ISSN: 2476-6909; Modares. Mech. Eng. *2025;25(07):453-464.*

Modares Mechanical Engineering

DOI: 10.48311/MME.25.7.453
journal homepage: mme.modares.ac.ir

Design of Direct Injection Mold for Shoe Soles by Additive Manufacturing Technology

Hossein Minaparvar, Kaivan Mohammadi*

Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: March 02, 2025
Revised: July 12, 2025
Accepted: July 15, 2025
ePublished: September 14, 2025

ABSTRACT

This study investigates the feasibility of fabricating direct-injection shoe-sole molds using three-dimensional printer technology, incorporating metamaterial structures. The primary objective is to evaluate the influence of lattice pattern type (including hexagonal, rectangular, and simple grids) and shell wall thickness (0.8, 1.0, and 1.2 mm) on the mechanical properties—specifically strength and energy absorption—of specimens reinforced with epoxy resin. Initially, a prototype shoe-sole mold was printed from ABS polymer and resin; however, due to insufficient intrinsic strength, reinforcement was required. To address this, standard test specimens were designed and printed, after which their inner cavities and the outer surface of the shell were filled with epoxy resin. Metamaterial patterns (hexagonal and rectangular) were applied to the exterior walls of the shell to enhance structural strength and stability. The final specimens were subjected to impact testing and three-point bending tests. The results demonstrated that the incorporation of lattice structures and the optimization of wall thickness significantly improved the mechanical properties. For instance, in the impact test, specimens featuring a hexagonal lattice with a 1 mm wall thickness absorbed an average of 1.46 J of energy, whereas simple and rectangular specimens absorbed 1.21 J and 1.01 J, respectively. Additionally, in the three-point bending test, the rectangular-lattice specimens exhibited the highest flexural strength (1129.1 MPa), indicating a pronounced effect of metamaterials in enhancing mechanical performance. These findings suggest that, by employing intelligent metamaterial design, it is possible to achieve components with high strength and performance while reducing material usage and production time.

Keywords: Shoe Sole Mold – Metamaterials – Epoxy Resin – Impact Test – Energy Absorption – Additive Manufacturing

How to cite this article
Minaparvar H, Mohammadi K, Design of direct injection mold for shoe soles by Additive Manufacturing Technology. Modares Mechanical Engineering; *2025;25(07):453-464.*

*Corresponding author's email: kaivan.mohammadi@sharif.edu
*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-6124-7504

Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

شاپا: ۷۹۰۹-۲۴۷۶؛ مهندسی مکانیک مدرس. ٤٦-٤٥٣:(٠٧)٢٥;١٤٠٤

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/MME.25.7.453

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir

طراحی قالب تزریق مستقیم زیره کفش با استفاده از پرینتر سه بعدی

حسین میناپرور، کیوان محمدی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله
دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

چکیده

این پژوهش به بررسی قابلیت ساخت قالب‌های تزریق مستقیم زیره کفش با استفاده از فناوری چاپگر سه‌بعدی و بهره‌گیری از ساختارهای فراماده می‌پردازد. هدف اصلی مطالعه، ارزیابی تأثیر نوع الگوی شبکه‌ای (شامل شش ضلعی، مستطیلی و ساده) و ضخامت دیواره‌های پوسته (۰/۸، ۱ و ۱/۲ میلی‌متر) بر خواص مکانیکی، به ویژه استحکام و انرژی جذب نمونه‌های تقویت‌شده با رزین اپوکسی است. در ابتدا، نمونه‌ای از قالب زیره کفش با استفاده از پلیمر ABS و رزین چاپ شد که به دلیل عدم استحکام کافی، نیاز به تقویت داشت. برای رفع این چالش، نمونه‌هایی استاندارد طراحی و چاپ شدند و سپس داخل آن‌ها و سطح خارجی پوسته با رزین اپوکسی پر گردید. الگوهای فراماده (شش ضلعی و مستطیلی) بر روی دیواره‌های خارجی پوسته اعمال شدند تا استحکام و پایداری ساختاری افزایش یابد. نمونه‌های نهایی تحت آزمایش‌های ضربه و خمش سه‌نقطه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از ساختارهای شبکه‌ای و بهینه‌سازی ضخامت دیواره، به طور قابل توجهی خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد. به عنوان مثال، در آزمایش ضربه، نمونه‌های دارای ساختار شش ضلعی با ضخامت ۱ میلی‌متر، به طور میانگین ۱/٤٦ ژول انرژی جذب کردند، در حالی که نمونه‌های ساده و مستطیلی به ترتیب ۱/۲۱ و ۱/۰۱ ژول جذب انرژی داشتند. همچنین، در آزمایش خمش سه‌نقطه، ساختار مستطیلی بالاترین استحکام خمشی (۱۱۲۹/۱ مگاپاسکال) را نشان داد که بیانگر تأثیر چشمگیر فراماده در بهبود خواص مکانیکی است. این یافته‌ها حاکی از آن است که با بهره‌گیری از طراحی هوشمندانه فراماده، می‌توان ضمن کاهش مصرف مواد و زمان تولید، به قطعاتی با استحکام و کارایی بالا دست یافت.

کلیدواژه‌ها: قالب زیره کفش – فراماده –رزین اپوکسی – آزمایش ضربه – انرژی جذب – ساخت افزایشی

نحوه ارجاع به این مقاله

میناپرور حسین، محمدی کیوان، طراحی قالب تزریق مستقیم زیره کفش با استفاده از پرینتر سه بعدی، مهندسی مکانیک مدرس. ٤٦-١٤٠٤;٢٥(٠٧):٤٥٣

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kaivan.mohammadi@sharif.edu

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۰۰۰۰-۰۰۰۲-۶۱۲۴-۷۵۰۴

Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، فناوری ساخت افزایشی (Additive Manufacturing) که به‌عنوان چاپ سه‌بعدی نیز شناخته می‌شود، به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین و تحول‌آفرین در تولید قطعات با هندسه‌های پیچیده و قابلیت شخصی‌سازی بالا، جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف از جمله مهندسی پزشکی، هوافضا و طراحی صنعتی یافته است. این فناوری مبتنی بر ساخت لایه‌به‌لایه‌ی یک شیء فیزیکی از روی مدل دیجیتالی آن است و در مقایسه با روش‌های سنتی ساخت، مزایایی چون کاهش مواد، کوتاه شدن زمان توسعه محصول و امکان طراحی آزادانه را فراهم می‌آورد. از میان روش‌های متنوع مورد استفاده در ساخت افزایشی، سه فناوری Fused Deposition Modeling (FDM)، Selective Laser Sintering (SLS) و Digital Light Processing (DLP) کاربرد گسترده‌تری یافته‌اند. در روش FDM، ترموپلاستیک به‌صورت مذاب از نازل خارج شده و به‌صورت لایه‌به‌لایه روی هم قرار می‌گیرد که به‌دلیل سادگی فرآیند و هزینه پایین، یکی از رایج‌ترین روش‌ها در چاپ سه‌بعدی به شمار می‌رود. در مقابل، فناوری SLS با بهره‌گیری از تابش لیزر برای ذوب موضعی پودرهای پلیمری یا فلزی، امکان ساخت قطعات با استحکام مکانیکی بالا و ساختارهای پیچیده‌تر را فراهم می‌سازد. در این میان، فناوری DLP به‌دلیل دقت ابعادی بالا و کیفیت سطح بهتر، در تولید قطعات ظریف و دقیق بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، یک منبع نور دیجیتالی (نظیر پروژکتور) الگوی هر لایه را به‌صورت هم‌زمان بر سطح یک رزین حساس به نور تابانده و آن را به‌صورت موضعی پخت می‌کند. مزیت اصلی DLP نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر فوتوپلیمریزاسیون، سرعت بالا و توانایی ساخت جزئیات دقیق‌تر به‌دلیل تابش هم‌زمان نور به کل سطح لایه است [1]. با توجه به ویژگی‌های یادشده، در پژوهش حاضر از فناوری DLP برای ساخت نمونه‌های مورد نظر استفاده شده است تا دقت ابعادی و کیفیت سطح مطلوبی در قطعات حاصل فراهم گردد.

قالب‌های زیره کفش یکی از اجزای کلیدی در طراحی و تولید کفش به شمار می‌آیند و تأثیر بسزایی در راحتی، عملکرد بیومکانیکی و جذب ضربه دارند. در گذشته، ساخت این قالب‌ها عمدتاً به روش‌های سنتی مانند ماشین‌کاری، ریخته‌گری و قالب‌گیری تزریقی انجام می‌شد. این روش‌ها اغلب زمان‌بر، پرهزینه و فاقد انعطاف‌پذیری در طراحی هندسه‌های پیچیده بودند. با ظهور فناوری چاپ سه‌بعدی، امکان تولید قالب‌هایی با ویژگی‌های منحصر به‌فرد و ساختارهای پیچیده فراهم شده است که نه‌تنها موجب افزایش کیفیت نهایی کفش می‌شود، بلکه فرآیند تولید را نیز متحول کرده است [2]. برآوردها نشان می‌دهد که بازار کفش‌های چاپ سه‌بعدی تا سال ۲۰۲۵ به بیش از ۲/۵ میلیارد دلار خواهد رسید و حدود ۳۰٪ از برندهای معتبر صنعت کفش از این فناوری در فرآیند طراحی و تولید خود بهره خواهند برد [3].

کاربرد چاپ سه‌بعدی در صنعت کفش در سه بخش عمده خلاصه می‌شود: تولید مدل اولیه برای ریخته‌گری، ساخت قالب زیره کفش، و تولید مستقیم زیره کفش [3]. این فناوری با امکان ایجاد ساختارهای شبکه‌ای سبک و بهینه، منجر به بهبود خواص مکانیکی مانند استحکام، جذب ضربه و کاهش وزن شده است [4]. از سوی دیگر، امکان شخصی‌سازی دقیق بر اساس آناتومی پای افراد نیز فراهم آمده است؛ به‌گونه‌ای که مطالعات نشان داده‌اند استفاده از زیره‌های تولیدشده با چاپ سه‌بعدی می‌تواند فشار وارد بر مفاصل را در بیماران دیابتی یا ورزشکاران حرفه‌ای تا ۲۵٪ کاهش دهد [5]. همچنین، پژوهش‌ها حاکی از آن است که استفاده از مواد ترموپلاستیک الاستومر و پلی‌آمید در چاپ سه‌بعدی، قالب‌هایی با قابلیت جذب انرژی تا ٤٠٪ بیشتر از روش‌های سنتی ایجاد می‌کند [6].

در مطالعه‌ای انجام‌شده در سال ۲۰۲۱ توسط تیمی از محققان دانشگاه MIT، مشخص شد که چاپ سه‌بعدی می‌تواند برای ساخت قالب‌هایی با خواص مکانیکی متنوع و ضربه‌گیر استفاده شود. این پژوهش از مواد الاستومری پیشرفته بهره گرفت و نشان داد که قالب‌های تولیدشده با چاپ سه‌بعدی تا ۳۰٪ عملکرد بهتری نسبت به قالب‌های سنتی دارند [7]. از دیگر مزایای چاپ سه‌بعدی، کاهش زمان و هزینه تولید است. بر خلاف روش‌های سنتی که نیاز به ماشین‌آلات پیچیده و نیروی کار ماهر دارند، چاپ سه‌بعدی فرآیند تولید قالب‌ها را ساده و سریع کرده است. مطالعه‌ای توسط ژنگ و همکاران (۲۰۲۱) گزارش داد که این فناوری می‌تواند زمان تولید را تا ٦٠٪ و هزینه‌ها را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد [8]. علاوه بر این، قابلیت شخصی‌سازی قالب‌های زیره کفش از طریق چاپ سه‌بعدی، اهمیت بسیاری در کاربردهای پزشکی و ورزشی دارد. به‌عنوان نمونه، مطالعه‌ای توسط تلفر و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که استفاده از چاپ سه‌بعدی در قالب‌سازی می‌تواند به بهبود وضعیت پای افراد مبتلا به آرتروز و پای صاف کمک نماید [9].

با توجه به پتانسیل‌های گسترده چاپ سه‌بعدی، در این پژوهش تلاش شده است امکان‌سنجی ساخت قالب‌های زیره کفش با استفاده از این فناوری مورد ارزیابی قرار گیرد. فرآیند سنتی ساخت قالب زیره شامل طراحی، ساخت مدل اولیه و انتقال آن به قالب‌ساز است که بسته به جنس قالب (رزین یا آلومینیوم)، ممکن است ۳ تا ۶ ماه زمان ببرد. در مقابل، چاپ سه‌بعدی امکان ساخت قالب‌هایی از جنس فلز یا رزین را در زمان بسیار کوتاه‌تری فراهم کرده است. هرچند ساخت قالب‌های فلزی با چاپ سه‌بعدی بسیار پرهزینه است، اما برخی شرکت‌های پیشرو مانند ECCO که نمونه ای از قالب آن در شکل۱ آمده است، موفق به تولید قالب‌های رزینی شده‌اند که بیش از ۱۰۰۰ چرخه تزریق را بدون سایش یا خرابی تحمل کرده‌اند [10].

در این تحقیق، ابتدا قالبی از زیره کفش با استفاده از ماده ABS چاپ شد که در شکل ۲ نمایش داده شده است اما نمونه حاصل

فاقد استحکام کافی بود و با ضربه‌ای سبک دچار شکست شد. ازاین‌رو، به‌منظور بهبود خواص مکانیکی، راهکارهایی مانند تغییر ماده اولیه، بهینه‌سازی ضخامت، استفاده از مواد تقویت‌کننده و ارتقاء طراحی پیشنهاد شد. درنهایت، تصمیم گرفته شد پوسته‌ای از قالب چاپ شود و فضای درونی آن با رزین اپوکسی پر شود. این روش ضمن افزایش استحکام، از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه است؛ چرا که هزینه رزین اپوکسی نسبت به مواد اولیه چاپ سه‌بعدی پایین‌تر است. نکته کلیدی در این روش، تعیین ضخامت مناسب برای پوسته است. هرچند ضخامت بیشتر می‌تواند به افزایش استحکام کمک کند، اما ممکن است منجر به مصرف بیشتر ماده، افزایش زمان چاپ و بروز عیوب در قطعات نازک شود. برای رفع این چالش، سطح خارجی پوسته با ساختارهای شبکه‌ای و فراموادِ پوشانده شد. این رویکرد علاوه بر افزایش استحکام، احتمال اعوجاج و بروز عیب در چاپ قطعات نازک و پیچیده را کاهش می‌دهد. از این رو، در ادامه مقاله ساختارهای فراموادِ به‌عنوان راهکاری برای بهبود استحکام قطعات چاپ‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

شکل ۱ ساخت قالب تزریق مستقیم زیره کفش توسط شرکت ecco [10]
Fig. 1 Making direct injection molds for shoe soles by ecco [10]

شکل ۲ قالب اولیه ساخته شده به طور ساده و دارای استحکام پایین
Fig. 2 The initial mold is simply made and has low strength

فراموادِ (Metamaterials) به موادی اطلاق می‌شود که ساختار آن‌ها نه تنها خواص ذاتی مواد اولیه را تعیین می‌کند، بلکه به‌واسطه طراحی هندسی ویژه، ویژگی‌های فیزیکی منحصربه‌فردی از خود نشان می‌دهند. این مواد معمولاً از تکرار واحدهای سلولی کوچک‌مقیاس تشکیل شده‌اند که به‌صورت آرایشی منظم کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. کوچک‌ترین واحد این ساختارها «سلول» نام دارد و عملکرد مکانیکی کل ماده تابعی از طراحی این سلول‌های پایه است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد با الهام گرفتن از طبیعت می‌توان ساختارهای سلولی را به نحوی طراحی کرد که ویژگی‌های مکانیکی مانند وزن سبک، جذب انرژی زیاد، کنترل ارتعاش و عملکرد گرمایی پیشرفته را به‌دست آورد [11].

به طور کلی فراموادِ به چهار دسته تقسیم می‌شوند: فراموادِ الکترومغناطیسی، آکوستیکی، مکانیکی و حرارتی. مواد معمولی معمولاً با چهار ثابت الاستیک شامل مدول یانگ (E)، مدول برشی (G)، مدول بالک (K) و نسبت پواسون (ν) مشخص می‌شوند که سه مورد آخر به‌ترتیب با سفتی، استحکام و قابلیت فشردگی ماده مرتبط هستند. بر همین اساس، انواع فراموادِ مکانیکی به گروه‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند، از جمله:

فراموادِ با ضریب پواسون منفی یا اگزتیک ($G >> K$)

فراموادِ با مدول برشی منفی یا پنتامود ($G << K$)

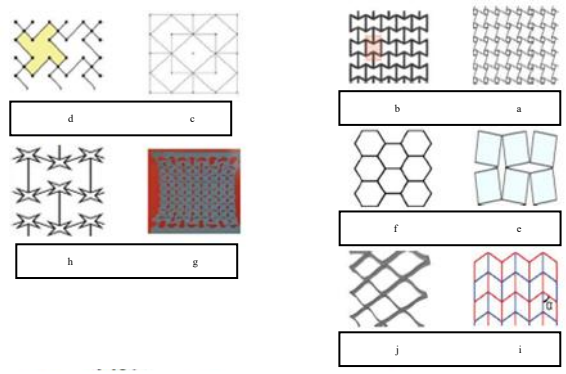
فراموادِ با تراکم‌پذیری و سفتی منفی ($-4G/3 < K < 0$)

ازجمله رایج‌ترین فراموادِ مکانیکی، موادی با ضریب پواسون منفی هستند که به اگزتیک (Auxetic) معروف‌اند. اگزتیک‌ها هنگام اعمال تنش کششی، در راستای عمود بر نیرو نیز ضخیم‌تر می‌شوند. این رفتار در تضاد با عملکرد مواد معمول است که در اثر کشش، نازک‌تر می‌شوند. ضریب پواسون صفر نیز نشان‌دهنده عدم تغییر شکل در راستای عمود بر نیرو است. اگزتیک‌ها دارای ویژگی‌های مکانیکی منحصر به‌فردی از جمله مقاومت بیشتر در برابر فرورفتگی، مقاومت به شکست، مدول برشی عرضی بالا و خواص دینامیکی پیشرفته مانند جذب انرژی، میرایی امواج و عملکرد بهتر در ضربه هستند [12].

برای طراحی این ساختارها می‌توان از ابزارهای نرم‌افزاری و بهینه‌سازی توپولوژی مانند nTopologyبهره گرفت. ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی متنوعی برای این فراموادِ طراحی شده‌اند که برخی از آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده‌اند [11]. پس از تعیین هندسه بهینه، فراموادِ می‌توانند با استفاده از فناوری‌های ساخت افزایشی به‌ویژه چاپ سه‌بعدی تولید شوند. این روش تولید، امکان ساخت قطعات با هندسه‌های پیچیده و خواص مکانیکی مهندسی‌شده را فراهم کرده و موجب توسعه کاربردهای فراموادِ در صنایعی نظیر پزشکی، خودرو و هوافضا شده است [13].

کلید افزایش استحکام در طراحی این ساختارها، توزیع بهینه تنش و کاهش تمرکز تنش در سراسر قطعه است. به‌عنوان مثال شبکه‌های لاتیس(lattice) با توپولوژی‌های خاص، مانند ساختارهای شبکه‌ای مانند اکتت-تراس (Octet-Truss) می‌توانند بارهای کششی و فشاری را به‌صورت یکنواخت توزیع کرده و

استحکام ویژه را به‌طور قابل‌توجهی نسبت به مواد سنتی افزایش دهند. برخی مطالعات نشان داده‌اند که این ساختارها می‌توانند استحکام را تا ۱۰ برابر افزایش دهند [14]. علاوه بر این، ساختارهای سلسله‌مراتبی (Hierarchical) که در چند مقیاس طراحی می‌شوند، موجب بهبود مقاومت به شکست و خستگی در قطعه می‌گردند [15]. همچنین در مطالعه‌ای توسط وانگ و همکاران (۲۰۲۰) مشخص شد که استفاده از ساختارهای شبکه‌ای در طراحی فراموا‌د می‌تواند استحکام ماده را تا ٤٠% افزایش داده و در عین حال وزن آن را نیز کاهش دهد [16]. بر اساس این یافته‌ها، در ادامه پژوهش، فرضیات مربوط به نقش ساختارهای فراموا‌د در بهبود استحکام قالب‌های چاپ‌شده مورد آزمایش تجربی قرار گرفته‌اند. با توجه به ماهیت کاری قالب تزریق مستقیم زیره کفش که ممکن است تحت بارهای ضربه‌ای قرار گیرد، نمونه‌هایی استاندارد برای آزمون ضربه طراحی و تولید شده‌اند تا عملکرد آن‌ها از نظر جذب انرژی و مقاومت بررسی و تحلیل گردد.



شکل ۳ انواعی از ساختارهای فراموا‌د اگزنتیک [11]

Fig. 3 Types of auxetic metamaterial structures [11]

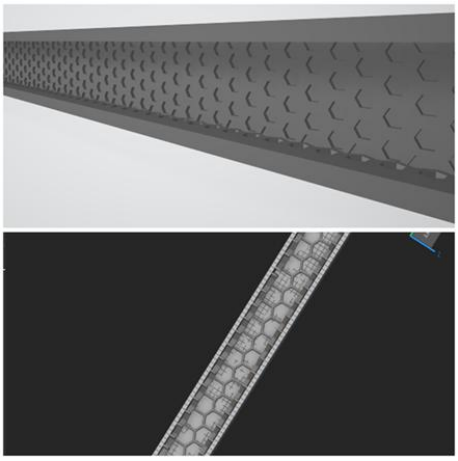
با وجود آنکه پژوهش‌های پیشین به مزایای چاپ سه‌بعدی در صنعت کفش و همچنین پتانسیل‌های نظری فراموا‌د پرداخته‌اند، اما شکاف پژوهشی در زمینه ارزیابی عملی و امکان‌سنجی استفاده از ساختارهای فراموا‌د برای تقویت قالب‌های تزریق مستقیم زیره کفش و قطعات چاپ شده سه بعدی که تحت بارهای ضربه‌ای قرار می‌گیرند، همچنان وجود دارد. نوآوری اصلی این تحقیق، ارائه و آزمودن یک راهکار ترکیبی است که در آن، پوسته قالب با فناوری دقیق DLP چاپ شده و سطح خارجی آن با لایه‌ای از ساختارهای فراموا‌د تقویت می‌گردد تا استحکام لازم فراهم شود. بنابراین، هدف این پژوهش، طراحی و ساخت نمونه‌های استاندارد آزمون ضربه با ساختارهای شبکه‌ای الهام‌گرفته از فراموا‌د و بررسی تجربی تأثیر این هندسه‌ها بر ظرفیت جذب انرژی و مقاومت به ضربه است تا قابلیت اطمینان این رویکرد نوین برای ساخت قالب‌های صنعتی ارزیابی گردد.

۲- مواد و روش انجام کار

۲-۱ طراحی نمونه های استاندارد

این بخش از پژوهش به طراحی و ساخت نمونه‌های استاندارد جهت انجام آزمایش‌های مکانیکی می‌پردازد. نمونه‌های مورد استفاده برای آزمایش ضربه، مطابق با استاندارد ASTM D256، با ابعاد ۵ × ۱۰ × ۱۳۰ میلی‌متر طراحی شدند. پس از فرآیند طراحی، ناچ مورد نیاز با زاویه ٤٥ درجه در ناحیه مرکزی نمونه‌ها، توسط یک دستگاه مخصوص ایجاد می‌گردد.

شایان ذکر است، با توجه به اینکه نمونه‌های مورد مطالعه به صورت توخالی طراحی شده و سپس با رزین اپوکسی پر می‌شوند، طراحی اولیه نمونه‌ها به شکل ناچدار مناسب نبوده است. علاوه بر این، جهت طراحی نمونه‌های استاندارد و همچنین تقویت پوسته قالب‌های پیچیده، لازم بود روش طراحی سازگار با این الزامات باشد. جهت طراحی هندسی این نمونه‌ها، بررسی اولیه در نرم‌افزارهایی مانند SolidWorks و CATIA انجام گرفت. اما به دلیل محدودیت‌های این نرم‌افزارها در طراحی ساختارهای پیچیده و سلولی، نرم‌افزار nTopology انتخاب شد. این نرم‌افزار به‌طور تخصصی برای طراحی و بهینه‌سازی ساختارهای شبکه‌ای با قابلیت تنظیم پارامترهای هندسی، توپولوژی، وزن و استحکام به کار می‌رود. شکل ۴ مقایسه‌ای میان طراحی نمونه در SolidWorks و nTopology را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، برای بررسی توانمندی طراحی ساختارهای سلولی بر روی سطوح پیچیده، از نمونه‌ای از قالب زیره کفش استفاده شد که ساختار شبکه‌ای روی سطح خارجی آن اعمال شد.



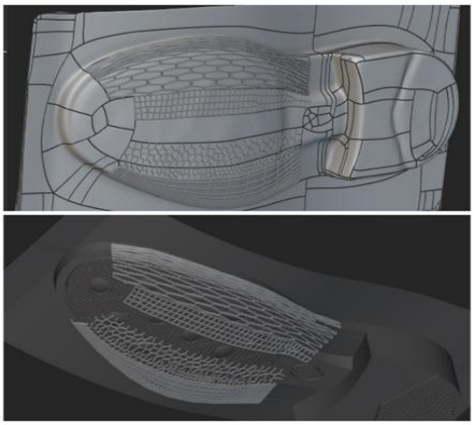
شکل ۴ مقایسه طراحی نمونه درsolidworks (بالا) و در nTop (پایین)

Fig. 4 Comparison of sample design in Solidworks (top) and in nTop (bottom)

۲-۲ فرآیند چاپ و پس پردازش نمونه ها

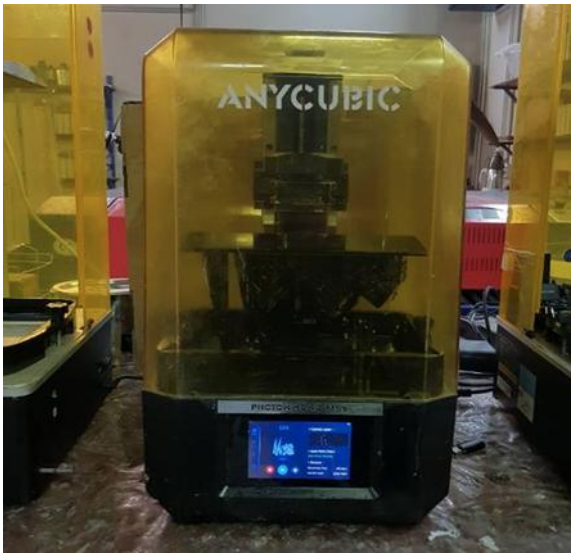
طراحی‌های انجام‌شده به فرمت STL ذخیره و برای چاپ سه‌بعدی آماده شدند. چاپ نمونه‌ها با استفاده از پرینتر رزینی مدل Anycubic M5sصورت گرفت. فایل‌های STL وارد نرم‌افزار Chitubox شده و پایه‌هایی برای نمونه‌ها طراحی گردید تا فرآیند چاپ پایدارتر باشد. چاپ هر دسته‌ی ۶ تایی از نمونه‌ها، با در نظر گرفتن پایه‌ها، حدود ۷ ساعت به طول انجامید. روندی از چاپ نمونه ها و لایه

گذاری آنان در شکل ٦ آورده شده است. همچنین، در برخی موارد چاپ با شکست مواجه شد و قطعات ناقص یا دچار اعوجاج بودند. لذا برای کاهش احتمال خطا و مصرف مواد، بعضی از نمونه‌ها بدون پایه مستقیماً روی صفحه ساخت چاپ شدند. البته این روش باعث سختی در جداسازی قطعات و افت دقت در برخی جزئیات گردید. پارامترهای دقیق چاپ که با توجه به تجربه چاپ این ماده و همچنین پیشنهاد شرکت سازنده استخراج شده اند، در جدول ۱ فهرست شده‌اند.



شکل ۵ راستی آزمایی ایجاد الگو بر سطوح پیچیده

Fig. 5 Verification of pattern creation on complex surfaces



شکل ٦ فرآیند چاپ نمونه‌ها و لایه گذاری به روش DLP

Fig. 6 Sample printing and layering process using the DLP method

پس از چاپ، نمونه‌ها نیازمند فرآیند پس‌پردازش بودند. برای نمونه‌های دارای پایه‌های پشتیبانی، جداسازی این پایه‌ها به سهولت انجام گرفت. در مرحله بعد، برای حذف رزین‌های باقی‌مانده در داخل قطعات پس از چاپ، نمونه‌ها به مدت تقریبی یک دقیقه در محلول الکل قرار داده شدند. سپس، قطعات به دستگاه post-cure منتقل گردیدند. این دستگاه با تابش اشعه فرابنفش (UV)، فرآیند پخت نهایی و خشک شدن قطعات را تکمیل می‌کند. به طور کلی، تمامی قطعات رزینی به منظور بهبود خواص مکانیکی و افزایش استحکام نیازمند پخت نهایی هستند. افزایش زمان این فرآیند می‌تواند منجر به خشک‌تر و شکننده‌تر شدن قطعه شود. با این حال، افزایش بیش از حد مدت زمان پخت، پس از یک بازه مشخص، نه تنها تأثیر مثبتی نخواهد داشت، بلکه ممکن است شکنندگی قطعه را نیز افزایش دهد. با توجه به این ملاحظات، نمونه‌های چاپ‌شده به مدت ۳ دقیقه در دستگاه مذکور تحت تابش اشعه ماوراء بنفش قرار گرفتند. شکل ۷، روند کامل چاپ و پس‌پردازش را نمایش می‌دهد.

جدول ۱ پارامترهای چاپ سه‌بعدی نمونه‌ها

Table 1 3D printing parameters of samples

Parameter	Value	Unit
Layer thickness	50	micron
Print speed	<60	mm/hr
Exposure time per layer	3.2	second
Base layer exposure time	35	second

شکل ۷ ساخت و پس پردازش نمونه ها

Fig. 7 Fabrication and post-processing of the samples

۲-۳ پر کردن نمونه ها با رزین اپوکسی

پس از اتمام فرآیند چاپ و آماده‌سازی اولیه، نمونه‌های ساخته‌شده جهت افزایش استحکام و ارزیابی اثر ساختار داخلی، با رزین اپوکسی پر شدند. هدف از این مرحله شبیه‌سازی رفتار مکانیکی قالب‌هایی است که در تولید واقعی زیره کفش، با استفاده از مواد سخت پر می‌شوند. رزین انتخاب‌شده در این پژوهش از نوع اپوکسی E06EXC با ویسکوزیته بین ۱۴۰۰ cP – ۱۰۰۰ بوده و به‌همراه سخت‌کننده‌ی SH571 با ویسکوزیته ۲۵۰ cP – ۲۰۰ استفاده گردید. نسبت ترکیب این دو ماده مطابق دستورالعمل تولیدکننده و نتایج

آزمایشات قبلی، برابر با ۲ به ۱ (دو قسمت رزین به یک قسمت سخت‌کننده) بود.

ابتدا دو جزء رزین و سخت‌کننده در ظرفی پلاستیکی و یک‌بارمصرف ریخته شدند و به‌مدت حدود ۱۰ دقیقه به‌آرامی هم زده شدند تا اختلاط کامل و یکنواخت بدون ایجاد حباب حاصل شود. سپس ترکیب آماده‌شده به‌کمک قاشق پلاستیکی کوچک و با دقت وارد حفره‌های درونی نمونه‌ها گردید. مشاهده شد که در برخی نمونه‌ها، پس از گذشت زمان و فرآیند سخت‌شدن رزین، حباب‌هایی در بخش‌های داخلی تشکیل شده است که موجب افت موضعی در خواص مکانیکی گردید. به‌منظور کاهش میزان حباب‌های ایجادشده، از دو راهکار استفاده شد. نخست افزایش مدت زمان هم‌زدن برای گاززدایی طبیعی و دوم، استفاده از تکنیک پیش‌گرمایش مواد. در روش دوم، رزین و سخت‌کننده پیش از ترکیب، به‌مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه درون هیتر با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. پس از گرم شدن، مواد به‌مدت ۱ تا ۲ دقیقه با سرعت کم مخلوط شدند و سپس بلافاصله عملیات پر کردن نمونه‌ها انجام شد. این روش موجب کاهش محسوس تشکیل حباب‌های درشت در نمونه‌ها شد و در نتیجه، توزیع یکنواخت‌تری از رزین در فضای داخلی به‌دست آمد.

در مواردی که هدف مقایسه عملکرد ساختارهای مختلف بود، تلاش شد که حجم رزین تزریق‌شده و دمای محیط در تمام مراحل یکنواخت حفظ شود تا نتایج به‌دست‌آمده قابلیت تحلیل مقایسه‌ای داشته باشند. همچنین در پر کردن نمونه‌های با ساختارهای پیچیده‌تر، میزان تزریق و سرعت تزریق مورد توجه قرار گرفت تا فضای داخلی به‌خوبی پر شده و حباب‌ها به لبه‌ها یا نواحی غیر بحرانی هدایت شوند. شکل ۸ تصویری از مقایسه نمونه‌های پر شده بدون پیش‌گرمایش مواد و با پیش‌گرمایش را نشان می‌دهد که کاهش قابل‌توجه حباب‌ها در نمونه‌های بهینه‌سازی‌شده قابل مشاهده است.

۴-۲ آزمایشات تجربی

۴-۲-۱ تجهیزات آزمون ضربه و خمش

برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمایش ضربه و ایجاد ناچ مورد نیاز، از دستگاه ناچ‌زنی استفاده شد. عملکرد این دستگاه به گونه‌ای است که با تنظیم ارتفاع نمونه، عمق ناچ مورد نظر تعیین شده و سپس با استفاده از یک فرز تعبیه‌شده در دستگاه، ناحیه مرکزی نمونه تراشیده می‌شود. دستگاه اصلی مورد استفاده برای آزمایش ضربه، دستگاه تست ضربه SANTAM SIT-20D بود. در این دستگاه، انرژی ضربه با انتخاب یکی از چکش‌های موجود تعیین می‌گردد. مقادیر انرژی قابل اعمال شامل ۱، ۲/۷۱، ۵ یا ۲۰ ژول می‌باشد. پس از قرارگیری نمونه در جایگاه تست، محل برخورد چکش به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در راستای برش نمونه و وجه مقابل ناچ قرار گیرد. چکش تا حداکثر ارتفاع بالا رفته و با قفل شدن آن توسط دستگیره و صفر کردن نمایشگر صفحه مدرج، نمونه آماده اعمال ضربه می‌گردد. در نهایت، با رهاسازی دستگیره، چکش آزاد شده و پس از برخورد با نمونه و شکست آن، نمایشگر روی یک عدد مشخص متوقف می‌شود. تفاضل بین انرژی اولیه چکش (که در این پژوهش ۲/۷۱ ژول بود) و مقدار نشان‌داده شده توسط نمایشگر، نشان‌دهنده میزان انرژی جذب شده برای شکست نمونه است.

شکل ۸ تاثیر پیش گرم شدن رزین اپوکسی در مقدار ایجاد حباب در نمونه‌ها

Fig. 8 Effect of pre-heating epoxy resin on bubble formation in the samples

برای تست خمش، از دستگاه سنجش استحکام خمشی دیجیتال ۱۰۰ کیلوگرم صنعت سرام استفاده شد. این دستگاه قادر به اعمال نیروی 100 kgf (معادل تقریبی ۹۸۱ نیوتن) می‌باشد. سمبه دستگاه یونیورسال برای اجرای تست خمش، با سرعت مشخصی که معمولا بین ۱۰ تا ۱۱ میلی متر بر دقیقه است به سمت قطعه مورد آزمون حرکت می‌کند. در حالت سه نقطه ای قطعه مورد آزمون روی پایه‌ای که دارای دو قسمت به عنوان تکیه گاه است قرار گرفته و نیرو از طریق سمبه به وسط قطعه اعمال می‌گردد. در هر دو حالت نیروی اعمالی به سمبه هنگام برخورد به قطعه افزایش می‌یابد و همچنین قطعه در محل برخورد با سمبه به سمت پایین حرکت می‌کند.

۴-۲-۲ آزمایش ضربه و خمش سه نقطه

جهت بررسی عملکرد مکانیکی ساختارهای طراحی‌شده تحت بارهای دینامیکی، ابتدا آزمون ضربه به‌صورت استاندارد انجام گرفت. در این مرحله، نمونه‌ها به‌صورت افقی قرار گرفته و ضربه توسط چکش پاندولی به آن‌ها وارد شد. در ابتدا، ناچ عرضی با عرض تقریبی ۲ میلی‌متر در ضلع باریک‌تر نمونه (ضلع ۵ میلی‌متری) ایجاد شد. با این حال، نتایج به‌دست‌آمده از این نحوه ناچ‌زنی تفاوت معنی‌داری بین ساختارها نشان نمی‌داد، چراکه محل تمرکز تنش دقیقاً در ناحیه دارای ساختار رزینی نبود و درنتیجه اثر ساختار داخلی کمتر منعکس می‌شد.

بنابراین، با بازطراحی موقعیت ناچ، در مرحله‌ی بعدی ناچ طولی به عرض حدود ۱ میلی‌متر در ضلع ۱۰ میلی‌متری ایجاد شد؛ یعنی در

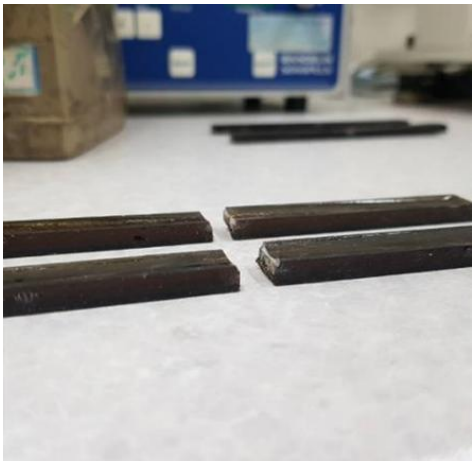
ناحیه‌ای که رزین اپوکسی تزریق شده بود و انتظار می‌رفت تأثیر بیشتری از ساختار داخلی دیده شود. این تغییر موجب شد تا تفاوت در رفتار ضربه‌ای ساختارهای مختلف بهتر آشکار گردد. در این آزمون، ساختار شش‌ضلعی به‌طور میانگین توانست انرژی ۱٫٤٦ ژول را جذب کند، در حالی‌که ساختار ساده و ساختار مستطیلی به‌ترتیب انرژی‌های ۱٫۲۱ و ۱٫۰۱ ژول را جذب نمودند. لازم به ذکر است که یکی از نمونه‌های ساده دارای نقص سطحی بود و احتمال می‌رود این ناهمواری موجب بروز ترک پیش‌رس و کاهش انرژی جذب‌شده در آن شده باشد. همچنین در یکی از آزمون‌های مربوط به ساختار مستطیلی، احتمال داده شد که ضربه مستقیماً بر روی یکی از خطوط طولی ساختار وارد شده باشد و همین موضوع منجر به شکست زودهنگام نمونه شده است. چنین ملاحظاتی در تفسیر دقیق داده‌ها در نظر گرفته شدند.

به‌منظور تکمیل تحلیل، آزمون خمش سه‌نقطه‌ای نیز روی همان مجموعه از نمونه‌ها انجام گرفت. در این آزمون، نمونه‌ها بر روی دو تکیه‌گاه با فاصله معین قرار گرفته و بار فشاری از بالا توسط دستگاه تست یونیورسال اعمال گردید. نیروی بارگذاری در این مرحله برابر با ۱۰۰ کیلوگرم‌نیرو در نظر گرفته شد.(شکل ۹) نتایج این آزمون نیز حاکی از عملکرد متفاوت ساختارهای طراحی‌شده بود. نمونه‌های دارای ساختار مستطیلی بیشترین مقاومت خمشی را از خود نشان دادند یعنی ۱۱۲۹٫۱ مگاپاسکال، در حالی‌که ساختار شش‌ضلعی و ساختار ساده به‌ترتیب مقادیر ۸٤۸٫۹۵ و ۲۸۲٫۵۳ مگاپاسکال را ثبت کردند. این نتایج به‌روشنی نشان‌دهنده‌ی تأثیر طراحی ساختارهای فرامادہ بر عملکرد مکانیکی و جذب انرژی تحت شرایط مختلف بارگذاری هستند.

شکل ۹ انجام تست خمش سه نقطه بر روی نمونه های ۱ میلی متری

Fig. 9 Conducting three-point bending test on 1-mm-thick samples

همچنین مشاهدات تصویری از آزمون‌ها و بررسی نواحی شکست نمونه‌ها تا حدودی تفاوت در نحوه شکست را نمایش داد و تأیید کرد که در ساختارهای سلولی، مسیر پیشروی ترک دچار انحراف شده و انرژی بیشتری برای شکست کامل نیاز است. این ویژگی، به‌ویژه در طراحی قطعات کاربردی مقاوم به ضربه، دارای اهمیت ویژه‌ای است. شکل ۱۰ تصویری از برخی نمونه‌ها بعد از انجام آزمون ضربه را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰ انجام تست ضربه بر روی نمونه های ۱ میلی متری

Fig. 10 Performing impact test on 1-mm-thick samples

۴-۲-۳ آزمون ضربه برای ضخامت های ۰٫۸ و ۱٫۲ میلی متر

برای بررسی تأثیر ضخامت دیواره ساختارهای پرینت‌شده بر میزان جذب انرژی، نمونه‌هایی با ضخامت‌های مختلف شامل ۰٫۸، ۱ و ۱٫۲ میلی‌متر ساخته شدند. هدف از این بخش از آزمون‌ها، تحلیل نقش نسبت ماده پرینت‌شده به حجم رزین در رفتار مکانیکی نهایی نمونه بود. تمامی نمونه‌ها پس از چاپ و پر شدن با رزین اپوکسی، تحت شرایط یکسان پخت و نگهداری قرار گرفتند تا اثر پارامتر زمان و دمای محیط بر نتایج به حداقل برسد.

در نمونه‌هایی با ضخامت ۰٫۸ میلی‌متر، افزایش چشمگیر انرژی جذب‌شده در آزمون ضربه مشاهده شد. این رفتار به این دلیل رخ داد که نسبت رزین به ماده پرینت‌شده در این نمونه‌ها بیشتر بوده و مسیرهای انتشار ترک سریع‌تر با حجم بیشتری از رزین مستحکم مواجه می‌شدند. در این حالت، بخش عمده‌ای از انرژی ضربه توسط رزین جذب می‌گردد که منجر به تأخیر در گسترش ترک و شکست کلی نمونه می‌شود. این ویژگی به‌طور خاص در ساختارهای شش‌ضلعی مشهودتر بود. در مقابل، نمونه‌های با ضخامت ۱٫۲ میلی‌متر به‌دلیل افزایش سهم ماده جامد چاپ‌شده، سفتی اولیه بالاتری داشتند اما ظرفیت جذب انرژی کمتری از خود نشان دادند. علت این امر کاهش انعطاف‌پذیری ساختار و جذب مکانیکی کمتر رزین در مقایسه با نمونه‌های نازک‌تر است.

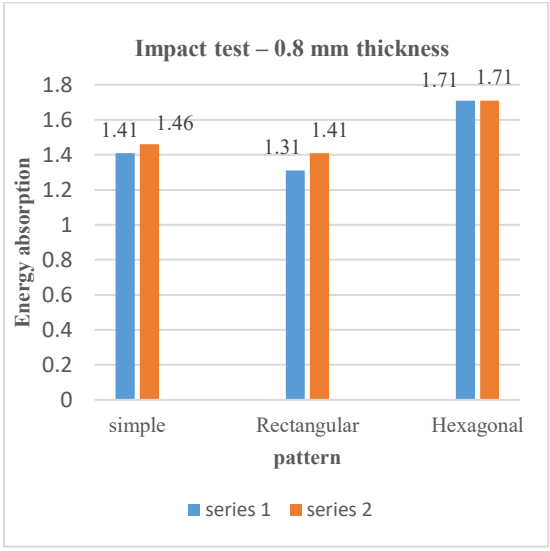
در مقایسه بین ساختارهای مختلف، در تمامی ضخامت‌ها، ساختار شش‌ضلعی بیشترین انرژی ضربه را جذب کرد. ساختار ساده و مستطیلی عملکرد نزدیک به‌هم داشتند، اما در برخی موارد عملکرد ساختار مستطیلی تحت تأثیر وجود حباب‌های بیشتر در فضای

داخلی آن کاهش یافت. این مشاهدات حاکی از آن است که طراحی بهینه ساختار شبکه‌ای و کنترل کیفیت فرآیند پر کردن نقش بسیار مهمی در تضمین عملکرد مکانیکی قطعات دارد. یافته‌های این بخش از آزمایش‌ها نقش کلیدی در بهینه‌سازی طراحی قطعات چاپ شده سبک‌وزن برای کاربردهای صنعتی ایفا می‌کند؛ به‌ویژه در مواردی که نیاز به جذب انرژی بالا و حفظ استحکام ساختاری در کنار کاهش وزن وجود دارد.

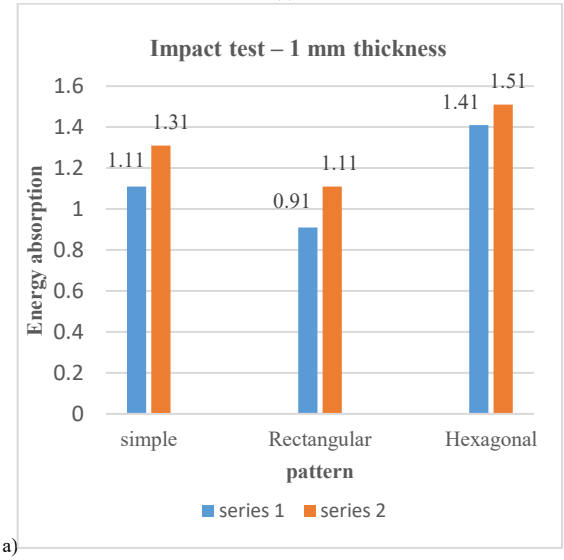
۳- بحث و تحلیل نتایج

۳-۱ تاثیر الگو بر انرژی جذب در ضخامت های ثابت

به منظور تحلیل تأثیر الگوی ساختاری بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها، نمودارهای مربوط به نتایج آزمایش‌های ضربه در ضخامت‌های ثابت ترسیم و مورد بررسی قرار گرفتند. این آزمایش‌ها برای دو نمونه از هر پیکربندی انجام شده‌اند که در شکل ۱۱ نمودارها با نمونه ۱ و ۲ مشخص گردیده‌اند.

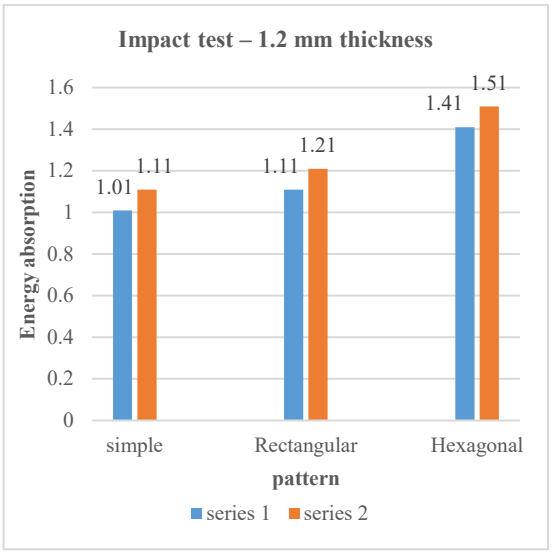


(a)



a)

(b)



(c)

شکل ۱۱ تاثیر الگو بر انرژی جذب قطعه با ضخامت های ثابت
الف) ۰/۸ میلی متر ب) ۱ میلی متر ج) ۱/۲ میلی متر

Fig. 11 Effect of pattern on energy absorption in specimens with constant thickness a) 0.8 mm b) 1 mm c) 1.2 mm

بررسی نتایج نشان می‌دهد که در هر ضخامت مشخص، الگوی شش‌ضلعی به طور مداوم انرژی جذب بالاتری نسبت به الگوی مستطیلی و نمونه‌های فاقد الگو (الگوی ساده) از خود نشان داده است. این رفتار را می‌توان به توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها و چگالی بیشتر ساختار شش‌ضلعی نسبت داد که امکان تحمل نیروهای اعمالی را در جهات مختلف به صورت همگن‌تری فراهم می‌آورد. در مقابل، ساختار مستطیلی به کار رفته، تقریباً یک عضو دو نیرویی را تشکیل می‌دهد که مقاومت آن در برابر نیروهای خارج از محور اصلی محدودتر است. در الگوی ساده (فاقد الگو)، استحکام دیواره اساساً وابسته به خواص رزین اپوکسی پر کننده است.

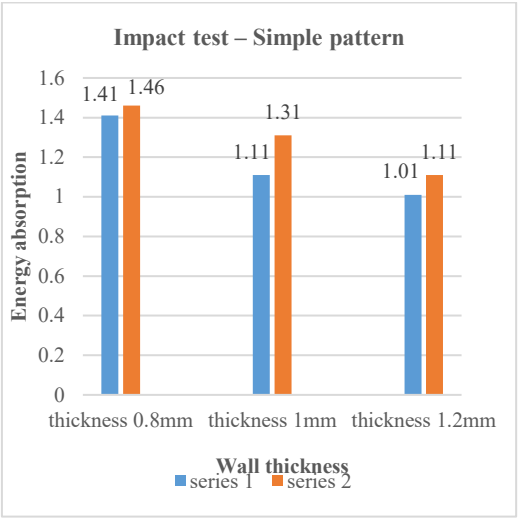
همچنین، بررسی اولیه نتایج حاکی از آن است که عملکرد الگوی ساده تا حدودی بهتر از الگوی مستطیلی می‌باشد. این یافته ممکن است این تصور را ایجاد کند که ایجاد الگوی شبکه‌ای مستطیلی از لحاظ افزایش استحکام همواره منطقی نیست. با این حال، باید در نظر داشت که این بهبود جزئی در الگوی ساده می‌تواند ناشی از عواملی نظیر وجود حباب‌های کمتر در این ساختار و در نتیجه سهم بیشتر رزین اپوکسی در استحکام نهایی باشد. علاوه بر این، همانطور که پیش‌تر بیان شد، دو کارکرد اصلی ایجاد ساختارهای فراماده (متامتریال) بر روی دیواره، علاوه بر افزایش استحکام، جلوگیری از اعوجاج قطعات در طول فرآیندهای چاپ و پر کردن با رزین اپوکسی است. در این زمینه، الگوی مستطیلی کارایی مناسبی در مهار اعوجاج از خود نشان داده است.

همچنین، در حالی که نتایج آزمایش ضربه تأثیر قابل توجهی از الگوی مستطیلی نسبت به الگوی ساده را نشان نداد، داده‌های حاصل از آزمایش خمش سه‌نقطه تفاوت آشکاری را نمایان ساختند. در این آزمون، الگوی مستطیلی به طور قابل ملاحظه‌ای

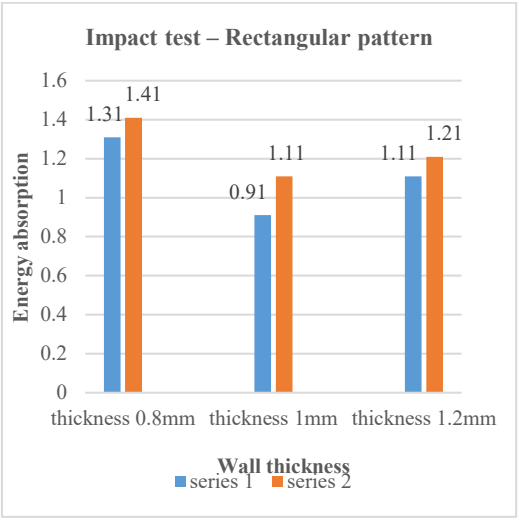
استحکام بالاتری نسبت به الگوی شش‌ضلعی و سپس الگوی ساده از خود نشان داد. این تفاوت در رفتار مکانیکی تحت بارهای ضربه و خمش، نشان‌دهنده اهمیت انتخاب الگوی ساختاری بر اساس نوع بارگذاری مورد انتظار در کاربرد نهایی است. در نتیجه، با توجه به کاربرد و شرایط کاری مورد انتظار قطعه و نیروهایی که متحمل می‌شود، می‌توان الگوی ساختاری بهینه را بر دیواره‌ها و سطح قطعه ایجاد کرد تا استحکام آن افزایش یابد و دیگر نیازی به افزایش یکنواخت ضخامت کلی قطعه نباشد. این رویکرد، با به کارگیری ضخامتی کمتر و ایجاد الگویی شبکه‌ای بر دیواره، علاوه بر افزایش استحکام قطعه، به کاهش زمان و هزینه پرینت و افزایش کارایی منجر می‌شود. پیاده‌سازی این روش، امکان ساخت قطعات با جزئیات و ملاحظات پیچیده‌تر را نیز فراهم می‌آورد.

۳-۲ تاثیر ضخامت بر انرژی جذب در الگوهای یکسان

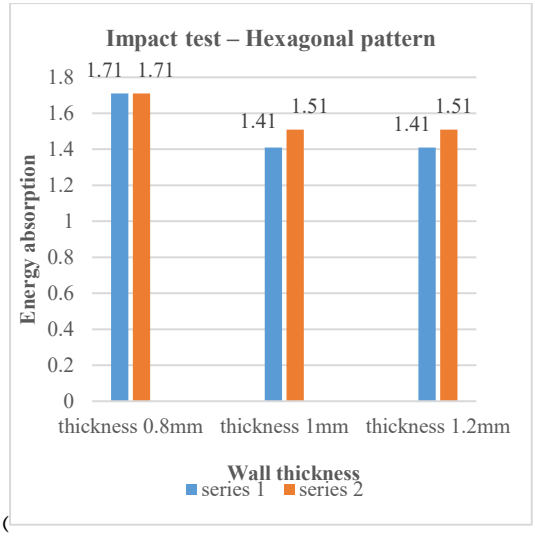
برای بررسی تأثیر ضخامت دیواره بر انرژی جذب شده در الگوهای یکسان، نمودارهای مربوط به نتایج آزمایش‌ها با توجه به شرایط مختلف در شکل ۱۲ رسم و تحلیل گردیدند.



(a)



(b)



(c)

شکل ۱۲ تاثیر ضخامت بر انرژی جذب در الگوهای یکسان الف) الگوی ساده ب) الگوی مستطیلی ج) الگوی هگزاگون

Fig. 12 Effect of thickness on energy absorption in identical patterns: a) Simple pattern b) Rectangular pattern c) Hexagonal pattern

یافته‌های حاصل از این پژوهش، به‌ویژه در زمینه تأثیر نوع ساختار و ضخامت دیواره بر ویژگی‌های جذب انرژی و مقاومت مکانیکی، با نتایج مطالعات معتبر بین‌المللی هم‌خوانی دارد و مورد تأیید قرار گرفته است. برای نمونه، وانگ و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای به بررسی ساختارهای مختلف شبکه‌ای با استفاده از چاپگر سه‌بعدی DLP پرداختند. آنان دریافتند که ساختارهای شش‌ضلعی، نسبت به سایر ساختارها مانند مربعی و مثلثی، عملکرد بهتری در جذب انرژی دارند. به‌طور خاص، این ساختارها به‌دلیل توزیع تنش یکنواخت و تغییر مسیر طبیعی ترک‌ها، شکست تدریجی‌تری را تجربه می‌کنند که منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌شود. این نتیجه با یافته‌های کنونی ما در خصوص برتری ساختار شش‌ضلعی در آزمون ضربه مطابقت کامل دارد [17].

همچنین، در مقاله بیلر و همکاران (۲۰۲۴) تأکید شده که طراحی هندسی ساختارهای فرامادہ، به‌ویژه شبکه‌های شش‌ضلعی، می‌تواند نقش بسیار مهم‌تری نسبت به جنس ماده‌ی پایه در تعیین عملکرد مکانیکی ایفا کند. در این مطالعه، ساختارهای شش‌ضلعی در بارگذاری دینامیکی، توازن مناسبی میان جذب انرژی، انعطاف‌پذیری، و پایداری مکانیکی از خود نشان دادند. این یافته مستقیماً با هدف طراحی سبک‌وزن و مقاوم قالب‌های تزریقی در این پژوهش همسو است [18].

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، مشخص شد که ایجاد ساختار شبکه‌ای بر سطح دیواره نمونه‌هایی که با رزین اپوکسی پر شده‌اند، در صورت ثابت بودن ضخامت دیواره، منجر به افزایش میزان انرژی جذب‌شده می‌گردد. این تأثیر به‌ویژه در ساختار شش‌ضلعی نسبت به ساختار مستطیلی و نمونه‌های فاقد الگو

(ساختار ساده) به‌وضوح مشاهده شد. همچنین بررسی آزمون خمش نشان داد که در ضخامت برابر، ساختار مستطیلی بیشترین مقاومت خمشی را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، کاهش ضخامت دیواره در نمونه‌هایی با ساختار مشابه که با رزین اپوکسی پر شده‌اند، به‌طور کلی منجر به افزایش انرژی جذب‌شده می‌شود. در این میان، نمونه‌هایی با ضخامت ۰.۸ میلی‌متر و ساختار شش‌ضلعی بیشترین انرژی جذب‌شده را در میان نمونه‌های مورد آزمون داشتند. با این حال، کاهش ضخامت دیواره با چالش‌هایی نیز همراه است، از جمله دشواری در فرآیند چاپ، افزایش احتمال اعوجاج و تغییر شکل قطعه و همچنین تأثیرپذیری بیشتر از واکنش گرمازای رزین اپوکسی. نکته قابل‌توجه دیگر این است که ایجاد ساختار شبکه‌ای بر سطح نمونه‌ها نه‌تنها سبب افزایش انرژی جذب‌شده، بلکه منجر به بهبود فرآیند چاپ و کاهش اعوجاج در قطعه نیز می‌گردد. این موضوع به‌ویژه در نمونه‌های دارای ساختار شش‌ضلعی پس از پر شدن با رزین اپوکسی مشاهده شد.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که طراحی بهینه ساختار شبکه‌ای و انتخاب ضخامت مناسب دیواره، با در نظر گرفتن شرایط عملکردی و محدودیت‌های چاپ، می‌تواند به تولید قطعاتی با عملکرد مکانیکی بهینه و صرفه‌جویی در هزینه و زمان منجر شود. همچنین، با بهره‌گیری از تکنیک‌های طراحی ساختاری مانند الگوهای شبکه‌ای، پوشش‌های رزینی و تنظیم ضخامت دیواره، امکان بهبود استحکام و جذب انرژی قالب‌های چاپ‌شده، به‌ویژه در کاربردهایی مانند زیره کفش، فراهم می‌شود. البته چالش‌هایی مانند چاپ ناقص، اعوجاج پس از پر شدن با رزین، تشکیل حباب یا پخش نامنظم رزین باید به‌طور دقیق کنترل شوند تا صحت نتایج حفظ گردد.این پژوهش با هدف بررسی تأثیر نوع ساختار سلولی و ضخامت دیواره بر عملکرد مکانیکی قالب‌های طراحی‌شده با ساختارهای فراموا د و تولیدشده با چاپگر سه‌بعدی انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمون‌های ضربه و خمش سه‌نقطه‌ای نشان داد که ساختار شش‌ضلعی در جذب انرژی ضربه عملکرد برتری داشت، در حالی‌که ساختار مستطیلی مقاومت خمشی بیشتری ارائه داد. همچنین مشخص شد که کاهش ضخامت دیواره موجب افزایش جذب انرژی، اما در عین حال سبب کاهش سفتی و استحکام مکانیکی نمونه‌ها می‌شود. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب هوشمندانه نوع ساختار و ضخامت دیواره بر اساس کاربرد نهایی تأکید دارند. بهره‌گیری از طراحی مهندسی‌شده ساختارهای سلولی در کنار فرآیند چاپ افزایشی، می‌تواند راهکاری عملی برای تولید قالب‌هایی سبک، مستحکم و قابل سفارشی‌سازی فراهم آورد. این مزایا، به‌ویژه در صنایع نیازمند جذب انرژی و کاهش وزن، مانند طراحی زیره کفش، حائز اهمیت است.

با این حال، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی همچون تعداد نمونه محدود، فقدان مدل‌سازی عددی، و نبود ارزیابی در شرایط عملکرد واقعی مواجه بود. بنابراین، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با تمرکز بر تحلیل عددی، ارزیابی رفتار خستگی و همچنین تأثیر متغیرهای دیگر مانند نوع رزین، دما و زمان پخت، به تعمیق و گسترش دامنه نتایج این تحقیق بپردازند. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که طراحی هدفمند ساختارهای سلولی و کنترل پارامترهای چاپ، ظرفیت بالایی برای بهبود خواص عملکردی قطعات چاپ‌شده دارند و می‌توانند در توسعه محصولات پیشرفته و کارآمد نقش مؤثری ایفا کنند.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

[1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, 2018.

[2] C. Bishop, R. Williams, and J. Thompson, "Limitations of traditional shoe sole manufacturing: A review," in *Footwear Design and Engineering*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019, pp. 89–104.

[3] T. Spahiu, E. Piperi, A. Ehrmann, H. A. Almeida, R. M. T. Ascenso, and L. C. Vitorino, "3D Printing: An Innovative Technology for Customised Shoe Manufacturing," in *Progress in Digital and Physical Manufacturing*, H. Almeida and J. Vasco, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 171–180, doi: 10.1007/978-3-030-29041-2_22.

[4] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2015, doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.

[5] Y. Wang, L. Zhang, and J. Li, "Customized 3D-printed insoles for diabetic patients: A biomechanical study," *J. Biomech.*, vol. 112, p. 110045, 2020, doi: 10.1016/j.jbiomech.2020.110045.

[6] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, and R. C. Advincula, "Mechanical characterization of 3D-printed polymers," *Addit. Manuf.*, vol. 23, pp. 374–388, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.12.001.

[7] M. MIT Research Team, "Customizable shoe sole design using 3D printing," *J. Adv. Manuf.*, vol. 12, no. 4, pp. 567–582, 2021.

[8] L. Zhang, Y. Wang, and X. Liu, "Cost and time efficiency of 3D printing in footwear manufacturing," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 59, no. 8, pp. 2345–2360, 2021.
[9] S. Telfer and J. Woodburn, "The use of 3D printing for custom orthotics," *Prosthet. Orthot. Int.*, vol. 44, no. 2, pp. 89–97, 2020.
[10] Stratasys Ltd., "Stratasys partners with ECCO to innovate footwear manufacturing using 3D printing technology," Apr. 2021. [Online]. Available: https://www.stratasys.com/company/news/stratasys-partners-with-ecco .
[11] S. Dezianiyan and M. Azadi, "A review on types of metamaterials, additive manufacturing methods, and their applications in the automotive industry," *Sci. J. Iran. Soc. Mech. Eng.*, pp. [page numbers], 2021.
[12] M. Azadi, "A review on applications, design and manufacturing processes of metamaterials using additive manufacturing techniques and 3D printers," *J. Res. Dev. Polym. Technol. Iran*, vol. 6, no. 2, pp. 22–35, 2021.
[13] R. Makarem and H. Sharifi, "A review on the methods of additive manufacturing of metamaterials," in *Proc. 5th Int. Congr. Eng., Technol. Appl. Sci.*, Auckland, New Zealand, 2023.
[14] J. B. Berger, H. N. G. Wadley, and R. M. McMeeking, "Mechanical metamaterials at the theoretical limit of isotropic elastic stiffness," *Nature*, vol. 543, no. 7646, pp. 533–537, Mar. 2017. doi: 10.1038/nature21072.
[15] X. Zheng, W. Smith, J. Jackson, B. Moran, H. Cui, D. Chen, and J. B. Hopkins, "Multiscale metallic metamaterials," *Nat. Mater.*, vol. 20, no. 4, pp. 637–644, Apr. 2021.
[16] Y. Wang, X. Chen, and L. Zhang, "Mechanical properties of lattice structures in additive manufacturing," *Mater. Des.*, vol. 185, p. 108267, Jan. 2020. doi: 10.1016/j.matdes.2019.108267.
[17] Y. Wang, J. Liu, X. Zhang, and B. Li, "Mechanical performance comparison of lattice structures fabricated via DLP printing," *Front. Mech. Eng.*, vol. 9, p. 1204893, 2023.
[18] M. Bieler and D. Weinberg, "On the mechanical efficiency of 3D-printed metamaterial structures under dynamic loading," *arXiv preprint arXiv:2412.06547*, 2024.