



بررسی عملکرد غشاهای نانوفیلتر تجاری در جداسازی انتخابی یون‌های اورانیم (VI) از آهن (III)

مرتضی قاسمی ترک‌آباد، علیرضا کشتکار*، سید جابر صفدری

پژوهشکده‌ی مواد و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: برای جداسازی انتخابی یون‌های اورانیم (VI) از آهن (III)، عملکرد سه غشای نانوفیلتر تجاری (PES-۲، NF-۱ و NF-۲) از نظر میزان، شدت جریان عبوری و گزینش‌گری تحت شرایط عملیاتی مختلف ارزیابی شد. با افزایش pH از ۳ تا ۶، شدت جریان عبوری از غشاهای کاهش و ضریب بازدارندگی یون‌ها افزایش یافت. اورانیم دارای ضریب بازدارندگی کوچک‌تری نسبت به آهن بوده و غشاهای PES-۲ و NF-۱ در pH ۴ بیشینه‌ی گزینش‌گری اورانیم نسبت به آهن را دارند. اما، بیشینه‌ی گزینش‌گری NF-۲ برابر با ۲٫۹۷ و در pH ۳ است. غشای PES-۲ در فشار ۱۰ bar دارای مقدار بیشینه‌ی ۷۲٫۲۵٪ برای بازدارندگی آهن بوده و مقادیر بازدارندگی آهن و اورانیم برای NF-۱ در فشارهای مختلف نسبتاً ثابت بود (به ترتیب حدود ۹۷٪ و ۸۴٪). با افزایش فشار از ۵ تا ۲۰ bar، بازدارندگی آهن توسط NF-۲ ثابت مانده (حدود ۹۷٪) اما میزان بازدارندگی اورانیم توسط این غشا از ۸۴٫۰۶٪ به ۷۰٫۴۶٪ کاهش می‌یابد. رفتار این غشاهای در مقابل افزایش غلظت یون‌های آهن از ۰٫۱۲ به ۱ mM متفاوت است. بیشینه‌ی گزینش‌گری برای غشاهای NF-۱ و NF-۲ به ترتیب برابر با ۴۳٫۷۱ و ۱۳٫۵۹ بود که نشان می‌دهد NF-۱ عملکرد خیلی مطلوبی دارد. به نظر می‌رسد فرایند نسبتاً جدید نانوفیلتراسیون دارای قابلیت خوبی در استفاده از آن برای جداسازی انتخابی اورانیم از آهن است.

کلیدواژه‌ها: غشاهای نانوفیلتر، جداسازی، اورانیم، آهن

Investigation of Performance of Commercially Available Nanofilter Membranes in Selective Separation of Uranium (VI) Ions from Iron (III)

M. Ghasemi Torkabad, A.R. Keshtkar*, J. Safdari

Materials and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

Abstract: Performance of Three commercially available nanofilter membranes (PES-2, NF-1 and NF-2) in terms of rejection, permeate flux, and membrane selectivity under a variety of operational conditions was evaluated for selective separation of uranium (VI) ions from iron (III). The membranes permeate fluxes were decreased with an increase in the pH range of 3-6, while the rejection of ions was increased. Uranium rejection with these membranes was lower than iron rejection and the PES-2 and NF-1 membranes had the maximum membrane selectivity of iron over uranium at pH 4. The maximum membrane selectivity of NF-2, however, was 2.97 at pH 3. The PES-2 membrane had the maximum iron rejection of 72.25% at the pressure 10 bar. For NF-1 the rejection of iron and uranium was found to be relatively constant (about 97% and 84%, respectively) against increasing the pressure. As the pressure increased from 5 to 20 bar, iron rejection by NF-2 was remained constant (about 97%) but uranium rejection by this membrane was decreased from 84.06% to 70.46%. It was found that the effect of increasing the iron concentration from 0.12 to 1mM on the behavior of these membranes is different. The maximum membrane selectivity of uranium over iron by the NF-1 and NF-2 membranes was 43.71 and 13.59, respectively, which showed that NF-1 has a very desirable performance. It seems that the relatively new process of nanofiltration has a good potential for selective separation of uranium from iron.

Keywords: Nanofilter Membranes, Separation, Uranium, Iron



۱. مقدمه

اولین مرحله از فرایند تولید اورانیم از کان‌سنگ پس از استخراج آن، مرحله‌ی کانه‌آرایی است. در یک کارخانه‌ی کانه‌آرایی فرایندهایی نظیر آماده‌سازی، خردایش و آسیاب نمودن، فروشویی، جداسازی جامد از مایع، تغلیظ و خالص‌سازی، رسوب‌گیری و در نهایت آب‌گیری و خشک کردن بر روی کان‌سنگ انجام می‌شود تا محصول کارخانه که اورانیم اکسید است برای مرحله‌های بعدی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای تولید شود [۱، ۲]. همان‌طور که مشخص است یکی از فرایندهای اصلی در مرحله‌ی کانه‌آرایی، تغلیظ و خالص‌سازی محلول فروشویی است. هدف از این فرایند، انجام یک جداسازی انتخابی و تغلیظ اورانیم در محلول فروشویی است [۱]. برای این منظور، با توجه به مشخصه‌های محلول فروشویی و هم‌چنین مشخصه‌های مورد نیاز برای محصول کارخانه، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که اساس این روش‌های مرسوم، استخراج با حلال، تبادل یون و یا ترکیبی از این دو فرایند است [۱، ۳]. یکی از ناخالصی‌های همراه با محلول فروشویی، آهن (III) است. کنترل و حذف آهن، موضوعی بسیار مهم در معدن‌کاری و صنعت استخراج فلزها است. بنابراین، برای سهولت در بازیابی فلزهای ارزشمند و حذف مزاحمت آهن، استفاده از فرایندهای تبادل یون و استخراج با حلال به منظور استخراج یون‌های آهن (III) از محلول‌های فرایندی مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. اگر غلظت این یون در محلول فروشویی زیاد باشد از فرایند استخراج با حلال و در غیر این صورت از فرایند تبادل یون استفاده می‌شود [۵]. این در حالی است که این روش‌ها از نظر اقتصادی به صرفه نیستند. زیرا، اغلب استخراج‌کننده‌های جامد و مایعی که برای آهن (III) پیشنهاد شده‌اند با آن پیوند محکمی برقرار می‌کنند و این موضوع باعث می‌شود که فرایند عریان‌سازی فاز آلی باردار و یا بازگشت آهن به فاز آبی آن به سختی صورت گیرد [۴]. با توجه به اهمیت جداسازی آهن (III) به دلیل تأثیر نامطلوب آن بر جداسازی و خالص‌سازی اورانیم، پژوهش‌های مختلفی برای بهبود فرایند تغلیظ و خالص‌سازی محلول فروشویی سنگ معدن اورانیم به انجام رسیده است.

برای مثال، در پژوهش انجام شده به وسیله‌ی چراغ‌پور و همکاران [۵] عنوان شده است که با توجه به وجود یون‌های آهن

(III) با غلظت نسبتاً کم در محلول‌های رقیق‌شده‌ی حاصل از فروشویی سنگ معدن اورانیم ساغند، لزوم حذف آن‌ها به روش تبادل یون آشکار می‌شود. برای جداسازی این یون‌ها ابتدا آزمایش‌ها بر روی محلول ساختگی انجام شد و برای این منظور از رزین‌های آنیونی بهره جسته شد. توانایی چند رزین بررسی و مشخص شد که درصد جذب یون‌های آهن (III) از محلول کلریدی به عامل‌هایی چون غلظت اسید، نوع رزین و اندازه‌ی ذرات رزین وابسته است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که رزین Dowex ۱X۴ برای جذب یون‌های آهن مناسب است. رزین انتخابی، با محلول فروشویی کان‌سنگ اورانیم نیز آزمایش و گزینش‌گری این رزین برای جذب یون‌های آهن (III) تأیید شد. هم‌چنین، در پژوهش دیگری [۲]، قبل از استفاده از فرایند استخراج با حلال برای استخراج اورانیم، از فرایند جذب سطحی و از یک زئولیت پوشش داده شده با منگنز اکسید برای حذف آهن و سایر ناخالصی‌های همراه با محلول فروشویی سنگ معدن اورانیم استفاده شد.

در پژوهش حاضر، از ویژگی جداسازی انتخابی نانوفیلترها استفاده شد و فکری برای جداسازی انتخابی یون‌های اورانیل از یون‌های آهن (III) به منظور خالص‌سازی محلول فروشویی سنگ معدن کم‌عیار اورانیم شکل گرفت. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، بررسی امکان جداسازی یون‌های آهن (III) از یون‌های اورانیم (VI) با تکیه بر استفاده از فن‌آوری نانوفیلتراسیون است. اخیراً، استفاده از فرایند غشایی نانوفیلتراسیون در صنایع مختلف گسترش پیدا کرده است. زیرا، با استفاده از این فن‌آوری، برخی از مشکل‌های مربوط به فن‌آوری‌های مرسوم مرتفع شده است [۶]. هم‌چنین، می‌توان از فن‌آوری نانوفیلتراسیون در تفکیک یونی استفاده نمود. زیرا یکی از مشخصه‌های منحصربه‌فرد این فن‌آوری، امکان تفکیک یون‌ها براساس اندازه و بار آن‌ها است. جداسازی یون‌ها اساساً توسط چگالی بار یون‌ها به همراه تحرک‌پذیری و اندازه‌ی یون آب‌دار به انجام می‌رسد. بنابراین، امکان استفاده از غشاهای نانوفیلتر در جداسازی انتخابی یون‌ها وجود دارد که این موضوع یکی از مزیت‌های مهم و یکی از دلیل‌های رشد تجاری سریع این فن‌آوری است [۷، ۸]. در پژوهش پیشین [۹]، به شناسایی و بررسی تأثیر مهم‌ترین پارامتر فرایندی بر عملکرد فرایند غشایی نانوفیلتراسیون برای جداسازی یون‌های اورانیم از محلول آبی



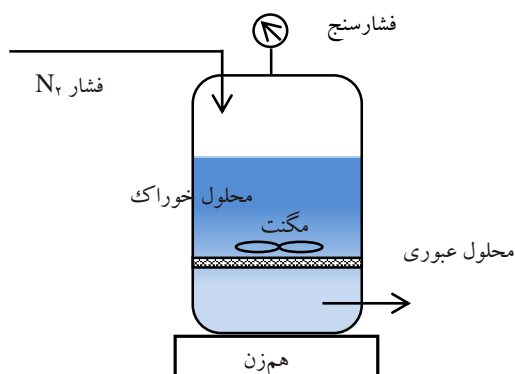
به سیستم جریان متقاطع، پسماند کمتری تولید خواهد شد. در شکل ۱ طرحواره‌ای از سیستم آزمایشگاهی مورد نظر آورده شده است. مهم‌ترین بخش این سیستم واحد غشایی^(۳) است. این واحد، محفظه‌ای به حجم ۰/۵ لیتر است. در هر آزمایش ۲۵۰ ml محلول داخل آن ریخته و برای جلوگیری از پدیده‌ی پلاریزاسیون غلظتی توسط مگنت و هم‌زن مغناطیسی با تندی ۵۰۰ دور بر دقیقه هم زده می‌شود. سطح مؤثر غشا در آن 7.07 cm^2 (دایره‌ای به قطر ۳ cm) بوده و فشار مورد نیاز از طریق یک کپسول نیتروژن تأمین می‌شود.

۳.۲ انتخاب نوع غشا

شرکت‌های زیادی در دنیا اقدام به تولید و ارائه غشاهای پلی‌مری نظیر نانوفیلترها می‌کنند. با توجه به مطالعه‌های انجام شده و امکان‌های شرکت‌های واردکننده‌ی تجهیزات و مواد آزمایشگاهی، برای انجام این پژوهش غشاهایی با مشخصه‌های درج شده در جدول ۱ تهیه شد. پس از تهیه، غشاها دور از نور و در محیطی تاریک نگه‌داری شد و قبل از استفاده، با آب بدون یون شستشو داده و سپس به مدت ۲۴ ساعت درون آب بدون یون قرار داده شد. لازم به ذکر است، تاکنون پژوهشی در رابطه با بررسی عملکرد غشاهای مورد استفاده در این پژوهش (PES-۲، NF-۱ و NF-۲) در جداسازی یون اورانیم (VI) از یون آهن (III) انجام نشده است.

۴.۲ اندازه‌گیری مقدار اورانیم محلول

مقدار یون‌های اورانیل و آهن محلول با استفاده از دستگاه طیف‌سنج نشری اتمی- پلاسما جفت‌شده‌ی القایی (مدل DV۷۳۰۰، ساخت شرکت اُپتیما^(۴)) و به ترتیب در طول موج‌های 409.014 و 259.939 nm اندازه‌گیری شد.



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از سیستم ته بسته و تجهیزهای مورد نیاز.

تک‌جزیی اورانیم پرداخته شد و با توجه به نتیجه‌های به دست آمده، مشخص شد که این فرایند دارای قابلیت خوبی به منظور استفاده از آن در جداسازی و بازیابی اورانیم محلول در آب است. در این پژوهش، برای فهم بیشتر قابلیت فن‌آوری نانوفیلتراسیون در جداسازی یون‌های اورانیم (VI) از آهن (III) در یک محیط دو جزیبی، سه غشای نانوفیلتر PES-۲، NF-۱ و NF-۲ تحت شرایط عملیاتی مختلف شامل pH (از ۳ تا ۶)، فشار (۵ تا ۲۰ bar) و غلظت یون آهن (از ۰/۱۲ تا ۱ mM) مورد آزمایش قرار گرفت. به نظر می‌رسد که بتوان از نتیجه‌های حاصل از این پژوهش در مطالعه‌های بیشتر و انتخاب فن‌آوری غشایی نانوفیلتراسیون برای کاربرد در صنعت چرخه‌ی سوخت هسته‌ای استفاده نمود.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ مواد شیمیایی

محلول‌های دو جزیبی با استفاده از آب بدون یون و نمک‌های اورانیل نیترات $[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ و آهن نیترات $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$ (ساخت شرکت مرک آلمان) تهیه شد. در تمام آزمایش‌ها، غلظت اورانیم در محلول دو جزیبی اورانیم-آهن برابر با 0.12 mM بود (جهت تشابه با محلول حاصل از زیست فروشویی کان‌سنگ کم‌عیار اورانیم ساغند که غلظت اورانیم در آن حدود 26 mg/l است و در آزمایشگاه تولید شده است، این غلظت انتخاب شد). pH محلول‌ها با استفاده از HNO_3 و NaOH یک مولار و به وسیله‌ی یک pH متر (مدل ۶۹۱، ساخت شرکت مترآم^(۱)) در مقدارهای دلخواه تنظیم شد.

۲.۲ سیستم غشایی آزمایشگاهی

یکی از بخش‌های این پژوهش، طراحی و ساخت یک سیستم غشایی آزمایشگاهی است. با بررسی پژوهش‌های انجام شده، مشخص شد که پژوهش‌گران در بحث فرایندهای غشایی با نیرومحرکه‌ی فشار، معمولاً از دو مفهوم سیستم آزمایشگاهی ته بسته^(۲) و سیستم آزمایشگاهی جریان متقاطع استفاده نموده‌اند. در این پژوهش، سیستم آزمایشگاهی ته بسته که کار کردن با آن راحت بوده ترجیح داده شد. این سیستم به دلیل سادگی، زمان کم‌تری برای انجام آزمایش‌ها نسبت به سیستم جریان متقاطع لازم دارد. هم‌چنین، با توجه به حجم کم محلول مورد نیاز نسبت



جدول ۱. مشخصه‌های غشاهای مورد استفاده (ارایه شده توسط شرکت سازنده)

NF-۲	NF-۱	PES-۲	مشخصه‌های غشا
سپرو	سپرو	سپرو ^(۵)	شرکت سازنده
صفحه‌ای، پلی‌مری	صفحه‌ای، پلی‌مری	صفحه‌ای، پلی‌مری	نوع غشا
پلی استر تقویت شده با یک بستر پلی‌سولفون	پلی استر تقویت شده با یک بستر پلی‌سولفون	متعلق به سازنده	جنس ماده‌ی نگه‌دارنده
پلی آمید	پلی آمید	پلی اتر سولفون	جنس ماده‌ی سطح غشا
-	-	۲۰۰۰	اندازه‌ی حفره‌ها (دالتون)
۵۰ درصد NaCl ۹۸ درصد MgSO _۴	۹۰ درصد NaCl ۹۹٫۵ درصد MgSO _۴	-	میزان بازداری ^۶
فشار ۱۲۰۰ psi، دما ۵۰ °C و pH بین ۳ تا ۱۰	فشار ۱۲۰۰ psi، دما ۵۰ °C و pH بین ۳ تا ۱۰	فشار ۱۵۰ psi، دما ۵۰ °C و pH بین ۲ تا ۱۰	محدودیت‌های عملیاتی
۲۵٫۰۶	۵٫۶۱	۱۵۷٫۱۷	نفوذپذیری آب خالص ^۷ (l/(h.m ^۲ .bar))

^۶ تحت شرایط آزمایش فشار ۱۵۰ psi، غلظت ۲۰۰۰ mg l^{-۱} و دمای ۲۵ °C
^۷ به دست آمده در این پژوهش.

۵.۲ شرایط آزمایش

تمام آزمایش‌ها در دمای محیط انجام شد. پارامترهای مورد اندازه‌گیری در هر آزمایش شامل شدت جریان محلول عبوری از غشا^(۶) و غلظت یون‌های آهن و اورانیل در محلول عبوری از غشا بود. شدت جریان عبوری، یکی از پارامترهای مهم در بررسی عملکرد یک غشا است. معمولاً فرض می‌شود که حفره‌های غشا دارای اندازه‌ی یکسانی هستند. با در نظر گرفتن این که حفره‌های غشا به صورت مویرگ‌های موازی با هم باشند، می‌توان شدت جریان حجمی محلول عبوری از غشا به ازای واحد سطح (J) را به دست آورد [۶]

$$J = \frac{V}{t \times A} \quad (۱)$$

که در آن، V حجم محلول عبوری در زمان t و A سطح غشا است. هم‌چنین، با رسم شدت جریان آب خالص عبوری از غشا نسبت به فشار (ΔP)، خط راستی به دست می‌آید که می‌توان نفوذپذیری^(۷) غشا برای آب خالص (L_p) را از شیب آن به دست آورد [۶]

$$L_p = \frac{J}{\Delta P} \quad (۲)$$

یکی از پارامترهای مورد استفاده در بررسی عملکرد یک غشا با نیرومحرکه‌ی فشار، ضریب بازداری یا پس‌زنی^(۸) یون‌ها توسط غشا است. بازداری جزء i که با R_i نمایش داده می‌شود، در سیستم‌های ته بسته چنین به دست می‌آید [۱۰]

$$R_i = \left(1 - \frac{C_i^P}{C_i^C}\right) \times 100 \quad (۳)$$

که در آن، C_i^P غلظت جزء محلول i در جریان عبوری از غشا و C_i^C، غلظت جزء i در محلول نگه‌داشته شده^(۹) است. مقدار C_i^P را می‌توان مستقیماً از تجزیه‌ی عنصری محلول عبوری از غشا به دست آورد اما به دلیل بسته و تحت فشار بودن محفظه امکان نمونه‌گیری از محلول داخل محفظه‌ی غشایی وجود ندارد. از این‌رو، مقدار C_i^C از طریق موازنه‌ی جرم محاسبه می‌شود (با مشخص بودن مقدار اولیه در خوراک، حجم محلول عبوری از غشا و ترکیب آن). هم‌چنین، درصد عبور جزء i (T_i) که همان توانایی عبور جزء i محلول از میان غشا است، چنین به دست می‌آید [۱۱]

$$T_i = \frac{C_i^P}{C_i^C} \times 100 \quad (۴)$$

مفهوم گزینش‌گری غشا نسبت به دو ماده‌ی i و j موجود در محلول را که با MS_{i/j} نشان داده می‌شود می‌توان برای مشخصه‌یابی توانایی یک غشا در جداسازی دو جزء i و j از یک‌دیگر استفاده نمود. این ضریب را می‌توان هم به صورت نسبت درصد عبور دو جزء از غشا و هم همانند فرایندهای تقطیر به صورت تابعی از غلظت‌های جزء i و j در جریان‌های خوراک (یا محلول نگه‌داشته شده) و جریان محلول عبوری از غشا نشان داد [۱۱، ۱۲]

$$MS_{i/j} = \frac{T_i}{T_j} = \frac{C_i^P}{C_i^C} \times \frac{C_j^C}{C_j^P} = \frac{1-R_i}{1-R_j} \quad (۵)$$



۳. یافته‌ها و بحث

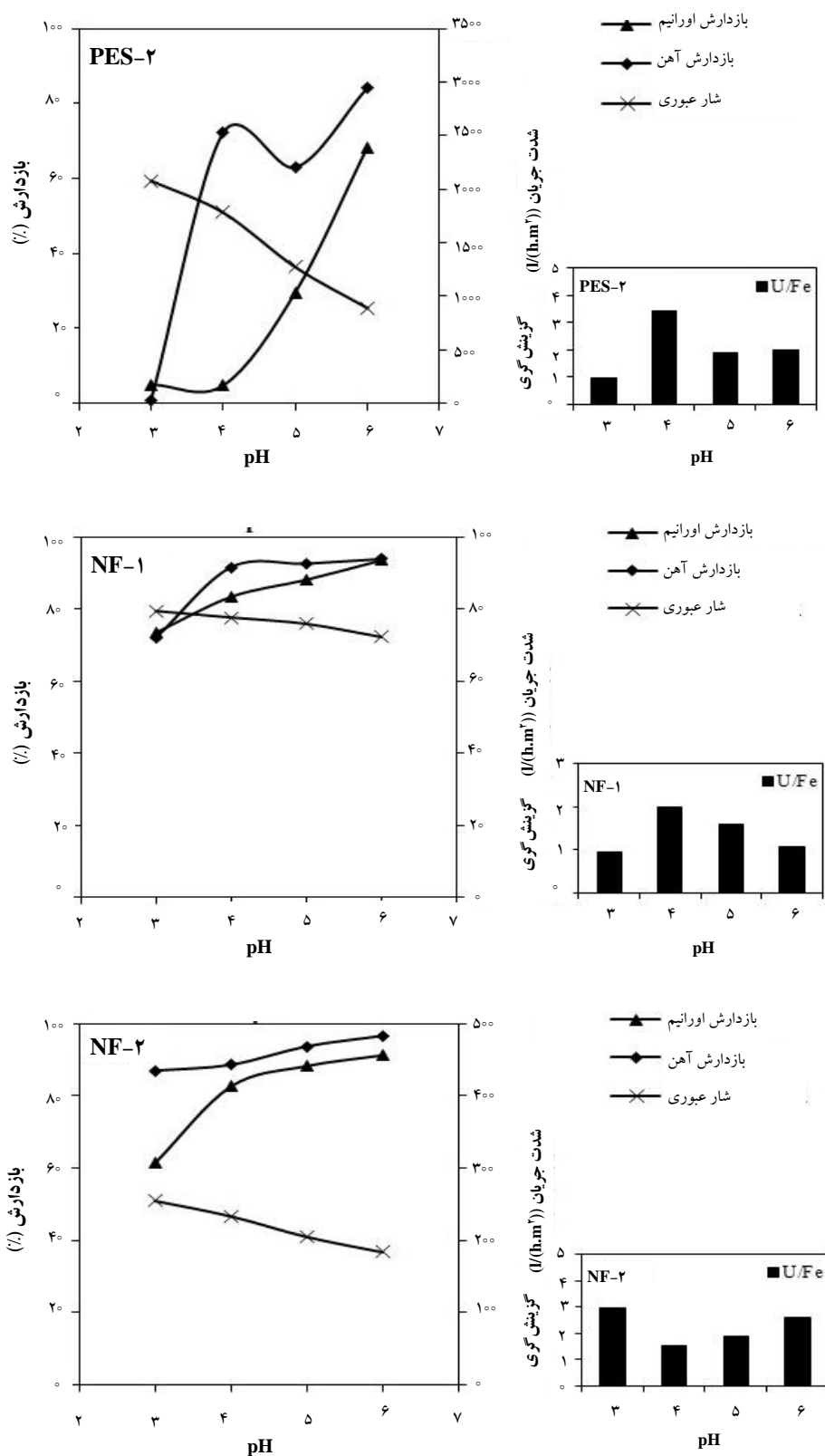
۱.۳ تأثیر pH محلول بر فرایند

کاتیون‌ها بر درصد گونه‌های مختلف یک عنصر خاص (برای مثال اورانیم) در محیط، استفاده شده است نرم‌افزار ویزوآل مینتک^(۱۰) است [۱۴]. در این پژوهش نیز از این نرم‌افزار برای برآورد تأثیر pH محلول بر روی توزیع گونه‌های مختلف آهن و اورانیم استفاده شد. نتیجه‌های به دست آمده برای محلول با غلظت ۱۲ mM نسبت به آهن و اورانیم در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در محدوده‌ی pHهای اسیدی ۳ تا ۴ گونه‌ی غالب موجود در محلول برای اورانیم به صورت UO_2^{2+} است و در pHهای بالاتر یعنی ۵ و ۶ به شکل $(UO_2)_2(OH)_6^{+}$ و $(UO_2)_2(OH)_4^{+}$ است که ترکیب‌های کمپلکسی به مراتب بزرگ‌تر از UO_2^{2+} هستند. هم‌چنین با توجه به داده‌های جدول ۲، در محدوده‌ی pH مورد بررسی یون‌های آهن بیش‌تر به صورت $FeOH^{2+}$ و $Fe(OH)_3^+$ ظاهر می‌شوند. یک ویژگی کلی برای فرایند غشایی نانوفیلتراسیون، جداسازی یون‌ها براساس اندازه و ظرفیت (یا چگالی بار) آن‌ها است [۱۵]. از این‌رو، با افزایش pH محلول، ضریب بازدارش یون‌ها افزایش می‌یابد چون ترکیب‌های کمپلکسی بزرگ، که بیش‌تر در pHهای بالاتر ظاهر می‌شوند، به سختی می‌توانند از منافذ غشا عبور کنند. از یک نگاه دیگر، ضریب بازدارش یون‌های اورانیل نسبت به یون آهن کوچک‌تر است. این امر می‌تواند به دلیل بزرگ‌تر بودن چگالی بار در یون‌های آهن باشد. این موضوع به نوعی تأییدکننده‌ی این مطلب است که هم بار یک یون و هم اندازه‌ی آن در میزان جدایش آن توسط غشاهای نانوفیلتر مؤثر است.

نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که در محدوده‌ی pH مورد بررسی، میزان بازدارش یون‌های آهن توسط غشاهای PES-۲، NF-۱ و NF-۲ به ترتیب کم‌تر از ۸۵ درصد، بیش‌تر از ۷۰ درصد و بیش‌تر از ۸۵ درصد است. هم‌چنین یون‌های اورانیل توسط غشاهای PES-۲، NF-۱ و NF-۲ به ترتیب با مقدارهای کم‌تر از ۷۰ درصد، بیش‌تر از ۷۰ درصد و بیش‌تر از ۶۰ درصد نگه داشته می‌شود. بنابراین، میزان بازدارش یون‌ها توسط غشای PES-۲ از غشاهای NF-۱ و NF-۲ کوچک‌تر است. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده در رابطه با نفوذپذیری آب خالص برای این سه غشا (جدول ۱)، مشخص می‌شود که غشای PES-۲ دارای اندازه‌ی حفره‌های بزرگ‌تری نسبت به دو غشای دیگر است. بنابراین، کوچک‌تر بودن مقدارهای بازدارش یون‌ها توسط این غشا دور از انتظار نیست.

pH محلول از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند غشایی نانوفیلتراسیون است [۱۳]. این پارامتر می‌تواند با تغییر در طبیعت بار سطحی غشا و اندازه‌ی حفره‌های آن و هم‌چنین با تغییر در گونه‌های فلزی حل شده عملکرد جداسازی غشا را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، pH محلول با تأثیر بر روی مشخصه‌های غشا و هم‌چنین بر روی شیمی محلول، باعث تغییر ضریب بازدارش و ترکیب جریان عبوری از غشا می‌شود [۶]. با توجه به این موضوع، معمولاً از این پارامتر به عنوان کلیدی برای کنترل میزان جداسازی مورد نظر استفاده می‌شود [۸]. با توجه به اهمیت این پارامتر، در این پژوهش نیز به بررسی تأثیر آن بر روی شدت جریان محلول عبوری از غشا، ضریب بازدارش یون‌ها و هم‌چنین گزینش‌گری غشا پرداخته شد. لازم به ذکر است در پژوهش‌ها، برای مطالعه‌ی اثر یک پارامتر، غالباً آن پارامتر را تغییر داده و سایر پارامترها را ثابت نگه می‌دارند [۱۳]. بنابراین، در این آزمایش فشار ۱۰ bar و غلظت یون‌های آهن و اورانیل در محلول خوراک ۱۲ mM انتخاب و با تغییر pH محلول خوراک، شدت جریان عبوری از غشاهای PES-۲، NF-۱ و NF-۲ و ضریب بازدارش یون‌های آهن و اورانیل توسط این غشاها اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که پارامترهای مربوط به طراحی واحد غشایی (به عنوان مثال ابعاد غشا) و شرایط عملیاتی (نظیر فشار و ...) به طور مستقیم بر روی شدت جریان عبوری از غشا تأثیرگذار هستند. از این‌رو، با توجه به تجربه‌ی کار با سیستم آزمایشگاهی در شرایط مختلف، فشار به نحوی انتخاب شد که شدت جریان محلول عبوری از غشا به یک مقدار معقول و قابل اندازه‌گیری برسد. انتخاب غلظت یون‌های اورانیل نیز براساس محدوده‌ی غلظت اورانیم در محلول‌های حاصل از زیست‌فروشی کان‌سنگ کم‌عیار اورانیم بوده است. هم‌چنین، با توجه به داده‌های جدول ۱ که توسط شرکت سازنده‌ی غشاها ارایه شده است، امکان انجام آزمایش در pHهای کم‌تر از ۳ وجود ندارد چون پایین‌تر از محدوده‌ی عملیاتی غشاهای مورد استفاده است. نتیجه‌های به دست آمده در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده مشخص می‌شود که با افزایش pH از ۳ تا ۶، شدت جریان عبوری از غشاها کاهش و ضریب بازدارش یون‌های آهن و اورانیل توسط این غشاها افزایش می‌یابد.

از جمله‌ی نرم‌افزارهایی که در مقاله‌ها برای توجیه نتیجه‌ها و هم‌چنین پیش‌بینی تأثیر pH محلول و حضور سایر آنیون‌ها و



شکل ۲. تأثیر pH محلول بر بازدارش یون‌های آهن و اورانیل و هم‌چنین شدت جریان محلول عبوری از غشاهای PES-۲، NF-۱ و NF-۲. شکل الحاقی مربوط به انتخاب‌پذیری اورانیم نسبت به آهن توسط غشاهای است.



جدول ۲. توزیع گونه‌های مختلف اورانیم و آهن در pHهای مختلف (به دست آمده توسط نرم‌افزار ویزوآل میتک)

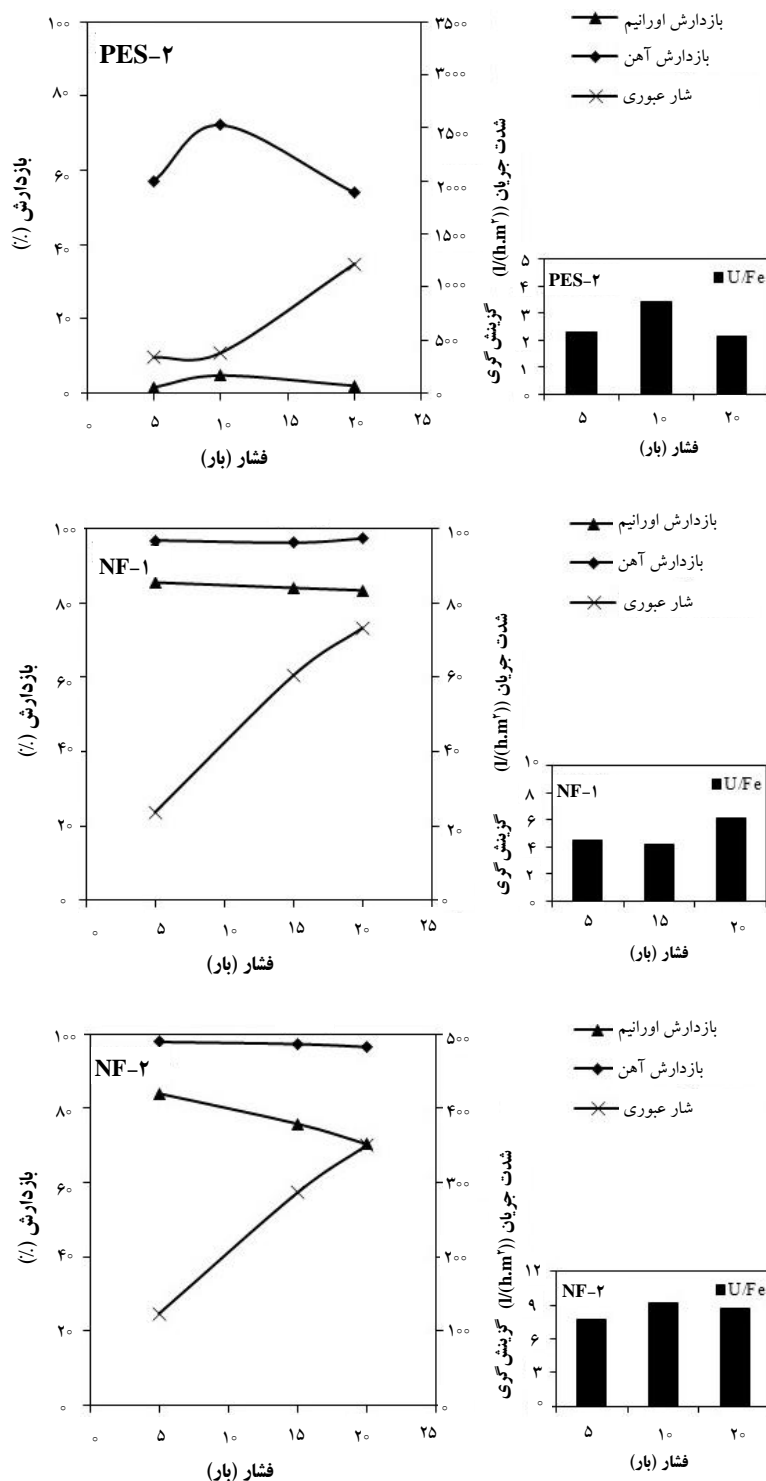
pH	جزء	گونه	غلظت (%)	pH	جزء	گونه	غلظت (%)
۳	UO ₂ ²⁺	UO ₂ ²⁺	۹۹,۳۰۰	۵	UO ₂ ²⁺	UO ₂ ²⁺	۱۷,۰۵۳
		UO ₂ NO ₃ ⁺	۰,۱۰۵			UO ₂ (OH) ₂ (aq)	۰,۱۰۹
		UO ₂ OH ⁺	۰,۴۹۴			UO ₂ NO ₃ ⁺	۰,۰۱۹
		(UO ₂) ₂ (OH) ₂ ²⁺	۰,۰۵۰			UO ₂ OH ⁺	۸,۹۰۱
		(UO ₂) ₂ OH ³⁺	۰,۰۵۱			(UO ₂) ₂ (OH) ₂ ²⁺	۱۵,۷۹۰
	Fe ³⁺	Fe ³⁺	۹,۹۱۴		(UO ₂) ₂ (OH) ₂ ²⁺	۴۹,۸۴۹	
		FeOH ²⁺	۷۷,۱۰۲		(UO ₂) ₂ (OH) ₂ ⁺	۵,۷۳۰	
		Fe(OH) ₂ ⁺	۱۲,۶۹۳		(UO ₂) ₂ (OH) ₂ ²⁺	۲,۳۹۹	
		Fe ₂ (OH) ₂ ⁴⁺	۰,۲۸۹		(UO ₂) ₂ OH ³⁺	۰,۱۴۹	
		UO ₂ ²⁺	۹۰,۴۰۱		FeOH ²⁺	۵,۴۶۹	
۴	UO ₂ ²⁺	UO ₂ NO ₃ ⁺	۰,۱۰۰	۶	UO ₂ ²⁺	UO ₂ ²⁺	۴,۶۳۵
		UO ₂ OH ⁺	۴,۶۳۴			UO ₂ (OH) ₂ (aq)	۰,۲۷۰
		(UO ₂) ₂ (OH) ₂ ²⁺	۰,۰۷۰			UO ₂ OH ⁺	۲,۱۹۱
		(UO ₂) ₂ (OH) ₂ ⁺	۰,۰۳۴			(UO ₂) ₂ (OH) ₂ ²⁺	۰,۹۵۳
		(UO ₂) ₂ OH ³⁺	۰,۴۲۰			(UO ₂) ₂ (OH) ₂ ⁺	۷۴,۶۴۵
	Fe ³⁺	Fe ³⁺	۰,۴۵۰		(UO ₂) ₂ (OH) ₂ ⁺	۲۱,۱۶۲	
		FeOH ²⁺	۳۶,۸۷۵		(UO ₂) ₂ (OH) ₂ ²⁺	۰,۳۵۷	
		Fe(OH) ₂ ⁺	۶۲,۶۱۱		FeOH ²⁺	۰,۶۲۷	
		Fe ₂ (OH) ₂ ⁴⁺	۰,۰۶۱		Fe(OH) ₂ ⁺	۹۹,۳۷۳	

شده و حفره‌های آن کوچک‌تر شده است. این پدیده باعث کاهش شدت جریان محلول عبوری از غشا شده است. یافته‌های مشابه توسط سایر پژوهش‌گران گزارش شده است [۱۶، ۶].

۲.۳ تأثیر فشار بر فرایند

فشار از جمله پارامترهای فرایندی مهم تأثیرگذار بر فرایندهای غشایی با نیرومحرکه‌ی فشار است. بنابراین، در اکثر پژوهش‌ها به بررسی اثر این پارامتر بر عملکرد غشا پرداخته شده است. در شکل ۳ نیز میزان بازدارش یون‌های آهن و اورانیل به همراه شدت جریان محلول عبوری از غشاها و هم‌چنین انتخاب‌پذیری اورانیم نسبت به آهن توسط غشاهای PES-۲، NF-۱ و NF-۲ به صورت تابعی از فشار آورده شده است. غلظت هر دو یون آهن و اورانیل در محلول دو جزیی برابر با ۰,۱۲ mM بوده و نتیجه‌های به دست آمده برای محلولی با pH ۴ است. با افزایش فشار از ۵ تا ۲۰ bar، شدت جریان محلول عبوری از هر سه غشا افزایش یافته اما رفتار غشاها از نظر تغییرهای میزان بازدارش یون‌های آهن و اورانیل متفاوت است.

نتیجه‌های به دست آمده برای انتخاب‌پذیری اورانیم نسبت به آهن توسط این غشاها، نشان داد که غشاهای PES-۲ و NF-۱ در pH ۴ بیشینه‌ی گزینش‌گری را دارند (به ترتیب مقادیرهای ۳,۴۳ و ۱,۹۹). اما بیشینه‌ی انتخاب‌پذیری اورانیم نسبت به آهن توسط غشای NF-۲ برابر با ۲,۹۷ بوده که در pH ۳ اتفاق افتاده است. با توجه به شکل ۲، افزایش pH منجر به تغییرهای خطی در شدت جریان محلول عبوری از غشاها شده است. با افزایش pH از ۳ تا ۶، شدت جریان محلول عبوری از غشاهای PES-۲، NF-۱ و NF-۲ به ترتیب حدود ۵۷، ۹ و ۲۸ درصد کاهش پیدا کرده است. در فرایندهای غشایی با نیرومحرکه‌ی فشار نظیر نانوفیلتراسیون، شدت جریان محلول عبوری از غشا و میزان بازدارش به هم وابسته نیستند. از این‌رو، وابستگی شدت جریان به pH محلول نشان‌دهنده‌ی یک الگوی بسیار پیچیده است. اندازه‌ی حفره‌های غشا با pH محلول در تماس با آن، به دلیل منبسط و منقبض شدن شبکه‌ی پلی‌مری غشا، تغییر می‌کند [۱۶، ۶]. بنابراین، به نظر می‌رسد که با افزایش pH محلول، به دلیل تفاوت در میزان جذب آب توسط گروه‌های یونیده شده‌ی غشا، غشا دچار انقباض



شکل ۳. تأثیر فشار بر بازدارش یون‌های آهن و اورانیل و هم‌چنین شدت جریان محلول عبوری از غشاهای PES-۲، NF-۱ و NF-۲. شکل الحاقی مربوط به انتخاب‌پذیری اورانیم نسبت به آهن توسط غشاهای است.

تحت تأثیر اندازه و بار آن‌ها بوده افزایش نمی‌یابد (شدت جریان آب عبوری و مقدار یون‌های عبوری از غشا به یک نسبت تغییر نمی‌کنند). بنابراین، شدت جریان آب عبوری بیش‌تر منجر به رقیق شدن جریان عبوری از غشا شده و در نتیجه بازدارش بیش‌تری

در مجموع اثر فشار را می‌توان توسط دو سازوکار توصیف نمود که این دو سازوکار میزان جدایش یون‌ها توسط یک غشا را کنترل می‌کنند. در سازوکار اول، افزایش فشار منجر به افزایش شدت جریان آب عبوری از غشا می‌شود. اما، انتقال یون‌ها چون



پژوهش دیگری [۱۱]، تأثیر فشار بر روی بازدارش یون‌های اورانیل از یک نمونه‌ی آب آشامیدنی توسط دو غشای نانوفیلتر $G1^0$ و DL (تهیه شده از شرکت اسمونیکس^(۱۱)) مورد بررسی قرار گرفت. غلظت اولیه‌ی اورانیم در این نمونه‌ی آب برابر با ۲ ppm بود. با توجه به نتیجه‌های این پژوهش، افزایش فشار منجر به تغییرهای اندکی در گزینش‌گری هر دو غشا شد. هنگامی که فشار از ۱ تا ۴ bar افزایش پیدا کرد، انتخاب‌پذیری اورانیم نسبت به سدیم توسط دو غشای $G1^0$ و DL به ترتیب از ۱٫۵ به ۲٫۸ و از ۱۶ به ۲۰ افزایش پیدا کرد. انتخاب‌پذیری اورانیم نسبت به منیزیم نیز برای غشای $G1^0$ از ۱٫۴ به ۲ و برای غشای DL از ۱۱٫۸ به ۱۱ تغییر کرد.

شدت جریان محلول عبوری از غشا یک پارامتر مهم در طراحی و تحلیل اقتصادی فرایندهای جداسازی غشایی است. زمانی که میزان بازدارش ماده‌ی حل‌شده مناسب باشد، شدت جریان محلول عبوری از غشا تبدیل به یک پارامتر اساسی در بهینه‌سازی فرایند می‌شود. با بالا بودن این شدت جریان، سطح غشای مورد نیاز برای فرآوری مقدار مشخصی از محلول، کاهش می‌یابد [۱۹]. با بررسی تأثیر فشار بر روی شدت جریان محلول عبوری از این سه غشا، مشخص شد که افزایش فشار باعث افزایشی نسبتاً خطی در شدت جریان محلول عبوری از این غشاها شده است، به نحوی که شدت جریان محلول عبوری از غشای PES-۲ از 34^0 به $1221 \text{ l}(\text{h.m}^2)$ تغییر کرده است. هم‌چنین، برای غشاهای NF-۱ و NF-۲ این تغییرها به ترتیب از ۲۴ به $3 \text{ l}(\text{h.m}^2)$ و از ۱۲۴ به $35^0 \text{ l}(\text{h.m}^2)$ هستند. این موضوع، نشان‌دهنده‌ی آن است که افزایش فشار عملیاتی باعث افزایش نیروی محرکه و غلبه بر مقاومت غشاها شده است [۱۹]. این موضوع توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است [۱۸، ۲۰]. به عنوان مثال، در یک پژوهش برای حذف Na^+ از محلول NaCl با غلظت ۲٫۵ mM، با افزایش فشار از ۵ به ۱۳ bar شدت جریان محلول عبوری از غشای NF-۲ به صورت خطی و حدوداً از ۶۵ به $19^0 \text{ l}(\text{h.m}^2)$ افزایش پیدا کرده است [۲۱].

۳.۳ تأثیر غلظت آهن (III) بر فرایند

برای مطالعه‌ی اثر غلظت یون آهن بر روی عملکرد سه غشای PES-۲، NF-۱ و NF-۲ در جداسازی انتخابی یون‌های اورانیل از آهن، غلظت یون اورانیل در محلول خوراک در مقدار

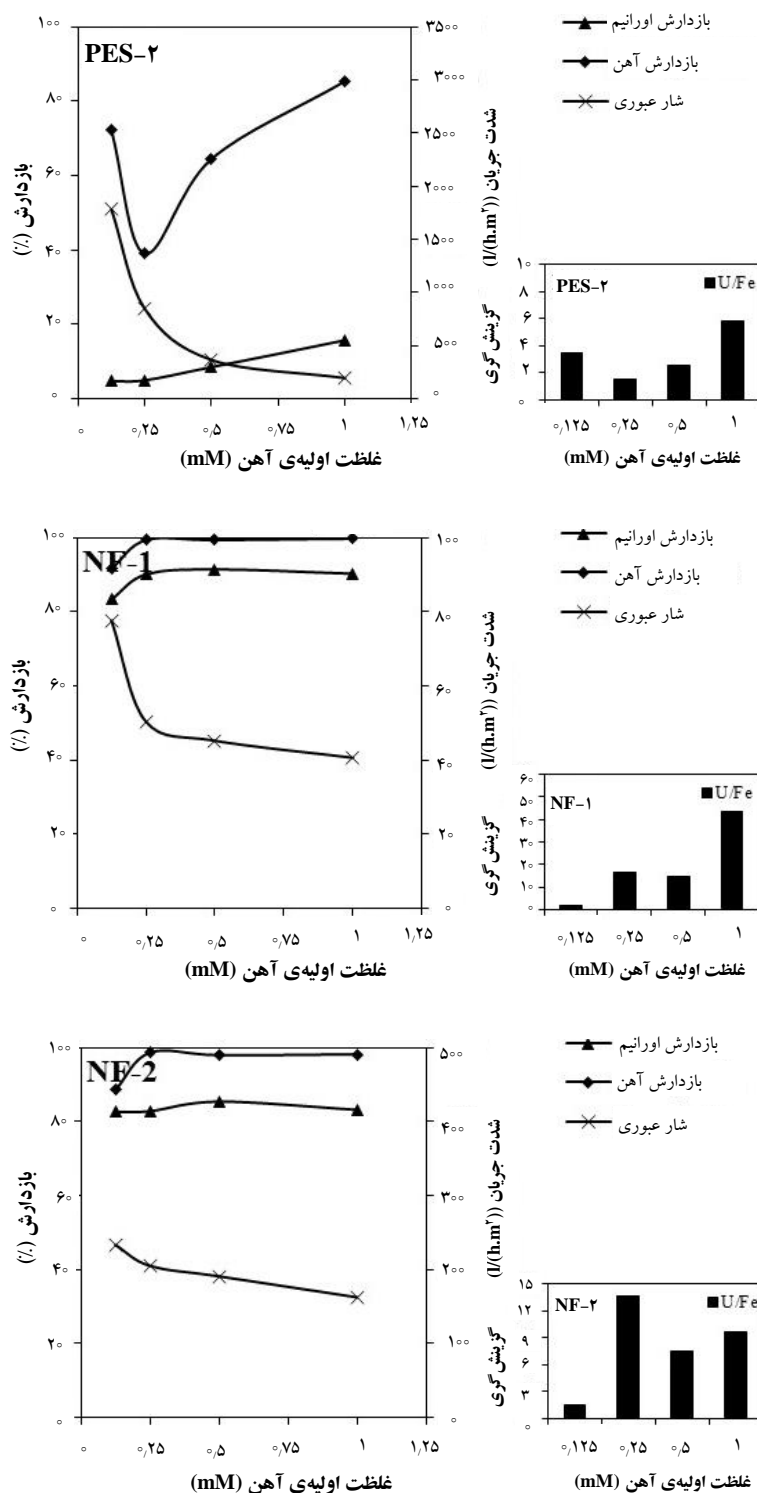
مشاهده می‌شود. در سازوکار دوم، افزایش فشار باعث می‌شود یون‌های بیش‌تری به سطح غشا منتقل شده و از این‌رو پلاریزاسیون غلظتی بر روی سطح غشا افزایش می‌یابد. پلاریزاسیون غلظتی منجر به کاهش اثرهای دافعه‌ی ناشی از بار روی غشا و بار یون‌ها شده و در نتیجه میزان بازدارش یون‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین، این دو پدیده که به صورت هم‌زمان رخ می‌دهند تعیین‌کننده‌ی رفتار بازدارشی یون‌ها توسط غشا در فشارهای مختلف هستند [۱۷، ۱۸]. در این پژوهش نیز اثر کلی فشار بر روی میزان بازدارش یون‌های آهن و اورانیل توسط این دو پدیده و سازوکار رقابتی کنترل شده است. به عنوان مثال، برای غشای PES-۲ در فشارهای پایین (کم‌تر از ۱۰ bar) سازوکار اول غالب بوده و در فشارهای بالا (بیش‌تر از ۱۰ bar) سازوکار دوم، کنترل‌کننده‌ی میزان بازدارش است. بنابراین، به همین دلیل است که در فشار ۱۰ bar شاهد مقدار بیشینه‌ی ۷۲٫۲۵ درصد برای بازدارش آهن توسط این غشا هستیم. مقادیرهای بازدارش مشاهده شده برای غشای NF-۱ در فشارهای مختلف نسبتاً ثابت است. این مقادیرها برای آهن و اورانیم به ترتیب حدود ۹۷ و ۸۴ درصد هستند. بنابراین، رقابت دو سازوکار اشاره شده منجر به مشاهده‌ی مقادیرهای تقریباً ثابتی برای بازدارش آهن و اورانیم توسط غشای NF-۱ شده است و این غشا از نظر میزان بازدارش یون‌ها رفتار پایداری در مقابل فشار دارد. هم‌چنین ضریب بازدارش یون آهن توسط غشای NF-۲ با تغییر فشار ثابت مانده (حدود ۹۷ درصد) اما با افزایش فشار از ۵ تا ۲۰ bar مقدار بازدارش اورانیم توسط این غشا از ۸۴٫۰۶ درصد به ۷۰٫۴۶ درصد کاهش پیدا کرده است.

نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که مقدار بازدارش یون‌ها توسط غشای PES-۲ از غشاهای NF-۱ و NF-۲ کوچک‌تر است. همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد به نظر می‌رسد این موضوع به دلیل ساختار باز غشای PES-۲ نسبت به دو غشای کاملاً فشرده‌ی NF-۱ و NF-۲ باشد. هم‌چنین، دلیل بزرگ‌تر بودن ضریب بازدارش آهن نسبت به اورانیم را می‌توان، همان‌طور که در بخش ۱.۳ توضیح داده شد، به بزرگ‌تر بودن چگالی بار نسبت داد.

با توجه به شکل ۳، غشای NF-۲ از نظر گزینش‌گری یون آهن نسبت به اورانیم عملکرد بهتری نسبت به دو غشای دیگر دارد. بیشینه‌ی گزینش‌گری مشاهده شده برای سه غشای PES-۲، NF-۱ و NF-۲ به ترتیب، برابر با ۳٫۴۳، ۶٫۰۸ و ۹٫۱۳ است. در

به این داده‌ها، مشخص می‌شود که رفتار سه غشای PES-۲، NF-۱ و NF-۲ در مقابل افزایش غلظت یون‌های آهن متفاوت است.

۰٫۱۲ mM ثابت نگه داشته شد و غلظت یون آهن از ۰٫۱۲ mM به ۱ mM افزایش داده شد. این آزمایش در pH ۴ و فشار ۱۰ bar انجام شد. داده‌های تجربی در شکل ۴ آورده شده است. با توجه



شکل ۴. تأثیر غلظت یون آهن بر بازدارش یون‌های آهن و اورانیل و هم‌چنین شدت جریان محلول عبوری از غشاهای PES-۲، NF-۱ و NF-۲. شکل الحاقی مربوط به انتخاب‌پذیری اورانیم نسبت به آهن توسط غشاهای است.



رقیق شدن محلول باقی مانده بر روی غشا دلیل کاهش مقدار بازدارش یون‌ها است).

با توجه به مقادارهای به دست آمده برای انتخاب پذیری، مشخص می‌شود که غشای NF-1 دارای مقادارهای خیلی بالایی برای انتخاب پذیری اورانیم نسبت به آهن است. بیشینه گزینش‌گری مشاهده شده برای غشاهای NF-1 و NF-2 به ترتیب برابر با ۴۳/۷۱ و ۱۳/۵۹ است که نشان می‌دهد غشای NF-1 از نظر گزینش‌گری و تحت شرایط عملیاتی مورد مطالعه عملکرد خیلی مطلوبی دارد. هم‌چنین، با افزایش غلظت یون آهن گزینش‌گری این غشا افزایش می‌یابد.

از شکل ۴ مشخص است که شدت جریان محلول عبوری از غشاهای PES-2، NF-1 و NF-2 با افزایش غلظت یون آهن کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان با ذکر دو پدیده بیان نمود. اول این که جذب و یا رسوب یون‌ها بر روی سطح غشا منجر به کاهش در اندازه‌ی مؤثر حفره‌های غشاها می‌شود. هم‌چنین، افزایش غلظت محلول منجر به افزایش در میزان فشار اسمزی شده و از این رو، شدت جریان محلول عبوری از غشا کاهش می‌یابد [۶، ۲۰].

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی عملکرد سه غشای PES-2، NF-1 و NF-2 به منظور جداسازی اورانیم (VI) از آهن (III) پرداخته شد. با توجه به یافته‌ها مشخص شد که pH محلول مستقیماً بر روی مشخصه‌های غشا و نوع گونه‌های یون‌های موجود در محلول تأثیر می‌گذارد به نحوی که افزایش آن از ۳ به ۶ منجر به کاهش ۵۷، ۹ و ۲۸ درصدی در شدت جریان محلول عبوری از غشاهای PES-2، NF-1 و NF-2 شد. هم‌چنین، با افزایش pH ضریب بازدارش یون‌های آهن و اورانیل توسط این سه غشا افزایش می‌یابد. افزایش فشار باعث افزایش نیروی محرکه و غلبه بر مقاومت غشاها شده و افزایشی نسبتاً خطی در شدت جریان را به همراه داشت. اما، رفتار غشاها از نظر تغییرهای مقدار بازدارش یون‌های آهن و اورانیل متفاوت بود. افزایش غلظت یون‌های آهن از ۰/۱۲ به ۱ mM منجر به کاهش شدت جریان محلول عبوری از این سه غشا و در بیش‌تر موارد افزایش ضریب بازدارش یون‌ها شد. با توجه به

همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، غشای PES-2 دارای اندازه‌ی حفره‌های بزرگ‌تری نسبت به دو غشای دیگر بوده و از این رو، ضریب بازدارش یون‌های آهن و اورانیل توسط این غشا کوچک‌تر از غشاهای NF-1 و NF-2 است که عملکرد مناسبی در محدوده‌ی شرایط عملیاتی مورد مطالعه نسبت به دو غشای دیگر ندارد. در رابطه با غشاهای NF-1 و NF-2، در اغلب موارد با افزایش غلظت یون آهن در محیط، میزان بازدارش یون‌های آهن و اورانیل افزایش می‌یابد، به نحوی که با افزایش غلظت آهن از ۰/۱۲ به ۱ mM، میزان بازدارش یون‌های آهن و اورانیل توسط غشای NF-1 به ترتیب از ۹۱/۶۶ درصد به ۹۹/۷۸ درصد و از ۸۳/۴۲ درصد به ۹۰/۳۶ درصد تغییر می‌یابد. هم‌چنین، تغییرهای ضریب بازدارش یون‌های آهن و اورانیل برای غشای NF-2 به ترتیب از ۸۸/۶۸ درصد به ۹۸/۲۵ درصد و از ۸۲/۶۵ درصد به ۸۳/۲۸ درصد است. افزایش ضریب بازدارش یون‌ها با افزایش غلظت خوراک توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است [۶] و به این صورت بیان شده است که افزایش بازدارش به دلیل جذب یون‌ها بر روی سطح غشا بوده است. نتیجه‌های به دست آمده از یک پژوهش دیگر [۱۷]، نیز نشان داد که با افزایش غلظت محلول خوراک، مقدار ضریب بازدارش افزایش می‌یابد. هم‌چنین، نتیجه‌ها نشان داد که انتقال آرسنیک از غشا متناسب با افزایش غلظت آن در خوراک افزایش نمی‌یابد. از یک نگاه دیگر، افزایش غلظت یون در محلول می‌تواند از دو طریق بر روی میزان بازدارش آن توسط غشا تأثیر بگذارد. هنگامی که غلظت یک یون در محلول اطراف غشا افزایش می‌یابد، نیروی‌های الکترواستاتیکی مابین غشا و یون‌های موجود در محلول ضعیف‌تر می‌شود. هم‌چنین، نیروی محرکه‌ی غلظت برای انتقال یون از غشا افزایش می‌یابد که باعث افزایش نفوذ یون و انتقال آن از غشا می‌شود. بنابراین، این دو موضوع در بعضی از پژوهش‌ها باعث کاهش بازدارش یون‌ها توسط غشا شده است [۱۳، ۲۲]. در پژوهش دیگری [۲۰]، نیز بیان شده است که با افزایش غلظت خوراک، فشار اسمزی افزایش می‌یابد. این فشار اسمزی متعاقباً منجر به کاهش شدت جریان عبوری از غشا می‌شود و از این رو، با کاهش میزان عبور حلال از غشا، میزان بازدارش غشا نیز کاهش می‌یابد



مرجع‌ها

- [1] C.R. Edwards, A.J. Oliver, Uranium Processing: A Review of Current Methods and Technology, JOM, 52 (2000) 12-20.
- [2] E.S.A. Nouh, M. Amin, M. Gouda, A. Abd-Elmagid, Extraction of uranium(VI) from sulfate leach liquor after iron removal using manganese oxide coated zeolite, Journal of Environmental Chemical Engineering, 3 (2015) 523-528.
- [3] Uranium Extraction Technology, IAEA, Vienna, (1993) 380.
- [4] P.A. Riveros, The extraction of Fe(III) using cation-exchange carboxylic resins, Hydrometallurgy, 72 (2004) 279-290.
- [5] S. Cheraghpour, S.A. Milani, M. Salari, M. Kiaee, Separation of Fe (III) Ions from Acidic Leach Liquor of Metasummatite Saghand Ore by Anion Exchange Resins, Journal of Nuclear Science and Technology, 45 (2008) 28-32.
- [6] B.A.M. Al-Rashdi, D.J. Johnson, N. Hilal, Removal of heavy metal ions by nanofiltration, Desalination, 315 (2013) 2-17.
- [7] J. Tanninen, S. Platt, A. Weis, M. Nyström, Long-term acid resistance and selectivity of NF membranes in very acidic conditions, Journal of Membrane Science., 240 (2004) 11-18.
- [8] B. Van der Bruggena, M. Manttari, M. Nystrom, Drawbacks of applying nanofiltration and how to avoid them: A review, Separation and Purification Technology, 63 (2008) 251-263.
- [9] M. Ghasemi Torkabad, A.R. Keshtkar, S.J. Safdari, A. Zaheri, H. Sohbatzadeh, Investigation of Effect of Main Parameter in Nanofiltration Membrane Process for Uranium Ions Separation from Aqueous Solution, Journal of Nuclear Science and Technology, 79 (2017) 75-85.
- [10] L.F. Greenlee, D.F. Lawler, B.D. Freeman, B. Marrot, P. Moulin, Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges, Water Research, 43 (2009) 2317-2348.
- [11] A. Favre-Reguillon, G. Lebusit, D. Murat, J. Foos, C. Mansour, M. Draye, Selective removal of dissolved uranium in drinking water by nanofiltration, Water Research, 42 (2008) 1160-1166.

نتیجه‌های به دست آمده، بیشینه‌ی گزینش‌گری مشاهده شده برای غشای NF-۱ برابر با ۴۳/۷۱ بود که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مطلوب این غشا تحت شرایط عملیاتی مورد مطالعه است. شدت جریان محلول عبوری از غشای PES-۲ بزرگ‌تر از دو غشای دیگر بوده و در تمام موردها ضریب بازدارش یون‌های آهن از اورانیم بزرگ‌تر است. به نظر می‌رسد که با مطالعه‌ی دقیق‌تر فرایند نانوفیلتراسیون، امکان استفاده از آن در بخش‌های مختلف چرخه‌ی سوخت هسته‌ای به منظور جداسازی انتخابی عناصر وجود دارد.

تشکر و قدردانی

این پروژه توسط پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران حمایت مالی شده است. هم‌چنین، نویسندگان از کلیه‌ی پرسنل پژوهشکده‌ی چرخه سوخت که از کمک‌های خود دریغ نورزیده‌اند، کمال تشکر را دارند.

پی‌نوشت‌ها

1. Metrohm
2. Dead-End
3. Membrane Module
4. Optima
5. Sepro
6. Permeate
7. Permeability
8. Retention or Rejection Coefficient
9. Retentate
10. Visual MINTEQ
11. Osmonics



- [12] P. Schmidt, T. Köse, P. Lutze, Characterisation of organic solvent nanofiltration membranes in multi-component mixtures: Membrane rejection maps and membrane selectivity maps for conceptual process design, *Journal of Membrane Science*, 429 (2013) 103-120.
- [13] F. Chang, W. Liu, X. Wang, Comparison of polyamide nanofiltration and low-pressure reverse osmosis membranes on As(III) rejection under various operational conditions, *Desalination*, 334 (2014) 10–16.
- [14] H.M.A. Rossiter, M.C. Graham, A.I. Schäfer, Impact of speciation on behaviour of uranium in a solar powered membrane system for treatment of brackish groundwater, *Separation and Purification Technology*, 71 (2010) 89-96.
- [15] A. Favre-Reguillon, G. Lebizit, J. Foos, A. Guy, A. Sorin, M. Lemaire, M. Draye, Selective Rejection of Dissolved Uranium Carbonate from Seawater Using Cross-Flow Filtration Technology, *Separation Science and Technology*, 40 (2005) 623-631.
- [16] G.T. Ballet, L. Gzara, A. Hafiane, M. Dhahbi, Transport coefficients and cadmium salt rejection in nanofiltration membrane, *Desalination*, 167 (2004) 369-376.
- [17] J. Fang, B. Deng, Rejection and modeling of arsenate by nanofiltration: Contributions of convection, diffusion and electromigration to arsenic transport, *Journal of Membrane Science*, 453 (2014) 42–51.
- [18] C.V. Gherasim, J. Cuhorka, P. Mikulášek, Analysis of lead(II) retention from single salt and binary aqueous solutions by apolyamide nanofiltration membrane: Experimental results and modelling, *Journal of Membrane Science*, 436 (2013) 132–144.
- [19] W. Zuo, G. Zhang, Q. Meng, H. Zhang, Characteristics and application of multiple membrane process in plating wastewater reutilization, *Desalination*, 222 (2008) 187–196.
- [20] C.V. Gherasim, P. Mikulášek, Influence of operating variables on the removal of heavy metal ions from aqueous solutions by nanofiltration, *Desalination*, 343 (2014) 67-74.
- [21] G. Artug, *Modelling and Simulation of Nanofiltration Membranes*, Cuvillier Verlag, Göttingen, (2007) 248.
- [22] Treatment of liquid effluent from uranium mines and mills, IAEA, (2004) 27-44.