



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.  
۱۱-۹ 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 جابه‌جایی فریزهای ماره بر اثر اعمال شیب دمایی مثبت از پایین به بالا توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز 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، جابه‌جایی فریزها در حالتی که انتقال گرما صرفاً 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.

کلیدواژه-انحراف‌سنجی ماره‌ای، هدایت گرمایی، همرفت

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

Afsane Rajaei 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 happen through both mods of conduction and convection. The results show that when the heat transfer is directed only through the conduction, the Moiré 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.

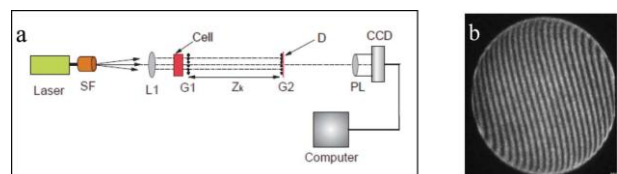
**Keywords:** Moire deflectometry, Conduction, Convection

## مقدمه

انتقال گرما در یک سیال از طریق هدایت، همرفت و تابش امکان پذیر است [۱]. روش های تجربی مختلفی برای اندازه گیری هدایت گرمایی سیالات وجود دارد که به دو دسته روش های گذرا [۲] و حالت پایا [۳] تقسیم می شود. روش های سیم داغ گذرا، آنالیزور ثابت گرمایی، نوسان دمایی و تکنیک  $3\omega$  از جمله روش های گذرای اندازه گیری هدایت گرمایی سیالات می باشد [۴]. دو روش صفحه موازی پایدار و سلول استوانه ای از روش های حالت پایا می باشند [۳]. این روش ها در کنار 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 اند که فاقد مشکلات فوق باشد. یکی از این روش ها که در اندازه گیری های اپتیکی اهمیت زیادی دارد، تکنیک انحراف سنجی ماره ای 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 می شود.

## روش انحراف سنجی ماره ای

انحراف سنجی ماره ای یکی از روش های اندازه گیری هدایت گرمایی سیالات می باشد که در آن جسم مورد آزمایش در امتداد یک پرتو نور موازی قرار می گیرد [۶]. طرحواره ی چیدمان مورد استفاده در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱. طرحواره ای از انحراف سنجی ماره ای، شامل سلول حاوی سیال و توری های رانکی  $G_1$  و  $G_2$  و پرده

نور تحت تکفامی از سلول حاوی سیال عبور داده می شود. دو توری رانکی مشابه  $G_1$  و  $G_2$  که در فاصله تالیبوت (مرتب اول) یکدیگر هستند، بلافاصله پس از سلول قرار داده می شوند. بر اثر برهم نهی خودتصویر  $G_1$  روی  $G_2$ ، فریزهای ماره روی پرده (صفحه ی مات) واقع در پشت  $G_2$  ایجاد می شود. در صورتی که ضریب شکست محیط با دما تغییر کند، اعمال یک شیب گرمایی در محیط، یک اثر منشور گونه ای به وجود می آورد و موجب انحراف پرتو در جهت افزایش ضریب شکست خواهد شد. به همین دلیل خودتصویر توری اول روی توری دوم جابه جا می شود و در نتیجه فریزهای ماره نیز جابه جا می شوند. مقدار زاویه ی انحراف، وقتی نور به اندازه ی  $\delta x$  در محیط منتشر شود، به شرط کوچک بودن ضخامت و یا گرادیان کوچک دمایی برابر با انتگرال زیر است:

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

لذا مقدار زاویه ی انحراف باریکه ی نوری متناسب با انتگرال زیر است:

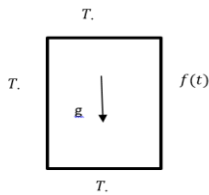
$$I = \int_0^{\delta x} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx \quad (2)$$

اگر بلافاصله بعد از سلول حاوی سیال، از انحراف سنج ماره ای استفاده کنیم، مقدار جابه جایی الگوهای ماره در اثر زاویه ی انحراف باریکه ی ورودی به آن برابر مقدار زیر خواهد شد:

$$\Delta \eta = \left( \frac{2k\lambda^2}{\lambda} \frac{1}{2 \sin(\frac{\theta}{2})} \right) \frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right) \int_0^{\delta x} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx \quad (3)$$

که در آن  $\lambda$  طول موج نور،  $\Lambda$  گام توری،  $\theta$  زاویه ی بین خطوط خودتصویر توری  $G_1$  و توری  $G_2$  و  $n$  ضریب شکست محیط است. مقادیر  $\theta$  و  $k$  (مرتبیه ی خودتصویرسازی) و  $\lambda$  و  $\Lambda$  ثابت است.

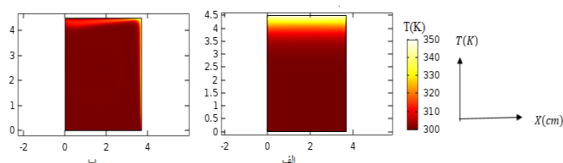
مقدار انتگرال رابطه ی ۳ در سیالات وابسته به مدهای انتقال گرما می باشد. اگر شیب دمایی در جهت گرانش



شکل ۳. شرایط مرزی اعمال شده در مد همرفت

### نتایج و بحث

ابتدا، دمای نقاط مختلف مابعد به صورت تابعی از زمان در دو حالت یاد شده بالا، در نرم افزار کامسول به دست 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 مشخصه زمانی انتقال حرارت حالت پایا می باشد. همان گونه که ملاحظه می شود در مد هدایت دما از سطح بالایی به طور منظم تغییر می کند که نتیجه مستقیمی از معادله ی پخش است. در حالی که در مد همرفت همان گونه که در شکل ۳-ب می توان ملاحظه کرد، توزیع دما لزوماً به طور یکنواخت نسبت به سطح گرم تغییر نمی کند. این به علت جابه جایی سیال بر اثر تغییر چگالی ناشی از تغییر دما است که به صورت همرفت نمایان می شود. همچنین مشاهده می شود که پربندهای هم دما در کنار سطح گرم از پایین به بالا، از یکدیگر دورتر می شوند. این پدیده نیز به طور مستقیم به مد همرفت وابسته است. از طرفی با توجه به این واقعیت که در هنگام گرمایش از دیواره ی کناری مدهای هدایت و همرفت هر دو مسئول انتقال گرما هستند، شیب گرمایی در کنار دیواره نسبت به حالتی که گرمایش از بالا ایجاد می شود (صرفاً 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 جابه جایی فریزهاست در دو حالت ۱ و ۲ به صورت تابعی از ارتفاع

ایجاد شود (از بالا به پایین) صرفاً انتقال گرما از طریق هدایت امکان پذیر است. اما در صورتی که شیب گرمایی در راستایی غیر از آن مولفه ای داشته باشد، انتقال گرما از طریق همرفت نیز امکان پذیر است. به منظور شبیه سازی انتقال گرما از طرق یاد شده ما از نرم افزار کامسول استفاده کردیم که در ادامه به آن می پردازیم.

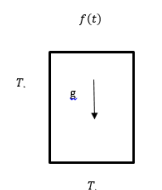
### انتقال گرما

به منظور بررسی انتقال گرما از طریق هدایت و همرفت، از نرم افزار کامسول استفاده شد. سیال مورد نظر آب می باشد که درون یک سلول مکعب مستطیلی شکل در دمای اولیه ی  $300K$  مفروض است. برای سادگی یکی از ابعاد را نامتناهی در نظر می گیریم. لذا انتقال حرارت به دو بعد محدود می شود که مستطیلی با ابعاد  $3.7 \times 4.5 cm$  محسوب شد. شرایط مرزی که مستقیماً در مد انتقال حرارت سیال موثر است به دو صورت مختلف اعمال شد.

**حالت اول:** دمای همه ی سطوح بجز سطح بالایی در دمای ثابت  $300$  کلون در نظر گرفته می شود و دمای سطح بالایی مطابق رابطه ی ۴ اعمال شد.

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

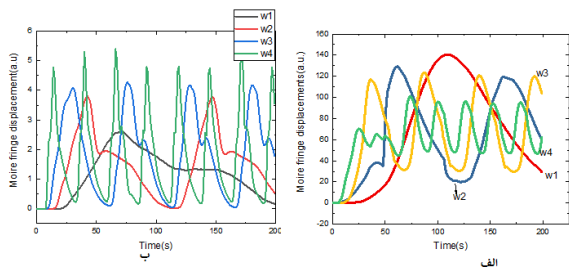
در این وضعیت انتقال گرما صرفاً از طریق هدایت امکان پذیر است.



شکل ۲. شرایط مرزی اعمال شده در مد هدایت

$\omega$  فرکانس مشخصه ی گرمایش محیط است. لازم به توضیح است که انتخاب شرایط مرزی متناوب ممکن است اطلاعاتی دقیق تر در مورد ضریب هدایت گرمایی محیط فراهم آورد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

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



شکل ۶-الف. مقایسه‌ی جابه‌جایی فریزهای ماره در ۴ فرکانس یادشده در ارتفاع  $0.6 \text{ cm}$  نسبت به سطح گرم در مد هدایت شکل ۶-ب. مقایسه‌ی جابه‌جایی فریزهای ماره در ۴ فرکانس یادشده در ارتفاع  $0.6 \text{ cm}$  نسبت به سطح گرم در مد همرفت با توجه به نمودارهای 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.

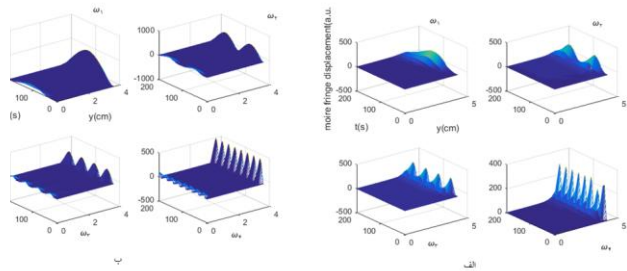
### نتیجه‌گیری

به منظور بررسی مدهای هدایت و همرفت در انتقال گرما می‌توان از انحراف‌سنجی ماره‌ای استفاده کرد. زمانی که 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 conductivity of nanofluids*, Faculty of Mechanical Manufacturing Engineering, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 2017
- [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] . ا. شفیع، "پایان نامه کارشناسی ارشد." دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۹۴
- [6] 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

سلول در بازه زمانی  $200 \text{ S}$  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.



شکل ۵. 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 نسبتاً کم از سطح گرم، جابه‌جایی فریزها، متأثر از شرایط مرزی چند قله وجود دارد. اما با دور شدن از سطح گرم، یک قله با تاخیر زمانی قابل مشاهده است. این رفتار مستقیماً به انتقال حرارت از طریق هدایت وابسته است. در حقیقت همان‌گونه که اشاره شد، هدایت گرمایی از معادله‌ی پخش (فوریه) تبعیت می‌کند. با توجه به شکل ۵-الف زمان مشخصه‌ی هدایت گرمایی به فرکانس وابسته است و هرچه فرکانس کمتر باشد زمان مشخصه‌ی هدایت گرمایی بیشتر است در نتیجه عمق نفوذ بیشتر می‌باشد. در صورتی که زمان مشخصه‌ی هدایت گرمایی کوچک‌تر از زمان تغییرات باشد، نوسانات حرارتی نسبت به زمان 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 تقریباً صفر است.

به منظور مقایسه و تجزیه و تحلیل نمودارهای شکل ۵-الف و ۵-ب، در ارتفاع ثابت سیال نسبت به منبع گرمایی ( $CM$ )، جابه‌جایی فریز ماره نسبت به زمان برای هر چهار فرکانس رسم شد.