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

فاطمه دادبخش[۱]، سوسن پورامینائی[۲]، امید مهدی‌یار[۳]

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
Fatimadadbakhsh7@gmail.com
۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی،کازرون، ایران
susan.aminaee@gmail.com
۳- استاد گروه مهندسی پزشکی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی،کازرون، ایران
Omid.mahdiyar@iau.ac.ir

چکیده

این پژوهش در زمینه بررسی فرایند بهینه‌سازی توپولوژی در ساختار شوارتز اولیه با توابع هدف متفاوت به‌منظور بهبود استحکام و جذب انرژی توسط نرم‌افزار آباکوس با حلگر توسکا می‌باشد. در تحقیق پیش‌رو بهینه‌ترین حالت سازه شوارتز ازنظر قابلیت جذب انرژی، استحکام بالا و حجم کم ارائه‌شده و میزان قابلیت جذب انرژی با توجه به نمودارها و اعداد به‌دست‌آمده، مشخص شده است. سازه‌ها با حجم‌های متفاوت در توپولوژی مورد بررسی قرار گرفتند. هدف اصلی انجام این پژوهش رسیدن به ساختار بیومدیکال بهینه بوده، به‌طوری‌که سازه‌ای با حجم کم و چگالی جذب انرژی بالا حاصل شود و بتوان از آن در جایگزینی استخوان‌های بدن استفاده کرد. برای این منظور چگالی جذب انرژی سازه‌های معرفی‌شده نسبت به سازه موجود به‌صورت عددی بررسی شده اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که چگالی جذب انرژی برای سازه با درصد حجم ۹۰ ، بیشتر از سایز سازه ها می باشد. نتایج و دستاوردهای این پژوهش، بینش جدیدی را در تعیین سازه بهینه و درصد حجم مطلوب و ارتباط آن با چگالی جذب انرژی ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: تی پی‌ام اس، شوارتز اولیه، نرم‌افزار آباکوس و توسکا، کتیا، چگالی انرژی جذب‌شده، بهینه‌سازی توپولوژی، حجم بهینه

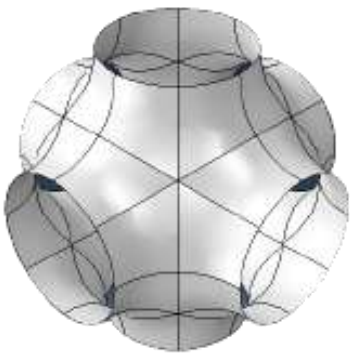
۱- مقدمه

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[۱]. 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 بارها شرایط مرزی و محدودیت‌ها باهدف به حداکثر رساندن عملکرد سیستم بهینه می‌کند[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 دوره‌ای گسترش یابند[۳] که هرکدام از آن‌ها خواص مکانیکی خود رادارند. یکی از دلایل استفاده از تی پی ام اس ها در جایگذاری‌های درون بدن وجود خواص مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی در آن‌ها است[۴]. سازه‌ای که در این پژوهش موردبررسی قرارگرفته است نوعی تی پی ام اس است.

هدف از این پروژه بهبود هندسه در توپولوژی با استفاده از توابع نیروی کرنشی و حجم در راستای چگالی جذب انرژی سازه شوارتز اولیه می باشد. علاوه بر این، حجم‌های متفاوت باهدف انتخاب حجم نهایی مناسب که با استفاده از آن چگالی جذب انرژی و سفتی سازه افزایش می‌یابد هم روی سازه اعمال شده است این روش تاکنون در هیچ مرجع علمی ارائه نشده است. هدف اصلی این پژوهش دستیابی به سازه نهایی شوارتز بهینه ازنظر حجم مناسب، سفتی و قابلیت جذب انرژی بالا برای استفاده در استخوان‌های بدن انجام‌شده است. از آنجایی که در این پژوهش به دنبال طراحی سازه ای بوده که جایگزین بخشی از استخوان شود، بنابراین بهینه سازی توپولوژی در نظر گرفته شده تا سازه بدست آمده دارای کمترین حجم ممکن با قابلیت جذب انرژی بالا باشد. دلیل انتخاب پارامتر قابلیت جذب انرژی، بخاطر این بوده که سازه حاصل شده، مشابه استخوان تحمل انرژی ها، ضربات و فشارهای وارده را داشته باشد.

ساختار متفاوت شوارتز اولیه با نسبت سطح به حجم بالا و تخلخل بالا باعث بهبود خواص مکانیکی می شود که از آن بعنوان داربست جایگزین برای ترمیم، حفظ یا بهبود عملکرد بافت استفاده می شود[۵]. دراین تحقیق روی سازه شوارتزاولیه تحلیل انجام‌شده و با درصد حجم‌های مختلف موردبررسی قرارگرفته است. این سازه در شکل ۱ نشان داده‌شده است.



شکل ۱: سازه شوارتز اولیه

ساختار شوارتز اولیه را میتوان به راحتی دستکاری کرد در شکل ۲ اضافه کردن سلول به شوارتز قابل مشاهده است[۶]:

شکل ۲: عملیات اضافه شدن به شوارتز اولیه

ابعاد و مشخصات سازه شوارتز اولیه در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: ابعاد سازه شوارتز اولیه

سازه	ابعاد (میلی متر)	ضخامت (میلی متر)
شو ارتز اولیه	۲× ۲	۱

در سال ۲۰۱۸ تحقیقی تحت عنوان بررسی اثر تعداد سلول‌ها روی جذب انرژی انجام شد، در سال‌های اخیر سازه‌های سبک‌وزن توجه زیادی را برای ساخت‌وساز به خود جلب کرده است از دلایل محبوبیت سازه‌ها می‌توان به وزن کم و سفتی و استحکام بالا و انرژی مناسب اشاره کرد، سازه‌ها به‌عنوان سفت کننده و دوام مناسب با جذب انرژی بالا در صنایع مختلف ازجمله خودروسازی و حفاظت کشتی و... استفاده می‌شوند. نتایج این بررسی نشان داد که مدل تی پی ام اس با تعداد زیادتر سلول می‌تواند برای جذب انرژی مناسب استفاده شود[۷].

در سال ۲۰۱۹ گفته شد که سطح تی پی ام اس ها برای طراحی داربست‌ها استفاده می‌شوند، ویژگی‌های مهم یک داربست خوب عبارت‌اند از: ساختار کنترل‌شده، دارای مقاومت الکتریکی، داشتن منافذ به‌هم‌پیوسته با اندازه مناسب، ساختار زیست سازگار به‌منظور راحتی با ویژگی‌های زیست‌شناسی و ... بهترین داربست داربستی است که دارای استحکام مکانیکی باشد و تخلخل آن در حدی باشد که به مقاومت داربست لطمه وارد نکند.

بر اساس مطالعه‌ای که آقای شین انجام داده است قدرت نفوذپذیری سیال در شوارتز اولیه نسبت به سایر سطوح مینی مال بالاتر است، درنتیجه این سطح برای طراحی داربست‌های بافتی از اندازه ۳ تا ۵ میلی‌متر مناسب است[۸].

در سال ۲۰۲۱ رفتار مکانیکی چند تی پی ام اس شوارتز سخت، جایرود۱، شوارتز اولیه را موردبررسی قرار داده شد. نتایج تجربی این بررسی نشان داد که معماری ساختار بر خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد و نتیجه ساختارها بسته به اثر اندازه آن‌ها متفاوت است:

شوارتزسخت بالاترین قدرت مکانیکی را نسبت به معماری‌های دیگر نشان داد و شوارتز اولیه ساختاری با جذب انرژی مناسب به‌ویژه در طول تغییر شکل پلاستیک را از خود نشان داد[۹].

در سال ۲۰۲۲ ساختارهای تی پی ام اس از پوسته‌های پیوسته و صاف تشکیل‌شده‌اند که نسبت سطح به حجم بالا و اتصال متقابل منافذ را فراهم می‌کنند که نشان‌دهنده راه‌حلی نوظهور برای کاربردهای سبک‌وزن است.

محققان امکان پرینت سه‌بعدی سازه‌های تی پی ام اس را نشان دادند و خواص ساختارهای یکنواخت تی پی ام اس را بررسی کرده‌اند. ذوب لیزری یکی از محبوب‌ترین و مؤثرترین روش‌ها برای ساخت سازه‌های تی پی ام اس است[۱۰].

1 Gyroid

۲- روش کار

در این تحقیق تجزیه‌وتحلیل اجزای محدود برای پیش‌بینی رفتار سازه شوارتز با درنظرگرفتن شرایط مرزی در نرم‌افزار تجاری آباکوس انجام شده است. مدل تغییر شکل‌پذیر به دلیل شرایط بارگذاری در یک سیستم مختصات سه‌بعدی شبیه‌سازی‌شده است. بررسی همگرایی[1] مش نشان می‌دهد که باید روی ۲ میلی‌متر تنظیم شود. در این هندسه نوع المان پوسته ۴ گرهی با نقطه انتگرال گیری کاهش یافته و عدد مش ۲ میلی متر در نظر گرفته شد که در جدول ۲ قابل‌نمایش است.

جدول ۲: اندازه مش و نوع المان به‌کاربرده شده روی سازه شوارتزاولیه

عدد مش (میلی‌متر)	نوع المان
۲	S4R چهارگرهی

المان ۴ گرهی از گروه ورق‌ها، مناسب و رایج در استفاده‌های معمول تحلیل ورق، دارای فرمول‌بندی کاهش یافته از معروف‌ترین المان‌های مورد استفاده در تحلیل مسائل ورق که دارای سرعت بالا در گرفتن پاسخ نیز می باشد. به دلیل پوسته بودن هندسه در این پژوهش از المان های پوسته استفاده شده است. در این تحلیل درجه خطی چهار گره امتحان شده، همگرایی مش را صحیح نشان داد.

در ابتدای این تحقیق برای دستیابی به روش مناسب بهینه‌سازی روش‌های متفاوت موجود مورد آزمایش قرار گرفت، بهینه‌سازی‌های مورد آزمایش عبارت‌اند از:

بهینه‌سازی اندازه[2]: در این روش با تغییر ضخامت پوسته، اجازه تغییرات اندکی در قطعه ایجاد می‌شود.

بهینه‌سازی مهره‌ای[3]: از طریق افزودن مهره‌های تقویتی به یک سازه پوسته‌ای منجر به افزایش ممان اینرسی می‌شود که درنهایت استحکام سازه افزایش و تنش را کاهش می‌دهد

بهینه‌سازی توپولوژی[4]: بهینه‌سازی ازنظر وزن را بهینه‌سازی توپولوژی می‌گوییم یک فرآیند

در این تحقیق یک مدل تی پی ام اس به نام شوارتز اولیه به ضخامت ۱ میلی‌متر و ابعاد ۲ در ۲ میلی‌متر توسط کدنویسی در نرم‌افزار متلب طراحی شده و سپس بااستفاده از نرم افزار طراحی مهندسی کتیا سازه با پسوند اس تی ال[5] تولید و تبدیل به سطح شده است و در نهایت آن را به نرم‌افزار آباکوس وارد کرده و روی آن تحلیل‌هایی انجام شد به این صورت که در فضای قطعه به‌صورت دوبعدی در نظر گرفته و مرحله بعد در محیط خواص مکانیکی متریال الاستیک[6] برای سازه شوارتز اولیه تعریف شد و به سازه نسبت داده شد، در محیط بارگذاری از سمت بالا به سازه انرژی وارد شد و جابجایی منفی ۲۵ بر روی سازه اعمال شد و ضلع پایین را ثابت در نظر گرفته، سپس عدد مش ۲ میلی‌متر را روی آن اعمال و تحلیل روی سازه به‌صورت کامل انجام شد و با استفاده از ابزار نمودار نیرو و جابجایی آن رسم شد و سپس سازه وارد مرحله بهینه‌سازی شده، در این مرحله با انتخاب بهینه‌سازی توپولوژی و در نظر گرفتن توابع هدف حجم و انرژی کرنشی با چند درصد حجم متفاوت ۱۰۰٪، ۹۰٪، ۸۰٪، ۷۰٪ خروجی گرفته شد و نمودارهای نیرو جابجایی و قابلیت جذب انرژی هرکدام از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته اند و با توجه به نمودارهای به‌دست‌آمده میتوان بیان کرد که از حجم٪۱۰۰ به ۹۰٪ مقدار جذب انرژی سازه بهینه‌شده افزایش می‌یابد و به این دلیل است که بهینه‌سازی درست عمل کرده و علاوه بر اینکه حجم را کم کرده، چگالی جذب انرژی را بالابرده و سازه ازلحاظ جرم و چگالی جذب انرژی بهینه‌شده است.

1 Convergence
2 Sizing optimization
3 Bead optimization
4 Topology optimization
5 STL: Standard Triangle Language
6 elastic

در این تحقیق بهینه‌سازی بر پایه هندسه برای بررسی ساختار نهایی صورت گرفت. دو متغیر به‌عنوان توابع پاسخ تعریف شدند که شامل انرژی کرنشی و حجم به ترتیب برای توابع هدف و محدودیت هستند. تابع محدودیت با چند درصد متفاوت ۷۰-۸۰-۹۰-۱۰۰ در نظر گرفته شد.

۳- نتایج

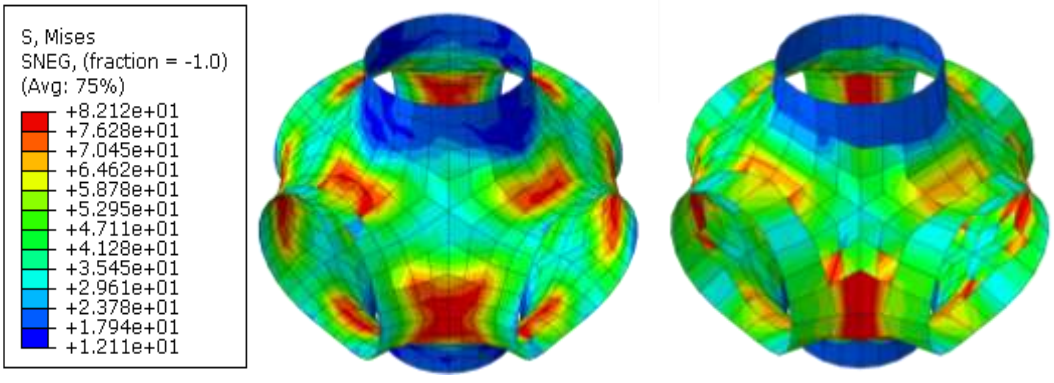
۳-۱- یافتن تعداد المان مناسب جهت همگرایی

به دلیل وابستگی نتایج حل المان محدود به‌اندازه مش و تعداد المان‌های استفاده‌شده، همواره باید در نواحی‌ای از مدل که مقادیر تنش، کرنش و یا هر پارامتر دیگری که باید به‌طور دقیق محاسبه گردد، همگرایی مش چک شود. در این پژوهش برای انتخاب اندازه مش مناسب طبق جدول ۳ مطالعه همگرایی مش انجام شده است. با توجه به این جدول، برای رسیدن به تعداد مطلوب المان‌ها یک پارامتر اصلی که هدف تحلیل بوده در نظر گرفته شد، در گام بعد تعداد المان‌ها و عدد مش را عوض کرده و مجدداً حل را تکرار کرده تا تأثیر این تغییر عدد مش بر پارامتر مذکور سنجیده شود. این کار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که دیگر با افزایش تعداد المان‌ها تغییر زیادی در جواب‌ها ایجاد نشود، درواقع هزینه محاسبات بر تغییرات جواب‌ها غلبه کند. در این مرحله به‌اصطلاح گفته می‌شود که جواب‌ها همگرا شده و نیازی به استفاده از تعداد بیشترالمان نیست و دیگر کمکی به افزایش دقت حل نمی‌کند و تنها مدت‌زمان حل را افزایش می‌دهد.

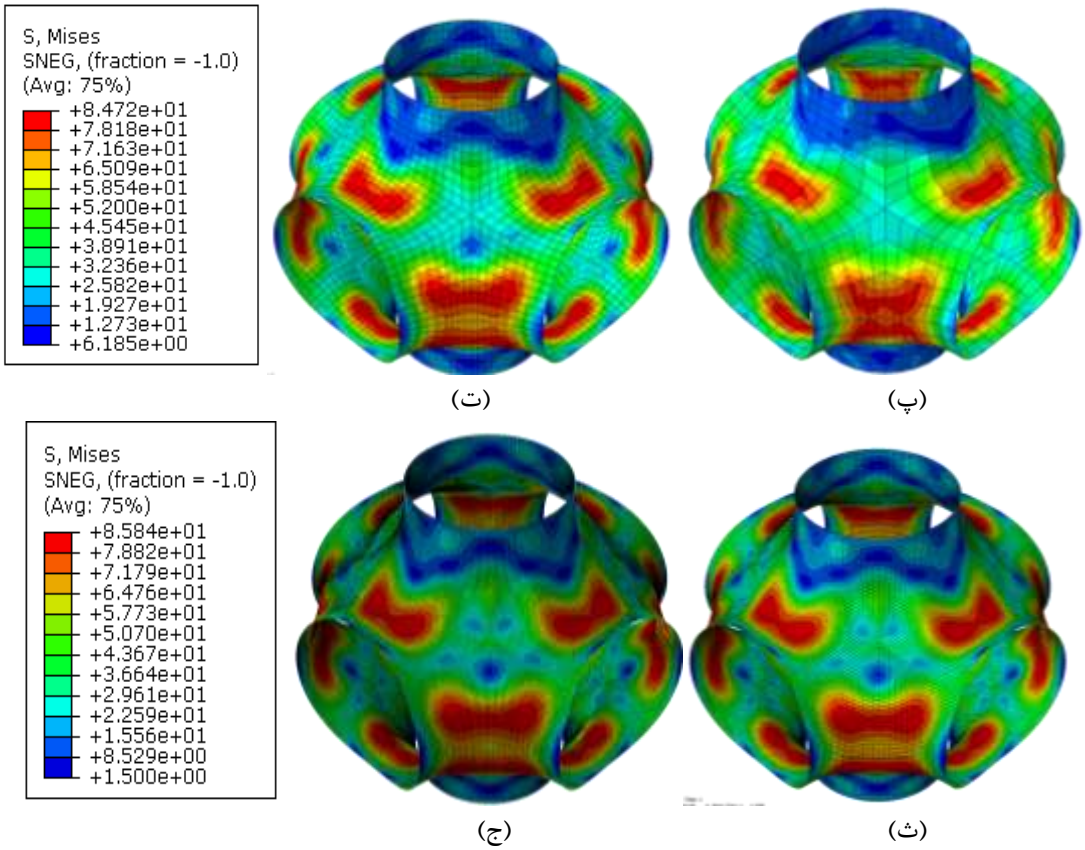
جدول ۳: اندازه مش و تعداد المان‌های امتحان شده برای همگرایی مش روی سازه شوارتز

	اندازه مش (میلی‌متر)	تعداد المان	ماکزیمم تنش (مگا پاسکال)	نیرو (نیوتون)
سازه شوارتز اولیه	۲۰	۴۳۲	۸۵/۹۲	۲۲۴۱/۶۱
	۱۵	۷۶۸	۸۲/۱۲	۲۲۹۴/۳۷
	۱۰	۱۰۸۸	۸۳/۱۵	۲۳۰۱/۳۷
	۵	۳۸۸۸	۸۴/۷۲	۲۲۹۵/۳۷
	۲	۲۴۴۶۴	۸۵/۶۷	۲۲۹۲/۳۱
	۱	۱۰۰۸۰۰	۸۵/۸۴	۲۲۹۱/۱۷

توزیع تنش و المان‌ها در اندازه مش‌های مختلف در شکل ۳ قابل‌نمایش است.

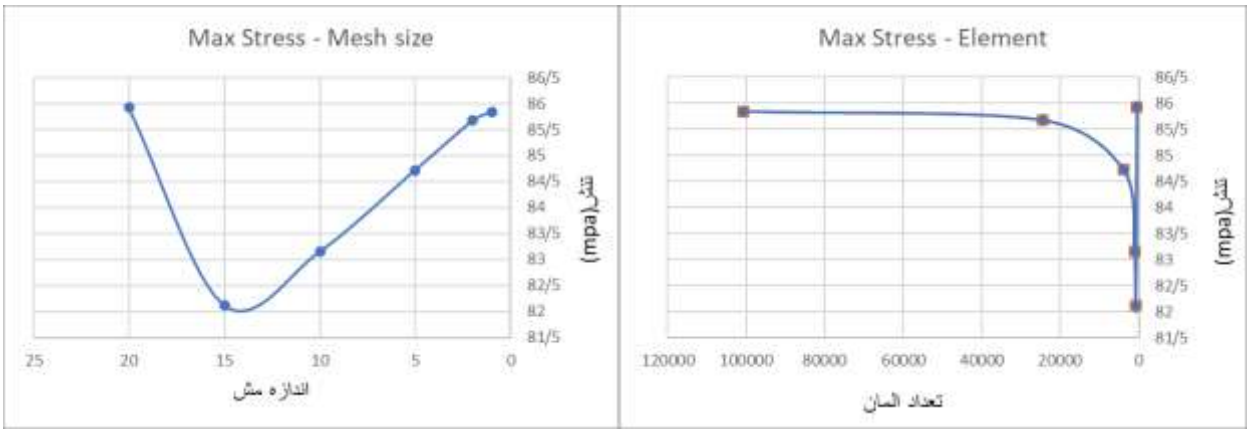


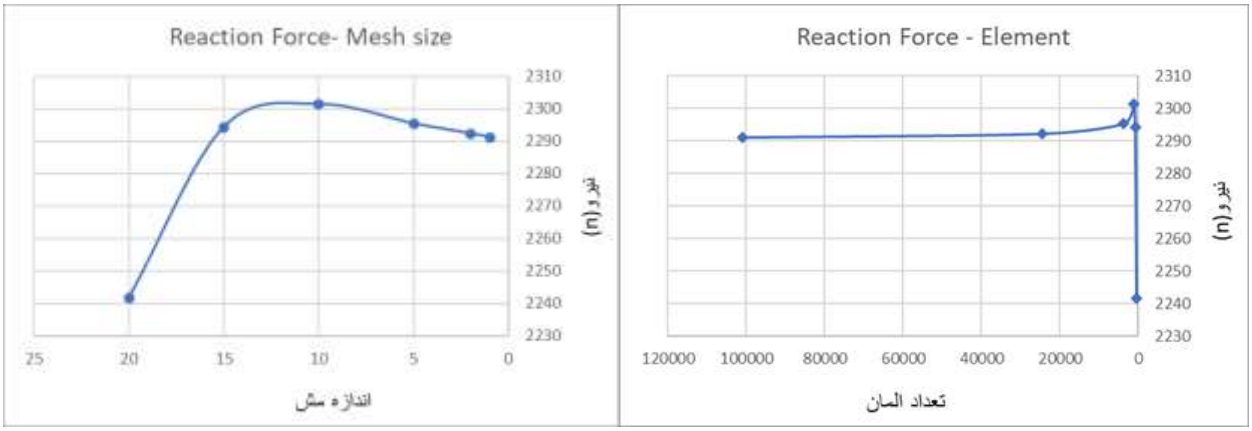
(ب) (الف)



شکل ۳: انواع عددهای امتحان شده مش برای سازه شوارتز
(لف) مش ۲۰ میلی‌متر، (ب) مش ۱۵ میلی‌متر، (پ) مش ۱۰ میلی‌متر، (ت) مش ۵ میلی‌متر،
(ث) مش ۲ میلی‌متر، (ج) مش ۱ میلی‌متر.

نمودار به‌دست‌آمده برای مطالعه همگرایی مش نیز در شکل ۴ قابل‌مشاهده است.





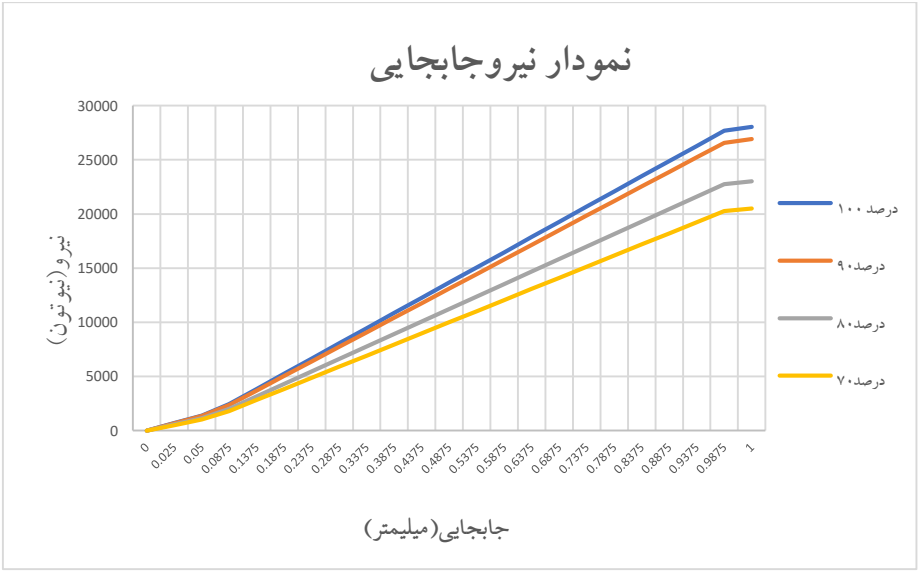
(ت) (پ)

شکل ۴: نمودارهای مطالعه همگرایی مش.
(الف) تنش برحسب تعداد المان. (ب) تنش برحسب اندازه مش.
(پ) نیرو برحسب تعداد المان. (ت) نیرو برحسب اندازه مش.

با توجه به شکل های ۳ و۴ که مشاهده شده است که هرچقدر از اعداد درشت مش به سمت اعداد کوچک‌تر پیش می‌رود، نتایج به سمت همگرایی می‌رود و بعد از یک نوسان از عدد ۲ میلی‌متر به بعد تغییرات چشمگیری دیده نشده است. با توجه به این موضوع سازه در اندازه مش ۲ میلی‌متر به همگرایی می‌رسد و از تعداد مش‌ها مستقل می‌شود و پاسخ قابل اتکا می باشد.

۲-۳- ارزیابی رفتار مکانیکی سازه شوارتز اولیه

مقایسه رفتار مکانیکی عددی سازه‌های شوارتز اولیه با حجم‌های مختلف به‌صورت نمودار نیرو - جابه‌جایی در شکل ۵ رسم شده است، همان‌طور که در شکل قابل‌مشاهده است نیرو به‌واسطه اینکه قسمت‌هایی از سازه در فرآیند بهینه‌سازی حذف‌شده‌اند به‌مراتب کاهش پیداکرده است اما در سازه ۱۰۰٪ نیرو بیشتری نمایش داده‌شده است که با توجه به کاهش حجم کمتر نسبت به کاهش انرژی در این درصد، چگالی جذب انرژی آن کمتر از چگالی جذب انرژی در سازه با حجم ۹۰٪ است. همچنین مقادیر محاسبه‌شده آن در درصد حجم‌های مختلف جلوتر آورده شده است.



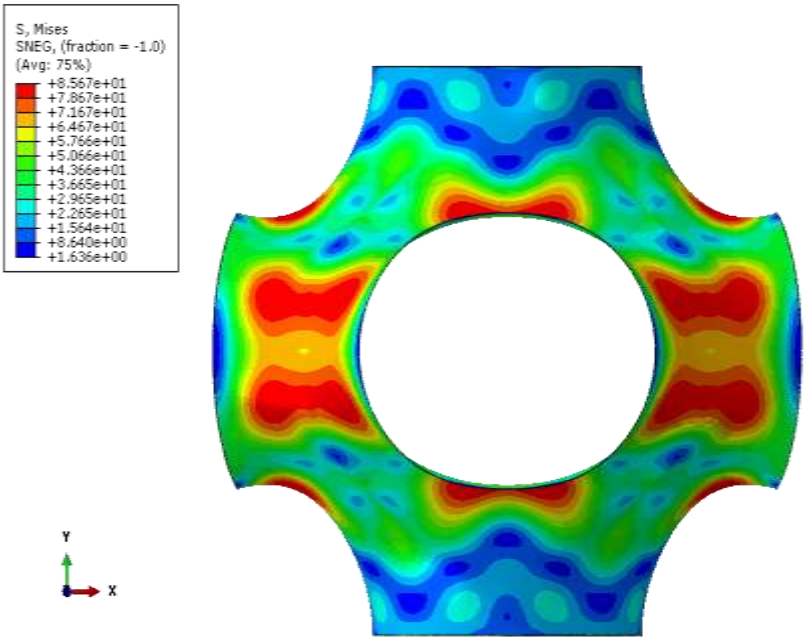
شکل ۵: نمودار نیرو جابجایی سازه شوارتز با حجم‌های مختلف

در جدول ۴ حجم مؤثر سازه شوارتز در هر درصد و چگالی جذب انرژی آن‌ها قابل مشاهده است. برای به دست آوردن چگالی جذب انرژی، جذب انرژی به‌دست‌آمده برای هر سازه را بر حجم آن سازه تقسیم می‌کنیم. مشاهده شده است که برای درصد حجم ۹۰، بیشترین مقدار چگالی جذب انرژی حاصل شده است. بنابراین این حالت به عنوان سازه بهینه در نظر گرفته می شود.

جدول ۴: مقایسه چگالی جذب انرژی درصدهای متفاوت شوارتز تأثیر بهینه‌سازی هندسه بر توزیع تنش

درصد حجم سازه شوارتز	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	۷/۷۸۹	۱۱۵۱۶/۰۸۱	۱۴/۵۸۲۸۶
٪۷۰	۷۰۱/۹	۱۰۲۶۰/۳۵۷	۱۴/۶۱۷۹۷

توزیع تنش فون میسز[1] برای سازه شوارتز اولیه در شکل ۶ نشان داده‌شده است. همان‌طور که در این شکل قابل‌مشاهده است، قسمت‌های قرمزرنگ در سازه نشان‌دهنده تمرکز تنش و جذب انرژی بالا هستند که فرآیند بهینه‌سازی در آباکوس این قسمت‌ها را حفظ می‌کند و قسمت‌های غیرضروری که به رنگ آبی نمایش داده شده‌اند و نشان‌دهنده‌ی جذب انرژی کمتر در این بخش‌ها می‌باشند را به‌منظور کم کردن حجم و افزایش چگالی جذب انرژی از سازه حذف می‌کند، به‌عبارت دیگر قسمت‌هایی از سازه که ازنظر گشتاورهای اینرسی نسبت به بخش‌های دیگر گشتاور اینرسی بزرگ‌تری دارند تمرکز تنش در آن‌ها کمتر است به این معنا که اگر گشتاور اینرسی زیاد باشد، تنش در آن قسمت کم است و بالعکس.



شکل ۶: توزیع تنش فون میسز در سازه شوارتز

1 Von mises tension

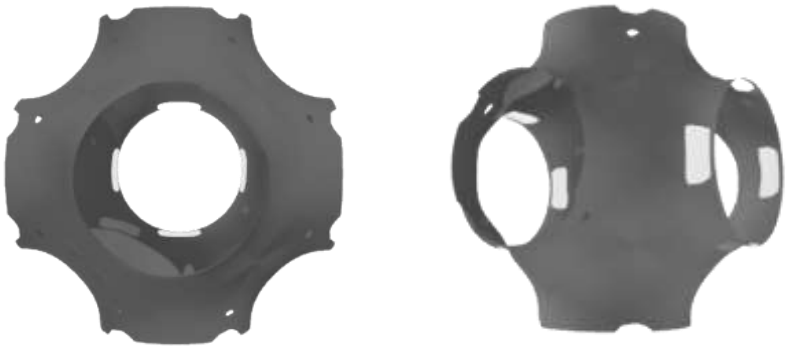
خروجی سازه شوارتز اولیه با درصد حجم‌های متفاوت در جدول ۵ نمایش داده‌شده است.

جدول ۵ خروجی اس تی ال درصدهای متفاوت سازه شوارتز اولیه بهینه‌شده.

اس تی ال سازه‌های بهینه‌شده	درصد حجم در نظر گرفته‌شده
	٪۷۰
	٪۸۰
	٪۹۰ درصد حجمی بهینه ازنظر چگالی جذب انرژی
	٪۱۰۰

تأثیر بهینه‌سازی هندسه بر چگالی جذب انرژی به این صورت است که با کاهش حجم سازه شوارتز، چگالی جذب انرژی افزایش می‌یابند، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده چگالی جذب انرژی در سازه با درصد حجم ۹۰ بیشتر از سایر درصدها است. درحالی‌که از درصد ۹۰ به ۷۰ ترتیب صعودی چشم‌گیری ندارد یعنی به سازه بهینه ازنظر سفتی و چگالی جذب انرژی در حجم ۹۰٪ دست‌یافته شده است. چگالی جذب انرژی در ۹۰ درصد برابر با ۱۵/۱۷۹۰۱ مگاژول بر مترمکعب می‌باشد.

پس از چرخه‌های متعدد، بر اساس فرایند بهینه‌سازی تأیید کرد که سازه شوارتز با درصد کمتر از ۹۰ درصد بهینه‌شده است، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده‌شده است، آن قسمت از هندسه که در محدوده حجم مؤثر قرار دارد تقریباً بدون تغییر باقی‌مانده است.



شکل ۷: مدل بهینه‌شده با حذف المان‌های غیرضروری

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش بر روی چند حجم متفاوت نسبت به حجم کلی از تی پی ام اس شوارتز اولیه با انجام بهینه‌سازی با توابع یکسان بر هندسه‌های مهندسی‌شده که دارای چگالی جذب انرژی بیشتر از ساختار اولیه شوارتز است تمرکز دارد. یافته های اصلی این تحقیق عبارتند از:

- با حذف شدن المان‌های غیرضروری در سازه 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، با توجه به این‌که سازه شوارتز اولیه در درصد حجم ۹۰ سازه بهینه اعلام‌شده درنتیجه چگالی جذب انرژی به‌دست‌آمده با استفاده از تقسیم جذب انرژی هر درصد بر حجم تأثیرگذاری که از نرم‌افزار کتیا به‌دست‌آمده از سازه با حجم ۱۰۰٪ به ۹۰٪ افزایش‌یافته است.

- مقدار چگالی جذب انرژی در سازه شوارتز اولیه با درصد حجمی ۹۰ برابر ۱۷۹۰۱/ ۱۵مگاژول بر مترمکعب است.

- میزان نرخ رشد چگالی جذب انرژی در سازه شوارتز از ۱۰۰٪ به ۹۰٪ برابر با ۱/۶۲۳ درصد است. برای به دست آوردن نرخ رشد چگالی، چگالی جذب انرژی سازه‌ها با درصد حجم‌های متفاوت به‌صورت دوبه‌دو در نظر گرفته‌شده و سپس پاسخ بر عدد چگالی جذب انرژی کوچک‌تر تقسیم و ضرب‌در ۱۰۰ شد. به این صورت درصد نرخ رشد چگالی بین سازه‌ها با حجم‌های متفاوت به دست آمد و بین ۹۰٪ و ۱۰۰٪ میزان نرخ رشد چگالی ۱/۶۲۳ درصد به دست آمد.

۵- مراجع

[1] Park, J., et al., Design of complex bone internal structure using topology optimization with perimeter control, Computers in biology and medicine, 94: p. 74-84, 2018.

[2] Lógó, J. and H. Ismail, Milestones in the 150-year history of topology optimization: a review, 2020.

[3] Simsek, U., et al., Modal characterization of additively manufactured TPMS structures: comparison between different modeling methods, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 115(3): p. 657-674, 2021.

[4] Jiang, W., et al., A voxel-based method of multiscale mechanical property optimization for the design of graded TPMS structures, Materials & Design, 204, 2021.

[5] Almeida, H. and P. Bártolo, The use of periodic minimal surfaces for scaffolds design, in Innovative developments in design and manufacturing, CRC Press, p. 93-98, 2009.

[6] Almeida, H.A. and P.J. Ba´ rtolo, The Use of Schwartz Geometries for Scaffold Design in Tissue Engineering Applications, Engineering Systems Design and Analysis, 2010.

[7] Sychov, M.M., et al., Mechanical properties of cellular structures with Schwartz primitive topology, International Conference on Global Research and Education, Springer, 2018.

[8] Salehi, A. and A. Daneshmehr, Using Minimal Surface theory to design bone tissue scaffold and validate it with SLS 3D printer, 2019.

[9] Kladovasilakis, N., K. Tsongas, and D. Tzetzis, Mechanical and FEA-assisted characterization of fused filament fabricated triply periodic minimal surface structures, Journal of Composites Science, 5(2): p. 58-66, 2021.

[10] Guo, X., et al., Enhancement in the mechanical behaviour of a Schwarz Primitive periodic minimal surface lattice structure design, International Journal of Mechanical Sciences, 216, 2022.