



بهبود سیستم‌های ایمنی برای تشخیص اجسام در تصاویرهای پرتونگاری بار

سمانه شیخ‌ربیعی^۱، بهروز رکرک^{*۲}، عفت یاحقی^۱، بهنام آرزابک^۳

۱. دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، کد پستی: ۳۴۱۴۸۹۶۸۱۸، قزوین، ایران

۲. پژوهشکده‌ی راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

۳. مرکز نظام ایمنی هسته‌ای ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۴۹-۱۳۱۴۵، تهران - ایران

چکیده: بازرسی چشمی بار در فرودگاه‌ها و مراکز حساس مستلزم صرف زمان زیادی است و اجسام در بسیاری از موارد خصوصاً زمانی که در موقعیت و زاویه‌های خاصی قرار گرفته باشند قابل شناسایی با بازرسی‌های سریع چشمی نیستند. امروزه از دستگاه‌های تصویربرداری پرتو ایکس برای تشخیص اجسام در بار استفاده می‌شود. تصاویر پرتونگاری حاصل به علت پراکندگی فوتونی دارای میزانی از مه‌آلودگی هستند و گاهی تشخیص دقیق اجسام با مشکل مواجه می‌شود. روش‌های پردازش تصویر می‌توانند به بهبود کنتراست و در نتیجه بهتر شدن قابلیت تشخیص اجسام کمک کنند. در پرتونگاری بار سطح نویز و پراکندگی در تصویرهای مختلف با هم تفاوت زیادی دارند که این موضوع ضرورت استفاده از روش‌های پردازش تصویر خودکار را ایجاب می‌کند. در این پژوهش از دو روش موجک و صافی گابور با سطح آستانه‌ی خودکار استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد تصویرهای بازسازی شده اگرچه در جزئیات دارای اختلافاتی هستند ولی در میزان تشخیص اجسام توسط افراد تفاوت زیادی ندارند. در هر دو روش کنتراست و قابلیت تشخیص اجسام نسبت به تصویرهای اولیه بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است. زمان اجرای الگوریتم موجک گسسته حدود یک هشتم زمان اجرای صافی گابور است که با توجه به اهمیت سرعت پردازش تصویر در بازرسی بار برتری قابل ملاحظه‌ای است.

کلیدواژه‌ها: پرتونگاری بار، سیستم بازرسی بار، پرتو ایکس، روش موجک گسسته، فیلتر گابور

Improvement of Security Systems by Enhancing the Detection of Objects in Baggage X-Ray Radiography Images

S. Sheykh Rabiee¹, B. Rokrok^{*2}, E. Yahaghi¹, B. Arezabak³

1. Imam Khomeini International University, Postcod: 3414896818, Qazvin-Iran

2. Research School of Reactor and Nuclear Safety, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran

3. Iran Nuclear Regulatory Authority, AEOL, P.O.Box: 13145-1349, Tehran-Iran

Abstract: Visual inspection of baggage in airports and other critical centers takes a great time. In many cases, especially when the objects inside the load are positioned at specific angles, they may not be detectable by rapid visual examinations. Nowadays, X-ray imaging devices are used to detect objects at the passengers' luggage. Radiographic images obtained due to scattering of photon have a degree of fogging, and sometimes the exact diagnosis of objects is difficult. Image processing methods can improve the contrast and the ability to recognize objects. Different noises and scattering levels exist in radiographic images, which justify the use of automated image processing methods. In this study, Gabor filter and wavelet methods with automatic threshold level have been used to improve the quality of images. According to the results, there is no significant difference in the degree of detection of the objects, regardless of the differences in the reconstructed images. In both methods, the contrast and detection capabilities of the primary radiography images have improved significantly. The computation time of the implementation of the discrete wavelet algorithm is about one eighth of Gabor's time of execution, which can be remarkable given the importance of image processing speed in the area of passenger traffic inspection.

Keywords: Luggage Radiography, Luuggage System Inspection, X-Ray, Discrete Wavelet Method, Gabor Filter



۱. مقدمه

الگوریتم برای شناسایی بهتر اجسام به خصوص اشیای فلزی به کار گرفته می‌شود. روش‌های متعددی برای حذف نویز تصویرها وجود دارد، از صافی‌های پایین-گذر و بالا-گذر مانند صافی میانه، صافی گوسی تا الگوریتم‌های مبتنی بر بسامد مانند تبدیل فوریه و انواع تبدیل‌های موجک. استفاده از هر کدام از این صافی‌ها و الگوریتم‌ها مزایایی دارد.

برای بازرسی با پرتونگاری نیاز به الگوریتمی است که در عین سریع بودن، به صورت خودکار بتواند سطح نویز را شناسایی و مؤلفه‌های نویزی را حذف کند [۱۰، ۱۱]. با توجه به این که در داخل بار اشیای خطرناک غیرفلزی نیز وجود دارند، لازم است برای شناسایی آن‌ها نیز تمهیداتی اندیشیده شود. در بسیاری از موارد بازرسی شی مورد نظر مشکوک است و لازم است پردازش ثانویه سریع برای تشخیص آن صورت گیرد. پردازش ثانویه باید سریع و دارای سطح آستانه‌ی خودکار باشد. برای دستیابی به این منظور در این پژوهش از دو الگوریتم موجک دوبعدی و صافی گابور برای تشخیص اجسام داخل بار استفاده شده است [۱۲-۱۵]. این روش‌ها مبتنی بر تجزیه‌ی علامت و یا تصویر به مؤلفه‌های آن و حذف بعضی از آن‌ها با سطح آستانه‌ی مشخص هستند. الگوریتم موجک علامت و یا تصویر را براساس موجک مورد نظر به مؤلفه‌های مختلف تجزیه می‌کند. صافی گابور مانند تبدیل موجک است ولی با این تفاوت که تابع تبدیل آن دارای دو مؤلفه‌ی حقیقی و موهومی است. مؤلفه‌های به دست آمده از تصویر می‌توانند با آستانه‌گذاری و بازترکیب، تصویری با کنتراست بهتر ارائه دهند [۸، ۱۲، ۱۳]. در سایر پژوهش‌ها در حیطه‌ی پردازش تصویر برای تبدیل موجک، سطح آستانه‌ی دستی اعمال شده است. تعداد سطوح تجزیه‌ی تصویر به اطلاعات درون آن و هدف نهایی از پردازش بستگی دارد. برای تجزیه‌ی تصویرهای معمولی معمولاً سه تا شش سطح در نظر گرفته می‌شود.

باید دقت داشت که هر چه سطوح تجزیه‌ی تصویر بیشتر شود ممکن است دقت پردازش بیشتر شود، از این رو زمان آن نیز بیشتر می‌شود. برای صافی گابور تجزیه‌ی اطلاعات هم در جهت دامنه و هم در جهت فاز است ولی در موجک اطلاعات ناشی از تغییرات دامنه در یک فاز مشخص به دست می‌آید، یعنی تعداد مؤلفه‌های صافی گابور در تجزیه‌ی تصویر بیشتر است.

یکی از روش‌های اصلی بازرسی در سیستم حمل و نقل هوایی و همچنین در دروازه‌های ورودی مراکز حساس استفاده از پرتونگاری صنعتی است. در این روش اجسام داخل بار از طریق عبور پرتو ایکس و شکل‌گیری تصویر بر روی نمایش‌گر بازبینی می‌شوند که به آن بازرسی پرتونگاری می‌گویند. این تصویرها باید در زاویه‌های مختلف تهیه شده و دارای کنتراست بالا باشند. همچنین باید در زمان کوتاهی تهیه شوند تا در روند بازرسی اختلال زمانی پیش نیاید [۱، ۲]. در سیستم بازرسی پرتونگاری رقمی یک آشکارساز رقمی، به عنوان محیط ثبت تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. در بازرسی پرتونگاری دو هدف مورد نظر است: ۱) تخمین ساختار - به منظور دستیابی به مدل هندسی جسم از زاویه‌های دید مختلف (۲) تشخیص اجسام [۴]. مدل هندسی، یکپارچگی و ابعاد هندسی اجسام با استفاده از ساختار نتیجه‌شده از زاویه‌های دید مختلف مشخص می‌شود [۵، ۶]. در سیستم‌های پرتونگاری، نویز به صورت ذاتی وجود دارد که ناشی از عامل‌های مختلفی مانند پراکندگی فوتونی ناشی از برهم‌کنش‌ها در مواد است. تجهیزهای الکترونیکی و سیستم‌های جمع‌آوری اطلاعات نیز از عامل‌های ایجاد نویز هستند. این نویز در تصویر به صورت مات‌شدگی قابل‌ملاحظه است. اگرچه نمی‌توان اثر این نویز را به طور کامل از بین برد ولی بهبود کیفیت تصویر با الگوریتم‌های رفع مات‌شدگی، تأثیر بسیار زیادی در حذف تأثیرهای نویز و تشخیص بهتر اجسام داخل بار دارد [۷-۹].

مری و همکاران برای حذف نویز از الگوریتم‌های فضایی، از صافی‌های میانه و بالا-گذر در تشخیص بهتر اجسام چدنی استفاده کردند [۷-۹]. در ادامه آن‌ها به دنبال روشی سریع برای کشف اجسام خطرناک مانند اسلحه و کارد با استفاده از تصویرگیری چند زاویه‌ای پرتو ایکس بودند تا با استفاده از این تصویرها در چند زاویه‌ی مختلف بتوانند جسم را تشخیص دهند [۱، ۵]. لامپرت و همکاران نیز با استفاده از سیستم بازبینی چند زاویه‌ای، با استفاده از زیر-پنجره و شاخه روشی را برای تشخیص اجسام در تصویر ارائه دادند [۷]. بیستن با ارائه‌ی روشی براساس انرژی دوتایی، رده‌بندی تصویر و رنگی‌سازی آن توانست الگوریتم مؤثری را برای تشخیص بهتر اشیاء در داخل بار به کار گیرد [۲]. در سیستم‌های بازرسی موجود ترکیبی از چند



شکل ۱. تصویر تلفن همراه و ماشین حساب داخل کیف مورد بازرسی.



شکل ۲. نحوه‌ی قرارگیری کیف و صفحه‌ی تصویرگیر زیر لوله‌ی پرتو ایکس.

۲.۲ روش موجک گسسته

موجک دسته‌ای از توابع ریاضی است که برای تجزیه‌ی علامت پیوسته به مؤلفه‌های بسامدی آن به کار می‌رود. تبدیل موجک یک تابع، با جمع حاصل ضرب تابع مزبور در تابع موجک مادر و یا دختر در کل بازه‌ی زمانی تعریف می‌شود. بنابراین به طور کلی می‌توان نوشت

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \omega\left(\frac{t-a}{a}\right) dt \quad (1)$$

که در آن، $f(t)$ تابع مورد نظر، ω تابع موجک با قابلیت تغییرات مقیاسی b و مکانی a هستند. از نتیجه‌ی این تبدیل ضرب‌های موجک C محاسبه می‌شوند که تابعی از مقیاس و مکان هستند

زیاد شدن مؤلفه‌های تصویر باعث بالا رفتن زمان پردازش می‌شود. در این پژوهش با ارایه‌ی یک روش خودکار برای انتخاب سطح آستانه، از این دو الگوریتم برای بهبود تصویرهای پرتونگاری بار استفاده شده است. علت انتخاب این دو الگوریتم قابلیت آن‌ها در اعمال خودکار سطح آستانه و زمان اجرای مناسب آن‌ها است.

۲. روش‌ها

۱.۲ تصویرهای پرتونگاری

برای تهیه‌ی تصویرهای پرتونگاری اجسام داخل بار، تعدادی وسیله شامل ماشین حساب، دسته کلید، موبایل، شال و عینک، پنس کاغذ و تراش و چند وسیله معمول دیگر در داخل یک کیف چرمی به ابعاد تقریبی 19×21 و ضخامت 12 سانتی‌متر قرار داده شدند. تصویر تلفن همراه و ماشین حساب داخل کیف در شکل ۱ و ترتیب آزمایشی پرتونگاری در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. برای پرتونگاری و بررسی روش‌ها، اجسام با دو چیدمان مختلف در کیف قرار داده شدند. تصویربرداری با استفاده از دستگاه مولد پرتو ایکس مدل CERAM235، به روش پرتونگاری رقمی^(۱) (CR)، با استفاده از سامانه‌ی پرتونگاری رقمی CareStream، صفحه‌های تصویرگیر فسفری^(۲) (IP) و با انتخاب ولتاژها، جریان‌ها و زمان‌های مختلفی انجام شدند و فاصله‌ی چشمه تا صفحه‌ی آشکارساز برابر صد سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

در زیر صفحه‌های آشکارساز یک صفحه‌ی سربی قرار گرفت تا پس‌پراکنندگی پرتو بر روی تصویر به حداقل برسد. پونیده‌ی (اسکتر) لیزری مخصوص برای خواندن صفحه‌های آشکارساز با قدرت تفکیک مکانی 50 میکرون استفاده شد. آزمایش‌های پرتونگاری براساس استانداردهای ISO انجام شد تا کلیه‌ی آزمایش‌ها و نتایج حاصله تکرارپذیر باشند و نتایج یکسانی را ایجاد کنند [۱۶، ۱۷]. هم‌چنین مقررات 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)، در کلیه‌ی آزمایش‌های پرتونگاری رعایت شد [۱۸، ۱۹].



$x/2n$ و $y/2n$ به دست خواهد آمد. سپس از الگوریتم عکس تبدیل موجک دو بعدی برای بازسازی تصویر براساس ضریب‌های به دست آمده استفاده می‌شود. با اعمال سطح آستانه‌های مختلف روی مرحله‌های تجزیه‌ی تصویرها و ترکیب عامل‌های به دست آمده می‌توان تصویرهای خروجی با کنتراست متفاوت داشت.

برای استفاده از الگوریتم به منظور نویززدایی بعد از تجزیه‌ی تصویر در چند سطح، سطح آستانه‌ای برای سطوح تجزیه شده در نظر گرفته شده و با اعمال آن سطوحی که به عنوان نویز تشخیص داده شده‌اند، حذف می‌شود. در الگوریتم‌های معمول سطح آستانه دستی انتخاب می‌شود. در این پژوهش برای ایجاد سطح آستانه‌ی خودکار که وابسته به تصویر است از توزیع رایلی در تصویر استفاده شد [۱۳، ۱۴] که با تفصیل بیش‌تر در بخش ۲.۴ آورده شده است.

۳.۲ روش صافی گابور

یک موجک گابور دو بعدی عبارت است از یک تابع گاوسی مدوله شده با یک تابع سینوسی مختلط که می‌تواند به عنوان آشکارسازهای جهت‌دار و تطبیق‌پذیر با مقیاس، به منظور آشکارسازی خطوط و لبه‌ها در تصویرها مورد استفاده قرار گیرد. این صافی‌ها بهترین محلی‌سازی هم‌زمان اطلاعات مکانی و بسامدی را دارند [۱۴، ۱۵]. از مزایای استفاده از صافی گابور این است که تابع‌های موجک با بسامدها و زاویه‌های فاز مختلف می‌توانند وجود داشته باشند. صافی گابور دارای یک جزء حقیقی و یک جزء موهومی است که عبارت‌اند از [۱۵]:

$$g(x, y, \lambda, \Theta, \sigma, \gamma) = \exp\left(-\frac{x'' + \lambda' y''}{2\sigma_\gamma}\right) \exp\left(i\left(\frac{2\pi x'}{\lambda} + \Psi\right)\right)$$

$$g_R(x, y, \lambda, \Theta, \sigma, \gamma) = \exp\left(-\frac{x'' + \lambda' y''}{2\sigma_\gamma}\right) \cos\left(\frac{2\pi x'}{\lambda} + \Psi\right)$$

$$g_I(x, y, \lambda, \Theta, \sigma, \gamma) = \exp\left(-\frac{x'' + \lambda' y''}{2\sigma_\gamma}\right) \sin\left(\frac{2\pi x'}{\lambda} + \Psi\right) \quad (3)$$

که در آن‌ها x' و y' مختصات یک نقطه از تصویر، x و y مختصات یک نقطه از تصویر به دست آمده پس از به کارگیری صافی گابور و λ معرف طول موج سینوسی است. طول موج به فاصله‌ی بین دو قله‌ی متوالی موج یا بین هر دو نقطه‌ی تکراری

[۸]. تغییرهای مکانی و مقیاس که در تعریف موجک به کار رفته به معنی حرکت موجک در طول محور زمان و میزان گسترش موجک در طول محور زمان است. هر تابعی به عنوان موجک به کار گرفته شود، دارای میانگین صفر و انرژی واحد است. یعنی داریم.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega(u) du = 0$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega^*(u) du = 1 \quad (2)$$

موجک مادر دارای طول متناهی و نوسانی شدیداً میرا است که می‌تواند با انتقال و تغییر مقیاس به موجک دختر تبدیل شود. موجک انواع مختلفی دارد مانند موجک هار و دابچیز که هر کدام عملکرد مخصوصی دارند. روش به دست آوردن تبدیل موجک برای علامت یک بعدی به این صورت است که علامت با یک صافی پایین-گذر و یک صافی بالا-گذر به دو بخش بسامد پایین و بسامد بالا تقسیم می‌شود. تعداد نمونه‌ها در هر یک از این بخش‌ها نصف تعداد نمونه‌های علامت اصلی است. سپس بخش بسامد پایین دوباره به دو بخش بسامد بالا و بسامد پایین تقسیم می‌شود. تعداد دفعاتی که این عمل انجام می‌گیرد تعداد سطح تجزیه‌ی تبدیل موجک را نشان می‌دهد [۱۲]. مشابه علامت یک بعدی، تبدیل برای علامت دو بعدی هم به همان ترتیب یک بار به طور افقی و یک بار به طور عمودی انجام می‌شود. در تبدیل موجک دو بعدی، تصویری با ابعاد x و y به چهار ناحیه HH ، LH ، HL و LL تقسیم می‌شود. هر کدام از این قسمت‌ها حاوی مفهومی از تصویر هستند. H و L بیان‌گر صافی‌های بالا و پایین گذر هستند. به عنوان مثال در قسمت LL مؤلفه‌های بسامد پایین تصویر وجود دارد که تقریبی از کل تصویر است. قسمت LH لبه‌های تصویر در جهت عمودی، قسمت HL لبه‌های تصویر را در جهت افقی و قسمت HH لبه‌ها را در جهت قطری دربردارند. LL ناحیه‌ای با ابعاد $x/2$ و $y/2$ است. سپس این ناحیه دوباره به چهار ناحیه به نام‌های $HH1$ ، $HL1$ ، $LH1$ و $LL1$ تقسیم شده و این عمل تقسیم می‌تواند به دفعات دلخواه ادامه یابد. برای تبدیل موجک در سطح تجزیه‌ی n این فرایند n بار انجام می‌شود. در نهایت ناحیه‌ی LLn با ابعاد



پایه‌سازی صافی گابور است، این الگوریتم برای قسمت موهومی اجرا شده و پس از اعمال سطح آستانه برای فاز، علامت باقی‌مانده با قسمت حقیقی جمع شده است. در این روش با استفاده از الگوریتم معکوس موجک، علامت بدون نویز به دست می‌آید. در رابطه‌ی ۳ تابع موجک به شکل یک تابع گاوسی مختلط در نظر گرفته شده است. بنابراین در این تبدیل اطلاعات فاز و دامنه‌ی هم‌زمان موجود است. برای حفظ داده‌ها در یک تصویر، در اولین مرحله فاز محلی و اطلاعات دامنه در هر نقطه در تصویر استخراج می‌شود. به عبارت دیگر الگوریتم تابع گسسته برای چند سطح با پایه‌ی موجک مختلط در دو راستای عمود برهم اجرا می‌شود. برای استفاده از این الگوریتم برای کم کردن نویز لازم است بعضی از مؤلفه‌های دامنه و فاز حذف شوند تا با باز ترکیب آن‌ها بر اساس انرژی سیستم و یا الگوریتم‌های دیگر، تصویر تیزتر و واضح‌تری به دست آید. برای مشخص کردن سطح آستانه‌ی خودکار در این الگوریتم از روش توزیع رایلی برای مؤلفه‌های دامنه استفاده شده که در ادامه توضیح داده شده است.

۴.۲ محاسبه‌ی سطح آستانه‌ی خودکار

در الگوریتم موجک و صافی گابور نیاز به استفاده از یک سطح آستانه است که معمولاً به طور دستی اعمال می‌شود. با توجه به تفاوت علامت و تصویرها لازم است الگوریتم خودکاری برای سطح آستانه ارایه شود. با توجه به مستقل بودن تغییرات مؤلفه‌های حقیقی و موهومی در صافی گابور و الگوریتم موجک با فرض این که تغییرات آن‌ها دارای توزیع نرمال با واریانس مشابه باشند می‌توان از توزیع رایلی برای محاسبه‌ی سطح آستانه با توجه به اطلاعات دامنه بدون اثر گذاشتن بر اطلاعات فاز استفاده کرد که در آن تابع چگالی احتمال توزیع عبارت است از [۱۳]:

$$R(x) = \frac{x}{\sigma_g} \exp\left(-\frac{x}{2\sigma_g}\right) \quad (7)$$

که در آن، انحراف معیار توزیع گاوسی دو بعدی در محل بردار پاسخ صافی است و متوسط تابع توزیع رایلی چنین محاسبه می‌شود

موج که شکل یکسان دارند گفته می‌شود. Θ زاویه‌های صافی گابور را نشان می‌دهد و Ψ فاز است و تقارن صافی گابور را نشان می‌دهد یعنی، اگر صفر یا 180° باشد متقارن و اگر 90° یا منفی 90° باشد نامتقارن است [۱۵]. σ طول پوش تابع گاوسی و γ نسبت ابعاد فضایی است. اگر گاما برابر یک باشد شکل به صورت دایره است و اگر کوچک‌تر از یک باشد به صورت بیضی‌وار خواهد بود [۱۵]. در تولید صافی گابور بعضی از این پارامترها نقش مهم‌تری ایفا می‌کنند که پارامترهای مؤثر بر تولید صافی گابور نامیده می‌شوند و با دادن مقادیر مختلف به پارامترهای مؤثر بر تولید صافی گابور مجموعه‌ای از صافی گابور به دست می‌آید که به آن‌ها بانک صافی گابور گفته می‌شود. با ثابت نگه داشتن Ψ ، σ و با تغییر پارامترهای بسامد و Θ در یک محدوده‌ی خاص بانک صافی گابور تولید می‌شود [۱۵]. در صافی گابور دو پارامتر اصلی - بسامد یا طول موج و زاویه یا جهت صافی وجود دارد. که با تغییر این دو پارامتر شکل صافی عوض می‌شود. در تبدیل گابور علامت یا تصویر I با n درجه‌ی تجزیه‌ی سطح در راستای موجک‌های g^e و g^o که تابع‌های پایه‌ی عمود برهم هستند، علامت در راستای محور حقیقی و موهومی چنین تجزیه می‌شود.

$$[e_n(x), o_n(x)] = [I(x) * g_n^e(x), I(x) * g_n^o(x)] \quad (4)$$

مقدار $e_n(x)$ و $o_n(x)$ به ترتیب، قسمت‌های حقیقی و موهومی موج مختلط است. دامنه‌ی علامت چنین به دست می‌آید

$$r_n(x) = \sqrt{e_n(x)^2 + o_n(x)^2} \quad (5)$$

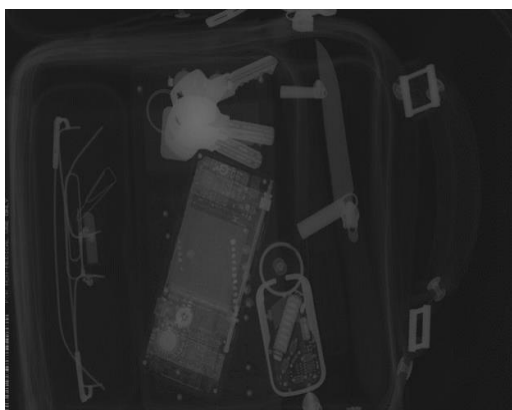
و برای فاز داریم

$$\Phi_n(x) = a \tan[e_n(x), o_n(x)] \quad (6)$$

معمولاً از قسمت حقیقی تابع موجک برای ساخت علامت استفاده می‌شود ولی در این روش قسمت موهومی نیز در ساخت علامت تأثیر دارد. برای حذف نویز از تابع‌هایی استفاده می‌شود که مقدار ضریب‌های موجک قسمت حقیقی مربوط را صفر یا نزدیک به صفر می‌کند. در روش حفظ فاز [۱۳] که نوعی روش



(الف)



(ب)

شکل ۳. نمونه‌ای از پرتونگاری صنعتی تهیه شده برای دو چیدمان مختلف.

۱.۳ نتایج موجک گسسته

برای حذف پس‌زمینه و رفع مات‌شدگی از پرتونگاری بار تصویرها با استفاده از تبدیل موجک گسسته با موجک هار در سه سطح تجزیه شده و مؤلفه‌های عمودی، افقی و قطری آنها به‌دست آمد. موجک هار یک موجک دو قطبی و متقارن است و به علت ناپیوستگی مشتق‌پذیر هم نیست. این موجک برای مواردی که در سیستم تغییرات ناگهانی وجود داشته باشد کارایی خوبی دارد. از آنجایی که لبه‌های تصویرها به شکل تغییرات گرادینانی سریع در تصویر دیده می‌شوند، استفاده از موجک هار می‌تواند مفید واقع شود. در الگوریتم‌های حاضر، برای رفع مات‌شدگی، از یک سطح آستانه برای مؤلفه‌ها به‌منظور حذف پس‌زمینه استفاده می‌شود. تغییرات این سطح آستانه در کیفیت تصویر خروجی مؤثر است. در شکل ۴ خروجی حاصل از اجرای الگوریتم برای شکل ۳ الف در دو آستانه‌ی مختلف نشان داده شده است. تغییرات دستی آستانه یکی از مشکلات این الگوریتم است.

$$\mu_r = \sigma_g \sqrt{\frac{\pi}{\gamma}} \quad (8)$$

و انحراف معیار آن این است

$$\sigma_r^2 = \frac{4-\pi}{\gamma} \sigma_g^2 \quad (9)$$

آستانه با توجه به مقدارها به شکل زیر محاسبه می‌شود

$$T = \mu_r + k\sigma_r \quad (10)$$

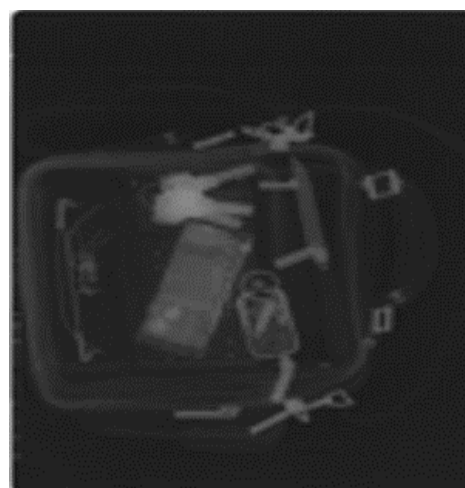
۳. یافته‌ها

در این پژوهش برای تشخیص بهتر اجسام در داخل بار از روش موجک گسسته و موجک گابور با سطح آستانه‌ی خودکار استفاده و نتایج حاصل از اعمال این روش‌ها مقایسه شد. ابتدا تصویرهای رادیوگرافی رقمی تهیه و سپس با برنامه‌ی نوشته شده در محیط نرم‌افزار متلب ۲۰۱۵ و روش‌های مختلف آشکارسازی اجسام به منظور بهبود کنتراست برای بازرسی بر آنها اعمال شد. رادیوگرافی در دو مرحله و دو چیدمان مختلف اجسام در داخل کیف با ولتاژهای مختلف انجام شد. در شکل ۳ نمونه‌ای از تصویرهای تهیه شده نشان داده شده است. در شکل ۳ الف پرتونگاری کیف حاوی سوئیچ، تلفن همراه، ماشین حساب متوسط، چاقو، تعدادی کلید و جا عینکی که در داخل آن عینک، گیره و تراش قرار داده شده نمایش داده شده است. در این چیدمان ولتاژهای اعمالی لوله‌ی پرتو ایکس ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ کیلو ولت و اندازه‌ی جریان ۱/۵ میلی آمپر و زمان تابش ۴ دقیقه بود. در شکل ۳ ب پرتونگاری کیف حاوی قیچی بزرگ پیچیده شده در ورق آلومینیمی، خودکار، مداد، کارت دارای مگنت، شمع، کلید، گیره و منگنه نشان داده شده است؛ برای این چیدمان ولتاژهای اعمالی لوله‌ی پرتو ایکس ۷۰ و ۱۰۰ کیلوولت، زاویه‌ها صفر و ۳۰ درجه، اندازه‌ی جریان ۱/۵ میلی آمپر و زمان تابش پرتو ۴ دقیقه بود. به علت وجود پراکندگی فوتونی و نویزهای دیگر تصویر اجسام داخل کیف مه‌آلوده و مات هستند. برای رفع این مات‌شدگی لازم است تا حدی اطلاعات زمینه در تصویر حذف شود. برای این منظور از دو روش موجک گسسته و صافی گابور استفاده شد که نتایج آنها در ادامه آورده شده است.

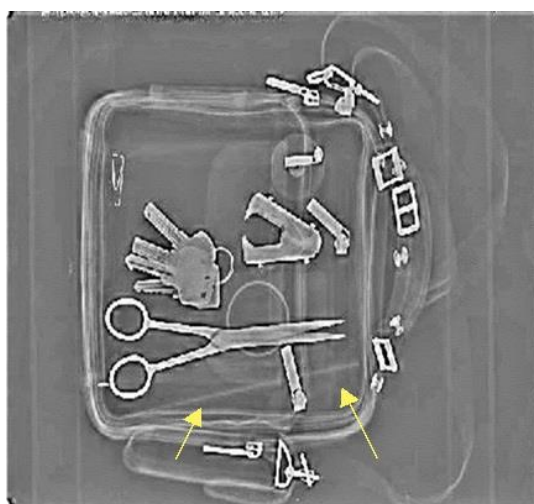
برای حل این مشکل از الگوریتم خودکار برای تعیین آستانه با توجه به تابع آماری تصویر استفاده شد. پس از به دست آوردن مؤلفه‌های تصویر، سطح آستانه با فرض توزیع رایلی برای اطلاعات دامنه، متوسط و انحراف معیار آن مطابق روابط ۷ تا ۱۰ محاسبه شد. با اعمال این سطح آستانه بر روی مؤلفه‌های تصویرهای شکل‌های ۳ الف و ب، نویزدایی انجام و با بازترکیب مؤلفه‌های جدید، تصویر بازسازی شده مطابق شکل ۵ به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود مات‌شدگی از بین رفته و اجسام واضح‌تر دیده می‌شوند. مداد به علت ضخامت کم در پرتونگاری اصلی مشخص نیست ولی در تصویر بازسازی شده (که با پیکان نشان داده شده است) به خوبی مشخص شده است.



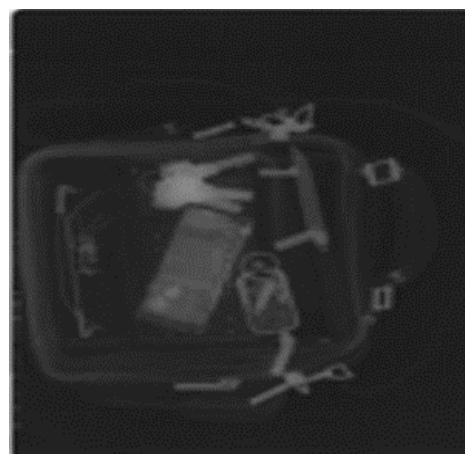
(الف)



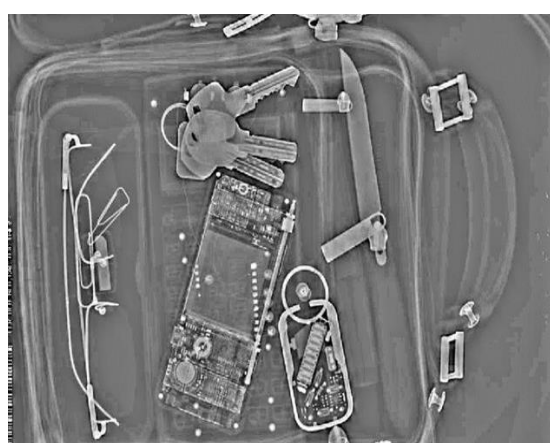
(ب)



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۵. تصویر بازسازی شده‌ی شکل‌های ۳ الف و ب پس از اعمال الگوریتم تبدیل موجک دو بعدی با الگوریتم خودکار تعیین سطح آستانه.

شکل ۴. الف) پرتونگاری اصلی بار، و شکل خروجی ب) برای آستانه‌ی ۱۵ و ج) برای آستانه‌ی ۰/۱۵.



۲.۳ نتایج صافی گابور

مقدار بزرگ‌تر این معیار نشان‌دهنده‌ی کم‌تر بودن نوفه در علامت دوبعدی و یا تصویر است. در شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات MSE و PSNR برای تعداد مختلف جهت‌ها و مقیاس‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، افزایش تعداد مقیاس‌ها و جهت‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر روی تصویر بازسازی شده ندارد. دلیل این امر آن است که هرچه سطوح تجزیه بیش‌تر باشد مؤلفه‌های تصویر در سطوح تجزیه دارای اطلاعات کم‌تر بوده و در آستانه‌گذاری حذف می‌شوند.

برای بازسازی یک تصویر به کمک صافی گابور، تصویر پس از برده شدن به حوزه‌ی بسامد با استفاده از تبدیل سریع فوریه، در صافی گابور که حاصل ضرب یک تابع نمایی مختلط و گاوسی است ضرب شده و مؤلفه‌های مقیاسی و جهتی آن به دست می‌آید. در شکل ۸ چند نمونه تصویر بازسازی شده‌ی شکل ۳ ب با عبور از صافی گابور با بسامدها و زاویه‌های مختلف نشان داده شده است. سپس یک سطح آستانه برای مؤلفه‌های دامنه، مطابق معادله‌ی ۱۰ محاسبه شد تا قسمت‌های زیر آن از زمینه‌ی تصویر حذف شوند. در نهایت پاسخ به دست آمده با استفاده از تبدیل معکوس فوریه به حوزه‌ی مکانی برگردانده شد تا تصویر واضح‌تری به دست آید. تصویر بازسازی شده‌ی شکل ۳ ب با اعمال صافی گابور و بدون در نظر گرفتن سطح آستانه در شکل ۹ و با سطح آستانه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود لبه‌ها تیزتر و اجسام واضح‌تر شده‌اند و هم‌چنین مات‌شدگی از بین رفته و اندازه‌ی اجسام قابل تشخیص است.

اثرهای تغییر مقیاس‌ها و جهت‌ها در این الگوریتم نیز بررسی شد. در شکل ۱۱ نتایج حاصل از بازسازی پرتونگاره‌ی ۳ الف با تغییر مقیاس‌ها و جهت‌ها نشان داده شده است. برای شکل ۱۱ الف تعداد مقیاس‌ها و جهت‌ها برابر ۶ و برای شکل ۱۱ ب برابر ۸ (جمعاً ۶۴ زیرتصویر) در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر تعداد مقیاس‌ها و جهت‌ها تغییر قابل‌توجهی در تصویر بازسازی شده دیده نمی‌شود و تنها به دلیل این که تعداد زیرمجموعه‌های تصویر بیش‌تر می‌شود کنتراست (تباین) تصویر کمی افزایش یافته و زمان اجرای الگوریتم بیش‌تر می‌شود. در شکل ۱۲ نتایج حاصل از به‌کارگیری دو الگوریتم برای پرتونگاره‌های مختلف بار، نشان داده شده است.

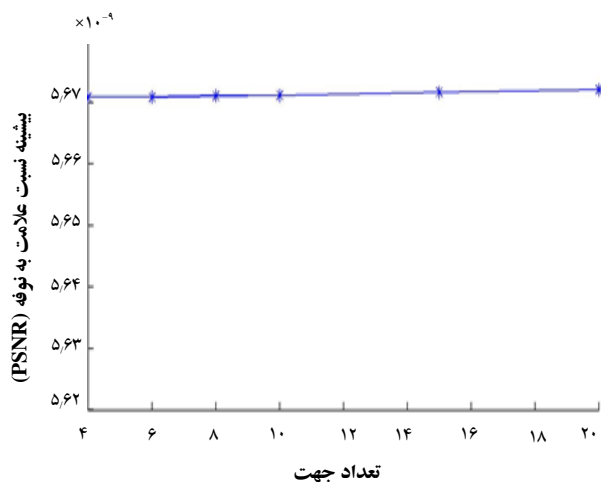
همان‌طور که گفته شد موجک گابور دو بعدی عبارت است از یک تابع گاوسی مدوله شده با یک تابع سینوسی مختلط که توانایی محاسبه‌ی مؤلفه‌های تصویر را در مقیاس‌ها و جهت‌های مختلف دارد. در این الگوریتم، تصویر ورودی توسط بانک صافی‌های گابور به $K * S$ زیرتصویر تبدیل می‌شود، که S در آن، تعداد مقیاس‌ها و K تعداد جهت‌ها است. در این پژوهش تعداد مقیاس‌ها برابر ۶ و تعداد جهت‌ها نیز برابر ۶ است (جمعاً ۳۶ زیرتصویر) انتخاب و کم‌ترین طول موج ۰/۵ در نظر گرفته شده است. بررسی‌ها نشان داد که تغییر تعداد مقیاس‌ها و جهت‌ها تأثیر قابل‌توجهی در نتایج بازیابی ایجاد نمی‌کند ولی تغییر کم‌ترین طول موج اثر زیادی در تصویر خروجی دارد که علت آن تغییر پوش بسته‌های موجک طبق رابطه‌ی ۳ است.

برای بررسی اثر تعداد جهت‌ها و مقیاس‌ها بر روی تصویرها، برای تصویر شکل ۳ الف تعداد مقیاس‌ها و جهت‌ها بین ۴ تا ۲۰ تغییر و تغییرات میانگین مربعی خطا^(۳) (MSE) و بیشینه نسبت علامت به نوفه^(۴) (PSNR) تصویرهای خروجی نسبت به پرتونگاره‌ی اصلی بررسی شد. خطای میانگین مربعی، که کاربرد وسیعی در پردازش برای ارزیابی انواع علامت یک‌بعدی و دوبعدی (تصویر) دارد چنین تعریف می‌شود

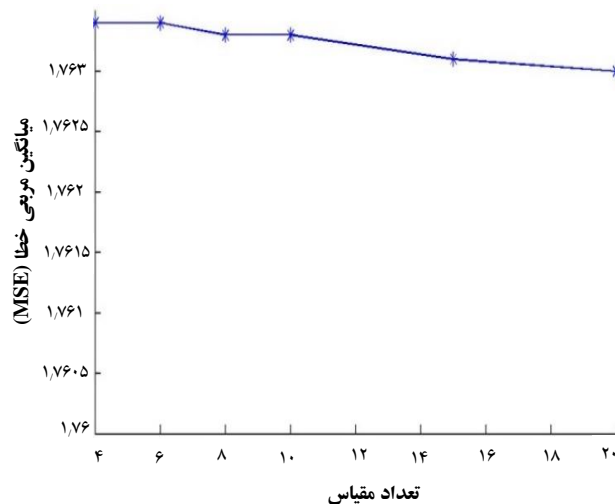
$$MSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{original}(i, j, t) - I_{denoised}(i, j, t))^2} \quad (11)$$

که در آن M و N ابعاد تصویر مورد بررسی، $I_{original}$ تصویر اصلی و $I_{denoised}$ تصویر پس از حذف نوفه است. مقدار کم‌تر MSE نشان‌دهنده‌ی نزدیک‌تر بودن تصویر به تصویر اصلی است. نسبت بیش‌ترین مقدار علامت به نوفه، (PSNR) بیان‌گر میزان انرژی علامت اصلی در برابر انرژی نوفه‌ی موجود در علامت است و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$PSNR = \frac{1}{MN} \log \left(\frac{255^2 MN}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{original}(i, j, t) - I_{denoised}(i, j, t))^2} \right) \quad (12)$$



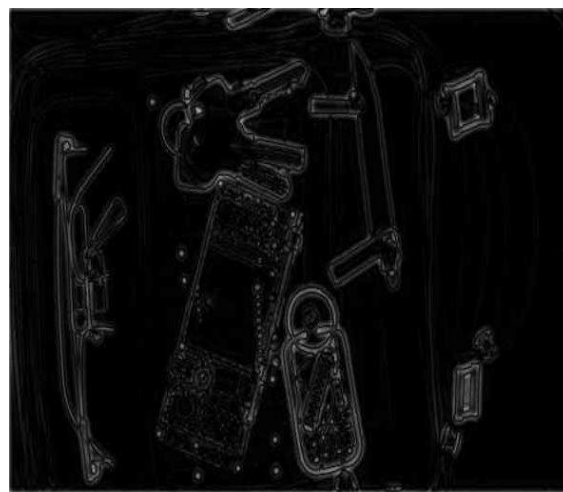
شکل ۷. رابطه‌ی بین پیشینه نسبت علامت به نوفه (PSNR) و تعداد جهت.



شکل ۶. رابطه‌ی بین میانگین مربعی خطا (MSE) و تعداد مقیاس‌ها.



بسامد ۰٫۲۵۰۰ هرتز و زاویه‌ی ۰٫۵۲۳۶ رادیان



بسامد ۰٫۱۲۵۰ هرتز و زاویه‌ی صفر رادیان

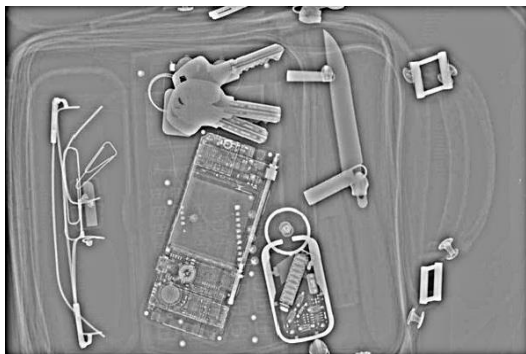


بسامد ۴ هرتز و زاویه‌ی ۲٫۶۱۸۰ رادیان



بسامد ۰٫۱۲۵۰ هرتز و زاویه‌ی ۱٫۰۴۷۲ رادیان

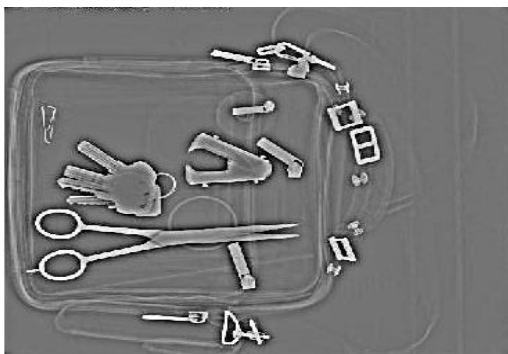
شکل ۸. چند نمونه تصویر بازسازی شده با تغییر بسامد و زاویه در خروجی صافی گابور.



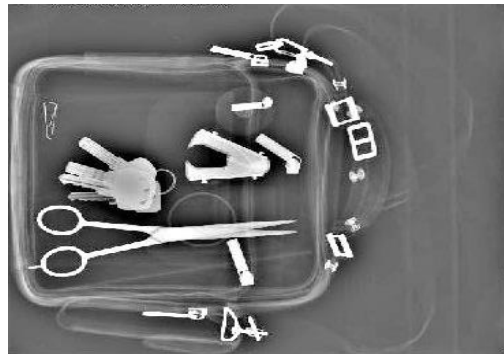
شکل ۱۰. تصویر بازسازی شده با صافی گابور با سطح آستانه.



شکل ۹. تصویر بازسازی شده با صافی گابور بدون سطح آستانه.

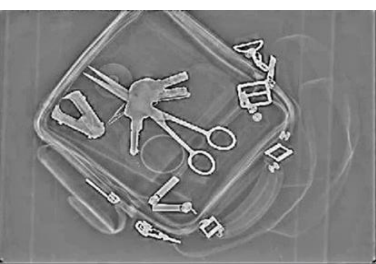
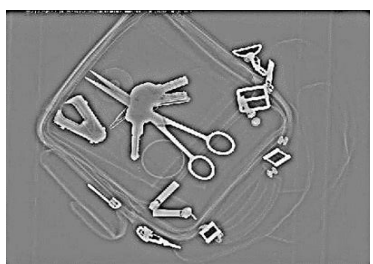
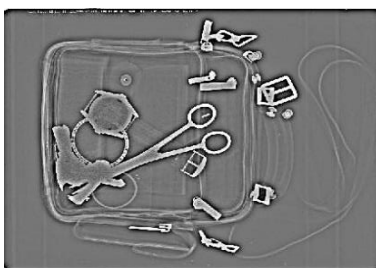
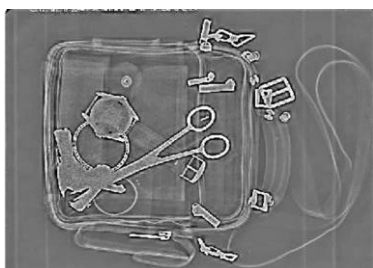


(ب)



(الف)

شکل ۱۱. تصویر بازسازی شده (الف) با تعداد مقیاس‌ها و جهت‌های برابر ۶ و (ب) با تعداد مقیاس‌ها و جهت‌های برابر ۸.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۱۲. (الف) پرتونگاره‌ی اصلی، (ب) تصویرهای بازسازی شده به روش موجک گسسته و (ج) صافی گابور.



۳.۲ ارزیابی نتایج

برای ارزیابی نتایج حاصل از بازسازی تصویرها و مقایسه‌ی آن‌ها با تصویرهای پرتونگاری اصلی، از روش ناظر انسانی استفاده شد. به این ترتیب که از چهار متخصص در پرتونگاری صنعتی و پنج فرد عادی خواسته شد که اجسام داخل کیف را از روی پرتونگاری اصلی و بازسازی شده شناسایی کنند. درصد تعداد اجسام شناسایی شده توسط افراد به تعداد کل اجسام در جدول ۱ درج شده است. علت عدم شناسایی بعضی از وسایل توسط متخصصین و افراد عادی، ضخامت و چگالی کم اجسام گذاشته شده در داخل کیف مانند شال، مداد و خط‌کش بوده که با توجه به تضعیف کم پرتو تصویر مناسبی از آن‌ها ایجاد نشده و در نتیجه قابل شناسایی نیستند. نظرات افراد نشان می‌دهد که تصویرهای بازسازی شده با دو روش فوق نسبت به پرتونگاری اصلی وضوح بیش‌تری داشته و کنتراست آن‌ها بهبود یافته است. هم‌چنین به نظر آن‌ها نتایج دو روش بازسازی تفاوت خیلی کمی در جزئیات نشان داده و تفاوتی در شناسایی اجسام نداشته است. از نظر زمان اجرای برنامه هر دو الگوریتم سریع هستند و برای یک تصویر با ابعاد 700×1200 برای موجک گسسته حدود $1/99$ ثانیه و برای صافی گابور $16/4$ ثانیه با یک رایانه دو هسته‌ای اینتل $2/660$ GHz با متلب (R) 2015 است. علت زمان‌بری بیش‌تر الگوریتم صافی گابور انجام محاسبات بیش‌تر در جهات و مقیاس‌های مختلف مطابق توضیحات بخش ۳.۲ است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش‌های موجک دوبعدی و صافی گابور با سطح آستانه‌ی خودکار برای افزایش وضوح پرتونگاریهای اجسام داخل بار استفاده شده است. برای انجام این، ابتدا مؤلفه‌های تصویرها با دو روش موجک گسسته و صافی گابور محاسبه و سپس سطح آستانه برای حذف پس‌زمینه‌ی تصویر براساس توزیع رایلی تصویر محاسبه و براساس آن مؤلفه‌های زیر سطح آستانه حذف شدند. با ترکیب مؤلفه‌ها، تصویرهای بازسازی شده با هر دو روش به دست آمد. ارزیابی نتایج حاصل از به کارگیری این دو الگوریتم با استفاده از نظرهای افراد متخصص و غیرمتخصص انجام شد. نظرهای این افراد نشان

می‌دهد که هر دو روش کارایی لازم برای بهبود کیفیت پرتونگاری بار را دارند. تصویرهای بازسازی شده با هر دو روش نسبت به پرتونگاری اصلی کنتراست بهتری دارند و اطلاعات با وضوح بیش‌تری روی آن‌ها دیده می‌شود. روش موجک گسسته جزئیات را با دقت کمی بیش‌تر نسبت به روش صافی گابور نشان می‌دهد. ولی این امر در تشخیص اجسام تأثیر چندانی ندارد یعنی کارایی دو روش در این مورد تقریباً یکسان است و میزان بهبود مشابهی را نتیجه می‌دهند. استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر سبب شد که درصد شناسایی افراد کارشناس 11% و افراد عادی 18% افزایش یابد. قابل توجه است که درصد نهایی تشخیص اجسام در پرتونگاری اصلی 76% برای افراد متخصص و 63% برای افراد عادی بوده است. در تصویرهای بازسازی شده با دو روش موجک گسسته و صافی گابور با سطح آستانه‌ی خودکار نتایج ارزیابی برای متخصصین به 87% و برای افراد عادی به 81% ارتقا یافته که نشان‌دهنده‌ی کارایی دو الگوریتم در شناسایی بهتر اجسام است. اجسام شناسایی نشده مانند کارت دارای ضخامت و چگالی نامناسب بوده‌اند و در پرتونگاری اصلی نیز هیچ‌گونه اطلاعاتی از آن‌ها دیده نشده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم صافی گابور به علت محاسبات در جهت‌ها و مقیاس‌های مختلف زمان بیش‌تری حدود ۸ برابر روش موجک گسسته نیاز دارد که این امر برتری کارایی زمانی روش موجک گسسته را نشان می‌دهد. در پژوهش‌های پیشین، الگوریتم‌ها بر آشکارسازی قطعات فلزی خطرناک مانند اسلحه، کارد و تیغه‌ی فلزی و موارد دیگری از این قبیل تمرکز داشته‌اند [۱، ۵] ولی در این پژوهش به آشکارسازی اجسام کوچک و با چگالی کم نیز پرداخته شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که دو الگوریتم استفاده شده در این پژوهش اجسام خطرناک فلزی موجود در بار را با درصد بالایی آشکار می‌کنند و هم‌چنین قادرند اجسام کوچک و با چگالی کم را نیز آشکار کنند. برای ادامه‌ی کار، استفاده از روش تصویرگیری چندزاویه‌ای [۶]، انرژی دو گانه و سیستم‌های ردیاب خودکار [۴] برای شناسایی اشیا می‌تواند مفید باشد.



جدول ۱. درصد شناسایی اجسام و جمع‌بندی نظرهای متخصصین و افراد عادی حاصل از مقایسه‌ی پرتونگاری اصلی و بازسازی شده با دو الگوریتم موجک گسسته و صافی گابور با سطح آستانه‌ی خودکار.

نظر	تعداد کل اجسام در تصویرهای مختلف	تعداد اجسام شناسایی شده در تصویرهای اصلی	تعداد اجسام شناسایی شده در تصویرهای بازسازی شده با موجک گسسته	تعداد اجسام شناسایی شده در تصویرهای بازسازی شده با صافی گابور	درصد شناسایی اجسام در پرتونگاری تصویرهای اصلی	درصد شناسایی اجسام با موجک گسسته	درصد شناسایی اجسام با صافی گابور
افراد متخصص	۹۸	۷۵	۸۶	۸۶	۷۶٪	۸۷٪	۸۷٪
افراد عادی	۹۸	۶۲	۸۰	۸۰	۶۳٪	۸۱٪	۸۱٪

پی‌نوشت‌ها

1. Computed Radiography (CR)
2. Phosphor Imaging Plate (IP)
3. Mean Square Error (MSE)
4. Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)

مرجع‌ها

- [1] D. Mery, T. Jaeger, D. Filbert, A review of methods for automated recognition of casting defects, *Insight*, No. **44(7)** (2002) 428-436.
- [2] M. Bastan, M.R. Yousefi, T.M. Breuel, Visual words on baggage Xray images, In *Computer Analysis of Images and Patterns*, 360–368 (2011).
- [3] P. Viola, M. Jones, Robust real time object detection, *International Journal of Computer Vision*, **57(2)** (2004) 137-154.
- [4] M. Mansoor, R. Rajashankari, Detection of concealed weapons in X-ray images using fuzzy K-NN, *International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology*, **2(2)** (2012).
- [5] D. Mery, V. Riffo, Automated Object Recognition in Baggage Screening Using Multiple X-ray Views, In *52nd Annual Conference of the British Institute for Non-Destructive Testing*, Telford, Sept, (2013).
- [6] T. Franzel, U. Schmidt, S. Roth, Object Detection in Multi-view X-Ray Images, In *DAGM*, (2012).
- [7] C.H. Lampert, M.B. Blaschko, T. Hofmann, Efficient Subwindow Search: A Branch and Bound Framework for Object Localization, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **31(12)** (2009) 34-40.
- [8] L. He, J. Li, A. Plaza, Y. Li, Discriminative Low-Rank Gabor Filtering for Spectral-Spatial Hyperspectral Image Classification, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (2017) 1381–1395.
- [9] D. Mery, V. Riffo, I. Zuccar, C. Pieringer, Automated X-Ray Object Recognition Using an Efficient Search Algorithm in Multiple Views, In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, (2013) 368–374.
- [10] R.I.C. Gonzalez, R.E. Woods, S.T. Eddins, *Digital image processing using MATLAB*, 2nd ed, Gatesmark publishing, (2009).
- [11] Al. Bovik, *The Essential Guide to Image Processing*, Elsevier, 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA, (2010).
- [12] W. Selesnick, R.G. Baraniuk, N.G. Kingsbury, The dual tree complex wavelet transform, *IEEE Signal Processing Magazine*, **22(6)** (2005) 123-151.
- [13] L. Chao, J. Ling-yao, S. Dong-cheng, Identity Recognition Algorithm Using Improved Gabor, Feature Selection of Gait Energy Image, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf Series*, **787** (2017) 012015, doi:10.1088/1742-6596/787/1/012015.
- [14] R.J. Ferrari, R.M. Rangayyan, J.E.L. Desautels, A.F. Frère, Analysis of Asymmetry in Mammograms via Directional Filtering With Gabor Wavelets, *IEEE Trans. on Medical Imaging*, **20(9)** (2001) 953-964.



- [15] A. Serrano, I.M. de Diego, C. Conde, E. Cabello, Analysis of variance of Gabor filter banks parameters for optimal face recognition, Pattern Recognition Letters, (2011) 1998-2008.
- [16] EN 14096-1, Non-destructive testing- Qualification of radiographic film digitisation systems- Part I: Definitions, qualitative measurements of image quality parameters, standard reference film and qualitative control, European Norm, (2004).
- [17] EN 14096-2, Non-destructive testing- Qualification of radiographic film digitisation systems- Part 2: Minimum requirement, European Norm, (2004).
- [18] Iran Nuclear Regulatory Authority, Basic Safety Standards for Protection against ionizing radiation, Atomic Energy Organization of Iran, (2001).
- [19] ISIRI 7751, Protection against ionizing radiation and the safety of radiation sources – Basic standards, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, (2005).