



کوپر تایر

اولین وکیلند تایر در ایران

تشخیص عیب در تصاویر X-Ray تایر با ترکیب روش های GLCM, LBP و یادگیری ماشین

فاضل فایده کارشناس اداره طراحی، ساخت، نصب و راه اندازی، شرکت کوپر تایر

ایمیل: fazel.faide@gmail.com

چکیده: کیفیت و ایمنی تایر نقش اساسی در عملکرد خودرو و حفظ جان سرنشینان دارد. در فرآیند تولید انبوه تایر، شناسایی سریع و دقیق عیوب ساختاری از اهمیت بالایی برخوردار است. روش های سنتی بازرسی که متکی بر نیروی انسانی و مشاهده چشمی تصاویر X-Ray هستند، به دلیل محدودیت دقت و سرعت پاسخ گویی با چالش های جدی مواجه اند. در این پژوهش یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر پردازش تصویر و یادگیری ماشین برای تشخیص خودکار عیوب در تصاویر اشعه ایکس تایر ارائه شده است. در این روش، ابتدا ویژگی های بافتی محلی با استفاده از الگوریتم استخراج ویژگی های بافتی محلی از تصاویر (LBP) و ویژگی های آماری از طریق ماتریسی آماری برای بررسی توزیع هم زمان سطوح خاکستری و بافت تصویر (GLCM) استخراج می شوند. سپس با به کارگیری روش های انتخاب ویژگی نظیر PCA و RFE، ابعاد داده ها کاهش یافته و تنها شاخص های مؤثر حفظ می شوند. در ادامه، ویژگی های منتخب به الگوریتم های یادگیری ماشین شامل الگوریتم یادگیری نظارت شده برای طبقه بندی داده ها با یافتن مرز تصمیم گیری بهینه (SVM)، الگوریتم یادگیری ماشین مبتنی بر جنگل درخت تصمیم برای طبقه بندی و رگرسیون (RF) و الگوریتم ساده ای که داده جدید را بر اساس شباهت به نزدیک ترین نمونه های آموزشی (k-NN) داده شده اند. نتایج آزمایش ها بر روی مجموعه ای از تصاویر X-Ray تایر نشان داد که مدل SVM با کرنل RBF بهترین عملکرد را داشته و دقتی در حدود ۹۳٪ و نرخ یادآوری بیش از ۹۵٪ ارائه داده است. همچنین، ترکیب LBP و GLCM نسبت به استفاده جداگانه از هر کدام، بهبود قابل توجهی در معیارهای عملکرد ایجاد کرد. میانگین زمان پردازش کمتر از یک ثانیه برای هر تصویر بود که نشان دهنده قابلیت استفاده عملی این روش در خطوط تولید صنعتی است. یافته های این پژوهش بیانگر آن است که رویکرد پیشنهادی می تواند جایگزین مناسبی برای روش های سنتی بازرسی بوده و به ارتقای سطح اتوماسیون، کاهش خطای انسانی و بهبود کیفیت در صنعت تایر کمک شایانی نماید.

واژه های کلیدی: پردازش تصویر، یادگیری ماشین، هوش مصنوعی در تولید Defect Detection, Tire X-Ray Inspection, (LBP).

محرور مقاله: فناوری ماشین آلات و قطعات تولیدی

۱. مقدمه

تایر به عنوان یکی از حیاتی ترین اجزای خودرو نقشی کلیدی در ایمنی، پایداری و کارایی سوخت دارد. کیفیت ساخت تایر به طور مستقیم بر عملکرد دینامیکی خودرو و میزان ایمنی سرنشینان اثر می گذارد. در فرآیند تولید انبوه، وجود هرگونه ترک، حفره یا عیب ساختاری می تواند منجر به بروز حوادث جدی شود. به همین دلیل، بازرسی کیفی تایر در خطوط تولید همواره به عنوان یکی از مهم ترین مراحل کنترل کیفیت در نظر گرفته می شود.

بازرسی سنتی تایرها عمدتاً متکی بر نیروی انسانی یا روش های بصری ساده بوده است. اپراتورها با بررسی تصاویر X-Ray یا استفاده از ابزارهای مکانیکی به دنبال شناسایی ترک ها و ناهنجاری ها هستند. این رویکرد هرچند در گذشته کارآمد به نظر می رسید، اما با افزایش حجم تولید و پیچیدگی ساختار تایرها، به ویژه تایرهای رادیال و تایرهای ویژه خودروهای سنگین، ناکارآمدی خود را نشان داده است. خطای انسانی، خستگی و عدم یکپارچگی در قضاوت از مهم ترین محدودیت های این روش ها محسوب می شود. (۱)

با توسعه فناوری های تصویربرداری X-Ray، امکان مشاهده ساختار داخلی تایر فراهم شده است. تصاویر اشعه ایکس می توانند عیوب پنهان مانند جادشدگی لایه ها، جابجایی هوا یا عیوب سیم فولادی را نمایان سازند. اما حجم عظیم داده های تصویری تولید شده در خطوط تولید مدرن نیازمند ابزارهای خودکار و هوشمند برای تحلیل سریع و دقیق این داده ها است.

در این میان، یادگیری ماشین (۲) پردازش تصویر به عنوان دو حوزه کلیدی توانسته اند راهکارهای نوینی ارائه دهند. الگوریتم های یادگیری ماشین قادرند الگوهای پیچیده و ظریف موجود در تصاویر X-Ray را شناسایی کرده و با دقت بالاتری نسبت به انسان یا روش های ساده، عیوب تایر را آشکار سازند. با وجود این، استفاده صرف از شبکه های عصبی یا مدل های یادگیری عمیق به دلیل نیاز به حجم بالای داده های برچسب خورده و هزینه محاسباتی زیاد همیشه عملی نیست. بنابراین ترکیب ویژگی های کلاسیک با الگوریتم های یادگیری ماشین سبک تر می تواند گزینه ای مقرون به صرفه و کارآمد برای صنعت تایر باشد. (۲)

در این پژوهش، چارچوبی ترکیبی ارائه می شود که در آن ویژگی های بافت کلاسیک شامل الگوریتم استخراج ویژگی های بافتی محلی از تصاویر (LBP²) و الگوریتم ماتریسی آماری برای بررسی توزیع هم زمان سطوح خاکستری و بافت تصویر (GLCM³) از تصاویر X-Ray استخراج شده و به عنوان ورودی به الگوریتم های یادگیری ماشین مانند SVM و الگوریتم یادگیری ماشین مبتنی بر جنگل درخت تصمیم برای طبقه بندی و رگرسیون (RF⁴) داده می شوند. هدف این چارچوب، دستیابی به دقت بالا در تشخیص عیوب تایر با حداقل هزینه محاسباتی و حداکثر قابلیت پیاده سازی در خطوط تولید صنعتی است. (۳)

در این پژوهش تایر با رویکردی ترکیبی برای تشخیص عیوب در تصاویر X-Ray تایر استفاده شده است. نخستین گام، جمع آوری مجموعه داده ای شامل تصاویر اشعه ایکس از تایرهای سالم و معیوب است. این تصاویر از خطوط بازرسی خودکار یا دیتابیس های صنعتی گردآوری شده و توسط کارشناسان کیفی برچسب گذاری می شوند. عیوب مورد توجه شامل ترک خوردگی، جدایش لایه ها، جابجایی داخلی و ناهنجاری های سیم فولادی است. برچسب گذاری دقیق داده ها نقش مهمی در کیفیت آموزش مدل ایفا می کند و به عنوان معیار اصلی صحت تشخیص به کار می رود.

گام دوم، پیش پردازش تصاویر است. تصاویر خام X-Ray اغلب دارای نویز، تغییر شدت روشنایی و تفاوت در رزولوشن هستند. به همین منظور از فیلترهای حذف نویز نظیر Gaussian Filter و Median Filter استفاده شده است. همچنین برای یکپارچه سازی شدت روشنایی، الگوریتم Histogram Equalization به کار گرفته شد تا جزئیات ساختاری تایر در تمام تصاویر قابل مقایسه باشند. پس از این مرحله، تصاویر به ابعاد استاندارد کاهش مقیاس یافته و برای استخراج ویژگی آماده شدند.

در مرحله بعد، استخراج ویژگی ها (Feature Extraction) انجام شد. دو روش کلاسیک پرکاربرد برای توصیف بافت تصاویر انتخاب شدند: LBP و GLCM. الگوریتم LBP قادر است الگوهای محلی بافت را با در نظر گرفتن همسایگی پیکسل ها توصیف کند و نسبت به تغییرات روشنایی مقاوم است. این ویژگی برای تشخیص ترک های ریز با حفره های کوچک در تایر بسیار ارزشمند است. در مقابل، ماتریس هم وقوع خاکستری (GLCM) توزیع احتمالی شدت خاکستری پیکسل ها را در جهات مختلف بررسی کرده و معیارهایی مانند انرژی، کنتراست، یکپارچگی و آنتروپی را محاسبه می کند که در تشخیص جدایش لایه ها و ناهمگنی های ساختاری مؤثر هستند.

پس از استخراج ویژگی های LBP و GLCM، یک مرحله انتخاب ویژگی (Feature Selection) برای کاهش ابعاد داده ها و حذف ویژگی های غیر ضروری انجام گرفت. در این پژوهش از الگوریتم های نظیر RFE⁶ و PCA⁶ استفاده شد تا تنها مهم ترین ویژگی ها حفظ شوند. این کار باعث کاهش پیچیدگی محاسباتی و جلوگیری از بیش برآش⁷ شد. (4)

ویژگی های انتخاب شده به عنوان ورودی به مدل های یادگیری ماشین داده شدند. در این پژوهش سه الگوریتم پرکاربرد شامل RF (SVM) و k-NN⁸ مورد استفاده قرار گرفتند. الگوریتم SVM به دلیل توانایی در ایجاد مرز تصمیم گیری بهینه میان کلاس ها گزینه ای مناسب برای تشخیص عیب بود. مدل RF نیز به دلیل قابلیت یادگیری روابط غیر خطی و مدیریت ویژگی های متعدد مورد توجه قرار گرفت. در نهایت، الگوریتم k-NN به عنوان یک روش ساده اما مؤثر به کار گرفته شد تا عملکرد آن با سایر روش ها مقایسه گردد. (5)

برای ارزیابی کارایی مدل ها، از روش Cross-Validation k-fold (با k=10) استفاده شد. این روش امکان ارزیابی مدل روی بخش های مختلف داده را فراهم کرده و از بروز بیش برآش جلوگیری می کند. معیارهای مورد استفاده شامل دقت¹، دقت مثبت¹، یادآوری¹ و امتیاز F1 بودند. همچنین از ROC منحنی² و شاخص AUC برای سنجش توانایی مدل در جداسازی کلاس ها استفاده شد. نتایج ارزیابی نشان دادند که ترکیب ویژگی های کلاسیک و الگوریتم های یادگیری ماشین می تواند عملکردی قابل رقابت با روش های یادگیری عمیق ارائه دهد، در حالی که هزینه محاسباتی بسیار کمتری دارد. (۶)

۳. نتایج و نتیجه گیری

پس از پیاده سازی چارچوب پیشنهادی و آموزش مدل های یادگیری ماشین با ویژگی های استخراج شده، نتایج نشان دادند که رویکرد ترکیبی توانایی بالایی در تشخیص عیوب تایر دارد. در مقایسه میان الگوریتم ها، مدل SVM با کرنل RBF بهترین عملکرد را نشان داد و میانگین دقت آن در تشخیص عیب ها حدود ۹۳٪ بود. این دقت بالا به ویژه در تمایز بین تایرهای سالم و دارای ترک خوردگی کوچک مشهود بود. در مقابل، الگوریتم k-NN با وجود سادگی، عملکرد ضعیف تری نسبت به SVM و RF داشت و دقت کلی آن در حدود ۸۶٪ ثبت شد. بررسی نتایج معیار Precision نشان داد که مدل Random Forest توانست بالاترین دقت مثبت را ارائه دهد؛ به طوری که در شناسایی تایرهای معیوب، نرخ خطای مثبت کاذب به حداقل رسید. این ویژگی در صنعت اهمیت زیادی دارد، زیرا کاهش نرخ مثبت کاذب باعث می شود تایرهای سالم به اشتباه به عنوان معیوب کنار گذاشته نشوند و از هدررفت منابع جلوگیری شود. در مقابل، SVM با وجود دقت کلی بالاتر، در برخی موارد نرخ مثبت کاذب بیشتری نسبت به RF داشت.

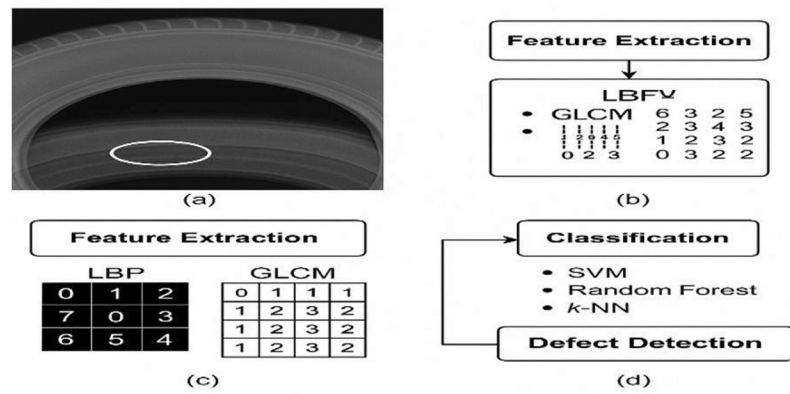
از نظر معیار Recall، مدل SVM بهترین عملکرد را داشت و توانست بیش از ۹۵٪ تایرهای معیوب را به درستی شناسایی کند. این نتیجه نشان می دهد که این مدل برای جلوگیری از ورود تایرهای معیوب به بازار بسیار قابل اعتماد است. اهمیت این معیار در صنایع حساس همچون خودروسازی دوچندان است، چرا که حتی یک تایر معیوب می تواند منجر به خسارات جانی و مالی شود. بر اساس تحلیل F1-Score که ترکیبی از Precision و Recall است، SVM در صدر قرار گرفت و پس از آن Random Forest بود. این موضوع نشان دهنده تعادل بهتر میان شناسایی صحیح عیوب و جلوگیری از هشدارهای اشتباه است. همچنین نتایج منحنی ROC نشان دادند که AUC برای مدل SVM برابر با ۰.۹۶ و برای Random Forest برابر با ۰.۹۳ است که بیانگر توانایی بالا در جداسازی کلاس های سالم و معیوب می باشد.

یکی دیگر از نتایج مهم پژوهش، مقایسه عملکرد ویژگی های LBP و GLCM بود. در حالی که استفاده مستقل از LBP دقتی حدود ۸۸٪ داشت و GLCM نیز به تنهایی به ۸۵٪ رسید، ترکیب این دو ویژگی باعث افزایش دقت مدل ها تا مرز ۹۳٪ شد. این موضوع نشان می دهد که ویژگی های بافت محلی و آماری مکمل یکدیگر هستند و استفاده هم زمان آن ها موجب بهبود چشمگیر در کارایی سیستم می شود.

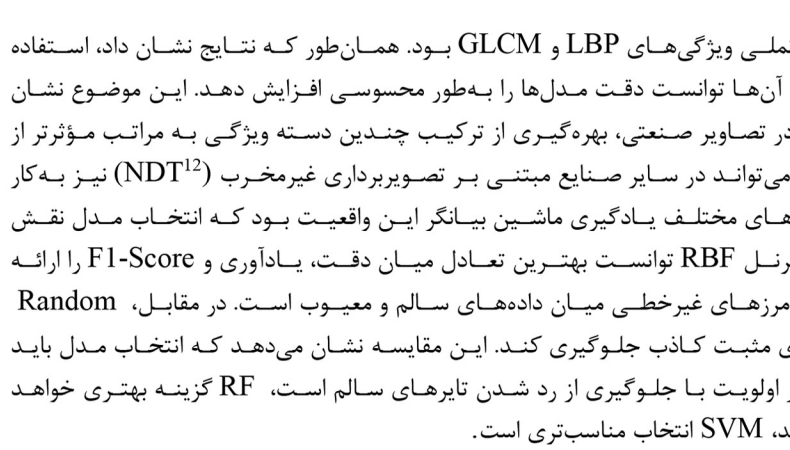
در نهایت، ارزیابی زمان پردازش نشان داد که چارچوب پیشنهادی از نظر محاسباتی بسیار بهینه است. میانگین زمان پردازش هر تصویر کمتر از یک ثانیه بود که این امر امکان استفاده عملی از این سیستم را در خطوط تولید پرسرعت تایر فراهم می کند. این ویژگی در مقایسه با مدل های یادگیری عمیق که نیازمند منابع محاسباتی سنگین هستند، یک مزیت اساسی محسوب می شود.

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که استفاده از ترکیب ویژگی های بافتی کلاسیک LBP و GLCM همراه با الگوریتم های یادگیری ماشین می تواند راهکاری کارآمد برای تشخیص خودکار عیوب تایر در تصاویر X-Ray باشد. این دستاورد از دو جنبه اهمیت دارد: نخست، کاهش وابستگی به نیروی انسانی در فرآیند بازرسی که همواره با خطا و نوسان همراه بوده است؛ دوم، ایجاد زیرساختی برای پیاده سازی سیستم های هوشمند کنترل کیفیت در خطوط تولید مدرن. در صنایع بزرگی مانند تولید تایر، حتی کاهش اندک در خطاهای بازرسی می تواند منجر به صرفه جویی های اقتصادی چشمگیر و ارتقای سطح ایمنی محصولات شود.

یکی از مهم ترین یافته ها در این مطالعه، نقش مکملی ویژگی های LBP و GLCM بود. همان طور که نتایج نشان داد، استفاده جداگانه از هر کدام کارایی محدودی داشت، اما ترکیب آن ها توانست دقت مدل ها را به طور محسوسی افزایش دهد. این موضوع نشان می دهد که برای کاربردهای همچون تشخیص عیب در تصاویر صنعتی، بهره گیری از ترکیب چندین دسته ویژگی به مراتب مؤثرتر از تمرکز بر یک روش منفرد است. چنین رویکردی می تواند در سایر صنایع مبتنی بر تصویربرداری غیرمخرب (NDT¹²) نیز به کار گرفته شود. از سوی دیگر، مقایسه میان الگوریتم های مختلف یادگیری ماشین بیانگر این واقعیت بود که انتخاب مدل نقش تعیین کننده ای در نتایج دارد. الگوریتم SVM با کرنل RBF توانست بهترین تعادل میان دقت، یادآوری و F1-Score را ارائه دهد. این امر ناشی از توانایی SVM در یافتن مرزهای غیرخطی میان داده های سالم و معیوب است. در مقابل، Random Forest با ارائه بالاترین توانست از خطای مثبت کاذب جلوگیری کند. این مقایسه نشان می دهد که انتخاب مدل باید بر اساس نیاز صنعتی صورت گیرد؛ به عنوان مثال، اگر اولویت با جلوگیری از رد شدن تایرهای سالم است، RF گزینه بهتری خواهد بود، اما اگر تمرکز بر شناسایی تمامی تایرهای معیوب باشد، SVM انتخاب مناسب تری است.



شکل 1 مثال از یک سیستم واقعی برای پایش و پیش بینی رفتار آن.



17th Conference And 9th Exhibition Rubber And Related Industries

Iranmall January 6-7 2026

موضوع دیگر، مقیاس پذیری و سرعت پردازش است. چارچوب پیشنهادی نشان داد که می توان در یک ثانیه برای هر تصویر تصمیم گیری کرد، که این موضوع برای خطوط تولید با سرعت بالا کاملاً حیاتی است. در مقایسه با مدل های یادگیری عمیق که نیازمند GPU و منابع محاسباتی پرهزینه هستند، این رویکرد سبک تر بوده و قابلیت پیاده سازی آسان تری در محیط های صنعتی دارد. این مزیت باعث می شود که تولیدکنندگان تایر در کشورهای در حال توسعه نیز بتوانند بدون نیاز به سرمایه گذاری کلان، از فناوری های هوش مصنوعی در بازرسی استفاده کنند.

البته محدودیت هایی نیز وجود دارد. نخست، دقت مدل وابسته به کیفیت داده های ورودی است. در صورتی که تصاویر X-Ray دارای نویز شدید یا کیفیت پایین باشند، احتمال کاهش عملکرد مدل وجود دارد. دوم، مجموعه داده مورد استفاده محدود به تعداد خاصی از عیوب بوده است و ممکن است در مواجهه با عیوب نادر یا ناشناخته کارایی کاهش یابد. این محدودیت ها نشان می دهد که توسعه سیستم های ترکیبی که از مدل های یادگیری عمیق به صورت مکمل برای استخراج ویژگی های پیچیده تر استفاده کنند، می تواند گام بعدی این مسیر باشد. در نهایت، این پژوهش چشم انداز روشنی برای آینده ارائه می دهد. ادغام سیستم پیشنهادی با خطوط تولید در انقلاب صنعتی چهارم (Industry 4.0) و اتصال آن به سامانه های مانیتورینگ بلادرنگ می تواند سطح جدیدی از اتوماسیون در صنعت تایر ایجاد کند. علاوه بر این، ترکیب این چارچوب با روش های Digital Twin امکان پیش بینی عیوب قبل از وقوع و افزایش عمر مفید تایرها را فراهم خواهد کرد. این جهت گیری همسو با روندهای جهانی در صنعت تایر، یعنی حرکت به سمت تولید هوشمند، پایدار و ایمن است. این پژوهش یک چارچوب ترکیبی برای تشخیص خودکار عیوب در تصاویر X-Ray تایر ارائه داد که بر پایه استخراج ویژگی های کلاسیک بافتی LBP و GLCM و استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین توسعه یافته است. نتایج نشان دادند که این رویکرد می تواند دقتی در حد مدل های پیشرفته یادگیری عمیق اما با هزینه محاسباتی به مراتب کمتر ارائه دهد. به ویژه، ترکیب ویژگی های LBP و GLCM توانست نقاط ضعف هر روش منفرد را پوشش داده و عملکرد مدل ها را بهبود بخشد. از نظر کاربرد صنعتی، مزیت اصلی روش پیشنهادی در سرعت پردازش و قابلیت پیاده سازی آن در خطوط تولید است. میانگین زمان پردازش کمتر از یک ثانیه برای هر تصویر، نشان می دهد که این سیستم می تواند در خطوط تولید انبوه با ظرفیت بالا نیز بدون ایجاد گلوگاه عملیاتی به کار گرفته شود. این ویژگی به ویژه برای صنایع تایر در کشورهای در حال توسعه که منابع سخت افزاری محدود دارند، اهمیت فراوانی دارد.

با وجود این مزایا، پژوهش حاضر محدودیت هایی نیز داشت. مجموعه داده مورد استفاده شامل تعداد محدودی عیب خاص بود و ممکن است در مواجهه با عیوب نادر یا ناشناخته عملکرد سیستم کاهش یابد. همچنین کیفیت تصاویر X-Ray تأثیر مستقیمی بر خروجی مدل دارد و در شرایطی که تصاویر دارای نویز یا کنتراست پایین باشند، احتمال کاهش دقت وجود دارد. این محدودیت ها ضرورت استفاده از پایگاه های داده بزرگ تر و متنوع تر را در تحقیقات آینده برجسته می سازد.

از سوی دیگر، ادغام این رویکرد با فناوری های نوینی همچون Digital Twin و یادگیری عمیق هیبریدی می تواند کارایی سیستم را به سطح بالاتری ارتقا دهد. برای مثال، استفاده از شبکه های کانولوشنی (CNN) در کنار ویژگی های کلاسیک می تواند توانایی مدل را در شناسایی الگوهای پیچیده تر افزایش دهد. همچنین ترکیب این سیستم با سامانه های پایش بلادرنگ در کارخانه می تواند به ایجاد چرخه بازخورد سریع و اصلاح فرایندهای تولید منجر شود. (۷) در مجموع، این تحقیق نشان داد که رویکردهای ترکیبی مبتنی بر ویژگی های کلاسیک و الگوریتم های یادگیری ماشین می تواند به عنوان یک راهکار عملی و کارآمد برای ارتقای کیفیت و ایمنی در صنعت تایر به کار گرفته شوند. این دستاورد نه تنها موجب کاهش هزینه ها و افزایش بهره وری خواهد شد، بلکه همسو با روند جهانی حرکت به سمت تولید هوشمند و Industry 4.0 است. بنابراین، چارچوب پیشنهادی می تواند سنگ بنایی برای توسعه نسل آینده سامانه های کنترل کیفیت هوشمند در صنعت تایر باشد. (۸)

مراجع:

- Alqhatani A, Khan MA, Rehman S. Automated defect detection in tire X-ray images using texture features and machine learning. Applied Sciences. 2022;12(4):1851.
- Bharati MH, Liu JJ. Image texture analysis techniques for industrial inspection: A review. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2020;31(5):781-96.
- Ghosh J, Datta A. Hybrid machine learning approaches for defect detection in industrial X-ray images. Pattern Recognition Letters. 2021;146:12-21.
- Gonzalez RC, Woods RE. Digital Image Processing. London: Pearson; 2018.
- Russell SJ, Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. London: Pearson; 2020.
- International A. Standard guide for X-ray inspection of tires (ASTM E2699-21). 2021.
- Wang L, Zhou Q, Sun T. Non-destructive testing of tire defects using X-ray imaging and machine learning. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Informatics 2021. p. 225-31.
- Zhang Y, Liu H, Wang P. Inspection of tire defects based on GLCM texture analysis and SVM. Journal of Nondestructive Evaluation. 2021;40(3):455-67.