

تشخیص خودکار شمش‌های گرد ناصاف از محصولات خروجی دستگاه صافکاری با استفاده از

روش‌های بینایی ماشین

راستین نمیرانیان^۱، سحرسلطانی^۲، ولی درهمی^{۳*}

^۱ واحد فناوری اطلاعات، شرکت فولاد آلیاژی ایران، یزد، ایران

^۲ کارشناسی ارشد هوش مصنوعی و رباتیک، شرکت توسعه فولاد آلیاژی ایرانیان، یزد، ایران

^۳ استاد، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران

مقاله پژوهشی

چکیده

این مقاله به مساله تشخیص شمش فولادی گرد ناصاف در حال غلتیدن می پردازد. در سالن تکمیل کاری کارخانه فولاد آلیاژی ایران یکی از عملیاتی که روی شمش‌های گرد انجام می‌شود، صاف کردن آن‌ها است. لیکن هیچ سیستمی برای اینکه کیفیت خروجی دستگاه صافکاری را مشخص کند وجود ندارد. در اینجا برای حل این چالش ویدیوها از شمش خارج شده از دستگاه صافکاری که در حال غلتیدن روی میز است، گرفته می‌شود. پس از پیش پردازش و تعادل کردن نوری تصویر، مقطع شمش در هر تصویر با روش انتقال هاف دایره مشخص می‌شود. سپس مسیر حرکت شمش در هر ویدیو تعیین می‌شود. شش ویژگی از این مسیر حرکت برای مطالعه انتخاب شده است. این ویژگی‌ها شامل: طول مسیر حرکتی، مجموع مربعات انحراف، مجموع مربعات انحراف عمودی، ارتعاش انحراف معیار، انرژی ارتعاش مبتنی بر موجک و انحراف معیار شتاب هستند. مقدار این ویژگی‌ها با لحاظ کردن نمونه برداری در واحد طول محاسبه می‌شوند. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌هایی همچون انحراف معیار ارتعاش، مجموع مربعات انحراف عمودی و مجموع مربعات انحراف، قدرت تمایز بالایی در تفکیک شمش‌های سالم و ناصاف دارند. هرچند مقدار منفی نادرست کمی بالا است ولی روش پیشنهادی توانسته با دقت حدود ۸۵ درصد، عملکرد قابل قبولی ارائه دهد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۸/۲۳

کلیدواژه‌ها:

بینایی ماشین، تبدیل هاف
دایره‌ای، دستگاه صافکاری،
شمش فولادی

نویسنده مسئول:

vderhami@yazd.ac.ir

doi : 10.22034/ABMIR.2025.23720.1171

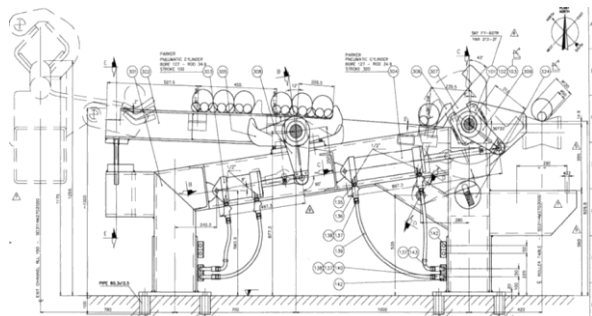
۱- مقدمه

فولاد یکی از کالاهای اساسی و استراتژیک در صنایع هر کشور به شمار می‌رود. میزان تولید و مصرف فولاد نه تنها یک شاخص مهم در توسعه صنعتی محسوب می‌شود، بلکه به عنوان معیاری برای سنجش رشد اقتصادی و زیرساختی کشورها نیز در نظر گرفته می‌شود. ویژگی‌های ممتاز فولاد از جمله استحکام بالا، شکل پذیری مناسب، مقاومت در برابر سایش و قابلیت بازیافت، موجب شده است که این ماده در حوزه‌های متعددی مانند ساخت و ساز، صنایع انرژی، خودروسازی، تولید تجهیزات صنعتی و حتی صنایع نظامی جایگاه ویژه‌ای داشته باشد. از این رو، کیفیت محصولات فولادی به طور مستقیم بر کارایی و ایمنی پروژه‌های صنعتی و عمرانی اثرگذار بوده و هر گونه نقص در فرآیند تولید می‌تواند پیامدهای جدی به دنبال داشته باشد [۱، ۲].

در این مقاله، مساله بررسی میزان صاف بودن شمش‌های فولادی گرد در قسمت تکمیل کاری کارخانه فولاد آلیاژی ایران مورد بحث قرار گرفته است. در کارخانه فولاد آلیاژی ایران، پس از انجام عملیات نورد گرم یا عملیات حرارتی روی شاخه‌های فولادی با سطح مقطع گرد، شمش‌ها وارد مرحله‌ای حیاتی به نام صافکاری دوغلتکی می‌شوند. این فرآیند به منظور اصلاح کجی یا انحنای احتمالی شمش‌ها طراحی شده است تا محصول نهایی با بالاترین کیفیت ممکن به بازار عرضه شود. کیفیت اجرای این مرحله تأثیر مستقیمی بر سطح کیفی نهایی دارد و هرگونه خطا در صافکاری، می‌تواند موجب کاهش بهره‌وری و افزایش ضایعات شود.

دستگاه صافکاری دوغلتکی که در شکل ۱ نمایش داده شده است، از سه بخش اصلی تشکیل شده است: میز ورودی، مجموعه صافکاری و میز خروجی. در این مجموعه، شمش‌های فولادی بین دو تیغه صاف و دو غلتک محدب و مقعر از بالا و پایین قرار می‌گیرند. تنظیم زاویه و فشار این غلتک‌ها بسته به سختی شمش و میزان کجی ورودی انجام می‌شود. طراحی خاص غلتک‌ها موجب می‌شود که شاخه علاوه بر حرکت طولی، دوران ملایمی داشته باشد تا با اصلاح کرنش‌های الاستیک، کجی موجود برطرف گردد. در صورتی که فشار کافی اعمال نشود، بخشی از کجی در

خروجی باقی می‌ماند و در مقابل، فشار بیش از حد نیز سبب افزایش مصرف انرژی و استهلاک دستگاه خواهد شد.



شکل (۱): شماتیک دستگاه صافکاری دوغلتکی

در حال حاضر در کارخانه، تشخیص صحت این فرآیند و اندازه‌گیری میزان کجی باقیمانده در شمش خروجی، به طور کامل به قضاوت چشمی اپراتورهای انسانی متکی است. این نیروهای خبره با مشاهده‌ی نحوه‌ی غلتیدن شمش بر روی میز خروجی شیب‌دار، سالم یا ناصاف بودن آن را تشخیص می‌دهند. این روش ذاتاً ذهنی و مستعد خطای انسانی است که می‌تواند به خروج محصول معیوب یا کاهش بهره‌وری منجر شود. ضمن اینکه فعلاً حضور نیروی خبره انسانی بطور دائم در محل میسر نیست.

لذا مساله تشخیص میزان ناصافی با روش‌های هوشمند در کارخانه مطرح و مورد پژوهش قرار گرفت. در مسیر تحقیق در مراحل اولیه، ایده‌های مختلفی همچون ثبت و تحلیل صدای شمش در هنگام غلتیدن یا نصب لودسل [۳] برای سنجش نیروهای اعمال شده بر میز خروجی مطرح شد. اما این روش‌ها یا به تجهیزات اضافی نیاز داشتند و یا در برابر شرایط محیطی حساس بودند. در نهایت، تیم تحقیقاتی به سمت بهره‌گیری از روش‌های بینایی ماشین هدایت شد، چرا که این روش‌ها امکان ثبت مستقیم حرکت سطح مقطع شمش و استخراج ویژگی‌های مرتبط با میزان صافی یا ناصافی را فراهم می‌کردند.

بر اساس آخرین دانش ما، این مقاله اولین تحقیق در زمینه‌ی تشخیص ناصافی شمش‌ها با استفاده از تحلیل حرکت آن‌ها بر روی میز دشارژ در محیط باز سالن کارخانه با روش بینایی ماشین است. ایده اصلی بر این فرض استوار است که شمش در خروجی دستگاه، حداقل بخشی از مسیر شیب‌دار را می‌غلطد و امکان ردیابی حرکت سطح مقطع آن فراهم می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده

بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل ۴ نمونه‌ای از شمش خیلی ناصاف و در شکل ۵ نمونه‌ای از شمش کمی ناصاف نمایش داده شده است. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، در نمونه‌ی خیلی ناصاف، خمیدگی و تاب‌خوردگی در طول شمش به‌وضوح قابل تشخیص است، در حالی که در شمش کمی ناصاف، میزان انحراف بسیار کم بوده و حتی توسط افراد خبره نیز به‌سختی قابل شناسایی است.



شکل (۴): شمش خیلی ناصاف با خمیدگی و تاب‌خوردگی مشخص در طول شمش



شکل (۵): شمش کمی ناصاف، میزان انحراف بسیار کم
دوم اینکه رفتار شمش‌ها بر روی میز خروجی همیشه قابل پیش‌بینی نیست؛ برخی شمش‌ها به دلیل ناصافی یا شرایط سطح میز، در

می‌شود، زمانی که میز خروجی پر از شمش‌های دیگر است، فضای کافی برای غلتیدن وجود ندارد و تحلیل حرکت قابل انجام نیست. در مقابل، شکل ۳ شرایطی را نشان می‌دهد که میز خروجی تقریباً خالی است و شمش می‌تواند آزادانه حرکت کند؛ این حالت مبنای اصلی تحلیل‌های پژوهش حاضر قرار گرفته است.



شکل (۲): نمایی از میز خروجی کاملاً پر



شکل (۳): نمایی از میز خروجی تقریباً خالی

از طریق ردیابی مسیر حرکت سطح مقطع شمش در چنین شرایطی می‌توان اطلاعات دقیقی در خصوص میزان صافی یا ناصافی به‌دست آورد. ویژگی‌های استخراج‌شده از این مسیر، شامل شاخص‌های حرکتی و ارتعاشی، معیارهای عینی برای تفکیک شمش سالم از ناصاف ارائه می‌دهند. این رویکرد، جایگزینی مطمئن برای قضاوت ذهنی اپراتورهای انسانی است و امکان تصمیم‌گیری علمی، تکرارپذیر و خودکار را در فرآیند کنترل کیفیت فراهم می‌کند.

با وجود جذابیت و کارایی این ایده، چندین چالش اساسی در پیاده‌سازی آن وجود دارد. نخست اینکه میزان ناصافی در برخی شمش‌ها بسیار جزئی است، به‌طوری‌که حرکت آن‌ها شباهت زیادی به شمش‌های سالم دارد و استخراج ویژگی‌های متمایزکننده کار دشواری می‌شود. به‌منظور درک بهتر سطوح مختلف ناصافی، سه نمونه از شمش‌های گرد با درجات متفاوت انحراف مورد

در این روش، برای بالابردن دقت از یک سیستم اندازه‌گیری تماسی استفاده شده و مدل‌سازی ریاضی آن استخراج شده است. در نهایت به دقت اندازه‌گیری به کمتر از ۰.۰۰۰۵ میلی‌متر رسیده است. نتایج تحلیل این سیستم نشان می‌دهد که تکرارپذیری خوبی دارد. این روش نیاز به بستر خاص دارد که برای دستگاه صافکاری تحقیق مذکور جوابگو نمی‌باشد.

در تحقیق دیگر سیف و همکارانش [۲] به اندازه‌گیری گردی محصول می‌پردازند و از تکنیک‌های بینایی ماشین و پردازش تصویر برای تحلیل دقیق هندسه قطعات استفاده کرده‌اند. این روش از الگوریتم‌های پردازش تصویر، مانند تبدیل هاف^۴ و تشخیص لبه^۵ بهره می‌برد تا ویژگی‌های دایره‌ای قطعات را شناسایی و تحلیل کند. سیستم طراحی شده با استفاده از دوربین‌های با وضوح بالا و نورپردازی مناسب توانسته اختلاف اندازه‌گیری بین ۵ تا ۹/۶ میکرومتر نسبت به سیستم سنتی ماشین اندازه‌گیری مختصات داشته باشد، که نشان‌دهنده دقت قابل قبول آن در کاربردهای صنعتی است.

در تحقیق دیگر، چن و همکارانش [۱] یک چارچوب جامع برای تشخیص خودکار انحنا و ناصافی در شاخه‌های U شکل ارائه دادند. این پژوهش با ترکیب هوشمندانه‌ای از تکنیک‌های پردازش تصویر و بینایی ماشین، رویکردی چندمرحله‌ای را طراحی کرده است. در مرحله اول، از الگوریتم پولو^۶ برای تشخیص دقیق موقعیت شاخه‌ها و استخراج نقاط مرکز به عنوان مرجع استفاده شده است. سپس با به کارگیری روش‌های تشخیص لبه و خط، کانتورهای دقیق استخراج شده و خطوط مربوطه شناسایی می‌شوند. در ادامه، با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی، خطوط هم‌راستا گروه‌بندی شده و با تکنیک دوخت خطوط^۶، قطعات خطی به صورت پیوسته ترکیب می‌شوند. در نهایت، با تحلیل هندسی این خطوط و اندازه‌گیری انحنا، وضعیت تختی یا انحنای شاخه‌ها با دقت بالا تشخیص داده می‌شود.

برای اندازه‌گیری صافی شمش، روش‌های دیگری مثل کار اشمید و تیمشان [۵] نیز انجام شده است که با استفاده از شدت نور

مسیر کج حرکت می‌کنند یا حتی متوقف می‌شوند. این رفتار غیرخطی می‌تواند داده‌های جمع‌آوری شده را نویزی و غیرقابل اتکا سازد.

از سوی دیگر، شرایط تصویربرداری در محیط کارخانه نیز چالش بزرگی به شمار می‌آید. نورپردازی ضعیف باعث شد ویدیوهای گرفته شده اولیه کیفیت مناسبی نداشته باشند و نیاز به انجام پردازش‌های پیشرفته مانند افزایش کنتراست و بهبود وضوح باشد. همچنین، تهیه یک مجموعه داده بزرگ و دقیق که شامل برچسب‌های سالم و ناصاف باشد، نیازمند صرف زمان و هزینه قابل توجه است، با توجه به نبود ابزار دقیق مرتبط برای اندازه‌گیری ناصافی و همچنین محدودیت‌های عملی موجود در کارخانه، فرآیند برچسب‌گذاری نمونه‌ها صرفاً بر پایه قضاوت دو فرد خبره انجام شد.

در این مقاله روش تشخیص ناصافی شمش گرد با فرض غلتیدن در یک حداقل طول با استخراج اطلاعات و ویژگی‌های مسیر حرکت وسط سطح مقطع شمش ارائه می‌شود.

ساختار این مقاله بدین شرح است: ابتدا در بخش دوم مروری بر کارهای گذشته و در بخش سوم مبانی نظری مرتبط با تشخیص حرکت و تحلیل ارتعاشات ارائه می‌شود. در بخش چهارم، فرآیند گام‌به‌گام روش پیشنهادی شامل پردازش ویدیوها، تشخیص سطح مقطع شمش‌ها، استخراج ویژگی‌های حرکتی و ارتعاشی و نهایتاً روش‌های تصمیم‌گیری تشریح می‌گردد. در بخش پنجم، ارزیابی نتایج شامل تحلیل آستانه‌گذاری، نمودار مشخصه عملکرد سیستم^۱ و روش‌های خوشه‌بندی^۲ مانند K-Means ارائه و مقایسه می‌شود. در پایان، جمع‌بندی دستاوردهای پژوهش همراه با پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده در بخش ششم مطرح خواهد شد.

۲- مروری بر کارهای گذشته

در این بخش به برخی از کارهای مرتبط با موضوع تحقیق پرداخته می‌شود. چن و همکارانش [۴] روی تشخیص صافی میلگرد تراش خورده سیلندرها به روش سه نقطه‌ای در حوزه زمان پرداخته‌اند.

^۴ Edge Detection

^۵ YOLO (You Only Look Once)

^۶ Stitching

^۱ Receiver Operating Characteristics (ROC curve)

^۲ Clustering

^۳ Hough Transform

تصویربرداری، خطاهای هندسی را کاهش داده و نگهداری سیستم را ساده‌تر می‌کند. همچنین با به‌کارگیری الگوریتم‌های ثبت پروفایل مقاوم در سه مرحله (تراز اولیه، تراز کلی و تراز محلی)، اثر لرزش‌ها و جابه‌جایی‌های حین تولید جبران می‌شود. در مرحله تحلیل، از روش‌های محاسبه انحراف سطح و فیلترینگ هوشمند برای جداسازی نویز و استخراج ویژگی‌های واقعی تختی استفاده شده است [۷].

همچنانکه دیده شد هرچند تحقیقاتی روی شمش‌های فولادی انجام شده است، اما تحقیقی بابت تشخیص صافی شمش گرد در محیط باز سالن کارخانه با روش بینایی ماشین انجام نشده است. البته می‌توان از ایده‌های مطرح شده در مقاله‌ها بهره برد.

۳- مفاهیم پایه

با توجه به دانش فرد خبره، نحوه غلتیدن و الگوی ارتعاش شمش در هنگام حرکت بر روی میز خروجی می‌تواند شاخصی مهم برای تشخیص میزان صافی یا ناصافی سطح محصول دستگاه صافکاری باشد. نخستین گام در طراحی سامانه تشخیص خودکار، شناسایی دقیق سطح مقطع شمش در حال حرکت و ردیابی مرکز آن در طول ویدیو است. برای این منظور، روش‌های مختلفی نظیر یولو، تبدیل هاف دایره‌ای^۴ و تطبیق الگو^۵ بررسی شدند و مزایا و محدودیت‌های هرکدام مورد ارزیابی قرار گرفت در این بخش مختصری از این روش‌ها گفته می‌شود.

۳-۱ الگوریتم یولو

الگوریتم یولو یکی از معماری‌های پیشرو در زمینه تشخیص اشیاء مبتنی بر یادگیری عمیق است. این روش نخستین‌بار در سال ۲۰۱۵ توسط جوزف ردمن و همکارانش معرفی شد و با کنار گذاشتن رویکردهای دو مرحله‌ای سنتی مانند شبکه‌های عصبی کانولوشنی مبتنی بر ناحیه^۶، تحولی بزرگ در سرعت و دقت تشخیص ایجاد کرد [۸]. برخلاف مدل‌هایی که ابتدا نواحی پیشنهادی را شناسایی و سپس آن‌ها را طبقه‌بندی می‌کردند، یولو کل فرآیند را در یک گام و به‌صورت انتها به انتها انجام می‌دهد [۹].

بازتاب‌شده نسبت به زاویه اسکن، میزان انحراف از حالت کاملاً مستقیم را محاسبه می‌کند. این تکنیک نیاز به چرخش کامل میله ندارد و فقط در مرحله کالیبراسیون، چرخش جزئی لازم است. مزیت اصلی این روش، امکان استفاده در خطوط تولید بدون تماس فیزیکی با قطعه است. برای انجام کالیبراسیون مورد نیاز در این روش، ممکن است لازم باشد میله یکبار حول محور خود بچرخد تا ویژگی‌های سطح و موقعیت نسبی لیزر مشخص شود. مهمترین چالش در این روش فراهم‌سازی محیط آزمایش و نورپردازی است. چرا که انعکاس نورها تاثیر زیادی روی کیفیت عملکرد روش دارد. در تحقیق دیگر، به مسئله‌ی حیاتی تشخیص خودکار عیوب سطح فولاد پرداخته شده است که در صنایع حساس مانند هوافضا، خودروسازی و دفاعی نقش اساسی در کنترل کیفیت دارد. هدف آن‌ها رفع مشکل تعادل بین دقت بالا و سرعت پردازش واقعی است؛ چالشی که روش‌های بازرسی دستی از عهده‌ی آن برنمی‌آیند. برای این منظور، مدلی بهبودیافته از یولو پنج پیشنهاد شد که توانایی شناسایی شش نوع عیب سطحی فولاد را دارد. این روش با بهره‌گیری از چند نوآوری فنی مانند الگوریتم K-means++ برای بهینه‌سازی کادرهای محصورکننده، تابع خطای اشتراک بر اتحاد کارآمد^۱ برای بهبود همگرایی، روش نمونه‌برداری افزایشی کاراف^۲ برای حفظ اطلاعات معنایی در گسترش نقشه‌های ویژگی، و مکانیزم توجه^۳ برای افزایش حساسیت کانال‌ها، عملکرد مدل پایه را به‌طور چشمگیری ارتقا داده است. این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های هوشمند در طراحی شبکه‌های عمیق می‌تواند بدون افزایش زیاد هزینه‌ی محاسباتی، کیفیت تشخیص را در کاربردهای واقعی صنعتی به‌طور مؤثری بهبود بخشد [۶].

در تحقیق دیگر، به مشکل اندازه‌گیری میزان تختی در ریل‌های راه‌آهن پرداخته شده است که برای رفع محدودیت‌های روش‌های سنتی که نیازمند چندین دوربین یا لیزر و حساس به تغییرات نور و بازتاب سطح بودند، یک سامانه اندازه‌گیری خودکار مبتنی بر بینایی ماشین و دوسامانه‌ی مثلث‌سازی لیزری پیشنهاد کردند. این روش با استفاده از کالیبراسیون هم‌زمان برای دو واحد

⁴ Hough Circle Transform

⁵ Template Matching

⁶ Region-based Convolutional Neural Network

¹ Efficient Intersection over Union (EIoU)

² Carafe Upsampling

³ SE-Net (Squeeze-and-Excitation Network)

مستقیم تنظیم کرد. نقطه قوت اصلی تبدیل هاف دایره‌ای در شرایطی است که شکل مقطع شمش‌ها به‌طور طبیعی نزدیک به دایره باشد و محیط تصویربرداری از وضوح مناسبی برخوردار باشد.

با وجود مزیت‌های ذکر شده، تبدیل هاف دایره‌ای در برابر نویز و تغییرات روشنایی حساس است. به همین دلیل، پیش‌پردازش‌هایی مانند متعادل‌سازی هیستوگرام^۱ برای بهبود کنتراست یا اعمال فیلترهای حذف نویز^۲ قبل از اجرای الگوریتم اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، به دلیل سرعت بالا، عدم نیاز به مدل‌سازی داده و قابلیت پیاده‌سازی ساده روی خطوط تولید واقعی، از تبدیل هاف دایره‌ای به‌عنوان گزینه اصلی تشخیص سطح مقطع استفاده شد.

٣-٣ تطبيق الكو

تطبیق الگوی یکی از روش های سنتی در پردازش تصویر است که بر مبنای یافتن بیشترین شباهت بین یک الگو و بخش های مختلف تصویر عمل می کند. این الگوریتم با محاسبه معیارهایی مانند همبستگی^۳ یا مجموع قدرمطلق اختلاف ها میزان شباهت هر ناحیه از تصویر را با الگوی ورودی اندازه گیری می کند [۱۲]. در صورتی که سطح مقطع شمش همیشه دارای اندازه و روشنایی نسبتاً ثابت باشد، این روش می تواند در تشخیص موقعیت مرکز سطح مقطع کارآمد باشد.

از مزیت‌های الگوریتم تطبیق الگو، سادگی و عدم نیاز به مدل‌سازی پیچیده است. تنها کافی است یک الگوی مرجع از سطح مقطع شمش در اختیار داشته باشیم تا با حرکت پنجره‌ای کوچک روی تصویر و محاسبه میزان تطابق، موقعیت دایره پیدا شود. اما این روش در برابر تغییرات اندازه^۴ یا چرخش^۵ بسیار آسیب‌پذیر است و به همین دلیل در شرایط واقعی خطوط تولید که شمش‌ها ممکن است با سرعت‌های مختلف حرکت کنند یا تحت تأثیر نورهای متفاوت قرار گیرند، دقت و یابداری بالایی ندارد.

یکی دیگر از محدودیت‌های این روش سرعت نسبتاً پایین آن در پردازش ویدئوهای با نرخ فریم بالا است، زیرا باید شباهت در هر فریم به صورت کامل، محاسبه شود. همین موضوع باعث شده است

پیشرفت‌های پیاپی در نسخه‌های مختلف یولو نشان‌دهنده تلاش برای بهبود توازن بین سرعت و دقت است. در نسخه‌های جدیدتر، شبکه‌های عمیق‌تری به‌عنوان ستون فقرات معماری استفاده شده‌اند تا استخراج ویژگی‌های دقیق‌تر انجام شود. علاوه بر این، سازوکارهایی نظیر کادرهای محصورکننده برای بهبود تشخیص اشیاء با اندازه‌های مختلف و مکانیزم‌های بهینه‌سازی به‌منظور کاهش نرخ خطا به کار گرفته شده است. این ویژگی‌ها موجب شد یولو گزینه‌ای جذاب برای سامانه‌های نظارت تصویری، خودروهای خودران و بازارهای صنعتی باشد [۹، ۱۰].

با وجود مزایای فراوان، یولو محدودیت‌هایی نیز دارد. به عنوان مثال، تشخیص اشیاء بسیار کوچک یا اشیائی که به شدت همپوشانی دارند ممکن است با دقت کافی انجام نشود. علاوه بر این، برای آموزش مؤثر این مدل به مجموعه داده‌های حجیم نیاز است و در صورتی که کلاس‌های جدید اضافه شوند، باید شبکه از ابتدا یا حداقل به صورت جزئی بازآموزی گردد. با این حال، معماری انعطاف‌پذیر و سرعت بالای آن سبب شده است که همچنان یکی از پرکاربردترین ابزارها در حوزه بینای ماشین باشد.

۲-۳ تبدیل هاف دایره‌ای

تبدیل هاف یکی از ابزارهای کلاسیک و قدرتمند در بینایی ماشین برای شناسایی اشکال هندسی ساده نظیر خطوط و دایره‌ها است. نسخه ویژه این الگوریتم که برای تشخیص دایره طراحی شده است که ایده اصلی آن مبتنی بر نگاشت نقاط موجود در تصویر به فضای پارامتری شعاع و مرکز دایره است. هر نقطه از لبه‌های تصویر به مجموعه‌ای از دایره‌های ممکن نگاشت می‌شود و نقاطی که در فضای پارامتری بیشترین تراکم رأی را دارند به عنوان مراکز احتمالی دایره شناسایی می‌شوند[۱۱].

این الگوریتم بدون نیاز به داده‌های آموزشی حجیم و صرفاً با تحلیل ویژگی‌های هندسی تصویر کار می‌کند، بنابراین برای کاربردهای صنعتی که داده‌های برچسب‌خورده کمی وجود دارد بسیار مناسب است. همچنین به دلیل ماهیت ریاضی روشن، می‌توان پارامترهای آن نظیر آستانه‌های تشخیص لبه یا بازه تغییرات شعاع را به‌طور

4 Scaling

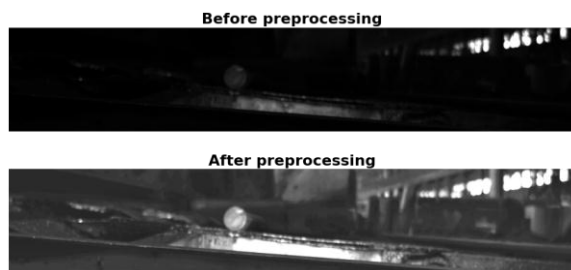
^o Rotation¹ Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization

² Gaussian Blur

³ Correlation



شکل (۶): نمای کلی روش پیشنهادی برای تشخیص ناصافی شمش گرد در این مرحله به منظور بهبود کیفیت تصویر و حذف اثرات تغییرات نور محیط، روش‌هایی مانند افزایش کنتراست و تنظیم روشنایی اعمال گردید. این پیش‌پردازش‌ها موجب شد تشخیص لبه‌ها و سطح مقطع شمش‌ها پایدارتر و دقیق‌تر انجام گیرد و تغییرات ناخواسته نور محیط کارخانه کاهش یابد. در شکل ۷ نمونه‌ای از اعمال پیش‌پردازش‌های تصویر، نمایش داده شده است. تصویر سمت بالا مربوط به محیط با نور کارخانه است و تصویر سمت پایین تغییرات پس از اعمال پیش‌پردازش‌ها می‌باشد.



شکل (۷): نتایج حاصل از پیش‌پردازش

که در پژوهش حاضر، الگوریتم تطبیق الگو صرفاً به عنوان یک گزینه مطالعاتی در نظر گرفته شود اما به دلیل ضعف عملکرد در محیط پرنویز و تغییرپذیر کارخانه، در نسخه نهایی کنار گذاشته شد.

۴- روش پیشنهادی

در این پژوهش روشی برای ارزیابی سلامت شمش‌های فولادی هنگام حرکت روی میز خروجی ارائه شد. ایده اصلی این روش مبتنی بر ثبت و تحلیل مسیر حرکت سطح مقطع شمش در ویدیوهای صنعتی است. مشاهده شد که شمش‌های سالم رفتار دینامیکی یکتواخت‌تری داشته و تغییرات ناگهانی کمتری در مسیر حرکت نشان می‌دهند، در حالی که شمش‌های ناصاف یا دارای ناهمواری، بیشتر دچار انحراف و ارتعاش می‌شوند. این تفاوت‌ها به کمک استخراج ویژگی‌های حرکتی کمی‌سازی شده و برای تصمیم‌گیری خودکار به کار رفت.

فرآیند پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شده که علاوه بر کارخانه مورد مطالعه، در خطوط تولید مشابه و حتی صنایع دیگر که به پایش حرکت اجسام نیاز دارند، قابل استفاده باشد. به‌طور کلی این روش شامل جمع‌آوری ویدیوها و پیش‌پردازش، تشخیص خودکار سطح مقطع، یکتواخت‌سازی نقاط مسیر، استخراج ویژگی‌های حرکتی و در آخر روش‌های تصمیم‌گیری است. نمای کلی روش پیشنهادی در شکل ۶ نشان داده شده است. در ادامه، هر یک از مراحل به تفصیل در زیر بخش‌های ۴-۱ تا ۴-۵ توضیح داده شده‌اند.

۴-۱ جمع‌آوری ویدیوها و پیش‌پردازش

ویدیوهای صنعتی با نرخ فریم بالا برابر با ۱۰۰ فریم بر ثانیه و نورپردازی مناسب جمع‌آوری شدند. همچنین از سرعت بالای شاتر جهت جلوگیری از تاری تصویر و افزایش وضوح حرکت سطح مقطع استفاده شد. برای تأمین روشنایی یکتواخت، دو منبع نور LED با توان ۲۰ وات در پشت دوربین و در دو سوی آن نصب شدند تا نور از زاویه‌ی مایل بر سطح شمش بتابد. سپس ویدیوهای ثبت‌شده تحت پردازش‌های ابتدایی قرار گرفتند.

۲-۴ تشخیص خودکار سطح مقطع

با بررسی سه روش یولو، تبدیل هاف دایره‌ای و تطبیق الگو، نتیجه‌گیری شد که تبدیل هاف دایره‌ای، بهترین توازن بین سرعت، دقت و سادگی تنظیم پارامترها را برای شرایط صنعتی موجود فراهم می‌کند. اگرچه یولو از نظر دقت بالقوه در تشخیص اشیاء پیچیده‌تر عملکرد بهتری دارد، اما نیاز به داده‌های آموزشی برچسب‌خورده فراوان و فرآیند آموزش زمان‌بر دارد که در محیط‌های صنعتی همیشه امکان‌پذیر نیست. از طرفی تطبیق الگو نیز به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات نوری و هندسی انتخاب مناسبی نبود. در مقابل، تبدیل هاف دایره‌ای بدون نیاز به آموزش مدل، امکان پیاده‌سازی سریع و تنظیم مستقیم پارامترهای آشکارسازی شعاع دایره را فراهم می‌کند.

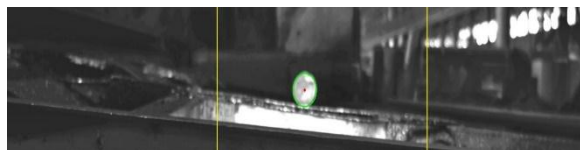
علاوه بر این، الگوریتم هاف قابلیت اجرا روی سخت‌افزارهای موجود در خطوط تولید را بدون نیاز به واحد پردازش گرافیکی فراهم می‌سازد. در این پژوهش پس از انتخاب تبدیل هاف دایره‌ای، فرآیند استخراج مراکز سطح مقطع شمش‌ها با دقت و سرعت کافی انجام شد و داده‌های به‌دست آمده به مرحله تحلیل حرکت و استخراج ویژگی‌ها منتقل شدند.

۳-۴ یکنواخت‌سازی مسیر حرکتی

پس از بهبود کیفیت تصویر، خطوط مرزی (خط شروع و خط پایان) در فریم‌ها مشخص شدند تا تنها نقاطی که در بازه حرکتی مورد نظر قرار دارند، جمع‌آوری شوند. این کار باعث شد داده‌ها از نظر مکانی نیز استاندارد شوند و اثر ورود و خروج شمش به صحنه و نواحی غیرقابل اعتماد کاهش یابد. در هر فریم، مرکز سطح مقطع شمش تشخیص داده شد و به عنوان یک نقطه حرکتی در مسیر غلتیدن ثبت گردید.

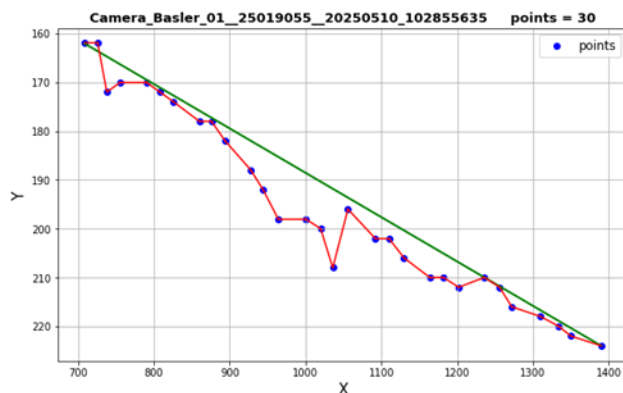
در نهایت، برای یکسان‌سازی نمونه‌ها تعداد نقاط استخراج شده از هر ویدیو به مقدار مشخصی (مثلاً ۳۰ نقطه) تنظیم شد. اگر ویدیو تعداد بیشتری نقطه داشت، نقاط به‌طور یکنواخت از کل مسیر انتخاب شدند و اگر کمتر بود، از روش درون‌یابی استفاده شد که باعث شد ویژگی‌های حرکتی تنها منعکس‌کننده رفتار دینامیکی شمش باشند و نه صرفاً طول مسیر یا تعداد فریم‌ها. به بیان دیگر این کار مانع از آن شد که طول ویدیو یا تعداد فریم‌های ثبت شده

بر نتایج تحلیلی تأثیر نامطلوب بگذارد. بدین ترتیب، مجموعه‌ای از نقاط حرکتی استاندارد و قابل مقایسه برای استخراج ویژگی‌ها به‌دست آمد. در شکل ۸ خطوط مرزی با رنگ زرد نشان داده شده است، در این فریم تشخیص سطح مقطع با روش تبدیل هاف دایره‌ای انجام شد و مرکز سطح مقطع شمش به عنوان یک نقطه حرکتی در مسیر غلتیدن ثبت گردید.

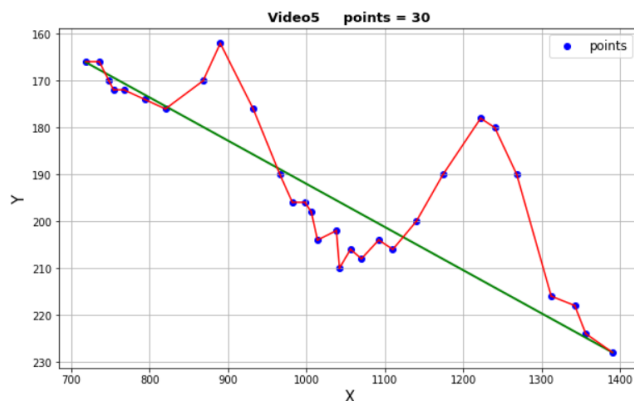


شکل (۸): تشخیص مرکز سطح مقطع شمش

همچنین شکل ۹، تصویر مسیر حرکتی شمش سالم در ویدیو و شکل‌های ۱۰ تا ۱۲، به‌ترتیب تصویر مسیر حرکتی شمش‌های گرد با درجات متفاوت انحراف را نشان می‌دهند.



شکل (۹): مسیر حرکتی ترسیم شده از مرکز سطح مقطع‌های شمش سالم در طول خطوط مرزی حین غلتیدن روی میز خروجی



شکل (۱۰): مسیر حرکتی ترسیم شده از مرکز سطح مقطع‌های شمش خیلی ناصاف در طول خطوط مرزی حین غلتیدن روی میز خروجی

$$TL = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (1)$$

که در آن x_i و y_i مختصات مرکز سطح مقطع شمش در فریم i ام و N تعداد فریم‌ها است.

ویژگی دوم مجموع مربعات انحراف^۳ است. در این روش برای هر نقطه، فاصله عمودی آن از خط مستقیم بین نقطه شروع و پایان مسیر محاسبه شده و سپس مربع این فاصله‌ها با هم جمع می‌شود. این ویژگی معیاری برای سنجش میزان انحراف مسیر از حرکت ایده‌آل (خط راست) است و در مسیرهایی که نوسان یا تاب‌خوردگی بیشتری دارند، مقدار بالاتری خواهد داشت. نحوه محاسبه آن در رابطه ۲ نشان داده شده است.

$$SSD = \sum_{i=1}^N d_i^2, \quad (2)$$

$$d_i = \frac{|(x_N - x_1)(y_1 - y_i) - (y_N - y_1)(x_1 - x_i)|}{\sqrt{(x_N - x_1)^2 + (y_N - y_1)^2}}$$

که در آن d_i فاصله عمودی هر نقطه از خط مرجع مسیر و (x_1, y_1) و (x_N, y_N) به ترتیب مختصات نقاط شروع و پایان مسیر هستند. نسخه ساده‌تر این ویژگی یعنی مجموع مربعات انحراف عمودی^۳، تنها در راستای عمودی مسیر محاسبه می‌شود و می‌تواند تغییرات در جهت اصلی ارتعاش را به‌طور خاص‌تر آشکار کند و مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$SSVD = \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^{ref})^2 \quad (3)$$

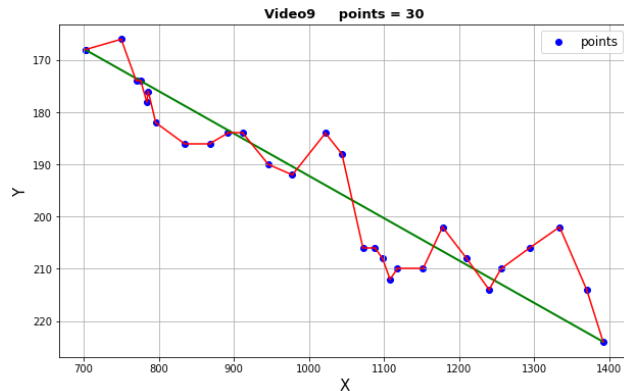
در این رابطه y_i^{ref} مقدار متناظر روی خط بین نقاط ابتدایی و انتهایی مسیر برای مختصات x_i است.

برای بررسی نوسانات کوتاه‌مدت مسیر، ویژگی انحراف معیار ارتعاش^۴ تعریف شد که بر اساس مشتق اول مختصات عمودی محاسبه می‌شود که در رابطه ۴ آمده است. این ویژگی توانایی بالایی در آشکارسازی لرزش‌های سریع و محلی دارد.

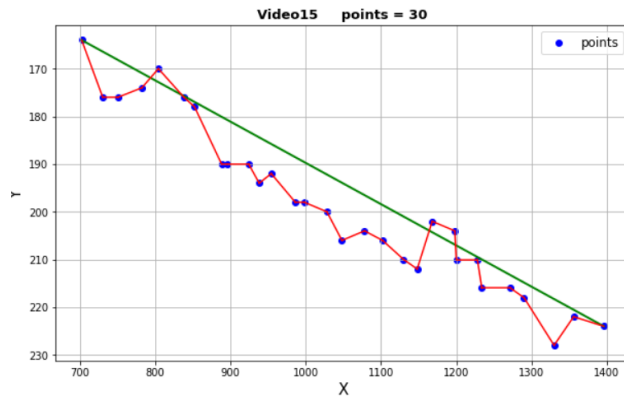
$$VSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\Delta y_i - \bar{\Delta y})^2}, \quad (4)$$

³ Sum of Squared Vertical Deviations

⁴ Vibration of Standard Deviation



شکل (۱۱): مسیر حرکتی ترسیم شده از مرکز سطح مقطع‌های شمش ناصاف در طول خطوط مرزی حین غلتیدن روی میز خروجی



شکل (۱۲): مسیر حرکتی ترسیم شده از مرکز سطح مقطع‌های شمش کمی ناصاف در طول خطوط مرزی حین غلتیدن روی میز خروجی

۴-۴ استخراج ویژگی‌های حرکتی

در این پژوهش مجموعه‌ای از ویژگی‌های حرکتی استخراج شد که طراحی آن‌ها به گونه‌ای است که نه تنها برای تشخیص ناصافی شمش‌های فولادی کاربرد دارند، بلکه قابلیت استفاده در سایر سناریوهای صنعتی را نیز دارا هستند. نخستین ویژگی طول مسیر حرکتی^۱ است که به‌عنوان مجموع فاصله‌های متوالی مراکز سطح مقطع در طول حرکت تعریف می‌شود. این شاخص میزان لغزش یا پیشروی مسیر را نشان می‌دهد و مستقل از جهت‌گیری دوربین قابل محاسبه است. از این رو، هر نوع حرکت دوبعدی جسم را می‌توان با این ویژگی ارزیابی کرد. این ویژگی از رابطه ۱ بدست می‌آید.

¹ Trajectory Length

² Sum of Squared Deviations

در یک فضای مشترک انجام شود و انتخاب آستانه‌ها یا معیارهای طبقه‌بندی با کمترین سوگیری ناشی از مقیاس صورت گیرد.

۴-۵ روش‌های تصمیم‌گیری

پس از استخراج ویژگی‌های حرکتی که بیانگر رفتار شمش در هنگام غلتیدن هستند، گام بعدی انتخاب روشی مناسب برای تبدیل این ویژگی‌ها به یک طبقه‌بندی دودویی (سالم و ناصاف) است. برای این منظور، پس از بررسی روش‌های مختلف سه روش در میان آن‌ها انتخاب شد و در آن‌ها شمش‌های ناصاف به‌عنوان کلاس مثبت و شمش‌های سالم به‌عنوان کلاس منفی در نظر گرفته شدند. روش اول، آستانه‌گذاری تک‌مرحله‌ای است. در این روش، برای هر ویژگی یک آستانه بهینه تعیین می‌شود تا داده‌ها به دو دسته جداگانه تقسیم شوند. انتخاب این آستانه با استفاده از نمودار مشخصه عملکرد سیستم انجام می‌شود. این منحنی با ترسیم نرخ مثبت درست^۳ در برابر نرخ مثبت نادرست^۴ ساخته می‌شود. نرخ مثبت درست که با عنوان حساسیت^۵ نیز شناخته می‌شود، نسبت نمونه‌های مثبت به درستی شناسایی شده را نشان می‌دهد. در مقابل، نرخ مثبت نادرست احتمال شناسایی نادرست نمونه‌های منفی به‌عنوان مثبت را نشان می‌دهد. از آنجا که نمودار مشخصه عملکرد سیستم تمامی آستانه‌های ممکن را ارزیابی می‌کند، انتخاب آستانه به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که اختلاف بین نرخ مثبت درست و نرخ مثبت نادرست بیشینه شود و بدین ترتیب بهترین نقطه برای جداسازی دو کلاس مشخص گردد.

روش دوم، آستانه‌گذاری چندمرحله‌ای است که با توجه به حساسیت بیشتر نسبت به هزینه مسئله طراحی شده است. در مسئله حاضر، کلاس شمش ناصاف اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا خطای تشخیص شمش ناصاف به‌عنوان سالم بسیار پرهزینه‌تر از خطای معکوس آن خواهد بود. بنابراین، در طراحی این رویکرد توجه ویژه‌ای به کاهش موارد منفی نادرست شده است، حتی اگر این امر باعث افزایش اندک مثبت‌های نادرست گردد. معیارهای اصلی در این روش شامل سه اصل است:

۱- حداکثرسازی مثبت‌های درست و منفی‌های درست

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i, \quad i = 1..N-1$$

در این رابطه $\overline{\Delta y}$ میانگین تغییرات عمودی در کل مسیر Δy_i اختلاف موقعیت عمودی بین دو فریم متوالی است.

در ادامه، برای تحلیل دقیق‌تر رفتار ارتعاشی، از انرژی ارتعاش مبتنی بر تبدیل موجک^۱ استفاده شد. در این روش انرژی جزئیات سطح اول سیگنال به کمک تبدیل موجک محاسبه می‌شود که امکان تمرکز بر اجزای پر فرکانس ارتعاش را فراهم می‌سازد. نحوه محاسبه آن در رابطه ۵ آمده است.

$$WVE = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (d_k^{(1)})^2 \quad (5)$$

که در آن $d_k^{(1)}$ ضرایب جزئیات سطح اول تبدیل موجک و K تعداد ضرایب جزئیات است.

ویژگی مهم دیگر انحراف معیار شتاب^۲ است که بر اساس تغییرات سرعت محاسبه می‌شود. مقدار بزرگ‌تر این ویژگی بیانگر نوسانات شدیدتر در دینامیک حرکت است و می‌تواند برای تمایز نمونه‌های سالم و ناصاف کاربرد بالایی داشته باشد. نحوه محاسبه این ویژگی در رابطه ۶ نشان داده شده است.

$$ASD = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^{N-2} (a_i - \bar{a})^2}, \quad (6)$$

$$a_i = v_{i+1} - v_i,$$

$$v_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

که در آن $\bar{a}$ میانگین شتاب در کل مسیر، a_i تغییرات سرعت (یعنی شتاب نسبی) و v_i سرعت لحظه‌ای بین دو فریم است.

لازم به ذکر است که همه‌ی محاسبات بر روی مسیر یکنواخت‌شده با $N = M$ نمونه انجام می‌شود تا تأثیر طول مسیر و تعداد فریم حذف گردد. در این پژوهش مقدار M برابر ۳۰ تعیین شد. در نهایت، برای جلوگیری از تأثیر مقیاس‌های متفاوت این ویژگی‌ها بر روند تحلیل، تمامی داده‌ها با استفاده از روش Z-score [۱۳] نرمال‌سازی شدند. این کار باعث می‌شود مقایسه ویژگی‌ها

⁴ False Positive Rate (FPR)

⁵ Recall

¹ Wavelet Vibration Energy

² Acceleration's Standard Deviation

³ True Positive Rate (TPR)

شمش‌های سالم و دیگری به‌عنوان نماینده شمش‌های ناصاف برجسب‌گذاری شد. در این روش، تعیین کلاس برای داده‌های جدید نیز در واقع براساس مقایسه فاصله اقلیدسی نمونه با مراکز خوشه‌ها انجام می‌شود.

در نهایت، هر یک از این سه روش به‌صورت جداگانه بر روی داده‌های استخراج‌شده اعمال شدند تا کارایی و قابلیت تفکیک آن‌ها در شرایط صنعتی بررسی شود. جزئیات نتایج و تحلیل مقایسه‌ای عملکرد این رویکردها در بخش پنجم ارائه شده است. همچنین، نمای کلی از شبه‌کد روش پیشنهادی در شکل ۱۳ نشان داده شده است که به‌صورت مرحله‌به‌مرحله تمام مراحل پردازش، استخراج ویژگی و تصمیم‌گیری را نمایش می‌دهد.

```

Input: video, lines A/B, target_points = M
Output: label ∈ {Healthy, Defective}, features

1. video ← enhance(video; contrast, CLAHE); assert
   fps=100
2. for each frame:
   detect circle center c = (cx, cy) using Hough
   if A ≤ cx ≤ B: centers.append(c)
3. centers ← uniform_resample(centers, M) #
   interpolation if needed
4. x ← centers[:,0]; y ← centers[:,1]

5. Extract Features:
   trajectory_length = Σ ||c[i+1]-c[i]||
   sum_sq_dev = Σ d(point, line(start,end))^2
   sum_vertical_sq_dev = Σ (y[i] - line_y[i])^2
   vibration_std = std(diff(y))
   ay = diff(diff(y))
   wavelet_vib_energy = Σ (DWT_details(ay))^2 / |ay|
   acceleration_std = std(diff(√((diff(x)^2 + diff(y)^2))))

6. features ← Zscore(features)

7. Decision Methods:
   (a) Single-threshold:
   τ ← argmax_τ { TPR(τ) - FPR(τ) } (Youden's J via
   ROC)
   label = Bent if feature* > τ else Straight

   (b) Multi-stage Thresholding:
   For each feature fi:
   Evaluate candidate thresholds by Recall, Precision,
   TN, Fβ (β=2)
   Priority:
   Step 1 → max(Fβ) if Recall ≥ 0.90 ∧
   Precision ≥ 0.60 ∧ TN ≥ 50%
   Step 2 → max(TP+TN) if Recall ≥ 0.90 ∧ TN ≥ 50%
   Step 3 → max(Recall) under TN ≥ 50%
   Step 4 → fallback to Youden's J
   label = Bent if fi > τi else Straight

   (c) K-Means clustering:
   X ← all_features_normalized
   clusters ← kmeans(X, k=2)
   assign cluster with higher Bent ratio → label=Bent
   label = cluster(video_features)

8. Report:
   Confusion Matrix, Precision, Recall, F1-score,
   ROC/AUC, PCA-2D clusters
  
```

شکل (۱۳): شبه‌کد روش پیشنهادی

۲- به حداقل رساندن منفی‌های نادرست به‌عنوان مهم‌ترین اولویت
۳- کاهش مثبت‌های نادرست با اهمیت ثانویه.

این ساختار چندمرحله‌ای عملاً یک غربال‌گری تدریجی ایجاد می‌کند تا موارد مرزی با دقت بیشتری بررسی شوند و خطر از دست رفتن یک نمونه ناصاف به حداقل برسد.

در پیاده‌سازی عملی این روش، برای هر ویژگی، نمودارهای دقت پیش‌بینی - حساسیت^۱ و مشخصه عملکرد سیستم محاسبه گردید تا عملکرد الگوریتم در سطوح مختلف آستانه بررسی شود. در گام نخست، آستانه‌هایی انتخاب شدند که سه شرط زیر را هم‌زمان برآورده کنند:

۱. مقدار حساسیت حداقل برابر با ۰/۹ باشد تا اطمینان حاصل شود که حداقل ۹۰ درصد از شمش‌های ناصاف به‌درستی شناسایی می‌شوند.

۲. مقدار دقت پیش‌بینی^۲، کمتر از ۰/۶ نباشد تا میزان هشدارهای اشتباه در حد قابل قبول باقی بماند.

۳. تعداد منفی‌های درست بیش از نیمی از کل شمش‌های سالم باشد تا صحت شناسایی محصولات سالم نیز حفظ شود.

در میان آستانه‌هایی که این سه شرط را برآورده می‌کردند، مقداری به‌عنوان آستانه بهینه انتخاب شد که بیشترین مقدار شاخص F2-Score را داشت. در صورتی که هیچ آستانه‌ای تمامی شرایط را برآورده نمی‌کرد، با حذف شرط دوم، آستانه‌ای با بیشترین دقت^۳ انتخاب می‌گردید. اگر در این مرحله نیز آستانه‌ای یافت نمی‌شد، آستانه‌ای با بیشترین مقدار حساسیت در عین حفظ تعداد منفی‌های درست بالا برگزیده می‌شد. در حالتی که هیچ‌کدام از شرایط قبلی برآورده نمی‌شدند، آستانه‌ای انتخاب می‌گردید که بیشترین توان تفکیک بین دو کلاس را بر اساس اختلاف میان نرخ مثبت درست و مثبت نادرست ایجاد کند. این منطق چندمرحله‌ای موجب شد تا فرآیند تصمیم‌گیری با تمرکز بر کاهش موارد منفی نادرست انجام گیرد، حتی اگر این امر موجب افزایش اندکی در خطاهای مثبت نادرست شود.

روش سوم، خوشه‌بندی مبتنی بر الگوریتم K-Means است که براساس مقادیر ویژگی‌های غالب، یکی از خوشه‌ها به‌عنوان نماینده

² Precision
³ Accuracy

¹ Precision-Recall

$$F1 = \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \times 2 \quad (10)$$

در رابطه‌های ۷ تا ۱۰، TP مثبت درست است، یعنی تعداد برچسب‌های مثبتی که به درستی توسط طبقه‌بندی‌کننده مثبت پیش‌بینی شده است. TN منفی درست است، تعداد برچسب‌های منفی که توسط طبقه‌بندی‌کننده به درستی منفی پیش‌بینی شده است. FP مثبت نادرست، تعداد برچسب‌های منفی که توسط طبقه‌بندی‌کننده به اشتباه مثبت پیش‌بینی شده است و FN نشان دهنده منفی نادرست است و به تعداد برچسب‌های مثبت که توسط طبقه‌بندی‌کننده به اشتباه منفی پیش‌بینی شده است اشاره می‌کند.

۵-۲ تحلیل ویژگی‌ها با نمودار جعبه‌ای

در این مطالعه، نمودار جعبه‌ای به‌عنوان ابزاری کلیدی برای مقایسه توزیع مقادیر ویژگی‌ها در میان دو گروه سالم و ناصاف به‌کار گرفته شد. این نمودار امکان نمایش شاخص‌های مرکزی مانند میانه، چارک‌ها و همچنین شناسایی مقادیر پرت را فراهم می‌آورد و نشان می‌دهد کدام ویژگی‌ها قدرت تمایز بیشتری دارند. این نمودار برای هر ویژگی ترسیم شد و نتایج نشان داد که شمش‌های صاف و ناصاف همپوشانی دارند ولی بهترین تمایزها مربوط به ویژگی‌های مجموع مربعات انحراف، مجموع مربعات انحراف عمودی و انحراف معیار ارتعاش هستند.

۵-۳ نتایج روش‌های تصمیم‌گیری

پس از تحلیل اولیه ویژگی‌ها، سه روش تصمیم‌گیری معرفی‌شده در بخش ۴-۵ بر روی ویژگی‌ها آزمایش شدند و دقت و پایداری هر یک از روش‌ها در شرایط صنعتی بررسی شد.

برای ارزیابی توان پردازشی، زمان اجرای بخش‌های کلیدی سیستم روی یک رایانه با مشخصات سخت‌افزاری (CPU: Intel i7 / RAM: 16GB) اندازه‌گیری شد. میانگین زمان پردازش هر فریم برای پیش‌پردازش حدود ۵ ms، برای تبدیل هاف دایره‌ای حدود ۱۱ ms و برای استخراج ویژگی‌ها و تصمیم‌گیری نهایی کمتر از ۱ ms بوده است. در مجموع، میانگین زمان پردازش هر شمش زیر یک ثانیه است. این سرعت نشان می‌دهد که الگوریتم

۵-۱ ارزیابی نتایج

در مراحل اولیه، ویدیوهای متعددی از فرآیند غلتیدن شمش‌های خروجی دستگاه صافکاری در کارخانه فولاد آلیاژی ایران ثبت شد، اما همه‌ی آن‌ها از کیفیت لازم برای تحلیل برخوردار نبودند. شمش‌ها روی میز خروجی همیشه قابل پیش‌بینی نیست؛ برخی شمش‌ها به‌دلیل ناصافی یا وضعیت سطح میز، در مسیر حرکت کج شده یا حتی متوقف می‌شوند و این موارد باعث حذف بخشی از داده‌ها شد. از سوی دیگر، فرآیند ضبط هر ویدیو نیازمند هماهنگی میان چندین واحد کارخانه، توقف موقت خط تولید و تنظیم دقیق پارامترهای نور، زاویه دید و شاتر دوربین باسلر بود. در هر نوبت آزمایش، تنظیمات تصویربرداری باید مجدداً انجام می‌شد تا وضوح و ثبات تصویر تضمین شود. در نهایت، پس از تلاش و انجام چندین مرحله آزمایشی، مجموعه‌ای شامل ۲۳ ویدیو با کیفیت بالا و شرایط کنترل‌شده تهیه گردید که هر کدام نمایانگر حرکت یک شمش خروجی بر روی میز شیب‌دار دستگاه صافکاری هستند. از میان این نمونه‌ها، ۶ شمش توسط کارشناسان به‌عنوان سالم^۱ و ۱۷ شمش به‌عنوان ناصاف^۲ برچسب‌گذاری شدند. اگرچه تعداد نمونه‌ها محدود است، اما تمامی آن‌ها در شرایط واقعی صنعتی و با کیفیت یکنواخت ثبت شده‌اند تا ارزیابی روش پیشنهادی از اعتبار فنی کافی برخوردار باشد.

۵-۱ معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی نیاز به معیارهایی استاندارد و قابل اعتماد است. در این راستا، از معیارهایی نظیر دقت، حساسیت، دقت پیش‌بینی و امتیاز $F1$ استفاده شد که نحوه محاسبه آن‌ها در رابطه‌های ۷ تا ۱۰ بیان شده است.

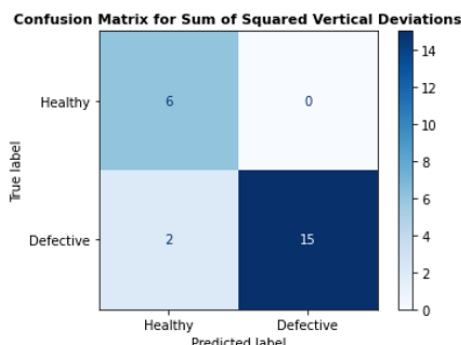
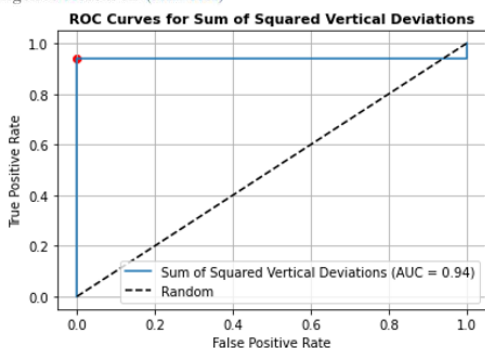
$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (7)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (8)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (9)$$

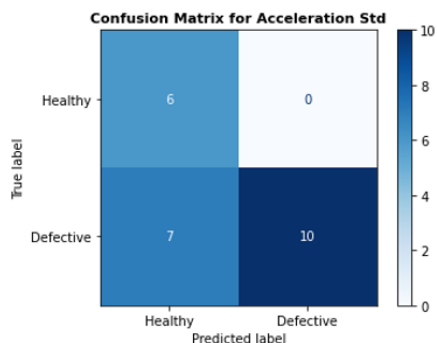
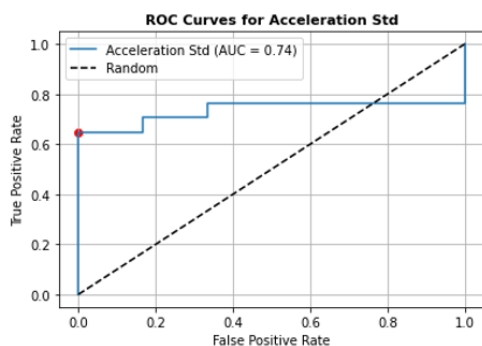
² Defective

¹ Healthy



شکل (۱۴): نمودار مشخصه عملکرد سیستم و ماتریس درهم‌ریختگی

برای ویژگی مجموع مربعات انحراف عمودی



شکل (۱۵): نمودار مشخصه عملکرد سیستم و ماتریس درهم‌ریختگی

برای ویژگی انحراف معیار شتاب

پیشنهادی بدون نیاز به سخت‌افزار خاص، توانایی اجرا در زمان واقعی در محیط صنعتی را دارد.

در فرآیند عملی، فاصله زمانی مشخص حداقل ۴۰ ثانیه میان خروج هر شمش از دستگاه صافکاری و ورود شمش بعدی به روی میز وجود دارد. با توجه به این بازه، سیستم فرصت کافی دارد تا ویدیو را پردازش کرده، ویژگی‌ها را استخراج نموده و تصمیم نهایی درباره سالم یا ناصاف بودن شمش را اعلام کند. در چنین حالتی، به محض تشخیص ناصافی، سیستم می‌تواند به اپراتور هشدار دهد یا به صورت خودکار مسیر خروج شمش را تغییر دهد تا از ورود محصول معیوب به خطوط بعدی جلوگیری شود.

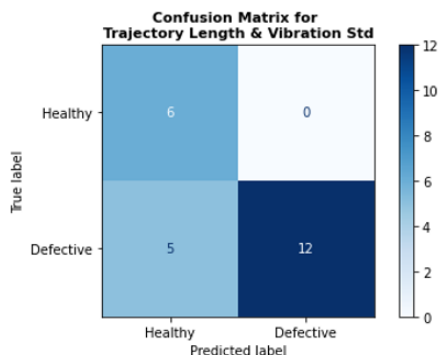
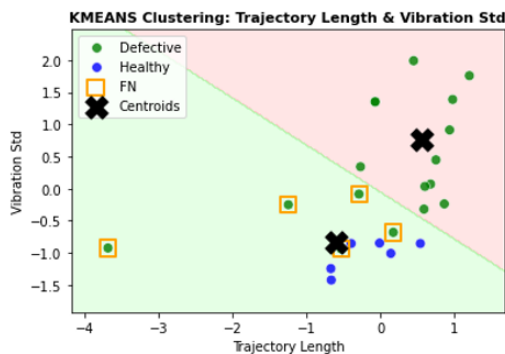
در ادامه، در این بخش ابتدا نتایج روش آستانه‌گذاری تک‌مرحله‌ای، سپس آستانه‌گذاری چندمرحله‌ای و در نهایت روش خوشه‌بندی مبتنی بر K-Means ارائه و مقایسه شدند.

نتایج روش آستانه‌گذاری تک‌مرحله‌ای نشان داد که بهترین عملکرد به ترتیب مربوط به ویژگی‌های مجموع مربعات انحراف عمودی، انحراف معیار ارتعاش و مجموع مربعات انحراف هستند. نمونه‌ای از این نتایج در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ آمده است. به طور خاص، ویژگی مجموع مربعات انحراف عمودی با آستانه منفی ۰/۵۷ در شکل ۱۵ با سطح زیر منحنی ۰/۹۴ توانسته است عملکرد بسیار خوبی در جداسازی شمش‌های سالم و ناصاف ارائه دهد. همچنین، ماتریس درهم‌ریختگی این ویژگی نشان می‌دهد که از ۱۷ شمش ناصاف، ۱۵ مورد به درستی شناسایی شده و تنها ۲ مورد خطا داشته است، در حالی که تمامی ۶ شمش سالم بدون خطا تشخیص داده شده‌اند. این نتایج بیانگر قدرت بالای این ویژگی برای کاربردهای بازرسی صنعتی است.

روش آستانه‌گذاری چندمرحله‌ای با توجه به هزینه‌های متفاوت خطا طراحی شد و نتایج نشان داد که سه ویژگی انحراف معیار ارتعاش، مجموع مربعات انحراف عمودی و مجموع مربعات انحراف بیشترین قدرت تفکیک را داشتند. ماتریس‌های درهم‌ریختگی برای هر ویژگی محاسبه شد و نمونه‌هایی از این نتایج در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نمایش داده شده است که بیانگر بهبود در شناسایی شمش‌های ناصاف هستند.

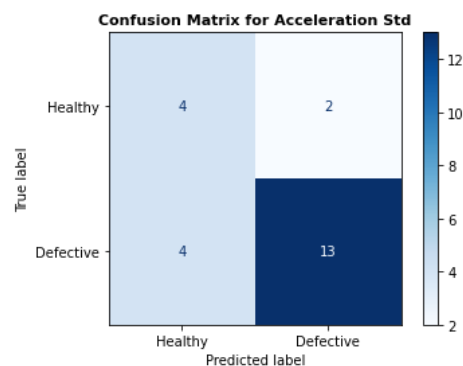
در بررسی تأثیر مقدار آستانه، مشاهده شد که جهت تغییرات عملکرد به نوع ویژگی بستگی دارد. در ویژگی‌هایی مانند مجموع مربعات انحراف که مقدار آن با ناصافی شمش افزایش می‌یابد، با افزایش آستانه نمونه‌های ناصاف کمتری شناسایی شده و احتمال از دست رفتن آن‌ها افزایش می‌یابد، در نتیجه کاهش حساسیت کاهش و دقت پیش‌بینی افزایش می‌یابد. در مقابل، در ویژگی‌هایی نظیر انحراف معیار شتاب که رفتار معکوس دارند، کاهش آستانه همان اثر را ایجاد می‌کند.

در نهایت، نتایج روش خوشه‌بندی نشان داد که این روش توانسته است تا حد زیادی داده‌ها را بر اساس ساختار فاصله‌ای خوشه‌بندی کند، اما به دلیل محدودیت ذاتی این روش در استفاده از مرزهای خطی، توانایی کافی برای تشخیص داده‌های پیچیده یا هم‌پوشان را ندارد. در این خروجی، داده‌های نزدیک به مرز بیشترین میزان خطا را داشته‌اند، که امری طبیعی در روش‌های مبتنی بر فاصله است. در ادامه، نتیجه روش خوشه‌بندی روی دو ویژگی طول مسیر حرکتی و انحراف معیار ارتعاش در شکل ۱۸ نمایش داده شده است.

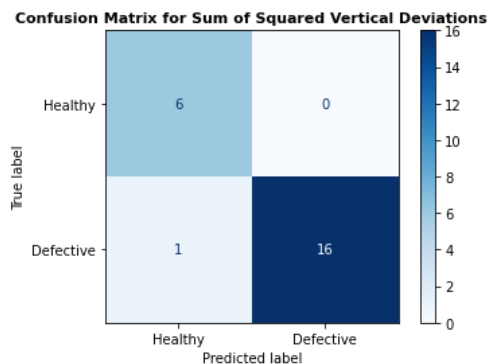


شکل (۱۸): نتیجه روش خوشه‌بندی روی دو ویژگی طول مسیر حرکتی و انحراف معیار ارتعاش

تحلیل دقیق‌تر نتایج نشان می‌دهد که این استراتژی توانست خطای منفی نادرست را کاهش دهد. برای مثال، در ویژگی انحراف معیار شتاب با آستانه منفی ۰/۷۲ تعداد خطاهای منفی نادرست از ۷ در روش تک‌مرحله‌ای به ۴ کاهش یافت، به این معنا که تعداد شمش‌های ناصاف شناسایی‌شده از ۱۰ به ۱۳ افزایش پیدا کرد. هرچند که در این روش تعداد خطاهای مثبت نادرست از صفر به ۲ مورد افزایش یافت، اما با توجه به اهمیت بالاتر جلوگیری از رد شدن شمش‌های ناصاف، این تغییر یک بهبود ارزشمند محسوب می‌شود. با این حال کاهش خطاهای منفی نادرست با هزینه افزایش خطاهای مثبت نادرست در تمام ویژگی‌ها رخ نداد و ما در ویژگی مجموع مربعات انحراف عمودی با آستانه منفی ۰/۸۵، شاهد بهبود چشم‌گیری بوده‌ایم، به‌طوری‌که خطای منفی نادرست از ۲ به ۱ کاهش پیدا کرد و در عین حال هیچ افزایشی در خطاهای مثبت نادرست مشاهده نشد. این نتیجه نشان می‌دهد که این ویژگی نه تنها در شناسایی شمش‌های ناصاف موفق عمل کرده، بلکه توانسته تمامی نمونه‌های سالم را نیز به درستی تشخیص دهد.



شکل (۱۶): ماتریس درهم‌ریختگی ویژگی انحراف معیار شتاب



شکل (۱۷): ماتریس درهم‌ریختگی ویژگی مجموع مربعات انحراف عمودی

هزینه‌های نامتقارن خطا، عملکرد دقیق‌تر و باثبات‌تری نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌دهد. این منطق چندمرحله‌ای باعث شد سیستم ضمن افزایش حساسیت نسبت به شناسایی شمش‌های ناصاف، ثبات خود را در حفظ دقت تشخیص نمونه‌های سالم نیز حفظ کند و در نتیجه توازن میان ایمنی تشخیص (حساسیت بالا) و قابلیت اطمینان صنعتی (دقت پیش‌بینی قابل قبول) برقرار شود. ارزیابی زمان اجرای الگوریتم نشان داد که میانگین زمان پردازش هر شمش زیر یک ثانیه است؛ بنابراین روش پیشنهادی بدون نیاز به سخت‌افزار خاص، قابلیت اجرا در زمان واقعی را دارد و می‌تواند در بازه زمانی بین عبور دو شمش روی میز خروجی تصمیم‌نهایی را اعلام کند. هرچند تعداد نمونه‌های مورد استفاده به دلیل محدودیت‌های عملیاتی و الزامات ایمنی کارخانه محدود بوده است، اما داده‌ها از تنوع حرکتی کافی برخوردار بودند و برای ارزیابی هدف پژوهش کفایت دارند. در ادامه‌ی این پژوهش، برنامه جمع‌آوری داده‌های گسترده‌تر، بهبود شرایط نوری و استفاده از چند موقعیت دوربین در نظر گرفته شده است تا دقت و تعمیم‌پذیری مدل افزایش یابد.

References

- [1] Y. J. Chen, Y. H. Yeh, and J. F. Yang, "A system for the real-time detection of the U-shaped steel bar straightness on a production line," *Sensors*, vol. 25, no. 13, p. 3972, 2025.
- [2] Y. Saif, A. Z. M. Rus, Y. Yusof, M. L. Ahmed, S. Al-Alimi, D. H. Didane, and H. Q. A. Abdulrab, "Advancements in roundness measurement parts for industrial automation using Internet of Things architecture-based computer vision and image processing techniques," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 20, p. 11419, 2023.
- [3] O. Sidla, E. Wilding, A. Niel, and H. Barg, "Vision system for gauging and automatic straightening of steel bars," in *Machine Vision and Three-Dimensional Imaging Systems for Inspection and Metrology*, vol. 4189, pp. 248–257, Feb. 2001.
- [4] X. Chen, M. Bi, and C. Xue, "Study on straightness measurement technology of slender rod based on time-domain three-point method," in *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1303, no. 1, p. 012140, Aug. 2019, IOP Publishing.
- [5] T. Schmid-Schirling, L. Kraft, and D. Carl, "Laser scanning-based straightness measurement of precision bright steel rods at one point," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 116, no. 7, pp. 2511–2519, 2021.
- [6] Y. Jiang, "Surface defect detection of steel based on improved YOLOv5 algorithm," *Electronic Research Archive*, vol. 31, no. 11, 2023.
- [7] R. Usamentiaga and D. F. Garcia, "Rail flatness measurement based on dual laser triangulation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 60, no. 4, pp. 5849–5860, 2024.
- [8] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, 2016, pp. 779–788.
- [9] C. H. Kang and S. Y. Kim, "Real-time object detection and segmentation technology: An analysis of the YOLO algorithm," *JMST Adv.*, vol. 5, no. 2, pp. 69–76, 2023.
- [10] N. M. Alahdal, F. Abukhodair, L. H. Meftah, and A. Cherif, "Real-time object detection in autonomous vehicles with YOLO," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 246, pp. 2792–2801, 2024.

همانطور که مشاهده می‌شود، مراکز خوشه‌ها به‌وسیله الگوریتم مشخص شده‌اند و نواحی تصمیم‌گیری بر اساس فاصله اقلیدسی شکل گرفته‌است. نقاط سبز نشان‌دهنده شمش‌های ناصاف و نقاط آبی نمایانگر شمش‌های سالم هستند که این امکان را فراهم می‌کند تا عملکرد الگوریتم در مقایسه با واقعیت ارزیابی شود. با این حال، داده‌های نزدیک به مرزها بیشترین میزان خطا را داشتند. همچنین ماتریس درهم‌ریختگی نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های سالم به‌درستی شناسایی شده‌اند، اما پنج نمونه از شمش‌های ناصاف به اشتباه در گروه سالم قرار گرفتند. این موضوع باعث شد دقت کلی مدل حدود ۷۸ درصد باشد.

۶- نتیجه‌گیری و کارهای آینده

در این پژوهش، روشی مبتنی بر تحلیل مسیر حرکت سطح مقطع شمش‌های فولادی جهت تشخیص خودکار ناصافی ارائه شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ویژگی‌هایی مانند مجموع مربعات انحراف عمودی و انحراف معیار ارتعاش بیشترین قدرت تمایز را میان شمش‌های سالم و ناصاف دارند. مقایسه‌ی روش‌های تصمیم‌گیری نشان داد که رویکرد آستانه‌گذاری چندمرحله‌ای با در نظر گرفتن



- [11] Y. Xie and Q. Ji, "A new efficient ellipse detection method," in Proc. 16th Int. Conf. Pattern Recognit., vol. 2, 2002, IEEE.
- [12] R. Brunelli and T. Poggio, "Template matching: Matched spatial filters and beyond," Pattern Recognit., vol. 30, no. 5, pp. 751–768, 1997.
- [13] S. W. Huck, T. L. Cross, and S. B. Clark, "Overcoming misconceptions about Z-scores," Teaching Statistics, vol. 8, pp. 38–40, 1986.

Automatic Detection of Defective Round Steel Billets from Straightening Machine Output Using Machine Vision Techniques

Rastin Namiranian¹, Sahar Soltani², Vali Derhami^{3*}

¹ Information Technology Department, Iran Alloy Steel Company, Yazd, Iran

²M.Sc. in Artificial Intelligence and Robotics, Iranian Alloy Steel Development Company, Yazd, Iran

³ Professor, Department of Computer Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Article Information

Original Research Paper

Received:

2025 September 25

Accepted:

2025 November 14

Keywords:

Circular Hough Transform, machine Vision, Steel Billet, Straightening Machine

Corresponding Author*:

vderhami@yazd.ac.ir

Abstract

This paper addresses the problem of detecting defective round steel billets during their rolling motion. In the finishing hall of the Iran Alloy Steel Factory, one of the essential operations applied to round billets is straightening. However, no system currently exists to automatically assess the quality of the straightening machine's output. To address this challenge, videos of billets rolling on the discharge table after leaving the straightening machine are recorded. After preprocessing and illumination balancing, the cross-section of each billet in every frame is detected using the Circular Hough Transform method. The motion trajectory of the billet in each video is then determined, and six motion-related features are extracted for analysis. These features include Trajectory Length, Sum of Squared Deviations, Sum of Squared Vertical Deviations, Vibration of Standard Deviation, Wavelet Vibration Energy, and Standard Deviation of Acceleration. The values of these features are computed with normalization based on sampling per unit length. Experimental results demonstrate that features such as Vibration of Standard Deviation, Sum of Squared Vertical Deviations, and Sum of Squared Deviations show strong discriminative power in separating healthy billets from defective ones. Although the false negative rate is somewhat high, the proposed method achieves an overall accuracy of about 85%, which is considered acceptable for practical industrial application.



: 10.22034/ABMIR.2025.23720.1171

E-ISSN: [2821-2037](#)

/© 2025. Published by Yazd University This is an open access article

under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

