته و برای سازه جایرود درحجم ۷۰٪ که به ترتیب به صورت عددی شامل مقادیر ۵۵/۶۲۲۹۷ و ۱۵/۱۷۹۰۱ مگاژول بر متر مکعب میباشد. بنابراین بهینه سازی هندسه روی سازه شوارتز اولیه و جایرود به صورت موفق انجام شده است. همچنین با توجه به اعداد مشخص شده بین تی پی ام اس های شوارتز اولیه و جایرود'جایرود مقدار جذب انرژی بیشتری را داشته اما سازه شوارتز در درصد حجمی بیشتری به حالت بهینه رسیده است.

در این پژوهش از بهینه سازی هندسه استفاده شده است و این بهینه‌سازی یک فرآیند الگوریتمی میباشد که کارآمدترین طراحی را بر اساس مجموعه‌ای از محدودیت‌ها یا ویژگی‌ها، اغلب با حذف مواد از طرح، نشان می‌دهد'بنابراین با انجام بهینه سازی هندسه حجم سازه کاهش پیدا کرده. حجم اولیه سازه شوارتز قبل از بهینه سازی هندسه ۹۳۸/۵ میلیمتر مکعب و برای سازه جایرود ۱۲۴۵ بوده است' که به مراتب با انجام بهینه سازی کاهش یافته. سازه شوارتز در بهینه سازی ۹۰٪ به حداکثر چگالی جذب انرژی خود و حجم به ۸۸۶/۳ میلیمتر مکعب رسیده'به عبارت دیگر نرخ کاهش حجم از حالت اولیه سازه تا بهینه ترین حالت برای سازه شوارتز ' ۵/۵٪ میباشد. سازه جایرود در ۷۰٪ کاهش حجم' به بهینه ترین حالت خود رسیده و حجم ۸۹۹/۴ میلیمتر مکعب میباشد که نرخ کاهش حجم برای سازه جایرود از حالت اولیه تا ۷۰٪ بهینه سازی٪ ۳۰/۸ میباشد.جدول ۱ و ۲

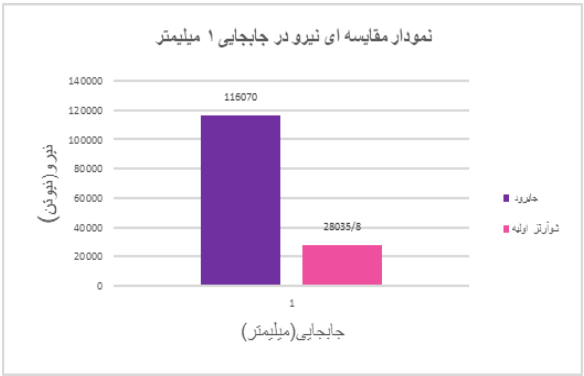
موضوع مورد مطالعه دیگر در این پژوهش'محاسبه نرخ رشد چگالی جذب انرژی در حالت بهینه شده برای دو سازه تی پی ام اس شوارتز اولیه و جایرود میباشد.سازه شوآرتز اولیه در ۹۰٪ بهینه سازی هندسه به حالت بهینه خود' که بیشترین چگالی جذب انرژی را داشته'رسیده.و سازه جایرود در ۷۰٪ به بهینه ترین حالت خود دست

پیدا کرده است.اعداد مربوط به نرخ رشد چگالی جذب انرژی برای این دو سازه به ترتیب مذکور شامل: ٪۱/۶۲۳ و ٪۱۸/۲۴ میباشد.

شکل۳- نمودار نیرو- جابجایی سازه شوآرتز اولیه در درصد های مختلف حجم در بهینه سازی هندسه



شکل۴ـ نمودار نیرو جابجایی سازه جایرود در درصد های مختلف حجم در بهینه سازی هندسه



شکل۵ – نمودار میله ای جذب نیرو سازه شوآرتز اولیه و جایرود در جابجایی ۱ میلیمتر

مقایسه چگالی جذب انرژی درصدهای متفاوت شوارتز تأثیر بهینه‌سازی هندسه بر توزیع تنش.

جدول - ۱مشخصات سازه شوارتز اولیه

درصد حجم سازه شوارتز اولیه	حجم (مترمکعب)	جذب انرژی (مگاژول)	چگالی جذب انرژی به‌صورت عددی (مگاژول بر مترمکعب)
٪۱۰۰	۹۳۸.۵	۱۴۰۱۷.۹۱۳	۱۴.۹۳۶۵۱
٪۹۰	۸۸۶.۳	۱۳۴۵۳.۱۵۲	۱۵.۱۷۹۰۱
٪۸۰	۷۸۹.۷	۱۱۵۱۶.۰۸۱	۱۴.۵۸۲۸۶
٪۷۰	۷۰۱.۹	۱۰۲۶۰.۳۵۷	۱۴.۶۱۷۹۷

جدول – ۲مشخصات سازه جایرود

درصد حجم سازه جایرود	حجم (مترمکعب)	جذب انرژی (مگاژول)	چگالی جذب انرژی به‌صورت عددی (مگاژول بر مترمکعب)
٪۱۰۰	۱۲۴۵	۵۸۰۳۴.۸۰۳	۴۶.۶۱۴۳
٪۹۰	۱۱۴۳	۵۷۸۶۲.۰۶	۵۰.۶۲۲۹۷
٪۸۰	۱۰۲۳	۵۴۹۰۴.۹۴	۵۳.۶۷۰۵۲
٪۷۰	۸۹۹.۴	۵۰۰۲۷.۳	۵۵.۶۲۲۹۷
٪۶۰	۷۷۰.۵	۴۲۳۳۰.۷۷	۵۴.۹۳۹۳۵

خروجی سازه شوارتز اولیه و جایرود با فرمت اس تی ال است که یکی از رایج‌ترین فرمت‌های موجود برای پرینترهای سه‌بعدی محسوب می‌شود.

نتیجه گیری و جمع بندی

- عدد ۲ میلی متر برای مش زدن هندسه سازه شوارتز اولیه و جایرود مورد استفاده قرار گرفته است.
- استفاده از المان ۴ گرهی با نقطه انتگرال گیری کاهش یافته برای مش زدن سازه شوارتز اولیه و جایرود در نرم افزار المان محدود آباکوس.
- بهینه‌سازی توپولوژی برای بهینه کردن سازه شوارتز اولیه و جایرود مورداستفاده قرار می‌گیرد.

- بهینه‌سازی توپولوژی روی سازه های شوارتز اولیه و جایرود با درنظرگرفتن توابع حجم و انرژی کرنشی انجام می‌شود.
- در سازه شوارتز اولیه و جایرود با توجه به این‌که هدف از بهینه کردن این سازه در این پژوهش بالا بردن سفتی و چگالی جذب انرژی است.

- با حذف شدن المان‌های غیرضروری در سازه های شوارتز اولیه جایرود بر اساس گشتاور اینرسی به این صورت که هر قسمت که گشتاور اینرسی بیشتری داشته باشد تنش کمتری دارد و بالعکس و متخلخل شدن پوسته، سطح مقطعی که نیرو را تحمل می‌کند نیز تغییر می‌کند و تغییرات تنشی ایجاد می‌شود به این معنا که تنش در قسمت‌هایی که تمرکز تنش وجود دارد بیشتر می‌شود.

- چگالی جذب انرژی روی سازه شوارتزاولیه از درصد حجم ۱۰۰ به ۹۰ افزایش می‌یابد و برابر با ۱۵/۱۷۹۰۱مگاژول بر مترمکعب و در سازه جایرود نیز چگالی جذب انرژی از درصد حجم ۱۰۰ به ۷۰ افزایش می یابد و برابر با ۵۵/۶۲۲۹۷ مگاژول بر مترمکعب می باشد.

- میزان نرخ رشد چگالی جذب انرژی در سازه شوارتز اولیه از ٪۱۰۰ به ٪۹۰ برابر با ۱/۶۲۳ درصد و در جایرود از ٪۱۰۰ به ٪۷۰ برابر با ۱۸/۲۴ درصد می باشد.
- بنابراین بهینه سازی هندسه به شکل موفقی روی دو سازه تی پی ام اس شوارتز اولیه و جایرو عمل کرده که باعث افزایش چگالی جذب انرژی شده. در واقع سازه شوارتز اولیه نسب به جایرود زودتر به حالت بهینه خود رسیده اما سازه جایرود با نرخ رشد بیشتری به حالت بهینه دست یافته است.

مراجع و منابع

۱. Park, J., et al., *Design of complex bone internal structure using topology optimization with perimeter control.* Computers in biology and medicine, ۲۰۱۸. **۹٤**: p. ۷٤-۸٤.
۲. Lógó, J. and H. Ismail, *Milestones in the 150-year history of topology optimization: A review.* Computer Assisted Methods in Engineering and Science, ۲۰۲۰. ۲۷(۲-۳): p. ۹۷-۱۳۲.
۳. Simsek, U., et al., *Modal characterization of additively manufactured TPMS structures: comparison between different modeling methods.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, ۲۰۲۱. **۱۱۵**(۳): p. ٦٥۷-٦۷٤.
٤. Salehi, A. and A. Daneshmehr, *Using Minimal Surface theory to design bone tissue scaffold and validate it with SLS 3D printer.* ۲۰۱۹.
٥. Yang, L., et al., *Insights into unit cell size effect on mechanical responses and energy absorption capability of titanium graded porous structures manufactured by laser powder bed fusion.* Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, ۲۰۲۰. **۱۰۹**: p. ۱۰۳۸٤۳.
٦. Li, D., et al., *Optimal design and modeling of gyroid-based functionally graded cellular structures for additive manufacturing.* Computer-Aided Design, ۲۰۱۸. **۱۰٤**: p. ۸۷-۹۹.
۷. Lv, X., et al., *Gyroid minimal surface-based composite porous structure with superior mechanical property via triangular grid design and stress distribution optimization.* Materials Today Communications, ۲۰۲۲. **۳۳**: p. ۱۰٤٥٥۰.
۸. Jia, H., et al., *An experimental and numerical investigation of compressive response of designed Schwarz Primitive triply periodic minimal surface with non-uniform shell thickness.* Extreme Mechanics Letters, ۲۰۲۰. **۳۷**: p. ۱۰۰٦۷۱.
۹. https://www.iranmodares.com/article-index.php?ID=٥٨۳۰.
۱۰. https://waterse.ir/abaqus-introduction/.
۱۱. https://abaqus-docs.mit.edu/۲۰۱۷/English/DSSIMULIA_Established.htm.