**تاثیر غلظت بخار آب موجود در هوا بر انتقال حرارت تشعشعی در یک محفظه دارای شعله با استفاده از ضریب جذب میانگین پلانک**

میثم آتش افروز 1،\*، حمیدرضا حاجعلیزاده2، طاهره اسدی3

1 دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

2 کارشناس ارشد کنترل پروژه، پالایشگاه نفت بندر عباس، بندر عباس، ایران

3 استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

\* [Meysam.atashafrooz@yahoo.com](mailto:Meysam.atashafrooz@yahoo.com) , [m.atashafrooz@sirjantech.ac.ir](mailto:m.atashafrooz@sirjantech.ac.ir)

**چکيده**

در این تحقیق، به بررسی عددی اثرات غلظت بخار آب موجود در مخلوط هوا بر مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی در یک محفظه دارای شعله، پرداخته می­شود. توزيع ضريب جذب طیفی تمام مخلوط­های هوای مورد مطالعه در این تحقیق، بر اساس اطلاعات منتشر شده در پايگاه داده HITRAN2008 و با استفاده از محاسبات دقيق خط به خط بدست مي­آيد. برای محاسبه ضریب جذب مستقل از طیف (خاکستری)، از روش دقیق و کارآمد ضريب جذب ميانگين پلانک استفاده می­شود. معادله انتقال تشعشع یا بکارگیری روش راستاهای مجزا مجزا حل می‌شود. بعلاوه، معادله انرژی با استفاده از روش حجم محدود و با بکارگیري روش­هاي عددي تکراري خط به خط حل می­شود. نتایج این تحقیق به­وضح نشان می­دهد که توزیع میدان دما در محفظه و همچنین توزیع شارهای تشعشعی روی دیوارهای محفظه بطور قابل توجه­ای وابسته به مقادیر غلظت بخار آب موجود در مخلوط هوا هستند.

**واژگان كليدي:**

بخار آب، محفظه تشعشعی، ضریب جذب طیفی، محیط خاکستری، روش راستاهای مجزا، ضريب جذب ميانگين پلانک.

1. **مقدمه**

در دو دهه گذشته، محققین متعددی به بررسی اثرات مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی در هندسه­های مختلف پرداخته­اند ]4-1[. این توجه و اهمیت بیشتر به این علت است که در بسیاری از تکنولوژی­ها و کاربردهای مهندسی (محفظه­های احتراق، توربین­های گاز، کلکتورهای انرژی خورشیدی و ...)، پدیده تشعشع مکانیزم غالب بر انتقال حرارت بوده و بطور قایل توجه­ای بر رفتارهای حرارتی تاثیر می­گذارد ]8-5[.

خواص تشعشعی بسياري از گازهای موجود در مخلوط هوا یا محصولات احتراق (بخار آب، دي اکسيد کربن و دوده)، به­شدت و بطور نوسانی در طول طیف متغیر است. از اینرو، غلظت این گازهای تشعشعی، به طور چشمگیری روی رفتارهای حرارتی سیستم­های مهندسی تاثیر گذار است. تاکنون چندين مدل طيفي متفاوت براي محاسبه خواص تشعشعی گازهاي مختلف ارائه شده است ]11-9[. در زمینه انتقال حرارت تابشی در محیط­های دارای خواص تشعشعی وابسته به طیف، تاکنون چندین مطالعه و پژوهش از سوی محققین علوم حرارتی انجام شده است ]14-12[.

اما باید توجه داشت که آنالیز مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی با فرض متغیر بودن خواص در طول طیف، بسیار زمان­بر و پر هزینه بوده و در اکثر موارد نیازمند کامپیوترهای مهندسی پیشرفته است. به همین دلیل، تاکنون چندین مدل مختلف برای آنالیز مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی با استفاده از خواص تابشی مستقل از طیف (محیط خاکستری)، از سوی محققین مختلف ارائه و توسعه داده شده است ]14، 11، 9[. از میان این مدلها، روش ضریب جذب میانگین پلانک دارای هزینه محاسباتی بسیار مناسب بوده و از دقت مناسب و بسیار بالایی برخوردار است.

در این تحقیق تلاش می­شود تا تاثیر غلظت بخار آب موجود در مخلوط هوا روی انتقال حرارت تشعشعی در یک محفظه دارای شعله با ذکر جزئیات مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. لازم بذکر است که در پژوهش حاضر، برای محاسبه میدان شدت تشعشع در محفظه، از روش­های ضریب جذب میانگین پلانک و راستاهای مجزا استفاده می­شود. همچنین برای محاسبه میدان دما، معادله انرژی با استفاده از روش حجم محدود حل می­شود.

1. **بیان مسئله**

مسئله مورد مطالعه در این تحقیق، به­صورت یک محفظه تشعشعی دو بعدی دارای سه شعله در نظر گرفته شده است. هندسه این محفظه همراه با جزئیات مربوط به ابعاد و شرایط مرزی آن در شکل 1 نشان داده شده است. محیط واسط در این محفظه مخلوط هوا با غلظت مشخصی از گاز بخار آب است. همانطور که از این شکل مشخص است سه شعله با قدرت روی دیوار بالایی و دیوارهای سمت چپی و سمت راستی محفظه واقع شده­اند. محل قرار گیری این شعله­ها در زیر ارائه شده است:

محل شعله روی دیوار سمت چپ:

محل شعله روی دیوار سمت راست:

محل شعله روی دیوار بالایی:

همچنین ضریب گسیل روی دیوارهای این محفظه به­صورت زیر در نظر گرفته شده­اند:

|  |
| --- |
| shem.wmf |
| شکل 1. هندسه محفظه مورد مطالعه همراه با جزئیات مربوط به ابعاد هندسی و شرایط مرزی آن |

1. **معادلات حاکم**

معادله حاکم برای تعیین رفتارهای حرارتی مخلوط هوا در محفظه مورد مطالعه در این تحقیق، معادله انرژی بوده که به­صورت زیر قابل بیان است ]11-9[:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

این معادله در غیاب مکانیزم­های انتقال حرارت هدایتی و جابجایی نوشته شده است و پارامتر  در معادله بالا نشان دهنده قدرت شعله بوده که برای نواحی فاقد شعله مقدار آن برابر با صفر در نظر گرفته می­شود.

همچنین، پارامترهای ،  و در معادله بالا، به­ترتیب نشان­دهنده ضريب جذب محيط واسط، شدت تشعشع جسم سياه و شدت تشعشع در مكان  و جهت  هستند.

همانطور که از معادله (1) مشخص است برای حل معادله انرژی و یافتن توزیع دما، ابتدا لازم است که میدان شدت تشعشع در محفظه پیدا شود. میدان شدت تشعشع در محفظه نیز با حل معادله انتقال تشعشع و شرط مرزی مربوط به آن که به­ترتیب در معادلات (2) و (3) ارائه شده­اند، بدست می­آید ]11-9[:

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |
| (3) |  |

لازم بذکر است که معادله (2)، با توجه به فرض پخش همگن محيط ارائه شده است و پارامتر  در این معادله نشان دهنده ضریب پخش محیط است. همچنین، پارامترهای به­ترتيب ضريب صدور و بردار يكه عمود بر سطح مرزي هستند.

1. **حل عددی معادلات انرژی و انتقال تشعشع**

همانطور که از معادلات (1) و (2) مشخص ست اولین قدم در حل معادلات انرژی و انتقال تشعشع، یافتن ضریب جذب محیط است. توزيع ضريب جذب يک محيط در طول طيف ، از طريق محاسبات دقيق خط به خط و بر اساس پايگاه داده HITRAN2008 بدست مي­آيد.

آنالیز دقیق داده­های مستخرج از این پایگاه به­وضوح نشان می­دهد که توزیع ضریب جذب مخلوط­های هوای دارای بخار آب، بطور قابل توجه­ای نوسانی و در طول طيف متغير است.

همانطور که قبلا نیز بیان شد. آنالیز مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی با استفاده از ضریب جذب طیفی محیط، پیچیده و در اکثر موارد نیازمند کامپیوترهای مهندسی پیشرفته بوده و مقرون به صرفه نیست. از همین رو، در این پژوهش برای تعیین میدان شدت تشعشع و یافتن توزیع دما، از ضريب جذب ثابت ميانگين پلانک استفاده می­شود. محاسبه این ضریب برای محیط­های مختلف، با استفاده از ضریب جذب طیفی هر محیط و با بکارگیری معادله زیر انجام می­شود ]11-9[:

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |

در شکل 2، مقادیر ضریب جذب میانگین پلانک محاسبه شده برای مخلوط­های مختلف هوا با غلظت­های مختلف بخار آب ارائه شده ­است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 2. مقادیر ضریب جذب میانگین پلانک محاسبه شده برای مخلوط­های مختلف هوا با غلظت­های مختلف بخار آب |

همانطور که از معادلات (2) و (3) مشخص است، معادله انتقال تشعشع و شرط مرزي مربوط به آن، از نوع معادلات ديفرانسيل- انتگرالي هستند. در این تحقیق، برای حل این معادلات، از روش راستاهای مجزا استفاده می­شود. بر طبق این روش، معادلات (2) و (3) با *n* معادله بصورت زیر تقریب زده شده می­شوند. در اين معادلات،  تابع وزني مربوط به جهت  مي‌باشد.

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |
| (6) |  |

جزییات بیشتر این روش در مراجع ]12-9[ بطور کامل شرح داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در این تحقیق، از تعداد جهات S6 برای حل معادلات تشعشعی استفاده شده است.

همچنین لازم بذکر است که برای حل معادله انرژی در این تحقیق، از روش حجم محدود استفاده می­شود. در اين روش، محفظه مورد مطالعه به تعدادي حجم کنترل متصل به هم تقسيم مي‌شود. سپس معادله انرژی براي هر حجم کنترل اعمال مي‌شود. در حقیقت، با استفاده از این روش، معادله انرژی روي حجم هر المان گسسته شده تا به دستگاهي از معادلات جبري تبدیل شود. در مرحله بعد، این دستگاه معادلات جبری با استفاده از روش­های تکراري خط به خط و با بکارگیری الگوریتم ماتریس سه قطری حل شده تا میدان دما در محفظه بدست آید. بهرحال، در این پژوهش، از یک شبکه بهینه با تعدادگره 200×160 در جهت ، برای حل معادله انرژی و معادلات تشعشعی استفاده شده است. لازم بذکر است كه براي داشتن نتايج دقيقتر، اين شبكه در نزديكي دیوارهای محفظه ریزتر و متراكم­تر است. بعلاوه، ملاک همگرايي در حل معادلات انرژی و انتقال تشعشع، برقرار شدن شرط زیر تعيين شده است:



در معادله بالا، پارامتر بیان کننده میدان­های دما و شدت تشعشع و سیمبل  نشان دهنده مرحله تکرار است.

همچنین ذکر این نکته ضروری است که اعتبار سنجی برنامه کامپیوتری نوشته شده برای حل عددی معادلات انرژی و انتقال تشعشع، در مطالعات پیشین ارائه شده توسط نویسنده اول، آورده شده است ]14[. بنابراین برای پرهیز از تکرار مطالب، از بیان آنها در این پژوهش خودداری می­شود.

1. **نتایج و بحث**

برای آنالیز تاثیر غلظت بخار آب موجود در مخلوط هوا بر رفتارهای حرارتی در محفظه مورد مطالعه، توزیع میدان­های دما در شکل­های 3 (الف) و (ب) برای برای دو مخلوط هوای دارای و نشان داده شده­اند. از آنالیز و مقایسه دقیق نتایج ارائه شده در این شکل­ها به­وضح نمایان است که توزیع میدان دما در محفظه بطور قابل توجه­ای وابسته به مقادیر غلظت بخار آب است. از این شکل­ها به­خوبی مشخص است که تاثیر غلظت بخار آب بر میدان دما در نواحی بالایی محفظه که شعله­ها قرار دارند به مراتب بیشتر از سایر نواحی است. نکته قابل توجه دیگر این است که ماکزیمم دمای نواحی شعله، مربوط به حالتی است که غلظت بخار آب مینیمم است.

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
|  |  |
| (الف) مخلوط هوا با | (ب) مخلوط هوا با |
| شکل 3. توزیع دما برای دو مخلوط هوا با غلظت­های متفاوت بخار آب | |

برای بررسی اثرات غلظت بخار آب بر شار تشعشعی روی دیوار پایینی محفظه مورد مطالعه، شکل 4 ارائه شده است. با توجه به تقارن هندسه محفظه، توزیع شار تشعشعی روی دیوار پایینی نیز متقارن بوده، بطوریکه مقدار مینیمم آن در مرکز دیوار پایینی محفظه اتفاق می­افتد. همچنین لازم بذکر است که مقادیر مثبت شار تشعشعی، نشان دهنده این واقعیت است که جهت شار انتقال حرارت تشعشعی روی دیوار پایینی محفظه، از سوی دیوار به سمت محیط داخل محفظه است. بهرحال از شکل 4 به­وضوح مشخص است که با افزایش میزان غلظت بخار آب موجود در هوا، مقادیر شار تشعشعی روی دیوار پایینی محفظه بطور قابل توجه­ای کاهش می­یابند. در حقیقت، با افزایش غلظت بخار آب موجود در مخلوط هوا، ضریب جذب محیط افزایش چشمگیری یافته و در نتیجه شار تشعشعی خروجی از سطح کاهش می­یابد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 4: تاثیر غلظت بخار آب موجود در مخلوط هوا بر توزیع شار تشعشعی روی دیوار پایینی محفظه |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 5: تاثیر غلظت بخار آب موجود در مخلوط هوا بر توزیع شار تشعشعی روی دیوار بالایی محفظه |

تاثیر غلظت بخار آب موجود در مخلوط هوا بر شار تشعشعی روی دیوار بالایی محفظه در شکل 5 نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، مقادیر ماکزیمم قدر مطلق شار تشعشعی روی دیوار بالایی محفظه، دقیقا در مرکز دیوار (وسط محل شعله) رخ می­دهند. بهرحال ذکر این نکته ضروری است که مقادیر منفی شار تشعشعی روی دیوار بالایی محفظه، نشان دهنده این واقعیت است که جهت شار انتقال حرارت تشعشعی روی دیوار بالایی محفظه، از سوی محیط داخل محفظه به سمت دیوار است. بعلاوه، آنالیز شکل 5 به­وضح نشان می­دهد که هر افزایشی در مقادیر غلظت بخار آب، موجب افزایش مقادیر قدر مطلق شار تشعشعی روی دیوار بالایی محفظه می­شود.

1. **نتیجه گیری**

در این تحقیق، تاثیر غلظت بخار آب موجود در مخلوط هوا بر انتقال حرارت تشعشعی در یک محفظه دارای شعله به­صورت عددی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. توزیع ضریب جذب طیفی از داده­های موجود در پایگاه HITRAN2008 بدست آمد. برای محاسبه ضریب جذب مستقل از طیف، از مدل بسیار دقیق و کارآمد ضریب جذب میانگین پلانک استفاده شد. معادلات انرژی و انتقال تشعشع به­ترتیب با استفاده از روش­های حجم محدود و راستاهای مجزا حل شدند. خلاصه نتایج حاصل از این تحقیق به­صورت زیر بیان می­شوند:

1. هر افزایشی در میزان غلظت بخار آب منجر به افزایش قابل توجه مقادیر ضریب جذب مخلوط هوا می­شود.

2. ماکزیمم دمای نواحی شعله، مربوط به حالتی است که غلظت بخار آب مینیمم است.

3. توزیع شار تشعشعی روی دیوارهای بالایی و پایینی محفظه متقارن بوده، بطوریکه ماکزیمم مقادیر قدر مطلق شار تشعشعی روی دیوار بالایی محفظه و مینیمم مقادیر شار تشعشعی روی دیوار پایینی محفظه، دقیقا در مرکز دیوارهای مربوطه رخ می­دهد.

4. با افزیش غلظت بخار آب موجود در هوا، مقادیر شار تشعشعی روی دیوار پایینی محفظه کاهش می­یابند.

5.مقادیر قدر مطلق شار تشعشعی روی دیوار بالایی محفظه، با افزایش غلظت بخار آب موجود در هوا، افزایش می­یابند.

**Effect of water vapor concentration in the air mixture on the radiative heat transfer in an enclosure with flame using Planck mean absorption coefficient**

**Meysam Atashafrooz 1,\*, Hamidreza Hajalizadeh 2 ,Tahereh Asadi 3**

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

**2** Bandar Abbas Oil Refinery, Bandar Abbas, Iran

**3** Department of Chemical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

**\***[Meysam.atashafrooz@yahoo.com](mailto:Meysam.atashafrooz@yahoo.com) , [m.atashafrooz@sirjantech.ac.ir](mailto:m.atashafrooz@sirjantech.ac.ir)

**Abstract:**

In this study, the effects of water vapor concentration in the air mixture on the radiative heat transfer mechanism in an enclosure with flame are investigated numerically. The distribution of spectral absorption coefficient of all air mixtures studied in this research is obtained based on the information of the HITRAN2008 database and using the accurate line-by-line calculations. To calculate the absorption coefficient independent of the spectrum (gray), the accurate and efficient Planck mean absorption coefficient method is used. The radiation transfer equation is solved by applying the discrete ordinates method. In addition, the energy equation is solved using the finite volume method and iterative numerical approaches. The results of this study clearly show that the temperature field distribution in the enclosure and also distribution of radiative fluxes on the enclosure walls are significantly dependent on the values of water vapor concentration in the air mixture.

**Key words:** Water vapor, Radiative enclosure, Spectral absorption coefficient, Gray medium, Discrete ordinates method, Planck mean absorption coefficient.

**منابع**

1. Zabihi, M., Lari, K., & Amiri, H., 2017. Coupled radiative-conductive heat transfer problems in complex geometries using embedded boundary method, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 39(7), 2847-2864.
2. Mehdi Keshtkar, M., & Amiri, B., 2018. Numerical simulation of radiative-conductive heat transfer in an enclosure with an isotherm obstacle, Heat Transfer Engineering, 39(1), 72-83.
3. Li, Z. H., Li, X. L., Xia, X. L., & Sun, C., 2020. A hybrid strategy for solving radiation-conduction in irregular geometries filled with gray semitransparent medium using Monte Carlo method combined with blocked-off and embedded boundary treatments, Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 77(1), 22-41.
4. Sukumar, S., & Kar, S. P., 2020. A combined conduction–radiation model for analyzing the role of radiation on freezing of a biological tissue, Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 12(1), 011015.
5. Sun, Y., & Zhang, X., 2018. A hybrid strategy of lattice Boltzmann method and finite volume method for combined conduction and radiation in irregular geometry, International Journal of Heat and Mass Transfer, 121, 1039-1054.
6. Keshtkar, M. M., & Talebizadehsardari, P., 2018. Investigation of transient conduction–radiation heat transfer in a square cavity using combination of LBM and FVM, Sādhanā, 43(4), 1-10.
7. Penazzi, L., Blanco, S., Caliot, C., Coustet, C., El Hafi, M., Fournier, R., & Roger, M., 2019. Toward the use of Symbolic Monte Carlo for conduction-radiation coupling in complex geometries, In Proceedings of the 9th International Symposium on Radiative Transfer, RAD-19, Begel House Inc.
8. Atashafrooz, M., 2020. Influence of radiative heat transfer on the thermal characteristics of nanofluid flow over an inclined step in the presence of an axial magnetic field, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 139(5), 3345-3360.
9. Cuevas, J. C., & García-Vidal, F. J., 2018. Radiative heat transfer, Acs Photonics, 5(10), 3896-3915.
10. Fraga, G. C., Zannoni, L., Centeno, F. R., & França, F. H. R., 2019. Evaluation of different gray gas formulations against line-by-line calculations in two-and three-dimensional configurations for participating media composed by CO2, H2O and soot, Fire Safety Journal, 108, 102843.
11. Modest, M. F., & Mazumder, S., 2021. Radiative heat transfer, Academic Press.
12. Guo, J., Hu, F., Luo, W., Li, P., & Liu, Z., 2019. A full spectrum k-distribution based non-gray radiative property model for unburnt char, Proceedings of the Combustion Institute, 37(3), 3081-3089.
13. Darbandi, M., & Abrar, B., 2018. Thermal radiation transfer calculations in combustion fields using the SLW model coupled with a modified reference approach, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 205, 105-113.
14. Atashafrooz, M., Salehi, F., Asadi, T., Yang, T. F., & Yan, W. M., 2021. Gray and non-gray simulations of the combined conduction and radiation heat transfer in a complex enclosure utilizing FSK method considering the scattering influences, International Communications in Heat and Mass Transfer, 126, 105390.