

بررسی عملکردی راکتور FBC به منظور حذف سختی کلسیمی - مطالعه موردی سد شیرین دره بجنورد

آرش رئوف شیبانی^{۱*}، حامد عزیزی نامقی^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، سرگروه فرآیندهای آب و فاضلاب، شرکت مهندسی مشاور طوس آب،

a.sheibani@toossab.net

۲- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، کارشناس فرآیندهای آب و فاضلاب، شرکت مهندسی مشاور طوس آب،

hamedazizi6648@gmail.com

*a.sheibani@toossab.net

چکیده

در این مقاله، عملکرد یک راکتور کریستالیزاسیون بستر سیال (FBC) جهت حذف سختی کلسیمی از یک نمونه آبی مشخص (نمونه آب برداشت شده از سد شیرین دره بجنورد) مورد بررسی قرار گرفته است. پس از تعریف مسئله (ساخت یک واحد سختی‌گیری برای تصفیه خانه آب بجنورد)، نتایج کیفی خوراک ورودی بررسی و مقادیر پارامترهای مدنظر برای بهترین شرایط کاری راکتور به منظور دستیابی به بالاترین راندمان برای حذف کلسیم تعیین گردید. سپس جهت تعیین پارامترهای عملکردی، آزمایشات پایلوت تست توسط یک راکتور نیمه صنعتی بر روی یک نمونه با حجم 1 m^3 از خوراک و با استفاده از انواع و مقادیر مختلف مواد شیمیایی و سرعت‌های بالاروندگی انجام شد. در طی تست‌های پایلوت مواردی از جمله دی‌ها (خوراک و مواد شیمیایی)، pH جریان‌ها، دما، میزان EC در ورودی و خروجی، ارتفاع بستر (ثابت و سیال شده) و میزان غلظت کلسیم در ورودی و خروجی مورد سنجش قرار گرفت. سپس با تحلیل نتایج حاصل (راندمان حذف کلسیم تا حدود ۹۰٪)، بهترین نوع ماده شیمیایی (NaOH)، سرعت بالاروندگی (80 m/h) و مقدار pH ($5/9$) جهت انجام واکنش سختی‌گیری تعیین شد. علاوه بر این، با توجه به میزان پایین آب خروجی همراه با دانه‌های پلت و عدم تولید هرگونه پساب/لجن این فرآیند را در زمره فرآیندهای بدون پساب و دوست‌دار محیط‌زیست قرار می‌دهد.

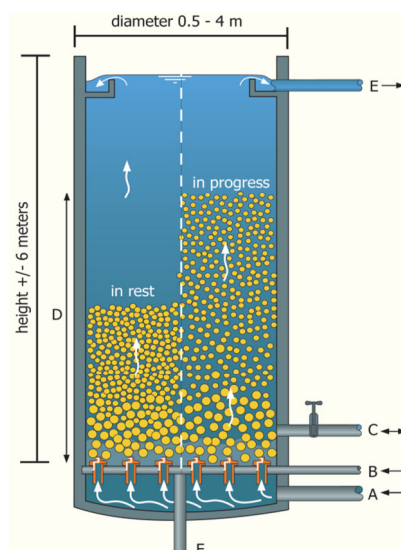
واژه‌های کلیدی: سختی کلسیمی، سختی‌گیری، راکتور کریستالیزاسیون بستر سیال، پایلوت تست.

۱- مقدمه

سختی‌گیری^۱ به مجموعه روش‌هایی گفته می‌شود که به منظور کاهش مقدار یون‌های ایجادکننده سختی به کار برده می‌شوند. در طول سال‌ها، روش‌های فراوانی بدین منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند که هر یک از فرآیند خاص خود استفاده می‌نمایند. از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به مواردی از قبیل، سیستم‌های تبادل‌کننده یونی^۲، سیستم‌های غشایی و روش‌های ترسیب شیمیایی (بر مبنای ته نشینی لجن) اشاره نمود (Kawamura, 1991). در هر سه روش فوق، بخشی از آب به صورت پساب/لجن خارج شده و راندمان تولید را پایین می‌آورد. همچنین، به علت همین پساب/لجن تولیدی تمامی روش‌های فوق از لحاظ زیست محیطی آسیب‌رسان بوده و پساب/لجن تولیدی در آنها را می‌بایست مجدداً به روشی مدیریت نمود. در این میان توسعه راکتورهای کریستالیزاسیون بستر سیال^۳ (FBC) (و یا در اصطلاح راکتورهای دانه‌ای^۴) مزایای قابل توجهی را نسبت به سیستم‌های قدیمی ایجاد نموده‌اند. راکتورهای

FBC به منظور سختی‌گیری و حذف کربنات کلسیم از ابتدای ۱۹۷۰ در هلند به کار برده شدند. پس از آن، تحقیقات گسترده‌ای برای توسعه این تکنولوژی صورت گرفت و ظرفیت سیستم‌های سختی‌گیری نصب شده از این نوع رشد قابل توجهی را طی سال‌های اخیر شاهد بوده است (Demopoulos, 2009; Lewis et al., 2006). طی سال‌های گذشته، کاربرد این راکتورها از فرآیند سختی‌گیری فراتر رفته است. کاربرد آنها در حذف فسفات (van Ammers et al., 1986)، فلوراید (Mons et al., 2007)، حذف و یا بازیابی انواع فلزات سنگین (van Dijk and Braakensiek, 1984) و حتی کنترل میزان CO_2 هوا توسط آنها (Aldaco et al., 2005)، توجهات بسیاری را به نحوه عملکردشان معطوف نموده است.

ساختار کلی راکتورهای دانه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است. این راکتورها از یک تانک با سطح مقطع دایره‌ای و یا چهارگوش که بخشی از آن توسط ذرات دانه‌بندی شده‌ای پر می‌شود، تشکیل شده است. اندازه این ذرات دانه‌بندی شده در حدود ۰/۱-۰/۶ mm متغییر است. به همین سبب سطح وسیعی ($4000 \text{ m}^2/\text{m}^3$) را برای انجام فرآیند کریستالیزاسیون فراهم می‌آورد (Aldaco et al., 2005).



شکل ۱- ساختار یک راکتور کریستالیزاسیون بستر سیال A: ورود آب و یا پساب، B: ورود مواد شیمیایی، C: ورود ذرات ماسه، D: تشکیل دانه‌ها، E: خروجی آب صاف شده، F: خروجی دانه‌های رشد یافته (Graveland et al. 1983)

جریان ورودی با سرعت بالاروندگی (حاصل کسر دبی سیال ورودی به مساحت سطح راکتور) بین 120 m/h - 40 از پایین راکتور وارد می‌شود (Scholler et al., 1987). اگر جهت جریان از بالا به پایین انتخاب می‌شد، پس از گذشت مدت زمان کوتاهی از کارکرد راکتور، لایه‌های کریستالی تشکیل شده بر روی ماسه‌ها به یکدیگر متصل شده و بستری سیمانی شکل ایجاد می‌نمود (Lin and Lee, 2007). انتخاب سرعت بالاروندگی زیاد نیز سبب از بین رفتن لایه ته نشست شده بر روی ذرات ماسه، به سبب سایش آنها به یکدیگر، خواهد گردید.

به همراه جریان آب ورودی، مواد شیمیایی نیز توسط نازل‌هایی به داخل راکتور تزریق می‌شوند. اختلاط کامل این مواد با جریان ورودی و تشکیل رژیم جریانی لوله‌ای^۵ از نکات اساسی در این راکتورها است. تمامی این شرایط فرآیندی، همین طور انتخاب نوع مواد شیمیایی و حتی ساختار راکتور بستگی به نوع موادی دارد که راکتور به منظور جداسازی آن طراحی شده است. با گذشت زمان و رشد لایه کریستالی نشست کرده بر روی دانه‌های اولیه، برخی از



دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران
و دومین همایش ملی عرضه و تقاضای آب شرب و بهداشتی
دانشگاه صنعتی اصفهان
۲۲ الی ۲۴ آبان ماه ۱۳۹۷

دانه‌ها سنگین شده و جریان ورودی دیگر قادر به سیال کردن آن‌ها نمی‌باشد، لذا در انتهای راکتور تجمع می‌یابند. افزایش مقدار این دانه‌ها سبب افزایش اختلاف فشار در طول بستر راکتور خواهد گردید. با افزایش این اختلاف فشار از حد مشخصی، بخشی از این دانه‌ها می‌بایست تخلیه و دانه‌های تازه جایگزین آنها گردد. اندازه نهایی دانه‌ها بین ۲ mm - ۱ بوده و از خلوص بسیار بالایی برخوردار هستند (>۹۸٪) که سبب می‌شود کاربرد بسیاری در صنایع مختلف پیدا نمایند (جدول ۱) (Bacocchi et al., 2006).

جدول ۱- مشخصات مواد خروجی از فرآیندهای FBC و سختی‌گیری رایج (Scholler et al., 1987)

مشخصه	خروجی فرآیند FBC	مقدار در خروجی فرآیندهای سختی‌گیری رایج
اندازه	دانه‌های گرد با اندازه ۱-۲ mm	لجن
مقدار آب همراه	۱-۵٪	۶۰-۸۵٪ (پس از آبگیری مکانیکی)
خلوص	۹۸٪	---

میزان پایین آب خروجی همراه با دانه‌های پلت (جدول ۱) و عدم تولید هرگونه پساب/لجن این فرآیند را در زمره فرآیندهای بدون پساب (ZLD) و دوست‌دار محیط‌زیست قرار می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

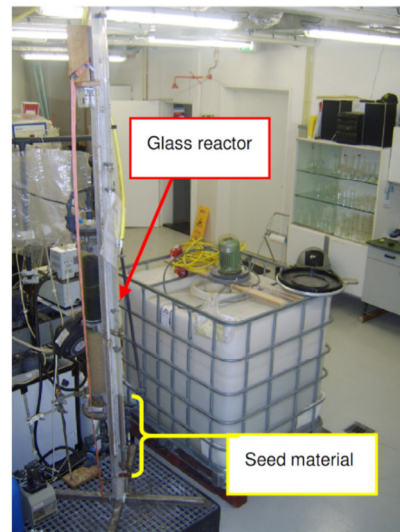
جهت تعیین شرایط عملکردی مناسب و نیز تعیین نوع ماده شیمیایی مورد نیاز جهت استفاده در راکتور پس از انجام نمونه‌گیری به میزان ۱ m^۳ از سد شیرین دره، آزمایشات پایلوت بر روی آن صورت گرفت. آزمایشات پایلوت در یک ستون شیشه‌ای با ارتفاع ۲/۲ m و قطر ۲ cm انجام شد (شکل ۲). راکتور با استفاده از ماسه گردگوشه کوارتزیت با دانسیته بالا و اندازه بین ۰/۳-۰/۱۵ mm به عنوان ماده اولیه پر شد، ارتفاع اولیه بستر نیز ۴۰ cm انتخاب گردید. در جداول ۲ و ۳ به ترتیب مشخصات فیزیکی و شیمیایی ماسه انتخابی مشاهده می‌شود.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی نمونه ماسه انتخابی

نام پارامتر	چگالی توده ماسه	چگالی ماسه	اندازه دانه اولیه (d ₁₀)	ضریب یکنواختی	میزان تخلخل	میزان سختی
واحد	kg/m ³	kg/m ³	mm	-	-	mohs
مقدار	۱۵۰۰	۲۴۵۰	۰/۲۴	۱/۶	۰/۳۸	۷

جدول ۳- مشخصات شیمیایی نمونه ماسه انتخابی

نام ماده شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	inert
درصد وزنی	۹۶/۱۱	۱/۷۲	۰/۴۳	۰/۰۹	۰/۷۳	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۲	۰/۴۳



شکل ۲- تصویری از سیستم پیلوت استفاده شده

آب خام از پایین راکتور وارد گردیده و جریان خروجی نیز از بالای راکتور خارج می‌شود. میزان آب خام ورودی به راکتور توسط پمپ خوراک کنترل می‌شود، تا سرعت بالاروندگی بین ۶۰-۹۰ m/h تنظیم گردد. مواد شیمیایی نیز (در ابتدا ۱۰۴ mmol/L NaOH و سپس ۷۴ mmol/L Ca(OH)₂) از پایین راکتور توسط نازل‌های دوزینگ تزریق می‌گردد. دمای جریان آب نیز در طول تست (بین ۱۹-۲۵ °C) ثابت نگاه داشته شد. در هنگام انجام تست پیلوت علاوه بر پارامترهای مؤثر بر فرآیند مانند pH و بررسی اثر آن بر تعادل بی‌کربنات و سرعت بالاروندگی که پیش از این به آنها اشاره شد، پارامترهای زیر نیز مورد بررسی قرار گرفتند:

- بار سختی کلسیمی (kgCa/m².h)
- بازده کریستالیزاسیون:

میزان کلسیم محلول (٪) + میزان کلسیم کریستال نشده (لجن آمورف) (٪) + میزان کلسیم کریستال شده (٪) = کلسیم ورودی (٪)
نمونه‌ها در طی آزمایشات از ورودی و خروجی راکتور برداشته می‌شوند. پس از هر دوره نمونه‌برداری پارامترهای زیر اندازه‌گیری گردید (جدول ۴).

جدول ۴- پارامترهای اندازه‌گیری شده و نحوه سنجش و آنالیز آنها

ردیف	نوع پارامتر	روش اندازه‌گیری
۱	تمامی دبی‌ها (خوراک و مواد شیمیایی)	به روش حجمی (حجم مایع بر حسب زمان)
۲	pH جریان ورودی و خروجی	pH متر دستی
۳	دما	دماسنج دستی
۴	میزان EC در ورودی و خروجی	هدایت سنج LF191 ساخت Retsch
۵	ارتفاع بستر ثابت و سیال شده	خط‌کش
۶	میزان غلظت کلسیم کل و کلسیم (پس از فیلتر کردن)	فیلتراسیون با غشای ۰/۴۵ μm تیتراسیون با EDTA (۰/۰۱ M) و NaOH (۱M)
۷	میزان غلظت منیزیم کل و منیزیم (پس از فیلتر کردن)	با سنجش میزان سختی کل به روش تیتراسیون با EDTA و کسر آن از میزان کلسیم

در جدول ۵ تست‌های انجام شده و نحوه تغییرات پارامترهای کلیدی در هر یک از آنها نشان داده شده است.

جدول ۵- تست‌های انجام شده و نحوه تغییر پارامترها اولیه در هر یک از آنها

شماره تست	pH	سرعت بالاروندگی (m/h)	نوع ماده شیمیایی مصرفی	دوز ماده شیمیایی مصرف شده (mmol/L solution)	میزان بار سختی (Ca/m ² .h)
۱	۸/۵	۶۰	NaOH	۰/۵۷	۴/۸۵
۲	۹	۶۰	NaOH	۱/۲۷	۴/۸۵
۳	۹/۵	۶۰	NaOH	۱/۵۶	۴/۸۵
۴	۸/۵	۸۰	NaOH	۰/۴۱	۴/۸۵
۵	۹	۸۰	NaOH	۱/۳۶	۶/۹۱
۶	۹/۵	۸۰	NaOH	۲/۰۵	۶/۹۱
۷	۱۰	۸۰	NaOH	۳	۶/۹۱
۸	۸/۵	۹۰	Ca(OH) ₂	۰/۲۵	۸/۵۵
۹	۹	۹۰	Ca(OH) ₂	۰/۸۱	۱۰/۶
۱۰	۹/۵	۹۰	Ca(OH) ₂	۱/۷۱	۱۳/۹۹
۱۱	۹/۷۵	۹۰	Ca(OH) ₂	۱/۹۱	۱۴/۷۴

۳- نتایج و بحث

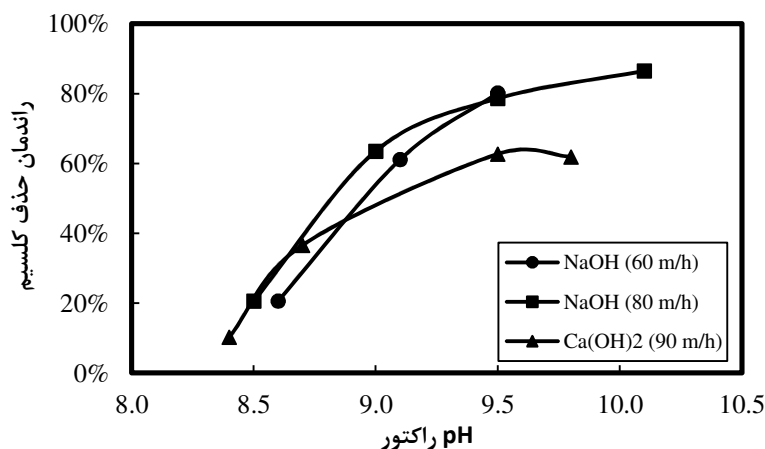
جهت انتخاب فرآیند مناسب آب انتقالی از سد شیرین دره به بجنورد، نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های آب سد شیرین دره مورد بررسی قرار گرفته اند. به علت گستردگی داده‌های شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیکی و میکروبی در اینجا تنها بخشی از نتایج کیفیت شیمیایی آب خروجی از سد شیرین دره که در جهت تعیین موارد مورد نیاز جهت انجام فرآیند سختی‌گیری اهمیت دارند، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. آزمایشات پایلوت با برداشت ۱ m³ آب از سد شیرین دره بر طبق جدول ۶ انجام شد. در ادامه به ارائه نتایج حاصل از این تست‌ها و تحلیل آنها پرداخته شده است.

جدول ۶- نتایج آنالیز کیفی نمونه برداشته شده از سد شیرین دره

مقدار		پارامتر	
پس از فیلتر کردن	پس از همزدن		
۷/۶	۷/۶	pH	
۹۱۹ μS/cm	۹۱۹ μS/cm	هدایت الکتریکی	
۱۶/۶	۱۶/۶	قدرت یونی (محاسبه شده)	
۱/۷۵ mmol/L	۷۱ mg/L	۱/۷۷ mmol/L	۷۱ mg/L
۷۰ mg/L		کلسیم	
۱/۳۲ mmol/L	۳۲ mg/L	۱/۳۲ mmol/L	۳۲ mg/L
۳۲ mg/L		منیزیم	
<۰ mg/L	<۱۰ mg/L	مواد معلق (TSS)	
<۱۰ mg/L	<۱۰ mg/L	کربنات	
۲۳۰ mg/L	۳/۷۷ mmol/L	۲۳۰ mg/L	بی‌کربنات

۳-۱- اثر pH بر راندمان حذف کلسیم

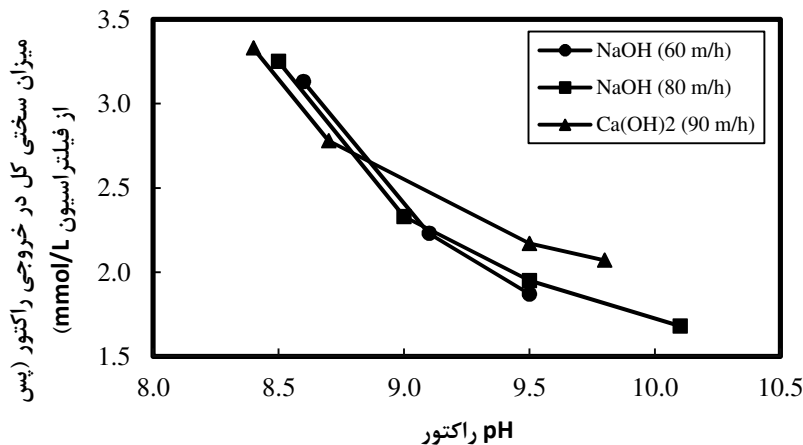
شکل ۳ اثر pH بر میزان راندمان حذف کلسیم را طی تست‌های پایلوت نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، میزان حذف کلسیم توسط راکتور در pH حدود ۹-۱۰ قابل توجه می‌باشد، به طوری که ۸۰٪ و ۸۶٪ از کلسیم به ترتیب در pHهای برابر ۹/۵ و ۱۰ حذف می‌شود. راندمان حذف کلسیم توسط سود در سرعت‌های بالاروندگی نسبتاً مشابه (۸۰-۹۰ m/h) همواره بالاتر از راندمان حذف کلسیم توسط آهک است. در مقادیر بالای pH ($>9/5$) راندمان حذف برای آهک یکنواخت شده در حالی که با سود می‌توان به راندمان‌های بالاتر در مقادیر بسیار بالای pH دست یافت. این نمودار کاملاً با نتایج به دست آمده توسط ماهوی و همکارانش (۲۰۰۵) تطابق دارد (Mahvi et al., 2005). همچنین تأثیر سرعت بالاروندگی به مراتب از تأثیر میزان ماده تزریقی در بالا بردن میزان راندمان سیستم کمتر است.



شکل ۳- راندمان حذف کلسیم در مقادیر مختلف pH

۳-۲- اثر pH بر میزان سختی کل

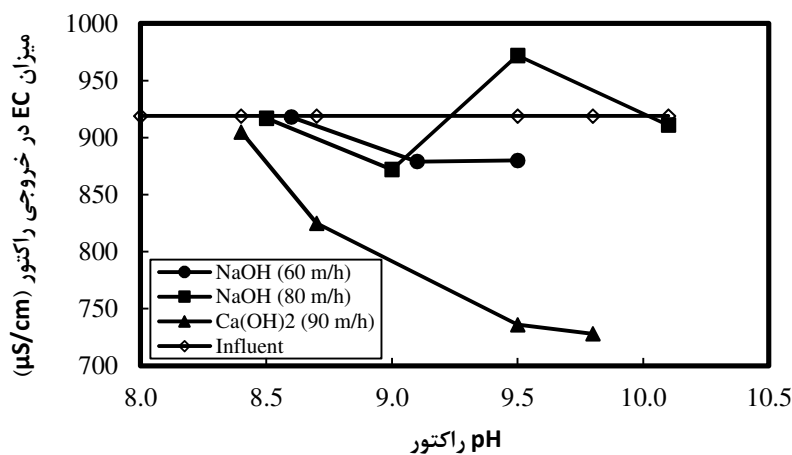
اثر تغییرات pH بر روی کاهش میزان سختی کل در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به راندمان بالای سیستم در حذف کلسیم که در شکل ۳ مشاهده شد، میزان سختی باقیمانده در شکل زیر عملاً سختی منیزیمی خواهد بود که راکتور در این شرایط عملیاتی قابلیت حذف آن را ندارد.



شکل ۴- میزان حذف سختی کل در مقادیر مختلف pH

۳-۳- اثر pH بر هدایت الکتریکی خروجی

همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد میزان هدایت الکتریکی همواره (به جز یک مورد) کمتر از میزان اولیه آن می‌باشد، برای آن یک مورد افزایش نیز دلیلی منطقی نمی‌توان پیشنهاد نمود. همچنین با وجود اینکه راندمان حذف سود (یون سدیم) از حذف یون کلسیم بالاتر می‌باشد، ولی به علت اینکه میزان یون سدیم در طی واکنش افزایش می‌یابد، میزان کاهش EC در آن نسبت به آهک کمتر است.



شکل ۵- تغییرات میزان EC در مقادیر مختلف pH

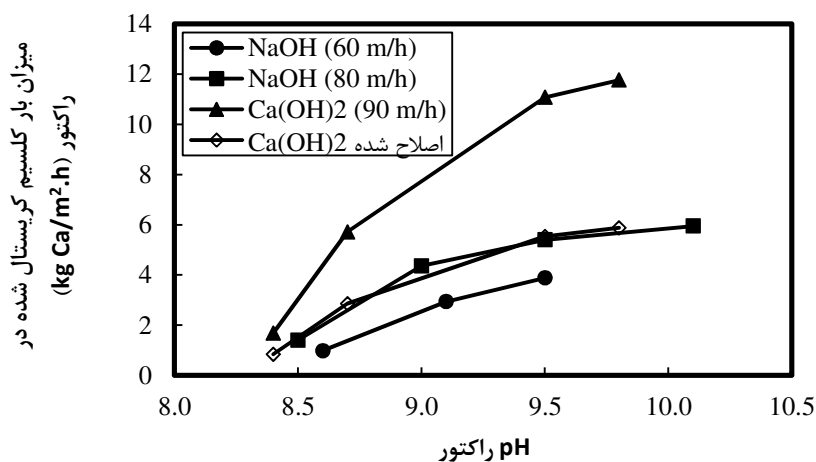
۳-۴- اثر pH بر بار کلسیم کریستال شده عبوری از راکتور

مقادیر بار کلسیم کل (شامل کلیه حالت‌های کلسیم موجود در واکنش) محاسبه شده در تست‌های مختلف در جدول ۷ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، میزان بار سختی کلسیم به غلظت سود تزریقی بستگی ندارد ولی با افزایش سرعت بالاروندگی سود، میزان کلسیم عبوری از سطح راکتور نیز افزایش می‌یابد. در عوض هنگامی که از آهک به عنوان ماده شیمیایی استفاده می‌شود، میزان بار کلسیم با افزایش میزان تزریق ماده شیمیایی افزایش می‌یابد.

جدول ۷- مقادیر محاسبه شده برای بار کلسیم راکتور در تست‌های مختلف

نوع ماده و سرعت بالاروندگی	میزان ماده شیمیایی تزریق شده (mmol/L water)	pH	بار کلسیم کل در راکتور (kg Ca/m ² .h)
NaOH (60 m/h)	۰/۵۷	۸/۶	۴/۵۸
	۱/۲۷	۹/۱	۴/۵۸
	۱/۵۶	۹/۵	۴/۵۸
NaOH (80 m/h)	۰/۴۱	۸/۵	۶/۹۱
	۱/۳۶	۹	۶/۹۱
	۲/۰۵	۹/۵	۶/۹۱
	۳	۱۰/۱	۶/۹۱
Ca(OH) ₂ (90 m/h)	۰/۲۵	۸/۴	۸/۵۵
	۰/۸۱	۸/۷	۱۰/۶۰
	۱/۷۱	۹/۵	۱۳/۹۹
	۱/۹۱	۹/۸	۱۴/۷۴

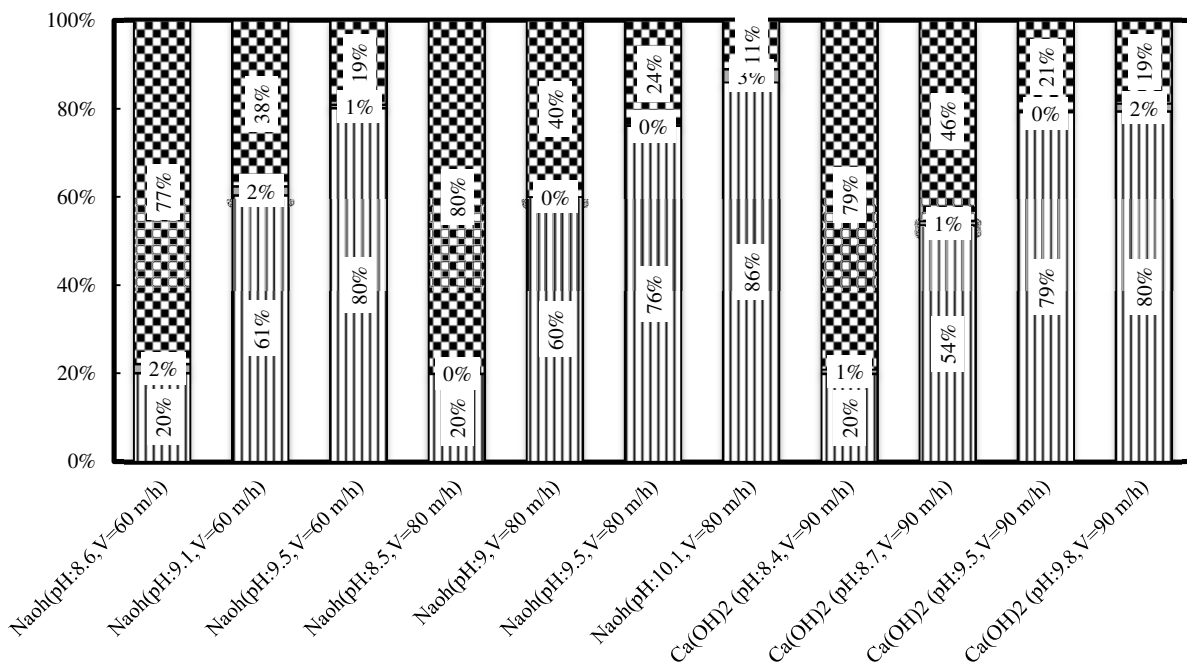
مقادیر اندازه‌گیری شده در هنگام تست برای میزان کلسیم کریستال شده در راکتور در شکل ۶ نشان داده شده است. بار کلسیم کریستال شده در راکتور بر اساس همین مقادیر اندازه‌گیری شده محاسبه شده است. این پارامتر نسبت به بار کلی کلسیم دید بهتری نسبت به کارکرد راکتور ارائه می‌کند. در نگاه اول مشاهده می‌شود که میزان بار کلسیم برای آهک بسیار بالاتر از سود است، که این به معنی کمتر بودن میزان سطح مورد نیاز و به طبع آن اندازه و یا تعداد راکتور کمتر است. ولی همانگونه که پیش از این نیز اشاره شد، میزان کربنات کلسیم تشکیل شده در صورت استفاده از آهک، به ازای حذف یک مقدار برابر از سختی، دو برابر میزانی است که از سود استفاده می‌شود. لذا برای مقایسه بهتر باید میزان بار کلسیم اصلاح شده را برای آهک، که در حقیقت میزان بار کلسیم مؤثر عبوری از سطح مقطع راکتور (بار کلسیم حقیقی تقسیم بر ۲) می‌باشد، محاسبه نمود. بر این اساس بار کلسیم اصلاح شده، میزان بار کلسیم برای آهک و سود تفاوت چندانی ندارد.



شکل ۶- مقادیر اندازه‌گیری شده برای بار کلسیم کریستال شده در راکتور در تست‌های مختلف

۳-۵- حالت‌های مختلف مقدار تشکیل کلسیم در راکتور

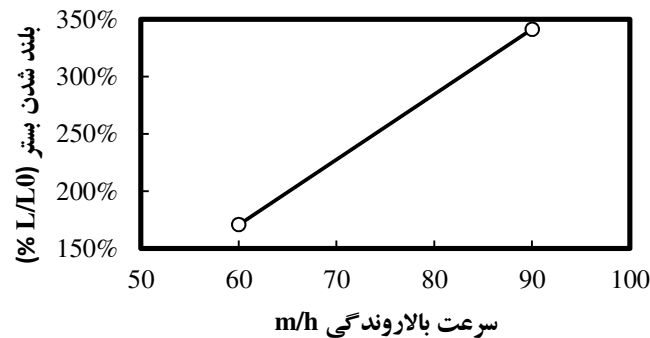
مقادیر مختلف کلسیم تشکیل شده در سیستم برای هر یک از شرایط در شکل ۷ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، میزان کلسیم آمورف (که در حقیقت ماده ناخواسته واکنش بوده و به شکل لجن در انتهای راکتور نشست می‌نماید) در هنگام استفاده از سود در سرعت بالاروندگی 60 m/h در تمامی مقادیر pH تشکیل می‌گردد و در pH برابر $9/5$ به مقدار حداقل خود می‌رسد. برای سرعت بالاروندگی بالاتر (در حدود 80 m/h) تا pH برابر $9/5$ اثری از تشکیل کلسیم آمورف مشاهده نمی‌شود، ولی با افزایش pH به 10 ناگهان میزان قابل توجهی از کلسیم آمورف تشکیل می‌شود. در هنگام استفاده از آهک به جز در pH برابر $9/5$ در بقیه مقادیر pH کلسیم آمورف تشکیل می‌شود. همچنین برای pH بالاتر از $9/5$ ، افزایش pH تفاوت چندانی در میزان کلسیم کریستال شده به وجود نیاورده و تنها صرف تولید لجن می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که pH برابر $9/5$ نقطه مناسب کارکرد راکتور از لحاظ حداقل کردن میزان لجن تولیدی می‌باشد.



شکل ۷- مقادیر جزئی حالت‌های مختلف کلسیم تشکیل شده برای هر یک از تست‌ها. (راه راه: کلسیم کریستال شده، خاکستری: کلسیم آمورف (لجن) و شطرنجی: کلسیم محلول)

۳-۶- بررسی میزان بلند شدگی بستر (L/L_0) در سرعت‌های بالاروندگی مختلف

به منظور محاسبه میزان بلند شدگی بستر در میزان ارتفاع بستر اولیه، میزان بلند شدگی بستر برای دو سرعت 60 و 90 m/h اندازه‌گیری گردید. بر اساس این دو مقدار درصد بلند شدن بستر محاسبه شده و بر حسب سرعت بالاروندگی در شکل ۸ رسم گردید. با در دست داشتن این دو نقطه به راحتی می‌توان میزان بلند شدگی را برای سرعت‌های میانی نیز محاسبه نمود.



شکل ۸- مقدار بلند شدگی بستر در سرعت‌های مختلف

۴- نتیجه‌گیری

بر طبق نتایج حاصل از پایلوت تست می‌توان نتیجه‌گیری نمود، که استفاده از روش FBC برای سختی‌گیری آب سد شیرین دره، در صورتی که نمونه آب برداشتی معیار مناسبی جهت شرایط حقیقی آب فرض شود، بسیار مناسب می‌باشد. با وجود اینکه میزان کاهش EC در صورت استفاده از سود نسبت به آهک کمتر است، لیکن با توجه به جمیع موارد استفاده، سود نسبت به آهک برتری دارد. لذا سود به عنوان ماده شیمیایی مناسب جهت فرآیند سختی‌گیری انتخاب می‌گردد. در خصوص انتخاب بهترین سرعت بالاروندگی نیز با توجه به نتایج حاصل از پایلوت تست با وجود افزایش ارتفاع بلند شدگی در سرعت ۸۰ m/h، لیکن از سایر جهات این سرعت نسبت به سرعت ۶۰ m/h برتری دارد. در خصوص میزان pH نیز مقدار ۹/۵ به عنوان مقدار منتخب تعیین گردید.

۵- قدردانی

در انجام این تحقیق از شرکت‌های آب منطقه‌ای خراسان شمالی (مهندس مرتضوی)، شرکت DHV، شرکت ساب نیرو (مهندس کیوانلو)، و شرکت مهندسی مشاور طوس آب (مهندس گیفانی) به خاطر کلیه همکاری‌های صورت گرفته قدردانی می‌گردد.

۶- پی‌نوشت‌ها

شماره	فارسی	انگلیسی	شماره	فارسی	انگلیسی
۱	سختی‌گیری	Softening	۴	راکتورهای دانه‌ای	Pellet Reactors
۲	تبادل‌کننده یونی	Ion-exchange (IOX)	۵	جریان لوله‌ای	Plug Flow
۳	کریستالیزاسیون بستر سیال	Fluidized Bed Crystallization	۶	فرآیندهای بدون پساب	Zero Liquid Discharge

- Aldaco. R., Irabien. A., Luis, P., (2005), "Fluidized bed reactor for fluoride removal", *Chemical Engineering Journal*, 107, 113-117.
- Baciocchi, R., Storti, G., Mazzotti, M., (2006), "Process design and energy requirements for the capture of carbon dioxide from air", *Journal of Chemical Engineering and Processing*, 45, 1047-1058.
- Demopoulos, G.P., (2009), "Aqueous precipitation and crystallization for the production of particulate solids with desired properties", *Hydrometallurgy*, 96(3), 199-214.
- Graveland, A., van Dijk, J.C., de Moel, P.J., Oomen; J.H.C.M., (1983), "Developments in water softening by means of pellet reactors", *Journal American Water Works Association*, 75(12), 619-625.
- Kawamura, S. (1991), *Integrated design of water treatment facilities*, A Wiley-Interscience publication.
- Lewis, A.E., (2006), "Fines Formation (and Prevention) in Seeded Precipitation Processes", *KONA Powder and Particle Journal*, 24, 119-125.
- Lin, S. and Lee, C., (2007), *Water and wastewater calculation manual*", 2nd Ed., US: McGraw-Hill Professional, New York.
- Mahvi, A.H., Shafiee, F., Naddafi, K., (2005), "Feasibility study of crystallization process for water softening in a pellet reactor", *International Journal of Environmental Science & Technology*, 1(4), 301-304.
- Mons, M.N., van Dijk, J.C., Gatel, D., Hesse, S., Hofman, J., Nguyen, M. L., (2007), "Drinking water hardness; review of reasons and criteria for softening and conditioning of drinking water", *Global Water Research Coalition* (in preparation).
- Scholler, M., van Dijk, J.C., Wilms, D., (1987), *Recovery of Heavy Metals by Crystallization in the Pelletreactor*, In: De Waal K.J.A., Van Den Brink W.J. (eds) Environmental Technology. Springer, Dordrecht.
- van Ammers, M., van Dijk, J.C., Graveland, A., Nühn, P.A.N.M., (1986), "State of the art of pellet softening Water Supply", *Proceedings of the Specialized Conference on New Technologies in Water Treatment, Organized by the International Water Supply Association*, Amsterdam, 15 - 19th Sep., 4, pp. 223-235.
- van Dijk, J.C., Braakensiek, H., (1984), "Phosphate removal by crystallization in a fluidized bed", *Water Science Technology*, 17, 133-142.

Performance Investigation of a FBC Reactor for Calcium Softening- Case study: Shirin Dare Dam-Bojnourd

Arash Rauof Sheibani^{1,*}, Hamed Azizi Namaghi²

**1- Graduated M.Sc. student in Chemical Engineering, Head of Process Group,
Toossab Consulting Engineers Company, a.sheibani@toossab.net**

**2- Ph.D student in Chemical Engineering, A Member of Process Group, Toossab
Consulting Engineers Company, Hamedazizi6648@gmail.com**

a.sheibani@toossab.net

Abstract

In this paper, the performance of a fluidized bed crystallization (FBC) reactor in calcium softening of the specific water sample (Bojnourd Shirin-Dare dam) has been investigated. After definition of the problem (construction of a softening unit for water treatment plant of Bojnourd), the results of feed quality were assessed and the values of mentioned parameters for optimum operating conditions of reactor were determined in order to reach the maximum efficiency for calcium softening. Afterwards, in order to determine the performance parameters, pilot tests were conducted by semi-industrial reactor on 1 m³ sample of the feed. Accordingly, various type and amount of chemicals and up-ward velocities were performed. The variables such as: flows (feed and chemicals), pH, temperature, EC of inlet and outlet streams, height of bed (fixed and fluidized), total concentration of the calcium in inlet and outlet streams were measured during the pilot tests. After analyzing the results of pilot tests (removal efficiency of calcium is around 90%), the best chemical (NaOH), up-ward velocity (80 m/h) and pH value (9.5) were determined for softening reaction. Furthermore, with respect to the low water discharge with pellets and lack of any wastewater production, this process categorizes in the group of zero liquid discharge and environmental friendliness processes.

Keywords: Calcium hardness, Softening, FBC reactor, Pilot test