

# بهینه‌سازی یک سیستم پیچیده و بزرگ ریخته‌گری بوسيله

## شبیه‌سازی کامپیوتری

محمدعلی آزاده

استادیار گروه مهندسی صنایع - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

کاوه عسگری راد

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی صنایع - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۸/۹/۶، تاریخ تصویب ۸۰/۳/۱۹)

### چکیده

هدف از انجام این پروژه، ایجاد یک مدل فراگیر شبیه‌سازی در یک سیستم پیچیده و بزرگ ریخته‌گری، به منظور شناخت عملکرد سیستم و ارائه مجموعه‌ای از آلترناتیوهای بهینه می‌باشد. به منظور نائل آمدن به اهداف فوق، یک مدل شبیه‌سای به زبان Visual SLAM در محیط نرم‌افزاری Awesim که از پیشرفته‌ترین نرم‌افزارهای حال حاضر دنیای شبیه‌سازی می‌باشد، ارائه شده است. در ابتدای فرآیند ایجاد مدل، پس از بازدیدهای مکرر از خط تولید، منطق حاکم بر فرآیند تولید و همچنین اطلاعات زمانی مورد نیاز جمع‌آوری و مورد تجزیه و تحلیل آماری و مهندسی قرار گرفت. پس از آن بر مبنای اطلاعات بدست آمده، مدل شبیه‌سازی ایجاد گردید و پس از تصدیق، اعتبار آن در بیان سیستم واقعی مورد تأیید قرار گرفت. ساختار مدل شبیه‌سازی و نتایج آن نیز توسط مدیران تولید و فنی تجزیه و تحلیل و مورد تأیید قرار گرفت. به منظور شناخت منطقی از آنکه کدامین آلترناتیوهای بهبود دهنده بیشترین تأثیر را بر میزان تولید را دارد، از روشهای طراحی آزمایشها استفاده گردیده است. نهایتاً مجموعه‌ای از آلترناتیوهای بهینه و بهبود دهنده برای شرایط مختلف تولید ارائه گردیده است. از نکات بارز و انحصاری این تحقیق فراگیر بودن مدل شبیه‌سازی است بترتیبی که کلیه جزئیات، عملیات و فرآیندهای حاکم بر تولید، نگهداری و تعمیرات و کنترل کیفیت را در بر می‌گیرد. ثانیاً مدیران و تصمیم‌گیرندگان می‌توانند براحتی از پایگاه قواعد شبیه‌سازی برای در نظر گرفتن آلترناتیوهای مختلف تولید استفاده نمایند. ثالثاً مدل مزبور وضعیتهای بهینه تولید تحت شرایط مختلف و نحوه ارتقاء و تغییر مکانیزمهای موجود در این راستا را به مدیران نشان می‌دهد. با توجه به آنکه مدل شبیه‌سازی کامپیوتری مورد تصدیق، تعیین اعتبار و تأیید شرکت قرار گرفته است و کلیه جزئیات فرآیند فولادسازی و ریخته‌گری را در بر می‌گیرد، می‌تواند برای برنامه‌ریزی استراتژیک، بلند مدت و کوتاه مدت و توسعه ظرفیت سیستم استفاده شود و صدها میلیارد تومان سودآوری داشته باشد. شایان ذکر است که مدل شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن، در حال حاضر در سیستم مورد بررسی در حال اجرا می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، ریخته‌گری، سیستم، طراحی آزمایش تعیین اعتبار، تصدیق

### مقدمه

و تحلیل سیستم‌ها شبیه‌سازی کامپیوتری می‌باشد. شبیه‌سازی عبارت است از فرآیند مدلی از یک سیستم واقعی و انجام آزمایشهایی بر روی مدل با هدف پی‌بردن به رفتار سیستم یا ارزیابی استراتژی‌های گوناگون برای عملیات آن [۱ و ۲]. ابزارهای گوناگونی مانند برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی عدد صحیح، تئوری صف و مدل‌های ریاضی GERT برای تحلیل سیستم‌ها وجود دارد. ولی تمام روشهای مزبور بغیر از

در فرآیند توسعه بشری، همواره سیستم‌های پیچیده‌تری بوجود می‌آیند و به همان نسبت مدیریت، نظارت و کنترل آنها مشکل‌تر می‌گردد. بدلیل تأثیرات متقابلی که قسمت‌های مختلف یک سیستم بروی هم دارند، علم شبیه‌سازی سیستم‌ها به کمک مدیران و مهندسين به منظور مطالعه و بررسی نتایج حاصل این اثرات بوجود آمده است. در واقع یکی از کارآمدترین و پیشرفته‌ترین ابزارهای عصر نوین صنعتی و اطلاعاتی جهت تجزیه

شبیه‌سازی کامپیوتری:

۱- با در نظر گرفتن بعضی فرضیات سعی در ساده‌سازی سیستم می‌کنند و بنابراین منعکس کننده بسیاری از خواص سیستم نیستند.

۲- نمی‌توانند روابط پیچیده و عوامل تصادفی یا استوکاستیک سیستم واقعی را در نظر بگیرند و بنابراین میزان دقت تحلیل سیستم را کاهش می‌دهند.

۳- ابزارهای مزبور نمی‌توانند براحتی بسیاری از سیستم‌های واقعی را مدل‌سازی کنند.

اخیراً مطالعات و تحقیقات قابل توجهی در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های ریخته‌گری و فولاد سازی به منظور بررسی رفتار اینگونه سیستم و ارائه راهکارهای بهینه در کشورهای صنعتی و پیشرفته صورت گرفته است. در واقع تأخیرات در حمل پاتیل‌های حامل فولاد مذاب موجب افت حرارتی آن و نهایتاً منجر به تبدیل بر ضایعات می‌شود که هزینه‌های بسیار سنگینی را به واحد صنعتی تحمیل می‌نماید. به منظور پیگیری از بروز چنین مشکلاتی بایستی رفتار اینگونه سیستم‌ها شناسائی تا اولاً از تأخیرات جلوگیری و ثانیاً با ارائه راهکارهایی بهبود دهنده میزان تولید آنها را ارتقاء بخشید. در این راستا مطالعات زیادی در زمینه تحلیل سیستم‌های فولادسازی و ریخته‌گری با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی در کشورهایمانند آمریکا، فرانسه، ژاپن، کانادا، کره جنوبی، روسیه، چین و کره شمالی صورت گرفته است [۱۱]، ولیکن اکثر این مطالعات با هدف ارتقاء وضعیت قسمتی از اینگونه سیستم‌ها انجام شده‌اند و هدف خاصی را دنبال می‌کنند. بعبارت دیگر اغلب این مطالعات در حین اهمیت بصورت غیر فراگیر یا نیمه‌فراگیر صورت گرفته‌اند. برای مثال هدف شبیه‌سازی مشخص کردن تعداد بهینه پاتیل‌های حمل فولاد مذاب از فولادسازی به ریخته‌گری در یکی از این مطالعات بوده است. در مطالعه دیگری شبیه‌سازی به منظور ارزیابی اقتصادی انجام عملیات مختلف مربوط به تحویل فولاد مذاب از یک مجموعه کوره‌های ویژه به مجموعه از کوره‌های اکسیژن ایجاد شد [۱۲]. در مطالعه شبیه‌سازی دیگری که در آمریکا انجام شد، تعداد پاتیل‌های بهینه تعیین و بالانس تجهیزات تولید انجام گرفت. بعلاوه با استفاده از شبیه‌سازی روشن شد که وجود انبارهای میانی برای حفظ درجه حرارت فولاد مذاب ضروری است که این موارد موجب ۱۰۰ میلیون دلار صرفه‌جویی سالیانه گردید [۱۳]. بنابراین و با توجه به نتایج مطالعاتی که اخیراً انجام شده می‌توان نتیجه گرفت

که براستی شبیه‌سازی کامپیوتری می‌تواند براحتی و با هزینه بسیار کمی فوائد و سود سالیانه بسیار هنگفتی را نصیب واحدهای ریخته‌گری و فولادسازی داخلی نماید. لذا هدف از انجام این مطالعه شبیه‌سازی فراگیر یک واحد بزرگ ریخته‌گری با در نظر گرفتن کلیه عوامل، نهادها، منابع و سیستم‌های پشتیبانی به منظور شناسائی گلوگاهها، رفتار سیستم (کلی و جزئی) و نهایتاً ارائه راهکارهای ارتقاء راندمان تولید، بالانس تجهیزات تولید و بهینه‌سازی سیستم تولید ریخته‌گری می‌باشد.

مدل شبیه‌سازی این مطالعه بصورت فراگیر برای یکی از شرکتهای بزرگ ذوب آهن کشور طراحی گردیده است و مشخصات انحصاری آن بترتیب ذیل می‌باشد.

الف - شبیه‌سازی بصورت فراگیر صورت گرفته است و کلیه جزئیات، عملیات، فرآیندها و موارد کنترل کیفی و نگهداری و تعمیرات را مدل‌سازی می‌کند.

ب - مدیران و مهندسين می‌توانند براحتی از پایگاه قواعد شبیه‌سازی برای در نظر گرفتن آلترناتیوهای مختلف تولید استفاده نمایند (برنامه‌ریزی استراتژیک).

ج - مدل شبیه‌سازی بهترین وضعیت تولید (بهینه‌ترین) را با توجه به امکانات موجود و بهینه‌ترین وضعیت تولید را با توجه ظرفیت سیستم معرفی می‌نماید.

د - مدل شبیه‌سازی با استناد به پارامترهای مختلف تولید مورد تعیین اعتبار و تصدیق گرفته و مضافاً مدیران و متخصصین مجرب شرکت مورد مطالعه طی جلساتی نتایج شبیه‌سازی را تأیید نموده‌اند. بنابراین مدل شبیه‌سازی می‌تواند کلیه مشکلات سیستم ریخته‌گری مورد نظر را بدون آنکه آزمایشی روی آن صورت بگیرد و هزینه هنگفت در برداشته باشد معرفی نماید.

ه - با توجه به آنکه مدل شبیه‌سازی مورد تصدیق، تعیین اعتبار و تأیید متخصصین سیستم قرار گرفته است می‌تواند براحتی بعنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی بلند مدت، میان مدت یا کوتاه مدت مورد استفاده قرار گیرد. مضافاً می‌تواند برای توسعه سیستم مورد نظر بعنوان ابزاری تنومند با هزینه بسیار پائین مورد استفاده قرار گیرد. شایان ذکر است نتایج شبیه‌سازی این مطالعه در سیستم ریخته‌گری و فولادسازی استفاده گردیده است و نتایج بسیار ارزنده در زمینه تیراژ تولید به همراه داشته که خارج از مقوله این مقاله است. به امید روزی که این ابزار تنومند بتواند در کلیه واحدهای صنعتی به منظور شناسائی رفتار فرآیند تولید و بهینه‌نمودن آن و نهایتاً کاهش قابل توجه هزینه‌های تولید مورد استفاده قرار گیرد.

انجماد ثانویه غلطکهای کاشنده مسئولیت هدایت شمش‌ها را برعهده دارند. بعد از غلطکهای کاشنده مشعل برش‌کاری وجود دارد که شمش‌ها را بطول معین برش می‌دهد. وزن هر پاتیل که ریخته‌گری می‌شود بطور متوسط  $130$  تن است. با توجه به آنکه بعد از هر بار ریخته‌گری ابتدا و انتهای شمش ضایعات محسوب می‌شود، در زمان ریخته‌گری سعی می‌شود که چندین ذوب در ذوب را پشت سرهم ریخته‌گری نمایند. تعداد ذوب در ذوب‌ها به مارک فولاد بستگی دارد. مارکهای  $2-37-A$  و  $2-50-A$  را می‌توان تا  $5$  ذوب در ذوب ریخته‌گری نمود و بقیه مارکها را حداکثر تا  $3$  ذوب در ذوب می‌توان ریخته‌گری کرد. مدت زمان ریخته‌گری به مارک ذوب و ابعاد شمش بستگی دارد. با توجه به بررسی دفاتر کنترل کیفیت بخش ریخته‌گری در سالهای  $75$  و  $76$  مشاهده می‌گردد که  $96$  درصد محصولات تولید شده از نوع  $2-37-A$  و  $2-50-A$  می‌باشند، و فقط  $5$  درصد از محصولات تولید شده از نوع فولادهای آلیاژی مخصوص می‌باشند و بنابراین در این تحقیق بیشتر بر روی دو محصولات فوق تکیه گردیده است. بعلاوه با بررسی دفاتر کنترل کیفیت بخش ریخته‌گری سال  $76$ ، مشاهده می‌گردد که حدوداً  $99/8$  درصد محصولات تولید شده در این کارگاه را شمش‌های با ابعاد  $150 \times 150$ ،  $200 \times 200$  و  $250 \times 250$  تشکیل می‌دهند و تنها  $0/2$  درصد از محصولات تولید شده از شمش‌های با ابعاد  $180 \times 180$  و  $360 \times 250$  می‌باشد و لذا در این تحقیق بر سه محصول اصلی متمرکز شده است. نمودار (۱) شمای کلی فعالیتهای بخش ریخته‌گری را نشان می‌دهد.

### تشریح فرآیند کارگاه ریخته‌گری

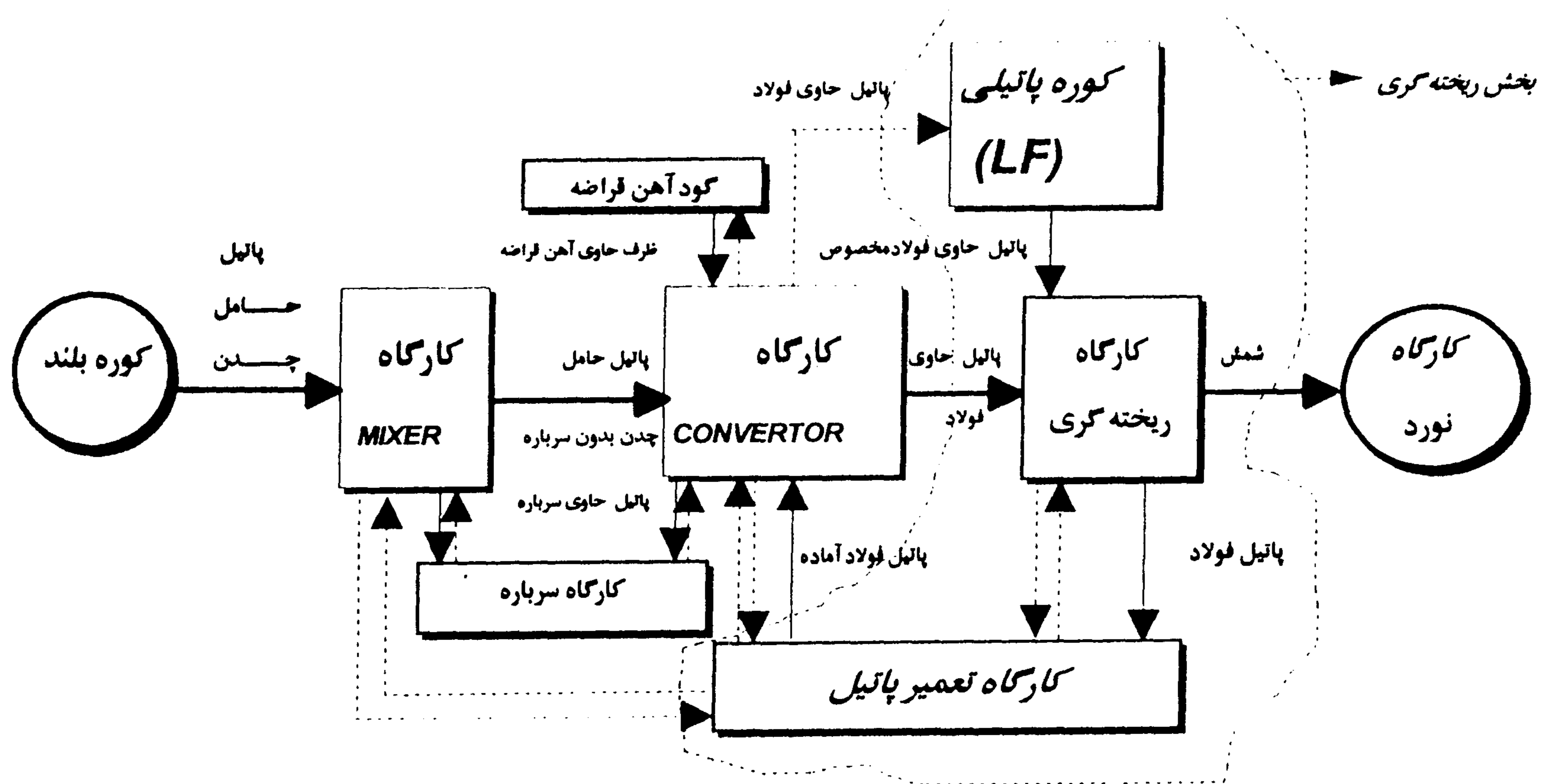
پاتیل فولاد ارسالی از فولادسازی توسط فولادبر به محوطه کار جرثقیل‌های ریخته‌گری آورده می‌شود و منتظر می‌ماند تا ایستگاه آماده شود. اگر مدت زمان انتظار پاتیل فولاد بیشتر از  $45$  دقیقه باشد، بدلیل سرد شدن مذاب باید به LF برده شود. بعبارت دیگر، فولاد توسط جرثقیل و اسکیت از روی فولادبر به روی فولادبر LF (کوره پاتیلی) منتقل شده و سپس توسط فولاد بر LF به زیر LF جهت انجام عملیات LF انتقال می‌یابد.

پس از اتمام عملیات LF پاتیل فولاد توسط فولاد بر LF از زیر LF خارج شده و سپس توسط یکی از جرثقیل‌ها و اسکیت به ایستگاه ریخته‌گری ارسال می‌شود و بر روی تارت ایستگاه گذاشته می‌شود. در صورتیکه مدت زمان انتظار پاتیل فولاد کمتر از  $45$  دقیقه باشد، پاتیل فولاد توسط جرثقیل و اسکیت به ایستگاه ریخته‌گری ارسال

در بخشهای بعدی مختصراً به تعریف سیستم ریخته‌گری و فرآیندهای آن و مدل شبیه‌سازی پرداخته‌ایم. ثانیاً نحوه تعیین اعتبار و تصدیق و تأیید بحث گردیده است و در آخر با استفاده از آنالیز حساسی و تحلیل واریانس (ANOVA) آلترناتیوهای بهینه تعیین و معرفی گردیده است.

### معرفی سیستم ریخته‌گری

سیستم مورد بررسی این تحقیق از بخشهای عمده یکی از بزرگترین کارخانه‌های ذوب آهن در خاورمیانه می‌باشد. این کارخانه تا حدود زیادی کشور را از وابستگی به آهن‌آلات بی‌نیاز می‌کند و در حال حاضر شامل کارگاههای کوره بلند، فولادسازی، ریخته‌گری و خطوط نورد می‌باشد. در کارگاه کوره بلند ابتدا سنگ معدن همراه با ذغال سنگ و مواد دیگر ذوب می‌گردند. مواد ذوب شده توسط دیگ‌ها یا پاتیل‌های ویژه به کارگاه فولادسازی منتقل می‌گردد و در این کارگاه آهن خام یا چدن، کربن زدایی شده و به فولاد تبدیل می‌گردد و فولاد بدست آمده به کارگاه ریخته‌گری منتقل می‌گردد. در کارگاه ریخته‌گری ذوب‌ها توسط قالب‌های مخصوص شمش‌ریزی و به ابعاد گوناگون در می‌آیند. نهایتاً، شمش‌ها به کمک تریلی و تلسکی به خطوط نورد انتقال یافته و پس از نورد به انواع تیرآهن، پروفیل، نبشی و سیم تبدیل می‌گردد. بخش ریخته‌گری از کارگاههای تعمیر پاتیل، کوره پاتیلی (LF) و ایستگاههای ریخته‌گری تشکیل گردیده است. همانطوریکه قبلاً اشاره شد، فولاد مذابی که از بخش فولادسازی بدست می‌آید به قسمت ریخته‌گری حمل می‌گردد. اصولاً فولاد را به دو روش ریخته‌گری می‌کنند: ریخته‌گری در قالب و ریخته‌گری در ماشینهای مداوم. در سیستم مورد بررسی این مطالعه و در بخش ریخته‌گری از ماشینهای مداوم استفاده می‌شود، بدین ترتیب که فولاد مذاب از پاتیل ریخته‌گری به داخل تاندیش و از آنجا به داخل قالب دو جداره (کریستالیزاتور) ریخته می‌شود. جداره داخلی قالب از جنس مس و جداره خارجی آن از جنس چدن یا فولاد می‌باشد. در بین دو جداره مذکور آب از مجرای پائینی وارد شده و از مجرای بالائی خارج می‌گردد و در اثر تماس فولاد مذاب با جداره سرد قالب به تدریج منجمد می‌گردد. شمش‌ها که از کریستالیزاتور خارج می‌شود گداخته است و هنوز مقداری فلز بصورت مذاب در مغز آن وجود دارد. عمل انجماد در منطقه سرد کننده ثانوی که در زیر کریستالیزاتور قرار دارد (آب توسط افشانک‌ها به سطح شمش پاشیده می‌شود) صورت می‌گیرد. سپس و بعد از عملیات کامل



نمودار ۱: شمای کلی سیستم ریخته گری.

در کارگاه تعمیر پاتیل کلیه فعالیتهای مربوط به نسوزکاری و آجرچینی پاتیل های فولاد و تاندیش ها (پاتیل های میانی) انجام می شود. مجموعاً ۱۹ پاتیل موجود است که این تعداد بطور متوسط ۱۰ پاتیل در حال گردش و ۹ پاتیل در حال تعمیر و رزرو هستند. پس از تخلیه ذوب در ایستگاه ریخته گری، پاتیل فولاد توسط یکی از جرثقیل ها و اسکیت به روی فولاد بر منتقل می شود و سپس توسط فولادبر وارد کارگاه تعمیر پاتیل می شود و توسط جرثقیل برداشته شده و روی استند افقی خوابانده می شود. مجموعاً ۵ استند افقی در کارگاه وجود دارد که کلیه عملیات آماده سازی پاتیل فولاد شامل برشکاری و تعویض استکان ها در این زمان انجام می شود.

پاتیل فولاد هر دفعه که ذوب تحویل می دهد بایستی استکان بیرونی و پلیت های آن تعویض شوند. استکان داخلی پاتیل فولاد هر ۳ ذوب باید تعویض شود. پس از انجام عملیات آماده سازی، پاتیل فولاد توسط جرثقیل از روی استند افقی برداشته می شود. بعلاوه، پاتیل فولاد تا ۱۵ ذوب اول نیاز به جرم ریزی ندارد، اما بعد از آن هر ۵ ذوب نیاز به جرم ریزی دارد. ضمناً در هر ۵ ذوب پاتیل نیاز به تعمیر لبه و تعمیر اساسی (تخریب، امور مکانیکی و نوچینی) پیدا می کند و پس از تکمیل عملیات آماده سازی، باید

و به روی تارت ایستگاه گذاشته می شود.

پس از قرار گرفتن پاتیل فولاد بر روی تارت ایستگاه، کشویی واقع در زیر پاتیل باز می شود و مذاب بداخل تاندیش تخلیه می شود. زمان عملیات ریخته گری به ابعاد قالب ها و تعداد شاخه های ایستگاه بستگی دارد. پس از تخلیه ذوب در ایستگاه ریخته گری، پاتیل فولاد توسط یکی از جرثقیل های ریخته گری برداشته و به محل کنتوات ارسال می گردد. پس از انجام عملیات کنتوات، پاتیل فولاد به روی فولادبر گذاشته و توسط فولادبر جهت آماده سازی ذوب بعدی به کارگاه تعمیر پاتیل ارسال می شود. بخش مورد مطالعه از ۸ ایستگاه ریخته گری عمودی (ایستگاههای ۱ و ۲)، عمودی و قوسی (ایستگاههای ۴ و ۵) و قوسی (ایستگاههای ۳، ۶، ۷ و ۸) تشکیل گردیده است. ایستگاههای ۱، ۲ و ۳ برای ابعاد بیشتر از ۲۰۰ میلی متر و بقیه ایستگاهها برای ابعاد کمتر از ۲۰۰ میلی متر مناسب می باشند. ایستگاههای ۱ و ۲ دارای ۴ شاخه و بقیه ایستگاهها دارای ۶ شاخه هستند. ایستگاههای ۱، ۲، ۴ و ۵ دارای ظرفیت اسمی ۲۰۰۰۰۰ تن در سال و بقیه دارای ظرفیت اسمی ۶۰۰۰۰۰ تن در سال هستند. در حال حاضر ایستگاههای ۲، ۳، ۶، ۷ و ۸ فعال و بقیه بدلیل قدیمی بودن (از نوع روسی) غیرفعال هستند.

## نمودار ۲: گردش فرآیند بخش ریخته‌گری

ردیف	شرح عملیات	D	□	○	⇒	▽	ماشین
۱	سفارش ذوب ریخته‌گری به فولادسازی			*			-
۲	عملیات آماده کردن ذوب در فولادسازی			*			-
۳	قرار دادن پاتیل فولاد آماده بر روی فولادبر			*			جرتقیل ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳
۴	انتقال پاتیل فولاد به زیر کنورتور			*			فولادبر
۵	شارژ همزمان فولاد و مواد فرو آلیاژ به داخل پاتیل فولاد			*			کنورتور و بونکرهای جانبی
۶	شارژ آهک و سیوس			*			-
۷	انتقال پاتیل فولاد به منطقه کارجر ثقیل‌های ریخته‌گری			*			فولاد بر
۸	انتقال پاتیل فولاد از روی فولادبر کنورتور به فولادبر LF			*			جرتقیل ۱۶ و اسکیت ۱ و ۲
۹	انتقال پاتیل فولاد به زیر LF			*			فولادبر LF
۱۰	عملیات LF			*			LF
۱۱	انتظار برای آماده‌سازی ایستگاه ریخته‌گری	*					-
۱۲	انتقال پاتیل فولاد به روی تارت ایستگاه ریخته‌گری			*			جرتقیل ۱۶ و اسکیت ۱ و ۲
۱۳	انتظار پاتیل فولاد برای شروع ریخته‌گری	*					-
۱۴	بازکردن کشویی پاتیل فولاد و تخلیه مذاب به داخل پاتیل میانی (تاندیش)			*			-
۱۵	انجام عملیات ریخته‌گری			*			ماشین ریخته‌گری مداوم
۱۶	انتقال پاتیل فولاد از ایستگاه ریخته‌گری به محل کنتوات			*			جرتقیل ۱۵ و ۱۶ و اسکیت ۱ و ۲
۱۷	انجام عملیات کنتوات			*			جرتقیل ۱۵ و ۱۶ و اسکیت ۱ و ۲
۱۸	انتقال پاتیل فولاد به روی فولادبر			*			جرتقیل ۱۵ و ۱۶ و اسکیت ۱ و ۲
۱۹	انتقال پاتیل فولاد به کارگاه تعمیر پاتیل			*			فولادبر
۲۰	تمیزکردن دهانه پاتیل فولاد			*			جرتقیل ۱۲ و ۱۳
۲۱	تعویض پلیت واستکان بیرونی پاتیل فولاد			*			استند افقی
۲۲	تعویض جرم‌ریزی پاتیل فولاد			*			استند افقی
۲۳	جرم‌ریزی پاتیل فولاد			*			جرتقیل ۱۲ و ۱۳
۲۴	تعمیر لبه پاتیل فولاد			*			-
۲۵	تخریب پاتیل فولاد			*			ماشین تخریب
۲۶	انجام کارهای مکانیکی پاتیل فولاد			*			-
۲۷	نوجینی پاتیل فولاد			*			-
۲۸	خشک کردن پاتیل فولاد			*			گرم‌کن پاتیل فولاد
۲۹	انتظار جهت سرد شدن تاندیش	*					-
۳۰	تخلیه کازبول تاندیش			*			تاندیش برگردان
۳۱	پلاستر تاندیش			*			استند آماده‌سازی تاندیش
۳۲	پیش گرم تاندیش			*			خشک‌کن تاندیش
۳۳	بریدن شمشها به طول مورد نظر			*			مشعلهای برش
۳۴	سرد کردن شمشها			*			بستر سرد

می‌شود و درپوش گذاشته می‌شود. برای ایستگاههای ۶، ۷ و ۸ پنج دستگاه هستند آماده‌سازی تاندیش وجود دارد.

پس از پلاستر، تاندیش توسط جرثقیل خشک کن تاندیش منتقل می‌شود و تاندیش حداقل یک شیفت پیش‌گرم می‌شود و سپس تاندیش آماده ارسال می‌گردد. برای ایستگاههای ۷ و ۸ دو دستگاه خشک کن تاندیش و برای ایستگاه ۶ یک دستگاه خشک کن تاندیش موجود می‌باشد. نحوه عملیات ایستگاه ۳ کم و بیش مانند ایستگاههای فوق (۶، ۷ و ۸) می‌باشد. نمودار (۲) نحوه گردش عملیات بخش ریخته‌گری را نشان می‌دهد.

شمش‌های بدست آمده از ایستگاههای ریخته‌گری تحویل کارگاه شمش به منظور برش‌کاری و دسته‌بندی می‌شوند. بطور خلاصه عملیاتی که در کارگاه شمش انجام می‌شود عبارتند از:

- (۱) سردکردن شمش‌های ریخته‌گری، (۲) دسته‌بندی و شماره‌گذاری شمش‌ها، (۳) برش شمش‌ها به طول‌های سفارش داده شده، (۴) تمیزکاری و یکنواخت‌سازی سطح شمش‌ها
- (۵) تحویل شمش‌های آماده به کارگاه نورد، (۶) ضایعات کردن شمش‌های غیرقابل قبول.

پودریزی انجام گیرد. پس از انجام عملیات تعمیر و در صورتیکه فولادسازی به پاتیل نیاز داشته باشد، پاتیل توسط جرثقیل روی فولاد بر گذاشته می‌شود و در غیر اینصورت بوسیله جرثقیل زیر مشعل چتر عمودی قرار داده می‌شود. ایستگاههای ۷ و ۸ شانزده تاندیش دارند و از این تعداد سه تاندیش در حال تعمیرند. ایستگاههای ۳ و ۶ بترتیب ۷ و ۸ تاندیش دارند که از این تعداد بطور متوسط دو تاندیش در حال تعمیرند. بعد از اتمام ریخته‌گری تاندیش ایستگاه ۷ یا ۸ توسط جرثقیل به روی سطح کارگاه منتقل شده و درپوش آن برداشته می‌شود.

بعد از اتمام ریخته‌گری تاندیش ایستگاه ۶ توسط اسکیت به ایستگاه ۸ منتقل و درپوش آن برداشته می‌شود و بعد از برداشتن درپوش، چهار ساعت طول می‌کشد تا تاندیش سرد شود، سپس تاندیش توسط جرثقیل به روی استند تاندیش برگردان جهت تخلیه کازیول منتقل می‌شود و برای ایستگاههای ۷ و ۸ دو دستگاه و برای ایستگاه ۶ یک دستگاه تاندیش برگردان موجود می‌باشد. پس از تخلیه کازیول، تاندیش توسط جرثقیل به روی استند آماده‌سازی تاندیش گذاشته می‌شود و سپس تاندیش پلاستر

جدول ۱: نمونه‌ای از خلاصه نتایج زمان فرآیند و تعمیرات بخش ریخته‌گری.

شرح فرآیند زمان سنجی	نوع زمان	توزیع احتمالی / زمان (دقیقه)
زمان عملیات ریخته‌گری شمش ۲۰۰×۲۰۰ در ایستگاه‌دانیلی	قطعی	71
زمان انتقال پاتیل فولاد از ایستگاه ریخته‌گری به محل کنتوات	احتمالی	LN(3.26, .73)
زمان عملیات کنتوات	احتمالی	RNORM(3.06, .89)
زمان انتقال پاتیل فولاد از محل کنتوات به روی فولادبر	احتمالی	LN(3, .9)
زمان انتقال پاتیل فولاد توسط فولادبر به کارگاه تعمیر پاتیل	قطعی	1.17
مدت زمان تعمیر کردن دهانه پاتیل فولاد	قطعی	10
مدت زمان تعویض پلیت‌واستکان بیرونی هرکشویی پاتیل فولاد	قطعی	25
مدت زمان بین خرابی جرثقیل‌های ریخته‌گری	احتمالی	EXPON (4390.48)
مدت زمان تعمیر جرثقیل‌های ریخته‌گری	احتمالی	LN(179, 336)
مدت زمان بین خرابی LFها	احتمالی	GAMA (0001,.9)
مدت زمان تعمیر LFها	احتمالی	LN(280, 465)
مدت زمان بین خرابی ایستگاه ۳	احتمالی	GAMA (001,2.68)
مدت زمان تعمیر ایستگاههای ریخته‌گری	احتمالی	LN (301, 299)

## جمع‌آوری و تحلیل اطلاعات

اطلاعات مربوط به عملیات، فرآیندها و تعمیرات و ضایعات و کنترل کیفی از دفاتر بخش، مصاحبه حضوری با سرپرستان و زمان‌سنجی بدست آمده. اطلاعاتی که ماهیت تصادفی دارند بوسیله روشهای آماری مربع کای یا کالماگراف اسمیرانوف تحلیل و توابع توزیع و پارامترهای مربوطه آنها تعیین گردیده است. در این راستا از نرم‌افزار آماری Statgraph به منظور ضبط و تجزیه و تحلیل اطلاعات استفاده گردیده است. اطلاعات مربوط به نگهداری و تعمیرات در رابطه با طول مدت خرابی و فاصله زمان بین خرابی جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شده است. جدول (۱) نمونه‌ای از خلاصه نتایج تجزیه و تحلیل زمان فرآیند و تعمیرات و نگهداری را نشان می‌دهد. مجموعاً ۳۹ عملیات زمان‌سنجی و تحلیل گردیده است که ۱۳ نمونه از آنها در جدول (۱) مشاهده می‌گردد.

ورودی بخش ریخته‌گری، پاتیل فولاد حاوی فولاد مذاب می‌باشد. بخش فولادسازی تنها در صورتی اقدام به آماده نمودن و ارسال ذوب می‌نماید که بخش ریخته‌گری درخواست کرده باشد. از طرفی ورودی بخش فولادسازی (چدن) از کوره بلندها تأمین می‌شود و میزان چدن تولیدی کوره بلندها جوابگوی نیاز فولادسازی و ریخته‌گری نمی‌باشد و همین باعث شده است که تولید سالانه فولادسازی و ریخته‌گری در حدود ۱۶۰۰۰ ذوب باشد. میزان ذوب ورودی از فولادسازی به بخشهای فعال ریخته‌گری مطابق سال ۱۳۷۷ در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲: میزان ذوب بخشهای فعال ریخته‌گری در سال ۷۷.

شماره ایستگاه ریخته‌گری	۲	۳	۴	۷	۸	جمع
تعداد ذوب در سال ۷۷	۷۷۶	۳۶۸۹	۳۸۹۷	۳۸۷۳	۳۹۰۶	۱۶۱۴۰

## مدلسازی بخش ریخته‌گری

مدل شبیه‌سازی با استفاده از زبان Visual SLAM & Awesim، یکی از معتبرترین زبانهای پیشرفته شبیه‌سازی دنیا ساخته شده است [۱۳]. در این بخش به تشریح مدل شبیه‌سازی

می‌پردازیم که کلیه اجزاء آن بوسیله زبان مزبور ساخته شده است. پس از سفارش ذوب از ایستگاه ریخته‌گری، فولادسازی اقدام به آماده نمودن ذوب می‌نماید. در فولادسازی ۳ دستگاه کنورتور وجود دارد و در هر کنورتور پس از دریافت سفارش ذوب (در صورت بیکار بودن) به مدت ۱۵ دقیقه قراضه و چدن شارژ می‌شوند و سپس عملیات کنورتور شروع می‌شود که با تابع توزیع  $RNORM(61.69, 8.08)$  و ماکزیمم و مینیمم بترتیب ۷۰ و ۴۸ دقیقه طول می‌کشد و بعد از آن و شارژ ذوب در پاتیل فولاد با مدت زمان  $RLOGN(4.53, 1.61)$ ، پاتیل فولاد توسط فولادبر با زمان ۱/۲۵ دقیقه به محوطه کار جرثقیل‌های ریخته‌گری منتقل می‌شود.

اگر ایستگاهی که سفارش این ذوب را داده است سالم باشد، ذوب، به همان ایستگاه برده می‌شود ولی در غیر اینصورت به یک ایستگاه دیگر برده می‌شود. در صورتیکه ذوب بیشتر از ۴۵ دقیقه منظر بماند به LF برده می‌شود و در غیر اینصورت ذوب توسط جرثقیل ۱۶ یا اسکیت ۱ و ۲ با زمان  $RNORM(7.86, 2.01)$  به روی تارت ایستگاه منتقل می‌شود. هر ایستگاه ریخته‌گری پس از ۵ ذوب، به مدت یک ساعت جهت آماده‌سازی متوقف می‌شود. عملیات ریخته‌گری طبق جدول ۱ برای ایستگاههای دانیلی (۳، ۶، ۷ و ۸) و روسی (۲) صورت می‌پذیرد. ذوب‌هایی که پیش از رفتن به ایستگاه باید به LF بروند توسط جرثقیل ۱۶ یا اسکیت ۱ و ۲ با زمان  $TRIAG(77.14, 10.08)$  به روی فولادبر LF منتقل می‌شوند و پس از ۲ دقیقه توسط فولادبر به زیر LF انتقال می‌یابند، مدت زمان عملیات LF در ۷۶ درصد از مواقع از تابع توزیع  $GAMA(2.08, 6.94)$  و در بقیه اوقات از تابع توزیع  $ERLNG(2.94, 7)$  پیروی می‌نماید.

هر پاتیل فولاد پس از هر بار تحویل ذوب و هر تاندیش پس از ۵ بار تحویل ذوب به کارگاه تعمیر پاتیل به منظور تعمیرات مورد نیاز ارسال می‌گردند. پس از ورود پاتیل فولاد به کارگاه تعمیر پاتیل، پاتیل توسط جرثقیل ۱۲ یا ۱۳ از روی فولادبر به روی کف کارگاه منتقل و فولاد دهانه پاتیل توسط یاکا تمیز می‌شود که این عملیات به طور متوسط ۱۰ دقیقه طول می‌کشد و در طی این مدت جرثقیل مشغول می‌باشد. سپس پاتیل فولاد توسط جرثقیل ۱۲ یا ۱۳ برداشته شده و روی استند افقی خوابانده می‌شود که بطور متوسط

دقیقه)، که چهار ساعت طول می‌کشد تا تاندیش سرد شود. سپس تاندیش توسط اسکیت ۱ یا ۲ به روی استند تاندیش برگردان جهت تخلیه کازبول منتقل می‌شود که به ترتیب ۵ دقیقه و ۶۰ دقیقه انتقال و تخلیه آن طول می‌کشد. پس از تخلیه کازبول، تاندیش توسط اسکیت ۱ یا ۲ به روی ارابه تاندیش منتقل و سپس توسط ارابه تاندیش به داخل کارگاه آماده‌سازی تاندیش (اینکات) با زمانهای به ترتیب ۱ و ۵ دقیقه منتقل می‌شود. مضافاً تاندیش توسط جرثقیل ۲۱ از روی ارابه تاندیش به روی استند آماده‌سازی گذاشته می‌شود و سپس تاندیش پلاستر می‌شود و درپوش گذاشته می‌شود که این عملیات تقریباً یک شیفت طول می‌کشد. سپس تاندیش توسط جرثقیل ۲۱ به خشک‌کن تاندیش منتقل می‌شود و حداقل یک شیفت پیش‌گرم می‌شود و آماده ارسال می‌گردد.

به منظور ساده‌سازی، انعطاف‌پذیر کردن و فراگیر نمودن مدل شبیه‌سازی بخش ریخته‌گری کل مدل در قالب ۱۳ شبکه مجزا و لکن مرتبط AWESIM طراحی و ساخته شده است و هر شبکه بخشی از فرآیند تولید یا نگهداری و تعمیرات را در بر می‌گیرد. برای مثال نمودار ۳ بخشی از شبکه Z4 (آماده کردن ذوب سفارش شده) را که منطق شروع به کار کنورتور درخواست ذوب ریخته‌گری و کنورتور با دو گره (S259, S205) QUEUE و گره SELECT (S206) نشان می‌دهد. گره S207 یا AWAIT درخواست کنورتور را می‌دهد که بعد از شارژ شدن چدن و قراضه به مدت ۱۵ دقیقه در گره ACTIVITY در گره ASSIGN (S237) زمان عملیات کنورتور با تابع توزیع نرمال با میانگین و انحراف معیار ۶۱/۶۹ و ۸/۱۸ دقیقه تعریف می‌شود و بعلاوه زمان شبیه‌سازی برای گزارش‌گیری‌های بعدی نیز ضبط می‌گردد. گره AWAIT (S238) درخواست یک پاتیل فولاد را می‌کند و گره S241 کنورتور را آزاد می‌کند و یک کپی آن را به صف کنورتور (S259) و یک نسخه از آن برای شارژ در پاتیل فولاد با تابع توزیع لاگ‌نرمال و میانگین و انحراف معیار ۴/۵۳ و ۱/۶۱ دقیقه ارسال می‌شود و بعد پاتیل فولاد بوسیله ACTIVITY 24 و زمان ۱/۲۵ دقیقه به محوطه جرثقیل‌های ریخته‌گری ارسال می‌شود. گره COLCT (S242) تعداد ذوب‌ها را می‌شمارد و گره (S244) ASSIGN آمار مربوط به تعداد ذوب را با استفاده از متغیر X<sub>1</sub> برای گزارش‌گیری‌های نهایی ضبط می‌کند. جدول (۳) لیست شبکه‌های

۲ دقیقه طول می‌کشد. بعلاوه پاتیل فولاد هر بار که ذوب می‌دهد، باید استکان بیرونی و پلیت‌های آن تعویض شوند که این عملیات ۲۵ دقیقه طول می‌کشد. استکان داخلی پاتیل فولاد هر ۳ ذوب باید تعویض شوند (بطور متوسط ۱۵ دقیقه). پس از انجام عملیات آماده‌سازی، پاتیل فولاد توسط جرثقیل ۱۲ یا ۱۳ از روی استند افقی برداشته می‌شود که بطور متوسط ۲ دقیقه این عملیات طول می‌کشد. پاتیل فولاد تا ۱۵ ذوب اول نیاز به جرم‌ریزی ندارد، اما بعد از آن هر ۵ ذوب نیاز به جرم‌ریزی دارد که این عملیات ۲۵ دقیقه زمان می‌برد. در طی این ۲۵ دقیقه جرثقیل ۱۲ یا ۱۳ به مدت ۱۰ دقیقه برای ۵ دقیقه اول عملیات و ۵ دقیقه آخر عملیات مورد نیاز می‌باشد. بعد از هر ۵۰ بار ذوب پاتیل نیاز به عملیات تعمیر لبه می‌کند (به مدت ۳۰ دقیقه). پس از اتمام این عملیات بایستی عملیات پودرریزی انجام پذیرد که ۵ دقیقه طول می‌کشد و در طی این مدت جرثقیل ۱۲ یا ۱۳ مشغول است. بعلاوه بعد از هر ۵۰ بار ذوب پاتیل تعمیرات اساسی می‌گردد که شامل تقریباً یک شیفت تخریب، دو شیفت کارهای مکانیکی، دو شیفت نوچینی و ۱۲ ساعت خشک کردن می‌باشد.

بعد از اتمام ریخته‌گری تاندیش ایستگاه ۷ یا ۸ توسط جرثقیل ۱۹ یا ۱۵ به روی سطح کارگاه منتقل می‌شود و درپوش آن برداشته می‌شود و ۱۵ دقیقه زمان می‌برد. بعد از اتمام ریخته‌گری تاندیش ایستگاه ۶ توسط ۱ به ایستگاه ۸ منتقل و درپوش آن برداشته می‌شود و ۲۰ دقیقه زمان می‌برد. بعد از برداشتن درپوش چهار ساعت طول می‌کشد تا تاندیش سرد شود و سپس تاندیش توسط جرثقیل ۱۵ یا ۱۹ به روی استند برگردان جهت تخلیه کازبول منتقل می‌شود. زمان انتقال و تخلیه کازبول بترتیب ۵ و ۶۰ دقیقه می‌باشد. پس از تخلیه کازبول تاندیش توسط جرثقیل ۱۹ یا ۱۵ به روی استند آماده‌سای تاندیش گذاشته می‌شود (۲ دقیقه زمان انتقال) و سپس تاندیش پلاستر می‌شود و درپوش گذاشته می‌شود که بطور متوسط یک شیفت طول می‌کشد. سپس تاندیش توسط جرثقیل ۱۹ یا ۱۵ به خشک‌کن تاندیش ارسال (مدت زمان انتقال ۵ دقیقه است) و تاندیش حداقل یک شیفت پیش‌گرم می‌شود و سپس آماده ارسال می‌گردد.

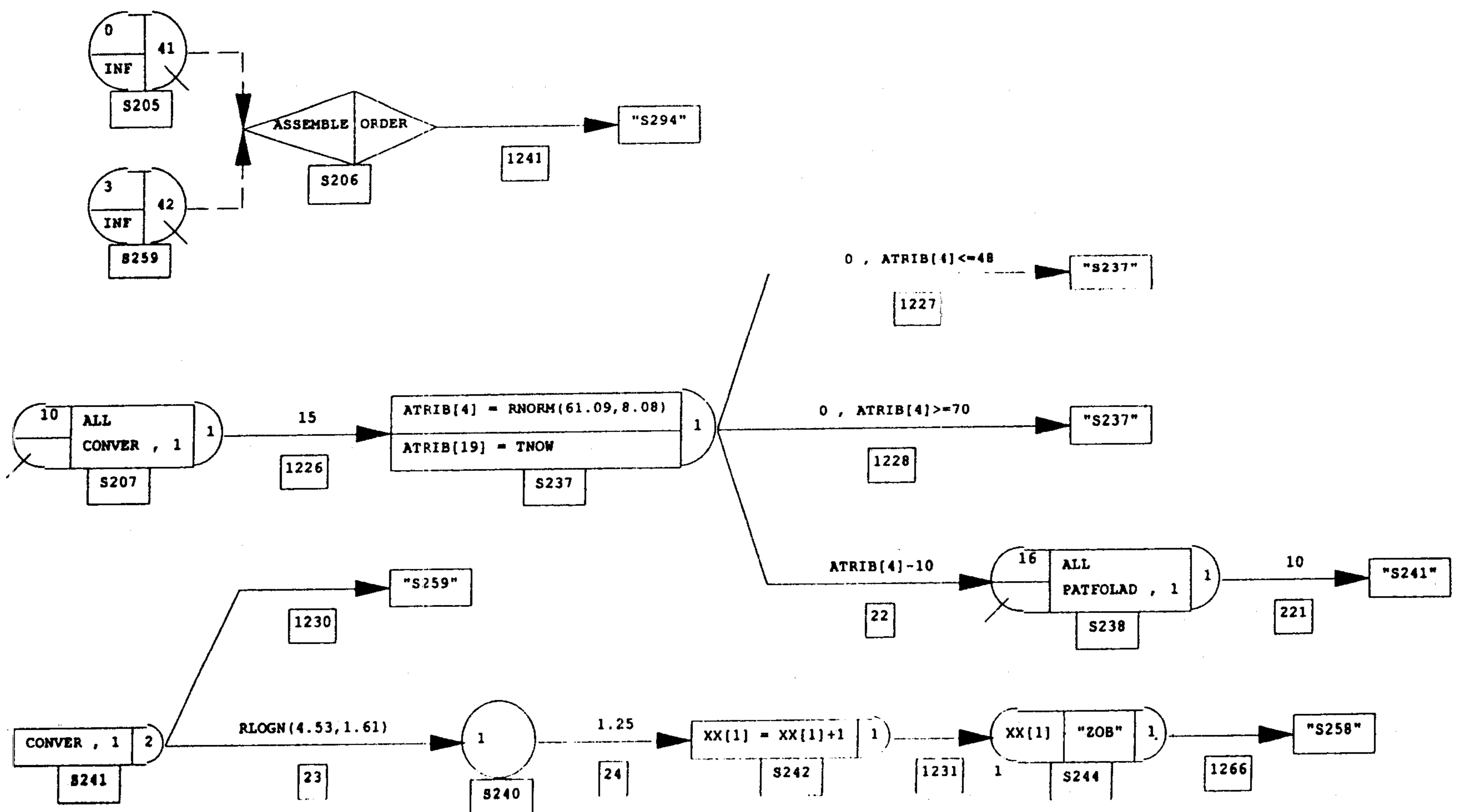
بعد از اتمام ریخته‌گری تاندیش ایستگاه ۳ توسط اسکیت ۱ یا ۲ به ایستگاه ۳ منتقل و درپوش آن برداشته می‌شود (بطور متوسط ۱۵



شبیه سازی بخش ریخته گری را با استفاده از زبان AWESIM شبیه سازی ۱۳ شبکه استفاده گردیده است. نشان می دهد. مجموعاً از تقریباً ۷۰۰ گره برای مدل سازی و

جدول ۳: فهرست شبکه های مدل شبیه سازی بخش ریخته گری.

ردیف	کد شبکه	شرح فرآیند موجود در شبکه
۱	Z۱	منابع تعریف شده در شبکه های سیستم ریخته گری
۲	Z۴	آماده کردن ذوب سفارش داده شده در فولادسازی
۳	Z۵۲	ایستگاه ۲ ریخته گری
۴	Z۵۳	ایستگاه ۳ ریخته گری
۵	Z۵۶	ایستگاه ۶ ریخته گری
۶	Z۵۷	ایستگاه ۷ ریخته گری
۷	Z۵۸	ایستگاه ۸ ریخته گری
۸	Z۷	تعمیر پاتیل های فولاد
۹	Z۷۳	تعمیر تاندیش های ایستگاه ۳
۱۰	Z۷۶	تعمیر تاندیش های ایستگاه ۶
۱۱	Z۷۷	تعمیر تاندیش های ایستگاه ۷
۱۲	Z۷۸	تعمیر تاندیش های ایستگاه ۸
۱۳	Z۷۲	تعمیرات و نگهداری جرثقیل های ۱۶ و اسکیت ۱ و ۲ و LF و ایستگاه های ۳، ۶، ۷ و ۸ ریخته گری



نمودار ۳: بخشی از شبکه Awesim آماده کردن ذوب (Z3).

## تصدیق و تعیین اعتبار مدل شبیه‌سازی

به خروجی در مدل نیز معتبر است. ثانیاً دلیل دیگر جهت انتخاب این معیار قابل اندازه‌گیری بودن آن در مدل و سیستم واقعی (ریخته‌گری) می‌باشد.

مدل شبیه‌سازی برای ۱۲ ماه و مطابق با برنامه تولید همان ماه ران شده است و خروجی‌های ۱۲ ماه ایستگاه‌های ریخته‌گری مدل با ۱۲ ماه سیستم واقعی (ریخته‌گری) با استفاده از آزمون  $t$  زوجی مورد مقایسه آماری قرار گرفته است. عبارت دیگر تفاوت‌های بین هر زوج از مشاهدات را بدست آورده و فرض می‌کنیم که این تفاوت‌ها متغیرها تصادفی مستقل، دارای توزیع نرمال با میانگین و انحراف معیار  $\mu_D$  و  $\sigma_D$  می‌باشند و آزمون فرض  $H_0 = \mu_D = 0$  است. جدول شماره (۴) نتایج آزمون  $t$  زوجی در رابطه با تعداد ذوب ایستگاه‌های ریخته‌گری مدل شبیه‌سازی و سیستم ریخته‌گری واقعی را با استفاده از نرم‌افزار Statgraph نشان می‌دهد. با استناد به نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که فرض صفر برای کلیه ایستگاه‌های ریخته‌گری قبول می‌شود و بنابراین با ۹۵ درصد اطمینان ادعا می‌کنیم که خروجی‌های مدل شبیه‌سازی با سیستم ریخته‌گری برابرند و بنابراین مدل شبیه‌سازی بیانگر سیستم ریخته‌گری می‌باشد.

باتوجه به آنکه هدف این تحقیق ساختن مدلی است که کلیه مشکلات و ویژگی‌های رفتاری سیستم ریخته‌گری را بصورت فراگیر شبیه‌سازی کند. مضافاً مدل بدست آمده بایستی دارای یک سطح اطمینان قابل قبول بدین معنی که نتایج و استنتاج‌های بدست آمده از آن باید صحیح و قابل تطبیق با سیستم ریخته‌گری باشد. لذا ساختار مدل با سیستم ریخته‌گری مقایسه و بعلاوه چند خروجی حاصل از مدل با خروجی‌های مشابه سیستم واقعی مقایسه می‌گردد. در مرحله اول ساختار مدل شبیه‌سازی کامپیوتری با سیستم واقعی مقایسه گردیده و مشخص گردیده است که مدل دارای کلیه خصوصیات و رفتارهای سیستم ریخته‌گری می‌باشد. بعلاوه ساختار مدل مورد تأیید کارشناسان و مدیران سیستم ریخته‌گری قرار گرفته است. در مرحله دوم تعداد ذوب تولید شده توسط هر ایستگاه بعنوان خروجی معتبر مورد مقایسه (بین مدل و سیستم) قرار گرفته است. علت انتخاب این خروجی یا معیار این است که ایستگاه‌های ریخته‌گری بعنوان نبض اصلی سیستم ریخته‌گری محسوب می‌شوند و در صورت تعیین اعتبار این خروجی‌ها می‌توان ادعا نمود که مکانیزم تبدیل ورودی

جدول ۴: خلاصه مقایسه آزمون  $t$  خروجی بین مدل شبیه‌سازی و سیستم ریخته‌گری.

معیار	تعداد مشاهدات	میانگین	انحراف معیار	سطح اطمینان	آماره $t$	نتیجه آزمون
۱- خروجی ایستگاه ۲ ریخته‌گری	۱۲	۰/۲۵	۰/۷۲	۹۵	۱۰۲	قبول $H_0$
۲- خروجی ایستگاه ۳ ریخته‌گری	۱۲	-۱	۴/۸۵	۹۵	-۷۱	قبول $H_0$
۳- خروجی ایستگاه ۶ ریخته‌گری	۱۲	۱/۵	۴/۷۶	۹۵	۱/۰۹	قبول $H_0$
۴- خروجی ایستگاه ۷ ریخته‌گری	۱۲	۰/۲۱	۵/۴۲	۹۵	۰/۱۳	قبول $H_0$
۵- خروجی ایستگاه ۸ ریخته‌گری	۱۲	-۲/۸۶	۶/۹۹	۹۵	-۱/۴۲	قبول $H_0$

## تحلیل نتایج و ارائه راهکارهای بهینه

آلترناتیو اول میزان تولید کوره بلند بلندها را دو برابر فرض می‌کند و بعلاوه، برنامه تولید ریخته‌گری با حداکثر ظرفیت (۶۰۰۰۰۰ تن در سال) برای هر یک از ایستگاه‌های ۳، ۶، ۷ و ۸ و صفر تن در سال برای ایستگاه ۲ بدلیل سیاست شرکت بر عدم استفاده از ایستگاه‌های روسی و قدیمی فرض شده است. آلترناتیو دوم ظرفیت ایستگاه ۲ را ۱۷۵۰ ذوب در سال فرض می‌کند و بقیه مشخصات آن مانند آلترناتیو اول است (متوسط وزن هر ذوب ۱۳۰

پس از تعیین اعتبار و تصدیق مدل، ابتدا وضعیت بکارگیری بخش ریخته‌گری بررسی شده است. برای این منظور شبیه‌سازی برای یکسال ران شده و میزان بکارگیری تجهیزات در جدول (۵) درج گردیده است. در این قسمت سعی شده است که با مطالعه چند آلترناتیو مختلف رفتار سیستم ریخته‌گری را تحت شرایط خاصی بررسی نمائیم.

جدول ۵: میزان بکارگیری تجهیزات بخش ریخته گری.

نام ایستگاه	درصد زمان بکارگیری	نام ایستگاه	درصد زمان بکارگیری
۱- ایستگاه ۳	۸۶/۷	۱۱- جرثقیل ۱۶	۱۳
۲- ایستگاه ۶	۸۶/۶	۱۲- فولادبر LF	۳
۳- ایستگاه ۷	۸۶/۶	۱۳- LF	۴/۲
۴- ایستگاه ۸	۸۶/۷	۱۴- تاندیش ایستگاه ۳	۳۱/۷
۵- پاتیل فولاد	۴۲/۴	۱۵- تاندیش ایستگاه ۶	۳۱/۸
۶- جرثقیل های ریخته گری	۱۰	۱۶- تاندیش ایستگاه ۷	۳۰/۶
۷- تارت ایستگاه ۳	۳۱/۳	۱۷- تاندیش ایستگاه ۸	۳۰/۷
۸- تارت ایستگاه ۶	۵۰/۴	۱۸- جرثقیل ۱۵	۱۲/۲
۹- تارت ایستگاه ۷	۳۹/۶	۱۹- جرثقیل ۱۲ و ۱۳	۲۳/۴
۱۰- تارت ایستگاه ۸	۴۰/۳		

جدول ۶: بررسی آلترناتیوهای بهبود دهنده بوسیله شبیه سازی.

شماره آلترناتیو	تعداد ذوب بدست آمده					
	ایستگاه ۲	ایستگاه ۳	ایستگاه ۶	ایستگاه ۷	ایستگاه ۸	مجموع
۱	۰	۴۵۹۵	۴۵۸۸	۴۵۹۶	۴۵۹۶	۱۸۳۷۵
۲	۱۵۹۵	۴۱۶۵	۴۱۵۳	۴۱۳۴	۴۱۷۱	۱۸۲۱۸
۳	۱۶۴۲	۴۲۷۱	۴۲۳۹	۴۲۹۲	۴۲۶۸	۱۸۷۱۲
۴	۱۶۶۵	۴۳۶۴	۴۳۰۳	۴۳۲۱	۴۳۳۱	۱۸۹۸۴
۵	۱۶۸۸	۴۴۰۲	۴۳۶۳	۴۴۳۱	۴۴۲۹	۱۹۳۱۳
۶	۱۷۰۹	۴۴۹۲	۴۴۵۷	۴۴۷۴	۴۴۸۴	۱۹۶۱۶

تن است). آلترناتیو سوم متوسط زمان عمر کنورتور را از متوسط ۶۰۰ ذوب به ۱۰۰۰ ذوب افزایش داده است و بقیه مشخصات آن مانند آلترناتیو دوم است. آلترناتیو چهارم مدت زمان عملیات کنورتور را برای هر ذوب ۵ دقیقه کاهش داده است و بقیه مشخصات آن مانند آلترناتیو دوم است. آلترناتیو پنجم مدت زمان عملیات برای هر ذوب را ۵ دقیقه کاهش داده است و مدت زمان عمر کنورتور را از متوسط ۶۰۰ ذوب به ۱۰۰۰ ذوب افزایش داده است و بقیه مشخصات آن مانند آلترناتیو دوم است. آلترناتیو ششم فرض کرده است که هر ۳۰ دقیقه یک لوکوموتیو همراه با ۳ پاتیل

حاوی ۷۰ تن چدن وارد فولادسازی می شود و بقیه مشخصات آن مانند آلترناتیو پنجم است (بغیر از ۲ برابر شدن میزان تولید کوره بلندها) جدول (۶). با یک برآورد ساده مشاهده می گردد که با اجرای آلترناتیو ششم میزان تولیدات بخش ریخته گری از وضعیت موجود ۱۶۱۴۰ به ۱۹۶۱۶ ذوب در سال تغییر می کند که معادل سودآوری تقریباً ۴۵۱۸۸۰ تن در سال می باشد (معادل بر میلیاردها تومان سودآوری اقتصادی در سال خواهد بود).

در این مقطع می توان از طراحی آزمایش برای مشخص نمودن عواملی که بیشترین اثر را بر میزان تولید دارد استفاده

جدول ۷: مشخصات عوامل آزمون ANOVA فاکتوریال<sup>۳۴</sup>.

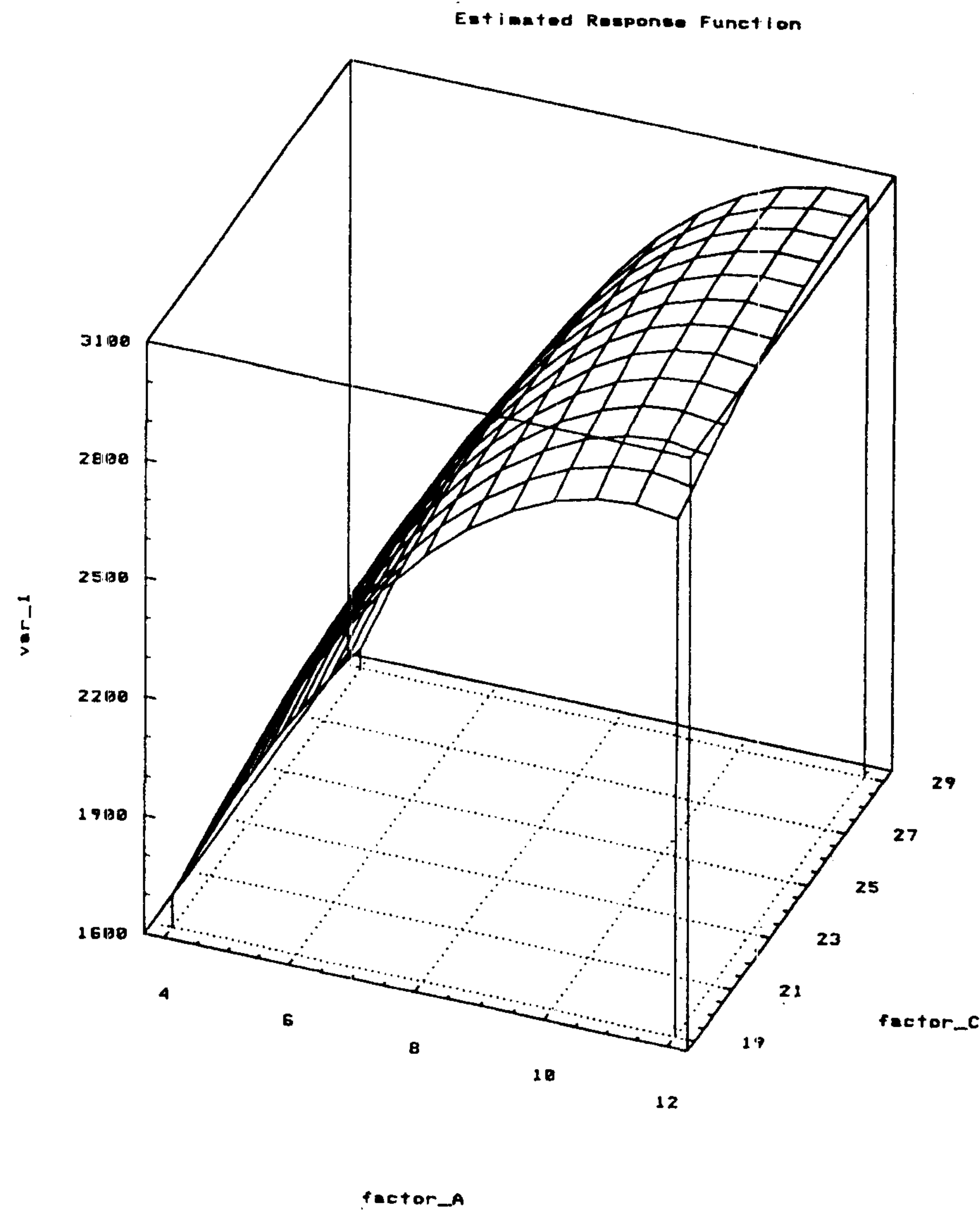
عامل	اثر تصادفی/ثابت	حدپائین	حدبالا	نقطه مرکزی	واحد تغییرات	تعدادسطوح
A	ثابت	۴	۱۲	۸	۴	۳
B	ثابت	۲	۴	۳	۱	۳
C	ثابت	۱۹	۲۹	۲۴	۵	۳
D	ثابت	۳	۷	۵	۳	۲

جدول ۸: تحلیل واریانس مدل فاکتوریال کامل<sup>۳۴</sup>.

ارزش P	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	اثر
0	1045.03	23642673	1	23642673.4	A
.973	.00	25	1	25.4	B
.116	2.52	57103	1	57102.5	C
0	736.88	16671111	1	16671111.4	D
.977	.00	19	1	18.8	AB
.056	3.75	84875	1	84875.1	AC
0	442.26	10005623	1	10005623.4	AD
.991	.00	3	1	2.8	BC
.987	.00	5	1	5.4	BD
.059	3.66	82848	1	82848.0	CD
0	123.75	2799716	1	2799716.0	AA
.543	.38	8699	1	8699.2	BB
.171	1.91	43180	1	43180.2	CC
0	47.90	1083691	1	1083690.7	DD
		22624	70	1583674.3	خطا
			84	56591381.2	مجموع

بعلاوه، با بکارگیری متدلوژی سطح پاسخ<sup>۱</sup> متغیر سطح پاسخ را بهینه خواهیم کرد. با توجه به آنکه نتایج حاصل از ۸۵ ران (آزمایش) شبیه‌سازی از حوصله این مقاله خارج است از درج آن خوداری می‌کنیم. ضمناً آزمون ترسیم احتمالی نرمال<sup>۲</sup> عنصر خطا، نرمال بودن آن را برای این آزمایش تائید می‌کند. نتایج آزمون فاکتوریال کامل<sup>۳۴</sup> با سطح اطمینان ۹۵٪ با استفاده از نرم‌افزار Statgraph در جدول (۸) نشان داده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود عوامل A،

نمود[۱۴]. بدین منظور پارامترهائی که امکان تغییر آنها در سیستم واقعی وجود دارد را تعریف می‌کنیم که عبارتند از: عامل A (تعداد ایستگاههای ریخته‌گری)، عامل B (تعداد LF)، عامل C (تعداد پاتیل فولاد) و عامل D (تعداد کنورتور) مشخصات عوامل آزمایش در جدول (۷) نشان داده شده است. برای تخمین و بررسی اثرات هر یک از عوامل و اثرات متقابل آنها، یک آزمایش فاکتوریال کامل<sup>۳۴</sup> همراه با پنج نقطه مرکزی طراحی و هر آزمایش برای یک ماه ران می‌شود.



نمودار ۴: اثر فاکتور A (ایستگاههای ریخته‌گری) و C (پاتیل فولاد) بر یکدیگر در افزایش متغیر پاسخ.

تیزترین شیب (گرادیان) با در نظر گرفتن موثرترین عامل (A) اثر تغییرات سایر عوامل (در جهت تیزترین شیب) و مقدار متغیر پاسخ (میزان تولید) را دنبال کنیم. در واقع، می‌توانیم به ازای افزایش هر ایستگاه ریخته‌گری میزان افزایش تولید و ظرفیت سایر تجهیزات تولید بخش ریخته‌گری را بدست آوریم و به نقطه بهینه دست یابیم. برای مثال در صورتیکه هدف مدیریت افزایش حدوداً ۱۰۰ درصد میزان تولید باشد، با ۹ دستگاه ریخته‌گری، ۲۴ پاتیل فولاد و ۶ کنورتور قادر خواهیم بود براحتی به آن دست یابیم.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق نمونه عملی یک آزمایش شبیه‌سازی بصورت فراگیر در یکی از معتبرترین و پیچیده‌ترین صنایع ایران پیاده گردیده است. بعلاوه راهکارهای بهینه‌سازی سیستم که صدها میلیارد تومان فوائد اقتصادی در مقابل هزینه ناچیز آن ارائه گردیده است. در این راستا از محیط شبیه‌سازی AWESIM استفاده گردیده است که براحتی اطلاعات ورودی و خروجی را از

D, C, AD, CD, AC, AA و DD بر متغیر پاسخ اثر قابل توجه دارند. شایان ذکر است که عامل A (تعداد ایستگاههای ریخته‌گری بیشترین اثر را بر میزان تولید دارد و عامل B (تعداد LF) اثر قابل توجهی بر میزان تولید ندارد. بعلاوه، عامل C (تعداد پاتیل فولاد) و عامل A (تعداد ایستگاههای ریخته‌گری) اثر یکدیگر را در افزایش متغیر پاسخ تشدید می‌کنند و لکن عامل A با سرعت بیشتری متغیر پاسخ را افزایش می‌دهد (نمودار ۴).

به دلیل معنی‌دار نبودن اثرات عوامل B (تعداد LF) و اثرات متقابل AB, BC, BD و BB بر متغیر پاسخ از این اثرات صرف‌نظر شده است. مضافاً به دلیل معنی‌دار بودن اثرات عوامل A, C و D و اثرات متقابل آنها مدل رگرسیون خطی یک تقریب درست برای روش RSM نمی‌باشد و مدل رگرسیون درجه و بشرح ذیل توسط نرم‌افزار STATGRAF تخمین زده می‌شود:

$$Y = -578.26 + 159.88A + 56.85C + 231.46D + 2.43AC + 65.9AD + 4.78CD - 23.89A^2 - 1.95C^2 - 59.60D^2$$

پس از تخمین معادله رگرسیون، قادر خواهیم بود در جهت بردار

بوسیله نتایج شبیه‌سازی یا تحلیل ANOVA یا هر دو بدست می‌آید و این مقاله نحوه انجام آنها را ارائه داده است.

۳- مدل نه تنها مورد تعیین اعتبار و تصدیق علمی قرار گرفته است بلکه بوسیله مدیران و کارشناسان بخش مزبور تأیید شده است.

۴- گذشته، حال و آینده سیستم ریخته‌گری می‌تواند براحتی تحلیل گردد. بعلاوه، از مدل شبیه‌سازی می‌توان برای بررسی رفتار سیستم در صورت افزایش ظرفیت یا توسعه آن در آینده استفاده نمود. این امر میلیاردها تومان فوائد اقتصادی در مقابل هر نیمه ناچیز استفاده از مدل مزبور را خواهد داشت.

۵- اثر عوامل مختلف مانند افزایش تقاضای تولید از بخش نورد براحتی می‌تواند تحلیل گردد. بعلاوه اثر متقابل یا تعامل دستگاهها و تجهیزات بر یکدیگر قابل ارزیابی است. نهایتاً، مدل شبیه‌سازی می‌تواند جواب کلیه سوالات مدیریت در رابطه با افزایش تولید، جایگزینی یا اضافه کردن دستگاهها و اثرات آن به سیستم ورودی یا خروجی را بدهد.

نرم‌افزارهای M.S. Office دریافت یا انتقال می‌نماید. مدل شبیه‌سازی نه تنها مورد تصدیق و تعیین اعتبار قرار گرفته است بلکه مورد تأیید مدیران و کارشناسان این واحد بزرگ ریخته‌گری قرار گرفته است و در مرحله اجرا قرار دارد. بعلاوه با توجه به آنکه مدل شبیه‌سازی از ۱۳ شبکه مجزا و مرتبط تشکیل شده است و نحوه استفاده از آن بسیار ساده و انعطاف پذیر است. اینگونه ساختار بعلاوه بر طراحی آزمایش و متدلوژی سطح پاسخ (RSM) یک پایگاه قواعد ایجاد کرده است که می‌تواند براحتی جواب کلیه اگر A سپس B را بدهد و نقاط بهینه را براساس شرایط مختلف دیگر مشخص سازد. نکات بارز و انحصاری مدل شبیه‌سازی این مطالعه بشرح ذیل است:

- ۱- مدلسازی بصورت فراگیر انجام شده است و کلیه جزئیات و عملیات تولید و نگهداری و تعمیرات و ضایعات را در بر می‌گیرد.
- ۲- مدل شبیه‌سازی جوابهای بهینه را در رابطه با فرآیند تولید و موجودی بوسیله یک مکانیزم پایگاه قواعد بدست می‌دهد. این امر

## مراجع

- ۱ - بنکس، ج. و کارسن، ج. "شبیه‌سازی سیستم‌های گسسته - پیشامد." ترجمه دکتر هاشم محلوجی، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۷۶).
- ۲ - شانون، ر. "علم و هنر شبیه‌سازی سیستم‌ها." ترجمه علی اکبر عرب مازار، مرکز نشر دانشگاهی، (۱۳۷۱).
- 3 - Stover, W. D. and Mabrouk, K. (1991). "Scheduling Steelmaking With Simulation." *Manufacturing Systems*, Vol.9, No. 11, PP. 58-59,61.
- 4 - Naganuma, Y., Takahashi, H., Ogai, H., Tanka, K. and Masuda, S. (1987). "Some steel making process simulators and their applications H.; conference: automation in mining." *Mineral and Metal Processing 1986*, Tokyo, Japan, PP. 24-29 Aug. 1986, Pergamon Press, Headington Hill Hall, Oxford OX3 OBW, UK.
- 5 - Pegden, C. D. (1993). "Simulation in the steel industry: past, Present and future, Conference: CPC-93. Computerized Production Control in Steel Plant, Seoul." South Korea, 1-5 Nov. 1993, Korean Institute of Metals and Materials, Rm. 301, Keoyang Bldg. 51-8, Susong-Dong, Chongro-Ku, Seoul, 110, South Korea.
- 6 - Shevchenko, A. D., Bulanov, Yu. N. and Medickov, V. Ya. (1989). "Evaluation of the operation of an electric steelmaking shop with the aid of simulation modeling." *Byelorussian Metallurgical Works, Siberian Metallurgical Institute, STAL*, Vol. 6, PP. 89-91.
- 7 - Todd, P. N. (1984). "Computer simulation for steelplant design and planing." *Conference: Journees*

- Siderurgiques (Steelmaking Meeting ATS 1984*, Paris, France, 5-6 Dec. 1984, Association Technique de la Siderurgie Francaise, 5 bis rue de Madrid, Paris, France.
- 8 - Yu, Z. and Yang, S. (1996). "Simulation training system for Steelmaking of LD convertor." *Journal of University of Science and Technology Beijing*, Vol. 18, No. 2, PP. 197-200.
- 9 - Currey, D. (1995). "Opimization of casting Speed for higher productivity on Dofasco's No.1 continuous caster." *Steelmaking Conference Proceedings*, Vol. 78, Nashville, Tennessee, USA, 2-5 Apr. 1995, Iron and Steel Society/AIME, 410 Commonwealth Dr.P.O.Box 411, Warrendale, PA 15086-7512, USA.
- 10 - Chang, K. S., Lee, I. B., Yun, S. Y. and Jung, H. C. (1991). "Dynamic modeling of LD convertor processes." *Research Institute of Industrial Science and Technology Technical Research Report 5*, No. 2, PP. 384-399, Korean.
- 11 - Hintikka, S., Konttinen, J., Leiviska. and Tolvanen, M. (1992). "Optimization of molten steel flow in continuous casting mold." *Steelmaking Conference Proceedings*, Vol.75, Toronto, Ontario, Canada 5-8 Iron and Steel Society, Inc., 410 Commonwealth Dr. Warrendale, PP. 887-891.
- 12 - Pritsker, et.al. (1989). *Network Models for Decision Support*. New Jersey: Prentice Hall.
- 13 - Pritsker, et.al. (1997). *Simulation with Visual SLAM and Awesim*. New York: John Wiley.
- 14 - Montgomery Douglas, C. (1984). *Design and Analysis of Experiments: Second Edition*. John Wiley & Sons.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Response Surface Methodology

2 - Normal Probability Plot