



تعیین تابع توزیع احتمال چگالی نوری در فیلم‌های رادیوگرافی صنعتی با پرتو ایکس

محمد تقان ساسانپور*، علی طاهری، رضا قلی‌پور پیوندی

پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

چکیده: در این مقاله به بررسی تابع توزیع چگالی نوری حاصل از فیلم رادیوگرافی در ولتاژهای ۸۰ الی ۱۲۰ kV پرداخته شده است. صفحات فولادی $30 \times 30 \text{ cm}^2$ به ضخامت‌های ۲ و ۸ mm براساس استانداردهای اروپایی با شدت جریان‌ها و زمان‌های مختلف تحت تابش قرار گرفته‌اند. اطلاعات فیلم‌های رادیوگرافی با اسکنر لیزری به داده‌های عددی بر مبنای داده‌های ۸ بیتی با قدرت تفکیک ۳۲۰۰ dpi تبدیل شده‌اند. هیستوگرام‌های حاصل از این اسکن‌ها با تمام توابع احتمال موجود مقایسه شده‌اند. به علت فراوانی توابع احتمال، ابتدا میزان انطباق آنها بر بهترین و ساده‌ترین هیستوگرام بررسی شد. سپس توابع انتخاب شده برای فیلم‌های باقی‌مانده به کار رفتند. به این ترتیب بهترین تابع توزیع احتمال مشخص شد. همین مراحل برای عیوب رادیوگرافی نیز به اجرا درآمدند. هم‌چنین میزان انطباق توابع توزیع احتمال به کار برده شده برای حالت زمینه و عیوب نیز بررسی شد.

کلیدواژه‌ها: فیلم رادیوگرافی، پرتو ایکس، توابع توزیع احتمال، هیستوگرام، رادیوگرافی

Determination of Probability Distribution Function of Optical Density in Industrial Radiographic Films by X-Ray

M.T. Sasanpour*, A. Taheri, R.G. Peyvandi

Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-3486, Tehran-Iran

Abstract: In this paper, the optical density distribution function obtained from the radiographic films at the voltages of 80-150 kV was investigated. Steel plates of $30 \times 30 \text{ mm}^2$ with thicknesses of 2 and 8 mm were irradiated according to the European standards with different currents at various times. The information of the radiographic films was converted into 8-bit numeric data by using a laser scanner with a resolution of 3200 dpi. The histograms obtained from these scans were compared with all applicable probability functions. Due to the large number of the employed probability functions, their compatibility was first assessed on the best and simplest histogram. Afterwards, the selected functions were used for the remaining films. In this way, the best probability distribution function was determined. The same steps were taken for radiographic defects. Furthermore, the degree of adaptation of the probability distribution functions applied to the base metal and the defects regions was also evaluated.

Keywords: Radiographic Film, X-Ray, Probability Distribution Function, Histogram, Radiography



۱. مقدمه

رادیوگرافی صنعتی با پرتو ایکس دارای قدمتی بیش از صد سال است و به کارگیری فیلم رادیوگرافی نیز تاکنون دقیق‌ترین و به صرفه‌ترین روش تصویربرداری است. اخیراً تلاش زیادی شده است تا با به کارگیری تکنولوژی جدید تصویربرداری دیجیتالی، از آشکارسازهای دیگری به جز فیلم استفاده شود که پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای نیز حاصل شده است [۱]. با این وجود، هنوز هم دقت تصویر فیلم‌های رادیوگرافی بسیار بالاست، به خصوص وقتی که از اسکنرهای پیشرفته‌ی کنونی به جای دستگاه‌های معمولی نظیر چگالی‌سنج‌های نوری به منظور تبدیل اطلاعات فیلم‌ها به داده‌های عددی استفاده شود.

پژوهشگران رادیوگرافی همواره سعی داشته‌اند تا داده‌های حاصل از آزمون‌ها به صورت فرمول‌های ریاضی بیان شوند. از جمله دانشمندان پیش‌تاز این فن، ساسنین است که در سال ۱۹۸۸ به بررسی ریاضی نتایج حاصل از رادیوگرافی براساس توابع توزیع احتمال پرداخته است [۲]. او چشمه‌ی پرتو ایکس را به عنوان مجموعه‌ای از چشمه‌های گامای تک‌انرژی با تابع توزیع گاما (بر اساس انرژی- فراوانی فوتون‌ها) در نظر گرفت. بر این اساس، تابع توزیع احتمال در هنگام عبور از جسم، تحت تأثیر تابع توزیع احتمال پواسون قرار می‌گرفت. ساسنین نشان داد که می‌توان تابع نهایی را به صورت یک تابع توزیع گاما در نظر گرفت. از این تابع در حوزه‌های دیگری چون تصاویر راداری نیز استفاده شده است [۳، ۴]. هم‌چنین در این زمینه، علاوه بر تابع گاما، از توابع دیگری چون رایلی و به طور خاص تر رایلی با دنباله‌ی وزین^(۱) [۵، ۶]، لگاریتمی نرمال [۷، ۸] و توابع جدیدی چون ناکاگامی^(۲) [۹، ۱۰] نیز استفاده می‌شود.

اهداف انجام این پژوهش عبارتند از: الف) فرمول‌بندی ریاضی رفتار تابع توزیع حاصل از چگالی نوری فیلم رادیوگرافی؛ این روابط ریاضی کاربرد فراوانی در استفاده از روش‌های پردازش تصویر به منظور ارتقاء کیفیت تصاویر حاصل از روش رادیوگرافی خواهند داشت. ب) بررسی میزان انطباق تابع توزیع احتمال چگالی نوری حاصل از فلز پایه^(۳) با تابع توزیع احتمال چگالی نوری مربوط به عیوب؛ بررسی این موضوع با توجه به هدف اصلی آزمون‌های غیرمخرب (شناسایی و

آشکارسازی عیوب موجود در جسم) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۲. تجهیزات و نحوه‌ی انجام آزمون‌های رادیوگرافی

در این پژوهش، دستگاه تصویربرداری پرتو ایکس ERESKO 65 MF2 X-ray، با اندازه‌ی کانون^(۴) $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ، فیلم رادیوگرافی KODAK-AA 400-MX125 با ابعاد $10 \times 30 \text{ cm}^2$ و چگالی‌سنج نوری مدل X-Rite 331 برای تعیین چگالی فوتوگرافی و هم‌چنین اسکنر TAM 1000 XL Scan Market 1000 XL pro MICROTEK برای اسکن فیلم‌ها استفاده شدند.

فاصله‌ی چشمه تا جسم، ثابت و برابر ۱m در نظر گرفته شده است. پارامترهای مهمی که بر چگالی نوری روی فیلم رادیوگرافی اثر می‌گذارند، عبارتند از: ولتاژ دستگاه، جریان تیوب و زمان تابش. آزمون‌ها و فیلم خوانی بر اساس استانداردهای اروپایی EN انجام گرفته است [۱۱-۱۶]. معمولاً از فولاد به صورت فلز مرجع در انجام آزمون‌های رادیوگرافی صنعتی استفاده می‌شود. به همین علت در این پژوهش نیز از صفحات فولادی با ضخامت‌های ۲ و ۸ mm استفاده شد (شکل ۱). پس از ظهور فیلم‌های رادیوگرافی (طبق استاندارد EN)، چگالی هر فیلم با دستگاه چگالی‌سنج نوری، تعیین شد. بر اساس نتایج به دست آمده، چگالی نوری فیلم‌ها بین ۲ تا ۳/۵ قرار داشتند. در مرحله‌ی بعدی، فیلم‌ها با اسکنر دارای قدرت تفکیک ۳۲۰۰ dpi با ۲۵۶ کانال در سطح رنگ خاکستری به صورت ۸ بیتی، اسکن شدند. به این ترتیب، داده‌های عددی با دقت بالایی به دست آمدند. جدول ۱ مقادیر مختلف پارامترهای استفاده شده در رادیوگرافی را نشان می‌دهد.

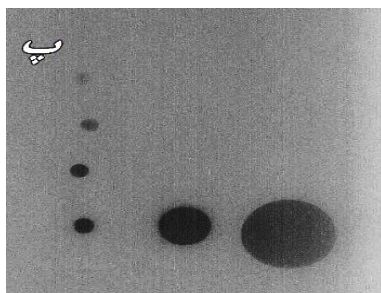
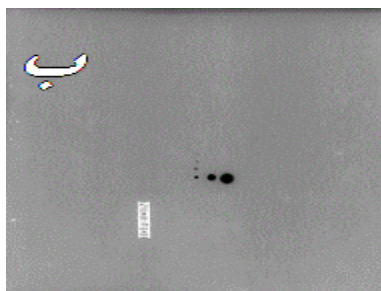
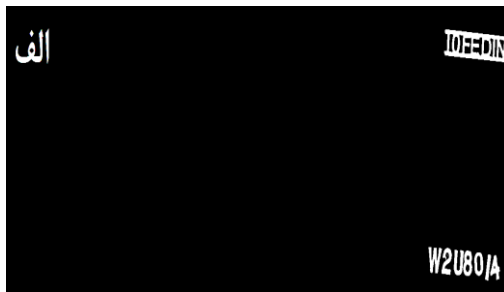
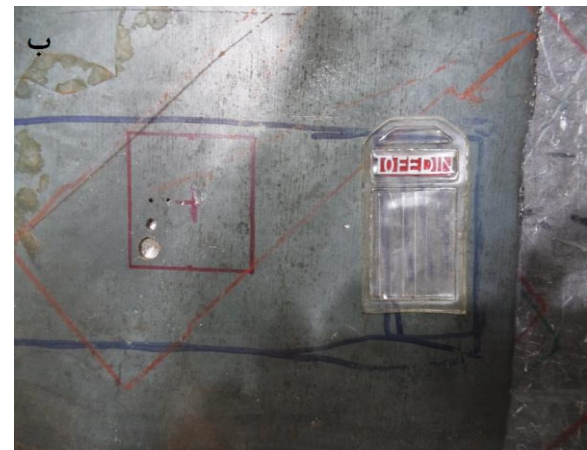
در واقع اساس کار آزمون رادیوگرافی که جزئی از آزمون‌های غیرمخرب است، بر مشخص کردن عیوب موجود در جسم استوار است. بنابراین در مرحله‌ی بعد، عیوبی بر روی سطح صفحه‌ی فولادی ایجاد شد. با توجه به این که امکان ایجاد عیوب دلخواه روی صفحه‌ی فولادی با ضخامت ۲ mm وجود نداشت، عیوب تنها روی صفحه‌ی فولادی ۸ mm ایجاد شدند. این عیوب به صورت حفره‌های استوانه‌ای شکل با قطر‌ها و عمق‌های متفاوتی بر روی صفحه‌ی فولادی مورد نظر تعبیه شدند. مشخصات عیوب ایجاد شده به همراه کدهای اختصاص یافته به آنها در جدول ۲



ارائه شده‌اند. این عیوب در شکل‌های ۲-ب و ۲-پ نیز نشان داده شده‌اند.

جدول ۲. مشخصات عیوب ایجاد شده بر صفحه‌ی فولادی به ضخامت λ mm

کد	عمق (mm)	قطر (mm)	شماره‌ی عیب
d10h5	۵	۱۰	۱
d10h5		۵	۲
d10h5		۲	۳
d2h3	۳	۲	۴
d2h2	۲		۵
d2h1	۱		۶



شکل ۱. الف) چگونگی قرارگیری دستگاه اشعه ایکس و صفحه‌ی فولادی؛ ب) صفحه‌ی فولادی دارای عیوب ایجاد شده بر روی آن.

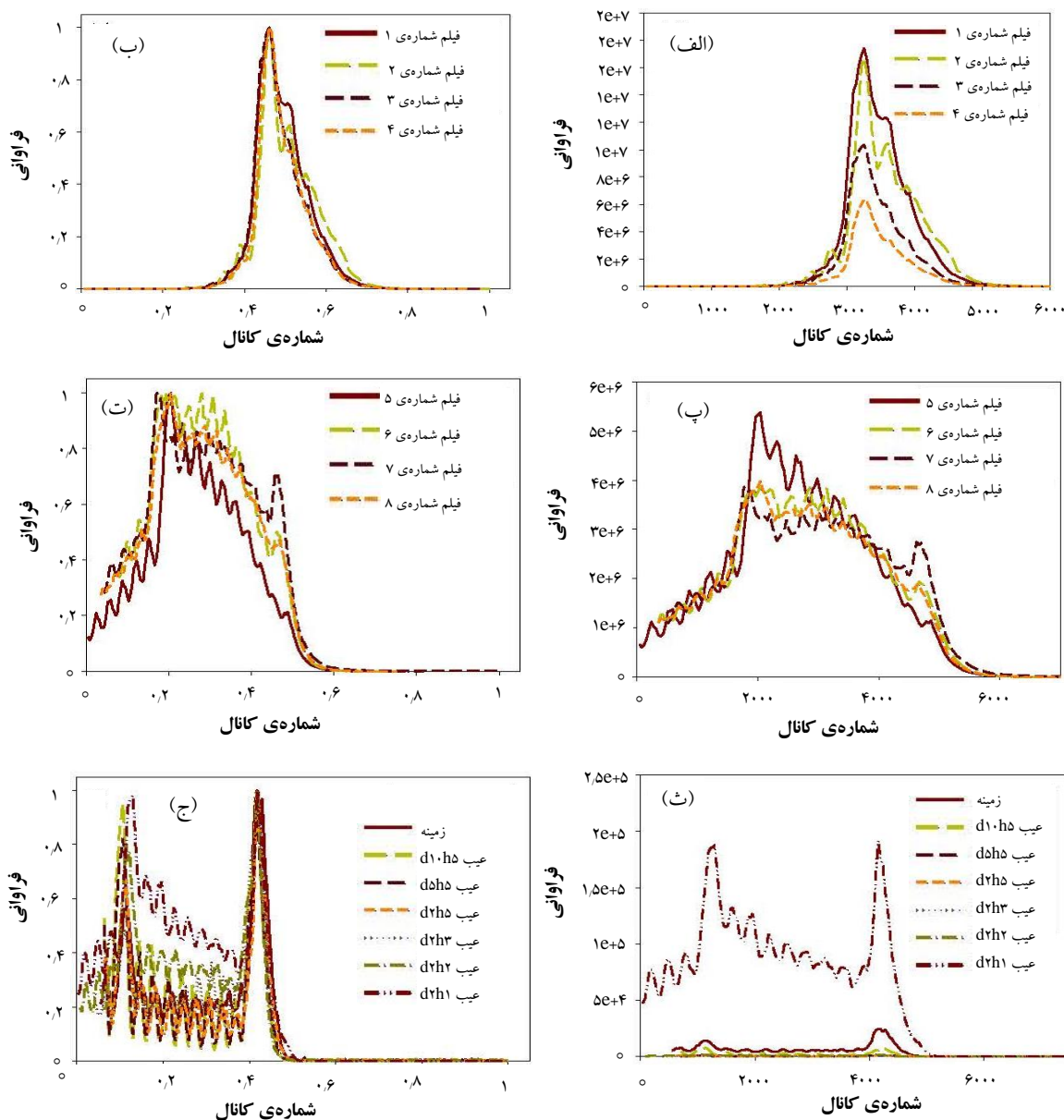
جدول ۱. مشخصات رادیوگرافی فیلم‌های تابش داده شده

شماره‌ی فیلم	ضخامت (mm)	ولتاژ (kV)	جریان (mA)	میزان تابش (mA.min)
۱	۲	۸۰	۱	۲۴
۲			۲	
۳			۴	
۴			۵	
۵	۲	۱۰۰	۲	۱۲
۶			۳	
۷			۴	
۸			۵	
۹	۸	۱۲۰	۲	۱۰

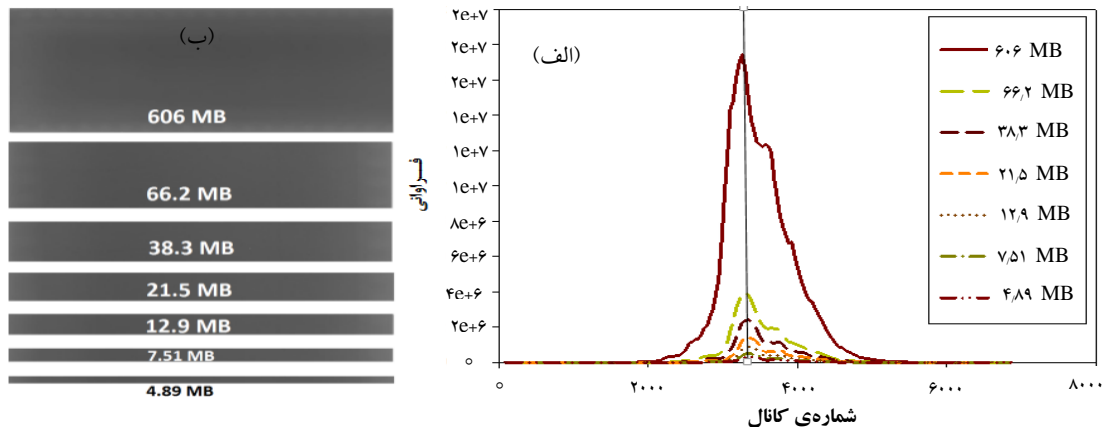
شکل ۲. تصاویر فیلم‌های اسکن شده (تصاویر برای مشاهده‌ی بهتر کوچک‌نمایی یا بزرگ‌نمایی شده‌اند)، الف) تصویر فیلم شماره ۳ مربوط به زمینه برای صفحه‌ی فولادی با ضخامت ۲ mm، ب) تصویر فیلم شماره ۹ مربوط به زمینه و عیوب برای صفحه‌ی فولادی به ضخامت ۸ mm، پ) تصویر عیوب فیلم شماره ۹ که از نزدیک نشان داده شده‌اند.

۳ تا ۶ در بخش ۳ نشان داده شده‌اند.

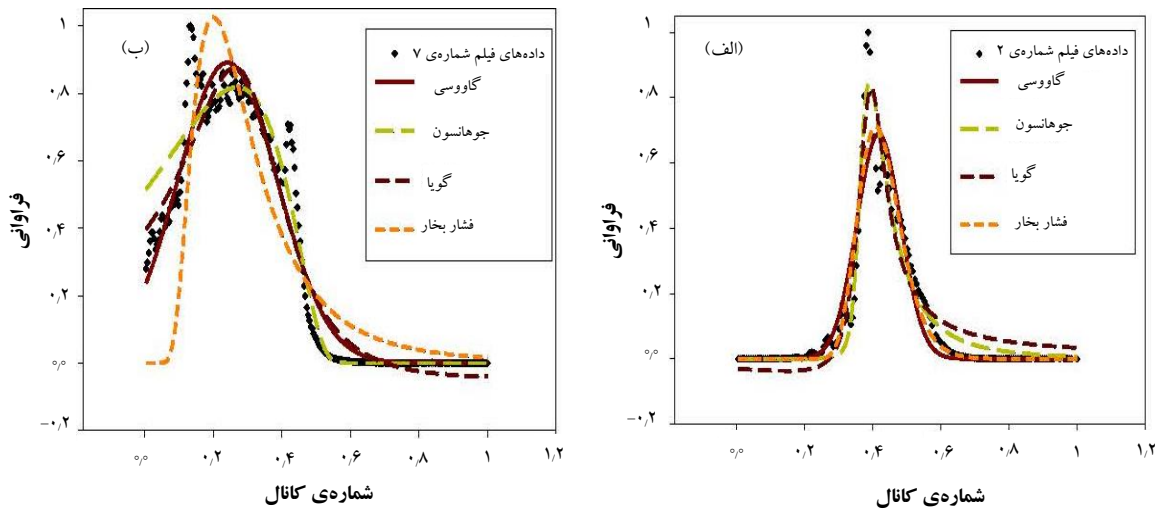
هم‌چنین داده‌های حاصل از اسکتر به صورت هیستوگرام رسم شدند. برخی از هیستوگرام‌های به دست آمده در شکل‌های



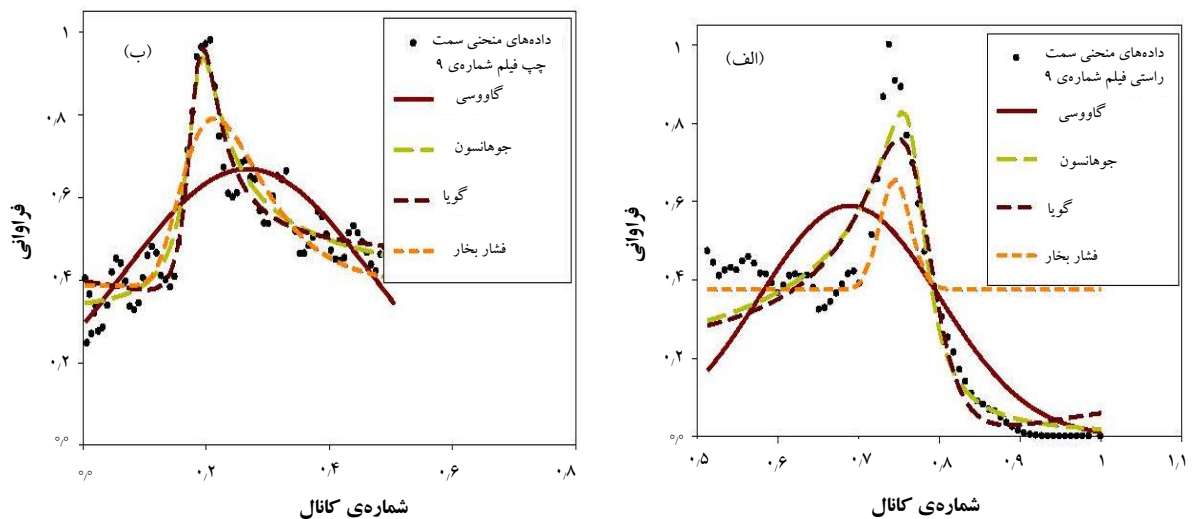
شکل ۳. هیستوگرام فیلم‌ها. منحنی شکل‌های (الف)، (پ)، (ث) بر اساس شمارش‌های واقعی و منحنی شکل‌های (ب)، (ت) و (ج) برای حالت نرمالیزه شده نسبت به بیشینه مقدار، رسم شده‌اند. شکل‌های (ث) و (ج) هیستوگرام زمینه و عیوب فیلم شماره‌ی ۹ را نشان می‌دهند.

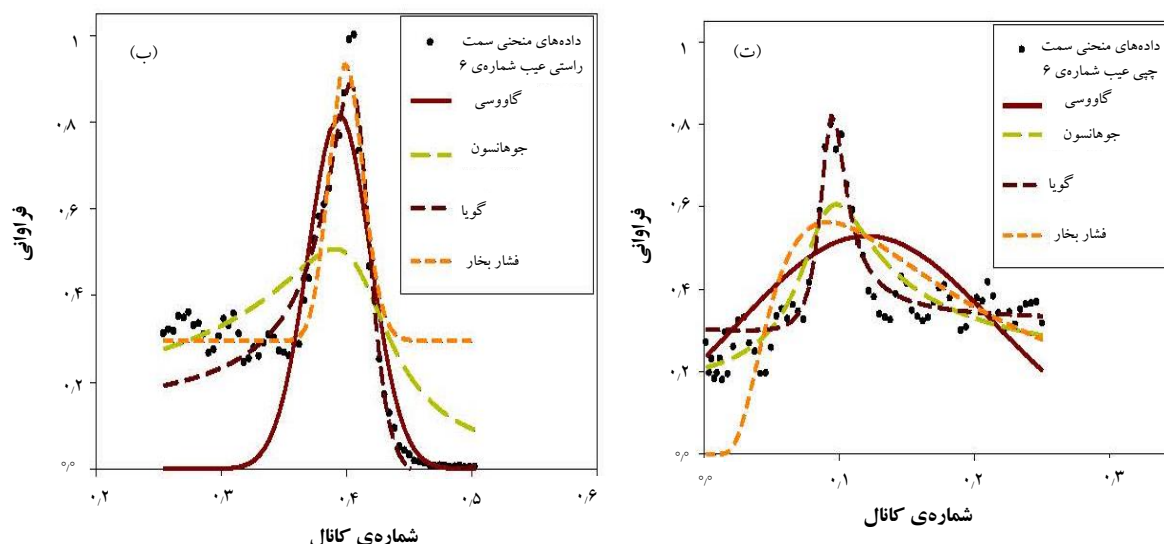


شکل ۴. الف) منحنی هیستوگرام سطوح اسکن شده فیلم شماره ۱، ب) برش‌های مختلف فیلم شماره ۱ (حجم فایل مربوط به هر برش بر روی آن درج شده است).



شکل ۵. انطباق منحنی‌های توابع احتمال بر داده‌های مربوط به زمینه فیلم‌های رادیوگرافی.





شکل ۶. توابع احتمال منطبق شده بر داده‌های مربوط به زمینه و عیب فیلم رادیوگرافی شماره‌ی ۹.

۱۸]. در بررسی منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۳، جابه‌جایی افقی برخی از منحنی‌ها در شکل‌های ۳. الف، پ و ث ناشی از پراکندگی آماری داده‌های به دست آمده از اسکنر است، اما نوسان‌های عمودی ایجاد شده در منحنی‌ها که با افزایش ولتاژ بیش‌تر می‌شود، ناشی از تأثیر پدیده‌ی کامپتون است.

در ادامه، به بررسی رفتار منحنی هیستوگرام زمینه و عیوب پرداخته شده است. در این راستا قسمت سالم تصویر فیلم رادیوگرافی یعنی زمینه و قسمت‌های مربوط به عیوب مشاهده شده در فیلم شماره‌ی ۹ اسکن شدند. رفتار منحنی داده‌های به دست آمده در شکل‌های ۳. ث و ۳. ج قابل مشاهده است. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، رفتار منحنی هیستوگرام زمینه‌ی فیلم و عیوب یکسان است. این موضوع نشان می‌دهد که برهم‌کنش بین جسم فولادی و فوتون‌های چشمه در قسمت‌های مربوط به زمینه و محل قرارگیری عیوب طبق توضیحات داده شده در پاراگراف قبل، بستگی به انرژی چشمه‌ی تابش و نوع برهم‌کنش بین جسم و فوتون‌ها دارد.

علاوه بر این، چگونگی تغییرات رفتار منحنی هیستوگرام بر اساس تغییرات سطح اسکن شده یک فیلم رادیوگرافی بررسی شد. برای دست‌یابی به این هدف، برش‌های نرم‌افزاری از فیلم شماره‌ی ۱ با مساحت‌های مختلف ایجاد، و استفاده شدند. حجم تصویر ذخیره شده بر روی رایانه مربوط به هر یک از برش‌های ایجاد

۳. نتایج و بحث

۱.۳ بررسی رفتار هیستوگرام فیلم‌ها در اثر تغییرات پارامترهای رادیوگرافی

با بررسی منحنی‌های توزیع حاصل از چگالی نوری فیلم‌ها، رفتارهای متفاوتی برای این منحنی‌ها مشاهده شد. مهم‌ترین پارامتری که بر رفتار هیستوگرام چگالی نوری فیلم رادیوگرافی اثر می‌گذارد، ولتاژ دستگاه پرتو ایکس است. به این ترتیب که در ولتاژهای ثابت، وقتی جریان‌ها و زمان‌های تابش تغییر می‌کردند، تغییر محسوسی در رفتار کلی منحنی فرآوانی چگالی نوری مشاهده نمی‌شد، در صورتی که تغییرات ولتاژ اثر کاملاً محسوسی بر رفتار منحنی‌های هیستوگرام می‌گذاشت. در شکل ۲ نحوه‌ی تغییرات هیستوگرام‌ها بر حسب ولتاژ و جریان لامپ اشعه ایکس نشان داده شده است. دلیل این موضوع به اثر ولتاژ دستگاه پرتو ایکس، یا متناسب با آن انرژی فوتون‌های فرودی، و نوع برهم‌کنش‌های بین ماده و فوتون‌های فرودی مربوط می‌شود.

همان‌طور که از منحنی ضریب تضعیف خطی فولاد نسبت به انرژی پرتو ایکس مشاهده می‌شود، در ولتاژهای پایین‌تر مانند ۸۰ kV در بین سه پدیده‌ی مهم فوتوالکتریک، پراکندگی هم‌دوس تامسون (یا رایلی)، و پراکندگی غیر هم‌دوس کامپتون، پدیده‌های فوتوالکتریک و پراکندگی رایلی غالب‌اند. اما در ولتاژهای ۱۰۰ kV و ۱۲۰ kV، تأثیر پدیده‌ی فوتوالکتریک کاهش یافته است و پدیده‌ی کامپتون خودنمایی می‌کند [۱۷]،



احتمال بر داده‌ها، بررسی می‌شوند. برای مقایسه‌ی نتایج، تنها یک پارامتر از چهار پارامتر یعنی R-sq، مبنای انتخاب توابع برای فیلم شماره ۱ در نظر گرفته شد. دلایل این انتخاب عبارتند از:

۱. SSE برای تمام R-sq های بیش از ۰٫۹۵، مقادیر کوچکی داشتند. به ویژه وقتی R-sq به مقدار ۱ نزدیک می‌شد، مقدار SSE نیز به مقادیر نزدیک به صفر میل می‌کرد. این هم‌خوانی در نتایج ارائه شده مشاهده شد.
 ۲. Adj R-sq معمولاً به R-sq ترجیح داده می‌شود، چون این پارامتر، هم بیان‌کننده‌ی نزدیکی نقاط به دست آمده به مقدار میانگین است، و هم عاملی است که تعداد نقاط داده-ها را نیز در نظر می‌گیرد. خوشبختانه در این پژوهش، رفتار Adj R-sq هم‌راستا با رفتار R-sq است و تنها از نظر اندازه، اختلاف جزئی با هم داشتند. بنابراین امکان ارزیابی نتایج با در نظر گرفتن تنها رفتار R-sq فراهم بود.
 ۳. RMSE کاملاً در راستای R-sq رفتار می‌کرد. به این ترتیب که با نزدیک شدن R-sq به ۱، مقدار RMSE نیز کاهش می‌یافت و به صفر نزدیک‌تر می‌شد.
- جدول ۳ مقادیر عددی پارامترهای بالا را برای چند تابع احتمال نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، موارد توضیح داده شده در رابطه با R-sq کاملاً رعایت شده‌اند. با وجود آن که در این جدول، بسیاری از توابع احتمالی که مقادیر R-sq مناسبی نداشتند، حذف شده‌اند. اما برخی از این توابع احتمال از جمله توابع گاما، فیشر [۱۹، ۲۰]، ناکاگامی، و رایلی جزء توابع احتمالی مهم در پردازش تصویر محسوب می‌شوند. لازم به ذکر است که انتخاب توابع احتمال بر مبنای $R-sq \geq 0.95$ انجام گرفته است. حذف توابع مهمی که معرفی شدند، بیان‌کننده‌ی این موضوع است که در فیلم رادیوگرافی، نمی‌توان توابعی را که در روش‌های دیگری مانند تصویربرداری ماهواره‌ای و راداری کاربرد دارند، استفاده کرد.

شده بر روی آنها درج، و در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل ظاهری و رفتار کلی منحنی هیستوگرام مستقل از سطح اسکن شده است. خط عمود رسم شده‌ی عبوری از نقاط پیشینه‌ی این منحنی‌ها نیز نشان می‌دهد که کانال مربوط به نقاط پیشینه‌ی منحنی‌ها، تغییرات چندانی نسبت به تغییر سطح برش‌ها نشان نمی‌دهد. در عین حال، بدیهی است که سطح زیر منحنی هیستوگرام متناسب با کاهش سطح اسکن شده کاهش می‌یابد.

۲.۳ چگونگی انطباق توابع احتمال بر منحنی هیستوگرام فیلم‌ها

بدیهی است که تمام توابع احتمال را نمی‌توان به آزمون گذاشت، چون این کار بسیار زمان‌بر است و حتی در بسیاری از موارد می‌تواند بیهوده باشد. به همین دلیل، قبل از انجام کار انطباق، به بررسی منحنی‌های هیستوگرام پرداخته شد. رفتار کلی منحنی‌های هیستوگرام به این صورت است که در ابتدا نقاط داده‌ها برای رسیدن به مقدار حداکثری، حرکتی سریع دارند اما پس از آن (با وجود نوسانی بودن برخی از منحنی‌ها) با شیب کم‌تری کاهش می‌یابند. به این ترتیب تعداد توابع احتمالی که چنین رفتاری را از خود نشان می‌دادند، به ۳۸ عدد رسیدند. به منظور کاهش تعداد این توابع، دو عامل در نظر گرفته شد:

۱. انتخاب منحنی هیستوگرام مبنای
۲. کاهش تعداد پارامترهای آماری مربوط به توابع احتمال منطبق شده بر داده‌ها

در رابطه با عامل اول، ساده‌ترین منحنی هیستوگرام یعنی منحنی هیستوگرام فیلم شماره ۱ در نظر گرفته شد.

در رابطه با عامل دوم، بهترین گزینه، بررسی پارامترهای آماری ارائه شده برای برازش توابع احتمال بر داده‌های فیلم رادیوگرافی است. معمولاً چهار پارامتر مهم $SSE^{(5)}$ ، $Adj R-sq^{(6)}$ ، $RMSE^{(7)}$ و $R-sq^{(8)}$ به منظور منطبق کردن تابع توزیع

جدول ۳. توابع توزیع احتمال منطبق شده بر هیستوگرام فیلم شماره ۱ و پارامترهای آماری حاصل از انطباق این توابع احتمال

اسامی توابع احتمال	فرمول*	SSE	R-square	Adj R-sq	RMSE
فیشر	$\frac{ae^{bx}}{(ce^{dx^k} + f)^g} + h$	۲,۳۴۶۱	۰,۶۵۴۰	۰,۶۱۵۵	۰,۱۹۳۰
ناکاگامی	$ax^b e^{-cx^d} + d$	۰,۵۰۳۴	۰,۸۶۳۳	۰,۸۵۷۱	۰,۰۸۶۷
رایلی	$ax e^{-bx^2} + c$	۲,۳۳۷۳	۰,۶۵۵۳	۰,۶۵۰۳	۰,۱۸۴۰
گاما	$ax^{b-1} e^{-x/c}$	۱,۷۷۲۴	۰,۶۶۵۸	۰,۶۵۸۲	۰,۱۱۵۹



۰,۲۲۲۹	۰,۴۸۷۰	۰,۵۰۱۶	۳,۳۷۹۲	$\frac{\alpha e^{-b/x}}{x^{-c}}$	معکوس گاما
۰,۰۶۳۴	۰,۹۲۳۷	۰,۹۲۵۸	۰,۲۷۳۰	$\alpha e^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2}$	گاووس
۰,۰۵۱۳	۰,۹۴۹۹	۰,۹۵۲۸	۰,۱۷۳۸	$\frac{\alpha e^{-(\log x - c)^2}}{bx} + f$	معکوس گاووس
۰,۰۷۰۶	۰,۹۴۸۵	۰,۹۵۰۷	۰,۳۳۴۰	$\frac{\alpha e^{-b(\log x - c)^2}}{x} + d$	لگاریتمی نرمال
۰,۰۴۶۹	۰,۹۷۷۳	۰,۹۷۸۶	۰,۱۴۵۲	$\alpha(x^{-b} + x^{-c})e^{-dx}$	فرسایش
۰,۰۴۴۰	۰,۹۸۰۰	۰,۹۸۱۴	۰,۱۲۵۹	$\frac{\alpha e^{-(d + f \sinh^{-1}(bx - c))^2}}{\sqrt{1 + (bx - c)^2}}$	جوهانسون
۰,۰۴۴۱	۰,۹۷۹۹	۰,۹۸۱۴	۰,۱۲۶۴	$\frac{\alpha e^{-(bx+c)}}{(1 + e^{-(dx+g)})^2} + f$	لجستیک
۰,۰۳۵۰	۰,۹۶۸۹	۰,۹۶۹۴	۰,۱۶۲۵	$e^{\alpha + \frac{b}{x} + c \ln x}$	فشار بخار
۰,۰۴۴۵	۰,۹۶۲۴	۰,۹۶۴۶	۰,۱۳۰۴	$\frac{a + bx}{1 + cx + dx^2} + f$	گویا

* در این فرمول‌ها a, b, c, d, g, f, h و k پارامترهای مربوط به ثابت‌های فرمول توابع احتمال‌اند.

در فیلم‌های ۱ تا ۸، مقدار متوسط R-sq حاصل از پردازش برابر ۰,۹۴۲۵ به دست آمده است. اما متأسفانه این دقت برای تابع گاووسی در هنگام نوسانی بودن منحنی هیستوگرام از بین می‌رود. بر اساس داده‌های جدول ۴، مقدار متوسط R-sq تابع گاووسی برابر با ۰,۵۴۶۹ به دست می‌آید. این مقدار برای عمل تطابق تابع احتمال بر منحنی هیستوگرام غیر قابل قبول است.

۲. تمام توابع نشان داده شده در جدول ۴ از فیلم شماره‌ی ۱ تا ۸ رفتار خوبی از خود نشان می‌دهند. به عنوان نمونه می‌توان به شکل ۵-الف و ۵-ب اشاره کرد. در این حالت توابع احتمال به ترتیب نزولی از فرسایش، جوهانسون، و گویا با مقادیر ۰,۹۶۸۴، ۰,۹۶۵۴ و ۰,۹۵۴۹ که شرط $R-sq \geq 0,95$ را رعایت می‌کنند، و لجستیک، گاووسی، لگاریتمی نرمال، معکوس گاووسی، و فشار بخار با مقادیر ۰,۹۴۳۲، ۰,۹۴۲۵، ۰,۹۳۵۱، ۰,۹۲۵۳، و ۰,۹۰۷۱ توابع بعدی را معرفی می‌کنند. اما با در نظر گرفتن حالت زمینه‌ی فیلم شماره‌ی ۹ و عیب موجود در آن، به علت نوسان منحنی هیستوگرام، رفتار توابع در برابر این نوسان‌ها بسیار متفاوت است. این رفتارها در شکل ۶-الف، ۶-ب، و ۶-پ، ت به وضوح دیده می‌شوند.

یکی از توابع مهمی که کاربرد زیادی در رادیوگرافی دارد، تابع گاووسی است [۲۱-۲۴]. این تابع با نام تابع احتمال مینا در جداول این پژوهش ارائه شده است. در جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود که تابع گاووسی مقداری کم‌تر از مینای ۰,۹۵ را به دست می‌دهد.

به این ترتیب توابع احتمال انتخاب شده به ترتیب اهمیت و نزدیکی به $R-sq=1$ عبارت خواهند بود از: جوهانسون^(۹)، لوجستیک^(۱۰)، فرسایش^(۱۱)، فشار بخار^(۱۲)، گویا^(۱۳)، معکوس گاووس^(۱۴)، لگاریتمی نرمال^(۱۵). با در نظر گرفتن این توابع احتمال، نتایج حاصل از محاسبات انطباق این توابع بر داده‌های مربوط به زمینه‌ی فیلم‌های جدول ۱ و کوچک‌ترین عیب جدول ۲، در جدول ۴ ارائه شده‌اند. علت انتخاب کوچک‌ترین عیب، درجه‌ی اهمیت عیوب در بررسی‌های رادیوگرافی آنهاست. لازم است بیان شود که به علت وجود دو منحنی مجزا در شکل هیستوگرام مربوط به فیلم‌های شماره ۹ و عیوب مربوطه‌ی آن، در هنگام انطباق توابع احتمال، منحنی هیستوگرام به دو منحنی نوسانی مجزای چپ و راست تقسیم شده است.

با توجه به جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت که:

۱. در رابطه با هیستوگرام زمینه تا زمانی که منحنی هیستوگرام ساده است، تابع احتمال گاووسی رفتار نسبتاً معقولی دارد.

جدول ۴. محاسبه‌ی R-sq منحنی‌های توابع احتمال منطبق شده بر زمینه و کوچک‌ترین عیب و زمینه فیلم‌های رادیوگرافی



شماره فیلم	گاووسی	معکوس گاووسی	فرسایش	جوهانسون	لگاریتمی نرمال	لجستیک	فشار بخار	گویا
۱	۰٫۹۲۵۸	۰٫۹۵۲۸	۰٫۹۷۸۶	۰٫۹۸۱۴	۰٫۹۵۰۷	۰٫۹۸۱۴	۰٫۹۵۵۲	۰٫۹۶۴۶
۲	۰٫۸۸۷۷	۰٫۹۰۹۷	۰٫۹۴۴۷	۰٫۹۴۹۳	۰٫۹۱۸۲	۰٫۹۴۷۱	۰٫۸۶۸۲	۰٫۸۹۷۵
۳	۰٫۹۳۹۸	۰٫۹۵۵۵	۰٫۹۸۳۹	۰٫۹۸۹۸	۰٫۹۵۶۸	۰٫۹۴۷۹	۰٫۹۳۹۰	۰٫۹۷۲۳
۴	۰٫۹۲۶۶	۰٫۹۴۲۶	۰٫۹۴۹۴	۰٫۹۸۸۵	۰٫۹۴۴۲	۰٫۸۲۸۶	۰٫۹۱۹۹	۰٫۹۸۰۶
۵	۰٫۹۶۹۳	۰٫۹۴۵۳	۰٫۹۶۹۸	۰٫۹۶۹۴	۰٫۹۵۰۱	۰٫۹۶۷۲	۰٫۹۲۵۹	۰٫۹۵۳۶
۶	۰٫۹۷۱۶	۰٫۹۱۱۰	۰٫۹۷۶۴	۰٫۹۲۹۲	۰٫۹۲۸۷	۰٫۹۶۸۹	۰٫۹۳۹۰	۰٫۹۷۲۳
۷	۰٫۹۴۹۶	۰٫۸۷۹۱	۰٫۹۶۷۱	۰٫۹۷۱۵	۰٫۹۰۳۹	۰٫۹۳۸۳	۰٫۸۳۹۷	۰٫۹۳۵۸
۸	۰٫۹۶۹۸	۰٫۹۰۶۱	۰٫۹۷۷۰	۰٫۹۴۴۰	۰٫۹۲۸۰	۰٫۹۶۶۲	۰٫۸۶۸۸	۰٫۹۶۲۷
۹-چپ*	۰٫۵۱۲۰	۰٫۴۵۹۹	۰٫۴۶۸۷	۰٫۹۰۳۶	۰٫۷۶۸۰	۰٫۷۵۶۳	۰٫۷۲۹۱	۰٫۹۰۸۷
۹-راست*	۰٫۶۴۶۵	۰٫۸۹۰۳	۰٫۸۴۲۱	۰٫۹۱۵۴	۰٫۵۸۳۲	۰٫۸۸۶۲	۰٫۸۹۰۶	۰٫۸۹۸۶
عیب ۶-چپ*	۰٫۳۵۷۰	۰٫۳۶۱۵	۰٫۴۵۴۰	۰٫۶۶۲۶	۰٫۸۰۹۴	۰٫۸۵۴۶	۰٫۳۱۴۰	۰٫۸۶۸۷
عیب ۶-راست*	۰٫۶۷۲۱	۰٫۸۹۶۱	۰٫۴۵۶۷	۰٫۵۷۳۴	۰٫۸۹۶۱	۰٫۹۰۰۷	۰٫۸۹۳۹	۰٫۹۵۱۴

* چپ و راست یعنی قله‌های اصلی در قسمت چپ و راست منحنی هیستوگرام است.

شده در درون جسم دارد. نوع برهم کنش تابش پرتو ایکس با جسم نیز بستگی به انرژی فوتون‌های پرتو ایکس دارد که انرژی فوتون‌ها خود متناسب با ولتاژ دستگاه پرتو ایکس است. با وجود کاربرد فراوان تابع احتمال گاووسی در بررسی داده‌های حاصل

از فیلم‌های رادیوگرافی، این تابع توانمندی چندانی در تمام حالات ندارد. این تابع در برابر نوسان منحنی هیستوگرام حاصل از برهم کنش کامپتون برای فلز پایه و یا عیوب موجود در آن رفتار مناسبی از خود نشان نمی‌دهد. با بررسی توابع دیگر مشاهده می‌شود که برای تصاویر زمینه‌ی فیلم، توابع فرسایش و جوهانسون انطباق بسیار خوبی بر منحنی چگالی نوری فیلم دارند اما این انطباق برای فیلمی که در آن برهم کنش کامپتون به عنوان برهم کنش غالب عمل می‌کند، کارایی چندانی ندارد. تنها تابعی که در تمام حالات و با وجود انواع برهم کنش‌ها رفتار انعطاف-پذیری به منظور انطباق بر داده‌ها از خود نشان می‌دهد، تابع احتمال گویاست. این تابع هم برای حالت زمینه و هم برای عیوب، رفتار انطباقی بسیار خوبی دارد. یکی از خوبی‌های این تابع، سادگی آن است، به طوری که از چند جمله‌ای‌های ساده‌ای در صورت و مخرج کسر تشکیل می‌شود.

تشکر و قدردانی

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر متوسط R-SQ مربوط به زمینه‌ی فیلم شماره‌ی ۹ و عیب شماره‌ی ۶ برای توابع گویا، لجستیک، لگاریتمی نرمال، جوهانسون، فشار بخار، معکوس گاووسی، فرسایش، و گاووسی به ترتیب برابر ۰٫۹۰۶۹، ۰٫۸۴۹۵، ۰٫۷۶۴۲، ۰٫۷۶۳۸، ۰٫۷۰۶۹، ۰٫۶۵۲۰، ۰٫۵۵۵۴ و ۰٫۵۴۶۹ است که بهترین مقدار را تابع احتمال گویا دارد.

۳. تنها تابع احتمالی که در هر دو حالت مربوط به زمینه و عیوب رفتار بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد، تابع گویاست. انطباق آن بر تمام هیستوگرام‌های فیلم‌های رادیوگرافی جداول ۱ و ۲ در سطح بالایی است، در صورتی که برخی توابع، این رفتار را از خود نشان نمی‌دهند. به عنوان مثال، تابع فرسایش، با وجود رفتار عالی در برابر هیستوگرام‌های غیر نوسانی فیلم‌های شماره‌ی ۱ تا ۸ رفتاری بسیار نامناسب در برابر هیستوگرام‌های نوسانی قسمت زمینه و عیوب موجود در فیلم شماره‌ی ۹ از خود نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

داده‌های آماری منحنی‌های هیستوگرام چگالی نوری مربوط به تصویر رادیوگرافی یک جسم فولادی، چه برای فلز پایه و چه برای عیوب موجود در فلز، بستگی زیادی به نوع برهم کنش انجام



نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از همکاری و مساعدت‌های آقایان مهدی فتحی و امیراحمد شجاعی در آزمایشگاه تست‌های غیرمخرب مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، اعلام می‌دارند.

پی‌نوشت‌ها

1. Heavy-Tailed Rayleigh
2. Nakagami
3. Base Metal
4. Focal Spot Size
5. Sum of Squared Residuals
6. Adjusted R^2
7. Root Mean Square Deviation
8. R^2
9. Johnson SU
10. Logistic
11. Fatigue
12. Vapor Pressure
13. Rational
14. Inverse Gaussian
15. Log Normal

مراجع

- [1] U. Ewert, U. Zscherpel, Replacement of film radiography by digital techniques and enhancement of image quality, *NDT.net* **12(6)** (2007) 14.
- [2] F.R. Sasnin, Estimation of parameters of radiographic images of defects, *RUSS. J. NONDESTRUCT* **4** (1988) 40-44.
- [3] A. El-Zaart, Synthetic aperture radar images segmentation using minimum cross entropy with Gamma distribution, *SIPIJ* **6** (2015) 19-31.
- [4] G. Gao, X. Qin, S. Zhou, Modeling SAR images based on a generalized gamma distribution for texture component, *PIER Journal* **137** (2013) 669-685.
- [5] A.M. Achim, E.E. Kuruoglu, J. Zerubia, Maximum a posteriori estimation of radar cross section in SAR images using the heavy-tailed Rayleigh model, *EUSIPCO 2005*, IEEE Conference Publications (2005) 1-4.
- [6] A. Achim, E.E. Kuruglu, J. Zerubia, SAR Image Filtering Based on the Heavy-Tailed Rayleigh Model, *IEEE Trans. Image Proc.* **15 (9)** (2006) 2686-2693.
- [7] S. Sayama, S. Ishii, Suppression of Log-Normal Distributed Weather Clutter Observed by an S-Band Radar, *WET* **4(3)** (2013) 125-133.
- [8] J. Liang, Q. Liang, S. Samn, A Propagation Environment Modeling in Foliage, *EURASIP. J. Wirel. Commun. Netw.* (2010) 12.
- [9] G. Moser, J. Zerubia, S.B. Serpico, SAR Amplitude Probability Density Function Estimation Based on a Generalized Gaussian Model, *IEEE Trans. Image Proc.* **15 (6)** (2006) 1428-1442.
- [10] X. Huang, A.C. Madoc, Image and Its Noise Removal in Nakagami Fading Channels, *ICACT 2006* **1** (2006) 570-573.
- [11] EN 444, Non-destructive testing—General principles for radiographic examination of metallic materials by X- and gamma-rays (1994).
- [12] EN 462-1, Non-destructive testing—Image quality of radiographs—Part 1: Image quality indicators (wire type)—Determination of image quality value (1994).
- [13] EN 473, Non-destructive testing—Qualification and certification of NDT personnel—General principles (2000).



- [14] EN 584-2, Non-destructive testing–Industrial radiographic film–Part 2: Control of film processing by means of reference value.
- [15] EN 1435, Non-destructive testing of welds—Radiographic testing of welded joints (includes amendments A1:2002 and A2:2003) (1997).
- [16] EN 12681, Founding-Radiographic examination (2003).
- [17] H.E. Johns, J.R. Canningham, The physics of radiology, fourth edition (1983) 796.
- [18] J.H. Hubbell, Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV, *NSRDS-NBS* **29** (1969) 85.
- [19] G. Abdel-Azim, Z.A. Abo-Eleneen, A Novel Algorithm for Image Thresholding Using non Parametric Fisher Information, *ECEA-1* **1** (2014) 12.
- [20] H. Wang, P. Li, T. Zhang, Histogram feature-based Fisher linear discriminant for face detection, *Neural Comput. Appl.* **17** (2008) 49–58.
- [21] I. Valavanis, D. Kosmopoulos, Multiclass defect detection and classification in weld radiographic images using geometric and texture features, *Expert Syst. Appl.* **37** (2010) 7606-7614.
- [22] R. Hou, D. Du, J. Shao, L. Wang, B. Chang, Segmentation of Weld Defects in X-ray Image Based on Partial Surface Reconstruction, 17th WCNDT, Shanghai, China 92 (2008)12.
- [23] B. Venkatraman, M.M. Anishin Raj, V. Vaithyanathan, Weld Defect Detection Using Iterative Image Reconstruction Methods, *Indian. J. Sci. Technol.* **6 (4)** (2013) 4378-4383.
- [24] M. Tridi, S. Belaifa, N. Nacreddine, Weld defect classification using EM algorithm for Gaussian mixture model, *SETIT 2005*, TUNISIA (2005) 6.