عناصر نادر خاکی (REE)،

تضمین‌کننده‌ی نقش برجسته‌ی بخش معدن در آینده‌ی اقتصاد جهانی و توسعه‌ی فناوری‌های پاک، نیازمند سرمایه‌گذاری بخش خصوصی

نویسندگان:
دکتر علیرضا گنجی، دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، مدیر تحقیقات و اکتشافات شرکت معدنی و صنعتی سوراوجین عقیق
دکتر امید گنجی، دکتری مهندسی متالورژی و مواد، مدیر تحقیق و توسعه شرکت دانش‌بنیان پویشگران مواد پارت آزمون

مقدمه

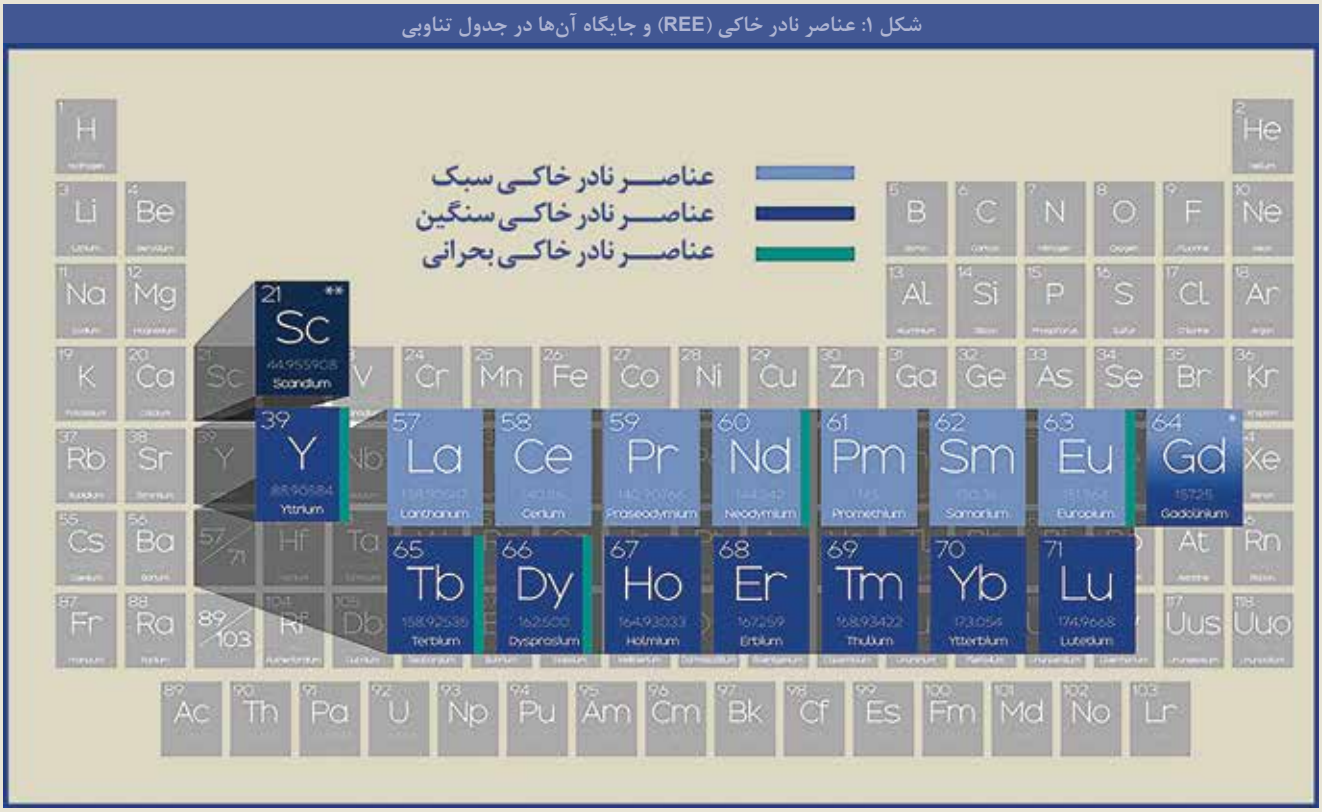
*** عناصر نادر خاکی (REE) که از آن‌ها به‌عنوان طلای قرن ۲۱ نیز یاد می‌شود، جزو عناصر استراتژیک بسیار مهم در جهان مدرن امروزی هستند که به‌نوعی می‌توان آن‌ها را سوخت‌های پاک نیز معرفی کرد. این عناصر استراتژیک در دنیای آینده و با توسعه و پیشرفت فناوری‌های پاک- از جمله توربین‌های بادی، خودروهای برقی و هیبریدی و باتری‌های قابل شارژ- نقش بسیار مهمی را در جوامع بشری ایفا خواهند کرد و می‌توانند جایگزین بسیار شایسته‌ای برای سوخت‌های فسیلی، به‌خصوص در کشورهایی مثل ایران که اقتصاد آن‌ها کاملاً متکی به آن است، گردند. در آینده‌ی جهان که یک اتفاق‌نظر و اجماع جهانی برای کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و به تبعیت از آن کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی وجود دارد، شاید تولید عناصر REE بتواند یک راهکار مناسب برای حفظ جایگاه کشورمان در اقتصاد جهان آینده و ایفای نقش مؤثر در رشد و توسعه‌ی فناوری‌های پاک نوین بشری شود.**

در این مقاله سعی می‌گردد با معرفی اجمالی عناصر REE، کانسارها و ذخایر معدنی آن‌ها و بیان کاربردها و نقش این عناصر استراتژیک در اقتصاد جهانی و توسعه‌ی فناوری‌های پاک، توجه مخاطبان و بالأخص فعالین معدنی بخش خصوصی کشور را به اهمیت ورود آن‌ها به عرصه‌ی اکتشاف، استخراج، فرآوری و استحصال عناصر REE معطوف کرد تا همچون گذشته بتوانند گام‌های مؤثری را در اعتلا و توسعه‌ی بخش معدن کشور با نگاه به آینده‌ی اقتصادی آن برداشته و ضمن همگام شدن با فناوری‌های پاک نوین جهانی، مسئولیت خطیر خود را در جهت تأمین مواد اولیه‌ی مورد نیاز آن و حفظ جایگاه اقتصادی کشور در تولید ناخالص ملّی جهانی آینده ایفا نمایند.

معرفی عناصر REE و کانی‌های محتوی آن‌ها

* عناصر نادر خاکی (REE) شامل عناصر خانواده لانتانیدها در جدول تناوبی هستند که عدد اتمی آن‌ها از ۵۷ تا ۷۱ است. علاوه بر آن، دو عنصر اسکاندیوم با عدد اتمی ۲۱ و ایتریوم با عدد اتمی ۳۹ نیز به دلیل ویژگی‌های شیمیایی مشابه با این عناصر هم‌خانواده هستند. REE ها به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند؛ عناصر نادر خاکی سبک (LREE) و عناصر نادر خاکی سنگین (HREE). عناصر نادر خاکی سبک عبارت‌اند از: لانتانوم، سریوم، پراسئودیمیوم، نئودیمیوم و ساماریوم (از عدد اتمی ۵۷ تا ۶۲) و عناصر نادر خاکی سنگین عبارت‌اند از: یوروپیوم، گادولینیوم، تربیوم، دیسپروسیوم، هولمیوم، اربیوم، تولیوم، ایتربیوم و لوتتیوم (از عدد اتمی ۶۳ تا ۷۱) به‌علاوه‌ی ایتریوم (با عدد اتمی ۳۹) (شکل ۱). اسکاندیوم در هیچ‌یک از دو گروه LREE و HREE قرار نمی‌گیرد، زیرا از کانسارهایی مشابه با سایر عناصر REE قابل استخراج نیست.

شکل ۱: عناصر نادر خاکی (REE) و جایگاه آن‌ها در جدول تناوبی



عناصر REE، علی‌رغم نام خود، عناصری نسبتاً فراوان در پوسته‌ی زمین هستند، به‌طوری که به‌عنوان مثال از میان آن‌ها عنصر سریوم، با میانگین فراوانی ppm ۶۸، بیست و پنجمین عنصر فراوان در پوسته‌ی زمین بوده و فراوان‌تر از عنصر مس است. عناصر REE به دلیل ویژگی‌های ژئوشیمیایی خاصی که دارند به‌وفور در پوسته‌ی زمین پراکنده شده‌اند و این بدان معناست که این عناصر می‌توانند به‌صورت تجمعات قابل استخراج و استحصالی در پوسته‌ی زمین تمرکز یافته‌اند. در واقع علت نام‌گذاری آن‌ها به‌عنوان عناصر نادر به دلیل کمیاب بودن کانی‌های حاوی این عناصر است. عناصر LREE فراوان‌تر از عناصر HREE بوده ولی در مقابل عناصر HREE که عموماً در فناوری‌های پیشرفته (High Tech) کاربرد دارند، به‌مراتب گران‌قیمت‌تر هستند.

عناصر REE در کانی‌هایی با ترکیبات متنوع یافت می‌شوند، ولی فراوان‌ترین غلظت عناصر REE در دوکانی باستنازیت ($CeCO_3F$) و مونازیت ($CePO_4$) پیدا می‌شود. کانی باستنازیت به‌طور شاخص حاوی عناصر LREE و میزان کمتری عناصر HREE است، در حالی که کانی مونازیت غالباً حاوی عناصر LREE بوده ولی نسبت عناصر HREE در آن دو تا سه برابر بیشتر است. سایر کانی‌های اقتصادی شناخته‌شده‌ی محتوی عناصر REE عبارت‌اند از: زینوتایم (YPO_4)، یودیالیت $Na_4(Ca,Ce,Fe,Mn)_2ZrSi_6O_{17}(OH,Cl)_2$، فسفریت ها و کانی‌های رسی حاوی REE (به‌صورت جذب یونی). دیگر کانی‌های فرعی حاوی عناصر REE که تعداد زیادی نیز دارند، معمولاً به لحاظ استحصال صنعتی این عناصر اهمیت اقتصادی ندارند. جدول ۱ فهرستی از کانی‌های فرعی حاوی عناصر REE را که تا کنون شناخته شده‌اند، معرفی کرده است.

کاربردهای صنعتی عناصر REE

* از نقطه‌نظر شیمیایی عناصر REE عوامل احیاکننده‌ی قوی هستند. ترکیبات شیمیایی این عناصر عموماً یونی بوده و نقاط ذوب و جوش آن‌ها بالاست. عناصر REE در حالت فلزی نسبتاً نرم هستند و این در حالی است که عناصر REE دارای عدد اتمی بزرگ‌تر خود را سخت‌تر

نام کانی	فرمول شیمیایی
Aeschynite	$(Ce, Ca, Fe)(Ti, Nb)_2(O, OH)_6$
Aenigmatite	$(Na, Ca)_4(Fe, Ti, Mg)_{12}Si_{12}O_{40}$
Allanite (Orthite)	$(Ca, Ce)(Al, Fe^{2+})(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$
Ancylite	$SrCe(CO_3)_2(OH)\cdot(H_2O)$
Apatite	$Ca_5(PO_4)_3F$ آپاتیت یک کانی خاص عناصر نادر خاکی نیست ولی این عناصر می‌توانند در ساختار آن تمرکز یابند که این تمرکز به‌صورت جانشینی با عنصر کلسیم در ساختار کانی رخ می‌دهد
Brannerite	$(U, Ca, Ce)(Ti, Fe)_2O_6$
Britholite	$Ca_2(Ce, Ca)_3(SiO_4, PO_4)_3(OH, F)$
Cerite	$(Ce, La, Ca)_9(Mg, Fe)(SiO_4)_3(HSiO_4)_4(OH)_3$
Cerianite	$(Ce, Th)O_2$
Cheralite	$(Ca, Ce)(Th, Ce)(PO_4)_2$
Churchite	$YPO_{20}{}^{4}(H_2O)$
Euxenite	$(Y, Ce, Ca)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$
Fergusonite	$Y(Nb, Ti)O_4)$
Florencite	$(Ce, La)Al_3(PO_4)_2(OH)_6$
Gadolinite	$Y_2Fe^{2+}Be_2Si_2O_{10}$
Huanghoite	$BaCe(CO_3)_2F$
Hydroxylbastnaesite	$(Ce, La, Nd)CO_3(F, OH)$
Kainosite	$Ce_2(Y, Ce)_2(Si_4O_{12})(CO_3)\cdot H_2O$
Loparite	$(Na, Ce, Ca, Sr, Th)(Ti, Nb, Fe)O_3$
Mosandrite	$Na(Na, Ca)_2(Ca, Ce, Y)_4(Ti, Nb, Zr)(Si_2O_7)_2(O, F)_2F_3$
Parisite	$Ca(Ce, La)_2(CO_3)_3F_2$
Rinkite	$(Na, Ca)_3(Ca, Ce)_4Ti(Si_2O_7)_2OF_3$
Samarskite	$(Y, Fe^{+3}, U)\ (Nb, Ta)_5O_4$
Synchisite	$Ca(Ce, Nd, Y)CO_3F$
Steenstrupine	$Na_{14}Ce_6Mn^{+2}\ Mn^{3+}\ Fe^{2+} + (Zr, Th)(Si_6O_{18})_2(PO_4)_7{}^{3}(H_2O)$
Tengerite	$Y_2(CO_3)_3O^{2-3}(H_2O)$
Thalenite	$Y_3Si_3O_{10}(OH)$
Yttrotantalite	$(Y, U, Fe)(Ta, Nb)O_4$
Zircon	$ZrSiO_4$ زیرکن نیز مثل آپاتیت، یک کانی خاص عناصر نادر خاکی نیست ولی این عناصر می‌توانند در ساختار آن تمرکز یابند که این تمرکز به‌صورت جانشینی با عنصر زیرکنیوم در ساختار کانی رخ می‌دهد

جدول ۱: فهرست کانی‌های فرعی شناخته‌شده‌ی حاوی عناصر REE

نشان می‌دهند. این عناصر با سایر عناصر فلزی و غیرفلزی واکنش داده و ترکیباتی با رفتارهای شیمیایی ویژه ایجاد می‌کنند. این خصلت شیمیایی عناصر REE آن‌ها را به‌عنوان اجزای ضروری و غیر قابل جایگزینی در کاربردهای صنعتی مهمی ازجمله صنایع الکترونیک، اپتیک، مغناطیس و کاتالیست مبدّل ساخته است. ترکیبات عناصر REE معمولاً در زیر نور مافوق بنفش خاصیت فلوئورسانس دارند که این خصلت به شناسایی آن‌ها کمک می‌کند. همچنین عناصر REE با آب یا اسید رقیق‌شده واکنش داده و گاز هیدروژن تولید می‌نمایند.

به دلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی غیرمعمول ویژه، مثل خواص مغناطیسی و اپتیکی منحصربه‌فرد، عناصر REE کاربردهای وسیعی در جنبه‌های مختلف زندگی و فرهنگ مدرن بشر امروزی دارند (شکل ۲ و جدول ۲).

عناصر REE ویژه به‌صورت عنصری و یا به‌صورت ترکیبات شیمیایی، مواد فسفرسانسی تولید می‌کنند که توانایی نشر لومینسانس داشته و برای تولید انواع زیادی از تیوب‌های اشعه و پنل‌های نمایش مسطح، در مانیتورهایی از اندازه‌ی صفحات گوشی‌های هوشمند تا اسکوربردهای بزرگ استادیوم‌ها به‌کار برده می‌شوند. برخی عناصر REE نیز در تولید نور فلوئورسانس و LED کاربرد دارند. مواد فسفرسانس عناصر ایتریوم، یوروپیوم و تربیوم، فسفرسانس های قرمز-سبز-آبی هستند که در بسیاری از لامپ‌ها، پنل‌ها و تلویزیون‌ها استفاده می‌شوند.

صنعت شیشه بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌ی مواد خام REE است که این عناصر را برای جلا دادن شیشه و همچنین به‌عنوان ایجادکننده‌ی رنگ و ایجاد خصوصیات اپتیکی ویژه در شیشه مورد استفاده قرار می‌دهد. لانتانوم تا حدود ۵۰ درصد لنزهای دوربین‌های دیجیتال، از جمله دوربین‌های موبایل را تشکیل می‌دهد.

کاتالیست های پایه‌ی لانتانوم در پالایش نفت و کاتالیست های پایه‌ی سریوم در مبدل‌های کاتالیزوری خودروها مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه کاربرد مگنت‌های دائمی که در آن‌ها عناصر REE به‌کار گرفته می‌شوند، به‌سرعت در حال رشد است. مگنت‌های نئودیمیوم-آهن-بور قوی‌ترین مگنت‌های شناخته‌شده هستند که در شرایطی که مکان و وزن دو فاکتور محدودیت‌زا هستند، بسیار مفیدند. مگنت‌های عناصر REE در هارد دیسک‌های کامپیوتری و درایوهای CD و DVD نیز استفاده می‌شوند. زمانی که از مگنت REE استفاده می‌شود، سوزن

شکل ۲: عناصر REE در اجزای مختلفی از مصنوعاتی که امروزه در جوامع بشری نوین مورد استفاده قرار می‌گیرند کاربرد دارند

عنصر REE	کاربردهای امروزی
اسکاندیوم	آلیاژهای فلزی مورد استفاده در صنایع هوافضا
ایتریوم	مواد فسفرسانس، سرامیک‌ها، آلیاژهای فلزی
لانتانوم	باتری‌ها، کاتالیست های مورد استفاده در پالایش نفت
سریوم	کاتالیست های اتومبیل، کاتالیست های شیمیایی، جلادهنده‌ی شیشه، آلیاژهای فلزی
پراسئودیوم	مگنت‌های دائمی شدت بالا، پیگمنت سرامیکی زرد رنگ، اتوکاتالیست
نئودیمیوم	مگنت‌های دائمی شدت بالا
پرومتیوم	منبع اشعه‌ی بتا
ساماریوم	مگنت‌های دائمی دما بالا
پوروپیوم	منبع نور فلوئورسانس
گادولیمیوم	عامل کنتراست MRI، رادهای رآکتورهای هسته‌ای
تربیوم	ماده‌ی فسفرسانس برای تولید نور، مگنت‌های دائمی شدت بالای دما بالا
دیسپروسیوم	مگنت‌های دائمی شدت بالای دما بالا، لیزرها
هولمیوم	مگنت‌های دائمی شدت بالا
اربیوم	لیزرها، رنگ دهنده‌ی شیشه
تولیوم	مواد مغناطیس سرامیکی (در حال تحقیق و توسعه)
ایتربیوم	فناوری فیبرهای نوری، پنل‌های خورشیدی
لوتتیوم	اسکنرهای توموگرافی انتشار پوزیترون (PET)

جدول ۲: مهم‌ترین کاربردهای صنعتی امروزه‌ی هر یک از عناصر REE

یک درایو دیسک کامپیوتری ثبات و پایداری بالایی را در حرکت چرخشی آن ایجاد می‌کند. همچنین این نوع مگنت‌ها در طیف وسیعی از سیستم‌های فرعی اتومبیل‌های معمولی، مثل فرمان‌های برقی، شیشه‌های برقی، صندلی‌های برقی و بلندگوهای صوتی، استفاده می‌شوند.

باتری‌های هیبریدی نیکلی با آلیاژهای پایه‌ی لانتانوم به‌عنوان آند ساخته می‌شوند. این نوع باتری‌ها وقتی در خودروهای برقی هیبریدی استفاده می‌شوند، مقادیر قابل توجهی از عنصر لانتانوم را مصرف می‌کنند به‌طوری که این مقدار مصرف حدود ۱۰ تا ۱۵ کیلوگرم برای هر خودروی برقی است.

عناصر سریوم، لانتانوم، نئودیمیوم و پراسئودیمیوم معمولاً به شکل یک اکسید اختلاطی که میش متال (mischmetal) نامیده می‌شود، در فولادسازی برای جدایش ناخالصی‌ها و تولید آلیاژهای ویژه بکار برده می‌شوند.

کانسارهای عناصر REE

* عناصر REE، به دلیل به اشتراک‌گذاری بار یونی سه ظرفیتی ($^{+3}$) و تشابه شعاع یونی، عموماً همراه با یکدیگر در پوسته‌ی زمین یافت می‌شوند. این عناصر برخلاف عناصر فلزی مثل طلا یا مس که اغلب به‌طور جداگانه در سنگ‌های مختلف تمرکز می‌یابند، در داخل شبکه‌ی کانی‌های اصلی یا فرعی خاص تجمع پیدا می‌کنند. در محیط‌های آذرین، مقادیر زیادی از محتوای عناصر REE ماگما توانایی ورود به ساختار بلورین کانی‌های سیلیکاته‌ی اصلی تشکیل‌دهنده‌ی سنگ‌های آذرین را نداشته و در نتیجه زمانی که این‌گونه کانی‌ها-از قبیل فلدسپارها، پیروکسن ها، اولیوین و آمفیبول ها- متبلور می‌شوند، اکثر عناصر REE در ماگمای باقیمانده متبلور نشده، تمرکز یافته تا آنجا که در پی ادامه‌ی روند تبلور ماگما و در مراحل نهایی آن کانی‌های خاص محتوی عناصر REE متبلور می‌شوند. عناصر REE می‌توانند در ساختار بلورین این کانی‌های خاص جایگزین یکدیگر شده و بنابراین چندین عنصر REE درون یک کانی خاص جای می‌گیرند.

عناصر REE عموماً در سنگ‌ها و جایگاه‌های زمین‌شناسی غیرمعمول به وجود می‌آیند و همان‌طور که قبلاً نیز اشاره گردید، علی‌رغم آنکه در پوسته‌ی زمین معمول هستند ولی به‌ندرت به‌صورت تمرکزات اقتصادی یافت می‌شوند. کانسارهای اقتصادی شناخته‌شده‌ی عناصر REE در دو گروه اصلی ذیل تقسیم‌بندی می‌شوند:

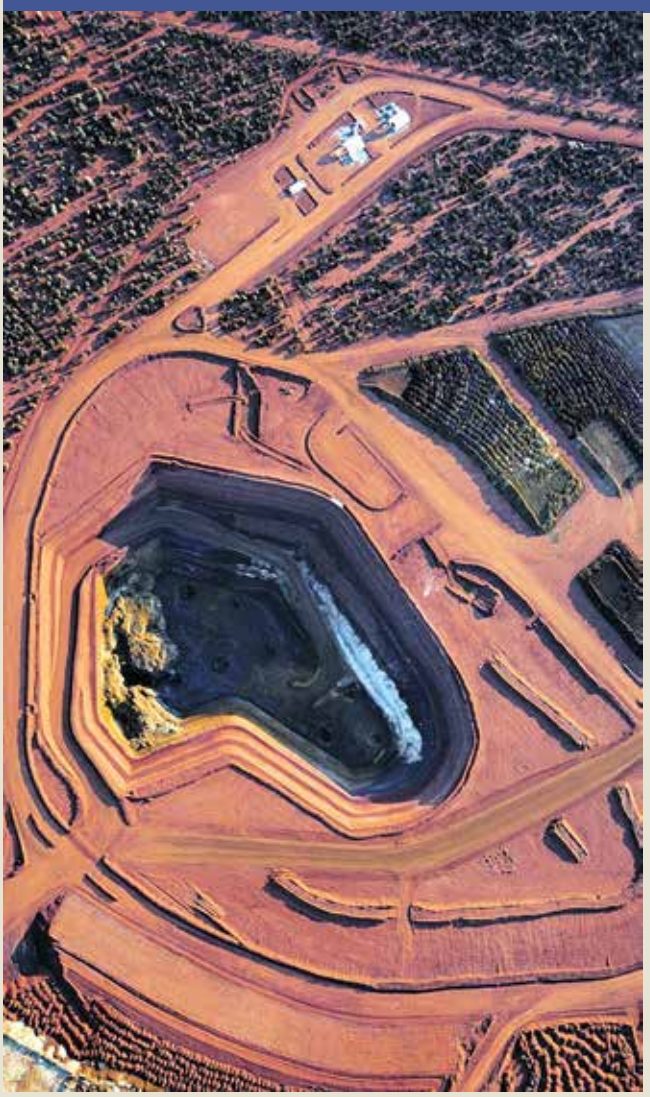
گروه اول) کانسارهای آذرین REE؛ خود شامل چهار زیرگروه اصلی است که عبارت‌اند از:

نام کانسار	موقعیت جغرافیایی	نوع کانسار	اصلی REE عناصر	REE (کانی (های
Mountain Pass	کالیفرنیا، آمریکا	کربناتیت	La. Ce. Nd	Bastnaesite
Bayan Obo	مغولستان داخلی، چین	کربناتیت/گرمابی	LREE	Bastnaesite, parisite, monazite
Mount Weld	جنوب غربی استرالیا	کربناتیت/لاتریت	LREE	Apatite, monazite, synchysite, churchite, plumbogummite-group minerals
Ilimaussaq (Kronefeldld, Kringlerne, Motzfeldt So)	گرینلند ((دانمارک	سنگ‌های آذرین پرآلکالن	La. Ce, Nd	Eudialyte. steenstrupine
Pilanesberg	آفریقای جنوبی	سنگ‌های آذرین پرآلکالن	Ce, La	Eudialyte
Steenkampskraal	آفریقای جنوبی	رگه‌ای	La. Ce. Nd	Monazite. apatite
Hoidas Lake	کانادا	رگه‌ای	La. Ce. Pr. Nd	Apatite, allanite
Thor lake	کانادا	سنگ‌های آذرین پرآلکالن	La. Cc, Pr, Nd, HREE	Bastnacsitc
Strange Lake and Misery Lake	کانادا	سنگ‌های آذرین آلکالن / گرمابی	La. Cc, Nd, HREE	Gadolinite. bastnaesite
Nolans Bore	استرالیا	رگه‌ای	La. Cc, Nd	Apatite. allanite
Norra Karr	سوئد	سنگ‌های آذرین پرآلکالن	La. Ce. Nd. HREE	Eudialyte
Khibina and Lovozero	روسیه، پنینسولا	سنگ‌های آذرین پرآلکالن	LREE + Y. minor HREE	Eudialyte. apatite
Nkwombwa Hill	زامبیا	کربناتیت	LREE	Monazite. bastnaesite
Kagankunde	مالاوی	کربناتیت	LREE	Monazite-Ce, bastnaesite-Ce
Tundulu	مالاوی	کربناتیت	LREE	Synchysite, parisite, bastnaesite
Songwe	مالاوی	کربناتیت	LREE. especially Nd	Synchysite. apatite
Chinese ion adsorption deposit	جنوب چین	خاک‌ها	La. Nd. HREE	Clay minerals
Maoniuping	سیچوآن، چین	کربناتیت	LREE	Bastnaesite
Deep Sea	ویتنام	کربناتیت	LREE	Bastnaesite. parisite
Deep Sea	اقیانوس آرام	،غشاء سطحی زمین گل‌های پلاژیک		

بالا، جدول ۳: تعدادی از انواع کانسارهای REE مهم شناسایی‌شده در جهان

پایین، شکل ۳: معدن Bayan Obo چین، بزرگ‌ترین معدن REE جهان

بالا،شکل ۴: معدن **Strange Lake** کانادا واقع در شمال شرقی کبک



پایین، شکل ۵: معدن **REE** نوع لاتریتی **Mont Weld** واقع در استرالیای غربی

(۱) کانسارهای کربناتیتی،
(۲) کانسارهای آلکالن (یا پرآلکالن)،
(۳) کانسارهای پگماتیتی و
(۴) کانسارهای ماگمایی-گرمابی (یا رگه‌ای)

گروه دوم) کانسارهای رسوبی REE؛ شامل پنج زیرگروه اصلی است که عبارت‌اند از:

(۱) کانسارهای بازماندی (لاتریتی و بوکسیتی)
(۲) کانسارهای پلاسری،
(۳) کانسارهای فسفریتی یا فسفات‌ها،
(۴) کانسارهای رسی جذب یونی و
(۵) کانسارهای همراه زغال‌سنگ‌ها.

در جدول ۳ تعدادی از انواع کانسارهای REE مهم شناسایی‌شده در جهان تشریح شده‌اند.

حتّی با داشتن این تنوع کانساری، تمرکزات اقتصادی قابل استخراج عناصر REE کمیاب هستند. به‌عنوان مثال، با آنکه بیش از ۵۰۰ کانسار REE نوع کربناتیتی در جهان شناسایی شده‌اند، فقط ۶ تا از آن‌ها در حال حاضر برای استخراج عناصر REE مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

کربناتیت ها میزبان بزرگ‌ترین کانسارهای REE جهان هستند و به‌طور شاخص از عناصر LREE غنی شده‌اند. کربناتیت ها سنگ‌های آذرین غیرمتعارفی هستند که از ماگماهای غنی از کربنات حاصل می‌شوند، در مقابل ماگماهای معمولی غنی از سیلیس که به وجود آورنده‌ی سنگ‌های آذرین متعارف هستند. سنگ‌های آذرین کربناتیتی، سنگ‌هایی‌اند که بیش از ۵۰ درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها کانی‌های کربناته، به‌طور رایج کلسیت و دولومیت، هستند. کربناتیت ها بالاترین تمرکزات عناصر REE را در بین تمامی سنگ‌های آذرین دارا

هستند. امروزه عناصر REE از بزرگ‌ترین کانسارهای REE آذرین نوع کربناتیتی واقع در کالیفرنیای ایالات متحده (Mountain Pass)، چین (Bayan Obo, Maoniuping, Daluxiang, and Weishan) و غرب استرالیا (Mount Weld) استخراج می‌شوند.

سنگ‌های آذرین آلکالن (پرآلکالن)، متشکل از گروهی از انواع سنگ‌های آذرین غیرمتعارف هستند که میزان سیلیس آن‌ها کم و به نسبت سدیم، پتاسیم و کلسیم بالا دارند. ازجمله سنگ‌های آذرین آلکالن میزبان کانسارهای REE، می‌توان به نفلین سینیت ها، تراکیت ها و گرانیت های پرآلکالن اشاره نمود که این مجموعه‌های سنگی معمولاً در موقعیت‌های تکتونیکی داخل ورقه‌های قاره‌ای همراه با ریفت های قاره‌ای و گسل‌ها در ارتباط با ماگماتیسم نقاط داغ تشکیل می‌شوند. کانی‌های اصلی محتوی عناصر REE در این نوع کانسارها عبارت‌اند از؛ یودیالیت، لوپاریت، گیتینسیت، زینوتایم، مونازیت، زیرکن، فرگوسنیت و به میزان کمتر باستنازیت. در سالیان اخیر پروژه‌های اکتشافی زیادی در جای‌جای جهان بر روی توده‌های بزرگ سنگ‌های آذرین آلکالن برای کشف کانسارهای REE مرتبط انجام شده که منجر به کشف تمرکزات قابل توجهی از عناصر REE (مجموع درصد اکسیدهای عناصر REE برابر ۰,۳ تا ۲,۶درصد) شده است. مهم‌ترین کانسارهای آذرین آلکالن REE شناسایی‌شده در جهان در موقعیت‌های گرین لند (Ilimaussaq)، روسیه (Lovozero and Khibiny)، کانادا (Thor Lake, Strange Lake)، امریکا (Bokan Mountain) و استرالیا (Toongi and Brockman) واقع شده‌اند.

پگماتیت ها سنگ‌های آذرین نفوذی فلسیک دانه‌درشت‌اند که غنی از عناصر ناسازگار ژئوشیمیایی از جمله عناصر REE هستند. این سنگ‌ها غالباً غنی از کانی آپاتیت هستند. یکی از کانسارهای REE نوع پگماتیتی حاوی آپاتیت در ایالت نیویورک امریکا واقع شده است به نام Mineville که در واقع یک معدن آهن است. تیلینگ باطله‌ی این معدن محتوی آپاتیت است که غنی از عناصر REE است. میانگین غلظت اکسیدهای عناصر REE در آن حدود ۱۱ درصد تخمین زده شده و حجم کل باطله‌ی محتوی عناصر REE در این معدن ۱۰ میلیون تن برآورد شده است.

مطالعات زیادی نشان داده‌اند که بوکسیت‌ها می‌توانند غنی از عناصر REE باشند. ذخایر بزرگ بوکسیت دنیا در کشورهای گینه، استرالیا، برزیل، جامائیکا و چین یافت شده‌اند. بوکسیت های کارستی که تنها ۱۴ درصد از کل ذخایر بوکسیتی جهان را تشکیل می‌دهند، محتوی عناصر REE بیشتری نسبت به بوکسیت های لاتریتی دارند. بوکسیت های غنی از REE ها به‌فراوانی در چین کشف شده‌اند. مقدار عناصر REE در بوکسیت های چین ۰,۰۵ تا ۰,۲ درصد است. مطالعه‌ی عناصر REE در بوکسیت های کارستی چین نشان داده است که این عناصر به دو صورت رخ می‌دهند؛ یا جذب سطحی کانی‌های دیاسپور، گیبسیت و کانی‌های رسی می‌شوند و یا در ساختار بلورین کانی‌های دیاسپور و گیبسیت به‌صورت ایزوموف جایگزین می‌گردند. در تعدادی از بوکسیت های کارستی دنیا نیز عناصر REE در ساختار کانی‌های خاص حاوی این عناصر، از قبیل پاریسیت، چرچیت، سینچیزیت و سریانیت یافت شده‌اند. عناصر REE معمولاً در افق‌های غنی از Al و گاهی غنی از Fe تجمع می‌یابند. کانی‌های فلوئورکربناته فراوان‌ترین کانی‌های حاوی عناصر REE در بوکسیت های کارستی هستند. غنی‌شدگی عناصر LREE در این کانی‌ها در همه‌ی کانسارها تأیید شده است.

شکل ۶: استحصال مونازیت از ماسه‌های ساحلی معدن Tamil Nadu هند

شـــکل ۷: تانک‌های اسیدی و حوضچه‌های رواناب اســـتحصال عناصر HREE در معدن Longnan جنوب چین

کانســـارهای پلاســـری حاوی مونازیت-زینوتایم تا اواســـط دهه‌ی ۱۹۶۰ منابع مهمی از REE بشـــمار می‌رفتنـــد. کانی REE-توریوم-فســـفات مونازیت می‌تواند از برخی نهشته‌های ساحلی قدیمی و جدید به‌عنوان یک محصول فرعی در طی اســـتخراج کانی‌های سنگین هدف، مانند ایلمنیت، روتیل و زیرکن، بازیافت شـــود. در این‌گونه نهشـــته‌ها، کانی‌هـــای ایلمنیت و روتیـــل کانی‌های اصلی باارزش هســـتند که به روش‌های مکانیکی از نهشته‌های ماسه‌ای و سیلتی جدا می‌شوند. به‌طور هم‌زمان با این فرآیند جدایـــش کانی مونازیت نیز قابلیت بازیافت دارد. کانی مونازیت به‌عنوان یک محصول فرعی از ماســـه‌های ساحلی سواحل جنوبی هند بازیافت می‌شـــود. در آنجـــا کانی مونازیت یک منبع مهم از عناصر LREE و توریوم محســـوب می‌شود. توریوم بازیافت شده ذخیره می‌گردد تا در آینده به‌عنوان سوخت هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد. در حال حاضر استفاده از توریوم در مرحله‌ی تحقیق و توسعه است. کانی زینوتایم که نسبت به مونازیت کمتر معمول است، به‌عنوان منبعی برای عنصر ایتریوم و سایر عناصر REE به‌صورت یک محصول فرعی از معادن پلاسری قلع بازیافت می‌شود.

شکل ۸: معدن زغال‌سنگ Pavlovka روسیه که از خاکستر زغال‌سنگ آن (با محتوای REE ۹۰۰ تا ۸۴۰۰ ppm) عناصر REE استحصال می‌شوند.

کانسارهای فسفریت به‌صورت نهشته‌های شیمیایی در مناطق فلات قاره‌ای تشـــکیل می‌شوند. بالا آمدن آب‌های سرد غنی از فسفات و گرم شدن آن‌ها سبب کاهش حلالیت آن شده و این نهشته‌ها رسوب می‌کنند. عناصر REE می‌توانند در شـــبکه‌ی کانـــی فرانکولیت ((Ca, Mg, Sr, Na)۱۰(PO۴, SO۴, CO۳)۶F۲-۳) جانشـــین عنصر کلسیم شده و بدین ترتیب در نهشـــته‌های فسفریتی تمرکز پیدا کنند. در نهشته‌های فســـفریتی دونین فوقانی ایالات متحده میـــزان تمرکز عناصر REE به حدود ۱۸۰۰۰ ppm می‌رســـد که تقریباً ۱۰۰ درصد آن با استفاده از اسید رقیق‌شده قابل استحصال است.

کانسارهای رســـی جذب یونی در جنوب چین اولین ذخایر عناصر HREE جهـــان هســـتند. این نوع کانســـارها به‌طور غیررســـمی بنام کانسارهای رســـی جنوب چین نیز شهرت دارند. تجمعات رسی ضخیم میزبـــان تمرکزات پایینـــی از عناصر REE (از حـــدود ۰,۰۴ درصد تا ۰,۲۵درصد مجموع اکســـیدهای REE) در مناطق اســـتوایی با بارش متوســـط تا زیاد تشکیل شـــده‌اند. فرآیندهای متوالی که سبب تشکیل این نوع کانسارها شده‌اند عبارت‌اند از: (۱) آبشست عناصر REE توسط آب‌های زیرزمینی از داخل پی‌سنگ‌های گرانیتی، (۲) تشکیل زون های ضخیمی از خاک‌های غنی از رس در روی پی‌ســـنگ‌های گرانیتی و (۳) جذب یونی ضعیف عناصر REE متحرک توسط کانی‌های رسی موجود در خاک. علی‌رغم غلظت‌های پایین عناصر REE، کانســـارهای رســـی جنوب چین اقتصادی هســـتند زیرا اولاً عناصر REE به‌راحتی توســـط اسیدهای ضعیف از رس ها قابل استحصال بوده، ثانیاً این کانسارها غالباً غنی از عناصر HREE بسیار باارزش هستند و ثالثاً هزینه‌های پرسنلی در این معادن بســـیار پایین اســـت. منطقـــه‌ی Longnan-Xunwu-Xinfeng در اســـتان Jiangxi جنـــوب چیـــن بزرگ‌تریـــن منطقه‌ی قرارگیری کانسارهای REE رسی جذب یونی و مهم‌ترین تولیدکننده‌ی HREE در جهان اســـت. معـــادن Zudong و Heling در این منطقه به‌ترتیب مهم‌ترین کانســـارهای HREE و LREE رسی جذب یونی در چین هستند.

علاوه بر این‌ها، در حال حاضر یک پروژه‌ی پایلوت در کشـــور جامائیکا در حال ارزیابی اســـت کـــه در آن بازیافت عناصر REE از تیلینگ های گل‌های قرمز تولید شده در طی فرآوری بوکسیت در حال بررسی است؛ که این نوع از تمرکزات عناصر REE را نیز می‌توان به‌عنوان نوع دیگری از کانسارهای رسی جذب یونی در نظر گرفت.

کانســـارهای REE همراه با زغال‌سنگ‌ها در کشـــورهای ایالات متحده، روســـیه و چین یافت شـــده‌اند. زغال‌ســـنگ‌ها علاوه بر عناصر REE می‌تواننـــد حاوی رنیوم و وانادیم نیز باشـــند و جزو منابع اصلی عنصر ژرمانیوم محسوب می‌گردند. سه منشأ برای عناصر کمیاب همراه با زغال‌سنگ‌ها ذکر شده است: (۱) منشأ آلی، (۲) جذب سطحی توسط کانی‌های رســـی موجود در حوضه زغالی و (۳) منشأ معدنی و رسوبات همراه با مواد آلی در حین تشکیل زغال. عناصر REE هم داخل لایه‌های

زغال‌سنگ و خاکستر زغال‌ســـنگ و هم در لایه‌های سنگ‌های رسوبی فوقانی و هم در لایه‌های سنگ‌های رسوبی تحتانی لایه‌های زغال‌سنگ می‌توانند تمرکز یابند. مطالعات نشان داده است تمرکز عناصر REE در خاکســـتر حاصل از احتراق زغال‌سنگ بیشـــتر از خود زغال‌سنگ است. استخراج این عناصر از خاکستر آســـان‌تر از معدنکاری زغال‌سنگ است و این امر موجب کاهش چشـــم‌گیر مشـــکلات زیســـت‌محیطی ناشی از خاکسترهای حاصل از احتراق می‌شود. بر اساس داده‌های تجربی مربوط به اســـتخراج عناصر REE از خاکستر حاصل از احتراق در روسیه، عیار حد ۰٫۱ درصد برای بازیابی عناصر REE در زغال‌سنگ‌ها انتخاب شده اســـت. البته چنانچه ضخامت لایه‌ی زغال‌سنگ بزرگ‌تر از ۵ متر باشد، عیار حد ۰٫۰۸ یا ۰٫۰۹ درصد هم اقتصادی خواهد بود.

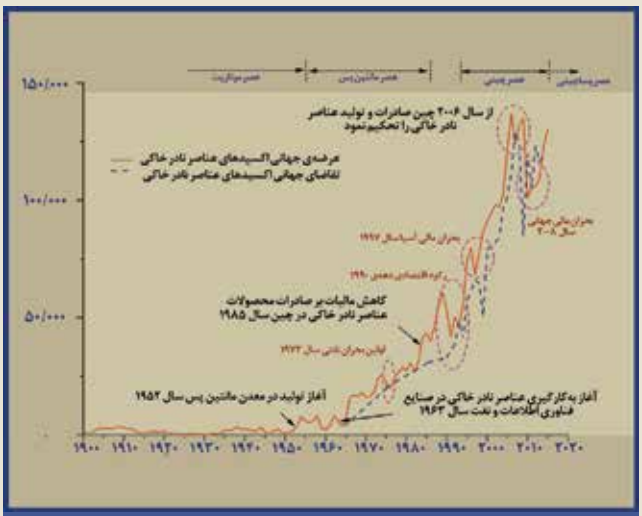
* کل منابـــع معدنـــی عناصر REE جهـــان معـــادل ۴۷۸ میلیون تن اکســـیدهای REE (یـــا REO) برآورد می‌گردند کـــه غالب آن مربوط به کانســـارهای کربناتیتی بوده و به ترتیب در کشـــورهای چین، برزیل، اســـترالیا و کانادا قرار گرفته‌اند. از این میان ۴۲ درصد کانسارهای REE از نوع معادن سایز متوسط (medium-sized)، با میزان ذخیره‌ی کمتر از ۱۰۰۰۰۰ تن REO بوده و ۸۵ درصد کانسارهای REE دارای غلظت REO کمتر از ۳ درصد هستند.

عرضه و تقاضای جهانی عناصر REE

* از دهـــه‌ی ۱۹۶۰ به بعد کاربرد عناصر REE به‌طور تدریجی در زندگی روزمره بشر گســـترش یافت، از صفحات تلویزیون گرفته تا صنعت نفت و سیستم‌های کامپیوتری، همین امر سبب گردید تا تولید و مصرف جهانی عناصر REE به‌طور قابل ملاحظه‌ای در دهه‌های بعدی افزایش پیدا کند (شـــکل ۹). امروزه عناصر REE به‌طور گسترده‌ای در انواع کاتالیست ها، متالورژی، سیستم‌های پزشـــکی، فناوری‌های پیشرفته، تولید انرژی‌های پاک و سیســـتم‌های دفاعی نظامی مورد اســـتفاده قرار می‌گیرند و به‌ویژه در حـــال ظهور در عرصـــه‌ی فناوری‌های پاک، مثـــل توربین‌های بادی، خودروهای برقی، تولید روشـــنایی‌های کم‌مصرف و مبدل‌های کاتالیتیک هســـتند. ارزش کل تولیدات محتوی عناصـــر REE جهان حداقل ۱٫۵ تا ۲ تریلیون دلار اســـت که این مقدار نزدیک به ۵ درصد کل تولید ناخالص ملی جهان را در سال ۲۰۰۹ به خود اختصاص داده است. تغییر قابل توجه رخداده از ســـمت منابع انرژی سنتی، مثل سوخت‌های فسیلی، به سمت منابع انرژی پاک، مانند افزایش تولید خودروهای برقی و توربین‌های بادی، منجر به افزایش مســـتمر تقاضای عناصر REE در دهه‌های آینده خواهد شد و این افزایش تقاضا سبب نیاز بیشتر به تولید عناصر REE در جهان و نیاز به یک زنجیره‌ی تأمین پایدار در بلندمدت خواهد گردید.

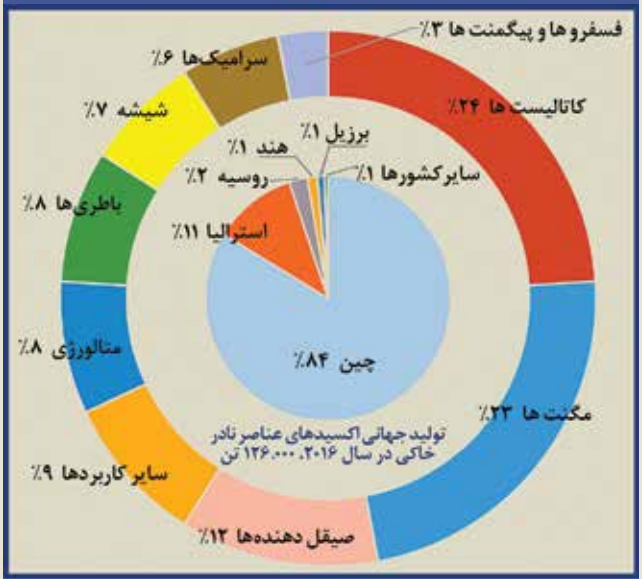
در ســـال ۲۰۱۶ تولیـــد جهانی عناصـــر REE معـــادل ۱۲۶۰۰۰ تن اکســـیدهای REE (یا REO) بوده است (شـــکل ۱۰) که اساساً توسط دو کشـــور چین (۸۵ درصدتولید جهانی) و اســـترالیا (۱۰ درصد تولید جهانی) و بعد از آن‌ها توســـط کشـــورهای مالزی، برزیل، هند، روسیه و ویتنام تأمین شده است.

مصرف جهانی عناصر REE در ســـال ۲۰۱۵ بـــه مقدار ۱۱۹۶۵۰ تن

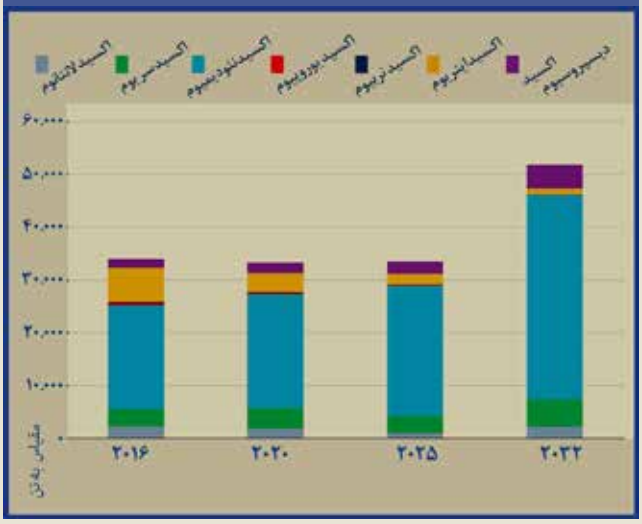


شکل ۹: عرضه و تقاضای جهانی عناصر REE

شکل ۱۰: نمودار توزیع جهانی تولید و مصرف عناصر REE در سال ۲۰۱۵



شکل ۱۱: تقاضای جهانی اکسیدهای REE برای فناوری‌های پاک در سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۲۰، ۲۰۲۵ و ۲۰۳۰



مبدل‌های کاتالیتیک	باطری‌ها	وسایل نقلیه‌ی برقی		روشنایی‌ها			انرژی باد (MW)	سال
	باطری‌های نیکل-هیدرید فلز	دوچرخه‌های برقی	خودروهای برقی	LED	CFL	LFL		
(میلیون خودرو)	(باطری)	(وسیله‌ی نقلیه)		(میلیون لامپ)				
۹۵	۵۸۰,۱۲۵	۳۵,۰۰۰,۰۰۰	۷۵۰,۰۰۰	۲۶۷۵	۲۹۰۳	۲۱۴۲	۶۳,۳۵۰	۲۰۱۶
۱۰۰	۱,۲۵۱,۹۰۰	۳۵,۵۰۰,۰۰۰	۲,۱۴۰,۰۰۰۰	۴۸۲۸	۱۴۹۱	۱۶۰۴	۷۹,۰۰۵	۲۰۲۰
۱۱۱	۷۱۵,۸۰۳	۳۶,۲۰۰,۰۰۰	۷,۹۵۳,۳۷۵	۵۸۷۴	۶۶۲	۱۱۱۶	۷۶,۸۱۰	۲۰۲۵
۱۱۷	۲,۶۵۷,۷۲۹	۳۷,۰۰۰,۰۰۰	۲۹,۵۳۰,۳۲۳	۷۱۴۶	۲۹۴	۷۷۶	۱۰۷,۴۸۸	۲۰۳۰

جدول ۴: مروری اجمالی بر تقاضای جهانی فناوری‌های پاک در سال‌های ۲۰۱۶/۲۰/۲۵/۳۰

جدول ۵: مقدار میانگین مصرف هر یک از عناصر REE در فناوری‌های پاک

کاربرد	La (kg)	Ce (kg)	Nd (kg)	Eu (kg)	Tb (kg)	Dy (kg)	Y (kg)
توربین‌های بادی			۱۲۰			۱۲	
خودروهای برقی (موتور)			۰,۴۵			۰,۰۷۵	
دوچرخه‌های برقی (موتور)			۰,۰۳۸			۰,۰۳۱	
باطری‌های نیکل-هیدریدفلزی (باطری)	۰,۶۱	۰,۸۶	۰,۲۵۵				
CFL (لامپ)	۰,۰۰۰۰۷۶۵	۰,۰۰۰۱۸		۰,۰۰۰۰۴۰۵	۰,۰۰۰۰۴۵		۰,۰۰۰۵۵۸
LFL (لامپ)	۰,۰۰۰۴۶۲	۰,۰۰۰۱۳۷		۰,۰۰۰۰۹۴۵	۰,۰۰۰۱۰۵		۰,۰۰۱۳
LED (لامپ)				۰,۰۰۰۰۰۰۴			۰,۰۰۰۰۰۵
مبدل‌های کاتالیتیک (خودرو)		۰,۰۲					

معادل REO تخمین زده شد که این مصرف به ترتیب به کاتالیست ها (به‌عنوان بزرگ‌ترین بخش) و بعد از آن به مگنت‌های دائمی، لادهنده ها و سایر تولیدات اختصاص داشته است (شکل ۱۰). نرخ رشد سالانه تقاضای جهانی عناصر REE تا سال ۲۰۲۰ حدود ۵ درصد بوده و پیش‌بینی می‌شود که این نرخ رشد با توجه به رشد فزاینده‌ی بازار انرژی‌های پاک افزایش یابد. یک چنین تقاضای روبه افزایشی فشار بزرگی بر زنجیره‌ی تأمین جهانی عناصر REE وارد آورده و آن را به‌طور مستمر به چالش خواهد کشید.

عناصر REE نقش بسیار مهمی در فناوری‌های پاک نوظهور، مانند توربین‌های بادی، خودروهای برقی، روشنایی‌های کم‌مصرف و باتری‌های قابل شارژ، ایفا می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود که مقارن با تغییر مسیر سیستم انرژی جهانی به سمت یک سیستم پایدارتر و تجدیدپذیرتر، این فناوری‌های پاک به‌طور قابل ملاحظه‌ای در دهه‌های آینده رشد کنند. لذا به تبعیت از این رشد روزافزون، تقاضای عناصر REE نیز افزایش خواهد یافت و این مسئله نیاز فوری برای تأمین عناصر REE در آینده را به دنبال خواهد داشت. به‌عنوان مثال، تولید خودروهای برقی جدید در سال ۲۰۱۶ بیش از ۷۵۰۰۰۰ عدد بوده است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۵ سالانه حداقل ۳۰ درصد افزایش یابد و با توجه به اینکه ۱۰۰ درصد خودروهای برقی از مگنت‌های دائمی بر پایه‌ی عناصر REE استفاده می‌کنند لذا پیش‌بینی می‌شود که این رشد تولید تقاضای چند برابری عناصر REE را در پی خواهد داشت. جدول ۴ مروری اجمالی بر این مسئله دارد. مقدار میانگین مصرف هر یک از عناصر REE در هر کدام از مصارف فناوری‌های پاک در جدول ۵ نشان داده شده است و میزان تقاضای جهانی عناصر REE برای فناوری‌های پاک در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. پیش‌بینی می‌گردد تقاضای جهانی بازار روشنایی‌ها برای عناصر REE به‌طور ادامه‌داری کاهش یابد، ولی در مقابل تقاضای جهانی بازارهای توربین‌های بادی، خودروهای برقی و باتری‌های نیکل-هیدرید فلز (NiHM) برای این عناصر به‌طور فزاینده‌ای افزایش خواهد داشت.

تقاضای جهانی فناوری‌های پاک برای عناصر REE در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰ به ترتیب معادل ۳۳,۹ و ۳۳,۳ هزار تن بوده و برای سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۳۰ به ترتیب معادل ۳۳,۶ و ۵۱,۹ هزار تن REO (اکسیدهای عناصر REE) پیش‌بینی می‌گردد. از میان کل فناوری‌های پاک سهم تقاضای جهانی انرژی باد، خودروهای برقی و باتری‌های نیکل-هیدرید فلز (NiHM) برای REO در سال ۲۰۱۶ به ترتیب ۱۱,۶ درصد، ۵۰,۱ درصد و ۳,۴ درصد بوده است که پیش‌بینی می‌گردد این

سهم‌ها در سال ۲۰۳۰ افزایش یافته و به ترتیب به ۱۳,۴ درصد، ۶۸,۵ درصد و ۱۰,۳درصد برسد، البته تقاضای اکسیدهای عناصر نئودیمیوم و دیسپروسیوم از طرف این سه حوزه‌ی فناوری پاک به‌مراتب بیشتر خواهد بود و پیش‌بینی می‌گردد که نسبت به سال ۲۰۱۶ در سال ۲۰۳۰ به ترتیب به میزان ۱۹۹,۲ درصد و ۲۶۸,۳ درصد افزایش یابد. این مسئله بیانگر آن است که از بین عناصر REE دو عنصر نئودیمیوم و دیسپروسیوم به‌طور فزاینده‌ای نقش مهم‌تری در توسعه‌ی فناوری‌های پاک در آینده ایفا خواهند کرد و لذا از هم اکنون بیشتر پروژه‌های اکتشافی عناصر REE در جهان بر روی این دو عنصر متمرکز شده‌اند.

وضعیت ذخایر معدنی عناصر REE در ایران

* در ایران گام‌های نخستین برای شناسایی کانسارها و ذخایر معدنی عناصر REE برداشته شده و مطالعات نسبتاً خوبی عمدتاً توسط بخش دولتی، از جمله سازمان‌های زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو)، انجام شده است. اهم این مطالعات بر روی اکتشاف عناصر REE در کانسارهای آهن-آپاتیت تیپ کایرونا (ازجمله چغارت، چادرملو، لکه سیاه، زریگان، میشدوان، چاه گز و اسفوردی)، کانسارهای پلاسری (پلاسر مروست در استان یزد)، بوکسیت ها (بوکسیت جاجرم) و زغال‌سنگ‌ها (کارمزد، سنگرود، طزره، همکار، هشونی، پابدانای اصلی، چشمه پودنه و هجدک) صورت پذیرفته است که نتایج حاصل از این مطالعات را به تفکیک و به‌طور خلاصه به‌صورت ذیل می‌توان بیان نمود؛

- کانسارهای آهن آپاتیت ایران از لحاظ تمرکز عناصر REE باارزش محسوب می‌شوند. به‌طوری که به‌عنوان مثال در معدن فسفات اسفوردی، جدایش عناصر REE از آپاتیت به‌عنوان محصول فرعی و در نتیجه بهبود کیفیت کنسانتره فسفات، نزدیک به سطح بودن کانسار و استخراج آن به روش روباز و نیز غنی بودن باطله‌های معدن، همگی این معدن را از حیث استخراج و استحصال عناصر REE اقتصادی نموده‌اند.
- کانسار پلاسری مروست استان یزد، حاوی کانی مونازیت با عیار قابل قبول است ولی مطالعات فرآوری و به‌ویژه تست‌های استحصال عناصر REE کامل نبوده و نیازمند بررسی‌های تفصیلی‌تر است.
- محتوای عناصر REE در کانسار بوکسیتی جاجرم بیشتر از بسیاری از کانسارهای بوکسیتی چین است و با توجه به حضور این عناصر به‌صورت جذب یونی در بخش‌های رسی این کانسار فرآوری و استحصال آن‌ها کم‌هزینه‌تر و آسان‌تر بوده که در حال حاضر در مطالعات و تست‌های پایلوت آن در حال انجام است.
- مطالعات انجام‌شده بر روی کانسارهای زغال‌سنگ ایران حاکی از بالا بودن محتوای عناصر REE در این کانسارها حتّی نسبت به برخی کانسارهای زغال‌سنگ کشورهای چین و امریکا است. ولی این نوع کانسارها هنوز نیازمند انجام مطالعات اکتشافی تفصیلی و تست‌های فرآوری و استحصال تکمیلی هستند.

* با توجه به مطالب فوق‌الذکر، کاملاً مشخص است که شناسایی و مطالعه‌ی فنی-اقتصادی انواع مختلف کانسارها و پتانسیل‌های معدنی عناصر REE ایران نیازمند تکمیل مطالعات اکتشافی، فرآوری و استحصال این عناصر بوده و در این راستا ورود بخش خصوصی معدنی کشور و به‌کارگیری توان و تجربه‌ی فنی و اقتصادی آن و البته برقراری ارتباط با شرکت‌های خصوصی بین‌المللی دارای تجربه و فناوری لازم از کشورهای تولیدکننده‌ی این عناصر در جهان می‌تواند بسیار راهگشا گردد.

منابع مورد استفاده

- محمدی زاده، م.، کوهساری، ا.ح.، ۱۳۹۴، مطالعه منابع عناصر نادر خاکی با هدف امکان‌سنجی استخراج این عناصر در ایران، دومین همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع، دانشگاه شیراز

– ΥΣΓΣ Σχιεντιφιχ Ινωεστιγατιονσ Ρεπορτ, 2010, Τηε Ραρε–Εαρτη Ελεμεντσ□χιταλ το Μοδερν Τεχ ηνολογιεσ ανδ Λιφεστψλεσ, Υ.Σ. Γεολογιχαλ Συρ ωεψ
– Βανκ, Τ., ετ αλ., 2017, Γεολογψ οφ Ραρε Εαρτη Δεποσιτσ, Υνιωερσιτψ οφ Νεω Βρυνσωιχκ
– Ζηου, Β., ετ αλ., 2017, Γλοβαλ Ποτεντιαλ οφ Ρ αρε Εαρτη Ρεσουρχεσ ανδ Ραρε Εαρτη Δεμανδ φρομ Χλεαν Τεχηνολογιεσ, Μινερ αλσ 2017, 7, 203; δοι:10.3390/μιν7110203
– Ξιε, Ψ., ετ αλ., 2016, Ραρε Εαρτη Ελεμεντ Δεπο σιτσ ιν Χηινα, Σοχιετψ οφ Εχονομιχ Γεολογιστσ, Ινχ., Ρεωιεωσ ιν Εχονομιχ Γεολογψ, ω. 18, χηαπ. 6, ππ. 115□136
– Ηυρστ, Χ., 2010, Χηιναεσ Ραρε Εαρτη Ελεμεντ σ Ινδυστρψ: Ωηατ Χαν τηε Ωεστ Λεαρν?, Ινστιτυ τε φορ τηε Αναλψσισ οφ Γλοβαλ Σεχυριτψ (ΙΑΓΣ)
– Ψανγ, Ξ. Θ., ετ αλ., 2013, Χηιναεσ ιον–αδσορπτ ιον ραρε εαρτη ρεσουρχεσ, μινινγ χονσεθυενχεσ ανδ πρεσερωατιον, Ενωιρονμενταλ Δεωελοπμεν τ Θουρναλ, 8, ππ.131□136
– ζονχκεν, Θ.Η.Λ., 2016, Τηε Ραρε Εαρτη Ελεμεντ σ: Τηε Ορε Μινεραλσ ανδ Μαφορ Ορε Δεποσιτσ οφ τηε Ραρε Εαρτησ, Χηαπ. 2, ΣπρινγερΒριεφσ ιν Εαρτη Σχιενχεσ, ΔΟΙ 10.1007/978–3–319–26809–5_2
– Δοσταλ, Θ., 2017, Ραρε Εαρτη Ελεμεντ Δεποσιτ σ οφ Αλκαλινε Ιγνεουσ Ροχκσ, Ρεσουρχεσ, 6, 34; δοι:10.3390/ρεσουρχεσ6030034
– Σερεδιν, ζ.ζ., ετ αλ., 2012, Χοαλ δεποσιτσ ασ ποτεντιαλ αλτερνατιωε σουρχεσ φορ λαντηανιδεσ ανδ ψττριυμ, Ιντερνατιοναλ Θουρναλ οφ Χοαλ Γεολογψ 94, ππ. 67□93