

شبیه سازی عددی انتقال حرارت درون یک محفظه مربعی با گرمکن موضعی با استفاده از روش شبکه بولتزمن

علی دوستعلی^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد

مرضیه رضازاده^۲

استادیار

در این مقاله، انتقال حرارت جابجایی طبیعی دو بعدی درون یک محفظه مربعی همراه با دو گرمکن موضعی در دیواره پایین که تحت شار حرارتی نوسانی قرار دارد، با استفاده از روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار گرفته است. دیواره بالایی محفظه در دمای ثابت سرد و دیواره‌های جانبی و اطراف گرمکن‌ها عایق هستند. اثر طول و موقعیت گرمکن نسبت به دیواره جانبی، همچنین دامنه و طول موج نوسان شار حرارتی بر روی دمای ماکزیمم گرمکن‌ها و جریان درون محفظه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با نزدیک شدن گرمکن‌ها به دیواره‌های جانبی، دمای ماکزیمم آنها اختلاف کمتری داشته و جریان پایدارتر خواهد بود.

واژه های راهنما: روش شبکه بولتزمن، شار حرارتی نوسانی، جابجایی طبیعی، محفظه مربعی

۱- مقدمه

انتقال حرارت جابجایی طبیعی در بسیاری از کاربردهای مهندسی، تکنولوژی و فرآیندهای طبیعی از اهمیت فراوانی برخوردار است. انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه مربعی با گرمکن موضعی روی دیواره کاربرد مهمی در ابزار خنک کننده الکترونیکی، کلکتورهای خورشیدی و رآکتورهای هسته‌ای دارد. تحقیقات مختلفی در زمینه انتقال حرارت درون محفظه با یک گرمکن تحت دمای ثابت و نوسانی انجام شده است. به عنوان نمونه، لاکال و همکاران [۱] جابجایی طبیعی درون محفظه مربعی حاوی هوا و یک منبع حرارتی روی دیواره پایین را با استفاده از روش تفاضل محدود بررسی کرده اند. در شبیه سازی آنها دمای منبع حرارتی به صورت سینوسی با زمان تغییر می‌کند. آنها اثر دامنه نوسان شار حرارتی، طول گرمکن، طول موج نوسان، فاصله مرکز محفظه تا مرکز منبع حرارتی و عدد رایلی را بر روی میدان دما و جریان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که به علت وجود منبع حرارتی با شار نوسانی، تغییرات پارامترهای مورد بررسی نیز نوسانی بوده ولی از الگوی سینوسی پیروی نمی‌کند.

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، گلپایگان dostali_ali@yahoo.com

^۲استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، گلپایگان rezazadeh@gut.ac.ir

ابوریدا و همکاران [۲] جابجایی طبیعی محفظه مربعی حاوی هوا با دمای نوسانی دیواره پایین و بالا را به روش تفاضل محدود بررسی کردند. این مطالعه در سه حالت بررسی شده است. در حالت اول تنها دمای گرمتر دیواره پایین نوسان دارد. در حالت دوم و سوم دمای گرم و سرد با اختلاف فاز طول موج صفر و π نوسان می‌کند. نتایج آنها نشان می‌دهد که برای اعداد رایلی بالا، با افزایش طول موج در حالت اول و دوم گردابه جریان بزرگتر کمتر غالب می‌شود. در حالت سوم جریان سیال حول مرکز محفظه توسط یک گردابه جریان بزرگ در گردش است. نیتپادوی و همکاران [۳] تغییرات میدان دما و جریان درون محفظه را به روش حجم کنترل مورد مطالعه قرار دادند. دیواره سمت راست در دمای سرد ثابت و دیواره سمت چپ به صورت موضعی تحت دمای گرم نوسانی قرار دارد. آنها نتایج را در محدوده اعداد گراشف 10^4 تا 10^5 ، دامنه نوسان بی بعد دمایی 0.12 ، 0.4 و 0.6 و طول موج نوسان بی بعد دمایی 3.1 و 5 بررسی کردند.

نتایج آنها نشان می‌دهد که نرخ انتقال حرارت متوسط با افزایش دامنه نوسان برای طول موج بی بعد 1 و 5 افزایش و برای طول موج بی بعد 3 کاهش می‌یابد همچنین عدد ناسلت متوسط یک رفتار غیر خطی نسبت به طول موج نوسان دارد. با افزایش دامنه نوسان برای طول موج بی بعد 1 ، تغییراتی در ناسلت متوسط مشاهده نشده و برای طول موج بی بعد 3 ، با افزایش دامنه نوسان نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد. چیک و همکاران [۴] جابجایی طبیعی درون محفظه مربعی که دیواره پایین آن تحت شار حرارتی ثابت و دیواره‌های جانبی و بالایی به صورت موضعی تحت شرایط متفاوت در دمای ثابت قرار دارند را به روش تفاضل محدود مدل سازی نموده‌اند. آنها چهار حالت مختلف را مطالعه کرده‌اند. در حالت اول دیواره‌های جانبی در دمای سرد و دیواره بالایی عایق، در حالت دوم دیواره بالایی و سمت چپ در دمای سرد، در حالت سوم دیواره بالایی و نیمه بالایی دیواره‌های جانبی در دمای سرد و در حالت چهارم دیواره بالایی و نیمه پایینی دیواره‌های جانبی در دمای سرد قرار دارند. آنها شبیه‌سازی را برای دو طول منبع حرارتی 20% و 80% درصد طول دیواره پایین و در محدوده اعداد رایلی 10^3 تا 10^7 انجام دادند.

نتایج آنها نشان می‌دهد که برای منبع با طول کمتر، ناسلت متوسط ماکزیمم در حالت دوم اتفاق می‌افتد ولی برای منبع با طول بیشتر، صرف نظر از حالت سوم به دلیل ناپایداری رایلی بنارد، حالت اول خنک کاری بهتری خواهد داشت. ژاو و همکاران [۵] جابجایی طبیعی جریان آرام را برای محفظه مربعی با دو گرمکن در دیواره سمت راست و دیواره سمت چپ در دمای ثابت را به روش حجم محدود شبیه‌سازی کرده‌اند. آنها دو حالت مختلف را در نظر گرفته‌اند. در حالت اول دمای گرمکن بالایی به صورت سینوسی با زمان تغییر کرده و دمای گرمکن پایینی در دمای ثابت بوده و در حالت دوم عملکرد گرمکن‌ها بر عکس در نظر گرفته شده است. فرکانس نوسان بی بعد بین 0.1 تا 10 می‌باشد. نتایج آنها نشان می‌دهد که در حالت اول انتقال حرارت گرمکن پایینی اثر کمتری بر تغییر دمای نوسانی گرمکن دارد.

قاسمی و امین ساداتی [۶] جابجایی طبیعی درون یک محفظه حاوی نانو سیال را برای حالتی که قسمتی از دیواره سمت چپ تحت شار حرارتی نوسانی و دیواره سمت راست در دمای ثابت قرار دارد را به روش حجم کنترل بررسی کردند. آنها اثر پارامترهایی مانند عدد رایلی، کسر حجمی ذرات، موقیت منبع حرارتی، طول موج نوسان و نوع نانو ذره را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

نتایج آنها نشان می‌دهد که تاثیر موقعیت منبع حرارتی تابعی از عدد رایلی بوده، بهترین عملکرد خنک‌کاری مربوط به حالتی است که منبع حرارتی برای اعداد رایلی کم در وسط دیواره سمت چپ و برای اعداد رایلی بالاتر در دیواره پایین قرار دارد. انجیو و همکاران [۷] اثر گرمکن موضعی و اندازه گرمکن را بر انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی درون یک محفظه مربعی با استفاده از روش المان محدود مدل سازی کرده اند. دیواره‌های جانبی محفظه عایق، دیواره پایینی دارای یک گرمکن موضعی و دیواره بالایی در دمای ثابت سرد قرار دارد. نتایج آنها نشان می‌دهد که با کاهش اندازه گرمکن عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد.

علاوه بر این، در حالتی که گرمکن در نیمه اول دیواره افقی پایین قرار دارد، ناسلت متوسط با افزایش فاصله گرمکن از ابتدای دیواره، افزایش می‌یابد. ساحا و همکاران [۸] اثر طول منبع حرارتی واقع در وسط دیواره پایینی یک محفظه مربعی برای عدد گراش 10^3 تا 10^6 و پراتنل $0/71$ را به روش المان محدود شبیه سازی نموده اند. این محفظه حاوی یک استوانه عایق در مرکز می‌باشد. در این مطالعه طول بی‌بعد منبع از $0/2$ تا $0/8$ تغییر می‌کند. نتایج آنها نشان می‌دهد که برای اعداد گراش کمتر از 10 ، تغییرات عدد ناسلت نسبت به طول منبع ناچیز بوده و برای همه نسبت‌های طول منبع به جز طول بی‌بعد $0/2$ ، عدد ناسلت در محدوده اعداد گراش 5×10^4 تا 5×10^5 تغییر چندانی ندارد.

بی و همکاران [۹] جابجایی آزاد درون یک محفظه مستطیلی که ضلع بزرگتر آن در راستای عمودی قرار دارد را به روش حجم محدود بررسی کرده اند. در این محفظه سه گرمکن بر روی دیواره عمودی نصب شده و سه حالت مختلف بررسی شده است. در حالت اول پایین‌ترین گرمکن ناگهان روشن شده، در حالت دوم ناگهان خاموش شده و در حالت سوم به صورت متناوب روشن و خاموش می‌شود. محدوده اعداد رایلی 10^3 تا 10^7 است. نتایج آنها نشان می‌دهد که برای اعداد رایلی بالا، در حالت دوم و سوم اثر حرارت تولیدی به وسیله پایین‌ترین گرمکن و جریانی که با حرارت این گرمکن ایجاد می‌شود، منجر به ایجاد دمای حداکثر در گرمکن میانی و بالایی می‌شود.

ماهاپاترا و همکاران [۱۰] جابجایی طبیعی ناپایدار را برای دو گرمکن که به صورت متناوب خاموش و روشن می‌شوند به روش حجم محدود بررسی کرده اند. محدوده اعداد رایلی 10^3 تا 10^6 و پراتنل $0/71$ است. نتایج آنها نشان می‌دهد که با کاهش پریود میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین برای طول موج نوسان $0/01$ و رایلی 10^3 ، انتقال حرارت $37/7$ درصد و در رایلی بالاتر از 10^6 ، 29 درصد افزایش می‌یابد. همچنین در طول موج نوسان $0/2$ ، میزان افزایش انتقال حرارت در دو رایلی 10^3 و 10^6 به ترتیب $8/4$ و $12/5$ درصد می‌باشد. ایچی و همکاران [۱۱] اثر گرمایش سینوسی بر روی جابجایی طبیعی همراه با اثر تشعشع حرارتی را در یک محفظه مربعی که دو دیواره پایین و جانبی آن به صورت موضعی تحت گرمایش نوسانی نسبت به زمان و دو دیواره دیگر به صورت موضعی تحت دمای سرد ثابت قرار دارد را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که در یک سیکل جریان، ساختار جریان رفتار پیچیده‌ای بسته به میزان تشعشع حرارت و دامنه و طول موج نوسان دارد و سرعت انتقال حرارت در حالت انتقال گرمای سینوسی افزایش می‌یابد. سیدیکی و همکاران [۱۲] جابجایی طبیعی محفظه مربعی حاوی سیال هوا را به روش تفاضل محدود بررسی کرده اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش اختلاف دمای بین دیواره‌های عمودی، شدت جریان درون محفظه بیشتر شده و عدد ناسلت متوسط با افزایش اعداد رایلی، افزایش می‌یابد.

ساحا و همکاران [۱۳] جابجایی طبیعی درون محفظه با گرمایش موضعی در دیواره پایینی را به روش حجم محدود مدل سازی کردند. دیواره‌های جانبی در دمای ثابت قرار داشته و دیواره‌های دیگر عایق هستند. آن‌ها اثر طول بی بعد گرمکن 0.2 ، 0.4 ، 0.6 و 0.8 را بر روی میزان انتقال حرارت بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی و اندازه گرمکن میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. نافوتی و همکاران [۱۴] جابجایی طبیعی درون یک محفظه مربعی که با یک گرمکن در دیواره پایینی را برای پرانتل 0.71 و رایلی 10^3 تا 10^6 بررسی کرده‌اند. آن‌ها اثر تغییرات فاصله از مرکز، ارتفاع و طول گرمکن بر میزان انتقال حرارت را بررسی کرده‌اند.

نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی، ناسلت متوسط در امتداد سطح بالا و جانبی گرمکن افزایش می‌یابد. همچنین برای حالتی که گرمکن در مرکز محفظه قرار دارد، نرخ انتقال حرارت برای اعداد رایلی بالا، افزایش می‌یابد. نافوتی و همکاران [۱۵] اثر طول، موقعیت منبع حرارتی و عدد گراشرف را بر جریان درون یک محفظه مربعی با یک منبع حرارتی در دیواره پایین در محدوده عدد گراشرف 10^4 تا 10^6 بررسی کرده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش عدد گراشرف نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش طول منبع حرارتی، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. موسی و همکاران [۱۶] اثر تغییر موقعیت منبع حرارتی واقع در دیواره پایین را درون محفظه مربعی در اعداد رایلی مختلف بررسی نموده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به حالتی است که گرمکن در وسط محفظه قرار می‌گیرد.

نافوتی و همکاران [۱۷] جابجایی طبیعی آرام درون یک محفظه مربعی با دو گرمکن مشابه در دیواره پایینی را برای پرانتل 0.71 و عدد رایلی 10^3 تا 10^6 مدل سازی کرده‌اند. آنها اثر فاصله بین گرمکن‌ها، ارتفاع و نسبت ابعاد محفظه بر روی میدان جریان و دما را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش فاصله بین گرمکن‌ها، تعامل بین دو توده سیال کمتر شده و عدد ناسلت متوسط به خصوص برای بیشترین فاصله، افزایش می‌یابد. آنها فاصله بهینه را برای عدد رایلی 10^5 ، فاصله گرمکن 0.6 ، ارتفاع گرمکن 0.05 و نسبت ابعاد 1 به دست آورده‌اند.

گانگاوین و همکاران [۱۸] اثر گرمایش موضعی و اندازه گرمکن بر جابه‌جایی طبیعی درون یک محفظه با انتهای باز را با استفاده از روش شبکه بولتزمن در محدوده اعداد رایلی 10^3 تا 10^6 و پرانتل ثابت 0.71 بررسی کرده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که در پایین‌ترین مقدار عدد رایلی، به دلیل نیروی شناوری ضعیف یک انشعاب از جریان در دیواره‌های بالا و پایین ایجاد می‌شود. در اعداد رایلی بالا، ماکزیمم اندازه گردابه در نزدیک دیواره گرم بالایی به وجود می‌آید.

نظری و همکاران [۱۹] جابجایی طبیعی درون یک محفظه مثلثی قائم زاویه را با استفاده از روش بولتزمن مدل سازی نموده‌اند. آنها اثر تغییر موقعیت زاویه قائمه و زوایای پایه را بر عدد ناسلت برای دو حالت مختلف مدل سازی کرده‌اند. در حالت اول که زاویه قائمه در پایین گوشه سمت چپ قرار دارد، می‌توان مشاهده نمود که برای تمام اعداد رایلی و زوایای پایه مختلف، با افزایش فاصله از دیوار پایین، عدد ناسلت موضعی در دیواره چپ افزایش یافته و با افزایش عدد رایلی خطوط همدمما به دیواره مایل (دیواره گرم) نزدیک می‌شود. در حالت دوم که زاویه قائمه در بالای گوشه سمت چپ قرار دارد، می‌توان مشاهده نمود که در اعداد رایلی بزرگتر، عدد ناسلت موضعی در دیوار چپ ابتدا کاهش یافته، سپس با افزایش فاصله از دیوار افقی، افزایش می‌یابد.

در این حالت خطوط همدمای با افزایش عدد رایلی به سمت دیوار چپ (دیواره سرد) نزدیک می شود. جامی و همکاران [۲۰] جابجایی طبیعی آرام درون یک محفظه حاوی یک استوانه را با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیه سازی نموده اند. نتایج آنها نشان می دهد که برای عدد رایلی ثابت، ناسلت متوسط دیواره سرد و گرم با اختلاف دما به صورت خطی تغییر می کند. رامن و همکاران [۲۱] جابجایی طبیعی درون یک محفظه مربعی با یک گرمکن روی دیواره جانبی را به روش المان محدود بررسی کرده اند. گرمکن مورد نظر آنها به صورت ناگهانی روشن می شود. آنها اثر تغییر مکان و طول گرمکن و میزان انتقال حرارت تولیدی را بر جریان سیال بررسی کرده اند. نتایج آنها نشان می دهد که در حالتی که گرمکن در وسط دیواره قرار دارد عدد ناسلت و دمای متوسط سیال در محفظه حداکثر خواهد بود.

اوستوایزن و همکاران [۲۲] جابجایی طبیعی ناپایدار هوا درون یک محفظه مربعی که دیواره سمت چپ آن تحت شار حرارتی نوسانی و دیواره سمت راست در دمای ثابت سرد قرار دارد، را بررسی کرده اند. نتایج آنها نشان می دهد که در مقادیر کوچکتر طول موج نوسان، با کاهش طول موج نوسان تغییرات دمای متوسط دیواره سمت چپ کاهش می یابد. اما در مقادیر بزرگتر طول موج نوسان، تغییرات دمای متوسط مستقل از طول موج نوسان شار حرارتی است.

جویری و همکاران [۲۳] جابجایی طبیعی آرام هوا درون یک محفظه مربعی را برای موقعیتهای متفاوت گرمکن در دیواره جانبی به روش حجم محدود بررسی کرده اند. آنها اثر سه موقعیت گرمکن بالا، پایین و وسط دیواره جانبی را بررسی کرده اند. نتایج آنها نشان می دهد که برای همه اعداد رایلی، حداقل عدد ناسلت مربوط به حالتی است که گرمکن در پایین ترین قسمت دیوار قرار دارد. همچنین حداکثر ناسلت در حالتی است که گرمکن در بالاترین قسمت دیواره جانبی قرار دارد.

نیتادوی و همکاران [۲۴] جابجایی طبیعی درون یک محفظه مستطیلی که دیواره جانبی آن به صورت موضعی سرد و گرم شده اند را بررسی کرده اند. آنها اثر نسبت ابعاد و تغییر مکان موضعی بخش های تحت دمای سرد و گرم را در نه حالت متفاوت بررسی کرده اند. نتایج آنها نشان می دهد که نرخ انتقال حرارت برای یک نسبت ابعاد مشخص برای حالتی که قسمت گرم در پایین دیواره چپ و قسمت سرد در بالای دیواره راست قرار دارد، افزایش می یابد. برای موقعیت عکس این حالت، میزان انتقال حرارت به حداقل مقدار خود می رسد. همچنین با افزایش نسبت ابعاد، نرخ انتقال حرارت افزایش می یابد.

راجی و همکاران [۲۵] انتقال حرارت جابجایی طبیعی هوا درون یک محفظه مربعی را که دیواره پایین تحت دمای ثابت گرم و دیواره بالایی تحت دمای سرد نوسانی سینوسی نسبت به زمان قرار دارد را بررسی کرده اند. در شرایطی که دمای سرد دیواره بالا ثابت است، سه حالت متفاوت جریان تک سلولی، دو سلولی افقی و عمودی اتفاق می افتد. آنها با مقایسه شرایط دمای نوسانی نسبت به دمای ثابت به این نتیجه رسیده اند که برای دمای سرد نوسانی، در یک طول موج نوسان بحرانی، نرخ انتقال حرارت به طور قابل توجهی افزایش می یابد. اکثر پژوهشهای انجام شده اثر اندازه و موقعیت یک گرمکن با شار حرارتی نوسانی ثابت را بررسی کرده اند. در این مقاله جریان درون یک محفظه شامل دو گرمکن با شار حرارتی ثابت و نوسانی با استفاده از روش شبکه بولتزمن مدل سازی شده است. سپس اثر طول گرمکن، فاصله گرمکن ها تا دیواره جانبی، دامنه و طول موج نوسان شار حرارتی بر تغییرات دما بررسی شده است.

۲- معادلات حاکم و روش حل

امروزه استفاده از روش شبکه بولتزمن در دینامیک سیالات محاسباتی گسترش یافته است. لذا در مقاله حاضر از روش شبکه بولتزمن برای شبیه سازی میدان جریان و توزیع دما استفاده شده است که در ادامه جزییات آن شرح داده خواهد شد. از جمله مزایای این روش می توان به سهولت پیاده سازی و قابلیت انجام محاسبات موازی اشاره نمود.

در این پژوهش برای شبیه سازی از مدل D2Q9 شبکه بولتزمن مطابق شکل (۱) استفاده شده است. در روش شبکه بولتزمن تابع توزیع بیانگر احتمال وجود ذرات در یک زمان معین و در یک محدوده مکانی مشخص می باشد. تابع توزیع مربوطه باید معادله پیوستگی، مومنتم و انرژی را در مقیاس میکروسکوپی ارضا کند. تابع توزیع با استفاده از تقریب BGK، در حضور نیروی خارجی برای میدان جریان به صورت رابطه (۱) بیان می شود [۲۶]:

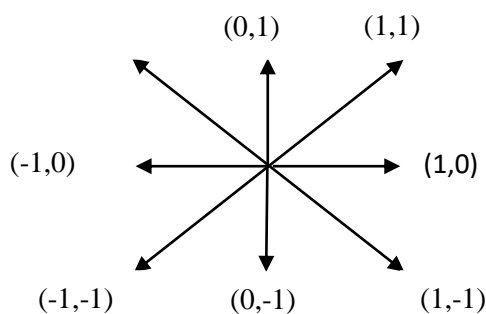
$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{\Delta t}{\tau_v} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] + 3 w_i \beta \rho(x, t) T(x, t) g_y c_{iy} \quad (1)$$

در رابطه (۱) جمله آخر بیانگر نیروی خارجی می باشد. در جابجایی طبیعی این نیروی خارجی همان نیروی بویانسی می باشد که از تقریب بوزینسک محاسبه می شود. g_y شتاب گرانشی در راستای y و c_{iy} مؤلفه عمودی سرعت ذرات c_i و β ضریب انبساط حرارتی می باشد که از رابطه (۲) محاسبه می شود:

$$\beta = \frac{1}{\rho_{ref}} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2)$$

که در آن چگالی مرجع سیال و $T(x, t)$ و $\rho(x, t)$ به ترتیب چگالی و دمای موضعی هستند که در هر موقعیت از شبکه محاسبه می شود. برای محاسبه میدان دما به روش شبکه بولتزمن، تابع توزیع از رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$g_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = g_i(x, t) - \frac{\Delta t}{\tau_\alpha} [g_i(x, t) - g_i^{eq}(x, t)] \quad (3)$$



شکل ۱- شبکه D2Q9 و سرعت ذرات در جهت های مختلف

که در آن c_i همان سرعت ذرات می باشد که برای مدل D2Q9 در شکل (۱) ارائه شده است. در روابط (۱)، w_i همان تابع وزنی ذرات است که برای مدل D2Q9 از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$w_i = \begin{cases} \frac{4}{9} & i = 0 \\ \frac{1}{9} & i = 1 - 4 \\ \frac{1}{36} & i = 5 - 8 \end{cases} \quad (۴)$$

تابع توزیع تعادلی $f_i^{eq}(x,t)$ و $g_i^{eq}(x,t)$ در رابطه های (۱) و (۳) بر اساس رابطه (۵) و (۶) بیان می شود:

$$f_i^{eq}(x) = w_i \rho \left[1 + 3 \frac{c_i * u}{c^2} + \frac{9}{2} \frac{(c_i * u)^2}{c^2} - \frac{3 u^2}{2 c^2} \right] \quad (۵)$$

$$g_i^{eq}(x) = w_i \rho \left[1 + 3 \frac{c_i * u}{c^2} + \frac{9}{2} \frac{(c_i * u)^2}{c^2} - \frac{3 u^2}{2 c^2} \right] \quad (۶)$$

مقادیر ماکروسکوپیک چگالی، سرعت، دما و شار حرارتی به ترتیب از روابط (۷-۱۰) محاسبه می شود:

$$\rho = \sum_{i=0}^8 f_i \quad (۷)$$

$$u = 1/\rho \sum_{i=0}^8 f_i c_i \quad (۸)$$

$$T = \sum_{i=0}^8 g_i \quad (۹)$$

$$q = \frac{\tau_\alpha - 1/2}{\tau_\alpha} \sum_{i=0}^8 (c_i - u) g_i \quad (۱۰)$$

$\alpha \tau$ و $v \tau$ در روابط (۱)، (۳) و (۱۰) به ترتیب بیانگر زمان آرامش برای معادله جریان و دما می باشند. لازم به ذکر است که برای دستیابی به مقادیر مثبت ویسکوزیته سینماتیکی v و حرارتی α ، باید τ بزرگتر از 0.5 باشد. ویسکوزیته سینماتیکی و حرارتی بر اساس روابط (۱۱) و (۱۲) بیان می شود:

$$v = \left(\tau_v - \frac{1}{2} \right) c_s^2 \Delta t \quad (۱۱)$$

$$\alpha = \left(\tau_\alpha - \frac{1}{2} \right) c_s^2 \Delta t \quad (۱۲)$$

۲-۱- شرایط مرزی

یکی از شرایط مرزی که در محفظه از آن استفاده شده است شرط مرزی بازتاب آینه‌ای است. این شرط مرزی همان شرط عدم لغزش در دیواره را بیان می‌کند. برای اعمال این شرط مرزی باید توابع توزیع جریان بعد از برخورد به دیواره در راستای حرکت خود منعکس می‌شود. شکل (۲) نحوه اعمال شرط مرزی بازتاب آینه‌ای را نشان می‌دهد. توابع توزیعی که با خط چین مشخص شده‌اند، توابع مجهول هستند. بنابراین توابع مجهول شکل (۲) با توجه به تعریف شرط مرزی بازتاب آینه‌ای، از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شوند که برای سایر مرزها قابل تعمیم است:

$$\begin{aligned} f_2 &= f_4 \\ f_5 &= f_7 \\ f_6 &= f_8 \end{aligned} \quad (13)$$

همچنین شرط مرزی دما ثابت برای شکل (۲) به صورت روابط (۱۴-الف-ج) تا (۱۴-ج) بیان می‌شود:

$$g_6 = \frac{1}{18} T_c - g_8 \quad (14\text{-الف})$$

$$g_2 = \frac{2}{9} T_c - g_4 \quad (14\text{-ب})$$

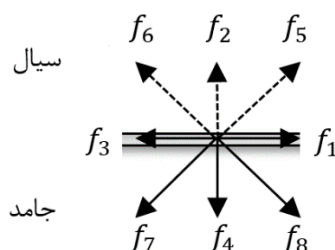
$$g_5 = \frac{1}{18} T_c - g_7 \quad (14\text{-ج})$$

برای شرط مرزی عایق، به عنوان مثال در دیواره جانبی سمت راست از رابطه (۱۵) استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} g_6 &= g_8 \\ g_5 &= g_7 \\ g_2 &= g_4 \end{aligned} \quad (15)$$

شرط مرزی شار حرارتی گرمکن با توجه به شرط تعادل در جهت عمود بر مرز و رابطه (۱۰) اعمال شده و توابع مجهول آن از رابطه (۱۶) به دست می‌آیند که برای سایر مرزها قابل تعمیم می‌باشد:

$$\sum_{i=0}^8 g_i^{eq} c_i = \sum_{i=0}^8 g_i c_i \quad (16)$$



شکل ۲- شرط مرزی بازتاب آینه‌ای در دیواره

با توجه به معادله (۱۰) و (۱۶)، مقادیر توابع مجهول برای توزیع دما از رابطه (۱۷-الف) به دست می آیند:

$$g_5 = \frac{1}{2} \left(q_y \left(\frac{\tau_\alpha}{\tau_\alpha - 1/2} \right) + 2g_7 + g_3 - g_1 \right) \quad (۱۷-الف)$$

$$g_6 = \frac{1}{2} \left(q_y \left(\frac{\tau_\alpha}{\tau_\alpha - 1/2} \right) + 2g_8 + g_1 - g_3 \right) \quad (۱۷-ب)$$

برای محاسبه عدد پرانتل و عدد رایلی از روابط (۱۸) و (۱۹) استفاده شده است:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (۱۸)$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu} \quad (۱۹)$$

همچنین عدد ناسلت در دیواره پایین با استفاده از روش تفاضل محدود مرتبه دوم از رابطه (۲۰) محاسبه می شود:

$$Nu_w = \sum \frac{3T_0 - 4T_1 + T_2}{2dx} \quad (۲۰)$$

همچنین ابعاد به صورت بعد به صورت روابط (۲۱) و (۲۲) تعریف شده اند:

$$B = \frac{L}{W} \quad (۲۱)$$

$$\varepsilon = \frac{x_c}{W} \quad (۲۲)$$

تابع جریان بر اساس مولفه های سرعت در جهت X و Y به ترتیب از روابط (۲۳) و (۲۴) محاسبه می شود:

$$u = -\frac{\partial\Psi}{\partial y} \quad (۲۳)$$

$$v = \frac{\partial\Psi}{\partial x} \quad (۲۴)$$

از آنجا که در این مقاله شار حرارتی گرمکن ها به صورت نوسانی می باشد لذا از شار حرارتی نوسانی مطابق رابطه (۲۵) استفاده می شود:

$$q = q_0 \left(1 + a \sin \left(\frac{2 * t_s}{\tau} \right) \right) \quad (۲۵)$$

۳- بیان مساله

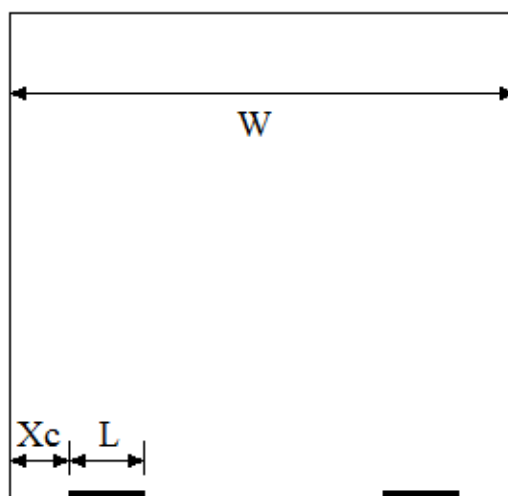
هندسه مساله شامل یک محفظه مربعی حاوی هوا مطابق شکل (۳) می باشد که دیواره پایینی شامل دو گرمکن به طول L تحت شار نوسانی می باشد. دیوار بالایی در دمای ثابت، دیواره های جانبی و دیواره های پایین اطراف گرمکن ها عایق هستند. پارامترهای شبیه سازی و خواص ترموفیزیکی سیال در جدول (۱) ارائه شده است.

۴- بررسی استقلال از شبکه

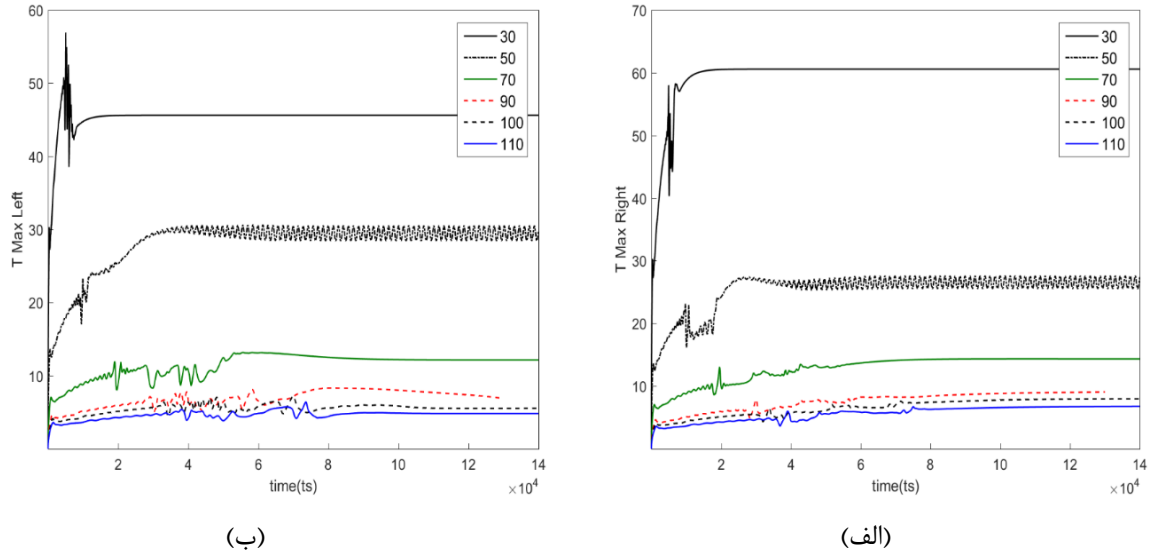
استقلال از شبکه برای یک محفظه با دو گرمکن روی دیواره پایینی و به فاصله $0/1$ تا دیواره جانبی، عدد رایلی 10^5 و طول گرمکن $0/2$ انجام شده است. در این حالت شار حرارتی ثابت بوده و دمای ماکزیمم برای شبکه بندی های 30×30 ، 50×50 ، 70×70 ، 90×90 ، 100×100 و 110×110 بررسی شده است. شکل (۴) تغییرات دمای گرمکن راست و چپ در محفظه را برای شبکه های ذکر شده نشان می دهد. با توجه به تغییرات اندک بین شبکه های 100×100 و 110×110 ، شبکه 100×100 انتخاب شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال عامل و پارامترهای شبیه سازی

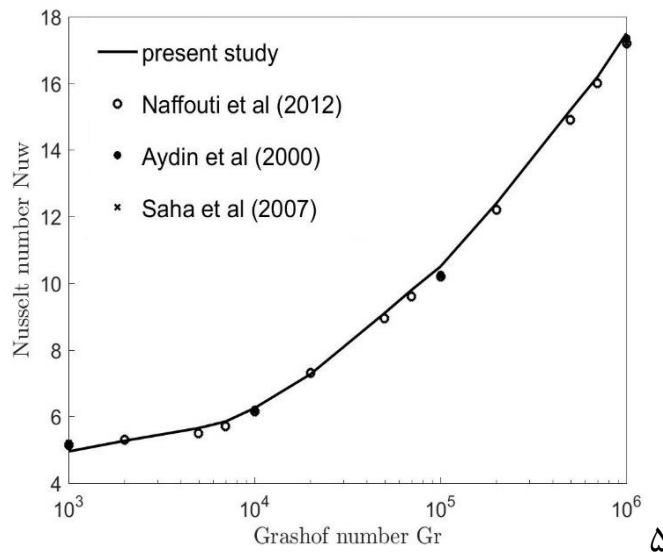
نام پارامترها	علامت اختصاری	مقدار	واحد
رایلی	Ra	10^5	-
چگالی	ρ	$1/25$	kg/m^3
ضریب انبساط حجمی	β	$0/0082$	$1/k$
ویسکوزیته سینماتیکی	ν	3×10^{-6}	m^2/s
پرانتل	Pr	$0/71$	-
ارتفاع محفظه	H	۱	m
طول محفظه	W	۱	m



شکل ۳- هندسه محفظه شامل دو گرمکن



شکل ۴- تغییرات دمای ماکزیمم برای (الف) گرمکن سمت راست (ب) گرمکن سمت چپ برای شبکه های متفاوت



شکل ۵- مقایسه مقادیر عدد ناسلت برای محفظه با یک گرمکن روی دیواره پایینی برای شبیه سازی حاضر و

مقادیر آیدین [۲۷] و ساجا [۲۸]

۵-اعتبارسنجی

یک برنامه کامپیوتری با استفاده از نرم افزار متلب برای تحلیل جریان و دمای گرمکن‌ها درون محفظه به روش شبکه بولتزمن تهیه شده است. جهت اعتبارسنجی نتایج برنامه برای حالت محفظه با یک گرمکن روی دیواره پایین با نتایج آیدین [۲۷] و ساجا [۲۸] مقایسه شده و در شکل (۵) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۵) مشاهده می شود عدد ناسلت برای طول منبع یکسان ۰/۲ و عدد گراشف 10^3 ، 10^6 از تطابق خوبی برخوردار است.

۶-نتایج

در این بخش با استفاده از برنامه تدوین شده اثر طول گرمکن، فاصله گرمکن از دیواره جانبی، دامنه نوسان و طول موج نوسان شار حرارتی شده است.

۶-۱- اثر طول گرمکن

اثر طول گرمکن بر روی جریان و دمای سیال درون محفظه برای دامنه نوسان ۰/۴، طول موج نوسان ۰/۱ و طول‌های متفاوت گرمکن ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ بررسی شده است. شکل (۶) تغییرات دمای ماکزیمم گرمکن‌ها را نسبت به زمان برای طول‌های مختلف محفظه نشان می‌دهد.

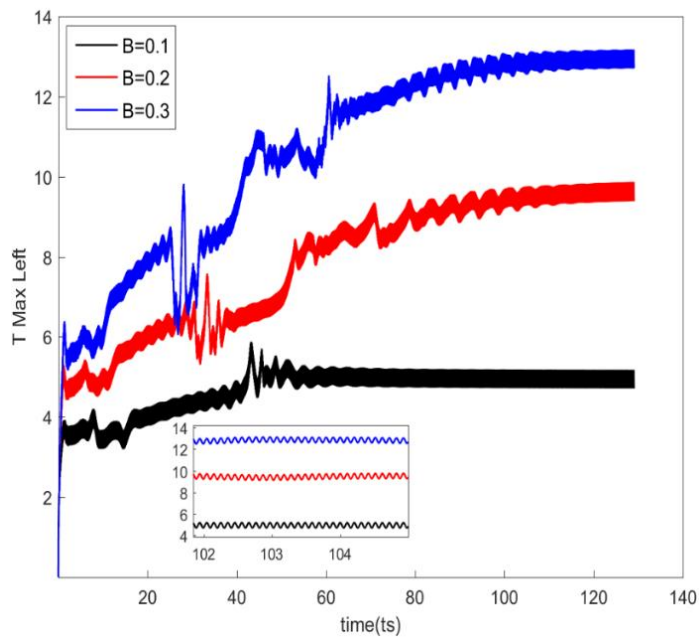
با توجه به شکل (۶) دمای هر دو گرمکن در حالت $B=0/3$ حداکثر و در $B=0/1$ حداقل مقدار را دارد. همچنین دمای گرمکن راست نسبت به چپ برای طول‌های متفاوت به یکدیگر نزدیک‌تر هستند. مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط دمای مربوط به گرمکن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به جدول (۲) نوسان دما در طول‌های متفاوت یکسان بوده، با افزایش طول گرمکن‌ها اختلاف دمای متوسط آنها به شدت افزایش می‌یابد. اختلاف دمای متوسط گرمکن‌ها برای طول‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب ۰/۹۵، ۲/۹ و ۴/۷۵ می‌باشد.

شکل (۷) تغییرات تابع جریان ماکزیمم را درون محفظه نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۷)، با افزایش طول گرمکن مقدار ماکزیمم تابع جریان افزایش می‌یابد. با افزایش طول گرمکن‌ها میزان نوسانات جریان درون محفظه افزایش می‌یابد. نوسانات تابع جریان در طول‌های بزرگتر در اثر تغییرات گردابه‌های جریان درون محفظه است، این فرآیند به گونه‌ای است که گردابه‌های جریان بر یکدیگر غلبه کرده تا تشکیل یک گردابه بزرگتر داده، با تشکیل گردابه بزرگ فرآیند به حالت پایدار می‌رسد.

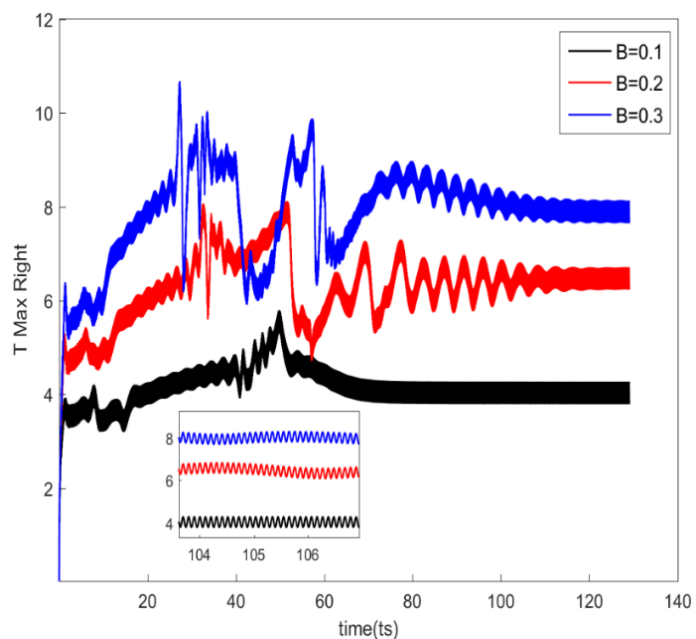
شکل (۸) خطوط جریان درون محفظه را برای گرمکن با طول‌های متفاوت نشان می‌دهد. با افزایش طول گرمکن‌ها به جای تشکیل یک گردابه بزرگ مرکزی، جریان به دو گردابه تقسیم می‌شود. در طول گرمکن ۰/۳ سطح تماس سیال با گرمکن بیشتر شده و در نتیجه سیال فرصت بیشتری برای تغییر دما پیدا می‌کند. همچنین در هر سه حالت گرمکن سمت چپ دمای بیشتری نسبت به گرمکن سمت راست دارد. علاوه بر این با توجه به خطوط جریان سطح تماس سیال با گرمکن سمت راست بیشتر می‌باشد.

جدول ۲- تغییرات دمای ماکزیمم بر مکن‌ها برای طول گرمکن مختلف

TL _{max}				TR _{max}				B
نوسان	متوسط	حداقل	حداکثر	نوسان	متوسط	حداقل	حداکثر	
۰/۴۸	۴/۹۶	۴/۷۲	۵/۲	۰/۴۸	۴	۳/۷۹	۴/۲۷	۰/۱
۰/۳۷	۹/۴۱	۹/۲۳	۹/۶	۰/۴۸	۶/۶۴	۶/۴	۶/۸۸	۰/۲
۰/۴۸	۱۲/۸۲	۱۲/۵۸	۱۳/۰۶	۰/۴۸	۸/۱۱	۷/۸۷	۸/۳۵	۰/۳

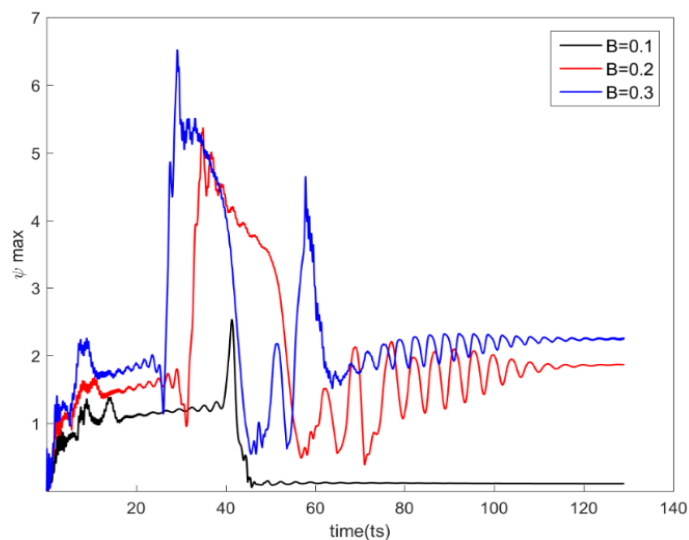


(الف)

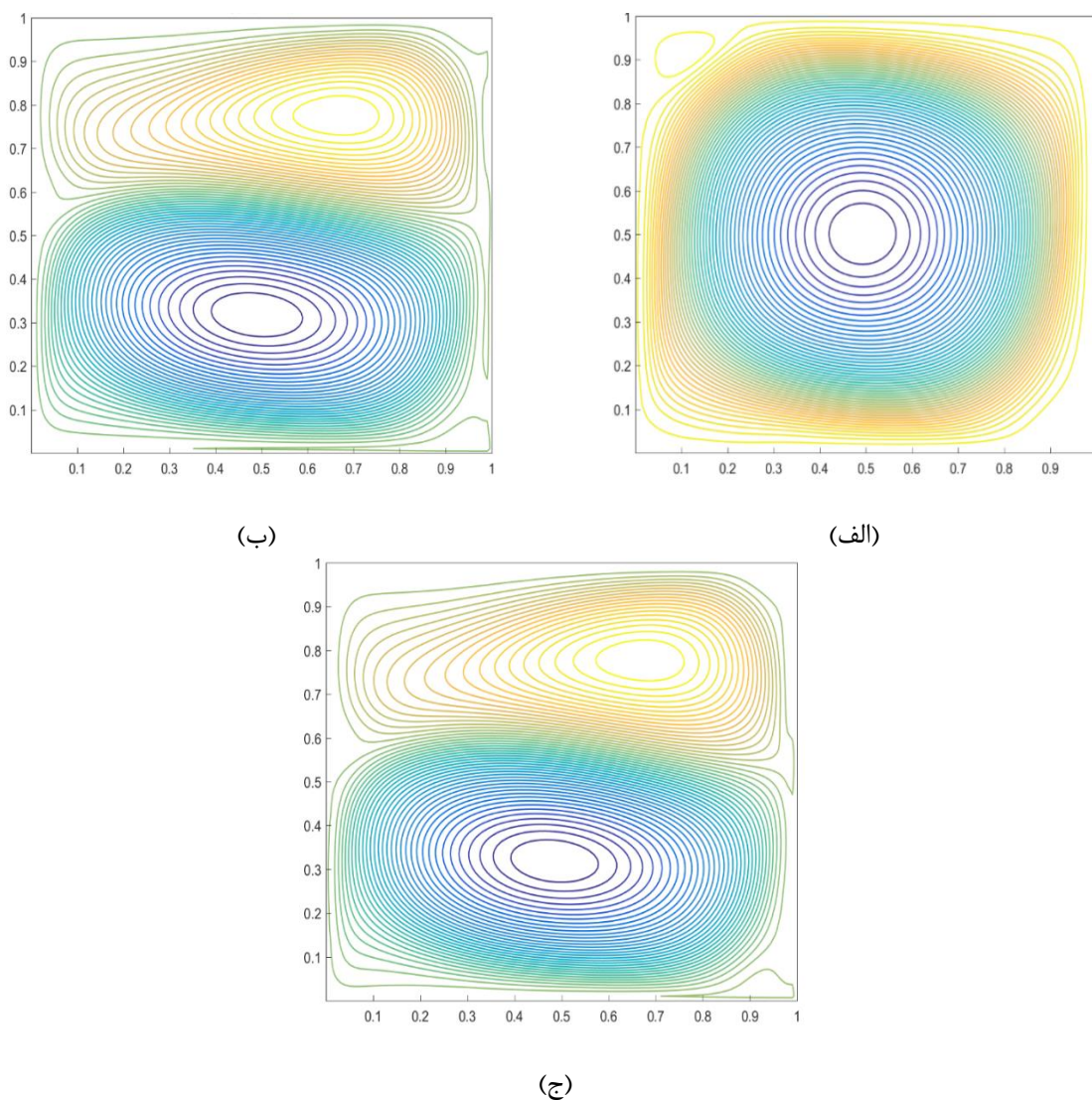


(ب)

شکل ۶- تغییرات دمای ماکزیمم برای (الف) گرمکن راست (ب) گرمکن چپ برای طول گرمکن مختلف



شکل ۷- تغییرات تابع جریان ماکزیمم برای طول گرمکن مختلف

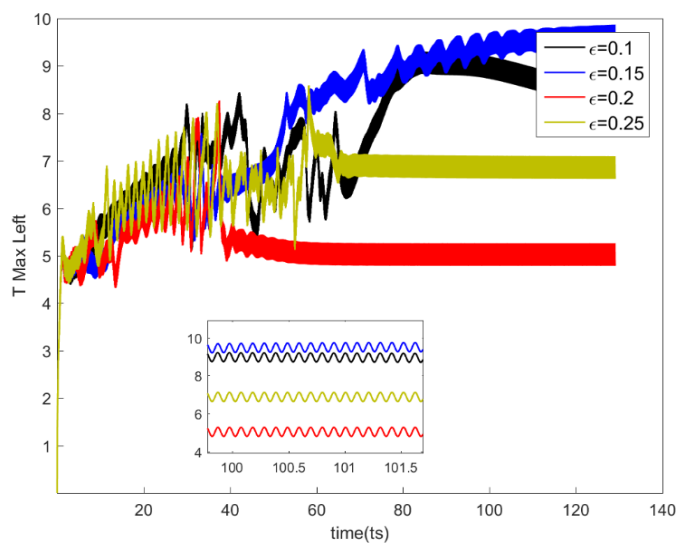


شکل ۸- خطوط جریان درون محفظه با طول گرمکن الف) ۰/۱، ب) ۰/۲، ج) ۰/۳

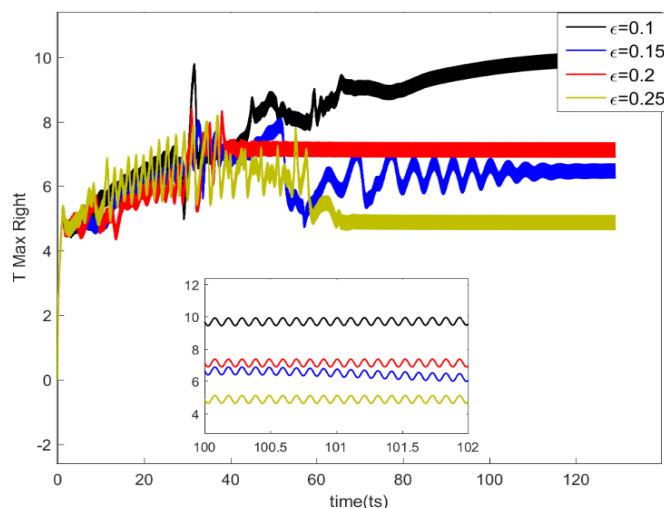
۶-۲- اثر فاصله گرمکن‌ها تا دیواره‌های جانبی

در این حالت اثر فاصله گرمکن تا دیواره جانبی برای چهار حالت ۰/۲۵، ۰/۲، ۰/۱۵ و ۰/۱ با دامنه نوسان ۰/۴، طول موج نوسان ۰/۱ و طول گرمکن ۰/۲ مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل (۹) حداقل دما برای گرمکن سمت راست در $\epsilon = 0.25$ و برای گرمکن سمت چپ در $\epsilon = 0.2$ اتفاق می‌افتد. با نزدیک شدن گرمکن‌ها به دیواره‌های عایق تغییرات شدید دمایی اتفاق می‌افتد.

در صورتی که برای گرمکن‌های نزدیکتر به مرکز، توزیع دما سریعتر به حالت پایدار رسیده، برای $\epsilon = 0.2$ ، این اتفاق سریعتر رخ می‌دهد. همچنین برای فاصله ۰/۱، دمای گرمکن سمت چپ در حالت پایدار به شدت کاهش و دمای گرمکن سمت راست افزایش می‌یابد. در مقایسه اختلاف دمای گرمکن‌ها نسبت به یکدیگر با توجه به جدول (۳) اختلاف دمای گرمکن‌ها با نزدیک شدن به مرکز کاهش می‌یابد. اختلاف دما برای فواصل جانبی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ به ترتیب ۲/۸۹، ۲/۱۲ و ۱/۹۸ می‌باشد.



(الف)

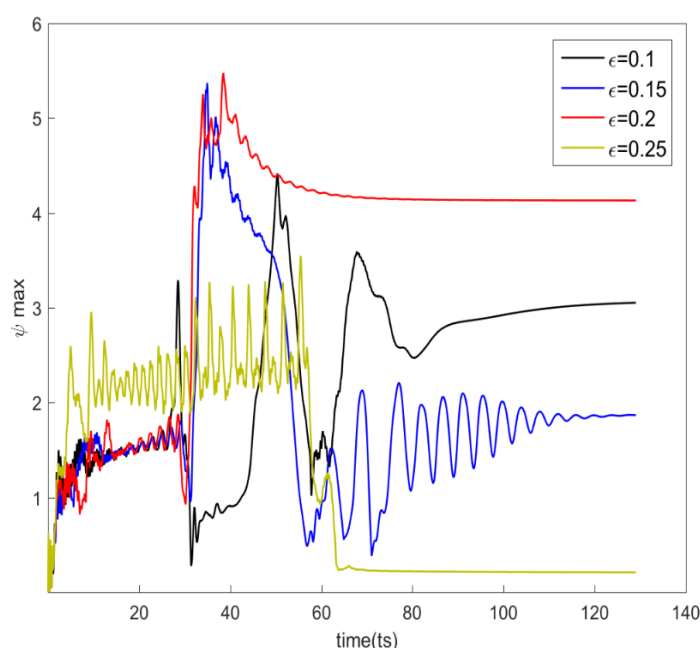


(ب)

شکل ۹- تغییرات دمای ماکزیمم برای (الف) گرمکن سمت چپ (ب) گرمکن سمت راست برای فاصله‌های مختلف از دیواره جانبی

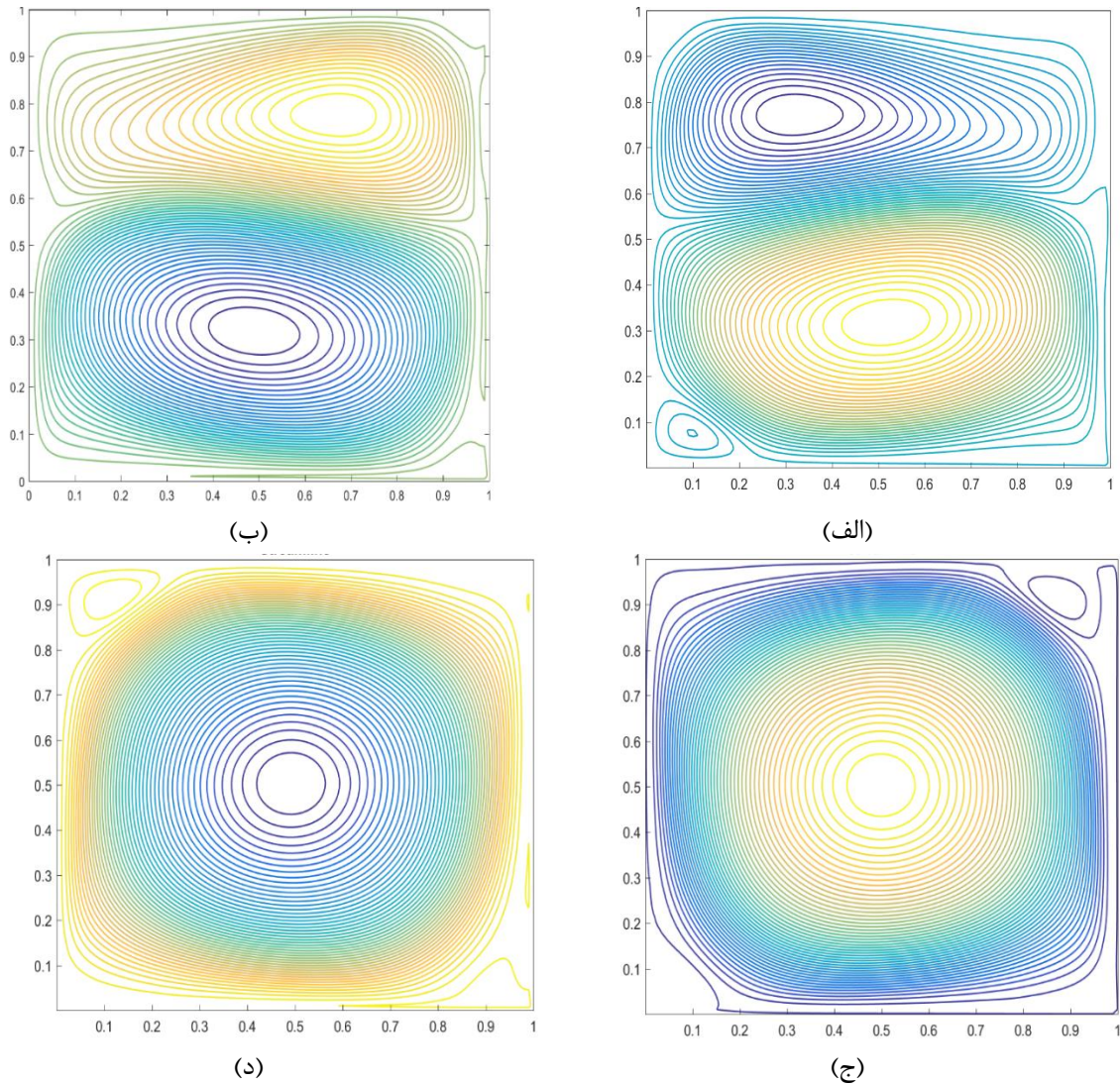
جدول ۳- تغییرات دمای ماکزیمم گرمکن‌ها برای فاصله‌های مختلف از دیواره جانبی

TL _{max}				TR _{max}				ε
نوسان	متوسط	حداقل	حداکثر	نوسان	متوسط	حداقل	حداکثر	
۰/۴۶	۸/۹۵	۸/۷۲	۹/۱۸	۰/۴۶۳	۹/۶۷	۹/۴۴	۹/۹۱	۰/۱
۰/۴۶	۹/۴۷	۹/۲۴	۹/۷	۰/۴۸	۶/۵۸	۶/۳۴	۶/۸۲	۰/۱۵
۰/۴۶	۵	۴/۸	۵/۲۶	۰/۴۸	۷/۱۲	۶/۸۸	۷/۳۶	۰/۲
۰/۵	۶/۸۵	۶/۶	۷/۱	۰/۴۸	۴/۸۷	۴/۶۳	۵/۱۱	۰/۲۵



شکل ۱۰- تغییرات تابع جریان ماکزیمم برای فاصله‌های مختلف از دیواره جانبی

شکل (۱۰) تغییرات تابع جریان ماکزیمم درون محفظه را نشان می‌دهد، همانگونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود علت پایداری سریعتر دما در $\epsilon=0/2$ ، ناشی از پایداری سریعتر جریان درون محفظه می‌باشد. شکل (۱۱) خطوط جریان درون محفظه را برای فواصل مختلف گرمکن‌ها از دیواره جانبی نشان می‌دهد. در $\epsilon=0/25$ ، به دلیل عدم تشکیل گردابه‌های کوچک در مجاور دیواره‌های جانبی توزیع دما یکنواخت‌تر می‌باشد. بنابراین با فاصله گرفتن گرمکن‌ها از دیواره‌های جانبی تعداد گردابه‌های جریان کمتر خواهد شد. با توجه به خطوط جریان در شکل (۱۱)، تشکیل یک گردابه کوچک جریان در مجاور گرمکن سمت چپ باعث کاهش دما در این گرمکن می‌شود.



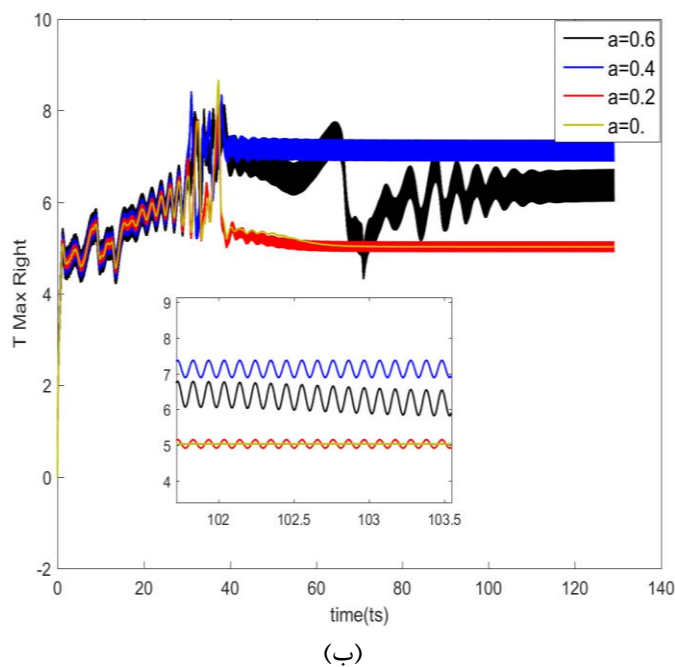
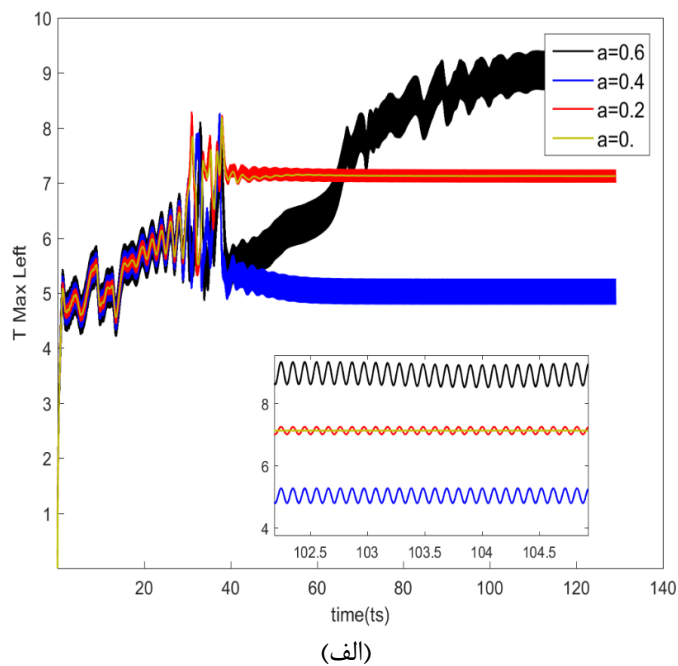
شکل ۱۱- تغییرات خطوط جریان درون محفظه برای فاصله گرمکن تا دیواره جانبی
 الف) $\epsilon=0/1$ ، ب) $\epsilon=0/15$ ، ج) $\epsilon=0/2$ ، د) $\epsilon=0/25$

۳-۶- اثر دامنه نوسان شار حرارتی

در این حالت از دو گرمکن با $\epsilon=0/1$ ، طول $0/2$ و چهار دامنه نوسان متفاوت 0 ، $0/2$ ، $0/4$ و $0/6$ استفاده شده است. شکل (۱۲) دمای ماکزیمم گرمکن ها را در دامنه های نوسان متفاوت نشان می دهد. همانگونه که در شکل (۱۲) مشاهده می شود، ماکزیمم و مینیمم دما برای گرمکن سمت چپ به ترتیب در دامنه نوسان $0/6$ و $0/4$ اتفاق می افتد. همچنین برای گرمکن سمت راست حداکثر و حداقل دما به ترتیب در دامنه نوسان $0/4$ و $0/2$ اتفاق می افتد علاوه بر این در دامنه نوسان کمتر جریان درون محفظه سریعتر پایدار می شود. از طرفی با توجه به مقادیر جدول (۴) اختلاف دمای گرمکن ها برای دامنه نوسان $0/6$ به شدت افزایش می یابد در حالی که برای دامنه نوسان 0 ، $0/2$ و $0/4$ مقدار آن یکسان می باشد. با افزایش دامنه نوسان شار حرارتی در گرمکن ها میزان نوسانات دما در گرمکن ها افزایش می یابد.

جدول ۴- تغییرات دمای ماکزیمم گرمکن‌ها برای دامنه‌های نوسان متفاوت

TL max				TR max				a
نوسان	متوسط	حداقل	حداکثر	نوسان	متوسط	حداقل	حداکثر	
-	-	-	۷/۱۲	-	-	-	۵	۰/۰
۰/۲۴	۷/۱۲	۷	۷/۲۴	۰/۲۴	۵	۴/۹	۵/۱۴	۰/۲
۰/۴۶	۵	۴/۷۹	۵/۲۵	۰/۴۸۶	۷	۶/۸۸	۷/۳۶	۰/۴
۰/۷۲	۹	۸/۶۳	۹/۳۵	۰/۷۲	۶/۳۶	۶	۶/۷۲	۰/۶

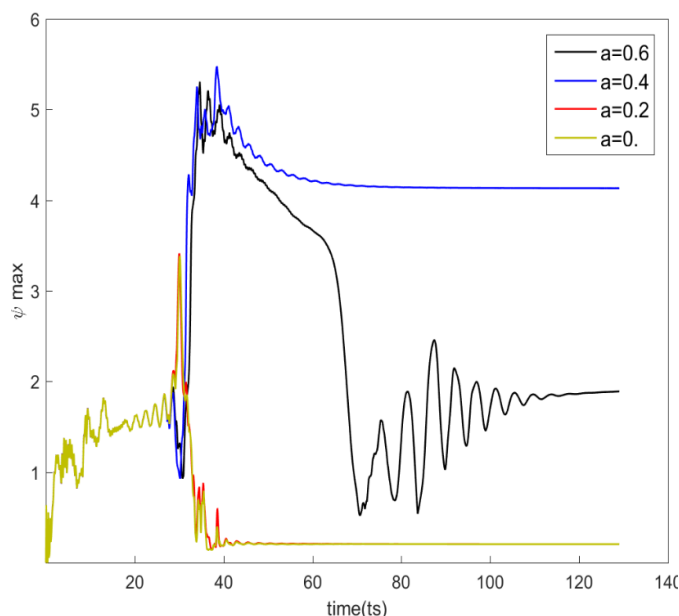


شکل ۱۲- تغییرات دمای ماکزیمم درون محفظه برای (الف) گرمکن چپ (ب) گرمکن سمت راست برای دامنه‌های نوسان متفاوت

شکل (۱۳) تغییرات تابع جریان ماکزیمم را برای دامنه‌های نوسان متفاوت نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود برای دامنه نوسان بالاتر، ناپایداری جریان بیشتر می‌شود. این ناپایداری جریان باعث می‌شود که دمای گرمکن‌ها یکنواختی کمتری داشته باشند. همچنین با توجه به شکل (۱۳) تغییرات تابع جریان ماکزیمم در دامنه نوسان 0.2 ، نسبت به حالت شار حرارتی ثابت تغییرات اندکی دارد که علت را می‌توان ناشی از تغییرات کمتر دامنه شار حرارتی درون گرمکن دانست.

۶-۴- اثر طول موج نوسان شار حرارتی

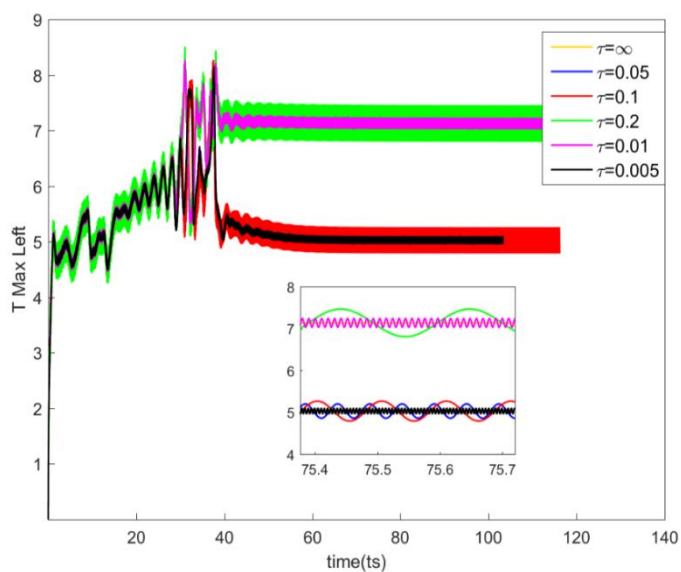
در این قسمت اثر پیروی نوسان برای $a=0.4$ و طول گرمکن $B=0.2, \varepsilon=0.2$ و طول موج نوسان $0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10$ بررسی می‌گردد. با توجه به جدول (۵) و شکل (۱۴)، حداکثر دمای گرمکن سمت چپ در $0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10$ و برای گرمکن سمت راست در $0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10$ اتفاق می‌افتد، چرا که جهت گردش گردابه بزرگ در این دو مورد عکس یکدیگر است. با افزایش پیروی نوسان دامنه نوسانات دمایی افزایش می‌یابد همچنین اختلاف دمای متوسط گرمکن‌ها نسبت به یکدیگر در همه طول موج‌های نوسان یکسان است. با مقایسه نتایج دمای گرمکن‌ها در طول موج نوسان‌های متفاوت نسبت به نتایج دمای گرمکن‌ها در دامنه نوسانهای متفاوت مشاهده می‌شود که با افزایش طول موج نوسان دمای گرمکن‌ها یکنواخت خواهد بود و دچار نوسانات شدید دمایی نمی‌شود. جدول (۵) تغییرات دمای ماکزیمم گرمکن‌ها را در طول موج نوسان‌های متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر جدول (۵) میزان نوسان دمای گرمکن‌ها با افزایش طول موج نوسان افزایش می‌یابد.



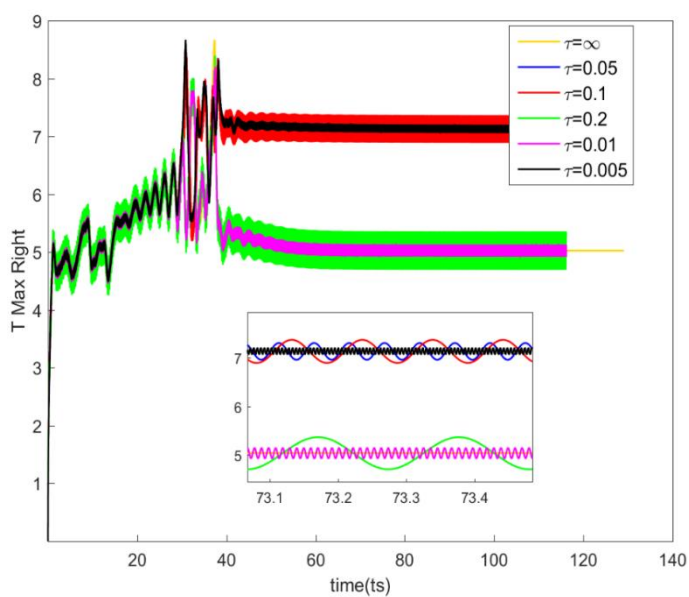
شکل ۱۳- تغییرات تابع جریان ماکزیمم برای دامنه‌های نوسان متفاوت

جدول ۵- تغییرات دمای ماکزیمم گرمکن ها برای طول موج نوسان متفاوت

TL max				TR max				τ
نوسان	حداقل	متوسط	حداکثر	نوسان	متوسط	حداقل	حداکثر	
-	-	-	۷/۱۳	-	-	-	۵	∞
۰/۱۵	۵/۰۲۵	۴/۹۵	۵/۱	۰/۱۴	۷/۱۳	۷/۰۶	۷/۲	۰/۰۰۵
۰/۲۰۲	۷/۱۳	۷	۷/۲۳	۰/۲۱	۵	۴/۹	۵/۱۳	۰/۰۱
۰/۳۴	۵	۴/۸۶	۵/۲	۰/۳۴	۷/۱۳	۶/۹۶	۷/۳	۰/۰۵
۰/۴۷	۵	۴/۷۹	۵/۲۶	۰/۴۸	۷/۱۳	۶/۸۹	۷/۳۷	۰/۱
۰/۶۶	۷/۱۳	۶/۸	۷/۴۶	۰/۶۵	۵	۴/۷	۵/۳۵	۰/۲



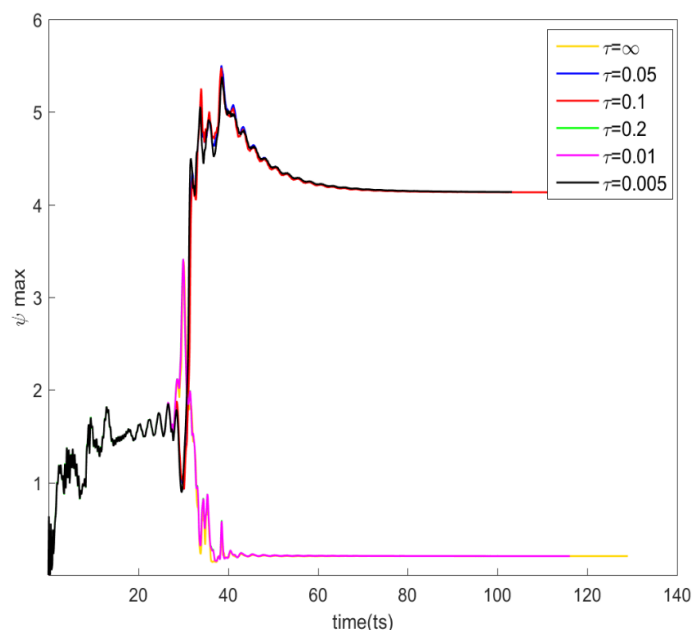
(الف)



(ب)

شکل ۱۴- تغییرات دمای ماکزیمم برای (الف) گرمکن چپ (ب) گرمکن سمت راست

برای طول موج نوسان شار حرارتی مختلف



شکل ۱۵- تغییرات تابع جریان ماکزیمم برای طول موج نوسان شار حرارتی مختلف

شکل (۱۵) تابع جریان ماکزیمم را برای طول موج نوسان‌های مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود جریان درون محفظه تا زمان ۳۱ ts برای تمام موارد تقریباً یکسان بوده ولی برای مقادیر بیشتر از آن، اختلاف چشمگیری می‌یابد. علت آن را می‌توان ناشی از اختلاف جهت گردش گردابه بزرگ جریان دانست.

۷- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر جابجایی طبیعی درون یک محفظه مربعی شامل دو گرمکن موضعی در دیواره پایین که تحت شار حرارتی نوسانی قرار دارند با استفاده از روش شبکه بولتزمن به صورت عددی شبه سازی شد. اثر دامنه و طول موج نوسان شار حرارتی بر دمای ماکزیمم گرمکن‌ها و تابع جریان ماکزیمم درون محفظه بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش طول گرمکن، دمای ماکزیمم گرمکن‌ها افزایش یافته، به دو گردابه تقسیم می‌شود. همچنین بیشترین مقدار دمای ماکزیمم مربوط به $\varepsilon = 0.1$ بوده، در $\varepsilon = 0.2$ ، جریان سیال درون محفظه نسبت به موارد دیگر پایدارتر بود. تغییرات دمای گرمکن‌ها نسبت به یکدیگر در دامنه نوسان 0.6 اختلاف قابل توجهی نسبت به دامنه‌های نوسان دیگر داشته، جریان سیال به دو گردابه جریان جداگانه تقسیم می‌شود. در یک دامنه نوسان ثابت با تغییرات طول موج نوسان شار حرارتی گرمکن‌ها، میزان نوسانات دمایی گرمکن‌ها تغییر خواهد کرد. از برنامه تدوین شده در مقاله حاضر می‌توان برای بررسی مسائل دیگری از جمله عملکرد نانوسیال و محیط متخلخل در حضور گرمکن روی دیواره‌های محفظه، همچنین محفظه دوزنقه و مثلی با گرمکن روی دیواره استفاده کرد.

مراجع

- [1] Lakhal, E. K., Hasnaoui, M., Vasseur, P., and Bilgen, E., "Natural Convection in a Square Enclosure Heated Periodically from Part of the Bottom Wall", *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 27, pp. 319-333, (1994).
- [2] Abourida, B., Hasnaoui, M., and Douamna, S., "Transient Natural Convection in a Square Enclosure with Horizontal Walls Submitted to Periodic Temperatures", *Numerical Heat Transfer A*, Vol. 36, pp. 737-750, (1999).
- [3] Nithyadevi, N., Kandaswamy, P., and Sivasankaran, S., "Natural Convection in a Square Cavity with Partially Active Vertical Walls: Time-periodic Boundary Condition", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2006, pp. 1-16, (2006).
- [4] Cheikh, N. B., Beya, B. B., and Lili, T., "Influence of Thermal Boundary Conditions on Natural Convection in a Square Enclosure Partially Heated from Below", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, No. 3, pp. 369-379, (2007).
- [5] Zhao, F.Y., Liu, D., and Tang, G.F., "Resonant Response of Fluid Flow Subjected to Discrete Heating Elements", *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No. 9, pp. 2461-2472, (2007).
- [6] Ghasemi, B., and Aminossadati, S. M., "Periodic Natural Convection in a Nanofluid-filled Enclosure with Oscillating Heat Flux", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 1, pp. 1-9, (2010).
- [7] Ngo, I.L., and Byon, C., "Effects of Heater Location and Heater Size on the Natural Convection Heat Transfer in a Square Cavity using Finite Element Method", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 7, pp. 2995-3003, (2015).
- [8] Saha, S., and Saha, G., and Islam, M., "Natural Convection in Square Enclosure with Adiabatic Cylinder at Center and Discrete Bottom Heating", *DIU Journal of Science and Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 29-36, (2008).
- [9] Bae, J.H., and Hyun, J.M., "Time-dependent Buoyant Convection in an Enclosure with Discrete Heat Sources", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 43, No. 1 pp. 3-11, (2004).
- [10] Mahapatra, P.S., Manna, N.K., Ghosh, K., and Mukhopadhyay, A., "Heat Transfer Assessment of an Alternately Active Bi-heater Undergoing Transient Natural Convection", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 83, pp. 450-464, (2015).
- [11] Ayachi, R. El., Abdelghani, R., Mohamed, N., Hassan, E., and Mohammed, H., "Effect of Sinusoidal Heating on Natural Convection Coupled to Thermal Radiation in a Square Cavity Subjected to Cross Temperature Gradients", *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, Vol. 3, No. 1, pp. 7-21, (2013).

- [12] Siddiki, M.N.A.A., “Free Convective Heat Transfer in a Square Cavity with Heated from Below and Symmetrically Cooling from the Sides”, *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 2, No. 8, pp. 2348-7968, (2015).
- [13] Saha, S.C., Molla, M., and Khan, M.A.I., “Natural Convection Flow in a Porous Enclosure with Localized Heating from Below”, *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-16, (2012).
- [14] Naffouti, T., Zinoubi, J., and Ben-Maad, R., “Lattice Boltzmann Analysis of 2-D Natural Convection Flow and Heat Transfer within Square Enclosure Including an Isothermal Hot Block”, *International Journal of Thermal Technologies*, Vol. 3, No. 4, pp. 146-152, (2013).
- [15] Naffouti, T., and Djebali, R., “Natural Convection Flow and Heat Transfer in Square Enclosure Asymmetrically Heated from Below: A Lattice Boltzmann Comprehensive Study”, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 88, No. 3, pp. 211-227, (2012).
- [16] Mussa, M.A., Abdullah, S., Azwadi, C.N., and Muhamad, N., “Simulation of Natural Convection Heat Transfer in an Enclosure by the Lattice-Boltzmann Method”, *Computers & Fluids*, Vol. 44, No. 1, pp. 162-168, (2011).
- [17] Naffouti, T., Zinoubi, J., Sidik, N.A., and Maad, R.B., “Applied Thermal Lattice Boltzmann Model for Fluid Flow of Free Convection in 2-D Enclosure with Localized Two Active Blocks: Heat Transfer Optimization”, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 9, No. 1, pp. 419-430, (2016).
- [18] Gangawane, K.M., Bharti, R.P., and Kumar, S., “Effects of Heating Location and Size on Natural Convection in Partially Heated Open-ended Enclosure by using Lattice Boltzmann Method”, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 37, No. 6, pp. 507-522, (2016).
- [19] Nazari, M., Shokri, H., and Kayhani, M.H., “Control of Convection Heat Transfer by Changing the Right-angle Position and the Base Angle of Triangular Storages Lattice Boltzmann Simulation”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 37, No. 1, pp. 149-161, (2015).
- [20] Jami, M., Mezrhab, A., Bouzidi, M.H., and Lallemand, “Lattice Boltzmann Method Applied to the Laminar Natural Convection in an Enclosure with a Heat-generating Cylinder Conducting Body”, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, No. 1, pp. 38-47, (2007).
- [21] Rahman, M.M., Mamun, M.A.H., Billah, M.M., and Rahman, S., “Natural Convection Flow in a Square Cavity with Internal Heat Generation and a Flush Mounted Heater on a Side Wall”, *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 37-50, (2011).
- [22] Oosthuizen, P.H., and Paul, J.T., “Unsteady Natural Convective Flow in an Enclosure with a Periodically Varying Side Wall Heat Flux”, *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Vol. 12, pp. 53-62, (1996).

- [23] Djoubeir, D., Omar K., Soufien, C., and Saadoun, B., “Numerical Simulation of Natural Convection in a Square Cavity with Partially Active Vertical and Horizontal Walls”, Laboratory of Transport and Environment Engineer-2014, Vol. 2, ISSN- 2356-5608, (2014).
- [24] Nithyadevi, N., Kandaswamy, P., and Lee, J., “Natural Convection in a Rectangular Cavity with Partially Active Side Walls”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, No. 23 pp. 4688–4697, (2007).
- [25] Raji, A., Hasnaoui, M., Firdaouss, M., and Ouardi, C., “Natural Convection Heat Transfer Enhancement in a Square Cavity Periodically Cooled from Above”, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, Vol. 63, No. 7, pp. 511-533, (2013).
- [26] McNamara, G.R., and Zanetti, G., “Use of the Boltzmann Equation to Simulate Lattice-gas Automata”, Physical Review Letters, Vol. 61, No. 20, pp. 2332-2335, (1988).
- [27] Aydin, O., and Yang, W.J., “Natural Convection in Enclosure with Localized Heating From Below and Symmetrically Cooling from Sides”, International Journal of Numerical Methods of Heat and Fluid Flow, Vol. 10, No. 5, pp. 518-529, (2000).
- [28] Saha, G., Saha, S., Islam, M.Q., and Akhanda, M.R., “Natural Convection in Enclosure with Discrete Isothermal Heating from Below ”, Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 1-13, (2007).

فهرست نمادهای انگلیسی

رایلی	Ra
عدد پراتل	Pr
طول گرمکن (m)	L
فاصله گرمکن تا دیواره جانبی (m)	x_c
دما (K)	T
عرض محفظه (m)	w
شار حرارتی (Wm^{-2})	q
سرعت افقی (ms^{-1})	u
تابع توزیع چگالی	f
تابع توزیع تعادلی چگالی	f^{eq}
تابع توزیع انرژی	g
تابع توزیع تعادلی انرژی	g^{eq}
سرعت ذرات مجازی روی شبکه بولتزمن	c_i
ناسلت متوسط در دیواره پایین	Nu_w
طول بی بعد گرمکن	B

دمای دیواره سرد بالا	T_c
سرعت عمودی (ms^{-1})	v
دامنه نوسان شار حرارتی	a
دمای ماکزیمم گرمکن سمت چپ	TL_{max}
دمای ماکزیمم گرمکن سمت راست	TR_{max}
زمان بولتزمان	t_s
تابع وزنى ذرات روى شبکه بولتزمان	W_a

نمادهای یونانی

لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})	ν
ضریب پخش حرارتی (m^2s^{-1})	α
فاصله بی بعد گرمکن تا دیواره جانبی	ε
چگالی (kgm^{-3})	ρ
طول موج نوسان شار حرارتی	τ
ضریب انبساط حجمی (K^{-1})	β
تابع جریان	Ψ
تابع جریان ماکزیمم	Ψ_{max}
زمان آرامش حرارتی	$\alpha\tau$
زمان آرامش هیدرودینامیکی	$\nu\tau$

Abstract

In this paper, square cavity with air inside, two heaters situated at its lower wall, its upper wall insulated, and its two side walls kept at a constant temperature. The Lattice Boltzmann method has been used for simulation in this study; and the overall goals of this research are to optimize the installation length of heaters and to explore the effects of the amplitude and wavelength of thermal flux fluctuation and Riley's number. The findings indicate that the flow within the cavity stabilizes more quickly by increasing the difference between the oscillation amplitude and period of thermal flux in heaters. In this paper, square cavity with air inside, two heaters situated at its lower wall, its upper wall insulated, and its two side walls kept at a constant temperature. The Lattice Boltzmann method has been used for simulation in this study; and the overall goals of this research are to optimize the installation length of heaters and to explore the effects of the amplitude and wavelength of thermal flux fluctuation. The findings indicate that the flow within the cavity stabilizes more quickly by increasing the difference between the oscillation amplitude and period of thermal flux in heaters