



مدل سازی تحلیلی سامانه اندازه گیری و جداسازی میکروذرات به کمک اثرات ترموفورسیس و فوتوفورسیس

شهرزاد عبادتی¹، محمد ضابطیان طرقي^{2*}

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-143، zabetian@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 آبان 1396

پذیرش: 16 آذر 1396

ارائه در سایت: 08 دی 1396

کلید واژگان:

ترموفورسیس

فوتوفورسیس

مدل تحلیلی

لیزر

جداسازی

چکیده

اثرات حرارتی ترموفورسیس و فوتوفورسیس که حرکت ذرات به ترتیب به دلیل گرادیان دمای کلی داخل سیال و گرادیان دما داخل ذره به وجود می‌آید، با توجه به کاربردهای فراوانی که دارد، در سال‌های گذشته بسیار مورد بررسی قرار گرفته‌است. ایجاد این گرادیان دما می‌تواند توسط نور لیزر ایجاد شود. بررسی این دو اثر، خصوصاً اثر فوتوفورسیس در محیط مایع به صورت بسیار محدود انجام شده است. در این پژوهش، به بررسی این دو اثر در محیط مایع و سرعت القایی توسط این دو نیرو به ذرات پرداخته شده است. پارامترهای مؤثر بر این دو اثر، بررسی و نحوه تأثیر آن بر ذرات مشخص شده است. اثر پارامترهای لیزر همچون توان و طول موج لیزر بررسی و بیشینه سرعت و دما، داخل کانال محاسبه شده است. در بخش فوتوفورسیس نیز، اثر پارامترهایی همچون توان لیزر، قطر ذرات و طول باریکه نور لیزر بر سرعت فوتوفورسیس محاسبه شده است. با بررسی مدل‌های موجود در محاسبه سرعت ترموفورسیس، مدل برنر به عنوان مدل دقیق‌تر انتخاب و در محاسبات استفاده می‌شود. همچنین مشاهده شد که تأثیر تغییر طول موج لیزر بر سرعت ترموفورسیس، بسیار بیش‌تر از تأثیر تغییر توان لیزر است. در محاسبه سرعت فوتوفورسیس، با استفاده از مدل‌های تحلیلی موجود، میزان این سرعت نیز محاسبه شده است. مقادیر بدست آمده سرعت‌های ترموفورسیس و فوتوفورسیس با مقادیر تجربی موجود مقایسه شده و تطابق مناسبی وجود دارد. نتایج این پژوهش در طراحی و ساخت سامانه جداساز ذرات، قابل استفاده است.

Analytical modeling of a mechanism for micro-particle measurement and separation using thermophoresis and photophoresis

Shahrzad Ebadati, Mohammad Zabetian Targhi*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, zabetian@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 October 2017
Accepted 07 December 2017
Available Online 29 December 2017

Keywords:
Thermophoresis
Photophoresis
Analytical Modeling
Laser
Separation

ABSTRACT

The two thermal effects, thermophoresis and photophoresis phenomena that cause particle movements due to thermal gradient through the liquid and thermal gradient through the particle, respectively, have been widely studied over the past years because of their wide range of applications. This thermal gradient can be made by laser beam. There are a few studies concerning these two effects, especially photophoresis, in liquid media. In this paper, these two effects and their induced velocity to particles are studied in liquid media. The affecting parameters on these effects are studied and their effect on particles are determined. Effect of laser parameters like laser power and wavelength in the channel are discussed and the maximum velocity and temperature inside the channel are calculated. Also in the photophoresis part, the effect of parameters like laser power, particle and laser beam diameter is calculated. By considering the existing models for calculation of thermophoretic velocity, Brenner model is chosen as the most accurate model and will be used in calculations. It is also found that the effect of laser wavelength on thermophoretic velocity is more than changing laser power. In the photophoresis part, photophoretic velocity is calculated by using existing analytical models. The calculated velocities of thermophoresis and photophoresis are compared with the experimental values and there is an acceptable matching between them. The results of this paper will be used for designing and making a particle separator tool.

1- مقدمه

نوری، از بدو اختراع در سال 1960 [1] در کاربردهای متعدد در پزشکی، مهندسی و علوم مورد توجه قرار گرفته‌است. اثرات لیزر بر جریان‌های حاوی ریزذرات شامل دو اثر حرارتی و اثر هیدرودینامیکی به نام فشار تشعشعی³

لیزر به دلیل اثرات منحصر به فرد نظیر چگالی توان بسیار بالا، امواج همدوس¹، تک طول موج بودن² و واگرایی بسیار کم، نسبت به سایر منابع

³ Radiation Pressure

¹ Harmonic Waves
² Single Wavelength

Please cite this article using:

Sh. Ebadati, M. Zabetian Targhi, Analytical modeling of a mechanism for micro-particle measurement and separation using thermophoresis and photophoresis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 94-102, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ذره سر می خورد، میزان سرعت فوتوفورسیس را به صورت تحلیلی محاسبه کند [4]. از جمله پژوهش های تجربی در این زمینه، پژوهش زین و همکاران در سال 2011 است که در این پژوهش از اثر فوتوفورسیس برای جدا کردن ذرات از سیال استفاده شد [5]. به این صورت که با قراردادن فیبر نوری داخل ظرف حاوی آب و ریزذرات معلق دیگر، با روشن کردن فیبر نوری و ایجاد پدیده فوتوفورسیس، ذرات به سمت فیبر نوری حرکت کرده و داخل آن متمرکز شدند. این پژوهش به روش تصویربرداری میکروسکوپی انجام شده است [5]. از این پژوهش می توان در پالایش و تصفیه آب و سایر سیالات استفاده کرد. در پژوهشی دیگر، مانجوشیرو و همکاران در سال 2013 است، از اثر فوتوفورسیس برای جداسازی سلول های خونی استفاده کردند. به این صورت که با تابش نور لیزر بر لوله های حاوی خون، مشاهده شد که گلبول های قرمز خون، بسیار سریع تر از گلبول های سفید و پلاکت ها حرکت کردند. در این پژوهش از روش تصویربرداری میکروسکوپی و پردازش تصویر استفاده شد [6]. از روش توسعه داده شده، می توان در تشخیص های پزشکی و بررسی سلول های خونی استفاده کرد. زین و همکاران در پژوهش دیگری که در سال 2013 انجام شد، از پدیده فوتوفورسیس برای جداسازی ذرات از یکدیگر بر اساس اندازه استفاده کردند. به این صورت که با قراردادن دو فیبر نوری در داخل کانال حاوی آب و ذرات با اندازه های مختلف، دو فیبر نوری متناوباً روشن و خاموش شده و باعث القای سرعت فوتوفورسیس در ذرات شد. ذرات با توجه به داشتن اندازه های مختلف، سرعت های مختلفی بدست آورده که باعث می شود پس از گذشت زمانی کوتاه، ذرات با اندازه های مختلف، از یکدیگر جدا شوند. تکنیک انجام این پژوهش، روش تصویربرداری میکروسکوپی بود [7].

در زمینه ترموفورسیس، پژوهش مک ناب در سال 1973 از نخستین پژوهش ها بود که در آن به صورت تحلیلی به محاسبه سرعت ترموفورسیس در محیط گازی پرداخته شد [8]. پس از او پژوهشگران زیادی تلاش کردند تا معادلاتی برای محاسبه سرعت ترموفورسیس در محیط مایع نیز ارائه کنند. از جمله این پژوهشگران، برن و همکاران بودند که با ارائه مدلی مناسب در محاسبه سرعت ترموفورسیس در مایعات و در نظر گرفتن تأثیر دما بر این سرعت، مدلی کارآمد ارائه کردند [8]. براون و همکاران از جمله پژوهشگرانی بودند که از این اثر در زمینه تشخیص های پزشکی و جداسازی سلول های خونی استفاده کرد. آن ها از لیزر و اثر ترموفورسیس جهت جابجایی مولکول های دی ان ای³ استفاده نمودند [9]. با توجه به عدم آسیب به این ذرات در استفاده از لیزر و همچنین جداسازی بسیار دقیق، این روش، روشی مناسب در بررسی ذراتی مانند دی ان ای و آر ان ای⁴ و سلول های خونی، شناخته شد. اسلامیان و همکاران در پژوهش خود به بررسی اثر ترموفورسیس پرداختند و تلاش کردند مدل ارائه شده توسط مک ناب که برای محاسبه سرعت ترموفورسیس در گازها بود را در محیط مایع نیز ارائه کنند. آن ها بیان کردند که مدل ارائه شده در محاسبه سرعت، به نوع مایع و دمای آن و تأثیر آن بر مقادیری مانند ضریب انبساط حرارتی و ضریب هدایت حرارتی سیال بستگی دارد [10]. هوانگ و همکاران در سال 2017 با استفاده از فیبر نوری و روش های اپتیکی، موفق به چرخاندن سلول های خونی شدند و بیان کردند که شدت نور لیزر فیبر نوری بر سرعت چرخش این سلول ها و مکان این فیبرهای نوری بر جهت چرخش سلول اثر دارد. این پژوهش به این صورت انجام شد که دو فیبر نوری با فاصله افقی نسبتاً زیاد و فاصله عمودی کوچک چند

است. اثرات حرارتی که موضوع مورد بررسی در این پژوهش است، خود شامل دو اثر ترموفورسیس¹ و فوتوفورسیس² است. پدیده ترموفورسیس، حرکت ذرات معلق در مایع، به دلیل وجود گرادیان دمای کلی داخل سیال است و این حرکت از سمت گرم تر سیال به سمت سردتر آن انجام می شود. تصویر شماتیک این پدیده در شکل 1 مشاهده می شود که در آن ذرات از سمت گرم تر سیال به سمت سردتر حرکت می کنند. پدیده فوتوفورسیس، به دلیل گرادیان دما داخل ذره توسط جذب نور یک منبع خارجی ایجاد می شود که سبب حرکت ذره در سیال می شود. در صورتی که ذره کدر باشد، بخشی از ذره که به منبع نور و حرارت نزدیک تر است، گرم تر شده و باعث افزایش دمای ذرات سیال اطراف خود می شود. این افزایش دما باعث افزایش جنبش مولکول های سیال که در سمت گرم تر ذره هستند شده که ضربات بیش تری به ذره وارد کرده و ذره را حرکت می دهند. این حرکت باعث دور شدن ذره از منبع حرارت می شود (شکل 2).

در صورتی که ذره نیمه شفاف باشد، سمتی از ذره که از نور دورتر است، گرم تر می شود و فرآیند گفته شده باعث حرکت ذره، این بار در جهتی که ذره به سمت منبع نور حرکت کند، می شود.

پژوهش های اندکی در زمینه فوتوفورسیس در محیط مایع به علت ماهیت پیچیده آن، انجام شده است. از نخستین پژوهش های زمینه فوتوفورسیس در محاسبه سرعت، پژوهش تحلیلی ماکوسکی در سال 1989 بود که معادله ای جهت محاسبه سرعت فوتوفورسیس ارائه کرد [2]. در سال 2010 سونگ و همکاران در پژوهش خود مقدار سرعت فوتوفورسیس را با استفاده از نتایج پژوهش ماکوسکی محاسبه کرده و تأثیر مواردی مانند آبگریز بودن ذرات و برهمکنش ذره و سیال را نیز در محاسبات خود وارد کردند [3]. در سال 2013 نیز فو از نتایج ماکوسکی و سونگ استفاده کرد تا با تغییر شرایط مرزی محاسبات با در نظر گرفتن این موضوع که سیال بر روی

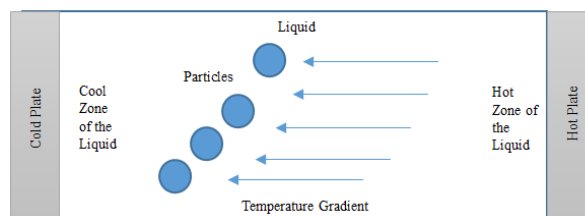


Fig. 1 Schematic of thermophoresis phenomenon and floating particles' movement from the hot zone of the liquid to the cool zone

شکل 1 شماتیک از پدیده ترموفورسیس و حرکت ذرات معلق از سمت گرم سیال به سمت سردتر آن

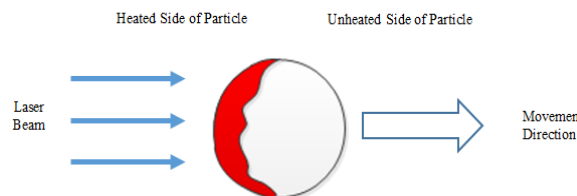


Fig. 2 Schematic of photophoresis phenomenon and the heating of particle due to laser radiation and movement of particle away from the light source

شکل 2 شماتیک از پدیده فوتوفورسیس و گرم شدن ذره در اثر جذب تابش لیزر و حرکت و دور شدن ذره از منبع نور

³ DNA

⁴ RNA

¹ Thermophoresis

² Photophoresis

است، و به تبع آن پایین بودن عدد پکلت⁵، با معادله هدایت حرارتی قابل تقریب زدن می شود. معادله انتقال حرارت توسط معادله (5) محاسبه می شود [12].

$$\nabla^2 T + \frac{q}{k}(r, x, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{DT}{Dt} \quad (5)$$

در این معادله، q حرارت، k ضریب هدایت حرارتی، t زمان و α نفوذ حرارتی است. با حل این معادله، مقدار دما T و گرادیان دما محاسبه می شود و در معادله (4) جاگذاری می شود. اما جهت محاسبه ضریب نفوذ حرارتی (D_T)، مدل های زیادی توسط پژوهشگران ارائه شده است. از جمله مدل ارائه شده توسط مک ناب و همکاران که نخستین مدل جهت محاسبه ضریب نفوذ حرارتی است که البته برای محیط گاز قابل استفاده است. پژوهشگران تلاش کردند این مدل را به محیط مایع نیز تعمیم دهند. از جمله این پژوهشگران برنر، اسلامیان و سمنوو⁶ بودند [8]. در تحقیق ایشان، جهت محاسبه دقیق ترین مدل برای محاسبه ضریب نفوذ، مدل های موجود استفاده شده و مقدار به دست آمده توسط آن با مقادیر تجربی موجود در پژوهش رگازتی [13] مقایسه شد و مشاهده شد که مدل ارائه شده توسط برنر و اسلامیان که در واقع یک معادله را بیان می کنند، بسیار به مقادیر تجربی موجود نزدیک هستند. معادله (6) مدل ارائه شده توسط برنر و همکاران در محاسبه ضریب نفوذ حرارتی است.

$$D_{TB} = \frac{\beta k_l}{[1 + k_p/2k_l] \rho c_p} \quad (6)$$

این مدل، تأثیر خواص ترموفیزیکی سیال از جمله ضریب هدایت حرارتی، ضریب انبساط حرارتی حجمی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت، که خود وابسته به دما هستند را در محاسبه ضریب نفوذ نشان می دهد [8]. معادله (7)، مدل ارائه شده توسط مک ناب و همکاران است.

$$D_{TM} = \frac{0.26k_l \eta}{2k_l + k_p \rho T} \quad (7)$$

این مدل برای محاسبه ضریب نفوذ حرارتی در گازها ارائه شده است [8]. معادله (8)، مدل سمنوو برای محاسبه ضریب نفوذ حرارتی در مایعات است [8].

$$D_{TS} = \frac{(\ln 3) \sqrt{H_p H_l}}{64 \eta r_l [1 + k_p/2k_l]} \quad (8)$$

مدلی است که برای تعمیم مدل مک ناب به محیط مایع توسط اسلامیان و همکاران ارائه شده است در معادله (9) مشاهده می شود که در آن C_S مقداری ثابت است که توسط معادله (10) محاسبه می شود [10].

$$C_S = \frac{\rho T k_l \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p}{\eta c_p} \quad (10)$$

در معادلات (6) تا (10)، D_T ضریب نفوذ حرارتی، ρ چگالی سیال، T دما، ϵ_R نفوذپذیری نسبی سیال⁷، β ضریب انبساط حرارتی حجمی⁸ سیال، k ضریب هدایت حرارتی، H ثابت هاماکار، η ویسکوزیته دینامیکی سیال، η شعاع مولکولی سیال و c_p ظرفیت حرارتی ویژه است. در جدول 1، مقادیر ضریب نفوذ حرارتی توسط مدل های مک ناب، برنر، مک ناب اصلاح شده و سمنوو محاسبه شده و همچنین مقادیر تجربی نیز برای محاسبه در جدول 1 ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، دو مدل مک ناب اصلاح شده و برنر با خطای بیشینه 10 درصد از مقدار تجربی، برای هر چهار ذره/ سیال

میکرومتری و قراردادن سلول بین این دو فیبر نوری، باعث می شود که فیبر پایین تر قسمت پایینی و فیبر نوری بالاتر قسمت بالایی سلول را گرم تر کند و این عدم تقارن در گرمایش سلول باعث چرخش سلول شده است [11].

با توجه به کاربردهای فراوان اثرات ترموفورسیس و فوتوفورسیس و همچنین با توجه به پژوهش های اندک انجام شده در این زمینه، در محیط مایع، نیاز به بررسی دقیق تر این دو اثر وجود دارد. در این پژوهش، تأثیر دو پدیده ترموفورسیس و فوتوفورسیس بر میکروذرات داخل مایع بررسی می شوند. مقدار سرعت ایجاد شده توسط این دو اثر محاسبه می شود و تأثیر پارامترهای مختلف همچون توان و طول موج لیزر بر سرعت ترموفورسیس و توان و قطر باریکه نور لیزر و قطر ذرات بر سرعت فوتوفورسیس بررسی می شود. مدل مناسب محاسبه سرعت ترموفورسیس با مقایسه با مقادیر تجربی موجود انتخاب شده و از این مدل در محاسبه سرعت ترموفورسیس در داخل کانال عبور جریان استفاده می شود. در بخش ترموفورسیس و فوتوفورسیس اعتبارسنجی نتایج محاسبات با مقایسه با نتایج تجربی موجود در مراجع، انجام شده است.

2- بررسی تحلیلی سرعت های فوتوفورسیس و ترموفورسیس

در این بخش به بررسی تحلیلی محاسبه سرعت های فوتوفورسیس و ترموفورسیس پرداخته خواهد شد. سرعت فوتوفورسیس با حل تحلیلی معادله انتقال حرارت داخل ذره و داخل سیال به دست می آید. مقدار این سرعت در پژوهش سونگ مطابق با معادله (1) به دست می آید [3].

$$V_{ph} = - \frac{\beta H r_0^2}{18 \mu v_0 k_f} I J_1 \frac{\ln 3 + 4(\ln 3 - 1) L_s / r_0}{(k_p / k_f + 2)(1 + 2L_s / R)} \quad (1)$$

در معادله (1)، V_{ph} سرعت فوتوفورسیس، r_0 شعاع مولکولی سیال¹ یا همان اندازه قطر مولکول سیال، β_T ضریب انبساط حرارتی، μ لزجت دینامیکی سیال، I شدت نور لیزر، v_0 حجم ویژه² سیال، k_f و k_p ضریب هدایت حرارتی ذره و سیال و A ثابت هاماکر³ سیال است. دقت شود که مقدار L_s یا همان طول لغزش در مایعات برابر صفر است. مقدار J_1 یا ضریب عدم تقارن، میزان نفوذ نامتقارن حرارت داخل ذره را نشان می دهد که با استفاده از معادله (2) محاسبه می شود.

$$J_1 = \frac{6\pi R n_p k_p}{m_f^2 \lambda} \int_0^1 \int_0^\pi B(\zeta, \theta) \zeta^3 \cos \theta \sin \theta d\theta d\zeta \quad (2)$$

در معادله (2)، R شعاع ذره، n_p ضریب شکست، k_p ضریب جذب ذره، m_f ضریب شکست مختلط سیال و λ طول موج است. محاسبه سرعت فوتوفورسیس به دلیل وجود ضریب عدم تقارن، پیچیدگی های زیادی دارد. در فرمول (3)، Q تابع منبع حرارت است که محاسبه آن برای به دست آمدن مقدار ضریب عدم تقارن مطابق فرمول (2) نیاز است.

$$Q(r, \theta) = \frac{4\pi n_p I}{m_f^2 \lambda} B(r, \theta) \quad (3)$$

سرعت ترموفورسیس با استفاده فرمول مک ناب محاسبه می شود (معادله (4)).

$$V_{th} = D_T \nabla T \quad (4)$$

که در این معادله D_T ضریب نفوذ حرارتی⁴ است. همچنین مقدار گرادیان دما توسط معادله انتقال حرارت به دلیل فرض پایین بودن عدد رینولدز، که فرض اصلی در مسائل ترموفورسیس القاشده در سیالات ساکن

⁵ Peclet Number

⁶ Semenov

⁷ Relative Permittivity

⁸ Volumetric Thermal Expansion Coefficient

¹ Molecular Radius

² Specific Volume

³ Hamaker Constant

⁴ Thermal Diffusivity

پارامترهای مؤثر و نحوه تأثیر این پارامترها بر سرعت مهاجرت ذرات است تا بتوان از نتایج تحلیلی این پژوهش در طراحی و ساخت کانالی مانند کانال شکل 3 استفاده شود. در این پژوهش، تابع توزیع نور لیزر به صورت گاوسی در نظر گرفته شده است. همچنین قطر باریکه نور لیزر در تمام بررسی های بخش ترموفورسیس برابر 2 میلی متر در نظر گرفته شده است.

گرادیان دما داخل این کانال توسط معادله هدایت حرارتی به کمک معادله (5) و استفاده از روش جداسازی متغیرها محاسبه شده است که دما داخل ناحیه 2 مطابق با معادله (11) و دما در ناحیه 1 توسط رابطه (12) بدست آمد. دقت شود که به دلیل کم بودن عدد رینولدز داخل کانال، از عبارت جابجایی صرف نظر شده و معادله انتقال حرارت به معادله هدایت حرارتی تبدیل شده است. همچنین روش جداسازی متغیرها به دلیل، هزینه محاسباتی اندک، دقت بالا و ارائه فرم بسته جواب در مقایسه با سایر روش های حل تحلیلی مانند تبدیل فوریه، روش اختلالات جزئی و حل سری، روش مناسب تری است [16,15].

$$T_2(r) = (T_w - T_i) \ln\left(\frac{r}{\omega}\right) / \ln\left(\frac{\omega}{r_i}\right) + T_w \quad (11)$$

$$T(r, x) = T_w + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{P_0 a_\lambda}{k\pi} \times \frac{\exp(-a_\lambda x)}{2^n (2n+2)!} \left\{ 1 - \frac{r^{2n+2}}{\omega^{2n+2}} \right\} \quad (12)$$

در معادلات (11) و (12)، دمای دیواره، T_w ، دمای ابتدا، T_i ، قطر پرتو نور لیزر، P_0 توان لیزر، a_λ ضریب جذب در طول موج لیزر، r راستای شعاع، x راستای طولی و k ضریب جذب است.

در شکل 4، نحوه محاسبه سرعت داخل کانال نشان داده شده است. برای محاسبه دما، از طریق معادله انتقال حرارت (معادله (5))، دمای ناحیه 4 که حمام سیال است با قراردادن شرایط مرزی، محاسبه می شود. از دمای ناحیه 4 به عنوان اطلاعات ورودی محاسبه ناحیه 3 یا همان دیواره کانال، استفاده می شود. پس از محاسبه دمای دیواره، این دما به عنوان شرط مرزی در محاسبه دمای ناحیه 2 که جریان حاوی میکروذرات است، استفاده می شود و دمای ناحیه 2 محاسبه می شود. در انتها از دمای ناحیه 2 نیز به عنوان یکی از شرایط مرزی در محاسبه دمای ناحیه 1 که ناحیه مورد بررسی است و ناحیه تابش لیزر به جریان حاوی میکروذرات است، استفاده می شود.

4-نتایج و بحث

4-1- نتایج مربوط به دما و سرعت القا شده توسط پدیده ترموفورسیس

در ادامه، نتایج حل مدل تحلیلی به ازای طول موجها و توان های مناسب برای سامانه جداسازی و اندازه گیری ذرات ارائه شده است. با توجه به این که سیال عامل آب در نظر گرفته شده است و این که ضریب جذب آب در طول موج های

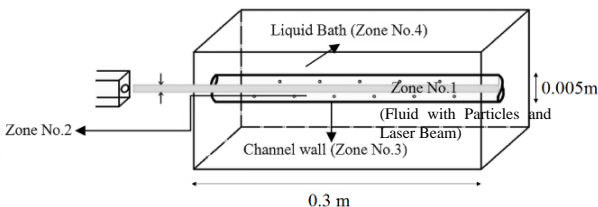


Fig. 3 Flow channel consisting of 4 zones. Zone 1, flowing fluid and laser beam radiation, zone 2, flowing fluid, zone 3, channel wall, zone 4, liquid bath for balancing light fraction

شکل 3 کانال عبور جریان که شامل 4 ناحیه است. ناحیه 1، ناحیه تحت عبور جریان و تابش نور لیزر، ناحیه 2، ناحیه تحت عبور جریان، ناحیه 3، دیواره کانال، ناحیه 4، حمام سیال جهت از بین بردن اثر شکست نور

گفته شده، مدل های دقیق تری هستند. مقادیر تجربی موجود در جدول 1 از پژوهش شمر، اسلامیان و رگازتی استخراج شده است [13,10,8].

در جدول 2، مقدار سرعت ترموفورسیس توسط مدل برنز محاسبه شده و با مقادیر تجربی موجود در پژوهش رگازتی و همکاران [13] مقایسه شده است. با توجه به خطای بیشینه 10 درصد، این مدل، مدل قابل قبولی جهت استفاده در محاسبه سرعت ترموفورسیس است.

3- روند حل معادلات برای سامانه جداساز ذرات

در این بخش، مقادیر سرعت های ترموفورسیس و فوتوفورسیس در جریان حاوی میکروذرات محاسبه می شود و همچنین به بررسی پارامترهای مختلف و تأثیر آن ها بر سرعت های ترموفورسیس و فوتوفورسیس پرداخته خواهد شد. بدین منظور یک سامانه اندازه گیری و جداسازی ذرات معلق در سیال طراحی و به صورت تحلیلی مدل سازی شده است. محاسبه سرعت فوتوفورسیس از فرمول (1) و محاسبه سرعت ترموفورسیس از فرمول (4) است. در محاسبه سرعت ترموفورسیس، گرادیان دما از طریق حل معادله انتقال حرارت (معادله (5)) و ضریب نفوذ نیز از معادله (6) محاسبه می شود.

3-1- طراحی سامانه جداساز ذرات به کمک اثر ترموفورسیس

شکل 3، کانال مورد بررسی را نشان می دهد [14]. این کانال شامل 4 ناحیه است که ناحیه 1، محل عبور جریان و نور لیزر، ناحیه 2 محل عبور جریان به تنهایی، ناحیه 3، دیواره کانال و ناحیه 4 حمام خنک کن است. وجود ناحیه 4 هم به دلیل خنک کردن سیال داخل کانال و هم از بین رفتن اثرات شکست نور به دلیل دایروی بودن سطح مقطع کانال عبور جریان است. سیال موجود در این حمام خنک کن باید از جنس سیال داخل کانال عبور جریان باشد. البته حل دقیق معادله انتقال حرارت برای کانال با سطح مقطع مربع یا مستطیل اندکی دشوارتر است. هدف از بررسی سامانه ای نظیر شکل 3، بررسی پارامتریک میزان سرعت ترموفورسیس ایجاد شده در این کانال و مشاهده

جدول 1 مقادیر ضریب نفوذ محاسبه شده با مدل های مختلف و مقدار ضریب نفوذ از محاسبات تجربی ($\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Table 1 Calculated values of thermal diffusivity using different models and the experimental values of thermal diffusivity ($\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$)

ذره-سیال	تجربی	فرمول فرمول مک ناب	فرمول فرمول اصلاح شده	فرمول فرمول مک ناب
سیلیکا- استونیتریله	16	46	16.3	1549
سیلیکا- آب	22	227	18.5	1617
سیلیکا- پروپیلن گلیکول	22	6044	13.7	19
فولورن- تلون	55	-	55	243

جدول 2 مقادیر تحلیلی سرعت ترموفورسیس و مقایسه آن با مقادیر تجربی موجود در مسئله گرادیان دمای خطی بین دو صفحه تخت

Table 2 Analytical values of thermophoretic velocity and a comparison with the existing experimental values for the case of linear temperature gradient between two parallel plates

ذره/ سیال کاری	مقادیر تجربی	مقادیر تحلیلی سرعت	درصد خطا از مقدار تجربی (%)
سیلیکا/ آب	5.5 ($\mu\text{m/s}$)	6.07 ($\mu\text{m/s}$)	10.36
سیلیکا/ استونیتریله	4.0 ($\mu\text{m/s}$)	4.1 ($\mu\text{m/s}$)	2.5

20 وات رسیده است. گردیدیم دما داخل کانال و در نتیجه سرعت ترموفورسیس افزایش یافته است. قابل مشاهده است که، سرعت ترموفورسیس به 0.1 میکرومتر بر ثانیه رسیده است. به این ترتیب می توان با افزایش توان لیزر، به صورت تقریباً خطی سرعت مهاجرت ذرات به واسطه اثر ترموفورسیس را افزایش داد.

جهت بررسی تأثیر طول موج بر سرعت ترموفورسیس، در شکل 5 (د) و شکل 6 (د)، توزیع سرعت و دمای ترموفورسیس داخل کانال حاوی میکروذرات با استفاده از لیزر با توان 2 وات و طول موج 1064 نانومتر، ارائه شده است. با مقایسه در شکل 5 (الف) و شکل 5 (د) که توزیع سرعت برای لیزر با توان 2 وات در طول موج های 808 نانومتر و 1064 نانومتر نشان داده شده است، مشاهده می شود سرعت مهاجرت، نسبت به حالتی که لیزر با طول موج 808 نانومتر استفاده شده بود، افزایش قابل ملاحظه حدود 25 برابر داشته است و سرعت ترموفورسیس به مقدار بیشینه حدود 0.25 میکرومتر بر ثانیه رسیده. همچنین در شکل 6 (الف) و شکل 6 (د) مشاهده می شود که توزیع اختلاف دما داخل کانال از دمای مرجع، حدود 3 بار افزایش یافته است. همان گونه که مشاهده می شود، تأثیر تغییر طول موج لیزر بر سرعت مهاجرت و همچنین تأثیر آن بر اختلاف دمای داخل کانال از مقدار مرجع، بسیار بیش تر از زمانی است که توان لیزر تغییر می کند. در این محاسبات، توان لیزر تا 10 برابر افزایش یافته اما تأثیر آن بر سرعت مهاجرت، کم تر از تأثیر افزایش طول موج از 808 نانومتر به 1064 نانومتر است.

در شکل 5 (ه) و شکل 6 (ه)، توان لیزر برای طول موج 1064 نانومتر، 10 وات در نظر گرفته شده است. همان گونه که مشاهده می شود، افزایش دما بسیار زیاد شده و در صورتی که لیزر به صورت ممتد به کانال تابانده شود، در صورت وجود آب به عنوان سیال کاری داخل کانال، آب تبخیر می شود. اگر لیزر به طور غیر ممتد تابانده شود تا این دما کاهش یابد، سرعت ترموفورسیس حدود 1 میکرومتر بر ثانیه ایجاد می شود.

در شکل 5 (و) و شکل 6 (و)، توان لیزر با طول موج 1064 نانومتر، به 20 وات رسیده است. افزایش شدید توزیع دما داخل لوله، سبب تبخیر مایع می شود. البته در این پژوهش تغییر فاز سیال داخل لوله در نظر گرفته نشده است. با توجه به سرعت ترموفورسیس ایجاد شده با لیزر با طول موج 1064 نانومتر و توان 20 وات که حدود 1.6 میکرومتر بر ثانیه است، محدوده سرعت مناسبی ایجاد می شود اما با توجه به تبخیر آب به عنوان سیال کاری داخل لوله، استفاده از لیزر با این توان و طول موج، مناسب نیست.

در جدول 3 مقادیر بیشینه دما و بیشینه اختلاف دمای ایجاد شده در داخل کانال توسط لیزر با توان و طول موج های مختلف، مشاهده می شود. علت انتخاب طول موج های 1064 نانومتر و 808 نانومتر، جذب زیاد نور توسط آب، در این طول موج هاست. تغییر توان لیزر نیز به دلیل این بود که محدوده مناسب تغییر توان لیزر مشخص شود. به عنوان مثال، با انجام این محاسبات

جدول 3 مقدار بیشینه سرعت و بیشینه دما در داخل کانال جریان حاوی ریزذرات

Table 3 The maximum value of thermophoretic velocity and temperature inside the channel of particulate flow

طول موج لیزر (نانومتر)	توان لیزر (وات)	سرعت بیشینه (میکرومتر بر ثانیه)	اختلاف دمای بیشینه (از مقدار مرجع (کلوین))
808	2	0.01	1.33
808	10	0.049	6.68
808	20	0.098	13.36
1064	2	0.28	39.52
1064	10	1.0698	197.62
1064	20	1.67	395.24

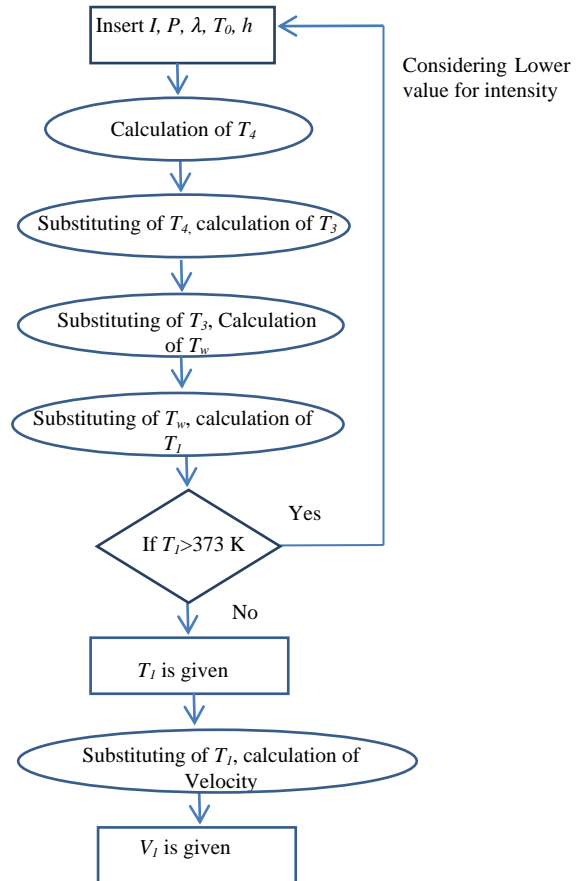


Fig. 4 Flowchart for calculation of the temperature inside the channel, by starting with calculation of zone 4's temperature and calculation of zone 3's temperature with that, and by using zone 3, 2nd zone's temperature and by zone 2, temperature of zone 1 is calculated.

شکل 4 روند نامی محاسبه دمای داخل کانال، به این صورت که با حل دمای ناحیه 4 شروع کرده و به کمک آن دمای ناحیه 3 و از دمای ناحیه 3، دمای ناحیه 2 و از این نتیجه در محاسبه دمای ناحیه 1 محاسبه می شود.

808 نانومتر و 1064 نانومتر نسبت به طول موج های کم تر، به شدت افزایش می یابد، این طول موج ها جهت تحلیل انتخاب شده است. در خصوص توان لیزر، با بررسی سازندگان، توان های 2، 10 و 20 وات جهت تحلیل انتخاب شده است. در این قسمت فرض شده است که ذرات دارای بازتاب بسیار کوچک (حذف اثر فشار تابشی لیزر) و جذب حرارتی بسیار کم (حذف اثر فوتوفورسیس) باشند. در شکل 5 و 6، توزیع سرعت و دما داخل کانال در ناحیه 1 با در نظر گرفتن لیزر با طول موج 808 و 1064 نانومتر و توان 2، 10 و 20 وات مشاهده می شود. در شکل 5 (الف) و شکل 6 (الف) همان گونه که گفته شد، قطر باریکه نور لیزر برابر 2 میلی متر در نظر گرفته شده است. ملاحظه می شود، دما به میزان بسیار کم و حدود 1.3 کلوین افزایش یافته است که در نتیجه سرعت ترموفورسیس بسیار کوچک 0.01 میکرومتر بر ثانیه ایجاد شده است. در شکل 5 (ب) و شکل 6 (ب)، توان لیزر به 10 وات افزایش یافته است و میزان طول موج لیزر ثابت باقی مانده است. مشاهده می شود که اختلاف دمای ایجاد شده کمی افزایش یافته و به مقدار بیشینه حدود 6.5 کلوین رسیده است. در نتیجه این افزایش گردیدیم دما، سرعت ترموفورسیس حدود 4.5 برابر افزایش یافته است. در واقع 5 برابر شدن توان لیزر، سرعت ترموفورسیس را حدود 4.5 بار افزایش داد.

در شکل 5 (ج) و شکل 6 (ج)، توان لیزر باز هم افزایش یافته و به مقدار

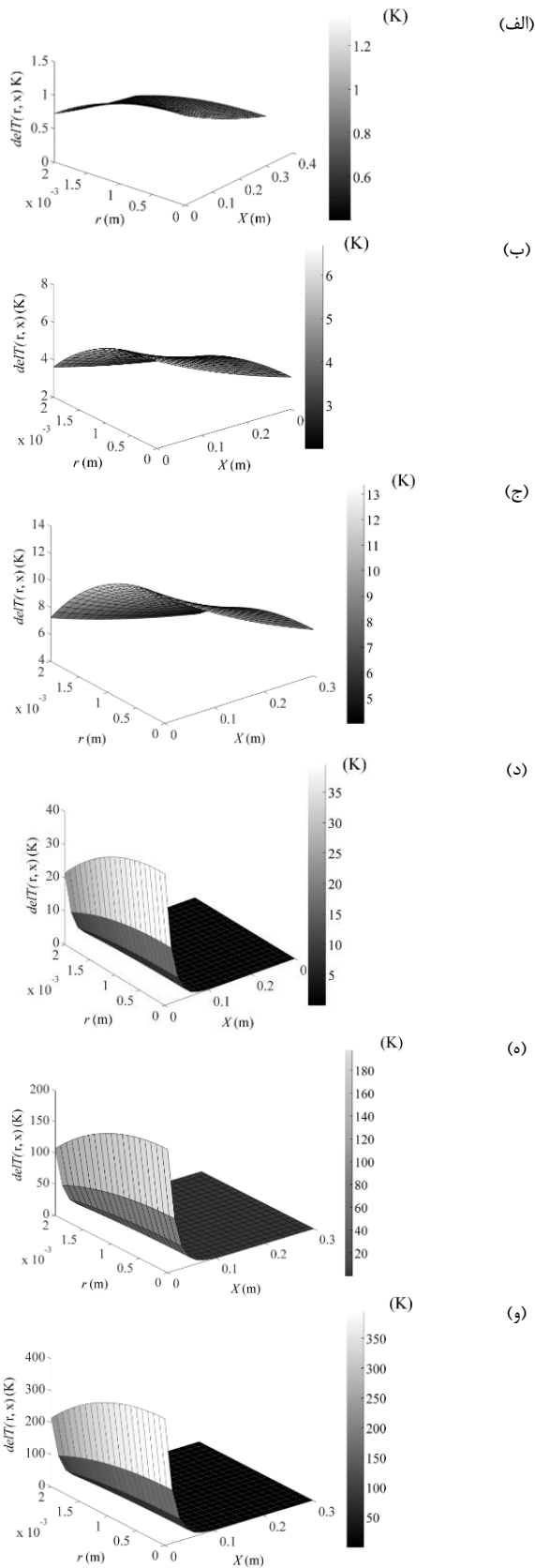


Fig. 6 Temperature distribution inside the tube, using laser with wavelength and power (a) 808nm, 2W (b) 808nm, 10W (c) 808nm, 20W (d) 1064nm, 2W (e) 1064nm, 10W (f) 1064nm, 20W

شکل 6 توزیع دما داخل لوله توسط لیزر با طول موج و توان (الف) 808 نانومتر و 2 وات (ب) 808 نانومتر و 10 وات (ج) 808 نانومتر و 20 وات (د) 1064 نانومتر و 2 وات (ه) 1064 نانومتر و 10 وات (و) 1064 نانومتر و 20 وات

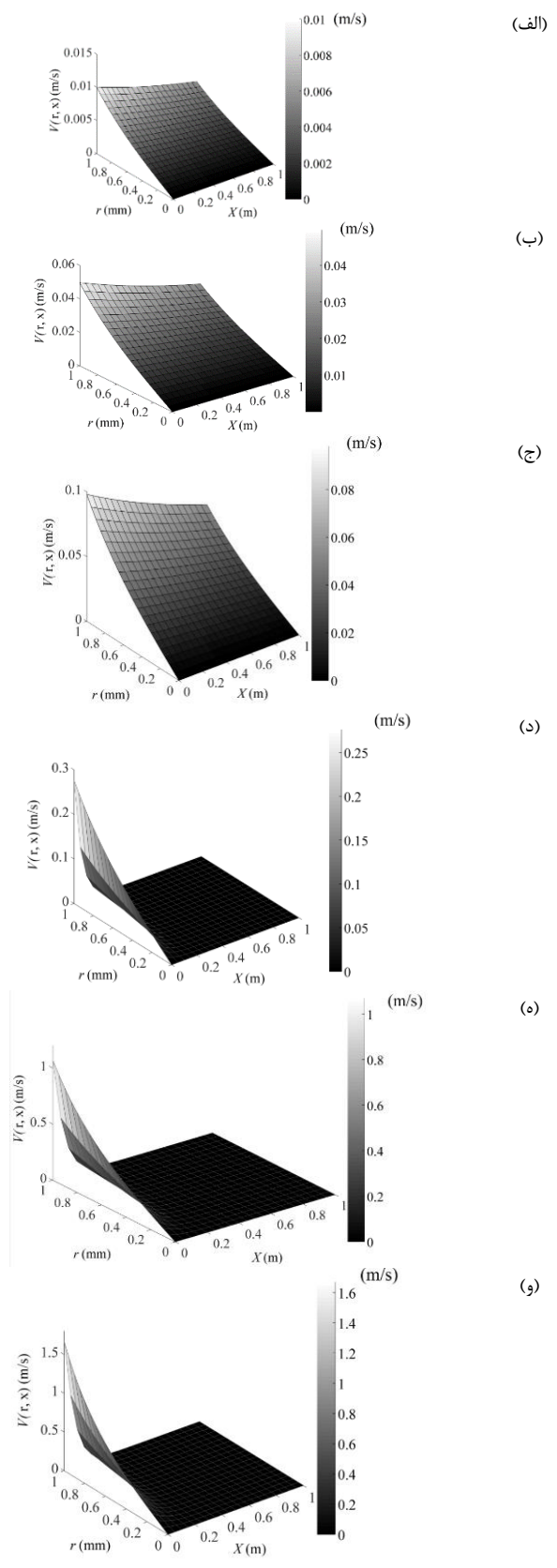


Fig. 5 Velocity distribution inside the tube, using laser with wavelength and power (a) 808nm, 2W (b) 808nm, 10W (c) 808nm, 20W (d) 1064nm, 2W (e) 1064nm, 10W (f) 1064nm, 20W

شکل 5 توزیع سرعت داخل لوله توسط لیزر با طول موج و توان (الف) 808 نانومتر و 2 وات (ب) 808 نانومتر و 10 وات (ج) 808 نانومتر و 20 وات (د) 1064 نانومتر و 2 وات (ه) 1064 نانومتر و 10 وات (و) 1064 نانومتر و 20 وات

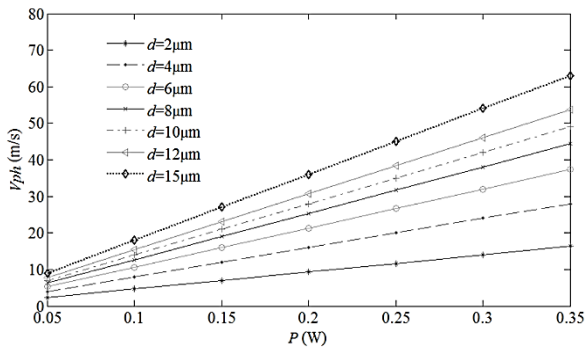


Fig. 8 Photophoretic velocity vs. laser power for different particle diameters

شکل 8 نمودار سرعت فوتوفورسیس بر حسب توان‌های مختلف لیزر به ازای ذرات با قطرهای مختلف ($\mu\text{m}^1\text{s}^{-1}$)

داخل ذره، باعث کاهش سرعت فوتوفورسیس می‌شود. با توجه به شکل 19، با دو برابر شدن قطر باریکه نور لیزر از 1.2 میکرومتر به 2.4 میکرومتر، سرعت فوتوفورسیس به اندازه 75 درصد افزایش یافته‌است. از مقایسه شکل‌های 8 و 9 و درصدهایی که برای افزایش سرعت گفته‌شد، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر افزایش قطر باریکه نور لیزر بر سرعت فوتوفورسیس بیش‌تر از تأثیر افزایش توان لیزر یا افزایش اندازه قطر ذرات است.

در جدول 4، مقدار سرعت فوتوفورسیس برای ذرات مختلف از فرمول (1) محاسبه شده است. سرعت منفی به معنی حرکت ذره به سمت منبع نور است. بسته به نوع ذره و ضریب جذب و نشر آن، ممکن است ذره سرعت فوتوفورسیس مثبت یا منفی داشته‌باشد. جهت مشاهده تأثیر پارامترهای مختلف بر سرعت فوتوفورسیس، ذرات با ضریب هدایت حرارتی، ضریب جذب و پارامتر اندازه (معادله (13)) λ طول موج لیزر و R قطر ذره مختلف در نظر گرفته شده‌اند [3].

$$a = \frac{2\pi R}{\lambda} \quad (13)$$

دو مقدار موجود در دو ستون آخر جدول 4، با مقادیر تجربی موجود مقایسه شده و با توجه به اختلاف کم‌تر از 4 درصد بین مقادیر محاسبه شده و مقادیر تجربی موجود، صحت محاسبات فوق مشخص می‌شود. تأثیر پارامتر اندازه در سرعت فوتوفورسیس به این صورت است که افزایش پارامتر اندازه باعث افزایش توزیع نامتقارن حرارت در ذره و در نتیجه افزایش سرعت فوتوفورسیس می‌شود. در این پژوهش، با افزایش حدود 50 درصدی پارامتر اندازه، سرعت فوتوفورسیس حدود 30 درصد افزایش یافته‌است. تأثیر پارامتر ضریب جذب بر سرعت فوتوفورسیس به این صورت است که کاهش ضریب جذب، باعث کاهش سرعت فوتوفورسیس می‌شود. در انتها، بالا بودن ضریب هدایت حرارتی ذره باعث پخش حرارت در داخل ذره و افزایش همگنی دمایی داخل ذره می‌شود که خود باعث کاهش ضریب عدم تقارن و در نتیجه کاهش سرعت فوتوفورسیس می‌شود. همان‌گونه که در مورد ذره‌ای از جنس الماس با ضریب هدایت حرارتی بسیار زیاد مشاهده می‌شود، سرعت فوتوفورسیس بسیار کوچک است.

5- جمع بندی

در این پژوهش، به بررسی دو اثر ترموفورسیس و فوتوفورسیس در محیط مایع پرداخته شد. با بررسی مدل ساده گرادیان دمای خطی بین دو صفحه تخت و مقایسه بین مقادیر تجربی موجود و محاسبه سرعت ترموفورسیس به صورت تحلیلی توسط مدل‌های موجود در محاسبه این سرعت، دقیق‌ترین

این نتیجه حاصل شد که لیزر در طول موج و توان بسیار بالا سبب تبخیر سیال می‌شود. از جدول 3، همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش طول موج لیزر در مقایسه با افزایش توان لیزر، تأثیر بسیار بیش‌تری در افزایش سرعت ترموفورسیس دارد.

در محاسبات بخش ترموفورسیس، از اثرات گرادیان دما درون ذره صرف نظر شده است. در ادامه، با لحاظ کردن جذب نور توسط ذره، به محاسبه سرعت فوتوفورسیس پرداخته می‌شود.

2-4- بررسی نتایج مربوط به سرعت فوتوفورسیس

برای بررسی سرعت فوتوفورسیس، ذره پی ام ای¹، به منظور مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مراجع موجود، در نظر گرفته شده است و تمام محاسبات برای این ذره انجام گرفته است. با استفاده از معادلات گفته شده در محاسبه سرعت فوتوفورسیس (V_{ph})، مقدار این سرعت بر حسب قطر ذره و توان‌های مختلف لیزر محاسبه شد. این نتایج با مقادیر تجربی به دست آمده توسط زین و همکاران [7] مقایسه شده و با خطای کمتر از 2 درصد، تطابق بسیار خوبی میان نتایج محاسبه شده و تجربی وجود دارد. مقایسه این نتایج با نتایج پژوهش زین در شکل 7 ارائه شده است. نتایج موجود به ازای قطرهای مختلف ذرات از فرمول (1) در نمودار شکل 8 آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش توان لیزر و قطر ذرات، باعث افزایش سرعت فوتوفورسیس می‌شود. به عنوان مثال در توان 0.35 وات، 5 برابر شدن قطر ذره از 2 میکرومتر به 10 میکرومتر، باعث افزایش حدود 66.6 درصدی سرعت فوتوفورسیس شده است.

همچنین افزایش قطر ذره از 6 میکرومتر به 8 میکرومتر، افزایش 15.8 درصدی سرعت فوتوفورسیس را ایجاد کرده‌است. جهت مشاهده تأثیر توان لیزر بر سرعت فوتوفورسیس، مشاهده می‌شود که 2 برابر شدن توان از 0.1 وات به 0.2 وات برای ذره 6 میکرومتری، سبب افزایش نزدیک به 50 درصدی سرعت فوتوفورسیس می‌شود. این افزایش برای ذره 15 میکرومتری، اندکی بیش‌تر از 50 درصد است.

در شکل 9، تأثیر تغییر قطر باریکه نور لیزر بر سرعت فوتوفورسیس در شعاع‌های مختلف ذره مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش قطر باریکه نور لیزر، به دلیل شدت نور و در نتیجه کاهش گرادیان دمای

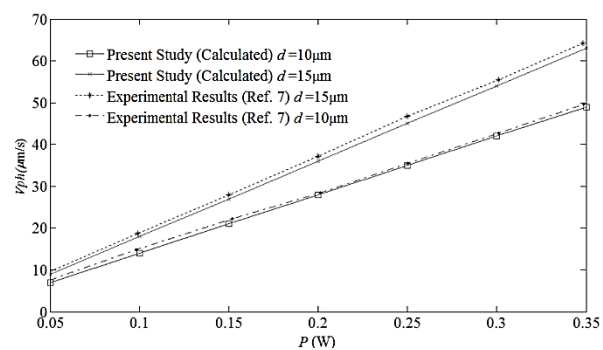


Fig. 7 Comparison between the calculated values of photophoretic velocity vs. laser power, for 10 and 15 micrometer particles, and the experimental values of Xin et al. experiment for laser with 2.8 micrometer beam diameter and 1.55 micrometer wavelength

شکل 7 مقایسه مقادیر سرعت فوتوفورسیس بدست آمده بر حسب توان لیزر به ازای ذرات 10 و 15 میکرومتر در این پژوهش با مقادیر تجربی موجود در پژوهش زین و همکاران برای لیزر با قطر باریکه نور 2.8 میکرومتر و طول موج 1.55 میکرومتر

¹ Poly(methyl methacrylate) (PMMA)

C_s	مقدار ثابت (-)
D_T	ضریب نفوذ حرارتی ($\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$)
g	ثابت گرانش (ms^{-2})
k	ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
H	ثابت هاماکر (J)
h	ضریب انتقال حرارت ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
I	شدت نور لیزر (Wmm^{-2})
J_1	ضریب عدم تقارن (-)
L_s	طول سرش (m)
P	توان (W)
Q	تابع منبع حرارت (J)
r	شعاع مولکولی (μm)
R	شعاع ذره (μm)
T	دما (K)
V	سرعت (μms^{-1})

علایم یونانی

α	نفوذ حرارتی (m^2/s)
β	ضریب انبساط حرارتی حجمی (K^{-1})
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
η	ویسکوزیته دینامیکی ($\text{Kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ε	نفوذپذیری نسبی (-)
λ	طول موج (nm)
v	حجم ویژه (m^3)
κ	ضریب جذب (-)
ζ	نسبت r/R (-)
ω	قطر پرتو نور لیزر (μm)

زیرنویس ها

f	سیال
i	اولیه
p	ذره
ph	فوتوفورسیس
R	نسبی
th	ترموفورسیس
w	دیواره

7- مراجع

- [1] C. M. Cobb, Lasers in periodontics: A review of the literature, *Journal of Periodontology*, Vol. 77, No. 4, pp. 545-564, 2006.
- [2] D. Mackowski, Photophoresis of aerosol particles in the free molecular and slip-flow regimes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, No. 5, pp. 843-854, 1989.
- [3] C. Soong, W. Li, C. Liu, P. Tzeng, Theoretical analysis for photophoresis of a microscale hydrophobic particle in liquids, *Optics Express*, Vol. 18, No. 3, pp. 2168-2182, 2010.
- [4] H. Fu, Y. Huang, L. Gao, Photophoresis of spherical particles with interfacial thermal resistance in micro-nano fluids, *Physics Letters A*, Vol. 377, No. 39, pp. 2815-2820, 2013.
- [5] H. Xin, H. Lei, Y. Zhang, X. Li, B. Li, Photothermal trapping of dielectric particles by optical fiber-ring, *Optics Express*, Vol. 19, No. 3, pp. 2711-2719, 2011.
- [6] H. Monjushiro, Y. Tanahashi, H. Watarai, Laser-photophoretic migration and fractionation of human blood cells, *Analytica Chimica Acta*, Vol. 777, No. 1 pp. 86-90, 2013.

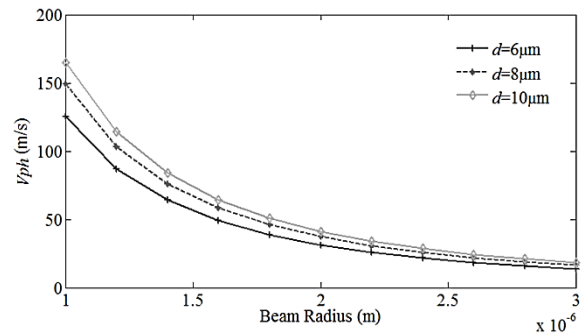


Fig. 9 Photophoretic velocity vs. laser beam diameter for different particle diameters

شکل 9 نمودار سرعت فوتوفورسیس بر حسب قطرهای مختلف باریکه نور لیزر به ازای ذرات با قطرهای مختلف ($\mu\text{m}^1\text{s}^{-1}$)

جدول 4 مقادیر محاسبه شده سرعت فوتورسیس برای ذرات مختلف به ازای ضرایب

هدایت حرارتی، ضرایب جذب و پارامترهای اندازه متفاوت در توان 0.3 وات

Table 4 Calculated values of photophoretic velocity for particles with different thermal conductivity, absorption coefficient and size parameter for 0.3w power

ماده	پارامتر اندازه	ضریب جذب (cm^{-1})	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	سرعت فوتوفورسیس ($\mu\text{m/s}$)
الماس	2	0.07	2600	-0.08
سولفید روی	2	0.02	16.7	-12.63
اکسید منیزیم	2	0.05	42	-2.57
پی ام ای	7	0.001	0.25	-29
پی ام ای	15	0.001	0.25	-42

مدل که همان مدل برنر است، انتخاب شد. تا جایی که بررسی شد، تحقیق چاپ شده‌ای که به بررسی مقایسه‌ای صحت فرمول مناسب برای محاسبه سرعت و ضریب دیفیوژن بپردازد، وجود ندارد. محاسبات برای یک سامانه اندازه‌گیری و جداسازی ذرات در مایع استفاده شد. تأثیر تغییرات توان و طول موج بر این سرعت، بررسی شده و مقدار بیشینه دما و سرعت داخل لوله محاسبه شد. همچنین مشاهده شد که تأثیر تغییر طول موج لیزر بر سرعت ترموفورسیس بسیار بیش‌تر از تأثیر تغییر توان لیزر است. در ادامه، مقدار سرعت فوتوفورسیس نیز محاسبه شد که پژوهش‌های محدودی سرعت مهاجرت ذرات در اثر فوتوفورسیس را به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش، تأثیر تغییر توان و قطر باریکه نور لیزر برای ذرات با قطرهای مختلف بررسی شد. نوآوری این پژوهش، بررسی مدل‌های موجود در محاسبه سرعت ترموفورسیس و انتخاب دقیق‌ترین مدل می‌باشد. همچنین بررسی هر دو اثر ترموفورسیس و فوتوفورسیس در این پژوهش انجام شد که هر دو اثر در محیط مایع بررسی شدند. نتایج این پژوهش در جداسازی ذرات برای طراحی سامانه‌های اندازه‌گیری و بر اساس اندازه، ویژگی‌های نوری مانند ضریب جذب و ضریب شکست و هدایت حرارتی ذره، قابل استفاده است. علاوه مدل تحلیلی توسعه داده شده به عنوان ابزاری جهت پیش‌بینی پارامترهای مؤثر بر ایجاد گردایان دما در سیال و القای سرعت در ذرات قابل استفاده است.

6- فهرست علایم

a	پارامتر اندازه (-)
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

- [13] A. Regazzetti, M. Hoyos, M. Martin, Experimental evidence of thermophoresis of non-Brownian particles in pure liquids and estimation of their thermophoretic mobility, *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 108, No. 39, pp. 15285-15292, 2004.
- [14] S. Ebadati, *Theoretical and Experimental Analysis of Laser Thermal Effects on the Flows Containing Microparticles*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2017. (in Persian فارسی)
- [15] M. Zabetian, M. S. Saidi, M. B. Shafii, M. H. Saidi, Separation of microparticles suspended in a minichannel using laser radiation pressure, *Applied Optics*, Vol. 52, No. 20, pp. 4950-4958, 2013.
- [16] E. Kreyszig, *Advanced Engineering Mathematics*, 10th Edition, pp. 545-552, Danvers: John Wiley & Sons, 2011.
- [7] H. Xin, D. Bao, F. Zhong, B. Li, Photophoretic separation of particles using two tapered optical fibers, *Laser Physics Letters*, Vol. 10, No. 3, pp. 036004, 2013.
- [8] R. T. Schermer, C. C. Olson, J. P. Coleman, F. Bucholtz, Laser-induced thermophoresis of individual particles in a viscous liquid, *Optics Express*, Vol. 19, No. 11, pp. 10571-10586, 2011.
- [9] D. Braun, A. Libchaber, Trapping of DNA by thermophoretic depletion and convection, *Physical Review Letters*, Vol. 89, No. 18, pp. 188103, 2002.
- [10] M. Eslamian, M. Z. Saghir, On thermophoresis modeling in inert nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 80, No. 2 pp. 58-64, 2014.
- [11] J. Huang, X. Liu, Y. Zhang, B. Li, Orbital rotation of biological cells using two fibre probes, *Laser Physics Letters*, Vol. 14, No. 3, pp. 035103, 2017.
- [12] J. P. Holman, *Heat Transfer (SI Units) Sie*, 9th Edition, pp. 60-155, New York: McGraw-Hill, 2008.