

# هیدرودینامیک جمعی شناگرهای ریزمقیاس در مایعات زیستی

زهرا اکبری

پروژه درس مکانیک سیالات - نیمسال اول 1401

## 1-مقدمه

شنا کردن موجودات زنده ریزمقیاس مثل اسپرماتوزا، پلانکتون، جلبک ها و بسیاری از باکتری ها مکررا در طبیعت دیده میشود. این پدیده فرآیندهای زیستی مانند تولید مثل، ابتلا به بیماری ها و زندگی در اکوسیستم های دریایی را تحت تاثیر قرار می دهد. هر باکتری برای ادامه زندگی به مصرف غذا برای تهیه انرژی مورد نظرش نیاز دارد. با تخمین های ساده ای از اندازه و شرایط یک باکتری که در مایعی با گرادیانی از مواد شیمیایی که جهت مواد غذایی را مشخص میکند قرار گرفته، میتوان دید که پدیده پخش نمیتواند باکتری را در زمان مناسب، به اندازه طول لازم برای یافت غذا جابجا کند. به همین دلیل اکثر موجودات زنده ی ریزمقیاس به شنا کردن برای بقا نیاز مبرمی دارند. اهمیت بررسی این موضوع، موجب افزایش مطالعات در زمینه مدل سازی شناگرهای ریزمقیاس و بررسی های تجربی و عددی این پدیده در دهه ی اخیر شده است.

موجودات ریز عموماً در رژیم عدد رینولدزهای پایین شنا میکنند. که به این معنی است اثرات لختی در برابر اتلاف مایع قابل صرف نظر کردن است. شناگرها با یکدیگر، سطوح و میدان جریان خارجی برهم کنش میکنند. آن‌ها عموماً در مایعات پیچیده شنا می‌کنند و رفتارهای غیرنیوتنی مثل ویسکوالاستیسیته<sup>۱</sup> از خود نشان می‌دهند. اما داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در غلظت‌های کافی باکتری‌های شناگر حرکت‌های هماهنگ‌شده در مقیاس طولی 10 تا 100 میکرومتر دارند که در برابر اندازه‌ی هر باکتری بسیار بزرگ است در حالی که آنقدر کوچک هم هست که نتوان آن را به اثرات گرانشی یا لختی مرتبط دانست. در این نوشته خلاصه‌ای از یافته‌ها در زمینه‌های ذرات خود-ران<sup>۲</sup> با برهم کنش‌های هیدرودینامیکی و تحلیل پایداری‌شان برای شناگرهای رینولدز پایین را بررسی خواهیم کرد. در مطالعاتی یافت شده که حرکت‌های خودبخودی در چنین سیستم‌هایی می‌تواند از جفت‌شدگی بین تنش‌هایی که باکتری‌های در شاره ایجاد می‌کنند و چرخش باکتری توسط اختلالات سرعت شاره نشأت بگیرد.

بررسی‌های تجربی اخیر نشان داده‌اند که محلول‌هایی از باکتری‌های شناگر با غلظتی که در آن بتوانند با میدان اختلال‌های هیدرودینامیکی برهم کنش کنند، از خود حرکت‌هایی با مقیاس بزرگتر (10 تا 100 میکرومتر) نسبت به اندازه خود (3 میکرومتر) نشان می‌دهند. این یافته‌ها منجر به تلاش برای شبیه سازی‌های عددی ذرات خود-ران برهم کنش‌کننده با جریان اختلالی استوکسی‌شان و همین‌طور تحلیل‌های پیوستار از این شاره‌های زنده با تنش ناشی از شناکردن شده‌اند. با اینکه این تحلیل‌ها می‌توانند در مورد شناگرهای مهندسی شده هم به کار گرفته شوند تمرکز ما در این نوشته بر موجودات زنده است. در این نوشته تلاش بر آن است که از پیشرفت‌های بررسی این پدیده در سه حیطه تئوری، تجربی و شبیه سازی خلاصه‌ای آورده شود.

---

<sup>1</sup> Visco-elasticity

<sup>2</sup> Self-propelling

## 2 - ساز و کار کلی شناکردن باکتری‌ها

با اینکه باکتری‌ها از فرم‌های اولیه حیات هستند دینامیک غنی و رفتارهایی اجتماعی دارند. هر سلول از گونه باکتری‌ها در زمان‌های حدود یک ثانیه‌ای در یک جهت در خط راست شنا میکند و در مقیاس زمانی 0.1 ثانیه غلت می‌خورد<sup>۳</sup> و مجدداً با یک اختلاف زاویه‌ای میانگین 68 درجه‌ای در جهت جدیدی به شنا کردن ادامه می‌دهد البته در حین حرکت در خط راست هم اختلال‌های گرمایی و... می‌توانند جهت شناکردن را به مقدارهای کوچک تغییر دهند. این حرکت تصادفی موجب می‌شود در حضور گرادیان مواد شیمیای جاذب، جهت مرجحی برای شناگر به وجود بیاید.

باکتری‌ها با محیط زندگی‌شان سازگار میشوند. آن‌ها میتوانند ماکرومولکول‌هایی دفع کنند که در شرایط سخت لایه‌های نازک زیستی<sup>۴</sup> ایجاد می‌کند. آن‌ها همچنین میتوانند برای کولونایز کردن سطوح تجمع<sup>۵</sup> کنند. در غلظت مناسب باکتری‌ها موادشیمیایی تولید می‌کنند که به باکتری‌های همسایه برای تغییر رفتارشان علامت می‌فرستد.

### 2.2- حرکت تجمیعی<sup>۶</sup>

در یک سطح مرطوب یا یک لایه نازک شاره، باکتری رفتار متفاوتی در شناکردن از خود نشان می‌دهد که حرکت تجمیعی نامیده میشود. حرکت تجمیعی باکتری به جابجایی سریع سلول‌ها در چگالی بالا روی سطح که توسط چرخش تازک‌ها تامین میشود گفته می‌شود. ویژگی‌های اصلی این پدیده بزرگ مقیاس چرخش‌ها<sup>۷</sup> و حرکت‌های جریانی<sup>۸</sup> آن هستند. این باکتری‌ها که در فاصله کم از

---

<sup>3</sup> Tumbling

<sup>4</sup> Bio-films

<sup>5</sup> Swarming

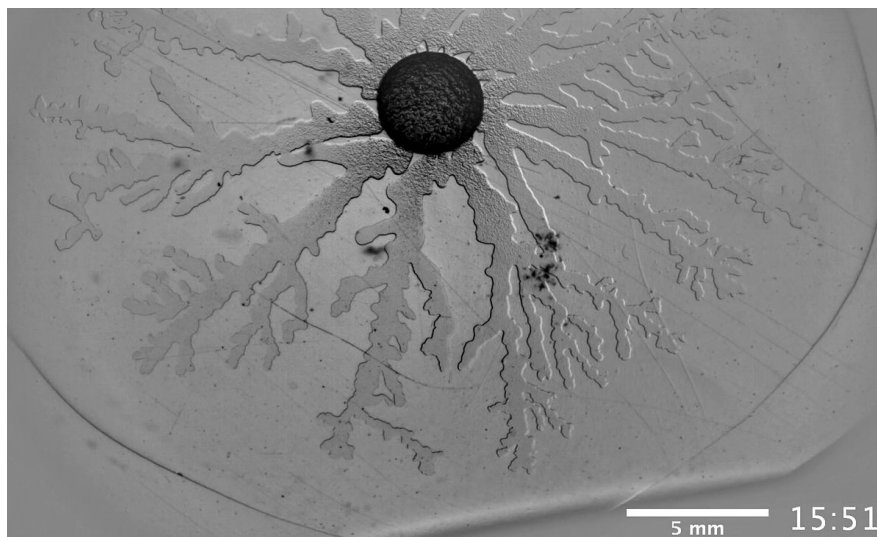
<sup>6</sup> Swarming motility

<sup>7</sup> Swirling

<sup>8</sup> Streaming motions

هم تجميع یافته‌اند و به سرعت روی سطح شاره در حال حرکت‌ند و از خود ماده‌ای ژل مانند ترشح می‌کنند که اصطکاک را کاهش می‌دهد.

شکل 1 حرکت جمعی باکتری باسیلوس  
ماتیلیس از کولونی مادر به اطراف روی  
سطح شاره



## 2.1 - مکانیسم شناکردن مدل خزنده<sup>9</sup>: شناگر جاذب<sup>10</sup> یا رباينده<sup>11</sup>

در بسیاری از موارد حرکت رو به جلو وابسته به ناهمسانگردی<sup>12</sup> نیروی اصطکاک تجربه شده توسط فیلامنت‌های باریک است. اجسام باریک ضریب اصطکاکی دارند که در راستای عمودی دوبرابر راستای محور اصلی آن‌هاست. در نتیجه چرخش تاژک یک باکتری می‌تواند نیروی هیدرودینامیکی موازی محور چرخش ایجاد کند. این نیرو، نیروی اصطکاک رو به عقب را خنثی می‌کند و مجموعه کل باکتری و تاژکش نیروی داخلی صفر دارد.

یکی از مدل‌های رایج برای بررسی حرکات زیستی مدل خزیدن است. در این مدل شناگر را نسبت به محور حرکت متقارن و سرعت آن را مماسی و در سطح آن فرض می‌کنیم که می‌تواند حرکت

<sup>9</sup> Squirmer

<sup>10</sup> Puller

<sup>11</sup> Pushers

<sup>12</sup> Anisotropy

میکرواورگانایسم‌هایی مانند ولوکس<sup>۱۳</sup> و پارامسیوم<sup>۱۴</sup> را توضیح دهد. با تقریب‌هایی فرض می‌کنیم توزیع سرعت در راستای سطح خارجی کره شناگر به شکل زیر است:

$$u_s(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n V_n(\cos \theta)$$

که در آن  $\theta$  زاویه قطبی است که از جهت شناکردن سنجیده می‌شود و ضرایب نماینده‌ی اندازه مد  $n$  حرکت خزیدن است. در این رابطه داریم:

$$V_n(x) = \frac{2\sqrt{1-x^2}}{n(n+1)} \frac{d}{dx} P_n(x)$$

که در آن چند جمله‌ای‌های لژاندر هستند. در یک شاره نیتوتنی تحت شرایط جریان استوکس در یک محیط بدون مرز سرعت خزنده با رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$U_0 = 2 \frac{B_3}{B_1}$$

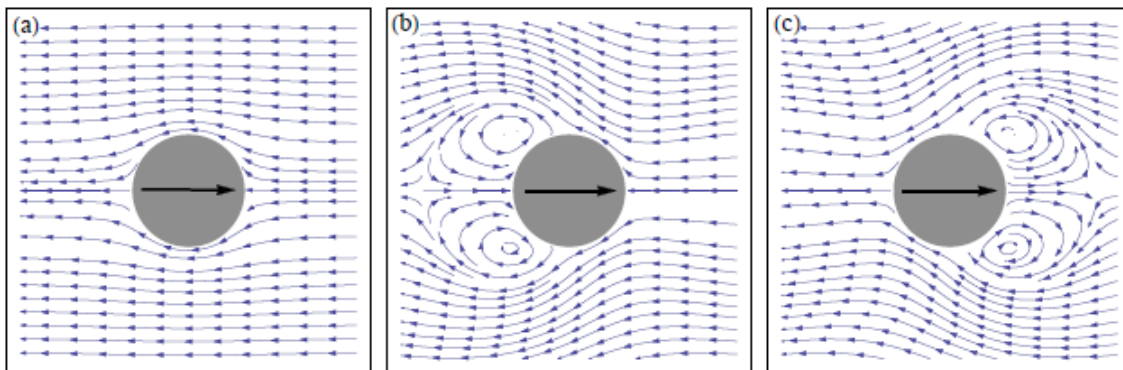
عموما در این مدل ضرایب مربوط به  $n$  بزرگتر از 2 را صفر فرض می‌کنیم. علامت پارامتر نسبت ضریب دوم به ضریب اول

$$\beta = \frac{B_2}{B_1}$$

مکانیسم شناکردن را مشخص می‌کند. برای  $\beta > 0$ ، شناگر مایع جلوی خود را به سمت بدنه‌اش می‌کشد به همین دلیل به آن شناگر جاذب می‌گوییم. در  $\beta$  منفی شناگر مایع پشت خود را به شکل نیروی دوقطبی به عقب هل می‌دهد و شاره را در اطرافش به سمت خود می‌کشد. که این شناگرها رباینده نامیده می‌شوند. در  $\beta = 0$  هم خزنده خنثی است که در میدان جریان ایجاد شده توسط شناکردنش تقارن بیشتری مشاهده می‌شود. شکل زیر این پدیده را به نمایش می‌گذارد.

<sup>13</sup> Volvox

<sup>14</sup> Paramecium



شکل 2: a یک شناگر خزنه خشی، b شناگر رباینده و c شناگر جاذب است. فلش مشکی رنگ جهت حرکت را مشخص میکند.

### 3- مقیاس‌های حرکت جمعی و پیوستار

چون نیروهای وارد بر سلول شناگر هم بر بدنه‌ی سلول هم به تاژک آن وارد می‌شوند، یک مشخصه طولی مناسب در نظر گرفتن جمع طول این دو بخش خواهد بود، که عموماً اندازه  $L=12$  میکرومتر را به ما می‌دهد. به طور کلی جفت‌شدگی‌های هیدرودنامیک در مقیاس‌های رخ میدهند که در آن  $nL^3 = O(1)$  در اینجا  $n$  تعداد سلول‌ها در واحد حجم است. مطابق با این فرض شناکردن جمعی در تعداد سلول‌های  $10^{10}$  تا  $10^8$  دیده میشود که معادل  $0.2$  تا  $nL^3 = 20$  می‌باشد.

سلول اسپرماتوزا، یک شناگر از نوع رباینده که با حرکت‌های موج دار صفحه‌ای تاژکش حرکت میکند. این سلول در غلظت‌های مناسب رفتار جمعی از خود نشان می‌دهد. به عنوان مثال اسپرماتوزای انسان با طول تقریباً 40 میکرومتر و تعداد  $2 \times 10^{10}$  در هر میلی لیتر مقدار  $nL^3 = 1.3$  را می‌دهد. از آنجایی که سرعت اسپرم با باروری رابطه مستقیم دارد، حرکت جمعی میتواند به نکته‌ای مثبت برای شنای موثرتر تبدیل شود.

در مقیاس‌های طولی به اندازه‌ی کافی بزرگ برای شامل شدن تعداد زیادی باکتری میتوانیم به محلول به عنوان یک پیوستار موثر نگاه کنیم. این پیوستار نوع جدیدی از یک شاره‌ی پیچیده است. یک شاره زنده که ذراتش، سلول‌ها، می‌توانند مواد غذایی را به انرژی برای حرکت شاره تبدیل کنند.

در حالی که در شاره‌های عادی تنها در برابر گرادیان سرعت، دما، فشار و... می‌توانند از تعادل خارج شوند، شاره‌ها زیستی بدون حضور این عوامل می‌توانند با انرژی تولیدشده توسط شناگرها حرکت‌های خودبخودی داشته‌باشند.

برخی محققان مانند سیمها و راماسوامی<sup>۱۵</sup> فرمی از معادلات حرکت برای موجودات زنده بر اساس اصول کلی پیوستار صورت بندی کرده‌اند درحالی که برخی دیگر معادلات را از آنسامبل‌های میانگین گیری شده از یک مدل ریزساختار از سلول‌های دارای برهم کنش هیدرودینامیکی استخراج کرده‌اند. یکی از ویژگی‌های مشترک این مدل‌ها جفت‌شدگی بین حرکت شاره توسط تنش شناگرها و چرخش شناگرهاست. بررسی معادلات پیوستار نشان‌داده شاره‌های زیستی ناپایداری‌هایی از خود نشان می‌دهند که پیش از آن در شاره‌های منفعل دیده نشده بود.

ناپایداری یک محلول ناهمسانگرد از شناگرها ناشی جفت‌شدگی جهت شناگرها، جریان شاره و تنش‌های تولیدشده توسط شناگرهاست. هنگامی که محلولی از شناگرهای میکرومقیاس تحت تاثیر یک جریان برشی ساده (با گرادیان سرعت کوچک در مقایسه با عکس زمان بین تغییر جهت‌های شناگر<sup>۱۶</sup>) قرار می‌گیرد، توزیع جهتی سرعت در راستای محور جریان برشی تقویت می‌شود.

در محلول‌هایی از شناگرهای رباینده مثل ای-کولی<sup>۱۷</sup> و بی سابتیلیس<sup>۱۸</sup>، تنش فعال باکتری در این جهت منجر به تقویت جهت حرکت در راستای این جریان می‌شود. با این کار این شناگرها اثری منفی بر ویسکوزیته می‌گذارند. سابمارینیان و کوخ (2005)<sup>۱۹</sup> نشان دادند که در یک غلظت بحرانی این ویسکوزیته فعال منفی، ویسکوزیته شاره را خنثی می‌کند. در غلظت‌های بالاتر از این مقدار، محلول شناگرها نسبت به اختلالات سرعت شاره ناپایدار است. در یک شاره منفعل چنین وقایعی اصول ترمودینامیکی را نقض می‌کردند. اما در اینجا تبدیل انرژی شیمیایی به مکانیکی این اثر را رقم

<sup>15</sup> Simha & Ramaswamy (2002)

<sup>16</sup> tumbings زمان بین غلت زدن ها یا همان

<sup>17</sup> *E. coli*

<sup>18</sup> *B. subtilis*

<sup>19</sup> Subramanian & Koch

می‌زند. معادلات حرکت پیوستار، نشان می‌دهند که این حرکات می‌تواند در مقیاس‌های طولی بسیار بزرگ‌تر از اندازه‌ی سلول رخ دهد.

از طرف دیگر در شناگرهای جاذب مانند سی-رینباردت<sup>۲۰</sup> ویسکوزیته موثر را افزایش می‌دهند. این پدیده مشابه رفتار شارهای منفعل است و پیش‌بینی می‌شود که یک محلول همسانگرد از این شناگرها پایدار خواهد بود.

#### 4- تئوری‌های پیوستار

انگیزه‌های اولیه برای مدل کردن سیستم‌های ذرات خود-ران برهم‌کنش‌کننده بدون حضور میدان خارجی در جوامع فیزیکی آغاز شد. انگیزه اولیه توضیح دینامیک جمعی مشاهده‌شده در شبیه‌سازی‌های عددی یک مدل شناگر ساده (ارائه داده شده توسط ویکسس در سال ۱۹۹۵<sup>۲۱</sup>) بود. در این مدل هر شناگر سعی می‌کند جهت سرعتش را با شناگرهای همسایه به طور موضعی هماهنگ کند. دینامیک نتیجه‌شده در غلظت‌های مناسب (حتی در دو بعد) به یک حالت گذار فاز غیرتعادلی منظم-نامنظم می‌انجامد. پارامتر نظم در اینجا سرعت میانگین بود و ظهور یک فاز منظم، یک گله<sup>۲۲</sup>، نمایشگر حرکت جمعی در مقیاس‌هایی بسیار بزرگ‌تر از ابعاد شناگرها بود.

تئوری‌هایی که این گذار را توصیف می‌کنند حیطه وسیعی را از جمله حرکت دسته‌های پرندگان و گونه‌های مختلف شامل میشوند. از برهم‌کنش‌های هیدرودینامیکی عموماً در این تئوری‌ها صرف نظر می‌شود. بنابراین حرکات جمعی شناگرهایی که توسط این نظریه‌ها توصیف می‌شوند فقط به علت برهم‌کنش‌های جهت‌یابی موضعی رخ می‌دهند.

جهت حرکت یک باکتری در زمانی که هنوز جهت خود را تصادفاً عوض نکرده می‌تواند به علت مرزهای محیط (در غلظت‌های بالا)، برهم‌کنش‌های هیدرودینامیکی و پاسخ به غلظت ناهگن میدان مواد

---

<sup>20</sup> C. reinhardtii

<sup>21</sup> Vicsek T, Czir -1995

<sup>22</sup> flock



شیمیایی حاضر (نشأت گرفته از باکتری های دیگر یا عوامل خارجی) تغییر کند. تمام این عوامل باید در یک نظریه ی کامل برای محلولی از شناورها به کار گرفته شوند.

در غلظت های پایین و در عدم حضور مواد شیمیایی جاذب شناگرها تمامی برهم کنش ها عموماً هیدرودینامیک هستند. در عدد رینولدز های پایین، میدان سرعت ناشی از حرکت یک باکتری با معکوس مجذور فاصله کاهش میابد.<sup>۲۳</sup> این برهم کنش های هیدرودینامیک بلند برد نتیجه شده، هر گونه تمایل به گله ای شدن<sup>۲۴</sup> ناشی از برهم کنش های کوتاه برد را تغییر می دهد. این نتایج اولین بار توسط سیمها و راماسوامی در سال 2002<sup>۲۵</sup> کشف شد. آن ها معادلات میدان پیوستاری پیشنهاد دادند که هیدرودینامیک یک محلول منظم (از نظر جهت گیری شناگرهای بدون لختی) را توصیف می کرد. با تحلیل پایداری خطی، نویسندگان نشان دادند که بر خلاف محلول های منفعل، وضعیت اولیه با نظم قطبی<sup>۲۶</sup> یا نماتیک<sup>۲۷</sup> در این محلول ها نسبت به اختلالات جهت گیری با طول موج بالا ناپایدار است. حدس نظم جهت گیری بدون یک میدان خارجی از علاقه به پایداری فازهای منظم تئوری های گله ای<sup>۲۸</sup> نشأت می گرفت، البته در این تئوری ها برهم کنش های کوتاه برد در ناپایداری هیدرودینامیکی با طول موج بالا نقشی نداشتند. وجود این ناپایداری ها نهایتاً با شبیه سازی هایی توسط سینتیلان و شلی تایید شد.<sup>۲۹</sup>

غلت خوردن ها<sup>۳۰</sup> و پخش شدن چرخشی<sup>۳۱</sup> منجر به تغییر جهت گیری در محلول های باکتری ها شده و در غلظت های به اندازه کافی پایین و مقیاس های طولی بزرگتر از باکتری سیستم را به سوی

---

<sup>23</sup> Kim & Karrila 1991

<sup>24</sup> flocking

<sup>25</sup> Simha & Ramaswamy (2002)

<sup>26</sup> polar

<sup>27</sup> nematic

<sup>28</sup> flocking

<sup>29</sup> Saintillan & Shelley

<sup>30</sup> Tumbling

<sup>31</sup> Rotary diffusion

همسانگردی پیش می‌برند. بنابراین حداقل برای غلظت‌های پایین که برهم‌کنش‌های حجمی به جهت گیری خاصی منجر نمی‌شوند، بررسی پایداری حالت همسانگرد مهم‌تر است.

بر خلاف بررسی فاز نماتیک توسط سیمها و راماسوامی که برای محلول‌های حاوی شناگرهای جاذب و رباینده ناپایدار می‌ماند، بررسی حالت همسانگرد توسط سینتیلین و شلی<sup>۳۲</sup> ناپایداری خطی را تنها برای محلول رباینده‌ها مشاهده کرد. این نتیجه مهمی است زیرا تفاوت بزرگی بین محلول‌هایی که تنها از نظر میکروسکوپی متفاوتند را مشخص می‌کند. این نتایج به تازگی در 2008 توسط آندرهیل<sup>۳۳</sup> تایید شدند.

هیچ کدام از نظریه‌های نام برده‌شده تا اینجا اما، مکانیسم تغییر جهت‌های مربوط به یک باکتری شناگر ذکر شده در پیش را توصیف نمی‌کنند. برای مثال هم سیمها و راماسوامی و هم سینتیلین و شلی، یک فرآیند واهلش پخشی-فضایی<sup>۳۴</sup> فرض می‌کنند که در آن نرخ واهلش نسبت به نرخ از بین رفتن پایداری در حدهای طول موج بالا به طور مجانبی ضعیف می‌شود. در نتیجه پیش بینی می‌شود که هر محلول از شناگرها در هر غلظت غیر صفری ناپایدار است. این پیش بینی نسبت به مطالعات ووئت ال<sup>۳۵</sup> عجیب به نظر می‌رسد. چون در این مقاله نشان داده شده که تقویت پخش انتقالی<sup>۳۶</sup> باکتری با شناگرهای منفرد تنها پس از یک حد بحرانی از غلظت باکتری‌ها رخ می‌دهد. علت این است که غلت خوردن‌ها و پخش چرخشی که به بازتنظیم جهت گیری منجر می‌شوند، به طول موج اختلالات وابسته نیست. پس نتیجتاً یک حد غلظت متناهی برای ناپایداری وجود خواهد داشت. با یک تحلیل از پایداری خطی در طول موج‌های بلند، سابرامانیان و کوخ عبارتی برای غلظت بحرانی مورد نظر یافتند. در ادامه این روند را خلاصه می‌کنیم. با معادلاتی که در مقیاس‌های بزرگ زمانی و

---

<sup>32</sup> Saintillan & Shelley 2007

<sup>33</sup> Underhill et al. (2008)

<sup>34</sup> Spatial-diffusion relaxation mechanisms

<sup>35</sup> Wu et al. (2006)

<sup>36</sup> Translational diffusion

مکانی محلول را توصیف می کنند شروع میکنیم. معادله تراکم ناپذیری را به شکل زیر داریم. در ادامه  $\mathbf{u}$  میدان سرعت میانگین گیری شده شناگرها و  $p$  میدان سرعت شاره را مشخص میکند.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

با فرض تعادل لحظه ای تنش باکتری ها و ویسکوزیته و صرف نظر کردن از لختی داریم:

$$-\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla \cdot \sigma^B = \mathbf{0}$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + (U p + u) \cdot \nabla_x \Omega + \nabla_p \cdot (p \Omega) - D_r \nabla_p^2 \Omega + \frac{1}{\tau} \left( \Omega - \frac{1}{4\pi} \int \Omega dp' \right) = 0$$

در این معادله  $\Omega$ ، چگالی احتمال حضور شناگر در مکان  $x$  با جهت  $\mathbf{p}$  است. زمان های مشخصه غلت خوردن و پخش چرخشی به ترتیب با  $\tau$  و  $D_r$  مشخص میشوند. در اینجا  $\nabla p$  عملگر گرادیان روی کره واحد است. بنابر معادله بالا، چگالی احتمال نه فقط به جمع سرعت شناگرها و سرعت شاره بلکه به تغییرات پخش چرخشی، غلت خوردن ها و چرخش شناگرها  $p'$  که روی میدان سرعت میانگین گیری شده هم وابسته است.

$$\dot{p} = \omega \cdot p + (I - pp) \cdot (e \cdot p)$$

به طوری که  $\omega$  و  $e$  به ترتیب نماینده ورتیسیته<sup>37</sup> و نرخ تانسور تنش مرتبط با میدان سرعت شاره هستند.

تنش باکتری در معادله بالا منجر به ناپایداری میشود که توسط رابطه زیر داریم:

$$\sigma^B = -C(n\mu UL^2) \left\langle \mathbf{p} - \frac{1}{3} \mathbf{I} \right\rangle$$

در اینجا  $\langle \rangle$  به معنی میانگین گیری با وزن تابع چگالی است. تنش به علت ناهمسانگردی دوقطبی نیروی داخلی ایجاد می شود و اولین بار توسط سیمها و راماسوامی با استدلال های تقارنی به دست آمد.

---

<sup>37</sup> Vorticity

ثابت  $C$  از رابطه زیر به دست می آید که در آن  $S$  مختصات همراه باکتری شناگر است و  $f^i(s)$  چگالی نیرو در راستای محور ایجاد شده توسط باکتری هاست.

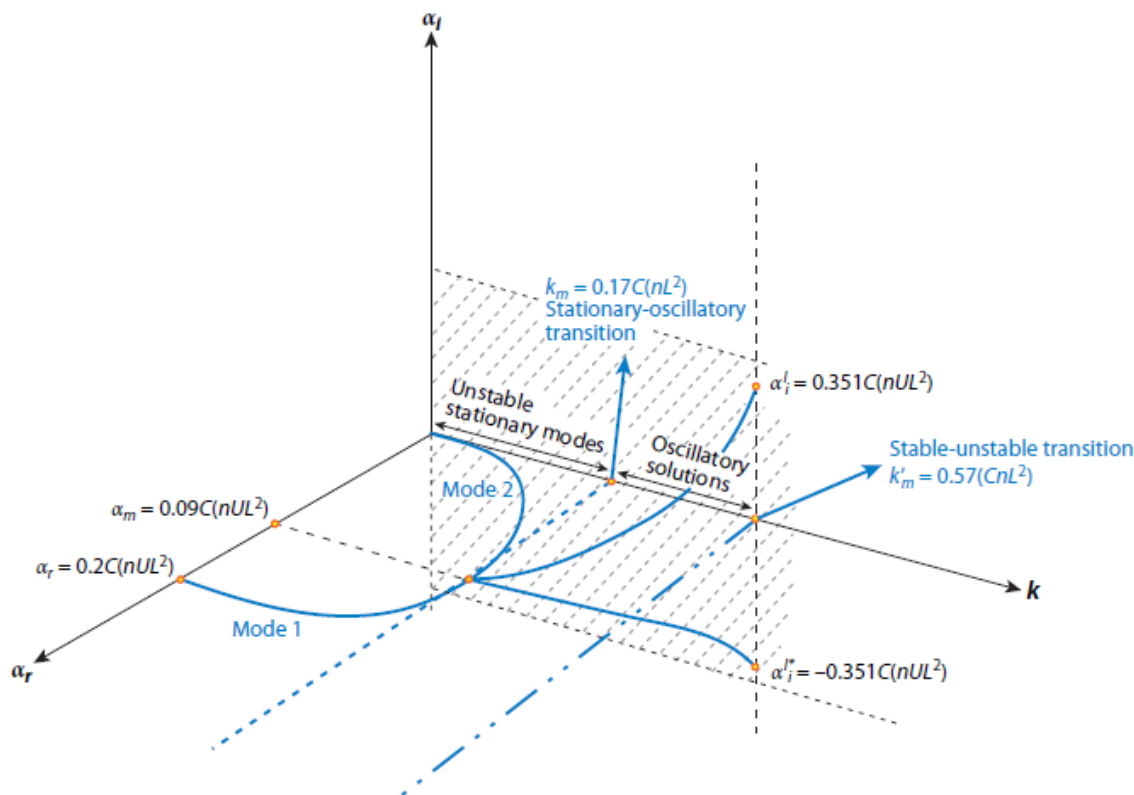
$$C = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} s f^i(s) ds$$

این ثابت همان  $\beta$  ست که بالاتر نشان دادیم علامتش جاذب، رباینده یا خزنده خنثی بودن شناگر را مشخص میکند. طبق استدلال هایی که پیش از این داشتیم می دانیم محلول فقط برای  $C$  های مثبت یا همان رباینده ها می تواند ناپایدار باشد.

با خطی کردن دستگاه معادلات بالا حول یک حالت ناهمسانگرد پایه و در نظر گرفتن اختلال فضایی سینوسی میدان سرعت، فشار و توزیع جهت گیری باکتری، یک تحلیل در طول موج های بالا نشان می دهد که اختلال های حالت پایدار باکتری های شناگر مستقل، بعد از یک غلظت مشخص رشد میکنند. که این غلظت مشخص تنها به پارامترهای توصیف کننده حرکت یک باکتری منفرد مربوط میشود:

$$(nL^3)_{\text{crit}} = \frac{1}{C} \left[ \frac{5L}{U\tau} + \frac{30LD_r}{U} \right]$$

برای طول موج های بالا، طبیعت غیر موضعی تنش ایجاد شده توسط حرکت باکتری اهمیتی ندارد. در واقع توزیع مانایی از باکتری هایی که در پاسخ به جریان موضعی (دارای اختلالات سرعت) در حال تغییر جهت گیری هستند، علت شکل گیری ناپایداری ست. افزایش جهت گیری باکتری ها در راستای جریان آنگاه یک تنش فعال باکتریایی ایجاد می کند که اختلالات میدان سرعت را افزایش میدهد. این پدیده در شکل زیر قابل مشاهده است:



شکل 3 بخش حقیقی و مجازی نرخ رشد مدهای سرعت شاره در محلولی از شناگرهای مستقیم بر حسب عدد موج رسم شده است.

تئوری‌های پیوستار تا کنون محدود به کشف خواص شناگرهای جمعی در محیط‌های بدون مرز بوده اند. یکی از مسائلی که بهتر است بیشتر به آن توجه شود شرایط مرزی ست. زیرا معادلات میدان برای محیطی محدود و همینطور مقدار فضایی که در آن محیط چنین پدیده‌هایی ممکن است دینامیک بالک را تغییر دهند، مشخص میکند. این در میکروشاره‌ها کاربردهای مهمی دارد.

## نتیجه گیری

تئوری‌ها، آزمایشات، تحلیل‌های عددی و شبیه‌سازی‌های بسیار مهمی در این زمینه انجام شده که جنبه‌های متفاوتی از این پدیده را بررسی می‌کنند. بررسی این یافته‌ها با محدودیت‌های این نوشته امکان پذیر نیست. اما امید است این متن شهودی از رفتارهای جمعی شناگرهای ریزمقیاس و ناپایداری شان و... ایجاد کرده باشد.

1. Donald L. Koch and Ganesh Subramanian, Collective Hydrodynamics of Swimming Microorganisms: Living Fluids
2. Gaojin Li, Hydrodynamics of swimming microorganisms in complex fluids
3. Darnton, N. C., Turner, L., Rojevsky, S., & Berg, H. C. (2010). Dynamics of bacterial swarming. *Biophysical journal*, 98(10), 2082-2090
4. Subramanian G, Koch DL. 2009. Critical bacterial concentration for the onset of collective swimming. *J. Fluid Mech.* 632:359–400
5. Subramanian G, Koch DL, Fitzgibbon SR. 2010. The stability of a homogeneous suspension of chemotactic bacteria. *Phys. Fluids*. In press
6. Vicsek T, Czirók A, Ben-Jacob E, Cohen I, Shochet O. 1995. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Phys. Rev. Lett.* 75:1226–29
7. Simha RA, Ramaswamy S. 2002. Hydrodynamic fluctuations and instabilities in ordered suspensions of selfpropelled particles. *Phys. Rev. Lett.* 89:058101
8. WuM, Roberts JW, Kim S, KochDL, DeLisa MP. 2006. Collective bacterial dynamics revealed using a threedimensional population-scale defocused particle tracking technique. *Appl. Environ. Microbiol.* 72:4987–94

