



## حل مسئله تابش-نفوذ دوجزئی گذرا در فشارهای پایین بین دو صفحه تخت در یک محیط خاکستری

سهیلا محمدپور، سمیرا پایان\*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران، زاهدان

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۹  
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۸/۲۲  
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۹/۲۸

### کلمات کلیدی:

تابش-نفوذ دوجزئی گذرا  
تبادل تابشی  
روش جهات مجزا  
محیط خاکستری  
ضریب نفوذ متغیر با دما

**خلاصه:** در این مقاله یک مسئله تابش-نفوذ دوجزئی گذرا با زمان به صورت عددی حل شده است. هدف از حل این مسئله بررسی تأثیر چگالی گاز جاذب تابشی در فشارهای پایین روی توزیع دمای محیط برحسب مکان و زمان و میزان انتقال حرارت از محیط تابشی برحسب زمان، در دو حالت تعادل تابشی و دمای ثابت محیط است. به منظور حل مسئله تابش از روش جهات مجزای تصحیح شده و برای حل مسئله نفوذ گذرا با زمان از روش ضمنی حجم محدود استفاده شده است. مسئله در دو حالت گذرا و پایا مورد تحلیل قرار گرفت و مشاهده شد که تأثیر زمانی چگالی باعث تأثیر زمانی در توزیع دمای محیط با تعادل تابشی شده و این تأثیر در حالات با ضریب جذب جرمی ۱ و ۱۰ قابل صرف نظر کردن نیست. همچنین به علت در نظر گرفتن ضریب نفوذ به صورت تابعی از دما، اتصال مسئله نفوذ با تابش، منجر به وابستگی چگالی جزء جاذب به دما شده است به گونه‌ای که از تأثیرات چگالی برحسب دما نمی‌توان صرف نظر کرد. تحلیل مسئله نشان می‌دهد که اگرچه برای بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده، معادله تابش به شکل پایا حل می‌شود اما نمی‌توان از تأثیر زمانی آن به واسطه تغییرات چگالی گاز جاذب در فشارهای پایین صرف نظر کرد. با تحلیل مسئله مشخص شد که تأثیرپذیری دمایی چگالی در حالت تعادل تابشی نسبت به ضریب نفوذ بیشتر است. این تأثیر در ضرایب جذب جرمی ۱ و ۱۰ مشهود بوده و اهمیت در نظر گرفتن تابعیت ضریب نفوذ برحسب دما را تأکید می‌کند.

### ۱- مقدمه

و غیره از اهمیت زیادی برخوردار است. در بیشتر کارهای انجام شده از فرض ساده ضریب جذب ثابت در طول موج و مکان برای حل این مسائل استفاده شده است. برخی دانشمندان با بررسی مسئله انتقال حرارت مرکب با نوع انتقال حرارت تابشی بدون انحراف تابش در محیط، تأثیر پارامترهای مختلف مثل نیروهای بویانسی، عدد تابش و عدد اشمیت بر روی زمان مورد نیاز برای رسیدن به پایداری حرارتی و همچنین تغییرات سرعت جریان درون محفظه را تحلیل و بررسی کردند [۹-۶]. تعداد محدودی حالت واقعی تر ضریب جذب را بررسی کردند. آن‌ها ضریب جذب را به صورت تابع مکانی در نظر گرفتند که متناسب با غلظت مکانی گونه جاذب تغییر می‌کند [۱۰ و ۱۱]. همچنین تعداد محدود دیگر به بررسی اثر دیفیوژن بر روی تابش گازهای واقعی پرداختند. نتایج عددی نشان داد که اثرات تابش روی مشخصات میدان جریان و حرارت و غلظت مهم است و به طبیعت رژیم جریان (حرارتی در ۵٪ بخار آب، گذار در ۱۰٪ بخار آب و جرم در ۲۵٪ بخار آب) وابستگی دارد. به طور کلی آن‌ها دریافتند که تابش گاز، مقدار انتقال حرارت کل را هرچقدر که اثرات انتقال جریان به سمت رژیم گذار یا رژیم جرم پیش رود، کم می‌کند [۱۴-۱۲].

به طور واقعی در مخلوط گازها ممکن است یک گاز در گاز دیگر و یا یک گاز در یک سطح مایع یا گاز یا جامد نفوذ کند. نفوذ بخارات به سطح ذرات ارگانیک و یا اجزای ابر و یا نفوذ بخارات در هوای اتمسفر بحثی مهم در انتقال اجزای جو می‌باشد. ماده نفوذکننده ممکن است جاذب، صادرکننده و منحرف کننده انرژی تابشی باشد که این موضوع بر میزان تبادل تابش در محیط تأثیرگذار است. برخی از این ترکیبات ارگانیک و هوا، سمی و مضر هستند زیرا به محض ورود به ریه در آن رسوب می‌کنند. به منظور ارزیابی بهتر برخورد بخارات فرار، اکسیدهای مضر، ذرات ارگانیک روی آب و هوا و سلامت عمومی، دانستن میزان غلظت، توزیع سایر اجزا و ترکیبات شیمیایی مخلوط ذرات ضروری است [۱-۵].

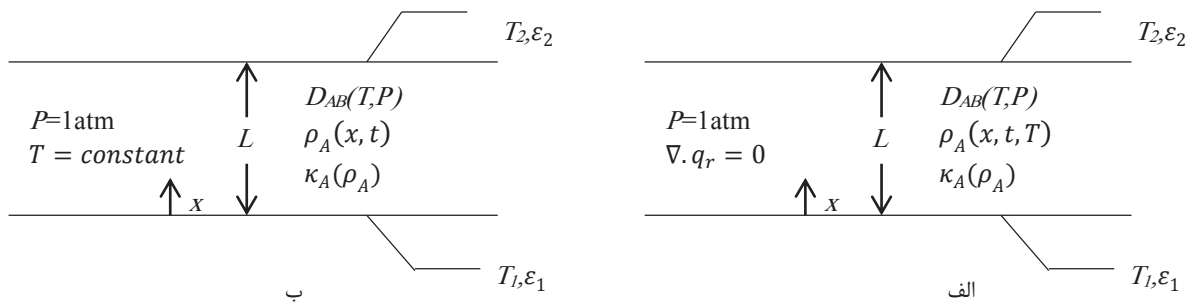
اخیراً تأثیر نفوذ دوجزئی در مسائل تابش حجمی مورد توجه قرار گرفته است زیرا این پدیده در پرتاب موشک، محفظه احتراق راکت، راکتورهای اتمی گاز خنک شده، راکتورهای هسته‌ای، محفظه‌های احتراق، رشد کریستال‌ها

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s\_payan\_usb@eng.usb.ac.ir

انتقال جرم و انرژی در سیستم‌های سیال دوتایی که اغلب در پروسه‌های مهندسی شیمی و همچنین آئرودینامیک شرکت می‌کنند و یا برای جداسازی ایزوتوپ‌ها در یک مخلوط گازی سبک (مثل هیدروژن و هلیوم) در یک محیط سبک (هوا-نیترژن)، دو پارامتر فوق مؤثر بوده و غیرقابل صرف نظر کردن می‌باشد. نتایجی که در کار آن‌ها مشاهده شد این‌گونه بود که با افزایش پرانتل، عدد اشمیت، پارامتر مکش و هارتمن، میزان سرعت افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش گراشف، نفوذ حرارتی و نفوذ ترمو، سرعت کاهش می‌یابد. با افزایش ضریب نفوذ ترمو، ضریب انتقال حرارت و دما افزایش و با افزایش پرانتل، دما کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضریب نفوذ حرارتی، ضریب انتقال جرم افزایش و با افزایش عدد اشمیت میزان ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. احمد و همکاران [۱۹] به بررسی ضریب نفوذ حرارتی و ضریب نفوذ ترمو در جریان مگنتوهیدرودینامیک که توسط یک دیوار موجی موازی احاطه شده است پرداختند. آن‌ها یک میدان مغناطیسی القایی در جهت عمود بر صفحه عمودی اعمال کردند. حل به دو بخش آرام و آشفتنه تقسیم شد که بخش آشفتنه به دلیل متحرک و موج بودن دیوار لحاظ شد و به این نتایج دست یافتند که با افزایش پارامترهای تابش، ضریب نفوذ حرارتی و ضریب نفوذ ترمو، دما کاهش می‌یابد. ضخامت لایه مرزی، تحت تأثیر ضریب نفوذ ترمو، نفوذ حرارتی و تابش حرارتی افزایش می‌یابد. نفوذ ترمو، نفوذ حرارتی و تابش حرارتی نقش اساسی در انتقال جریان و پارامترهای انتقال دارند. از دیگر کسانی که در زمینه تأثیر نفوذ حرارتی و نفوذ ترمو در جریان‌های مگنتوهیدرودینامیک کار کرده‌اند می‌توان به ژاو و همکاران [۲۰] کساواریا و همکاران [۲۱] و سرجا و همکاران [۲۲] اشاره کرد. همان‌طور که مشاهده شد تاکنون اثر دیفیوژن دوجزئی با ضریب نفوذ متغیر با فشار و دما بر روی توزیع دمای لایه تابشی با تعادل تابشی و توزیع چشمه تابشی برحسب زمان، همچنین بر روی زمان پایداری لایه در چنین مواردی مورد تحلیل قرار نگرفته است. مطرح کردن چنین موضوعی نشان می‌دهد در نظر گرفتن جزئیات تابعیت دمای خواص در مسائل تابش به‌منظور بررسی انتقال حرارت از محیط‌های با تابش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و اگرچه ممکن است آن خاصیت از نظر مقداری کوچک باشد، اما تغییرات آن باعث تغییر میزان انتقال حرارت تابشی می‌شود و در نتیجه در موارد پیچیده‌تر مانند ترکیب انتقال حرارت تابش با انواع دیگر انتقال حرارت از جمله جابجایی، بر روی رشد لایه مرزی، در نتیجه میزان کل انتقال حرارت اثرگذار است.

در این مقاله یک مسئله تابش خاکستری-نفوذ دوجزئی گذرا به‌صورت عددی حل شده است. از آنجایی که پایداری چنین لایه‌های تابشی از اهمیت

کارهای پیچیده‌تر نیز به بررسی میدان مغناطیسی و همچنین نانو سیالات در این محیط‌ها پرداختند. از جمله گانش کومار و همکاران [۱۵] به تأثیر تابش غیرخطی روی جریان لایه مرزی جابجایی مرکب نانو سیال ویسکوالاستیک با نفوذ دوجزئی روی یک صفحه کششی پرداختند. آن‌ها فرض کردند که سیال هادی الکتربسته در حضور میدان مغناطیسی القایی بوده و حرکت براونی و ترموفورز مکانیزم اصلی برای افزایش تأثیر جابه‌جایی نانو سیال در نظر گرفته شد. آن‌ها تأثیر پارامترهای وابسته روی پروفیل سرعت، دما، غلظت حل شده و غلظت اجزای نانو را بررسی کردند و به این نتایج دست یافتند که تأثیر کسر حجمی نانو ذرات و تابش غیرخطی، رشد لایه مرزی حرارتی را پایدار می‌کند. همچنین با افزایش پارامتر براون موشن، ناسلت محلی کاهش و ضریب اصطکاک محلی افزایش می‌یابد. تانگ و همکاران [۱] به تدوین و ارزیابی ضریب انتشار گازهای رقیق شده در جو و نفوذ اجزا ارگانیک برای محاسبه جذب گاز پرداختند. آن‌ها از یک مدل چندلایه جنبشی برهم‌کنش گاز به‌منظور توصیف تأثیر نفوذ گاز روی میعان ترکیبات ارگانیک با فراریت مختلف استفاده کردند و نتیجه گرفتند که انتشار فاز گاز نقش مهمی در تعیین ذرات آرسنیک آلیاژ ثانویه به‌وسیله تراوش بخارات آلی کم فرار دارد. عیسی بالا یابو و همکاران [۱۶] تأثیر مرکب نفوذ حرارتی و نفوذ ترمو روی جابجایی گذرا و انتقال جرم در یک کانال عمودی با تابش حرارتی را تحلیل کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش تابش، اختلاف دما، نفوذ حرارتی و نفوذ ترمو، سرعت و دما افزایش می‌یابد و همچنین سرعت با عدد اشمیت کاهش می‌یابد. شرما و همکاران [۱۷] تأثیر نفوذ حرارتی و نفوذ ترمو را روی جریان مگنتوهیدرودینامیک<sup>۱</sup> گذرا در یک محیط متخلخل بررسی کردند. آن‌ها فرض کردند که صفحه درون یک سیال متخلخل قرار داده شده است و با سرعت ثابت در جهت میدان مغناطیسی حرکت می‌کند و نتیجه گرفتند که برای سیال با وزن مولکولی (هوا و  $H_2$ ) اثرات نفوذ ترمو و نفوذ حرارتی غیرقابل صرف نظر کردن است. همچنین با افزایش پارامتر تابش و چشمه حرارتی، سرعت و دما افزایش می‌یابد. سارادا و همکاران [۱۸] به بررسی تأثیر نفوذ ترمو و نفوذ حرارتی در جریان مگنتوهیدرودینامیک گذرا در یک ورق متخلخل در حضور مکش و تزریق پرداختند. آن‌ها ادعا کردند که دو پارامتر نفوذ حرارتی و نفوذ ترمو در شرایط مختلف حائز اهمیت بوده و غیر قابل صرف نظر کردن می‌باشند. به‌عنوان مثال وقتی یک گونه در سطح میدان سیال که غلظت متفاوت با سیال محیط دارد تولید می‌شود، دو پارامتر اشاره‌شده مهم هستند. همچنین برای گازهای با وزن مولکولی متوسط در



**شکل ۱:** هندسه مسئله انتقال حرارت مرکب تابش-نفوذ دوجزئی گذرا بین دو صفحه تخت در یک محیط خاکستری با ضریب نفوذ متغیر با دما (الف) محیط در تعادل تابشی (ب) محیط در دمای ثابت

**Fig. 1.** Geometry of the Transient Diffusion-Radiation mixture heat transfer problem between two flat plates in a gray medium with varying diffusion coefficient with temperature a) The medium in the radiation equilibrium b) medium at constant temperature

قرار می‌گیرد. در حالت تعادل تابشی، هدف از حل مسئله، محاسبه توزیع چگالی جزء جاذب به‌عنوان یک گاز خاکستری از معادله غلظت در فشارهای پایین با ضریب نفوذ متغیر با دما در هر لحظه بوده که پس از جایگزینی در معادله ضریب جذب و حل معادله تابش در آن لحظه، توزیع دمای محیط و شارهای حرارتی سطوح را منجر می‌شود. در حالت دما ثابت حل این مسئله منجر به محاسبه چشمه تابشی در هر لحظه و شار تابشی سطوح می‌گردد. توزیع ضریب نفوذ برحسب دما از معادله حاکم بر گازهای با فشار پایین تبعیت می‌کند که تابعی از دما و فشار کل است. در این مسئله فشار ثابت و برابر ۱ بار در نظر گرفته شده است. غلظت جز جاذب بر روی مرزها مشخص بوده و با کاهش دما کاهش می‌یابد تا به مقدار صفر در مرز سرد می‌رسد. همچنین در تمام مسائل مطرح شده فاصله بین صفحات ۱ متر در نظر گرفته شده است. برای درک زمانی بهتر از حل مسئله، شکل‌های ۲-الف و ۲-ب که به ترتیب نشان‌دهنده لحظه اولیه و مدت‌زمانی پس از در معرض قرارگیری لایه، با گاز جاذب است، نمایش داده شده‌اند. شکل شماتیک ۲-الف گاز گونه B است که در لحظه اول تمام محیط را اشغال کرده است و گونه A در لحظه اولیه (شرط اولیه) در محیط وجود ندارد. اما ناگهان سطح گرم پایین در معرض نفوذ گاز A قرار می‌گیرد. شکل ۲-ب شماتیک زمانی پس از نفوذ جزء جاذب A در محیط را نشان می‌دهد.

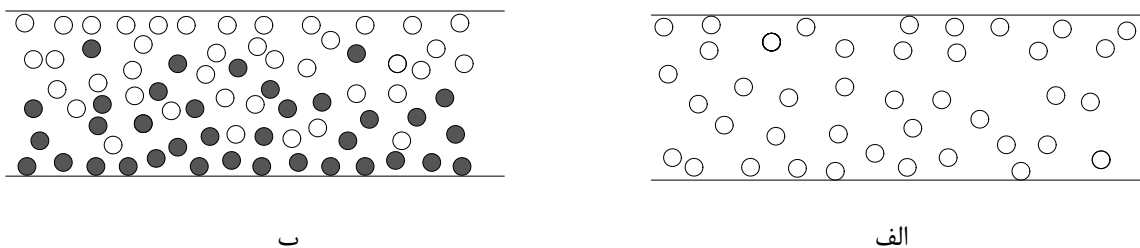
### ۳- معادلات حاکم

معادله غلظت گذرا مطابق رابطه (۱) می‌باشد و برای محاسبه چگالی جزء جاذب تابشی A مورد استفاده قرار می‌گیرد. شرایط مرزی و اولیه حل رابطه

برخوردار است و حل عددی مبتنی بر جزئیات (اعمال تغییرات ضریب نفوذ برحسب دما و فشار) به برآورد دقیق‌تر زمان پایداری آن‌ها کمک می‌کند، دو الگوریتم محاسباتی مجزا به‌منظور حل مسئله در دو حالت تعادل تابشی و دمای ثابت محیط، ارائه شده است. هدف دیگر از حل مسئله، بررسی ضریب دیفیوژن متغیر با دما در فشارهای پایین گازهای خاکستری و تأثیر آن بر روی توزیع چگالی گاز جاذب و در نتیجه تأثیر چگالی بر روی توزیع دما و شار تابشی محیط خاکستری در حالت تعادل تابشی است. همچنین تأثیر چگالی بر روی شار حرارتی خروجی از مرزها و چشمه تابشی در زمان‌های مختلف در حالت دما ثابت از اهداف دیگر حل مسئله در چنین محیط‌هایی می‌باشد. نتایج حل مشخص کرد که چگالی محیط تابع دما است و به‌این ترتیب شار حرارتی سطوح و زمان پایداری لایه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین از تأثیر زمانی بر روی توزیع دما و چشمه تابشی نمی‌توان صرف‌نظر کرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده باید تغییرات دمایی ضریب نفوذ برای تحلیل دقیق‌تر چنین مسائلی و محاسبه مدت‌زمان دقیق‌تر پایداری آن در نظر گرفته شود.

### ۲- تعریف مسئله

در این مقاله دو مسئله تابش-نفوذ دوجزئی گذرا، لذا دو الگوریتم حل برای مسائل تعریف‌شده، بیان می‌گردد. انتقال حرارت مرکب تابش-نفوذ دوجزئی گذرا را بین دو صفحه تخت در یک محیط خاکستری، در دو حالت تعادل تابشی و دما ثابت مطابق شکل ۱ در نظر بگیرید. سطوح محفظه سیاه و در دمای مشخص قرار دارند. همان‌طور که در شکل‌های ۱-الف و ۱-ب مشاهده می‌شود، محیط در دو حالت تعادل تابشی و دما ثابت مورد بررسی



شکل ۲: شماتیکی از الف) زمان اولیه لایه، وجود گاز B غیر جاذب در محیط ب) زمانی پس از نفوذ گاز جاذب A در لایه و ایجاد مخلوط گاز دوجزئی

Fig. 2. The schematic of a) the initial time of the layer, the presence of non-adsorbent gas B in the medium; b) the time after diffusion of A adsorbent gas in the layer and Creation of a binary gas mix.

بیان می‌گردد.

(۱) در روابط (۲-الف) و (۲-ب) ذکر شده است.

$$\frac{dI}{ds} = -(\kappa_a + \sigma_s)I(\Omega) + \kappa_a I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} I(\Omega')\phi(\Omega', \Omega)d\Omega' \quad (۴)$$

$$I = \varepsilon I_b + \frac{(1-\varepsilon)}{\pi} \int_{\hat{n} \cdot \Omega < 0} I(\Omega')|\hat{n} \cdot \Omega|d\Omega' \quad (۵)$$

$$\frac{d\rho_A}{dt} + \frac{d}{dx} \left( D_{AB}(T, P) \frac{d\rho_A}{dx} \right) = 0 \quad (۱)$$

$$x=0 \quad T=673K \quad \rho_A=0.3 \frac{kg}{m^3} \quad (الف)$$

$$x=L \quad T=273K \quad \rho_A=0.0 \frac{kg}{m^3} \quad (۲)$$

$$t=0 \quad T=273K \quad \rho_A=0.0 \frac{kg}{m^3} \quad (ب)$$

$$D_{AB}(T, P) = aP \left( \frac{T}{\sqrt{T_{C-A}T_{C-B}}} \right)^b \times (P_{C-A}P_{C-B})^{1/3} (T_{C-A}T_{C-B})^{5/12} \left( \frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0.5} \quad (۳)$$

برای حل عددی رابطه (۱) با شرایط مرزی و اولیه (رابطه (۲)) از روش حجم کنترل استفاده شده است. در رابطه (۱)،  $D_{AB}$  ضریب نفوذ است که برای گازهای با فشار پایین از رابطه (۳) تبعیت می‌کند. در این معادله  $M_A$  و  $M_B$  به ترتیب جرم مولکولی جزء A و B و  $T_{C-A}$ ،  $T_{C-B}$  و  $P_{C-A}$  و  $P_{C-B}$  به ترتیب دماها و فشارهای بحرانی جزء A و جزء B هستند. a و b ضرایب ثابت هستند. همچنین P فشار کل لایه گاز است که در این مقاله ۱ اتمسفر در نظر گرفته شده است.

معادله انتقال حرارت تابشی در محیط تأثیرگذار مطابق رابطه (۴) می‌باشد. در رابطه (۴) ضریب جذب  $\kappa_a$  به صورت  $\kappa_a^* (kg/m^3) = \kappa_a (1/m) = \kappa_a^* (1/m \cdot (kg/m^3))$  تعریف می‌گردد.  $\kappa_a^*$  ضریب جذب جرمی است. شرایط مرزی حاکم بر معادله تابش مطابق رابطه (۵)

در رابطه (۴)، s نشان‌دهنده مسیر پرتو و  $\square$  تابع فاز انحراف است. انتقال حرارت تابشی به روش MDOM [۲۳] فرمول‌بندی شده است و با استفاده از حجم محدود حل می‌گردد.

۳-۱- روش جهات مجزای تصحیح‌شده

معادله انتقال حرارت تابشی یک پرتو به صورت زیر است:

$$\frac{dI}{ds} = -(\kappa_a + \sigma_s)I(\Omega) + \kappa_a I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} I(\Omega')\phi(\Omega', \Omega)d\Omega' \quad (۶)$$

برای یافتن شدت تابش لازم است شرط مرزی روی دیواره‌ها معلوم باشد. برای یک سطح کدر با صدور و انعکاس پخششی، شدت مستقل از جهت است؛ بنابراین، در هر نقطه دلخواه روی سطح شرایط مرزی به صورت زیر است:

$$I = \varepsilon I_b + \frac{(1-\varepsilon)}{\pi} \int_{\hat{n} \cdot \Omega < 0} I(\Omega')|\hat{n} \cdot \Omega|d\Omega' \quad (۷)$$

$$\theta^m = (m - 1/2)\Delta\theta^m \quad (14)$$

$$\Delta\theta^m = \frac{\pi}{M_\theta} \quad (15)$$

که  $M_\theta$ ، تعداد تقسیمات زاویه  $\theta$  می‌باشد.

### ۳-۲- الگوریتم حل

#### ۳-۲-۱- الگوریتم حل مسئله در حالت تعادل تابشی

۱- با داشتن مقادیر دمای مرزها، متوسط دمای مرزها را برای تمام نقاط

داخل محیط در نظر بگیرید.  $t$  را برابر  $dt$  قرار دهید.

۲- برای زمان  $t$  با استفاده از توزیع دما ضریب نفوذ را مطابق رابطه (۳)

محاسبه کنید.

۳- معادله غلظت را با استفاده از رابطه (۱) در زمان  $t$  حل کنید و مقادیر

چگالی برای تمام حجم‌های کنترل در این زمان را به دست آورید. معادله

غلظت در این زمان تا رسیدن به همگرایی ادامه می‌یابد. (معیار همگرایی

که به صورت تفاوت غلظت‌ها در تمامی نقاط در دو تکرار متوالی است، باید

کوچک‌تر از  $10^{-9}$  باشد)

۴- مقادیر چگالی محاسبه‌شده را وارد مسئله تابش کرده و میزان شدت

تابش روی مرزها، شار تابشی و همچنین دمای محیط را در این زمان

محاسبه کنید. (در این زمان مسئله تابش تا همگرایی کامل ادامه می‌یابد.

معیار همگرایی به صورت تفاوت شدت‌های تابش بین دو تکرار متوالی است

که باید کوچک‌تر از  $10^{-9}$  شود.)

۵- معیار همگرایی را چک کنید. اگر معیار همگرایی برقرار بود حل مسئله

پایا شده است و حل به اتمام رسیده در غیر این صورت زمان را  $t=t+dt$  در

نظر بگیرید و به مرحله ۲ بازگردید. (معیار همگرایی برای دو زمان متوالی

اختلاف دماها و چگالی‌ها در نظر گرفته شده است و از مرتبه  $10^{-9}$  می‌باشد)

#### ۳-۲-۲- الگوریتم حل مسئله در حالت دمای ثابت محیط

۱- برای زمان  $t$  با استفاده از توزیع دما، ضریب نفوذ را مطابق رابطه

(۳) محاسبه کنید.

۲- معادله غلظت را با استفاده از رابطه (۱) در زمان  $t$  حل کنید و مقادیر

چگالی برای تمام حجم‌های کنترل در این زمان را به دست آورید. معادله

غلظت در این زمان تا رسیدن به همگرایی ادامه می‌یابد. (معیار همگرایی

که به صورت تفاوت غلظت‌ها در تمامی نقاط در دو تکرار متوالی است، باید

روش جهات مجزا، روشی برای تبدیل معادله انتقال تابش به یک

مجموعه از معادلات دیفرانسیل است، به طوری که انتگرال زاویه فضایی را

به سری تبدیل می‌کند. در روش جهات مجزا معادله انتقال تابشی در جهات

مختلف به صورت زیر در محیط یک‌بعدی محاسبه می‌گردد:

$$I_p^m = \frac{|\mu^m| AI_x^m + (\kappa_a I_b + S_p^m) \mathcal{V}_P}{|\mu^m| A + \beta \mathcal{V}_P} \quad (8)$$

که در رابطه (۸)،  $\beta$  ضریب استهلاک بوده و مقدار آن برای این مسئله

برابر با  $\kappa_a$  می‌باشد.

در این معادله  $\mu^m$  به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود:

$$\mu^m = \cos \theta^m \quad (9)$$

در این معادله  $S_p^m$ ، معرف عبارت چشمه تابشی است که طبق رابطه

(۱۰) تعریف می‌شود:

$$S_p^m = \frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{m=1}^M w_g^{m'} I_p^{m'} \phi^{m,m'} \quad (10)$$

همچنین شار حرارتی سطوح به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q = \int_{\Omega=0}^{4\pi} I(\Omega) \cos \theta d\Omega = \sum_{m=1}^M I^m w_h^m \quad (11)$$

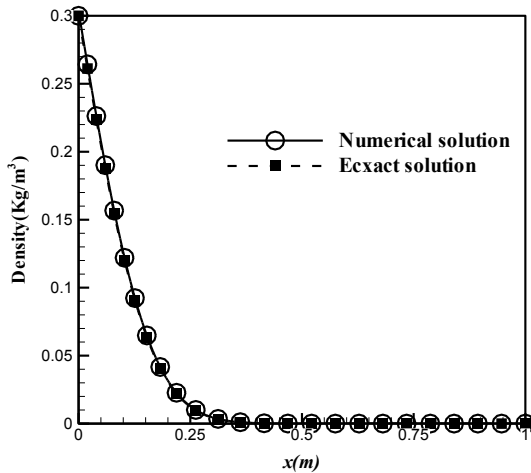
$w_h$  و  $w_g$ ، توابع وزنی می‌باشند که با استفاده از روش MDOM [۲۳]

به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$w_g^{m'} = 4\pi \sin \theta^{m'} \cos\left(\frac{\Delta\theta^m}{2}\right) \quad (12)$$

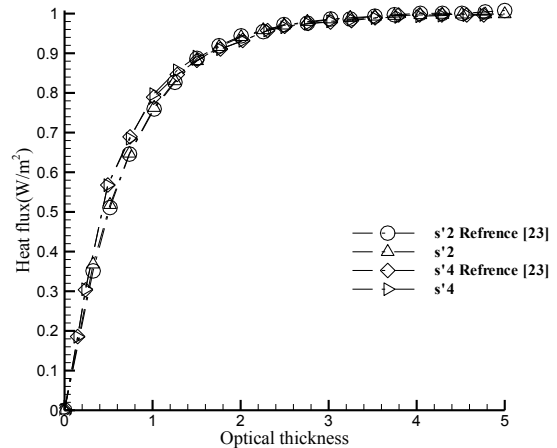
$$w_h^m = 2\pi [\sin \theta^m \cos \theta^m \sin \Delta\theta^m] \quad (13)$$

$\theta^m$  و  $\Delta\theta$  به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) تعریف می‌شوند:



شکل ۴: مقایسه حل عددی و دقیق نفوذ دوجزئی گذرا بین دو صفحه تخت با ضریب نفوذ ثابت  $10^{-5}$

Fig. 4. Comparison of numerical and exact solution of transient binary diffusion between the two flat plates with constant diffusion coefficient of  $10^{-5}$



شکل ۳: مقایسه شار تابشی مرزها با مرجع [۲۳] در حالت تابش خاکستری

Fig. 3. Comparison of radiation fluxes of boundaries with reference [23] in term of gray radiation

#### ۴-۱-۲- اعتبار سنجی مسئله نفوذ دوجزئی

نفوذ دوجزئی گذرا بین دو صفحه تخت در نظر گرفته شده است. چگالی جز A روی دیوار پایین و بالا به ترتیب  $0/3$  و صفر کیلوگرم بر مترمکعب است. شرایط اولیه چگالی جز A در محیط صفر بوده و باگذشت زمان توزیع چگالی برحسب مکان از رابطه (۱) قابل محاسبه است. مسئله نفوذ نیز با حل دقیق برای حالت ضریب نفوذ ثابت  $D_{AB}=10^{-5}$  اعتبار سنجی شده است. نتایج به دست آمده توزیع چگالی برحسب مکان در زمان ۱۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه را نشان می‌دهد که از دقت قابل قبولی برخوردار است. از آنجایی که هر کدام از مسائل فوق به تنهایی از اعتبار بالایی برخوردار هستند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب آن‌ها نیز معتبر خواهد بود.

#### ۴-۱-۳- انتخاب شبکه زمانی و مکانی مناسب برای حل مسئله تابش-

##### نفوذ دوجزئی

شبکه زمانی و مکانی مناسب برای هر ضریب جذب جرمی محاسبه شده است که این تحلیل به عنوان نمونه برای ضریب جذب جرمی  $10$  آورده شده است. ابتدا تعداد شبکه  $80$  در نظر گرفته شده است و  $4$  گام زمانی  $2/5$  و  $5$  و  $7/5$  و  $10$  ثانیه آزمایش شده است که به عنوان مثال توزیع دما برحسب مکان در شکل ۵-الف در حالت پایا در این گام‌های زمانی باهم مقایسه شده‌اند.

کوچک‌تر از  $10^{-9}$  باشد)

۳- مقادیر چگالی محاسبه شده را وارد مسئله تابش کرده و میزان شدت تابش روی مرزها، شار تابشی و همچنین چشمه تابشی را در این زمان محاسبه کنید.

۴- معیار همگرایی را چک کنید. اگر معیار همگرایی برقرار بود حل مسئله پایا شده است و حل به اتمام رسیده در غیر این صورت زمان را  $t=t+dt$  در نظر بگیرید و به مرحله ۲ بازگردید. (معیار همگرایی برای دو زمان متوالی اختلاف چگالی‌ها در نظر گرفته شده است و از مرتبه  $10^{-9}$  می‌باشد)

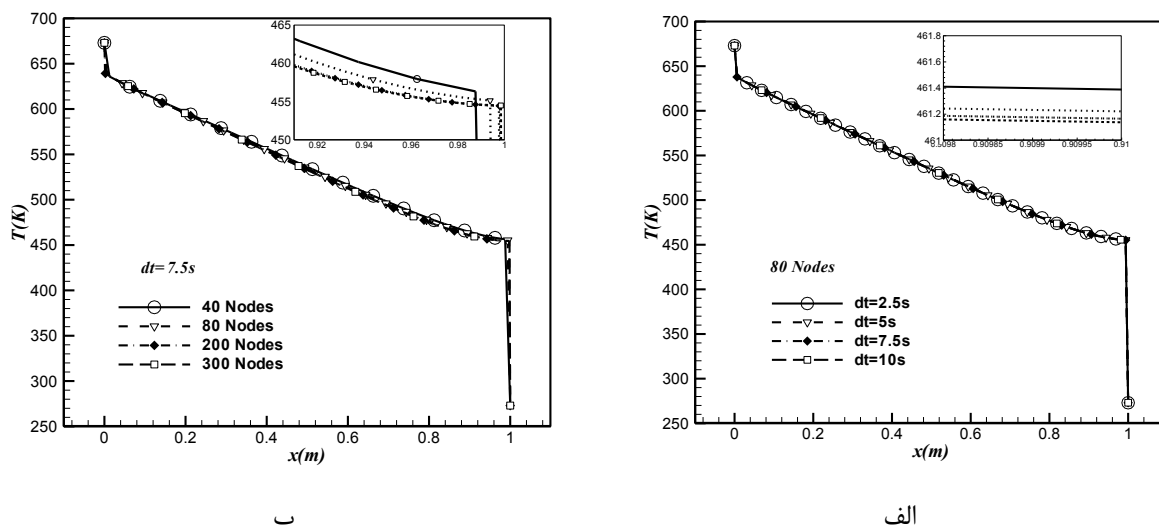
#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- اعتبار سنجی مسئله

##### ۴-۱-۱- اعتبار سنجی مسئله تابش یک بعدی

محفظه‌ای یک بعدی با دیوارهای سیاه در نظر گرفته شده است. دما روی مرز پایین و بالا به ترتیب  $T_1$  و  $T_2$  و برابر صفر کلوین می‌باشد. محیط در حالت دمای ثابت بوده و مقدار آن برابر  $64/8$  کلوین می‌باشد و هدف به دست آوردن شار حرارتی بی بعد برحسب ضخامت اپتیکی برای دو حالت  $S'_2$  و  $S'_4$  است. مسئله تابش مطابق شکل ۳ با مقاله مرجع [۲۳] اعتبارسنجی شده است که از دقت خوبی برخوردار است.





شکل ۵: توزیع دما (الف) در یک شبکه مکانی در گام‌های زمانی مختلف (ب) در یک زمان در شبکه‌های مکانی مختلف

Fig. 5. Temperature distribution a) In a spatial network at different time b) At one time in different spatial networks

#### ۴-۲-۱- تأثیر زمانی توزیع دما در مقدار $K_a^*$

همان‌طور که از شکل‌های ۶-الف تا ۶-ج مشاهده می‌شود با افزایش ضریب جذب جرمی بر میزان تأثیر زمانی توزیع دما در محیط تابشی افزوده می‌شود و این موضوع به دلیل افزایش ضخامت اپتیکی محیط تابشی و کاهش تأثیر سطوح و افزایش تأثیر محیط جاذب و جزء A در محیط است. همان‌طور که از نمودار ۶-الف مشخص است با افزایش زمان به سمت حالت پایا توزیع دما اندکی از حالت ثابت فاصله می‌گیرد و مدت‌زمان پایا شدن (پایداری لایه) ۴ ساعت و ۴۰ دقیقه است. این موضوع نشان می‌دهد با وجود ضریب جذب جرمی کوچک، توزیع چگالی جزء جاذب تغییراتی دارد که بر مدت‌زمان پایداری لایه می‌افزاید. با افزایش ضریب جذب جرمی به ۱ همان‌طور که از شکل ۶-ب مشخص است حتی در زمان‌های پایین نیز توزیع دما از حالت ثابت فاصله داشته که این تفاوت در نزدیکی دیوار گرم و به علت بالاتر بودن ضریب نفوذ در نزدیکی دیوار گرم و لذا بالا بودن چگالی جزء جاذب A در این ناحیه است. با افزایش زمان، تغییرات دما به علت نفوذ جزء جاذب در لایه‌های سردتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد و از حالت یکنواخت خارج می‌شود. نمودار ۶-ج تغییرات بیشتری در دمای محیط را به علت افزایش ضریب جذب جرمی نشان می‌دهد. البته پرس دمایی به‌واسطه ضخامت اپتیکی پایین بخصوص در مرز سرد همچنان قابل مشاهده است اما با افزایش ضریب جذب جرمی این پرس کاهش می‌یابد. با مقایسه نمودارهای دما در دو حالت ضریب جذب جرمی ۱ و ۱۰ مشاهده

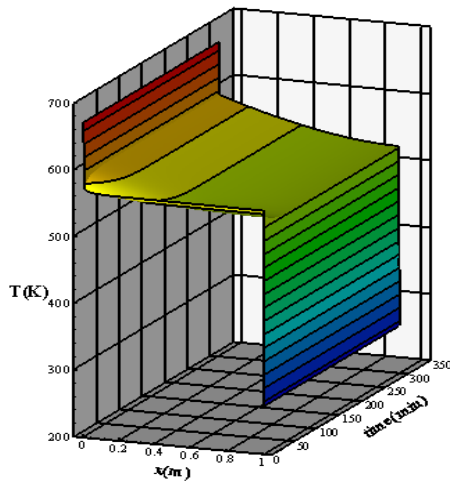
همان‌طور که دیده می‌شود، تفاوت آشکاری در گام‌های زمانی در یک شبکه وجود ندارد لذا به علت صرفه‌جویی در زمان و در ضمن دقت کافی، بازه زمانی ۷/۵ ثانیه انتخاب شده است. سپس برای این گام زمانی ۴ شبکه ۴۰ و ۸۰ و ۲۰۰ و ۳۰۰ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از شکل ۵-ب مشاهده می‌شود، پس از ۲۰۰ شبکه نتایج بر هم منطبق هستند. لذا برای ضریب جذب جرمی ۱۰، شبکه فضایی ۲۰۰ و گام زمانی ۷/۵ ثانیه انتخاب می‌شود. این کار برای ضریب جذب جرمی ۱/۰ انجام شد و همان اعداد به دست آمد. اما برای ضریب جذب جرمی ۰/۱ که حساسیت کمتری به زمان دارد گام زمانی بزرگتر ۳۰ ثانیه و شبکه ۲۰۰ به‌دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده به شبکه فضایی حساس نبوده و تقسیم‌بندی زاویه‌ای ۲۰ شبکه فضایی انجام شده است.

#### ۴-۲- نتایج مسئله

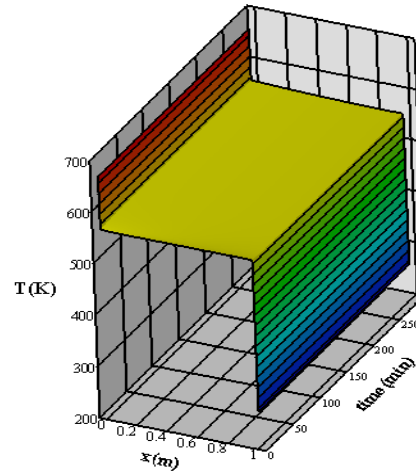
برای تحلیل مسئله تابش-نفوذ دوجزئی از تغییرات چند متغیر استفاده شده است. این متغیرها در دو حالت تعادل تابشی و دما ثابت متفاوت‌اند.

##### الف- حالت تعادل تابشی

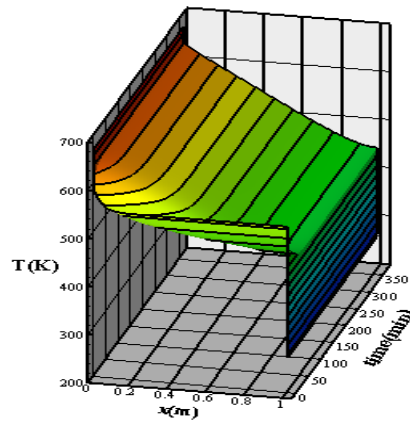
در این قسمت تأثیر حل ترکیبی تابش-نفوذ دوجزئی با رسم نمودارهای ضریب نفوذ و چگالی برحسب دما در زمان‌های متفاوت و رسم نمودار دما برحسب مکان در زمان‌های متفاوت در سه ضریب جذب جرمی مختلف مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.



ب



الف



ج

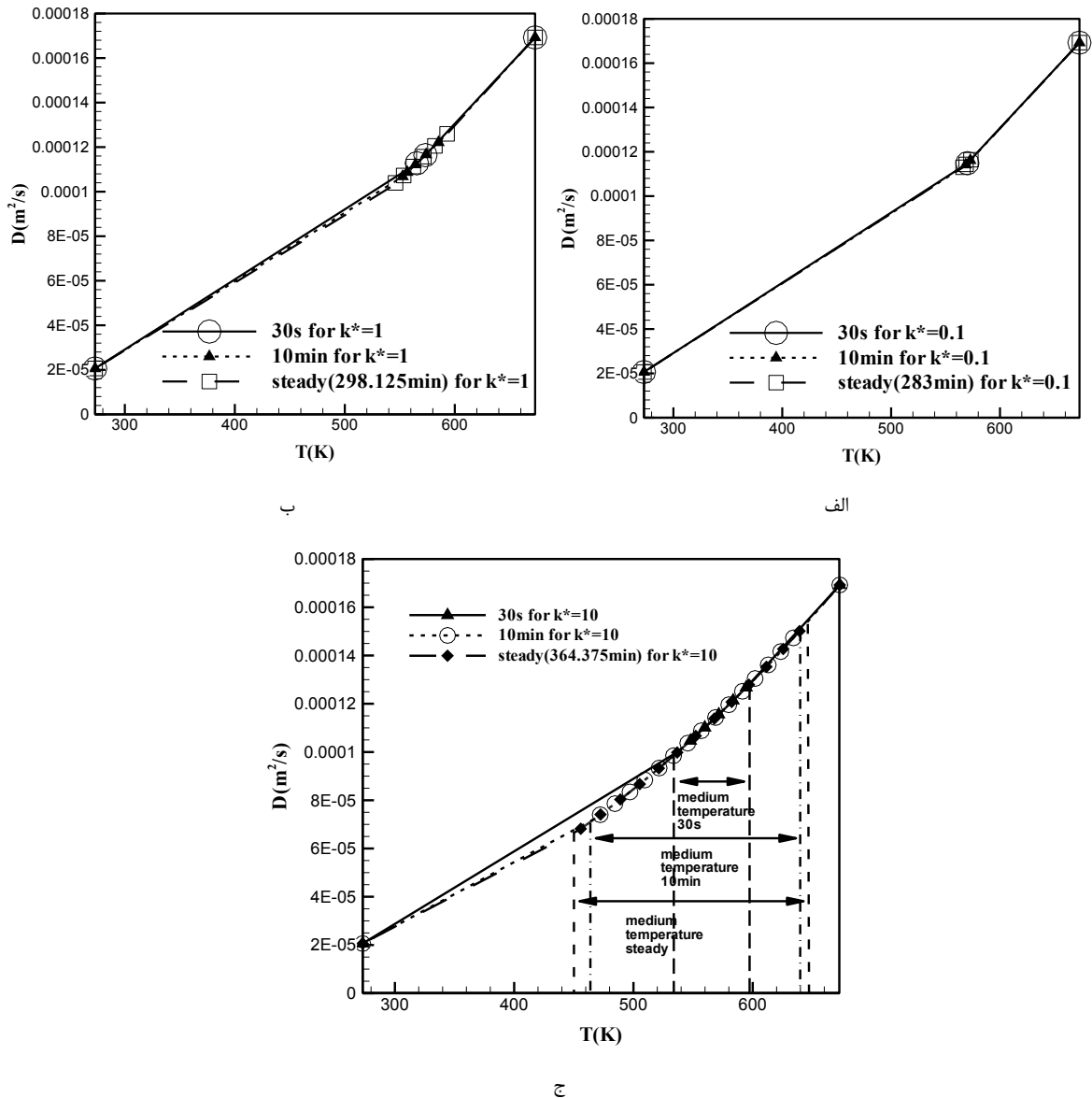
شکل ۶: تغییرات دما برحسب مکان و زمان در حالت تعادل تابشی محیط، الف)  $\kappa_a^* = 0.1$  ب)  $\kappa_a^* = 1.0$  ج)  $\kappa_a^* = 10.0$

Fig. 6. Temperature changes in terms of location and time in the medium radiative equilibrium a)  $\kappa_a^* = 0.1$  b)  $\kappa_a^* = 1.0$  c)  $\kappa_a^* = 10.0$

۴-۲-۲- تأثیر زمانی ضریب نفوذ برای مقدار  $\kappa_a^*$  همان طور که از شکل های ۷-الف تا ۷-ج مشخص است میزان ضرایب نفوذ بسیار کوچک بوده و تحت تأثیر دما تغییر زیادی نمی کنند. این تغییرات در شکل های ۷-الف و ۷-ب قابل مشاهده نبوده و اندکی در شکل ۷-ج دیده می شود. این نمودارها مشخص می کند که شکل نمودار به دما حساس بوده اما مقدار آن زیاد تحت تأثیر نیست و این به واسطه رابطه ضریب نفوذ است که تابعی از خواص جزء جاذب علاوه بر دما نیز می باشد و برای گازها در فشارهای پایین مقدار ضریب نفوذ کوچک است؛ لذا تابعیت دمایی آن روی

می شود که برای یک زمان مشخص مثلاً ۱۰ دقیقه بیش از نیمی از محفظه هنوز توزیع دمای یکنواخت را در ضریب جذب جرمی ۱ داراست درحالی که در همان زمان کمتر از نیمی از محفظه توزیع یکنواخت دما در ضریب جرمی ۱۰ را داراست. همچنین مقایسه زمان پایا شدن دما (پایداری لایه) در شکل های ۶-الف تا ۶-ج نشان دهنده آن است که هر چه ضریب جذب جرمی افزایش یابد مدت زمان بیشتری برای پایا شدن لایه به علت چگال بودن آن همان طور که انتظار می رفت لازم است. لذا گذرا در نظر گرفتن مسئله ضروری است.



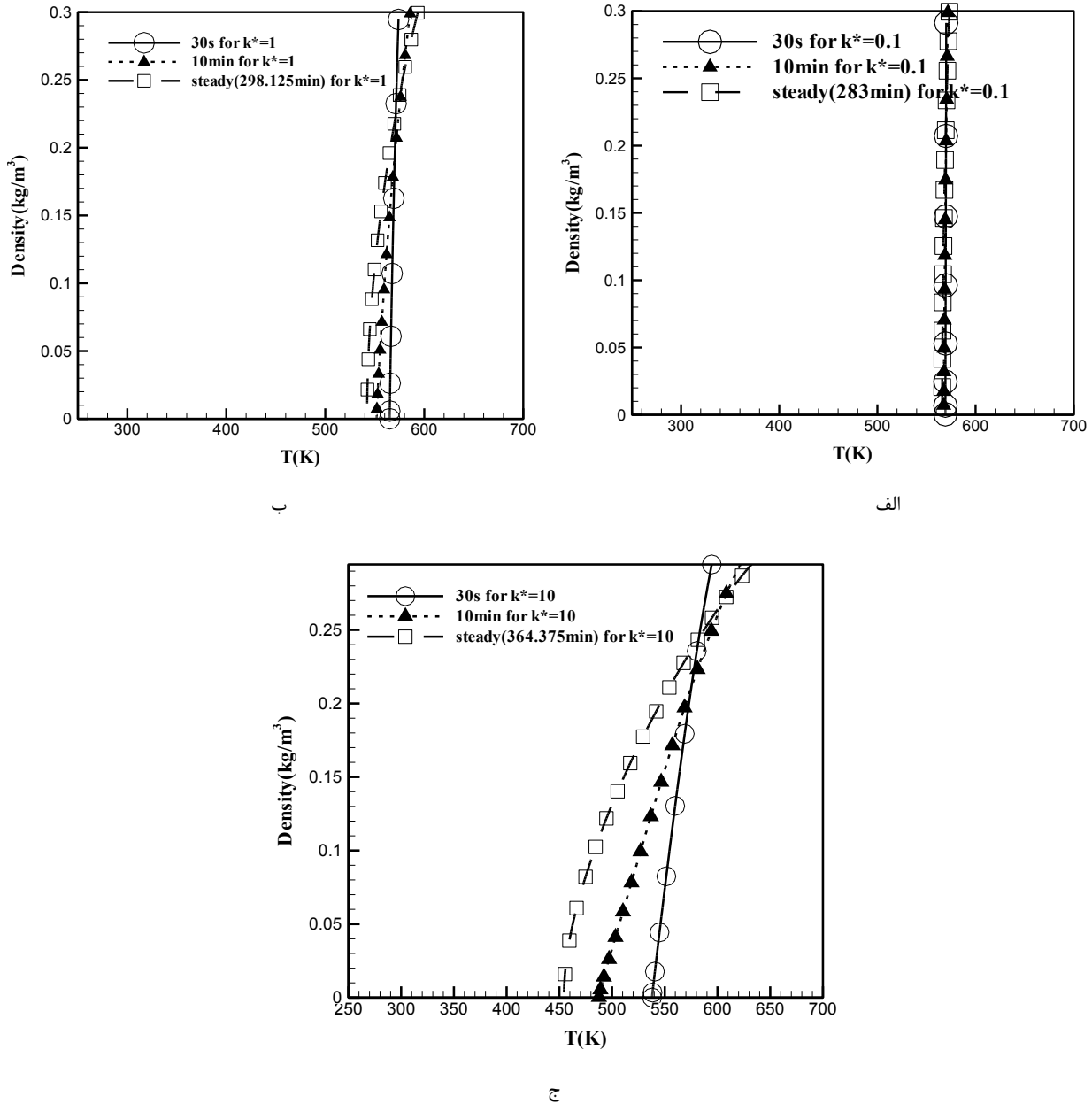


شکل ۷: تغییرات ضریب نفوذ برحسب دما در حالت تعادل تابشی محیط، الف)  $\kappa_a^* = 0.1$  ب)  $\kappa_a^* = 1.0$  ج)  $\kappa_a^* = 10.0$

Fig. 7. Diffusion coefficient changes in terms of temperature in the medium radiative equilibrium a)  $\kappa_a^* = 0.1$  b)  $\kappa_a^* = 1.0$  c)  $\kappa_a^* = 10.0$

دمای محیط در ۳۰ ثانیه حدوداً در بازه ۵۴۰-۶۰۰ است و بقیه محیط در دمای ثابت قرار دارند و پرش دمایی در نقاط مرزی نیز مشهود است. دمای محیط با نمادهای مثلثی بر روی شکل ۷-ج در این زمان نشان داده شده است. در زمان ۱۰ دقیقه همان‌طور که از شکل ۶-ج مشخص است، کمی بیش از ۷۵ درصد طول محفظه تغییرات دمایی دارد و این تغییرات دما تقریباً در بازه ۴۷۰-۶۴۰ است. لذا تابعیت ضریب نفوذ تغییر می‌کند. دمای محیط بر روی شکل ۷-ج در این زمان با نمادهای دایره‌ای مشخص شدند و همچنان پرش دمایی در مرزها دیده می‌شود. در حالت پایا، با رجوع به شکل ۶-ج

چگالی تأثیرگذار است و شکل تغییرات چگالی برحسب دما را تغییر می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۷-ج مشخص است، نمودار ضریب جذب در زمان‌های ابتدایی با حالت پایا تفاوت دارد. این تفاوت با گذشت زمان در بازه‌های دمایی پایین نمود بیشتری دارد. علت این موضوع نفوذ جزء جاذب با ضریب جرمی بالا در لایه‌های سردتر است که در نتیجه آن، تغییرات دما در لایه‌های سردتر ایجاد شده است. نتیجه این تغییرات دما، تغییر ضریب نفوذی است که تابع دما می‌باشد. برای وضوح بیشتر نواحی تغییر دما در شکل ۶-ج را می‌توان با شکل ۷-ج مقایسه کرد. با مقایسه این دو نمودار، مشخص می‌شود تغییرات



شکل ۸: تغییرات چگالی برحسب دما در حالت تعادل تابشی محیط در سه زمان، الف)  $\kappa_a^* = 0.1$  ب)  $\kappa_a^* = 1.0$  ج)  $\kappa_a^* = 10.0$

Fig. 8. Density changes in terms of temperature in the medium radiative equilibrium a)  $\kappa_a^* = 0.1$  b)  $\kappa_a^* = 1.0$  c)  $\kappa_a^* = 10.0$

#### ۴-۲-۳- تأثیر زمانی چگالی در مقدار $\kappa_a^*$

همان‌طور که از نمودارهای توزیع چگالی برحسب دما مشخص است، حتی در ضرایب جذب جرمی پایین نیز چگالی لایه تحت تأثیر دما قرار دارد. اگرچه این تغییرات همان‌طور که از شکل ۸-الف مشخص است اندک است. همان‌طور که از شکل‌های ۸-الف تا ۸-ج مشخص است به‌واسطه تفاوت شدید دما در سطح و گاز نزدیک آن چگالی لایه نیز دارای تغییرات شدید یا

مشاهده می‌شود بیش از ۹۵ درصد محفظه تحت تأثیر گاز جاذب دارای تغییر دما بوده و این تغییر دما حدوداً در بازه ۴۵۰-۶۴۵ قرار دارد. دمای محیط در شکل ۷-ج در این زمان با نمادهای مربعی مشخص شده‌اند. همان‌طور که مشخص است به علت نبود ضخامت اپتیکی بالا، بین گاز روی مرز و دمای مرز پرش دمایی وجود دارد که البته با گذشت زمان و نفوذ گاز جاذب در لایه‌های با دمای پایین از این تفاوت کاسته می‌شود.

**Table 1. The thermal flux of the surface in a few different times in the medium radiant equilibrium for 3 mass absorption coefficients**

**جدول ۱:** شار حرارتی سطح در چند زمان متفاوت در حالت تعادل تابشی محیط برای ۳ ضریب جذب جرمی

حالت پایا	۱۰ دقیقه	۳۰ ثانیه	$t$ (زمان)
۱۱۱۴۹/۴۵	۱۱۲۱۹/۱۷	۱۱۲۹۶/۷۱	$\kappa^*=0.1$
۹۹۰۵/۱۲	۱۰۴۴۸/۱۸	۱۱۱۰۴/۶۸	$\kappa^*=1$
۴۸۲۹/۰۵	۶۵۷۵/۲۹	۹۶۳۸/۱	$\kappa^*=10$

حتی اگر به واسطه ثابت بودن دمای لایه، ضریب نفوذ در تمام لایه ثابت باشد.

۴-۲-۵- تأثیر زمانی چشمه تابشی در ۳ مقدار  $\kappa_a^*$

همان طور که از نمودارهای دیورژانس شار حرارتی در شکل‌های ۱۰-۱-۱۰ ج-۱۰ مشخص است، حتی با ثابت بودن دما و در نتیجه ضریب جذب همچنان تأثیرات زمانی چگالی بر روی میزان چشمه تابشی حتی در ضرایب جرمی پایین قابل صرف نظر کردن نیست و این تغییرات باید در نظر گرفته

پرش در نزدیک مرزها است. با افزایش ضریب جذب جرمی همان طور که در شکل‌های ۸-ب و ۸-ج دیده می‌شود بر تأثیرپذیری چگالی لایه بر حسب دما افزوده شده است. البته پرش دمایی به واسطه ضخامت اپتیکی پایین و تأثیر دما بر روی چگالی بخصوص در مرز سرد همچنان قابل مشاهده است اما با افزایش ضریب جذب جرمی این پرش کاهش می‌یابد.

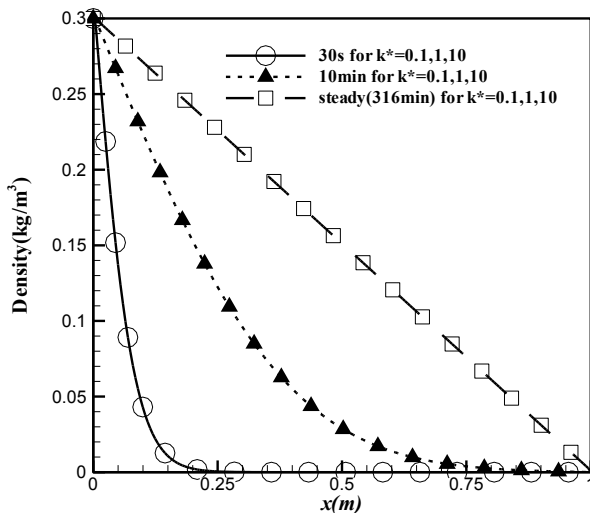
همان طور که از نتایج جدول ۱ مشخص است با افزایش زمان میزان شار حرارتی خروجی از مرزها به واسطه افزایش جذب تابش داخل محیط، کاهش می‌یابد. در حالت ضریب جذب جرمی ۱ این میزان از زمان ۳۰ ثانیه تا حالت پایا تنها ۱۰/۸ درصد کاهش می‌یابد اما برای ضریب جذب جرمی ۱۰ این میزان ۴۹/۸ درصد است. این جدول زمان پایداری لایه گاز را در ضرایب جذب جرمی مختلف نشان می‌دهد.

ب) حالت دمای ثابت در لایه

از آنجایی که در این قسمت، چگالی تنها تابعی بر حسب زمان و مکان است، حساسیت به زمان افزایش می‌یابد لذا در هر سه ضریب جذب، بازه زمانی ۷/۵ ثانیه، برای حل انتخاب شده است.

۴-۲-۴- تأثیر زمانی چگالی در ۳ مقدار  $\kappa_a^*$

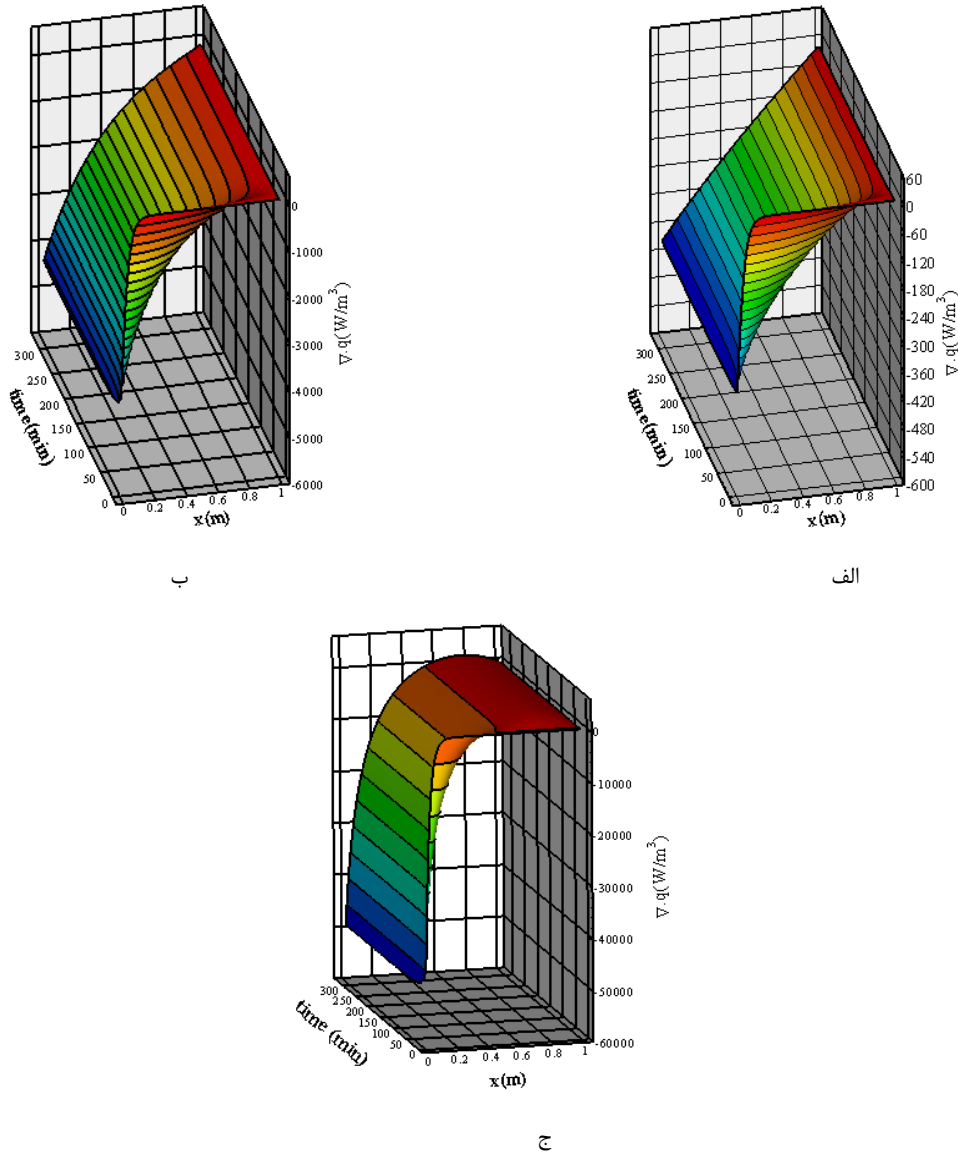
در شکل ۹ مشاهده می‌شود که در حالت پایا چگالی به صورت خطی بر حسب مکان تغییر می‌کند زیرا طبق معادله غلظت، در این حالت ضریب نفوذ ثابت و در نتیجه چگالی تابع دما نیست. همان طور که از شکل زیر مشخص است به علت مستقل بودن معادله غلظت از معادله تابش، چگالی گاز جاذب در سه ضریب جذب جرمی مشابه است. زمان پایدار شدن نیز در هر ۳ ضریب جذب جرمی ۱/۰، ۱/۰، ۱۰ یکسان است. نتایج این نمودارها حاکی از این است که باید تغییرات چگالی بر حسب زمان در نظر گرفته شود،



**شکل ۹:** تغییرات چگالی بر حسب مکان در حالت دمای محیط ثابت، برای سه ضریب

جذب جرمی الف)  $\kappa_a^* = 0.1$  ب)  $\kappa_a^* = 1.0$  ج)  $\kappa_a^* = 10.0$

**Fig. 9. Density changes based on location in a constant temperature of medium for three mass-absorption coefficients a)  $\kappa_a^* = 0.1$  b)  $\kappa_a^* = 1.0$  c)  $\kappa_a^* = 10.0$**

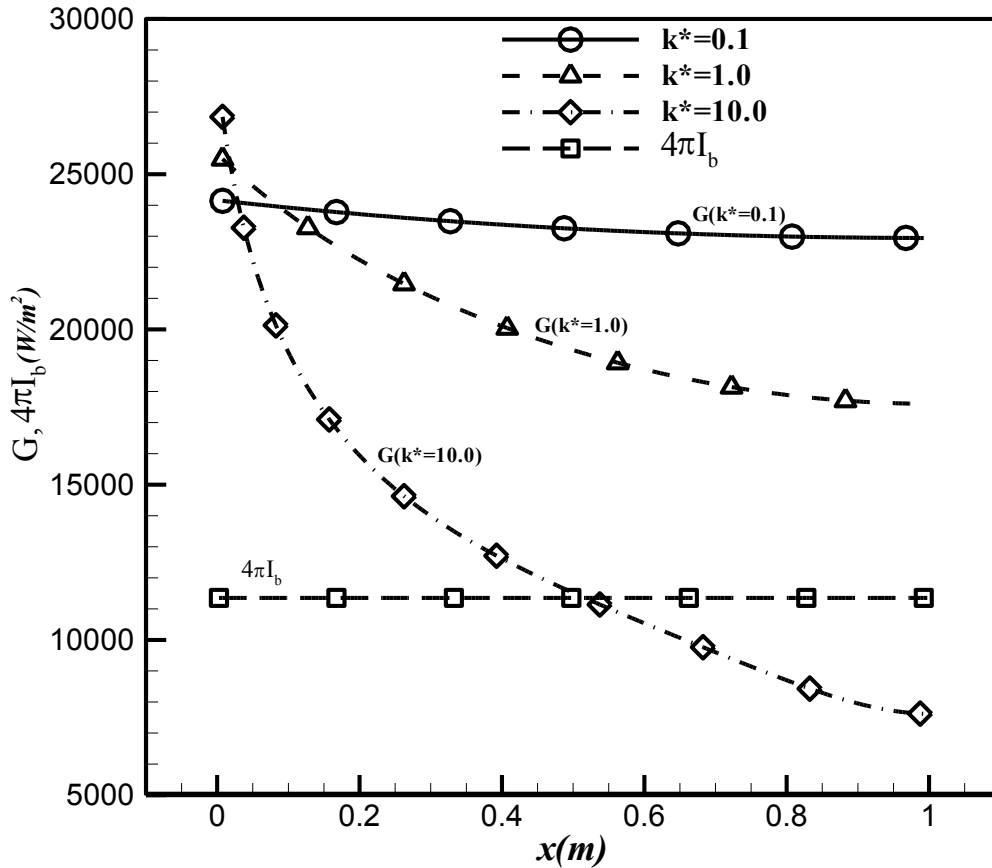


شکل ۱۰: تغییرات چشمه تابشی برحسب مکان و زمان در حالت دمای محیط ثابت، الف)  $\kappa_a^* = 0.1$  ب)  $\kappa_a^* = 1.0$  ج)  $\kappa_a^* = 10.0$

Fig. 10. Radiation source changes in terms of location and time in the medium constant tempera a)  $\kappa_a^* = 0.1$  b)  $\kappa_a^* = 1.0$  c)  $\kappa_a^* = 10.0$

علاوه بر موارد ذکرشده، نموداری از شار تابشی فرودی در حالت پایا در سه ضریب جذب جرمی و همین‌طور بیشینه شار تابشی صادرشده در شکل ۱۱ برای بررسی رفتار گاز در محیط در حالت دمای ثابت ترسیم شده است. مطابق رفتار گاز، با فاصله گرفتن از سطح گرم از میزان انرژی صادرشده به محیط (شار تابش فرودی) کاسته می‌شود. این تغییرات که به‌صورت تغییرات شار تابش فرودی است، در هر سه نمودار شکل ۱۱ مشخص است. همان‌طور که از نمودار شار تابش فرودی در شکل ۱۱ مشخص است هر چه بر میزان ضریب جذب جرمی افزوده می‌شود، این کاهش انرژی شدیدتر می‌گردد.

شود. در این حالت معادله غلظت به‌صورت مستقل از دما و لذا معادله تابش حل می‌شود و برای هر سه ضریب جذب تابعیت آن یکسان است، بنا بر دلیل ذکرشده برخلاف حالت تعادل تابشی زمان پایدار شدن لایه در ۳ ضریب جذب جرمی متفاوت ۰/۱ و ۱/۰ و ۱۰، یکسان است. همچنین همان‌طور که مشخص است میزان چشمه تابشی در ضریب جذب جرمی ۱۰ از همه بیشتر و توزیع آن حتی در حالت پایا نیز غیرخطی است، زیرا میزان جذب در محیط بیشتر از حالات دیگر بوده که منجر به تغییرات غیرخطی در معادله تابش می‌شود.



شکل ۱۱: توزیع شار حرارتی فرودی در ضرایب جذب جرمی ۰/۱، ۱/۰ و ۱۰ در حالت دمای ثابت محیط و مقایسه آن‌ها با شار تابشی صادر شده در محیط

Fig. 11. Incident thermal flux distribution in the mass absorption coefficients of 0.1, 1.0 and 10 at the constant temperature of medium and comparing them with the radiation flux exported in the medium

ضریب جذب جرمی ۱۰) به وجود آمده است و نقطه بیشینه‌ای بر روی نمودار توزیع دیورژانس شار تابشی در ضریب جذب جرمی ۱۰ در زمان پایداری لایه و ۱۰ دقیقه (اندکی قابل مشاهده است) ایجاد می‌گردد. در بقیه ضرایب جذب جرمی همان‌طور که از شکل ۱۱ مشخص است و همچنین در تمام ضرایب جذب جرمی در لحظات ابتدایی به‌عنوان نمونه ۳۰ ثانیه نیز چنین رفتاری به علت اینکه محیط تقریباً شفاف است و گاز جاذب در محیط نفوذ نکرده است و یا ضریب جذب جرمی بسیار کوچک است، مشاهده نمی‌شود.

همان‌طور که از نتایج جدول ۲ مشخص است با افزایش زمان، میزان شار حرارتی خروجی از مرزها به‌واسطه افزایش جذب تابش داخل محیط، کاهش می‌یابد. جدول ۲ شار حرارتی از مرز با دمای پایین‌تر را نشان می‌دهد. در حالت ضریب جذب جرمی ۱ این میزان از زمان ۳۰ ثانیه تا حالت پایا تنها ۱۶/۵ درصد کاهش می‌یابد اما برای ضریب جذب جرمی ۱۰ این میزان ۶۱/۴۸ درصد بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت دما ثابت

همان‌طور که از مقایسه صدور تابش (مقداری ثابت در دمای ثابت محیط) مشخص است تنها در ضریب جذب جرمی ۱۰، نقطه‌ای وجود دارد که به علت کاهش بیش‌ازحد تابش فرودی، میزان صدور و جذب با هم برابرند که این مکان تقریباً در ۰/۵۵ بوده و از هر دو نمودار در شکل‌های ۱۰-ج و ۱۱ در حالت پایا مشخص است. اگر محیط دارای ضریب جذب ثابت (مستقل از چگالی) باشد، پس از برابری شار تابش صادر شده و فرودی به علت افزایش ضخامت اپتیکی محلی با دور شدن از سطح گرم، همچنان از میزان شار تابش فرودی کاسته شده و مقدار دیورژانس شار تابشی مثبت می‌شود؛ اما در مسئله حاضر به علت تابعیت ضریب جذب به چگالی و کم شدن آن نزدیک سطح سرد و صفر بودن آن در دمای سطح سرد، دیورژانس شار تابشی مجدداً کاهش یافته و در سطح سرد به صفر می‌رسد. به‌طور خلاصه به علت توزیع چگالی ماده جاذب در محیط و در نتیجه توزیع جذب غیریکنواخت چنین تغییراتی (عدم تطابق رفتار دیورژانس شار تابش و شار تابشی فرودی در

**Table 2. The thermal flux of the surface in a few different times in the medium constant temperature for 3 mass absorption coefficients**

**جدول ۲:** شار حرارتی سطح سرد در چند زمان متفاوت در حالت دمای محیط ثابت، برای ۳ ضریب جذب جرمی

حالت پایا	۱۰ دقیقه	۳۰ ثانیه	$t$ (زمان)
۱۱۰۵۹/۰۸	۱۱۱۹۲/۰۷	۱۱۲۸۸/۸۱	$\kappa^*=۰/۱$
۹۲۱۸/۴۶	۱۰۲۰۰/۰۰	۱۱۰۴۵/۰۶	$\kappa^*=۱$
۳۵۱۸/۹۵	۵۳۷۵/۷	۹۱۳۷/۲۴	$\kappa^*=۱۰$

(دمای متوسط دو سطح) این درصد کاهش، بیشتر است.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله مسئله تابش-نفوذ دوجزئی در محیط‌های خاکستری بین دو صفحه تخت حل شده است. ضریب نفوذ به صورت تابعی از دما در فشارهای پایین در نظر گرفته شده است. از روش حجم محدود برای حل معادلات تابش و غلظت استفاده شده است و از روش جهات مجزای تصحیح شده به منظور مدل سازی عددی مسئله تابش بهره گرفته شده است. این مقاله به بررسی میزان تأثیر چگالی گاز جاذب تابشی در فشارهای پایین روی توزیع دمای محیط و چشمه تابشی برحسب مکان و زمان و میزان انتقال حرارت از یک محیط تابشی برحسب زمان پرداخته است. با تحلیل دو حالت گذرا و پایا مشخص شد که تأثیر زمانی چگالی منجر به تأثیر زمانی در توزیع دمای محیط و یا چشمه تابشی شده و هر چه میزان جذب جرمی محیط بالاتر می رود، این تأثیر چگالی در محیط با تعادل تابشی، غیرقابل صرف نظر کردن می شود. از طرفی به دلیل وابسته بودن ضریب نفوذ به دما، چگالی نیز به دما وابسته می گردد به گونه ای که از تأثیر چگالی برحسب دما در محیط با دمای متغیر نمی توان صرف نظر کرد. لذا این مقاله، اهمیت در نظر گرفتن تابعیت ضریب نفوذ برحسب دما، همچنین تحلیل گذرای مسائل تابش-نفوذ با گازهای جاذب تابشی را تأیید می کند. به طور خلاصه خروجی این مقاله، ارائه الگوریتم محاسباتی جهت پیش بینی زمان پایداری لایه های تابشی یک بعدی خاکستری به همراه نفوذ گاز جاذب با در نظر گرفتن ضریب نفوذ آن با تابعیت دما و فشار کل می باشد. همچنین، از اهداف دیگر الگوریتم، محاسبه توزیع دما و چشمه حرارتی و در نتیجه بررسی رفتار تابشی لایه و محاسبه شار خروجی در معرض چنین مخلوط‌های گازی است. مطرح

کردن چنین موضوعی نشان می دهد در نظر گرفتن جزئیات تابعیت دمای خواص در مسائل تابش به منظور بررسی انتقال حرارت از محیط‌های با تابش از اهمیت ویژه ای برخوردار است و اگر چه ممکن است آن خاصیت از نظر مقداری کوچک باشد اما تغییرات آن باعث تغییر میزان انتقال حرارت تابشی می شود. در این مقاله، زمان پایداری لایه های تابشی، توزیع چشمه تابشی، توزیع دما و شار حرارتی خروجی از مرزها با نفوذ گازهای دوجزئی برای دو حالت دما ثابت و تعادل تابشی به دقت محاسبه شد. عمده نتایج حاصل از این بررسی به صورت زیر خلاصه می شود:

### الف- حالت تعادل تابشی

- ۱- با افزایش ضریب جذب جرمی بر میزان تأثیر زمانی توزیع دما در محیط تابشی افزوده می گردد.
  - ۲- با افزایش ضریب جذب جرمی مدت زمان بیشتری برای پایا شدن لایه لازم است لذا گذرا در نظر گرفتن مسئله حائز اهمیت است.
  - ۳- ضریب نفوذ علاوه بر دما به خواص جزء جاذب نیز وابسته است و به همین دلیل در گازهای با فشار پایین مقدار ضریب نفوذ کوچک است. تابعیت دمایی ضریب نفوذ روی چگالی تأثیرگذار است و شکل تغییرات چگالی برحسب دما را تغییر می دهد.
  - ۴- به دلیل تفاوت شدید دما در سطح و گاز نزدیک آن در اثر پایین بودن ضخامت اپتیکی، چگالی لایه نیز دارای تغییرات شدید یا پرش در نزدیک مرزهاست. با افزایش ضریب جذب جرمی میزان تغییرات چگالی لایه برحسب دما افزایش می یابد.
  - ۵- با افزایش زمان، به علت افزایش جذب، میزان شار حرارتی خروجی از مرزها کاهش می یابد.
- ب- دما ثابت



$\kappa_A$	ضریب جذب، $1/m$	۱- در حالت دما ثابت با ثابت بودن ضریب نفوذ تأثیرات زمانی چگالی بر روی میزان تابش و چشمه تابشی حتی در ضریب جذب جرمی پایین قابل صرف نظر کردن نیست.
$\sigma_s$	ضریب انحراف، $1/m$	۲- برخلاف حالت تعادل تابشی زمان پایا شدن لایه در ۳ ضریب جذب جرمی متفاوت، $1/0.01$ و $10$ یکسان است.
$\Omega$	زاویه فضایی	۳- در حالت پایا چگالی به صورت خطی برحسب مکان تغییر می کند و تغییرات چگالی برحسب زمان در ضرایب جذب جرمی متفاوت، به دلیل حل مستقل معادله غلظت از معادله تابش یکسان است.
$\varepsilon$	ضریب صدور	
$\theta$	زاویه پرتو	
$\mu$	کسینوس زاویه پرتو	
$\nabla q_r$	دیورژانس شار تابشی، $W/m^3$	

## منابع

## ۶- فهرست علائم

- |   |          |                               |
|---|----------|-------------------------------|
| [1] M. Tang, M. Shiraiwa, U. Pöschl, R. Cox, M. Kalberer, Compilation and evaluation of gas phase diffusion coefficients of reactive trace gases in the atmosphere: Volume 2. Diffusivities of organic compounds, pressure-normalised mean free paths, and average Knudsen numbers for gas uptake calculations, Atmospheric Chemistry and Physics, 15(10) (2015) 5585-5598. | $A$      | مساحت سطح، $m^2$              |
| [2] S. Platt, I.E. Haddad, S. Pieber, R.-J. Huang, A. Zardini, M. Clairotte, R. Suarez-Bertoa, P. Barmet, L. Pfaffenberger, R. Wolf, Two-stroke scooters are a dominant source of air pollution in many cities, Nature communications, 5 (2014) 3749.   | $a$      | ضریب ثابت                     |
| [3] J.H. Kroll, J.H. Seinfeld, Chemistry of secondary organic aerosol: Formation and evolution of low-volatility organics in the atmosphere, Atmospheric Environment, 42(16) (2008) 3593-3624.  | $b$      | ضریب ثابت                     |
| [4] A.L. Robinson, N.M. Donahue, M.K. Shrivastava, E.A. Weitkamp, A.M. Sage, A.P. Grieshop, T.E. Lane, J.R. Pierce, S.N. Pandis, Rethinking organic aerosols: Semivolatile emissions and photochemical aging, Science, 315(5816) (2007) 1259-1262.  | $D_{AB}$ | ضریب جذب جرمی، $m^2/s$        |
| [5] J. Han, Diffusion Law of Air Pollution in Chemical Enterprises, Chemical Engineering Transactions, 59 (2017) 1153-1158.   | $I$      | شدت تابش، $W/m^2.sr$          |
|   | $I_b$    | شدت تابش جسم سیاه، $W/m^2.sr$ |
|   | $I_p$    | شدت تابش المان، $W/m^2.sr$    |
|   | $L$      | ضخامت لایه، $m$               |
|   | $M$      | جرم مولکولی، $kg/mol$         |
|   | $m$      | جهت مجزا                      |
|   | $P$      | فشار گاز، $atm$               |
|   | $q$      | شار حرارتی سطوح، $W/m^2$      |
|   | $S_p$    | چشمه تابشی                    |
|   | $T$      | دما، $K$                      |
|   | $t$      | زمان، $s$                     |
|   | $V_p$    | حجم المان، $m^3$              |
|   | $w_g$    | تابع وزنی                     |
|   | $w_h$    | تابع وزنی                     |
|   | $x$      | طول المان، $m$                |
|   | $\rho_A$ | چگالی، $kg/m^3$               |

- diffusive convection in a non-gray air-H<sub>2</sub>O mixture, *International Journal of Thermal Sciences*, 77 (2014) 38-46.
- [14] S. Meftah, A. Ibrahim, D. Lemonnier, A. Benbrik, Coupled radiation and double diffusive convection in nongray air-CO<sub>2</sub> and air-H<sub>2</sub>O mixtures in cooperating situations, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 56(1) (2009) 1-19.
- [15] K.G. Kumar, B. Gireesha, S. Manjunatha, N. Rudraswamy, Effect of nonlinear thermal radiation on double-diffusive mixed convection boundary layer flow of viscoelastic nanofluid over a stretching sheet, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 12(1) (2017) 18.
- [16] I.B. Yabo, B.K. Jha, J.-E. Lin, Combined Effects of Thermal Diffusion and Diffusion-Thermo Effects on Transient MHD Natural Convection and Mass Transfer Flow in a Vertical Channel with Thermal Radiation, *Applied Mathematics*, 7(18) (2016) 2354.
- [17] B.K. Sharma, K. Yadav, N.K. Mishra, R. Chaudhary, Soret and Dufour effects on unsteady MHD mixed convection flow past a radiative vertical porous plate embedded in a porous medium with chemical reaction, *Applied Mathematics*, 3(7) (2012) 717.
- [18] M. Thakur, M.V. Krishna, • THE EFFECTS OF Soret AND DUFOUR ON AN UNSTEADY MHD FREE CONVECTION FLOW PAST AN INFINITE VERTICAL PLATE WITH THERMAL RADIATION AND HEAT SOURCE, *International Journal of Mathematical Archive EISSN 2229-5046*, 5(5) (2014).
- [19] N. Ahmed, D. Bhaattacharya, D. Barua, Radiation, Soret and Dufour Effects in MHD Channel Flow Bounded by a Long Wavy Wall and a Uniformly Moving Parallel at Wall, *Journal of Applied Mathematics and Fluid*
- [6] P. Ganesan, P. Loganathan, Radiation and mass transfer effects on flow of an incompressible viscous fluid past a moving vertical cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(21) (2002) 4281-4288.
- [7] M.N. Borjini, H.B. Aissia, K. Halouani, B. Zeghmati, Effect of optical properties on oscillatory hydromagnetic double-diffusive convection within semitransparent fluid, *International journal of heat and mass transfer*, 49(21-22) (2006) 3984-3996.
- [8] V.R. Prasad, N.B. Reddy, R. Muthucumaraswamy, Radiation and mass transfer effects on two-dimensional flow past an impulsively started infinite vertical plate, *International Journal of Thermal Sciences*, 46(12) (2007) 1251-1258.
- [9] F. Moufekkik, M. Moussaoui, A. Mezrhab, H. Naji, M. Bouzidi, Numerical study of double diffusive convection in presence of radiating gas in a square cavity, *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 8(2) (2012) 129-153.
- [10] M. Rafieivand, Etude numérique de la convection de double diffusion en présence de rayonnement en cavité rectangulaire/par Mehrdad Rafieivand, Poitiers, 1999.
- [11] A. Mezrhab, D. Lemonnier, S. Meftah, A. Benbrik, Numerical study of double-diffusion convection coupled to radiation in a square cavity filled with a participating grey gas, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(19) (2008) 195501.
- [12] M. Cherifi, A. Benbrik, S. Laouar-Meftah, D. Lemonnier, Effect of horizontal walls emissivity on coupled double diffusive convection and non gray-gas radiation of air-H<sub>2</sub>O mixture in a cooperating case, in: *Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*, 2015 International Conference on, IEEE, 2015, pp. 1-8.
- [13] S. Laouar-Meftah, M. Cherifi, D. Lemonnier, A. Benbrik, Gas radiation effects on opposing double-

- (2013) 56-72.
- [22] K. Sudhakar, R. Srinivasa Raju, M. Rangamma, Chemical reaction effect on an unsteady MHD free convection flow past an infinite vertical accelerated plate with constant heat flux, thermal diffusion and diffusion thermo, International Journal of Modern Engineering Research, 2(5) (2012) 3329-3339.
- [23] S.C. Mishra, H.K. Roy, N. Misra, Discrete ordinate method with a new and a simple quadrature scheme, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 101(2) (2006) 249-262.
- Mechanics, 6 (2014) 1-19.
- [20] B.K. Jha, A.O. Ajibade, Diffusion-thermo effects on free convective heat and mass transfer flow in a vertical channel with symmetric boundary conditions, Journal of Heat Transfer, 133(5) (2011) 052502.
- [21] D.C. Kesavaiah, P. Satyanarayana, S. Venkataramana, Radiation and Thermo-Diffusion Effects on Mixed Convective Heat and Mass Transfer Flow of a Viscous Dissipated Fluid over a Vertical Surface in the Presence of Chemical Reaction with Heat Source, International Journal of Scientific Engineering and Technology, 2(2)

