نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

J. Energy Conversion
Volume: 12, Issue:4, 2026: 1-13

دوره ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص: ۱۳-۱

مطالعه عددی تأثیر هندسه سرمشعل بر جریان دمای احتراق کوره آند ریخته گری ذوب مس

علی افشار[۱]، محمد حسن نوبختی [۲و*]

*۱- کارشناس ارشد تبدیل انرژی، گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، ea.afshar@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، m.nobakhti@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۷/۹ ، بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

چکیده

درپژوهش حاضر به بررسی عددی تأثیر هندسه مشعل بر جریان احتراق کوره آند مجتمع مس سرچشمه با استفاده ازروش حجم محدود، توسط نرم‌افزار فلوئنت با مش سه بعدی بی‌سازمان، پرداخته شده است. جهت بررسی علت سوختگی سر مشعل هندسه از مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ برای مدل کردن جریان مغشوش و از مدل اتلاف ادی مفهومی برای شبیه‌سازی احتراق در نرم‌افزار فلوئنت بهره گرفته شده است. عیب سوختگی سر مشعل موجب توقف کوره آند شده و با توقف کوره‌های آند کارخانه‌های بالادستی مثل پالایشگاه نیز از چرخه تولید خارج و به‌طور کامل تولید مس متوقف می‌گردد. از آن‌جایی‌که طراحی یک مشعل جدید جهت جلوگیری از سوختگی با روش تجربی زمان‌بر بوده و ازلحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه نمی‌باشد، در این تحقیق با روش عددی تغییراتی در هندسه سر مشعل داده شد تا عملکرد بهینه مشعل به‌دست آید. بررسی نتایج حاصل از حل عددی نشان داد که علت سوختگی، تشکیل زودهنگام شعله در نزدیکی ناحیه سرمشعل است. مقایسه ماکزیمم دمای این ناحیه در دو طرح پیشنهادی نسبت به طرح موجود نشان می دهد که در طرح شماره ۱، دما دراین ناحیه ۳۱ درصد نسبت به طرح موجود کاهش یافته است. هم‌چنین درطرح شماره ۲ این کاهش نزدیک به ۴۷ درصد نسبت به طرح مشعل موجود می‌باشد. الگوی توزیع جریان دما داخل کوره در طرح شماره ۲ نسبت به طرح شماره ۱ و طرح موجود یکنواخت‌تر شده و ماکزیمم دمای شعله نیز حدود ۹۰ درجه کلوین کاهش پیدا کرده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده طرح شماره ۲ به‌عنوان طرح نهایی انتخاب شد و درکارگاه کارخانه مشعل با هندسه جدید ساخته و اجرا گردید. پایش های منظم انجام شده از عملکرد مشعل نشان داد که مشکل سوختگی سر مشعل به کلی برطرف‌گردیده است.

کلمات کلیدی: سوختگی مشعل، دمای احتراق کوره، تغییرهندسه مشعل

* **عهده‌دار مکاتبات:** m.nobakhti@srbiau.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله علی افشار، محمد حسن نوبختی. مطالعه عددی تأثیر هندسه سرمشعل بر جریان دمای احتراق کوره آند ریخته گری ذوب مس. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۴; ۱۲ (۴) : ۱-۱۳.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]

۱- مقدمه

تولید قالب‌های آند مس به طریق خشک -مات به‌طورکلی از حرارت دادن و ذوب نمودن کنسانتره و سپس ریخته گری مذاب خروجی از کوره‌های آند با خلوص بالا در قالب‌های مخصوص صورت می‌گیرد. دراین روش ابتدا، درکوره‌های ذوب مخلوطی از سولفورهای مس و آهن که مات مس نام دارد از سنگ های معدنی مس گوگرددار ایجاد شده و سپس توسط یک کنورتور (مبدل) به مس خام تبدیل می شود. در مرحله بعد، این مس خام اولیه با خلوص بالا پس از تصفیه در کوره‌های آند به مس آندی تبدیل می‌شود. کورهای آند امور ذوب جزو مهم‌ترین تجهیزات مجتمع مس سرچشمه در فرآیند خالص سازی مس می‌باشند. با توقف کوره‌های آند کارخانه‌های بالادستی مثل پالایشگاه متوقف شده و به‌طور کامل تولید مس متوقف می‌گردد. از این‌رو، خطوط کوره‌های آند به‌طور مستمر توسط کارشناسان متخصص مربوطه بازرسی و پایش می‌شود. در چند ماه اخیر در خلال پایش، مشاهده شد مشعل یکی از کوره‌های آند بعد از مدت کوتاهی از بهره‌برداری به‌شدت دچار سوختگی در ناحیه سر مشعل شده که در شکل (۱) نشان داده شده است. این سوختگی موجب آسیب جدی به مشعل و به دنبال آن کاهش کارایی و افزایش هزینه‌های ناشی از تعمیرات و توقف تولید را به مجموعه تحمیل خواهد کرد. از آن‌جایی که طراحی یک مشعل جدید جهت جلوگیری از سوختگی با روش تجربی زمان‌بر بوده و ازلحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه نمی‌باشد، در این تحقیق به روش عددی تغییراتی در هندسه سر مشعل داده خواهد شد تا عملکرد بهینه مشعل به‌دست آید.



شکل ۱: سوختگی و آسیب دیدگی سر مشعل

به‌وجود آمدن شعله در اثر یک واکنش گرمازای خود انتشار یابنده است، که با یک ناحیه واکنش درخشان همراه است. با توجه به چگونگی اختلاط واکنش دهنده‌ها شعله بر دو نوع است، اولین نوع که شعله پخشی [1]نام دارد، هنگامی به‌وجود می‌آید که دو جریان گازهای واکنش دهنده، نخست از هم جدا باشند و سپس با یکدیگر برخورد کنند و واکنش در سطح تماس آن‌ها صورت پذیرد. نوع دیگر شعله به‌دلیل اینکه گازهای واکنش دهنده پیش از احتراق به خوبی با هم آمیخته می‌شوند، شعله پیش آمیخته نام دارد [۱]. برای بیش‌تر مسائل مهندسی لازم نیست که جزئیات نوسانات آشفته را حل کنیم. معمولاً فقط اثرات آشفتگی روی جریان متوسط ملاحظه می‌شود. برای یک مدل آشفتگی در موارد کلی، برنامه CFD باید دارای کاربرد وسیع، دقیق، ساده و از نظر اقتصادی قابل اجرا باشد [۲]. برای شبیه‌سازی فرآیند احتراق امروزه نرم‌افزارهای تجاری متعددی وجود دارد، که نرم‌افزار انسیس فلوئنت یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در این زمینه می‌باشد. در پژوهش حاضر از آن برای شبیه‌سازی جریان شعله و احتراق مشعل استفاده شده است. هدف از این شبیه‌سازی، پیداکردن علت سوختگی سر مشعل از طریق بررسی و تحلیل میدان جریان شعله و توزیع دما در اطراف سر مشعل و ارائه راهکارهایی برای رفع آن می‌باشد. مشکل سوختگی سر مشعل یکی از مشکلات اساسی در صنایع مختلف بوده موجب آسیب جدی به مشعل و به دنبال آن کاهش کارایی مشعل، کاهش راندمان کوره

[1] Diffusion flame

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]

و افزایش هزینه‌های ناشی از تعمیرات و توقف تولید می شود. مشعل یکی از پارامترهای تأثیرگذار در پایدار کردن شعله می‌باشد. در فرآیند احتراق توزیع دما در امتداد طولی از سرمشعل به‌تدریج زیاد شده تا به دمای بشینه می‌رسد و سپس به‌صورت توانی کاهش می یابد. دلایل متعددی از جمله هندسه مشعل، سرعت جریان هوا و سوخت، انتخاب نادرست محل نازل‌های سوخت و هوا، عدم تنظیم دقیق نسبت دبی سوخت و هوا و... می تواند سبب عدم اختلاط مناسب سوخت و هوا شده و تأثیردرمحل تشکیل شعله داشته باشد، هم‌چنین برگشت شعله و سوختگی سر مشعل را در داخل کوره به‌وجود آورد [۳]. سارلج و همکارانش با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی [1]طراحی یک مشعل را که به‌صورت تجربی ساخته شده بود را بهینه کردند. آن‌ها حالت بهینه طراحی را برای نازل‌های سوخت ثانویه بر اساس مینیمم تولید NOx به‌دست آورند [۴]. در مشعل‌های با سرعت چرخش پایین یکی از مشکلاتی که در هنگام سوختن گاز مخلوط شده وجود داشت توزیع نامناسب گرمای تولید شده در محفظه احتراق بود. مورجوساتیو و همکارانش با تغییر در قطر ورودی سوخت و هم‌چنین کاهش پره‌های هوای ورودی و تغییر زاویه ۳۰ درجه این پره‌ها توانستند کیفیت و قدرت شعله را افزایش دهند [۵]. غفاری و همکارانش با شبیه‌سازی عددی اثر تغییر زاویه سوخت در مشعل گازسوز اختلاط نیافته روی پارامترهای احتراق در نقاط مختلف محفظه احتراق بررسی کردند. هدف آن‌ها یافتن بهترین هندسه به‌ترتیب با ایجاد تغییراتی روی زاویه تزریق گاز بوده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نحوه پاشش سوخت به محفظه احتراق تأثیر زیادی در نحوه اختلاط سوخت و اکسیدکننده دارد. زاویه تزریق سوخت برای سه نازل به‌ترتیب زاویه ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه در نظر گرفته شد و زاویه مناسب برای توزیع دمای بهینه در محفظه احتراق و نیز مقادیر پایین انتشار آلاینده‌ها به‌عنوان بهترین مدل معرفی شده است [۶]. نوبختی و همکارانش به شبیه‌سازی عددی احتراق در یک محفظه احتراق توربین گازی دو پیچشی پرداختند. آن‌ها تأثیر نسبت هم‌ارزی را بر شدت گردابه‌های موجود در محفظه، دما و طول شعله بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاهش نسبت هم‌ارزی سبب افزایش شدت گردابه موجود در محفظه، کاهش بیشینه دما و طول شعله، هم‌چنین کاهش آلاینده NOx در فرآیند احتراق می‌شود [۷]. زاردویا و همکاران با هدف توسعه یک روش نوآورانه برای بهینه‌سازی و تطبیق یک موتور دریایی احتراق داخلی جهت جایگزینی سوخت آن به مطالعه و تحقیق پرداختند. آن‌ها در مجموع ۶ آزمایش که ۳ مورد از آن‌ها تغییر در محفظه احتراق و سه تای دیگر تغییر در شمع بودند را انجام دادند. هر آزمایش در یک موتور تک سیلندر با دو نوع سوخت با عدد متان بالا انجام شد. تأثیر حجم محفظه، جهت‌گیری سوراخ‌های شمع، تأثیر مقدار فلز گرانبها درالکترود، شکل آن، نحوه قرارگیری در محفظه احتراق مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که اصلاح محفظه و شمع، می‌تواند حداکثر بهبودی راندمان ۱/۹ درصدی را ایجاد کند که این مقدار برای موتور نوع دیگر تا ۴/۳ درصد نیز می‌تواند به‌دست آید [۸]. با باز طراحی مشعل شعله مسطح صنعتی با شبیه‌سازی عددی احتراق بر اساس تجربیات توسط جمالی و هکارانش، تفاوت عملکرد آن در استفاده از سوخت گاز طبیعی و سوخت پرهیدروژن مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مشاهدت تجربی، پایین بودن سرعت شعله گاز طبیعی به همراه نوسان بالای درفت کوره، احتمال ناپایداری شعله و کنده شدن آن را زیاد می‌کند. برای رفع مشکل با استفاده از یک نگهدارنده شعله، سرعت مخلوط هوا و گاز را در ریشه شعله ۵۰ درصد کاهش داده شد، که این تغییر به پایداری شعله کمک کرد. هم‌چنین این موضوع باعث شد که حتی در سوخت با ۸۵ درصد هیدروژن، تولید اکسید های ازت NOx به حداقل برسد و در محدوده کم‌تر از ۲۰ppm باقی بماند [۹]. هوانگ و همکارانش به مطالعه عددی و بهینه سازی پارامترهای محفظه احتراق در یک کوره تصفیه فلز روی از نوع برجی پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که نامناسب بودن جریان خروجی گازها منجر به اختلاط ضعیف گاز و هوا شده در نتیجه دمای نامناسب کوره را ایجاد می‌کند. یک منطقه با دمای پایین به‌وضوح در زیر مرحله دوم مشعل‌ها مشاهده می‌شود، محلی که مقدار قابل توجهی از گاز طبیعی به‌طور کامل نمی‌سوزد. آن‌ها با استقرار دریچه‌های هوای لایه سوم، مناطق با دمای پایین را به مقدار قابل توجهی حذف کردند و محدوده مناطق با دمای بالا را گسترش داده و وضعیت کوره را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشیدند [۱۰]. دانگ و همکارانش به بهینه‌سازی یک مشعل هیدروژنی برای به حداقل رساندن انتشار NOx با استفاده ار دینامیک سیالات محاسباتی از روش سطح پاسخ پرداختند. پژوهش آن‌ها یک چارچوب محاسبات سینماتیکی ارائه داد که دینامیک سیالات محاسباتی در جریان واکنشی را به

[1] Computational fluid dynamics (CFD)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]

روش سطح پاسخ ادغام می‌کند تا یک مشعل با سوخت هیدروژن خالص را بهینه‌سازی کند. آن‌ها از مدل‌های CFD قبلی استفاده کرده و یک تحلیل حساسیت مبتنی بر واریانس را برای شناسایی پارامترهای هندسی کلیدی انجام دادند و به سطوح پاسخ بسیار دقیقی دست یافتند. طراحی بهینه که از طریق شبیه‌سازی CFD اعتبار سنجی شده است با اختلاف کم‌تر از ۱/۲ درصدی در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تطابق خوبی با پیش‌بینی روش سطح پاسخ نشان داده است. نکته قابل توجه این است که مشعل بهینه شده موجب کاهش ۳۸/۲ درصدی در انتشار گازهای گلخانه‌ای شد که این موضوع به علت افزایش اختلاط سوخت و هوا هم‌چنین بهبود انتقال حرارت در منطقه احتراق بوده است [۱۱].

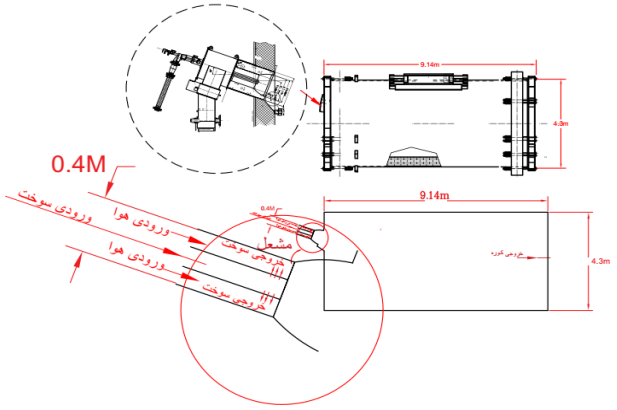
۲- هندسه مسئله و شبکه‌بندی حل

مسأله حاضر شامل یک کوره استوانه‌های افقی به قطر ۴/۳ متر و ۹/۱۴ متر طول می‌باشد. مشعل گازی کوره به قطر ۱۴/۳ سانتی‌متر و قطر نازل‌های سوخت ۸ میلی‌متر بوده که در سمت چپ بالای کوره قرار دارد. مخلوط گاز طبیعی و هوا به‌صورت غیر پیش‌آمیخته وارد کوره شده، و احتراق به‌صورت کامل در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) تصویری از کوره آند مجتمع مس سرچشمه و محل قرارگیری مشعل آن نشان داده شده است.



شکل ۲: تصویر کوره آند و نحوه قرارگیری مشعل داخل کوره

در شکل (۳) تصویر دو بعدی از مشعل و کوره و هم‌چنین مسیر ورودی هوا و سوخت به داخل مشعل و خروج سوخت از نازل‌های سر مشعل نشان داده شده است.



شکل ۳: تصویر دو بعدی کوره و مشعل و مسیرهای سوخت و هوا داخل مشعل

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

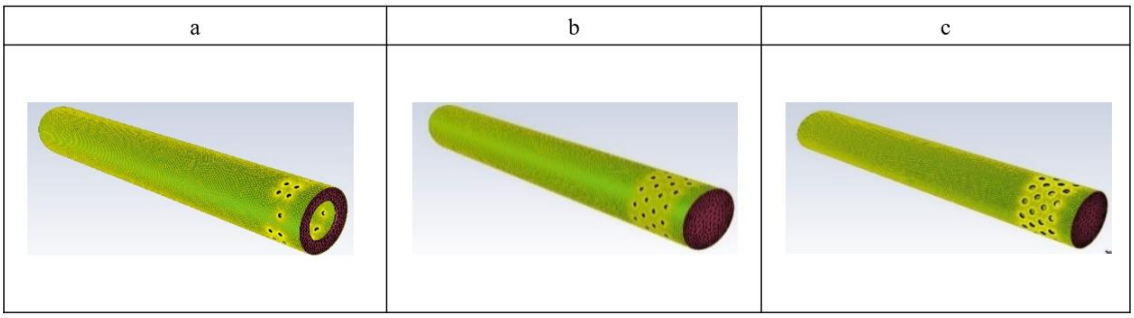
[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]

همین‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده شبیه‌سازی عددی بر روی مدل هندسی مشعل موجود در کارخانه و هم‌چنین دو مدل هندسی پیشنهادی جهت رفع مشکل سوختگی سر مشعل انجام شده است. مشخصات هندسی هر طرح به‌صورت زیر است:

۱. طرح موجود مشعل که سوراخی به قطر۷۸ میلی‌متر در جلوی مشعل بوده و تعداد ۲۰ نازل سوخت به قطر ۸ میلی‌متر در اطراف سر جلو مشعل قرار دارد (قطر لوله مشعل گازی ۱۴/۳ سانتی‌متر).

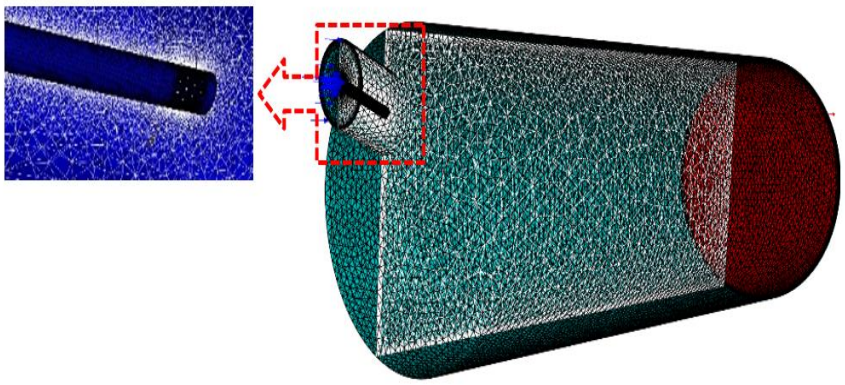
۲. طرح شماره ۱ تعداد ۴۸ عدد نازل سوخت به قطر ۸ میلی‌متر در اطرف سر جلو مشعل قرار دارد (قطر لوله مشعل گازی ۱۴/۳ سانتی‌متر).

۳. طرح شماره ۲ تعداد ۴۸ عدد نازل سوخت به قطر ۱۲/۵ میلی‌متر در اطراف سر جلو مشعل قرار دارد (قطر لوله مشعل گازی ۱۴/۳ سانتی‌متر)



شکل۴ : تصویر شبکه‌بندی، مشعل موجود (a)، طرح شماره ۱ (b)، هندسه شماره ۲ (c)

در شکل (۵) تصویر نحوه شبکه‌بندی کوره نشان داده شده است. انتخاب شبکه مناسب با توجه به بزرگی ابعاد کوره و کوچک بودن قطر سوراخ نازل‌های سوخت مشعل بسیار اهمیت دارد. لذا در شبکه‌بندی محل‌هایی که دارای گرادیان بالا بوده و یا هندسه کوچکی دارند (مانند سوراخ های نازل سوخت) ازشبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است.



شکل ۵: شبکه تولید شده برای کوره

با توجه به اهمیت بررسی دما در این پژوهش، جهت مشخص نمودن استقلال حل از شبکه نمودار دمای استاتیک شعله بر روی خطی که از سر مشعل شروع شده و در راستای خط مرکزی کوره تا خروجی آن ادامه دارد برای شبکه‌بندی‌های مختلف از نظر

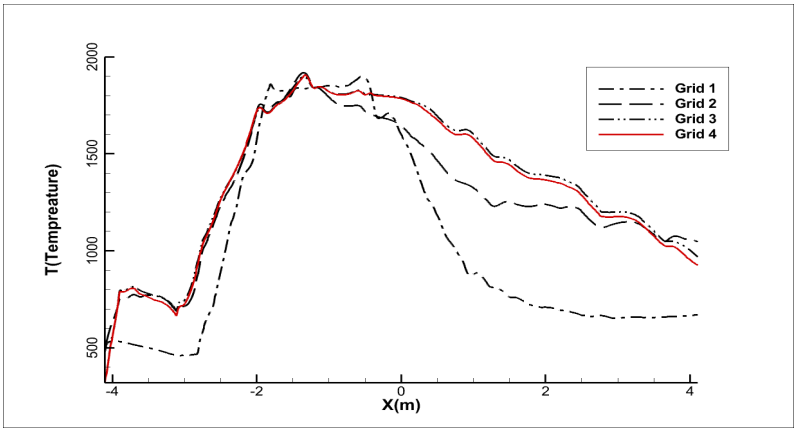
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]

تعداد سلول در جدول (۱) بررسی شد. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود شبکه‌بندی‌های شماره۳ و ۴ تقریباً بر هم منطبق شده‌اند، بنابراین از شبکه ۴ با تعداد سلول کم‌تر به‌عنوان شبکه بهینه برای حل عددی استفاده شد.

جدول ۱: تعداد سلول های مورد استفاده برای تولید شبکه‌بندی های مختلف

تعداد سلول‌های شبکه ۱	تعداد سلول‌های شبکه ۲	تعداد سلول‌های شبکه۳	تعداد سلول‌های شبکه ۴
۸۸۳۶۷۲	۱۱۲۷۴۹۲	۲۲۶۰۹۵۶	۱۴۹۹۰۸۶



شکل ۶: دمای استاتیک شعله در راستای محور مرکزی کوره برای شبکه‌بندی‌های مختلف

ورودی جریان سوخت و هوا در شبیه‌سازی دبی جرمی ثابت، در نظر گرفته شد. خروجی مسئله به‌صورت خروجی فشار می‌باشد. دیواره‌ها به‌صورت دما ثابت 300k فرض شده است. مقادیر شرایط مرزی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: مقادیر شرایط مرزی در شبیه‌سازی

شرط مرزی	مقدار	واحد
دبی جرمی سوخت	۰/۰۵۴۷	$(kg.s^{-1})$
دبی جرمی هوا	۰/۹۴۱۶	$(kg.s^{-1})$
دمای دیواره	۳۰۰	K
فشار خروجی	۱۰۳۲۵	pa

۳- فرضیات مسأله

۱. جریان لزج، نیوتنی، تراکم‌ناپذیر و دائم است، ۲. مسأله به‌صورت سه‌بعدی حل شده است، ۳. مخلوط سوخت و هوا غیر پیش‌آمیخته در نظر گرفته شده است، ۴. احتراق به‌صورت کامل (استوکیومتری) در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]

۴- روابط حاکم-روند شبیه‌سازی

در تمامی معادلات شامل پیوستگی، مومنتوم، در راستای x,y,z انرژی، احتراق، توربولانس، تشعشع در فرم انتگرالی و به‌صورت حجم محدود با استفاده از نرم افزارFLUENT 2022R1 حل شده است. کلیه شبیه‌سازی‌ها به‌صورت حالت پایدار[1] در نظر گرفته شده است.

۴-۱ معادلات حاکم

در تمام انواع جریان، نرم افزارفلوئنت معادلات بقای مومنتم و جرم را حل می‌کند. جریان‌هایی که در آن‌ها انتقال حرارت وجود دارد، معادلات بقای انرژی نیز حل می‌شود. هم‌چنین در جریان‌هایی که شامل مخلوط‌های شیمیایی یا واکنش‌دهنده‌ها می‌باشند، معادلات بقای گونه و نوع نیز حل می‌شود. در جریان‌های مغشوش معادلات انتقال مغشوش نیز باید حل شود.

معادله بقای جرم یا پیوستگی، در معادله شماره (۱) نوشته شده است:

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho U_i) = 0 \qquad (۱)$$

که بردار $\boldsymbol{U_i}$ بیانگر سرعت و $\boldsymbol{\rho}$ بیانگر دانسیته می‌باشد. معادله بالا یک شکل کلی از معادله بقای جرم برای جریان‌های غیرقابل تراکم می‌باشد.

جریان آرام و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است و معادله شماره (۲) بیانگر معادله بقای مومنتوم می‌باشد:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ji}}{\partial x_j} + S_e \qquad (۲)$$

که بردار $\boldsymbol{x_i}$ بیانگر مکان، $\boldsymbol{t}$ بیانگر زمان، $\boldsymbol{p}$ بیانگر فشارp و $\boldsymbol{S_e}$ همان نیروی حجمی است.

معادله انرژی در حالت کلی به‌صورت معادله (۳) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v}\rho h) = \nabla \cdot \left(k_{eff}\nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j \right) + S_h \qquad (۳)$$

که در آن k_{eff} ضریب هدایت حرارتی مؤثر، J_j شار دیفیوژن گونه j می‌باشد. سه ترم اول سمت راست معادله به‌ترتیب بیان‌گر انتقال انرژی در اثر هدایت، دیفی ژن گونه‌ها و اتلاف در اثر لزجت می‌باشد. S_h بیانگر حرارت ناشی از واکنش‌های شیمیایی (احتراق) می‌باشد.

برای مدل‌سازی احتراق، معادله بقای گونه‌ها باید به‌طور هم‌زمان با معادله انرژی و دیگر معادلات مربوط به جریان حل گردد که در معادله (۴) نشان داده شده است :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i \qquad (۴)$$

که R_i نرخ خالص تولید گونه Y_i بر اثر واکنش‌های شیمیایی و u بردار سرعت آنی جریان برای جریان آرام می‌باشد.

[1] Steady State

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]

معادله (۵) بیانگر معادله انتقال حرارت برای یک محیط جذب‌کننده، منتشرکننده و پراکنده‌کننده در موقعیت و در جهت می‌باشد:

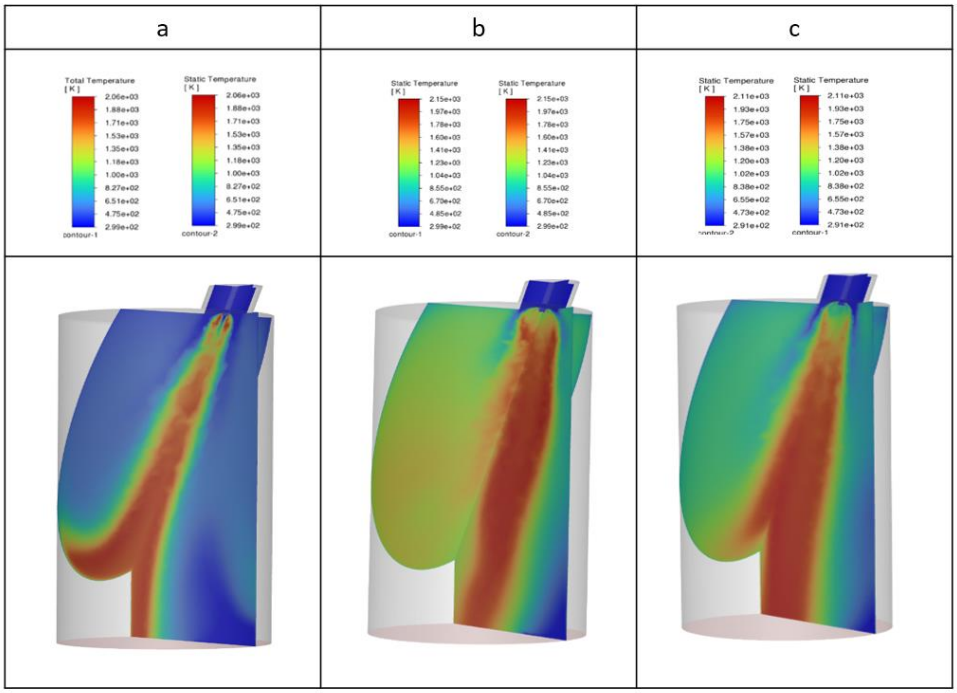
$$\frac{dI(r,s)}{ds} = -(a+\sigma_s)I(r,s) + an^2\frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi}\int_0^{4\pi} I(r,s)\phi(s.s')d\Omega' \qquad (۵)$$

که در آن σ ثابت استفان- بولتزمن و I شدت تابش کلی که به موقعیت r و جهت s بستگی دارد. $(a+\sigma_s)I(r,s)$ ضخامت نوری و یا کدری محیط است.

۵- بحث و بررسی نتایج

از عوامل سوختگی سر مشعل‌ها بالا بودن دما در ناحیه نزدیک به سر مشعل می‌باشد. افزایش و یا کاهش ابعاد نازل سوخت و هوا، هم‌چنین تغییر محل آن‌ها از راه‌کارهای تأخیر در اختلاط سوخت و هوا بوده و باعث تأخیر در تشکیل شعله، تغییرطول شعله و گستردگی آن می‌شود. این راهکارها سبب تأخیر در تشکیل شعله در جبهه جلو مشعل و پایین آمدن دمای ناحیه سر مشعل خواهند شد. در این پژوهش سعی شده با تغییر در هندسه سر مشعل از سوختگی آن جلوگیری شود. ازآن‌جایی که فلز مورداستفاده برای ساخت مشعل فولاد کربنی بوده که این فلز در دمای بالای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خواص خود را از دست داده و فرآیند اکسیداسیون آن رشد بسیار زیادی می‌کند و هم‌چنین این فلز در دماهای بالاتر از ۱۴۲۰ درجه سانتی‌گراد دچار سوختگی می‌شود لذا این مشعل بعد از مدت زمان کوتاهی (نزدیک دو ماه) از شروع کارکرد دچار سوختگی سر مشعل خواهد شد. جهت بررسی دمای نحوه توزیع دما داخل کوره، شبیه‌سازی عددی برای هر سه هندسه انجام شد، و در دو صفحه که عمودی و افقی نشان داده شده است.

در شکل (۷) نتایج شبیه‌سازی عددی مربوط به پروفیل دما که برای هر سه هندسه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می شود ماکزیمم دمای شعله در صفحات عمودی و افقی یکسان است. بیش‌ترین کاهش در دمای ماکزیمم شعله مربوط به طرح شماره (۲) بوده که از طرح مشعل موجود ۹۰ درجه کلوین کم‌تر است.

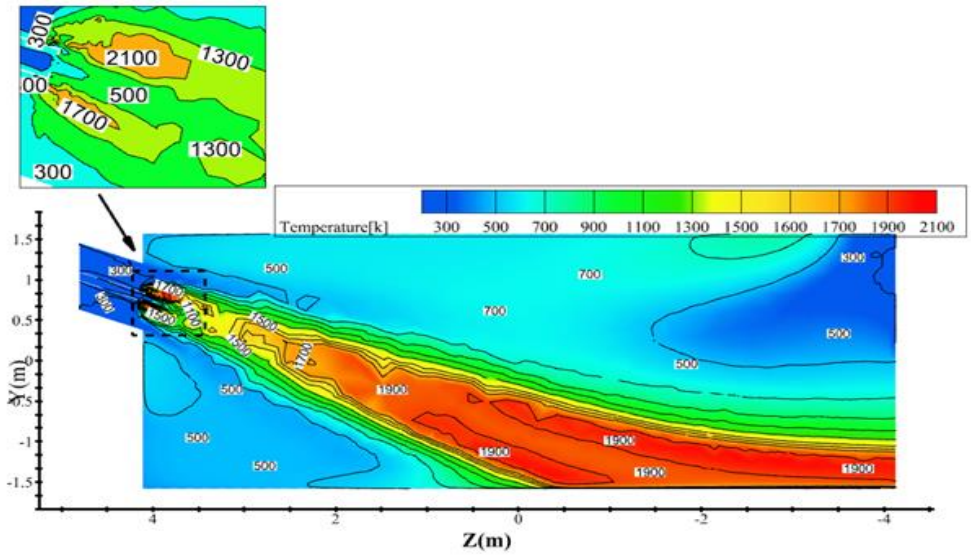


شکل ۷: پروفیل دمای شعله داخل کوره در صفحات عمودی و افقی عبوری از مرکز مشعل تا انتهای کوره، مشعل موجود (a)، طرح شماره۱ (b)، طرح شماره ۲ (c)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

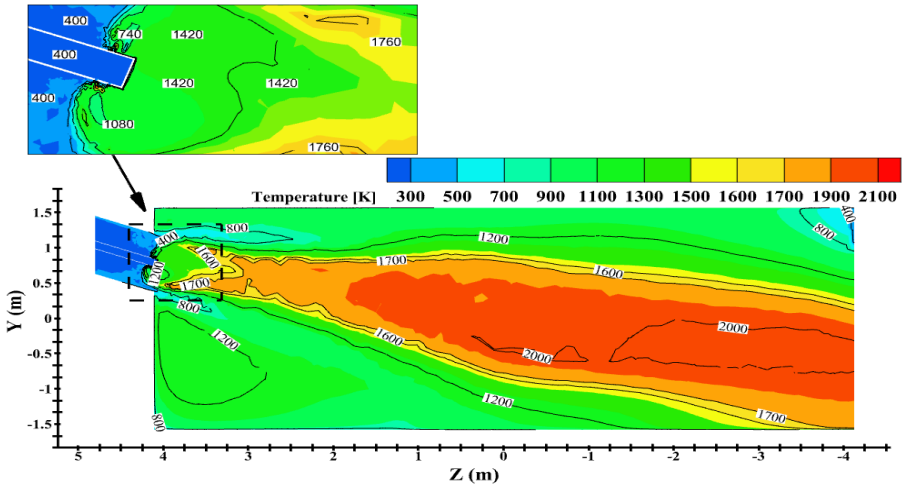
[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]

یکی از مهم‌ترین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی این است که نشان می‌دهد تغییرات صورت گرفته بر روی هندسه سر مشعل سبب تأخیر در تشکیل شعله و فاصله گرفتن آن از ناحیه سر مشعل شده است. کانتور دمای استاتیک در صفحه عمودی عبوری از وسط مشعل برای مشعل موجود کارخانه در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود ماکزیمم دما در ناحیه اطراف سر مشعل تقریبا ۱۷۰۰ درجه کلوین (۱۴۲۶ سانتی‌گراد) می‌باشد.



شکل ۸: کانتور دمای شعله در صفحه عمودی در مشعل موجود در کارخانه

همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است با تغییراتی که در هندسه سر مشعل ایجاد شد، ماکزیمم دما در ناحیه اطراف سر مشعل به ۱۲۰۰ درجه کلوین رسید که ۵۰۰ درجه کلوین نسبت به هندسه مشعل موجود کاهش پیدا کرده است.

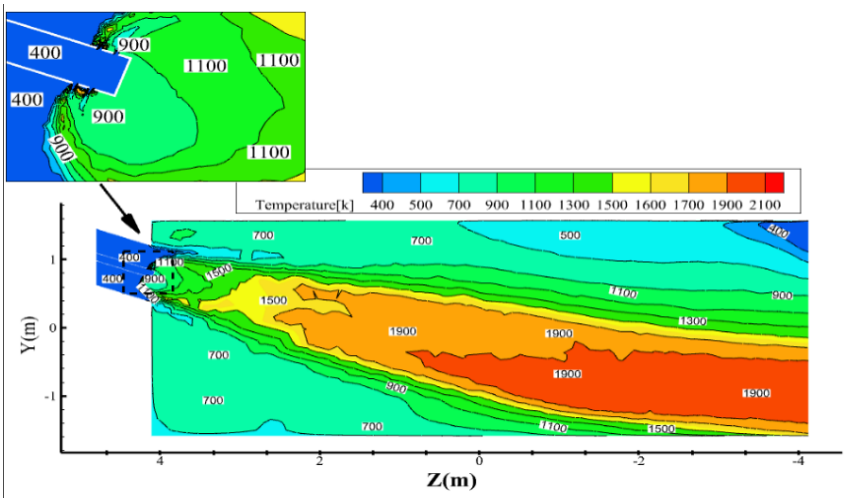


شکل ۹: کانتور دمای شعله در صفحه عمودی در طرح شماره ۱

در ادامه طرح شماره ۲ بررسی گردیده است و همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، مقدار دما در این ناحیه ۹۰۰ درجه کلوین نسب به طرح مشعل موجود در کارخانه کاهش پیدا کرده شده است.

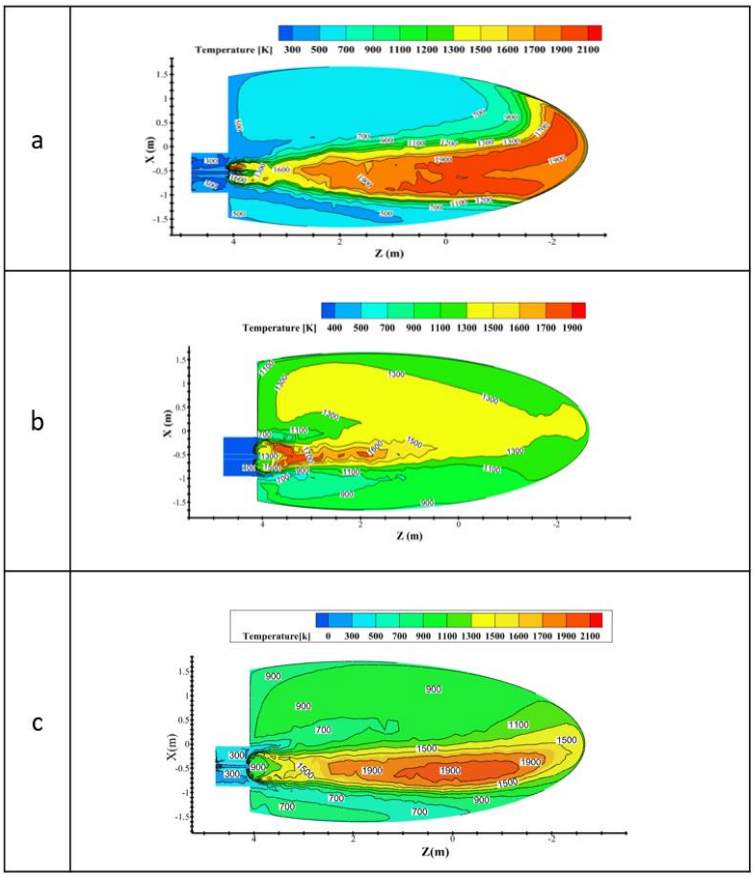
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]



شکل ۱۰: کانتور دمای شعله در صفحه عمودی در طرح شماره ۲

هم‌چنین کانتور دمای استاتیک در صفحه افقی برای سه طرح بررسی شده، همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می شود، در طرح شماره ۱ شعله نسبت به طرح موجود به سمت بالا جابه‌جا شده و دما در داخل کوره غیر یکنواخت‌تر از طرح شماره (۲) شده است. درطرح شماره ۲ دمای کوره بسیار یکنواخت‌تر در کل توزیع شده و موقعیت شعله نیز به طرح اولیه مشعل موجود در کارخانه نزدیک‌تر است.



شکل ۱۱: کانتور دمای شعله در صفحه افقی، مشعل موجود (a)، طرح شماره۱ (b)، طرح شماره ۲ (c)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]

۶- نتیجه‌گیری

در بخش‌های قبل طرح‌هایی برای بهینه‌سازی مشعل ارائه و نتایج آن‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. باتوجه به نتایج به‌دست آمده کاهش دمای نزدیک به ۹۰۰ درجه کلوین دمای ناحیه اطراف سر مشعل نسبت به طرح موجود و هم‌چنین کاهش ۹۰ درجه کلویندمای ماکزمیم شعله داخل کوره درطرح شماره۲، این طرح به‌عنوان عنوان طرح نهایی انتخاب شد. برای اعتبارسنجی پروژه با توجه به هندسه خاص این مشعل و صنعتی بودن این نوع کوره و مشعل، کار پژوهشی تجربی مشابهی در دسترس نبود. تحقیق و برررسی‌هایی از سازنده این کوره و مشعل شرکت اتوتک (Outotec) فلاند و دیگر کمپانی‌های بزرگ دنیا انجام شد و متوجه شدیم که این کمپانی‌های نیز درجهت تحقیق و توسعه محصولات خود در طراحی‌های جدید تغییراتی در هندسه محصولات خود انجام می‌دهند که بتوانند بهره‌وری این آن‌ها را بالا ببرند. مشعل جدید با هندسه طرح شماره ۲ در کارگاه ساخت کارخانه مجتمع مس سرچشمه ساخته شد, شکل (۱۲)، و در داخل کوره نصب و راه‌اندازی گردید. با نصب مشعل جدید مشکل سوختگی سر مشعل به‌طور کامل بر طرف گردید.



شکل ۱۲: مشعل نهایی ساخته شده مطابق طرح شماره۲

۶- مراجع

[1] J. A. Barnard and J. N. Bradly. “Flame and Combustion”, second edition.Chapman and Hall.,1985

[2] “Fluent User Manuals”, Fluent Inc, USA

[3] J. Warnatz ,U. Mass and R. W. Dibble. “Combustion”, Third editon. 1959

[4] M. Sˇarlej, P. Petr, J. Ha´jek, P. Stehlı´k, “Computational support in experimental burner design optimization”, Applied Thermal Engineering 27. (16) (2007) 2727–2731.

[5] Surjosatyo, Y.D. Priambodho, “Investigation of gas swirl burner characteristic on biomass gasification system using combustion unit equipment December 2011, No 33, 15-31 .

[۶] غفاری، رحیمی اهر، دردایی(۱۳۹۰)، " شبیه‌سازی عددی اثر تغییر زاویه سوخت در مشعل گازسوز از پیش اختلاط نیافته روی پارامترهای احتراق در نقاط مختلف محفظه احتراق"، سومین کنفرانس ملی کاربرد در صنایع شیمیایی و نفت.

[۷] محمد حسن نوبختی، صدقی، زارع(۱۴۰۰)، " شبیه‌سازی عددی اثر نسبت سوخت به هوا در کاهش آلاینده NO در یک محفظه احتراق توربین گاز با مشعل دو پیچشی"، نشریه علمی پژوهشی سوخت و احتراق.

[8] Ander Ruiz Zardoya, Iñigo Oregui Bengoetxea, Angel Lopez Martinez, Iñaki Loroño Lucen“Methodological Design Optimization of a Marine LNG Internal Combustion Gas Engine to Burn Alternative Fuels”, 2023, 11, 1194.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]

[۹] وحید جمالی، محرم مختاری(۱۴۰۳)،" شبیه‌سازی عددی عملکرد یک مشعل صنعتی کوره حرارتی دارای فناوری کواندا"، پنجمین کنفرانس بین المللی دو سالانه نفت گاز پتروشیمی.

[10] Zhengzong Huang, Liu Liu, Lu Chen, Changhong Wang, Guofu Wang,Zhaohong Fan, Hongjie Yan “Numerical modeling and parameter optimization of thecombustion chamber in a tower-type zinc refining furnace”, Case Studies in Thermal Engineering 10.1016/j.csite.2024.105450

[11] Dang Khoi Le , Min Jung Lee , Hyunguk Kwon , “Optimization of a hydrogen burner to minimize NOx emissions using computational fluid dynamics and response surface methodology” 10.1016/j.fuel.2025.135818 .

[12] J. Hu, B. Rivin and E. Sher, Exp Therm Fluid, Sci 21, pp. 124-133, 2000.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]

Numerical study on the effect of torch geometry on the combustion process inside an Copper melting anode casting furnace

Ali Afshar[1], Mohammad Hassan Nobakhti [1,*]

1-Department of Mechanical Engineering, Sciences and Researches Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: Autumn 2025 Accepted: Winter 2026

Abstract

In the present study, a numerical investigation was conducted to examine the effect of burner-head geometry on the combustion flow in the anode furnace of the Sarcheshmeh Copper Complex. The simulations were performed using the finite volume method in ANSYS Fluent with an unstructured three-dimensional mesh. To identify the cause of burner-tip burnout, the k–ε turbulence model was employed to capture the turbulent flow field, while the Eddy Dissipation Concept (EDC) combustion model was used to simulate the combustion process. Burner-tip burnout leads to shutdown of the anode furnace; consequently, upstream units such as the refinery must also cease operation, resulting in complete interruption of copper production. Since experimentally designing a new burner to prevent burnout is time-consuming and economically impractical, the burner-head geometry was modified numerically in this research to achieve optimal performance. The numerical results indicate that the burnout is primarily caused by premature flame formation in the vicinity of the burner head. A comparison of the maximum temperature in this region for the two proposed designs with the current design shows that, in Design 1, the temperature decreases by 31%, while in Design 2, the reduction reaches approximately 47% relative to the existing burner. Moreover, the temperature distribution inside the furnace becomes more uniform in Design 2 compared with both Design 1 and the current configuration, and the maximum flame temperature drops by about 90 K. Based on these results, Design 2 was selected as the final design, and the burner with the modified geometry was manufactured and installed in the plant. Routine performance monitoring confirmed that the burner-tip burnout issue has been completely resolved.

Key words: burner tip burnout, furnace combustion temperature, burner geometry modification

*corresponding author: m.nobakhti@srbiau.ac.ir

Cite this article as: Ali Afshar, Mohammad Hassan Nobakhti, Numerical study on the effect of torch geometry on the combustion process inside an Copper melting anode casting furnace. **Journal of Energy Conversion, 2026, 12(4), 1-13**.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.563]