

بررسی تجربی و عددی رفتار خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید تولیدشده به روش ساخت افزایشی

محمد رضا هاشمی، حامد ادیبی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۰۸
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۲۴

کلمات کلیدی:

الگوریتم تاگوچی
مقاومت خستگی
روش تنش-عمر
تحلیل المان محدود
لایه نشانی ذوبی

خلاصه: ساخت افزایشی، شامل روش‌های نوظهوری می‌باشد که با کاهش در زمان و هزینه تولید و همچنین توانایی تولید قطعات با هندسه پیچیده، امروزه کاربرد وسیعی در صنایع گوناگون پیدا کرده است. فرآیند لایه نشانی ذوبی یکی از محبوب‌ترین روش‌های ساخت افزایشی می‌باشد، که تاکنون تحقیقات فراوانی با هدف مدلسازی و بهبود رفتار مکانیکی قطعات تولیدشده توسط این روش، انجام شده است. هدف از این پژوهش، انجام مطالعه تجربی به منظور مدلسازی و بررسی تاثیر متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی بر رفتار خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید، به همراه توسعه ابزار عددی برای پیش‌بینی این رفتار می‌باشد. در این مقاله جهت انجام مطالعه تجربی از الگوریتم تاگوچی به منظور طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. با انجام آزمایش خستگی بر روی نمونه‌ها و تحلیل نتایج بدست آمده از آن، مقدار بهینه متغیرهای مورد بررسی فرآیند و همچنین میزان تاثیر آنها تعیین گردید که متغیرهای چگالی سطح، دمای نازل و ضخامت لایه به ترتیب بیشترین میزان تاثیر را بر روی عمر خستگی دارند. شبیه‌سازی المان محدود با در نظر گیری مفروضات معین صورت پذیرفته و نتایج آن با مقادیر آزمون خستگی نمونه بهینه‌سازی شده ارزیابی شده است. نتایج مدلسازی تجربی و شبیه‌سازی المان محدود نشان می‌دهد، مدل‌های ارائه شده به ترتیب با ضریب رگرسیون ۹۶٪ و ۹۸٪ رفتار خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید را پیش‌بینی می‌کنند.

۱- مقدمه

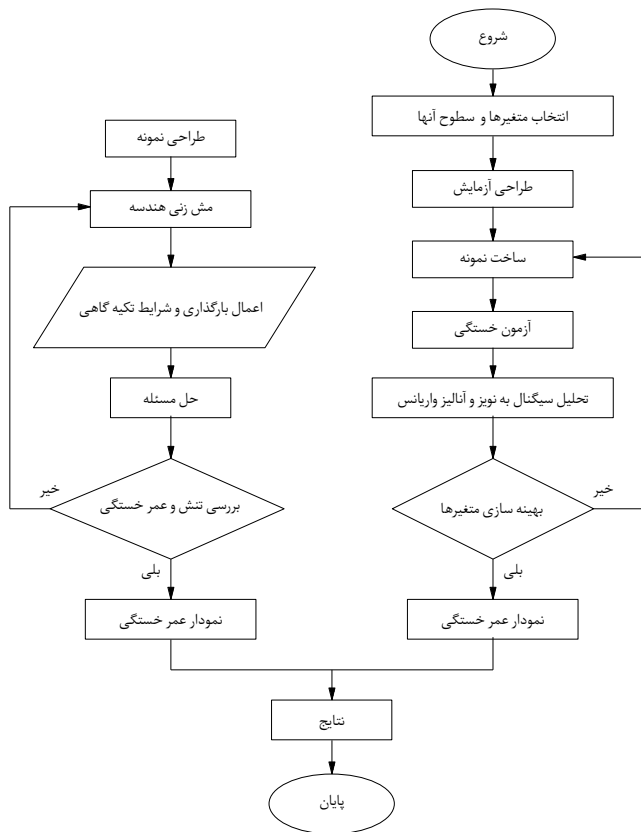
بر رفتار مکانیکی می‌گردد. دلیل دوم را می‌توان وجود نیروها و تنش‌های باقی‌مانده در قطعه دانست، که ناشی از حرارت میان لایه‌ها و نحوه قراردادن لایه‌ها بر روی یکدیگر می‌باشد [۳، ۴]. وجود این چالش‌ها سبب انجام مطالعاتی به منظور تعیین اثر متغیرهای فرآیند بر رفتار مکانیکی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی در قطعات لایه‌نشانی شده، گردیده است. گورالا و همکاران [۵] به منظور تعیین رفتار مکانیکی قطعات ساخته شده به روش لایه نشانی، اقدام به بررسی تاثیر متغیرهای فرآیند بر رفتار مکانیکی کردند. آنها با در نظر گیری متغیر جهت لایه‌نشانی قطعه روی میز و با هدف رسیدن به بیشترین مقدار مقاومت مکانیکی، گزارش دادند جهت لایه‌نشانی باید در راستای بارگذاری انتخاب شود. در سال ۲۰۱۲، سود و همکاران [۶] با مطالعه بر روی تاثیر ضخامت لایه بر رفتار مکانیکی، گزارش دادند که با کاهش میزان ضخامت لایه، انتقال حرارت میان لایه‌ها افزایش پیدا می‌کند. این مسئله باعث بهبود کیفیت اتصال میان لایه‌ها شده و به افزایش استحکام مکانیکی قطعه منجر می‌شود. محققان دیگری نیز به مطالعه بر روی متغیر ضخامت

ساخت افزایشی^۱ فناوری نوظهوری است، که امروزه کاربرد وسیعی در بخش‌های مختلف صنعتی پیدا کرده است. اصطلاح ساخت افزایشی، فرآیندهایی را در بر می‌گیرد که در تولید قطعات، دارای روشی مشترک می‌باشند. اساساً نقطه مشترک این فرآیندها روشی است که با آن، ساخت قطعات به صورت لایه به لایه انجام می‌شود [۱]. روش لایه نشانی ذوبی^۲ یکی از فرآیندهای ساخت افزایشی می‌باشد که به دلیل توانایی تولید قطعات با هندسه پیچیده، کاهش در زمان و هزینه تولید و استفاده طیف وسیعی از انواع مواد مصرفی در ساخت قطعات، گسترش فراوانی در صنایع مختلف پیدا کرده است [۲]. یکی از چالش‌های موجود در روش لایه نشانی ذوبی، تعیین رفتار مکانیکی قطعات تولیدشده توسط این روش می‌باشد. این مسئله به دو علت حائز اهمیت می‌باشد، دلیل اول تعداد زیاد متغیرهای موثر فرآیند می‌باشد، که این موضوع سبب پیچیدگی در بررسی تاثیر این متغیرها

- 1 Additive Manufacturing (AM)
- 2 Fused Deposition Modelling (FDM)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hadibi@aut.ac.ir





شکل ۱. فلوجارت انجام تحقیق

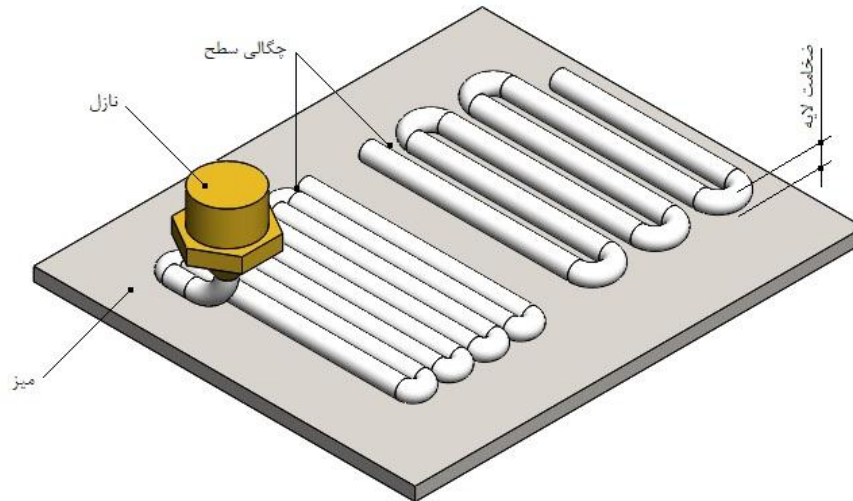
Fig. 1. Research process flow chart

رفتار خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید، به همراه توسعه ابزار عددی برای پیش‌بینی این رفتار پرداخته شده است. به این منظور چهار متغیر ضخامت لایه، دمای نازل، دمای میز و چگالی سطح جهت تعیین میزان تاثیر متغیرهای فرآیند بر عمر خستگی انتخاب شدند. با استفاده از الگوریتم تاگوچی و در نظرگیری سه سطح برای متغیرهای مورد بررسی، طراحی آزمایش صورت پذیرفت و با استفاده از آرایه‌های پیشنهاد شده، آزمون خستگی انجام شد. با استفاده از تحلیل واریانس و نسبت سیگنال به نویز، میزان تاثیر و مقدار بهینه متغیرهای فرآیند تعیین گردید. پس از آن با استفاده از برازش به روش حداقل مربعات بر روی نتایج خستگی نمونه ساخته شده با مقدار بهینه متغیرهای فرآیند، مدل تجربی جهت پیش‌بینی رفتار خستگی ارائه گردید. همچنین جهت توسعه ابزار عددی در پیش‌بینی رفتار قطعات تحت بارگذاری دینامیکی، شبیه‌سازی المان محدود صورت پذیرفت. در این شبیه‌سازی که با در نظرگیری مفروضات معین صورت پذیرفت، نتایج مدل‌سازی المان محدود با نتایج مطالعه تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت.

لایه پرداختند. آنها گزارش دادند که کاهش ضخامت لایه‌ها، سبب بهبود کیفیت سطح می‌شود که این موضوع باعث افزایش زمان و هزینه ساخت قطعات می‌شود [۷، ۸]. در سال ۲۰۱۲، وال و همکاران [۹] به مطالعه در مورد تاثیر متغیرهای چگالی سطح و فاصله هوایی بر رفتار مکانیکی قطعات لایه‌نشانی شده پرداختند. در این مطالعه گزارش شد که با افزایش میزان چگالی سطح، مقدار متغیر فاصله هوایی کاهش پیدا می‌کند که این مسئله باعث افزایش مقدار سفتی قطعات می‌شود.

علی‌رغم اهمیت بررسی رفتار مکانیکی قطعات ساخته شده به روش ساخت افزایشی تحت بارگذاری دینامیکی، مطالعات کمی در این زمینه انجام شده است. در سال ۲۰۱۶، افروز و همکاران [۱۰] به بررسی جهت قرارگیری قطعه بر روی میز و اثر آن بر مقاومت مکانیکی و عمر خستگی قطعات لایه‌نشانی شده پرداختند. این محققان با ساخت قطعات تحت زاویه ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه و قراردادن این قطعات تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی، گزارش دادند که با افزایش زاویه قرارگیری قطعه روی میز، میزان مقاومت مکانیکی قطعات کاهش می‌یابد. اما در بارگذاری دینامیکی، قطعات ساخته شده با زاویه ۴۵ درجه بیشترین عمر و مقاومت در برابر خستگی را در مقایسه با سایر قطعات دارند. در مطالعه صورت گرفته توسط افروز و همکاران، طیف وسیعی از متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی ثابت فرض شده‌اند و اثر این متغیرها بر روی عمر و مقاومت خستگی در نظر گرفته نشده است. به همین جهت، گومز و همکاران [۱۱] در مطالعه خود به بررسی تاثیر متغیرهای چگالی سطح، قطر نازل، ارتفاع لایه و سرعت نازل بر عمر خستگی قطعات لایه‌نشانی شده تحت دو الگوی سطح لانه زنبوری و مستطیلی پرداختند. آنها با استفاده از تحلیل نسبت سیگنال به نویز و تحلیل واریانس، به ترتیب مقدار بهینه و میزان تاثیر هر متغیر را بر عمر خستگی تعیین کردند. با توجه به مطالعه‌ای که توسط سود و همکاران انجام شده است [۶]، متغیرهای موثر بر انتقال حرارت میان لایه‌ها تاثیر فراوانی بر رفتار مکانیکی قطعات دارند. از این جهت وجود برخی از این متغیرها در مطالعه انجام شده توسط گومز و همکاران در نظر گرفته نشده است. لذا با در نظرگیری این مسئله می‌توان بررسی دقیق‌تری در این زمینه انجام داد.

در این پژوهش با استفاده از نتایج مطالعات صورت گرفته، به ارائه مدل تجربی و بررسی تاثیر متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی بر



شکل ۲. متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی

Fig. 2. Fused deposition modeling process variables

۲- روش مطالعه

صورت گرفته متغیرهای ضخامت لایه، دمای نازل، میزان پرشوندگی سطح (چگالی سطح) و دمای میز بیشترین تاثیر را بر روی خواص مکانیکی قطعات لایه نشانی شده دارند [۶-۹]، لذا از این متغیرها جهت بررسی رفتار خستگی استفاده شد. شکل ۲، متغیرهای موردنظر فرآیند را نشان می دهد.

در این پژوهش به انجام مطالعه تجربی بر روی تاثیر متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی بر رفتار خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید، به همراه مدلسازی المان محدود برای پیش بینی این رفتار پرداخته شد. در بخش اول روش مطالعه تجربی و پس از آن نحوه مدلسازی المان محدود تشریح گردید. شکل ۱، فلوچارت انجام این پژوهش را نشان می دهد.

۲-۲- طراحی آزمایش

الگوریتم تاگوچی یک روش سیستماتیک و موثر را برای طراحی بهینه فراهم می کند. این الگوریتم با ساده سازی برنامه آزمایشها و ایجاد امکان مطالعه برهم کنش متغیرهای فرآیند، باعث کاهش تعداد آزمایشها و در نتیجه آن سبب کاهش در هزینه و زمان انجام آزمایشها می شود. جهت انتخاب یک آرایه متعامد مناسب برای آزمایش می بایست تمامی درجه های آزادی محاسبه شوند. تعداد درجه های آزادی یک کمیت بارزش می باشد، زیرا کمترین تعداد شرایط رفتاری را تعیین می کند [۱۲]. الگوریتم تاگوچی در این پژوهش، تعداد ۲۷ آرایه متعامد را برای بررسی اثر چهار متغیر فرآیند لایه نشانی ذوبی در سه سطح را پیشنهاد کرد. جدول ۱، متغیرهای فرآیند و مقدار سطح های انتخابی آنها را نشان می دهد. به منظور افزایش دقت در خروجی آزمایش، هر آرایه پیشنهادی سه مرتبه تکرار شد. جدول ۲، آرایه های پیشنهادی را نشان می دهد.

۲-۱- متغیرهای فرآیند

در این پژوهش از چهار متغیر جهت بررسی تاثیر متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی بر رفتار خستگی قطعات استفاده شد. در مطالعات

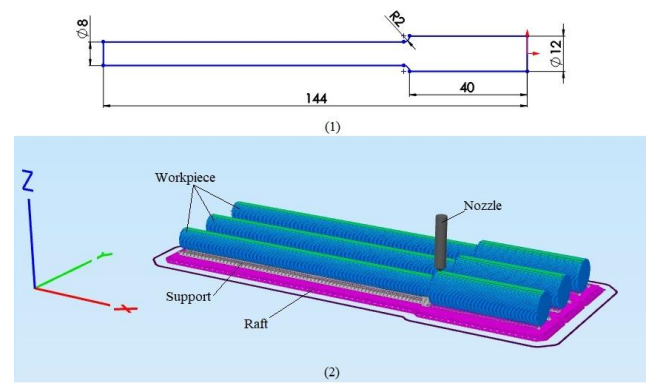
جدول ۱. متغیرهای فرآیند و سطح های آنها

Table 1. Process variables and their levels

متغیرها	نماد	واحد	سطوح		
			۱	۲	۳
ضخامت لایه	L	(mm)	۰/۱	۰/۲	۰/۳
دمای نازل	T	(°C)	۱۹۰	۱۹۵	۲۰۰
چگالی سطح	F	(%)	۲۵	۵۰	۷۵
دمای میز	B	(°C)	۶۰	۶۵	۷۰

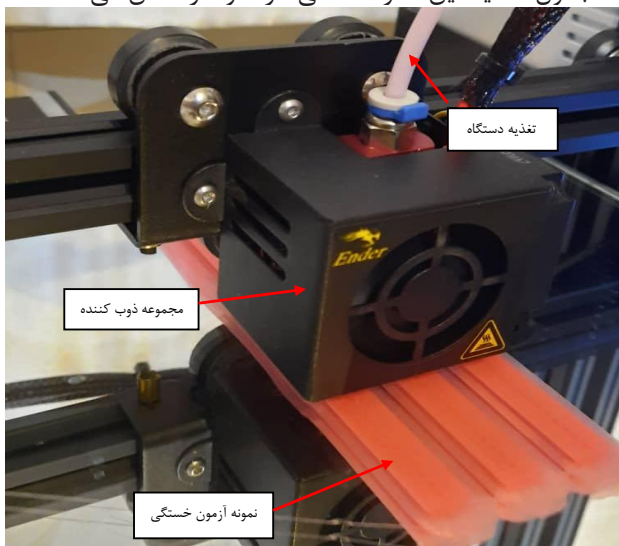
۲-۳- ساخت نمونه ها و آزمون خستگی

جهت ساخت نمونه های آزمون خستگی براساس آرایه های پیشنهادی



شکل ۳. مدلسازی، (۱) طراحی نمونه (۲) شبیه‌سازی ساخت نمونه‌ها
Fig. 3. Computer modeling (1) sample design (2) Simulation of sample construction

با استفاده از فیلامنت پلی‌لاکتیک اسید محصول شرکت یوسو^۵ نمونه‌های آزمون خستگی مطابق با دستورالعمل استاندارد^۶ ساخته شدند [۱۳، ۱۴]. شکل ۴، ساخت نمونه‌های آزمون خستگی را نشان می‌دهد. جهت انجام آزمون خستگی بر روی نمونه‌های ساخته‌شده مطابق با دستورالعمل سازنده، از دستگاه آزمون خستگی^۷ استفاده شد. شکل ۵، دستگاه آزمون خستگی را نشان می‌دهد. نمونه‌های ساخته‌شده با قرارگیری در محور دستگاه جهت انجام آزمون خستگی با سرعت دورانی ۲۸۰۰ دور بر دقیقه، گیره‌بندی شدند. جهت اعمال نیرو به انتهای نمونه، از سیستم بارگذاری مجهز به نیروسنج استفاده شد. با اعمال نیرو ۱۵ نیوتن به انتهای نمونه‌ها، آزمون خستگی انجام شد. جدول ۴ میانگین عمر خستگی هر نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۴. ساخت نمونه‌های خستگی
Fig. 4. Fatigue sample construction

جدول ۲. آرایه‌های پیشنهادی
Table 2. Suggested arrays

آرایه‌ها	ضخامت لایه	دمای نازل	چگالی سطح	دمای میز
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۲	۲
۳	۱	۱	۳	۳
۴	۱	۲	۱	۲
۵	۱	۲	۲	۳
۶	۱	۳	۱	۳
۷	۱	۳	۲	۳
۸	۱	۳	۳	۳
۹	۱	۲	۲	۲
۱۰	۲	۱	۱	۲
۱۱	۲	۱	۲	۳
۱۲	۲	۲	۱	۳
۱۳	۲	۲	۲	۳
۱۴	۲	۳	۱	۳
۱۵	۲	۳	۲	۳
۱۶	۲	۳	۳	۳
۱۷	۳	۱	۱	۳
۱۸	۳	۱	۲	۳
۱۹	۳	۱	۳	۳
۲۰	۳	۲	۱	۳
۲۱	۳	۲	۲	۳
۲۲	۳	۲	۳	۳
۲۳	۳	۳	۱	۳
۲۴	۳	۳	۲	۳
۲۵	۳	۳	۳	۳
۲۶	۳	۳	۳	۳
۲۷	۳	۳	۳	۳

روش تاگوچی، از دستگاه لایه نشانی ذوبی اندر پرو^۱ استفاده شد. جدول ۳، مشخصات فنی دستگاه لایه‌نشانی را نشان می‌دهد. در گام اول، نمونه آزمون خستگی با استفاده از نرم‌افزار مدلسازی سالیدورکس^۲ طراحی شد. پس از آن با پسوند قابل خواندن^۳ برای نرم‌افزارهای ساخت افزایشی ذخیره شد. نمونه ذخیره‌شده به عنوان ورودی نرم‌افزار سیمپلی‌فای^۴ مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها با اعمال متغیرهای موردنظر بر اساس آرایه‌های پیشنهادی تاگوچی موجود در جدول ۲، تحت فرآوری قرار گرفتند و سایر متغیرهای فرآیند ثابت در نظر گرفته شدند. از خروجی نرم‌افزار، کد مسیر پیمایش نازل جهت ساخت نمونه‌ها استخراج گردید. شکل ۳، مدلسازی نمونه آزمون خستگی را نشان می‌دهد.

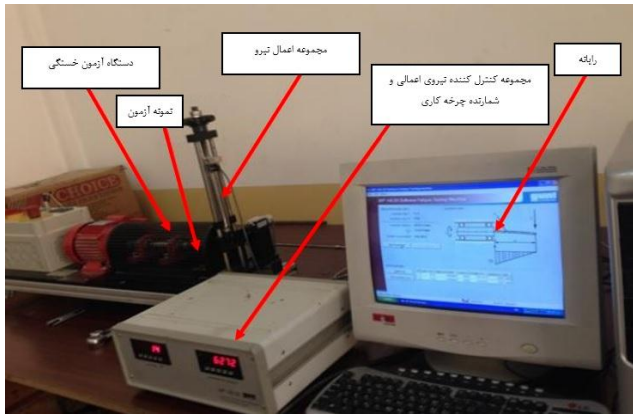
- 1 Ender 3 Pro
- 2 SolidWorks 2017
- 3 Standard Triangle Language (.Stl)
- 4 Simplify3D

- 5 Yousu Plastic Technology Co.
- 6 ASTM D7774-12
- 7 Rotating bending test machine (GUNT WP 140)

جدول ۳. مشخصات فنی دستگاه لایه نشانی ذوبی

Table 3. Technical specifications of the smelting layer (machine (FDM

متغیر	واحد	میزان دقت (یا محدوده کاری)
قطر نازل	mm	۰/۴
ابعاد فیلامنت	mm	۱/۷۵
ابعاد میز	mm × mm × mm	۲۲۰×۲۲۰×۲۵۰
رزولوشن	μm	۱۰۰-۴۰۰
حداکثر دمای اکسترودر	°C	۲۵۵
حداکثر دمای میز	°C	۱۰۰



شکل ۵. دستگاه آزمون خستگی
Fig. 5. Fatigue test machine

سطوح بهینه هر یک از متغیرها، از یک تابع زیان^۲ استفاده شد [۱۲]، [۱۵]. تابع زیان مورد استفاده از نوع بزرگتر-بهرتر^۳ در نظر گرفته شد، زیرا بیشترین مقدار عمر خستگی مدنظر می‌باشد. روابط مورد استفاده جهت تعیین نسبت سیگنال به نویز، با توجه به تابع زیان بزرگتر-بهرتر به صورت زیر می‌باشند [۱۵]:

$$L_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (1)$$

$$S/N = -10 \log L_i \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، L_i تابع زیان و یا میانگین مربعات انحرافات، n تعداد کل آزمایش‌ها، y_i خروجی هر آزمایش و S/N نسبت سیگنال به نویز می‌باشد. در هر آزمایش برای ایجاد بهترین شرایط همواره

جدول ۴. میانگین عمر خستگی نمونه‌ها

Table 4. Average fatigue life of samples

آرایه‌ها	چرخه	آرایه‌ها	چرخه	آرایه‌ها	چرخه
۱	۸۱۶/۰۶۲	۱۰	۸۳۴/۱۹۷	۱۹	۷۲۵/۳۸۹
۲	۸۸۸/۶۰۱	۱۱	۱۶۳۲/۱۲	۲۰	۵۰۷/۷۷۲
۳	۱۳۲۳/۸۳	۱۲	۳۰۸۲/۹	۲۱	۱۶۵۰/۲۶
۴	۹۹۷/۴۰۹	۱۳	۱۰۵۱/۸۱	۲۲	۱۳۴۱/۹۷
۵	۱۳۷۸/۲۴	۱۴	۲۰۴۹/۲۲	۲۳	۱۹۶۷/۶۸
۶	۲۰۱۲/۹۵	۱۵	۳۷۵۳/۸۹	۲۴	۳۷۹۰/۱۶
۷	۱۰۶۹/۹۵	۱۶	۱۰۱۵/۵۴	۲۵	۱۷۷۷/۲
۸	۱۲۳۳/۱۶	۱۷	۱۶۱۳/۹۹	۲۶	۴۲۶۱/۶۶
۹	۳۶۶۳/۲۱	۱۸	۳۲۸۲/۳۸	۲۷	۶۲۵۶/۴۸

- Loss function
- Larger is better

- Signal to noise ratio

جدول ۵. تحلیل واریانس

Table 5. Analysis of variance

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مجموع مربعات	F	P	میزان تاثیر (%)
ضخامت لایه	۲	۴۷/۴۲۵	۲۳/۷۱۲	۲/۵	۰/۱۱۰	۷/۷۰۸۹
دمای نازل	۲	۱۷۳/۳۱۴	۸۶/۶۵۷	۹/۱۴	۰/۰۰۲	۲۸/۱۸۳۷
چگالی سطح	۲	۳۷۲/۳۳۷	۱۸۶/۱۶۸	۱۹/۶۳	۰/۰۰۰	۶۰/۵۳۰۶
دمای میز	۲	۳/۰۶۶	۱/۵۳۳	۰/۱۶	۰/۸۵۲	۰/۴۹۳۳
خطا	۱۸	۱۷۰/۷۴۴	۹/۴۸۶			۳/۰۸۳۵
کل	۲۶	۷۶۶/۸۸۵				۱۰۰

افزایش سیالیت ماده مصرفی و روان شدن آن بر روی سطح می شود که این موضوع سبب کاهش استحکام اتصال و کاهش دقت ابعادی قطعه می شود. در متغیر چگالی سطح (میزان پرشوندگی سطح) با افزایش چگالی، میزان فضاهای خالی در قطعه کاهش پیدا کرده است. این امر موجب اتصال بهتر رشته ها و در نتیجه افزایش نسبت سیگنال به نویز می شود. از آنجایی که انتخاب بیشترین مقدار نسبت سیگنال به نویز در هر متغیر سبب بهبود عمر خستگی قطعات می شود، می توان این مقدار را سطح بهینه هر متغیر دانست. لذا حالت بهینه متغیرهای مورد بررسی فرآیند (L۳F۳T۳B۳) می باشد.

۲-۵- تعیین میزان تاثیر متغیرهای فرآیند

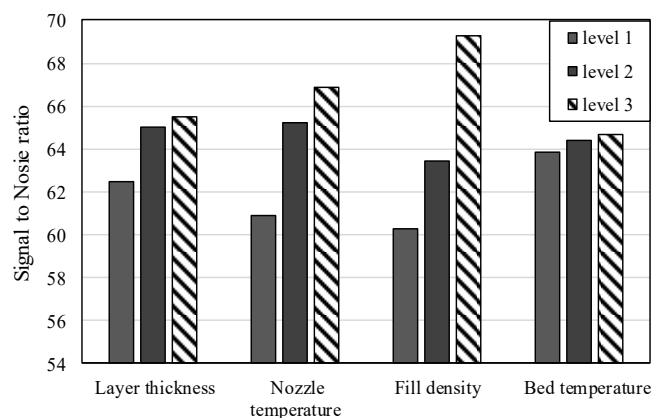
به منظور تعیین میزان تاثیر متغیرهای فرآیند بر عمر خستگی، از نتایج تحلیل نسبت سیگنال به نویز استفاده شد. بدین منظور با استفاده از تحلیل واریانس، میزان تاثیرگذاری متغیرهای فرآیند مشخص شد [۱۵]. جدول ۵، میزان تاثیر متغیرهای فرآیند بر عمر خستگی قطعات را نشان می دهد.

با در نظرگیری مقادیر آماره F موجود در جدول ۵، میزان موثر بودن یا عدم تاثیر متغیرهای فرآیند تعیین شد. با توجه به این مقادیر نتیجه می شود که متغیرهای چگالی سطح، دمای نازل و ضخامت لایه به ترتیب با ۶۰/۵۳٪، ۲۸/۱۸٪ و ۷/۷۱٪ بیشترین و متغیر دمای میز با ۰/۴۹٪ کمترین میزان تاثیر را بر عمر خستگی دارند، همچنین میزان تاثیرگذاری متغیرهای نویز و خطاهای آزمایش ۰/۸۳۵٪ می باشد.

دلیل تاثیر بالای متغیر چگالی سطح و دمای نازل را می توان این مسئله دانست که با افزایش مقدار دمای نازل، اتصال میان لایه های

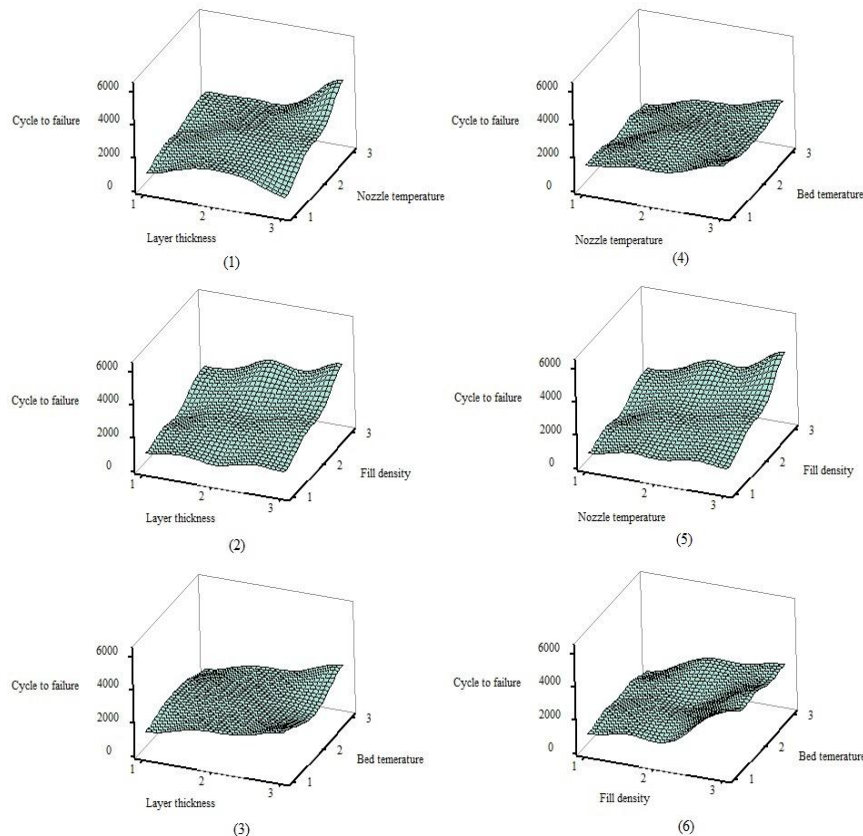
بزرگترین مقدار عددی نسبت سیگنال به نویز مطلوب است. مقدار سیگنال به نویز بالا نشان دهنده این است که اثر متغیرهای قابل کنترل بیشتر از اثر متغیرهای نویز می باشد [۱۱]. با استفاده از نتایج میانگین عمر خستگی موجود در جدول ۴، مقدار نسبت سیگنال به نویز برای هر نمونه با استفاده از نرم افزار تحلیل داده مینی تب^۱ محاسبه گردید. شکل ۶، مقادیر نسبت سیگنال به نویز هر متغیر در سطوح مورد بررسی را نمایش می دهد.

با توجه به شکل ۶، ملاحظه می شود که با افزایش دمای نازل، نسبت سیگنال به نویز افزایش پیدا کرده است. با افزایش دمای نازل، مقدار گرادیان دمایی افزایش پیدا می کند که این مسئله سبب افزایش سیالیت ماده خروجی از نازل و ایجاد پیوند قوی تری میان لایه ها می شود. همچنین با افزایش دمای میز، این مسئله تشدید می گردد. این نکته قابل ذکر است که افزایش بی رویه دمای نازل و میز، باعث



شکل ۶. مقادیر سیگنال به نویز

Fig . 6. Signal to noise values



شکل ۷. برهمکنش متغیرهای فرآیند

Fig. 7. Interaction of process variables

رویه مورد نظر با افزایش میزان چگالی سطح از ۲۵٪ تا ۷۵٪ سبب افزایش میزان عمر خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید شده است.

۲-۶- آزمایش تایید

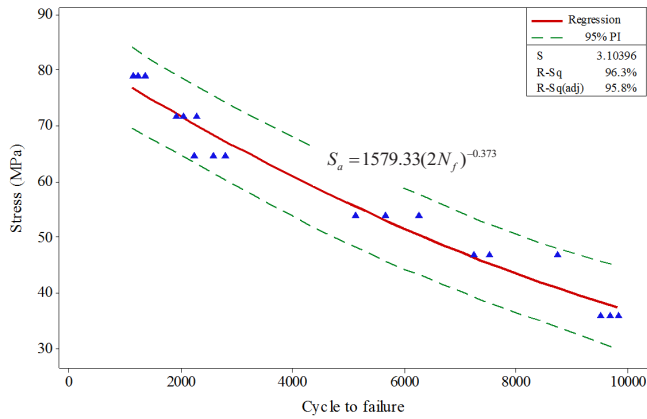
قسمت نهایی مطالعه تجربی، انجام آزمایش تاییدی به منظور اعتبارسنجی در طراحی آزمایش ارائه شده توسط الگوریتم تاگوچی می باشد. به منظور انجام اعتبارسنجی، یک آزمایش با بکارگیری سطح بهینه هر متغیر صورت پذیرفت و پس از آن بازه اطمینان برای آن مشخص گردید. با مقایسه مقدار نسبت سیگنال به نویز نمونه بهینه با بازه تعیین شده، اگر مقدار نسبت سیگنال به نویز در بازه یاد شده باشد، می توان صحت طراحی آزمایش انجام شده و تحلیل های صورت گرفته را تایید کرد. مقدار نسبت سیگنال به نویز و بازه اطمینان

جدول ۶. نتایج پیش بینی الگوریتم تاگوچی

Table 6. Predictive results of Taguchi algorithm

متغیر	آزمایش نمونه بهینه	مقدار پیش بینی
سیگنال به نویز	۷۲/۵۹	۷۳/۳۲
بازه اطمینان	(۷۱/۳۹۹۷ - ۷۵/۲۷۰۴)	

بهتری شکل می گیرد که این اتصال در مقابل رشد ترک مقاومت می کند. افزایش مقدار متغیر چگالی سطح میزان ماده بیشتری در هر لایه وجود داشته که این مسئله مقاومت خستگی قطعه را بالا می برد [۹]. در آزمایش های انجام شده، متغیرهای مورد بررسی به صورت متقابل بر روی عمر خستگی قطعات لایه نشانی شده تاثیر دارند. تاثیرات برهم کنش متغیرهای فرآیند بر عمر خستگی در شکل ۷ آورده شده است. به عنوان مثال، شکل ۷-۱ (تاثیر متقابل ضخامت لایه و دمای نازل) نشان می دهد که متغیرهای ضخامت لایه و دمای نازل به ترتیب تاثیر نوسانی و افزایشی بر عمر خستگی دارند. با قرارگیری متغیر دمای نازل در بیشترین مقدار مورد بررسی و انتخاب متغیر ضخامت لایه در سطح ۳، بیشترین مقدار عمر خستگی از برهم کنش این دو متغیر حاصل می شود. شکل ۷-۴ نیز بیان کننده این مسئله می باشد که متغیر دمای نازل تاثیر زیادی بر روی عمر خستگی ندارد، اما با افزایش مقدار دمای نازل عمر خستگی افزایش پیدا می کند. با بررسی اثر دو متغیر چگالی سطح و دمای نازل در شکل ۷-۶، ملاحظه می شود که دمای نازل در مقابل چگالی سطح، تاثیری تقریباً یکنواخت بر روی میزان عمر خستگی دارد، در مقابل



شکل ۸. نمودار تنش - عمر خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید

Fig. 8. Stress-fatigue life diagram for PLA material

تنش ایجادشده برای تعیین نمودار خستگی، در جدول ۷ آورده شده است.

در گام بعدی و به جهت تعیین مدل رفتار خستگی، از تحلیل رگرسیون به روش حداقل مربعات بر روی نتایج استفاده شد. مدل حداقل مربعات از رابطه (۵) تبعیت می کند [۱۸]:

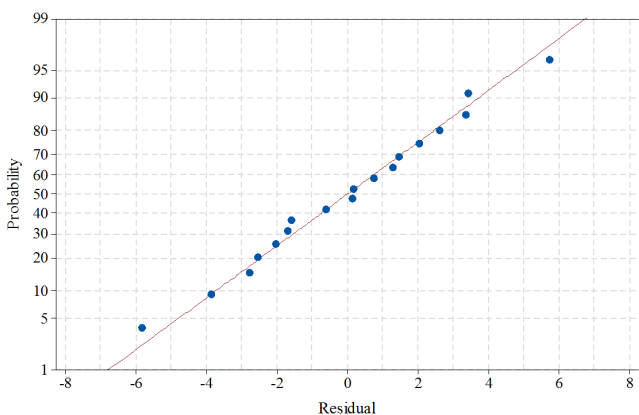
$$Y = A + BX \quad (5)$$

که در رابطه (۵)، ضرایب A و B به صورت زیر تعیین می شوند [۱۸]:

$$A = Y - BX \quad (6)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} (x_i - X)(y_i - Y)}{\sum_{i=1}^{n_i} (x_i - X)^2} \quad (7)$$

در روابط (۵)، (۶) و (۷)، X مقدار میانگین مقادیر x، Y مقدار میانگین مقادیر y، x مقادیر تنش خستگی و y مقادیر عمر خستگی



شکل ۹. نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌های مدل رگرسیون

Fig. 9. Normal probability diagram of regression model residuals

را می توان با استفاده از روابط (۳) و (۴) تعیین کرد [۱۶]:

$$n_{opt} = n_m + \sum_{i=1}^p (n_i - n_m) \quad (3)$$

$$C.I. = \pm \sqrt{\frac{F(n_1, n_e) \times MS_e}{n_{eff}}} \quad (4)$$

که در روابط (۳) و (۴) مقدار سیگنال به نویز بهینه، n_m میانگین نسبت سیگنال به نویز، n_i مقدار سیگنال به نویز هر سطح بهینه، $F(n_1, n_e)$ مقدار توزیع استاندارد برای درجه آزادی متوسط و خطا، MS_e میانگین مجموع مربعات خطا و n_{eff} عدد موثر می باشند [۱۶].

با استفاده از روابط (۳) و (۴) مقدار بازه اطمینان تعیین شد. جدول ۶، نتایج پیش بینی الگوریتم تاگوچی را نشان می دهد. مطابق نتایج موجود در جدول ۶ و در سطح اطمینان ۹۰٪، نسبت سیگنال به نویز نمونه بهینه در بازه اطمینان مجاز قرار دارد و لذا صحت روش تاگوچی در طراحی آزمایش و تحلیل های انجام شده، اثبات می شود.

۲-۷- تعیین نمودار خستگی

جهت مدلسازی تنش-عمر خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید، در ابتدا از مقدار بهینه متغیرهای ارائه شده در شکل ۶، جهت ساخت نمونه های بهینه استفاده شد. جهت تعیین مدل تنش-عمر خستگی برای قطعات لایه نشانی شده، نمونه ها در شش سطح بارگذاری مختلف با سه تکرار برای هر سطح به منظور بهبود دقت در نتایج، مورد آزمایش خستگی قرار گرفتند [۱۷، ۱۸]. مقدار نیروی اعمال شده و جدول ۷. مقادیر نیرویی اعمال شده برای تعیین نمودار خستگی و حداکثر مقدار تنش

Table 7. The amount of force applied to determine the fatigue graph and the maximum value of stress

تنش خستگی (MPa)	گشتاور خمشی (N.mm)	مقدار نیرویی (N)
۷۸/۸۱۹	۱۰۴۰	۱۰
۷۱/۶۲۵	۱۳۵۲	۱۳
۶۴/۵۳۹	۱۵۶۰	۱۵
۵۳/۸۰۳	۱۸۷۲	۱۸
۴۶/۶۱۰	۲۰۸۰	۲۰
۳۵/۸۰۷	۲۲۸۸	۲۲

جدول ۸. نتایج تحلیل واریانس بر روی مدل رگرسیون

Table 8. Stress diagram - fatigue life of polylactic acid components

P	F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
۰/۰۰۰	۱۹۴/۹۰	۱۸۷۷/۷۶	۳۷۵۵/۵۲	۲	رگرسیون
		۹/۶۳	۱۴۴/۵۲	۱۵	باقیمانده
			۳۹۰۰/۰۴	۱۷	کل

شکل ۸، نمودار تنش-عمر خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید را نشان می‌دهد.

به جهت بررسی مناسب بودن و سازگاری مدل رگرسیون ارائه شده از دو ابزار تحلیل واریانس و تحلیل باقیمانده‌ها استفاده شده است. با انجام تحلیل واریانس بر روی مدل، مشخص گردید که میزان $P\text{-value} < 0.05$ می‌باشد. مقادیر مربوط به تحلیل واریانس برای مدل رگرسیون بدست آمده، در جدول ۸ آورده شده است.

به جهت بررسی مناسب بودن مدل و با در نظر گیری فرض توزیع نرمال باقیمانده‌ها، به تحلیل نمودار باقیمانده‌ها پرداخته شد. شکل ۹ احتمال نرمال بودن باقیمانده‌های مدل رگرسیون را نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل ۹ مشاهده می‌شود، خط مستقیم نشان دهنده باقیمانده‌های مدل می‌باشد و نقاط، مقادیر حقیقی باقیمانده‌های بدست آمده از مدل رگرسیون ارائه شده را نشان می‌دهند. نقاط باقیمانده در امتداد خط با شرط نرمال، قرار دارند که این نقاط به صورت تقریباً خطی تغییر می‌کنند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که باقیمانده‌های بدست آمده از مدل دارای توزیع نرمال می‌باشند، که در نتیجه شرط نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها پذیرفته شده و به طبع مدل رگرسیون اعتبار کافی برای برآزش داده‌ها دارد.

۲-۸- تحلیل المان محدود

جهت بررسی دقیق رفتار خستگی در قطعات پلی لاکتیک اسید ساخته شده به روش لایه نشانی ذوبی، تحلیل عددی رفتار خستگی با استفاده از نرم افزار تحلیل مهندسی انسیس^۲ انجام شد. حل مسئله مورد نظر با استفاده از محیط تحلیل استاتیکی^۳ صورت پذیرفت. جهت مقایسه نتایج تحلیل المان محدود، شبیه سازی برابر شکل ۱۰، روی نمونه آزمون خستگی مطابق مطالعه تجربی انجام شد. به منظور

می‌باشند. با محاسبه ضرایب A، B و جایگذاری این مقادیر در رابطه (۵) مدل حداقل مربعات ایجاد شد.

رابطه (۸) حالت لگاریتمی معادله تنش-عمر خستگی را نشان می‌دهد [۱۸]:

$$\log(2N_f) = -\frac{1}{b} \log(S'_f) + \frac{1}{b} \log(S_a) \quad (8)$$

که در رابطه (۸)، N_f عمر خستگی، S'_f ضریب مقاومت خستگی و S_a تنش خستگی می‌باشند. با معادل سازی روابط (۵) و (۸)، می‌توان مقادیر زیر را هم‌ارز دانست [۱۸]:

$$Y = \log(2N_f) \quad (9)$$

$$A = -\frac{1}{b} \log(S'_f) \quad (10)$$

$$B = \frac{1}{b} \quad (11)$$

$$X = \frac{1}{b} \log(S_a) \quad (12)$$

$$S'_f = 10^{(-Ab)} \quad (13)$$

رابطه (۱۴)، مدل تنش-عمر خستگی را نشان می‌دهد [۱۸]:

$$S_a = S'_f (2N_f)^b \quad (14)$$

با استفاده از نرم افزار تحلیل داده‌ها^۱، تحلیل رگرسیون به روش حداقل مربعات بر روی نتایج آزمون خستگی موجود در جدول ۷ و بر اساس روابط (۴) تا (۱۳) صورت پذیرفت و مدل مورد نظر برای پیش بینی رفتار خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید تولید شده به روش لایه نشانی ذوبی تعیین شد. در این تحلیل مقدار ضرایب A و B به ترتیب ۸/۵۷۵ و ۲/۶۸۳- محاسبه گردید. رابطه (۱۵) مدل تنش-عمر خستگی را نشان می‌دهد:

$$S_a = 1579.33(2N_f)^{-0.373} \quad (15)$$

2 ANSYS 18.2

3 Static structural

1 Minitab 17

جدول ۹. خواص فیزیکی و مکانیکی پلی لاکتیک اسید

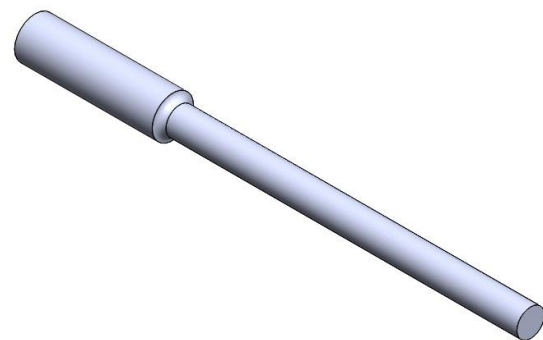
Table 9. Results of analysis of variance on regression model

مقدار	واحد	کمیت
۱/۲۵۲	g/cm ³	چگالی
-	J/kg°C	گرمای ویژه
۲۰۶۰		۱۹۰°C
۱۹۵۵		۱۰۰°C
۱۵۹۰		۵۵°C
۷۰	MPa	استحکام تسلیم
۷۳	MPa	استحکام نهایی
۳۵۰۰	MPa	مدول الاستیک
۱۲۸۷	MPa	مدول برشی
۰/۳۶	-	ضریب پواسون

مدلسازی رفتار ماده، خواص فیزیکی و مکانیکی پلی لاکتیک اسید در بانک اطلاعات مواد^۱ نرم افزار وارد گردید. به این جهت با استفاده از مقادیر استحکام مکانیکی و خواص فیزیکی گزارش شده توسط دیگر محققان، خواص ماده مورد نظر در نرم افزار انسیس تعریف شد [۳].

جدول ۹، خواص فیزیکی و مکانیکی پلی لاکتیک اسید را نشان می دهد.

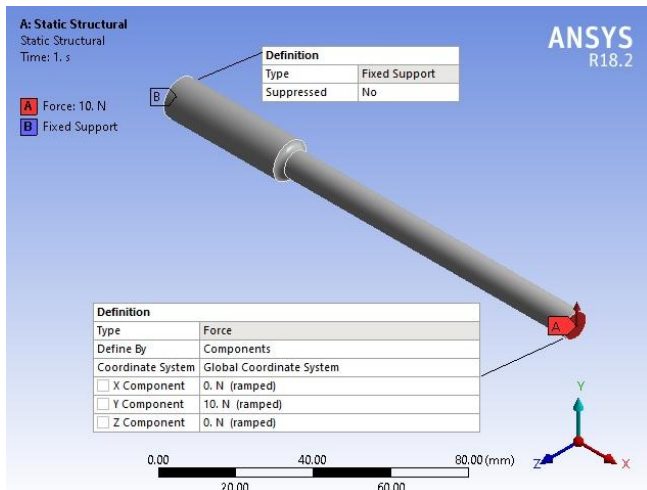
به منظور شبیه سازی المان محدود رفتار خستگی، از روش تنش- عمر^۲ در این تحلیل استفاده شد [۱۹]. در این روش بار نوسانی به نمونه اعمال می شود که تعداد گردش های شمارش شده تا شکست، عمر نمونه را نشان می دهد. به منظور اعمال بارگذاری بر روی نمونه،



شکل ۱۰. مدل المان محدود مورد استفاده

Fig. 10. Finite element model

- 1 Engineering Data
- 2 Stress – Life method



شکل ۱۱. اعمال شرایط بارگذاری و تکیه گاهی

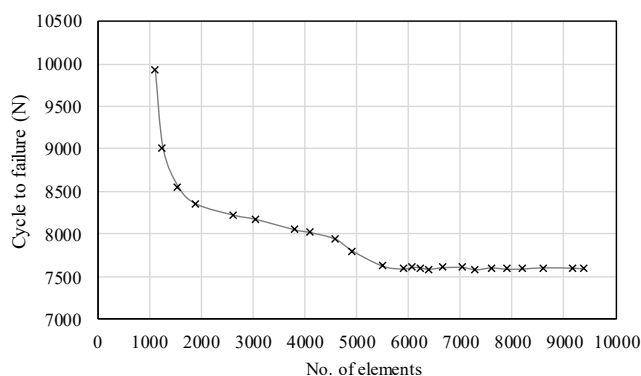
Fig. 11. Apply loading and boundary conditions

از بار متمرکز در انتهای نمونه در بازه ۱۰ الی ۲۲ نیوتن استفاده شد، همچنین شرط تکیه گاه ثابت در انتهای نمونه در نظر گرفته شد [۱۹].

شکل ۱۱، اعمال شرایط بارگذاری و تکیه گاهی را نشان می دهد.

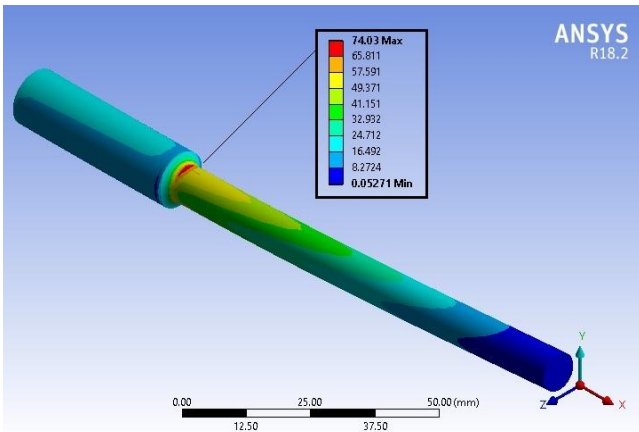
در موضوع مش زنی مدل مورد تحلیل، مسئله حائز اهمیت استفاده از مش ریزتر در ناحیه رآکورد (تغییر قطر از ۸ به ۱۲ میلیمتر) ایجاد شده به شعاع ۲ میلیمتر می باشد. از طرفی موضوع محدودیت در تعداد کلی مش نیز وجود دارد. با توجه به این شرایط، آزمون حساسیت نتایج نسبت به مش بر روی مسئله مورد بررسی صورت گرفت. شکل ۱۲، نمودار حساسیت نتایج نسبت به مش را نشان می دهد. با توجه به نتایج موجود در شکل ۱۲، پس از ثابت شدن میزان حساسیت عمر خستگی نسبت به مش، از مش با ابعاد ۰/۰۰۱۶۸ برای کل مدل و مش با ابعاد ۰/۰۰۰۵ در ناحیه رآکورد استفاده شد. در مجموع از کل تعداد ۶۹۸۴ المان تعریف شده در حل مسئله استفاده شد. شکل ۱۳، شکل مش و موقعیت آنها را نشان می دهد.

در تحلیل انجام شده، به منظور تعیین عمر و تنش خستگی از بارگذاری



شکل ۱۲. نمودار حساسیت خروجی نسبت به مش

Fig. 12. FEM result sensitivity diagram to the mesh

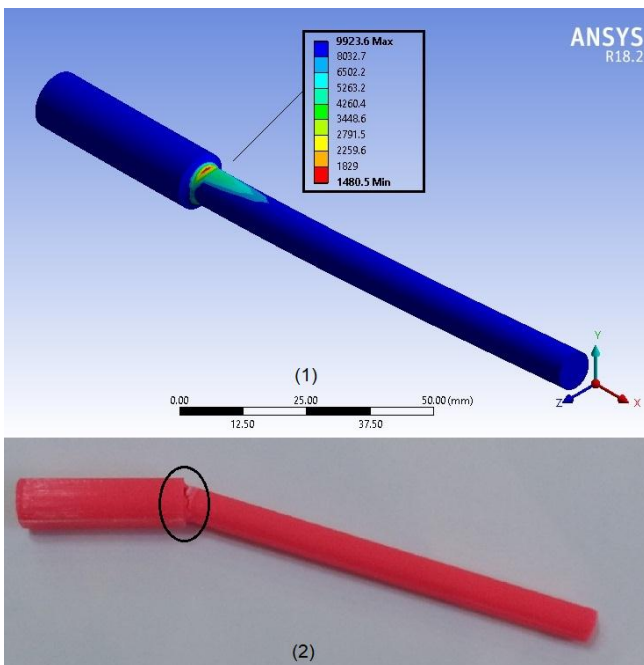


شکل ۱۵. توزیع تنش تحت بارگذاری ۲۲ نیوتن

Fig. 15. Stress distribution under 22 N load

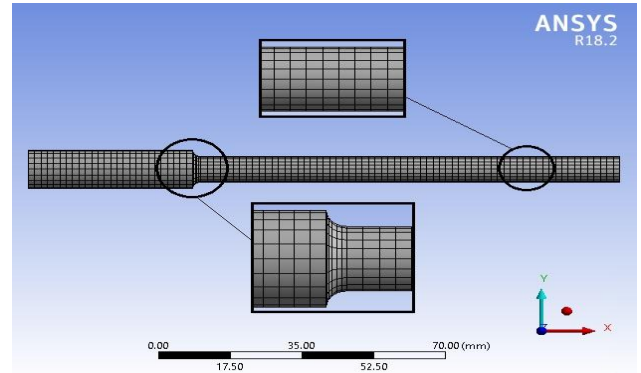
اطمینان ۱/۴۰۷۳ را دارا می‌باشد. با توجه به مدلسازی انجام‌شده، نمونه دارای عمر ۹۹۲۳/۶ چرخه می‌باشد.

شکل ۱۵ نحوه توزیع تنش قطعه را با بارگذاری ۲۲ نیوتن در انتهای نمونه نشان می‌دهد. تنش ایجادشده در نمونه برابر ۷۴/۰۳ مگاپاسکال است. با استفاده از منطقه امن گربر مشخص گردید، نمونه تحت بارگذاری ۲۲ نیوتن دارای ضریب اطمینان ۰/۶۳۹۶۷ می‌باشد. مقدار عمر خستگی در این نمونه با استفاده از روش تنش-عمر برابر ۱۴۸۰/۵ چرخه می‌باشد. با مقایسه عمر نمونه شبیه‌سازی شده تحت



شکل ۱۶. مقایسه محل شکست نمونه خستگی تحت (۱) شبیه‌سازی المان محدود، (۲) آزمون خستگی

Fig. 16. Comparison of fatigue sample failure location with 1) finite element simulation, 2) fatigue test



شکل ۱۳. شکل مش و موقعیت آنها

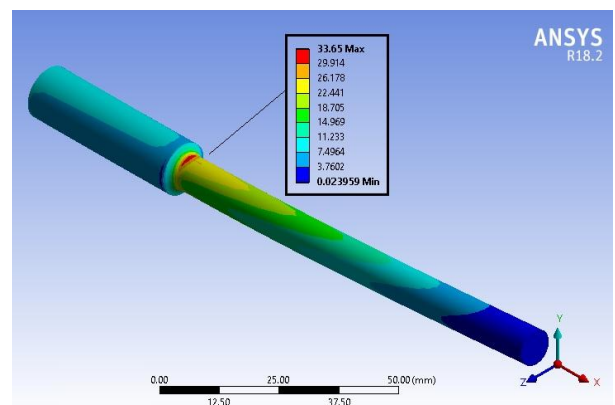
Fig. 13. Mesh shape and locations

در حالت کاملاً معکوس شونده^۱ استفاده شد، که نسبت بارگذاری^۲ در این حالت ۱- می‌باشد. همچنین از معیار تسلیم گربر^۳ جهت تعیین مقدار تنش متوسط^۴ در روش تحلیل تنش-عمر خستگی استفاده شد [۱۹]. رابطه (۱۶) معادله معیار تسلیم گربر را نشان می‌دهد:

$$\frac{\sigma_{Alternating}}{S_e} + \left(\frac{\sigma_{Mean}}{S_{ut}} \right)^2 = 1 \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، σ_{Mean} تنش متوسط، $\sigma_{Alternating}$ تنش متناوب، S_e حد دوام و S_{ut} حد نهایی کششی می‌باشند. با در نظرگیری این مفروضات، شبیه‌سازی رفتار خستگی انجام شد.

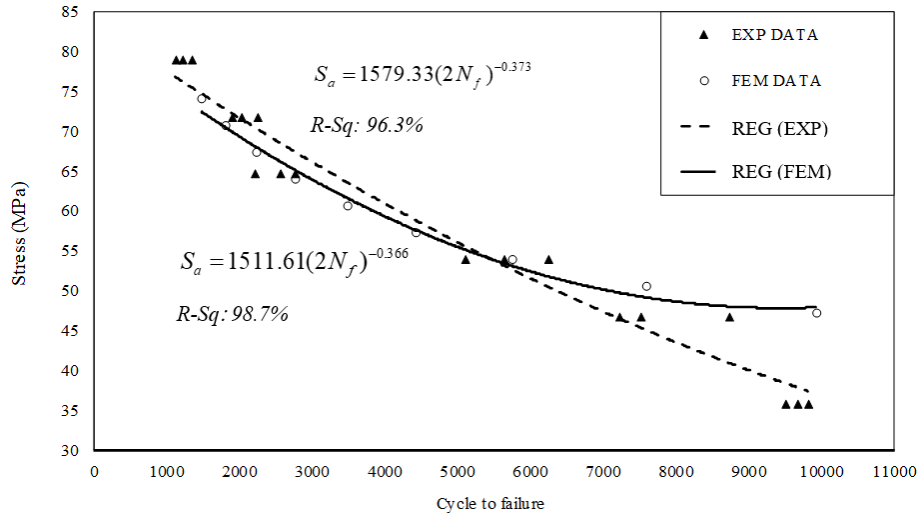
شکل ۱۴، توزیع تنش در نمونه خستگی تحت نیروی ۱۰ نیوتن را نشان می‌دهد. تنش به وجود آمده در محل شروع رآکورد برابر ۳۳/۶۵ مگاپاسکال می‌باشد که با در نظرگیری معیار تسلیم گربر، مقدار ضریب



شکل ۱۴. توزیع تنش تحت بارگذاری ۱۰ نیوتن

Fig. 14. Stress distribution under 10 N load

- 1 Fully Reversed
- 2 Loading Ratio
- 3 Gerber
- 4 Mean stress correction



شکل ۱۷. مقایسه نتایج مطالعه تجربی و تحلیل المان محدود

Fig. 17. Comparison of the results of experimental study and finite element analysis

تعیین شد. در این تحلیل مشخص گردید متغیرهای چگالی سطح، دمای نازل و ضخامت لایه به ترتیب با ۶۰/۵٪، ۲۸/۱٪ و ۷/۷٪ بیشترین تاثیر را بر روی عمر خستگی قطعات دارند. در این تحلیل میزان خطا برابر با ۳/۰٪ محاسبه شد.

- با استفاده از برازش با روش حداقل مربعات بر روی نتایج عمر خستگی قطعه ساخته شده با مقدار بهینه هر متغیر ۴، مدل تنش-عمر خستگی برای قطعات پلی لاکتیک اسید با ضریب رگرسیون ۹۶/۳٪ ارائه گردید.

- در تحلیل المان محدود، مقاومت به خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید ساخته شده به روش لایه‌نشانی ذوبی با اختلاف ۲/۱۵ مگاپاسکال نسبت به حالت تجربی تعیین شد. که علت این اختلاف را می‌توان ترکیب عواملی مانند اختلاف در خواص مکانیکی تعریف شده و یا شرایط تکیه‌گاهی دانست.

۴- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
تابع زیان، cycle	L_i
نسبت سیگنال به نویز	S/N
نسبت سیگنال به نویز بهینه	n_{opt}
میانگین مربعات خطا	MS_e
عمر خستگی، cycle	N_f
ضریب مقاومت خستگی	S'_f
تنش خستگی، N/mm^2	S_a
حد دوام، N/mm^2	S_e
استحکام نهایی کششی، N/mm^2	S_{ut}
علائم یونانی	
تنش متوسط، N/mm^2	σ_{Mean}
تنش متناوب، N/mm^2	$\sigma_{Alternating}$

بارگذاری ۲۲ نیوتن با نمونه آزمون تجربی مشابه، مشخص گردید، موضع ایجادشده شکست در هر دو مسئله یکسان می‌باشد. شکل ۱۶، مقایسه محل شکست نمونه تحت آزمون خستگی با شبیه‌سازی المان محدود را نشان می‌دهد.

۲-۹- صحنه گذاری تحلیل المان محدود

جهت اعتبارسنجی روش تحلیل المان محدود صورت گرفته، نتایج تحلیل المان محدود با نتایج مطالعه تجربی مقایسه گردید. در تحلیل المان محدود، رفتار خستگی قطعات پلی لاکتیک اسید ساخته شده به روش لایه‌نشانی ذوبی را به میزان ۶٪ شبیه‌سازی می‌نماید. شکل ۱۷، مقایسه نتایج مطالعه تجربی و تحلیل المان محدود را نشان می‌دهد.

۳- نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه تجربی و تحلیل المان محدود رفتار خستگی در قطعات پلی لاکتیک اسید ساخته شده به روش لایه‌نشانی ذوبی را می‌توان به موارد زیر خلاصه نمود.

- با طراحی آزمایش و استفاده از تحلیل سیگنال به نویز مشخص گردید، ضخامت لایه با مقدار ۰/۳ میلی‌متر، چگالی سطح به میزان ۷۵٪، دمای نازل و دمای میز به ترتیب به میزان ۲۰۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد مقدار بهینه متغیرهای مورد بررسی می‌باشند.
- با انجام تحلیل واریانس بر روی خروجی آزمایش‌ها، میزان تاثیر متغیرهای مورد بررسی بر رفتار خستگی قطعات لایه‌نشانی شده

- solution, finite element method and experimental verification, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 14(4) (2012) 449-468.
- [10] M.F. Afrose, S.H. Masood, P. Iovenitti, M. Nikzad, I. Sbarski, Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material, *Progress in Additive Manufacturing*, 1(1) (2016) 21-28.
- [11] G. Gomez-Gras, R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodriguez, J. Lluma-Fuentes, Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens, *Materials & Design*, 140 (2018) 278-285.
- [12] S.C.a.Y.W. G. Taguchi, *Quality Engineering: Strategy in Research and Development*, in: *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, 2004, pp. 39-55.
- [13] YouSu 3D, your professional 3D pen and 3D filament supplier!, in: *Yousu*, 2020.
- [14] ASTM D7774 - 17, in: *ASTM International - Standards Worldwide*, 2020.
- [15] O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, *Advances in Manufacturing*, 3(1) (2015) 42-53.
- [16] R.K. Roy, *A primer on the Taguchi method*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [17] M.C.L. P. H. Wirsching Fatigue under wide band random stresses, *Journal of the Structural Division*, 106(7) (1980) 1593-1607.
- [18] Y.-L. Lee, 2 - FATIGUE DAMAGE THEORIES, in: Y.-L. Lee, J.W.O. Pan, R.B. Hathaway, M.E. Barkey (Eds.) *Fatigue Testing and Analysis*, Butterworth-Heinemann, Burlington, 2005, pp. 57-76.
- [19] R. Browell, A. Hancq, Calculating and displaying fatigue results, *Ansys Inc*, 2 (2006).
- [1] N. Mohan, P. Senthil, S. Vinodh, N. Jayanth, A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process, *Virtual and Physical Prototyping*, 12(1) (2017) 47-59.
- [2] M. Attaran, The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing, *Business Horizons*, 60(5) (2017) 677-688.
- [3] M. Domingo-Espin, J.M. Puigoriol-Forcada, A.-A. Garcia-Granada, J. Llumà, S. Borros, G. Reyes, Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts, *Materials & Design*, 83 (2015) 670-677.
- [4] Q. Sun, G.M. Rizvi, C.T. Bellehumeur, P. Gu, Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments, *Rapid Prototyping Journal*, 14(2) (2008) 72-80.
- [5] P.K. Gurralla, S.P. Regalla, Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling, *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3) (2014) 141-149.
- [6] A.K. Sood, R.K. Ohdar, S. Mahapatra, Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement, *Journal of Advanced Research*, 3 (2012).
- [7] R. Singh, Some investigations for small-sized product fabrication with FDM for plastic components, *Rapid Prototyping Journal*, 19(1) (2013) 58-63.
- [8] I. Durgun, R. Ertan, Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost, *Rapid Prototyping Journal*, 20(3) (2014) 228-235.
- [9] L. Wahl, S. Maas, D. Waldmann, A. Zürbes, P. Frères, Shear stresses in honeycomb sandwich plates: Analytical

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. R. Hashemi, H. Adibi. *Experimental and Numerical Investigation of Fatigue Behavior of Polylactic acid Components Made by Additive Manufacturing Method*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53 (6) (2021) 3703-3716.

DOI: 10.22060/mej.2021.18299.6794



