

بررسی عددی اثر تغییر زاویه مشعل‌ها بر پدیده احتراق در دیگ بخار یک نیروگاه منتخب

حمید معصومی* و حمید آب روشن**

پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده تولید نیرو، گروه بهره‌برداری سیستم‌های نیروگاهی
(دریافت: ۱۳۹۱/۳/۱، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۶/۲۶، پذیرش: ۹۱/۷/۱۱)

در این مقاله، اثر تغییر زاویه مشعل‌های دیگ بخار بر روی متغیرهای جریان گازی و فرایند احتراق به صورت عددی بررسی شده است. بدین منظور دیگ بخار نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی بندرعباس با ابعاد واقعی در نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی شده است و معادلات سه‌بعدی انتقال تکانه، انرژی و گونه‌های شرکت‌کننده در واکنش احتراق در فضای محاسباتی به طور کامل حل شده‌اند. اثر آشفته‌گی بر جریان سیال و احتراق به ترتیب با استفاده از مدل‌های $k-\epsilon$ استاندارد و اتلاف گردابه در نظر گرفته شده است و برای منظور کردن اثر انتقال حرارت تشعشع مدل $P1$ به کار رفته است. متغیرهای احتراق و جریان سیال برای زوایای مختلف مشعل‌ها محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تغییر زاویه مشعل‌ها راه کار مناسبی برای کنترل شعله‌ها و دمای قسمت‌های مختلف دیگ بخار و در نتیجه کاهش آلاینده‌ها و محافظت از اجزای داخلی دیگ بخار است. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج منتشر شده مقایسه شده و رفتار قابل قبولی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه: احتراق، زاویه مشعل، شبیه‌سازی عددی، کوره

مقدمه

امروزه، با توجه به بحران انرژی در جهان، بهبود عملکرد پدیده احتراق، به عنوان یکی از پیچیده‌ترین و کاربردی‌ترین پدیده‌های مورد استفاده در صنایع مختلف، مورد توجه ویژه قرار گرفته است. در مدل‌سازی عددی این پدیده باید اثرات برهم‌کنش جریان‌های واکنش‌پذیر، شیمی واکنش، سینیتیک واکنش، اثرات آشفته‌گی و روش‌های مختلف انتقال حرارت در نظر گرفته شود. از طرفی، بخار، سیال قابل قبولی برای انجام کار در بسیاری از نیروگاه‌ها محسوب شده و دیگ‌های بخار به عنوان تولیدکننده بخار از جمله مهم‌ترین تجهیزات صنعتی به شمار می‌آیند. بنابراین، بهینه‌سازی دیگ‌های بخار و بهبود عملکرد پدیده احتراق در آن‌ها می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای سبب کاهش مصرف انرژی و افزایش بازده نیروگاه‌های بخار شود.

اسپالدینگ [۱] جزء اولین کسانی بود که سعی بر مدل‌سازی احتراق کرد و با توجه به حجم بالای محاسبات توانست با ساده‌سازی معادلات مربوطه و تعیین خطای محاسباتی این مشکل را تا حدودی مرتفع سازد. بعد از او افرادی همچون نلسون [۲]، وافین [۳] و یه [۴] نیز در این زمینه به فعالیت پرداختند. امروزه، با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی جریان سیال، می‌توان مشخصه‌های احتراق را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرد و اثر متغیرهای مختلف را بر روی آن‌ها بررسی کرد. در این راستا کیم و چو [۵]، با شبیه‌سازی یک دیگ بخار ۵۰۰ مگاواتی، توزیع دما و پخش اکسیدهای ازت را بررسی کردند. آن‌ها با مقایسه نتایج خود با یافته‌های تجربی اعلام کردند که روش‌های عددی راهیافت مناسبی برای پیش‌بینی صحیح مشخصات یک دیگ بخارند. نتایج آن‌ها همچنین نشان دادند که تولید آلاینده‌ها در دیگ بخار وابستگی زیادی به متغیرهای احتراق مانند دما

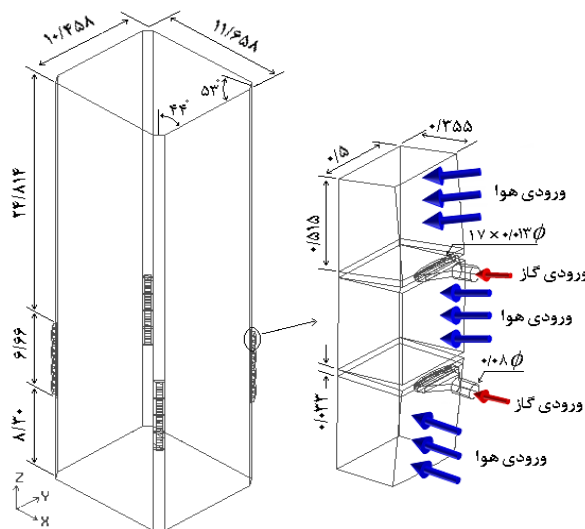
* کارشناس ارشد- نویسنده مخاطب (ایمیل: hmasoumi@nri.ac.ir)

** کارشناس ارشد (ایمیل: habroshan@nri.ac.ir)

و غلظت گونه‌های شرکت‌کننده در واکنش دارد. همچنین، لی و همکارانش [۶]، با شبیه‌سازی کوره یک دیگ بخار ۲۲۰ مگاواتی، متغیرهای عملیاتی آن را در بارهای مختلف بررسی کردند. آن‌ها با این روش دما و غلظت گونه‌های مختلف گازی، تولید و پخش آلاینده‌ها، شار حرارتی و بازده دیگ بخار را به خوبی پیش‌بینی کردند. رحیمی و همکارانش [۷] دیگ بخار نیروگاه بیستون را شبیه‌سازی کردند و ضمن در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشع به دو ردیف از لوله‌های فوق‌گرمکن پلاتن^۱، متغیرهای مختلف احتراق را در این دیگ بخار بررسی کردند. همچنین، احمدی کیا و همکارانش [۸]، با استفاده از شبیه‌سازی عددی دیگ بخار نیروگاه اصفهان، به ارائه راه‌حلی برای جلوگیری از تخریب لوله‌های سوپرهیتر این دیگ بخار پرداختند. در این پژوهش، با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، فرایند احتراق در کوره‌های دیگ بخار نیروگاه بندرعباس با مقیاس واقعی شبیه‌سازی شده است. سپس اثر تغییر زاویه مشعل‌ها بر روی متغیرهای مختلف جریان گازها و احتراق در دیگ بخار بررسی شده است. نرخ انجام واکنش، کسر جرمی گونه‌های شرکت‌کننده و دما و سرعت گازها در کوره محاسبه و توزیع دما و سرعت در دیگ بخار ترسیم شده است.

مشخصات دیگ بخار نیروگاه بندرعباس

دیگ بخار نیروگاه بندرعباس از نوع آویز، درام دار با گرمایش مجدد یک‌مرحله‌ای است. حجم دیگ بخار ۴۵۰۰ متر مکعب و سطح حرارتی آن ۱۹۹۷۵ متر مربع و با ظرفیت تولید بخار به میزان ۱۰۵۶ تن در ساعت است. دیگ بخار دارای ابعادی به عمق ۱۰/۴۵۸، ارتفاع ۳۹/۷۷۴ و عرض ۱۱/۶۵۸ متر بوده و هر وجه آن چهار طبقه مشعل دارد و هر طبقه دارای سه کانال هوا و دو نازل گاز است. شکل ۱ نمای کلی دیگ بخار و یک طبقه از یک وجه مشعل‌ها را نشان می‌دهد [۹].



شکل ۱- نمای کلی کوره و یک طبقه از مشعل‌ها (ابعاد به مترند)

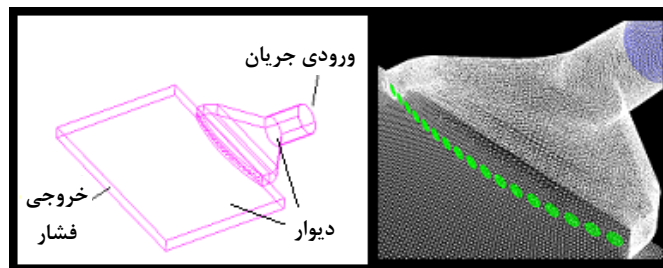
به ازای هر طبقه مشعل دیگ بخار سه کانال هوا برای تامین هوای مورد نیاز احتراق وجود دارد. یکی از این کانال‌ها در بین دو نازل گاز و دو کانال دیگر در بالا و پایین آن‌ها قرار گرفته‌اند. برای اختلاط بهتر گاز با هوا در دیگ بخار، نازل‌های گاز و کانال‌های بالا و پایین هوا در هر طبقه از مشعل‌های دیگ بخار با زاویه +۵ و -۵ نسبت به سطح افق قرار گرفته‌اند. به منظور تولید گردابه آتش، مشعل‌های هر ردیف در گوشه دیگ بخار با زوایای ۳۷ و ۴۶ درجه در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند [۹].

1. Platen superheaters
2. Profile

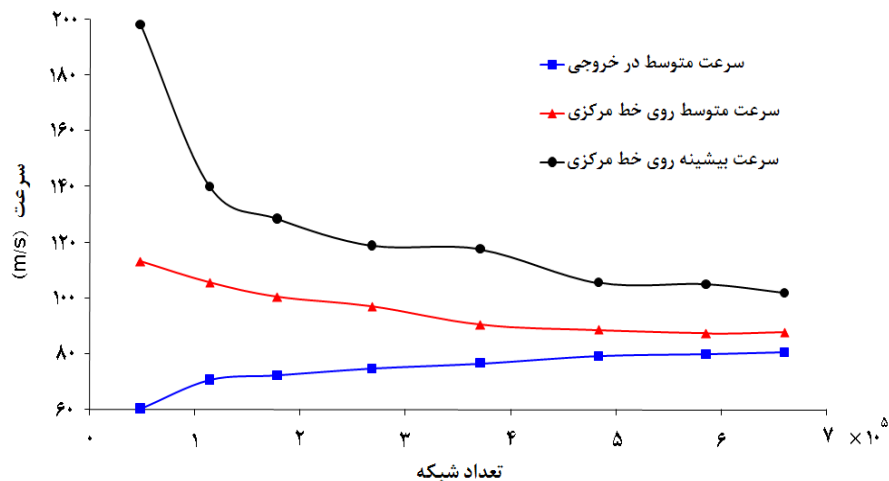
شبکه‌بندی و شرایط مرزی

جریان آشفته در داخل مشعل‌ها دارای سرعت بسیار بالا در فضای کوچک و محدودشده به دیوارهای فلزی است و انجام محاسبات با دقت قابل قبول در چنین شرایطی نیازمند شبکه‌های بسیار ریز و توان محاسباتی بالاست [۱۰]. بنابراین، با هدف کاهش هزینه‌های محاسباتی، حل مسئله در دو فاز مجزا دنبال می‌شود. بدین ترتیب که در فاز اول جریان سیال در داخل مشعل‌ها به طور کامل شبیه‌سازی شده و با قراردادن مشخصات جریان خروجی مشعل‌ها به عنوان ورودی دیگ بخار در فاز دوم به شبیه‌سازی جریان داخل دیگ بخار پرداخته شده است.

شرایط مرزی و نوع شبکه‌بندی مشعل در شکل ۲ نشان داده شده است. شبکه به کار رفته در این قسمت از نوع بی‌سازمان و مثلثی است. به منظور تعیین شبکه بهینه و مستقل کردن نتایج از شبکه، ابتدا مسئله مورد نظر در ۸ سری شبکه با تعداد سلول‌های مختلف به طور کامل حل شده و نتایج به صورت نمودارهای سرعت جریان خروجی در شکل ۳ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نتایج به دست آمده از دو شبکه آخر تقریباً یکسان بوده و بنابراین شبکه با ۵۸۵۴۷۷ سلول برای حل این مسئله انتخاب می‌شود.



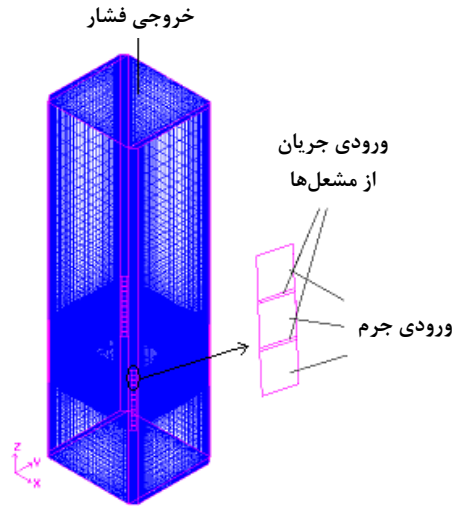
شکل ۲- ابعاد مدل و شرایط مرزی به کار رفته



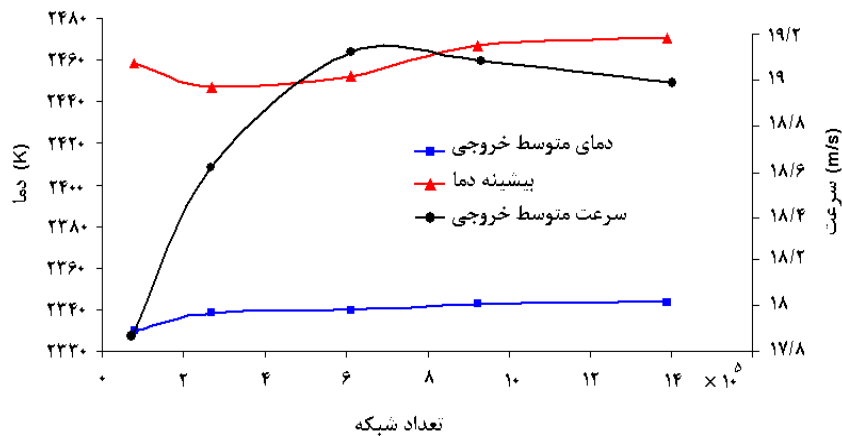
شکل ۳- بررسی استقلال نتایج از شبکه در مشعل

شرایط مرزی و شبکه به کار رفته در شبیه‌سازی دیگ بخار نیز در شکل ۴ دیده می‌شود. شبکه به کار رفته در این قسمت کاملاً با سازمان بوده و دارای ۹۲۴۰۰۰ حجم کنترل است. شبکه در نزدیکی دیواره‌ها و اطراف نازل‌های ورودی گاز و کانال‌های هوا، به علت وجود گرادیان‌های شدید، ریزتر شده است. در این قسمت نیز، با بررسی اختلاف دمای خروجی دیگ بخار در

تحلیل با شبکه‌های مختلف، مطابق با نمودارهای شکل ۵، از استقلال نتایج نسبت به شبکه اطمینان حاصل شده است. برای کانال‌های هوای ورودی و نازل‌های گاز شرط مرزی دبی ورودی در نظر گرفته شده است. شرط مرزی خروجی دیگ بخار فشار اتمسفر بوده و دیوارهای جانبی و کف دیگ بخار با شرط مرزی دیوار با دمای ثابت شبیه‌سازی شده است.



شکل ۴- شبکه‌بندی و شرایط مرزی دیگ بخار



شکل ۵- بررسی استقلال نتایج از شبکه در دیگ بخار

معادلات حاکم

محاسبه عدد رینولدز جریان‌های ورودی به دیگ بخار، به عنوان معیار تشخیص رژیم جریان (آرام یا آشفته)، نشان می‌دهد که عدد رینولدز جریان‌های هوا و گاز ورودی به ترتیب ۶۸۵۲۱۳ و ۷۳۶۸۴۹ است که بسیار بالاتر از حد رینولدز بحرانی برای جریان‌های داخلی است ($Re_{cr} = 4000$). بنابراین، جریان‌های داخل دیگ بخار آشفته بوده و برای محاسبه آن‌ها معادلات پیوستگی، تکانه (Momentum)، انرژی و آشفتگی به طور کامل حل شده است. همچنین، برای تعیین انرژی حرارتی حاصل از احتراق، معادله انتقال گونه‌ها برای هر گونه شرکت‌کننده در واکنش نیز حل شده و اثر انتقال حرارت تشعشع به کمک معادله تشعشع در مسئله منظور شده است.

به منظور فهم بهتر مسئله در این بخش شرح مختصری از معادلات بیان شده ارائه می‌شود. همه این معادلات برای جریان سه‌بعدی، پایا، تراکم‌پذیر و با به‌کار بردن خواص متوسط زمانی برای جریان آشفته بیان می‌شوند [۱۱].

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

که در آن t زمان، ρ چگالی و U بردار سرعت است.

معادله تکانه:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + F_i \quad (2)$$

که در آن P فشار سیال، g بردار شتاب نیروی جاذبه، F بردار مجموع نیروهای حجمی دیگر و μ_t گرانیوی آشفته است که از حل معادلات آشفته‌گی به‌دست می‌آید.

معادلات آشفته‌گی:

در این مطالعه از مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ استفاده شده است. این مدل شامل حل معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفته‌گی و اتلاف آن است. در این مدل، گرانیوی آشفته‌گی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۰].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

که در آن $C_\mu = 0.09$ ثابت بی‌بعد است. معادلات انرژی جنبشی آشفته‌گی و اتلاف آن نیز به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

که در آن $\sigma_\varepsilon = 1/3$ ، $\sigma_k = 1$ ، $C_{1\varepsilon} = 1/44$ و $C_{2\varepsilon} = 1/92$ ثابت‌های مدل بوده و G_k جمله تولید آشفته‌گی و S_k و S_ε به‌ترتیب منابع دیگر آشفته‌گی و اتلاف‌اند.

معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho h u_i) = \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(P u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \Phi + S_h \quad (6)$$

که در آن S_h منابع دیگر آنتالپی تولیدی و Φ تابع اتلاف نامیده می‌شود و با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\Phi = (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

مدل‌سازی احتراق

به منظور شبیه‌سازی احتراق از مدل انتقال گونه‌های شرکت‌کننده در واکنش^۱ استفاده شده است. در این مدل یک معادله انتقال برای تک‌تک گونه‌ها (در اینجا چهار معادله برای متان، اکسیژن، آب و دی‌اکسید کربن) حل شده و در هر دور محاسبات کسر جرمی آن‌ها محاسبه می‌شود. این روش از بررسی واکنش‌های میانی و رادیکال‌ها و دیگر محصولات اضافی احتراق

1. Species transport

صرف نظر می‌کند؛ بنابراین با داشتن دقت قابل قبول از نظر هزینه محاسباتی مقرون به صرفه است. معادله انتقال برای کسر جرمی m_l به صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_l) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho m_l u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\rho D + \frac{\mu_l}{\sigma_m} \right) \frac{\partial m_l}{\partial x_i} \right] + R_l \quad (8)$$

که در آن D ضریب نفوذ گونه l در مخلوط و σ_m عدد اشمیت آشفته‌گی و R_l نرخ خالص تولید گونه l در واکنش شیمیایی است. گرمای تولیدشده بر اثر واکنش احتراق از این معادله محاسبه شده و در عبارت چشمه معادله انرژی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی اثرات آشفته‌گی بر احتراق، از مدل اتلاف گردابه^۱ استفاده شده است. از این مدل در شرایطی استفاده می‌شود که سوخت بسیار سریع بسوزد و در نتیجه نرخ کلی واکنش توسط آشفته‌گی جریان سوخت و هوا کنترل شود. در شعله‌های غیرپیش‌آمیخته سوخت و اکسیدکننده به‌آرامی بر اثر آشفته‌گی جریان مخلوط شده و به منطقه واکنش انتقال می‌یابند و در آنجا به سرعت می‌سوزند. در شعله‌های پیش‌آمیخته واکنش‌های سرد و محصولات داغ به آرامی بر اثر آشفته‌گی جریان مخلوط شده و به منطقه واکنش انتقال می‌یابند و در آنجا واکنش به سرعت انجام می‌شود. در چنین مواردی به احتراق، اختلاط-کنترل گفته می‌شود. این فرایند پیچیده بوده و در آن نیازی به داشتن اطلاعات در مورد نرخ انجام واکنش‌های میانی نیست. در این موارد از نرخ سینتیک شیمیایی می‌توان با اطمینان صرف نظر کرد [۱۲].

مدل اتلاف گردابه یک از مدل‌های برهم کنش احتراق-آشفته‌گی است که توسط فلونت بر مبنای توضیحات فوق ارائه شده است و در آن نرخ خالص تولید گونه l در واکنش r ، $R_{l,r}$ است که برابر کوچک‌ترین مقدار از بین مقادیر دو عبارت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$R_{l,r} = v'_{l,r} M_l A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{m_R}{v'_{R,r} M_R} \right) \quad (9)$$

$$R_{l,r} = v'_{l,r} M_l A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P m_P}{\sum_j^N v''_{j,r} M_j} \quad (10)$$

که در آن $v'_{l,r}$ و $v''_{j,r}$ به ترتیب ضرایب استوکیومتری واکنشگر و محصول l در واکنش r است، M_l وزن مولکولی گونه l ، N تعداد گونه‌های شرکت‌کننده در واکنش، $A=5$ و $B=0.5$ ثابت‌های تجربی و زیرنویس‌های P و R به ترتیب به محصولات و واکنشگرها اشاره دارند.

دو رابطه بالا یکی بر حسب محصولات و دیگری بر حسب واکنشگرها بیان شده که هر کدام نرخ محدودکننده واکنش را با توجه به کسر جرمی مربوطه و مقیاس زمانی جریان آشفته (k/ε) محاسبه می‌کند و از بین این دو مقدار، نرخ واکنش کوچک‌تر به عنوان نرخ کنترل‌کننده واکنش مورد استفاده قرار گرفته و نرخ خالص انجام واکنش به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$R_l = M_l \sum_{r=1}^{N_R} R_{l,r} \quad (11)$$

که در آن N_R تعداد واکنش‌هاست.

مدل‌سازی تشعشع

در کوره، تشعشع به عنوان مهم‌ترین روش انتقال حرارت از شعله به محیط اطراف به دلیل دمای بسیار بالای آن مطرح است. رابطه حاکم بر تشعشع شعله بر محیط اطراف این پدیده را به‌دقت در فضای فیزیکی معرفی می‌کند. انتقال حرارت تشعشعی از شعله به محیط اطراف و فضای درون محفظه احتراق از نوع حجمی است. در حالت کلی مدل‌سازی تشعشع حجمی در یک

فضای سه بعدی مستلزم هزینه محاسباتی بسیار بالایی است و می بایست معادله انتقال تشعشع به ازای تک تک سلول ها و در کلیه جهات سه بعدی (زوایای یک کره) در نظر گرفته شود. از این رو به منظور کاهش حجم محاسبات و قابل استفاده بودن آن ها، مدل های مختلفی ارائه شده است که هر یک مناسب شرایطی از دامنه حل است. معادله انتقال تشعشع (RTE) برای یک محیط جاذب، ساطع کننده و پراکندگی متوسط در موقعیت \vec{r} و جهت \vec{s} به صورت زیر است [۱۱]:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{r}, \vec{s}') d\Omega' \quad (12)$$

که در آن \vec{s}' بردار جهت پراکندگی، s طول مسیر، a ضریب جذب، σ_s ضریب پراکندگی، $\sigma = 5.672 \times 10^{-8} W/m^2 - K^4$ ثابت استفان-بولتزمن، I شدت تشعشع، T دمای محلی، Φ تابع فاز و Ω' زاویه جامد است.

با توجه به وجود گازهای دی اکسید کربن و بخار آب در محصولات احتراق، از مدل مجموع وزنی چند گاز خاکستری (WSGGM)^۱ برای بررسی رفتار غیرخاکستری گازها و تعیین ضریب جذب مخلوط استفاده شده است [۱۱]. با توجه به نبود ذرات خارجی در محیط، از پراکندگی صرف نظر شده [۱۲] و طبیعت جسم پخش کننده، که با تابع فاز مشخص می شود، ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است.

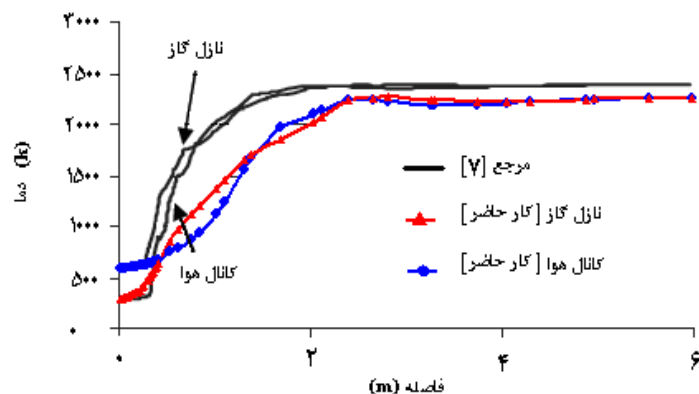
در مسئله حاضر، با توجه به ضخامت نوری نسبتاً بالا، سادگی، هزینه محاسباتی پایین و دقت قابل قبول، مدل $P1$ برای مدل سازی تشعشع انتخاب شده است.

الگوریتم حل

معادلات حاصل از مدل سازی انجام گرفته یک دستگاه با ۱۲ معادله را تشکیل می دهند که برای حل آن از نرم افزار فلونت بر اساس روش حجم محدود استفاده شده است. برای میانمایی عبارتهای فشاری روی سطوح حجم کنترل از روش استاندارد استفاده شده و دیگر معادلات با استفاده از طرح اختلاف بالادست مرتبه اول گسسته سازی شده اند. به منظور ارتباط میدان های پیوستگی و تکانه برای حصول معادله تصحیح فشار و سرعت، الگوریتم سیمپل مورد استفاده قرار گرفته است.

مقایسه با نتایج دیگران

به منظور اطمینان از صحت مدل سازی انجام گرفته، نتایج مربوط به دما روی خطوطی که از مقابل بالاترین نازل تا مرکز دیگ بخار کشیده شده اند برای حالت مشعل افقی ($a=0$) در شکل ۶ رسم شده و با کار مشابه در مرجع [۷] مقایسه شده است.

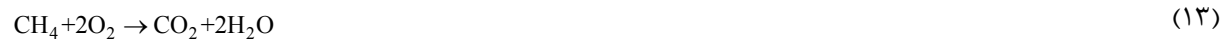


شکل ۶- مقایسه نتایج موجود با مرجع [۷]

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، رفتار نمودارها کاملاً یکسان بوده و تنها تفاوت موجود مقداری کاهش دما در کار حاضر را نشان می‌دهد که می‌تواند به دلیل اختلاف در برخی مدل‌ها و شرایط اولیه انتخاب‌شده (مانند مدل تشعشع، ضریب جذب اولیه و حذف سوپرهیترها) باشد. البته واضح است که دماهای موجود در کار حاضر تطابق بیشتری با مقادیر واقعی دارد.

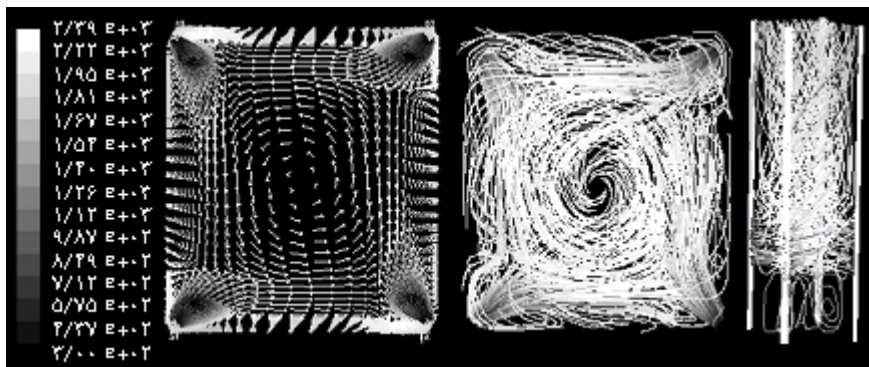
نتایج

همان‌طور که گفته شد، ابتدا جریان سیال در نازل‌های گاز شبیه‌سازی شده، سپس نتایج خروجی آن‌ها به عنوان ورودی دیگ بخار در نظر گرفته شده است. واکنش صورت‌گرفته در این مدل، سوختن گاز متان است که معادله کامل آن به صورت زیر است.



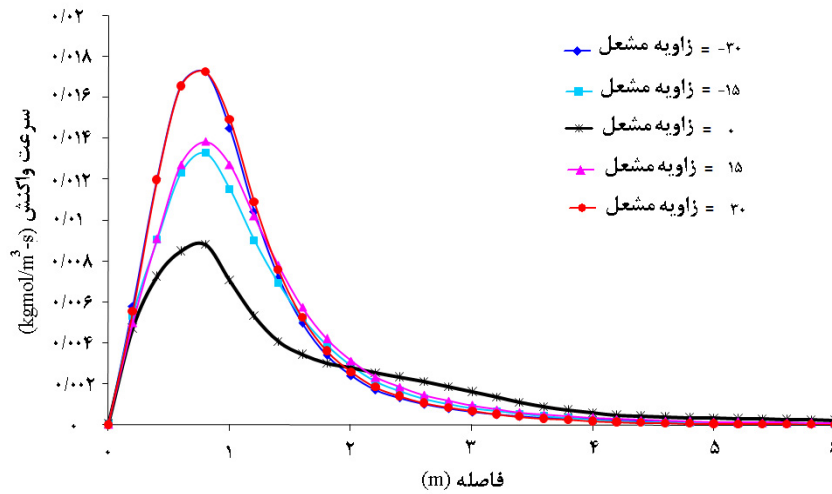
این واکنش به صورت غیرپیش‌آمیخته انجام می‌شود؛ یعنی گاز و هوا از دو مجرای مجزا وارد دیگ بخار شده و عمل احتراق همزمان با ورود مخلوط سوخت و هوا انجام می‌گیرد [۱۳].

برای نشان‌دادن نتایج به‌دست آمده، علاوه بر سطح خروجی کوره، از دو مقطع دیگر نیز استفاده شده است. مقطع A که صفحه‌ای است عمود بر ارتفاع دیگ بخار (موازی سطح خروجی) مقابل بالاترین نازل گاز ($z = 14/443 \text{ m}$) و مقطع B که صفحه‌ای است موازی ارتفاع کوره و از مرکز و دو گوشه مقابل کوره می‌گذرد (شکل ۴). همچنین، برای رسم نمودار متغیرهای مختلف از مقابل مشعل‌ها تا مرکز دیگ بخار، این مقادیر روی خطوطی که در فواصل مختلف از مشعل‌ها و به موازات آن‌ها رسم شده‌اند، میانگین‌گیری شده است. شکل ۷ تشکیل گردابه آتش در کوره به صورت بردارهای سرعت و خطوط جریان روی مقطع A بر حسب دما را نشان می‌دهد.

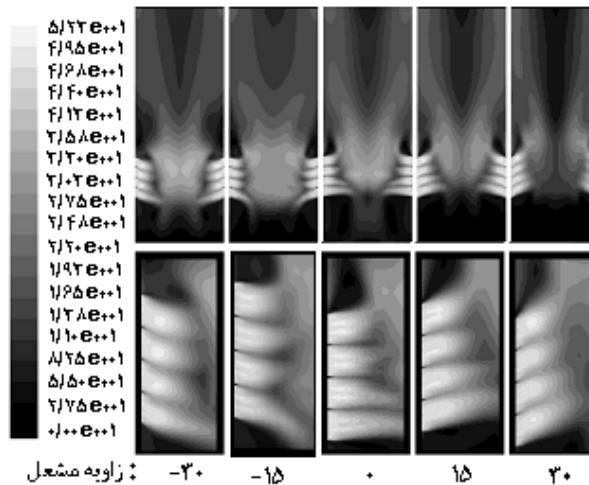


شکل ۷- خطوط جریان و تشکیل گردابه آتش بر حسب دما

در شکل ۸، متوسط نرخ انجام واکنش در مقابل مشعل‌ها تا مرکز کوره برای زوایای مختلف مشعل‌ها رسم شده است. همان‌گونه که در این نمودار دیده می‌شود، سرعت واکنش در ابتدا با ورود مخلوط به داخل کوره به مقدار بیشینه خود می‌رسد و در ادامه با سوختن و عمل احتراق، سرعت واکنش نیز کاهش یافته و به مقدار صفر می‌رسد. در این محدوده همه متان با هوا واکنش داده و اکسیژن موجود در هوای ورودی صرف سوختن متان شده و دی اکسید کربن و آب تولید می‌شود. همچنین، این نمودار حاکی از آن است که نرخ انجام واکنش، ضمن استقلال از جهت زاویه مشعل‌ها، به اندازه این زاویه وابستگی مستقیم دارد. به طور مثال، نرخ واکنش زوایای ۱۵- و ۱۵+ برابر است. نرخ انجام واکنش تابعی از غلظت واکنشگرها و میزان تداخل آن‌هاست [۱۳] و از آنجا که تداخل واکنشگرها خود تابعی از سرعت و آشفتگی جریان است، به منظور تحلیل مناسب‌تر نمودار شکل ۸، بهتر است سرعت جریان در مقابل مشعل‌ها نیز بررسی شود. در شکل ۹، توزیع سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه در مقطع B برای زوایای مختلف مشعل (a) به نمایش درآمده است.

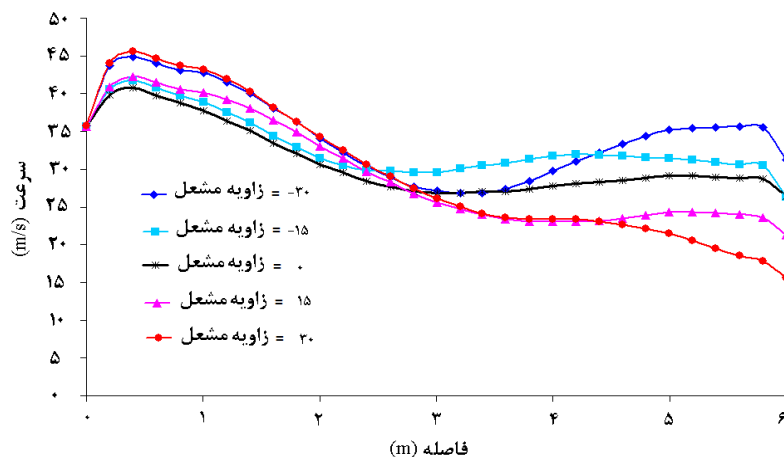


شکل ۸- متوسط نرخ انجام واکنش

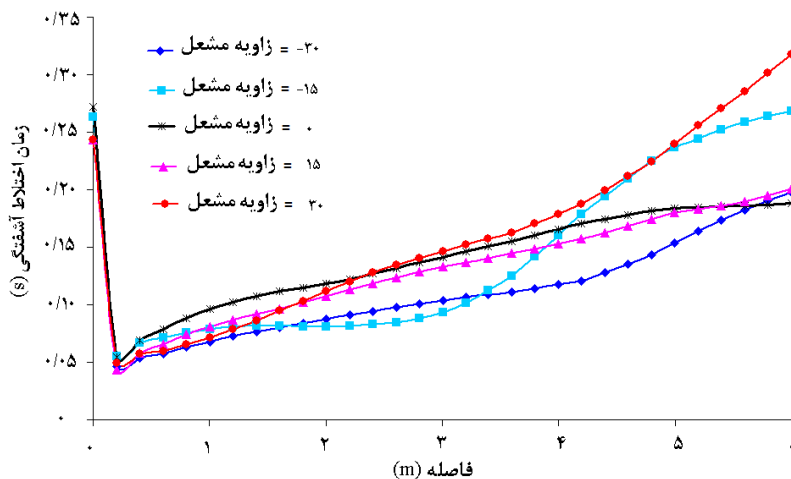


شکل ۹- توزیع سرعت جریان در مقطع B

برای درک بهتر تغییرات نرخ انجام واکنش احتراق در مقابل مشعل‌ها، نمودارهای متوسط سرعت مخلوط گازی و زمان اختلاط آشفته‌گی (k/ε) در این ناحیه برای زوایای مختلف مشعل‌ها در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ رسم شده‌اند. جریان‌های سوخت و هوا با سرعت زیاد وارد دیگ بخار شده و با نزدیک شدن به مرکز کوره، الگوی آن‌ها تحت تأثیر تغییر زاویه مشعل‌ها و گردابه آتش قرار می‌گیرد. این موضوع به وضوح در میزان سرعت و آشفته‌گی جریان‌ها در مرکز کوره موثر است. همان‌طور که از نمودار و توزیع سرعت مشخص است، افزایش بزرگی زاویه مشعل‌ها سبب افزایش سرعت جریان و در نتیجه آشفته‌گی و تداخل بیشتر جریان‌های ورودی در مقابل مشعل‌ها می‌شود. از آنجا که مدل اتلاف گردابه برای بررسی اثرات آشفته‌گی بر احتراق استفاده شده است و در این مدل کنترل واکنش به طور کامل توسط آشفته‌گی جریان صورت می‌گیرد، افزایش سرعت و آشفته‌گی در زوایای بالاتر مشعل‌ها منجر به افزایش نرخ انجام واکنش می‌شود. همچنین، بر اساس معادلات (۹) و (۱۰)، نرخ انجام واکنش با زمان اختلاط آشفته‌گی رابطه عکس دارد و همان‌طور که در نمودار ۱۱ دیده می‌شود زمان اختلاط آشفته‌گی با افزایش بزرگی زاویه مشعل‌ها کاهش می‌یابد که خود دلیلی بر افزایش نرخ انجام واکنش است.



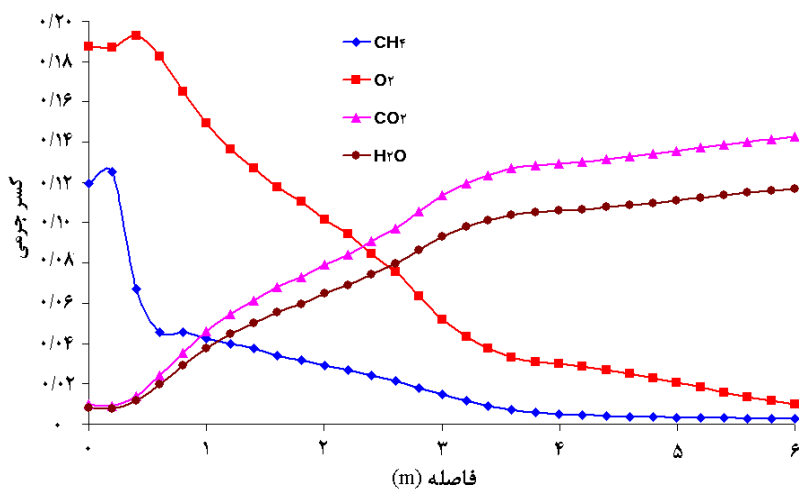
شکل ۱۰- متوسط سرعت جریان‌ها (متر بر ثانیه)



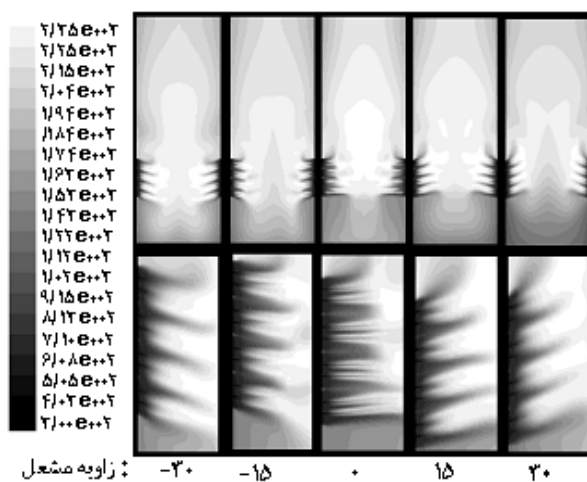
شکل ۱۱- متوسط زمان اختلاط آشفتنگی (ثانیه)

میزان کسر جرمی واکنشگرها و محصولات احتراق در مقابل مشعل‌ها نیز به طور مستقیم به نرخ انجام واکنش وابسته است. اما، برای نمونه و مقایسه، نمودار میانگین کسر جرمی برای زاویه مشعل صفر درجه در شکل ۱۲ رسم شده است. این نمودار نیز گویای کاهش کسر جرمی سوخت و اکسیژن از مقابل مشعل‌ها تا مرکز دیگ بخار و افزایش محصولات احتراق (دی اکسید کربن و آب) در همان فاصله است.

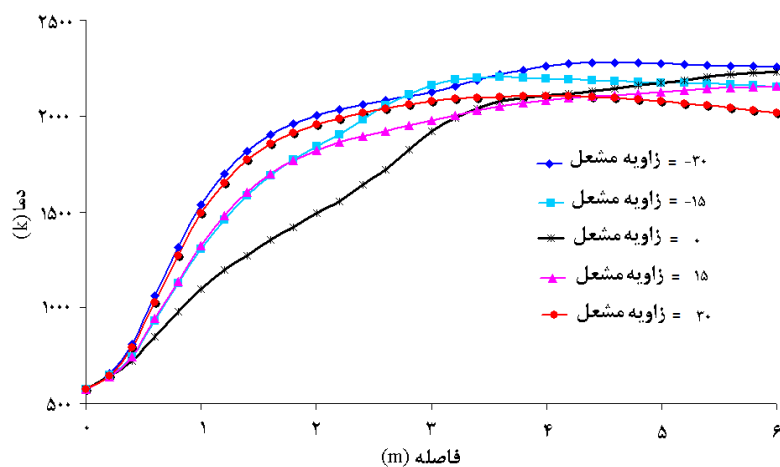
در شکل ۱۳ توزیع دما بر حسب کلوین در مقطع B نشان داده شده و منطقه تشکیل شعله‌ها بزرگ‌نمایی شده است. همچنین نمودار متوسط دما در مقابل مشعل‌ها تا مرکز دیگ بخار برای زوایای مختلف مشعل‌ها در شکل ۱۴ رسم شده است. بر اساس نمودار شکل ۱۴، دمای متوسط در این ناحیه با سرعت انجام واکنش نسبت مستقیم دارد و در مقابل مشعل‌ها (تا حدود فاصله ۳ متری) با افزایش اندازه زاویه مشعل‌ها افزایش دما رخ می‌دهد. اما در مرکز کوره (فاصله بیش از ۳ متر) جهت افزایش زاویه بر تغییرات دما موثر می‌شود، زیرا همانطور که از پروفیل‌های سرعت (شکل ۹) و دما (شکل ۱۳) می‌توان نتیجه گرفت، افزایش زاویه منفی مشعل‌ها منجر به تشکیل جریان هوای داغ در مرکز کوره می‌شود، حال آنکه افزایش زاویه در جهت مثبت سبب هدایت این جریان به سمت کناره‌های کوره خواهد شد. بنابراین، در مرکز دیگ بخار برای زاویه مشعل منفی افزایش دمای میانگین و برای زاویه مشعل مثبت کاهش دمای میانگین اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۱۲- کسر جرمی شرکت کننده‌ها برای زاویه مشعل صفر درجه



شکل ۱۳- توزیع دما در مقطع B



شکل ۱۴- متوسط دما (کلوین)

شکل ۱۳ به خوبی نشان می‌دهد که تغییر زاویه مشعل‌ها سبب هدایت شعله‌ها می‌شود. از این رو زاویه منفی‌تر سبب هدایت شعله‌ها به سمت کف دیگ بخار و در نتیجه افزایش دما در قسمت تحتانی می‌شود و زاویه مثبت‌تر سبب هدایت شعله‌ها به سمت خروجی دیگ بخار و افزایش دما در قسمت فوقانی خواهد شد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام‌گرفته نشان می‌دهد که تغییر زاویه مشعل‌ها راه‌حل مناسبی برای کنترل شعله‌ها و دمای قسمت‌های مختلف دیگ بخار است. بر این اساس زاویه منفی مشعل‌ها سبب هدایت شعله‌ها به سمت کف و افزایش دمای قسمت تحتانی دیگ بخار و همچنین جریان گازهای داغ در مرکز می‌شود. برعکس، زاویه مثبت مشعل‌ها سبب هدایت شعله‌ها به سمت خروجی و افزایش دمای قسمت فوقانی دیگ بخار و همچنین جریان گازهای داغ در کناره‌ها خواهد شد. از این ابزار کنترلی می‌توان به منظور محافظت از تجهیزات درون دیگ بخار (مثل فوق‌گرمکن‌ها، واتروال‌ها^۱ و بازگرمکن‌ها^۲ و ...) در مقابل حرارت مستقیم شعله‌ها در شرایط مختلف کاری بهره گرفت.

افزایش زاویه مشعل‌ها همچنین سبب افزایش سرعت و تداخل بیشتر گازهای ورودی و در نتیجه افزایش نرخ انجام واکنش می‌شود که خود بر دما و کسر جرمی گونه‌های شرکت‌کننده در واکنش احتراق اثر مستقیم دارد. نتایج نشان دادند که افزایش زاویه مشعل، صرف‌نظر از مثبت یا منفی بودن آن، موجب افزایش نرخ واکنش در نزدیکی مشعل‌ها خواهد شد. از سوی دیگر، در زوایای مثبت، سرعت جریان گاز در نزدیکی دیواره‌ها بیشتر شد، در حالی که زوایای منفی سرعت یکنواخت‌تری را در کوره به همراه داشتند. با این حال توزیع دمای کوره در زوایای مثبت یکنواخت‌تر می‌شود. به طور کلی، با کاهش زاویه مشعل از مقدار صفر، هسته مرکزی داغی که در مرکز کوره شکل گرفته است کمی به پایین آمده و موجب افزایش تشعشع در قسمت تحتانی کوره می‌شود. از طرف دیگر از سوختگی لوله‌های فوق‌گرمکن‌هایی که بالای کوره قرار گرفته‌اند جلوگیری می‌شود. افزایش زاویه مشعل از مقدار صفر نیز اگرچه اثر نسبتاً مشابهی در مورد سوختگی فوق‌گرمکن‌ها دارد ولی هسته مرکزی گاز داغ را به پایین کوره منتقل نمی‌کند، بلکه آن را در عرض منبسط می‌کند. بدین ترتیب توزیع گاز یکنواخت‌تر شده، از سوی دیگر سرعت جریان و در نتیجه اثر انتقال حرارت جابه‌جایی در دیواره‌ها کمی افزایش می‌یابد.

منابع

1. D. B. Spalding, *The Art of Partial Modeling, Ninth Symposium (International) on Combustion*, Academic Press, New York, 1963, pp. 833-843.
2. H. F. Nelson, "Combustion Modeling in Large Gas-Fired Furnaces," *Heat & Mass Transfer*, 6, No. 1, 1979, pp. 23-33.
3. A. M. Abdullin and V. Vafin, "Numerical Investigation of the Effect of Tube Waterwall and Combustion Products on Heat Transfer in Furnaces," *J. Eng. Physics and Thermophysics*, 65, No. 2, 1994, pp. 752-757.
4. G. H. Yeoh, R. K. K. Yuen, S. C. P. Chueng and W. K. Kwok, "On Modeling Combustion Radiation and Soot Processes in Compartment Fires," *Building and Environment*, 38, 2003, pp. 771-785.
5. C. R. Choi and C. N. Kim, "Numerical Investigation on the Flow Combustion and NO_x Emission Characteristics in a 500 MW_e Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler," *Fuel*, 88, No. 9, 2009, pp. 1720-1731.
6. Z. Li, J. Jing, G. Liu, Z. Chen and C. Liu, "Measurement of Gas Species, Temperatures, Char Burnout, and Wall Heat Fluxes In A 200-Mw_e Lignite-Fired Boiler at Different Loads," *Applied Energy*, 87, No. 4, 2010, pp. 1217-1230.
7. M. Rahimi, S. M. Shariati and A. Khoshhal, "Investigation of Combustion and Transport Phenomena in Bistoun Power Plant Using CFD," *10th Congress of Chemical Engineering*, Sistan and Baluchestan University, Sistan and Baluchestan, Iran, November 2005, (in Farsi).
8. S. Falahatkar and H. Ahmadikia, "Developing a New Method for Prevention of Superheater Tubes Destruction in Boiler," *Second Conference of Power Plant Industrial*, Sharif University, Tehran, November 2010, (in Farsi).
9. Bandar Abbas Power Plant Documents.
10. H. K. Versteeg, W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method*, First Edition, New York, Longman Ltd, 1995.

1. Waterwalls
2. Reheaters

11. Fluent User's Guide, 2006.
12. J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*, Third Edition, Cambridge, Massachusetts, Phlogiston Press, 2008.
13. A. M. Kanury, *Introduction to Combustion Phenomena*, First Edition, New York, Gordon and Breach, 1977.

English Abstract

Numerical Investigation of Burner Angles Effect on the Combustion Phenomenon in a Selected Power Plant Boiler

H. Masoumi and H. Abroshan

Niroo Research Institute, Power Generation Research Center, Power Plant Operation Systems

(Received: 2012.5.21, Received in revised form: 2012.9.16, Accepted: 2012.10.2)

In this paper the effect of burners tilt angle on gaseous flows and combustion process is numerically investigated. The furnace of the Bandar Abbas power plant boiler was comprehensively simulated using FLUENT software on the actual scale. The three dimensional Navier-Stokes, the energy and the chemical species transport equations were solved in the computational domain. The standard $k-\epsilon$ turbulence model for fluid flow and the eddy dissipation model for turbulent combustion were utilized and radiation heat transfer was considered using the P1 model. The effects of tilt angle on the fluid flow and combustion parameters were analyzed at a constant air and fuel flow rate. Results show that changing the burners tilt angle is an appropriate way to control the flames and the temperature of different boiler parts. The obtained results were compared with the corresponding results in the literature which showed good agreement.

Keywords: Burners tilt angle, Combustion, Furnace, Numerical simulation