



تحلیل انتقال حرارت ترکیبی (جابجایی مختلط - تشعشع گرمایی) آشفته در کانال قائم سه بعدی با خواص متغیر با دما

فرزاد بازدیدي طهراني^{۱*}، ودود امدادی حور^۲ و سعید مقدم^۳

^۱ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

^۲ کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

^۳ دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۹/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۱۰

چکیده

هدف از مقاله حاضر، تحلیل انتقال حرارت ترکیبی (تشعشع گرمایی-جابجایی مختلط) آشفته در یک کانال سه بعدی قائم تحت شرایطی است که خواص سیال متغیر بوده و وابسته به دما است. جریان سیال در عدد رینولدز، برابر با 6200 بر مبنای عرض کانال و عدد گراشف برابر با 10^7 بر مبنای عرض کانال و اختلاف دمای دیواره گرم و سرد، با سرعت و دمای یکنواخت وارد این کانال می‌شود. دیواره سمت راست گرم بوده و جریان سیال در نزدیکی آن، دارای اثرات شناوری هم‌سو و دیواره سمت چپ سرد بوده و جریان سیال در نزدیکی آن، دارای شناوری ناهم‌سو است. خواص ترموفیزیکی سیال مانند، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی بر مبنای قانون توانی با دما تغییر می‌یابد. چگالی سیال نیز، بر مبنای قانون گاز کامل تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در حضور تشعشع گرمایی، به دلیل کاهش اثرات شناوری، پروفیل‌های دما مسطح‌تر می‌شود؛ همچنین، تشعشع گرمایی باعث افزایش انتقال گرما در هر دو سمت هم‌سو و ناهم‌سو می‌شود و گرادیان سرعت در سمت هم‌سو، کاهش و در سمت ناهم‌سو، افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، فرض خواص متغیر با دما سبب کاهش گرادیان‌های سرعت و دما در ناحیه هم‌سو و افزایش آنها در ناحیه ناهم‌سو می‌شود.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت ترکیبی؛ جریان آشفته؛ کانال قائم؛ خواص متغیر با دما؛ روش جهات مجزا.

Analysis Of Turbulent Combined Heat Transfer (Mixed Convection-Thermal Radiation) Heat Transfer in a Vertical Three Dimensional Duct With Variable Thermo-physical Properties

F. Bazdidi-Tehrani^{1*}, V. Emdadi Hor², S. Moghaddam³

¹ Professor, Mech. Eng., Iran University Of science & Technology, Tehran, Iran.

² M.Sc. , Mech. Eng., Iran University Of science & Technology, Tehran, Iran.

³ Ph.D. , Mech. Eng., Iran University Of science & Technology, Tehran, Iran.

Abstract

The aim of the present paper is to analyse the effect of thermal radiation on turbulent mixed convection in a vertical duct with variable thermos-physical properties. The Reynolds number based on duct width is 6200 and the Grashof number based on duct width and hot to cold wall temperature difference is 10^7 . The right wall is the hot wall and buoyancy effect in its vicinity is aiding where the left wall is cold and buoyancy effect in its vicinity is opposing. Changes of dynamic viscosity and thermal conductivity of the medium follow the power law. Density is based on the perfect gas equation of state. Results show that with the presence of thermal radiation, due to the reduction in bouyancy effects, temperature profiles become more flattened. Also, radiation causes an increase in heat transfer on both the aiding and opposing sides whereby the velocity gradient reduces on the aiding side and increases on opposing side. Also, the assumption of variable properties results in a reduction of the velocity and temperature gradients on the aiding side and an augmentation on the opposing side.

Keywords: Combined Heat Transfer; Turbulent Flow; Vertical Duct; Variable Thermophysical properties; Discrete Ordinates Method.

۱- مقدمه

موضوع انتقال حرارت در کانال‌ها، به ویژه کانال‌های قائم به علت کاربردهای مهم و متنوع صنعتی، بسیار مورد توجه پژوهش‌گران در دهه‌های اخیر قرار گرفته است. کاربردهای کانال‌های قائم از ابعادی کوچک مانند، خنک‌کاری قطعات الکتریکی و الکترونیکی (منابع تغذیه، ترانسفورماتورها، بردهای الکترونیکی) تا ابعادی بسیار بزرگ مانند، صنایع انرژی خورشیدی (دودکش خورشیدی برای تولید انرژی) و مهندسی هسته‌ای را شامل می‌شود.

از دیگر موارد کاربرد کانال‌های قائم، در دودکش نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها است. با توجه به اینکه محصولات احتراق، کوره را در یک دمای بالا ترک می‌کنند و با خود مقدار زیادی حرارت که نمی‌توان از آن در کوره به صورت مستقیم استفاده کنند، به بیرون از کوره انتقال می‌دهند، قسمتی از این حرارت بوسیله پیش‌گرم کردن هوای مورد نیاز برای احتراق قابل برگشت است که بخشی از این انتقال حرارت، از طریق کانال‌های قائم می‌تواند صورت پذیرد.

بسیاری از محققان به بررسی انتقال حرارت همرفتی اعم از طبیعی، اجباری و یا ترکیبی درون کانال‌ها پرداختند. بدلیل سادگی، بسیاری از این پژوهش‌ها روی جریان آرام صورت گرفته است. یانگ و وو^۱ [۱]، به بررسی عددی انتقال حرارت ترکیبی در کانالی پرداختند که بصورت متقارن گرم شده بود. کار چنگ و همکاران^۲ [۲] در مورد جریان کاملاً توسعه یافته آرام در حضور انتقال حرارت ترکیبی آرام و آشفته در یک کانال قائم است که در این بررسی، امکان وقوع جریان بازگشتی نیز در نظر گرفته شده است.

موارد اشاره شده در بالا بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل تشعشع گرمایی و انتقال حرارت همرفتی ارائه شده است. در بسیاری از موارد، حضور تشعشع گرمایی به اندازه انتقال همرفتی حائز اهمیت است. از همین رو بسیاری از دانشمندان و محققان به بررسی انتقال همرفتی در حضور تشعشع گرمایی پرداختند. یان و لی^۳ [۳]، برای جریانی آرام در یک کانال، به بررسی اثرات متقابل انتقال حرارت همرفتی

و تشعشعی در شرایطی پرداختند که سیال عامل بصورت خاکستری در نظر گرفته شده بود. بازدیدی طهرانی و صفاکیش^۴ [۴] نیز به تحلیل انتقال حرارت مختلط در کانال قائم سه‌بعدی پرداختند که به صورت غیرمتقارن گرم شده است. در این مطالعه سیال عامل نیز، دارای خواص تشعشعی در نظر گرفته شده است.

در ادامه و با پیشرفت سیستم‌های رایانه‌ای و در راستای بهبود و هر چه بیشتر کاربردی کردن نتایج، سمت و سوی - پژوهش‌ها در راستای مطالعه انتقال حرارت در جریان‌های آشفته قرار گرفته است. ساتیش و همکاران^۵ [۵]، به صورت عددی به بررسی اثرات شناوری روی انتقال حرارت ترکیبی در کانال قائم و افقی پرداختند. در این بررسی جریان بصورت آشفته در نظر گرفته شده است. کار میونگ^۶ [۶]، در مورد بررسی عددی جریان آشفته و انتقال حرارت در یک کانال سه‌بعدی با سطح مقطع مربعی است.

برخی از محققان به استفاده از روش شبیه‌سازی مستقیم عددی برای تحلیل آشفته‌گی روی آوردند. تحلیل عددی مستقیم برای جریان کاملاً توسعه یافته و انتقال حرارت آشفته در یک کانال مربعی، توسط ما و همکاران^۶ [۷] انجام گرفته است. در این مطالعه دو دیواره عمودی دارای دمای یکنواخت ثابت بوده و دو دیواره افقی کاملاً آدیاباتیکی فرض شده‌اند. در این بررسی، عدد رینولدز اصطکاکی برابر با ۴۰۰ در نظر گرفته شده است. عدد رینولدز جریانی نیز، ۶۲۰۰ فرض شده است. بررسی‌ها برای چهار عدد گراش مختلف، ۱۰^۴، ۱۰^۵، ۱۰^۶ و ۱۰^۷ انجام پذیرفته است.

همانطور که اشاره شد، عدم بررسی همزمان تشعشع گرمایی و انتقال حرارت همرفتی در بسیاری از موارد می‌تواند موجب ایجاد خطاهای قابل توجهی شود؛ بنابراین مهم است که بررسی‌ها به نحوی انجام گیرد که تشعشع گرمایی و همرفتی بصورت همزمان مطالعه شود تا برهم‌کنش بین تشعشع گرمایی و همرفتی تحلیل شود. در همین راستا، بسیاری از محققان به بررسی همزمان تشعشع و همرفتی در رژیم جریان آشفته پرداخته‌اند. اثر تشعشع روی همرفتی ترکیبی بین دو صفحه که بصورت نامتقارن گرم شده‌اند، به

⁴ Satish et al.

⁵ Myong

⁶ Ma et al.

¹ Yang & Wu

² Cheng et al.

³ Yan & Li

بررسی واقع نشده است؛ همچنین، عملکرد مدل‌های مبتنی بر متوسط‌گیری شده زمانی رینولدز معادلات ناویر-استوکس^۴ در حضور انتقال حرارت تشعشی، مورد توجه کافی واقع نشده است. با توجه به هزینه‌های محاسباتی نسبتاً پایین مدل‌های متوسط‌گیری شده رینولدز معادلات ناویر-استوکس در مقایسه با روش‌های رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و شبیه‌سازی عددی مستقیم، مطالعه حاضر می‌تواند بسیار سودمند باشد. علاوه بر این موضوع، اغلب مطالعات صورت گرفته موجود در ادبیات فن در این مباحث، به شرایط کاملاً توسعه یافته در کانال محدود شده‌اند؛ بنابراین، آنالیز ناحیه ورودی کانال که در آن میادین جریان و حرارتی هنوز در حال توسعه هستند، از اهمیت به سزایی برخوردار خواهد بود. با مرور آنچه که در قسمت‌های قبل ذکر شد و با توجه به این نکته که اکثر کاربردهای عملی کانال‌ها بصورت سه بعدی می‌باشد، لذا بررسی این قبیل کانال‌ها در حالت سه بعدی، از اهمیت بالایی برخوردار است.

از این رو، در پژوهش حاضر به آنالیز کامل انتقال حرارت ترکیبی (جابجایی مختلط - تشعشع) در جریان آشفته همراه با خواص متغیر با دما، با فرض غیربوزینسک قانون گاز کامل برای تغییرات چگالی در کانال سه بعدی قائم پرداخته می‌شود که به صورت نامتقارن گرم شده است. این در حالی است که اثر پدیده تشعشع گرمایی برای دیواره‌ها و محیط شرکت کننده لحاظ گردیده و سیال عامل علاوه بر خواص جذب و صدور، دارای خاصیت پراکنش نیز بوده است. اثر تغییرات نسبت پراکنش روی میدان‌های جریانی و گرمایی و عدد ناسلت و ضریب اصطکاک نیز، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مشخصات هندسی و فرضیات حاکم بر مسئله

در مقاله حاضر، به بررسی انتقال حرارت ترکیبی (جابجایی مختلط - تشعشع گرمایی) در کانال سه بعدی قائمی که به صورت غیرمتقارن گرم شده، پرداخته شده است. جریان سیال با عدد پرنتل 0.71 ، عدد رینولدز بر مبنای سرعت ورودی و قطر هیدرولیکی کانال برابر با 6200 و عدد گراشف برابر با 10^7 در نظر گرفته شده است. بر مبنای تحقیقات و بررسی‌های صورت گرفته در مرجع [۷]، تحت شرایط اعداد

صورت عددی توسط بازدید طهرانی و آقامینی [۸] انجام پذیرفته است. در این مطالعه نتایج در دو ناحیه جریان هم‌سو و ناهم‌سو ارائه شده است. سیال عامل خاکستری بوده و در تشعشع دخالت دارد. الیزالدو و همکاران^۱ [۹]، در مورد جریان آشفته در کانال بصورت عددی مطالعه کرده است. انتقال گرمای همرفتی و تشعشی بصورت همزمان و سیال نیز دخیل در تشعشع در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی و تحلیل میدان جریان آشفته، از رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و برای حل معادله انتقال تشعشی، از روش جهات مجزا استفاده شده است.

در تمامی مقاله‌های مرور شده در قسمت‌های قبل، خواص ترموفیزیکی سیال به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. این در حالی است که در عمل خواص سیال ثابت نبوده و با تغییر فشار و دما دچار تغییرات می‌شود؛ لذا عدم شبیه‌سازی جریان‌ها با فرض خواص متغیر با دما می‌تواند منجر به خطاهای قابل توجهی گردد. این امر موجب شده است تا بسیاری از محققان در بررسی‌های خود به تغییرات خواص با دما توجه نمایند. ونگ و همکاران^۲ [۱۰]، به بررسی همرفت طبیعی گاز پرداخته‌اند و اینکه چگونه خواص متغیر با دما روی جریان و انتقال حرارت تاثیر می‌گذارد را بررسی کردند. برخی از خواص سیال مانند، ویسکوزیته، رسانندگی گرمایی و چگالی بر مبنای قانون توانی متغیر با دما در نظر گرفته شده‌اند. توتانت و باتایل^۳ [۱۱] جریان کاملاً توسعه یافته آشفته از میان دو صفحه موازی در حضور گرادیان دمای بالا را با استفاده از رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مورد بررسی قرار دادند. تغییرات چگالی بر اساس قانون گاز کامل و تغییرات ویسکوزیته دینامیکی و رسانندگی گرمایی، بر اساس قانون سادرلند اعمال شده است.

بسیاری از مطالعات انجام شده در مورد اثرات خواص وابسته به دما روی میدان‌های جریانی و گرمایی، محدود به جریان آرام است و یا از تاثیر تشعشع یا شناوری در سیال چشم‌پوشی شده است. در ضمن، در شرایط جابجایی مختلط آشفته در هندسه‌ای که به طور غیر متقارن گرم شده، اثرات تشعشع به طور جداگانه روی نواحی هم‌سو و ناهم‌سو، مورد

^۱ Elizaldo et al.

^۲ Weng et al.

^۳ Toutant and Bataille

^۴ Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

هندسه حاکم بر مسئله در شکل ۱ ارائه شده است. مطابق شکل ۱ کانال قائم با سطح مقطع مربعی به عرض H و طول L در نظر گرفته شده است. طول کانل باندازه‌ای در نظر گرفته شده است که جریان در دو ناحیه در حال توسعه و توسعه یافته مورد بررسی قرار بگیرد. دیواره سمت راست، در دمای ثابت $T_h = 900K$ و دیواره سمت چپ، $X = 0$ ، در دمای ثابت $T_c = 300K$ قرار دارند. دو دیواره دیگر بصورت آدیاباتیک در نظر گرفته شده‌اند. شرایط مرزی به گونه‌ای اتخاذ شده است که دیواره‌های کانال دارای شرایط دمایی غیرمتقارن باشند. شرایط دمایی غیر متقارن باعث می‌شود که شرایط شناوری متفاوتی در دو سمت دیواره‌های سرد و گرم حاصل شود؛ لذا، در کانال به طور همزمان شرایط شناوری هم‌سو (نزدیک دیواره گرم) و ناهم‌سو (نزدیک دیواره سرد) ایجاد و مشاهده می‌شود تا بتوان نحوه تاثیر تشعشع روی جابجایی مختلط در دو ناحیه با شرایط جریانی متفاوت را مورد مطالعه قرار داد. دیواره‌های کانال به صورت خاکستری و دیفیوز و ورودی و خروجی کانال به صورت سطوح سیاه مجازی در نظر گرفته شده‌اند. ضریب صدور برای دیواره‌ها یکسان بوده و در محدوده‌ی $0 \leq \varepsilon \leq 1$ تغییر می‌کند؛ همچنین از انتقال حرارت هدایت در دیواره‌های کانال صرف‌نظر شده است. محیط شرکت‌کننده نیز، به صورت خاکستری و دارای تمامی خواص تشعشعی جذب، صدور و پراکنش است. لازم به ذکر است که پراکنش به صورت ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است و تابع فاز برابر با واحد است ($\phi = 1$).

خلاصه شرایط مرزی ذکر شده به زبان ریاضی بشرح زیر است:

برای دیواره گرم:

$$U = V = W = 0; \theta = 1; 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (1)$$

برای دیواره سرد:

$$U = V = W = 0; \theta = 0; 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (2)$$

برای دیواره‌های آدیاباتیک:

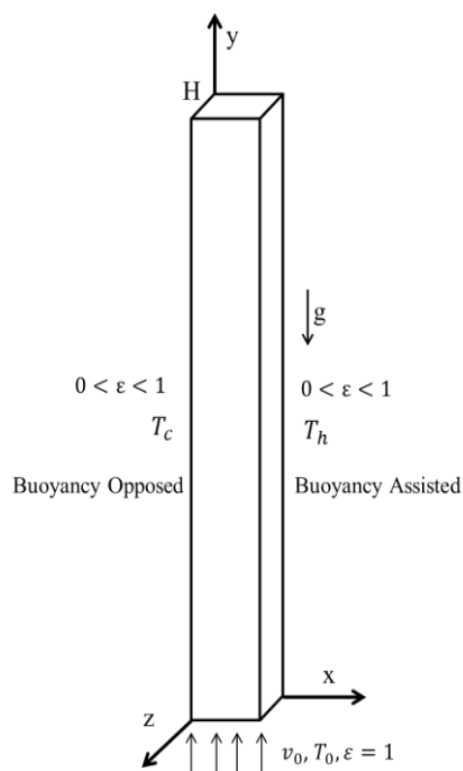
$$U = V = W = 0; \frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0; 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (3)$$

برای ورودی کانال:

$$V = 1; U = W = 0; \theta = \theta_0; \varepsilon = 1 \quad (4)$$

برای خروجی کانال:

رینولدز و گراشوف مذکور، شرایط جریانی آشفته و همرفت مختلط اجباری و طبیعی قابل دستیابی است. علاوه بر آن، بر مبنای بررسی‌های انجام شده توسط مرجع [۱۲] که بر اساس مقایسه ضخامت لایه‌های مرزی مختلف صورت گرفته است، برای سیالات دارای $Pr < 1$ ، عدد بی‌بعد مناسب برای تشخیص نوع همرفت، $Bo^{1/4}/Pe^{1/2}$ است. در مقاله حاضر، مقدار این پارامتر 0.72 است که در محدوده همرفت مختلط قرار می‌گیرد. یکی دیگر از پارامترهای موثر در جریان جابجایی مختلط، نسبت Gr/Re است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در مراجع [۱ و ۲] هنگامی که نسبت مذکور در محدوده‌ی 100 تا 2000 قرار دارد، به عنوان یک محدوده مناسب و ایمن برای بررسی جریان جابجایی مختلط محسوب می‌شود. در کار حاضر، بر اساس تعریف اعداد رینولدز و گراشوف، نسبت یاد شده برابر با 1600 است که در محدوده جابجایی مختلط قرار دارد.



شکل ۱- هندسه و شرایط حاکم بر مسئله

برای بدست آوردن لزجت دینامیکی آشفته، μ_t ، از مدل آشفستگی دومعادله‌ای مبتنی بر رهیافت رنس^۱ $K - \omega/SST$ استفاده شده است. مدل $k - \omega/SST$ توسط منتر^۲ [۱۳] و به منظور آمیختن فرمولبندی دقیق و قدرتمند مدل $k - \omega$ در نواحی نزدیک دیواره با مدل $k - \epsilon$ مستقل از جریان آزاد در نواحی دور از دیواره ارائه شده است؛ یعنی این مدل بطور همزمان، توانایی بالای مدل $k - \omega$ در نواحی با عدد رینولدز پایین و توانایی بالای مدل $k - \epsilon$ در نواحی با عدد رینولدز بالا را در اختیار گرفته است. روابط مربوط به این مدل در مرجع [۱۳] ارائه شده است.

با رجوع دوباره به معادله ۸، ترم آخر این معادله که بیانگر چشمه تشعشی است، بصورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود:

$$\nabla \cdot q_r = 4\alpha \left[e_b - \frac{1}{4} \int_0^{4\pi} i'(\omega_i) d\omega_i \right] \quad (11)$$

برای بدست آوردن چشمه تشعشی ارائه شده در معادله ۱۱، لازم است تا معادله انتقال تشعشی ۱۲ حل شود تا شدت تابش در نقاط مختلف از این طریق بدست آید.

$$\frac{di'_\lambda}{ds} = -\alpha_\lambda(s) i'_\lambda(s) + \alpha_\lambda(s) i'_{\lambda b}(s) - \sigma_{s\lambda}(s) i'_\lambda(s) + \frac{\sigma_{s\lambda}(s)}{4\pi} \int_0^{4\pi} i'_\lambda(s, \omega_i) \phi(\lambda, \omega, \omega_i) d\omega_i \quad (12)$$

روش جهات مجزا^۳ [۱۴]، یکی از متداول‌ترین روش‌های حل معادله انتقال تشعشی محسوب می‌شود و به همین جهت مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. اساس این روش بر تبدیل نمودن انتگرال موجود در معادله انتقال تشعشی به روابط جبری استوار است تا بدین ترتیب، معادله مذکور به یک معادله دیفرانسیلی تبدیل شود. چنانچه به معادله انتقال تشعشی مراجعه شود، مشاهده می‌گردد که در این معادله یک ترم انتگرالی که متغیر آن زاویه فضایی است، به چشم می‌خورد. در روش جهات مجزا با توجه به ثابت بودن شدت تابش در هر یک از زوایای فضایی، حاصل انتگرال

$$\frac{\partial U}{\partial Y} = \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{\partial W}{\partial Y} = \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0; \quad \epsilon = 1 \quad (5)$$

ویسکوزیته دینامیکی و رسانندگی گرمایی سیال بر اساس قانون توانی مدل‌سازی شده‌اند. برای محاسبه چگالی نیز، از فرض گاز ایده‌آل استفاده گردیده است.

تعریف پارامترهای اصلی مورد استفاده در مقاله حاضر، شامل پارامترهای بی‌بعد، به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} X &= x/H; Y = y/H; Z = z/H \\ Y^* &= Y/Re \cdot Pr; \theta = (T - T_c)/(T_h - T_c) \\ U &= u/v_0; V = v/v_0; W = w/v_0 \\ Re &= v_0 H/\nu; Re_\tau = u_\tau H/\nu \\ \Delta T &= T_h - T_c; Pe = Re \cdot Pr; \tau = \kappa H \\ Gr &= g\beta\Delta T H^3/\nu^2; Pr = \mu C_p/\lambda \\ I &= i/\sigma T_c^4; Bo = Gr \cdot Pr^2; \omega = \sigma_s/\kappa \\ Pl &= k\Delta T/H\sigma T_c^4; \kappa = \sigma_s + \alpha \end{aligned}$$

۳- معادلات و فرضیات حاکم بر مسئله

معادلات حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر آشفته سه بعدی شامل، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی، به شرح زیر می‌باشد:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

معادله مومنتوم:

$$\rho(\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] - B_i \quad (7)$$

معادله انرژی:

$$\rho C_p(\bar{u}_j \frac{\partial T}{\partial x_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho C_p \overline{u'_j T} \right) \right] - \nabla \cdot q_r \quad (8)$$

معادله حالت گاز کامل:

$$P = \rho RT \quad (9)$$

همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، خواص سیال مانند ویسکوزیته دینامیکی و رسانندگی گرمایی، بصورت توانی و مطابق با رابطه ۱۰، متغیر با دما در نظر گرفته شده‌اند.

$$\mu = \mu_s \left(\frac{T}{T_s} \right)^n \quad (10)$$

¹ RANS

² Menter

³ Discrete Ordinate Method

است. همانطور که از جدول ۱ برمی آید، با ریزتر شدن شبکه در راستای x و z مقدار عدد ناسلت نیز به یک مقدار مشخص می‌گراید، بطوریکه اختلاف مقدار در آخرین مرحله شبکه-بندی کمتر از ۰/۲٪ شده است که برای استقلال نتایج از شبکه بندی درصد اختلاف مناسبی است. لذا با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱، شبکه بندی $60 \times 120 \times 120$ بعنوان شبکه بندی مبنا انتخاب شده و تمامی نتایج به وسیله این شبکه بندی بدست آمده‌اند.

جدول ۱ - استقلال نتایج از اندازه شبکه

$n_x \times n_z \times n_y$	Nu_h	اختلاف با شبکه مرجع
$110 \times 110 \times 60$	۷/۰۲۹۳۲۱	۲/۳٪
$115 \times 115 \times 60$	۷/۱۲۱۵۰۵	۰/۶٪
$120 \times 120 \times 60$	۷/۱۹۴۸۲۵	۰
$125 \times 125 \times 60$	۷/۲۰۴۳۹۶	۰/۱۳۳٪
$120 \times 120 \times 70$	۷/۱۸۰۰۷۰	۰/۲۰۵٪

لازم به ذکر است، در تغییر تعداد المان‌ها در راستای x و z یا همان عرض کانال و در تعیین میزان غیریکنواختی، توجه شده است که $\gamma^+ = 1$ گردد تا حداقل یک المان در زیرلایه لزج قرار داده شود. این بحث به دلیل استفاده از مدل‌های آشفتگی رینولدز- پایین باید اجرا شود که در آنها از توابع دیواره استفاده نمی‌گردد؛ همچنین پهنای المان چسبیده به دیوار برابر با ۰/۰۱ پهنای المان در میانه کانال است.

۵- اعتبارسنجی روش‌های به کار گرفته شده

برای اطمینان از کارایی یک حل عددی، مسائلی به عنوان محک در نظر گرفته شده است که در واقع کارها و تحقیقات معتبر موجود در ادبیات فن می‌باشند. بدین طریق، در مقام مقایسه، صحت و دقت حل گر مورد استفاده مشخص می‌شود.

۵-۱- اعتبارسنجی در عدم حضور تشعشع گرمایی

اعتبارسنجی‌های اول و دوم، به پژوهش ما و همکاران [۷] مربوط می‌شود. در این پژوهش جریان کاملاً توسعه یافته

فوق با مجموع این شدت تابش‌ها تقریب زده می‌شود که البته در این میان ضرایب وزنی نیز سهیم هستند. پس:

$$\int_0^{4\pi} i'(w_i) dw_i = \sum_{m'} w_{m'} i_{m'} \quad (13)$$

که در آن w ضریب وزنی امتدادها و m' راستای آنها را نشان می‌دهد. در این پژوهش، از روش جهات مجزا با مرتبه S_6 استفاده شده است که در مجموع شامل ۴۸ امتداد می‌شود. پس از اعمال روش جهات مجزا روی معادله ۱۲، این معادله به شکل رابطه (۱۴) تغییر می‌کند:

$$\begin{aligned} \mu_m \frac{\partial i_m}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial i_m}{\partial y} + \eta_m \frac{\partial i_m}{\partial z} \\ = \alpha(s) i_b(s) - \kappa(s) i_m(s) \\ + \frac{\sigma_s(s)}{4\pi} \sum_{m'} w_{m'} i_{m'}(s) \end{aligned} \quad (14)$$

که در این معادله بدلیل خاکستری بودن محیط، وابستگی شدت تشعشع به طول موج از بین رفته و تابع فاز نیز، واحد فرض شده است. لازم بذکر است که ورودی و خروجی کانال، بصورت صفحات سیاه مجازی فرض شده‌اند.

در مقاله حاضر برای گسسته‌سازی معادلات حاکم، از روش حجم محدود استفاده شده است. برای گسسته‌سازی ترم‌های کانوکشن^۱ در معادلات، از روش آپویند^۲ مرتبه دو استفاده شده است. برای حل معادلات بصورت همزمان، از الگوریتم شناخته شده سیمپل^۳ استفاده شده است. تمامی موارد ذکر شده در بسته نرم افزاری متن‌باز اوپن‌فوم^۴ [۱۵] اعمال شده است. بدین منظور حل‌گر^۵ جدیدی به نام buoyantSimpleRadiationPowerlawFOAM طراحی و تولید شده است.

۴- بررسی استقلال از شبکه نتایج

به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه بندی، ۵ اجرای مختلف، به ازای یکی از شرایط حاکم بر مسئله برای ۳ راستای x ، y و z ، مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شده

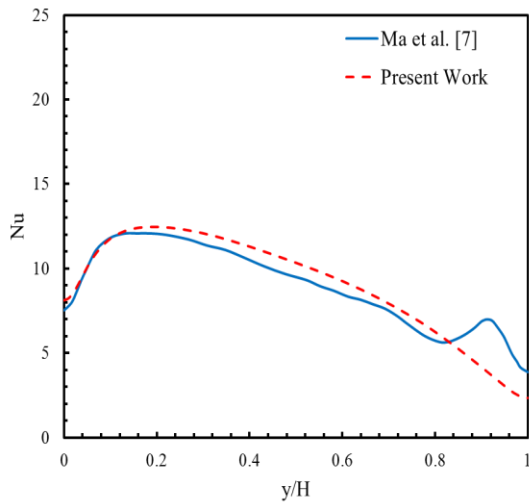
¹ Convection

² Upwind

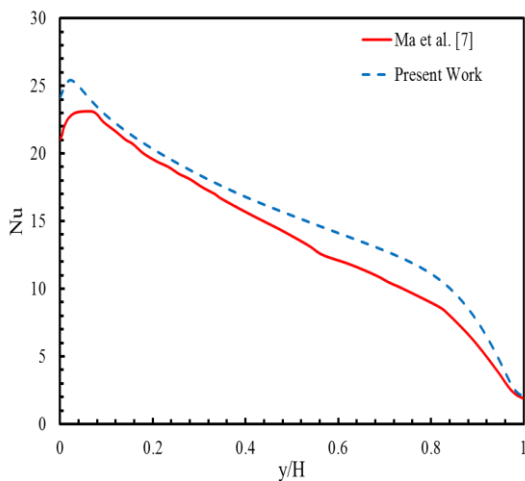
³ SIMPLE

⁴ OpenFoam

⁵ Solver



شکل ۲- مقایسه عدد ناسلت محلی دیواره گرم مرجع [۷] و نتایج حاضر در شرایط $Re = 6200$ و $Gr = 10^6$



شکل ۳- مقایسه عدد ناسلت محلی دیواره گرم مرجع [۷] و نتایج حاضر ($Re = 6200$ و $Gr = 10^7$)

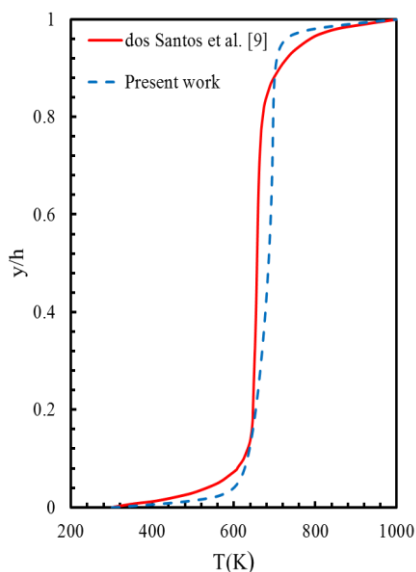
در این کانال سطح بالا گرم و در دمای ثابت ۱۰۰۰ کلوین و سطح پایینی سرد و در دمای ثابت ۳۰۰ کلوین قرار دارد. عدد رینولدز جریان بر مبنای سرعت و قطر هیدرولیکی، برابر با ۵۷۵۰ است. در این پژوهش برای مدل‌سازی آشفتگی، از رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. برای اعمال اثرات تشعشع، از روش جهات مجزا با دقت S_4 استفاده شده است. در بررسی تشعشع گرمایی، پارامتر ضخامت نوری مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست

آشفته در یک کانال مربعی دچار گرمایش با استفاده از رهیافت شبیه‌سازی عددی مستقیم^۱ مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش مذکور، عدد رینولدز جریان بر مبنای سرعت و قطر هیدرولیکی برابر با $Re = 6200$ و عدد گراشف بر مبنای اختلاف دمای دو دیواره گرم و سرد در حالت اول برابر با $Gr = 10^6$ و در حالت دوم برابر با $Gr = 10^7$ در نظر گرفته شده است. نتایج ارائه شده به صورت نمودارهای تغییرات عدد ناسلت روی دیواره گرم است که در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از کار [۷]، دارای تطابق قابل قبولی است و مقدار عدد ناسلت میانگین بدست آمده در حالت‌های اول و دوم، به ترتیب به میزان ۵٪ و ۱۱٪ با نتایج مرجع [۷] اختلاف دارد. در بیان علت اختلاف در نتایج بدست آمده می‌توان گفت که در مرجع [۷]، از روش DNS برای تحلیل جریان آشفته بهره برده شده است؛ در حالیکه در مقاله حاضر، از مدل مبتنی بر RANS برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شده است که این امر بخودی خود باعث کاهش دقت در تحلیل می‌شود. در گام بعدی نکته حائز اهمیت این است که اختلاف به وجود آمده مربوط به گوشه بالایی کانال است. در این ناحیه، به دلیل گوشه بودن، وجود جریان‌های ثانویه قابل پیش‌بینی است. از طرفی بسیاری از مدل‌های مبتنی بر RANS، در پیش‌بینی و آشکارسازی جریان‌های ثانویه از دقت قابل قبولی برخوردار نمی‌باشند؛ لذا در این ناحیه وجود جریان ثانویه باعث بالا رفتن جزئی انتقال حرارت نسبت به سایر نقاط شده است که مدل RANS مورد استفاده در مقاله حاضر، قادر به پیش‌بینی دقیق در این ناحیه بخصوص نبوده است.

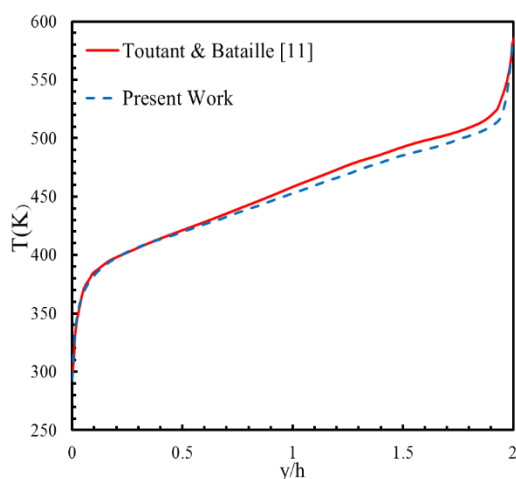
۵-۲- اعتبارسنجی در حضور تشعشع گرمایی

اکنون، به منظور صحت‌سنجی در حضور تشعشع گرمایی کار الیزالدو دوس سانتوس و همکاران [۹]، مورد استفاده قرار گرفته است. در مقاله مذکور، جریان آشفته از کانالی مستطیلی شکل و افقی عبور می‌کند.

^۱ Direct Numerical Simulation



شکل ۴- پروفیل‌های دمای متوسط در عرض کانال مرجع [۹] و نتایج حاضر برای $\tau = 0.01$



شکل ۵- پروفیل‌های دمای متوسط در عرض کانال مرجع [۱۱] و نتایج پژوهش حاضر

یکی از نوآوری‌های مقاله حاضر، سهیم بودن محیط و نقش داشتن آن در فرآیند تشعشع گرمایی است. از همین رو، محیط شرکت کننده (participating medium) به صورت خاکستری و دارای خواص (قابلیت) جذب، صدور و پراکنش فرض شده است که از آن با لفظ سیال عامل یاد می‌شود. با توجه به تعریف ضخامت نوری، $\tau = (\sigma_s + \alpha) \cdot H$ ، مقدار $\sigma_s + \alpha$ ثابت است. از طرفی دیگر، پارامتر تشعشعی مورد

آمده بصورت پروفیل دمای متوسط در عرض کانال برای ضخامت نوری $\tau = 0.01$ با نتایج [۹] در شکل ۴ مقایسه شده است که دارای تطابق مناسبی بوده و حداکثر خطا تقریباً ۷٪ است.

۵-۳- اعتبارسنجی در شرایط خواص متغیر با دما

جهت بررسی صحت روش به کار گرفته شده در مورد خواص ترموفیزیکی متغیر با دما، کار توتانت و باتایل [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است. در این کار جریان کاملاً توسعه یافته آشفته از میان دو صفحه موازی که دارای گرادیان دمای بالایی است، با استفاده از رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مورد بررسی قرار گرفته است.

صفحه بالایی گرم و صفحه پایینی سردتر در نظر گرفته شده است. تغییرات چگالی بر اساس قانون گاز کامل و تغییرات ویسکوزیته دینامیکی و رسانندگی گرمایی بر اساس قانون سادرلند^۱، همچنین اعمال عدد رینولدز جریان بر مبنای سرعت میانگین و نصف فاصله دو صفحه برابر با ۶۴۰۰، در نظر گرفته شده است. سیال عامل دارای عدد پرنتل برابر با ۰/۷۱ است. در شکل ۵ مقایسه پروفیل دمای بدست آمده در راستای صفحه مرکزی مابین دو صفحه سرد و گرم صورت پذیرفته است.

۶- نتایج و تفسیر آنها

مقاله حاضر به بررسی تاثیر پارامتر تشعشعی نسبت پراکنش (ω) در حالت ضریب میرایی (κ) ثابت روی سرعت خط مرکز کانال، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در طول کانال در سمت‌های هم‌سو و ناهم‌سو پرداخته است. نتایج در طول کانال و شامل دو ناحیه در حال توسعه و توسعه‌یافته هیدرودینامیکی و حرارتی است. در ارائه نتایج از روابط (۱۵-۱۶) برای بدست آوردن عدد ناسلت و ضریب اصطکاک استفاده شده است:

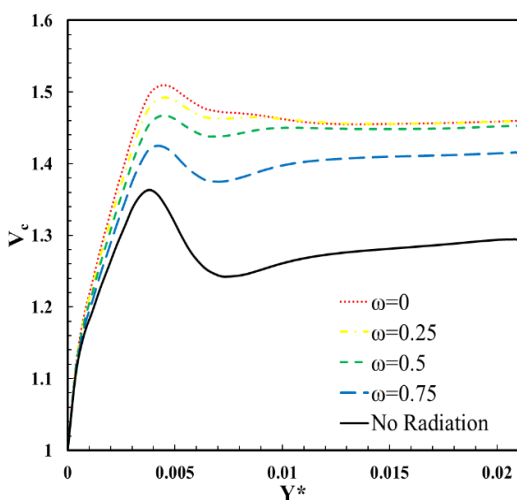
$$Nu = \frac{q_w H}{\lambda \Delta T} \quad (15)$$

$$f \cdot Re = -2 \frac{\partial V}{\partial y} \quad (16)$$

¹ Sutherland

تشعشعی کمتر می‌شود. علت این افزایش شدید، بالا رفتن مقدار انرژی تشعشعی جذب شده توسط سیال عامل و بالا رفتن دمای آن و به تبع آن تأثیر دمای بالا روی خواص سیال و از جمله کاهش شدید چگالی و در نتیجه افزایش سرعت است.

شکل‌های ۷ و ۸، به صورت متوالی، نمایان‌گر روند تغییرات عدد ناسلت میانگین در طول دو دیواره گرم (Nu_h) و سرد (Nu_c)، به ترتیب دارای اثرات شناوری هم‌سو و ناهم‌سو، در مقادیر مختلف ω است. با مقایسه نمودارهای Nu گرم و سرد با یکدیگر نتیجه‌گیری می‌شود که میزان تأثیر تغییر ω روی Nu در دیواره سرد، بسیار چشم‌گیرتر از دیواره گرم است. از طرفی مشاهده می‌شود که در دیواره سرد به دلیل حضور شناوری ناهم‌سو، میزان آشفستگی و ترم‌های نوسانی سرعت بیشتر است و در نتیجه میزان انتقال حرارت در این ناحیه، زیادتر از ناحیه هم‌سو است که این امر با نتایج مرجع [۸] مطابقت دارد. در شکل ۷ ملاحظه می‌شود که در حالت بدون تشعشع، نمودار در ابتدا و در ناحیه ورودی کانال کاهش و سپس با کمی افزایش به مقدار پایا یا همان حالت توسعه یافته می‌رسد. علت آن این است که در ورودی کانال هنوز اثرات شناوری پدیدار نشده‌اند و در ادامه با ظهور این اثرات روند انتقال گرما با کمی افزایش، متعادل می‌شود.



شکل ۶ - سرعت خط مرکز بی‌بعد در نسبت‌های پراکنش مختلف در طول کانال برای $\epsilon_w = \tau = 0.5$ & $Pl = 0.3$ و $Gr/Re = 1600$

تحلیل و مقایسه، نسبت پراکنش است که بصورت $\omega = \sigma_s / (\sigma_s + \alpha)$ تعریف می‌شود. لذا با توجه به ثابت بودن مخرج کسر مذکور، برای تغییر مقدار نسبت پراکنش باید ضریب پراکنش یا همان σ_s تغییر کند. با تغییر σ_s و با توجه به ثابت فرض شدن ضخامت نوری، مقدار α یا همان ضریب جذب سیال نیز متغیر است.

نسبت پراکنش ω ، سهم پراکنش را در تضعیف انرژی تشعشعی به هنگام عبور از محیط نشان می‌دهد. در مقاله حاضر، نسبت پراکنش بین ۰ تا ۰/۷۵ انتخاب شده است تا حالت‌های حدی آن در نظر گرفته شود. نسبت پراکنش صفر، بیانگر این مطلب است که محیط خاصیت پراکنش نداشته و نسبت پراکنش ۰/۷۵، تضعیف انرژی تشعشعی را تقریباً تنها ناشی از پراکنش می‌داند. هرچه این نسبت به عدد یک نزدیک‌تر باشد، تأثیر تشعشع بر جریان سیال کمتر است.

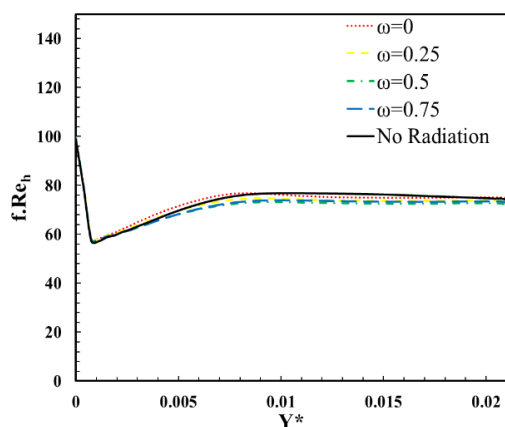
تمامی نتایج در شرایط $\epsilon_w = \tau = 0.5$ & $Pl = 0.3$ برای $Gr/Re = 1600$ مختلف ارائه شده‌اند.

شکل ۶ روند تغییرات سرعت بی‌بعد خط مرکز کانال (V_c) را در نسبت‌های پراکنش (ω) مختلف نمایش می‌دهد. در تمامی نمودارها، V_c در ابتدا افزایش می‌یابد و به یک مقدار بیشینه می‌رسد. سپس از آن مقدار بیشینه کاهش پیدا می‌کند و به ناحیه یکنواخت یا همان توسعه یافته می‌رسد. روند مذکور، به این دلیل اتفاق می‌افتد که در ابتدای کانال، به واسطه اثر دیواره‌ها که دارای شرط عدم لغزش می‌باشند، در نزدیکی دیواره‌ها شرایط سکون نسبی حاصل می‌شود؛ بنابراین برای برقراری قانون بقای جرم، با توجه به اینکه دبی در مقاطع مختلف کانال باید ثابت بماند و ذکر این نکته که اثرات شناوری هنوز ظهور نکرده‌اند، V_c افزایش می‌یابد. با پیشرفت در طول کانال، اثرات شناوری که در شرایط موجود در این مقاله در دو سمت دیواره‌ها به صورت مخالف است، یعنی افزایش سرعت ناشی از شناوری هم‌سو در سمت دیواره گرم و کاهش سرعت در اثر شناوری ناهم‌سو در سمت دیواره سرد، یکدیگر را بالانس می‌نمایند و برآیند به صورت کاهش شدید در مقدار V_c تا رسیدن به یک مقدار ثابت خواهد بود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حضور تشعشع گرمایی مقدار V_c در طول کانال نسبت به حالت بدون تشعشع افزایش پیدا می‌کند و میزان این افزایش با بیشتر شدن جذب انرژی

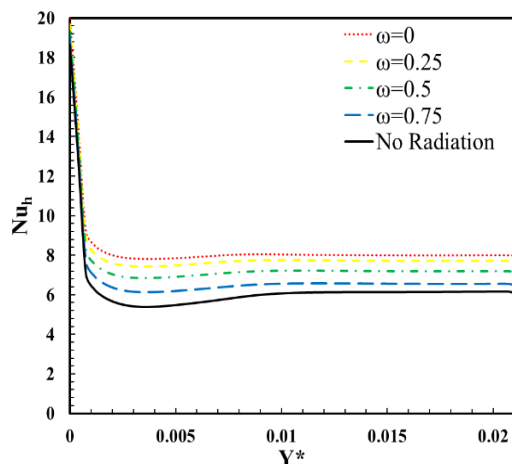
در شکل‌های ۹ و ۱۰ بترتیب روند تغییرات ضریب اصطکاک میانگین در طول دو دیواره گرم ($f \cdot Re_h$) و سرد ($f \cdot Re_c$) که دارای اثرات شناوری هم‌سو و ناهم‌سو هستند، در ω های مختلف ارائه شده است. در نگاه اول، با مقایسه دو شکل ۹ و ۱۰ ملاحظه می‌شود که مقدار پارامتر $f \cdot Re$ در ناحیه هم‌سو، بیشتر از ناحیه ناهم‌سو است که این امر با نتایج مرجع [۸] کاملاً تطابق دارد. با مقایسه نمودارهای $f \cdot Re$ گرم و سرد با یکدیگر این نتیجه حاصل می‌شود که میزان تأثیر تغییر ω روی $f \cdot Re$ ، در دیواره سرد بسیار چشم‌گیرتر از دیواره گرم است. به عبارت دیگر، می‌توان استنباط کرد که با اعمال تشعشع و تغییر در میزان قدرت تشعشعی به واسطه تغییر ω ، تغییرات مشهودی در $f \cdot Re_h$ به وجود نمی‌آید، ولی در شکل ۱۰ با افزایش قدرت تشعشعی ناشی از کاهش ω ، مقدار $f \cdot Re_c$ افزایش می‌یابد. در قسمت خواص متغیر با دما، از قانون توانی برای تغییرات ویسکوزیته دینامیکی و رسانندگی گرمایی سیال استفاده شده است.

در این بخش به بررسی تأثیر در نظر گرفتن خواص ترموفیزیکی متغیر با دمای سیال نسبت به شرایط خواص ثابت پرداخته می‌شود.



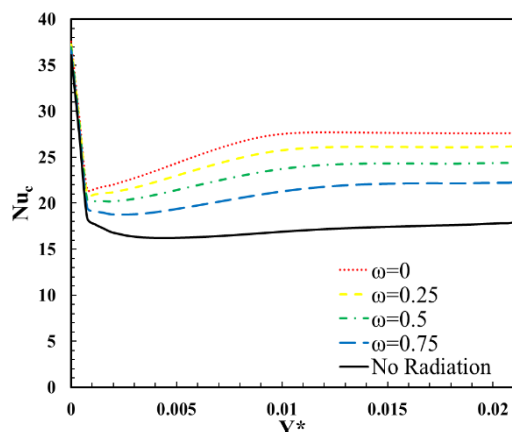
شکل ۹- ضریب اصطکاک میانگین دیواره گرم (جریان هم-سو) در نسبت‌های پراکنش مختلف در طول کانال

همچنین در این قسمت برای هر دو حالت خواص ثابت و متغیر، شرایط $Pl = 0.3$ & $\varepsilon_w = \tau = 0.5$ و $Gr/Re = 1600$ فرض شده است.



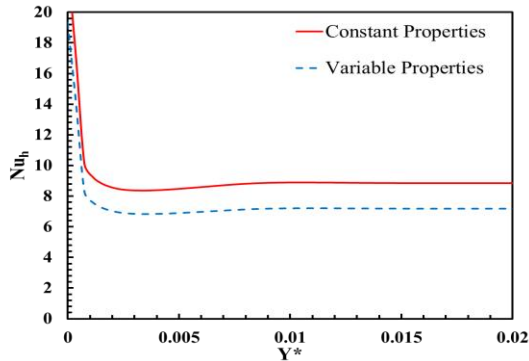
شکل ۷- عدد ناسلت میانگین دیواره گرم (جریان هم‌سو) در نسبت‌های پراکنش مختلف در طول کانال

با اعمال تشعشع، مقدار Nu نسبت به حالت بدون تشعشع، به دلیل حضور ترم تشعشعی در معادله انرژی، مقدار انتقال گرما و در نتیجه Nu بیشتر از حالت بدون تشعشع است. با افزایش ω اثرات تشعشعی ضعیف‌تر شده، در نتیجه مقدار Nu هم کمتر می‌شود. در ناحیه ورودی با توجه به عدم ظهور کامل شناوری، تغییر در میزان قدرت تشعشعی منجر به تغییرات کمی در مقدار Nu می‌شود؛ ولی به تدریج با پیشروی در طول کانال و غالب‌تر شدن اثرات شناوری، میزان تأثیر تشعشع چشم‌گیرتر از ناحیه ورودی می‌شود.

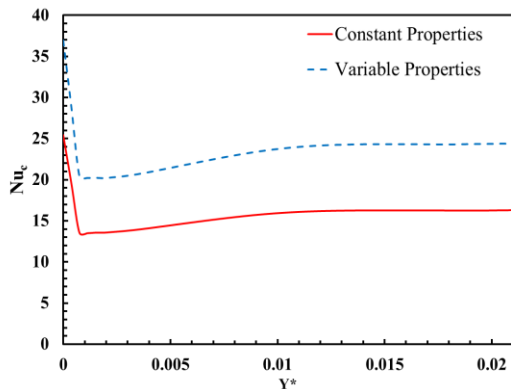


شکل ۸- عدد ناسلت میانگین دیواره سرد (جریان ناهم‌سو) در نسبت‌های پراکنش مختلف در طول کانال

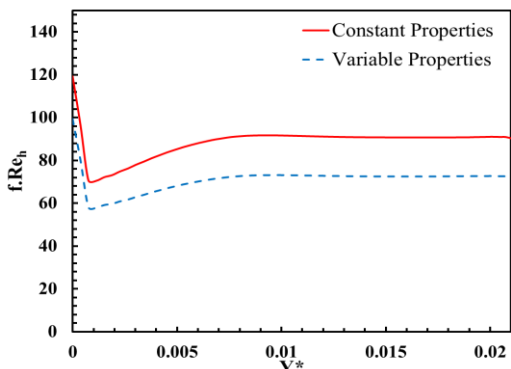
حالت خواص ثابت کمتر شده است. در دیواره سرد معکوس این روند رخ داده و فرض خواص متغیر با دما منجر به افزایش $f \cdot Re$ شده است.



شکل ۱۱- عدد ناسلت میانگین دیواره گرم (جریان هم‌سو) در نسبت‌های پراکنش مختلف در طول کانال



شکل ۱۲- عدد ناسلت میانگین دیواره سرد (جریان ناهم‌سو) در نسبت‌های پراکنش مختلف در طول کانال

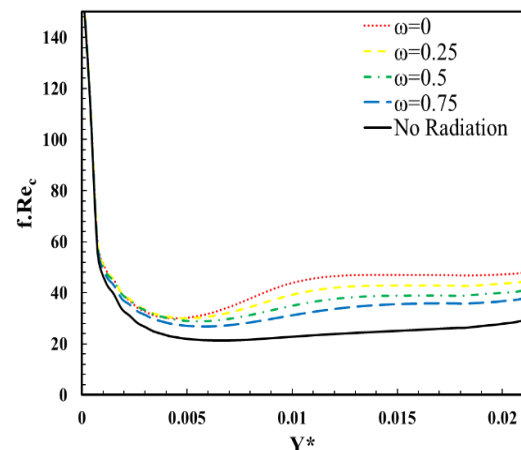


شکل ۱۳- ضریب اصطکاک میانگین دیواره گرم (جریان هم-سو) در دو حالت خواص ثابت و متغیر با دما

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مقایسه‌ای است، از نحوه تغییرات عدد ناسلت میانگین در طول دو دیواره گرم (Nu_h) و سرد (Nu_c) که بترتیب دارای اثرات شناوری هم‌سو و ناهم‌سو هستند که در دو حالت خواص ثابت و متغیر نمایش داده شده است.

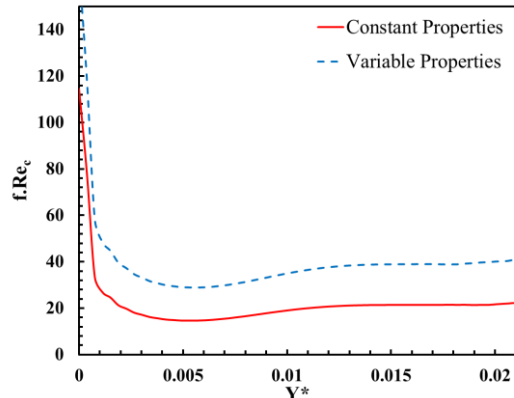
مقایسه دو نمودار شکل‌های ۱۱ و ۱۲ با یکدیگر نشان می‌دهد که میزان تأثیر خواص ترموفیزیکی متغیر با دما روی Nu ، در دیواره سرد بسیار چشمگیرتر از دیواره گرم است. در بیان علت می‌توان به این نکته اشاره کرد که خواص سیال با رابطه توانی تغییر می‌کند؛ لذا با توجه به اینکه دمای دیواره‌ها بصورت غیرمتقارن در نظر گرفته شده است، میزان تغییرات آن در نزدیکی دیواره سرد، کمی بیشتر از دیواره گرم است. از طرفی مشاهده می‌گردد که در دیواره گرم به دلیل افزایش λ ناشی از افزایش دما، گرادیان‌های دما در این ناحیه کاهش یافته و در نتیجه مقدار Nu نسبت به حالت خواص ثابت کمتر شده است. در دیواره سرد روند معکوس رخ داده و فرض خواص متغیر با دما منجر به افزایش Nu شده است.

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب، روند تغییرات ضریب اصطکاک میانگین در امتداد طولی دو دیواره گرم ($f \cdot Re_h$) و سرد ($f \cdot Re_c$)، دارای اثرات شناوری هم‌سو و ناهم‌سو، برای دو حالت خواص ثابت و متغیر با دما با یکدیگر مقایسه شده است. با مقایسه این دو نمودار با یکدیگر در دیواره گرم به دلیل افزایش μ ناشی از افزایش دما، گرادیان‌های سرعت در این ناحیه کاهش یافته و در نتیجه مقدار $f \cdot Re$ نسبت به

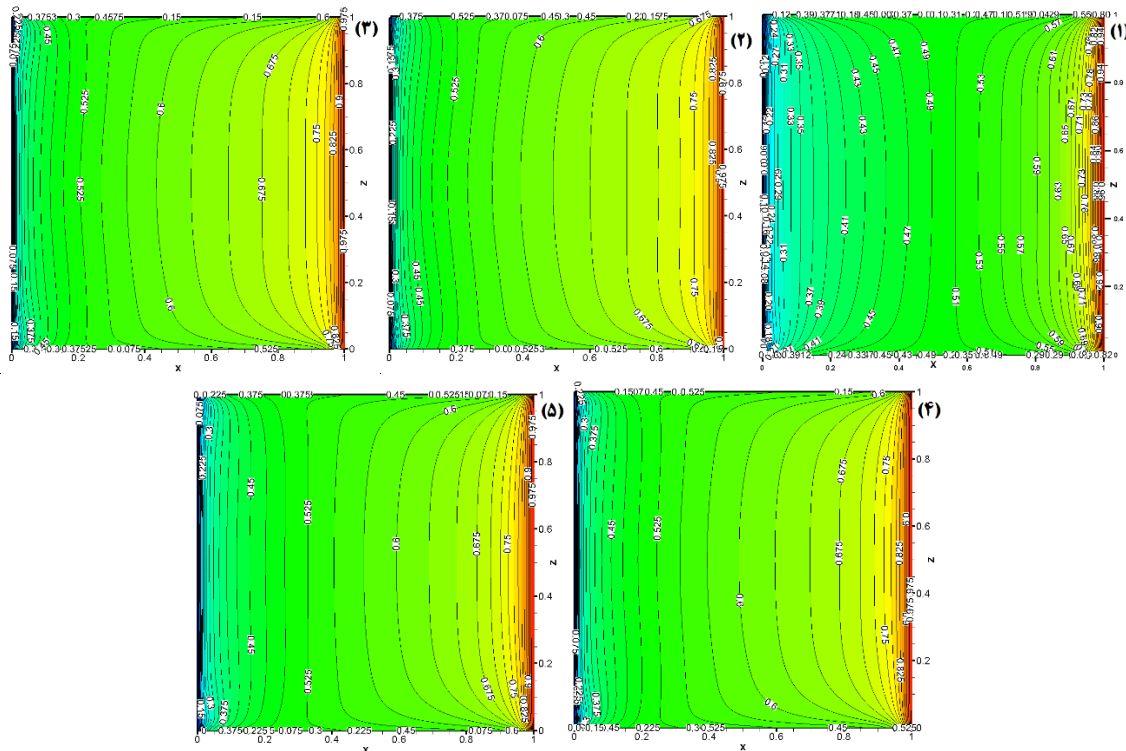


شکل ۱۴- ضریب اصطکاک میانگین دیواره سرد (جریان ناهم‌سو) در نسبت‌های پراکنش مختلف در طول کانال

شکل ۱۵ توزیع دمایی بی بعد در مقادیر ω مختلف در مقطع عرضی کانال را نشان می دهد. در این شکل مشاهده می شود که با افزایش ω ، مقدار جذب انرژی تشعشعی افزایش یافته و دمایی سیال بخصوص در نزدیکی دیواره گرم، افزایش می یابد. با مقایسه کانتور (۱) که در حالت عدم حضور تشعشع گرمایی ارائه شده است، با سایر کانتورها می توان اظهار داشت که با اعمال تشعشع گرمایی، کانتور دما بواسطه کاهش اثرات شناوری مسطح تر شده است و دارای توزیع یکنواخت تری می شود. از طرفی مشاهده می شود که گرادیان های دما در ناحیه نزدیک به دیواره سرد، بیشتر از دیواره گرم است. از طرفی مشاهده می شود که با تغییرات ω ، گرادیان های دما در نزدیکی دیواره سرد بیشتر از دیواره گرم دچار تغییر شده است.



شکل ۱۴ - ضریب اصطکاک میانگین دیواره سرد (جریان ناهم سو) در دو حالت خواص ثابت و متغیر با دما



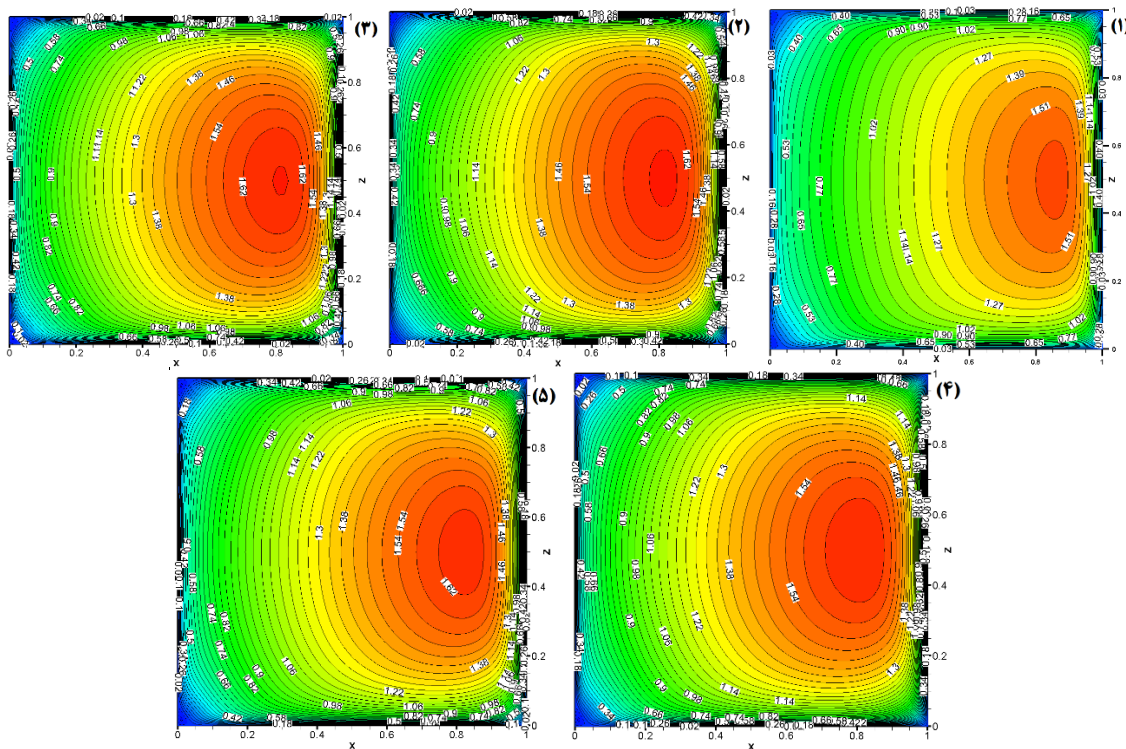
شکل ۱۵ - توزیع دمایی بی بعد در مقطع عرضی کانال در نسبت های پراکنش مختلف، (۱) عدم حضور تشعشع گرمایی، $\omega = 0$ (۲)، $\omega = 0.25$ (۳)، $\omega = 0.5$ (۴) و $\omega = 0.75$ (۵)

یافته و مقدار سرعت بیشینه افزایش می یابد که بدلیل حضور جریان شناوری هم سو در نزدیکی دیواره گرم قابل مشاهده است. با مقایسه کانتور (۱) که در حالت عدم حضور تشعشع

شکل ۱۶ توزیع سرعت بی بعد در ω های مختلف در مقطع عرضی کانال را نشان می دهد. در این شکل مشاهده می شود که با افزایش ω ، مقدار جذب انرژی تشعشعی افزایش

ديواره گرم است. با مقايسه كانتورها در ω هاي مختلف مي توان گفت كه گراديان سرعت در نزديكي ديواره سرد، بيشتر از گراديان سرعت در نزديكي ديواره گرم دستخوش تغيير شده است. علت اين امر، شرايط مرزي دمائي نامتقارن در ديواره هاست كه منجر به تغيير خواص نامتقارن در سيال شده است.

گرمائي ارائه شده است، با ساير كانتورها مي توان اظهار داشت كه با اعمال تشعشع گرمائي كانتور سرعت در ناحيه نزديك به ديواره گرم، پهن تر شده است كه بيانگر افزايش سرعت در تمامي نواحي است. دليل اين رخداد، تغييرات شديد خواص ترموفيزيكي مانند چگالي است. با دقت در توزيع سرعت در نزديكي ديواره ها مشاهده مي شود كه گراديان سرعت در نزديكي ديواره سرد، بيشتر از گراديان سرعت در نزديكي



شكل ۱۶- توزيع سرعت بي بعد در مقطع عرضي كانال در نسبت هاي پراكنش مختلف، (۱) عدم حضور تشعشع گرمائي، (۲)

$$\omega = 0 \quad (۳) \quad \omega = 0.25 \quad (۴) \quad \omega = 0.5 \quad (۵) \quad \omega = 0.75$$

۷- نتيجه گيري

ملموس در خواص ترموفيزيكي سيال از جمله چگالي، سرعت خط مركز در طول كانال افزايش مي يابد.

- با کاهش نسبت پراكنش، اثرات تشعشعي تشديد شده و منجر به جذب بيشتر انرژي گرمائي توسط محيط شركت كننده مي شود؛ لذا انتقال حرارت افزايش يافته و با افزايش گراديان هاي دما در نزديك ديوار به واسطه مسطح تر شدن پروفيل هاي

مقاله حاضر به تحليل انتقال حرارت تركيبی (جابجایی مختلط-تشعشع گرمایی) آشفته در كانال قائم سه بعدي همراه با خواص متغير با دما پرداخته است. در اين راستا، تأثير پارامتر تشعشعي نسبت پراكنش و فرض خواص ترموفيزيكي متغير با دما بر ميدان هاي جريان و دما مطالعه شده است. خلاصه نتايج حاصله به شرح زير است:

- با افزايش اثرات تشعشعي ناشي از کاهش نسبت پراكنش، بواسطه کاهش اثرات شناوري و تغييرات

مولفه‌های مختصاتی	x, y, z	دما، عدد ناسلت میانگین در هر دو ناحیه هم‌سو و	
مولفه‌های مختصاتی بی‌بعد	X, Y, Z	ناهم‌سو در طول کانال افزایش می‌یابد.	
مختصات Y بی‌بعد	Y^*	• با کاهش نسبت پراکنش، بدلیل پایین بودن انرژی جنبشی آشفته‌گی در ناحیه هم‌سو و شدید بودن آشفته‌گی در ناحیه ناهم‌سو بواسطه اثرات شناوری معکوس در این ناحیه، گرادیان‌های سرعت در ناحیه هم‌سو تغییر چندانی نمی‌کند؛ ولی در ناحیه ناهم‌سو در طول کانال افزایش می‌یابد.	
چگالی (kgm^{-3})	ρ	• با اعمال فرض خواص متغیر با دما، بدلیل نامتقارن بودن شرایط مرزی گرمایی در دو سمت، تغییرات خواص نیز بصورت نامتقارن در دو سمت رخ داده و باعث می‌شود که عدد ناسلت و ضریب اصطکاک میانگین در طول کانال در ناحیه هم‌سو کاهش و در ناحیه ناهم‌سو افزایش می‌یابد.	
ضریب صدور دیواره	ϵ_w		
تابع فاز	ϕ		
دمای بی‌بعد	θ		
ضریب انبساط حجمی (K^{-1})	β		
لزجت سینماتیک (m^2s^{-1})	ν		
ضریب نفوذ حرارتی (m^2s^{-1})	α		
ضخامت نوری	τ		
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ		
ضریب پراکنش (m^{-1})	σ_s		
نسبت پراکنش	ω		
لزجت دینامیکی آشفته‌گی	μ_t		
ثابت استفان - بولتزمن، $5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{k}^{-4}\text{)}$	σ		
ضریب میرایی	κ		
رسانندگی گرمایی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	λ		
	بالانویس‌ها		
مقدار متوسط	-		
	زیرنویس‌ها		
مقدار در حالت جسم سیاه	b	نیروی حجمی	B_i
مقدار در دیواره سرد	c	عدد بوزینسک	Bo
مقدار در دیوار گرم	h	ضریب اصطکاک	f
مقدار در دیواره	w	عدد گراشف	Gr
مقدار در ورودی	0	عرض کانال (m)	H
		شدت تشعشع	i
		شدت تشعشع بی‌بعد	I
		انرژی جنبشی آشفته‌گی	k
		طول کانال (m)	L
		سمت‌های جهات مجزا	m, m'
		تعداد شبکه در جهات مختلف	n_x, n_y
		عدد ناسلت	Nu
		فشار ترمودینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)	P
		فشار دینامیکی	\bar{p}
		عدد پکلت	Pe
		عدد پلانک	Pl
		عدد پرائنتل	Pr
		شار گرمایی (Wm^{-2})	q
		ثابت گاز کامل ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	R
		عدد رینولدز	Re
		عدد رینولدز اصطکاکی	Re_τ
		دما (K)	T
		مولفه‌های سرعت بترتیب در جهت x, y, z (ms^{-1})	u, v, w

۹- مراجع

- [1] Yang G, Wu J (2014) Effect of aspect ratio and assisted buoyancy on flow reversal for mixed convection with imposed flow rate in a vertical three dimensional rectangular duct. Int J Heat Mass Transf 77: 335-343.
- [2] Cheng CH, Kou HS, Huang WH (1990) Flow reversal and heat transfer of fully developed mixed convection in vertical channels. J Thermophys Heat Transfer 4(3): 375-383.
- [3] Yan WM, Li HY (2001) Radiation effects on mixed convection heat transfer in a vertical square duct. Int J Heat Mass Transf 44(7): 1401-1410.
- [4] Bazdidi-Tehrani F, Safakish A (2014) Mixed-convection and thermal radiation heat transfer in a three-dimensional asymmetrically heated vertical channel. Heat Transfer Res 45(6).

- channel flows with several optical thicknesses: a comparison between LES and RANS. *Revista Brasileira Ciencias Mecanicas* 36(1): 207-219.
- [10] Weng HC (2008) Variable physical properties in natural convective gas microflow. *J Heat Transf* 130(8): 082401.
- [11] Toutant A, Bataille F (2013) Turbulence statistics in a fully developed channel flow submitted to a high temperature gradient. *Int J Therm Sci* 74: 104-118.
- [12] Bejan A (2013) *Convection heat transfer*. John Wiley & sons.
- [13] Menter FR (2003) Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications.
- [14] Modest MF (2003) *Radiative heat transfer*. 2nd edn. Academic Press, USA.
- [15] See "The OpenFOAM foundation homepage" on www.openfoam.com, 2015-2016.
- [5] Satish N, Venkatasubbaiah K, Harish R (2015) Effect of buoyancy on turbulent mixed convection flow through vertical and horizontal channels. *Advances in Computation, Modeling and Control of Transitional and Turbulent Flows* 251.
- [6] Myong HK (1991) Numerical investigation of fully developed turbulent fluid flow and heat transfer in a square duct. *Int J Heat Fluid Flow* 12(4): 344-352.
- [7] Ma LD, Li ZY, Tao WQ () Direct numerical simulation of turbulent flow and heat transfer in a square duct with natural. *Heat Mass Transfer* 44: 229-250
- [8] Bazdidi-Tehrani F, Aghaamini M, Moghaddam S (2017) Radiation effects on turbulent mixed convection in an asymmetrically heated vertical channel. *Heat Transfer Eng* 38(5): 475-497.
- [9] dos Santos ED, Isoldi LA, Petry AP, França FH (2014) A numerical study of combined convective and radiative heat transfer in non-reactive turbulent