

مدل سازی ضریب انتقال حرارت تابشی در بستر سیال گردشی

سعید رسولی*⁺

اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، دانشکده فنی، صندوق پستی ۱۱۹-۸۴۱۷۵

محمد رضا گلرینز

سوند، یومنو، دانشگاه یومنو، گروه انرژی

علی اصغر حمیدی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده: یک ساختار دوفازی شامل جریانی از ذره‌های خوشه‌ای شکل و نیز جریان رقیقی از مواد معلق (ذره‌های جامد و گاز) در مجاور سطح انتقال حرارت برای مدل‌سازی ضریب انتقال حرارت تابشی در نظر گرفته شده است. توزیع شدت تابشی به صورت یک بعدی و ایزوتروپیک در دو جهت مخالف یکدیگر در امتداد عمود بر سطح انتقال حرارت (دیواره‌ی بستر) فرض شده است. توزیع دما و نیز توزیع غلظت ذره‌های جامد در لایه مرزی مجاور دیواره بستر در مدل لحاظ شده است. با استفاده از مدل بالا اثر پارامترهای مؤثر در ضریب انتقال حرارت تابشی بررسی شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت تابشی با افزایش پارامترهای دمای بستر، دمای دیواره، ضریب نشر دیواره و ضریب نشر ذره‌ها، افزایش می‌یابد. تاثیر اندازه‌ی ذره‌ها و نیز قطر ریزر بر ضریب انتقال حرارت تابشی به چگالی‌های مواد معلق پایین محدود می‌شود. مدل معرفی شده با نتیجه‌های آزمایشگاهی ارایه شده توسط سایر محققان سازگاری مناسبی دارد.

واژه‌های کلیدی: بستر سیال گردشی، تابش، ضریب انتقال حرارت، مدل‌سازی.

KEY WORDS: Circulating fluidized bed, Radiation, Heat transfer coefficient, Modeling.

مقدمه

جذب و ضریب‌های پراکندگی مواد معلق مؤثر است [۱]. هنگامی که تابش قابل صرف‌نظر باشد، شار حرارتی کل با کاهش قطر ذره‌ها، افزایش می‌یابد و این امر به علت کاهش متوسط فاصله بین ذره‌ها و دیواره در هدایت انتقال حرارت است [۲ و ۳].

۲- چگالی مواد معلق: این پارامتر به‌عنوان اصلی‌ترین عامل مؤثر در انتقال حرارت در بستر سیال گردشی است و بیشتر محققان

انتقال حرارت در بستر سیال برای طراحی و بهینه‌سازی دیگ‌های بخار بستر سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای زیر از مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرایند انتقال حرارت از بستر به دیواره است:

۱- اندازه‌ی ذره‌ها در بستر: هنگامی که انتقال حرارت تابشی مورد بررسی قرار می‌گیرد، اندازه‌ی ذره‌ها متناسب با d_p^{-1} در ضریب‌های

+E-mail: saeid.rasouli@iaukhsh.ac.ir

* عهده دار مکاتبات

کاهش حتی به نصف مقدار انتقال حرارت ر مقایسه با بدنه اصلی لوله نیز می‌رسد [۱۸].

۷- دمای بستر: افزایش دمای بستر باعث افزایش رسانایی حرارتی گاز و افزایش تابش در دماهای بالا می‌شود. دما در دیگ‌های بخار صنعتی در حدود ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده و تابش ۲۵ تا ۵۰ درصد از ضریب انتقال حرارت کلی را شامل می‌شود [۱۹ و ۲۰]. مدل‌های معتبر موجود برای تخمین ضریب انتقال حرارت تابشی در بستر سیال گردشی عبارت‌اند از:

مدل باسو و ناگ، در این مدل یک فرایند گذرا از بسته‌های ذره‌ها به دیواره در نظر گرفته شده است، به طوری که شار حرارتی وابسته به زمان ماندگاری تماس بسته‌های ذره‌ها با سطح دیواره است. مولفه تابشی به صورت مجموع شارهای تابشی بسته‌های ذره‌ها و فاز رقیق (گاز) مدل شده است [۵].

مدل چن و همکاران، در این مدل موازنه انرژی در شرایط پایدار برای یک حجم معیار شامل انتقال حرارت جابه‌جایی و تابش مواد معلق در نظر گرفته شده است. تغییرات دما در جهت‌های شعاعی و عرضی در بستر سیال لحاظ و فرض شده که ذره‌های جامد دارای توزیع یکنواخت عرضی در طول رایزر باشند [۲۱].

مدل وردرمن و وردر، در این مدل مواد معلق به صورت مجموعه‌ای از ذره‌های کروی با اندازه‌ی یکنواخت چیده شده به صورت مکعبی فرض شده است. رویه‌های ذره‌های فرض شده، به عنوان سطح مبادله کننده تابش در نظر گرفته شده است [۲۲].

مدل گلاتزر و لینزر، در این مدل با در نظر گرفتن توزیع دما در لایه مرزی حرارتی با غلظت یکنواخت ذره‌های نزدیک سطح انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت تابشی به دست آمده است [۲۳]. فرضیه‌های اصلی و پارامترهای موجود در مدل‌های بالا در جدول ۱ فهرست شده است. در هیچ یک از مدل‌ها تغییرات غلظت ذره‌ها در سطح مقطع بستر در نظر گرفته نشده است. در مدل پیشنهادی در این تحقیق، توزیع دما و نیز توزیع غلظت ذره‌های جامد در لایه مرزی حرارتی و هیدرودینامیکی نزدیک سطح انتقال حرارت مورد توجه قرار گرفته است.

نظریه‌ی انتقال حرارت تابشی در بستر سیال

جذب^(۱) و نشر^(۲) مکانیسم‌های اصل یانتقال حرارت تابشی در محیط همگن مانند گازها است. مکانیسم پراکندگی^(۳) شامل

نتیجه‌های تجربی انتقال حرارت را برحسب چگالی مواد معلق در سطح مقطع بستر به دست آورده‌اند [۴-۷].

تمرکز ذره‌های جامد در لایه نزدیک دیواره با افزایش چگالی مواد معلق افزایش می‌یابد [۸]. ضخامت این لایه متناسب با $D^{-0.57}$ است [۹]. ضخامت بیشتر این لایه و غلظت بیشتر ذره‌ها در این لایه باعث افزایش مقاومت تابشی بین فضای میان بستر و دیواره شده که باعث کاهش انتقال حرارت تابشی می‌شود.

۳- سرعت متوسط گاز: افزایش سرعت متوسط گاز باعث خروج ذره‌های بیشتری از بالای رایزر بستر می‌شود و افت فشار در طول رایزر را کاهش می‌دهد [۱۰]. بنابراین در یک نرخ ثابت گردشی ذره‌ها با افزایش سرعت متوسط گاز، چگالی مواد معلق در بستر کاهش یافته و باعث کاهش ضخامت لایه مرزی در دیواره شده و ضریب‌های انتقال حرارت تابشی را افزایش می‌دهد. اثر سرعت متوسط گاز روی ضرایب انتقال حرارت، بستگی به نحوه جابه‌جایی ذره‌ها در مجاور دیواره خواهد داشت.

۴- تشکیل خوشه‌های ذره‌ها: در بستر سیال گردشی خوشه‌هایی از ذره‌های به هم چسبیده تشکیل شده است [۱۱ و ۱۲]، این خوشه‌ها در ناحیه مرکزی رایزر از پایین به بالای رایزر حرکت کرده و در ناحیه مرزی دیواره، روی دیواره به سمت پایین جابه‌جا می‌شوند، به طوری که پس از طی مسافت حدود ۱ تا ۳ متر، به واسطه نیروی ناشی از گاز و یا ضربه ذره‌های دیگر از هم پاشیده می‌شوند. تشکیل این خوشه‌ها، سبب ایجاد یک سپر تابشی ضخیم در مجاور دیواره شده که باعث کاهش شار تابشی به دیواره می‌گردد [۱۳ و ۱۴].

۵- ضخامت لایه گاز: ذره‌ها و خوشه‌های سقوط کرده در مجاور دیواره بستر، به وسیله‌ی لایه نازکی از گاز از جداری دیواره جدا می‌شوند، ضخامت این لایه از مرتبه‌ی قطر متوسط ذره‌ها است [۱۵ و ۱۶]. ضخامت لایه گاز اثر مهمی بر مولفه هدایتی انتقال حرارت خواهد داشت. به طوری که افزایش ضخامت لایه گاز باعث افزایش مقاومت هدایتی شده، اما اثر زیادی روی مؤلفه تابشی انتقال حرارت ندارد [۱۷].

۶- هندسه دیواره‌ی بستر: دیواره بستر سیال گردشی از لوله‌های عمودی تشکیل شده که به وسیله‌ی پره‌های جانبی به یکدیگر متصل شده است. هنگامی که خوشه‌های ذره‌ها به دیواره می‌رسند، بر روی این پره‌ها افتاده و با افزایش زمان ماندگاری این

(۱) Absorption

(۲) Emission

(۳) Scattering

جدول ۱- فرضیه‌های اصلی و پارامترهای استفاده شده در مدل‌های انتقال حرارت تابشی در بستر سیال گردش‌ی.

مدل	پارامترها	فرضیه‌ها
باسو و ناگ [۵]	f, e_{cl}, e_d, T_b T_w, e_p, e_w	- ذره‌های کروی - مولفه انتقال حرارت شامل هدایت و تابش - توزیع دما و ضریب خلا یکنواخت در خوشه‌ها و فاز رقیق
چن و همکاران [۲۱]	k_s, k_a, k_c, ϵ G', u_p, u_g, e_w T_b, T_w	- جریان ذره‌های جامد به طرف بالا - صرف نظر از تابش در جهت محوری - غلظت یکنواخت ذره‌های جامد در بستر
وردمن و وردر [۲۲]	$e_i, T_i, F_{ij}, \epsilon(r)$	- ذره‌های کروی با اندازه‌ی یکنواخت - لحاظ توزیع غلظت ذره‌های در جهت شعاعی
گلاتر و لینزر [۲۳]	k_s, k_a, k_c, T_b T_w, e_p, e_w, δ_c	- ذره‌های کروی - تابش یک بعدی - سطح انتقال حرارت خاکستری - دمای متوسط در مرکز بستر و ناحیه شعاعی - غلظت یکنواخت ذره‌های جامد - لحاظ توزیع دما در لایه آمولوسیون

$-a_{\lambda} i'_{\lambda}(x)$: کاهش شدت شار تابشی به‌واسطه‌ی جذب
 $-s_{\lambda} i'_{\lambda}(x)$: کاهش شدت شار تابشی به‌واسطه‌ی پراکندگی
 $+a_{\lambda} i'_{\lambda b}(x)$: شدت شار تابشی به‌واسطه‌ی نشر و عبارت چهارم سمت راست معادله (۱)، بیان کننده شدت شار تابشی به واسطه‌ی پراکندگی تابش از جهت‌های متفاوت به طرف جهت مورد نظر است.

i'_{λ} ، شدت تابش به‌عنوان انرژی بر واحد سطح و واحد زاویه فضایی ذره‌های جامد در طول موج λ تعریف می‌شود، بنابراین، تابع فاز پراکندگی در یک فرایند پراکندگی ایزوتروپیک برابر یک است، $\Phi(\lambda, w, w_i) = 1$. ضریب‌های پراکندگی و جذب به‌صورت قسمتی از انرژی تلف شده از انتشار امواج تابشی در واحد طول انتشار موج تعریف شده و دارای واحد عکس طول (۱/L) هستند. مخلوط ذره‌های جامد و گاز رفتاری نزدیک یک محیط خاکستری داشته و ذره‌های جامد در داخل گاز باعث جذب یا نشر تابش شده به‌طوری که ضریب‌های جذب و نشر با یکدیگر برابر و مستقل از طول موج هستند.

بنابراین، معادله (۱) را می‌توان به‌صورت زیر ساده کرد:

$$\frac{di'_{\lambda}}{dx} = -ai'_{\lambda}(x) - si'_{\lambda}(x) + ai'_{\lambda b}(x) + \frac{S_{\lambda}}{4\pi} \int_{w_i=0}^{4\pi} i'_{\lambda}(x) \Phi(w, w_i) dw_i \quad (2)$$

معرفی مدل

در مدل معرفی شده، بستر به دو ناحیه تقسیم می‌شود: یک ناحیه نزدیک دیواره بستر که به‌وسیله‌ی خوشه‌هایی از ذره‌ها پوشیده شده و ناحیه دیگر که به طرف مرکز بستر سیال میل می‌کند و از مواد معلق بسیار رقیقی (رقیق از نظر تعداد ذره‌های جامد) تشکیل شده است (شکل ۱) بنابراین، دو شار تابشی تعریف می‌شود، یکی برای قسمتی از دیواره که به‌وسیله‌ی خوشه‌ها پوشیده شده q_{cl} و دیگری برای ناحیه‌ای که به وسیله‌ی فاز رقیق جامد و گاز احاطه شده q_{di} ، شار تابشی کل برابر خواهد شد با:

$$q''_r = fq_{cl} + (1-f)q_{di} \quad (3)$$

ضریب انتقال حرارت تابشی متوسط از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$h_r = \frac{q''_r}{T_i - T_j} \quad (4)$$

انعکاس^(۱)، انحراف^(۲) و انکسار^(۳) در محیط‌های غیرهمگن مانند ذره‌های جامد (شن) در بستر سیال نیز به مکانیسم‌های قبلی اضافه می‌شود. فرایند انتقال حرارت تابشی در بستر سیال، به‌طور معمول از مواد معلق گاز - ذره‌های جامد در مرکز بستر^(۴) و دیواره بستر نشر می‌شود. انتقال حرارت تابشی به‌وسیله‌ی یک اندرکنش پیچیده بین ذره‌های جامد و گاز در بستر سیال به‌واسطه‌ی فرایندهای جذب، نشر و پراکندگی صورت می‌گیرد. سه فاکتور اصلی ضریب جذب (a)، ضریب پراکندگی (s) و تابع فاز پراکندگی (Φ) به‌عنوان مشخصه‌های مهم در فرایند تابش معرفی می‌شوند. انتشار تابش در یک محیط به‌واسطه‌ی جذب، نشر و پراکندگی به‌واسطه‌ی معادله انتقال (۱) بیان می‌شود [۲۴ و ۲۵]:

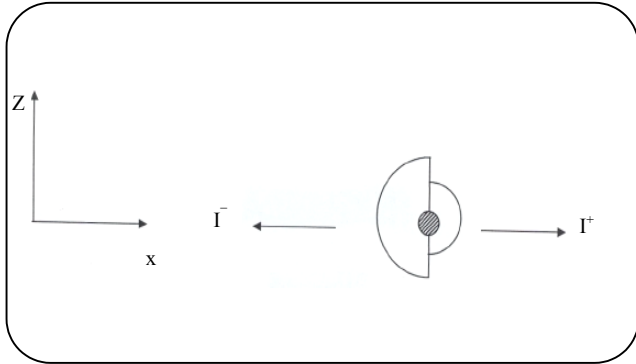
$$\frac{di'_{\lambda}}{dx} = -a_{\lambda} i'_{\lambda}(x) - s_{\lambda} i'_{\lambda}(x) + a_{\lambda} i'_{\lambda b}(x) + \frac{S_{\lambda}}{4\pi} \int_{w_i=0}^{4\pi} i'_{\lambda}(x) \Phi(\lambda, w, w_i) dw_i \quad (1)$$

(۱) Reflection

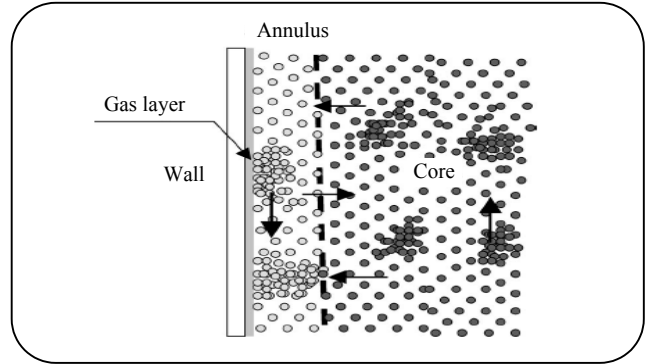
(۳) Diffraction

(۲) Refraction

(۴) Core



شکل ۲- مدل دو شاری برای یک ذره جامد.



شکل ۱- مدل رفتار ذره‌ها و گاز در بستر سیال

برای تعیین دمای هر نقطه در بستر (T)، از مدل گلرینر استفاده شده است [۱۶]:

$$\frac{T - T_w}{T_b - T_w} = 1 - \left[-0.23 \text{Re}_p + 0.94 \left(T_b / T_w \right) + 0.294 (Z/H) \right] \times \exp \left[-0.054 \left(x / d_p \right) \right] \quad (10)$$

در معادله‌ی بالا $\text{Re}_p = \frac{U_g d_p}{\nu_g}$ ، Z فاصله عمودی از صفحه توزیع کننده گاز و H ارتفاع بستر سیال است. متوسط غلظت حجمی ذره‌ها به صورت زیر تعریف می شود:

$$C = 1 - \varepsilon(\phi) \quad (11)$$

برای محاسبه ضریب خلأ ε در بستر برای ثلث شعاع بستر به طرف مرکز بستر، از معادله/بیزانگیا استفاده می شود [۲۷]:

$$\varepsilon(\phi) = \varepsilon_{mf} + (\varepsilon_{cs} - \varepsilon_{mf}) \varepsilon_{cs}^{(-1.5 + 2.1\phi^{0.7} + 0.5\phi^{1.4})} \quad (12)$$

به طوری که در معادله بالا، $\phi = 1 - \frac{x}{X}$ و X : شعاع هیدرولیکی بستر، x : فاصله تا دیواره و ε_{cs} ضریب تهی شدن متوسط در سطح مقطع بستر بوده که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\varepsilon_{cs} = \frac{\rho_p - \rho_{sus}}{\rho_p - \rho_g} \quad (13)$$

غلظت متوسط حجمی ذره‌ها برای خوشه‌ها در ثلث شعاع به طرف دیواره‌ی بستر، از مدل لیتنر به صورت زیر استفاده می شود [۲۸]:

$$C_{cl} = 1.23 C^{0.54} \quad (14)$$

اگر انتقال حرارت خالص تابش تنها در یک بعد و جهت در نظر گرفته شود (مدل یک بعدی)، معادله انتقال (۲) را می توان به مدل دو شاری^(۱) ساده کرد [۲۶ و ۲۷]، به طوری که دو شدت شار تابشی در جهت های جلو و عقب (دو مسیر متفاوت الجهدت) در یک امتداد یک بعدی را در نظر می گیرد (شکل ۲)، نشر و پراکندگی تابش از ذره های جامد متقارن فرض شده اما دارای مقدارهای متفاوت در جهت مثبت (جلو) و منفی (عقب یا پشت) هستند. معادله های دو شاری برای محاسبه شار حرارتی تابش به صورت زیر است:

$$\frac{dI^+}{dx} = -(a + sB)I^+ + sBI^- + aI_b(x) \quad (5)$$

$$-\frac{dI^-}{dx} = -(a + sB)I^- + sBI^+ + aI_b(x) \quad (6)$$

به طوری که B ضریب انحراف پشت^(۲) بوده و ضریب های a و s به صورت زیر به دست می آیند:

$$a = 3k \frac{c e_p}{d_p} \quad (7)$$

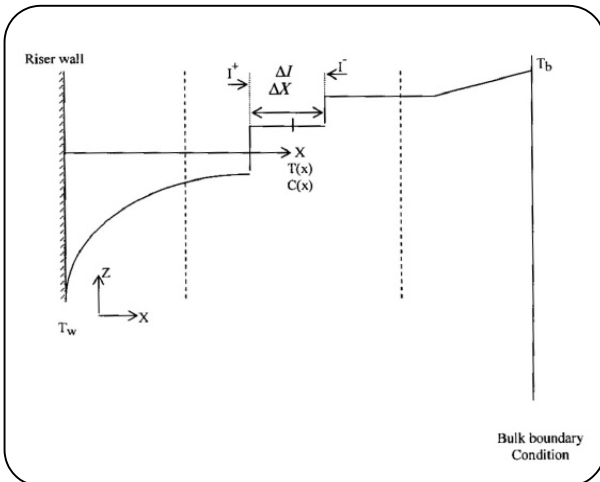
$$s = 3k \frac{c(1 - e_p)}{d_p} \quad (8)$$

در معادله ی (۵)، عبارت $-(a + sB)I^+$ ، کاهش شار تابشی در جهت مثبت به واسطه ی انحراف پشتی به طرف جهت منفی، عبارت sBI^- شار تابشی ناشی از انحراف پشتی در جهت منفی را نشان می دهد و عبارت $aI_b(x)$ نشر تابش به واسطه ی دماست که بر مبنای قانون استفان - بولتزمن به صورت زیر تعریف می شود:

$$I_b(x) = \sigma T^4 \quad (9)$$

(۱) Two Flux Model

(۲) Back-scatter



شکل ۳- تعریف مقادیرهای I^+ و I^- در فاصله x از دیواره.

در ابتدا هیچ مقداری از I^- مشخص نیست، بنابراین در نخستین حرکت از دیواره به سمت ناحیه مرکزی همه شارها در جهت منفی صفر فرض می شوند. شار حرارتی در ناحیه مرکزی بستر (خارج از لایه مرزی) به صورت زیر تعریف می شود:

$$I^- = e_b \sigma T_b^4 + (1 - e_b) I^+ \quad (21)$$

از این مرز به سمت دیواره در جهت عکس حرکت کرده و در بازه های تشکیل شده، مقادیرهای I^- از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$I^-_{\text{جدید}} = I^-_{\text{قبلی}} + \Delta I^- \quad (22)$$

تغییرهای شار تابشی در جهت منفی با استفاده از معادله ی (۶) به صورت زیر است:

$$\Delta I^- = (-)(\Delta x) \left(-(a + sB) I^- + sB I^+ + a \sigma T^4 \right) \quad (23)$$

شار حرارتی خالص رسیده به دیواره به وسیله ی رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$q_r'' = I^- - I^+_w \quad (24)$$

I^- شار حرارتی در جهت منفی در آخرین مرحله در لحظه رسیدن به دیواره بستر است.

عملیات روی بازه های Δx از دیواره به سمت بستر و برعکس را آنقدر ادامه داده تا به تغییرهای حدود ۰/۰۱ درصد در شار حرارتی به دست آمده از رابطه ی (۲۴) منتهی شود.

قسمتی از دیواره (f) که با خوشه ها (تجمع ذره های جامد) پوشیده شده است، به وسیله ی مدل پیشنهادی گلیکزنم به صورت زیر تعیین می شود [۱۱]:

$$f = 3.5 C^{0.37} \quad (15)$$

ضخامت لایه مرزی (که به وسیله ی خوشه ها احاطه شده است) به وسیله ی مدل بای به صورت زیر استفاده می شود [۸]:

$$\delta = X \left(1 - \sqrt{1.34 - 1.3(1 - \epsilon_{cs})^{1.2} + (1 - \epsilon_{cs})^{1.4}} \right) \quad (16)$$

روش حل مدل

مطابق شکل ۳ فاصله ی بین دیواره بستر و ناحیه مرکزی بستر (خارج از لایه مرزی کنار دیواره) به بازه های Δx تقسیم شده، به طوری که دو بازه اول Δx (از دیواره بستر شروع می شود) برابر $10 \mu m$ و بقیه ی فاصله براساس معادله ی فیبوناچی^(۱) به صورت زیر به دست می آیند:

$$\text{step}_{n+2} = \text{step}_n + \text{step}_{n+1} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (17)$$

تقسیم بندی Δx را آنقدر ادامه داده تا گرادیان دما در جهت x به سمت صفر میل کند (در ماکسیمم فاصله $z = 1 \text{ mm}$ هنگامی که $\frac{T - T_w}{T_b - T_w} = 0.995$ ، تقسیم بندی به پایان رسیده و به ناحیه مرکزی (bluk) بستر رسیده است.

از دیواره شروع کرده، شرط مرزی روی دیواره برابر است با:

$$I^+ = e_w \sigma T_w^4 + (1 - e_w) I^- \quad (18)$$

عبارت $e_w \sigma T_w^4$ میزان تابش صادر شده از دیواره و عبارت $(1 - e_w) I^-$ ، انعکاس تابش صادر شده در جهت منفی را نشان می دهد. در جهت مثبت حرکت کرده و در بازه های تشکیل شده Δx ، مقادیرهای I^+ از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$I^+_{\text{جدید}} = I^+_{\text{قبلی}} + \Delta I^+ \quad (19)$$

تغییرات شار تابشی در جهت مثبت، با توجه به معادله ی (۵) برابر خواهد بود با:

$$\Delta I^+ = \Delta x \left(-(a + sB) I^+ + sB I^- + a \sigma T^4 \right) \quad (20)$$

ضریب انحراف پشتی B توسط بروستر و تین [۱] به میزان $B = 0.667$ تعیین و به وسیله ی نتایج آزمایشگاهی تأیید شده است.

(۱) Fibonacci

جدول ۲- مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل برای مطالعه اثر پارامترهای موثر بر انتقال حرارت تابشی.

پارامتر	مقدار
دمای بستر، T_b	$850\text{ }^\circ\text{C}$
دمای دیواره، T_w	$210\text{ }^\circ\text{C}$
ضریب نشر دیواره، e_w	۰/۸
ضریب نشر ذرات، e_p	۰/۶
قطر ذرات، d_p	$260\text{ }\mu\text{m}$
دانسیته ذرات، ρ_p	$2600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
دانسیته متوسط بستر	$30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
سرعت متوسط گاز	$3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
طول رایزر	3 m
عرض رایزر	5 m

این نتیجه‌ها بیشتر در دمای پایین و مقیاس آزمایشگاهی بوده است [۴-۶ و ۲۸]. سهم انتقال حرارت تابش در مقایسه با کل انتقال حرارت صورت گرفته در بستر سیال در دماهای حدود ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد از موضوعاتی است که هم اکنون مورد تحقیق است. مقادیر به دست آمده از مدل معرفی شده با نتیجه‌های تجربی به دست آمده از اندازه‌گیری غیرمستقیم ضریب انتقال حرارت تابشی [۱۹ و ۱۵] مطابق جدول ۳، سازگاری مناسبی دارد، تعداد محدودی از محققان نیز شار حرارتی تابشی را به‌طور مستقیم به‌وسیله‌ی پروب اندازه‌گیری کرده‌اند [۲۹-۳۱]. نتیجه‌های حاصل از مقایسه مدل معرفی شده و نتیجه‌های تجربی به دست آمده از اندازه‌گیری مستقیم در جدول ۴ مقایسه شده است. در شکل ۵ نتیجه‌های حاصل از مدل و نتیجه‌های تجربی به دست آمده توسط باسو و کانوچی مقایسه شده است [۲۹]، مدل در دماهای پایین سازگاری بیشتری با نتیجه‌های تجربی از خود نشان می‌دهد. تفاوت نتیجه‌ها در دماهای بالا به دلیل وجود تغییرهای ضریب نشر با دما بوده [۳۲]، به طوری که این تغییرها در مدل لحاظ نشده است و علت دیگر این که انرژی حرارتی اندازه‌گیری شده به‌وسیله‌ی پروب به‌صورت انرژی تابشی خالص نبوده و قسمتی از انرژی حرارتی هدایت و جابه‌جایی بستر نیز به پروب منتقل شده است. در شکل ۶ ضریب‌های انتقال حرارت تابشی حاصل از مدل و نتیجه‌های آزمایشگاهی به دست آمده توسط لوان و همکاران تابعی از دمای مواد معلق ترسیم شده است [۳۱].

مقادیر ضریب‌های نشر (دیواره، ذره‌های جامد و بستر) به‌سادگی قابل دسترس نیستند. تغییرهای نشر با زبری سطح تغییر می‌کنند، به طوری که برای سطح‌های صیقلی کمتر از سطح‌های زبر و خشن بوده، و به‌طور معمول با تغییر دمای سطح نیز تغییر می‌کند. با توجه به دامنه اعداد در نظر گرفته شده در این مدل، (که بر داده‌های واقعی آزمایشگاهی استوار است)، مقادیر به‌صورت $e_p=0.6$ و $e_w=0.8$ در نظر گرفته شده است.

برای تعیین ضریب نشر بستر از معادله بروستر به‌صورت زیر استفاده می‌شود [۲۶]:

$$e_b = \left[\frac{e_p}{(1-e_p)B} \left(\frac{e_p}{(1-e_p)B} + 2 \right) \right]^{0.5} - \frac{e_p}{(1-e_p)B} \quad (25)$$

تعیین ضریب تناسب k در معادله‌های (۷) و (۸) مسأله دشواری است و پژوهشگران در خصوص نحوه‌ی استخراج این ضریب مقاله‌ای منتشر نکرده‌اند.

در این تحقیق با مقادیر متفاوت k مدل حل و ضریب انتقال حرارت تابشی (RHTC) در k های متفاوت به دست آمده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد در $k=1/20000$ مقدار RHTC به سمت می‌نیم می‌شود و از مقدار $k=1/17000$ تا $k=1/23000$ مقدار RHTC به تقریب ثابت است. با کاهش k کمتر از مقدار $k=1/30000$ مقدار RHTC افزایش پیدا می‌کند و در مقادیر بالاتر نیز دوباره افزایش می‌یابد. پایداری منحنی حول $1/20000$ است که برای حل مدل در نظر گرفته شده است. منحنی تغییرهای RHTC (ضریب انتقال حرارت تابشی) بر حسب k مطابق شکل ۴ است.

نتیجه‌ها و بحث

به منظور مقایسه نتیجه‌های به دست آمده از مدل معرفی شده با نتیجه‌های تجربی موجود، و بررسی اثر پارامترهای متفاوت بر ضریب انتقال حرارت تابشی از شرایط عملکرد مطابق جدول‌های ۲ تا ۴ استفاده شده است.

مقایسه بین نتیجه‌های تجربی گزارش شده و نتیجه‌های حاصل

از مدل

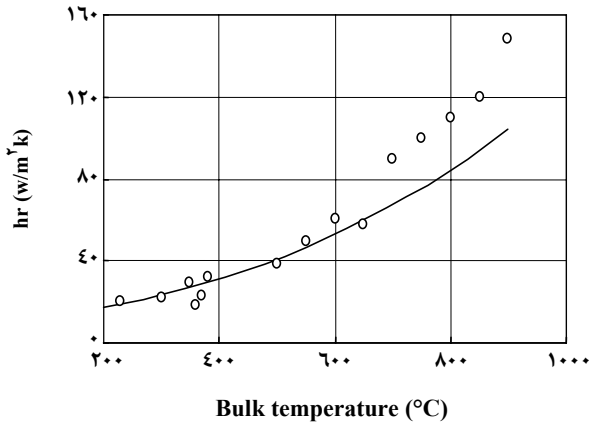
ضریب انتقال حرارت کلی اندازه‌گیری شده بین بستر سیال گردشی و سطح‌های انتقال حرارت در رایزرهای با مقیاس بزرگ و غیرآزمایشگاهی در مقاله‌های متعددی گزارش شده است، متأسفانه

جدول ۳- شرایط عملکرد و مقایسه نتیجه‌های به دست آمده از مدل با نتیجه‌های دیگران.

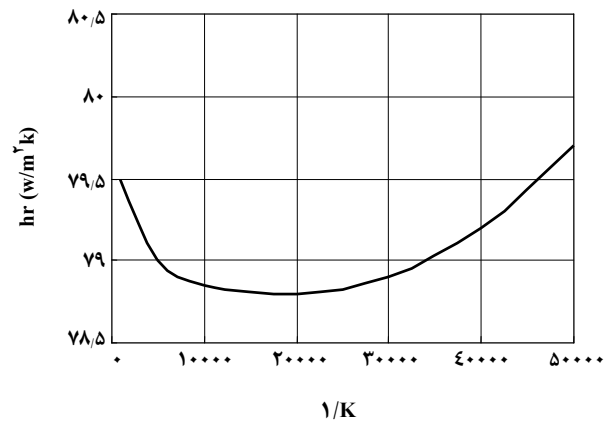
مدل	Wu et al.[۱۹]	Golriz & Suden[۱۵]	Steward et al. [۳۳]
دمای بستر (°C)	۷۰۱	۸۰۰-۸۵۰	۸۵۰
دمای دیواره یا پروب (°C)	۸۳	۲۱۰	۲۷۹
ضریب نشر دیواره یا پروب	غیرقابل دسترس	۰/۸	۰/۸۵
چگالی ذره‌ها (kg.m ⁻³)	۳۰۶۶	۲۶۰۰	۲۱۰۰
قطر ذرات (μm)	۲۹۹	۲۷۰	۲۰۰
چگالی مواد معلق (kg.m ⁻³)	۶۰	۱۵-۷۰	۲-۴۰
ابعاد رایزر (m)	۷/۳ × ۰/۱۵ × ۰/۱۵	۱/۴ × ۱/۷ × ۱۳/۵	۳/۹۶ × ۳/۹۶ × ۲۳
سرعت گاز (m.s ⁻¹)	۶/۵-۸/۶	۴-۶	۶/۴
h _r گزارش شده [Wm ⁻² K ⁻¹]	۶۸	۷۵-۸۰	۱۰۰
h _r محاسبه شده به وسیله‌ی مدل پیشنهادی [Wm ⁻² K ⁻¹]	۵۶	۷۹-۹۰	۹۱

جدول ۴- شرایط عملکرد و مقایسه نتیجه‌های به دست آمده از مدل با نتیجه‌های دیگران.

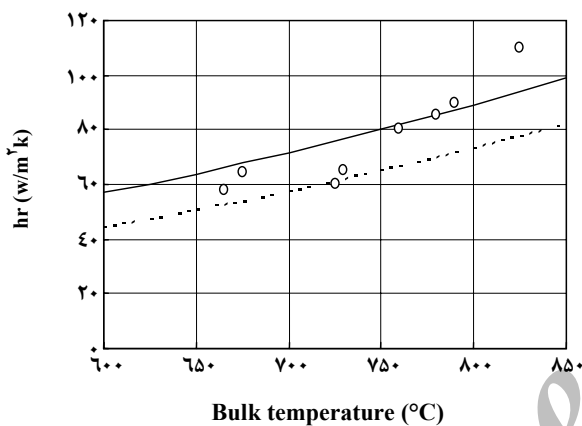
مدل	Han & Cho[۳۰]	Basu & Kanuche[۲۹]	Luan et al.[۳۱]
دمای بستر (°C)	۶۵۰-۸۵۰	۶۵۰-۸۸۵	۸۰۰-۹۰۰
دمای دیواره یا پروب (°C)	۱۰۰-۲۵۰	۵۰-۷۰	۲۵-۱۸۹
ضریب نشر دیواره یا پروب	۰/۷	غیرقابل دسترس	۰/۹
دانشیته ذرات (kg.m ⁻³)	۲۶۰۰	۲۶۵۰	۲۶۱۰
قطر ذرات (μm)	۴۵۰	۲۹۶	۲۸۶ و ۳۳۴
دانشیته سوسپانسیون (kg.m ⁻³)	۲۰-۳۰	۴-۳۰	۲۰-۹۰
ابعاد رایزر (m)	۰/۲ × ۰/۲ × ۶	۰/۲ × ۰/۲ × ۶/۷	۰/۱۵ × ۰/۱۵ × ۷/۳
سرعت گاز (m.s ⁻¹)	۳-۵	۸-۱۱	۸
h _r گزارش شده [Wm ⁻² K ⁻¹]	۶۰-۱۲۰	۴۵-۱۱۰	۱۹-۱۴۳
h _r محاسبه شده توسط مدل پیشنهادی [Wm ⁻² K ⁻¹]	۴۴-۹۶	۴۷-۸۶	۱۱-۹۸



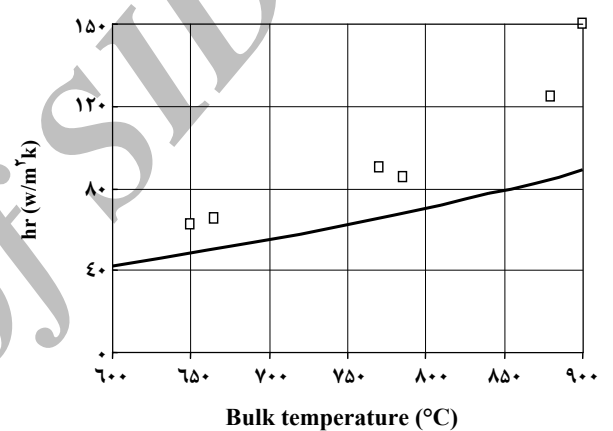
شکل ۶- مقایسه ضریب انتقال حرارت تابشی به دست آمده به وسیله مدل (منحنی) با نتیجه‌های دیگران (نقاط) [۳۱].



شکل ۴- نمودار تغییر ضریب انتقال حرارت تابشی با ضریب تناسب k.



شکل ۷- مقایسه‌ی ضریب انتقال حرارت تابشی به دست آمده به وسیله مدل با نتیجه‌های دیگران (نقاط) [۳۰]، منحنی توپر در دمای دیواره ۲۵۰ و منحنی نقطه‌چین در دمای دیواره ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۵ - مقایسه ضریب انتقال حرارت تابشی به دست آمده به وسیله مدل (منحنی) با نتیجه‌های دیگران (نقاط) [۲۹].

حرارت تابشی در بستر سیال گردشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین پارامترها دمای مواد معلق، دمای دیواره، ضریب نشر ذره‌ها، ضریب نشر دیواره، چگالی مواد معلق، قطر ذره‌ها و قطر چگالی مواد معلق صفر فرض شود ($\rho_{\text{sus}}=0$)، هیچ تابشی از ذره‌ها در مواد معلق وجود نداشته و بایستی نتیجه‌های به دست آمده از مدل برابر با ضریب انتقال حرارت تابشی ماکسیمم به دست آمده از معادله‌ی زیر باشد:

$$h_{r,\text{max}} = \frac{\sigma(T_b^2 + T_w^2)(T_b + T_w)}{\frac{1}{e_b} + \frac{1}{e_w} - 1} \quad (26)$$

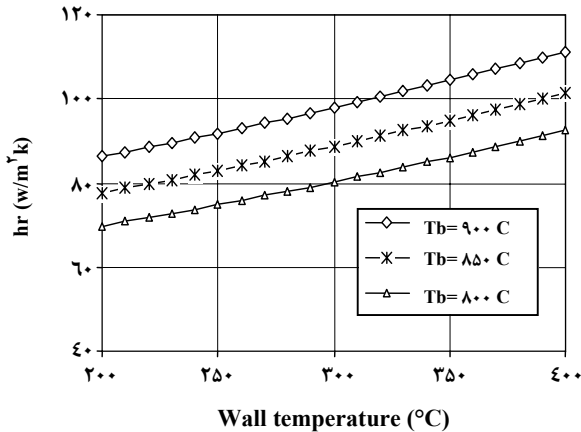
در شکل ۸ رابطه‌ی بین ضریب انتقال حرارت تابشی و چگالی مواد معلق نشان داده شده است. با افزایش چگالی مواد معلق

داده‌های آزمایشگاهی از داده‌های به دست آمده به وسیله مدل در دماهای بالا، بزرگ‌تر می‌باشد، علت را می‌توان چنین توضیح داد که با افزایش دمای بستر، ضریب هدایت حرارتی گاز بیشتر شده و باعث نفوذ انرژی هدایتی و جابه‌جایی بیشتری به پروب اندازه‌گیر و نمایش مقادیرهای بزرگ‌تر ضریب انتقال حرارت شده است.

در شکل ۷ نتیجه‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط هان و چو [۳۰] در شرایط سرعت متوسط گاز ۴ متر بر ثانیه، چگالی مواد معلق ۲۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب، قطر ذره‌ها $400 \mu\text{m}$ در یک بستر با سطح مقطع 0.2×0.2 متر با مدل معرفی شده در دمای دیواره ۱۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد مقایسه شده است.

مطالعه اثر پارامترهای متفاوت بر انتقال حرارت تابشی

مدل معرفی شده برای مطالعه اثر پارامترهای متفاوت بر انتقال



شکل ۹- نمودار تغییر ضریب انتقال حرارت تابشی تابعی از دمای دیواره و دمای مواد معلق.

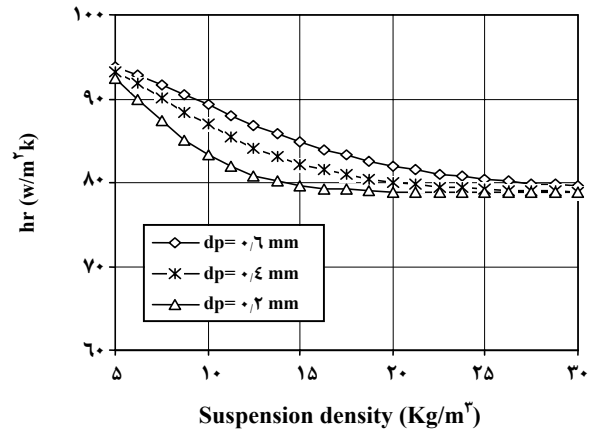
آزمایشگاهی به دست آمده از بستر سیال با دمای پایین و نیز دمای بالا سازگاری مناسبی دارد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت تابشی با افزایش پارامترهای دمای بستر، دمای دیواره، ضریب نشر دیواره و ضریب نشر ذره‌ها، افزایش می‌یابد. تاثیر اندازه‌ی ذره‌ها و نیز قطر رایزر بر ضریب انتقال حرارت تابشی به چگالی مواد معلق پایین محدود می‌شود.

با افزایش چگالی مواد معلق به واسطه‌ی افزایش غلظت ذره‌ها در خوشه‌ها، افزایش در پوشش قسمت بیشتری از دیواره به وسیله‌ی خوشه‌ها و نیز افزایش ضخامت لایه مرزی دیواره، سبب کاهش ضریب انتقال گرمای تابشی می‌شود.

همچنین ضریب انتقال حرارت تابشی در چگالی‌های کمتر از ۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب با افزایش چگالی کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

a	ضریب جذب محیط خاکستری
a_λ	ضریب جذب در طول موج λ
A	سطح مقطع بستر (m^2)
B	ضریب انحراف پشت
C	غلظت حجمی ذره‌ها
C_{cl}	متوسط غلظت حجمی خوشه ذره‌ها
d_p	قطر ذره‌ها (m)
D	قطر رایزر (m)
e_b	ضریب نشر بستر
e_p	ضریب نشر ذره‌ها
e_w	ضریب نشر دیواره



شکل ۸- نمودار تاثیر چگالی مواد معلق و قطر ذره‌ها بر ضریب انتقال حرارت تابشی.

به واسطه‌ی افزایش غلظت ذره‌ها در خوشه‌ها، افزایش در پوشش قسمت بیشتری از دیواره به وسیله‌ی خوشه‌ها و نیز افزایش ضخامت لایه مرزی دیواره، ضریب انتقال حرارت تابشی کاهش می‌یابد. شکل ۸ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش قطر ذره‌ها ضریب انتقال حرارت تابشی نیز افزایش می‌یابد.

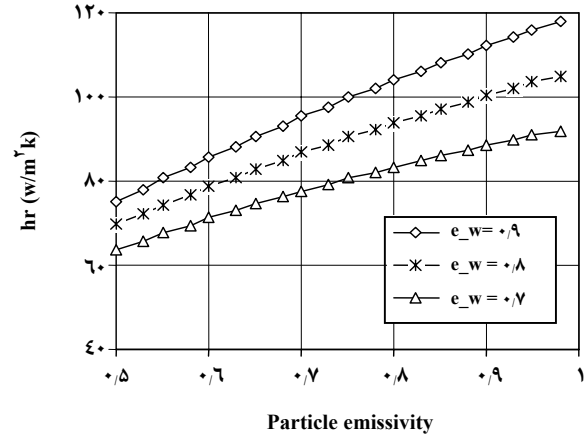
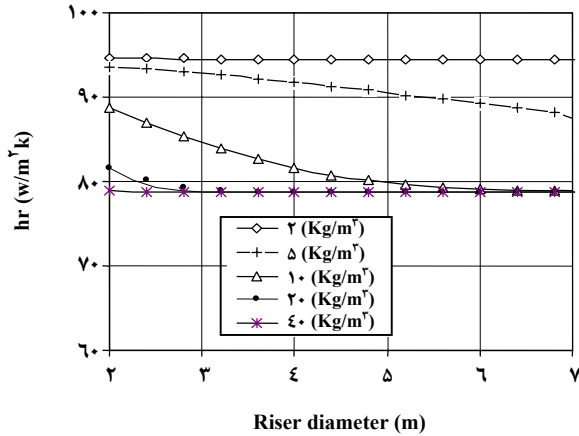
ضریب انتقال حرارت تابشی با افزایش دمای مواد معلق و دمای دیواره افزایش می‌یابد (شکل ۹). این نمودار با نتیجه‌های به دست آمده توسط سایر محققان [۳۱ و ۳۲] سازگاری دارد.

اثر ضریب‌های نشر ذره‌ها و دیواره در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این نمودار ضریب انتقال حرارت تابشی با افزایش ضریب‌های نشر، افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب نشر ذره‌ها از ۰/۶ تا ۰/۸۵، برای ضریب نشر دیواره ۰/۸، حدود ۲۳ درصد افزایش در ضریب انتقال حرارت تابشی رخ می‌دهد. این افزایش در ضریب‌های نشر دیواره بالاتر نیز دیده می‌شود.

در چگالی مواد معلق بالاتر از ۲ کیلوگرم بر متر مکعب، (شکل ۱۱)، با افزایش قطر رایزر، ضریب انتقال حرارت تابشی کاهش می‌یابد. این کاهش به واسطه‌ی کم شدن سطح دیواره در مقایسه با حجم رایزر بوده، به طوری که باعث افزایش ضخامت لایه مرزی مجاور دیواره و در نتیجه قوی‌تر شدن سپر محافظتی تابشی در مجاور دیواره خواهد شد.

نتیجه‌گیری نهایی

مدلی بر مبنای روش دوشاری برای تعیین ضریب انتقال حرارت تابشی روی دیواره کوره محفظه احتراق بستر سیال گردشی معرفی شده است. نتیجه‌های به دست آمده از مدل با نتیجه‌های



شکل ۱۱- نمودار تاثیر قطر رایزر و چگالی مواد معلق بر ضریب انتقال حرارت تابشی.

شکل ۱۰- نمودار تغییرهای ضریب انتقال حرارت تابشی تابعی از ضریب نشر ذره‌ها و ضریب نشر دیواره.

T_b	دمای بستر (K)
T_w	دمای دیواره (K)
u_g	سرعت گاز ($m s^{-1}$)
X	شعاع هیدرولیکی بستر (m)
z	مختصه عمودی، به طرف بالای رایزر (m)
δ	ضخامت لایه مرزی مجاور دیواره (m)
ε	ضریب تهی شدن مواد معلق
ε_{cs}	ضریب تهی شدن متوسط در بستر
ε_{mf}	ضریب تهی شدن در شرایط مینیمم سیلان
λ	طول موج تابش (μm)
ν_g	ویسکوزیته سینماتیکی گاز ($m^2 s^{-1}$)
ρ_g	چگالی گاز ($Kg m^{-3}$)
ρ_p	چگالی ذره‌ها ($Kg m^{-3}$)
ρ_{sus}	چگالی مواد معلق ($Kg m^{-3}$)
σ	ضریب استفان بولتزمن ($W m^{-2} K^{-4}$)
ϕ	فاصله بی‌بعد در رایزر
Φ	تابع فاز پراکندگی
w	زاویه فضایی (sr)

f	کسری از دیواره پوشیده شده از خوشه ذره‌ها
h	ضریب انتقال حرارت ($W m^{-2} K^{-1}$)
h_r	ضریب انتقال حرارت تابشی ($W m^{-2} K^{-1}$)
H	ارتفاع رایزر (m)
i'_{λ}	شدت طیف تابشی ($W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$)
$i'_{\lambda,b}$	شدت طیف تابشی جسم سیاه ($W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$)
Γ^+	شار حرارتی تابشی در جهت مثبت ($W m^{-2}$)
Γ^-	شار حرارتی تابشی در جهت منفی ($W m^{-2}$)
I_b	شار حرارتی تابشی جسم سیاه ($W m^{-2}$)
k	فاکتور تناسب
q_{el}	شار حرارتی تابشی خالص در کسری از دیواره پوشیده شده از خوشه ذره‌ها ($W m^{-2}$)
q_{di}	شار حرارتی تابشی خاص در کسری از دیواره پوشیده شده از مواد معلق رقیق ($W m^{-2}$)
q_r''	شار حرارتی تابشی خالص ($W m^{-2}$)
Re_p	عدد رینولدز
s	ضریب پراکندگی جسم خاکستری (m^{-1})
s_{λ}	ضریب پراکندگی در طول موج λ (m^{-1})
T	دما (K)
x	مختصه افقی، از دیواره به سمت مرکز بستر (m)

تاریخ دریافت: ۱۴/۱/۸۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴/۹/۸۴

مراجع

- [1] Brewster, M.Q. and Tien, C.L., Examination of the Two-Flux Model for Radiative Heat Transfer in Particulate Systems, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **25**, p. 1905 (1982).
- [2] Kobro, H. and Brereton, C., "Control and Fuel Flexibility of Circulating Fluidized Beds, in

- Circulating Fluidized Bed Technology”, ed. Basu, P., Pergman, Toronto, pp. 263-272 (1986).
- [3] Subbarao, D. and Basu, P., A Model for Heat Transfer in Circulating Fluidized Beds, *Int. J. Heat Transfer*, **29**, p. 487 (1986).
- [4] Golriz, M.R. and Sunden, B., An Experimental Investigation of Thermal Characteristics in a 12 MWth CFB Boilers, *Experimental Heat Transfer J.*, **7**, p. 217 (1994).
- [5] Basu, P. and Nag, P.K., Heat Transfer to Walls of a Circulating Fluidized Bed Furnace, *Chemical Engineering Science*, **51**, p.1 (1996).
- [6] Andersson, B.A., Effect of Bed Particle Size to Walls of a Circulating Fluidized Bed Boilers, *Powder Technology*, **87**, p. 239 (1996).
- [7] Dutta, A., Basu, P., An Improved Cluster-Renewal Model for Estimation of Heat Transfer Coefficients on the Water-Walls of Commercial Circulating Fluidized Bed Boilers, 17th Int. Fluid Bed Combustion Conf., Jacksonville, Florida, (2003).
- [8] Bi, X.T., Zhou, J., Qin, S.Z. and Grace, J.R., Annular Wall Layer Thickness in Circulating Fluidized Bed Risers, *Can. J. Chem. Eng.*, **74**, p. 811 (1996).
- [9] Werther, J., “Fluid Mechanics of Large-Scale CFB Units, in Circulating Fluidized Bed Technology IV”, ed. Avidan, A.A., AIChE, New York, pp. 1-14 (1994).
- [10] Bader, R., Findlay, J. and Knowlton, T.M., “Gas/Solid Flow Patterns in a 30.5 cm-Diameter Circulating Fluidized bed, in Circulating Fluidized Bed Technology II”, eds. Basu, P. and Large, J. F., Pergamon, Toronto, pp. 123-137 (1998).
- [11] Glicksman, L.R., “Heat Transfer in Circulating Fluidized Beds, Chap. 8 in: Circulating Fluidized Beds”, Grace, J. R., Avidan, A.A., Knowlton, T. M., eds., Chapman and Hall, London, pp. 261-311, (1997).
- [12] Chen, J.C., Grace, J.R., Golriz, M.R., Heat Transfer in Fluidized Beds, Design Methods, *Powder Technology*, **150**, p. 123 (2005).
- [13] Wu, R.I., Lim, C.J., Grace, J.R. and Brereton, C.M.H., Instantaneous Local Heat Transfer and Hydrodynamics in a Circulating Fluidized Bed, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **34**, P. 2019 (1990).
- [14] Golriz, M.R. and Grace, J.R., Augmentation of Heat Transfer by Deflectors on Circulating Fluidized Bed Membrane Walls, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **45**, p. 1149 (2002).
- [15] Golriz, M.R. and Sunden, B., An Analytical-Empirical Model to Predict Heat Transfer Coefficients in Circulating Fluidized Bed Combustors, *Warme und Stoff Ubertragung*, **30**, p. 337 (1995).
- [16] Golriz, M.R., “An Experimental Correlation for Temperature Distribution at the Membrane Wall of CFB Boilers”, Proc. 13th Int. Fluidized Bed Combustion Conference Vol. 1, ed. K. J. Heinschel, ASME, New York, pp. 499-505 (1995).
- [17] Xie, D., “Modeling of Heat Transfer in Circulating Fluidized Beds”, PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada (2001).
- [18] Golriz, M.R., “Heat Transfer Determination in CFB Boiler Water-wall Tubes Using a Heat

- Flux Meter”, Proc. Swedish-Finnish Days (1993), pp. 222-226, Gothenburg (1993).
- [19] Wu, R.L., Grace, J.R., Lim, C.J. and Brereton, C., Suspension to Surface Heat Transfer in a Circulating Fluidized Bed Combustor, *AIChE J.*, **35**, p. 1685 (1989).
- [20] Flamant, G., Variot, B., Golriz, M.R. and Lu, J.D., “Radiative Heat Transfer in a Pilot Scale Circulating Fluidized Bed Boiler, in Circulating Fluidized Bed Technology V”, eds. Kwauk, L.M. and Li, J., Science Press, Beijing, pp. 563-568 (1996).
- [21] Chen, J.C., Cimini, R.J. and Dou, S., “A Theoretical Model for Simultaneous Convective and Radiative Heat Transfer in Circulating Fluidized Bed Technology II”, eds. Basu, P. and Large, J.F., Pergamon, Toronto, pp. 255-262 (1988).
- [22] Werdermann, C.C. and Werther, J., “Heat Transfer in Large-Scale Circulating Fluidized Bed Combustors of Different Sizes, in Circulating Fluidized Bed Technology IV”, ed. Avidan, A.A., AIChE, New York, pp. 428-435 (1994).
- [23] Glatzer, A. and Linzer, W., “Radiative Heat Transfer in Circulating Fluidized Beds, in Fluidization VIII”, eds. Large, J.F. and Laguerie, C., Engineering Foundation, New York, pp. 311-318 (1995).
- [24] Siegel, R. and Howell, J.R., “Thermal Radiation Heat Transfer”, Third Edition, Hemisphere Publishing Corporation, USA, (1992).
- [25] Ozisik, M.N., “Radiative Heat Transfer and Interactions with Conduction and Convection”, John Wiley and Sons Inc., USA, (1973).
- [26] Brewster, M.Q., Effective Absorptivity and Emissivity of Particulate Media with Application to Fluidized Bed, *Trans. ASME J. Heat Transfer*, **108**, p. 710 (1986).
- [27] Issangya, A.S., Grace, J.R., Bai, D. and Zhu, J., Radial Voidage Variation in CFB Risers, *Can. J. Chem. Eng.*, **79**, p. 279 (2001).
- [28] Lints, M., “Particle-to-Wall Heat Transfer in Circulating Fluidized Beds”, Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA (1992).
- [29] Basu, P. and Kanuche, F., “Radiative Heat Transfer from a Fast Fluidized Bed, in Circulating Fluidized Bed Technology II”, eds. Basu, P. and Large, J. F., Pergamon, Toronto, Canada, pp. 245-253 (1988).
- [30] Han, G.Y. and Cho, Y.J., Radiative Heat Transfer in a Circulating Fluidized Bed Coal Combustor, *Powder Technology*, **102**, p. 266 (1998).
- [31] Luan, W., Lim, C.J., Brereton, C.M.H., Bowen, B.D., Grace, J.R., Experimental and Theoretical Study of Total and Radiative Heat Transfer in Circulating Fluidized Beds, *Chem. Eng. Sci.*, **54**, p. 3749 (1999).
- [32] Baskakov, A.P., “Heat Transfer in Fluidized Beds”, Academic Press, London, (1985).
- [33] Steward, F.R., Counturier, M.F. and Poolpol, S., “Analysis of Radiative Heat Transfer in a Circulating Fluidized Bed”, Proc. 13th Int. Fluidized Bed Combustion Conference Vol. 1, ed. Heinnschet, K.J., ASME, New York, pp. 507-513 (1995).