

پس پردازش قطعات اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن چاپ سه بعدی با

استفاده از ارتعاشات فراصوت

عبدالواحد کمی
استادیار
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه سمنان
akami@semnan.ac.ir

وحید فرتاش‌وند*
استادیار
دانشکده هنر، گروه طراحی صنعتی
دانشگاه الزهرا (س)
v.fartashvand@alzahra.ac.ir

عباسعلی باقری
فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه سمنان
abbasali.bagheri.1979@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۳

چکیده

روش چاپ سه بعدی امکان تولید قطعات با هندسه پیچیده را در زمان کوتاه فراهم می‌کند. با این وجود قطعات تولیدی به دلیل ماهیت لایه‌ای آنها و وجود عیوبی مانند حفره‌ها و چسبندگی ضعیف بین لایه‌ای، خواص مکانیکی ضعیفی دارند. در این مقاله، استفاده از ارتعاشات فراصوت برای بهبود خواص مکانیکی قطعات پلیمری از جنس اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن (ABS)^۱ مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها با هندسه استاندارد آزمون کشش با استفاده از چاپگر سه بعدی رومیزی از نوع مدل‌سازی رسوب ذوبی^۲ ساخته شدند. برای بررسی اثر ارتعاشات بر روی پارامترهای فرایند چاپ، ضخامت لایه‌های پرینت در بازه ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳۰ میلی‌متر و میزان پر شدن ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد انتخاب شد. همچنین، تأثیر مدت زمان اعمال ارتعاشات فراصوت (در محدوده ۱ الی ۲ ثانیه) بر روی خواص کششی مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی اثر پارامترهای مورد اشاره، طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ انجام پذیرفت. سپس آزمایش کشش تک محوری روی نمونه‌ها اجرا و با تحلیل واریانس داده‌ها بررسی شدند. نتایج نشان دادند که اعمال ارتعاشات فراصوت سبب بهبود قابل توجه در استحکام کششی قطعات پلیمری می‌شود که این اثرگذاری در ضخامت لایه کم، بیشتر است. همچنین، با افزایش مقدار درصد پر شدن، اثر ارتعاشات فراصوت بیشتر می‌شود که این می‌تواند ناشی از پیوند بهتر لایه‌های پرینت در اثر ارتعاشات فراصوت و کاهش میزان حفره‌ها در مقادیر پر شدن پایین باشد. از این‌رو، می‌توان انتظار داشت که با اعمال ارتعاشات فراصوت بر روی نمونه‌های حاصل از چاپ سه بعدی، از آنها در مدل‌های عملکردی مهندسی استفاده کرد.

واژگان کلیدی: ارتعاشات فراصوت، پس پردازش، اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن، چاپ سه بعدی، ساخت افزایشی.

۱. مقدمه

صنایع نظامی، خودروسازی، پزشکی و غیره برای ساخت نمونه‌های اولیه، محصولات نهایی و قالب‌ها استفاده می‌شود [۱، ۲].

روش مدل‌سازی رسوب ذوبی یکی از رایج‌ترین روش‌های ساخت افزایشی بر پایه اکستروژن ماده است. این روش در

اگرچه از روش مدل‌سازی رسوب ذوبی برای چاپ مواد مختلفی شامل کامپوزیت‌ها، فلزات و سرامیک‌ها استفاده شده است، اما بیشترین کاربرد آن برای چاپ پلیمرها است [۴-۲].

قطعات پلیمری تولید شده به روش چاپ سه‌بعدی به دلیل ماهیت لایه‌ای این فرایندها و همچنین وجود عیوبی مانند چسبندگی ضعیف لایه‌ها و حفره‌های مواد رسوب یافته، خواص مکانیکی ضعیف‌تری در مقایسه با قطعات تزریق پلاستیک دارند. به همین دلیل لازم است با انجام عملیات ثانویه‌ای مانند عملیات حرارتی، پرس گرم و اعمال امواج فراصوت خواص مکانیکی بهبود داده شود [۵]. امواج فراصوت در مراحل مختلفی از چاپ سه‌بعدی پلیمرها و کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. میدین و همکاران [۶] سه مکانیزم مختلف برای اعمال امواج فراصوت در حین چاپ سه‌بعدی را بررسی کردند. این سه مکانیزم عبارتند از: نصب مستقیم مبدل (ترنسدیوسر) فراصوت روی نازل، اتصال مبدل به نازل با یک رابط فلزی و اتصال مبدل به میز. نتایج نشان دادند که در روش اتصال مبدل فراصوت به نازل با یک رابط فلزی، نمونه‌های چاپ شده بهترین خواص ظاهری را دارند. تفنگچی و همکاران [۷] ارتعاشات فراصوت را در جهت عرضی به نازل چاپ‌گر مدل‌سازی رسوب ذوبی وارد کردند و اثر اعمال ارتعاشات فراصوت را بر چسبندگی بین لایه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با اعمال ارتعاشات فراصوت، چسبندگی بین لایه‌ای به میزان ۱۰ درصد بهبود پیدا می‌کند. لی و همکاران [۸-۱۰] از ارتعاشات فراصوت در عملیات ثانویه (پس‌پردازش) استفاده کردند. نمونه‌هایی از جنس پلی لاکتیک اسید و اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن چاپ شدند و سپس ارتعاشات فراصوت روی آنها اعمال شد. نتایج نشان داد که حفره‌ها کاهش یافته، چسبندگی لایه‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه خواص مکانیکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. گوویر و همکاران [۱۱] در حین چاپ سه‌بعدی و بعد از اتمام چاپ هر لایه،

قطعه را تحت پینینگ فراصوت^۳ قرار دادند. این عملیات در دو حالت انجام شد؛ بعد از چاپ ۴ لایه و بعد از چاپ ۸ لایه. نتایج نشان دادند که پینینگ فراصوت بعد از چاپ ۸ لایه تأثیری بر خواص مکانیکی ندارد. در صورتی که پینینگ فراصوت بعد از چاپ ۴ لایه انجام شود، میزان کرنش شکست (شکل‌پذیری) و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد ولی استحکام کششی افزایش می‌یابد. به عبارتی، ارتعاشات فراصوت موجب افزایش استحکام و کاهش چقرمگی شده است. علاوه بر موارد فوق، ارتعاشات فراصوت در چاپ کامپوزیت‌های زمینه پلیمری نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۲، ۱۳]. در این کاربردها، افزایش چسبندگی الیاف به زمینه پلیمری مدنظر بود که در نتیجه آن خواص مکانیکی قطعات کامپوزیتی بهبود زیادی نشان داده است [۱۲، ۱۳].

مرور مقالات نشان می‌دهد که مطالعه‌ای در مورد اثرات هم‌زمان پارامترهای چاپ سه‌بعدی و امواج فراصوت صورت نگرفته است. در این مقاله، اثر اعمال ارتعاشات فراصوت بر خواص کششی و کاهش عیوب ساختاری قطعات چاپ سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه‌های مختلف با درصد پر شدن و ضخامت لایه متفاوت چاپ شدند. سپس این نمونه‌ها تحت امواج فراصوت در بازه‌های زمانی متفاوتی قرار گرفتند. رفتار کششی این نمونه‌ها با نمونه‌های عادی (بدون اعمال امواج فراصوت) مقایسه شدند. انتظار می‌رود که امواج فراصوت با افزایش جوش‌پذیری لایه‌های چاپ شده در هر مرحله و نیز ذوب موضعی در نواحی حفره‌ها، منجر به بهبود خواص مکانیکی شود.

۲. مواد و روش‌ها

برای چاپ سه‌بعدی از فیلامنت ABS استفاده شد که خواص مطلوبی نظیر سفتی و استحکام کششی بالا، مقاومت به ضربه خوب و مقاومت شیمیایی مناسب دارد. به همین دلیل یکی از پر مصرف‌ترین مواد در چاپ سه‌بعدی بوده و علاوه بر این برای تولید قطعات صنعتی و تولید قطعات

روزمره کاربرد دارد [۱۴]. نمونه‌های کشش مطابق با استاندارد ASTM D638 [۱۵] طراحی شدند. چاپ نمونه‌ها به روش رسوب‌نشانی مدل ذوبی و با استفاده از یک دستگاه چاپ سه‌بعدی رومی‌زی انجام شد. در شکل ۱ نمونه چاپ شده نمایش داده شده است. این نمونه دارای طول ۸۰ میلی‌متر، عرض ناحیه میانی ۶ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر است. پارامترهای چاپ سه‌بعدی در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. نمونه استاندارد کشش با ضخامت ۳ میلی‌متر

جدول ۱. پارامترهای چاپ سه‌بعدی ABS

پارامتر	مقدار
قطر نازل (mm)	۰/۵
زاویه چاپ (درجه)	±۴۵
سرعت چاپ (mm/s)	۵۰
دمای چاپ (°C)	۲۵۰
دمای بستر (°C)	۷۰

درصد پر شدن نمونه در بازه ۶۰ تا ۱۰۰ درصد و ضخامت لایه‌ها در بازه ۰/۱۵ تا ۰/۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. این نمونه‌ها تحت امواج فراصوت با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ قرار گرفتند. مقادیر پارامترهای جدول ۲ براساس تجربه نویسندگان و همچنین مراجع [۸، ۹] انتخاب شدند. برای اعمال ارتعاشات فراصوت، از دستگاه جوش پلاستیک ساخت شرکت فراصوت تجهیز ایرانیان استفاده گردید که در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲. دستگاه جوش پلاستیک تراسونیک

مقدار توان اسمی ترانسدیوسر فراصوت ۲ کیلووات با فرکانس نامی ۲۰ کیلوهرتز است که در شکل ۳ آمده است. ترانسدیوسر تراسونیک از نوع پیزوالکتریک بوده و جزئیات آن در مرجع [۱۶] ارائه شده است. با اعمال جریان الکتریکی متناوب با فرکانس بالا به ترانسدیوسر، ارتعاشات مکانیکی ایجاد شده و از طریق قطعه بوستر، دامنه ارتعاشی تقویت و در نهایت از طریق هورن، ارتعاشات به محل مدنظر یعنی قطعات پرنیت شده منتقل شد.



شکل ۳. ترانسدیوسر، بوستر و هورن استفاده شده برای اعمال

ارتعاشات تراسونیک

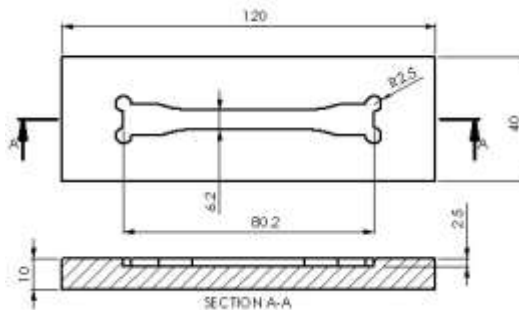
قطع و فقط فشار بر روی قطعه حفظ (زمان نگهداری) می‌گردد تا زمانی برای خنک‌کاری قطعه در حین اعمال فشار و ایجاد چسبندگی فراهم شود. این زمان بیانگر، زمان نگهداری است. زمان اعمال امواج فراصوت در بازه ۱ تا ۲ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین با ارسال فرمان حرکت به جک پنوماتیک، قبل از تماس هورن فراصوت با قطعه نیاز است تا ترنسدیوسر خاموش باشد و بعد از اعمال فشار به قطعه، ترنسدیوسر روشن و ارتعاشات به قطعه منتقل می‌شود. از این زمان به‌عنوان زمان تأخیر یاد می‌شود. پارامترهای متناسب با فرایند در مرجع [۱۷] توضیح داده شده است.

جدول ۲. مقادیر تنظیم شده برای پارامترهای امواج فراصوت

پارامتر	مقدار
توان (kW)	۲
فرکانس (kHz)	۲۰
فشار (kPa)	۳/۵
زمان تأخیر (s)	۰/۵
زمان نگهداری (s)	۰/۵
زمان اعمال ارتعاشات (s)	۱-۲

با در نظر گرفتن سه پارامتر متغیر (درصد پر شدن، تعداد لایه و زمان اعمال امواج فراصوت) طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ^۴ از نوع کامپوزیت مرکزی^۵ انجام شد. بدین ترتیب ۱۷ آزمایش مختلف مطابق با جدول ۳ به‌دست آمد. تمامی آزمایش‌های جدول ۳ سه بار تکرار شدند و مقدار میانگین استحکام کششی به‌عنوان خروجی در تحلیل‌ها استفاده شد.

برای اعمال ارتعاشات، قطعات در یک فیکسچر، متناسب با هندسه قطعات روی میز دستگاه قرار گرفته در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از ایجاد هم‌راستایی بین سطح هورن و سطح بالایی قطعه، هورن توسط جک پنوماتیک پایین آمده و با قطعه تماس پیدا می‌کند.



شکل ۴. ابعاد فیکسچر قرارگیری نمونه برای اعمال ارتعاشات

التراسونیک



شکل ۵. بسته شدن فیکسچر به میز دستگاه و قرارگیری نمونه

درون آن

بعد از ایجاد تماس و توقف هورن بر روی قطعه با روش کنترل نیرو (لود کنترل)، ارتعاشات در زمان مشخصی (زمان اعمال ارتعاشات) به قطعه وارد می‌شود و سپس ارتعاشات

جدول ۳. نمونه‌های آزمایش کشش حاصل از طراحی آزمایش و مقدار استحکام کششی آنها

شماره آزمایش	تعداد لایه	درصد پر شدن	زمان اعمال امواج فراصوت (s)	استحکام کششی (MPa)
۱	۱۰	۶۰	۱	۳۱/۵
۲	۱۰	۶۰	۲	۳۰/۰
۳	۱۰	۸۰	۱/۵	۳۳/۷
۴	۱۰	۱۰۰	۱	۳۹/۵
۵	۱۰	۱۰۰	۲	۴۰/۳
۶	۱۵	۶۰	۱/۵	۲۹/۴
۷	۱۵	۸۰	۱	۳۱/۱
۸	۱۵	۸۰	۱/۵	۲۸/۴
۹	۱۵	۸۰	۱/۵	۳۰/۶
۱۰	۱۵	۸۰	۱/۵	۳۱/۶
۱۱	۱۵	۸۰	۲	۳۰/۰
۱۲	۱۵	۱۰۰	۱/۵	۴۱/۲
۱۳	۲۰	۶۰	۱	۲۶/۲
۱۴	۲۰	۶۰	۲	۲۸/۵
۱۵	۲۰	۸۰	۱/۵	۳۴/۹
۱۶	۲۰	۱۰۰	۱	۴۲/۳
۱۷	۲۰	۱۰۰	۲	۴۰/۸

جدول ۴. نمونه‌های شاهد (نمونه‌های کشش بدون اعمال امواج

فراصوت) و مقدار استحکام کششی آنها

شماره آزمایش	تعداد لایه	درصد پر شدن	استحکام کششی (MPa)
۱	۱۰	۶۰	۲۸/۱
۲	۱۰	۸۰	۳۴/۸
۳	۱۰	۱۰۰	۳۷/۵
۴	۱۵	۶۰	۲۷/۶
۵	۱۵	۸۰	۳۴/۱
۶	۱۵	۱۰۰	۳۶/۲
۷	۲۰	۶۰	۲۴/۲
۸	۲۰	۸۰	۳۲/۸
۹	۲۰	۱۰۰	۳۷/۶

آزمایش کشش تک محوری بر روی نمونه‌های جدول ۳ مطابق با استاندارد ASTM D638 [۱۵] انجام شدند. از دستگاه کشش سنتام ۱۵ تن STM-150 برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد و سرعت انجام آزمایش‌ها برابر با ۵ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. علاوه بر نمونه‌های جدول ۳، نمونه‌های دیگری نیز به‌عنوان نمونه‌های شاهد چاپ شدند. مشخصات چاپ این نمونه‌ها عیناً مشابه نمونه‌های جدول ۳ است ولی امواج فراصوت روی آنها (عملیات ثانویه بعد چاپ) اعمال نشد. مشخصات نمونه‌های شاهد در جدول ۴ ارائه شده است. استحکام کششی نمونه‌های جداول ۳ و ۴ به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد و با انجام تحلیل‌های واریانس، میزان و نحوه تاثیر پارامترها بر استحکام کششی نمونه‌ها مشخص شد.

۳. نتایج و بحث

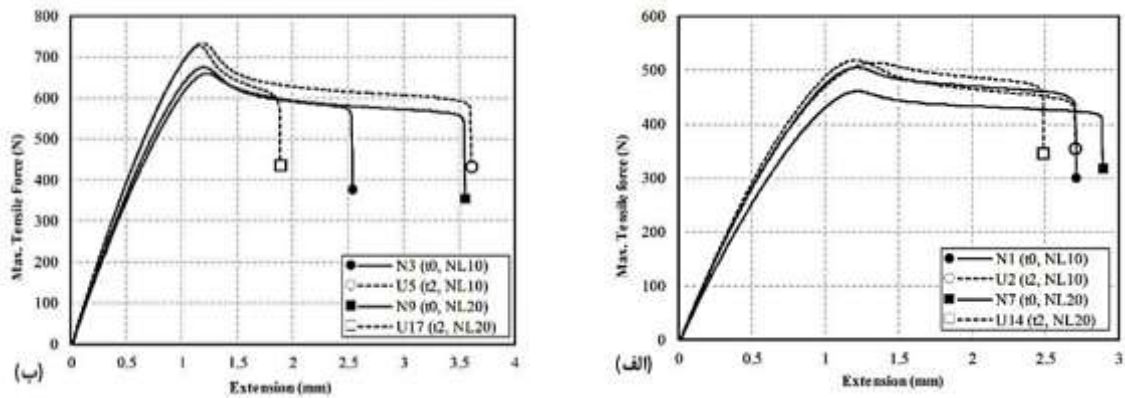
نتایج به دست آمده در این مطالعه در دو بخش ارائه شده است. در بخش اول استحکام کششی نمونه‌هایی که روی آنها امواج فراصوت اعمال شده است با استحکام کششی نمونه‌های شاهد (بدون اعمال امواج فراصوت) مقایسه شده است. در بخش بعدی آنالیز واریانس روی استحکام کششی نمونه‌ها با هدف بررسی اثر امواج فراصوت و پارامترهای چاپ ارائه شده است. برای اطمینان از تکرارپذیری داده‌ها، هر سطح آزمون سه مرتبه اجرا و داده میانگین در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۱. بررسی اثر اعمال امواج فراصوت

در شکل ۶ نمودارهای نیرو-جاب‌جایی برای نمونه‌های با ۶۰ درصد و ۱۰۰ درصد پر شدن نمایش داده شده است. در این شکل، نمودارهای مشخص شده با U از جدول ۳ (تحت تأثیر ارتعاشات فراصوت) و نمونه‌های مشخص شده با N از جدول ۴ (بدون اعمال ارتعاشات فراصوت) هستند. مطابق شکل ۶، هم در درصد پر شدن پایین (۶۰٪) و هم در درصد پر شدن بالا (۱۰۰٪) اعمال امواج فراصوت سبب افزایش استحکام ABS شده است. علاوه بر این، فارغ از تعداد لایه‌ها، اعمال امواج فراصوت حداکثر نیروی کششی را افزایش داده است. یکی از دلایل این بهبود خواص، نفوذ زنجیره‌های مولکولی در فصل مشترک لایه‌ها و چسبندگی بین لایه‌ها می‌تواند باشد. همچنین امواج فراصوت سبب حذف حفره‌های بین رشته‌های چاپ شده (رسوب یافته) می‌شود که این خود عاملی در بهبود استحکام کششی نمونه‌ها است.

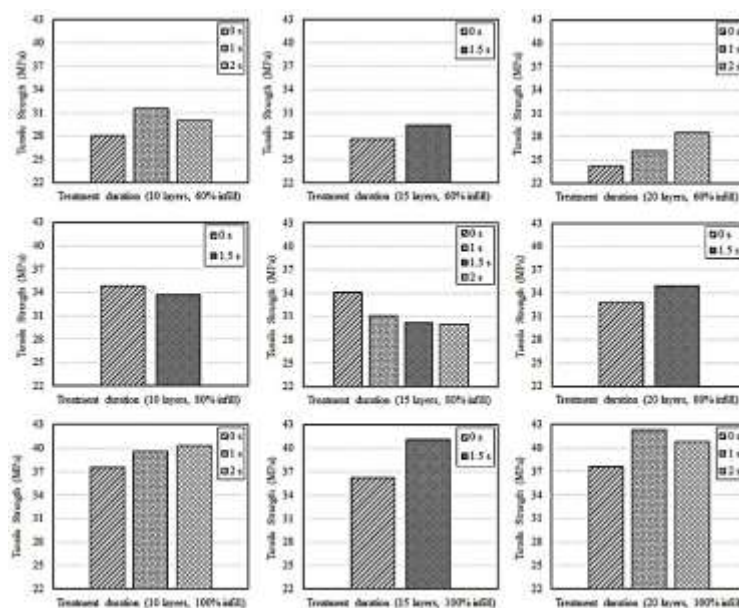
بر اساس نمودارهای نیرو-جاب‌جایی (مشابه آنچه در شکل ۶ نشان داده شده است) استحکام کششی نمونه‌ها استخراج شد

که مقادیر آنها در جداول ۳ و ۴ بیان شده است. برای مقایسه بهتر داده‌های این جداول، مقادیر استحکام کششی به صورت نمودارهای ستونی در شکل ۷ رسم شدند. در این شکل، هر ردیف از نمودارها نشان‌دهنده یک درصد پر شدن و هر ستون از نمودارها مشخص‌کننده یک تعداد لایه است. علاوه بر این، تمامی نمودارها در یک مقیاس و ابعاد رسم شده‌اند تا مقایسه بهتری انجام شود. مطابق با شکل ۷، به جز در درصد پر شدن ۸۰ و تعداد لایه‌های ۱۰ و ۱۵، در سایر موارد اعمال امواج فراصوت سبب افزایش استحکام کششی می‌شود. بنابراین می‌توان اظهار داشت که اعمال فراصوت اثر مثبت داشته و خواص کششی را افزایش می‌دهد. در مورد درصد پر شدن ۸۰، به احتمال زیاد بهینه نبودن شرایط اعمال امواج فراصوت سبب مشاهده رفتار کاهش در خواص کششی شده است. می‌توان چنین استنباط کرد که با افزایش درصد پر شدن، سطوح اتصالی لایه‌ها و نقاط انتقال انرژی فراصوت افزایش یافته و در نتیجه میزان انتقال امواج فراصوت بالا می‌رود. در نتیجه امکان تخریب پلیمر با افزایش زمان اعمال امواج وجود دارد. با افزایش تعداد لایه‌ها (کاهش ضخامت لایه‌ها)، محل‌های مصرف انرژی زیاد شده و در نتیجه اثرپذیری امواج بر خواص بیشتر می‌شود. به عنوان نمونه، در درصد پر شدن ۶۰، با افزایش تعداد لایه‌ها از ۱۰ به ۲۰، بهبود استحکام از ۷٪ به ۱۷/۷٪ افزایش می‌یابد. همچنین در درصد پر شدن ۱۰۰، بهبود استحکام از ۷/۳٪ به ۸/۵٪ افزایش می‌یابد. در نتیجه امواج فراصوت در نمونه‌های با تعداد لایه‌های بیشتر، بالاترین اثرگذاری در بهبود استحکام کششی را دارند.



شکل ۶. مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی بین نمونه‌های پس‌پردازش شده و نمونه‌های شاهد، (الف) نمونه‌ها با درصد پر شدن ۶۰ و (ب)

نمونه‌ها با درصد پر شدن ۱۰۰



شکل ۷. مقایسه مقادیر استحکام کششی نمونه‌های جداول ۳ و ۴ (نمودارهای هر ردیف یک درصد پر شدن یکسان و نمودارهای هر ستون تعداد لایه یکسانی دارند)

۲-۳. آنالیز واریانس اثر امواج فراصوت و پارامترهای چاپ سه‌بعدی

نتایج آنالیز واریانس (برای داده‌های جدول ۳) در جدول ۵ آمده است. اگر مقدار شاخص p هر یک عوامل ذکر شده در ستون اول این جدول کمتر از ۰/۰۵ باشد به معنی تأثیرگذاری قابل توجه آن عامل است. همچنین مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۱ نشان می‌دهد که آن عامل بی‌تأثیر است یا در مقابل سایر عوامل تأثیر قابل توجهی ندارد.

مطابق جدول ۵، تابع درون‌یابی به‌دست آمده برای استحکام کششی شاخص p کمتر از ۰/۰۰۰۱ دارد. بنابراین می‌توان گفت که تابع به‌دست آمده، پیش‌بینی معناداری انجام می‌دهد. مقدار شاخص فیشر^۷ (شاخص F) این تابع درون‌یاب برابر با ۳۵/۳۰ به‌دست آمده است. این مقدار به احتمال کمتر از ۰/۰۱ درصد به دلیل نوفه^۸ به‌دست آمده است. به عبارت دیگر، اثر عوامل خطا در پیش‌بینی تابع درون‌یاب استحکام کششی قابل صرف‌نظر است. مقدار شاخص‌های p و فیشر برای نقص برازش تابع درون‌یاب به ترتیب برابر با ۰/۶۷۵ و

۰/۷۳۴ است. اولاً شاخص فیشر مقدار بسیار کوچکی دارد. ثانیاً همین مقدار نیز به احتمال ۶۷/۵ درصد به دلیل نوفه ایجاد شده است. بنابراین مجموعه داده‌های آماری جدول ۵ بیانگر این نکته است که تابع درون‌یاب توسعه یافته معنی‌دار بوده و عوامل خطا در پیش‌بینی‌های آن اثر بسیار ناچیزی دارد.

جدول ۵. نتایج آنالیز واریانس برای نمونه‌های کششی که تحت امواج فراصوت قرار گرفته‌اند

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	شاخص F	شاخص p
تابع درون‌یابی	$۱۰۶ \times ۲/۰۹$	۸	$۱۰۵ \times ۲/۶۲$	۳۵/۳۰	<۰/۰۰۰۱
A - تعداد لایه‌ها	۲۳۱/۲۱	۱	۲۳۱/۲۱	۰/۰۳۱	۰/۸۶۴
B - درصد پر شدن	$۱۰۶ \times ۱/۶۶$	۱	$۱۰۵ \times ۱/۶۶$	۲۲۴/۳۴	<۰/۰۰۰۱
C - زمان	۱۰۰۴/۰۱	۱	۱۰۰۴/۰۱	۰/۱۳۵	۰/۷۲۲
AB	۵۵۹۸۰/۲۱		۵۵۹۸۰/۲۱	۷/۵۶	۰/۰۲۵
A ²	۵۴۱۶۳/۵۱	۱	۵۴۱۶۳/۵۱	۷/۳۱	۰/۰۲۷
B ²	$۱۰۵ \times ۱/۶۰$	۱	$۱۰۵ \times ۱/۶۰$	۲۱/۵۹	۰/۰۱۷
C ²	۲۷۴۰۷/۱۷	۱	۲۷۴۰۷/۱۷	۳/۷۰	۰/۰۹۱
ABC	۲۰۳۰۰/۱۴	۱	۲۰۳۰۰/۱۴	۲/۷۴	۰/۱۳۷
باقی‌مانده	۵۹۲۷۴/۰۵	۸	۷۴۰۹/۲۶	-	-
نقص برازش	۴۰۷۶۵/۳۹	۶	۶۷۹۴/۲۳	۰/۷۳۴	۰/۶۷۵
خطای خالص	۱۸۵۰۸/۶۶	۲	۹۲۵۴/۳۳	-	-
مجموع	$۱۰۶ \times ۲/۰۹$	۱۶	-	-	-

مطابق شکل ۸، مقادیر استحکام کششی پیش‌بینی شده توسط تابع درون‌یابی پراکندگی بسیار کمی نسبت به خط ۴۵ درجه (مقادیر تجربی) دارند.

جدول ۶. مقادیر شاخص‌های آماری در تعیین دقت تابع

درون‌یابی استحکام کششی

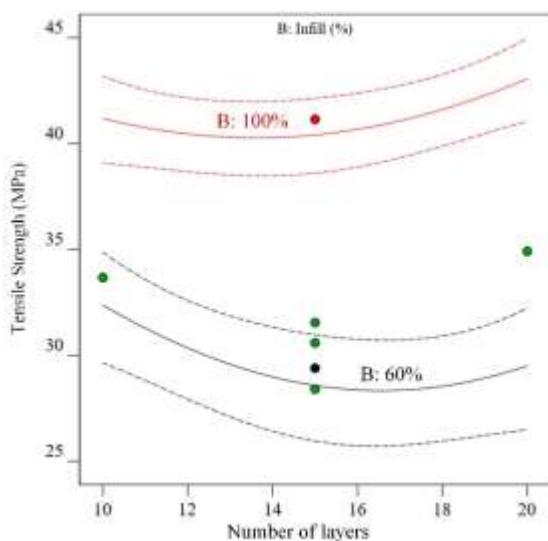
شاخص	مقدار
انحراف معیار	۸۶/۰۸
مقدار میانگین	۱۱۵۰/۰۱
ضریب تغییرات	۷/۴۸
ضریب تعیین (R^2)	۰/۹۷۲۵
ضریب تعیین تعدیل شده	۰/۹۴۴۹
ضریب تعیین پیش‌بینی	۰/۹۱۵۷
دقت کافی	۱۷/۳۰

همچنین میزان دقت تابع درون‌یابی را می‌توان براساس شاخص‌های آماری جدول ۶ مورد بررسی قرار داد. شاخص‌های آماری این جدول نشان می‌دهند که تابع درون‌یابی استحکام کششی از دقت بالایی برخوردار است. زیرا ضرایب تعیین^۹ (R^2)، تعیین پیش‌بینی و تعیین تعدیل شده بسیار نزدیک به ۱ هستند. همچنین ضرایب تعیین پیش‌بینی و تعدیل شده هم‌خوانی قابل‌قبولی با یکدیگر دارند (اختلاف آنها کمتر از ۰/۲ است). مقدار دقت کافی^{۱۰} نیز که نشان‌دهنده نسبت سیگنال به نوفه برابر با ۱۷/۳ است. مقادیر بالای ۴ برای دقت کافی، مقادیر مطلوبی بوده و نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول تابع برای درون‌یابی فضای مسئله است. این ادعا را می‌توان با رسم منحنی مربوط به مقادیر پیش‌بینی مدل در مقابل مقادیر به‌دست آمده از آزمایش‌های کشش نیز نشان داد که در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

مقادیر شاخص فیشر که در جدول ۵ بیان شده است، هم‌خوانی دارد.

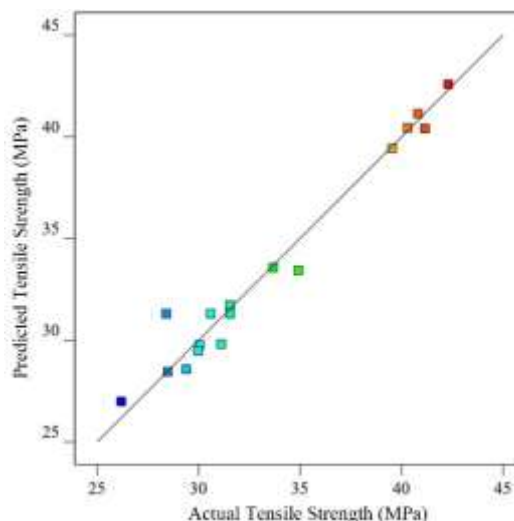
$$\begin{aligned} (\text{Tensile Strength})^2 = & 982.14 \\ & -4.81A + 407.7B - 10.02C \\ & +83.65AB + 142.18A^2 + 244.34B^2 \\ & -101.14C^2 - 50.37ABC \end{aligned} \quad (1)$$

مقدار شاخص فیشر ۷/۵۶ برای AB در جدول ۵ و همچنین قرارگیری جمله AB در معادله ۱ نشان می‌دهد که پارامترهای تعداد لایه‌ها و درصد پر شدن با یکدیگر اثر متقابل دارند. این اثر متقابل در شکل ۹ نمایش داده شده است. در درصد پر شدن ۱۰۰، با افزایش تعداد لایه‌ها بهبود استحکام کششی رخ می‌دهد درحالی‌که در درصد پر شدن ۶۰، این روند کاهش می‌یابد.



شکل ۹. اثر متقابل پارامترهای درصد پر شدن و تعداد لایه‌ها

تغییرات در استحکام کششی نمونه‌های ABS با تغییر در تعداد لایه‌ها و درصد پر شدن به صورت سه‌بعدی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. مطابق این شکل، بیشترین استحکام کششی در درصد پر شدن ۱۰۰ و تعداد لایه ۲۰ به دست می‌آید. همچنین کمترین استحکام کششی مربوط به درصد پر شدن ۶۰ و تعداد لایه ۲۰ است.

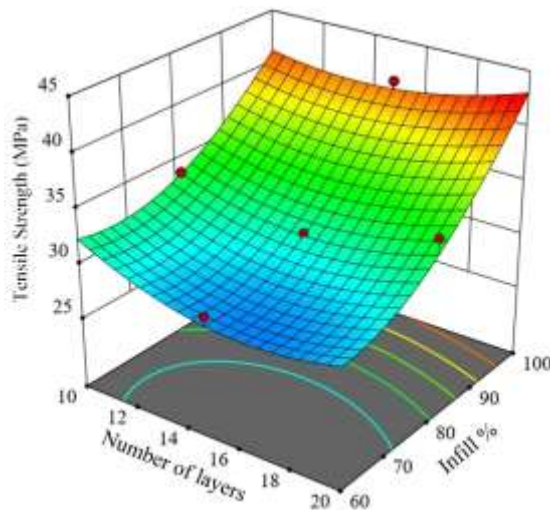


شکل ۸. مقایسه بین مقادیر استحکام کششی پیش‌بینی شده توسط تابع درجه دو با مقادیر تجربی

از طرف دیگر، مطابق با جدول ۵، از میان پارامترهای مورد بررسی، درصد پر شدن قطعه (B) شاخص p کمتر از ۰/۰۰۰۱ و شاخص فیشر ۲۲۴/۳۴ دارد. این مقادیر در مقایسه با مقادیر شاخص‌های آماری دیگر اختلاف بسیار بالایی دارند. به عبارت دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که درصد پر شدن اثر قابل توجه داشته، به طوری که اثرات پارامترهای دیگر قابل مشاهده نیست. غیر از این، جملات AB، A²، B² نیز جزء عبارات با تأثیرگذاری بالا هستند.

آنچه در مورد اثر پارامترها بر روی استحکام کششی براساس جدول آنالیز واریانس بحث شد، می‌توان براساس ضرایب پارامترها در تابع درون‌یابی نیز بیان نمود. تابع درون‌یابی استحکام کششی در معادله ۱ بیان شده است. در این معادله ضریب مثبت به معنی اثر افزایشی و ضریب منفی به معنی اثر کاهش می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب پارامتر درصد پر شدن (B) مثبت بوده و بزرگ‌ترین مقدار را دارد. به عبارت دیگر این پارامتر بیشترین اثر را بر استحکام کششی دارد. در جایگاه‌های بعدی اهمیت عبارات B²، A²، C² و AB قرار دارند. ضرایب جملات معادله ۱ با

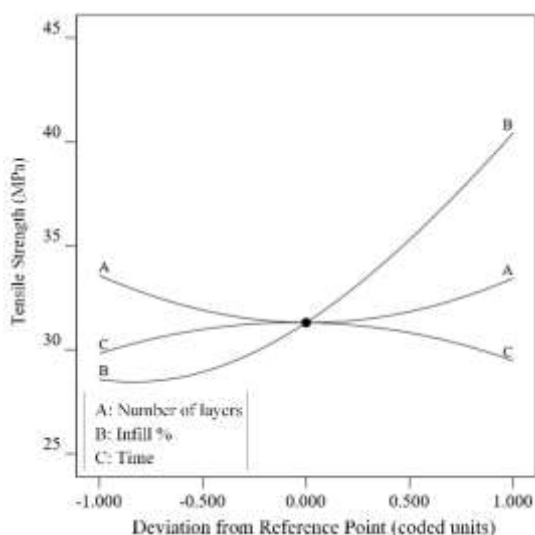
چنین مشاهده‌ای بیانگر این نکته است که عامل غالب درصد پر شدن بوده و تعداد لایه (ضخامت لایه) در جایگاه دوم اهمیت قرار دارد. صحت این نتیجه‌گیری را می‌توان با رسم نمودار اغتشاش^{۱۱}، مطابق شکل ۱۱، بررسی نمود.



شکل ۱۰. سطح پاسخ برای تغییر در استحکام کششی در مقابل تغییرات تعداد لایه‌ها و درصد پر شدن

در شکل ۱۱، تغییرات استحکام کششی نسبت به تغییر هر پارامتر، درحالتی که بقیه پارامترها در مقدار میانی (درصد پر شدن ۸۰، تعداد لایه ۱۵ و زمان اعمال امواج فراصوت ۱/۵ ثانیه) ثابت نگه داشته شده‌اند، رسم شده است. در این شکل، منحنی پارامتر درصد پر شدن بیشترین شیب و تغییرات را دارد. به عبارت دیگر با افزایش درصد پر شدن، بیشترین افزایش در استحکام کششی رخ می‌دهد. دلیل این مشاهده این است که در درصد پر شدن بالاتر، حجم بیشتری از ماده در مقطع نمونه وجود داشته و می‌تواند بارهای بزرگ‌تری را تحمل کند. با افزایش تعداد لایه‌ها، ابتدا کاهش استحکام کششی و در ادامه افزایش استحکام رخ داده است. این رفتار به احتمال زیاد به دلیل اثرات متقابل پارامترهای درصد پر شدن و تعداد لایه است که در شکل ۹ نیز نمایش داده شد. همچنین در مورد مدت زمان اعمال امواج فراصوت، با افزایش زمان، ابتدا کاهش و سپس افزایش استحکام رخ داده است.

با افزایش زمان اعمال امواج فراصوت، پیوند زنجیره‌های پلیمری بین لایه‌ها تقویت شده و همچنین حفره‌های بین مواد رسوب یافته که یکی از مهم‌ترین علل ضعف قطعات چاپ سه‌بعدی است، کاهش قابل توجه می‌یابد؛ ولی با افزایش بیشتر زمان، احتمال تخریب پلیمر وجود داشته و ماده تضعیف می‌شود. به همین دلیل انتخاب مدت زمان مناسب برای رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب بسیار ضروری است.



شکل ۱۱. تغییرات استحکام کششی با تغییر در مقدار پارامترهای مورد مطالعه

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی هم‌زمان اثر ارتعاشات فراصوت توان بالا و پارامترهای چاپ سه‌بعدی بر روی خواص مکانیکی قطعات ABS پرداخته شد. روش اعمال ارتعاشات به صورت عملیات ثانویه و بعد از اتمام فرایند چاپ قطعات است که موارد ذیل قابل نتیجه‌گیری است:

- اعمال ارتعاشات فراصوت منجر به افزایش خواص مکانیکی قطعات در مقایسه با نمونه‌های کار نشده (بدون اعمال ارتعاشات فراصوت) شده است.
- با افزایش مقدار درصد پرشدگی، استحکام نمونه‌ها افزایش می‌یابد که در این زمینه اثرپذیری ارتعاشات فراصوت نیز بیشتر شده و منجر به افزایش استحکام

- با کاهش ضخامت لایه‌ها (بیشتر شدن تعداد لایه‌ها)، حداکثر تا ۴۲/۳ مگاپاسکال در مقدار پرشدگی ۱۰۰ درصد شده است. به دلیل افزایش محل‌های مصرف و تمرکز انرژی فراصوت، اثرپذیری ارتعاشات افزایش می‌یابد.

۵. مأخذ

- [1] Fico, Daniela, Daniela Rizzo, Raffaele Casciaro, and Carola Esposito Corcione, "A review of polymer-based materials for fused filament fabrication (FFF): focus on sustainability and recycled materials", *Polymers*, 2022, Vol.14, no.3, p.465.
- [2] Singh, Sunpreet, Gurminder Singh, Chander Prakash, and Seeram Ramakrishna, "Current status and future directions of fused filament fabrication", *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, Vol.55, pp.288-306.
- [3] Ramazani, Haidar, and Abdolvahed Kami, "Metal FDM, a new extrusion-based additive manufacturing technology for manufacturing of metallic parts: a review", *Progress in Additive Manufacturing*, 2022, Vol.7, no.4, pp.609-626.
- [4] Brenken, Bastian, Eduardo Barocio, Anthony Favaloro, Vlastimil Kunc, and R. Byron Pipes, "Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review", *Additive Manufacturing*, 2018, Vol.21, pp.1-16.
- [5] Safari, Faraz, Abdolvahed Kami, and Vahid Abedini, "3D printing of continuous fiber reinforced composites: A review of the processing, pre-and post-processing effects on mechanical properties", *Polymers and Polymer Composites*, 2022, Vol.30, p.09673911221098734.
- [6] Maidin, S., M. K. Muhamad, and Eujin Pei, "Experimental setup for ultrasonic-assisted desktop fused deposition modeling system", In *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol.761, pp.324-328. Trans Tech Publications Ltd.
- [7] Tofangchi, Alireza, Pu Han, Julio Izquierdo, Adithya Iyengar, and Keng Hsu, "Effect of ultrasonic vibration on interlayer adhesion in fused filament fabrication 3D printed ABS", *Polymers*, 2019, Vol.11, no.2, p.315.
- [8] Li, Guiwei, Ji Zhao, Wenzheng Wu, Jili Jiang, Bofan Wang, Hao Jiang, and Jerry Ying Hsi Fuh, "Effect of ultrasonic vibration on mechanical properties of 3D printing non-crystalline and semi-crystalline polymers", *Materials*, 2018, Vol.11, no.5, p.826.
- [9] Li, Guiwei, Ji Zhao, Jili Jiang, Hao Jiang, Wenzheng Wu, and Mengxin Tang, "Ultrasonic strengthening improves tensile mechanical performance of fused deposition modeling 3D printing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, Vol.96 pp.2747-2755.
- [10] Wu, Wenzheng, Jialin Li, Jili Jiang, Qingping Liu, Aodu Zheng, Zheng Zhang, Ji Zhao, Luquan Ren, and Guiwei Li, "Influence Mechanism of Ultrasonic Vibration Substrate on Strengthening the Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling", *Polymers*, 2022, Vol.14, no.5, p.904.
- [11] Guivier, Manon, Jesse Kuebler, Trevor Swanson, Christopher Lawson, Lucia Fernandez-Ballester, Mehrdad Negahban, and Michael P. Sealy, "Mechanical Behavior of ABS after Interlayer Ultrasonic Peening Printed by Fused Filament Fabrication", In *2021 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin, 2021.
- [12] Billah, Kazi Md Masum, Jose L. Coronel Jr, Luis Chavez, Yirong Lin, and David Espalin, "Additive manufacturing of multimaterial and multifunctional structures via ultrasonic embedding of continuous carbon fiber", *Composites Part C: Open Access*, 2021, Vol.5, p.100149.

- [13] Qiao, Jing, Yingrui Li, and Longqiu Li, "Ultrasound-assisted 3D printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic (FRTP) composites", *Additive Manufacturing*, 2019, Vol.30, p.100926.
- [14] Paganin, L. C., and G. F. Barbosa, "A comparative experimental study of additive manufacturing feasibility faced to injection molding process for polymeric parts", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, Vol.109, pp.2663-2677.
- [15] <https://www.astm.org/d0638-14.html>

[۱۶] عابدینی، ر.، فرتاش‌وند، و.، سالاری، ر. "تعیین مشخصه‌های عملکردی و پایش سلامت پیزوالکتریک به روش تحلیل امپدانسی"، نشریه علمی صوت و ارتعاش، دوره ۱۱، شماره ۲۱، صفحه ۱۴-۲۹.

[۱۷] سیوکی، ع.، عابدینی، ر.، عبدالله، ا.، فرتاش‌وند، و.، "بررسی سمت و سوی کاربرد ارتعاشات توان بالای فراصوتی در فرآیندهای جوشکاری"، نشریه علمی صوت و ارتعاش، دوره ۱۰، شماره ۲۰، صفحه ۳۵-۵۵.

پی‌نوشت:

1. Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)
2. Fused Deposition Modeling (FDM)
3. Ultrasonic Peening
4. Response Surface Methodology (RSM)
5. Central Composite
6. Degradation
7. Fisher Index
8. Noise
9. Coefficient of determination
10. Adequate Precision
11. Perturbation Plot