فصلنامه علمی - ترویجی
سال سوم، شماره ۱، شماره پیاپی ۹، بهار ۱۳۹۷
Vol. 3, No. 1, Issue No. 9, Spring 2018, Quarterly
صفحه ۶۴ - ۵۷

Iran Polymer Technology: Research and Development

# بررسی تأثیر ریزجاندارها بر رفتار رئولوژیکی سیال پلیمری

بهتاب منتصر کوهساری[۱]، نادره گلشن ابراهیمی[*۱]

۱ تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر

## چکیده ...

بدون اغراق، امروزه استفاده ازریزجاندارها (Microorganisms)، انقلاب عظیمی در همه ابعاد زندگی انسان به وجود آورده است. هیدرودینامیک محلول‌های تعلیقی (Suspensions) فعال، با توجه به اهمیت زیاد آن، در صدر مطالعات بنیادی است. ریزجاندارهای زنده در اعداد رینولدز پایین، در سیالات حرکت می‌کنند. در این گزارش، گرانروی محلول تعلیقی حاوی باکتری‌های شناگر، مورد بررسی قرار گرفته است. دیده شده که برهم‌کنش‌های هیدرودینامیکی دوربرد، در سیال گرانرو، منجر به کاهش چشمگیر گرانروی مؤثر می‌شود. گرانروی، وابسته به حرکات جمعی و برهم‌کنش‌های بین شناگران است. این حرکت‌ها شدیداً تحت تأثیر حضور یا غیاب اکسیژن یا هرگونه ماده شیمیایی دیگر است.

**واژه‌های کلیدی:**

**ریز جاندارها**
**گرانروی**
**برهم‌کنش‌های هیدرودینامیکی**

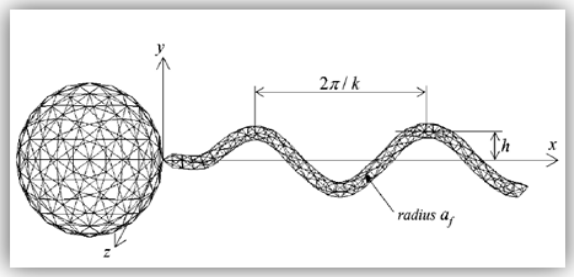
*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
ebrahimn@modares.ac.ir

## ۱ مقدمه

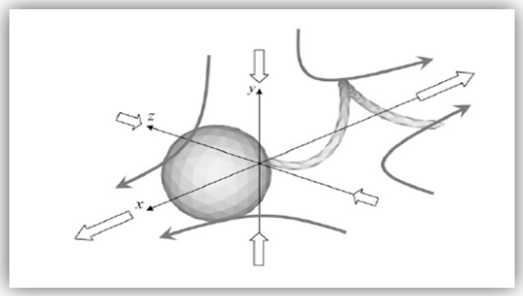
ریزجاندارها موجودات ریز میکروسکوپی هستند که طول آن‌ها کمتر از یک میلی‌متر است و با چشم غیرمسلح دیده نمی‌شوند. ریزجاندارها با وجود ساختمان سلولی تقریباً ساده، دارای همان فعالیت‌های اساسی فیزیولوژیکی نظیر تغذیه، تولید مولکول‌های جدید و تولید انرژی هستند که در موجودات عالی با ساختمان چند سلولی دیده می‌شود. باکتری‌ها که از نظر تعداد، بزرگ‌ترین گروه ریزجاندارها هستند، بر اساس اختلاف فیزیولوژی تقسیم‌بندی می‌شوند. به بیان دیگر پاسخ گروه‌های مختلف باکتری به اکسیژن، منجر به طبقه‌بندی آن‌ها در سه دسته می‌شود: دسته اول باکتری‌های هوازی هستند که برای رشد و فعالیت به اکسیژن نیاز دارند. دسته دوم باکتری‌های غیر هوازی اختیاری هستند که قادر به رشد در حضور یا عدم حضور اکسیژن هستند و دسته سوم باکتری‌های غیر هوازی حقیقی هستند که فقط در محیط‌های عاری از اکسیژن رشد می‌کنند. باکتری‌ها و قارچ‌ها، در صورت وجود داشتن نیتروژن کافی و قبل از افزودن مواد آلی، اولین ریزجاندارهایی هستند که در هر محیطی شروع به رشد می‌کنند ولی در محیط‌های اسیدی غالباً کمتر از یک درصد از تعداد کل میکروب‌های زنده را تشکیل می‌دهند. هیدرودینامیک محلول‌های تعلیقی فعال، با توجه به اهمیت و کاربرد زیاد آن‌ها، توجه محققان را به خود جلب کرده است. ریزجاندارهای زنده در سیالات در اعداد رینولدز پایین حرکت می‌کنند. تحرک آن‌ها ناشی از تاژک (Flagella) موجود در آن‌هاست. نیروی محرکه برای حرکت باکتری ای -کولای (E- Coli) از چرخش تاژک مارپیچی شکل به وجود می‌آید که در قسمت عقب پیکر سلول (Cell Body)، نیروی دافعه ایجاد می‌کند [۱]. گروهی از محققان تأثیر باکتری بر رفتار جریان محلول تعلیقی خاک رس- آب دریا را مورد بررسی قرار داده‌اند. میکروب‌ها و ترشحات آن‌ها در همه جای رسوبات دریایی موجودند. این موجودات می‌توانند خواص مکانیکی و مقاومت فرسایشی رسوبات را تغییر دهند؛ بنابراین کیفیت آب و سابقه زمین‌شناسی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مشاهده شده که فعالیت‌های باکتریایی به میزان قابل‌توجهی روی تنش تسلیم و گرانروی محلول تعلیقی خاک رس آب دریا اثر دارند. تنش تسلیم به‌عنوان تنش موردنیاز برای به حرکت درآوردن محلول تعلیقی منسجم، تحت برش، تعریف می‌شود [۲]. گیاهان پلانکتونی(Planktonic) و باکتری‌ها به همراه دیگر مواد آلی که تولید می‌کنند، نقش مهمی در اقیانوس و غلظت گازهای اتمسفر شامل $O_2$ و $CO_2$ و درنتیجه کنترل آب و هوا دارند. باکتری‌ها و خزه‌های دریایی، خواص رئولوژیکی آب دریا را تغییر می‌دهند. آن‌ها باعث افزایش کشسانی می‌شوند. افزایش ویسکوالاستیسیته عمدتاً وابسته به غلظت باکتری است [۳]. گرانروی مهم‌ترین ویژگی محلول‌های پلیمری است. مطالعات اخیر نشان داده است که عوامل متعددی بر گرانروی تأثیرگذارند که از آن جمله می‌توان به تنش برشی، دما، pH و تأثیر ریزجاندارها بر محلول پلیمری اشاره کرد. هر فرایندی که سبب شکسته شدن ساختار مولکولی بزرگ مولکول‌های پلیمری شود، تخریب پلیمری (Polymer Degradation) نامیده می‌شود که ناپایداری پلیمری را در پی دارد. تخریب زیستی پلیمر، ناشی از وجود ریزجاندارها و فعالیت‌های آن‌ها است. ریزجاندارها در صورت وجود شرایط مناسب توانایی مصرف زنجیره کربنی پلیمر، به‌عنوان منبع کربن یا مصرف گروه‌های عاملی متصل به زنجیر کربنی را به‌عنوان منبع نیتروژن دارند. این فعالیت و مصرف پلیمر سبب شکست مولکول پلیمری می‌شود [۴].

## ۲ مدل میکروبی

در مدل میکروبی که فان تین (Phan-Thien) و همکاران پیشنهاد داده‌اند، فرض می‌شود که مرکز شناگری باکتری منطبق بر مرکز هندسی آن است، درنتیجه باکتری مدل شده بدون نیرو و گشتاور است. عدد رینولدز بر اساس سرعت شنا و طول بدن، معمولاً کوچک‌تر از ۳-۱۰ است، بنابراین فرض می‌شود که میدان جریان اطراف باکتری استوکس (Stokes) است. طول بدن باکتری معمولی همراه با تاژک آن ۲-۱۰ میکرومتر می‌شود که بسیار بزرگتر از آن است که تحت تأثیر حرکت براونی قرار گیرد. بنابراین حرکات براونی در نظر گرفته نشده است. با این حال وقتی دو باکتری دور از هم هستند، باید در مورد اثر حرکت براونی بحث شود زیرا این مهم یکی از عوامل اصلی برای تغییر جهت‌گیری باکتری منفرد است. برگ (Berg) گزارش داد که نفوذ زاویه‌ای ای -کولای، ده درجه در ۰/۵ ثانیه است. همچنین تغییر جهت‌گیری هر باکتری




شکل ۱ متغیرهای شکل برای مدل میکروبی [۱].



شکل ۲ میدان سرعت تولیدشده توسط تنش باکتری منفرد [۱].

نه‌تنها توسط حرکات براونی است بلکه با عدم تقارن شکل تاژک، تغییر شکل تاژک، انحراف محور مرکزی مارپیچی تاژک از محور بدن، برهم‌کنش‌های باکتری‌ها و ... نیز امکان‌پذیر است. بنابراین نمی‌توان گفت که نفوذ زاویه‌ای مشاهده‌شده در ای- کولای تنها به دلیل حرکات براونی است. با فرض این‌که طول بدن ای -کولای تقریباً ۲ میکرومتر و سرعت شنای آن تقریباً ۲۰ میکرومتر بر درجه است، باکتری منفرد ای کولای، پس از شنای پنج برابر بیش‌تر از طول بدن خود، تقریباً ۱۰ درجه جهت‌گیری خود را تغییر می‌دهد. هندسه باکتری، جسم سلولی کروی با تاژک مارپیچ، در شکل ۱ نشان داده‌شده است. میدان جریان سه‌بعدی در اطراف باکتری که به دلیل شکل نامتقارن و مارپیچی تاژک ایجاد می‌شود، سبب ناپایداری حرکت شنای باکتری می‌شود. در مطالعاتی که قبلاً حرکات جمعی باکتری را مورد بحث قرار داده‌اند، بی‌ثباتی حرکت شنا نادیده گرفته شده‌است[۱].

شکل ۲ میدان سرعت تولیدشده توسط تنش باکتری منفرد را نشان می‌دهد. تنش باکتری در جهت بردار جهت‌گیری، منفی است؛ زیرا از پشت نیروی رانش تولید می‌کند.

## ۳ توصیف مدل حرکتی باکتری‌ها

حرکت باکتری در مدل پورسل (Purcell's Model) توسط متغیرهای سینماتیکی سرعت شنا (v,0,0)، سرعت زاویه‌ای بدن (Ω,0,0) و سرعت زاویه‌ای تاژک( ω,0,0-)، توصیف می‌شود. اگر ω، Ω، v مثبت باشند، نیروهای کشش (F)و گشتاور (N)، روی بدن باکتری و تاژک‌های آن بدین‌صورت است:

$$\begin{pmatrix} F_f \\ N_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ B & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V \\ \omega \end{pmatrix} \quad (۱)$$

$$\begin{pmatrix} F_b \\ N_b \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} A_0 & 0 \\ 0 & D_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \Omega \end{pmatrix} \quad (۲)$$

که A، B، D ، $A_0$ و $D_0$ متناسب با گرانروی حلال هستند. اگر بدن باکتری و تاژک آن، عاری از تنش وگشتاور در نظر گرفته شود:

$$\Omega = \frac{D(A_0 + A) - B^2}{D_0(A + A_0)} \omega \equiv \beta\omega \quad (۳)$$

$$v = \frac{B}{A_0 + A} \omega \equiv \gamma\omega \quad (۴)$$

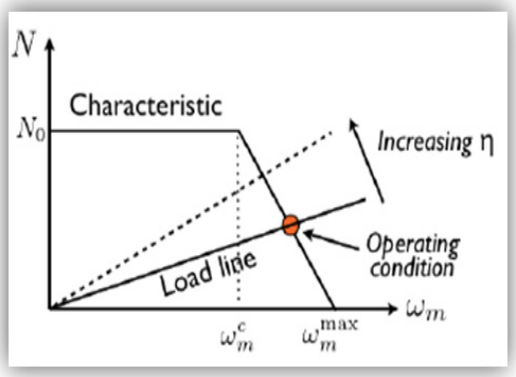
که $\beta$ و $\gamma$ ثوابت هندسی مستقل از گرانروی هستند. معادلات (۳) و (۴) پیش‌بینی می‌کنند که:

$$R_1 = \frac{\beta}{\gamma} \quad (۵)$$

$$\Omega = R_1 V \quad (۴)$$

$$\omega_m = \omega + \Omega = (1 + \beta^{-1})\Omega \quad (۶)$$

در رابطه (۷)، زیروند m مخفف کلمه موتور است. پروتئینِ موتور، مسئول چرخش تاژک باکتری است. اندازه‌گیری‌ها نشان داده است که $N(\omega_m)$، دو وضعیت را نشان می‌دهد. ارتباط N یا $\omega_m$ در شکل ۳ یا رابطه‌های




شکل ۳ طرح‌واره ارتباط گشتاور تاژک با سرعت زاویه‌ای آن [۵].

۸ و ۹ مدل شده است.

$$\omega \le \omega_m{}^c \;:\; N = N_0 \qquad (۷)$$

$$\omega \ge \omega_m{}^c \;:\; N = \alpha\left(\omega_m{}^{\max} - \omega_m\right) \qquad (۸)$$

که در آن $\alpha = \left|\frac{dN}{d\omega_m}\right| = \frac{N_0}{(\omega_m{}^{\max} - \omega_m{}^c)}$ ، شیب مطلق $N(\omega_m)$

با شرط $\omega_m{}^c \prec \omega \prec \omega_m{}^{\max}$ است.

اکنون $\Omega$ و $v = \frac{\Omega}{R_1}$ به‌عنوان تابعی از گرانروی حلال می‌توانند پیش‌بینی شود. در این صورت گشتاور موتور با گشتاور کشش بدن باکتری به تعادل رسیده است؛ یعنی:

$$N = D_0\Omega = \left(\frac{D_0}{1+\beta^{-1}}\right)\omega_m \qquad (۱۰)$$

برای جسم سلولی به شکل بیضی کشیده شده، با محورهای اصلی و فرعی a و b و $D_0 = \frac{16\pi\eta ab^2}{3}$ می‌توان نوشت:

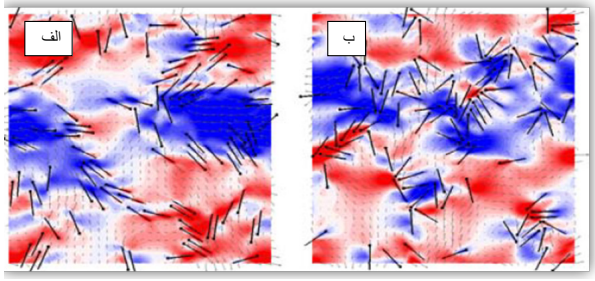
$$\omega \le \omega_m{}^c :\; N = N_0$$
$$\omega \ge \omega_m{}^c :\; \Omega = \frac{\alpha^*\Omega^{\max}}{\alpha^* + D_0} = \frac{3\alpha^*\Omega^{\max}\eta^{-1}}{16\pi ab^2 + 3\alpha^*\eta^{-1}}$$

که در آن $\alpha^* = \left|\frac{dN}{d\Omega}\right| = \frac{N_0}{\left(\Omega^{\max} - \Omega^c\right)}$ ، شیب مطلق $N(\Omega)$ است. نتایج بالا نشان می‌دهند که در حالت گشتاور ثابت موتور $\omega \ge \omega_m{}^c$ ، $\Omega \propto \eta^{-1}$ است [۵].

## ۴ حرکت جمعی ریزجاندارها در سیالات

باکتری ای-کولای، با فشار دادن سیال توسط تاژکی که در پشتش وجود دارد، خود را به جلو می‌کشاند. اگر تاژک باکتری در جلوی آن قرار گرفته باشد، سبب کشش سیال می‌شود.کِشنده‌ها (Pullers) و فشار دهنده‌ها (Pushers) اثرات متفاوتی روی گرانروی کلی سیال دارند. حرکت جمعی ریزجاندارها که به‌عنوان "تلاطم فعال" (Active Turbulence) شناخته می‌شود، توسط نوسانات قوی، افزایش نفوذ و اختلاط سیال شناخته می‌شود. انرژی برای جریان متلاطم میکروبی، توسط ریزجاندارها در مقیاس میکرو تولید می‌شود و جریان در این اعداد رینولدز پایین، بسیار اتلافی است. ریزجاندارها وقتی‌که در سیالات غیرنیوتونی شنا می‌کنند، هردو رفتار ویسکوالاستیک و گرانروی رقیق شونده با برش را نشان می‌دهند. برای شناگر در محلول تعلیقی رقیق، خواص رئولوژیکی سیال به شدت بر روی سرعت شنا اثر می‌گذارد. نقش خواص سیال در برهم‌کنش‌های هیدرودینامیکی ریزجاندارها در محلول تعلیقی ناشناخته است. میدان جریان، با مقیاس بسیار بزرگ‌تر از اندازه شناگر، در شکل ۴ نشان داده شده است [۶].

فشار دهنده‌ها تمایل دارند تا با همسایگان خود در یک صف درآیند و نظمی محلی نشان دهند. این در حالی است که کشنده‌ها به فرم خوشه در می‌آیند. نتایج مشابهی در محلول تعلیقی میکروشناگرها در سیال نیوتونی گزارش شده است. در سیال نیوتونی، فشار دهنده‌ها سریع‌تر ولی کشنده‌ها آرام‌تر شنا می‌کنند. باکتری فشار دهنده، سرعت جریان را افزایش می‌دهد، درحالی‌که باکتری کشنده آن را کاهش می‌دهد. پس در بحث گرانروی سیال، باکتری کشنده، باعث افزایش




شکل۴ توزیع شناگرها و میدان جریان الف) محلولی تعلیقی از فشار دهنده‌ها ب) محلول تعلیقی از کِشنده‌ها [۶].

گرانروی و باکتری فشار دهنده موجب کاهش آن می‌شود. محققان نشان دادند که محلول باسیلوس سوبتیلیس(Bacillus-Subtilis)، باکتری میله‌ای شکل از نوع فشار دهنده، یک‌هفتم گرانروی آب را دارد. هر چه باکتری‌ها آرام‌تر شنا کنند، کاهش گرانروی کمتر خواهد بود. دراصل این محققان می‌گویند که باکتری‌ها انرژی شیمیایی را به حرکت سیال تبدیل می‌کنند، درنتیجه جریان سیال را آسان‌تر و محلول را رقیق‌تر می‌کنند. چند تن از محققان، آزمایش‌هایی را روی ریزجانداران کشنده انجام دادند. این افراد نمونه‌هایی از هردو نوع سلول‌های مرده و زنده را آزمایش کردند. برای اندازه‌گیری گرانروی نمونه‌ها، آن‌ها از رئومتر استاندارد استفاده کردند که در آن نیروی پیچشی شناخته‌شده به مخروط غوطه‌ور در مایع اعمال می‌شود و چرخش حاصله، اندازه‌گیری می‌شود. گرانروی برای هر دو سلول‌های زنده و مرده با غلظت، افزایش یافته است، اما برای سلول‌های زنده، این افزایش بسیار سریع‌تر بوده است. در غلظت ۱۵ درصد، گرانروی محلول سلول زنده دو برابر محلول سلول مرده بود [۷].

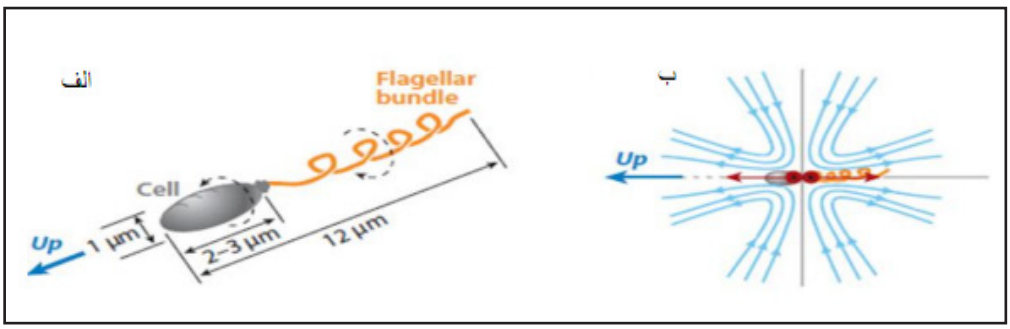
## ۵ بررسی گرانروی محلول‌های تعلیقی حاوی ریزجاندار

طبق مطالعات انجام شده، برهم‌کنش‌های هیدرودینامیکی دوربرد، در سیال گرانرو، منجر به کاهش چشمگیر گرانروی مؤثر می‌شود. طبق آزمایش‌های انجام شده روی محلول تعلیقی باسیلوس سوبتیلیس، نشان داده شد که کاهش گرانروی، به علت برهم‌کنش‌های بین شناگران است. در شکل ۵ طرح‌واره سلول ریزجاندار نشان داده شده است.

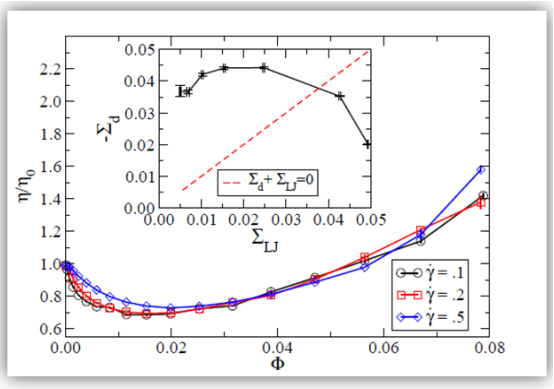
کاهش گرانروی، تنها به علت غلظت کم شناگران اتفاق می‌افتد. به‌علاوه، افزایش غلظت شناگران سبب افزایش گرانروی می‌شود. در محلول تعلیقی حاوی باکتری شناگر باسیلوس سوبتیلیس، در غلظت ۲-۱ درصد کسر حجمی، کاهش گرانروی هفت برابر مشاهده شده است. کاهش گرانروی، تنها زمانی رخ می‌دهد که شناگران تحت تأثیر نفوذ چرخشی مانند جست‌وخیز کردن و غلت زدن (Tumbling) قرار گیرند. اما کاهش گرانروی باسیلوس سوبتیلوس، برای اکثر شرایط آزمایشگاهی، بدون در نظر گرفتن این جست‌وخیزها اندازه‌گیری شده است. البته شبیه‌سازی‌ها و نظریه‌های تحلیلی نشان می‌دهند که کاهش گرانروی به دلیل برهم‌کنش‌های هیدرودینامیکی بین شناگرها اتفاق می‌افتد و نیاز به غلت زدن نیست. همچنین شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که وقتی غلظت افزایش می‌یابد، گرانروی در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد که این مورد در شکل ۶ نشان داده شده است [۹ و ۱۰].

## ۶ کاربرد ریزجاندارها در صنعت

بعضی از چاه‌های نفتی موجود در طبیعت، به علت تزریق آب، قادر به تولید نفت نیستند یا به اصطلاح غرقاب شده‌اند. همچنین چاه‌هایی وجود دارند که به دلیل رسوب ترکیبات آلی و معدنی مسدود شده‌اند. لذا بعد از استخراج اولیه و ثانویه نفت، قسمت اعظم آن (حدود ۸۰ درصد) در چاه‌ها باقی می‌ماند. بنابراین استفاده از روش‌های مختلف به منظور استخراج مابقی نفت، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. یکی از این روش‌ها، روش ازدیاد برداشت میکروبی در




شکل ۵ (الف) سلول باکتری که توسط چرخش تاژک پیچ مانندش به جلو رانده می‌شود. (ب) میدان سرعت دوقطبی تولیدشده توسط باکتری شناگر [۸].




شکل ۶ کاهش و سپس افزایش گرانروی با افزایش کسر حجمی برای باکتری‌های فشاردهنده [۹ و ۱۰].

صنعت ((Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR)) است که در آن به‌وسیله میکروب‌های مخصوص و مشخص، میزان نفت استخراجی از چاه‌ها را افزایش می‌دهند. پیشرفت‌های اخیر در شناخت و غربال‌گری ریزجاندارها و نیز تولید انبوه آن‌ها، روش MEOR را به عنوان جایگزینی مناسب برای بسیاری از روش‌های مرسوم ازدیاد برداشت معرفی کرده است. به‌علاوه مزیت‌هایی مانند هزینه‌های کمتر این روش، نسبت به سایر روش‌ها، وجود کارکردهای متفاوت این فناوری در مخزن و کمک به حفاظت از محیط زیست از دیگر عوامل توجه به این فناوری است [۱۱]. میکروب‌ها به سه طریق می‌توانند باعث ازدیاد برداشت از مخازن نفتی شوند: الف) با اکسایش نفت، اسید چربی تولید می‌کنند که باعث کاهش گرانروی نفت می‌شود. ب) با تولید مقادیر نسبی از گاز $CO_2$ باعث افزایش فشار در مخزن می‌شوند از این رو مانند تزریق گاز عمل می‌کنند. ج) میکروب‌ها با به‌وجود آوردن توده زیستی میان سنگ و نفت مخزن، باعث جابجایی فیزیکی نفت می‌شوند. شرایط فیزیکی نفت مثل دما، فشار، نمک و ... عامل محدودکننده استفاده از MEOR است. از آنجا که شرایط فیزیکی چاه‌های نفت با هم فرق می‌کنند، نمی‌توان برای همه آن‌ها از یک نوع ریزجاندار استفاده کرد. باکتری‌های مورد استفاده در روش MEOR باید این خصوصیات را داشته باشند: الف)کوچک باشد. ب) قادر به تحمل شرایط محیطی چاه باشد. ج) رشد سریعی داشته باشد و از تحرک لازم داخل چاه برخوردار باشد. د) تحمل مواد ضدمیکروبی و ضدخوردگی را داشته باشند. ه) برای رشد به مواد مغذی پیچیده‌ای نیاز نداشته باشند.

انواع باکتری‌های مورد استفاده در روش MEOR عبارتند از:

اشرشیاکولای (E-Coli)، سودوموناس (Pseudomonas)، میکروکوکوس (Micrococcus)، کلستریدیوم (Clostridium)، انتروباکتریاسه (Enterobacteriaceae)، مایکوباکتریوم (Mycobacterium).

در حفاری چاه‌های نفت و گاز از گِل حفاری استفاده می‌شود. این گل به دلیل نقش‌های متعدد، در مقاطع مختلف حفاری خواص متفاوتی دارد که باید از نظر خواص رئولوژی، رفتار مناسبی از خود نشان دهد. برای حصول رفتار مورد نظر، مواد متنوعی از جمله پلیمرها به گل اضافه می‌شود. افزودنی‌های پلیمری به خوبی می‌توانند خواص رئولوژی گل حفاری را بر حسب شرایط مورد نیاز، بهبود بخشند. به منظور افزایش سرعت حفاری نیاز به گلی است که در سرعت‌های برشی و حرارت زیاد، از کمترین گرانروی و در فضای حلقوی چاه، از گرانروی بهینه برخوردار باشد تا بتواند کنده‌های حفاری را به بیرون چاه هدایت کند. انواع پلیمرهای طبیعی، مصنوعی و اصلاح‌شده برای این هدف می‌توانند استفاده شود. به عنوان مثال، صمغ زانتان پلیمر آلی استخراج‌شده از سلولز و زیست‌پلیمری است که برای کنترل گرانروی استفاده می‌شود. زانتان شبه‌پلاستیکی است که با افزایش تنش برشی روی محلول، گرانروی آن کاهش می‌یابد. در شرایطی که میزان برش اعمال‌شده خیلی زیاد باشد( مثلاً در نازل‌های مته حفاری) گرانروی سیال آنقدر کاهش می‌یابد که شبیه گرانروی آب می‌شود. در شرایطی مانند شرایط داخل فضای حلقوی چاه که میزان برش اعمال‌شده کمتر است، دوباره پیوندهای هیدروژنی سیال تشکیل شده و گرانروی آن افزایش می‌یابد. حضور ای-کولای در مواردی که نیاز به گرانروی کمتر است، این مهم را فراهم می‌سازد.

یکی دیگر از این پلیمرها، کربوکسی متیل سلولز (Carboxymethyl Cellulose (CMC))، از مشتقات سلولز است. در اثر افزایش غلظت CMC، گرانروی افزایش

می‌یابد که در نتیجه مقدار تنش تسلیم نیز زیاد می‌شود. در اینجا هم در مواردی که گرانروی کم برای گل حفاری مورد نیاز است، باکتری ای-کولای می‌تواند کارساز شود [۱۲].

## ۷ نتیجه‌گیری

برهم‌کنش‌های هیدرودینامیکی دوربرد، در سیال گرانرو، منجر به کاهش چشمگیر گرانروی مؤثر می‌شود. این نتیجه موافق با آزمایش‌هایی است که روی محلول تعلیقی باسیلوس سوبتیلیس (باکتری فشاردهنده) انجام شده است. کاهش گرانروی به دلیل برهم‌کنش‌های هیدرودینامیکی بین شناگرها اتفاق می‌افتد. با افزایش غلظت باکتری، گرانروی در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. درواقع در لحظات اول، باکتری‌ها دارای اکسیژن کافی هستند ولی ازآنجایی‌که آن‌ها مصرف‌کننده اکسیژن هستند، سرعت متوسط و ضریب نفوذ آن‌ها کاهش می‌یابد و پس از مدتی تثبیت می‌شود. پایداری حرکت جمعی در محلول‌های تعلیقی باکتریایی مهم است. بسیاری از خواص سیال، ناشی از فعالیت‌های شنای باکتری‌هاست. تغییر در جهت شنای آن‌ها، تحت تأثیر جهت‌گیری‌های اولیه، زاویه و شکل تاژک است. بعضی از باکتری‌ها تاژکشان در عقب و برخی دیگر تاژکشان در جلو قرار دارد. برخی خود را با فشار دادن سیال توسط تاژکی که در پشتشان قرار دارد، به جلو می‌کشانند و گروه دیگر برعکس عمل می‌کنند.

# مراجع


1. Ishikawa T. ,Sekiya G., Imai Y., Yamaguchi T., Hydrodynamic Interaction Between Two Swimming Bacteria ,"*Biophysical Journal*, 93, 2217-2225, **2007**.

2. Dade W.B., Self R.L., Pellerin N.B., Moffet A., Jumars P.A., The Effects of Bacteria on Flow Behavior of Sea-water Suspensions, *Journal of Sedimentary Research*, 66, 39-42, **1996**.

3. Jenkinson I.R, Chen J., Li Z., Mitchell J.G .,Wang P.,"Rheology and Nano/microfluidics Around Non-living Particles and Living Organisms in Natural Waters ,"*International Congress of Rheology*, **2016**.

۴. ا.ظریفی، ر.خراط، ش.آیت اللهی، «بررسی تأثیر باکتری بومی مخزن جنوب ایران بر رئولوژی پلیمر پلی(آکریلآمید) در فرایند ازدیاد برداشت»، سومین همایش ملی نفت و گاز و صنایع وابسته، **۱۳۹۴**.

5. Martinez V.A ., Schwarz-Linek J., .Reufer M., Wilson L.G., Morozov A.N., Poon,W.C.K ., Fellagelated Bacterial Motility in Polymer Solutions ,"*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1-18, **2014**.

6. Li G ., Ardekani A.M., Collective Motion of Microorganisms in ComplexFluids ,"XXIV ICTAM, Canada, **2016**.

7. Gachelin J., Rousselet A., Lindner A., Clement E., "Collective Motion in an Active Suspension of Escherchia Coli Bacteria", *New Journal of Physics*, 1-9, **2014**.

8. Koch D.L., Subramanian G., "Collectiv Hydrodynamics of Swimming Microorganisms: Living Fluids", *Annual Review of Fluid Mechanics,* 43, 637-659, **2011**.

9. Ryan Sh.D., Effective Properties and Collective Dynamics in Bacterial Suspensions", Chapter 2, The Pennsylvania State University: The Graduate School, **2014**.

10. Ryan Sh.D. , Haines B.M., Berlyand L., Ziebert F., Aranson I.S.,"Viscosity of Bacterial Suspensions: Hydrodynamic Interactions and Self-induced Noise, *Physical Biology,* 87*,* 1-5, **2011**.

11. http://blog.Persianec.ir.

12. Patteson A.E., Gopinath A., Goulian M., Arratia P.E., "Running and Tumbling with E. Coli in Polymeric Solutions", *Scientific Reports*, 5, 15761, **2015**.