بیست و چهارمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و
دهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۱۰ الی ۱۲ بهمن ۹۶ - دانشگاه شهرکرد
24th Iranian Conference on Optics and Photonics (ICOP 2018) and
9th Iranian Conference on Photonics Engineering and Technology (ICPET 2018)
Jan 30 - Feb 1 , 2018 - Shahrekord University

اندازه‌گیری ضریب سره در مایعات با استفاده از انحراف‌سنجی ماره

احد صابر[۱]، سمیرا رضایی[۱]، سحر گل‌محمدی[۱]

۱- دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، کد پستی ۵۶۱۹۹-۱۱۳۶۷

در این مقاله روش جدیدی مبتنی بر تکنیک انحراف‌سنجی ماره برای اندازه‌گیری ضریب پخش گرمایی مایعات ارائه شده است و ضریب سره محلول ۱۰ درصد ساکارز در آب اندازه‌گیری شده است. بدین منظور مخزن پخش حاوی محلول یکنواخت آب و شکر در سیستم انحراف‌سنج ماره قرار می‌گیرد و دو انتهای آن توسط یک سیستم خنک کننده آبی در دماهای متفاوت T_0 و T_1 نگه داشته می‌شود. به‌خاطر اختلاف دما، گرادیان دمای خطی در سیستم ایجاد می‌شود و موجب شارش جرم از یک سمت به سمت دیگر می‌شود. با گذشت زمان در محیط گرادیان غلظت نیز ایجاد می‌شود که آن نیز باعث شارش ماده در جهت عکس می‌گردد. در نهایت این دو پدیده به حالت تعادل می‌رسند تا شارش خالص جرم صفر شود. با قطع کردن اختلاف دما ابتدا گرادیان دما و سپس گرادیان غلظت از بین می‌رود و باعث جابجایی فریزهای ماره می‌شود. از روی میزان انحراف فریزهای ماره گرادیان ضریب شکست و سپس ضریب سره محاسبه می‌شود.

کلید واژه- انحراف سنجی ماره – ضریب سره – گرادیان دما

Measuring the soret coefficient of liquids using moiré deflectometry

Ahad Saber[1], Samira Rezaei[1], Sahar Golmohamadi[1]

Department of Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, 56199-11367, Iran.

A new method is introduced to measure the thermal diffusion coefficient, based on moiré deflectometry. The soret coefficient of sucrose-water solution of 10% is measured. A cell containing the homogeneous solution of sucrose and water solution is placed in a moiré deflectometry system. Using a water cooling system, the two end of the cell is held on different temperatures T_0 and T_1. This causes a linear temperature gradient inside the solution and a mass transfer occurred from one side to other side. A concentration gradient is also occurred over time, which causes mass transfer in opposite direction. Finally these two phenomena reach to equilibrium and the net mass transfer gets zero. By cutting off the temperature difference, first, the temperature gradient, and then the concentration gradient, disappears, and causes the displacement of moiré fringes. The moiré fringes deflections are used to measure the refractive index gradient inside the cell and then the soret coefficient is derived.

Keywords: Moiré deflectometry, Soret coefficient, Temperature gradient.

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

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

۱- مقدمه

اگر محیطی دارای ناهمگنی دمایی باشد، حرکت مولکولی ناشی از آن را پخش گرمایی می‌گویند که به اثر سره معروف است [۱]. این اثر توسط دانشمند سوئیسی چارلز سره در سال ۱۸۷۹ کشف شده است [۲]. سره مشاهده کرد که وقتی دو انتهای لوله‌ای حاوی محلول یکنواختی از نمک در دماهای مختلفی نگه داشته می‌شود، غلظت نمک در انتهای سردتر بیشتر از غلظت آن در انتهای گرم‌تر می‌شود. بنابراین او نتیجه گرفت که به خاطر گرادیان دما نمک شارش می‌یابد و در حالت تعادل باعث ایجاد گرادیان غلظت در محلول می‌شود. سره این پدیده را با جزئیاتش مطالعه و فرمولبندی کرد [۳].

اثر سره اهمیت فراوانی در مطالعه استخرهای خورشیدی [۴] و ساختار میکرونی اقیانوس‌ها [۵] بواسطه وجود محلول نمک و گرادیان دما در آنها، جریان همرفت ستاره‌ها، مخازن طبیعی هیدروکربن جهت استخراج بهینه نفت خام [۶] و سیستم‌های بیولوژیکی به خاطر انتقال جرم از غشاهای سلولی در اثر گرادیان دمایی [۷] دارد.

روش‌های مطاله اثر سره شامل مطالعات آن به همراه همرفتی و بدون همرفتی است [۸]. روش‌های اپتیکی به دلیل اینکه روش‌هایی دقیق، غیرمخرب، زمان-واقعی و قابل اعتماد هستند، پتانسیل فراوانی برای مطالعه پخش گرمایی دارند. تاکنون از روش انحراف باریکه لیزر برای اندازه‌گیری ضریب سره استفاده شده است [۹].

در این مقاله روش جدیدی برای مطالعه اثر سره بکار برده می‌شود که مبتنی بر روش انحراف‌سنجی ماره است. این روش یکی از روش‌های قدرتمند برای اندازه‌گیری‌های اپتیکی است و قادر است انحراف‌های بسیار کوچک نور را اندازه‌گیری کند. مزیت انحراف سنجی ماره نسبت به روش‌های اپتیکی دیگر، سادگی بکارگیری آن، کم هزینه بودن و حساسیت پایین نسبت به لرزش‌های خارجی است. انحراف‌سنجی ماره تاکنون کاربردهای زیادی در اندازه‌گیری خواص فیزیکی و نوری محیط‌های شفاف داشته است. از آن در اندازه‌گیری ضریب پخش مایعات [۱۰]، مطالعه گرادیان دما در هوا و مایعات، مطالعه محیط‌های پاشنده و مطالعه اجسام فازی و رویه نگاری استفاده شده است [۱۱].

۲- تکنیک انحراف‌سنجی ماره

اندازه‌گیری انحراف نور در عبور یا بازتاب از اجسام فازی به کمک فریزهای ماره، انحراف‌سنجی ماره نامیده می‌شود. چیدمان یک انحراف‌سنج شامل دو توری است که در فاصله zاز همدیگر قرار گرفته‌اند و خطوط‌شان نسبت به هم زاویه کوچک α دارد. گام فریزهای ماره که از برهم‌نهی تصویر توری اول روی توری دوم و توری دوم تشکیل می‌شود، برابر است با:

$$d_m = \frac{d}{\alpha} \qquad (۱)$$

که d گام هر یک از توری‌ها است. اگر پرتو نور فرودی به توری اول به اندازه θ منحرف شود، تصویر آن روی توری دوم به اندازه $z\theta$ جابجا خواهد شد و باعث جابجایی فریزهای ماره به اندازه h خواهد شد:

$$h = \frac{z\theta}{\alpha} \qquad (۲)$$

با استفاده از معادله مسیر نور در محیط‌های غیریکنواخت می‌توان نشان داد که اگر نور از محیطی با گرادیان ضریب شکست $\frac{dn(x)}{dx}$ عبور کند، آنگاه راستای انتشار اولیه نور به مقدار $\theta(x)$ منحرف خواهد شد [۱۲].

$$\theta(x) = \frac{L}{n_0}\frac{dn(x)}{dx} \qquad (۳)$$

که L طول محیط در راستای انتشار نو و n_0 ضریب شکست محیط در محل فرود نور است. اگر این باریکه نور از انحراف‌سنج ماره عبور کند، آنگاه باعث جابجایی فریزهای ماره به اندازه

$$h(x) = \frac{Lz}{n_0\alpha}\frac{dn(x)}{dx} \qquad (۴)$$

خواهد شد. به عبارت دیگر می‌توان مقدار گرادیان ضریب شکست را از میزان انحراف فریزهای ماره حساب کرد:

$$\frac{dn(x)}{dx} = \frac{n_0 d}{Lzd_m}h(x) \qquad (۵)$$

۳- پخش گرمایی

اگر پخش فقط در راستای x صورت گیرد، آنگاه شارش جرم در جهت x به صورت زیر خواهد بود [۸]:

$$J_x = -\rho D\frac{\partial \mathrm{c}}{\partial \mathrm{x}} - \rho D_T C_0(1-C_0)\frac{\partial T}{\partial x} \qquad (۶)$$

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

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

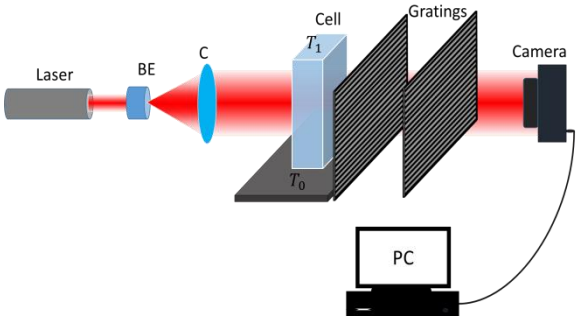
که C غلظت، D ضریب پخش ماده مرجع و D_T ضریب پخش گرمایی است. در حالت پایا شارش ماده J_x صفر خواهد بود و در نتیجه بین گرادیان دما و گرادیان غلظت رابطه زیر برقرار می‌شود:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = -S_T c_0(1-c_0)\frac{\partial T}{\partial x} \qquad (۷)$$

که S_T ضریب سره است و برای اندازه‌گیری آن باید $\frac{\partial c}{\partial x}$ و $\frac{\partial T}{\partial x}$ را اندازه‌گیری کنیم. با توجه به اینکه هدایت گرمایی و پخش به لحاظ زمانی چند مرتبه بزرگی با هم تفاوت دارند، می‌توان اثرات آنها را از هم دیگر تفکیک کرد. پخش گرمایی معمولا خیلی سریعتر از پخش جرمی اتفاق می‌افتد و در نتیجه بلافاصله بعد از برقراری اختلاف دما، گرادیان دمایی ایجاد می‌شود که آثار آن را می‌توان ثبت کرد و $\frac{\partial T}{\partial x}$ را اندازه‌گیری کرد. تغییراتی که در زمان‌های دیرتر اتفاق می‌افتد، به دلیل گرادیان غلظت است. در نتیجه آثار مشاهده شده در زمانهای بلندتر مربوط به هر دو گرادیان دمایی و غلظتی است و با اندازه‌گیری آن و در نظر گرفتن گرادیان دمایی می‌توان مقدار گرادیان غلظتی، $\frac{\partial c}{\partial x}$ را نیز مشخص کرد و از روی آنها ضریب سره را محاسبه کرد. از طرف دیگر این کار را می‌توان بلافاصله پس از قطع اختلاف دمایی نیز انجام داد، اثراتی که در ابتدا دیده می‌شود مربوط به گرادیان دما و گرادیان غلظت است و بعد از گذشت زمان نسبتا کوتاهی گرادیان دما از بین می‌رود و آن چه باقی می‌ماند مربوط به گرادیان غلظت خواهد بود. بنابراین اندازه‌گیری گرادیان ضریب شکست در زمان‌های بلندتر مستقیما گرادیان غلظت را بدست می‌دهد.

۴- چیدمان آزمایش و نتایج تجربی

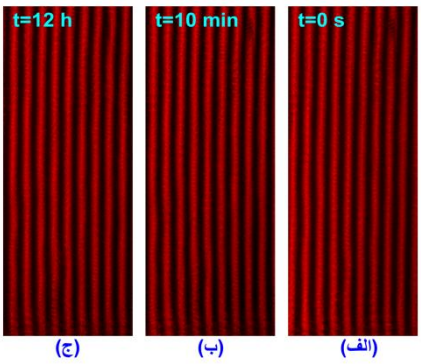
طرحواره چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل (۱) نمایش داده شده است. در این آزمایش از لیزر دیودی با طول موج $\lambda = 655nm$ استفاده شده است. ابتدا نور لیزر توسط پالایه فضایی BE باز می‌شود و به جبهه موج کروی تبدیل می‌شود، سپس با استفاده از یک عدسی همگرا C موازی می‌شود. نور موازی شده از مخزن پخش عبور می‌کند. مخزن پخش روی سطحی قرار گرفته است که دمای آن با استفاده از یک سیستم خنک کننده آبی در مقدار ثابت T_0 نگه داشته می‌شود. دمای سطح بالایی



شکل ۱: طرحواره‌ی چیدمان آزمایش

مخزن با دمای محیط، T_1، برابر است. ارتفاع مخزن پخش حدود $2.2cm$ است. پس از اینکه نور از مخزن پخش عبور کرد به چیدمان انحراف‌سنج ماره می‌رسد که از دو توری با گام‌های یکسان $d = 0.2mm$ تشکیل شده است. فاصله بین دو توری برابر با یکی از فواصل تالبوت انتخاب می‌شود. پس از چیدمان انحراف‌سنج ماره دوربین نیکون D5200 جهت ثبت الگوی فریزهای ماره قرار گرفته است. فریزهای ماره تشکیل شده روی توری دوم در زمان‌های از پیش تعیین شده توسط دوربین ثبت می‌شوند و در کامپیوتر ذخیره می‌شوند.

برای بررسی پخش گرمایی ابتدا مخزن پخش را به مدت ۲۴ ساعت در اختلاف دمایی T_0 و T_1 نگه می‌داریم تا حالت پایا ایجاد شود. سپس اختلاف دمایی را قطع می‌کنیم و در زمان‌های مختلف پس از قطع کردن اختلاف دمایی فریزهای ماره را ثبت می‌کنیم. در شکل ۲ (الف- ج) فریزهای ماره درست قبل از قطع کردن اختلاف دما، ۱۰ دقیقه پس از آن و ۱۲ ساعت پس از آن نشان داده شده است.

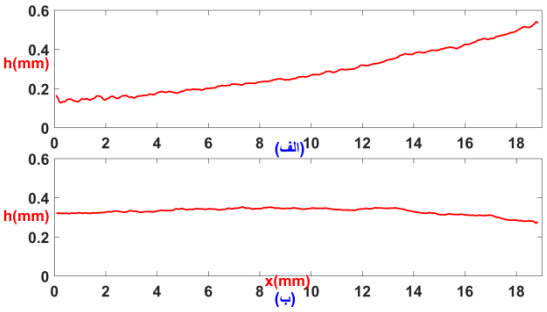


شکل ۲: فریزهای ماره (الف) در موقع قطع کردن اختلاف دمایی، (ب) ۱۰ دقیقه پس از قطع اختلاف دما و (ج) ۱۲ ساعت پس از قطع اختلاف دما

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

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

جابجایی فریزهای ماره در زمان $t = 10min$ نسبت به $t = 0$، همچنین $t = 10min$ نسب به $t = 12h$ اندازه‌گیری شده و در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳: جابجایی فریزهای ماره (الف) بین زمان‌های $t = 0$ و $t = 10min$ و (ب) بین زمان‌های $t = 10min$ و $t = 12h$

برای محاسبه ضریب سره رابطه (۷) را به شکل زیر می‌نویسیم:

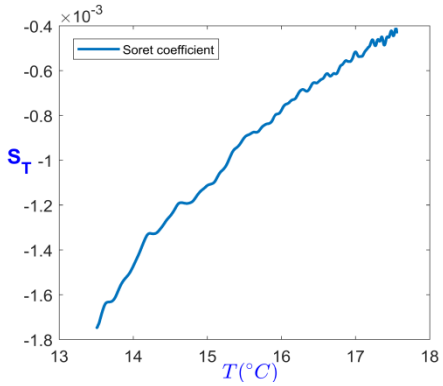
$$S_T = -\frac{\frac{\partial n}{\partial T}\frac{\partial n}{\partial x}|_T}{C_0(1-C_0)\frac{\partial n}{\partial C}\frac{\partial n}{\partial x}|_C} \qquad (۸)$$

که $\frac{\partial n}{\partial x}|_T$ تغییرات ضریب شکست در دمای ثابت و به خاطر گرادیان غلظت، $\frac{\partial n}{\partial x}|_C$ تغییرات ضریب شکست در غلظت ثابت و به خاطر گرادیان دما است که مقادیر آن با استفاده از رابطه (۵) و نمودارهای شکل ۳ (الف) و (ب) محاسبه می‌شود. طبق مرجع [۱۳] مقدار $\frac{\partial n}{\partial C}$ برای غلظت ۱۰ درصد ساکارز در بازه دمایی $13°C$ تا $20°C$ تقریبا ثابت و برابر با 0.155 است. همچنین $\frac{\partial n}{\partial T}$ در این بازه رفتار خطی دارد که مقدار آن را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$\frac{\partial n}{\partial T}(T) = -(2.557\,T + 51.55) \times 10^{-6}/°C \qquad (۹)$$

C_0 غلظت اولیه ساکارز د آب است که در این آزمایش 10 درصد است. با استفاده از این مقادیر و رابطه (۸) ضریب سره محاسبه شده است و در شکل (۴) نمایش داده شده است.

در این پژوهش ضریب سره برای پخش گرمایی محلول ۱۰ درصد ساکارز در آب به صورت تابعی از دما و با استفاده از روش انحراف‌سنجی ماره اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش به خوبی با نتایج سایر مقالات سازگار است.



شکل ۴: ضریب سره محلول ۱۰% شکر در آب بر حسب تابعی از دما

مراجع

[1] Cussler, Edward Lansing, *Diffusion: mass transfer in fluid systems*, Cambridge university press, 2009.

[2] M. Eslamian, Advances in thermodiffusion and thermophoresis (soret effect) in liquid mixtures, Frontiers in Heat and Mass Transfer, 2, 2012.

[3] C. Soret, Influence de la température sur la distribution des sels dans leurs solutions, 1880.

[4] H. Weinberger, the physics of the solar pond, *SPIE milestone series*, 54, 545–556, 1993.

[5] C. Gregg, Michael the microstructure of the ocean, *Scientific American*, 228, 64–77, 1973.

[6] F. Montel, La place de la thermodynamique dans une modélisation des répartitions des espèces d'hydrocarbures dans les réservoirs pétroliers. incidence sur les problèmes de production. *Entropie*, 34, 7–9, 1998.

[7] F. J. Bonner and Lars-Olof. Sundelöf, thermal diffusion as a mechanism for biological transport, Zeitschrift für Naturforschung C, 39, 656–661, 1984.

[8] J. K. Platten, The soret effect: a review of recent experimental results, Journal of applied mechanics, 73, 5–15, 2006.

[9] K. J. Zhang, M. E. Briggs, R.W. Gammon, and J. V. Sengers, Optical measurement of the soret coefficient and the diffusion coefficient of liquid mixtures, The Journal of chemical physics, 104, 6881–6892, 1996.

[10] K. Jamshidi-Ghaleh, M. T. Tavassoly, and N. Mansour, Diffusion coefficient measurements of transparent liquid solutions using moiré deflectometry, Journal of Physics D: Applied Physics, 37, 1993, 2004.

[11] Kafri, Oded, Keren, Eliezer, Kreske, Kathi, and Zac, Yaacov. Moire deflectometry with a focused beam: radius of curvature, microscopy, and thickness analysis. Applied optics, 29, 133–136, 1990.

[۱۲] احد صابر، سمیرا رضایی، سحر گلمحمدی، اندازه‌گیری گرادیان دما در مایعات با استفاده از انحراف‌سنجی ماره، بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۲ تا ۱۴ بهمن ۱۳۹۵

[13] Blanco, Pablo, Kriegs, Hartmut, Arlt, Bastian, and Wiegand, Simone, Thermal diffusion of oligosaccharide solutions: the role of chain length and structure. The Journal of Physical Chemistry B, 114, 10740–10747, 2010.

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

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