



تأثیر چسبندگی بین لایه‌ای در پیش‌بینی شکست خستگی قطعات ساخته‌شده با پرینت سه‌بعدی

احسان امینی^۱، علیرضا فتحی^{۲*}، علی محمد باغستانی^۳

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
 ۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
 ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
 * ایمیل نویسنده مسئول: a.fathi@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۴ دی ۱۴۰۲
 پذیرش: ۲۷ بهمن ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

شکست خستگی
 ایمپلنت کمر
 پرینت سه‌بعدی
 لایه نشانی ذوبی
 اجزای محدود

چکیده

امروزه استفاده از تولید افزودنی یا به عبارتی پرینت سه‌بعدی در صنایع مختلف از جمله حوزه پزشکی رشد چشمگیری داشته است که از به‌روزترین کاربردهای آن در این حوزه تولید ایمپلنت‌های بین مهره‌ای است. نظر به تأثیر بسیار زیاد چسبندگی بین لایه‌ای در عمر نهایی قطعات ساخته شده به روش پرینت سه‌بعدی، در این مطالعه، با استفاده از تحلیل اجزا محدود برای پیش‌بینی شکست خستگی در ایمپلنت مهره پایین کمر ساخته شده توسط پرینتر سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا با استفاده از روش لایه نشانی ذوبی، چندین نمونه قطعات استاندارد آزمون کشش و مهره پایین کمر ساخته شده است و آزمایش‌های استحکام مکانیکی انجام می‌گردد. ماده مورد استفاده شده جهت انجام این تحقیق، ماده اولیه پلی لاکتیک اسید است که با این ماده در دو راستای افقی و عمودی قطعات نمونه استاندارد کشش و خستگی با مشخصات ضخامت لایه ۰/۳ میلی‌متر، قطر نازل ۰/۴ میلی‌متر، زاویه پرینت ۴۵/۴۵ و سرعت ساخت ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه پرینت شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که راستای پرینت قطعات بسیار در عمر خستگی قطعات مؤثر بوده و مدل اجزای محدود مورد استفاده با دقت قابل قبولی عمر خستگی قطعات را پیش‌بینی می‌کند.

The effect of interlayer adhesion in predicting fatigue failure of 3D printed parts

Ehsan Amini¹, Alireza Fathi^{2*}, Ali-Mohammad Baghestani³

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Associated Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* Corresponding Author's Email: a.fathi@um.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 14 January 2024

Accepted: 16 February 2024

Keywords:

Fatigue Failure

Body Implant

3D-Printing

Fused Deposition Modeling (FDM)

Finite Elements

Abstract

Today, the use of additive manufacturing has grown significantly in various industries, including the medical field, and one of its most recent applications in this field is the production of lumbar fusion cage implants. Considering the high impact of interlayer adhesion on the final life of parts made by 3D printing method, in this study, using finite element analysis to predict fatigue failure in lower back vertebra implants made by 3D printing has been studied. In this regard, using the fused deposition modeling (FDM) method, several samples of standard tensile test parts and lower back vertebrae have been made, and mechanical strength tests have been performed. The material used to carry out this research is polylactic acid, with this material, in both horizontal and vertical directions, the standard tensile and fatigue samples with the characteristics of layer thickness of 0.3 mm, nozzle diameter of 0.4 mm, print angle 45/45 and the production speed of 20 mm/s have been printed. The obtained results show that the printing alignment of the parts is very effective in the fatigue life of the parts and the finite element model predicts the fatigue life of the parts with acceptable accuracy.

Please cite this article using:

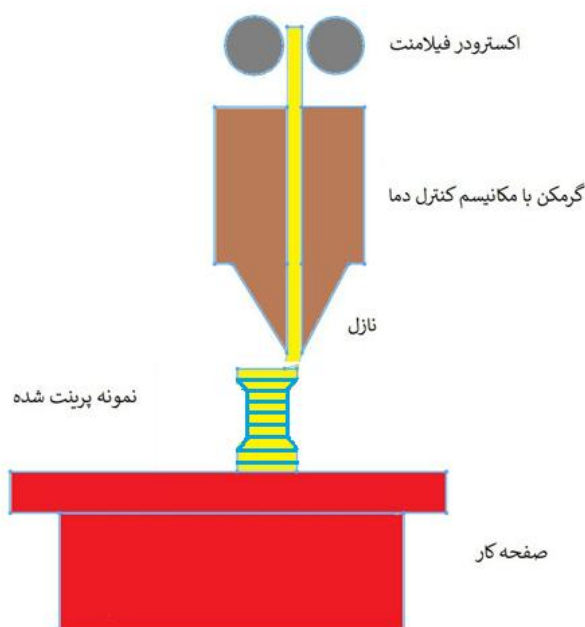
Amini E, Fathi A, Baghestani AM. The effect of interlayer adhesion in predicting fatigue failure of 3D printed parts. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 October 23;10(8):36-48. doi: 10.22034/IJME.2024.434383.1906 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

درد کمر یک مشکل بسیار رایج است که ممکن است بسیاری افراد در طول زندگی آن را تجربه کنند. استفاده از ایمپلنت‌هایی تحت عنوان قفس هم‌جوشی بین مهره‌ای که برای هم‌جوشی بین دو یا چند مهره در ستون فقرات استفاده می‌گردد، امروزه جهت درمان آسیب‌های کمر بسیار استفاده می‌شود. با توجه به اینکه هندسه و ابعاد این ایمپلنت‌ها برای اشخاص مختلف یکسان نیست، تحقیقات زیادی در خصوص استفاده از پرینت سه‌بعدی برای شخصی‌سازی ساخت این ایمپلنت‌ها در جریان است.

در دو دهه اخیر تکنولوژی پرینت سه‌بعدی به طرز باورنکردنی توسعه یافته و روش‌های مختلفی ابداع شده است که مهم‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از: لایه نشانی ذوبی^۱، فیوژن بستر پودری^۲، استریولیتوگرافی^۳، چاپ جوهر افشان^۴، ذوب گزینشی لیزری^۵، رسوب مستقیم انرژی و ساخت اشیای چندلایه^۶ [۱-۵]. در میان این روش‌ها لایه نشانی ذوبی که در شکل ۱ نشان داده شده است، رایج‌تر است. برای این فرآیند از پلیمرهای مختلفی مانند پلی کربنات‌ها که به‌صورت فیلامنت می‌باشند استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین مسائل در این‌گونه فرآیندها و استفاده از محصولات آن، خواص مکانیکی و به‌ویژه شکست خستگی است که به پارامترهای مختلفی از جمله قطر نازل، فاصله بین لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها، سرعت پرینت، میزان پر شوندگی داخلی و الگوی پر شوندگی داخلی بستگی دارد [۶، ۷].



شکل ۱ شماتیک کلی پرینتر سه‌بعدی - لایه نشانی ذوبی

ضخامت لایه‌ها به حجم ماده‌ی خروجی از نازل و همچنین سرعت حرکت نازل بستگی داشته که می‌تواند در قسمت‌های مختلف قطعه ثابت و یا متغیر باشد. ضخامت لایه‌ی بیشتر به معنای تخلخل بیشتر در محصول است که خود بر استحکام قطعه تأثیر می‌گذارد. برای بررسی اثر ضخامت لایه‌ها، در مطالعه‌ای، زمینان و همکاران [۸] دریافته‌اند که این پارامتر نسبت به سایر پارامترها تأثیر کمتری بر استحکام محصول نهایی دارد. در مطالعه‌ای دیگر گیبسون و همکاران [۹] بر روی تأثیر فاصله بین رشته‌ها بر روی استحکام نهایی تحقیق کردند و به این نتیجه رسیدند که این پارامتر بر فشردگی قطعه نهایی نیز تأثیر می‌گذارد. عدم وجود این حفره‌ها و یا به عبارتی همپوشانی رشته‌ها، باعث فشردگی بیشتر قطعه نهایی می‌شود که در نهایت باعث افزایش استحکام قطعه نهایی می‌گردد.

¹ Fused Deposition Modeling (FDM)

² Powder Bed Fusion

³ Stereolithography Apparatus (SLA)

⁴ Inkjet Printing

⁵ Selective Laser Melting (SLM)

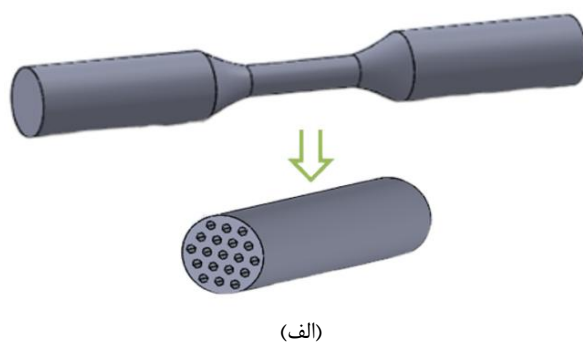
⁶ Laminated Object Manufacturing (LOM)

زمینان و همکاران [۱۰، ۱۱] در مطالعات مشابه دیگری بر روی تأثیر پارامترهای ذکر شده تحقیق نمودند. همچنین با توجه به استانداردها [۱۲] و نیز مطالعات کوربرت و همکاران [۱۳]، به‌طور کلی نشان داده شد که زاویه پرینت ۴۵/۴۵، سرعت پرینت پایین‌تر، ضخامت لایه کمتر، و پر شونده‌گی داخلی بیشتر باعث افزایش استحکام نهایی قطعه می‌گردد. با توجه به اینکه پرینت سه‌بعدی به‌صورت لایه به لایه انجام می‌شود و هر لایه به صورت ذوب شده بر روی لایه قبلی ریخته می‌شود، یقیناً چسبندگی بین این لایه‌ها تأثیر چشمگیری در استحکام نهایی خواهد داشت که در شبیه‌سازی‌ها به آن توجه نشده است، لذا در مطالعه حاضر این موضوع مهم مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

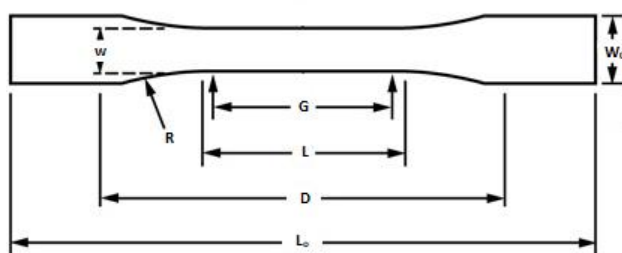
در این پژوهش اثر چسبندگی بین لایه‌ها در عمر خستگی قطعات ساخته شده به روش پرینت سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا اثر چسبندگی بین لایه‌ای در قطعات با هندسه استاندارد آزمون کشش و آزمون خستگی مورد مطالعه قرار گرفته است. لذا در ابتدا با استفاده از بررسی‌های پیشین انجام‌شده توسط پژوهشگران مختلف در خصوص پارامترهای تأثیرگذار بر استحکام نهایی قطعات ساخته‌شده توسط پرینتر سه‌بعدی، بهترین ترکیب پارامترهای فرآیند انتخاب‌شده است. سپس با توجه به این پارامترها، قطعات استاندارد لازم جهت آزمون کشش و آزمون خستگی با استفاده از پرینت سه‌بعدی تولید گردیده‌اند. سپس تأثیر چسبندگی بین لایه‌ها که تاکنون به‌صورت خیلی محدود در شبیه‌سازی‌ها لحاظ شده است، بررسی شده است. در آخرین مرحله پس از صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی، تأثیر چسبندگی بین لایه‌ها بر روی شکست و خستگی ایمپلنت بین مهره‌های کمر مطالعه گردیده است.

۲- روش تحقیق

ابتدا با استفاده از استاندارد آزمون کشش ASTM D638 قطعات مورد نیاز برای انجام آزمون کشش در نرم‌افزار سالیدورکس^۱ طراحی شده است. برای انجام آزمایش کشش، قطعات باید در دو جهت افقی و عمودی تولید شوند. هنگامی که قطعات در جهت افقی تولید می‌شوند و تحت آزمایش کشش قرار می‌گیرند، به خاطر اینکه نیروی اعمالی موازی با جهت آرایش لایه‌ها است، چسبندگی بین لایه‌ها بر استحکام قطعه تأثیر نمی‌گذارد، اما زمانی که قطعه مورد نیاز برای آزمایش کشش در جهت عمودی پرینت می‌گردد و تحت آزمایش کشش قرار می‌گیرد، نیرو عمود بر لایه‌ها خواهد بود که در این صورت نتایج به‌دست آمده مربوط به چسبندگی بین لایه‌ها خواهد بود. شماتیک شکل قطعات استاندارد پرینت شده و ابعاد مورد استفاده در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲ الف) الگوی داخلی قطعه آزمون خستگی، ب) ابعاد استاندارد آن

^۱ SolidWorks

جدول ۱ ابعاد هندسی قطعه استاندارد آزمون کشش

اندازه (mm)	پارامتر
۱۳	w- عرض بخش نازک
۵۷	L- طول بخش نازک
۱۹	W ₀ - عرض کل
۱۶۵	L ₀ - طول کل
۵۰	G- طول بخش اصلی
۱۱۵	D- فاصله بین گیره‌ها
۷۶	R- شعاع فیلت

نمونه‌های آزمون خستگی با استفاده از استاندارد ASTM E606 طراحی شده‌اند. در این مطالعه، نمونه‌های آزمایش خستگی به‌صورت افقی با تراکم پر شدن ۸۰ درصد و با الگوی پر کردن لانه زنبوری تولید شده‌اند. از آنجایی که چاپگر سه‌بعدی قادر به تولید خودکار این طرح داخلی در جهت افقی نیست، این الگو باید با توجه به‌دقت دستگاه چاپگر همان‌طور که در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود، از قبل طراحی شود.

همان‌طور که ذکر گردید مطالعات انجام شده بر روی قطعات تولید شده توسط پرینترهای سه‌بعدی به‌صورت تجربی و آزمایشگاهی بوده و مطالعاتی که به‌صورت شبیه‌سازی انجام شده است، بدون در نظر گرفتن اثر چسبندگی بین لایه‌ها است و این خود باعث خطاهای زیادی در شبیه‌سازی می‌گردد.

در این تحقیق از آنجایی که لایه‌ها بدون هیچ‌گونه چسبی به یکدیگر متصل شده‌اند، از تئوری آسیب موجود برای چسب‌ها استفاده نشده است، بلکه برای ایجاد حالت لایه‌ای قطعات ساخته شده با پرینتر سه‌بعدی، از روش پارتیشن‌بندی قطعات و اعمال خواص به‌دست آمده از آزمایش‌های کشش برای هر قطعه استفاده شده است. نتایج آزمایش کشش قطعات افقی تولید شده و نتیجه آزمایش کشش قطعات تولید شده عمودی به ترتیب بر روی لایه‌های ضخیم که نمایانگر لایه‌های اصلی و لایه‌های بسیار نازک است که نشان‌دهنده چسبندگی بین لایه‌ها است، اعمال شده است. با توجه به مطالعه آدیکاری [۱۴]، نظریه‌های شکستی که می‌توانند در شکست مواد کامپوزیتی استفاده شوند، از جمله معیارهای تسای-هیل^۱، مالمیستر^۲، نوریس^۳ و مکینتون^۴، تسایوو^۵ به دلیل تفاوت‌های زیاد در نتایج، در این مطالعه قابل استفاده نیستند. بهترین راه برای استفاده از آن به‌عنوان مدل آسیب و جلوگیری از پیچیدگی کار، رایج‌ترین شکل آسیب برای مواد شکل‌پذیر است که با ایجاد تغییراتی می‌توان از آن برای مواد شکننده نیز استفاده کرد.

چگالی جرمی مواد استفاده شده در آزمایش توسط شرکت تولید کننده مشخص است اما سایر کمیت‌های فیزیکی نظیر مدول یانگ و نسبت پواسون خیلی مشخص نمی‌باشند. لذا در ابتدا با انجام آزمون‌های مکانیکی این مقادیر اندازه‌گیری می‌شوند. پس از انجام موارد فوق یکی از مهم‌ترین قسمت‌ها انتخاب تئوری شکست است که با توجه به توضیحات قبلی از تئوری آسیب مواد شکل‌پذیر استفاده می‌شود که در آن دو نکته بسیار مهم وجود دارد. نکته اول، تعیین مقدار درجه نسبی تنش هیدرو استاتیک به تنش معادل فون میسر است [۱۱] که به‌صورت رابطه زیر می‌باشند:

$$T.F. = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} = \frac{\left(\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}\right)}{\sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}{2}}} \quad (1)$$

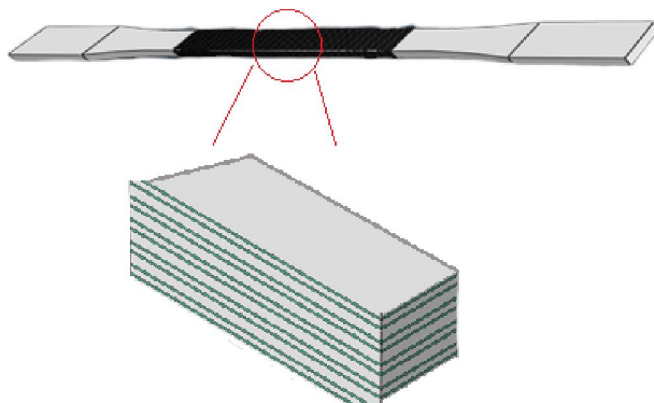
از آنجایی که در تحقیق حاضر حالت تنش به‌صورت تک‌محوری است، بنابراین تنها مقدار تنش σ_{11} وجود خواهد داشت که با قرار دادن در رابطه ۱، سه محوری تنش ۰/۳۳ به دست می‌آید.

¹ Tsai-Hill
² Malmister
³ Norris
⁴ McKinnon
⁵ Tsayovo

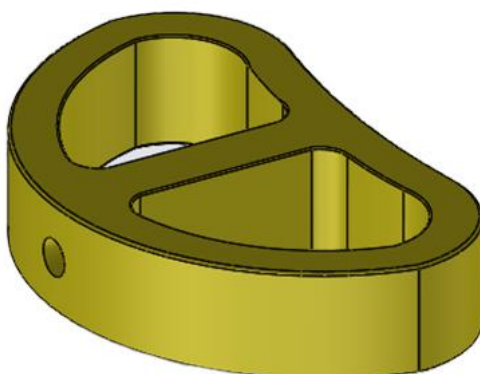
مورد دوم تعیین میزان آسیب^۱ است که یکی از مهم‌ترین مواردی است که باعث می‌شود این نظریه برای شبیه‌سازی مواد نسبتاً شکننده مورد استفاده قرار گیرد. در محاسبه این کمیت، جابجایی در هنگام شکست باید مشخص شود، که به صوت تفاوت بین کرنش در حداکثر تنش و کرنش در هنگام شکستن نمونه، ضرب در طول مشخصه تعیین می‌گردد.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، برای بررسی اثر چسبندگی بین لایه‌ها، قطعات پارتیشن‌بندی شده و لایه‌های بسیار نازکی به ضخامت ۰/۰۲ میلی‌متر که به رنگ سبز نشان داده شده است، برای در نظر گرفتن اثر چسبندگی بین لایه‌ها در شبیه‌سازی ایجاد می‌شود.

در آخرین مرحله این پژوهش قطعه ایمپلنت بین مهره‌های ستون فقرات شبیه‌سازی می‌گردد. از آنجایی که این نوع ایمپلنت‌ها در بین مهره‌های کمر قرار می‌گیرند و تحت بارهای کششی و فشاری و خمشی قرار گرفته و نیز انواع مختلفی دارند، لذا برای شبیه‌سازی آن از مدل مورد استفاده توسط الن پرواگی و همکاران [۱۶] استفاده شده است. در این تحقیق که یکی از محدود تحقیقات موجود است، شکل ایمپلنت به صورت یک ساختار دو حفره‌ای است که می‌تواند حمایت کافی از بافت استخوان را جهت همجوشی بین مهره‌ها انجام دهد. در شکل ۴ تصویر ایمپلنت مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۳ پارتیشن‌بندی قطعه و نحوه اعمال خواص چسبندگی بین لایه‌ای



شکل ۴ شماتیک ایمپلنت بین مهره‌های پایین کمر مورد مطالعه

دو حفره‌ی موجود در این ایمپلنت که ۳۶ درصد از حجم کل را در برمی‌گیرد، جهت حمایت از بافت استخوان برای فرآیند همجوشی ایجاد گردیده است. نیروهای اعمالی با توجه به مطالعات عددی بر روی نیروهای وارده بر بخش‌های کمری ستون فقرات که توسط نوایی و همکاران [۱۷] مطالعه گردیده است انتخاب شده است.

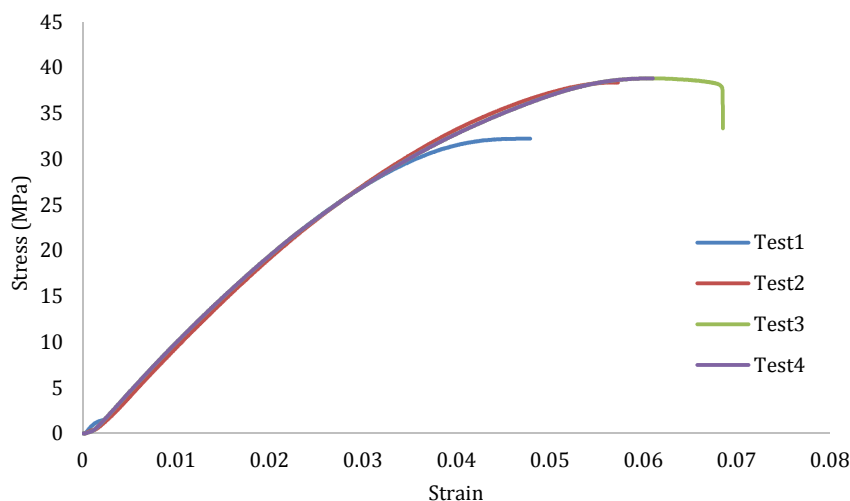
¹ Damage Evolution

این نیروها شامل فشار ۲ مگاپاسکال بر سطح بالای قطعه و نیز گشتاور خمشی که بر نقطه‌ای بر وسط سطح بالای قطعه وارد می‌گردد است. با اعمال این گشتاور به‌صورت تناوبی، نقاط تحت کشش و فشار قرار می‌گیرند تا حالت خم شدن مشخص و اعمال گشتاور خمشی بر ایمپلنت شبیه‌سازی شود.

۳- نتایج و بحث

مهمترین پارامترهایی که بر روی عمر-خستگی قطعات ساخته شده توسط پرینتر سه‌بعدی تأثیر می‌گذارند عبارت هستند از ضخامت لایه، ضخامت نازل، زاویه پرینت، سرعت پرینت، میزان پر بودن قطعه و شکل داخلی که در این مطالعه با توجه به بررسی مطالعات قبلی و نیز دقت دستگاه پرینتر در اختیار، بهترین ترکیب این پارامترها به صورت ضخامت لایه ۳ / ۰، ضخامت نازل ۴ / زاویه پرینت ۴۵ - / ۴۵، سرعت پرینت ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه، میزان پر بودن قطعه ۸۰ درصد انتخاب شد و شکل داخلی به صورت لانه زنبوری انتخاب گردید.

نمودار تنش- کرنش به‌دست آمده از آزمایش کشش ساده یکی از قطعات که به‌صورت افقی چاپ شده است، در شکل ۵ برای چند بار انجام آزمایش نشان داده شده است. با توجه به تکرارپذیری خوبی که مشاهده می‌گردد، از این داده‌ها برای استفاده در مرحله شبیه‌سازی استفاده می‌شود.



شکل ۵ نمودار تنش- کرنش آزمون کشش قطعه پرینت شده به‌صورت افقی برای چند بار آزمایش

با توجه به شکل ۵ که تکرارپذیری قابل‌قبول آزمون‌ها را نشان می‌دهد، می‌توان از آن‌ها در شبیه‌سازی برای یافتن یک مدل شبیه‌سازی مناسب استفاده کرد. جدول ۲ و جدول ۳ مقادیر به‌دست‌آمده از نمودار تنش-کرنش آزمایش کشش قطعه چاپ شده افقی را نشان می‌دهند که می‌تواند در شبیه‌سازی به‌عنوان خواص مواد استفاده شود.

جدول ۲ تنش تسلیم و کرنش پلاستیک به‌دست‌آمده از آزمون کشش

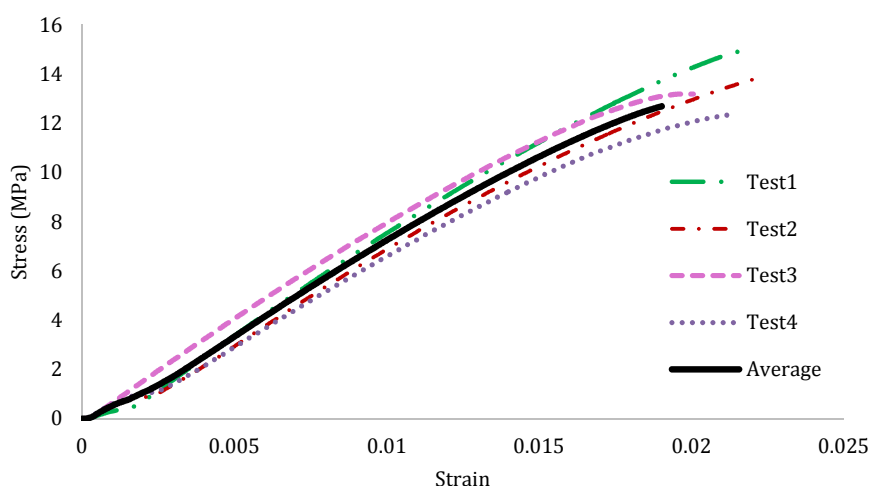
کرنش پلاستیک	تنش تسلیم (MPa)
۰	۱۹/۲
۰/۰۰۵	۲۸/۸
۰/۰۱	۳۲/۷
۰/۰۱۸	۳۶/۵
۰/۰۲۴	۳۸

جدول ۳ مقادیر به‌دست‌آمده از آزمون کشش قطعه افقی

مقادیر	پارامترها
1240 kg/m^3	چگالی
10^9 Pa	مدول یانگ
۰/۳۵	ضریب پواسون
۰/۰۳۴	کرنش شکست
$8/3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$	نرخ کرنش
$2 \times 10^{-5} \text{ mm}$	جابجایی لحظه شکست

در مرحله بعدی، قطعات ساخته شده به‌صورت عمودی باید تحت آزمایش کشش قرار گیرند. محققان خاطر نشان کرده‌اند که قطعات ساخته شده در جهت عمودی بسیار کمتر از قطعات ساخته شده در جهت افقی استحکام دارند. دلیل اصلی استحکام کمتر قطعات ساخته شده در جهت عمودی در مقایسه با قطعات ساخته شده در جهت افقی این است که وقتی قطعات ساخته شده در جهت عمودی تحت آزمایش کشش قرار می‌گیرند، نیروی عمود بر جهت لایه‌ها اعمال می‌شود که در واقع نشان دهنده استحکام کمتر چسبندگی بین لایه‌ها به نسبت قطعه اصلی است.

در این مرحله نیز نمودار تنش کرنش به‌دست آمده از آزمون کشش قطعه ساخته شده به‌صورت افقی و برای چند آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ نمودار تنش-کرنش آزمون کشش قطعه پرینت شده به‌صورت عمودی و بررسی تکرارپذیری آزمون‌ها

جدول ۴ تنش تسلیم و کرنش پلاستیک به‌دست‌آمده از آزمون کشش

تنش تسلیم (MPa)	کرنش پلاستیک
۶/۵	۰
۸	۰/۰۰۱۵
۱۰	۰/۰۰۲۵
۱۲	۰/۰۰۴
۱۳	۰/۰۰۶

جدول ۵ مقادیر به‌دست‌آمده از آزمون کشش قطعه عمودی

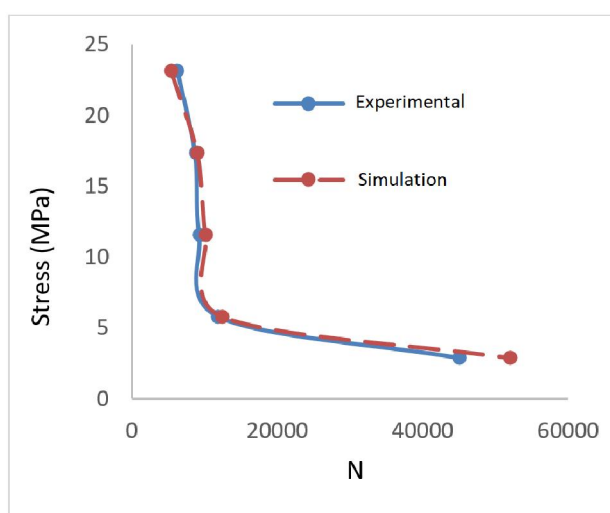
مقادیر	پارامترها
1240 kg/m^2	چگالی
$75 \times 10^7 \text{ Pa}$	مدول یانگ
۰/۳۵	ضریب پواسون
۰/۰۰۷	کرنش شکست
$8/3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$	نرخ کرنش
$2 \times 10^{-5} \text{ mm}$	جابجایی لحظه شکست

در آخرین مرحله آزمون آزمایشگاهی، قطعات چاپ شده برای آزمون خستگی باید تحت آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای قرار گیرند. نتایج تجربی حاصل از آزمون خستگی در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶ نتایج تجربی تنش اعمال شده و عمر خستگی قطعات

قطعه	نیرو (Kg)	تنش (MPa)	تعداد سیکل خستگی
۱*	۲۰	۶۰/۴	۱۱
۲	۸	۲۳/۱	۶۲۳۴
۳	۶	۱۷/۳	۸۶۵۲
۴	۴	۱۱/۵	۹۲۱۳
۵	۲	۵/۸	۱۱۹۷۰
۶	۱	۲/۹	۴۵۱۲۶

در شکل ۷ نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده است که دقت قابل قبولی را می‌توان مشاهده نمود. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نمودارهای تنش-عمر مربوط به نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های آزمون خستگی به‌طور منطقی به هم نزدیک هستند. تفاوت‌های موجود در این نمودارها شامل موارد زیادی از جمله خطای چاپگر سه‌بعدی، خطای دستگاه آزمون کشش برای استخراج داده‌های موردنیاز برای استفاده از آن به‌عنوان خواص مواد، خطای دستگاه آزمون خستگی چهار نقطه و خطای انسانی است.



شکل ۷ مقایسه نمودار تنش-عمر به‌دست‌آمده از آزمون آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

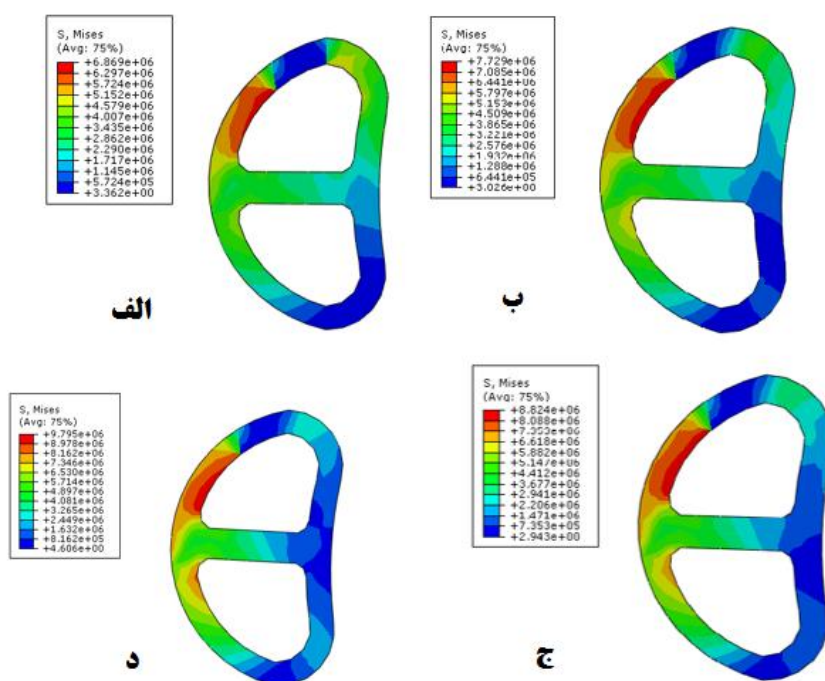
جدول ۷ شبیه‌سازی آزمون خستگی با تنش‌های مشابه جدول ۶

قطعه	نیرو (Kg)	تنش (MPa)	تعداد سیکل خستگی
۱*	۲۰	۶۰/۴	۲۶
۲	۸	۲۳/۱	۵۳۷۶
۳	۶	۱۷/۳	۸۹۵۴
۴	۴	۱۱/۵	۱۰۱۲۱
۵	۲	۵/۸	۱۲۵۰۰
۶	۱	۲/۹	۵۲۰۰۰

همان‌طور که مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد، مدل پیشنهادی دقت قابل قبولی در پیش‌بینی عمر خستگی قطعات استاندارد دارد. در این مرحله شبیه‌سازی و پیش‌بینی عمر خستگی ایمپلنت بین مهره‌های ستون فقرات با استفاده از مدل پیشنهادی انجام خواهد شد.

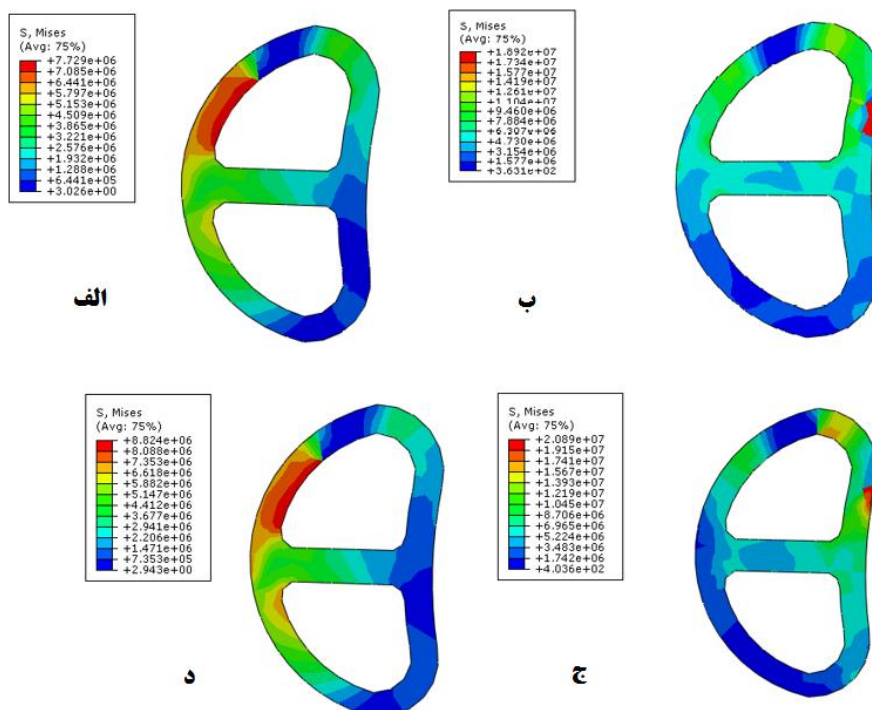
آستانه تحمل درد در افراد مختلف بنا بر شرایط و حالت جسمانی آن‌ها متفاوت است، اما در مطالعه‌ای که شوابای وانگ و همکاران بر روی چند شخص با سلامت جسمانی و نیز وزن میانگین ۷۰ کیلوگرم انجام دادند به این نتیجه رسیدند که بیشترین فشار بر روی مهره L3-4 وار می‌گردد که برابر با مقدار ۴/۲ مگاپاسکال است. بدیهی است که با افزایش وزن شخص و نیز امکان حمل بار توسط شخص، مقدار گشتاور اعمالی و نیز بار فشاری بر ایمپلنت افزایش خواهد یافت که به همین منظور در این مطالعه با توجه به مطالعه الینا پروواگی و همکاران که بر روی موردی که گشتاور خمشی ۷/۵ مگاپاسکال بر ایمپلنت وارد می‌گردد و نیز بار ۱۰۰۰ نیوتن بر سطح بالایی ایمپلنت با توجه به وزن شخص اعمال می‌گردد، مقادیر مختلف گشتاور خمشی تا لحظه رسیدن به مقدار مورد مطالعه آن‌ها بررسی می‌گردد.

برای این کار ابتدا گشتاورهای خمشی ۷/۵ نیوتن متر، ۶ نیوتن متر، ۴ نیوتن متر و ۲ نیوتن متر همراه با ۲ مگاپاسکال فشار بر ایمپلنت اعمال می‌گردد تا بتوان کانتورهای تنش آن‌ها بر بخش پایینی ایمپلنت که بیشترین تنش را تحمل می‌کند مشاهده (شکل ۸) نمود.



شکل ۸ کانتور تنش در اثر اعمال فشار ۲ مگاپاسکال همراه با اعمال گشتاور (الف) ۲ نیوتن متر (ب) ۴ نیوتن متر (ج) ۶ نیوتن متر (د) ۷/۵ نیوتن متر

با توجه به بررسی‌های انجام شده تا به این مرحله می‌توان ایمپلنت را تحت بارگذاری ۲ مگاپاسکال همراه با اعمال گشتاور خمشی متناوب قرارداد تا بتوان شکست خستگی این نوع ایمپلنت را شبیه‌سازی نمود.

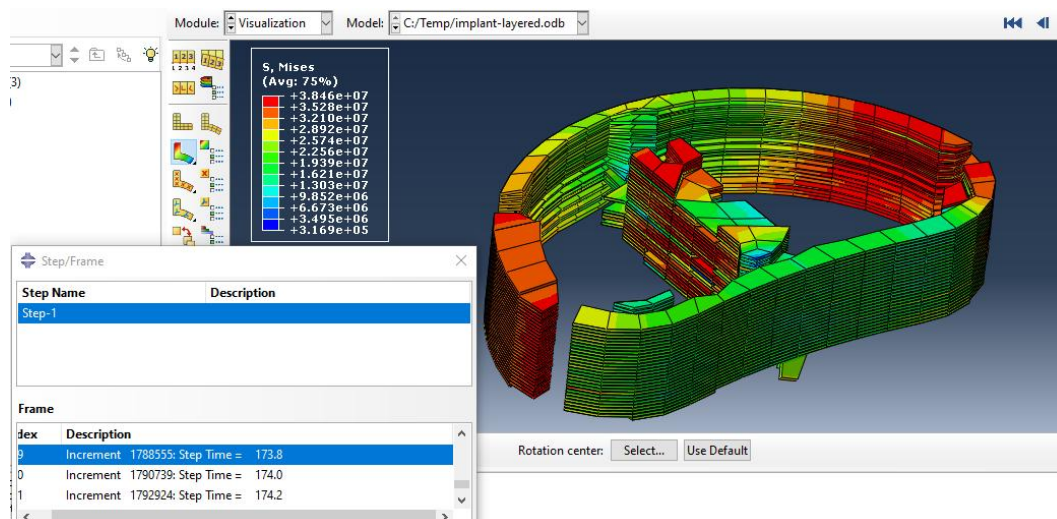


شکل ۹ مقایسه کانتور تنش در قطعه ایمپلنت تحت بارگذاری متناوب فشاری همراه با اعمال گشتاور خمشی (الف) ۴ نیوتن متر در یک سیکل (ب) ۴ نیوتن متر متناوب تا لحظه شکست، (ج) ۶ نیوتن متر تنها یک سیکل (د) ۶ نیوتن متر متناوب تا لحظه شکست

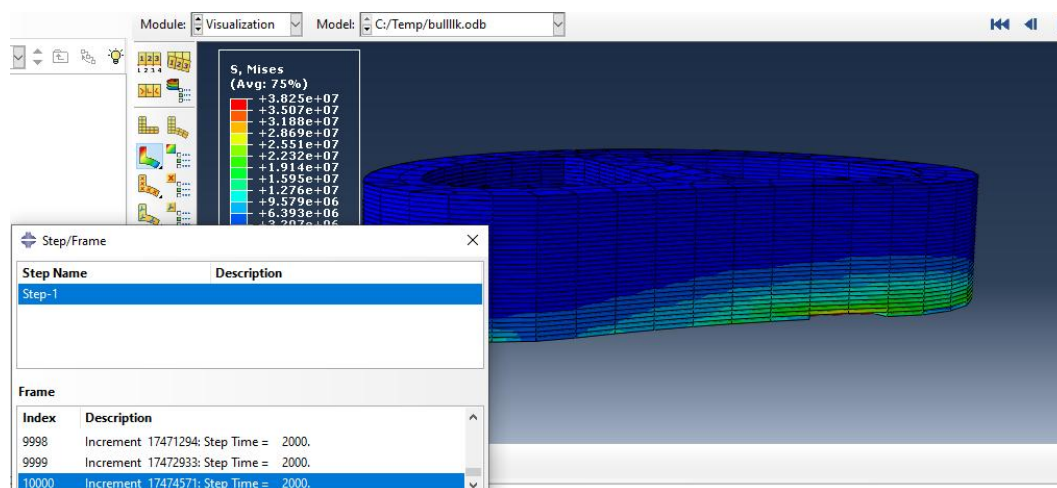
قبل از بررسی نهایی شکست خستگی و عمر قطعه ایمپلنت می‌توان این نوع ایمپلنت را در حالتی که بارگذاری به صورت فشار همراه با اعمال گشتاور خمشی در یک مرحله و بارگذاری به صورت فشار همراه با اعمال گشتاور خمشی متناوب را بررسی نمود. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد، اعمال گشتاور خمشی متناوب باعث افزایش بسیار زیاد تنش بر ایمپلنت می‌گردد که دلیل اصلی افزایش زیاد مقدار گشتاور رخ دادن شکست و حذف شدن المان‌هایی در بخش‌هایی از قطعه است که به‌عنوان چسبندگی بین لایه‌ها تعریف شده‌اند. که این روند پس از تعداد دور مشخصی باعث شکست خستگی کامل ایمپلنت می‌گردد. کانتورهای تنش در حالت اعمال گشتاور خمشی متناوب مربوط به لحظه قبل از شکست خستگی است.

در این تحقیق با توجه به روش به‌دست آمده جهت شبیه‌سازی و نیز تأثیر چسبندگی بین لایه‌ها در شبیه‌سازی شکست خستگی قطعات ساخته شده توسط پرینتر سه‌بعدی، می‌توان شبیه‌سازی شکست خستگی ایمپلنت بین مهره‌های کمر را جهت پیش‌بینی شکست خستگی و به دست آوردن نمودار تنش-عمر این نوع ایمپلنت در بارگذاری‌های مختلف انجام داد.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، هنگامی که چسبندگی بین لایه‌ها در شبیه‌سازی ایمپلنت بین مهره‌های کمر لحاظ گردد، این قطعه پس از ۷۵۰ سیکل دچار شکست خستگی می‌گردد و نیز همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد، در صورت در نظر نگرفتن چسبندگی بین لایه‌ها، این قطعه پس از ۱۰۰۰۰ سیکل شروع به شکست خستگی می‌کند.



شکل ۱۰ شبیه‌سازی ایمپلنت بین مهره‌های کمر با در نظر گرفتن اثر چسبندگی بین لایه‌ها

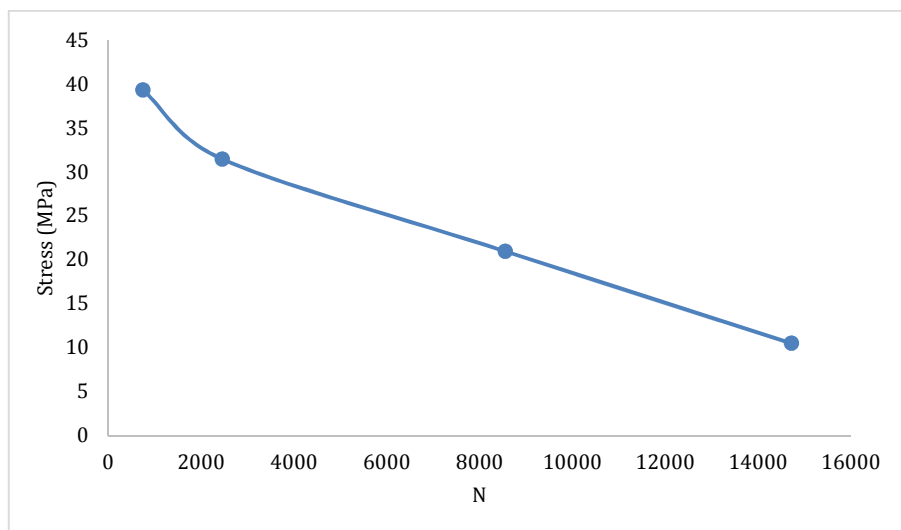


شکل ۱۱ شبیه‌سازی ایمپلنت بین مهره‌های کمر بدون در نظر گرفتن اثر چسبندگی بین لایه‌ها

پس از بررسی تمام این موارد و با توجه به تأثیر چسبندگی بین لایه‌ها در شبیه‌سازی، در آخرین مرحله با توجه به جدول ۸ که نشان‌دهنده چندین نمونه گشتاور خمشی اعمال شده بر ایمپلنت است می‌توان نمودار تنش-عمر ایمپلنت را همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد به دست آورد.

جدول ۸ مقادیر تنش اعمالی با توجه به گشتاور خمشی و عمر ایمپلنت

شماره نمونه	گشتاور خمشی اعمالی (N.M)	تنش اعمالی (Pa)	تعداد دور شکست خستگی
۱	۷/۵	۳۹۳۰۷۵	۷۵۰
۲	۶	۳۱۴۴۶۰	۲۴۶۱
۳	۴	۲۰۹۶۴۰	۸۵۵۶
۴	۲	۱۰۴۸۲۰	۱۴۷۲۳



شکل ۱۲ نمودار رفتار عمر خستگی تنش-عمر ایمپلنت کمر

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا نمونه‌های استاندارد آزمون کشش و آزمون خستگی با استفاده از روش FDM ساخته شده و بر اساس داده‌های استخراج شده تجربی یک مدل پیش‌بینی عمر خستگی قطعات توسعه داده شد. مدل استخراج شده قادر است با دقت بسیار خوبی عمر خستگی قطعات را با در نظر گرفتن چسبندگی بین لایه‌ای تخمین بزند. با استفاده از مدل پیشنهادی عمر خستگی ایمپلنت بین مهره‌های ستون فقرات انسان مورد مطالعه قرار گرفت و نشان داده شد که چسبندگی بین لایه‌ای اثر بسیار زیادی روی عمر خستگی دارد. از این رو استفاده از روش پرینت سه‌بعدی برای ساخت این مهره‌ها باید با دقت بیشتری صورت بگیرد. به‌عنوان مثال عمر خستگی این ایمپلنت با در نظر گرفتن چسبندگی بین لایه‌ای از ۱۰ هزار سیکل به ۷۵۰ سیکل کاهش پیدا می‌کند.

References

- [1] Saraeian P, Shakouri E. Evaluation of rotary fatigue bending and creep performance in PLA components during fused deposition modeling. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021;8(9):60-69. [In Persian]
- [2] Akhouni B, Khosravian E, Modanloo V. Deposition of Continuous Glass Fibers on a Curved Surface by 3D Printer Based on Fused Filament Fabrication Technology. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 2024. doi: 10.22034/ijme.2024.429126.1885 [In Persian]
- [3] Hooshmand MJ, Mansour S. Investigating the effect of build orientation on surface roughness and build time using Fused Deposition Modelling. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 2021;7(12):37-53. [In Persian]
- [4] Chang Z, Chen Y, Schlangen E, Šavija B. A review of methods on buildability quantification of extrusion-based 3D concrete printing: From analytical modelling to numerical simulation. *Developments in the Built Environment*; 2023;16:100241. doi: 10.1016/j.dibe.2023.100241
- [5] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KT, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 2018;143:172-196. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
- [6] Bekas DG, Hou Y, Liu Y, Panesar A. 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review, *Composites Part B: Engineering*, 2019;179:107540, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107540
- [7] Yuan L, Ding S, Wen C. Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review, *Bioactive Materials*, 2019;4:56-70. doi: 10.1016/j.bioactmat.2018.12.003
- [8] Ziemian C, Sharma M, Ziemian S. Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling. *Mechanical engineering*. 2012 Apr 11;23:159-80. doi: 10.5772/34233
- [9] Gibson I, Rosen DW, Stucker B, Gibson I, Rosen DW, Stucker B. Photopolymerization processes. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 2010:78-119. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3

- [10] Ziemian S, Okwara M, Ziemian CW. Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene. *Rapid Prototyping Journal*, 2015;21(3):270-278. doi: [10.1108/RPJ-09-2013-0086](https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2013-0086)
- [11] Ziemian CW, Ziemian RD, Haile KV. Characterization of stiffness degradation caused by fatigue damage of additive manufactured parts. *Materials & Design*. 2016 Nov 5;109:209-18. doi: [10.1016/j.matdes.2016.07.080](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.080)
- [12] ASTM International. ASTM D638-14. Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM International; 2015.
- [13] Corbett T, Kok T, Lee C, Smith ST, Villarraga H, Tarbutton JA. Identification of mechanical and fatigue characteristics of polymers fabricated by additive manufacturing process. in ASPE Spring Topical Meeting. 2014;57:186:9.
- [14] Adhikari B. Strength and failure mechanisms in 3D printed parts [dissertation]. Aalto University School of Engineering; 2016.
- [15] Landes JD, McCabe DE, Boulet JA, editors. Fracture mechanics: twenty-fourth volume. ASTM International; 1994.
- [16] Provaggi E, Capelli C, Rahmani B, Burriesci G, Kalaskar DM. 3D printing assisted finite element analysis for optimising the manufacturing parameters of a lumbar fusion cage. *Materials & Design*, 2019;163:107540. doi: [10.1016/j.matdes.2018.107540](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107540)
- [17] Noailly J, Lacroix D, Planell JA. Finite element study of a novel intervertebral disc substitute. *Spine*, 2005 Oct 15;30(20):2257-64. doi: [10.1097/01.brs.0000182319.81795.72](https://doi.org/10.1097/01.brs.0000182319.81795.72)