

A ritkaföldfém-bányászat jelene és perspektívái a világban

The present and perspectives of rare earth elements mining in the world

JANCSEK KRISZTIÁN

PhD-hallgató



A felgyorsult digitalizáció és automatizáció korszakába lépve egyre nagyobb az igény a ritkaföldfémekre. Számos lelőhelyet tartanak számon, de kevés esetében történt meg az ásványvagyon felmérése. Elsősorban karbonátitokhoz és alkáli magmás tevékenységekhez köthetőek a legjobb minőségű telepek. Az utóbbi években megtörni látszik a kínai hegemonia mind a kitermelés, mind a készletek tekintetében. Egyre több ország folytat kiterjedt kutatásokat és jelenik meg a ritkaföldfémpiacon. Ezzel párhuzamosan Európa fáziskésésben próbálja behozni a lemaradását és felmérni a saját nyersanyag-potenciálját.

Kulcsszavak: ritkaföldfém-bányászat, lelőhelyek, hegemonia

As we enter the accelerated automation era and the so-called green revolution, the demand for rare earth elements (REE) grows. But what are these elements? Fifteen of them belong to the lanthanoids or lanthanides: lanthanum (La), cerium (Ce), praseodymium (Pr), neodymium (Nd), promethium (Pm), samarium (Sm), europium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), thulium (Tm), ytterbium (Yb), lutetium (Lu), as well as yttrium (Y) and scandium (Sc) from the transition metals. The main REE ore-minerals are bastnäsite, monazite, loparite and ion adsorption clays. The first three occur in carbonate or phosphate primary deposits, while the clay type of enrichments is related to sedimentation.

There are many deposits around the globe, but few have been assessed so far. In recent years, the Chinese hegemony in extraction and resource/reserve evaluation seems to be breaking down. More and more countries are entering the rare earth elements market and conducting explorations. That is welcome news in respect of mutual raw material security, especially in the shadow of global phenomena such as the coronavirus, chip shortages, or monopoly situations. At the same time, Europe is trying to catch up and assess its raw material potential somewhat behind schedule.

The following conclusions are made about the world's rare earth deposits and their potential. China, the most dominant player in the market, has vast carbonatite and hydrothermal mineralization. Mining of ion adsorption clays is significant too. The next big player in rare earth mining in Asia could be Vietnam, but Russia and India also have enormous reserves. Looking at North America, the USA is dominated by carbonatite deposits, such as Elk Creek, while in Canada, they are more of hydrothermal origin. In South America, Brazil is considered to have the third largest reserves of rare earths. Australia is a dominant player both in extraction and in terms of net mineral wealth. Africa's rare earth mining occurs in Madagascar from high-quality ion adsorption plants. The Republic of South Africa has one of the best monazite deposits in the world. Additional carbonatite deposits occur in the Democratic Republic of Congo, Tanzania, etc. The dependence of the European Union on raw materials and the achievement of the climate goals set in the Green Deal can be promoted by such crucial discoveries as the Swedish Per Greijer deposit this year. Europe's more well-explored raw material deposits are located in Scandinavia and Greenland, such as the carbonate Fen, Alnö, or the complex peralkaline Kvanefjeld. Many European Raw Material Alliance partners are exploring further opportunities across the continent.

Keywords: rare earths elements mining, deposits, hegemony

Napjainkban a felgyorsult digitalizáció, automatizáció az életünk minden területére kihat. De ez még csak a kezdet! Hamarosan beléphetünk az ipar 4.0 korszakába, aminek köszönhetően az információáramlás, digitalizáció és robotizáció gyökeresen változtatja meg az életünket. Ennek megfelelően, évről évre nő az emberiség nyersanyagigénye. A kutatókat és döntéshozókat egyre inkább foglalkoztatja, hogy a jövőben milyen forrásból és milyen technológiával tudjuk majd kielégíteni ezt az igényt. A ritkaföldfémeknek más nyersanyagokkal együtt kiemelt szerep jut. Ebben az értekezésben röviden bemutatom a ritkaföldfémeket általánosságban, szerepüket a modern gazdaságban, valamint a legfontosabb lelőhelyeiket a világban, és felvillantom a hozzájuk kapcsolódó nyersanyagpolitikai kérdéseket.

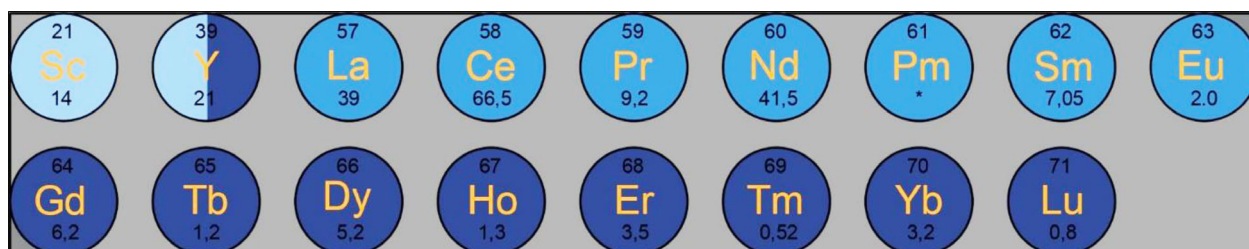
1. A ritkaföldfémekről általában

A ritkaföldfémek nem annyira ritkák, mint azt a nevük sugallja, hanem a természetben kevés helyen dúsultak fel [1]. Jó példa erre a cérium, amelynek átlagos földkéregbeli koncentrációja a rézével mérhető össze. De mik is ezek a ritkaföldfémek? A ritkaföldfémekhez 17, a hétköznapi ember számára szinte teljesen ismeretlen elemet szokás sorolni, közülük 15 lantanoidákhoz vagy másnéven lantanidákhoz tartozik: lantán (La), cérium (Ce), praezodímium (Pr), neodímium (Nd), prométium (Pm), samárium (Sm), eurórium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), diszprórium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), túlium (Tm), itterbium (Yb), lutécium (Lu), valamint az átmeneti fémektől kettő az ittrium (Y) és szkandium (Sc) tartoznak ide (1. ábra) [2, 3]. Prométium a természetben nem vagy csak nagyon ritkán fordul elő [4]. A leggyakoribb osztályozásuk az atomtömegem alapján, és ennek alapján megkülönböztetünk könnyű (LREE), nehéz (HREE), és bizonyos esetekben középső (MREE) ritkaföldfémeket (1. ábra). Legújabbán egy, a kritikuságra vonatkozó kategóriát, a kritikus ritkaföldfémeket (CREE) is bevezettek [5]. A ritkaföldfémek rendkívül hasonló fizikai és kémiai tulajdonságokkal rendelkeznek. Fontos megjegyezni a lantanoidakonttrakciót, azaz azt a jelenséget, hogy a lantántól kezdve

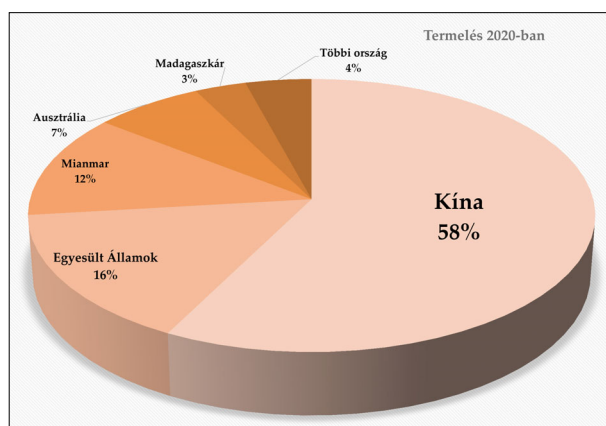
a lutéciumig a rendszám növekedésével az ionsugár folyamatosan csökken [6].

A ritkaföldfém-ásványokat és a hozzájuk köthető feldúsulásokat létrehozó folyamatokat két csoportra lehet bontani. A magmás és hidrotermális tevékenységek hozzák létre az elsődleges telepeket, míg a másodlagos lelőhelyeket a lepusztulás-üledékképződés kettőse eredményezi. Az elsődleges telepeket tekintve az alkáli-peralkáli magmás kőzetekhez és karbonatitokhoz köthetőek a legjobb minőségű telepek. Ehhez kapcsolódóan a reagens ritkaföldfémek a természetben számos ásványban megtalálhatóak, legyenek azok szilikátok, karbonátok vagy foszfátok [6]. Jelenleg mintegy 200–250 ilyen ásványt ismerünk, de gazdasági értékkel a mai technológiai színvonalon kizárólag a komplex összetételű bastnäsit (Ce,La)CO₃(F,OH₄), monacit (Ce,La,Nd,Th)PO₄, loparit (Na,Ce,Sr)(Ce,Th)(Ti,Nb)₂O₆ rendelkeznek, az ionadszorpciós agyagokkal kiegészülve [6]. Gyakran más ásványokkal együtt bányásszák ezeket [7].

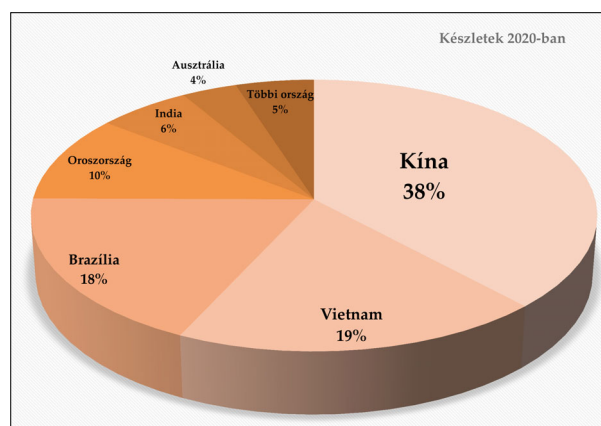
A közelmúltban Barakos és társai (2016) összesen több mint 400 potenciális ritkaföldfém-lelőhelyről és kapcsolódó projektről számoltak be [5]. Ugyan ez elsősre megnyugtathatónak tűnik, azonban e lelőhelyeknek csupán a töredéke van a teljes felmérés és készletszámítás szintjén. Sőt a cikk írásakor az Egyesült Államok Geológiai Szolgálatának (USGS) utolsó, 2021-ben elkészült és a 2020-as évre vonatkozó jelentése még inkább árnyalja a képet. A 2. és 3. ábrán látható, hogy a ritkaföldfémek bányászatának 96%-áért mindössze öt ország felel: Kína, Egyesült Államok, Mianmar, Ausztrália és Madagaszkár, sorrendben 140, 38, 30, 17 és 8 kilotonnás ritkaföldfémoxid- (REO-) termeléssel. Igaz, hogy a korábbi évekhez képest Kína részaránya valamelyest csökkent, mégis önmagában, majdnem a világ termelésének 60%-át adja. Ez az arány bizonyosan magasabb lehet, mivel meglehetősen gyakori az illegális bányászat az országban. Az ásványvagyonok tekintetében hasonló a helyzet. A jelenlegi megkutatottság alapján Kína, Vietnam és Brazília hármasa birtokolja a készletek háromnegyedét, azaz a feltételezett 120 millióból 87 millió tonnát.



1. ábra. Ritkaföldfémek csoportosítása. Halványkék: szkandium és ittrium; világoskék: könnyű ritkaföldfémek (LREE); sötétkék: nehéz ritkaföldfémek (HREE). Az egyes elemek rövidítései felett a rendszám, míg alul az átlagos földkéregbeli gyakoriságuk van feltüntetve, ppm-ben megadva. * A prométium a természetben nem fordul elő



2. ábra. Ritkaföldfém-termelés országok szerinti megoszlása a 2020-as év során



3. ábra. Ritkaföldfémkészletek országok szerinti megoszlása a 2020-as év során

A ritkaföldfémeket az ipar számos területén használják fel: mágnesek, katalizátorok, fenntartható és megújuló energiatermelés (napelem, szélenergia), telekommunikációs eszközök, nemzetvédelmi és csúcstechnológiás katonai eszközök (éjjellátó távcsövek stb.) és e-mobilitás [2, 8–11]. Természetesen az egyes technológiák eltérő mennyiségben igénylik a 17 elem valamelyikét, viszont általánosságban a kevésbé gyakori HREE elemek, pl. Tb és Dy számítnak ellátottság szempontjából fokozottan kritikusnak. Az iparban betöltött szerepüket jól jelzi, hogy évente kb. 6–10%-kal növekszik a felhasználásuk, ami a zöld technológiák térnyerésével tovább fokozódhat [10]. Egy korábbi, óvatossággal becsült alapján 2035-ig 350–400 ezer tonna lesz az emberiség éves ritkaföldfémigénye, amely közel duplája a jelenlegi felhasználásnak [7]. Nem egyszerű megjósolni a jövőbeli igényeket, hiszen a technológiai innovációk fejlesztése minden eddiginél gyorsabban zajlik, pl. a ritkaföldfémek egyik fő és dinamikus fejlődő piacát az elektromobilitást tekintve. Bizakodásra ad okot, hogy ez idáig a termelés tudta fedezni az igényeket.

A ritkaföldfémipar számára azonban intő jelek is akadnak, amire jó példa a jelenleg zajló globális mikrochiphiány. Ezt a jelenséget három tényező együttes hatása alakítja, a 2020-ban berobbant koronavírus-járvány, az Egyesült Államok és Kína között zajló kereskedelmi háború és különböző természeti csapások, mint a tajvani aszály [12]. Tajvan felel a globális mikrochipgyártás jelentős részéért. A koronavírus-járvány hatására az otthoni munkavégzésre és kikapcsolásra kényszerült emberek hatalmas mennyiségben kezdtek el felvásárolni az elektronikai eszközöket. A lezárásoktól sújtott és ellátási gondokkal küzdő elektronikai ipar törekedett az ugrásszerűen megnövekedett kereslet kielégítésére, méghozzá a hibrid- és elektromosautó gyártásának rovására. Elsősorban a félvezetők, pl. szilícium hiánya okozta ezt az autóiipari válságot, azonban nem szabad arról sem megfeledkezni, hogy az elektromotorokhoz

ritkaföldfémeket is felhasználnak. Ennek ellenére ritkaföldfémhiány nem lépett fel, a kínai export így is 20%-ot esett 2020 első hónapjaiban az egy évvel korábbi teljesítményhez képest [13]. Belátható, hogy egy járvány, az egyre gyakoribbá váló szélsőséges időjárási jelenségek vagy éppen egy ország monopolhelyezete, akár az egész világ nyersanyag-előállítására is kihathat.

A fentebb taglaltak alapján a cikk további részében az egyes régiók ritkaföldfém-bányászatát ismeretemen röviden, kiemelt fókuszba helyezve Kínát és a szempontunkból fontos Európai Uniót.

2. Kína

Ahogy láthattuk, a 2. és 3. helyen lévő, 140 kilotonnás termeléssel és 44 millió tonnás készletével jelenleg Kína a ritkaföldfém-bányászat legmeghatározóbb szereplője. Azonban Zhou és társai (2017) szerint a ritkaföldfémipacot tekintve már beléptünk a 'posztkínai' korszakba, amit a 2009 óta egyre csökkenő, államilag szabályozott kínai termelés is alátámaszt [14]. Ennek legfőbb oka a kínai kormány protekcionista szemlélete, mely szerint nemzetbiztonsági érdek a ritkaföldfémek felhalmozása, a hazai ipar kiszolgálása és az export arányának csökkentése [15]. Szintén jelentős tényező a kínai kormány határozott fellépése az illegális nyersanyagbányászat és a feketeipari értékesítés ellen, amelyek jelentős arányt képviseltek és bizonyosan ma is képviselnek a kínai kitermelésben [16]. Az illegális bányászat gyakran környezetkárosító tevékenységekben nyilvánul meg [5]. A kínai ritkaföldfémipar igazi ereje és előnye abból fakad, hogy az egyetlen ország, ahol a termelés mellett teljes ritkaföldfémeket feldolgozó ipar és ellátási lánc épült ki [14].

A kínai termelés döntő része a bastnäsit és monacit ásványok bányászatából származik, melyeket az ionadszorpciós agyagok és a loparit követ [14]. A legfontosabb kínai telep a Belső-Mongóliában talál-

ható Bayan Obo, amely a világ legnagyobb ritkaföldfém-lelőhelye [17]. Komplex REE-Nb-Fe ércesedése dolomitot átmetező karbonattitlérekben alakult ki [f4]. A legfontosabb ritkaföldfémásványok a bastnäsite és a monacit; nióbium elsősorban fergusonit-hoz és kolumbit-hoz, míg a vas magnetit-hoz és hematit-hoz köthető [18]. A ritkaföldfémeket a vasércbányászat során keletkezett meddőhányókból nyerik ki [19]. A pontos nyersanyagkészlet nem ismert. További fontos, jelenleg is kitermelés alatt álló karbonattit-lelőhelyek, a Miaoya szienit-karbonatit komplexum, bastnäsit, parisit, monacit ércesedéssel; a Maoniuping, amely Kína második legnagyobb lelőhelye, és az ércstest szieniteket átszővő erekben képződtek; valamint a tipikusan karbonatitban kialakult hidrotermális Weishan lelőhely [19].

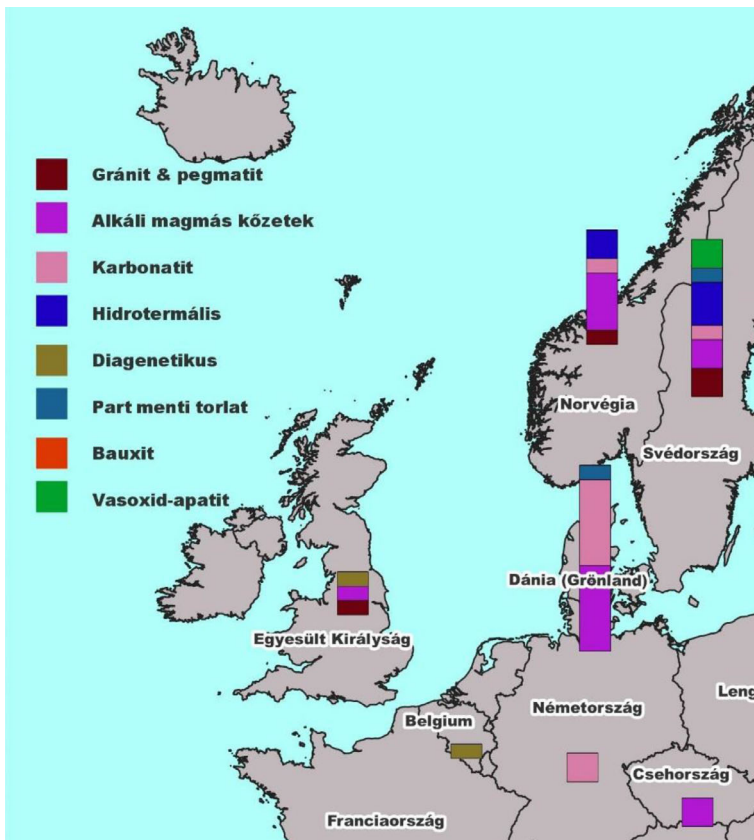
A kínai lelőhelyek másik nagy csoportját az ionadszorpciós agyagtelepek képviselik. Ezek úgy jönnek létre, hogy a csapadékosabb területeken, a magas hőmérsékletű talajvizek kilúgozzák a ritkaföldfémeket, melyeket ezután a gránitos anyakőzetben képződött agyagtalajok gyengén megkötik. A teljes kínai készletnek mindössze 3%-át adják a gyenge minőségű (0,03–0,50% REO) ionadszorpciós telepek. Gazdasági értékük mégis kiemelkedő, mivel az egész világon a bányászható közepes és nehéz ritkaföldfémek mintegy 80%-a ezekben a telepekben található, és a gyengén kötött ionok könnyen újra mobilizálhatók a különböző kioldásos (leaching) technológiákkal [8]. Az ionadszorpciós telepek Dél-Kínában fordulnak elő, mely régió egybeesik az illegális bányászat fő területével [14].

3. Az Európai Unió ritkaföldfém-politikája

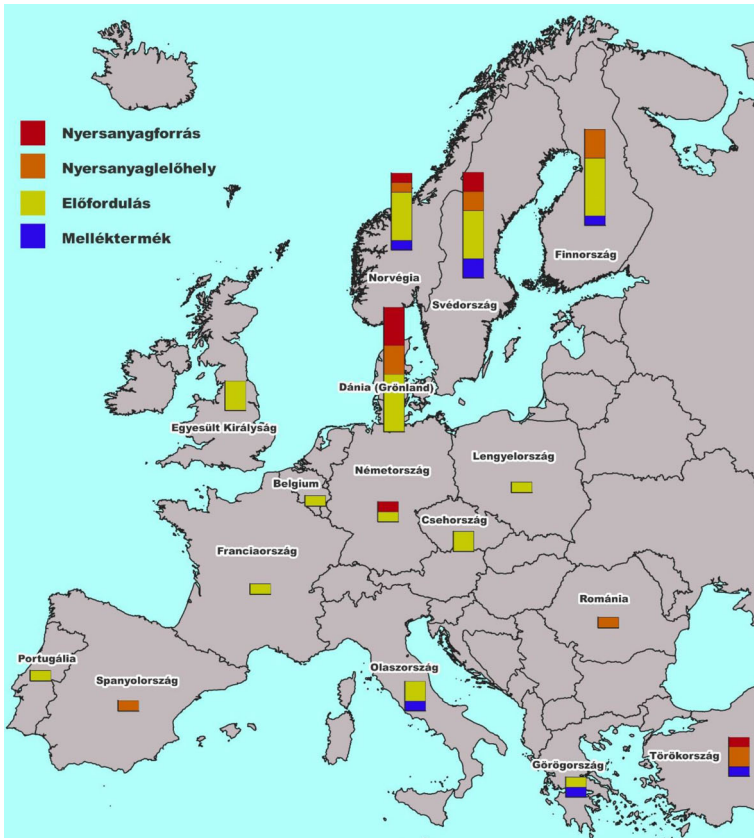
2019 decemberében az Európai Unió Bizottsága közzétette az „európai zöld megállapodás” (Green Deal) című stratégiai elképzelését, melyben vázolják a 2050-ig kitűzött klímacélokat. Ennek alaptétele a karbonsemlegesség elérése és ezzel párhuzamosan az uniós polgárok általános jólétének megteremtése és fenntartása. Ezen ambiciózus célok megvalósításához többek között a megújuló erőforrások és az atomenergia kiaknázása a kulcs. Ezeknek erőforrásoknak a kiaknázásáról megoszlanak a vélemények mind a szakértői körökben, mind pedig a közvéleményben. A bevezetésben már láthattuk, hogy a zöld technológiák alkalmazásakor a ritkaföldfémek – ha kis mennyiségben is – nélkülözhetetlenek. Itt kezdődnek a problémák. Az 1860-as években tetőző csúcsot követően folyamatosan csökken Európa aránya a világon folyó bányászatban, és a 2000-es évek eleje óta gyakorlatilag pár százalékon stagnál. Ily módon nem meglepő, hogy az Unió a legtöbb nyersanyagból, köztük a ritkaföldfémekből is behozatalra szorul. Sőt, ez utóbbiak szinte kizárólagos importforrása Kína, ami

már önmagában veszélyezteti az Unió tagállamok nyersanyagbiztonságát. Ehhez kapcsolódik a kritikus elemek listája, amelynek utolsó, 2020-ban kiadott jelentése – összesen 30 – az Unió jövőbeli boldogulásához és fejlettségének megőrzéséhez kulcsfontosságú, de ellátási kockázatot jelentő nyersanyagot tartalmaz, mint pl. ritkaföldfémek, lítium, magnézium stb. A kritikus elemek listáját is jegyző Európai Nyersanyag-szövetség, röviden ERMA (European Raw Material Alliance) felel a nyersanyagbiztonsági lehetőségek és projektek előkészítő kutatásának EU szintű finanszírozásáért és kivitelezéséért. A szervezet jelenleg több mint 130 céget, 50 szervezetet és 20 egyetemet, valamint több száz kutatót tömörít.

A Goodenough és társai (2016) által összegyűjtött adatokból a 4. és 5. ábrán láthatók a különböző európai ritkaföldfém-lelőhelyeket típus és a megkutatottság szintje alapján bemutató térképek [20]. Az előfordulások négy csoportba sorolhatók: feltáratlan nyersanyagforrás, megkutatott nyersanyag-lelőhely, termelői előfordulás és másodlagos melléktermék-kinyerés. Megfigyelhető, hogy a jelenlegi megkutatottság és készletfelmérések alapján Grönland és a Skandináv-félsziget országai rendelkeznek a legtöbb potenciális érccel. Grönland annyira felértékelődött, hogy az Egyesült Államok korábbi elnöke, Donald Trump megkísérelte megvásárolni a dán autonóm területet, míg a jelenlegi amerikai vezetés gazdasági segélycsomaggal kívánja szorosabbra fűzni a viszonyt a helyiakkal. A sziget déli részén, a Gardar Provincia alkáli intrúzióhoz kapcsolódóan három kiemelkedő minőségű telepet találunk, a Motzfeldt Sø, a Kringlerne és a Kvanefjeld lelőhelyeket. Utóbbi kettő a több mint egymilliárd éves Ilímaussaq intrúzió és az Igaliko Nefelinszenit Komplexumon belül helyezkedik el. A Kvanefjeld projekt az egyik legígéretesebb a világon [21]. Jelentőségét annak köszönheti, hogy a komplex lelőhely, összesen mintegy 437 millió tonna ritkaföldfém-, urán-, lítium-, cirkónium- és fluorércet tartalmaz [22]. Az anyakőzet a lujavrit nevű peralkáli szienit változat, mely ritka, nagy térejeű elemekben (Zr, Nb, Ta stb.) gazdag ásványokat, mint pl. steenstrupint, lovozeritet tartalmaz [23]. Hasonló kőzetekkel Grönlandon kívül az orosz Kola-félszigeten és Dél-Afrikában találkozhatunk [24]. A grönlandi ritkaföldfémvagyoneért felelős képződmények másik nagy csoportja a karbonatitok, melyek a sziget nyugati felén helyezkednek el. Legjelentősebb telepei a Sarfartoq, Qaqarssuk és a Tikiussaq, ahol főleg különböző fluorokarbonát ásványok, quarssukit, szinchizit és a Tikiussaq esetében a monacit a fő ritkaföldfém-hordozók. A sziget érceinek jövőbeli kiaknázásával összefüggésben azonban határt szabhat a grönlandi parlament tavaly novemberi határozata, mely szerint az uránérc-kutatást és -bányászatot egyaránt megtilt



4. ábra. A ritkaföldfém-lelőhelyekkel rendelkező országok és a lelőhelyek genetikai típusai



5. ábra. A ritkaföldfém-lelőhelyekkel rendelkező országok és a lelőhelyek megkutatottság szerinti típusai

ják a területen, amely intézkedés különösen hátrányosan érinti a Kvanefjeld projektet.

Grönland szigetét elhagyva térjünk rá a Skandináv-félszigetre! A 4. és 5. ábrán feltüntetett európai lelőhelyek majdnem fele található Norvégiában, Svédországban és Finnországban. A valószínűleg ez az arány bizonyosan még magasabb lehet, hiszen a proterozóikum-i orogének során számos gránithoz és pegmatithoz köthető előfordulást ismerünk részletezés nélkül. A Japetus-óceán felnyílását (~580 millió év) követően létrejött norvég Fen és a svéd Alnö lelőhelyek tipikus képviselői a sövitteléreket tartalmazó karbonatitlepeknek [25, 26]. A korábban vasércre és nióbiumra bányászott Fen a számítások alapján 84 millió tonna, 1,08% TREO-s minőségű kimutatott ásványvagyonnal rendelkezik [20]. Az Alnö Alkáli Komplexum Svédország egyik legjobb minőségű telepe számos ritkaföldfémásványt tartalmaz, mint pl. a monacit, apatit, szinchizit, eszchinit stb. Norra Kärr a legjobban megkutatott és termelésre előkészített svéd előfordulás. Finnország területén alkáli- és karbonatitlepek fordulnak elő. Számos további lelőhely és előfordulás található a skandináv országokban, de bővebb bemutatásukra ebben az értekezésben nincs lehetőség.

Európa többi részén is találhatunk kutatásra érdemes telepeket. Nyugat-Európában az alkáli magmás anyakőzetű telepek közül a skóciai Loch Loyal Szienit Komplexumot lehet kiemelni, melynek Cnoc nan Cuilean nevezetű intrúziója jelentős mennyiségben és 2% TREO-s minőségben tartalmaz ritkaföldfémeket, főként fluorapatit- és allanitásványokban [27]. Az Egyesült Királyság, Franciaország, Belgium és Portugália paleozoós üledékes medencéiben egyaránt megtalálhatóak a gyenge minőségű, diagenetikus eredetű gumós monacittelepek [20]. Dél- és Délkelet-Európában változatos lelőhelyekkel és előfordulásokkal rendelkezik. Alkáli magmás telepek közül elsősorban a spanyol Galiñeiro Komplexum ismert. A gneisz anyakőzetben hidrotermális hatás eredményeként jöttek létre bastnäsit-, allanit-, tantál- és nióbiumásványok, valamint foszfátok,

mint pl. xenotim és monacit [28]. Hidrotermális eredetű a török Kizilcaören is. Karbonatit-előfordulások Törökországban és Olaszországban jelennek meg. Jelentős csoportot képviselnek a gumós monacit-hasonlóan másodlagos telepek közé sorolt part menti torlatok, melyek főként Görögországra, Törökországra és Olaszországra jellemzőek [29]. A torlatokban elsősorban monacit, ritkábban xenotim található meg [30]. Jelenleg kiaknázatlan, de nagy potenciál rejlik a bauxit feldolgozásakor, a Bayer-eljárás során melléktermékként keletkező vörösiszapban is, melyben feldúsulnak a bauxit agyagásványai által megkötött ritkaföldfémek. Deadly és társai (2014) szerint a főleg Dél-Európára és a Balkánra szorítkozó alumíniumgyártás évente 1,4 millió tonna vörösiszapot eredményez, ezekben a ritkaföldfémek koncentrációja a 900 ppm-t is elérheti [31]. Goodenough és társai (2016) által összegyűjtött ritkaföldfém-lelőhelyek közül csak néhány található Közép-Európában [20]. Három karbonatit ismert a régióban, Delitzsch és Kaiserstuhl Németországban, valamint Tajno Lengyelországban. A Delitzsch lelőhely az egyetlen, amelyre készletfelmérés történt. A kimutatott és következtetett vagyon mintegy 4,4 millió tonnára tehető 0,45%-os TREO-val [30]. Csehországban és a szomszédos Romániában alkáli magmás telepek fordulnak elő. Utóbbi esetében a hazai kutatók által is jól ismert Ditrői Alkáli Masszívum Jolotca és Belcina területein ritkaföldfémekben gazdag karbonátterek szövik át a nefelinszenites összletet [32].

4. A világ többi része

Észak- és Dél-Amerika

Habár 2020-ban a második legnagyobb ritkaföldfém-kitermelő az Egyesült Államok volt, nyilvántartott készlete kevésbé jelentős (1,5 millió tonna). Elsődleges kitermelés kizárólag az 1950-es évek óta kisebb megszakításokkal üzemelő kaliforniai Mountain Pass bányában zajlott. Ez a világ második legnagyobb ismert lelőhelye, ahol a karbonatitos érctelep shonkinit – szienit – gránitösszletbe nyomult képződményekben alakult ki. Az elsődleges ércásvány a bastnásite, míg alárendelten parisitet és monacitot bányásznak [4]. Az Egyesült Államok legígéretesebbnek tűnő új bányájának a megnyitását a nebraskai Elk Creek mellett tervezik. Itt található az ország legnagyobb karbonatit eredetű nióbiumlelőhelye, amelyhez szkandium és titán is társul [36]. Az előzetes tervek alapján a minimális környezeti terheléssel járó projektet mind a helyi döntéshozók, mind pedig a közvélemény döntő többsége támogatja. A teljes készletről nem áll rendelkezésre információ. Szintén karbonatit-hoz köthető a wyomingi Bear Lodge projekt, melynek keretében 498 ezer tonna teljes ritkaföldfém-oxidokkal egyen-

értékű ásványvagyonot prognosztizálnak. A szomszédos Kanada esetében 15 millió tonnás ásványvagyonot és 830 ezer tonnás készletet tartanak nyilván. A Strange Lake és Thor Lake/Nechalacho nevezetű lelőhelyek hidrotermális eredetűek, míg a Saint-Honoré Komplexum területén, az egyetlen működő kanadai bánya bastnásite ércesedése kevert magmás hidrotermális eredetű [37]. Dél-Amerikában egyedül Brazíliát tartják számon a ritkaföldfémvagyonot illetően. Az ország 21 millió tonnás készlete a harmadik legnagyobb a világon. Annak ellenére, hogy két helyen, Araxá és Catalao települések közelében is bányásznak ritkaföldfémeket karbonatitból, a mostani 1000 tonnás termelés csekély. Az elsődleges források leginkább foszfátok, xenotim, monacit és apatit.

Ázsia többi országa

Kína mellett más ázsiai országok is jelentős termeléssel és ércvagyonnal rendelkeznek. 2020-ban Kína és az Egyesült Államok mellett 30 ezer tonnával Mianmar volt a harmadik legnagyobb ritkaföldfém-kitermelő ország. A készletekről jelenleg nincsen információ. Brazíliához hasonlóan Vietnam bányászata a maga 1000 tonnájával is eltörpül az ásványvagyon mellett, amely 22 millió tonnára tehető. Két legfontosabb lelőhelye az Északnyugat-Vietnamban, egymástól mindössze 40 km-re található a szienites alapközet mállásával keletkezett laterites Dong Pao és karbonatit-metaszomatikus eredetű Nam Xe [38]. A Dong Pao mállott zónájában a LREE elemek koncentrációja a 10 tömeg%-t is eléri [39]. Tekintélyes ásványvagyonnal rendelkezik Oroszország és India is, melyek így a negyedik és ötödik helyen állnak. Az orosz vezetés nagy reményeket fűz a Jakutföld területén található Tomtor érctelephez, melynek kiaknázásával 2025-re önellátóvá válhat az ország. A lelőhely a maga nemében egyedülálló, a 11,4 millió tonnás ásványvagyonhoz 10% feletti ritkaföldfémoxid-koncentráció társul [40]. India elsősorban a parti torlatokban feldúsult monacit-, rutil cirkon- és ilmenitásványokat szeretné kiaknázni [41]. Ázsia ötödik, míg a világ nyolcadik legnagyobb ritkaföldfém-kitermelője Thaiföld, ahol a hidrotermális-metaszomatikus ón- és volfrámtelepek melléktermékeként bányásznak nióbiumot és tantált.

Ausztrália

A legfrissebb adatok alapján Ausztrália kitermelésben a negyedik, míg ásványvagyonával a hatodik pozíciót foglalja el. A 17 ezer tonnás kibányászott mennyiség szinte teljes mértékben a Mount Weld lelőhelyről származik. Az üzemeltető a legnagyobb, nem kínai tulajdonban lévő feldolgozott ritkaföldfém-értékesítő a piacon. Az érctelep prekambriumi, több mint

2000 millió éves vulkáni-üledékes kőzetek közé benyomult karbonatit laterites mállása során jött létre, hozzávetőleg 100 méteres vastagságban [38]. Tekintélyes, 2,3 millió tonnás vagyona azonban eltöri a Dél-Ausztráliában fekvő Olympic Dam 47 millió tonnás feltételezett ásványvagyona mellett. Az IOCG (Fe-Cu-Au) típusú telepekhez tartozik, és amellet, hogy a világ egyik legfontosabb urán- és vasérclelőhelye, hatalmas mennyiségű ritkaföldfémeket is tartalmaz bastnäsit-, florencit-, monacit- és xenotimásványok formájában. Az ausztrál vezetés szeretne még inkább meghatározóvá válni a nyersanyagpiacon, a legfrissebb kiadványuk alapján a fentebb bemutatott két lelőhelyen kívül még 10 másik ritkaföldfémprojektet tartanak számon [42].

Afrika

Madagaszkár 8000 tonnával a világ ötödik legnagyobb kitermelője volt 2020-ban. Az ország északi részén, az Ampasindava félszigeten alkáli kőzetek laterites mállásával képződtek a jó minőségű ionadszorpciós telepek [43]. A szingapúri érdekltségű, közel fél budapestnyi méretű koncessziós terület azonban kiváltotta a helyi lakosság elégedetlenségét, mivel a térség körül endemikus egérmakifajoknak is otthont adó, védett esőerdők húzódnak [44]. A USGS felmérése alapján Dél-Afrika 790 ezer tonna készlettel rendelkezik. Az ország nyugati felében a közeljövőben megkezdheti működését a Steenkampskraal bánya. A 605 ezer tonnás ásványvagyon átlagosan 14,4%-os TREO minőséggel párosul [45]. Északkeletre található a Pilanesberg Komplexum, ahol hidrotermális tevékenység hatására cink- és ritkaföldfém-tartalmú eudialitásvány képződött a nefelinszenitekben [46]. Karbonatitlelőhelyek találhatóak számos afrikai országokban, köztük a Kongói Demokratikus Köztársaságban, Tanzániában, Malawiban és Zambiában.

Összefoglalás

Az értekezésben bemutatam a ritkaföldfémeket, egyes típusaikat és szerepüket a modern gazdaságban. Ezt követően világ ritkaföldfémtelepeit ismertettem, egy-egy lelőhelyet kiemelve. Kína és Európa hangsúlyosabban került bemutatásra. Összességében látható volt, hogy a ritkaföldfém kitermelése és a lelőhelyek nagy része leginkább néhány ország között oszlik meg, ami nyersanyagbiztonsági szempontból nem előnyös. Habár zajlik egy átrendeződés is, egyre több ország szeretné kiharítani a maga szeletét világtermelésből. Mindeközben Európa lemaradva, fáziskésésben próbál felzárkózni, és lehetőségeit kitágítani.

A hazai előfordulásokról a tanulmány második részében lesz szó részletesen.

IRODALOM

- [1] Hiskey J. B., Copp R. G. (2018): Solvent extraction of yttrium and rare earth elements from copper pregnant leach solutions using Primene JM-T. *Minerals Engineering*, 125, 265–270.
- [2] Han K. N., Kellar J. J., Cross W. M., Safarzadeh S. (2014): Opportunities and challenges for treating rare-earth elements. *Geosystem Engineering*, 17/3, 178–194.
- [3] Peelman S., Sun Z. H. I., Sietsma J., Yang Y. (2016): Leaching of rare earth elements. Review of past and present technologies. In: De Lima I. B., Filho W. L. (eds). *Rare Earths Industry. 1st Edition, Technological, Economic, and Environmental Implications*, pp. 319–334.
- [4] Dushyantha N., Batapola N., Ilankoon I. M. S. K., Rohitha S., Premasiri R., Abeysinghe B., Ratnayake N., Dissanayake K. (2020): The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. *Ore Geology Reviews*, 122, 10352.
- [5] Barakos G., Gutzmer J., Mischo H. (2016): Strategic evaluations and mining process optimization towards a strong global REE supply chain. *Journal of Sustainable Mining*, 15, 26–35.
- [6] Balaram V. (2019): Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10/4, 1285–1303.
- [7] Alonso E., Sherman A. M., Wallington T. J., Everson M. P., Field F. R., Roth R., Kirchain R. E. (2012): Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. *Environ. Sci. Technol.*, 46, 3406–3414.
- [8] Yang X. J., Lin A., Li X-L., Wu Y., Zhou W., Chen Z. (2013): China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. *Environmental Development*, 8, 131–136.
- [9] Haschke M., Ahmadian J., Zeidler L., Hubrig T. (2016): In-situ recovery of critical technology elements. "SYMPHOS 2015", 3rd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry, *Procedia Engineering*, 138, 248–257.
- [10] Bisaka K., Thobadi I. C., Pawlik C. (2017): Extraction of rare earths from iron-rich rare earth deposits. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117, 731–739.
- [11] Smith Y. R., Kumar P., McLennan J. D. (2017): On the extraction of rare earth elements from geothermal brines. *Resources*, 6/3, 39, 1–16.
- [12] <https://www.nytimes.com/2021/04/08/technology/taiwan-drought-tsmc-semiconductors.html>
- [13] <https://www.reuters.com/article/instant-article/idINL4N2B11JR>
- [14] Zhou B., Li Zhongxue, Chen C. (2017): Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals*, 7, 203.
- [15] Barteková E., Kemp R. (2016): National strategies for securing a stable supply of rare earths in different world regions. *Resources Policy*, 49, 153–164.

- [16] Ho P., Zhao H. (2021): Mining conflict and rent-seeking in China: A mixed method analysis of cases of illegality. *The Extractive Industries and Society*, 101031 (in press).
- [17] Wang Z. Y., Fan H. R., Zhou L., Yang K. F., She H. D. (2020): Carbonatite-related REE deposits: An overview. *Minerals*, 10, 965.
- [18] Fan H. R., Yang K-F., Hu F. F., Liu S., Wang K. Y. (2016): The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: Controversy and ore genesis. *Geoscience Frontiers*, 7, 335–344.
- [19] Ilankoon I. M. S. K., Tang Y., Ghorbani Y., Northey S., Yellishetty M., Deng X., McBride D. (2018): The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry. *Challenges and opportunities. Minerals Engineering*, 125, 206–222.
- [20] 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., Eilopoulos D. G., Shaw R. A., Thrane K., Neulen N. (2016): Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 72, 838–856.
- [21] <https://www.mining.com/greenland-bans-uranium-mining-blocking-vast-rare-earths-project/>
- [22] Thrane K., Kalvig P., Keulen N. (2014): REE deposits and occurrences in Greenland. *ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference [Milos] 04-07/09/2014*.
- [23] Marks M. A. W., Markl G. (2017): A global review on apatitic rocks. *Earth-Science Reviews*, 173, 229–258.
- [24] Sørensen H., Bohse H., Bailey J. C. (2006): The origin and mode of emplacement of lujavrites in the Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland. *Lithos*, 91, 286–300.
- [25] Andersen T. (1988): Evolution of peralkaline calcite carbonatite magma in the Fen complex, southeast Norway. *Lithos*, 22, 99–112.
- [26] Meert J. G., Torsvik T. H., Eide E. A., Dahlgren S. (1998): Tectonic significance of the Fen province, S. Norway: Constraints from geochronology and paleomagnetism. *The Journal of Geology*, 106, 553–564.
- [27] Walters A. S., Goodenough K. M., Hughes H. S. R., Roberts N. M. W., Gunn A. G., Rushton J., Lacinska A. (2013): Enrichment of rare earth elements during magmatic and post-magmatic processes: A case study from the Loch Loyal Syenite Complex, northern Scotland. *Contrib. Mineral Petrol.*, 166, 1177–1202.
- [28] Montero P. B., Floor P., Castanon L. G. C. (1998): The accumulation of rare-earth and high-field-strength elements in peralkaline granitic rocks: The Galiñeiro orthogneiss complex, northwestern Spain. *The Canadian Mineralogist*, 36/3.
- [29] Papadopoulos A., Tzifas I. T., Tsikos H. (2019): The potential for REE and associated critical metals in coastal sand (placer) deposits of Greece: A review. *Minerals*, 9, 469.
- [30] Deady É., Richard S., Goodenough K. (2017): Research and development for the rare earth element supply chain in Europe. *Eurare*, 40 pp.
- [31] Deady É., Mouchos E., Goodenough K., Williamson B., Wall F. (2014): Rare earth elements in karst-bauxites: A novel untapped European resource? *ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference [Milos] 04-07/09/2014*.
- [32] Honour V. C., Goodenough K. M., Shaw R. A., Gabudianu I., Hirtopanu P. (2018): REE mineralisation within the Ditrău Alkaline Complex, Romania: Interplay of magmatic and hydrothermal processes. *Lithos*, 314–315, 360–381.
- [33] Lengyel A., Lakatos J. (2011): Vörösiszap hasznosításának lehetőségei – Possibilities of utilization of red mud. *Anyagmérnöki Tudományok*, 36/1, 35–48.
- [34] Nyirádi Zs. (2012): Vörösiszap hasznosítás, falazóblokk és vasklorid termelése mellett, a titán és ritkaföldfém tartalom kinyerésével. *Synpetrol Hungary, Inc.*
- [35] M. Tóth T., Schubert F., Raucsik B., Fintor K. (2019): Mineralogical and geochemical constraints of the REE accumulation in the Almásfüzitő red mud deposit in northwest Hungary. *Applied Sciences*, 9, 3654.
- [36] <https://www.niocorp.com/elk-creek-project/>
- [37] Néron A., Bédard L. P., Gaboury D. (2018): The Saint-Honoré carbonatite REE zone, Québec, Canada: Combined magmatic and hydrothermal processes. *Minerals*, 8, 397.
- [38] Smith M. P., Moore K., Kavecsánszki D., Finch A. A., Kynicky J., Wall F. (2016): From mantle to critical zone: A review of large and giant sized deposits of the rare earth elements. *Geoscience Frontiers*, 7, 315–334.
- [39] Chau N. D., Jadwiga P., Adam P., Hao D. V., Phon L. K., Pawel J. (2017): General characteristics of rare earth and radioactive elements in Dong Pao deposit, Lai Chau, Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 39/1, 14–26.
- [40] Malkova M. Y., Zadiranov A. N., Zaya K., Dkhar P. (2020): Ore of the Tomtor rare-earth deposit for its industrial processing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1687, 012038.
- [41] <https://www.srk.com/en/projects/tomtor-resource-reserve-estimation>
- [42] https://www.industry.gov.au/sites/default/files/202106/outlook_for_selected_critical_minerals_in_australia_2021_report.pdf
- [43] Estrade G., Marquis E., Smith M., Goodenough K., Nason P. (2019): REE concentration processes in ion adsorption deposits: Evidence from the Ambohimihavavy alkaline complex in Madagascar. *Ore Geology Reviews*, 112, 103027.
- [44] <https://news.mongabay.com/2017/11/another-blow-to-troubled-madagascar-rare-earth-mine/>
- [45] <https://www.steenkampskraal.com/geology/>
- [46] Olivo G. R., Williams-Jones A. E. (1999): Hydrothermal REE-rich eudialyte from the Pilaanesberg Complex, South Africa, 37/3, 653–663.