

Thermal Signal Reconstruction and Empolyment of K Clustering Method for Inspection of Additive Manufactured Polymer Parts

Pouria Meshkizadeh^{1*}, Mojtaba Rezaee Hajideh², Mohammadreza Farahani³, Mohammad Heidari-Rarani⁴

1- MSc Student, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2- Phd Candidate, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran

3- Associate Professor, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran

4- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan

*p.meshkizadeh@ut.ac.ir

Abstract

Due to the increase in the application of additive manufactured components in the industry, developing fast and accurate methods for defect evaluation of these products has become vitally important. In this study, a PLA sample was inspected by thermography. Several artificial defects varying in size and depth were produced in the specimen. A projector with 2 KW in power was utilized to heat the sample for the 15s. The infrared camera recorded the sample's temperature during the heating period and 30s after shutting down the source. Afterward, the best frame of raw data was selected. The contrast of defective and sound regions improved with applying the well-known Thermal Signal Reconstruction (TSR) image processing method to enhance the automatic detectability of defects. The contrast enhancement was studied quantitatively via adopting signal to noise ratio (SNR) parameter. According to the acquired results, TSR's 1st derivative image had the highest average of SNR. This amount was approximately four times higher than that of the best frame of raw data. Ultimately, to identify the defects automatically, k-means clustering was adopted. By comparing the segmented images, it was proved that the adopted process was successful in improving automatic defect detection. While the proportion of detectable defects through segmented image concluded from the best frame of raw data was only 70 percent, the figure for segmented images concluded from 1st and 2nd derivative of TSR was substantially higher at 100 percent.

Keywords: Nondestructive Tests; Thermography; Thermal image processing; Automatic defect detection; Additive manufacturing.

بازسازی تصاویر حرارتی و به‌کارگیری روش خوشه‌بندی K جهت عیب‌یابی قطعات پلیمری ساخت افزایشی

پوریا مشکی زاده^{۱*}، مجتبی رضایی حاجیده^۲، محمدرضا فراهانی^۳، محمد حیدری رارانی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۴- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان

*p.meshkizadeh@ut.ac.ir

چکیده

امروزه قطعات ساخته‌شده به روش تولید افزایشی با سرعت بالایی در حال توسعه هستند و کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارند. از این رو بهره‌گیری از روش‌های سریع و دقیق برای بررسی سلامت و کیفیت این قطعات اهمیت دوچندانی پیدا کرده است. در این پژوهش یک نمونه از جنس PLA ساخته‌شده به روش مدل‌سازی رسوب ذوب شده به روش ترموگرافی بازرسی شد. پس از بررسی تصاویر اولیه حرارتی بهترین فریم انتخاب گردید. به منظور بهبود تصاویر حرارتی اولیه، روش پردازش بازسازی پاسخ حرارتی (TSR) به داده‌های اعمال و بهترین تصاویر مشتقات اول تا سوم این روش تعیین گردید. تصاویر منتخب به منظور بررسی اثر روش پردازش در بهبود اختلاف شدت نور میان نواحی معیوب و سالم، به کمک پارامتر نسبت سیگنال به نویز (SNR) مقایسه شدند. بر اساس نتایج به دست آمده بالاترین مقدار میانگین SNR متعلق به تصویر مشتق اول پردازش، برابر با ۱۵٫۶۸، بود. این میزان تقریباً ۴ برابر مقدار میانگین SNR برای بهترین فریم اولیه بود. همچنین باهدف تشخیص عیوب به صورت خودکار روش دسته‌بندی k-means به تصاویر منتخب اعمال شد. بعد از بررسی تصاویر باینری نهایی مشخص شد که ۱۰۰٪ عیوب در تصاویر مشتق اول و دوم TSR قابل شناسایی هستند.

واژگان کلیدی: آزمون غیرمخرب، ترموگرافی، پردازش تصاویر حرارتی، شناسایی عیوب به صورت خودکار، تولید افزایشی.

۱- مقدمه

چاپ سه‌بعدی^۱ یک فناوری مهندسی است که با قرارگیری لایه‌های پی‌درپی بر روی یکدیگر به خلق ده‌ها هزار شکل با طراحی‌های انعطاف‌پذیر می‌پردازد [۱]. تحقیقات در زمینه توسعه و افزایش عملکرد انواع مواد هنوز در مراحل ابتدایی بوده و به طرز فزاینده‌ای در سرتاسر دنیا رو به رشد است. وسیع‌ترین کاربرد فناوری چاپ سه‌بعدی در زمینه‌های خودروسازی، هوافضا، فلز و آلیاژ، الکترونیک و مهندسی پزشکی است [۲]. مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده^۲ به دلیل هزینه نسبتاً کم و سرعت چاپ سریع، رایج‌ترین روش چاپ سه‌بعدی در بازار است. ترموپلاستیک‌های مختلف مانند نایلون، آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، پلی لاکتیک اسید (PLA) و مواد کامپوزیتی با فیبر کربن را

می‌توان با چاپگرهای FDM چاپ کرد [۳]. کنترل کیفیت ساختارهای چاپ سه‌بعدی برای قابلیت اطمینان اشیاء ساخته‌شده با مواد افزودنی موردتوجه است [۴]. روش آزمون بازرسی موجود برای محصولات چاپ سه‌بعدی را می‌توان به‌طور کلی در دو نوع مکانیکی و امواج الکترومغناطیس تقسیم‌بندی کرد. آزمایش‌های مکانیکی اطلاعاتی را از نظر خاصیت ارتجاعی مانند مدول یانگ^۳ [۵-۸]، مدول برشی^۴ [۱۰، ۹]، استحکام مواد^۵ [۱۱، ۱۲] و سختی^۶ ارائه می‌دهد [۱۳]. هیچ روش آزمایش مکانیکی توزیع تراکم در ساختارهای چاپ سه‌بعدی را نمی‌تواند مشخص کند [۱۴]. در روش‌های آزمایش موج الکترومغناطیسی، چگالی ساختار چاپی یکی از عوامل اصلی بازرسی کیفیت است. به‌وسیله اشعه ایکس [۱۵] یا اشعه

⁴Shear modulus

⁵Strength

⁶Hardness

¹Three-dimensional Printing (3DP)

²Fused Deposition Modeling (FDM)

³Young' modulus

ممکن است ایجاد شود، به کار گرفته می‌شود [۲۳]. از جمله پژوهش‌های صورت گرفته در این خصوص پژوهش صورت گرفته در سال ۲۰۱۶ توسط میگler^۸ و سپالالا^۹ است که با بهره‌گیری از تکنیک ترموگرافی منفعل^{۱۰} شناسایی عیوب جدایش لایه‌ای در حین فرآیند تولید نمونه به روش تولید افزایشی را مطالعه نمودند [۲۴]. به کارگیری روش ترموگرافی برای بازرسی قطعات تولیدشده نیز در تعدادی از پژوهش‌ها دنبال شده است. مونتینارو^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۱۸ با هدف شناسایی عیوب مصنوعی ایجادشده در یک نمونه تیتانیومی ساخته‌شده به روش تولید افزایشی، از روش ترموگرافی فعال^{۱۲} با منبع تحریک نوری استفاده نمودند. مطابق نتایج ارائه شده، عیوب تا عمق ۱/۳ میلی‌متر به کمک منبع حرارتی لیزری با توان ۱/۵ کیلووات قابل شناسایی بودند [۲۵]. در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۵ مایلر^{۱۳} و همکاران به منظور معرفی روشی برای حذف عیوب قطعات ساخته‌شده به روش تولید افزایشی در حین فرآیند تولید پژوهشی را انجام دادند. در این پژوهش یک نمونه از طریق ذوب پودر Ti-6Al-4V به روش ذوب باریکه الکترونی^{۱۴} به همراه تعدادی از عیوب ساختگی با هندسه و ابعاد مختلف (۱۰۰-۲۰۰ میکرومتر) تولید شد. نمونه معیوب به روش ترموگرافی مورد بازرسی قرار گرفت. نتیجه حاصل‌شده نشان داد که به کمک تصاویر حرارتی عیوب تا اندازه ۶۰۰ میکرومتر قابل شناسایی هستند [۲۶].

ماهیت فرآیند بازرسی به روش ترموگرافی و ثبت تصاویر حرارتی به گونه‌ای است که همواره مشکلاتی از قبیل حرارت-دهی غیریکنواخت^{۱۵} وجود دارد که باعث کاهش قابلیت شناسایی عیوب می‌شود. به منظور حل این مشکلات روش‌های پردازش تصویر متعددی پیشنهادشده است. از جمله روش‌های مطرح این حوزه می‌توان به روش تجزیه و تحلیل مولفه اصلی^{۱۶}، حرارت‌نگاری فازی پالسی^{۱۷}، بازسازی پاسخ حرارتی^{۱۸} و رگرسیون حداقل مربعات جزئی^{۱۹} اشاره

گاما [۱۶] می‌توان حجم شکست عیب^۱ را شناسایی کرد. اخیراً برای بازرسی کیفیت فیلامنت‌های^۲ مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی از روش اسکن الکترومغناطیسی استفاده شده است که عملکرد خوبی داشته است [۱۷]. هم آزمون مکانیکی و هم آزمایش موج الکترومغناطیسی به‌طور گسترده در تحقیقات کاربرد دارند، اما محدودیت مهم این آزمون‌ها مخرب بودن این روش‌ها یا در حین آزمایش یا تهیه نمونه است [۱۸].

تحقیقات متعددی در خصوص به کارگیری آزمون‌های غیرمخرب برای بازرسی نمونه‌های ساخته‌شده به روش تولید افزایشی صورت گرفته است. از جمله آنها می‌توان به پژوهش صورت گرفته در سال ۲۰۱۵ توسط استرانتزا^۳ و همکاران اشاره کرد. در این پژوهش محققان قابلیت سیستم پایش وضعیت طراحی‌شده برای شناسایی عیوب قطعات ساخته شده به روش تولید افزایشی را مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور تعدادی از روش‌های بازرسی غیرمخرب از جمله بازرسی به کمک آزمون نشرآوایی^۴، مایع نافذ^۵، جریان گردابی^۶ و پرتونگاری^۷ را برای شناسایی عیوب موجود در قطعات انتخاب نمودند [۱۹]. طبق نتایج ارائه شده دو روش نشرآوایی و جریان گردابی کلیه عیوب در تمامی نمونه‌ها را شناسایی نمودند. همچنین مشخص شد که به کمک روش نشرآوایی ضمن تشخیص عیوب، رشد ترک‌ها و رویش عیوب نیز قابل بازرسی هستند [۱۹].

ترموگرافی از جمله روش‌های متداول غیرمخرب در حوزه بازرسی قطعات ساخته‌شده به روش تولید افزایشی است. محبوبیت این روش بدلیل سرعت بالای بازرسی، غیر تماسی بودن فرآیند و از همه مهم‌تر توسعه سریع روش‌های پردازش تصاویر حرارتی که منجر به افزایش قابلیت شناسایی عیوب می‌شود، است [۲۰، ۲۱، ۲۲]. ترموگرافی در حوزه ساخت افزایشی قطعات عمدتاً برای بررسی هندسه و دمای حوضچه مذاب به‌منظور تخمین عیوبی که در نمونه

¹¹ Montinaro

¹² Active Thermography

¹³ Mireles

¹⁴ Electron Beam Melting (EBM)

¹⁵ Non-uniform heating

¹⁶ Principal Component Analysis (PCA)

¹⁷ Pulsed Phased Thermography (PPT)

¹⁸ Thermal Signal Reconstruction (TSR)

¹⁹ Partial Least Square Regression (PLSR)

¹ Volume Fraction

² Filament

³ Strantza

⁴ Acoustic Emission (AE)

⁵ Penetrant liquid

⁶ Eddy current

⁷ Radiography

⁸ Migler

⁹ Seppala

¹⁰ Passive Thermography

تکنیک تولید افزایشی، به کمک روش ترموگرافی صورت گرفت. برای انجام این مهم، پس از بررسی تصاویر حرارتی اولیه و انتخاب بهترین تصویر حرارتی خام، روش پردازش بازسازی پاسخ حرارتی به اطلاعات ثبت شده اعمال شد. بهترین تصاویر پردازش شده از مشتقات این روش به همراه بهترین تصویر خام حرارتی از نظر اختلاف شدت نور میان نواحی سالم و معیوب با یکدیگر مقایسه شدند. همچنین به منظور تشخیص خودکار عیوب قابل شناسایی، روش دسته بندی k -means^۳ به تصاویر منتخب اعمال شد. با بررسی تصاویر باینری حاصل، اثر پردازش اعمال شده مورد مطالعه قرار گرفت.

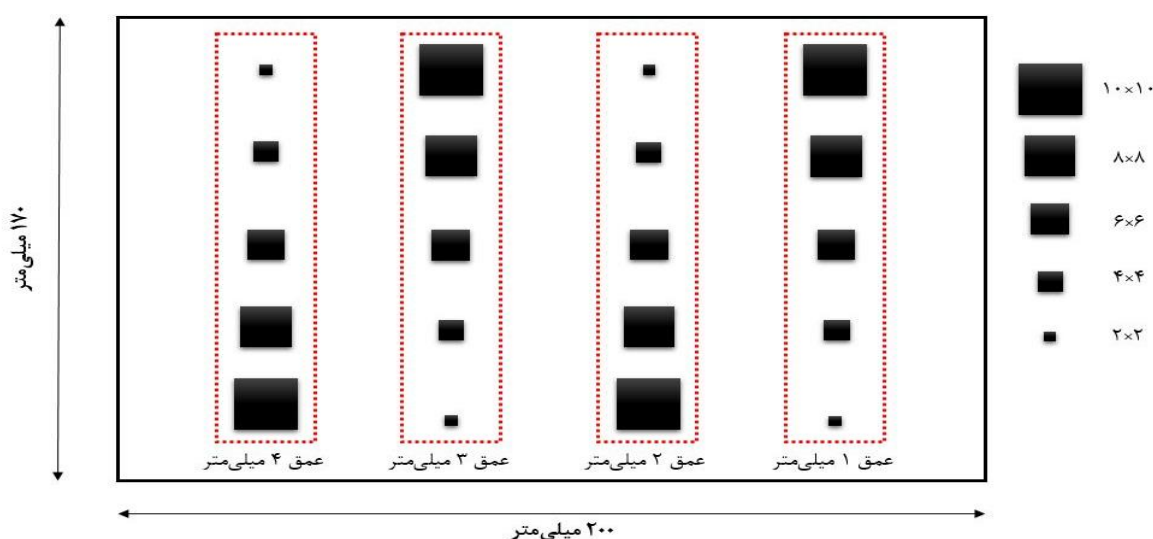
۲- ساخت نمونه و تجهیزات آزمایش

۲-۱- ساخت نمونه

یک نمونه از جنس PLA به روش تولید افزایشی به ابعاد 170×200 میلی متر ساخته شد. در تولید این نمونه از فیلامنت های PLA ساخت شرکت YS^4 و روش ساخت پیوسته^۵ استفاده شده است. جدول ۱ اطلاعات تکمیلی را در خصوص نمونه استفاده شده ارائه می دهد. در این نمونه تعدادی عیوب مربعی شکل ایجاد شد که نحوه قرارگیری و ابعاد آنها در شکل ۱ نمایش داده شده است. ضخامت هر ناحیه معیوب برابر ۱ میلی متر بوده و ضخامت کل نمونه ۶ میلی متر است.

کرد [۳۰، ۲۹، ۲۸، ۲۷]. همچنین برای شناسایی عیوب به صورت خودکار و کاهش نیاز به تحلیل تصاویر برای تشخیص نواحی معیوب، روش های جداسازی^۱ تصویر نقش بسیار پررنگی دارند. پژوهش های گسترده ای در زمینه پیاده سازی تکنیک های متخلف جداسازی صورت گرفته است. از جمله این پژوهش ها می توان به پژوهش سینگ^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ اشاره کرد. در این مطالعه موتورهای الکتریکی سالم و در حالت اتصال کوتاه به روش ترموگرافی مورد بررسی قرار گرفتند. سینگ برای تشخیص عیوب علاوه بر مطالعه تغییرات دمایی هریک از نمونه ها در حین آغاز شروع به کار، نواحی معیوب در تصاویر حرارتی ثبت شده در حالت ثابت بودن دمای نمونه ها را، به کمک روش جداسازی معرفی شده در مقاله، از نواحی سالم جدا نمود. در این پژوهش ابتدا بهترین میزان سرحد برای جداسازی موتور از زمینه از طریق بررسی ترکیبات خطی مقدار میانگین و انحراف معیار داده های حرارتی تعیین شد. سپس بر اساس اختلاف دمای ثبت شده نواحی روی موتور به سه دسته تقسیم شدند [۳۱].

با گسترش روزافزون کاربرد قطعات ساخته شده به روش تولید افزایشی در صنایع مختلف، نیازی مبرم بر پیدا کردن روش های دقیق و سریع برای بازرسی این نوع قطعات احساس می شود. بدین منظور، این پژوهش با هدف بهبود کیفیت نتایج حاصل از بازرسی یک نمونه پلیمری از جنس PLA و ساخته شده با



شکل ۱- نحوه قرارگیری عیوب در نمونه

⁴Guangzhou Yousu Plastic Technology Co.

⁵Continuous Filament Fabrication (CFF)

¹Segmentation methods

²Singh

³K-means clustering

۳- روش‌های پردازش تصاویر حرارتی

به‌منظور ارتقای قابلیت شناسایی عیوب و تشخیص خودکار آن‌ها، دو روش پردازش تصویر مورد استفاده قرار گرفت. این دو روش در ادامه به‌اختصار شرح داده شده‌اند.

۳-۱- روش بازسازی پاسخ حرارتی

یکی از پرکاربردترین روش‌های بهبود تصاویر حرارتی، الگوریتم بازسازی پاسخ حرارتی (TSR) است. این روش با بازسازی اطلاعات هر پیکسل تصویر حرارتی، میزان نویز تصاویر اولیه را کاهش و قابلیت شناسایی عیوب را افزایش می‌دهد [۳۲]. اصول حاکم بر این الگوریتم برگرفته از مدل اولیه توزیع حرارت یکنواخت در یک صفحه ضخیم است. این مدل که به معادله نفوذ حرارتی شهرت دارد در اصل برگرفته از معادله‌های حرارت انتقال‌یافته به نمونه و انتقال حرارت جابه‌جایی در طول نمونه است که به شرح زیر هستند.

$$Q = mc \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۱)$$

$$Q_z = k \times dx \times dy \times \frac{\partial T}{\partial z} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (۳)$$

در فرمول بالا C ظرفیت حرارتی ویژه، k ضریب هدایت حرارتی، α ضریب نفوذ حرارتی و Q انرژی انتقال‌یافته به نمونه است. با در نظر گرفتن رابطه میان ضریب نفوذ حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی، می‌توان رابطه ۳ را به‌صورت زیر بازنویسی کرد.

$$T = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (۴)$$

با اعمال لگاریتم پایه e به دو طرف رابطه ۴، می‌توان آن را به یک رابطه خطی تبدیل کرد [۳۳].

$$\ln T(t) = C_1 - \frac{1}{2} \ln(\pi t) \quad (۵)$$

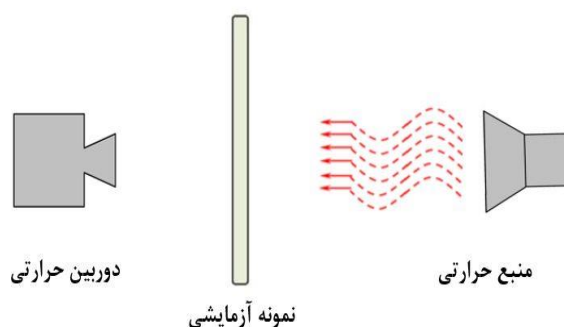
رابطه بالا نمایان می‌سازد که بین دما و زمان اعمال حرارت رابطه خطی وجود دارد. این رابطه قابلیت تخمین و تبدیل

جدول ۱- اطلاعات فرآیند تولید نمونه

پارامتر	مقدار
سرعت پرینت	۶۰ میلی‌متر بر ثانیه
ضخامت هر لایه	۰/۱۵ میلی‌متر
قطر نازل	۰/۴ میلی‌متر
عرض تزریق	۰/۴ میلی‌متر
ضریب تزریق	٪۱۰۰
دمای پرینت	۲۰۰ درجه سلسیوس

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

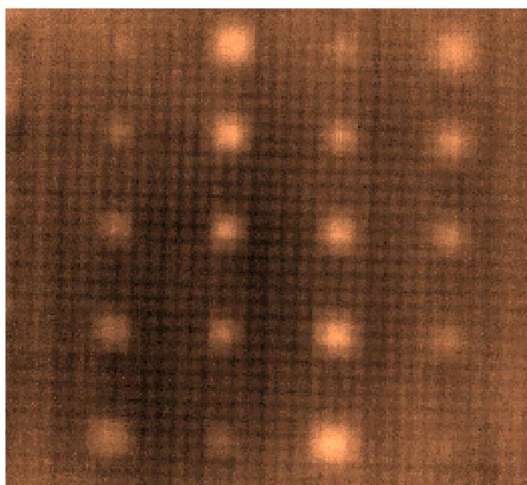
در این پژوهش از یک پروژکتور نوری با توان نامی ۲ کیلووات به عنوان منبع حرارتی استفاده شد و مدت زمان روشن بودن منبع حرارتی و فرآیند گرم کردن نمونه به مدت ۱۵ ثانیه صورت پذیرفت. با هدف کاهش مشکل عدم تابش یکنواخت منبع حرارتی و ارسال امواج حرارتی به کل نمونه به صورت یکسان، مرکز منبع حرارتی در راستای مرکز نمونه قرار داده شد. دوربین حرارتی Flir A325sc برای ثبت دمای نمونه مورد استفاده قرار گرفت. این دوربین با رزولوشن ۳۲۰×۲۴۰، توانایی ثبت دماهای بین ۰ تا ۳۵۰ درجه سلسیوس را دارد. همچنین سرعت تصویربرداری برابر با ۳۰ هرتر تنظیم شد. پروژکتور نوری و دوربین در دو سمت قطعه واقع شدند که این نحوه قرارگیری را اصطلاحاً حالت عبوری^۱ می‌نامند. لازم به ذکر است فاصله دوربین و پروژکتور از نمونه به ترتیب ۳۰ سانتی‌متر و ۱ متر در نظر گرفته شد. شکل ۲ شماتیک کلی نحوه قرارگیری دوربین، منبع حرارتی و نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نحوه قرارگیری اجزای آزمایش.

^۱Transmission mode

نواحی سالم، برخی از عیوب مانند عیوب با ابعاد 2×2 میلی-متر در عمق‌های ۱ و ۴ میلی-متر قابل تشخیص نیستند. علاوه بر عیوب نام‌برده تعدادی دیگر از عیوب مانند عیوب 2×2 میلی-متر واقع در عمق‌های ۲ و ۳ میلی-متر نیز به‌سختی شناسایی می‌شوند. به‌منظور افزایش قابلیت شناسایی خودکار عیوب نمونه‌ی پلیمری، روش معروف TSR، باهدف افزایش اختلاف شدت نور میان نواحی سالم و معیوب، به داده‌های حرارتی اولیه اعمال شد. بهترین تصاویر پردازش‌شده و بهترین فریم داده‌های حرارتی اولیه از نظر میزان اختلاف شدت نور میان نواحی معیوب و سالم با یکدیگر به‌صورت کمی مقایسه شدند. برای انجام این مهم پارامتر نسبت سیگنال به نویز (SNR) تعریف و به کار گرفته شد. در انتها به‌منظور تشخیص خودکار تعداد عیوب قابل‌شناسایی و بررسی اثر افزایش اختلاف شدت نور نواحی سالم و معیوب بر این مهم، روش دسته‌بندی k-means به تصاویر منتخب اعمال شد و تصاویر نهایی حاصل از اعمال روش دسته‌بندی نام‌برده مورد مقایسه قرار گرفتند.



شکل ۳- بهترین فریم داده‌های حرارتی اولیه

۴-۱- استخراج بهترین تصاویر پردازش‌شده و مقایسه با بهترین تصویر حرارتی اولیه
پس از اعمال روش پردازش TSR، بهترین فریم از اطلاعات مشتقات اول تا سوم این روش انتخاب شد. این تصاویر در شکل ۴ نمایان هستند.

به یک رابطه چندجمله‌ای را داراست که اصل رابطه‌ی الگوریتم بازسازی پاسخ حرارتی را تشکیل می‌دهد.

$$\ln T(t) = \sum_{i=0}^n a_i \{\ln(t)\}^i \quad (6)$$

در این پژوهش از چندجمله‌ای درجه چهارم برای تخمین اطلاعات حرارتی بهره گرفته شد و داده‌های استخراج‌شده از مشتقات اول تا سوم موردبررسی قرار گرفت.

۳-۲- روش دسته‌بندی k-means

این روش دسته‌بندی یکی از پرکاربردترین روش‌های دسته‌بندی اطلاعات است که مقالات متعددی از آن بهره بردند [۳۵، ۳۴].

تصور کنید که $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ یک دسته نقاط باشند و K نمایانگر تعداد دسته‌ها باشد. در این روش ابتدا می‌بایست دو مرکز دلخواه در نظر گرفت و فاصله نقاط تا این مراکز را محاسبه نمود. داده x_i به دسته‌ای تعلق دارد که کمترین فاصله با مرکز آن را داشته باشد. این روش به دنبال دسته‌بندی اطلاعات به‌گونه‌ای است که مقدار زیر به حداقل برسد.

$$J_k = \sum_{k=1}^K \sum_{(i)=k} d(x_i - x_j) \quad (7)$$

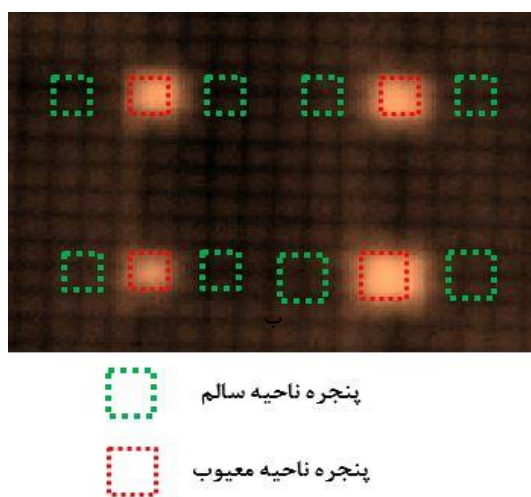
در رابطه بالا $C(i) = k$ بیانگر این است که داده x_i متعلق به دسته k ام است و $d(x_i - x_j)$ نشانگر فاصله داده مذکور تا مرکز دسته است. در این پژوهش $k=2$ انتخاب شد. در نتیجه این انتخاب تصویر نهایی به‌صورت سیاه‌سفید به نمایش درآمد.

۴- بیان و تحلیل نتایج

علاوه بر ثبت تصاویر حرارتی نمونه در طول مدت زمان گرم شدن، در نظر گرفته شد تا پس از خاموش کردن منبع به مدت ۳۰ ثانیه دوربین حرارتی به ثبت دمای نمونه ادامه دهد. تصاویر حرارتی اولیه موردبررسی قرار گرفت و بهترین فریم داده‌های حرارتی انتخاب شد. شکل ۳ بهترین فریم داده‌های حرارتی اولیه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در تصویر پیداست به دلیل اختلاف شدت نور کم میان عیوب و

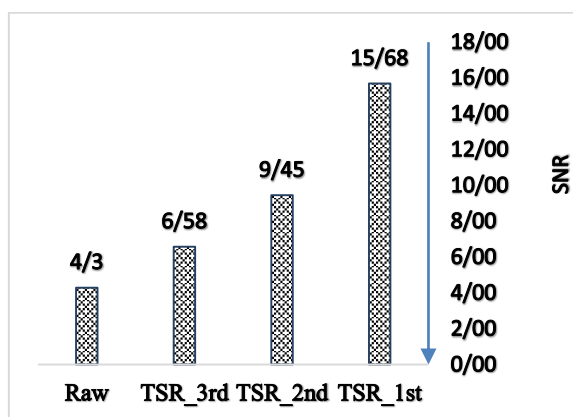
$$SNR = \frac{|\mu_{w_d} - \mu_{w_s}|}{\sigma_{w_s}} \quad (1)$$

در رابطه نمایش داده شده در بالا μ_{w_d} و μ_{w_s} به ترتیب میانگین داده های درون پنجره انتخاب شده در ناحیه معیوب و سالم است. همچنین σ_{w_s} نمایانگر انحراف معیار داده های درون پنجره واقع در ناحیه سالم است. پنجره نواحی معیوب با توجه به اندازه عیوب انتخاب شد. همچنین پنجره نواحی سالم متناسب با اندازه پنجره ناحیه معیوب مدنظر و در دو سمت این ناحیه در نظر گرفته شد. شکل ۵ نمونه ای از انتخاب پنجره ها را نمایش می دهد.

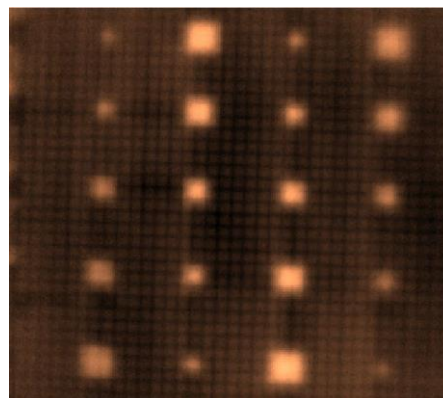


شکل ۵- نحوه انتخاب پنجره های نواحی سالم و معیوب

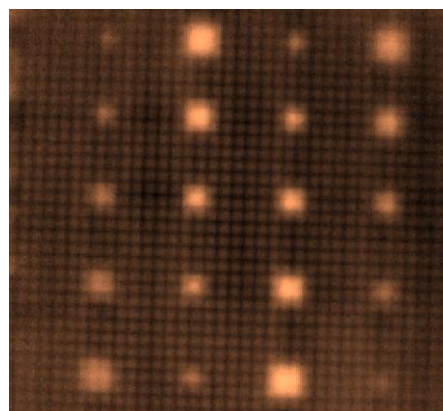
به نحوی که در بالا نشان داده شده است، پنجره های نواحی سالم و معیوب برای هر عیب انتخاب و میزان SNR محاسبه شد. میانگین مقدارهای به دست آمده برای هر تصویر منتخب محاسبه شد و در شکل ۶ نمایش داده شده است.



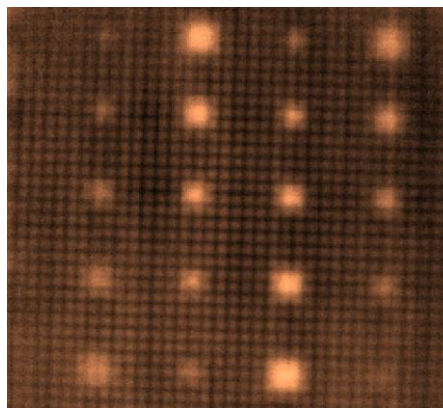
شکل ۶- میانگین داده های SNR برای تصاویر منتخب



(الف)



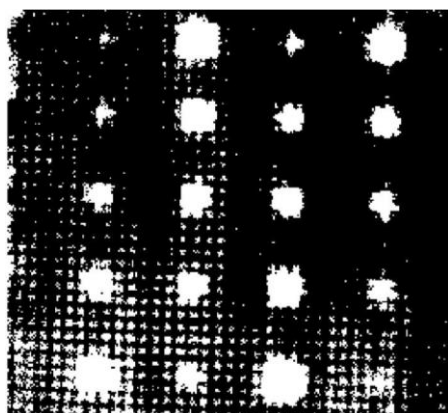
(ب)



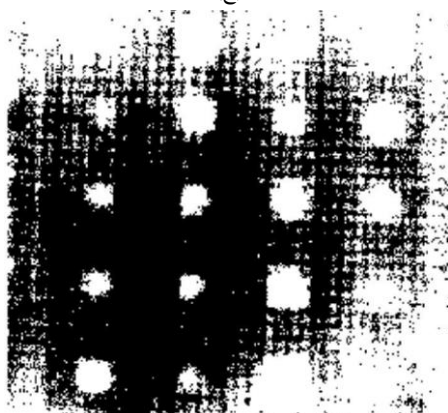
(ج)

شکل ۴- بهترین تصاویر پردازش شده. الف) مشتق اول، ب) مشتق دوم، ج) مشتق سوم TSR.

با مقایسه تصاویر شکل ۴، می توان مشاهده کرد که تصویر مشتق اول TSR مناسب ترین تصویر برای شناسایی عیوب است. دلیل این مهم نیز تیره تر بودن نواحی سالم در این تصویر نسبت به دو تصویر دیگر است. همچنین با مقایسه اشکال ۳ و ۴، می توان پی برد که پردازش اطلاعات موجب شده است تا شناسایی عیوب راحت تر و تعداد عیوب قابل شناسایی افزایش یابد. برای بررسی کمی میزان بهبود اطلاعات حرارتی اولیه، پارامتر SNR به صورت زیر تعریف شد [۳۶].



(ج)



(د)

شکل ۷- تصاویر نهایی؛ الف) مشتق اول پردازش، ب) مشتق دوم پردازش، ج) مشتق سوم پردازش، د) داده‌های اولیه

با در نظر گرفتن شکل ۷، کلیه عیوب به‌وضوح از طریق تصاویر نهایی مشتق اول و دوم پردازش قابل مشاهده است. در تصویر نهایی مشتق سوم پردازش، عیب 2×2 میلی‌متر واقع در عمق ۱ میلی‌متر قابل تمایز از زمینه نیست. همچنین به دلیل نویز بالای این تصویر، وجود عیب 2×2 میلی‌متر در عمق ۴ میلی‌متر را نمی‌توان بدون اطلاع از محل قرارگیری عیوب تایید کرد. با این وجود تعداد عیوب قابل شناسایی در تصویر نهایی مشتق سوم به مراتب از تصویر نهایی داده‌های اولیه بیشتر است.

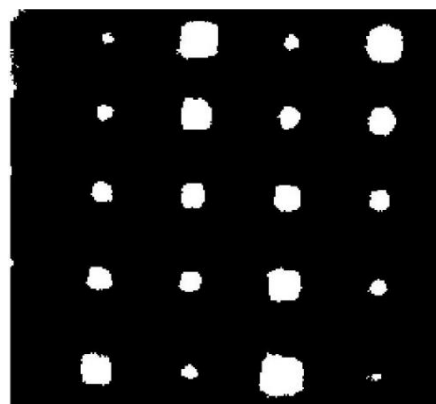
با بررسی تصاویر ۷-الف و ۷-ب می‌توان گفت که اگرچه این دو تصویر از نظر تعداد عیوب قابل شناسایی تفاوتی با یکدیگر ندارند، لیکن مرز عیوب در تصویر نهایی مشتق اول نمایان‌تر است. این مهم از طریق بررسی عیب 2×2 میلی‌متر واقع در عمق ۱ میلی‌متر در دو تصویر مشهود است. همچنین با مقایسه این عیب در دو تصویر مشاهده می‌شود که در تصویر نهایی مشتق اول تنها یک ناحیه سفیدرنگ موجود است، در حالی که در تصویر نهایی مشتق دوم پردازش به دلیل نویز در محل عیوب مذکور، بیش از یک ناحیه سفید موجود است

همان‌گونه که از مقایسه بصری دو شکل ۳ و ۴ نتیجه‌گیری شد، در تصویر مشتق اول میزان اختلاف شدت نور میان نواحی معیوب و سالم بیشینه است. با توجه به داده‌های شکل ۶ تصویر مشتق اول پردازش اعمال شده بالاترین میزان SNR_{ave} را به دست آورد که این مهم نتیجه حاصل شده از مقایسه بصری را تایید می‌کند. با بررسی تصاویر شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد که نواحی سالم در تصویر مشتق دوم نسبت به تصویر مشتق اول و سوم به ترتیب شدت نور بیشتر و کمتری دارد. از این رو در شکل ۶ مشاهده می‌شود که میزان SNR_{ave} برای این تصویر مقایسه بصری تصاویر منتخب در بالا مبنی بر بهبود اختلاف شدت نور بعد از اعمال پردازش توسط داده‌های SNR_{ave} تایید می‌شود.

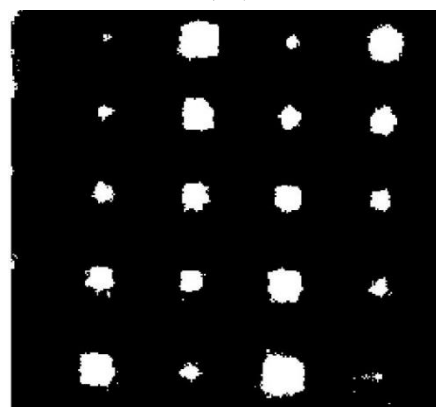
۴-۲- بررسی اثر پردازش اعمال شده در شناسایی خودکار

عیوب

به منظور شناسایی خودکار عیوب در تصاویر منتخب، روش دسته‌بندی k -means انتخاب شد. با اعمال این روش دسته‌بندی به تصاویر منتخب، تصاویر نهایی حاصل شدند. این تصاویر در شکل ۷ نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

بودند. مقادیر مذکور به ترتیب تقریباً ۴ و ۲/۵ برابر مقدار به-دست آمده برای بهترین تصویر اولیه حرارتی بودند. این برتری با مقایسه بصری تصاویر منتخب نیز قابل مشاهده بود به گونه‌ای که کوچکترین عیب با بیشترین عمق، عیب با ابعاد 2×2 میلی‌متر واقع در عمق ۴ میلی‌متر، در تصویر منتخب مشتق اول TSR وضوح به مراتب بالاتری نسبت سایر تصاویر دارد. در انتها نیز به منظور شناسایی خودکار نواحی معیوب و سهولت در شناسایی آنها، روش دسته‌بندی k-means به تصاویر منتخب اعمال شد. با مقایسه تصاویر باینری مشخص شد که همه ۲۰ عیب قرار داده شده در نمونه از طریق تصاویر باینری مشتق اول و دوم TSR قابل شناسایی هستند، که این تعداد برای تصویر نهایی بهترین فریم داده‌های اولیه تنها ۱۴ عیب بود. همچنین با در نظر داشتن نقشه اولیه عیوب و بررسی تصاویر باینری می‌توان مشاهده نمود که تصویر مشتق اول TSR تنها نواحی معیوب را با رنگ سفید مشخص می‌نماید. به عبارت دیگر این تصویر عاری از نویز بوده و سبب می‌شود تا فرآیند بازرسی نمونه با اطمینان بالاتری انجام پذیرد.

۶- منابع

- [1] Heidari-Rarani M, Rafiee-Afarani M and Zahedi A M 2019 Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites Composites B, 175, pp.107-147.
- [2] Sam-Daliri, O., Farahani, M., Faller, L. M., & Zangl, H. (2020). Structural health monitoring of defective single lap adhesive joints using graphene nanoplatelets. Journal of Manufacturing Processes, 55, 119-130.
- [3] Jin Y, Rao A, Brinkman W and Choi T-Y 2017 3D printing assisted energy loss testing of artificial aortic heart valves Eng. Sci. Technol.: Int. J. (ESTIJ), 7, pp. 4-11.
- [4] Ren H, Zhang H, Jin Y, Gu Y and Arigong B 2019 A novel 2D 3×3 Nolen matrix for 2D beamforming applications IEEE Trans. Microw. Theory Tech, 67, pp. 22-31.
- [5] Mobarakian, M., Safarabadi, M., & Farahani, M. (2020). Investigating the effects of cooling rate on distortion of asymmetric composite laminates. Composite Structures, 236, 111875.
- [6] Sam-Daliri, O., Farahani, M., & Araei, A. (2019). Condition monitoring of crack extension in the reinforced adhesive joint by carbon nanotubes. Welding Technology Review, 91(12), 7-15.
- [7] Ghabezi, P., & Farahani, M. (2019). A cohesive model with a multi-stage softening behavior to predict fracture in nano composite joints. Engineering Fracture Mechanics, 219, 106611.
- [8] Ghabezi, P., Farahani, M., Shahmirzaloo, A., Ghorbani, H., & Harrison, N. M. (2020). Defect evaluation of the honeycomb structures formed during the drilling process. International Journal of Damage Mechanics, 29(3), 454-466.
- [9] Rahmatabadi, D., Shahmirzaloo, A., Hashemi, R., & Farahani, M. (2019). Using digital image correlation for

که این موضوع باعث خطا در تشخیص عیب مذکور می‌شود. از این رو می‌توان داده‌های منتخب مشتق اول پردازش را بهترین مرجع برای شناسایی عیوب در این پژوهش معرفی کرد. تعداد عیوب قابل شناسایی هر یک از تصاویر نهایی در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۲- تعداد عیوب قابل شناسایی در تصاویر نهایی

تصویر	تعداد	درصد (%)
مشتق اول پردازش	۲۰	۱۰۰
مشتق دوم پردازش	۲۰	۱۰۰
مشتق سوم پردازش	۱۹	۹۵
بهترین تصویر خام اولیه	۱۴	۷۰

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور افزایش قابلیت شناسایی خودکار عیوب تصاویر حرارتی ثبت شده از نمونه پلیمری ساخته شده به روش تولید افزایشی صورت گرفت. در این پژوهش تعدادی عیوب با ابعاد و در عمق‌های مختلف در نمونه پلیمری قرار داده شد. نمونه معیوب به کمک یک پروژکتور نوری با توان نامی ۲ کیلووات گرم شد. دمای نمونه در بازه ۱۵ ثانیه روشن بودن منبع حرارت دهی نوری و تا ۳۰ ثانیه پس از خاموش کردن منبع، توسط دوربین حرارتی ثبت شد. پس از انتخاب بهترین فریم تصاویر اولیه حرارتی، مشاهده شد که عیوب کوچک قرار داده شده، با ابعاد 2×2 میلی‌متر، به سختی قابل شناسایی هستند. همچنین عیوب واقع در عمق ۴ میلی‌متر نیز اختلاف شدت نور کمی با زمینه دارند که این مهم به سخت‌تر شدن تشخیص عیوب با کاهش ابعاد آنها منجر می‌شود. از سوی دیگر افزایش اختلاف شدت نور نواحی معیوب و سالم باعث افزایش قابلیت شناسایی خودکار عیوب توسط سیستم و تشکیل تصاویر باینری مناسب‌تری می‌شود. از این رو روش شناخته شده پردازش TSR به داده‌های اولیه اعمال شد و پس از بررسی داده‌های مشتقات اول تا سوم این پردازش، بهترین تصاویر پردازش شده شناسایی شدند. به منظور مقایسه کمی میزان افزایش اختلاف شدت نور نواحی سالم و معیوب، پارامتر SNR تعریف و استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل میزان میانگین SNR تصاویر پردازش شده از بهترین تصویر اولیه حرارتی بالاتر بود که نشان دهنده تاثیر مثبت پردازش اعمال شده است. براساس این نتایج، تصاویر مشتق اول و دوم TSR با میانگین SNR معادل با به ترتیب ۱۵/۶۸ و ۹/۴۵ بالاترین مقادیر ممکن را بدست آورده

- [24] 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.
- [25] Bartlett, J.L., Heim, F.M., Murty, Y.V. and Li, X., 2018. In situ defect detection in selective laser melting via full-field infrared thermography. *Additive Manufacturing*, 24, pp.595-605.
- [26] Seppala, J.E. and Migler, K.D., 2016. Infrared thermography of welding zones produced by polymer extrusion additive manufacturing. *Additive manufacturing*, 12, pp.71-76.
- [27] Montinaro, N., Cerniglia, D. and Pitarresi, G., 2018. Defect detection in additively manufactured titanium prosthesis by flying laser scanning thermography. *Procedia Structural Integrity*, 12, pp.165-172.
- [28] Mireles, J., Ridwan, S., Morton, P.A., Hinojos, A. and Wicker, R.B., 2015. Analysis and correction of defects within parts fabricated using powder bed fusion. technology. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 3(3), p.034002.
- [29] Maldague, X., & Marinetti, S. (1996). Pulse phase infrared thermography. *Journal of applied physics*, 79(5), 2694-2698.
- [30] Cadelano, G., Bortolin, A., Ferrarini, G., Molinas, B., Giantin, D., Zonta, P. and Bison, P., 2016. Corrosion detection in pipelines using infrared thermography: experiments and data processing methods. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 35(3), p.49.
- [31] Shahmirzaloo, A., Farahani, M., & Farhang, M. (2020). Evaluation of local constitutive properties of Al2024 friction stir-welded joints using digital image correlation method. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 0309324720981201.
- [32] Sam-Daliri, O., Fallier, L. M., Farahani, M., & Zangl, H. (2021). Structural health monitoring of adhesive joints under pure mode I loading using the electrical impedance measurement. *Engineering Fracture Mechanics*, 245, 107585.
- [33] Singh, G., Kumar, T.C.A. and Naikan, V.N.A., 2016. Induction motor inter turn fault detection using infrared thermographic analysis. *Infrared Physics & Technology*, 77, pp.277-282.
- [34] Balageas, D.L., Roche, J.M., Leroy, F.H., Liu, W.M. and Gorbach, A.M., 2015. The thermographic signal reconstruction method: a powerful tool for the enhancement of transient thermographic images. *Biocybernetics and biomedical engineering*, 35(1), pp.1-9.
- [35] Poudel, A., Mitchell, K.R., Chu, T.P., Neidigk, S. and Jacques, C., 2016. Non-destructive evaluation of composite repairs by using infrared thermography. *Journal of Composite Materials*, 50(3), pp.351-363.
- [36] Ayech, M.W. and Ziou, D., 2016. Terahertz image segmentation using k-means clustering based on weighted feature learning and random pixel sampling. *Neurocomputing*, 175, pp.243-264.
- [37] Lu, X., He, Z., Su, L., Fan, M., Liu, F., Liao, G. and Shi, T., 2018. Detection of micro solder balls using active thermography technology and K-Means algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(12), pp.5620-5628.
- [38] Gong, J., Liu, J., Qin, L. and Wang, Y., 2014. Investigation of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheet with subsurface defects inspection using thermal-wave radar imaging (TWRI) based on the multi-transform technique. *Ndt & E International*, 62, pp.130-136.
- characterizing the elastic and plastic parameters of ultrafine-grained Al 1050 strips fabricated via accumulative roll bonding process. *Materials Research Express*, 6(8), 086542.
- [10] Sabokrouh, M., & Farahani, M. (2019). Correlation between the Weld Residual Stresses and its Tensile and Impact Strength. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 5(4), 727-734.
- [11] Safari, A., Farahani, M., & Ghabeezi, P. (2020). Experimental study on the influences of different surface treatment processes and adhesive type on the aluminum adhesive-bonded joint strength. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 1-14.
- [12] Ramezani, N. M., Davoodi, B., Farahani, M., & Khanli, A. H. (2019). Surface integrity of metal matrix nanocomposite produced by friction stir processing (FSP). *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(11), 1-11.
- [13] Sanjayan J G, Nematollahi B, Xia M and Marchment T 2018 Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete Constr. Build. Mater, 172, pp. 468-75.
- [14] El-Hajje A, Kolos E C, Wang J K, Maleksaeedi S, He Z, Wiria F E, Choong C and Ruys A J 2014 Physical and mechanical characterisation of 3D-printed porous titanium for biomedical applications J. Mater. Sci., Mater. Med, 25, pp. 2471-80.
- [15] Chua C K, Wong C H and Yeong W Y 2017 Standards, quality control, and measurement sciences in 3D printing and additive manufacturing (New York: Academic).
- [16] Otten W, Pajor R, Schmidt S, Baveye P C, Hague R and Falconer R E 2012 Combining x-ray CT and 3D printing technology to produce microcosms with replicable, complex pore geometries Soil Biol. Biochem, 51, pp. 53-5.
- [17] Miller B W, Moore J W, Barrett H H, Frye T, Adler S, Sery J and Furenlid L R 2011 3D printing in x-ray and gamma-ray imaging: A novel method for fabricating highdensity imaging apertures Nucl. Instrum. Methods Phys. Res A, 659, pp. 262-8.
- [18] Huber C et al 2016 3D print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user3D printer Appl. Phys. Lett, 109, pp. 162-170
- [19] 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.
- [۲۰] کلاگر، علی محمدی، چراغزاده، محمد، اکبری، داوود، فراهانی، محمدرضا. (۱۳۹۹). ارزیابی غیرمخرب کانال‌های خنک‌کاری پره توربین گاز با استفاده از روش دمانگاری فروسرخ، نشریه علمی فناوری آزمون‌های غیرمخرب، جلد ۲، شماره ۶، صفحه ۵۲-۴۶.
- [۲۱] مشکلی زاده، پوریا، فراهانی، محمدرضا، رضایی حاجیده، مجتبی، حیدری رازانی، محمد. (۱۳۹۹). به کارگیری روش‌های پردازش تصاویر حرارتی به منظور بهبود شناسایی عیوب قطعات تولیدشده به روش ساخت افزایشی، نشریه علمی فناوری آزمون‌های غیرمخرب، جلد ۲، شماره ۶، صفحه ۳۶-۵۴.
- [۲۲] اردبیلی، امیررضا، فراهانی، محمدرضا، اصغری، سعید. (۱۳۹۸). حرارت‌نگاری با تحریک تابشی در ارزیابی غیرمخرب پوسته‌های کامپوزیتی و فلزی. نشریه علمی فناوری آزمون‌های غیرمخرب، جلد ۲، شماره ۵، صفحه ۳-۱۳.
- [۲۳] احمدی، علیرضا، فراهانی، محمدرضا، اردبیلی، امیررضا. (۱۳۹۹). به کارگیری تکنیک حرارت‌نگاری پالسی در ارزیابی عیوب خوردگی در ورق‌های فولادی. مجله علمی پژوهشی مهندسی ساخت و تولید ایران، جلد ۵، شماره ۷، صفحه ۳۲-۲۴.