

## مروری بر مشخصات مکانیکی و کاربردهای سازه های طراحی شده بر مبنای سطوح مینیمال تکرار شونده و نحوه مدل سازی آن ها

**چکیده:** سطوح مینیمال، نوعی خاصی از سطوح هندسی هستند که مجموع انحناهای اصلی آن ها در دو راستا در هر نقطه روی سطح، برابر با صفر است. از مهم ترین انواع این سطوح می توان به سطوح مینیمال شوارز پی، الماسی، ژیروید و I-WP اشاره کرد. از کاربردهای برجسته این سطوح می توان به طراحی و ساخت سازه های سبک، فیلتراسیون، عایق ها، کاتالیزورها، جاذب ها و همچنین کاربردهای پزشکی نظیر تولید استخوان های مصنوعی و ایمپلنت ها اشاره نمود. در این پژوهش خواص مکانیکی ساختارهای سه بعدی که در اثر تکرار سلولهای واحد مینیمال ایجاد می شوند نظیر استحکام و سفتی، همچنین قابلیت جذب انرژی، خستگی و دوام آن ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین کاربردهای این سطوح در حوزه های مهندسی پزشکی، سازه ای، سیالات و انتقال حرارت و خودروسازی بررسی شده است. در ادامه روش های شبیه سازی و مدل سازی این سطوح که در المان محدود و پرینت سه بعدی مورد نیاز است ارائه می شود. سطوح مینیمال تکرار شونده به دلیل ویژگی های منحصر به فرد خود از جمله فراهم نمودن نسبت سطح به حجم بالا و نسبت سفتی به وزن و استحکام به وزن بالا پتانسیل بالایی برای استفاده در حوزه های مختلف صنعتی و پزشکی دارند و قابلیت این را دارند که در چارت های انتخاب مواد، گزینه های جدیدی را فرا روی پژوهشگران و مهندسان قرار دهند.

**واژه های راهنما:** خواص مکانیکی، کاربردهای سطوح مینیمال، مدل سازی سطوح مینیمال، بهینه سازی

پوریا ترابی

دانشجوی کارشناسی ارشد

علی حسن آبادی\*

استادیار،

دانشکده مهندسی،

گروه مهندسی مکانیک،

دانشگاه بیرجند، بیرجند

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶

Porya Torabi  
MSc Student

Ali Hasanabadi\*  
Assistant Professor,  
Faculty of Engineering,  
Mechanical  
Engineering  
Department,  
University of Birjand,  
Birjand

## A review of the mechanical characteristics and applications of structures designed based on triply periodic minimal surfaces and their modeling methods

**Abstract:** Minimal surfaces are a special type of geometric surfaces whose sum of main curvatures in two directions at any point is equal to zero. Among the most important types of these levels, we can mention the minimal Schwarz levels including Primitive, Diamond, Gyroid and I-WP. Among the outstanding applications of these surfaces, we can mention the design and construction of light structures, filtration, insulators, catalysts, absorbents, as well as medical applications such as the production of artificial bones and implants. In this research, the mechanical properties of three-dimensional structures created by the repetition of minimal unit cells, such as strength and stiffness, as well as their ability to absorb energy, fatigue and durability, have been investigated. Also, the applications of these surfaces in the fields of medical, structural, fluids and heat transfer and automotive engineering have been investigated. In the following, the simulation and modeling methods of these surfaces, which are required in finite element and 3D printing, are presented. Three dimensional periodic minimal surfaces have a high potential for use in various industrial and medical fields due to their exceptional features, including high surface-to-volume ratio, stiffness-to-weight ratio, and strength-to-weight ratio to present new options to researchers and engineers in material selection charts.

**Keywords:** Minimal surfaces, Properties of minimal surfaces, Applications of minimal surfaces, Modeling of minimal surfaces

## ۱- مقدمه

اخیر گزارش شده است مورد بررسی قرار گیرد. در این زمینه ابتدا خواص مکانیکی این سازه‌ها از جمله استحکام و سفتی، قابلیت جذب انرژی، خستگی و دوام آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس مواردی عملی که این سازه‌ها می‌توانند کاربرد داشته باشند در زمینه‌هایی نظیر مهندسی پزشکی، سازه‌ای، سیالات و انتقال حرارت و خودروسازی مورد توجه قرار می‌گیرد. در انتها نیز پژوهش‌های مرتبط با روش‌های شبیه‌سازی و نحوه مدل‌سازی این سطوح مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- بررسی مشخصات مکانیکی سطوح مینیمال تکرار شونده  
۲-۱- استحکام و سفتی

بررسی‌های تجربی و عددی نشان داده‌اند که سطوح مینیمال تکرار شونده به دلیل هندسه پیچیده و توزیع یکنواخت بار می‌توانند از نظر مکانیکی عملکرد بهتری نسبت به ساختارهای معمولی داشته باشند.

گوانگ فو و همکاران [۶] به بررسی طراحی، خواص مکانیکی و شبیه‌سازی ساختارهای مینیمال مبتنی بر ساخت پرینت سه بعدی به روش SLM<sup>۵</sup> پرداختند و هدف آن‌ها بررسی مزایای سطوح مینیمال در ساختار سازه‌ها و بررسی خواص مکانیکی آن‌ها بوده است. آن‌ها نشان دادند که استفاده از سطوح مینیمال در طراحی ساختارهای شبکه‌ای گرادپانی، مزایایی مانند نسبت سطح به حجم بالا، اتصال بهتر حفره‌ها و توانایی کنترل توزیع بهتر نیروهای وارده برای خواص مکانیکی مختلف را ارائه می‌دهد. این سطوح می‌توانند در طراحی ساختارهای گرادپانی، عملکردی پیوسته را از طریق تغییر پارامترهای کسر حجمی ارائه دهند.

مطابق پژوهش گوانگ فو و همکاران [۶]، ساختارهای ژیروید گرادپانی شده (شکل ۱-الف)، مدول الاستیک، استحکام تسلیم و تغییرات تنش کمتری را در مقایسه با سازه‌های مبتنی بر شبکه با ساختار یکسان نشان می‌دهند. همچنین پرینت سه بعدی می‌تواند به طور مناسبی ساختارهای مینیمال با خواص گرادپانی را ایجاد نماید (شکل ۱-ب)). قابل ذکر است ساختارهای مبتنی بر حالت پوسته‌ای ضخامت دار در مقایسه با ساختارهای مبتنی بر شبکه جامد توپر، پایداری مکانیکی و خواص الاستیک بالاتری را نشان می‌دهند. شکل (۱-ج) شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای پیش‌بینی خواص مکانیکی فشاری و رفتار تغییر شکل نمونه را نشان می‌دهد.

سون و همکاران [۸] به بررسی تجربی خواص مکانیکی چهار نوع ساختار مینیمال ساخته شده به روش پرینت سه بعدی DLP<sup>۶</sup> پرداختند (شکل ۲) و هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی استحکام فشاری با توجه به چگالی نسبی ساختارها بوده است.

ساختارهای متخلخل به دلیل وزن سبک و عملکرد مکانیکی مطلوب به‌طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. این ساختارها که نظیر بافت‌های گیاهی و استخوان‌ها در طبیعت نیز مشاهده می‌شوند [۱]، الهام‌بخش تولید مواد متخلخل مصنوعی با کارایی بالا بوده‌اند. این مواد در حوزه‌هایی نظیر جذب‌کننده‌ها و کاتالیزورها نیز کاربرد دارند و می‌توانند عملکرد در زمینه‌های مختلف انرژی و محیط زیست را بهبود بخشند [۲].

ساختارهای مبتنی بر سطوح مینیمال از جمله مهم‌ترین ساختارها در این حوزه هستند [۳]. سطوح مینیمال به نحوی فرمول‌بندی شده‌اند که مجموع مقادیر انحناهای اصلی در هر نقطه روی سطح برابر با صفر می‌باشد. سطوح مینیمال شوارز که شامل انواعی چون پی<sup>۱</sup>، الماسی<sup>۲</sup>، ژیروید<sup>۳</sup> و I-WP<sup>۴</sup> می‌باشند به دلیل توپولوژی قابل کنترل و خواص مهندسی عالی، مورد توجه محققان از زمینه‌های مختلف قرار گرفته‌اند [۴]. این ساختارها با هندسه‌های همبند و سطوح صاف، قابلیت تقلید ویژگی‌های بافت‌هایی نظیر استخوان را نیز دارند [۵].

بررسی خواص مکانیکی ساختارهای متخلخل به منظور درک عملکرد و رفتار آن‌ها در برابر نیروها و تنش‌ها اهمیت دارد. این بررسی‌ها از طریق روش‌های تجربی نظیر آزمایش‌های کشش، فشار و خمش و همچنین مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام می‌شوند [۶].

یکی از مراحل مهم در به‌کارگیری و شبیه‌سازی سطوح سه‌بعدی، مدل‌سازی و تجسم مناسب آن‌ها در نرم‌افزارهای طراحی به کمک کامپیوتر است. فرمول‌بندی ریاضی مناسب باید به‌گونه‌ای باشد که تمامی نقاط سطح را به درستی نمایش دهد [۷].

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در طراحی و ساخت سازه‌های متخلخل، هنوز چالش‌های زیادی در درک کامل خواص مکانیکی و کاربردهای عملی سازه‌های مبتنی بر سطوح مینیمال تکرار شونده وجود دارد. این چالش‌ها شامل مسائل مربوط به نحوه مدل‌سازی دقیق این سازه‌ها، ارزیابی جامع خواص مکانیکی و شناسایی کاربردهای نوین و بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف است.

در این پژوهش به بررسی مشخصات مکانیکی، روش‌های مدل‌سازی و کاربردهای سطوح مینیمال تکرار شونده پرداخته می‌شود. هدف این است که با بررسی و مقایسه پژوهش‌های مختلف، درک عمیق‌تری از این ساختارها و پتانسیل‌های بالقوه آن‌ها برای کاربردهای عملی فراهم شود. به این منظور تلاش شده است که عمده کاربردهایی که از سطوح مینیمال در پژوهش‌های

<sup>4</sup> I-WP Surface

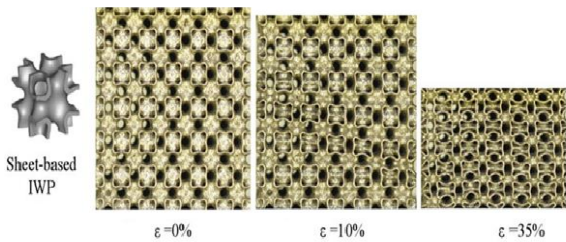
<sup>5</sup> Selective Laser Melting (SLM)

<sup>6</sup> Digital Light Processing (DLP)

<sup>1</sup> Primitive

<sup>2</sup> Diamond

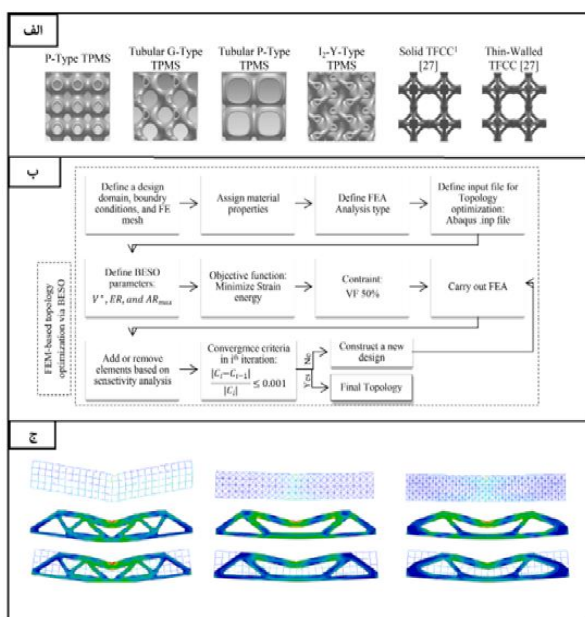
<sup>3</sup> Gyroid



شکل ۳ تغییرات ساختار مینیمال مبتنی بر پوسته در آزمایش فشار [۹]

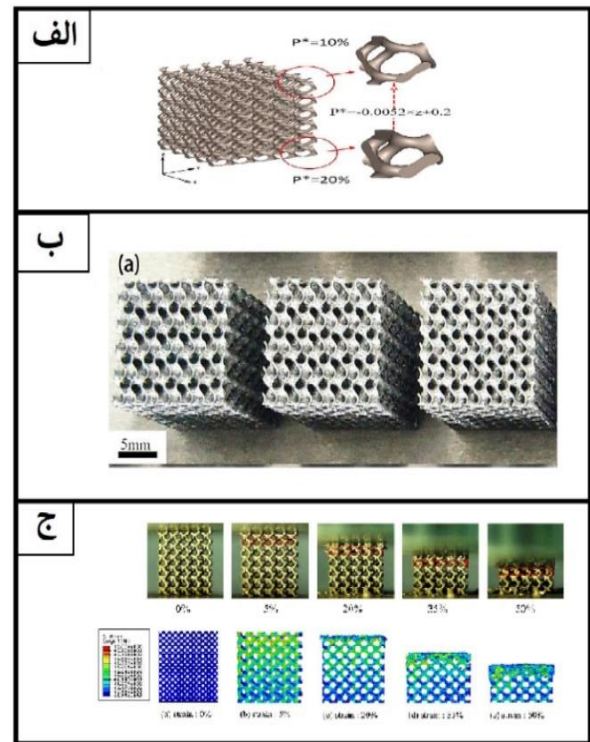
ابوالربع و همکاران [۹] به بررسی تاثیر هندسه بر خواص مکانیکی ساختار مینیمال IWP پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، رابطه بین مشخصات هندسی و خواص مکانیکی با بررسی ساختارهای متخلخل ایجاد شده با استفاده از ساختار مینیمال IWP بوده است. پژوهش آن‌ها نشان داد که ساختارهای مینیمال IWP مبتنی بر پوسته ضخامت‌دار رفتار کششی با راندمان ساختاری بالا از خود نشان می‌دهند که این ویژگی آن‌ها را برای کاربردهای مهندسی که به مواد مستحکم و سبک وزن با قابلیت‌های جذب انرژی عالی نیاز دارند، مناسب می‌سازد (شکل (۳)).

دستکاری جنبه‌های توپولوژیکی می‌تواند منجر به افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی سازه‌ها شود. ویژگی‌هایی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت هدایت حرارتی و افزایش جذب انرژی مکانیکی می‌تواند با این دست‌کاری‌ها بهبود یابد. با طراحی ساختارهای متخلخل با معماری داخلی کاملاً مشخص، می‌توان در مقایسه با فوم‌های فلزی با ساختار تصادفی، خواص را برای کاربردهای خاص به طور مؤثرتری تنظیم کرد.

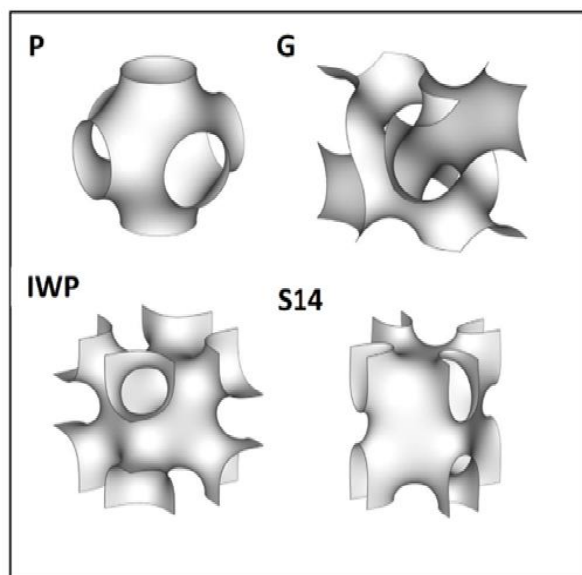


شکل ۴ الف- ساختارهای مینیمال، ب- بهینه‌سازی توپولوژی BESO، ج- نمایی از بررسی عددی [۱۱]

خواص مکانیکی ساختارهای مینیمال، به ویژه استحکام فشاری و مدول یانگ، با توجه به چگالی‌های نسبی مختلف، متفاوت است. استحکام فشاری سازه‌های مینیمال با افزایش چگالی نسبی، افزایش می‌یابد. در میان ساختارهای مورد مطالعه، ساختار S14 (شکل ۲) بالاترین استحکام فشاری را نشان داده است و به دنبال آن ساختارهای IWP، ژیروید و پی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، ساختارهای مینیمال می‌توانند بیش از ۲ درصد کرنش را بدون شکست حفظ کنند.

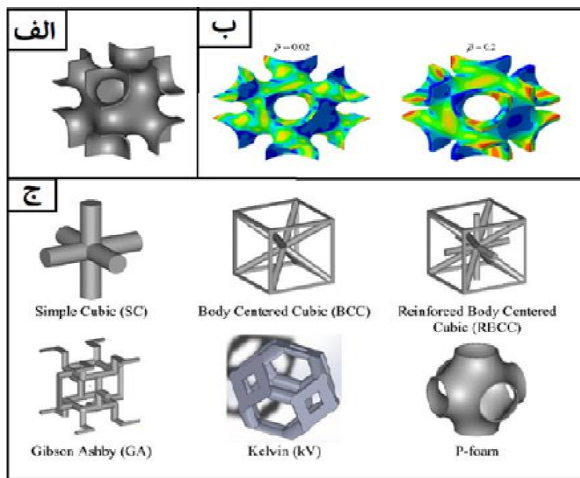


شکل ۵ الف- ساختار سلول ژیروید، ب- پرینت SLM، ج) بررسی عددی و تجربی [۶]



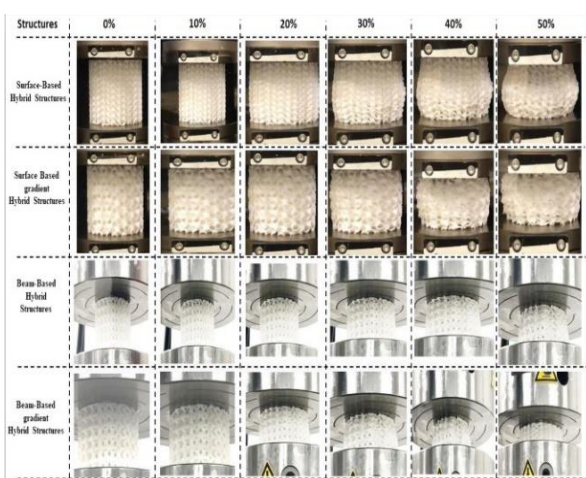
شکل ۲ چهار نوع ساختار مینیمال [۸]

پتانسیل بالایی برای کاربرد در صنایع مختلف هستند و بهینه‌سازی طراحی و انتخاب مواد می‌تواند خواص مکانیکی آن‌ها را بهبود بخشد.



شکل ۵ الف- سلول IWP، ب- نمایی از بررسی عددی، ج- ساختارهای دیگر که در بعضی از خواص شباهت دارند [۱۲]

سجاد و همکاران [۱۴] به بررسی سطوح متخلخل ترکیبی و ارزیابی خواص مکانیکی آن‌ها پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، طراحی و ارزیابی ساختارهای متخلخل ترکیبی با طراحی شعاعی و گرادینانی بوده است. این تحقیق یک رویکرد ترکیبی استوانه‌ای و شعاعی را معرفی می‌کند که شامل سه سلول واحد مجزا شامل سلول مکعبی مرکزدار، سلول مکعبی با وجوه مرکزدار و نوع سوم از ساختارهای مبتنی بر انواع سطوح مینیمال شامل الماسی و ژبروید می‌باشد. آن‌ها مطابق شکل (۶) آزمون‌های فشار شبه استاتیکی برای ارزیابی تأثیر ساختار گرادینانی بر مدول فشاری، استحکام نهایی، جذب انرژی ویژه و خواص شکست انجام دادند.



شکل ۶ مراحل آزمایش فشرده‌سازی شبه استاتیکی [۱۴]

داداشی و رحیمی [۱۰] به بررسی خواص مکانیکی ساختارهای مبتنی بر سطوح مینیمال تکرار شونده شوارز پی پرداختند. آن‌ها با استفاده از سه روش تحلیلی، عددی و تجربی به بررسی خواص مکانیکی ساختار شوارز پی پرداختند و نهایتاً روابطی برای پیش‌بینی مقادیر مدول الاستیک، استحکام تسلیم، و حداکثر نیروی باربری ارائه نمودند. قابل ذکر است مقادیر مدول الاستیک و استحکام تسلیم، مستقل از طول سلول واحد هستند و به پارامترهای هندسی و خواص مواد سازنده بستگی دارند.

تیموری و همکاران [۱۱] مطالعه‌ای را برای ارزیابی عملکرد مکانیکی ساختارهای مینیمال انجام دادند. هدف آن‌ها در این پژوهش مطابق با شکل (۴-الف) توسعه سازه‌های خرپایی شکل با استفاده از ساختارهای مینیمال و بهینه‌سازی با روش BESO<sup>۱</sup> بوده است. مطابق با شکل (۴-ج)، عملکرد مکانیکی ساختارهای خرپایی شکل متشکل از سطوح مینیمال با استفاده از تحلیل المان محدود به صورت شبه استاتیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاکی از بهبود عملکرد مکانیکی از نظر استحکام سازه، بار کمانشی و جذب انرژی در مقایسه با سازه‌های بدون سطوح مینیمال بوده است.

ابوالرب و کاهان [۱۲] به بررسی خواص ویسکو الاستیک سطوح مینیمال IWP پرداختند (شکل (۵)) و هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی این ساختار برای شرایط بارگذاری هیدرواستاتیک بوده است.

مدل سطح با استفاده از پوسته‌های جامد به دست آمده از ضخیم شدن ساختار مینیمال IWP ایجاد شده است به سان صورت که با استفاده از نرم افزار Surface Evolver این سطوح ایجاد شده و سپس به نرم افزار سالیدورک انتقال داده شده است تا یک مدل سه بعدی ایجاد شود. ضخامت پوسته برای ساختارهای IWP با چگالی نسبی از ۲ تا ۲۴ درصد متفاوت در نظر گرفته شده است.

نتایج نشان می‌دهند که ساختارهای IWP در شرایط بارگذاری محوری و هیدرواستاتیکی عملکرد بهتری به عنوان دمپر دارند. این ساختارها در پاسخ‌های ویسکو الاستیک خود مشابه با ساختارهای مکعبی ساده، و ساختارهای مکعبی با وجوه مرکزدار هستند، اما در حالت کلی فوم‌های IWP بهترین عملکرد را در شرایط مورد مطالعه نشان دادند.

کویی و همکاران [۱۳] به بررسی خواص مکانیکی ساختارهای شبکه‌ای بر اساس سطوح مینیمال شوارز پی پرداختند و از روش‌های تحلیلی، شبیه‌سازی اجزاء محدود و آزمایش‌های تجربی برای بررسی رفتار مکانیکی ساختار استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که این ساختارها دارای

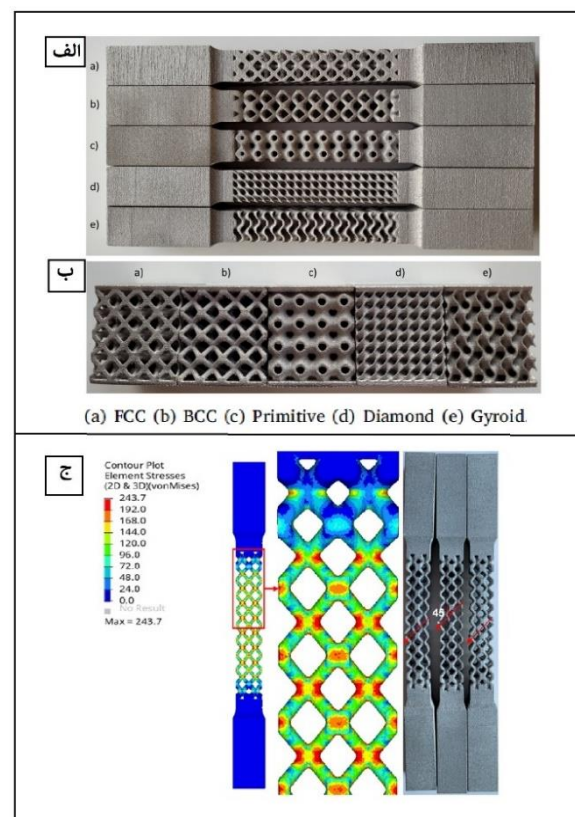
<sup>۱</sup>Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO)

از منظر کیفیت ساخت، نمونه‌های تولید شده انحرافات ابعادی را نشان می‌دهند، به طوری که نمونه‌های ژیروید بیشترین خطای ابعادی و نمونه‌های الماسی کمترین خطا را دارند. در آزمایش کشش، مطابق با شکل (۷-ج) یک نوار برشی ۴۵ درجه در هندسه BCC مشاهده شد در حالی که توپولوژی‌های دیگر شکستگی را در مقاطع تقریباً مستقیم نشان دادند. در آزمون فشار، همه ساختارها تغییر شکل بشکه مانند را در نرخ کرنش کم نشان دادند، به جزء ساختار FCC که نوار برشی مورب را در نرخ کرنش پایین به نمایش می‌گذارد.

گید و باقری [۱۶] مدل‌سازی و رفتار مکانیکی ساختارهای مینیمال ساخته شده با پلیمر PEEK<sup>۱</sup> با روش تولید افزایشی را مورد بررسی قرار دادند. ساختارهای انتخاب شده به عنوان شبکه‌های مکعبی بر اساس استاندارد ASTM D695-15 طراحی شده‌اند. آن‌ها تاثیر پارامترهای مورفولوژیکی سلول‌های مینیمال شامل اندازه سلول واحد، تخلخل، اندازه حفره و ضخامت را مورد بررسی قرار دادند. چهار مدل مختلف برای ارزیابی عملکرد مکانیکی ساختارها مورد استفاده قرار گرفته‌اند: مدل همونیزاسیون، مدل آرودا بویس، مدل هایپر الاستیک و مدل جانسون-کوک. این مدل‌ها برای شبیه‌سازی دقیق رفتار مکانیکی پلیمرهای پایه‌ی سطوح مینیمال استفاده شده‌اند و به دلیل توانایی بالای آن‌ها در پیش‌بینی تغییر شکل در تنش‌های بزرگ، وابستگی به زمان و دما، انتخاب شده‌اند. آزمایش‌های فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های چاپ شده سه‌بعدی انجام شده تا مقادیر محاسبه شده اعتبارسنجی شوند و با مقادیر تجربی مقایسه شوند. این مطالعه نشان‌دهنده نقش حیاتی مدل‌های مواد در تحلیل محاسباتی رفتار مکانیکی ساختارهای شبکه‌ای است.

ژانگ و همکاران [۱۷] به مطالعه مشخصات توپولوژیکی و خواص مکانیکی ساختارهای مینیمال با دامنه متغیر پرداختند. ساختارهای مینیمال قابلیت کاربردهای سبک وزن و چند منظوره دارند اما مطالعات عمدتاً بر روی عواملی مانند ضخامت جداره و تناوب سلول‌ها متمرکز شده‌اند تاثیر فاکتورهایی نظیر اندازه دامنه بر شکل و خواص مکانیکی به طور کامل بررسی نشده است. این مطالعه ساختارهای اولیه (P)، ژیروید (G) و الماسی (D) را برای درک تاثیر تغییر دامنه بر شکل و چگالی نسبی ساختار مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که تغییر دامنه، الگوی تغییر شکل سازه را تغییر نمی‌دهد اما می‌تواند خواص مکانیکی را در محدوده وسیعی تنظیم کند. افزایش ضریب دامنه منجر به کاهش جزئی در کرنش و افزایش قابل توجهی در قابلیت جذب انرژی شد. این پژوهش راه جدیدی را برای بهبود خواص مکانیکی ساختارهای مینیمال ارائه می‌کند. این پژوهش نشان داده است که دامنه به طور قابل توجهی بر مشخصات توپولوژیکی تأثیر می‌گذارد ولی تأثیر کمتری بر چگالی

بر اساس این پژوهش، ساختارهای متخلخل گرادایانی مبتنی بر سطوح مینیمال، بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی در مقایسه با ساختارهای ترکیبی، با افزایش مدول فشاری، استحکام نهایی و جذب انرژی ویژه نشان دادند. نتایج تجربی و عددی در این پژوهش نشان دادند که ساختارهای متخلخل شبکه‌ای گرادایانی، چه بر پایه سطوح مینیمال و چه بر پایه شبکه مکعبی، عملکرد مکانیکی بهبود یافته‌ای را نشان می‌دهند گرچه ساختارهای متخلخل گرادایانی مبتنی بر سطوح مینیمال، مدول فشاری، استحکام و جذب انرژی بالاتری به نمایش گذاشتند. گلجان و همکاران [۱۵] به مقایسه خواص مکانیکی ساختارهای مینیمال ساخته شده توسط روش ذوب پرتو الکترونی پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، مطالعه و مقایسه رفتار مکانیکی دو ساختار شبکه‌ای مبتنی بر BCC و FCC و سه سطح مینیمال ژیروید، پی و الماسی بوده است (شکل ۷- الف و ب). در این زمینه نتایج آزمون کشش نشان داد که بیشترین و کمترین مقادیر استحکام کشش نهایی برای نمونه‌های الماسی (۴۲۲ مگاپاسکال) و BCC (۱۹۲ مگاپاسکال) به دست می‌آید. در ادامه نیز مشخص شد ساختار مینیمال الماسی دارای بیشترین مقدار تنش تسلیم (۴۲۷ مگاپاسکال) است. بیشترین و کمترین مقادیر قابلیت جذب انرژی نیز در ساختار ژیروید مشاهده شده است.



شکل ۷ الف- نمونه‌های آزمایش کشش، ب- نمونه‌های آزمایش فشار، ج- مطالعه عددی نمونه BCC [۱۵]

<sup>1</sup>Polyether ether ketone

یاندیوریو و همکاران [۲۰] استحکام ساختارهای فلزی طراحی شده بر اساس سطوح مینیمال را مورد بررسی قرار دادند و هدف آن‌ها از این پژوهش بهبود نسبت استحکام به وزن ساختارهای شبکه‌ای مکعبی فلزی با استفاده از سلول‌های واحد الهام‌گرفته شده از سطوح مینیمال بوده است. این ساختارها از آلیاژ آلومینیوم AA6082 با استفاده از فرآیند ریخته‌گری دقیق و با کمک پرینت سه بعدی ساخته شده‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از اشکال الهام‌گرفته شده از ساختارهای مینیمال، می‌توان به ساختارهای شبکه‌ای مکعبی فلزی با استحکام مکانیکی بالاتر و وزن کمتر دست یافت که می‌تواند در صنایع مختلفی مانند هوافضا، خودروسازی و پزشکی مفید باشد. میازا و همکاران [۲۱] طراحی، خواص مکانیکی و بهینه سازی چند مقیاسی ساختارهای شبکه‌ای ایجاد شده بر اساس سطوح مینیمال را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تاثیر ساختارهای فرورونده در هم و همچنین پارامتر کسر حجمی را مورد بررسی قرار داده و دریافتند که خواص مکانیکی می‌تواند به شدت تحت تاثیر پارامترهای فروروندگی ساختارها قرار گیرد. منظور از ساختارهای فرورونده در پژوهش آن‌ها این است که ابتدا دو ساختار متمایز بر مبنای سطوح مینیمال یا غیر آن، ایجاد شده و سپس ساختاری جدید بر مبنای جبر بول از این دو ساختار ایجاد می‌شود. آن‌ها اعتبار سنجی تجربی را با استفاده از نمونه‌های چاپ سه بعدی انجام داده و چارچوبی برای بهینه‌سازی همزمان کسر حجمی و پارامتر در هم فروروندگی ارائه نمودند که منجر به ایجاد سازه‌های سبک با سفتی بالاتر در مقایسه با نمونه‌های مشابه شده است.

## ۲-۲- جذب انرژی

یکی از ویژگی‌های برجسته سازه‌های مبتنی بر سطوح مینیمال، توانایی بالای آن‌ها در جذب انرژی است. این ویژگی به دلیل وجود فضای خالی و ساختار متخلخل آن‌هاست که به جذب انرژی کمک می‌کند. این خاصیت برای کاربردهایی که نیاز به جذب انرژی و کاهش ضربه دارند، بسیار مهم است.

ژائو و همکاران [۲۲] به بررسی ویژگی‌های مکانیکی و خاصیت جذب انرژی ساختارهای مینیمال ساخته شده به روش ساخت افزودنی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش دو نوع رویه مینیمال شوارز پی و شوارز ژیروید (شکل ۹- الف) را مورد بررسی قرار دادند.

نمونه‌ها بوسیله پرینت سه بعدی با روش SLM با ابعاد ۲۰ میلی متر مربع برای آزمایشات تجربی ساخته شده است. با تغییر در ضخامت پوسته‌های ساختار در بعضی از نمونه‌ها به صورت گرادیانی (شکل ۹- ب)) این نتیجه بدست آمده است که قابلیت جذب انرژی در ساختارهایی که ضخامت آن‌ها متغیر بوده است نتایج بهتری ارائه کرده است. در ادامه آن‌ها برای بررسی عددی و شبیه‌سازی ساختارها از نرم افزار آباکوس استفاده کردند و برای

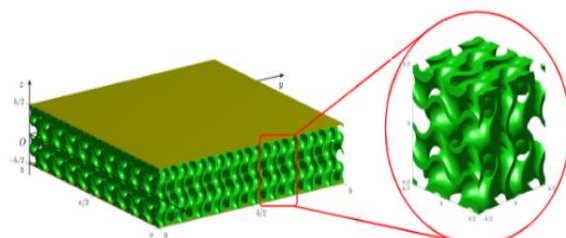
نسبی دارد و به طور مؤثری خواص مکانیکی سازه را تنظیم می‌کند. افزایش دامنه، مدول الاستیک و استحکام تسلیم را بهبود می‌بخشد.

نواک و همکاران [۱۸] به بررسی رفتار مکانیکی ساختارهای مینیمال فلزی یکنواخت و ترکیبی با نرخ کرنش بالا پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی عددی و تجربی خواص مکانیکی این ساختارها بوده است.

نمونه‌های ترکیبی از دو سلول واحد ژیروید و الماسی یکنواخت در امتداد ارتفاع نمونه تولید شدند. اندازه سلول ۵ میلی متر و تمام نمونه‌ها از نظر ارتفاع ۲۰ میلی متر در نظر گرفته شدند. سازه‌ها با استفاده از سیستم همجوشی بستر پودری با لیزر فیبر ایتربیوم ۴۰۰ وات ساخته شدند. پودر فولاد ضد زنگ L۳۱۶ تمیزه شده با گاز استفاده شده است و برای همه نمونه‌ها از ضخامت لایه ۲۰ میکرومتر استفاده شده است. پس از ساخت، نمونه‌ها برای محاسبه چگالی نسبی آن‌ها توزین شده‌ند و بیش از ۶۰ نمونه تولید شده است.

چهار ساختار سلولی مختلف مینیمال (الماسی، ژیروید، IWP و پی) و یک ساختار ترکیبی ژیروید-الماسی ساخته و تحت نرخ‌های کرنش فشاری مختلف از جمله نرخ کرنش‌های شبه استاتیک آزمایش شدند. آزمایش با استفاده از دستگاه‌های مختلف از جمله میله هایپکینسون انجام شد. نتایج نشان داد که ساختارهای الماسی و IWP تا پنج برابر بیشتر جذب انرژی در طول بارگذاری با نرخ کرنش بسیار بالا در مقایسه با آزمایش‌های شبه استاتیک و دینامیکی پایین‌تر نشان دادند. آزمایش‌های نمونه‌های ترکیبی نشان داد که جهت‌گیری نمونه به طور قابل توجهی بر پاسخ مکانیکی نرخ کرنش بالا تأثیر می‌گذارد.

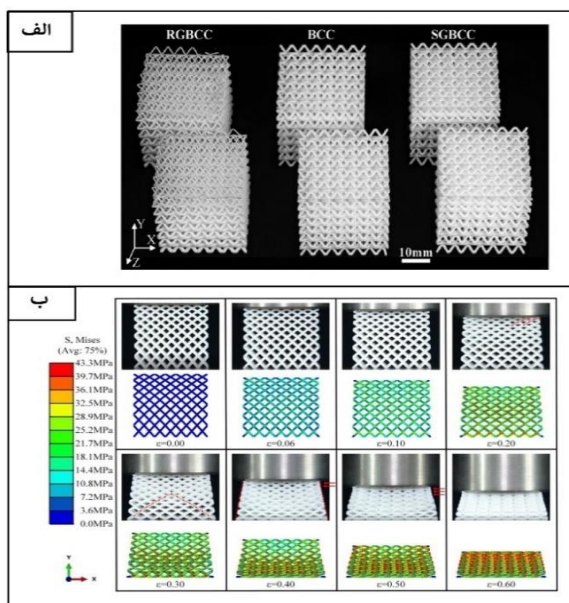
لی [۱۹] به بررسی مدل‌سازی سطوح مینیمال با حالت گرادیانی صفحات پرداخت. این پژوهش مدل جدیدی از صفحات متخلخل به نام صفحات مینیمال با حالت گرادیانی (FG-TPMS) را بررسی می‌کند (شکل ۸)، که از نسبت استحکام به حجم بالای ساختارهای مینیمال الهام گرفته شده است. سه معماری سطوح مینیمال با توابع گرادیانی متفاوت ارائه شده است: پی (P)، ژیروید (G) و IWP. نتایج نشان می‌دهد که ساختارهای FG-TPMS استحکام بالاتری نسبت به ساختارهای همسانگرد با همان وزن ارائه می‌دهند و اینکه مدل FG-TPMS یک جایگزین عالی برای این گونه ساختارها است.



شکل ۸ یکی از ساختارهای طراحی شده [۱۹]

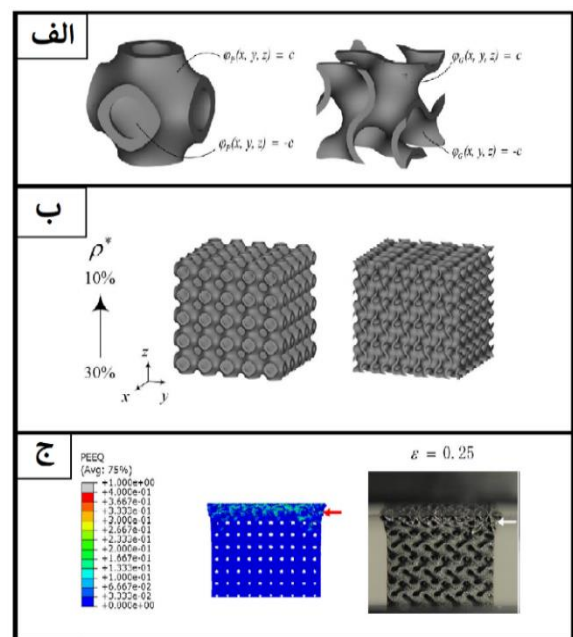
انصاری و همکاران [۲۴] به بررسی و ارزیابی ظرفیت جذب انرژی سه نوع ترکیب ساختاری مینیمال با استفاده از مواد ABS-M30i و تحت نرخ‌های کرنش فشاری مختلف پرداختند. مطالعه مذکور تحلیل ویژگی‌های مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی این ساختارها را در سه نرخ کرنش انجام می‌دهد. نتایج نشان داد که ساختارهای ترکیبی مینیمال مانند شوارز پی و IWP، شوارز الماسی و نوویوس<sup>۱</sup>، شوارز ژیروید و فیشرکوخ<sup>۲</sup> در نرخ‌های کرنش مختلف ویژگی‌های مطلوب جذب انرژی و توزیع تنش بهینه‌ای دارند. این پژوهش ثابت کرد که ساختارهای ترکیبی مینیمال می‌توانند ویژگی‌های مکانیکی منحصربه‌فردی ارائه دهند که با تغییر نرخ کرنش بهینه می‌شوند. هر سه نوع ساختار طراحی شده با مدل‌های گیبسون-اشبی تطابق داشتند و این مدل‌ها برای پیش‌بینی عملکرد مکانیکی این سازه‌ها توسعه یافتند.

سونو و همکاران [۲۵] به مطالعه و بررسی خواص مکانیکی و قابلیت‌های جذب انرژی ساختارهای مینیمال پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی ساختارهای مینیمال گرادانی شده با ساختارهای متنوع و بررسی خواص مکانیکی آن‌ها بوده است. آن‌ها سلول‌هایی با چگالی و پیکربندی‌های مختلف، طراحی و سپس با تغییر اندازه یک سلول، شبکه ساختاری یکنواختی تشکیل دادند. در ادامه ساختار متخلخل گرادانی با چگالی‌های مختلف و توپولوژی‌های متنوع مونتاژ شدند. مطابق شکل (۱۰-الف) نمونه‌های آزمایشی با استفاده از پرینت سه بعدی با روش SLS<sup>۳</sup> ساخته شده و توسط آزمایش فشرده سازی شبه استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۱۰ الف- ساختارهای مینیمال به کار رفته، ب- نمونه فیزیکی در آزمایش تجربی و عددی [۲۵]

آزمایشات تجربی از دستگاه تست فشار کمک گرفتند (شکل ۹-ج). پژوهش آن‌ها نشان داد که ساختارهای شوارز پی و ژیروید می‌توانند نواحی غیر متصل ساختارهای شبکه‌ای را حذف کنند که منجر به پیوستگی هندسی و اتصال ساختارهای شبکه‌ای با کسر حجمی حتی پایین می‌شود. بر این اساس ساختارهای شبکه‌ای از نظر رفتار تغییر شکل و قابلیت جذب انرژی، مزایای قابل توجهی دارند، که می‌توان برای کاربردهای حفاظتی و جذب انرژی، مانند کلاه ایمنی، مواد بسته بندی و موارد دیگر مورد استفاده قرار بگیرد.



شکل ۹ الف- ساختار شوارز پی و ژیروید، ب- ساختار متغییر ضخامت، ج- شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی [۲۲]

روشن و همکاران [۲۳] به بررسی خواص مکانیکی، طراحی و ساخت سطوح مینیمال پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش این بوده است که پارامترهایی مانند چگالی نسبی، گرادانی بودن و اندازه سلول چه تاثیری در رفتار مکانیکی ساختارها در هنگام قرار گرفتن در جهت‌های بارگذاری مختلف دارد. این مطالعه اهمیت این پارامترها را در کنترل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی برجسته می‌کند. سطوح مینیمال خواص مکانیکی بهبود یافته‌ای مانند نسبت سطح بالاتر به حجم و رفتار تغییر شکل بهتر در مقایسه با سایر انواع ساختارهای شبکه‌ای ارائه می‌کنند. حالت گرادانی، چگالی نسبی و موارد دیگر می‌تواند به طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی ساختارهای شبکه‌ای مبتنی بر این سطوح تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، استفاده از رویکرد پوسته‌های ضخامت‌دار به جای ساختار شبکه‌ای توپر می‌تواند منجر به خواص مکانیکی بالاتر شود.

<sup>3</sup> Selective Laser Sintering (SLS)

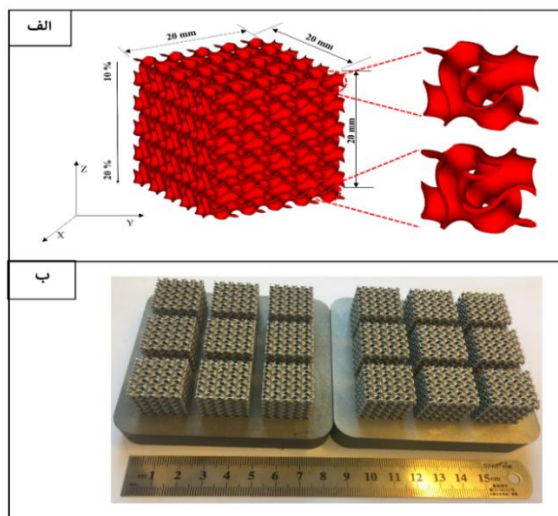
<sup>1</sup> Neovius

<sup>۲</sup> Fisher-Koch

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، ساختار لانه زنبوری ژئرویدی ظرفیت جذب انرژی قابل توجهی را در سرعت‌های فشاری مختلف نشان می‌دهد و ایده‌های ارزشمندی برای افزایش حفاظت در برابر تصادف در خودروهایی که از ساختارهای لانه زنبوری مبتنی بر سطوح جدید استفاده می‌کنند، ارائه می‌دهد. ژانگ و همکاران [۲۷] به مطالعه رفتار مکانیکی ساختار مینیمال ژئروید که با پرینت سه بعدی SLM ساخته شده است پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی قابلیت ساخت افزودنی این سازه‌ها، تاثیر طراحی گرادایانی بر حذف عیب و جذب انرژی و استفاده از روش اجزای محدود برای پیش‌بینی توزیع تنش و کرنش بوده است.

مزایای کلیدی ساختار مینیمال ژئروید (شکل ۱۲ الف)) ساخته شده با استفاده از پرینت سه بعدی SLM (شکل ۱۲ ب)) باعث طراحی سبک، ظرفیت جذب انرژی بالا و خواص عایق حرارتی و صوتی عالی می‌شود. این مطالعه از ساختار مینیمال ژئروید برای طراحی ساختار شبکه‌ای ساخته شده از فولاد ضد زنگ SS 316L استفاده کرد. یافته‌ها نشان داد که افزایش کسر حجمی و استفاده از طرح گرادایانی به حذف ترک‌های کوچک در ساختار کمک کرد. خواص مکانیکی با افزایش کسر حجمی بهبود یافت و ساختار گرادایانی شده خواص برتری نسبت به ساختارهای یکنواخت نشان دادند. این مطالعه نشان داد که سازه‌های گرادایانی و یکنواخت رفتارهای تغییر شکل و پاسخ‌های مکانیکی متفاوتی را تحت بارهای فشاری از خود نشان می‌دهند.

ژیانگ‌یو و همکاران [۲۸] به بررسی خواص مکانیکی و جذب انرژی بودن سطوح مینیمال گرادایانی پرداختند. در مقایسه با ساختارهای یکنواخت، ساختارهای مینیمال گرادایانی شده مطابق با شکل (الف ۱۳) می‌توانند خواص مکانیکی را از طریق تغییر در شکل ساختارها و کسر حجمی آن‌ها تغییر بدهند.

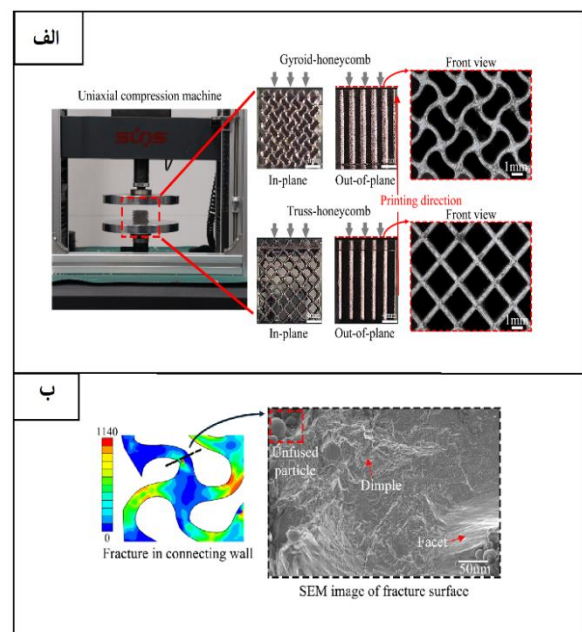


شکل ۱۲ الف- ساختار سلول ژئروید، ب- پرینت SLM [۲۷]

نتایج آزمایش فشرده سازی تجربی بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۰-ب)). نتایج نشان داد که ساختار SG (یکی از ساختارهای ساخته شده با الهام از ساختار BCC) دارای مدول و استحکام بالایی تحت کرنش کم است. این نشان‌دهنده امکان‌پذیری آن برای کاربرد در دستگاه‌های محافظتی با ویژگی‌های مقاومت در برابر ضربه است، چرا که عملکرد محافظتی بهتری را در شرایط کرنش کم و توانایی جذب انرژی بیشتر تحت فشار زیاد در مقایسه با سایر سازه‌ها ارائه می‌دهد. ظرفیت جذب انرژی یک سازه مشبک به طراحی آن بستگی دارد و یک استراتژی گرادایانی برای ساختار شبکه پیشنهاد شد، که عملکرد محافظتی بهتری را تحت کرنش کم و توانایی جذب انرژی بیشتری تحت کرنش زیاد ارائه داد.

زی‌ژانگ و همکاران [۲۶] به بررسی قابلیت جذب انرژی ساختارهای شبه لانه زنبوری ساخته شده به روش پرینت سه بعدی SLM پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی پاسخ‌های مکانیکی و قابلیت جذب انرژی ساختار شبه لانه زنبوری الهام گرفته از ساختار مینیمال ژئروید و ساختارهای خرپایی از طریق آزمایش‌های فشرده‌سازی و شبیه‌سازی‌های عددی در مقادیر فشاری مختلف بوده است (شکل ۱۱-الف)).

در مقایسه با ساختارهای لانه زنبوری خرپایی معمولی، ساختار لانه زنبوری ژئرویدی کاهش نوسانات تنش و بهبود جذب انرژی تحت فشرده سازی نشان داد. ساختار لانه زنبوری ژئرویدی حالت شکست منحصر به فرد، همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح شکست مشاهده می‌شود، مشخص می‌کند (شکل ۱۱-ب)).



شکل ۱۱ الف- ساختارهای ساخته شده، ب- تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه ژئرویدی [۲۶]

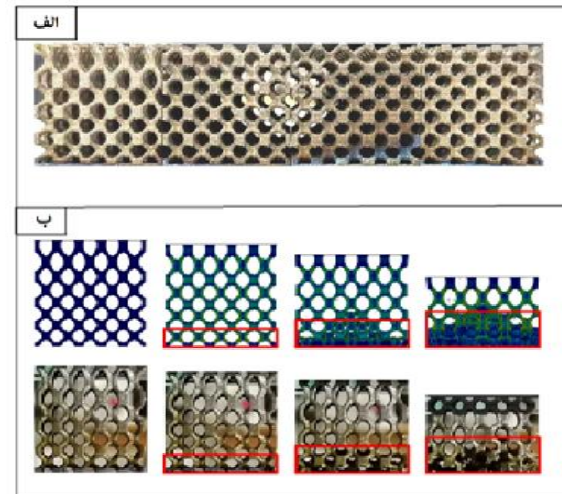
<sup>1</sup> Scanning Electron Microscope (SEM)

الماسی و پی است و ساختار ژئروید با توزیع تنش یکنواخت و خواص مکانیکی بهینه، بهترین عملکرد را در جذب انرژی دارد و در نهایت ساختار ژئروید به عنوان مناسبترین گزینه برای کاربردهای مهندسی جذب انرژی ضربه در وسایل نقلیه پیشنهاد می‌شود.

بانسیر و همکاران [۳۱] به بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر قابلیت جذب انرژی و تغییر شکل سازه‌های سلولی مینیمال با تمرکز بر سطح ثابت و طول سلول واحد بین دو فرم برجسته، یعنی IWP و FRD پرداختند سازه‌های FRD<sup>۴</sup> که بر اساس الگوریتم فورستر<sup>۵</sup> طراحی شده‌اند، به دلیل توزیع تصادفی نقاط ویژگی‌های منحصر به فردی در توزیع تنش و جذب انرژی دارند. مزایای اصلی این سازه‌ها شامل بهبود عملکرد جذب انرژی، وزن سبک و کارایی در چگالی‌های پایین است. از معایب آن‌ها می‌توان به پیچیدگی ساخت و هزینه‌های تولید بالاتر نسبت به ساختارهای سنتی اشاره کرد. با این حال، ویژگی‌های برجسته FRD ها در جذب انرژی و توزیع تنش، آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای ایمنی و جذب ضربه تبدیل می‌کند. سازه‌های FRD در جذب انرژی و کاهش نیروی اوج اولیه به‌ویژه در چگالی‌های نسبی پایین، عملکرد بهتری دارند. سازه‌های FRD به دلیل توزیع تصادفی نقاط، توزیع تنش یکنواخت‌تر، ظرفیت جذب انرژی بالا و وزن سبک‌تر، گزینه‌های مناسبی برای طراحی جذب‌کننده‌های انرژی در صنایع خودروسازی و هوافضا هستند.

سانگ و همکاران [۳۲] فراماده‌ای<sup>۶</sup> جدید با مدول بالا و رفتار غیرالاستیک<sup>۷</sup> پایدار با استفاده از سطوح مینیمال تکرار شونده ارائه نمودند. نتایج نشان می‌دهند که فراماده مینیمال پیشنهادی، دارای مدول بالا، استحکام زیاد و قابلیت جذب انرژی بالا هستند. این فراماده همچنین یک منحنی تنش طولانی و صاف را نشان می‌دهند که از شکست فاجعه‌بار جلوگیری کرده و بازده بارگذاری ساختار تحت فشار را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نتایج عددی حاکی از آن است که پاسخ غیرالاستیک پایدار این متامواد به رفتار جریان پلاستیک ماده اصلی حساس نیست.

این تحقیق نشان می‌دهد که فراماده مینیمال جدید، چندین برابر استحکام و جذب انرژی بیشتری نسبت به مواد شبکه‌ای موجود دارند. این فراماده می‌تواند به عنوان قطعات حامل بار و جاذب‌های انرژی ضربه در صنایع مختلفی مانند خودروها و هواپیماها مورد استفاده قرار گیرند. ویژگی‌های منحصر به فرد این فراماده می‌تواند به بهبود ایمنی و کارایی در کاربردهای مهندسی کمک شایانی کند.



شکل ۱۳ الف- ساختارهای گرادپانی شده، ب- مطالعه عددی و تجربی [۲۸]

بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی (شکل ۱۳-ب)) ساختار شبکه گرادپانی خطی، استحکام تسلیم بالاتری را در طول دوره کرنش نشان می‌دهد. مقایسه انواع سازه‌های یکنواخت، گرایانی خطی و گرادپانی با تابع درجه دو، نشان داده است که سازه‌های LF IW-P<sup>۱</sup> و QF IW-P<sup>۲</sup> به ترتیب عملکرد بهتری تحت کرنش‌های کمتر و ظرفیت جذب انرژی بیشتر تحت کرنش بزرگتر با کسر حجمی یکسان دارند که نشان دهنده قابلیت بالا برای استفاده در ساخت دستگاه‌های محافظ یا دستگاه‌های میراکننده ارتعاش است.

آلمایهو و تودو [۲۹] به بررسی قابلیت جذب انرژی در ساختارهای شبکه‌ای الهام‌گرفته از سطوح مینیمال ژئروید ترکیبی با استفاده از روش ساخت لایه‌ای (FFF<sup>۳</sup>) پرداختند. این ساختارها برای کاربردهای مختلف مهندسی به ویژه در حوزه خودروسازی، هوافضا و مهندسی پزشکی مورد بررسی قرار می‌گیرند. ساختارهای شبکه‌ای ترکیبی ژئروید پتانسیل بالایی برای استفاده به عنوان جاذب‌های ضربه در خودروها نشان دادند. آزمایش‌های مکانیکی و شبیه‌سازی‌های عددی نشان دادند که این ساختارها می‌توانند به طور مؤثری در سناریوهای برخورد با سرعت بالا مورد استفاده قرار گیرند و ایمنی و عملکرد خودروها را بهبود بخشند.

فلونگ و همکاران [۳۰] به بررسی خواص مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی ساختارهای متخلخل الهام‌گرفته شده از سطوح مینیمال در آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V برای استفاده در جذب انرژی ضربه در وسایل نقلیه پرداختند و نتایج بدست آمده بر اساس آزمون فشار نشان داد که ساختار ژئروید دارای توزیع تنش یکنواخت‌تر و استحکام فشاری بالاتری نسبت به ساختارهای

<sup>5</sup> Förstner

<sup>6</sup> Metamaterial

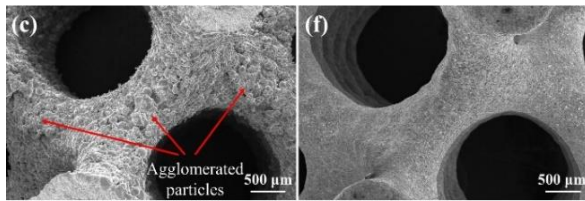
<sup>7</sup> Inelastic

<sup>1</sup> Linear Function I-Wrapped Package

<sup>2</sup> Quadratic Function I-Wrapped Package

<sup>3</sup> Fused Filament Fabrication

<sup>4</sup> Förstner Random Dots



شکل ۱۴ بافت سلول ژئروید [۳۵]

شولتایس و همکاران [۳۶] به بررسی رفتار خستگی خمشی ساختارهای ژئروید تولید شده به روش ذوب لیزری بستر پودر پرداختند. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند برای ساختارهای سلولی دیواره نازک می‌تواند منجر به بهبود قابل توجهی در مقاومت خستگی شود، هرچند این بهبود به افزایش زبری سطح منجر می‌شود. کاهش عیوب ساختاری مانند حفره‌ها و اندازه دانه‌های ریزتر در این ساختارها عامل اصلی این بهبود است. معلوم شد که تنظیم پارامترهای فرآیند تولید می‌تواند به بهبود چشمگیری در مقاومت خستگی ساختارهای سلولی نازک منجر شود که این مسئله به‌ویژه برای کاربردهایی که زبری سطح مسئله‌ساز نیست یا حتی مطلوب است، مفید خواهد بود. تغییرات پارامتری شامل سرعت اسکن، توان لیزر، فاصله بین لایه‌ها و دمای پلتفرم ساخت است که منجر به دیواره‌های نازک‌تر و دانه‌های ریزتر می‌شود. این ساختارها در موارد مختلفی مانند ساخت مبدل‌های حرارتی، جذب‌کننده‌های انرژی و ایمپلنت‌های پزشکی کاربرد دارند و بهینه‌سازی پارامترهای تولید می‌تواند هزینه تولید را کاهش داده و کیفیت نهایی محصولات را بهبود بخشد. این تحقیق همچنین پایه‌ای برای مطالعات آینده در زمینه خستگی خمشی ساختارهای سلولی تولید افزایشی فراهم می‌کند.

سانگ و همکاران [۳۷] ویژگی‌های حرارتی و هیدرولیکی مبدل‌های حرارتی که با استفاده از سلول واحد شوارز الماسی (D) ایجاد شده‌اند را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همبستگی اعداد ناسلت، رینولدر و پراندتل را برای ساختار شوارز الماسی مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها در طراحی مبدل‌های حرارتی جمع‌وجور قابلیت استفاده دارد.

ساهو و همکاران [۳۸] به بررسی واکنش خستگی ساختارهای سلولی مبتنی بر سطوح مینیمال با استفاده از یک چارچوب عددی جدید پرداختند. این پژوهش به تأثیر توزیع مواد و جهت بارگذاری بر خستگی و کارایی ساختاری این ساختارها می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهند که ساختار ژئروید نسبت به ساختار پی خواص خستگی بهتری دارد، همچنین توزیع محلی مواد و جهت بارگذاری نیز بر مشخصات خستگی و کارایی ساختاری تأثیرگذار است. این پژوهش نشان می‌دهد که چارچوب عددی پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک ابزار مؤثر برای ارزیابی واکنش خستگی وابسته به جهت ساختارهای شبکه‌ای مورد استفاده قرار گیرد و می‌تواند در بهینه‌سازی ساختارهای شبکه‌ای در کاربردهای مختلف مهندسی مفید باشد.

نوروزی و همکاران [۳۳] ساختار شبکه‌ای ترکیبی با اضافه کردن ستون‌هایی به سلول‌های سطوح مینیمال ایجاد کرده و سپس آن را مورد بررسی قرار دادند. این تغییر، بهبود قابل توجهی را در ظرفیت جذب انرژی این ساختارها ایجاد کرده است. نتایج نشان داده است که افزودن ستون‌ها به ساختار، باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌شود. تحلیل‌های اجزای محدود نشان داده است که مدول الاستیک مؤثر ساختار ترکیبی بهبود یافته است، که این بهبود ناشی از استفاده از ستون‌های عمودی است. مقایسه با ساختارهای مینیمال نشان می‌دهد که ساختارهای ترکیبی در پارامترهای جذب انرژی بهتر عمل می‌کنند. با توجه به نتایج این تحقیق، ساختارهای شبکه‌ای ترکیبی جدید می‌توانند در کاربردهای مختلفی مانند لایه‌های جذب انرژی در کلاه‌های ایمنی مورد استفاده قرار گیرند.

برنارد و همکاران [۳۴] در پژوهشی مروری، طراحی، ساخت و تحلیل مواد با ساختار سلولی، از جمله ساختارهای مینیمال را منظر جذب انرژی مورد بررسی قرار دادند. ساختارهای سلولی، با کنترل چینش فضایی ماده، ساختارهایی جدید با خواص جدید فراهم می‌آورند که در صورتی که ماده توپر می‌بود آن ترکیب خواص حاصل نمی‌شد.

## ۲-۳- خستگی و دوام

سازه‌های طراحی شده بر مبنای سطوح مینیمال تکرارشونده به دلیل ساختار هندسی خاص خود، از مقاومت خوبی در برابر خستگی و تنش‌های سیکلی برخوردارند. این سازه‌ها می‌توانند در کاربردهای طولانی مدت و تحت بارگذاری‌های متناوب، دوام و عمر مفید بالایی داشته باشند.

یانگ و همکاران [۳۵] به بررسی رفتار خستگی ساختار مینیمال ژئروید ساخته شده به روش پرینت سه بعدی پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی پدیده آسیب خستگی که بر شکست سازه‌ها تأثیر می‌گذارد و مطالعه درک مکانیسم خستگی ساختارهای سلولی ژئروید و پتانسیل آن‌ها برای استفاده طولانی مدت در یک ساختار اسکلتی بوده است.

آسیب‌های ناشی از خستگی منجر به شکست در طول آزمایش می‌شود. نمونه‌های شکست، نوارهای شکستگی را در امتداد سطح مورب نشان می‌دهند. آسیب خستگی با ایجاد ترک در سطوح بالایی و پایینی پایه‌های شیب‌دار به شکست ساختارهای سلولی ژئروید در طول آزمایش خستگی کمک می‌کند. ذرات پودر نیمه مذاب روی سطح شکل (۱۴) می‌توانند باعث ایجاد ترک و تسریع شکست شوند. این پژوهش نشان داده است که عملیات سندبلاست با کاهش و به تاخیر انداختن هسته‌زایی ترک، خواص مقاومت در برابر خستگی را بهبود می‌بخشد به نحوی که خستگی ساختارهای سلولی ژئروید را می‌توان از طریق عملیات سندبلاست بهبود بخشید.

## ۳- کاربردهای سطوح مینیمال تکرار شونده

## ۳-۱- مهندسی پزشکی

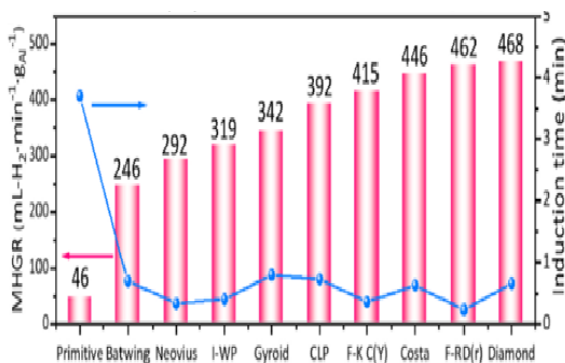
در حوزه مهندسی پزشکی، سازه‌های مبتنی بر سطوح مینیمال می‌توانند به عنوان ایمپلنت‌های استخوانی و داربست‌های مهندسی بافت مورد استفاده قرار گیرند. ساختار متخلخل این سازه‌ها می‌تواند به رشد سلول‌ها و انتقال مواد مغذی کمک کند و در نتیجه فرآیند ترمیم بافت را تسریع بخشد.

سیهانم و همکاران [۳۹] اثر عیوب ناشی از روش ساخت را بر روی رفتارهای جریان غیر نیوتنی نظیر خون را ارزیابی نمودند. آن‌ها ساختار مینیمال ژئوپوید (شکل (۱۵)) ساخته شده با روش افزودنی را از منظر زبری سطح و انحراف هندسی مورد بررسی قرار دادند.

در مهندسی پزشکی، ساختارهای مینیمال به دلیل شباهت آن‌ها به بافت استخوان‌های انسان به طور گسترده مورد مطالعه قرار می‌گیرند. دینامیک سیالات محاسباتی اغلب برای مطالعه برهم‌کنش بین معماری‌های ساختاری و میدان‌های جریان استفاده می‌شود. این مطالعه بر روی سطوح مینیمال ژئوپوید با چگالی نسبی متفاوت متمرکز شده است و تأثیر نقص‌های ساخت را بر رفتار سیال در بافت‌ها بررسی کرده است. این مطالعه نشان داد که نقص‌های تولید تأثیر جزئی بر پاسخ‌های سیال دارند، اما ویسکوزیته سیال غیرنیوتنی به طور قابل توجهی بر پیش‌بینی رفتار سیال تأثیر می‌گذارد. مقایسه بین مدل‌های ویسکوزیته نیوتنی و غیرنیوتنی تفاوت‌هایی را در افت فشار و تنش برشی متوسط نشان داد. این مطالعه اهمیت مدل ویسکوزیته را برای تجزیه و تحلیل CFD<sup>۱</sup> داربست‌ها، به ویژه در هنگام در نظر گرفتن رفتار غیر نیوتنی برجسته می‌کند.

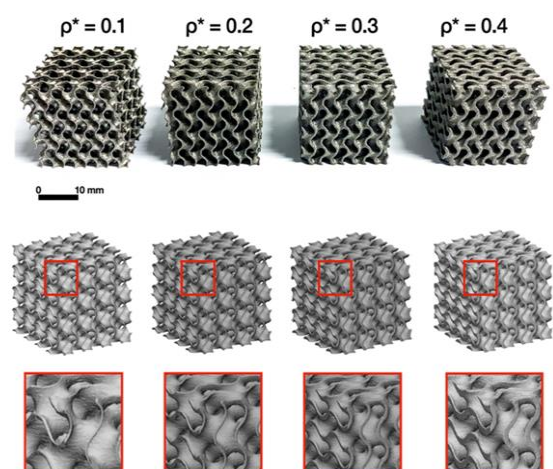
در این پژوهش اثر عیوب ناشی از روش ساخت و ویسکوزیته سیال، بر رفتار جریان سطوح مینیمال ژئوپوید با چگالی نسبی از ۰/۱ تا ۰/۴ بررسی شده و از میکروسکوپ دیجیتال و میکرو سی تی برای تجزیه و تحلیل زبری سطح و به دست آوردن مدل‌های سه بعدی استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های CFD نشان داده است که عیوب هندسی و مدل سیال غیرنیوتنی بر افت فشار و تنش برشی جداره تأثیر می‌گذارند. افت فشار و تنش برشی تفاوت‌های ظریفی را بین مدل‌های طراحی‌شده و ساخته‌شده نشان داد، در حالی که ویسکوزیته غیرنیوتنی تأثیر قابل توجهی بر پاسخ‌های جریان داشت.

ژانگ و همکاران [۴۰] به بررسی سطوح مینیمال برای تولید هیدروژن از واکنش آلومینیوم و آب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با ساختار متخلخل نوع مینیمال الماسی نتایج امیدوارکننده‌ای از نظر بازده تولید هیدروژن قابل انتظار خواهد بود. ساختار مینیمال در فرامواد متخلخل آلومینیوم به طور قابل توجهی بر عملکرد تولید هیدروژن آن‌ها تأثیر می‌گذارد. مساحت سطح و اندازه منافذ ساختارهای مینیمال نقش مهمی در افزایش نرخ تولید هیدروژن و کارایی ساختار دارد. ساختارهایی مانند مواد متخلخل مینیمال از نوع الماسی (شکل (۱۶))، عملکرد تولید هیدروژن بسیار خوبی را به دلیل مساحت سطح خاص و اندازه حفره‌شان نشان می‌دهند. مواد متخلخل مینیمال از نوع الماسی به دلیل تلاطم فراوان جریان و افت فشار کم، عملکرد تولید هیدروژن عالی دارند و در نتیجه این مطالعه نوع جدیدی از مواد آلومینیوم متخلخل را با پایداری بالا و راه اندازی سریع برای تولید هیدروژن فراهم کرده است.



شکل ۱۶ نرخ تولید هیدروژن انواع ساختارهای متخلخل [۴۰]

چو و همکاران [۴۱] به بررسی، عملکرد ساختارهای مینیمال تحت بارگذاری فشاری برای کاربردهای مهندسی پرداختند و هدف آن‌ها از این پروژه، بررسی قابلیت این ساختارها به عنوان بافت می‌باشد. در این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی فشاری چهار نوع از ساختارهای مینیمال (شکل (۱۷)) می‌پردازد، که



شکل ۱۵ ساختار ژئوپوید با چگالی‌های مختلف [۳۹]

<sup>۱</sup> Computational Fluid Dynamics

و استحکام، پارامترهای زیست‌شناسی مانند اندازه منافذ و محدودیت‌های تکنولوژیکی مانند ضخامت دیواره در نظر گرفته شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داده است که مدل‌های  $ML^2$  می‌توانند با موفقیت یک بافت ساختار مینیمال با ویژگی‌های تجویز شده بر اساس خواص مورد نیاز بیومکانیکی، مکانیکی و زیستی طراحی کنند.

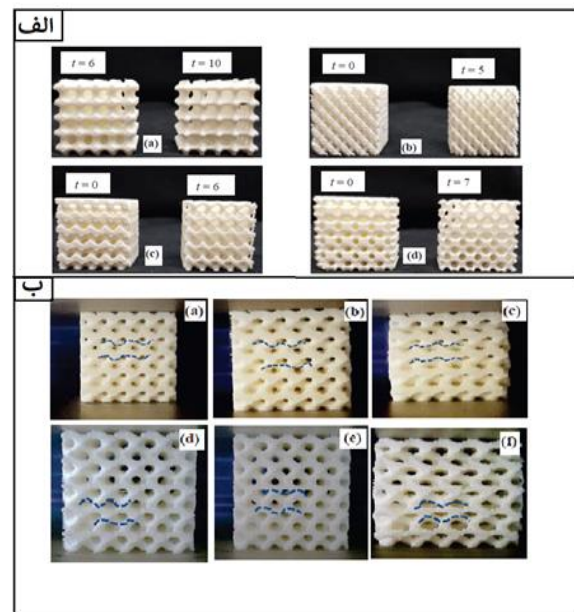
زنگره و همکاران [۴۳] به بررسی خصوصیات ساختارهای مینیمال تولید شده با همجوشی بستر پودر با لیزر پرداختند. ظهور همجوشی بستر پودر لیزر ( $LPBF^3$ ) امکان ایجاد ایمپلنت‌های استخوانی متخلخل باز مانند ایمپلنت‌های مهره کمر (LIF) را فراهم می‌کند. ایمپلنت‌های  $LIF^4$  سنتی دارای ساختارها و حفره‌های حمایتی گسترده برای مطابقت با استانداردهای نظارتی هستند. برای کشف جایگزین‌های مقرون به صرفه و ایمن‌تر، این مطالعه پتانسیل استفاده از سطوح مینیمال را برای ایمپلنت‌های فلزی LIF بدون تکیه‌گاه و حفره بررسی می‌کند. بافت‌های ساخته شده با استفاده از همجوشی بستر پودر لیزری، انحراف مورفولوژیکی کمی را پس از درمان نشان دادند. سنجش تماس با استخوان در شرایط آزمایشگاهی عملکرد زیستی مناسبی را برای تمام بافت‌های مینیمال نشان داد.

سپهانم و همکاران [۴۴] به بررسی اثر اندازه منافذ برای ساختارهای استخوانی با چاپ سه بعدی پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی قابلیت استفاده از ساختارهای مینیمال در ایمپلنت‌های پزشکی بوده است.

این مطالعه تأثیر اندازه منافذ را بر ساختارهای شبکه‌ای مینیمال ژئروید و الماسی برای ایمپلنت‌های پزشکی بررسی کرد. مطابق با شکل (۱۸-الف) نمونه‌ها به صورت افزودنی با اندازه منافذ در محدوده ۳۰۰ تا ۱۳۰۰ میکرومتر ساخته شدند و از نظر قابلیت ساخت و خواص مکانیکی ارزیابی شدند (شکل ۱۸-ب)). نتایج نشان داد که با اندازه منافذ بهینه تقریباً ۵۰۰ میکرومتر برای هر دو ساختار، ساختار ژئروید قابلیت ساخت و خواص مکانیکی بهتری دارد. این مطالعه یک ارزیابی جامع از اثرات اندازه منافذ ارائه می‌کند و یک چارچوب مناسب برای ارزیابی ساختارهای شبکه به عنوان ایمپلنت‌های پزشکی پیشنهاد می‌کند. کلیه نمونه‌ها دارای چگالی نسبی ثابت  $0/3$  در نظر گرفته شده‌اند. این مطالعه قابلیت تولید، خواص مکانیکی و پاسخ‌های بیولوژیکی را برای ساختارهای ژئروید و الماسی ارزیابی کرده و نتیجه گرفته است که ساختار ژئروید از نظر ساخت و حساسیت نسبت به تیرانس‌های ساخت و همچنین پارامترهای بیولوژیکی، بهتر عمل می‌کند.

دهاقانی و همکاران [۴۵] به بررسی طراحی و ارزیابی ساختارهای مینیمال برای تثبیت‌کننده‌های موقت مورد استفاده در ارتوپدی کودکان پرداختند. این ساختارها به گونه‌ای طراحی

شامل ساختار پی، الماسی، ژئروید و I-WP می‌باشد. این مطالعه مدول فشاری، استحکام فشاری و کرنش تسلیم آن‌ها را تحت دو چگالی نسبی مختلف، مقایسه کرده است. این مطالعه همچنین خواص مکانیکی شبکه‌ها را با انواع بافت‌های انسانی مقایسه کرده و شباهت‌های بین شبکه‌های با چگالی نسبی پایین‌تر و استخوان اسفنجی آشکار کرده است. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل خطا بر روی چگالی نسبی شبکه‌های تولید شده برای ارزیابی مناسب بودن روش مدل‌سازی رسوب ذوب شده ( $FDM^1$ ) برای ساخت داربست‌های بافت انجام شده است.



شکل ۱۷ الف- ساختارهای مینیمال به کار رفته، ب- نمونه‌ها در آزمایش [۴۱]

ابراهیمی و همکاران [۴۲] به بررسی رویکردهای یادگیری ماشین برای طراحی بیومکانیکی ساختارهای مهندسی سازگار با بافت استخوانی پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی قابلیت‌های ساختارهای مینیمال در این حوزه بوده است.

فرمول تحلیلی ساختارهای مینیمال به طور مستقیم پارامترهای ورودی را با خواص مکانیکی و مورفولوژیکی سازه مرتبط نمی‌کند. در این مطالعه، مجموعه داده‌ای بیش از هزار بافت ساختار مینیمال برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین برای یافتن این همبستگی ایجاد شده است. برای مشخص کردن بافت‌ها از مدل سازی المان محدود و پردازش تصویر استفاده شده است. سه مدل مختلف بر اساس رویکردهای خطی و غیر خطی آموزش داده شدند. پیش‌بینی خواص را می‌توان به صورت کاملاً خودکار یا توسط کاربر و همچنین از طریق ترکیبی از هر دو روش انتخاب کرد. به طور خاص، خواص مکانیکی مانند سفتی

<sup>3</sup> laser powder bed fusion (LPBF)

<sup>4</sup> lumbar interbody fusion (LIF)

<sup>1</sup> Fused Deposition Modeling

<sup>2</sup> Machine Learning (ML)

شده است تا هزینه‌های محاسباتی مدل‌های چند مقیاسی را کاهش دهد. نتایج نشان می‌دهد که این روش در تحلیل ساختارهای مینیمال و شناسایی پوکی استخوان مؤثر است و این نوآوری می‌تواند در بهبود دقت و کارایی تحلیل‌های مکانیکی و کاهش هزینه‌های محاسباتی مورد استفاده قرار گیرد.

چو و همکاران [۴۷] به مقایسه تأثیر ساختارهای متخلخل سطوح مینیمال و ورونوی<sup>۱</sup> بر خصوصیات مکانیکی و نفوذپذیری داربست‌های استخوانی پرداختند. با طراحی و شبیه‌سازی عددی این ساختارها، نتایج نشان داده‌اند که ساختارهای مینیمال به دلیل شباهت به ساختار استخوان تراپکولار دارای مقاومت فشاری بیشتری هستند و نفوذپذیری بهتری دارند که منجر به کمک به رشد استخوان می‌شود. در مقابل، ساختارهای ورونوی با داشتن مدول الاستیک کمتر، پشتیبانی مکانیکی مناسب‌تری را فراهم می‌کنند. بنا بر این، بسته به نیازهای خاص کاربردی، هر یک از این ساختارها می‌توانند مناسب‌ترین گزینه برای کاربردهای ایمپلنت‌های استخوانی باشند. این پژوهش می‌تواند در بهبود طراحی و کاربرد بالینی داربست‌های استخوانی مؤثر باشد.

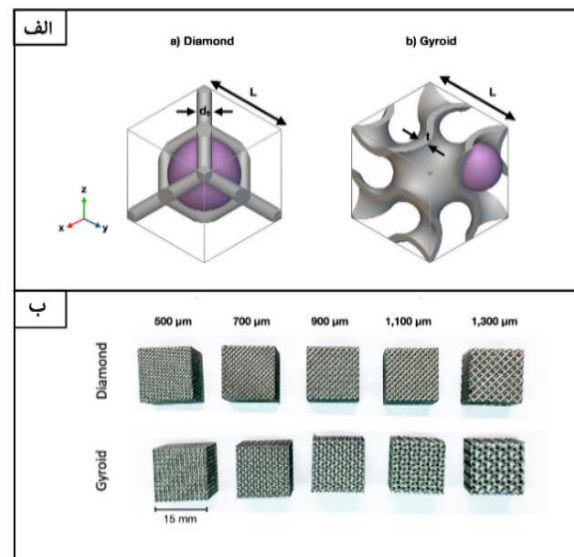
### ۳-۲- کاربردهای سازه‌ای

سازه‌های طراحی شده بر اساس سطوح مینیمال می‌توانند در طراحی پل‌ها، ساختمان‌ها و سایر سازه‌های بزرگ به کار گرفته شوند. ساختار متخلخل و استحکام بالای این سازه‌ها می‌تواند به افزایش دوام و پایداری سازه‌ها کمک کند.

وسنجاک و همکاران [۴۸] به بررسی رفتار فشاری لوله‌های فولادی ضد زنگ پر شده با سطوح مینیمال پرداختند (شکل ۱۹-الف). لوله‌های جدارنازک پر شده از مواد سلولی مانند فوم فلزی، به‌ویژه سطوح مینیمال، نتایج امیدوارکننده‌ای ارائه کرده‌اند. در این مطالعه، پاسخ مکانیکی قوطی‌های پر شده با فوم با هسته‌های مشبک مبتنی بر سطوح مینیمال الماسی مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های ساخته شده از فولاد ضد زنگ L۳۱۶ تحت بارگذاری فشاری آزمایش شدند (شکل ۱۹-ب). قوطی‌های پر شده با سطوح مینیمال، تحت بارگذاری محوری، در مقایسه با قوطی‌های خالی، جذب انرژی بیشتری در آزمون تجربی نشان دادند که آن‌ها را برای کاربردهای تصادفات و موارد مشابه آن که نیاز به جذب ضربه وجود دارد مناسب می‌کند.

آزمون‌های تجربی انجام شده نشان داد که طول نمونه‌ها بر رفتار تغییر شکل به ویژه در قوطی‌های پر شده با سطوح مینیمال اثر می‌گذارد. بارگذاری محوری در مقایسه با بارگذاری عرضی قابلیت جذب انرژی بالاتری را نشان داد. سازه‌های پر شده با سطوح مینیمال افت نیرو را پس از پیک اولیه حذف کردند و تغییر شکل پایدار و جذب بهتر انرژی را فراهم کردند. در

شده‌اند که سفتی و استحکام کافی را در محدوده استخوان‌های کودکان فراهم کنند و در عین حال امکان حذف آسان پس از بهبودی را نیز داشته باشند.



شکل ۱۸ الف- ساختارهای مینیمال مورد استفاده، ب- نمونه‌های تولید شده [۴۴]

تثبیت‌کننده‌های موقت در ارتوپدی کودکان برای تثبیت شکستگی‌ها و اصلاح ناهنجاری‌های اندام مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از فلزات در این دستگاه‌ها منجر به مشکلاتی مانند انتقال بار به ایمپلنت و کاهش چگالی استخوان می‌شود که در کودکان به دلیل رشد سریع استخوان‌ها حائز اهمیت بیشتری است. در ادامه ساخت شش نوع مختلف از ساختارهای مینیمال با استفاده از فناوری روش ذوب لیزری بستر پودر با استفاده از ماده Ti-6Al-4V انجام شده است و آزمایش‌های مکانیکی برای ارزیابی سفتی و استحکام هر ساختار و تحلیل داده‌ها برای شناسایی بهترین نوع سطوح مینیمال صورت پذیرفته است.

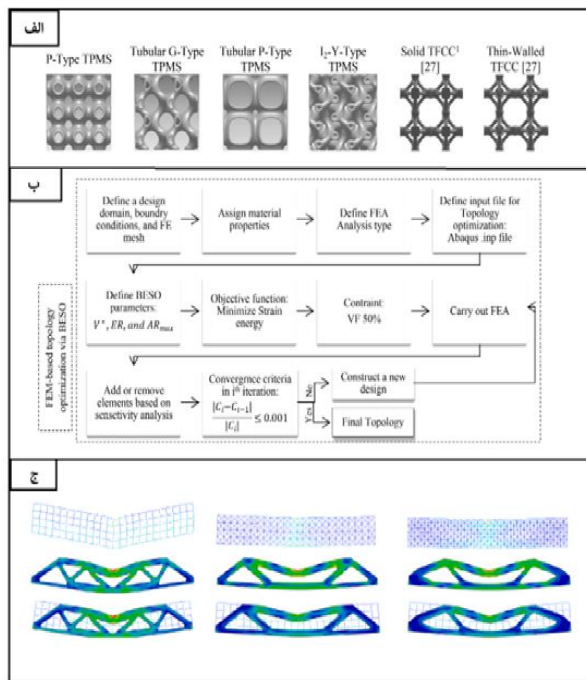
نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ساختارهای مینیمال مبتنی بر واحد سلولی پی به دلیل نسبت بالای استحکام به سفتی و قابلیت ساخت بهتر عملکرد بهتری نسبت به سایر انواع سطوح مینیمال داشتند و در نهایت این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از ساختارهای مینیمال می‌توان تثبیت‌کننده موقت ارتوپدی با ویژگی‌های چندمنظوره‌ای تولید کرد که علاوه بر داشتن سفتی و استحکام مناسب، امکان کاهش مشکلات ناشی از انتقال بار به ایمپلنت و کاهش چگالی استخوان را نیز فراهم می‌کنند.

وانگ و همکاران [۴۶] به تحلیل ساختارهای ماتریال سطوح مینیمال و کاربردهای آن در استخوان ران پرداختند. در این روش از المان محدود به همراه شبکه‌های عصبی استفاده

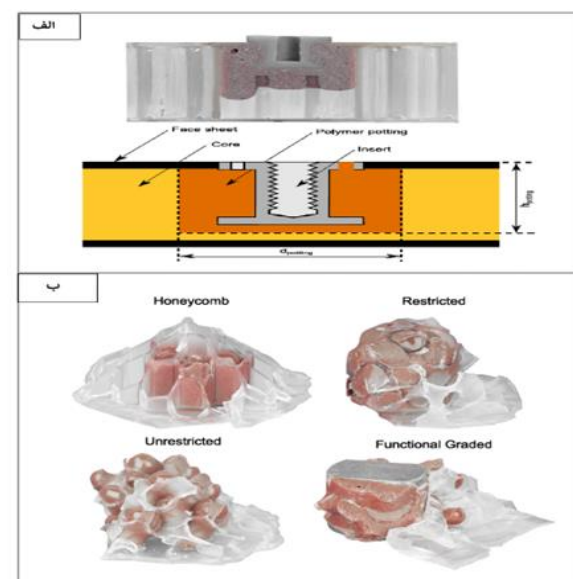
<sup>1</sup> Voronoi

اتصال در ژیروید مطابق شکل (۲۱-ب) پس از شکست اولیه ظرفیت باربری قابل توجهی را نشان دادند که منجر به افزایش استحکام سیستم شده است.

میرافضلی و حسن آبادی [۵۰] به بررسی نحوه جذب انرژی ساختار متخلخل شوارز پی ساخته شده به روش پرینت سه بعدی پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش بررسی قابلیت جذب انرژی در ساختار مینیمال شوارز پی بوده است.



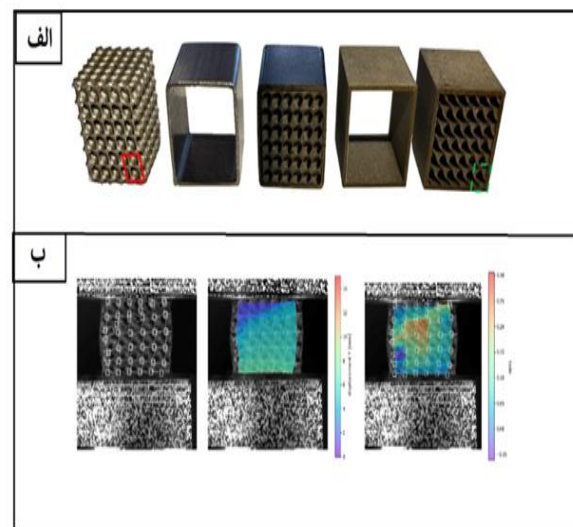
شکل ۲۰ الف- ساختارهای مینیمال، ب- بهینه‌سازی توپولوژی (BESO، ج) نمایی از بررسی عددی [۱۱]



شکل ۲۱ الف- ساختار کلی شکل، ب- بررسی نمونه‌ها در آزمایش تجربی [۴۹]

بارگذاری محوری، جذب انرژی تا ۴۴ درصد در سازه‌های پر شده با سطوح مینیمال افزایش یافته است. در بارگذاری عرضی، افزایش جذب انرژی تا ۱۲ درصد در قوطی‌های پر شده با سطوح مینیمال مشاهده شده است.

تیموری و همکاران [۱۱] پژوهشی را برای ارزیابی عملکرد مکانیکی ساختارهای مینیمال انجام دادند. هدف آن‌ها در این پژوهش توسعه سازه‌های خرپایی شکل با استفاده از ساختارهای مینیمال (شکل (۲۰-الف)) متشکل از شبکه‌های سیمی برای بهینه‌سازی با روش BESO<sup>۱</sup> بوده است (شکل (۲۰-ب)).



شکل ۱۹ الف- نمایی از ساختار مینیمال به کار رفته در لوله فولادی، ب- تصویری از مطالعات عددی تست فشار [۴۸]

عملکرد مکانیکی ساختارهای خرپایی شکل متشکل از سطوح مینیمال با استفاده از تحلیل المان محدود به صورت شبه استاتیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (شکل (۲۰-ج)). نتایج حاکی از بهبود عملکرد مکانیکی از نظر استحکام سازه، بار کم‌انرژی و جذب انرژی در مقایسه با سازه‌های بدون سطوح مینیمال بوده است. بر اساس نتایج عددی، همه ساختارهای خرپایی متشکل از سطوح مینیمال از نظر استحکام عملکرد بهتری در مقایسه با سازه‌های خرپایی ساده نشان دادند.

لو و همکاران [۴۹] به بررسی قابلیت تولید پنل‌ها با ساختارهای ژیروید پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، توسعه، تولید و بررسی مکانیکی سطوح مینیمال مورد استفاده در پنل‌های ساندویچی می‌باشد (شکل (۲۱-الف)). آزمایش‌ها برای مقایسه نمونه‌های ساندویچی انجام شده است. مشخص شده است که ساختار ژیروید گرادینانی نسبت بار به وزن به طور قابل توجهی بالاتر از ساختار لانه زنبوری را ارائه می‌کند که نشان دهنده کارایی آن است. برخلاف نقاط اتصال لانه زنبوری، نقاط

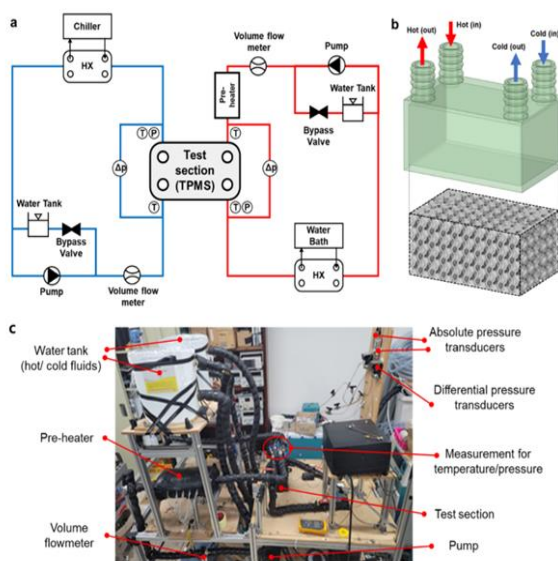
<sup>1</sup>Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO)

پُر شده با سطوح مینیمال مورد مطالعه قرار دادند و در نهایت لوله‌های پر شده با شبکه‌های سطوح مینیمال در مقایسه با مجموع لوله‌های خالی از شبکه سطوح مینیمال ظرفیت جذب انرژی بیشتری نشان دادند. طراحی چندشکلی و گرادینانی چگالی در شبکه سطوح مینیمال منجر به کاهش قابل توجه نیروی پیک اولیه فشاری گردید. لوله پر شده با طراحی ترکیبی شامل شبکه‌های الماسی و ژبروئید، حداقل  $1/16/3$  جذب انرژی ویژه بیشتری نسبت به سایر طراحی‌های ترکیبی داشت که نشان‌دهنده بهترین عملکرد جذب انرژی بود.

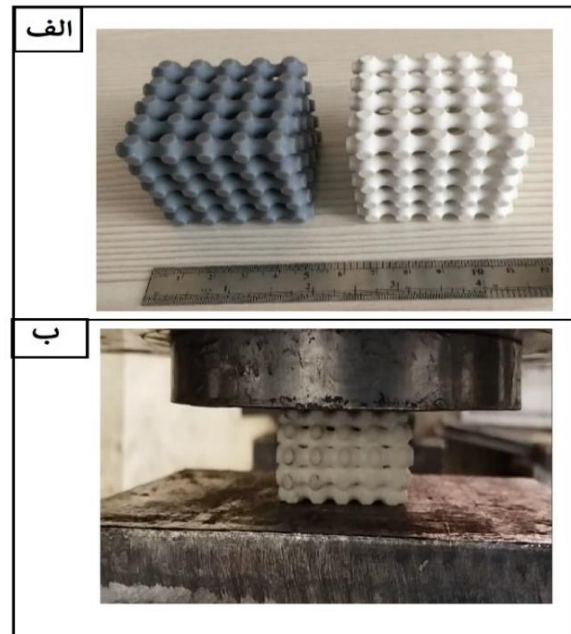
### ۳-۳- انتقال حرارت

سطوح مینیمال به دلیل داشتن سطح بزرگ، دارای قابلیت بالایی در انتقال حرارت هستند. این خاصیت می‌تواند در کاربردهایی که نیاز به دفع حرارت و انتقال حرارت مؤثر دارند، مورد استفاده قرار گیرد.

هی و همکاران [۵۲] قابلیت استفاده ساختارهای مینیمال را در طراحی و ساخت افزودنی مبدل‌های حرارتی فشرده مورد بررسی قرار دادند. از آنجا که سازه‌های مینیمال چگالی سطح بالا و قابلیت تبادل حرارتی بهبود یافته‌ای ارائه می‌دهند پیشرفت‌های اخیر در ساخت افزودنی منجر به توسعه سطوح مینیمال برای استفاده در مبدل‌های حرارتی شده است. شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های افت فشار نیز نشان داده است که کانال‌های ساختار مینیمال به طور قابل توجهی مقاومت جریان را کاهش می‌دهند. آزمون‌ها نشان داده‌اند تبادل حرارتی با استفاده از طراحی بهینه ساخته شده، بیش از دو برابر محصولات موجود بوده است که نشان دهنده قابلیت ساختارهای مینیمال در افزایش قابلیت تبادل حرارتی ساختار است (شکل ۲۳).



شکل ۲۳ قابلیت ساختارهای مینیمال در افزایش قابلیت تبادل حرارتی [۵۲]



شکل ۲۲ الف- نمونه پلی لاکتیک اسید متخلخل و نمونه رزینی پرینت شده به روش MSLA، ب- نمونه متخلخل در کرنش [۵۰]

به این منظور سه نمونه مکعبی طراحی شدند و مورد تست فشار قرار گرفتند. دو نمونه از جنس پلی لاکتیک اسید که یکی از آن‌ها کاملاً توپر و دومی با پنجاه درصد تخلخل بوده است و به کمک روش لایه‌نشانی ذوبی پرینت گرفته شدند. نمونه سوم از جنس رزین یو وی و با پنجاه درصد تخلخل، به کمک روش استریولیتوگرافی ماسک دار ساخته شد (شکل ۲۲ الف)). سپس هر سه نمونه تحت تست فشار قرار گرفتند (شکل ۲۲ ب)) و نمودارهای نیرو-جابجایی و همچنین انرژی-جابجایی استخراج شدند. نتایج به دست آمده نشان دادند که رفتار نمونه رزینی کاملاً به صورت ترد می‌باشد و قابلیت تغییر شکل و جذب انرژی ندارد. در مقابل نمونه متخلخل از جنس پلی لاکتیک اسید تا کرنش  $70\%$  تحت تغییر شکل قرار گرفته است. همچنین مقایسه دو نمونه توپر و متخلخل از جنس پلی لاکتیک اسید نشان داد که مقدار انرژی جذب شده در نمونه متخلخل حدود یک سوم، اما نحوه جذب انرژی در آن به صورت نرم و هموار می‌باشد.

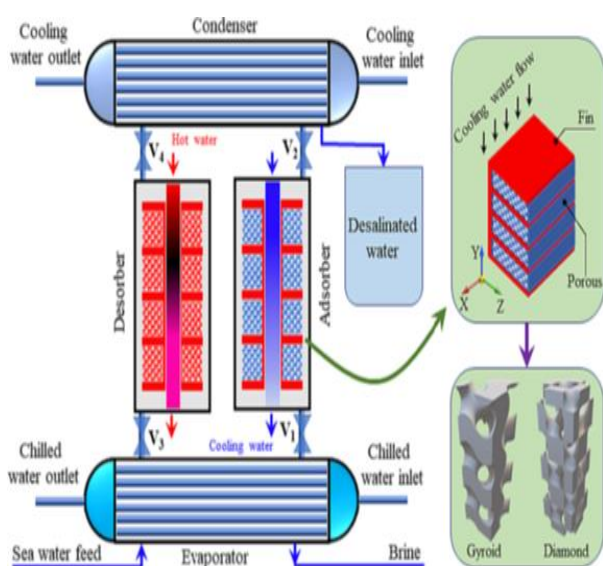
وان و همکاران [۵۱] به بررسی رفتار جذب انرژی قوطی‌های جدار نازک پر شده با شبکه‌های سطوح مینیمال تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیک محوری پرداختند. آزمایش فشار شبه‌استاتیک هم روی قوطی‌های خالی و هم لوله‌های پر شده با سطوح مینیمال انجام شد. رفتار فشاری شامل ویژگی‌های نیروی عکس‌العمل، حالت‌های تغییر شکل، عملکرد جذب انرژی و اثرات تعاملی بین شبکه سطوح مینیمال و قوطی‌های جدار نازک مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها تأثیر چگالی نسبی، ارتفاع سلول واحد و طراحی ترکیبی را بر روی ظرفیت جذب انرژی لوله‌های

مزایای استفاده از ساختارهای مینیمال نسبت به ساختارهای سلولی معمولی کلوین در کاربردهای ذخیره انرژی حرارتی عبارتند از افزایش هدایت حرارتی مؤثر کامپوزیت‌ها، بهبود راندمان انتقال حرارت و همگنی دما در طول فرآیند و پتانسیل ذخیره سازی انرژی حرارتی گرمای نهان کارآمدتر.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ساختارهای مینیمال در کامپوزیت‌های مواد به طور قابل توجهی هدایت حرارتی مؤثر را افزایش می‌دهد که منجر به بهبود عملکرد در سیستم‌های ذخیره سازی انرژی حرارتی نهان می‌شود. این نشان‌دهنده پتانسیل توسعه سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی کارآمدتر و مؤثرتر با استفاده از ساختارهای مینیمال است.

نادا و همکاران [۵۴] به بررسی قابلیت بسترهای جاذب مورد استفاده در سیستم‌های نمک‌زدایی و خنک کننده طراحی شده با استفاده از ساختارهای مینیمال پرداختند. آن‌ها به کمک شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، ساختارهای مینیمال را با جاذب‌های لوله پره‌دار بر اساس تولید ویژه روزانه آب ( $SDWP^2$ ) و قدرت خنک‌کننده ویژه ( $SCP^3$ ) مقایسه کردند. این مطالعه تأثیر ناحیه انتقال حرارت، هدایت حرارتی مؤثر، انتشار مؤثر و تورچوسیتی را بر روی  $SCP$  و  $SDWP$  برای ساختارهای لوله‌ای مشتق شده از سطوح مینیمال و باله‌دار با سطوح تخلخل متغیر بررسی کرده است.

نتایج نشان داد که افزایش تخلخل ساختارهای مینیمال منجر به کاهش  $SCP$  و  $SDWP$  می‌شود اما همچنان عملکرد بهتری را در مقایسه با جاذب‌های لوله پره‌دار به دست می‌دهد. عملکردها به ویژگی‌های ساختاری مبتنی بر سطوح مینیمال مانند هدایت حرارتی، تخلخل، مساحت سطح و تورچوسیتی بستگی دارد.

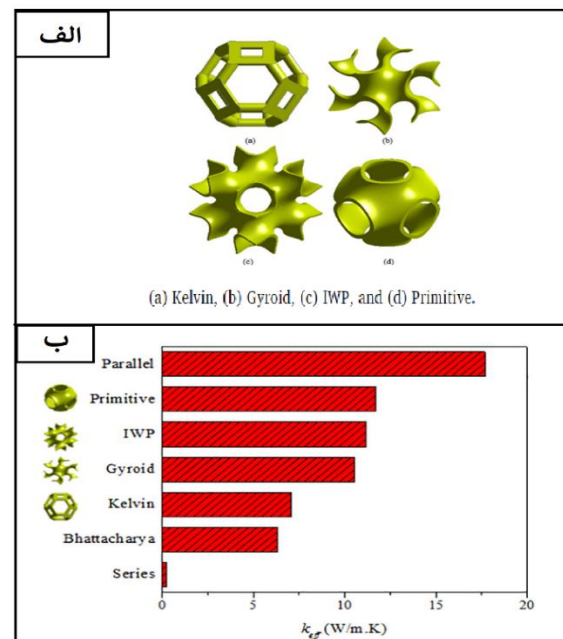


شکل ۲۵ سیستم مورد بررسی [۵۴]

این مطالعه یک مبدل حرارتی مبتنی بر سطوح مینیمال را برای برآوردن نیازهای عملکردی مختلف طراحی ارائه کرده است. مبدل حرارتی تولید شده با ساخت افزودنی ضریب انتقال حرارت کلی بیش از دو برابر مبدل حرارتی‌های معمولی آب را نشان می‌دهد.

قریشی و همکاران [۵۳] قابلیت استفاده از ساختارهای فوم فلزی مبتنی بر سطوح مینیمال برای کامپوزیت‌های PCM<sup>۱</sup> را بررسی کردند که در مدیریت و برنامه‌ریزی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی استفاده می‌شود. هدف آن‌ها از این پژوهش بررسی عملکرد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی کامپوزیت‌های مبتنی بر سطوح مینیمال با کامپوزیت‌های معمولی مبتنی بر سلول کلوین (شکل ۲۴-الف)) می‌باشد و نشان می‌دهد که ساختارهای مینیمال هدایت حرارتی مؤثر کامپوزیت‌ها را افزایش می‌دهد.

مواد تغییر فاز دهنده (PCM) مانند موم پارافین، پتانسیل زیادی برای استفاده در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی دارند. با این حال به دلیل رسانایی حرارتی کم، اغلب با فوم فلزی با رسانایی حرارتی بالا ترکیب می‌شوند که منجر به کامپوزیت‌های فوم فلزی می‌شود. در این کار از سه ساختار مینیمال شوارز پی، ژیروید و IWP استفاده شده است که با افزایش هدایت حرارتی مؤثر کامپوزیت‌ها، عملکرد ذخیره انرژی حرارتی کامپوزیت‌ها را افزایش می‌دهد که منجر به بهبود راندمان انتقال حرارت و یکنواختی دما در طول فرآیند می‌شود که از کامپوزیت‌های مبتنی بر سلول کلوین معمولی بهتر عمل می‌کند (شکل ۲۴-ب)).



شکل ۲۴ الف- ساختار سطوح مینیمال به کار رفته، ب- داده‌های هدایت حرارتی مؤثر [۵۳]

<sup>3</sup> Specific Cooling Power (SCP)

<sup>1</sup> Phase change material

<sup>2</sup> Specific Daily Water Production (SDWP)

این پژوهش اندازه و تخلخل سلول واحد و همچنین تأثیر شرایط کار ویسکوز را بر ضریب انتقال حرارت همرفتی برای توپولوژی‌های مختلف، بررسی کرده است که توپولوژی شوارز پی بیشترین تأثیر را دارد.

هوانگ و همکاران [۵۶] به بررسی عملکرد حرارتی و هیدرولیکی ریجنراتورهای جدید مبتنی بر سطوح مینیمال برای استفاده در موتورهای سیکل ترکیبی هواپیماها پرداختند. این پژوهش به دنبال ارائه روش‌های عددی برای ارزیابی عملکرد و ایجاد همبستگی‌های تجربی برای پیش‌بینی رفتار حرارتی و هیدرولیکی این ساختارها می‌باشد.

تحلیل و بررسی عملکرد کلی حرارتی-هیدرولیکی ساختارهای سطوح مینیمال نشان می‌دهد که ساختارهای سطوح مینیمال نظیر شوارز الماسی دارای عملکرد مناسبی هستند که به علت مخلوط شدن شدید جریان، تنش برشی مرزی بزرگ و سطح ویژه بالای این ساختارها می‌باشد. در این پژوهش نشان داده شده که ریجنراتورهای مبتنی بر سطوح مینیمال می‌توانند در فضا صرفه‌جویی کنند، وزن را کاهش دهند و بار مفید هواپیماها را افزایش دهند. ساختارهای مینیمال با عملکرد حرارتی-هیدرولیکی بهتر و نسبت توان به وزن بالاتر پتانسیل بالایی برای استفاده در صنایع هوافضا دارند.

سان و همکاران [۵۷] به بررسی عملکرد حرارتی-هیدرولیکی ساختارهای شبکه‌ای سه‌بعدی سطوح مینیمال بر اساس طرح شوارز الماسی پرداختند. هدف این مطالعه، تحلیل تأثیر فشرده‌سازی ساختار در جهت‌های مختلف و به درجات مختلف بر انتقال حرارت و افت فشار در مبدل‌های حرارتی است. یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ساختارهای مینیمال فشرده شده در جهت عرضی نه تنها باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود بلکه افت فشار را نیز کاهش می‌دهد. این بهینه‌سازی می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای در طراحی مبدل‌های حرارتی با کارایی بالا داشته باشد و به عنوان جایگزینی مناسب برای پره‌های سنتی در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای-پره‌ای مطرح شود.

خدیری و همکاران [۵۸] به تحلیل رفتار جریان و انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی با ساختارهای سطوح مینیمال از جمله فیشرکوخ اس، PMY، FRD و ژیروید پرداخته است. هدف اصلی بررسی عملکرد حرارتی و جریان سیال در این ساختارها با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی بوده و اثر نرخ جریان و کسر حجمی بر کارایی سطوح مینیمال ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که سطوح مینیمال می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد مبدل‌های حرارتی ایجاد کند، به‌ویژه ساختار فیشرکوخ اس که با کمترین مقاومت جریان و بالاترین ضریب انتقال حرارت کلی، بهترین عملکرد را در کسر حجمی و نرخ‌های گرمی مختلف از خود نشان داده است.

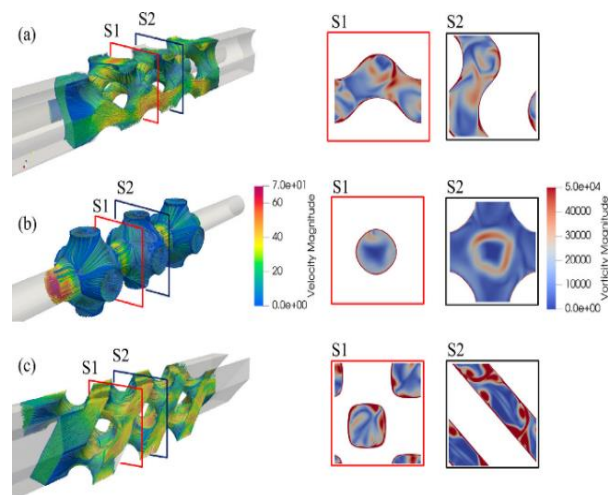
این یافته‌ها اهمیت زیادی در طراحی مبدل‌های حرارتی با کارایی بالا دارند و نشان می‌دهند که ساختارهای سطوح مینیمال

سطح ویژه بیشترین تأثیر را بر عملکرد دارد. ساختارهای مینیمال شبکه‌ای دارای SDWP و SCP بالاتری در مقایسه با ساختارهای مینیمال شبکه‌ای جامد و جاذب‌های لوله پره‌دار معمولی هستند. شبکه پوسته‌ای الماسی در مقایسه با جاذب‌های پره‌دار استاندارد، ۱۹/۴٪ افزایش SDWP را با تخلخل ۰/۸ ارائه می‌دهد. استفاده از ساختارهای مینیمال افزایش عملکرد سیستم نمک زدایی و خنک‌کننده‌ها را به همراه دارد (شکل (۲۵)). شبکه پوسته‌ای فلزی مینیمال بر رسانایی حرارتی ضعیف محیط متخلخل جاذب غلبه می‌کند و به طور قابل توجهی هدایت حرارتی مؤثر و انتقال حرارت سطحی را از طریق سطح افزایش می‌دهد.

برامباتی و همکاران [۵۵] انتقال حرارت همرفتی در مبدل‌های حرارتی مبتنی بر سطوح مینیمال را مورد بررسی قرار دادند. ساختارهای مینیمال به دلیل مزایایی که در افزایش سطح تبادل حرارتی و افزایش پدیده‌های همرفتی دارند، به طور گسترده در زمینه تبادل حرارت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی برای تکرار دقیق رفتار دینامیکی حرارتی و سیال این سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که البته از نظر محاسباتی گران هستند. این مطالعه یک رابطه واحد را بر اساس نتایج شبیه‌سازی CFD برای محاسبه ضریب انتقال حرارت همرفتی برای سیالات مختلف و توپولوژی‌ها و هندسه‌های مختلف سطوح مینیمال ارائه می‌کند (شکل (۲۶)).

رابطه ارائه شده، با تیرانس  $\pm 20\%$  درصد برای سه توپولوژی ژیروید، پی و الماسی در محدوده تخلخل ۷۰٪ تا ۹۰٪ با در نظر گرفتن طول سلول‌های مختلف و سیالات مختلف معتبر است.

این مطالعه همچنین اثر گرمایش ویسکوز در اعداد رینولدز بالا را بر توپولوژی‌های مختلف بررسی نموده و روابطی در این زمینه ارائه کرده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که می‌توان یک رابطه واحد ارائه کرد که بتواند ضریب انتقال حرارت همرفتی را برای ساختارهای مختلف مینیمال، ارائه نماید.



شکل ۲۶ مطالعات عددی سطوح مینیمال برای استفاده در مبدل‌های حرارتی [۵۵]

خصوصیات جذب انرژی و مقاومت ضربه‌ای ساختارها مشخص شود.

نتایج آن‌ها نشان داد که ساختارهای مینیمال متخلخل ژبروید و پی ویژگی‌های مکانیکی برتری نشان دادند که باعث بهبود جذب انرژی در مقایسه با ساختارهای جاذب انرژی قدیمی شدند. استفاده از ساختارهای مینیمال متخلخل نه تنها مشکلات بار زیاد و نوسان بار غیر یکنواخت در جاذب‌های انرژی قدیمی را حل کرد، بلکه هم‌زمان نیازهای سبک‌وزنی و جذب انرژی را نیز برآورده کرد.

یون کیم و همکاران [۶۱] به بررسی و توسعه رفتار مکانیکی تایرهای بدون هوا با استفاده از ساختارهای سیلندری مبتنی بر سطوح مینیمال پرداختند. این پژوهش به دنبال ایجاد پایداری بالا در رفتار فشاری و برشی تایرهای بدون هوا بوده است. آن‌ها ساختارهای داخلی تایرها را با استفاده از نرم‌افزار CAD طراحی کرده و آن را به فایل STL تبدیل نمودند. در ادامه فایل ایجاد شده بایستی به کدهایی برای چاپ سه‌بعدی تبدیل شده و تنظیم پارامترهای چاپ انجام شود. با استفاده از چاپگر سه‌بعدی با سیستم کنترل فشار و موتورهای خطی XYZ، چاپ دقیق ساختارهای سیلندری مبتنی بر سطوح مینیمال صورت پذیرفت. با استفاده از روش‌های وولکانیزاسیون سنتی و فوتوکورینگ، تثبیت ساختار چاپ‌شده و افزایش پایداری مکانیکی آن انجام شده است. در نهایت ارزیابی رفتار فشاری و برشی تایرهای چاپ‌شده با استفاده از تست‌های مکانیکی صورت پذیرفته است. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ساختارهای مبتنی بر سطوح مینیمال در تایرهای بدون هوا منجر به بهبود پایداری فشاری و برشی می‌شود. این ساختارها دارای سفتی متغیر هستند که در جابجایی‌های کوچک، مقدار آن کمتر بوده و در جابجایی‌های بزرگ‌تر، مقدار آن بیشتر می‌شود. این ویژگی‌ها می‌تواند راحتی رانندگی را افزایش داده و ظرفیت جذب ضربه و حمل بار را بهبود بخشند.

#### ۴- مدل‌سازی سطوح مینیمال

##### ۴-۱- مدل‌های ریاضی و تحلیل عددی

مدل‌سازی سطوح مینیمال هم شامل ایجاد هندسه ساختار در نرم‌افزار طراحی به کمک کامپیوتر و هم شامل شبیه‌سازی رفتار ساختار در نرم‌افزارهای مهندسی می‌شود که نیاز به استفاده از مدل‌های ریاضی دقیق و تحلیل‌های عددی دارد. این مدل‌ها به منظور پیش‌بینی رفتار مکانیکی سازه‌ها تحت بارهای مختلف و بهینه‌سازی طراحی استفاده می‌شوند. معادلات دیفرانسیل جزئی و روش‌های عددی مانند روش المان محدود از جمله ابزارهای رایج در این زمینه هستند.

آهور و همکاران [۶۲] پژوهشی در رابطه با مطالعه عددی مواد الاستوپلاستیک سلولی مختلف باز و بسته و تولید هندسه

می‌توانند نیازهای خاص مدیریت حرارتی را به طور مؤثرتری برآورده کنند. استفاده از این ساختارها در مبدل‌های حرارتی می‌تواند منجر به بهبود عملکرد حرارتی و کاهش مقاومت جریان شود، که این امر کاربردهای گسترده‌ای در مهندسی و طراحی مبدل‌های حرارتی دارد.

#### ۳-۴- خودروسازی

در صنایع خودروسازی، این سازه‌ها می‌توانند در طراحی قطعات سبک و مقاوم به کار گرفته شوند. استفاده از این سازه‌ها می‌تواند به کاهش وزن خودروها و در نتیجه افزایش کارایی سوخت و کاهش مصرف انرژی منجر شود.

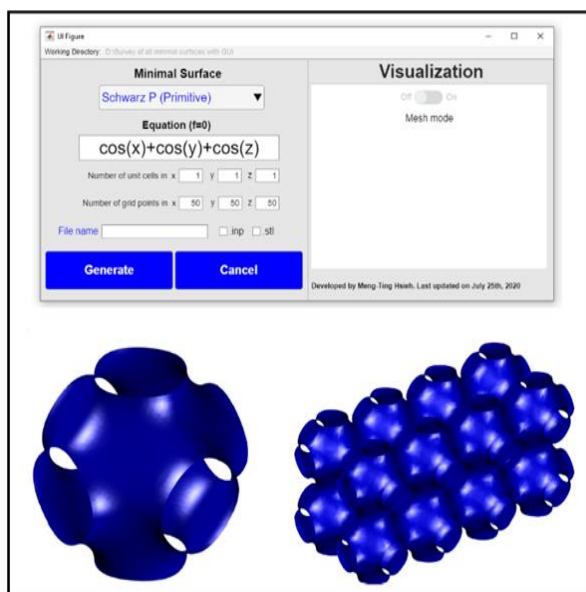
اورمیستون و ساندرام [۵۹] به بررسی سطوح مینیمال تقویت شده با فایبرگلاس برای جذب انرژی پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی میزان کاربردی بودن نقش فایبرگلاس در تقویت سطوح مینیمال بوده است.

این پژوهش ساختارهای شبکه‌ای کامپوزیتی را بر اساس سطوح مینیمال ارائه می‌کند که با استفاده از چاپ سه بعدی ایجاد شده‌اند و از نایلون دربردارنده فیبر کربن میکرو به عنوان ماتریس پایه و فایبرگلاس به عنوان تقویت‌کننده استفاده کرده‌اند.

سازه‌های تقویت‌شده با فایبرگلاس با چگالی ۲۵ درصد، خواصی مشابه یا بهتر در مقایسه با سازه‌های با چگالی ۷۵ درصد اما بدون تقویت، به نمایش گذاشته‌اند. افزودن فایبرگلاس ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های استوانه‌ای را ۲۴/۸ درصد و ظرفیت تنش نمونه‌های میله‌ای و نمونه‌های پرینت شده دمبلی شکل تست کشش را به ترتیب ۶۴/۶ و ۱۱۳ درصد افزایش داده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ساختارهای کامپوزیتی سبک وزن مینیمال می‌توانند برای کاربردهای جذب انرژی مثل در خودروها نویدبخش باشند. آزمایشات مکانیکی نشان داد که افزودن فایبرگلاس به طور قابل توجهی قابلیت تحمل بار سازه‌ها را به ویژه در سازه‌های با تراکم نسبی ۲۵ درصد افزایش می‌دهد که مشخصاً نشان‌دهنده این واقعیت است که افزودن فایبرگلاس حداکثر ظرفیت تنش و جذب انرژی سازه‌ها را افزایش داده و ساختارهای کامپوزیتی سبک وزن مینیمال تقویت شده با فایبرگلاس از ساختارهای بدون تقویت بهتر عمل کردند.

ژائو و همکاران [۶۰] ظرفیت جذب انرژی قوطی‌های پر شده با ساختارهای متخلخل سطوح مینیمال را با هدف طراحی خودروهای سبک، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها هشت ساختار مینیمال شامل ژبروید، الماسی، I-WP، نویوس، پی، فیشرکوخ اس، FRD و PMY را با استفاده از نرم‌افزار متلب طراحی نموده و سپس نمونه‌های طراحی شده را با استفاده از ساخت افزایشی به روش SLM پرینت کردند. سپس این نمونه‌ها در معرض آزمون فشار شبه‌استاتیکی و ضربه با سرعت پایین قرار گرفتند تا

والدویت و تین هیش [۶۳] یک مولد سطوح مینیمال برای استفاده در مدل‌سازی اجزای محدود و همچنین ایجاد ساختار به روش ساخت افزایشی پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، ایجاد ابزاری توانمند برای طراحی سطوح مینیمال بوده است. مطابق شکل (۲۸)، این برنامه یک مولد سطوح مینیمال است که تجسم سطح و ایجاد فایل طراحی به کمک یک رابط کاربری گرافیکی فراهم می‌کند و می‌تواند قسمت‌های داخلی سطح مینیمال مد نظر کاربر را با کنترل بر تناوب و دقت مورد نیاز ایجاد نماید.



شکل ۲۸ رابط کاربری برنامه و سطح پی ایجاد شده [۶۳]

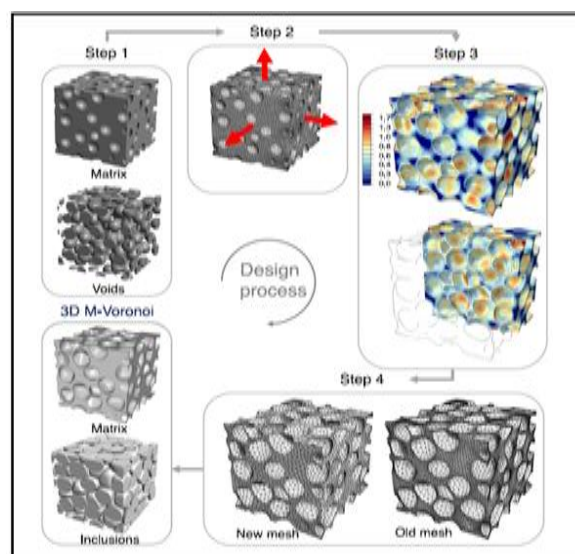
این ابزار، هم شمایل سطح مینیمال را نمایش می‌دهد و هم فایل‌های CAD مورد نیاز برای مدل‌سازی المان محدود و همچنین فایل‌های با فرمت STL برای ساخت افزایشی را ارائه می‌کند. به کمک رابط گرافیکی ارائه شده می‌توان ۱۹ سطح مینیمال را با کنترل کامل بر مشخصات آن‌ها ایجاد نمود و همچنین قابلیت اینکه کاربر نیز سطح مینیمال دلخواه خود را با استفاده از تقریب لول ست<sup>۱</sup> ایجاد نماید نیز وجود دارد. رابط کاربری گرافیکی ساده با یک پنل کنترل برای انتخاب حداقل سطوح و تنظیم تعداد سلول‌های واحد و یک پنل تجسم برای نمایش سطوح تولید شده از قابلیت‌های نرم‌افزار ارائه شده می‌باشد. این نرم‌افزار می‌تواند تصاویر بدون مش یا حالت مش را به کمک نرم‌افزار متلب تولید کند.

گونجی و کوهان [۶۴] به بررسی ساخت افزودنی ساختارهای مینیمال و مطالعه تجربی بر روی مقاومت جریان هوا با توجه به این ساختارها پرداختند و هدف آن‌ها از این پروژه، طراحی ساختارهای مینیمال برای دستیابی به عملکرد صوتی مطلوب مطابق با استانداردهای (E) ISO 9053-1:2018 است.

آن و مطالعه عددی آن‌ها در کرنش‌های کوچک و بزرگ پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، مطالعه بر روی انواع ساختارهای تصادفی از جمله استراتژی طراحی عددی برای نوع جدیدی از هندسه سه بعدی ورونوی به نام M-Voronoi بوده است. این مواد دارای اشکال حفره‌ای محدب تصادفی و ضخامت بین حفره‌ای غیریکنواخت هستند و می‌توانند طیف وسیعی از چگالی‌های نسبی را پوشش دهند. نقطه شروع ایجاد ساختار، استفاده از یک الگوریتم جذب تصادفی می‌باشد که مطابق شکل (۲۷) ابتدا حفره‌های کروی به صورت تصادفی در فاز ماتریس ایجاد نموده و به دنبال آن تغییرات حجمی برای القای رشد فضای خالی به میزان دلخواه در آن اعمال می‌شود. فرآیند M-Voronoi امکان تشکیل طرح‌های همسانگرد یا ناهمسانگرد را فراهم می‌کند.

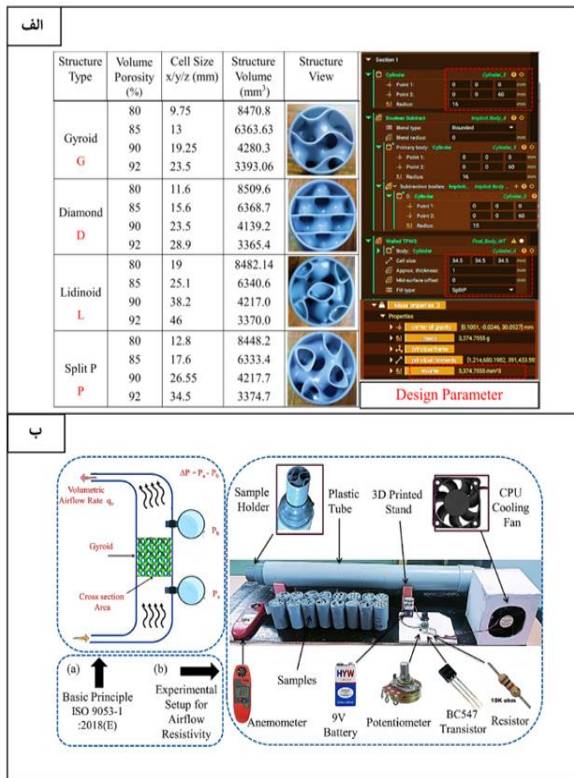
خواص الاستیک-پلاستیک ساختارهای متخلخل M-Voronoi با سایر هندسه‌های متخلخل شناخته شده از جمله ساختارهای متخلخل با حفره‌های کروی توزیع شده به صورت تصادفی و هندسه TPMS ژبروید و چند ساختار دیگر مقایسه شده است. نتایج نشان داده است که هندسه M-Voronoi و ساختارهای متخلخل با حفره‌های کروی بالاترین تنش تسلیم و سفتی را ارائه نموده‌اند. مقایسه با سایر هندسه‌ها نشان می‌دهد که تصادفی بودن می‌تواند خواص مکانیکی را بسته به ویژگی‌های به کار

گرفته شده و صاف بودن آن‌ها بهبود ببخشد. با توجه به نتایج این پژوهش، هندسه تناوبی مینیمال ژبروید سفتی و تنش تسلیم کمتری نشان داده است اما از نظر طراحی ساختار، نسبت به ساختار M-Voronoi ساده‌تر خواهد بود.



شکل ۲۷ مراحل انجام کار [۶۲]

<sup>۱</sup> Level-set



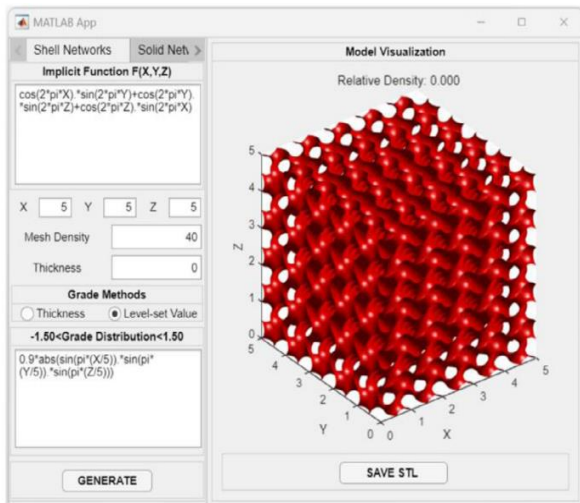
ساختارهای مینیمال به طور گسترده در صنایع معماری و هواپیماها برای کاهش نویز استفاده می‌شود. مقاومت در برابر جریان هوا تأثیر قابل توجهی بر عملکرد صوتی سازه‌های متخلخل دارد. شبکه‌های مینیمال ژیروید، الماسی، لیدینوئید<sup>۱</sup> و پی با تخلخل، طول نمونه و ابعاد متفاوت برای پیش بینی مقاومت جریان هوا و افت فشار طراحی شدند. آزمایش‌ها نشان داد که ساختارهای شبکه‌ای با تخلخل، طول نمونه و ابعاد کمتر، مقاومت جریان هوا و افت فشار بالاتری را نشان می‌دهند. با این حال، حداقل تفاوت در مقادیر مقاومت جریان هوا در بین چهار شبکه وجود دارد.

در این پژوهش ساختارهای مینیمال با استفاده از نرم افزار مدلسازی ضمنی NTOPOLOGY طراحی شده‌اند. نمونه‌ها به صورت استوانه‌ای، با قطر ۳۲ میلی متر، ضخامت دیواره ۱ میلی متر و ارتفاع ۶۰ میلی متر در نظر گرفته شده‌اند. برای هر نوع ساختار ژیروید، الماس، لیدینوئید و پی، نمونه‌ها در چهار تخلخل حجمی مختلف تولید شدند (شکل ۲۹ الف).

این مطالعه بر اندازه‌گیری مقاومت جریان هوا متمرکز بود و شامل سه مرحله اصلی بود: طراحی و ساخت سازه‌های شبکه مینیمال، توسعه دستگاه ویژه سنجش مقاومت جریان هوا و بحث درباره اثرات تخلخل، طول نمونه و قطر بر مقاومت جریان هوا و افت فشار. ساختارهای شبکه‌ای مختلف با تخلخل، طول نمونه و قطرهای مختلف ایجاد شد و با استفاده از یک دستگاه ویژه آزمایش شدند (شکل ۲۹ ب). یافته‌ها نشان داد که مقاومت جریان هوا به تخلخل بستگی دارد و نمونه‌های با تخلخل کم مقاومت بالاتری دارند. ساختار لیدینوئید بهترین مدل برای مقاومت جریان هوا و افت فشار است. طول نمونه کمترین تأثیر را بر مقاومت داشت، در حالی که ساختارهای شبکه‌ای با قطر کوچک‌تر مقاومت و افت فشار را افزایش دادند.

عزیزی و همکاران [۶۵] به بررسی و ایجاد افزونه نرم افزاری تولید کننده سطوح مینیمال چند بعدی پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، ایجاد یک افزونه نرم افزاری جدید متلب به نام MD-TPMS می‌باشد که برای تولید ساختار مینیمال سه بعدی با قابلیت طراحی گرادینانی از جمله شبکه‌های مینیمال پوسته‌ای و توپر با وضعیت گرادینانی در یک راستا بوده است (شکل ۳۰). این افزونه به کاربران اجازه می‌دهد تا توابع ضمنی دلخواه مینیمال، طرح‌های گرادینانی پیچیده و ارسال فایل‌های STL برای ساخت افزودنی و همچنین مدل‌های مورد نیاز برای مطالعه عددی را تعریف کنند. هدف این نرم افزار کمک به محققان در ساخت سریع ساختارهای مینیمال گرادینانی پیچیده است و برای استفاده در زمینه‌های بین رشته‌ای در نظر گرفته شده است.

شکل ۲۹ الف- نرم افزار مدلسازی و پارامترها،  
ب- دستگاه ساخته شده [۶۴]

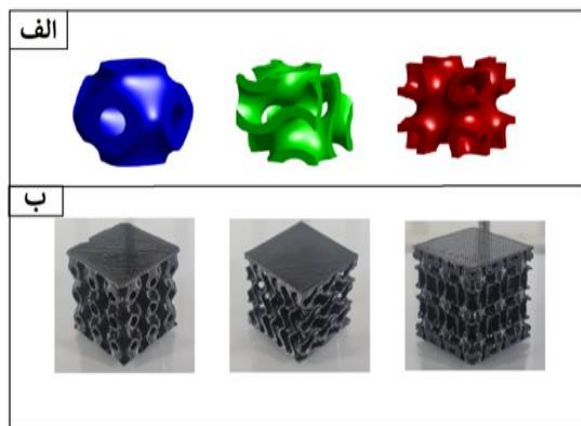


شکل ۳۰ محیط نرم افزار [۶۵]

حسن‌آبادی [۶۶] به بررسی طراحی ریزساختار مواد ناهمگن با استفاده از پینه چندضلعی پرداخت و هدف از این پژوهش، ارائه روشی جدید و ساده برای طراحی ریزساختار مواد به منظور دستیابی به خواص دلخواه با استفاده از روش تقریب زنی سطوح به کمک پینه‌ی چندضلعی برای ایجاد ساختار مینیمال پی بوده است.

<sup>1</sup> Lidinoid

در این پژوهش، طراحی صفحات سبک‌وزن با کارآمدی مکانیکی بالا و بررسی تاثیر گرادایانی کردن در این ساختارهای بوده است. چارچوب‌های ارائه شده هر کدام بر روی کنترل چگالی جرم، مدول الاستیک و مدول برشی تمرکز دارند و سه توزیع تخلخل و سه توزیع کسر حجمی صفحات گرفت را شامل می‌شوند. چند ساختار مینیمال از جمله پی، ژبروید و I-WP بررسی شدند (شکل ۳۲ الف)). ابتدا تجزیه و تحلیل استاتیکی و ارتعاشات آزاد با استفاده از یک مدل تئوری صفحه پنج متغیری با تجزیه و تحلیل ایزوژئومتری انجام می‌شود. تأثیر ضرایب تخلخل و کسرهای وزنی بر پاسخ‌های صفحه مورد مطالعه قرار گرفته است. یافته‌های آن‌ها در زمینه صفحات ضخیم، نشان داد که صفحات مبتنی بر سطح مینیمال پی، عالی‌ترین عملکرد را دارند. این مطالعه همچنین فرمول‌هایی را برای ترکیب ساختارهای مینیمال در چارچوب‌های کنترل مدول الاستیک و مدول برشی پیشنهاد کرد که استحکام ساختارهای مینیمال را در مقایسه با سایر جامدات سلولی، به‌ویژه در زمینه صفحات ضخیم (شکل ۳۲ ب))، متمایز می‌کند.



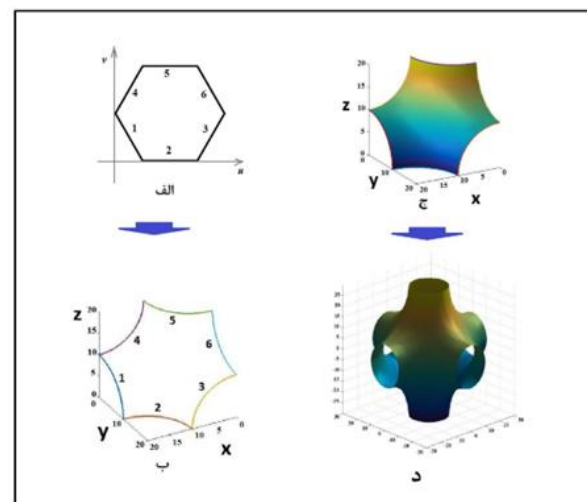
شکل ۳۲ الف- ساختارهای مینیمال به کار رفته، ب- نمونه فیزیکی [۶۷]

افشار و همکاران [۶۸] به بررسی ویژگی‌های استحکام فشاری بافت‌های سطوح متخلخل مینیمال با گرادایان شعاعی پرداختند و هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی ساختار شعاعی و خواص مکانیکی آن بوده است (شکل ۳۳)).

در پژوهش آن‌ها، اثر تخلخل هندسه و گرادایانی بودن تخلخل روی خصوصیات فشاری و مکانیسم‌های تغییر شکل مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور ساختارهای TPMS شامل پی، الماسی و I-WP مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که الگوهای گرادایانی به طور قابل توجهی مکانیسم‌های تغییر شکل را تحت تاثیر قرار دادند. ساختارهای با گرادایان شعاعی، یعنی گرادایانی بودن در راستای عمود بر اعمال نیرو، تغییر شکل‌پذیری بالاتر و ساختارهای با گرادایان طولی کرنش شکست کم را ارائه نمودند. به طور کلی، سازه‌هایی که در آن‌ها

مطابق شکل (۳۱- الف) ابتدا شش ضلعی در محیط پارامتریک  $u$  و  $v$  ایجاد شده است که هر کدام از اضلاع شش ضلعی مرتبط با یکی از کمان‌های ترسیم شده به عنوان منحنی‌های مرزی مورد استفاده برای ایجاد پینه می‌باشد که در سه صفحه مختصات ترسیم شده‌اند.

در ادامه رویه متصل کننده این منحنی‌ها مطابق با شکل (۳۱- ج) با استفاده از رابطه‌ی پینه‌های چندضلعی، ایجاد شده است. در ادامه پینه‌ی ایجاد شده، برای ساخت یک سلول دو فازی از نوع شوارز پی مطابق با شکل (۳۱- د)، که بطور متناوب ساختار را ایجاد خواهد کرد، مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به انعطاف‌پذیری منحنی‌های مرزی، ساختارهای متنوعی با درصد حجمی‌های مختلف به صورت توپر ساخته شدند. ساختارهای توپر ایجاد شده بر اساس ضریب هدایت حرارتی مؤثر، مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه شده به خوبی قادر است ساختارهایی با نسبت حجمی دلخواه برای ضرایب هدایت حرارتی، هدایت الکتریکی و ضریب نفوذ دو فاز ارائه نماید.



شکل ۳۱ الف- فضای دو بعدی پارامتری، ب- ایجاد منحنی‌ها بر اساس پارامترها، ج- تقریب زنی رویه چند ضلعی، د- شکل نهایی [۶۶]

#### ۴-۲- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته مهندسی مانند انسیس، آباکوس و کامسول انجام می‌شوند. این شبیه‌سازی‌ها به مهندسان امکان می‌دهند تا رفتار سازه‌ها را تحت شرایط مختلف بررسی کنند و به بهینه‌سازی طراحی‌ها بپردازند. کیم و همکاران [۶۷] چارچوب‌های مدل‌سازی محاسباتی جدیدی برای ارزیابی ساختارهایی شامل گرافن مورد استفاده در ساختارهای TPMS به صورت گرادایانی، ارائه نمودند. هدف آنها

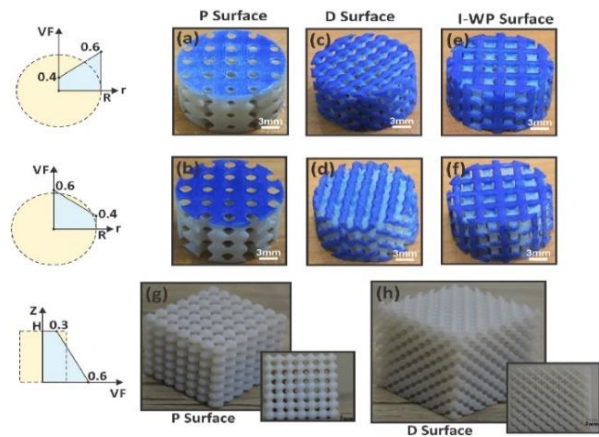
در این پژوهش، روش جدیدی برای ساخت ریزساختارهای ناهمگن چند مقیاسی ارائه شده است. این روش از توابع همبستگی آماری، به‌ویژه توابع همبستگی دو نقطه‌ای، برای ایجاد یک ساختار دو فازی با فازهای جامد و خالی استفاده می‌کند. یک تابع سینوسی با کاهش نمایی به عنوان تابع اتوکوواریانس برای ساخت ساختار ناهمگن استفاده شده است. ساختار متخلخل بر اساس سطح شوارز پی به فاز جامد متخلخل و فاز خالی تقسیم می‌شود. مشاهده شده است که هر دو فاز ریزساختار ساخته شده در سراسر ساختار متصل هستند. به طور کلی به غیر از اینکه خود ساختار شوارز پی بافت متخلخلی را در ابعاد بزرگتر تشکیل می‌دهد (شکل ۳۴ ب)) درون خود ساختار شوارز پی نیز متخلخل است (شکل ۳۴-الف)). چنین ساختارهایی برای طراحی مواردی مانند استخوان مصنوعی و کاتدهای پیل سوختی که به وزن کم و نسبت سطح به حجم بالا نیاز دارند، مناسب هستند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی سطوح مینیمال تکرار شونده و کاربردهای آن‌ها پرداخته شد. با تحلیل و بررسی ساختارهای مینیمال نظیر شوارز پی، الماسی، ژیروید و I-WP مشخص می‌شود که این ساختارها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، قابلیت‌های فراوانی در طراحی و ساخت انواع سازه‌های سبک، کارآمد و بهینه دارند.

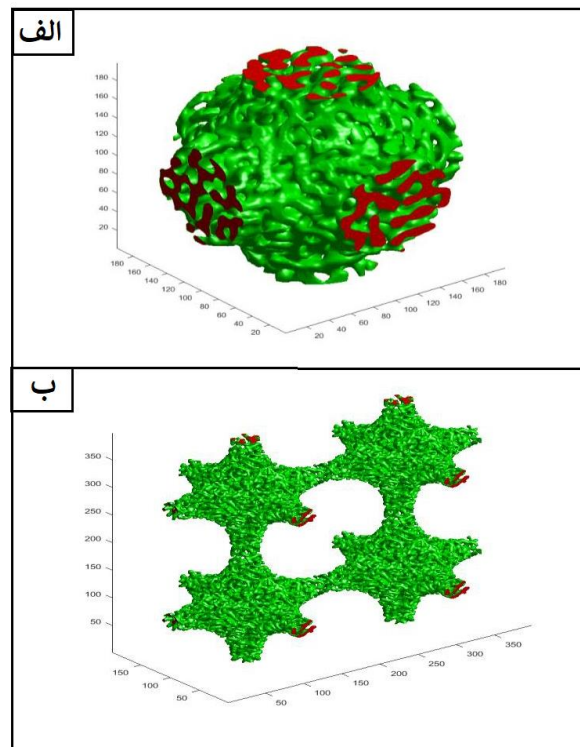
مطالعات نشان داده‌اند که ساختارهای مینیمال به دلیل ویژگی‌های خاص خود، دارای نسبت‌های تنش تسلیم به وزن بالا و همچنین سفتی به وزن بالا هستند. این امر در طراحی سازه‌های هوایی و خودروها که وزن پارامتر مهمی می‌باشد بسیار مفید است. همچنین، تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که ساختارهای مینیمال می‌توانند به‌طور مؤثری در ساخت ایمپلنت‌های پزشکی استفاده شوند. این ساختارها قادر هستند بافت‌های طبیعی بدن را تقلید کنند و فرآیندهای ترمیم و بازسازی بافت را تسهیل نمایند. ساختارهای مینیمال می‌توانند کارایی سیستم‌های فیلتراسیون و فرآیندهای کاتالیستی را بهبود بخشند. این سطوح می‌توانند جریان مایعات و گازها را بهینه کنند و همچنین به دلیل دارا بودن نسبت سطح به حجم بالا، سطح تماس بیشتری را برای واکنش‌های شیمیایی فراهم نمایند. مطالعات اخیر بر اهمیت تکنیک‌های مدل‌سازی دقیق برای بهره‌برداری کامل از قابلیت‌های ساختارهای مینیمال تأکید دارند و پیش‌بینی‌های دقیقی از رفتار آن‌ها تحت شرایط مختلف ارائه می‌دهند. از بین انواع سطوح مینیمال، پژوهش‌های متعدد قابلیت‌های سطح مینیمال ژیروید را در جذب انرژی بهتر از سایر

شرایط کششی غالب است، نظیر ساختار پی و I-WP خواص مکانیکی و کارایی بالاتری را تحت بارهای مکانیکی نشان دادند. شبیه‌سازی‌های المان محدود در پیش‌بینی تغییر شکل و پاسخ‌های مکانیکی مؤثر بودند و آن‌ها را به ابزاری ارزشمند برای طراحی بافت‌های متخلخل گرادیانی چند منظوره تبدیل کردند.



شکل ۳۳ بررسی شیب ساختار [۶۸]

حسن آبادی [۶۹] به بررسی ساخت ریزساختارهای متخلخل ناهمگن چند مقیاسی با استفاده از توابع همبستگی آماری و سطوح مینیمال پرداخت و هدف از این پژوهش طراحی ساختارهای ناهمگن چند فازی در دو مقیاس به صورت هم‌زمان بوده است.



شکل ۳۴ الف- بافت متخلخل خود شوارز پی، ب- شوارز پی در ایجاد بافت متخلخل بزرگتر [۶۹]

قابل ذکر است که عمده ساختارهایی که به صورت فیزیکی در این زمینه ارائه شده و مورد آزمون قرار گرفته‌اند به علت پیچیدگی ساختار بایستی به کمک روش‌های پرینت سه‌بعدی ایجاد شوند. این مورد کاربرد وسیع آن‌ها در زمینه‌های مختلف را با چالش مواجه می‌کند. چرا که توسعه این ساختارها مشخصاً به توسعه روش‌های پرینت سه‌بعدی چه از منظر امکان‌پذیری و چه از منظر کیفیت ساختار، قویا وابسته می‌شود.

این پژوهش با ارائه شواهد قوی از مزایا و کاربردهای وسیع سطوح مینیمال، اهمیت و ضرورت تحقیق و توسعه بیشتر در این زمینه را برجسته می‌سازد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان انتظار داشت که این ساختارها در آینده‌ای نه چندان دور، با گسترش روش‌های پرینت سه‌بعدی و ساخت افزودنی در ایجاد ساختارهایی کارا با نسبت‌های سفتی به وزن و استحکام به وزن بالا، ساختارهایی با قابلیت‌های ویژه در جذب انرژی، انتقال حرارت و سیالات به صورت وسیع کاربرد پیدا کنند.

سطوح گزارش کرده‌اند. همچنین این ساختار در زمینه خواص خستگی و در ایمپلنت‌های پزشکی نیز بهتر عمل کرده است. ساختار الماسی (D)، در کاربردهای سیالاتی و انتقال حرارتی بهتر عمل کرده و پژوهش‌های متعدد، مناسب بودن آن در مبدل‌های حرارتی را تایید کرده‌اند. همچنین پژوهش‌های متعدد تایید کرده‌اند که پوسته‌های ضخامت‌دار سطوح مینیمال، نسبت به حالتی که سطح مینیمال به صورت یک سازه توپر متخلخل در نظر گرفته شود در زمینه‌هایی نظیر جذب انرژی، استحکام و سفتی بهتر عمل کرده‌اند.

گرادینانی کردن ساختارهای مینیمال باعث می‌شود که این سازه‌ها نسبت به حالت یکنواخت غیر گرادینانی، رفتار متفاوتی داشته باشند. مثلاً در استوانه‌های گرادینانی شده به صورت شعاعی، در صورتی که سازه در راستای عمود بر راستای گرادینانی تحت فشار قرار گیرد، قابلیت شکل‌پذیری بیشتری به نمایش می‌گذارد در حالی که اگر در راستای اعمال نیرو، ساختار گرادینانی شود، به علت اینکه بخشی از ساختار ضعیف‌تر از سایر بخش‌ها می‌شود کرنش تسلیم کمتری تحمل خواهد کرد.

## ۶- مراجع

structures manufactured by selective laser melting: Design, mechanical properties, and simulation," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 175, p. 105480, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105480>.

[7] C. Yan *et al.*, "Design of TPMS structures," *triply period. Minimal Surf Lattices Addit Manuf by Sel Laser Melting*, Elsevier, pp. 27-38, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824438-8.00002-9>.

[8] M. Shen *et al.*, "Mechanical properties of 3D printed ceramic cellular materials with triply periodic minimal surface architectures," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 41, no. 2, pp. 1481-1489, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.062>.

[9] O. Al-Ketan, R. K. A. Al-Rub, and R. Rowshan, "The effect of architecture on the mechanical properties of cellular structures based on the IWP minimal surface," *Journal of Materials Research*, vol. 33, no. 3, pp. 343-359, 2018, doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.1>.

[10] A. Dadashi and G. Rahimi, "A comprehensive investigation of the lattice structure mechanical properties based on Schwarz Primitive triply periodic minimal surface: Elastic modulus, yield strength, and maximum bearing force in the elastic region," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 295, p. 112776, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112776>.

[1] W. Chen, L. Gan, and J. Huang, "Design, Manufacturing and Functions of Pore-Structured Materials: From Biomimetics to Artificial," *Biomimetics (Basel)*, vol. 8, no. 2, Mar 29 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/biomimetics8020140>.

[2] Z. Chen *et al.*, "Understanding porous materials with pair distribution functions," *Cell Reports Physical Science*, vol. 4, no. 12, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101681>.

[3] K. Yeranee and Y. Rao, "Triply Periodic Minimal Surfaces Thermal Hydraulic Effects," *encyclopedia.pub*, 2022, doi: 10.3390/en15238994 <https://encyclopedia.pub/entry/3918>.

[4] S. Zou *et al.*, "Mechanical and biological properties of enhanced porous scaffolds based on triply periodic minimal surfaces," *Materials & Design*, vol. 219, p. 110803, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110803>.

[5] M. Zhang, J. Li, C. Liu, M. Deng, X. Liao, and D. Wang, "Study on the Anisotropy of Triply Periodic Minimal Surface Porous Structures," *Coatings*, vol. 13, no. 7, p. 1206, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13071206>.

[6] H. Zhou, M. Zhao, Z. Ma, D. Z. Zhang, and G. Fu, "Sheet and network based functionally graded lattice

- [20] C. Iandiorio, G. Mattei, E. Marotta, G. Costanza, M. E. Tata, and P. Salvini, "The Beneficial Effect of a TPMS-Based Fillet Shape on the Mechanical Strength of Metal Cubic Lattice Structures," *Materials*, vol. 17, no. 7, p. 1553, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17071553>.
- [21] M. Zhao, X. Li, D. Z. Zhang, and W. Zhai, "TPMS-based interpenetrating lattice structures: design, mechanical properties and multiscale optimization," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 244, p. 108092, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.108092>.
- [22] M. Zhao, D. Z. Zhang, F. Liu, Z. Li, Z. Ma, and Z. Ren, "Mechanical and energy absorption characteristics of additively manufactured functionally graded sheet lattice structures with minimal surfaces," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 167, p. 105262, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105262>.
- [23] O. Al-Ketan, D.-W. Lee, R. Rowshan, and R. K. A. Al-Rub, "Functionally graded and multi-morphology sheet TPMS lattices: Design, manufacturing, and mechanical properties," *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, vol. 102, p. 103520, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103520>.
- [24] A. I. Ansari, N. A. Sheikh, and N. Kumar, "Evaluation of the energy absorbing capacity of the two combinations of TPMS structure subjected to different compressive strain rates," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 46, no. 6, p. 334, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-024-04925-8>.
- [25] L. Bai *et al.*, "Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 182, p. 105735, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105735>.
- [26] H. Zhou, M. Zhao, N. He, T. Zhang, X. Ma, and D. Z. Zhang, "Compressive response and energy absorption of additive manufactured Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface honeycomb structure," *Journal of Alloys and Compounds*, p. 173744, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173744>.
- [27] C. Zhang *et al.*, "Mechanical responses of sheet-based gyroid-type triply periodic minimal surface lattice structures fabricated using selective laser melting," *Materials & Design*, vol. 214, p. 110407, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110407>.
- [28] X. Ma, D. Z. Zhang, M. Zhao, J. Jiang, F. Luo, and H. Zhou, "Mechanical and energy absorption
- [11] M. Teimouri, M. Mahbod, and M. Asgari, "Topology-optimized hybrid solid-lattice structures for efficient mechanical performance," in *Structures*, 2021, vol. 29: Elsevier, pp. 549-560, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.055>.
- [12] K. A. Khan and R. K. Abu Al-Rub, "Viscoelastic properties of architected foams based on the Schoen IWP triply periodic minimal surface," *Mechanics of advanced materials and structures*, vol. 27, no. 10, pp. 775-788, 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1538470>.
- [13] Y. Cui, A. K. Gain, L. Zhang, and Z. Li, "Manufacture and property characterization of interconnected pore-gradient TPMS materials," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 892, p. 146100, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146100>.
- [14] S. Hussain, A. Nazir, S. Waqar, U. Ali, and O. Gokcekaya, "Effect of additive manufactured hybrid and functionally graded novel designed cellular lattice structures on mechanical and failure properties," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 128, no. 11-12, pp. 4873-4891, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12201-7>.
- [15] B. Sokollu, O. Gulcan, and E. I. Konukseven, "Mechanical properties comparison of strut-based and triply periodic minimal surface lattice structures produced by electron beam melting," *Additive Manufacturing*, vol. 60, p. 103199, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103199>.
- [16] K. M. Gide and S. Bagheri, "Mechanical Behavior and Material Modeling of Fused Filament Fabricated PEEK based on TPMS Lattices: A Comparative Study," 2024, doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4320202/v1>.
- [17] X. Ma, C. Guo, C. Hu, Z. Zhang, and J. Shen, "Study on the topological morphology and mechanical properties of variable-amplitude TPMS structures," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 27, pp. 3459-3472, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.164>.
- [18] N. Novak *et al.*, "High strain rate mechanical behaviour of uniform and hybrid metallic TPMS cellular structures," *Thin-Walled Structures*, vol. 191, p. 111109, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111109>.
- [19] H. Nguyen-Xuan, K. Q. Tran, C. H. Thai, and J. Lee, "Modelling of functionally graded triply periodic minimal surface (FG-TPMS) plates," *Composite Structures*, vol. 315, p. 116981, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116981>.

- [37] Y. Song *et al.*, "Systematic study of the thermal and hydraulic characteristics of a heat exchanger based on the Schwartz-D structure for aviation application," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 156, p. 107611, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107611>.
- [38] S. K. Sahoo, N. Saintier, and Y. Chemisky, "Exploration of the orientational-dependent fatigue response of triply periodic minimal surface cellular structures: A numerical study," *Procedia Structural Integrity*, vol. 57, pp. 375-385, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.03.040>.
- [39] S. Seehanam, W. Chanchareon, and P. Promoppatum, "Assessing the effect of manufacturing defects and non-Newtonian blood model on flow behaviors of additively manufactured Gyroid TPMS structures," *Heliyon*, vol. 9, no. 5, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15711>.
- [40] L. Dong *et al.*, "3D printing Al porous metamaterials with triply periodic minimal surfaces (TPMS) for hydrogen generation from Al-water reaction," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 1426-1435, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.047>.
- [41] E. H. Khogalia, H. L. Choo, and W. H. Yap, "Performance of triply periodic minimal surface lattice structures under compressive loading for tissue engineering applications," in *AIP conference proceedings*, 2020, vol. 2233, no. 1: AIP Publishing, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0001631>.
- [42] S. Ibrahimi, L. D'Andrea, D. Gastaldi, M. W. Rivolta, and P. Vena, "Machine Learning approaches for the design of biomechanically compatible bone tissue engineering scaffolds," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 423, p. 116842, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.116842>.
- [43] F. Günther *et al.*, "Characterization of additively manufactured lumbar interbody fusion cages based on triply periodic minimal surfaces," *Materials Today Communications*, vol. 39, p. 108634, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108634>.
- [44] S. Seehanam, S. Khruaduangkham, C. Sinthuvanich, U. Sae-Ueng, V. Srimaneepong, and P. Promoppatum, "Evaluating the effect of pore size for 3d-printed bone scaffolds," *Heliyon*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26005>.
- [45] A. Dehaghani, Z. Javanbakht, M. Barzan, D. Lloyd, and S. Feih, "Multi-Functional Design of TPMS-Structures for Temporary Paediatric Fixation properties of functionally graded lattice structures based on minimal curved surfaces," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-14, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07768-y>.
- [29] D. B. Alemayehu and M. Todoh, "Enhanced Energy Absorption in Bioinspired Combined TPMS-Gyroid and Walled TPMS-Gyroid Lattice Structure Manufactured via Fused Filament Fabrication (FFF)," 2024, doi: <https://doi.org/10.20944/preprints202403.1003.v1>.
- [30] Z. Fulong, P. Mingbo, L. Yanzhou, S. Liu, and W. Xi, "Parametric design and mechanical properties of TPMS porous structure," 2024, doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3848979/v1>.
- [31] P. Bunsri, S. Lophisarn, P. Jongpradist, S. Kongwat, and D. Watanabe, "Design parameter effects on crashworthiness of IWP and FRD in TPMS cellular structures," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 46, no. 2, p. 87, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04667-z>.
- [32] L. Xiao, G. Shi, G. Feng, S. Li, S. Liu, and W. Song, "Large deformation response of a novel triply periodic minimal surface skeletal-based lattice metamaterial with high stiffness and energy absorption," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 296, p. 112830, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112830>.
- [33] H. Gharehbaghi, A. Farrokhabadi, and Z. Noroozi, "Introducing a new hybrid surface strut-based lattice structure with enhanced energy absorption capacity," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 31, no. 14, pp. 2955-2964, 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2167246>.
- [34] A. R. Bernard and M. S. ElSayed, "Design, Manufacturing, and Analysis of Periodic Three-Dimensional Cellular Materials for Energy Absorption Applications: A Critical Review," *Materials*, vol. 17, no. 10, p. 2181, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17102181>.
- [35] L. Yang *et al.*, "Compression-compression fatigue behaviour of gyroid-type triply periodic minimal surface porous structures fabricated by selective laser melting," *Acta Materialia*, vol. 181, pp. 49-66, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.09.042>.
- [36] G. Schultheiß, B. Heine, and M. Merkel, "Characterization of flexural fatigue behaviour of additively manufactured (PBF-LB) gyroid structures," *Progress in Additive Manufacturing*, pp. 1-10, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00607-y>.

- [54] M. G. Gado, S. Ookawara, S. Nada, M. F. Elkady, and H. Hassan, "Adsorbent beds packed in triply periodic minimal surface-derived structures and their performance in adsorption desalination/cooling systems," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 150, p. 107205, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107205>.
- [55] G. Brambati, M. Guilizzoni, and S. Foletti, "Convective heat transfer correlations for Triply Periodic Minimal Surfaces based heat exchangers," *Applied Thermal Engineering*, vol. 242, p. 122492, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122492>.
- [56] W. Huang *et al.*, "Thermal-hydraulic performance of TPMS-based regenerators in combined cycle aero-engine," *Applied Thermal Engineering*, p. 123510, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123510>.
- [57] G. Yan *et al.*, "Thermal-hydraulic performance of modified Schwartz-Diamond solid-networks triply periodic minimal surface structures," *Applied Thermal Engineering*, p. 123384, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123384>.
- [58] I. El Khadiri, M. Abouelmajd, M. Zemzami, N. Hmina, M. Lagache, and S. Belhouideg, "Comprehensive analysis of flow and heat transfer performance in triply periodic minimal surface (TPMS) heat exchangers based on Fischer-Koch S, PMY, FRD, and Gyroid structures," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 156, p. 107617, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107617>.
- [59] S. Ormiston and S. Srinivas Sundarram, "Fiberglass-reinforced triply periodic minimal surfaces (TPMS) lattice structures for energy absorption applications," *Polymer Composites*, vol. 45, no. 1, pp. 523-534, 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.27795>.
- [60] X. Zhao, Z. Li, Y. Zou, and X. Zhao, "Compressive Characteristics and Energy Absorption Capacity of Automobile Energy-Absorbing Box with Filled Porous TPMS Structures," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 9, p. 3790, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14093790>.
- [61] D.-Y. Kim, H.-S. Kim, S. S. Kamath, X. Hou, J.-W. Choi, and S.-H. Park, "TPMS-based auxetic structure for high-performance airless tires with variable stiffness depending on deformation," *Advanced Engineering Materials*, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202400518>.
- [46] Y.-Z. Chen, C.-H. Wang, T.-Y. Hsieh, C.-C. Tung, P.-Y. Chen, and T.-H. Huang, "An Efficient Parameterized Neural Network Enhanced Multiscale Finite Element Modeling for Triply Periodic Minimal Surface Meta-Structures and its Applications for Femur," *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.023>.
- [47] M. Mamuti, L. Chao, and Z. Tian, "Analysis of mechanical characteristics and permeability of TPMS and Voronoi porous structure for bone scaffold," *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, pp. 1-14, 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/10255842.2024.2358378>.
- [48] N. Novak *et al.*, "Compression behaviour of TPMS-filled stainless steel tubes," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 852, p. 143680, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143680>.
- [49] D. Lohuis, H. Traub, and C. Hühne, "Mechanical testing of threaded inserts for additively manufactured sandwich panels with Gyroid core structures," *Results in Materials*, p. 100543, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100543>.
- [50] Mirafazli, Seyed Mohammad Baqer, and Hassan Abadi, "Investigation of the energy absorption of the porous Schwarz Pi structure made by 3D printing method," *Iran Construction and Production Engineering*, vol. 9, no. 11, pp. 13-20, 2023, [In Persian] doi: <https://doi.org/10.22034/IJME.2023.383269.1744>.
- [51] M. Wan, D. Hu, H. Zhang, and Z. Zhang, "Energy absorption characteristics of TPMS-filled square tubes under quasi-static axial crushing," *Thin-Walled Structures*, vol. 199, p. 111811, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111811>.
- [52] S.-H. Oh, C.-H. An, B. Seo, J. Kim, C. Y. Park, and K. Park, "Functional morphology change of TPMS structures for design and additive manufacturing of compact heat exchangers," *Additive Manufacturing*, vol. 76, p. 103778, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103778>.
- [53] Z. A. Qureshi, S. A. B. Al-Omari, E. Elnajjar, O. Al-Ketan, and R. A. Al-Rub, "Using triply periodic minimal surfaces (TPMS)-based metal foams structures as skeleton for metal-foam-PCM composites for thermal energy storage and energy management applications," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 124, p. 105265, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105265>.

- reinforced functionally graded triply periodic minimal surface (GPLR-FG-TPMS) plates," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 126, pp. 667-697, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.10.043>.
- [68] M. Afshar, A. P. Anaraki, and H. Montazerian, "Compressive characteristics of radially graded porosity scaffolds architected with minimal surfaces," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 92, pp. 254-267, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.06.051>.
- [69] A. Hasanabadi, "Construction of Porous Multiscale Heterogeneous Microstructures using Statistical Correlation Functions and Minimal Surfaces," *Journal of Solid Mechanics*, vol. 14, no. 4, pp. 491-498, 2022, doi: <https://doi.org/10.22034/jsm.2021.1921437.1674>.
- Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 11419, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62101-3>.
- [62] Z. Hooshmand-Ahoor, H. Luo, and K. Danas, "M-Voronoi and other random open and closed-cell elasto-plastic cellular materials: Geometry generation and numerical study at small and large strains," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 290, p. 112680, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112680>.
- [63] M.-T. Hsieh and L. Valdevit, "Minisurf—A minimal surface generator for finite element modeling and additive manufacturing," *Software Impacts*, vol. 6, p. 100026, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2020.100026>.
- [64] G. Chouhan and B. Gunji, "Additive manufacturing TPMS lattice structures: Experimental study on airflow resistivity," *Results in Materials*, vol. 20, p. 100478, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100478>.
- [65] C. Lu, L. A. Lesmana, F. Chen, and M. Aziz, "MD-TPMS: Multi-dimensional gradient minimal surface generator," *Software Impacts*, vol. 17, p. 100527, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2023.100527>.
- [66] A. Hassan Abadi, "Designing the microstructure of heterogeneous materials using polygonal callus," 1400. [Online]. Available: [In Persian] [https://www.iranjme.ir/article\\_131941.html](https://www.iranjme.ir/article_131941.html).
- [67] K. Q. Tran, T.-D. Hoang, J. Lee, and H. Nguyen-Xuan, "Three novel computational modeling frameworks of 3D-printed graphene platelets