

## بهینه سازی جعبه فولادی آبگرد از نظر اتلاف حرارت و دوام در کوره پخت واحد گندله سازی ۲ شرکت فولاد خوزستان

سید خطیب الاسلام صدرنژاد<sup>۱</sup>، داود حسینی<sup>۲</sup>، یاسر بهاری ملامحله<sup>۳</sup>، حسن پایاب<sup>۴</sup>، مرتضی رستی<sup>۵</sup>

- ۱- استاد دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف  
۲،۳- دانشجوی کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف  
۴- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد، ۵- مدیر تحقیقات و فناوری شرکت فولاد خوزستان

### چکیده

بازدهی کوره های صنعتی ارتباط مستقیمی با نحوه عایق بندی دارد. در صورت عدم کارکرد صحیح این عایقها، علاوه بر اینکه از عمر مفید کوره کاسته می شود، تلفات حرارتی کوره نیز افزوده می شود. یکی از اجزای سیستم عایق بندی در کوره های پخت گندله، جعبه فولادی آبگردی است که اصطلاحاً سیل باکس (seal box) نامیده می شود. استفاده از این جعبه مشکلاتی از قبیل از دست دادن مقدار قابل توجهی حرارت با توجه به آبگرد بودن سیل باکس، مصرف انرژی توسط پمپ برای گردش آب در سیستم و تبرید مجدد آن، مشکلات مربوط به نشتی آب در صورت سوراخ شدن سیل باکس و ترکیدگی لوله ها و اتصالات در اثر افزایش فشار به سبب تبخیر آب در نتیجه بالا رفتن دما به علت کاهش دبی جریان در صورت قطع برق، رسوب لجن و یا نشت آب را به همراه دارد. با توجه به اهمیت بهینه سازی سیل باکسهای کوره های پخت گندله، در این مقاله آخرین دستاوردهای تحقیقاتی برای تعیین طرح و جنس بهینه این قطعات ارائه می شود.

کلمات کلیدی: گندله سازی، سیل باکس، نسوز آلومینوسیلیکاتی، اتلاف حرارت، صرفه جویی اقتصادی

## مقدمه

شرکت فولاد خوزستان دارای دو واحد گندله سازی هر یک با ظرفیت ۲/۵ میلیون تن در سال است [۱]. کوره های پخت اساسی ترین بخش واحدهای گندله سازی هستند که از نظر کنترل کیفیت محصول اهمیت ویژه ای دارند [۲-۵]. گندله خام به وسیله نوار نقاله وارد کوره ها و توسط نوار نقاله نوسانی در پهنای ۳/۵ متری پالتهای ماشین پخت به طور یکنواخت توزیع می شوند. گندله های زیر ۶ توسط نوار نقاله ای به مخلوط کن های بخش ساخت و آماده سازی خمیر باز می گردند و دوباره به صورت خمیر به قسمت گندله سازی برگشت داده شوند [۶ و ۵]. ماشین پخت گندله (شکل ۱) متشکل از دو قسمت خشک کن های گندله، سه قسمت پیش گرمکن، آتشگاه و محفظه بعد از آتشگاه و همچنین دو محفظه خنک کن گندله می باشد. زنجیره پالتهای به صورت پی در پی روی ریلهای مخصوص حرکت می کنند و توسط دو محور چرخ که در ابتدا و انتهای کوره وجود دارد به ترتیب از ریلهای پایین و برگشتی به ریلهای بالایی و بالعکس مطابق شکل ۱ حرکت می کنند. سرعت زنجیره توسط دستگاه توزین کنترل می شود تا ضخامت بار همواره یکسان وضعیت حرارتی کوره و مشعلها به هم نخورد. دو محفظه خشک کن کوره اولی توسط هوای گرم خروجی از محفظه انتهایی خنک کننده و محفظه دوم توسط هوای گرم خروجی از منطقه احتراق گرم، گندله ها را خشک می کنند. گندله بعد از این مرحله به قسمتهای با دمای بالا وارد می شود و نباید آب همراه خود داشته باشد زیرا تبخیر سریع آب در داخل گندله موجب ترکیدن آن می گردد [۶، ۱]. پس از خشک کردن عمل پخت در دمای حدود ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد انجام می شود. یکی از اجزای سیستم عایق بندی در کوره های پخت گندله، جعبه فولادی آبگردی است که اصطلاحاً سیل باکس (seal box) نامیده می شود. این جعبه ها نقش دیواره کوره را ایفا می کند و همراه با قطعات دیگر مانند لیتل و دیواره آجری از انتقال حرارت و مواد به خارج کوره جلوگیری می نمایند. گردش آب در درون سیل باکس، سبب تنظیم دما و جلوگیری از داغ شدن سطح خارجی دیواره کوره می شود. نمای کلی جعبه آبگرد (سیل باکس) کوره پخت گندله شرکت فولاد خوزستان در شکل ۲ و نحوه اتصال آن به بقیه اجزاء کوره در شکل ۳ آمده است [۶].

## روش تحقیق

آمار و اطلاعات شرکت فولاد خوزستان نشان می دهد که طی بهمن ۱۳۸۳ تا شهریور ۱۳۸۴ در واحد گندله سازی شماره ۲ شرکت مزبور، تعداد ۳۰ جعبه آبگرد ضمن کار تخریب و در نتیجه از رده

خارج شده اند [۶]. آبگرد بودن سیل باکسها مسائل حادی همچون گرفتگی لوله ها، سوراخ شدن قسمتهای تخریب شده، نشست آب و احتمال انفجار را به همراه دارد. در نتیجه کار تحقیقاتی برای حذف سامانه آبگرد از طریق جایگزینی با دیواره ای از جنس ماده نسوز، به عنوان روشی مناسب برای حذف مشکلات فعلی پیشنهاد شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفته است. با توجه به محدودیت های طراحی از جمله نحوه اتصال سیل باکس به سایر اجزای کوره مطابق شکل ۳ و همچنین ضخامت ماده نسوز، طرح پیشنهادی به صورت شکل ۴ ارائه گردید. با توجه به دو عامل اصلی در این طراحی (تحمل حرارت و استحکام بالا) و بررسی های آزمایشگاهی، از جرم ریختنی آلومینوسیلیکاتی استفاده شد (جدول ۱). در این راستا ۱۲ نمونه جعبه حاوی مواد نسوز ساخته شد. ۶ نمونه در انتهای منطقه خنک کن ۱ کوره پخت واحد گندله سازی ۲ شرکت فولاد خوزستان (مشخص شده با علامت ستاره در شکل ۱) نصب شد و ۵ نمونه در منطقه خنک کن ۲ در محلهای مشخص شده با علامت ستاره در شکل یک و یک نمونه در قسمت آتشگاه نصب گردید.

### نتایج و بحث

در این بخش ریز فرضها و محاسبات انتقال حرارت برای تعیین میزان اتلاف گرما در دو نوع جعبه آبگرد و جعبه ساخته شده با استفاده از مواد نسوز همراه با نتایج بدست آمده ارائه می شود [۸-۱۲]. فرضهای بکار رفته برای انجام محاسبات در جدول ۲ خلاصه شده اند.

۱- محاسبه ضخامت ماده نسوز: با توجه به فرضهای جدول ۲، شار انتقال حرارت از طریق جابجایی در حالت ثبات با شار انتقال حرارت از طریق هدایت برابر است. لذا داریم [۸]:

$$q = -k_{tot} A_1 \frac{\Delta T_1}{\Delta x} = h_{air} A_2 \Delta T_2 \Rightarrow A_1 \Delta T_1 \left[ \frac{1}{\frac{\theta_{ref}}{k_{ref}} + \frac{\theta_{s,s}}{k_{s,s}} + \frac{\theta_{airgap}}{k_{air}} + \frac{\theta_{st37}}{k_{st37}}} \right] = h_{air} A_2 \Delta T_2 \quad (1)$$

$$\Rightarrow A_1 (950 - 120) \left[ \frac{1}{\frac{\theta_{ref}}{0.45} + \frac{0.006}{30} + \frac{0.01}{0.024} + \frac{0.006}{50}} \right] = 16(1.3A_1)(120 - 40) \Rightarrow \theta_{ref} = 4 \text{ cm}$$

که در آن  $\Delta T_1$  اختلاف دمای سطح داخلی با سطح خارجی سیل باکس،  $\Delta T_2$  اختلاف دمای سطح خارجی سیل باکس با هوای محیط و  $\Delta x$  ضخامت سیل باکس است. بنابر نتیجه محاسبه، ضخامت مطلوب ماده نسوز ۴ سانتیمتر است که در ساخت نمونه جدید مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- محاسبه اتلاف حرارت: برای محاسبه اتلاف حرارت از طریق نمونه آبگرد، اگر میانگین دمای آب ورودی  $25^{\circ}\text{C}$ ، میانگین دمای آب خروجی  $45^{\circ}\text{C}$ ، و دبی آب ورودی با دبی آب خروجی یکسان بوده و برابر با  $300$  گرم بر ثانیه (به طور متوسط) باشد. در آن صورت:

$$q_1 = mc\Delta T = 0.3 \times 4.19 \times (45 - 25) = 25.14 \text{ KW} \quad (2)$$

$$q_2 = hA\Delta T = 16 \times (2 \times 0.4) \times 1.3 \times (70 - 40) = 499.2 \text{ W} \quad (3)$$

اتلاف حرارت از مجموعه سیل باکسهای آبگرد (۶۴ عدد در دو طرف) به قرار زیر است:

$$q_{1total} = 64 \times 25.14 = 1608.9 \text{ KW} \quad (4)$$

$$q_{2total} = 2 \times 16 \times (96 \times 0.4) \times 1.3 \times (70 - 40) = 47.92 \text{ KW} \quad (5)$$

$$q_{total} = 1656.8 \text{ KW} \quad (6)$$

ترکیب شیمیایی و چگالی چهار نوع ماده نسوز مورد استفاده برای ساخت جعبه های جایگزین سیل باکس در جدول ۱ فهرست شده است. چون دمای مناطق مختلف کوره با یکدیگر فرق دارند، اتلاف حرارت نمونه های ساخته شده (بدون فاصله هوایی) در مناطق مختلف متفاوت است. لذا اتلاف حرارت باید برای هر منطقه بطور جداگانه محاسبه شود:

۱- منطقه خشک کن:

$$q_1 = h_{air} A \Delta T = 16 \times (9 \times 0.4) \times 1.3 \times (120 - 40) = 6.0 \text{ KW} \quad (7)$$

۲- منطقه پیش گرمکن:

$$q_2 = h_{air} A \Delta T = 16 \times (9 \times 0.4) \times 1.3 \times (250 - 40) = 15.7 \text{ KW} \quad (8)$$

۳- منطقه آتشگاه:

$$q_3 = h_{air} A \Delta T = 16 \times (36 \times 0.4) \times 1.3 \times (350 - 40) = 92.8 \text{ KW} \quad (9)$$

۴- منطقه بعد از آتشگاه:

$$q_4 = h_{air} A \Delta T = 16 \times (6 \times 0.4) \times 1.3 \times (300 - 40) = 13.0 \text{ KW} \quad (10)$$

۵- منطقه خنک کن ۱:

$$q_5 = h_{air} A \Delta T = 16 \times (27 \times 0.4) \times 1.3 \times (250 - 40) = 47.3 \text{ KW} \quad (11)$$

۶- منطقه خنک کن ۲:

$$q_6 = h_{air} A \Delta T = 16 \times (9 \times 0.4) \times 1.3 \times (120 - 40) = 6.0 \text{ KW} \quad (12)$$

مجموع اتلاف حرارت از نمونه های ساخته شده با استفاده از مواد نسوز برای دو طرف کوره:

$$\Rightarrow q_{total} = 2(q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) = 361.60KW \quad (۱۳)$$

۳- محاسبه اتلاف حرارتی حداقل بر اساس نتایج به دست آمده، جعبه های ساخته شده با مواد نسوز، از سیل باکسهای آبگرد ۸۶/۹٪ حرارت کمتر تلف می کنند.

$$(۱۴) \quad = \frac{1656.8 - 361.6}{1656.8} = 78.1\% \quad \text{درصد بهینه شده اتلاف حرارتی}$$

حال چنانچه تأثیر فاصله هوایی موجود در جعبه حاوی مواد نسوز نیز در نظر گرفته شود، دمای سطح خارجی سیل باکس کمتر و اتلاف حرارت از مقدار ۷۸/۱٪ هم کمتر خواهد شد. با ساخت جعبه حاوی ماده نسوز چند لایه مشتمل بر فاصله هوایی و مواد نسوز متعدد امکان کاهش چشمگیر وزن قطعه، اتلاف حرارت و مصرف مواد نسوز بوجود آمده و زمینه صرفه جویی بیشتر هزینه های فراهم خواهد شد.

۴- استحکام سایشی: به علت برخورد برخی از پالته‌ها به دیواره کوره پخت گندله و سیل باکسهای آبگرد، امکان تغییر فرم و تخریب جعبه ها در هنگام کار وجود دارد. مقاومت سایشی نمونه های ساخته شده با استفاده از مواد نسوز گوناگون این تحقیق از طریق انجام آزمایش سایش تعیین شد. ابتدا سطح نمونه ها توسط مشعل گاز سوز تا دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد داغ شد. آنگاه بلافاصله با استفاده از یک ماشین صفحه تراش از سطح نمونه ها به مدت یک دقیقه براده برداری شد. بار دستگاه صفحه تراش ۲ میلیمتر و سرعت آن ۴ متر بر دقیقه بود که تقریباً نزدیک به سرعت حرکت پالت در کوره پخت گندله (۳ متر بر دقیقه) بود. نتایج به دست آمده برای فولاد نوع st37 و چهار نوع ماده نسوز آلومینوسیلیکاتی در جدول ۳ خلاصه شده است. مطابق با شکل ۵ ملاحظه می شود که ماده نسوز نوع ۱ کاهش حجم کمتری نسبت به بقیه مواد نسوز و فولاد st37 دارد. لذا از بقیه مواد مورد استفاده نسبت به سایش مقاومتر است و برای ساخت قطعه جایگزین سیل باکس آبگرد مناسبتر است. در نتیجه برای ساخت سیل باکسهای آزمایشی مورد استفاده در واحد گندله سازی ۲ شرکت فولاد خوزستان، از ماده نسوز ۱ استفاده شد. شکل ۴ اسکلت جعبه ساخته شده را به صورت مقطع از راست نشان می دهد.

۵- محاسبه اقتصادی اتلاف حرارت: با محاسبه اتلاف حرارت یک سیل باکس و در نتیجه کل سیل باکسهای کوره میتوان مقدار مصرف گاز هدر رفته و در نتیجه زیان اقتصادی را بدست آورد:

$$q = 1656.8KW$$

میزان اتلاف در مدت یک سال (با فرض اینکه کوره ۳۰۰ روز در حال کار بوده است)

$$q_{year} = 1656.8 \times 300 \times 24 = 11928960KWh = 4.295 \times 10^{13} J \quad (۱۵)$$

اگر ارزش حرارتی سوختن یک متر مکعب گاز طبیعی ۴۰ MJ/m<sup>3</sup> باشد [۸]. مقدار حجم گاز برابر

با:

$$V_{gas} = \frac{4.295 \times 10^{13}}{40 \times 10^6} = 1.07 \times 10^6 m^3 \quad (۱۶)$$

است. قیمت واحد به ازای مصرف یک متر مکعب گاز طبیعی در سال ۸۵، ۱۳۸/۵ ریال می باشد.

$$1.07 \times 10^6 \times 138.5 = 148.2 \times 10^6 \text{ Rial} \quad (۱۷)$$

هزینه سالانه اتلاف حرارت توسط جعبه های آبگرد نزدیک به ۱۵ میلیون تومان است. قیمت جهانی گاز تقریباً برابر ۶ دلار به ازای هر Million Btu می باشد [۱۵]. گرمای تولید شده به ازای سوختن یک متر مکعب گاز طبیعی:

$$40 \times 10^6 J = 3.791 \times 10^4 \text{ Btu} \quad (۱۸)$$

قیمت هر متر مکعب گاز:

$$P = \frac{3.791 \times 10^4 \text{ Btu}}{10^6 \text{ Btu}} \times 6 \text{ Dollar} = 0.227 \text{ Dollar} = 2050 \text{ Rial} \quad (۱۹)$$

قیمت کل گاز اتلافی:

$$P_{total} = 1.07 \times 10^6 \times 2050 = 2193.5 \times 10^6 \text{ Rial} \quad (۲۰)$$

اگر یارانه دولت در نظر گرفته نشود و طبق قیمت های جهانی محاسبات انجام شود، سالانه حدود ۲۱۹۳/۵ میلیون ریال اتلاف انرژی خواهیم داشت. بنابراین به میزان ۷۸/۱٪ صرفه جویی اقتصادی خواهیم داشت. قیمت صرفه جویی داخلی حدوداً ۱۵۰ میلیون و قیمت جهانی حدوداً ۲۱۹۳/۵ میلیون ریال است.

### نتیجه گیری

- ۱- جعبه ساخته شده از جنس ماده نسوز آلومینوسیلیکاتی امکان جایگزینی سیل باکس فولادی آبگرد مورد استفاده در دیوار کوره واحد گندله سازی شماره ۲ شرکت خوزستان را فراهم ساخته است.
- ۲- طرح پیشنهادی سبب کاهش چشمگیر اتلاف حرارت از طریق سیل باکس می شود که خود سبب صرفه جویی اقتصادی می گردد.
- ۳- حذف سیستم آبگرد، مشکلاتی مانند خوردگی، نشت رطوبت و کنترل دبی آب را از بین می برد.
- ۴- مقاومت سایشی مطلوب و ضربه گیر بودن سامانه حاوی جرم ریختنی نسوز سبب بهبود وضعیت دیواره ها در برابر ضربات اتفاقی پالها می شود.

- ۵- کاهش مصرف انرژی به سبب حذف پمپهای آب و نیز حذف مشکلات ناشی از قطع برق که منجر به پمپ نشدن آب به داخل سیل باکسها می شود، از مزایای طرح جدید است.
- ۶- کاهش تخریب جعبه ها سبب کاهش زمان مورد نیاز برای تعویض سیل باکسها و کوتاه شدن زمانهای توقف و بهبود اقتصاد عملیات پخت گندله می گردد.
- ۷- جایگزینی جعبه ساخته شده از جنس مواد نسوز میتواند به سبب عمر مفید بیشتر نسبت به جعبه آبگرد، باعث صرفه جویی در هزینه های تعویض و نیروی انسانی لازم ربای اجرای عملیات شود.

### قدردانی

از مدیریت تحقیق و فناوری شرکت فولاد خوزستان به سبب عقد قرارداد پژوهشی با دفتر ارتباط با صنعت دانشگاه صنعتی شریف و تامین هزینه اجرای طرح، سپاسگزاری می شود. همچنین از پرسنل واحد گندله سازی شرکت فولاد خوزستان به خاطر همکاری صمیمانه در ساخت و نصب جعبه های جایگزین سیل باکسهای آبگرد و جمع آوری داده های آزمایشی صنعتی قدردانی می شود.

### مراجع

- [۱] خطیب الاسلام صدرنژاد، "ساخت قطعه مقاوم به سایش برای جایگزینی قطعات کربوفراکس پاروهای دیسکهای گندله سازی، فصل ۴ و فصل ۵"، گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی ارتباط با صنعت، دانشگاه صنعتی شریف و شرکت فولاد خوزستان، دی ماه ۱۳۸۴، ص ۹۳-۱۰۶.
- [۲] ناصر توحیدی، "آماده سازی بار کوره های تولید آهن و فولاد"، ۱۳۷۶، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۳] حشمت الله مرادی، "مطالعه تاثیر پخت بر خواص فیزیکی و شیمیایی گندله سنگ آهن گل گهر"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۷.
- [۴] کشاورز علمداری، "بررسی قابلیت گندله سازی و احیاءپذیری سنگ معدن گل گهر"، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۷۰.
- [5] H. E. McGannon (Editor), "Making, Shaping and Treating of Steel", Ninth Ed, US Steel, (1971).
- [۶] خطیب الاسلام صدرنژاد، "امکان یابی تغییر طرح Seal Box کوره گندله سازی از حالت آبگرد به مواد نسوز"، گزارش مرحله اول پروژه تحقیقاتی ارتباط با صنعت: دانشگاه صنعتی شریف و شرکت فولاد خوزستان، آبان ماه ۱۳۸۴، ص ۱-۳۸.
- [۷] [www.outokumputechnology.com](http://www.outokumputechnology.com) رویت شده در مورخه ۱۳۸۵/۱/۲۸.

- [۸] خطیب‌الاسلام صدرنژاد، احمد کرمانپور، "سوخت و انرژی، ۱۳۸۰، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
- [۹] ج. زکلی، ترجمه رضا قاسم زاده، "انتقال حرارت در متالورژی"، ۱۳۷۰، دانشگاه علم و صنعت، چاپ اول.
- [۱۰] دیوید گسکل، ترجمه رضا زارع و علیرضا اعلائی، "مقدمه ای بر پدیده های انتقال در مهندسی مواد"، ۱۳۸۲، انتشارات ارکان.
- [۱۱] ولفگانگ شوله، ترجمه طاهر محمودیان، "مواد دیر گداز"، ۱۳۷۸، نشر جانان.
- [۱۲] زیارتعلی نعمتی، "دیر گدازهای سرامیکی"، ۱۳۸۲، انتشارات ارکان.
- [۱۳] جک فیلیپ هولمن، ترجمه ملک زاده و کاشانی حصار، "انتقال حرارت"، ۱۳۷۰، مشهد، فرید.
- [۱۴] خطیب‌الاسلام صدرنژاد، "حرارت و حرکت در مواد"، ۱۳۷۸، انتشارات وزارت امور خارجه، چاپ اول.
- [۱۵] <http://tonto.eia.doe.gov/oog/info/ngw/ngupdate.asp> رویت شده در مورخه ۱۳۸۵/۴/۱۵.

جدول ۱. چگالی و ترکیب شیمیایی مواد نسوز استفاده شده در این تحقیق.

چگالی $\text{gr/cm}^3$	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)				شماره نمونه
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	
۲/۴	۶۶	۴	۲۵	۰/۷	۱
۰/۵	۵۲	۱۱	۳۱/۵	۲	۲
۱/۳	۴۰	۳۰	۵	۱۸	۳
۰/۷۸	۴۰	۰/۴	۵۵	۱/۳	۴

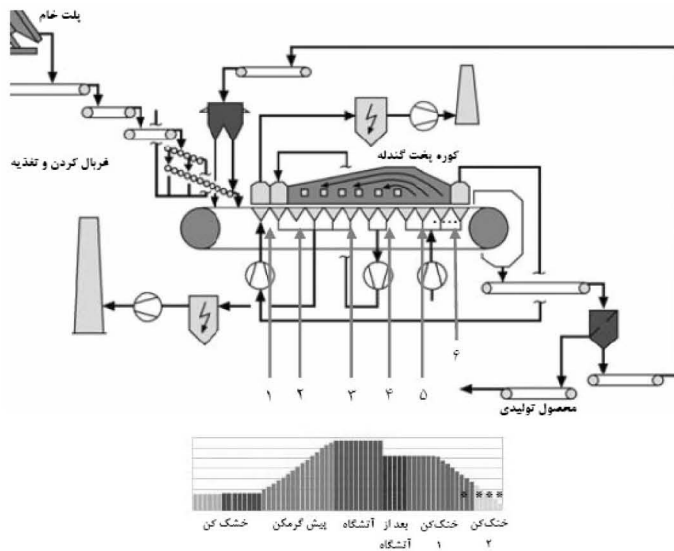
جدول ۲. فرض های بکار رفته برای محاسبه میزان انتقال حرارت از طریق جعبه آبگرد و جعبه نسوز [۸-۱۴].

مقدار	علامت	کمیت
۹۵۰	$T_1$	دمای سطح نسوز در تماس مستقیم با اتمسفر کوره ( $^{\circ}\text{C}$ )
۴۰	$T_g$	دمای محیط ( $^{\circ}\text{C}$ )
۱۰۰	$T_{id}$	میانگین دمای سطح خارجی سیل یا کس فولادی آبگرد ( $^{\circ}\text{C}$ )
۴/۱۹	$c$	گرمای ویژه آب ( $\text{J/gr}^{\circ}\text{C}$ )
۱۶	$h$	ضریب انتقال حرارت ( $\text{W/m}^2\text{C}$ )
۱۲۰	$T_{id37}$	دمای سطح بیرونی ورق $St_{37}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
۶	$\delta$	ضخامت ورق فولادی (mm)
۴۰	$\theta_{ref}$	ضخامت محاسبه شده بهینه ماده نسوز (mm)
۱۰	$\theta_{ref, gap}$	فاصله هوایی (mm)
۵۰	$k_{id37}$	ضریب هدایت حرارتی فولاد $St_{37}$ ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )
۳۰	$k_{is}$	ضریب هدایت حرارتی فولاد زنگ نزن ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )
۰/۰۲۴	$k_{air}$	ضریب هدایت حرارتی هوا ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )
۰/۴۵	$k_{ref}$	ضریب هدایت حرارتی مواد نسوز ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )
۳۰۰ یا ۲۰۰×۳۰	$A_1$	مساحت سطح انتقال حرارت به طریق هدایت ( $\text{cm}^2$ )
1.3 $A_1$	$A_2$	مساحت سطح انتقال حرارت به طریق جابجایی ( $\text{cm}^2$ )
	$q_{total}$	شار انتقال حرارت از طریق هدایت و یا کنوکسیون
		شار انتقال حرارت از طریق تشعشع قابل صرف نظر است.

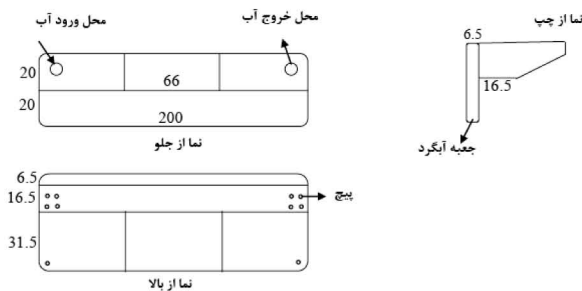


جدول ۳. نتایج آزمایش سایش.

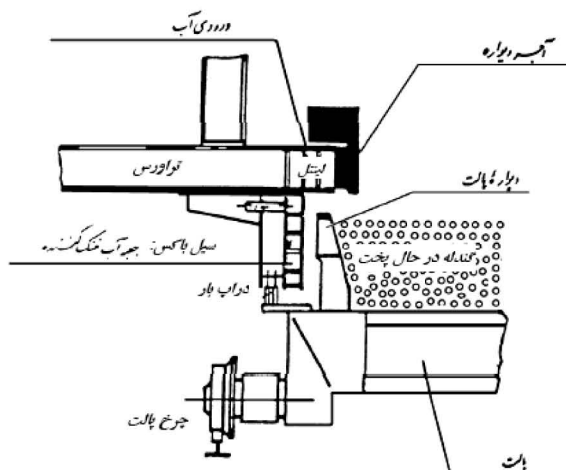
نمونه	جرم اولیه (گرم)	جرم نهایی (گرم)	کاهش جرم	درصد کاهش جرم	درصد کاهش حجم
فولاد st37	۲۳۷	۲۳۳	۴	۱/۶۹	۱/۷
نسوز ۱	۷۵۰	۷۴۰	۱۰	۱/۳۳	۰/۹۲
نسوز ۲	۷۹۰	۷۷۷	۱۳	۱/۶۵	۱/۳۷
نسوز ۳	۵۵۴	۵۴۲	۱۲	۲/۱۷	۳/۰۸
نسوز ۴	۴۲۸	۴۲۱	۷	۱/۶۴	۳/۶۵



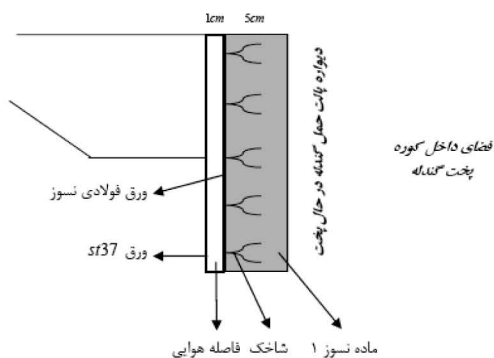
شکل ۱. اجزاء کوره پخت گندله: (۱) خشک کن، (۲) پیشگرم کن، (۳) آتشگاه، (۴) بعد از آتشگاه، (۵) خشک کن ۱ و (۶) خشک کن ۲. محل نصب جعبه‌های نسوز ساخته شده در این تحقیق با علامت × مشخص شده [۷، ۶].



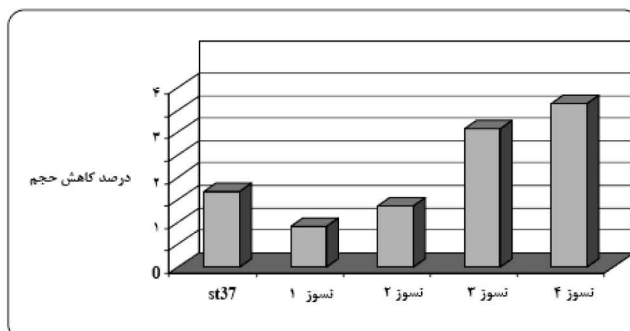
شکل ۲. نماهای جعبه سیل باکس (ابعاد ذکر شده در شکل بر حسب سانتیمتر است).



شکل ۳. نحوه قرار گرفتن پالت، سیل باکس، لینتل و دیواره آجری کوره پخت گندله کنار هم [۶].



شکل ۴. نمای کلی سیل باکس ساخته شده در این تحقیق.



شکل ۵. مقایسه درصد کاهش حجم طی تست سایش برای مواد نسوز جدول ۱.