ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. Proceedings of the 6th National Conference on Mechanical-Civil Engineering and Advanced Technologies. 2024; 24(11):65-70.

Simulation of the Heat Transfer Mechanism from Steel Slag to Water Flow for Electricity Generation

ARTICLE INFO

Authors
Saadat-Targhi M.[1*],
Nabati A.[1]
Heidari A.[1]

[1] Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran.

*** Correspondence**
Address: Esfarayen University of Technology, Esfarayen
Msaadat@esfarayen.ac.ir

How to cite this article
Saadat-Targhi M, Nabati A. Heidari A. Simulation of the Heat Transfer Mechanism from Steel Slag to Water Flow for Electricity Generation. *Proceedings of the 6th National Conference on Mechanical-Civil Engineering and Advanced Technologies. 2024; 24(11):65-70.*

ABSTRACT

Steel factories, smelting and alloying industries always require a lot of energy consumption, and reducing the consumption or recycling of wasted energy has always been considered as one of the important strategies to solve this problem. The production process in the aforementioned industries has some by-products, one of which is slag resulting from the chemical reaction of molten materials with some existing elements and materials. Slag also has a very high temperature due to contact with the melt and a lot of thermal energy is stored in it. Currently, this thermal energy is transferred to the environment in a useless way. The existence of a suitable mechanism for using this wasted energy would be very profitable and useful. The purpose of this research is to find a way to recycle the thermal energy in slag and use it in industries. In this article, an attempt has been made to use this heat to generate electricity using an innovative mechanism that is presented for the first time.

Keywords Waste Heat Recycling, Steel Slag, Heat Transfer, Electricity Generation

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات ششمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک، عمران و فناوری‌های پیشرفته

شبیه‌سازی مکانیزم انتقال حرارت از سرباره فولاد به جریان آب به منظور تولید برق

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها
مرتضی سعادت طرقی[1*]
امین نبات[1]
عباس حیدری[1]

[1] مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، اسفراین، ایران

*** نویسنده مسئول**
آدرس: اسفراین، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین
Msaadat@esfarayen.ac.ir

چکیده

کارخانه های فولاد، صنایع ذوب و آلیاژسازی همواره نیاز به مصرف انرژی بسیار زیادی دارند و همواره کاهش مصرف و یا بازیافت انرژی اتلافی به عنوان یکی از راهبرد های مهم در جهت حل این مسئله مطرح بوده است. فرآیند تولید در صنایع مذکور دارای برخی محصولات جانبی می باشد که یکی از این محصولات سرباره ناشی از واکنش شیمیایی مواد مذاب با برخی از عناصر و مواد موجود هستند. سرباره نیز به علت تماس داشتن با مذاب دمای بسیار زیادی دارد و انرژی حرارتی زیادی در آن ذخیره می باشد. در حال حاضر این انرژی حرارتی به صورت نامفید به محیط منتقل می‌گردد. وجود یک مکانیزم مناسب برای استفاده از این انرژی اتلافی بسیار سودآور و مفید خواهد بود. هدف از این تحقیق یافتن راهی برای بازیافت انرژی حرارتی موجود در سرباره و به کارگیری آن در صنایع می‌باشد. در این مقاله سعی شده تا از این گرما با استفاده از مکانیزمی خلاقانه که برای اولین بار ارائه میگردد، برای تولید برق استفاده شود.

کلیدواژه‌ها بازیافت انرژی اتلافی، سرباره فولاد، انتقال حرارت، تولید برق

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

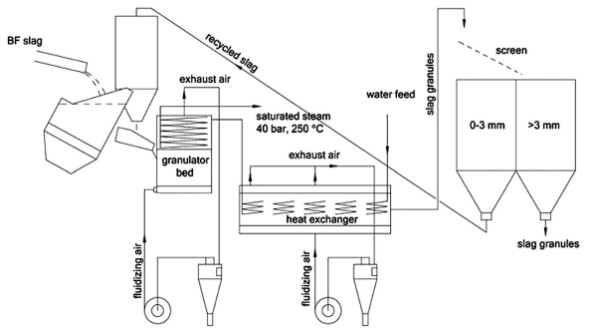
۱- مقدمه

صنایع ذوب و آلیاژسازی همواره نیاز به مصرف انرژی بسیار زیادی دارد. این صنایع دارای برخی محصولات جانبی هستند، یکی از این محصولات سرباره‌ی ناشی از واکنش شیمیایی مواد مذاب با برخی از عناصر و مواد موجود در محیط کار هستند. سرباره نیز به علت تماس داشتن با مذاب دمای بسیار زیادی دارد و انرژی حرارتی زیادی در آن ذخیره می‌باشد. از طرفی این انرژی حرارتی به صورت نامفید به محیط منتقل می‌گردد. به منظور استفاده‌ی مفید از این انرژی تحقیقات زیادی به صورت آزمایشگاهی صورت پذیرفته است. وجود یک مکانیزم مناسب برای استفاده از این انرژی بسیار سودآور و مفید خواهد بود. مکانیزم‌های استفاده از انرژی حرارتی موجود در سرباره متفاوت می باشند.

اولین روش، فرآیند برخورد سرباره با جامد است. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده اساس این فرآیند خورد کردن جریان سرباره مایع در اثر برخورد با ذرات جامد می باشد [1]. این فرآیند توسط گروه سوئدی مروتک ارائه شده است. در این فرایند، جریان سرباره مایع که دارای انرژی حرارتی می باشد در اثر برخورد با ذرات جامد سرباره ای که که قبلا بازیافت شده، به ذرات کوچک شکسته می‌شود. در این مرحله حرارت سرباره از طریق انتقال حرارت جابه جایی به هوای اطراف منتقل می‌گردد. روش بعدی فرآیند همزن مکانیکی است. در فرآیند همزن مکانیکی سرباره مذاب به وسیله‌ی پره یا میله‌ی در حال حرکت هم زده می‌شود. این فرآیند توسط شرکت فولاد ژاپنی کاواساکی مطابق شکل ۲ طراحی گردیده است [2]. سرباره‌ی مذاب توسط یک هم زن در یک ظرف استوانه ای خورد می‌شود و بیشتر حرارت سرباره از طریق انتقال حرارت تشعشع به لوله‌های آب اطراف ظرف منتقل می‌شود. بعد از آن دانه‌های سرباره تخلیه می‌شود و فرآیند بازیافت حرارت اتفاق می افتد. همچنین مکانیزم دیگری ارائه گردیده است که شماتیک آن در شکل ۳ نشان داده شده است [3]. در این روش سرباره‌ی مذاب توسط پره‌های چرخان به حرکت در امده و در اثر تماس پره با سرباره مذاب، سرباره به دانه‌های ریز تبدیل می‌شود و عمل انتقال حرارت از طریق انتقال حرارت هدایت و تشعشع به جریان آب درون پوشش و محور منتقل می‌شود. در این روش دمای سرباره‌ی خروجی حدود ۹۰۰ درجه‌ی سانتی گراد و نرخ بازیابی حرارت کمتر از ۵۰ درصد می باشد [3]. مشکل اصلی فرآیند همزن مکانیکی ابعاد بزرگ دانه‌های سرباره است که مانع از رسیدن به نرخ بازده بالا می باشد. نکته مهم در دو روش قبلی این موضوع است که هیچ یک از دو روش مذکور کاربرد تجاری ندارند. در روش دیگری که به روش غلطکی دوار مشهور است در اثر چرخش غلتک روی لایه نازکی از سرباره، سرباره به ذرات ریز تر شکسته شده و عمل انتقال حرارت با هوا صورت می پذیرد. اولین روش غلتک دوار در اوایل سال ۱۹۸۰ توسط شرکت یک شرکت ژاپنی صنایع سنگین طراحی شده است [3]. در این روش سرباره‌ی مذاب بر روی یک غلطک دوار می ریزد و به علت نیروی وارد شده سرباره می‌شکند و پس از آن سرباره‌ی خورد شده به دلیل نیروی گریز از مرکز به درون دریچه پرتاب می‌شود. سپس در یک مبدل حرارتی انرژی گرمایی سرباره به هوا منتقل و عمل بازیافت حرارت تکمیل می گردد. دمای گرم شدن هوا حدود ۵۰۰ درجه سانتی گراد است و نرخ بازیافت حرارت حدود ۶۰ درصد می‌باشد که البته به شرایط مختلف بستگی دارد.

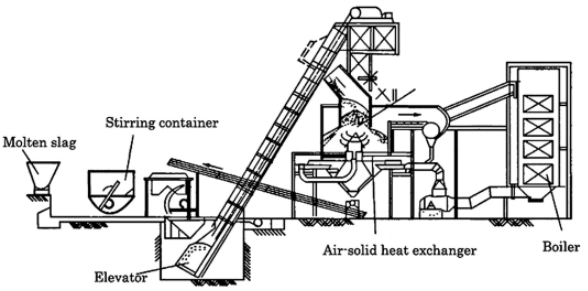
یک شرکت ژاپنی دیگر در طرحی خلاقانه یک سیستم دو غلطکی ارائه نمود که اساس عملکرد این روش در شکل ۴ نشان داده شده است [4]. مطابق این روش عمل خورد کردن سرباره مذاب توسط دو غلطک دوار همراستا که در خلاف جهت هم می چرخند است. سرباره‌ی مذاب در شکاف بین دو غلطک وارد شده و همزمان با چرخش دو غلطک از قسمت پایین سرباره خورد شده خارج می گردد. در ادامه مایع خنک کننده ای بر روی سرباره ها ریخته شده و در نهایت بخار مایع خنک کننده به بویلر یک سیکل توان منتقل و برق تولید می گردد. راندمان بازیافت حرارت در یک مقیاس آزمایشگاهی برای این روش حدود ۴۰ درصد گزارش گردیده است. بزرگترین مشکل این روش چسبیدن سرباره به غلطک ها می باشد که برای رفع این مشکل نیاز به طراحی سیستمی جهت تمیز نمودن غلطک ها است. وجود این مشکلات و همچنین مقرون به صرفه بودن فرآیند از نظر اقتصادی منجر گردید که این روش در مقیاس واقعی عملیاتی نگردد.

در ادامه روش هایی توسعه یافت که از جریان پر سرعت هوا برای خرد کردن سرباره مذاب استفاده می شود. به عنوان نمونه روش دمیدن هوای اصلاح شده که در کشور روسیع توسعه یافته و نحوه عملکرد آن مطابق شکل ۵ می باشد [۳]. اساس این روش عبور ریان پر فشار و پر سرعت هوا از روی بستری مرتعش که روی ان سرباره قرار گرفته است. سرباره‌ی مذاب قبل از ورود به بستر مرتعش به وسیله‌ی نازل های هوا دانه‌بندی می‌شود و از لرزش مداوم بستر برای پایین بردن سرباره و جلوگیری از اتصال مجدد ذارت استفاده می‌شود. به سبب وجود بستر لرزان زیر سیال، دمای سرباره را به شدت کاهش و در نتیجه راندمان بازیافت حرارت نسبت به روش های قبلی افزایش می یابد.

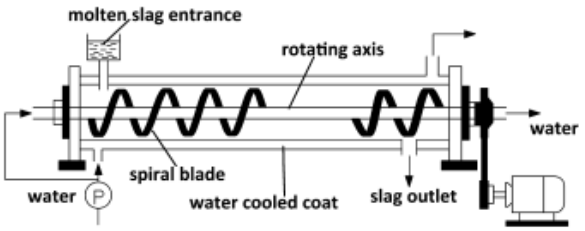


شکل ۱) فرایند برخورد سرباره با جامد [1]

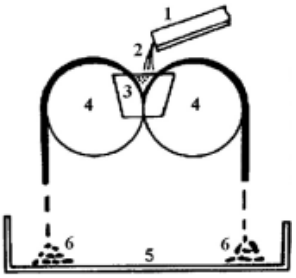
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]



شکل ۲) فرایند همزن مکانیکی [2]



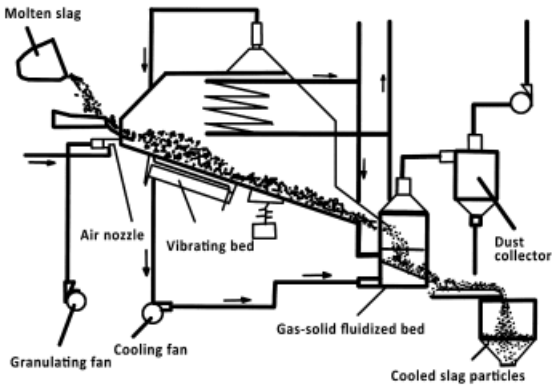
شکل ۳) روش همزن مکانیکی توسعه یافته [3]



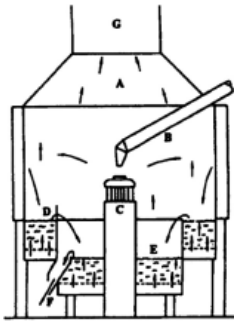
شکل ۴) روش غلطکی دوار [4]

در ادامه توسعه فرآیند های مرتبط با بازیافت حرارت سرباره فولاد، روش هایی توسعه یافتند که اساس خرد کردن سرباره مذاب استفاده از نیروی گریز از مرکز می باشد. به عنوان نمونه در یکی از این روش ها سرباره‌ی مذاب مستقیم درون یک جام دوار ریخته می‌شود و سپس سرباره مذب به واسطه چرخش جام و ایجاد نیروی گریز از مرکز به صورت شعاعی به سمت بیرون پرتاب می-شود. به طور همزمان هوا از پایین برای خنک کردن ذرات خرد شده جریان می یابد و در نهایت ذرات جامد ریز با دمای پایین و هوا با دمای بالا بدست می‌آید. اولین جام دوار با مکانیزم تشریح شده توسط پیکرینگ و همکارانش در انگلستان در سال ۱۹۷۰ مطابق شکل ۶ ارائه گردید که راندمان بازیافت حرارت از سرباره فولاد حدود ۶۰ درصد گزارش گردیده است [5].

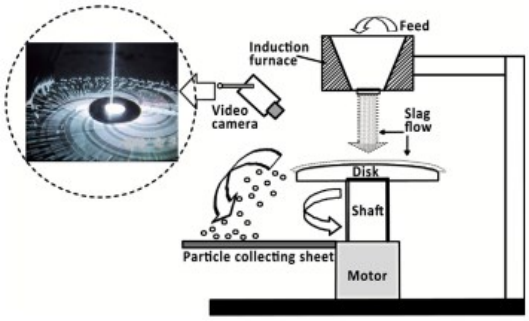
در روش دیگری که مشابه روش های تشریح شده در قبل است، سرباره توسط یک دیسک دوار خرد کننده دانه‌بندی می‌شود. تفاوت با روش قبلی در در ساختار دانه‌بندی آن‌ها می باشد. هر چند که در این روش نیز اساس دانه بندی سرباره مذاب همان نیروی گریز از مرکز می باشد. یک نمونه از روش استفاده از دیسک دوار توسط آکامیا و همکارانش در شکل ۷ ارائه گردیده است [6]. در این دستگاه ابتدا سرباره مذاب به صورت یک لایه نازک بر روی دیسک پخش می‌شود. سپس به صورت تعداد زیادی شیار نازک به صورت شعاعی خارج می‌شود. در اثر چرخش و ایجاد نیروی گریز از مرکز به ذارت کوچکتر شکسته شده و عمل بازیافت حرارت صورت می پذیرد. اثرات سرعت چرخش روتور و ویسکوزیته‌ی سرباره و دبی جریان هوا عوامل تاثیر گذار بر روی اندازه‌ی ذرات سرباره می باشد. اندازه ذرات تولید شده حدود ۶ تا ۷ میلیمتر گزارش گردیده است.



شکل ۵) روش دمیدن هوایی اصلاح شده [3]



شکل ۶) روش جام دوار توسعه یافته [5]



شکل ۷) دستگاه آزمایشی دیسک دوار [6]

اکثر مدل های ارائه شده در گذشته برمبنای بازیافت انرژی به واسطه جذب گرما توسط سیال واسط می باشد که این سیال واسط یا آب هست و یا هوا. در این روش ها عمل جذب انرژی همراه با

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

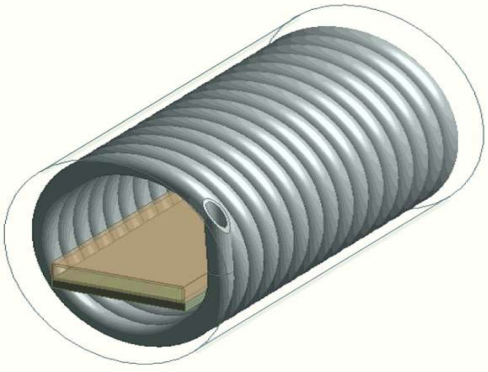
دانه بندی سرباره صورت گرفته است که همین امر موجب افزایش هزینه های اولیه میگردد. در مقاله حاضر انرژی حرارتی موجود در سرباره توسط یک مکانیزم خلاقانه به سیال عامل جهت تولید برق منتقل می گردد. کاهش هزینه ها مهمترین مزیت سیستم بازیافت گرمای پیشنهادی می باشد.

۲- مدل‌سازی

شماتیک مدل پیشنهادی در شکل ۸ نشان داده شده است. فرضیات در نظر گرفته شده به منظور شبیه سازی مکانیزم انتقال حرارت از سرباره فولاد به جریان آب به منظور تولید برق بر اساس مدل پیشنهادی مطابق موارد زیر است:

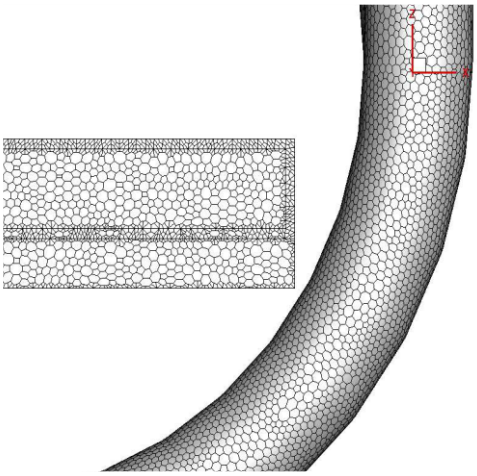
- از حل گر بر مبنای فشار در این شبیه سازی استفاده شده است.
- سرباره به صورت یک مکعب مدل سازی شده است.
- از حالت تشعشع استفاده شده است.
- محیط حل به صورت عایق در نظر گرفته شده است.
- فشار خروجی آب برابر با فشار محیط در نظر گرفته شده است.
- دبی آب را به صورت ثابت در نظر گرفته شده است.
- برای ایجاد جابه جایی آزاد درون محیط حل از مدل گاز ایده آل استفاده شده است.
- شبیه سازی به صورت پایا فرض شده است.
- جنس کویل ها مس در نظر گرفته شده است.

ایجاد هندسه اولین مرحله در شبیه سازی های عددی می باشد. برای این منظور نرم افزارهای تجاری مختلفی توسعه داده شده است. در این تحقیق هندسه ی مورد نیاز با استفاده از نرم افزار تجاری سالیدورکس ایجاد شده است. نماهایی از هندسه ی ایجاد شده در شکل ۸ ارائه گردیده است. همان طور که می دانیم در حل های عددی به علت عدم وجود جواب دقیق برای معادلات حاکم باید حل به روش تکرار صورت پذیرد. برای این منظور نیاز هست که هندسه ی مورد نظر نیز گسسته سازی شود. در این تحقیق به منظور تولید فضای محاسباتی گسسته از نرم افزار انسیس مشینگ استفاده شده. نمایی از فضای محاسباتی ایجاد شده برای این حل عددی در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۸) نمایی از لوله‌های مارپیچ، سرباره و نوار نقاله‌ی حامل آن

شکل ۹) نمایی از شبکه‌ی محاسباتی ایجاد شده روی لوله‌های مارپیچ، سرباره و نوار نقاله



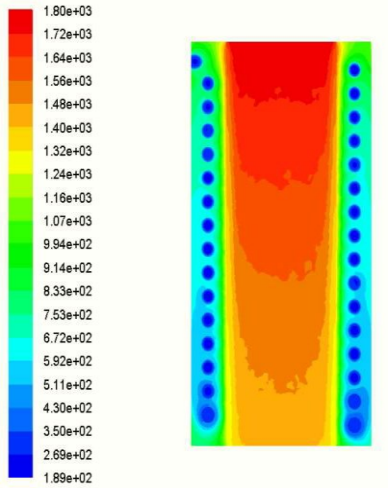
شکل ۱۰) نمایی نزدیک از شبکه‌ی محاسباتی

به منظور مدلسازی فرآیند پیشنهادی ابتدا لازم است که با توجه به فیزیک مسئله معادلات حاکم تشخیص داده شوند. پایه ای ترین معدلات در حل های عددی میدان سیال معادله ی پیوستگی و معادلات ممنتوم هستند، علاوه بر این معادلات با توجه به فیزیک مسئله باید معادلات انرژی، تشعشع نیز همزمان با سایر معادلات به صورت کوپل با هم حل شوند. این حل عددی به صورت پایا فرض شده است. به منظور شبیه سازی فرایند جابه جایی آزاد از مدل گاز ایده آل برای تعریف چگالی هوا استفاده شد. به منظر مدل نمودن اثرات انتقال جابه جایی آزاد از مدل گاز ایده ال برای تعریف چگالی هوا استفاده شد. به منظور مدل نمودن اثرات انتقال حرارت تشعشعی از مدل DO بهره گرفته شده است. حل عددی به صورت تک فاز انجام گرفته و خواص خواص آب و هوا به جز چگالی آن به صورت مستقل از دما و ثابت در نظر گرفته شده اند.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

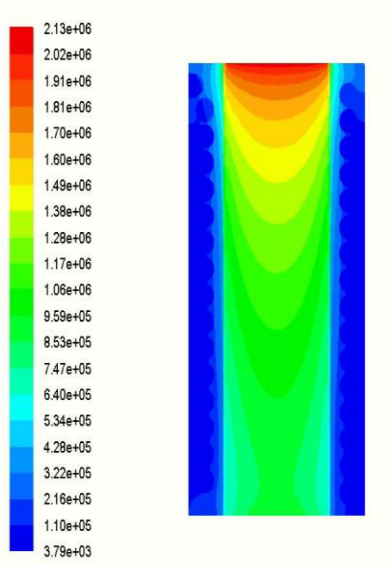
۳-نتایج

بر اساس نتایج حاصل از حل عددی، مکانیزم طراحی شده قابلیت مناسبی در انتقال حرارت از سرباره به آب را دارا است و میتواند به منظور استفاده از انرژی حرارتی موجود در سرباره مورد استفاده قرار گیرد. مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی نقشی غالب در این مکانیزم را دارد. از سیال خروجی که دمای آن در اثر انتقال حرارت از سرباره افزایش یافته می توان در یک سیکل ترمودینامیکی انرژی الکتریسیته تولید نمود. سرباره خروجی از مکانیزم هنوز هم دارای دمای قابل توجهی است و می توان بیشتر از انرژی حرارتی موجود در آن استفاده نمود. به عبارت دیگر میتوان بیان نمود که نصب این سیستم پیشنهادی خللی در سایر تجهیزات فرآیند ندارد و حتی میتواند قبل از سیستم های تشریح شده در مقدمه بکارگیری شود. نتایج مربوط به کانتور دما در مقطع میانی و موازی با افق در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

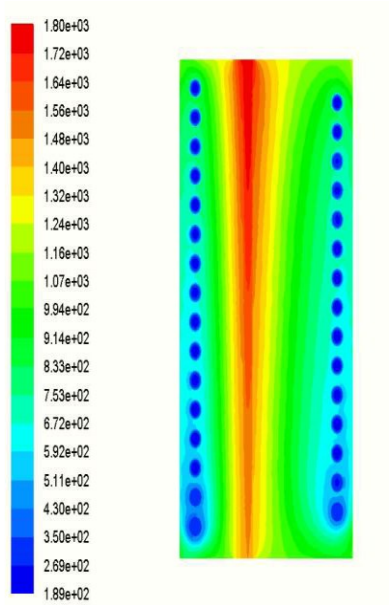


شکل ۱۱) کانتور دما در مقطع میانی و موازی با افق

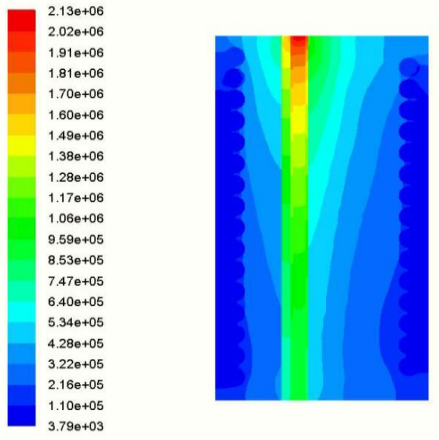
همچنین نتایج کانتور شدت تشعشع در مقطع میانی و موازی با افق در شکل ۱۲ ارائه گردیده است. مطابق این نتایج الگوی دما و شدت تشعشع مشابه هستند و با کاهش دمای سرباره میزان تشعشع آن نیز کاهش می یابد. همچنین نتایج بیانگر این موضوع هستند که تشعشع از سطح لوله ها ناچیز است. در شکل های ۱۳ و ۱۴ کانتور های دما و تشعشع در مقاطع میانی و نماهای صفحه قائم نشان داده شده است.



شکل ۱۲) کانتور شدت تشعشع در مقطع میانی و موازی با افق



شکل ۱۳) کانتور دما در مقطع میانی و در صفحه قائم

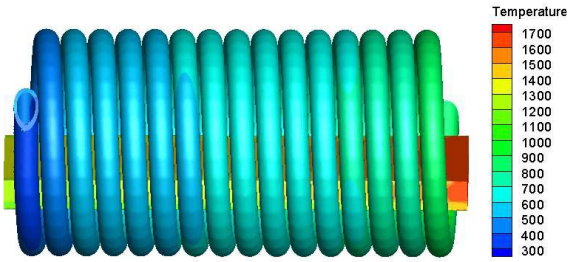


شکل ۱۴) کانتور شدت تشعشع در مقطع میانی و صفحه قائم

نتایج مربوط به توزیع دما روی لوله‌های مارپیچ و سرباره در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همچنین توزیع شدت تشعشع بر روی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

لوله‌ی مارپیچ و سرباره در شکل ۱۶ ارائه گردیده است. روند افزایش دما لوله های مارپیچ که نهایتاً منجر به افزایش دمای سیال میگردد در شکل ۱۵ مشهود می‌باشد.



شکل ۱۵) کانتور دما روی لوله‌های مارپیچ و سرباره

شکل ۱۶) کانتور شدت تشعشع بر روی لوله‌ی مارپیچ و سرباره

۳-جمع‌بندی

در این مقاله یک مدل ابتکاری استفاده از گرمای اتلافی موجود در سرباره کوره های ذوب فولاد ارائه و مکانیزم انتقال حرارت در این مدل شبیه سازی گردیده است. بر اساس نتایج حاصل از حل عددی مکانیزم طراحی شده قابلیت مناسبی در انتقال حرارت از سرباره به آب را داراست و می تواند به منظور استفاده از انرژی حرارتی موجود در سرباره مورد توجه قرار گیرد. نتایج بیانگر این موضوع هستند که مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی نقشی غالب در این مدل را داراست. از سیال خروجی که دمای آن در اثر انتقال حرارت از سرباره افزایش یافته می توان در یک سیکل ترمودینامیکی انرژی برق تولید نمود. سرباره خروجی از مکانیزم هنوز هم دارای دمای قابل توجهی است و می توان توسط مکانیزم هایی که پیشتر ارئه گردیده اند، بیشتر از انرژی حرارتی موجود در آن استفاده نمود. به منظور تحقیقات بیشتر در این زمینه پیشنهاد می شود بررسي تاثیر ضخامت و شکل سطح مقطع کویل های آبگرم. بررسی فرم پیچش کویل های آبگرد در اطراف سرباره، بررسی میزان بهره وری سیال گرم شده در یک سیکل ترمودینامیکی، انجام تحقیق مشابه به صورت آزمایشگاهی، مورد توجه قرار گیرند.

مراجع

1- M. Barati, S. Esfahani Energy recovery from high temperature slags. Energy. 2011; 36: 5440-5449.
2- H. Zhang et al. Apparatus for heat recovery from molten slag in steel industry. Applied Energy. 2013; 112: 956-966.
3- D. Xiaotian, et al. Development of molten slag dry granulation and heat recovery in steel industry. J Iron Steel Res, Vol. 20, 2008.
4- H. Yoshida, The technology of slag heat recovery. at NKK SEAISI conference of energy utilization in the iron and steel industry. 1984.
5- G. Bisio, Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovered energy. Energy. 1997; 22: 501-509.
6- D. Xie et al. Dry granulation of slags–turning waste into valuable cement binder. CAMP-ISIJ. 2005; 18: 1088-91.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]