

## مطالعه تجربی کاربرد اثرات حرارتی لیزر بر جریان حاوی میکرو ذرات برای تصفیه

### ذرات از آب

محمد ضابطیان طرقي

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس  
zabetian@modares.ac.ir

آيسان منصوريان

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس  
a.mansourian@modares.ac.ir

#### چکیده

از جمله ی سیالات حاوی میکروذرات می توان به هوا، انواع آب های سطحی و خون اشاره نمود. لیزر به عنوان یک منبع پرتوان انرژی با خواص و قابلیت های منحصر به فردی که دارد، می تواند برای شناسایی و جداسازی ذرات موسوم به آلودگی موجود در آب های سطحی و هوا، بکار گرفته شود. برهم کنش لیزر با سیال حاوی میکروذرات را می توان در دو قالب اثرات هیدرودینامیکی از جمله فشار تشعشعی و اثرات حرارتی شامل: جریان القایی، ترموفورسیس و فوتوفورسیس دسته بندی نمود. از جمله کاربردهای اثرات حرارتی لیزر بر سیال حاوی میکروذرات میتوان به به حرکت درآوردن ذرات جاذب طول موج لیزر، جداسازی ذرات از سیال (تصفیه سیال) و تفکیک ذرات مستغرق براساس اندازه، جرم و ضریب جذب آنها اشاره نمود.

در این مقاله، پس از معرفی انواع اثرات حرارتی لیزر، به بررسی کاربرد هر یک از این اثرات در تصفیه آب پرداخته شد، نشان داده شد که سرعت ناشی از فوتوفورسیس در مقایسه با دو اثر دیگر قابل توجه می باشد بنابراین به وسیله ی اثر فوتوفورسیس می توان ذرات مشخصی را با سرعت نسبتا بالایی از سیال جدا نمود. اثرات جریان القایی و ترموفورسیس نیز برای جداسازی ذرات متعدد و ناشناخته مناسب می باشد.

**کلمات کلیدی:** میکروذرات، فشار تشعشعی، جریان القایی، ترموفورسیس، فوتوفورسیس

#### فهرست علائم

	ثابت هاماکر [J]	A
سیال	ظرفیت گرمایی ویژه [J/Kg.K]	$c_p$
ذره	شعاع [ $\mu\text{m}$ ]	R
	ضریب نفوذ حرارتی [ $\mu\text{m}^2/\text{s.K}$ ]	$D_T$
نفوذ حرارتی [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	ثابت گرانش [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]	g
ضریب انبساط حرارتی حجمی [1/K]	ضریب هدایت حرارتی [W/m.K]	k
ویسکوزیته دینامیکی [Kg/m.s]	طول سرش	$L_S$
چگالی [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	توان [W]	P
	شدت نور تابانده شده	I
ضریب انبساط حرارتی	تابع تابش نور منبع حرارتی	Q
ضریب جذب	دما [K]	T
نسبت شعاع مولکول حلال به شعاع ذره	ضریب عدم تقارن	J
طول موج نور		$\lambda$

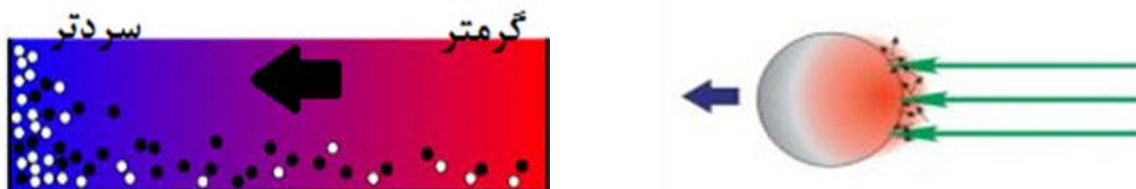
## ۱- مقدمه

لیزر دارای ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله توان بالا، هم‌فازی و واگرایی کم امواج، تک طول موج بودن است و در مقایسه با سایر منابع نوری قابلیت‌ها و کاربرد های چشمگیری در علوم و صنایع مختلف داراست. همانطور که گفته شد، اثر لیزر بر جریان‌های حاوی ریز ذرات به دو بخش اثر حرارتی و اثر هیدرودینامیکی تقسیم می‌شود. اثرات حرارتی به سه دسته ترموفورسیس، فوتوفورسیس و جریان القایی تقسیم می‌شود. بنا به خواص ترموفیزیکی سیال و ذرات هر یک از این اثرات حادث خواهند شد. هر ماده جاذب بازه محدودی از امواج الکترو مغناطیس می باشد و از طرفی لیزر نیز تک طول موج است. بدین ترتیب به واسطه جنس ذره و یا سیال انرژی لیزر می تواند جذب شود.

برای سیال جاذب طول موج لیزر، جریان القایی و ترموفورسیس اتفاق می افتند. بدین ترتیب که جذب حرارت لیزر توسط سیال و ایجاد اختلاف دمای محلی در سیال، منجر به افزایش انرژی جنبشی محلی سیال و کاهش چگالی محلی سیال می شود. بیشتر بودن نیرو های وارد شده به ذره از قسمت گرمتر سیال (ترموفورسیس)، که ناشی از بیشتر بودن انرژی جنبشی سیال است و جریان همرفت (جریان القایی) به وجود آمده، ذرات را از ناحیه گرمتر به قسمت سردتر می رانند. زین برای تصفیه آب [۱] از این آثار استفاده کرد. همچنین رگازتی و همکاران با به کارگیری اثر ترموفورسیس در زمینه‌های پزشکی و جداسازی سلول‌های خونی [۲] تحقیقاتی انجام دادند.

برای فاز گسسته (ذرات) جاذب حرارت نیز در اثر تغییر دمای موضعی ذره، در نتیجه ی انتقال حرارت جابجایی، اختلاف دمای محلی سیال در دو طرف ذره به وجود می آید که باعث ایجاد گرادیان فشار در دو سمت ذره شده و ذره در اثر نیروی وارد شده به حرکت در می آید؛ در شکل ۱ اثر فوتوفورسیس قابل مشاهده خواهد بود. حرکت ذره به نیروی وارد شده به آن (که خود متأثر از اختلاف دمای ایجاد شده می باشد) و دیگر خواص فیزیکی ذره از جمله سایز و چگالی می باشد. لازم به ذکر است که سرعت القا شده به ذره به وسیله روابط نیمه تجربی موجود قابل محاسبه می باشد. میکروپلاستیک ها یکی از انواع آلودگی هایی هستند که در آب های سطحی مشاهده شده اند و منجر به آسیب زیست محیطی و مسمومیت آبزیان و گاه انسان ها شده اند [۳-۵]. با تاباندن لیزر با طول موجی که این نوع ذرات جاذب آنها هستند، می توان به شناسایی و جداسازی این نوع ذرات پرداخت.

همچنین در سیالی که حاوی دو یا چند نوع ذره است می توان با اختلاف حرکت ذرات، به جداسازی آن ها از هم پرداخت. ژانگ در سال ۲۰۱۲ در یک مطالعه آزمایشگاهی، روشی برای جدا کردن ذرات از یکدیگر ارائه داد [۶] و مونجوشیرو و همکاران برای جداسازی سلول های خونی از هم [۷] از این خاصیت استفاده نمودند. همچنین زین از این خاصیت فوتوفورسیس برای به دام اندازی ذرات و دستکاری آنها و در پژوهشی دیگر برای متراکم نمودن ذرات با استفاده از فیبر نوری [۸] استفاده کرده است. در نتیجه با تاباندن لیزر به سیال می توان به صورت غیر تهاجمی (با کنترل از راه دور) ایجاد حرکت در ذره نمود. اکثر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه برای سیال ساکن و با استفاده از فیبر نوری بوده است، ولی در این تحقیق، ما با استفاده از لیزر به بررسی قابلیت های لیزر برای سیال ساکن و یا در حال حرکت (جریان سیال) خواهیم پرداخت.



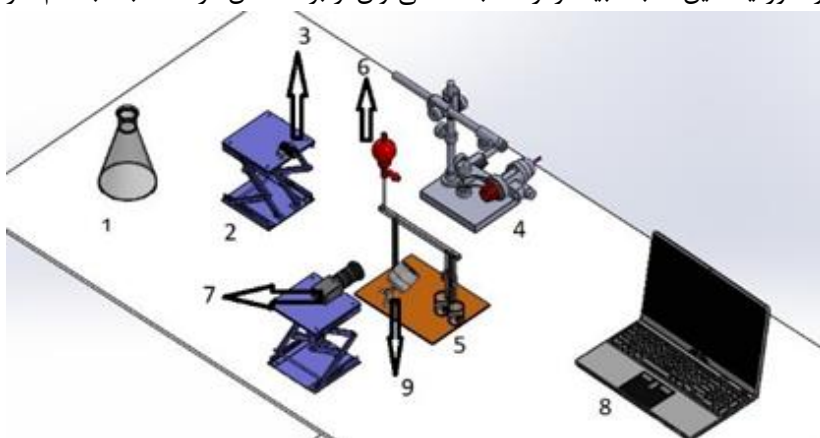
شکل ۱: تصویر سمت راست، پدیده فوتوفورسیس و سمت چپ، پدیده ترموفورسیس

## ۲- روش تجربی و نتایج

در ادامه به شرح آزمایشات انجام شده پرداخته می شود و از نتایج بدست آمده پیشنهاداتی برای جداسازی ذرات ارائه می شود.

### ۲-۱- شرح روش انجام آزمایش

برای مشاهده ی اثرات حرارتی ناشی از لیزر به فرآخور ماهیت فرآیند هر یک، شرایط آزمایشگاهی متفاوتی باید فراهم نمود. بستر آزمون موجود (شکل ۲) شامل کانال با مقطع مستطیلی، پمپ یا مخزن هیدرودینامیکی، مخازن ورودی و خروجی، دوربین میکروسکوپ نوری از نوع دیجیتال، لنز همگرا کننده، نور پس زمینه، رایانه و... است و در جدول ۱ معین شده است. همچنین به لیزرهای سبز رنگ (۴۰۰ میلی وات) و مادون سرخ (۳۰۰ میلی وات-با طول موج ۹۸۰ نانومتر) و دو دسته مخلوط سوسپانسیون، یکی مخلوط ذرات جاذب نور در آب و دیگری مخلوط حاوی ذرات معلق (رودامین ب) که فاز پیوسته ای جاذب نور داشته باشد، نیاز است. لازم به ذکر است که غلظت مخلوط ها به گونه ای انتخاب می شود که نسبت فاصله ذرات به قطر آنها ( $L/D=10$ ) بزرگتر از ۱۰ باشد. در صورتیکه این نسبت بیشتر از ۱۰ باشد، می توان از برهمکنش ذرات نسبت به هم صرف نظر کرد.



شکل ۲: چیدمان اجزای آزمایش

جدول ۱: نام تجهیزات به کار رفته

شماره در تصویر	نام تجهیز
۱	مخزن
۲	پایه نگهدارنده
۳	لیزر
۴	دوربین میکروسکوپ و مکانیزم نگهدارنده آن
۵	کانال جریان
۶	پمپ
۷	دوربین ضبط کننده
۸	سیستم رایانه
۹	نور پس زمینه

برای اجرای آزمایش پس از تهیه و آماده سازی ادوات و محلول هایی با غلظت معین، ابتدا پلاگ آب مقطر در کانال تشکیل می شود، پس از تنظیم باریکه نور لیزر منطبق بر مرکز کانال (هم راستا با آن) و تنظیم میکروسکوپ در بزرگنمایی 140، با استفاده از سرنگ، حجم معینی (یک سی سی) از آب کانال تخلیه شده و به همان مقدار، از محلول حاوی میکروذرات تهیه شده به کانال تزریق می شود. در این مرحله پس از تنظیم میکروسکوپ و قرار دادن نور پس زمینه رو به روی میکروسکوپ جهت

مشاهده مطلوب تر ذرات، لیزر تابانید شده و تصویر برداری در بازه های زمانی معینی انجام می شود. در ادامه با آنالیز تصاویر به روش لاگرانژی در نرم افزار PVTLab، تاثیر گرادیان دمای موضعی ایجاد شده در ذره (اثر فوتوفورسیس) و گرادیان دمای محلی به وجود آمده در حجم سیال (اثر جریان القایی و ترموفورسیس)، در واقع سرعت میانگین ایجاد شده در ذرات محاسبه و گزارش می شود. همچنین کانتور های نمایش برداری سرعت ذرات نیز رسم می شود. که بدین طریق تحلیل نتایج حاصل محقق خواهد شد.

## ۲-۲- معادلات حاکم

در نتیجه تحقیقات انجام شده، مطالعات تحلیلی موجود درباره ی اثرات حرارتی لیزر در خصوص دو اثر برموفورسیس فوتوفورسیس در ادامه آورده شده است.

در سال ۲۰۱۱ ضابطیان و همکاران در یک بررسی تحلیلی با استفاده از روش جداسازی متغیرها، با حل معادله انتقال حرارت و بدست آوردن پروفیل دما، معادله ای برای محاسبه سرعت ترموفورسیس بدست آوردند. این فرمول ها در معادلات (۱) تا (۳) آورده شده اند. در این معادلات  $\rho$  چگالی سیال،  $T$  دما،  $k$  ضریب هدایت حرارتی سیال،  $\mu$  ویسکوزیته سیال،  $P_0$  توان لیزر،  $a_\lambda$  ضریب جذب و  $\omega$  شعاع باریکه نور لیزر است [۹].

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

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

$$V_{th} = 0.26 \times \frac{k}{2k + k_p} \frac{\mu}{\rho T} \nabla T \quad (3)$$

در سال ۲۰۱۰ سونگ و همکاران به صورت تحلیلی فرمولی برای محاسبه فوتوفورسیس ذرات آب گریز داخل سیال به دست آوردند. این فرمول به صورت معادلات (۴) تا (۶) برای محاسبه سرعت فوتوفورسیس محاسبه شد [۱۰].

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

$$J_1 = \frac{6 \pi R n_p \kappa_p}{m_f^2 \lambda} \int_0^1 \int_0^\pi B(\zeta, \theta) \zeta^3 \cos \theta \sin \theta \, d\theta d\zeta \quad (5)$$

$$Q(r, \theta) = \frac{4 \pi n_p I}{m_f^2 \lambda} B(r, \theta) \quad (6)$$

در معادلات بالا،  $V_{ph}$  سرعت فوتوفورسیس،  $\kappa$  ضریب جذب،  $r_0$  شعاع مولکولی،  $n$  ضریب انتشار،  $L_s$  طول سرش<sup>۱</sup>،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی،  $R$  شعاع ذره،  $m$  ضریب نشر مختلط،  $I$  شدت نور تابانده شده،  $A$  ثابت هاماکار،  $v_0$  حجم مولکولی

<sup>1</sup> Slip Length

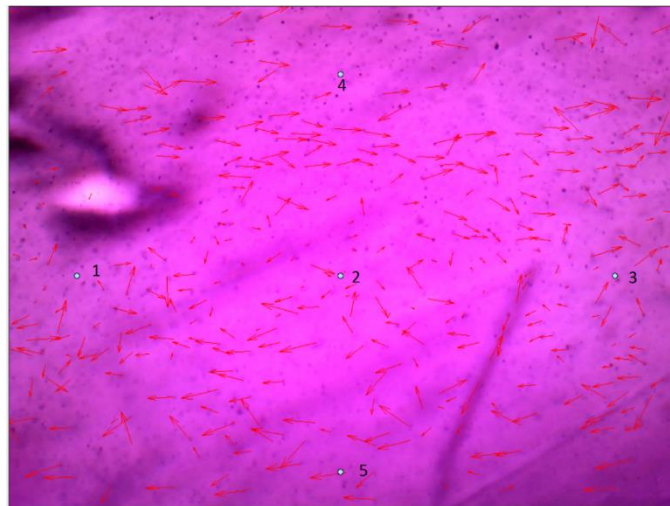
ویژه،  $k$  ضریب هدایت حرارتی،  $\beta_T$  ضریب انبساط حرارتی،  $\lambda$  طول موج نور،  $J_1$  ضریب عدم تقارن،  $Q$  تابع تابش نور منبع حرارتی و  $G$  نسبت شعاع مولکول حلال به شعاع ذره است. همچنین این معادله در مایعات قابل استفاده بوده و رژیم لغزشی را نیز در نظر گرفته است. لازم به ذکر است با در دست داشتن خواص ترموفیزیکی و فیزیکی ذرات، می توان نتایج تجربی به دست آمده از آزمایشات را با نتایج تحلیلی مقایسه نمود. همچنین با بررسی این روابط می توان به عوامل تاثیر گذار بر سرعت به وجود آمده، از جمله گرادیان دمای به وجود آمده و قطر ذرات، پی برد.

### ۳-۲- نتایج و بحث روی نتایج

اثرات حرارتی لیزر بر جریان حاوی ذرات بر اساس خاصیت ذرات و یا سیال (اینکه کدام جاذب طول موج لیزر مربوطه می باشد) به دودسته تقسیم می شوند. در ادامه آزمایش مربوط به سیال جاذب انرژی لیزر، ترموفورسیس و جریان القایی، در ابتدا آورده شده و در ادامه آزمایش مربوط به ذرات جاذب، فوتوفورسیس، آورده شده است.

### ۳-۲-۱- بررسی سرعت انتقال ذرات توسط پدیده های جریان القایی و ترموفورسیس

محل مورد استفاده برای این آزمایش باید دارای میزان معین رودامین ب (قطر ذرات ۱۰ میکرون است). حل شده باشد. غلظت رودامین ۳/۵ مولار و پراکندگی ذرات همانند آزمایش فوتوفورسیس ( $L/D=15$ ) در نظر گرفته شد.



شکل ۳: موقعیت نقاط در تصویر. پنج نقطه در موقعیت‌های مختلف جهت بررسی تاثیر لیزر در فواصل مختلف

جدول ۲: میانگین اندازه سرعت های نقاط تعیین شده در شکل ۱ در فریم های متوالی

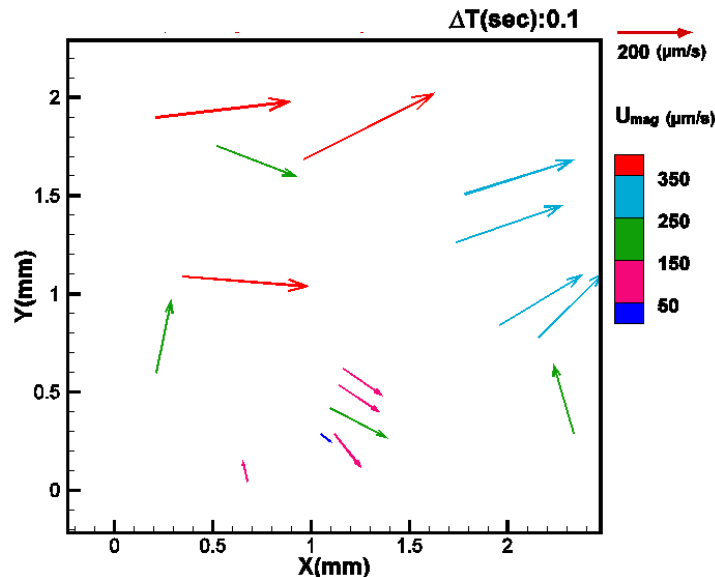
نقطه	اندازه سرعت ( $\mu\text{m/s}$ )
۱	۶۸/۷۸
۲	۵۵/۷۲
۳	۴۴/۴۶
۴	۱۴۴/۹
۵	۸۵/۹۵

شکل ۳ نشان دهنده پنج نقطه فرضی برای بررسی تاثیر جریان القایی و ترموفورسیس لیزر بر ذرات است و جدول ۲ مقادیر کمی میانگین سرعت ذرات در طول ۱ ثانیه را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، سرعت حرکت ذرات در نقطه ۱ بیشتر از سایر نقاط است. زیرا مقدار بیشتری از انرژی لیزر، به واسطه فاصله ی کمتری که با لیزر دارد، در این محدوده جذب

می شود. ذرات در نقطه ۴ بیشترین مقدار سرعت را دارند که می توان علت آن را هم پوشانی هر دو اثر ترموفورسیس و جریان القایی عنوان نمود. ذرات در نقطه ۳ نیز کمترین سرعت را دارند چرا که به واسطه فاصله از منبع انرژی، کمترین انرژی را دریافت می نمایند. با توجه به برگشت تعداد قابل توجه ذره به قسمت ابتدایی کانال، می توان گفت بازدهی این اثرات برای جداسازی ذرات مطلوب نمی باشد. اثر حرارتی دیگر، فوتوفورسیس است که برای ذره جاذب نور اتفاق می افتد.

### ۲-۳-۲- بررسی سرعت انتقال ذرات توسط پدیده ی فوتوفورسیس

برای ساخت محلول با تراکم مطلوب، ذرات (۶۹ میکرونی) با نسبت (L/D=15) در نظر گرفته شد و با تاباندن نور لیزر به آنها حرکت ایجاد شده است. برای سنجش تکرار پذیر بودن آزمایش در یک مقطع مشخص از کانال چندین نوبت ذرات وارد شده و سرعت میانگین آنها محاسبه شده است. در شکل ۴ بردار حرکت ذرات تحت اثر فوتوفورسیس نمایش داده شده است. همانطور که در جدول ۳ آورده شده است، سرعت میانگین افقی حدود ۴۰ میکرون بر ثانیه و سرعت محوری به وجود آمده در حدود ۱۹۱ میکرون بر ثانیه می باشد.



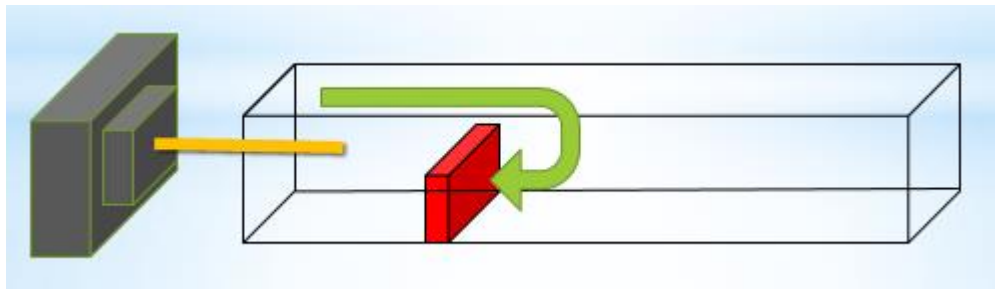
شکل ۴: بردارهای حرکت ذرات در یک مقطع ثابت تحت اثر تابش لیزر- پدیده فوتوفورسیس

جدول ۳: یک نمونه جدول مربوط به تغییر متغیرها در شرایط مختلف

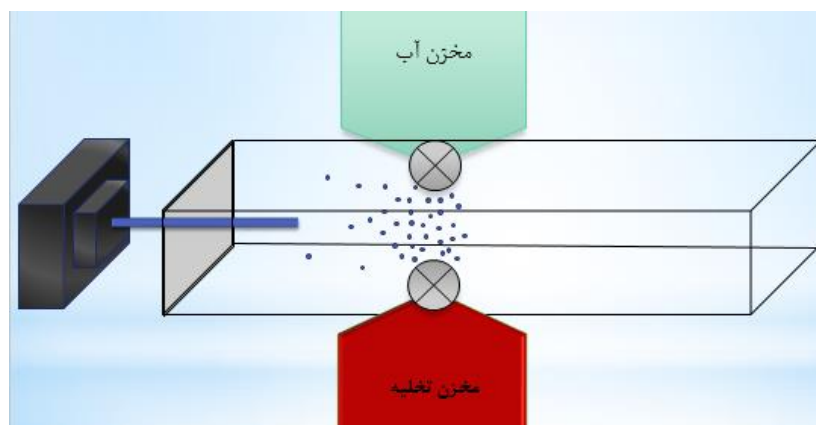
میانگین سرعت شعاعی ( $\mu\text{m/s}$ )	میانگین سرعت محوری ( $\mu\text{m/s}$ )	فریم	زمان آزمایش (sec)
۷۷	۱۹۳	۷ و ۶	۱۰ الی ۱
۶۹	۱۹۷	۵ و ۴	۵ الی ۶
۱۹	۱۷۳	۱۰ و ۹	۱۰ الی ۱۱
۲۷	۲۲۳	۴ و ۳	۱۵ الی ۱۶
۱۹	۲۲۳	۶ و ۵	۲۰ الی ۲۱
۱۷	۱۷۸	۶ و ۵	۲۵ الی ۲۶
۴۳	۱۷۲	۸ و ۷	۳۰ الی ۳۱
۴۵	۱۷۳	۱۰ و ۹	۳۵ الی ۳۶
۳۹/۵	۱۹۱/۵	میانگین سرعت ذرات در کل آزمایش	

## ۲-۴- ارائه طرح مفهومی جداساز ذرات از آب

شماتیک کانال پیشنهادی برای تصفیه سیال در در ادامه آورده شده است. در شکل ۵ کانال مناسب برای اثرات جریان القایی و ترموفورسیس، نشان داده شده است؛ با توجه به ماهیت جریان به وجود آمده (همرفت) با تعبیه یک دیواره در نیمه پایینی کانال، مانع از بازگشت ذرات به قسمت ابتدایی کانال شده و سیال ابتدای کانال به مرور زمان عاری از ذرات خواهد شد. برای افزایش سرعت و بازدهی تصفیه با توجه به رابطه شماره ۳ بهره گرفت. سرعت ترموفورسیس وابسته به اختلاف دمای به وجود آمده در سیال است، بنابراین با افزایش این اختلاف دما، سرعت جداسازی ذرات را می توان افزایش داد. شکل ۶ نیز نشان دهنده کانال پیشنهادی برای جداسازی ذرات به وسیله اثر فوتوفورسیس می باشد. همانطور که در تصویر مشخص شده با تعبیه ی یک منبع سیال در بالا و یک منبع تخلیه در پایین محلی که ذرات در آن جمع می شوند، می توان ذرات را از سیال خارج نمود.



شکل ۵: شماتیک کانال پیشنهادی برای تصفیه سیال با بهره گیری از جریان القایی و ترموفورسیس



شکل ۶: شماتیک بستر آزمون برای خارج کردن ذرات از سیال (تصفیه آب) با استفاده از اثر فوتوفورسیس

## ۳- نتیجه گیری

در این تحقیق، با هدف بررسی قابلیت های اثرات حرارتی لیزر برای جداسازی ذرات مستغرق از سیال، دو آزمایش طراحی و انجام شد. در هر دو با روشن شدن لیزر، در حیطه ی پرتو، سرعت ذرات افزایش قابل توجه پیدا می کردند که نشانگر اثر مستقیم لیزر بر روی حرکت در آوردن سیال و ذرات می باشد. در آزمایش اول، مشخص شد که اثر فوتوفورسیس منجر به افزایش قابل توجه سرعت محوری ذرات شده و این در حالی است که ذرات سرعت شعاعی هم بدست آوردند.

در آزمایش دوم، در نتیجه تاثیر اثرات ترموفورسیس و جریان القایی، ذرات به صورت همرفتی حرکت می نمودند که علت آن حرکت همرفتی ناشی از گرم شدن سیال، یا همان پدیده جریان القایی می باشد که به علت کاهش چگالی بخش گرم شده در قسمت بالایی کانال به سمت جلو حرکت نموده و با مواجه با ذرات ساکن جلویی، از قسمت پایین کانال (به علت اختلاف دمای اندک ایجاد شده) به عقب رانده می شوند و حرکت ساعتگرد به وجود می آید. همچنین نشان داده شد که ذراتی که در ناحیه ی فوقانی کانال حرکت کردند، دارای سرعت بیشتری بودند، زیرا هر دو اثر حرارتی هم پوشانی داشتند.

مشاهده می شود که سرعت به وجود آمده بر اثر فوتوفورسیس با میانگین سرعت حدودا ۱۹۱ (میکرون/ثانیه) بیشتر از سرعت پیشینه حاصل از ترموفورسیس و جریان القایی (۶۸ میکرون/ ثانیه)) می باشد. که از لحاظ فیزیکی می توان گفت به دلیل اینکه در فوتوفورسیس، انرژی لیزر در ذرات جذب می شود، متمرکزتر بوده و می تواند سرعت بیشتری ایجاد کند؛ حال آن که در ترموفورسیس و جریان القایی، سیال جاذب حرارت، انرژی لیزر را دریافت و جذب می نماید و منجر به حرکت ذرات می شود.

با توجه به سرعت بیشتر ناشی از اثر فوتوفورسیس، این اثر می تواند برای جداسازی ذرات از سیال کارآمدتر باشد. نکته قابل توجه این است که طبق روابط تحلیلی آورده شده می توان گفت وقوع اثر فوتوفورسیس وابسته به جنس ذره و ابعاد آن است. در صورتیکه چندین نوع ذره در سیال وجود داشته باشد، پرتو لیزر تنها روی ذراتی که جاذب طول موج لیزر می باشند، تاثیر گذاشته و آنها را به حرکت در می آورد. بنا براین از این اثر می توان برای جداسازی نوع مشخصی از ذره استفاده نمود. به علاوه می توان از اثر فوتوفورسیس برای شناسایی انواع ذره در سیال نیز بهره گرفت. این در حالی است که دو اثر دیگر بر روی هر نوع ذره ای تاثیر می گذارند و تنها لازم است، سیال جاذب طول موج لیزر باشد. از این اثرات نیز می توان برای جداسازی ذرات متعدد و یا نامشخص استفاده کرد.

## مراجع

[۱] H. Xin, H. Lei, Y. Zhang, X. Li, and B. Li, "Photothermal trapping of dielectric particles by optical fiber-ring," *Opt. Express*, vol. 19, no. 3, p. 2711, Jan. 2011 .

[۲] Anne Regazzetti, and Mauricio Hoyos, and M. Martin\*, "Experimental Evidence of Thermophoresis of Non-Brownian Particles in Pure Liquids and Estimation of Their Thermophoretic Mobility," 2004.

[۳] A. Isobe, K. Uchiyama-Matsumoto, K. Uchida, T. Tokai, "Microplastics in the Southern Ocean," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 114, p. 623–626, 2017.

[۴] V. Hidalgo-Ruz, L. Gutow, "Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification," *Environmental Science & Technology*, vol. 46, 3060-3075, Fe. 2012.

[۵] A. Isobe, K. Uchiyama-Matsumoto, K. Uchida, T. Tokai, "Microplastic pollution in the Maowei Sea, a typical mariculture bay of China," *Science of the Total Environment*, 2018, 192, 0048-9697.

[۶] H. Lei, Y. Zhang, and B. Li, "Particle separation in fluidic flow by optical fiber," *Opt. Express*, vol. 20, no. 2, p. 1292, Jan. 2012.

[۷] H. Monjushiro, Y. Tanahashi, and H. Watarai, "Analytica Chimica Acta Laser-photophoretic migration and fractionation of human blood cells," *Anal. Chim. Acta*, vol. 777, pp. 86–90, 2013.

[۸] H. Xin, B. Li, "Fiber-based optical trapping and manipulation," *Optoelectron*, Oct. 2017.

[۹] Zabetian, M., et al., Modeling of laser thermal and hydrodynamic effects on a dilute suspension of micro-particles in water. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014. 28(3): p. 1017-1026.

[۱۰] Soong, C., et al., Theoretical analysis for photophoresis of a microscale hydrophobic particle in liquids. *Optics express*, 2010. 18(3): p. 2168-2182.