

محاسبه تولید انتروپی تابش سطحی با توسعه روش تابش خالص در محفظه‌ای مایل همراه با جابه‌جایی طبیعی

چکیده

در این مقاله با توسعه روش تابش خالص، تولید انتروپی تابش سطحی در محفظه‌ای مایل همراه با جابه‌جایی طبیعی تحلیل و بررسی شده است. معادلات حاکم با فرمول‌بندی تابع جریان-ورتیسیته با روش تفاضل محدود و معادلات تابش سطحی با روش تابش خالص طیفی حل می‌گردند. تولید انتروپی تابش سطحی، شامل انتروپی تابشی در میدان و در ماده است. در این روش، با حل معادلات تابش خالص به صورت طیفی، شدت تابش ورودی و خروجی از سطوح بدست می‌آید. آنگاه، انتروپی تابشی در ماده و شدت انتروپی تابشی طیفی محاسبه و در پایان با استفاده از شدت انتروپی تابشی طیفی، انتروپی تابشی در میدان محاسبه می‌گردد. جهت صحت محاسبه تولید انتروپی تابش سطحی، روش تابش خالص توسعه داده با قانون دوم ترمودینامیک، اعتبارسنجی شده است. تأثیر عدد رایلی، ضریب صدور و زاویه محفظه بر تولید انتروپی بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه محفظه تولید انتروپی تابش سطحی کاهش می‌یابد. کمترین تولید انتروپی در زاویه ۹۰ درجه، حالتی که دیواره گرم دیواره پایینی محفظه باشد، اتفاق می‌افتد. همچنین ۸۵٪ تولید انتروپی کل ناشی از تابش سطحی می‌باشد به طوری که تولید انتروپی ناشی از تأثیر تابش سطحی، ۵۲۰٪ نسبت به حالتی که از تابش سطحی چشم‌پوشی می‌گردد، افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: انتروپی تابش سطحی؛ روش تابش خالص توسعه یافته؛ محفظه‌ای مایل

Calculation of Surface Radiation Entropy Generation by Developing the Net Radiation Method in an Inclined Enclosure with Natural Convection

Abstract

In this article, by developing the net radiation method, the entropy generation of surface radiation in an inclined enclosure with natural convection has been investigated. The governing equations are solved by the stream-vorticity function with the finite difference method and the surface radiation equations are solved with the net spectral radiation method. Surface radiation entropy generation includes radiation entropy in the field and in the matter. In this method, by solving the equations of net radiation in a spectral form, the intensity of the incoming and outgoing radiation from the surfaces is obtained, then the radiation entropy in the matter and the intensity of the spectral radiation entropy are calculated, and finally, the radiation entropy in the field is calculated using the intensity of the spectral radiation entropy. In order to accurately calculate the entropy generation of surface radiation, the developed net radiation method has been validated with the second law of thermodynamics. The effect of Rayleigh number, emissivity and enclosure angle on entropy generation is investigated. The results show that the surface radiation entropy generation decreases with the increase of the enclosure angle. The lowest entropy generation occurs at an angle of 90 degrees, when the hot wall is the lower wall of the enclosure. Also, 85% of the total entropy generation is due to surface radiation. So that the entropy generation due to the effect of surface radiation increases by 520% compared to the case where surface radiation is ignored.

Keywords: surface radiation entropy; developed net radiation method; An inclined enclosure

کردند و نشان دادند که نتایج این تحقیق به واقعیت نزدیکتر است و دلیل آن عدم وجود سطوحی با ضریب صدور صفر در واقعیت می‌باشد. آکیاما و چانگ [۳] تحلیل عددی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی با تابش سطحی در یک محفظه مربعی را بررسی کردند و نشان دادند که تابش، اگر چه تأثیر کمی بر عدد ناسلت انتقال حرارت جابه‌جایی دارد ولی بخش مهمی از شار حرارتی کلی و عدد ناسلت کلی را تشکیل می‌دهد. اگر چه مطالعات زیادی در حوزه انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی با تابش سطحی انجام شده ولی مطالعات اخیر به سمت تولید انرژی در محفظه‌ها پیش رفته که در ادامه بیان می‌گردد.

از تاپ و السالم [۱] خلاصه‌ای از مطالعات در حوزه تولید انرژی سیستم‌های حرارتی در محفظه‌های مختلف را ارائه کردند. خلاصه مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی، تولید انرژی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک، افزایش می‌یابد. شوگا و همکاران [۴] تولید انرژی جابه‌جایی طبیعی در یک حفره مربعی با جسم گرم را برای شبیه سازی خنک کننده تجهیزات میکرو الکترونیکی حل کردند و تأثیر سیال عامل هوا و آب را مقایسه و دریافتند که انرژی تولیدی هوا در مقایسه با مورد برای آب مقدار بیشتری می‌باشد به طوری که جسم جامد گرم شده در شرایط شبیه‌سازی نشان داده، گرمای بیشتری را در هوا از دست می‌دهد. اربی و همکاران [۵] تولید انرژی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی آرام در یک محفظه مربعی را به صورت عددی بررسی و اثر گرمایش قسمتی از دیواره را بر تولید انرژی مورد مطالعه قرار

امروزه تعیین تولید انرژی برای افزایش کارایی سیستم‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. در واقع، تحلیل تولید انرژی امکان شناسایی علت‌های ناکارآمدی سیستم‌ها را فراهم می‌کند. افزایش کارایی سیستم‌های حرارتی دما بالا همیشه مورد بحث و بررسی دانشمندان بوده است. انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی - تابش سطحی در محفظه‌ها به دلیل اهمیت آن در کاربردهای زیادی از جمله بویلرها، کوره‌ها، کلکتورهای خورشیدی و سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی ساختمان‌ها استفاده می‌گردد. تحلیل تولید انرژی در انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی - تابش سطحی در تجهیزات حرارتی از این لحاظ قابل درک می‌باشد که وقتی تجهیزات بازگشت‌ناپذیری کمتری داشته باشند، انرژی کمتری نیز تولید می‌شود که منجر به راندمان بالاتر می‌گردد، بنابراین این امکان فراهم می‌شود که با استفاده از حداقل کردن تولید انرژی در این تجهیزات، راندمان آن‌ها افزایش می‌یابد [۱].

انتقال حرارت و اصطکاک دو عامل اصلی هستند که باعث بازگشت‌ناپذیری در فرآیندها می‌شوند. این دو عامل در کنار هم باعث تولید انرژی می‌شوند، بنابراین لازم است سهم تولید انرژی در اثر انتقال حرارت و یا اصطکاک جریان سیال به‌طور جداگانه مشخص گردد تا برای بهبود راندمان سیستم و یا طراحی بهینه آن تصمیمات درستی اتخاذ گردد. برای مدل‌سازی دستگاه‌های حرارتی دما بالا، علاوه بر انتقال حرارت جابه‌جایی، انتقال حرارت تابشی نیز باید در نظر گرفته شود و صرف نظر کردن از آن باعث ایجاد خطاهای قابل ملاحظه‌ای می‌گردد.

بالاجی و ونکاتشان [۲] اثر تابش سطحی بر جابه‌جایی طبیعی در یک حفره مربع شکل را بررسی

دادند و تغییرات عدد رایلی و پرانتل را بر تولید انتروپی بررسی کردند.

وارول و همکاران [۶] تولید انتروپی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی و جریان سیال در داخل محفظه‌ای با دیواره ضخیم جامد را بررسی و نشان دادند که تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت نسبت به برگشت‌ناپذیری جریان سیال برای کلیه مقادیر ضخامت دیواره‌های جامد قابل توجه‌تر است و تأثیر ضخامت دیواره گرم بر تولید انتروپی نسبت به ضخامت دیواره سرد چشمگیرتر است و با کاهش ضخامت دیواره سرد، انتقال حرارت کاهش می‌یابد. ایلیس و همکاران [۷] تأثیر نسبت ابعادی یک محفظه مستطیلی بر تولید انتروپی را بررسی و دریافتند که تولید انتروپی کل در یک محفظه با افزایش عدد رایلی افزایش می‌یابد، اگر چه افزایش نرخ تولید انتروپی به نسبت ابعاد محفظه بستگی دارد. برای عدد رایلی یکسان، تولید انتروپی کل برای یک محفظه بلند کمتر از یک محفظه کوتاه‌تر می‌باشد. اولیوسکی و همکاران [۸] تولید انتروپی در یک حفره مستطیلی بسته با جابه‌جایی طبیعی را بررسی کردند و تأثیر نسبت ابعادی و نسبت برگشت‌ناپذیری گرمایی به لزجی را بر تولید انتروپی ارزیابی کردند.

علی پناه و همکاران [۹] تحلیل تولید انتروپی در انتقال حرارت طبیعی با سیال تراکم‌پذیر هوا در یک حفره مربع، با توجه به رویکرد بوزینسک انجام دادند. در این مطالعه، تولید انتروپی در انتقال حرارت طبیعی تراکم‌ناپذیر و تراکم‌پذیر با خواص متغیر با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که انتروپی تولید شده برای جریان تراکم‌پذیر همیشه بیشتر از جریان تراکم‌ناپذیر

است. همچنین با افزایش عدد رایلی، اختلاف بین جریان تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر کاهش می‌یابد. بوعبید و همکاران [۱۰] تأثیر عدد گراشف حرارتی، زاویه، نسبت توزیع برگشت‌ناپذیری و نسبت ابعادی حفره بر تولید انتروپی در یک حفره مستطیلی شیب‌دار پر از هوا را بررسی کردند. بوندروا و همکاران [۱۱] تحلیل عددی تولید انتروپی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی آرام نانوسیال مس در یک محفظه مثلثی باز که جریک‌هاز آن به‌طور جزئی تحت گرمایش می‌باشند قرار گرفته، و از نانوسیال مس پر شده است را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیر روی اثرات عدد رایلی و موقعیت منبع حرارتی محلی را بر روی خطوط جریان، و خطوط دما ثابت و تولید انتروپی محلی بررسی کردند. چو [۱۲] تحلیل عددی در مورد اثر انتقال حرارت و تولید انتروپی جریان جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه موجی شکل پر شده با نانوسیال مس - آب انجام داد. ایشان اثرات پارامترهای جریان و شرایط هندسی دیواره موجی را بر عدد ناسلت، نرخ تولید انتروپی بررسی کردند و نشان دادند تولید انتروپی کل با افزایش دامنه سطح موجی افزایش می‌یابد.

سیدی و همکاران [۱۳] تحلیل عددی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی و تولید انتروپی در حضور میدان مغناطیسی در یک محفظه مایل مربعی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد حرارتی محفظه، از معیار جدید ضریب عملکرد اکولوژیکی استفاده شده است و تأثیر عدد هارتمن، زاویه محفظه و عدد رایلی بر تولید انتروپی، عدد ناسلت و ضریب عملکرد اکولوژیکی مورد بررسی قرار گرفته شده است. افتخار و همکاران [۱۴] تجزیه و تحلیل تولید

انتروپی ناشی از جریان جابه‌جایی هیدرومغناطیسی را در داخل حفره مربعی پر از سیال غیرنیوتنی انجام دادند و حداقل تولید انتروپی در این مطالعه گزارش گردید. در ادامه به مطالعات انجام شده در زمینه تحلیل تولید انتروپی انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی-تابش سطحی پرداخته می‌شود.

امراکویی و همکاران [۱۵] تحلیل عددی تولید انتروپی انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی و تابش سطحی را در کلکتور خورشیدی بررسی کردند و تأثیر غلظت‌های مختلف، دماهای ورودی و نرخ‌های جریان را بر تولید انتروپی بررسی کردند و نشان دادند که یک نرخ جریان بهینه وجود دارد که در آن انتروپی تولید شده برای هر ترکیبی از نسبت غلظت و دمای ورودی، حداقل است. دشتی و صفوی‌نژاد [۱۶] تجزیه و تحلیل انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی با تابش سطحی در یک محفظه دو بعدی را انجام و با رویکرد کمینه‌سازی تولید انتروپی، محل بهینه منبع گرمایی در محفظه را بدست آوردند. هینوجوسا و همکاران [۱۷] اثر تابش سطحی بر تولید انتروپی در حفره‌ای باز تحت انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی بررسی کردند و نشان دادند که تبادل تابشی باعث ایجاد تغییرات چشمگیری در میزان تولید انتروپی می‌گردد و نمی‌توان از آن صرف‌نظر کرد. آن‌ها اثر تابش سطحی را روی میدان دما و سرعت بدست آورده‌اند به عبارتی تولید انتروپی ناشی از هدایت و اصطکاک سیال محاسبه شده و تولید انتروپی روی سطوح ناشی از تابش سطحی محاسبه نشده است.

بر اساس اطلاعات نویسندگان تاکنون محاسبه تولید انتروپی تابشی در محفظه با روش تابش خالص انجام نشده است، بنابراین در این پژوهش با توسعه روش تابش خالص، تولید انتروپی تابش سطحی که شامل انتروپی تابشی در میدان و در ماده می‌باشد، محاسبه

می‌گردد، چرا که بدون در نظر گرفتن تولید انتروپی تابش سطحی، محاسبات تولید انتروپی دقیق نمی‌باشد. در روش تابش خالص توسعه داده شده، با حل معادلات تابش خالص به صورت طیفی، شدت تابش ورودی و خروجی محاسبه می‌گردد که با استفاده از آن، انتروپی تابشی در ماده (دیواره) و شدت انتروپی تابشی طیفی محاسبه می‌گردد آنگاه با استفاده از شدت انتروپی تابشی، انتروپی تابشی در میدان محاسبه می‌گردد. از مجموع انتروپی تابشی در میدان و در ماده، انتروپی تابش سطحی بدست می‌آید.

جهت بررسی دقت و صحت حل معادلات تولید انتروپی تابشی، نرخ تولید انتروپی تابشی محاسبه شده در محفظه، با قانون دوم ترمودینامیک اعتبارسنجی می‌گردد. در این مطالعه تأثیر تابش سطحی، زاویه محفظه و ضریب صدور بر تولید انتروپی بررسی و توزیع تولید انتروپی تابش سطحی در محفظه محاسبه می‌گردد و جهت حل معادلات مومنتوم و انرژی هم از روش تابع جریان-ورتیسیتی استفاده شده است.

۲- تعریف مسأله و معادلات حاکم

در این مقاله، یک محفظه مایل مطابق شکل (۱) با دیواره گرم در دمای T_h ($1000 < T_h < 4000$)، دیواره سرد با دمای ثابت $T_c = 300K$ و بقیه دیواره‌های محفظه آدیاباتیک می‌باشند. جریان در محفظه پایا، آرام و دوبعدی فرض می‌گردد و تمام سطوح داخلی محفظه کدر، پخشی و خاکستری است و هوا به‌عنوان سیال عامل و تراکم‌ناپذیر با تقریب بوزینسک، با خصوصیات ثابت و پراوتل 0.71 می‌باشد.

استفاده از تابع جریان- ورتیسیتی، معادلات (۱)-(۴) به

صورت شکل های بدون بعد زیر می گردند:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} = -\Omega \quad (۷)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} - \frac{\partial \psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = Pr \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \quad (۸)$$

$$Ra Pr \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \cos \gamma - \frac{\partial \theta}{\partial Y} \sin \gamma \right) \quad (۹)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial Y} \frac{\partial \theta}{\partial X} - \frac{\partial \psi}{\partial X} \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right)$$

معادلات فوق تحت شرایط مرزی زیر قرار دارند:

$$\psi = 0, \frac{\partial \psi}{\partial X} = 0, \Omega = 1 \quad Y = 0,$$

$$-\frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} = 1$$

$$\psi = 0, \frac{\partial \psi}{\partial Y} = 0, \Omega = 1 \quad X = 0,$$

$$-\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} = 1 \quad (۱۰)$$

$$\theta = 1 \quad X = 0$$

$$\theta = 0 \quad X = 1$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial Y} + N_r Q_r = 0 \quad Y = 0$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Y} + N_r Q_r = 0 \quad Y = 1$$

که $N_r = \sigma T_c^4 \left(\frac{L}{k_f \Delta T} \right)$ پارامتر بدون بعد تابش-رسانش و $Q_r = \frac{q_r}{\sigma T_c^4}$ پارامتر بدون بعد شار تابشی خالص می باشد.

$$Pr = \frac{\rho c_p \alpha}{k_f}, \quad Ra = \frac{g \beta_T (T - T_c) L^3}{\nu \alpha} \quad (۱۱)$$

عدد ناسلت متوسط جابه جایی و تابشی برای سطح منبع حرارتی به صورت زیر تعریف می شوند [۲۰]:

$$Nu_{ave,c} = - \int_0^1 \frac{\partial \theta}{\partial X} dY \quad (۱۲)$$

$$Nu_{ave,r} = \int_0^1 N_r Q_r dY$$

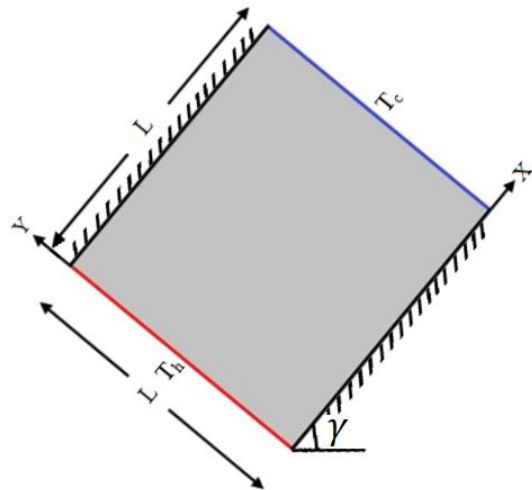
۲-۲- معادلات تابش سطحی

جهت تبادل تابشی بین دیواره های محفظه از روش تابش خالص استفاده می گردد که به صورت معادله زیر

بیان می گردد [۲۱].

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{kj} - (1 - \epsilon_k) F_{kj}) J_j = \epsilon_k \sigma T_k^4 \quad (۱۳)$$

که ϵ_k ضریب صدور سطح محفظه و J_j شار تابشی خروجی توسط سطح j ام است. N تعداد المان روی



شکل (۱) مدل فیزیکی محفظه مایل با شرایط مرزی

۱-۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسأله شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی به ترتیب به شرح زیر می باشد [۱۹].

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

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \beta_T (T - T_c) \sin \gamma \quad (۲)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \beta_T (T - T_c) \cos \gamma \quad (۳)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \left(\frac{k_f}{\rho c_p} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (۴)$$

تابع جریان (ψ) و ورتیسیتی (ω) به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = - \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (۵)$$

همچنین متغیرها و پارامترهای بدون بعد در این تحقیق به صورت زیر تعریف می شوند.

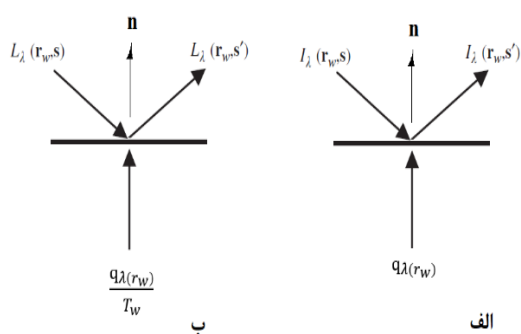
$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}, \quad \varphi = \frac{T_H - T_c}{T_c}, \quad \Omega = \frac{\omega L^2}{\alpha}, \quad \Psi = \frac{\psi}{\alpha} \quad (۶)$$

روش تابع جریان- ورتیسیتی برای حذف عبارت فشار در معادلات مومنتوم استفاده می شود. بنابراین، با

$$\dot{S}_{gen,f}''' = \frac{\mu}{T} \left[2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (17)$$

۳-۲- تولید انتروپی تابش سطحی در محفظه

یک پرتو تابشی نه تنها انرژی بلکه انتروپی هم حمل می‌کند. شکل (۲) نشان می‌دهد، جذب و انتشار انتروپی تابشی در دیواره بسیار شبیه انرژی تابشی است. انتروپی تابشی از انتروپی تابشی در میدان و در ماده (دیواره) تشکیل شده است.



شکل (۲) الف-انتقال انرژی تابشی ب- انتقال انتروپی تابشی

روی سطح

نرخ تولید انتروپی تابشی بر روی سطح به صورت کلی به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$\dot{S}_{gen,r}''(r_w) = \frac{q_{in} - q_{out}}{T_w} - (\dot{S}_{in}'' - \dot{S}_{out}'') \quad (18)$$

در سمت راست معادله فوق، بخش اول تولید انتروپی در اثر انتقال حرارت را بیان می‌کند که انتروپی در ماده را تشکیل می‌دهد و بخش دوم معادله، تغییر انتروپی بر روی سطح را نشان می‌دهد که انتروپی تابشی در میدان را تشکیل می‌دهد.

با در نظر گرفتن یک سطح دیفرانسیلی dA ، نرخ انتروپی طیفی برخوردی به سطح با انتگرال‌گیری از

دیواره‌های محفظه، F_{kj} ضریب دید بین المان k و j است که از روش نخ‌های متقاطع هاتل بدست می‌آید و δ ، دلتای کرونگر است. از معادله ماتریسی $(X) AX=B$ همان شار تابشی J مجهول می‌باشد) برای حل معادله (۱۳) استفاده می‌گردد و شار تابشی خروجی بدست می‌آید. پس از محاسبه شار تابشی خروجی، از معادله (۱۴) جهت محاسبه شار تابشی ورودی استفاده می‌گردد.

$$G_k = \sum_{j=1}^N F_{kj} J_j \quad (14)$$

شار تابش خالص q_k هر المان هم از معادله (۱۵) بدست می‌آید.

$$q_k = J_k - G_k \quad (15)$$

۳- معادلات تولید انتروپی

جهت محاسبه تولید انتروپی بایستی عوامل بازگشت‌ناپذیری سیستم را پیدا کرده سپس معادلات تولید انتروپی هر عامل بازگشت‌ناپذیری را بدست آورد. در یک محفظه با انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی-تابش سطحی، تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال، ناشی از اصطکاک جریان سیال و ناشی از انتقال حرارت تابش سطحی می‌باشد.

۳-۱- تولید انتروپی انتقال حرارت هدایت و اصطکاک سیال

نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و ناشی از اصطکاک جریان سیال برای یک جریان دو بعدی به ترتیب به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۲].

$$\dot{S}_{gen,c}''' = \frac{k_f}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (16)$$

شدت انتروپی تابشی بر روی همه جهت‌ها، 2π به شکل زیر بیان می‌شود.

$$\dot{S}_{\lambda, in}''(r_w) = \quad (19)$$

شدت انتروپی تابشی طیفی که توسط یک پرتو تابشی حمل می‌شود توسط پلانک به صورت معادله زیر تعریف شده است.

$$L_{\lambda} = \frac{2k_B c}{\lambda^4} \left\{ \left(1 + \frac{I_{\lambda} \lambda^5}{2hc^2} \right) \ln \left(1 + \frac{I_{\lambda} \lambda^5}{2hc^2} \right) - \left(\frac{I_{\lambda} \lambda^5}{2hc^2} \right) \ln \left(\frac{I_{\lambda} \lambda^5}{2hc^2} \right) \right\} \quad (20)$$

شدت تابش طیفی جسم سیاه هم توسط قانون پلانک به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۳].

$$I_{\lambda, b}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/k_B \lambda T} - 1)} \quad (21)$$

که c سرعت نور در خلأ، h ثابت پلانک و k_B ثابت بولتزمن است.

مشابه معادله (۱۹) شار انتروپی طیفی خارج شده از سطح از معادله زیر به دست می‌آید.

$$\dot{S}_{\lambda, out}''(r_w) = \quad (22)$$

با ترکیب معادلات (۱۹) و (۲۲) برای تغییر خالص انتروپی محلی در میدان تابشی و بر روی سطح کدر به دلیل فرآیند صدور و بازتابش، شار انتروپی در میدان تابشی (Radiative Field) با استفاده از شدت انتروپی تابشی طیفی به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۴].

$$\dot{S}_{\lambda, r.f.}''(r_w) = \dot{S}_{\lambda, out}''(r_w) - \dot{S}_{\lambda, in}''(r_w) = \quad (23)$$

که برای سطوح پخششی، شار انتروپی خروجی و ورودی به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\dot{S}_{out}''(r_w) = \pi \int_0^{\infty} L_{\lambda, out} d\lambda \quad (24)$$

$$\dot{S}_{in}''(r_w) = \pi \int_0^{\infty} L_{\lambda, in} d\lambda \quad (25)$$

به واسطه تابش، انرژی سطح کدر به دلیل فرآیند جذب- صدور تغییر می‌کند. تغییر انتروپی محلی در سطح کدر که تحت تأثیر فرآیند تابش قرار دارد که انتروپی تابشی طیفی در ماده (matter) را تشکیل می‌دهد و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\dot{S}_{\lambda, M}''(r_w) = - \frac{q_{r, \lambda}''(r_w)}{T_w} = - \frac{1}{T_w} \int_{4\pi} I_{\lambda}(r_w, \hat{s})(n_w \cdot \hat{s}) d\Omega \quad (26)$$

نرخ انتروپی تابشی در میدان هم به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\dot{S}_{r.f.}'' = \int_0^{\infty} (\dot{S}_{\lambda, out}'' - \dot{S}_{\lambda, in}'') d\lambda \quad (27)$$

در اثر تابش، دیواره با جذب و انتشار تابش، حرارت دریافت یا صادر می‌کند. طبق تعریف، نرخ انتروپی تابشی در ماده برای سطوح پخششی هم از معادله زیر محاسبه می‌گردد.

$$\dot{S}_M''(r_w) = - \frac{\pi}{T_w} \int_0^{\infty} (I_{\lambda, out} - I_{\lambda, in}) d\lambda \quad (28)$$

که جهت محاسبه انتروپی تابشی در ماده، ابتدا شار تابش خروجی از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{kj} - \epsilon_k) F_{kj} = \sum_{j=1}^N \epsilon_k I_{k, \lambda, b} \quad (29)$$

سپس شار تابشی طیفی ورودی هم با استفاده از شار تابشی طیفی خروجی از معادله زیر محاسبه می‌گردد.

$$G_{k, \lambda} = \sum_{j=1}^N F_{kj} J_{j, \lambda} \quad (30)$$

پس از محاسبه شار تابشی طیفی ورودی و خروجی، با استفاده از معادلات (۲۹) و (۳۰)، شدت تابشی طیفی ورودی و خروجی بدست می‌آید.

$$I_{k, \lambda, in} = G_{k, \lambda} / \pi \quad (31)$$

$$I_{k, \lambda, out} = J_{k, \lambda} / \pi \quad (32)$$

سپس با جایگذاری در معادله (۲۸)، نرخ انتروپی تابشی در ماده بدست می‌آید.

اما جهت محاسبه نرخ انترویی تابشی در میدان، ابتدا شدت انترویی تابشی طیفی از معادلات (۳۳) و (۳۴) محاسبه می‌گردد.

$$L_{k,\lambda,out} = \frac{2k_Bc}{\lambda^4} \left\{ \left(1 + \frac{I_{k,\lambda,out}\lambda^5}{2hc^2} \right) \ln \left(1 + \frac{I_{k,\lambda,out}\lambda^5}{2hc^2} \right) - \left(\frac{I_{k,\lambda,out}\lambda^5}{2hc^2} \right) \ln \left(\frac{I_{k,\lambda,out}\lambda^5}{2hc^2} \right) \right\} \quad (33)$$

$$L_{k,\lambda,in} = \sum_{j=1}^N F_{kj} L_{j,\lambda,out} \quad (34)$$

آنگاه با جایگذاری معادلات فوق در معادلات (۲۴) و (۲۵)، شار انترویی خروجی و ورودی بدست می‌آید و در نهایت با جایگذاری در معادله (۲۷)، نرخ انترویی تابشی در میدان بدست می‌آید. از مجموع نرخ انترویی تابشی در ماده و در میدان، نرخ انترویی تابش سطحی محاسبه می‌گردد.

$$\dot{S}_{gen,r} = \dot{S}_M'' + \dot{S}_{r,f}'' \quad (35)$$

با انتگرال‌گیری معادلات (۱۶)، (۱۷) و معادله (۳۵)، نرخ تولید انترویی ناشی از انتقال حرارت هدایت، اصطکاک سیال و تابش سطحی محاسبه می‌گردد.

$$\dot{S}_{gen,c} = \int_V \dot{S}_{gen,c}''' dV \quad (36)$$

$$\dot{S}_{gen,f} = \int_V \dot{S}_{gen,f}''' dV \quad (37)$$

$$\dot{S}_{gen,r} = \int_A \dot{S}_{gen,r}'' dA \quad (38)$$

از مجموع روابط (۳۶)، (۳۷) و (۳۸) نرخ تولید انترویی کل در محفظه محاسبه می‌گردد.

$$\dot{S}_{gen} = \dot{S}_{gen,c} + \dot{S}_{gen,f} + \dot{S}_{gen,r} \quad (39)$$

۴- روش حل

معادلات حاکم با روش تفاضل محدود در یک شبکه مربعی یکنواخت گسسته می‌گردند که برای انفصال عبارت نفوذ از طرح تفاضل مرکزی مرتبه دوم و برای انفصال عبارات جابه‌جایی نیز از طرح تفاضل مرکزی

استفاده شده است [۲۷-۲۵]. معادله پواسون و معادله انرژی با روش ضمنی و معادله انتقال ورتیسیتی با روش فوق تخفیف متوالی نقطه به نقطه (Point Successive Over-Relaxation Method) یا روش تکرار گاوس سایدل (The Point Gauss-Seidel Iteration Method) حل شده است. در انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی توأم با تابش سطحی، ابتدا دمای سطوح آدیاباتیک در محفظه حدس زده می‌شود سپس با حل دستگاه معادلات (۱۳) و (۱۴)، شار تابش ورودی و خروجی و از معادله (۱۵) شار تابشی خالص هر المان محاسبه می‌گردد. شار تابشی خالص محاسبه شده در روش تابش خالص (Net Radiation Method) میزان شار تابشی بر وجه هر المان شبکه را نشان می‌دهد که برای هر گره در شرایط مرزی حل معادلات جریان، باید میانگین شار تابشی دو المان مجاور آن گره محاسبه گردد. با استفاده از شار تابشی خالص هر المان و شرایط مرزی، دمای سطوح را به‌هنگام کرده و معادله انرژی با دمای اصلاح شده سطوح، حل می‌گردد. این روند تا رسیدن به همگرایی با شرط توقف ادامه می‌یابد. با داشتن توزیع دما و سرعت در محفظه، نرخ تولید انترویی ناشی از انتقال حرارت هدایت و اصطکاک سیال از معادلات (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌گردد. اما تولید انترویی تابش سطحی در محفظه، شامل تولید انترویی در میدان و در ماده است که نرخ تولید انترویی تابشی در میدان از معادله (۲۷) و نرخ تولید انترویی در ماده از معادله (۲۸) محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه تابش به‌صورت بخشی از طیف الکترومغناطیسی تعریف می‌شود که شامل تابش مرئی و بخشی از تابش مادون قرمز و ماورأ بنفش می‌باشد بنابراین با

جدول ۱) مقادیر ناسلت جابه‌جایی، ناسلت تابشی و نرخ
انترویی تابشی با تغییرات شبکه

ابعاد شبکه	ناسلت جابه‌جایی	ناسلت تابشی	انترویی تابش سطحی	زمان محاسبه (ثانیه)
۴۱×۴۱	۴/۴۵۵	۴/۵۳۰	۲۲/۲۴۴	۴۶
۶۱×۶۱	۴/۳۹۷	۴/۵۷۸	۲۲/۰۷۵	۷۰
۸۱×۸۱	۴/۳۷۵	۴/۶۰۲	۲۲/۰۴۰	۲۵۵
۱۰۱×۱۰۱	۴/۳۶۴	۴/۶۱۶	۲۲/۰۱	۳۸۷

۵- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

۵-۱- استقلال از شبکه

در حل جابه‌جایی طبیعی توأم با تابش سطحی، یک محفظه مطابق شکل (۱) با دیواره گرم در دمای ثابت $T_c=300K$ و دیواره سرد با دمای ثابت $T_h=1000K$ بقیه دیواره‌های محفظه آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. جریان در محفظه پایا و آرام و دوبعدی فرض می‌گردد و تمام سطوح داخلی محفظه کدر، پخشی و خاکستری است. مطابق جدول (۱)، استقلال از شبکه برای محاسبه عدد ناسلت جابه‌جایی و ناسلت تابشی و نرخ انترویی تابشی در رایلی 10^5 ، ضریب صدور یک، زاویه محفظه 30° درجه و نسبت دمای بی‌بعد $\varphi = 2/33$ در چهار شبکه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی استقلال از شبکه نشان می‌دهد که خطای نسبی عدد ناسلت و نرخ انترویی تابشی برای شبکه 61×61 نسبت به شبکه 101×101 ، به ترتیب کمتر از 0.4% و 0.3% درصد می‌باشد. بنابراین شبکه 61×61 ، به‌عنوان یک شبکه مناسب از نظر دقت عملکرد و زمان محاسبه در تمامی حل‌ها انتخاب گردید.

۵-۲- اعتبارسنجی تولید انترویی تابش سطحی

نرخ تولید انترویی بر اساس قانون دوم ترمودینامیک یک سیستم بسته در حالت پایا از معادله (۴۰) به‌دست می‌آید.

$$\dot{S}_{gen} = - \sum_{i=1}^N \frac{\dot{Q}_i}{T_i} \quad (40)$$

جهت اعتبارسنجی محاسبات انجام شده، یک محفظه با یک سطح گرم با دمای $T_h=1000K$ (دیواره چپ) و سه سطح سرد با دمای $T_c=500K$ در نظر گرفته می‌شود. محفظه تحت تابش خالص می‌باشد و هر سطح محفظه به 60° قسمت مساوی تقسیم شده است. جدول (۲)، نتایج نرخ تولید انترویی تابش سطحی با روش تابش خالص و قانون دوم ترمودینامیک در محفظه ذکر شده را در ضرایب صدور مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که نرخ تولید انترویی تابش سطحی با روش تابش خالص و قانون دوم ترمودینامیک در ضرایب صدور مختلف از مطابقت بسیار بالایی برخوردار است که نشان از صحت عملکرد کد برنامه‌نویسی شده می‌باشد. بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، نرخ انترویی کل در محفظه محاسبه می‌شود در صورتی که با روش تابش خالص، انترویی

هر المان از سطح قابل محاسبه می‌باشد. با افزایش ضریب صدور، نرخ تولید انتروپی تابش سطحی افزایش می‌یابد.

جدول ۲) نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در محفظه

ع	دیواره پایین	دیواره راست (دیواره سرد)	دیواره بالا	دیواره چپ (دیواره گرم)	روش عددی	بر اساس قانون دوم ترمودینامیک	درصد (٪) اختلاف
۰/۱	۰/۲۱۹۵	۰/۲۳۰۲	۰/۲۱۹۹	۰/۳۴۸۰	۱/۰۱۷۹	۱/۰۱۸	۰/۰۰۰۷٪
۰/۲	۰/۴۵۴۷	۰/۴۹۷۴	۰/۴۵۵۰	۰/۶۷۸۵	۲/۰۸۵۷	۲/۰۸۵۷	۰/۰۰۰۱٪
۰/۵	۱/۲۵۰۵	۱/۵۳۹۹	۱/۲۵۲۵	۱/۶۰۲۸	۵/۶۴۵۷	۵/۶۴۵۸	۰/۰۰۰۱٪
۰/۸	۲/۱۹۷۱	۲/۹۸۷۹	۲/۲۰۱۹	۲/۵۱۳۰	۹/۹۰۰۰	۹/۹۰۰۰	۰/۰۰۰۳٪
۱/۰	۲/۹۳۰۵	۴/۱۴۷۳	۲/۹۳۷۵	۳/۲۴۸۰	۱۳/۲۶۳۲	۱۳/۲۶۳۲	۰/۰۰۰۱٪

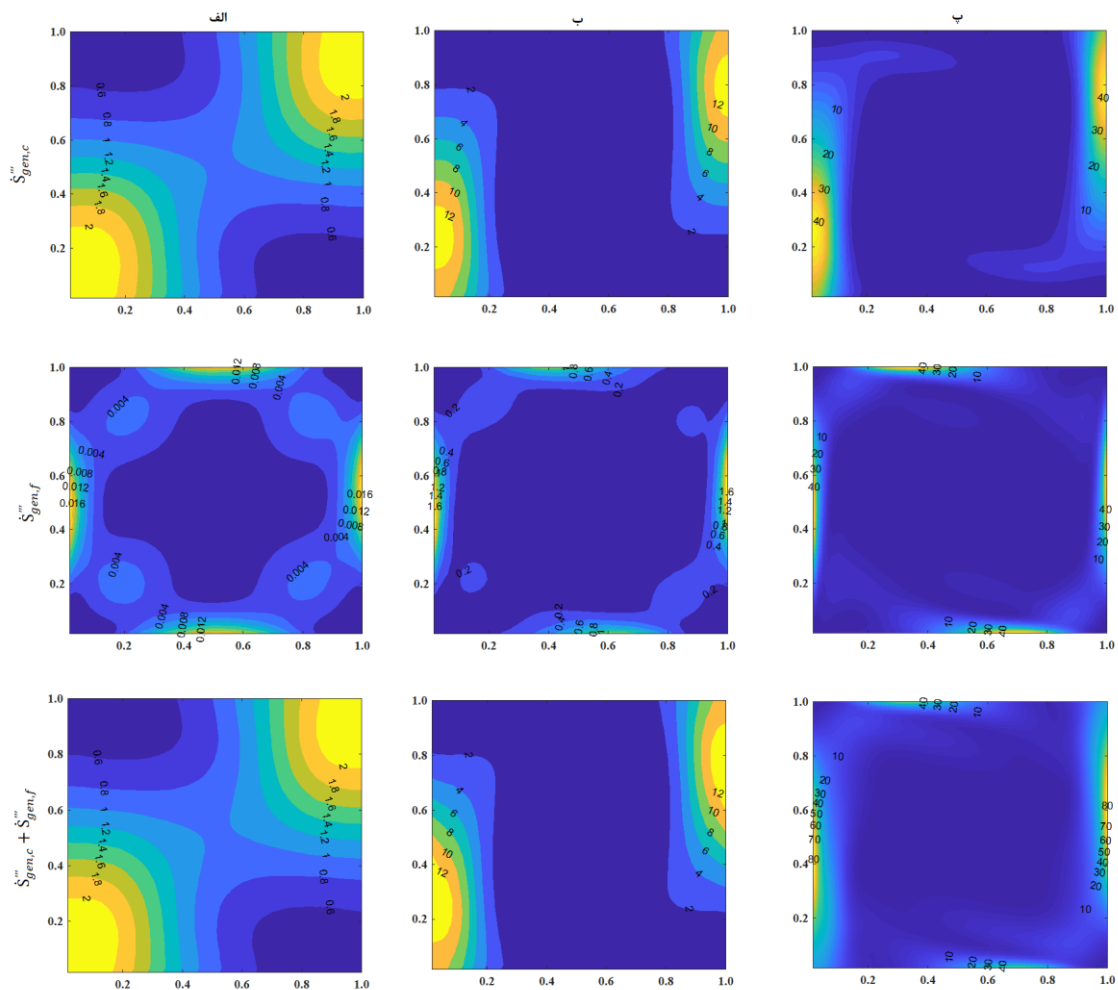
۶- بحث و نتایج

تابش سطحی در محاسبات را نسبت به عدم وجود تابش سطحی در عدد رایلی مختلف بررسی می‌گردد. در شکل (۳) تولید انتروپی جابه‌جایی طبیعی در محفظه مایل ۴۵ درجه، $\varphi = 2/33$ و بدون حضور انتقال حرارت تابشی نشان داده شده است. با افزایش عدد رایلی، نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک افزایش می‌یابد به طوری که روی دیواره‌های سرد و گرم بیشترین تولید انتروپی وجود دارد. تولید انتروپی بدون وجود تابش سطحی، به صورت منظم روی دیواره‌ها توزیع شده است. نیمه پایینی دیواره گرم و نیمه بالایی دیواره سرد بیشترین تولید انتروپی را دارد زیرا بیشترین اختلاف دما در دیواره سرد T_c ، سمت بالا و دیواره گرم T_h ، سمت پایین می‌باشد. نرخ تولید انتروپی با افزایش فاصله از دیواره گرم و سرد، کاهش می‌یابد. علاوه بر این انتقال حرارت هدایت سیال، مکانیزم غالب تولید انتروپی است و سیال بدلیل اختلاف دمای دو دیواره سرد و گرم به صورت ساعت‌گرد در چرخش است.

به منظور تجزیه و تحلیل تولید انتروپی انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی - تابش سطحی، مطابق شکل (۱) یک محفظه‌ای مایل با دو دیواره دما ثابت و دو دیواره آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. جریان در محفظه پایا و آرام و دوبعدی فرض می‌گردد و تمام سطوح داخلی محفظه کدر، پخششی و خاکستری است. با توسعه روش تابش خالص، تولید انتروپی تابش سطحی محاسبه می‌گردد. سهم تابش سطحی از تولید انتروپی تابش در میدان و در ماده بررسی می‌شود. به طور کلی توجه ویژه‌ای به تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی شده است. عدد رایلی در محدوده 10^3 تا 10^5 و اختلاف دمای بدون بعد φ در محدوده $0,33$ تا $2/33$ می‌باشد.

۶-۱- تأثیر تابش سطحی بر تولید انتروپی

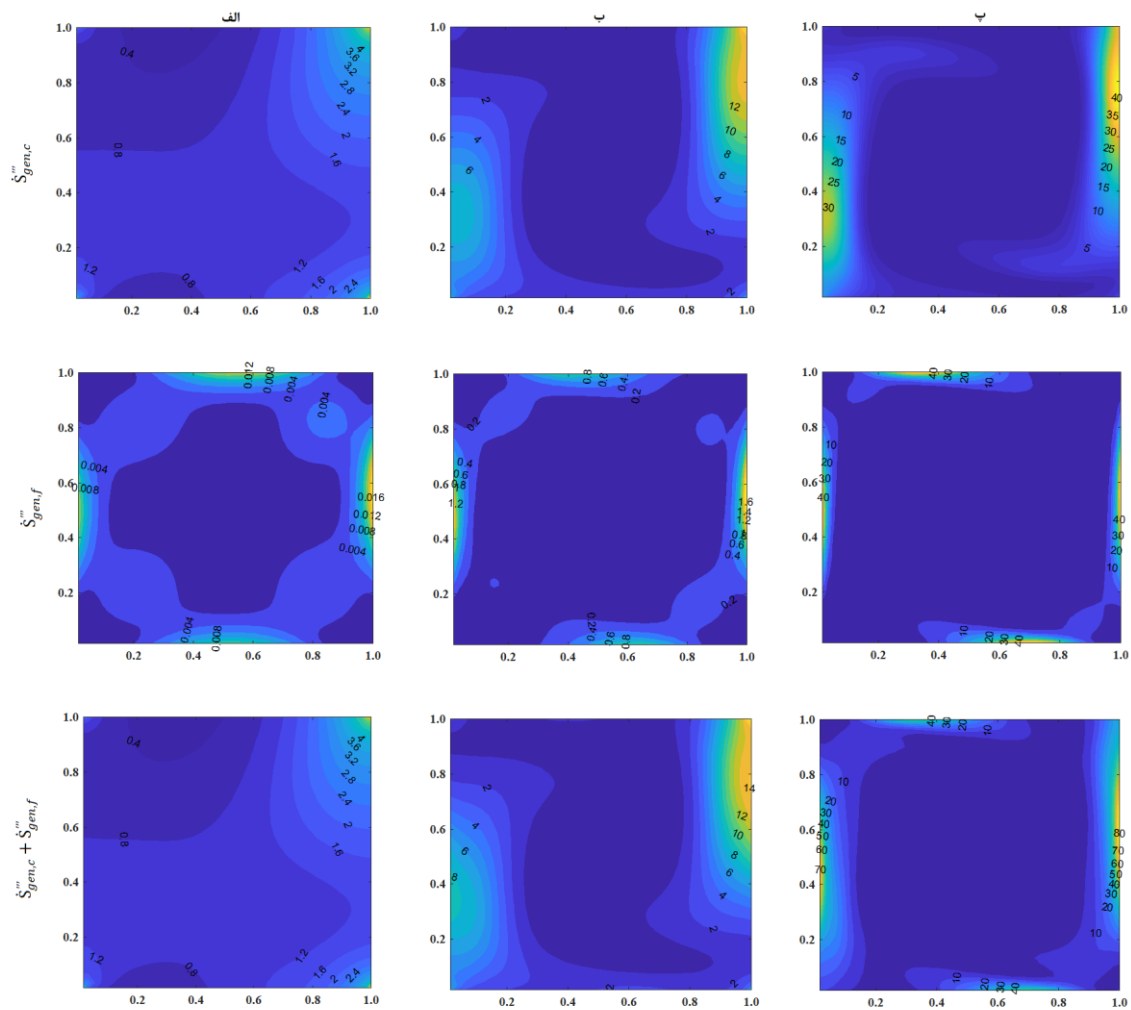
در ابتدا تأثیر تابش سطحی بر نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک به عبارتی تأثیر



شکل ۳) تولید انتروپی بدون تابش در محفظه‌ی ۴۵ درجه، بی‌بعد $\varphi = 2/3$ و $\varepsilon = 0$ الف- رایلی 10^2 ب- رایلی 10^4 پ- رایلی 10^5

در حضور تابش دارد. حضور تابش باعث عدم تقارن نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک در محفظه می‌گردد و بیشترین تولید انتروپی به سمت دیواره سرد T_c کشیده می‌شود زیرا بیشترین اختلاف دما در آنجا اتفاق می‌افتد.

در صورتی که تابش سطحی در نظر گرفته شود، نمودارهای نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک به صورت شکل (۴) می‌باشند. شکل‌ها نشان می‌دهند که دیواره سرد، بیشترین نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و اصطکاک



شکل ۴) نرخ تولید انرژی با تابش در محفظه‌ی ۴۵ درجه در $\varphi = ۲/۳۳$ و $\varepsilon = ۱$ الف-رایلی $۱۰^۳$ ب-رایلی $۱۰^۴$ پ-رایلی $۱۰^۵$

درصد اختلاف ۲۱۲۸٪ در رایلی $۱۰^۳$ و $\varphi = ۲/۳۳$ و کمترین ۲۶٪ در رایلی $۱۰^۵$ و بی بعد $\varphi = ۰/۳۳$ می‌باشد. بنابراین تبادل تابشی سطحی نقش مهمی در نرخ تولید انرژی در محفظه دارد. همچنین با افزایش عدد رایلی و دمای دیواره گرم، تولید انرژی افزایش می‌یابد.

جدول (۳) تأثیر تابش سطحی بر نرخ تولید انرژی در محفظه‌ی مایل ۴۵ درجه را نشان می‌دهد. در حالتی که تابش سطحی در نظر گرفته شود، نرخ تولید انرژی به میزان قابل توجهی بیشتر می‌گردد به طوری که حداکثر در رایلی $۱۰^۵$ ، $\varphi = ۲/۳۳$ و حداقل در رایلی $۱۰^۳$ و $\varphi = ۰/۳۳$ ترتیب ۲۵/۷۹ و ۰/۱۸۷ می‌باشد. بیشترین

جدول (۳) نرخ تولید انتروپی کل در محفظه

ϕ	تولید انتروپی کل در محفظه								
	$\varepsilon = 0$			$\varepsilon = 1$			درصد اختلاف		
	$Ra = 10^3$	$Ra = 10^4$	$Ra = 10^5$	$Ra = 10^3$	$Ra = 10^4$	$Ra = 10^5$	$Ra = 10^3$	$Ra = 10^4$	$Ra = 10^5$
۰/۳۳	۰/۰۴۰۲۹	۰/۱۰۴۶۱	۰/۴۵۴۸۱	۰/۱۸۷۰۴	۰/۲۳۸۹۶	۰/۵۷۲۹۵	%۳۶۴	%۱۲۸	%۲۶
۱/۳۳	۰/۴۳۱۲۸	۰/۹۶۶۷۲	۱/۹۸۱۳	۴/۶۹۹۴۳	۵/۱۸۱۳۷	۶/۱۷۸۱۲	%۹۹۰	%۴۳۶	%۲۱۲
۲/۳۳	۱/۰۰۵۶	۲/۲۱۴۳	۴/۱۶۳۲	۲۲/۰۰۴۹	۲۳/۷۲۷۸	۲۵/۷۹۱۹۸	%۲۱۲۸	%۹۷۲	%۵۲۰

ناشی از انتقال حرارت هدایت سیال و تابش سطحی افزایش و نرخ تولید انتروپی ناشی از اصطکاک سیال کاهش می‌یابد. در سیستم‌های انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی همراه با تابش سطحی در $\phi > 0/33$ ، انتقال حرارت تابش سطحی مکانیزم غالب تولید انتروپی می‌باشد.

جدول (۴) نرخ تولید انتروپی در رایلی 10^5 همراه با تابش سطحی در محفظه‌ای مایل 45° درجه را نشان می‌دهد. حداقل %۲۶ از نرخ تولید انتروپی کل در $0/33$ و حداکثر %۸۵ از نرخ تولید انتروپی کل در $2/33$ $\phi =$ و متعلق به نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی می‌باشد. با افزایش دمای دیواره گرم، نرخ تولید انتروپی

جدول (۴) تأثیر دمای دیواره گرم بر نرخ تولید انتروپی تابش سطحی

تولید انتروپی					
$Ra = 10^5, \varepsilon = 1$					
ϕ	انتقال حرارت هدایت	اصطکاک سیال	تابش سطحی	انتروپی کل	انتروپی تابش سطحی / انتروپی کل %
۰/۳۳	۰/۱۴۱۰	۰/۲۷۹۶	۰/۱۵۲۳	۰/۵۷۲۹	%۲۶/۶
۱/۳۳	۱/۵۳۵۸	۰/۲۵۲۲	۴/۳۹۰۱	۶/۱۷۸۱	%۷۱/۱
۲/۳۳	۳/۵۹۳۱	۰/۲۳۲۹	۲۱/۹۶۶	۲۵/۷۹۲	%۸۵/۲

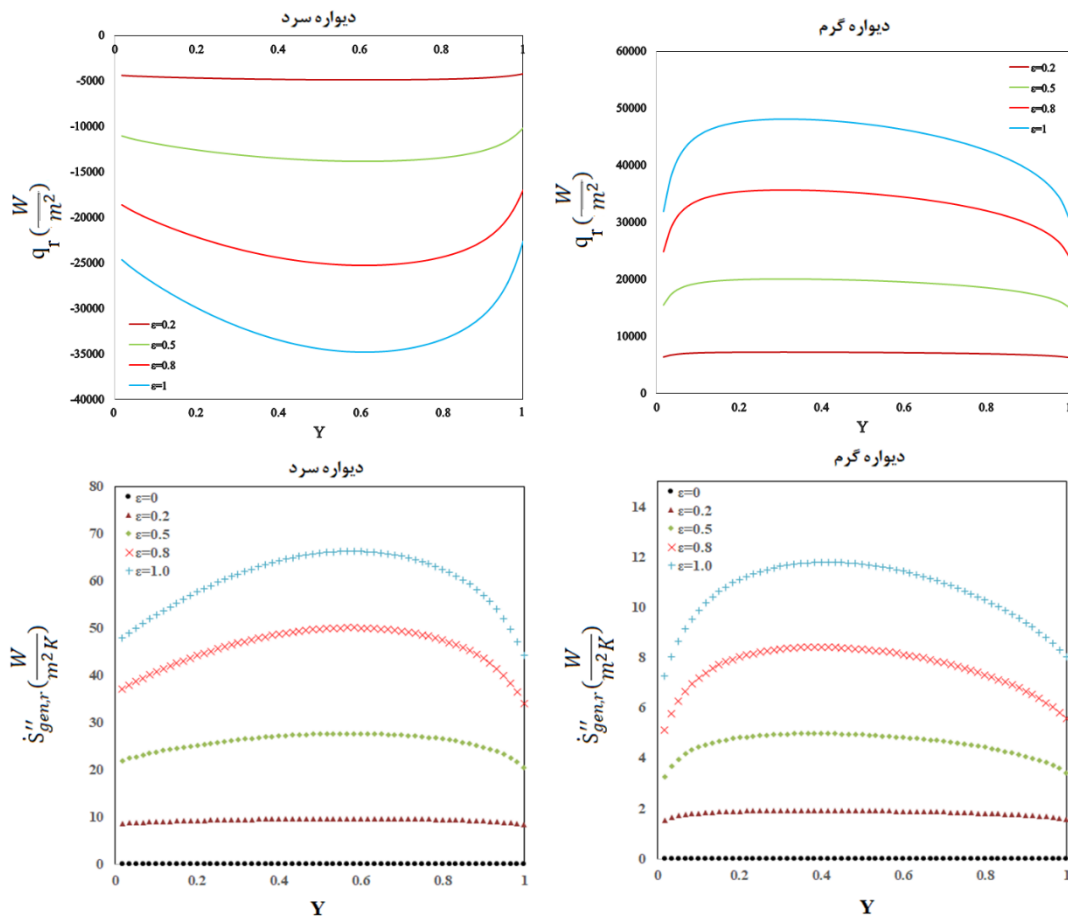
می‌شود با افزایش ضریب صدور، شار حرارتی تابشی روی سطوح دیواره گرم و دیواره سرد افزایش می‌یابد، بنابراین با توجه به رابطه (۱۸) که شار حرارتی تابشی رابطه مستقیمی با نرخ تولید انتروپی تابشی دارد، پس با افزایش شار حرارتی تابشی، نرخ تولید انتروپی تابشی

۶-۲- تأثیر ضریب صدور بر تولید انتروپی تابش سطحی

شکل (۵)، تأثیر ضریب صدور بر شار حرارتی تابشی و نرخ تولید انتروپی تابش سطحی روی دیواره‌های گرم و سرد محفظه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده

آدیاباتیک کاهش می‌یابد. علاوه بر این نرخ تولید انترویی تابشی بر روی دیواره سرد بیشتر از دیواره گرم می‌باشد.

افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که شار حرارتی تابشی و نرخ تولید انترویی با نزدیک شدن به دیواره



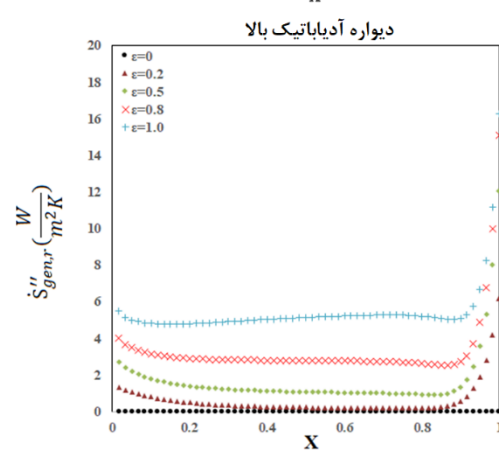
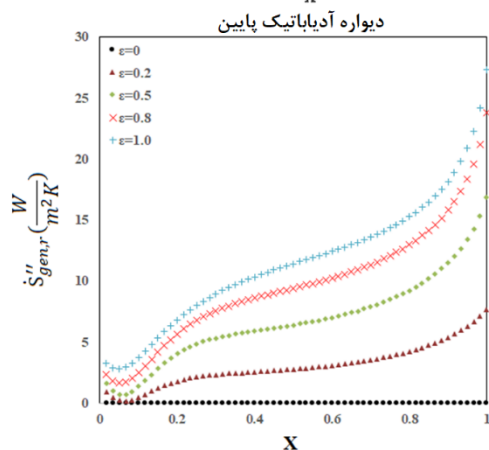
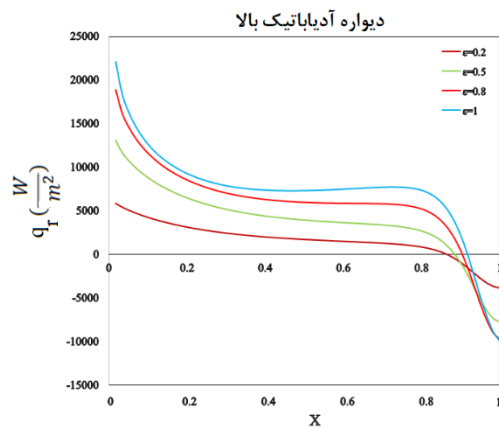
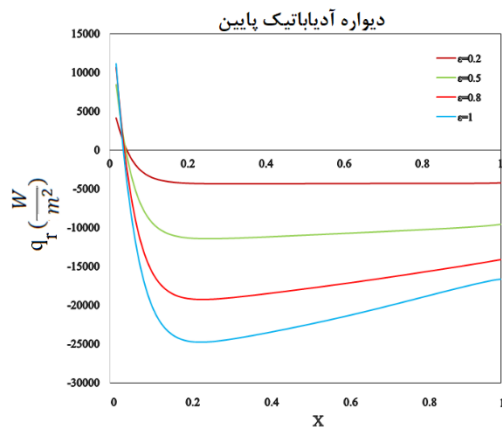
شکل ۵) تأثیر ضریب صدور بر شار حرارتی تابشی و نرخ تولید انترویی تابش سطحی در دیواره‌های گرم و سرد

نرخ تولید انترویی تابشی، نرخ تولید انترویی تابشی افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که شار حرارتی تابشی دیواره‌های آدیاباتیک در محل تقاطع با دیواره‌های گرم و سرد، به دلیل نزدیک شدن به دیواره‌های گرم و سرد، دچار تغییرات زیادی نسبت به قسمت میانی دیواره‌های آدیاباتیک دارد. در واقع هر چه سطوح

شکل ۶)، تأثیر ضریب صدور بر شار حرارتی تابشی و نرخ تولید انترویی تابش سطحی روی دیواره‌های آدیاباتیک محفظه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب صدور، شار حرارتی تابشی روی سطوح دیواره‌های آدیاباتیک افزایش می‌یابد، بنابراین با توجه به رابطه مستقیم شار حرارتی تابشی و

آدیاباتیک به دیواره سرد نزدیک‌تر باشد، نرخ تولید انتروپی آن بیشتر است.

دیواره‌های آدیاباتیک به دیواره گرم نزدیک‌تر باشد، نرخ تولید انتروپی آن کمتر است و هر چه سطوح دیواره‌های



شکل ۶) تأثیر ضریب صدور بر شار حرارتی تابشی و نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در دیواره‌های آدیاباتیک

صدور، نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت و اصطکاک سیال، کاهش ناچیز و نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی افزایش چشم‌گیری می‌یابد. با افزایش ضریب صدور، درصد سهم تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی افزایش می‌یابد به طوری که غالب تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی می‌باشد بنابراین نمی‌توان از تابش سطحی در محاسبات چشم‌پوشی نمود.

جدول (۵) نرخ تولید انتروپی همراه با تابش سطحی در عدد رایلی 10^5 و $\phi = 2/33$ در محفظه‌ای مایل با ضریب صدور مختلف نشان می‌دهد. با افزایش ضریب صدور سهم تابش سطحی در تولید انتروپی افزایش می‌یابد. حداقل ۳۱٪ از تولید انتروپی کل در $\epsilon = 0/1$ و حداکثر ۸۵٪ از تولید انتروپی کل در $\epsilon = 1$ متعلق به تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی می‌باشد. با افزایش ضریب

جدول ۵) تأثیر ضریب صدور بر نرخ تولید انتروپی

تولید انتروپی					
$Ra = 10^5, \phi = 2/33$					
ε	انتقال حرارت هدایت	اصطکاک سیال	تابش سطحی	انتروپی کل	انتروپی تابش سطحی % انتروپی کل
۰/۱	۳/۸۷۹۱	۰/۲۴۱۲۳	۱/۸۵۸۸	۵/۶۷۷۵	٪۳۱
۰/۲	۳/۸۳۹۴	۰/۲۴۰۱۵	۳/۷۴۶۶	۷/۸۲۶۱	٪۴۸
۰/۵	۳/۷۳۲۳	۰/۲۳۷۱۴	۹/۷۴۸۵	۱۳/۷۱۷۹	٪۷۱
۰/۸	۳/۶۴۲۹	۰/۲۳۴۴۵	۱۶/۶۲۰۶	۲۰/۴۹۷۹	٪۸۱
۱/۰	۳/۵۹۳۱	۰/۲۳۲۸۸	۲۱/۹۶۶	۲۵/۷۹۲	٪۸۵

در جدول (۶) نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی روی سطوح محفظه‌ی مایل ۴۵ درجه در عدد رایلی 10^5 و $\phi = 2/33$ ارائه شده است. با افزایش ضریب صدور، تولید انتروپی روی تمام سطوح محفظه افزایش می‌یابد. بیشترین نرخ تولید انتروپی تابشی مربوط به دیواره سرد و کمترین تولید انتروپی روی سطح

آدیاباتیک بالایی می‌باشد. تابش سطحی باعث افزایش تولید انتروپی و عدم تقارن انتروپی در محفظه می‌گردد. نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی روی همه دیواره‌های محفظه مثبت می‌باشد و غالب تولید انتروپی روی دیواره سرد بدلیل اختلاف دما با دیواره گرم را دارد.

جدول ۶) نرخ تولید انتروپی تابشی روی دیواره‌های محفظه

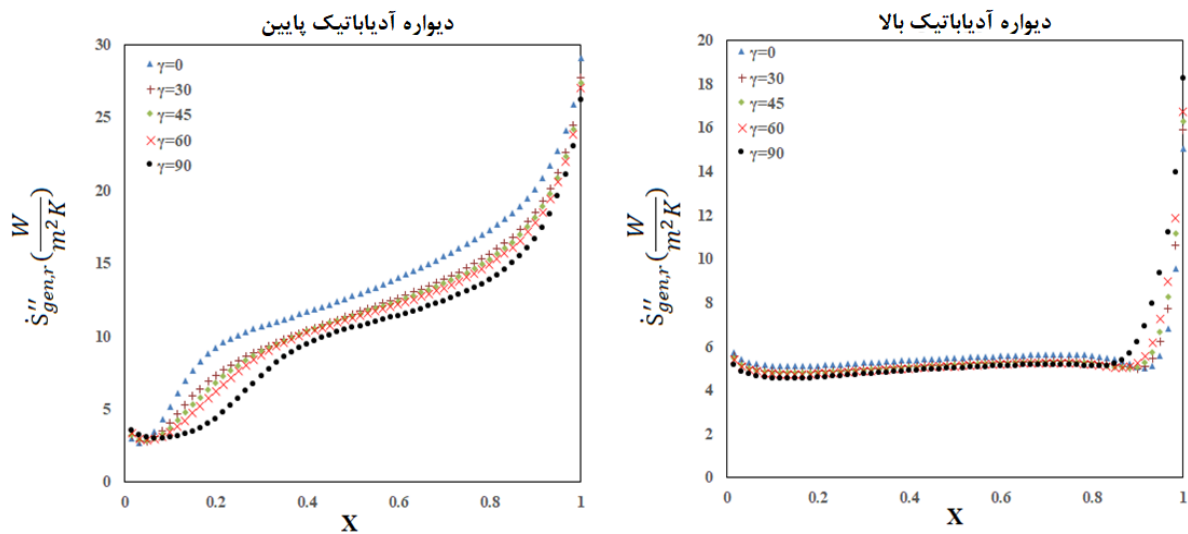
تولید انتروپی				
$Ra = 10^5, \phi = 2/33$				
ε	آدیاباتیک پایین	سرد	آدیاباتیک بالا	گرم
۰/۱	۰/۴۰۱۰۲	۱/۱۴۰۷	۰/۰۸۳۹۸۶	۰/۲۳۳۰۳
۰/۲	۰/۷۷۱۰۲	۲/۳۴۹۹	۰/۱۶۳۷۳	۰/۴۶۱۹۵
۰/۵	۱/۷۱۱۳	۶/۴۶۸۶	۰/۴۲۵۰۸	۱/۱۴۳۶
۰/۸	۲/۴۴۲۴	۱۱/۴۵۱۹	۰/۸۲۸۶۶	۱/۸۹۷۷
۱/۰	۲/۹۱۲۶	۱۵/۰۳۲۱	۱/۳۶۵۶	۲/۶۵۵۸

۶-۳- تأثیر زاویه محفظه بر تولید انتروپی تابش

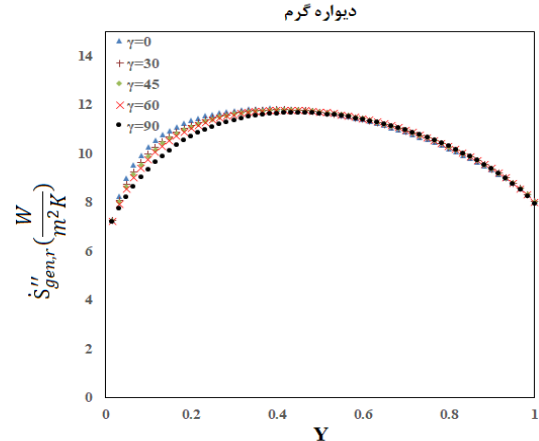
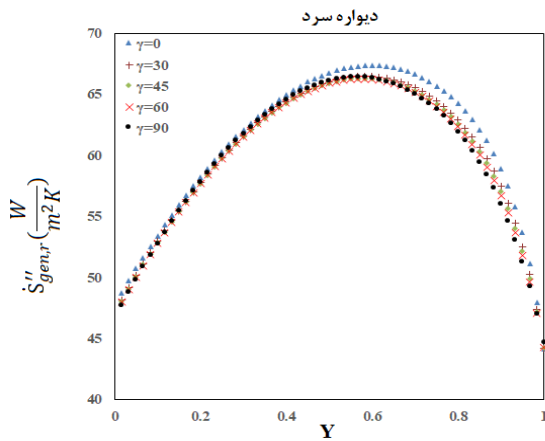
سطحی

در این بخش تأثیر زاویه‌های مختلف محفظه بر تولید انتروپی بررسی می‌گردد. شکل (۷) تأثیر زاویه محفظه بر نرخ تولید انتروپی تابشی سطحی روی دیواره‌های آدیاباتیک بالا و پایین و شکل (۸) تأثیر زاویه محفظه بر نرخ تولید انتروپی تابشی سطحی روی دیواره‌های سرد و گرم نشان می‌دهد. کمترین نرخ تولید انتروپی مربوط به سطح دیواره گرم و دیواره آدیاباتیک بالا می‌باشد و بیشترین نرخ تولید انتروپی مربوط به دیواره سرد می‌باشد. نمودار نرخ تولید انتروپی تابشی بر روی دیواره‌های دما ثابت به صورت گنبدی شکل می‌باشد یعنی یک نقطه

ماکزیمم دارند که دیواره سرد کمی بعد از مرکز دیواره و دیواره گرم کمی قبل از مرکز دیواره، بیشترین نرخ تولید انتروپی روی دیواره را دارند ولی دیواره‌های آدیاباتیک یک روند صعودی را دارند و در میانه دیواره، شیب افزایش انتروپی کاهش می‌یابد و در گوشه‌های بدلیل برخورد با دیواره‌های سرد و گرم، افزایش نرخ تولید انتروپی تابشی با شیب بیشتری همراه می‌گردد. با افزایش زاویه محفظه، نرخ تولید انتروپی تابش سطحی کاهش می‌یابد. کمترین نرخ تولید انتروپی در زاویه ۹۰ درجه، حالتی که دیواره گرم، دیواره پایینی محفظه و دیواره سرد، دیواره بالایی محفظه می‌باشد، اتفاق می‌افتد.



شکل (۷) تأثیر زاویه محفظه بر نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در دیواره‌های آدیاباتیک



شکل ۸) تأثیر زاویه محفظه بر نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در دیواره‌های گرم و سرد

۷- نتیجه‌گیری

محفظه افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب صدور، نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی افزایش می‌یابد. کمترین نرخ تولید انتروپی تابشی روی دیواره آدیاباتیک بالایی و بیشترین نرخ تولید انتروپی تابشی روی دیواره سرد اتفاق می‌افتد. نرخ تولید انتروپی تابشی بر روی دیواره‌های دما ثابت شامل یک نقطه ماکزیمم می‌باشد ولی دیواره‌های آدیاباتیک با نزدیک شدن به دیواره سرد، باعث افزایش نرخ تولید انتروپی تابشی و با نزدیک شدن به دیواره گرم، باعث کاهش نرخ تولید انتروپی می‌گردد. با افزایش زاویه محفظه تولید انتروپی تابش سطحی کاهش می‌یابد. کمترین تولید انتروپی در زاویه ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. به طور کلی در این مطالعه با گسترش روش تابش خالص، تأثیر تابش سطحی بر تولید انتروپی و تأثیر مولفه‌های تشکیل دهنده تولید انتروپی تابش سطحی یعنی تابش در میدان و در ماده بررسی و مشاهده گردید که تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی ۸۵٪ از نرخ تولید انتروپی کل در محفظه را تشکیل می‌دهد به طوری که اختلاف تولید انتروپی با تابش سطحی و بدون آن در محفظه، بسیار قابل ملاحظه می‌باشد بنابراین نمی‌توان در

تحلیل عددی تولید انتروپی انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی- تابش سطحی در یک محفظه‌ی مایل دوبعدی با دو دیواره دما ثابت و دو دیواره آدیاباتیک انجام گردید. نرخ انتروپی تابش سطحی شامل انتروپی تابشی در میدان و در ماده می‌باشد. در این مطالعه با توسعه روش تابش خالص، نرخ تولید انتروپی تابش سطحی محاسبه گردید. همچنین تأثیر ضریب صدور و زاویه محفظه بر تولید انتروپی تابش سطحی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان می‌دهد، وجود تابش سطحی در محفظه باعث عدم تقارن توزیع نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت هدایت و اصطکاک سیال می‌گردد و با افزایش ضریب صدور، نرخ تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت سیال کاهش و نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی افزایش می‌یابد. بیشترین نرخ تولید انتروپی تابش سطحی، بر روی دیواره سرد متمرکز شده است. افزایش اختلاف دمای دیواره‌ی گرم و سرد، صرف‌نظر از انتقال حرارت تابشی، تولید انتروپی در محفظه را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش عدد رایلی، تولید انتروپی در

مسائل انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی طبیعی-تابشی از تابش سطحی چشم‌پوشی نمود.

۸- فهرست علائم

m/s	سرعت نور در خلأ،	c	ضریب شکل المان k ام به جام	F_{kj}
J s	ثابت پلانک،	h	شتاب گرانش، m/s^2	g
$W/m^2 sr$	شدت تابش،	I	پهنا و ارتفاع محفظه، m	L
J/K	ثابت بولتزمن،	k_B	هدایت حرارتی سیال، W/mK	k_f
	نرمال سطح	\hat{n}	تعداد کل المان‌های سطح داخلی محفظه	N
K	دما،	T	عدد بی بعد تابش-رسانش	N_r
	شدت انتروپی تابشی طیفی، $W/m^2 K \mu m sr$	L_λ	فشار، N/m^2	P
K	دما دیواره سرد،	T_c	عدد پراوتل	Pr
K	دما دیواره گرم،	T_h	بردار مکان	r
m/s	مؤلفه‌های سرعت،	u,v	بردار جهت	s
			شار حرارتی، W/m^2	q
			شار حرارت تابش خالص سطح، W/m^2	q_r
			شار حرارتی تابش ورودی، W/m^2	G
m^2/s	پخش حرارتی،	α	شار حرارت تابش خالص بی‌بعد سطح	Q_r
1/K	ضریب انبساط حرارتی حجمی،	β	عدد رایلی	Ra
	دلتهای کروندکر	δ	نرخ انتروپی سیستم، W/K	\dot{S}
	ضریب صدور سطح داخلی	ε	نرخ تولید انتروپی ناشی از اصطکاک بر واحد	$\dot{S}_{gen,f}'''$
	دمای بی‌بعد	θ	حجم، $W/m^3 K$	
kg/ms	لزجت دینامیکی،	μ	نرخ تولید انتروپی ناشی از هدایت سیال بر	$\dot{S}_{gen,c}'''$
m^2/s	لزجت سینماتیکی،	ν	واحد حجم، $W/m^3 K$	
kg/m ³	چگالی سیال،	ρ	نرخ تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی بر	$\dot{S}_{gen,r}''$
$W/m^2 K^4$	ثابت استفان-بولتزمن،	σ	واحد سطح، $W/m^2 K$	
m^2/s	تابع جریان،	ψ	نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در میدان بر	$\dot{S}_{r,f}''$
	تابع جریان بی‌بعد	Ψ	واحد سطح، $W/m^2 K$	
1/s	ورتیسیته،	ω	نرخ تولید انتروپی تابش سطحی در ماده بر	\dot{S}_M''
	ورتیسیته بی‌بعد	Ω	واحد سطح، $W/m^2 K$	
m	طول موج،	λ	نرخ تولید انتروپی کل، W/K	\dot{S}_{gen}

ماده (دیواره)	M	نسبت دمای بی بعد سطح محفظه	φ
میدان تابشی	r.f.	زاویه فضایی، sr	Ω
انتقال حرارت تابشی	r		
تولید انتروپی کل	gen		زیر نویس ها
تولید انتروپی ناشی از هدایت سیال	gen,c	ورودی	in
تولید انتروپی ناشی از اصطکاک	gen,f	خروجی	out
تولید انتروپی ناشی از تابش سطحی	gen,r	دیواره سرد	c
		دیواره گرم	h

۹- مراجع

- Oztop, H. F. and Al-Salem, K., "A review on entropy generation in natural and mixed convection heat transfer for energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, Pp. 911-920, (2012).
- Balaji, C. and Venkateshan, S. P., "Interaction of Surface Radiation with Free Convection in a Square Cavity," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 14, No. 3, Pp. 260-267, (1993).
- Akiyama, M. and Chong, Q. P., "Numerical Analysis of Natural Convection with Surface Radiation in a Square Enclosure," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 32, No. 4, Pp. 419-433, (1997).
- Shuja, S. Z., Yilbas, B. S., and Budair, M. O., "Natural Convection in a Square Cavity with a Heat Generating Body: Entropy Consideration," *Heat and Mass Transfer*, journal article Vol. 36, No. 4, Pp. 343-350, (2000).
- Berrin Erbay, L., Altaç, Z., and Sülüş, B., "Entropy Generation in a Square Enclosure with Partial Heating from a Vertical Lateral Wall," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 12, Pp. 909-918, (2004).
- Varol, Y., Oztop, H. F., and Koca, A., "Entropy Generation due to Conjugate Natural Convection in Enclosures Bounded by Vertical Solid Walls with Different Thicknesses," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 5, Pp. 648-656, (2008).
- Ilis, G. G., Mobedi, M., and Sunden, B., "Effect of Aspect Ratio on Entropy Generation in a Rectangular Cavity with Differentially Heated Vertical Walls," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 6, Pp. 696-703, (2008).
- Oliveski, R. D. C., Macagnan, M. H., and Copetti, J. B., "Entropy Generation and Natural Convection in Rectangular Cavities," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 8, Pp. 1417-1425, (2009).
- Alipanah, M., Hasannasab, P., Hosseinizadeh, S. F., and Darbandi, M., "Entropy Generation for Compressible Natural Convection with High Gradient Temperature in a Square Cavity," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 9, Pp. 1388-1395, (2010).
- Bouabid, M., Magherbi, M., Hidouri, N., and Brahim, A. B., "Entropy Generation at Natural Convection in an Inclined Rectangular Cavity," *Entropy*, Vol. 13, No. 5, Pp. 1020-1033, (2011).
- Bondareva, N. S., Sheremet, M. A., Oztop, H. F., and Abu-Hamdeh, N., "Entropy Generation due to Natural Convection of a Nanofluid in a Partially Open Triangular Cavity," *Advanced Powder Technology*, Vol. 28, No. 1, Pp. 244-255, (2017).
- Cho, C.-C., "Heat Transfer and Entropy Generation of Mixed Convection Flow in Cu-water Nanofluid-filled Lid-driven Cavity with Wavy Surface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 119, Pp. 163-174, (2018).

13. Seyyedi, S. M., Dogonchi, A. S., Hashemi-Tilehnoee, M., Waqas, M., and Ganji, D. D., "Investigation of Entropy Generation in a Square Inclined Cavity Using Control Volume Finite Element Method with Aided Quadratic Lagrange Interpolation Functions," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 110, P. 104398, (2020).
14. Iftikhar, B., Javed, T., and Siddiqui, M. A., "Entropy Generation Analysis During MHD Mixed Convection Flow of Non-Newtonian Fluid Saturated Inside the Square Cavity," *Journal of Computational Science*, Vol. 66, P. 101907, (2023).
15. Amraqui, S., Mezrhab, A., and Abid, C., "Combined Natural Convection and Surface Radiation in Solar Collector Equipped with Partitions," *Applied Solar Energy*, Vol. 47, No. 1, Pp. 36-47, (2011).
16. Dashti, M. A. and Safavinejad, A., "Optimal Design with Entropy Generation Minimization Approach in Combined Natural Convection with Surface Radiation in a Two-dimensional Enclosure," *Heat Transfer—Asian Research*, Vol. 48, No. 8, Pp. 4049-4073, (2019).
17. Hinojosa, J. F., Buentello, D., Xamán, J., and Pérez-Tello, M., "The Effect of Surface Thermal Radiation on Entropy Generation in an Open Cavity with Natural Convection," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 81, Pp. 164-17, (2017).
18. Sadeghi, P. and Safavinejad, A., "Radiative entropy generation in a gray absorbing, emitting, and scattering planar medium at radiative equilibrium," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 201, Pp. 17-29, (2017).
19. Bejan, A., *Convection Heat Transfer*. Wiley, (2013).
20. Montiel Gonzalez, M., Hinojosa Palafox, J., and Estrada, C. A., "Numerical study of heat transfer by natural convection and surface thermal radiation in an open cavity receiver," *Solar Energy*, vol. 86, no. 4, pp. 1118-1128, (2012).
21. Howell, J. R., Menguc, M. P., and Siegel, R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, 5th Edition. CRC Press, (2010).
22. Bejan, A., *Entropy Generation Minimization: The Method of Thermodynamic Optimization of Finite-size Systems and Finite-time Processes*. CRC press, (2013).
23. Planck, M., *The theory of heat radiation*. Blakiston, (1914.)
24. Liu, L. and Chu, S., "Verification of Numerical Simulation Method for Entropy Generation of Radiation Heat Transfer in Semitransparent Medium," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 103, No. 1, Pp. 43-56, (2007).
25. de Vahl Davis, G., "Natural Convection of Air in a Square Cavity: a Bench Mark Numerical Solution," *International Journal for numerical methods in fluids*, Vol. 3, No. 3, Pp. 249-264, (1983).
26. Behnia, M., Reizes, J., and de Vahl Davis, G., "Combined Radiation and Natural Convection in a Rectangular Cavity with a Transparent Wall and Containing a Non-participating Fluid," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 10, No. 3, Pp. 305-325, (1990).
27. Martyushev, S. G. and Sheremet, M. A., "Numerical Analysis of Conjugate Natural Convection and Surface Radiation in an Enclosure with Local Heat Source," *Computational Thermal Sciences: An International Journal*, Vol. 5, No. 1, (2013).

Entropy	انتروپی	Ecologie	بوم شناسی
Vorticity	گردابی	Momentum	مومنتوم
Nusselt	عدد ناسلت	Element	المان
Rayleigh	عدد رایلی	Adiabatic	عایق
Boussinesq	تقریب بوزینسک		