

## مقایسه روش‌های تجزیه مد تجربی و موجک در تشخیص ترک‌های جوشکاری

عفت یاحقی<sup>۱</sup>، امیر موافقی<sup>۲</sup> و نورالدین محمدزاده<sup>۲</sup>

### چکیده

رادیوگرافی صنعتی یکی از مهمترین روش‌های آزمون‌های غیر مخرب برای شناسایی عیوب جوشکاری مانند ترک می‌باشد. تشخیص دقیق عیب‌های ترک (تفسیر فیلم) به دقت و مهارت شخص پرتوکار و کیفیت فیلم‌های پرتونگاری بستگی دارد. بسیاری از تصاویر تهیه شده به روش پرتونگاری صنعتی وضوح کافی را ندارند. در نتیجه روش‌هایی مورد نیاز است که بتوان این عیب‌ها را با دقت بیشتری بررسی کرد. ترک‌ها بعلت شکل ظاهری و کوچک بودن پهنای آنها نسبت به طولشان، ترکیب فرکانسی خاصی نسبت به سایر عیوب جوشکاری دارند. بنابراین با روش‌های تحلیلی پردازش تصویر بر اساس فرکانس و زمان می‌توان سیگنال‌های آنها را تجزیه و تحلیل کرد. در این تحقیق با استفاده از دو روش تجزیه مد تجربی و تبدیل موجک که مبتنی بر مشخصات زمانی و فرکانسی سیگنال‌ها هستند نواحی و شکل ترک در جوش مشخص و مقایسه شده‌اند. در هر دو روش با ترکیب وزنی مولفه‌های بدست آمده از تجزیه تصاویر، تصاویری ساخته شده‌اند و عیوب ترک در آنها بررسی شده است. نتایج حاصل از بکارگیری هر دو روش نشان می‌دهند روش تجزیه مد تجربی نسبت به روش تبدیل موجک در شناسایی عیوب ترک مناسب‌تر است و در این تصاویر هر چند کنتراست کاهش یافته ولی شکل و محل ترک‌ها واضح‌تر شده‌اند.

### کلید واژه‌ها

عیب ترک، رادیوگرافی صنعتی، پردازش تصویر، روش تجزیه مد تجربی، تبدیل موجک

### ۱ مقدمه

بازسازی دارند [۱-۲]. ترک بدترین و زیان آورترین نوع عیب در جوشکاری معمولی و اتصالات لوله‌های گاز است، این عیب در هر نوع فلزی، با هر نوع فرآیند جوشکاری و در هر منطقه‌ای که به نحوی با جوش در تماس است می‌تواند ایجاد شود، ترک‌های طولی و عرضی معمولاً در راستای خط جوش ایجاد شده و با شناخت دقیق عیب و علل بروز آن می‌توان اقدامات لازم و پیشگیری‌های ضروری را برای جلوگیری از ایجاد آن به عمل آورد [۳-۵].

ترک‌ها انواع گوناگونی دارند که در اثر عواملی مانند انجماد، سرد شدن و تنش‌های داخلی ناشی از انقباض جوش ایجاد می‌گردند. به عنوان نمونه ترک‌های گرم، ترک‌هایی هستند که در دماهای بالا ایجاد شده و معمولاً به فرآیند انجماد مربوط می‌شوند. ترک‌های سرد ترک‌هایی هستند که بعد از اینکه جوش به دمای اطاق رسید ایجاد می‌شوند. بیشتر ترک‌ها در اثر تنش‌های فیزیکی انقباض

عوامل زیادی باعث ایجاد گسستگی‌های مختلف در ناحیه جوش یا مناطقی که تحت تأثیر حرارت بالا قرار می‌گیرند، می‌شوند. این عدم امتزاج‌ها باعث ایجاد عیوب گوناگونی مانند تخلخل، آخال‌های سرباره یا انواع ترک‌ها می‌شوند. از میان این عیوب تخلخل و آخال‌های سرباره ممکن است تحت شرایطی قابل قبول باشند اما ترک‌های جوش باعث کاهش استحکام شده و نیاز به اصلاح و

این مقاله در بهمن‌ماه سال ۱۳۹۱ دریافت، در اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۳ بازنگری و در خردادماه ۱۳۹۳ پذیرفته شد.

<sup>۱</sup>قزوین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، رایانامه: [yahaghi@sci.ikiu.ac.ir](mailto:yahaghi@sci.ikiu.ac.ir)

<sup>۲</sup>تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران، گروه ایمنی هسته‌ای و حفاظت پرتو، [amovafeghi@acoj.org.ir](mailto:amovafeghi@acoj.org.ir) و [nmhzadeh@acoj.org.ir](mailto:nmhzadeh@acoj.org.ir)

زمان دارای چندین مد ذاتی باشد. برای بدست آوردن توابع مد ذاتی<sup>۲</sup> (IMF) الگوریتم زیر اجرا می‌شود [۱۲-۱۱، ۶]:

الف - تمام اکسترماهای سیگنال اصلی،  $x(t)$ ، شناسایی می‌شوند. در شکل ۱ خطوط پیوسته سیگنال اصلی و دایره‌های توخالی در قسمت بالا و پایین شکل اکسترماها را نشان می‌دهند.

ب- با برازش منحنی بر نقاط حداکثر و حداقل دو منحنی پوش بالا  $e_{\max}(t)$  (منحنی خط چین در شکل ۱) و پوش پایین  $e_{\min}(t)$  (منحنی نقطه چین) بدست می‌آیند.

ج- مقدار  $m(t) = (e_{\min}(t) + e_{\max}(t))/2$  محاسبه می‌شود (منحنی خط- نقطه در شکل ۱).

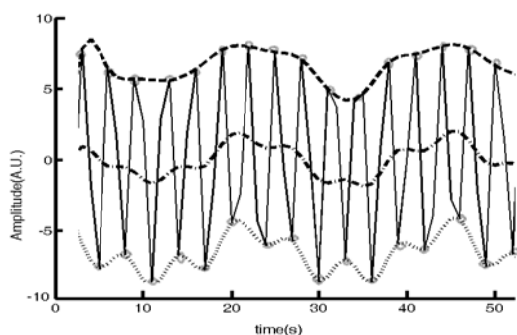
د- مقدار  $d_1(t) = x(t) - m(t)$  بدست می‌آید و این عملیات برای  $d_1(t)$  تکرار می‌شود تا مقدار آن کمتر از مقدار مطلوب  $\varepsilon$  شود ( $d_1(t) < \varepsilon$ ).

ه- چنانچه  $d_1(t)$  شرایط لازم را داشته باشد اولین تابع مد ذاتی،  $IMF_1$  در نظر گرفته شده و در غیر این صورت مراحل دوباره تکرار می‌شود تا اولین IMF بدست آید.

و- باقیمانده از رابطه  $r_1(t) = x(t) - IMF_1(t)$  محاسبه می‌شود. با تکرار این الگوریتم اجزای سیگنال محاسبه می‌شود بطوریکه در نهایت سیگنال اولیه به این ترتیب قابل محاسبه است:

$$x(t) = r_n(t) + \sum_{i=1}^n IMF_i(t) \quad (1)$$

با تجزیه سیگنال، مولفه‌هایی از موج‌های فرکانس بالا و فرکانس پایین بدست می‌آیند که ترکیب آنها سیگنال اصلی را بازسازی می‌کند. مولفه‌های IMF ایجاد شده در هر مرحله دارای فرکانس کمتری نسبت به مرحله قبل هستند.



شکل ۱ سیگنال زمانی  $x(t)$  با خط پیوسته و نقاط حداقل و حداکثر پوش‌ها با دایره توخالی و منحنی‌های برازش شده بر نقاط حداکثر  $e_{\max}(t)$  و حداقل  $e_{\min}(t)$  و  $m(t)$  به ترتیب با خط چین، نقطه چین و نقطه - خط نشان داده شده است.

این الگوریتم در دو بعد هم قابل اجرا است و می‌توان از آن برای تجزیه تصاویر به مولفه‌های آن نیز استفاده کرد. در این تحقیق از روش تجزیه مد تجربی برای تجزیه تصاویر به مولفه‌های آن تا سه سطح  $n=3$  استفاده شده است. در این الگوریتم  $\varepsilon \leq 0.1$  استفاده

ناشی از سرد شدن جوش که معمولاً با تغییر شکل جسم نیز همراه می‌باشد، ایجاد می‌شوند. وجود ترک در جوش و یا در مجاورت آن بیانگر وجود اشکال در جوشکاری است. بررسی دقیق ترک‌ها و تعیین علت ایجاد آنها در پیش‌بینی استحکام جوش مهم است [۵]. برخی از ترک‌ها را براحتی می‌توان با چشم غیر مسلح هم مشاهده کرد، ولی ترک‌های داخلی و ریز عمده‌ها به کمک آزمون‌های غیرمخرب مانند رادیوگرافی و التراسونیک قابل تشخیص هستند. در سال‌های اخیر استفاده از رادیوگرافی در تشخیص عیوب جوش پیشرفت‌های مهمی داشته است. استفاده از رادیوگرافی دیجیتال جهت بهبود کیفیت تصاویر رادیوگرافی با تکنیک‌های پردازش تصویر، استخراج ویژگی‌های تصاویر در راستای مشخص کردن عیوب از جمله این پیشرفت‌ها هستند. یکی از روش‌های قدیمی ایجاد تصویر دیجیتالی استفاده از اسکنرهای مخصوص است ولی ایراد این روش افت کیفیت تصویر بر اثر نویز است. عوامل زیادی باعث مخدوش شدن تصاویر رادیوگرافی و عدم کنتراست آنها می‌شوند که مشکلاتی را برای مفسر فیلم بوجود می‌آورد [۵].

برای بهبود کیفیت این تصاویر می‌توان از روش‌های مکانی (بر اساس اساس میزان سطوح خاکستری هر پیکسل) و فرکانسی (بر اساس انتقال اطلاعات به حوزه فرکانس) استفاده کرد. در این تحقیق برای تشخیص ترک‌ها و سایر عیوب جوش روش تجزیه مد تجربی که یک ابزار تطبیقی برای تحلیل سیگنال‌های غیرخطی و غیرایستا است [۸-۶] و روش تبدیل موجک که نوعی تبدیل در حوزه فرکانس - زمان است بکار گرفته شده‌اند [۱۰-۹]. در این تحقیق با استفاده از تجزیه تصاویر رادیوگرافی به مولفه‌های اولیه و ترکیب مجدد این مولفه‌های، سعی در ساخت تصاویری است که در آن عیوب جوش بخصوص ترک‌ها واضح‌تر شده باشند. به این منظور از وزن دهی به مولفه‌های فرکانسی که بیشترین اطلاعات عیوب ترک را در بر دارد، استفاده شده است.

## ۲ روش‌ها

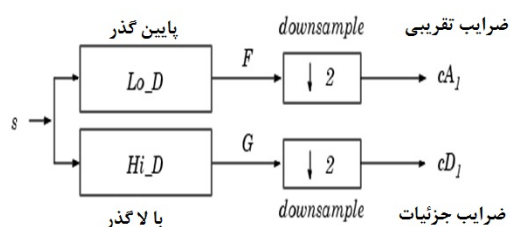
### ۲-۱ روش تجزیه مد تجربی

روش تجزیه مد تجربی یک ابزار تطبیقی برای تحلیل سیگنال‌های غیرخطی و غیرایستا است. در این روش هر سیگنال بر پایه‌ی رفتار محلی آن تجزیه می‌شود. داده‌های مربوط به هر سیگنال شامل مدهای نوسانی بسیار متفاوتی هستند که با یکدیگر تداخل نموده و داده‌های پیچیده‌ای را تولید می‌کنند. هر مد ذاتی، خطی یا غیرخطی یک نوسان ساده است که دارای نقاط اکسترما<sup>۱</sup> (بیشینه و کمینه) و نقاط عبور از صفر<sup>۲</sup> یکسانی است. به عبارت دیگر، نوسان‌های حول میانگین مکانی، متقارن هستند. یک داده ممکن است در یک

<sup>1</sup> extrema

<sup>2</sup> zero-cross

<sup>3</sup> Intrinsic Mode Function



شکل ۲: تبدیل موجک یک بعدی

مشابه سیگنال یک بعدی، تبدیل برای سیگنال دو بعدی هم به همان ترتیب یکبار به طور افقی و یکبار به طور عمودی انجام می‌شود. در شکل ۳ نمودار تبدیل موجک دو بعدی نشان داده شده است. در تبدیل موجک دو بعدی تصویری به ابعاد  $x$  و  $y$  به چهار ناحیه  $LL_1$ ،  $LH_1$ ،  $HL_1$ ،  $HH_1$  تقسیم می‌شود که  $LL_1$  ناحیه‌ای با ابعاد  $x/2$  و  $y/2$  است. با توجه به روابط فیلترهایی که در تبدیل موجک استفاده می‌شوند، هر یک از قسمت‌ها حاوی مفهومی از تصویر می‌باشند.

به عنوان مثال در قسمت  $LL$  مولفه‌های فرکانس پایین تصویر وجود دارد که تقریبی از کل تصویر است. قسمت  $LH$  لبه‌های تصویر را در جهت عمودی، قسمت  $HL$  لبه‌های تصویر را در جهت افقی و قسمت  $HH$  لبه‌ها را در جهت قطری دربردارند. فیلترهایی که در تبدیل موجک برای ساختن قسمت‌های مختلف استفاده می‌شوند کاملاً بر هم عمود نیستند، به همین دلیل قسمت‌ها مستقل از هم نبوده و بر کیفیت تصویر مستقل هم اثر نمی‌گذارند. در ادامه این ناحیه دوباره به چهار ناحیه با ابعاد  $x/4$  و  $y/4$  و به نام‌های  $LL_2$ ،  $LH_2$ ،  $HL_2$ ،  $HH_2$  تقسیم شده و این عمل تقسیم می‌تواند به دفعات مورد نیاز ادامه یابد. برای تبدیل موجک در سطح تجزیه  $n$  این فرآیند  $n$  بار انجام می‌شود. در نهایت ناحیه  $LL_n$  با ابعاد  $x/2^n$  و  $y/2^n$  به دست خواهد آمد [۱۰]. بنابراین تصویر در حوزه تبدیل موجک به یک ساختار هرمی مانند آنچه در شکل ۴ نمایش داده شده است تبدیل می‌شود. الگوریتم عکس تبدیل موجک دو بعدی برای بازسازی تصویر بر اساس ضرایب بدست آمده در شکل ۵ نشان داده شده است. برای شناسایی عیوب تصاویر رادیوگرافی می‌توان آنها را مانند مؤلفه‌های گذرا با شکل و ابعاد خاص در نظر گرفت.

برای آشکارسازی این عیوب اطلاعات فرکانسی تصویر در یک مکان مشخص لازم است که می‌توان برای بدست آوردن این اطلاعات از تبدیل موجک استفاده کرد. با تجزیه تصویر به مؤلفه‌های زمانی - فرکانسی و ترکیب آنها بر اساس مولفه‌های مورد نظر می‌توان تصاویر مناسبی از مناطق عیوب را بدست آورد. در این تحقیق با استفاده از toolbox موجک در نرم افزار متلب (MATLAB R2012b(8)، مولفه‌های تصاویر رادیوگرافی حاوی عیب ترک با تبدیل موجک در سه سطح بدست آمده و با ترکیب مجدد وزنی آنها بر اساس مولفه‌های فرکانسی تصاویر جدیدی بدست آمده‌اند.

شده و از برآزش بر روی ۴ پیکسل مجاور استفاده شده است. برنامه‌ها با استفاده از نرم افزار متلب (8) MATLAB R 2012b اجرا شده است. با توجه به اینکه هر کدام از این مولفه‌ها دارای اطلاعات فرکانسی - زمانی مختلفی هستند. ترکیب وزنی این مولفه‌ها برای ساخت تصاویر جدیدی که عیوب را بهتر نشان دهند بکار گرفته شده است.

## ۲-۲ تبدیل موجک

تبدیل موجک<sup>۱</sup>،  $WT$ ، یکی از تبدیلات بسیار کارآمد و قوی در زمینه تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها است. در این روش با تبدیل سیگنال یک بعدی در حوزه زمان به سیگنال دو بعدی در حوزه زمان- فرکانس می‌توان به مشخصه‌های بسیار زیادی از سیگنال دست یافت و بر خلاف تبدیل فوریه زمان کوتاه<sup>۲</sup>،  $SFT$ ، می‌توان در آن از پنجره شناور استفاده کرد. در این تبدیل گذر سیگنال از فیلترها باعث تفکیک جزئیات آن در فرکانس‌های مختلف می‌شود [۱۰، ۱۵-۱۳].

تجزیه یک تابع به روش تبدیل موجک، بر مبنای توابع موجک می‌باشد. موجک‌ها که به عنوان موجک‌های دختر نیز شناخته می‌شوند، نمونه‌های انتقال یافته و مقیاس شده یک تابع موجک مادر نوسانی با طول متناهی و شدیداً میرا هستند. موجک‌ها اولین موجک شناخته شده است که پیدایش آن به سالهای ابتدای قرن بیستم باز می‌گردد [۱۰]. این موجک که ساده‌ترین نوع موجک هم هست دارای پایه‌هایی متعامد است. تبدیل موجک پیوسته، تبدیلی است که تابعی پیوسته در زمان را به فضای زمان-فرکانس می‌برد. تبدیل موجک پیوسته کلاسیک برای تابع پیوسته  $x(t)$  که مربع آن انتگرال‌پذیر باشد در مقیاس  $a > 0$  و مکان  $b \in \mathbb{R}$  چنین تعریف می‌شود:

$$X_w(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \varphi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

که  $\varphi(t)$  تابع پیوسته‌ای در فضای زمان و فرکانس است و با نام موجک مادر شناخته می‌شود. در این رابطه  $a$  و  $b$  ضرایب ثابتی هستند که نوع و درجه موجک را تعیین می‌کنند. موجک‌ها انواع مختلفی دارند مانند موجک هار و دابچیز که هر کدام عملکرد مخصوصی دارند. روش به دست آوردن تبدیل موجک برای یک سیگنال یک بعدی به این صورت است که سیگنال به کمک یک فیلتر پائین گذر و یک فیلتر بالاگذر به دو بخش فرکانس بالا و فرکانس پائین تقسیم می‌شود که تعداد نمونه‌ها در هر یک از این بخش‌ها نصف تعداد نمونه‌های سیگنال اصلی است. سپس بخش فرکانس پائین دوباره به دو بخش فرکانس پائین و فرکانس بالا تقسیم می‌شود. تعداد دفعاتی که این عمل انجام می‌گیرد تعداد سطح تجزیه تبدیل موجک را نشان می‌دهد (شکل ۲).

<sup>1</sup> Wavelet Transform

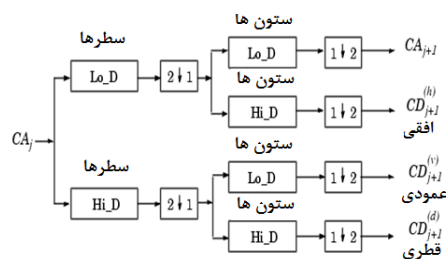
<sup>2</sup> Short Time Fourier Transform

قدرت تفکیک (رزولوشن) مکانی dpi ۶۴۰۰ (میکرون) و فیلم‌های با حداکثر چگالی اپتیکی ۴ را داراست و عنصر حساس آن CCD است. طبق اکثر استانداردهای دیجیتالی کردن فیلم‌های رادیوگرافی، اسکنر فیلم باید توانایی اسکن فیلم‌های رادیوگرافی با حداقل دانسیته اپتیکی ۳/۵ را داشته باشد [۱۸]. برای کالیبراسیون و کنترل اسکنر از فیلم استاندارد کالیبراسیون IT8.7/1 ساخت آگفا و همچنین فیلم‌های پله‌ای کالیبراسیون X-rite و BAM استفاده شده است.

در تصاویر پرتونگاری یا رادیوگرافی عیب‌های جوش بر روی زمینه تصویر قرار گرفته‌اند و نسبت به زمینه تصویر دارای شدت اپتیکی متفاوتی هستند، از این اختلاف شدت به عنوان ویژگی تمیز دهنده برای استخراج عیب‌ها از تصویر رادیوگرافی استفاده می‌شود [۲، ۴]. تصاویر تهیه شده در رادیوگرافی صنعتی معمولاً دارای نویز زمینه ناشی از پراکندگی فوتونی هستند و کنتراست و وضوح کافی ندارند و لازم است برای اصلاح مقادیر پیکسل‌های تصویر دیجیتال شده از روش‌های پردازش تصویر استفاده شود. با توجه به شکل و مشخصات عیوب، پردازش‌های تصویر مبتنی بر مشخصات زمانی-فرکانسی می‌توانند در آشکارسازی عیوب مفید باشند.

### ۳ نتایج

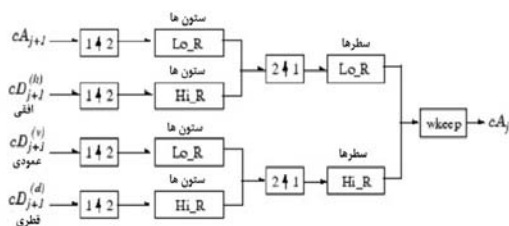
در این تحقیق برای آشکارسازی عیوب جوش از روی تصاویر رادیوگرافی از الگوریتم‌های مبتنی بر روش‌های تجزیه مد تجربی و تبدیل موجک که بر مبنای مولفه‌های زمان - مکان هستند، استفاده شده است. در یک تصویر اگر اختلاف شدت روشنایی پیکسل‌ها مجاور کم باشد، فرکانس بالا و اگر اختلاف شدت روشنایی پیکسل‌های مجاور زیاد باشد، فرکانس پایین است. در نتیجه استفاده از فیلترهای مختلف روی تصویر تاثیر دارد برای مثال فیلتر پائین گذر باعث ایجاد تغییرات روی فرکانس‌های بالا شده و شدت تغییرات تصویر در لبه‌ها و نویزها ملایم می‌شوند؛ ولی در اثر فیلتر بالا گذر تصویری تیزتر حاصل می‌شود. بررسی عیوب ترک در تصاویر رادیوگرافی نشان می‌دهند اختلاف شدت روشنایی در امتداد طولی ترک کم و شامل فرکانس‌های بالا و در امتداد عرضی زیاد و دارای فرکانس‌های میانی و پایین است. بنابراین استفاده از فیلترهای مختلف در جدا کردن این اطلاعات فرکانسی مفید است. با توجه به موارد ذکر شده نتیجه می‌شود که جدا کردن فرکانس‌های بالا که نشان دهنده امتداد طولی ترک است و ترکیب آن با اطلاعات فرکانس پایین و میانی که ترکیب وزنی کمتری دارند می‌تواند در وضوح قسمت‌های حاوی ترک موثر باشد. در این تحقیق عیوب تصاویر رادیوگرافی صنعتی با تجزیه تصاویر به مولفه‌های اولیه و ترکیب مجدد آنها بر اساس وزن دهی‌های مختلف به مولفه‌های فرکانسی مشخص و واضح‌تر شده‌اند. در ادامه نتایج بدست آمده به تفصیل بررسی شده‌اند.



شکل ۳: الگوریتم تبدیل موجک دو بعدی



شکل ۴: تجزیه هرمی موجک سطح ۳.



شکل ۵: عکس تبدیل موجک دو بعدی

## ۲-۳ تهیه تصاویر رادیوگرافی

برای تهیه تصاویر رادیوگرافی از قطعات حاوی ترک، از دستگاه مولد پرتو ایکس با ولتاژ 80kV، جریان 4mA و زمان پرتو دهی ۳ دقیقه و فیلم KODAK AA-400 استفاده شده است. تصاویر با فرمت TIFF دیجیتالی شده و در کامپیوتر ذخیره شدند. برای انجام پردازش‌های بعدی بر روی این تصاویر از نرم افزار متلب (MATLAB R2012b(8) استفاده شده است.

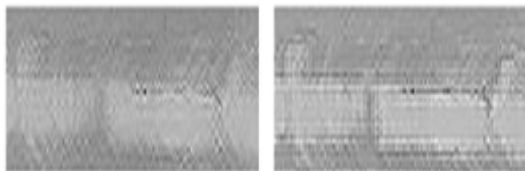
در کلیه مراحل شامل رادیوگرافی، ظهور و ثبوت، تفسیر، دیجیتالی کردن فیلم، استانداردهای سری ASTM، ISO و ASME در نظر گرفته شده‌اند تا کلیه آزمایش‌ها و نتایج حاصله ضمن تکرارپذیری نتایج یکسانی را حاصل کنند. همچنین در کلیه آزمایش‌های رادیوگرافی، ایمنی و حفاظت در برابر اشعه مطابق با قانون حفاظت در برابر اشعه کشور و استاندارد ملی شماره ۷۷۵۱ (که توسط سازمان انرژی اتمی ایران مطابق استانداردهای جهانی مصوب شده است) رعایت شده است [۱۶، ۱۷].

برای تبدیل فیلم‌های رادیوگرافی به قالب تصاویر دیجیتال از اسکنر مخصوص فیلم ScanMaker 1000-XL Microtek استفاده شده که توانایی اسکن مدارک در ابعاد A3 و با حداکثر

بازسازی شده مشخص تر است و وضوح تصویر در ناحیه ترک بیشتر شده، هر چند که نواحی دیگر تصویر ساخته شده بعلت نسبت وزنی مولفه‌های فرکانسی میانی و کم وضوح اولیه را ندارد.

### ۳-۲ نتایج تبدیل موجک

ابتدا تصاویر با استفاده از موجک db1 یا هار تجزیه شد. در ادامه برنامه‌ای نوشته شده که با ترکیب مولفه‌های حاصل از تصاویر با ترکیب وزنی بیشتر برای دامنه‌ی فرکانس بالا ( $HH_1, HH_2, HH_3$ ) و ترکیب وزنی کمتر برای دامنه‌ی فرکانس‌های میانی ( $HL_1, LH_1, HL_2, LH_2, LH_3, HL_3$ ) و فرکانس‌های کم ( $LL_1, LL_2, LL_3$ ) تصاویر ساخته شدند. نسبت ترکیب وزنی مولفه‌های فرکانس بالا و میانی و کم تصویر مانند روش تجزیه مد تجربی ۱ و ۳/۰ در نظر گرفته شده است. بررسی تصاویر ساخته شده نشان داد که عیوب ترک به علت تغییرات فرکانسی زیادی که در این بازه دارند، واضح نبوده و تغییر نسبت وزنی ترکیب مولفه‌های فرکانسی تصویر رادیوگرافی نیز تاثیر چندانی در وضوح عیب ترک در تصاویر ندارد. نمونه‌ای از این تصاویر بازسازی شده بر اساس موجک db1 یا هار در شکل ۸- الف نشان داده شده است. مقایسه این شکل با شکل ۶- الف (تصویر رادیوگرافی اصلی) نشان می‌دهد علاوه بر کم شدن کنتراست در ناحیه ترک وضوح نیز مناسب نیست. در مرحله بعد با تغییر تابع موجک به  $db_{10}$  (یک نوع موجک دابچیز) نتایج مورد نظر بدست آمد (شکل ۸- ب). این تابع موجک حاوی بسته فرکانسی با فرکانس‌های بیشتر است و تجزیه مولفه‌ها بر



الف ب  
شکل ۸ تصاویر بازسازی شده بر اساس تبدیل موجک  
الف - db1 ، ب - db10

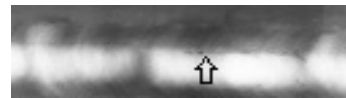
اساس بسته فرکانسی متفاوتی نسبت به موجک هار انجام می‌شود. در شکل دیده می‌شود که وضوح ناحیه ترک نسبت به شکل ۸- الف کمتر شده است. نتایج نشان می‌دهند بسته به نوع و ابعاد ترک که حاوی مولفه‌های فرکانسی متفاوت است، تغییر نوع موجک تا حدی در بهبودی وضوح ترک کمک می‌کند.

### ۳-۳ مقایسه نتایج دو روش

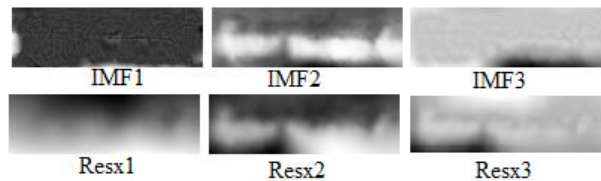
برای مقایسه دو روش تبدیل موجک و تجزیه مد تجربی در آشکارسازی عیوب ترک در تصاویر رادیوگرافی، تصاویر رادیوگرافی شامل عیب ترک به مولفه‌های آن تجزیه و در مرحله بعد با ترکیب وزنی مولفه‌های آنها، تصاویر جدیدی ساخته شده است. در شکل ۹ نمونه‌هایی از این تصاویر رادیوگرافی حاوی ترک و تصاویر بازسازی شده آنها نشان داده شده است. در این شکل

### ۳-۱ نتایج روش تجزیه مد تجربی

تصاویر رادیوگرافی حاوی عیوب ترک با مشخصات توضیح داده شده در قسمت ۲-۳ تهیه شده و سپس با روش تجزیه مد تجربی تا سه سطح تجزیه شده اند. نمونه‌ای از تصاویر رادیوگرافی حاوی عیب ترک و مولفه‌های آن در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۶- الف تصویر اصلی رادیوگرافی و در شکل ۶- ب تصاویر IMFها و مانده‌های آنها نشان داده شده است. در تصاویر ۶- ب مشاهده می‌شود که مولفه IMF1 دارای فرکانس‌های بزرگ است و عیب ترک در این تصویر با وضوح کم قابل رویت است (محل ترک با پیکان مشخص شده است). در مولفه‌های دیگر تصاویر، اختلاف سطح روشنایی‌ها کمتر شده و تصاویر حاوی فرکانس‌های میانی و کم هستند و عیب ترک بسختی در آنها دیده می‌شود و این امر به دلیل جدا کردن فرکانس‌های بالای تصویر است که سبب عدم وضوح ترک شده است.

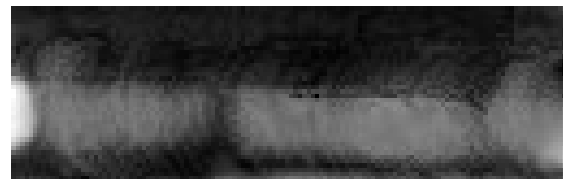


الف



ب

شکل ۶- الف تصویر اصلی ب- مولفه‌های تصویر با الگوریتم تجزیه مد تجربی



شکل ۷ تصویر ساخته شده با ترکیب وزنی مولفه‌های فرکانسی

در ادامه با ترکیب وزنی مولفه‌های هر تصویر، تصاویر دیگری ساخته شده که در آنها نسبت وزنی مولفه‌ی فرکانس بالای تصویر نسبت به سایر مولفه‌های تصویر بیشتر انتخاب شده است. بطور تجربی بدست آمد که برای تصاویر رادیوگرافی موجود که دارای عیب ترک با ابعاد و اندازه‌های مختلف بوده‌اند، ترکیب وزنی مولفه‌های فرکانس‌های بالای تصویر نسبت به سایر مولفه‌های آن به نسبت ۱ به ۳/۰، بهترین وضوح در ناحیه ترک را حاصل می‌کند. نمونه‌ای از تصویر ساخته شده با این نسبت وزنی مولفه‌های تصویر رادیوگرافی جوش در شکل ۷ نشان داده شده است. مقایسه شکل ۶- الف (تصویر اصلی) و شکل ۷ (تصویر ساخته شده با ترکیب وزنی مولفه‌های تصویر) نشان می‌دهد شکل و ابعاد آن در تصویر



برای ارزیابی اندازه ترک‌ها، از یک نمونه از ترک جوش استاندارد که همه عیوب آن در کارخانه سازنده قطعات عیب دار اندازه‌گیری و کالیبره شده، همراه با متر سربی (برای مقیاس بندی تصویر) رادیوگرافی شد. اندازه این ترک حدود ۲۸ میلی‌متر است که در شکل ۱۰-الف تصویر رادیوگرافی آن نشان داده شده است. در شکل ۱۰-ب تصویر باز سازی شده از روش تجزیه مد تجربی و در شکل ۱۰-ج تصویر ساخته شده توسط روش موجک نشان داده شده است. با توجه به مقیاس متر سربی روی شکل ۱۰ دیده می‌شود که اندازه ترک روی تصویر اصلی و بازسازی شده با روش تجزیه مد تجربی حدود ۲۷ میلی‌متر است که با مقدار واقعی تطبیق دارد. ولی در تصویر بدست آمده از روش موجک ترک بسختی دیده می‌شود و بعلاوه اندازه‌گیری ابتدا و انتهای آن نیز به علت واضح نبودن کار دشواری است. با توجه به اینکه ترک‌های جوش عیوبی هستند که در داخل جوش پدید می‌آیند و دسترسی چشمی و اندازه‌گیری مستقیم آنها ممکن نیست، برای ارزیابی این دو روش در شناسایی مناطق ترک و اندازه‌گیری آن، از نظر مفسرین فیلم‌های رادیوگرافی استفاده شده است.

هدف اصلی شناسایی مناطق ترک و اندازه آن است؛ بنابر این برای بررسی کارایی دو روش از افراد متخصص خواسته شد که با دیدن تصاویر نظرات خود را درباره عیوب و وضوح آنها بیان کنند. ۵۰ تصویر اصلی و تصاویر ساخته شده با دو روش تجزیه مد تجربی و موجک، در سه مرحله به ۷ فرد که در رادیوگرافی صنعتی مهارت دارند نشان داده شد. در ابتدا تصاویر ساخته شده به روش تجزیه مد تجربی و تبدیل موجک به تنهایی به افراد نشان داده شد و در مرحله سوم این تصاویر بطور همزمان با تصاویر اصلی به آنها نشان داده شد و از آنها خواسته شد مکان عیوب ترک را مشخص کنند. نتایج حاصل از نظرات آنها در جدول ۲ آورده شده است. از روی نظرات آنها درصد تشخیص درست به این ترتیب محاسبه شد:

$$100 \times \frac{\text{تعداد کل عیوب درست تشخیص شده داده}}{\text{تعداد کل عیوب مشخص شده}} = \text{درصد تشخیص عیوب}$$

جمع‌بندی نظرات آنها در مورد تصاویر ساخته شده نشان می‌دهد تمامی این افراد به کم شدن کنتراست در تصاویر ساخته شده با دو روش تبدیل موجک و تجزیه مد تجربی اذعان دارند، ولی واضح‌تر شدن ناحیه عیب ترک در روش تجزیه مد تجربی را تأیید کرده و در عین حال بر مشاهده همزمان تصاویر ساخته شده و تصاویر اولیه را برای مکان یابی و تشخیص شکل ترک های موجود در تصاویر تأکید دارند.

اشکال روش تجزیه مد تجربی طولانی بودن زمان محاسبات آن است بطوریکه اگر ابعاد تصویر بزرگ‌تر از  $128 \times 128$  باشد زمان محاسبات بطور محسوسی افزایش یافته و تا حدود چندین ساعت بالا می‌رود، ولی در روش تبدیل موجک با اعمال سریع فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر محاسبات خیلی سریع انجام

تصاویر رادیوگرافی اصلی در ردیف اول و تصاویر ساخته شده به روش تجزیه مد تجربی در ردیف دوم و تصاویر بازسازی شده با روش تبدیل موجک در ردیف سوم نشان داده شده‌اند. بررسی تصاویر ساخته شده که شامل ترک‌های مختلف در راستای افقی، عمودی، قطری و یا ترکیبی از آنها هستند، نشان می‌دهد روش تجزیه مد تجربی در ظاهر کردن عیوب تصویر نسبت به روش تبدیل موجک کارایی بالایی دارد. همانطور که دیده می‌شود تصاویر ساخته شده با هر دو روش بعلت وزنی که به مولفه‌های دارای فرکانس میانی و کم داده می‌شود دارای کنتراست مناسبی نیستند، ولی در روش مد تجربی تجزیه که تصویر بر اساس مولفه‌های زمانی- فرکانسی تجزیه شده و اطلاعات فرکانسی- زمانی آن جدا می‌شود عیوب ترک که شامل فرکانس‌های مختلف هستند بهتر متمایز شده و ساختار و شکل ترک در آنها واضح‌تر است.

در شکل ۹-الف ترک عمودی در جوش که با پیکان نمایش داده شده روی تصویر اصلی بسختی قابل مشاهده است ولی در تصویر ساخته شده در ردیف دوم ترک‌ها بهتر دیده شده و در تصویر ساخته شده با تبدیل موجک اصلاً قابل مشاهده نیستند. در دو شکل ۹-ب و ج نیز ترک‌ها در تصاویر ردیف سوم نسبت به تصاویر ردیف دوم وضوح کمتری دارند. برای ارزیابی تصاویر، پارامترهای PSNR<sup>۱</sup>، RMSE<sup>۲</sup> و STD<sup>۳</sup> برای تصویر اصلی و ساخته شده به روش مد تجربی تجزیه و موجک به این ترتیب محاسبه شده‌اند:

$$PSNR = 10 \log \left( \frac{255^2 MN}{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i,j) - I'(i,j))^2} \right)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i,j) - I'(i,j))^2} \quad (3)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i,j) - I'(i,j))}$$

در این معادلات I تصویر اصلی، I' تصویر ساخته شده به روش تجزیه مد تجربی و روش موجک، M و N ابعاد تصاویر هستند. متوسط و انحراف معیار این پارامترها در جدول ۱ ثبت شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقدار PSNR روش تجزیه مد تجربی بیشتر از روش موجک است و با توجه به شباهت تصویر ساخته شده با روش مد تجربی به تصویر اصلی این امر طبیعی است و پارامترهای RMSE و STD هر دو در روش تجزیه مد تجربی کمتر از روش موجک هستند. این پارامترها بیانگر کیفیت تصاویر و شباهت آنها به تصاویر اصلی هستند ولی با توجه به اینکه در اینجا هدف ظاهر کردن محل و شکل عیوب ترک است و بعلت استفاده از نسبت وزنی مولفه‌ها در تصاویر ساخته شده، این پارامترها معیارهای مناسبی نیستند.

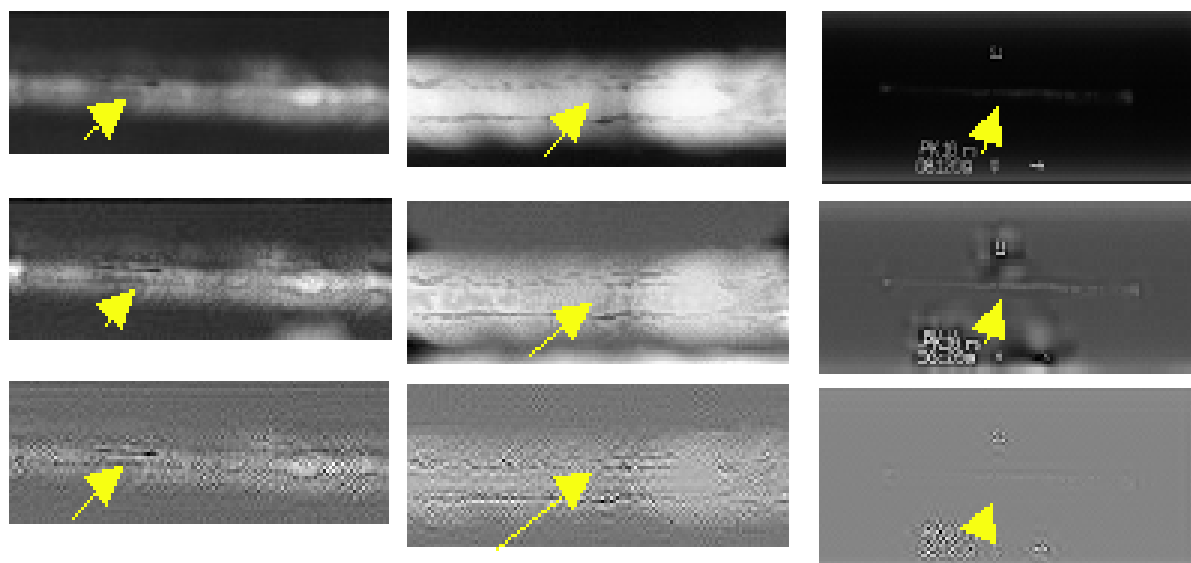
<sup>1</sup> Peak Signal to noise

<sup>2</sup> Root Mean Square Error (RSME)

<sup>3</sup> Standard Division

یکسان است و برای شکل ترک‌های مختلف نتایج یکسانی بدست می‌آید.

می‌شوند. همچنین انتخاب تابع اولیه موجک در تجزیه مولفه‌های تصویر تاثیر داشته و تابع موجکی که که دارای مولفه‌های فرکانسی نزدیک به مولفه‌های فرکانسی ترک باشد برای تشخیص ترک مناسب‌تر است، ولی در روش تجزیه مد تجربی ساختار الگوریتم



الف ب ج

شکل ۹ چند تصویر رادیوگرافی و تصاویر ساخته شده آنها با دو روش مد تجربی تجزیه و موجک، ردیف اول تصاویر اصلی ردیف دوم و سوم تصاویر ساخته شده با روش مد تجزیه تجربی و تبدیل موجک را نشان می‌دهد.



الف ب ج

شکل ۱۰ تصویر یک ترک جوش استاندارد همراه با متر سربی الف- تصویر اصلی ب- تصویر بازسازی شده با روش تجزیه مد تجربی ج- تصویر بازسازی شده با روش موجک

جدول ۲ نتایج حاصل از نظرات مفسرین فیلم‌های رادیوگرافی

	روش مد تجربی تجزیه	روش موجک	مشاهده هم زمان تصاویر
درصد تشخیص عیوب ترک	۸۷%	۳۵%	۱۰۰%

جدول ۱ پارامترهای محاسبه شده برای تصویر اصلی و بازسازی شده در دو روش

	PSNR	RMSE	STD
روش مد تجربی تجزیه	$87 \pm 7$	$35 \pm 17$	$2/3 \pm 1/27$
روش موجک	$70 \pm 4$	$68 \pm 18$	$8/1 \pm 3/2$

## ۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش‌های تجزیه مد تجربی و تبدیل موجک برای شناسایی عیوب ترک در تصاویر رادیوگرافی صنعتی استفاده شده و با توجه به تجزیه تصاویر رادیوگرافی جوش حاوی عیب ترک به مولفه‌های فرکانسی- زمانی و ترکیب مجدد این مولفه‌ها با وزن دهی به مولفه‌های فرکانس بالا سعی در واضح کردن شکل و ابعاد ترک شده است. نتایج نشان می‌دهند در تصاویر بررسی شده رادیوگرافی که حاوی ترک‌های افقی، عمودی و مورب هستند استفاده از دو روش تجزیه مد تجربی و تبدیل موجک سبب کم شدن کنتراست شده، ولی ناحیه عیب ترک واضح تر شده است. همچنین دیده می‌شود که روش تجزیه مد تجربی در تشخیص عیوب ترک نسبت به روش موجک کارایی بالاتری دارد. نتایج نشان می‌دهند در تبدیل موجک، نوع تابع اولیه موجک در مشخص کردن عیب ترک تاثیر دارد و برای بعضی از عیوب ترک در تصاویر، تغییر تابع موجک اولیه باعث آشکار شدن بهتر عیوب می‌شود. ولی روش تجزیه مد تجربی دارای الگوریتمی یکسانی بر اساس مولفه‌های فرکانسی و زمانی است و مانند تبدیل موجک وابستگی به تابع اولیه خاصی ندارد و برای کلیه عیوب پارامترهای یکسانی در اجرای الگوریتم در آن استفاده می‌شود و در نتیجه کار با آن برای کاربر راحت‌تر است.

## مراجع

- studies. Rev. Geophys. 46, RG2006. (doi:10.1029/2007RG000228)
- [9] Gonzalez R. C. and Woods R. E., 2002, Digital Image Processing 2/E. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, pp. 349-404.
- [10] Mallat S. G., 1989, A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation, Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11, 7, 674-693.
- [11] Nunes J. C., Bouaoune Y., Delechelle E., Niang O. and Bunel Ph., 2003, Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition, Image and Vision Computing, Vol. 21, Issue 12, pp.1019-1026.
- [12] Janosi, I. M. & Muller, R., 2005, Empirical mode decomposition and correlation properties of long daily ozone records. Phys. Rev. E 71, 056126. (doi:10.1103/PhysRevE.71.056126)
- [13] Acharya T. and Ray A. K., 2005, Image Processing: Principles and Applications. 24 Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, pp. 79-104.
- [14] Kofidisi E., Kolokotronis N., Vassilarakou A., Theodoridis S. and Cavouras D., 1999, Wavelet-based medical image compression, Future Generation Computer Systems, Vol.15, 2, pp. 223-243.
- [15] Lischinski. D. D., 2003, Fast multiresolution image operations in the wavelet domain. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics., Vol.9(3), pp.395-412,
- [۱۶] سازمان انرژی اتمی ایران، "استانداردهای پایه حفاظت در برابر اشعه"، معاونت نظام ایمنی هسته‌ای کشور، ۱۳۸۰.
- [۱۷] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، "حفاظت در برابر پرتوهای یون‌ساز و ایمنی منابع پرتو-استانداردهای پایه"، استانداردهای ملی ایران، استاندارد شماره ۷۷۵۱، ۱۳۸۳
- [18] ISO-EN 14096, 2005, Non-destructive testing - Qualification of radiographic film digitisation systems, Geneva.
- عفت یاحقی فارغ التحصیل رشته مهندسی برق- مخابرات از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی در مقطع کارشناسی و فارغ التحصیل رشته مهندسی هسته‌ای- پرتوپزشکی در مقطع کارشناسی ارشد و دکتری از دانشگاه صنعتی امیرکبیر هستند.**
- زمینه‌های تحقیقاتی موردعلاقه ایشان، محاسبه آسیب بافت در تصویربرداری MRI، عیب‌یابی در جوشکاری صنعتی با استفاده از پردازش تصویر و سیگنال و همچنین تخمین و پیش بینی آلودگی‌های زیست‌محیطی است.
- امیر موافقی فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه تبریز و کارشناسی ارشد نیروگاه‌های اتمی از آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مهندسی هسته‌ای- پرتوپزشکی از دانشگاه‌های صنعتی امیرکبیر و صنعتی شریف می‌باشند.**
- زمینه‌های تحقیقاتی موردعلاقه ایشان پردازش تصویر در صنعت هسته‌ای و آزمون‌های غیر مخرب (NDT) است.
- [1] Edalati, K., Rastkhah, N., Kermani, A., Seiedi M and Movafeghi, A., 2006, The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Elsevier Pub., pp. 736-741, Vol. 83.
- [2] Movafeghi A., Kargarnovin M. H., Soltanian-Zadeh H., et al, 2005, Flaw Detection Improvement of Digitized Radiographs by Morphological Transformations, Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 47, No. 10, pp. 625-630.
- [3] Movafeghi A., Krgarnovin M. H., Soltanian-Zadeh H. et al, 2004, A radiographic calibration method for eddy current testing of heat exchanger tubes", Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 46, No. 10, pp. 594-597.
- [4] Wainwright, I. N.M., 2007, Examination of Paintings by Physical and Chemical Methods, Department of Communications, and held at the National Gallery., Canadian Conservation Institute (CCI) - Publications, <http://www.cci-icc.gc.ca/> accessed.
- [5] ASME, 2004, Digital image acquisition, display, interpretation and storage of radiographs for nuclear applications, ASME Boiler and pressure vessel code and standard, Section 5, Article 2, Appendix 6, American Society of Mechanical Engineering.,
- [6] Linderhed A., 2002, 2D empirical mode decompositions in the spirit of image compression, Wavelet and Independent Component Analysis Applications IX, SPIE Proceedings Vol. 4738, pp.1-8, ISBN: 0-8194-4488-X.
- [7] Kris V., Cook F. A, 2000, Empirical mode skeletonization of deep crystal data: Theory and applications, Journal of Geophysical research, Vol. 105, no B4.
- [8] Huang N. E., Wu, Z., 2008, A review on Hilbert-Huang transform: method and its applications to geophysical



**عفت یاحقی فارغ التحصیل رشته مهندسی برق- مخابرات از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی در مقطع کارشناسی و فارغ التحصیل رشته مهندسی هسته‌ای- پرتوپزشکی در مقطع کارشناسی ارشد و دکتری از دانشگاه صنعتی امیرکبیر هستند.**

زمینه‌های تحقیقاتی موردعلاقه ایشان، محاسبه آسیب بافت در تصویربرداری MRI، عیب‌یابی در جوشکاری صنعتی با استفاده از پردازش تصویر و سیگنال و همچنین تخمین و پیش بینی آلودگی‌های زیست‌محیطی است.



**امیر موافقی فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه تبریز و کارشناسی ارشد نیروگاه‌های اتمی از آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مهندسی هسته‌ای- پرتوپزشکی از**

دانشگاه‌های صنعتی امیرکبیر و صنعتی شریف می‌باشند. زمینه‌های تحقیقاتی موردعلاقه ایشان پردازش تصویر در صنعت هسته‌ای و آزمون‌های غیر مخرب (NDT) است.





نورالدین محمدزاده فارغ التحصیل رشته فیزیک از دانشگاه تربیت معلم تهران هستند. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان، آزمون‌های غیر مخرب (NDT) و لیزر است. ایشان دارنده گواهینامه‌های سطح ۲ پنج روش اصلی آزمون‌های غیر مخرب هستند.