



شناسایی طرح‌های پنهان در تابلوهای عتیقه با استفاده از پرتونگاری صنعتی

مهدی میرزاپور^{۱*}، عفت یاحقی^۲، سیده مریم قیاسی لیمنجوبی^۳، خوزه آنتونی مادرید گارسیا^۴، امیر موافقی^۵

۱. استادیار و عضو هیئت علمی گروه ریاضی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲. دانشیار و عضو هیئت علمی گروه فیزیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
۴. استاد و عضو هیئت علمی مؤسسه دانشگاهی مرمت و بازسازی، دانشگاه پلی تکنیک والنسیا، والنسیا، اسپانیا
۵. دانشیار و عضو هیئت علمی پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

چکیده

برای جلوگیری از تخریب و سوزاندن تابلوهای نفیس در زمان جنگ و حوادث اجتماعی در گذشته، بر آن‌ها اثر هنری جدید نقاشی می‌شده است. برای شناسایی لایه‌های پنهان تابلوها، استفاده از یک روش عمقی که بتواند طرح‌های زیرین را مشخص کند، مفید است. اشعه ایکس که قابلیت نفوذ در مواد مختلف را دارد، می‌تواند تصویر پنهان نقاشی را مشخص کند. قبل از استفاده از آزمون پرتونگاری، ضخیم بودن لایه‌های نقاشی کارشناسان را به این باور می‌رساند که نقاشی اصل نبوده و بر روی آن طرحی دیگر کشیده شده است. مسئله مهم در بررسی تابلوهای هنری، حفظ آن‌ها و شناسایی نواحی ناقص است. برای این امر فن‌های مختلف غیر مخرب به کار گرفته می‌شوند. آزمون پرتونگاری جزئی از آزمون‌های غیر مخرب است. در پرتونگاری به دلیل نفوذ پرتو ایکس به لایه‌های زیرین، بدون تخریب و تغییر در نمونه آزمایشی، الگوهای پنهان و آسیب‌های عمقی آشکار می‌شوند. تصاویر حاصل از پرتونگاری به دلیل پراکندگی و تضعیف پرتو در قطعه و نیز اندازه چشمه، واضح نیستند و کیفیت پایینی دارند، به این دلیل، شناسایی نواحی عیوب در پرتو نگاره‌ها دشوار است. برای افزایش کنتراست پرتو نگاره‌ها روش‌های پردازش تصویر می‌توانند به کار گرفته شوند. در این تحقیق از پرتونگاری برای تشخیص تصاویر پنهان تابلوهای نقاش‌های موجود در موزه والنسیا، اسپانیا استفاده شده است. همچنین از دو روش هرم گوسی و هرم لاپلاسی برای بهبود کیفیت و کاهش عدم وضوح پرتو نگاره‌ها استفاده شده است که دارای پیچیدگی محاسباتی کم و سادگی بالا در پیاده‌سازی هستند. نتایج، نشان می‌دهند که پرتونگاری روش مؤثری در شناسایی نقاشی‌های پنهان است. با این روش بدون وارد شدن هیچ‌گونه آسیبی به تابلو می‌توان اطلاعات مهمی در مورد طرح‌های پنهان آن به دست آورد. استفاده از الگوریتم‌های پردازشی هرمی لاپلاسی و گوسین در تصاویر پرتونگاری نیز می‌تواند در شناسایی بهتر طرح‌های پنهان کمک کند.

واژگان کلیدی: طرح‌های پنهان، تابلوهای عتیقه، پرتونگاری صنعتی، روش هرم گوسی، روش هرم لاپلاسی

۱. مقدمه

آثار هنری و باستانی از نظر مادی، فرهنگی و تاریخی ارزش بسیار بالایی دارند و منبعی مهم و اصلی برای تحقیقات علمی، تاریخی و دیگر علوم مرتبط با باستان‌شناسی به شمار می‌روند. این آثار اغلب بسیار گران‌بها و غیرقابل جایگزین هستند و آیینۀ تمام‌نمای هویت فرهنگی انسان‌ها در هر قبیله و جامعه‌ای محسوب می‌شوند. هنگامی که هنرمندی، کشیدن یک نقاشی را به پایان می‌رساند؛ این اثر هنری از همان لحظه در معرض تغییر و زوال قرار می‌گیرد. تغییرات شدت نور و دمای محیط، تأثیرات رطوبت، گذر زمان (پیری طبیعی)، آسیب‌های تصادفی، آلودگی باکتریایی، حشرات و سایر موارد از عوامل نابودی فیزیکی و تغییر شکل ظاهری آثار هنری به شمار می‌روند. این عوامل موجب ایجاد شوره‌زدگی در سطح نقاشی، گسترش و یا انقباض ترک‌ها، محو شدن رنگ‌دانه‌ها، تیره شدن و تغییرات رنگ، تخریب زیستی و پارگی در تابلوی نقاشی می‌شوند [1,2]. با مطالعه و تجزیه و تحلیل بسیاری از آثار هنری که در موزه‌های سراسر جهان وجود دارند، می‌توان اطلاعاتی مهم از نحوه طراحی، نوع مواد به کار رفته، رنگ‌دانه‌ها و ساختار مولکولی رنگ‌ها به دست آورد، با استفاده از این اطلاعات، متخصصان می‌توانند روشی خاص برای حفاظت و مرمت آثار پیشنهاد کنند. روش‌های متفاوتی برای تشخیص عیوب و طرح‌های پنهان تابلوها وجود دارد. برای حفظ و نگهداری از آثار نقاشی، شناسایی ترکیب شیمیایی نمونه‌ها و دانستن اثرات مکانیسم‌های تخریب، از عوامل حیاتی به شمار می‌روند [3,4].

اگر آسیب‌های زیرسطحی و نقش‌های پنهان موجود در تابلوی هنری شناسایی نشوند و جلوی تخریب آن‌ها گرفته نشود، باگذشت زمان صدمات غیرقابل جبران به تابلو وارد می‌شود و نقاشی اصلی قابل‌رویت نخواهد بود. همچنین در سال‌های گذشته گاهی برای جلوگیری از تخریب و سوزاندن تابلوهای نفیس در زمان جنگ و حوادث اجتماعی، بر آن‌ها اثر هنری جدیدی نقاشی می‌شده که طرح اصلی تابلو را پوشانده است. برای دستیابی به این اطلاعات، لازم است از روش‌های غیر مخرب استفاده شود تا با توجه به شناسایی مواد و طرح‌های زیرین تابلو که در هر دوره تاریخی متفاوت هستند بتوان اطلاعات مفیدی در مورد آن‌ها به دست آورد [1,3,5].

جهت شناسایی عیوب موجود در تابلوهای هنری روش‌های متنوعی به کار گرفته می‌شوند و هدف تمام فن‌های مورد استفاده، کشف و آشکارسازی عیوبی است که واضح نیستند و با چشم غیر مسلح دیده نمی‌شوند. از مهم‌ترین روش‌های فیزیکی و شیمیایی برای تشخیص آسیب‌ها در نقاشی‌ها، زدودن غبار روی سطح آن‌ها از طریق مکش، ضد عفونی کردن، استفاده از آب اکسیژنه و پودرهای پاک‌کننده را می‌توان نام برد، البته باید دقت شود که مواد شیمیایی به‌مرور زمان موجب نابودی آثار هنری می‌شوند و نمونه‌برداری از آثار هنری، موجب تخریب و از بین رفتن آن‌ها می‌شود.

روش‌های دیگری نیز برای شناسایی تخریب تابلوها و طرح‌های پنهان آن‌ها وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از تصویربرداری چند طیفی^۱ (MSI) است که یک روش غیر مخرب محسوب می‌شود [6-8]. این روش قادر است اطلاعاتی را آشکارسازی کند که توسط چشم انسان قابل‌مشاهده نیست. تصویربرداری چند طیفی علاوه بر واضح ساختن الگوهای پنهان، اطلاعاتی درباره مواد مورد استفاده در نقاشی و شناسایی رنگ‌دانه‌ها نیز در اختیار متخصصان مرمت قرار می‌دهد. این روش، وضوح طیفی محدودی دارد و استفاده مؤثر از این تکنیک به اپراتورهای با تخصص بسیار بالا و دستگاه‌های مکانیکی ویژه‌ای نیاز دارد [9-12]. همچنین استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز اسپکتروسکوپی پراش انرژی پرتوایکس^۲ (SEM-EDS) یکی از انواع روش‌هایی است که برای شناسایی ترکیب شیمیایی نمونه‌ها و مشاهده ریزساختارها مورد استفاده قرار می‌گیرد [13].

علاوه بر روش‌های بالا، آزمایش‌هایی وجود دارند که بدون آسیب رساندن و ایجاد تغییر در شکل ظاهری و وضعیت فیزیکی آثار و قطعه‌های مورد آزمایش به شناسایی عیوب و نقوش و طرح‌های ریز و پنهان کمک می‌کنند که به آزمون‌ها یا ارزیابی‌های غیر مخرب^۳ (NDT or NDE) معروف هستند. انواع مختلف آزمون‌های غیرمخرب مانند تصویربرداری فرابنفش، تصویربرداری فروسرخ (مادون قرمز)، آزمون‌های فراصوتی و پرتونگاری به‌طور گسترده برای ارزیابی غیرمخرب تابلوهای هنری شناخته شده‌اند [8-11] و استفاده می‌شوند. بازرسی چشمی که جزئی از آزمون‌های غیر مخرب است، مهم‌ترین جزء هر تجزیه و تحلیل به شمار می‌رود و اطلاعات مربوط به شفافیت لاک و ترک‌های بزرگ رویه نقاشی را ارائه می‌دهد ولی برای شناسایی الگوها و آسیب‌های پنهان موجود در تابلوها قابل استفاده نیست [14-18].

آزمون پرتونگاری روش دیگری از آزمون‌های غیرمخرب است که علاوه بر کاربرد گسترده در صنعت و پزشکی، در علوم و مطالعات باستان‌شناسی برای شناسایی و تعیین نواحی عیوب پنهان در آثار باستانی هم کاربرد زیادی دارد. اساس آزمون پرتونگاری استفاده از پرتوهای ایکس (طول موج 10^{-2} - 10^{-5} میکرومتر) است که توانایی نفوذ بسیار بالایی در اجسام دارند، حتی اجسامی که نور مرئی از آن‌ها عبور نمی‌کند. در این فرایند قسمتی از پرتوها جذب قطعه مورد آزمایش، قسمتی پراکنده و قسمتی نیز جین عبور از قطعه تضعیف

و سپس خارج می‌شود؛ این پرتوهای خارج شده با برخورد به آشکارسازی که درست پشت نمونه آزمایش قرار دارد، پرتو نگاره‌ها (تصاویر حاصل از پرتونگاری) را ایجاد می‌کنند. آشکارسازها بسته به نوع پرتونگاری متفاوت هستند. به‌طور مثال در آزمون پرتونگاری سنتی از فیلم‌های مخصوص و در آزمون پرتونگاری محاسباتی^۴ (CR) از صفحات فسفری^۵ تصویرساز به‌عنوان آشکارساز استفاده می‌شود [19-22].

با پرتونگاری تابلوهای هنری می‌توان اطلاعاتی را در مورد تزئینات بوم، طرح‌های مقدماتی و نقوش پنهان بوم، نقایص زیرسطحی و مسیر حرکت قلم‌مو به دست آورد. پرتونگاری تابلوهای هنری به دلیل ضخامت کم آن‌ها امری دشوار است و انرژی مورد استفاده برای پرتونگاری به ابعاد تابلو و فاصله آن تا چشمه نور بستگی دارد، اما به‌طور معمول از پرتوهایی با انرژی بین ۲۰ تا ۶۰ کیلوولت برای پرتونگاری استفاده می‌شود.

تفسیر صحیح و مناسب پرتو نگاره‌ها برای ارزیابی و به دست آوردن اطلاعات بیشتر و دقیق‌تر جهت شناسایی الگوهای پنهان، ضروری است. تصاویر پرتونگاری به دلیل پراکندگی ذاتی پرتو ایکس و عوامل دیگر مانند انواع نوفه^۶ ایجاد شده توسط قسمت الکترونیکی دستگاه و پرتوهای پراکنده، کیفیت پایین دارند و خیلی واضح نیستند. تفسیر صحیح آن‌ها نیازمند بهبود کیفیت و افزایش وضوح تصاویر است. به دلیل دیجیتالی بودن پرتو نگاره‌ها می‌توان از روش‌های مختلفی برای بهبود کیفیت آن‌ها استفاده کرد. کوچک کردن نقطه کانونی چشمه پرتوی تابشی، استفاده از صفحات فزون‌ساز و موازی کردن پرتوهای تابشی از روش‌های بهبود کیفیت پرتو نگاره‌ها به شمار می‌روند، اما این روش‌ها نیازمند ایجاد تغییراتی در دستگاه پرتونگاری هستند که هزینه زیادی در بردارند. دقیق‌ترین و مقرون به‌صرفه‌ترین روش برای بهبود کیفیت پرتو نگاره‌ها با حفظ جزئیات آن‌ها استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های پردازش تصویر است. روش‌های پردازش تصویر به‌طور معمول با الگوریتم‌های مکانی، فرکانسی و فرکانسی-زمانی انجام می‌شود و هر کدام از این الگوریتم‌ها، به‌عنوان مثال الگوریتم تبدیل موجک [23-25]، صافی میانگین غیرخطی یا صافی گابور [26-28]، قادر به نمایان‌سازی ویژگی‌های خاصی از پرتو نگاره تابلوهای نقاشی هستند.

با توجه به اینکه پرتونگاری، اغلب برای اهداف صنعتی و پزشکی طراحی شده‌اند و پردازش تصویر در این حوزه‌ها قدمت طولانی‌تری نسبت به تابلوهای هنری دارد ولی می‌توان با تغییر مؤلفه‌های الگوریتم‌های پردازش تصویر، کارایی آن‌ها را برای تابلوهای هنری افزایش داد و یا از الگوریتم‌هایی استفاده کرد که کارایی مؤثری در افزایش وضوح پرتو نگاره‌های صنعتی و پزشکی ندارند.

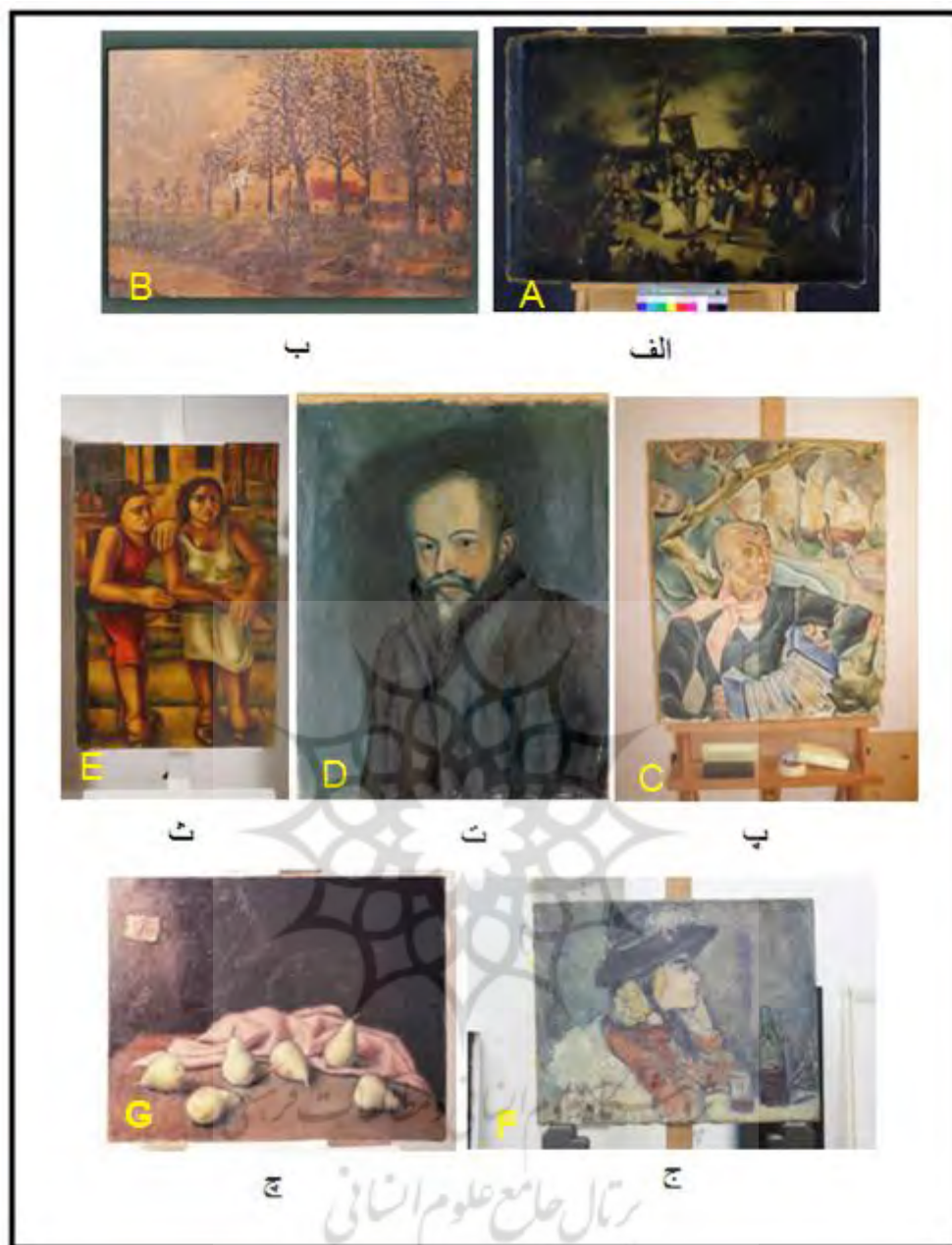
در این تحقیق، برای بهبود کیفیت تصاویر پرتونگاری جهت تشخیص الگوهای پنهان موجود در تابلوی هنری از الگوریتم‌های هرم گوسی و هرم لاپلاسی استفاده شده است. هدف از ساخت هرم‌های تصویر، نمایش استخراج ساختار و ویژگی‌های تصویر اصلی در مقیاس‌های مختلف برای کاهش نوفه است. در این روش‌ها، با رویکرد نمونه‌کاهی^۷، یک دنباله از تصاویر با ابعاد کوچک‌تر تولید می‌شوند که به تولید هرم تصویر منجر می‌شوند. در روش هرم گوسی، برای ساخت هرم در هر مرحله، از میانگین‌گیری گوسی استفاده می‌شود در حالی که در روش هرم لاپلاسی، از یک تبدیل لاپلاس برای ساخت هرم تصویر استفاده می‌شود. در این هرم‌های تصویر، هر لایه نسبت به لایه پایین‌تر خود ابعاد کوچک‌تر و همواری بیشتری دارد. پس از ساخت هرم، برای بازسازی تصویر نوفه‌زدایی شده، ابتدا فیلتری را بر روی هر یک لایه‌های هرم اعمال می‌کنند و سپس با رویکرد نمونه‌افزایی^۸ تصویر شفاف‌تر بازسازی می‌شود [28,29]. هدف از این تحقیق، ارائه روشی برای بالا بردن کیفیت پرتو نگاره‌های تابلوهای هنری است تا با شناسایی بهتر نواحی آسیب‌دیده و نقوش پنهان در پرتو نگاره‌ها، دقیق‌ترین اطلاعات در اختیار مرمتگران قرار گیرد. با این اطلاعات مرمتگران می‌توانند مناسب‌ترین روش را برای ترمیم و حفظ و حراست از نقاشی‌ها ارائه کنند. تابلوهای هنری نفیس استفاده شده در این تحقیق متعلق به موزه هنری والنسیا در کشور اسپانیا است. الگوریتم هرم گوسی و هرم لاپلاسی بر پرتو نگاره‌های این تابلوها برای وضوح و بالا بردن کیفیت پرتو نگاره‌ها و تعیین نواحی الگوها و نقاشی‌های نهان اعمال شده است.

۲. روش‌ها

۱,۲. معرفی تابلوها

هفت تابلو از آثار هنری و تاریخی موزه والنسیا در اسپانیا برای این بررسی انتخاب شده که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. شکل ۱-الف تابلوی دفن ساردین است که نقاش آن ناشناخته و تکنیک نقاشی، رنگ روغن است. شکل ۱-ب تابلوی چشم‌انداز است که با رنگ روغن روی بوم، منظره زیبایی پاییزی را نشان می‌دهد. شکل ۱-پ تابلوی مردی با آکاردئون، اثر جنارو لاهوئرتات را نشان می‌دهد. شکل‌های

۱- ت، ث و ج تابلوهای پرتره انسان، دو زن و یک بانو را نشان می‌دهند. شکل ۶- چ تابلوی «هنوز زندگی با گلایی» را که توسط والتین دوربان کشیده شده است، نشان می‌دهد.

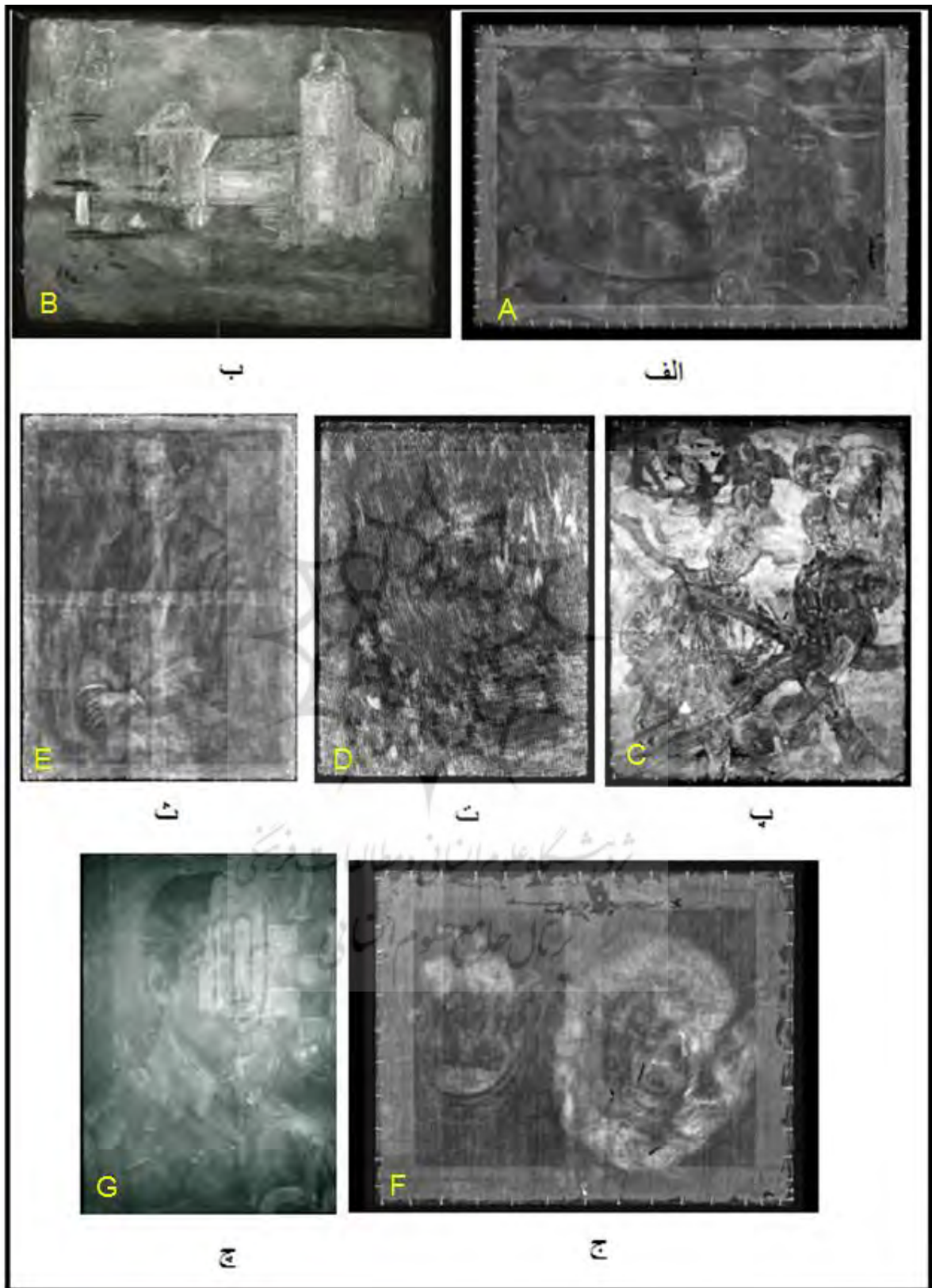


شکل ۱: تصاویر تابلوها الف- دفن ساردین، ب - چشم‌انداز، پ- مردی با آکاردئون، ت- پرتره انسان، ث- دو زن ج- بانو، د- هنوز زندگی با گلایی
 Fig. 1: Painting: A(The burial of the sardine, B) Scenery, C) Man with Accordion, by Genaro Lahuerta, D(Portrait of man, E) Two ladies, F(Lady G) Still Life with Pears by Valentine Durban

۲-۲. پرتونگاری

پرتونگاری با یک دستگاه ترانس پورتیکس[®] 50 انجام شده که دارای تیوب اشعه ایکس با توان ۳kW و اندازه نقطه کانونی ۲/۳ mm با صافی آلومینیومی ۲ mm است. محدوده تغییرات ولتاژ این تیوب بین ۲۰ تا ۱۱۰ کیلوولت است. این دستگاه مولد پرتوایکس، یک سیستم تابش نور مرئی دارد که با پرتوایکس خروجی هم‌راستا شده است و از آن برای مشخص کردن محل بیم روی تابلو استفاده می‌شود. برای پرتونگاری تابلوها از روش پرتونگاری سنتی و پرتونگاری محاسباتی استفاده شده است. در روش سنتی از فیلم اکفا و در روش محاسباتی از صفحات CR فسفری استفاده شده است. صفحات فسفری تصویرساز برای آشکارسازی اشعه ایکس عبوری از جسم استفاده شده است که بعد از پرتوگیری با اسکنر لیزری مخصوص CR 30-X تا ابعاد ۴۰۹۶×۴۰۹۶ پیکسل می‌تواند تصویر

دیجیتال تولید کند. با توجه به اینکه ابعاد تابلوها متفاوت هستند، پارامترهای تصویربرداری مانند فاصله چشمه تا فیلم، جریان و ولتاژ برای ایجاد بهترین پرتو نگاره انتخاب شده‌اند. در جدول ۱ مقادیر انتخابی برای پرتونگاری هر تابلو نوشته شده است.



شکل ۲: پرتو نگاره‌های تصاویر تابلوهای شکل ۱ الف- دفن ساردین، ب - چشم‌انداز، پ- مردی با آکاردئون، ت- پرتره انسان، ث- دو زن، ج- بانو، د- هنوز زندگی با گلای

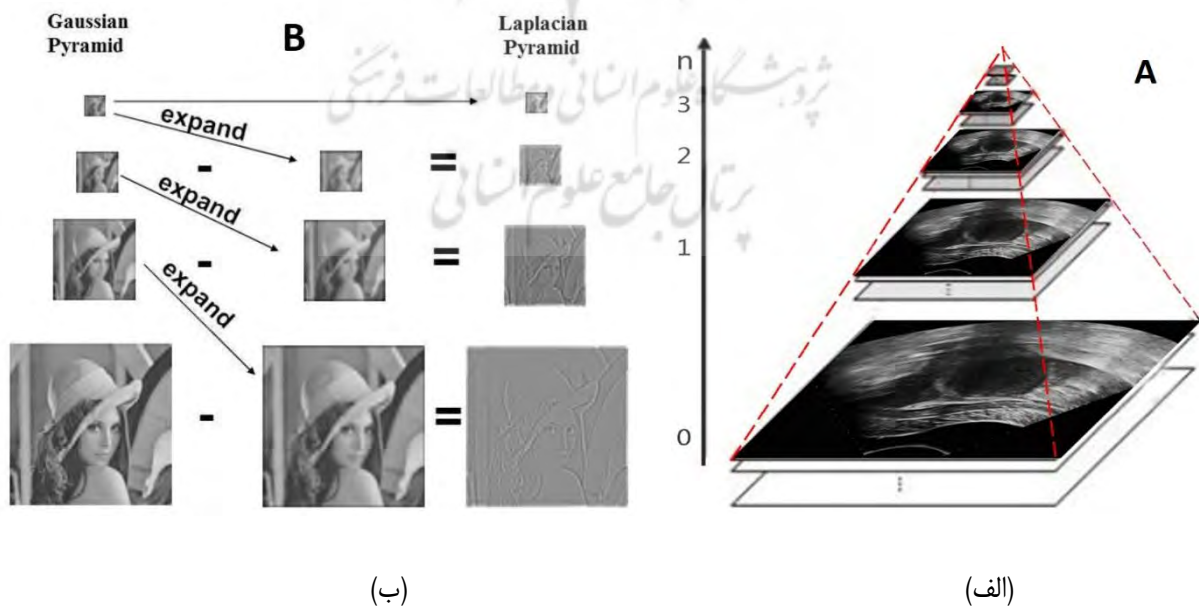
Fig. 2: The radiography of the Paintings in Fig. 1: A) The burial of the sardine, B) Scenery, C) Man with Accordion, by Genaro F) Lady G) Still Life with Pears by Valentine Durban Lahuerta, D) Portrait of man, E) Two ladies,

جدول ۱: مشخصات پرتونگاری تابلوها
Table 1. The parameters of exposure for the painting

Name of painting	Detector type	SFD (cm)	time (Second)	electric current (mA)	voltage (kV)
The burial of the sardine, B-,	CR	300	3	20	51
Scenery	Film	120	1265	20	36
Man with Accordion, by Genaro Lahuerta,	Film	190	600	20	36
Portrait of man,	CR	200	3	20	37
Two ladies,	CR	90	3	20	59
Lady	CR	90	3	20	35
Still Life with Pears by Valentine Durban	Film	196	175	20	32

۳-۲. الگوریتم‌های هرم گوسی و هرم لاپلاسی

یکی از روش‌های شناسایی و استخراج ویژگی‌های یک تصویر، استفاده از رویکرد نمونه‌برداری است که منجر به تغییر ابعاد تصویر می‌شود. در این رویکرد، یک مجموعه از تصاویر مشابه با ابعاد مختلف جمع‌آوری می‌شود که به این مجموعه، هرم تصویر گفته می‌شود. دلیل این نام‌گذاری این است که وقتی تصاویر این مجموعه با یک ترکیب نزولی (از لحاظ ابعاد تصویر) در لایه‌های مختلف مرتب می‌شوند، یک شکل به صورت هرم با قاعده مربعی شکل ظاهر می‌شود. شکل ۱-الف بیانگر یک هرم تصویر است [29]. دو نوع هرم وجود دارد، هرم گوسی و هرم لاپلاسی. در ادامه به طور مختصر این دو نوع هرم و ارتباط بین آن‌ها شرح داده می‌شود.



شکل ۳: الف: یک هرم تصویر [28]، ب: ارتباط بین هرم‌های گوسی و لاپلاسی [29]
Fig. 3: A) An image pyramid [28], B) Relationship between Gaussian and Laplacian Pyramids [29]

فرض کنیم تصویر نوفه $I = g_0$ داده شده باشد. در هرم گوسی از دو عملگر کاهش (reduce) و افزایش (expand) ابعاد تصویر استفاده می‌کنیم که در عملگر کاهش، تصویر فعلی به یک تصویر با نصف اندازه تصویر اصلی تبدیل می‌شود و در عملگر افزایش، تصویر فعلی

به یک تصویر با ابعاد دو برابر اندازه آن تبدیل می‌شود. بنابراین سطح ℓ -ام هرم گوسی به صورت $g_\ell = reduce(g_{\ell-1})$ بیان می‌شود و درایه‌های آن از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$g_\ell(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) g_{\ell-1}(2i + m, 2j - n) \quad (1)$$

که در آن $w = \hat{w} \times \hat{w}^T$ یک پنجره (فیلتر) گوسی 5×5 است. ما در نتایج تجربی این تحقیق قرار می‌دهیم:

$$\hat{w}^T = [0.0625 \ 0.25 \ 0.375 \ 0.25 \ 0.0625]$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هرم گوسی ابتدا فیلتر اعمال و سپس رویکرد نمونه‌کاهی استفاده می‌شود. در نتیجه در زمان افزایش ابعاد، که با رویکرد نمونه‌افزایی انجام می‌پذیرد، پیکسل‌های جدید با وزن دهی گوسی به پیکسل‌های قبلی ساخته می‌شوند. در هرم لاپلاسی، از یک عملگر لاپلاس بر روی هرم گوسی استفاده می‌شود، بدین معنی که لایه‌ها یا سطوح هرم لاپلاسی از محاسبه اختلاف دو سطح هرم گوسی به دست می‌آیند. از آنجاکه دو سطح هرم گوسی دارای ابعاد برابری نیستند، سطح با ابعاد کوچک‌تر را با استفاده از عملگر افزایش به یک تصویر هم‌اندازه با تصویر سطح قبلی تبدیل می‌کنیم و اختلاف آن‌ها را به‌عنوان یک سطح از هرم لاپلاسی در نظر می‌گیریم، شکل ۳-ب را ملاحظه کنید. به‌طور دقیق‌تر اگر $g_{\ell+1}$ و g_ℓ بیانگر دو سطح متوالی از هرم گوسی باشند آنگاه سطح ℓ -ام از هرم لاپلاسی به‌صورت زیر ساخته می‌شود [29]

$$L_\ell = g_\ell - expand(g_{\ell+1}) \quad (2)$$

که در آن درایه‌های $expand(g_{\ell+1})$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$expand(g_{\ell+1}(i, j)) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) g_{\ell+1}\left(\frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2}\right). \quad (3)$$

بنابراین تصویر نوفه‌زدایی شده \hat{g}_0 را می‌توان به‌صورت زیر به دست آورد:

$$\hat{g}_0 = L_0 + expand(g_1). \quad (4)$$

در این تحقیق برای افزایش کنتراست و شناسایی تصاویر پنهان، از تکنیک حذف زمینه تصویر استفاده شد؛ بدین صورت که پس از به دست آوردن یک تصویر مات در لایه ℓ -ام و تغییر ابعاد آن به اندازه ابعاد تصویر اصلی I ، این تصویر مات، از تصویر اصلی کم می‌شود تا تصویر با وضوح بیشتر $I_{denoised}$ به دست آید. نحوه پیاده‌سازی هرم‌های گوسی و لاپلاسی به ترتیب در الگوریتم‌های ۱ و ۲ خلاصه شده است.

الگوریتم ۱: الگوریتم هرم گوسی

۱- ورودی‌ها:

- تصویر نویزی $I = g_0$
- تعداد لایه‌ها S
- فیلتر w

۲- برای $\ell = 0, 1, \dots, S$

سطح ℓ -ام هرم گوسی (g_ℓ) را با استفاده از (۱) محاسبه کن.

۳- با استفاده از عملگر افزایش ابعاد (۳)، قرار دهید

$$\hat{g}_0 = expand(g_S)$$

۴- قرار دهید

$$I_{denoised} = I - \hat{g}_0.$$

الگوریتم ۲: الگوریتم هرم لاپلاسی

۱- ورودی‌ها:

- تصویر نویزی $I = g_0$

• تعداد لایه‌ها S

• فیلتر w

۲- برای $\ell = 0, 1, \dots, S$

• سطح ℓ -ام هرم گوسی (g_ℓ) را با استفاده از (۱) محاسبه کن.

• سطح ℓ -ام هرم لاپلاسی (L_ℓ) را با استفاده از (۲) و (۳) محاسبه کن.

۳- با استفاده از عملگر افزایش ابعاد (۳)، قرار دهید

$$\hat{L}_0 = \text{expand}(L_S)$$

۴- قرار دهید

$$I_{\text{denoised}} = I - \hat{L}_0$$

برای ارزیابی تصاویر ایجادشده، از نسبت بیشترین مقدار سیگنال به نوفه^۹ (PSNR) و خطای میانگین مربعی^{۱۰} (MSE) استفاده شده است. فرض کنیم تصویر اصلی I و تصویر بعد از حذف نوفه I_{denoised} که هر دو دارای ابعاد $M \times N$ هستند، داده شده باشند. PSNR که بیانگر میزان انرژی سیگنال اصلی در برابر انرژی نوفه موجود در سیگنال است به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{PSNR} = \frac{1}{MN} \log \left(\frac{MN}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i,j) - I_{\text{denoised}}(i,j))^2} \right) \quad (5)$$

مقدار بیشتر PSNR نشان‌دهنده نزدیک‌تر بودن تصویر به تصویر اصلی است. به عبارت دیگر هرچه این معیار دارای عدد بزرگ‌تری باشد نشان‌دهنده کمتر بودن نوفه موجود در سیگنال دوبعدی و یا تصویر است [29]. MSE که کاربرد وسیعی در ارزیابی انواع سیگنال یک‌بعدی و دوبعدی (تصویر) دارد به این ترتیب تعریف می‌شود:

$$\text{MSE} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i,j) - I_{\text{denoised}}(i,j))^2} \quad (6)$$

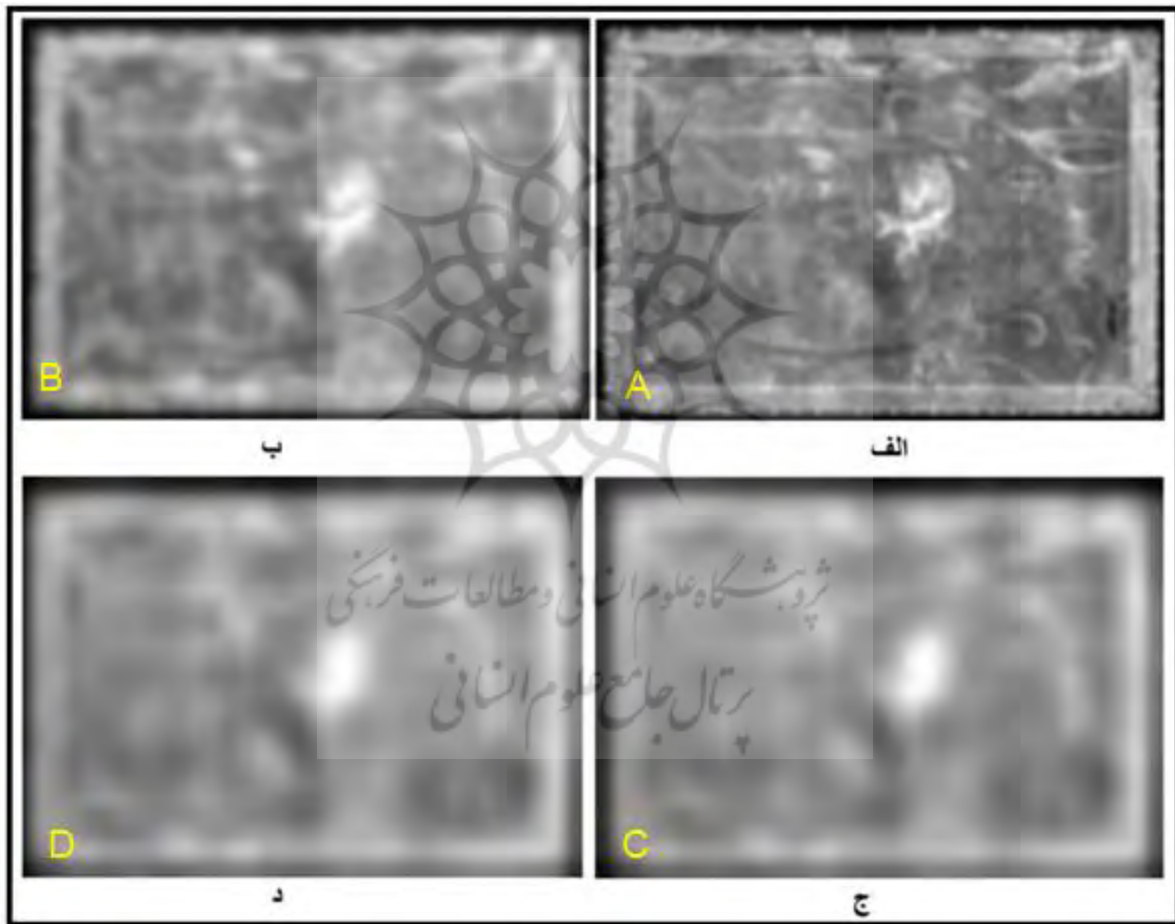
مقدار کمتر MSE نشان‌دهنده شباهت تصویر به تصویر اصلی است.

هر دو الگوریتم هرم گوسی و هرم لاپلاسی با استفاده از نرم‌افزار متلب^{۱۱} ۲۰۱۶ پیاده‌سازی شده‌اند. برای اجرای برنامه‌ها از یک رایانه با پردازنده Intel Core i7-7500U 3.6 GHz و حافظه 8 GB استفاده شده است.

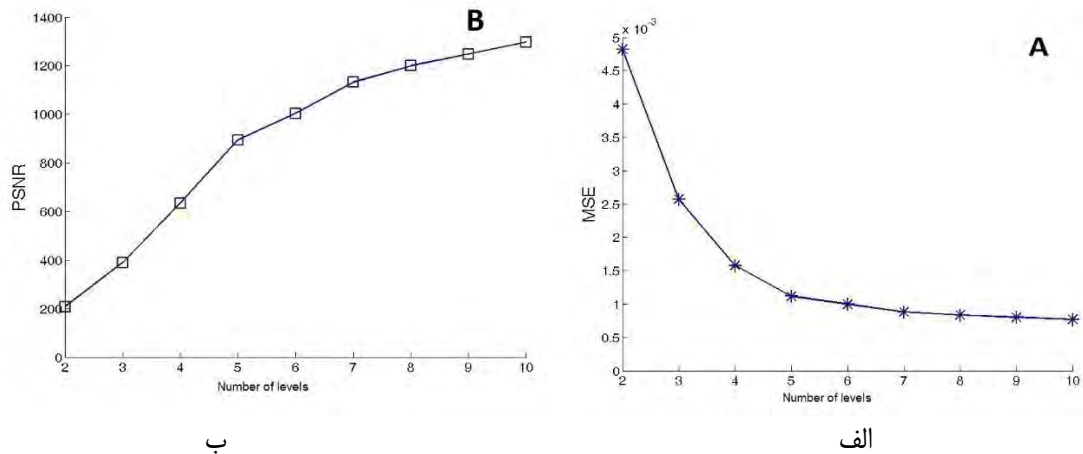
۴. نتایج و یافته‌ها

در این تحقیق برای شناسایی تصاویر پنهان تابلوهای نفیس از پرتونگاری استفاده شده است. تابلوها مطابق بخش ۲-۱، پرتونگاری شده‌اند. در شکل ۲ پرتو نگاره‌های تابلوهای شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تصاویر پرتو نگاره‌ها شباهتی به طرح تابلوهای شکل ۱ ندارند. این نتایج نشان می‌دهند که به علت مسائل مختلف مانند تغییرات اجتماعی و سیاسی جامعه، کمبود امکانات و مواد، اثر دیگری روی تابلوها کشیده شده است. در بعضی از موارد هم شاید عواملی مانند دل‌زدگی طرح در این امر تأثیر داشته‌اند. از روی تصاویر پرتو نگاره می‌توان علاوه بر شناسایی آسیب‌های لایه‌های زیرین به اطلاعاتی در مورد چگونگی کشیده شدن طرح و سابقه تاریخی آن دست پیدا کرد. در روی پرتو نگاره‌های شکل ۲ علاوه بر طرح کلی نقاشی قبلی، محل‌های آسیب به بوم و خراشیدگی نیز دیده می‌شوند. برای استخراج اطلاعات بیشتر و بالا بردن کنتراست تصاویر از دو روش تجزیه هرم گوسی و هرم لاپلاسی استفاده شده است. در این دو روش مطابق الگوریتم توضیح داده شده در بخش ۲-۲ پرتو نگاره‌ها در چند سطح نمونه‌برداری شده‌اند که هرچه تعداد نمونه‌برداری‌ها بیشتر باشد تصاویر خروجی مات‌تر می‌شود. یعنی در هر دو الگوریتم هرم گوسی و هرم لاپلاسی اساس کار بر نمونه‌برداری تصویر با پنجره‌های مختلف است که به‌طور متوالی در چند سطح انجام و یک پنجره در هر مرحله در تصویر درهم‌پیچیده می‌شود. در شکل ۴-الف و ج تصاویر حاصل از اجرای الگوریتم هرم گوسی برای پنج و شش سطح و در شکل ۴-ب و د تصاویر برای الگوریتم هرم لاپلاسی برای شکل ۲-الف نشان داده شده است. برای بررسی اثر تعداد سطوح در نمونه‌برداری از تصویر از پارامترهای PSNR و MSE استفاده شد. در شکل ۵ نمودار تغییرات PSNR و MSE برای سطوح مختلف نمونه‌برداری برای روش

هرم لاپلاسی از تصویر شکل ۲-ب نشان داده شده است. برای روش هرم گوسی نیز تغییرات برای این تصویر به همین شکل بوده است. نتایج، نشان می‌دهند که تغییرات PSNR و MSE هر دو صعودی هستند ولی از حدود ۵ سطح به بالا تغییرات کمتر می‌شوند. در الگوریتم هرم گوسی و هرم لاپلاسی از یک پنجره با مقدار مشخص استفاده می‌شود که به‌طور متوالی در چند سطح با تصویر کانولوشن می‌شود و تصاویر کوچک‌تری را به وجود می‌آورد. این تصاویر به علت ترکیب پیکسل‌های مجاور، مات شده‌اند که می‌توان با کم کردن آن‌ها از تصویر پرتو نگاره اصلی تصاویری با وضوح بهتر به دست آورد. بررسی الگوریتم‌های گوسین و لاپلاسی هر می برای تأثیر تعداد سطوح، نشان می‌دهد که زیاد شدن تعداد سطوح نمونه‌برداری سبب ترکیب پیکسل‌ها و کوچک‌تر شدن تصاویر می‌شود که اگر تصاویر، در اندازه تصویر اولیه دیده شوند مات خواهند بود. در شکل ۳ تصاویر خروجی الگوریتم برای شکل ۲-الف در پنج سطح با دو الگوریتم هرم گوسی و هرم لاپلاسی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که درهم‌آمیختگی پیکسل‌ها در الگوریتم هرم لاپلاسی بیشتر است و تصویر مات‌تر شده است. در شکل ۶ تصویر حاصل از کم کردن پرتو نگاره شکل ۲-الف از شکل ۴ نشان داده شده است. تصاویر حاصل تیزتر از پرتو نگاره اصلی هستند و لبه‌ها در آن‌ها با وضوح بیشتری نشان داده شده است. مسیر کشیده شدن قلم‌مو، نواحی کوبیده شدن میخ در بوم، آسیب در نواحی بوم و رنگ‌ها در تصاویر شکل ۶ واضح‌تر از شکل ۲-الف دیده می‌شوند. صلیب و طرح تزئینی گل و ساقه نیز بهتر قابل تشخیص هستند. برای بهتر دیده شدن نواحی، لازم است آن‌ها را با بزرگنمایی بالا ببینید.

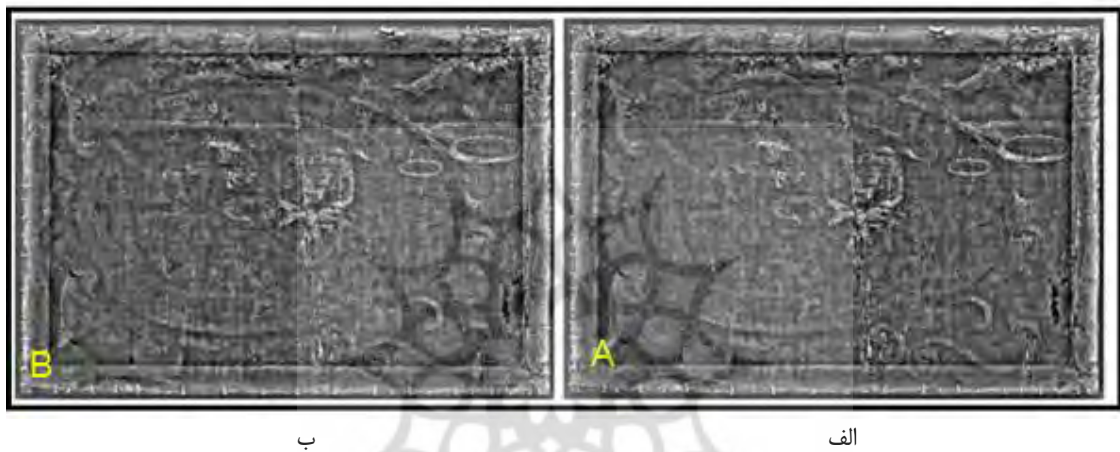


شکل ۴: تصویر خروجی (برای شکل ۲-الف): الف و ج- روش هرم گوسی ب و د- روش هرم لاپلاسی برای نمونه‌برداری در سطوح ۵ و ۶
 Fig. 4: Output image (for Fig.2-A): A and C) Gaussian pyramid method, B and D) Laplace pyramid method for sampling at levels 5 and 6



شکل ۵. نمودار تغییرات الف- MSE و ب- PSNR برحسب سطح برای شکل ۲- الف برای روش هرم لاپلاسی

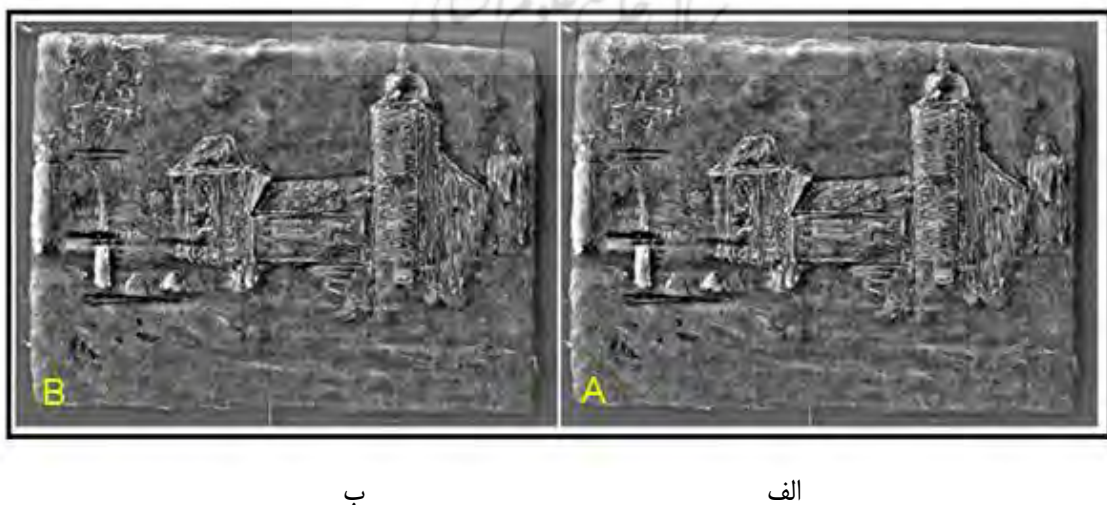
Fig. 5. The variation of A) MSE and B) PSNR with different level for Fig. 2-A for the Laplacian pyramid method.



شکل ۶: تصویر ساخته شده از کم کردن (شکل ۲- الف) از تصاویر شکل ۳ الف - روش هرم گوسی ب- روش هرم لاپلاسی

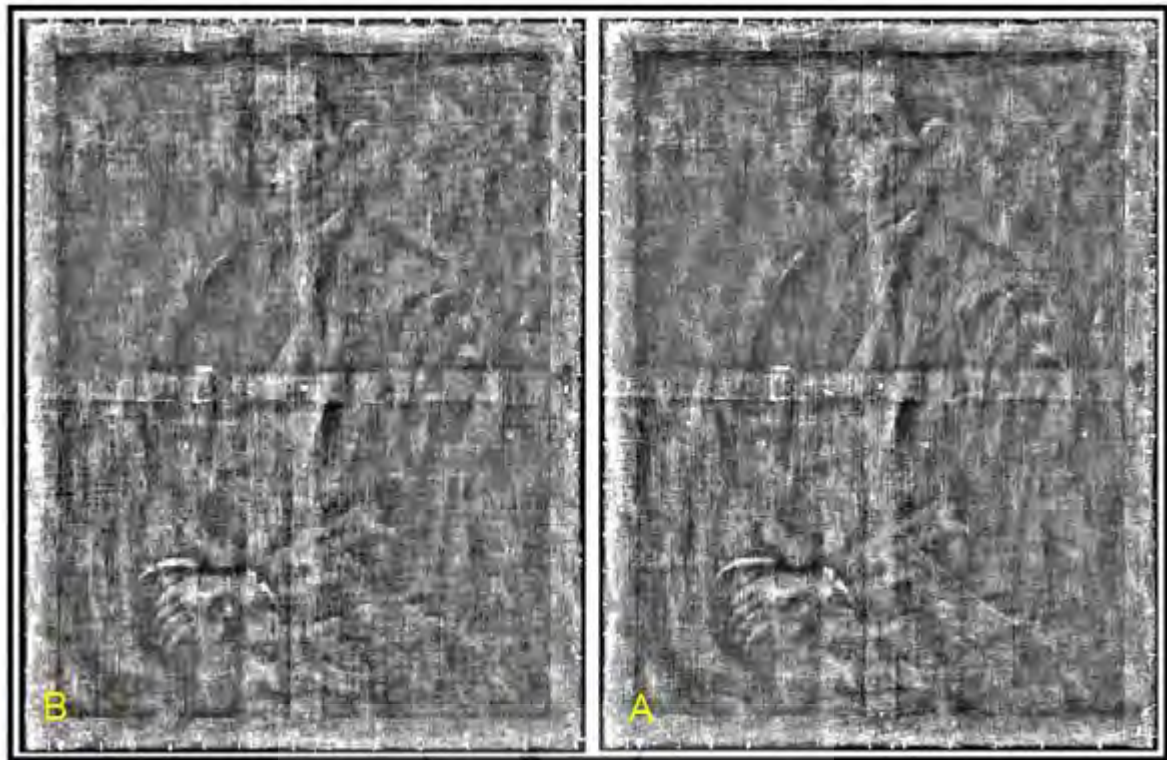
Fig. 6: The reconstructed image by subtracting (Fig. 2- A) from the images Fig. 3 A) Gaussian pyramid method, B) Laplacian pyramid method.

نمونه‌های تصاویر بازسازی شده در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند. در شکل ۷ تصویر بازسازی شده پرتو نگاره‌های شکل ۲- ب برای پنج سطح نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نقوش واضح‌تر شدند و جزئیات بهتر دیده می‌شوند. در شکل ۸ تصویر بازسازی شده پرتو نگاره شکل ۲- ث نشان داده شده است.



شکل ۷: تصویر بازسازی شده پرتو نگاره‌های (شکل ۲- ب) برای پنج سطح الف - روش هرم گوسی ب- روش هرم لاپلاسی

Fig. 7: The reconstructed image of radiographs (Fig. 2-b) for five levels, A) The Gaussian pyramid method, B) the Laplacian pyramid method



ب الف

شکل ۸: تصویر بازسازی شده پرتو نگاره‌های (شکل ۲-ث) برای پنج سطح الف - روش هرم گوسی ب- هرم لاپلاسی

Fig. 8: The reconstructed image of radiographs (Fig. 2-c) for the five levels A) Gaussian pyramid method, B) Laplace pyramid

برای ارزیابی نتایج حاصل، تصاویر بازسازی شده به رویت سه متخصص پرتونگاری و یک متخصص مرمت و بازسازی آثار باستانی رسید و از آن‌ها خواسته شد که امتیازاتی بین یک تا پنج، به تصاویر پرتو نگاره اصلی و تصاویر بازسازی شده با دو روش، اختصاص دهند. نتایج این ارزیابی برای هفت تابلوی مذکور برحسب درصد در جدول ۲ ثبت شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که تابلوهای مردی با آکاردئون و پرترة انسان بعد از پردازش بهبود زیادی نیافته‌اند. علت این امر، پردازش تصاویر بعد از اسکن شدن آن‌ها با اسکنر فیلم بوده است. این دو تصویر به روش پرتونگاری سنتی تهیه شده‌اند ولی برای سایر تابلوها تصاویر بهبود یافته‌اند و جزئیات آن‌ها از نظر داوران بهتر دیده می‌شوند.

جدول ۲: درصد امتیازات متخصصان به پرتو نگاره‌های اصلی و بازسازی شده با دو روش هرم گوسی و هرم لاپلاسی

Table 2: Percentage of experts' scores on original and reconstructed radiographs by Gaussian pyramid and Laplace pyramid methods

Name of painting	Original radiograph	Reconstructed by Gaussian Pyramid method	Reconstructed by Laplacian Pyramid method
The burial of the sardine, B-,	68%	92%	91%
Scenery	72%	93%	94%
Man with Accordion, by Genaro Lahuerta,	92%	92%	92%
Portrait of man,	93%	92%	91%
Two ladies,	81%	96%	96%
Lady	81%	96%	95%
Still Life with Pears by Valentine Durban	79%	91%	91%

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، از پرتونگاری برای بررسی نقش‌های پنهان تابلوهای اثری استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که استفاده از این روش در آشکارسازی نقوش، بدون ایجاد اثرات تخریبی روی تابلو کارایی خوبی دارد. همچنین برای بهتر دیده شدن نقوش از روش‌های پردازشی هرم گوسی و هرم لاپلاسی استفاده شد که بر اساس ترکیب پنجره‌ای پیکسل‌ها کار می‌کنند. با این دو روش قسمت مات‌کننده تصویر استخراج شده و با کم کردن از تصویر اصلی، تصویری با جزئیات بهتر به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهند که هر دو روش پردازشی کارایی یکسانی دارند و از نظر متخصصان هر دو به یک اندازه در بهبود تصویر تأثیر دارند.

پی‌نوشت‌ها

1. Multi Spectral Imaging
2. Scanning Electron Microscope Equipped with X-ray energy Diffraction Spectroscopic analysis
3. Non-destructive testing or Non-destructive evaluation
4. Computed Radiography
5. Phosphor plate
6. Noise
7. Down-sampling
8. Up-sampling
9. Peak Signal to Noise Ratio
10. Mean Square Error
11. MATLAB

References

- [1] Hadadi M, Mohammadi M, Study the repair documents of Golestan, Saheb-gheranieh and Farah Abad Palace Tableaus, Ganjine-ye Asnad, Spring 2013; 23(1):86-99. [in Persian]
[حدادی محمد، محمدی آچالویی محسن، بررسی اسناد تعمیرات تابلوهای کاخ گلستان، صاحبقرانیه و فرح آباد، فصلنامه گنجینه اسناد، سال بیست و سوم، دفتر اول، بهار ۱۳۹۲.]
- [2] Maev RG, Gavrilov D, Maeva A, Vodyanoy I. Modern non-destructive physical methods for paintings testing and evaluation. In Proceedings of the 9th International Conference on NDT of Art 2008 May 25 (pp. 25-30).
- [3] Gavrilov D, Maev RG, Almond DP. A review of imaging methods in analysis of works of art: Thermographic imaging method in art analysis. Canadian Journal of Physics. 2014; 92(4):341-64.
- [4] Ghanouni M. Report on the maintenance and restoration of the painting of the camp by the river by Kamal Ol-Molk. Library, Museum and Document Center Islamic Consultative Assembly, 2019.
[قانونی محسن، گزارش نگاهداشت و مرمت تابلو نقاشی منظره اردوگاه در کنار رودخانه اثر کمال الملک، کارگاه مرمت موزه مجلس، کتابخانه موزه و مرکز اسناد مجلس شورای اسلامی؛ ۱۳۹۸.]
- [5] Afzali N, Vatan-Parast R. Pathology and erosion analysis of oil paintings on Kamal-ol-Molk canvas in Golestan Palace. Athar Journal. Spring 2017, 38(76): 3-76.
[افزلی نرگس، وطن پرست رسول، آسیب‌نگاری، آسیب‌شناسی و تحلیل فرسودگی‌های نقاشی‌های رنگ‌روغن روی بوم کمال الملک در کاخ گلستان، اثر فصلنامه علمی فنی هنری؛ بهار ۱۳۹۶.]
- [6] Baronti S, Casini A, Lotti F, Porcinai S. Multispectral imaging system for the mapping of pigments in works of art by use of principal-component analysis. Applied optics. 1998 Mar 10; 37(8):1299-309.
- [7] Casini A, Lotti F, Picollo M, Stefani L, Buzzegoli E. Image spectroscopy mapping technique for noninvasive analysis of paintings. Studies in conservation. 1999 Jan 1; 44(1):39-48.
- [8] Balas C, Papadakis V, Papadakis N, Papadakis A, Vazgiouraki E, Themelis G. A novel hyper-spectral imaging apparatus for the non-destructive analysis of objects of artistic and historic value. Journal of Cultural Heritage. 2003 Jan 1; 4: 330-7.
- [9] Fischer C, Kakoulli I. Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications. Studies in Conservation. 2006 Jun 1; 51(sup1):3-16.
- [10] Vilaseca M, Pujol J, Arjona M, de Lasarte M. Multispectral system for reflectance reconstruction in the near-infrared region. Applied optics. 2006 Jun 20; 45(18):4241-53.
- [11] Cristoforetti G, Legnaioli S, Palleschi V, Salvetti A, Tognoni E. Optical chemical sensors for cultural heritage. In Optical Chemical Sensors 2006 (pp. 515-526). Springer, Dordrecht.

- [12] Bonifazzi C, Carcagnì P, Fontana R, Greco M, Mastroianni M, Materazzi M, Pampaloni E, Pezzati L, Bencini D. A scanning device for VIS–NIR multispectral imaging of paintings. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2008 May 1; 10 (6):064011.
- [13] Arbabi F. Restoration of several pins excavated from Salmabad village in Khosf (South Khorasan). *Bi-annual Journal of Restoration Science and Culture Heritage*; Spring 2018, 5(9):1-11. [in Persian]
[آربابی فائزه، مرمت چند نمونه سنجاق مکشوفه از سلم آبادِ خوسف (خراسان جنوبی). *دوفصلنامه تخصصی دانش مرمت و میراث فرهنگی*; ۱۳۹۷.]
- [14] Taft WS, Mayer JW. *The science of paintings*. Measurement Science and Technology, 2001.
- [15] Berezchnoy IE, Postma EO, van den Herik HJ. Authentic: computerized brushstroke analysis. In 2005 IEEE International Conference on Multimedia and Expo 2005 Jul 6 (pp. 1586-1588).
- [16] B. Raj, "Practical N.D.T.", Alpha Science, 3th edition, 2007.
- [17] Cortz L. *Non-Destructive Testing*. ASM International; 1995.
- [18] Toyserkani H. *Nondestructive evaluations*, Jahad Daneshgahi, Isfahan, 2015. [in Persian]
[تویسرکانی ح، بررسی‌های غیرمخرب. اصفهان: جهاد دانشگاهی؛ ۱۳۹۴.]
- [19] Bridgman CF. The amazing patent on the radiography of paintings. *Studies in Conservation*. 1964 Nov 1; 9(4):135-9.
- [20] Nacereddine N, Drai R, Benchaala A. Weld defect extraction and identification in radiograms based neural networks. In Proc. IASTED International Conference on Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications, Crete, Greece 2002 Jun 25 (pp. 38-43).
- [21] Movafeghi A, Kargarnovin MH, Soltanian-Zadeh H, Taheri M, Ghasemi F, Rokrok B, Edalati K, Rastkhah N. Flaw detection improvement of digitised radiographs by morphological transformations. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2005 Oct 1; 47(10):625-30.
- [22] Felisberto MK, Lopes HS, Centeno TM, De Arruda LV. An object detection and recognition system for weld bead extraction from digital radiographs. *Computer Vision and Image Understanding*. 2006 Jun 1; 102(3):238-49.
- [23] Daubechies I, Defrise M, De Mol C. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint. *Communications on Pure and Applied Mathematics: A Journal Issued by the Courant Institute of Mathematical Sciences*. 2004 Nov; 57(11):1413-57.
- [24] Carrasco MA, Mery D. Segmentation of welding defects using a robust algorithm. *Materials Evaluation*. 2004; 62(11):1142-7.
- [25] Carvalho AA, Suita RC, Silva RR, Rebello JM. Evaluation of the relevant features of welding defects in radiographic inspection. *Materials Research*. 2003 Jun; 6(3):427-32.
- [26] Lampert CH, Blaschko MB, Hofmann T. Efficient subwindow search: A branch and bound framework for object localization. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2009 Jul 17; 31(12):2129-42.
- [27] Mery D, Riffo V, Zuccar I, Pieringer C. Automated X-ray object recognition using an efficient search algorithm in multiple views. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops 2013* (pp. 368-374).
- [28] Liao X, Yuan Z, Zheng Q, Yin Q, Zhang D, Zhao J. Multi-scale and shape constrained localized region-based active contour segmentation of uterine fibroid ultrasound images in HIFU therapy. *PloS one*. 2014 Jul 25; 9(7):e103334.
- [29] Leavline EJ, Sutha S. Design of FIR Filters for Fast Multiscale Directional Filter Banks. *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*. 2014; 7(5):221-34.