

عناصر نادر خاکی

(کلیات، استحصال و بازار)

مؤلفین:

مهندس عبدالله سمیعی بیرق

(هیأت علمی جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر)

مهندس محمد مشکینی

(هیأت علمی جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر)

مهندس علیرضا برزین

(قائم مقام مدیر عامل شرکت گنج آفرینان ایرانیان)

انتشارات جهاد دانشگاهی

واحد صنعتی امیرکبیر

سرشناسه	: سمیع بیرق، عبدالله، ۱۳۵۲ -
عنوان و نام پدیدآور	: عناصر نادر خاکی : (کلیات، استحصال و بازار)
مشخصات نشر	: تهران: جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری	: ۲۱۰ص: مصور، جدول، نمودار
شابک	: ISBN: 978-964-210-214-3 : ۱۵۵۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی	: فیزیای مختصر
یادداشت	: فهرست نویسی کامل این اثر در نشانی: http://opac.nia.i.ir قابل دسترسی است
شناسه افزوده	: مشکینی، محمد، ۱۳۶۲ -
شناسه افزوده	: برزین، علیرضا، ۱۳۵۳ -
شناسه افزوده	: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۸۱۴۱۷۳

این کتاب در جلسه مورخ ۹۴/۰۱/۲۲ شورای نشر کتاب جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر پس از طی مراحل ارزیابی علمی، مجوز چاپ و انتشار، دریافت نموده است.



عناصر نادر خاکی (کلیات، استحصال و بازار)

مؤلفین: مهندس عبدالله سمیع بیرق، مهندس محمد مشکینی، مهندس علیرضا برزین

جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر

ناشر	جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر
نوبت چاپ	: اول
سال چاپ	: ۱۳۹۴
قطع	: وزیری
شمارگان	: ۵۰۰ نسخه
قیمت	: ۱۵۵۰۰۰ ریال
طراح	: آرزو انصاری
چاپخانه	: اصیل



ISBN: 978-964-210-214-3

شابک: ۳-۲۱۴-۲۱۰-۹۶۴-۹۷۸

نمایشگاه و فروشگاه دائمی: تهران، خیابان حافظ، روبروی سمیه، جنب دانشگاه صنعتی امیرکبیر،
انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر تلفن: ۹۸۱-۹۸۲۱۶۶+ تلفکس: ۹۸۲-۹۸۲۱۶۶+۹۸۲۱۶۶

اَطْلُبُوا الْعِلْمَ مِنَ الْمَهْدِ إِلَى اللَّحْدِ

توانمندسازی پایه‌های علمی دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی کشور از وظایف اصلی سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان نظام مقدس جمهوری اسلامی ایران می‌باشد. این مهم، ضمن افزایش اقتدار علمی کشور در عرصه‌های بین‌المللی؛ زمینه‌ساز استقلال اقتصادی با محوریت یافته‌های فن‌آورانه و دانش‌بنیان می‌گردد که خود از ارکان اصلی توسعه پایدار به‌شمار می‌آید. همچنین واضح است که در کنار دو عنصر تعهد و تخصص، دسترسی به اطلاعات روز علمی و تکنولوژی‌های مدرن؛ نیاز اولیه برای توانمندسازی پایه‌های علمی به‌شمار می‌رود.

بر این اساس جهادگران جهاد دانشگاهی امیرکبیر با مدیریت جهادی خود علاوه بر فعالیت‌های فرهنگی، پژوهش‌های فن‌آورانه و نیز آموزش‌های تخصصی فن‌آور و اشتغال‌محور، با چاپ کتب و مجلات علمی متخصصان و دانشگاهیان فرهیخته کشور و همچنین ترجمه آثار فاخر و به‌روز دنیا توسط "انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر «پلی‌تکنیک تهران»" که یکی از معتبرترین انتشارات دانشگاهی در حوزه علوم پایه و مهندسی می‌باشد؛ به وظیفه انقلابی و اعتقادی خویش جامه عمل پوشانده و امیدوار است بتواند نیازهای علمی پژوهشگران، دانشجویان و پویندگان راه علم را در تحقق آرمان‌های اصیل انقلاب فراهم سازد.

این کتاب به روح پرفتوح معمار کبیر انقلاب، شهدا و ایثارگران هشت سال دفاع مقدس به‌ویژه شهدای گرانقدر جهاد دانشگاهی و دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تقدیم می‌گردد. امید است دانشگاهیان و فعالین عرصه‌های علم و فناوری کشور، پویانده راه این شهیدان والا مقام همچون شهدای جهاد علمی، در محیط مقدس و انسان ساز دانشگاه باشند.

از همه عزیزان محقق و دانش‌پژوه تقاضا می‌شود این انتشارات را از نظرات تخصصی و پیشنهادات راهگشای خود در جهت ارتقاء سطح علمی کتب منتشره و همچنین گسترش زمینه‌های علمی آن‌ها، بهره‌مند سازند.

"هماره در پرتو الطاف الهی پیروز و سربلند باشید"

انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر

امروزه عناصر نادر خاکی و آلیاژهای آنها در ساخت بسیاری از وسایل مورد استفاده بشر به کار می‌روند. کاربرد این عناصر به عنوان مواد اولیه برای صنایع با تکنولوژی مدرن با سرعت شگفت‌آوری در حال افزایش است. مبدل‌های کاتالیست کنترل آلودگی هوا در خودروها، تلفن‌های همراه، حافظه‌های جانبی رایانه‌ها، دوربین‌ها، دستگاه‌های پخش کننده قابل حمل، باتری‌های قابل شارژ، مغناطیس‌های پایدار، تصفیه نفت، نورهای فلورسنت، فیبرهای نوری، کاربردهای درمانی در دندانپزشکی، جراحی‌های لیزری، انرژی هسته‌ای، هوا و فضا، داروهای ایزوتوپی، داروهای مورد استفاده در درمان سرطان‌ها مثال‌هایی از کاربرد روز افزون و منحصر به فرد این عناصر هستند.

در سال‌های اخیر به دلیل تنوع کاربرد عناصر نادر خاکی و ترکیبات آنها در صنایع تجهیزات مختلف، توجه جهانی به این عناصر بیشتر شده است. هرچند مقالات و مطالبی به صورت پراکنده و اندک در نشریات و مدارک علمی کشور وجود دارد ولی عدم وجود یک منبع علمی با زبان فارسی که حاوی اطلاعات کافی در مورد خصوصیات، کاربردها، ذخایر، روش‌های فرآوری و تولید باشد احساس می‌شود.

مؤلفین این کتاب با سابقه چندین ساله آموزشی، تحقیقاتی و پژوهشی در زمینه معدن و فرآوری مواد معدنی در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی بر آن شدند جهت تشویق صاحبان معادن و صنایع معدنی برای سرمایه‌گذاری در این زمینه و آشنایی بیشتر اساتید بزرگوار، محققان، فارغ‌التحصیلان و دانشجویان کتابی تألیف نمایند.

کتاب حاضر در ۸ فصل جداگانه ارائه شده است. فصل اول شامل اطلاعاتی در زمینه تاریخچه، فراوانی، طبقه‌بندی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی عناصر و اثرات زیست محیطی آنها است. در فصل دوم بررسی ذخایر و منابع، خاستگاه زمین‌شناسی و کانی‌شناسی عناصر نادر خاکی ارائه شده است. فصل سوم شامل کاربردها و مصارف عناصر نادر خاکی در صنایع مختلف است. در فصل چهارم شناسایی، خواص سنجی و همچنین پیش‌فرآوری کانی‌های

عناصر نادر خاکی بررسی شده است. فصل پنجم درباره روش‌های فرآوری شیمیایی شامل فروشویی و انحلال عناصر نادر خاکی در محلول‌های مختلف بحث می‌کند. در فصل ششم روش‌های استخراج حلالی، تبادل یونی، اکسیداسیون و احیای انتخابی و روش‌های تبلور جزء به جزء و ترسیب به منظور جدایش و خالص سازی عناصر نادر خاکی به صورت فلز جداگانه و یا ترکیبی از آنها، بیان شده است. در فصل هفتم حذف آهن از محلول‌های حاوی عناصر نادر خاکی با روش ترسیب و استخراج حلالی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل هشتم به پارامترهای اقتصادی مانند کد آسبیک و تعرفه گمرکی، شرایط صادرات و واردات، اهمیت استراتژیکی، میزان تولید در جهان، کشورها و شرکت‌های بزرگ تولید کننده و پیش‌بینی تولید و قیمت عناصر نادر خاکی در آینده پرداخته شده است.

بدون هیچ تردیدی این نوشتار عاری از خطا و اشتباه نیست، بنابراین از خوانندگان گرامی درخواست می‌شود که با ارایه نظرات و پیشنهادهای خود در جهت رفع نواقص و هر چه پربارتر شدن آن در ویرایش‌های بعدی ما را یاری نمایند.

در پایان توفای زديم بر آستان حضرت حافظ که چنین آمد:

رازی که بر غیر نگفتم و نگوییم با دوست بگوییم که او محرم راز است

بهار ۱۳۹۴



فصل ۱: خصوصیات عناصر نادر خاکی.....	۱۵
۱-۱- مقدمه.....	۱۵
۲-۱- تاریخچه و نام‌گذاری عناصر نادر خاکی.....	۱۵
۳-۱- فراوانی عناصر نادر خاکی.....	۱۶
۴-۱- طبقه‌بندی عناصر نادر خاکی.....	۱۸
۵-۱- ویژگی‌های شیمیایی عناصر نادر خاکی.....	۱۹
۶-۱- عناصر نادر خاکی و خصوصیات آنها.....	۲۱
۷-۱- اثرات زیست محیطی و بیولوژیکی عناصر نادر خاکی.....	۳۲
فصل ۲: ذخایر و منابع عناصر نادر خاکی.....	۳۷
۱-۲- مقدمه.....	۳۷
۲-۲- عناصر نادر خاکی از دیدگاه زمین شناسی اقتصادی.....	۳۷
۱-۲-۲- کانی‌های عناصر نادر خاکی.....	۳۸
۲-۲-۲- کانسارهای عناصر نادر خاکی.....	۴۳
۳-۲- ذخایر عناصر نادر خاکی ایران.....	۵۰
۴-۲- اکتشاف عناصر نادر خاکی.....	۵۶
۱-۴-۲- اکتشاف عناصر نادر خاکی در ایران.....	۵۸

فصل ۳: کاربردهای عناصر نادر خاکی..... ۶۱

- ۳-۱- مقدمه ۶۱
- ۳-۲- معرفی، طبقه‌بندی و میزان مصرف و کاربرد عناصر نادر خاکی..... ۶۱
- ۳-۳- کاربرد عناصر نادر خاکی در کاتالیست‌های کراکینگ زئولیتی..... ۶۲
- ۳-۴- کاربرد عناصر نادر خاکی در کاتالیست‌های غیرکراکینگی..... ۶۳
- ۳-۵- کاربرد عناصر نادر خاکی در صنعت تلویزیون‌سازی..... ۶۳
- ۳-۶- کاربرد عناصر نادر خاکی در رادیوگرافی پزشکی..... ۶۴
- ۳-۷- کاربرد عناصر نادر خاکی در حسگرهای اکسیژن..... ۶۴
- ۳-۸- کاربرد عناصر نادر خاکی در تولید آهن ریخته‌گری شده..... ۶۴
- ۳-۹- کاربرد عناصر نادر خاکی در سرامیک‌های الکترواپتیک..... ۶۴
- ۳-۱۰- کاربرد عناصر نادر خاکی در مواد حافظه‌دار حبابی..... ۶۵
- ۳-۱۱- کاربرد عناصر نادر خاکی در ساخت آلیاژها..... ۶۵
- ۳-۱۲- کاربرد عناصر نادر خاکی در ساخت مغناطیس‌های دائم..... ۶۶
- ۳-۱۳- سایر کاربردها..... ۶۷

فصل ۴: شناسایی و پیش‌فرآوری کانی‌های عناصر نادر خاکی..... ۷۱

- ۴-۱- مقدمه ۷۱
- ۴-۲- شناسایی و خواص سنجی..... ۷۱
- ۴-۲-۱- شناسایی بر اساس خواص ظاهری..... ۷۱
- ۴-۲-۲- شناسایی بر اساس خواص فیزیکی..... ۷۲
- ۴-۲-۳- شناسایی با روش‌های میکروسکوپی..... ۷۲
- ۴-۲-۴- روش‌های شناسایی دستگاهی و شیمیایی..... ۷۳
- ۴-۲-۵- شناسایی عناصر نادر خاکی..... ۷۷
- ۴-۳- روش‌های پیش‌فرآوری..... ۷۸
- ۴-۳-۱- جدایش ثقلی..... ۷۸
- ۴-۳-۲- جدایش مغناطیسی..... ۸۲
- ۴-۳-۳- جدایش الکترواستاتیکی..... ۸۳

۴-۳-۴	فرآیند فلوتاسیون	۸۴
۴-۴	جدایش فیزیکی کانی‌های عناصر نادر خاکی	۹۱
۴-۴-۱	جدایش فیزیکی موناژیت	۹۱
۴-۴-۲	جدایش فیزیکی موناژیت و زئوتايم	۹۲
۴-۴-۳	جدایش فیزیکی کانی باستناژیت	۹۳
۴-۴-۴	جدایش فیزیکی کانی‌های عناصر نادر خاکی بایان اوبو	۹۵
۴-۴-۵	جدایش فیزیکی سایر کانی‌های عناصر نادر خاکی	۹۷
فصل ۵:	فروشویی و انحلال عناصر نادر خاکی	۱۰۱
۵-۱	مقدمه	۱۰۱
۵-۲	فروشویی عناصر نادر خاکی	۱۰۱
۵-۲-۱	پارامترهای مؤثر در فروشویی کانی‌های عناصر نادر خاکی	۱۰۲
۵-۲-۲	انواع روش‌های فروشویی عناصر نادر خاکی	۱۰۴
فصل ۶:	فرآیندهای جدایش، تخلیص و تولید عناصر نادر خاکی	۱۱۳
۶-۱	مقدمه	۱۱۳
۶-۲	روش استخراج حلالی	۱۱۳
۶-۲-۱	فاکتورها و عوامل مؤثر در فرآیند استخراج با حلال	۱۱۴
۶-۲-۲	خصوصیات محلول آبی و حلال آلی و تأثیر آنها در روش استخراج	۱۱۷
۶-۲-۳	جداسازی عناصر نادر با روش استخراج حلالی	۱۱۹
۶-۲-۴	استخراج‌کننده‌های حلال آلی	۱۲۲
۶-۳	روش تبادل یونی	۱۳۹
۶-۳-۱	اصول کلی روش تبادل یونی	۱۴۰
۶-۳-۲	روش جدایش عناصر نادر خاکی از محلول حاوی این عناصر	۱۴۰
۶-۳-۳	مواد شستشو دهنده رزین‌ها برای جدایش عناصر نادر خاکی	۱۴۴
۶-۴	اکسیداسیون انتخابی	۱۴۵
۶-۵	احیای انتخابی	۱۴۶
۶-۶	تبلور جزء به جزء	۱۵۰

- ۶-۷- ترسیب جزء به جزء ۱۵۲
- ۶-۸- جداسازی ناخالصی‌ها از محلول لیچینگ با ترسیب و سانتریفیوژ ۱۵۴
- ۶-۹- کروماتوگرافی استخراجی ۱۵۵
- ۶-۹-۱- روش‌های آغشته کردن رزین ۱۵۶
- ۶-۹-۲- شرایط مورد نیاز برای یک استخراج کننده ۱۵۹
- ۶-۹-۳- مزایای روش کروماتوگرافی استخراجی ۱۵۹
- ۶-۱۰- جدایش عناصر نادر خاکی با روش کروماتوگرافی استخراجی ۱۵۹
- ۶-۱۰-۱- رفتار نقطه شکست برای یون‌های مختلف در ستون تبادل یونی ۱۶۲
- ۶-۱۰-۲- رفتار شستشوی لاتانیدها و عناصر مزاحم با رسم نمودار شویش ۱۶۳
- ۶-۱۰-۳- جذب یون‌های فلزی توسط رزین‌های اسیدهای ارگانوفسفر ۱۶۴
- ۶-۱۱- استریپینگ ۱۶۵
- ۶-۱۲- اسکرابینگ ۱۶۷
- ۶-۱۲-۱- اسکرابینگ عناصر نادر خاکی ۱۶۷
- فصل ۷: روش‌های حذف ناخالصی آهن از محلول حاوی عناصر نادر خاکی ۱۷۱
- ۷-۱- مقدمه ۱۷۱
- ۷-۲- روش‌های ترسیب برای حذف آهن از محلول عناصر نادر خاکی ۱۷۱
- ۷-۲-۱- ترسیب هیدروکسیدی ۱۷۱
- ۷-۲-۲- ترسیب آهن به صورت جاروسیت ۱۷۴
- ۷-۲-۳- روش ترسیب آهن با گوئیت ۱۷۵
- ۷-۲-۴- ترسیب آهن به صورت فسفات ۱۷۵
- ۷-۲-۵- انحلال انتخابی عناصر نادر خاکی در اسید ۱۷۵
- ۷-۲-۶- ترسیب نمک مضاعف عناصر نادر خاکی ۱۷۶
- ۷-۲-۷- ترسیب عناصر نادر خاکی به صورت اگزالات یا کربنات ۱۷۷
- ۷-۳- روش استخراج حلالی برای حذف آهن از محلول عناصر نادر خاکی ۱۷۸
- ۷-۳-۱- حذف آهن با RNH_2 یا N_{1923} ۱۷۸
- ۷-۳-۲- حذف آهن با N_{503} ۱۷۸

- ۱۷۸ حذف آهن با آلامین-۳۳۶
- ۱۸۰ حذف آهن با P_{204} ، P_{507} و سیانکس 272
- ۱۸۱ جدایش آهن - لانتانیم با دی متیل هیتیل متیل فسفات
- ۱۸۳ جداسازی عناصر نادر خاکی از ناخالصی ها با نفتیک اسید
- ۱۸۳-۷ جداسازی آهن با استفاده از بنزوهیدروکسامیک اسید (BHA) و ا-فتالویل
- ۱۸۴ هیدروکسامیک اسید (OPHA)

فصل ۸: اقتصاد عناصر نادر خاکی..... ۱۸۷

- ۱۸۷ ۱-۸ مقدمه
- ۱۸۷ ۲-۸ تعرفه گمرکی و کد آیسیک
- ۱۸۷ ۳-۸ شرایط صادرات و واردات
- ۱۸۸ ۴-۸ اهمیت استراتژیکی عناصر نادر خاکی در دنیای امروز
- ۱۸۸ ۵-۸ بررسی و ارائه اطلاعات لازم در زمینه قیمت عناصر نادر خاکی
- ۱۹۰ ۶-۸ کشورهای عمده تولید کننده و مصرف کننده عناصر نادر خاکی
- ۱۹۴ ۷-۸ شرکت های داخلی تولید کننده و مصرف کننده عناصر نادر خاکی
- ۱۹۴ ۸-۸ بررسی روند مصرف عناصر نادر خاکی در ایران
- ۱۹۴ ۹-۸ وضعیت عرضه و تقاضا عناصر نادر خاکی
- ۱۹۶ ۱۰-۸ چشم اندازی از عناصر نادر خاکی
- ۱۹۶ ۱۱-۸ بازار فلزات نادر خاکی
- ۱۹۹ منابع و مراجع