

## حرارت‌نگاری با تحریک تابشی در ارزیابی غیرمخرب پوسته های کامپوزیتی و فلزی

امیررضا اردبیلی<sup>۱</sup>، محمدرضا فراهانی<sup>۲\*</sup>، سعید اصغری<sup>۳</sup>

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

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

۳- دانشیار، پژوهشکده مواد و انرژی

\* mrfarahani@ut.ac.ir

### چکیده

نقصها و آسیبها در حین ساخت کامپوزیتها یا قطعات فلزی اجتناب ناپذیر است. بنابراین، آزمون غیرمخرب برای جلوگیری از شکست و افزایش قابلیت اطمینان ساختارهای کامپوزیتی یا اجزای سازنده فلزی بسیار ضروری است. فناوریهای غیرمخرب حرارت‌نگاری مزایای فراوانی در این زمینه را نشان داده‌اند. در این فناوری تغییرات دمای سطح با استفاده از دریافت امواج فروسرخ ساطع شده از سطح قطعه کار انجام می‌پذیرد. این امواج با دقت بسیار بالا دمای هر نقطه از سطح را آشکار می‌نمایند. در این مقاله، بررسی کامل و جامعی از روش‌های آزمون غیرمخرب حرارت‌نگاری فروسرخ برای بازرسی فلزات و کامپوزیتها انجام شد و پیشرفتهای فناوریهای حرارت‌نگاری فروسرخ مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مفاهیم پایه برای حرارت‌نگاری آزمون غیرمخرب معرفی شدند. سپس انواع روش‌های حرارت‌نگاری با تحریک تابشی شرح داده و مورد مقایسه قرار داده شدند. در ادامه نمونه‌های پژوهشی از کاربرد روش‌های حرارت‌نگاری و برخی از نقاط قوت و محدودیت‌های فناوریهای حرارت‌نگاری با هم مقایسه شده و به تفصیل شرح داده شده است.

**واژگان کلیدی:** آزمون غیرمخرب، تحریک تابشی، حرارت‌نگاری فروسرخ

### ۱- مقدمه

ساخت و در حین کارکرد، بسیار ضروری است. علاوه بر مزیت‌های ذکر شده، استفاده از آزمون‌های غیرمخرب<sup>۴</sup>، قابل اعتماد و مقرون به صرفه<sup>۵</sup> می‌باشد و نظارت بر سلامت ساختمانی<sup>۵</sup> خواهد بود.

امروزه بسیاری از روش‌های آزمون غیرمخرب برای بازرسی‌های کامپوزیت مانند آزمون‌های فراصوتی<sup>۶</sup>، نشر آوایی<sup>۷</sup>، شبکه فیبر براگ<sup>۸</sup>، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی<sup>۹</sup>، جریان گردابی الکتریکی<sup>۱۰</sup>، مایکروویو، اشعه تی، اشعه ایکس، تداخل‌سنجی برشی صیقلی<sup>۱۱</sup>، شیروگرافی<sup>۱۲</sup> و حرارت‌نگاری فروسرخ، موجود می‌باشند که در میان آنها حرارت‌نگاری فروسرخ مزایای بسیاری را ارائه می‌دهد که از جمله آن‌ها، سرعت بازرسی بیشتر، وضوح و حساسیت بالاتر و قابلیت تشخیص نقص داخلی می‌باشد. بر خلاف آزمون فراصوتی، در این روش نیاز به تماس با سطح قطعه نمی‌باشد. علاوه بر حرارت‌نگاری با استفاده از تحریک نوری، دیگر منابع حرارتی از جمله جریان الکتریکی، لیزر، مایکروویو و فراصوت، دیگر روش‌های آزمون غیرمخرب نیز توسعه یافته‌اند. در حال حاضر، آزمون‌های مخرب گوناگونی بر روی مواد و

امروزه بیشتر مواد کامپوزیتی مانند پلیمر تقویت شده شیشه<sup>۱</sup> و پلیمر تقویت شده کربن<sup>۲</sup> در هوافضا<sup>۱</sup>، انرژی‌های تجدیدپذیر<sup>۲</sup>، و معماری<sup>۳،۴</sup> و سایر صنایع، به دلیل دارا بودن مزایای بسیار مانند کم هزینه بودن، وزن سبک، نسبت استحکام به وزن بالا و نسبت سفتی به وزن بالا، کاربرد دارند. برای اکثر کامپوزیت‌های ماتریس پلیمری<sup>۳</sup>، فقط اتصال چسبندگی و اتصال مکانیکی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد<sup>۵</sup>. پیوند چسبنده، به دلیل اتصال مداوم، به اتصال مکانیکی ترجیح داده می‌شود. این در حالی است که در سوراخکاری برای پیچ و مهره‌ها یا پرچ‌ها، الیاف یا دیگر تقویت کننده‌ها برش داده شده و در هر سوراخ اتصال دهنده گسسته، شدت تنش زیاد رخ می‌دهد. اجتناب ناپذیری ضعف‌هایی نظیر خستگی، ناپیوستگی، تداخل تصادفی و مواد نامطلوب ممکن است در ساختار مصالح کامپوزیتی رخ دهد. اجزای کامپوزیت با محیط خشن و پیچیده سرو کار دارند و می‌توانند در حین کارکرد، آسیب ببینند. بنابراین، برای جلوگیری از شکست اجزاء کامپوزیت، انجام آزمون غیرمخرب، در هنگام

7 Acoustic Emission (AE)

8 Fiber Bragg Grating (FBG)

9 Electrical Resistivity Measurement (ERM)

10 Eddy Current (ET)

11 Speckle Shearing Interferometry

12 Shearography

1 Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

2 Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

3 Polymer Matrix Composites (PMC)

4 Non-destructive Testing (NDT)

5 Structural Health Monitoring (SHM)

6 Ultrasonic Testing (UT)

دمایی بطور طبیعی وجود دارد و اپراتور تنها به دریافت تشعشعات فروسرخ و تحلیل آنها، اکتفا می‌کند [۲۱].

## ۲-۲- حرارت‌نگاری فعال

بر خلاف حرارت‌نگاری غیرفعال، حرارت‌نگاری فعال نیاز به یک منبع گرمای خارجی برای تحریک مواد تحت آزمون، دارد. منبع گرمای اصلی می‌تواند جریان هوا یا آب گرم باشد. با این حال، منابع حرارتی نوری مانند لامپ‌های سینماتوگرافی با قدرت بالا یا فلاش لامپ با قدرت بالا به طور معمول استفاده می‌شود.

انواع معمولی حرارت‌نگاری فعال عبارتند از حرارت‌نگاری پالسی<sup>۱</sup>، حرارت‌نگاری پله‌ای<sup>۲</sup> [۲۲]، حرارت‌نگاری قفلی<sup>۳</sup> یا حرارت‌نگاری مدوله شده<sup>۴</sup> [۲۳]، حرارت‌نگاری فازی پالسی<sup>۵</sup> [۱۱، ۲۴] و حرارت‌نگاری فرکانس مدولاسیون شده<sup>۶</sup> [۲۵، ۲۶]. همانطور که خط توپر در شکل ۱ (a) نشان داده شده است. حرارت‌نگاری پالسی، با استفاده از یک پالس انرژی کوتاه مدت، قطعه کار را تحریک می‌کند و اندازه‌گیری دما بر حسب زمان با استفاده از یک دوربین فروسرخ انجام می‌شود. گاهی اوقات حرارت‌نگاری پالسی تحت عنوان حرارت‌نگاری انفجاری<sup>۷</sup>، حرارت‌نگاری فلش<sup>۸</sup> و حرارت‌نگاری پالس مربعی<sup>۹</sup> به کار می‌رود که از یک پالس فازی مربعی<sup>۱۰</sup> به عنوان تحریک استفاده می‌شود. این موضوع در شکل نقطه‌ای ۱ (a) نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱ (b) نشان داده شده است، حرارت‌نگاری پله‌ای، یک پالس طولانی برای تحریک حرارتی نمونه و روند فرایند مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل ۱ (c) نشان داده شده است، حرارت‌نگاری قفلی با استفاده از تحریک حرارتی دوره‌ای، به منظور استخراج اطلاعات در مورد فاز و اندازه موج بازتابی حرارتی، حتی در پیک‌های پایین، استفاده می‌شود. حرارت‌نگاری فاز پالس، از پالس به عنوان تحریک در دامنه فرکانس استفاده می‌کند که پیوند بین حرارت‌نگاری پالسی و حرارت‌نگاری قفلی است [۲۴]. به همین ترتیب، تحلیل فازی SPT و BT تحت عنوان فرایند حرارت‌نگاری پالس مربعی و حرارت‌نگاری فاز انفجاری<sup>۱۱</sup> به کار می‌رود. همانطور که در شکل ۱ (d) نشان داده شده است، از تحریک مدولاسیون فرکانس<sup>۱۲</sup>، برای اطلاعات فاز در بسیاری از امواج حرارتی در یک بازرسی استفاده می‌شود.

تجهیزات مختلف اعمال شده‌اند [۷-۱۹]، اما در آنها بر روی حرارت‌نگاری نوری تمرکز شده است. بنابراین، بررسی جامعی از تحولات، نقاط قوت و محدودیت‌ها برای حرارت‌نگاری آزمون غیرمخرب با منابع تحریک مختلف مورد نیاز است. در این کار، بررسی کامل، عمیق و جامعی از روش‌های حرارت‌نگاری نوری برای بازرسی کامپوزیت‌ها بر اساس یک نظرسنجی ادبی منظم و مختصر گزارش شده است.

مفاهیم حرارت‌نگاری آزمون غیرمخرب در بخش ۲ معرفی شده است. بعد از آن، پیشرفت‌های آزمون غیرمخرب حرارت‌نگاری نوری برای بازرسی کامپوزیت‌ها در بخش ۳ مورد بررسی قرار گرفت. سپس، برخی از بازرسی‌های موردی توسط حرارت‌نگاری، در بخش ۴ مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت نتیجه‌گیری‌ها در بخش ۵ آورده شده‌اند.

## ۲- مفاهیم پایه آزمون غیرمخرب حرارت‌نگاری

### ۲-۱- حرارت‌نگاری منفعل

فناوری فروسرخ بر این پایه استوار است که همه اجسام از خودشان انرژی منتشر می‌کنند و تابش فروسرخ یک فرم از این انرژی می‌باشد. سیستم تصویر برداری حرارتی فروسرخ یا دوربین‌های فروسرخ تجهیزاتی هستند که با اندازه‌گیری شدت تابش فروسرخ گسیل شده از سطح سوژه، تصاویری از دمای سطح سوژه تهیه می‌کنند. حرارت‌نگاری هم برای سوژه و هم بازرسی بسیار ایمن است، چرا که روش غیرتماسی است. بازرسی حرارت‌نگاری در صورتی امکان‌پذیر است که جسم تحت بازرسی، با محیط بیرون از خود درگیر انتقال حرارت باشد و یک گرادیان دمایی طبیعی با محیط اطراف خود داشته باشد. از نقطه نظر سخت‌افزاری، بسته به اینکه این گرادیان دمایی را ما ایجاد کنیم و یا ناشی از کارکرد جسم، بطور طبیعی وجود داشته باشد؛ بازرسی به دو روش بازرسی فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شود [۲۰]. در بازرسی حرارت‌نگاری فعال، تحریک حرارتی جسم به عهده اپراتور می‌باشد و اپراتور با ایجاد یک گرادیان دمایی بین جسم و محیط و حالت انتقال حرارت گذار بین این دو، نحوه پاسخ جسم را به این شرایط بررسی می‌شود. در بازرسی حرارت‌نگاری غیرفعال به دلیل شرایط کاری جسم، این گرادیان

7 Burst Thermography (BT)

8 Flash Thermography (FT)

9 Square Pulse Thermography (SPT)

10 Square Pulse Phase Thermography (SPPT)

11 Burst Phase Thermography (BPT)

12 Frequency Modulated (FMT)

1 Pulsed Thermography (PT)

2 Stepped Thermography (ST)

3 lock-in Thermography (LT)

4 Modulated Thermography (MT)

5 Pulsed Phase Thermography (PPT)

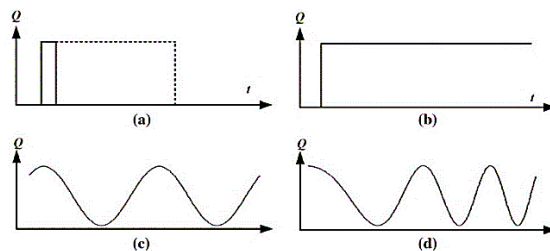
6 Frequency Modulated Thermography (FMT)

## ۲-۲-۲- طبقه بندی بر اساس نحوه حرارت‌دهی

به طور معمول، این منابع حرارتی نوری منجر به گرم شدن سطح ماده تحت آزمایش<sup>۱</sup> می‌شوند. همانطور که در شکل ۲ (a) نشان داده شده است، روش‌های اندازه‌گیری عمق نقص در حالت‌های بازتابی [۲۹-۳۳]، نشان داده شده‌اند. بنابراین، آنها را می‌توان به عنوان حرارت‌نگاری حرارتی سطحی<sup>۲</sup> نامگذاری کرد.

دیگر نمونه‌های حرارت‌نگاری حرارتی سطحی عبارتند از حرارت‌نگاری جریان الکتریکی و حرارت‌نگاری هدایتی<sup>۳</sup> برای مواد فلزی فرومغناطیس، جایی که عمق بازرسی به دلیل نفوذ پذیری بالا، زیاد است. بنابراین، می‌توان آن را در گروه حرارت‌نگاری حرارتی سطحی طبقه بندی کرد. برعکس، هنگامی که از جریان القایی به عنوان منبع تحریک استفاده می‌شود، پلیمر تقویت شده کربن با هدایت توده حرارتی کوچک گرم می‌شود. هنگامی که از مایکروویو به عنوان منبع تحریک استفاده می‌شود، پلیمر تقویت شده کربن گرم می‌شود. همانطور که در شکل ۲ (b) نشان داده شده است، این روش‌ها به عنوان حرارت‌نگاری حرارت حجمی<sup>۴</sup> [۳۴] نامگذاری شده‌اند. نقص‌هایی که گرما تولید نمی‌کنند یا حرارت بیشتری تولید می‌کنند، باعث گرمای غیرطبیعی می‌شوند. بیشترین مزیت حرارت‌نگاری توده حرارتی این است که امواج حرارتی تنها باید به اندازه نصف فاصله (از نقص به سطح) نسبت به روش‌های نوری در حالت بازتابی (از سطح به نقص و برگشت به سطح) حرکت کنند. با استفاده از حرارت‌نگاری توده حرارتی، روش‌های توصیف در حالت انتقال و انعکاس با توجه به حجم حرارت مشابه می‌باشند [۳۵].

در برخی موارد، فقط در داخل نقص یا اشیاء گرما وجود دارد. ما این روش‌ها را به عنوان حرارت‌نگاری حرارتی غیرطبیعی<sup>۵</sup> یا حرارت‌نگاری گرمایشی انتخابی نامگذاری<sup>۶</sup> می‌کنیم. همانطور که در شکل ۲ (c) نشان داده شده است، روش‌های حرارت‌نگاری با منابع حرارتی مختلف می‌تواند به عنوان بازرسی حرارت‌نگاری حرارت سطحی یا حرارت‌نگاری عمقی طبقه بندی شوند. این موضوع در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- توابع تحریک (a) PT و SPT، (b) ST، (c) LT و (d) FMT

## ۲-۲-۱- طبقه بندی بر اساس منابع تحریک حرارتی

منبع حرارتی مورد استفاده در آزمون حرارت‌نگاری فعال، از جمله تحریک نوری، تحریک الکترومغناطیسی، تحریک صوتی و تحریک تنش / کشش، همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، متفاوت است. می‌توان حرارت‌نگاری را بر اساس منابع تحریک طبقه بندی کرد: (۱) حرارت‌نگاری نوری با استفاده از تحریک نوری مانند فلاش لامپ و لامپ تنگستنی و اگر از پرتو لیزر به عنوان منبع حرارتی استفاده شود، به نام حرارت‌نگاری لیزری نامگذاری شود؛ (۲) حرارت‌نگاری جریان گردابی که از جریان گردابی القا شده به عنوان منبع حرارتی برای حرارت مواد رسانا استفاده می‌کند؛ (۳) حرارت‌نگاری هدایتی که از جریان الکتریکی به عنوان منبع استفاده می‌کند؛ (۴) القایی مغناطیسی [۲۷]، که از میدان مغناطیسی به عنوان منبع گرما برای مواد فرومغناطیس استفاده می‌کند؛ (۵) حرارت‌نگاری مایکروویو [۲۸]، از مایکروویو به عنوان منبع حرارت برای مواد دی الکتریک استفاده می‌کند؛ (۶) از ارتعاشات حرارتی به عنوان منبع تحریک استفاده می‌شود که حرارت‌نگاری فراصوت نامیده می‌شود؛ و (۷) تنش حرارتی که از فشار و تنش به عنوان منابع گرما استفاده می‌شود. هر حرارت‌نگاری ذکر شده در بالا می‌تواند به عنوان حرارت‌نگاری پالسی، حرارت‌نگاری پله‌ای، حرارت‌نگاری قفلی، حرارت‌نگاری فاز پالس، و حرارت‌نگاری مدولاسیون فرکانس استفاده شود. در میان آنها حرارت‌نگاری جریان الکتریکی، حرارت‌نگاری مایکروویو و حرارت‌نگاری فراصوت در بازرسی کامپوزیت به طور وسیعی به کار گرفته می‌شوند که در بخش بعدی بررسی می‌شود.

4 Volume Heating Thermography (VHT)  
5 Abnormal Heating Thermography (AHT)  
6 Selectively Heating Thermography (SHT)

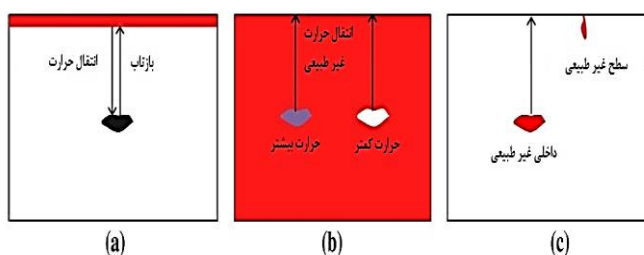
1 Material Under Tests (MUT)  
2 Surface Heating Thermography (SHT)  
3 Conduction Thermography

جدول ۱- روش‌های عمده حرارت‌نگاری آزمون غیرمخرب

| منابع تحریک حرارتی     | نوع فناوری                           | منشا حرارت                     | شیوه حرارت‌دهی                                    |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---|
| تحریک نوری             | حرارت‌نگاری نوری / حرارت‌نگاری لیزری | پرتو نور                       | سطحی (SHT)  |
| تحریک الکترومغناطیسی   | حرارت‌نگاری جریان گردابی             | جریان الکتریکی                 | سطحی (SHT)<br>توده حرارتی (VHT)<br>غیرطبیعی (AHT) |
|                        | حرارت‌نگاری میدان مغناطیسی القایی    | جریان مغناطیس القایی           | توده حرارتی (VHT)                                 |
|                        | حرارت‌نگاری مایکروویو                | امواج مایکروویو                | توده حرارتی (VHT)<br>غیرطبیعی (AHT)               |
| تحریک فراصوتی          | حرارت‌نگاری لرزشی و فراصوتی          | لرزش و اصطکاک بین اتم‌های مواد | غیرطبیعی (AHT)                                    |
| تحریک تنش فشاری و کششی | حرارت‌نگاری تنشی                     | لغزش و اصطکاک بین اتم‌های مواد | توده حرارتی (VHT)<br>غیرطبیعی (AHT)               |

۲-۲-۴- طبقه بندی بر اساس حرکت نسبی قطعه و منبع تحریک با توجه به حرکت نسبی منبع تحریک، دوربین و مواد تحت آزمایش، حرارت‌نگاری را می‌توان به چیدمان ایستا و حرکتی طبقه بندی کرد. محدودیت اصلی چیدمان ایستا این است که ناحیه بازرسی توسط منطقه گرمایی و نمای دوربین محدود می‌شود. چیدمان حرکتی یک راه حل ارزشمند برای این مشکل است. در چیدمان حرکتی، حداقل یکی از اجزا، دوربین فروسرخ یا قطعه کار، حرکت می‌کند. چیدمان حرکتی می‌تواند به صورت‌های زیر مورد استفاده قرار گیرد:

(۱) منبع نقطه در نمای دوربین حرکت می‌کند. فقط منبع حرارت باید گاهی اوقات حرکت کند. (۲) منبع خط در نمای دوربین حرکت می‌کند. منبع خطی حرارت مؤثرتری نسبت به منبع نقطه دارد که نمونه را در حالت حرکت خطی در نمای دوربین گرم می‌کند [۴۳، ۴۴]. (۳) منبع تحریک و دوربین در یک امتداد حرکت می‌کنند [۴۰، ۴۱]. این تنظیمات هنوز برای اجزای مقیاس بزرگ، محدود می‌باشند. به منظور حل این مشکل، هر دو منبع تحریک و دوربین می‌توانند نسبت به قطعه کار، حرکت نسبی داشته باشند [۴۰، ۴۱]. حرارت‌نگاری حرکتی خطی<sup>۱</sup>، که در آن یک آشکارساز فروسرخ در کنار یک منبع حرارت در طول نمونه حرکت می‌کند، یک روش کلاسیک است [۴۰-۴۵]. علاوه بر این، سایر انواع حرارت‌نگاری مانند حرارت‌نگاری جریان الکتریکی را می‌توان همانند چیدمان حرکتی، تنظیم کرد [۴۶-۴۸].



شکل (۲): روش‌های حرارت‌دهی (a) SHT، (b) VHT و (c) AHT.

۲-۲-۳- طبقه بندی بر اساس موقعیت نسبی قطعه و منبع تحریک با توجه به موقعیت نسبی منبع تحریک و دوربین، دو نوع تنظیمات وجود دارد: (۱) حالت بازتابی، بطوریکه منبع تحریک و دوربین در یک طرف قرار دارند و (۲) حالت گذرا، بطوریکه منبع تحریک و دوربین در مقابل هم قرار دارند. معمولاً دسترسی به هر دو جز، به طور مستقیم وجود ندارد. بدین ترتیب، چیدمان حالت بازتابی برای حرارت‌نگاری تحریک نوری، می‌تواند عمق نقص را در حالی که در مرحله تحریک و یا خنک کاری قرار دارد، اندازه گیری کند. با این حال، حالت گذرا معمولاً نتایج دقیق‌تری نسبت به حالت بازتابی در برخی از قطعات (مانند ورق نازک) ارائه می‌دهد [۳۶-۳۹]. یکی دیگر از مزیت‌های حالت گذرا این است که در هنگام تحریک، مانعی در مقابل دوربین ایجاد نمی‌کند.

### ۳- حرارت‌نگاری با تحریک تابشی

۱-۳- حرارت‌نگاری پالسی

در حرارت‌نگاری پالسی، یک پالس حرارتی برای مواد مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از استفاده از این پالس حرارتی و پس از آنکه دمای سطح نمونه به مقدار مورد نظر رسید، با استفاده از یک دوربین فروسرخ، که امکان بازرسی نقایص زیرسطحی فراهم می‌شود. دمای مواد به سرعت پس از شوک حرارتی اولیه تغییر می‌کند، زیرا جبهه حرارتی با انتشار در زیر سطح، گسترش می‌یابد. حضور نقص موجب کاهش میزان انتشار می‌شود، به طوری که هنگام مشاهده دمای سطح، اختلاف حرارتی بین عیوب و مناطق عاری از آن‌ها مشاهده می‌شود. در واقع، زمان مشاهده  $t$  یک تابع (در تقریب اول) مربع عمق  $Z$  است و از دست دادن کنتراست  $C$  متناسب با معکوس مکعب عمق  $Z$  است. معادله (۱):

$$C \approx \frac{1}{Z^3} \quad t \approx \frac{Z^2}{\alpha}$$

که  $\alpha$  انتشار حرارتی است. این دو رابطه، دو محدودیت حرارت‌نگاری پالسی را نشان می‌دهند: نقص‌های قابل مشاهده به طور کلی کم عمق می‌باشند و کنتراست ضعیف است. علاوه بر این، گرادیان درجه حرارت سطح نه تنها ناشی از نقص‌های پنهان، بلکه تحت تاثیر تغییرات محلی انتشار در سطح مواد و همچنین به دلیل افزایش حرارت غیر یکنواخت است.

۲-۳- حرارت‌نگاری قفلی

اساس کاربرد حرارت‌نگاری قفلی این است که یک ورودی حرارتی دوره‌ای به سطح یک شیء است. هنگامی که موج حرارت ساطع می‌شود، عیب مشخص می‌شود و موجب تغییر فاز نسبت به موج گرمای ورودی می‌شود. محدوده عمق برای تشخیص نقص بستگی به طول پخش حرارتی دارد که می‌تواند نشان داده شود. به عنوان مثال معادله (۲):

$$\mu_t = \sqrt{\frac{2k}{\omega \rho c}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$$

که در آن  $k$  هدایت حرارتی،  $\rho$  چگالی،  $C$  ظرفیت حرارتی،  $\alpha$  پراکندگی حرارتی، و  $f$  فرکانس موج حرارتی است. مزیت حرارت‌نگاری قفلی این است که فاز نسبت به تغییرات محلی روشنائی و یا میزان تابش سطحی، حساسیت کمتری دارد. برای تشخیص نقص‌هایی که در عمق‌های مختلف در نمونه آزمون وجود دارد، تکرار آزمون در فرکانس‌های مختلف یک فرایند زمان گیر است.

### ۳-۳- حرارت‌نگاری فازی پالسی

حرارت‌نگاری فازی پالسی، که به طور همزمان مزایای حرارت‌نگاری پالسی و حرارت‌نگاری قفلی را در بر می‌گیرد، در ابتدا در سال ۱۹۹۶ توسط مالداگ و مارینتی [۲۴] توسعه یافت. حرارت‌نگاری فاز پالس، تحلیل فاز در حوزه فرکانس حرارت‌نگاری پالسی ساخته شده بر روی انتشار موج حرارتی را انجام می‌دهد. نشان داده شده است که هر شکل موج دوره‌ای می‌تواند توسط مجموعه‌ای از امواج کاملاً هارمونیک در فرکانس‌های مختلف دچار نوسان شود. محتوای فرکانس یک پالس زمانی مطلوب از طول صفر، دارای یک طیف فرکانس با توزیع انرژی یکنواخت بین تمام فرکانس‌های صفر تا بی نهایت می‌باشد. گرچه پالس حرارتی در پلیمر تقویت شده کربن متفاوت از پالس زمانی ایده آل است، می‌توان آن را به عنوان یک مجموعه امواج حرارتی شناخت. به علت روش گرم شدن سطح، امواج حرارتی به داخل نفوذ می‌کنند. هر کدام از آنها دارای فرکانس  $\omega$  متفاوت، طول تابش حرارتی  $\mu_t$  و سرعت  $v$  می‌باشند. طبق نظریه موج حرارتی، طول مدت انتشار حرکت  $\mu_t$  و سرعت انتشار  $v$  می‌تواند توسط معادله (۳) محاسبه شوند:

$$v = \sqrt{2\omega\alpha} \quad \mu_t = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho c}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$$

که در آن  $k$  هدایت حرارتی،  $\rho$  چگالی،  $C$  ظرفیت گرمایی و  $\alpha$  پراکندگی حرارتی است. دو معادله فوق نشان می‌دهند که امواج حرارتی با فرکانس بالاتر در نزدیکی سطح و سریعتر حرکت می‌کنند، در حالی که موج حرارتی فرکانس پایین‌تر، دورتر، اما به آرامی حرکت می‌کند. اگر طول نفوذ گرما،  $\mu_t$ ، برابر  $d$  باشد، تغییر موج حرارتی در این فرکانس می‌تواند نقص را نشان دهد. تجزیه و تحلیل فاز حرارت‌نگاری فازی پالسی بر مبنای تبدیل گسسته فوریه است. طیف‌های فاز دیفرانسیل با کم کردن طیف فاز مناطق بدون نقص از طیف فاز عیوب به دست می‌آیند. سپس چندین ویژگی از طیف فاز یا طیف فاز کم شده، جدا می‌شود [۱۱]. ترکیبی از ویژگی‌ها و مزایای حرارت‌نگاری پالسی و حرارت‌نگاری قفلی، حرارت‌نگاری فازی پالسی است که یک روش معمول آزمون غیرمخرب در صنعت هوا فضا برای بازرسی ساختارهای کامپوزیتی است. کاربرد حرارت‌نگاری فازی پالسی برای قطعات ساندویچی مورد استفاده در صنایع هوایی، مورد بررسی قرار گرفت [۷].

کم کربن، عیب با قطر ۴ میلی متر در عمق ۱ میلی متر و در نمونه فولاد آلیاژی، عیب با قطر ۳ میلی متر در عمق ۱ میلی متر بود. در مقایسه تصاویر حرارتی نمونه فولاد آلیاژی با فولاد کم کربن، مشاهده شد که وضوح و تعداد عیوب قابل تشخیص در تصاویر حرارتی نمونه فولاد آلیاژی بیشتر است [۵۰].

تجزیه و تحلیل فرسوخ بر روی مواد کامپوزیتی دارای مزایای متعدد، مانند استفاده بدون تماس جسم در زمان کوتاه که می توان عیوب داخل مواد را شناسایی کرد. در این مقاله به بررسی عیوب در مواد کامپوزیتی به وسیله حرارتنگاری فعال گذرا که بیشتر در صنایع پره های توربین بادی مورد استفاده قرار می گیرد. در پژوهشی، سه نوع مختلف نمونه به وسیله گرمای وارده به مواد کامپوزیتی و دوربین حرارتنگاری و به وسیله نرم افزار مورد آنالیز قرار می گیرد. در نتیجه، تعدادی عکس حرارتنگاری که نشان دهنده انتشار گرمای سطح که سبب تضاد در حضور عیوب ایجاد شده، شناسایی و بررسی می شود. سه نوع عیوب مختلف در عمق های متفاوت در فیبر کربن و کیوم شده استفاده شد. عیب جدایش (استفاده از PTFE)، پلی اتیلن، ورق سیلیکونی و قطعات لاتکس چسبنده جاسازی شده در فیبر کربن و چروک های فیبر کربن، در نمونه شماره یک به کار برده شد. در نمونه شماره دو از اتصالات چسبنده که با رزین اپوکسی طراحی شده از چهار نوع مختلف عیب استفاده شده است. عیب ها به ترتیب حجم خالی از چسب، ایجاد هوا در بین لایه ها، عیب جدایش و قطعات چسبنده جاسازی شده است. در نمونه شماره سه از نمونه ساندویچی که در آن رزین تزریق شده و قطعاتی از الیاف بدون رزین در لایه های اطراف به عنوان عیب استفاده شد. نتیجه به دست آمده در این مطالعه به این صورت است که در نمونه فیبر کربن، بازرسی عیوب نزدیک به سطح (۲،۳ میلی متری) به خوبی مورد بازرسی قرار می گیرد. در نمونه شماره دو اتصالات چسبنده چیدمان بازتابی با ضخامت ۵ میلی متری نتیجه مطلوبی به دست آمده است. در نمونه شماره سه ساندویچی به وسیله حرارتنگاری فعال و تنها با چیدمان بازتابی به خوبی مورد بازرسی قرار گرفت [۵۱].

بازرسی هایی بر روی نمونه CFRP با مجموع ۲۵ تفلون مربعی در ضخامت ها و عمق های مختلف انجام شد. برای هر سمت نمونه (پشت و روی نمونه) فرکانس و فریم معین تعیین شده است. تصاویر حرارتی قبل حین انجام و بعد از تحریک پالسی نوری بر روی نمونه اعمال شد. چند روش پردازش تصویر بر روی تصاویر حرارتنگاری بدست آمده استفاده شد که عبارتند از FT، TSR، WT، DAC، PCT. نمونه CFRT با جاسازی قطعات

۳-۴- حرارتنگاری فرکانسی فازی مدوله شده

حرارتنگاری پالسی، حرارتنگاری قفلی و حرارتنگاری فازی پالسی مزایا و معایب خود را دارند. حرارتنگاری پالسی از منابع تحریک با قدرت بالا، برای شناسایی عیوب، استفاده می کند. اختلاف درجه حرارت سطحی نه تنها ناشی از عیوب پنهان است، بلکه تحت تاثیر تغییرات محلی انتشار در سطح مواد و همچنین به دلیل گرمایش غیر یکنواخت است. با حرارتنگاری قفلی، مزیت زاویه فاز آن این است که حساسیت کمتری نسبت به میزان تابش سطحی دارد. با این حال، به علت تحریک تک فرکانس، وضوح عمق یک آزمون با طول موج حرارتی به دست می آید. برای تشخیص عیوبی که در عمق های مختلف در نمونه تحت آزمون قرار دارند، تکرار آزمون در فرکانس های مختلف یک فرآیند زمان بر است [۲۵]. علاوه بر این، نیاز است تا یک تناسب بین عمق شناسایی عیوب و وضوح آن ها ایجاد شود [۴۹]. در مطالعات حرارتنگاری نوری که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند، به این نتیجه می رسیم که:

۱- حرارتنگاری نوری را می توان تحت عنوان حرارتنگاری پالسی (از جمله حرارتنگاری پالسی) به حرارتنگاری پله ای، حرارتنگاری قفلی، حرارتنگاری فاز پالسی و حرارتنگاری مدولاسیون فرکانسی طبقه بندی کرد.

۲- حرارتنگاری نوری دارای مزایای بسیاری، مانند عدم تماس، سرعت و کارآمدی بالا می باشد. به خصوص، حرارتنگاری فرکانس مدولاسیون شده دارای مزایای بسیاری از جمله بهبود توانایی عمق بازرسی، وضوح، حساسیت بالاتر نسبت به سیگنال نویز، تشخیص بهتر ضخامت و حذف تابش و گرمای غیریکنواخت می باشد.

۳- حرارتنگاری نوری به عنوان یک روش آزمون غیرمخرب موثر برای کامپوزیت ها در هوافضا ثابت شده است و توجه بیشتری را در زمینه مهندسی عمران جلب کرده است.

#### ۴- نمونه های پژوهشی از کاربرد روش های حرارتنگاری

در پژوهشی تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات، یک دوربین حرارتی و دو پروژکتور با توان ۱ کیلووات به عنوان منبع تحریک مورد استفاده قرار گرفته بودند. چیدمان آزمایشات بصورت بازتابی انجام شده بود. از دو ورق به ضخامت ۵ میلی متر، مربعی شکل از جنس فولاد کم کربن و فولاد آلیاژی انتخاب شده بودند. بر روی هر دو نمونه، الگوهایی سوراخ کاری شده بود. قطر این سوراخ ها از ۵ تا ۲ میلی متر و با عمق های ۱ تا ۴،۷ میلی متر بود. کوچکترین عیوب قابل تشخیص در این پژوهش، در نمونه فولاد

متر به عنوان عیب جدایش جاسازی شد. بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از توابع متعامد، روش پیشنهادی در این پژوهش، با سه روش (PCT، NTC، TSR) و یکی در حوزه فرکانس (PPT) مقایسه شد. نتایج نشان داد که همه روشها، عمق نقص را تشخیص می‌دهند اما NTC، OPD، PCT و PPT نقص‌های عمیق تر از TSR را بهتر شناسایی و مشخص می‌کنند. OPD بهتر از PCT عمل می‌کند و همچنین NTC و PPT را بدون نیاز به یک منطقه بی عیب مرجع انجام می‌دهد [۵۵].

در پژوهش دیگری از وصله‌های کامپوزیتی با اندازه‌های مختلف در اعماق متفاوت برای ایجاد عیوب استفاده شد. حرارت‌نگاری گرمایشی صفحه آلومینیومی چسبیده به یک لایه کامپوزیت برای نشان دادن توانایی این روش در تشخیص نقایص مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، فرآیند آزمایش یک مدل حاوی عیب جدایش مختلف برای بررسی اثرات نقص‌های مختلف در پروفایل دما و برای نشان دادن اثرات صفحه فلزی در روش انتقال حرارت شبیه سازی شد. مقادیر مختلف تغییرات دما به دلیل نقایص مختلف مورد آنالیز قرار گرفت و همچنین اثرات عمق و بعد نقص مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که تغییر در هر پارامتر (ابعاد یا عمق) در عیب‌های عمیق‌تر (در اینجا عیوب در عمق بیش از ۱ میلی متر) منجر به تغییرات کمتر دما در مقایسه با عیوب نزدیک به سطح خواهد شد. علاوه بر این، با توجه به تأثیر فلز (آلومینیوم) بر روی انتقال حرارت و مشخصات تغییر دما به دلیل عیب مشاهده شده در شبیه سازی، نتیجه گرفته شد که گرم کردن هر دو سطح آلومینیوم و کامپوزیت در مرحله گرمایش توانایی تشخیص را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، نتایج تجربی تأیید کرد که تغییر در ابعاد و عمق نقایص نزدیک به سطح، منجر به تغییرات چشمگیر در پیک‌های دما خواهد شد. از آنجایی که همه نتایج شبیه سازی و تجربی سازگار هستند، به آن قسمت از نتایج شبیه سازی که در انتخاب پارامترهای آزمون بهینه (مانند روش حرارت‌دهی) کمک می‌کنند [۵۶].

##### ۵- جمع بندی

استفاده از بازرسی حرارت‌نگاری خطی، در بازرسی کیفیت قطعه در قطعات پره‌های توربین بادی و نمونه‌هایی با هندسه مشابه، ترکیب مواد و کیفیت ساختار لایه‌های کامپوزیتی پر کاربرد است. در جمع بندی پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که روش بازرسی حرارت‌نگاری خطی یک روش سریع و کارآمد برای اسکن پره‌های توربین بادی بزرگ کامپوزیت فراهم کرده است [۴۶، ۴۵].

تفلون با حرارت‌نگاری پالس نوری تست شده است. روش‌های پردازش داده‌های مختلفی بر روی نمونه برای بهبود نتایج بازرسی انجام شده است. در نتیجه، روش‌های پردازش تصویر TSR، PCT موثرتر بوده است [۵۲].

در پژوهش دیگری تصاویر فرسوخ با استفاده از روش SNR عیوب قابل شناسایی را پردازش شد. با استفاده از CFRP و نمونه لانه زنبوری، از پنج روش پردازش SD، FT، FD، NC و PPT برای افزایش قابلیت تشخیص عیوب در نمونه مورد بررسی قرار گرفت. ژوان و همکارانش تصاویر حرارتی و پردازش شده CFRP منحنی شکل و لانه زنبوری را آنالیز کردند. در نمونه CFRP از عیوب تفلونی در عمق‌ها و اندازه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. در نمونه لانه زنبوری از ساندویچ پنل‌های لانه زنبوری از جنس آلومینیوم دارای چهار عیب مختلف مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت پوان و همکاران یک فرم کلی از ارزیابی تشخیص عیوب در تصاویر فرسوخ آزمون غیر مخرب طراحی کرده‌اند که در آن برای افزایش پردازش تصویر و شناسایی دقیق عیب مورد بررسی و سپس یک روش برای تولید تصاویر SNR که باعث شناسایی دقیق عیب گسترش دادند. بنابراین، یک آنالیز حساس که در آن با در نظر گرفتن تفاوت‌ها در ضخامت عیب نسبت به مناطق سالم می‌توان عیوب را با تصاویر فرسوخ به راحتی مورد شناسایی قرار داد [۵۳].

حرارت‌نگاری فرسوخ سبب ایجاد تشخیص عیوب سریع و به موقع می‌شود که در روش حرارت‌نگاری فعال به وسیله یک منبع انرژی خارجی برای تولید تضاد گرمایی بین مواد دارای عیب و بدون آن در صنایع هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پژوهشی، از ساختار ساندویچ پنل لانه زنبوری بین دو لایه فیبر کربن CFRP که در صنایع هوایی بسیار پر کاربرد است، استفاده شده است. در پژوهشی، نمونه‌ای ساخته شده از چند نوع عیوب برای بازرسی مورد استفاده قرار گرفت. حرارت‌نگاری با استفاده از فناوری‌های نوری عیوب را به خوبی تجزیه و تحلیل می‌کنند. اگرچه نتایج به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های سطح و عوامل خارجی مانند گرمایش یکنواخت و بازتاب‌های محیطی قرار می‌گیرند اما پردازش سیگنال / تصویر پیشرفته برای کاهش این عوامل نیاز است. به عنوان مثال، روش‌های PPT و TSR امکان تشخیص نقص را تا عمق ۲،۵ میلی متر، برای نقایص دارای نسبت اندازه به عمق تقریباً ۲ و بالاتر فراهم کرد [۵۴].

در پژوهش دیگری، تصاویر حرارتی نمونه‌های CFRP و GFRP با ضخامت ۲ میلی متر را تجزیه و تحلیل شد. در هر دو نمونه ۲۵ قطعه تفلون با اندازه‌های جانبی ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ میلی

مسافت دو برابری را بپیماید (از سطح تا عیب و بازگشت به سطح).

۲- حرارت‌نگاری لیزری را می‌توان از فاصله دور استفاده کرد. با این حال، با توجه به منطقه حرارت‌دهی کوچک، حرارت‌نگاری لیزری معمولاً به مکانیزم اسکن برای تشخیص نقطه یا خط نیاز دارد. این مکانیزم به دلیل هدایت گرمای جانبی، نسبت به ترک سطحی حساس است.

۳- حرارت‌نگاری نوری، لیزری، میکروویو و فراصوتی تقریباً برای تمام کامپوزیت‌ها مناسب می‌باشند، در حالی که حرارت‌نگاری جریان گردابی فقط برای فلزات و مواد کامپوزیتی رسانا، مانند CFRP، به کار می‌رود.

۴- حرارت‌نگاری میکروویو از نظر مفاهیم و توسعه سیستم، در مقایسه با دیگر روش‌های حرارت‌نگاری، به مقدار کافی پیشرفته نمی‌باشد. حرارت‌نگاری میکروویو جهت تشخیص عیوب در محیط آبی، بسیار مفید می‌باشد.

۵- از حرارت‌نگاری نوری معمولاً برای تشخیص عیوب جانبی مانند لایه لایه شدن استفاده می‌شود. حرارت‌نگاری لیزری به خصوص در برابر ترک سطحی حساس است. حرارت‌نگاری فراصوت نسبت به انواع عیب و خرابی حساس می‌باشد ولی در بازرسی کامپوزیت‌ها مناسب نیست. حرارت‌نگاری جریان گردابی به ترک و عیب جانبی حساس است و می‌توان از آن برای مشاهده الگوی فیبر کربن استفاده کرد. دقیقاً مانند حرارت‌نگاری جریان گردابی، حرارت‌نگاری میکروویو به هر دو ترک و عیوب لبه‌ای حساس است و به طور خاص در آب و اشیاء هادی، حساس می‌باشد.

جهت درک بهتر تفاوت روش‌های حرارت‌نگاری جدول ۲ و شکل ۳ می‌توانند کمک کند. در جدول ۲ انواع بازرسی با روش‌های حرارت‌نگاری، در شرایط قابل اجرا مختص خود، بطور مختصر مقایسه شده‌اند. در شکل ۳ ویژگی‌های بیشترین روش حرارت‌نگاری مورد استفاده با ویژگی‌های دیگر روش‌ها مورد مقایسه قرار گرفته شده است.

با توجه به کارهای انجام شده توسط محققان، مقایسه بین PT، LT، PPT و FMT در این پژوهش آمده است. به دلیل استفاده از دوربین فرورسرخ، همه آنها وضوح و حساسیت بالایی دارند، می‌توان ضخامت و عمق را به طور کمی بیان کرد. روش PT از نظر سرعت و سهولت در انجام کار، مناسب است اما برای موادی با ضخامت بالا، کمی زمان بر است. با استفاده از روش PT، اختلاف‌های دمایی سطح تنها توسط عیوب به وجود نمی‌آیند، بلکه تحت تاثیر گوناگونی در انتشار از سطح و گرم کردن نامتوازن نیز رخ می‌دهند. در نهایت، PT ممکن است به دلیل اعمال انرژی بالا، صدماتی را به قطعه وارد کند. انرژی مورد نیاز برای انجام LT معمولاً کمتر از PT است. با توجه به روش LT، معمولاً انرژی مورد نیاز برای انجام LT کمتر از PT می‌باشد. زاویه فاز این مزیت را دارد که نسبت به تغییرات محلی نور و یا تغییرات در انتشار از سطح، حساسیت کمتری از خود نشان می‌دهد. این وجود، بین عمق و مقدار وضوح، هماهنگی وجود دارد. به منظور شناسایی عیوب در عمق‌های مختلف، تکرار آزمون در فرکانس‌های مختلف باعث افزایش زمان فرآیند می‌شود. PPT دارای مزایای PT و LT می‌باشد و مانند PPT، مستقل از انتشار از سطح و گرمایش یکنواخت می‌باشد و به دلیل اعمال پالس کوتاه به عنوان تحریک، سریعتر از LT عمل می‌کند و حاوی طیف فرکانس گسترده‌ای است. با این حال، انرژی با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. PPT عمق و همچنین وضوح بیشتری را نسبت به PT ارائه می‌دهد اما قبل از انجام فرآیند، نیاز به الگوریتم می‌باشد. FMT تمام مزایای ذکر شده در بالا مانند سرعت، عدم وابستگی به قدرت انتشار، از بین بردن گرمایش غیر یکنواخت، عمق و وضوح بیشتر و قدرت تشخیص بهتر (SNR) را دارا می‌باشد. با این حال، پیچیده ترین سیستم را نسبت به بقیه روش‌ها دارا می‌باشد.

روش‌های پر کاربرد حرارت‌نگاری با منابع تحریک مختلف از جمله حرارت‌نگاری نوری، لیزری، جریان گردابی، میکروویو و فراصوت دارای وضوح و حساسیت بالا و سرعت مناسب می‌باشند و قادر به تشخیص ضخامت و عمق هستند. اما برخی تفاوت‌ها دارند:

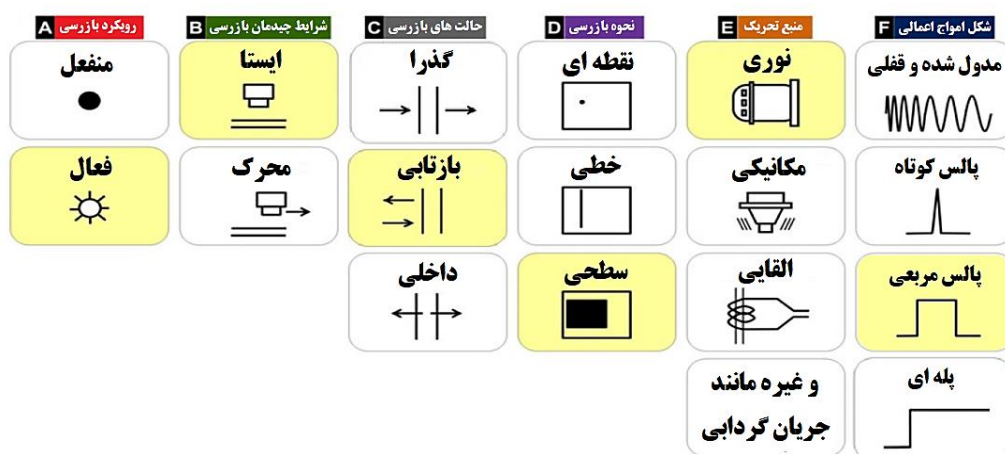
۱- حرارت‌نگاری نوری و لیزری برای بازرسی SHT کامپوزیت‌ها مناسب می‌باشد، در حالی که همین دو نوع روش حرارت‌نگاری برای بازرسی VHT کامپوزیت‌ها نیز مناسب می‌باشد. حرارت‌نگاری فراصوت، حرارت‌نگاری حرارتی غیر طبیعی می‌باشد. روش‌های بازرسی VHT و SHT این مزیت را دارند که امواج فراصوت حرارتی فقط باید از نصف فاصله (از عیب تا سطح) عبور کنند در حالی که در روش بازتابی، این عبور باید



جدول (۲): انواع بازرسی قابل اجرا با روش‌های حرارت‌نگاری

| منبع تحریک                 | بازرسی<br>برخطی | بازرسی<br>برون خطی | مدت تحریک/پالس |      | قابل پردازش<br>با الگوریتم | شرایط و نمونه‌های قابل اجرا   |
|----------------------------|-----------------|--------------------|----------------|------|----------------------------|---|
|                            |                 |                    | کوتاه          | بلند |                            |   |
| لامپ‌های تنگستنی           | ✓               | ✓                  | -              | ✓    | ✓                          | مواد کامپوزیتی: شناسایی عیوب جدایش، ضربه و خوردگی<br>فلزات: شناسایی عیوب خوردگی، کیفیت اتصالات، ترک و سلامت جوش |
| فلش لامپ‌ها                | ✓               | ✓                  | ✓              | -    | ✓                          | مواد کامپوزیتی: شناسایی عیوب جدایش، ضربه و خوردگی<br>فلزات: شناسایی عیوب خوردگی، ترک و سلامت جوش                |
| فراصوت                     | ✓               | ✓                  | -              | ✓    | -                          | مواد کامپوزیتی: شناسایی عیوب جدایش<br>فلزات: شناسایی ترک  |
| لیزر                       | ✓               | ✓                  | ✓              | -    | -                          | شناسایی عیوب قطعات فلزی کوچک  |
| جریان‌های<br>گردابی/القایی | ✓               | ✓                  | -              | ✓    | -                          | شناسایی ترک در قطعات فلزی   |
| مکانیکی                    | ✓               | ✓                  | ✓              | ✓    | ✓                          | شناسایی ترک، خوردگی و سلامت جوش در فلزات  |

✓ = قابل اجرا - = غیرقابل اجرا



شکل (۳): مقایسه روش بازرسی حرارت‌نگاری پرکاربرد با دیگر روش‌های بازرسی حرارت‌نگاری

Nondestructive Testing of Polymer Plates, *Nondestructive Testing Technology*, 2 (2019) 38-45.

[8] Using of Modulated Thermography for Nondestructive Testing of Polymer Plates

[9] M. Khalili, M. Farahani S. Asghari, Thermography of the cooling channels using steam heating, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, (2019) Under publication.

[10] A. Ahmadi, M. Farahani, A. Ardebili, Applying pulse thermography technique for corrosion defect evaluation on the steel plates, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, (2019) Under publication.

[11] B. Yang, L. Zhang, W. Zhang, Y. Ai, Non-destructive testing of wind turbine blades using an infrared thermography: a review, in: *Materials for Renewable Energy and Environment (ICMREE), 2013 International Conference on, IEEE*, 2014, pp. 407-410.

[12] C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, Pulsed phase thermography reviewed, *Quant. InfraRed Thermography J.* 1 (2004) 47-70.

[13] Y. Hung, Y.S. Chen, S. Ng, L. Liu, Y. Huang, B. Luk, R. Ip, C. Wu, P. Chung, Review and comparison of

## ۶- منابع

[1] A.B. Harman, C.H. Wang, Improved design methods for scarf repairs to highly strained composite aircraft structure, *Compos. Struct.* 75 (2006) 132-144.

[2] K.B. Katnam, A.J. Comer, D. Roy, L.F.M. da Silva, T.M. Young, Composite repair in wind turbine blades: an overview, *J. Adhes.* 91 (2015) 113-139.

[3] A.M. Brandt, Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, *Compos. Struct.* 86 (2008) 3-9.

[4] S.S. Pendhari, T. Kant, Y.M. Desai, Application of polymer composites in civil construction: a general review, *Compos. Struct.* 84 (2008) 114-124.

[5] J.R. Vinson, Adhesive bonding of polymer composites, *Polym. Eng. Sci.* 29 (1989) 1325-1331.

[6] L. Cheng, G.Y. Tian, Transient thermal behavior of eddy-current pulsed thermography for nondestructive evaluation of composites, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 62 (2013) 1215-1222.

[7] R. Khoshkbary, M. Farahani, M. Safarabadi, S. Asghari, Using of Modulated Thermography for

- [32] J.G. Sun, Analysis of pulsed thermography methods for defect depth prediction, *J. Heat Transfer* 128 (2006) 329–338.
- [33] V. Vavilov, Dynamic thermal tomography: perspective field of thermal NDT, in: *Thermosense XII: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications*, Orlando, 1990, pp. 178–182.
- [34] S.M. Shepard, T. Ahmed, J.R. Lhota, Experimental considerations in vibrothermography, in: *Defense and Security, International Society for Optics and Photonics*, 2004, pp. 332–335.
- [35] Y. He, R. Yang, eddy current volume heating thermography and phase analysis for imaging characterization of interface delamination in CFRP, *IEEE Trans. Ind. Inform.* (2015).
- [36] R. Yang, Y. He, eddy current pulsed phase thermography considering volumetric induction heating for delamination evaluation in carbon fiber reinforced polymers, *Appl. Phys. Lett.* 106 (2015) 234103.
- [37] J.N. Zalameda, P.W. Winfree, Quantitative thermal nondestructive evaluation using an uncooled microbolometer infrared camera, in: *Thermosense XXIV, SPIE*, Orlando, 2002, pp. 610–617.
- [38] T. Hoshimiya, J. Hoshimiya, M. Tsuda, Line-focus beam-scan time-domain active thermography with external control, in: *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Naples Italy, 2012.
- [39] J. Hoshimiya, T. Hoshimiya, Whole-electronic line-focus light-scanner for active thermography, in: *The 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Bordeaux, 2014.
- [40] Y.-K. An, J. Yang, S. Hwang, H. Sohn, Line laser lock-in thermography for instantaneous imaging of cracks in semiconductor chips, *Opt. Lasers Eng.* 73 (2015) 128–136.
- [41] D. Kaltmann, Quantitative line-scan thermographic evaluation of composite structures, in: School of Aerospace, *Mechanical and Manufacturing Engineering, RMIT University*, Melbourne, 2008.
- [42] J. Varis, J. Rantala, J. Hartikainen, An infrared line scanning technique for detecting delaminations in carbon fibre tubes, *NDT E Int.* 29 (1996) 371–377.
- [43] O. Ley, M. Butera, V. Godinez, S. Chung, assessing impact damage on composites using line scanning thermography, *Adv. Mater. Processes* 170 (2012) 20–25.
- [44] O. Ley, S. Chung, J. Schutte, A. Caiazzo, V. Godinez, B. Bandos, Application of line scanning thermography for the detection of interlaminar disbonds in sandwich composite structures, in: P.J. Shull, A.A. Diaz, A.F. Wu (Eds.) *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security* 2010, 2010.
- [45] O. Ley, V. Godinez, Feasibility of using line scanning thermography in NDE of wind turbine blades, *Nondestruct. Characterization Compos. Mater., Aerospace Eng., Civil Inf., Homeland Secur.* 2011 (2011) 7983.
- [46] O. Ley, M. Butera, V. Godinez, Inspection of Composite Structures Using Line Scanning Thermography, in: D. Burleigh, G.R. Stockton (Eds.) *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIV*, shearography and active thermography for nondestructive evaluation, *Mater. Sci. Eng.: R: Rep.* 64 (2009) 73–112.
- [14] M.A. Omar, Y. Zhou, A quantitative review of three flash thermography processing routines, *Infrared Phys. Technol.* 51 (2008) 300–306.
- [15] K.K. Ghosh, V.M. Karbhari, A critical review of infrared thermography as a method for non-destructive evaluation of FRP rehabilitated structures, *Int. J. Mater. Prod. Technol.* 25 (2006) 241–266.
- [16] V.P. Vavilov, D.D. Burleigh, Review of pulsed thermal NDT: physical principles, theory and data processing, *NDT E Int.* 73 (2015) 28–52.
- [17] D. Banerjee, S. Chattopadhyay, S. Tuli, Infrared thermography in material research – a review of textile applications, *Indian J. Fiber Text. Res.* 38 (2013) 427–437.
- [18] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, F.G. Bulnes, Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing, *Sensors* 14 (2014) 12305–12348.
- [19] C. Meola, G.M. Carlomagno, Application of infrared thermography to adhesion science, *J. Adhes. Sci. Technol.* 20 (2006) 589–632.
- [20] C. Meola, G.M. Carlomagno, Recent advances in the use of infrared thermography, *Meas. Sci. Technol.* 15 (2004) R27.
- [21] S. Melnyk, I. Tuluzov, A. Melnyk, Method of remote dynamic thermographic testing of wind turbine blades, in: *The 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Bordeaux, 2014.
- [22] W. Harizi, S. Chaki, G. Bourse, M. Ourak, Mechanical damage assessment of glass fiber-reinforced polymer composites using passive infrared thermography, *Compos Part B – Eng* 59 (2014) 74–79.
- [23] A.A. Badghaish, D.C. Fleming, Non-destructive inspection of composites using step heating thermography, *J. Compos. Mater.* 42 (2008) 1337–1357.
- [24] X.P. Maldague, Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, *John Wiley Interscience*, New York, 2001.
- [25] X.P. Maldague, S. Marinetti, Pulsed phase infrared thermography, *J. Appl. Phys.* 79 (1996) 2694–2698.
- [26] R. Mulaveesala, S. Tuli, Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive subsurface defect detection, *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006).
- [27] N. Tabatabaei, A. Mandelis, Thermal-wave radar: a novel subsurface imaging modality with extended depth-resolution dynamic range, *Rev. Sci. Instrum.* 80 (2009) 034902.
- [28] P. Jäckel, U. Netzelmann, the influence of external magnetic fields on crack contrast in magnetic steel detected by induction thermography, *Quant. InfraRed Thermography J.* 10 (2013) 237–247.
- [29] R. Yang, H. Zhang, T. Li, Y. He, An investigation and review into microwave thermography for NDT and SHM, in: *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT)*, IEEE, Zhuhai, 2015.
- [30] Z. Zeng, C. Li, N. Tao, L. Feng, C. Zhang, Depth prediction of non-air interface defect using pulsed thermography, *NDT and E Int.* 48 (2012) 39–45.
- [31] S.M. Shepard, Flash thermography of aerospace composites, in: *IV Pan American Conference for Non destructive Testing*, Buenos Aires, Argentina, 2007.

"ThermoPoD: A reliability study on active infrared thermography for the inspection of composite materials." *Journal of mechanical science and technology* 26, no. 7 (2012): 1985-1991.

[54] Florez-Ospina, Juan F., and H. D. Benitez-Restrepo. "Toward automatic evaluation of defect detectability in infrared images of composites and honeycomb structures." *Infrared Physics & Technology* 71 (2015): 99-112.

[55] Ibarra-Castanedo, Clemente, Mirela Susa, Matthieu Klein, Marc Grenier, Jean-Marc Piau, Wael Ben Larby, Abdelhakim Bendada, and Xavier Maldague. "Infrared thermography: principle and applications to aircraft materials." *In Int. Symp. NDT Aerosp.*, vol. 114, p. 348. 2008.

[56] Alvarez-Restrepo, C. A., H. D. Benitez-Restrepo, and L. E. Tobón. "Characterization of defects of pulsed thermography inspections by orthogonal polynomial decomposition." *NDT & E International* 91 (2017): 9-21.

[57] Daryabor, P., and M. S. Safizadeh. "Investigation of defect characteristics and heat transfer in step heating thermography of metal plates repaired with composite patches." *Infrared Physics & Technology* 76 (2016): 608-620.

*SPIE*, Baltimore, Maryland, USA, 2012, pp. 835406-835401-835406.

[47] B. Oswald-Tranta, M. Sorger, Scanning Pulse Phase Thermography with inductive line source, *in: 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Naples, Italy, 2012.

[48] K.R. Thomas, K. Balasubramaniam, Scanning induction thermography (SIT) for imaging damages in carbon-fibre reinforced plastics (CFRP) components, *in: 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, AIP Publishing, 2015, pp. 306-313.

[49] B. Oswald-Tranta, M. Sorger, Scanning pulse phase thermography with line heating, *Quant. InfraRed Thermogr. J.* 9 (2012) 103-122.

[50] N. Tabatabaei, A. Mandelis, B.T. Amaechi, Thermophotonic radar imaging: an emissivity-normalized modality with advantages over phase lock-in thermography, *Appl. Phys. Lett.* 98 (2011) 163706.

[51] Alireza Ahmadi, Mohammadreza Farahani, Amirreza Ardebili, Applying pulse thermography technique for corrosion defect evaluation on the steel plates, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 2019.

[52] Lizaranzu, Miguel, Alberto Lario, Agustín Chiminelli, and Ibán Amenabar. "Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools." *Infrared Physics & Technology* 71 (2015): 113-120.

[53] Duan, Yuxia, Pierre Servais, Marc Genest, Clemente Ibarra-Castanedo, and Xavier PV Maldague.

## Thermography with Radiation Excitation for Non-Destructive Evaluation of Composite and Sheet Metal

Amirreza Ardebili<sup>1</sup>, Mohammadreza Farahani<sup>2\*</sup>, Saeed Asghari<sup>3</sup>

1- MSc, School of mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2- Associate Professor, School of mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran

3- Associate Professor, Institute of Materials and Energy

\* mrfarahani@ut.ac.ir

### Abstract

Defects and damage during the manufacture of composites or metal parts are inevitable. Therefore, non-destructive testing is essential to prevent failure and increase the reliability of composite structures or metal components. Non-destructive thermography technologies have shown many advantages in this regard. In the thermography technology, the temperature variation of the external surface of the work piece was determined by receiving the radiated infrared waves. These waves indicated the point temperature precisely. In this paper, a complete and comprehensive study of non-destructive infrared thermography test methods for metal and composite inspection, detailed analysis was performed and the developments of infrared therapeutic technologies were investigated. First, the basic concepts for non-destructive test thermography were introduced. Then different types of thermography with radiation stimulation are described and compared. In the following, research examples of the application of thermography methods and some of the strengths and limitations of thermography technologies were compared and described in detail.

**Keywords:** Non-destructive testing, Radiation stimulation, Infrared thermography