



مطالعه بهینه‌سازی روشی نیکل از کاتالیستهای مستعمل و بررسی جداسازی نیکل به صورت

رسوب‌دهی

هادی سالاری*

بخش شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران

چکیده کاتالیست‌های بر پایه نیکل، در فرایندهای پالایشگاهی و پتروشیمی استفاده می‌شوند. این کاتالیست‌ها پس از چندین بار احیاء و استفاده مجدد، به صورت کاتالیست‌های مستعمل در طبیعت رها می‌شوند که این کار علاوه بر مخاطرات زیست‌محیطی، از نظر اقتصادی هم؛ به دلیل وجود فلز باارزش نیکل؛ توجیه اقتصادی ندارد. عموماً برای استخراج نیکل، از روش‌های هیدرومتالورژی استفاده می‌شود که سخت و گران هستند. با توجه به کمبود قابل توجه معادن کانی نیکل، استفاده از این منابع ثانویه کاملاً حائز اهمیت است. در این پژوهش، امکان بازیابی نیکل از کاتالیست‌های مستعمل، مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا، این کاتالیست‌ها کک‌زدایی شدند و سپس تأثیر سه اسید مختلف در روشی نیکل، مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای مختلف، از قبیل دما، سرعت هم‌زدن، نسبت محلول به جامد، اندازه ذرات و غلظت اسید، مورد بررسی قرار گرفتند. پس از روشی کامل نیکل، خالص‌سازی نیکل به صورت رسوب‌دهی گزینش‌پذیر نیکل هیدروکسید انجام شد.

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۳/۰۶
دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷
پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۱/۲۶

کلیدواژه‌ها:

کاتالیست،
روش‌های نیکل،
بهینه‌سازی

<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.232659.1093>

URL: http://www.jamt.ir/article_129240.html

JAMT: Vol. 9, No. 4, (Winter 2021), 71-77

Optimization Study of Nickel Leaching from Used Catalysts and Investigation of Nickel Separation by Precipitation

Hadi Salari*

Department of Chemistry, College of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Fars, Iran

Paper History:

Received: 2020-05-26
Revised in revised form: 2021-01-26
Accepted: 2021-04-15

Keywords:

Catalysts,
Ni Leaching,
Optimization

Abstract Nickel-based catalysts are used in refining and petrochemical processes. After being regenerated and reused several times, these catalysts are released as used catalysts in nature, which, in addition to environmental risks, are not economically viable due to the presence of the precious metal nickel. Hydrometallurgical methods are commonly used to extract nickel, which is difficult and expensive. Due to the significant shortage of nickel mines, the use of these secondary resources is quite important. In this study, the possibility of nickel recovery from used catalysts has been investigated. Initially, the cokes were removed, and then the effects of three different acids on nickel leaching were investigated. Various parameters such as temperature, mixing speed, liquid to solid ratio, particle size, and acid concentration were investigated. After the complete leaching of nickel, nickel purification was performed by selective nickel hydroxide precipitation.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.232659.1093>

URL: http://www.jamt.ir/article_129240.html

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، فارس، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، بخش شیمی، تلفن: ۰۷۱-۳۶۱۶۷۱۷۳، دورنگار: -

پیام نگار: hsalari@shirazu.ac.ir

Please cite this article as: Salari, H., "Optimization study of nickel leaching from used catalysts and investigation of nickel separation by precipitation", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 9, No. 4, (2021), 71-77. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.232659.1093>).



۱- مقدمه

روش‌های مختلفی برای فروشوی نیکل وجود دارد. این مرحله از اهمیت به سزایی برخوردار است؛ زیرا باعث بازیابی نیکل و استحصال بهتر آن در مراحل بعدی می‌شود. فروشوی با اسید، ارزان‌ترین و مؤثرترین راه برای جدا کردن نیکل از بدنه کاتالیست است. بیشتر اسیدهای صنعتی و قوی در ایران تولید می‌شوند و طراحی روش‌هایی مبتنی بر استفاده از اسید، اقتصادی و قابل اجراست. اسید سولفوریک، اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک، متداول‌ترین اسیدهای معدنی استفاده‌شده در فروشوی فلزات هستند. در کاتالیست‌های بر پایه نیکل، فلز به صورت سولفات نیکل، نترات نیکل و کلرید نیکل، وارد فاز محلول می‌شود. پارامترهای تجربی مختلفی بر فرایند فروشوی اسیدی تأثیرگذارند. نسبت جامد به محلول، سرعت هم‌زدن، اندازه ذرات کاتالیست، غلظت اسید به کار رفته، نوع اسید استفاده‌شده و زمان، از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فروشوی هستند.

پس از ورود نیکل به فاز محلول، نوبت خالص‌سازی و جداسازی آن از فاز محلول است. این مرحله، یک گام بسیار حیاتی در فرایند بازیابی نیکل است؛ چراکه خلوص محصول نهایی را مشخص می‌کند. یکی از روش‌های متداول برای جداسازی نیکل از سایر فلزات، استفاده از روش‌های احیاء الکتروشیمیایی (الکترووینینگ^۱) است. این روش‌ها گران بوده و علاوه بر صرف انرژی زیاد؛ اگر فلزاتی با پنجره پتانسیل مشابه با نیکل، در محلول وجود داشته باشند؛ دیگر کارایی مناسب را ندارند. طراحی روشی ارزان و قابل اجرا در صنعت برای خالص‌سازی نیکل، از اهمیت کاربردی زیادی برخوردار است.

در این کار پژوهشی از روش مناسبی برای جداسازی نیکل استفاده می‌شود. رسوب دهی انتخاب‌پذیر، روشی ارزان، دقیق و پربازده برای جداسازی نیکل به صورت نیکل هیدروکسید است. در این پروژه، فروشوی نیکل با استفاده از اسید سولفوریک انجام می‌شود. مراحل این فرایند و عوامل مختلف بر آن، بررسی شده و در مرحله بعد خالص‌سازی نیکل انجام می‌شود.

نیکل از فلزات بسیار مهم و راهبردی در صنعت به حساب می‌آید. این فلز کاربردهای متنوعی در صنایع گوناگون مانند الکترونیک، فولاد، باتری‌سازی، آبکاری و صنایع شیمیایی دارد. این فلز از لحاظ قیمتی، با ارزش بوده و منابع معدنی آن در کشور بسیار محدود است. همچنین، استخراج آن از معادن موجود، به دلیل کم‌عیار بودن، توجیه اقتصادی ندارد. سالیانه مقادیر زیادی از این فلز به صورت شمش و یا ترکیبات مختلف معدنی وارد کشور می‌شود. استفاده از منابع ثانویه نیکل؛ که همان کاتالیست‌های مستعمل نیکل می‌باشند؛ از اهمیت زیادی برخوردار است. در بسیاری از فرایندهای شیمیایی، پالایشگاهی و پتروشیمیایی از کاتالیست‌های بر پایه نیکل استفاده می‌شود. فرایندهای هیدروژن دار کردن^۱، ریفورمینگ^۲، هیدروکراکینگ^۳، آلکیل‌دار شدن^۴، پلیمریزاسیون^۵ و تولید متان نمونه‌هایی از کاربرد کاتالیست‌های نیکل در صنعت هستند.

این کاتالیست‌ها پس از احیاء مجدد و استفاده چندین باره، به صورت ضایعات درمی‌آیند. پسماندهای کاتالیستی؛ به دلیل دارا بودن مقادیر فراوان فلزات سنگین؛ آلودگی‌های زیست‌محیطی شدیدی را تولید می‌کنند و دفن آن‌ها علاوه بر ایجاد مخاطرات زیستی، از لحاظ اقتصادی هم پرهزینه خواهد بود. بازیافت این کاتالیست‌ها و استخراج فلزات سنگین، علاوه بر بازدهی اقتصادی فراوان، خطرات زیست‌محیطی آن‌ها را نیز کاهش می‌دهد.

کاتالیست‌های مختلف استفاده‌شده در فرایند ریفورمینگ، دارای اکسید نیکل (NiO) هستند که بر پایه آلومینا قرار گرفته‌اند. عناصر مختلفی مانند کلسیم، منیزیم و آهن در این کاتالیست‌ها وجود دارند که جداسازی و خالص‌سازی نیکل را دشوار می‌کنند. این عناصر در مرحله فروشوی با نیکل، به راحتی وارد محلول می‌شوند. اگرچه مقدار آن‌ها نسبت به نیکل کمتر است؛ ولی به عنوان ناخالصی، حضور جدی دارند.

¹ Hydrogenation

² Reforming

³ Hydrocracking

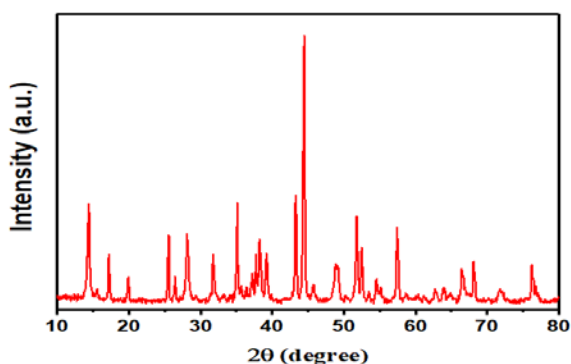
⁴ Alkylation

⁵ Polymerization

⁶ Electrowinning

۲- بخش تجربی

پراش پرتوی ایکس کاتالیست مستعمل را نشان می‌دهد. پیک-های پراش در درجه‌های $37/2$ ، $43/1$ ، $62/8$ و $75/2$ مربوط به سطوح بلوری (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) اکسید نیکل هستند [۱]. پیک‌های متعدد دیگر، بیانگر حضور سایر اکسیدهای فلزی می‌باشند که با آنالیزهای دیگر هم قابل تأیید است. پیک‌های حاضر شده در درجه‌های $36/9$ ، $42/9$ ، $62/3$ ، $74/6$ و $78/6$ مربوط به سطوح بلوری (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱) و (۲۲۲) ساختار اکسید منیزیم است [۲]. پیک‌های مربوط به آلفا آلومینا ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) نیز در درجه‌های $25/5$ ، $35/1$ ، $37/7$ ، $43/3$ ، $46/1$ ، $53/1$ ، $57/5$ ، $61/3$ ، $66/4$ ، $68/1$ و $76/8$ مربوط به سطوح (۰۱۲)، (۰۱۴)، (۱۰۰)، (۱۱۳)، (۲۰۲)، (۰۲۴)، (۱۱۶)، (۰۱۸)، (۲۱۴)، (۳۰۰) و (۱۰۱) هستند که در شکل، ظاهر شده‌اند [۳].



شکل ۱. الگوی XRD مربوط به کاتالیست مستعمل

از آنالیز جذب اتمی و پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP) برای تشخیص عناصر موجود و میزان آن‌ها در کاتالیست مستعمل، استفاده شد. ابتدا مقدار مشخصی کاتالیست مستعمل، به صورت پودر ریز درآمد و در محلول تیزاب سلطانی تازه، در دمای 70 درجه سلسیوس به مدت 4 ساعت قرار داده شد. محلول حاصل، صاف شد و به حجم رسید. محلول‌های آماده‌شده به دستگاه جذب اتمی و ICP تزریق شدند. طبق این آنالیزها، مقدار میانگین فلز نیکل $10/94$ درصد گزارش شد. آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF) نیز درصد اکسید نیکل را 13 درصد گزارش کرده است.

شکل شماره (۲)، تأثیر سه نوع اسید را بر فروشویی نیکل نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، اسید سولفوریک با غلظت 8 مولار پس از 5 ساعت در دمای 70

مواد مورد استفاده، شامل اسید سولفوریک 98 درصد، اسید نیتریک 65 درصد، اسید هیدروکلریک 35 درصد، سود و آب مقطر است. از همزن حرارتی برای هم‌زدن و کنترل دمایی استفاده می‌شود. مواد، ساخت شرکت مرک بوده که دارای خلوص $99/9$ درصد می‌باشند. در ابتدا، فرایند کک‌زدایی انجام می‌شود. مقدار زیادی کک، حین فرایندهای پالایشگاهی و پتروشیمیایی، بر روی کاتالیست قرار می‌گیرد که سایت‌های فعال کاتالیست را مسدود می‌کند. کک‌زدایی در کوره در دمای بالا انجام می‌شود. برای این کار، کاتالیست در دمای 600 درجه سلسیوس به مدت 4 ساعت در کوره نگه داشته می‌شود تا کک به صورت دی‌اکسید کربن خارج شود. در این حالت، رنگ ظاهری کاتالیست نیز تغییر می‌کند. عمل کک‌زدایی، فرایند فروشویی نیکل را شتاب می‌دهد. در مرحله بعد، فروشویی نیکل با اسید انجام می‌شود که پارامترهای مختلف بر این فرایند، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. پس از انتخاب نوع اسید، در هر مرحله 1 گرم از کاتالیست را به مقدار مشخصی اسید اضافه می‌کنیم و مخلوط با سرعت 700 دور در دقیقه هم می‌خورد. اثر پارامترهایی مثل نسبت جامد به مایع، دما و زمان هضم، باید مورد بررسی قرار گیرد. پس از صاف کردن، از طریق روش جذب اتمی، مقدار نیکل اندازه‌گیری می‌شود. کاتالیست‌های مستعمل بعد از کک‌زدایی، به صورت مش‌های مختلفی درمی‌آیند و تأثیر اندازه ذرات نیز بر فرایند فروشویی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بعد از بهینه کردن شرایط در مرحله فروشویی و رسیدن به بیشترین مقدار فروشویی، مرحله رسوب‌گیری گزینش‌پذیر با محلول سود انجام می‌شود. در این مرحله نیکل به صورت هیدروکسید نیکل جدا خواهد شد.

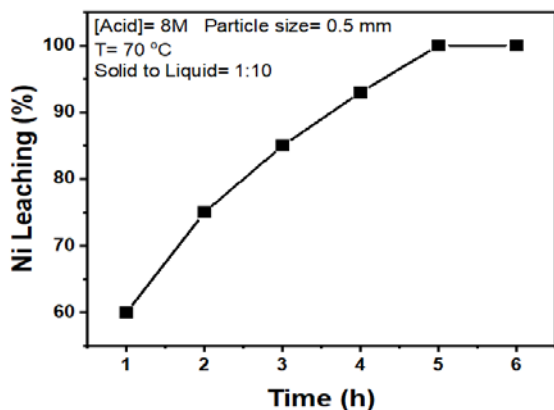
۳- نتایج و بحث

در ابتدا برای تشخیص عناصر و اکسیدهای فلزی موجود در ساختار کاتالیست مستعمل، تحلیل‌های پراش پرتوی ایکس^۱ (XRD)، فلورسانس اشعه ایکس^۲ (XRF)، پلاسمای جفت‌شده القایی^۳ (ICP) و جذب اتمی انجام شد. شکل (۱)، الگوی

^۱ X-Ray Diffraction

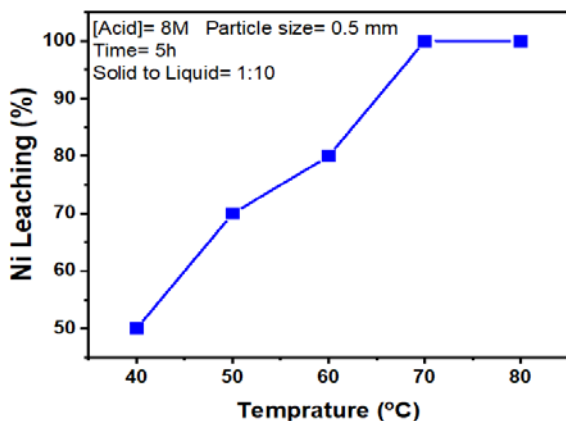
^۲ X-Ray Fluorescence

^۳ Inductively Coupled Plasma



شکل ۳. اثر زمان بر فروشوی نیکل

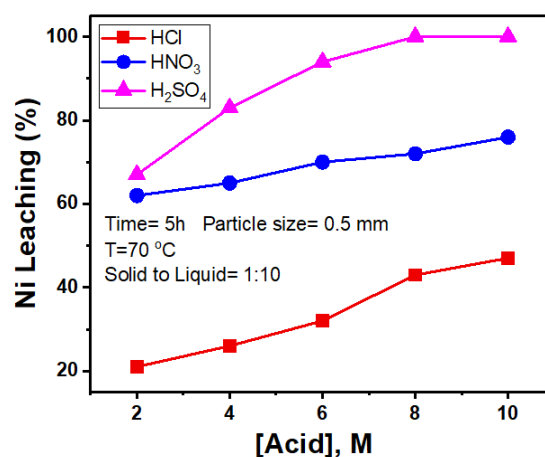
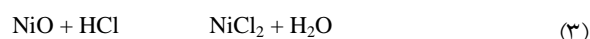
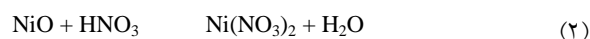
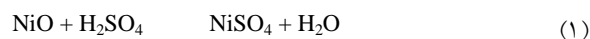
شکل شماره (۴)، تأثیر دما (بازه ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس) را بر فروشوی نیکل نشان می‌دهد. با افزایش دما، درصد فروشوی نیکل، افزایش زیادی می‌یابد. بیشترین مقدار فروشوی، در دمای ۷۰ درجه سلسیوس پس از ۵ ساعت ایجاد شده است. با افزایش دما، سرعت فعل و انفعالات شیمیایی؛ به علت افزایش بسامد برخوردها؛ افزایش می‌یابد و طبیعتاً سرعت واکنش اسید سولفوریک با نیکل نیز بیشتر می‌شود. یکی از پارامترهای مهم در فرایند فروشوی، نسبت جامد به مایع است. بهینه‌سازی این فرایند بسیار مهم است؛ زیرا مانع استفاده زیاد از سیال موردنظر می‌شود. علاوه بر این، سایر فرایندهای بعدی را نیز به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.



شکل ۴. اثر دما بر فروشوی نیکل

در شکل شماره (۵)، نتایج مربوط به فرایند فروشوی در نسبت‌های مختلف جامد به مایع مورد بررسی قرار گرفته است. در نسبت یک به ده، بیشترین درصد فروشوی مشاهده می‌شود. در نسبت‌های کمتر؛ سیال به خوبی در تماس با ذرات جامد قرار نمی‌گیرد و در نتیجه، درصد فروشوی کاهش

درجه سلسیوس، به طور کامل نیکل را از بدنه کاتالیست جدا کرده است. اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک نیز به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. اسید سولفوریک؛ به علت داشتن دو هیدروژن اسیدی در یک غلظت یکسان؛ سرعت بیشتری در فروشوی نیکل خواهد داشت (معادلات ۱-۳).

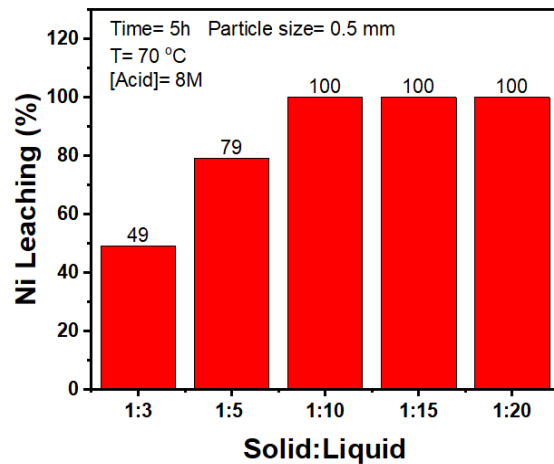


شکل ۵. تأثیر غلظت سه اسید مختلف بر فرایند فروشوی

اسید سولفوریک نسبت به دو اسید دیگر، قیمت پایین‌تری دارد و در داخل کشور نیز تولید می‌شود. بنابراین اسید سولفوریک که یک اسید قوی و در دسترس است، عملکرد مناسبی برای فروشوی نیکل دارد. با افزایش غلظت هر سه اسید، افزایش فروشوی نیکل را شاهد هستیم؛ به طوری که برای اسید سولفوریک در غلظت ۸ مولار، این مقدار به ۱۰۰ درصد می‌رسد. ادامه آزمایشات، با اسید سولفوریک ۸ مولار انجام شده است. نتایج تأثیر زمان هم‌خوردن بر فروشوی نیکل در شکل شماره (۳) نشان داده شده است. با افزایش زمان هم‌خوردن، میزان نیکل جدا شده از بدنه کاتالیست نیز افزایش می‌یابد. در زمان ۵ ساعت، ۱۰۰ درصد نیکل جدا می‌شود و زمان بهینه برای فروشوی نیکل در حضور اسید سولفوریک ۸ مولار، ۵ ساعت می‌باشد. با افزایش زمان، فرصت بیشتری برای برهم‌کنش بین اسید و نیکل موجود در بدنه کاتالیست، وجود دارد و این زمان بعد از ۵ ساعت، به طور کامل فراهم می‌شود.

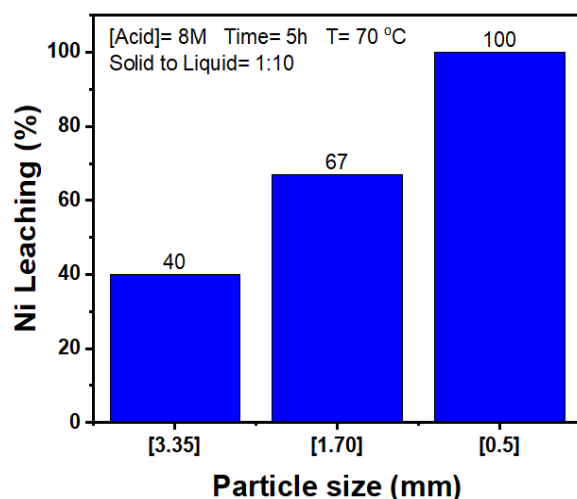
مهم بعدی، جداسازی و خالص‌سازی نیکل خواهد بود. طبیعتاً به همراه نیکل، سایر فلزات نیز به داخل محلول وارد می‌شوند که جدا کردن آن‌ها در خالص‌سازی نیکل نهایی، حائز اهمیت است. آلومینیوم، منیزیم، آهن و کلسیم مهم‌ترین فلزات وارد شده به محلول در فرایند فروشویی هستند. روش‌های مختلفی برای خالص‌سازی نیکل پیشنهاد شده است. الکترووینینگ نیکل یکی از روش‌های مبتنی بر الکتروشیمی است که نیکل به صورت فلزی بر روی الکترود قرار می‌گیرد [۷-۴]. اشکال عمده این روش؛ علاوه بر هزینه ابتدایی زیاد و مصرف انرژی بالا؛ رسوب سایر فلزات در کنار نیکل است که انتخاب‌پذیری این فرایند را تحت تأثیر قرار می‌دهد. استفاده از لیگاندهایی که به صورت انتخاب‌پذیر با نیکل واکنش می‌دهند، روش گزینش‌پذیری برای جداسازی نیکل است [۸ و ۹]؛ اما این لیگاندها بسیار گرانند که استفاده از آن‌ها را به شدت محدود می‌کند. استفاده از رزین‌ها برای جذب و جداسازی نیکل هم پیشنهاد شده است که رزین‌های پیشنهادی؛ به علت گرانی و کمیاب بودن؛ کاربرد زیادی ندارند [۱۳-۱۰]. همه فلزات وارد شده به فاز محلول در مرحله فروشویی، در محیط قلیایی رسوب می‌کنند. بنابراین دانستن منطقه‌ای که از لحاظ غلظتی و pH، در آن رسوب‌دهی اتفاق می‌افتد، از اهمیت زیادی برخوردار است. همه این فلزات به صورت هیدروکسید رسوب می‌کنند و برخی از آن‌ها به دلیل داشتن ثابت انحلال‌پذیری پایین، خیلی سریع‌تر رسوب می‌کنند؛ چراکه انحلال‌پذیری بسیار پائین‌تری دارند [۱۴]. جدول شماره (۱) ثابت انحلال‌پذیری هیدروکسیدهای فلزی مختلف را در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نشان می‌دهد [۱۵]. همان‌طور که از داده‌های جدول مشخص است، هیدروکسید فلزاتی مانند کلسیم و منیزیم، انحلال‌پذیری کمتری دارند. نکته مهم در رسوب‌دهی فلزات، غلظت اولیه خود فلز نیز می‌باشد. در غلظت ثابت یون هیدروکسید، طبیعتاً فلزاتی که غلظت بالاتری در محیط دارند، سریع‌تر به نقطه اشباع می‌رسند. بنابراین علاوه بر pH، غلظت عناصر موجود در محلول نیز، عامل مهمی در رسوب‌دهی فلزات داخل محلول می‌باشد. جدول شماره (۲) غلظت عناصر مختلف را در مرحله فروشویی (در شرایط بهینه‌شده برای فروشویی کامل نیکل) نشان می‌دهد.

می‌یابد. در نسبت‌های بالاتر نیز فروشویی کامل است؛ اما باید سیال بیشتری استفاده شود.



شکل ۵. اثر نسبت جامد به مایع بر فروشویی نیکل

اندازه ذرات، تأثیر زیادی بر فرایند فروشویی دارد. کاهش اندازه ذرات، بازدهی فرایند فروشویی افزایش می‌یابد. ذرات کوچک‌تر، نسبت سطح به حجم بیشتری دارند و بیشتر در معرض اسید قرار می‌گیرند که نتیجه آن، فروشویی بیشتر است. تأثیر اندازه ذرات بر فرایند فروشویی در شکل (۶) نشان داده شده است. ذرات با سه اندازه ۳/۲۵، ۱/۷ و ۰/۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند و درصد فروشویی آن‌ها به ترتیب ۴۰، ۶۷ و ۱۰۰ به دست آمد.



شکل ۶. اثر اندازه ذرات کاتالیست مستعمل بر فروشویی نیکل

بعد از انتخاب نوع اسید و بهینه‌سازی پارامترهای مختلف برای به دست آوردن بیشترین درصد فروشویی، مرحله

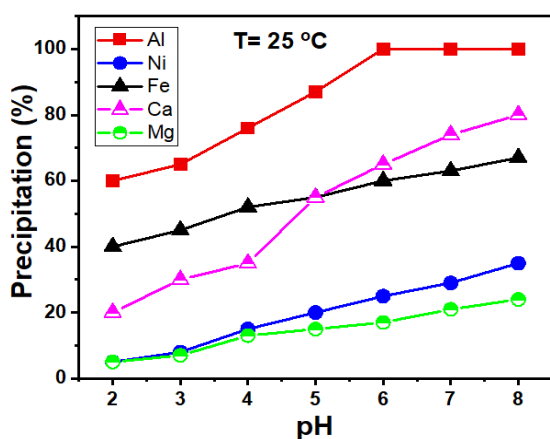
جدول ۱. ثابت حلالیت هیدروکسیدهای مختلف عناصر [۱۴ و ۱۵]

Al(OH) ₃	Ni(OH) ₂	Fe(OH) ₃	Mg(OH) ₂	Ca(OH) ₂	ماده
$2/7 \times 10^{-11}$	$2/8 \times 10^{-16}$	$6/3 \times 10^{-38}$	$1/5 \times 10^{-11}$	$5/5 \times 10^{-6}$	K _{sp}

جدول ۲. میزان عناصر موجود در محلول پس از فروشویی

Ni	Al	Ca	Mg	Fe	Si	عنصر
۱۶۰	۳۰۰	۰/۴	۱/۶	۰/۴	۰	مقدار در محلول (ppm)

نتایج نشان داد که راندمان جداسازی نیکل، ۸۶ درصد و خلوص آن، ۹۱ درصد است.



شکل ۷. اثر pH بر رسوبدهی فلزات مختلف

۴- نتیجه گیری

در این کار تحقیقاتی، فلز باارزش نیکل طی فرایند فروشویی با اسید، از کاتالیست‌های مستعمل پالایشگاهی کاملاً جدا شد. تأثیر پارامترهای مختلف بر سرعت فرایند فروشویی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اسید سولفوریک در مقایسه با اسید نیتریک و اسید هیدروکلریدریک، بازدهی بیشتری را در فرایند فروشویی دارد. بهینه‌سازی پارامترها انجام شد. کاتالیست مستعمل با اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر، غلظت اسید سولفوریک ۸ مولار، زمان ۵ ساعت، دمای ۷۰ درجه و نسبت جامد به مایع ۱ به ۱۰، بیشترین تأثیر را بر فرایند فروشویی داشت؛ به طوری که با حفظ این شرایط، به بازدهی ۱۰۰ درصد در جداسازی نیکل رسیدیم. در مرحله بعد، محدوده pH مناسب برای رسوبدهی نیکل به صورت نیکل هیدروکسید، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که در

از عوامل مختلفی می‌توان برای بالا بردن pH محلول استفاده کرد. محلول آمونیاک می‌تواند گزینه مناسبی برای این کار باشد، اما کار کردن با این مایع خورنده؛ به دلیل بوی زیاد و مایع بودن؛ مشکل است. استفاده از سود سوزآور، گزینه مناسب دیگری است که علاوه بر قیمت مناسب، به دلیل جامد بودن، حمل و نقل و جابجایی راحت‌تری دارد. شکل (۷)، میزان رسوبدهی فلزات گوناگون را در pH های مختلف نشان می‌دهد. در pH برابر با ۲، ۶۰ درصد از آلومینیوم، ۴۰ درصد از آهن و ۲۰ درصد از کلسیم رسوب می‌کند.

برای سایر فلزات، میزان کمی رسوبدهی مشاهده می‌شود. با افزایش pH، رسوبدهی همه فلزات افزایش می‌یابد. در pH برابر با ۸، ۱۰۰ درصد از آلومینیوم، ۷۵ درصد از کلسیم و ۶۰ درصد از آهن رسوب می‌کنند. اهمیت شکل (۷) در این است که می‌توان محدوده مناسبی را پیدا کرد که در آن، بیشتر فلزات رسوب کنند و کمترین میزان هدررفت نیکل را مشاهده کرد؛ بنابراین در محدوده pH بین ۵ تا ۶، می‌توان بیشتر فلزات را تا حد زیادی رسوب داد و مطمئن بود که میزان کمی از نیکل به همراه سایر فلزات، رسوب می‌کند. در pH برابر با ۶، تمام آلومینیوم رسوب می‌کند و می‌توان از مزاحمت این فلز که بیشترین سهم وزنی را در محلول دارد، راحت شد. نکته قابل توجه این است که می‌توان رسوبدهی را در چند مرحله تکرار کرد. پس از جداسازی کامل آلومینیوم، می‌توان محلول را صاف کرده و مجدداً رسوبدهی را در حضور سایر فلزات تکرار کرد. در این حالت با تغییر غلظت همه فلزات، پروفایل کاملاً متفاوتی به وجود خواهد آمد. در هر مرحله، می‌توان به طور کامل یک یا دو فلز مزاحم را حذف کرد. پس از سه بار تکرار این عمل، رسوبدهی کامل هیدروکسید نیکل انجام شد.

- methods", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 148, (2017), 233-244. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.158>
8. Awual, M. R., Hasan, M. M., Iqbal, J., Islam, M. A., Islam, A., Khandaker, S., Asiri, A. M., Rahman, M. M., "Ligand based sustainable composite material for sensitive nickel (II) capturing in aqueous media", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 8, (2020), 103591. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103591>
 9. Rath, M., Behera, L. P., Dash, B., Sheik, A. R., Sanjay, K., "Recovery of dimethylglyoxime (DMG) from Ni-DMG complexes", *Hydrometallurgy*, Vol. 176, (2018), 229-234. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.01.014>
 10. Li, T., Xiao, K., Yang, B., Peng, G., Liu, F., Tao, L., Chen, S., Wei, H., Yu, G., Deng, S., "Recovery of Ni (II) from real electroplating wastewater using fixed-bed resin adsorption and subsequent electrodeposition", *Frontiers of Environmental Science Engineering*, Vol. 13, (2019), 91. <https://doi.org/10.1007/s11783-019-1175-7>
 11. Padh, B., Rout, P. C., Mishra, G. K., Suresh, K. R., Reddy, B. R., "Recovery of nickel and molybdate from ammoniacal leach liquors of spent HDS catalysts using chelating ion exchange resin", *Hydrometallurgy*, Vol. 184, (2019), 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.01.001>
 12. Fila, D., Hubicki, Z., Kołodzyńska, D., "Recovery of metals from waste nickel-metal hydride batteries using multifunctional diphenyl resin", *Adsorption*, Vol. 25, (2019), 367-382. <https://doi.org/10.1007/s10450-019-00013-9>
 13. Junior, A. B. B., Dreisinger, D. B., Espinosa, D. C. R., "A review of nickel, copper, and cobalt recovery by chelating ion exchange resins from mining processes and mining tailings", *Mining Metallurgy & Exploration*, Vol. 36, No. 1, (2019), 199-213. <https://doi.org/10.1007/s42461-018-0016-8>
 14. Perez, I. D., Correa, M. M. J., Tenório, J. A. S., Espinosa, D. C. R., "Effect of the pH on the recovery of Al^{3+} , Co^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} and Zn^{2+} by purolite S950", *Energy Technology, The Minerals, Metals & Materials Series*, Sun, Z. et al. Eds., Springer, Cham, (2018), 385-393. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72362-4_34
 15. Bhattacharya, L., Elzinga, E. J., "A comparison of the solubility products of layered Me(II)-Al(III) hydroxides based on sorption studies with Ni(II), Zn(II), Co(II), Fe(II), and Mn(II)", *Soil Systems*, Vol. 2, No. 2, (2018), 20. <https://doi.org/10.3390/soilsystems2020020>
- محدوده pH بین ۵ تا ۶، می‌توان بیشترین مقدار نیکل را در این محدوده غلظتی بازیابی کرد.
- ### ۵- سپاسگزاری
- بدین‌وسیله از حمایت‌های دانشگاه شیراز، در پیشبرد این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.
- ### مراجع
1. Farhadi, S., Roostaei-Zaniyani, Z., "Preparation and characterization of NiO nanoparticles from thermal decomposition of the $[Ni(en)_3](NO_3)_2$ complex: A facile and low-temperature route", *Polyhedron*, Vol. 30, (2011), 971-975. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2010.12.044>
 2. Nemade, K., Waghuley, S., "Synthesis of MgO nanoparticles by solvent mixed spray pyrolysis technique for optical investigation", *International Journal of Metals*, Vol. 2014, (2014). <https://doi.org/10.1155/2014/389416>
 3. Sriharan, N., Senthil, T., Kang, M., Ganesan, N., "Rutile TiO_2 nanorod arrays incorporated with α -alumina for high efficiency dye sensitized solar cells", *Applied Physics A*, Vol. 125, (2019), 118. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2407-1>
 4. Njau, K. N., Janssen, L. J. J., "Electrochemical reduction of nickel ions from dilute solutions", *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 25, (1995), 982-986. <https://doi.org/10.1007/BF00241595>
 5. Kim, J., Kim, H. S., Bae, S., "Parametric study for enhanced performance of Cu and Ni electrowinning", *Membrane Water Treatment*, Vol. 10, No. 3, (2019), 201-206. <http://dx.doi.org/10.12989/mwt.2019.10.3.201>
 6. Bakhshi, M. H., Zakeri, A., "Electrowinning of nickel from dilute sulfate solution", *Journal of Advanced Materials in Engineering*, Vol. 36, No. 4, (2018), 89-103. <https://doi.org/10.29252/jame.36.4.89>
 7. Tanong, K., Tran, L. H., Mercier, G., Blais, J. F., "Recovery of Zn(II), Mn(II), Cd(II) and Ni(II) from the unsorted spent batteries using solvent extraction, electrodeposition and precipitation