بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

شبیه‌سازی انتقال حرارت در سیالات از طریق هدایت و همرفت به کمک انحراف‌سنجی ماره‌ای

افسانه رجائی نژاد، مجید رشیدی هویه
گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده- در این پژوهش به بررسی انتقال گرما از طریق هدایت و همرفت توسط انحراف‌سنجی ماره‌ای پرداخته شده است. اساس این روش بر مبنای جابه‌جایی فریزهای ماره به علت شیب ضریب شکست سیال بر اثر اعمال شیب دمایی است. بدین منظور ابتدا مقدار جابه-جایی فریزهای ماره بر اثر اعمال شیب دمایی مثبت از پایین به بالا توسط نرم‌افزار شبیه ساز کامسول، محاسبه شد. با اعمال شیب دمایی مثبت از پایین به بالا انتقال گرما تنها از طریق هدایت اتفاق می‌افتد. سپس مقدار جابه‌جایی فریزهای ماره بر اثر اعمال شیب دمایی مثبت از چپ به راست محاسبه شد. در این صورت انتقال گرما در سیال از طریق هدایت و همرفت امکان‌پذیر است. نتایج نشان می‌دهد، جابه-جایی فریزها در حالتی که انتقال گرما صرفا از طریق هدایت است، همواره در یک راستا است در حالی که افت‌وخیزهایی در جابه‌جایی فریزهای ماره در حالتی که انتقال گرما از طریق هر دو مد گرمایی (همرفت و هدایت) اتفاق می‌افتد ، مشاهده می‌شود. همچنین پاسخ گرمایی محیط به اعمال شرایط مرزی متناوب نسبت به زمان، مورد بررسی قرار گرفت.

کلید واژه-انحراف سنجی ماره ای، هدایت گرمایی، همرفت

Simulation of heat transfer in fluids through conduction and convection using Moiré deflectometry

Afsane Rajaee Nezhad, Majid Rashidi Huyeh
Department of Physics, University of Sistan and Baluchestan,Zahedan,Iran

Abstract- In this study, the conduction and convection modes in heat transfer have been investigated using Moiré deflectometry method. The method is based on the displacement of Moiré fringes due to a refractive index gradient, induced by a temperature gradient. For this, were evaluated Moiré fringe displacements under a temperature gradient on the fluid from up to down by COMSOL Multiphysics software. In this case, just heat conduction mode may be participating in the heat transfer of the fluid. Then, Moiré fringe displacements were determined under a temperature gradient on the fluid from a horizontal side to another horizontal side. In this case, heat transfer in the fluid may be happen through both mods of conduction and convection. The results show that when the heat transfer is directed only through the conduction, the Moré fringe displacements happen on a one direction at any time, but in the case in which both thermal modes are excited, some fluctuation may be observed in the Moiré fringe displacements. In addition, medium thermal response has been study under a temporal periodic condition on the boundaries.
Keywords: Moire deflectometry, Conduction, Convection

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

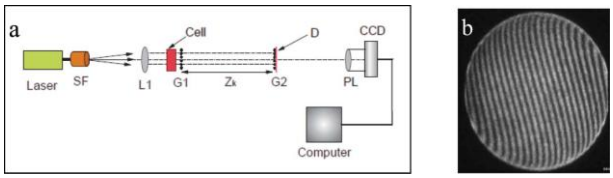
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

مقدمه

انتقال گرما در یک سیال از طریق هدایت، همرفت و تابش امکان‌پذیر است [۱]. روش‌های تجربی مختلفی برای اندازه‌گیری هدایت گرمایی سیالات وجود دارد که به‌دو دسته روش‌های گذرا[۲] و حالت پایا[۳] تقسیم می‌شود. روش‌های سیم داغ گذرا، آنالیزور ثابت گرمایی، نوسان دمایی و تکنیک 3ω از جمله روش‌های گذرای اندازه-گیری هدایت گرمایی سیالات می‌باشد[۴]. دو روش صفحه موازی پایدار و سلول استوانه‌ای از روش‌های حالت پایا می‌باشند[۳].این روش‌ها درکنار مزایای بسیار، دارای معایبی از جمله چیدمان پیچیده، پرهزینه و حساس به لرزش محیط نیز می باشند. به همین دلیل همواره محققین به دنبال روشی بوده اندکه فاقد مشکلات فوق باشد. یکی از این روش‌ها که در اندازه گیری های اپتیکی اهمیت زیادی دارد، تکنیک انحراف‌سنجی ماره‌ای است. این روش در سال های اخیر بسیار مورد توجه بوده است[۵]. در این تحقیق از این تکنیک برای بررسی مدهای هدایت و همرفت در انتقال گرما استفاده شده که در ادامه بیان می‌شود.

روش انحراف‌سنجی ماره‌ای

انحراف‌سنجی ماره‌ای یکی از روش‌های اندازه‌گیری هدایت گرمایی سیالات می‌باشد که در آن جسم مورد آزمایش در امتداد یک پرتو نور موازی قرار می‌گیرد[۶]. طرحواره‌ی چیدمان مورد استفاده در شکل(۱) آمده است.



شکل ۱.طرحواره‌ای از انحراف‌سنجی ماره‌ای، شامل سلول حاوی سیال و توری‌های رانکی G_1 و G_2 و پرده

نور تخت تکفامی از سلول حاوی سیال عبور داده می‌شود. دو توری رانکی مشابه G_1 و G_2 که در فاصله تالبوت (مرتبه اول) یکدیگر هستند، بلافاصله پس از سلول قرار داده می‌شوند. بر اثر برهم نهی خودتصویر G_1 روی G_2 ،فریزهای ماره روی پرده (صفحه‌ی مات) واقع در پشت G_2 ایجاد می‌شود. در صورتی‌که ضریب شکست محیط با دما تغییر کند، اعمال یک شیب گرمایی در محیط، یک اثر منشور گونه‌ای به‌وجود می‌آورد و موجب انحراف پرتو در جهت افزایش ضریب شکست خواهد شد. به‌همین دلیل خودتصویر توری اول روی توری دوم جابه‌جا می‌شود و در نتیجه فریزهای ماره نیز جابه‌جا می‌شوند. مقدار زاویه‌ی انحراف، وقتی نور به اندازه‌ی δx در محیط منتشر شود، به شرط کوچک بودن ضخامت و یا گرادیان کوچک دمایی برابر با انتگرال زیر است:

$$\alpha = \frac{1}{n}\int_0^{\delta x}\left(\frac{\partial n}{\partial y}\right)dx = \frac{1}{n}\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)\int_0^{\delta x}\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)dx \qquad (۱)$$

لذا مقدار زاویه‌ی انحراف باریکه‌ی نوری متناسب با انتگرال زیر است:

$$I = \int_0^{\delta x}\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)dx \qquad (۲)$$

اگر بلافاصله بعد از سلول حاوی سیال، از انحراف‌سنج ماره‌ای استفاده کنیم، مقدار جابه جایی الگوهای ماره در اثر زاویه‌ی انحراف باریکه‌ی ورودی به آن برابر مقدار زیر خواهد شد:

$$\Delta\eta = \left(\frac{2k\Lambda^2}{\lambda}\frac{1}{2\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right)\frac{1}{n}\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)\int_0^{\delta x}\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)dx \qquad (۳)$$

که در آن λ طول موج نور، Λ گام توری، θ زاویه‌ی بین خطوط خودتصویر توری G_1 و توری G_2 و n ضریب شکست محیط است.مقادیر θ و k (مرتبه‌ی خودتصویرسازی) و λ و Λ ثابت است.

مقدار انتگرال رابطه‌ی ۳ در سیالات وابسته به مدهای انتقال گرما می‌باشد. اگر شیب دمایی در جهت گرانش

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

ایجاد شود(از بالا به پایین) صرفا انتقال گرما از طریق هدایت امکان‌پذیر است. اما در صورتی‌که شیب گرمایی در راستایی غیر از آن مولفه‌ای داشته باشد، انتقال گرما از طریق همرفت نیز امکان‌پذیر است. به‌منظور شبیه‌سازی انتقال گرما از طرق یاد شده ما از نرم‌افزار کامسول استفاده کردیم که در ادامه به‌آن می‌پردازیم.

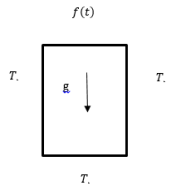
انتقال گرما

به‌منظور بررسی انتقال گرما از طریق هدایت و همرفت، از نرم‌افزار کامسول استفاده شد. سیال مورد نظر آب می‌باشد که درون یک سلول مکعب مستطیلی شکل در دمای اولیه‌ی 300K مفروض است. برای سادگی یکی از ابعاد را نامتناهی در نظر می‌گیریم. لذا انتقال حرارت به‌دو بعد محدود می‌شود که مستطیلی با ابعاد $3.7 \times 4.5\ cm$ محسوب شد. شرایط مرزی که مستقیما در مد انتقال حرارت سیال موثر است به‌دو صورت مختلف اعمال شد.

حالت اول: دمای همه‌ی سطوح بجز سطح بالایی در دمای ثابت ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته می‌شود و دمای سطح بالایی مطابق رابطه‌ی ۴ اعمال شد.

$$f(t) = 300 + A\sin^2(\omega t) \qquad (4)$$

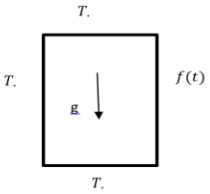
در این وضعیت انتقال گرما صرفا از طریق هدایت امکان‌پذیر است.



شکل ۲. شرایط مرزی اعمال شده در مد هدایت

ω فرکانس مشخصه‌ی گرمایش محیط است. لازم به‌توضیح است که انتخاب شرایط مرزی متناوب ممکن است اطلاعاتی دقیق‌تر در مورد ضریب هدایت گرمایی محیط فراهم آورد که در ادامه به‌آن پرداخته خواهد شد.

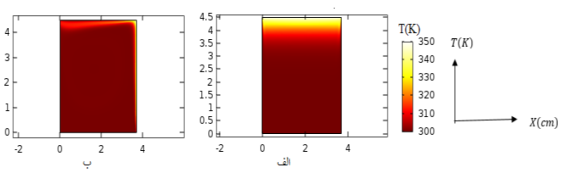
حالت دوم: به‌منظور ایجاد مد همرفت در سیال لازم است که یک شیب دمایی در جهتی غیر از راستای گرانش ایجاد شود. به‌همین دلیل شرایط مرزی مطابق شکل ۳ مشابه قسمت هدایت انتخاب شد.



شکل ۳. شرایط مرزی اعمال شده در مد همرفت

نتایج و بحث

ابتدا، دمای نقاط مختلف مایع به‌صورت تابعی از زمان در دو حالت یاد شده بالا، در نرم‌افزار کامسول به‌دست آمد. الگوی توزیع دما در دو حالت و در زمان $t=200$ ثانیه به ترتیب در نمودار شکل ۴- الف و ۴-ب آمده است. این زمان با توجه به مشخصه‌ی زمانی انتقال حرارت حالت پایا می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در مد هدایت دما از سطح بالایی به‌طور منظم تغییر می‌کند که نتیجه‌ی مستقیمی از معادله‌ی پخش است. در حالی‌که در مد همرفت همان‌گونه که در شکل ۳-ب می‌توان ملاحظه کرد، توزیع دما لزوما به‌طور یکنواخت نسبت به‌سطح گرم تغییر نمی‌کند. این به‌علت جابه‌جایی سیال بر اثر تغییر چگالی ناشی از تغییر دما است که به‌صورت همرفت نمایان می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که پربندهای هم‌دما در کنار سطح گرم از پایین به بالا، از یکدیگر دورتر می‌شوند. این پدیده نیز به‌طور مستقیم به مد همرفت وابسته است. از طرفی با توجه به‌این واقعیت که در هنگام گرمایش از دیواره‌ی کناری مدهای هدایت و همرفت هر دو مسئول انتقال گرما هستند، شیب گرمایی در کنار دیواره نسبت به‌حالتی که گرمایش از بالا ایجاد می‌شود (صرفا مد هدایت)، بیشتر است.



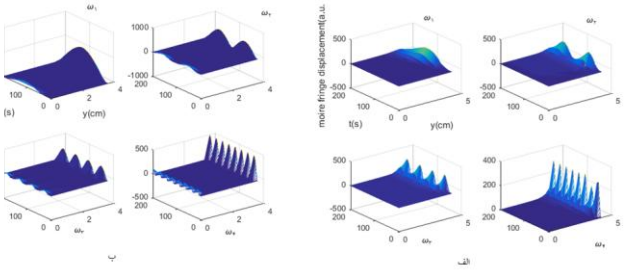
شکل ۴. الگوی توزیع دمای سلول در نقاط مختلف در حالت اول، شامل انتقال حرارت از طریق هدایت (الف) و الگوی توزیع دما در حالت دوم شامل انتقال حرارت از طریق همزمان هدایت و همرفت (ب) در حالت پایا ($t=200s$)

همچنین مقدار انتگرال I، که متناسب با جابه‌جایی فریزهاست در دو حالت ۱و۲ به‌صورت تابعی از ارتفاع

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

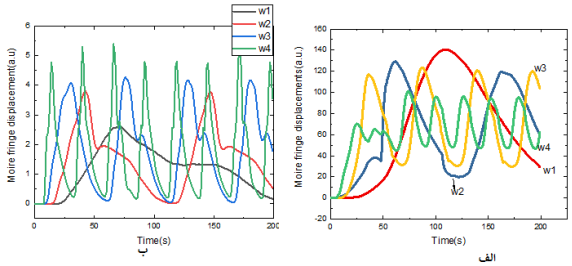
سلول دربازه زمانی $۲۰۰S$ به ازای ۴ فرکانس $\omega_0 = 0.02\pi, \omega_1 = \frac{1}{4}\omega_0, \omega_2 = \frac{1}{2}\omega_0, , \omega_3 = \omega_0, , \omega_4 = 2\omega_0$برای گرمایش از بالا (هدایت) و از کنار (همرفت +هدایت) محاسبه شد. نتایج در نمودارهای شکل ۵-الف و ۵-ب آمده است.



شکل5.مقدار محاسبه شده‌ی انتگرال I، متناسب با جابه‌جایی فریز ماره در حالت اول (الف) و حالت دوم (ب)

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در حالت اول (شکل ۵-الف) در فواصل نسبتا کم از سطح گرم، جابه‌جایی فریزها، متاثر از شرایط مرزی چند قله وجود دارد. اما با دور شدن از سطح گرم، یک قله با تاخیر زمانی قابل مشاهده است. این رفتار مستقیما به انتقال حرارت از طریق هدایت وابسته‌است. در حقیقت همان گونه که اشاره شد، هدایت گرمایی از معادله‌ی پخش (فوریه) تبعیت می‌کند. با توجه به شکل ۵-الف زمان مشخصه‌ی هدایت گرمایی به‌فرکانس وابسته است و هرچه فرکانس کمتر باشد زمان مشخصه‌ی هدایت گرمایی بیشتر است در نتیجه عمق نفوذ بیشتر می‌باشد. در صورتی‌که زمان مشخصه‌ی هدایت گرمایی کوچک‌تر از زمان تغییرات باشد، نوسانات حرارتی نسبت به‌زمان قابل مشاهده خواهد بود. لذا زمان بین چند پالس شکل با عمقی که نوسانات محو می‌شود، تغییر می‌کند. در نمودار شکل ۵-ب، همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مقدار جابه‌جایی فریزها در فاصله‌ی نزدیک به سطح گرم مقدار قابل توجهی دارد و پس از آن مقدار جابه‌جایی تقریبا صفر است.

به‌منظور مقایسه و تجزیه و تحلیل نمودارهای شکل ۵-الف و ۵-ب،در ارتفاع ثابت سیال نسبت به منبع گرمایی (cm ۰/۶، جابه‌جایی فریز ماره نسبت به زمان برای هر چهار فرکانس رسم شد.



شکل ۶-الف. مقایسه‌ی جابه‌جایی فریزهای ماره در ۴فرکانس یادشده در ارتفاع $0.6\ cm$ نسبت به سطح گرم در مد هدایت شکل ۶-ب . مقایسه‌ی جابه‌جایی فریزهای ماره در ۴فرکانس یادشده در ارتفاع $۰,۶\ cm$نسبت به سطح گرم در مد همرفت

با توجه به‌نمودارهای ۶-الف و ۶-ب مشاهده می‌شود که مقدار جابه‌جایی فریزها در این فاصله نسبت به سطح گرم کمتر از مد هدایت می‌باشد چون در این فاصله تغییرات چندانی در دما و شیب آن وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

به منظور بررسی مدهای هدایت و همرفت در انتقال گرما می‌توان از انحراف‌سنجی ماره‌ای استفاده کرد. زمانی‌که شیب مثبت دما در جهتی غیر از عکس جهت گرانش باشد، هر دو مد هدایت و همرفت اتفاق می‌افتد. در حالی که وقتی شیب مثبت دما رو به بالا است، انتقال حرارت از طریق هدایت امکان‌پذیر است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد انحراف‌سنجی فریزهای ماره می‌تواند به منظور بررسی مدهای انتقال حرارت به کار برده شود. به خصوص با تغییرات متناوب شرایط مرزی می‌توان به نتایج دقیقی نایل آمد.

مراجع

[1] Hadadian, M., Samiee,S., Ahmadzadeh,H., Goharshadi,E., *Nanofluids for heat transfer enhancement–A review*,Physical Chemistry Research, 1(1), pp. 1-33, 2013

[2] Tang Tsz Loong, Hamidon Salleh, *A review on measurement techniques of apparent thermal*, Faculty of Mechanical Manufacturing Engineering, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia,2017 conductivity of nanofluids

[3] G. Paul, M. Chopkar, I. Manna, P.K. Das, *Techniques for measuring the the conductivity of nanofluids: A review*, Department Metallurgical and Materials Engineering, Indian Institute of Technology Kharagpur,2010

[4]سیف‌الله رسولی،پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان،(۱۳۷۶)

. [5]م. ا. شفیعی, "پایان نامه کارشناسی ارشد," دانشگاه سیستان و بلوچستان, ۱۳۹۴.

[۶] Rashidi Huyeh, M., Goudarzi, P., Rasouli,S., *Study of Thermal Conductivity of Nanofluids Containing Gold Nanoparticles Using Moiré Deflectometry*, International Journal of Green Nanotechnology, 4(3), pp.385-388, 2012

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]