مرکز دانش شبکه خبرگان صنعت فولاد

بازرسی هوشمند اسلب‌های فولادی با دوربین‌های صنعتی اسکن خطی ZDS: معماری اپتومکانیکی، الگوریتم‌های هوش مصنوعی و نقشه راه استقرار در خطوط ریخته‌گری مداوم

مقالات تخصصی | علی ارجمندی اصل | ۱۴۰۵/۰۸/۲۰

فرایند تولید فولاد در مجتمع‌های عظیم متالورژی، زنجیره‌ای به‌هم‌پیوسته از تحولات ترمودینامیکی و مکانیکی است که در آن کیفیت محصول نهایی در خطوط نورد گرم و سرد، مستقیماً به‌سلامت فیزیکی و متالورژیکی محصول میانی یعنی تختال یا اسلب (Slab) گره‌خورده است.

چکیده اجرایی: فرایند تولید فولاد در مجتمع‌های عظیم متالورژی، زنجیره‌ای به‌هم‌پیوسته از تحولات ترمودینامیکی و مکانیکی است که در آن کیفیت محصول نهایی در خطوط نورد گرم و سرد، مستقیماً به‌سلامت فیزیکی و متالورژیکی محصول میانی یعنی تختال یا اسلب (Slab) گره‌خورده است. تلفیق فناوری بینایی ماشین (Machine Vision) مبتنی بر دوربین‌های صنعتی اسکن خطی (Line Scan) برند ZDS و الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری عمیق (Deep Learning)، ارتقای پارادایم کنترل کیفیت در صنعت فولاد را از یک بازرسی چشمی محدود (۵ تا ۱۵ درصد) به یک پایش برخط (Real-time)، تمام‌وقت و ۱۰۰ درصدی کاملاً امکان‌پذیر و بستر آن را آماده ساخته است. این مقاله، امکان‌سنجی مهندسی سامانه‌های بازرسی هوشمند سطح پیوسته را به همراه طرح پیشنهادی پروژه بازرسی هم‌زمان سطح رویی و زیرین صفحات فولادی با دوربین‌های اسکن خطی ZDS، متالورژی عیوب سطحی، الگوریتم‌های هوش مصنوعی و نقشه راه استقرار صنعتی مورد بررسی قرار می‌دهد.

۱. مبانی استراتژیک کنترل کیفیت سطح تختال و گذار از بازرسی سنتی به سامانه نظارت سطح هوشمند

در زنجیره ارزش تولید مقاطع تخت فولادی، تختال به‌عنوان خشت بنای تمامی فرایندهای شکل‌دهی بعدی عمل می‌کند. در خروجی ماشین‌های ریخته‌گری مداوم (Continuous Casting Machines – CCM)، تختال‌های فولادی در دماهای بسیار بالا (بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) تولید می‌شوند. هرگونه ناپیوستگی ساختاری یا عیب سطحی که در جریان انجماد فولاد مذاب درون قالب مسی (Mold) یا در نواحی خنک‌کاری ثانویه و

صاف‌کاری (Unbending) شکل بگیرد، در طول فرایند نورد به دلیل اعمال تنش‌های فشاری و کششی شدید، دستخوش تغییر شکل پلاستیک شده و به‌صورت عیوب گسترده نظیر تورق (Lamination) یا پارگی ورق روی کلاف نهایی ظاهر می‌گردد.

۱.۱. چالش‌های متالورژیکی و محدودیت‌های بازرسی چشمی در محیط‌های پرحرارت فولادسازی

بازرسی سنتی در کارگاه‌های ریخته‌گری و اسکارفینگ (Scarfing Bay) متکی بر مشاهده چشمی اپراتورها یا نمونه‌برداری مقطعی پس از سردشدن تختال است. این رویکرد سنتی با چهار مانع بنیادین فیزیکی و عملیاتی روبروست:

- **تابش خیره‌کننده حرارتی و خطای دید:** دمای سطحی تختال در خروجی ریخته‌گری مداوم بین ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (و در ناحیه قالب نزدیک به ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) قرار دارد که تابش شدید الکترومغناطیسی ایجاد کرده و چشم انسان را از تشخیص کنتراست‌های ظریف مربوط به ترک‌های مویی ناتوان می‌سازد.
- **خستگی اپراتور و تصمیم‌گیری سلیقه‌ای:** خستگی ناشی از کار یکنواخت، آلودگی شدید محیط صنعتی، وجود بخار آب و برخورد سلیقه‌ای بازرسان در تعیین شدت عیب، پایداری کنترل کیفیت را مختل کرده و پوشش بازرسی را به ۵ تا ۱۵ درصد محدود می‌سازد.
- **اتلاف انرژی حرارتی و توقف شارژ گرم مستقیم:** الزام به سردکردن تختال برای بازرسی دستی، مانع از اجرای فرایند «شارژ گرم مستقیم» (Direct Hot Charging) به کوره‌های پیش‌گام نورد گرم شده و اتلاف عظیم انرژی را به کارخانه تحمیل می‌نماید.
- **عدم دسترسی فیزیکی به سطح زیرین تختال:** سطح زیرین تختال به دلیل قرارگیری مداوم بر روی غلتک‌های میز نقاله (Roller Table)، عملاً از دید بازرس انسانی پنهان مانده و تنها با جرثقیل و ورق‌برگردان قابل‌مشاهده است که در سرعت‌های بالای تولید غیرممکن است.

۱.۲. معماری مهندسی سامانه هوشمند نظارت سطح و ابعاد تختال

برای غلبه بر این تنگناهای صنعتی، امکان‌سنجی و طراحی سامانه‌های بازرسی و نظارت هوشمند تختال (اسلب) بر پایه دوربین‌های اسکن خطی ZDS مطرح می‌شود. این سامانه‌ها می‌توانند باهدف تبدیل کنترل کیفیت از یک فرایند محدود و موردی به یک سیستم پایش هوشمند، خودکار و داده‌محور در خطوط استراتژیک فولادسازی به کار گرفته شوند:

- **زیرسیستم تصویربرداری صنعتی مقاوم‌سازی‌شده:** بهره‌گیری از دوربین‌های صنعتی با رزولوشن بالا، سرعت شاتر بالا، حساسیت نوری فوق‌العاده و مقاومت کامل در برابر شرایط محیطی.
- **زیرسیستم پردازش موازی (Parallel Processing):** استفاده از سرورهای باقدرت پردازشی بالا جهت اجرای بلادرنگ الگوریتم‌های پردازش تصویر و بینایی ماشین در سرعت‌های بالای خط تولید.
- **هسته الگوریتم‌های هوش مصنوعی و پای‌گاه‌داده:** شناسایی خودکار انواع عیوب بادقت بالای ۹۰ تا ۹۹ درصد، بازرسی هم‌زمان دو سطح محصول (رو و زیر)، قابلیت عکس‌برداری آنلاین و زوم روی تصاویر، نمایش نحوه توزیع عیوب و ایجاد بانک اطلاعاتی جامع جهت ردیابی تختال.

۲. مهندسی اپتیک و مشخصات فنی دوربین‌های صنعتی Line Scan برند ZDS در بازرسی فولاد

انتخاب حسگر تصویربرداری، حیاتی‌ترین تصمیم مهندسی در طراحی سامانه بازرسی سطح تختال است. درحالی‌که دوربین‌های اسکن ناحیه‌ای (Area Scan) یک ماتریس دوبعدی از پیکسل‌ها را در یک‌لحظه ثبت می‌کنند، در بازرسی صفحات عریض و پیوسته فولادی که با سرعت بالا حرکت می‌کنند با محدودیت‌های جدی مواجه می‌شوند.

۲.۱. مقایسه فناوری اسکن خطی و اسکن ناحیه‌ای در پایش پیوسته اسلب‌های عریض

استفاده از دوربین‌های اسکن ناحیه‌ای (Area Scan) برای پوشاندن عرض یک تختال استاندارد (۱۶۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌متر) نیازمند چیدمان چندین دوربین در عرض خط و دوختن تصاویر (Image Stitching) در طول حرکت است؛ فرایندی که به دلیل اعوجاج پرسپکتیو در لبه‌ها، تغییرات غیریکنواخت نورپردازی و تاری حرکتی (Motion Blur) در سرعت‌های بالای ۲ متر بر ثانیه، دقت اندازه‌گیری را به‌شدت کاهش می‌دهد. در مقابل، دوربین‌های اسکن خطی (Line Scan) دارای مزایای مهندسی زیر هستند:

- **حذف کامل تاری حرکتی و خطای دوخت تصویر:** دوربین‌های اسکن خطی دارای یک آرایه خطی تک‌بعدی از پیکسل‌ها (از ۲ هزار تا ۱۶ هزار پیکسل در یک ردیف) هستند که با حرکت پیوسته تختال، تصویر را خط‌به‌خط با فرکانس‌های فوق‌العاده بالا ثبت کرده و یک تصویر یکپارچه با طول نامحدود تولید می‌کنند.
- **سرعت بازرسی ۲۰ تا ۳۰ برابر بیشتر:** در پایش پیوسته سطوح عریض، فناوری اسکن خطی سرعت بازرسی را ۲۰ تا ۳۰ برابر نسبت به حسگرهای ناحیه‌ای افزایش می‌دهد.

- **اصلاح سخت‌افزاری درون‌دوربینی:** در دوربین‌های اسکن خطی، اصلاح بهره (Gain) و آفست (Offset) پیکسل‌ها مستقیماً درون سخت‌افزار دوربین انجام می‌شود، درحالی‌که دوربین‌های ناحیه‌ای بار این محاسبات را به پردازنده مرکزی سیستم تحمیل می‌کنند.

معیار مقایسه‌ای و پارامتر فنی	دوربین اسکن خطی (Line Scan)	دوربین اسکن ناحیه‌ای (Area Scan)
روش ثبت تصویر	ثبت متوالی یک ردیف پیکسلی منفرد در فرکانس بالا	ثبت تک‌شات از یک آرایه مستطیلی دوبعدی
نحوه تشکیل تصویر دوبعدی	بازسازی پیوسته تصویر از کنار هم قرارگرفتن خطوط متوالی	ثبت کامل قاب تصویر در یک نوبت نوردهی
رزولوشن عملیاتی استاندارد	۴ هزار تا بیش از ۱۶ هزار پیکسل در عرض با طول نامحدود	۲ تا ۶۵ مگاپیکسل در هر فریم محدود
سرعت تصویربرداری	۱۰ هزار تا ۱۱۰ هزار خط بر ثانیه (کیلوهرتز)	۱۷ تا ۷۰ فریم بر ثانیه در رزولوشن کامل
عملکرد در سرعت‌های بالای ۲ متر بر ثانیه	ایده‌آل و بدون تاری حرکتی با همگام‌سازی انکودر	بروز تاری حرکتی شدید و نیازمند نورپردازی استروب غیرعملی
هندسه نورپردازی موردنیاز	نور خطی متمرکز و یکنواخت (Uniform Line Light)	نورهای حلقه‌ای، گنبدی یا صفحه‌ای (Ring/Dome Lights)

۲.۲. کالبدشکافی فنی سری Edmund برند ZDS

برند ZDS مجموعه متنوّعی از دوربین‌های اسکن خطی سری Edmund را برای محیط‌های سنگین صنعتی ارائه می‌دهد. در پروژه‌های بازرسی سطح اسلب و ورق فولادی، مدل‌های مختلف این خانواده نقش محوری ایفا می‌کنند:

- **خانواده سری Edmund (شامل مدل‌های EDL با رابط GigE):** این سری شامل دوربین‌های اسکن خطی با رزولوشن ۲ هزار و ۴ هزار پیکسل (نظیر مدل شاخص EDL4096-410GM)، اندازه پیکسل ۷ میکرومتر و عمق بیت ۱۰ بیتی با فرمت‌های خروجی MONO16، RAW8، MONO8 و RAW16 است. این دوربین‌ها با توان مصرفی کمتر از ۳ وات، تغذیه منعطف ۹ تا ۵۲ ولت DC یا PoE، ابعاد فشرده ۶۲ در ۶۲ در ۲۹.۵ میلی‌متر و وزن کمتر از ۲۲۰ گرم، گزینه‌ای ایده‌آل برای فضاهای محدود صنعتی محسوب می‌شوند.
- **خانواده سری Edmund (مجهز به رابط فیبر نوری ۱۰ گیگابیت و اترنت ۲.۵ گیگابیت):** این خانواده برای کاربردهای با سرعت و کیفیت تصویر فوق‌العاده بالا طراحی شده و امکان انتقال پایدار و بلادرنگ داده‌های تصویری از طریق بستر فیبر نوری (Fiber Optic) تا مسافت‌های بیش از ۳۰۰ متر

را بدون افت سیگنال فراهم می‌سازد.

- **مدل‌های پیشرفته سری Edmund (مجهز به سنسورهای high-resolution و نویز پایین):** این مدل‌ها رزولوشن‌های بالاتر و نرخ اسکن بیشتری را پوشش می‌دهند. طراحی بدون فن (Fan-less) و مصرف انرژی پایین در سری Edmund، افزایش دمای داخلی سنسور را به حداقل رسانده و نویز حرارتی (Thermal Noise) را در محیط‌های گرم فولادسازی سرکوب می‌کند. همچنین انتقال داده بر بستر فیبر نوری یا اترنت پرسرعت، ایمنی کامل در برابر تداخلات شدید الکترومغناطیسی (EMI) ناشی از موتورهای الکتریکی فشارقوی را تضمین می‌نماید.

ویژگی فنی و مهندسی	سری Edmund (مدل‌های GigE / EDL)	سری Edmund (مدل‌های high-speed / Fiber Optic)
رزولوشن افقی سنسور	۲K تا ۴K پیکسل (مانند EDL4096-410GM)	۴K تا ۸K پیکسل
فناوری انباشت نوری (TDI)	پشتیبانی از Multi-line TDI و تک‌خطی	پشتیبانی از Multi-line TDI و SCS
حداکثر نرخ اسکن خطی	تا ۸۰ kHz متناسب با پهنای باند GigE	نرخ اسکن بالا متناسب با پهنای باند ۱۰ Gbps
رابط انتقال داده و طول کابل	GigE / PoE (تا ۱۰۰ متر کابل شبکه صنعتی)	فیبر نوری ۱۰ Gbps (بیش از ۳۰۰m) و ۲.۵ Gbps
پردازشگر داخلی تصویر (ISP)	اصلاح FFC، FPN، LUT و سایه لنز	حذف FPN، LUT، تراز سفیدی و ماتریس رنگ
مانت لنز و ابعاد فیزیکی	M42 / ۶۲ × ۶۲ × ۲۹.۵ mm	مانت صنعتی عریض / بدون فن
سازگاری و استانداردها	GigE Vision, GenICam, Halcon, OpenCV	GigE Vision, GenICam, Halcon, OpenCV

۲.۲.۱. فناوری انباشت زمانی با تأخیر TDI و جبران افت نور در سرعت‌های بالا

یکی از چالش‌های فیزیکی در اسکن خطی با فرکانس بالا، کوتاه‌شدن زمان نوردهی (Exposure Time) در هر خط است که در مدل‌های ZDS می‌تواند تا ۸ میکروثانیه کاهش یابد. در چنین بازه زمانی کوتاهی، تعداد فوتون‌های دریافتی توسط سنسور کاهش‌یافته و تصویر تاریک و پرنویز می‌شود. دوربین‌های صنعتی ZDS با بهره‌گیری از فناوری «انباشت زمانی و تأخیر» (Time Delay and Integration – TDI) در آرایه‌های چندخطی (نظیر آرایه ۴ خطی در مدل GCL2048-304GM تا آرایه‌های چندخطی پیشرفته در سری‌های ۱۶ هزار پیکسلی)، این محدودیت فیزیکی را برطرف کرده‌اند.

۲.۲.۱.۱. مکانیزم انتقال بار سنکرون و تقویت نسبت سیگنال به نویز در طیف فروسرخ نزدیک NIR

در معماری TDI، سنسور به‌جای یک ردیف، دارای چندین ردیف موازی از پیکسل‌هاست که به‌صورت عمودی چیده شده‌اند. هنگامی که تختال فولادی در مقابل دوربین حرکت می‌کند، بارهای فتوالکتریک تولیدشده در

ردیف اول پیکسل‌ها، دقیقاً همگام با سرعت حرکت تختال (توسط پالس‌های دریافتی از انکودر)، به ردیف بعدی پیکسل‌ها منتقل شده و با بار نوری جدید جمع می‌شوند. این فرایند انباشت سنکرون، زمان مؤثر نوردهی را در تعداد ردیف‌های TDI ضرب می‌کند؛ بدون آنکه کوچک‌ترین تاری حرکتی ایجاد شود. نتیجه این مکانیزم در دوربین‌های ZDS، دستیابی به دامنه دینامیکی بالا (HDR تا ۶۵ دسی‌بل) و حساسیت فوق‌العاده در طیف فروسرخ نزدیک (NIR) است که امکان ثبت تصاویر با کنتراست بی‌نظیر را در سرعت‌های بالای خط فراهم می‌سازد.

۲.۲.۱.۱.۱. تنظیم فیلترهای میان‌گذر و بالاگذر نوری LP950 برای حذف تابش جسم سیاه تختال گداخته

در بازرسی تختال‌های داغ، سطح فولاد به‌عنوان یک جسم سیاه تابش شدیدی در طول‌موج‌های سرخ و فروسرخ ساطع می‌کند که می‌تواند سنسور دوربین را اشباع نماید. دوربین‌های اسکن خطی ZDS امکان نصب مستقیم فیلترهای نوری تخصصی نظیر فیلتر عبور دهنده طول‌موج‌های بلند LP950 (Long-Pass 950nm Filter) یا فیلترهای باند باریک هماهنگ با طول‌موج منبع نور خطی را بر روی مانت M42 فراهم می‌کنند. استفاده از فیلتر LP950 در ترکیب با حساسیت بالای NIR در سنسورهای ZDS، به سیستم اجازه می‌دهد تا امواج مزاحم محیطی و بازتاب‌های کاذب بخار آب را مسدود کرده و صرفاً امواج هدف را برای کشف ترک‌های زیرسطحی و سطحی دریافت نماید.

۲.۳. محاسبات ریاضی طراحی اپتیک، نرخ اسکن خطی و پهنای باند انتقال داده

طراحی مهندسی یک ایستگاه بازرسی سطح تختال با دوربین‌های ZDS نیازمند فرمولاسیون دقیق روابط اپتیکی و سینماتیکی در چهار مرحله است:

- **محاسبه رزولوشن مکانی عرضی و تعداد پیکسل‌های سنسور:** رزولوشن مکانی عرضی (x) بر اساس عرض میدان دید (FOV) و تعداد پیکسل‌های افقی سنسور (Hc) تعیین می‌شود. بر اساس استانداردهای بینایی ماشین مبتنی بر هوش مصنوعی، برای‌آنکه یک شبکه عصبی بتواند کوچک‌ترین عیب هدف با ابعاد d_min را به‌صورت پایدار شناسایی کند، تصویر آن عیب باید حداقل ۱۰ پیکسل (و برای عیوب بافتی پیچیده بیش از ۲۰ پیکسل) را روی سنسور بپوشاند:

$$x = FOV / Hc$$

$$Hc \le dmin / 10 \quad Hc \ge (10 \times FOV) / dmin$$

- **مثال کاربردی تعیین رزولوشن:** برای بازرسی یک تختال با عرض ۱۶۰۰ میلی‌متر (FOV = 1600 mm)،

در صورت استفاده از یک دوربین ۲ هزار پیکسلی (Hc = 2048)، دقت تفکیک پیکسلی برابر با 0.78 mm خواهد بود. اما برای کشف ترک‌های بسیار ظریف با عرض 0.3 mm تا 1.0 mm در دمای بالای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، استفاده از دوربین‌های ۱۶ هزار پیکسلی برند ZDS (با Hc = 16384 پیکسل) دقت تفکیک را به 0.097 mm بر پیکسل (کمتر از ۱۰۰ میکرومتر) می‌رساند.

- **محاسبه فرکانس یا نرخ اسکن خطی دوربین:** برای جلوگیری از کشیدگی یا فشردگی تصویر در راستای طولی تختال، رزولوشن طولی (y) باید برابر با رزولوشن عرضی (x) تنظیم شود. اگر سرعت حرکت تختال بر روی غلتک‌ها را با Vo (بر حسب میلی‌متر بر ثانیه) نمایش دهیم، حداقل نرخ اسکن خطی دوربین (f_line بر حسب هرتز) از رابطه زیر به دست می‌آید:

fline ≥ Vo / x

- **محاسبه بزرگ‌نمایی اپتیکی و انتخاب مانت لنز:** با توجه به اندازه پیکسل (p_size = 7 m) در دوربین‌های ZDS، طول آرایه سنسور (S) و بزرگ‌نمایی اپتیکی لنز ( ) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

= S / FOV = (Hc × psize) / FOV

ازآنجاکه برای سنسورهای عریض (از ۴ هزار تا ۱۲ و ۱۶ هزار پیکسل که طول سنسور تا بیش از ۸۶ میلی‌متر افزایش می‌یابد)، مانت‌های معمولی C-mount (با حداکثر پشتیبانی از قطر ۲۲ میلی‌متر) قابل‌استفاده نیستند، دوربین‌های اسکن خطی ZDS به مانت‌های صنعتی بزرگ نظیر F-mount، M42 و M72 مجهز شده‌اند تا در ترکیب با لنزهای دارای تابع انتقال مدولاسیون (MTF) بالا، کنتراست تصویر در لبه‌های تختال دقیقاً برابر با مرکز آن حفظ شود.

- **محاسبه پهنای باند انتقال داده و انتخاب رابط ارتباطی:** نرخ تولید داده خام (B) با لحاظ‌کردن ضریب اطمینان ۱.۵ برابری برای سربار شبکه و انتقال‌های انفجاری (Burst Transfers) تعیین می‌گردد (که در آن BPP تعداد بایت در هر پیکسل است):

نوع رابط انتقال داده	حداکثر پهنای باند	حداکثر مسافت کابل	کاربرد در دوربین‌های ZDS
20GigE Fiber Optic	۲۵۰۰ MB/s) (۲۰ Gbps	بیش از ۳۰۰ متر (فیبر نوری)	دوربین‌های 16K سری Edmund
10GigE Fiber Optic	۱۲۵۰ MB/s) (۱۰ Gbps	بیش از ۳۰۰ متر (فیبر نوری)	دوربین‌های 8K و 16K سری Edmund
CoaXPress (CXP-6/12)	۷۵۰ تا ۱۵۰۰ MB/s در هر کانال	بیش از ۴۰ متر کابل کواکسیال	اسکن خطی سرعت بالا در فواصل متوسط

نوع رابط انتقال داده	حداکثر پهنای باند	حداکثر مسافت کابل	کاربرد در دوربین‌های ZDS
Camera Link (Full)	۶۸۰ تا ۸۵۰ MB/s	محدود به ۱۰ متر (نیازمند Frame Grabber)	سیستم‌های نسل قدیم بافاصله کوتاه
GigE Vision	۸۰ تا ۱۲۵ MB/s	تا ۱۰۰ متر کابل شبکه Cat6	دوربین‌های 2K/4K سری Edmund

۳. شرح مراحل اجرایی پروژه بازرسی هم‌زمان سطح رویی و زیرین صفحات فولادی با دوربین ZDS

پیاده‌سازی موفق پروژه بازرسی سطح اسلب نیازمند پوشش کامل هر دو وجه اصلی صفحه (سطح رویی یا Loose Side و سطح زیرین یا Fixed Side) است؛ زیرا مکانیزم تشکیل عیوب در این دو سطح به دلیل تفاوت در شرایط روانکاری قالب، تجمع آخال‌های شناور در قوس داخلی ماشین ریخته‌گری و تماس مستقیم سطح زیرین با غلتک‌های راهنما، ماهیتاً متفاوت است. قابلیت‌ها و مشخصات فنی تجهیزات ZDS دستیابی کامل به این هدف را میسر می‌سازد.

۳.۱. فاز اول: مهندسی مکانیک و جانمایی ایستگاه تصویربرداری سطح رویی تختال

اجرای بازرسی در سطح رویی (Top Surface Inspection) شامل مراحل مهندسی زیر است:

- **نصب سازه دروازه‌ای ایزوله (Overhead Gantry):** طراحی و نصب یک سازه دروازه‌ای صلب در بالای میز غلتکی که کاملاً از فونداسیون غلتک‌ها ایزوله شده است تا ارتعاشات مکانیکی ناشی از ضربه حرکت تختال‌های سنگین به دوربین‌ها منتقل نگردد.
- **جانمایی عمودی دوربین‌های ۱۶ هزار پیکسلی ZDS:** نصب یک یا دو دوربین اسکن خطی 16K برند ZDS (سری Edmund) در بالای خط به‌گونه‌ای که محور اپتیکی دوربین عمود بر سطح تختال بوده و خط اسکن تمام عرض صفحه را به‌اضافه ۲۰۰ میلی‌متر حاشیه جابه‌جایی عرضی پوشش دهد.
- **پوسته‌زدایی و آماده‌سازی نوری سطح:** تعبیه ایستگاه پوسته‌زدایی با جت آب فشارقوی یا دمنده هوای فشرده پیش از خط دید دوربین جهت زدودن پوسته‌های اکسیدی سست و آب راکد از روی سطح تختال.
- **نورپردازی خطی ترکیبی میدان روشن و تاریک:** استفاده از منابع نور خطی (Line Light) مبتنی بر آرایه‌های LED فوق‌پرنور فاقد پرش نوری (Flicker-free) در ترکیب با قابلیت نوردهی چندگانه ۴ کاناله (Channel Multiple Exposure-4) در دوربین‌های ZDS، جهت آشکارسازی هم‌زمان

ترک‌های باز (در میدان روشن) و خراش‌های سطحی (در میدان تاریک با زاویه تابش مایل).

۳.۲. فاز دوم: معماری مهندسی بازرسی سطح زیرین صفحات در فضای بین غلتک‌های میز نقاله

بازرسی سطح زیرین (Bottom Surface Inspection) پیچیده‌ترین بخش مهندسی پروژه است؛ چرا که این سطح بر روی غلتک‌های فولادی قرار دارد و دسترسی نوری به آن شدیداً محدود است. مزیت استراتژیک دوربین‌های اسکن خطی ZDS در این بخش نمایان می‌شود: ازآنجاکه دوربین Line Scan برای ثبت تصویر تنها به یک خط دید تک‌بعدی بسیار باریک نیاز دارد، نیازی به فضای باز وسیع در زیر تختال نیست و دوربین می‌تواند از میان شکاف باریک بین دو غلتک متوالی میز نقاله (Inter-roller Gap) کل سطح زیرین را با عبور تختال جاروب کند.

۳.۲.۱. طراحی محفظه‌های صنعتی استیل ۳۱۶ با خنک‌کاری فعال و پرده هوای فشرده

محیط زیر میز غلتکی در معرض ریزش مداوم پوسته‌های اکسیدی داغ، چکیدن آب و روغن، تجمع بخار و حبس حرارت تابشی قرار دارد. برای حفاظت از دوربین‌های ZDS در این ناحیه، از «محفظه‌های صنعتی دوربین (هوسینگ)» تخصصی با مشخصات زیر استفاده می‌شود:

- **بدنه مقاوم استیل ضدزنگ با حفاظت IP67:** ساخت محفظه دوجداره از جنس فولاد ضدزنگ استیل ۳۱۶ و ۳۰۴ مقاوم در برابر خوردگی ناشی از محیط‌های آلوده و گازهای شیمیایی، همراه با گواهینامه حفاظت محیطی IP67 در برابر نفوذ آب و گردوغبار.
- **سیستم خنک‌کاری فعال آب یا هوا:** اتصال محفظه به مدار گردش آب صنعتی یا هوای فشرده جهت حفظ دمای کاری دوربین ZDS در محدوده استاندارد مجاز (منفی ۱۰ تا مثبت ۵۰ درجه سانتی‌گراد) در مجاورت تختال‌های بالای ۸۰ درجه.
- **جانمایی زاویه‌دار و سپر پنوماتیکی پرده هوا:** استفاده از مکانیزم تنظیم زاویه دید هوزینگ جهت قرارگیری دوربین در زاویه کمی مایل نسبت به مسیر سقوط مستقیم ذرات سنگین، همراه با نازل پرده هوای فشرده (Air Knife) و برنامه تمیزکاری و نگهداری منظم لنز جهت منحرف کردن قطرات آب و پوسته‌های اکسید پیش از برخورد به شیشه دید.

۳.۲.۲. هندسه نورپردازی خطی زاویه‌دار و همگام‌سازی انکودر چرخشی با حرکت تختال

در زیر میز غلتکی، منابع نور خطی LED پرقدرت درون هوسینگ‌های آب‌خنک در طرفین شکاف بین دو غلتک نصب می‌شوند و پرتو نوری متمرکز خود را از همان شکاف باریک بر روی خط اسکن در زیر تختال می‌تابانند.

ازآنجاکه سرعت حرکت تختال بر روی غلتک‌ها متغیر است، استفاده از نرخ اسکن ثابت باعث کشیدگی یا فشردگی تصویر می‌شود. برای حل این مسئله، یک انکودر چرخشی (Encoder) بر روی شفت غلتک میز نقاله نصب شده و پالس‌های خروجی آن از طریق کانکتور صنعتی ۱۲ پین دایره‌ای به ورودی تریگر سخت‌افزاری (Hardware Trigger) دوربین‌های ZDS رویی و زیرین اعمال می‌گردد. بدین ترتیب، به‌ازای هر گام حرکتی مشخص از تختال، دقیقاً یک پالس تریگر صادر شده و هر دو دوربین رو و زیر، هم‌زمان یک خط پیکسلی را ثبت می‌کنند تا مختصات طولی و عرضی تصویر سطح رویی و زیرین بادقت میلی‌متری بر یکدیگر منطبق گردند.

۴. طبقه‌بندی علمی و متالورژیکی انواع عیوب سطحی و هندسی روی صفحات و اسلب‌های فولادی

عیوب سطحی و هندسی تختال و اسلب از پنج قلمرو متمایز متالورژیکی و مکانیکی در طول فرایند ریخته‌گری مداوم سرچشمه می‌گیرند که هر یک امضای نوری، حرارتی و مورفولوژیکی خاصی را بر روی سطح بر جای می‌گذارند. شناسایی دقیق این عیوب توسط دوربین‌های ZDS علاوه بر تعیین تکلیف تختال، خرابی تجهیزات ماشین ریخته‌گری نظیر سایش صفحات مسی قالب، عدم هم‌راستایی سگمنت‌ها یا گرفتگی نازل‌های آبپاش را به‌صورت ریشه‌ای مشخص می‌سازد.

۴.۱. تحلیل ریشه‌ای عیوب ریخته‌گری مداوم و پیامدهای آن در نورد گرم و سرد

مهم‌ترین عیوب قابل‌تشخیص توسط سامانه نظارت سطح و دوربین‌های اسکن خطی ZDS در سطح رویی و زیرین صفحات عبارت‌اند از:

- **ترک‌های طولی (Longitudinal Cracks):** این ترک‌ها در راستای کشش تختال شکل می‌گیرند و ناشی از غیریکنواختی انتقال حرارت و انجماد پوسته اولیه در قالب مسی هستند. در صورت عدم تشخیص، در مرحله نورد گرم باز شده و منجر به شکست لبه‌ها (Edge Breaks) می‌شوند. هوش مصنوعی سامانه این ترک‌ها را بادقت بالا از خطوط پوسته اکسیدی و رد آب خنک‌کاری تفکیک می‌کند.
- **ترک‌های عرضی و ترک‌های گوشه (Transverse & Corner Cracks):** عمود بر جهت ریخته‌گری و عمدتاً در قعر خطوط نوسان قالب یا در لبه‌های تختال در اثر تنش‌های کششی ناحیه صاف‌کاری شکل می‌گیرند و در طول نورد به‌صورت عیب تورق (Lamination) و درزهای لبه‌ای گسترش می‌یابند.
- **نواقص خطوط نوسان و قلاب‌های زیرسطحی (Oscillation Mark Defects & Hooks):** انحراف

در پارامترهای نوسان قالب مسی باعث عمیق شدن خطوط نوسان و تشکیل ساختارهای قلاب‌مانند در زیر سطح می‌شود که حباب‌های گاز و ذرات آخال را به دام می‌اندازند.

- **آخال‌های سطحی، حبس سرباره و حفره‌های گازی (Surface Inclusions, Slag & Pinholes/Blowholes):** ورود ذرات غیرفلزی، به دام افتادن پودر قالب (Mold Flux) یا خروج گازهای محلول در حین انجماد، به‌صورت لکه‌های سرباره و حفره‌های سوزنی یا گازی درشت ظاهر می‌شوند که در مرحله نورد به عیب پوسته (Sliver) تبدیل می‌گردند.
- **خراش‌های مکانیکی، رد غلتک و عیوب اسکارفینگ (Scratches, Roll Marks & Scarfing Defects):** قفل شدن غلتک‌های سگمنت یا میز نقاله باعث ایجاد خراش‌های طولی ممتد یا رد غلتک به‌ویژه در سطح زیرین تختال می‌شود و شیارهای ناشی از اسکارفینگ دستی نامناسب نیز پیش از ورود به نورد توسط سامانه شناسایی می‌گردند.

نام عیب سطحی / هندسی	منشأ متالورژیکی / مکانیکی	پیامد بحرانی در نورد	روش بهینه تشخیص (ZDS)
ترک طولی (Longitudinal Crack)	انجماد غیریکنواخت در قالب مسی و تلاطم مذاب	پارگی ورق، شکست لبه‌ها و خطر Breakout	اسکن خطی 16K در میدان روشن با پروفایل حرارتی
ترک عرضی و گوشه (Transverse/Corner)	تنش کششی در صاف‌کاری و خنک‌کاری نامتقارن	بروز تورق (Lamination) و درز لبه‌ای	نورپردازی مایل (Dark Field)، TDI و فیلتر LP950
آخال سطحی و سرباره (Inclusions/Slag)	حبس پودر قالب (Mold Flux) و ذرات اکسیدی	ایجاد پوسته (Sliver) و لکه‌های سیاه	تحلیل کنتراست بازتابی/طیفی در مونوکروم ۱۰ بیتی و NIR
حفره گازی و پین‌هول (Blowhole)	خروج گازهای محلول در انجماد اولیه	ایجاد سوراخ‌های ریز و خطوط تیره	رزولوشن زیر ۱۰۰µm و الگوریتم‌های تشخیص ناهنجاری
خراش مکانیکی و رد غلتک (Scratch)	قفل شدن غلتک‌ها یا چسبیدن سرباره	انتقال خطوط مکانیکی به سطح ورق	بازرسی سطح زیرین از شکاف غلتک‌ها و تناوب مکانی
انحراف شمشیری و شکم‌دادگی (Camber)	فشار فرواستاتیک و تنظیم نادرست سگمنت	خروج اسلب از خط و آسیب به تجهیزات	سیستم ابعادبرداری اسلب داغ و بازسازی ۳D

۴.۲. یکپارچه‌سازی بازرسی نوری با سیستم‌های پروفایلر لیزری برای پایش انحرافات سه‌بعدی

در کنار سامانه نظارت سطح، امکان یکپارچه‌سازی با سیستم‌های اندازه‌گیری ابعاد و شکل هندسی تختال (Shape Meter) فراهم است که با بهره‌گیری از دوربین‌های صنعتی ZDS و پروفایلرهای لیزری، نقاط کور (Blind Spots) را

حذف کرده و یک مدل سه‌بعدی جامع از تمام وجوه اسلب در مناطق گرم استخراج می‌نمایند. این طرح یکپارچه،

پایش چهار انحراف هندسی و حرارتی کلیدی را بادقت بالا امکان‌پذیر می‌سازد:

- **تشخیص انحراف شمشیری یا موزی‌شکل (Camber / Banana Shape):** شناسایی هوشمند انحراف طولی محور تختال که از خروج اسلب از خط نورد و آسیب جدی به تجهیزات جانبی جلوگیری می‌کند.
- **آنالیز تقعر و تحدب سطوح جانبی (Concavity & Convexity):** تشخیص میزان محدب یا مقعر بودن سطوح جانبی تختال که کنترل آن برای جلوگیری از بروز عیوب لبه‌ای در فرایند نورد حیاتی است.
- **پایش شکم‌دادگی و لوزی‌شدگی (Bulging & Rhomboidity):** تشخیص انحرافات شکل مقطع عرضی تختال جهت تنظیم بلادرنگ دهانه غلتک‌ها (Roll Gap).
- **پیش‌بینی ترکیدگی پوسته (Breakout Prediction):** شناسایی ناهنجاری‌های الگوی حرارتی، نقاط داغ موضعی و چسبندگی پوسته (Sticker Patterns) در ناحیه قالب ۳۰ تا ۶۰ ثانیه پیش از وقوع پارگی پوسته بادقت بالای ۹۹ درصد که حوادث ترکیدگی مذاب را تا ۹۵ درصد کاهش می‌دهد.

۵. نقش الگوریتم‌های هوش مصنوعی، یادگیری عمیق و معماری کدنویسی در سامانه بازرسی سطح

در محیط صنعتی فولاد، روش‌های سنتی پردازش تصویر به دلیل حضور گسترده «عیوب کاذب» نظیر لکه‌های آب، بخار، پوسته‌های اکسیدی نامنظم و خطوط نوسان قالب ناکارآمد هستند. ازاین‌رو، معماری نرم‌افزاری سامانه بر پایه ترکیب پردازش سخت‌افزاری سطح پایین و الگوریتم‌های یادگیری عمیق (Deep Learning) سطح بالا در چهار لایه مهندسی بنا شده است.

۵.۱. معماری نرم‌افزاری، پردازش سخت‌افزاری درون‌دوربینی ISP و مدیریت بافر در کدنویسی

برای پردازش بدون وقفه جریان داده دوربین‌های ۱۶ هزار پیکسلی، خط لوله نرم‌افزاری در چهار لایه متوالی طراحی و کدنویسی می‌شود:

لایه معماری نرم‌افزار	محیط و ابزار کدنویسی	وظایف پردازشی و الگوریتم‌ها	شاخص عملکرد و زمان پاسخ
لایه ۱: پیش‌پردازش سخت‌افزاری	FPGA داخلی دوربین ZDS	حذف FPN، اصلاح FFC، نگاشت LUT و اصلاح سایه لنز	پردازش بلادرنگ با بار صفر روی CPU سرور

لایه معماری نرم‌افزار	محیط و ابزار کدنویسی	وظایف پردازشی و الگوریتم‌ها	شاخص عملکرد و زمان پاسخ
لایه ۲: اخذ داده و بافرینگ	C++ و GenICam/GigE Vision	دریافت ۱۰/۲۰ Gbps در بافر حلقوی و همگام‌سازی انکودر	انتقال بدون افت فریم و حذف نقاط کور مرزی
لایه ۳: سنتز داده و آموزش	شبکه‌های LarGAN و ELV-GAN	تولید تصاویر مصنوعی از میکروعیوب نادر و غنی‌سازی دیتاست	رفع کمبود داده و ارتقای دقت به ۹۹.۲٪
لایه ۴: استنتاج موازی Edge AI	LDS-Net, EfficientNetv2m, OpenCV	بخش‌بندی/طبقه‌بندی موازی عیوب و ارسال فرمان به L2	زمان تأخیر استنتاج کمتر از ۱۰۰ms

۵.۱.۱. الگوریتم همپوشانی فریم‌ها و حذف نویز الگوی ثابت FPN در سطح FPGA

در دوربین‌های اسکن خطی، در صورتی که حساسیت یک پیکسل از آرایه ۱۶۳۸۴ پیکسلی به دلیل تلرانس ساخت تغییر کند، در تصویر دوبعدی نهایی به‌صورت یک خط عمودی ممتد در تمام طول تختال ظاهر می‌شود که به آن نویز الگوی ثابت (FPN) می‌گویند. در کدنویسی ماژول کالیبراسیون، ضرایب بهره (G_i) و آفست تاریکی (D_i) برای

هر پیکسل Hc ,..., 1} i} محاسبه شده و در حافظه داخلی ۴ کیلوبایتی دوربین ZDS ذخیره می‌گردد تا معادله اصلاح خطی زیر به‌صورت بلادرنگ بر روی هر خط اعمال شود:

$$I_{corrected}(i) = (I_{raw}(i) - D_i) \times G_i$$

در لایه دوم نیز نرم‌افزار خطوط دریافتی از بافر فریم حجیم دوربین را تجمیع کرده و به فریم‌های دوبعدی تبدیل می‌نماید. برای‌آنکه عیوب واقع در مرز برش بین دو فریم متوالی نصف نشوند، در کد مدیریت بافر، آخرین خطوط اسکن‌شده از انتهای فریم k عیناً در ابتدای فریم k+1 کپی می‌شوند (Successive Frame Overlapping) تا هر عیب مرزی به‌صورت یکپارچه توسط شبکه عصبی بررسی گردد.

۵.۲. شبکه‌های عصبی عمیق، تولید داده مصنوعی با GAN و پردازش موازی بی‌درنگ

فریم‌های تصویر بازسازی‌شده از طریق کتابخانه‌های پردازش تصویر نظیر OpenCV به واحدهای پردازش گرافیکی منتقل می‌شوند تا الگوریتم‌های یادگیری عمیق به‌صورت موازی بر روی تصاویر سطح رویی و زیرین اجرا گردند.

- **غلبه بر کمبود داده با شبکه‌های مولد تخاصمی (GAN):** ازآنجاکه جمع‌آوری داده در محیط ریخته‌گری مداوم دشوار است و برخی عیوب بحرانی به ندرت رخ می‌دهند، از معماری‌های LarGAN و شبکه GAN مبتنی بر تشدید تغییرات محلی (ELV-GAN) برای تولید داده‌های مصنوعی استفاده

می‌شود که فضای ویژگی دیتاست اصلی را غنی ساخته و دقت تشخیص میکروعیوب تا ابعاد ۰.۰۱ میلی‌متر را به ۹۷.۰۶ تا ۹۹.۲ درصد می‌رساند.

- **مکان‌یابی بلادرنگ با شبکه سبک LDS-Net:** برای استنتاج برخط با زمان تاخیر کمتر از ۱۰۰ میلی‌ثانیه، معماری سبک‌وزن LDS-Net به کار گرفته می‌شود که با کاهش ۷.۹ درصدی تعداد پارامترها، کاهش ۶.۷ درصدی عملیات ممیز شناور (FLOPs) و کاهش ۵.۲ درصدی حجم مدل، پایداری بالا و بی‌نیازی از تنظیم مکرر آستانه‌ها را در پس‌زمینه‌های پیچیده صنعتی فراهم می‌کند.
- **طبقه‌بندی دقیق با EfficientNetv2m و Improved ResNet:** پس از بخش‌بندی ناحیه عیب، استفاده از مدل‌های Improved ResNet همراه با افزایش داده و ترکیب مدل EfficientNetv2m با بهینه‌ساز Adam، دقت طبقه‌بندی عیوب سطحی را به ۹۹.۴۲ درصد می‌رساند.

مدل AI / سناریوی صنعتی	حوزه عملکرد و دیتاست هدف	شاخص دقت و کارایی
EfficientNetv2m + بهینه‌ساز Adam	طبقه‌بندی دقیق عیوب و جایگزینی بازرسی دستی	۹۹.۴۲٪ دقت طبقه‌بندی
شبکه مولد تخاصمی ELV-GAN	تشخیص عیوب کوچک در دیتاست‌های NEU-CLS و RSW-C	۹۹.۲۰٪ دقت کل (بهبود ۱.۳ تا ۸.۴٪)
پیش‌بینی Breakout قالب	تشخیص الگوی حرارتی چسبندگی ۳۰-۶۰ ثانیه قبل از رخداد	بیش از ۹۹.۰۰٪ دقت پیش‌بینی
میکروعیوب روی HUST-Tactile	شناسایی میکروعیوب ظریف تا ابعاد ۰.۰۱ mm	۹۷.۰۶٪ دقت تشخیص
بینایی AI روی اسلب داغ خروجی	تشخیص عیوب در دمای بالای ۸۰۰°C با تفکیک ۰.۳mm	۹۶.۰۰٪ دقت عملیاتی برخط
شبکه سبک LDS-Net	بخش‌بندی بلادرنگ عیوب سطحی با حداقل منابع	کاهش ۷.۹٪ پارامترها و ۶.۷٪ FLOPs

۵.۲.۱. تمایز هوشمند عیوب واقعی از عیوب کاذب محیطی و اتصال به اتوماسیون سطح دو

مدل‌های هوش مصنوعی آموزش‌دیده بر روی گریدهای مختلف فولادی (فولادهای کربنی، کم‌آلیاژ با استحکام بالا HSLA، فولادهای بدون عناصر بین‌نشینی IF، فولادهای پریتکتیک و سیلیکونی)، ترک‌های واقعی را از الگوهای پوسته اکسیدی و لکه‌های خنک‌کاری تفکیک می‌کنند. پس از تعیین شدت عیب، اطلاعات از طریق لوله‌های داده (API Data Pipelines) به سطح ۲ اتوماسیون کارخانه (Level 2 Automation) و سیستم مدیریت نت (CMMS) ارسال می‌گردد تا تصمیمات خودکار زیر اجرا شوند:

- هدایت مستقیم به شارژ گرم (Direct Hot Charging): ارسال مستقیم تختال‌های سالم به کوره پیش‌گرم نورد گرم بدون نیاز به سرد کردن که نرخ شارژ گرم مستقیم را تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد.

- صدور دستور کار اسکارفینگ و سنگ‌زنی هدفمند (AI-Guided Targeted Scarfing): ارسال نقشه مختصات طولی و عرضی عیوب به کارگاه اسکارفینگ جهت اصلاح موضعی نقاط معیوب به‌جای سوزاندن کل سطح که هزینه‌های آماده‌سازی تختال را تا ۵۸ درصد کاهش می‌دهد.
- تغییر گرید یا اسقاط خودکار (Downgrade Routing / Scrap): تغییر مسیر خودکار تختال‌های دارای عیوب شدید و اصلاح پارامترهای سرعت ریخته‌گری در کمتر از ۱۰۰ میلی‌ثانیه.

۶. نقشه راه جامع استقرار صنعتی و تحلیل بازگشت سرمایه در کارخانجات فولاد

استقرار سامانه هوشمند بازرسی سطح تختال با دوربین‌های ZDS در یک واحد فعال فولادسازی، مستلزم اتخاذ یک رویکرد مهندسی مرحله‌به‌مرحله است تا بدون ایجاد وقفه در تولید جاری کارخانه، سیستم به بلوغ عملیاتی کامل دست یابد.

۶.۱. چرخه پنج‌فازی پیاده‌سازی از ممیزی خط تا اسکارفینگ خودکار داده‌محور

بر اساس استانداردهای اجرایی در مجتمع‌های بزرگ فولادی، نقشه راه پیاده‌سازی در قالب یک چرخه ۵ فازی ۱۸ ماهه تعریف می‌شود:

فاز اجرایی پروژه	بازه زمانی	اقدامات کلیدی مهندسی	خروجی و دستاورد
فاز ۱: ارزیابی اثرات و طراحی	ماه ۱ تا ۳	ممیزی سوابق ضایعات، اولویت‌بندی مالی عیوب، نقشه‌برداری میز غلتکی و محاسبات اپتیکی	تعیین گلوگاه‌های کیفی و نهایی‌سازی طراحی اپتومکانیکی
فاز ۲: نصب سخت‌افزار و زیرساخت	ماه ۴ تا ۶	نصب سازه، هوزینگ‌های آب‌خنک IP67، اجرای فیبر نوری، تعریف برنامه کالیبراسیون در CMMS	راه‌اندازی کامل ایستگاه تصویربرداری و خطوط انتقال داده
فاز ۳: استقرار پایلوت و آموزش AI	ماه ۷ تا ۱۲	پایلوت روی ۱-۲ خط، جمع‌آوری تصاویر عیوب به تفکیک گرید و اعتبارسنجی با متالوگرافی	تثبیت نرخ تشخیص بالای ۹۶-۹۹٪ و کاهش هشدارهای کاذب
فاز ۴: مقیاس‌پذیری کامل	ماه ۱۳ تا ۱۸	گسترش به تمام خطوط، اتصال نقشه عیوب به سامانه نورد گرم و تحلیل همبستگی سایش قالب	پوشش ۱۰۰٪ تولید و پایش پیش‌بینانه استهلاک تجهیزات
فاز ۵: بهره‌برداری مستمر	سال دوم به بعد	کالیبراسیون دوره‌ای، پایش لحظه‌ای داشبوردها و همگرایی با دوقلوی دیجیتال	پایداری کیفیت و بازگشت کامل سرمایه زیر یک سال

۶.۲. جمع‌بندی استراتژیک و شاخص‌های کمی بازگشت سرمایه (ROI)

تحلیل داده‌های صنعتی و فنی نشان می‌دهد که تجهیز خطوط ریخته‌گری مداوم و نورد به سامانه بازرسی

هوشمند سطح مبتنی بر دوربین‌های اسکن خطی برند ZDS، یک سرمایه‌گذاری استراتژیک کاملاً عملی و با دوره بازگشت سرمایه تخمینی کمتر از یک سال خواهد بود. خلاصه دستاوردهای کمی و اقتصادی قابل دستیابی این سامانه در جدول زیر جمع‌بندی شده است:

شاخص کلیدی عملکرد (KPI)	روش سنتی (بازرسی دستی)	دستاورد سامانه هوشمند بینایی
پوشش سطحی وجوه تختال	۵ تا ۱۵ درصد (نمونه‌برداری تصادفی)	۱۰۰ درصد پوشش پیوسته و تمام‌وقت (۲۴/۷)
حوادث Breakout در ریخته‌گری	توقف‌های فاجعه‌بار و خسارات سنگین	۹۵ درصد کاهش حوادث با پیش‌بینی هوشمند
ضایعات و مردودی‌های نورد گرم	سرایت مستقیم ترک‌ها به کلاف نورد	۷۱ تا ۷۴ درصد کاهش ضایعات سطحی
شکایات و برگشتی‌های مشتریان	ریسک بالای ارسال ورق دارای عیوب پنهان	۷۰ درصد کاهش ادعاها و شکایات کیفی
هزینه‌های اسکارفینگ و آماده‌سازی	اسکارفینگ سرتاسری و هدررفت فلز سالم	۵۸ درصد کاهش هزینه با اسکارفینگ موضعی
نرخ شارژ گرم مستقیم (Hot Charge)	محدود به دلیل الزام به سرد کردن اسلب	۵۰ درصد افزایش شارژ گرم و صرفه‌جویی انرژی
نرخ محصول درجه یک (Prime Yield)	افت راندمان ناشی از تغییر گرید اجباری	۳۵ درصد بهبود مستقیم در نرخ محصول درجه یک

در افق پیش رو، همگرایی این سامانه‌های بازرسی اپتیکی با مدل‌های «دوقلوی دیجیتال» (Digital Twins) فرایند ریخته‌گری و سیستم‌های اسکارفینگ تمام‌خودکار، امکان بستن کامل حلقه کنترل کیفیت را میسر خواهد کرد. در چنین معماری پیشرفته‌ای، سامانه نظارت سطح نه تنها می‌تواند عیوب سطح رویی و زیرین اسلب را در کسری از ثانیه کشف کند، بلکه به‌عنوان مغز متفکر خط تولید قادر خواهد بود پارامترهای ترمودینامیکی انجماد را به‌صورت خودکار تنظیم کرده و فرمان اصلاح فیزیکی سطح تختال را بدون دخالت انسان صادر نماید؛ تحولی که امکان‌پذیری و دستیابی به آن با اتکا به تجهیزات و دوربین‌های ZDS کاملاً در دسترس بوده و جایگاه صنایع فولاد کشور را در تراز کارخانه‌های هوشمند نسل چهارم صنعت تثبیت خواهد کرد.

منابع و مراجع (Works Cited)

1. AI-Powered Slab and Billet Surface Inspection: Catching Defects at
2. Steel Inspection Systems using 3D Laser Profiler Sensors in India
3. Line Scan Cameras – Computer Vision Expert
4. AI Vision System for Steel Casting Lines – Oxmaint
5. Line Scan vs Area Scan Cameras: Choosing the Right Vision System

6. Camera Selection Guide for AI Industrial Vision: Resolution, Frame
7. Comprehensive Overview of Line Scan Cameras – lontenoe
8. ZDS Industrial Cameras & Machine Vision Solutions
9. Understanding Line Scan Camera Applications
10. How line-scan cameras work — motion and lighting build an image
11. Understanding Line Scan Applications | Teledyne DALSA
12. دوربین اسکن خطی – بارمان ویژن‌امشاور و مجری پروژه‌های بینایی ماشین
13. GCL2048-304GM – ZDS Industrial Cameras – Computer Vision Expert
14. Slab and Bloom Surface Inspection with AI for Hot Scarfing
15. Industrial Camera Selection Guide | Area Scan vs Line Scan
16. Understanding the Fundamentals of Line Scan Cameras
17. Deep-Learning-Based Small Surface Defect Detection via an
18. GEOMETRIC AND RADIOMETRIC CALIBRATION OF VIDEO
19. Automated Visual Defect Detection for Flat Steel Surface – Li Liu

نویسنده و تهیه کننده مقاله:

https://experts.steelexperts.ir/experts/m.keiany

نسخه آنلاین مقاله: https://landing.steelexperts.ir/2026/11/11/zds-steel-slab-line-scan-inspection/