اندازه‌گیری هدایت گرمایی سیالات با کمک روش انحراف‌سنجی ماره

مریم السادات شفیعی[۱]، مجید رشیدی هویه[۱]، مهدی شفیعی آفارانی[۲]

[۱]گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان
[۲]گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده – در این پژوهش، به اندازه‌گیری هدایت گرمایی سیالات (آب و اتیلن گلیکول) به کمک روش انحراف‌سنجی ماره پرداخته‌شده 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 براثر اعمال شیب دمایی از بالا به پایین، اندازه‌گیری شد. به دلیل اعمال شیب دمایی از بالا به پایین، انتقال گرما در سیال صرفا از طریق هدایت گرمایی امکان‌پذیر است. با توجه به شبیه‌سازی انتقال گرما در سیال و محاسبه‌ی مقدار جابه‌جایی فریزهای ماره به کمک نرم افزار کامسول(*COMSOL*)، هدایت گرمایی دو سیال آب و اتیلن گلیکول ارزیابی شد. هدایت گرمایی بدست‌آمده از این طریق برای این دو سیال تطابق خوبی با مقدار گزارش شده دارد.

کلید واژه- انحراف‌سنجی ماره ، خواص گرما-نوری ، سیال ، هدایت گرمایی.

Measurement of thermal conductivity of fluids using moiré deflectometry

Maryam sadat Shafiee[۱], Majid Rashidi Huyeh[۱], Mahdi Shafiee Afarani[۲]

[1]Department of Physics, University of Sistan and Baluchestan, 98135-674, Zahedan, Iran.

[2] Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, 98135-674, Zahedan, Iran.

Abstract- In this study, thermal conductivity of fluids (Water and Ethylene glycol) have been determined using moiré deflectometry method**.** The method is based on the displacement of moiré fringes due to a refractive index gradient, affected by temperature gradient. For this, were measured moiré fringes displacement under a temperature gradient on the fluid from up to down. As applied temperature gradient is from up to down, just heat conduction mode may be participate to heat transfer in the fluid. The thermal conductivity of fluid (water and ethylene glycol) was then evaluated by determination of the heat transfer in fluid, and so the moiré fringe displacements, using COMSOL software. The thermal conductivity values obtained using current method are very good agreement with those reported before.

Keywords: Moiré deflectometry, Thermo-optical properties, Fluid , Thermal conductivity.

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

۱- مقدمه

خواص فیزیکی سیالات(مایعات و گازها)، از قبیل هدایت گرمایی، نقش مهمی در طراحی طیف گسترده‌ای از کاربردهای مهندسی، از جمله مبدل‌های حرارتی ایفا می-کند[۱]. انتقال گرما از طرق هدایت، همرفت و تابش امکان-پذیر است[۲]. هدایت، انتقال انرژی از ذرات پرانرژی یک ماده به ذرات کم انرژی مجاور است به‌طوری‌که نتیجه‌ای از فعل و انفعالات بین ذرات است[۱]. هدایت‌گرمایی در مواد با توجه به معادله‌ی پخش حرارتی به کمک معادله‌ی فوریه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial T}{\partial t}(\mathbf{r},t) = D\nabla^2 T(\mathbf{r},t) \qquad (۱)$$

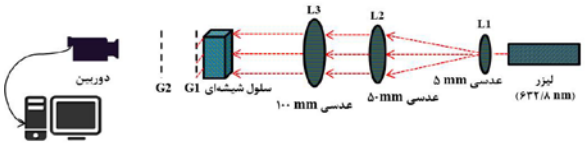
در معادله‌ی (۱)، $T(\mathbf{r},t)$ دمای نقطه‌ی $\mathbf{r}$ در لحظه‌ی t است. D ضریب پخش گرمایی است که ممکن است به ضریب هدایت گرمایی k و ظرفیت گرمایی ویژه در واحد حجم، C، به صورت زیر مربوط شود:

$$k = DC \qquad (۲)$$

همان‌گونه که در معادلات بالا مشخص است سرعت انتقال گرما از طریق ضریب پخش گرمایی D، مستقیما به ضریب هدایت گرمایی k، مرتبط می‌شود. به عبارت دیگر تحولات زمانی دما در هر نقطه از ماده به هدایت گرمایی ماده وابسته می‌شود[۲]. از سوی دیگر مسیر یک پرتو نورانی می‌تواند به علت شیب ضریب شکست، ناشی از شیب دمایی، منحرف شود. در حقیقت بر اثر تغییر دمای محیط ضریب شکست نیز می‌تواند تغییر کند که با توجه به ضریب گرما-نوری، $\frac{\partial n}{\partial T}$، بیان می شود. این ضریب وابسته به طول موج نور فرودی، می‌تواند مقادیر مختلف مثبت یا منفی را دارا باشد [۳]. بر اثر اعمال شیب دمایی، شیب ضریب شکست نیز به وجود می‌آید. حال اگر پرتوی عمود بر راستای شیب ضریب شکست بر ماده تابیده شود، این پرتو در راستای افزایش ضریب شکست منحرف می‌شود. در این مقاله، روشی بر اساس انحراف‌سنجی ماره ارائه می‌شود که به کمک آن می-توان ضریب هدایت گرمایی یک سیال را ارزیابی نمود.

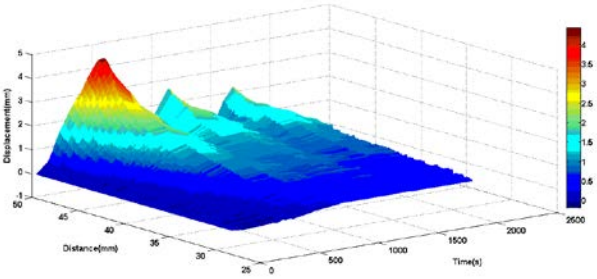
۲- روش انحراف سنجی ماره

همان‌گونه که اشاره شد، برای اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی از روش انحراف سنجی ماره استفاده شده است. لازم به توضیح است که این روش تا کنون جهت اندازه‌گیری هدایت گرمایی هوا به کار برده شده است [۴]. طرحواره‌ی چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده، در شکل ۱ آمده است. یک جبهه‌ی موج تخت با استفاده از عدسی‌های L_1، L_2 و L_3 ایجاد می‌شود. سپس این جبهه‌ی موج از سلول شیشه-ای مکعب مستطیلی حاوی سیال ، عبور داده می‌شود. دو توری رانکی مشابه G_1 و G_2 که در فاصله‌ی تالبوت مرتبه



شکل۱. طرحواره‌ای از چیدمان آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی.

اول یکدیگر هستند، بلافاصله پس از سلول قرار داده می-شود. بر اثر برهم‌نهی خودتصویر G_1 و G_2 فریزهای ماره روی پرده‌ی نیم‌شفافی که پشت توری G_2 قرار دارد، ایجاد و توسط یک دوربین ثبت می‌شود. شیب دمایی با کمک یک صفحه‌ی حرارتی که روی سلول شیشه‌ای قرار داده شده، ایجاد می‌شود. صفحه‌ی حرارتی شامل یک صفحه‌ی تخت از جنس مس است و سطح تماس بره‌ی تخت مسی با سلول طوری تراشیده شده است که در سلول را می‌پوشاند به - طوری که کاملا با سیال می‌تواند در تماس باشد. این صفحه توسط یک مقاومت حرارتی که به یک منبع تغذیه متصل است، گرم می‌شود. از یک ترموستات نیز برای کنترل دما استفاده شد. مدار الکترونیکی نیز جهت اندازه‌گیری و ثبت دما نسبت به زمان طراحی شد. لازم به ذکر است با توجه به این واقعیت که شیب دمایی ایجاد شده از بالا به پایین است، انتقال حرارت در سیال صرفا از طریق هدایت گرمایی امکان-پذیر است. بر اثر اعمال گرادیان دما در سیال، خودتصویر توری اول روی توری دوم جابه‌جا می‌شود در نتیجه فریزهای ماره نیز جابه‌جا می‌شود. با استفاده از کدنویسی در متلب (MATLAB) میزان جابه‌جایی یکی از فریزها در وسط سیال، نسبت به زمان اندازه‌گیری شد. شکل (۲) نمونه‌ای از جابه‌جایی افقی فریزهای ماره را بر اثر شیب دمایی در ارتفاع‌ها مختلف سیال نسبت به زمان نشان می‌دهد.



شکل ۲. مقدار اندازه‌گیری شده‌ی جابه‌جایی فریز ماره برای سیال اتیلن گلیکول در ولتاژ ۶۰ ولت.

مقدار جابه‌جایی جزیی فریزهای ماره، $\delta(\Delta\eta)$، بر اثر عبور نور به اندازه‌ی δl در محیطی با شیب دمایی عمودی $\frac{\partial T}{\partial z}$ با رابطه‌ی زیر داده شود [۴]:

$$\delta(\Delta\eta) = \frac{2\Lambda^2}{\lambda}\frac{1}{2\sin(\theta/2)}\frac{1}{n}\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)\delta l \qquad (۳)$$

که در آن λ طول موج نور، Λ گام توری، θ زاویه بین خطوط خودتصویر توری G1 و توری G2 و n ضریب شکست محیط است. با توجه به این‌که در یک آزمایش مشخص مقادیر Λ، λ و θ ثابت است، مقدار جابه‌جایی فریزهای ماره پس از عبور نور از محیط عبارت است از:

$$\Delta\eta = \left(\frac{2k\Lambda^2}{\lambda}\frac{1}{2\sin(\theta/2)}\right)\int\frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial T}.\frac{\partial T}{\partial z}\delta l \qquad (۴)$$

لذا مقدار جابه‌جایی فریزها با

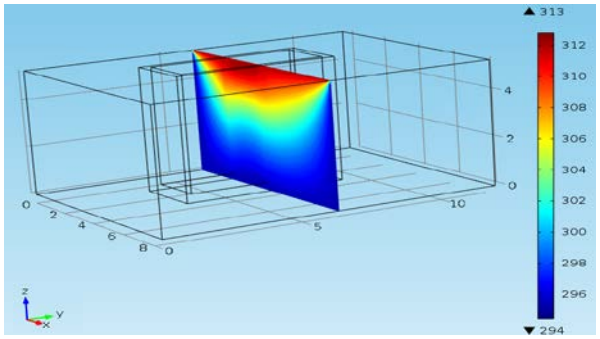
$$I = \int_C \frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial T}.\frac{\partial T}{\partial z}\delta l \qquad (۵)$$

متناسب است. از طرفی مقدار زمانی شیب عمودی دما $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)$ به هدایت گرمایی وابسته است. برای ارزیابی شیب دمایی $\frac{\partial T}{\partial z}$ و در نتیجه هدایت گرمایی ماده، دمای محیط ابتدا با توجه به رابطه‌ی (۱) به کمک بخش هدایت گرمایی بسته‌ی محاسباتی کامسول محاسبه شد، سپس مقدار انتگرال I به ازای مقادیر مختلف k، وابسته به زمان در ارتفاع‌های مختلف، از نتایج استخراج شد.

۳- شبیه‌سازی

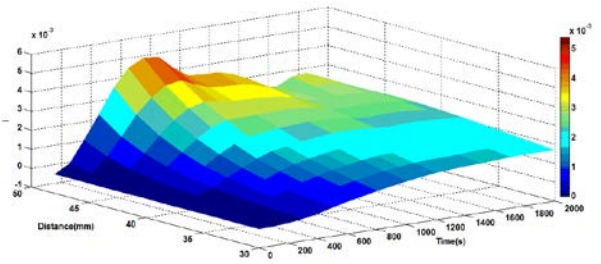
طبق رابطه‌ی (۵) میزان جابه‌جایی فریزها با انتگرال I متناسب است. ازاین‌رو در نرم افزار شبیه‌ساز کامسول، مدلی طراحی شد که بتوان مقدار شیب دمایی و در نتیجه این انتگرال را محاسبه کرد. بدین منظور و با توجه به اعمال گرادیان دمای در سیال از بالا به پایین، از بخش هدایت گرمایی در جامدات نرم‌افزار کامسول استفاده شد. شکل (۳) هندسه به کار برده شده مطابق شرایط آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. این شکل شامل سه محیط مکعب مستطیلی است که به سیال، سلول شیشه‌ای و هوای اطراف اختصاص دارد. شرایط اولیه و مرزی نیز به صورت زیر در نظر گرفته شد:

- دمای همه‌ی نقاط در لحظه‌ی شروع برابر دمای محیط در نظر گرفته شد.
- دمای سطوح جانبی و سطح قاعده در زمان‌های مختلف مقدار ثابت و معادل دمای محیط در نظر گرفته شد.
- دمای سطح بالایی با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنسور دمایی در آزمایش مربوطه اعمال شد.



شکل۳. هندسه و ابعاد مدل استفاده شده در نرم افزار شبیه ساز کامسول. تحلیل جابه‌جاییی فریزهای ماره با توجه معادله‌ی(۵) در صفحه‌ی مشخص شده در شکل که به موازات xoz و از مرکز سلول می‌گذرد، انجام شده است. نمودار در مقیاس رنگی صفحه‌ی مذکور بیان‌گر دمای محیط در لحظات پایانی آزمایش مربوطه است.

نمونه‌ای از محاسبات انجام شده در شکل ۴ آمده است. ضریب هدایت گرمایی سیال k، بین ۱/۵- ۰/۵ تغییر داده شد و انتگرال I به ازای هر ضریب هدایت گرمایی محاسبه شد.

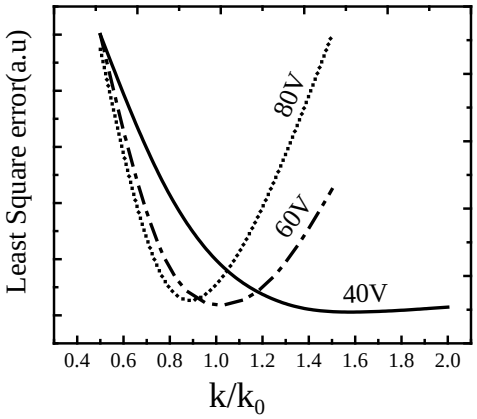


شکل۴. مقدار محاسبه شده‌ی انتگرال I متناسب با جابه‌جایی فریز ماره برای سیال اتیلن گلیکول در ولتاژ ۶۰ ولت.

به منظور برآورد ضریب هدایت گرمایی سیال، از روش کمینه کردن مجموع مربعات استفاده شد. مجموع مربعات به ازای هر ضریب هدایت گرمایی از رابطه‌ی ۶ محاسبه شد و مقدار کمینه برای هر سیال بدست آمد:

$$s = \sum_{t,z}\sum\left(d_{e,n} - d_{t,n}\right)^2 \qquad (۶)$$

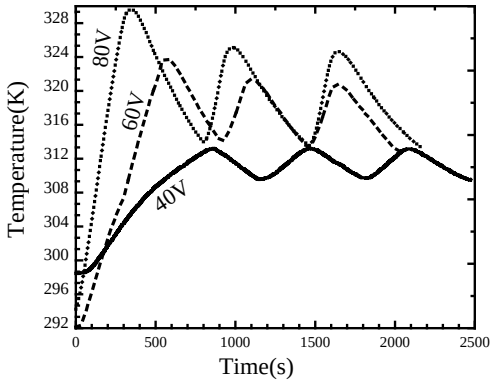
$d_{e,n}$ و $d_{t,n}$ به ترتیب بیان‌گر مقادیر تجربی و محاسبه‌شده‌ی جابه‌جایی است که نسبت به بیشینه مقدار بهنجار شده است. شکل ۵ نمونه‌ای از محاسبات انجام شده به منظور تعیین هدایت گرمایی نسبی ($\frac{k}{k_0}$) اتیلن گلیکول آمده است. مشاهده می‌شود که مقدار اندازه‌گیری شده، معادل ۱ است که تطابق بسیار خوبی با مقادیر گزارش شده دارد.



شکل۵. نمودار مجموع مربعات برای اتیلن‌گلیکول در سه ولتاژ مختلف.

۳-۱- نتایج

روش فوق برای تعیین هدایت گرمایی دو سیال آب و اتیلن گلیکول به کار برده شد. بدین منظور صفحه‌ی حرارتی در دفعات مختلف، تحت ولتاژهای متفاوت بین ۴۰ تا ۸۰ ولت قرار داده شد. در نمودار شکل ۶ تغییرات زمانی دمای صفحه‌ی حرارتی نشان داده شده است. از نمودار مشخص است که دمای مربوطه، وابسته به ولتاژ تغییر می‌کند. با افزایش ولتاژ دامنه تغییرات بیشتر و فرکانس آن تغییر می‌کند. این رفتار از یک سو به پاسخ گرمایی محیط و از سوی دیگر به پاسخ گرمایی صفحه‌ی حرارتی بستگی دارد.



شکل۶. تغییرات زمانی دمای سیال اتیلن‌گلیکول در سه ولتاژ مختلف.

مقدار اندازه‌گیری شده برای هدایت گرمایی نسبی آب، k/k_0 ، معادل ۰/۹ به دست آمد. این مقدار به اندازه ۱۰ درصد نسبت به هدایت گرمایی آب انحراف نشان می‌دهد. این مقدار انحراف می‌تواند به دلیل خطاهای ناشی از آزمایش باشد. لازم به توضیح است که نتایج بدست آمده در ولتاژ ۴۰ ولت، مطلوب نبوده است. در شکل ۶، ضریب هدایت گرمایی نسبی اتیلن گلیکول، بین ۰/۹ تا ۱ متغیر است که معادل انحراف کمتر از ۱۰ درصد است. لازم به ذکر است که نتایج مطلوب به ازای اعمال ولتاژ ۶۰ ولت به صفحه گرم کننده به دست آمد. همچنین برای اتیلن‌گلیکول در ۴۰ ولت نتایج قابل اعتماد نیست. این می‌تواند به علت نحوه‌ی گرمایش سیال مربوطه و دامنه تغییرات گرمایی باشد که نیاز به تحقیق بیشتر در این مورد است.

۴- نتیجه‌گیری

به منظور اندازه‌گیری هدایت گرمایی دو سیال آب و اتیلن گلیکول از روش انحراف‌سنجی ماره استفاده شد و برای شبیه‌سازی آزمایش‌های انجام شده، نرم‌افزار شبیه‌ساز کامسول به کار برده شد. نتایج نشان داد که این روش برای هدایت گرمایی ده درصد خطا دارد. خطای موجود در اندازه‌گیری ممکن است با استفاده از ابزاری پیشرفته‌تر جهت کنترل راحت‌تر دما به حداقل برسد؛ بنابراین می‌توان این روش را با توجه به سادگی و هزینه پایین آن، روش مناسبی برای اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی سیال دانست.

سپاسگزاری

این تحقیق با پشتیبانی مادی و معنوی دانشگاه سیستان و بلوچستان انجام شده است.

مراجع

[1] Abu-Mulaweh, Hosni I., D. W. Mueller, "*The determination of the thermal conductivity of fluids*", World Transactions on Engineering and Technology Education,Vol. 5, No. 3,p. 429, 2006.

[2] Roland, W. Lewis, P. E. R. U. M. A. L. Nithiarasu, K. N. Seetharamu, *Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2004.

[3] S., Yaltkaya , R. Aydin, "Experimental investigation of temperature effect on the refractive index of dye laser liquids", Turk. J. Phys, 26, pp.41-47, 2002

[۴] سیف اله رسولی، پایان نامه کارشناسی ارشد، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان، ۱۳۷۶.