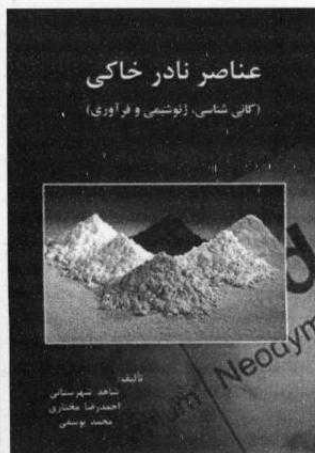


۱۳۶۴۷۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



عناصر نادر خاکی (کانی شناسی، ژئوشیمی و فراوری)

مؤلف

سahed شهرستانی

(دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان)

احمد رضا مختاری

(عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان)

محمد یوسفی

(کارشناس ارشد مهندس اکتشاف معدن)



سرشناسه	: شهرستانی، شاهد، ۱۳۶۰ -
عنوان و نام پدیدآور	: عناصر نادر خاکی : کانی‌شناسی، ژئوشیمی و فرآوری/شاهد شهرستانی، احمد رضا مختاری، محمد یوسفی.
مشخصات نشر	: تهران: سیمای دانش، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری	: ۲۱۷ ص.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۱۲۰-۲۳۸-۴
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: کتابنامه.
عنوان دیگر	: کانی‌شناسی، ژئوشیمی و فرآوری.
موضوع	: خاک‌های کمیاب
شناسه افزوده	: مختاری، احمد رضا، ۱۳۵۵ -
شناسه افزوده	: یوسفی، محمد، ۱۳۶۰ -
رده بندی کنگره	: QD ۱۷۲ ۱۳۹۴ ش ۲ خ /
رده بندی دیویی	: ۳/۵۴۶
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۰۱۳۹۵۵

عناصر نادر خاکی

(کانی‌شناسی، ژئوشیمی و فرآوری)

تألیف:	شاهد شهرستانی، احمد رضا مختاری، محمد یوسفی
ناشر:	انتشارات سیمای دانش
ناشر همکار:	انتشارات آذر
نوبت چاپ:	اول/۱۳۹۴
تیراژ:	۱۱۰۰ نسخه
لیتوگرافی:	باختر
چاپخانه:	فرشیوه - یکتا
صحافی:	فرشیوه - یکتا
شابک:	۹۷۸-۶۰۰-۱۲۰-۲۳۸-۴
قیمت:	۱۶۰۰۰ تومان

کلیه حقوق این اثر برای انتشارات سیمای دانش محفوظ است.

انتشارات سیمای دانش: خیابان انقلاب- ابتدای خیابان ۱۲ فروردین

پلاک ۳۱۸- تلفن: ۶۶۴۶۴۷۷۹

فروشگاه سیمای دانش: ۶۶۴۶۰۵۴۵

انتشارات آذر: ۶۶۴۶۵۸۳۰

کتابفروشی عصر دانش: ۱ ۶۶۴۹۳۷۰

کتابفروشی پرهام: ۶۶۴۶۸۲۳۵

فهرست مطالب

ز	پیشگفتار چاپ اول
۹	فصل اول: ویژگی‌های ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی
۹	۱-۱- عناصر نادر خاکی (Rare earth element)
۱۰	۱-۲- ژئوشیمی و کانی‌شناختی عناصر نادر خاکی
۱۳	۱-۳- متالوژنی عناصر نادر خاکی
۱۴	۱-۴- ویژگی‌های عمومی ژئوشیمیایی و فراوانی عناصر نادر خاکی
۱۷	۱-۴-۱- فراوانی عناصر نادر خاکی در منظومه شمسی، خورشید و زمین
۲۴	۱-۴-۲- حالات اکسیداسیون
۲۵	۱-۴-۳- جانشینی عنصری و جزءبندی
۲۶	۱-۴-۴- جزءبندی (تفریق) و عوامل مؤثر بر آن
۲۳	فصل دوم: کانی‌شناسی عناصر نادر خاکی
۲۳	۱-۲- کانی‌شناسی عناصر نادر خاکی
۳۶	۲-۲- هالیدها
۳۷	۳-۲- کربنات‌ها
۳۸	۱-۳-۲- کربنات‌ها به همراه فلوئور
۴۰	۴-۲- اکسیدها
۴۴	۵-۲- بورات
۴۴	۶-۲- سیلیکات‌ها
۴۷	۷-۲- فسفات‌ها
۵۰	۸-۲- آرسنیدها
۵۰	۹-۲- سولفات
۵۱	فصل سوم: تمرکز و متالوژنی عناصر نادر خاکی
۵۱	۱-۳- رفتار کانی‌های سنگ ساز و فرعی
۵۲	۲-۳- الیوین
۵۳	۳-۳- محتوی عناصر نادر خاکی در الیوین‌ها
۵۳	۱-۳-۳- شهابسنگ‌ها
۵۳	۲-۳-۳- لرزولیت‌های گارنت‌دار
۵۳	۳-۳-۳- لرزولیت‌های اسپینل‌دار در زینولیت‌های حاصل از ایالات بازالت-آلکالین
۵۵	۴-۳-۳- ورلیت، تروکتولیت و الیوین گابرو
۵۶	۴-۳-۴- ارتوپیروکسن

۵۹	۳-۴-۱- شهابسنگ‌ها
۶۰	۳-۴-۲- لرزولیت‌های اسپینلی واقع در زینولیت‌های عمیق
۶۰	۳-۴-۳- لرزولیت‌های توده‌های مافیک-اولترامافیک
۶۰	۳-۴-۴- هارزبورژیت
۶۱	۳-۴-۵- پیروکسنیت
۶۱	۳-۴-۶- گابرو-نوریت
۶۱	۳-۴-۷- بازالت، آندزیت، داسیت و ریولیت
۶۲	۳-۴-۸- توزیع ایزومورفیک عناصر نادر خاکی در ارتوپیروکسن‌ها
۶۲	۳-۵-۵- کلینوپیروکسن
۶۲	۳-۵-۱- محتوای عناصر نادر خاکی در کلینوپیروکسن
۶۲	۳-۵-۲- گارنت و لرزولیت‌های گارنت‌دار در زینولیت‌های عمیق
۶۳	۳-۵-۳- پریدوتیت‌های اسپینلی حاصل از زینولیت‌های عمیق
۶۴	۳-۵-۴- لرزولیت‌های اسپینلی حاصل از توده‌های سنگی
۶۹	۳-۵-۵- فرآیند ایزومورفیسم عناصر نادر خاکی در کلینوپیروکسن
۷۰	۳-۶- پلاژیوکلاز
۷۸	۳-۷- گارنت‌ها
۷۹	۳-۸- اسپینل‌های کروم
۷۹	۳-۹- ایلمنیت
۸۰	۳-۱۰- زیرکن
۸۰	۳-۱۱- آپاتیت
۸۱	۳-۱۲- تیتانیات‌ها
۸۲	۳-۱۳- پروفسکیت
۸۲	۳-۱۴- میکاها
۸۲	۳-۱۵- انواع کانسارهای اصلی عناصر نادر خاکی
۸۷	۳-۱۶- کانسارهای اولیه
۸۸	۳-۱۶-۱- کانسارهای همراه با کربناتیت‌ها
۹۱	۳-۱۶-۲- کانسارهای همراه با سنگ‌های آذرین آکالی
۹۲	۳-۱۶-۳- کانسارهای نامرتبط با سنگ‌های آذرین آکالی
۹۴	۳-۱۷- کانسارهای ثانویه
۹۴	۳-۱۷-۱- نهشته‌های پلاسری
۹۵	۳-۱۷-۲- کانسارهای باقیمانده از هوازدگی
۹۷	۳-۱۸- تمرکز عناصر نادر خاکی در دیگر محیط‌های زمین‌شناسی
۹۹	فصل چهارم: اکتشاف و فرآوری عناصر نادر خاکی

۹۹	۴-۱- روش‌های اکتشاف عناصر نادر خاکی
۱۰۶۲	۴-۲- فراوری عناصر نادر خاکی
۱۰۶	۴-۳- کانی‌های عناصر نادر خاکی مورد استخراج
۱۱۰	۴-۳-۱- باستاناسیت
۱۱۱	۴-۳-۲- مونازیت
۱۱۲	۴-۳-۳- زینوتیم
۱۱۲	۴-۳-۴- رس‌های جاذب یون
۱۱۲	۴-۳-۵- دیگر کانی‌های عناصر نادر خاکی
۱۱۲	۴-۴- عملیات‌های واحد فرآوری
۱۱۳	۴-۴-۱- جداسازی ثقیلی
۱۱۶	۴-۴-۲- لجن زدایی (گل شویی)
۱۱۷	۴-۴-۳- جداسازی منطائیسی
۱۱۸	۴-۴-۴- جداسازی الکترواستاتیکی
۱۱۹	۴-۴-۵- فلوتاسیون
۱۱۹	۴-۴-۶- شیمی سطح
۱۲۰	۴-۴-۷- فلوتاسیون باستاناسیت
۱۲۶	۴-۴-۸- فلوتاسیون مونازیت
۱۲۹	فصل پنجم: مطالعه و بررسی عناصر نادر خاکی در کانسارهای آهن- آپاتیتی بلوک بافق
۱۲۹	۵-۱- تکتونیک و زمین ساخت ایران مرکزی
۱۳۱	۵-۲- خصوصیات مغناطیسی بلوک بافق
۱۳۴	۵-۳- عوامل موثر در تکوین و تشکیل کانسارهای آهن حوزه بافق
۱۳۴	۵-۴- مراحل زایشی کانسارهای آهن بلوک بافق
۱۳۵	۵-۴-۱- تیپ کوارتزیت‌های آهن‌دار
۱۳۵	۵-۴-۲- تیپ کانسنگ‌های سیدریتی و منگانوسیدریتی
۱۳۶	۵-۴-۳- تیپ پیرولوویت - لیمونیت
۱۳۶	۵-۴-۴- تیپ کنتاکت متاسوماتیت
۱۳۶	۵-۵- پدیده متاسوماتیسم (دگرنهادی)
۱۳۷	۵-۵-۱- ماگماتیک فلوتید متاسوماتیسم (Magmatic Fluid Metasomatism)
۱۳۸	۵-۵-۲- اتومتامورفیک متاسوماتیسم (Autometamorphic Metasomatism)
۱۳۸	۵-۵-۳- پنوماتوهیدروترمال متاسوماتیسم (Pneumatohydrothermal Metasomatism)
۱۳۸	۵-۵-۴- هیدروترمال متاسوماتیسم (Hydrothermal Metasomatism)
۱۳۹	۵-۵-۵- سنگ دگرنهادی آلوده شده (Contaminated Metasomatite)
۱۳۹	۵-۵-۶- سنگ دگرنهادی برشی (Breccia Contaminated Metasomatite)

۱۳۹.....	۵-۷-۷- سنگ دگرنهادی مطبق یا لایه دار (Banded Contaminated Metasomatite)
۱۴۰.....	۵-۸-۵- سنگ‌های دگرنهادی از نوع کنتاک متاسوماتیت (Contact Metasomatite)
۱۴۰.....	۵-۶- تیپ بندی (طبقه بندی عیاری) سنگ آهن در ایران مرکزی
۱۴۱.....	۵-۷- متالوژی و ژنز کانسارهای آهن- آپاتیت بلوک بافق
۱۴۸.....	۵-۸- مطالعه پراکندگی‌های عناصر کمیاب خاکی در کانسار آهن آپاتیتی اسفوردی
۱۴۹.....	۵-۹- بررسی فرآیندهای کانی سازی Fe-REE در منطقه بافق
۱۴۹.....	۵-۱۰- بررسی چگونگی کانی سازی Fe-REE در کانسار اسفوردی
۱۵۲.....	۵-۱۱- عناصر نادر خاکی در ایران مرکزی
۱۵۵.....	۵-۱۱-۱- زمین شناسی
۱۵۷.....	۵-۱۱-۲- ژئوشیمی
۱۵۸.....	۵-۱۱-۳- ژنز کانسار
۱۶۰.....	۵-۱۲- کانسار آهن- آپاتیت اسفوردی
۱۶۱.....	۵-۱۲-۱- کانی‌های کربناتی و فسفاتی عناصر نادر خاکی
۱۶۱.....	۵-۱۲-۲- مونازیت
۱۶۶.....	۵-۱۲-۳- زینوتایم
۱۷۰.....	۵-۱۲-۴- سینکیسیت و باستانسیت
۱۷۲.....	۵-۱۲-۵- سیلیکات‌های عناصر نادر خاکی
۱۷۵.....	۵-۱۲-۶- محتوای عناصر نادر خاکی در آپاتیت و زون‌های مگنتیتی
۱۷۹.....	۵-۱۲-۷- رویه تجربی
۱۸۱.....	۵-۱۲-۷-۱- آماده سازی نمونه
۱۸۱.....	۵-۱۲-۷-۲- آنالیز ابعادی
۱۸۱.....	۵-۱۲-۸- رویه آزمایش
۱۸۱.....	۵-۱۲-۸-۱- میز لرزان
۱۸۱.....	۵-۱۲-۸-۲- جدایش مغناطیسی شدت بالا با روش تر
۱۸۲.....	۵-۱۲-۹- بررسی‌های کانی‌شناختی و شیمیایی
۱۸۲.....	۵-۱۲-۹-۱- آپاتیت
۱۸۳.....	۵-۱۲-۹-۲- یافته‌های کلینشناختی
۱۸۳.....	۵-۱۲-۹-۳- عیارهای سرریز
۱۸۴.....	۵-۱۲-۹-۴- آنالیز ابعادی
۱۸۹.....	فهرست منابع

پیشگفتار چاپ اول

عنصر نادر خاکی کمیاب با نشانه اختصاری "REEs"، مجموعه ۱۷ عنصر شیمیایی جدول تناوبی هستند. این دسته از عناصر عبارتند از پانزده عنصر لانتانیدها و دو عنصر اسکاندیم و ایتربیم. توسعه تکنولوژی در تولید حافظه‌های کامپیوتری، لوح‌های فشرده، باتری‌های قابل شارژ، تلفن همراه، کاتالیست‌ها، قطعات مغناطیسی، قطعات اپتیکی، لامپ‌های نوری و ... باعث گردیده عناصر نادر خاکی و آلیاژهای آنها که به طور مستقیم در تولیدات این نوع کالاها دخالت دارند، در دو دهه گذشته بیش از پیش مورد توجه و استفاده قرار گیرند. از نظر حجم مصرف، صنایع پتروشیمی بزرگترین مصرف کننده این عناصر جهت تولید کاتالیست‌ها و اتوکاتالیست‌ها می باشند و پس از آن صنایع متالوژی در رتبه دوم مصرف قرار دارند. صفحات نمایشگر، قطعات الکترونیکی و اپتیکی، تجهیزات نظامی و ... از دیگر منابع مصرف کننده این عناصر محسوب می‌شوند. تا سال ۱۹۴۸، عناصر نادر خاکی از ذخایر پلاسیری هند و برزیل استخراج می گردید. در سال ۱۹۵۰ ذخایر موناویت آفریقای جنوبی به عنوان منابع مهم عناصر نادر خاکی معرفی گردید و پس از آن از سال ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ معدن Mountain Pass در آمریکا به عنوان بزرگترین تولید کننده عناصر نادر خاکی در جهان به شمار می آمد. امروزه هند و آفریقای جنوبی هنوز به عنوان تولید کننده عناصر نادر خاکی مطرح می باشند ولی این میزان تولید در مقایسه با تولید چین بسیار ناچیز است. با کاهش تولید معدن Mountain Pass در اوایل سال ۱۹۹۰ و توقف فعالیت به دلیل مشکلات زیست محیطی و افزایش هزینه‌های تولید، چین به عنوان تولید کننده اصلی عناصر نادر خاکی در جهان مطرح گردید و در سال ۲۰۰۰ با سهم ۹۰ درصدی تولید جهانی و قیمت پایین محصولات، در رتبه اول تولیدکنندگان عناصر نادر خاکی قرار گرفت و با ادامه این روند در سال ۲۰۰۹، ۹۷ درصد تولید جهانی را از آن خود نمود. براساس گزارش سازمان زمین شناسی آمریکا، کشورهای دیگری نیز همانند قرقیزستان، مالزی، اندونزی، نیجریه، کره شمالی و ویتنام نیز دارای تولیدات عناصر نادر خاکی می باشند. در سال ۲۰۱۰ چین اعلام نمود با توجه به نیاز محصولات داخلی به عناصر نادر خاکی و اطمینان جهت تامین این عناصر از منابع داخلی، صادرات خود را به میزان چشمگیری کاهش خواهد داد به نحوی که تا سال ۲۰۱۵ این صادرات متوقف خواهد شد. این خبر باعث افزایش بی سابقه قیمت عناصر نادر خاکی در دنیا گردید. عناصر نادر خاکی پوسته زمین نسبتاً فراوان هستند، اما تجمع اقتصادی این عناصر نسبت به دیگر عناصر پوسته زمین، بسیار محدود بوده و معادن این گونه عناصر در دنیا نایاب می باشند. عمده ذخایر اقتصادی این عناصر در کانی‌های گروه باستانزیت و موناویت یافت می‌شود. ذخایر باستانزیت در چین و ایالات متحده بزرگترین منابع اقتصادی عناصر نادر خاکی را تشکیل می دهند و ذخایر موناویت در استرالیا، برزیل، چین، هند، مالزی، آفریقای جنوبی، سریلانکا، تایلند، و همچنین در ایالات متحده در رده دوم، از منابع اقتصادی بعدی عناصر نادر خاکی می باشند. آپاتیت، یودالیت و چرالیت، لوپاریت و ... منابع دیگری برای عناصر نادر خاکی هستند. از سال ۲۰۱۰ تلاش‌های اکتشافی به منظور افزایش منابع عناصر نادر خاکی به طرز چشمگیری افزایش یافته است و در حاضر سرمایه گذاری بسیاری در آمریکا و کانادا جهت کشف و بهره برداری ذخایر جدید در حال

انجام است. براساس گزارش منتشر شده سازمان زمین شناسی افغانستان و بررسی تخمینی سازمان زمین شناسی آمریکا، میزان ذخیره عناصر نادر خاکی سبک در محدوده معدنی خانه شین ولایت هلمند افغانستان، حداقل ۱ میلیون تن برآورد شده است و از نظر عیار، این ذخیره در کلاس جهانی با معادن Bayan Obo در چین و Mountain Pass در آمریکا قابل مقایسه است. تلاش ها و تمرکز جهت اکتشاف و بهره برداری از این ذخایر به کشورهای همسایه ایران نیز کشیده شده است. اکتشافات موضوعی انجام شده و شناسایی آنومالی های این عناصر، حاکی از وجود پتانسیل بالقوه عناصر نادر خاکی در کشور می باشد. از سویی رشد شتاب گرفته مصرف و ارزش استراتژیک این عناصر، فضا را جهت توجه بیشتر به منابع موجود آماده نموده است و لازم است با استفاده از دانش روز دنیا و انجام اکتشافات گسترده و شناسایی منابع اقتصادی، نسبت به توسعه فعالیت های زیرساختی مرتبط با حوزه عناصر نادر خاکی اقدام نمود. در فصل اول کتاب حاضر رفتار و ویژگی های ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی به تفصیل توصیف شده اند تا مبنایی برای توجیه رفتار مشابه این طیف از عناصر معرفی شود. در فصل بعدی انواع کانی های عناصر نادر خاکی فارغ از میزان اقتصادی بودن آنها ارائه شده است. به نظر می رسد فهرست کاملی از تمام انواع کانی های حاوی این عناصر گزارش شده است. در فصل سوم رفتار عناصر نادر خاکی در گهواره های مختلف سنگی و نیز کانی های شاخص سازنده سنگ و کمیاب مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه انواع کانسارهای عناصر نادر خاکی و خصوصیات هر یک تبیین شده است. در فصل آخر روش های اکتشاف کانسارهای معرفی شده برای این عناصر و نیز رویه های مهم استحصال کانی های آنها مورد توجه بوده است. در این کتاب سعی شده است با تکیه بر ظرفیت کشور عزیزمان ایران در زمینه برخورداری از منابع عناصر نادر خاکی، گامی کوچک در جلب توجه دانشگاهیان گرانقدر، دست اندرکاران صنعت معدن و کارشناسان معدن و زمین شناسی نسبت به این عناصر ارزشمند و نیز شناساندن ماهیت و ویژگی های این گروه از عناصر برداشته شود. در تدوین کتاب سعی شده که همه جنبه های اساسی موضوع چه از نظر تئوری و چه از نظر کاربردی حفظ شود تا ابهامات موجود در مورد مطالب بیان شده به حداقل برسد و دانشجویان بتوانند با برخورداری از حداقل راهنمایی از آن بهره ببرند. تقدیم و تاخر ارائه مطالب علمی و تسلسل آن بنحوی است که با سایر کتب مرجع و منابع مختلف در این زمینه هماهنگی لازم را داراست و در امر تدوین بیشترین کارایی مطلوب را در فراگیری مطالب درسی ارائه می نماید. از تمامی اساتید محترم، دانشجویان و فعالان صنعت معدن و زمین شناسان عزیز تقاضا داریم ما را در جریان انتقادات، نظرات و پیشنهادات سخاوتمندانه خویش قرار داده و بستر مناسب جهت رفع نواقص و بهبود کیفیت محتویات کتاب حاضر را برای ما فراهم سازند.

شاهد شهرستانی، احمد رضا مختاری، محمد یوسفی