

اثرات غیر خاکستری گازهای تابشی بر انتقال گرمای جابجایی ترکیبی در یک کانال شیبدار و دارای جدایش جریان

میثم آتش افروز*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب

استاد، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

در این پژوهش، اثرات غیر خاکستری گازهای تابشی بر انتقال گرمای جابجایی مرکب آزاد و اجباری در یک کانال شیبدار و دارای جدایش جریان، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. توزیع ضریب جذب محیط در تمام محدوده طیف از طریق محاسبات دقیق خط به خط بر اساس پایگاه داده HITRAN2008 بدست می‌آید. برای شبیه سازی محیط غیر خاکستری، یکی از موثرترین و جدیدترین مدل‌های طیفی به نام روش توزیع k تمام طیف، بکار گرفته می‌شود، در حالیکه محاسبات مربوط به محیط خاکستری بر اساس ضریب جذب میانگین پلانک انجام می‌شود. علاوه، تاثیر شیب کانال بر رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی جریان سیال در هر دو محیط خاکستری و غیر خاکستری بصورت نموداری بررسی می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش شیب کانال، ضریب اصطکاک و عددهای ناسلت جابجایی، تابشی و کل بروی دیواره پایینی کانال، بطور قابل توجهی افزایش می‌یابند. همچنین، نتایج محیط خاکستری با نتایج محیط غیر خاکستری به عنوان "حالت واقعی" مقایسه می‌شوند. این مقایسه نشان می‌دهد که تفاوت میان نتایج این دو محیط، با افزایش شیب کانال زیاد شده، بطوریکه بیشترین اختلاف میان نتایج، مربوط به کانالهای عمودی است.

واژه های کلیدی: محیط غیر خاکستری، روش توزیع k تمام طیف، انتقال گرمای مرکب، انتقال گرمای تابشی، جدایش جریان.

Effects of Non-Gray Radiating Gases on Mixed Convection Heat Transfer in an Inclined Duct with Separation

M. Atashafrooz

Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

S. A. R. Gandjalikhan Nassab

Department of Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Abstract

In this research, the effects of non-gray radiating gases on mixed forced and free convection heat transfer in an inclined duct with separation are studied. Distributions of absorption coefficients across the spectrum are obtained from the HITRAN2008 database. The full-spectrum k -distribution method (FSK) is used to account for non-gray radiation properties, while the gray radiation calculations are carried out using the Planck mean absorption coefficient. In addition, the effects of duct inclination on the hydrodynamic and thermal behaviors of fluid flow are presented graphically for both gray and non-gray medium situations. The results show that increasing in the duct inclination leads to a considerable increase in the values of friction coefficient, and convective, radiative and total Nusselt numbers. Also, the results of gray medium are compared with non-gray results as a real case. This comparison illustrates that the difference between the results of these mediums enhances by increasing the duct inclination, such that the highest difference between the results is related to the vertical ducts.

Keywords: Non-gray medium, FSK method, Combined heat transfer, Radiative heat transfer, Flow separation.

معیار برای معترسازی نتایج استفاده می‌شود. در دو دهه اخیر، آنالیز جریان سیال و انتقال گرما در چنین هندسه‌هایی که دارای جدایی جریان می‌باشند توسط محققین زیادی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۱-۶].

ترکیب مکانیزم انتقال گرمای تابشی با سایر مکانیزم‌های انتقال گرما در بسیاری از وسایل و کاربردهای مهندسی ذکر شده در بالا، نقش و اهمیت بسزایی دارد. محیط واسط در اغلب این وسایل از طریق انحراف، جذب و یا صدور تابش روی آهنگ انتقال گرما و توزیع دما تاثیر می‌گذارد. بطوریکه برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، می‌بایستی جریان گاز را مانند یک محیط شرکت کننده در انتقال گرما تابشی در نظر گرفت و تمام پدیده‌های انتقال گرما شامل جابه‌جایی، رسانش و

۱- مقدمه

جدایی جریان و جریان بازگشتی به دلیل تغییرات ناگهانی در هندسه جریان، در بسیاری از وسایل و کاربردهای مهندسی مشاهده می‌شوند. به عنوان مثال می‌توان از وسایل تولید توان، پخش کننده‌ها، مبادله کن های گرما، خنک‌کاری در وسایل الکترونیکی، پره‌های توربین و راکتورهای هسته‌ای نام برد. از جمله هندسه‌هایی که به خوبی جدایی جریان و جریان بازگشتی را نشان می‌دهند، کانالهایی با پله پسر و پیشرو هستند. اگرچه این هندسه‌ها در ظاهر ساده به نظر می‌رسند، اما جریان سیال و انتقال گرما در آنها، پیچیدگی‌های زیادی را شامل می‌شوند. به گونه‌ای که از این هندسه‌ها به عنوان هندسه

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.atashafrooz@sirjantech.ac.ir

انتقال حرارت ترکیبی از این مدلها در کنار تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شود [۲۶-۲۷]. در میان مدل‌های طیف کامل، مدل توزیع k تمام طیف^۴ جدیدترین است و توانایی بدست آوردن نتایج بسیار دقیق برای محیط‌های همگن در ازای کسر کوچکی از هزینه محاسباتی روش خط به خط را دارا می‌باشد [۱۵]. همچنین، این روش می‌تواند در محفظه‌هایی با اشکال دلخواه شامل دیواره‌های منعکس کننده و محیط پخش کننده، با استفاده از روشهای دلخواه حل معادله انتقال تابشی بکار گرفته شود [۱۵ و ۲۲]. تاکنون تعداد کمی مطالعه در زمینه ترکیب انتقال گرمای تابشی با سایر مکانیزم‌های انتقال گرما با استفاده از روش توزیع k تمام طیف انجام شده است. از میان این کارها، پروتر و همکاران [۲۸] با استفاده از این روش به تحلیل انتقال گرمای تابشی در محیط‌های احتراقی دارای سوخته‌های گازی اکسیژن دار پرداخته‌اند. بعلاوه، لاری و همکاران [۲۹] با استفاده از همین روش به شبیه سازی ترکیب انتقال گرمای تابشی با جابجایی آزاد در یک محفظه بسته دو بعدی پرداختند. محققین در این مطالعه نشان دادند فرض خاکستری محیط با خطاهای قابل توجهی همراه خواهد بود. همچنین در جدیدترین مطالعات در این زمینه، آتش افروز و همکاران [۳۰-۳۱] به بررسی انتقال حرارت مرکب جابجایی اجباری و تابش غیر خاکستری در کانال‌های افقی دارای پله پرداختند. نتایج این تحقیقات نشان داد که برای دستیابی به نتایج دقیقتر، باید محیط تابشی را غیر خاکستری فرض کرد.

لازم بذکر است که در مطالعات [۳۰-۳۱]، محققین نقش مکانیزم انتقال حرارت جابجایی آزاد و بخصوص تغییرات شیب کانال را در نظر نگرفته‌اند که این می‌تواند در تحلیل دقیق مسایل تاثیر بگذارد. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط نویسندگان حاضر، تاثیر شیب کانال بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی آزاد و اجباری برای یک گاز تابشی غیر خاکستری در کانالهای دارای جدایش، تاکنون توسط محققین دیگر نیز مورد مطالعه و آنالیز قرار نگرفته است؛ بنابراین هدف اصلی از انجام این پژوهش، مطالعه اثرات غیر خاکستری گازهای تشعشعی بر رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی جریان جابجایی مرکب آزاد و اجباری در یک کانال شیبدار و دارای پله پسرودار است. در حقیقت، در این تحقیق تاثیر شیب کانال بر رفتارهای هیدرودینامیکی و گرمای جریان جابجایی یک گازتابشی در دو محیط مختلف خاکستری و غیر خاکستری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین، محیط غیرخاکستری به عنوان "حالت واقعی" در نظر گرفته شده و نتایج محیط خاکستری با این محیط مقایسه میگردد تا میزان خطاهای ناشی از فرض محیط خاکستری در هندسه مورد مطالعه مشخص گردد. برای مدل سازی محیط غیر خاکستری از روش کارآمد و موثر توزیع k تمام طیف استفاده خواهد شد؛ در حالیکه محاسبات مربوط به محیط خاکستری بر اساس ضریب جذب میانگین پلانک انجام خواهند شد. لازم به ذکر است که در هر دو محیط خاکستری و غیر خاکستری، برای حل معادله انتقال گرمای تابشی^۵ از روش مشهور و کارآمد طول‌های مجزا^۶ استفاده خواهد شد.

تابش را به طور همزمان مورد بررسی و مطالعه قرار داد. حل عددی معادله انرژی شامل جملات تابش، جابجایی و یا رسانش تاکنون توسط محققین زیادی انجام شده است [۷-۹].

در رابطه با موضوع انتقال گرما ترکیبی جابجایی- تابشی در کانالهای دارای جدایش جریان، تاکنون چندین تحقیق با فرض محیط خاکستری انجام شده است. در میان این تحقیقات، کو و آناند [۱۰] انتقال گرما ترکیبی جابجایی- تابشی بروی یک پله پسرودار را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، خواص ترموفیزیکی محیط، وابسته به دما در نظر گرفته شده بود. به منظور بررسی اثرات تابش بر رفتارهای هیدرودینامیکی و گرمای در هندسه مذکور، تحلیلی دقیق بر اندازه طول ناحیه گردابه‌ای، دمای متوسط و توزیع عددهای ناسلت جابجایی، تابشی و کل انجام گرفته شده است. همچنین در ادامه تحقیقات در این زمینه، انصاری و گنجعلیخاننساب [۱۱] و آتش افروز و گنجعلیخاننساب [۱۲-۱۳] به مطالعه ترکیب مکانیزم انتقال گرما تابشی با انتقال حرارت جابجایی در کانالهای دو بعدی و سه بعدی دارای جدایش جریان پرداختند. در این مطالعات، برای حل معادله انتقال تابشی از روش مشهور جهات مجزا استفاده شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که در نظر گرفتن پدیده انتقال گرمای تابشی به میزان زیادی بر رفتارهای حرارتی در جریان جابجایی یک گازتابشی اثر می‌گذارد.

لازم بذکر است که در تمامی مطالعات عنوان شده در مراجع [۷-۱۳]، محققین محیط دخیل در پدیده انتقال گرمای تابشی را بصورت خاکستری فرض کرده‌اند. فرض محیط خاکستری اغلب فرض خوبی در قسمت نسبتا کوچکی از طیف است، اما بطور کلی هیچگاه نمی‌تواند حالت واقعی محیط های دخیل در تابش را پیش بینی کند. در حقیقت، خواص تابشی بسیاری از گازهای تابشی از قبیل بخار آب (H_2O) و دی اکسید کربن (CO_2)، به شدت تابع طول موج بوده و تغییرات بسیار زیاد در طول طیف خواهند داشت؛ بطوریکه ساده سازی فرض خاکستری بودن یک محیط دخیل در تابش، جز برای محیط‌های خاص، فرض ضعیفی است که منجر به خطاهای قابل توجهی در تحلیل می-شود [۱۴-۱۵]. در نتیجه به منظور تحلیل تمامی اثرات مکانیزم انتقال گرمای تابشی و رسیدن به نتایج دقیق و قابل اعتماد، محیط باید بصورت غیر خاکستری (در نظر گرفتن تغییرات طیفی خواص تابشی) در نظر گرفته و مدل شود.

تاکنون چندین نوع مدل طیفی مختلف برای محاسبه خواص غیر خاکستری گازهای تشعشعی ارایه و توسعه داده شده است. بطور کلی این مدلها در سه گروه مجزا و مختلف دسته بندی می‌شوند: ۱- مدل‌های خط به خط [۱۶-۱۷]، ۲- مدل‌های باند [۱۸-۲۲] و ۳- مدل‌های طیف کامل [۱۵] و [۲۲-۲۵]. هر کدام از این مدلها دارای ویژگیهای خاصی بوده و به چندین زیر گروه دیگر تقسیم می‌شوند.

از میان این مدلها، مدل‌های طیف کامل کمترین زمان محاسباتی را داشته و استفاده از آنها نتایج بسیار دقیقی را برای شبیه سازی خواص غیر خاکستری گازهای واقعی تابشی از قبیل CO_2 و H_2O به همراه دارد. به همین دلایل است که اغلب ترجیح داده می‌شود در حل مسایل

^۴Full spectrum k distribution method (FSK)

^۵Radiative transfer equation (RTE)

^۶Discrete ordinate method (DOM)

^۱ Line by line models (LBL)

^۲ Band models

^۳ Full spectrum models

$\varepsilon_w = 0.8$ صورت می‌گیرد. همچنین فرض شده است که میزان تابش ورودی به کانال از دو مقطع ورودی و خروجی جریان، باتابش صادر شده از یک جسم سیاه با دمای سیال به ترتیب در ورود و خروج جریان از کانال برابر است [۱۱ و ۱۳].

۳- معادلات حاکم

برای آنالیز هیدرودینامیکی و گرمایی مساله مورد مطالعه، ابتدا بایستی معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی و معادلات تابشی حل شوند. این معادلات برای جریان دو بعدی، لایه ای ، پایا و تراکم ناپذیر بصورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \gamma g_x (T - T_{ave}) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \gamma g_y (T - T_{ave}) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho c_p} \nabla \cdot \vec{q}_r \quad (4)$$

این نکته باید ذکر گردد که جمله آخر در سمت راست معادلات مومنتم، نشان دهنده اثرات نیروی شناوری است که با استفاده از تقریب بوزینسک محاسبه شده است. همچنین جمله آخر در سمت راست معادله انرژی، دیورژانس شارتابشی کل بوده و بصورت زیر قابل محاسبه است [۱۵]:

$$\nabla \cdot \vec{q}_r = \int_0^\infty \sigma_{a\eta} \left(4\pi I_{b\eta}(\vec{r}) - \int_{4\pi} I_\eta(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega \right) d\eta \quad (5)$$

در معادله بالا شدت تابش طیفی در مکان \vec{r} و جهت \vec{s} است. همچنین شدت تابش طیفی جسم سیاه در دمای محیط واسط و $\sigma_{a\eta}$ ضریب جذب طیفی محیط واسط می‌باشد. همانطورکه از معادله (۵) مشخص است برای محاسبه دیورژانس شار تابشی کل به میدان شدت تابش طیفی در محیط واسط نیاز است. محاسبه میدان شدت تابش طیفی نیز خود نیازمند حل معادله انتقال گرما تابشی است. این معادله برای یک محیط جذب‌کننده و صادرکننده می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۱۵]:

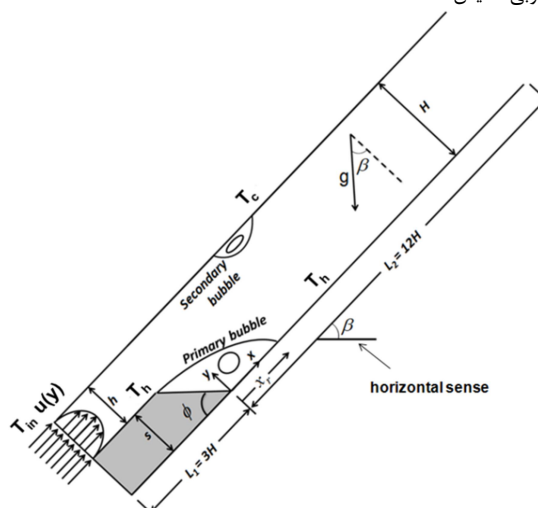
$$\frac{dI_\eta(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = \vec{s} \cdot \nabla I_\eta(\vec{r}, \vec{s}) = \sigma_{a\eta} I_{b\eta}(\vec{r}) - \sigma_{a\eta} I_\eta(\vec{r}, \vec{s}) \quad (6)$$

شرط مرزی برای معادله (۶)، برای یک سطح صادر کننده و منعکس کننده پخشی بصورت زیر است [۱۵]:

$$I_\eta(\vec{r}_w, \vec{s}_i) = \varepsilon_w I_{b\eta}(\vec{r}_w) + \frac{(1 - \varepsilon_w)}{\pi} \int_{\vec{n}_w \cdot \vec{s}_j < 0} I_\eta(\vec{r}_w, \vec{s}_j) |\vec{n}_w \cdot \vec{s}_j| d\Omega' \quad \vec{n}_w \cdot \vec{s}_i > 0 \quad (7)$$

۲- شرح مساله

هندسه مورد مطالعه در این تحقیق به صورت یک کانال شیبدار دوبعدی به همراه یک پله پسرو شیبدار می‌باشد که در شکل ۱ به خوبی نمایش داده شده است.



شکل ۱- طرحواره مساله مورد مطالعه

همانطور که از این شکل پیداست، ارتفاع پله s و ارتفاع کانال در بالا دست و پایین دست جریان به ترتیب h و H می‌باشند؛ به گونه‌ای که در این مسئله نسبت انبساط $(ER=H/h)$ برابر ۲ در نظر گرفته شده است. پله پسرو شیبدار بوده و زاویه شیب آن برابر با $\phi = 45^\circ$ انتخاب شده است. همچنین، شیب کانال مورد مطالعه با زاویه β نشان داده شده و اندازه آن می‌تواند از $\beta = 0^\circ$ تا $\beta = 90^\circ$ نسبت به محور افقی تغییر کند. طول کانال قبل و بعد از پله بترتیب برابر با $L_1 = 3H$ و $L_2 = 12H$ در نظر گرفته شده است. این طول‌ها به این دلیل انتخاب شده‌اند که جریان در مقطع ورودی و خروجی کانال تحت تاثیر تغییر ناگهانی در مقطع کانال قرار نگرفته و همچنین جریان در خروجی کانال به صورت توسعه یافته خارج شود. بعلاوه، سیال داخل کانال مخلوط هوا با $10\% \text{ CO}_2$ و $20\% \text{ H}_2\text{O}$ است. لازم بذکر است که این مخلوط، یکی از مخلوط‌های مهم و پرکاربرد در مسائل مهندسی و بخصوص مسائل مربوط به انتقال حرارت تابشی و احتراق بوده و از آن با عنوان مساله اگزوز یاد می‌شود [۲۲ و ۲۹].

۱-۲- شرایط مرزی

برای تمام دیوارها، اصل عدم لغزش (سرعت صفر) برقرار است. دیواره‌های پائینی کانال و سطوح پله پسرو، داغ و دارای دمای ثابت $T_h = 1000K$ بوده در حالیکه دیواره بالایی کانال سرد و با دمای $T_c = 800K$ می‌باشد. در مقطع ورودی کانال، جریان به صورت یکنواخت و با دمای ثابت T_{in} وارد می‌شود، بطوریکه $T_{in} = T_c < T_h$ است. در مقطع خروجی کانال، فرض توسعه یافتگی هیدرودینامیکی و گرمای برای جریان سیال برقرار است. همچنین، برای شرایط مرزی تابشی در این هندسه، فرض بر این است که انعکاس و صدور تابش از دیواره‌ها، کاملاً بصورت پخشی در تمام جهات و با ضریب صدور

محیط همگن دارا می باشد. در حقیقت، دقت این روش برای محیط-های با اختلاف دمای نسبتاً کم ($T_h - T_c \leq 0.2 T_h$)، بسیار بالا است. همچنین، بر اساس این روش، تمامی خواص محیط (جریان سیال)، بجز ضریب جذب طیفی، دردمای میانگین محیط ($T_{ave} = \frac{T_h + T_c}{2}$) محاسبه می‌شوند [۱۵ و ۲۲].

۲-۳- روش طولهای مجزا

در این مطالعه برای حل معادلات (۸) و (۹) از روش طولهای مجزا استفاده می‌شود. در این روش، معادله انتقال تابش و شرط مرزی مربوط به آن برای n جهت مختلف \vec{s}_i نوشته می‌شوند. در نتیجه، در این روش تمام انتگرالهای موجود در معادلات با سری‌هایی بصورت زیر جایگزین می‌شوند.

$$(\vec{s}_i \cdot \nabla) I_g(\vec{r}, \vec{s}_i) = k I_b(\vec{r}) - k I_g(\vec{r}, \vec{s}_i) \quad (15)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$I_g(\vec{r}_w, \vec{s}_i) = \varepsilon_w I_b(\vec{r}_w) + \frac{(1 - \varepsilon_w)}{\pi} \sum_{\vec{n}_w \cdot \vec{s}_j < 0} I_g(\vec{r}_w, \vec{s}_j) |\vec{n}_w \cdot \vec{s}_j| w_j \quad (16)$$

لازم بذکر است که در این معادلات w_i تابع وزنی مربوط به جهت \vec{s}_i می‌باشد. جزئیات بیشتر این روش در مراجع [۱۱-۱۳ و ۱۵] بخوبی ارایه شده است.

۳-۳- محاسبه ضریب جذب خاکستری

در مطالعه حاضر، محاسبات مربوط به فرض محیط خاکستری با استفاده از ضریب جذب میانگین پلانک به عنوان یک ضریب جذب ثابت متوسط استفاده می‌شود. این ضریب جذب میانگین از طریق محاسبات خط به خط با استفاده از معادله ذیل بدست می‌آید [۱۵]:

$$k_p = \frac{\int_0^\infty I_{b\eta} \sigma_{a\eta} d\eta}{\int_0^\infty I_{b\eta} d\eta} = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_0^\infty I_{b\eta} \sigma_{a\eta} d\eta \quad (17)$$

۴-۳- پارامترهای مورد بررسی

پارامترهای بدون بعد که در بیان نتایج این مطالعه از آنها استفاده شده است، به صورت زیر ارایه می‌شوند:

$$(X, Y) = \left(\frac{x}{H}, \frac{y}{H} \right), (U, V) = \left(\frac{u}{U_o}, \frac{v}{U_o} \right), \Theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad (18)$$

$$\theta_1 = \frac{T_c}{T_h - T_c}, \theta_2 = \frac{T_h}{T_c}, Re = \frac{\rho U_o H}{\mu}, q_r^* = \frac{q_r}{\sigma T_h^4}$$

$$Gr = \frac{\gamma g (T_h - T_c) H^3}{\nu^2}$$

در این تحقیق، برای درک بهتر رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی در محیط‌های مختلف، علاوه بر آنالیز میدانهای سرعت و دما، به محاسبه پارامترهای ضریب اصطکاک و عدد ناسلت پرداخته می‌شود. این پارامترها بصورت زیر قابل محاسبه خواهند بود:

$$C_f = \frac{2}{Re} \frac{dU}{dY} \Big|_{Y=0}, C_f^* = \frac{Re}{2} C_f \quad (19)$$

که در آن $I_{b\eta}(\vec{r}_w)$ شدت تابش طیفی جسم سیاه در دمای مرز و شدت تابش طیفی است که سطح مرزی را ترک می‌کند. همچنین \vec{n}_w, ε_w به ترتیب ضریب صدور و بردار عمود یکه سطح مرزی می‌باشند.

۱-۳- روش توزیع k تمام طیف

همانطور که قبلاً بیان شد، در این مطالعه از روش توزیع k تمام طیف برای در نظر گرفتن خصوصیات تابشی غیر خاکستری استفاده شده است. با استفاده از این روش، معادله انتقال گرما تابشی و شرط مرزی مربوط به آن در یک فضای بی بعد g با تغییرات هموار، مرتب شده و بصورت زیر بازنویسی می‌شوند [۱۵ و ۲۲]:

$$\frac{dI_g(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = \vec{s} \cdot \nabla I_g(\vec{r}, \vec{s}) = k I_b(\vec{r}) - k I_g(\vec{r}, \vec{s}) \quad (8)$$

$$I_g(\vec{r}_w, \vec{s}_i) = \varepsilon_w a(T_w, T, g) I_b(\vec{r}_w) + \frac{(1 - \varepsilon_w)}{\pi} \int_{\vec{n}_w \cdot \vec{s}_j < 0} I_g(\vec{r}_w, \vec{s}_j) |\vec{n}_w \cdot \vec{s}_j| d\Omega' \quad (9)$$

در این معادلات

$$I_g = \frac{\int_0^\infty I_\eta \delta(k - \sigma_{a\eta}) d\eta}{f(T, k)} \quad (10)$$

$$g(T, k) = \int_0^k f(T, k) dk \quad (11)$$

$$a(T_w, T, g) = \frac{f(T_w, k)}{f(T, k)} = \frac{dg_w(T_w, k)}{dg(T, k)} \quad (12)$$

$$f(T, k) = \frac{1}{I_b} \int_0^\infty I_{b\eta} \delta(k - \sigma_{a\eta}) d\eta \quad (13)$$

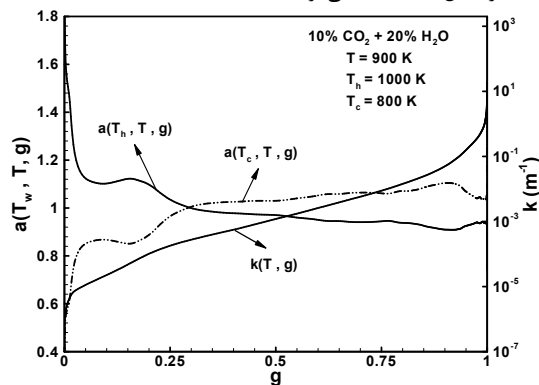
در معادلات (۸) تا (۱۳)، I_g شدت تابشی در فضای g ، T دمای محیط همگن، k ضریب جذب محلی دوباره مرتب شده از $\sigma_{a\eta}$ در دمای T و I_b شدت تابش جسم سیاه کل می باشد. g توزیع k تراکمی است و از لحاظ فیزیکی، کسر وزنی تابع پلانک از طیف با ضریب جذب $k < \sigma_{a\eta}$ می باشد. $\delta(k - \sigma_{a\eta})$ تابع دیراک-دلتا و $a(T_w, T, g)$ یک فاکتور انبساطی غیر خاکستری به منظور در نظر گرفتن اختلاف بین دمای دیواره T_w و دمای T در تابع پلانک می‌باشد، که برای ساختن توزیع k - g استفاده می‌شود. جزئیات بیشتر روش توزیع k تمام طیف در مراجع [۱۵ و ۲۲] توضیح داده شده است.

همچنین با استفاده از این روش، دیورژانس شار گرمای تابشی کل، به صورت زیر قابل محاسبه است [۱۵ و ۲۲]:

$$\nabla \cdot \vec{q}_r = \int_0^l k \left(4\pi I_b - \int_{4\pi} I_g(\vec{s}) d\Omega \right) dg \quad (14)$$

باید تذکر داده شود که روش FSK ارایه شده توسط معادلات (۸) تا (۱۳)، توانایی بدست آوردن دقتی معادل روش خط به خط را برای

معادله (۸) جایگزین و معادله RTE در همه جهات حل می‌شود. همچنین در محاسبات محیط غیر خاکستری با استفاده از روش FSK، ابتدا با استفاده از توزیع ضریب جذب خط به خط و معادله (۱۳)، توزیع k تمام طیف $f(T, k)$ با بکارگیری T_{ave} بجای دمای محیط همگن (T)، بدست می‌آید. سپس، توزیع k تراکمی $g(T, k)$ و توابع وزن $a(T_w, T, g)$ از طریق معادلات (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند. با انجام این مراحل، توزیع به شدت نوسانی ضریب جذب $\sigma_{a\eta}$ ، به یک توزیع نرم و هموار k که تابعی از عدد موج بدون بعد (عدد موج مصنوعی) g است، تبدیل می‌شود. در شکل ۳، توزیع k تراکمی $g(T, k)$ و توابع وزن $a(T_w, T, g)$ محاسبه شده از طریق توزیع ضریب جذب نشان داده شده در شکل ۲، مشاهده می‌گردد.



شکل ۳- توزیع k - g برای مخلوط هوا با ۱۰٪ CO_2 و ۲۰٪ H_2O در دمای $T=900\text{K}$ در تمام طیف، بدست آمده از طریق محاسبات پایگاه داده [۳۳HITRAN2008]

بدلیل اینکه توزیع k تراکمی هموار می‌باشد، می‌تواند با یک آرایش تربیع عددی N نقطه مناسب، تقریب زده شود. در این مطالعه، تربیع همانهای گوسیمرتبه سه ۱۲ نقطه برای بدست آوردن نقاط تربیع به منظور تقریب زدن توزیع k - g استفاده شده است. برای محاسبه جمله تابشی در معادله انرژی، از روش مشهور طول-های مجزا استفاده شده است. از آنجائیکه در روش طول‌های مجزا، تعداد بردارهای متفاوتی را می‌توان انتخاب کرد، مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده از سه حالت S_4, S_6, S_8 و نشان داد که تفاوت بسیار اندکی بین نتایج بدست آمده از دو حالت S_6 و S_8 وجود دارد. در نتیجه برای سرعت بخشیدن در تمام محاسبات انجام شده در کار حاضر، از حالت S_6 استفاده شده است. همچنین، در حل عددی معادلات حاکم در این تحقیق، از تعداد تقسیمات 40×51 در جهت YX به‌عنوان شبکه بهینه استفاده شده است. این نکته باید ذکر شود که برای دستیابی به نتایج دقیقتر، از شبکه غیر یکنواخت استفاده گردیده است، به‌گونه‌ای که در نزدیکی دیواره‌ها، این شبکه متمرکز می‌شود. علاوه، برای شبیه‌سازی سطح‌حشیدار پله پسر در داخل کانال، از روش ناحیه غیرفعالدر سیستم مختصات دکارتی دو بعدی استفاده شده است [۱۲ و ۳۴]. در آخر باید ذکر شود که ملاک همگرایی در محاسبه میدان‌های سرعت، فشار، دما و شدت تابش، برقرار شدن شرط زیر تعیین شده است.

$$Nu_c = \frac{q_c D_h}{\kappa(T_w - T_b)} = \frac{-l}{\Theta_w - \Theta_b} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (20)$$

$$Nu_r = \frac{q_r D_h}{\kappa(T_w - T_b)} = \frac{RC \cdot \theta_1 \cdot \theta_2}{\Theta_w - \Theta_b} q_r^* \quad (21)$$

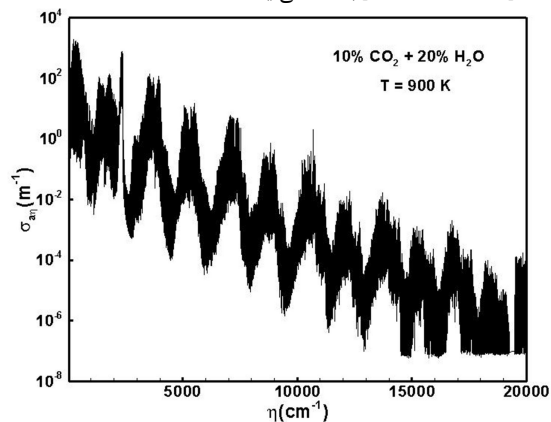
$$Nu_t = Nu_c + Nu_r \quad (22)$$

در معادلات بالا، Θ_b دمای متوسط مخلوط بوده و بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$\Theta_b = \frac{\int_0^l \Theta U dY}{\int_0^l U dY} \quad (23)$$

۴- حل عددی معادلات حاکم

در کار حاضر، معادلات حاکم که شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی هستند، با استفاده از تکنیکهای دینامیک سیالات محاسباتی توسط الگوریتم SIMPIE [۳۲] و روش تکراری خط به خط حل می‌شوند. همانطور که قبلاً توضیح داده شد محیط مورد مطالعه در این رساله، هوا است که مخلوطی از دو گاز جذب کننده بخار آب (H_2O) و دی اکسید کربن (CO_2) با کسر مولیهای متفاوت می‌باشد. بنابراین، ابتدا برای این مخلوط توزیع ضریب جذب $\sigma_{a\eta}$ در تمام محدوده طیف از طریق محاسبات دقیق خط به خط بر اساس پایگاه داده [۳۳HITRAN2008] بدست می‌آید.



شکل ۴- توزیع ضریب جذب $\sigma_{a\eta}$ در تمام طیف برای مخلوط هوا با ۱۰٪ CO_2 و ۲۰٪ H_2O در دمای $T=900\text{K}$ بدست آمده از طریق محاسبات پایگاه داده [۳۳HITRAN2008]

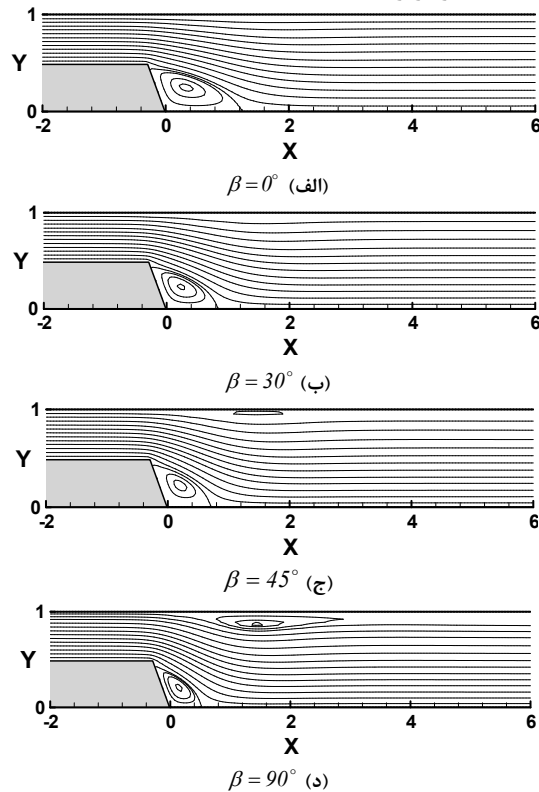
به منظور داشتن دیدی مناسب نسبت به چگونگی این فرآیند، در شکل ۲ توزیع ضریب جذب $\sigma_{a\eta}$ برای مخلوط هوا با ۱۰٪ CO_2 و ۲۰٪ H_2O که از محاسبات خط به خط برای کل طیف بدست آمده است، مشاهده می‌گردد.

برای محاسبات خاکستری، ابتدا با استفاده از توزیع ضریب جذب خط به خط بدست آمده در شکل ۲ و معادله (۱۷)، ضریب جذب میانگین پلانک محاسبه می‌شود و سپس این ضریب جذب میانگین در

شود. اگرچه مطابق با زمان انجام محاسبات که در شکل ۴ نشان داده شده است، روش FSK بسیار سریعتر از روش LBL می‌باشد.

۶- نتایج و بحث

همانطور که قبلاً ذکر گردید در این تحقیق، ترکیب انتقال گرمایی تابشی با انتقال حرارت جابجایی مرکب آزاد و اجباری در یک کانال شیبدار دو بعدی و دارای جدایش، مورد بررسی و آنالیز قرار می‌گیرد. سیال داخل کانال، مخلوط هوا با ۱۰٪ CO₂ و ۲۰٪ H₂O بوده و در تمامی محاسبات، عددهای رینولدز و گراشف بترتیب برابر با $Re=100$ و $Gr=5000$ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۵- توزیع خطوط جریان برای محیط‌های واقعی در شیب‌های مختلف کانال

نخست برای درک بهتری از رفتارهای هیدروپدینامیکی جریان سیال در هندسه مورد مطالعه، توزیع خطوط جریان برای محیط‌های واقعی در چهار شیب مختلف کانال، در شکل‌های ۵ (الف) تا (د) نشان داده شده است. از مقایسه خطوط جریان در این شکل‌ها به خوبی مشاهده می‌شود که شیب کانال، نقش مهم و بسزایی در تعیین ویژگی‌های میدان جریان سیال دارد. بر طبق نتایج ارائه شده در شکل ۵، با افزایش شیب کانال از $\beta=0^\circ$ (کانال افقی) تا $\beta=90^\circ$ (کانال عمودی)، طول ناحیه گردابه‌ای بعد از پله پسر و کاهش یافته و نقطه باز برخورد سیال به دیواره پایین، به بالا دست جریان منتقل می‌گردد. نکته قابل توجه دیگر این است که افزایش شیب کانال منجر به وجود آمدن و رشد یک ناحیه گردابه‌ای در نزدیکی دیواره بالایی کانال می‌گردد، بطوریکه در $\beta=0^\circ$ ، هیچ ناحیه گردابه‌ای در نزدیکی دیواره بالایی مشاهده نمی‌شود.

$$Error \Phi = \max \left| \frac{\Phi^n(i,j) - \Phi^{n-1}(i,j)}{\Phi^n(i,j)} \right| \leq 10^{-5}$$

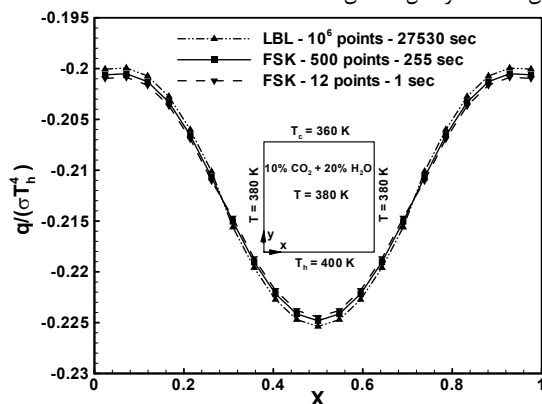
در عبارات بالا Φ می‌تواند U, T, V و I و اندیس نشان‌دهنده مرحله تکرار است.

۵- اعتبار سنجی نتایج

نخست، لازم بذکر است که اعتبار سنجی نتایج مربوط به رفتارهای حرارتی و هیدروپدینامیکی جریان سیال در کانالهای دارای جدایش جریان، در پژوهشهایی قبلی دیگر، توسط نویسندگان حاضر ارائه شده است [۱۲-۱۳]. این اعتبارسنجی‌ها مربوط به انتقال گرما جابجایی خالص و همچنین مربوط به انتقال گرمایی مرکب جابجایی-تابشی در محیط‌های خاکستری هستند. بنابراین در اینجا فقط به اعتبار سنجی روش FSK در شبیه سازی محیط‌های غیر خاکستری پرداخته می‌شود.

۵-۱- اعتبار سنجی روش FSK

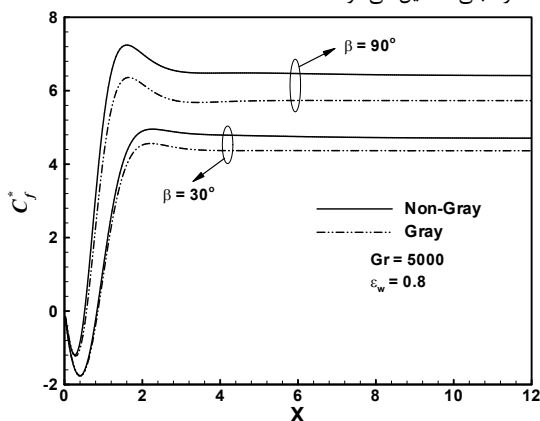
به منظور نشان دادن ودقت روش FSK در شبیه سازی محیط‌های غیر خاکستری، یک محفظه مربعی بسته با طول ضلع $L=1m$ محتوی هوای همگن با دمای ثابت $T=380K$ شامل ۱۰٪ دی اکسید کربن (CO₂) و ۲۰٪ بخار آب (H₂O) در نظر گرفته شده است. دیواره پایینی محفظه، داغ در دمای $T_h=400K$ و دیواره بالایی، سرد در دمای $T_c=360K$ می‌باشد. بقیه دیواره‌ها در دمای $T=380K$ و تمامی دیواره‌ها سیاه می‌باشند. تنها انتقال گرمایی تابشی در نظر گرفته شده و مساله با تعداد سلول شبکه 21×21 در جهت x و y حل عددی شده است. توزیع شار گرمایی تابشی بدون بعد بر روی دیواره بالایی این محفظه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- توزیع شار حرارت تابشی بدون بعد بر روی دیواره سرد بالایی یک محفظه مربعی بسته، بدست آمده از روشهای FSK و LBL

این نتایج، بوسیله روش خط به خط (LBL) با استفاده از یک میلیون خط برای ضریب جذب، بدست آمده از پایگاه داده HITRAN2008 [۳۳] و همچنین از طریق روش FSK با استفاده از ۵۰۰ و ۱۲ نقطه تربیع حاصل شده است. همانطور که از شکل ۴ مشخص است، نتایج روش FSK برای محیط همگن و دما ثابت با اختلاف دمای دیواره کوچک، در سازگاری بسیار خوبی با نتایج روش معیار LBL می‌باشد، حتی زمانی که تنها ۱۲ نقطه تربیع بکار گرفته

توزیع ضریب اصطکاک بروی دیواره پایینی کانال، در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۷ پیدا است، ضریب اصطکاک از یک مقدار مینیمم در گوشه پایینی پله پسر، جایی که سرعت سیال ناچیز است، شروع می‌شود. با ورود به ناحیه گردابه‌ای، ضریب اصطکاک کاهش نسبتاً شدیدی پیدا کرده و در اواسط ناحیه گردابه‌ای به کمترین مقدار خود می‌رسد. سپس با پیشروی در جهت جریان و با نزدیک شدن به نقطه دوباره برخورد جریان به دیواره، این پارامتر با شیب نسبتاً زیاد در ناحیه گردابه ای افزایش یافته و در نقطه مذکور، مقدارش برابر با صفر می‌شود. با خروج از ناحیه گردابه‌ای، ضریب اصطکاک با مقادیر مثبت شده افزایش یافته و به یک مقدار کمینه می‌رسد. در نهایت و با پیشروی بیشتر در جهت جریان، این پارامتر کاهش یافته و به سمت مقدار ثابتی متمایل می‌شود.

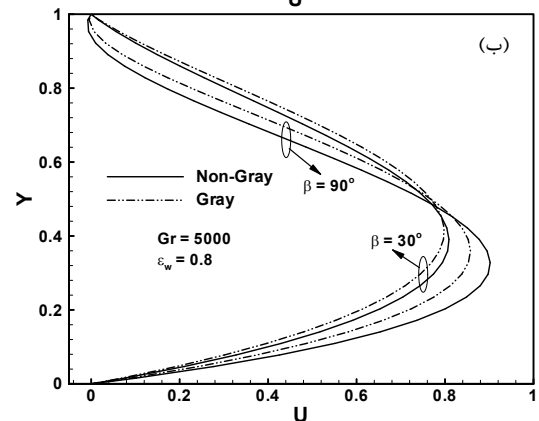
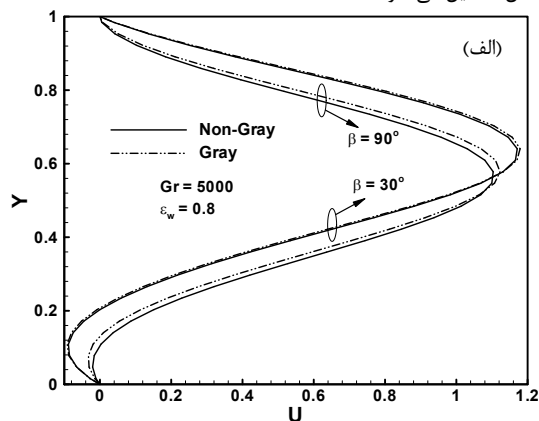


شکل ۷- تاثیر شیب کانال بر توزیع ضریب اصطکاک بروی دیواره پایین کانال در محیط‌های مختلف

همچنین در شکل ۷، تاثیر شیب کانال بر ضریب اصطکاک در محیط‌های خاکستری و غیر خاکستری بخوبی نمایان است. همانطور که از این شکل پیداست، در هر دو محیط یاد شده با کاهش شیب کانال، ضریب اصطکاک در ناحیه گردابه‌ای مجاور پله پسر در جهت منفی افزایش می‌یابد. این افزایش در ضریب اصطکاک، به دلیل افزایش شدت چرخش سیال و در نتیجه افزایش گرادیان‌های منفی سرعت است. در حالیکه در خارج از ناحیه گردابه‌ای ذکر شده، با کاهش عدد گرافش، ضریب اصطکاک بطور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند.

بهرحال شکل ۷ نیز مانند شکل ۶، بخوبی نشان می‌دهد که با افزایش شیب کانال، اختلاف میان نتایج محیط‌های خاکستری و غیر خاکستری در محاسبه گرادیان‌های سرعت بروی دیواره داغ کانال، زیاد می‌شود. آنالیز دقیق این شکل نشان می‌دهد که با افزایش شیب کانال از $\beta = 30^\circ$ تا $\beta = 90^\circ$ ، اختلاف میان نتایج محیط‌های خاکستری و غیر خاکستری در محاسبه مقادیر ضریب اصطکاک در ناحیه توسعه یافته $\left(\left| \frac{(C_f^*)_{non-gray} - (C_f^*)_{gray}}{(C_f^*)_{non-gray}} \right| \times 100 \right)$ به ترتیب از ۷/۱ درصد تا ۱۳/۶۵ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین شبیه سازی محیط‌های تابشی با استفاده از فرض محیط خاکستری، در کانال‌های عمودی با خطای بیشتری همراه بوده و قابل قبول نیست. لازم بذکر است که تفاوت عمده بین نتایج محیط خاکستری با نتایج محیط غیر خاکستری، بدلیل این

گردد؛ درحالیکه در $\beta = 90^\circ$ ، یک ناحیه گردابه‌ای بزرگ نزدیک این دیواره تشکیل شده است. به منظور تعیین نقش شیب کانال بروی رفتارهای هیدرودینامیکی جریان سیال در محیط‌های مختلف، توزیع سرعت محوری جریان سیال در دو مقطع مختلف و برای دو شیب متفاوت کانال، در شکل‌های ۶ (الف) تا (ب) نشان داده شده است. از این شکل‌ها بخوبی نمایان است که شیب کانال تاثیر مهمی بر رفتارهای هیدرودینامیکی در محیط‌های مختلف دارد؛ بطوریکه در تمامی فرض‌های مختلف محیط، با افزایش شیب کانال و در نتیجه افزایش نیروی محرکه بویانسی، ماکزیمم توزیع سرعت در مقاطع مختلف به سمت دیواره داغ کانال متمایل می‌شود.

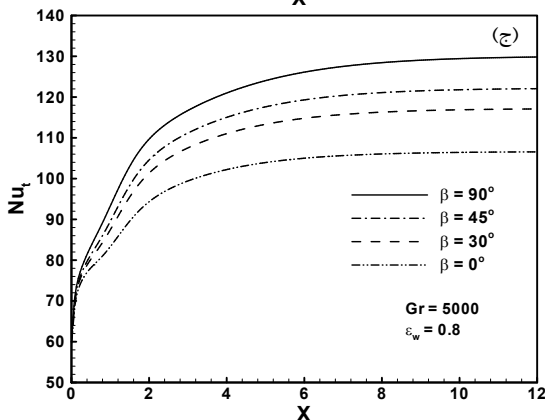
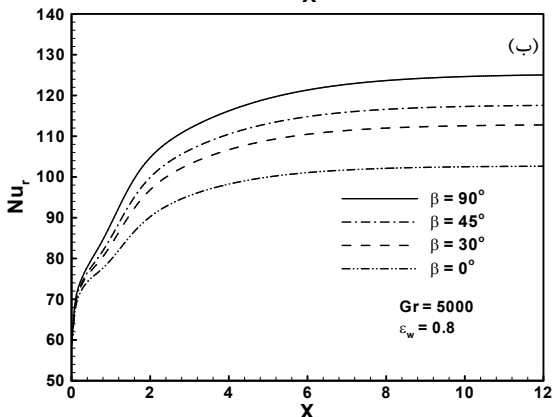
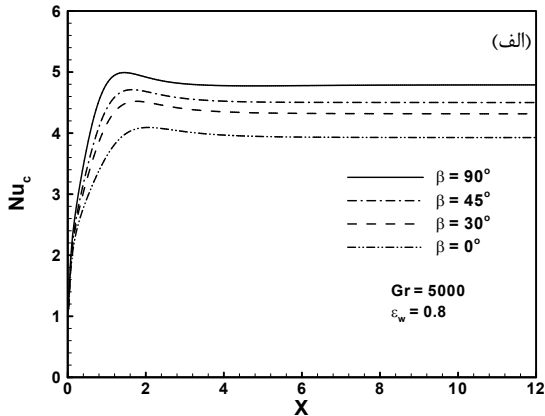


شکل ۶- تاثیر شیب کانال بر توزیع سرعت محوری جریان در محیط‌های مختلف، (الف) $X=0.5$ ، (ب) $X=3.0$

بر طبق آنچه شکل‌های ۶ (الف) تا (ب) نشان می‌دهند، با افزایش شیب کانال، توانایی فرض محیط خاکستری در پیش‌بینی رفتارهای هیدرودینامیکی محیط واقعی کاهش می‌یابد. بنابراین استفاده از این فرض محیط بجای محیط واقعی، منجر به ایجاد خطا و اشتباهات قابل توجهی در محاسبه توزیع سرعت، بخصوص در $\beta = 90^\circ$ خواهد شد. رفتار جالب دیگری که از مقایسه توزیع‌های سرعت در شکل ۶ مشاهده می‌شود این است که در تمامی شیب‌های کانال، کمترین مقادیر خطای ناشی از فرض محیط خاکستری، در مقاطع نزدیک به دیواره شیبدار پله وجود دارد.

به منظور وضوح بیشتر در نشان دادن اثرات شیب کانال بروی رفتارهای هیدرودینامیکی در محیط‌های خاکستری و غیر خاکستری،

در شبیه‌های مختلف کانال، می‌توان انتظار داشت که رفتارهای حرارتی جریان نیز متأثر از تغییرات شیب کانال باشد. برای وضوح بیشتر این نتیجه، توزیع عددهای ناسلت جابجایی، تابشی و کل بروی دیواره پایینی کانال در شبیه‌های مختلف کانال، در شکل‌های ۹(الف) تا (ج) برای یک محیط واقعی (محیط غیر خاکستری) نشان داده شده‌اند.

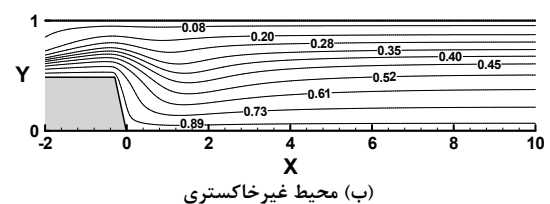
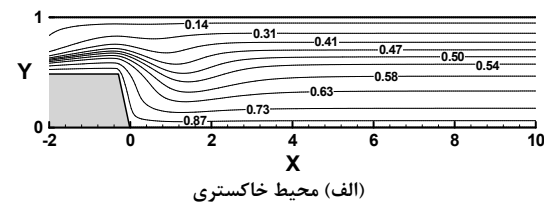


شکل ۹- تاثیر شیب کانال بر توزیع عددهای ناسلت بروی دیواره پایینی کانال در محیط غیر خاکستری، (الف) عدد ناسلت جابجایی، (ب) عدد ناسلت تابشی، (ج) عدد ناسلت کل

اثرات شیب کانال بر نحوه تغییرات نرخ‌های انتقال حرارت جابجایی، تابشی و کل، بخوبی از این شکل مشخص است. بر طبق آنچه شکل‌های ۹(الف) تا (ج) نشان می‌دهند، کمترین مقادیر پارامترهای Nu_c ، Nu_r و Nu_t مربوط به کانالهای افقی است؛ در حالیکه در

واقعیت است که تغییرات ضریب جذب گازهای جذبکننده، یعنی CO_2 و H_2O ، در طول طیف شدت نوسانی بوده و در قسمت اعظم طیف برابر صفرا نزدیک به صفر می‌باشد (شکل ۲). بنابراین در اکثر طیف، گازهای یاد شده در برابر انرژی تابشی شفاف بوده و در نتیجه در نظر گرفتن یک ضریب جذب یکسان در تمام طول طیف برای این گازها، منجر به ایجاد خطاهای بزرگ خواهد شد.

بر اساس آنچه که معادلات حاکم نشان می‌دهند، در جریان‌های جابجایی ترکیبی آزاد و اجباری، معادلات پیوستگی و مومنوم با معادله انرژی کوپل بوده و تغییرات میدان دما و میدان سرعت، متقابلاً بر یکدیگر تاثیر می‌گذارند. بنابراین در این نوع جریانها، رفتارهای هیدرودینامیکی متأثر از رفتارهای حرارتی خواهند بود. در حقیقت، می‌توان گفت که نتایج متفاوت فرضیه‌های مختلف محیط در پیش بینی رفتارهای هیدرودینامیکی، می‌تواند به علت متفاوت بودن میدان دما در آن محیط‌ها باشد. به منظور پی بردن به چگونگی تغییرات دما در هندسه مورد مطالعه، توزیع خطوط دما ثابت برای فرض‌های محیط خاکستری و غیر خاکستری در شکل ۸ ارایه شده‌اند.



شکل ۸- توزیع خطوط دما ثابت در محیط‌های مختلف، $\beta = 30^\circ$

تاثیر مکانیزم انتقال گرمای تابشی بروی رفتارهای گرمایی با مقایسه توزیع خطوط دما ثابت در محیط‌های مختلف آشکار خواهد شد. تاثیر این مکانیزم بروی خطوط دما ثابت در محیط‌های مختلف، بخوبی از طریق گرادینانهای دما در نزدیکی دیواره‌های کانال، قابل مشاهده است. بر طبق آنچه شکل ۸ بیان می‌کند، نتایج حاصل از شبیه سازی محیط‌های خاکستری، تفاوت قابل توجه و چشمگیری با نتایج محیط واقعی (غیر خاکستری) دارند. این تفاوت بخصوص در نواحی نزدیک به دیواره سرد بالایی، خیلی بیشتر است. به عنوان مثال، در مقطع $X=4$ ، اختلاف میان نتایج محیط‌های خاکستری و غیر خاکستری در محاسبه مقادیر دمای بی بعد $\left(\frac{(\theta)_{non-gray} - (\theta)_{gray}}{(\theta)_{non-gray}} \times 100 \right)$ تغییر ارتفاع جریان از $Y=0.05$ تا $Y=0.95$ ، به ترتیب از ۱/۹ درصد تا ۵۶/۶ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از فرض محیط خاکستری، قابل قبول نبوده و منجر به خطاهای بسیار بزرگ در پیش بینی رفتارهای حرارتی محیط واقعی می‌شود.

با متوجه به متفاوت بودن رفتارهای هیدرودینامیکی جریان سیال

I_b	شدت تابش جسم سیاه، $[W/m^2]$
k	متغیر ضریب جذب، $[m^{-1}]$
k_p	ضریب جذب میانگین پلانک، $[m^{-1}]$
Nu	عدد ناسلت
p	فشار، $[N/m^2]$
q	شار حرارتی، $[W/m^2]$
Re	عدد رینولدز
T	دما، $[K]$
u, v	مولفه سرعت در راستای x, y ، $[m/s]$
U, V	مولفه سرعت بدون بعد در راستای x, y
U_o	سرعت متوسط ورودی، $[m/s]$
x, y	مختصات، $[m]$
X, Y	مختصات بدون بعد

علایم یونانی

α	پخشندگی گرمایی، $[m^2/s]$
β	زاویه شیب کانال
σ	ثابت استفان بولتزمن، $[5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)]$
ϵ	ضریب گسیل
ϕ	زاویه شیب پله
μ	لزجت دینامیکی، $[kg/m.s]$
ρ	چگالی سیال، $[kg/m^3]$
θ	دمای بدون بعد
θ_b	دمای متوسط سیال
θ_1, θ_2	پارامترهای بدون بعد دما

زیر نویس ها

b	سیاه
c	دیواره سرد- جابجایی
g	توزیع k تراکمی
h	دیواره گرم
in	ورودی
r	تابشی
t	کل
w	دیواره
η	عدد موج، $[cm^{-1}]$

۹- مراجع

[1] Erturk E., Numerical solutions of 2-D steady incompressible flow over a backward facing step, Part I: High Reynolds number solutions. *Computers & Fluids*, Vol. 37, pp. 633-655, 2008.

[2] Nie J.H., Chen Y.T., and Hsieh H.T., Effects of a baffle on separated convection flow adjacent to backward-facing step. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 618-625, 2009.

[3] Atashafrooz M., Gandjalikhan Nassab S.A., and Ansari A. B., Numerical analysis of laminar forced convection flow over backward and forward facing steps in a duct under

کانال‌های عمودی، عددهای ناسلت بیشترین مقادیر خورد را دارا می-باشند. این رفتار بدین گونه توجیه می شود که با افزایش شیب کانال و در نتیجه افزایش نیرو محرکه بویانسی، گرادیان‌های دما و شار گرمای تابشی بروی دیواره داغ کانال افزایش یافته و در پی آن مقادیر Nu_c ، Nu_r و Nu_t نیز افزایش می‌یابند.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، برای اولین بار تاثیر شیب کانال بر انتقال گرمای مرکب جابجایی آزاد و اجباری برای یک گاز تابشی غیرخاکستری در یک کانال دوبعدی شیبدار و دارای پله پسرو، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. معادلات حاکم به صورت عددی و با استفاده از تکنیکهای دینامیک سیالات محاسباتی و با به کار بردن روش ناحیه غیرفعال در سیستم مختصات دکارتی حل شده‌اند.

در این پژوهش، سیال داخل کانال بصورت مخلوطی از هوا با دو گاز غیر خاکستری، بخار آب (H_2O) و دی اکسید کربن (CO_2) با کسر مولیهای متفاوت، در نظر گرفته شده است. این سیال با توجه به فرض محیط، می‌تواند تابشی خاکستری و تابشی غیر خاکستری در نظر گرفته شود. در این پژوهش، محیط غیر خاکستری به عنوان "حالت واقعی" در نظر گرفته شده و نتایج فرض محیط خاکستری با این محیط مقایسه شده تا میزان خطاهای ناشی از فرض محیط خاکستری در هندسه مورد مطالعه مشخص گردد. برای شبیه سازی محیط غیر خاکستری، یکی از موثرترین و جدیدترین مدل‌های طیفی به نام روش توزیع k تمام طیف، مورد استفاده قرار گرفته شد؛ در حالیکه محاسبات مربوط به محیط خاکستری بر اساس ضریب جذب میانگین پلانک انجام شده است. همچنین برای حل معادلات تابشی، از روش مشهور و کارآمد طول‌های مجزا استفاده شده است. نتایج بدست آمده از این تحقیق رامی‌توان بصورت ذیل خلاصه کرد:

- ✓ شیب کانال، تاثیر بسزایی روی رفتارهای هیدرو دینامیکی و تابشی در محیط‌های مختلف دارد. با افزایش این پارامتر و در نتیجه افزایش نیرو محرکه بویانسی، ضریب اصطکاک و عددهای ناسلت جابجایی، تابشی و کل افزایش می‌یابند.
- ✓ با افزایش شیب کانال، توانایی فرض محیط خاکستری در پیش-بینی نتایج محیط‌های واقعی کاهش می‌یابد. بنابراین استفاده از فرض محیط خاکستری در کانال‌های عمودی، منجر به اشتباهات بزرگی در شبیه سازی سیستم‌های گرمایی خواهد شد.

۸- نمادها

a	تابع وزن برای روش توزیع k تمام طیف
C_f	ضریب اصطکاک
C_f^*	ضریب اصطکاک بهبود یافته
ER	نسبت انبساط کانال
f	توزیع k ، $[m]$
g	توزیع k تراکمی
Gr	عدد گرافش
I	شدت تابش، $[W/m^2]$

- and its evaluation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 84, No. 4, pp. 465–475, 2004.
- [20] Yan L., Cao Y., Li X., He B., A modified exponential wide band model for gas emissivity prediction in pressurized combustion and gasification processes. *Energy & Fuels*, Vol. 32, No. 2, pp. 1634–1643, 2018.
- [21] Jo S.M., Kim J.W., and Kwon O.J., A narrow-band k-distribution model with single mixture gas assumption for radiative flows. *Infrared Physics & Technology*, Vol. 91, pp. 27-36, 2018.
- [22] Modest M.F., Narrow band and full spectrum k-distributions for radiative heat transfer-correlated-k vs., scaling approximation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 76, No. 1, pp. 69–83, 2003.
- [23] Solovjov V.P., and Webb B.W., SLW modeling of radiative transfer in multi component gas mixtures. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 65, pp. 655–672, 2000.
- [24] Fernandez S.F., Paul C., Sircar A., Imren A., Haworth D.C., Roy S. and Modest M.F., Soot and spectral radiation modeling for high-pressure turbulent spray flames. *Combustion and Flame*, Vol. 190, pp. 402-415, 2018.
- [25] Solovjov V.P., Andre F., Lemonnier D., and Webb B.W., The Scaled SLW model of gas radiation in non-uniform media based on Planck-weighted moments of gas absorption cross-section. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 206, pp.198-212, 2018.
- [26] Ibrahim A., and Lemonnier D., Numerical study of coupled double-diffusive natural convection and radiation in a square cavity filled with a N₂-CO₂ mixture. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 197–202, 2009.
- [27] Sun Y., Zhang X., and Howell J.R., Combined natural convection and non-gray radiation heat transfer in a horizontal annulus. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 206, pp. 242-250, 2018.
- [28] Proter R., Liu, F., Pourkashanian M., Williams A., and Smith D., Evaluation of solution method for radiative heat transfer in gaseous oxy-fuel combustion environments. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 111, pp. 2084–2094, 2010.
- [29] Lari K., Baneshi M., Gandjalikhan Nassab S.A., Komiya A., and Maruyama S., Numerical study of non-gray radiation and natural convection using the full-spectrum k-distribution method. *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 61, pp.61-84, 2012.
- [30] Atashafrooz M., Gandjalikhan Nassab S.A., and Lari K., Application of full-spectrum k-distribution method to combined non-gray radiation and forced convection flow in a duct with an expansion. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 845-859, 2015.
- [31] Atashafrooz M., Gandjalikhan Nassab S.A., and Lari K., Numerical analysis of interaction between non-gray radiation and forced convection flow over a recess using the full-spectrum k-distribution method. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 2, pp. 361-377, 2016.
- [32] Patankar S.V., and Spalding D.B., A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, No. 10, pp. 1787–1806, 1972.
- [33] Rothman, L.S. et al., The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 110, pp. 533–572, 2009.
- [34] Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor & Francis, Philadelphia, PA. 1981
- bleeding condition. *International Review of Mechanical Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 513-518, 2011.
- [4] Selimefendigil F., and Oztop H.F., Numerical analysis of laminar pulsating flow at a backward facing step with an upper wall mounted adiabatic thin fin. *Computers & Fluids*, Vol. 88, pp. 93-107, 2013.
- [5] Barrios-Pina H., Viazzo S., and Rey C., A numerical study of laminar and transitional mixed convection flow over a backward-facing step. *Computers & Fluids*, Vol. 56, pp. 77–91, 2012.
- [6] Nouri-Borujerdi A., and Moazezi A., Investigation of obstacle effect to improve conjugate heat transfer in backward facing step channel using fast simulation of incompressible flow. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 1, pp. 135-150, 2018.
- [7] Maerefat M., and Esmaili A., Analysis of combined conduction-radiation heat transfer in multilayer insulations. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol.46, No. 1, pp. 47-56, 2014.
- [8] Zabihi M., Lari K., and Amiri H., Coupled radiative-conductive heat transfer problems in complex geometries using embedded boundary method. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 39, No. 3, pp. 2847-2864, 2017.
- [9] Ren T., Modest M.F., and Haworth D.C., Simulating turbulence-radiation interactions using a presumed probability density function method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 121, pp. 911-923, 2018.
- [10] Ko, M., and Anand N.K., Three-dimensional combined convective-radiative heat transfer over a horizontal backwardfacing step—A finitevolume method. *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 54, pp. 109–129, 2008.
- [11] Ansari A.B., and Gandjalikhan Nassab S.A., Combined gas radiation and laminar forced convection flow adjacent to a forward facing step in a duct. *International Journal of numerically method for Heat and fluid flow*, Vol. 23, No. 2, pp. 320-335, 2011.
- [12] Atashafrooz M., and Gandjalikhan Nassab S.A., Numerical analysis of laminar forced convection flow with two inclined steps considering gas radiation effect. *Computers & Fluids*, Vol. 66, pp.167-176, 2012.
- [13] Atashafrooz M., and Gandjalikhan Nassab S.A., Combined heat transfer of radiation and forced convection flow of participating gases in a three-dimensional recess. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 10, pp. 3357-3368, 2012.
- [14] Tencer J., Howell J. R., A multi-source full spectrum k-distribution method for 1-D inhomogeneous media. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 129, pp. 308–315, 2013.
- [15] Modest M.F., *Radiative Heat Transfer*. McGraw-Hill, New York, 2003.
- [16] Solovjov V.P., and Webb B.W., The cumulative wavenumber method for modeling radiative transfer in gas mixtures with soot. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 93, pp. 273-287, 2005.
- [17] Chu H., Ren F., Feng Y., Gu M., and Zheng S., A comprehensive evaluation of the non-gray gas thermal radiation using the line-by-line model in one-and two-dimensional enclosures. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 124, pp. 362-370, 2017.
- [18] Edwards D.K., Molecular gas band radiation. *Advances in Heat Transfer*, Vol. 12, pp. 115–193, 1976.
- [19] Liu F., and Smallwood G.J., An efficient approach for the implementation of the SNB based correlated-k method