

بررسی اثر ضخامت لایه دیرگداز پاتیل حمل فولاد شرکت فولاد مبارکه بر افت دما در فاصله بارگیری تا بارریزی با استفاده از روش المان‌های محدود

احسان شاه محمدی^۱، فرهاد گلستانی فرد^۱، اردشیر نظامی نیا^۲، محمد علی توحیدی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ^۲ مجتمع فولاد مبارکه

e.shahmohamadi66@gmail.com

چکیده: هدف این پژوهش بررسی اثر ضخامت لایه دیرگداز پاتیل حمل فولاد بر افت دما در فاصله بارگیری تا بارریزی با استفاده از روش المان‌های محدود می‌باشد. در این طرح با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری و استفاده از نرم‌افزار Ansys اثر تغییر ضخامت لایه دیرگداز بر افت دما بررسی شد. جنس دیرگدازها از انواع AMC، MgO-C و مونولیتیکی بوده که ضخامت و جنس لایه کاری از ۵۰٪ تا ۱۵۰٪ مقدار واقعی ابعادی خود تغییر داده شد. با استفاده از نرم افزار پروفیل دمایی مشخص و افت دمایی مذاب و سایر لایه‌های درونی پاتیل وابسته به ضخامت دیرگداز در طول گردش پاتیل تعیین گردید. نتایج حاصله با مقادیر واقعی مقایسه شده و صحت آن‌ها با اختلاف کم از مقادیر واقعی تایید شده است.

کلید واژه: شبیه سازی دیرگداز، انتقال حرارت پاتیل، پروفیل حرارتی، المان محدود، طراحی دیرگداز، پاتیل فولادسازی

۱- مقدمه

اهمیت دیرگداز در فولادسازی ثانویه از آن جهت است که انجام فرآیندها نیاز به زمان داشته و بدیهی است توانایی دیرگداز برای نگهداری مذاب در پاتیل برای زمان طولانی مستلزم انتخاب صحیح دیرگدازها با پایداری ترمومکانیکی و مقاومت به خوردگی بیشتر است. لازم به ذکر است که مجموعه این عوامل باعث شده است که متالورژی ثانویه، پر مصرف‌ترین بخش فولادسازی از لحاظ مصرف دیرگداز باشد [۱]. از آنجایی که پوشش لبه پاتیل (دهانه) اغلب در معرض تنش‌های ترمومکانیکی قرار می‌گیرد، معمولاً از جرم‌های آلومینا بالا در آن استفاده می‌شود. خط سرباره به دلیل تماس مداوم با سرباره خورنده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به شرایط سرباره در فولادسازی، لازم است که نسوزهای مصرفی در این ناحیه از نوع بازی انتخاب شوند [۲]. به طور کلی نسوزهایی که برای این ناحیه مورد استفاده قرار می‌گیرند بر پایه منیزیا بوده که از آن جمله می‌توان به آجرهای منیزیت-کربنی و آلومینا بالا اشاره کرد. از این میان دو مورد اول اغلب در کوره‌های پاتیلی و آجرهای آلومینا بالا در پاتیل‌های معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ناحیه دیواره‌های کناری از زیرخط سرباره شروع شده و تا ناحیه پاشنه ادامه می‌یابد. آجرهای این ناحیه اغلب از جنس منیزیت-کربنی هستند، نسوزهای این نواحی می‌بایست علاوه بر مقاومت به خوردگی خوب، مقاومت به سایش بالایی هم داشته باشند. آجرهایی که در دیواره مورد استفاده قرار می‌گیرند اغلب از جنس منیزیت-کربنی می‌باشند. هرچند که از آجرهای منیزیتی باند رزینی یا باند مستقیم و آجرهای آلومینایی نیز استفاده می‌گردد [۲].

در ناحیه بین خط سربراره و دیواره کناری ناحیه‌ای به نام ناحیه واسط تعریف می‌شود. در ناحیه واسط به علت تفاوت بین ضریب انبساط حرارتی آجرهای منیزیت-کربنی خط سربراره و نسوزهای دیواره کناری و همچنین کم کردن کربن دهی نسوزهای خط سربراره به مذاب، استفاده از آجرهای آلومینا-منیزیا-کربن^۱ رواج یافته است. این آجرها در مقابل خوردگی و نفوذ سربراره و همچنین فرسایش و نفوذ ناشی از جریان مذاب و نیز اکسیداسیون گرافیت مقاومت داشته، به علاوه با تشکیل اسپینل درجا سبب بهبود مقاومت به خوردگی در برابر سربراره و مقاومت به شوک حرارتی می‌شود. کف پاتیل معمولاً از آجرهای آلومینا-منیزیا-کربن، منیزیت-کربنی و یا آجرهای آلومینا بالا استفاده می‌شود. همچنین معمولاً در اطراف کف از جرم‌های کوبیدنی منیزیت-کرومیتی باند شیمیایی نیز استفاده می‌شود[۲].

پیشرفت در سرعت محاسبات و حافظه کامپیوترها منجر به توسعه قابل توجهی در کاربرد شبیه‌سازی کامپیوتری در صنعت شده است. این امر موجب شده است که بتوان طراحی‌های پیچیده را در صنعت دیرگداز اجرا کرد. با توجه به تاثیر مستقیم مدت زمان لازم برای نوچینی دیرگدازها بر راندمان تولید کارخانه فولادسازی بهینه‌یابی در طراحی دیرگداز توسط نرم افزارهای جدید بسیار مهم خواهد بود.

مشخصات پاتیل شبیه سازی شده

قطر دهانه	۴۱۰۸ mm
-----------	---------

در دهه‌های اخیر، روش المان‌های محدود به عنوان یک ابزار مهم مهندسی در میان تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان دیرگداز تبدیل شده است. زیرا این روش به عنوان یک تکنیک موثر برای طراحی محصول و بهینه‌سازی فرآیند به کار می‌رود. این آنالیز یک روش عددی می‌باشد که می‌توان آن را برای محاسبه توزیع دما، تغییر شکل و تنش در تمام ساختارها به کار برد[۳]. در تحقیق حاضر توسعه و تدوین یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی رفتار حرارتی و پروفیل دمایی جداره دیرگداز پاتیل صورت گرفته است. این مدل می‌تواند در پیش‌بینی مناطق بحرانی از لحاظ شوک حرارتی و سایر جنبه‌های مهم در طراحی کمک شایانی بنماید. در واقع این پیش‌بینی‌ها می‌تواند به عنوان راهنمایی در طراحی و توسعه دیرگدازهای پاتیلی موثر و برای مقاصد خاص به کار برده شوند[۴]. اما تاکید می‌شود که پیش‌بینی پروفیل دمایی تنها نتایج تخمینی را تامین می‌کند. به همین دلیل مهم است که چنین پیش‌بینی‌هایی به وسیله داده‌های آزمایشگاهی تایید شوند. از این رو با استفاده از ترموکوپل موجود در محیط واقعی اندازه‌گیری‌هایی از دمای مذاب در شرایط نزدیک به مدل سازی انجام شده است[۵]. دو فاکتور دمای دیواره فولادی پاتیل و حجم مفید پاتیل-که متاثر از ضخامت دیرگداز است- دو مسئله بحرانی است که بایستی در طراحی دیرگداز پاتیل لحاظ شود. هدف این پروژه ارائه مدل ریاضی است که بتوان با حل آن و در دست داشتن دو شرط مرزی محاسبات هزینه و محدودیت‌های تکنیکی، ضخامت بهینه را در پاتیل مربوطه تعیین نمود.

۲- روش پژوهش

۲-۱- مدلسازی

با توجه به شکل اصلی نمونه و نقشه‌های دریافتی ابعاد دقیق مورد نیاز برای مدلسازی از پاتیل بدست آمد. شکل ۱ نقشه‌ی پاتیل

^۱ AMC

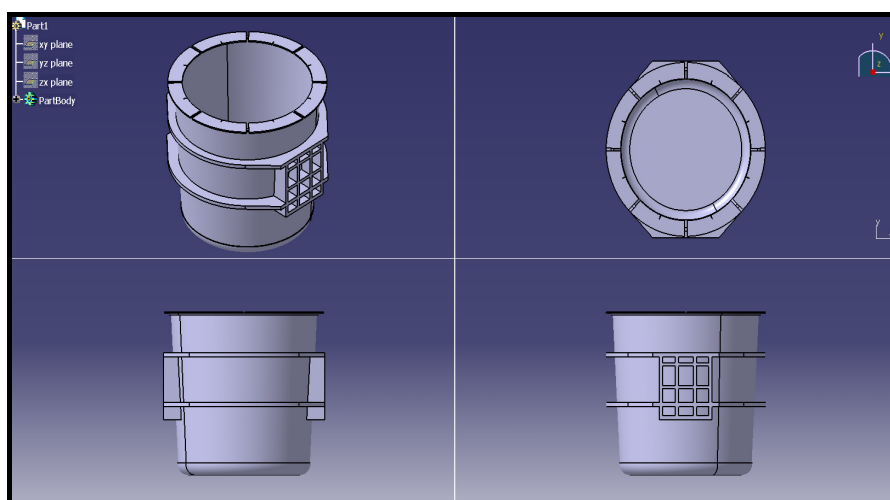
۲۰۰ تنی فولاد مبارکه است که مدلسازی شده و مورد تحلیل حرارتی قرار گرفت.

ظرفیت	حجم	ارتفاع	قطر کف
۲۰۰ تن	۱۸۵m ³	۴۱۹۵mm	۳۳۶۲mm



شکل ۱

برای ترسیم شکل پاتیل از نرم افزار catia استفاده شد. شکل ۲ نمای سه بعدی پاتیل در نرم افزار catia ، مطابق با اندازه های اخذ شده می باشد. مدل پس از طراحی به محیط Ansys انتقال داده شد.



شکل ۲- نمای سه بعدی از مدل پاتیل در محیط Catia

بعد از اینکه لایه‌ی دیرگداز وارد طراحی مدل شد، خواص حرارتی لایه‌ها نیز بایستی وارد مدلسازی شود. اطلاعات حرارتی آجرها از شرکت تولیدکننده‌ی آجرها اخذ شد و بعضی خواص موردنیاز نیز که در شرکت تولید کنندگی آجر ارائه نشده بود از منابع اخذ شد. برای مثال مشخصات و ترکیب شیمیایی مربوط به دیرگدازهای ناحیه دیواره پاتیل در جدول ۱ و ۲ قابل مشاهده است.

داده‌های خاص مربوط به هر ناحیه پاتیل به لایه‌های مدل سه بعدی طراحی شده اعمال شد.

جدول ۱- مشخصات آجرهای دیرگداز ناحیه دیواره پاتیل جهت استفاده در شبیه سازی

جنس لایه			خواص حرارتی
AMC	Monolithic	مذاب	
۳۹۰۰	۲۷۰۰	۷۰۰۰	دانسیتته (kg/m ³)
۳۱۲۰	۲۰۸۰	۴۶۹	ظرفیت حرارتی (j/kg°C)
۴	۶	۵۲	هدایت حرارتی (W/m.°k)

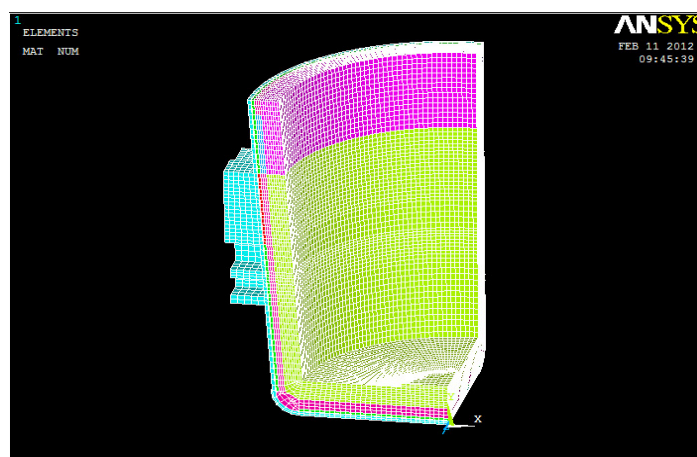
جدول ۲- ترکیب شیمیایی آجرهای دیرگداز ناحیه دیواره پاتیل

ترکیب شیمیایی	محل کاربرد	نام دیرگداز
85%Al ₂ O ₃ – 10%SiO ₂ – 1.8%CaO – 1.1%Fe ₂ O ₃ – 0.7% TiO ₂	به عنوان لایه ثابت در کل بدنه پاتیل	جرم منولیتیک Low cement Alumina castable
78%Al ₂ O ₃ – 10%MgO – 7%C – 1.5%SiO ₂ – 1%TiO ₂ – 0.6%Fe ₂ O ₃ – 0.2% CaO	لایه کاری در دیواره در حال تماس با مذاب	AMC 7- (Parsilumag 7)

۲-۲- شبیه سازی

۲-۲-۱- تعیین مش بندی و ابعاد تحلیلی مناسب

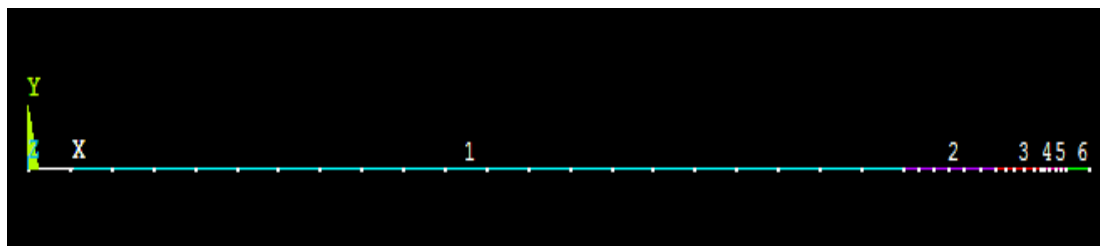
از آنجایی که شکل پاتیل دارای تقارن بود یک چهارم از پاتیل مدلسازی شد. در مرحله مش بندی برای امتحان مش بندی ارزیابی داده‌ها از ۴۰۰۰۰ گره آغاز شد با افزایش تعداد گره‌ها از ۷۰۰۰۰ گره نتایج تغییر چندانی نداشت که برای اطمینان بیشتر ۷۸۰۰۰ گره برای مدلسازی انتخاب شد. (شکل ۳)



شکل ۳- نمای سه بعدی مش بندی آجرچینی

از آنجایی که خود مدل سه بعدی نیز دارای تقارن بود پاتیل به صورت یک بعدی نیز شبیه‌سازی شد که این مدل برای پنج ناحیه‌ی کف، دستک قسمت بالایی وسط و انتهایی بدنه پاتیل در نظر گرفته شده است، نزدیکی نتایج بدست آمده از مدل سه

بعدی و مدل یک بعدی مدل یک بعدی را قابل اطمینان تر ساخت و از آنجایی که سرعت تحلیل و اعمال تغییرات در ابعاد و جنس لایه‌ها در مدل یک بعدی سریع‌تر می‌بود، برای ادامه کار مدل یک بعدی انتخاب شد. (شکل ۴)



شکل ۴- نمای یک بعدی مشبندی آجرچینی و مذاب. شماره (۱) مذاب (۲) آجر آلومینا منیزیا گرافیتی^۱ (۳) جرم مونولیتیکی (۴) پوشش سرامیکی^۲ (۵) فولاد (۶) هوا

در مورد تعداد گره‌های مدل‌های یک بعدی نیز تعداد گره‌ها از ۲۴ گره برای حل مسئله آغاز شد با افزایش تعداد گره‌ها به ۳۰ گره اختلاف جواب‌ها با افزایش تعداد گره ناچیز شد و جواب‌ها همگرا شدند. بنابراین برای اطمینان بیشتر تعداد ۴۰ گره - ۱۰ گره بیشتر از ۳۰ گره برای اطمینان بیشتر - تعداد مناسبی برای حل مسئله انتخاب شد. دقیقاً همین مراحل برای تعیین بازه‌های زمانی مورد تحلیل^۳ نیز اعمال شده است. در جدول ۳ و ۴ روند کاهش درصد خطا برای انتخاب تعداد گره و بازه زمانی مناسب مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است برای محاسبه همگرایی جواب‌ها، ابتدا یک مقدار اولیه در نظر گرفته می‌شود سپس با افزایش تعداد اولیه و حل معادله تغییر مقدار جواب نسبت به حالت قبلی به عنوان درصد خطا تعیین می‌شود هرچه خطا کمتر شود مقدار انتخاب شده مناسب‌تر است.

جدول ۳- تعیین تعداد گره مناسب

تعداد گره	تعداد المان	نتیجه افت دمایی بر حسب درجه سانتی گراد	درصد خطا
مقدار اولیه ۲۴	۲۱	۳۴/۶۵۲	۰
۲۵	۲۲	۳۵/۴۳۵	۲/۲۶
۲۶	۲۳	۳۵/۹۳۱	۱/۶
۲۷	۲۴	۳۶/۴۳۲	۱/۳۹
۲۸	۲۵	۳۶/۵۵۱	۰/۳
۲۹	۲۶	۳۶/۵۵۵	۰/۰۱
۳۰	۲۷	۳۶/۵۵۷	۰/۰۰۸
۴۰	۳۷	۳۶/۵۵۷۱۴	۰/۰۰۰۳۸

¹ AMC

² Ceramic blanket

³ Time steps

جدول ۴- تعیین بازه زمانی تحلیل مناسب

زمان time step	افت حرارتی بر حسب دما	درصد خطا
مقدار اولیه ۲۵	۳۶/۱	۰
۳۰	۳۶/۳۲	۰/۶۱
۳۵	۳۶/۴۶	۰/۳۹
۴۰	۳۶/۵۱	۰/۱۳۷
۴۵	۳۶/۵۵۱	۰/۱۳
۶۰	۳۶/۵۵۷۱۴	۰/۰۱۶

۲-۲-۲- اعمال گام‌های زمانی پروسه پاتیل به مدل تحلیلی

بر اساس اطلاعات دریافت شده از نحوه گردش پاتیل زمان و دماهای مراحل مختلف گردش پاتیل به مدل مورد نظر اعمال شد (جدول ۵) و بر همین اساس ادامه عملیات تحلیلی توسط نرم افزار Ansys صورت گرفت. طی این عملیات تحلیلی، دماهای اجزای مختلف پاتیل شامل مذاب و سایر لایه‌های دیرگداز دیواره مرکب و جداره فلزی پاتیل اعمال شد و در بازه‌های زمانی مختلف چرخش پاتیل انتقال حرارت در جداره‌ها محاسبه و دمای مذاب و لایه‌های دیرگداز ثبت شد.

جدول ۵- زمان‌بندی‌های اعمال شده در مدل

گردش پاتیل	زمان آغاز ثانیه	زمان پایان ثانیه	طول زمان ثانیه	تعداد substep	نوع بارگذاری	دمای اعمالی °C
پیش گرم	۰	۱۸۰۰۰	۱۸۰۰۰	۳۰۰	خطی	۱۱۰۰
انتقال به بارگیری	۱۸۰۰۰	۲۰۷۰۰	۲۷۰۰	۴۵	خطی	سرد شدن
بارگیری	۲۰۷۰۰	۲۱۰۰۰	۳۰۰	۵	خطی	۱۶۲۵
انتقال به LF	۲۱۰۰۰	۲۵۸۰۰	۴۸۰۰	۸۰	خطی	سرد شدن
LF	۲۵۸۰۰	۲۸۸۰۰	۳۰۰۰	۵۰	خطی	۱۵۹۰
انتقال به بارریزی	۲۸۸۰۰	۳۰۰۰۰	۱۲۰۰	۲۰	خطی	سرد شدن

۲-۳- آزمون صحت سنجی

در نهایت برای اطمینان از صحت داده‌ها آزمایشات تعیین دما در مرحله نهایی گردش پاتیل با استفاده از ترموکوپل صورت گرفت. در این مرحله با استفاده از ترموکوپل دمای مذاب ثبت شد تا با نتایج حاصل از شبیه سازی کامپیوتری مقایسه شود.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا نتایج حاصل از شبیه سازی که شامل پروفیل دمایی در سه ناحیه دیواره، دستک و کف می‌باشد، نمایش داده شده است. در قسمت بعد با اعمال تغییرات در عامل ضخامت دیرگداز تاثیر این عوامل روی افت دما بررسی شده است. اثر

این عوامل در نمودارهایی نشان داده شده که بیانگر تغییرات دمایی نواحی مختلف پاتیل با تغییر عوامل مذکور می‌باشد. اثر این عوامل به صورت معادلات ریاضی نیز بیان شده که بیانگر رفتار سامانه در مقابل عامل متغیر می‌باشد. در قسمت آخر نیز عملیات اعتبار سنجی با مقایسه‌ی دماهای بدست آمده از نمونه‌ی واقعی با نتایج حاصل از شبیه سازی، ارائه شده است.

۴- فرضیات در نظر گرفته شده

در مدلسازی انجام شده از آنجایی که وارد کردن تلاطم موجود در مذاب، تخلیه الکتریکی و دمش گاز خنثی نیازمند اطلاعات و داده‌های اولیه زیادی بوده که امکان بدست آوردن آنها نبوده، از این شرایط صرف نظر شده و اثر این عوامل به صورت دمایی نهایی مذاب و سایر لایه‌ها در انتهای مرحله‌ی متالورژی ثانویه در شرایط مرزی مدلسازی، اعمال شده است [۷].
به دلیل اهمیت زیاد مرحله‌ی انتقال به بارریزی برای مجتمع و بحرانی‌تر بودن این مرحله این مرحله مورد توجه بیشتر قرار گرفته و اثر متغیرها در این مرحله در نظر گرفته شده است [۸]. همچنین از آنجایی که از لحاظ ابعادی نازک‌ترین منطقه دیواره می‌باشد بعد از شبیه سازی ابعاد واقعی در ۵ ناحیه از پاتیل، اثر عوامل زمان ضخامت و جنس فقط در دیواره در نظر گرفته شده است.

۵- شرایط مرزی

از آنجایی که مدل متقارن بوده و یک بعدی در نظر گرفته شده است و پاتیل به صورت در بسته در ارتفاع از زمین قرار دارد شرایط مرزی در ۵ قسمت از ابعاد پاتیل، تنها به حالت هدایت حرارتی از طریق سیال اطراف جداره خارجی اعمال شده است و از جهات دیگر انتقال حرارتی وجود ندارد. دماهای اولیه نیز روی المان‌ها با جنس‌های مختلف اعمال شده و نهایتاً شرایط مرزی در نظر گرفته شده به صورت زیر می‌باشد:

$$kA \frac{d^2 q}{dx^2} = 0 \quad x = 0$$

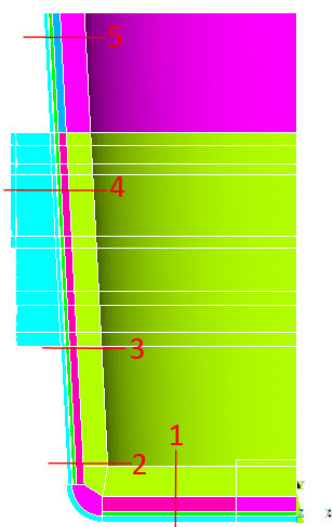
$$-kA \frac{d^2 q}{dx^2} = hA(q_b - q_f) \quad x = H$$

همچنین در حل وابسته به زمان از روش صریح^۱ استفاده شده و مقادیر $\delta = \alpha = 0$ در نظر گرفته شده است [۹].

۶- نتایج حاصل از شبیه‌سازی یک بعدی

۵ ناحیه از پاتیل که در مدل یک بعدی شبیه سازی شده است مطابق شکل (۴-۱) می‌باشد. در واقع اعداد ۱ تا ۵ روی مدل سه بعدی بیانگر مناطقی است که در مدل یک بعدی اعمال شده است.

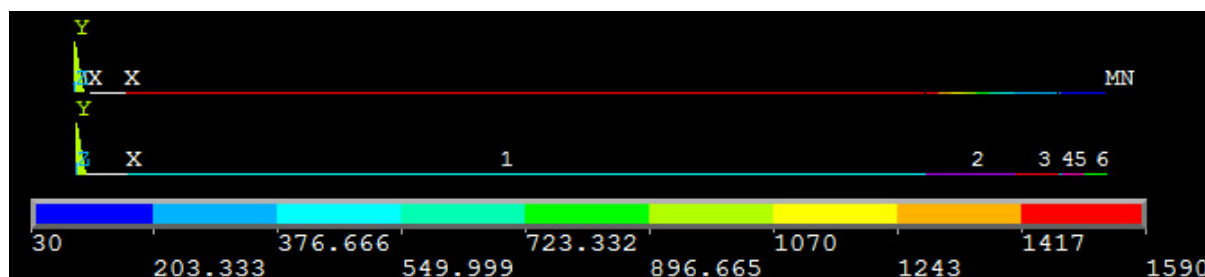
^۱ Explicit



شکل ۵- مناطق شبیه سازی شده در مدل یک بعدی (۱ کف (۲ انتهای دیواره (۳ ناحیه میانی دیواره (۴ دستک (۵ دهانه پاتیل

۷- نتایج تحلیل پاتیل

در شکل ۶ قسمتی از پاتیل که در شکل ۵ با شماره ۵ نشان داده شده، تحلیل شده است.



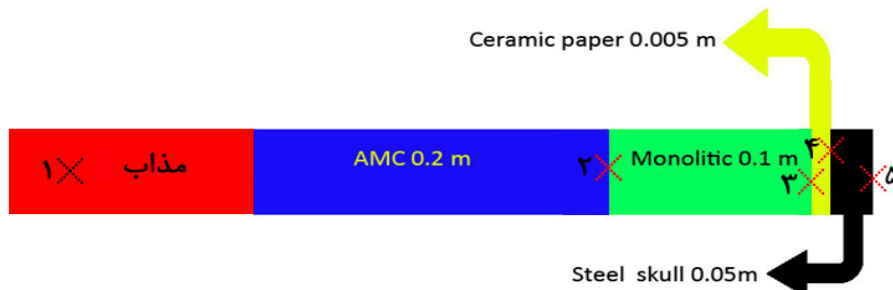
شکل ۶- پروفیل حرارتی دهانه پاتیل در انتهای مرحله بارریزی با استفاده از حل حرارتی Ansys

(نوار انتهای تصویر نشان دهنده دمای منطقه بر حسب درج سانتی گراد می باشد)

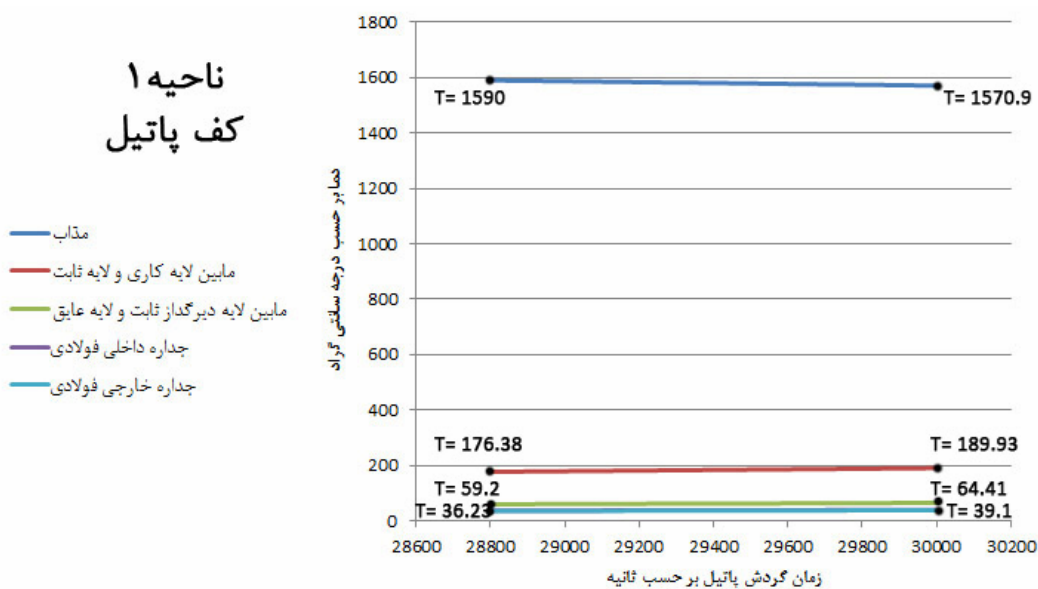
در شکل ۷ منطقه ۱ بیانگر ناحیه مذاب، منطقه ۲ نشانگر آجر آلومینا منیزبا گرافیت (لایه کاری)، منطقه ۳ بیانگر جرم مونولیتیکی (لایه ثابت)، ناحیه ۴ لایه سرامیکی عایق، ناحیه ۵ دیواره فولادی و ناحیه ۶ هوای اطراف پاتیل می باشد. در شکل ۶ خط MN در واقع نشان دهنده انتقال حرارت از درون جداره پاتیل حین عملیات بارریزی می باشد که دما را در نواحی مختلف پاتیل توسط خطوط رنگی به نمایش گذاشته است.

این تحلیل برای نواحی دیگر پاتیل که در شکل ۵ از شماره ۱ تا ۵ نشان داده شده است، صورت گرفته که نتایج حاصل برای ناحیه ۱ کف پاتیل در شکل ۸ آمده است. در این شکل ها محور افقی بیانگر زمان گردش پاتیل می باشد. برای مرحله بارریزی این زمان یک بازه ۱۲۰۰ ثانیه ای (۲۰ دقیقه) می باشد که از ثانیه ۲۸۸۰۰ گردش پاتیل شروع شده و تا ثانیه ۳۰۰۰۰ ادامه می یابد. محور عمودی بیانگر دما بر حسب درجه سانتی گراد می باشد. هر نمودار شامل ۵ منحنی می باشد. هر یک از منحنی ها تغییرات دمایی ناحیه کف پاتیل را نشان می دهد. این ناحیه خود متشکل از ۵ لایه شامل مذاب، حد فاصل بین لایه کاری و لایه

ثابت دیرگداز، حد فاصل بین لایه ثابت و لایه سرامیکی، دیواره داخلی فولاد و دیواره خارجی می‌باشد. این نواحی به صورت شماتیک در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با گذشت زمان دمای مذاب در حین انتقال پاتیل برای بارریزی کاهش یافته ولی به دلیل نفوذ حرارتی مذاب به عمق ضخامت پاتیل، دمای دیگر لایه‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۷- شماتیک عمق پاتیل مورد بررسی - مختصات مورد بررسی: (۱ مذاب ۲) حد فاصل لایه کاری و لایه ثابت (۳) حد فاصل لایه ثابت و لایه سرامیکی (۴) حد فاصل لایه سرامیکی و جداره فولادی (۵) دیواره خارجی



شکل ۸- تغییرات دما با گذشت زمان در لایه‌های پاتیل، ناحیه ۱ کف

۸- صحت‌سنجی

در این مرحله با استفاده از ترموکوپلی که هنگام بارریزی وارد مذاب شده دمای مذاب اندازه گرفته شد و مقدار آن با داده‌ی حاصل از شبیه‌سازی مطابق با ثانیه ۳۰۰۰۰ گردش پاتیل، در جدول ۴ مقایسه شده است.

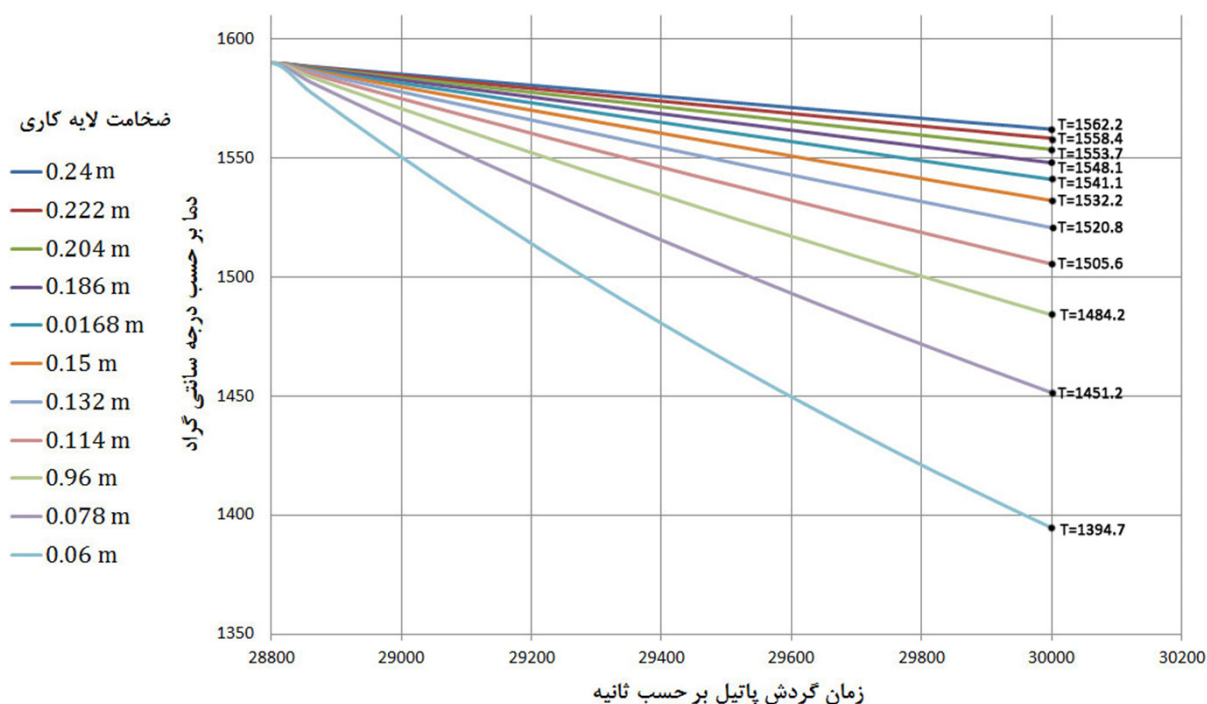
جدول ۴- مقادیر دماهای شبیه‌سازی شده و اندازه‌شده

درصد خطا	دمای حاصل از شبیه‌سازی بر حسب درجه سانتی‌گراد	داده‌های فولاد مبارکه بر حسب درجه سانتی‌گراد	دمای مذاب در آغاز ذوب ریزی
۰/۴۷	۱۵۵۲/۶ ناحیه ۵ دهانه	۱۵۶۰/۳ دمای مذاب نزدیک به دهانه	دمای مذاب در آغاز ذوب ریزی

تطابق قابل قبولی بین داده اندازه گرفته شده و مقدار شبیه سازی شده وجود دارد که امکان این امر را می دهد تا از صحت روش و شرایط در نظر گرفته شده اطمینان حاصل شود و در ادامه اثر عوامل دیگر روی دمای مذاب با استفاده از مدل مطالعه شود. دما با ۳ بار تکرار اندازه گیری شده و نتیجه به صورت میانگین بیان شد.

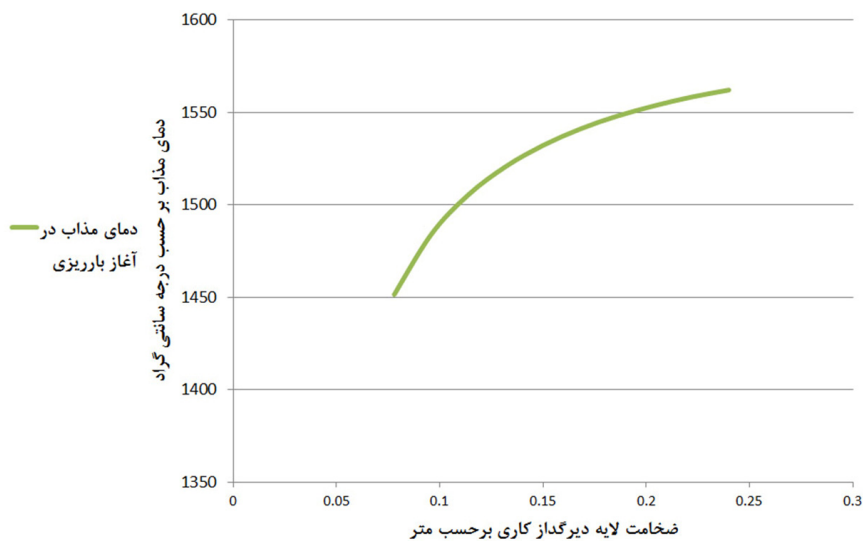
۹- بررسی اثر پارامتر ابعادی

در این قسمت اثر ضخامت لایه کاری دیرگداز بر روی دمای مذاب بررسی شده است. بدین منظور ضخامت لایه کاری از ۰/۵ تا ۱/۵ برابر مقدار واقعی تغییر نموده است. اثر این تغییر در روی میزان افت دمای مذاب و لایه های دیگر ضخامت پاتیل بررسی شده است شکل ۹ که محور افقی آن زمان بوده و محور عمودی آن دمای مذاب می باشد، شامل ۱۱ منحنی است که هر منحنی بیانگر ضخامت خاصی برای لایه دیر گداز کاری می باشد، که هر ضخامت خاص با رنگ مربوطه نشان داده شده است و ضخامت مربوط به ۰/۶ متر بیانگر اندازه واقعی لایه دیرگداز است.



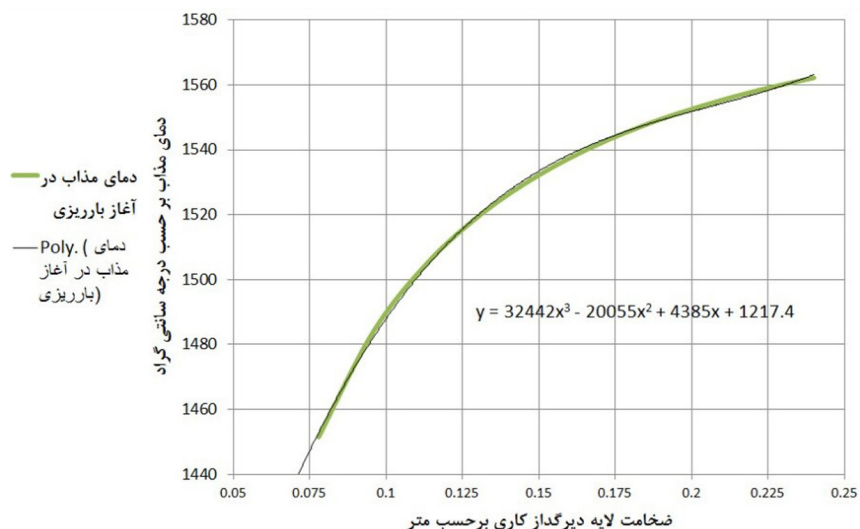
شکل ۹- منحنی تغییرات دمای مذاب بر حسب زمان برای ضخامت های مختلف لایه دیرگداز کاری

همان طور که از نمودار بر می آید با افزایش ضخامت لایه کاری دمای مذاب کمتر کاهش می یابد، زیرا که نقش عایق جداره پاتیل افزوده شده و حرارت کمتری از دست داده و نرخ افت دمایی مذاب با گذشت زمان کاهش می یابد ولی مسئله مهم نمایان شده، رفتار افت حرارتی مذاب در ضخامت های مختلف است. در نمودار شکل ۱۰ نرخ افت دمای مذاب با تغییر ضخامت لایه دیرگداز کاری در ثانیه ۳۰۰۰۰ گردش پاتیل یعنی درست در لحظه بارریزی، به صورت منحنی نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تغییرات دمایی مذاب در لحظه بارریزی با ضخامت لایه کاری

روند این تغییرات با استفاده از نرم افزار Excel، به صورت یک معادله درجه ۳ درآمده است. (شکل ۱۱) که مطابق با رابطه ۱ می باشد.



شکل ۱۱- معادله حاصل از درونیابی نمودار

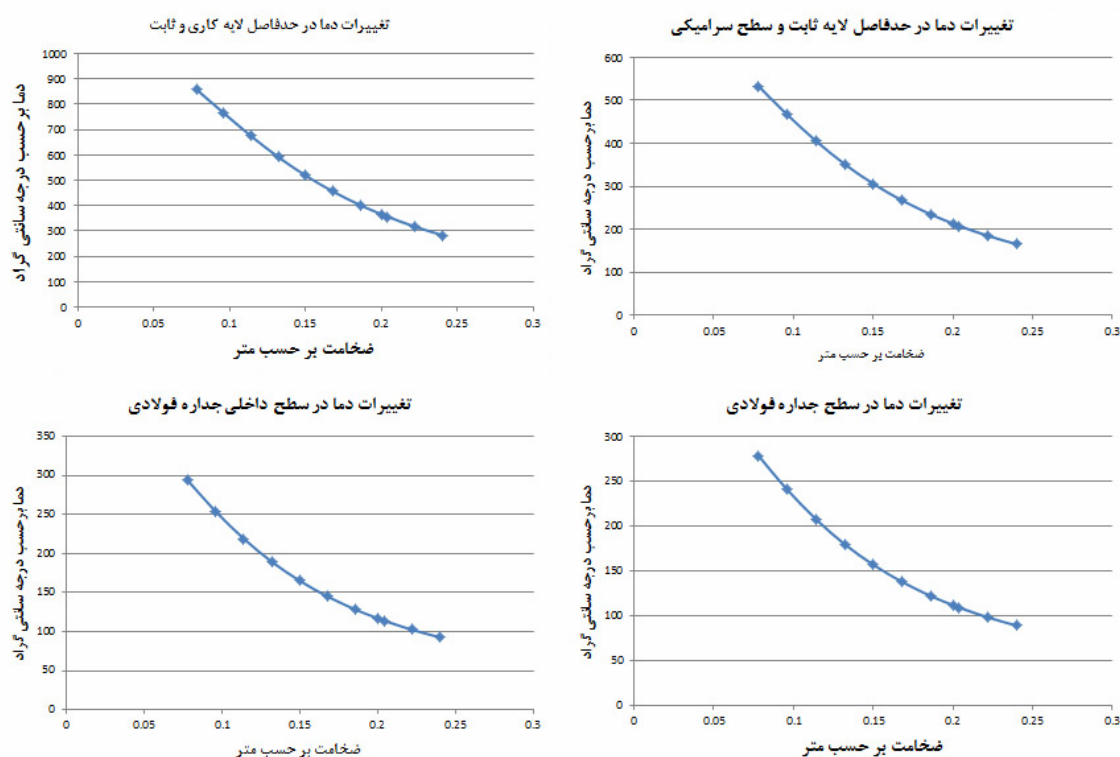
$$\text{Temp} = 32442t^3 \pm 20055t^2 + 4385x + 1217.4 \quad (1)$$

Temp: دمای مذاب در لحظه بارریزی

t: ضخامت لایه کاری دیرگداز

لازم به ذکر است که معادله بالا برای ضخامت‌های بالای ۰/۰۷۵ متر از نوع آجرهای آلومینا منیزیا گرافیتی در نظر گرفته شده و پایین‌تر از این ضخامت در زمان ۲۰ دقیقه انتظار برای بارریزی مذاب به دمای انجماد رسیده که اصلاً مطلوب نمی باشد. ضخامت‌های بالا نیز از نظر فنی و اقتصادی کاری غیر قابل قبول محسوب شده و توجیه ناپذیر است از این رو معادله مذکور در ضخامت‌های اشاره شده در نمودار قابل بررسی می باشد.

همین روند برای لایه‌های عمقی جداره پاتیل تکرار شده و روند تغییرات دمایی در آنها به صورت رابطه در آمده است، در شکل ۷ به صورت شماتیک محل‌هایی از عمق ضخامت پاتیل که تغییرات دمایی آنها مورد مطالعه قرار گرفته، آمده است. همانگونه که انتظار می‌رفت و نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد دما در لایه‌های دیرگداز با گذشت زمان افزایش یافته که این امر در نتیجه نفوذ حرارت مذاب به داخل لایه‌ها در اثر گذشت زمان می‌باشد. نمودارهای شکل ۱۲ در واقع نشان‌دهنده تغییرات دما در لایه‌ها با تغییر ضخامت لایه کاری می‌باشد. در این نمودارها خط افقی بیانگر ضخامت لایه کاری بر حسب متر می‌باشد و خط عمودی در واقع نشان‌دهنده دما در لحظه بارریزی در مناطق مختلف عمق پاتیل است که محل دقیق آن در شکل ۷ آمده است.



شکل ۱۲- تغییرات دمایی مناطق مختلف عمق پاتیل در لحظه بارریزی با ضخامت لایه کاری

در ادامه روند تغییرات دما به صورت معادلاتی درون‌یابی شده است تا بتوان دقیق‌تر اثر ضخامت بر دمای لایه‌ها را مورد بررسی قرار داد. این معادلات به صورت رابطه درجه ۳ دما بر حسب ضخامت در جدول ۷ طی رابطه ۲ آمده است. بر اساس روابط ۱ و ۲ بدست آمده می‌توان در زمان مورد نظر از گردش پاتیل که البته بر حسب ثانیه می‌باشد، دمای مذاب و دیگر لایه‌های درونی دیرگداز را تعیین نمود و از این داده‌ها در طراحی دیواره دیرگداز و چینش آن بهره جست. کاهش ضخامت اولیه طراحی شده باعث افزایش حجم پاتیل شده و ظرفیت تولید افزایش می‌یابد ولی محدودیت‌هایی مثل افزایش دمای جداره فولادی، افت حرارتی مذاب و نوچینی با دوره زمانی کوتاه‌تر ایجاد می‌شود. لذا برای بهینه‌یابی بایستی یک سری محاسبات هزینه صورت گرفته شود و طراح می‌تواند با استفاده از دمای بحرانی حاصل از روابط برای ضخامت‌های مختلف لایه کاری یا لایه ثابت و محدودیت‌های اقتصادی حاصل از محاسبات هزینه، اقتصادی‌ترین ضخامت را محاسبه نماید.

جدول ۷- معادلات درونیابی شده دما بر حسب ضخامت لایه کاری برای محل‌های مختلف پاتیل

شماره مختصات ضخامت دیرگداز از شکل ۷	Temp=at ³ +bt ² +ct+d			رابطه ۲
	a	b	c	d
۲	-۴۳۳۳/۶	۱۴۹۹۰	-۷۹۶۰/۲	۱۳۹۲/۴
۳	-۱۶۶۱۵	۱۷۵۷۹	-۶۴۹۴/۵	۹۴۱/۶۹
۴	-۱۶۸۰۲	۱۳۹۱۰	-۴۲۷۷/۷	۵۵۰/۵۷
۵	-۱۶۳۸۸	۱۳۴۳۱	-۴۰۹۱/۹	۵۲۳/۶۴

۱۰- نتیجه‌گیری

با استفاده از شبیه سازی اثر ضخامت لایه کاری دیرگداز پاتیل نوچینی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه سازی پس از مطابقت خوب با مقدار دمایی اندازه گرفته شده به صورت روابطی توسعه یافته است. این نتایج اثر ضخامت در پروفیل دمای لایه‌ها را به صورت رابطه درجه ۳ درونیابی شده (جدول ۷)، بیان می‌نماید البته ساده سازی‌هایی برای سهولت در حل معادلات صورت گرفته ولی نتایج قابل قبول در مقایسه با مقدار واقعی این امکان را می‌دهد از این فرمول در طراحی جداره دیرگداز و اصلاح روند گردش پاتیل و بهینه سازی اقتصادی کارخانه فولاد سازی بهره جست. به منظور بهینه‌یابی تعیین میزان تاثیر ضخامت بر افت دمای مذاب و همچنین دمای جداره فولادی بسیار مهم می‌باشد. فرمول‌های نهایی ارائه شده به طراح کمک می‌کند تا با یک سری محاسبات هزینه از یک سو و از سوی دیگر روابط بدست آمده مقدار بهینه ضخامت را تعیین نماید.

مراجع

- [1] H. Nishio, "Steel making refractory trends in Japan", Shinagawa Technical Report, VOL.;NO.47,pp21-36,2009
- [2] David E. Shewmon, Improvement the structural Integrity of steel Ladle refractory linings..., UNITECR '05: Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories, November 8-11, 2005, Orlando, Florida, USA, 9th Biennial Worldwide Congress on Refractories,p5,2005
- [3] F. Damhofa,W. A. M. Brekelmansb, M. G. D Geersb "Predictive FEM simulation of thermal shock damage in the refractory lining of steelmaking installations" The Netherlands - Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, 25 1375-1384, 2011
- [4] S. Yılmaz "Thermomechanical Modelling for Refractory Lining of a Steel Ladle Lifted by Crane", Int. J. Appl. Ceram , 504 141-145 (2010)

- [5] Y. Joliff, J. Absi, J.C. Glandus, M. Huger, N. Tossier, N. Doyen "Experimental and numerical study of the thermo-mechanical behavior of refractory model materials" Journal of the European Ceramic Society 8 553-559 ,2007
- [6] David E. Shewmon, Improvement the structural Integrity of steel Ladle refractory linings..., UNITECR '05: Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories, November 8-11, 2005, Orlando, Florida, USA, 9th Biennial Worldwide Congress on Refractories,p5,2005
- [7] F. Damhof, W. A. M Brekelmans, M. G. D Geers," Experimental analysis of the evolution of thermal shock damage using transit time measurement of ultrasonic waves" J. Eur. Ceram. 2009.
- [8] F. Damhof, W. A. M Brekelmans, M. G. D Geers," Non-local modeling of cyclic thermal shock damage including parameter estimation. 2011.
- [9] Ansys Theory Manual, 2009.