شبیه سازی عددی پدیده جابجایی اجباری گازهای تابشی داخل یک کانال همراه با جدایش

عباس دهقانی راینی[۱]، سید عبدالرضا گنجعلی‌خان نسب[۲*]

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۵/۱۴)

چکیده

در مطالعه حاضر آنالیز عددی و دوبعدی جریان جابه‌جایی اجباری آرام سیال بر روی دو پله شیب‌دار با انقباض در داخل کانال‌های با مقطع مستطیلی و با در نظر گرفتن اثرات تابشی گاز مورد بررسی قرار گرفته است. دلیل انتخاب این هندسه کاربرد بسیار زیاد آنها در صنعت و به‌خصوص استفاده از آنها در اتصال کانال‌هایی با سطح مقطع متفاوت بهم دیگر می‌باشد. سیال عامل، همانند یک محیط خاکستری در جذب، صدور و پخش تشعشع شرکت می‌کند. جهت به‌دست آوردن میدان‌های سرعت و دما معادلات مومنتوم و انرژی به صورت عددی حل می‌شوند. فرم جداسازی شده معادلات حاکم، توسط روش حجم محدود به‌دست‌آمده و با به‌کار بردن الگوریتم سیمپل حل می‌شوند. برای شبیه‌سازی جریان روی پله داخل کانال، از روش مسدود شده در سیستم مختصات کارتزین دو بعدی استفاده شده است. از آنجایی که گاز به عنوان یک محیط شرکت کننده در انتقال حرارت تشعشعی نقش دارد، تمام مکانیزم‌های انتقال حرارت که شامل جابه‌جایی، هدایت و تشعشع بوده به طور هم‌زمان در جریان گاز درنظر گرفته می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: انقباض ناگهانی، کانال با پله پیشرونده، انتقال حرارت تشعشعی، روش مسدودشده، روش طول‌های مجزا

Numerical Simulation of Forced Convection Duct Flow of a Radiating Gas with Separation

A. Dehghani Rayeni, S.A.R. Gandjalikhan Nassab

Department of Mechanical Engineering,

Islamic Azad University of kerman

(Received:16/January/2017; Accepted: 5/August/2017)

ABSTRACT

In this paper, a numerical study of a 2-D combined convection-radiation heat transfer in a horizontal rectangular duct with two sudden contractions is presented. Contractions in duct are created by two inclined forward facing steps. To simulate the incline surfaces of the FFS, the blocked- off method was employed for both fluid mechanic and radiation problems. The fluid was treated as a gray, absorbing, emitting and scattering medium. To solve the governing equations, the 2-D Cartesian coordinate system was used. These equations were solved numerically, using the CFD techniques and SIMPLE algorithm. For computation of radiative term in energy equation, the radiative transfer equation (RTE) was solved numerically by discrete ordinates method (DOM) to find the divergence of radiative heat flux distribution. The effects of optical thickness, radiation-conduction parameter and albedo coefficient on heat transfer behavior of the system were carried out. Comparison of numerical results with available credential data shows good consistency.

Keywords: Sudden Contraction, Forward Facing Step, Radiation Heat Transfer, Blocked - off Method, Discrete Ordinate Method

۱- دانشجوی دکتری: dehghanii.abbas@yahoo.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): Ganj110@uk.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

فهرست علائم

C_P	گرمای ویژه سیال (J.Kg-1K-1)
H	ارتفاع کانال بین دو پله
h	ارتفاع‌های ورودی و خروجی جریان
I	شدت تشعشع (W.m-2)
I*	شدت تشعشع بدون بعد
I_b	شدت تشعشع جسم سیاه
L_1	طول کانال قبل از پله اول (m)
L_2	طول کانال بعد از پله دوم (m)
L	طول کل کانال(m)
Nu_c	عدد نوسلت جابجایی
Nu_r	عدد نوسلت تشعشعی
Nu_t	عدد نوسلت کل
p	فشار (kgm-1s-2)
pe	عدد پکلت
Pr	عدد پرانتل
q_t	شار حرارتی کل
q_r	شار حرارتی تشعشعی
q_c	شار حرارتی هدایتی
Re	عدد رینولدز
RC	عدد تشعشع-هدایت
s	ارتفاع پله
T	دما (K)
T_{in}	دمای سیال ورودی (K)
T_W	دمای دیوار (K)
T_b	دمای متوسط سیال(K)
u	سرعت جریان سیال در جهت محور x (ms-1)
U	سرعت بدون بعد جریان سیال در جهت محور X
$U_\circ$	سرعت یکنواخت ورودی(ms-1)
v	سرعت جریان سیال در جهت محور y(ms-1)
V	سرعت بدون بعد جریان سیال در جهت محور Y
x	طول متغیر در جهت محور x در فضای محاسباتی(m)
X	طول بدون بعد متغیر در جهت محور X در فضای محاسباتی
y	طول متغیر در جهت محور y در فضای محاسباتی (m)
Y	طول بدون بعد متغیر در جهت محور Y در فضای محاسباتی

علائم یونانی

α	ضریب پخش حرارتی
β	ضریب استهلاک
γ_c	ضریب انتقال حرارت جابجایی
ϕ	زاویه پله
φ	تابع فاز
ω	ضریب البدو
Ω	زاویه فضایی
σ_a	ضریب جذب
σ_s	ضریب پخش
κ	ضریب هدایت حرارتی
τ	ضخامت نوری
Θ	دما بدون بعد
Θ_b	دمای متوسط بدون بعد
Θ_M	دمای میانگین بدون بعد
θ_1 , θ_2	اعداد بدون بعد
μ	لزجت مطلق سیال
ν	لزجت سینماتیکی
ρ	چگالی سیال

زیر نویس

c	جابجایی
r	تشعشعی
t	کل

۱- مقدمه

جریان سیال با جابه‌جایی اجباری در کانال‌هایی که دارای انبساط یا انقباض ناگهانی در سطح مقطع خود هستند، به‌طور گسترده در کاربردهای مهندسی مشاهده می‌شود. به‌عنوان‌مثال می‌توان، از وسایل تولید توان، پخش‌کننده‌ها، مبدل‌های حرارتی و خنک کاری در وسایل الکترونیکی نام برد. در جریان اجباری داخل چنین هندسه‌هایی، جدایی جریان و جریان بازگشتی به دلیل تغییرات ناگهانی در هندسه جریان رخ می‌دهد. در نتیجه این پدیده‌ها، میزان زیادی از جریان سیال

Archive of SID

www.SID.ir

کم انرژی و پرانرژی در ناحیه بازگشتی باهم دیگر آمیخته می‌شوند. این پدیده‌ها تأثیر بسیار زیادی را روی انتقال حرارت در وسایل یادشده می‌گذارند. به‌خصوص این‌که میزان انتقال مومنتوم و انتقال حرارت در ناحیه بازگشتی و در داخل این جریان تغییرات بسیار زیادی را دارد. به‌عنوان مثال کمترین مقدار تنش برشی و بیشترین میزان انتقال حرارت در همسایگی ناحیه جریان بازگشتی رخ می‌دهد درحالی که کمترین نرخ انتقال حرارت درجایی رخ می‌دهد که تغییرات زیاد در هندسه شروع می‌شود. در چنین هندسه‌هایی اندازه ناحیه جریان بازگشتی مشخص‌کننده ویژگی‌های کلی فرایند انتقال حرارت و جریان سیال است.

در بسیاری موارد مانند جریان گاز بر روی پره های توربین و یا جریان گاز ناشی از محصولات احتراق، انتقال حرارت تشعشعی نقش بسزایی را ایفا می کند. محیط واسط در اغلب این سیستم‌ها از طریق انحراف جذب و یا صدور تشعشع روی انتقال حرارت تأثیر می گذارد. این پدیده بخصوص در دماهای بالا تأثیر بسیار زیادی روی انتقال حرارت و توزیع دما می گذارد. در نتیجه برای دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر، می‌بایستی جریان گاز را مانند یک محیط شرکت‌کننده در انتقال حرارت تشعشعی در نظر گرفت و تمام پدیده های انتقال حرارت شامل جابه‌جایی، هدایت و تشعشع را به‌طور هم‌زمان موردبررسی و مطالعه قرارداد. مثال‌هایی از تاثیرپدیده انتقال حرارت تشعشعی عبارت‌اند از: سیستم‌های احتراقی مانند کوره‌ها یا محفظه‌های احتراق اسپری در راکت‌ها، موتورهای دیزل و محفظه های احتراق بستر فشرده و بستر سیالی. یکی از هندسه‌هایی که به‌خوبی جدایی جریان و جریان بازگشتی را نشان می دهد، کانالی با پله پیش‌رونده است. اگرچه هندسه این کانال‌ها در ظاهر ساده به نظر می رسد، اما جریان سیال و انتقال حرارت بر روی این پله‌ها پیچیدگی‌های زیادی را شامل می‌شود. به‌گونه‌ای که از چنین هندسه‌هایی به‌عنوان هندسه معیار برای معتبرسازی نتایج استفاده می‌شود.

حل تمامی مسائل مربوط به جریان آرام سیال چسبنده، به حل معادلات کلی مومنتوم و انرژی برمی‌گردد. متأسفانه این معادلات به‌صورت غیرخطی می‌باشند و هیچ روش تحلیلی معینی جهت حل این معادلات وجود نداشته و حل تحلیلی معادلات تنها در موارد بسیار خاصی همراه با ساده‌سازی‌های زیادی قابل دسترس است. به‌عنوان مثال یک منبع دقیق در مورد جریان داخل کانال با هندسه‌های مختلف توسط اسچلیچتینگ [۱] ارائه شده است اما فرضیات صورت گرفته جهت ساده‌سازی برای حل دقیق این معادلات چندان مناسب و منطقی نیستند؛ بنابراین، این معادلات تنها از طریق تخمین عددی قابل‌حل می‌باشند.

حل تخمینی معادلات مومنتوم و انرژی از دیر زمانی مورد مطالعه قرارگرفته است. یک مطالعه مناسب توسط شاد و لندن [۲] ارائه شد که در آن حل عددی مسائل مربوط به جریان سیال در هندسه‌های مختلف از قبیل لوله، صفحات موازی و کانال‌های مستطیلی موردبررسی قرار گرفت. روش به‌کاررفته برای حل عددی معادلات مومنتوم و انرژی در این مطالعه، روش اختلاف محدود بود. اگرچه این مطالعه یک منبع مناسبی به شمار می‌رفت اما همه راه‌حل‌ها بر این فرض استوار بود که تمام خواص سیال ثابت در نظر گرفته شوند. تعدادی از خواص سیال وابستگی بالایی به دما دارند و فرض وابستگی این خواص به دما منجر به حل دقیق‌تر معادلات مومنتوم و انرژی خواهد شد. به‌عنوان مثال لزجت وابسته به دما تأثیرات فراوانی بر توزیع سرعت و دما خواهد داشت؛ بنابراین، آنالیزی کامل است که تأثیرات دما بر خواص سیال را در حل معادلات لحاظ کند.

ازجمله کارهای دوبعدی می‌توان به بررسی توزیع سرعت در داخل کانال و روی پله پسرو در رینولدزهای بسیار بالا به‌صورت عددی توسط ارتورک [۳] و در یک مطالعه دیگر، آرملی و همکاران [۴] توزیع سرعت و خواص جریان را بر روی یک پله پسرو و در داخل کانال با مقطع مستطیلی به روش تجربی به دست آوردند. آن‌ها برای محاسبه سرعت از دستگاه سرعت‌سنج لیزری[1] استفاده نمودند.

در سال ۲۰۰۳ یک بازبینی و مرور کامل بر روی تمام مطالعاتی که توسط محققین پیشین بر روی هندسه‌هایی چون کانال‌ها با پله‌های پسرو و پیشرو انجام‌شده بود، توسط ابوآ- مالاوه [۵] صورت گرفت. وی خلاصه‌ای کامل در مورد رفتار سیالاتی و حرارتی چنین جریان‌هایی تهیه نمود. هدف اصلی وی از انجام این کار بررسی اثر پارامترهای مختلفی همچون ارتفاع پله، عدد رینولدز و نیروی شناوری بر روی جریان و توزیع دما در جریان سیال بود. همچنین روابط

1- Laser Doppler

Archive of SID

www.SID.ir

متعددی که توسط محققین در مطالعات مختلف ارائه شده بود نیز گردآوری شد.

تمامی مطالعاتی که در بالا ذکر شده است، مربوط به جریان سیال از روی پله عمودی است؛ اما در بسیاری از کاربردهای مهندسی، پله پسرو یا پیشرو به‌صورت مایل و شیب‌دار قرار دارد. در این رابطه می‌توان به یکی از مطالعات اندکی که توسط محققین انجام شده اشاره کرد.

در یک مطالعه جدید، گنجعلی‌خان‌نسب و همکاران [۶] جریان آشفته با جابه‌جایی اجباری در داخل کانال بر روی پله شیب‌دار پیشرو را مورد بحث و بررسی قراردادند. در کار آن‌ها معادلات انرژی و مومنتوم توسط نگاشت همدیس شوارتزکریستوفل به فضای محاسباتی منتقل شده و بعد از حل، نتایج به فضای فیزیکی انتقال یافته‌اند. با این روش، اثرات زاویه شیب پله بر روی جریان و توزیع دما در داخل سیال مورد بررسی قرار گرفت.

انتقال حرارت تشعشعی به همراه جریان سیال با جابه‌جایی اجباری یکی از مهم‌ترین مسائل مورد بحث در کاربردهای مهندسی مانند خنک کاری پره‌های توربین، مبدل‌های حرارتی و محفظه‌های احتراق است. زمانی که گاز جاری همانند یک محیط شرکت‌کننده در انتقال حرارت تشعشعی رفتار می‌کند، خواص تشعشعی آن‌که عبارت‌اند از جذب، صدور و پخش تشعشع پیچیدگی‌های بسیار زیادی را در شبیه‌سازی این نوع جریان‌ها اعمال می‌کند. ویسکانتا [۷] این موضوع را به‌خوبی در مطالعات خود نشان داد.

در تمامی مطالعاتی که در بالا ذکر شد، از اثرات انتقال حرارت تشعشعی در آنالیز مسئله صرف‌نظر شده است. به‌طوری‌که، معادله انرژی تنها شامل ترم‌های جابه‌جایی و هدایت می‌باشد. در رابطه با بحث انتقال حرارت تشعشعی، تحقیقات اندکی در هندسه‌های پیچیده دوبعدی و سه‌بعدی موجود است که در ادامه به بعضی از آن‌ها مختصراً اشاره‌شده است. تحلیل هم‌زمان تشعشع و جابه‌جایی اجباری داخل کانال‌ها از پیچیدگی خاصی برخوردار است، به دلیل این‌که معادله انرژی برای جابه‌جایی اجباری به معادله حاکم بر پدیده تابش وابسته می‌شود. مطالعات انجام شده روی این موضوع مشخص می‌کند که خیلی از کارهای صورت گرفته روی ناحیه توسعه‌یافته حرارتی بوده و یا محدود به جذب و صدور گاز بدون اثرات پخش تشعشعی می‌باشند.

جریان آشفته با جابه‌جایی آزاد و اجباری و با در نظر گرفتن اثرات تشعشع در کانال‌های عمودی به روش گردابه‌های بزرگ[1] توسط برحقی و داویدسون [۸] شبیه‌سازی شد. آن‌ها در کار خود، دو حالت خاص را مورد بررسی قرار دادند که این دو حالت شامل دو مقدار مختلف برای نسبت عدد گراشف به عدد رینولدز می‌شد. در این مطالعه از اثرات تشعشع در جهت عرضی[2] نیز صرفه‌نظر شده بود. محققین در مطالعه خود نشان دادند که تغییرات خواص اثرات بسیار زیادی را بر روی توزیع دما می‌گذارد.

گروسان و پوپ [۹] جریان توسعه‌یافته آرام با جابه‌جایی اجباری و آزاد در داخل یک کانال عمودی را با در نظر گرفتن اثرات تشعشع مطالعه کردند. آن‌ها در مطالعه خود برای شبیه‌سازی ترم تشعشع در مطالعه انرژی، از تقریب روزلند[3] استفاده کردند. محققین به این نتیجه دست یافتند که تشعشع بر روی جریان سیال و انتقال حرارت تأثیر زیادی دارد.

چیو و همکاران [۱۱-۱۰] و جریان آرام با جابجایی آزاد و اجباری در کانال‌های سه‌بعدی افقی و مایل را با در نظر گرفتن اثرات تشعشعی مطالعه کردند. در کار آن‌ها معادلات مومنتوم و انرژی به‌طور هم‌زمان و با روش سرعت- گردابه[4] حل شده است. همچنین برای حل معادلات تشعشعی از روش طول‌های مجزا[5] استفاده گردیده است. اثرات تشعشع بر روی نیروی بویانسی، توزیع دما، ضریب اصطکاک و عدد نوسلت نیز بررسی شد.

آنالیز کامل حرارتی در جریان جابجایی در کانال‌های دارای پله پسرو و پیشرو در سال ۲۰۱۰ توسط انصاری و گنجعلی‌خان نسب ادامه پیدا کرد. نویسندگان مزبور در اولین تحقیق [۱۲]، به بررسی اثر پارامترهای تشعشعی بر روی رفتار حرارتی سیال و توزیع عدد نوسلت در داخل کانال‌های دوبعدی و بر روی پله‌های پس‌رونده پرداختند آن‌ها نشان دادند که در نظر گرفتن پدیده انتقال حرارت تشعشعی به میزان زیادی بر روی

1-Large Eddy
2- Span-wise
3- Rosseland approximation
4- Vorticity-velocity Method
5- Discrete Ordinate Method

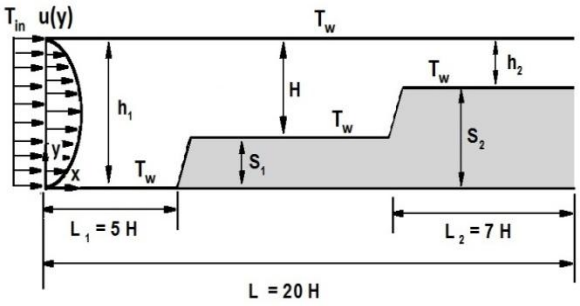
Archive of SID

www.SID.ir

رفتارهای حرارتی در جریان جابجایی اجباری یک گاز تشعشعی اثر می‌گذارد. آنالیز جریان جابجایی اجباری یک گاز تشعشعی در کانال‌های دوبعدی و بر روی پله‌های شیب‌دار پس‌رونده تحت شرایط دمش و مکش توسط انصاری و گنجعلی‌خان‌نسب [۱۳] و همچنین آنالیز جریان جابجایی اجباری یک گاز تشعشعی در کانال‌های دوبعدی بر روی پله شیب‌دار پیشرو [۱۴] مطالعه گردید. در این مطالعات نشان داده شد که با افزایش پارامترتشعشع- هدایت و ضخامت نوری و همچنین با کاهش ضریب البدو، عدد نوسلت جابجایی کاهش پیدا می‌کند. درحالی‌که دمای متوسط سیال، عدد نوسلت تشعشعی و عدد نوسلت کل افزایش می‌یابند. در سال ۲۰۱۲ و در ادامه تحقیقات در این زمینه، آتش‌افروز و گنجعلی‌خان نسب [۱۹-۱۵] در هندسه‌های دوبعدی و سه‌بعدی به مطالعه ترکیب پدیده انتقال حرارت تشعشعی با انتقال حرارت جابجایی اجباری در کانال‌های دارای ناحیه جدایش جریان پرداختند. در این مطالعات محیط دخیل در تشعشع خاکستری بود و اثرات سه‌بعدی بودن پدیده انتقال حرارت تشعشعی به‌خوبی نمایش داده می‌شود. در مطالعه حاضر، آنالیز عددی و دوبعدی جریان جابه‌جایی اجباری آرام سیال بر روی دو پله شیب‌دار با انقباض، در داخل کانال‌های با مقطع مستطیلی و با در نظر گرفتن اثرات تابشی گاز موردبررسی قرارگرفته و آنالیز جابجایی و تابش در هندسه مورد نظر کار جدیدی است.

۲- شرح مسئله

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، در این تحقیق، جریان جابه‌جایی آرام، پایا و تراکم ناپذیر یک گاز تشعشعی در یک کانال دوبعدی دارای دو پله پیشرو متوالی مورد مطالعه قرارگرفته است. شماتیک این کانال در شکل **۱** نشان داده شده است. همان‌طور که شکل نشان می دهد، ارتفاع‌های ورودی و خروجی جریان در این هندسه به ترتیب با پارامترهای h1 و h2 نشان داده شده‌اند درحالی‌که ارتفاع کانال بین دو پله با پارامتر H نشان داده‌شده است. همچنین ارتفاع دو پله پیشرو طوری انتخاب شده‌اند که نسبت‌های انقباض در این کانال برابر با $\frac{h_2}{H} = 0.5$ و $\frac{H}{h_1} = \frac{2}{3}$ در نظر گرفته شده است. به‌علاوه، طول کل کانال برابر با L=20H درحالی‌که طول کانال در بالادست و پایین‌دست جریان به ترتیب برابر با L1=5H و L2=7H در نظر گرفته شده است. این طول‌ها به این دلیل انتخاب شده‌اند که جریان در مقطع ورودی و خروجی کانال تحت تأثیر تغییر ناگهانی در مقطع کانال قرار نگیرند. همچنین جریان در خروجی کانال به‌صورت توسعه‌یافته خارج شود.



شکل (۱۰): هندسه مسئله.

۲-۱- شرایط مرزی

برای تمام دیوارها (دیوارهای بالا، پائین، جانبی و دیواره پله) اصل عدم لغزش (سرعت صفر) برقرار بوده و تمام دیواره‌ها دارای دمای ثابت T_W می‌باشند. در مقطع ورودی کانال جریان به‌صورت یکنواخت و با دمای ثابت T_{in} وارد می‌شود به‌طوری‌که $T_{in} < T_W$ است. در مقطع خروجی کانال فرض گرادیان صفر در جهت طولی برای دما و جریان نیز برقرار است.

برای شرایط مرزی تشعشعی در این هندسه، فرض بر این است که انعکاس و صدور تشعشع از دیواره‌ها، کاملاً به‌صورت پخشی در تمام جهات و با ضریب صدور $\varepsilon = 0.8$ صورت می‌گیرد. همچنین فرض شده است که میزان تشعشع ورودی به کانال از دو مقطع ورودی و خروجی جریان، با تشعشع صادرشده از یک جسم سیاه با دمای سیال به ترتیب در ورود و خروج جریان از کانال برابر است [۸].

۳- معادلات حاکم

۳-۱- معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی

برای جریان آرام، تراکم‌ناپذیر، دائم و دوبعدی سیال با خواص ثابت معادلات بقای جرم (پیوستگی)، بقای ممنتوم (ناویر استوکس) و معادله انرژی به‌صورت زیر بیان می‌شوند [۲۰]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 , \qquad (۱)$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right), \quad (۲)$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right), \quad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u c_p T)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v c_p T)=\kappa\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+\nabla.\vec{q}_r\ . \quad (۴)$$

در این مسئله جهت x همان جهت محور و جهت y جهت عمود بر محور در نظر گرفته شده است. در معادلات بالا ρ چگالی سیال، μ لزجت دینامیکی سیال، K ضریب هدایت سیال، C_p گرمای ویژه سیال، T دما و q_r بردار شار حرارتی تشعشعی می‌باشد.

۳-۲- معادلات تشعشعی

در معادله انرژی علاوه بر ترم‌های جابجایی و هدایت، ترم تشعشع نیز به‌عنوان انرژی حرارت تشعشعی ارائه شده است. برای محاسبه این ترم می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد [۲۰]:

$$\nabla.\vec{q}_r=\sigma_a\left(4\pi I_b(\vec{r})-\int_{4\pi} I(\vec{r},\vec{s})d\Omega\right), \quad (۵)$$

که در آن، $I(\vec{r},\vec{s})$ شدت تشعشع است که تابعی از مکان و جهت است، $I_b(\vec{r})$ شدت تشعشع جسم سیاه در دمای محیط واسط و $\sigma_a(\vec{r})$ ضریب جذب می‌باشد.

برای به‌دست آوردن شدت تشعشع لازم است که معادله انتقال حرارت تشعشعی حل شود. این معادله که شامل جذب، صدور و پخش خاکستری می‌باشد به‌صورت زیر بیان می‌گردد [۲۰]:

$$(\vec{s}.\nabla)I(\vec{r},\vec{s})=-\beta I(\vec{r},\vec{s})+\sigma_a I_b(\vec{r})+\frac{\sigma_s}{4\pi}\int_{4\pi} I(\vec{r},\vec{s})\varphi(\vec{s},\vec{s}')d\Omega', \quad (۶)$$

که در آن، $\varphi(\vec{r},\vec{s},\vec{s}')$ تابع فاز انتقال حرارت از جهت ورودی $\vec{s}'$ به جهت خروجی $\vec{s}$ است. همچنین $I(\vec{r},\vec{s})$ شدت تشعشع است که تابعی از مکان و جهت است، $I_b(\vec{r})$ شدت تشعشع جسم سیاه در دمای محیط واسط و $\sigma_a(\vec{r})$ و $\sigma_s(\vec{r})$ به ترتیب ضرایب جذب و انحراف خاکستری محیط واسط می‌باشند.

عبارت $\beta(\vec{r})=\sigma_a(\vec{r})+\sigma_s(\vec{r})$ نیز ضریب استهلاک نام دارد. سه جمله سمت راست به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات شدت تشعشع در اثر صدور، جذب و انحراف خارج شونده و انحراف وارد شونده می‌باشند.

در این مطالعه، متوسط پخش ایزوتروپیک نظر گرفته شده است که در آن، تابع فاز پخش ایزوتروپیک و برابر با یک است. سطح محصورکننده محیط، خاکستری و صادرکننده و انعکاس‌دهنده دیفیوز می‌باشد، شرط مرزی تشعشع برای معادله انتقال حرارت تشعشعی به‌صورت زیر خواهد بود [۲۰]:

$$I(\vec{r}_w,\vec{s})=\varepsilon_w I_b(\vec{r}_w)+\frac{(1-\varepsilon_w)}{\pi}\int_{\vec{n}_w.\vec{s}'<0} I(\vec{r}_w,\vec{s})|\vec{n}_w.\vec{s}'|d\Omega' \quad \vec{n}_w.\vec{s}>0, \quad (۷)$$

که در آن، $I(\vec{r}_w,\vec{s})$ شدت انرژی تشعشعی است که سطح مرزی را ترک می‌کند، $\vec{n}_w,\varepsilon_w$ به ترتیب ضریب صدور و بردار عمود یکه سطح مرزی می‌باشند. جملات سمت راست معادله (۷) به ترتیب بیانگر شدت تشعشع خارج شونده در اثر صدور تشعشع از سطح و انعکاس تشعشع وارد شونده می‌باشند.

در روش طول‌های مجزا، معادله انتقال حرارت تشعشعی برای n جهت مختلف $\vec{s}_i$ نوشته می‌شود. در نتیجه در این روش تمام انتگرال‌ها با سری‌ها به‌صورت زیر جایگزین می‌شوند [۲۰]:

$$\int_{4\pi} f(\vec{s})d\Omega\cong\sum_{i=1}^{n} w_i f(\vec{s}_i), \quad (۸)$$

که در آن، w_i تابع وزنی مربوط به جهت $\vec{s}_i$ می‌باشد.

۳-۳- بی‌بعد کردن معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی

لازم به ذکر است که برای بی‌بعدسازی معادلات از پارامترهای بدون بعد زیر استفاده شده است:

$$X=\frac{x}{D_h},\quad Y=\frac{y}{D_h},\quad P=\frac{p}{\rho U_\infty^2},\quad \Theta=\frac{T-T_{in}}{T_w-T_{in}},\quad (1-\omega)=\frac{\sigma_a}{\beta},\quad \theta_1=\frac{T_{in}}{T_w-T_{in}},$$
$$\theta_2=\frac{T_w}{T_{in}},\quad I^*=\frac{I}{\sigma T_w^4},\quad S^*=\frac{S}{\sigma T_w^4},\quad \mathbf{Re}=\frac{\rho U_0 H}{\mu},\quad RC=\frac{\sigma T_w^3 H}{k},\quad q_r^*=\frac{q_r}{\sigma T_w^4}. \quad (۹)$$

Archive of SID

www.SID.ir

با جایگذاری ترم‌های فوق در معادلات (۱) تا (۴) فرم بدون بعد معادلات به‌صورت زیر درمی‌آیند:

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0, \qquad (۱۰)$$

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(U^2-\frac{1}{Re}\frac{\partial U}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(UV-\frac{1}{Re}\frac{\partial U}{\partial Y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial X}, \qquad (۱۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(UV-\frac{1}{Re}\frac{\partial V}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(V^2-\frac{1}{Re}\frac{\partial V}{\partial Y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial Y}, \qquad (۱۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(U\Theta-\frac{1}{Pe}\frac{\partial \Theta}{\partial X}\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(V\Theta-\frac{1}{Pe}\frac{\partial \Theta}{\partial Y}\right)+\frac{\tau(1-\omega)RC\,\theta_1\theta_2}{Pe}\left[\frac{4}{\theta_2^4}\left(\frac{\Theta}{\theta_1}+1\right)^4-\sum_{i=1}^{n}I_i^* w_i\right]=0, \qquad (۱۳)$$

۴- الگوریتم حل

در حل عددی معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی که شامل معادلات (۱) تا (۴) هستند، فرم مجزا شده این معادلات، با انتگرال‌گیری روی هر حجم کنترل به دست می‌آید. برای محاسبه سرعت از حجم کنترل‌های جابه‌جا شده استفاده شده است درحالی‌که سایر متغیرهای موردنیاز در روی گره‌های اصلی محاسبه شده‌اند. برای حل عددی معادلات مجزا شده از الگوریتم سیمپل و روش تکراری خط به خط با پیشرفت در جهت محوری استفاده‌شده است. برای محاسبه ترم تشعشعی در معادله انرژی، از روش مشهور طول‌های مجزا استفاده شده است. از آنجائی که در روش طول‌های مجزا تعداد بردارهای متفاوتی را می‌توان انتخاب کرد، مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست‌آمده از سه حالت S_6, S_4 نشان داد که تفاوت بسیار اندکی بین نتایج به‌دست‌آمده از دو حالت S_6, S_4 وجود دارد. در نتیجه برای سرعت بخشیدن در تمام محاسبات انجام شده در کار حاضر، از حالت S_4 استفاده شده است. در حل عددی معادلات حاکم در این تحقیق، از تعداد تقسیمات ۳۶× ۴۱۰ در جهت Y و X به‌عنوان شبکه بهینه استفاده شده است. این نکته باید ذکر شود که برای دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر از شبکه غیریکنواخت استفاده گردیده است به‌گونه‌ای که در نزدیکی دیوارها شبکه متمرکز می‌شود. همچنین برای شبیه‌سازی جریان بر روی پله‌های شیب‌دار در داخل کانال، از روش مسدود شده در سیستم مختصات کارتزین دوبعدی استفاده شده است. برای رسیدن به همگرایی، فرایند تکرار حل تا همگرایی همه متغیرهای وابسته (سرعت، فشار، دما و شدت تشعشع) ادامه می‌یابد.

در این مطالعه، محاسبات به‌وسیله یک برنامه عددی نوشته‌شده به زبان فرترن ۹۰ انجام شده‌اند. نحوه رسیدن به همگرایی در حل معادلات از معیار زیر به‌دست می‌آید:

$$\text{Error}\Phi=\max\left|\frac{\Phi^n(i,j)-\Phi^{n-1}(i,j)}{\Phi^n(i,j)}\right|\le 10^{-6}$$

(Φ) به مؤلفه‌های سرعت، فشار، دما و شدت تشعشع اشاره دارد و n تعداد تکرار است.

۵- روش مسدود شده

در بسیاری از موارد برای یک برنامه محاسباتی عددی از مش‌های منظم استفاده می‌شود که با کمی بهبود، این مش‌ها برای محاسبه خواص جریان در شکل‌های نامنظم نیز کاربرد دارند. به این ترتیب که با تعریف یک ناحیه غیرفعال از حجم‌های کنترل در مناطقی که شکل مسئله نامنظم می‌شود، می‌توان شرایط مرزی پیچیده‌تر را تشکیل داد که به این روش محاسبه، روش انسداد کردن گویند. با توجه به مسئله موردمطالعه که بررسی جریان و انتقال حرارت در یک کانال شامل دو پله پیش‌رونده می‌باشد، این روش به‌صورت زیر مورد استفاده قرارگرفته است:

تمامی نقاط داخل هندسه مستطیل در حل عددی حضور دارند (فرض شده که هیچ‌گونه پله‌ای در داخل کانال وجود ندارد)؛ اما با تشکیل ناحیه غیرفعال (حجم کنترل‌هایی که مقدار (۰) دارند) برای نقاط داخل پله و ناحیه فعال (حجم کنترل‌هایی که مقدار (۱) دارند) برای نقاط خارج از پله، عملاً می‌توان به هندسه کانالی دست‌یافت که شامل دو پله می‌باشد. شکل **۲** مثالی را در مورد ناحیه مسدود شده در یک سری از حجم‌های کنترل نشان می‌دهد. با استفاده از این روش نقاطی که در مرز ناحیه غیرفعال و ناحیه فعال حضور دارند عملاً یک نوع مرزی را تشکیل می‌دهند که مرزهای واقعی

Archive of SID

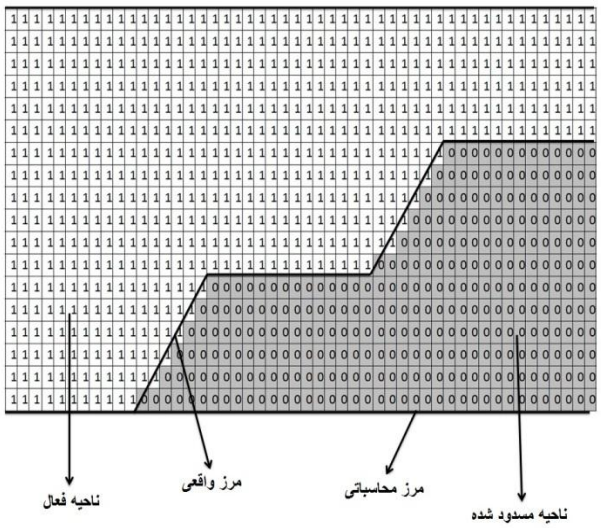
www.SID.ir

مسئله یعنی دیوارهای پله می‌باشند و از دیواره پایین کانال در ناحیه پله نیز، به مرزهای مجازی یاد می‌شود.

دو روش جهت غیرفعال کردن حجم‌های کنترل وجود دارد، اولین روش استفاده از مقادیر ترم‌های چشمه زیاد در معادلات برای نواحی که می‌خواهیم غیرفعال شوند، است و روش دوم که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از خواص Γ زیاد در معادلات حاکم بر نواحی که غیرفعال شدن آن مطلوب است، می‌باشد.

بر طبق این روش مقدار متغیرهای وابسته مانند سرعت و دما، باید در ناحیه غیرفعال مشخص باشند. به‌عنوان مثال اگر ناحیه غیرفعال یک جسم صلب یا مرز جامد است (مانند ناحیه پله در این هندسه) مؤلفه‌های سرعت در این ناحیه می‌بایستی مقدار صفر بگیرند و اگر این ناحیه یک سطح و یا مرز هم‌دما است، به تمام حجم کنترل‌های داخل این ناحیه باید مقدار دمای مشخصی اختصاص داده شود. به همین ترتیب وقتی شدت تشعشع وارد ناحیه غیرفعال می‌شود مقدار صفر را می‌گیرد و وقتی وارد ناحیه فعال می‌شود از مرز مربوطه مقدار جدیدی را می‌گیرد.

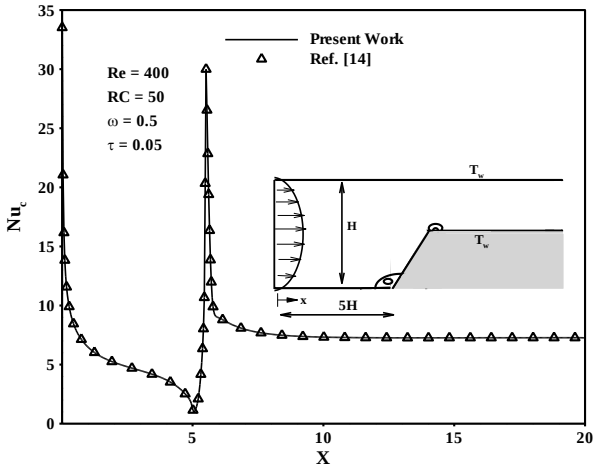
در برنامه محاسباتی حاضر، پس از اعمال شرط عدم لغزش بر روی دیواره پایین کانال (مرز مجازی)، با استفاده از ویسکوزیته بسیار بالا برای نقاط واقع در ناحیه غیرفعال، عملاً سرعت نقاط داخل پله به سمت صفر میل داده شده است. در نهایت با اعمال این روش هندسه منظم مستطیل شکل به هندسه مورد نظرمان که همان کانال شامل دو پله شیب‌دار می‌باشد تغییر داده شده و شرایط مرزی دلخواه به دست می‌آیند. بر طبق تکنیک انسداد کردن، معادلات حاکم برای حجم کنترل‌های داخل ناحیه غیرفعال نیز حل می‌شوند که این خود باعث افزایش حجم عملیات محاسباتی برنامه می‌گردد اما با استفاده از این روش همچنان می‌توان از حجم کنترل‌های مستطیل شکل در مسائل با هندسه‌های پیچیده‌تر استفاده نمود.



شکل (۲): ناحیه مسدود شده در یک شبکه منظم.

۶- اعتبارسنجی نتایج

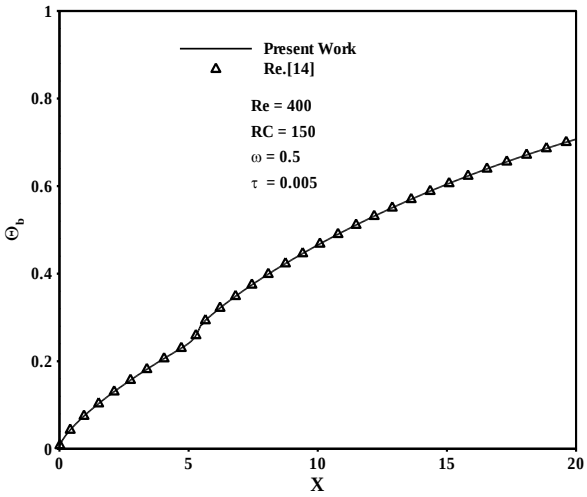
به‌منظور بررسی اعتبار نتایج انتقال حرارت ترکیبی جابجایی- تشعشع در این هندسه، نتایج مطالعه حاضر با نتایج به‌دست‌آمده توسط انصاری و گنجعلی‌خان‌نسب [۱۴] در یک کانال دوبعدی با پله پیشرو شیب‌دار در شکل‌های **۳ و ۴** مقایسه شده است. همان‌طور که از نتایج عددی حاضر و نتایج ارائه شده توسط انصاری و گنجعلی‌خان‌نسب [۱۴] برمی‌آید، تغییرات پارامترهای موردنظر و مقادیر و محل بیشینه و کمینه آن‌ها در کار حاضر و مراجع ذکر شده به هم نزدیک بوده و سازگاری خوبی بین نتایج برقرار است.



شکل (۳): تغییرات عدد نوسلت برحسب پهنای خط مرکز دیوار پائین کانال.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۴): توزیع دمای متوسط سیال در طول کانال

۷- نتایج

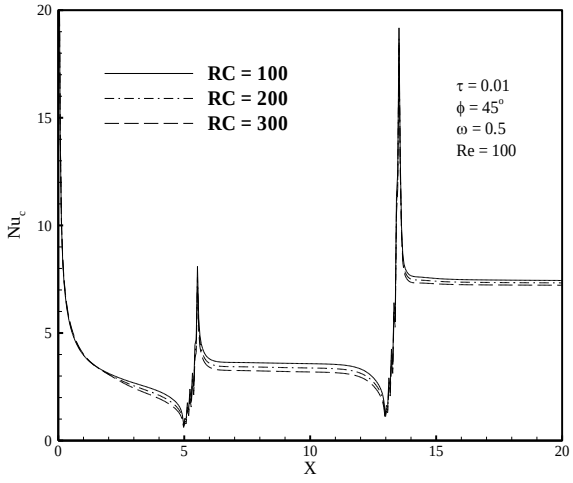
نتایج عددی کار حاضر در قالب شکل های ۵تا۱۶ که شامل تغییرات عدد نوسلت جابجایی، عدد نوسلت تشعشعیو توزیع دمای متوسط سیال در طول کانال می باشد آورده شده است.

۷-۱- تأثیرات عدد تشعشع- هدایت

یکی از مهم‌ترین پارامترها در سیستم‌هایی که انتقال حرارت تشعشعی و هدایت به‌طور هم‌زمان نقش دارند، پارامتر بی‌بعد تشعشع- هدایت می‌باشد. این پارامتر بیانگر اهمیت نسبی انتقال حرارت تشعشعی به انتقال حرارت هدایت می‌باشد. مقادیر بالای این پارامتر نشان می‌دهد که انتقال حرارت از طریق تشعشع بسیار مهم‌تر از انتقال حرارت از طریق هدایت می‌باشد.

۷-۱-۱- تأثیر عدد تشعشع-هدایت بر چگونگی تغییرات عدد نوسلت جابجایی

برای بررسی پارامتر تشعشع-هدایت بر روی رفتار حرارتی جریان سیال با جابه‌جایی اجباری در داخل کانال، تغییرات عدد نوسلت جابه‌جایی بر روی دیواره پائینی کانال در شکل **۵** نشان داده شده است. همان‌طورکه از این شکل مشخص است، عدد ناسلت جابجایی از یک مقدار مشخص نسبتاً زیاد در ابتدای کانال شروع‌شده و سپس با حرکت در طول کانال، مقدار آن کاهش‌یافته و در کنج پله اول، جایی که سرعت جریان ناچیز است، به یک مقدار مینیمم می‌رسد. سپس با تغییر مقطع ناگهانی کانال، عدد ناسلت جابجایی نیز تغییرات ناگهانی داشته و با شیب تندی افزایش‌یافته و به یک مقدار ماکزیمم محلی می‌رسد. پس از این تغییر ناگهانی، عدد نوسلت مجدداً کاهش‌یافته و با حرکت در جهت جریان به عددی ثابت میل می‌کند. با پیشروی بیشتر در جهت جریان و با نزدیک شدن به پله دوم، مجدداً عدد ناسلت جابجایی کاهش‌یافته و با عبور از پله دوم، مقدارش از یک مقدار مینیمم به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. سرانجام این پارامتر با رشد لایه مرزی حرارتی روند نزولی در پیش‌گرفته و به عددی ثابت میل می‌کند. در حقیقت این نکته باید ذکر گردد که ثابت شدن عدد ناسلت را می‌توان به توسعه‌یافتگی حرارتی جریان سیال در طول کانال مربوط دانست. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عدد تشعشع- هدایت عدد نوسلت جابه‌جایی کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار را می‌توان چنین توجیه کرد که با افزایش عدد تشعشع- هدایت و در نتیجه با افزایش تأثیر بیشتر مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی، میدان دما در داخل جریان سیال، حالت یکنواخت‌تری را به خود می‌گیرد که در نتیجه گرادیان دما در داخل سیال و در پی آن عدد نوسلت جابه‌جایی کاهش می‌یابد.



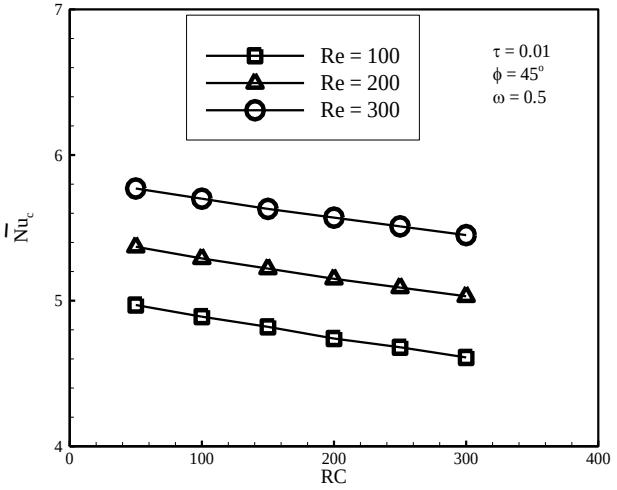
شکل (۵): تغییرات عدد نوسلت جابجایی برحسب پهنای دیوار پائین.

برای درک بهتر اثرات پارامتر تشعشع- هدایت، عدد نوسلت جابجایی میانگین در رینولدزهای مختلف در شکل **۶** ارائه شده است. همان‌طور که این شکل به‌خوبی نشان می‌دهد در هر رینولدز مشخص عدد نوسلت جابجایی میانگین با افزایش

Archive of SID

www.SID.ir

پارامتر تشعشع- هدایت کاهش می‌یابد. به‌علاوه، شکل به‌خوبی نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، عدد نوسلت جابجایی میانگین افزایش قابل‌توجهی می‌یابد.

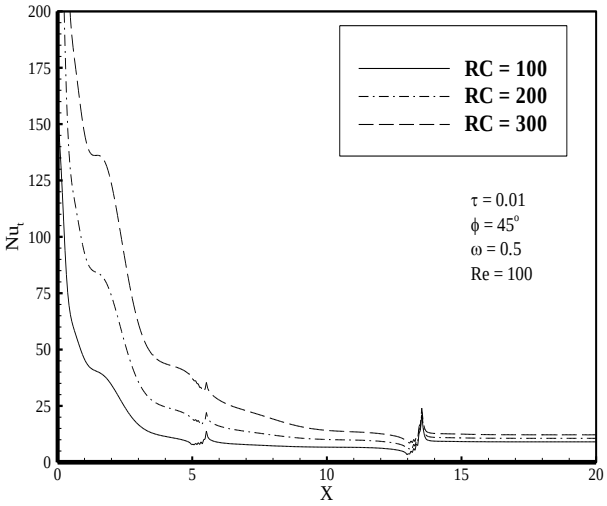


شکل (۶): تغییرات عدد نوسلت جابجایی میانگین.

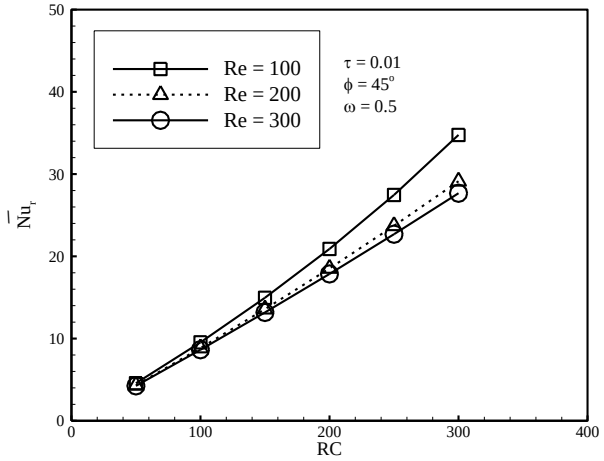
۷-۱-۲- تأثیر عدد تشعشع- هدایت بر چگونگی تغییرات عدد نوسلت تشعشعی

اثر پارامتر تشعشع- هدایت بر روی چگونگی توزیع عدد نوسلت تشعشعی روی دیواره پائین در شکل **۷** نشان داده‌شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود عدد ناسلت تشعشعی از یک مقدار مشخص نسبتاً زیاد در ابتدای کانال شروع می‌شود. سپس با پیشروی در جهت جریان و به دلیل کاهش شار حرارتی تشعشعی خروجی از سطح، این پارامتر کاهش می‌یابد. این کاهش در عدد نوسلت تشعشعی و یا شار تشعشعی خالص خروجی از سطح به دلیل افزایش در شار تشعشعی برخوردی به دیواره پائینی از طرف دیواره عمودی پله‌ها است. به‌علاوه، اثرات انقباض‌های ناگهانی ناشی از وجود دو پله بر روی توزیع عدد ناسلت تشعشعی به‌خوبی از شکل مشخص است به‌هرحال، این شکل به‌خوبی نشان می‌دهد که با افزایش در جهت طولی کانال میزان عدد نوسلت تشعشعی به مقدار ثابتی میل می‌کند.

برای درک بهتر اثرات پارامتر تشعشع- هدایت، عدد نوسلت تشعشعی میانگین در رینولدزهای مختلف در شکل **۸** ارائه شده است. همان‌طور که این شکل به‌خوبی نشان می‌دهد در هر رینولدز مشخص، عدد نوسلت تشعشعی میانگین با افزایش پارامتر تشعشع- هدایت افزایش می‌یابد. به‌علاوه، شکل به‌خوبی نشان می‌دهد که عدد نوسلت تشعشعی به‌ازای مقادیر کم تشعشع- هدایت، حساسیت زیادی به عدد رینولدز نداشته ولی در مقادیر تشعشع- هدایت بالا، با افزایش عدد رینولدز، کاهش جزئی در عدد نوسلت تشعشعی مشاهده می‌شود.



شکل (۷): تغییرات عدد نوسلت تشعشعی برحسب پهنای دیوار پائین.



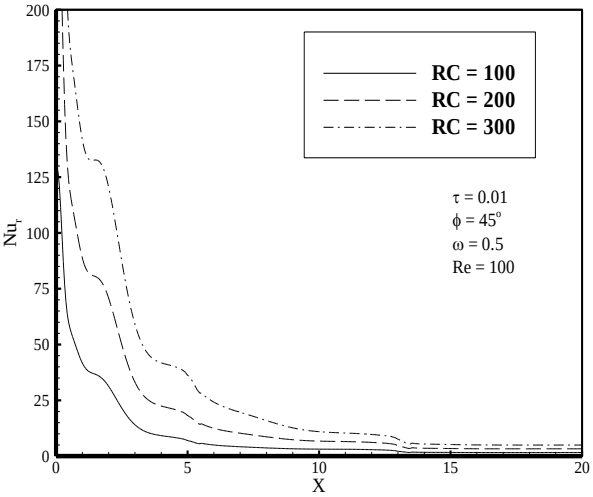
شکل (۸): تغییرات عدد نوسلت تشعشعی میانگین.

۷-۱-۳- تأثیر عدد تشعشع-هدایت بر چگونگی تغییرات عدد نوسلت کل

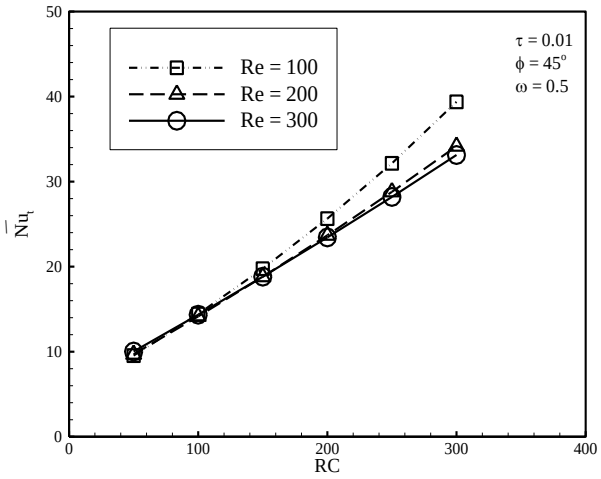
همان‌طور که پیش‌ازاین گفته شد، شار حرارتی خروجی از دیواره پائینی، ناشی از دو مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی و هدایتی است که در نتیجه آن عدد نوسلت کل نیز به‌صورت مجموع دو عدد نوسلت تشعشعی و جابه‌جایی است. به همین

www.SID.ir

منظور، نحوه تغییرات و توزیع عدد نوسلت کل بر روی دیواره پائینی کانال در شکل **۹** نشان داده شده است. اگر چگونگی توزیع عدد نوسلت کل در روی دیواره پایینی کانال مدنظر باشد مشاهده می‌شود که نحوه تغییرات عدد نوسلت کل شبیه عدد نوسلت تشعشعی هست که قبلاً در شکل **۷** توضیح داده شد. برای درک بهتر اثرات پارامتر تشعشع- هدایت، عدد نوسلت کل میانگین در رینولدزهای مختلف در شکل **۱۰** ارائه شده است. همان‌طور که این شکل به‌خوبی نشان می‌دهد در هر رینولدز مشخص، عدد نوسلت کل میانگین با افزایش پارامتر تشعشع- هدایت افزایش می‌یابد. به‌علاوه شکل به‌خوبی نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز و بخصوص در اعداد رینولدز بالا، در مقدار نوسلت کل نزول اتفاق می‌افتد.



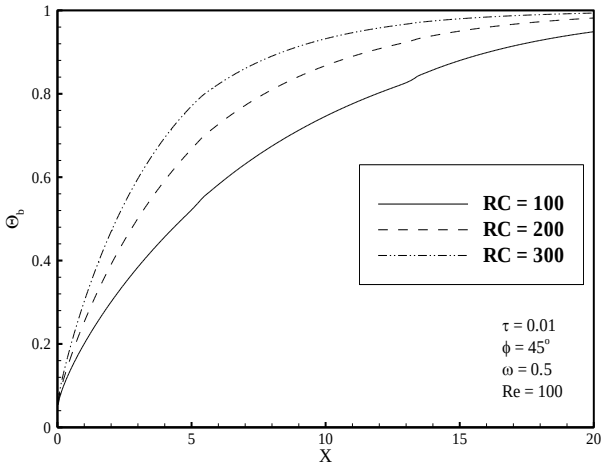
شکل (۹): تغییرات عدد نوسلت کل برحسب پهنای دیوار پائین



شکل (۱۰): نحوه تغییرات عدد نوسلت میانگین کل

۷-۱-۴- تأثیر عدد تشعشع-هدایت بر دمای متوسط سیال

برای بررسی اثرات عدد تشعشع-هدایت بر روی رفتار حرارتی جریان سیال، تغییرات دمای متوسط در طول کانال به ازای مقادیر مختلف عدد تشعشع-هدایت در شکل **۱۱** رسم شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عدد تشعشع- هدایت و در نتیجه با تأثیرگذاری بیشتر مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی، دمای متوسط در طول کانال افزایش‌یافته و در طول کمتری از کانال به مقدار نهایی خود که دمای سطح دیواره‌های کانال است میل می‌نماید.



شکل (۱۱): توزیع دمای متوسط سیال در طول کانال

۷-۲- تأثیرات ضخامت نوری

ضخامت نوری یکی از مهم‌ترین خواص تشعشعی برای یک محیط شرکت‌کننده در انتقال حرارت تشعشعی می‌باشد. مقادیر زیاد ضخامت نوری به معنای توانایی بیشتر محیط برای جذب و صدور انرژی تشعشعی می‌باشد. در ادامه این قسمت به بررسی اثرات این پارامتر بر روی رفتار حرارتی یک سیال تشعشعی در جریان جابجایی پرداخته می‌شود.

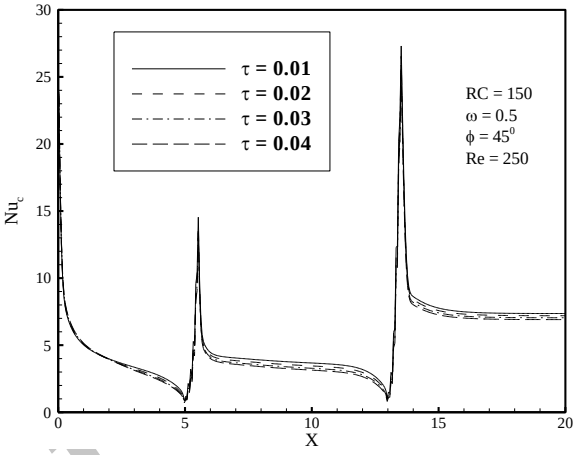
۷-۲-۱- تأثیر ضخامت نوری بر چگونگی تغییرات عدد نوسلت جابجایی

برای مطالعه اثرات ضخامت نوری بر روی رفتار حرارتی جریان سیال، چگونگی تغییرات عدد نوسلت جابجایی بر روی دیواره پائینی در شکل **۱۲** نشان داده شده است این شکل نشان می‌دهد با افزایش ضخامت نوری عدد نوسلت جابجایی به مقدار نه‌چندان زیادی کاهش می‌یابد. این تأثیر را این‌گونه می‌توان

Archive of SID

www.SID.ir

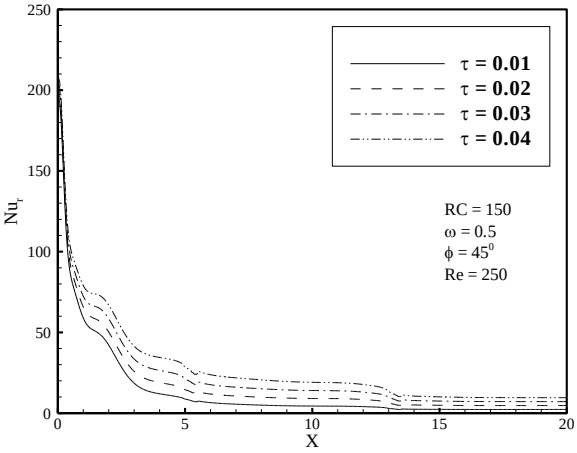
تفسیر کرد که با افزایش ضخامت نوری محیط شرکت‌کننده در انتقال حرارت ناشی از تشعشع نقش بیشتری ایفا کرده و با جذب بیشتر انرژی تشعشعی توزیع دمای یکنواخت‌تر و گرادیان دمای کمتری را بر روی دیواره پائینی منجر می‌شود که این نیز باعث کاهش عدد نوسلت جابجایی بر روی این دیوار می‌شود.



شکل (۱۲): تغییرات عدد نوسلت جابجایی برحسب پهنای دیوار پائین

۷-۲-۲- تأثیر ضخامت نوری بر چگونگی تغییرات عدد نوسلت تشعشعی

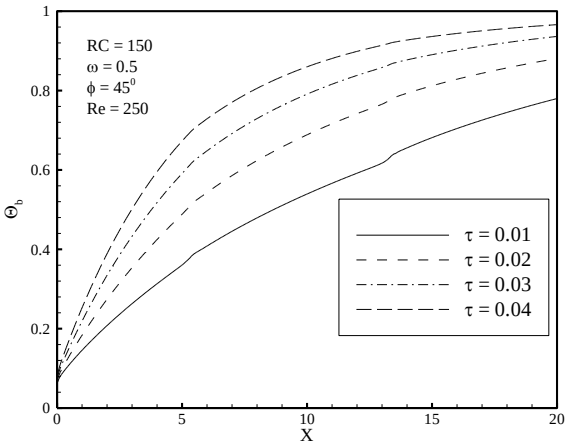
برای مطالعه اثرات ضخامت نوری بر عدد نوسلت تشعشعی بر روی دیواره پائینی شکل **۱۳** ارائه داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت نوری، میزان عدد نوسلت تشعشعی به دلیل توانایی محیط در جذب بیشتر شار تشعشعی خروجی از سطح، افزایش می‌یابد.



شکل (۱۳): تغییرات عدد نوسلت تشعشعی برحسب پهنای دیوار پائین

۷-۲-۳- تأثیر ضخامت نوری بر دمای متوسط سیال

برای مطالعه اثرات ضخامت نوری بر روی رفتار حرارتی جریان سیال با جابه‌جایی اجباری، تغییرات دمای متوسط در طول کانال به‌ازای مقادیر مختلف ضخامت نوری در شکل **۱۴** نشان داده‌شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش ضخامت نوری و در نتیجه افزایش اثرات تشعشعی، دمای متوسط با شدت بیشتری افزایش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود، سیال با جذب هرچه بیشتر انرژی تشعشعی از دیواره‌ها و ارسال آن به داخل محیط در انتقال حرارت تشعشعی شرکت می‌کند. ازاین‌رو با افزایش ضخامت نوری، دمای سیال در طول کمتری از ابتدای کانال، به دمای دیواره‌ها میل می‌کند.



شکل (۱۴): توزیع دمای متوسط سیال در طول کانال

۷-۳- تأثیرات ضریب البدو

ضریب البدو نیز یکی دیگر از خواص تشعشعی می‌باشد که توانایی محیط در پخش انرژی تابشی را نشان می‌دهد به‌گونه‌ای که مقادیر $\omega = 0.0$ و $\omega = 1.0$ به ترتیب مربوط به حالت غیر پخشی و تمام پخشی می‌باشند.

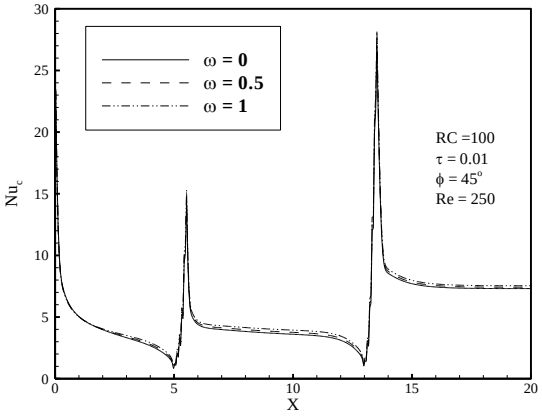
۷-۳-۱- تأثیر ضریب البدو بر چگونگی تغییرات عدد نوسلت جابجایی

همان‌طور که پیش از این گفته شد یکی از پارامترهای مؤثر در انتقال حرارت تشعشعی، ضریب البدو می‌باشد که مقادیر بالای آن بیانگر پخش بیشتر انرژی تشعشعی توسط محیط است. برای بررسی تأثیر این پارامتر بر روی رفتار حرارتی سیال، تغییرات عدد نوسلت جابجایی بر روی خط مرکزی دیواره پائین کانال برای مقادیر مختلف ضریب‌البدو در شکل **۱۵** رسم شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، تغییر قابل ملاحظه‌ای

Archive of SID

www.SID.ir

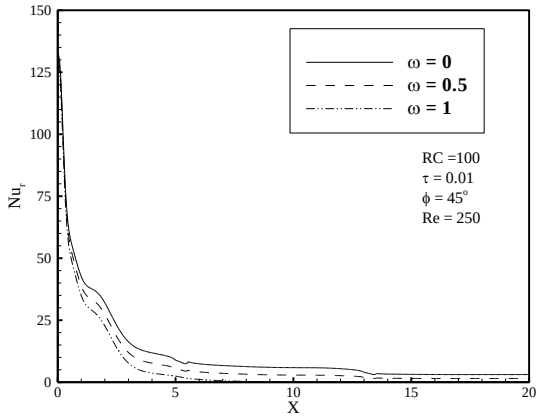
در نوسلت جابجایی به دلیل تغییر ضریب البدو مشاهده نمی‌شود. به‌جز این‌که در نواحی خاصی از دیواره پایین کمی کاهش در نوسلت جابجایی به دلیل افزایش ضریب البدو به وجود می‌آید.



شکل (۱۵): تغییرات عدد نوسلت جابجایی برحسب پهنای دیوار پائین

۷-۳-۲- تأثیر ضریب البدو بر چگونگی تغییرات عدد نوسلت تشعشعی

برای بررسی تأثیر پارامتر ضریب البدو بر روی تغییرات عدد نوسلت تشعشعی، شکل **۱۶** رسم شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، با کاهش ضریب‌البدو، میزان عدد نوسلت تشعشعی افزایش می‌یابد. این نتیجه را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که با کاهش ضریب‌البدو و افزایش اثرات تشعشعی، به دلیل توانایی محیط در جذب بیشتر شار تشعشعی خروجی از سطح، عدد نوسلت تشعشعی بر روی دیواره پائینی افزایش می‌یابد.



شکل (۱۶): تغییرات عدد نوسلت تشعشعی برحسب پهنای دیوار پائین

۸- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تمام پدیده‌های انتقال حرارت، شامل جابجایی، هدایت و تشعشع به‌طور هم‌زمان در جریان آرام سیال در داخل کانال دوبعدی به همراه پله شیب‌دار موردبررسی قرار گرفت. در این مطالعه سیال مانند یک محیط خاکستری در جذب، صدور و پخش تشعشع شرکت داشت. معادلات حاکم بر جریان سیال که معادلات بقای جرم (پیوستگی)، مومنتوم و انرژی هستند، به‌صورت عددی و با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی حل شدند.

برای شبیه‌سازی پله در داخل کانال، از روش مسدود شده در سیستم مختصات کارتزین استفاده شد. همچنین برای حل معادلات تشعشعی، از روش مشهور و کارآمد طول‌های مجزا نیز استفاده شد. تأثیر پارامترهای مختلفی بر روی جریان سیال و رفتار حرارتی آن موردبحث و بررسی قرار گرفتند که مختصراً در زیر به آن‌ها اشاره شده است:

در نظر گرفتن ترم تشعشعی در معادله انرژی، عدد نوسلت کل را به‌شدت افزایش می‌دهد.

با کاهش ضریب البدو و افزایش ضخامت نوری و در نتیجه افزایش اثرات تشعشعی، دمای متوسط و عدد نوسلت تشعشعی افزایش و عدد نوسلت جابجایی نیز به علت گرادیان دمای کمتر بر روی دیواره کاهش می‌یابد. همچنین عدد نوسلت کل که برابر با مجموع اعداد نوسلت جابجایی و تشعشعی است نیز افزایش می‌یابد که دلیل این موضوع افزایش بیشتر عدد نوسلت تشعشعی نسبت به کاهش عدد نوسلت جابجایی است.

با افزایش عدد تشعشع- هدایت و در نتیجه غلبه مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی به هدایتی، عدد نوسلت تشعشعی و دمای متوسط افزایش و عدد نوسلت جابجایی کاهش پیدا می‌نماید. همچنین عدد نوسلت کل نیز به علت افزایش بیشتر عدد نوسلت تشعشعی، رشد صعودی خواهد داشت.

با افزایش تأثیر انتقال حرارت تشعشعی، در طول کمتری از کانال، دمای سیال به دمای دیواره‌های کانال میل می‌نماید.

Archive of SID

www.SID.ir

۹- مراجع

1. Schlichting, H., "Boundary Layer Theory" ,7th Ed., McGraw-Hill, New York, 1979.
2. Shah, R. and London, A., "Laminar Flow Force Convection in Duct", 1th Ed., Academic Press, New York, 1978.
3. 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.
4. Armaly, B.F., Li, A., and Nie, J.H. "Measurements in Three-Dimensional Laminar Separated Flow", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 3573–3582, 2003.
5. Abu-Mulaweh, H.I. "A Review of Research on Laminar Mixed Convection Flow over Backward- and Forward-Facing Steps", Int. J. Thermal Sciences, Vol. 42, pp. 897–909, 2003.
6. Gandjalikhan Nassab, S.A., Moosavi, R., and Hosseini Sarvari S.M. "Turbulent Forced Convection Flow Adjacent to Inclined Forward Step in a Duct", Int. J. Thermal Sciences, Vol. 48, pp.1319–1326, 2009.
7. Viskanta, R., "Overview of Convection and Radiation in High Temperature", Int. J. Eng. Science, Vol. 36, pp. 1677-1699, 1998.
8. Barhaghi, D.G. and Davidson, L., "Large-Eddy Simulation of Mixed Convection-Radiation Heat Transfer in a Vertical Channel", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 3918–3928, 2009.
9. Grosan, T. and Pop, I., "Thermal Radiation Effect on Fully Developed Mixed Convection Flow in a Vertical Channel", Technische Mechanik, Vol. 27, No. 1, pp. 37-47, 2007.
10. Chiu, H.C., Jang, J.H., and Yan, W.M., "Mixed Convection Heat Transfer in Horizontal Rectangular Ducts with Radiation Effects", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 2874–2882, 2007.
11. Chiu, H.C. and Yan W.M., "Mixed Convection Heat Transfer in Inclined Rectangular, Ducts with Radiation Effects", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 51, pp. 1085–1094, 2008.
12. Ansari, B. and Gandjalikhan Nassab, S.A., "Thermal Characteristics of Convective Flows Encountered In A 2-D Backward Facing Step under the Effect of Radiative Heat Transfer", Int. Review of Mechanical Engineering, Vol. 4, No. 6, pp. 711-718, 2010.
13. Ansari, B. and Gandjalikhan Nassab, S.A., "Study of Laminar Forced Convection of Radiating Gas over an Inclined Backward Facing Step under Bleeding Condition, Using the Blocked-off Method", ASME, J. Heat Transfer, Vol. 133, No. 7, 2011.
14. Ansari, B. and Gandjalikhan Nassab, S.A., "Numerical Analysis of Laminar Forced Convection Flow of a Radiating Gas over an Inclined Forward Facing Step", Int. Review of Mech. Eng., Vol. 5, No. 1, pp. 120–127, 2011.
15. Atashafrooz, M. and Gandjalikhan Nassab, S.A., "Numerical Analysis of Laminar Forced Convection Recess Flow with Two Inclined Steps Considering Gas Radiation Effect, Computers & Fluids", Vol. 66, pp.167-176, 2012.
16. Atashafrooz, M. and Gandjalikhan Nassab S.A., "Simulation of Three-dimensional Laminar Forced Convection Flow of a Radiating Gas over an Inclined Backward-Facing Step in a Duct under Bleeding Condition, Institution of Mechanical Engineers, Part C", Journal of Mech. Eng. Science, Vol. 227, No. 2, pp. 332-345, 2012.
17. Atashafrooz, M. and Gandjalikhan Nassab, S.A., "Combined Heat Transfer of Radiation and Forced Convection Flow of Participating Gases in a Three-dimensional Recess", J. Mech. Science and Tech., Vol. 26, No. 1, pp. 3357-3368, 2012.
18. Atashafrooz, M., Gandjalikhan Nassab, S.A. and Lari, K. "Numerical Study of Couplenon-Gray Radiation And Separation Convection Flow In A Duct, Using The FSK Method", Int. J. Advanced Design and Manufacturing Tech., Vol. 9, N. 4, pp. 23-38, 2016.
19. Atashafrooz, M., Gandjalikhan Nassab, S.A. and Behineh, E.S. "Effects of Baffle on Separated Convection Step Flow of Radiating Gas in a Duct", Int. J. Advanced Design and Manufacturing Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 33-47, 2015.
20. M. F., Modest, Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 2003.

Archive of SID

www.SID.ir