

تغلیظ روتیل از کنسانتره ایلمنیت کهنوج

الله‌داد شبابی*، محمود پایه‌قدر**

چکیده

پرعیارسازی ایلمنیت و تولید روتیل از آن در کشورهای مختلف در حال انجام است (Sarke et.al. 2006; Kucukkaragoz & Eric, 2006; Lasheen, 2005; Mahmoud et.al. 2004; Jaya Kumari et.al. 2002; Van Dyk et.al. 2002; Zhang & Ostrovski, 2002; Ogasawara, 2000; Ward et.al. 1999; Olanipekun, 1999; Lanyon et.al. 1991). در ایران نیز با کشف کانسار ایلمنیت در کهنوج کرمان، با ذخیره بسیار بالا، به این موضوع پرداخته شده است. پرعیارسازی فیزیکی — مکانیکی (کانه‌آرایی)، در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی، بر روی ایلمنیت ایران انجام شده است، اما هیچ‌گونه کار تحقیقاتی‌ای برای تهیه روتیل از آن صورت نگرفته است. در این پژوهش، از کانی‌شویی کنسانتره ایلمنیت با اسیدهای معدنی تجاری و مخلوط آنها با ترکیبات هیدروکسیل‌دار مانند متانول، اتانول و اتیلن گلیکول استفاده و روتیل با عیار حدود ۷۵ درصد تهیه شده است.

کلید واژه

ایلمنیت، روتیل، کهنوج، اسید و باز سخت و نرم، کانی‌شویی، هیدرومتالورژی.

* کارشناس ارشد شیمی، دانشگاه پیام نور گیلانغرب.

** عضو هیئت علمی دانشگاه پیام نور، واحد کرج.

۱. مقدمه

تیتانیوم نهمین عنصر در پوسته زمین بوده، و از آنجا که فلزی پراهمیت است، نقش مهمی در فناوری صنعتی و توسعه اقتصادی هر کشوری ایفا می‌کند. این عنصر در طبیعت به صورت آزاد وجود ندارد و به صورت ترکیب شیمیایی همراه با آهن و اکسیژن مشاهده می‌شود. کانی‌های محتوی این عنصر، روتیل، آناتاز و بروکیت (که پلی مورف هستند و فرمول شیمیایی هر سه TiO_2 است)، ایلمنیت، لوکوکسن، پروسکیت و اسفن هستند (Lynd, 1975; Titanium, 1987).

از بین این کانی‌ها، ایلمنیت، روتیل و لوکوکسن کانی‌های اقتصادی تیتانیوم هستند. کنسانتره‌های روتیل دارای ۹۵٪ یا بیشتر TiO_2 است و به همین جهت محصولات به دست آمده از آن کیفیت بالاتری دارد. اما این کانه در همه جای جهان گسترده نیست و مقدار آن نیز کم است؛ به همین علت قیمت جهانی آن در حال افزایش است. از طرف دیگر، ایلمنیت تقریباً در سرتاسر جهان گستردگی دارد، بنابراین قیمت آن در بازار جهانی پائین تر از روتیل است. به همین علت، پژوهش در زمینه پرعیارسازی ایلمنیت و به عبارت دیگر، تولید روتیل از ایلمنیت در کشورهای پیشرفته صنعتی در حال انجام است.

پرعیارسازی ایلمنیت به منظور تولید روتیل در دو مرحله قابل اجراست. در مرحله اول به طریق فیزیکی - مکانیکی می‌توان ایلمنیت را از سایر کانی‌های همراه جدا کرد، که در این صورت تجهیزاتی مانند جیگ، میز، ماریچ، واسطه سنگین، فلوتاسیون، الکترواستاتیک، الکترومغناطیس و غیره مورد استفاده قرار خواهند گرفت. از آنجا که فرمول ایلمنیت $FeTiO_3$ یا $FeO.TiO_2$ است، در صورتی که بتوان آن را به طور کامل از سایر کانه‌ها جدا کرد، دارای

عیار ۵۲/۷ درصد TiO_2 خواهد بود. اما عملاً رسیدن به این عیار غیرممکن است و برای ایلمنیت کهنوج حداکثر عیار مورد انتظار تا ۴۰ درصد خواهد بود. هرچند کنسانتره اولیه ایلمنیت با ارزش خواهد بود، به منظور دسترسی به ماده‌ای معدنی که بتواند در صنایع تولید تیتانیوم و رنگینه TiO_2 استفاده شود، باید عیار بالاتر از ۸۵ درصد داشته باشد (light Metals; Girgin & Turber, 1986). برای تبدیل کنسانتره اولیه به روتیل مصنوعی، روش‌های متالورژیکی به شرح ذیل وجود دارد که تا حد زیادی در جهان استفاده می‌شوند:

۱. ذوب در کوره قوس الکتریکی برای تهیه سرباره غنی از دی اکسید تیتانیوم؛

۲. کانی‌شویی ایلمنیت با اسیدهای معدنی؛

۳. پیش عمل‌آوری ایلمنیت با عملیات اکسایش - کاهش، سپس انجام عملیات شیمیایی بر روی آن.

روش ذوب در کوره قوس الکتریکی در چند کارخانه در سطح جهان انجام می‌شود و یک فرایند پیچیده و پرهزینه است، ولی دو محصول عمده به دست می‌دهد که یکی سرباره غنی از دی اکسید تیتانیوم و دیگری شمش چدن با درجه خلوص بالاست. فرایند کانی‌شویی با اسیدهای معدنی نیز به طور تجارتي در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است. معمول‌ترین اسیدهایی که برای این کار استفاده می‌شوند اسید کلریدریک و اسید سولفوریک است.

اکثر فرایندهای مفید و مؤثر برای تولید روتیل در گروه سوم قرار دارد (Kucukkaragoz & Eric, 2006; Lasheen, 2005; Mahmoud et. al. 2004; Jaya Kuumari et. al. 2002; Van Dyk et.al. 2002)، و در این کار تحقیقاتی بر

ماده معدنی انجام شده، از کک تهیه شده در ذوب آهن اصفهان استفاده شده است. برای تهیه استاندارد ذخیره‌ای آهن (۱۰۰۰ ppm) از پودر خالص آهن از شرکت مرک آلمان استفاده شد.

دستگاه کانی‌شویی: همه آزمایش‌های کانی‌شویی در یک بالن ۳۰۰ میلی‌لیتری که روی گرمکن الکتریکی همراه با همزن مغناطیسی قرار داده شده است، انجام شد. برای جلوگیری از تبخیر محلول و در نتیجه جلوگیری از کم شدن حجم آن، یک مبرد در بالای بالن قرار داده شده است تا عمل رفلکس انجام دهد. از طریق یک لوله جانبی که در کنار مبرد قرار داده شده و به یک پوار دمنده هوا وصل است، هوا به درون سامانه دمیده و از لوله جانبی دیگر، محلول برای اندازه‌گیری آهن بیرون آورده می‌شد (شکل ۵).

روش اندازه‌گیری آهن: به منظور اندازه‌گیری مقدار آهن استخراج شده از ماده معدنی، از دستگاه جذب اتمی پرکین - المر مدل B ۱۱۰۰ استفاده شد. روش عمل، استفاده از نمودار کار بوده است. در این روش استانداردهای کار (۱۰ ppm و ۸، ۶، ۴، ۲) از رقیق کردن حجم‌های مشخصی از محلول ذخیره‌ای آهن در بالن‌های حجم‌سنجی ۱۰۰ سی‌سی تهیه می‌شد. پس از تنظیم دستگاه، مطابق کتابچه راهنمای آن، جذب محلول‌های استاندارد قرائت و سپس جذب محلول آهن تهیه شده از مرحله کانی‌شویی نیز در همان شرایط قرائت می‌شد. با رسم نمودار درجه‌بندی، غلظت آهن در نمونه‌های استخراج شده تعیین می‌شد.

روش کار: هر بار مقدار ۲/۵۰۰ گرم از کنسانتره اولیه ایلمنیت را به درون بالن ریخته، سپس ۱۲۵ میلی‌لیتر از محلول مورد استفاده برای کانی‌شویی را با غلظت مورد نظر به آن می‌افزاییم، سپس شمش به‌هم‌زن را درون آن انداخته،

روی ایلمنیت کهنوج نیز از یکی از روش‌های این گروه استفاده شده و نتایج بسیار خوبی به‌دست آمده است. تحقیقات در زمینه کانی‌شویی ایلمنیت نشان داده است که افزودن بعضی از الکل‌ها مانند متانول، اتانول و اتیلن گلیکول، به هیدروکلریک اسید، سرعت شستشو را افزایش می‌دهد و در حالی که از اتیلن گلیکول استفاده شود، نتایج بهتری حاصل می‌شود (Zhang & Ostrovski, 2002).

۲. عملیات آزمایشگاهی

کنسانتره اولیه: کنسانتره اولیه‌ای که در این عملیات مورد استفاده قرار گرفته، به طریق فیزیکی - مکانیکی از ماسه‌های ایلمنیت‌دار کهنوج تهیه شده است که آنالیز شیمیایی آن در جدول ۲ آورده شده و دانه بندی آن ۱۵۰+۱۰۰- مش است. برای تجزیه شیمیایی این نمونه، ترکیبی از روش‌های اسپکتروفتومتری و جذب اتمی شعله‌ای به‌کار رفت. SiO_2 به روش اسپکتروفتومتری با آبی مولیبدن، Al_2O_3 به روش اسپکتروفتومتری با شناساگر آلزارین رد - اس و TiO_2 به روش اسپکتروفتومتری با شناساگر تیرون پس از انحلال نمونه به طریق ذوب قلیایی در بوتله نیکلی با هیدروکسید سدیم اندازه‌گیری شدند. سایر فلزات به روش جذب اتمی پس از انحلال نمونه در بوتله تفلونی و روش نمودار کار اندازه‌گیری شدند. پرت حرارتی (L.O.I) از اختلاف وزن نمونه قبل و بعد از سوزاندن در کوره الکتریکی محاسبه شد.

مواد شیمیایی: کلیه مواد شیمیایی مصرفی شامل هیدروکلریک اسید، سولفوریک اسید، متانول، اتانول و اتیلن گلیکول از مواد خالص آزمایشگاهی از شرکت مرک آلمان بوده، درموردی که قبل از کانی‌شویی عمل کاهش روی

۱۲ مولار مقدار ۴۸/۳ درصد آهن از سنگ معدن احیا شده حذف شده است، در حالی که در همین شرایط، از سنگ معدن احیا نشده ۳۸ درصد آهن حذف شده است. یون کلرید در حلال‌های آلی، در مقایسه با حلال‌های آبگین، سخت‌تر می‌شود و نتیجتاً در محیط هیدروکلریک اسید، تمایل آن به کاتیون‌هایی که در مقایسه با پروتون سخت‌تر هستند بیشتر می‌شود. نتیجتاً، به علت افزایش تأثیرات متقابل $Fe^{+2} - Cl^-$ و $Fe^{+3} - Cl^-$ در محلول، انتقال آهن از شبکه بلوری ایلمنیت به داخل محلول در حضور برخی حلال‌های آلی بهتر می‌شود. این موضوع از مقایسه شکل‌های ۱ تا ۳ کاملاً مشهود است. استفاده از محلول هیدروکلریک اسید - متانول در غلظت ۹ مولار اسید با غلظت ۱۲ مولار هیدروکلریک اسید تنها، نتیجه تقریباً یکسانی داده است (شکل‌های ۱ و ۳). زمانی که از مخلوط هیدروکلریک اسید - اتانول و هیدروکلریک اسید - اتیلن گلیکول، استفاده شده، در غلظت ۶ مولار اسید نتیجه قابل مقایسه‌ای با اسید ۱۲ مولار حاصل شده است.

تأثیر الکل‌های متانول، اتانول و اتیکن گلیکول در یک دوره زمانی معین و در غلظت معینی از هیدروکلریک اسید (۴/۵ مولار) در جدول ۴ و شکل ۴ با یکدیگر مقایسه شده است که نشان می‌دهد تأثیر این الکل‌ها از متانول به اتیلن گلیکول روی حذف آهن از شبکه بلوری افزایش پیدا می‌کند.

تأثیر الکل‌ها را در فرایند کانی‌شویی ایلمنیت با هیدروکلریک اسید می‌توان در مفهوم اسیدها و بازهای سخت و نرم (HSAB) جستجو کرد (Pearson & Songstad, 1967). اصل اسیدها و بازهای سخت و نرم بیان می‌کند که «اسیدهای سخت با بازهای سخت و اسیدهای نرم با بازهای نرم سریع‌تر واکنش داده، پیوند قوی‌تری ایجاد می‌کنند (Pearson, 1963). اصل HSAB به‌طور موفقیت‌آمیزی برای همه گروه‌های الکتروفیل و

بلافاصله روی هیتر الکتریکی که قبلاً به دمای ثابت مورد نظر رسیده است قرار می‌دهیم. درحالی‌که مخلوط به هم زده می‌شود، در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه‌ای، مقدار یک میلی‌لیتر از محلول را بیرون آورده، پس از رساندن به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر به طریق جذب اتمی برای اندازه‌گیری آهن مورد عمل قرار می‌دهیم. در همه موارد سرعت به هم‌زن یکسان و درجه حرارت سامانه $110^{\circ}C$ (دمای رفلاکس مخلوط) بوده است. در مواقعی که از مخلوط اسید و الکل‌ها استفاده شده است محلول‌های مورد نظر، از رقیق کردن هیدروکلریک اسید غلیظ با الکل‌ها تا رسیدن به غلظت مورد نظر تهیه شده‌اند.

۳. بحث و نتیجه‌گیری

از طریق فیزیکی - مکانیکی، سنگ معدن ایلمنیت اولیه کهنوج با عیار ۴/۸۴ درصد محصولی با عیار ۴۳/۴ درصد، تبدیل شده است، ولی پرعیار کردن نمونه با روش‌های فیزیکی - مکانیکی تا بیش از این حد امکان‌پذیر نیست؛ زیرا در صورتی که بتوان ایلمنیت را به‌طور کامل از کانه‌های همراه جدا کرد، عیار تیتانیم دی‌اکسید در آن ۵۲/۷ درصد خواهد بود. برای اینکه بتوان ایلمنیت را بیش از این مقدار پرعیار کرد باید از روش‌های شیمیایی استفاده کرد.

روش شیمیایی برای پرعیارسازی ایلمنیت، روش کانی‌شویی با اسیدهای معدنی است. در این روش، کانی‌شویی به‌وسلیه اسید کلریدریک در مقایسه با اسید سولفوریک نتیجه بهتری داده است که علت آن در ادامه شرح داده شده است. در ضمن، چون استفاده از هیدروکلریک اسید مشکل‌ساز هم ندارد اهمیت بیشتری دارد. نتایج نشان‌دهنده در جدول ۳ و شکل‌های ۱ الی ۳ حذف بیشتر آهن از سنگ معدن ایلمنیت احیا شده را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که با هیدروکلریک اسید

مولکولی LUMO اسید سخت که پایین ترین انرژی را دارد واکنش می دهد (Parr & Pearson, 1963; Pearson, 1983).

جدول ۱: انرژی مشخصه برخی از کاتیون ها در آب

کاتیون	انرژی ارییتال (eV)	En (eV)
Ti ⁴⁺	39.46	4.35
Fe ³⁺	26.97	2.22
Fe ²⁺	14.11	0.69
H ⁺	1038	0.42

از میان کاتیون های موجود در جدول ۱، کاتیون Ti⁴⁺ دارای بیشترین انرژی ارییتال و بیشترین مقدار En است؛ بنابراین سخت ترین کاتیون در بین آنهاست. ولی این کاتیون در حلال های غیرآبی نرم تر می شود، زیرا ثابت دی الکتریک حلال های آبی در مقایسه با آب کمتر است. از طرف دیگر، برای آنیون کلرید نیز بر طبق محاسبات اختلالی می توان Em را (که به انرژی ارییتال آنیون ها مربوط است) را محاسبه کرد. این مقدار مساوی ۹/۹۴- الکترون ولت است و بدین معنی است که یون کلرید در حلال های آبی، در مقایسه با حلال های آبی، خیلی سخت تر است.

ثابت دی الکتریک آب، متانول، اتانول و اتیلن گلیکول، به ترتیب از راست به چپ ۷۸/۵۴، ۳۲/۶۳، ۲۴/۳۰ و ۳۷/۰۰ است (CRC Handbook of Chemistry Physics). بنابراین، بر اساس ثابت های دی الکتریک، نظریه اختلال پیش گویی می کند که از ترکیبات یک هیدروکسیلی در سری فوق، اتانول بهترین حلال برای افزایش سختی یون کلرید و نرمی کاتیون است. مطابق اصل HSAB، وقتی یون کلرید سخت تر می شود، تمایل آن به کاتیون هایی که سخت تر از پروتون هستند، در محیطی که دارای HCl است، افزایش می یابد. در نتیجه این عمل، به دلیل افزایش تأثیرات متقابل $Fe^{+2} - Cl^-$ و $Fe^{+3} - Cl^-$ در محلول، انتقال آهن از شبکه بلوری به محلول در نظام EtOH-HCl (در مقایسه با نظام H₂O - HCl) خیلی بهتر می شود.

نوکلئوفیل گسترش یافته است (Pearson & Songstad, 1967). تئوری اختلال بیان می کند که واکنش پذیری شیمیایی، تابعی از توزیع تأثیرات متقابل کولمبی - ارییتال است. به طور کلی، نوکلئوفیل های سخت دارای یک ارییتال HOMO با انرژی پایین و بار الکتریکی منفی هستند.

نوکلئوفیل های نرم دارای ارییتال HOMO با انرژی بالا هستند، ولی بار الکتریکی لزوماً منفی ندارند. از طرف دیگر، الکتروفیل های سخت، ارییتال LUMO با انرژی بالا و بار الکتریکی مثبت دارند، اما الکتروفیل های نرم ارییتال LUMO با سطح انرژی پایین دارند، ولی بار الکتریکی لزوماً مثبت ندارند. بنابراین، واکنش بین اسید سخت - باز سخت به علت جاذبه قوی کولمبی که بین آنها وجود دارد، سریع تر انجام می شود، ولی واکنش اسید نرم - باز نرم به دلیل تأثیرات متقابل قوی که بین ارییتال HOMO نوکلئوفیل و ارییتال LUMO الکتروفیل وجود دارد، سریع تر انجام می شود. تراز انرژی ارییتال های HOMO و LUMO مواد واکنش دهنده به علت تأثیرات متقابل حلال - جسم حل شده، دستخوش اختلال می شود (Salem, 1968). تئوری اختلال عمومی ثابت کرده است که وقتی ثابت دی الکتریک حلال کاهش پیدا می کند، کاتیون ها نرم تر و آنیون ها سخت تر می شوند. انرژی کاتیون های مورد نظر، در آب همراه با مقادیر En (که به انرژی ارییتال کاتیون ها مربوط است) در جدول ۱ آورده شده است. بحث رابطه کوانتومی الکترون گاتیویته و انرژی آن (En) در این مقاله نمی گنجد، ولی به طور کیفی می توان گفت هر قدر En بیشتر شود سختی باز بیشتر می شود. به عبارت دیگر، انرژی الکترون گاتیویته با سختی رابطه مستقیم دارد. در این واکنش، ارییتال مولکولی HOMO باز سخت که دارای بالاترین انرژی است با ارییتال

مقایسه با نظام‌های H_2O-HCl و $MeOH-H_2O$ حلال بهتری است. مطابق نظریه اختلال عمومی که بر اساس ثابت دی الکتریک پایه‌گذاری شده است، اثر اتیلن گلیکول در فرایند اسیدشویی با یون کلرید، باید در مقایسه با اتانول و متانول کمتر و در مقایسه با آب بیشتر باشد. از طرف دیگر، اتیلن گلیکول با وزن ملکولی ۶۲/۰ گرم بر مول، از همه حلالهای فوق‌الذکر سنگین‌تر است، بنابراین باعث گسترش بسیار بیشتری از بار الکتریکی در لایه مضاعف استرن — گوی می‌شود، به طوری که می‌توان نوشت:

$$\bar{\epsilon}_1(\text{Ethy - Gly}) > \bar{\epsilon}_1(\text{EtOH}) > \bar{\epsilon}_1(\text{MeOH})$$

دلیل این موضوع این است که بار الکتریکی در لایه مضاعف استرن — گوی مستقیماً با وزن ملکولی حلال متناسب است؛ در نتیجه، به علت توسعه بیشتر بار الکتریکی و افزایش غلظت یون کلرید در لایه مضاعف الکتریکی، پیش‌بینی می‌رود که اثر اتیلن گلیکول روی اسیدشویی با یون کلرید بهتر باشد.

بار الکتریکی (لایه مضاعف الکتریکی) در لایه استرن — گوی نیز عامل دیگری است که اثر اسیدشویی یون کلرید را افزایش می‌دهد. این بار الکتریکی که با $\bar{\epsilon}_1$ نشان داده می‌شود، مستقیماً با وزن ملکولی حلال متناسب است، پس می‌توان نوشت:

$$\bar{\epsilon}_1(\text{EtOH}) > \bar{\epsilon}_1(\text{MeOH}) > \bar{\epsilon}_1(\text{H}_2\text{O})$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اثر اسیدشویی یون کلرید در حضور اتانول، در مقایسه با سایر حلال‌ها، بهتر است. این موضوع به واسطه افزایش غلظت لایه مضاعف یون کلرید است. اما کاهش ثابت دی الکتریک، بار الکتریکی لایه گوی را که با $\bar{\epsilon}_2$ نشان داده می‌شود، افزایش می‌دهد و نوعی فشردگی در لایه مضاعف الکتریکی ایجاد می‌کند، به طوری که می‌توان نوشت:

$$\bar{\epsilon}_2(\text{EtOH}) > \bar{\epsilon}_2(\text{MeOH}) > \bar{\epsilon}_2(\text{H}_2\text{O})$$

بنابراین، با توجه به تأثیرات مختلفی که پیش‌تر برای انحلال آهن مورد بحث قرار گرفت، نتیجه گرفته می‌شود که نظام $EtOH-H_2O-HCl$ در

جدول ۲: نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه اولیه، قبل و بعد از پرعیارسازی به طریق فیزیکی - مکانیکی

اندازه‌گیری شده	قبل از پرعیارسازی، درصد*	بعد از پرعیارسازی، درصد*
SiO ₂	36.70	1.02
Al ₂ O ₃	14.12	0.45
TiO ₂	4.84	43.20
FeO	14.79	21.00
Fe ₂ O ₃	12.32	33.80
CaO	7.25	0.10
MgO	5.54	0.30
Na ₂ O	0.35	Trace
K ₂ O	0.43	Trace
MnO	0.65	—
P ₂ O ₅	0.03	—
L.O.I.	2.09	0.02

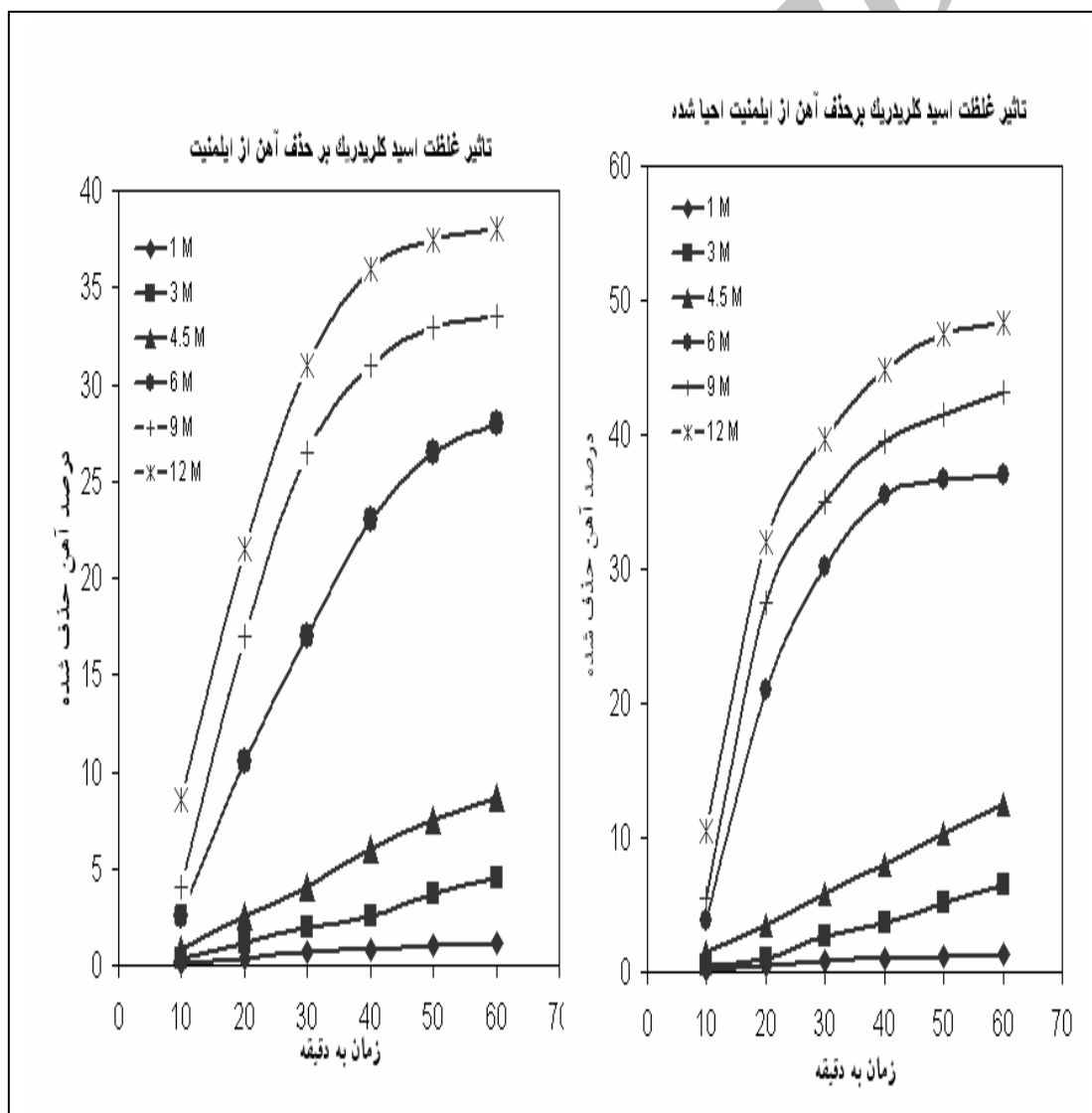
نتایج مقدار قابل قبول از تجزیه به روش‌های جذب اتمی و اسپکتروفوتومتری است.

جدول ۳: داده‌های حاصل از اسیدشویی کنسانتره ایلمنیت در شرایط مختلف: ۱. اسید کلریدریک و ایلمنیت خام؛ ۲. اسید کلریدریک و ایلمنیت احیاشده؛ ۳. اسید سولفوریک و ایلمنیت خام؛ ۴. اسید سولفوریک و ایلمنیت احیاشده؛ ۵. اسید کلریدریک همراه متانول و ایلمنیت احیاشده؛ ۶. اسید کلریدریک همراه اتانول و ایلمنیت احیا شده؛ ۷. اسید کلریدریک همراه اتیلن گلیکول و ایلمنیت احیاشده

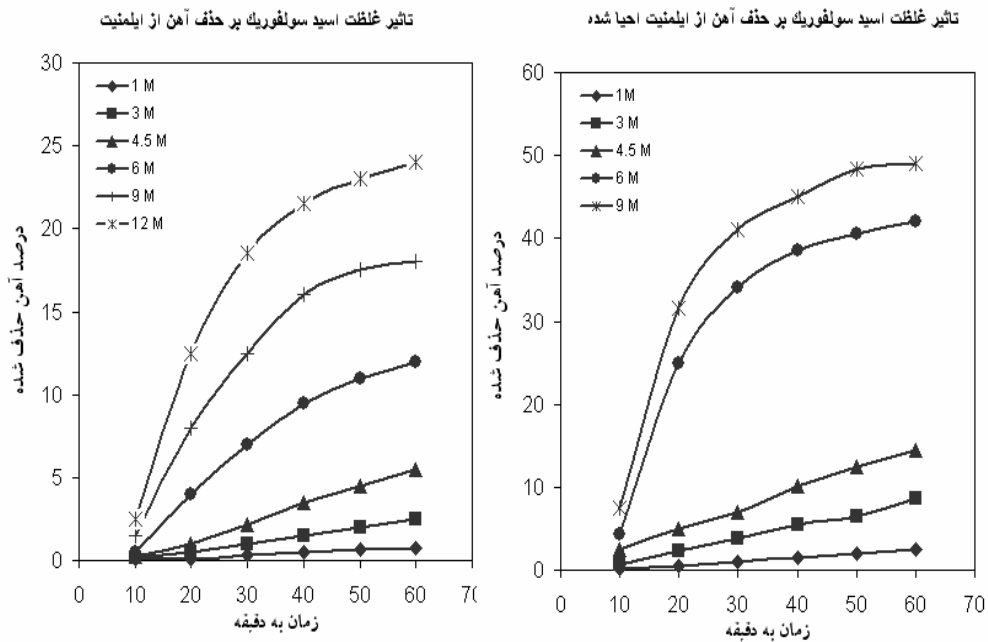
محلول شستشو	زمان به دقیقه	آهن حذف شده %					
		1M	3M	4.5M	6M	9M	12M
1	10	0.13	0.40	0.80	2.50	4.10	8.50
	20	0.40	1.15	2.50	10.50	17.00	21.50
	30	0.70	2.00	4.00	17.00	26.50	31.00
	40	0.83	2.60	6.00	23.00	31.00	36.00
	50	1.00	3.70	7.50	26.50	33.00	37.45
	60	1.20	4.50	8.70	28.00	33.50	38.00
2	10	0.15	0.50	1.50	3.80	5.50	10.50
	20	0.45	1.00	3.50	21.00	27.50	32.00
	30	0.80	2.60	5.80	30.20	35.00	39.75
	40	1.05	3.70	8.00	35.50	39.50	44.84
	50	1.20	5.23	10.30	36.75	41.50	47.50
	60	1.35	6.50	12.50	37.00	43.20	48.30
3	10	0.08	0.15	0.25	0.50	1.50	2.50
	20	0.10	0.50	1.00	4.00	8.00	12.50
	30	0.35	1.00	2.20	7.00	12.50	18.50
	40	0.50	1.50	3.50	9.50	16.00	21.50
	50	0.65	2.00	4.50	11.00	17.50	23.00
	60	0.75	2.50	5.50	12.00	18.00	24.00
4	10	0.20	0.70	2.50	4.30	7.50	
	20	0.50	2.30	5.00	25.00	31.50	
	30	1.00	3.80	7.00	34.00	41.00	
	40	1.50	5.50	10.20	38.50	45.10	
	50	2.00	6.50	12.50	40.50	48.40	
	60	2.50	8.70	14.50	42.00	49.00	
5	10	0.20	0.70	2.50	4.30	7.50	
	20	0.50	2.30	5.00	25.00	31.50	
	30	1.00	3.80	7.00	34.00	41.00	
	40	1.50	5.50	10.20	38.50	45.10	
	50	2.00	6.50	12.50	40.50	48.40	
	60	2.50	8.70	14.50	42.00	49.00	
6	10	0.50	1.50	4.00	5.50	7.50	
	20	1.00	3.00	8.00	26.10	36.30	
	30	1.50	4.50	12.00	34.50	42.20	
	40	2.20	7.50	15.00	39.20	45.50	
	50	2.50	8.70	17.60	42.50	48.50	
	60	3.00	9.50	19.50	43.60	49.50	
7	10	0.60	1.70	5.00	6.50	9.50	
	20	1.50	4.00	15.60	29.50	36.70	
	30	2.50	6.20	21.50	37.70	44.60	
	40	3.50	8.30	26.00	41.50	47.80	
	50	4.00	9.50	29.50	45.20	49.80	
	60	4.20	10.50	32.00	47.10	51.30	

جدول ۴: مقایسه تأثیر الکل‌های مختلف همراه با اسید کلریدریک ۴/۵ مولار بر حذف آهن از ایلمنیت احیاشده.

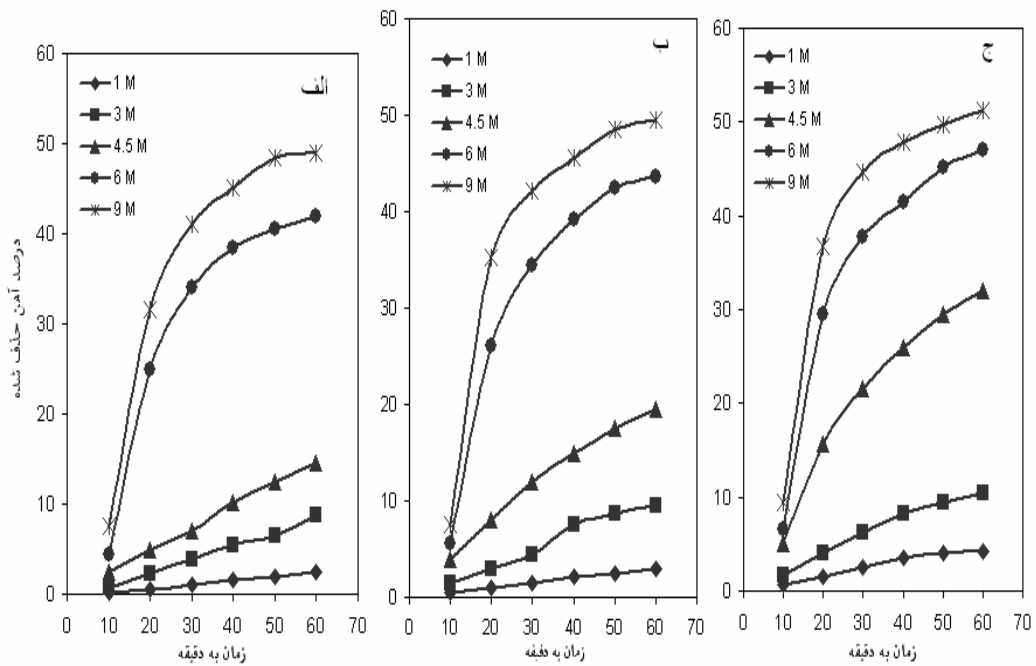
زمان به دقیقه	اسید تنها	متانول	اتانول	اتیلن گلیکول
10	1.50	2.50	4.00	5.00
20	3.50	5.00	8.00	15.60
30	5.80	7.80	12.00	21.50
40	8.00	10.20	15.00	26.00
50	10.30	12.50	17.60	29.50
60	12.50	14.50	19.50	32.00



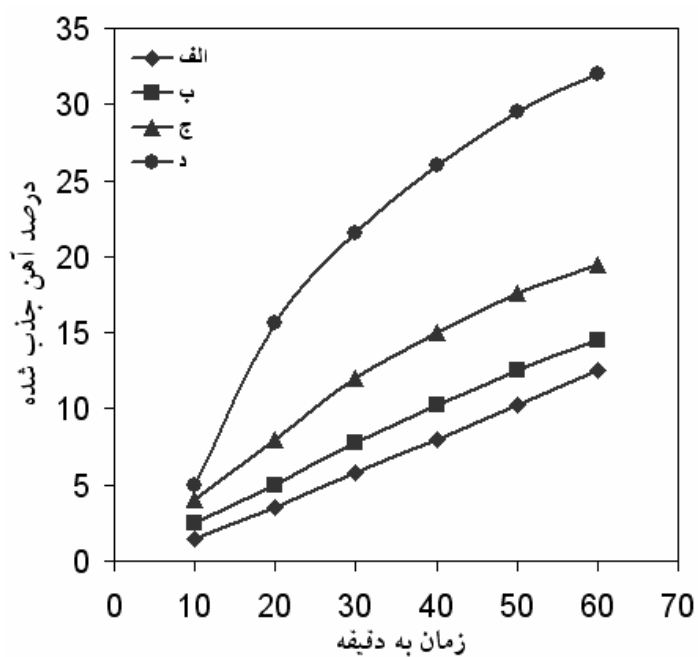
شکل ۱: تأثیر غلظت اسید کلریدریک بر حذف آهن از ایلمنیت خام و احیاشده.



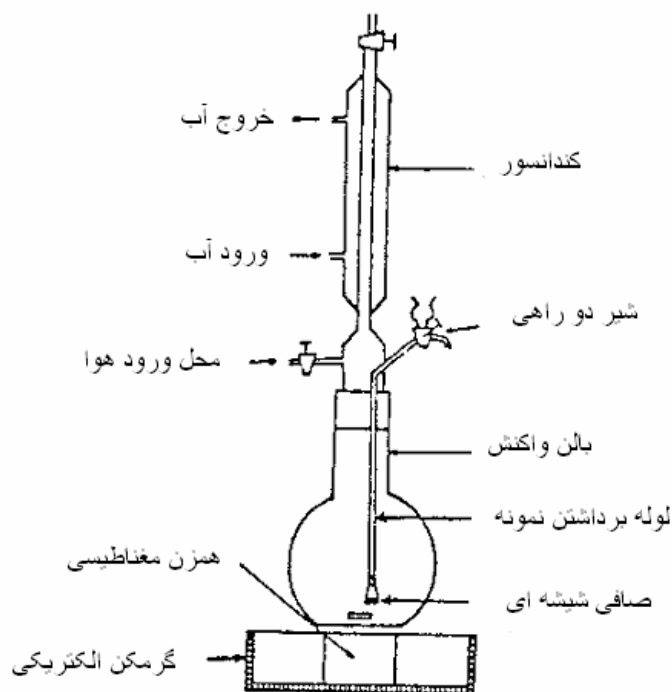
شکل ۲: تأثیر غلظت اسید سولفوریک بر حذف آهن از ایلمنیت خام و احیا شده.



شکل ۳: تأثیر مخلوط اسید کلریدریک با غلظت های مختلف و (الف) متانول (ب) اتانول و (ج) اتیلن گلیکول بر حذف آهن از ایلمنیت احیا شده.



شکل ۴: مقایسه تأثیر الکل‌های مختلف بر اسیدشویی ایلمنیت احیاشده: (الف) اسید کلریدریک ۴/۵ مولار؛ (ب) اسید کلریدریک ۴/۵ مولار همراه متانول؛ (ج) اتانول؛ (د) اتیلن گلیکول.



شکل ۵: طرح‌واره ساده‌ای از دستگاه اسیدشویی ایلمنیت.

منابع

- CRC Handbook of Chemistry and Physics**
(1982), 63th Edition: E55;
- Girgin, I. and L. Turber** (1986), *Bull. Proc. Australasia, Inst. Min. Metall.* 297: 61;
- Jaya Kumari, E. et.al.** (2002), *Hydrometallurgy* 65: 217;
- Kucukkaragoz, C.S. and R.H. Eric** (2006), *Minerals Engineering* 19: 334;
- Lanyon, M. R. et.al.** (1999), *Hydrometallurgy* 51: 299;
- Lasheen, T.A.I.** (2005), *Hydrometallurgy* 76: 123;
- Light Metals;**
- Lynd, E.**(1975), *Titanium, Industrial Minerals and Rocks*, 4th Edition;
- Mahmoud, M. H. H. et.al.** (2004), *Hydrometallurgy* 73: 99;
- Ogasawara, T. and R.V. Veloso de Araujo** (2000), *Hydrometallurgy* 56:203;
- Olanipekun, E.** (1999), *Hydrometallurgy* 53: 1;
- Parr, R.B. and R.G. Pearson** (1983), *J. Am. Chem. Soc.* 105: 7512;
- Pearson, R.G.** (1963), *J. Am. Chem. Soc.* 85: 3533;
- Pearson, R. G. and J. Songstad** (1967), *J. Am. Chem. Soc.* 89: 1927;
- Salem, L.** (1968), *J. Am. Chem. Soc.* 90: 543;
- Sarker, M.K. et.al.** (2006), *Int. J. Miner. Process.* 80: 223;
- Titanium, Australian Mineral Industry Annual Review (1987), Bureau of Mineral Resources, Canberra;
- VanDyk, J. P. et.al.** (2002), *Hydrometallurgy* 65: 31;
- Ward, J. et.al.** (1999), *Hydrometallurgy* 53: 215;
- Zhang, G. and O. Ostrovski** (2002), *Int. J. Miner. Process.* 64: 201. ■