

## Nadir Toprak Elementleri ve Yatak Türleri

### Rare Earth Elements and Bed Types

Güllü Kırat 

Doç. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü,  
Yozgat, Türkiye.

*Corresponding author: gullu.kirat@yobu.edu.tr*

*Geliş Tarihi / Received: 28.07.2022*  
*Kabul Tarihi / Accepted: 09.09.2022*

*Derleme Makalesi/Review Article*  
*DOI: 10.5281/zenodo.7130650*

### ÖZET

Nadir toprak element (NTE) cevherleşmesi birincil ve ikincil yataklarda meydana gelir. Birincil yataklar volkanik, granitik, pegmatitik, alkalın-ultramafik ve karbonatitlerle ilişkili yataklar olup, ikincil yataklar alüvyal ve sahil plaser yataklarıdır. Volkanizma ile ilişkili nadir toprak elementleri, genellikle hidrotermal alterasyona maruz kalmış volkanik kayalar içerisinde çatlak veya ince taneli dolgular şeklinde izlenmektedir. Volkanik kayalar özellikle trakit, riyolit ve tüf şeklindedir. Granitik kayalar, magmanın kristalleşmesi sırasında oluşan nadir toprak elementlerini içerir. Pegmatitik kayalardan olan granitik pegmatitler lityum, tantalum ve diğer nadir toprak elementleri için önemli kaynaklar oluştururlar. Alkalın-ultramafik ve karbonatitler ile ilişkili kayalar, genel olarak nadir toprak element ve niyobiyum cevherleşmeleri içermektedir. Karbonatitli kayalar, nadir toprak elementleri dışında filogopit, apatit, vermikülit, provskit, magnetit gibi mineraller için önemli kaynak kayaları oluştururlar. Nadir toprak elementler için önemli olan karbonatitli kayalar, dolomit, kalsit ve alkali ultrabazik kayalar ile köken bakımından ilişkili kayalardır. Nadir toprak element konsantrasyonunun hidrotermal çözünme veya kimyasal ayrışma ile arttığı durumlarda, karbonatitler oluşur. Karbonatitli magma, üst mantodaki karbonatlı peridotitin çok düşük derecelerde kristal fraksiyonasyonu veya kısmi ergimesiyle ile manto kökenli karbonat-silikat eriyiğinden meydana gelebilir. İkincil yataklar genellikle nadir toprak elementleri içeren karbonatitler, pegmatit ve granitik kayaların ayrışması ve taşınması sonucunda oluşurlar. Alüvyal (akarsu) plaserleri, akarsular tarafından taşınan jeolojik malzemelerden oluşurlar. Taşınan malzemede ekonomik öneme sahip nadir toprak elementler, zirkon, monazit, öksenit, brannerit, ksenotim, tantal ve niyobiyum mineralleridir. Bu minerallere plaser yataklarda yaygın bir şekilde bulunan manyetit, kasiterit, kromit, ilmenit, granat, turmalin ve rutil'de değişen miktarlarda yer alır. Sahil plaser yatakları, Avustralya, Brezilya, ABD ve Sierra Leona ve Mısır'da çok geniş alanlara yayılmış oluşumlardır. Genel olarak nadir toprak elementleri, kumlar içerisinde ağır minerallerle birlikte bulunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Nadir toprak element, birincil yataklar, ikincil yataklar.

### ABSTRACT

Rare earth element (REE) mineralization occurs in primary and secondary deposits. The primary deposits are volcanic, granitic, pegmatitic, alkaline-ultramafic and carbonatite-associated deposits, while the secondary deposits are alluvial and coastal placer deposits. Rare earth elements associated with volcanism are generally observed as cracks or fine-grained fillings in volcanic rocks that have been subjected to hydrothermal alteration. Volcanic rocks are especially in the form of trachyte, rhyolite and tuff. Granitic rocks contain rare earth elements formed during the crystallization of magma. Granite pegmatites, which are pegmatitic rocks, constitute important sources for lithium, tantalum and other rare earth elements. The rocks associated with alkaline-ultramafic and carbonatites generally contain rare earth element and niobium mineralizations. Carbonatite rocks form important source rocks for minerals such as phylogopite, apatite, vermiculite, provskit, magnetite, apart from rare earth elements. Carbonatite rocks important for the rare earth elements are rocks associated in origin with dolomite, calcite and alkali ultrabasic rocks. Carbonatites are formed when the rare earth element concentration increases by hydrothermal dissolution or chemical weathering. Carbonatite

magma may be formed from mantle-derived carbonate-silicate melt by very low-grade crystal fractionation or partial melting of carbonate peridotite in the upper mantle. Secondary deposits are generally formed as a result of weathering and transport of carbonatites, pegmatites and granitic rocks containing rare earth elements. Alluvial (fluvial) placers consist of geological materials carried by rivers. The rare earth elements that have economic importance in the transported material are zircon, monazite, euxenite, brannerite, xenotime, tantalum and niobium minerals. These minerals are found in varying amounts in magnetite, cassiterite, chromite, ilmenite, garnet, tourmaline and rutile, which are common in placer deposits. Coastal placer deposits are widespread formations in Australia, Brazil, USA, and Sierra Leonna and Egypt. In general, rare earth elements are found in sands together with heavy minerals.

**Keywords:** Rare earth element, primary deposits, secondary deposits.

## 1. GİRİŞ

NTE'ler 15 lantanit elementini (atom numarası 57 ila 71), itriyumu (Y, atom numarası 39) ve skandiyumu (Sc, atom numarası 21) içermektedir. NTE'leri, La, Pr, Ce, Nd, Sm, Pm, Eu, Tb, Gd, Dy, Er, Ho, Tm, Lu, Yb, Y ve Sc'dir. La'dan Pm'ye kadar olan elementler Hafif NTE'ler olarak adlandırılırken, Sm'den Lu'ya kadar olan elementler ağır NTE'ler olarak adlandırılır (Skirrow ve diğerleri, 2013; ERGI, 2020; PDM, 2020; Gonzalez- Alvarez ve diğerleri, 2021; Aranha ve diğerleri, 2022). NTE'ler, benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan ve bu nedenle doğada birlikte bulunan litofil elementlerdir. NTE'lerin yer kabuğundaki içeriği Ce için 60 ppm ve Tb için ~0.5 ppm'dir ve bu değer, gümüşün (Ag) kabuksal bolluğundan daha fazladır. Dört NTE (Y, La, Ce ve Nd) kurşundan (Pb) daha büyük kabuk bolluğuna sahiptir (Van Gosen ve diğerleri, 2018; Du ve Graedel, 2011). Bununla birlikte, NTE her zaman kolayca çıkarılabilen ekonomik yataklarda yoğun olarak bulunmaz (Van Gosen ve diğerleri, 2018; Du ve Graedel, 2011; Schulz ve diğerleri, 2017; Naumov, 2008; USA, 2008; Hedrick, 2009; Haxel ve diğerleri, 2002; McLemore, 2018).

NTE'ler, üç değerlikli bir yükü ve benzer iyonik yarıçapı paylaştıklarından, yer kabuğunda yaygın olarak bulunurlar. Üç değerlikli yükün dışında kalanlar,  $Ce^{4+}$  değerlik durumunda oluşabilen seryum ve  $Eu^{2+}$  olarak bulunabilen öropyumdur (Van Gosen ve diğerleri, 2017).

NTE maden yatakları, magmatik, sedimanter ve metamorfik kayalarda meydana gelir. Maden yataklarındaki NTE'lerin konsantrasyonu ve dağılımı, magmatik veya hidrotermal akışkanlardaki zenginleştirme dahil kayaç oluşumu ve hidrotermal süreçlerden etkilenir. NTE'lerin zenginleştiği ortamlar genel olarak iki kategoriye ayrılır. Bunlar, magmatik ve hidrotermal süreçlerle ilişkili birincil yataklar ile sedimanter süreçler ve ayrışma ile oluşan ikincil yataklardır. Bu iki grup içinde NTE yatakları, köken ilişkilerine, mineralojisine ve oluşum şekline bağlı olarak daha da alt bölümlere ayrılabilir. Bazı yatakların sınıflandırılması, köken ilişkileri belli olmayan ve/veya çoklu jeolojik süreçlerin dahil olması nedeniyle karmaşıktır. Örneğin, karbonatitlerle ilişkili yataklar, magmatik proseslerle ve kristalleşme ile doğrudan ilişkilidir. Diğerleri ise, damar/yer değiştirme türleri ve artık/yüzeysel ayrışma yatakları veya bunların bir kombinasyonu şeklindedir. Ticari olarak en önemli NTE yatakları, alkali magmatik kayaçlarla ve karbonatitlerle ilişkili magmatik kayaçlardır (British Geological Survey, 2011).

Birincil yataklar, magmatik veya hidrotermal kökenli mineralizasyonun baskın olduğu magmatik kayaçlarla ilişkilidir. Magmatik-hidrotermal sistemin kesilmesinden sonra yerinde kalmıştır. Bu yataklar magmatiklerle ilişkilerine göre alt bölümlere ayrılabilir (Linnen ve diğerleri, 2014):

1. Karbonatitli kayaçlar Nb'un kaynağıdır ve NTE'lerin birçoğu bu kayaçlarda bulunur
2. Peralkali granitik ve silika- doygun olmayan kayaçlar, bu kayaçlardaki mineralizasyon, yüksek NTE–Y–Nb–Zr konsantrasyonları ile karakterize edilmiştir ve bazı durumlarda yüksek konsantrasyonlarda Ta da bulunmaktadır.

3. Metalüminli ve peralüminli granitik kayaçlar, bu kayaçlar dünyanın en önemli Ta yataklarına ev sahipliği yapmaktadır. Bu granitik kayaçların bulunduğu yerlerde, Nb ve Sn cevherleşmesi de mevcuttur. Sn fazlı Ta-Nb granitleri ile Ta-Nb fazlı Sn granitleri arasında derecelenme bulunmaktadır. Pegmatitik kayaçların içerdiği Ta yatakları yaygın olarak Li ve/veya Cs içermektedir.

İkincil yataklar, fiziksel ve/veya kimyasal olarak konsantre edilmiş NTE mineralizasyonlarını içermektedir. Plaser yataklar için Ta, Zr ve Hf çok önemli kaynaklarıdır ve süperjen laterit killeri NTE'ne ev sahipliği yapmaktadır (Linnen ve diğerleri, 2014).

## **2. NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ VE YATAK TÜRLERİ**

### **2.1. Birincil Yataklar**

NTE'ler, büyük iyon yarıçapları nedeniyle tercihen kısmi eriyikler veya üst mantodan gelen sıvılar ve kabuk kaynaklı eriyikler tarafından zenginleştirilmiştir (Möller, 1986). Magmatik ve hidrotermal ortamda NTE mineralleri kuvars ve florit içeren damarlar, breş zonları, skarnlar ve pegmatitler ile ilişkili olabilir. NTE yatağının ekonomik potansiyeli, mineralojisinden ve oluştuğu jeolojik süreçlerden etkilenir. Alkali magmatik kayaçlarla ilişkili olan yataklar, karbonatitler ile ilgili magmatik kayaçlar ve diğeri peralkali magmatik kayaçlar ile ilişkili olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır (Samson ve Wood, 2004; British Geological Survey, 2011).

Dünya çapında, karbonatitler hem NTE'lerin hem de niyobyumun ana kaynağıdır ve ağır NTE'lere'ye göre hafif NTE'lerde önemli zenginleşmeler gözlenir. Karbonatitler tipik olarak kıtasal riftleşme ile birlikte oluşur (Mitchell, 2015). Karbonatitlerdeki en önemli NTE içeren mineraller monazit ve bastnazit'tir (Eimear ve diğerleri, 2017).

Dünyanın NTE yataklarının çoğu, silika bakımından zengin magmalardan çok karbonat bakımından zengin magmalardan türetilen magmatik kayaçlarla ilişkili karbonatitlerdir (Chakhmouradian ve Zaitsev, 2012). Karbonatit magmaları mantodan türetilmiştir, ancak karbonatit magmalarının oluşumundan sorumlu süreçler tartışmalıdır. Karbonatit magma oluşumundan sorumlu olası süreçler arasında birincil manto eriyikleri veya kristal fraksiyonlama yoluyla mantodan türetilen alkali bir eriyiğin evrimi yer alır. Karbonatit magması kristalleştikçe, NTE'ler birincil NTE mineral fazlarında yoğunlaşabilir veya geç evre magmalar veya sıvılarda zenginleşebilir (Van Gosen ve diğerleri, 2017).

Karbonatitler, yüzde 50'den fazla karbonat minerali içeren magmatik kayaçlardır. Üst mantodan karbon dioksit bakımından zengin ve silikadan fakir magmalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Karbonatitler sıklıkla alkalın magmatiklerle ilişkilidir ve genellikle kararlı kratonik bölgelerde, büyük faylanma alanlarında özellikle büyük ölçekli yarık yapıları ile birlikte bulunur. Dünya çapında 500'den fazla karbonatit oluşumu bulunmaktadır ve bunlar Doğu Afrika Rift bölgeleri, doğu Kanada, kuzey İskandinavya, Rusya'daki Kola Yarımadası ve güney Brezilya'dadır (Woolley ve Kjarsgaard, 2008; British Geological Survey, 2011).

Karbonatitlere ek olarak, NTE'lerin alkali magmatik süreçleri, özellikle peralkali magmatizma ile güçlü bir köken ilişkisi vardır. Alkali magmatik kayaçlar, silikat magma ve alkali elementler açısından zengin sıvılardan kristalleşir ve sodyum veya potasyum açısından zengin amfiboller ve piroksenler gibi sodyum ve potasyum içeren mineralleri çökeltir. Alkali magmatik kayaçlar tipik olarak silika içinde doygun değildir ve bu nedenle çok az kuvars içerirler veya hiç içermezler (Van Gosen ve diğerleri, 2017).

Metasomatizma, bir kıta altı litosfer mantosunun genellikle karbonatitik ve alkalın magmanın kaynak bölgesi olduğu düşünülmektedir (örneğin, Jones ve diğerleri, 2013). Ayrıca, metasomatik süreçler, kıta altı litosfer mantosunu NTE'ler dahil uyumsuzluklar açısından zenginleştirdiğinden, metasomatize olmuş kıta altı litosfer mantosunun ceplerinin hem karbonatit hem de alkalın magma ilişkili NTE yatakları için kaynak bölgeler olduğu düşünülmektedir (Duke 2009; Zheng, 2012, 2019; Duke ve diğerleri, 2014; Goodenough ve diğerleri, 2016; Anenburg ve diğerleri, 2021; Jones ve

diğerleri, 2013 Simonetti ve diğerleri, 1995, 1998; Bell and Tilton, 2002; Ernst and Bell, 2010; Bell and Simonetti, 2010; Pirajno 2015; Aranha ve diğerleri, 2022).

Granitik kayaçlar, esas (örneğin, Yichun, Çin; Huang ve diğerleri, 2002) veya yan ürün (örneğin, Pitinga, Brezilya; Basto Neto ve diğerleri, 2009) olarak önemli Ta rezervlerine ev sahipliği yapar. Bu kayaçlar, farklı miktarlarda P, B, Rb ve Cs'nin yanı sıra Li ve F bakımından da zengindir. Cevherleşme, Ta-Nb-Sn oksit mineralleri ile  $W_{\pm}Sn$  (wolframit-kasiterit) periferik kuvars damarlarında yer almıştır (Linnen ve diğerleri, 2014).

Granitik pegmatitler, genel bir granitik bileşime sahip iri taneli magmatik kayaçlar, çeşitli kökenlere sahiptir ve benzer şekilde çeşitli NTE zenginleşmeleri gösterebilir (Be, Cs, Li, B, F, Ta, Rb, Sc, Sn, Nb, NTE, U, Y). Pegmatitler, Cerný (1990, 1991a,b,c) tarafından NTE zenginleştirme modelline dayalı üç petrogenetik gruba ayrılmıştır. Bunlar, Li, Cs ve Ta ile zenginleştirilmiş pegmatitler (LCT grubu), Nb, Y ve F (NYF grubu) ve bu grupların karışımına sahip olanlar (karma grubu) şeklindedir (Ercit, 2005).

Volkanik kayaçlarla ilgili NTE yataklar, genellikle hidrotermal alterasyona maruz kalmış volkanik kayaçlarda veya bu kayaçlarla kesilmiş sedimanter birimlerde çatlak dolguları veya ince taneli olarak bulunur. Volkanik kayaçlar çoğunlukla trakit, riyolit ve tüflerden oluşup, sedimanter örtü birim ise, kumtaşlarıdır. Bu tür yataklarda en yaygın bulunan cevher mineralleri bastnazit, fluorit ve bertrandit bulunurken, barit daha az bulunur (Şahiner ve diğerleri, 2017).

## 2.2. İkincil Yataklar

Plaserler, ekonomik maden yataklarının yüksek yoğunluğa sahip olduğu, ancak kimyasal ve fiziksel bozulmaya karşı çok dirençli olduğu, sahiller ve akarsular gibi bozunmuş molozlardan minerallerin fiziksel konsantrasyonu ile oluşturulan maden yatakları olarak tanımlanır (Sengupta ve Van Gosen, 2016). Bu mineraller arasında dünyadaki en önemli NTE olarak kabul edilen plaserler monazit, bastnazit, ksenotim ve loparit kabul edilmektedir (Zhou ve diğerleri, 2017; Fauzi ve diğerleri, 2021)

Sahil plaserleri, Avustralya, Brezilya, Mısır, ABD ve Sierra Leonna'da çok büyük alanlarda yer almıştır. Genel olarak NTE'ler, kumlarda ağır mineraller ile birlikte bulunmaktadır. Akarsular tarafından kıyıya taşınan kumlar dalgalarla veya gel-git hareketleri yerleşmiştir (Şahiner ve diğerleri, 2017).

## 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma Nadir Toprak Elementleri (NTE) ve yatak türleri hakkında literatürdeki çalışmalar taranarak yazılmıştır. Nadir toprak elementleri birincil ve ikincil yataklarda yer almaktadır. Birincil yataklarda NTE'lerinin birçoğu, karbonat bakımından zengin magmalardan oluşan magmatik kayaçlarla ilişkili karbonatitlerdir. NTE'lerin alkali magmatik süreçleri, özellikle peralkali magmatizma ile köken ilişkisi bulunmaktadır. Volkanik kayaçlarla ilişkili NTE'ler, hidrotermal alterasyona maruz kalmış volkanik çatlak dolguları şeklinde bulunur. İkincil yataklarda yer alan plaserlerde ekonomik maden yatakları meydana gelmektedir.

## KAYNAKLAR

Anenburg, M., Broom-Fendley, S., Chen, W., 2021. Formation of rare earth deposits in carbonatites. *Elements Int. Mag. Mineral. Geochem. Petrol.* 17 (5), 327–332.

Aranha M., Porwal, A. & Gonzalez- ´ Alvarez, I. (2022). Targeting REE deposits associated with carbonatite and alkaline complexes in northeast India. *Ore Geology Reviews*, (148), 105026. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105026>



- Basto Neto, A.C., Pereira, V.P., Ronchi, L.H., de Lima, E.F. & Frantz, J.C. (2009). The world-class Sn, Nb, Ta, F (Y, REE, Li) deposit and massive cryolite associated with the albite-enriched facies of the Madeira A-type granite, Pitinga mining district, Amazonas State, Brazil. *The Canadian Mineralogist* 47, 1329–1357.
- Bell, K., Simonetti, A., 2010. Source of parental melts to carbonatites—critical isotopic constraints. *Mineral. Petrol.* 98 (1), 77–89.
- Bell, K., Tilton, G.R., 2002. Probing the mantle: the story from carbonatites. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 83 (25), 273–277.
- British Geological Survey, (2011). Rare earth elements. *British Geological Survey*, 54pp.
- Cerný, P. (1990). Distribution, affiliation and derivation of rare-element granitic pegmatites in the Canadian Shield: *Geologische Rundschau*, v. 79, p. 183-226.
- Cerný, P. (1991a). Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits: *Geoscience Canada*, v. 18, no. 2, p. 49-67.
- Cerný, P. (1991b), Rare-element granitic pegmatites. Part II: Regional to global environments and petrogenesis: *Geoscience Canada*, v. 18, no. 2, p. 68-81.
- Cerný, P. (1991c), Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies: *Precambrian Research*, v. 51, p. 429-468.
- Chakhmouradian, A.R. & Zaitsev, A.N. (2012). Rare earth mineralization in igneous rocks—Sources and processes: *Elements*, v. 8, no. 5, p. 347–353. [Also available at <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.8.5.347>.]
- Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy, (2008). *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy: Committee on Earth Resources; National Research Council: Washington, DC, USA, 264p, ISBN 0-309-11283-4.*
- Du, X. & Graedel, T.E.(2011). Global in-use stocks of the rare earth elements: A first estimate. *Environ. Sci. Technol.* 45, 4096–4101. [CrossRef] [PubMed]
- Duke, G.I., 2009. Black Hills-Alberta carbonatite–kimberlite linear trend: slab edge at depth? *Tectonophysics* 464 (1–4), 186–194.
- Duke, G.I., Carlson, R.W., Frost, C.D., Hearn Jr, B.C., Eby, G.N., 2014. Continent-scale linearity of kimberlite–carbonatite magmatism, mid-continent North America. *Earth Planet. Sci. Lett.* 403, 1–14.
- Eimear, D., Richard, S. & Kathryn, G. (2017). Research and development for the Rare Earth Element supply chain in Europe. *Eurare*, 40pp.
- Ercit, T.S. (2005). REE-enriched granitic pegmatites, in Linnen, R.L., and Samson, I.M., eds., *Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits: Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes* 17, p. 175-199.
- ERGI, 2020. ERGI, In: *Energy Resource Governance Initiative: Mineral Sector Governance for a Responsible Energy Transformation*, 32.
- Ernst, R.E., Bell, K., 2010. Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites. *Mineral. Petrol.* 98 (1–4), 55–76.
- Fauzi, F.A., Jamil, A.A., Rahman, A.H.A., Mahat Sibon, M. Hj., Hasan, M.S., Zahri, M.F., Ariffin, H. & Sulaiman, A. (2021). REE and Th potential from placer deposits: a reconnaissance study of monazite and xenotime from Jerai pluton, Kedah, Malaysia. *Thai Geoscience Journal*, 2(2), p. 43-60 43. DOI-10.14456/tgj.2021.5
- Gonzalez- ´ Alvarez, ´ I., Stoppa, F., Yang, X.Y. and Porwal, A., 2021. Introduction to the Special Issue, Insights on Carbonatites and their Mineral Exploration approach: A Challenge towards

- Resourcing Critical Metals, Ore Geology Reviews Special Issue 133, 104073, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104073.
- Goodenough, K.M., Schilling, J., Jonsson, E., Kalvig, P., Charles, N., Tuduri, J., Deady, E. A., Sadeghi, M., Schiellerup, H., Müller, A., Bertrand, G., 2016. Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenic provinces and their geodynamic setting. *Ore Geol. Rev.* 72, 838–856.
- Haxel, G.B.; Hedrick, J.B. & Orris, G.J. (2002). Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology; Fact Sheet; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA.
- Hedrick, J.B. Rare Earths (Advanced Release): (2007). Minerals Yearbook; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2009; 20p. Available online: <http://www.usmagneticmaterials.com/documents/USGS-RE-Minerals-Yearbook.pdf> (accessed on 22 January 2018).
- Huang, X.L., Wang, R.C., Chen, X.M., Hu, H. & Liu, C.S. (2002). Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz-lepidolite granite, Jiangxi province, Southern China. *The Canadian Mineralogist* 40: 1047–1068.
- Jones, A.P., Genge, M., Carmody, L., 2013. Carbonate melts and carbonatites. *Rev. Mineral. Geochem.* 75 (1), 289–322.
- Mitchell, R.H. (2015). Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites. *Ore Geology Reviews* 64, 626–641.
- Linnen, R.L., Samson, I.M., Williams-Jones, A.E. & Chakhmouradian, A.R. (2014). Geochemistry of the Rare-Earth Element, Nb, Ta, Hf, and Zr Deposits. *Treatise on Geochemistry* 2nd Edition, 543-564, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01124-4>
- McLemore, V.T. (2018). Rare Earth Elements (REE) Deposits Associated with Great Plain Margin Deposits (Alkaline-Related), Southwestern United States and Eastern Mexico, Resources, 7, 8, 2-44pp. ; doi:10.3390/resources7010008
- Möller, P. (1986). Rare Earth Mineral Deposits and their Industrial Importance. In: Möller, P, Cerný, P, and Saupé, F. Lanthanides, Tantalum And Niobium. Proceedings of a workshop in Berlin, November 1986. Springer Verlag.
- Naumov, A.V. (2008). Review of the world market of rare-earth metals. *Russ. J. Non-Ferrous Met.* 49, 14–22.
- PDM, 2020. Programa mineração e desenvolvimento, Plano de metas e ações ~ 2020/2023. Portaria MME 354, 15.
- Pirajno, F., 2015. Intracontinental anorogenic alkaline magmatism and carbonatites, associated mineral systems and the mantle plume connection. *Gondwana Res.* 27 (3), 1181–1216.
- Samson, I.M. & Wood, S.A. (2004). The rare earth elements: behaviour in hydrothermal fluids and concentration in hydrothermal mineral deposits, exclusive of alkaline settings. In: Linnen, R L, and Samson, I M. Rare-element geochemistry and mineral deposits. Geological Association Of Canada Short Course Notes Volume 17. Geological Association Of Canada, 269–298.
- Schulz, K.J., De Young, J.H., Jr., Bradley, D.C. & Seal, II. R.R. (2017). Critical mineral resources of the United States—An introduction, chap. A. In *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*; Professional Paper 1802; Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, Bradley, D.C., Eds.; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2017; pp. A1-A14.
- Skirrow, R.G., Huston, D.L., Mernagh, T.P., Thorne, J.P., Duffer, H., Senior, A., 2013. Critical commodities for a high-tech world: Australia's potential to supply global demand. *Geoscience Australia*, Canberra.

- Simonetti, A., Bell, K., Viladkar, S.G., 1995. Isotopic data from the Amba Dongar carbonatite complex, west–central India: evidence for an enriched mantle source. *Chem. Geol.* 122 (1–4), 185–198.
- Simonetti, A., Goldstein, S.L., Schmidberger, S.S., Viladkar, S.G., 1998. Geochemical and Nd, Pb, and Sr isotope data from Deccan alkaline complexes— inferences for mantle sources and plume–lithosphere interaction. *J. Petrol.* 39 (11–12), 1847–1864
- Şahiner, M., Akgök, Y.Z., Arslan M. & Ergin, M.H. (2017). Dünyada ve Türkiye’de Nadir Toprak Elementleri (Nte), Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara, Türkiye, Maden Serisi:5, Eylül 2017, 28 Eylül 2020, Mevcut adres: [https://enerji.mmo.org.tr/wpcontent/uploads/2019/05/dunyada\\_ve\\_turkiyede\\_nadir\\_toprak\\_elementleri.pdf](https://enerji.mmo.org.tr/wpcontent/uploads/2019/05/dunyada_ve_turkiyede_nadir_toprak_elementleri.pdf).
- Van Gosen, B.S., Verplanck, P.L., Seal, II, R.R., Long, K.R. & Joseph, G. (2017). Rare-earth elements, chap. O of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., *Critical mineral resources of the United States— Economic and environmental geology and prospects for future supply*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. O1– O31, <https://doi.org/10.3133/pp1802O>.
- Van Gosen, B.S., Verplanck, P.L., Seal, II, R.R., Long, K.R. & Gambogi, J. (2018). Rare-earth elements, chap. O. In *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*; U.S. Geological Survey Professional Paper 1802; Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, Bradley, D.C., Eds.; United States Geological Survey: Reston, VA, USA, 2017; pp. O1–O31. *Resources* 2018, 7, 8 35 of 44
- Woolley, A.R., & Kjarsgaard, B.A. (2008). Carbonatite occurrences of the world: map and database *Geological SURVEY of Canada*, Open file report 5796.
- Zheng, Y.F., 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem. Geol.* 328, 5–48.
- Zheng, Y.F., 2019. Subduction zone geochemistry. *Geosci. Front.* 10 (4), 1223–1254.
- Zhou, B., Li, Z. & Chen, C. (2017). Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals*, (7), 203–217. doi:10.3390/min7110203