

**Review Paper**

**مقاله مروری**

**Scale Formation and the Use of  
Antiscalant to Control Scaling**

**تشکیل رسوب‌های معدنی و استفاده از آنتی  
اسکالانت برای کنترل آن**

**Saba Bahrami<sup>1</sup> and Reza Panahi<sup>2\*</sup>**

1- M.Sc., Chemistry and Chemical Engineering  
Research Center of Iran (CCERCI), Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Chemistry and Chemical  
Engineering Research Center of Iran (CCERCI),  
Tehran, Iran

\*Corresponding Author, Email:  
[Panahi@ccerci.ac.ir](mailto:Panahi@ccerci.ac.ir)

صبا بهرامی<sup>۱</sup> و رضا پناهی<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، پژوهشگاه  
شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران.

۲- استادیار، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران.  
\*نویسنده مسئول، ایمیل: [panahi@ccerci.ac.ir](mailto:panahi@ccerci.ac.ir)

Received: 10/05/2020

Revised: 06/09/2020

Accepted: 07/09/2020

© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۱

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷

© انجمن آب و فاضلاب ایران

**Abstract**

**چکیده**

Scaling is known as one of the most important issues and limitation in aqueous systems, which involved several industries. Applying an efficient, economic and environment friendly solution to control scale formation is challenging. Scaling prevents efficient heat transfer by forming an insulated layer on the surface of heating elements. Moreover, scaling increases the pressure drop in the process and consequently it raises maintenance costs and even leads to system shut down. Using antiscalants is considered the most promising method to control scale formation. To this end, antiscalants are added to the process water. These compounds have received a lot of attention due to the fact that they can control the deposition by the low values and coverage of several mechanisms and can be used simultaneously with the process and do not have significant waste. Antiscalants disrupt the scaling process through a variety of mechanisms including threshold effect, crystal modification, dispersion or sequestration. In the current study, scale formation process and the role of antiscalants are discussed.

تشکیل رسوب یکی از بزرگ‌ترین مشکلات و محدودیت‌ها در سیستم‌های آبی به حساب می‌آید که صنایع بسیاری با آن درگیر هستند. انتخاب روشی کارآمد، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست برای کنترل تشکیل رسوب، همواره چالش‌برانگیز بوده است. رسوب‌های معدنی با ایجاد عایق روی سطوح حرارتی سبب کاهش انتقال حرارت می‌شوند. رسوب هم‌چنین باعث تشدید افت فشار در فرآیندها و در نتیجه افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و در موارد بحرانی باعث از کار افتادن واحدهای فرآیندی می‌شود. استفاده از آنتی اسکالانت‌ها یکی از موثرترین راهکارها برای کنترل رسوب‌های معدنی است. بدین منظور آنتی اسکالانت به آب فرآیندی افزوده می‌شود. این ترکیبات از این جهت بسیار مورد توجه قرار گرفتند که با مقادیر کم و پوشش‌دهی چند مکانیسم، قابلیت کنترل رسوب را دارند و هم‌زمان با انجام فرآیند قابل استفاده هستند و پسماند قابل توجهی ندارند. آنتی اسکالانت‌ها از طریق یک یا مجموعه‌ای از مکانیسم‌ها شامل اثر آستانه‌ای، اصلاح کریستال، پراکندگی و به‌دام انداختن در تشکیل رسوب اختلال ایجاد می‌نمایند. در این مقاله فرآیند تشکیل رسوب و نقش آنتی اسکالانت‌ها بررسی شده است.

**Keywords:** Antiscalant, Aqueous system, Calcium sulfate, Scale.

**واژه‌های کلیدی:** آنتی اسکالانت، سیستم‌های آبی، رسوب، کلسیم سولفات

حفره‌ای، خوردگی بین دانه‌ای، فرآیند آلیاژزدایی، خوردگی سایشی و خوردگی تنش‌ی اتفاق می‌افتد. در سیستم‌های آبی صنعتی عموماً خوردگی کلی در سطوح مکانیسم غالب خوردگی است که به واسطه فرآیند الکتروشیمیایی صورت می‌گیرد. سطوح فلزی در تماس با بخار یا اسیدها به مرور زمان دچار زنگ زدگی و نازک شدن می‌شود (Dillon, 1995).

## ۲-۱- انواع بازدارنده‌های خوردگی در صنایع

در صنعت بازدارنده‌های متنوعی برای کنترل این خوردگی به کار گرفته می‌شود. از بین این بازدارنده‌ها می‌توان به بازدارنده‌های فیلمی محافظت کننده، بازدارنده‌های غیرفعال کننده آندی، بازدارنده‌های آلی و بازدارنده‌های آلیاژهای مسی اشاره کرد. در ادامه شرح مختصری در مورد انواع بازدارنده‌های خوردگی ارائه می‌شود (Esmacher, 2010).

### ۲-۱-۱- بازدارنده‌های فیلمی محافظت کننده (ته‌نشین شونده/کاتدی)

محافظت از خوردگی فولاد با استفاده از تشکیل لایه‌ای خنثی روی سطح فلز صورت می‌گیرد. این لایه واکنش کاتدی و آندی را ناقص می‌سازد. نتیجه ته‌نشینی ترکیبات معدنی در سایت‌های کاتدی با pH های بالا تشکیل فیلم محافظت کننده است. فسفات‌های معدنی نظیر ارتوفسفات و پلی فسفات‌ها و نمک‌های روی، ترکیبات رایجی هستند که به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند. موفقیت این روش به تشکیل لایه محدودکننده روی سایت‌های کاتدی و ممانعت از ته‌نشینی کنترل نشده است که منجر به تشکیل رسوب محافظ می‌شود. علاوه بر این فسفات‌های معدنی مانند بازدارنده‌های کاتدی عمل می‌کنند، قطبیت کاتدی را افزایش می‌دهند که نقش بازدارنده آنیونی را نیز ایفا می‌کنند. مقادیر بالای فسفات معدنی فولاد را در حضور اکسیژن در pH های تقریباً خنثی غیرفعال می‌کنند. در حضور مقادیر کم فسفات یا در میزان شوری بالا خوردگی حفره‌ای اتفاق می‌افتد (Esmacher, 2010).

### ۲-۱-۲- بازدارنده‌های غیرفعال کننده آندی

علاوه بر بازدارنده‌های ته‌نشینی کننده، بازدارنده‌های منفعل کننده (بازدارنده‌های آندی) استفاده گسترده‌ای دارند، این ترکیبات شامل کرومات، نیتريت، مولیبدات و ارتوفسفات هستند. کرومات بازدارنده عالی برای کنترل خوردگی است، اما نظارت‌ها باعث شده از استفاده آن کاسته شود. نیتريت در غلظت‌های

آب حاوی مواد محلولی است که در شرایط خاص قادر به ایجاد رسوب معدنی<sup>۱</sup> هستند. برخی از این مواد که غالباً از جنس نمک‌ها هستند، حتی در غلظت‌های بسیار پایین نیز می‌تواند سبب تشکیل رسوب شوند. تشکیل رسوب معدنی به فرآیندی است که در آن به هم چسبیدن ناخواسته نمک‌های معدنی و تشکیل و رشد کریستال متراکم در فصل مشترک آب-جامد (سطح تجهیزات) اتفاق می‌افتد. تشکیل رسوب در عملیات صنعتی مختلفی مانند کریستالیزاسیون، تقطیر، نمک‌زدایی، تبخیر، تبادل حرارت مایعات اتفاق می‌افتد. نوع رسوب تابع محتویات معدنی آب یا سیال فرآیندی است. عواقب جدی تشکیل رسوب از است. تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی جوش‌آور منجر به کاهش ضریب انتقال حرارت، افزایش افت فشار و گرفتگی و خوردگی لوله‌ها می‌شود. مشکلات جدی دیگری نیز در اثر تشکیل رسوب در ژنراتورهای بخار، بویلرها، برج‌های خنک کن، لوله‌ها و همه تجهیزات فرآیندی مرتبط با آب ایجاد می‌گردد که می‌تواند کل فرآیند را مختل نماید. تشکیل رسوب سبب افزایش هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه‌های انرژی برای پمپاژ سیال در صنایع می‌شود. از تشکیل رسوب‌های معدنی به طرق مختلف می‌توان جلوگیری کرد. افزودن مواد شیمیایی که به عنوان آنتی اسکالانت<sup>۲</sup> اثر می‌کنند، یکی از موثرترین روش‌ها برای کنترل رسوب‌های معدنی است (Somerscales, 1990). در این میان بعضی از بازدارنده‌های رسوب در کنترل خوردگی فلزات در محدوده‌های وسیعی از pH های مختلف نیز موثرند. این بازدارنده‌ها با مکانیسم‌های مختلف از جمله کمپلکس‌سازی با کاتیون‌های فلزی اثر می‌کنند. این مواد در ترکیب با یون‌های فلزی اثر ضد خوردگی دارند. این ترکیبات با تشکیل لایه محافظ از سطح فلزات محافظت می‌کنند (Dimadis et al., 2005). در این مقاله به بررسی فرآیند تشکیل رسوب و معرفی ترکیبات کنترل کننده خوردگی و رسوب پرداخته شده است.

## ۲- کنترل خوردگی به موازات کنترل رسوب در فرآیندهای آبی

خوردگی از بین رفتن کلی سطح یک فلز یا بخشی از آن طی یک واکنش شیمیایی یا یک فرآیند فیزیکی در تماس با سیال تعریف می‌شود. خوردگی در سیستم‌های آبی به هشت شکل مختلف خوردگی کلی، خوردگی گالوانی، خوردگی شکافی، خوردگی

مشخصی موثر است و به حضور اکسیژن نیازی ندارد و از این لحاظ برای سیستم‌های بسته مناسب است (Esmacher, 2010).

### ۳-۱-۲- بازدارنده‌های آلی

بازدارنده‌های آلی با جذب بر روی کل سطح فلز اثر می‌کنند. بازدارنده‌های کاتیونی آلی بار کلی مثبت و بازدارنده‌های آلی آنیونی بار کلی منفی دارند. بازدارنده‌های آلی از سمتی که بار منفی دارند روی سطح فلز جذب می‌شوند. بازدارنده‌های کاتیونی (با بار مثبت) مانند آمین‌ها یا بازدارنده‌های آنیونی (با بار منفی) مانند سولفونات‌ها با توجه به این‌که بار سطح فلزی مثبت است یا منفی روی سطح جذب می‌شوند (Beer and Corvetto, 2007).

### ۴-۱-۲- بازدارنده‌های آلیاژهای مسی

موثرترین بازدارنده برای مس و آلیاژهای مسی تریازول‌های آروماتیک مانند بنزوتریازول و تولیل تریازول هستند. این ترکیبات با اکسید مس موجود در سطح فلزی پیوند برقرار و لایه شیمیایی محافظ ایجاد می‌کنند. علاوه بر این بعد از پیوند با سطح فلز تریازول‌ها با مس موجود در محلول پیوند برقرار می‌کنند (Esmacher, 2010).

### ۲-۲- مکانیسم کنترل خوردگی و کنترل خوردگی در صنایع مختلف

پلیمرهایی با عامل‌های کلاته‌ای، فسفونات‌ها و فسفات‌ها برای کنترل خوردگی در جوش‌آورها استفاده می‌شود. کنترل خوردگی با استفاده از پلیمرها از طریق کمپلکس‌سازی، تخریب کریستال یا پراکندگی صورت می‌گیرد. در کمپلکس‌سازی پلیمر با آلودگی‌های آب خوراک جوش آور مانند کلسیم ترکیب می‌شود و در نتیجه کمپلکس‌های پلیمر-آلودگی محلول باقی می‌ماند و با جریان خروجی جوش‌آور از سیستم خارج می‌شود. تخریب کریستال آلودگی‌هایی که طی ته‌نشینی فازها تشکیل کریستال داده‌اند به این صورت است که طی برهم کنش پلیمر با هسته‌های در حال رشد، اندازه آن‌ها در حدی نگه‌داشته شود که دوباره تمایل به انحلال داشته باشند. در این مکانیسم کریستال‌ها در محدوده اندازه ناپایداری نگه‌داشته می‌شود که نرخ انحلال در مرحله تشکیل-انحلال بیش‌تر است. در مکانیسم انحلال، تشکیل ذرات پایدار (به‌طور خاص اکسید آهن که از آب خوراک به سیستم انتقال داده می‌شود) به‌طور موثری توسط پلیمرهای جذب شده روی سطح پوشش داده می‌شوند. جذب پلیمر دافعه الکترواستاتیکی بار سطح را بهبود می‌بخشد. این جریان از تجمع ذرات و تشکیل

ذرات بزرگ‌تر و چسبیدن ذرات به سطح داخلی جوش‌آور جلوگیری می‌کند. ذرات پراکنده شده در آب جوش‌آور به‌صورت سوسپانسیون کلوییدی نگهداری و از طریق جریان خروجی غلیظ از سیستم خارج می‌شوند. عامل‌های کلاته‌ای کمپلکس‌های پایداری با کلسیم و منیزیم در آب خوراک جوش‌آور تشکیل می‌دهند که از ته‌نشینی این ترکیبات رسوب‌زا جلوگیری می‌کند. افزودن میزان کم عامل‌های کلاته‌ای به پلیمرهای پراکنده‌کننده در تمیز نگه‌داشتن سطح جوش‌آور نقش به‌سزایی دارد. افزودن فسفات برای کنترل تشکیل رسوب و خوردگی موثر است. برای مثال جریان نمک‌ها و اورتوفسفات‌های موجود در جریان آب جبرانی<sup>۳</sup> ممکن است موجب ته‌نشینی کلسیم و منیزیم در آب جوش‌آور شود که مانند گل و لای از قسمت‌های با سختی بالاتر مانند نواحی تولید بخار از سیستم خارج می‌شود. همراه با ورودی جریان آب جبرانی که عاری از کلسیم و منیزیم است نیز ترکیبات فسفاتی برای کنترل خوردگی برای تنظیم pH به سیستم تزریق می‌شود، این روش در سیستم‌های فشار بالا بسیار موثر است. فسفات‌ها با عملکردی بافر گونه اسیدی یا قلیایی بودن جریان را تنظیم می‌کنند (Esmacher, 2010).

### ۲-۲-۱- کنترل خوردگی در سیستم‌های خنک‌کن

در سیستم‌های خنک‌کن با توجه به طراحی سیستم استفاده از جریان‌های یک گذر یا چند گذر، باز یا بسته بودن سیستم و آب مورد استفاده در سیستم خنک‌کن انتخاب روش کنترل خوردگی متغیر است. هدف از کنترل خوردگی جلوگیری از آلودگی سطح است. این فرآیند با ایجاد لایه محافظ روی سطح فلزی با استفاده از مواد شیمیایی کنترل می‌شود، این ترکیبات شیمیایی لایه‌ای منفعل‌کننده روی سطح فلز تشکیل می‌دهند که این لایه نقشی محافظ برای سطح ایفا می‌کند یا در انحلال لایه‌های اکسیدی مشکل ایجاد می‌کند (Dillon, 1995).

### ۲-۲-۲- کنترل خوردگی در سیستم‌های جوش‌آور

کنترل خوردگی در سیستم‌های جوش‌آور به‌علت پایین آوردن احتمال انفجار و نشتی در اتصالات این تجهیزات حائز اهمیت است. تمایل تشکیل رسوب در آب ورودی جوش‌آورها با کاهش سختی، زدایش مواد معدنی و سیستم‌های اسمز معکوس کاهش داده می‌شود. با این حال باقی‌ماندن این ترکیبات ممکن است ایجاد مشکل کند (Esmacher, 2010).

ترکیبات بازدارنده با تشکیل لایه مگنتیت محافظ روی فولاد اکسیژن محلول را از بین می‌برند. در دماهای زیر ۲۵۰ درجه

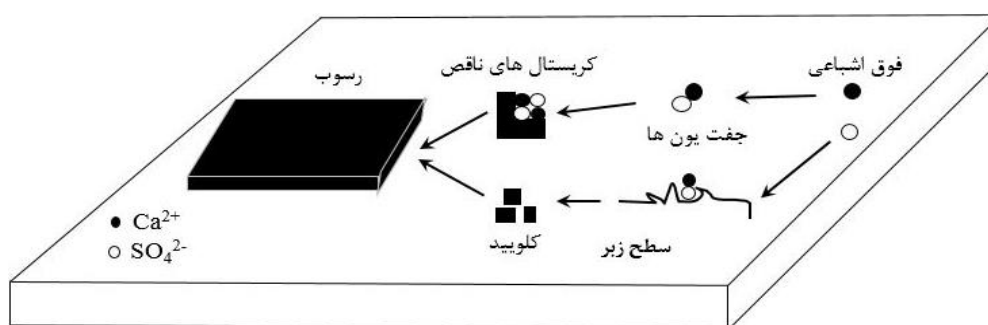
رسوب متشکل از ذرات کریستالی است. یک کریستال جامد شامل ساختاری شبکه‌ای از مولکول‌ها، اتم‌ها، یا یون‌ها است. فوق اشباع بودن محلول، شرط لازم یا به عبارت دیگر نیرو محرکه اصلی برای تشکیل کریستال است (Hoang, 2011). به طور کلی تشکیل رسوب روی یک سطح شامل مراحل آغاز<sup>۴</sup>، انتقال<sup>۵</sup>، چسبیدن<sup>۶</sup>، و پختگی<sup>۷</sup> است. در مرحله آغازین شرایط سطح برای تشکیل رسوب مهیا می‌شود (Kazi, 2015). در مرحله انتقال، ماده رسوب‌دهنده از توده سیال به سطح تجهیز (سطح انتقال حرارت) در سراسر لایه مرزی منتقل می‌شود. در مرحله چسبیدن، ذرات رسوب به سطح و به یکدیگر می‌چسبند. در این مرحله یون‌های نمک به دلیل نیروهای الکترومغناطیسی جذب سطح می‌شوند و به سطح می‌چسبند و هسته‌های کریستالیزاسیون را تشکیل می‌دهند. این هسته‌ها به تدریج رشد می‌کنند و لایه رسوب را تشکیل می‌دهند. با پایدار شدن رشد رسوب‌ها روی سطح و هم‌زمان با مراحل قبلی، رقابتی بین جدا شدن ذرات رسوب و لایه‌نشینی رسوب‌ها وجود دارد. حذف رسوب از سطح با مکانیسم‌های انحلال، سایش و لایه لایه شدن صورت می‌پذیرد. به محض تشکیل رسوب مرحله پختگی شروع می‌شود. در طول فرآیند پختگی، خواص مکانیکی رسوب‌ها به دلیل تغییرات شیمیایی یا ظاهری کریستال‌ها تغییر می‌کند (Kazi et al., 2015). این مراحل در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند.

سانتی‌گراد اکسیداسیون آهن موجب تشکیل هیدروکسید آهن می‌شود که به هماتیت تبدیل می‌شود و در دماهای بالاتر ۲۵۰-۳۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با اکسیداسیون مستقیم مگنتیت شکل می‌گیرد. در pH های بین ۸/۵-۱۲/۷ طی واکنش سطح فولاد در تماس با آب جوش به سرعت لایه نازک، چسبنده و بسیار محافظت کننده مگنتیت تشکیل می‌شود. لایه مگنتیت به گسترش تمایل دارد اما محدودیت رسیدن آلودگی‌های به سطح فلز زیر آن، ضخامت آن را در حالت تعادل نگه می‌دارد (Esmacher, 2010).

### ۲-۲-۳- کنترل خوردگی در سیستم‌های نمک زدایی

خوردگی حفره‌ای و شکافی در سیستم‌های نمک‌زدایی حرارتی از آب شور از جمله فلش چند مرحله‌ای، تقطیر چندمنظوره و اسمز معکوس بسیار شایع است که با بهبود جنس تجهیزات قابل کنترل است. استفاده از انواع فولاد ضد زنگ از جمله فولاد ضد زنگ مارتنزیتی، فریتی، آستنیتی و داپلکس برای ساخت تجهیزات، خوردگی سیستم‌ها را در شرایط دما و فشار بالا به تعویق می‌اندازد. استفاده از دیگر آلیاژهای فلزی نیز برای این منظور مرسوم است. وجود کلر در دماهای بالا موجب خوردگی حفره‌ای در سیستم می‌شود، پس حذف آن به جلوگیری از خوردگی کمک می‌کند (Malik, 1992).

### ۳- تشکیل رسوب و روش‌های کنترل آن



شکل ۱- فرآیند تشکیل رسوب (Amjad and Demadis, 2015)

رشد کریستال صورت می‌پذیرد. هسته‌های پایدار ذراتی بزرگتر از اندازه‌ی بحرانی هستند که به محض تشکیل در سیستم فوق اشباع به کریستال‌هایی قابل‌رویت تبدیل می‌شوند (Mullin, 2001). لایه‌های کریستالی با جذب مولکول‌ها یا جفت یون‌های رسوب‌دهنده، به رشد خود ادامه می‌دهند. اگر شرایط محلول مناسب باشد، رشد کریستال با جذب پیوسته مولکول‌ها، هم‌زمان با ته‌نشینی و انحلال از سایر سایت‌های رشد ادامه پیدا می‌کند

ته‌نشینی مواد کریستالی از توده محلول بر روی سایت تشکیل رسوب علاوه بر زمان کافی نیازمند هم‌زمانی فوق اشباعی و هسته‌زایی است که در ادامه توضیح داده می‌شوند. در هسته‌زایی به‌عنوان مرحله آغازین تشکیل رسوب، کوچک‌ترین تجمع پایدار از فاز کریستالی ایجاد می‌شود (Kazi et al., 2015). در این مرحله تعداد زیادی ذرات ریز تشکیل می‌شود که ته‌نشینی نمی‌شوند، اما به‌عنوان مکان‌هایی برای رشد کریستال عمل می‌کنند. در ادامه

(MacAdam and Parsons, 2004).

### ۱-۳- روش‌های کنترل رسوب

از روش‌های فیزیکی و شیمیایی برای از بین بردن رسوب استفاده می‌شود. شرح مختصری از این روش‌ها در ادامه گردآوری شده است. شستشوی فیزیکی به سه دسته هیدرولیکی، مکانیکی، اولتراسونیک تقسیم می‌شود. روش‌های شیمیایی نیز به دو صورت شستشوی شیمیایی و افزودن آنتی اسکالانت انجام می‌گیرند.

#### ۱-۱-۳- روش‌های فیزیکی (شستشوی فیزیکی)

شستشوی فیزیکی به واسطه شستشوی معکوس یا جریان معکوس، رسوب‌های تشکیل شده روی سطوح را از بین می‌برد. علاوه بر موارد یاد شده پاکسازی با هوا، شستشوی معکوس، رهاسازی، از جمله روش‌های فیزیکی دیگری است که اخیراً برای حذف رسوب به کار گرفته شده است. از میان این روش‌ها، روش‌های هیدرولیکی بیشترین کاربرد را داشته‌اند. پاکسازی با هوا یا هوازنی با عبور جریان هوا از محل رسوب برای از بین بردن رسوب‌های بازگشت‌ناپذیر استفاده می‌شود. این روش در بازه‌های مختلفی تکرار می‌شود تا رسوب را تا حد امکان از بین ببرد. این روش به دو صورت کم تکرار و پرتکرار انجام می‌شود. مدت زمان شستشوی معکوس با توجه به نوع و میزان رسوب متغیر است. رهاسازی در محل تشکیل رسوب با ایجاد گرادیان غلظت و با استفاده از نفوذ هوا صورت می‌گیرد. علاوه بر این روش‌ها شستشوی مکانیکی نیز به اشکال مختلف افزودن ذرات حامل، ارتعاش/چرخش، تکه‌تکه کردن برای از بین بردن رسوب با ایجاد تنش و تلاطم روی سطح رسوب گرفته استفاده می‌شود (Wang et al., 2014).

#### ۲-۱-۳- استفاده از روش‌های مکانیکی

از جمله روش‌های مکانیکی که برای از بین بردن رسوب استفاده می‌شود افزودن ذرات به جریان، ویبراسیون/چرخش و خراشیدن سطح رسوب گرفته است. افزودن ذرات به جریان به سه شکل افزودن ذرات معلق که نقش جاروب کننده سطوح را دارند، ذرات معلق که ایجاد تلاطم می‌کنند و ذرات معلق که در جریان ایجاد ارتعاش می‌کنند، صورت می‌گیرد. ویبراسیون/چرخش با ایجاد تنش یا تلاطم بالا روی سطح انجام می‌شود. خراشیدن سطح نیز با استفاده از ابزارهایی که رسوب را از سطح خراش می‌دهند انجام می‌شود (Wang et al., 2014).

### ۳-۱-۳- استفاده از امواج اولتراسونیک برای پاکسازی سطوح

امواج اولتراسونیک در فرآیندهای بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاپیتاسیون علت قدرت پاکسازی اولتراسونیک است. به‌خاطر امواج اولتراسونیک گره‌های فشاری و نواحی کم فشار در سیال ایجاد می‌شوند. در نواحی کم فشار حباب‌های کوچک شکل می‌گیرند. این حباب‌ها با گاز یا بخار پر می‌شوند و تا اندازه بحرانی رشد می‌کنند. زمانی که قطر حباب‌ها به قطر بحرانی رسید می‌ترکد. اگر حباب در نزدیکی سطح بترکد انفجار آن نامتقارن است و جت سیالی به سمت سطح ایجاد می‌شود. این جت‌ها سرعتی حدود ۴۰۰ کیلومتر بر ساعت دارند. همراه با انفجار حباب‌ها هم‌چنین امواج ناگهانی ایجاد و در محیط منتشر می‌شود. به‌همین دلیل پاکسازی اولتراسونیک روشی موثر در کاهش قطبش یونی و از بین بردن لایه رسوب روی سطح است. روش اولتراسونیک هم در محل تشکیل رسوب و خارج از محل تشکیل رسوب قابل انجام است. پارامترهای کلیدی روش اولتراسونیک فرکانس اولتراسونیک، غلظت توان و مدت زمان انجام فرآیند است. از فرکانس‌های پایین اولتراسونیک برای بهبود بازدهی پاکسازی استفاده می‌شود (Kunanz et al., 2014).

### ۲-۳- روش‌های شیمیایی

در روش‌های شیمیایی به‌علت استفاده از مقدار هم مولار با رسوب برای از بین بردن رسوب‌ها، حجم قابل توجهی از شوینده‌ها مورد نیاز است. این مسئله عواقب منفی برای سیستم و محیط زیست دارد؛ از طرفی بعضی رسوب‌ها نسبت به pH حساسیتی ندارند، بنابراین در این حالت شستشو با اسید یا باز تاثیر چندانی مشاهده نمی‌شود. از طرف دیگر برای انجام این روش‌ها باید فعالیت سیستم متوقف شود و بعد از شستشو فرآیند از سر گرفته شود. در بعضی موارد حین استفاده از شوینده‌ها آسیب‌هایی به سطوح وارد می‌شود که مانع از عملکرد صددرصدی سیستم می‌شوند. روش دیگر که از آن به‌عنوان افزودن آنتی اسکالانت یاد شده است، حین فرآیند، قابل انجام است و با استفاده از غلظت‌های پایین از تشکیل رسوب جلوگیری می‌کند. به‌همین دلیل آسیب قابل توجهی به محیط یا سطوح رسوب گرفته وارد نمی‌کند. شرح مفصلی در مورد این ترکیبات در بخش‌های آتی آورده شده است.

### ۴- آنتی اسکالانت‌ها

جلوگیری و کنترل تشکیل رسوب می‌تواند با افزودن مواد شیمیایی به‌نام آنتی اسکالانت به سیال انجام شود. آنتی اسکالانت‌ها نرخ رشد کریستال و ساختار کریستال را به‌طور

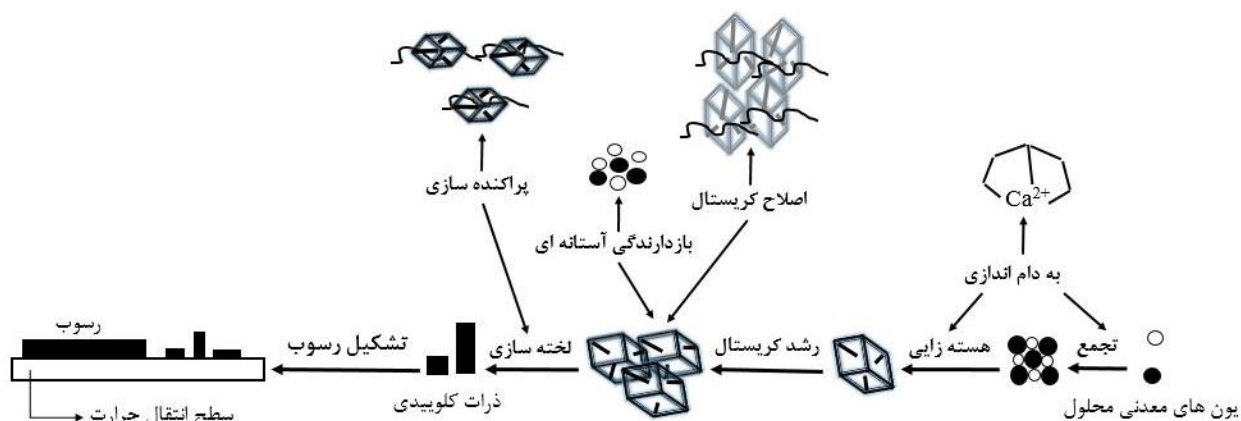


کمپلکس تشکیل می‌دهند و یون‌ها را غیرفعال می‌کنند. بنابراین یون‌ها با سایر عناصر یا یون‌ها که قابلیت تشکیل رسوب دارند، واکنش نمی‌دهند (Kolodynska, 2011). تغییر در ساختار کریستال ممکن است سبب انحلال مجدد رسوب به جای رشد کریستال شود. در مکانیسم اصلاح کریستال، آنتی اسکالانت‌ها بر روی سطح کریستال جذب می‌شوند. بدین ترتیب بر رشد کریستال‌ها اثر می‌گذارند و شکل نامنظم و غیر کریستالی به رسوب می‌دهند. در این مکانیزم، رشد کریستال‌های غیرمنظم بوده و رشد آن‌ها با تاخیر انجام شده یا متوقف می‌شود. همچنین کریستال‌ها حالت شکننده و نرم پیدا می‌کنند. پراکندگی به توزیع غیریکنواخت و پایدار مواد نامحلول در یک مایع اطلاق می‌شود. این مسئله زمانی اتفاق می‌افتد که آنتی اسکالانت به‌طور شیمیایی روی سطح کریستال جذب می‌شود و بار سطحی با چگالی بالا بر روی سطح ایجاد می‌نماید. بار سطحی ایجاد شده بین ذرات با بارهای همنام دافعه الکتریکی القا می‌کند و مانع تجمع آن‌ها شود. بدین ترتیب رشد ذرات کاهش می‌یابد و در نهایت باعث پراکندگی آن‌ها می‌شود (AL-Hamzah, 2014; Amjad and Koutsoukos, 2014; Nowack, 2003). مکانیزم اثرگذاری انواع آنتی اسکالانت‌های متداول در جدول ۱ ذکر شده است.

چشم‌گیری تغییر می‌دهند. آنتی اسکالانت‌ها می‌توانند با رسوب واکنش داده و پتانسیل تشکیل رسوب را کاهش دهند. همچنین برهم کنش‌های بین رسوب و سطح را به‌طریق فیزیکی مختل نمایند یا با تغییر کریستال‌ها، فرایند تشکیل رسوب را تحت تاثیر قرار دهند (Vidic et al., 2015).

#### ۴-۱- مکانیسم کارکرد آنتی اسکالانت‌ها

آنتی اسکالانت‌ها بر روی مراحل کریستالیزاسیون یا پختگی نظیر هسته‌زایی، رشد کریستال، تجمع و انتقال فاز تاثیر می‌گذارند. به‌طور کلی عملکرد آنتی اسکالانت‌ها از طریق یک یا مجموعه‌ای از مکانیسم‌های اثر آستانه‌ای<sup>۸</sup>، اصلاح کریستال<sup>۹</sup>، پراکندگی<sup>۱۰</sup> و یا به‌دام انداختن<sup>۱۱</sup> ایجاد می‌شود (شکل ۲) (Antony et al., 2011). اثر آستانه‌ای به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن آنتی اسکالانت در مقادیر کمتر از استوکیومتری از ته‌نشینی نمک‌ها در غلظت‌های بالاتر از حد حلالیت جلوگیری می‌کنند. در این مکانیسم آنتی اسکالانت از جفت شدن یون‌های رسوب دهنده جلوگیری کرده و آن‌ها را به‌صورت محلول در آب نگه‌می‌دارد (MacAdam and Parsons, 2004). آنتی اسکالانت‌های کلاته‌ای با مکانیسم به‌دام اندازی با یون‌های فلزی



شکل ۲- مکانیسم اثر آنتی اسکالانت و نقطه اثر آن‌ها (MacAdam and Parsons, 2004)

جدول ۱- رابطه نوع آنتی اسکالانت و مکانیزم حاکم در عملکرد آن‌ها

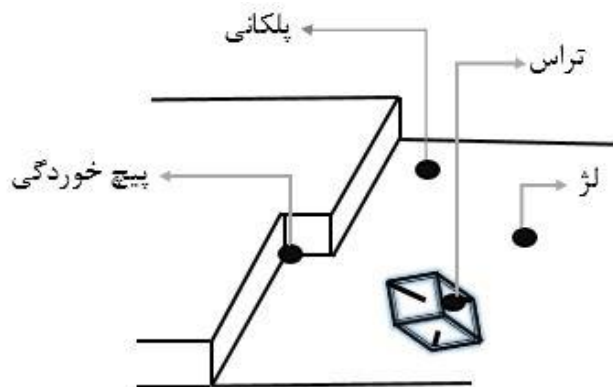
مراجع	مکانیزم حاکم	نوع آنتی اسکالانت
Antony et al. (2011); Kolodynska (2011); Knepper (2003); AL-Hamzah (2014); Amjad and Koutsoukos (2014); Nowack (2003)	بازدارندگی آستانه‌ای	پلی فسفات‌های معدنی، فسفات استرهای آلی و آمینو فسفات‌های آلی، آمینو کربوکسیلات‌ها، فسفینوپلی کربوکسیلات‌ها و فسفینوپلی سولفونات‌ها
	پراکندگی	هموپلیمرهای آکریلیک اسید، کوپلیمرهای پایدار آکریلیک اسید
	اصلاح کریستال	ترکیبات حاوی فسفر شامل پلی فسفات‌های معدنی، فسفات استرهای آلی، آمینو فسفات‌های آلی، فسفینوپلی کربوکسیلات‌ها، سولفونات‌ها پلیمرهای با جرم مولکولی پایین مانند: پلی آکریلیک اسید، پلی مالئیک اسید، پلی آمید، دندیمر پلی آمینو آمید، کربوکسی متیل اینولین
	به دام اندازی	آمینو کربوکسیلیک اسیدها، اتیلن دی آمین تتر استیک اسید، دی اتیلن تری آمین پنتا استیک اسید، پلی فسفونات‌ها، اتیلن تری آمین پنتا (متیلن فسفونیک اسید)

در سایت پلکانی است. با این حال جذب روی لژها به مقدار بیش‌تری آنتی اسکالانت نسبت به دو حالت دیگر نیاز دارد. همان‌طور که گفته شد نرخ رشد کریستال نیز به مکان جذب بستگی دارد. به‌همین دلیل تاخیر در رشد کریستال یا جلوگیری از آن با پوشش‌دهی کمی از سطح کریستال با استفاده از آنتی اسکالانت امکان پذیر است (Gunn, 1980; Wilson, 2004). در جدول ۲ رسوب‌های محتمل در صنایع مختلف و آنتی اسکالانت‌های مناسب برای رفع آن گردآوری شده است.

پیچ خوردگی‌ها، پلکانی‌ها و لژهای روی سطح کریستال برای جذب آنتی اسکالانت مناسب هستند (شکل ۳). مکان‌های پلکانی یا پیچ خوردگی فعال‌ترین سایت‌های رشد هستند. این نقاط برای جذب یون‌های آنتی اسکالانت نسبتاً کوچک بسیار مناسب هستند. جذب در راستای پلکانی‌ها برای مولکول‌های بزرگ احتمال کمتری دارد و این نوع آنتی اسکالانت‌ها روی لژها جذب می‌شوند. جذب آنتی اسکالانت روی پیچ خوردگی‌ها به غلظت پایین از آنتی اسکالانت نیاز دارد که این وضعیت برخلاف جذب

جدول ۲- رسوب‌های محتمل در صنایع شاخص و بازدارنده‌های مرتبط با آن (Amjad and Demadis, 2015)

رسوب معدنی	فرمول شیمیایی	صنایع مرتبط با رسوب	بازدارنده رسوب
کلسیم سولفات کلسیت باریت بروسیت مگنتیت	CaSO <sub>4</sub> CaCO <sub>3</sub> BaSO <sub>4</sub> Mg(OH) <sub>2</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	سیستم‌های خنک‌کن	سدیم هگزامتافسفات، سدیم تری پلی فسفات، هیدروکسی اتیلن دی فسفونیک اسید، فسفونوبوتان تری کربوکسیلیک اسید، آمینوتری متیلن فسفونیک اسید، هیدروکسی فسفونواستیک اسید، سدیم دو دسیل سولفات، آرژنین، گلوتامین، گلايسين، پلی متاکریلیک اسید، پلی آکریل آمید، بنزوتریازول
کلسیم سولفات کلسیت باریت بروسیت استرانسیم سولفات	CaSO <sub>4</sub> CaCO <sub>3</sub> BaSO <sub>4</sub> Mg(OH) <sub>2</sub> SrSO <sub>4</sub>	صنایع نفت و گاز	پلی فسفات‌ها، فسفات استر، فسفونات‌ها، هیدروکسی اتیلن دین دی فسفونیک اسید، فسفونوبوتان تری کربوکسیلیک اسید، آمینوتری متیلن فسفونیک اسید، هیدروکسی فسفونواستیک اسید، پلی آکرلیک اسید سولفوناتی، کربوکسی متیل اینولین
کلسیم سولفات کلسیت	CaSO <sub>4</sub> CaCO <sub>3</sub>	نمک‌زدایی حرارتی	پلی فسفونات، پلی مالئیک اسید، پلی کربوکسیلیک اسید، فسفونات‌ها، سدیم هگزامتافسفات، پلی آکرلیک اسید-آرولئین، پلی استایرن سولفونات، پلی مالئیک انهیدرید، پلی آمید، آلل پلی اتوکسی کربوسیلات، پلی آمینو آمید، پلی وینیل سولفونات، پلی گلوتامیک اسید
کلسیم سولفات کلسیت باریت بروسیت مگنتیت سیلیکا	CaSO <sub>4</sub> CaCO <sub>3</sub> BaSO <sub>4</sub> Mg(OH) <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	سیستم‌های ژئوترمال	اتیلن دی آمین تترا استیک اسید، نیتریلواستیک اسید، پلی کربوکسیلات‌ها
کلسیم سولفات کلسیت باریت بروسیت استرانسیم سولفات	CaSO <sub>4</sub> CaCO <sub>3</sub> BaSO <sub>4</sub> Mg(OH) <sub>2</sub> SrSO <sub>4</sub>	نمک‌زدایی غشایی	پلی فسفات‌ها، فسفونات‌ها، پلی آکرلیک اسید، پلی متاکریلیک اسید، پلی مالئیک اسید، هیدروکسی اتیلن دین-دی فسفونیک اسید
کلسیم سولفات کلسیت باریت بروسیت مگنتیت	CaSO <sub>4</sub> CaCO <sub>3</sub> BaSO <sub>4</sub> Mg(OH) <sub>2</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	جوش‌آورها	سدیم هگزامتافسفات، سدیم تری پلی فسفات، تتراپتاسیم پیروفسفات، تتراسدیم پیروفسفات، اتیلن دی آمین تترا استیک اسید، نیتریلواستیک اسید، پلی کربوکسیلات‌ها، پلی آکرلیک اسید، پلی متاکریلیک اسید، پلی مالئیک اسید، سیکلوهاگزیل آمین



شکل ۳- مویقت‌های احتمالی جذب آنتی اسکالانت (Amjad and Demadis, 2015)

#### ۲-۴- عوامل موثر بر کارکرد آنتی اسکالانت

غلظت و نوع آنتی اسکالانت، زمان ماند، دما و pH از عوامل موثر بر عملکرد آنتی اسکالانت‌ها هستند. به‌طور کلی افزایش زمان تماس در حضور آنتی اسکالانت موجب کاهش اثربخشی این ترکیبات می‌شود. افت دما یا افزایش غلظت آنتی اسکالانت نرخ تشکیل رسوب را کاهش می‌دهد و تاثیر آنتی اسکالانت را بهبود می‌بخشد. کارایی یک آنتی اسکالانت در مهار تشکیل رسوب، بستگی به غلظت آن دارد. در صورت کاهش میزان یونیزاسیون مولکول‌های آنتی اسکالانت بر اثر تغییر pH، میزان آنتی اسکالانت موثر و در نتیجه بازدهی عملکرد آن کاهش می‌یابد. به‌طور معمول، با افزایش غلظت آنتی اسکالانت تا میزان غلظت بهینه، میزان رسوب تشکیل شده کاهش می‌یابد. زمان مورد نیاز برای ظهور (دوره القایی) رسوب کلسیم سولفات با غلظت آنتی اسکالانت در محلول فوق اشباع متناسب است (Hoang et al., 2011).

#### ۳-۴- آنتی اسکالانت‌های متداول و گروه‌های عاملی موثر آن‌ها

آنتی اسکالانت‌ها ترکیبات معدنی یا آلی هستند که به سه دسته فسفات‌ها، ارگانوفسفونات‌ها و ترکیبات آلی تقسیم می‌شوند

که هر سه دسته شامل پلیمرهای سنتزی و طبیعی هستند. سدیم پلی فسفات‌ها شامل واحدهای P-O-P هستند که از آب زدایی یون‌های فسفات حاصل می‌شوند. این ترکیبات با اضافه شدن به محیط آبی، هیدرولیز شده و از طریق ایجاد پیوند بین اکسیژن ساختاری خود با یون کلسیم سبب کاهش تشکیل رسوب می‌شوند. در آنتی اسکالانت‌های فسفوناتی دو نوع گروه فعال دیده می‌شود. دسته اول فسفونات‌هایی که گروه فسفونات ( $PO(OH)_2$ ) آن‌ها با اتم کربن مولکول آلی پیوند می‌دهد. دسته دوم ترکیبات فسفینو-ارگانیک‌هایی هستند که پیوند C-P-C دارند. پلیمرهای مختلفی برای کنترل رسوب‌های معدنی استفاده می‌شوند. انواع ترکیبات آلی که برای جلوگیری از تشکیل رسوب استفاده می‌شوند، غالباً هموپلیمر یا کوپلیمرهایی با جرم مولکولی پایین و گروه‌های عاملی متنوع با بار منفی هستند. پلیمرهای کربوکسیلی دسته‌ای کلی از ترکیبات آلی هستند که در آن‌ها گروه عاملی کربوکسیل ( $COOH$ ) در ساختار زنجیری پلیمر تکرار می‌شوند (Vidic et al., 2015). متناسب با نوع مونومر استفاده شده در ساختار پلیمرها، گروه‌های عاملی کربوکسیلی، هیدروکسیلی، آمینی یا سولفوناتی در این ترکیبات دیده می‌شود (Amjad and Demadis, 2015). دسته بندی آنتی اسکالانت‌های متداول و گروه‌های عاملی آن‌ها در جدول ۳ داده شده است.

جدول ۳- دسته بندی آنتی اسکالانت‌ها و گروه‌های عاملی آن‌ها (Vidic et al., 2015)

نوع آنتی اسکالانت	گروه عاملی موثر	ترکیبات متداول
پلی فسفات‌های متراکم	پیوند P-O-P	سدیم تری پلی فسفات، سدیم هگزامتافسفات
فسفونات‌های معدنی	گروه $PO(OH)_2$ پیوند C-P-C	هیدروکسی اتان دی فسفونیک اسید و آمینوتری اتیلن فسفونیک اسید
پلی الکترولیت‌ها (پلیمرهای آلی)	گروه $COOH$ آمید $CONH_2$ سولفونات $RSO_3H$	هموپلیمرها: پلی آکریلیک اسید، پلی آکریل آمید، پلی استایرن سولفونات، پلی مالئیک اسید، پلی متاکریلیک اسید و هموپلیمرهای استایرن سولفونات کوپلیمرها: کوپلیمرهای مالئیک اسید-آکریلیک اسید، کوپلیمرهای مالئیک اسید-متاکریلیک اسید، کوپلیمر مالئیک اسید-آکریلات استر و پلی استایرن سولفونات



#### ۴-۴- نسل جدید آنتی اسکالانت‌ها

کنترل رسوب به دلیل الزام به صرفه‌جویی و استفاده مجدد آب اهمیت بسیاری در صنایع مختلف دارد. باقی ماندن آنتی اسکالانت‌ها در آب، سبب کاهش کیفیت آب و عدم امکان استفاده مجدد از آب به‌ویژه در کاربردهای خوراکی می‌شود. رفع این چالش‌ها نیازمند توسعه آنتی اسکالانت‌های جدیدی است. آنتی اسکالانت‌ها باید به‌صرفه، سازگار با سختی آب و دمای بالا و هماهنگ با منابع آبی باشند، همچنین این ترکیبات باید سمیت پایین و قابلیت تجزیه پذیری بالایی داشته باشند. ترکیبات معدنی فسفاتی و فسفونیکی به دلیل داشتن عامل‌های فسفردار با محیط سازگاری پایینی دارند. پلیمرهای سنتزی نیز به دلیل حساس بودن به pH و عدم زیست تخریب پذیری گزینه‌های ایده‌آلی برای استفاده به‌عنوان آنتی اسکالانت نیستند. به‌همین دلیل توسعه آنتی اسکالانت‌های سبز که غالباً طبیعی هستند، مورد توجه واقع شده‌اند. این ترکیبات همراه با کنترل رسوب، مزایایی هم‌چون سمیت پایین برای موجودات و زیست تخریب‌پذیری بالا همراه دارند. این آنتی اسکالانت‌ها می‌توانند برای کنترل رسوب در آب

با فشار و دمای مختلف مورد استفاده قرار گیرند. این ترکیبات با گروه‌های عاملی حلالیت‌پذیر خود نظیر کربوکسیل، هیدروکسیل، آمین توانایی کنترل تشکیل رسوب به‌عنوان عامل دیسپرسنت و کلاته‌ای را دارند. مشتقات این ترکیبات طبیعی می‌توانند جایگزینی برای آنتی اسکالانت‌های متداول باشند. در حال حاضر ترکیباتی بر پایه پلی آسپارتیک اسید به‌عنوان اثربخش‌ترین آنتی اسکالانت سبز شناخته می‌شوند. پلی آسپارتیک اسید یک پلی کربوکسیلیک اسید مصنوعی است که به‌عنوان آنتی اسکالانت، ترکیب ضد خوردگی، متفرق‌کننده، عامل کلاته‌ای و جاذب آب عمل می‌کند. ترکیبات مشتق شده از پلی آسپارتیک اسید سازگاری قابل‌قبولی با محیط‌زیست دارند (Hasson et al., 2011). مالئیک اسید، سیتریک اسید، گالیک اسید، دوپامین، هیستیدین، فنیلالانین، دی-گلوکونیک اسید-گاما لاکتون، سدیم گلوکونات، دی-گلوکونیک اسید و دی-مانوز مثال‌هایی از ساختارهای سازگار با محیط‌زیست و طبیعی هستند که قابلیت جلوگیری از تشکیل رسوب‌ها در مبدل‌های حرارتی را دارند. در ادامه در جدول ۴ ترکیبات سبزی که به کرات در مطالعات برای کنترل رسوب معدنی به‌کار گرفته شده‌اند، به اختصار آورده شده است.

جدول ۴- آنتی اسکالانت‌های سبز تکرار شده در مطالعات اخیر

مرجع	نوع رسوب	درصد کنترل	بازدارنده
Demadis et al. (2005)	سیلیکای کلوییدی کلسیم کربنات	۹۰ درصد	کربوکسی متیل اینولین
Kalpana et al. (2012)	کلسیم سولفات	۹۷-۱۰۰ درصد	پکتین متصل به پلی آکرلیک اسید
Chuhan et al. (2012)	کلسیم سولفات	۹۷/۷ درصد ۱۰۰ درصد	پکتین متصل به پلی آکرل آمید پکتین متصل به پلی(آکرل آمید-آمین)
Miksic et al. (2016)	کلسیم سولفات کلسیم کربنات	۹۲ درصد ۷۹ درصد ۸۹ درصد	پلیمر سوبا پلیمر شیر-کازئین الژینیک اسید
Zhang et al. (2017)	کلسیم کربنات	۹۰ درصد	کربوکسی متیل اینولین
Li et al. (2017)	کلسیم فسفات کلسیم کربنات	حدود ۹۰ درصد حدود ۹۰ درصد	کوپلیمر آکرلیک اسید TPEO/AA
Popov et al. (2017)	کلسیم سولفات	۸۰ و ۹۰ درصد	پلی آسپارتیک اسید و پلی اپوکسی سوکسینیک اسید
Zhang et al. (2017)	کلسیم اورتوفسفات کلسیم سولفات	۱۰۰ درصد ۹۱ درصد	کوپلیمری از مشتقات پلی آسپارتیک اسید PASPTU
Xue (2018)	کلسیم فسفات	۹۱ درصد	کوپلیمر(آکرلیک اسید/اتیلن گلیکول/ گلیسرول)
Karar and Naamoune (2018)	کلسیم کربنات	۸۰ درصد	سیتریک اسید
Yu (2019)	کلسیم کربنات	۸۰-۹۰ درصد	کربوکسی متیل سلولز

#### ۵- نتیجه‌گیری

بسیاری می‌شود. آنتی اسکالانت‌ها مواد شیمیایی بسیار موثری برای کنترل رسوب و جلوگیری از تشکیل آن هستند. این ترکیبات با مکانیزم‌های متنوعی از تشکیل رسوب جلوگیری

تشکیل رسوب در صنایع سبب بروز مشکلات فنی و اقتصادی

- (2005), "Inorganic foulants in membrane systems: Chemical control strategies and the contribution of 'green chemistry'", *Desalination*, 179 (1-3), 281-295.
- Dillon, C.P., (1995), *Materials of construction for once-through water systems*, MTI Publication No. 43, Nace International.
- Esmacher, M.J., (2010), *Corrosion control in industrial water systems*, Chapter 5, In: The Science and Technology of Industry Water Treatment, Amjad, Z. (ed.), pp. 319-342, Taylor & Francis Group.
- Hasson, D., Shemer, H., and Sher, A., (2011), "State of the art of friendly "green" scale control inhibitors: A review article", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 7601-7607.
- Hoang, T.A., Ang, H.M., and Rohl, V., (2011), "Effects of process parameters on gypsum scale formation in pipes", *Chemical Engineering and Technology*, 34, 1003-1009.
- Karar, A., and Naamoune, F., (2018), "Inhibition of calcium carbonate precipitation by citric acid", *Materials and Biomaterials Science*, 1(1), 19-23.
- Kazi, S.N., Liu, W., Li, H., and He, C., (2015), "Particulate matter: Interfacial properties, fouling, and its mitigation", In: Z., Amjad and K.D., Demadis (eds.), *Mineral Scales and Deposits Scientific and Technological Approaches*, pp. 141-168, Elsevier, Oxford, United Kingdom.
- Kolodynska, D., (2011), "The chelating agents of a new generation as an alternative to conventional chelators for heavy metal ions removal from different waste waters", In: R.Y., Ning, (ed.), *Expanding Issues Desalination*, pp. 339-371, InTech, Croatia.
- Li, J., Zhou, Y., Yao, Q., Wang, T., Zhang, A., Chen, Y., Wu, W., and Sun, W., (2017), "Preparation and evaluation of a polyether-based polycarboxylate as a kind of inhibitor for water systems", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(10), 2624-2633.
- MacAdam, J., and Parsons, S.A., (2004), "Calcium carbonate scale formation and control", *Reviews in Environmental Science and Biotechnol*, 3, 159-169.
- Malik, K., (1992), "Corrosion and material selection in desalination plants", In: *SWCC, O&M Seminar*, Al Jubail, Saudi Arabia, April.
- Miksic, B.A., Furman, A.Y. and Kharshan, M.A., (2016), "Biodegradable and renewable raw materials in a new generation of water-treatment products", *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 5(3), 190-199.
- Nowack, B., (2003), "Environmental chemistry of phosphonates", *Water Research*, 37, 2533-2546.
- Pervov, A.G., Andrianov, A.P., Danilycheva, M.N., (2018), "Preliminary evaluation of new green antiscalants for reverse osmosis water desalination", *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(1), 167-174.
- Somerscales, E., (1990), "Fouling of heat transfer surfaces: an historical review", *Heat Transfer Engineering*, 11, 19-36.
- Vidic, R.D., Liu, W., Li, H., and He, C., (2015), "Water treatment chemicals: Types, solution chemistry, and applications", In: Amjad, Z., and Demadis, K.D., می‌نمایند. در انتخاب و به‌کارگیری آنتی اسکالانت‌ها علاوه بر نکات فنی باید الزامات بهداشتی و محیط‌زیستی نیز مدنظر قرار گیرد. آنتی اسکالانت‌های طبیعی سمیت پایین و زیست تخریب‌پذیری بالایی دارند. به‌همین دلیل به‌نظر می‌رسد آنتی اسکالانت‌های طبیعی جایگزین مناسبی برای ترکیبات شیمیایی مرسوم باشند.
- ۶- پی‌نوشت‌ها**
- 1- Mineral scale
  - 2- Antiscalant
  - 3- Make up water
  - 4- Initiation
  - 5- Transformation
  - 6- Attachment
  - 7- Aging
  - 8- Threshold effect
  - 9- Crystal modification
  - 10- Dispersion
  - 11- Sequestering effect
- ۷- مراجع**
- AL-Hamzah, A.A., East, C.P., Doherty, W.O., and Fellows, C.M., (2014), "Inhibition of homogenous formation of calcium carbonate by poly (acrylic acid), The effect of molar mass and end-group functionality", *Desalination*, 338, 93-105.
- Amjad, Z., and Demadis, K.D., (2015), *Mineral scales and deposits scientific and technological approaches*, Elsevier, Oxford, United Kingdom.
- Amjad, Z. and Koutsoukos, P.G., (2014), "Evaluation of maleic acid based polymers as scale inhibitors and dispersants for industrial water applications", *Desalination*, 335, 55-63.
- Antony, A., Low, J.H., Gray, S., Childress, A.E., Le-Clech, P., and Leslie, G., (2011), "Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review", *Journal of Membrane Science*, 383, 1-16.
- Beer, W., and Corvetto, R., (2007), "A new closed system treatment program for industrial applications", *Proceedings of the Cooling Tower Institute Annual Conference*, Corpus Christi, TX.
- Chauhan, K., Kumar, R., Kumar, M., Sharma, P., and Chauhan, G.S., (2012), "Modified pectin-based polymers as green antiscalants for calcium sulfate scale inhibition", *Desalination*, 305, 31-37.
- Demadis, K.D., Katarachia, S.D., and Koutmos, M., (2005), "Crystal growth and characterization of zinc-(amino-tris (methylenephosphonate)) organic-inorganic hybrid networks and their inhibiting effect on metallic corrosion", *Inorganic Chemistry Communication*, 8(3), 254-258.
- Demadis, K.D., Neofotistou, E., Mavredaki, E., Tsiknakis, M., Sarigiannidou, E.-M., Katarachia, S.D.,

- (eds.), *Mineral Scales and Deposits Scientific and Technological Approaches*, pp. 169-191, Elsevier, Oxford, United Kingdom.
- Wilson, M.P., (2004), "Experimental and computer modelling studies of gypsum crystallization", Ph.D. Thesis, Curtin University of Technology, W.A.
- Wang, Z., Ma, J., Tang, C.Y., Kimura, K., Wang, Q., and Han, X., (2014), "Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review", *Journal of Membrane Science*, 468, 276-307.
- Kunanz, H., and Wolfel, S., (2014), *Scale removal with ultrasonic waves*, Society of Petroleum Engineering, SPE-169770-MS.
- Xue, M., Zhang, C., Liu, Q., Yang, H., and Liu, G., (2019), "Polyether copolymers containing fluorescent groups: A green inhibitor for calcium carbonate", *Water Supply*, 19(3), 725-734.
- Yu, W., Song, D., Li, A., and Yang, H., (2019), "Control of gypsum-dominated scaling in reverse osmosis system using carboxymethyl cellulose", *Journal of Membrane Science*, 577, 20-30.
- Zhang, Y., Yin, H., Zhang, Q., Li, Y., Yao, P., and Huo, H., (2018), "A novel polyaspartic acid derivative with multifunctional groups for scale inhibition application", *Environmental Technology*, 39(7), 843-850.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.