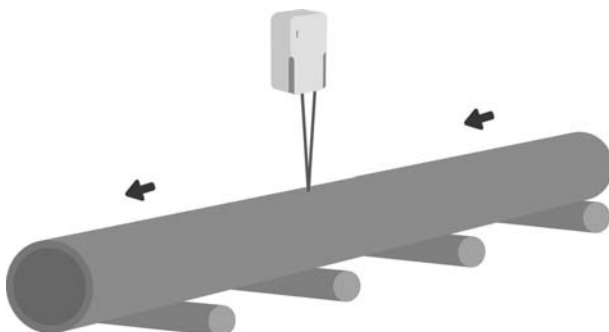


در این تحقیق، یک روش «بی سنسور» طول متالورژیکی را توسط مشاهده در زمان شروع به چرخش یک غلتک خاص در طی یک پله کوچک افزایش در سرعت ریخته گری استنتاج می کند. این روش برای ماشین ریخته گری پیوسته اسلب نازک در یکی از کارخانه های شرکت نوکور استیل بکار گرفته شد، و نتایج این تحقیق به منظور کالیبره کردن مدل محاسباتی انتقال حرارت زمان واقعی مورد استفاده قرار گرفت.



## روش جدید اندازه گیری طول متالورژیکی در ریخته گری پیوسته و کاربرد آن در بهبود مدل های محاسباتی



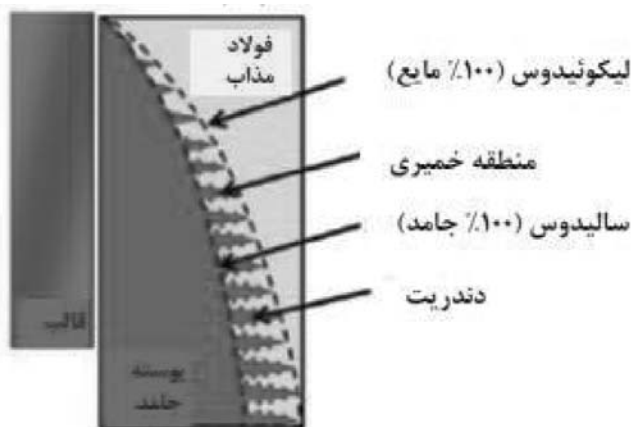
از سال ۲۰۱۳، بیش از ۹۰ درصد از ریخته‌گری فولاد در جهان از طریق ریخته‌گری پیوسته انجام شده است [۱]. مشخصه این فرآیند جریان پیوسته فولاد مذاب در ماشین ریخته‌گری است که با عبور از این ماشین منجمد شده و کاملاً جامد از آن خارج می‌شود. دانستن اینکه فولاد در کجا در ماشین ریخته‌گری پیوسته (شاخه) به طور کامل منجمد می‌شود، برای اهداف ایمنی، بهره‌وری و کیفیت خیلی مهم است. محققین صنعت فولاد و دانشگاهی تلاش‌های زیادی را صرف توسعه روش‌هایی، شامل اندازه‌گیری‌ها یا مدل‌های پیش‌بینی، به این منظور کرده‌اند. انجام این کار بخشی به دلیل تغییر زیاد تعریف «جامد کامل» بسته به هدف خاص دشوار است، و بر اینکه کدام تکنیک اندازه‌گیری یا مدل‌سازی مناسب‌ترین است تأثیر می‌گذارد.

### مقدمه

طول متالورژیکی (ML) عموماً به صورت فاصله از سطح مذاب در قالب ریخته‌گری پیوسته تا محلی در ماشین ریخته‌گری که در آن مقطع در نهایت به طور کامل جامد می‌شود تعریف شده است. بقیه این مقدمه اصطلاحات مورد استفاده در این مقاله را تعریف می‌کند. سپس، بررسی مختصری از روش‌های قبلی برای اندازه‌گیری ML ارائه می‌شود. روش جدیدی، که برای اولین بار در اینجا منتشر می‌گردد، به طور مفصل شامل شرح استفاده از آن در کارخانه نوکور استیل - دکاتور LLC می‌باشد. این روش نیازی

به تجهیزات و یا ابزار دقیق اضافی ندارد. در ادامه، بحث مختصری در مورد مدل‌های ریاضی پیش‌بینی ML ارائه می‌شود. یک مدل محاسباتی دینامیکی خاص، بنام کانسنسور، بر اساس اندازه‌گیری‌ها از نتایج حاصل از بکارگیری این روش جدید در ماشین ریخته‌گری کارخانه مذکور کالیبره شده است. علاوه بر این، اعتبار مدل کانسنسور با اندازه‌گیری‌های ML از مطالب منتشر شده در مورد یک ماشین ریخته‌گری پیوسته ضخامت اسلب معمولی تأیید شده است.

تعریف طول متالورژیکی - مشکل تعیین ML این است که، یک آلیاژ، فولاد، یک دمای انجماد منفرد از مذاب کامل تا جامد کامل ندارد. در عوض، فولاد در دامنه دمای گسترده‌ای، در زمانی که به صورت آنچه که اغلب «منطقه خمیری» نامیده می‌شود که شامل ریزساختار دندریتی پیچیده‌های حاوی جامد و مایع هر دو می‌باشد منجمد می‌شود. این موضوع در شکل ۱ نشان داده شده است. دو تعریف ممکن از فولاد «جامد» بر اساس دما وجود دارد: هنگامی که اول شروع به انجماد می‌کند، به نام دمای لیکوئیدوس، یا دما در زمانی که هیچ مذابی باقی نمانده، به نام دمای سالیدوس. بسیاری از اهداف فرآیندی توسط شرایط در منطقه خمیری، که نه کاملاً جامد و نه کاملاً مایع هستند به صورتی که دندریت‌های فولاد از پوسته کاملاً جامد به سمت مذاب در وسط شاخه رشد می‌کنند تعیین می‌شوند.



شکل ۱- انجماد فولاد در ماشین ریخته‌گری پیوسته.

تغییر شکل فاجعه بار پوسته در ماشین ریخته‌گری پیوسته اسلب به اندازه کافی شدید است. در داخل ماشین ریخته‌گری، پوسته فولاد توسط قالب و بعد از آن توسط غلتک‌های نگهدارنده یا پشتیبان پشتیبانی می‌شود. اما، اگر در زمان خروج فولاد از آخرین غلتک نگهدارنده هنوز مایع باقیمانده موجود باشد، فشار باعث برآمدگی اضافی پوسته می‌شود، یک «نهنگی» ایجاد می‌کند که ریخته‌گری باید متوقف تا نهنگی برای برش و بیرون کشیدن توسط

برای مثال، یک نگرانی جدی مهار نگهداشتن فولاد مذاب است. در خروجی قالب، پوسته فولاد برای جلوگیری از بیرون زدگی مذاب از شاخه (برک آوت)، که فاجعه بار خواهد بود، باید به اندازه کافی ضخیم باشد. حتی اگر مذاب از شاخه بیرون نرزد، حوضچه فولاد مذاب تحت فشارگرائش (ثقل) قرار دارد، باعث فشار آوردن بر پوسته فولاد به سمت بیرون می‌شود. این «برآمدگی» ناشی از فشار فروستاتیک اگر به مقدار کافی پشتیبانی نشود در واقع برای



کامل در سراسر حجم مایع گسترش نیابد، یا ممکن است در منطقه خمیری نفوذ نکند، و بنابراین اتورادیوگراف ها ضخامت پوسته بزرگتری از مقدار واقعی را نشان می دهند. از نقطه نظر عملی، این روش اسلب فولادی رادیواکتیوی را تولید می کند که کار کردن با آن خطرناک و فروش آن غیرممکن و پاک کردن آن پر هزینه است.

چاپ گوگرد روش مرتبطی است که ایده کلی افزودن یک ردیاب در فولاد مذاب را به کمک می گیرد، اما از اچ شیمیایی به جای تابش برای تهیه تصویر استفاده می کند. همانطور که از نام آن پیداست، ردیاب در این مورد گوگرد است، که پس از اچ کردن به رنگ زرد مایل به قهوه ای ظاهر می شود. از آنجا که گوگرد تنها در جایی که در آن مایع وجود دارد می تواند نفوذ (دیفوزیون) کند، مناطق جامد و مایع فولاد را به وضوح می توان در چاپ گوگرد مشاهده کرد. مثالی از استفاده از این روش در مرجع ۳ ارائه شده است. شکل ۲ تصویری از آن مقاله است، که چاپ گوگرد را با نتایج حاصل از مدل روش دو بعدی گذرای المان محدود (FEM) مقایسه می کند. توجه داشته باشید که به نظر می رسد ضخامت پوسته دیده شده در اچ گوگرد مطابقت خوبی با محل پیش بینی شده دمای محاسبه شده سولیدوس توسط مدل دارد.

روش دیگری که ضخامت پوسته بر روی نمونه های مقطع زده را نشان می دهد بر تغییر مکانیکی شاخه، به جای تغییر شیمیایی تکیه می کنند. این مطلب در مرجع ۴ تشریح شده است. شیم های (فاصله پر کن های) کوچکی بر روی سطح پهن یک ماشین ریخته گری پیوسته اسلب معمولی در بین دو غلطک پشتیبان قرار گرفتند. با حرکت شاخه، شیم بین پوسته فولاد و غلتک پشتیبانی فشرده شده، پوسته را به اندازه کافی تغییر شکل می دهد باعث ترک های داخلی می شود. ترک ها در جایی که هنوز حاوی فولاد مذاب است، نزدیکی جبهه انجماد، ایجاد می شوند. این ترک ها با مایع جدایش کرده پر می شوند و در سطح مقطع شاخه قابل مشاهده و اندازه گیری هستند [۴].

جرقه‌بیل به اندازه کافی منجمد شود. خود ماشین ریخته گری می تواند آسیب ببیند، و حتی در موارد شدید فولاد مذاب می تواند از پوسته بیرون بزند، اپراتورهای ماشین ریخته گری را به خطر بیناندازد و به تجهیزات لطمه بزند. به طور معمول، کسر ۷۰ درصد جامد برای مقاومت در برابر تشکیل نهنگی کافی در نظر گرفته می شود.

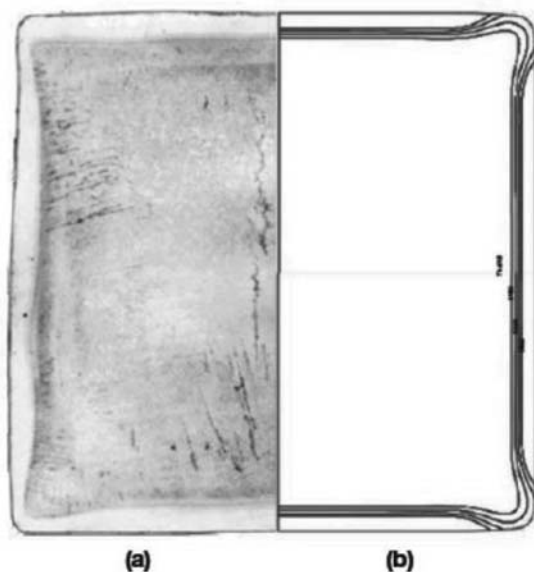
از جنبه کیفیت، با توجه به پدیده «جدایش» با کاهش دما از لیکوئیدوس تا سالدوس غلظت عناصر آلیاژی در فولاد مذاب افزایش می یابد. همینطور که شاخه منجمد می شود، مذاب غنی از عناصر آلیاژی به سمت مرکز شاخه رانده می شوند. در کسر خاصی از جامد، دندربیت ها به مقدار کافی در یکدیگر قفل می شوند از جریان یافتن مذاب جلوگیری می کنند، انباشته هائی از مواد پرالیاژ را محبوس کرده و عیوبی را به نام «جدایش خط مرکزی» ایجاد می کنند. برخی از ماشین های ریخته گری پیوسته روش های «کاهش سطح مقطع نرم» را بکار می گیرند، که هدف آنها جلوگیری از این عیب از طریق کاهش فاصله بین غلتک ها در کل منطقه ای است که در آن خط مرکزی بین لیکوئیدوس و سولیدوس قرار دارد برای مقابله با نیروهای انقباضی، که تمایل به بیرون کشیدن مایع پرالیاژ و تمرکز آن در انباشته هائی مرکزی دارند.

## اندازه گیری

به دلیل اهمیت آن، روش های اندازه گیری ML از اولین روزهای ریخته گری پیوسته تجاری مورد بررسی قرار گرفته اند. در این بخش، اندازه گیری های قبلی ML به دو دسته طبقه بندی می شوند. نوع اول اندازه گیری کلی ضخامت پوسته است. این روش ها لزوماً اندازه گیری مستقیم ML نیستند، زیرا ممکن است در هر نقطه ای در امتداد ماشین ریخته گری پیوسته از آنها استفاده شود. حتی اگر از آنها در نزدیکی انجماد نهایی استفاده نشود، می توان از آنها بالاخره برای پیش بینی ML از طریق استفاده از مدل ها، همانطور که در بخش بعدی بحث می شود استفاده نمود. نوع دوم روش اندازه گیری مستقیم ML با تشخیص محل انجماد نهایی در داخل شاخه است.

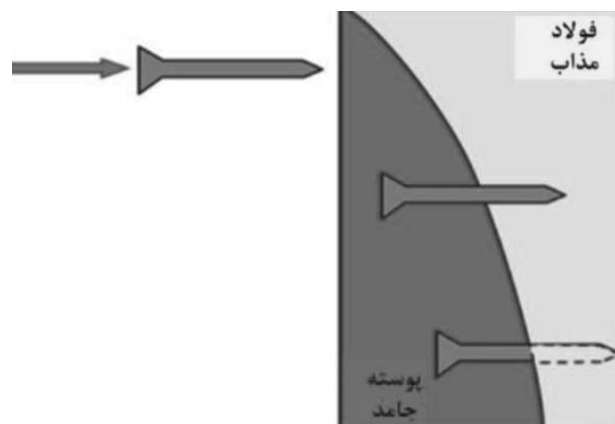
## اندازه گیری ضخامت پوسته - یکی از اولین روش ها برای

اندازه گیری ضخامت پوسته توسط بریماکومب و همکاران [۲] در سال ۱۹۷۴ انجام شد. طلای رادیواکتیو در سطح هلالی قالب به قالب تزریق شد، که در آن می تواند در مایع، اما نه در جامد، حل شده و پخش شود. سپس فولاد به مقاطعی برش زده شد، و «اتورادیوگراف هائی» از تابش های ساطع شده گرفته شد. این یکی از اولین اندازه گیری های ضخامت پوسته، اما با چند اشکال مهم است. از نقطه نظر فنی، مایع رادیواکتیو ممکن است به طور



شکل ۲- چاپ گوگرد نشان دهنده سطح مقطع اج شده بیلت (a) و خطوط تراز دما از شبیه سازی روش المان محدود (b) (FEM). [۳]

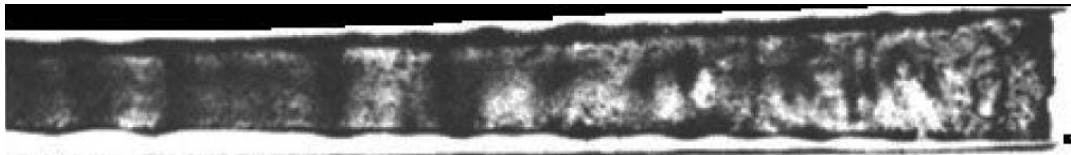
روش های مورد بحث در بالا برای اندازه گیری ضخامت پوسته طراحی شده اند. به این ترتیب، آنها اغلب بیش از یک اندازه گیری ساده ML، یعنی پروفایل ضخامت پوسته را ارائه می دهند. به طور خاص، اتورادیوگراف ها پروفایل در صفحه طولی را نشان می دهند. چاپ گوگرد به طور معمول پروفایل در صفحه عرضی را فراهم می نماید. یک پوسته برک آوت شده، بسته به اینکه چگونه برش زده شود، می تواند هر دو جهت را نشان دهد، گرچه ناحیه نزدیک محل واقعی برک آوت بر روی اسلب معمولاً نمایانگر شرایط عادی ریخته گری نیست. همچنین، تمام این روش ها از نوع مخرب هستند که نیاز به برشکاری اسلب نهائی دارند، و بنابراین نمی توانند ML را در طی ریخته گری واقعی تعیین کنند. اما، از این روش ها می توان برای کالیبره کردن یا اعتبارسنجی مدل های ضخامت پوسته که بعداً می توانند برای پیش بینی آنلاین ML بکار روند استفاده کرد.



شکل ۳- روش شلیک میخ.

یک روش دیگر مکانیکی برای اندازه گیری ضخامت پوسته شلیک میخ است. تصویری از آن در شکل ۳ نشان داده شده است. با استفاده از تفنگ شلیک میخ، یک میخ فلزی با نیروی کافی به صورتی که میخ تا حدی داخل فولاد مذاب فرو رود به درون شاخه شلیک می شود. مذاب داغ میخ را ذوب می کند، تنها بخش قرار گرفته در پوسته جامد دست نخورده باقی می ماند. مقدار شاخه دربردارنده میخ را می توان برشکاری کرد، مقطع زد، برای تعیین جایی که میخ ذوب شده مورد بررسی قرار داد و برای تعیین ضخامت پوسته جامدی که میخ در آن شلیک شده اندازه گیری کرد.

نوع دیگری از «آزمایش» وجود دارد که بیان آن مهم است: شکست های فاجعه بار. برای مثال، وقتی فولاد مذاب از پوسته جامد در ماشین ریخته گری بیرون می زند، این واقعه «بیرون زدگی مذاب (برک آوت)» نامیده می شود. این وقایع پر هزینه و خطرناک هستند و تا جای ممکن باید اجتناب شوند. اما، هنگامی که رخ داد، معقول ترین چیز انجام یادگیری هرچه بیشتر ممکن از شواهد باقی مانده یعنی پوسته فولاد خالی شده می باشد، مثالی از آن در شکل ۴ نشان داده شده است. پوسته، هنگامی که به مقطعی برش زده شود، به راحتی قابل اندازه گیری می گردد. همانطور که در شکل نشان داده شده، سطح داخلی پوسته برک آوت شده معمولاً صاف است. اما، در طی برک آوت، ظاهر منطقه خمیری می بایستی شامل دندریت های جامد چسبیده به مذاب باشد. سطح صاف پوسته برک آوت شده نشان می دهد که مایع بین دندریت ها محبوس شده و در نهایت منجمد خواهد شد. بنابراین، سطح پوسته برک آوت شده تقریباً باید مطابق با دمای لیکوئیدوس در شاخه باشد.



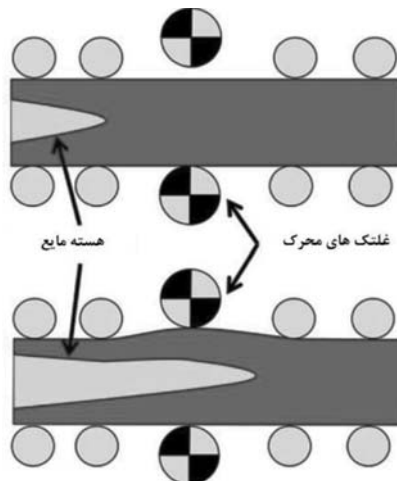
شکل ۴- پوسته های فلزی باقیمانده پس از برک آوت [۵].

سنج، زمانی که هیچ مایعی در زیر یک غلتک نباشد، هیچ نیروی فشاردهنده پوسته به غلتک نیز وجود ندارد. تماس بین پوسته و غلتک ها از بین رفت، به طوری که چرخش غلتک ها در سگمنت انتخابی متوقف شد. سپس، سرعت ریخته گری به آرامی افزایش داده شد. در نهایت، هسته مایع در زیر اولین غلتک سگمنت حرکت کرد و پوسته را به غلتک تحت فشار قرار داد، باعث شروع چرخش مجدد غلتک شد. این نشان داد که طول متالورژیکی تقریباً در محل آن غلتک در سرعت ریخته گری می باشد.

ماشین های ریخته گری پیوسته در کارخانه دکاتور قادر به کاهش سطح مقطع نرم دینامیک نمی باشند. اما، این آزمایش برای اجرا در کارخانه دکاتور با استفاده از روش جدید نشان داده شده در شکل ۵ جفت و جور شد. گرچه سگمنت ها خود در طی ریخته گری نمی توانند باز شوند، اما غلتک های محرک می توانند. این طراحی انجام شد تا امکان عبور یک دستگاه اندازه گیری فاصله از ماشین ریخته گری پیوسته بدون اعمال نیروی هیدرولیک بر غلتک محرک که ممکن بود شکننده قطعات الکترونیکی تجهیزات حساس باشد فراهم شود. برای آزمایش جدید، غلتک محرک به اندازه کافی به دور از ماشین ریخته گری منتقل شد به طوری که غلتک تماس خود با سطح فولاد را از دست داد. سپس نیروی محرک از موتور برداشته شد به طوری که در نهایت غلتک ایستاد. همانند آزمایش در کارخانه هرتفورد کانتی، سرعت ریخته گری در پله های کوچک افزایش یافت تا غلتک دوباره شروع به چرخش کرد. این نشان داد که مایع در زیر غلتک وجود دارد، پوسته را بالا آورده در تماس با غلتک محرک قرار داده است.

اندازه گیری طول متالورژیکی - چند روش دیگر برای اندازه گیری مستقیم ML در ماشین ریخته گری پیوسته در حال کار توسعه یافته اند. نمونه ای از آنها در مقاله ای که طراحی مجدد یک ماشین ریخته گری در کارخانه «آرسلورمیتال - برنز هاربر» [۶] را توصیف می کند نشان داده شده است. هنگام ساخت یک بند (سگمنت) جدید، کرنش سنج ها به غلتک های پشتیبان در مکان های مختلفی در نزدیکی انتهای ماشین ریخته گری پیوسته اضافه شدند. اگر مایعی در شاخه در زیر غلتک پشتیبان موجود باشد، فشار فروستاتیک به غلتک فشار وارد می کند، و کرنش سنج مقدار بالاتری را از زمانی که شاخه جامد است و هیچ مایعی در زیر غلتک وجود ندارد نشان می دهد. با جستجوی تغییرات شدید در اندازه گیری کرنش، می توان حرکت هسته مایع را پیش کرد و در دهانه بین دو غلتک مجهز شده تعیین مکان کرد. البته، این نیاز به نصب، نگهداری و تعمیر کرنش سنج ها دارد.

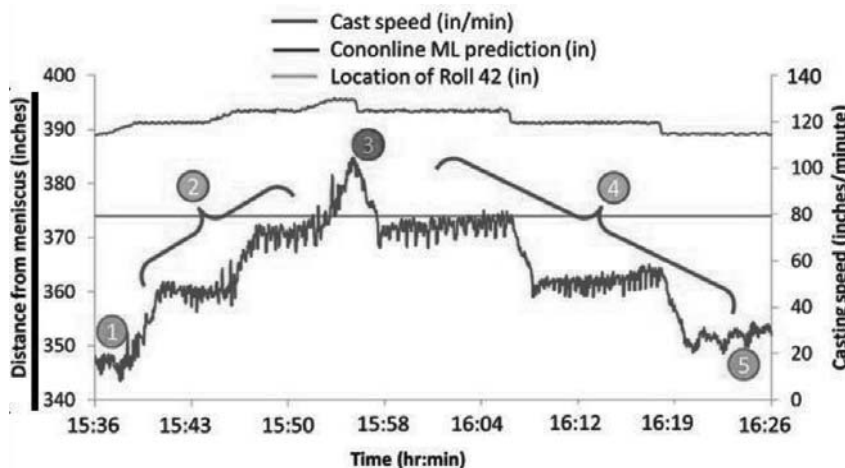
توشی هیروسه، مهندسی در کارخانه نوکوراستیل - هرتفورد کانتی در ایالت کارولینای شمالی، روشی را براساس همان اصل روش فوق، اما بدون نیاز به هیچ سنسوری بجز اندازه گیری سرعت ریخته گری و مشاهده خود ماشین ریخته گری توسعه داد. این ماشین ریخته گری دارای قابلیت کاهش سطح مقطع نرم دینامیک می باشد، یعنی، فاصله بین برخی از غلتک ها را می توان تا اندازه ای در طی تولید تغییر داد. بهینه سازی اینکه در کجا فاصله غلتک ها کاهش باید نیاز به دانستن موقعیت واقعی انجماد نهایی دارد. هیروسه آزمایشی را برای تعیین مکان هسته مایع ابداع کرد. نخست، یک بند (سگمنتی) را که معلوم بود فراتر از طول متالورژیکی قرار دارد کمی بازتر شد. همانند مورد کرنش



شکل ۵- اندازه گیری دینامیک طول متالورژیکی در کارخانه نوکور استیل - دکاتور LLC.

این شکل نشان می‌دهد که چگونه، با افزایش سرعت، طول متالورژیکی پیش بینی شده پس از یک تاخیر افزایش می‌یابد. با شروع از آغاز آزمایش، با مراجعه به اعداد در شکل ۶:

شکل ۶ اطلاعات جمع‌آوری شده در طی این آزمایش را نشان می‌دهد. خط آبی سرعت ریخته‌گری است. خط بنفش ML پیش بینی شده از کانسسور، یک مدل محاسباتی زمان واقعی است که در بخش بعدی با جزئیات بیشتری مورد بحث قرار گرفته است.



شکل ۶- شرایط ریخته‌گری و طول متالورژیکی پیش بینی شده در طی آزمایش در کارخانه نوکور استیل- دکاتور LLC.

دقیقه به محل غلتک می‌رسد. سپس این اطلاعات برای کالیبره کردن مدل محاسباتی کانسسور مورد استفاده قرار گرفت، که در بخش بعدی در مورد آن بحث خواهد شد.

پیش بینی طول متالورژیکی توسط مدل دشواری و هزینه اندازه‌گیری ML به تلاش‌های زیادی برای پیش بینی ML با استفاده از مدل‌ها منتج شده است. ساده‌ترین آنها مدل‌های «عامل-K» می‌باشند، که عموماً در کل صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. تجزیه و تحلیل شباهتی تشریح ساده ریاضی انجاماد [۷] پیش بینی می‌کند که ضخامت،  $S$ ، جامد در یک ماده در حال انجاماد از لحاظ نظری به صورت زیر رشد می‌کند:

$$s = K\sqrt{t} \text{ ..... (معادله ۱)}$$

که در آن

$$K = \text{ضریب خاص مدل و}$$

$t = \text{زمان از هنگامی که فلز شروع به انجاماد می‌کند.}$

برای ریخته‌گری پیوسته‌ای با ضخامت شاخه  $L$  و سرعت ریخته‌گری  $V$ ، این مدل ساده یک پیش‌بینی از ML ارائه می‌دهد:

$$ML = \frac{L^2}{4K^2} V \text{ ..... (معادله ۲)}$$

این بر اساس محاسبه زمان برابر شد ضخامت پوسته تا  $2/L$  می‌باشد، زیرا ماشین ریخته‌گری پیوسته از هر دو طرف منجمد می‌کند، و ML، فاصله‌ای است که فولاد از بالای ماشین ریخته‌گری پیوسته در آن زمان حرکت می‌کند.

یک موضوع آشکار با این مدل این است که تنها دو شرط ریخته‌

۱- سرعت ریخته‌گری به ۱۱۵ اینچ بر دقیقه کاهش داده شد تا اطمینان حاصل شود که طول متالورژیکی قبل از بالا آمدن غلتک است. شرایط شروع حالت پایدار با بلند کردن غلتک و انتظار برای توقف حرکت آن و برای پیش‌بینی دینامیک ML توسط کانسسور تا رسیدن به مقداری ثابت بدست آمد.

۲- سرعت ریخته‌گری در پله‌های ۵ اینچ بر دقیقه افزایش یافت. پس از هر افزایش، سرعت برای ۵ دقیقه ثابت حفظ شد، که بیش از زمان کافی برای امکان دادن به ماشین ریخته‌گری برای رسیدن به حالت پایدار بود. در طی این زمان، غلتک گاهی اوقات، اما نه هرگز به طور پیوسته جابجا می‌شد. این ممکن است ناشی از برآمدگی موضعی دینامیک، اعوجاج گرمایی نامتقارن غلتک، پوسته اکسیدی منقطع یا برخی علل دیگر باشد.

۳- در سرعت ریخته‌گری ۱۳۰ اینچ بر دقیقه، غلتک شروع به چرخش پیوسته می‌کند. برای جلوگیری از این برآمدگی از اینکه سبب مسائل جدایش خط مرکزی و ترک خوردگی در فولاد نشود، سرعت بلافاصله کاهش داده شد.

۴- به منظور کنترل پسماند (هیستریزیس)، سرعت دوباره به ۱۱۵ اینچ بر دقیقه برگشت داده شد، در پله‌های افزایشی ۵ اینچ بر دقیقه. هیچ تفاوتی بین رفتار غلتک پس از افزایش و بعد از کاهش سرعت ریخته‌گری مشاهده نشد.

۵- خاتمه آزمایش و شروع مجدد تولید عادی.

نتیجه‌گیری از این آزمایش این است که طول متالورژیکی، تحت شرایط ریخته‌گری آزمایش، با سرعت بین ۱۲۵ و ۱۳۰ اینچ بر

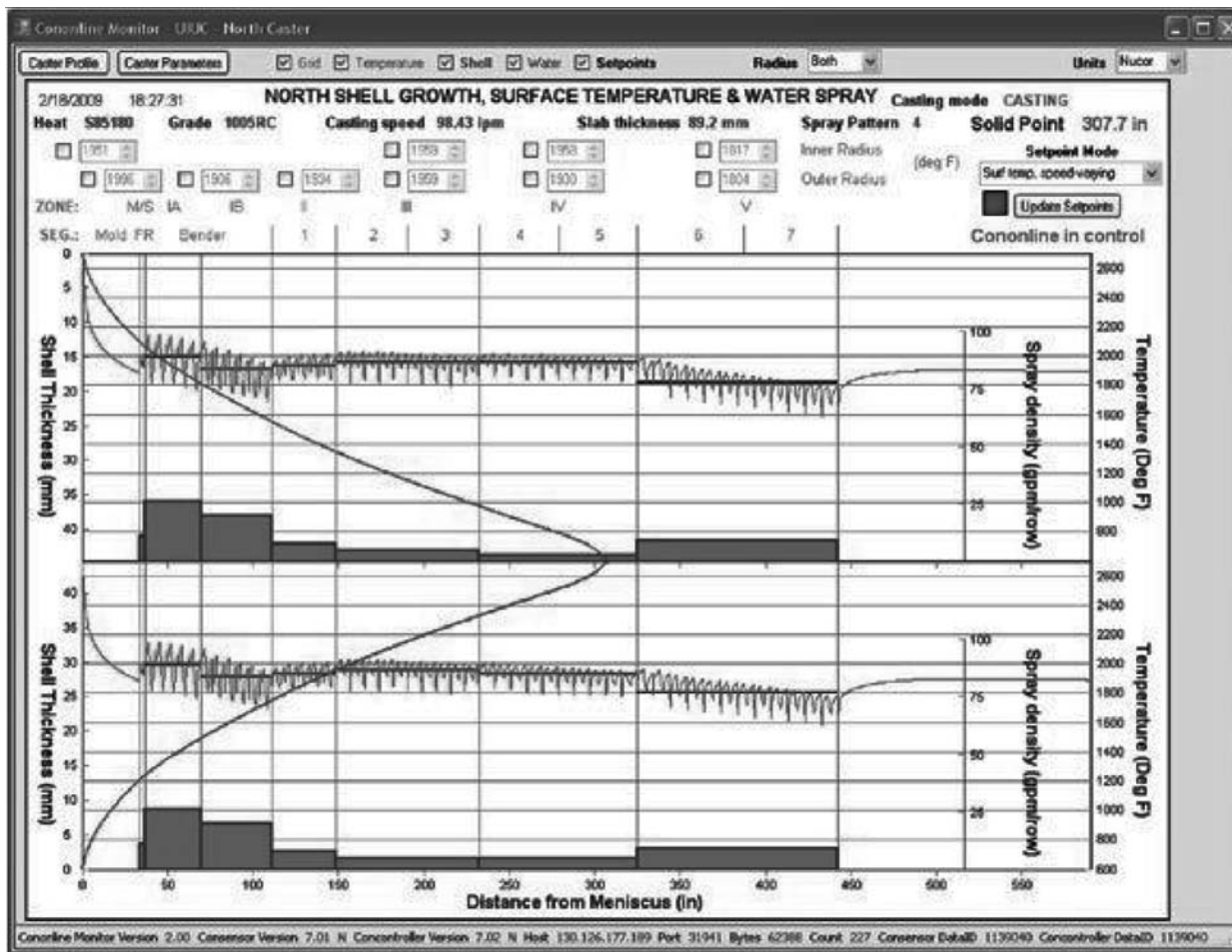


یا اعتبارسنجی یک مدل محاسباتی استفاده نمود. به هر حال، در نهایت، بهترین آزمون مدل های پیش بینی ML مقایسه با اندازه گیری مستقیم ML است.

اکنون کانسسور در کارخانه دکاتور در حال استفاده است. هدف از آزمایش مورد بحث در بخش قبلی جمع آوری داده برای کالیبره کردن کانسسور بود. به این ترتیب، بحث در مورد مدل با قدری جزئیات بیشتر آن ارزش دارد. کانسسور یک مدل زمان واقعا ز دما و انجماد برای ماشین های ریخته گری پیوسته اسلب فولاد است، که به عنوان بخشی از یک سیستم برای کنترل پاشش خنک کننده ثانویه در ماشین ریخته گری طراحی شده است. توضیحات کامل این مدل در جاهای دیگر [۱۱] منتشر شده است، بنابراین در اینجا تنها مروری کوتاه ارائه خواهد شد. خروجی های کانسسور یک پیش بینی زمان واقعی از دما و ضخامت پوسته شاخه، با استفاده از اندازه گیری شرایط فعلی ریخته گری، شامل سرعت ریخته گری، دمای تاندیش، و سرعت جریان آب در قالب و پاشش خنک کننده ثانویه است. کانسسور از مزیت این واقعیت برخوردار است که، در سرعت های معمول ریخته گری پیوسته، انتقال حرارت جابجائی افقی (حرکت فولاد در ماشین ریخته گری) غالب بر انتقال حرارت از طریق هدایت در جهت ریخته گری (محوری یا طولی) است. این بدان معنی است که نیازی به بسط شبکه محاسبات در این جهت نیست. از این رو، به جای محاسبه یک مدل کل ماشین ریخته گری، کانسسور برش های عرضی جداگانه حرارتی مواد در حال حرکت در ماشین ریخته گری در سرعت ریخته گری را مدل می کند. این رویکرد برش-ردیابی یک پیش بینی از دما و ضخامت پوسته شاخه را سریعتر از یک مدل منفرد دو بعدی ارائه می کند. مثالی از پیش بینی کانسسور در شکل ۷ نشان داده شده است.

گری یعنی سرعت ریخته گری و ضخامت شاخه را در بر می گیرد. در حالی که این دو از شرایط مهم تعیین ML هستند، سایر شرایط مهم، همانند آب خنک کننده قالب، خنک کاری ثانویه پاششی، دمای ریخته گری و گرید فولاد، همه در خود عامل K نهفته اند. در عمل، ارقام مختلف عامل K را می توان برای شرایط متفاوت تعیین کرد. یکی دیگر از مشکلات با وضوح کمتر این است که مقداری مفروضات مهم، و بعید، در فرمول اساسی مدل نهفته است. اول، همانطور که قبلا بحث شد، فولاد دارای مناطق مایع، جامد و خمیری است، نه یک ضخامت پوسته منفرد. این موضوع به طور معمول با استفاده از عوامل مختلف K برای دماهای گوناگون انجماد در نظر گرفته می شود. دوم، مدلی که این رابطه را ایجاد می کند یک دمای ثابت در سطح شاخه فرض می کند، که در واقع درست نیست. همچنین یک دمای ثابت در حوضچه مذاب فرض می کند، که یک تقریب منطقی است. سوم، مدل مقدار بینهایتی از فولاد مذاب فرض می کند. در واقع، با نزدیک شدن به پایان انجماد، پوسته سریعتر از ریشه دوم زمان رشد می کند چون حرارت آن در هر دو جهت گرفته می شود. همه این موارد بدان معنی است که یک مقدار K کالیبره برای مطابقت به عنوان مثال با یک پوسته برک آوت، قادر به پیش بینی درست ML و بالعکس نیست. اما، در بیشتر تاریخچه ریخته گری پیوسته، مدل عامل-K یک مزیت اساسی نسبت به مدل های دیگر داشت: سادگی آن بدان معنی است که می توان آنرا در طی تولید در پاسخ به تغییر شرایط ریخته گری محاسبه نمود.

رویکرد دیگر حل عددی معادله حاکم بر هدایت حرارت انجماد و شرایط مرزی مناسب است. مقدار زیادی کار و پژوهش با استفاده از چنین مدل هائی انجام شده است، که اکثر آنها فراتر از محدوده این مقاله است. این مدل ها از مدل های ساده یک بعدی انتقال حرارت تا مدل های بسیار پیچیده تر سه بعدی انتقال حرارت همراه با معادلات مکانیک، شیمی، جریان سیال و سایر پدیده های [انتقال] را در بر می گیرند. در اوایل تاریخچه ریخته گری پیوسته، محاسبه به اندازه کافی سریع این مدل ها برای استفاده ساده آنلاین در تولید غیرممکن بود. چون سرعت کامپیوترها افزایشی افته اند و روش های محاسباتی پیچیده تر رشد کرده اند، مدل های محاسباتی زمان واقعی انجماد به یک واقعیت تبدیل شده اند. اولین چنین مدل هائی که برای ریخته گری پیوسته منتشر شدند توسط Louhekilpi و همکاران [۸]، و سپس Hardin و همکاران [۹]، و پس از آن Zheng و همکاران [۱۰] بودند. مزیت بزرگ این مدل های اساسی تر نسبت به مدل عامل-K این است که آنها مواردی بیش از فقط ML را پیش بینی می کنند. به منظور محاسبه انجماد نهایی، آنها نیز باید ضخامت پوسته و دما در سراسر شاخه را پیش بینی کنند. بنابراین، از هر یک از تکنیک های اندازه گیری ذکر شده قبلی می توان برای بهبود



شکل ۷- مثالی از تغییرات دما و ضخامت پوسته پیش بینی شده توسط کانسنسور در طی ریخته گری در کارخانه نوکور استیل دکتور LLC.

مقدار ML را بیش از میزان واقعی پیش بینی می کند. کانسنسور در اصل پیش بینی کرد که ML فراتر از محل غلتک محرک بالا آمده با سرعت ریخته گری ۱۲۵ اینچ بر دقیقه می باشد، به جای ۱۳۰ اینچ بر دقیقه که در واقع در طی آزمایش مشاهده شده بود. بررسی بعدی نشان داد که کانسنسور به میزان زیادی اثر خنک کنندگی توسط غلتک های پشتیبان در اوایل ماشین ریخته گری را کمتر از میزان واقعی پیش بینی می کرد. طرح اصلی سگمنت های کارخانه دکتور دارای هیچ خنک کننده داخلی در غلتک های پشتیبان در چند سگمنت اولیه نبود. آب خنک کننده داخلی بعداً به این غلتک ها اضافه شد، اما کانسنسور بر اساس طرح اصلی ایجاد شد و فرض شد حرارت اندکی توسط این غلتک ها دفع می شود. شکل a8 پیش بینی دمای سطح نسخه اولیه کانسنسور را نشان می دهد. به الگوی تکرارشونده افت بزرگ به دنبال یک افت کوچک توجه داشته باشید. افت بزرگ پاشش آب است، و افت کوچک در تماس با یک غلتک پشتیبان است. شکل b8 تغییر به کانسنسور در نتیجه انجام این آزمایش را نشان

**کالیبره کردن و اعتبارسنجی مدل محاسباتی با استفاده از داده های آزمایشی کالیبراسیون کانسنسور با استفاده از آزمایش در کارخانه نوکور استیل دکتور LLC -**

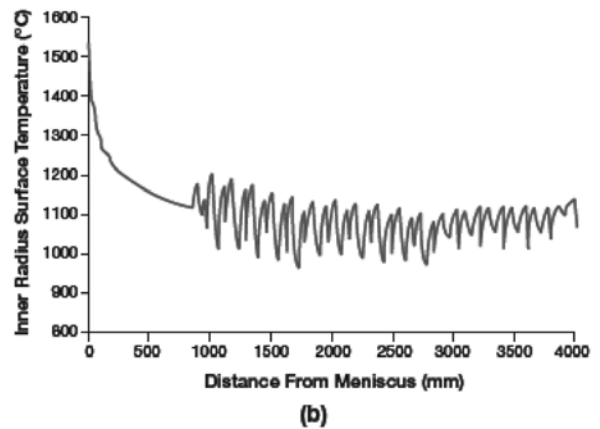
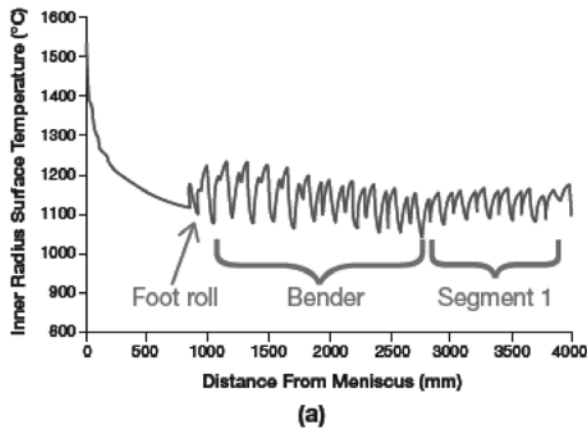
داده های جمع آوری شده برای کالیبره کردن کانسنسور چالش برانگیز بوده است. در واقع، مشکل بسیار زیاد کانسنسور به فقدان اندازه گیری قابل اعتماد دما و انجماد قابل دسترس در ماشین های ریخته گری پیوسته مربوط بود. پیرومترهای داخل ماشین ریخته گری در کارخانه دکتور در گذشته به دلیل وجود مقدار زیادی آب پاششی و بخار در ماشین ریخته گری که حصول یک سطح واضح با ثبات از سطح شاخه را دشوار می سازند قابل اعتماد نبودند. مقداری از کالیبره کردن بر روی پوسته برک آوت شده انجام گرفت، اما اندازه گیری نقطه انجماد نهایی بسیار مفیدتر است، همانطور که قبلاً بحث شده است. هدف از این آزمایش در کارخانه دکتور دستیابی به چنین اندازه گیری ای بود. آزمایش بسیار مفید بود، زیرا در ابتدا مشخص شد که کانسنسور





است، اما اثر قابل توجه تری بر پیش بینی های ML دارد، که حدود ۰,۵ متر کاهش داشت.

می دهد. اثر خنک کنندگی غلتک در غلتک پائین قالب ، خم کننده و اولین سگمنت تنظیم شد تا با سایر غلتک های ماشین ریخته گری سازگار باشد. اثر آن بر روی دمای سطح نسبتا کوچک



شکل ۸- مثالی از تغییرات دمای سطح پیش بینی شده توسط کانسنسور، قبل از (a) و پس از (b) کالیبره کردن هدایت غلتک پشتیبان در نتیجه آزمایش تعیین طول متالورژیکی.

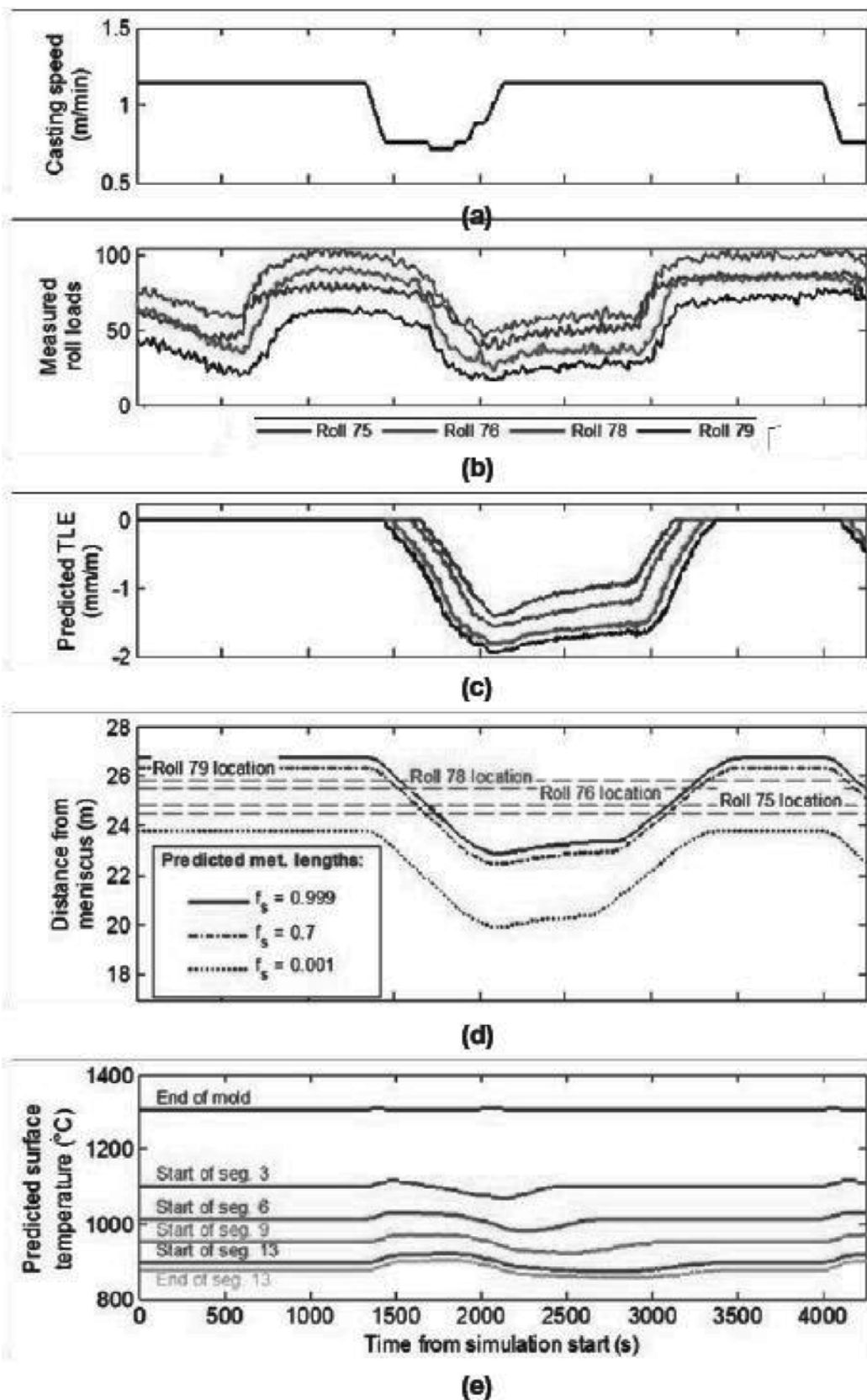
می کند با فرض اینکه تمام انتقال حرارت در جهت ریخته گری رخ می دهد ناشی از جابجائی افقی، با صرف نظر از هدایت حرارت می باشد. ماشین ریخته گری پیوسته کارخانه دکاتور ۹۰ میلیمتر ضخامت دارد، و سرعت ریخته گری معمول آن بالای ۳ متر بر دقیقه می باشد. در مقابل، ماشین ریخته گری پیوسته کارخانه آرسلورمیتال - برنز هاربر ۲۶۰ میلیمتر ضخامت، و سرعت ریخته گری در مثال های نشان داده شده همه کمتر از ۱,۵ متر بر دقیقه است. این تفاوت در شرایط به طور قابل توجهی دقت مدل را آزمایش می کند. یک مدل محاسباتی قبلا منتشر شده [۸] با شبکه های دو بعدی کامل زمان های گذرای بسیار طولانی تری را نسبت به پیش بینی های کانسنسور برای ماشین های ریخته گری اسلب معمولی پیش بینی کرد، که نشان می دهد ممکن است هدایت حرارت محوری قابل توجه باشد.

شکل های c۹ و e۹ پیش بینی های کانسنسور برای تغییرات سرعت در شکل a۹ را نشان می دهند. برای انجام این شبیه سازی، سابقه سرعت ریخته گری به طور مستقیم از نمودار قبلا اشاره شده در مقاله و فاصله غلتک ها از سایر شکل ها برداشت شده است. یک فولاد ساده، کم کربن (لیکوئیدوس  $1532^{\circ}\text{C}$ ، سولیدوس  $1515^{\circ}\text{C}$ )، با دمای ریخته گری  $1550^{\circ}\text{C}$  مورد استفاده قرار گرفت. شرایط باقیمانده برای انطباق طول متالورژیکی حالت پایدار گزارش شده ارائه شده در مقاله انتخاب شد. دفع حرارت آب قالب فرض شد متناسب با ریشه دوم سرعت ریخته گری باشد. این رابطه نظری برای دمای ثابت سطح است [۷] و نزدیک به روابط تجربی گزارش شده قبلی می باشد [۱۲، ۱۳]. سرعت جریان های آب خنک کاری ثانویه فرض شد به صورت خطی با سرعت

شکل ۶ پیش بینی کانسنسور با استفاده از پارامترهای کالیبره شده مجددا به صورت خط بنفش نشان می دهد. محل غلتک محرک بالا رفته به صورت خط سبز نشان داده شده است. پس از کالیبره کردن، کانسنسور پیش بینی کرد که ML به بعد از غلتک کشاننده منتقل می شود در زمانی که سرعت از ۱۲۵ به ۱۳۰ اینچ بر دقیقه تغییر می کند، که با نتایج آزمایش همخوانی دارد.

اعتبارسنجی کانسنسور با اندازه گیری های کرنش سنج ماشین ریخته گری پیوسته اسلب معمولی - در کاربردهای ذکر شده قبلی [۶]، چند مثال اندازه گیری از کرنش سنج نصب شده در یک ماشین ریخته گری پیوسته اسلب معمولی (۲۶۰ میلیمتر ضخامت) در طی یک سری از تغییرات در سرعت ریخته گری ارائه شده اند. شکل های a۹ و b۹ اندازه گیری های سرعت ریخته گری و کرنش سنج جمع آوری شده از شکل ۱۶ در مقاله مرجع را نشان می دهند. سرعت ریخته گری در ابتدا افت می کند، که می بایستی به طول متالورژیکی کوچکتر منجر شود. پس از افت سرعت، یک تاخیر وجود دارد و پس از آن بزرگی اندازه گیری های کرنش سنج کم می شود. این نشان می دهد که هسته مایع دیگر در زیر غلتک پشتیبان وجود ندارد. زمانی که سرعت دوباره افزایش می یابد، تاخیر طولانی قبل از برگشت افزایشی اندازه گیری های کرنش سنج به مقادیر اولیه خود وجود دارد. به عنوان یک اندازه گیری از ML، نتایج یک موفقیت روشن است. بر اساس اینکه کدام کرنش سنج بالا بخواند و کدام پائین بخواند، ML می تواند بین دو کرنش سنج تعیین محل شود.

این داده ها برای اعتبارسنجی پاسخ گذرای مدل کانسنسور نیز بسیار مفید است. کانسنسور به سرعت محاسبات سریع دست پیدا



شکل ۹- پیش بینی های مدل کانسسور از تغییرات دما، انجماد و انقباض حرارتی در طی یک سری از تغییرات سرعت در یک ماشین ریخته گری پیوسته در کارخانه آرسلورمیتال برنز هاربر، در مقایسه با بارهای غلتک اندازه گیری شده توسط کرنش سنج از مرجع ۶.



مدل با اندازه گیری های مدل مطابقت نمی کرد. این موید رویکرد برش-ردیابی مدل کانسسور است. نتایج بیشتر از مدل کانسسور کالیبره شده و اعتبارسنجی شده در انتشارات آینده ارائه خواهد شد.

### نتیجه گیری

اندازه گیری طول متالورژیکی با مقدار دقت مطلوب برای بهره برداری بهینه از ماشین ریخته گری پیوسته مشکل است. روش های مدرن، در بهترین حالت، دقت یک گام غلتک پشتیبان را ارائه می دهند و نیاز به تجهیز گسترده ابزار دقیق سگمنت های ماشین ریخته گری پیوسته وجود دارد. اما، ماشین های مدرن ریخته گری پیوسته بطور قابل توجهی پیچیده اند، پیش بینی قابل اعتماد ML توسط مدل را دشوار می سازند. در نهایت، توصیه می شود که رویکرد ایده آل ترکیب بهترین جنبه های هر دو رویکرد است. مدلی که به خوبی برای یک ماشین ریخته گری پیوسته خاص کالیبره شده باشد می تواند ساده تر، و از این رو سریعتر باشد و با احتمال کمتری از خطاهای اجرا، بدون فدا کردن توان پیش بینی روبرو باشد. علاوه بر این، کالیبره کردن مدل می تواند اطلاعاتی را از بسیاری از روش های مختلف اندازه گیری به طریقی اساسی و واقعا فیزیکی ایجاد کند. در ضمن، یک مدل کالیبره نشده و نامعتبر کمتر از یک حدس آزموده مفید است. هیچیک از رویکردها به تنهایی، اندازه گیری یا مدلسازی، کافی نیست؛ آنها در زمانی که با هم بکار گرفته شوند به مراتب مفیدتر هستند.

### مراجع:

- 1- Steel Statistical Yearbook 2014, World Steel Association, 2014.
- 2- J.E. Lait, J.K. Brimacombe and F. Weinberg, "Pool Profile, Liquid Mixing and Cast Structure in Steel, Continuously Cast in Curved Molds," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 1, No. 1, 1974, pp. 35-42, 89.
- 3- J.K. Park, B.G. Thomas and I.V. Samarasekera, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 29, No. 5, 2002, pp. ۳۷۵-۳۵۹.
- 4- J. Sengupta, M-K. Trinh, D. Currey and B.G. Thomas, "Utilization of CON2D at ArcelorMittal Dofasco's No. 2 Continuous Caster for Crater End Determination," *AISTech 2009 Conference Proceedings*, Vol. I, 2009, pp. 1177-1185.
- 5- S.N. Singh and K.E. Blazek, "Heat Transfer and Skin Formation in a Continuous Casting Mold as a Function of Steel C Content," *J. Met.*, Vol. 26, No. 1, 1974, pp. 17-23.
- 6- N. Gregurich, G. Flick, R. Moravec and K. Blazek, "In-Depth Analysis of Continuous Caster Machine Behavior During Casting With Different Roll Gap Taper Profiles," *Iron & Steel Technology*, Vol. 9, No. 12, 2012, pp. 62-75.
- 7- J.A. Dantzig and C.L. Tucker, *Modeling in Materials Processing*, New York: Cambridge University Press, 2001.
- 8- S. Louhenkilpi, E. Laitinen and R. Nienminen, "Real-Time Simulation of Heat Transfer in Continuous Casting," *Metallurgical & Material Transactions B*, Vol.

ریخته گری تناسب داشته باشد. ضرایب تناسب برای انطباق با طول های متالورژیکی گزارش شده انتخاب شدند.

بنابراین، کانسسور برای این ماشین ریخته گری اسلب ضخیم تر تنها با استفاده از اندازه گیری های حالت پایدار کالیبره شد. هیچ پارامتری قابل تنظیمی برای شرایط گذرا وجود ندارد. با وجود آن، و سادگی شرایط ریخته گری فرض شده، مدل انطباق کمی قابل توجهی را در حوزه زمانی تغییرات نسبی در اندازه گیری های کرنش سنج دینامیک ایجاد می کند. به طور خاص، زمان بندی پیش بینی شده تغییرات در انبساط خطی حرارتی (TLE) در نمودار سوم شکل ۹ انطباق خیلی خوبی با زمان بندی تغییرات در بار غلتک ها در نمودار دوم دارد. روش تا حدودی ویژه مدل در پیش بینی TLE در یک نقطه خاص در ماشین ریخته گری به طور مفصل در مرجع ۱۴ مورد بحث قرار گرفته است. به طور خلاصه، مدل پیش بینی می کند که وقتی مایع هنوز هم می تواند در کل مقطعی از فولاد آزادانه جریان یابد، هیچ انقباض حرارتی کلی به دلیل اینکه فولاد مذاب برای پر کردن حفره ناشی از انقباض به آن قسمت جریان پیدا می کند وجود ندارد، در حالی که فشار فروستاتیک پوسته را در تماس با غلتک های پشتیبان نگه می دارد. بنابراین ضخامت شاخه برابر با فاصله غلتک ها خواهد شد. پس از اینکه فولاد به اندازه کافی برای جلوگیری از جریان مایع چسبنده شد (فرض شده که ۷۰ درصد باشد)، بر اساس اندازه گیری های گزارش شده در مطالب منتشر شده این موضوع فرض می شود که فولاد به طور طبیعی منقبض می شود [۱۷-۱۵]. در شکل ۹، زمان های با TLE برابر با صفر نشان می دهد که مدل پیش بینی می کند که فولاد در زیر آن غلتک پشتیبان خاص هنوز چسبنده نیست. هنگامی که به چسبندگی می رسد، شکل متوسط TLE فولاد در زیر غلتک را نشان می دهد. از آنجا که کرنش واقعی بر روی غلتک ها به تفاوت بین فاصله غلتک ها و انقباض حرارتی و صلبیت سگمنت بستگی دارد، این فقط یک مقایسه کیفی با اندازه گیری های کرنش فراهم می کند.

TLE پیش بینی شده توسط مدل تأخیر طولانیتر و تغییر سریعتری را در طی افزایش دادن سرعت نسبت به مدت کاهش دادن سرعت نشان داد، که با اندازه گیری ها منطبق است. پس از کند شدن سرعت ریخته گری، کرنش اندازه گیری شده و TLE پیش بینی شده توسط مدل هر دو کاهش می یابند. سپس، چون سرعت ریخته گری دوباره افزایش را شروع می کند، اندازه گیری های کرنش سنج و TLE های پیش بینی شده مدل هر دو قبل از اینکه به مقدار پایدار برگردند بازهم کمتر می شوند. با این رفتار غیرعادی، مدل نشان می دهد که شاخه هرگز پاسخ گذرای خود به شرایط پایدار در سرعت ریخته گری کمتر، قبل از افزایش مجدد سرعت را کامل نکرد. در نهایت، مهم است توجه داشت که اگر هدایت حرارت محوری قابل توجه بود، پیش بینی های

۱۴. B. Petrus, "Distributed Parameter Control of Heat Diffusion With Solidification," Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014.
- 15- K. Harste, "Investigation of the Shrinkage and the Origin of Mechanical Tension During the Solidification and Successive Cooling of Cylindrical Bars of Fe-C Alloys," Ph.D. dissertation, Technical University of Clausthal, 1989.
- 16- A. Jablonka, K. Harste and K. Schwerdtfeger, "Thermomechanical Properties of Iron and Iron-Carbon Alloys: Density and Thermal Contraction," Steel Research, Vol. 62, No. ۱, pp. 24-33.
۱۷. I. Jimbo and A.A.W. Cramb, "The Density of Liquid Iron- Carbon Alloys," Metallurgical and Material Transactions B, Vol.24B, No. 1, 1993, pp. 5-10
- 24 No. 4, 1999, pp. 685-693.
- 9- R.A. Hardin, K. Liu, A. Kapoor and C. Beckermann, "A Transient Simulation and Dynamic Spray Cooling Control Model for Continuous Steel Casting," Metallurgical & Material Transactions B, Vol. 34B, June 2003, pp. 297-304.
10. K. Zheng, B. Petrus, B.G. Thomas and J. Bentsman, "Design and Implementation of a Real-Time Spray Cooling Control System for Continuous Casting of Thin Steel Slabs," AISTech2007 Conference Proceedings, Vol. II, 2007, pp. 165-179.
11. B. Petrus, K. Zheng, X. Zhou, B.G. Thomas and J. Bentsman, "Real-Time Model-Based Spray-Cooling Control System for Steel Continuous Casting," Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 42B, No. 2, 2011, pp. 87-103.
12. C. Cicutti, M. Valdez, T. Perez, G. Gresia, W. Balante and J. Petroni, "Mold Thermal Evaluation in a Slab Continuous Casting Machine," Proceedings of the 85th Steelmaking Conference, Vol. 85, Nashville, Tenn., USA, 2002, pp. 97-107.
- 13- P. Duvvuri, B. Petrus and B.G. Thomas, "Correlation for Mold Heat Flux Measured in a Thin-Slab Casting Mold," AISTech 2014 Conference Proceedings, Vol. III, 2014, pp. 2881-2893.