

## Application of Active IR Thermography in Defect Detection of FDM Printed Parts with Different Infill Percentage

Mohamad Hasani, Davood Akbari\*, Amir Hossein Behraves, Pouya Faraji Kalajahi

Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\*daakbari@modares.ac.ir

### Abstract

In this paper, Fused Deposition Modeling (FDM) printed parts are tested by active IR thermography method. Three PLA samples are printed with different infills. The filament burnout defect is produced during the printing. The excitation is performed by means of two halogen lamps. Two different set-ups including transmission and reflection mode are selected. The Thermal images are captured during heating as well as cooling times and all defects are detectable in the thermal images. Results indicate that the active IR thermography is capable of detection of filament burnout defects. Moreover, it was found that the reflection method generates better images in comparison with transmission mode.

**Keywords:** Nondestructive Tests, Active IR Thermography, Additive Manufacturing, FDM Process

## شناسایی عیوب قطعات ساخته شده به روش لایه نشانی مذاب با درصد پرشوندگی متفاوت با استفاده از روش دمانگاری فروسرخ

محمد حسنی، داود اکبری\*، امیرحسین بهروش، پویا فرجی کلجاهی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\*daakbari@modares.ac.ir

### چکیده

با پیشرفت روزافزون فرایندهای ساخت افزایشی و تولید محصولات دقیق تر با استفاده از مواد اولیه مختلف، قطعات ساخته شده از این فرایندها به طور فزاینده ای به عنوان محصولات نهایی مورد استفاده قرار می گیرند. در این موارد انجام آزمون غیرمخرب مناسب، برای شناسایی عیوب و تأیید عملکرد محصول نهایی ضروری است. در این مقاله، برای بازرسی قطعات پلیمری ساخته شده با فرایند لایه نشانی مذاب (FDM) از روش دمانگاری فروسرخ با تکنیک فعال استفاده شده است. سه نمونه از جنس پلی لاکتیک اسید (PLA) با درصد پرشوندگی مختلف ساخته شد. در نمونه های چاپ شده، عیب سوختن فیلامنت (تغییر شکل فیلامنت و تغییر رنگ ناشی از دمای بالا) ایجاد و مورد بررسی قرار گرفت. تحریک حرارتی نمونه ها به صورت تابشی توسط لامپ هالوژنی با دو روش بازتابی و عبوری انجام شد. سپس تصاویر حرارتی به دست آمده مورد بررسی قرار گرفت و جهت سهولت در شناسایی عیوب، نمودار تغییرات دما - پیکسل برای هر نمونه به طور جداگانه رسم شد. نتایج نشان داد که در این آزمون پیکربندی بازتابی قابلیت تشخیص عیب بهتری را نسبت به حالت عبوری داراست. در حالت بازتابی پس از رسم نمودارهای دما - پیکسل، در تمام نمونه ها، عیوب قابل شناسایی بودند.

**واژگان کلیدی:** آزمون غیرمخرب، دمانگاری فروسرخ فعال، ساخت افزایشی، فرایند FDM

### ۱- مقدمه

خواهند بود و در صورت استفاده از آنان ممکن است مشکلاتی بوجود آید [۵ و ۴]. لذا با افزایش استفاده از فناوری های ساخت افزایشی برای تولید محصول یا قطعه نهایی، نیاز به کنترل کیفیت نیز افزایش می یابد و بازرسی این قطعات، حائز اهمیت خواهد بود. از آنجا که بسیاری از دستگاه های چاپ سه بعدی<sup>۳</sup>، سیستم مشخصی برای ردیابی و نظارت بر روند چاپ ندارند، بازرسی قطعات سه بعدی تولید شده، در مقیاس تولیدی که در آن صدها دستگاه چاپ سه بعدی در تولید انبوه استفاده می شود، نیازی محسوس خواهد بود. پرنترهای سه بعدی ساخت افزایشی، در حال حاضر می توانند قطعات را با استفاده از چندین ماده از جمله فلز تولید کنند [۷ و ۶]. صرف نظر از تحولات جدید، پلیمرها همچنان یکی از پرکاربردترین مواد برای ساخت قطعات مختلف در روش ساخت افزایشی هستند [۸]. فرایند لایه نشانی مذاب<sup>۴</sup> (FDM) یکی از

ساخت افزایشی<sup>۱</sup> در سال های اخیر به گزینه ای مناسب برای تولید تبدیل شده است. فرایندهای ساخت افزایشی مدت هاست که مدل های سه بعدی CAD را برای تجسم بهتر قطعه نهایی تولید می کنند و به عنوان نمونه سازی اولیه سریع<sup>۲</sup> شناخته می شوند [۱]. از جمله مزیت اصلی این روش ها، توانایی تولید قطعات مختلف با هندسه های پیچیده، بدون محدودیت های کلی ناشی از فرایندهای ساخت سنتی است [۳ و ۲]. با پیشرفت فرایندهای ساخت افزایشی طی سال های اخیر، قطعات چاپ شده بدین روش ها، دیگر نه تنها برای نمونه سازی بلکه به عنوان محصولات نهایی مورد استفاده قرار می گیرند [۲]. همچون روش های دیگر تولید، نمونه های ساخته شده به روش ساخت افزایشی نیز، دارای عیوبی همچون ناصافی سطح، تاب برداشتن، حفره و ... در حین فرایند چاپ

<sup>4</sup> Fused Deposition Modeling

<sup>1</sup> Additive Manufacturing (AM)

<sup>2</sup> Rapid Prototyping

<sup>3</sup> 3D printer

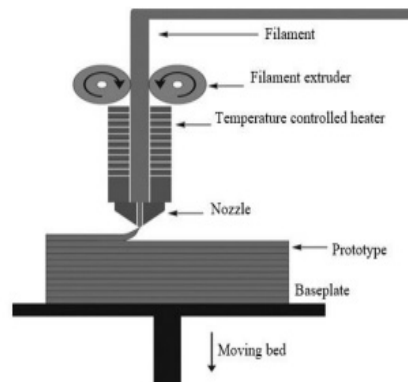
قطعات باشند [۱۳]. در بازرسی قطعات ساخته شده با فرایند لایه نشانی مذاب، با توجه به ساختار پلیمری و لایه‌بندی‌های مختلف، روش‌های آزمون غیرمخرب نوین مانند برهمنگاری تصاویر دیجیتال<sup>۱</sup> (DIC)، برشنگاری<sup>۲</sup> و روش دمانگاری فرورسرخ پیشنهاد می‌شود [۱۴]. از بین روش‌های مذکور روش دمانگاری فرورسرخ روشی پرکاربرد می‌باشد [۱۵].

از جمله پژوهش‌های انجام شده در بازرسی قطعات ساخته شده به روش لایه نشانی مذاب با استفاده از روش دمانگاری، پژوهش عمر<sup>۳</sup> و همکاران است. آنان در طی پژوهشی، یک نمونه از جنس PLA<sup>۴</sup> با روش ساخت افزایشی تولید کردند و عیوبی با اشکال هندسی مختلف در آن قرار دادند و بوسیله آزمون دمانگاری عیب‌یابی نمودند. در این پژوهش برای بهبود تصاویر ثبت شده، از روش اعمال فیلتر میانگین بهره گرفته شده بود. در نهایت تفاوت اندازه پنجره فیلتر و نتیجه حاصل از آن بر نمونه‌های تولید شده با ضریب تزریق متفاوت هم مورد بررسی قرار گرفت [۱۶].

از دیگر پژوهش‌های انجام گرفته در این باره، پژوهش پیرس<sup>۵</sup> و همکاران است. در این پژوهش، یک نمونه پلیمری از جنس ABS<sup>۶</sup> از طریق آزمون دمانگاری پالسی مورد بررسی قرار گرفت. ابعاد نمونه پرینت شده ۵۰×۸۰ با ضخامت ۸ میلی‌متر بوده است. عیوبی با ابعاد ۵×۸، ۸×۸ و ۱۰×۱۰ میلی‌متر را در عمق‌های مختلفی از قطعه قرار دادند و در انتها به دنبال تشخیص عمق عیوب، از روشی با عنوان شیب کنتراست دمایی استفاده نمودند و در نهایت توانستند عمق را با این نوع تحلیل شناسایی کنند [۱۷].

از دیگر پژوهش‌های صورت گرفته در این رابطه، پژوهش مشکی زاده و همکاران بوده است [۱۸]. در این پژوهش، یک نمونه مستطیلی شکل به ابعاد ۲۰۰×۱۷۰ میلی‌متر از جنس PLA به روش ساخت افزایشی ساخته شد. تعدادی عیوب مربعی شکل به صورت مصنوعی در نمونه قرار داده شد. از روش دمانگاری برای بازرسی نمونه استفاده گردید. پس از بررسی تصاویر حرارتی اولیه و انتخاب بهترین

رایج‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ساخت افزایشی است که در آن برای تولید قطعه از اکسترودر کردن فیلامنت‌هایی از جنس پلیمرهای ترموپلاستیک استفاده می‌شود. مزیت‌های منحصر به فردی نظیر سادگی عملکرد، امکان استفاده از گسترده وسیعی از مواد پلیمری با دوام و همچنین پایداری بالا و ساخت قطعات با هندسه‌های پیچیده با صرف کمترین هزینه و زمان نسبت به دیگر روش‌های ساخت افزایشی، باعث شده که این فرایند در سالهای اخیر مورد توجه قرار گیرد. این اکسترودر بر روی یک سازه سه بعدی قرار دارد که در جهت x و y و z حرکت کرده و پلیمر ذوب شده در داخل اکسترودر را بر روی صفحه ساخت می‌نشانند. بعد از اتمام یک لایه، اکسترودر به اندازه ضخامت یک لایه به سمت بالا حرکت می‌کند و در نهایت مدل را به صورت لایه به لایه تولید می‌کند [۹ و ۱۰]. شکل (۱) شمای کلی یک چاپگر سه‌بعدی FDM را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمای کلی یک چاپگر FDM [۹]

همانگونه که پیش‌تر اشاره گردید، فرایند لایه نشانی مذاب در سالهای اخیر به یکی از فناوری‌های متداول در نمونه‌سازی تبدیل شده است و با اضافه کردن تقویت کننده به ماده زمینه پلیمری و بهبود خواص مکانیکی قطعات، محدوده کاربرد این قطعات تولیدی بسیار وسیع شده است [۱۱ و ۱۲]. با این حال پژوهش‌هایی که در زمینه شناسایی عیوب قطعات تولیدی از این روش، صورت گرفته است، بسیار محدود می‌باشد. روش‌های آزمون غیرمخرب می‌توانند گزینه‌ی مناسبی جهت بازرسی این

<sup>5</sup> Pierce

<sup>6</sup> Acrylonitrile Butadiene Styrene

<sup>1</sup> Digital Image Correlation

<sup>2</sup> Shearography

<sup>3</sup> Omar

<sup>4</sup> Polylactic Acid

قطعه می‌گردد، بلکه به قسمت‌های الکترونیکی دستگاه پرینتر نیز آسیب می‌زند. به علاوه دمای بیش از حد فیلامنت، تاثیر مخرب بر دقت چاپ نیز دارد. هرچه شکل هندسی قطعه پیچیده‌تر و ابعاد آن کوچک‌تر باشد، عیب بیشتر نمایان می‌گردد. این عیب علاوه بر کم نمودن استحکام قطعه، باعث آسیب رساندن به لایه‌های مجاور (زیرین و بالایی و کناری) خود نیز می‌شود و در نهایت تغییر شکل قطعه در محدوده ایجاد شده عیب را به‌دنبال دارد. این پژوهش به دنبال شناسایی عیب سوختن فیلامنت در قطعات ساخته شده با تکنیک (FDM) با استفاده از روش دمانگاری فروسرخ است.

## ۲- اصول روش دمانگاری

دمانگاری یا ترموگرافی<sup>۳</sup> از روش‌های تصویربرداری فروسرخ است. براساس قانون جسم سیاه، هر جسمی که دمای بالاتر از صفر مطلق داشته باشد از خود تابش فروسرخ ساطع می‌کند که این امر امکان دیده شدن آن جسم را در صورت وجود یا عدم وجود نور مرئی فراهم می‌سازد. این تابش‌ها را می‌توان با استفاده از دوربین‌های مادون قرمز<sup>۴</sup> به صورت تصویر ذخیره کرد که به آنها دمانگاشت یا ترموگرام<sup>۵</sup> گویند.

دمانگاری فروسرخ از روش‌های غیرتماسی اندازه‌گیری دمای سطحی محسوب می‌گردد که در حوزه بازرسی غیرمخرب مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزایایی مانند سرعت بالا، بازرسی غیرتماسی، ایمنی از لحاظ فقدان پرتوهای مضر و محدوده وسیع کاربرد، باعث شده است که موضوع جایگزین کردن روش دمانگاری به جای سایر روشها برای انجام بازرسی در برخی قطعات، مورد توجه قرار گیرد [۲۱ و ۲۲].

بازرسی دمانگاری در صورتی قابل انجام است که جسم تحت بازرسی، با محیط بیرون از خود درگیر انتقال حرارت باشد و یک گرادیان دمایی طبیعی با محیط اطراف خود ایجاد کند. بسته به اینکه این گرادیان دمایی به‌طور مصنوعی ایجاد شود و یا ناشی از کارکرد جسم، به‌طور طبیعی وجود داشته باشد؛ بازرسی به دو روش بازرسی

تصویر حرارتی خام، دو روش پردازش داده‌های حرارتی به اطلاعات ثبت شده اعمال شد. بهترین تصاویر پردازش شده به همراه بهترین تصویر خام حرارتی از نظر تعداد عیوب قابل شناسایی و سهولت شناسایی عیوب با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت توانستند همه عیوب را در عمق-های در نظر گرفته شده، شناسایی کنند [۱۸].

سعید و همکاران نیز نمونه‌هایی کامپوزیتی از جنس الیاف کربن ساخته شده به روش چاپ سه بعدی را، با روش دمانگاری مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌های تولید شده دارای دو دسته عیب بودند که یک دسته به صورت سوراخ‌های ایجاد شده در پشت نمونه و دسته دیگر به صورت عیوب جایگذاری شده در بین لایه‌های نمونه، طراحی شده بود. همچنین برای بهبود تصاویر حرارتی روش تجزیه و تحلیل مولفه اصلی<sup>۱</sup> استفاده شده بود [۱۹].

از دیگر پژوهش‌های انجام گرفته در این رابطه، پژوهش کاروالهو<sup>۲</sup> و همکاران بوده است. در این پژوهش، یک قطعه تولید شده به روش ساخت افزایشی از جنس پلیمر Pa-12 با روش دمانگاری مورد بررسی قرار گرفت. دو نمونه عیب در هنگام ساخت در قطعه ایجاد شد. یک حفره و یک جا افتادگی بین لایه‌ای. نمونه تحت دو آرایش بازتابی و عبوری مورد آزمون قرار گرفت. در نهایت با استفاده از شبیه‌سازی عددی از طریق ANSYS و با در نظر گرفتن هر سه مکانیزم انتقال حرارت، نشان داده شد که نتایج حاصل از تغییرات دمایی در آزمون تجربی و شبیه‌سازی، بسیار نزدیک می‌باشد [۲۰].

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته بر روی قطعات تولیدی با فرایند FDM، اکثراً عیوبی نظیر حفره و فضاهای خالی بین لایه‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از عیوب مربوط به قطعات تولیدی با روش لایه نشانی مذاب، عیب سوختن فیلامنت (تغییر شکل و تغییر رنگ فیلامنت ناشی از دمای بالا) می‌باشد که در اثر انتخاب نامناسب دمای نازل اکسترودر، در هنگام پرینت به وجود می‌آید. علائم معمول روی طرح پس از چاپ به صورت تغییر رنگ، تغییر شکل ناشی از ذوب بیش از حد و ناهمواری لایه‌ها نمایان می‌شود. سوختن فیلامنت نه تنها باعث آسیب به

<sup>4</sup> IR Camera

<sup>5</sup> Thermogram

<sup>1</sup> Principal Component Analysis (PCA)

<sup>2</sup> Carvalho

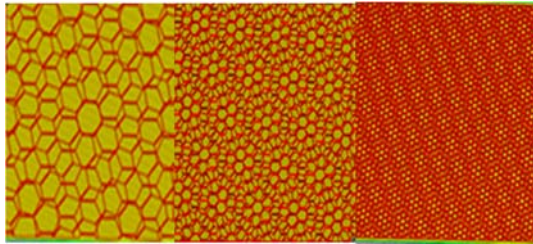
<sup>3</sup> Thermography

شناسایی عیوب قطعات ساخته شده به روش لایه‌نشانی مذاب با درصد پرشوندگی متفاوت با استفاده از روش دمانگاری فروسرخ

جدول (۲) مقدار درصد پرشوندگی برای ساخت هر نمونه آورده شده است.

میزان پرشوندگی	نمونه
٪۵۰	۱
٪۲۵	۲
٪۱۰	۳

در شکل (۲) شماتیکی از تفاوت میزان پرشوندگی قطعات نشان داده شده است.



شکل ۲- میزان پرشوندگی در نمونه‌ها (به ترتیب از راست به چپ ۱۰ درصد، ۲۵ درصد و ۵۰ درصد پرشوندگی)

جهت ایجاد عیب سوختن فیلامنت در قطعات، مقدار دو پارامتر سرعت چاپ و دمای چاپ در هنگام فرایند ساخت، مورد تغییر قرار گرفت. به عبارتی با افزایش دمای چاپ و همچنین کاهش سرعت ساخت، عیب مدنظر در دو ناحیه از قطعه و در لایه‌های درونی نمونه ایجاد شد. شکل (۳) و (۴). همچنین با کنترل تعداد لایه‌های چاپ شده در زمان ساخت، این عیوب ایجاد شده، در دو عمق متفاوت از سطح قطعه قرار گرفتند. در همه نمونه‌ها، عمق عیوب ایجاد شده، یکسان در نظر گرفته شد.

همان‌گونه که در شکل (۳) پیداست، مناطق معیوب نسبت به مناطق دیگر، با رنگ تیره‌تری (نزدیک به رنگ قهوه‌ای)، در بین لایه‌ها ایجاد شده‌اند. لازم به ذکر است، عیوب مدنظر هیچگونه تغییری در ضخامت و شکل هندسی نمونه‌ها ایجاد نکرده است و صرفاً این عیوب، در بین لایه‌های درونی قرار گرفته است.

فعال<sup>۱</sup> و غیرفعال<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. در دمانگاری فعال، از یک منبع حرارتی برای تحریک نمونه استفاده می‌شود. در این روش، بازرسی با یک سیستم تصویربرداری فروسرخ، تحریک حرارتی و نظارت بر تغییرات دمای سطحی در طول گرمایش صورت می‌پذیرد. یکی از انواع دمانگاری با تحریک تابشی، دمانگاری پالسی است که در طی تحریک، یک پالس حرارتی به نمونه داده می‌شود که پس از این پالس حرارتی، دمای نمونه تغییر می‌کند. در واقع، یک پالس کوتاه با انرژی بالا، دمای نمونه تحت آزمایش را تغییر داده و تغییرات حرارتی صورت گرفته، از طریق یک دوربین فروسرخ ثبت می‌شود که در ادامه امکان بازرسی نقایص زیر سطحی فراهم می‌گردد [۲۳].

### ۳- مواد و روش پژوهش

#### ۳-۱- ساخت نمونه

در این مقاله، سه نمونه‌ی مکعبی شکل به ابعاد  $80 \times 80 \times 5$  میلی‌متر از جنس پلیمر PLA به روش لایه نشانی مذاب ساخته شد. قطر فیلامنت مورد استفاده  $1.75 \text{ mm}$  است. جهت ایجاد عیب در قطعات و همچنین به دلیل نمایان شدن تغییر رنگ ماده خروجی از نازل پس از افزایش دما، از فیلامنت سفید رنگ برای ساخت استفاده شد. سایر اطلاعات مربوط به ساخت قطعات در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- پارامترهای تولید نمونه

پارامتر	اندازه
قطر نازل	۰.۴ میلی‌متر
ضریب سرعت اکستروژن	٪۱۰۰
ضخامت هر لایه	۰.۲ میلی‌متر
عرض تزریق	۰.۴۱ میلی‌متر
الگوی پرشوندگی <sup>۳</sup>	لانه زنبوری <sup>۴</sup>
ضخامت دیواره <sup>۵</sup>	۳ لایه

پارامتر متمایز در ساخت نمونه‌ها، میزان درصد پرشوندگی<sup>۶</sup> بود. میزان تراکم بافت مشبک در بخش‌های داخلی مدل برای هر قطعه متفاوت در نظر گرفته شد. در

<sup>5</sup> Shell Thickness

<sup>6</sup> Infill

<sup>1</sup> Active Thermography

<sup>2</sup> Passive Thermography

<sup>3</sup> Fill Pattern

<sup>4</sup> Honeycomb



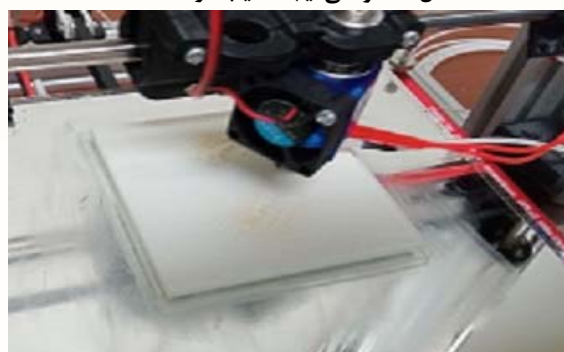
شناسایی عیوب قطعات ساخته شده به روش لایه‌نشانی مذاب با درصد پرشوندگی متفاوت با استفاده از روش دمانگاری فرسوخ

شد. در آرایش اول، لامپ‌های هالوژنی و دوربین در یک سمت نمونه واقع شدند که این نحوه قرارگیری را اصطلاحاً حالت بازتابی<sup>۱</sup> می‌نامند. شکل (۵) شماتیک کلی نحوه قرارگیری دوربین، منابع حرارتی و نمونه را در حالت بازتابی نشان می‌دهد.

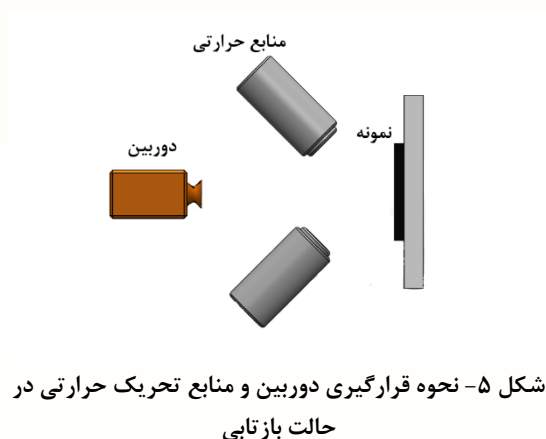
در آرایش دوم، منابع تحریک حرارتی در یک سمت نمونه و دوربین حرارتی در سمت دیگر قرار گرفت. که این نحوه قرارگیری را اصطلاحاً حالت عبوری<sup>۲</sup> گویند شکل (۶).



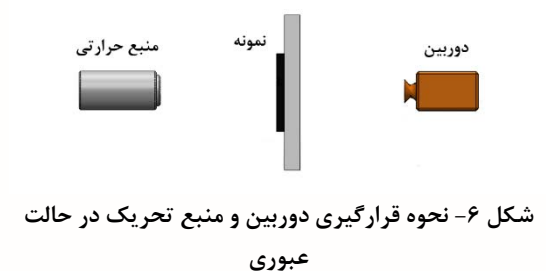
شکل ۳- نواحی ایجاد عیب در قطعه



شکل ۴- نواحی سوختن فیلامنت در حین پرینت در بین لایه‌ها

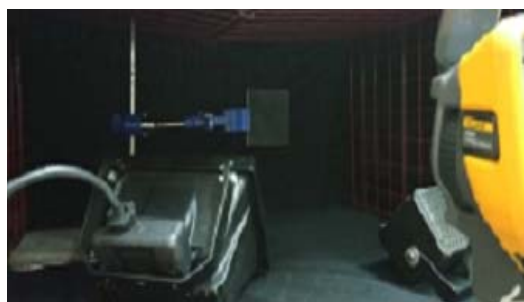


شکل ۵- نحوه قرارگیری دوربین و منابع تحریک حرارتی در حالت بازتابی



شکل ۶- نحوه قرارگیری دوربین و منبع تحریک در حالت عبوری

در نهایت هر نمونه، تحت دو حالت بازتابی و عبوری مورد آزمایش قرار گرفت. چیدمان آزمایش حرارت نگاری بازتابی در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- ستاپ آزمون حرارت نگاری مورد استفاده در حالت بازتابی

در انتها جهت به حداقل رساندن نویزهای ناشی از بازتاب نور و جذب حداکثر انرژی حرارتی اعمالی، نمونه‌ها با اسپری مشکی مات رنگ آمیزی شدند.

## ۲-۳- انجام آزمایش و تجهیزات مورد استفاده

برای انجام آزمایش‌ها، از تکنیک دمانگاری فعال استفاده شد. در این پژوهش از دو لامپ هالوژنی به عنوان منبع تحریک حرارتی استفاده گردید. توان هر لامپ هالوژنی مورد استفاده، ۵۰۰ وات می‌باشد و در هنگام تحریک، هر یک از نمونه‌ها به مدت ۲ ثانیه گرم شدند. برای ثبت دمای سطح قطعه، دوربین حرارتی FLUKE TIS75 با رزولوشن ۲۴۰ × ۳۲۰ پیکسل مورد استفاده قرار گرفت. برای دستیابی به بهترین نتایج، فاصله دوربین و همچنین فاصله منابع تحریک حرارتی از قطعه، ارزیابی شد. فاصله زیاد منابع حرارتی موجب عدم ایجاد انرژی لازم در قطعه و عدم تشخیص عیوب و فاصله‌ی کم نیز، باعث بازتاب بیش از حد نور، تشخیص دشوار و مجدداً عدم شناسایی عیوب خواهد شد. در نهایت فاصله دوربین تا قطعه ۵۰ سانتی‌متر و فاصله منابع تحریک حرارتی هم ۲۵ سانتی‌متر انتخاب

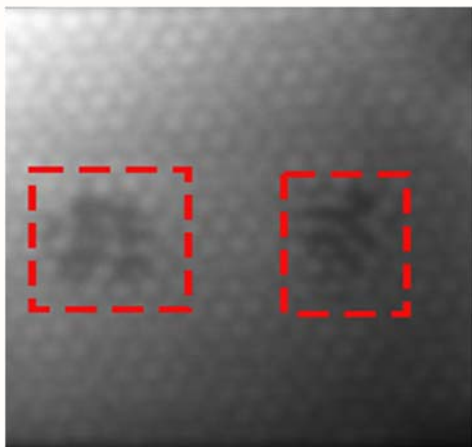
<sup>2</sup> Transmission mode

<sup>1</sup> Reflection mode

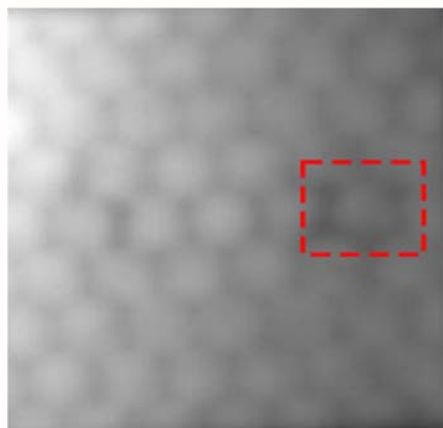
شناسایی عیوب قطعات ساخته شده به روش لایه‌نشانی مذاب با درصد پرشوندگی متفاوت با استفاده از روش دمانگاری فروسرخ

#### ۴- نتایج

دوربین حرارتی شناسایی شدند شکل (۸) و (۹). در نمونه سوم به دلیل میزان پرشوندگی کمتر و فضاهای خالی تر در بین لایه‌ها، کماکان تشخیص عیب امری دشوار است.



شکل ۹- تصویر حرارتی بدست آمده از بازرسی نمونه پلیمری دوم

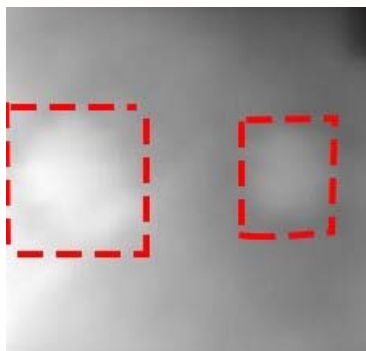


شکل ۱۰- تصویر حرارتی بدست آمده از بازرسی نمونه پلیمری سوم

#### ۴-۲- تصاویر حرارتی بدست آمده از حالت آزمایش

##### عبوری

در شکل (۱۱) تصویر حرارتی بدست آمده از بازرسی نمونه پلیمری اول در حالت آزمایش عبوری آورده شده است.

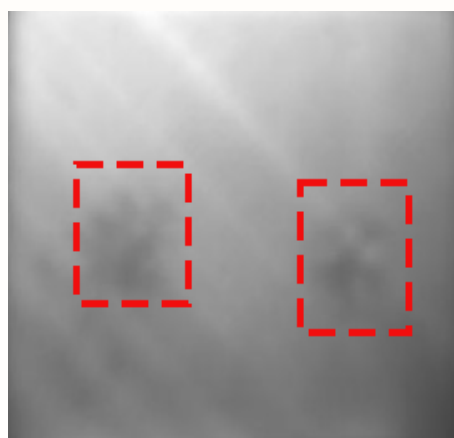


شکل ۱۱- تصویر حرارتی بدست آمده از بازرسی نمونه اول در حالت عبوری

دوربین حرارتی دمای هر یک از نمونه‌های مورد آزمایش را پس از خاموش شدن منابع تحریک حرارتی، به مدت ۶۰ ثانیه ثبت نمود. از میان تصاویر حرارتی ثبت شده، بهترین تصویر حرارتی از نظر وضوح عیوب برای هر نمونه، در این بازه زمانی انتخاب شد.

#### ۴-۱- نتایج بدست آمده از حالت بازتابی

در شکل (۸) تصویر حرارتی بدست آمده از بازرسی نمونه پلیمری اول در بازه زمانی خاموش بودن منابع حرارتی آورده شده است.



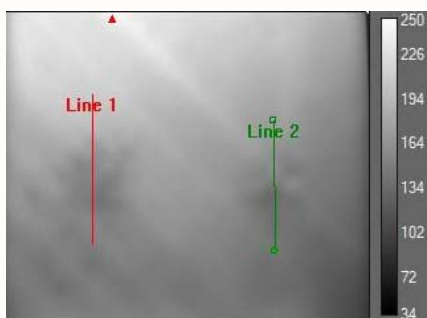
شکل ۸- تصویر حرارتی بدست آمده از بازرسی نمونه پلیمری اول (آرایش بازتابی)

همان‌گونه که در شکل (۸) پیداست، عیوب نمونه به صورت واضح توسط دوربین در حالت آزمون بازتابی شناسایی شد. برای هر یک از نمونه‌های دوم و سوم نیز، بهترین تصویر حرارتی در بازه زمانی تصویربرداری، انتخاب گردید. شکل (۹) و شکل (۱۰).

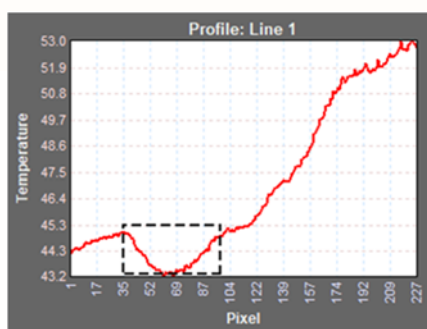
همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، پارامتر متمایز در ساخت قطعات، میزان پرشوندگی بود. هرچه میزان پرشوندگی داخلی قطعه بیشتر شود، قطعه سنگین‌تر و در نهایت متریال بیشتر و زمان طولانی‌تری برای ساخت نیاز خواهد بود. در عین حال پرشوندگی بیشتر باعث بهبود استحکام قطعه می‌شود. به‌طور معمول برای اغلب قطعات تولیدی با روش لایه‌نشانی مذاب، میزان تراکم ۱۵ الی ۲۵ درصد کافی است اما اگر قطعه‌ای تحت تنش قرار می‌گیرد، این میزان تراکم بالاتر و در حدود ۵۰ الی ۱۰۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. در نمونه‌های اول و دوم با توجه به میزان پرشوندگی داخلی بیشتر، عیوب به طور واضح توسط

شناسایی عیوب قطعات ساخته شده به روش لایه‌نشانی مذاب با درصد پرشوندگی متفاوت با استفاده از روش دمانگاری فروسرخ

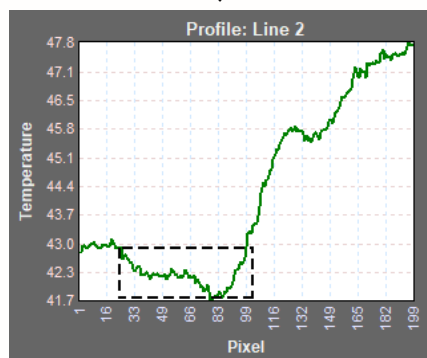
نمودارهای تغییرات دما - پیکسل برای نمونه پلیمری اول آورده شده است.



الف



ب



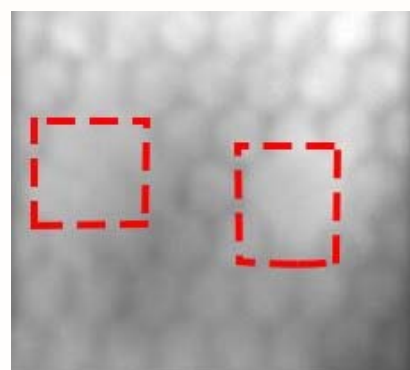
ج

شکل ۱۴- نمودارهای تغییرات دما - پیکسل رسم شده برای نمونه پلیمری اول؛ الف) نواحی خطوط رسم شده، ب) نمودار خط ۱، ج) نمودار خط ۲

مطابق با تصاویر حرارتی، دما در مناطق سیاه رنگ تصویر کمتر و به تدریج با افزایش دما، مناطق با رنگ روشن تری توسط دوربین ثبت گردیده‌اند. با در نظر گرفتن خطوط مشخص شده در نواحی معیوب در تصویر حرارتی شکل ۱۴- الف، نمودار تغییرات دما برحسب پیکسل برای هر یک از خطوط رسم گردید. در مناطق عاری از عیب، منحنی تغییرات دما به صورت تقریباً یکنواخت رشد کرده و افزایش دما را نشان می‌دهد. ولی همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۱۴- ب، ج) پیداست، در مناطق مستعد



شکل ۱۲- تصویر حرارتی بدست آمده از بازرسی نمونه دوم در حالت عبوری



شکل ۱۳- تصویر حرارتی بدست آمده از بازرسی نمونه سوم در حالت عبوری

همان‌گونه که در شکل (۱۱) پیداست، نواحی معیوب در نمونه پلیمری اول، به وضوح قابل شناسایی هستند. در تصویر حرارتی بدست آمده از بازرسی نمونه دوم شکل (۱۲)، شناسایی عیوب امری دشوار است. گرچه در بخش پیش، نواحی معیوب با روش آزمون بازتابی شناسایی شده بودند.

مطابق با شکل (۱۳)، در تصویر حرارتی بدست آمده از نمونه سوم، نواحی معیوب توسط دوربین شناسایی شدند. تشخیص این نواحی با روش آزمایش بازتابی، امری دشوار بود و عیب موجود در سمت چپ نمونه نیز، به کلی شناسایی نشده بود.

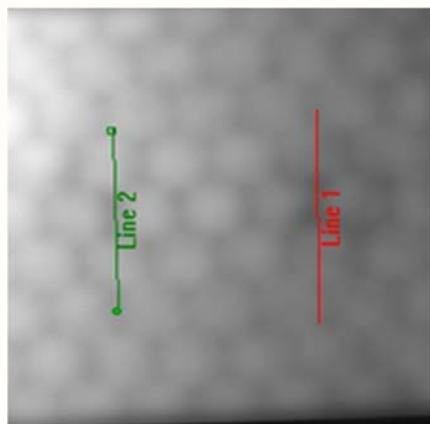
### ۳-۴- رسم نمودارهای دما- پیکسل

به دلیل وجود اختلاف دمای میان نواحی سالم و معیوب، برای اعتبارسنجی از تشخیص موارد بیان شده در بخش- های پیش و همچنین به عنوان روشی کارآمد در شناسایی عیوب، نمودار تغییرات دما - پیکسل در محدوده‌های مستعد عیب، برای هر نمونه رسم گردید. در شکل (۱۴)

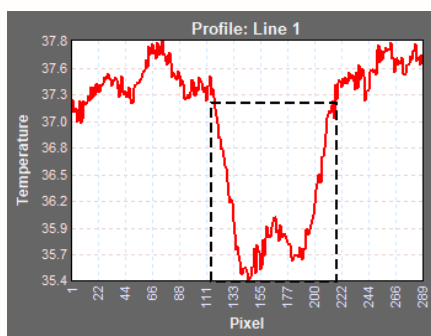


شناسایی عیوب قطعات ساخته شده به روش لایه‌نشانی مذاب با درصد پرشوندگی متفاوت با استفاده از روش دمانگاری فروسرخ

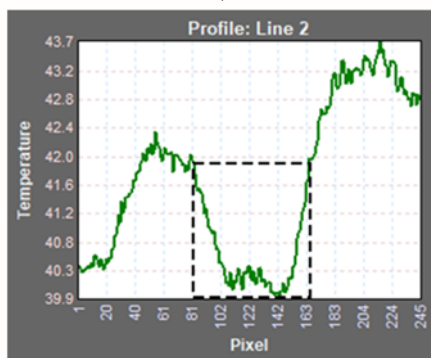
شناسایی بود. در نمودارهای شکل ۱۵- (ب، ج) نیز، نواحی معیوب شناسایی شدند و درستی تشخیص در بخش پیش نشان داده شد.



الف



ب

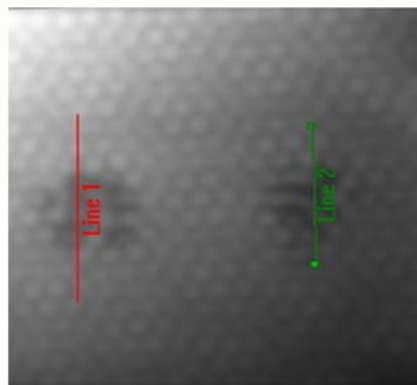


ج

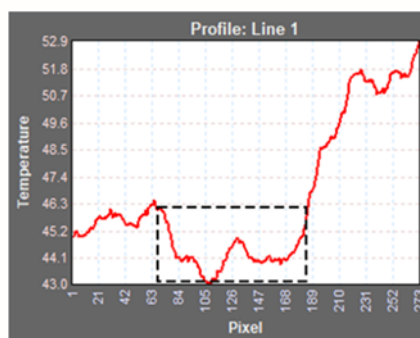
شکل ۱۶- نمودارهای تغییرات دما - پیکسل رسم شده برای نمونه پلیمری سوم؛ الف) نواحی خطوط رسم شده، ب) نمودار خط ۱، ج) نمودار خط ۲

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، تشخیص عیوب در نمونه سوم به دلیل میزان پرشوندگی کمتر نسبت به دیگر نمونه‌ها، امری دشوار بود. در این بخش با ترسیم نمودار دما - پیکسل در نواحی تصاویر حرارتی و با بررسی چگونگی تغییرات منحنی‌ها، عیوب موجود در نمونه سوم شناسایی

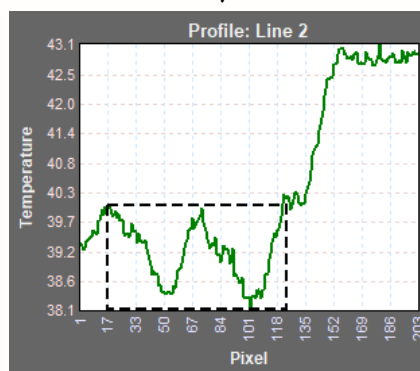
عیب و هنگام عبور از این نواحی، جهت نمودار دچار تغییر شده و دما کاهش یافته است (شیب منفی). دلیل این امر، گرادیان دمایی کمتر مناطق معیوب نسبت به مناطق عاری از عیب است. به عبارتی انتقال حرارت در این نواحی نسبت به مناطق سالم، با محیط پیرامون کمتر می‌باشد. نمودار تغییرات دمایی برای نمونه های دوم و سوم به- ترتیب در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) آورده شده است.



الف



ب



ج

شکل ۱۵- نمودارهای تغییرات دما - پیکسل رسم شده برای نمونه پلیمری دوم؛ الف) نواحی خطوط رسم شده، ب) نمودار خط ۱، ج) نمودار خط ۲

در نمونه دوم، همان‌گونه که در بخش قبل بیان شد، تشخیص نواحی معیوب از طریق تصاویر حرارتی ثبت شده از دوربین در حالت آرایش بازتابی، به وضوح قابل

نواحی معیوب در همه‌ی نمونه‌ها شناسایی شد. در نهایت با استناد به نتایج بدست آمده از این پژوهش، روش غیرمخرب دمانگاری فروسرخ را می‌توان، یک روش بازرسی مفید در شناسایی عیوب در حین ساخت در قطعات پلیمری ساخته شده به روش لایه‌نشانی مذاب محسوب کرد.

#### ۶- منابع

- [1] Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2016). "Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition" Springer Verlag. pp. 1. Chap. 1.
- [2] Samuel, H. H., Peng, L., Abhiram, M., & Liang, H., (2013), "Additive Manufacturing and Its Societal Impact: A Literature Review", Int. J. Adv. Manuf. Technol, 67, pp 1191-1203.
- [3] Frazier, W.E., 2014. Metal additive manufacturing: a review. Journal of Materials Engineering and performance, 23(6), pp.1917-1928.
- [4] Capote, G.A.M., Rudolph, N.M., Osswald, P.V. and Osswald, T.A., 2019. Failure surface development for ABS fused filament fabrication parts. Additive Manufacturing, 28, pp.169-175.
- [5] Chua, C.K., Leong, K.F, Lim, C.S., Rapid Prototyping: Principles and Applications, World Scientific, River Edge, 2010.
- [6] Es-Said, OS., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., Pregger, BA., "Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples" Advance Manufacturing Process, Vol. 15, No 1, pp. 22-107, 2000.
- [7] A. Lopez, R. Bacelar, I. Pires, T.G. Santos, J.P. Sousa, L. Quintino, Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing, Additive Manuf. 21 (2018) 298-306,
- [8] J.R.C. Dizon, A.H. Espera, Q. Chen, R.C. Advincula, Mechanical characterization of 3D-printed polymers, Additive Manuf. 20 (2018) 44-67.
- [9] Gross, B. C., Erkal, J. L., Lockwood, S. Y., Chen, C., Spence, D. M., "Evaluation of 3D Printing and its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences" Analytical Chemistry, Vol. 86, No. 7, pp. 3240-3253, 2014.
- [10] Schirmeister CG, Hees T, Licht EH, Mülhaupt R (2019) 3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication. Additive Manufacturing 28:152-159.
- [11] Tekinalp HL, Kunc V, Velez-Garcia GM, Duty CE, Love LJ, Naskar AK, et al. Highly oriented carbon fiber-

شد. مناطق خط‌چین شده در نمودارهای دما - پیکسل شکل ۱۶- (ب،ج)، نشان‌دهنده‌ی وجود عیب خواهد بود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

یکی از عیوب ایجاد شده در قطعات تولیدی با روش FDM، عیب سوختن فیلامنت (تغییر شکل فیلامنت و تغییر رنگ ناشی از دمای بالا) می‌باشد که به دلیل دمای نامناسب نازل اکسترودر، در حین فرایند پرینت به وجود می‌آید. علائم معمول روی طرح پس از چاپ به صورت تغییر رنگ، تغییر شکل ناشی از ذوب بیش از حد و ناهمواری لایه‌ها نمایان می‌شود و مدل فرم طبیعی خود را از دست می‌دهد. این عیب علاوه بر کم نمودن استحکام قطعه، باعث صدمه به لایه‌های مجاور نیز می‌شود و در نهایت تغییر شکل قطعه در محدوده ایجاد شده عیوب را به دنبال دارد. این پژوهش به منظور بررسی قابلیت شناسایی عیب سوختن فیلامنت در قطعات ساخته شده با تکنیک (FDM) از طریق آزمون دمانگاری فروسرخ صورت گرفت.

بدین منظور سه نمونه پلیمری از جنس PLA با روش لایه‌نشانی مذاب ساخته شد. پارامتر متمایز در ساخت نمونه‌ها، میزان درصد پرشوندگی بود که مقادیر ۵۰ درصد، ۲۵ درصد و ۱۰ درصد پرشوندگی برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد. جهت ایجاد عیب سوختن فیلامنت، مقدار دو پارامتر دمای پرینت و سرعت پرینت در حین ساخت مورد تغییر قرار گرفت. نمونه‌ها با دو لامپ هالوژنی به توان ۵۰۰ وات به مدت ۲ ثانیه مورد تحریک قرار گرفتند و دوربین حرارتی دمای هر نمونه را به مدت ۶۰ ثانیه ثبت نمود. هر نمونه تحت دو حالت بازتابی و عبوری مورد آزمون قرار گرفت. در تصاویر حرارتی بدست آمده از آزمون بازتابی، نواحی معیوب در نمونه‌های با ۵۰ و ۲۵ درصد پرشوندگی به وضوح قابل شناسایی بود. در نمونه سوم تشخیص نواحی معیوب از این شماتیک شناسایی نشد.

در تصویر حرارتی بدست آمده از حالت عبوری، نواحی معیوب در نمونه سوم نیز شناسایی شد. با مقایسه وضوح تصاویر حرارتی بدست آمده، پیکربندی بازتابی قابلیت تشخیص عیب بهتری نسبت به حالت عبوری داشت. جهت سهولت در شناسایی، با رسم نمودارهای دما-پیکسل در تصاویر حرارتی نمونه‌ها در حالت بازتابی،

*Exposition* (Vol. 58431, p. V008T10A083). American Society of Mechanical Engineers.

[18] Meshkizadeh, P., & Farahani, M. (2022). Developing effective thermal signal processing to improve thermographic non-destructive inspection of metallic components. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 1-19.

[19] Saeed, N., Omar, M.A., Abdulrahman, Y., Salem, S. and Mayyas, A., 2018. IR thermographic analysis of 3D printed CFRP reference samples with back-drilled and embedded defects. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 37(3), p.59.

[20] Carvalho, M. S., Martins, A. P., & Santos, T. G. (2019). Simulation and validation of thermography inspection for components produced by additive manufacturing. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113872.

[21] Ning, Z., Liu, R., Elhajjar, R.F. and Wang, F., 2017. Micro-modeling of thermal properties in carbon fibers reinforced polymer composites with fiber breaks or delamination. *Composites Part B: Engineering*, 114, pp.247-255.

[22] Liu, J., Yang, W. and Dai, J., 2010. Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT. *Infrared Physics & Technology*, 53(5), pp.348-357.

[23] A.A. Badghaish, D.C. Fleming, Non-destructive inspection of composites using step heating thermography, *J. Compos. Mater.* 42 (2008) 1337–1357.

polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*. 2014; 105:144-50.

[12] Shofner M, Lozano K, Rodriguez Macías F, Barrera E. Nanofiber reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. *Journal of applied polymer science*. 2003;89(11):3081-909.

[13] Strantza, M., Aggelis, D.G., De Baere, D., Guillaume, P. and Van Hemelrijck, D., 2015. Evaluation of SHM system produced by additive manufacturing via acoustic emission and other NDT methods. *Sensors*, 15(10), pp.26709-26725.

[14] Tizmaghz, Nejad Mohamad, DAVOOD AKBARI, and Shobeir Ghobadi. "Capability of Digital Shearography in Crack Defect Inspection." (2021): 41-61.

[15] Shrestha, R., Chung, Y. and Kim, W., 2019. Wavelet transform applied to lock-in thermographic data for detection of inclusions in composite structures: Simulation and experimental studies. *Infrared Physics & Technology*, 96, pp.98-112.

[16] Omar, M.A., Said, Z., Al Raisi, A., Al Rahman, Y.A., Abusafieh, A. and Sankaran, G.N., 2016. The Calibration and Sensitivity Aspects of a Self-Referencing Routine When Applied to Composites Inspection: Using a Pulsed Thermographic Setup. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 35(3), p.51.

[17] Pierce, J. R., & Crane, N. B. (2017, November). Preliminary Nondestructive Testing Analysis on 3D Printed Structure Using Pulsed Thermography. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and*