

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

گرایش حالت جامد

برهمکنش باریکه‌ی کانونی‌شده‌ی نور با سیال باردار و کاربرد آن در

میکرو/نانو پمپ‌های سیال

از

رضا کیانی ایران‌پور

استادان راهنما

دکتر صابر فرجامی شایسته

دکتر سید نادر رسولی

دی ۱۳۹۰

## تقدیر و تشکر

از استادان ارجمند آقایان دکتر صابر فرجامی شایسته و دکتر سید نادر رسولی به خاطر پذیرش و راهنمایی اینجانب تشکر و

قدردانی می‌نمایم؛ انجام این کار بدون کمک و پشتیبانی ایشان امکان‌پذیر نبود.

از خانواده عزیز و به‌خصوص همسر مهربانم به خاطر درک و صبرشان و اینکه مرا مورد همراهی و پشتیبانی قرار دادند

سپاسگزارم.

# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ث	فهرست شکل‌ها
ج	فهرست جدول‌ها
ح	چکیده فارسی
خ	چکیده انگلیسی
۱	مقدمه
۳	فصل ۱: مفاهیم اساسی
۳	۱-۱- معرفی میکروسیال
۱۰	۱-۲- معرفی انبرک نوری
۱۱	۱-۳- معرفی اثر سُرِه
۱۴	فصل ۲: محاسبه‌ی تغییر چگالی یون‌ها در حضور گرادبان دما و ایجاد ناحیه‌ی باردار در محلول
۱۴	۲-۱- مقدمه
۱۵	۲-۲) محاسبات نظری مسأله
۲۰	فصل ۳: اعمال میدان الکتریکی و محاسبه‌ی سرعت و فشار سیال بدون حضور مرز
۲۰	۳-۱- مقدمه
۲۰	۳-۲- محاسبه‌ی سرعت سیال
۲۴	۳-۳- محاسبه‌ی فشار سیال
۲۶	۳-۴- رسم پروفایل سرعت و خطوط فشار ثابت

فصل ۴: محاسبه‌ی سرعت و فشار سیال در حضور مرز استوانه‌ای.....	۲۸
۴-۱) مقدمه .....	۲۸
۴-۲) جواب‌های عمومی معادله‌ی نویر-استوکس در مختصات استوانه‌ای.....	۲۹
۴-۳) محاسبه‌ی سرعت و فشار سیال در حضور مرز استوانه‌ای و اعمال نیرو به مرکز ناحیه‌ی باردار.....	۳۳
۴-۴) محاسبه‌ی سرعت و فشار سیال در حضور مرز استوانه‌ای و اعمال نیرو به کل ناحیه‌ی باردار.....	۴۲
فصل ۵: خلاصه و نتیجه‌گیری، پیشنهادات در مورد ادامه‌ی کار.....	۵۸
پیوست ۱: روش استفاده از تابع گرین در حل معادلات دیفرانسیل.....	۵۹
پیوست ۲: حل معادله‌ی دیفرانسیل تابع گرین سرعت.....	۶۰
پیوست ۳: محاسبه‌ی انتگرال‌های کره-لایه.....	۶۲
پیوست ۴: تعریف تابع MeijerG.....	۶۵
منابع و مراجع.....	۶۶

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) طول مشخصه‌ی بعضی از وسایل میکروسیال .....	۳
شکل (۲-۱) یک وسیله‌ی LOC جهت آنالیز نوری واکنش‌های شیمیایی .....	۴
شکل (۳-۱) رابطه‌ی تنش برشی با چسبندگی .....	۵
شکل (۴-۱) مقایسه‌ی شرایط مرزی مختلف روی دیواره .....	۹
شکل (۵-۱) نیروهای وارد بر ذره کلونئیدی توسط انبرک نوری .....	۱۱
شکل (۱-۲) تغییرات تابع $F(r)$ نسبت به فاصله از مرکز باریکه‌ی گاوسی .....	۱۸
شکل (۲-۲) تغییرات میدان الکتریکی ناحیه‌ی باردار نسبت به فاصله از مرکز باریکه‌ی گاوسی .....	۱۹
شکل (۱-۳) تغییرات مؤلفه‌ی $v_r(r)$ روی محور $Z$ در حوالی ناحیه باردار .....	۲۴
شکل (۲-۳) تغییرات فشار سیال روی محور $Z$ در حوالی ناحیه باردار .....	۲۵
شکل (۳-۳) میدان سرعت سیال در نزدیکی ناحیه‌ی باردار در صفحه‌ی $Y-Z$ .....	۲۶
شکل (۴-۳) خطوط هم‌فشار سیال در نزدیکی ناحیه‌ی باردار .....	۲۷
شکل (۱-۴) تغییرات $v_{z,STL}$ نسبت به $Z$ .....	۳۹
شکل (۲-۴) تغییرات $v_{z,STL}$ نسبت به $\rho$ .....	۳۹
شکل (۳-۴) تغییرات $v_{\rho,STL}$ نسبت به $Z$ .....	۴۰
شکل (۴-۴) تغییرات $v_{\rho,STL}$ نسبت به $\rho$ .....	۴۰
شکل (۵-۴) تغییرات $p_{STL}$ نسبت به $Z$ .....	۴۱
شکل (۶-۴) تغییرات $p_{STL}$ نسبت به $\rho$ .....	۴۱
شکل (۷-۴) تغییرات $v_z$ نسبت به $Z$ .....	۵۳
شکل (۸-۴) تغییرات $v_z$ نسبت به $\rho$ .....	۵۳

- شکل (۹-۴) تغییرات  $v_\rho$  نسبت به  $Z$  ..... ۵۴
- شکل (۱۰-۴) تغییرات  $v_\rho$  نسبت به  $\rho$  ..... ۵۴
- شکل (۱۱-۴) تغییرات فشار نسبت به  $Z$  ..... ۵۵
- شکل (۱۲-۴) میدان سرعت سیال در نزدیکی ناحیه‌ی باردار ..... ۵۶
- شکل (۱۳-۴) خطوط هم‌فشار سیال در نزدیکی ناحیه‌ی باردار ..... ۵۷
- شکل (پ-۴) نمودار تابع  $B_{1,SP_L}(\rho, k)$  نسبت به  $k$  به‌ازای  $\rho = 1$  ..... ۶۵

## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول (۱-۱) ضریب چسبندگی بعضی از سیالات ..... ۶

جدول (۲-۱) عامل پخش حرارتی برای بعضی از یون‌ها ..... ۱۳

## چکیده

برهمکنش باریکه‌ی کانونی‌شده‌ی نور با سیال باردار و کاربرد آن در میکرو/نانو پمپ‌های سیال

رضا کیانی ایران پور

تابش باریکه‌ی کانونی‌شده‌ی لیزر، موجب گرم شدن موضعی سیال الکترولیت و ایجاد شیب میدان دما می‌شود؛ شیب دما باعث حرکت یون‌های مثبت و منفی به سمت ناحیه‌ی گرم‌تر یا سردتر می‌شود. این حرکت در نهایت منجر به تجمع یکی از انواع یون‌ها در ناحیه‌ی گرم می‌شود؛ تجمع یون‌ها در ناحیه‌ی گرم را می‌توان به صورت یک ذره‌ی باردار مصنوعی معلق در آب در نظر گرفت. اعمال میدان الکتریکی، روی یون‌های مجتمع شده و در نتیجه سیال اطراف آنها نیرو وارد کرده و باعث حرکت سیال می‌شود. ما معادلات حاکم بر این حرکت را حل کرده و میدان سرعت را برای دو مثال مشخص الکترولیت بدون مرز و نیز الکترولیت داخل یک لوله‌ی استوانه‌ای نامتناهی به دست آورده‌ایم. این ایده می‌تواند به عنوان بستری برای طراحی پمپ‌های میکرو/نانو سیال تلقی شود.

**کلمات کلیدی:** هیدرودینامیک عدد رینولد پایین، اثر سُرِه، شارش میکروسیال‌ها



## Abstract

Interaction of focused optical beam with charged fluids, and its application in micro/nano pumps.

Reza Kiani Iranpour

A focused laser beam is locally heating an electrolyte solution. It yields an inhomogeneous temperature profile which causes positive and negative ions to move toward hotter or colder region. This motion will eventually lead to condensation of one of the two types of ions in the focal hot spot. The ions accommodated in the hot spot can be considered as an artificial charged particle, suspended in water. An external electric field then applies a net force on accommodated ions; which is transferred to fluid surrounding ions and cause it to move. We solved the governing equations for this motion and obtained the velocity field for two distinguished example of an infinite electrolyte with no boundary as well as an electrolyte inside an infinite cylindrical tube. This idea can be used as a basis for designing micro/nano fluid pumps.

**Keywords:** Low Reynolds Number Hydrodynamics, Soret Effect, Microfluidics.

## مقدمه

برهمکنش نور با سیال باردار و نیز پمپ‌های میکرو/نانوسیال از جمله موضوعاتی هستند که در مبحث میکروسیال‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ دانش و مهندسی میکروسیال<sup>۱</sup> از اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی پدید آمده و کاربردهای مختلفی در شیمی، زیست‌شناسی، پزشکی، سیستم‌های کنترلی و هدایت گرمایی پیدا کرده‌است [۳].

در ابتدای فصل ۱ ابتدا موضوع میکروسیال‌ها به‌طور کلی معرفی شده و به بعضی از کاربردهای آن اشاره شده‌است؛ سپس مفاهیم اساسی که در فصل‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حد مورد نیاز توضیح داده شده‌اند؛ این فصل شامل مرور کلی بر میکروسیال‌ها و معرفی مفاهیم پیوستگی جریان، چسبندگی و تنش برشی، معادله‌ی نویر-استوکس<sup>۲</sup>، عدد رینولد و توضیح شرایط مرزی است؛ همچنین از آنجا که انبرک نوری ابزاری است که در ارتباط با میکروسیال مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌طور کلی معرفی شده‌است. در انتهای این فصل، اثر سُرّه که حرکت ذرات محلول در سیال در اثر وجود گرادیان دما است توضیح داده شده‌است.

در فصل ۲ با استفاده از معادله‌ی پخش یونها در حضور گرادیان دما، شرط پیوستگی جریان و نیز رابطه پتانسیل الکتریکی با چگالی بار، نحوه‌ی ایجاد ناحیه‌ی باردار در محلول بررسی شده و مقدار تغییر در چگالی یونها در اثر تابش باریکه‌ی نور و ایجاد گرادیان دما محاسبه شده‌است.

در فصل ۳ با در نظر گرفتن ناحیه‌ی باردار و تغییر چگالی یونها که در فصل ۲ به‌دست آمده، با فرض اعمال میدان الکتریکی ثابت و عدم حضور مرز در اطراف سیال، سرعت و فشار سیال در هر نقطه‌ی دلخواه محاسبه شده و میدان برداری سرعت و خطوط هم‌فشار رسم شده‌اند.

در فصل ۴ علاوه بر اعمال میدان الکتریکی ثابت، فرض شده که مرز استوانه‌ای نامتناهی در اطراف سیال وجود دارد و مرکز ناحیه‌ی باردار روی محور استوانه قرار دارد؛ با استفاده از شرط مرزی بدون لغزش روی دیواره‌ی داخلی استوانه،

---

۱ Microfluidics  
۲ Navier-Stokes

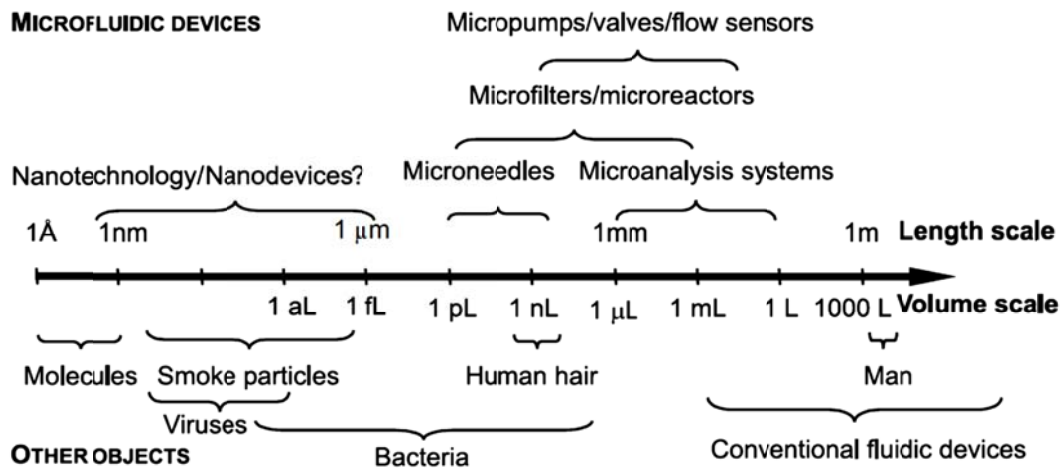
سرعت و فشار سیال در ناحیه‌ی داخلی استوانه محاسبه شده‌است؛ این محاسبه در دو مرحله انجام شده‌است: در ابتدا فرض کرده‌ایم که نیروی میدان الکتریکی به صورت تابع دلتا به مرکز ناحیه‌ی باردار و در مرحله‌ی دوم به یک پوسته‌ی کروی اعمال شود؛ در نهایت با استفاده از روش تابع گرین، سرعت و فشار سیال محاسبه شده و میدان برداری سرعت و خطوط هم‌فشار در این حالت نیز رسم شده‌اند.

## فصل ۱

## مفاهیم اساسی

۱-۱- معرفی میکروسیال<sup>۱</sup>

میکروسیال شامل دانش و مهندسی سیستم‌هایی است که در آنها رفتار سیال، به دلیل مقیاس کوچک سیستم، نسبت به حالت متعارف تغییر می‌کند [۱]؛ بنابراین، عبارت فوق به منظور بررسی رفتار، کنترل دقیق و دست‌کاری<sup>۲</sup> سیالات در مقیاس ریز به کار می‌رود؛ در اینجا منظور از «مقیاس ریز» می‌تواند ابعاد ریز، مصرف انرژی پایین و قلمرو تأثیر کوچک باشد؛ در شکل زیر ابعاد بعضی از وسایلی که در این مقیاس به کار می‌روند نشان داده شده است [۱]:

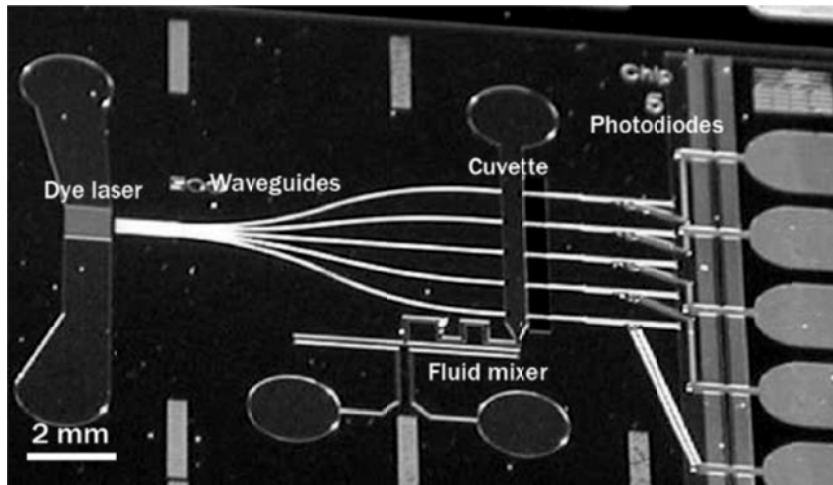


شکل (۱-۱) طول مشخصه‌ی بعضی از وسایل میکروسیال، تصویر از مرجع [۱]

<sup>۱</sup> Microfluidics  
<sup>۲</sup> Manipulation

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اصطلاح میکروسیال در مورد ابعاد کوچکتر از میکرو نیز به کار برده شده و بررسی در قلمرو نانوسیال<sup>۳</sup> را نیز شامل می‌شود؛ برهمکنش نور و سیال نیز از موضوعات مورد علاقه در این زمینه بوده و اصطلاح اپتوسیال<sup>۴</sup> به این منظور به کار می‌رود.

دانش و مهندسی میکروسیال از اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی پدید آمده و کاربردهای مختلفی در شیمی، زیست‌شناسی، پزشکی، سیستم‌های کنترلی و هدایت گرمایی پیدا کرده‌است [۳]. به‌عنوان مثال در شکل زیر ترکیبی از قطعات نوری، شیمیایی و الکترونیکی یک وسیله آزمایشگاه روی یک تراشه<sup>۵</sup> را تشکیل می‌دهند که برای آنالیز نوری یک واکنش شیمیایی به کار می‌رود.



شکل (۲-۱) یک وسیله LOC جهت آنالیز نوری واکنش‌های شیمیایی، تصویر از مرجع [۱]

### شرط پیوستگی جریان [۵ و ۶]

اگر  $\rho(\vec{r}, t)$  چگالی و  $\vec{u}(\vec{r}, t)$  سرعت سیال در زمان  $t$  و مکان  $\vec{r}$  باشند، قانون بقای جرم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho(\vec{r}, t) dV = - \oint_S \rho(\vec{r}, t) \vec{u}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{A} \quad (1-1)$$

<sup>۳</sup> Nanofluidics

<sup>۴</sup> Optofluidics

<sup>۵</sup> Lab. On a Chip: LOC

حال اگر سیال را تراکم‌ناپذیر فرض کنیم،  $\rho(\vec{r}, t) = \rho_0$  ثابت خواهد بود:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(\vec{r}, t) = 0 \quad (۲-۱)$$

بنابراین:

$$\oint_S \rho_0 \vec{u}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{A} = 0 \quad (۳-۱)$$

به عبارت دیگر می‌توان نوشت:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (۴-۱)$$

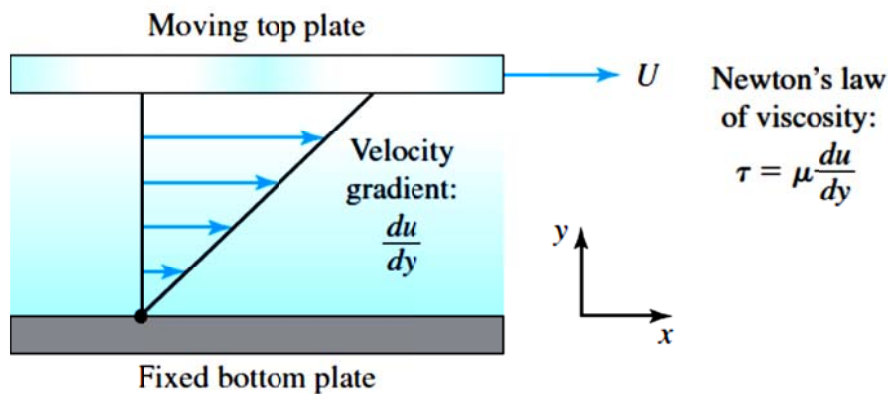
و چون  $\rho(\vec{r}, t)$  را ثابت فرض کرده‌ایم:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (۵-۱)$$

شرط فوق پیوستگی جریان یا تراکم‌ناپذیری سیال نامیده می‌شود.

## چسبندگی<sup>۶</sup>

چسبندگی معیاری از مقاومت سیال در مقابل تغییر شکل به وسیله‌ی تنش برشی<sup>۷</sup> است؛ تنش برشی (یا مماسی) عبارت از نیرویی است که در جهت مماس بر واحد سطح سیال اعمال می‌شود [۴].



شکل (۳-۱) رابطه‌ی تنش برشی با چسبندگی

۶ Viscosity  
۷ Shear Stress

با توجه به شکل فوق، چنانچه مؤلفه‌ی سرعت  $u_x$  سیال در راستای  $y$  تغییر داشته باشد، به دلیل وجود شیب سرعت، بر سطح  $dS_{yz}$  نیروی برشی وارد می‌شود که متناسب با سطح مربوطه است:

$$df_{xz} = \tau_{xy} dS_{xz} \quad (7-1)$$

که  $\tau_{xy}$  تنش برشی بوده و برای سیال نیوتونی متناسب با شیب تغییر سرعت است؛ هرچه چسبندگی سیال بیشتر باشد، نیروی برشی بیشتری بر واحد سطح سیال وارد می‌شود. برای شکل فوق، تنش برشی به صورت زیر خواهد بود:

$$\tau_{xy} = \eta \frac{du}{dy} \quad (7-1)$$

که  $\eta$  ضریب چسبندگی سیال بوده و بر حسب  $\frac{kg}{m.s}$  بیان می‌شود. در جدول زیر ضریب چسبندگی چند سیال در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است:

سیال	ضریب چسبندگی در 20°C kg/m.s
هوا	$1.8 \times 10^{-5}$
آب	$1 \times 10^{-3}$
جیوه	$1.56 \times 10^{-3}$
الکل	$1.8 \times 10^{-3}$
روغن زیتون	0.1
گلیسرین	0.85

جدول (۱-۱) ضریب چسبندگی بعضی از سیالات [۵]

از سوی دیگر باید جمله‌ی مربوط به دوران یکپارچه‌ی سیال از این عبارت حذف شود (مانند استوانه‌ی در حال دوران)؛ در

این صورت شکل کلی تنش برشی با تانسور  $\vec{\tau}$  داده خواهد شد که مؤلفه‌های  $\tau_{ij}$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau_{xy} = \eta \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (8-1)$$

## معادله‌ی نویر-استوکس [۵، ۶]^

برای جزء حجم  $dV$  از سیال، قانون دوم نیوتن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\vec{F} = m\vec{a} = \rho dV \frac{d\vec{u}}{dt} \quad (9-1)$$

اما نیروی وارد بر جزء حجم فوق، شامل نیروهای زیر است [۵]:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{pressure}} + \vec{F}_{\text{viscous}} + \vec{F}_{\text{body}} \quad (10-1)$$

که در آن:

$$\frac{\vec{F}_{\text{pressure}}}{dV} = -\vec{\nabla}p \quad (11-1)$$

$$\frac{\vec{F}_{\text{viscous}}}{dV} = \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} = \eta \nabla^2 \vec{u} \quad (12-1)$$

$$\frac{\vec{F}_{\text{body}}}{dV} = \vec{f}_b \quad (13-1)$$

که  $\vec{\tau}$  تانسور تنش بوده و  $\vec{f}_b$  شامل سایر نیروهایی است که بر واحد حجم سیال وارد می‌شود (مانند گرانش و میدان

الکتریکی خارجی)؛ بنابراین در مجموع، برای واحد حجم سیال می‌توان نوشت:

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = -\vec{\nabla}p + \eta \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}_b \quad (14-1)$$

و با جایگذاری مقدار  $\frac{d\vec{u}}{dt}$  در رابطه‌ی فوق، در نهایت برای سیال نیوتونی پیوسته می‌توان نوشت:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} \right) = -\vec{\nabla}p + \eta \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}_b \quad (15-1)$$

معادله‌ی فوق معادله‌ی نویر-استوکس برای سیال نیوتونی تراکم‌ناپذیر نامیده می‌شود.



عدد رینولد<sup>۹</sup>

اگر  $L$  بیانگر طول مشخصه (مانند قطر کره‌ای که داخل سیال حرکت می‌کند) و  $u$  سرعت مشخصه (مانند سرعت کره داخل سیال) باشد، عدد رینولد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho u L}{\eta} \quad (16-1)$$

مقدار فوق دارای بُعدی مشابه عبارت  $\frac{\rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u}}{\eta \nabla^2 \vec{u}}$  در معادله‌ی نویر-استوکس است؛ بنابراین اگر مقدار عدد رینولد کوچک باشد، می‌توان از جمله‌ی  $\rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u}$  در مقابل  $\eta \nabla^2 \vec{u}$  صرف‌نظر نمود و در حد عدد رینولد پایین خواهیم داشت:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\vec{\nabla} p + \eta \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}_b \quad (17-1)$$

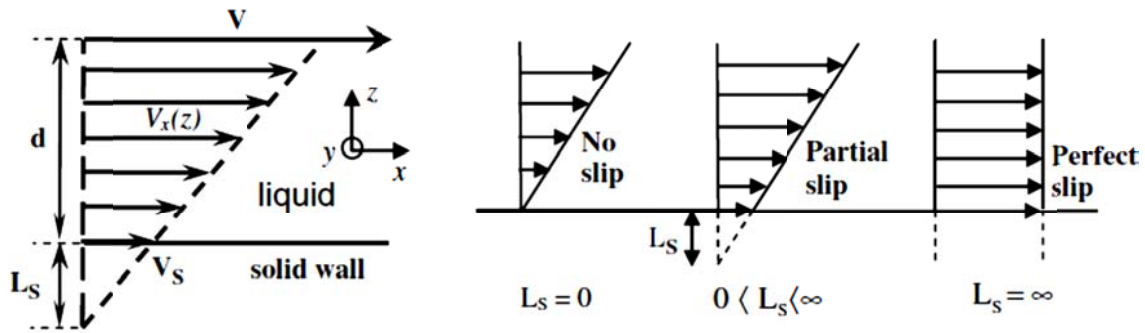
بنابراین در حالت پایا می‌توان نوشت:

$$\vec{\nabla} p - \eta \nabla^2 \vec{u} = \vec{f}_b \quad (18-1)$$

## شرایط مرزی

شرایط مرزی برای حرکت سیال روی دیواره‌ها با حالت‌های بدون لغزش<sup>۱۰</sup>؛ لغزش جزئی<sup>۱۱</sup> و لغزش کامل<sup>۱۲</sup> بیان می‌شوند؛ هر کدام از حالت‌های فوق در شکل زیر نشان داده شده‌اند:

- 
- ۹ Reynolds Number
  - ۱۰ No Slip
  - ۱۱ Partial Slip
  - ۱۲ Perfect Slip



شکل (۱-۱) مقایسه‌ی شرایط مرزی مختلف روی دیواره، تصویر از مرجع [۷]

در شکل سمت چپ،  $V_x(z)$  مؤلفه‌ی X سرعت سیال در کنار دیواره است که نسبت به Z متغیر است؛ از روی شیب تغییر سرعت نزدیک دیواره، کمیت طول لغزش  $L_s$  تعریف می‌شود؛ در این حالت برای شکل فوق می‌توان نوشت:

$$u_{\text{wall}} = L_s \frac{\partial V_x(z)}{\partial z} \quad (19-1)$$

در شکل سمت راست، حالت‌های مختلف شرط مرزی با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در شرط مرزی بدون لغزش ( $L_s = 0$ )، سرعت مماسی سیال روی دیواره (مرز) برابر صفر است؛ در حالت لغزش کامل ( $L_s = \infty$ )، دیواره روی سرعت مماسی تأثیری نمی‌گذارد و در حالت لغزش جزئی ( $0 < L_s < \infty$ )، از روی شیب تغییر سرعت نزدیک دیواره، کمیت طول لغزش  $L_s$  تعریف می‌شود.

## ۱-۲- معرفی انبرک نوری<sup>۱۳</sup>

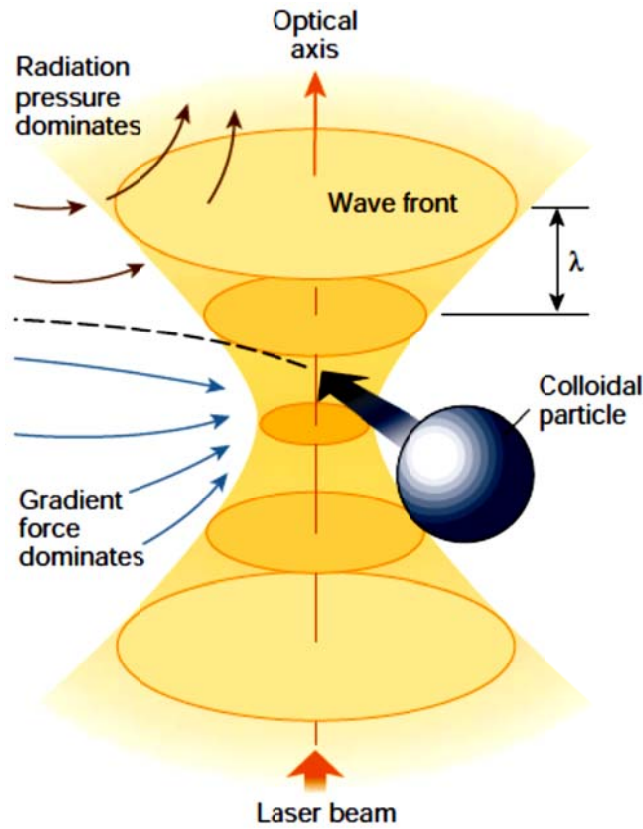
انبرک نوری ابزاری است که با استفاده از گرادیان شدت باریکه‌ی نور، به میکرو و نانو ذرات نیرو اعمال کرده و جهت به دام انداختن آنها توسط نور<sup>۱۴</sup>، یا به حرکت درآوردن آنها به صورت کنترل شده به کار می‌رود. این وسیله در مطالعه هیدرودینامیک کلوئیدها، ترمودینامیک غیرتعادلی، مطالعات زیست‌شناسی مولکولی و زیست‌فیزیک و ... کاربرد دارد.

انبرک نوری در کنار به دام انداختن ذرات کلوئیدی موجب گرم شدن موضعی سیال (معمولاً آب) نیز می‌شود و از این-طریق می‌تواند بر ذرات کلوئیدی نیرو وارد کند [۸] و موجب افزایش یا کاهش چگالی ذرات کلوئیدی در محل کانونی شدن نور بشود [۹]. جالب اینجاست که میل به حرکت در جهت موافق/مخالف گرادیان دما نه تنها در کلوئیدها بلکه در یون‌های مثبت و منفی و نیز مولکول‌های آب نیز وجود دارد [۱۰] و می‌تواند آثار جالبی را در پی داشته باشد. در شکل (۱-۵) عملکرد انبرک نوری به‌طور شماتیک نشان داده شده است؛ نور مورد استفاده معمولاً نور لیزر نزدیک به مادون قرمز است که از طریق یک عدسی، بشدت کانونی شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دو نیرو بر ذره وارد می‌شود که یکی در امتداد تابش نور و دیگری بسمت کانون شدت نور است.

---

۱۳ Optical Tweezers

۱۴ Optical Trapping



شکل (۱-۵) نیروهای وارد بر ذره کلوئیدی توسط انبرک نوری، تصویر از مرجع [۱۱].

### ۱-۳- معرفی اثر سُرِه<sup>۱۵</sup>

در یک محلول، معادله‌ی پخش<sup>۱۶</sup> یون‌ها بدون حضور گرادیان دما را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\vec{J} = -D\vec{\nabla}C \quad (۲۰-۱)$$

که در آن  $C$  غلظت<sup>۱۷</sup> یون‌ها (تعداد در واحد حجم) و  $D = \mu k_B T$  ضریب پخش یون‌ها است.

- ۱۵ Soret Effect
- ۱۶ Diffusion
- ۱۷ Concentration