

شناسایی آسیب‌های تابلوهای نفیس هنری با استفاده از پرتونگاری صنعتی

سیده مریم قیاسی^۱، عفت یاحقی^{۱*}، امیر موافقی^۲، خوزه آنتونی مادرید گارسیا^۳

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، صندوق پستی: ۹۶۸۱۸-۳۴۱۴۸، قزوین- ایران
۲. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران- ایران
۳. مؤسسه دانشگاهی مرمت و بازسازی، دانشگاه پلی‌تکنیک والنسیا، والنسیا- اسپانیا
*Email: yahaghi@sci.ikiu.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۲/۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۵/۱۲

چکیده

آسیب‌های عمده در تابلوهای هنری شامل پارگی، خراشیدگی، تاب برداشتن و... است که به دلیل تغییرات درجه حرارت، قرارگیری در محل مرطوب و ساییدگی به وجود می‌آیند. تشخیص محل دقیق آسیب از طریق پرتونگاری صنعتی، که از آزمون‌های غیرمخرب می‌باشد، امکان‌پذیر است. تصاویر تهیه شده در آزمون پرتونگاری، به دلیل پراکندگی ذاتی پرتو ایکس، عوامل هندسی مانند اندازه چشمه پرتو، ضخامت قطعه و فاصله چشمه تا فیلم (SFD) ممکن است وضوح پایینی داشته باشند. تشخیص دقیق شکل و اندازه آسیب‌ها در برخی موارد با دشواری انجام می‌شود. روش‌های پردازش تصویر به‌عنوان ابزار کمکی برای افزایش کیفیت تصویر و تفسیر سهل‌تر، می‌توانند به کار گرفته شوند. در این پژوهش، برای شناسایی بهتر محل آسیب‌های تابلوهای هنری از صافی گابور که مبتنی بر تجزیه اطلاعات تصویر با کمک موجک گابور با سطح آستانه خودکار است، برای کاهش عدم وضوح و افزایش کنتراست استفاده شده است. نتایج نشان داد تصاویر بازسازی شده حاصل از این الگوریتم دارای کنتراست بهتری بوده و آسیب‌ها و نشانه‌ها واضح‌تر از تصویر اولیه می‌باشند. این روش می‌تواند کمک شایانی به کارشناسان مرمت برای مرمت تابلوهای هنری به‌شمار رود.

کلیدواژه‌ها: پرتونگاری صنعتی، شناسایی آسیب، تابلوهای هنری، صافی گابور، پردازش تصویر

Defects identifying of valuable artistic paintings by industrial radiography

S. M. Ghyasi¹, E. Yahaghi^{1*}, A. Movafeghi², J. A. Madrid Garcia³

1. Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Imam Khomeini International University, P.O.BOX: 34148-96818, Qazvin, Iran
2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran- Iran
3. University Institute for the Restoration of the Patrimony, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain

Research Article

Received 21.4.2020, Accepted 2.8.2020

Abstract

The significant defects in the artistic paints are rupture, scratches, and twisting, which are caused by variations in temperature, exposure to moisture, and erosion. Industrial radiography can detect the defect locations, which is a non-destructive test, can be carried out. In radiography testing (RT), the produced radiographs may suffer from some degree of blurriness and low contrast due to the inherent scattering of X-ray, geometric factors such as the size of the beam source, the thickness of the part, and the source to film distance (SFD). The diagnosis of the shapes and sizes of the damages is difficult in some cases. Image processing methods can be used as additional tools for enhancing image quality and more accessible interpretation. In the present study, a Gabor filter technique, based on wavelet analysis with an automatic threshold level, was used to reduce the fogginess of radiographs. The reconstructed images of the proposed algorithm have better contrast, and the defects and signs are more precise than the original image. This algorithm can help the restoration experts for repairing the artistic paintings.

Keywords: Industrial radiography, Defect Identifying, Artistic painting, Gabor filtering, Image processing.



۱. مقدمه

در بعضی مواقع این صافی‌ها کارایی لازم برای استخراج اطلاعات را ندارند و لازم است صافی‌هایی با کارایی متفاوت و بیش‌تر برای آن‌ها استفاده شود تا اطلاعات مورد نظر از آن‌ها استخراج شود.

استفاده از آزمون غیرمخرب در شناسایی عیوب موجود در ساختار یک اثر بسیار اهمیت دارد. آزمون‌های غیرمخرب از روش‌های فیزیکی برای شناسایی عیوب در ساختار آثار، اجزا و قطعات استفاده می‌کنند، بدون اینکه به کارایی آن‌ها آسیب بزنند.

اساس آزمون پرتونگاری عبور پرتو ایکس یا پرتو گاما از جسم و ثبت تصویر بر روی فیلم و یا آشکارساز است. پرتو عبوری از ماده تضعیف شده و ثبت می‌شود. مقدار تضعیف به جنس، ضخامت ماده و انرژی پرتو بستگی دارد. در پرتونگاری سنتی از فیلم به‌عنوان آشکارساز استفاده می‌شود، در پرتونگاری محاسباتی^۴ (CR) از صفحات فسفری^۵ و در پرتونگاری دیجیتال^۶ (DR) از آشکارسازهای نیمه‌هادی به‌عنوان آشکارساز استفاده می‌شوند. از آن‌جا که پرتوهای ایکس و گاما قدرت نفوذ بالایی دارند می‌توانند به درون مواد، حتی موادی که نور از آن‌ها نمی‌گذرد، نیز نفوذ کنند [۵-۷]. پرتو ایکس هنگام عبور از نمونه مورد آزمایش برهم‌کنش‌های متفاوتی دارد که به جنس ماده و انرژی پرتو بستگی دارد.

تابلوهای هنری دارای ضخامت کم می‌باشند و این کم بودن ضخامت، مشکل اساسی پرتونگاری این تابلوها است. معمولاً از پرتوهایی با انرژی بین ۲۰ تا ۶۰ keV استفاده می‌شود ولی انتخاب انرژی به ابعاد تابلو و فاصله تابلو از چشمه نیز بستگی دارد. در این محدوده انرژی پرتو ایکس، برهم‌کنش‌های غالب پرتو با نمونه مورد آزمایش، اثر فوتوالکتریک و پدیده کامپتون هستند. به‌علت پراکندگی ذاتی در پدیده کامپتون پرتونگاره‌ها معمولاً عدم‌وضوح دارند.

با توجه به دیجیتال بودن تصاویر، برای بهبود کیفیت تصویر و از بین بردن عدم‌وضوح بهترین و مقرون به‌صرفه‌ترین روش استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر است. هرچند که با تجهیزات پیشرفته‌تر نیز امکان بهبود کیفیت تصویر وجود دارد ولی این کار مستلزم هزینه بسیار زیاد است [۶-۸]. برای از بین بردن عدم‌وضوح و نویز تصاویر، روش‌های مختلف پردازش تصویر شامل افزایش کنتراست و حذف مات‌شدگی می‌تواند به کار گرفته شود که هدف از این کار بالا بردن وضوح تصاویر با حفظ جزئیات آن‌ها می‌باشد. ویولت یا موجک یک روش مؤثر برای حذف نویز است و معمولاً فرض می‌شود که ضرایب ویولت تصویر دارای توزیع مستقل هستند و باعث کاهش حجم محاسبات می‌شوند اما در عمل این توزیع مستقل نیست و کیفیت نویززدایی روش‌های مبنی بر ویولت مناسب نیست [۹]. یکی از روش‌های دیگر بهبود کیفیت تصویر که در حوزه فرکانس عمل کرده و نسبت به صافی‌های مختلف کارایی مناسبی دارد، صافی گابور است. این الگوریتم با داشتن صافی‌های اندازه و جهتی می‌تواند بر اساس سطح آستانه تعیین شده، کیفیت تصاویر را به‌صورت دستی بهبود

نقاشی‌های هنری از جمله مهم‌ترین آثار تاریخی برجای مانده از تاریخ، فرهنگ و هنر هر ملتی هستند و به‌عنوان جزئی از هویت اجتماعی هر قوم و کشوری تلقی می‌شوند. نمونه‌های زیادی از این آثار در موزه‌های مختلف دنیا وجود دارند که می‌توان از روی آن‌ها اطلاعات مهمی در زمینه‌های آداب و رسوم و فرهنگ جامعه به‌دست آورد [۱]. خطرات زیادی آثار هنری را تهدید می‌کنند و این آثار به‌دلایل گوناگون در معرض تخریب بوده و هستند. شناخت مواد تشکیل‌دهنده آثار و نیز شناخت عوامل مخرب به حفاظت و مرمت آثار هنری کمک زیادی می‌کند. از دلایل اصلی که آثار هنری را تهدید می‌کنند می‌توان به عوامل مکانیکی، عوامل بیولوژیکی، عوامل شیمیایی و بلایای طبیعی اشاره کرد [۲]. برخی از عوامل تخریب آثار هنری عبارتند از شوره‌های سطح نقاشی، پارگی، تاب برداشتن، سیاه شدن رنگ‌های سربی و خراشیدگی که به‌دلیل قرارگرفتن در محل مرطوب، تغییرات درجه حرارت، نور و روشنایی و ساییدگی ایجاد می‌گردند. برای از بین بردن آسیب‌های موجود در تابلوهای هنری از روش‌های مختلفی مانند شستشوی خیس، استحکام بخشی پارگی‌ها، پودر پاک‌کن و... استفاده می‌شود. در این روش‌ها از مواد شیمیایی، که عمدتاً باعث از بین رفتن آثار می‌گردند، استفاده می‌شود. از روش اکسیژن اتمی^۱ نیز برای شناسایی آسیب‌ها استفاده می‌شود. استفاده از اکسیژن اتمی به‌منظور پاکسازی نقاشی روشی مطلوب است، چون فرایند بدون تماس مکانیکی در فاز گاز انجام می‌گیرد و واکنش محدود به سطح مورد نظر است که خطر آسیب رساندن به رنگ یا کرباس را کاهش می‌دهد. پاکسازی در یک محفظه خلأ بزرگ انجام می‌شود که ظرفیت نگهداری نقاشی روی چارچوب در ابعاد $21 \times 15 \text{ m}$ را دارد. این روش نیز معایبی دارد و قرار دادن نقاشی در معرض اکسیژن اتمی در مدت طولانی باعث از بین رفتن مواد در نقاشی می‌گردد و رنگدانه‌های آلی دچار اکسیداسیون شده و تخریب می‌شوند [۲]. برای شناسایی و بررسی تغییرات مواد و رنگدانه‌های به‌کار رفته در آثار هنری از روش‌های گوناگونی مانند میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به پاشندگی پرتوایکس (SEM-EDS)^۲ برای لایه‌نگاری اثر و میکروسکوپ پلاریزه با نور قطبی (PLM)^۳ استفاده می‌شود. این روش‌ها نیز معایب مختلفی دارند؛ برای مثال علاوه بر لزوم نمونه‌برداری از تابلو که یک عامل تخریب هر چند کوچک است، استفاده از این روش‌های آنالیز محدود به قسمتی از تابلو خواهد بود و نمی‌توان به‌طور هم‌زمان تمام قسمت‌های تابلو را اسکن و بررسی کرد [۴-۵].

استفاده از پردازش تصویر در پرتونگاره‌های اشیاء قدیمی قدمتی در حدود سی سال دارد [۱]، ولی در مورد تابلوهای هنری پیشینه فعالی دیده نمی‌شود. معمولاً از صافی‌های معمول مانند متوسط‌گیر، گوسین و یا تعدیل هیستوگرام که روی نرم‌افزار سیستم نصب است [۴]، استفاده می‌شود. ولی به‌علت اینکه سیستم‌های پرتونگاری برای پزشکی و یا صنعت طراحی شده‌اند،

1. Atomic Oxygen
2. Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersion Microanalysis
3. Polarized Light Microscopy

4. Computed Radiography

5. Phosphor plate

6. Digital Radiography





شکل ۱. چیدمان پرتونگاری.

جدول ۱. مشخصات تابلوهای نفیس

نام اثر	نوع نقاشی	ابعاد (cm) طول - عرض
مرگ مسیح	رنگ روغن روی بوم	۱۰۳-۸۷
معراج	رنگ روغن روی بوم	۹۱-۷۸
توبه	رنگ روغن روی بوم	۱۴۳-۱۰۷
اعتدال (اثر روزا مارتینز آرترو)	رنگ آکرلیک روی بوم	۲۰۰-۲۰۰

در این پژوهش، چهار تابلوی نفیس هنری که متعلق به دوران مختلف تاریخی بوده‌اند، پرتونگاری شده است. نمونه‌هایی از تابلوهایی پرتونگاری شده در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. این تابلوهای نفیس به موزه والنسیای اسپانیا تعلق دارند و هدف از پرتونگاری آن‌ها، به‌دست آوردن اطلاعات مربوط به آسیب‌های فیزیکی و شیمیایی است که با چشم دیده نمی‌شوند. هم‌چنین مشخصاتی از تاریخچه نقاشی و اطلاعات دیگر نیز با این روش قابل حصول است. مشخصات پرتونگاری در جدول ۲ گزارش شده است. فاصله چشمه تا آشکارساز بستگی به ابعاد تابلو، ساختار و جنس رنگ به‌کار رفته در آن دارد. هرچه ابعاد تابلو بزرگ‌تر باشد برای داشتن یک تصویر پرتونگاره یکپارچه نیاز است که فاصله چشمه تا آشکارساز بیش‌تر شود و از قانون عکس مجذور فاصله برای تنظیم شدت پرتوها استفاده شود. برای تنظیم این فاصله باید جنس بوم که پارچه و یا چوب است را هم در نظر گرفت. تابلوهای چوبی نسبت به تابلوهای پارچه‌ای و یا کاغذی نیاز به انرژی بیش‌تری برای تشکیل پرتونگاره دارند. هم‌چنین جنس رنگ ماده به‌کار رفته و تعداد کشیده شدن قلم‌مو (ضخامت رنگ) نیز در تعیین موارد فوق مؤثر است. تابلوهای رنگ روغن و رنگ آکرلیک هم از نظر ضخامت و هم از نظر عدد اتمی مواد استفاده شده متفاوت هستند و برای تنظیم عوامل مؤثر در پرتونگاری باید موارد را به‌درستی بررسی و تنظیم کرد. اگر قسمتی از تابلو تصویربرداری می‌شد و فاصله حدود ۱ متر انتخاب می‌شد، ولتاژ انتخابی در حد ولتاژ برای یکپارچه بود که حدود ۲۰ تا ۴۰ V است [۱]. ولی در این‌جا پرتونگاری از تمام تابلو به‌صورت

دهد. وابستگی الگوریتم به سطح آستانه یکی از معایب این الگوریتم است [۱۰-۱۱].

در پژوهش‌هایی که [۱۲-۱۴] که از روش صافی‌گابور در پردازش تصویر استفاده شده است، با اضافه کردن یک نویز مانند نویز گوسی و با انحراف معیار معلوم به تصویر اولیه و اعمال الگوریتم مورد نظر مانند صافی‌گابور، سعی در حذف و یا کم کردن نویز دارند. برای اطمینان از کارایی الگوریتم هم MSE و PSNR تصاویر با هم مقایسه می‌شوند. همین‌طور سطح آستانه در الگوریتم‌های صافی‌گابور ارایه شده به‌صورت دستی وارد می‌شود. در این پژوهش از پرتونگاره‌هایی استفاده شده که نویز و مقدار عدم وضوح آن‌ها مشخص نیست و هدف بالا بردن کنتراست تصویر در نقاطی است که آسیب واضح دیده نمی‌شود. در عین حال نویز و عدم‌وضوح هر پرتونگاره با دیگری متفاوت است. در چنین حالتی که مقدار نویز مشخص نیست، استفاده از این روش می‌تواند برای جدا کردن قسمت زمینه که باعث عدم‌وضوح تصویر می‌شود، مؤثر باشد [۱۵]. در این مرجع شناسایی و تفکیک اجسام داخل بار در حد چند میلی‌متر مورد نظر بوده است و فرکانس انتخابی و سایر پارامترها براساس تشخیص این اجسام انتخاب شده‌اند. در مورد تابلوها، آسیب‌ها در اندازه‌های دهم تا چند میلی‌متر هستند و باید پارامترها بر مبنای تشخیص آن‌ها بررسی و انتخاب شوند. نوآوری پژوهش حاضر در استفاده از صافی‌گابور، که یک روش پردازشی معمول است، برای پردازش تصاویری با نویزهای نامشخص می‌باشد و سعی شده روشی برای محاسبه سطح آستانه از روی خواص آماری هر تصویر ارایه شود.

در این پژوهش از صافی‌گابور برای بهبود کیفیت تصویر و رفع عدم‌وضوح پرتونگاره‌های تابلوهای نفیس هنری به‌منظور تعیین محل دقیق آسیب استفاده شده است. هدف تعیین و شناسایی دقیق محل و مقدار آسیب بوده است تا به کمک آن، کارشناسان مرمت آثار باستانی بتوانند مرمت و بازسازی آثار هنری را به خوبی انجام دهند. برای تعیین سطح آستانه نیز روشی براساس توزیع رایلی پیشنهاد شده تا سطح آستانه براساس توزیع آماری تصویر به‌طور خودکار تعیین شود. تابلوهای استفاده شده مربوط به موزه والنسیای کشور اسپانیا هستند که در دانشگاه پلی‌تکنیک والنسیا پرتونگاری شده‌اند.

۲. روش کار

۲.۱ پرتونگاری

برای پرتونگاری از یک دستگاه ترانس پورتیکس[®] 50 استفاده شده است که دارای تیوب پرتو ایکس ۳ kW و اندازه نقطه کانونی ۲/۳ mm با ۲ mm صافی آلومینیمی است. این تیوب محدوده تغییرات ولتاژ بین ۲۰ تا ۱۱۰ kV دارد. مجموعه دارای یک لامپ با نور مریبی است که برای مشخص کردن محل باریکه روی جسم استفاده می‌شود. صفحات فسفر برای آشکارسازی پرتو ایکس عبوری از جسم استفاده شده که بعد از پرتوگیری با اسکنر لیزری مخصوص CR 30-X، می‌تواند تا ابعاد ۴۰۹۶×۴۰۹۶ تصویر دیجیتال تولید کند. فاصله جسم تا چشمه بستگی به ابعاد تابلو دارد. چیدمان پرتونگاری در شکل ۱ نشان داده شده است. در جدول ۱ مشخصات تابلوها آورده شده‌اند.





(د)

شکل ۲. تابلوهایی که پرتونگاری شده‌اند: الف) مرگ مسیح، ب) معراج، ج) توبه، د) اعتدال (اثر روزا مارتینز آرترو).

جدول ۲. مشخصات پرتونگاری تابلوهای نفیس

نام اثر	ولتاژ (kV)	جریان (mA)	فاصله چشمه از آشکارساز (cm)
مرگ مسیح	۶۰	۲۰	۲۲۰
معراج	۴۵	۲۰	۲۴۰
توبه	۷۲	۲۰	۳۷۰
اعتدال	۶۲	۲۰	۵۰۰

با توجه به بزرگ بودن ابعاد تابلوها، این اندازه‌ها در حد یک تا پنج متر است. در شکل ۳ پرتونگاره‌های به‌دست آمده از تابلوی مرگ مسیح (شکل ۲- الف) نشان داده شده‌اند. تعداد پرتونگاری‌های انجام شده برای هر تابلو بین ۲ تا ۵ بار بوده که از تمام تابلو و قسمت‌های مشکوک به آسیب انجام شده است. در شکل ۳- الف پرتونگاره کامل تابلوی مرگ مسیح دیده می‌شود. تصویر پرتونگاره‌ها اطلاعات مناسبی در مورد نواحی آسیب و طرح کلی تابلو دارند. محل اتصالات با میخ در شکل به‌وضوح دیده می‌شوند.

قسمتی از پرتونگاره در ابعاد بزرگ در شکل ۳- ب نشان داده شده است که محل ترک‌ها در رنگ تابلو روی آن مشخص است. هرچند که محل آسیب‌ها و طرح کلی تابلو مشخص است، ولی عدم‌وضوح در تصویر وجود دارد که با پردازش تصویر می‌توان کیفیت تصویر را بهبود بخشید. در این پژوهش از صافی گابور برای بهبود کیفیت تصویر استفاده شده است. در ادامه توضیحات مربوط به الگوریتم آن ارائه شده است.

۲.۲ صافی گابور

صافی گابور یک صافی غیرخطی و محلی است و مبنای فرکانسی دارد. صافی‌های گابور کاربردهای مختلفی در پردازش تصویر دارند و در صورتی که به‌طور مناسب و دقیق تنظیم شوند،

یکپارچه مورد نظر بوده است. برای پوشش دادن تمام تابلو نیاز است فاصله را افزایش داده و در نتیجه برای داشتن پرتودهی مناسب روی سطح تابلو، باید ولتاژ بیش‌تر از مقدار معمول برای پارچه انتخاب گردد. لازم به ذکر است که با توجه به محدودیت‌های تیوب پرتو ایکس مورد استفاده، جریان تیوب در 20 mA محدود شده است و افزایش اکسپوژر^۱ موردنیاز (با توجه به نوع آشکارساز، فاصله، ضخامت و نوع تابلوی مورد استفاده) با افزایش ولتاژ تأمین داده شده است.



(الف)



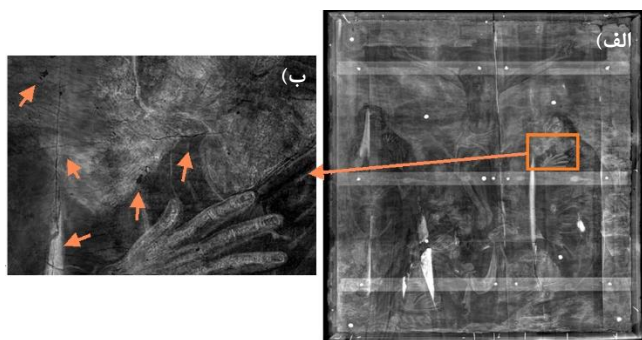
(ب)



(ج)

1. Exposure





شکل ۳. تصاویر پرتونگاری تهیه شده از تابلوی شکل ۲- الف مطابق بخش ۱.۲ الف) پرتونگاره کل تابلو ب) پرتونگاره قسمتی از سمت راست تابلو که با پیکان نشان داده شده است.

در صافی گابور چهار پارامتر نقش مهمی ایفا می‌کنند که پارامترهای مؤثر نامیده می‌شوند. با اختصاص مقادیر مختلف به پارامترهای مؤثر، مجموعه‌ای از صافی‌ها به دست می‌آیند که به آن‌ها بانک صافی گابور گفته می‌شود. این چهار پارامتر شامل فرکانس یا طول موج λ ، زاویه یا جهت صافی، σ و γ می‌باشند که با تغییر آن‌ها بسته به شرایط و اطلاعات مورد نظر تصویر، می‌توان اطلاعات مختلفی از تصویر را به دست آورد. در شکل ۴ صافی‌های ساخته شده با الگوریتم گابور برای شش اندازه و پنج زاویه ساخته شده است. کانولوشن هر کدام از این صافی‌ها در تصویر ورودی اطلاعات مختلفی از تصویر را می‌دهد.

از مزایای صافی گابور، پارامترهای متعدد تعریف شده در آن است که با تغییر آن‌ها می‌توان صافی‌های جهت‌ی با اندازه‌های متفاوت به دست آورد که می‌تواند اطلاعات مختلف از تصویر را استخراج کنند. این صافی می‌تواند کارایی لازم را برای پردازش تصویرهایی با محدوده وسیع دینامیکی داشته باشد. از معایب آن می‌توان لزوم استفاده از روش سعی و خطا برای تعیین فرکانس و σ را نام برد. با توجه به استفاده از فضای فرکانسی برای تصاویر بزرگ حدود 1000×1000 پیکسل، زمان پردازش افزایش یافته و ظرفیت حافظه زیادی مورد نیاز است.

از معایب صافی گابور، لزوم تعیین دستی مقدار آستانه برای حذف مؤلفه‌های کوچک تصویر است که با توجه به تفاوت سطح نویز در پرتونگاره‌ها، تعیین سطح آستانه کلی برای همه تصاویر مشکل است. توزیع رایلی معمولاً در مواردی مشاهده می‌شود که متغیری دارای دو عضو باشد که هر دو دارای توزیع نرمال با واریانس مشابه بوده و از هم مستقل باشند. در تصویر هم تغییرات در جهت افقی و عمودی وجود دارد که می‌توان گفت از هم مستقل هستند و با توجه به تعداد زیاد پیکسل‌ها، می‌توان فرض کرد که تغییرات توزیع نرمال دارند. بنابراین برای بررسی آن‌ها توزیع رایلی کارایی دارد. بنابراین استفاده از توزیع رایلی برای

عملکرد بسیار مناسبی در تشخیص ویژگی‌های بافت و لبه خواهند داشت [۹].

روش صافی گابور قادر به نمایش بهینه تعیین جهت و حوزه فضایی (فرکانس) می‌باشد. صافی گابور بر تجزیه اطلاعات تصویر با موجک گابور کار می‌کند که موجک حاصل ترکیب یک موج سینوسی با پوش گوسین است [۸-۱۰]. موجک‌های گابور در جهت‌ها و اندازه‌های مختلف با تصویر ترکیب شده و اطلاعات مختلفی از تصویر را به دست می‌دهند [۱۲-۱۴]. ترکیب مؤلفه‌های انتخابی از این اطلاعات استخراج شده می‌تواند در بهبود تصویر کارایی داشته باشد [۱۰]. برای به دست آوردن مؤلفه‌های تصویر دو مرحله باید انجام گیرد:

۱. ساخت صافی گابور با کمک روابط ریاضی.

۲. کانولوشن صافی گابور با تصویر اصلی.

صافی گابور دارای یک جزء حقیقی و یک جزء موهومی است.

رابطه صافی عبارت است از [۱۱]:

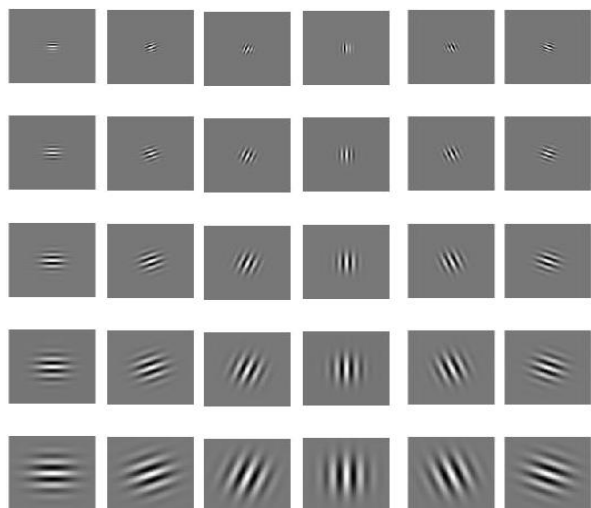
$$g(x, y, \lambda, \sigma, \theta, \varphi) = g_R(x, y, \lambda, \sigma, \gamma, \theta, \varphi) + i g_I(x, y, \lambda, \sigma, \gamma, \theta, \varphi) \quad (1)$$

$$g_R(x, y, \lambda, \sigma, \gamma, \theta, \varphi) = \frac{\gamma}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-\frac{x_r^2 + \gamma^2 y_r^2}{2\sigma^2}\right) \times \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda} + \varphi\right) \quad (2)$$

$$g_I(x, y, \lambda, \sigma, \gamma, \theta, \varphi) = \frac{\gamma}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-\frac{x_r^2 + \gamma^2 y_r^2}{2\sigma^2}\right) \times \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda} + \varphi\right) \quad (3)$$

که در آن g_R بخش حقیقی صافی و g_I بخش موهومی صافی است، $x_r = x \cos\theta + y \sin\theta$ و $y_r = -x \sin\theta + y \cos\theta$ ، x و y مختصات یک نقطه از تصویر هستند. هم‌چنین θ زاویه چرخش صافی را نشان می‌دهد و γ نرخ نمودار فضایی است. اگر $\gamma=1$ باشد، شکل محدوده به صورت دایره‌ای خواهد بود و اگر $\gamma < 1$ باشد، شکل محدوده به جهت زاویه θ به صورت بیضی خواهد چرخید [۱۲]. λ طول موج فرکانس موج سینوسی (طول موج به فاصله بین دو قله متوالی موج یا بین دو نقطه تکراری موج که شکل یکسان دارند گفته می‌شود)، σ تغییرات پوش تابع گوسین و φ فاز است. پارامتر φ تقارن تابع گابور را نشان می‌دهد؛ اگر $\varphi=0^\circ$ و $\varphi=180^\circ$ باشد، صافی گابور زوج یا متقارن می‌باشد و اگر $\varphi=90^\circ$ و $\varphi=270^\circ$ باشد صافی گابور فرد یا نامتقارن خواهد بود [۱۳].





شکل ۴. بانک صافی‌های گابور برای تعداد مقیاس ۶ و تعداد زاویه ۵.

۳. نتایج

در این پژوهش، برای تشخیص بهتر عیوب و آسیب‌های موجود در تابلوهای هنری موزهی والنسیا از صافی گابور استفاده شده است. ابتدا تصاویر پرتونگاری با توجه به شرایط توضیح داده شده در بخش ۱.۲ تهیه شده و سپس با برنامه نوشته شده در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۸ بازسازی شده است. سپس صافی گابور به منظور بهبود کیفیت تصاویر جهت شناسایی عیوب و بازسازی آن‌ها اعمال شده است. به دلیل پایین بودن ضخامت تابلوها و انرژی کم پرتو ایکس و پراکندگی آن، تصویر حاصل از پرتونگاری مات است که برای رفع این عدم‌وضوح، لازم است مقداری از اطلاعات زمینه حذف شوند. به این منظور از صافی گابور استفاده شده است که نتایج آن در ادامه گزارش شده است.

۱.۳ نتایج صافی گابور

همان‌طور که در بخش ۲.۲ توضیح داده شده است، صافی گابور براساس تجزیه اطلاعات تصویر به کمک موجک گابور کار می‌کند و موجک حاصل ترکیب یک موج سینوسی با پوش گاوسین است که توانایی محاسبه مؤلفه‌های تصویر در جهت‌ها و مقیاس‌های مختلف را دارد. در این الگوریتم پردازشی، تصویر ورودی توسط بانک صافی‌های گابور به $S \times O$ زیرتصویر تبدیل می‌شود که در آن S تعداد مقیاس‌ها و O تعداد جهت‌ها می‌باشد. بررسی‌ها در اعمال صافی گابور بر مجموعه تصاویر پرتونگاره موجود نشان داد انتخاب تعداد مقیاس‌ها و جهت‌ها در کیفیت تصاویر خروجی مؤثر هستند ولی افزایش تعداد مقیاس و جهت‌ها از حد مشخصی، باعث افزایش زمان محاسبات شده و در کیفیت تصاویر نیز تأثیر قابل‌توجهی نخواهد داشت. با توجه به این نکته، تعداد مقیاس‌ها

تعیین سطح آستانه خودکار پیشنهاد شد. برای تعیین سطح آستانه نویز می‌توان از توزیع رایلی با توجه به توزیع آماری اطلاعات اندازه در تصاویر استفاده کرد [۱۶]:

$$A_n(x) = \sqrt{g_R^2 + g_I^2} \rightarrow \text{اطلاعات اندازه} \quad (۴)$$

$$R(A_n) = \frac{A_n}{\sigma_g^2} \exp\left(-\frac{A_n^2}{2\sigma_g^2}\right) \rightarrow \text{توزیع رایلی} \quad (۵)$$

در این رابطه σ_g^2 واریانس توزیع گاوسین دوبعدی است که موقعیت بردارهای پاسخ صافی را توصیف می‌کند. میانگین توزیع رایلی توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu_r = \sigma_g \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (۶)$$

واریانس یا انحراف معیار توزیع رایلی برابر است با:

$$\sigma_r^2 = \frac{4 - \pi}{2} \sigma_g^2 \quad (۷)$$

و در نهایت آستانه کاهش نویز با توجه به مقادیر μ_r و σ_r محاسبه می‌گردد:

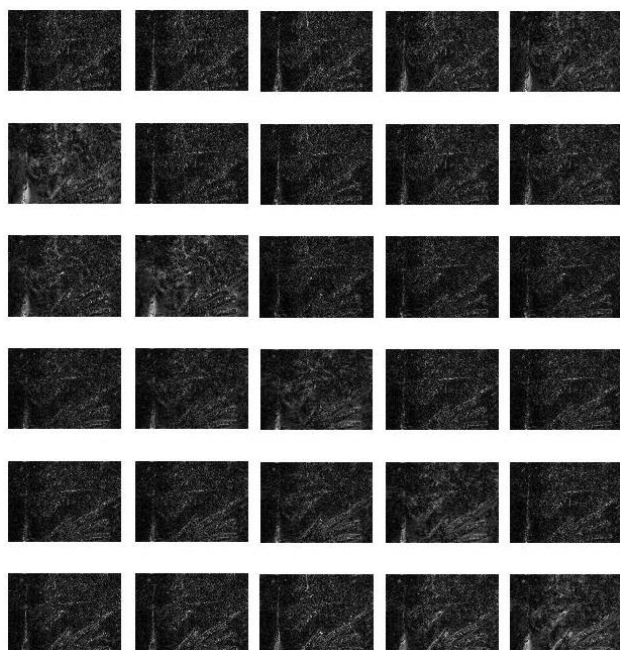
$$T = \mu_r + k\sigma_r \quad (۸)$$

با اعمال این سطح آستانه کاهش نویز بر مؤلفه‌ها می‌توان از ترکیب آن‌ها تصویری با وضوح مناسب به دست آورد که در آن آسیب‌ها و عیوب آثار مشخص‌تر از تصویر اولیه باشد. نحوه اجرای صافی گابور و بازسازی تصویر در الگوریتم ۱ ارایه شده است.

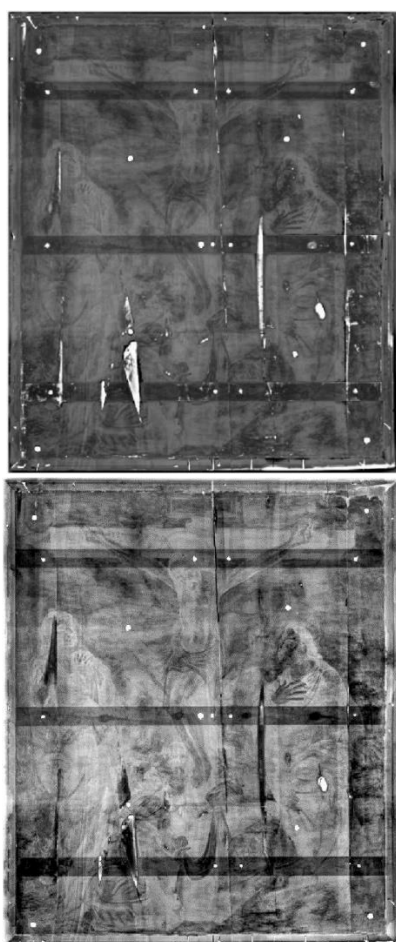
الگوریتم ۱- نحوه اعمال صافی گابور و بازسازی تصویر

۱. فراخوان فایل ورودی و تنظیمات اولیه صافی گابور
۲. استخراج صافی‌های گابور (روابط ۱ تا ۳)
۳. اعمال صافی و استخراج مؤلفه‌های پرتونگاره
۴. محاسبه سطح آستانه و اعمال آن به مؤلفه‌ها (روابط ۴ تا ۸)
۵. ترکیب مؤلفه‌های اصلاح‌شده و ساخت تصویر بازسازی‌شده
۶. نمایش تصویر بازسازی‌شده





شکل ۵. خروجی هر صافی گابور که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند برای شکل ۳-ب.



شکل ۶. تغییر تصویر بازسازی شده در خروجی برای دو آستانه الف) ۲۰، ب) ۴۰

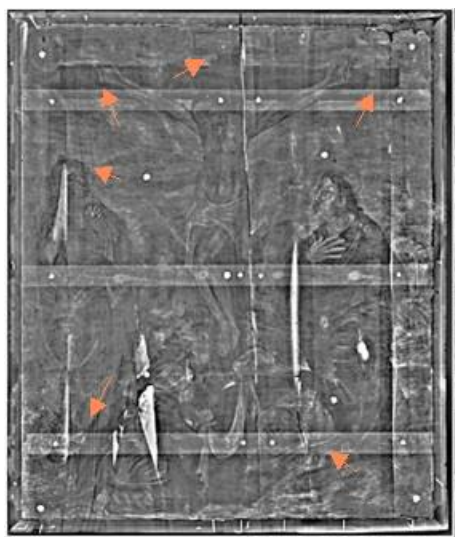
۵ و تعداد جهت‌ها ۶ در نظر گرفته شده است که جمعاً ۳۰ زیرتصویر به دست می‌دهند (شکل ۴).

در شکل ۵ خروجی صافی‌های گابور برای شکل ۳-ب و صافی‌های نشان داده شده در شکل ۴، نمایش داده شده‌اند. دقت در شکل ۵ نشان می‌دهد که اطلاعات استخراج شده از تصویرها متفاوت است. تابع صافی در تصویر ورودی با هم گشت (کانولوشن) شده^۱ و تصویر خروجی محاسبه شده است. به نظر می‌رسد که محدود شدن انتگرال در محاسبه کانولوشن در حالت گسسته برای تصاویر در بازه‌های مشخص می‌تواند در نتایج خروجی تأثیرگذار باشد. بررسی‌ها در این زمینه نشان داد که اگرچه قسمت کمی از اطلاعات تصاویر خروجی به این دلیل از بین می‌روند ولی نتایج خوبی در خروجی پس از ترکیب مؤلفه‌های تصویر به دست می‌آید.

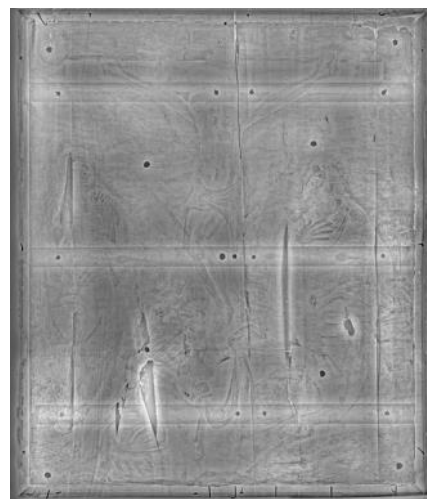
علاوه بر تعداد مقیاس و جهت صافی‌های انتخابی، مقدار آستانه می‌تواند در تصویر خروجی تأثیر داشته باشد؛ مقدار مؤلفه تصویر که کم‌تر از این مقدار است حذف شده و تصویر خروجی ساخته می‌شود. در شکل ۶ تغییرات سطح آستانه برای دو مقدار ۲۰ و ۴۰ برای پرتونگاره ۳-الف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات سطح آستانه باعث حذف مؤلفه‌های تصویر و تغییر در تصویر بازسازی شده می‌شود. سطح آستانه‌های مختلف می‌تواند اطلاعات متفاوتی از تصویر را بدهد. استفاده از یک آستانه که براساس خواص آماری پرتونگاره است می‌تواند کارایی داشته باشد. در قسمت بعد از تعیین سطح آستانه براساس توزیع رایلی استفاده شده است. برای بررسی اثر طول موج، تصویربازسازی شده برای دو طول موج ۲ و ۶ در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. می‌توان مشاهده کرد که تغییرات این پارامتر در تصویر نهایی بازسازی شده تأثیر فراوانی دارند و مشخصات مختلفی از تصویر را جدا می‌کنند. بسته به این‌که چه مشخصاتی از تصویر مورد توجه است می‌توان با تغییر آن‌ها مشخصات مورد نظر را استخراج کرد. یکی دیگر از عوامل مؤثر در کیفیت تصویر خروجی، انتخاب طول موج است که انتخاب آن در استخراج مؤلفه‌ها مؤثر خواهد بود. بررسی‌ها نشان داد کم و زیاد انتخاب شدن طول موج باعث محوشدگی تصویر می‌گردد. در این پژوهش، طول موج ۰/۵ cm در نظر گرفته شده است. تغییر مقیاس‌ها تأثیر قابل توجهی بر نتایج بازیابی تصویر ندارد. سطح آستانه کاهش نويز برای مؤلفه‌های دامنه طبق رابطه ۸ محاسبه شده تا مؤلفه‌های زیر این مقدار در تصویر خروجی حذف شده و عدم وضوح را به حداقل برساند.

1. Convolution





شکل ۸. تصویر بازسازی شده پرتونگاره شکل ۳-الف.



الف



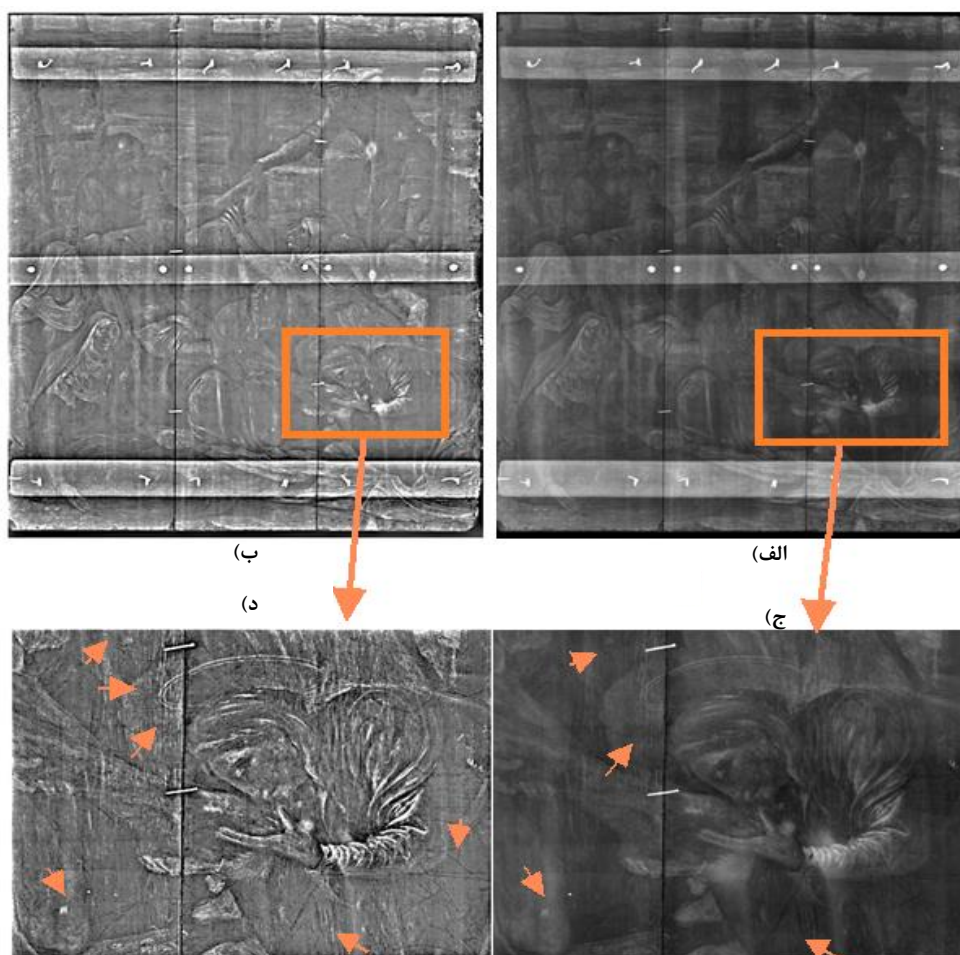
ب

شکل ۷. تغییر طول موج موجب محوشدگی تصویر می‌گردد: الف) طول موج ۲ (ب) طول موج ۶

در شکل ۱۰ پرتونگاره‌ها و تصاویر بازسازی شده دو تابلوی توبه و اعتدال نشان داده شده‌اند. مقایسه دو شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب نشان می‌دهد که در نواحی مختلف تصویر بازسازی شده آسیب‌ها بهتر دیده می‌شوند و خوردگی در کناره سمت راست تصویر کاملاً واضح است. تصویر بازسازی شده عدم وضوح ندارد و لبه‌ها تیزتر و نقوش واضح‌تر هستند. در شکل ۱۰-ج و ۱۰-د پرتونگاره تابلوی اعتدال و تصویر بازسازی شده آن نشان داده شده‌اند. این تصویر با رنگ آکرلیک نقاشی شده و به علت جنس مواد متفاوت با رنگ روغن، که عدد اتمی کم‌تری دارد، نقوش تصویر نسبت به سایر تابلوها مشخص نیست و پرتونگاره اصلی و تصویر بازسازی شده نیز نقوش را نشان نمی‌دهند. ولی آسیب‌ها روی قاب تابلو و بوم تا حدودی مشخص است و در تصویر بازسازی شده بهتر دیده می‌شوند. همچنین اثر رنگ‌ها و جهت رنگ آمیزی نیز در تصویر بازسازی شده با دقت بیشتری مشهود است. برای ارزیابی، نتایج پرتونگاره‌ها و تصاویر بازسازی شده به یک فرد متخصص در زمینه پرتونگاری صنعتی و یک فرد متخصص مرمت نشان داده شد و از آن‌ها خواسته شد که برحسب اطلاعات استخراج شده به تصاویر امتیازی بین صفر تا ۱۰۰ را اختصاص دهند. نتایج حاصل از این ارزیابی در جدول ۳ گزارش شده است. نتایج حاصل از ارزیابی متخصصین نشان می‌دهد که امتیازهای متخصصین برای تصویر بازسازی شده بیشتر بوده است که این موضوع بیانگر کارایی صافی گابور برای شناسایی و مشخص کردن نواحی آسیب از نظر متخصصین می‌باشد. همچنین متخصصین اذعان داشته‌اند که اگرچه در مواردی مانند شکل ۱۰-ب کیفیت تصویر بازسازی شده کم‌تر از کیفیت پرتونگاره اصلی بنظر می‌رسد، ولی با دقت در نواحی آسیب، دیده می‌شود که تصویر تیزتر شده و این نواحی با کیفیت مناسب‌تری نسبت به پرتونگاره‌های اصلی قابل مشاهده هستند.

بعد از اعمال سطح آستانه، تصویر نهایی به دست آمده توسط معکوس تبدیل فوریه به حوزه مکان بازگردانده شد تا تصویر خروجی حاصل شود. در شکل ۸ تصاویر بازسازی شده پرتونگاره شکل ۳-الف نشان داده شده است. مقایسه شکل ۳-الف و تصویر بازسازی شده شکل ۸ نشان می‌دهد که در تصویر بازسازی شده، کنتراست افزایش یافته، لبه‌ها تیزتر شده و طرح تابلو مشخص‌تر است. نقاط آسیب که با پیکان نمایش داده شده است در شکل بازسازی شده مشخص‌تر است. برای مشاهده بهتر نواحی آسیب، لازم است تصاویر با بزرگنمایی بررسی شوند. در شکل ۹-الف و ۹-ب پرتونگاره و تصویر بازسازی شده تابلوی معراج نشان داده شده است. در تصویر بازسازی شده علاوه بر این که نقوش تابلو واضح‌تر شده‌اند، خوردگی لبه‌ها و عیوب تابلو بهتر دیده می‌شوند. برای بررسی بهتر، قسمتی از تصویر با بزرگنمایی نشان داده شده است (شکل ۶-ج و ۶-د). در شکل بازسازی شده لایه‌های رنگ و آسیب‌های چوب و خوردگی در نواحی مختلف قابل ملاحظه است





شکل ۹. الف و ج) پرتونگاره اصلی ب و د) تصویر بازسازی شده تابلوی معراج با کنتراست بالاتر.

جدول ۳. نتایج ارزیابی پرتونگاره‌ها و تصاویر بازسازی شده.

امتیاز از ۱۰۰		
نام تابلو	پرتونگاره اصلی	تصویر بازسازی شده
مرگ مسیح	۸۰	۹۰
معراج	۸۰	۹۰
توبه	۷۵	۸۵
اعتدال (اثر روزا مارتینز آرترو)	۴۰	۵۰

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش از صافی گابور مبتنی بر سطح آستانه خودکار برای بهبود پرتونگاره‌ها و مشخص کردن محل آسیب تابلوهای هنری موزه والنسیا استفاده شده است. هرچند پرتونگاره‌های تهیه شده به روش CR اطلاعات مناسبی را در اختیار کارشناسان مرمت قرار داده است، ولی در این پژوهش با بهبود کیفیت تصاویر تلاش در راستای استخراج اطلاعات بیش‌تر از پرتونگاره‌ها بوده است. با تغییر پارامترهای صافی گابور، بهترین پارامترها برای بهبود تصاویر به‌دست آمده است. برای ارزیابی، از نظر متخصصین



شکل ۱۰. الف) پرتونگاره تابلوی توبه ب) تصویر بازسازی شده آن، ج) پرتونگاره تابلوی اعتدال د) تصویر بازسازی شده آن



6. B. Appelbaum, *Conservation treatment methodology*, 1st edition. [Softback with stiff wrappers](#), (2011).
7. E. Negahdarzadeh, and et al., *Diagnosis of design and defects in radiography of ceramic antique objects using the wavelet- domain hidden Markov models*, [Journal of Cultural Heritage](#), **35**, 56-63, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.07.005> (2019).
8. N. Nacereddine, R. Draï and A. Benchaala, *Weld defect extraction and identification in radiograms based neural networks*, (*IASTED International Conference on Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications 2002*), [Crete, Greece](#), June, pp 38-43, (2002.).
9. J. Rouhi, *Development of the Theories of Cultural Heritage Conservation in Europe: A Survey of 19th and 20th Century Theories*, [In Proceedings of the 4th International Congress on Civil Engineering, Architecture & Urban Development](#), Tehran, Iran, 2729, (2016)
10. Serrano, M. de Diego, C. Conde and E. Cabello, *Analysis of variance of Gabor filter banks parameters for optimal face recognition*, [Pattern Recognition Letters](#), 1998-2008, (2011).
11. R. J. Ferrari, and et al., *Analysis of Asymmetry in Mammograms via Directional Filtering With Gabor Wavelets*, [IEEE Trans. on Medical Imaging](#), **20** (9), 953-964, (2001).
12. J. Oh, S. Choi, *Selective generation of Gabor features for fast face recognition on mobile devices*, [Pattern Recognition Letters](#), **34**, (2013).
13. J. R. Movellan, *Tutorial on Gabor Filter*, <https://inc.ucsd.edu/mplab/tutorials> (2008).
14. P. Kruizinga, N. Petkov and S. E. Grigorescu, *Comparison of texture features based on Gabor filters*, [Proceedings of the 10th International Conference on Image Analysis and processing](#), (1999).
15. S. Sheykh Rabiee , B. Rokrok, E. Yahaghi, B. Arezabak, *Improvement of Security Systems by Enhancing the Detection of Objects in Baggage X-Ray Radiography Images*, [Journal of Nuclear Science and Technology \(JonSat\)](#), **39** (2), 19-37, 10.24200/NST.2018.1044, (2018). (In Persian)
16. P. Kovsi, *Phase Preserving Denoising of Images. The Australian Pattern Recognition Society Conference: DICTA'99*. [Perth WA. 212-217](#), (1999).

پرتونگاری و کارشناسان مرمت استفاده شده است. نتایج حاصل از ارزیابی متخصصین نشان می‌دهد که تصاویر بازسازی شده با صافی گابور محل آسیب‌ها را بهتر از پرتونگاره اصلی مشخص می‌کنند و جزئیات در تصاویر بازسازی شده قابل مشاهده‌تر هستند.

۵. تشکر و قدردانی

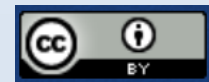
نویسندگان بدین‌وسیله تشکر و قدردانی فراوان خود را از آزمایشگاه انستیتوی بازسازی و مرمت آثار هنری دانشگاه پلی‌تکنیک والنسیا، اسپانیا به‌دلیل فراهم کردن امکانات انجام این پژوهش ابراز می‌دارند.

مراجع

1. J. Lang and A. Middleton, *Radiography of Cultural Material*, Second Edition, [Elsevier Butterworth-Heinemann](#), (2005).
2. J. A. Madrid Garcia, E. Yahaghi, A. Movafeghi. *Improvement of the digital radiographic images of old paintings on wooden support through the anisotropic diffusion method*, [Journal of Cultural Heritage](#), **49**, 115-122, (2021)(In Persian).
3. Sh. K. Rutledge, and et al., *Atomic Oxygen Treatment as a Method of Recovering Smoke-Damaged Paintings*, [Journal of the American Institute for Conservation](#), **39** (1), (2000).
4. J.A. Madrid, *Use of telemetry x-ray techniques in large-size pictorial works*, in [Ge-conservation](#), **5**, 101-109, (2013).
5. D. J. Yusà-Marco, B. D. Atienza and J. A. Madrid, *Review of the work of Antonio Bisquert carried out in the city of Teruel through radiographic analysis and characterization of materials by SEM / EDX*, [Ge-Conservacion](#), **1**(16):6-22, (2019).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers. *



استناد به این مقاله

سیده مریم قیاسی، عفت یاحقی، امیر موافقی، خوزه آنتونی مادریدگارسیا (۱۴۰۰)، شناسایی آسیب‌های تابلوهای نفیس هنری با استفاده از پرتونگاری صنعتی، ۹۸، ۱۸-۹
 DOI: [10.24200/nst.2021.1306](https://doi.org/10.24200/nst.2021.1306)
 Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1306.html

