



بررسی استحکام فشاری قطعات ساخته شده به روش FDM در محیط خورنده نمکی

محمدرضا ابراهیمیان*، شیرزاد علی نژاد اقدم، فرزاد رحمنی

گروه مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: m.ebrahimian@kar.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۵ اسفند ۱۴۰۳

پذیرش: ۲ خرداد ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

ساخت افزایشی

خوردگی

تست فشار

استحکام

روش تولید افزودنی، یکی از روش‌های پیشرفته تولید است که یکی از روش‌های آن FDM است که در آن می‌توان، قطعاتی از فیلامنت‌هایی با مواد مختلف تولید کرد. یکی از قطعات پرکاربرد در صنایع مختلف، ساختارهای شبکه‌ای و سبکی هستند که از تکرار سلول‌های واحدی تشکیل می‌شوند و در ابعاد و طراحی‌های متفاوتی که از مواد بازیافتی و یا سازگار با محیط‌زیست نیز تولید می‌شوند، هستند. در این مقاله، سازه‌های شبکه‌ای به روش FDM با دو نوع فیلامنت متفاوت پلی لاتیگ اسید (PLA) ساده و تقویت شده با الیاف کربن با سلول‌های واحد مربعی ساخته شده‌اند. نمونه‌های پرینت شده، به مدت یک هفته در سه محیط متفاوت هوا، محلول آب دریا در دمای محیط و با استفاده از گرم‌کننده صفحه‌ای در دمای بالای ۴۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و سپس بر روی آن‌ها، آزمون تست فشار انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که نمونه‌های قرار گرفته در محلول آب دریا در دمای بالا، دارای بیشترین نیروی فشاری را به دنبال داشت که مرتبط به چسبندگی بهتر لایه‌ها به واسطه‌ی دمای بالا بوده است و قرار گرفتن نمونه‌ها در محلول نمک دریا دمای محیط، سبب کاهش نیروی فشاری گردیده است. افزودن الیاف کربن به ماده پایه فیلامنت، سبب کاهش نیروی فشاری گردیده است. الگوهای سوراخ مربعی متغیر باعث کاهش استحکام فشاری شد به صورتی که برای الگوی یک‌طرفه استحکام در محیط آب‌نمک سرد ۶۷٪ نسبت به حالت ساده کمتر شده است. استحکام فشاری نمونه‌های قرار گرفته در آب‌نمک گرم به طور متوسط ۱۰٪ بالاتر از نمونه‌های با شکل مشابه در آب‌نمک سرد است.

Investigating the compressive strength of parts manufactured using the FDM method in a corrosive salt environment

Mohammad Reza Ebrahimian*, Shirzad Alinezhad Aghdam, Farzad Rahmani

Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

* Corresponding Author's Email: m.ebrahimian@kar.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 15 March 2025

Accepted: 23 May 2025

Keywords:

Additive Manufacturing

Corrosion

Pressure Test

Strength

Abstract

Additive manufacturing is an advanced manufacturing method, one of which is FDM, which can produce parts from filaments with different materials. One of the most widely used components in various industries is lightweight grid structures that are formed by repeating unit cells and come in different sizes and designs that are also produced from recycled or environmentally friendly materials. In this paper, network structures were made by FDM with two different types of filaments: plain and carbon fiber-reinforced Polylactic Acid (PLA) with square unit cells. The printed samples were placed in three different environments for one week: air, ambient temperature seawater solution, and seawater solution using a plate heater above 45°C, and then a pressure test was performed on them. The results showed that the samples placed in high-temperature seawater solution had the highest compressive force, which was related to better adhesion of the layers due to high temperature, and placing the samples in ambient temperature sea salt solution caused a decrease in compressive force. Also, a higher compressive force was obtained for samples impregnated with plain PLA fibers, and adding carbon fibers to the filament base material caused a decrease in compressive force. The use of variable square hole patterns reduced the compressive strength, with the one-sided pattern showing a 67% reduction in strength in cold brine compared to the plain condition. The compressive strength of samples exposed to hot brine was on average 10% higher than that of similarly shaped samples in cold brine.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ebrahimian MR, Alinezhad Aghdam Sh, Rahmani F. Investigating the compressive strength of parts manufactured using the FDM method in a corrosive salt environment. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Jun 22;12(4):76-86. doi: 10.22034/ijme.2025.512298.2065 [In Persian]

۱- مقدمه

ساخت افزایشی که معمولاً به عنوان پرینت سه بعدی شناخته می شود، یک فرایند جدید است که با افزودن متوالی مواد لایه به لایه، اشیاء سه بعدی را می سازد. پرینت سه بعدی طیف متنوعی از تکنیک ها، از جمله مدل سازی رسوب مذاب (FDM)، استریولیتوگرافی، تفجوشی لیزری انتخابی و بسیاری دیگر را در بر می گیرد. FDM، یکی از رایج ترین روش های پرینت سه بعدی، شامل اکستروژن کردن یک فیلامنت ترموپلاستیک لایه به لایه برای ایجاد جسم سه بعدی مورد نظر است [۱-۳]. انتخاب فیلامنت به شدت به کاربرد خاص و خواص مورد نظر قطعه چاپ شده سه بعدی بستگی دارد. رشته های رایج مورد استفاده شامل ABS (کریلونیتریل بوتادین استایرن) که به دلیل مقاومت در برابر ضربه و دوام شناخته شده است، و TPU (پلی اورتان ترموپلاستیک) که انعطاف پذیری و مقاومت سایشی خوبی را ارائه می دهد و PLA (اسید پلی لاکتیک) به دلیل سهولت چاپ، زیست تخریب پذیری، ترموپلاستیک زیست سازگار و هزینه نسبتاً پایین، یک انتخاب محبوب است، با این حال، برای کاربردهایی که به خواص مکانیکی تقویت شده نیاز دارند، فیلامنت های تقویت شده مانند PLA تقویت شده با پودرهای میکرو یا نانو یا الیافی مانند الیاف شیشه و کربن، به طور قابل توجهی استحکام و سختی قطعات چاپ شده را بهبود بخشیده اند [۴].

ساختارهای شبکه ای یک کاربرد جذاب از فناوری پرینت سه بعدی هستند. آن ها شامل ایجاد ساختارهای داخلی در یک قطعه هستند که شبیه شبکه های پیچیده است و اغلب از ساختارهای طبیعی مانند لانه زنبوری یا استخوان الهام گرفته شده اند. این شبکه ها فقط برای زیبایی نیستند. آن ها مزایای قابل توجهی از نظر کاهش وزن، افزایش استحکام و جذب انرژی ارائه می دهند [۵].

هندسه یک ساختار شبکه ای برای عملکرد آن بسیار مهم است. انواع شبکه های رایج شامل مکعبی، هشت وجهی، ژیروئید و الماس است. این هندسه ها در ساختار سلول واحد خود، واحد تکرار شونده شبکه، متفاوت هستند و بر عواملی مانند چگالی، سختی و جذب انرژی تأثیر می گذارند [۶]. خواص ساختارهای شبکه ای بسیار قابل تنظیم است و با تنظیم اندازه سلول واحد یا هندسه، می توان آن را کنترل کرد. ساختارهای شبکه ای کاربردهای متعددی در صنایع مختلف دارند، مانند هوا فضا برای ایجاد اجزای سبک و قوی برای هواپیما و فضاپیما، مهندسی پزشکی برای استفاده در ایمپلنت ها و داربست ها برای بازسازی بافت. سایر کاربردها شامل جذب انرژی در تجهیزات محافظ، کمک فنرها و مواد میرایی صوتی است و این خواص برای کنترل دقیق هندسه، سلول واحد و چگالی ساختارهای شبکه ای [۷] استفاده می شود.

تنگ فی و همکاران [۸] به صورت عددی و تجربی جذب انرژی و پاسخ فشاری ساختارهای شبکه ای چاپ شده سه بعدی مختلف، دو ساختار سطح حداقل سه گانه دوره ای (سطح ژیروئید و سطح بدوی) و دو ساختار توپولوژیکی رایج (ساختار شبکه BCC و ساختار شبکه خرابایی) را بررسی کردند. نتایج تأیید کرد که به دلیل تنش برشی، ساختار سطح بدوی نرم شدن آشکار و نوسان تنش را در منحنی تنش- کرنش نشان داد. ساختار شبکه BCC نیز به دلیل شکست تسلیم میله های صلب خود، نوسانات تنش جزئی را در منحنی نشان می دهد و ساختار ژیروئید به طور قابل توجهی از نظر استحکام و جذب انرژی عملکرد بهتری دارد. کانداسامی، موهان کومار و همکاران [۹] تأثیر چگالی نسبی و نرخ کرنش مختلف را بر مدول یانگ و جذب انرژی ساختار شبکه کلون تولید شده توسط مواد PA12 بررسی کردند. این ساختار رفتار الاستیک-پلاستیک را نشان می دهد و نتایج تجربی تأیید می کند که افزایش چگالی نسبی و نرخ کرنش، مدول یانگ و جذب انرژی را افزایش می دهد. کانکانامگه و همکاران [۱۰] به صورت تجربی تأثیر ساختارهای شبکه ای را بر رفتار فوق الاستیک تجزیه و تحلیل کردند. همچنین، تجزیه و تحلیل المان محدود برای ارزیابی تنش و جابجایی ساختارهای شبکه ای استفاده شد. آزمایش های مکانیکی نشان داد که یک ساختار شبکه ای جعبه نرم قادر به بازیابی ۳۰/۶۹٪ از کرنش در چرخه فشرده سازی اول و ۶۶/۲۳٪ در چرخه فشرده سازی پنجم است که برای یک ماده غیر فوق الاستیک چشمگیر است. رن و همکاران [۱۱] سه نوع ساختار شبکه ای دو فازی تولید کردند که فاز تقویت کننده توسط ذوب لیزری انتخابی با استفاده از پودر فولاد ضد زنگ L۳۱۶ طراحی و ساخته شد و آزمایش فشرده سازی شبه استاتیکی انجام شد. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی نمونه ها بالاتر از ساختار شبکه ای تک فازی است. نمونه مورب چهار بدنه بالاترین استحکام ویژه و سختی ویژه را نشان داد که ۹٪ و ۱۴/۲٪ بالاتر از ساختار شبکه مکعب مرکز بدنه تک فازی با پایه های Z بود، در حالی که نمونه ساختارهای شبکه ای دو فازی مورب دو وجهی بالاترین مقدار جذب انرژی ویژه ۱۷/۴۵ ژول بر گرم را داشت. لیو و همکاران [۱۲] ریزساختار و رفتار فشاری ساختارهای شبکه ای PLA/PHA-

چوب تولید شده با روش FFF را بررسی کردند و نتایج تفاوت‌های قابل توجهی در چگالی نسبی و تمرکز تنش به دلیل شکل خمشی اولیه نشان می‌دهند.

کائو و همکاران [۱۳] یک رویکرد جدید و مقرون به صرفه برای ساخت سازه‌های کامپوزیتی با خواص مکانیکی تقویت شده ارائه کردند که در آن از یک چاپگر سه‌بعدی برای ساخت PLA و پلی اورتان ترموپلاستیک به رشته‌های کامپوزیتی هسته-پوسته استفاده می‌شود. طراحی با بهترین خواص مکانیکی دارای کسری حجمی هسته PLA ۳۶٪ است که منجر به ۶۳٪ افزایش چقرمگی نسبت به TPU خالص و ۲۷ برابر بیشتر از PLA خالص می‌شود. مایرز و همکاران [۱۴] سعی کردند پارامترهای فرآیند تولید افزایشی FFF PLA را برای دو ساختار شبکه ای، ژیروئید و بدوی شوارتز، بهینه کنند. تأثیر پارامترهای فرآیند مانند ارتفاع لایه، نرخ جریان و سرعت چاپ بر دقت هندسی و استحکام فشاری نمونه‌ها تجزیه و تحلیل شد. مشخص شد که پارامترهای فرآیند FFF بهینه شده برای ساختارهای سلولی مورد مطالعه، ارتفاع لایه ۰/۱۶ میلی‌متر، سرعت چاپ ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه و نرخ جریان ۹۰٪ است. در نتیجه استفاده از این پارامترها، نمونه‌های جامد، ژیروئید شوئن و بدوی شوارتز مقادیر مدول الاستیک ۹۵۱ مگاپاسکال، ۲۶۴ مگاپاسکال و ۲۲۱ مگاپاسکال را نشان دادند. بلک و همکاران [۱۵] یک ساختار جدید برای کاربردهای اتلاف انرژی تولید کردند که اتلاف انرژی شبکه منشوری را با پر کردن آن با ژل بهبود می‌بخشد. برای آزمایش این فرضیه، شبکه‌های منشوری چاپ شده سه‌بعدی ساخته شده از PLA، PET-G و ABS با ۵٪ وزنی و ۱۰٪ وزنی آگار پر شدند و تحت فشردگی سازی شبه استاتیک تا شکست آزمایش شدند. در مقایسه با گروه کنترل پر نشده، مشخص شد که شبکه‌های PLA پر شده با ۱۰٪ وزنی آگار بهترین عملکرد را نشان می‌دهند که ۴۶/۱٪ افزایش در انرژی جذب شده و ۵۷/۴٪ افزایش در جابجایی تا شکست را نشان می‌دهد. تنبار و همکاران [۱۶] ساختار سبک وزن را با استفاده از تولید افزایشی ساختند و با فوم پلی اورتان کامپوزیتی جامد تقویت شده با پرکننده گرافیت که در ساختار منبسط شده بود، تقویت کردند. نتایج نشان داد که در آزمایش فشردگی سازی، مخلوط با ۲٪ پرکننده گرافیت بالاترین مقدار ۲/۵ کیلونیوتن را داشت. بالاترین آزمایش سختی روی نمونه با مخلوط ۲٪ گرافیت HA ۱۹/۸ بود. اولادپو و همکاران [۱۷] پاسخ شوک ساختارهای شبکه ای ژیروئید ساخته شده از رشته‌های PLA، ABS و TPU را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که ساختارهای شبکه ای ظرفیت جذب انرژی بالایی و یکپارچگی ساختاری خوبی را نشان می‌دهند و با یک ساختار هسته TPU بالاترین تغییر شکل را تحت بارگذاری شوک نشان می‌دهد، با حداکثر انحراف تقریباً ۶ میلی‌متر، و پس از آن ABS در ۰/۹ میلی‌متر و PLA در ۰/۸۲ میلی‌متر. هولم و همکاران [۱۸] پتانسیل کاربرد مواد ساختار شبکه سه‌بعدی را در ایمپلنت‌های داربست استخوان بررسی کردند. بنابراین، چهار نمونه مواد ساختار شبکه مختلف با ابعاد مساوی ۵۰ میلی‌متر در طول، عرض و ارتفاع که شامل بیست و پنج سلول واحد شبکه است، توسط تکنیک چاپ سه‌بعدی FFF با استفاده از PLA طراحی و ساخته شدند و نمونه‌ها تحت بارهای فشاری مورد بررسی قرار گرفتند و سپس استحکام هر شبکه اندازه‌گیری شد.

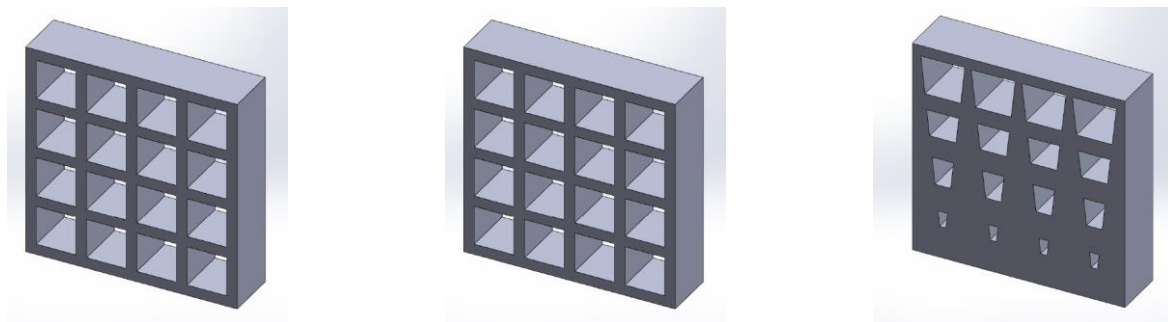
تعداد تحقیقاتی که بر روی خوردگی قطعات PLA ساخته شده به روش پرینت سه‌بعدی زیاد نیست. کریشنا آپادهیای و همکاران [۱۹] تخریب مکانیکی قطعات پرینت سه‌بعدی را در یک محیط دریایی شبیه‌سازی شده ارزیابی کردند. بدین منظور محیط شبیه‌سازی شده آب دریا، ایجاد شد و نمونه‌ها به مدت ۳۰ روز در آن غوطه‌ور گردیدند و خواص کششی این نمونه‌ها برآورد شد. نتایج XRD نشان داد که تبلور جزئی ماده PLA تحت شرایط شبیه‌سازی شده آب دریا تخریب می‌شود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که به طور عمده، محتوای نمک از آب دریا شروع به تخریب سطحی کرده و به صورت حفره‌های کوچک ظاهر می‌شوند، با این حال، تخریب در حالت کنترل شده است. هدایتی و همکاران [۲۰] به بررسی مقاومت ضربه سازه‌های شبکه PLA در معرض تخریب مواد تحت دمای اتاق، رطوبت و قرارگرفتن در معرض نور طبیعی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که سازه‌های با نسبت پواسون منفی علی‌رغم ضعیف شدن مواد، مقاومت بالایی در برابر خردشدن موضعی از خود نشان می‌دهند و کاهش شکنندگی ماده در مقایسه با کاهش تنش تسلیم تأثیر بیشتری بر پاسخ ضربه دارد. ظهور و همکاران [۲۱] دو نوع داربست با تخلخل ۶۰ و ۸۰ درصد با استفاده از روش FDM را بررسی نمودند و روش تخریب تسریع شده با استفاده از محلول قلیایی ۰/۷۴ مولار NaOH در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد با pH ۱۲/۵ مورد بررسی قرار دادند و نتایج را آنالیز کردند و دریافته‌اند داربست‌های با تخلخل ۶۰ درصد خواص مکانیکی و یکپارچگی بهتری را تا پایان آزمایش نشان می‌دهند. یونیزاوا و یامادا [۲۲] اجسام چاپ شده با FFF-3D را با آزمایش‌های کششی تک‌محوری و آزمایش‌های خمشی چهار نقطه‌ای ارزیابی کردند تا تغییرات سه ویژگی مکانیکی، یعنی حداکثر تنش، مدول الاستیک، و انرژی شکست را مشخص کنند و نتایج به دست آمده در این تحقیق برای طراحی ساختارهای PLA ساخته شده با چاپ سه‌بعدی FFF قابل استفاده خواهد بود.

استفاده از ساختارهای حفره‌دار می‌تواند به کاهش وزن کلی سازه کمک کند اما حفره‌ها باعث تمرکز تنش و همچنین کاهش استحکام سازه خواهد شد. از طرف دیگر استفاده از هندسه پیچیده برای حفره‌ها هزینه و زمان ساخت را به شدت بالا می‌برد. معمولاً در ساخت سازه‌های حفره‌دار از اندازه یکسان برای همه حفره‌ها استفاده می‌شود. در این مقاله، به منظور کاهش وزن از سه نوع حفره ساده، یک‌طرفه و دوطرفه مربعی استفاده شده است. اثر تغییر اندازه حفره‌ها در راستای اعمال نیروی فشاری مورد توجه قرار گرفته است. باتوجه به امکان کاربرد سازه‌های پرینت شده در محیط‌های مختلف که شامل نمک است اثر محیط نیز بر استحکام فشاری همه نمونه‌ها به صورت تجربی مطالعه شده است.

۲- روش ساخت

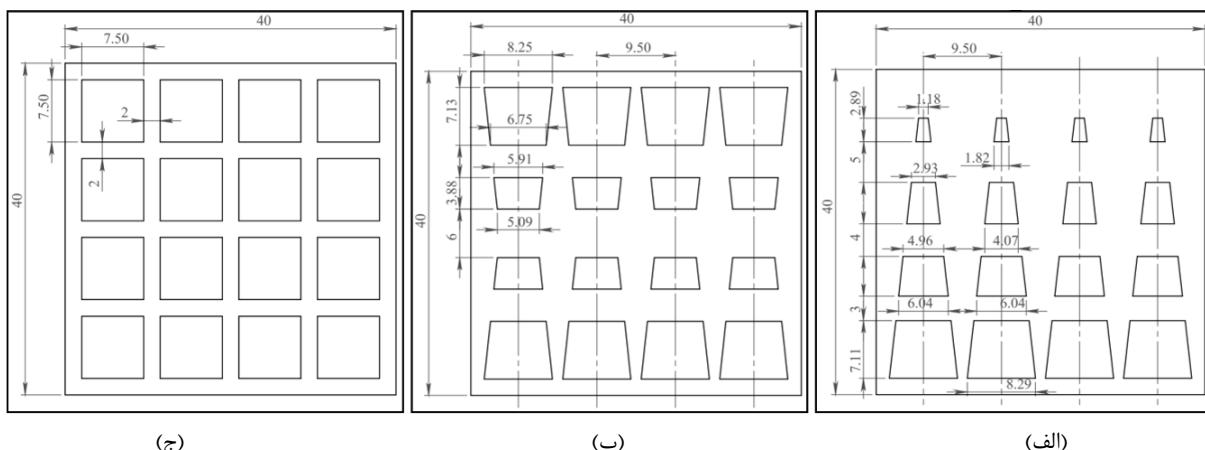
۲-۱- ساخت نمونه‌ها

سه نوع ساختار در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از چیدمان سوراخ‌ها به صورت اندازه‌های مساوی در طول نمونه قرار گرفته‌اند که نام این چیدمان در این مقاله ساده نام‌گذاری شده است. نوع دیگری از چیدمان سوراخ‌ها طوری طراحی گردیدند که سایز آن‌ها از بالا و پایین به سمت مرکز ساختار، روند کاهشی داشته باشد که این نوع چیدمان دوطرفه نام‌گذاری گردید. در نهایت نوع دیگری از چیدمان سوراخ‌ها طوری طراحی گردید از قسمت پایین ساختار به سمت بالای ساختار، اندازه سوراخ‌ها کمتر شود و این نوع الگوی طراحی در این مقاله با نام، یک‌طرفه نام‌گذاری گردید. تمامی ساختارها به صورت سه‌بعدی و مکعبی با ابعاد $40 \pm 1 \text{mm}$ در طراحی شدند و ضخامت هر کدام از این ساختارها، باهدف جلوگیری از وقوع پدیده کمانش حین آزمون فشار، 10 میلی‌متر در نظر گرفته شده است که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ شکل نمونه‌ها در نرم افزار سه‌بعدی قبل از اعمال فشار و ایجاد تغییر شکل

باتوجه به راستای حرکت سوراخ‌ها به سمت مرکز یا سمت مقابل، ابعاد اضلاع یا قطرهای نیز متناسب با آن‌ها تغییر کرده است. به منظور درک بهتر طراحی و نحوه چیدمان و نوع سوراخ‌ها، نقشه‌های آن‌ها به همراه ابعاد آن‌ها در شکل ۲ قابل مشاهده است.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۲ الف) ساختار ساده، ب) ساختار دوطرفه، ج) ساختار یک‌طرفه

پس از طراحی نقشه‌های سه‌بعدی نمونه‌ها، قدم بعدی پرینت نمونه‌ها است که آن‌ها با کمک روش FFF پرینت شده‌اند. به علت اینکه در زمان پرینت خواص قطعاً دچار تغییر خواهند شد؛ بنابراین در مقاله حاضر تست کشش قبل از پرینت انجام نشده است. در این مقاله شرایط پرینت طوری انتخاب شده که کمترین خطا ایجاد گردد، یعنی از قبل دما و ضخامت لایه و سرعت پرینت مورد بررسی قرار گرفته بوده است تا جدایش بین لایه‌ها مشاهده نشود. نمونه‌ها با دو نوع متفاوتی از فیلامنت‌ها تولید شدند که یکی از آن‌ها فیلامنت PLA ساده و نوع دیگر، فیلامنت PLA تقویت‌شده با ۳۰٪ وزنی الیاف کربن می‌باشد که هر دو فیلامنت در قطر ۱/۷۵ میلی‌متر تهیه شده‌اند. لازم به توضیح است فیلامنت الیاف کربن از برند Youso می‌باشد. تمامی نمونه‌ها با پرینتر سه‌بعدی با نازل از جنس برنج با قطر ۰/۴ میلی‌متر و دمای نازل ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و دمای میزکار ۹۰ درجه سانتی‌گراد پرینت شدند که پروسه با سرعت حرکتی نازل ۶۰ mm/s، ارتفاع لایه‌ی ۰/۱۵ میلی‌متر، درصد پرشدگی ۲۰٪ با a triangular filling pattern انجام پذیرفت.

۲-۲- شرایط محیطی

نمونه‌ها در سه سری تولید شدند و برای هر کدام از آن‌ها، یک شرایط محیطی متفاوتی ایجاد گردید و پس از آن، آزمون فشار بر روی تمامی نمونه‌ها انجام پذیرفت. یکی از شرایط محیطی، فضای آزاد است که نمونه‌ها به مدت یک هفته در دمای اتاق نگهداری شدند. شرایط محیطی ثانویه شامل محلول آب‌نمک دریا است که نمونه‌ها در این محلول و دمای اتاق، به مدت یک هفته نگهداری شدند و سپس آزمون فشار بر روی آن‌ها انجام پذیرفت. شرایط محیط دیگری شامل محلول آب‌نمک دریا و دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد بود که نمونه‌ها به مدت یک هفته در این شرایط قرار گرفتند و دما دائماً با دماسنج کنترل می‌گردید و سپس تحت آزمون قرار گرفتند. محلول آب‌نمک دریا، به صورت محلول و به صورت دستی، شامل ترکیب آب و ۴۰ گرم نمک دریا تهیه شدند. در طول مدت یک هفته، محلول به صورت دائم با دو مگنت آهنربایی و در فرکانس ۱۲۰ rpm در حال هم‌زدن قرار داشت و به منظور حفظ سطح آب، محلول آب‌نمک دریا به صورت متناوب به ظرف افزوده می‌شد. هدف بررسی خوردگی قطعات و اثر محیط خورنده نمکی؛ مانند محیط دریا بر قطعات پرینت شده است. این خوردگی ممکن است برای قطعات تزریق شده نیز رخ بدهد ولی مقاله‌ای در این خصوص مشاهده نشده است.

۲-۳- تست فشار

آزمون فشار بر روی نمونه‌های پرینت شده که در شرایط متفاوتی آماده شدند در دستگاه Zwick/Roll مدل Z100 انجام پذیرفت که شرایط آزمون با پیش نیروی ۲ نیوتن و سرعت اعمال نیروی ۵ mm/min انجام پذیرفت. آزمون فشار تا شکست نهایی تمامی ساختارهای شبکه‌ای انجام پذیرفت و نمودارهای مربوط آن‌ها، نیروی شکست و میزان جابه‌جایی هر نمونه، استخراج گردید. باتوجه به طراحی ساختارهای شبکه‌ای متفاوت و تولید نمونه‌ها با دو فلانمت متفاوت، فیلامنت PLA ساده و فیلامنت PLA تقویت‌شده با الیاف کربن، لازم به ذکر است که تمامی نمونه‌ها قبل از انجام تست فشار، به مدت یک هفته در محیط‌های اشاره شده، قرار گرفته بودند.

۳- نتایج و بحث

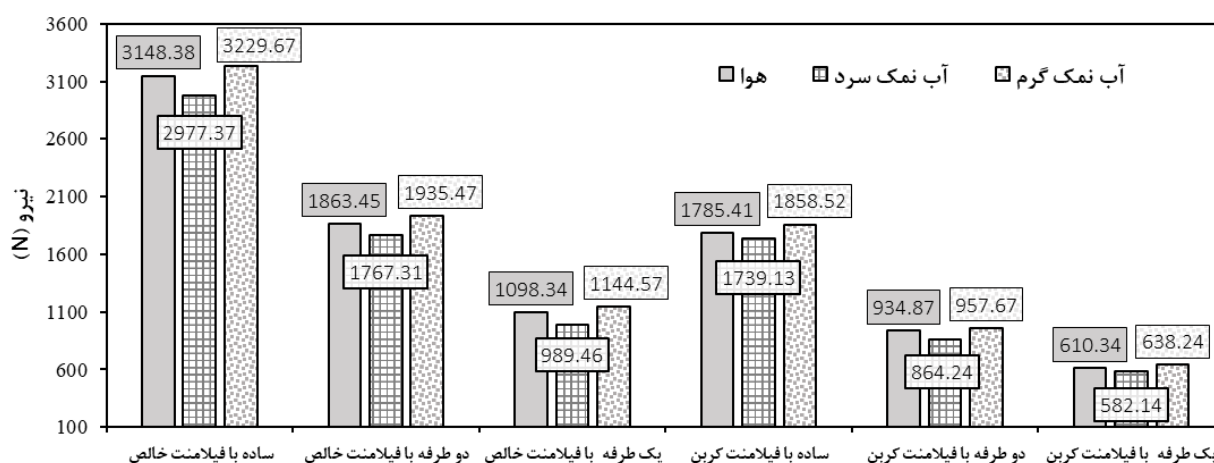
آزمون فشار بر روی ساختارهای شبکه‌ای با سوراخ‌های مربعی مانند، انجام پذیرفت. تمامی نمونه‌ها، قبل از آزمون، در شرایط محیطی متفاوت مطابق با بخش قبل، به مدت یک هفته نگهداری شده بودند. نتایج آزمون مطابق با جدول ۱ آورده شده است. در این مقاله خروجی آزمایش فشار که میزان استحکام نمونه‌ها می‌باشد که به صورت کمی ارائه گردیده است اما با توجه دقیق مشخص نبودن زمان شکست، جابجایی فشاری در زمان شکستن نمونه به صورت جداگانه ارائه نگردیده است. برای درک بهتر از روند نتایج، نمودار مربوط به نیروی شکست نمونه‌ها در شکل ۳ قابل مشاهده است.

مطابق با نتایج به دست آمده در شکل ۳ که در آن نمونه‌های پرینت‌شده با فیلامنت PLA تقویت‌شده با الیاف کربن به صورت هاشورخورده نشان داده شده‌اند، نشان می‌دهد به صورت کلی با افزوده شدن الیاف کربن به فیلامنت، استحکام فشاری ساختارهای شبکه‌ای کاهش یافته است. نتایج به دست آمده نشان داد که بین تمامی ساختارهای شبکه‌ای مربعی، بیشترین نیروی فشاری برای نمونه‌ی ساده تولید شده با الیاف خالص قرار گرفته در محلول آب‌نمک گرم برابر با ۳۲۲۹/۶۷ نیوتن به دست آمد که ۶۴٪ بیشتر از نمونه‌ی یک‌طرفه با الیاف خالص بوده است که برابر با ۱۱۴۴/۵۷ نیوتن می‌باشد. در نمونه‌های قرار گرفته در محیط نمکی، بیشترین نیروی فشاری برای نمونه‌ی ساده با الیاف خالص برابر با ۲۹۷۷/۳۷ نیوتن به دست آمد که با پرینت همین ساختار با فیلامنت

تقویت شده با الیاف کربن، نیروی فشاری با ۴۱٪ کاهش به نیروی ۱۷۳۹/۱۳ نیوتن به دست آمده است. در بین نمونه‌های قرار گرفته در محیط هوا، نیروی فشاری شکست برای نمونه‌های دوطرفه با الیاف خالص و یک طرفه با الیاف خالص برابر با ۱۸۶۳/۴۵ نیوتن و ۱۰۹۸/۳۴ نیوتن به دست آمده است. با حدود ۴۵٪ کاهش، نیروی فشاری شکست برای نمونه‌های دوطرفه با الیاف کربن و یک طرفه با الیاف کربن برابر با ۹۳۴/۸۷ نیوتن و ۶۱۰/۳۴ نیوتن به دست آمده است، که نشان از کاهش استحکام نمونه‌های پرینت شده با الیاف PLA تقویت شده با الیاف کربن دارد. باتوجه به نمودار شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزودن الیاف کربن به ماده پایه فیلامنت PLA، سبب کاهش نیروی فشاری نمونه‌های پرینت شده در مقایسه با نمونه‌های پرینت شده با فیلامنت‌های پایه PLA می‌باشد. علت این پدیده به حضور الیاف کربن در ماده پایه می‌باشد که سبب تردی ماده و نمونه‌های پرینت شده گردیده است. علت این رفتار، عدم پیوند مناسب الیاف با ماده پایه و حضور تخلخل در فیلامنت می‌باشد که سبب تولید نمونه‌هایی ترد و دارای استحکام کمتر می‌گردد. همچنین می‌تواند به کلوخه شدن و الیاف در ماده پایه مرتبط دانست که سبب کاهش استحکام نمونه‌ها در مقابل نیروی فشاری می‌گردد.

جدول ۱ نتایج تست فشار

| نوع نمونه | محیط | | | | | |
|-------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | آب نمک سرد | | آب نمک گرم | | هوا | |
| | نیروی فشاری (N) | تغییر شکل (mm) | نیروی فشاری (N) | تغییر شکل (mm) | نیروی فشاری (N) | تغییر شکل (mm) |
| ساده با فیلامنت خالص | 2977.37 | 19.84 | 3229.67 | 17.42 | 3148.38 | 21.76 |
| دوطرفه با فیلامنت خالص | 1767.31 | 19.78 | 1935.47 | 17.17 | 1863.45 | 21.43 |
| یک طرفه با فیلامنت خالص | 989.46 | 19.24 | 1144.57 | 16.54 | 1098.34 | 21.34 |
| ساده با فیلامنت کربن | 1739.13 | 18.32 | 1858.52 | 17.28 | 1785.41 | 20.48 |
| دوطرفه با فیلامنت کربن | 864.24 | 18.11 | 957.67 | 16.34 | 934.87 | 20.34 |
| یک طرفه با فیلامنت کربن | 582.14 | 17.86 | 638.24 | 15.81 | 610.34 | 20.22 |



شکل ۳ مقایسه استحکام فشاری نمونه‌ها

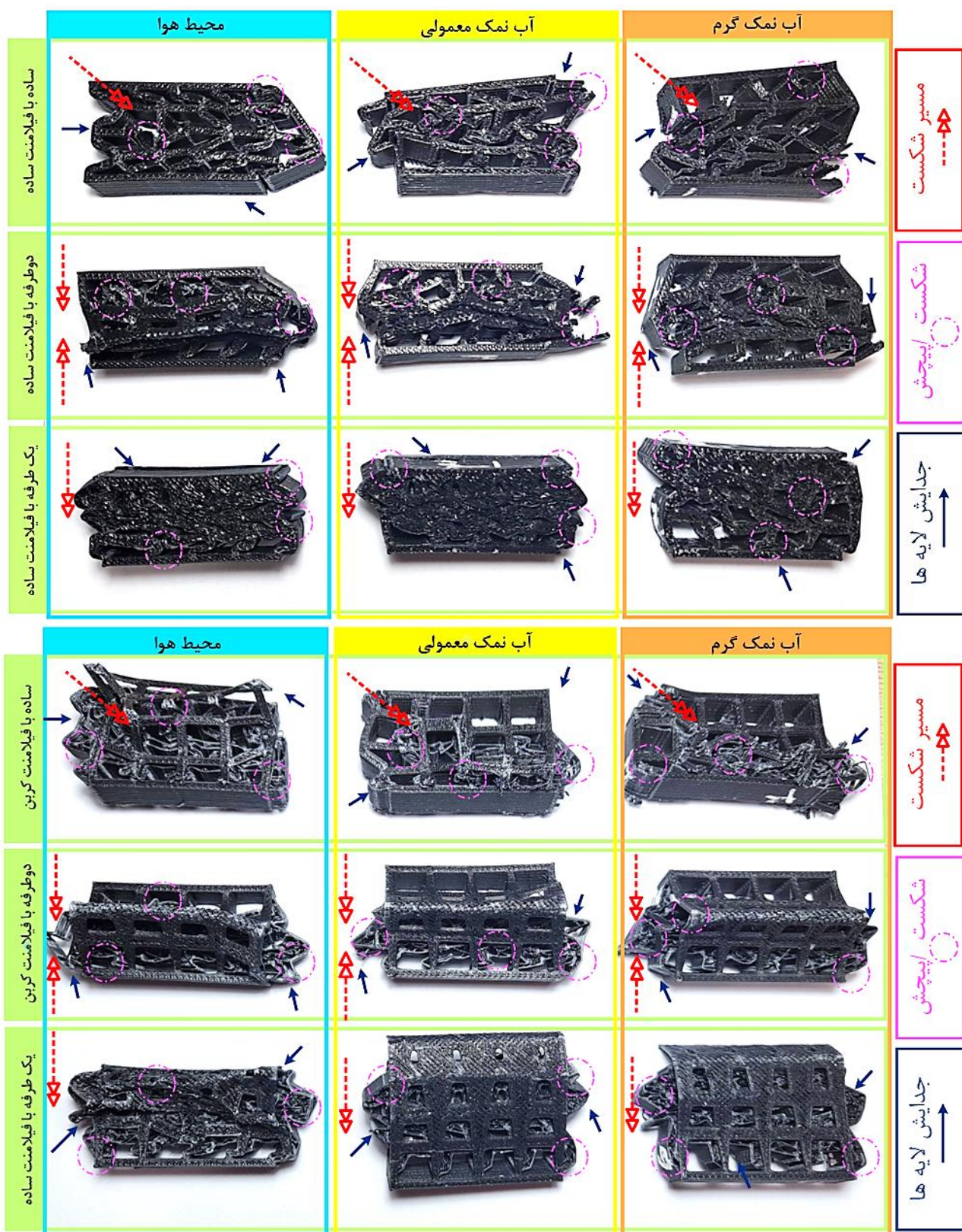
در مقایسه نتایج به دست آمده بین محیط‌های خورنده، بدون در نظر گرفتن نوع فیلامنت و هندسه آن‌ها، این نتیجه را حاصل کرده است که قرار گرفتن نمونه‌ها به مدت یک هفته در محیط نمکی سرد، سبب کاهش استحکام نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های قرار گرفته در محیط هوا گردیده است که علت آن به واسطه‌ی نفوذ ذرات نمک، بین لایه‌های پرینت شده است که سبب ایجاد تخلخل بیشتر در نمونه‌ها و فاصله افتادن بین لایه‌ها می‌گردد که با افزایش تمرکز تنش سبب کاهش استحکام نمونه‌ها می‌گردد. در مقابل بیشترین استحکام نمونه‌ها در بین محیط‌های متفاوت، برای نمونه‌هایی به دست آمد که در محیط آب نمک گرم قرار گرفته بودند که نشان می‌دهد حضور نمونه‌ها در آب گرم کمک به پیوندی مجدد و چسبندگی بیشتر بین لایه‌ها گردیده است و حضور نمک نتوانست بر این

افزایش استحکام غلبه کند. نتایج نشان می‌دهد، نیروی فشاری برای نمونه‌های ساده با الیاف خالص، قرار گرفته در محیط هوا برابر با $3148/38$ نیوتن می‌باشد و حضور این نمونه در محیط نمکی سرد سبب کاهش نیروی فشاری با نسبت $0.5/4$ ٪ گردیده است که نیروی $2977/37$ نیوتن به دست آمد. قرار گرفتن نمونه ساده با الیاف خالص در محیط آب‌نمک گرم سبب افزایش $0.2/5$ ٪ نیروی فشار در مقایسه با محیط هوا گردیده است. همین روند برای سایر نمونه‌ها با ساختارهای شبکه‌ای مربعی فارغ از نوع هندسه و فیلامنت تکرار شده است. در نمونه‌ی یک‌طرفه با الیاف کربن محیط آب‌نمک گرم نیروی فشاری برابر با $638/24$ نیوتن به دست آمد که با کاهشی $0.4/6$ ٪ نیروی فشاری به $610/34$ نیوتن در نمونه‌ی هوا به دست آمد و همچنین نیروی فشاری در محیط آب‌نمک سرد با کاهش $0.8/7$ ٪ به $582/14$ نیوتن رسیده است. به‌منظور بررسی بهتر رفتار نمونه‌های با ساختار شبکه‌ای مربعی، از تمامی نمونه‌های شکسته شده بعد از آزمون فشار عکس گرفته شده است که در شکل ۴ نشان داده شده است که در آن مسیر شکست نمونه‌ها در حین آزمون فشار با فلش قرمز رنگ خط‌چین، جدایی لایه‌های پرینت‌شده با فلش آبی رنگ و شکستگی و درهم پیچیدگی اتصالات با دایره‌های صورتی رنگ نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌های ساختار شبکه‌ای با هندسه‌ی ساده که هندسه‌ی سوراخ‌ها مربعی یکسان می‌باشند، مسیر شکست سلول‌ها و نمونه‌ها، عموماً در راستای قطر اتفاق افتاده است و این پدیده ارتباطی با نوع فیلامنت استفاده‌شده جهت پرینت و یا محیط قرارگیری نمونه‌ها قبل از آزمون فشار ارتباطی ندارد. در مقابل مسیر جمع‌شدگی و فشرده‌شدن نمونه‌های ساختار شبکه‌ای با هندسه‌ی دوطرفه از طرفین و از بالا و پایین اتفاق افتاده است و بیشترین جمع‌شدگی در مرکز نمونه اتفاق افتاده است که می‌تواند مرتبط با سوراخ‌ها و تمرکز تنش بیشتر در مرکز نمونه دانست که سبب آسیب‌پذیری بیشتر و شکست نمونه در این نواحی می‌گردد و این پدیده نیز در تمامی نمونه‌های پرینت‌شده با هر دو الیاف و محیط‌های متفاوت دیده شده است. در هندسه‌ی دیگری نیز از ساختار شبکه‌ای مربعی، ساختار یک‌طرفه، مسیر شکست از بالا به سمت پایین بوده است به طوری که سلول‌های ردیف پایین نزدیک به فک پایین دستگاه فشار، ساختار خود را تقریباً حفظ کرده‌اند و جمع‌شدگی نمونه‌ها از سمت بالا اتفاق افتاده است که سوراخ‌ها کوچکتر بوده‌اند و تمرکز تنشی بیشتری را به دست آوردند.

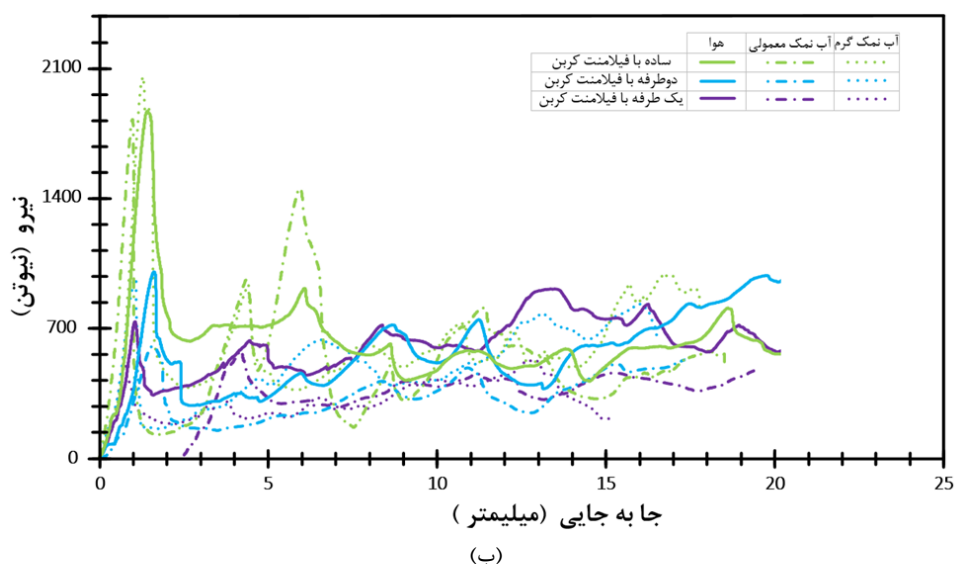
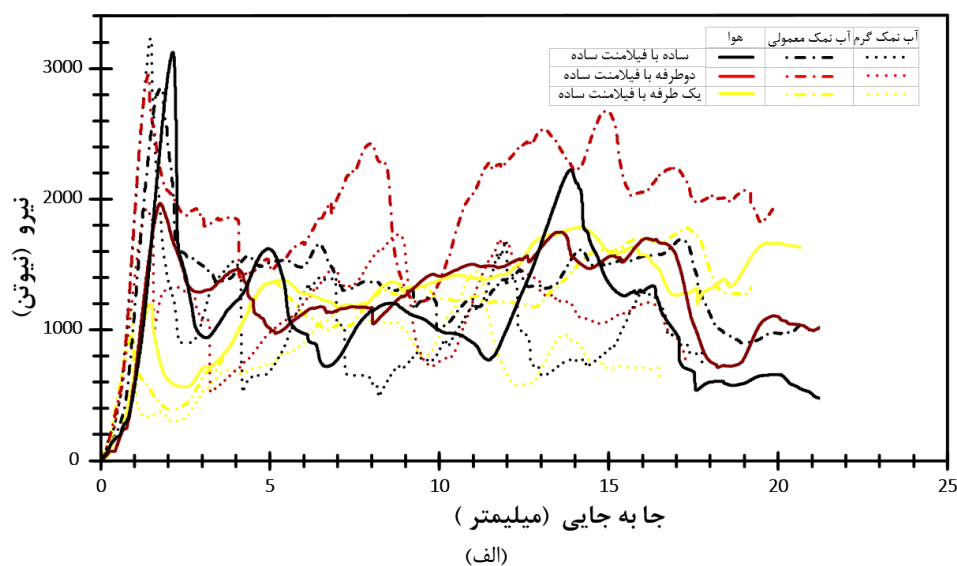
همچنین در تصاویر نمونه‌ها، نقاط شکست و چین‌خوردگی نمونه‌ها مشخص گردیده است که عموماً در محل اتصالات و گوشه‌های تیز نمونه‌ها رخ داده است و با اعمال فشار بیشتر، این چین‌خوردگی‌ها در مسیر شکست، افزایش یافته و شکل گرفته است. این میزان چین‌خوردگی و شکست نمونه‌ها، در نمونه‌های پرینت شده با الیاف PLA خالص در مقایسه با نمونه‌های پرینت شده با فیلامنت PLA تقویت‌شده الیاف کربن، شدت کمتری داشتند که نشان از استحکام فشاری بیشتر این نمونه‌ها است. عامل شکست دیگر نمونه‌های پرینت شده، باتوجه به تولید لایه به لایه آن‌ها، مربوط به جدایش لایه‌ها در اثر اعمال نیرو است و جدایش لایه‌ها با فلش‌های آبی‌رنگ مشخص گردیده‌اند که برحسب علامت‌گذاری‌های انجام شده، مشخص گردیده است میزان جدایش لایه‌ها در نمونه‌های قرار گرفته در محیط آب‌نمک سرد شدیدتر از سایر محیط‌ها است که نشان از آن دارد که آب‌نمک دریا، سبب ضعیف‌تر شدن اتصال لایه‌ها گردیده است که هم در بین اتصالات و در لایه‌های بیرونی گردیده است. کمترین تعداد و شدت جدایش بین لایه‌ها در نمونه‌هایی اتفاق افتاده است که در محیط آب‌نمک گرم به مدت یک هفته قرار گرفته بودند که نشان از پیوند بهتر و محکم و چسبندگی بیشتر بین لایه‌ها در اثر حرارت اتفاق افتاده است که در نهایت منجر به افزایش استحکام و افزایش نیروی فشاری شکست شده است. بادقت به تصاویر شکست نمونه‌ها و جدایش بین لایه‌ها، مشاهده می‌شود که بیشترین و شدیدترین جدایش برای نمونه‌های تولیدشده با فیلامنت الیاف PLA تقویت‌شده با الیاف کربن اتفاق افتاده است به طوری که در بیشتر این نمونه‌ها، لایه بیرونی آن‌ها از ساختار اصلی آن جدا شده است و نشان می‌دهد که حضور الیاف کربن در ماده پایه، سبب کاهش اتصال و چسبندگی بین لایه‌ها گردیده است.

به‌منظور بررسی رفتار نمونه‌ها در مقابل نیروی فشار، نمودار نیرو جابه‌جایی آن‌ها در شکل ۵ آورده شده است. به‌صورت کلی، میزان تغییر شکل فشاری تمامی نمونه‌ها در محدوده‌ی ۱۵ میلی‌متر تا ۲۲ میلی‌متر اتفاق افتاده است (در زمان اعمال فشار، بعد از جابجایی فک بالایی دستگاه به میزان ۱۵ تا ۲۲ میلی‌متر، اولین شکست در قطعه رخ داده است) که با الیاف PLA تقویت‌شده با الیاف کربن پرینت شدند، دارای نرخ جابه‌جایی کمتری می‌باشند که به واسطه‌ی تولید نمونه‌ها با پرینت فیلامنت‌های ترد می‌باشد. مورد دیگری در الگوی نمودارها می‌باشد که فارغ از محیط و نوع فیلامنت می‌باشد، حرکت نوسانی نیرو است که به‌صورت پله‌ای و نزولی می‌باشد که با شکست اول یکی از سلول‌ها، نیرو از بیشینه، سقوط می‌کند و مجدد روند افزایشی به خود می‌گیرد تا شکست سلول بعدی ساختار اتفاق بیافتد و این روند نیروها، تا شکست نهایی قطعه ادامه پیدا کرده است. بدیهی است هر چه نمونه تردتر باشد و چسبندگی بین لایه‌ها کمتر باشد، این میزان نوسان نیروها دامنه‌ی کمتری دارد که علت آن، شکست سریع و پیاپی سلول‌های

ساختار می‌باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت استحکام متوسط قطعات در آب‌نمک سرد کاهش شدیدی داشته و نشان می‌دهد کاربرد قطعات PLA در محیط نمکی مناسب نیست.



شکل ۴ تغییر شکل ساختارها پس از آزمایش فشار



شکل ۵ نمودارهای نیرو-جابجایی در آزمایش فشار الف) فیلامنت ساده، ب) فیلامنت کربن

۴- نتیجه گیری

در این مقاله اثر سه محیط متفاوت بر استحکام فشار نمونه‌های ساخته شده با پرینتر سه بعدی FDM مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها با دو نوع فیلامنت PLA و PLA تقویت شده با الیاف کربن ساخته شدند و در شرایط محیطی مختلف (هوا، محلول آب نمک دریا در دمای محیط، و محلول آب نمک در دمای بالا) قرار گرفتند و نتایج زیر حاصل شد:

- استفاده از فیلامنت دارای الیاف کربن باعث کاهش استحکام فشاری نمونه‌ها به صورت میانگین تا ۵۰٪ شده است که بیشترین مقدار کاهش مربوط به نمونه با سوراخ ساده مربعی است که در حد ۶۵٪ می باشد.
- بیشترین تغییر شکل فشار تحمل شده توسط نمونه‌هایی است که داخل آب نمک قرار نگرفته‌اند. حداکثر این مقدار مربوط به نمونه با سوراخ ساده با عدد ۲۱/۷۶ میلی‌متر است که نسبت به نمونه قرار گرفته در آب نمک سرد حدود ۱۰٪ بیشتر می‌باشد.
- نمونه‌هایی که در محلول آب نمک گرم قرار گرفتند، بالاترین استحکام فشاری را داشتند. این نشان می‌دهد که افزایش دما به بهبود چسبندگی بین لایه‌ای کمک کرده است.
- نمونه‌های قرار گرفته در محلول آب نمک در دمای محیط، کاهش استحکام نشان دادند. دلیل این امر نفوذ ذرات نمک بین لایه‌های پرینت شده و ایجاد تخلخل بیشتر بود.

- ساختار هندسی تأثیر مهمی در استحکام فشاری داشت. نمونه‌های دارای ساختار ساده در مقایسه با نمونه‌های دارای سوراخ‌های یک‌طرفه و دوطرفه، استحکام فشاری بیشتری داشتند.
- شکست نمونه‌ها در الگوهای مشخصی اتفاق افتاد که بیشتر در راستای چیدمان سلولی و تمرکز تنش قابل مشاهده بود.
- استفاده از PLA تقویت شده با الیاف کربن می‌تواند استحکام فشاری نمونه‌های پرینت شده را افزایش دهد، اما کیفیت چسبندگی بین لایه‌ها باید بهبود یابد. همچنین، شرایط محیطی به شدت بر عملکرد مکانیکی این قطعات تأثیرگذار است، به طوری که محیط‌های گرم باعث بهبود پیوند لایه‌ای و افزایش استحکام شدند، در حالی که محیط‌های نمکی سرد به کاهش استحکام انجامید.

References

- [1] Maghamfar A, Shahbazi M, Hashemi R. Detection and measurement of warping in FDM additive manufacturing process using artificial intelligence and machine vision. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Feb 19;11(12):1-5. doi: 10.22034/IJME.2024.479491.2011 [In Persian]
- [2] Moayedi Manizani S, Zamani Ashani J, Salehi M. Experimental investigation of mechanical and microscopic properties of ABS-Ni composite made by Fused Deposition Modeling (FDM) method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Nov 22;9(9):10-20. doi:10-20. doi: 10.22034/IJME.2023.371411.1716 [In Persian]
- [3] Sadooghi A, Ebrahimian MR, Hashemi SJ, Sayar R, Rahmani K, Bodaghi M. Impact of Infill Density and Glass Fiber Reinforcement on the Compressive and Bending Strength of Acrylonitrile Butadiene 3D-Printed Corrugated Sandwich Panels. *Advanced Engineering Materials*. 2025 Jan;27(1):2401842. doi: 10.1002/adem.202401842
- [4] Bodaghi M, Sadooghi A, Bakhsi M, Hashemi S, Rahmani K. Glass fiber reinforced acrylonitrile butadiene styrene composite gears by FDM 3D printing. *Advanced Materials Interfaces: A*. 2023 July 23; 2300337. doi: 10.1002/admi.202300337
- [5] Park SI, Rosen DW, Choi SK, Duty CE. Effective mechanical properties of lattice material fabricated by material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2014 Oct 1;1:12-23. doi: 10.1016/j.addma.2014.07.002
- [6] Maskery I, Sturm L, Aremu AO, Panesar A, Williams CB, Tuck CJ, Wildman RD, Ashcroft IA, Hague RJ. Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing. *Polymer*. 2018 Sep 12;152:62-71. doi: 10.1016/j.polymer.2017.11.049
- [7] Hanks B, Berthel J, Frecker M, Simpson TW. Mechanical properties of additively manufactured metal lattice structures: Data review and design interface. *Additive Manufacturing*. 2020 Oct 1;35:101301. doi: 10.1016/j.addma.2020.101301
- [8] Teng F, Sun Y, Guo S, Gao B, Yu G. Topological and mechanical properties of different lattice structures based on additive manufacturing. *Micromachines*. 2022 Jun 27;13(7):1017. doi: 10.3390/mi13071017
- [9] Kandasamy MK, Ganesan A, Srinivasan L. Influence of relative density and strain rate on mechanical behavior and energy absorption of additively manufactured lattice structure. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2023 Feb;76(2):505-10. doi: 10.1007/s12666-022-02780-6
- [10] Kankanamge UM, Mohamed OA, Xu W. Superelastic behavior of additively manufactured nylon-12 lattice structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021 Dec;30(12):9352-8. doi: 10.1007/s11665-021-06086-4
- [11] Ren Y, Nie Y, Ran W, Liu Z, Wang L, Lou C, Chen W. Mechanical properties and energy absorption of soft-hard dual phase lattice structures manufactured via selective laser melting. *Metals and Materials International*. 2024 Feb;30(2):303-14. doi: 10.1007/s12540-023-01502-x
- [12] Liu T, Zhu JH, Zhang W, Belhabib S, Guessasma S. Microstructure and compressive behaviour of PLA/PHA-wood lattice structures processed using additive manufacturing. *Polymer Testing*. 2024 Dec 1;141:108612. doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108612
- [13] Cao A, Wan D, Gao C, Elverum CW. A novel method of fabricating designable polylactic acid (PLA)/thermoplastic polyurethane (TPU) composite filaments and structures by material extrusion additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024 May 30;118:432-47. doi: 10.1016/j.jmapro.2024.03.015
- [14] Myers D, Abdel-Wahab A, Hafeez F, Kovacev N, Essa K. Optimisation of the additive manufacturing parameters of polylactic acid (PLA) cellular structures for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2022 Dec 1;136:105447. doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105447

- [15] Black S, Tzagiollari A, Mondal S, Dunne N, MacManus DB. Mechanical behaviour of gel-filled additively-manufactured lattice structures under quasi-static compressive loading. *Materials Today Communications*. 2023 Jun 1;35:106164. doi: [10.1016/j.mtcomm.2023.106164](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106164)
- [16] Tanbar F, Nugroho AD, Nugraha AD, Darmanto S, Widagdo D, Santos GN, Muflikhun MA. Hybrid lattice structure with micro graphite filler manufactured via additive manufacturing and growth foam polyurethane. *Composites Part C: Open Access*. 2024 Oct 1;15:100516. doi: [10.1016/j.jcomc.2024.100516](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100516)
- [17] Oladipo B, Doner S, Lyngdoh GA, Villada JT, Wanchoo P, Matos H, Shukla A, Das S. Shock response of sandwich panels with additively manufactured polymer gyroid lattice cores. *Materials Today Communications*. 2024 Dec 1;41:110664. doi: [10.1016/j.mtcomm.2024.110664](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110664)
- [18] Hulme J, Sakhaei AH, Shafiee M. Mechanical analysis and additive manufacturing of 3D-printed lattice materials for bone scaffolds. *Materials Today: Proceedings*. 2024 Jan 1;101:30-7. doi: [10.1016/j.matpr.2023.02.278](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.278)
- [19] Upadhyay RK, Mishra AK, Kumar A. Mechanical degradation of 3D printed PLA in simulated marine environment. *Surfaces and Interfaces*. 2020 Dec 1;21:100778. doi: [10.1016/j.surfin.2020.100778](https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100778)
- [20] Hedayati R, Alavi M, Sadighi M. Effect of degradation of polylactic acid (PLA) on dynamic mechanical response of 3D printed lattice structures. *Materials*. 2024 Jul 25;17(15):3674. doi: [10.3390/ma17153674](https://doi.org/10.3390/ma17153674)
- [21] Zohoor S, Abolfathi N, Solati-Hashjin M. Accelerated degradation mechanism and mechanical behavior of 3D-printed PLA scaffolds for bone regeneration. *Iranian Polymer Journal*. 2023 Oct;32(10):1209-27. doi: [10.1007/s13726-023-01191-8](https://doi.org/10.1007/s13726-023-01191-8) [In Persian]
- [22] Yonezawa A, Yamada A. Deterioration of the mechanical properties of FFF 3d-printed PLA structures. *Inventions*. 2020 Dec 22;6(1):1. doi: [10.3390/inventions6010001](https://doi.org/10.3390/inventions6010001) [In Persian]