

## واژه‌های کلیدی:

پلی‌الکترولیت،  
پلی‌اکریل‌آمید،  
تصفیه آب،  
عامل منعقدکننده

# بررسی عملکرد پلی‌الکترولیت‌های پلی‌اکریل‌آمید در کاربردهای تصفیه آب

زهره طاهرخانی\*

تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، جهاد دانشگاهی، گروه پژوهشی طراحی

فرایندهای شیمیایی

## چکیده ...

پلی‌الکترولیت پلی‌اکریل‌آمید (PAM) از مهم‌ترین و رایج‌ترین پلیمرهای محلول در آب است که به دلیل خواص متنوع آن بخش قابل توجهی از پلیمرهای سنتزی محلول در آب بر پایه این پلیمر تهیه می‌شوند. پلی‌اکریل‌آمیدها ویژگی‌های با ارزشی مانند لخته‌سازی، قابلیت دستیابی به وزن‌های مولکولی زیاد، قیمت مناسب و انحلال‌پذیری در آب در شرایط مختلف دارند و به‌طور گسترده در فرایندهای تصفیه آب (به‌عنوان منعقدکننده، کمک‌منعقدکننده و لخته‌ساز) استفاده می‌شوند. در این پژوهش، پلی‌الکترولیت‌های پلی‌اکریل‌آمید معرفی شده، روش‌های سنتز آن‌ها بررسی می‌شود. سپس خصوصیات و کاربردهای این مواد در صنایع مختلف و به‌ویژه تصفیه آب و فاضلاب با بررسی پژوهش‌های اخیر مطالعه و سازوکار عملکرد آن‌ها بیان می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که بازده پلی‌الکترولیت‌ها در جداسازی ناخالصی‌های موجود در آب به ساختار شیمیایی، نوع بار و چگالی توزیع آن در زنجیره پلیمر، وزن مولکولی، نوع اختلاط و زمان آن، pH محلول، غلظت مواد آلاینده، حضور نمک و همچنین خصوصیات محلول بستگی دارد.

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

Ztaherkhani@acecr.ac.ir

## ۱ مقدمه

پلی الکترولیت‌ها پلیمرهای باردار و محلول در آب هستند. که با توجه به وزن مولکولی، چگالی بار (CD) و توزیع آن در بسیاری از صنایع کاربرد دارند. طول زنجیره درشت مولکول از وزن مولکولی پایین تا ده‌ها میلیون گرم بر مول قابل کنترل است. همچنین، میزان بار منفی از صفر تا حدود ۱۰۰ درصد متغیر است. پلی الکترولیت‌ها با توجه به نوع بار، به سه گروه آنیونی (پلیمرهایی با بار منفی)، کاتیونی (پلیمرهایی با بار مثبت) و غیریونی طبقه‌بندی می‌شوند [۱-۲].

پلی اکریل آمید (PAM) یکی از مهم‌ترین پلی الکترولیت‌های محلول در آب است. همپلیمر اکریل آمید غیریونی است و در صورت حضور مونومرهای دیگر مانند آکریلات یا ۲-آکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونات (AMPS) به پلیمرهای آنیونی و ۱،۴-دی متیل دی آلایل آمونیم اتانامین و ۱،۲-دی متیل-۵-وینیل پیریدینوم به پلیمرهای کاتیونی تبدیل می‌شود [۳].

پلی اکریل آمیدها ویژگی‌های با ارزشی مانند لخته‌سازی، قابلیت دستیابی به وزن‌های مولکولی زیاد، قیمت مناسب، انحلال پذیری در آب در شرایط مختلف، تنظیم وزن مولکولی و امکان ایجاد گروه‌های یونی را دارا هستند و به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مهندسی و فناوری کاربرد پیدا کرده‌اند: - فرایندهای تصفیه آب (به عنوان منعقدکننده، کمک منعقدکننده و لخته‌ساز، افزایش دهنده سرعت ته‌نشینی مواد جامد معلق)

- صنعت نفت (به عنوان عامل کنترل کننده گرانیروی در ازدیاد برداشت نفت)

- کاغذسازی (بهبود کیفیت و مقاومت کاغذ)

- صنایع کشاورزی (عامل تثبیت خاک)

- صنایع معدنی (فراوری مواد معدنی و جداسازی ذرات و فلزات خاص)

- حفاری (مواد افزودنی سیال حفاری) [۴].

اما عمده‌ترین کاربرد پلیمرهای بر پایه پلی اکریل آمید در صنایع تصفیه آب و فاضلاب است. رشد جمعیت و کمبود منابع آب در دسترس و همچنین مسائل مرتبط با کیفیت منابع آب از چالش‌های مهم در فرایند توسعه است که باید مورد توجه قرار گیرد [۵]. از این رو در این پژوهش، در ابتدا به معرفی انواع مختلف پلی اکریل آمیدها، روش‌های تهیه آن‌ها و کاربرد در صنایع مختلف پرداخته می‌شود. سپس کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف و به ویژه تصفیه آب و فاضلاب بررسی شده، پارامترهای موثر به منظور دستیابی به آب باکیفیت معرفی می‌شوند.

## ۲ انواع پلی اکریل آمید

پلی اکریل آمیدها بر اساس بار موجود در ساختار به سه دسته آنیونی، کاتیونی و غیریونی تقسیم‌بندی می‌شوند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

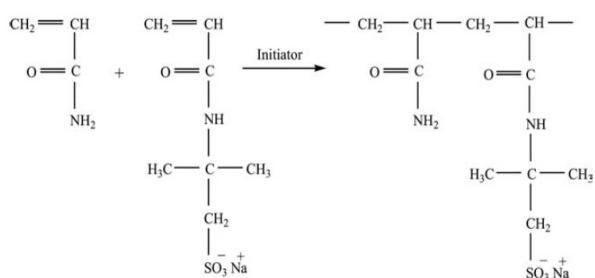
### ۲-۱ پلی اکریل آمید غیریونی

پلی اکریل آمیدهای غیریونی بر پایه پلیمر خالص بوده، پس از حل شدن در آب، دارای هیچ بار الکتریکی نیستند و محلولی با خاصیت باری خنثی ایجاد می‌کنند. به منظور سنتز این پلی الکترولیت‌ها از بسپارش اکریل آمید استفاده می‌شود. بسپارش اکریل آمید توسط آغازگرهای رادیکال آزاد مانند پراکسیدها، جفت‌های ردوکس و ترکیبات آزو انجام می‌شود. اما شروع‌کننده‌های الکتروشیمیایی، امواج فراصوت، شروع‌کننده‌های فتوشیمیایی، اشعه ماورا بنفش، اشعه رادیو ایزوتوپ، اشعه X، اشعه گاما، الکترون‌های شتابنده و تابش پرتو الکترون نیز برای سنتز PAM استفاده شده‌اند [۶]. نوع شروع‌کننده بر وزن مولکولی نهایی پلیمر موثر است. بسپارش حالت جامد اکریل آمید با اشعه، پلیمرهایی با وزن مولکولی بالا تولید می‌کند. در این فرایند از واکنش اختتام توسط ماتریس بی حرکت ممانعت می‌شود. بنابراین، واکنش انتشار رادیکال‌ها به طور کامل انجام شده، پلیمری با وزن مولکولی بالا تولید می‌شود [۶-۷].

همچنین افزودن نمک‌های فلز قلیایی اسیدهای کلریدریک، سولفوریک یا فسفریک به منظور تثبیت pH در مقدار ۳ برای کاهش واکنش‌های انتقال، امکان دستیابی به وزن مولکولی بسیار بالا را فراهم می‌کند. پلی اکریل آمید پایدار نیز با تنظیم pH محلول در مقدار ۴/۵ و در حضور اتانول آمین یا فلز قلیایی، فلز قلیایی خاکی یا تیوسیانات آمونیم، سنتز می‌شود. علاوه بر این، در بسپارش اکریل آمید با اشعه گاما در محلول آبی، افزودن نمک‌هایی مانند  $\text{NaCl}$ ،  $\text{NaNO}_3$ ،  $\text{NaOH}$ ،  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  و  $\text{NaCO}_3$  باعث تولید پلیمرهایی با وزن مولکولی بالا می‌شود [۶].

### ۲-۲ پلی اکریل آمید آنیونی

پلی اکریل آمیدهای آنیونی، پلی الکترولیت‌هایی هستند که در ساختار مولکولی خود، بار منفی دارند. کوپلیمرهای آنیونی اکریل آمید معمولاً حاوی گروه‌های عاملی کربوکسیلات، سولفونات یا فسفونات هستند [۴]. این کوپلیمرها توسط هم‌بسپارش اکریل آمید با مونومرهای وینیلی حاوی گروه عاملی کربوکسیلات، سولفونات یا فسفونات یا از طریق اصلاح شیمیایی پلی اکریل آمید برای ورود این گروه‌های عاملی تهیه می‌شوند.

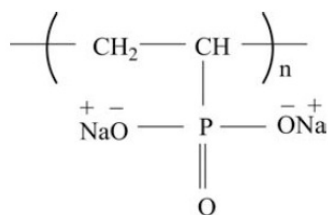


شکل ۲ فرایند هم‌بسپارش مونومر حاوی اسیدسولفونیک [۴].

آخرین در زمینه تصفیه آب است. به نظر می‌رسد که این پلیمرها در مناطق کنترل رسوب و چنگالشی (Chelation) قابلیت استفاده دارند [۴]. ساختار شیمیایی پلی‌الکترولیت‌های حاوی فسفر در شکل ۳ نشان داده شده است.

### ۲-۳ پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی

پلی‌اکریل‌آمیدهای کاتیونی، پلیمرهایی با وزن مولکولی بالا و حاوی بارهای مثبت هستند که به‌عنوان عوامل لخته‌ساز در شفاف‌سازی، رسوب‌گذاری و صافش استفاده می‌شوند. پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی خاصیت خود را مدیون تراکم و توزیع بارهای مثبت بر روی زنجیره‌های درشت مولکولی هستند که به‌شدت با ذرات معلق دارای بار منفی برهم‌کنش می‌دهند. از آنجا که بیشتر ذرات موجود در آب‌ها، پساب‌های طبیعی و تعلیقی‌های (Suspensions) صنعتی دارای بار منفی هستند، پلیمرهای کاتیونی در بسیاری از کاربردها از جمله تصفیه فاضلاب، کاغذسازی، فرآوری مواد معدنی و غیره مفید هستند. روش‌های سنتز پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی شامل هم‌بسپارش اکریل‌آمید با مونومر کاتیونی، اصلاح کاتیونی PAM و بسپارش پیوندی کاتیونی است. پلیمرهایی که از طریق روش‌های اصلاح کاتیونی سنتز می‌شوند، پلیمر کاتیونی با وزن مولکولی نسبتاً بالا حاصل می‌کنند، اما دارای پایداری ضعیف و قیمت بالا هستند. هم‌بسپارش پیوندی کاتیونی نیز منجر به سنتز پلیمرهایی با زمان انبارداری کوتاه، پایداری ضعیف و جرم مولکولی نسبی



شکل ۳ ساختار شیمیایی پلی‌الکترولیت‌های حاوی فسفر [۴].

### ۲-۲-۱ پلی‌الکترولیت‌های آنیونی حاوی کربوکسیل

پلی‌الکترولیت‌های آنیونی حاوی گروه‌های کربوکسیل مهم‌ترین گروه پلی‌الکترولیت‌های آنیونی هستند. پلی‌اکریل‌آمید جزئی از آب‌کافت (HPAM) پرکاربردترین پلیمر آنیونی متشکل از کوپلیمر خطی و با وزن مولکولی بالا است که از واحدهای مونومری اکریلات (آنیونی) و آکریل‌آمید (غیرآنیونی) تشکیل شده و دارای بار آنیونی متوسط است و کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارد. این پلیمر به یکی از دو روش زیر تهیه می‌شود: در روش اول، HPAM از طریق فرایند بسپارش و آب‌کافت هم‌زمان اکریل‌آمید به دست می‌آید. آماده‌سازی پلیمر از طریق واکنش یک مرحله‌ای انجام می‌شود که در آن بسپارش و آب‌کافت هم‌زمان انجام می‌شود. به منظور دستیابی به درجات مختلف آب‌کافت، نسبت‌های مختلف اکریل‌آمید و عامل‌های آب‌کافت قلیایی استفاده می‌شود و واکنش با افزودن یک آغازگر اکسایشی کاهش می‌تواند متشکل از پرسولفات پتاسیم و بی‌سولفیت سدیم، آغاز می‌شود [۸]. ساختار شیمیایی پلی‌اکریل‌آمید جزئی آب‌کافت شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

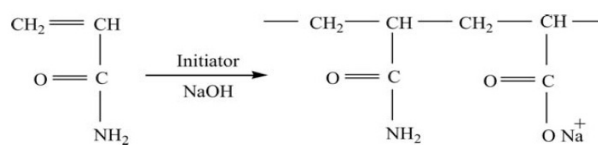
رویکرد دوم، شامل هم‌بسپارش اکریل‌آمید و سدیم‌اکریلات با سامانه ردوکس است که بسپارش رادیکال‌های آزاد را آغاز می‌کند. درجات مختلف آب‌کافت در کوپلیمر [اکریل‌آمید/اکریلات سدیم] با تغییر محتوای اکریلات مخلوط‌های مونومر به دست می‌آید [۹].

### ۲-۲-۲ پلی‌الکترولیت‌های آنیونی حاوی گوگرد

پلی‌اکریل‌آمید حاوی اتم‌های گوگرد از طریق بسپارش یا هم‌بسپارش مونومرهای حاوی اسیدسولفونیک سنتز می‌شود. روند هم‌بسپارش پلیمرهای سولفون در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است. سولفومتیلاسیون پلی‌اکریل‌آمید روش دیگری برای وارد کردن گروه‌های عاملی سولفونات به داخل ساختار پلیمر است [۴].

### ۲-۲-۳ پلی‌الکترولیت‌های آنیونی حاوی فسفر

پلی‌الکترولیت‌های آنیونی حاوی فسفر از جمله پیشرفت‌های



شکل ۱ ساختار پلی‌اکریل‌آمید جزئی آب‌کافت شده [۴].

باقی مانده‌های معدنی مضر توسط محققان مختلف بررسی شده است [۱۴-۱۱، ۶]. حضور پلی‌الکترولیت‌ها، امکان بازیافت آب در فرایندهای صنعتی را فراهم می‌کند و بنابراین باعث صرفه‌جویی در مصرف آب در صنعت می‌شود.

آب آشامیدنی از طریق تصفیه آب‌های طبیعی (خام) تولید می‌شود تا بو، طعم، شکل ظاهری، گونه‌های خورنده و رسوبات را تا حد قابل قبولی کاهش دهد و به‌طور کلی، شامل حذف باکتری‌ها، ویروس‌ها، جلبک‌ها، مواد معدنی محلول، مواد آلی محلول و مواد جامد معلق از آب است. منعقدکننده‌های معدنی بر پایه آلومینیوم، آهن و کلسیم برای تصفیه آب آشامیدنی استفاده شده‌اند. آلوم، (سولفات آلومینیوم)، پرمصرف‌ترین منعقدکننده معدنی است. از معایب استفاده از منعقدکننده‌های معدنی نیاز به مقدار زیاد و همچنین محدودیت pH برای تشکیل رسوبات هیدروکسیدی است. این معایب باعث افزایش مواد جامد محلول در آب آشامیدنی نهایی می‌شود و همچنین ممکن است باعث ایجاد مشکلات خوردگی به ویژه با نمک‌های آهن شده، مقادیر فراوانی لجن به دلیل حضور رسوبات هیدروکسید فلزی تولید شود. پلی‌الکترولیت کاتیونی می‌تواند به‌طور کامل یا جزئی با ماده منعقدکننده معدنی جایگزین شود تا شفافیت لازم را در آب ایجاد کرده، از این طریق تشکیل لجن را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.

پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی می‌توانند در تصفیه آب، به‌عنوان ماده منعقدکننده اولیه یا کمک منعقدکننده، استفاده شوند. بیش‌تر ناخالصی‌های کلوئیدی و معلق در آب دارای بارهای سطحی منفی هستند و از اینرو پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی کاربرد فراوانی به این منظور دارند. پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی ناخالصی‌ها یا آلاینده‌ها را خنثی کرده و سپس توده‌های بزرگ‌تر را برای جداسازی سریع آب جامد از طریق رسوب‌گذاری، شناورسازی، سانتریفیوژ، صافش یا اسمز معکوس شکل می‌دهند [۱۵، ۱۳، ۱]. از طیف گسترده‌ای از پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی تجاری می‌توان برای از بین بردن آلودگی‌ها استفاده کرد. طبق استانداردهای سازمان غذا و داروی آمریکا (FDA)، محتوای باقی مانده مونومر اکریل‌آمید در پلیمرهای مورد استفاده باید کم‌تر از ۰/۰۵ درصد باشد [۱۶].

پلی‌الکترولیت‌های آنیونی پلی‌اکریل‌آمید و کوپلیمرهای آن نیز به‌عنوان لخته‌ساز برای شفاف‌سازی آب وفاضلاب توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. چگالی بار و وزن مولکولی عامل‌های لخته‌ساز آنیونی دو عامل مهم در انتخاب شرایط بهینه از نقطه نظر کارایی و بهبود کیفیت آب در فرایند تصفیه هستند. پلی‌الکترولیت آنیونی با تعداد زیادی بار منفی در امتداد زنجیره

کم می‌شود. از اینرو این دو روش آماده‌سازی به‌طور گسترده‌ای در تولید صنعتی پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی استفاده نمی‌شود. مهم‌ترین روش تولید پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی، روش هم‌سپارش رادیکال‌های آزاد است. پلیمرهای حاصل از این روش عمدتاً کوپلیمر حاصل از مشتقات اکریل‌آمید و مونومرهای حاوی نمک آمونیوم چهارظرفیتی هستند. کوپلیمرهای تصادفی اکریل‌آمید و اکریلوئیلوکسی اتیل‌تری‌متیل‌کلرید آمونیوم با بارهای مثبت متفاوت (۵۰-۰٪) نیز نوع دیگری از پلیمرهای کاتیونی هستند که به‌طور انحصاری در صنعت آب استفاده می‌شوند [۱۱-۱۰].

### ۳ کاربردهای پلی‌اکریل‌آمیدها

جدول ۱ کاربرد پلی‌اکریل‌آمیدها را در کشورهای بزرگ جهان در صنایع مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این پلیمرها در درجه اول برای تصفیه آب و سپس در کاغذسازی، برداشت نفت و صنایع معدنی استفاده می‌شوند. بدیهی است که پلی‌اکریل‌آمید به‌عنوان عامل لخته‌ساز می‌تواند نقش مهمی در تأمین آب پاک، تصفیه آب و فاضلاب شهری، تصفیه آب صنعتی، و حتی آبیگری از لجن داشته باشد.

پلی‌اکریل‌آمیدها به‌عنوان مهم‌ترین کمک منعقدکننده معمولاً همراه با منعقدکننده‌های پلیمری معدنی مانند پلی‌آلومینیوم کلرید (PAC) و سولفات فریک پلیمری (PFS) در واحدهای تصفیه‌خانه آب لوله‌کشی و فاضلاب برای تصفیه منابع آلاینده استفاده می‌شوند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند [۵].

### ۳-۱ تصفیه آب آشامیدنی

مصرف آب در جهان به‌طور مداوم در حال افزایش است و بدیهی است که این امر برای تأمین نیازهای جمعیت از اهمیت زیادی برخوردار است. کاربرد پلی‌اکریل‌آمیدها در تصفیه آب در بازیابی فلزات، ایزوتوپ‌های رادیواکتیو، فلزات سنگین و

جدول ۱ کاربردهای پلی‌اکریل‌آمیدها در صنایع مختلف [۵].

کشور	تصفیه آب	صنایع کاغذ	صنایع نفت	صنایع معدن	سایر
آمریکا	۶۰	۲۵	۰	۱۱	۴
اروپا	۴۵	۳۲	۱۲	۸	۳
ژاپن	۳۶	۴۵	۱۱	۴	۴
چین	۴۰	۱۵	۳۵	۵	۵

آن‌ها سه پلی‌الکترولیت بر پایه پلی‌اکریل‌آمید با وزن مولکولی مشابه و بار مختلف (کاتیونی، غیریونی و آنیونی) را مورد مطالعه قرار دادند و به این مهم دست یافتند که لخته‌ساز کاتیونی در رابطه با لجن ارائه‌شده به‌طور موثرتر عمل می‌کند. این گروه گزارش کردند که افزودن پلی‌الکترولیت می‌تواند تولید متان را افزایش دهد. قابل توجه است که پلی‌اکریل‌آمیدهای آنیونی به دلیل حضور پتانسیل منفی زیاد در زنجیره مولکولی، قابلیت تصفیه فاضلاب و به‌ویژه فاضلاب حاوی فلز را از طریق خنثی‌سازی الکتریکی دارند.

#### ۴ سازوکار عملکرد عامل منعقدکننده پلی‌اکریل‌آمید در تصفیه آب و فاضلاب

ذرات موجود در فازهای جامد/مایع را می‌توان از طریق سه سازوکار اصلی پل زدن پلیمر، خنثی‌سازی بار و جذب پلیمر که لخته‌سازی را تقویت می‌کنند، ناپایدار کرد. با توجه به وزن مولکولی و چگالی بار عوامل لخته‌ساز، استفاده هم‌زمان از یک، دو یا هر سه سازوکار منجر به تشکیل کلوخه در محلول می‌شود.

##### ۴-۱ جذب پلیمر

پلیمرها می‌توانند توسط چندین نوع سازوکار بر روی ذرات پراکنده جذب شوند. سازوکارهای جذب پلیمر به ماهیت نیروهای درگیر وابسته بوده، شامل پیوند هیدروژن، برهم‌کنش آب‌گریز، اتصالات یونی، برهم‌کنش الکترواستاتیکی و نیروهای وان دروالس است که در ادامه به‌طور مختصر شرح داده می‌شوند.

- پیوند هیدروژنی: گروه آمید موجود در پلیمرهای آنیونی بر پایه پلی‌اکریل‌آمید، گروهی قطبی است و توانایی ایجاد پیوندهای هیدروژن با گروه‌های حاوی اکسیژن، نیتروژن و فلئوئور را در راستای جذب ذرات دارد. همچنین گروه‌های آمید قطبی قادر به ایجاد پیوند هیدروژنی با گروه‌های هیدروکسیل اکسیدهای معدنی مانند سیلیس و آلومینا هستند.

- برهم‌کنش آب‌گریز: پلی‌الکترولیت آنیونی بر پایه اکریل‌آمید شامل دو قسمت قطبی و غیرقطبی، یعنی بخش‌های آب‌دوست و آب‌گریز است. بخش آب‌گریز پلیمر مسئول جذب ذرات غیرقطبی است. در واقع ذرات غیرقطبی در تعلیق‌های مایع/جامد توسط بخش آب‌گریز پلیمر آنیونی جذب می‌شوند.

- اتصالات یونی: پلی‌الکترولیت‌ها قادر به جذب شدن بر روی سطوحی با بار مشابه هستند، بنابراین در حضور برخی از یون‌های دو یا سه‌ظرفیتی، پلیمرهای آنیونی حاوی بارهای منفی می‌توانند در سطوح دارای بار منفی جذب شوند. به‌عنوان مثال، یون‌های کلسیم، منیزیم و آلومینیوم می‌توانند

پلیمر به‌منظور ناپایدار کردن محلول آبی با ذرات برهم‌کنش برقرار کرده، باعث شفاف‌سازی فاز جامد مایع می‌شود. این پلیمرهای آنیونی می‌توانند ذرات باردار مثبت را جذب کرده، با سازوکار خنثی‌سازی بار باعث ناپایداری ذرات شوند. پلی‌الکترولیت‌های آنیونی همچنین می‌توانند ذرات دارای بار منفی را با سازوکار پل زدن لخته‌کنند. اگرچه، در سازوکار پل زدن توسط پلیمر آنیونی، باید نیروهای دافعه بین بخش‌های آنیونی پلیمر و سطوح منفی ذرات کاهش یابد. برای غلبه بر نیروی دافعه الکتریکی و تقویت جذب، غلظت مشخصی از یون‌های فلزی دو ظرفیتی مانند کاتیون‌های کلسیم و منیزیم نقش مهمی را ایفا می‌کند؛ به‌طوری‌که به‌شیوه موثری نیروهای دلیل دافعه را به‌لایل اثر غربالگری کاهش می‌دهد [۵].

##### ۳-۲ تصفیه فاضلاب

پساب‌های صنعتی و خانگی، انواع مختلف فاضلاب با آلاینده‌های مختلف ایجاد می‌کنند. یکی از آلاینده‌های مهمی که باید از جریان فاضلاب خارج شود، مواد مرتبط به رنگ و رنگ‌آمیزی است. حذف رنگ از جریان فاضلاب به منبع و ماهیت آن بستگی دارد. تصفیه فاضلاب با روش‌های شیمیایی، فیزیکی، فیزیکی و شیمیایی و زیستی انجام می‌شود. حذف رنگ با روش‌های شیمیایی مانند اکسایش با استفاده از مواد اکسیدکننده هیپوکلریت سدیم و پراکسید هیدروژن انجام می‌شود و روش گران‌قیمتی است. با این حال، حذف رنگ با روش‌های فیزیکی مانند جذب، در کاربردهای محدودی قابل اجرا است. گاهی روش فیزیکی در مرحله نهایی با روش‌های دیگر همراه می‌شود. این فرایند می‌تواند برای فاضلاب‌های مختلف از صنایع رنگرزی، کارخانه‌های نساجی، صنایع فرآوری مواد غذایی، تقطیر، خمیر کاغذ و غیره استفاده شود. به این روش، روش فیزیکی-شیمیایی گفته می‌شود [۱۷، ۱۸].

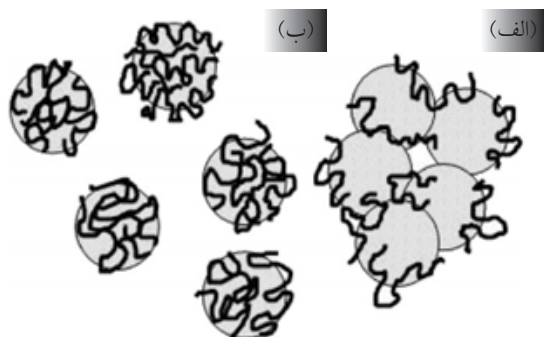
روش‌های زیستی نیز عمدتاً برای حذف مواد زیست‌فعال از پساب شهری و تصفیه فاضلاب استفاده می‌شود. امروزه پلی‌الکترولیت‌ها نیز در برخی یا تمام مراحل رسوب‌گذاری تصفیه فاضلاب و آبگیری از لجن در کنار روش‌های نامبرده استفاده می‌شوند. لخته‌سازهای پلی‌الکترولیت به‌منظور افزایش سرعت رسوب‌گذاری، کاهش حجم آن و تولید گاززیستی به لجن اضافه می‌شوند. اگرچه کسر وزنی پلی‌الکترولیت‌ها در آبگیری لجن کم است، اما این مواد تأثیر عمده‌ای در کاهش حجم لجن دارند [۵].

چو و همکاران [۱۸] نقش لخته‌سازهای پلی‌الکترولیت را در کارایی هضم بی‌هوازی لجن فعال شده فاضلاب بررسی کردند.

پلیمرهای خطی با وزن مولکولی بالا، موثرترین پلیمرها برای پل زدن هستند و CD تأثیر زیادی در سازوکار پل زدن دارد. طرح واره‌ای از ذرات پل شده توسط پلیمر جذب شده در شکل ۴ (الف) نشان داده شده است. نیاز اساسی برای سازوکار پل زدن، وجود سطوح اشغال نشده روی سطح ذره برای اتصال بخش‌هایی از زنجیره‌های پلیمری جذب شده روی ذرات دیگر است. به این ترتیب که مقدار جذب شده باید محدود باشد، در غیر این صورت، سطوح ذرات چنان اشغال می‌شوند که مکان‌های جذب کافی در دسترس نیستند و ذرات مجدداً غیر پایدار می‌شوند (شکل ۴ (ب)). البته مقدار جذب شده نباید خیلی کم باشد، در غیر این صورت تماس‌های کافی برای سازوکار پل زنی ایجاد نخواهد شد.

#### ۴-۳ خنثی‌سازی بار

در بسیاری از موارد کاربردی، ذرات ناخالصی، بار منفی دارند و در این حالت، پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی موثرترین عامل لخته‌ساز هستند. در چنین سامانه‌هایی، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک باعث جذب شدید و خنثی‌سازی سطح ذرات با عوامل لخته‌ساز می‌شوند. پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی به وسیله سازوکار خنثی‌سازی بار، ذرات دارای بار مخالف را جذب می‌کنند (شکل ۵). در مقابل، پلی‌الکترولیت‌های آنیونی با همان سازوکار بر روی ذرات دارای بار مثبت جذب می‌شوند. برهم‌کنش پلیمرهای باردار با ذرات دارای بار مخالف منجر به خنثی شدن بارهای آن‌ها و ناپایداری سامانه می‌شود. در فرایند خنثی‌سازی بار، بار سطحی ذرات کلونیدی خنثی می‌شود و ذرات می‌توانند به یکدیگر نزدیک شوند. بنابراین این احتمال وجود دارد که لخته شدن به سادگی در نتیجه کاهش بار سطحی ذرات و در نتیجه کاهش دافعه الکتریکی بین آن‌ها رخ دهد.



شکل ۴ (الف) سازوکار پل زدن و (ب) ناپایدار شدن زنجیره‌های پلیمر جذب شده [۱۰].

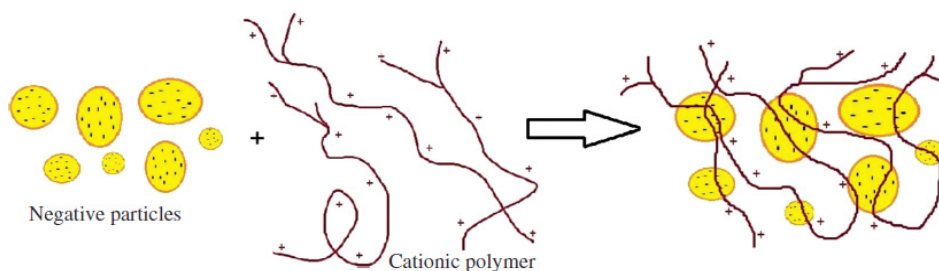
جذب پلی‌اکریل‌آمید آب‌کافت شده را بر روی ذرات با بار منفی تقویت کنند. این برهم‌کنش نتیجه پل زنی یون‌های دو یا سه ظرفیتی مثبت بین گروه‌های کربوکسیلات روی زنجیره‌های پلی‌اکریل‌آمید و مکان‌های آنیونی است. برهم‌کنش‌های اتصال یونی تأثیر شگرفی در فرایندهای لخته‌سازی مورد استفاده در کاربردهای صنعتی دارند.

- برهم‌کنش الکترواستاتیک: پلی‌الکترولیت‌ها بر روی ذرات یا سطوح با بار مخالف نیز از طریق برهم‌کنش الکترواستاتیک جذب می‌شوند، به این معنی که، پلیمرهای آنیونی با بارهای منفی با ذرات یا سطوح مثبت در تعلیقی، برهم‌کنش برقرار می‌کنند. بنابراین، انرژی جذب الکترواستاتیک نقش مهمی در تشکیل لخته‌های پلیمری دارد. با این حال، در این حالت، ظرفیت پلی‌الکترولیت برای جذب، بستگی به نوع و غلظت الکترولیت دارد. هنگامی که برهم‌کنش الکترواستاتیک، تنها برهم‌کنش قابل توجه است، تأثیر نمک می‌تواند مهم باشد. جذب پلی‌الکترولیت با افزایش غلظت نمک به دلیل اثر غربالگری نمک بین بخش‌های یونی زنجیر پلیمر و یون‌های حل شده، کاهش می‌یابد. با این حال، در مواردی که برهم‌کنش‌های بیش‌تر مانند پیوند هیدروژن یا جاذبه آب‌گریز وجود دارد، جذب پلی‌الکترولیت کم‌تر تحت تأثیر غلظت نمک است.

نیروهای وان‌دروالس: نیروهای وان‌دروالس نیروهای فیزیکی هستند که عمدتاً در بین همه مواد به صورت جاذبه وجود دارند. جاذبه وان‌دروالس به‌طور کلی تابعی از ترکیب مواد و قطبش‌پذیری مولکولی بوده، عمدتاً از نیروهای پراکندگی لاندن و برهم‌کنش‌های دو قطبی دو قطبی حاصل می‌شود [۵].

#### ۴-۲ سازوکار پل زدن

پلیمرهای کاتیونی، آنیونی و غیر یونی دارای تراکم بار کم و با وزن مولکولی بالا از طریق سازوکار پل زدن به‌عنوان لخته‌ساز در تصفیه آب عمل می‌کنند. پل زدن پلیمری شامل جذب بخش‌های کوچکی از زنجیره‌های پلیمری بر روی ذرات کلونید است. پل پلیمری سازوکار پایداری یا عدم پایداری را توصیف می‌کند که توسط آن درشت‌مولکول‌ها به ذرات مختلف متصل می‌شوند و به ترتیب باعث شناورسازی یا ایجاد کلوخه می‌شوند. پلیمر کاتیونی حاوی گروه‌های با بار مثبت می‌تواند با ذرات کلونیدی با بار منفی توسط سازوکار پل زدن برهم‌کنش داشته باشد و همچنین پلی‌الکترولیت دارای بار منفی با ذرات با بار مثبت برهم‌کنش ایجاد می‌کند. پل زنی ذرات کلونید توسط پلی‌الکترولیت با بار مخالف و وزن مولکولی بالا نشان‌دهنده انواع برهم‌کنش بین مواد با بارهای مختلف است [۱۰، ۱۱].



شکل ۵ سازوکار خنثی‌سازی بار [۱].

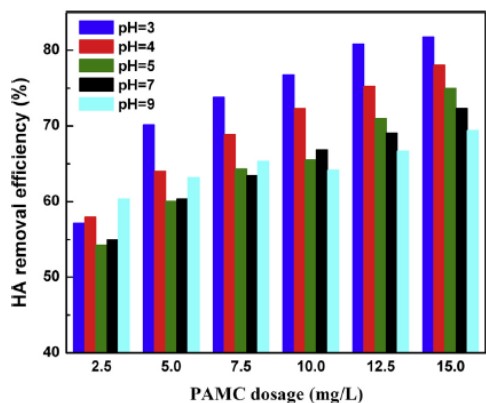
حذف HA به سرعت با افزایش مقدار PAMC در مقادیر کم‌تر از ۲ میلی‌گرم در لیتر افزایش یافته، با افزایش بیش‌تر مقدار PAMC به آرامی بین ۵۶/۸ و ۸۰/۳ درصد افزایش می‌یابد. در حضور مقادیر کم PAMC، برخورد بین HA و پلی‌اکریل‌آمید برای از بین بردن پایداری بین مولکول‌های HA کافی نیست و منجر به بازده پایین‌تر می‌شود [۲۱]. برخوردها به سرعت با افزایش عامل لخته‌ساز افزایش می‌یابد و لخته‌های بیشتری تشکیل می‌شود. با این حال، مقدار بیش از حد PAMC باعث ایجاد اثر « قفس » می‌شود که از رشد لخته‌ها جلوگیری کرده، بازده ته‌نشینی را کاهش می‌دهد. بنابراین، سرعت حذف HA با افزایش بیش‌تر مقدار پلی‌الکترولیت کاهش می‌یابد [۲۰].

در شکل ۷، دو پلی‌اکریل‌آمید PAMC1 و PAMC2 با درجه کاتیونی متفاوت ۲۰ و ۴۰ درصد برای کارایی حذف HA مقایسه شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مقادیر برابر از دو عامل لخته‌ساز، PAMC2 بازده بالاتری از حذف HA را با مقدار بیشینه ۸۰/۷ درصد در مقایسه با ۶۲/۵ درصد نشان می‌دهد. دلیل احتمالی این امر، تراکم بار مثبت بیش‌تر در PAMC2 است که باعث افزایش میزان خنثی‌سازی بار بین عامل لخته‌ساز و ذرات کلوئیدی HA می‌شود و به‌طور آشکار

بررسی محققان نشان می‌دهد که لخته‌سازی مطلوب با مقادیر محدودی از پلی‌الکترولیت برای خنثی کردن بار ذرات یا برای ایجاد پتانسیل زتا نزدیک به صفر حاصل می‌شود [۱۹]. در سازوکار خنثی‌سازی بار، پلی‌الکترولیت‌های با CD زیاد به دلیل حضور بار بیش‌تر، موثرتر هستند. از آن‌جا که افزایش CD پلی‌الکترولیت باعث ایجاد برهم‌کنش‌های قوی‌تر می‌شود، بنابراین CD نقش مهم‌تری را نسبت به وزن مولکولی ایفا می‌کند و پلیمرهای با وزن مولکولی کم با تراکم بار بالا، به‌طور موثری ذرات باردار مخالف را در فازهای جامد-مایع جذب می‌کنند. از آن‌جا که در بسیاری از کاربردها، هر دو سازوکار خنثی‌سازی بار و پل زدن به‌طور هم‌زمان فعال هستند، هر دو عامل CD و وزن مولکولی در فرایند جذب شرکت می‌کنند. بنابراین، ترکیبی از اثرات بار و وزن مولکولی برای ایجاد اثرات انعقادی و لخته‌ای بهتر نیاز است [۱۰، ۱].

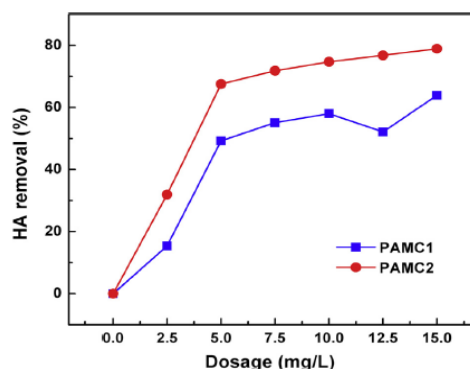
## ۵ عوامل موثر بر عملکرد پلی‌اکریل‌آمید در فرایند تصفیه آب

ما و همکاران [۲۰] عملکرد لخته‌سازی پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی با بار بالا را در تصفیه آب مورد بررسی قرار دادند و تأثیر عواملی مانند pH، مقدار پلی‌اکریل‌آمید (PAMC) و درجه کاتیونی را بر بازده تصفیه مطالعه کردند. شکل ۶ تأثیر pH بر بازده حذف هیومیک اسید (HA) با استفاده از عامل لخته‌ساز پلی‌اکریل‌آمید کاتیونی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش pH، بازده حذف HA افزایش می‌یابد. دلیل این امر پروتونه شدن گروه آمین و ممانعت از آب‌کافت گروه‌های آمونوم چهارتایی موجود در زنجیره جانبی پلی‌اکریل‌آمید است [۲۰]. بنابراین، عملکرد لخته‌سازی از طریق خنثی‌سازی بار بین پلی‌الکترولیت کاتیونی و محلول منفی HA بهبود می‌یابد. علاوه بر این، همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است، بازده حذف HA در مقادیر pH متفاوت، روند مشابهی را در تمام مقادیر پلی‌اکریل‌آمید نشان می‌دهد. به‌طوری‌که، بازده



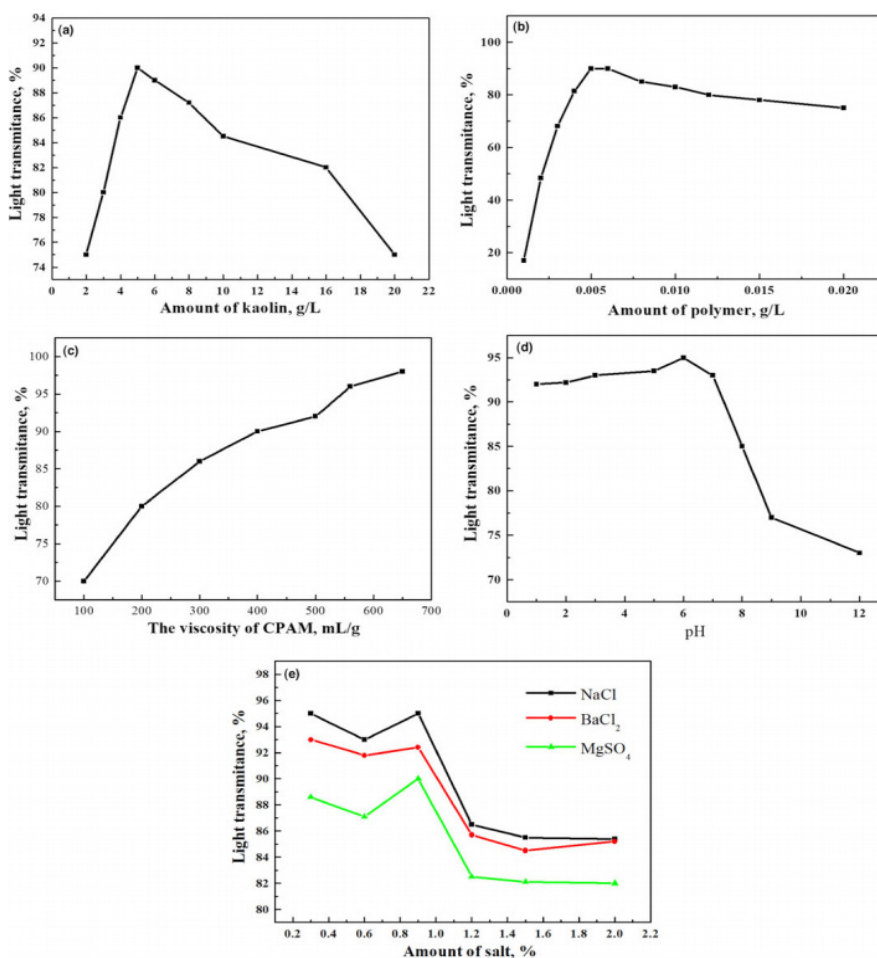
شکل ۶ تأثیر pH و مقدار پلی‌اکریل‌آمید بر بازده تصفیه [۲۰].

افزایش نسبت مونومر کاتیونی در بسپارش، عامل لخته‌ساز است. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که افزایش نامحدود نسبت مونومر کاتیونی باعث کاهش گرانروی ذاتی آن شده، اثر پل زدن بین PAMC و ذرات کلوئیدی را کاهش می‌دهد [۲۰، ۲۲]. تأثیر عوامل مقدار آلاینده کائولن، مقدار و گرانروی ذاتی لخته‌ساز، pH و غلظت نمک بر قابلیت تصفیه تعلیقه کائولن با استفاده از پلی‌اکریل‌امید کاتیونی CPAM توسط چنگ و همکاران [۲۳] بررسی شد (شکل ۸). همان‌طور که در شکل ۸(الف) مشاهده می‌شود، وقتی که غلظت کائولن کم‌تر از ۵ گرم در لیتر باشد، میزان عبورپذیری نور (T%) به عنوان معیاری از شفافیت آب با غلظت کائولن افزایش می‌یابد و به مقدار بیشینه ۹۰٪ در غلظت کائولن ۵ گرم در لیتر می‌رسد. اگر چه با افزایش بیش‌تر غلظت کائولن، مقادیر T% روند کاهشی پیدا می‌کند. شکل ۸(ب) تأثیر مقدار پلی‌اکریل‌امید را بر بازده تصفیه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار T% تعلیقی



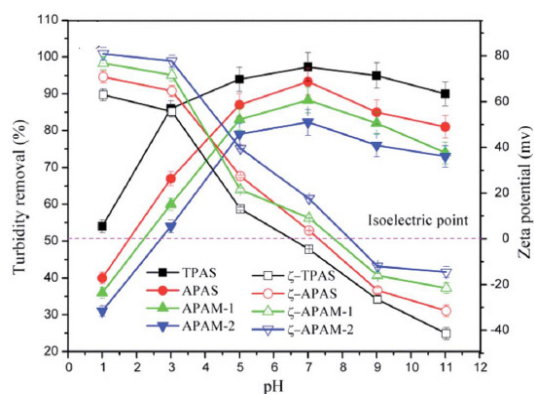
شکل ۷ تأثیر مقدار و میزان بار پلی‌اکترولیت بر بازده تصفیه [۲۰].

عملکرد لخته‌سازی را بهبود می‌بخشد. با این حال، این نتایج به معنای این نیست که هر چه درجه کاتیونی بالاتر باشد، بازده نیز بالاتر است. به طور کلی، روش موثر برای بهبود درجه کاتیونی،



شکل ۸ تأثیر (الف) غلظت کائولین، (ب) غلظت پلیمر، (ج) گرانروی پلیمر، (د) pH و (ه) مقدار نمک بر بازده تصفیه آب [۲۳].





شکل ۹ تأثیر pH و نوع پلی‌الکترولیت بر بازده تصفیه آب [۲۵].

خنثی‌سازی بار می‌شود.

فنگ و همکاران [۲۵] نوعی پلی‌اکریل‌آمید آنیونی با ساختار ریزقطعه‌ای را با استفاده از دو مونومر اکریل‌آمید، سدیم آلیل سولفونات و پلی (آلیل آمونیوم کلرید) به عنوان قالب و شروع کننده پرتو فرابنفش سنتز کرده، تأثیر مقدار پلی‌اکریل‌آمید آنیونی را بر میزان حذف کدورت (TR)، پتانسیل زتا و اندازه لخته بررسی کردند (شکل ۹). نتایج نشان داد که ریزقطعات آنیونی در کوپلیمر توانایی خنثی‌سازی و پل زدن را افزایش داده، عملکرد عالی در تصفیه آب با کدورت بالا نشان می‌دهند. بررسی‌ها نشان داد که میزان کدورت و اندازه لخته با افزایش مقدار کوپلیمر در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت، در حالی که پتانسیل زتا در تمام مقادیر بررسی شده روند کاهشی نشان داد. در محدوده مقادیر کم پلی‌اکریل‌آمید ( $0.8 \text{ mg/lit}^1$ )، با افزایش مقدار آن، کارایی خنثی‌سازی و جذب ذرات هماتیت باردار مثبت افزایش می‌یابد. در مقابل، افزایش بیشتر آن منجر به ایجاد اثر کیک و دافعه الکترواستاتیکی شده، بازده تصفیه را کاهش می‌دهد. نتایج شکل ۹ تأیید می‌کند که نمونه‌های ساخته شده بازده بالاتری نسبت به نمونه‌های تجاری APAM-1 و APAM-2 دارند و همچنین نمونه سنتز شده در حضور ماده قالب (TPAS) در مقایسه با نمونه بدون قالب عملکرد بهتری در تصفیه آب نشان می‌دهد.

## ۶ نتیجه‌گیری

پلی‌اکریل‌آمیدها و کوپلیمرهای آن، از مهم‌ترین و رایج‌ترین پلی‌الکترولیت‌های آلی لخته‌ساز هستند که کاربرد زیادی در صنایع مختلف از جمله صنایع تصفیه آب و فاضلاب دارند. در این فرایند عامل لخته‌ساز از طریق برهم‌کنش با ناخالصی

کائولن در ابتدا با افزایش مقدار پلی‌اکریل‌آمید به شدت تا مقدار بیشینه ۹۰٪ افزایش یافته، در ادامه به تدریج کاهش می‌یابد. تأثیر گرانیوی ذاتی و اندازه مولکولی پلی‌اکریل‌آمید بر مقدار عبورپذیری نور در شکل ۸ (ج) نشان داده شده است. در محدوده مورد مطالعه، انتقال نور به تدریج افزایش می‌یابد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که هرچه وزن مولکولی CPAM بالاتر باشد، گرانیوی محلول بالاتر و عملکرد لخته‌سازی بهتر است. pH عامل مهم دیگری است که بر خنثی‌سازی بار و عملکرد لخته‌سازی موثر است. همان‌طور که شکل ۸ (د) مشاهده می‌شود، CPAM در محیط اسیدی عملکرد لخته‌سازی بهتری دارد [۲۴] و توانایی لخته‌سازی تحت شرایط خنثی و قلیایی (pH: ۷-۱۲) به شدت کاهش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً بحث شد، خنثی‌سازی بار و پل زنی عوامل لخته‌ساز منجر به ایجاد لخته در تعلیق کائولن می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که پروتونه شدن گروه‌های  $\text{NH}_2$  در CPAM در  $\text{pH} < 7$  اتفاق می‌افتد، در نتیجه گروه‌های مثبتی از  $\text{NH}_3^+$  ایجاد می‌شود و خاصیت خنثی‌سازی بار را تقویت می‌کند. با توجه به غلظت بالاتر  $\text{H}^+$  در سامانه تحت شرایط اسیدی، بارهای مثبت بر روی CPAM یکدیگر را دفع می‌کند، که باعث ایجاد کشش بیش‌تر در ساختار زنجیره‌ای مولکول‌های بزرگ شده، موجب افزایش خنثی‌سازی بار و پل زنی می‌شود. با این حال، تحت شرایط قلیایی، گروه‌های آمیدی در CPAM آب‌کافت شده، گرانیوی به سرعت کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش پل زنی جذبی می‌شود. در این حالت، غلظت  $\text{OH}^-$  در سامانه افزایش می‌یابد، می‌تواند  $\text{NH}_4^+$  را در زنجیره مولکولی پلیمر خنثی کرده،  $\text{H}_2\text{O}$ ، تولید کند، بنابراین بار مثبت در زنجیره مولکولی کاهش می‌یابد و خنثی‌سازی الکتریکی را ضعیف می‌کند. در واقع کاهش هم‌زمان خنثی‌سازی بار و پل زنی جذبی، تأثیر لخته‌سازی را نامطلوب می‌کند.

همان‌طور که در شکل ۸ (ه) مشاهده می‌شود، افزودن نمک  $\text{NaCl}$ ،  $\text{BaCl}_2$  و  $\text{MgSO}_4$  بر اثر لخته‌سازی در تعلیقی کائولن موثر است. حضور نمک‌های  $\text{NaCl}$  و  $\text{BaCl}_2$  در غلظت کم‌تر از ۱٪، تأثیر مثبتی بر عملکرد لخته‌سازی دارد. با این حال، هنگامی که غلظت  $\text{NaCl}$  و  $\text{BaCl}_2$  بیش از ۱٪ شود، اثر لخته‌سازی غیرمطلوب می‌شود. زیرا در غلظت‌های پایین  $\text{NaCl}$  یا  $\text{BaCl}_2$ ، جذب بار مثبت خارجی بر روی کائولن بیش‌تر از اثر فشرده‌سازی آن بر روی زنجیره درشت‌مولکولی است. هنگامی که غلظت یون خارجی افزایش می‌یابد، زنجیره درشت‌مولکولی فشرده شده، بار مثبت در مولکول بزرگ با بار منفی خنثی می‌شود که منجر به ضعیف شدن اثر پل زدن و

در جداسازی ناخالصی‌های موجود در آب به ساختار شیمیایی، نوع بار و چگالی توزیع آن در زنجیره پلیمر، وزن مولکولی، نوع اختلاط و زمان آن، pH محلول، غلظت مواد آلاینده، حضور نمک و همچنین خصوصیات محلول بستگی دارد.

(پل‌سازی و خنثی‌سازی بار الکتریکی مواد موجود) باعث متراکم‌تر و حجیم‌تر شدن آن‌ها شده، با افزایش سرعت ته‌نشینی ذرات جامد، ناخالصی‌ها را از سامانه آبی حذف می‌کند. بررسی مطالعات انجام شده نشان داد که بازده پلی‌الکترولیت‌ها

## مراجع

- Rabiee A., Ershad-Langroudi A., Zeynali M.E., A Survey on Cationic Polyelectrolytes and Their Applications: Acrylamide Derivatives, *Review Chemical Engineering*, 31, 239–261, **2015**.
- Ma J., Shi J., Ding H., Zhu G., Fu K., Fu X., Synthesis of Cationic Polyacrylamide by Low-Pressure UV Initiation for Turbidity Water Flocculation, *Chemical Engineering Journal*, 312, 20–29, **2017**.
- Xiong B., Loss R.D., Shields D., Pawlik T., Hochreiter R., Zydny L.R., Kumar M., Polyacrylamide Degradation and Its Implications in Environmental Systems, *NPJ Clean Water*, 1, 17, **2018**.
- Rabiee A., Acrylamide-Based Anionic Polyelectrolytes and Their Applications: A Survey, *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 16, 111-119, **2010**
- Zheng H., Ma J., Ji F., Tang X., Chen W., Zhu J., Liao Y., Tan M., Synthesis and Application of Anionic Polyacrylamide in Water Treatment, *Asian Journal of Chemistry*, 25, 7071-7074, **2013**.
- Siyam T., Development of Acrylamide Polymers for the Treatment of Waste Water, *Designed Monomers and Polymers*, 4, 107-168, **2001**.
- Fadner T.A., Morawetz H., Polymerization in the Crystalline State. I. Acrylamide, *Journal of Polymer Science*, 45, 475-501, **1960**.
- Rabiee A., Zeynali M.E., Baharvand H., Synthesis of High Molecular Weight Partially Hydrolyzed Polyacrylamide and Investigation on its Properties, *Iranian Polymer Journal*, 14, 603-608, **2005**.
- Zeynali M.E., Rabiee A., Baharvand H., Synthesis of Partially Hydrolyzed Polyacrylamide and Investigation of Solution Properties (Viscosity Behaviour), *Iranian Polymer Journal*, 13, 479-484, **2004**.
- Boltoa B., Gregory G., Organic Polyelectrolytes in Water Treatment, *Water Research*, 41, 2301-2324, **2007**.
- Zheng H., Zhu J., Jiang Z., Ji F., Tan M., Sun Y., Miao S., Zheng X., Research on Preparation and Application of Dewatering Agents for Tailings Water Treatment, *Advanced Materials Research*, 414, 172-178, **2011**.
- Daifa M., Shmoeli E., Domb A.J., Enhanced Flocculation Activity of Polyacrylamide-Based Flocculant for Purification of Industrial Wastewater, *Polymer Advances Technology*, 30, 2636-2646, **2019**.
- Lee C.S., Robinson J., Chong M.F., A Review on Application of Flocculants in Wastewater Treatment, *Process Safety and Environment Protection*, 92, 489-508, **2014**.
- Ali M.A.M., Alsabagh A.M., Sabaa M., El-Salamony R.A., Mohamed R.R., Morsi R.E., Polyacrylamide Hybrid Nanocomposites Hydrogels for Efficient Water Treatment, *Iranian Polymer Journal*, 29, 455–466, **2020**.
- Wang L.K., Wang M.H., Kao J.F., Application and Determination of Organic Polymers, *Water, Air and Soil Pollution*, 9, 337–348, **1978**.
- Sojka R.E., Lentz RD. Reducing Furrow Irrigation Erosion with Polyacrylamide (PAM), *Journal of Production Agriculture*, 10, 47–52, **1997**.
- Gogate P.R., Pandit A.B., A Review of Imperative Technologies for Wastewater Treatment: I. Oxidation Technologies at Ambient Conditions, *Advances in Environmental Research*, 8, 501–551, **2004**.
- Chu C.P., Lee D.J., Chang B.V., You C.H., Liao C.S., Tay J.H., Anaerobic Digestion of Polyelectrolyte Flocculated Waste Activated Sludge, *Chemosphere*, 53, 757–764, **2003**.
- Kleimann J., Gehin-Delval C., Auweter H., Borkovec M., Super-stoichiometric Charge Neutralization in Particle-Polyelectrolyte Systems, *Langmuir*, 21, 3688–3698, **2005**.
- Ma J., Shi J., Ding H., Zhu G., Fu K., Fu X., Synthesis of Cationic Polyacrylamide by Low-Pressure UV Initiation for Turbidity Water Flocculation, *Chemical Engineering Journal*, 312, 20–29, **2017**.
- Ma J.Y., Fu K., Shi J., Sun Y.J., Zhang X.X., Ding L., Ultraviolet-assisted Synthesis of Polyacrylamide-grafted Chitosan Nanoparticles and Flocculation Performance, *Carbohydrate Polymer*, 151, 565–575, **2016**.
- Guan Q.Q., Zheng H.L., Zhai J., Zhao C., Zheng X.K., Tang X.M., Effect of Template on Structure and Properties of Cationic Polyacrylamide: Characterization and Mechanism, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 5624–5635, **2014**.
- Cheng Z., Dong Z., Su M., Zhang Y., Wang Z., He P., Synthesis of Cationic Polyacrylamide Via Inverse Emulsion Polymerization Method for the Application in Water Treatment, *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 56, 76-85, **2019**.
- Dharani M., Balasubramanian S., Synthesis and Characterization of Piperazinium Polyelectrolytes Carrying Hydrophobic

Functionalities: Effect of Counter Ion and Charge Density on Flocculation. *Journal of Macromolecules Science A.*, 52, 577–585, **2015**.

25. Feng L., Zheng H., Gao B., Zhang S., Zhao C., Zhou Y.,

Xu B., Fabricating an Anionic Polyacrylamide (Apam) with an Anionic Block Structure for High Turbidity Water Separation and Purification, *RSC Advances*, 7, 28918–28930, **2017**.