



بازیابی و تشخیص نقوش بشقاب مفرغی عتیقه‌ی لرستان با استفاده از آزمون رادیوگرافی و پردازش تصویر به روش تطبیق بافت‌نگار

عفت یاحقی^۱، امیر موافقی^{۲*}، شکوفه احمدی^۲، بهروز رک‌رک^۲، نورالدین محمدزاده^۲، ناصر راستخواه^۳

۱. گروه فیزیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، صندوق پستی: ۳۴۱۴۹-۵۵۹۹، قزوین - ایران

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران - ایران

۳. مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

چکیده: آثار هنری از مهم‌ترین گنجینه‌های هر کشوری به حساب می‌آیند. بسیاری از این آثار با گذشت زمان بر اثر مواردی مانند خوردگی، فرسایش و حوادث مختلف طرح اصلی خود را از دست می‌دهند. بررسی فرایند خوردگی و سایدگی نیازمند ابزارهای آشکارسازی قابل اعتمادی است که میزان تخریب در هر قسمت از قطعه را مشخص کند. در این مقاله از روش اندازه‌گیری عمق خوردگی در تصاویر رادیوگرافی برای مشخص کردن طرح یک بشقاب مفرغی طرح‌دار عتیقه از گنجینه‌های لرستان، استفاده شده است. با استفاده از این روش، میزان خوردگی و سایدگی اثر مشخص و نقوش بشقاب عتیقه که بر اثر مرور زمان دستخوش آسیب شده بود، بازسازی شده است. استفاده از روش بازسازی عمق و روش لبه‌یابی همراه با تطبیق بافت‌نگار، تصاویر واضحی از نقوش این بشقاب را نشان داد که در تصویر رادیوگرافی اولیه مشخص نبودند. این، نشان می‌دهد که ترکیب رادیوگرافی و تطبیق بافت‌نگار در روش‌های پردازش تصویر بر مبنای مشخصات فیلم و روش پرتونگاری با در نظر گرفتن اصول فیزیکی حاکم بر رادیوگرافی، می‌تواند نتایج بسیار مطلوبی را در شناسایی آثار باستانی و کاربردهای مشابه ارائه دهد. نتایج حاصل از ارزیابی انسانی، بهبود کیفیت تصاویر را با درصد اطمینان بالایی تأیید کرد.

کلیدواژه‌ها: مفرغ لرستان، رادیوگرافی، پردازش تصویر، تطبیق بافت‌نگار

LoRESTan Bronze Plate Design Identification by Nondestructive Radiography Method and Image Processing by Means of Histogram Matching

E. Yahaghi¹, A. Movafeghi^{2,3*}, S. Ahmadi², B. Rokrok³, N. Mohammadzadeh^{2,3}, N. Rastkhah^{2,3}

1. Physics Department, Imam Khomeini International University, P.O.Box: 34149-5599, Qazvin - Iran

2. Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

3. Iran Nuclear Regulatory Authority, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

Abstract: Radiography is known as one of the oldest and most widely used nondestructive testing (NDT) techniques, where it introduces the most appreciated technique by producing images which are acting as unique fingerprint records of samples of interest. Among the interesting applications of radiography are archeological and art applications. In this research, radiography was implemented for identification of a damaged art-historical material. The sample was a brass plate belonging to Iran cultural heritage. The estimated age of the plate was about 3500 years. The plate was discovered in Lorestan province, where it is generally called "Lorestan bronze". The plate was damaged seriously due to serious corrosion environmental attacks, and recognition of the sample was considered as the major problem. The simple radiography method was quite helpful for the plate determination but the method suffered from some major drawbacks due to contrast and thickness measurements. The thickness measurement and corrosion/erosion evaluation were the vital components of the inspection. The image processing techniques and precise thickness measurement method were added to the digitized radiographs. For the digital image processing, a histogram matching algorithm and an edge detection method were used. After all, the resulted image showed an enhanced quality image of the original traces of the hammered design. The results showed that a good experimental setup of radiography along with the image processing technique can give a high quality radiographic image which is able to be used effectively for the identification of art antiques. The human evaluation results also confirmed the ability of the proposed method with a high degree of certainty.

Keywords: Lorestan Bronze, Radiography, Image Processing, Histogram Matching

*email: amovafeghi@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۲/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۱۰/۱۰



۱. مقدمه

میراث فرهنگی و آثار هنری هر تمدنی، از جمله‌ی مفاخر آن تمدن به شمار می‌رود. با کشف هر اثر تاریخی سوال‌های مختلفی از قبیل، شناسایی درست بازه‌ی زمانی تاریخی و فرهنگی اثر، محل و روش تولید اثر و انتخاب روش درست حفظ و نگهداری و مرمت و بازسازی احتمالی در مورد آن مطرح می‌شوند [۱، ۲، ۳، ۴].

بسیاری از این آثار با گذشت زمان بر اثر مواردی مانند خوردگی، فرسایش و حوادث مختلف طرح اصلی خود را از دست می‌دهند. بررسی فرایند خوردگی و ساییدگی نیازمند ابزارهای آشکارسازی قابل اعتمادی است که میزان تخریب در هر قسمت از قطعه را مشخص کند. معمولاً استفاده از روش‌های فیزیکی بر روش‌های شیمیایی ترجیح داده می‌شود، چرا که آسیب کم‌تری به اثر هنری وارد می‌کند. آزمون‌های غیرمخرب (NDT) به دلیل داشتن پایه‌ی فیزیکی و آسیب کم‌تر جای‌گاه ویژه‌ای در شناسایی آثار تاریخی-هنری دارد [۵، ۶]. یکی از مهم‌ترین ابزارها برای مشخص کردن میزان خوردگی و ساییدگی، روش غیرمخرب رادیوگرافی است که می‌تواند به صورت دو بعدی و یا سه بعدی انجام شود [۷، ۸، ۹، ۱۰]. در این مقاله از رادیوگرافی و فنون پردازش تصویر، و از روش اندازه‌گیری عمق خوردگی برای مشخص کردن طرح بشقاب طرح‌دار عتیقه، استفاده شده است. این اثر باستانی متعلق به حدود ۳۵۰۰ سال قبل (عصر برنز)، در استان لرستان کشف شده است. شکل ۱ تصویری از این اثر باستانی را نشان می‌دهد.

از روش به کار گرفته شده برای بررسی خوردگی و ساییدگی این اثر، در عیب‌یابی و تعیین میزان عمق خوردگی در لوله‌های مختلفی که در صنعت نفت و گاز کاربرد دارند، استفاده می‌شود. با استفاده از فرمول نیمه‌تجربی به دست آمده در این روش می‌توان عمق خوردگی را بررسی کرد. در این جا با استفاده از این روش و تصویر رادیوگرافی بشقاب، میزان خوردگی و ساییدگی اثر مشخص و نقوش بشقاب عتیقه که بر اثر مرور زمان دستخوش آسیب شده بود، بازسازی شده است. استفاده از روش بازسازی عمق، روش لبه‌یابی کنی^(۱) و صافی گاوسی همراه با تطبیق بافت‌نگار، تصاویر واضحی از نقوش این بشقاب را به دست داد که در تصویر رادیوگرافی اولیه مشخص نبودند.

۲. روش‌ها

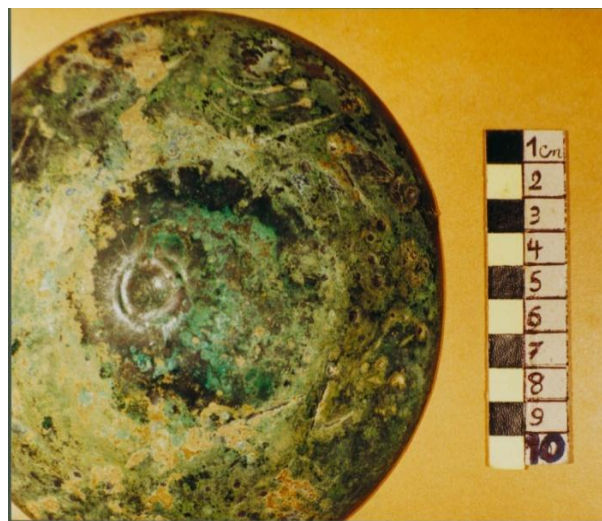
۱.۲ رادیوگرافی

در کلیه‌ی آزمایش‌های رادیوگرافی شامل انجام رادیوگرافی، ظهور و ثبوت فیلم، تفسیر و رقمی کردن فیلم، استانداردهای سری ISO، ASTM و ASME در نظر گرفته شد تا کلیه‌ی آزمایش‌ها و نتایج حاصله تکرارپذیر بوده و نتایج یکسانی به دست آید؛ ضمن این که ایمنی و حفاظت در برابر اشعه مطابق با قانون حفاظت در برابر اشعه‌ی کشور و استاندارد ملی شماره ۷۷۵۱ (که توسط سازمان انرژی اتمی ایران مطابق استانداردهای جهانی مصوب شده است) رعایت شد [۱۱، ۱۲].

۲.۲ ضخامت‌سنجی مواد با استفاده از رادیوگرافی و اندازه‌گیری

چگالی نوری فیلم‌ها

یکی از روش‌های ضخامت‌سنجی مواد و لوله‌ها اندازه‌گیری چگالی نوری فیلم است. این روش پیچیدگی‌های فنی خاص خود را دارد [۱۳، ۱۴، ۱۵]. این پیچیدگی‌ها به دلیل وابستگی چگالی نوری فیلم به نوع فیلم، شرایط ظهور فیلم، ابعاد و ضخامت ماده یا لوله، وجود عایق در سطح لوله، رسوبات و محتویات داخل لوله، روش رادیوگرافی، میزان پرتودهی و هم‌چنین موقعیت قرارگیری نقطه‌ی مورد بررسی بر روی فیلم هستند [۱۶، ۱۷]. در یکی از این روش‌ها، مدل ریاضی برای لوله‌های با قطر بزرگ (۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر) توسعه داده شده و سپس برای لوله‌های با قطر کم (در حدود ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر) بسط یافته است. در هر دسته، آزمایش‌های رادیوگرافی مختلفی انجام و مدل تکمیلی ارائه شده است. با



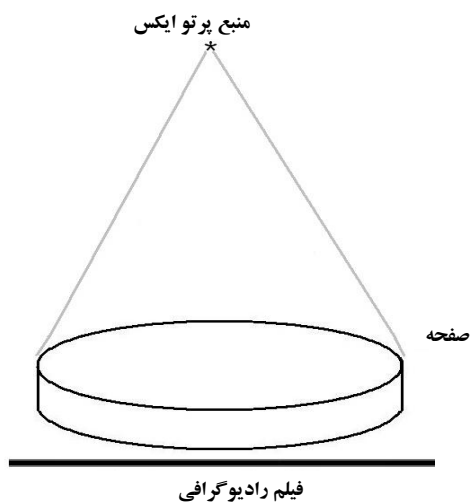
شکل ۱. شکل ظاهری اثر هنری بشقاب مفرغی لرستان.

[۱۷]، هر چند که با پیشرفت فن آوری این صفحه‌ها با کیفیت بسیار بهتری نسبت به گذشته عرضه می‌شوند.

رنگ کردن تصاویر خاکستری یکی از فنون پردازش تصویر برای ایجاد تفاوت رنگ^(۶) است. این روش در سیستم‌هایی که در آن‌ها کاربر، فرایند تصمیم‌گیری نهایی را انجام می‌دهد، کاربرد دارد. اضافه شدن رنگ به تصویر موجب ایجاد تمایز ناشی از رنگ (که چشم انسان به آن حساس‌تر است) در عنصرهای تصویر بین سطوح خاکستری نزدیک بهم می‌شود [۱۶، ۱۸].

رادیوگرافی این اثر هنری مطابق شرایط جدول ۱ انجام شده است و شکل ۲ طرح‌واره‌ی چیدمان آزمایش رادیوگرافی را نشان می‌دهد.

با توجه به این که در این مورد آشکارسازی عیوب ریز مورد نظر نبوده و شکل کلی نقوش اثر هنری برای شناسایی آن مورد توجه بوده است، با به کارگیری این فیلم که کاربرد پزشکی دارد و فیلمی سریع محسوب می‌شود، میزان (و زمان) پرتودهی به مقدار زیادی کاهش یافت. برای رقمی کردن تصویر رادیوگرافی که در شکل ۳ نشان داده شده از پویش‌گر معرفی شده استفاده شد. قابل توجه است که نقوش بشقاب در قسمت‌هایی که خوردگی دارد واضح نیستند. این عدم وضوح در قسمت‌های مرکزی تصویر و ناحیه‌ی مرکزی راست و بالای تصویر بیش‌تر است.



شکل ۲. طرح‌واره‌ی چیدمان آزمایش رادیوگرافی.

استفاده از آزمایش‌های انجام شده رابطه‌های نیمه‌تجربی برای ضخامت‌سنجی ارایه شده است. یک رابطه‌ی نیمه‌تجربی به دست آمده برای تعیین چگالی نوری فیلم‌های رادیوگرافی آگفا D7 چنین است [۱۸]

$$D = 90.0 E^{0.669} SFD^{-1.3384} e^{-0.7322t} \quad (1)$$

که در آن t ضخامت عبوری برای پرتو، SFD فاصله‌ی فیلم تا منبع و E انرژی دسته پرتو است. اثر ضریب انباشت نیز در این رابطه مستتر است. روابطی مشابه رابطه‌ی (۱) برای سایر فیلم‌ها نیز به دست می‌آیند.

برای تبدیل فیلم‌های رادیوگرافی به تصاویر رقمی به منظور انجام عملیات پردازش تصویر و علامت از پویش‌گر^(۲) مخصوص فیلم استفاده می‌شود. یکی از این پویش‌گرها ScanMaker 9800-XL Microtek است. این پویش‌گر توانایی پویش مدارک با اندازه‌ی $A3$ و با حداکثر قدرت تفکیک^(۳) مکانی 6400 dpi (۴ میکرون) و فیلم‌های با بیشینه چگالی اپتیکی 4.0 را دارا است و عنصر حساس آن CCD ^(۴) است. طبق اکثر استانداردهای رقمی کردن فیلم‌های رادیوگرافی، پویش‌گر فیلم باید حداقل توانایی پویش فیلم‌های رادیوگرافی با چگالی اپتیکی $3/5$ را داشته باشد [۱۹]. برای درجه‌بندی و کنترل پویش‌گر از فیلم استاندارد درجه‌بندی IT8.7/1 ساخت آگفا و هم‌چنین فیلم‌های درجه‌بندی پله‌ای X-rite و BAM استفاده شده است.

باید در نظر داشت که رقمی کردن فیلم‌های رادیوگرافی موجب می‌شود تا ذخیره‌سازی، بررسی کیفی و کمی تصویر، پردازش تصویر، انتقال تصویر و تهیه‌ی منظرهای^(۵) مختلف برای بررسی انواع عیوب قطعات بسیار ساده‌تر شود [۱۸]. با وجود معرفی روش‌های رادیوگرافی رقمی مستقیم و بدون نیاز به فیلم، که با استفاده از صفحه‌های آشکارساز، مثلاً صفحات سلنیمی، انجام می‌شود، به دلیل وضوح مکانی کم این روش‌ها، هنوز استفاده از فیلم و تبدیل آن به شکل رقمی ترجیح داده می‌شود

جدول ۱. تنظیمات برای رادیوگرافی اثر هنری

| نوع فیلم رادیوگرافی | فاصله‌ی فیلم تا نمونه (میلی‌متر) | فاصله‌ی لوله مولد ایکس تا نمونه (متر) | زمان پرتودهی (ثانیه) | جریان آند (میلی‌آمپر) | ولتاژ لوله مولد ایکس (کیلوولت) |
|---------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| آگفا معمولی | ۳ | ۱ | ۰.۰۸ | ۶۰ | ۱۵۰ |

* با توجه به حفاظ مناسب و فضای نسبتاً بزرگ آزمایشگاهی، در این آزمایش از باریکه‌ساز استفاده نشد.



$$g(m, n) = G_{\sigma}(m, n) * f(m, n). \quad (2)$$

که در آن، $f(m, n)$ بیان‌گر تابع تصویر در مختصات m و n است و برای صافی گاوسی داریم

$$G_{\sigma}(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{m^2 + n^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

برای محاسبه‌ی گرادیان از یکی از روش‌های معمول مانند رابرت، سوبل و پوویت استفاده می‌شود:

$$M(n, n) = \sqrt{g_m^2(m, n) + g_n^2(m, n)} \quad (4)$$

و

$$\theta(m, n) = \tan^{-1}[g_n(m, n) / g_m(m, n)] \quad (5)$$

حد آستانه برای M چنین است

$$M_T(m, n) = \begin{cases} M(m, n), & M(m, n) \geq T \\ 0, & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (6)$$

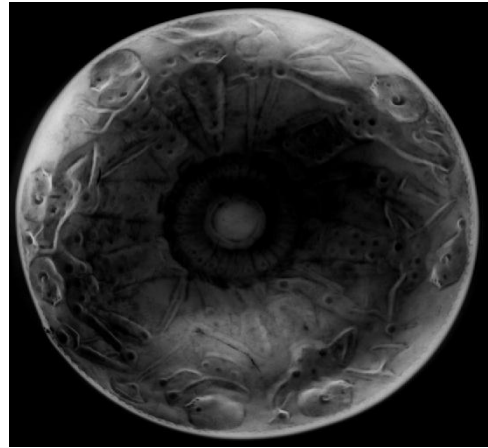
که در آن تمام لبه‌هایی که زیر حد نوفه‌ی T قرار می‌گیرند حذف می‌شوند. یک حسن دیگر این روش آن است که برای محاسبه‌ی گرادیان‌های محلی، جهت حرکت لبه‌ها نیز در هر نقطه در نظر گرفته می‌شود و بنابراین مرزها، به طور مستقل از موقعیت و جهت قرارگیری‌شان، شناسایی می‌شوند. با توجه به مزایای روش کنی، در این تحقیق نیز پس از بررسی الگوریتم‌های مختلف تشخیص لبه، خروجی‌های الگوریتم کنی مناسب‌تر تشخیص داده شدند و لذا در کلیه تصاویر از این الگوریتم برای شناسایی لبه‌ها استفاده شد.

با افزایش تفاوت رنگ تصویر با روش‌هایی چون متعادل‌سازی و تطبیق بافت‌نگار، وضوح این تصویر را می‌توان تا حدی بهبود بخشید تا از نظر بینایی انسان مناسب‌تر شود. در روش تطبیق بافت‌نگار سطوح شدت در تصویر طبق یک رابطه‌ی مشخص که در این‌جا همان رابطه‌ی (۱) در نظر گرفته شده است، تغییر داده می‌شود. اگر I و t معرف سطوح تصاویر، به ترتیب اولیه و بازسازی شده باشند، براساس رابطه‌ی (۱) چنین داریم

$$r = 90.0 \cdot E^{1/6692} \cdot SFD^{-1.23384} \cdot e^{-0.1322 \cdot t} \quad (7)$$

با ثابت گرفتن مقدار E و SFD رابطه‌ی زیر را داریم

$$r = K \cdot e^{-0.1322 \cdot t} \quad (8)$$



شکل ۳. تصویر رقمی رادیوگرافی اثر.

۳.۲ شناسایی الگوها در تصویرهای رادیوگرافی

برای آشکارسازی نقوش تصویر از شناسایی الگوها در تصویرها و از آشکارسازی لبه‌های تصویر استفاده شده است. برای پیدا کردن و آشکارسازی لبه‌ها روش‌های مختلفی وجود دارند [۲۰]. الگوریتم‌های شناسایی لبه، مرز بین نواحی مختلف تصویر را مشخص می‌کنند و عمدتاً بر مبنای تشخیص تغییرات سریع در مرز دو ناحیه عمل می‌کنند. برخی الگوریتم‌های شناسایی لبه با روش‌های مخصوص به خود این گرادیان را به روش‌های عددی تقریب می‌زنند. در این روش‌ها هر جا که گرادیان به یک مقدار بیشینه برسد به عنوان لبه شناسایی می‌شود. به عنوان مثال الگوریتم سوبل که از جمله‌ی مشهورترین الگوریتم‌های شناسایی لبه به شمار می‌رود، از تقریب سوبل برای مشتق‌گیری استفاده می‌کند. الگوریتم‌های لاپلاسی - گاوسی (تابع کلاه) و عبور از صفر بر مبنای مشتق دوم گیری از تابع تصویر دوبعدی عمل می‌کنند. تابع لاپلاسی - گاوسی لگاریتمی لبه‌ها را با توجه به عبور از صفر مشتق دوم، پس از اعمال صافی گاوسی به تصویر تعیین می‌کند. همین عمل در روش عبور از صفر با اعمال یک صافی متفاوت انجام می‌شود. در این الگوریتم لبه‌ها با توجه به بیشینه‌های محلی تابع گرادیان تصویر محاسبه می‌شوند. گرادیان‌ها در این روش با استفاده از اعمال مشتق بر روی یک صافی گاوسی محاسبه می‌شوند. در این روش از دو مقدار آستانه‌ای استفاده می‌شود تا لبه‌های ضعیف نیز بتوانند در کنار لبه‌های قوی شناسایی شوند. لبه‌های ضعیف فقط وقتی به عنوان لبه و مرز شناسایی می‌شوند که به یک لبه‌ی قوی متصل باشند و در غیر این صورت از تابع خروجی کنار گذاشته می‌شوند. در این روش که ابتدا با یک صافی گاوسی، نوفه و سایر عوامل ناخواسته‌ی تصویر تصفیه می‌شود داریم

که در آن K یک مقدار ثابتی است.

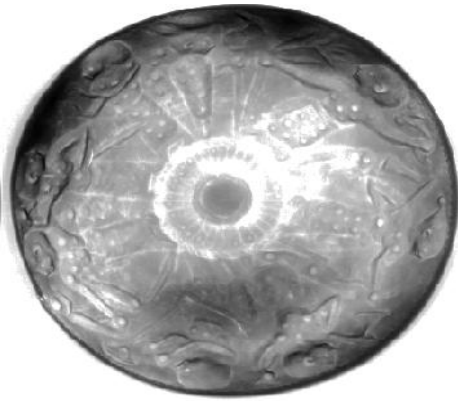
از رابطه‌ی (۸) مقدار سطوح بازسازی شده چنین به دست می‌آید

$$t = \frac{\log\left(\frac{r}{K}\right)}{-0.320} \quad (9)$$

با توجه به رابطه‌ی (۹) می‌توان سطوح روشنایی در تصویر بازسازی شده را براساس مشخصات فیلم و نوع رادیوگرافی به دست آورد. با اعمال این بهینه‌سازی می‌توان با استفاده از حداکثر تعداد بیت‌های موجود برای سطوح روشنایی تصاویر، وضوح الگوها و دقت تعیین ضخامت فلز را افزایش داد.

۳. نتایج و بحث

تصاویر رادیوگرافی بشقاب مفرغی لرستان، با و بدون استفاده از الگوریتم معرفی شده در بخش ۲.۲ و با به کارگیری بسته نرم‌افزار MATLAB بازسازی شدند. بدین منظور برای هر عنصر تصویر، تصحیح حاصل از اجرای الگوریتم فوق، اعمال شد. از به کارگیری الگوریتم بازسازی تصویر براساس تطبیق بافت‌نگار طبق رابطه‌ی (۹) برای هر عنصر تصویر ضخامت به دست آمد. از کنار هم گذاشتن مقادیر جدید عنصرهای تصویر بازسازی شده عمق تعیین شد. در شکل ۴ نگاتیو تصویر اولیه و بازسازی شده نشان داده شده است (علت نمایش نگاتیو تصویر وضوح بیشتر آن در هنگام چاپ بر روی کاغذ است و در حالت پوزیتیو تصویر رادیوگرافی نیز همین نتیجه‌گیری دارای اعتبار است)؛ با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود تصویر بازسازی شده به وسیله‌ی الگوریتم فوق واضح‌تر و طرح‌های آن مشخص‌تر است. برای مثال نقوش وسط بشقاب و لباس انسانی در سمت راست بشقاب، در تصویر اصلی به سختی دیده می‌شود ولی در تصویر بازسازی شده کاملاً واضح هستند. علت واضح‌تر شدن نقوش در تصویر بازسازی شده‌ی سمت راست این است که با توجه به رابطه‌ی (۹) عمق‌های کم تصویر اصلی، در تصویر، بازسازی شده و وزن بیشتری گرفته‌اند و در نتیجه وضوح نقوش مربوط به آن‌ها بیشتر شده است؛ یعنی در جاهایی که ساییدگی و خوردگی وجود دارد و عمق نقوش کم شده، با اعمال ضریب وزنی جدید نقوش واضح‌تر شده‌اند.



(الف)



(ب)

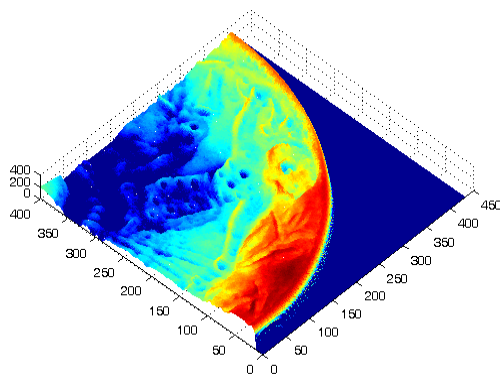
شکل ۴: نگاتیو تصویر رادیوگرافی؛ الف) تصویر بازسازی شده و ب) تصویر اولیه.

برای بررسی تأثیر این بازسازی، از شناسایی لبه‌ها با الگوریتم کنی نیز استفاده شد. با الگوریتم کنی، که یک الگوریتم ترکیبی است و در لبه‌ها با توجه به بیشینه‌های محلی تابع گرادیان تصویر را محاسبه می‌کند، لبه‌ها برای دو حالت با و بدون استفاده از الگوریتم بازسازی به دست آمد (شکل ۵). این تصاویر نشان می‌دهند که استفاده از این الگوریتم، مقدار خوردگی را اصلاح و باعث آشکارسازی و شناسایی بهتر نقوش اثر هنری شده است. برای وضوح بیشتر، نتایج فقط برای ربع اول تصویر نشان داده شده است. برای ساخت این تصویر از هر دو حالت الگوریتم لبه‌یابی کنی با حد آستانه‌ی ۰/۹ و صافی گاوسی با انحراف معیار ۱ استفاده شده است. تغییر حد آستانه باعث نمایش لبه‌های ریز ناشی از ساخت، که در نقوش تأثیر ندارند، می‌شود. در تصاویر اولیه که به صورت رقمی تهیه شده‌اند، هر عنصر تصویر بیان‌کننده‌ی مقدار عمق است. با استفاده از صافی کنی لبه‌های تیز این عمق‌ها که همان نقوش هستند مشخص شده است.

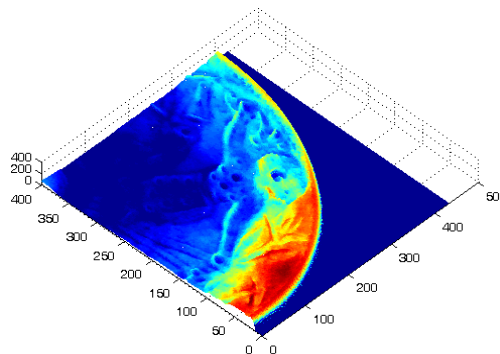


اختصاص می‌دهند و از کنار هم قرار گرفتن آن‌ها می‌توان تصویر سه‌بعدی از عمق را به دست آورد. نقاط قرمز تصویر دارای عمق بیش‌تر و نقاط آبی دارای عمق کم‌تری هستند. رنگ آبی بیان‌گر سطح بشقاب و رنگ قرمز عمق نقوش و یا خوردگی را بیان می‌کند. در شکل ۵. الف دیده می‌شود که بعد از به کارگیری الگوریتم بازسازی تصویر برای عمق، نقوش تصویر در مرکز و نواحی اطراف آن که خوردگی بیش‌تری نسبت به سایر قسمت‌ها داشته است واضح شده‌اند؛ در صورتی که در شکل ۵. ب اولیه، در این نواحی عمق‌ها خیلی کم و نقوش واضح نیستند و رنگ تصویر بیش‌تر آبی است.

در شکل ۷ از الگوریتم فوق برای بازسازی تصویر یک مجسمه که به فِدو مشهور است استفاده شده است. در شکل ۷. الف تصویر بازسازی شده و در شکل ۷. ب تصویر رادیوگرافی اولیه‌ی مجسمه نشان داده شده است. مشاهده دو قسمت شکل نشان می‌دهد که در تصویر بازسازی شده نقوش واضح‌تر هستند، برای مثال گردن‌بند مجسمه که با پیکان مشخص شده در تصویر بازسازی شده کاملاً مشخص و واضح است ولی در تصویر اولیه به سختی دیده می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۶. تصویرهای حجمی و عمق و رنگی شده‌ی مجازی برای دو حالت: (الف) با استفاده از الگوریتم بازسازی (ب) بدون استفاده از آن.



(الف)



(ب)

شکل ۵. تصاویر لبه‌ها برای دو حالت: (الف) با استفاده از الگوریتم بازسازی و (ب) بدون استفاده از آن.

در تصویر شکل ۵. الف به علت به کارگیری الگوریتم بازسازی عمق، مقدار تغییرات عمق که در محدوده‌ی انحراف معیار صافی گاوسی واقع شده کم‌تر می‌شود و در نتیجه عمق‌های بیش‌تر که نقوش را تشکیل می‌دهند آشکار می‌شوند ولی در شکل ۵. ب که بدون الگوریتم بازسازی عمق است و تصویر خوردگی را نشان می‌دهد به علت فرسایش، سطوح تقریباً یکسان شده و عمق‌هایی که در محدوده‌ی انحراف معیار صافی گاوسی قرار می‌گیرند زیاد است و در نتیجه نقوش اصلی به علت داشتن عمق قابل مقایسه با سطوح بشقاب به علت خوردگی و فرسایش به خوبی قابل تشخیص نیستند. لازم به یادآوری است که در الگوریتم کنی با توجه به اعمال صافی گاوسی، عمل نوفه‌زدایی از تصویر نیز انجام می‌شود.

در شکل ۶ برای نشان دادن چگونگی تصحیح عمق در این الگوریتم، بعد سوم تصویرها نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که خوردگی با استفاده از الگوریتم بازسازی، اصلاح شده و تصاویر واضح‌تری به دست آمده است. این تغییرات عمق با استفاده از دستورهای بسته نرم‌افزار MATLAB نمایش داده شده‌اند. این دستورها به مقدار هر عنصر تصویر یک رنگ

در بررسی اعتبار نتایج از روش انسانی نیز استفاده شد و نظر افراد متخصص و غیرمتخصص در رادیوگرافی سنجیده شد. برای نظرسنجی، پوزیتو تصاویر بازسازی شده و اولیه‌ی رادیوگرافی شکل ۳ به افراد مختلف نشان داده شد. افراد متخصص این آزمون رادیولوژیست‌ها و رادیوگرافست‌های صنعتی بودند و افراد عادی به صورت تصادفی بین سنین ۱۰-۵۰ سال انتخاب شده بودند. ۱۰۰٪ افراد متخصص و حدود ۹۹٫۵٪ افراد غیرمتخصص وضوح بیش‌تر تصویر بازسازی شده و تصحیح نقوش را تأیید نمودند.

۴. نتیجه‌گیری

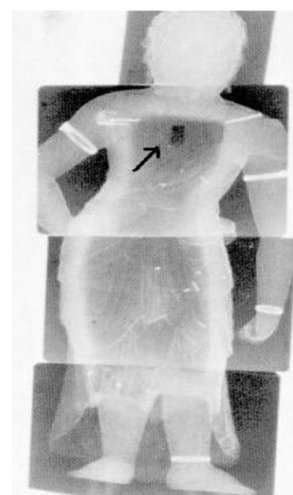
از روی تصویرهای رقمی رادیوگرافی تهیه شده و با استفاده از الگوریتم جدید و نیمه‌تجربی بازسازی حجمی، نقوش یک بشقاب عتیقه بازسازی شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که الگوریتم بازسازی عمق بر روی تصاویر رادیوگرافی تهیه شده می‌تواند مقدار خوردگی و ساییدگی آثار ارزشمند هنری را به دست دهد. برای بررسی صحت نتایج روش لبه‌یابی و بررسی سه‌بعدی تصاویر به کار گرفته شد که ظهور نقوش در مناطق خوردگی، کارایی این روش را نشان داد. برای بررسی نتایج از روش ارزیابی انسانی نیز استفاده شد و نتایج حاصل نشان داد که روش نظرسنجی انسانی نیز این نتایج را با درصد بسیار بالایی درست ارزیابی نمود. این مقاله نشان داد که ترکیب رادیوگرافی رقمی و روش‌های پردازش تصویر با در نظر گرفتن صحیح اصول فیزیکی حاکم بر رادیوگرافی، می‌تواند نتایج بسیار مطلوبی را در شناسایی آثار باستانی و کاربردهای مشابه به دست دهد.

پی‌نوشت‌ها:

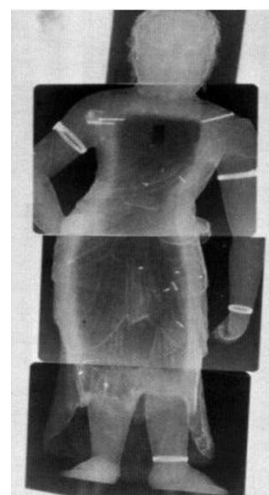
۱. Canny Method
۲. Scanner
۳. Resolution
۴. CCD: Charged Coupled Devices
۵. Catalogs
۶. Contrast



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷. الف) مجسمه‌ی فدو، و تصویر رادیوگرافی آن؛ ب) با استفاده از الگوریتم بازسازی؛ ج) بدون استفاده از آن.



مرجع‌ها:

1. E.H. Lehmann, P. Vontobela, E. Deschler-Erb, M. Soares, Non-invasive studies of objects from cultural heritage, nuclear instruments and methods in physics research A, 542 (2005) 68-75.
2. D. Bradley and D. Creagh, Physical techniques in the study of art, archaeology and cultural heritage, 1 and 2 Elsevier Publication (2006).
3. B.H. Stuart, Analytical techniques in materials conservation, John Wiley & Sons Ltd (2007).
4. I.N.M. Wainwright, Examination of paintings by physical and chemical methods, department of communications, and held at the national gallery, Canadian Conservation Institute (CCI)-Publications of Canada 26-28 October 1989 <http://www.cci-icc.gc.ca/> accessed October (2008).
5. F. Casali, X-ray digital radiography and computed tomography for cultural heritage, Archeometriai Muhely (2006) 24-28.
6. B. Ghose and D.K. Kankane, Estimation of location of defects in propellant grain by X-ray radiography, NDT & E International, 41 (2008) 125-128.
7. K. Edalati, N. Rastkhah, A. Kermani, M. Seiedi, A. Movafeghi, In-service corrosion evaluation in pipelines using gamma radiography-a numerical approach, Insight the Journal of the British Institute of Non-Destructive Testing, 46, 7 (2004) 396-398.
8. EN 14096-1, Non-destructive testing- Qualification of radiographic film digitization systems-part 1: Definitions, qualitative measurements of image quality parameters, standard reference film and qualitative control, European Norm (2004).
9. M. Giannoulaki, V. Argyropoulos, Th. Panou, A. Moundrea-Agrafioti, P. Themelis, The feasibility of using portable X-Ray radiography for the examination of the technology and the condition of a metals collection housed in the museum of ancient messene, Greece, e-Journal of Science & Technology (e-JST) (2006) 48-63.
10. سازمان انرژی اتمی ایران، استانداردهای پایه حفاظت در برابر اشعه، معاونت نظام ایمنی هسته‌ای کشور (۱۳۸۰).
11. مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، حفاظت در برابر پرتوهای یون‌ساز و ایمنی منابع پرتو- استانداردهای پایه، استانداردهای ملی ایران، استاندارد شماره ۷۷۵۱ (۱۳۸۳).
12. K. Edalati, N. Rastkhah, A. Kermani, M. Seiedi, A. Movafeghi, The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes, international journal of pressure vessels and piping, Elsevier Pub., 83 (2006) 736-741.
13. G. Kajiwara, Examination of the X-ray piping diagnostic system using EGS4 (examination of the film and iron rust), Proceedings of the Second International Workshop on EGS, Tsukuba, Japan (Aug 2000) 199-208.
14. S.S. Lee, Thickness evaluation of pipes using density profile on radiographs, in 10th asia-pacific conference on non-destructive testing, Brisbane, Australia (2001) 17-21.
15. J. Rheinlander and H. Christiansen, Using film density variations for determination of pipe thickness variation in gamma-ray radiography, Insight, 37(9) (1995) 691-694.
16. U. Zscherpel, Film digitization systems for DIR: standards, requirements, archiving and printing, NDT. Net, 5, 5 (2003).
17. A. Movafeghi, M.H. Krgarnovin, H. Soltanian-Zadeh, A radiographic calibration method for eddy current testing of heat exchanger tubes, Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 46(10) (2004) 594-597.
18. A. Movafeghi, M.H. Krgarnovin, H. Soltanian-Zadeh, Flaw detection improvement of digitized radiographs by morphological transformations, Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 47(10) (2005) 625-630.
19. P.K. Soltani, D. Wysniewski, K. Swartz, Amorphous selenium direct radiography for industrial imaging, international symposium on computerized tomography for industrial applications and image processing in radiology berlin, Germany (1999) 123-133.
20. R.C. Gonzales and R.E. Woods, Digital image processing, 2nd Edition, Prentice Hall Inc (2005).