

ارزیابی غیرمخرب عیوب مصنوعی قطعات چاپ شده به روش FDM با استفاده از ترموگرافی پالسی

محمد حسنی^۱، داود اکبری^{۲*}، امیرحسین بهروش^۳، پویا فرجی کلجاهی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۴ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

برجسته‌ها

- دو نمونه دارای عیوب مصنوعی یکسان و میزان پرشوندگی متفاوت، از طریق فرایند FDM ساخته شد.
- جهت ارزیابی عیوب در قطعات از روش غیرمخرب ترموگرافی با تحریک پالسی استفاده گردید.
- هر چه درصد پرشوندگی نمونه‌های چاپ شده بیشتر باشد، تشخیص پذیری و قابلیت ارزیابی عیوب بهتر است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

*نویسنده مسئول:

daakbari@modares.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

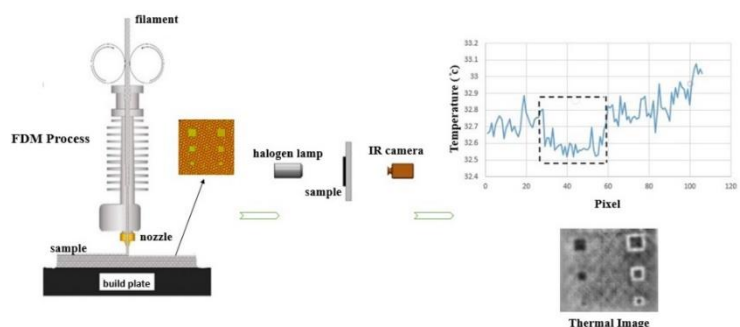
آزمون غیرمخرب

ترموگرافی فعال

ساخت افزایشی

فرآیند FDM

چکیده گرافیکی



چکیده

در سال‌های اخیر، تلاش‌های قابل توجهی جهت ارزیابی کیفیت قطعات ساخته شده به روش ساخت افزایشی صورت گرفته است و تکنیک‌های مختلفی به کار گرفته شده است. شناسایی عیوب نقش بسیار مهمی در کنترل محصولات نهایی در صنعت چاپ سه بعدی دارد و یکی از عناصر کلیدی در ارزیابی نهایی تولید محسوب می‌شود. در این مقاله، دو نمونه مکعبی شکل از جنس پلیمر PLA دارای عیوب مصنوعی یکسان و میزان پرشوندگی بین لایه‌های متفاوت، از طریق فرایند لایه نشانی مذاب (FDM) ساخته شد. جهت ارزیابی عیوب در این قطعات، از روش ترموگرافی فعال با تحریک حرارتی استفاده شده است. تحریک حرارتی نمونه‌ها به صورت پالس حرارتی با دو روش بازتابی و عبوری انجام شد. در ادامه برای اعتبارسنجی از نتایج به دست آمده، نمودار دما-پیکسل و نحوه توزیع دما برای هر نمونه رسم گردید. همچنین، برای ایجاد سهولت در شناسایی و بهبود کیفیت تصاویر به دست آمده، اثر فیلتر گوسین بر روی تصاویر حرارتی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی به دست آمده، کارایی بازرسی ترموگرافی با تحریک حرارتی، برای تشخیص عیوب در قطعات تولیدی با فرایند لایه نشانی مذاب را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

(DIC)، برش‌نگاری و روش ترموگرافی مادون‌قرمز برای بازرسی کنترل کیفیت قطعات تولیدی با این فرایند پیشنهاد می‌گردد. از میان روش‌های ذکر شده، روش ترموگرافی مادون‌قرمز روشی پرکاربرد و موفق بوده است.

از جمله پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، پژوهش عمر و همکاران [۱۴] است که یک نمونه از جنس PLA ساخته شده از روش FDM را با در نظر گرفتن عیوب هندسی مختلف، با ترموگرافی مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. از دیگر پژوهش‌های انجام گرفته در این باره، پژوهش پیرس و همکاران [۱۵] است. در این پژوهش، یک نمونه پلیمری از جنس ABS ساخته شده از طریق فرایند ساخت افزایشی به وسیله آزمون ترموگرافی پالسی مورد بررسی قرار گرفت. ابعاد نمونه پرینت شده $80 \times 50 \times 8$ با ضخامت ۸ میلی‌متر بوده است. عیوبی با ابعاد 5×5 ، 8×8 و 10×10 میلی‌متر را در عمق‌های مختلفی از قطعه قرار دادند و در انتها به دنبال تشخیص عمق عیوب، از روشی با عنوان شیب تباین دمایی استفاده نمودند و در نهایت توانستند عمق را با این نوع تحلیل شناسایی کنند [۱۵]. در پژوهش دیگر، باربارا و همکاران [۱۷]، یک روش جدید مبتنی بر ترموگرافی را مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی، یک نمونه ساخته شده به روش FDM دارای عیوب مصنوعی جایگذاری شده از جنس پلیمر ABS مورد آزمون ترموگرافی قرار گرفت. سپس از ترموگرام‌های به دست آمده، یک الگوریتم جدید برای افزایش کنتراست بین پس‌زمینه و نواحی نقص در چاپ سه‌بعدی آماده شد. در ادامه این روش برای شناسایی پارامترهای عیوب انتخابی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تجربی کارایی بالای روش پیشنهادی را برای تجسم ساختار داخلی نمونه و تعیین نقص و اندازه، از جمله عمق و قطر نشان می‌دهد [۱۶].

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته بر روی قطعات تولیدی با فرایند FDM، تمام نمونه‌های مورد آزمایش با میزان پرشوندگی کامل ساخته شده‌اند و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در حالی که یکی از پارامترهای مهم در هنگام ساخت قطعات با فرایند FDM، میزان درصد پرشوندگی است که بسیار بر زمان و هزینه ساخت تأثیرگذار خواهد بود. به‌طور طبیعی

با پیشرفت‌های اخیر در حوزه فناوری‌های ساخت افزایشی، قطعات تولیدی با این فرایندها، دیگر نه تنها برای نمونه‌سازی بلکه به‌عنوان محصولات نهایی استفاده می‌شوند و در کاربردهای مختلف صنعتی به‌طور گسترده مورد استقبال قرار می‌گیرند [۱]. همچون روش‌های دیگر تولید، قطعات ساخته شده با این روش‌ها نیز، دارای عیوبی همچون ناصافی سطح، تاب برداشتن، حفره و ... در حین فرایند ساخت خواهند بود که در صورت استفاده از آن‌ها ممکن است مشکلاتی به وجود آید [۲]. لذا با افزایش استفاده از فناوری‌های ساخت افزایشی برای تولید محصول، نیاز به کنترل کیفیت نیز افزایش می‌یابد و بازرسی این قطعات، مهم خواهد بود. از این‌رو، روش‌های غیرمخرب بسیاری برای کنترل کیفیت قطعات ساخته شده به روش ساخت افزایشی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله روش‌هایی نظیر بازرسی چشمی [۳]، پروفایلمتری لیزری [۴] که اغلب برای ارزیابی کیفیت سطح محصولات و روش‌هایی همانند ترموگرافی کامپیوتری [۵ و ۶] و سونوگرافی [۷ و ۸] که برای بررسی ساختار داخلی و تشخیص عیوب زیرسطحی استفاده شده‌اند. یکی از متداول‌ترین فرایندهای چاپ سه‌بعدی، فرایند لایه نشانی مذاب است که در آن برای تولید نمونه از اکستروود کردن فیلامنت‌هایی از جنس پلیمرهای گرمانرم استفاده می‌شود [۹]. این روش به دلیل ارزان بودن و سادگی، حوزه‌های کاربردی فراوانی پیدا کرده است. به کمک این روش امکان تولید قطعه با شکل هندسی پیچیده در زمان کوتاه وجود دارد [۱۰]. از حوزه‌های کاربردی این فرایند می‌توان به دندان‌پزشکی [۱۱]، ابزارسازی سریع [۱۰] و صنایع الکترونیک [۱۲] اشاره کرد. از جمله مشکلات موجود در قطعات ساخته شده به روش FDM، مغایرت ابعاد نمونه ساخته شده در مقایسه با مدل اولیه، قطع شدن نازل اکستروودر در حین فرایند چاپ و عدم چسبندگی لایه‌ها می‌باشند که همین امر موجب شده کنترل کیفیت قطعات FDM به‌عنوان یک چالش باقی بماند [۱۳]. با توجه به ساختار پلیمری و چینش لایه‌ها در فرایند FDM، روش‌های آزمون غیرمخرب نوین مانند برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال

برای جسم غیرسیاه، ضریب نشر، نسبت انرژی انتشار یافته از سطح جسم به جسم کاملاً سیاه تعریف می‌شود که بیانگر میزان راندمان سطح در انتشار انرژی مادون قرمز است.

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda,b}} \quad (3)$$

که در آن I_{λ} انرژی تابشی جسم در طول موج λ و $I_{\lambda,b}$ انرژی تابشی جسم سیاه در همان طول موج است.

مطابق با رابطه (۱)، هرچه جسم در درجه حرارت بالاتری قرار داشته باشد، میزان تشعشع مادون قرمز بیشتر بوده و در فرکانس بالاتر و طول موج پایین تر منتشر می‌شود.

اصل اساسی در بازرسی قطعات به روش ترموگرافی، وجود ضریب هدایت حرارتی متفاوت بین نواحی سالم و معیوب می‌باشد که موجب تفاوت دمایی پس از تحریک حرارتی و به عبارتی اختلاف دما میان نواحی سالم و معیوب می‌گردد. این ناهمگنی ناخواسته‌ی دمایی، سبب شناسایی عیوب موجود در قطعه توسط دوربین حرارتی فرسرخ با تحلیل و پردازش تصاویر حرارتی، بعد از انجام آزمون می‌گردد [۱۸].

یکی از روش‌های حرارت نگاری، حرارت نگاری با تحریک تابشی است. در این روش حرارت نگاری، از لامپ‌هایی با توان حرارتی بالا به‌عنوان منابع حرارتی برای تحریک قطعات توسط پالس‌های حرارتی استفاده می‌شود. در این روش، گرم کردن و تحریک نمونه‌ها از طریق اعمال ناگهانی انرژی به‌وسیله نور لامپ در یک بازه زمانی کوتاه انجام می‌گیرد و تغییر دمای سطح نمونه، بلافاصله پس از تحریک با دوربین حرارت نگاری ثبت می‌شود [۱۸ و ۱۹]. در طی این فرایند، اثر حرارتی ناشی از نواحی معیوب به سطح قطعه رسیده و امکان شناسایی عیوب فراهم می‌گردد. در زمینه آزمون غیرمخرب، حرارت نگاری پالسی به دلیل سرعت بالا در بازرسی، محدوده کاربرد وسیعی پیدا کرده است [۲۰ و ۲۱].

۳- مواد و روش پژوهش

۳-۱- ساخت نمونه‌ها

در این مقاله، دو نمونه‌ی مستطیلی شکل به ابعاد 80×80 با ضخامت ۶ mm از جنس پلیمر پلی لاکتیک اسید (PLA) به روش لایه نشانی مذاب ساخته شد. قطر فیلامنت مورد استفاده برای ساخت قطعات، ۱/۷۵ mm است. سایر

هرچه میزان پرشوندگی داخلی بیشتر شود، قطعه سنگین تر و در نهایت ماده اولیه بیشتر و زمان طولانی‌تری برای ساخت نیاز خواهد بود. هدف اصلی در این مقاله، شناسایی عیوب مصنوعی ایجاد شده در دو نمونه یکسان با دو میزان پرشوندگی متفاوت است و به امکان‌سنجی روش ترموگرافی در ارزیابی قطعات تولیدی از فرایند FDM با پرشوندگی محدود می‌پردازد. لذا با ساخت نمونه‌هایی با درصد پرشوندگی متفاوت، روش ترموگرافی در شناسایی عیوب مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

۲- اصول روش ترموگرافی

هر جسم در دمای بالاتر از صفر کلونین از خود امواج حرارتی منتشر می‌کند که به‌صورت طیفی از امواج در طول موج‌های مادون قرمز (۱ mm تا $1 \mu\text{m}$) منتشر می‌شوند. برای اندازه‌گیری شدت امواج صادره از اجسام، از دوربین ترموگرافی یا حرارت نگاری استفاده می‌گردد که از تعداد زیادی حسگر حرارتی تشکیل شده است و هر یک از حسگرها، دمای بخش کوچکی از میدان دید لنز دوربین را اندازه‌گیری می‌کند. بعد از دریافت این امواج توسط دوربین حرارت نگاری، انرژی مدنظر توسط حسگرهای دوربین، به یک سیگنال الکترونیکی و در نهایت تبدیل به یک تصویر گرمایی می‌شود که دمانگاشت یا ترموگرام نام دارد. مقدار انرژی تابشی به عواملی نظیر دمای جسم، دمای سطح، ضریب نشر و دمای محیط وابسته است. شدت تشعشع مادون قرمز از جسم سیاه (قانون پلانک) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۷]:

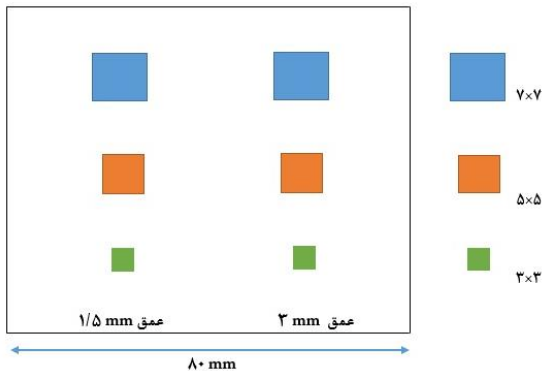
$$I_{\lambda,b} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \exp\left(\frac{hc}{\lambda KT}\right) - 1} \quad (1)$$

که در آن T دمای مطلق، h ثابت پلانک، c سرعت نور، K ثابت بولتزمن و λ طول موج ساطع شده می‌باشد. با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی پلانک، مجموع پرتو منتشر شده از جسم سیاه به دست می‌آید [۱۷]:

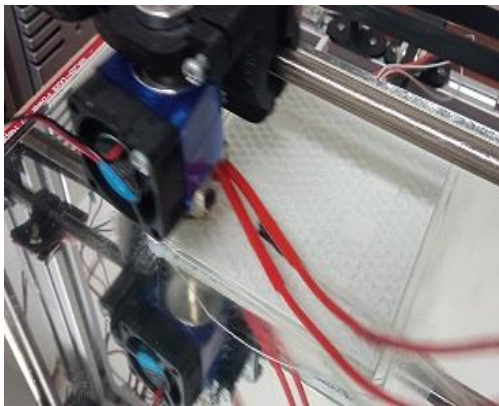
$$I = \sigma T^4 \quad (2)$$

که در این رابطه، σ ثابت استفان-بولتزمن است.

گرفته شد. در نهایت هر یک از نمونه‌ها تحت دو حالت بازتابی و عبوری مورد آزمایش قرار گرفت.



شکل (۱): موقعیت عیوب مصنوعی در نمونه‌های ساخته شده.



شکل (۲): تصویری از نمونه پلیمری دوم در زمان ساخت و نحوه قرارگیری عیوب.



شکل (۳): چیدمان آزمایش در حالت آزمون بازتابی.

جدول (۲): میزان پرشوندگی نمونه‌ها

نمونه	میزان پرشوندگی
۱	٪۱۰۰
۲	٪۲۵

اطلاعات مربوط به ساخت نمونه‌ها، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱): پارامترهای ساخت نمونه

پارامتر	اندازه
دمای چاپ	۲۰۰ °C
سرعت پرینت	۴۵ mm/s
قطر نازل	۰/۴ mm
ضریب سرعت اکستروژن	٪۱۰۰
ضخامت هر لایه	۰/۲ mm
عرض تزریق	۰/۴ mm
ضخامت دیواره	۲ لایه
الگوی پرشوندگی	لانه زنبوری

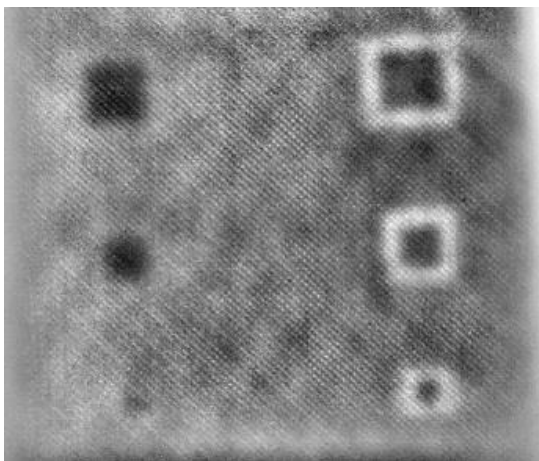
در این قطعات، شش عیب جافتادگی بین لایه‌ای به صورت مصنوعی با ضخامت ۱ mm در هر نمونه قرار داده شد (عیوب مدنظر قبل از ساخت، در فایل CAD در نظر گرفته شد). ابعاد و موقعیت مکانی عیوب در هر نمونه نیز، یکسان است (شکل‌های ۱ تا ۳). پارامتر متمایز در ساخت نمونه‌ها، میزان درصد پرشوندگی است. میزان تراکم بافت مشبک در لایه-های داخلی مدل برای هر قطعه متفاوت در نظر گرفته شد. در جدول ۲ درصد پرشوندگی برای ساخت هر نمونه آورده شده است. در نهایت جهت به حداقل رساندن بازتاب نور، حذف نویز در تصاویر ترموگرافی و همچنین به دلیل جذب حداکثری انرژی اعمالی، سطح خارجی نمونه‌ها با اسپری مشکی مات رنگ آمیزی شد.

۲-۳- انجام آزمایش‌ها و تجهیزات مورد استفاده

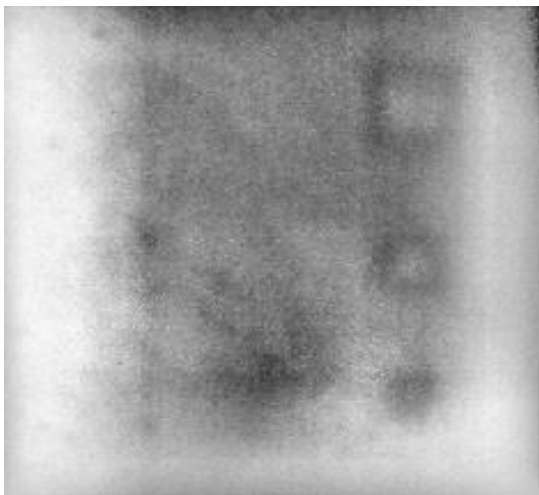
در انجام آزمایش‌ها، از تکنیک ترموگرافی فعال با روش تحریک حرارتی استفاده شد. شرایط لازم طبق استاندارد ISO 10880 فراهم شد. در این مقاله، از لامپ هالوژنی با توان ۱ KW برای تحریک حرارتی استفاده گردید و هر یک از نمونه‌ها به مدت ۵ s مورد تحریک حرارتی قرار گرفت. جهت ثبت تصاویر حرارتی حاصل، از دوربین حرارتی FLUKE TIS75 با رزولوشن ۳۲۰×۲۴۰ پیکسل و حساسیت حرارتی ۰/۰۸ °C استفاده شد. فاصله دوربین تا نمونه ۲۰ cm و فاصله منبع تحریک حرارتی از قطعه نیز ۱۰ cm در نظر

۴- نتایج

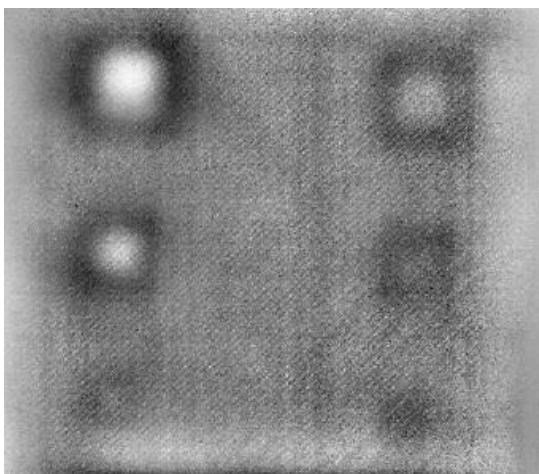
آزمایش ترموگرافی با دو روش بازتابی و عبوری انجام گردید. دوربین حرارتی دمای هر یک از نمونه‌های مورد آزمایش را پس از خاموش شدن منبع تحریک حرارتی، به مدت ۱۰۰ s ثبت نمود. از میان تصاویر حرارتی ثبت شده، بهترین تصویر حرارتی از نظر وضوح عیوب برای هر نمونه، در این بازه زمانی انتخاب شد.



شکل (۴): تصویر حرارتی به دست آمده از بازرسی نمونه پلیمری اول (حالت عبوری).



شکل (۵): تصویر حرارتی به دست آمده از بازرسی نمونه دوم (حالت عبوری).



شکل (۶): تصویر حرارتی به دست آمده از بازرسی نمونه اول (حالت بازتابی).

۴-۱- بررسی نتایج به دست آمده از حالت عبوری

در شکل ۴ تصویر حرارتی به دست آمده از بازرسی نمونه پلیمری اول با میزان پرشوندگی ۱۰۰٪ در حالت عبوری آورده شده است. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، تمامی عیوب نمونه به جز یک عیب، قابل تشخیص هستند. بهترین تصویر حرارتی استخراج شده از حالت آزمایش عبوری برای نمونه دوم با میزان پرشوندگی ۲۵٪، در شکل ۵ ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، عیوب موجود در عمق $1/5\text{mm}$ از سطح جلو در حالت آزمایش عبوری، در عمق بیشتری از سطح پشت قرار می گیرند. به همین دلیل عیوب در عمق 3mm از سطح جلوی نمونه، به سهولت در این حالت آزمایش قابل تشخیص هستند ولی شناسایی عیوب موجود در عمق دیگر، امری دشوار می باشد. از دلایلی که می تواند علت بهتر بودن نتایج حاصل از نمونه با پرشوندگی بیشتر باشد، تغییرات بیشتر انرژی حرارتی اعمالی است. در نمونه با پرشوندگی کمتر، فضاهای خالی بین لایه‌ها همانند عایق عمل کرده و گپ هوایی موجود در بین لایه‌ها، مانع انتقال حرارت به لایه‌های زیرین می گردد.

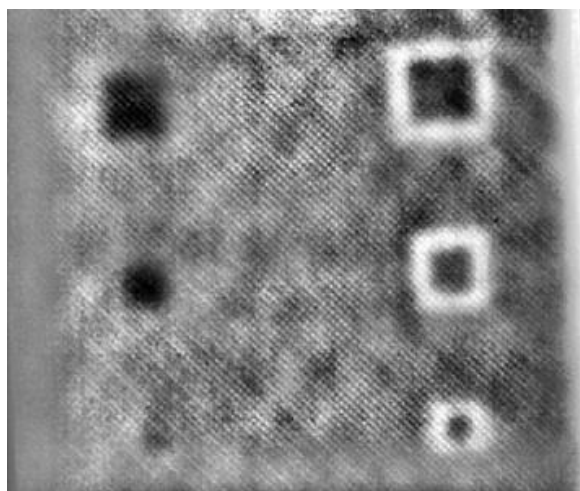
۴-۲- بررسی نتایج به دست آمده از حالت بازتابی

تصاویر حرارتی به دست آمده از بازرسی نمونه پلیمری اول با میزان پرشوندگی ۱۰۰٪ در حالت بازتابی در شکل ۶ و نمونه با پرشوندگی ۲۵٪ در شکل ۷ آورده شده است. پارامتر متمایز در ساخت این قطعات، میزان پرشوندگی است.

تابع گوسی دومتغیره به صورت معادله (۴) می‌باشد که σ یک عدد حقیقی مثبت است.

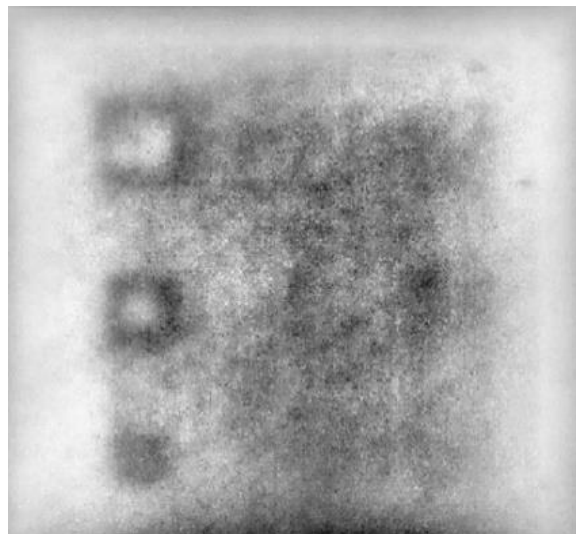
$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

این تابع یک تابع پیوسته می‌باشد و در همه نقاط مثبت است. تابع گوسی ماکزیمم خود را در (۰ و ۰) اختیار می‌کند و در بی‌نهایت به صفر میل می‌کند. هرچه مقدار σ بزرگ‌تر باشد، آنگاه تابع با سرعت کمتری به صفر میل خواهد کرد. با اعمال فیلتر گوسین پائین گذر 3×3 به داده‌های به دست آمده و با در نظر گرفتن مقدار $\sigma = 0.85$ تصاویر پردازش شده در ادامه نشان داده شده است. در شکل ۸ اثر فیلتر گوسین بر روی تصاویر حرارتی به دست آمده از حالت عبوری آورده شده است.



شکل (۸): اثر فیلتر گوسین بر روی تصویر حرارتی نمونه اول در حالت عبوری.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با اعمال فیلتر بر روی تصویر حرارتی به دست آمده از نمونه با میزان ۱۰۰٪ پرشوندگی، در حالت آزمایش عبوری، تمام عیوب شناسایی شدند. همچنین در شکل‌های ۹ و ۱۰ تأثیر فیلتر گوسین بر روی نتایج حاصل از حالت آزمایش بازتابی مشاهده می‌شود. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، تصاویر حرارتی حاصل از بازرسی در حالت بازتابی نتایج بهتری نسبت به روش عبوری نشان داد. با اعمال فیلتر برای روی تصاویر حاصل از روش بازتابی، بهبود کیفیت نمایش عیوب را به وضوح می‌توان دید؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با اعمال فیلتر گوسین به تصویر حرارتی حاصل در حالت بازتابی در نمونه با



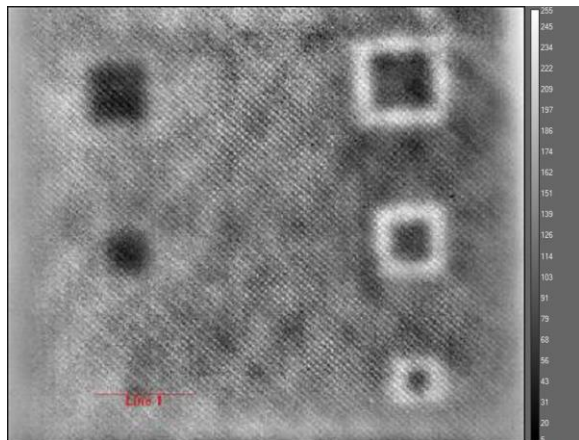
شکل (۷): تصویر حرارتی به دست آمده از بازرسی نمونه دوم (حالت بازتابی).

همان‌گونه که دیده می‌شود، تصاویر حرارتی به دست آمده از نمونه پلیمری با پرشوندگی ۱۰۰٪ اطلاعات بهتری را از نظر تشخیص عیوب ارائه داده است. برخلاف حالت عبوری که پنج عیب شناسایی شده بود، در حالت بازتابی تمامی عیوب نمونه اول با پرشوندگی کامل، قابل شناسایی هستند. نتایج به دست آمده از بازرسی نمونه پلیمری دوم با میزان پرشوندگی ۲۵٪ در شکل ۷ نیز قابل مشاهده است. با مقایسه تصاویر حرارتی به دست آمده از هر دو نمونه در دو حالت بازتابی و عبوری، تصاویر حاصل از حالت بازتابی در تشخیص نوع عیوب و اندازه عیوب کیفیت نمایش بهتری را نسبت به حالت عبوری ارائه می‌کند.

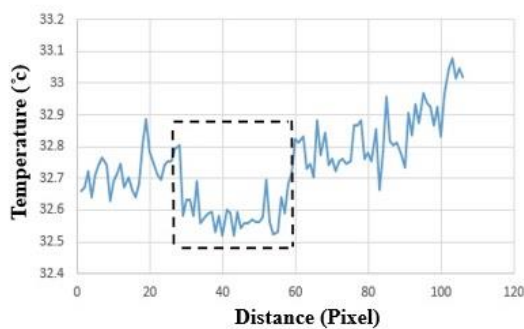
۳-۴- اثر فیلتر گوسین بر روی تصاویر حرارتی به دست آمده

فیلتر گوسی یک نوع فیلتر میانگین وزن دار می‌باشد که مؤلفه‌های ماتریس ماسک آن از تابع گوس اقتباس می‌گردد. در ماسک فیلتر گوسی، بیشترین ارزش به پیکسل اصلی (مرکزی) داده می‌شود و پیکسل‌های همسایه وزنی متناسب بافاصله‌شان تا پیکسل مرکزی به خود اختصاص می‌دهند. هرچه فاصله دورتر می‌شود، مقدار وزن نیز کوچک‌تر می‌شود. این نکته‌ای است که باعث می‌شود لبه‌ها و مرزها بهتر حفظ گردد و نویزهای تصویر حذف شود.

روشن‌تری توسط دوربین ثبت گردیده‌اند. در شکل ۱۱ نمودار تغییرات دما-پیکسل برای نمونه اول در حالت آزمایش عبوری آورده شده است.



(الف)

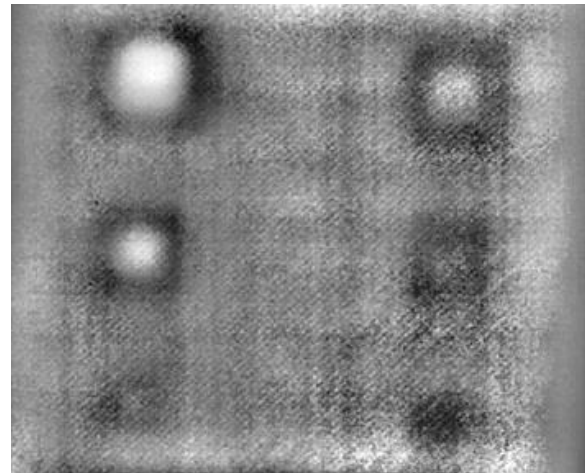


(ب)

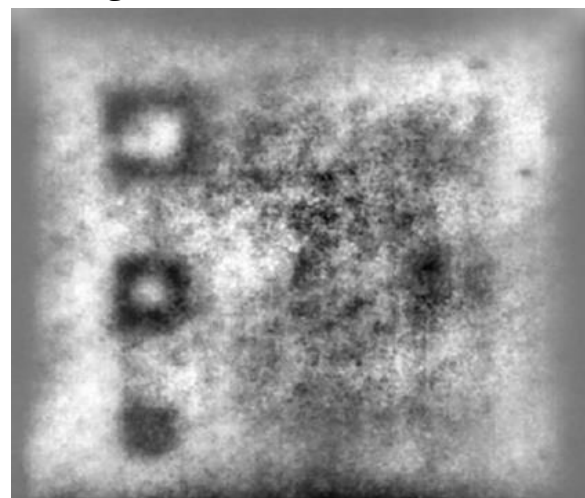
شکل (۱۱): نمودارهای تغییرات دما - پیکسل رسم شده برای نمونه پلیمری اول در حالت عبوری: الف) ناحیه خط رسم شده؛ ب) نمودار خط ۱.

همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، در حالت آزمایش عبوری نمونه اول با پرشوندگی ۱۰۰٪ پنج عیب از شش عیب موجود در نمونه شناسایی شد. در این بخش با رسم نمودار دما-پیکسل در محدوده عیب مدنظر و با نحوه تغییرات دما در این ناحیه، عیب مذکور نیز به سهولت شناسایی شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمودار رسم شده در ناحیه مستعد عیب، دچار تغییر جهت شده و دما کاهش پیدا کرده است (شیب منفی). همچنین برای اعتبارسنجی از تشخیص موارد بیان‌شده در بخش‌های پیش، نمودار توزیع دما برحسب پیکسل برای نمونه ۱ با پرشوندگی ۱۰۰٪ در حالت

پرشوندگی ۲۵٪، پنج عیب از شش عیب موجود در نمونه، قابل تشخیص می‌باشد.



شکل (۹): اثر فیلتر گوسین بر روی تصویر حرارتی به‌دست‌آمده از نمونه اول در حالت بازتابی.

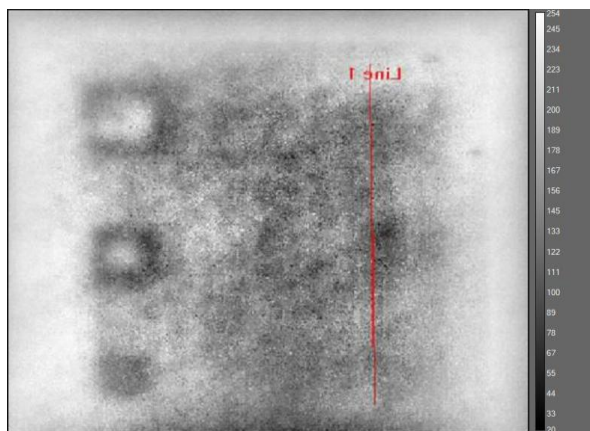


شکل (۱۰): اثر فیلتر گوسین بر روی تصویر حرارتی به‌دست‌آمده از نمونه دوم در حالت بازتابی.

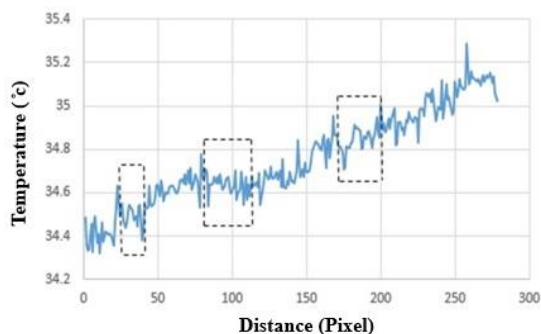
۴-۴- رسم نمودارهای دما-پیکسل

در این بخش با توجه به اختلاف دمای میان نواحی سالم و معیوب، نمودار دما-پیکسل برای شناسایی عیوب، در محدوده‌های مستعد عیب رسم گردید. با رسم نمودار تغییرات دما برحسب پیکسل و نحوه چگونگی توزیع دما در ناحیه‌های مدنظر، می‌توان به تشخیص عیوب در این نواحی پی برد. مطابق با تصاویر حرارتی، دما در مناطق سیاه‌رنگ تصویر کمتر و به‌تدریج با افزایش دما، مناطق بارنگ

شده در شکل‌های ۱۲ ب و ۱۲ ج، نشان‌دهنده مناطق معیوب هستند. همان‌گونه که در بخش قبل بیان شد، تشخیص نواحی معیوب از طریق تصاویر حرارتی ثبت شده از دوربین در حالت آرایش بازتابی، به‌وضوح قابل شناسایی بود. در شکل‌های ۱۲ ب و ۱۲ ج نیز، نواحی معیوب شناسایی شدند و درستی تشخیص در بخش پیش نشان داده شد. در شکل ۱۳ نمودار تغییرات دما برحسب پیکسل برای نمونه با پرتوانی ۲۵٪ در حالت آزمون بازتابی آورده شده است.



(الف)

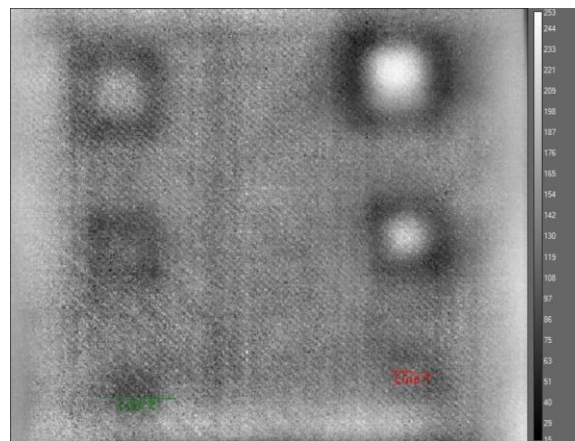


(ب)

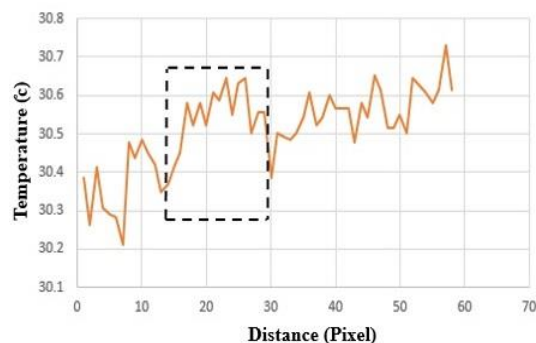
شکل (۱۳): نمودارهای تغییرات دما - پیکسل رسم شده برای نمونه پلیمری دوم در حالت بازتابی: الف) ناحیه خط رسم شده؛ ب) نمودار خط ۱.

با در نظر گرفتن خط مشخص شده در نواحی معیوب در تصویر حرارتی شکل ۱۳ الف، نمودار تغییرات دما برحسب پیکسل برای نمونه رسم گردید. در مناطق عاری از عیب، منحنی تغییرات دما به‌صورت تقریباً یکنواخت رشد کرده و افزایش دما را نشان می‌دهد. ولی همان‌گونه که در نمودارهای ۱۳ ب پیداست، در مناطق مستعد عیب و هنگام

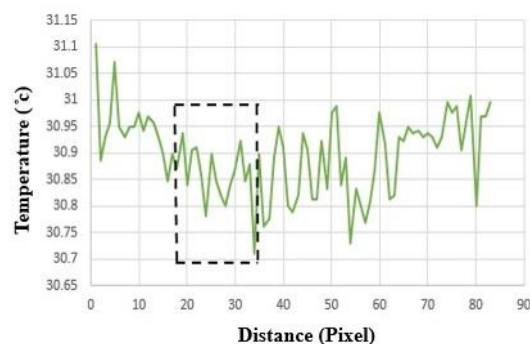
بازتابی نیز، در شکل ۱۲ برای عیب ۳×۳ mm در هر دو عمق، آورده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۲): نمودارهای تغییرات دما - پیکسل رسم شده برای نمونه پلیمری اول در حالت بازتابی: الف) نواحی خطوط رسم شده؛ ب) نمودار خط ۱؛ ج) نمودار خط ۲.

با تحلیل تغییرات دمایی خطوط رسم شده در تصاویر حرارتی شکل ۱۲ الف، نواحی مستعد عیب نسبت به دیگر نواحی با تغییرات شیب همراه خواهند بود. مناطق خط‌چین

کمتر از طریق تحلیل نمودارهای دما-پیکسل و استفاده از فیلتر تصاویر حرارتی، انجام شد. در نهایت می‌توان با استناد به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، ترموگرافی پالسی را روشی کارآمد در ارزیابی عیوب قطعات ساخته‌شده به روش FDM با میزان درصد پرشوندگی متفاوت، محسوب کرد.

۶- مراجع

- [1] Huang SH, Liu P, Mokasdar A, Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;67(5):1191-203.
- [2] Mazzei Capote GA, Rudolph NM, Osswald PV, Osswald TA. Failure surface development for ABS fused filament fabrication parts. *Additive Manufacturing*. 2019;28:169-75.
- [3] Okarma K, Fastowicz J, Lech P, Lukin V. Quality Assessment of 3D Printed Surfaces Using Combined Metrics Based on Mutual Structural Similarity Approach Correlated with Subjective Aesthetic Evaluation. *Applied Sciences*. 2020;10(18):6248.
- [4] Borish M, Post BK, Roschli A, Chesser PC, Love LJ. Real-Time Defect Correction in Large-Scale Polymer Additive Manufacturing via Thermal Imaging and Laser Profilometer. *Procedia Manufacturing*. 2020;48:625-33.
- [5] Villarraga-Gómez H. Studies of dimensional metrology with X-ray CAT scan: The University of North Carolina at Charlotte; 2018.
- [6] Khosravani MR, Reinicke T. On the use of X-ray computed tomography in assessment of 3D-printed components. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2020;39(4):1-17.
- [7] Lopez A, Bacelar R, Pires I, Santos TG, Sousa JP, Quintino L. Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2018;21:298-306.
- [8] Davis G, Nagarajah R, Palanisamy S, Rashid RAR, Rajagopal P, Balasubramaniam K. Laser ultrasonic inspection of additive manufactured components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;102(5):2571-9.
- [9] Gross BC, Erkal JL, Lockwood SY, Chen C, Spence DM. Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. ACS Publications; 2014.

عبور از این نواحی، جهت نمودار دچار تغییر شده و دما کاهش‌یافته است. دلیل این امر متفاوت بودن نرخ انتقال حرارت مناطق معیوب از دیگر نواحی سالم می‌باشد. مناطق مشخص‌شده با خط‌چین، نشان‌دهنده وجود عیب خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌منظور بررسی قابلیت شناسایی عیوب در قطعات ساخته‌شده با فرایند لایه‌نشانی مذاب با میزان پرشوندگی متفاوت، از آزمون غیرمخرب ترموگرافی استفاده شد. بدین منظور دو نمونه مکعبی شکل از جنس PLA به روش لایه‌نشانی مذاب ساخته شد. در این قطعات، تعدادی عیوب بین لایه‌ای به‌صورت مصنوعی قبل از ساخت در فایل CAD قرار داده شد. ابعاد و موقعیت مکانی تمام عیوب در هر دو نمونه یکسان است. با این تفاوت که نمونه اول با میزان پرشوندگی بین لایه‌ای ۱۰۰٪ و نمونه دوم با ۲۵٪ پرشوندگی بین لایه‌ای ساخته شد. در مدت‌زمان آزمایش، نمونه‌ها با یک لامپ هالوژنی به توان ۱ kW، ۵ s مورد تحریک قرار گرفتند و دوربین حرارتی دمای هر نمونه را به مدت ۱۰۰ s ثبت نمود. نمونه‌ها تحت دو حالت آزمون بازتابی و عبوری مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که هر چه درصد پرشوندگی نمونه‌های چاپ‌شده بیشتر باشد، تشخیص پذیری و قابلیت ارزیابی آن‌ها بهتر است. در نمونه با پرشوندگی ۱۰۰٪، پنج عیب از شش عیب موجود در نمونه، در حالت آزمایش عبوری شناسایی شد. تصاویر حرارتی حاصل از حالت بازتابی برای این نمونه، در تشخیص نوع عیوب و اندازه عیوب کیفیت نمایش بهتری نسبت به حالت عبوری ارائه کرد بدین‌صورت که تمامی عیوب نمونه شناسایی شدند. در نمونه با ۲۵٪ پرشوندگی هم حالت آزمایش بازتابی نتایج بهتری را ارائه نمود. همچنین با اعمال فیلتر گوسین بر روی تصاویر حرارتی حاصل از بازرسی نمونه با پرشوندگی ۲۵٪، تعداد پنج عیب از شش عیب موجود در نمونه، شناسایی گردید. در ادامه با رسم نمودار دما-پیکسل برای نمونه‌های اول و دوم در حالات بازتابی و عبوری و همچنین با تحلیل نمودارهای رسم شده و نحوه توزیع دما، تمامی عیوب در هر دو نمونه کاملاً شناسایی شدند. در نهایت، عیب‌یابی از نمونه‌های ساخته‌شده با پرشوندگی

- honeycomb structures. Research in Nondestructive Evaluation. 2009;20(1):1-31.
- [21] Zeng Z, Li C, Tao N, Feng L, Zhang C. Depth prediction of non-air interface defect using pulsed thermography. NDT & E International. 2012;48:39-45.
- [10] Mori K-i, Maeno T, Nakagawa Y. Dieless forming of carbon fibre reinforced plastic parts using 3D printer. Procedia engineering. 2014;81:1595-600.
- [11] Ćwikła G, Grabowik C, Kalinowski K, Paprocka I, Ociepka P, editors. The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. IOP conference series: materials science and engineering; 2017: IOP Publishing.
- [12] Shaffer S, Yang K, Vargas J, Di Prima MA, Voit W. On reducing anisotropy in 3D printed polymers via ionizing radiation. Polymer. 2014;55(23):5969-79.
- [13] Frazier WE. Metal additive manufacturing: a review. Journal of Materials Engineering and performance. 2014;23(6):1917-28.
- [14] Omar M, Said Z, Raisi AA, Al Rahman Y, Abusafieh A, Sankaran G. The Calibration and Sensitivity Aspects of a Self-Referencing Routine When Applied to Composites Inspection: Using a Pulsed Thermographic Setup. Journal of Nondestructive Evaluation. 2016;35(3):1-10.
- [15] Pierce JR, Crane NB, editors. Preliminary Nondestructive Testing Analysis on 3D Printed Structure Using Pulsed Thermography. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition; 2017: American Society of Mechanical Engineers.
- [16] Szymanik B, Psuj G, Hashemi M, Lopato P. Detection and identification of defects in 3D-printed dielectric structures via thermographic inspection and deep neural networks. Materials. 2021;14(15):4168.
- [17] Kolagar AM, Cheraghzadeh M, Akbari D, Farahani M. Nondestructive Evaluation of Gas Turbine Blade Cooling Holes Blockage by Thermography. NDT Technology. 2021;2(6):46-52. (in Persian)
- [18] Hasani M, Akbari D, Behravesht AH, Faraji kalajahi P. Application of Active IR Thermography in Defect detection of FDM printed parts with different infill percentage. NDT Technology. 2022;2(9):2-12. (in Persian)
- [19] Ibarra-Castanedo C, Tarpani JR, Maldague XP. Nondestructive testing with thermography. European Journal of Physics. 2013;34(6):S91.
- [20] Ibarra-Castanedo C, Piau J-M, Guilbert S, Avdelidis NP, Genest M, Bendada A, et al. Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of



Non-destructive Evaluation of Artificial Defects in FDM Printed Parts Using Pulse Thermography

Mohammad Hasani¹, Davood Akbari^{2*}, Amir Hossein Behraves³, Pouya Faraji Kalajahi⁴

¹ M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

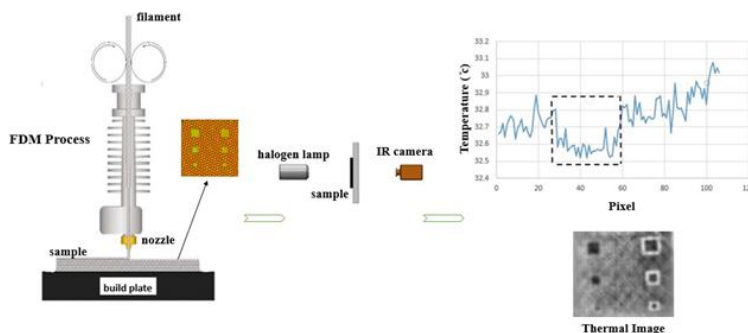
³ Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

⁴ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

HIGHLIGHTS

- Two samples with the same artificial defects and different infills made through the FDM process.
- The non-destructive method of thermography with pulse stimulation was used to evaluate the defects in the parts.
- The higher the infill percentage of the printed samples, detect of defects are easier.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 11 July 2022

Received in revised form: 23 July 2022

Accepted: 23 August 2022

Available online: 18 October 2022

*Correspondence:

daakbari@modares.ac.ir

How to cite this article:

M. Hasani, D. Akbari, A.H. Behraves, P.F. Kalajahi. Non-destructive evaluation of artificial defects in FDM printed parts using pulse thermography. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(4):77-87.

Keywords:

Nondestructive test

Active Thermography

Additive manufacturing

FDM Process

ABSTRACT

In recent years, considerable efforts have been deducted to evaluate the quality of various products. In this regard, quality control of products fabricated by the additive manufacturing methods has become a new interest. In the 3D printing industry, Defect detection could have a vital role in the final evaluation of products. In this study, artificial defects are located in PLA samples printed with different infills via the Fused Deposition Modeling (FDM) method. In order to detection of the mentioned defects in these parts, the Active IR Thermography was employed. Thermal stimulation was selected as excitation method. Two different excitation formation including transmission and reflection mode are used. In order to validate the results, the temperature-pixel diagram for each sample were illustrated. The effect of Gaussian filter on thermal images was also investigated to facilitate the identification of the obtained images. The experimental results indicated the capability of thermally stimulated thermographic inspection in detection of defects in FDM printed parts.

