

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Tara Stjepanović

**KRITIČNE MINERALNE SIROVINE: IZAZOV
TEHNOLOŠKOG RAZVOJA U BUDUĆNOSTI**

Seminar III
Preddiplomski studij geologije

Mentor:
prof. dr. sc. Nenad Tomašić

Zagreb, 2020.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Teorijska osnova	3
3. Općenito o REE	4
4. Rudni minerali REE.....	6
5. Tipovi ležišta u kojima dolaze REE	10
6. Najznačajnija svjetska i potencijalna europska ležišta REE.....	13
7. REE u industriji	19
8. REE na svjetskom tržištu.....	22
9. Zaključak	25
10. Literatura.....	26

1. Uvod

Svjetska robna tržišta često su podložna izraženim fluktuacijama u cijenama robe. Najčešće varijacije u cijenama se događaju na tržištima metala, minerala, poljoprivrednim tržištima, tržištima hrane i energije. Povećanje ili smanjenje cijene određene vrste robe ovisi o dostupnosti i potražnji iste. Ukoliko je potražnja velika, a dostupnost mala, cijena raste i obrnuto. Na svjetskim tržištima pojedine države imaju monopol nad određenim vrstama robe i na taj način kontroliraju cijelo tržište. Primjer je Kina koja kontrolira većinski dio tržišta mineralnih sirovina.

Europska unija (EU) znatno je ovisna o uvozu mineralnih sirovina. Zbog toga, Europska Komisija je 2008. godine pokrenula Inicijativu za sirovine kojoj je cilj rješavanje problema povezanih sa pristupom sirovinama. Inicijativa za sirovine je zasnovana na tri stupa: 1) osiguravanje pravedne i održive dobave sirovina sa svjetskih tržišta, 2) osiguravanje održive dobave sirovina unutar EU-a, 3) poticanje učinkovitosti izvora i povećanje količine recikliranja.

Europska Komisija je 2011. godine donijela Komunikaciju o sirovinama koja je službeni popis 14 „kritičnih“ sirovina (European Commission, 2011). Određena sirovina se klasificira kao kritična ako je od velike gospodarske važnosti, a postoji određeni rizik u dobavi iste. Rizik dobave određene sirovine ovisi o količini proizvodnje u zemljama proizvođačima i direktno se odražava na političku stabilnost zemlje. Popis „kritičnih“ sirovina se ažurira svake 3 godine, stoga se mijenja i broj sirovina koje se smatraju kritičnima. Tako je 2014. godine Europska Komisija donijela novi popis koji sadrži 20 kritičnih sirovina (Europska Komisija, 2014), a 2017. godine taj broj se popeo na 27 (Europska Komisija, 2017). Svrha popisa jest pridonijeti provedbi industrijske politike EU-a i osigurati jačanje industrijske konkurentnosti Europe mjerama u drugim područjima politike. Također, cilj je potaknuti europsku proizvodnju kritičnih sirovina i omogućavanje pokretanja novih rudarskih aktivnosti. Povećanjem konkurentnosti gospodarstva EU na tržištu, krajnji cilj je povećanje ukupnog BDP-a do 20% do 2020. godine (Europska Komisija, 2014).

U sirovine se ubrajaju minerali metala, industrijski minerali, građevinski materijali, drvo i prirodna guma. Ovaj rad detaljno obrađuje elemente rijetkih zemalja (REE) kao kritičnu sirovinu – najbitnije rudne minerale REE, tipove ležišta u kojima se mogu naći,

najznačajnija potencijalna svjetska i europska ležišta REE, korištenje REE u industriji te trenutnu situaciju na svjetskom tržištu vezanu za REE.

2. Teorijska osnova

Europska unija (EU) je ovisna o uvozu većine mineralnih sirovina. Jedna od najvažnijih sirovina o kojoj EU ovisi jesu elementi rijetkih zemalja (REE) koji se masovno koriste u razvoju moderne tehnologije koja iz dana u dan sve više napreduje. Istraživački projekti ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer*) i EURARE (*European Rare Earth Element*) su trenutno u tijeku i njihov je cilj istražiti potencijalna područja Europe bogata sa REE te ih iskartirati, procijeniti njihovu tehnološku i ekonomsku isplativost te istražiti metode za eksploataciju sirovina koje će imati minimalni utjecaj na okoliš, na ekonomski održiv i ekološki prihvatljiv način, kako bi EU mogla konkurirati na svjetskom tržištu REE, postati neovisna i razvijati se.

Potencijal Europe što se tiče obogaćenja na REE jest prepoznat, ali je još nedovoljno istražen. Pri istraživanju se polazi od osnovnog geološkog znanja o tome u kakvim geološkim okolišima je najveća mogućnost za pronalazak obogaćenja na REE. Obogaćenje na REE može se dogoditi tijekom magmatskih i hidrotermalnih procesa (primarni procesi) ili sekundarnim procesima koje karakterizira trošenje primarnih stijena bogatih REE te njihov transport i taloženje u obliku nanosa. Prema tome, prirodne pojave elemenata rijetkih zemalja mogu se podijeliti na visokotemperaturne (primarne) i niskotemperaturne (sekundarne) (Goodenough i sur., 2015). Primarni tipovi ležišta REE su najčešće vezani za alkalne stijene i karbonatite, ali također se pojavljuju i vezani uz granite i pegmatite ili u hidrotermalnim sustavima. Ukoliko dođe do trošenja ili erozije ovakvih primarnih ležišta REE može doći do formiranja sekundarnih ležišta REE koja se pojavljuju u obliku akumulacija na određenom mjestu nakon transporta ili se mogu nakon transporta adsorbirati na površine drugih stijena (tipično za tropska i suptropska područja).

3. Općenito o REE

Elementi rijetkih zemalja (REE) su skupina od 17 kemijskih elemenata koja uključuje lantanide, skandij (Sc) i itrij (Y) (slika 1). Lantanidi čine niz kemijskih elemenata od atomskog broja 57 (lantan, La) do 71 (lutecij, Lu). Bez obzira na njihovo ime, elementi rijetkih zemalja su relativno česti u Zemljinoj kori, a izuzetak je prometij (Pm) koji je radioaktivan i time nestabilan. Svi REE su metali i dijele neka slična kemijska i fizička svojstva: željezno siva boja, relativno mekani, mogu se kovati, reaktivni su i imaju karakteristična optička i magnetska svojstva zbog kojih su neophodni u industriji moderne tehnologije. U Zemljinoj kori su najzastupljeniji cerij (Ce), itrij (Y), lantan (La) i neodimij (Nd). Tulij (Tm) i lutecij (Lu) su najmanje zastupljeni u Zemljinoj kori, ali ipak imaju zastupljenost veću od zlata i do 200 puta. Elementi rijetkih zemalja su svi trovalentni (REE^{3+}), a izuzetak su cerij koji je u oksidacijskim uvjetima četverovalentan (Ce^{4+}) i europij koji pri visokim temperaturama može prijeći u dvovalentno (Eu^{2+}) stanje. Zbog njihovih sličnih oksidacijskih stanja i ionskog radijusa oni često mogu zamjenjivati jedni druge u kristalnim strukturama minerala.

Najčešća podjela REE je na lake elemente rijetkih zemalja (LREE, *Light Rare Earth Elements*) i na teške elemente rijetkih zemalja (HREE, *Heavy Rare Earth Elements*). Definicija LREE i HREE temeljena je na elektronskoj konfiguraciji elemenata rijetkih zemalja. U LREE spadaju lantanidi od atomskog broja 57 (lantan, La) do 63 (europij, Eu), a u HREE lantanidi od atomskog broja 64 (gadolinij, Gd) do 71 (lutecij, Lu) te itrij (Y) (slika 1). Itrij se uvrštava u skupinu HREE zbog svojih njima sličnih kemijskih svojstava, dok se skandij ne može uvrstiti niti u jednu skupinu zbog toga što ne pokazuje dovoljno sličnosti niti sa jednom skupinom.

Rare Earth Elements
by Geology.com

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
Lanthanides																		
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
Actinides																		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

Slika 1. Periodni sustav elemenata koji prikazuje elemente rijetkih zemalja (narančasto). Zelena boja prikazuje LREE, a crvena HREE. Preuzeto sa: www.geology.com

4. Rudni minerali REE

Elementi rijetkih zemalja se ne pojavljuju samostalno u prirodi. Najčešće ulaze u strukturu halogenida, karbonata, fosfata, oksida i silikata. Prepoznato je oko 245 minerala koji u svojoj strukturi mogu sadržavati REE (Van Gosen i sur., 2017). Takvi minerali najčešće imaju kompleksnu strukturu i sastav. Jedan mineral u svojoj strukturi ne sadrži samo jedan element rijetkih zemalja nego njih više. Primjerice, ako je mineral monacit ($(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})\text{PO}_4$) izrazito obogaćen cerijem, zapisuje se kao monacit-(Ce).

Iako ih je poznato mnogo, najvažniji rudni minerali iz kojih se dobivaju REE su bastnäsit $((\text{REE})(\text{CO}_3)\text{F})$, monacit $((\text{REE})\text{PO}_4)$, ksenotim (YPO_4) i apatit $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH}))$.

Bastnäsit $((\text{REE})(\text{CO}_3)\text{F})$

Bastnäsit je mineral koji kristalizira u heksagonskom kristalnom sustavu, voštanožute do crvenkastosmeđe boje, staklastog do masnog sjaja i tvrdoće 4 – 4 ½ (slika 2). Ime je dobio prema tipskom lokalitetu u Švedskoj, rudniku Bastnäs. Spada u nesilikate, razred karbonata, u karbonate s dodatnim anionima (Bermanec, 1999). U kemijskom sastavu mogu dominirati cerij, lantan ili itrij, pa se prema tome razlikuju bastnäsit-(Ce) $((\text{Ce}, \text{La})(\text{CO}_3)\text{F})$, bastnäsit-(La) $((\text{La}, \text{Ce})(\text{CO}_3)\text{F})$ i bastnäsit-(Y) $((\text{Y}, \text{Ce})(\text{CO}_3)\text{F})$, što ukazuje da je bastnäsit nositelj lakih elemenata rijetkih zemalja (LREE), umjesto teških elemenata rijetkih zemalja (HREE). Smatra se najvažnijom rudom REE jer je primarni rudni mineral dvaju najvećih svjetskih ležišta REE – karbonatitno ležište Mountain Pass u Kaliforniji i Fe-karbonatitno ležište Bayan Obo u Kini (Walters i sur., 2015).



Slika 2. Kristal bastnäsit veličine oko 1,5 cm. Preuzeto sa: www.wikiwand.com

Monacit ((REE)PO₄)

Monacit je mineral koji kristalizira u monoklinskom kristalnom sustavu, žućkasto, crvenkasto i zelenkasto smeđe boje, dijamantnog do voštanog sjaja (Slika 3). Spada u nesilikate, razred fosfata, u fosfate tipa A(XO₄), u grupu monacita (Bermanec, 1999.). Najrašireniji je mineral elemenata rijetkih zemalja. Tvrdoće je 5 – 5 ½ i dosta otporan na trošenje pa ga se zbog toga vrlo često može naći u nanosima rijeka i u pijescima koji su nastali mehaničkim trošenjem granitskih i sijenitskih pegmatita i gnajseva. Najčešće je izvor lakih elemenata rijetkih zemalja (LREE) i važno je naglasiti da u svom sastavu ima i torij (Th) (Walters i sur., 2015). Ovisno o tome koji REE je najzastupljeniji u sastavu, kemijska formula monacita se mijenja: (Ce,La,Nd,Th)PO₄ ako je dominantan cerij (monacit-(Ce)), (La,Ce,Nd)PO₄ ako je dominantan lantan (monacit-(La)) i (Nd,La,Ce)PO₄ ako je dominantan neodimij (monacit-(Nd)). Najveću ekonomsku važnost ima monacit-(Ce).



Slika 3. Kristal monacita veličine oko 5 cm. Preuzeto sa: www.geology.com

Ksenotim (YPO₄)

Ksenotim je mineral koji kristalizira u tetragonskom kristalnom sustavu, žućkasto do crvenkastosmeđe boje i voštanog sjaja (slika 4). Spada u nesilikate, u razred fosfata, u fosfate tipa A(XO₄) (Bermanec, 1999). Za razliku od bastnäsita i monacita, ksenotim u svoju kemijsku strukturu preferirano uklapa teške elemente rijetkih zemalja (HREE), najviše itrij, zbog čega je također ekonomski isplativ (Walters i sur., 2015). Dolazi u kiselim i alkalnim magmatskim stijenama, metamorfnim stijenama, a u pegmatitima može doći u obliku velikih kristala.



Slika 4. Kristal ksenotima dugačak oko 3 cm. Preuzeto sa: www.therussianstone.com

Apatit ($Ca_5(PO_4)(F,Cl,OH)$)

Apatit je naziv za grupu minerala (razred fosfata s dodatnim anionima) unutar koje razlikujemo tri niza: niz apatita (kalcijski fosfati), niz piromorfita (olovni kloridi) i niz svabita (arsenati). Kemijska formula $Ca_5(PO_4)(F,Cl,OH)$ označava niz apatita (kalcijskih fosfata) u koje se, u ovisnosti o sastavu, ubrajaju klorapatit ($Ca_5(PO_4)_3Cl$), fluorapatit ($Ca_5(PO_4)_3F$) i hidroksilapatit ($Ca_5(PO_4)_3OH$). Niz apatita kristalizira u heksagonskom sustavu, boja ovisi o sastavu, može biti zelena (slika 5), plava, plavozelena, ljubičasta, ljubičastoplava, crvena, smeđa, a mogu biti i bezbojni. Mutnog do mastnog sjaja, tvrdoće 5 (član Mohsove ljestvice) (Bermanec, 1999). Niza apatita ima u pegmatitima, gdje u kristalnu rešetku ulaze inkompatibilni elementi, posebice REE, kao posljedica izomorfne zamjene sa velikim kationima (Ca^{2+}).



Slika 5. Zeleni kristali apatita veličine prosječno 8 mm. Preuzeto sa: www.geology.com

5. Tipovi ležišta u kojima dolaze REE

Mineralna ležišta REE mogu biti vezana za magmatske i hidrotermalne procese i takva se nazivaju primarna, a sekundarnim ležištima se nazivaju ona ležišta koja su nastala trošenjem primarnih stijena obogaćenih na REE, transportom i akumulacijom produkata trošenja na određenom mjestu. Primarna ležišta minerala bogatih na REE mogu biti vezana uz karbonatitnu ili alkalnu magmu. Također, razlikuje se još jedan tip primarnih ležišta, IOCG (*iron-oxide-copper-gold*) tip koji nije vezan isključivo za alkalijske ili karbonatitne magme, nazvan prema masivnom ležištu Olympic Dam u južnoj Australiji.

Ležišta vezana uz karbonatitnu magmu

Mnoga svjetska ležišta bogata REE su vezana za karbonatite. Karbonatiti su magmatske stijene koje sadrže više od 50% karbonatnih minerala u svom sastavu, najčešće kalcit i dolomit i uglavnom sadrže najveće koncentracije REE u svom sastavu od svih ostalih magmatskih stijena. Karbonatitne magme potječu iz gornjeg plašta, ali proces njihovog nastanka još nije sasvim razjašnjen (van Gosen i sur., 2017). Mogući procesi koji mogu izazvati nastanak karbonatitne magme su taljenje primarnog plašta ili evolucija alkalne taljevine nastale iz plašta frakcijskom kristalizacijom. Karbonatitna ležišta se najčešće nalaze na stabilnim kontinentalnim kratonima, a najvažniji mineral vezan uz njih je bastnäsit, a uz njega se mogu pojaviti i monacit, parisit i apatit i takva ležišta su izrazito bogata na LREE, a osiromašena na HREE (Walters i sur., 2015).

Ležišta vezana uz alkalnu magmu

Alkalne magmatske stijene kristaliziraju iz magmi koje su toliko zasićene alkalijama da precipitiraju natrijem i kalijem bogate minerale kao što su natrijem i kalijem bogati amfiboli, pirokseni i feldspatoidi. Obično su podzasićene na silicijsku komponentu pa prema tome sadrže vrlo malo kremenca. Alkalne magmatske stijene mogu biti dalje klasificirane kao peralkalne ako u svom sastavu sadrže manji udio aluminijskog oksida (Al_2O_3) od kalijevog (K_2O) i natrijevog oksida (Na_2O) zajedno ($\text{Al}_2\text{O}_3 < \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (Van Gosen i sur., 2017.). Peralkalne stijene su u pravilu obogaćene na kalij, natrij i HFSE (high field strength elements, elemente inkompatibilne zbog prevelikog naboja), kao što su Zr, Ti i REE. Stijene s takvim obogaćenjem mogle su nastati iz magme koja je nastala parcijalnim taljenjem hidrotermalno izmjenjenog plašta (Ahmed i sur., 2018).

IOCG (iron-oxide-copper-gold) tip

Ovaj tip ležišta nije isključivo vezan uz jedan tip magme, zato se svrstava u poseban tip primarnih ležišta. Definira se kao magmatsko-hidrotermalni tip ležišta željeza koji sadrži ekonomski isplative koncentracije bakra i zlata. Ležišta ovog tipa mogu biti kilometarskih dimenzija i biti okružena alteracijskim zonama (van Gosen i sur., 2017). REE su u ovom tipu ležišta slabo zastupljeni, a dolaze u razičitim vrstama stijena, kao što su intruzivne magmatske, vulkanske ili sedimentne. Najzastupljeniji su željezoviti minerali (magnetit i hematit), u manjoj mjeri dolaze bakreni sulfidi, kremen i minerali obogaćeni na REE (bastnäsit, monacit, ksenotim, alanit, parisit i apatit). Ležišta ovog tipa dolaze u obliku diseminiranih ili masivnih tijela, u obliku vena ili breča. Formiranje ležišta se odvija u dvije faze - u prvoj fazi kristalizira magnetit u asocijaciji s apatitom, što nema veliku ekonomsku važnost zbog jako slabe zastupljenosti REE, a u drugoj fazi dolazi do kristalizacije REE bogatih minerala kao što je bastnäsit u asocijaciji s hematitom, kvarcsericitom, bornitom i baritom (Walters i sur., 2015).

Sekundarna ležišta minerala bogatih na REE nastaju trošenjem primarnih stijena bogatih na REE, transportom materijala i njegovom akumulacijom na određenom mjestu. Iako u ovim ležištima nisu prisutne koncentracije REE kao primarnim, ipak pokazuju ekonomski potencijal zbog lakoće obrade same rude. U sekundarna ležišta se ubrajaju nanosna ležišta (*placer deposits*) i rezidualna ležišta trošenja (*residual weathering deposits*).

Nanosna ležišta (placer ležišta)

Nanosna ležišta predstavljaju veće koncentracije teških minerala koji transportirani i istaloženi zajedno sa pijeskom i šljunkom uz posredovanje rijeka ili mora. Najvažnija nanosna ležišta vezana su za more, a minerali koji su obogaćeni na REE, zajedno sa pijeskom i šljunkom, se talože uz obalu koja je pod djelovanjem valova, morskih struja i morskih mijena. Navedeni minerali mogu potjecati iz različityh izvora, a najčešće su bogati na titanij, cirkonij i REE. Najvažniji mineral vezan uz sekundarna ležišta REE je monacit što upućuje na obogaćenje na LREE.

Rezidualna ležišta trošenja

Primjer rezidualnih ležišta su lateriti. Nastaju trošenjem primarnih stijena i taloženjem produkata trošenja *in situ*, bez transporta, prvenstveno u tropskim i subtropskim područjima. Ako je primarna stijena karbonatit i obogaćen je na REE, a podvrgnut

kemijskom trošenju, dolazi do disolucije sastavnih komponenti te stijene: kalcita, dolomita i apatita. Kemijsko trošenje uzrokuje otapanje navedenih minerala i otpuštanje REE u okoliš. Tako otpušteni REE mogu biti uklopljeni u strukturu novih supergenih minerala koji formiraju (potencijalno) ležište. Kod rezidualnih ležišta trošenja vezanih za REE najčešći rudni mineral je monacit (Walters i sur., 2015).

Dodatno, opisana je relativno nova vrsta rezidualnog ležišta trošenja. Riječ je o glinama obogaćenima na REE koje nastaju trošenjem granita bogatim REE. REE u procesu kemijskog trošenja prelaze u ionski oblik (REE^{3+}) i kao takve ih apsorbiraju minerali glina, najčešće grupa kaolina ili smektita (Yaraghi i sur., 2019). Ovaj tip ležišta je generalno najmanjih dimenzija, ali se ističe zbog izraženog obogaćenja na HREE i zbog malog udjela radioaktivnih elemenata (Walters i sur., 2015).

6. Najznačajnija svjetska i potencijalna europska ležišta REE

Elementi rijetkih zemalja su prisutni na mnogo svjetskih i europskih lokacija, međutim, neka područja su obogaćena više, a neka manje. Ovisno o koncentracijama REE na nekom području, ono može ili ne mora imati ekonomsku isplativost. Na svjetskom tržištu sirovinama koje su bogate na REE prednjači Kina koja rudarenjem i izvozom podmiruje 90% svjetske potražnje za REE. Ekonomski isplative zalihe REE također su pronađene u Sjedinjenim Američkim Državama, Rusiji, Australiji itd. (Walters i sur., 2015). Nadalje u tekstu bit će opisano nekoliko svjetski važnih i poznatih ležišta.

Najveće koncentracije REE u Kini se nalaze na ležištu Bayan Obo (slika 6). Za ovo ležište pretpostavlja se da je najveće ležište REE u svijetu. Formiralo se sredinom proterozoika kao posljedica riftinga. Ovo ležište je stratabound tipa u kojemu je stijena domaćin dolomit. Proteže se 18km u duljinu i dijeli se na tri rudna tijela – glavno rudno tijelo, istočno i zapadno. Otkriveno je oko 170 mineralnih vrsta, a ekonomski najvažniji su bastnašit i monacit za eksploataciju elemenata rijetkih zemalja (prvenstveno LREE), i željezoviti minerali (hematit i magnetit) za eksploataciju željeza (Walters i sur., 2015).



Slika 6. Bayan Obo površinski iskop u Kini. Preuzeto sa: www.ejAtlas.org

Velike koncentracije minerala i sirovina bogatih REE nalaze se i u Sjedinjenim Američkim Državama. Najviše se ističe mineralno ležište Mountain Pass u Kaliforniji (slika 7). Nastanak ležišta veže se uz intruziju karbonatitne magme u već postojeće magmatske i metamorfne stijene (gnajsevi, graniti i migmatiti) tvoreći jedno od važnijih svjetskih ležišta REE. U sastavu intruzije koja tvori navedeno ležište glavni minerali su kalcit, dolomit i barit, a najvažniji rudni mineral REE je bastnäsit. Pretkambrijske je starosti, otkriveno 1949. godine. Rudarenje i izvoz sirovina REE započeli su 1952., a 2002. godine dolazi do zatvaranja zbog štetnog utjecaja na okoliš. Na ovom ležištu rudarenje i eksploatacija se vršila isključivo zbog REE, dok su u većini ostalih rudnika REE nusprodukt koji ima dobru ekonomsku vrijednost pa se zbog toga eksploatira (Walters i sur., 2015).



Slika 7. Mountain Pass površinski iskop u Kaliforniji. Preuzeto sa: www.gettyimages.com

Rusija kao najveća država na svijetu također posjeduje zalihe REE. Najveće koncentracije otkrivene su na dva lokaliteta – Khibiny i Lovozero na poluotoku Kola. Nastanak ležišta veže se uz alkalnu magmu koja je nastala parcijalnim taljenjem plašta, a volumno ova dva lokaliteta predstavljaju dva najveća peralkalna tijela u svijetu. Lokalitet Khibiny je okarakterizirana velikim naslagama nefelinskih sijenita i značajnom količinom apatita. Apatit je važan zbog toga što u svoju kristalnu strukturu uklapa REE, najviše itrij,

što ovo ležište čini ekonomski isplativim. Lovozero karakterizira drugačija mineralizacija – obogaćenje na eudialit, loparit i apatit koji u svoju kristalnu strukturu uklapaju REE, cirkonij, niobij, stroncij, barij i fosfor što ovo ležište također čini ekonomski isplativim te je zbog toga aktivno već više od 50 godina. REE se na ovim lokalitetima ne rudare kao primarni produkt, već se dobivaju kao nusprodukt što povećava ekonomsku isplativost (Walters i sur., 2015).

Australija kao zaseban kontinent također posjeduje dosta velike zalihe REE. Najpoznatije ležište REE je Mount Weld i nalazi se na zapadu Australije. Ovo ležište je lateritnog tipa, nastalo trošenjem karbonatitnih stijena i taloženjem produkata trošenja *in situ*. Ležište sadrži jako velike količine REE, od kojih 40% od ukupne količine dolazi u fosfatnim mineralima (Walters i sur., 2015). Zbog toga na ovom ležištu REE se ne eksploatiraju kao nusprodukt, već je ležište otvoreno isključivo sa ciljem eksploatacije REE. Drugo potencijalno ležište u Australiji je Olympic Dam i nalazi se na jugu kontinenta. Tip ležišta je IOCG (*iron-oxide-copper-gold*) što ga svrstava u primarna, magmatsko-hidrotermalna ležišta. Ovo ležište čini granitno tijelo unutar kojeg se nalazi hidrotermalna breča koja je izrazito obogaćena na REE, najviše na lantan i cerij. Iako je generalno obogaćenje na REE veliko, REE u obliku oksida (REO) su slabo zastupljeni zbog čega ovo ležište nije ekonomski isplativo (Walters i sur., 2015).

Na području Europe u tijeku su razni projekti i istraživanja kojima je cilj otkriti i istražiti potencijalna ekonomski isplativa ležišta REE s ciljem da Europa postane neovisna o uvozu istih te da naposljetku postane konkurentna na svjetskom tržištu. Dosadašnjim istraživanjima otkriveno je stotinjak lokaliteta koji imaju veći ili manji potencijal za eksploataciju REE. Ovisno o zastupljenosti REE, lokalitet se može definirati kao pojavni oblik REE (u slučaju manje zastupljenosti) ili kao ležište (u slučaju veće zastupljenosti) (Goodenough i sur., 2015). Najviše utvrđenih potencijalno eksploatabilnih ležišta na području Europe svrstaju se u primarna ležišta vezana za alkalne magmatske stijene i karbonatite nastale u ekstenzijskom režimu, a smještene su na sjeveru Europe. Manje zastupljena su sekundarna ležišta vezana uz boksite smještene isključivo na jugu Europe.

Najviše potencijalnih ležišta vezanih za alkalne i karbonatitne magme otkriveno je na sjeveru Europe, konkretno na području Fenoskandije (Fenoskandijski štit). Fenoskandija geografski obuhvaća Skandinavski poluotok, Finsku i poluotok Kolu. Najvažnija potencijalna ležišta nalaze se na teritoriju Švedske i Finske, a ležišta koja se aktivno rudare na poluotoku Kola ne pripadaju Europskom teritoriju.

Formiranje Fenoskandijskog područja započinje u paleoproterozoiku (2500-1600 mil. godina) procesima kontinentalne kolizije i formiranjem superkontinenta Columbia. Spajanjem rubova manjih kontinenata dolazi do subdukcije i izražene magmatske aktivnosti koja je rezultirala formiranjem potencijalnih mineralnih ležišta. Tijekom kolizije formiralo se nekoliko orogenetskih pojaseva. Najvažniji je orogenetski pojas koji obuhvaća područje Švedske i Finske, a nazvan je Svekofenijski (*Svecofennian orogenic belt*). Povijesno gledano, najvažniji lokaliteti u Švedskoj su rudnici Bastnäs i Ytterby iz kojih potječu uzorci iz kojih se prvotno izolirao velik broj REE - Bastnäs tip ležišta. Ovakav tip ležišta pojavljuje se na nekoliko lokacija duž zone duge 80 – 100 km pružanja SI – JZ. Obogaćenje na REE nalazi se unutar hidrotermalno izmjenjenih paleoproterozojskih magmatskih i sedimentnih stijena, a razlikuju se dvije zone: jedna obogaćena na LREE, a druga obogaćena na HREE i itrij (Goodenough i sur., 2015).

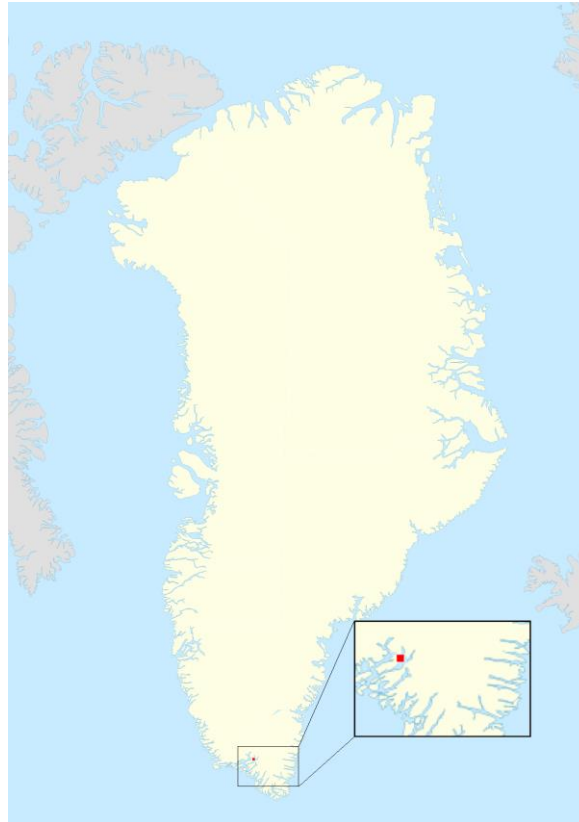
Važan tip ležišta u Švedskoj je i Kiruna-tip. Tom tipu ležišta pripadaju lokaliteti Kiirunavaara i Malmberget na sjeveru i Grängesberg – Blöberget u centralnom/južnom dijelu Švedske. Za ovaj tip ležišta karakteristično je izrazito obogaćenje na rude željeznih oksida unutar kojih je detektirana visoka koncentracija REE u obliku REE minerala kao što su monacit – (Ce), ksenotim – (Y) i allanit – (Ce). Da li je ovaj tip ležišta ortomagmatskog ili hidrotermalnog postanka nije još sasvim razjašnjeno (Goodenough i sur., 2016).

Teritorij Finske također je bogat potencijalnim ležištima REE. Najviše se ističu Kōrsnas na zapadu, Halpanen na istoku, Naantali na jugozapadu, Juuka na sjeveroistoku i Lamujärvi u centralnom dijelu. Južni dio Finskog teritorija također pokazuje potencijal za eksploataciju REE zbog detektiranog izrazitog obogaćenja na LREE, konkretno na mineral allanit. Kōrsnas, Halpanen, Naantali i Juuka su karakterizirani karbonatnim dajkovima i sva navedena potencijalna ležišta pokazuju sličnu mineralizaciju i obogaćenje na LREE. Obogaćenje na LREE također je prisutno na lokalitetu Lamujärvi u sijenitima, sa glavnim rudnim mineralima alanitom i monacitom.

Početak mezoproterozoika (1400 mil. godina) započinje proces raspada superkontinenta Columbia (rifting stabilnog kratona) (Bucković, 2006) što ponovno dovodi do stvaranja potencijalnih ležišta. Kao najvažniji lokalitet ističe se Nora Kärr u južnoj Švedskoj predstavljen peralkalijskim nefelinskim sijenitima bogatim na REE.

Kao posljedica riftinga potencijalno eksploabilna ležišta REE formirala su se i na južnom Grenlandu, a najistaknutija je provincija Gardar (slika 8). Danas se provincija Gardar

smatra jednim od najvažnijih potencijalno eksploatabilnih ležišta REE u Europi. Najpoznatiji kompleks u navedenoj provinciji je Ilímaussaq, kompleks formiran od uslojenih granitskih i nefelinskih sijenita koji sadrže velik broj minerala obogaćenih REE (Goodenough i sur., 2015).

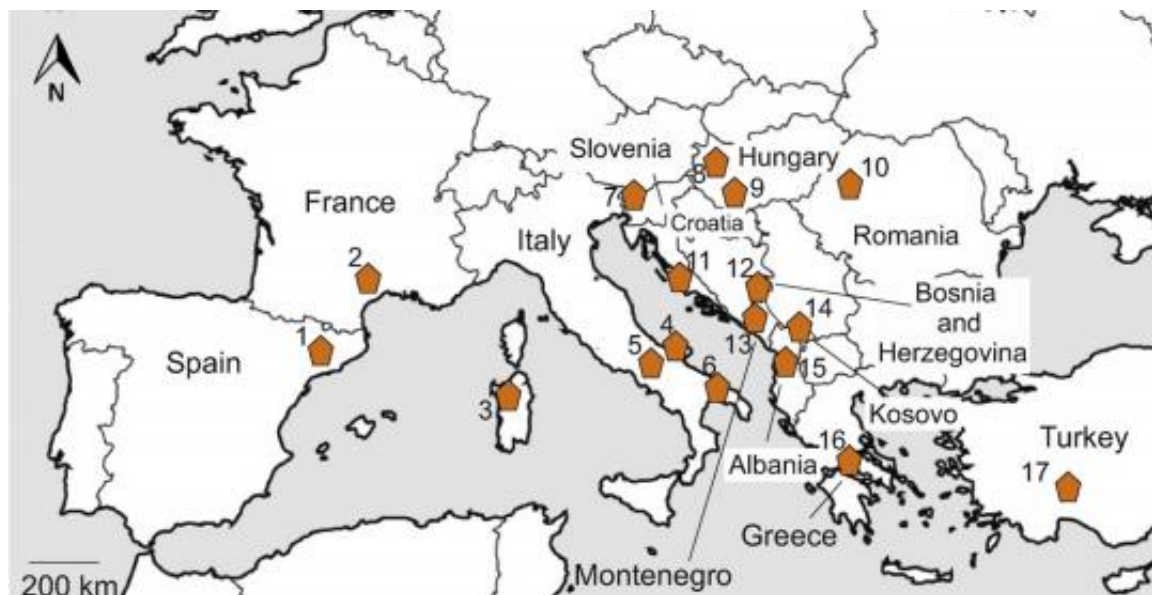


Slika 8. Područje provincije Gardar na južnom Grenlandu. Pruzeto sa: www.commonswikimedia.org

Početak neoproterozoika (1000 mil. godina) ponovno započinju kolizijski procesi kojima se posljedično stvara novi superkontinent – Rodinija (Bucković, 2006.). Formiranjem Rodinije dolazi do stvaranja novog orogenetskog pojasa na području granice Norveške i Švedske: Sveko – Norveški orogenetski pojas (*Sveconorwegian orogenic belt*). Time dolazi do formiranja najvažnijeg potencijalnog ležišta na lokalitetu Fen na jugu Norveške. Lokalitet Fen je potencijalno eksploatabilno ležište REE, a stijene domaćini su karbonatitni dajkovi obogaćeni bastnäsitom, parisitom i monacitom sa niskim sadržajem torija (Goodenough i sur., 2015).

Navedeni lokaliteti predstavljaju primarna ležišta s najvećim potencijalom ekploatabilnosti iako diljem Europe postoje još mnoga potencijalna ležišta koja su u procesu istraživanja.

Sekundarna ležišta su također prisutna na Europskom teritoriju, iako su puno manje zastupljena i imaju puno manju ekonomsku važnost. Najznačajnija su ležišta boksita koja se nalaze na sjevernoj obali Sredozemnog mora što uključuje teritorije Španjolske, Turske, Francuske, Mađarske, Italije, Grčke i Balkana (slika 9). Ležišta su nastala trošenjem rezidualnih glina, a trenutno se koriste kao primarni izvor aluminija. Pri procesu obrade boksitne rude i ekstrakciji aluminija, zaostaje „crveni mulj“ u kojemu je dokazana značajna koncentracija REE koja predstavlja potencijalni ekonomski važan izvor REE. Iz ove vrste ležišta nemoguće je dobiti koncentracije REE kao što je to slučaj sa primarnim ležištima, ali su od interesa zbog vrlo lake obrade same rude (Goodenough i sur., 2015).



Slika 9. Karta Europe koja prikazuje lokalitete na kojima su pronađena sekundarna ležišta bogata REE (Goodenough i sur., 2016)

7. REE u industriji

Od otkrića REE sve do danas, njihova važnost raste iz godine u godinu. Nagli razvitak moderne tehnologije uzrok je sve većoj potražnji za njima. Iako su REE jedna od najkorisnijih sirovina današnjice, njihovo rudarenje i prerada donosi mnogo problema, kako za ljude tako i za okoliš. Od samih početaka rudarenja, skladištenja i eksploatacije REE, postojali su razni problemi i opasnosti s kojima su se ljudi suočavali. Najveći problem sve do danas je ostala činjenica da procesi rudarenja i eksploatacije REE štetno djeluju na okoliš, ponajviše zbog toga što neke rude sadrže radioaktivne elemente (uran, torij) i time proizvode radioaktivni otpad. Nadalje, prerada samih ruda s ciljem ekstrakcije REE zahtjeva korištenje raznih kemikalija za koje se pokazalo da, ukoliko nisu adekvatno zbrinute, dovode do onečišćenja podzemnih voda, time utječu i na lokalnu poljoprivredu te uzrokuju bolesti stanovnika. Proces prerade ruda REE također zahtjeva značajnu količinu energije. Energija potrebna za preradu ruda REE dobiva se iz ugljena (izgaranjem) što za posljedicu ima povećanje koncentracije CO₂ u atmosferi i ima direktan utjecaj na klimatske promjene. S obzirom na dosta negativnih aspekata što se tiče ekstrakcije i prerade ruda REE, sami REE, kontradiktorno, imaju izrazito pozitivan utjecaj na razvitak moderne tehnologije, industrije, ekonomije, u zaštiti okoliša i slično. Zbog izazito puno pozitivnih aspekata, provode se razna istraživanja i projekti na svjetskoj i europskoj razini kojima se nastoji umanjiti ili, u najboljem slučaju, poništiti štetan utjecaj prerade ruda REE kako bi njihovo korištenje imalo stopostotni pozitivan utjecaj.

Elementi rijetkih zemalja neophodni su u širokoj lepezi visokotehnoloških proizvoda koji čine važan dio industrijske ekonomije u 21. stoljeću. Imaju najširu primjenu u svim granama industrije od svih ostalih kemijskih elemenata. Primjenjuju se kao neophodna komponenta u elektroničkim uređajima, u proizvodnji punjivih baterija, magneta, keramike i stakla, metalurgiji, kao fosfori za kompjutorske monitore, televizore i rasvjetu i u automobilskoj i naftnoj industriji kao katalizatori i ostalo.

REE kao katalizatori imaju široku primjenu u auto industriji i u industriji nafte. Cerijev karbonat (Ce₂(CO₃)₃) i cerijev oksid (CeO₂) koriste se u auto industriji kao auto katalizatori čija je uloga smanjenje toksičnih ispušnih plinova. U naftnoj industriji, REE imaju katalitičku primjenu u procesu krekiranja (proces u preradbi nafte i petrokemijskoj proizvodnji, kojim se složene organske molekule ili dugolančani ugljikovodici razbijaju na jednostavnije molekule s manjim brojem ugljikovih atoma), rafiniranjem sirove nafte sa

ciljem dobivanja lakših, ekonomičnijih proizvoda, kao što su benzin i dizelsko gorivo. Što se tiče primjene REE u metalurgiji, najveću primjenu imaju legure REE. Jedna od najvažnijih legura REE je *mischmetal* („mješani metal“), a sastoji se od 55% cerija i 25% lantana s manjim primjesama neodimija i praseodimija. Najčešće se upotrebljava kao sredstvo za stvaranje iskri kod upaljača, ali tada se dodatno legira sa željezovim ili magnezijevim oksidom zbog premale tvrdoće (Walters i sur., 2015).

Jedna od širih primjena REE je u industriji magneta, posebice trajnih (permanentnih) magneta. Trajnim magnetima se magnetska svojstva tijekom vremena ne mijenjaju ili se tek neznatno promjene i ne ovise o vanjskim utjecajima. Najvažniji REE u industriji magneta je neodimij. Magneti kojima je glavna komponenta neodimij koriste se u širokom spektru grana industrije, od proizvodnje najsitnijih dijelova elektroničkih uređaja za reprodukciju zvuka pa sve do proizvodnje vjetroelektrana. Uređaji koji imaju ugrađene magnete kojima je glavna komponenta neodimij (u odnosu na druge vrste magneta) zadržavaju istu razinu efikasnosti uz potrošnju manje količine energije i time su ekološki prihvatljiviji. U proizvodnji magneta važni su također disprozij i terbij. Magneti s primjesama disprozija i terbija koriste se u uvjetima visokih temperatura – magneti u uvjetima visokih temperatura često izgube svoj magnetizam, a disprozij i terbij to sprečavaju. Posebnu primjenu REE imaju u proizvodnji hibridnih automobila. Hibridni automobili za pogon kombiniraju benzinski motor i motor na bateriju. Glavni REE korišten u proizvodnji baterija za hibridne automobile je lantan, a u sastav većine ostalih dijelova tih automobila ulaze gotovo svi REE (Walters i sur., 2015).

U uređajima koji koriste LCD (*liquid crystal display*) i plasma (*plasma display panel*) tehnologiju ili katodnu cijev, kao što su kompjutorski monitori i televizori uloga REE je produkcija boje: smjesa itrija i europija daje crvenu boju, terbij-fluor-cinkov sulfid zelenu, a cerij-stroncij sulfid plavu. Također, REE se koriste u proizvodnji optičkih vlakana i lasera. Najvažniju ulogu u proizvodnji lasera ima erbij, a takvi laseri se najviše koriste dermatologiji i stomatologiji za izvršavanje kompliciranih zahvata (Walters i sur., 2015).

REE u proizvodnji stakla imaju široku primjenu: od agensa koji uzrokuju obojenje do agensa koji obojenje uklanjaju, koriste se kod raznih premaza i pri poliranju. Primjerice, cerij se u izrazito malim količinama može koristiti kada je staklu potrebno ukloniti žuto – zeleno obojenje uzokovano željezovim oksidom. Cerij se također u većim količinama koristi kao primjesa ukoliko se staklo želi obojiti u žutu ili smeđu boju. Neodimij boji staklo u crvenu, praseodimij u zelenu, holmij u plavu, a erbij u ružičastu boju. Pri poliranju

staklenih površina najčešće se koriste spojevi cerija, najviše cerijev oksid. Važna karakteristika REE je mogućnost apsorpcije UV zračenja. Zbog toga imaju široku primjenu u proizvodnji premaza za sunčane naočale, leća za fotoaparate i slično. U proizvodnji keramike REE se u smjesu dodaju u obliku oksida s ciljem poboljšavanja otpornosti i čvrstoće konačnog proizvoda, a koriste se i kao primjesa koja uzrokuje obojenje: praseodimij uzrokuje žuto, itrij narančasto, a neodimij ljubičasto obojenje (Walters i sur., 2015).

Ostale primjene REE obuhvaćaju vrlo širok spektar: primjena u nuklearnim reaktorima kod proizvodnje nuklearne energije zbog toga što ostaju stabilni pri vrlo visokim temperaturama, u proizvodnji tehnologije koja je neophodna za državnu sigurnost (optički uređaji, sonari, materijali za izradu letjelica i slično), u medicini – upotreba gadolinija kod detektiranja tumora, magneti REE koji su neophodni za funkcioniranje magnetne rezonance i slično, te u poljoprivredi – spojevi ili smjese REE u nekim zemljama se koriste kao gnojivo (Walters i sur., 2015).

8. REE na svjetskom tržištu

Ležišta REE nisu prisutna u svim dijelovima svijeta. Države koje posjeduju veće zalihe sirovina REE dominiraju svjetskim tržištem i na taj način mogu direktno utjecati na fluktuaciju njihovih cijena. Ovisno o proizvodnji i potražnji, cijene mogu varirati: što je veća proizvodnja, a manja potražnja, cijena je niža; što je proizvodnja manja, a potražnja veća, cijena je viša. Daleko najveće rezerve REE u svijetu ima Kina čime dominira na svjetskom tržištu. Tablica 1. prikazuje procijenjene rezerve oksida rijetkih zemalja (REO) u tonama za Kinu i ostale svjetske zemlje.

Tablica 1. Procijenjene svjetske rezerve oksida rijetkih zemalja (REO) izražene u tonama (Walters i sur., 2015). Zajednica neovisnih država odnosi se na organizaciju koja okuplja većinu država nastalih raspadom SSSR-a; Rusija, Bjelorusija, Ukrajina, Armenija, Azerbajdžan, Kazahstan, Kirgistan, Moldavija, Tadžikistan, Turkmenistan i Gruzija.

ZEMLJA	REZERVA (u tonama)
Kina	50 000 000
Zajednica neovisnih država	19 000 000
Sjedinjene Američke Države	13 000 000
Indija	3 100 000
Australija	1 600 000
Ostale zemlje	22 100 000
SVJETSKA ZALIHA	113 800 000

REE su otkriveni u granitskim pegmatitima pa se začetak industrije temelji na ekstrakciji iz istih. Države koje su bile glavni proizvođači su Indija i Brazil. Godine 1940. otkrivena je prisutnost REE u monacitu u nanosnim ležištima nakon čega Australija i Malezija postaju vodeće na tržištu. Između 1960. i 1980. u Americi se otkrivaju karbonatna ležišta bogata bastnäsitom te ona postaje vodeći svjetski proizvođač REE. Tek nakon 1980. godine Kina počinje eksploataciju REE i preuzima vodstvo na svjetskom tržištu koje traje sve do danas (Walters i sur., 2015).

Trenutna procjenjena vrijednost tržišta REE kreće se u rasponu od 2 do 3 milijarde dolara, što je relativno niska vrijednost u usporedbi sa cijenama na tržištu nekih drugih sirovina/minerala. S obzirom da elemenata rijetkih zemalja ima više i svaki se upotrebljava u svoju (više ili manje) karakterističnu svrhu, višak ili nedostatak određenog elementa na tržištu određuje njegovu cijenu. Na tržištu REE jedan od problema predstavlja činjenica da se REE ne mogu ekstrahirati pojedinačno. To znači da ukoliko postoji povećana potražnja na tržištu za određenim REE, obradom rude dobiva se taj REE, ali i drugi REE koji su prisutni u njoj, što može dovesti do stvaranja prekomjernih zaliha određenih elemenata zbog čega im cijena pada. Tijekom različitih perioda u prošlosti, uvijek je za određenim REE bila veća potražnja nego za ostalima. Primjerice, 1950-ih godina prošlog stoljeća, za izum televizora u boji bio je najpotrebniji europij, a početkom masovne proizvodnje potražnja za njime je drastično porasla. Od 1960-ih drastično raste potražnja za samarijem zbog njegove široke primjene u industriji magneta, a 1980-ih tu ulogu preuzima neodimij. U današnje vrijeme povećana je potražnja za disprozijem i terbijem u odnosu na druge REE (Walters i sur., 2015).

Postoje značajne razlike u cijenama REE na tržištu. Temeljna razlika nalazi se između HREE i LREE, gdje su HREE dosta skuplji zbog njihove slabije zastupljenosti u Zemljinoj kori. Također, važni faktori koji utječu na cijenu pojedinog REE na tržištu su način, troškovi i sama težina procesa obrade rude iz koje se REE ekstrahira te njezina čistoća. Na svjetskom tržištu postoji značajna razlika u cijenama pojedinačnih (čistih) REE i REO. Karakteristično, višlja je cijena pojedinačnih (čistih) REE. Tablica 2. prikazuje deset REE za koje je navedena tržišna cijena po kilogramu u čistom obliku i u obliku oksida izražena u američkim dolarima, a podaci se odnose na 2011. godinu (Walters i sur., 2015).

Tablica 2. Tržišna cijena 10 REE koja se odnosi na 1kg, izražena u američkim dolarima (A. Walters i sur., 2015)

REE	ČISTI REE (\$/kg)	OKSID REE (\$/kg)
Europij	6600 – 6620 \$	5860 – 5880 \$
Terbij	5100 – 5120 \$	4500 – 4520 \$
Disprozij	3400 – 3420 \$	2580 – 2600 \$
Neodimij	465 – 470 \$	335 – 340 \$
Praseodimij	280 – 282 \$	247 – 250 \$
Gadolinij	223 – 228 \$	200 – 210 \$
Itrij	205 – 215 \$	180 – 185 \$
Samarij	189 – 192 \$	127 – 130 \$
Cerij	168 – 170 \$	149 – 151 \$
Lantan	165 – 167 \$	149 – 151 \$

9. Zaključak

Potreba za elementima rijetkih zemalja raste sve više iz godine u godinu. Njihova dobra kemijska i fizička svojstva čine ih jednom od najtraženijih skupina elemenata u velikom broj grana industrije, pa tako i na svjetskom tržištu. Svjetske rezerve su vrlo velike, međutim nejednoliko raspoređene i nisu sva ležišta ekonomski isplativa. S obzirom da je obrada ruda REE skupa, bitno je da ležite bude ekonomski isplativo. Također, problem predstavlja i ekološki aspekt obrade ruda REE – prvenstveno zagađivanje okoliša otpadnim vodama i ispušnim plinovima, što je kontradiktorno svim pozitivnim stranama korištenja REE u industriji, posebice u „zelenoj industriji“. Budući da Kina kontrolira svjetsko tržište REE i da je većina svjetskih zemalja ovisna o uvozu REE, cilj ASTER i EURARE europskih projekata je istražiti teritorij Europe i pronaći ekonomski isplativa ležišta s ciljem da Europa postane neovisna, a moguće i konkurent na svjetskom tržištu.

Moderna tehnologija napreduje iz godine u godinu sve više pa se može zaključiti kako će tehnološka grana industrije imati sve veću potrebu za REE. Razvoj moderne industrije uvjetuje napredak modernog društva što znači da je nakon pronalaska potencijalno ekonomski isplativog ležišta REE potrebno osigurati siguran proces obrade rude koji neće utjecati na okoliš, a posljedično i na zdravlje ljudi.

10. Literatura

AHMED, H.A., MA, C., WANG, L., PALINKAŠ, L.A., GIREI, M.B., ZHU, Y., HABIB, M. (2018): Petrogenesis and Tectonic Implications of Peralkaline A-Type Granites and Syenites from the Suizhou-Zaoyang Region, Central China: *Journal of Earth Science*, 29, 5, 1181-1202, <https://doi.org/10.1007/s12583-018-0877-2>

BERMANEC, V (1999).: *Sistematska mineralogija – mineralogija nesilikata*, Targa, Zagreb, 172, 212 - 213, 226 - 227

BUCKOVIĆ, D. (2006): *Historijska geologija 1 (Prekambrij i paleozoik)*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu - Manualia universitatis studiorum Zagrabiensis, Zagreb, 50

European Commission (2011): *Communication from the commission to the European Parliament, The Council, The European economic and social committee and the Committee of the Regions; Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials*, Brussels, 2. 2. 2011.

Europska komisija (2014): *Komunikacija komisije Europskom Parlamentu, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i Odboru regija o reviziji popisa kritičnih sirovina za EU i provedbi Inicijative za sirovine*, Bruxelles, 26. 5. 2014.

Europska komisija (2017): *Komunikacija komisije Europskom Parlamentu, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i Odboru regija o reviziji popisa kritičnih sirovina za EU i provedbi Inicijative za sirovine*, Bruxelles, 13. 9. 2017.

GOODENOUGH, K.M., SCHILLING, J., JONSSON, E., KALVIG, P., CHARLES, N., TUDURI, J., DEADY, E.A., SADEGHI, M., SCHIELLERUP, H., MÜLLER, A., BERTRAND, G., ARVANITIDIS, N., ELIOPOULOS, D.G., SHAW, R.A., THRANE, K., KEULEN, N. (2016): Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting; *Ore Geology Reviews*, Volume 72, Part 1, 838-856

VAN GOSEN B.S., VERPLANCK P.L., SEAL R.R., LONG K.R., GAMBOGI J. (2017): *Critical mineral resources of the United States - Economic and environmental geology and prospects for future supply; poglavlje O: Rare-earth elements: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802*, 1 – 31 <https://doi.org/10.3133/pp1802O>

WALTERS A., LUSTY P., HILL A. (2011): Rare Earth Elements; British Geological Survey, 1 - 36

YARAGHI A., ARIFFIN K., BAHARUN N. (2019): A Short Review on REE Recovery from Ion-Adsorption Clays. Aspects Min Miner Sci.2(5) AMMS.000550.2019

Internetski izvori

www.geology.com (datum pristupa 20. 8. 2020.)

www.irocks.com (datum pristupa 20. 8. 2020.)

www.wikiwand.com (datum pristupa 20. 8. 2020.)

www.ejatlas.com (datum pristupa 12. 9. 2020.)

www.therussianstone.com (datum pristupa 20. 8. 2020.)

www.gettyimages.com (datum pristupa 12. 9. 2020.)

www.commonswikimedia.org (datum pristupa 14. 9. 2020.)

