

## مروری بر عملکرد، انواع و کاربردهای مواد فعال سطحی (سورفکتانت ها) در جریان سیالات چندفازی

**چکیده:** در این مقاله مواد فعال سطحی (سورفکتانت ها) و تأثیر آن بر جریان سیالات چند فازی مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا نحوه عملکرد سورفکتانت ها بیان شده است. بدین منظور، تعاریف تنش سطحی و نحوه تغییر آن در حضور سورفکتانت ها بررسی شده است. همچنین، فیزیک توزیع سورفکتانت ها در جریان چندفازی و جذب و دفع آن در سطح مشترک گزارش شده است. تغییرات فیزیکی سطح مشترک دوفاز به دلیل حضور سورفکتانت ها از طریق تعادل نیروها و تغییر در تنش سطحی و تعریف اثر مارانگونی بررسی شده است. انواع سورفکتانت ها و خواص آن ها بیان شده است. در نهایت کاربردهای مهم سورفکتانت ها در صنعت و زندگی روزمره با جزئیات ذکر شده است. این بررسی نشان می دهد که سورفکتانت ها به عنوان یکی از عوامل موثر بر جریان چندفازی نیاز به مطالعه روز افزون دارد. شناخت بهتر این مواد می تواند در دستکاری و بهینه سازی کاربردهای دارای جریان سیال چندفازی بسیار مفید باشد.

**واژه های راهنما:** مواد فعال سطحی، سورفکتانت ها، جریان سیالات چندفازی، تنش سطحی، اثرات مارانگونی، انواع، کاربردها

یاسر جعفری  
دانشجوی دکتری

محمد طیبی رهنی  
استاد،

دانشکده مهندسی هوافضا،  
دانشگاه صنعتی شریف، تهران

محمدرضا سلیمی\*

استادیار، پژوهشگاه هوافضا،  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری،  
تهران

رینهارد میلر

استاد، گروه بیوفیزیک ماده نرم،  
دانشگاه صنعتی دامشتارت،  
آلمان

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

Yaser Jafari  
Ph.D. Candidate

Mohammad  
Taeibi Rahni

Professor, Faculty of  
Aerospace Engineering  
Sharif University of  
Technology, Tehran

Mohammad Reza  
Salimi\*

Assistant Professor,  
Aerospace Research  
Institute, Ministry of  
Science, Research and  
Technology, Tehran

Reinhard Miller

Professor, Department  
of Soft Matter  
Biophysics, TU  
Darmstadt, Germany

## An overview of the functioning, types, and applications of surface active agents (surfactants) in multiphase flow

**Abstract:** In this article, Surface Active Agents (Surfactants) and its effect on the Multiphase Flow have been studied. First, the functioning of surfactants has been explained. For this purpose, the definitions of surface tension and how it changes in the presence of surfactants have been investigated. Also, the physics of surfactant distribution in multiphase flow and its absorption and repulsion at the interface have been reported. The physical changes of the two-phase interface due to the presence of surfactants have been investigated through the balance of forces and the change in surface tension and the definition of the Marangoni effect. Types of surfactants and their properties are stated. Finally, the important applications of surfactants in industry and daily life are mentioned in detail. This review shows that surfactants as one of the effective factors on multiphase flow need to be studied more and more. A better understanding of these materials can be very useful in manipulating and optimizing multiphase flow applications.

**Keywords:** Surface active agents, Surfactants, Multiphase flow, Surface tension, Marangoni effects, Types, Applications

## ۱- مقدمه

و تأثیرات آن پرداخته شود. همچنین، انواع سورفکتانت ها دسته بندی و ویژگی های هر یک توضیح داده خواهد شد. در انتها، بطور گسترده کاربردهای علمی و صنعتی سورفکتانت ها در زندگی روزمره انسان و فواید آن بیان خواهد شد.

## ۲- نحوه عملکرد سورفکتانت ها در جریان های سیالات چندفازی و تأثیرات آن

در جریان های چندفازی، سطح مشترک قابل تغییر شکل بین دو سیال در واقع یک لایه نازک است که به اندازه چند مولکول ضخامت دارد [۱]. تعریف مشخصی از این ضخامت وجود ندارد، زیرا خواص فیزیکی سیال در ناحیه سطح مشترک به سرعت ولی به صورت پیوسته از مقادیر یک فاز به مقادیر فاز دیگر تغییر می کند. به دلیل عدم وجود تئوری های مولکولی مناسب برای توصیف مرز مشترک، آن به عنوان یک مرز بدون جرم و با ضخامت صفر در نظر گرفته می شود که در آن مقادیر حجمی خواص سیال در دو طرف مرز مشترک ثابت است و به طور ناپیوسته در گذر از مرز مشترک تغییر می کند. مرز مشترک با تنش سطحی توصیف می شود، که به حالت ترمودینامیکی موضعی مانند دما، فشار و غلظت املاح مانند سورفکتانت ها و ذرات باردار بستگی دارد، اما به این که آیا سطح مشترک در حال تغییر شکل یا حرکت ماکروسکوپی است، وابسته نیست. برای درک نحوه عملکرد سورفکتانت ها در جریان های چند فازی ابتدا باید مفهوم تنش سطحی معرفی شود. از دو دیدگاه می توان به مفهوم تنش سطحی را بررسی کرد که عبارتند از: نیروی وارد بر مولکول های سیال برای باقیماندن در سطح مشترک دوفاز و انرژی آزاد لازم برای حداقل کار لازم برای تولید یک واحد سطح مشترک بین دو فاز.

## ۲-۱- تعاریف تنش سطحی در جریان چندفازی و تأثیر حضور سورفکتانت بر آن

در دیدگاه اول، تنش سطحی معمولاً به عنوان نیروی جذب خالص به داخل تعریف می شود که توسط مولکول ها در سطح مشترک دو سیال احساس می شود، تعرف می شود [۱۰]. به عبارت دیگر، این خاصیت مایع برای مقاومت در برابر نیروی خارجی وارد بر مولکول های موجود در سطح مشترک با سیال

عوامل فعال سطحی (سورفکتانت ها) ۱، مولکول های آمفیفیل ۲ هستند که در سطح مشترک جذب می شوند و می توانند دینامیک سیستم های جریان دو فازی را به شدت تحت تأثیر قرار دهند [۱-۳]. آمفیفیل یک ترکیب شیمیایی است که دارای هر دو خاصیت آب دوست (هیدروفیل) ۳ و آب گریز (لیپوفیل) ۴ است. کلمه سورفکتانت مخفف عبارت لاتین عوامل فعال سطحی ۵ که ویژگی دوگانه آب دوستی و آب گریزی آن خود نشان دهنده ماهیت فعال سطحی این دسته از ترکیبات و تمایل آنها به جذب در سطح مشترک است. این تمایل باعث تغییر تنش سطحی و در نتیجه تغییرات قابل توجهی در خواص سطحی جریان سیال چندفازی می شوند [۴-۵]. سورفکتانت ها آنها ساختار مولکولی با زنجیره بلند دارند که به دو بخش قطبی و غیر قطبی تقسیم می شود [۳]. بخش قطبی میل یا تنش قوی نسبت به حلال های قطبی نشان می دهد که به آن بخش سر آبدوست و به قسمت غیرقطبی دم آگریز گفته می شود [۱ و ۶]. دم آگریز به طور معمول یک زنجیره هیدروکربنی طولانی است که در سیال غیرقطبی قرار می گیرد [۱ و ۶]. در چندین فرآیند، سورفکتانت ها معمولاً به طور طبیعی یا به عنوان ناخالصی هایی وجود دارند که به سختی حذف می شوند. وجود سورفکتانت ها در سیستم های چند فازی، چه به صورت ناخالصی های اجتناب ناپذیر یا به عنوان مواد افزودنی، تأثیر زیادی بر شکل و دینامیک سطح مشترک دارد [۷]. انتخاب سورفکتانت بستگی به کاربرد دارد و مستلزم آگاهی از موارد زیر است [۸]:

- ویژگی های مشخصه سورفکتانت های موجود در حال حاضر (خواص فیزیکی و شیمیایی عمومی)،
- مشاهدات سطحی دخیل در کاربرد و نقش سورفکتانت در این پدیده ها و
- خواص شیمیایی سطح انواع ساختاری مختلف سورفکتانت ها و رابطه ساختار یک سورفکتانت با رفتار آن در پدیده های مختلف سطحی.

اگرچه محلول های آبی حاوی سورفکتانت ها معمولاً در بسیاری از کاربردها استفاده می شوند، اما درک جامع از نقش میکروسکوپی مولکول های سورفکتانت در گسترش پدیده ها همچنان چالش برانگیز است [۹]. در این مقاله سعی خواهد شد به جزئیات نحوه عملکرد سورفکتانت ها در جریان های چندفازی

<sup>4</sup> Hydrophobe (Lipophile)

<sup>5</sup> Surface Active Agents

<sup>1</sup> Surface Active Agents (Surfactants)

<sup>2</sup> Amphiphiles

<sup>3</sup> Hydrophilic (Hydrophile)

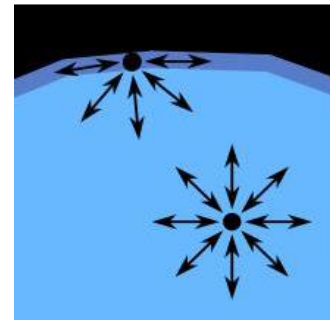
های آب و با ساختار آب در مجاورت گروه آبگریز باعث اعوجاج ساختار آب شود و انرژی آزاد سیستم را افزایش دهد. این سیستم با بیرون راندن مولکول سورفکتانت به سطح مشترک پاسخ می دهد تا تماس بین گروه آبگریز و آب را به حداقل برساند و انرژی آزاد سیستم را کاهش دهد. در نتیجه، سطح مشترک با مولکول های سورفکتانت پوشیده می شود و دم های آبگریز آن ها به سمت فاز غیر آبی (فاز دوم) می رود و در عین حال سرهای آبدوست خود را در فاز آب نگه می دارند تا عدم تشابه دو فاز در تماس با یکدیگر در فصل مشترک کاهش یابد. این کاهش در عدم تشابه (مولکول های هوا و گروه آبگریز غیرقطبی هستند) دو فاز در سطح منجر به کاهش تنش سطحی می شود. به عبارت دیگر، اکنون برای آوردن مولکول ها به سطح کار کمتری نیاز است. این کار، کار مورد نیاز برای ایجاد یک واحد سطح یعنی تنش سطحی را کاهش می دهد. توجه داشته باشید که وجود گروه آبدوست مانع از خروج کامل سورفکتانت از حلال به عنوان یک فاز جداگانه می شود، زیرا این امر مستلزم دهیدراته شدن گروه آبدوست است. بنابراین ساختار آمفیفیل سورفکتانت باعث می شود:

- افزایش غلظت سورفکتانت ها در سطح،
- کاهش تنش سطحی آب و
- جهت گیری مولکول در سطح با گروه آبدوست آن در فاز آبی و گروه آبگریز آن دور از فاز آبی.

## ۲-۲- نحوه تغییر تنش سطحی در جریان چند فاز نازی از حضور سورفکتانت ها

یک سطح مشترک دوفاز هوا-آب یا روغن-آب با تنش سطحی اولیه  $\sigma_0$  را در نظر بگیرید که به طور ناگهانی در معرض حضور سورفکتانت ها قرار می گیرد (شکل ۲) [۱]. اگر سورفکتانت ها زمان کافی برای جذب روی سطح مشترک داشته باشند و به تعادل برسند، تنش سطحی به مقدار تعادل خود یعنی  $\sigma_{eq}$  کاهش می یابد که کمتر از  $\sigma_0$  است [۱ و ۱۱]. تنش سطحی تعادل  $\sigma_{eq}$  به غلظت حجمی سورفکتانت ها بستگی دارد. اگر آزمایش هایی برای تعیین تنش سطحی تعادل برای غلظت های مختلف سورفکتانت حجمی انجام شود، نموداری مشابه شکل ۳ به دست می آید. برای غلظت های حجمی کوچک سورفکتانت، تنش سطحی تعادل تقریباً مشابه تنش سطحی اولیه (تمیز) باقی می ماند. با افزایش غلظت حجمی سورفکتانت ها، تنش سطحی تعادل کاهش می یابد تا زمانی که به یک مقدار ثابت در یک

دیگر است. مولکول های داخل مایع از همه طرف به طور مساوی جذب می شوند، در حالی که مولکول های سطح تنها با نیروی جذب مولکول های داخلی حجم مایع مواجه می شوند (شکل ۱). این نیروی جاذبه در برابر هر نوع نیروی خارجی مقاومت می کند. مولکول های سطحی سیالات توسط مولکول های سیال مجاور می شوند که اگر سیال مجاور گاز باشد نیرو بسیار کمتر است و می توان آن را ناچیز در نظر گرفت. این مقاومت در برابر نیروی های خارجی و جذب مولکول های سطحی در سطح مشترک مایع با سیال دیگر همان مفهوم نیروی تنش سطحی است. عوامل موثر بر قدرت برهمکنش سطحی نیز باعث کاهش تنش سطحی مانند دما یا سورفکتانت ها می شود. بازی با تنش سطحی در سطح مشترک دوفاز ایده اصلی پشت همه کاربردهای سورفکتانت است. همانطور که در مقدمه عنوان شد، سورفکتانت ها ماهیتی دوگانه دارند و به همین دلیل به عنوان آمفیفیل شناخته می شوند. مولکول های سورفکتانت به دلیل ماهیت خود تمایل دارند به نقطه ای حرکت کنند و خود را به گونه ای جهت دهند که راحت باشند، یعنی در سطح مشترک (بین دو فاز)، سر آبدوست به سمت آب و دم آبگریز دور از آب قرار گیرد. قرار گرفتن مولکول های سورفکتانت در بین مولکول های سیال در سطح مشترک باعث کاهش جاذبه مولکولی رو به داخل می شود و در نتیجه تنش سطحی کاهش می یابد.

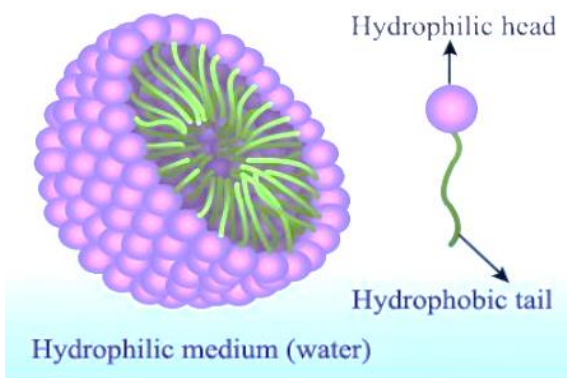


شکل ۱ نیروی جاذبه مولکولی در حجم و سطح مشترک سیال [۱۰]

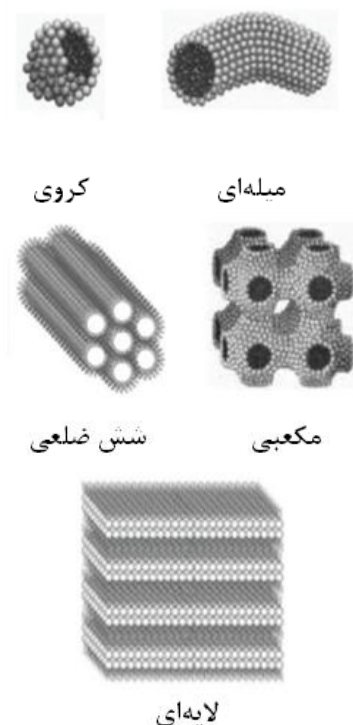
در دیدگاه دوم، انرژی آزاد سطحی حداقل مقدار کار مورد نیاز برای گسترش سطح مشترک است [۱ و ۶]. تنش سطحی یک مایع، انرژی آزاد سطحی در واحد سطح مرز بین مایع و هوای اطراف آن است. همچنین، این معیاری برای تفاوت ماهیت دو فاز است که در سطح مشترک (مرز بین هر دو فاز غیرقابل اختلاط) است. هر چه عدم تشابه در انرژی آزاد سطحی بیشتر باشد، تنش سطحی بیشتر است. هنگامی که یک سورفکتانت در یک محلول قطبی مانند محلول آبی حل می شود، وجود گروه آبگریز ممکن است با شکستن پیوندهای هیدروژنی بین مولکول

کاهش تنش سطحی کمک می کنند. تغییر خواص چندفازی مانند ترشوندگی و تشکیل کف توسط غلظت مونومرهای آزاد در محلول کنترل می شود. به طور کلی شکل میسل به ساختار سورفکتانت، معمولاً اندازه نسبی گروه سر و گروه دم بستگی دارد. ساختار یک میسل می تواند شکل های مختلفی مانند کروی، میله ای، دیسک و لایه ای داشته باشد (شکل ۵). در محلول غلیظ (غلظت بسیار بالاتر از CMC)، میسل های لایه ای تشکیل می شوند، به طوری که مولکول های فاز قطبی مانند محلول آبی منطقه بین صفحات موازی سورفکتانت را اشغال می کنند.

### Micelle

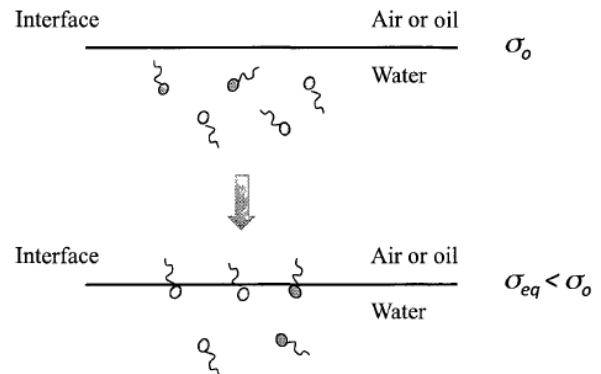


شکل ۴ تشکیل میسل در غلظت بالای سورفکتانت [۱۲]

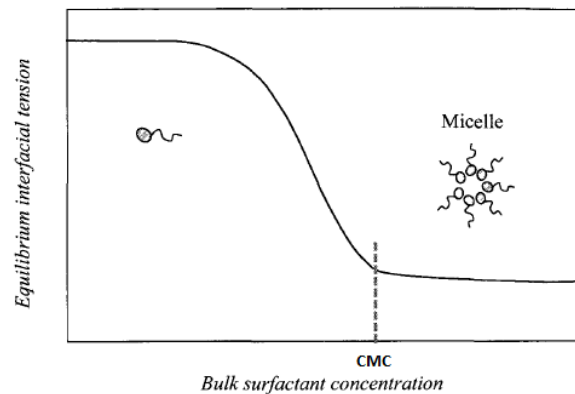


شکل ۵ انواع میسل در غلظت بالای سورفکتانت [۱۲]

غلظت بحرانی خاص که به عنوان غلظت بحرانی میسل<sup>۱</sup> شناخته می شود، کاهش می یابد. فراتر از CMC، سورفکتانت ها شروع به تجمع می کنند و میسل هایی را در داخل حجم محلول تشکیل می دهند که منجر به تنش سطحی تقریباً ثابت می شود [۱].



شکل ۲ شماتیک فرآیند کاهش تنش سطحی توسط سورفکتانت [۱]



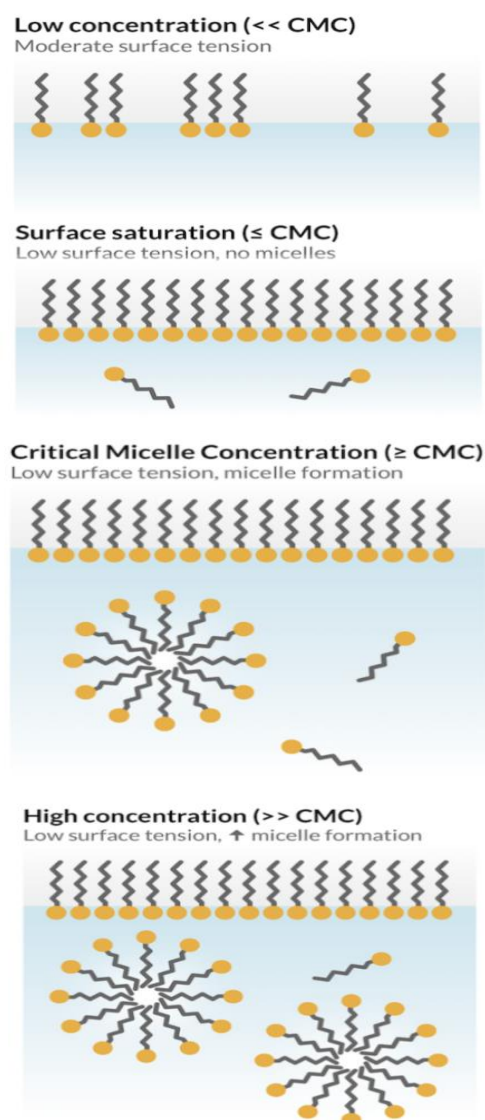
شکل ۳ روند کاهش تنش سطحی برحسب غلظت سورفکتانت [۱]

در یک میسل، سرهای قطبی در تماس با آب یک پوسته بیرونی تشکیل می دهند، در حالی که دم های غیرقطبی در داخل جدا می شوند [۱۲]. از این رو، هسته میسل از دم های بلند غیرقطبی تشکیل شده است. ساختار تشکیل میسل در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۲]. تشکیل میسل یک پدیده مهم است، زیرا مولکول های سورفکتانت بسته به اینکه در میسل ها وجود داشته باشند یا به صورت مونومر آزاد (تکی) رفتار بسیار متفاوتی دارند. میسل ها بر حلالیت هیدروکربن های آلی و روغن ها در محلول آبی تأثیر می گذارند و همچنین بر خاصیت مهمی به نام ویسکوزیته محلول تأثیر می گذارند. اندازه میسل با عدد جمعی که تعداد مولکول های سورفکتانت مرتبط با یک میسل است اندازه گیری می شود. فقط مونومرهای سورفکتانت به

<sup>1</sup> Critical Micelle Concentration (CMC)

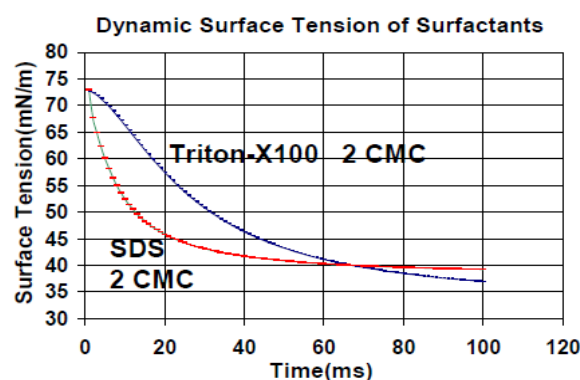
Surfactant Name	SDS	Triton X-100
Chemical formula	$C_{12}H_{25}SO_4$	$C_{14}H_{21}(OCH_2CH_2)_{9-10}OH$
Molecular wt.	288.3	624(Avg.)
Ethylene oxide groups	0	9-10
Appearance	White Powder	Clear Liquid
CMC	2500 wppm	200 wppm
Manufacturer	Fisher	Union Carbide
Equilibrium Surface Tension dyne/cm [ $@ 2 \times CMC$ ]	38.0	33.1
Equilibrium Surface Tension dyne/cm [ $@ 0.5 \times CMC$ ]	51.9	35.7

شکل ۷ مقادیر تنش سطحی برای دو سورفکتانت مختلف با دو غلظت مختلف [۳]



شکل ۸ رفتار مولکول های سورفکتانت [۱۴]

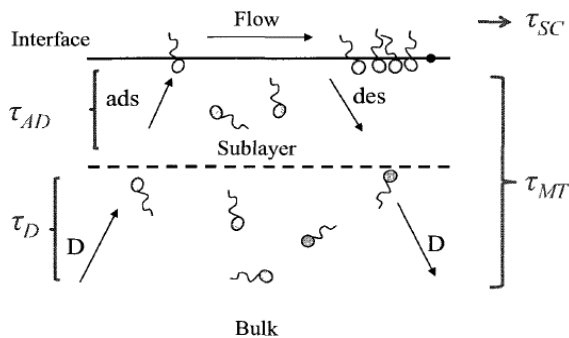
کاهش تنش سطحی به دلیل حضور سورفکتانت ها، تنش سطحی دینامیکی نامیده می شود [۱۳]. این یک پدیده وابسته به زمان است که در آن تغییر در تنش سطحی توسط تحرک مولکول های سورفکتانت پخش شده در سطح مشترک دوفاز ایجاد شده، سرعت جذب، غلظت حجمی و دینامیک میسلی کنترل می شود [۳]. بسیاری از این ویژگی ها به نوع سورفکتانت بکار برده شده بستگی دارد [۲]. بطور مثال در شکل ۶ نمودار کاهش تنش سطحی برای دو نوع سورفکتانت در جریان سیال دوفازی مشابه محلول آبی در حضور هوا با فرض غلظت از دو برابر  $CMC$  نشان داده شده است [۳]. همانطور که مشاهده می شود زمان رسیدن به غلظت تعادلی و میزان آن متفاوت است. همچنین مقادیر تنش تعادلی در حالت دو برابر  $CMC$  و نصف آن در شکل ۷ ذکر شده که نشان دهنده تفاوت اساسی در ویژگی های سورفکتانت ها برای کاهش تنش سطحی دارد [۳]. در شکل ۸ در صورت وجود زمان کافی برای جذب سورفکتانت ها در سطح مشترک نسبت به زمان اضافه شدن سورفکتانت ها به سیال، رفتار مولکول های سورفکتانت به سادگی به نمایش گذاشته شده است. مدل های فیزیکی اولیه تنش سطحی دینامیکی بر این فرض استوار بود که وابستگی زمانی تنش سطحی ناشی از انتقال مولکول ها در محلول حجمی به سطح مشترک یعنی توسط جذب است [۱۳]. از آن زمان، تحلیل های نظری زیادی از تنش سطحی دینامیکی در محلول های سورفکتانت منحصرأ بر اساس ایده جذب، با موفقیت قابل توجهی انجام شده است. با این حال، نظریه جذب با زمان تکامل یافته و نیاز به رابطه دیگری بین غلظت سطحی مولکول های جاذب و غلظت توده ای مولکول ها در نزدیکی و سطح داشت. علاوه بر این، تنش سطحی دینامیکی به دست آمده توسط تئوری جذب شامل پارامترهای متعددی است که باید از قبل تعیین شوند و استفاده از آن برای اهداف مهندسی ساده نبود.



شکل ۶ روند کاهش تنش سطحی برای دو سورفکتانت مختلف [۳]

<sup>1</sup> Dynamic Surface Tension (DST)

زیرلایه سورفکتانت ها برابر با غلظت سورفکتانت حجم است (سورفکتانت نامحلول). در محدوده کنترل شده پخش، اگر  $\tau_D$   $\tau_{AD} \ll$  باشد یک گرادیان غلظت سورفکتانت بین حجم سیال و زیر لایه وجود خواهد داشت (سورفکتانت محلول). در جدول ۱ خلاصه رفتار محلول یا نامحلول بودن سورفکتانت ها بطور خلاصه بر حسب مقایسه مقیاس های زمانی تعریف شده عنوان شده است. بسته به غلظت سورفکتانت و شرایط جریان، سیستم دو فازی همراه با سورفکتانت مشابه ممکن است رفتار متفاوتی داشته باشد [۱۶]. به طور مثال، اگر انتقال سورفکتانت به اندازه کافی سریع باشد، سطح هیچ رفتار ارتجاعی از خود نشان نمی دهد و یا اگر پدیده چندفازی به قدری سریع اتفاق بیافتد که سورفکتانت ها زمان کافی برای جذب در سطح مشترک را نداشته باشند، حضور سورفکتانت تاثیری در دینامیک مسئله ندارد.



شکل ۹ شماتیک مقیاس های زمانی و مکانی سورفکتانت ها در حجم سیال و سطح مشترک [۱]

جدول ۱ رفتار محلول یا نامحلول بودن سورفکتانت ها بر حسب مقایسه مقیاس های زمانی

$\tau_{MT} \ll \tau_{SC}$	$\tau_{MT} \gg \tau_{SC}$	$\tau_{SC} \sim \tau_{MT}$	
		$\tau_{AD} \gg \tau_D$	$\tau_{AD} \ll \tau_D$
محلول	نامحلول	نامحلول	محلول

## ۲-۴- تغییرات فیزیکی سطح مشترک دو فاز سیال در حضور سورفکتانت ها (تعادل نیروها و ایجاد نیروهای جدید)

غلظت سورفکتانت غیریکنواخت در امتداد یک سطح مشترک، نیروهای کپیلاری غیریکنواخت (عمودی) و مارانگونی<sup>۲</sup> (مماسی) را در سیال ایجاد می کند [۱۱ و ۱۷]. این به نوبه خود بر سرعت سیال تأثیر می گذارد که بطور متقابل روی توزیع سورفکتانت تأثیر می گذارد. به عنوان مثال، جابجایی سورفکتانت به سمت

## ۲-۳- فیزیک توزیع سورفکتانت ها در حجم سیال و سطح مشترک و جذب و دفع آن از سطح مشترک (محلول یا نامحلول بودن سورفکتانت)

یکی دیگر از ویژگی های مهم سورفکتانت ها حلالیت آنهاست [۸]. سورفکتانت های محلول می توانند هم در سطح مشترک و هم در قسمت حجم وجود داشته باشند. بنابراین، هنگامی که رفتار سورفکتانت مورد مطالعه قرار می گیرد، تبادل ثابت بین حجم سیال و سطح مشترک باید در نظر گرفته شود. در مورد سورفکتانت های نامحلول، سورفکتانت ها فقط در سطح مشترک وجود دارند. این رفتار را می توان یا توسط ماهیت سورفکتانت مشاهده کرد، یا زمانی که مقیاس های زمانی پخش و تبادل در مقیاسه با تولید سطح مشترک بسیار کوچک است. در مورد دوم، سورفکتانت ها به طور موثر نامحلول عمل می کنند. در حالت نامحلول هیچ تبادل انبوه سورفکتانت ها بین سطح مشترک فازها و حجم سیال وجود ندارد.

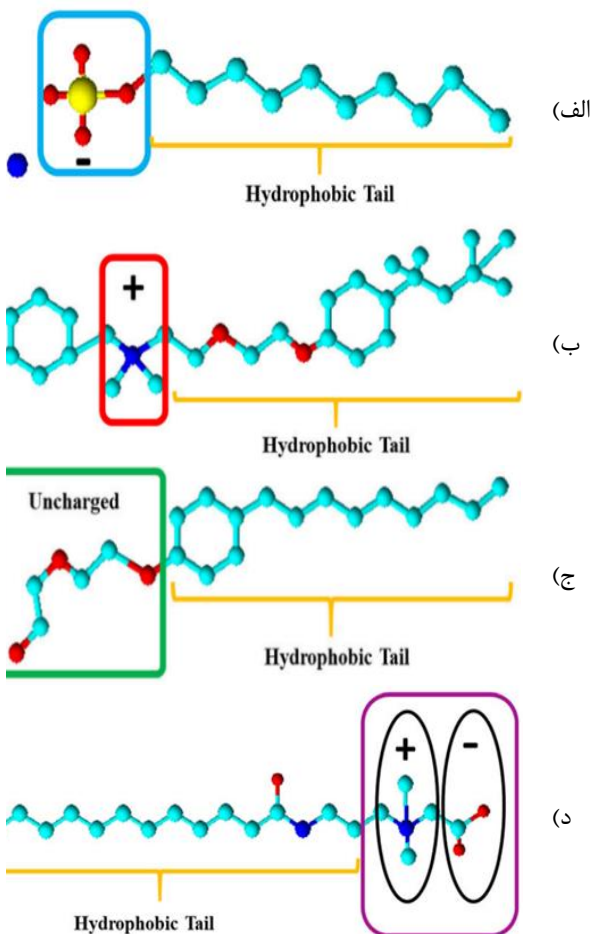
توزیع غیر یکنواخت سورفکتانت ها در سطح مشترک به مقیاس های زمانی نسبی پخش، همرفت و جذب-دفع در مسئله بستگی دارد [۸ و ۱۱ و ۱۵-۱۶]. علاوه بر اینکه سورفکتانت ها در امتداد سطح مشترک انتقال همرفتی و پخش دارند، توسط جذب-دفع و پخش بین سطح مشترک و حجم سیال منتقل می شوند [۱]. شکل ۹ شماتیکی از مقیاس های زمانی مختلف برای رفتار غیرتعادلی سورفکتانت ها در سطح مشترک با جریان سطحی را نشان می دهد. همرفت در فصل مشترک منجر به تجمع موضعی سورفکتانت ها در نقاط سکون می شود. مقیاس زمانی برای همرفت سطحی  $\tau_{SC}$  به سرعت مماسی در مرز مشترک بستگی دارد. مقیاس زمانی انتقال جرم سورفکتانت ها بین مرز مشترک و حجم محلول  $\tau_{MT}$ ، به مقیاس زمانی جذب و دفع سورفکتانت ها بین زیرلایه و مرز مشترک  $\tau_{AD}$  و مقیاس زمانی پخش حجمی سورفکتانت ها بین حجم و زیرلایه (عمق تخلیه)  $\tau_D$  بستگی دارد. اگر  $\tau_{MT} \ll \tau_{SC}$  باشد، مرز مشترک خیلی سریع با سورفکتانت ها پر می شود تا کاهش یکنواخت تنش سطحی در امتداد مرز مشترک حاصل شود و در این حالت سورفکتانت ها محلول هستند. از طرف دیگر، اگر  $\tau_{MT} \gg \tau_{SC}$  باشد، تقریباً هیچ تبادل سورفکتانت بین حجم سیال و مرز مشترک وجود ندارد و سورفکتانت ها اساساً نامحلول هستند. اگر  $\tau_{MT} \sim \tau_{SC}$  باشد، مقدار نسبی  $\tau_{AD}$  و  $\tau_D$  رفتار سورفکتانت ها را تعیین می کند. به عنوان مثال، در محدوده جذب-دفع اگر  $\tau_{AD} \gg \tau_D$  باشد غلظت

<sup>2</sup> Marangoni

<sup>1</sup> Debye Layer (Depletion Depth)

### ۳- انواع سورفکتانت ها

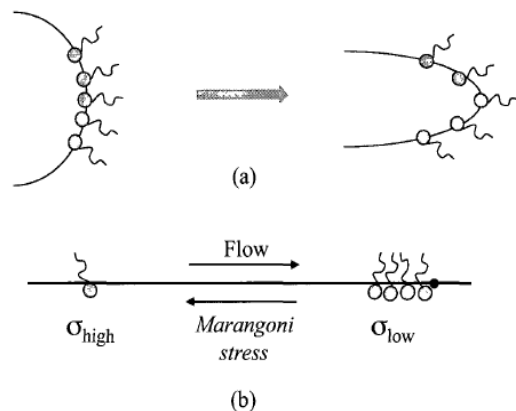
سورفکتانت ها براساس بار گروه سر قطبی (سر آبدوست) به عنوان آنیونی، کاتیونی، غیر یونی و زویتریونی (آمفوتریک) طبقه بندی می شوند [۳ و ۸]. در دسته آنیونی و کاتیونی سر آبدوست به ترتیب دارای بار منفی و مثبت است. در دسته غیر یونی، سر آبدوست باردار نیست و برای زویتریونی که در آن مناطق جداگانه ای از بار مثبت و منفی در سر آبدوست وجود دارد. در شکل ۱۱ نمونه ای از هر دسته به نمایش گذاشته شده است. بخش آبگریز معمولاً یک زنجیره آلکیل است که می تواند خطی یا منشعب باشد و طول آن معمولاً بین ۸ تا ۱۸ اتم کربن است. درجه انشعاب زنجیره، موقعیت گروه قطبی و طول زنجیره پارامترهای مهمی برای خواص فیزیکوشیمیایی سورفکتانت هستند [۸]. این تفاوت در خواص باعث می شود در بکارگیری سورفکتانت ها در کاربردهای مختلف انتخاب ها متفاوت باشد.



شکل ۱۱ انواع سورفکتانت ها، (الف) آنیونی (آمونیم لوریل سولفات)، (ب) کاتیونی (بنزونیم کلرید)، غیر یونی (اتوکسیلات نونیلفنول) و (د) زویتریونی (لئورامیدوپروپیل بتاین) [۱۹]

نقاط سکون در نوک یک قطره تمایل به کاهش تنش سطحی در آنجا و افزایش تغییر شکل قطره دارد. از سوی دیگر، نیروهای مارانگونی در برابر همرفت سورفکتانت به سمت نوک قطره مقاومت می کنند و در نتیجه تغییر شکل قطره را مهار می کنند. فشرده کردن/تنش سطح مشترک منجر به افزایش/کاهش متناظر در غلظت سورفکتانت می شود.

پرش تنش عمودی در عرض سطح مشترک دوفاز از لحاظ ریاضی توسط حاصل ضرب تنش سطحی و انحنای متوسط مرز مشترک اعمال می شود، در حالی که جهش تنش مماسی در سطح مشترک توسط گرادیان تنش سطحی به دست می آید. سورفکتانت های جذب شده در سطح مشترک دوفاز، تعادل تنش را به دو صورت تغییر می دهند. اول، تجمع موضعی سورفکتانت ها در امتداد سطح مشترک، تنش سطحی را در آنجا کاهش می دهد. برای متعادل کردن تنش عمودی در سطح مشترک، سطح مشترک در این مناطق با تنش سطحی کم تغییر شکل می دهد تا انحنای بزرگ تری ایجاد کند، مانند آنچه که در شکل ۱۰ (a) مشاهده می شود [۱]. این پدیده بر تغییر شکل سطح مشترک قطره ها و حباب ها در حضور سورفکتانت ها تأثیر می گذارد که به نوبه خود بر تحرک آن تأثیر می گذارد. دوم، اگر یک توزیع غیر یکنواخت از سورفکتانت ها در طول مرز مشترک به دلیل یک نقطه رکود در جریان ایجاد شود، یک تنش سطحی غیر یکنواخت در امتداد مرز مشترک ایجاد می شود [۱ و ۱۸]. همانطور که در شکل ۱۰ (b) نشان داده شده است، یک گرادیان در تنش سطحی، تنش های مماسی اضافی را ایجاد می کند که به عنوان تنش های مارانگونی شناخته می شوند که سرعت مماسی مرز مشترک را کاهش می دهد. این اثر بر تحرک قطره ها و حباب ها در حضور سورفکتانت ها تأثیر می گذارد.



شکل ۱۰ شماتیک اثر توزیع غیریکنواخت سورفکتانت ها براساس، (a) تعادل تنش عمودی و (b) تعادل تنش مماسی [۱]

### ۳-۱- سورفکتانت های آنیونی

استفاده می شوند. بخش بزرگی از این سورفکتانت های غیر یونی با حضور یک زنجیره پلی اتیلن گلیکول، که از پلی تراکم اکسید اتیلن به دست می آید، آب دوست می شوند. سورفکتانت های غیر یونی احتمالاً آنهایی هستند که بیشتر در کاربردهای دارورسانی استفاده می شوند. سورفکتانت غیر یونی می تواند از استرهای پلی ال، استرهای پلی اکسی اتیلن و پولوکسامرها یا پلورونیک ها باشد. استرهای پلی اکسی اتیلن عمدتاً شامل پلی اتیلن گلیکول هستند. متداول ترین سورفکتانت های غیر یونی مورد استفاده، اترهای الکل چرب هستند. سورفکتانت های غیر یونی به سختی کمتر سیستم سورفکتانت کمک می کنند [۳ و ۱۲]. نمونه از سورفکتانت غیر یونی در شکل ۱۱ ج نشان داده شده است.

### ۳-۴- سورفکتانت های زویتریونی

سورفکتانت های زویتریونی که به عنوان سورفکتانت های آمفوتریک نیز شناخته می شوند، دارای مراکز کاتیونی و آنیونی هستند که به یک مولکول متصل هستند. سورفکتانت های زویتریونی کمتر از سورفکتانت های آنیونی، کاتیونی و غیر یونی رایج هستند. این سورفکتانت ها بسیار ملایم هستند و به ویژه برای استفاده در محصولات مراقبت شخصی و پاک کننده های خانگی مناسب هستند. آنها با تمام کلاس های دیگر سورفکتانت ها سازگار هستند و در حضور غلظت های بالای الکترولیت ها، اسیدها و قلیاها محلول و موثر هستند. این سورفکتانت ها ممکن است حاوی دو گروه باردار با علائم متفاوت باشند. در حالی که بار مثبت تقریباً همیشه آمونیوم است، منبع بار منفی ممکن است متفاوت باشد (کربوکسیلات، سولفات، سولفونات). این سورفکتانت ها دارای خواص پوستی عالی هستند. آنها اغلب در شامپوها و سایر محصولات آرایشی و بهداشتی و همچنین در مایعات ظرفشویی دستی به دلیل خاصیت کف کنندگی زیاد استفاده می شوند. نمونه بارز سورفکتانت زویتریونی لئورامیدوپروپیل بتائین و لسیتین است که در شکل ۱۱ د نشان داده شده است [۳ و ۱۲].

### ۴- کاربرد سورفکتانت ها

سورفکتانت ها معمولاً در شکل گیری محصولات استفاده می شوند. به دلیل تطبیق پذیری سورفکتانت ها را در محصولات متنوعی مانند روغن موتور، محصولات دارویی، شوینده های لباسشویی و سایر محصولات تمیز کننده خانه، گل حفاری و مواد

سورفکتانت های آنیونی پس از انحلال در آب باعث ایجاد یک یون سورفکتانت با بار منفی می شوند [۳ و ۱۲]. این ماده پرکاربردترین نوع سورفکتانت برای شستشو، مایعات ظرفشویی و شامپوها به دلیل خاصیت پاک کنندگی عالی است. بیشتر سورفکتانت های آنیونی یون های کربوکسیلات، سولفات و سولفونات هستند. متداول ترین سورفکتانت های آنیونی آلکیل سولفات ها، آلکیل اتوکسیلات سولفات ها و صابون ها هستند. سورفکتانت های آنیونی نسبتاً غیر سمی هستند. زنجیره مستقیم یک گروه آلیفاتیک C12-C18 اشباع/غیراشباع است. پتانسیل حلالیت در آب سورفکتانت با وجود پیوندهای دوگانه در آن تعیین می شود. در محلول، سر دارای بار منفی است. سورفکتانت به ویژه در دور نگه داشتن کثیفی از پارچه ها و از بین بردن باقی مانده های نرم کننده پارچه از پارچه ها خوب است [۱۲]. شکل ۱۱ الف ساختار سورفکتانت آنیونی، سدیم دودسیل سولفات را نشان می دهد.

### ۳-۲- سورفکتانت های کاتیونی

سورفکتانت های کاتیونی در محلول، سر دارای بار مثبت است. آنها عوامل امولسیون کننده خوبی هستند. این سورفکتانت ها همچنین باکتری کش های خوبی هستند و برخی به عنوان ضد عفونی کننده موضعی استفاده می شوند. خواص میکروب کشی آنها باعث می شود که آنها به ویژه در ضد عفونی کننده های دستشویی و حمام مفید باشند. سورفکتانت های کاتیونی به سایت های دارای بار منفی جذب می شوند. آنها می توانند به این مکان ها متصل شوند و پارچه را با احساس نرم و راحت ارائه دهند. به همین دلیل اغلب به عنوان نرم کننده پارچه استفاده می شود [۳ و ۱۲]. نمونه مناسبی از سورفکتانت کاتیونی در شکل ۱۱ ب نشان داده شده است.

### ۳-۳- سورفکتانت های غیر یونی

این نوع سورفکتانت ها که در محلول های آبی یونیزه نمی شوند و به دلیل گروه آبدوست خود، از نوع غیر قابل تفکیک هستند، مانند الکل، فنل، اتر، استر یا آمید. این سورفکتانت ها بار الکتریکی ندارند که باعث می شود در برابر غیرفعال شدن سختی آب مقاوم باشند. آنها چربی زدای عالی هستند که در محصولات لباسشویی، پاک کننده های خانگی و مایعات ظرفشویی دستی



یک رشته یا قطره یکنواخت پوشیده شده شروع می شوند که در آن غلظت سطح زمان کافی برای متعادل شدن داشته است، در حالی که در چاپ جوهرافشان تولید سریع سطح جدید منجر به توزیع سورفکتانت می شود که فاصله زیادی با تعادل دارد [۲]. به طور خاص، مطالعات کمی برای اثرات سورفکتانت ها بر ادغام قطرات توضیح داده اند و این علی رغم این واقعیت که سورفکتانت ها در طبیعت همه جانبه هستند و حذف آنها در محیط های تجربی دشوار است [۲۲]. پدیده برخورد قطرات بر بسترهای جامد بیش از یک قرن به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. فرآیندی که در بسیاری از کاربردهای صنعتی از جمله پوشش اسپری، رسوب دهی، چاپ جوهر افشان، خنک کننده اسپری، هضم باران در توربین های گاز، اسپری محصول، یخ زدن هواپیما استفاده می شود [۳ و ۱۳]. تغییر شکل ناشی از تنش سطحی و شکستن یک قطره کشیده یا نخ مایع معلق در یک سیال لزج با استفاده از سورفکتانت ها یک رویداد مهم در بسیاری از فرآیندهای سیال از جمله تشکیل امولسیون، اختلاط در سیستم های سیال چند فازی، پوشش دهی، و چاپ جوهر افشان است [۱۶ و ۲۳]. عمل سورفکتانت ها دینامیک سطح مشترک را با پیامد های مهمی بر رفتار کلی جریان چند فازی تغییر می دهد. به عنوان مثال، آنها می توانند به شدت بر تعداد قطرات یا حباب هایی که در یک مخلوط تشکیل می شوند، رفتار امواج سطح مشترک، اتمیزه کردن، ادغام و پدیده های فروپاشی تأثیر بگذارند. همه این پدیده ها تأثیر زیادی بر نتیجه تعدادی از کاربرد های صنعتی و زیست محیطی دارند [۵]. جریان حبابی نقشی مهمی در انواع کاربردهای فنی مانند راکتورهای ستون حبابی، فرآیندهای شناورسازی یا تصفیه فاضلاب دارد. در این برنامه ها، عوامل فعال سطحی، به اصطلاح سورفکتانت ها، وجود دارند. سورفکتانت ها یا یکی از عوارض جانبی آلودگی هستند یا عمداً برای تأثیرگذاری بر تعامل بین فازها اضافه می شوند [۲۴].

میکرو سیالیک<sup>۲</sup> مطالعه سیالات در مقیاس میکروسکوپی است. این یک حوزه مطالعاتی با طیف وسیعی از کاربردها، مانند تحویل دارو، تراشه های تشخیصی و میکرو راکتورها است [۱۶ و ۲۵]. قطرات در سیستم های میکرو سیال در دنیای واقعی نسبت سطح به حجم زیادی دارند که نیروهای سطحی را مهم می کند. تغییر شکل یک قطره در یک جریان برشی ساده در تعدادی از سیستم های جاری صنعتی و بیولوژیکی اهمیت اساسی دارد [۱۷]

شناور مورد استفاده در غنی سازی سنگ معدن بسیار مفید هستند [۲]. سورفکتانت بخش ضروری از زندگی روزمره هستند. فرآیندهای مختلف خانگی و تجاری، مانند تمیز کردن، مرطوب کردن، امولسیون کردن و اهداف مختلف دیگر، نیاز به استفاده از فعل و انفعال سیال، چه با سیال و چه با مواد جامد دارند. سورفکتانت ها همچنین بخش مهمی از ریه های انسان هستند که به فرآیند تنفس کمک می کنند. سورفکتانت ها در جایی معرفی می شوند که سیالات متقابل باید رفتار خاصی از نظر تنش سطحی، قابلیت مرطوب شدن و غیره داشته باشند تا بتوانند یک کار خاص را انجام دهند. این ترکیبات خواص مکانیکی را تغییر می دهند و برای سهولت فرآیند اضافه می شوند [۱۰].

سورفکتانت ها تقریباً در تمامی فیزیک های مربوط به جریان چندفازی نقش داشته اند و از این رو از موضوعات جالب برای محققان است. سورفکتانت ها بر ضخامت لایه در جریان های پوششی<sup>۱</sup> پراکندگی امواج سطحی<sup>۲</sup>، دینامیک و ضخامت لایه نازک سیال پخش شده<sup>۳</sup> و طول عمر حباب ها، فوم ها و امولسیون ها تأثیر می گذارند [۲ و ۲۱-۲۰]. در دهه های اخیر، کاربردهای سورفکتانت ها به حوزه های با فناوری بالا مانند چاپ الکترونیک، بیوتکنولوژی، میکروالکترونیک و تحقیقات ویروسی گسترش یافته است [۲ و ۸]. مطالعات قبلی به تأثیر سورفکتانت ها در طیف وسیعی از هندسه های جریان مختلف، از جمله تغییر شکل قطره ای، پل ها و رشته های مایع<sup>۴</sup>، باریکه های سیال<sup>۵</sup>، تشکیل رشته های مکرر<sup>۶</sup>، جریان های لایه نازک<sup>۷</sup> و دینامیک قطع شدن جت های پیوسته<sup>۸</sup> پرداخته اند [۲]. کار اخیر بر روی شکست رشته های مایع توسط مطالعات اخیر، اهمیت سورفکتانت ها را در رفتار شکستگی به ویژه در اطراف ناحیه گلوگاه<sup>۹</sup> شکستگی نشان داد. با این حال، علی رغم برخی شباهت ها، ویژگی های خاصی از تشکیل قطره در چاپ جوهر افشان در حالت قطره تحت کنترل وجود دارد که این مسئله را کاملاً از مواردی که قبلاً در نظر گرفته شده بود متمایز می کند [۸]. اول، مقیاس های طولی و زمانی کاملاً متفاوت هستند. فرآیند چاپ جوهر افشان به ترتیب با مقیاس های طولی و زمانی میکرومتر و میکروثانیه مشخص می شود. در نتیجه، انتقال سورفکتانت تحت تأثیر سرعت سطح و اصلاح آن توسط تنش های مارانگونی قرار می گیرد که اثرات پخش در سطح<sup>۱۰</sup> و تبادل حجمی<sup>۱۱</sup> سورفکتانت برای چاپ جوهر افشان ناچیز است. دوم، اکثر مطالعات قبلی از شرایط اولیه

<sup>7</sup> Thin Film Flows

<sup>8</sup> Pinch-off Dynamics of Continuous Jets

<sup>9</sup> Neck Region

<sup>1</sup> Surface Diffusion

<sup>1</sup> Bulk Exchange

<sup>1</sup> Microfluidic

<sup>1</sup> Coating Flows

<sup>2</sup> Dispersion of Surface Waves

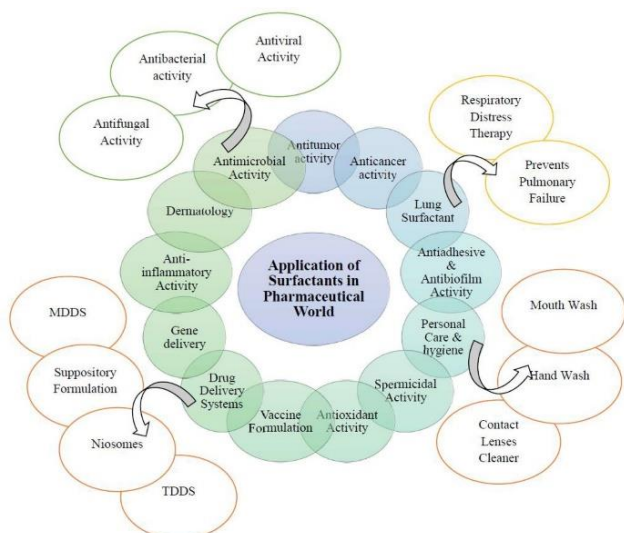
<sup>3</sup> Dynamics and Thicknesses of Spreading Films

<sup>4</sup> Liquid Bridges and Threads

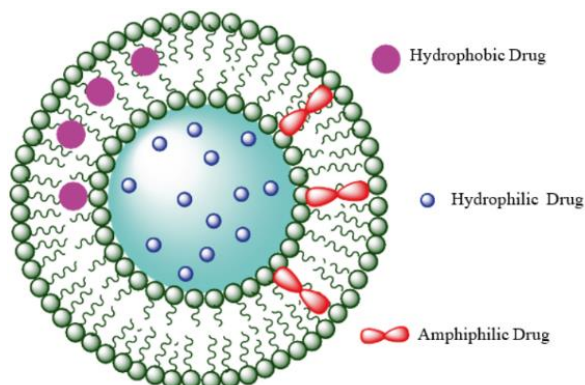
<sup>5</sup> Filaments

<sup>6</sup> Repeated Thread Formation

در مناطق با خاصیت مشابه در مسیل ها جذب شوند. این بدان معنی است که ذرات دارویی آبدوست در هسته مسیل که از محلول آبی تشکیل شده جذب می شود. ذرات دارویی با خاصیت آبگریز در قسمت دم های آبگریز سورفکتانت های تشکیل دهنده مسیل و ذرات دارای خاصیت دوگانه در بین دو سری از سورفکتانت ها جذب می شوند. به این ترتیب، به راحتی این ذرات دارویی همراه با حرکت سیال منتقل می شوند.



شکل ۱۲ کاربرد سورفکتانت ها در پزشکی و داروسازی [۲۹]



شکل ۱۳ کاربرد سورفکتانت ها در داروسازی [۲۹]

کاربرد دیگر پزشکی سورفکتانت ها در واکسن سازی است. سورفکتانت های خاصی تحت عنوان QS-21 استخراج می شوند که هم پاسخ های ایمنی با واسطه سلولی و هم آنتی بادی را افزایش می دهد و به عنوان یک کمکی در واکسن های زیر واحد برای درمان بیماری های جدی مانند HIV-1، ویروس هرپس سیمپلکس، ریو ویروس، پلاسمودیوم فالسیپاروم مالاریا، ملانوم و غیره استفاده می شود. اخیراً شرکت نوواواکس از این QS-21

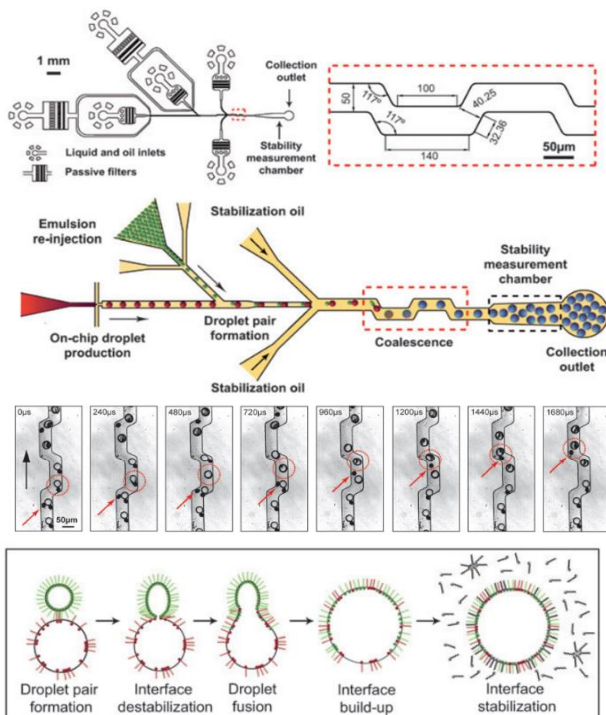
و [۲۶]. کاربردهای احتمالی شامل تشکیل و رئولوژی امولسیون ها، دستگاه های امولسیون کننده، ترکیب پلیمری، بازیابی نفت و مطالعه گلبول های قرمز و غیره خواهد بود [۲۶-۲۷]. مطالعاتی نشان می دهد که حتی سورفکتانت ها در پیش بینی وضع آب و هوا و شرایط جوی می تواند نقش اساسی داشته باشد [۲۸]. در ادامه، جهت آشنایی با نحوه عملکرد سورفکتانت ها به برخی از کاربرد های مهم با جزئیات و فیزیک مربوطه تشریح خواهد شد.

#### ۴-۱- کاربرد های پزشکی و دارویی

ویژگی ها و توانایی های منحصر به فرد فوق العاده، این سورفکتانت ها را به کاندیدای بالقوه ای برای طیف وسیعی از کاربردها در زمینه های مختلف زیست پزشکی مانند پوست، دارورسانی، درمان ضد سرطان، درمان سورفکتانت، فرمولاسیون واکسن، محصولات مراقبت بهداشت شخصی و بسیاری موارد دیگر تبدیل می کند [۲۹]. آنها به طور عمده عمدتاً به عنوان تثبیت کننده عمل می کنند. خاصیت خودآرایی سورفکتانت ها یک عملکرد بسیار قدرتمند برای سیستم های دارورسانی است. اکثر محصولات دارویی حلالیت آبی ضعیفی از خود نشان می دهند و از این نظر، سورفکتانت ها برای تأثیرگذاری بر حلالیت محصولات اجتناب ناپذیر هستند. در نوشیدنی های دارویی، سورفکتانت ها برای حل شدن ویتامین D، E، سایر مواد دارویی و سایر ترکیبات روغن ضروری استفاده می شوند. سورفکتانت ها در فرمولاسیون پمادها و همچنین در مورد کرم ها، روان کننده ها و ژل ها مفید هستند. همچنین، آنها برای افزایش میزان جذب دارو و نفوذ دارو استفاده می شوند. علاوه بر آن، سورفکتانت ها نیز برای تثبیت فرمولاسیون های نیمه جامد استفاده می شوند [۲۹]. در طول دهه ها، بسیاری از محققان فعالیت های ضد میکروبی، ضد چسب، آنتی بیوفیلم، ضد التهابی و آنتی اکسیدانی سورفکتانت ها را با توجه به کاربرد آن در اهداف دارویی گزارش کرده اند. شکل ۱۲ خلاصه ای از مهمترین کاربردهای پزشکی سورفکتانت ها به نمایش گذاشته شده است.

در حوزه دارورسانی از خاصیت تشکیل مسیل ها در بالاتر از غلظت بحرانی (CMC) سورفکتانت ها استفاده می شود. همانطور که در شکل ۱۳ مشخص است، ذرات دارویی با سه خاصیت آبدوست، آبگریز و دوگانه آبدوست-آبگریز تولید می شوند. هر یک از این خاصیت ها باعث می شود که ذرات دارویی

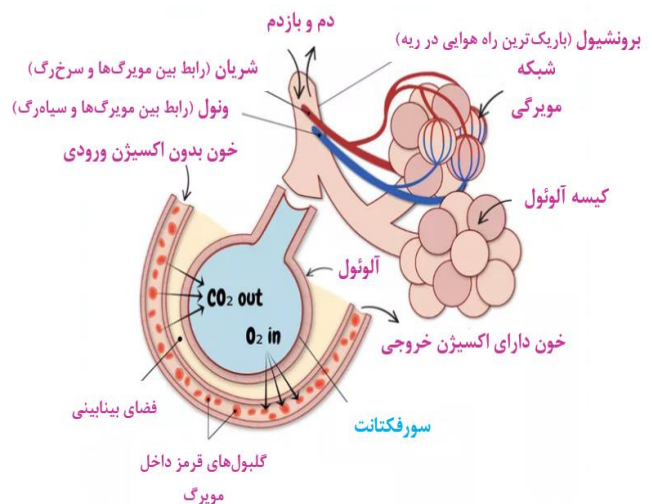
پزشکی [۳۲] و امولسیون سازی با قطرات دو یا چند جزئی که در صنایع غذایی، داروسازی و لوازم آرایشی [۳۳] استفاده می شود. قطرات حاصل از این فرآیند می توان برای آزمایش های شیمیایی برای ساخت ترکیبات شیمیایی جدید یا تجزیه و تحلیل نتایج برخی از روش ها استفاده کرد. نمونه ای از همجوشی قطرات در شکل ۱۵ نشان داده شده است. پس از ایجاد قطرات با استفاده از اتصالات T شکل یا دستگاه های متمرکز کننده جریان یا هر وسیله مناسب دیگری با سورفکتانت در مرزهای آنها، می توان این قطرات را در مسیرهای میکرو حرکت داد. قطرات مواد شیمیایی مختلف که دارای سورفکتانت جذب شده در مرز خود هستند، می توانند در مسیرهای میکرو پشت سر هم حرکت کنند (سورفکتانت جذب شده در سطح مشترک دلیل حرکت جداگانه آنها است). هنگامی که این قطرات وارد یک محفظه آغازگر آزمایشی گسترده تر در بین مسیرهای باریک می شوند، در ورود مجدد به مسیر باریک، قطره جلویی با انسداد مواجه می شود و بنابراین قبل از ورود مجدد با قطرات دیگر مواد شیمیایی که از عقب می آیند، ترکیب می شود و در نتیجه همجوشی را ممکن می سازد. دلیل اصلی ترکیب شدن قطرات وجود سورفکتانت ها است که تنش سطحی هر دو قطره را کاهش داده و از طرفی سر آبدوست آنها در هر دوسیال قطرات قابل حل است. این قطره نهایی با یک ترکیب جدید را می توان از نظر ماهیت آن در انتهای دیگر مسیر بررسی کرد.



شکل ۱۵ فرآیند همجوشی قطرات با استفاده از سورفکتانت ها [۳۴]

به عنوان کمکی برای فرمولاسیون واکسن کووید-۱۹ (کورونا) استفاده می کند [۲۹].

علاوه بر کاربردهای پزشکی که تا به حال اشاره شد، سورفکتانت ها بصورت طبیعی در بدن ما تولید و استفاده می شوند که مهم ترین آن سورفکتانت های تولید شده در سیستم تنفسی است. آلوئول ها جایی هستند که ریه ها و خون در طی فرآیند دم و بازدم، اکسیژن و دی اکسید کربن را تبادل می کنند. ریه های انسان دارای ۳۰۰ میلیون حباب مانند آلوئول است که منطقه اصلی تبادل گاز را تشکیل می دهد [۱۰]. این آلوئول ها با لایه مایع نازک پوشیده شده اند تا از سطوح سلولی ظریف خود محافظت کنند. بنابراین آلوئول ها را می توان به عنوان کیسه های پر از هوا که با آب پوشانده شده اند به تصویر کشید (شکل ۱۴). این یک سطح مشترک آب و گاز در تمام آلوئول ها ایجاد می کند. سورفکتانت هایی که به طور طبیعی در ریه ها وجود دارند، تنش سطحی را کاهش می دهند. این سورفکتانت ها به عنوان سورفکتانت ریوی شناخته می شوند که در واقع یک کمپلکس لیپوپروتئین فعال سطحی (فسفولیپوپروتئین) است که دائماً توسط سلول های آلوئولی موجود در دیواره آلوئول ایجاد می شود. با توجه به عملکرد سورفکتانت ها در کاهش تنش سطحی، وجود آنها ریه را قادر می سازد تا سطح آلوئولی بزرگی را که برای تبادل گاز کارآمد ضروری است، حفظ کند.



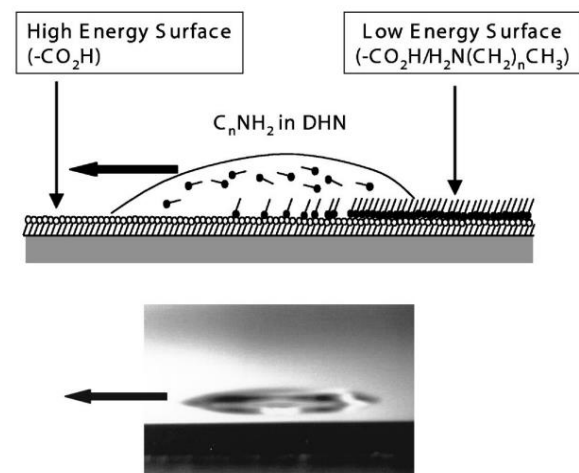
شکل ۱۴ نقش سورفکتانت ها در سیستم تنفسی انسان [۳۰]

## ۴-۲- همجوشی قطره ای

همجوشی قطرات دارای سورفکتانت در بسیاری از کاربردها از جمله میکرو راکتورها [۳۱]، تولید ترکیبات و انجام آزمایش های

### ۴-۳- حرکت قطره ای خودپیشران

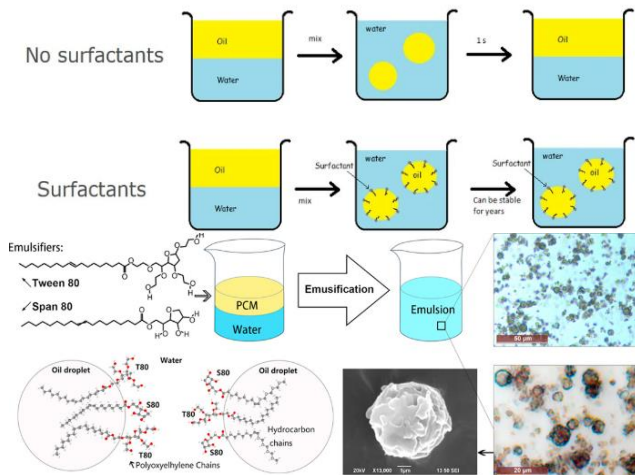
سورفکتانت ها را می توان در دستگاه های میکروسیال برای حرکت قطره ای خودپیشران استفاده کرد [۱۰]. با پوشاندن یک لایه نازک از ترکیب با سر آنیونی در مسیری که قطرات باید از آنجا حرکت کنند، وقتی قطره ای با یک سورفکتانت دارای قطبیت کاتیونی رها می شود، سرهای کاتیونی سعی می کنند خود را روی سرهای آنیونی بچسبانند و از این رو یک گرادیان انرژی تولید می کنند که قطره را به جلو می راند. شکل ۱۶ این فیزیک را نشان می دهد.



شکل ۱۶ حرکت قطره ای خودپیشران با استفاده از سورفکتانت ها [۳۵]

### ۴-۴- تثبیت کننده امولسیون ها

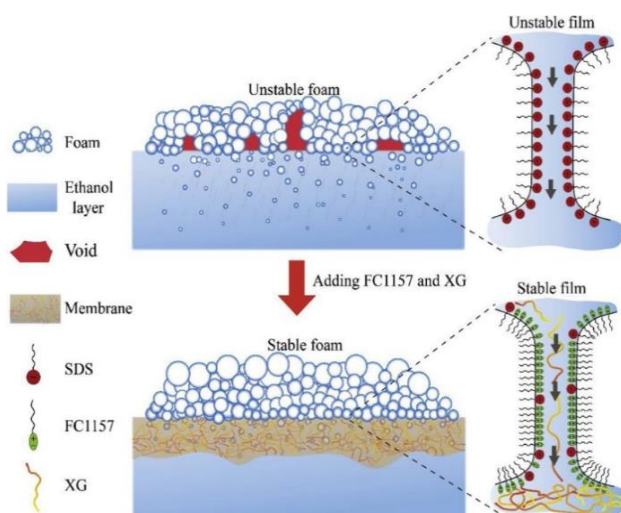
امولسیون مخلوطی از دو یا چند مایع غیرقابل اختلاط است. امولسیون ها در تعدادی از محصولات روزانه مورد استفاده قرار می گیرند. می توان مثال هایی مانند سس مایونز، کرم های سالاد، وینگرت، سس ها را در صنایع غذایی ارائه کرد. در داروها و لوازم آرایشی به صورت کرم، پماد، روغن کبد ماهی و همچنین در فرآیندهای روانکاری مورد استفاده هستند [۲۷ و ۳۶]. سورفکتانت ها در پایدارسازی این امولسیون ها استفاده می شوند. قطرات موجود در امولسیون می توانند به طور نامطلوب به هم پیوند بخورند یا شکسته شوند. سورفکتانت ها جذب شده در مرز قطرات به منظور محافظت از این رویداد نامطلوب استفاده می شود. اکنون وقتی قطرات با سورفکتانت در مرزهای خود نزدیک می شوند، یکدیگر را دفع می کنند و از این رو اندازه و ساختار قطرات را حفظ می کنند. شکل ۱۷ این فرآیند را به نمایش گذاشته است.



شکل ۱۷ پایدارسازی امولسیون ها با استفاده از سورفکتانت ها [۳۷-۳۸]

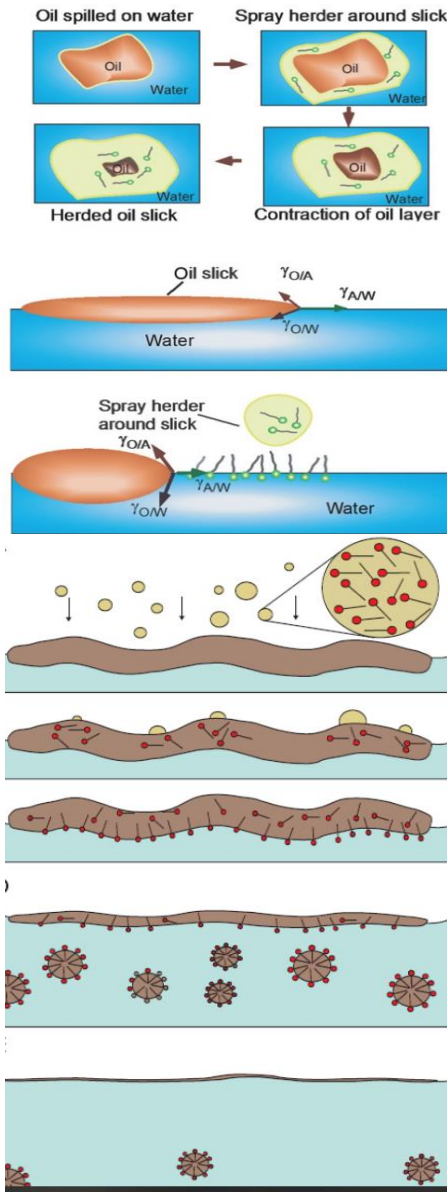
### ۴-۵- فوم های آتش نشانی

فوم ها مخلوطی از گاز با روغن یا آب هستند که در آن گاز به صورت پراکنده در مایع وجود دارد. سورفکتانت های استفاده شده پایداری کف را افزایش می دهند و همچنین به خاموش کردن آتش کمک می کنند. سورفکتانت های موجود در داخل فوم ها، مولکول های گاز را در بین آنها به دام می اندازند. عملکرد فوم های آتش نشانی از طریق خفه کردن آتش، جلوگیری از مخلوط شدن هوا با بخارات قابل اشتعال، جدا کردن شعله ها از سطح سوخت و خنک کردن سوخت و سطح آن است. البته برای افزایش پایداری این ترکیب از پلیمر های افزودنی به همراه سورفکتانت ها استفاده می شود [۱۰]. شکل ۱۸ فیزیک این مسئله را به نمایش گذاشته است.



شکل ۱۸ پایدارسازی فوم های آتش نشانی با استفاده از سورفکتانت ها [۳۹]

۴-۶- پاکسازی آلودگی لکه های نفتی ناشی در دریا

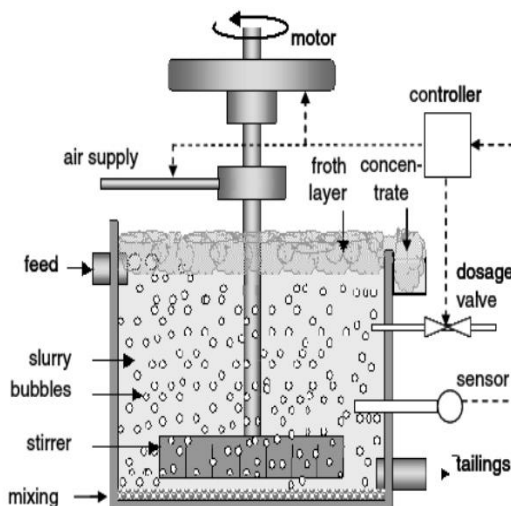


شکل ۱۹ مکانیزیم از بین بردن لکه های نفتی با استفاده از سورفکتانت ها [۴۰-۴۱]

نشت نفت در دریا معمولاً ناشی از تخلیه از کشتی های در حال حرکت، پالایشگاه ها و پایانه های نفتی و غیره است. این نشت ها تهدیدی برای محیط زیست دریاها هستند. برای حذف آن، محلول سورفکتانت با استفاده از هواپیما یا کشتی در دو حالت اضافه می شوند. حالت اول به محیط اطراف لکه نفتی و به آب دریا اضافه می شوند [۴۰]. یک گرادیان تنش سطحی ایجاد می شود. این گرادیان تنش سطحی در واقع ترشوندگی محیط آبی اطراف لکه را زیاد کرده و این اتفاق نفت را مجبور می کند تا در مرکز لکه متراکم و از گسترش آن جلوگیری شود، بنابراین کار حذف روغن آسان تر می شود. تا جای ممکن این لکه متراکم نفت را با استفاده از تجهیزات مختلف از سطح دریا جمع آوری و خارج می کنند. در حالت دوم، سورفکتانت ها در امتداد لکه نفت اضافه می شود [۴۱]. به دلیل اضافه شدن سورفکتانت ها و کاهش تنش سطحی لکه نفتی به قطرات ریزتر تبدیل می شوند. پراکندگی قطرات کوچک در یک حجم آب آسان تر است و قطرات کوچک ممکن است به راحتی توسط میکروب های موجود در آب تجزیه شوند. شکل ۱۹ هر دو مکانیزیم از بین بردن لکه های نفتی را به نمایش گذاشته است.

۴-۷- استخراج مواد معدنی

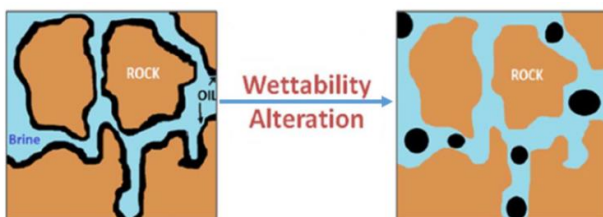
نمونه معروف جریان حبابدار تحت تأثیر سورفکتانت شناورسازی کف است که برای اولین بار در فرآوری مواد معدنی برای جداسازی مواد آبریز و آبدوست ایجاد شد. سنگ معدن خام خرد شده و در آب حل می شود تا دوغاب تشکیل شود [۲۴] و [۴۲]. سپس از یک سورفکتانت برای آبریز کردن مواد معدنی مورد نظر استفاده می شود. دوغاب به یک ستون حباب به اصطلاح سلول شناورسازی که هوادهی می شود، منتقل می شود. ذرات آبریز به حباب هایی می چسبند که به سطح سلول شناورسازی می رسند و در آنجا کف ایجاد می کنند که می توان آن را استخراج کرد. امروزه از شناورسازی کف در بازیافت کاغذ و تصفیه فاضلاب نیز استفاده می شود [۲۴]. شکل ۲۰ شماتیک یک سلول فلوتاسیون و تأثیر سورفکتانت ها را بر یک ازدحام حباب نشان می دهد.



شکل ۲۰ استخراج مواد معدنی با استفاده از سورفکتانت ها [۲۴]

## ۴-۸- باز یابی بهبود یافته نفت

علاوه بر نفت در حالت عادی، بخش قابل توجهی از ذخایر نفتی جهان را ماسه های نفتی و قیر تشکیل می دهند، مانند ذخایر آبرتای کانادا. برای باز کردن قفل این ذخایر، از روش های بخار درجا استفاده شده است. با این حال، چنین روش هایی از انتشار گازهای گلخانه ای فراوان موانع عملیاتی پرخطر، هزینه های سرمایه بالا و آثار زیست محیطی رنج می برند. این مسائل استفاده از تزریق بخار را برای بهبود بازیافت شن های نفتی و قیر محدود می کند. از این رو، نیاز فوری به توسعه نوع جدیدی از فناوری برای مقابله با این مسائل در بازیافت ماسه های نفتی و قیر وجود دارد. در میان گزینه های مختلف موجود، سورفکتانت ها راه حل های بالقوه ای برای بهبود عملکرد بازیابی با تغییر ویژگی های فیزیکوشیمیایی ماسه های نفتی و قیر هستند. بسیاری از سوالات اساسی مانند نحوه تعامل سورفکتانت ها با قیر در شرایط فشار و دمای بالا و نحوه رفتار امولسیون روغن در دمای بالا بی پاسخ باقی مانده است. این چالش های جدید باید قبل از استفاده از سورفکتانت ها به عنوان یک افزودنی مؤثر به بخار، به درستی مورد توجه قرار گیرند [۴۶].



شکل ۲۱ بازیابی بهبود یافته نفت با استفاده از سورفکتانت ها [۴۷]

## ۴-۹- ریزراکتورها

راکتورهای کف یکپارچه<sup>۳</sup> و راکتورهای با سایز میلیمتری<sup>۴</sup> به دلیل مزایایی مانند مساحت سطح بزرگ، نرخ انتقال جرم بالا، افت فشار کم و سهولت افزایش مقیاس نسبت به فناوری راکتور معمولی، علاقه تحقیقاتی زیادی را در صنعت و دانشگاه به دست آورده اند. راکتور کف یکپارچه شامل جریان دو فاز و یک کاتالیزور یکپارچه است. جریان درون کانال های یکپارچه متشکل از قطارهای حباب های گاز و اسلاگ های مایع، با تشکیل یک کف دو فازی در محفظه ای چسبیده زیر کانال یکپارچه تولید می شود. برای بهبود راندمان این نوع راکتورها، نیاز به درک رابطه بین نرخ انتقال جرم و سایر پارامترهای مهم است. برای سیستم های دو فازی گاز-مایع، یکی از عوامل اصلی که هم بر

نفت در قرن گذشته منبع اصلی انرژی بوده و بوده است و اقتصاد در مقیاس جهانی هنوز تا حد زیادی به آن وابسته است [۴۳]. پس از تکنیک های بهره برداری سنتی، که شامل مکانیسم های طبیعی (بازیابی اولیه) و سیلابی (بازیابی ثانویه) می شود، تا یک سوم تا ۵۰ درصد از نفت اصلی در محل ممکن است از میدان نفتی استخراج شود [۱۰ و ۴۳]. تکنیک های تولید اضافی، یا فرآیندهای بهبود یافته بازیابی نفت، نفت باقی مانده را که هنوز به دام افتاده است، هدف قرار می دهند [۴۳]. سورفکتانت ها به مخزن (سنگ بستر) وارد می شوند که دو عملکرد را انجام می دهند که تنش سطحی را کاهش و قابلیت ترشوندگی را تغییر می دهند، که بازیابی نفت باقی مانده را ممکن می سازد [۱۰]. مکانیسم های اصلی جریان یافتن نفت از طریق سورفکتانت عبارتند از کاهش تنش سطحی، تغییر ترشوندگی سنگ مخزن، و افزایش ویسکوزیته سیال جابجایی از طریق تشکیل میکروامولسیون. در مورد اول، نیروهای کپیلاری به دلیل وجود دو با چند سیال غیرقابل اختلاط در منافذ سنگ وجود دارد. این نیروهای کپیلاری باعث می شود مقدار زیادی نفت در مناطق پر آب مخزن باقی بماند. کاهش تنش سطحی بین آب و نفت، این نفت باقیمانده به دام افتاده بخاطر نیروی کپیلاری را با کاهش نیروهای کپیلاری بازیابی می کند [۴۴]. مورد دوم، ترشوندگی توزیع سیالات را در مخزن کنترل می کند. اعتقاد بر این است که مکانیسم اصلی افزایش بازیابی نفت در سنگ کربنات ها با استفاده از سورفکتانت ها، تغییر ترشوندگی است. برای شرایط مخلوط آبگریز (یا روغن دوست)، سنگ مخزن ترجیحاً نفت را می خورد و نفت در ماتریس سنگ مخزن به دام می افتد. سورفکتانت ها می توانند ترشوندگی سنگ را به حالت آبدوست تغییر دهند. معمولاً اعتقاد بر این است که افزایش بازیافت نفت زمانی اتفاق می افتد که سنگ بیشتر در آب خیس شود. این به این دلیل است که آب به درون ماتریکس سنگ نفوذ می کند و نفت را جابجا می کند، که منجر به کاهش اشباع باقیمانده نفت و بهبود بازیافت نفت می شود (شکل ۲۱) [۴۴]. در مورد سوم، میکروامولسیون ها به عنوان مخلوط های ترمودینامیکی پایدار و نسبتاً شفاف از نفت، آب و سورفکتانت تعریف می شوند که برای بازیابی بهبود یافته نفت شیمیایی بسیار مهم هستند. میکروامولسیون ها قادر به کاهش نیروهای مویرگی از طریق ایجاد تنش سطحی بسیار کم بین نفت و آب هستند که منجر به بازیابی بیشتر اشباع روغن باقیمانده به دام افتاده در مویرگی می شود [۴۴-۴۵].

<sup>3</sup> Monolith Froth Reactors

<sup>4</sup> Millimeter-Sized Reactors

<sup>1</sup> Natural Driven Mechanisms (Primary Recovery)

<sup>2</sup> Water Flooding (Secondary Recovery)

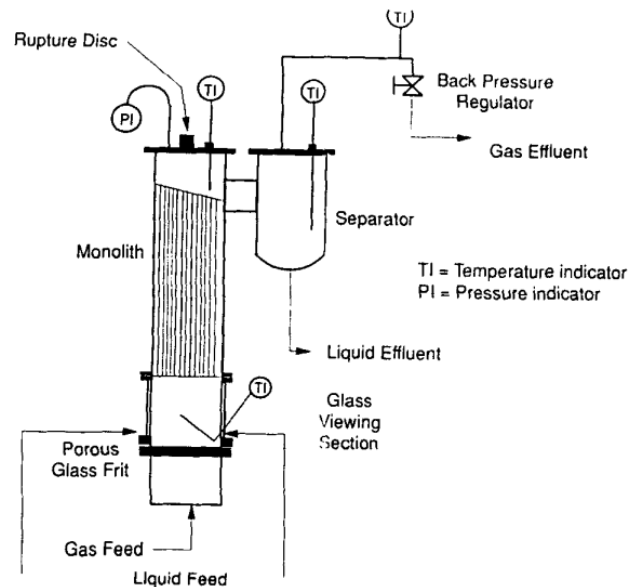
### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله مواد فعال سطحی (سورفکتانت ها) و تأثیر آن بر جریان سیالات چندفازی مطالعه شد. نحوه عملکرد سورفکتانت ها و تأثیر حضور آنها در سطح مشترک دوفاز به عوامل مختلفی مانند محلول یا نامحلول بودن سورفکتانت ها با تعریفی خاص بستگی دارد. همچنین، انواع سورفکتانت ها از روی بار الکتریکی سر آبدوست قابل دسته بندی بوده و خواص آنها فرق می کند. سورفکتانت ها در کاربردهای مهم صنعتی و زندگی روزمره وجود دارند. با توجه به دامنه وسیع این کاربردها، سورفکتانت ها به عنوان یکی از عوامل موثر بر جریان چند فازی نیاز به مطالعه روزافزون دارد. شناخت بهتر این مواد می تواند در دستکاری و بهینه سازی کاربردهای شامل جریان سیال چندفازی بسیار مفید باشد.

### ۶- مراجع

- [1] Cui, Y., A computational fluid dynamics study of two-phase flows in the presence of surfactants, *University of New Hampshire*, Durham, England, (2011).
- [2] Antonopoulou, E., Harlen, O. G., Rump, M., Segers, T., and Walkley, M. A., Effect of surfactants on jet break-up in drop-on-demand inkjet printing, *Physics of Fluids*, Vol. 33, No. 7, pp. 072112, (2021).
- [3] Sanjeev, A., Jog, M. A., and Manglik, R. M., Computational simulation of surfactant-induced interfacial modification of droplet impact and heat transfer, in *ILASS Americas, 21st Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Orlando, FL, May 18-21, USA, (2008).
- [4] Teng, C.-H., Chern, I.-L., and Lai, M.-C., Simulating binary fluid-surfactant dynamics by a phase field model, *Discrete and Continuous Dynamical Systems-B*, Vol. 17, No. 4, pp. 1289-1307, (2012).
- [5] Soligo, G., Roccon, A., and Soldatia, A., Coalescence of surfactant-laden drops by Phase Field Method, *Journal of Computational Physics*, Vol. 376, pp. 1292-1311, (2019).
- [6] Goodarzi, F. and Zendejboudi, S., Effects of salt and surfactant on interfacial characteristics of water/Oil systems: Molecular dynamic simulations and Dissipative Particle Dynamics, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 58, pp. 8817-8834, (2019).

هیدرودینامیک و هم بر سرعت انتقال جرم فازها تأثیر بسزایی دارد، وجود عوامل فعال سطحی (سورفکتانت ها) است. سورفکتانت ها در فصل مشترک گاز و مایع جذب می شوند و تنش سطحی را کاهش می دهند [۷]. شکل ۲۲ شماتیک یک ریز راکتور را نشان می دهد.



شکل ۲۲ شماتیک یک ریز راکتور [۷]

### ۴-۱۰- قطرات فوق پخش شونده

کنترل ترشوندگی بسترهای جامد توسط قطرات آبی، با توجه به بسیاری از کاربردهای جالب مانند فناوری پوشش، بهبود بازیافت نفت، دارورسانی، آفت کش ها و علف کش ها مورد نیاز هستند [۹]. فوق پخش شونده گسترش غیرمنتظره سریع و کامل قطرات آبی مملو از سورفکتانت بر روی بسترهای آبگریز است، پدیده ای که در دهه های گذشته توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است [۴۷]. سورفکتانت مسئول این پدیده هستند گیرند و با کاهش تنش سطحی بین محلول اسپری و سطح هدف به پخش محلول ها مانند آفت کش ها کمک می کنند. در شکل ۲۳ یک قطره قبل و بعد از اضافه کردن سورفکتانت های فوق پخش کننده مشاهده می شود.



شکل ۲۳ قرارگیری یک قطره روی سطح قبل و بعد از اضافه کردن سورفکتانت های فوق پخش کننده [۴۸]

<sup>1</sup> Superspreading

- [18] Herrada, M.A., Ponce-Torres, A., Rubio, M., Eggers, J., and Montanero, J.M., Stability and tip streaming of a surfactant-loaded drop in an extensional flow. Influence of surface viscosity, *J. Fluid Mech.*, Vol. 934, pp. A26, (2022).
- [19] Badmus, S. O., Amusa, H. K., Oyehan, T. A., and Saleh, T. A., Environmental risks and toxicity of surfactants: overview of analysis, assessment, and remediation techniques, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 28, No. 44, pp. 62085–62104, (2021).
- [20] Bazhlekov, I., Numerical simulation of drop coalescence in the presence of film soluble surfactant, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1487, pp. 351-359, (2012).
- [21] Hayashi, K., Motoki, Y., van der Linden, M. J. A., Deen, N. G., Hosokawa, S., and Tomiyama, A., Single contaminated drops falling through stagnant liquid at low Reynolds Numbers, *Fluids*, Vol. 7, No. 2, pp. 55-78, (2021).
- [22] Martin, D. W. and Blanchette, F., Simulations of surfactant effects on the dynamics of coalescing drops and bubbles, *Physics of Fluids*, Vol. 27, pp. 012103, (2015).
- [23] Young, Y.-N., Booty, M. R., Siegel, M., and Li, J., Influence of surfactant solubility on the deformation and breakup of a bubble or capillary jet in a viscous fluid, *Physics of Fluids*, Vol. 21, pp. 072105, (2009).
- [24] Steinhausen, M., Numerical simulation of single rising bubbles influenced by soluble surfactant in the spherical and ellipsoidal regime, *M.Sc. Thesis, Department of Mathematics Mathematical Modelling and Analysis, Technical University Darmstadt, Darmstadt, Germany*, (2018).
- [25] Palssona, S., Siegel, M., and Tornberg, A.-K., Simulation and validation of surfactant-laden drops in two-dimensional Stokes flow, *Journal of Computational Physics*, Vol. 386, pp. 218-247, (2019).
- [26] Soligo, G., Roccon, A., and Soldati, A., Deformation of clean and surfactant-laden droplets in shear flow, *Meccanica*, Vol. 55, pp. 371–386, (2020).
- [27] Urbina-Villalba, G., An algorithm for emulsion stability simulations: Account of flocculation, coalescence, surfactant adsorption and the process of ostwald ripening, *Int. J. Mol. Sci.*, Vol. 10, pp. 761–804, (2009).
- [28] Prisle, N. L., Asmi, A., Topping, D., Partanen, A.-I., Romakkaniemi, S., Dal Maso, M., Kulmala, M., Laaksonen, A., Lehtinen, K. E. J., McFiggans, G., and Kokkola, H., Surfactant effects in global simulations
- [7] Haghnegahdar, M., Boden, S., and Hampel, S., Investigation of surfactant effect on the bubble shape and mass transfer in a milli-channel using high-resolution microfocus X-ray imaging, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 87, pp. 184-196, (2016).
- [8] Antonopoulou, E., The role of surfactants in jet break-up for inkjet printing, *PhD Thesis, Woodhouse, Leeds, United Kingdom*, (2020).
- [9] Theodorakis, P. E., Müller, E. A., Craster, R. V., and Matar, O. K., Modelling the superspreading of surfactant-laden droplets with computer simulation, *Soft Matter*, Vol. 11, pp. 9254-9261, (2015).
- [10] Tariq, A., Phase-Field simulation of surfactant adsorption onto flat and droplet interfaces, *M.Sc. Thesis, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China*, (2012).
- [11] Yulianti, K., Gunawan, A. Y., Soewono, E., and Mucharam, L., Effects of an insoluble surfactant on the deformation of a falling drop towards a solid surface, *Journal of Computer Science & Computational Mathematics*, Vol. 3, No. 1, pp. 7-12, (2013).
- [12] Davea, N. and Joshi, T., A concise review on surfactants and its significance, *International Journal of Applied Chemistry*, Vol. 13, No. 3, pp. 663-672, (2017).
- [13] Hasegawa, T., Karasawa, M., and Narumi, T., Modeling and measurement of the dynamic surface tension of surfactant solutions, *J. Fluids Eng.*, Vol. 130, No. 8, pp. 081505, (2008).
- [14] Ahmed, E., Breaking Down Surfactants: What they are, how they work, and their role in the pandemic, *dispersa.ca*, Sep. 25, (2020): <https://www.dispersa.ca/blog/what-are-surfactants-and-how-do-they-work/>.
- [15] Mukherjee, S., Berghout, P., and Van den Akker, H. E. A., A lattice boltzmann approach to surfactant-laden emulsions, *American Institute of Chemical Engineers Journals*, Vol. 65, No. 2, pp. 811-828, (2019).
- [16] Jin, F., Gupta, N. R., and Stebe, K. J., The detachment of a viscous drop in a viscous solution in the presence of a soluble surfactant, *Physics of Fluids*, Vol. 18, pp. 022103, (2006).
- [17] Xu, J.-J., Li, Z., Lowengrub, J., and Zhao, H., A level-set method for interfacial flows with surfactant, *Journal of Computational Physics*, Vol. 212, pp 590-616, (2006).



- [39] Yu, X., Jiang, N., Miao, X., Zong, R., Sheng, Y., Li, C., and Lu, S., Formation of stable aqueous foams on the ethanol layer: Synergistic stabilization of fluorosurfactant and polymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 591, pp. 124545, (2020).
- [40] Gupta, D. Sarker, B., Thadikaran, K., John, V., Maldarelli, C., and John, G., Sacrificial amphiphiles: Eco-friendly chemical herders as oil spill mitigation chemicals, *Science Advances*, Vol. 1, No. 5, pp. e1400265., (2015).
- [41] Kjeilen-Eilertsen, G., Jersak, J. M., and Westerlund, S., Developing Treatment Products for Increased Microbial Degradation of Petroleum Oil Spills across Open-Water Surfaces, *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, 7–9 Feb. (2011).
- [42] Lai, M. -C., Tseng, Y. -H., and Huang, H., Numerical simulation of moving contact lines with surfactant by immersed boundary method, *Commun. Comput. Phys.*, Vol. 8, No. 4, pp. 735-757 (2010).
- [43] Druetta, P. and Picchioni, F., Simulation of surfactant oil recovery processes and the role of phase behaviour parameters, *Energies*, Vol. 12, pp. 983-1013, (2019).
- [44] Adila, A. S., Al-Shalabi, E. W., and Alameri, W., Geochemical investigation of hybrid Surfactant and low salinity/engineered water injections in carbonates: A numerical study, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 208, pp. 109367, (2022).
- [45] Sabirgalieva, N., Skartlien, R., and Rojas-Solorzano, L., DPD simulation of surface wettability alteration by added water-soluble surfactant in the presence of indigenous oil-soluble surfactant, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 57, pp. 1489-1494, (2022).
- [46] Ahmadi, M., and Chen, Z., Spotlight onto surfactant–steam–bitumen interfacial behavior via molecular dynamics simulation, *Scientific Reports*, Vol. 11, pp. 19660, (2021).
- [47] Shah, R. and Calderon, J., Developments in green surfactants for enhanced oil recovery march, aocs.org, Mar. 10, (2021): <https://www.aocs.org/stay-informed/inform-magazine/featured-articles/developments-in-green-surfactants-for-enhanced-oil-recovery-march-2021?SSO=True>.
- [48] Theodorakis, P. E., Smith, E. R., Craster, R.V., Müller, E. A., and Matar, O. K., Molecular dynamics simulation of the superspreading of surfactant-laden droplets. A review, *Fluids*, Vol. 4, No. 176, pp. 1-23, (2019).
- of cloud droplet activation, *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, pp. L05802, (2012).
- [29] Das, B., Kumar, B., Begum, W., Bhattarai, A., Mondal, M. H., and Saha, B., Comprehensive review on applications of surfactants in vaccine formulation, therapeutic and cosmetic pharmacy and prevention of pulmonary failure due to covid-19, *Chemistry Africa*, Vol. 5, pp. 459–480, (2022).
- [30] Ahmed, E., Alveoil gas exchange, medizzy.com, Aug. 20, (2022), Available: <https://medizzy.com/feed/5115715>.
- [31] Hao, Y., Jin, N., Wang, Q., Zhou, Y., Zhao, Y., Zhang, X., and Lü, H., Dynamics and controllability of droplet fusion under gas–liquid–liquid three-phase flow in a microfluidic reactor, *RSC Adv.*, Vol. 10, pp. 14322-14330, (2020).
- [32] Gao, G., Chen, F.-J., Zhou, L., Su, L., Xu, D., Xu, L., and Li, P., Control of lipid droplet fusion and growth by CIDE family proteins, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular and Cell Biology of Lipids*, Vol. 1862, No. 10, pp. 1197-1204, (2017).
- [33] Whitby, C. P. and Bahuon, F., Droplet fusion in oil-in-water pickering emulsions, *Front. Chem.*, Vol. 6, pp. 213-227, (2018).
- [34] Mazutis, L., Baretta, J. -C., and Griffiths, A. D., A fast and efficient microfluidic system for highly selective one-to-one droplet fusion, *Lab Chip*, Vol. 9, pp. 2665-2672, (2009).
- [35] Lee, S. -W., Kwok, D. Y., and Laibinis, P. E., Chemical influences on adsorption-mediated self-propelled drop movement, *Phys. Rev. E*, Vol. 65, pp. 051602, (2002).
- [36] Posocco, P., Perazzo, A., Preziosi, V., Laurini, E., Priola, S., and Guido, S., Interfacial tension of oil/water emulsions with mixed non-ionic surfactants: comparison between experiments and molecular simulations, *RSC Adv.*, Vol. 6, pp. 4723-4729, (2016).
- [37] Zhang, X., Wu, J. -y., and Niu, J., PCM-in-water emulsion for solar thermal applications: The effects of emulsifiers and emulsification conditions on thermal performance, stability and rheology characteristics, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 147, pp. 211-224, (2016).
- [38] Laurén, S., Evaluation of emulsion stability by interfacial rheology measurements, biolinscientific.com, Nov. 10, (2020): <https://www.biolinscientific.com/blog/evaluation-of-emulsion-stability-by-interfacial-rheology-measurements>.

<https://inthefurrow.com/2021/04/21/adjuvants-surfactants/>.

[49] CHS Agronomy, Get to know adjuvants: Surfactants, inthefurrow.com, Apr. 21, (2021):